

人行吊橋之橋梁安全監測

王仲宇／國立中央大學土木工程系教授

陳志賢／國立中央大學橋梁工程研究中心博士後研究員

摘要

在台灣，吊橋已成為觀光風景區重要的景點，常常吸引眾多的人潮，頻繁使用下如何確保結構安全是值得關注的議題。歷史上曾發生過數起吊橋倒塌的事故，且多是因為人為疏失造成，顯見吊橋維護管理的重要性。結構安全監測透過電子儀器 24 小時進行監控，可有效掌握結構的變形行為與特性，及早發現結構異常現象，避免災害發生。本文介紹碧潭吊橋監測系統的設計以及相關監測資料分析與應用，包含索力、舒適度、溫度與橋塔傾斜等分析方法，期望在既有的儀器設備條件下，能透過訊號分析獲得更多有用的資訊。

前言

台灣是一個多山的島嶼，山地、丘陵面積約占總面積 2/3，人行吊橋因建造所需材料與人力少，完工後可供行人、機車或小型牽引車使用，成為台灣早期串連溪谷兩岸的重要交通設施。對早期的山區居人而言，吊橋是不可或缺的交通命脈，經濟發展以後，鋼橋、混凝土橋逐漸取代人行吊橋的交通功能，人行吊橋漸漸失去交通上的價值，轉而成為觀光風景區的重要景點，主管機關搭建新的吊橋來串連區域的景點，提高地區觀光的發展，例如南投竹山鎮的天梯（梯子吊橋）與屏東的山川琉璃吊橋，都是相當成功的案例。

民國 98 年 6 月，新北市平溪區靜安吊橋，發生整建工程的施工意外，肇因為錨座扣環鋼棒斷裂，主索力量無法傳遞至錨座，造成橋面跌落至河床中。民國 99 年 6 月，台東縣達人鄉的土坂吊橋完工後驗收前發生橋塔基座倒塌意外。民國 99 年 4 月，興建中的基隆暖暖溪人行吊橋因疑似作業疏失，造成橋塔主索滑動

以致鋼構橋塔向前傾斜，吊橋主體垂降事故^[1]。以上事故均發生於新建工程或整修工程中，未發生民眾傷亡，民國 102 年 11 月，新北市三芝區根德吊橋因垂吊索鏽蝕斷裂造成橋面塌落，共計 4 人輕重傷，引起社會大眾對吊橋安全的重視。台灣吊橋的維護管理長久以來一直缺少統一的制度與標準，不若公路橋梁依據「公路橋梁養護手冊」需每兩年進行一次目視檢測，並有「臺灣地區橋梁管理系統」統一的管理與查詢機制，在無政策依據之下，便疏於妥善地檢查與維護。依據中華顧問工程司的調查^[1]吊橋管理單位包含交通部觀光局風景管理處、農委會林務局、內政部營建署國家公園管理處、原住民管理單位、縣市政府、鄉鎮市公所、乃至台灣電力公司等，過於分散的管理單位，可能也是造成目前吊橋沒有統一管理制度的主要原因之一。

著名景點的吊橋使用程度高，常有密集的人潮通過，為確保路人的安全，更須要有妥善維護與管理，定期的目視檢測有助於管理單位掌握吊橋狀態，能及早發現變形、鏽蝕、損傷等異常情況，評估造成之原因，並予以維修改善。部分老舊吊橋，因其歷史價值無法改建，又使用頻繁者，可透過結構監測更清楚了解橋梁在不同載重下的變形行為與結構特性，以期在早期發現結構出現異常時，進行診斷與分析，確保結構安全。

吊橋的力學行為

要合理的選擇監測項目與感測器安裝位置，必須清楚結構的受力與變形行為。吊橋是目前世界上跨度最長的橋梁結構形式，主要構件包含主索、垂吊索、橋塔、錨定基礎與橋面版（如圖 1）。行人載重 P 施加

