

橋梁健診系統建置與評估

張嘉峰／財團法人臺灣營建研究院工程技術與管理研究所副所長

邱信諤／財團法人臺灣營建研究院工程技術二組助理工程師

賴澄燦／天行工程有限公司總經理

鄭丁興／爾捷國際股份有限公司技術顧問

摘要

橋梁扮演著經濟脈絡互相連通不可或缺的角色。近年來經濟成長快速，各大產業皆蓬勃發展，由於過度的使用以及頻仍的天然災害，導致橋梁結構已進入老劣化階段，不僅降低橋梁之使用壽命，亦影響其發揮正常功能性，進而導致用路人行車安全。國內橋梁主管單位因后豐橋斷橋致人車掉落後，積極針對不同結構特性與其所處的環境建置自動化監測系統。為此，本文針對臺灣北部地區某橋梁因其鉸接端下陷，建置橋梁健診系統，透過分析橋梁長期的結構變化趨勢，確保橋梁安全性並發揮最大效益。

前言

位於臺灣北部地區某橋梁全長 671 m，橋面總寬度為 34.6 m，其平、立面圖如圖 1 所示，本橋採節塊懸臂式施工，上部結構為三室預力混凝土箱型梁，下部結構為鋼筋混凝土構造，PA、PB、PE 採用預力混凝土基樁，PN、PS 採用反循環鑽掘樁，PC、PD 採用掘井式基礎。該橋自完工開放通車後即陸續出現鉸接處伸縮縫拉伸、擠壓，及鉸接處沉陷等劣化異狀，依據民國 81 年之監測資料顯示鉸接處最大沉陷量達 62.9 cm，另依據民國 88 年之伸縮縫間隙量測成果顯示鉸接處伸縮縫最大拉開量為 18.7 cm。因此，透過橋梁健診系統分析橋梁長期的結構變化趨勢，確保橋梁安全性並發揮最大效益，實為目前重要的課題，本文以下將就該橋現況、監測系統架構、儀器配置、輔助檢測技術與現有成果做一說明。

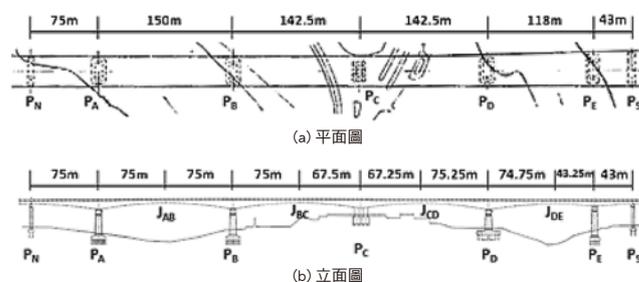


圖 1 橋梁平、立面圖

橋梁現況

針對該橋梁歷年檢測、維修與補強資料分述如下，大事紀如表 1 所示。

表 1 大事紀要表

日期	摘要重點
69 年夏季	調整 JAB 及 JDE 伸縮縫之有效伸縮量
69 年底	實施預留鋼鍵補施預力
72 年底	為縱坡調整加鋪瀝青混凝土
87 年 4 月	橋梁檢測及鋼箱補強
88 年 5 月	橋梁檢測及鋼箱補強完成
89 年 6 月	進行橋梁安全監測 (為期 5 年)
94 年 5 月	完成橋梁安全監測
100 年 2 月	進行橋梁耐震補強
102 年 2 月	完成橋梁耐震補強

於民國 67 年 7 ~ 9 月間發現 JAB 及 JDE 鉸接處之伸縮縫有受擠壓而損壞的情形，至民國 68 年夏季該伸縮縫受擠壓損壞程度有擴大之勢，且懸臂梁沉陷亦有顯著增加，經多次觀察判斷為完工後因預力混凝土之乾縮、潛變及鋼鍵之鬆弛等導致鉸接處過度沉陷。然民國 69 年 2 月之檢測成果顯示其最大沉陷量已大於原有預拱

