

光柵感測技術在 橋梁安全監測與管理上的初步應用

Application of Optical Fiber Sensor on Bridge Safety Monitoring and Management

李政寬／國家地震工程研究中心副研究員

Zheng-Kuan Lee / Associated Research Fellow, National Center for Research on Earthquake Engineering

摘要

本文目的在介紹應用光纖光柵感測元件，監測「長距多跨」橋梁。希望經由本文的介紹，讓更多橋梁工程師了解「光纖光柵感測與通訊技術」在防災與工程方面的應用潛力。文章首先回顧台灣天然災害對橋梁安全造成的危害事件，說明橋梁管理需要一套經濟、高效率的監測系統。其次介紹，光纖光柵結合簡易的機構原理或物理原理，可製作精準的感測器。最後，透過實例應用，說明監測系統如何運作。

ABSTRACT

Technology for the real-time monitoring of bridge safety is required by bridge management authorities and one task the National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) has continually researched and developed. How to conduct real-time monitoring of long-range, multi-span bridges economically and effectively has remained the most significant challenge for the related research and development. In recent years, NCREE has significantly improved the manufacturing of fiber optic sensor instruments, fiber optic welding, and communication capabilities, allowing the center to conduct real-time monitoring of long-range, multi-span bridges.

前言

台灣地理環境特別，位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交會處，地震發生頻繁，並常威脅橋梁；台灣也正好

位在西太平洋颱風行徑帶上，平均每年約有三至四個颱風侵襲而帶來豐沛雨水，過多的雨水甚至會引起洪水與土石流而危害橋梁。因此，台灣橋梁的設計、興建、養護管理作業，要同時考慮地震與洪水等環境因素，所面對環境條件確實較其世界各國嚴酷許多。除了地震與洪水威脅外，台灣的橋梁還有超載使用以及材料老劣化等的問題。依據交通部運輸研究所資料顯示，全台二萬八千多座橋梁平均橋齡已近二十多年^[1]，老舊橋梁的耐久性與安全性日益堪慮，所以橋梁的安全檢測工作日益重要。交通部臺灣區國道高速公路局橋梁檢測作業要點^[2]，規定了關於橋梁安全檢測的頻率、時機、與重點（公路總局亦類似），如表1摘要整理，目前這些工作都依靠人力目視檢測或手持工具測繪，如遇洪水或地震等特殊時機時，工作人員身陷危險而且工作效果不好，2008年后豐大橋與2009年雙園大橋，橋斷人亡事件（圖1），顯現人力巡守長距離橋梁時的困難和侷限^[3]。因此有必要開發一套經濟、耐用、「長距多跨」全面性的監測系統，協助橋梁主管機關，隨時隨地有效地了解橋梁現況。

表1 高速公路局與公路總局橋梁檢測作業要點摘要

經常性檢測	定期檢測	臨時檢測
日檢測：橋面以上與行車安全和服务性有關之構件。	每年或每兩年對橋梁所有構件全面檢測。定期檢測之重點在了解橋梁整體狀況，工作量及所需人力大，由轄區工程處委外辦理。	颱風、豪雨、地震等天災，檢測構件劣化情形。（高速公路局）於颱風、洪水或地震災害後視受災情況辦理，由各級養路人員以目視或簡單之量測器具進行之檢測。（公路總局）
半年檢測：對橋梁安全性有影響之河道狀況。		



圖 1 (a) 2008 年後豐大橋橋斷事件 (b) 2009 年雙園大橋橋斷事件

台灣常見的橋梁破壞模式與本研究「主觀建議」的監測方法

歷經 1999 年集集地震與多年洪害經驗，橋梁崩塌破壞多經歷圖 2 過程：伸縮縫拉開，橋面落橋；基礎或橋柱破壞，橋面沈陷變位。台灣橋梁破壞鮮少發生大梁從中間斷裂之破壞模式。因此，如果一座橋梁的河川水位高度在警戒線以下、伸縮縫和高程形狀沒有超過容許值、也沒有超過平常的統計值，那麼我們可認定這一座橋梁目前沒有立即性的安全疑慮，這是基於「穩定式平衡」的概念，破壞的發生需要能量、需要時間，如圖 3 示意。在這設定的前提下，對台灣絕大多數的傳統橋梁而言，監測河川水位、橋梁伸縮縫、橋梁高度或傾斜，是經濟有效率「防範意外狀況初初發生卻不知情」之方法。