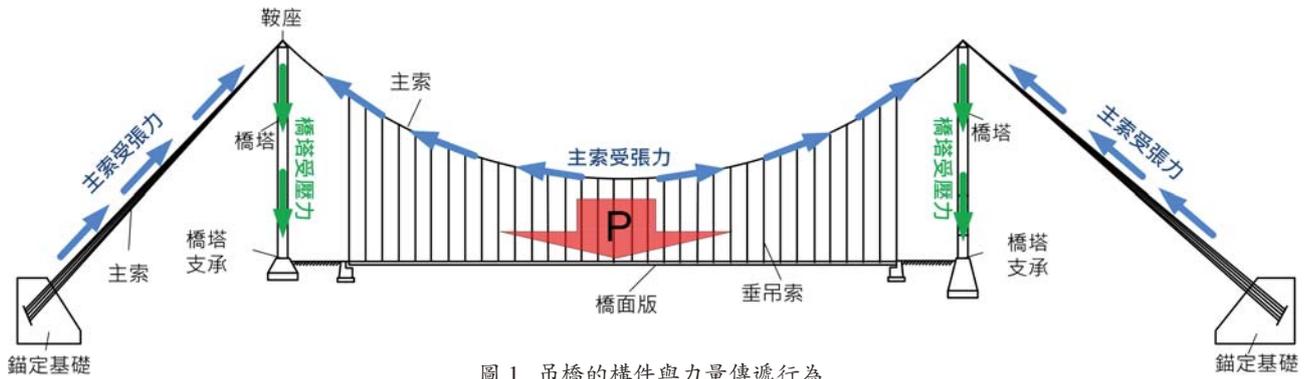


圖 1 吊橋的構件與力量傳遞行為

於橋面版，透過垂吊索傳遞至主索，主索受拉力，索力在跨中最低點處最小，在鞍座處最大，一部分力量透過橋塔傳遞到橋塔基礎，另一部分則由錨定基礎承受。橋塔主要承受軸壓力而錨定基礎需抵抗來自主索的拉力，換言之，吊橋是以鋼索傳遞力量，而結構系統的穩定性則仰賴橋塔與錨定端，在材料無損傷的情況下，當橋塔傾斜過大或錨定端無法承受主索拉力而失去平衡時，便會導致結構失效。

橋塔依照支承種類可分成搖擺式與固定式兩種結構形式，如圖 2 所示，其目的是使橋塔僅承受軸壓力，避免承受過大彎矩。搖擺式結構橋塔與基礎間採用鉸接支承，可自由轉動，此類型結構橋塔受主索變形帶動而產生傾斜，因此鞍座需採用固定式設計，即主索與鞍座間不允許產生相對位移，否則可能造成橋塔傾倒；固定式結構橋塔與基礎為固接，因此鞍座採用滑動式設計，主索可在鞍座上自由滑動，並使主索與鞍座間的摩擦力降到最低，避免摩擦力在橋塔底部產生過大的彎矩。

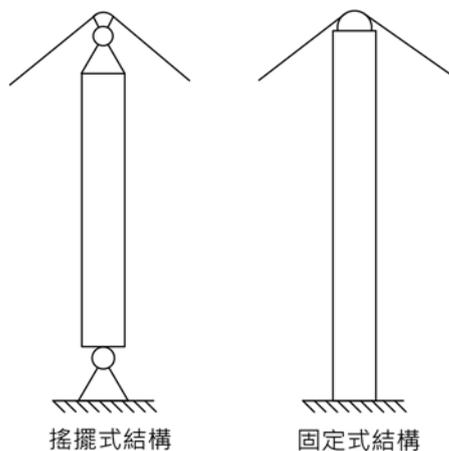


圖 2 橋塔結構形式

碧潭吊橋監測系統

碧潭吊橋為新北市碧潭風景區著名的地標，橋長 200 公尺，橋塔底部採用鑄鋼球軸承工法（圖 3），可自由轉動，為其結構之一大特色。碧潭吊橋建於 1937 年，迄今共進行 4 次較大規模的整修，並於 2010 年由新北市政府委託財團法人中華顧問工程司規劃建置橋梁安全監測系統。監測系統包含現地量測系統、中央控制系統、遠端監控系統等 3 個子系統，如圖 4 所示，以下針對個別系統做一簡單介紹。

現地量測系統

包含感測器與資料擷取器，監測資料透過網路傳送到現地量測主機，感測器配置如圖 5 所示，包含兩橋塔頂部及橋跨中央共三組風速風向計、橋塔傾斜角 θ_y （對 Y 軸旋轉，順時針為正）、主索與橋塔溫度、橋面版振動加速度、即時影像監控等。

中央控制系統

包含現地量測主機與資料庫主機，現地量測主機用於控制資料擷取器，取得監測資料，進行管理值判斷與警報發送之工作。另外，為執行長期監測評估，監測資料之保存為必要之需求，將監測資料庫建立於資料庫主機上，不僅可以提供評估系統分析之資料，更可給予相關人員進行查詢監看結構物狀況之服務。

遠端監控系統

為達到使用者管理便利的目的，遠端監控採用網際網路環境，讓使用者可透過網際網路遠端視覺化控制，提高系統管理效率；使用者可透過網際網路連線系統網頁，通過使用者權限管理認證後，可隨時隨地監看系統運作狀況，且提供歷時資料及完善的報表功能以供使用者查詢，即時了解結構狀態。