量，且較設計標高約低 13 cm；民國 81 年之監測資料顯示，JAB 之總沉陷量達 62.9 cm（原預拱量為 20.1 cm）；民國 88 年之伸縮縫間隙量測成果顯示，JAB 及 JDE 二處伸縮縫皆呈頂部閉合，底部拉開現象，而 JBC 及 JCD 二處伸縮縫則呈拉開現象，其底部拉開量甚大，最大已達 18.7 cm（原設計斷面中央處拉開量為 4 cm，原有繫拉鋼鍵預留鬆弛量為 6.5 cm）；惟由民國 94 年資料顯示，各鉸接處伸縮縫之沉陷量趨於穩定；因此監測本標的橋梁鉸接端之沉陷確有必要。

針對於此，橋管單位於民國 69 年至 72 年陸續針對鉸接處伸縮縫劣化狀況，曾進行：(1) 調整 JAB 及 JDE 伸縮縫之有效伸縮量，(2) 預留鋼鍵補施預力以改善下垂情形（惟效果不彰，實際僅抬高 1.4 ~ 1.9 cm），(3) 加鋪瀝青混凝土改善路面縱坡。另民國 100 年 3 月針對耐震補強，曾進行：(1) 端隔板補強，(2) 增設預力鋼腱，(3) 橋墩鋼板包覆補強，(4) 中空柱灌注混凝土，(5) 基礎補強，(6) 新設就地澆注混凝土基樁。

另針對鉸接處沉陷量、水平位移及橋墩應力變化，自民國 89 年起進行為期 5 年之長期安全監測。由民國 94 年之監測成果報告顯示，鉸接處之垂直變位各點仍有微小持續下垂情形，但其下垂量仍在預期範圍內，鉸接處之相對水平變位位移量均不及 1 cm，亦即

鉸接處之垂直、水平變位已趨於穩定，而結構體應變監測值雖有略微增加趨勢，但其值不大，無結構安全性問題，仍應持續長期監測以確保使用之安全性。另依據民國 101 年 5 月 ~ 103 年 6 月之橋面高程測量資料顯示，於鉸接處附近下垂量變化最為明顯，且日間與夜間相較，夜間下垂量較日間大。

監測作業內容

橋梁健診系統架構

本文所介紹之橋梁健診系統具備完整監測項目、系統可靠耐用、傳輸效率佳與即時展示等功能，以真正有效地監測橋梁之安全性。其主要架構分為現地端、網際網路及使用端，如圖 2 所示，為各自可運作的兩套監測系統以無線網路將所得資訊傳回遠端監控中心電腦主機（設於臺灣營建研究院），一旦有異常再通過警戒通報程序讓主管單位有效掌握。

監測儀器配置

為能有效掌握本標的橋梁之結構安全現況，就該橋之結構特性（鉸接端下陷）進行監測儀器配置，主要集中於 JAB ~ JBC 與 JCD ~ JDE 共兩個部分，作為主要監測區域，如圖 3 所示，相關安裝成果如圖 4 所示。

監測儀器種類及功能

本標的橋梁主要安裝之監測儀器種類及功能如表 2 所示。

系統建置

本標的橋梁所建置之橋梁健診系統，係以 HTML 與 JavaScript 語言撰寫，並結合結構安全監測系統、全測站經緯儀量測系統與智慧型結構監測系統（Smart Box）於現地蒐集並儲存資料後，會