監測河川水位、橋梁伸縮縫、橋梁高度或傾斜，只要將感測器安裝在上部結構物，如圖 4 所示。因此可



圖 2 台灣常見的橋梁崩塌破壞模式

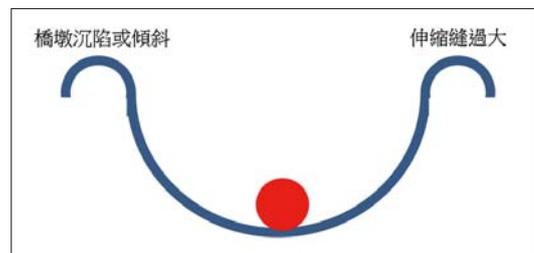


圖 3 「穩定式平衡」示意

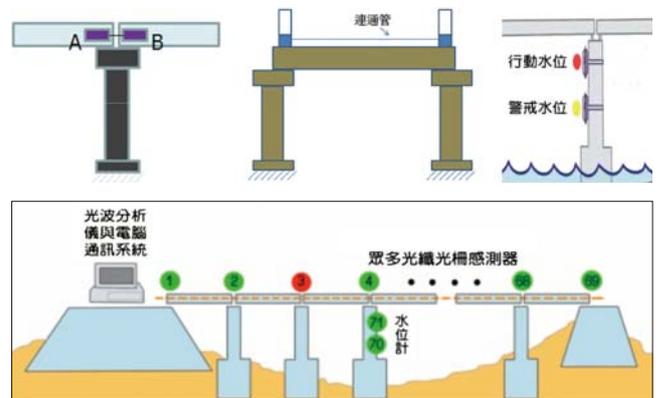


圖 4 眾多的感測器，監測河川水位、橋梁伸縮縫、橋梁高度或傾斜

隨時檢視、修護、更換失效的感測儀器。這樣監測儀器的安排，缺點是無法直接知道洪水時候橋墩土壤沖刷深度，但基於前述的穩定式平衡概念下，橋梁崩塌之前，需要時間並經歷過：伸縮縫逐漸拉開，橋面逐漸沈陷變位，因此橋墩沖刷深度的直接量測，並非不可或缺的（除非，沖刷深度監測這項工作是簡單易執行、能廣泛佈設在眾多橋梁上、而且經濟上可行）。

不過，研究少數幾座特定橋梁，克服困難，直接量測橋墩沖刷深度，建立洪水高度、流速與沖刷深度的關係，仍有研究價值，因為對工程學理而言，可回饋日後工程設計參考，關於基礎深度。目前已有數組研究團隊

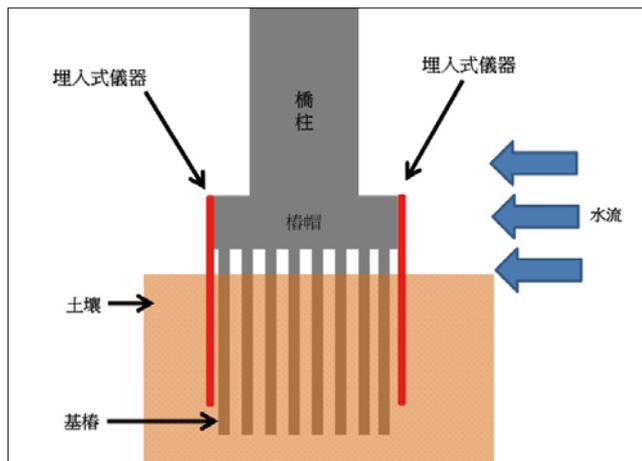


圖 5 「埋入式」感測器監測橋墩覆土深度

建置沖刷感測器，方法是在基礎旁安裝「埋入式」感測器（如圖 5），直接量測洪水時，土壤深度變化。此方法最大的風險是，洪水嚴重威脅儀器的存活度，如果儀器失去功能，將很難再拔出修復。再者，河道經常變遷，若為全部橋墩安裝「埋入式」感測器，經濟上有困難。因此，關於沖刷深度的直接量測，如何增加儀器的存活能力、降低安裝費用、大量佈設等問題，仍有待解決。

總言之，本文「主觀地」認為台灣傳統預力混凝土橋梁是個穩定式平衡的建築物，在高度與伸縮縫改變之後才會發生崩塌。在這樣的觀念下，在橋梁每一跨上部結構安裝感測器，監控高度線形、角度、伸縮縫、水位高，替代傳統人力測繪作業，應是兼顧經濟與效益的作法。

光纖感測器的原理簡介

光纖，是光導纖維的簡稱，是利用「全反射原理」，傳輸光能和訊號。目前常用的通訊光纖是單模石英纖維，光損失率大約為每公里 0.2 dB，通訊波段大致在 1510 nm ~ 1590 nm。本文所使用的感測原件是布拉格光纖光柵（fiber bragg grating），簡稱為 FBG。FBG 如圖 6 所示，是一段連接於光纖的感測元件。