圖 3 橋塔底部鋼球軸承

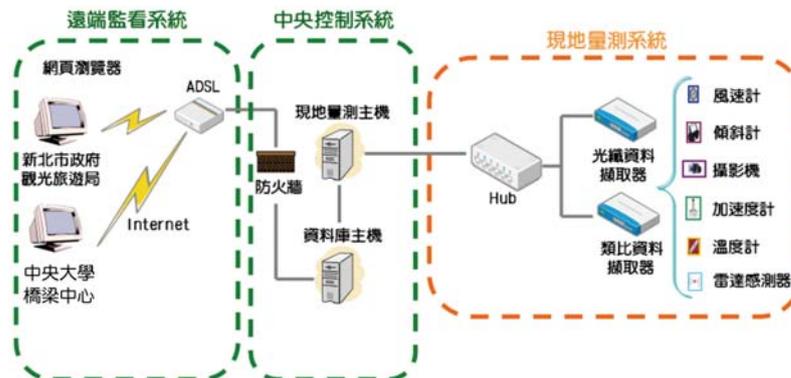


圖 4 監測系統組成架構圖

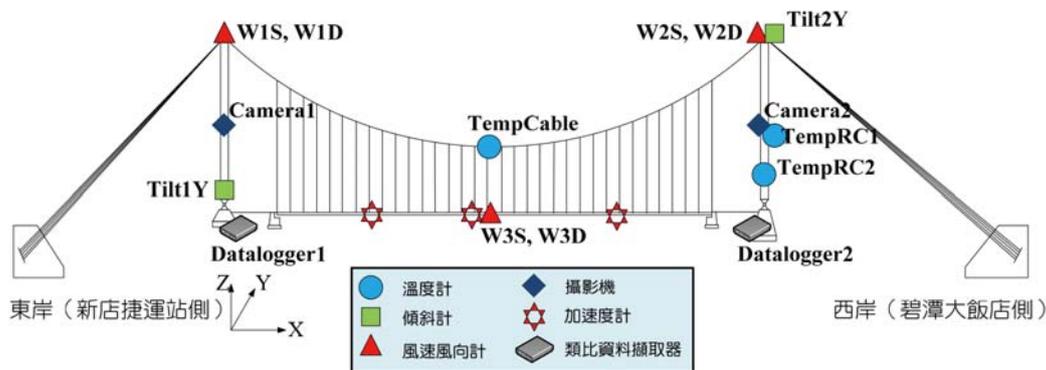


圖 5 感測器配置

監測資料分析

索力

主索索力為重要的監測項目，吊橋的容許拉力通常為 0.45 倍的極限拉力，以避免產生過大的鬆弛量^[2]。依照碧潭吊橋的橋塔的結構特性，主索受力變形後將帶動橋塔傾斜，索力與傾斜量為線性關係，兩者之對應關係可由數值模擬分析求得，數值模擬結果如圖 6 所示，主索索力隨位置改變，最大索力發生於鞍座處，相關數值模型參數與分析流程請參考文獻^[3]。由傾斜量對照關係曲線即可得知主索的受力狀況，但因傾斜計安裝時已是成橋狀態，傾斜角度僅能對應活載造成的索力，還須加上成橋的初始索力與溫度造成的索力後才是真正的索力值，在分析時應特別留意。

橋面振動

吊橋的自重輕、細長比高、勁度低，因此易因行人與風引發振動。許多吊橋橋面高度較高，更容易因為振動引發行人的不舒適，感甚至是感到恐慌。對於交通設施而言，除了提供安全的環境之外，舒適度也是一項重

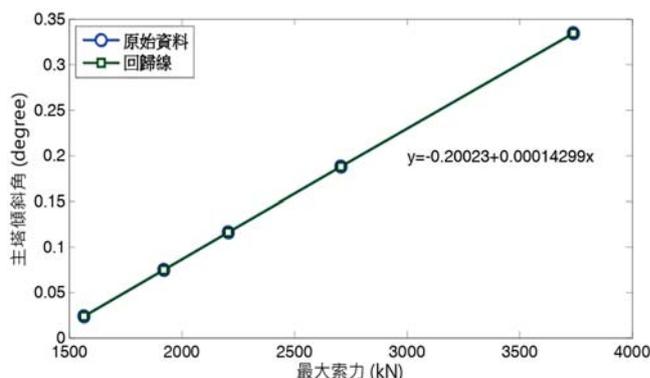


圖 6 最大索拉力與橋塔傾斜角關係曲線

要的課題。研究^[4-6]指出人的行走造成的垂直荷載頻率介於 1.2 ~ 2.4Hz，造成的橫向荷載頻率為垂直向的一半，即 0.6 ~ 1.2Hz，吊橋的自然頻率如果介於此範圍內，則可能因為共振而產生劇烈的振動反應，因而國際上有許多規範對於人行吊橋的自然振動頻率與舒適度制定標準，相關資料整理於表 1，除了 ISO 10137 是以基準曲線定義 1/3 八度音倍頻帶 (one-third octave band) 中心頻率的加速度值外，其餘採用定值，若吊橋自然振動頻率小於頻率上限時，則需要進一步進行限制橋梁加速度值。