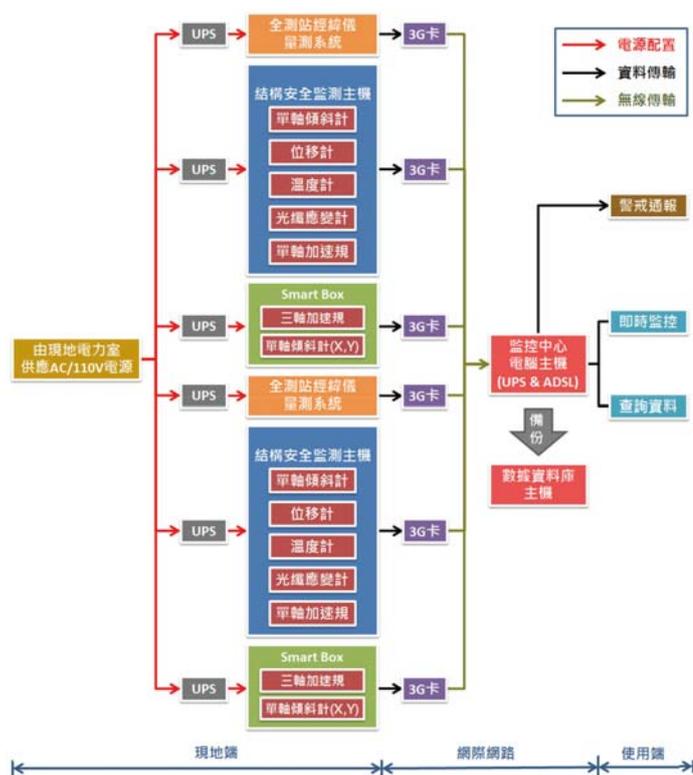


圖 2 橋梁健診系統架構圖

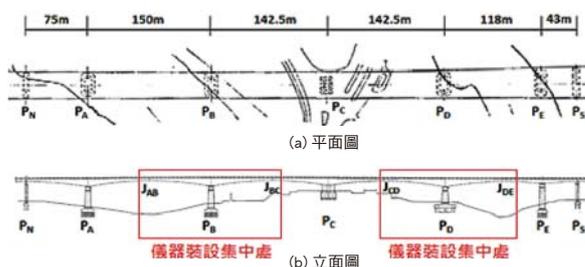


圖 3 監測儀器配置區分圖

表 2 監測儀器種類及功能表

頂次	儀器種類	功能
1	全測站經緯儀量測系統	鉸接點沉陷量及水平雙向相對位移監測。
2	結構安全監測主機	可整合項次 3 ~ 7 之設備，並內建傳輸介面及 20GB 紀錄器。
3	光纖應變計	安裝於梁之支承端、梁體及節塊交接處，以量測應變（梁變形）。
4	電子式單軸傾斜計	鉸接點相對轉角監測。
5	電子式位移計	鉸接點水平相對位移監測。
6	電子式溫度計	量測斷面上方，側面與下方溫度變化，以提供監測數據之改正與分析。
7	電子式單軸加速規	安裝於鉸接處，以量測垂直向振動資料
8	智慧型結構監測系統 (Smart Box)	針對帽梁外三軸向振動及單軸向傾角 (X,Y) 進行量測。



圖 4 監測儀器安裝成果圖

經由 3G 傳輸模組將資料回傳至監控中心主機，並由數據資料庫主機自動進行備份，橋梁主管單位透過網路瀏覽方式，即可進行遠端連線監控及系統操作等功能。

藉由即時監測模組，能即時監看所有監測儀器之量測值，如圖 5 所示。

藉由儀表板模組以圖形化之顏色區分警戒值（黃色）與行動值（紅色），判斷監測儀器量測值是否在正常範圍（綠色），如圖 6 所示，一旦超過警戒值或行動值時，除可啟動電腦之警報系統外，並可同時發出簡訊及 E-mail 通知相關人員。

藉由示波器模組，可透過波形圖即時顯示量測值動態波形，以檢視監測儀器訊號正確性，亦可自行修改監測儀器觀測值之更新秒數（系統預設為每 2 秒更新一次），進而瞭解其變化範圍（-6.802 mm ~ -7.098 mm），如圖 7 所示。

監測預警機制

除了透過監測系統可隨時掌握橋梁狀況外，當監測數據出現異常，可立即派員至現場勘查進行狀況研判，其預警機制流程如圖 8 所示，茲將各種情況分述如下：

監測數值超過警戒值

- 發佈簡訊通知，立即派員至現場勘查，並由緊急應變小組判讀其正確性。
- 若為誤報，則取消狀況，並通知系統維護人員分析原因。
- 若非誤報，則立即通報工程司，現場派人警戒。