於光纖的一端打入寬頻光，FBG 會將特定的窄頻光反射（由光柵柵距決定），「剩餘的」寬頻光繼續前進。當 FBG 承受拉力時，柵距變寬，反射窄頻光的中心波長會增加，光譜向右移動；當光纖光柵承受壓力時，柵距縮短，窄頻光反射的中心波長減小，光譜向左移動，此外 FBG 亦受溫度影響而改變其柵距，可以

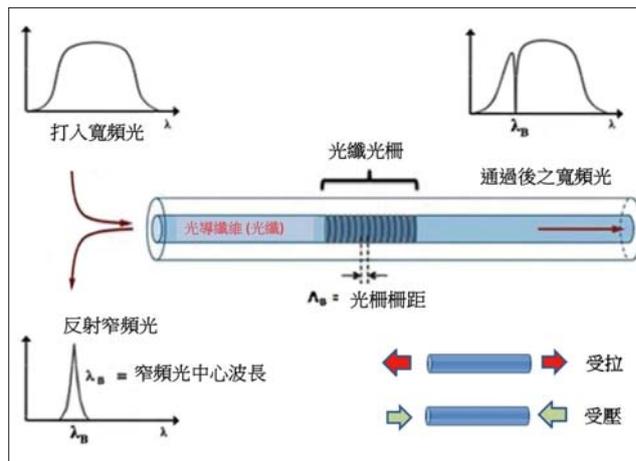


圖 6 布拉格光纖光柵感測作用

數學式式 (1) 表達相關物理量：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = C_S \Delta\varepsilon + C_T \Delta T \quad (1)$$

其中 λ_B 是窄頻光反射的中心波長， $\Delta\varepsilon$ 為光柵承受應力所產生的應變， ΔT 為光柵溫度的改變量， C_S 與 C_T 分別是相關係數。理論上，欲分辨 $\Delta\varepsilon$ 與 ΔT 對 $\Delta\lambda_B$ 的影響，需要同時間同地點使用二個 FBG，其中一個 FBG 處於無受力狀態（Stress Free）；實務上，只要 ΔT 的影響量不到 10%，工程應用可合理地忽略溫度效應，以避免過多 FBG 數量。再者有時候透過儀器機構設計原理， ΔT 的影響量甚至是可消除的。

從前面的討論可知，FBG 基本上可視為一枚光學式應變計，經過機構加工後，便可成為特定的感測儀器，如位移計、沈陷計等等。本文的加工方式，是於 FBG 的兩端，以熱收縮套管夾住光纖，熱收縮套管作為外力導入 FBG 的媒介^[4]，如圖 7 示意。這樣的局部組織，形成儀器元件，有了接頭便可施加預力，作為感測原點，如圖 8 示意。

圖 7 局部組織，可結合其他機構或物理原理，共同構成儀器。例如圖 9(a)，加了一條彈簧，提供緩衝功能與變形能力，形成了位移計。圖 9(b)，利用連通管原理與浮力原理，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，於是這樣的機構就形成了高度沈陷計。圖 9(c) 是水位計，一質塊與探針，探針上黏著 FBG，當河水觸及探針，FBG 突受擾動，光波長因而改變，於是可知河水達到警戒水位。