表 1 國際規範之舒適度準則

規範名稱	垂直加速度	水平加速度	垂直向 頻率上限	水平向 頻率上限
BS 5400 ^[7]	$a_{max} \leq 0.5 \sqrt{f_0} \text{ m/s}^2$	無	$\leq 5 \text{ Hz}$	$\leq 1.5 \text{ Hz}$
Eurocode ^[8]	$a_{max} \leq 0.7 \text{ m/s}^2$	$a_{max} \leq 0.2 \text{ m/s}^2$	$\leq 5 \text{ Hz}$	$\leq 2.5 \text{ Hz}$
ISO 10137 ^[6]	$a_{rms} \leq K$ 倍的基準曲線 ^(註 1) (圖 7(a))	$a_{rms} \leq K$ 倍的基準曲線 ^(註 1) (圖 7(b))	無	無
Bro 2004 ^[9]	$a_{rms} \leq 0.5 \text{ m/s}^2$	無	$\leq 3.5 \text{ Hz}$	無

註 1：如果行人為走動狀態， $K = 60$ ；如果行人為站立狀態， $K = 30$ 。
 f_0 ：自然振動頻率

振動監測可於橋面外懸橫梁上安裝加速度計，BS 5400 或 Eurocode 規範採用最大加速度，ISO 10137 與 Bro 2004 規範則採用均方根值平均加速度，取固定時間長度的加速資料進行平均。在實務上加速度計可能因為突波訊號或行人在感測器附近跳躍使加速度突然增加，造成判讀錯誤，採用平均值則可降低此類訊號的干擾。

碧潭吊橋橋面振動採用 Bro 2004 作為舒適度標準，以 10 分鐘為區間計算平均加速度值，並以星期一至星期日為時間軸，例如 1 日與 8 日同為星期五，則依時間區隔標示在相同 X 座標處，如此便能觀察出每日與每週的振動週期變化。圖 8 為一垂直加速度的分析資料，如以日為週期，振動量呈現 M 型分布，兩個峰值位於早上上班與下午下班時段，西岸居民經由吊橋至東岸捷運站時造成；若以一週為週期，最大振動量發生於週末或假日。這些規律的變化顯示吊橋振動量隨行人數量增加而上升。另外也受到風速的影響，

圖 8 中框示處的紅點為受到颱風影響，造成加速度超過舒適度標準。

溫度與橋塔傾斜角

溫度變化主要影響主索長度進而改變橋塔傾斜角，依照設計圖橋塔與背拉主索之幾何關係如圖 9，其中背拉索長 L ，因溫度上升伸長後的長度為 L' ，因橋塔為鉸支承，此時橋塔產生的旋轉角為 q 。依據此一幾何關係可推導出背拉索應變 ($\epsilon = \Delta L/L = (L'-L)/L$) 與橋塔傾斜的關係公式，如公式 (1) 所示，當溫度上升 ΔT 度時，主索因溫差產生之應變 $\epsilon_T = \alpha \Delta T$ ，令 $\epsilon = \epsilon_T$ ，可得橋塔因溫差產生的傾斜角 θ 與 ΔT 之關係式，如公式 (2)。假設鋼索的熱膨脹係數 $\alpha = 12E-6/^\circ\text{C}$ ，利用 (2) 式可得到主索溫度與橋塔傾斜角之轉換係數為 0.0022，代表主索溫度每上升 1°C 造成橋塔的傾斜量，當熱膨脹係數增加或減少 $1E-6$ 時，分別使轉換係數增加與減少 0.0002。