監測數值超過行動值

- 發佈簡訊通知，立即派員至現場勘查，並由緊急應變小組判讀其正確性。

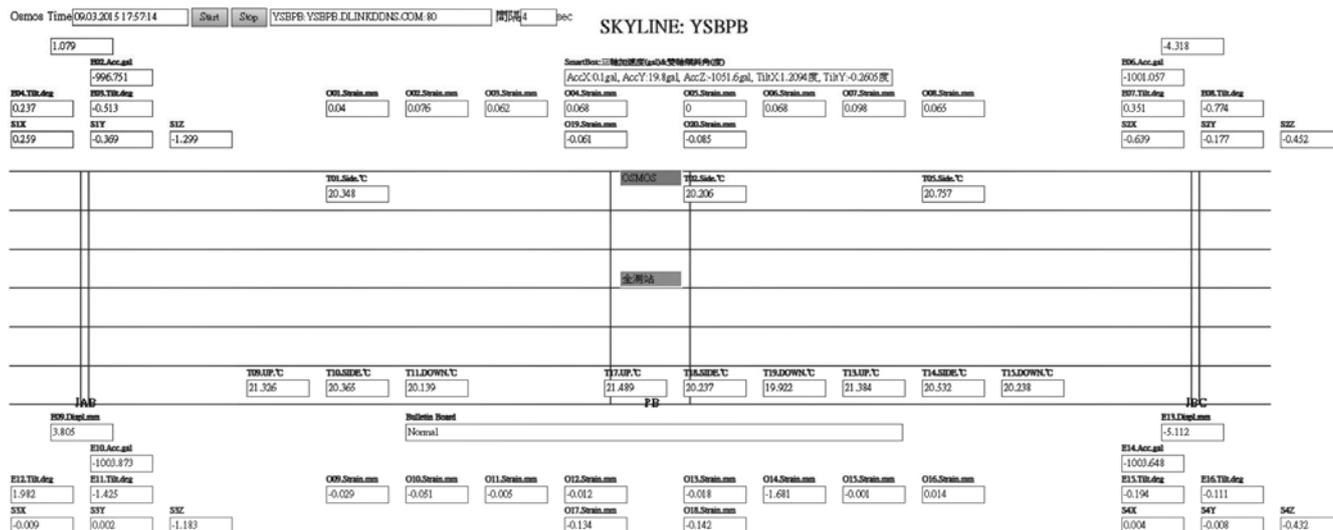


圖 5 即時監測模組示意圖 (以 PB 墩為例)