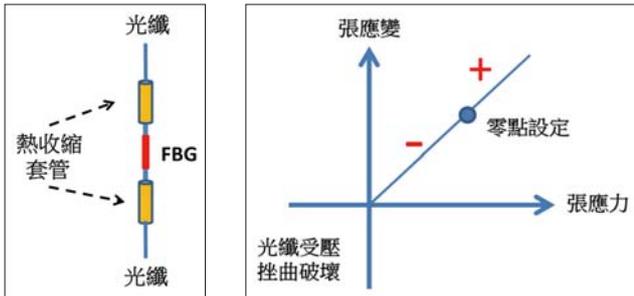


圖 7 製作接頭，外力導入 FBG 圖 8 施加預力，感測原點新設定

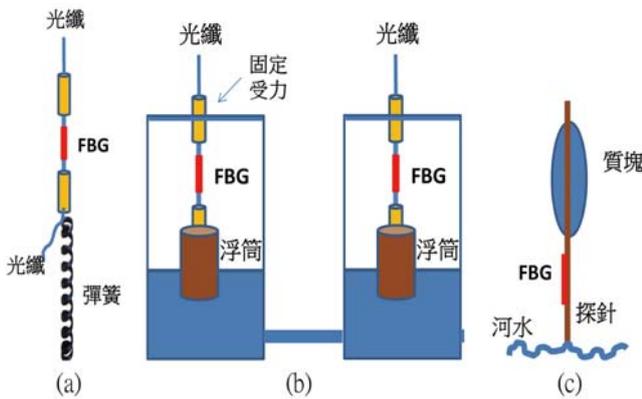


圖 9 光纖感測器 (a) 位移計、(b) 高度沈陷計、(c) 水位計

光纖熔接事宜

國震中心儀器設備 Micron Optics Si-425 具有十六頻道 (channel)，一頻道連接一條光纖，至於一條光纖能串接多少個 FBG 感測儀器卻不一定，這取決於光纖的熔接品質。好的熔接品質，在擷取器上顯示的光能譜，如圖 10(a)，是逐漸小幅減小的；差的熔接品質，如圖 10(b)，於某處突然變小，而使擷取器讀不到之後的 FBG。所以，要能充分利用擷取器的頻寬，增加感測器數量，必須有良好的熔接品質。關於熔接品質，現地環境與實驗室相比通常惡劣很多，譬如現地煙塵飛揚造成熔接品質不良、日曬高溫不利技術人員執行熔接作業，使得有效熔接之 FBG 儀器數量僅能數個左右。為了提升感測器觀測數量，應改變作業方式，於事前在橋梁現場調查光纖應預留長度，之後在塵害較少的實驗室中執行熔接，能提升一條光纖承載二十個以上的感測器。一整條光纖與全部儀器都完成熔接作業之後，再整體帶至現場執行儀器固定安裝作業。如此作業，便可充分運用擷取器的頻寬，增加感測器的數量，減輕現場熔接困難與減少作業時間。

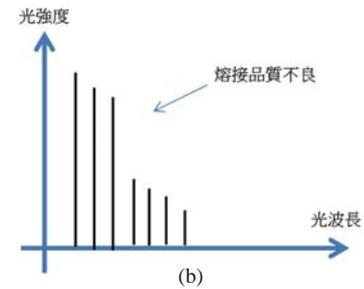
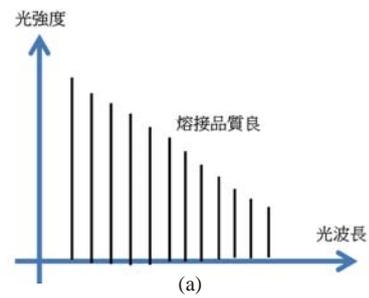


圖 10 擷取器光能譜判讀熔接品質，(a) 熔接品質良好，(b) 熔接品質不良

現今商售的光纖資料擷取器^[5]，擷取器感測頻道可多達十六個，如果每頻道承載二十個儀器，則感測器總數量可達三百二十個，此數量可應付二公里長（約六、七十跨）跨河長橋之監測需要。

光纖監測應用案例： 大直橋高程線形即時監測

2012 年 9 月台北市政府惠允國震中心橋梁實驗，於大直橋佈設光纖監測系統，包括水位計、位移計、高程沈陷計、鋼纜振動計等感測儀器。本文僅就光纖沈陷計，說明其佈設與功用。光纖沈陷計沿主跨中央分隔島佈設，如圖 11，經由程式軟體分析數據，能即時繪示反應大梁高程變化。圖 11 中七組高程計，各組

