



橋梁監測與結構健康診斷

宋裕祺／國立臺北科技大學土木系 教授兼工程學院院長、國家地震工程研究中心 組長

張國鎮／國立台灣大學土木工程系 特聘教授

陳俊仲／國家地震工程研究中心 副研究員

李政寬／國家地震工程研究中心 副研究員

洪曉慧／國家地震工程研究中心 研究員

蘇進國／國家地震工程研究中心 副研究員

前言

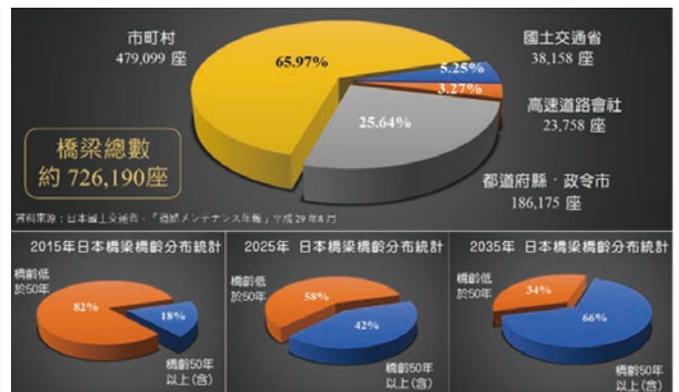
橋梁是非常重要的基礎設施結構，連結著社會經濟運輸路網，世界各國均很重視橋梁安全維護工作，在民生經濟建設的發展過程，必須持續提升民眾生活品質並同時確保其生命財產安全，進行橋梁監測和健康診斷是讓橋梁結構維持使用性與服務安全之必要手段。以美國為例，目前美國橋梁總數約六十餘萬座，橋齡超過 50 年則佔了約 31%，根據美國道路與運輸建設集團報告指出，美國公路及橋梁平均壽命落在 50 至 70 年，50 年使用期間從未進行重建工程之橋梁超過四分之一，約十七萬座，估計超過五萬五千座橋梁急需修護或汰換重建（圖 1a）。而鄰近台灣的日本，日本橋梁目前總數約七十二萬座，大部分隸屬市町村（約四

十七萬餘座），其它橋梁管理單位尚包括國土交通省、高速道路會社與都道府縣和政令市，2015 年統計日本橋梁橋齡大於 50 年約占 18%，並推估到 2035 年日本有超過 66% 之橋梁橋齡將超過 50 年（圖 1b）。

台灣於 2017 年橋梁統計數量約將近二萬八千座，分別由交通部公路總局管理占 11.5%，高速公路局管理占 8.5%，鐵路局管理為 5.8%，其餘 74% 則屬於縣市政府及其它機關管理，台灣橋梁橋齡超過 50 年占橋梁總數約 3.5%（圖 2）。2005 年世界銀行發表之自然災害熱點全球風險分析報告內容顯示，台灣土地以及人口受災風險位居世界首位，2015 年跨國保險組織發表 2015-2025 城市風險指標，台北市在事故和自然災害導致的經濟損失規模排名第一，超過日本東京、韓國

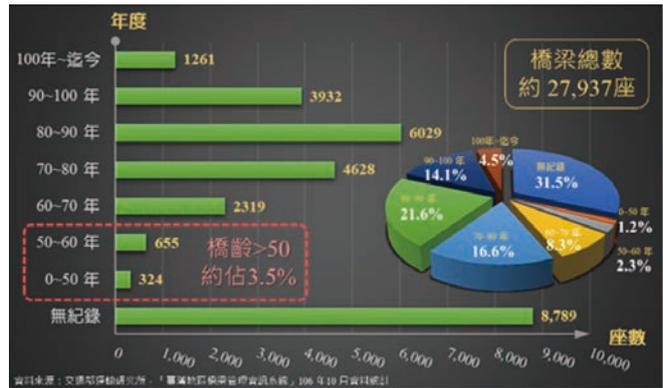
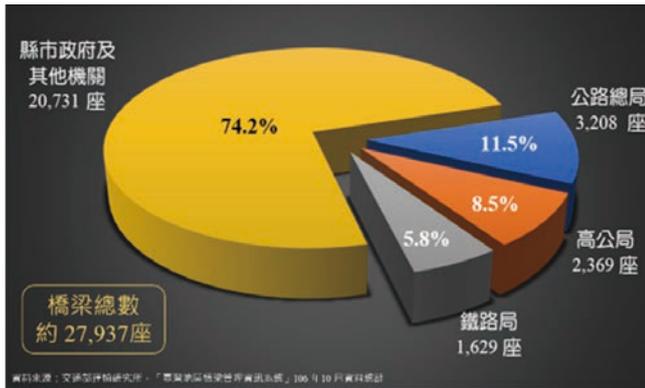