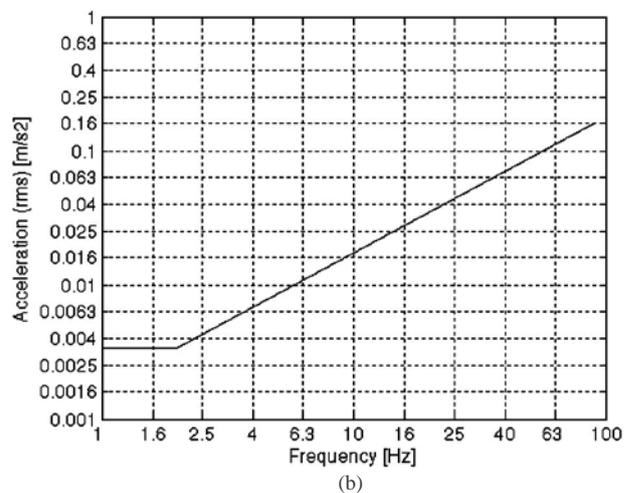
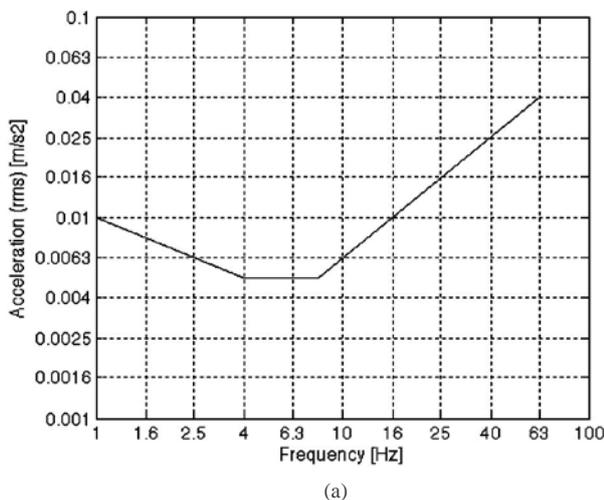


圖 7 ISO 10137 加速度基準曲線，(a) 垂直向，(b) 側向

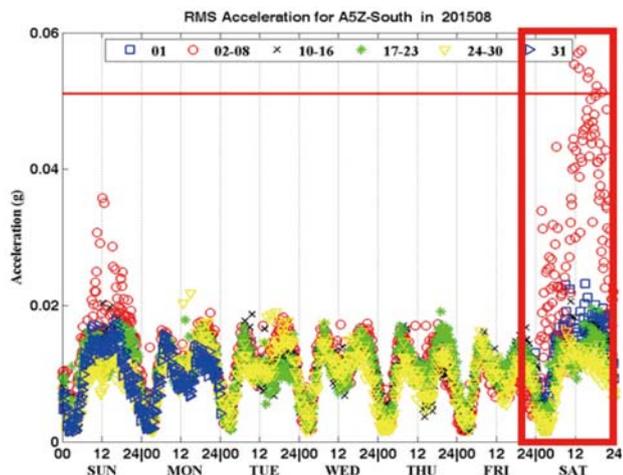


圖 8 橋面版加速度舒適度分析，框示處為因颱風造成振動超越舒適度標準。

進一步將結果與監測資料進行比對，圖 10 為 7 日的主索溫度與橋塔傾斜角監測資料，可發現橋塔傾斜角大致上隨主索溫度變化，同時也與行人載重相關，例如 10 月 3 日與 10 月 4 日為週末，遊客較平日提高許多，在溫度變化相似之下，兩日的橋塔傾斜量大幅增加。為降低行人的干擾，取一年監測資料中凌晨 2:00 至 4:00 的資料進行回歸分析，所得結果如圖 11 所示，回歸線斜率為 0.0019 即為監測資料計算出的轉換係數 R，與理論值相當接近。一般鋼材的熱膨脹係數介於 $11E-6/^{\circ}C \sim 13E-6/^{\circ}C$ 之間，由前述計算結果可知熱膨脹係數影響轉換係數計算結果相當明顯，為理論值與監測值差異的原因之一。

$$\varepsilon = \frac{\left[(L \cos \phi + 20 \sin \theta)^2 + (L \sin \phi - 20(1 - \cos \theta))^2 \right]^{\frac{1}{2}} - L}{L} \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{\left[(L \cos \phi + 20 \sin \theta)^2 + (L \sin \phi - 20(1 - \cos \theta))^2 \right]^{\frac{1}{2}} - L}{\alpha L} \quad (2)$$

橋塔傾斜角與行人數

行人是吊橋主要外力來源之一，除了增加纜索、橋塔與錨定基礎受力外，也會造成橋面更大的振動量，降低行人舒適度。國內對人行吊橋設計無明確規範，結構設計時多會參考日本道路協會「小規模吊橋指針同解說」^[10]，其中規定橋面設計活載重為 300 kg/m^2 ，若假設每人重 75 kg ，相當於 1 平方公尺內站立 4 人之多，實務上難以發生。但材料會隨時間劣化，結構強度需作適當折減，承載能力與可承載人數便會降低，此時就要對人數進行控管；另外若因人數過多造成舒適度超過規範時，也應對人數進行控管。