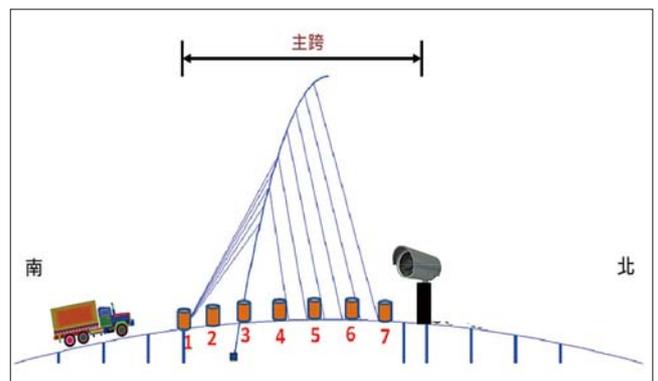


圖 11 光纖沈陷計沿主跨佈設

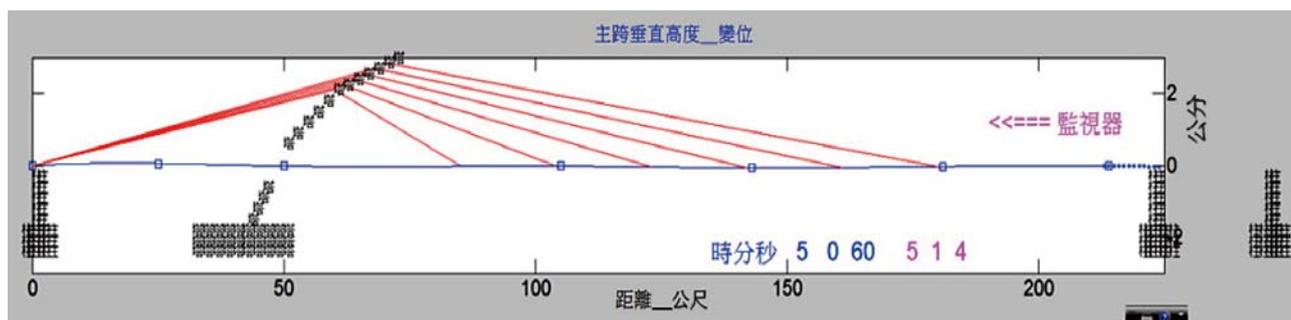


圖 12 主跨高程線形即時反應圖

儀器有水管相連通，當橋面高程改變時，各組儀器與水管內流動的水，使得 FBG 光柵柵距讀數改變。我們以點 1 設為參點零點，經由疊加計算，可得其他七個點位的相對高程。

圖 12 是主跨監測數據，繪示橋梁高程線形即時圖，當重車駛過橋梁或地震發生，在沒有發生結構破壞情況下，高程線形會暫時改變，隨後恢復原高程線形。若強烈地震擾動造成橋柱破壞歪斜或土壤液化橋墩沈陷，或是河床沖刷橋柱歪斜，監測的高程線形將改變。因此，高程線形是判讀橋梁是否安全的重點觀測。

光纖監測系統與傳統電子監測系統在特性、成本、功效上的比較

光纖材料以石英光纖為核心而以塑料等材質為保護層，使其耐候性的表現（不怕雷擊影響、耐酸鹼、不生鏽），優於傳統電子監測系統。兩系統之間物理化學特性的比較，整理如表 2。

成本的比較方面，目前國內使用的傳統電子監測系統，包括資料擷取器、感測器，多為國外進口品；而光纖監測系統，目前僅資料擷取器需要從國外進口，因此，「長距多跨」橋梁安全監測在相同的儀器佈設條件下，光纖監測系統的成本大約只有電子監測系統的一半費用。

功效方面，配合自行撰寫的分析程式，能使軟應硬的充分整合，並且因光纖感測儀器構造簡單，橋梁工程人員可以自行維護或修復。反觀，電子式監測系統的感測器若是從國外進口，當遇到故障、維護事件需送回國外處理，反而增加監測作業困擾。

從上述分析可知，在「長距多跨」橋梁安全監測

表 2 光纖監測系統與傳統電子監測系統物化特性比較

物化特性	光纖監測系統	傳統（有線電子儀器）
集束線	簡潔	複雜
電源性	單一	多點
雷擊與受潮風險	無	嚴重
電磁干擾	無	時常有且不明來源
訊號品質	優	普通
長距離	無影響	影響訊號
耐候性	佳	普通

應用，光纖監測系統的耐候性、經濟性、維護性，確實具有優勢和潛力。

結論與建議

本文思考如何將光纖感測技術，應用於一般多跨橋梁安全監測。本文從儀器的製作原理、熔接感測器的數量、橋梁的現場應用、分析軟體的建置，說明了光纖感測技術可滿足「長距多跨」橋梁的監測需求。這樣的監測系統可以應用在公路、鐵路、捷運、高鐵等交通系統。未來國家地震工程研究中心將推廣這套監測系統，協助橋梁主管單位提升大眾用路安全。

參考文獻

1. 王仲宇、張國鎮、張荻薇、黃俊鴻、姚乃嘉、陳賜賢、陳銘鴻、李維峰、曾志煌、鄔德傳、巫柏蕙，「橋梁政策白皮書之研擬」，交通部運輸研究所，2012。
2. 交通部臺灣區國道高速公路局，「交通部臺灣區國道高速公路局橋梁檢測作業要點」，2001。
3. 聯合報新聞報導，后豐斷橋二公僕無罪，2011年06月16日。
4. 李政寬，「全光纖式全橋橋梁安全監測整合系統之感測方法」，中華民國發明專利第 I-507585 號，2015年11月10日。
5. 美國 Micron optics 公司，<http://www.micronoptics.com/>