(a) 美國橋梁統計資料



(b) 日本橋梁統計資料

圖 1 美國和日本橋梁統計資料



(a) 橋梁分屬單位統計

(b) 橋齡統計

圖 2 台灣橋梁統計資訊

首爾、菲律賓馬尼拉、美國紐約和洛杉磯和中國上海等大都市，因此台灣橋梁相較於美國和日本的橋梁，其結構健康安全面臨著更多種災害風險的高度威脅，包括地震、颱風、洪水、山崩、土石流及腐蝕劣化等，故如何強化並落實橋梁監測和健康診斷技術，有效降低橋梁破壞的可能，確保民眾行的安全是持續性且刻不容緩的工作。

橋梁全生命週期管理思維

橋梁等基礎設施結構可比喻為人的身體，必須適當照護才能確保健康並面對使用期間各種威脅的挑

戰，如何減少橋梁結構因天然災害或老劣化因素損壞產生破壞，以延長橋梁使用年限並有效提供服務功能，為當務之急（圖 3）。將橋梁生命週期成本之思維導入橋梁管理工作，已深受各國重視。橋梁於服務期間經歷包括規劃、設計、發包、施工、維護、管理、拆除或重建等不同生命週期之階段，各階段所需面臨的橋梁特有問題並不盡相同，然而維護橋梁具備應有性能的橋梁管理目標並無二致（圖 4）。

不同的橋梁維護策略將導致不同的全生命週期成本結果。圖 5 所示預防補強型與損傷後補強型管理策略現不同的成本支出特性。前者的維護門檻值較高，

地震

颱風洪水

沖刷

老化

劣化

Lloyd's City Risk Index 2015-2025
Analysing the economic exposure from 18 threats over ten years

Understand the risks: www.lloyds.com/cityriskindex

Taipei, Taiwan

Average GDP growth rate: 3.84%
Average annual GDP: \$400.54bn*
Total GDP@Risk: \$181.20bn
Share of Average annual GDP: 45.24%

GDP@Risk ranking
Global: 1 Regional: 1 National: 1

GDP@Risk by threat type

圖 3 台灣橋梁自然環境的挑戰（國家地震工程研究中心）

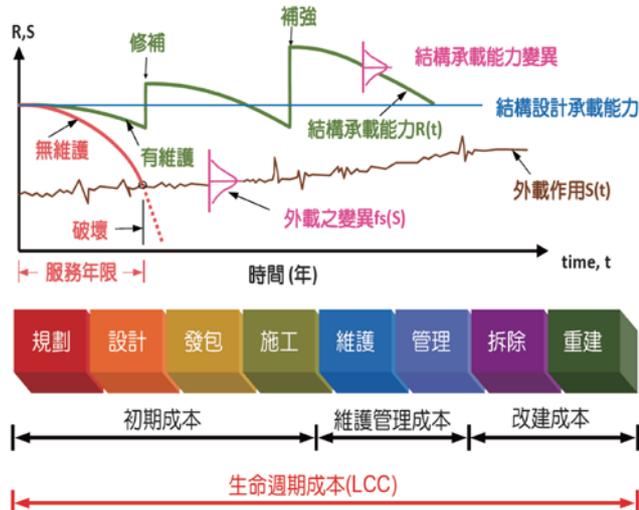


圖 4 橋梁生命週期成本

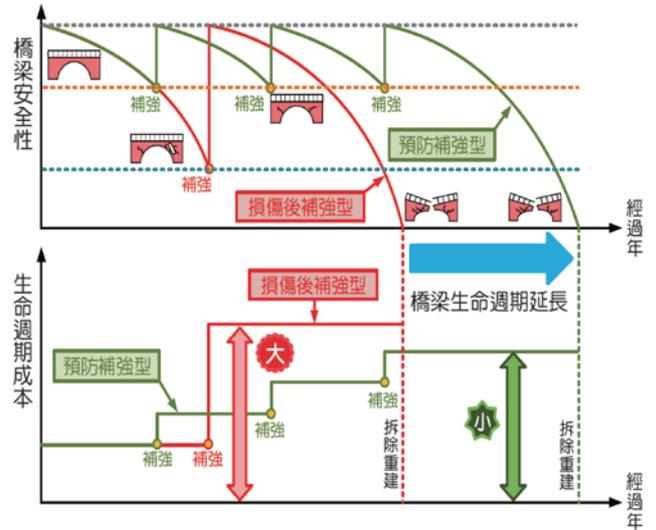


圖 5 橋梁生命週期管理計畫

舉凡橋梁各項性能退化到該門檻值時，即行啟動橋梁維修或補強作業，因此時橋梁性能與剛完工時者差距不大，因此所需費用與工期並不至於太大，橋梁管理單位的維護成本支出呈現微幅成長的漸變階梯狀分布，有利於橋梁管理單位的預算編列與財務管理；後者的維護門檻值較低，大多橋梁呈現明顯且嚴重的損害後才行橋梁維修或補強作業，此時橋梁性能與剛完工時者差距頗大，因此所需費用與工期相對增大，橋梁管理單位的維護成本支出呈現巨幅跳躍式成長的分布，不利於橋梁管理單位的預算編列與財務管理。由橋梁全生命週期成本管理思維而言，相對於橋梁發生明顯損壞或損傷後之補強工作，預防性補強可降低橋梁全生命週期成本並使橋梁在其服務使用年限內保有較佳的橋梁性能。