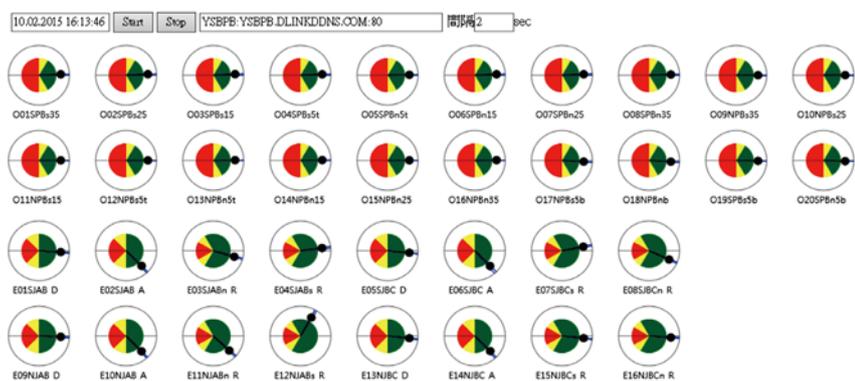


圖 6 儀表板模組示意圖

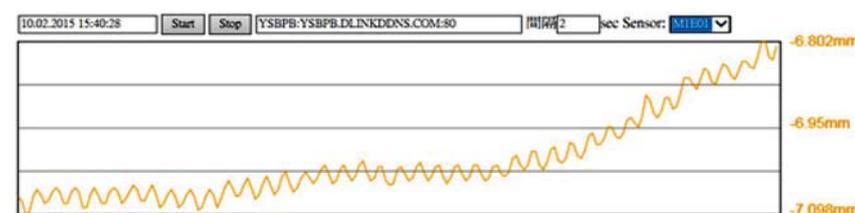


圖 7 示波器模組示意圖

天然災害

- 視現地狀況進行系統快速檢查等協助分析研判之相關事宜。

解除警報

- 依據搶修工程或補強改善後之監測資料，判斷是否解除警報。

監測資料分析

依據民國 103 年 12 月至民國 104 年 11 月間之監測資料進行說明，以供未來監測資料分析其趨勢變化參考之用，分述如下。

鉸接點沉陷量趨勢分析

針對鉸接點沉陷量趨勢分析資料，其中各鉸接點南下車道與北上

- 若為誤報，則取消狀況，並通知系統維護人員分析原因。
- 若非誤報，則立即通報工程司，現場派人警戒，準備進行限速、限重或封橋後續相關事宜。

限速、限重及封橋

- 初期建議於接近該橋之路肩設置警示燈號及標語，提醒用路人行車速度及重量限制。
- 若到達封橋標準，建議於交流道口進行交通管制，嚴禁車輛通行，並設置替代道路標語，提供用路人行車資訊。

車道的沉陷量歷時圖走勢相當一致，而如圖 9 所示，JCD 南下與北上車道的鉸接點沉陷量變化範圍最大，約介於 3 cm ~ -4.7 cm 之間。

鉸接點伸縮縫水平位移趨勢分析

針對鉸接點伸縮縫水平位移趨勢分析資料，如圖 10 所示，其中鉸接點伸縮縫水平位移變化範圍以 JBC 北上車道、JCD 南下車道與 JCD 北上車道變化約達 45 ~ 48 mm 為較大；JAB 南下車道變化約達 15 mm 為較小。

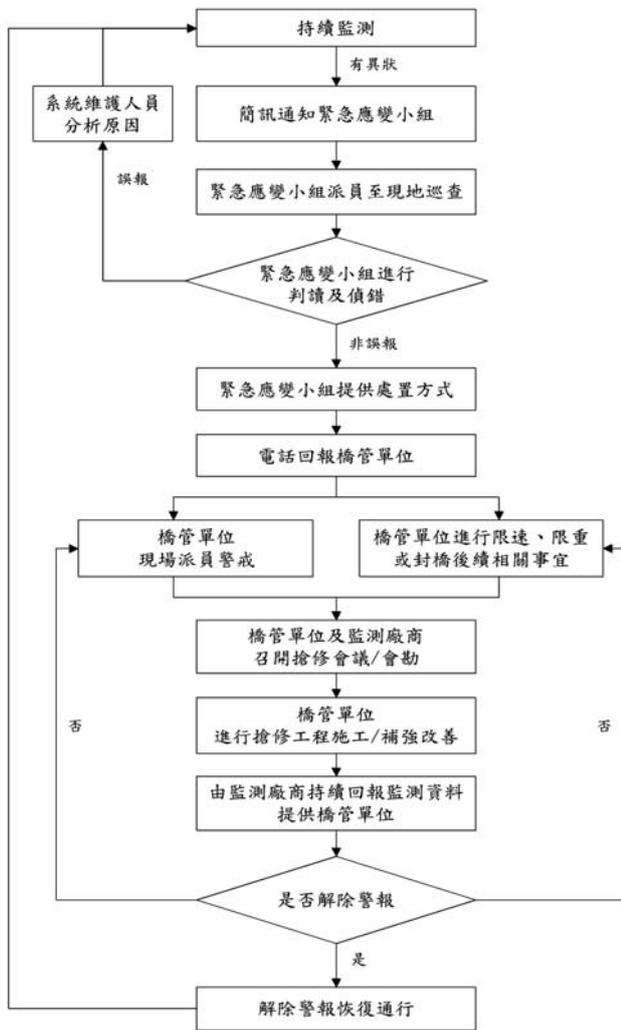


圖 8 預警機制執行流程

鉸接點振動趨勢分析

針對鉸接點振動趨勢分析資料，如圖 11 所示，其中各鉸接點加速度約為 $-1g$ 左右，變化不大。

鉸接點相對轉角趨勢分析

針對鉸接點相對轉角趨勢分析資料，如圖 12 所示，其中各鉸接點相對轉角變化範圍介於 0.12 度 ~ -0.35 度之間，變化不大。

鉸接點沉陷量與溫度之趨勢分析

針對鉸接點沉陷量與溫度之趨勢分析資料，如圖 13 所示，以 JCD 南下與北上車道為例，當溫度上升時鉸接點呈現沉陷狀態，當溫度下降時鉸接點呈現上揚狀態。另外相同斷面的溫度變化，因頂版處之溫度較底版處來得直接，故其溫度變化較為顯著。