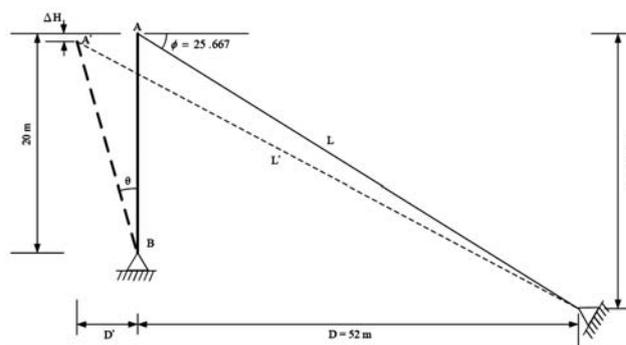


圖 9 橋塔與背拉斜索變形示意圖

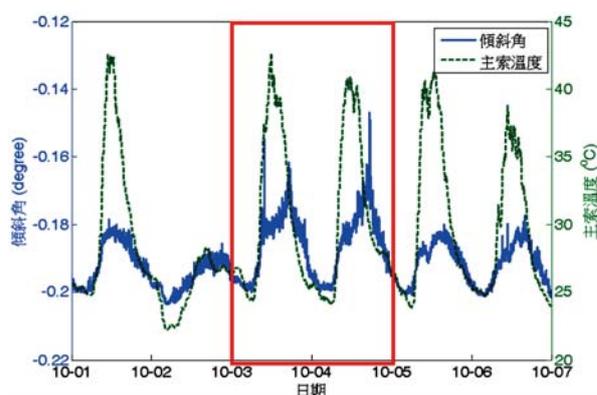


圖 10 主索溫度與橋塔傾斜角，圖中框示處為週末人潮較多造成傾斜量增加。

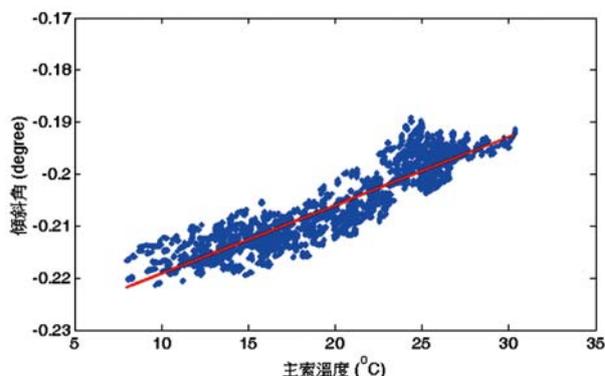


圖 11 主索溫度與橋塔傾斜角之回歸關係 (斜率 0.0019)

人數計算方法是以吊橋整體為地磅的概念，利用橋塔傾斜量推估橋上的承載人數。首先以人工的方式觀看某例假日的影像記錄，統計當日早上 9 點至下午 6 點東西岸進出口的通行人數與橋上停留人數，人數統計結果如圖 12，最多有 231 人同時在橋上。橋塔傾斜角主要受到溫度與活載的影響，要分析橋塔傾斜角與人數的關係，需先將溫度造成的傾斜角扣除，由前述溫度與橋塔傾斜角之關係可知，每上升 $1^{\circ}C$ 橋塔傾斜角增加 0.0019 度 ($R = 0.0019 \text{ 度}/^{\circ}C$)。取當日凌晨 3:00 起 24 小時的傾斜角與主索溫度資料進行分析，假設凌晨 3:00 時橋上無人，以第 1 筆為初值歸零，再利用主索溫度資料與轉

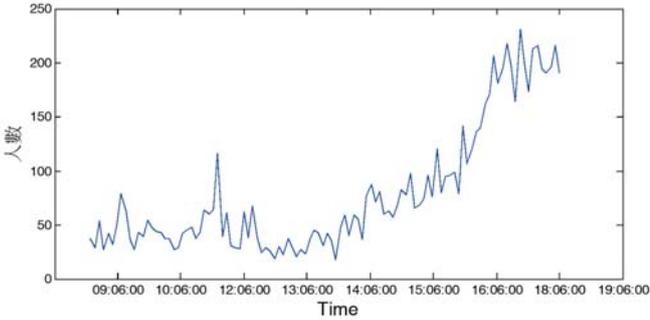


圖 12 橋上停留人數統計資料

換係數 R 扣除傾斜角內之溫度效應，所得結果圖 13 所示。分別為東岸及西岸，為了方便分析將西岸傾斜角乘以負號，使其與東岸之方向一致。圖中藍色虛線為原始資料，綠色實線為扣除溫度效應後之結果，圖中溫度與傾斜角均為相對值。