橋梁健康監測與診斷技術

對於目前處於營運階段的重點橋梁而言，施以必要的長期健康監測，透過合宜的健康診斷技術，妥善規劃雲端監測資料庫和警報應變機制，將可達到自動化橋梁防災之目標，發揮及早發出致災警告之功能，有效降低橋梁損壞甚至崩塌引致的人命傷亡與社會成本之損失。近幾年資訊技術發展益趨成熟，已可針對高精度感測元件之大量監測資料，應用更多樣的方法進行處理工作，如採用機器學習或深度分析等人工智慧邏輯演算方法處理相關大數據，即時顯示攸關橋梁安全之各項控制指標，已蔚為健康診斷技術的核心。

橋梁健康監測系統

橋梁健康監測系統可分為硬體和軟體兩部分，其中硬體部分大致包括四個子系統：(1) 感測器系統、(2) 資料擷取系統、(3) 資料通信與傳輸系統及 (4) 資料分析和處理系統，各子系統藉由通信網路連結並搭配相應之系統程式軟體，構成完整的監測系統。擬定橋梁監測計畫必須考量工址環境適合性、橋梁結構性能、安全性和使用性（如圖 6），方能提供橋梁營運期間有效的維護管理建議。

完整的橋梁健康監測系統，在工程方面至少應具備：(1) 穩定性及可靠度高之感測器，例如感測元件對於應變或溫度變化等物理量之感測靈敏度要高，雜訊干擾要小，並應搭配智慧型功能避免誤報。且橋梁監測環境嚴苛且監測設備通常需使用達數年之久，經常日曬雨淋等高溫、高濕、灰塵之作用，感測材料劣化或現場溫濕度造成訊號飄移，均會影響監測之正確

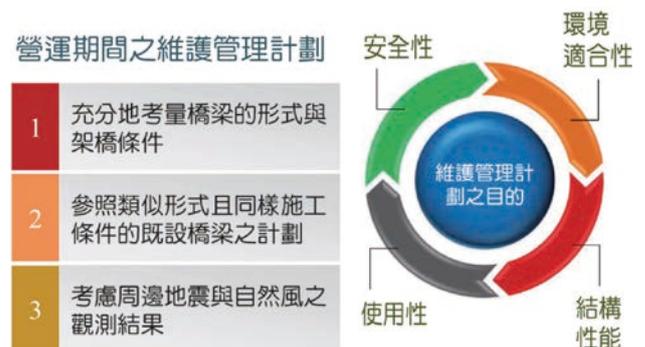


圖 6 橋梁健康監測計畫擬定要點

性，因此除定期檢測更新外，選用之感測器須能抵抗惡劣環境而不致損壞或尚失穩定性，才能於橋梁使用年限中發揮應有的功效；(2) 全自動雲端監測，監測項目內容主要可分為一般長期服務性量測及突發應變狀況量測，一般量測乃針對橋梁靜載、劣化，定期蒐集並儲存各感測器量得之訊號。而突發性量測對象則是活載等常變的載重，當橋梁受到足以造成損壞或已造成部分損壞之載重時，必須能迅速及時地將橋梁反應以高頻率記錄器記錄下來並回報，長期之監測系統應由已程式化之電腦進行定時量測，並具有自動觸發紀錄量測之功能，也藉由通訊網路技術之發展，目前市面上已有許多有線和無線通訊模組與雲端儲存資料庫服務功能，對於遠端監測應用需求提供穩定且可靠的方法；(3) 後處理及儲存能力，對於原始資料，系統必須能自動地定期整理分類數據，並套用適當之評估演算邏輯執行診斷作業，簡化監測系統人為操作設定程序，使監測設備需讓使用者一看即可操作才能普遍應用，並能自動將原始資料加以壓縮儲存備查，掌握橋梁結構物之健康狀況；(4) 設備保護措施及完善之電力系統，精密之量測儀器及電腦必須安置於僻護良好之測站中，透過空調及防震設施確保儀器能正常地運作，並配置保全系統以免儀器遭竊或被破壞，在電力方面應準備不斷電系統，以免停電而使得監測中斷，目前市場也有部分感測儀器無需連結現地主機，簡化現地佈建監測設備箱之需求，大幅提高了監測系統建置效率，一般橋梁監測之主要項目和內容可參考圖 7。

監測項目	監測內容
應變	鋼梁、混凝土頂板、腹板或底板應變
位移	支承墊、伸縮縫、跨斷層位移
沉陷	墩柱、上部結構、路基沉陷
傾斜	墩柱、橋塔傾斜
荷重	鋼索頻率或荷重監測
振動	墩柱、上部結構、橋塔、外置預力振動
溫度	大氣溫度、箱梁溫度梯度、鋼箱內溫度
風速	橋塔、橋面、地面之風速
沖刷	水深變化、沖刷深度與回淤變化