鉸接點伸縮縫與溫度之趨勢分析

針對鉸接點伸縮縫與溫度之趨勢分析資料，如圖 14 所示，以 JCD 南下與北上車道為例，當溫度上升時鉸接點呈現沉陷狀態，當當溫度上升時鉸接點伸縮縫呈現壓縮狀態，當溫度下降時鉸接點伸縮縫呈現拉伸狀態。另外相同斷面的溫度變化，因頂版處之溫度較底版處來得直接，故其溫度變化較為顯著。

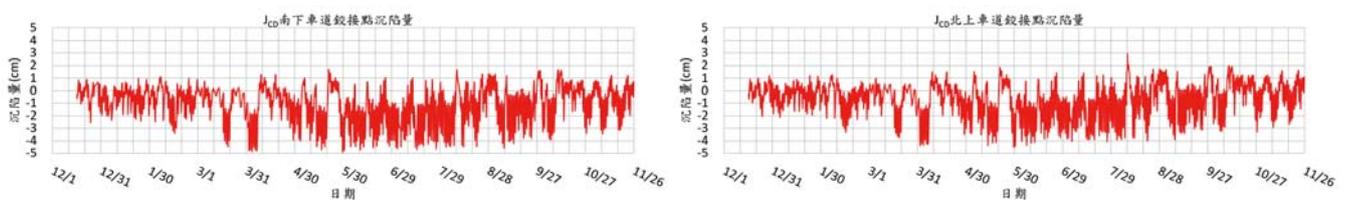


圖 9 鉸接點沉陷量趨勢監測資料

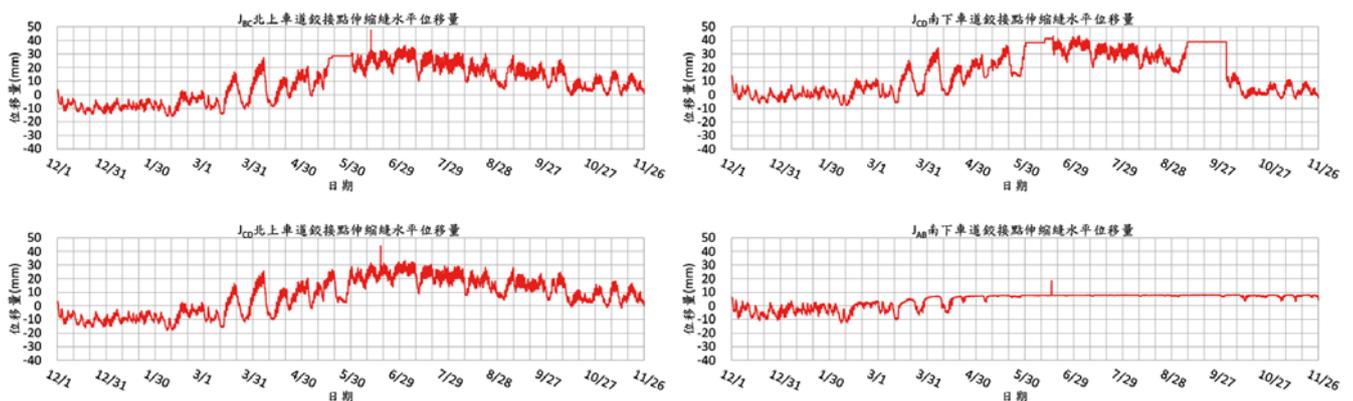


圖 10 鉸接點伸縮縫水平位移趨勢監測資料

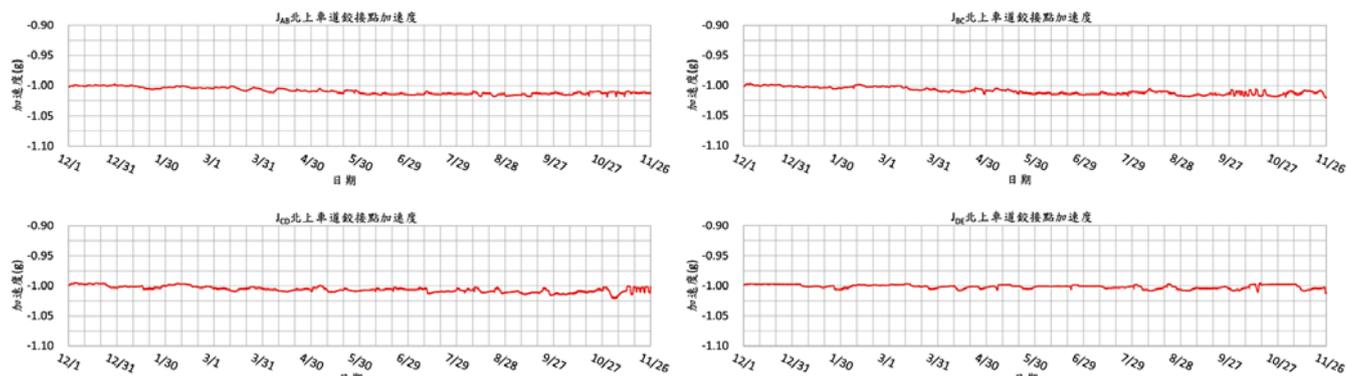