將修正後的傾斜角資料與人數繪製於同一圖上，東岸與西岸的橋塔傾斜與人數關係圖如圖 14 所示，上圖為人數與傾斜角隨時間之變化圖，圖中藍色實線為人數，綠色虛線為扣掉溫度效應後之傾斜角，可發現傾斜角隨人數增加而遞增，下圖為人數與傾斜角之關係圖，可發現人數與傾斜角有不錯之線性關係， R^2 可達 0.86 與 0.81。回歸線之斜率代表人數與橋塔傾斜的關係係數，由分析結果發現兩岸的關係係數相當接近，東岸為 1.03×10^{-4} 度/人，西岸為 1.05×10^{-4} 度/人。分析成果可應用於橋上人數的反算，人數與傾斜角關係係數由線性回歸得到，反算人數結果在 95% 的信賴區間內約有 ± 50 人的統計誤差，但實際誤差目前無法估計，需有更多的人數與傾斜角資料互相對應，才能更準確反算人數。

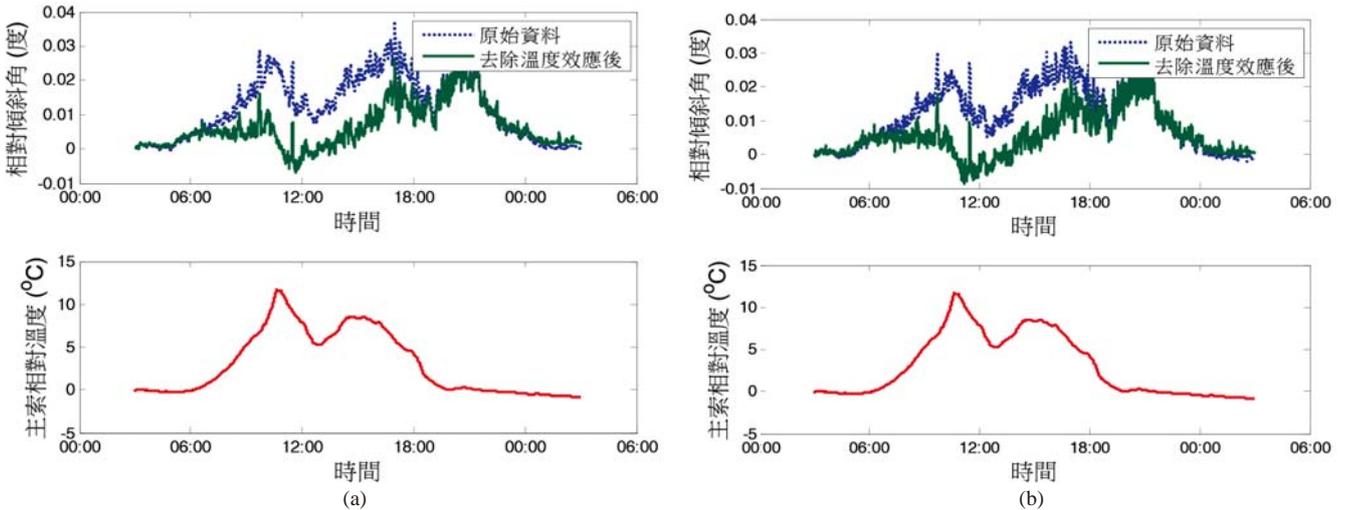


圖 13 (a) 主索溫度與東岸（捷運站側）橋塔傾斜角，(b) 主索溫度與西岸橋塔傾斜角，溫度與橋塔傾斜角均為相對值，以當日 3:00 之資料為初始值歸零。

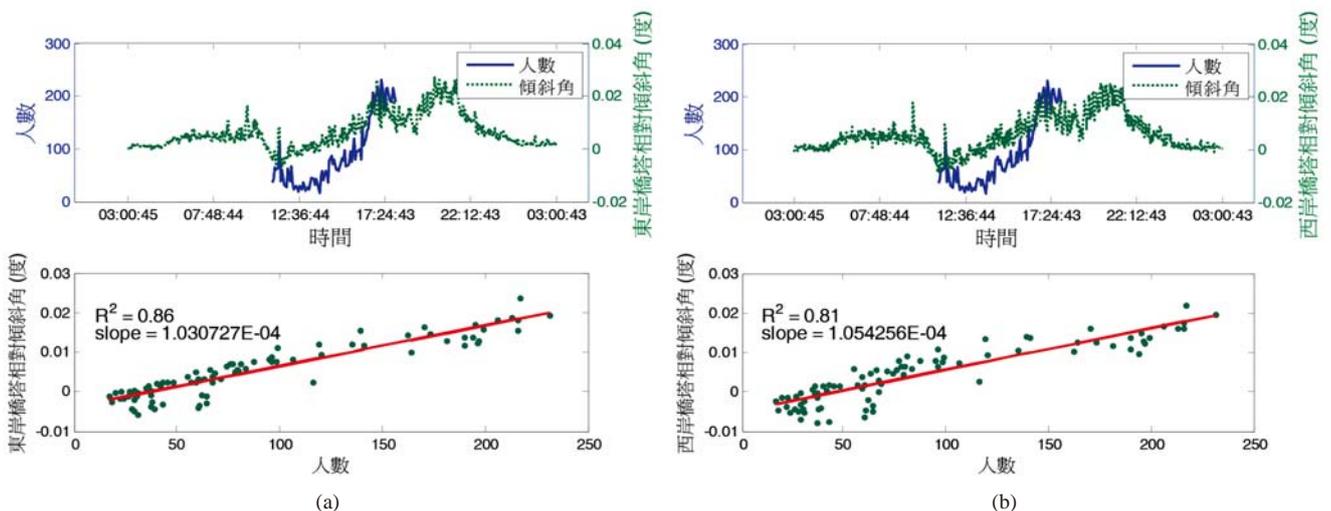


圖 14 (a) 東岸（捷運站側），(b) 西岸，橋塔傾斜角與橋上人數之關係。

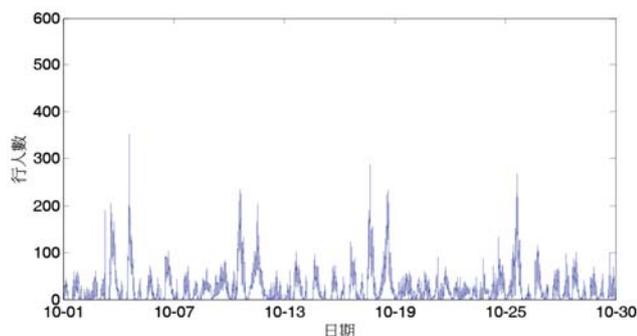


圖 15 以橋塔傾斜角估算橋上人數

結論與建議

台灣吊橋因管理單位眾多，且沒有統一的檢測制度與標準，在維護管理上易造成疏漏，為避免再次發生吊橋倒塌的意外，主管機關應儘速建立相關維護管理制度。

在吊橋監測中，溫度是必要的監測項目之一，其影響主索索力與橋塔傾斜變化，在計算監測系統管理值時，應考慮溫度效應的影響。

在碧潭吊橋監測案例中，橋塔傾斜角是最重要的監測項目，透過結構分析與訊號分析方法，可將橋塔傾斜角與人數及索力建立轉換關係，獲得更多有用的資訊。

參考文獻

1. 財團法人中華顧問工程司，「記錄台灣吊橋」，財團法人中華顧問工程司，臺北市，第3頁、第136-139頁（2013）。
2. Gimsing, N.J. and C.T. Georgakis, "Cable Supported Bridges: Concept and Design 3rd Edition," John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom, pp. 111 (2012).
3. 王仲宇，陳志賢，李承儒，「吊橋的監測與診斷」，第九屆公共工程非破壞檢測研討會論文集，台北（2015）。