圖 7 橋梁健康監測的主要項目和內容

橋梁健康診斷

橋梁結構健康監測泛指根據橋梁量測資料結果，以期得到關於橋梁結構設計、施工、維護管理的知識之統稱，可以更精確地掌握實際詳細狀況，營運階段中也能進行量測結構物的振動特性，將結構振動特性作為結構物的監測指標，圖 8 說明橋梁結構健康診斷實施目的，首先須藉由實際量測到的橋梁結構反應，比對量測資料與結構分析結果之差異，進而採用適用的識別和評估分析方法，修正建構橋梁結構分析模型之相關參數，確認結構分析模型之正確性，期讓橋梁結構分析模型詳實反映現地橋梁結構真實行為，並據以進行推估橋梁結構在各種可能環境載重作用下的行為，做為橋梁健康診斷的根基。

橋梁健康監測技術研發與應用案例

國家實驗研究院地震工程研究中心因應全球科學技術發展趨勢，近幾年積極投入橋梁健康監測與健康診斷技術研發工作，也參與許多國內現地橋梁監測診斷與試驗工作，本節概述近期自製研發之橋梁監測元件與相關橋梁監測健康診斷技術應用案例。

光纖式沉陷量測系統

相較於傳統的電子通訊方式，光纖傳輸具有低干擾與損耗、頻寬大、高穩定性等優勢，將光纖通訊應用於結構監測系統，已成為工程科技的主流。橋梁監測項目中，橋面高程線型變化可反應橋梁結構承受各式載重（如行車載重、溫差載重、風力、洪水與地震

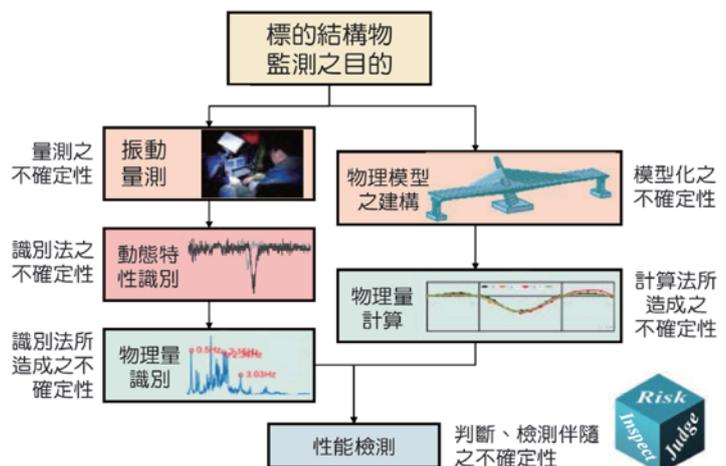


圖 8 橋梁結構健康診斷實施目的

力等)下的結構行為,可供為掌握及評估橋梁結構使用狀態的重要指標之一可藉由測量與統計橋梁日常荷載與反應,界定橋梁服務安全之「基準值」或「安全界限值」指標,經由自動化長期觀測橋梁結構變化,更可協助橋梁管理者進一步掌握及監控橋梁安全的變化狀況。

自製研發之光纖式沉陷量測系統如圖 9,系統主要架構包括可注入液體之連通管路及可感測管內液面變化之光纖光柵元件兩部分,藉由量測連通管液面變化得到各量測點之相對高程關係,系統工作原理則結合了連通管原理、浮力原理和虎克定律(光纖光柵材料)。基本原理係應用光纖光柵感測元件(Fiber Bragg Grating, FBG)量測液面高程變化,利用連通管原理與浮力原理,圖中所示右側水筒上升或下降時,左側的 FBG 承受的拉力因而減小或增大,組構成沈陷量測系統,此系統之靈敏度、解析度、容許衝程等可搭配量測標的特性規劃設計參數製作感測元件提供客製化量測功能。

此系統為國內自製開發具有構造簡單、安裝容易、系統穩定且資料可靠度高、適合大型結構量體長期與短期量測以及可連續性自動記錄等特色,圖 10 為以鋼梁為試體之系統校正試驗,梁側邊的各撓度量測點鎖固 L 型鋼板, L 型鋼板上安裝光纖沉陷計,下方安裝電子式位移計,試驗時於梁中點施加垂直載重,以光纖沉陷計與電子式位移計同時量測撓度進行系統校正並獲得驗證,對於橋梁、隧道、水壩、邊坡擋土設施等大型結構體,採用傳統測量方法進行完整且全面性的水準測量作業將耗時費力。針對此些大型工程量體而言,光纖式沉陷量測系統將可有效率地進行結構變形量測資訊的長期紀錄,同時滿足工程經濟性且務實可靠的變位量測結果,目前也已於國內數座橋梁建置正常提供橋梁長期監測服務功能中。