4. Bachmann, H. "Lively Footbridges a Real Challenge," Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Paris, France, pp. 18-30 (2002).
5. Bachman, H., A.J. Pretlove, and H. Rainer. "Dynamic forces from rhythmical human body motions, in Vibration Problems in Structures: Practice Guidelines," Birkhäuser, Basel, appendix G (1995).
6. ISO, "Bases for design of structures Serviceability of buildings and pedestrian walkways against vibration," ISO/CD 10137, International Standardization Organization, Geneva, Switzerland (2005).
7. "Design Manual for Road and Bridges: Design Criteria for Footbridges: BD 29/04," Highway Agency, London, February, 2004.
8. Eurocode 5, "Design of Timber Structures Part 2: Bridges, EN1995-2: 2004," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium (2004).
9. Bro 2004, "Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar. Svensk Byggtjänst," Stockholm, Sverige (2004).
10. 社團法人日本道路協會，「小規模吊橋指針・同解說」，(1996)。



敬邀您加入本學會會員



www.ciche.org.tw

學會是 ...

- 一個凝聚產官學土木專業知識的團體
- 一個國際土木組織最認同的代表團體

- 一個土木人務必加入的專業學術團體
- 一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體

會員可享多項優惠 ...

- 申請學生獎學金
- 得到國際專業組織承認
- 參加國際交流活動
- 免費贈送一年六期會刊

- 本會出版品七折優待
- 本會學刊訂閱優惠
- 主辦研討會優先參加及大幅優惠