以蘇花公路白米景觀橋建置之橋梁監測系統為案例(圖 11),該橋為國內橋梁工程首次採用之具有波形鋼腹板脊背橋,考量其工程特色屬新橋型創舉,為更

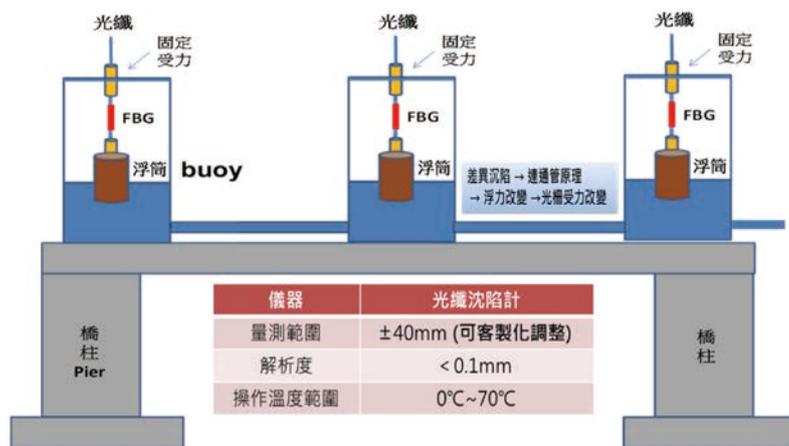
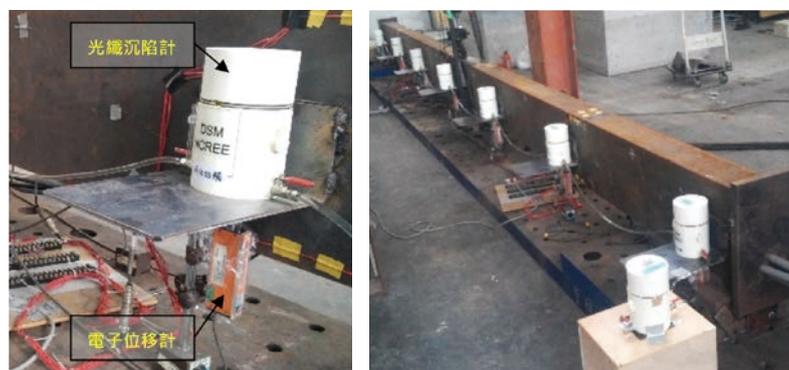


圖 9 光纖式沉陷量測系統



(a) 光纖沉陷計與電子式位移計 (b) 鋼梁試體

圖 10 光纖式沉陷計校正試驗

瞭解此類創新橋梁型式實際結構特性,故除建置橋梁結構分析模型之外,於橋體結構安裝應變計、外置斜索與箱梁內鋼纜安裝索力計、塔頂安裝傾斜計以及箱梁內設置光纖沉陷計,組構成全方位之橋梁長期監測系統,記錄橋梁承受環境外力的反應並分析橋梁的安全性,有利日後橋梁維護管理,並經由車輛載重試驗及監測成果驗證系統可靠性。

橋梁監測案例一 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程計畫中五股林口段

國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程計畫中五股林口段工程,範圍北起由汐五高架段五股端(統一里程約 31K),南至統一里程 45K 處,全長約 14 公里,有關路線設計原則係採北上線與南下線分離並緊鄰國道 1 號二側設置。在五股林口段工程當中有三種特殊橋梁型式,包括:

- (1) 林口跨越橋為考量儘量避免造成環境的不利影響,

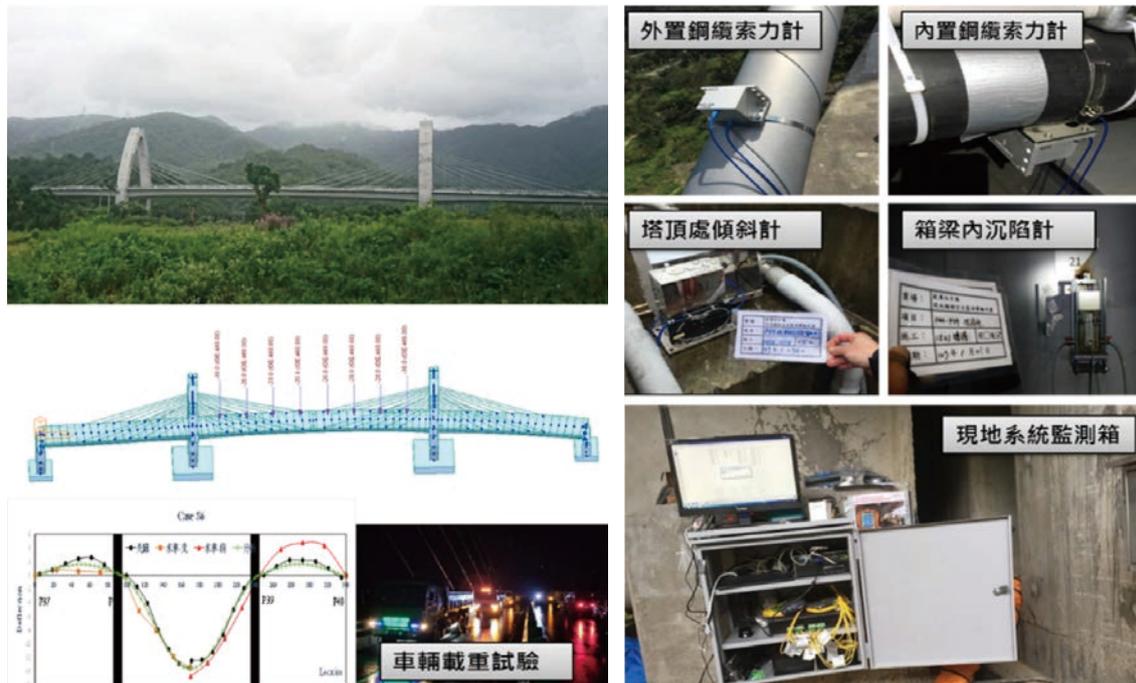


圖 11 蘇花公路白米景觀橋橋梁監測系統

北上線須避開地質敏感區，以致於橋梁平面線形須配設為兩度跨越中山高速公路，此跨越橋梁的主跨為全台灣目前最長跨度之鋼箱型梁，中央跨徑達 216 公尺，主跨的跨徑中央處因受到地震、車流量的振動影響，容易產生較大的變形，且本橋採用較大梁深設計，沿梁深方向容易形成溫度梯度，導致產生非預期的撓曲曲率，故有必要進行結構監測以了解橋梁的力學特性。

- (2) 泰山林口段雙層高架橋為因應工址東側邊坡屬地質敏感區，故北上線與南下線採雙層共墩方式（即北上線置於上層，南下線置於下層）。在雙層共構以及高橋墩柱設計概念下，容易造成橋梁受到自身荷重影響，產生長期偏心效應，使得橋梁下部結構容易形成局部較大應力及整體變位的可能，因此，為減輕自重，上、下層橋均採鋼箱型梁橋配置，下部結構採用矩形 RC 橋墩。為了解雙層高橋墩承受長期偏心載重以及地震與車輛振動的影響，有必要對於橋墩底部的構材應變與承載下層橋面之懸臂帽梁端部的變位進行結構監測。
- (3) 鋼與預力混凝土混合梁橋位於跨越進出高公局匝道路段中，橋梁上部結構採用等梁深配置，並使用鋼與預力混凝土混合梁橋之配置方式，同時為減小跨

徑亦設計偏心橋墩因應之。鋼梁對稱配設於主跨中央處，並於主跨左右四分之一處各設置了鋼梁與混凝土梁的接合。在此不同材料的接合處，容易因勁度不連續造成應力集中現象，藉由結構監測，將有助於了解此材料混合處之力學特性。

本應用案例橋梁極具代表性，橋梁監測系統之設置主要為掌握結構動態及靜態行為，分析研判其安全性，其中動態監測對象主要為地震、交通車流對橋體引起的振動行為；靜態監測則為研析橋體受非動態載重等作用下，橋體的溫度、傾斜量、位移值、應變值，目的乃用以檢驗設計階段假設值是否合理，期能得知完工時結構內部應力之狀況，並藉由定時蒐集資料做為結構診斷與管理之參考。

圖 12 為本案例監測系統建置作業內容與成果，說明除了各橋梁結構分析模型建置研究工作之外，於現地橋梁擇定位置安裝應變計、位移計、傾斜計、溫度計與強震加速度計等感測器，並組成完整之橋梁監測系統，同時配合現地試驗包括強迫振動試驗、靜態車輛載重試驗與動態車輛載重試驗等量測資料，回饋各橋梁結構分析模型，由模型分析資料輸出與現場監測資料比對，應用橋梁結構健康診斷方法進行評估，並據以訂定監測警戒值與行動值，提供橋梁安全應變和維護管理策略主要參考資訊。本監測

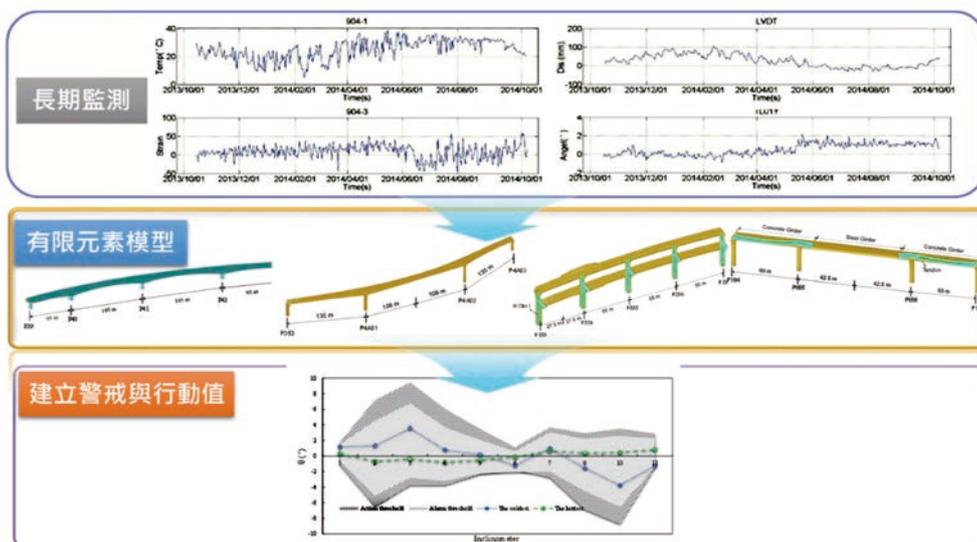
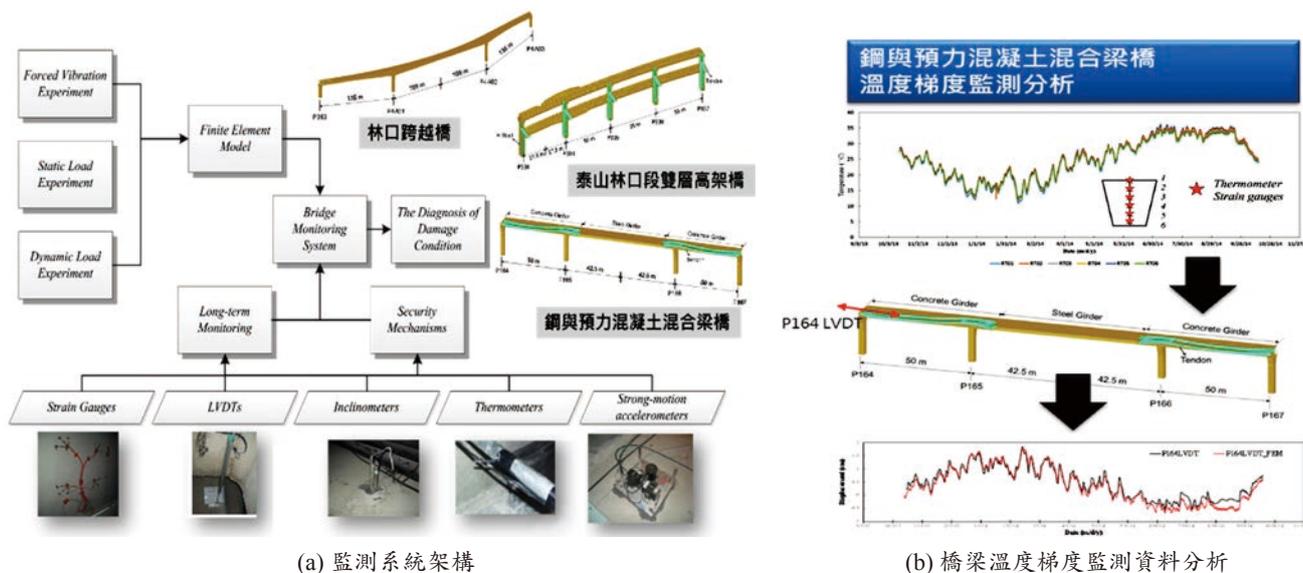


圖 12 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程計畫中五股林口段橋梁監測案例

案例除使用一般傳統儀器進行橋梁之應力、應變與結構變形等監測，亦引進微機電技術與無線傳輸模組組合的系統，對橋梁結構進行相關監測，藉由兩種不同監測系統，記錄橋梁實際結構行為，以比對驗證監測結果的可靠性與準確性，掌握橋梁結構變化情形。

橋梁健康監測與診斷系統之開發

國家地震工程研究中心建構有效且完整之橋梁防災安全管理服務平台，平時可進行自動化的橋梁安全評估，更可在災害發生前，由先進的橋梁全自動監測系統，及時提醒橋梁管理單位，成為橋梁健康安全防災管理的全新里程碑。

圖 13 為結合光纖沉陷量測系統所建置的橋梁自動監測與健康長期照護系統，此系統畫面搭配適當間距設置量測點位，直接顯示橋梁高程線型變化，反應橋梁結構承受各式荷重，例如行車載重、溫差載重等外力對結構本體產生之影響，亦可用為掌握及評估橋梁結構使用狀態的指標之一。

橋梁防災安全管理服務平台也可結合地震與颱風洪水等災害事件的資訊，在地震及颱風洪水發生前後，可迅速預測或推估出可能受損的橋梁，通知相關單位進行災後特別檢測，並在必要時實施封橋作業，避免斷橋危害民眾安全。

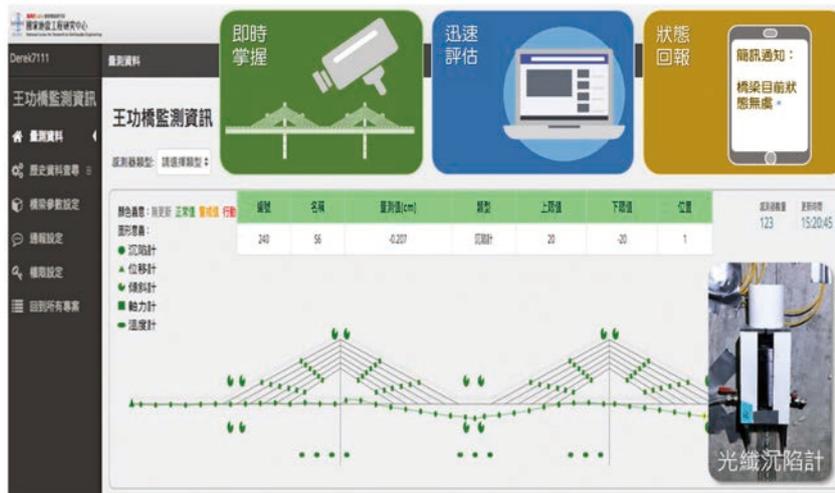


圖 13 橋梁自動監測與健康長期照護系統

結論與展望

本文綜合闡述橋梁監測與結構健康診斷技術之相關內容與應用，無論美國、日本或台灣等世界各國，既有橋梁都會隨著服務年限增加而發生老劣化問題，於橋梁生命週期各階段以維護營運階段為期最長，針對台灣橋梁而言，由於位屬發生地震、風災與水災等多種天然災害發生頻繁的區域，橋梁防災的維護管理議題更為重要。

早在民國九十年行政院公共工程委員會提出「橋梁安全政策白皮書」中，即針對國內橋梁現況分析探討說明，而國內橋梁絕大部分為混凝土構造，雖然混凝土係為耐久性良好之材料，惟國內橋梁所處環境日趨惡化，橋梁管理單位人力不足，維修補強經費相當有限，使得國內橋梁劣化或損害情況已成為國人重視之問題。為使橋梁之使用年限與設計年限相符，減輕因自然環境、外力超載、材料老化劣化等不利因素折損其使用年限，建構能符合國內橋梁需求之監測系統，提供可靠且穩定之監測檢測訊號，瞭解橋梁結構狀況據以採取適當之處理，乃為應當且必要之措施。

近幾年，強化防災管理已成為橋梁管理單位所需面臨的課題之一，對於防災地圖中之重點橋梁而言，對其進行長期健康監測與健康診斷已是刻不容緩的工作，期待政府相關橋梁維護與管理單位，能夠投入更多心力於此一重要課題，如此將有助於延長橋梁使用年限、有效發揮橋梁服務功能、降低橋梁結構損壞或崩塌造成生命財產損失的機率。

參考文獻

1. 陳俊仲，「光纖布拉格光柵於結構感測器之應用與研發」，碩士學位論文，國立台灣大學，臺北，臺灣，2001年6月。
2. 蘇進國，「模糊遺傳算法在橋梁耐震性能設計之應用與耐震維修補強生命週期成本最小化之研究」，博士學位論文，國立台北科技大學，臺北，臺灣，2008年6月。
3. Y.C. Sung and C.K. Su (2011), "Time-dependent seismic fragility curves on optimal retrofitting of neutralised reinforced concrete bridges", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 7, No. 10, October 2011, pp. 797-805.
4. Y.C. Sung, T. Miyasaka, T.K. Lin, C.Y. Wang, C.Y. Wang (2012), "A Case Study on Bridge Health Monitoring Using Position Sensitive Detector Technology", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 19, No. 2, pp. 295-308.
5. Y.C. Sung, C.Y. Wang (2013), "A Study on Damage Assessment of the Scoured Bridges", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 36, No. 8, pp. 994-1007.
6. Y.T. Chiu, T.K. Lin, H.H. Hung, Y.C. Sung, K.C. Chang (2014), "Integration of In-Situ Load Experiments and Numerical Modeling in a Long-Term Bridge Monitoring System on a Newly-Constructed Widened Section of Freeway in Taiwan", *Smart Structures and Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 1015-1039.
7. Federal Highway Administration (FHWA) (2013), "Bridge by Year Built, Year Reconstructed and Material Type".
8. Y.C. Sung, T.K. Lin, Y.T. Chiu, K.C. Chang, K.L. Chen, C.C. Chang (2016), "A Bridge Safety Monitoring System for Prestressed Composite Box-Girder Bridges with Corrugated Steel Webs Based on In-Situ Loading Experiments and a Long-Term Monitoring Database", *Engineering Structures*, Vol. 126, pp. 571-585.
9. 張國鎮、宋裕祺、陳俊仲、許家銓、李政寬，「橋梁結構安全與養護管理檢監測技術研發與應用」，中華技術，第111期，第42-53頁，2016年7月。
10. 日本國土交通省，「道路メンテナンス年報」，平成29年（2017）8月。
11. 「臺灣地區橋梁管理系統」，交通部運輸研究所，參考網址：<http://tbms.iot.gov.tw/bms2/>，2017年。
12. 宋裕祺，橋梁監測與結構健康診斷，橋梁全生命週期管理研討會，中國土木水利工程學會，2018年9月12日。