圖 11 鉸接點振動趨勢監測資料

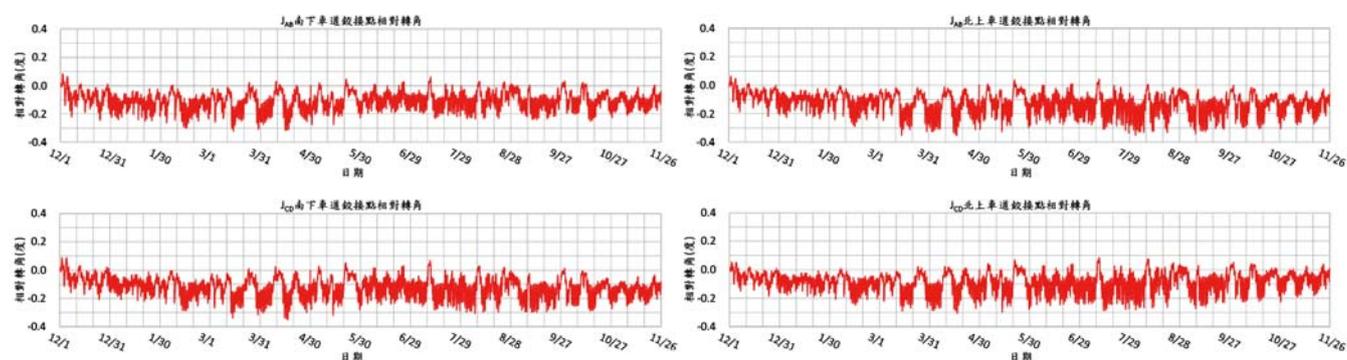


圖 12 鉸接點相對轉角趨勢監測資料

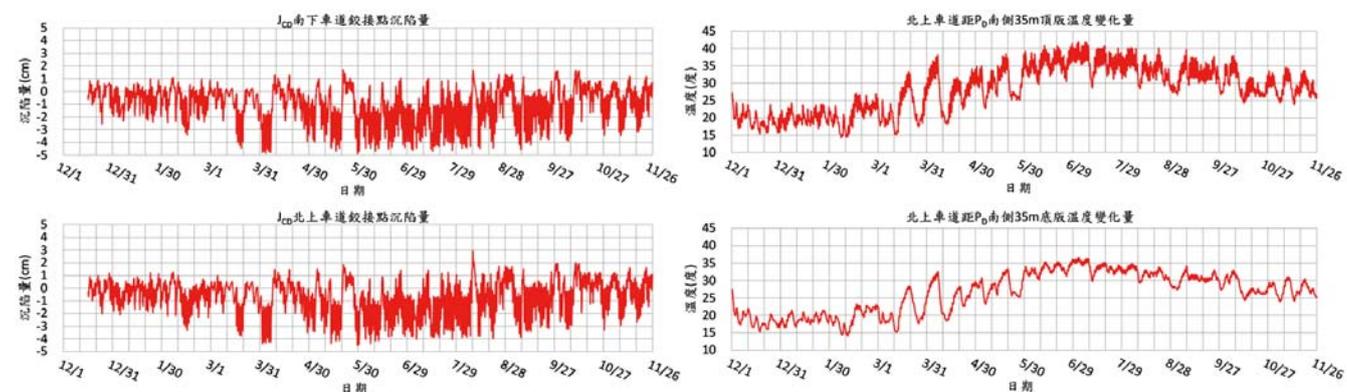


圖 13 鉸接點沉陷量與溫度之趨勢對照資料

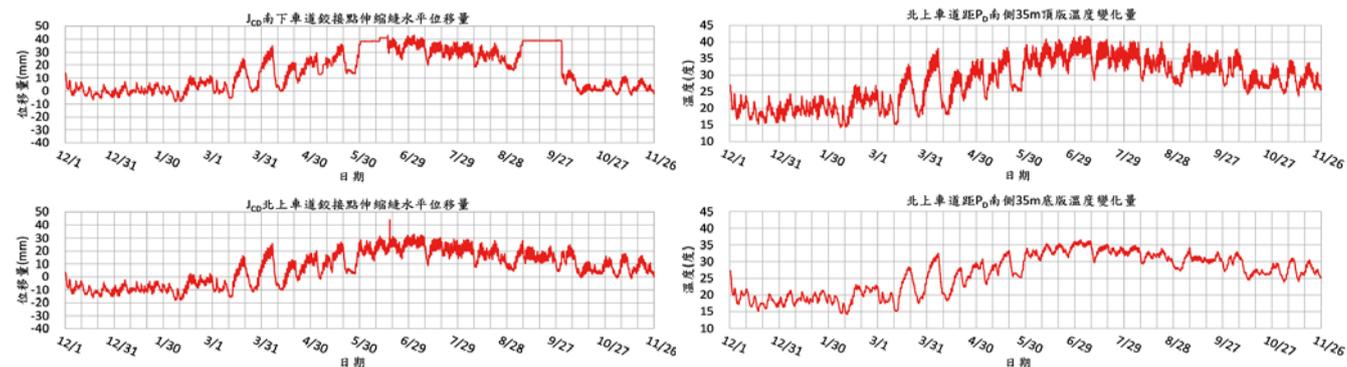


圖 14 鉸接點伸縮縫與溫度之趨勢對照資料

動態分析

針對本標的橋梁鉸接端進行動態量測，於 JBC 北上車道共記錄到 3242 次超過振動變化範圍 ($\pm 80\text{gal}$) 資料，初步研判為瞬間衝擊車載重所造成。因此，針對其最大變化範圍之振動資料進行動態分析，並將其加速規歷時波形經由快速傅利葉轉換成頻域分析，其分述如下：

振動資料分析

平時車載作用下

圖 15 為平時 JBC 北上車道加速規振動資料，圖中顯示其變化範圍介於 $0.013\text{ g} \sim -1.058\text{ g}$ ，其對應頻率約為 2.0 Hz 左右，如圖 16 所示。

春節期間

圖 17 為春節期間 JBC 北上車道加速規振動資料，圖中顯示其變化範圍介於 $-1.050\text{ g} \sim -0.959\text{ g}$ ，其對應頻率約為 0.94 Hz 、 2.1 Hz 與 4.2 Hz 左右，如圖 18 所示。

結構物自然頻率

藉由春節期間由於車流量較少，車輛載重對橋梁干擾較少，與平時的結果相較，其中 0.94 Hz 的頻率因

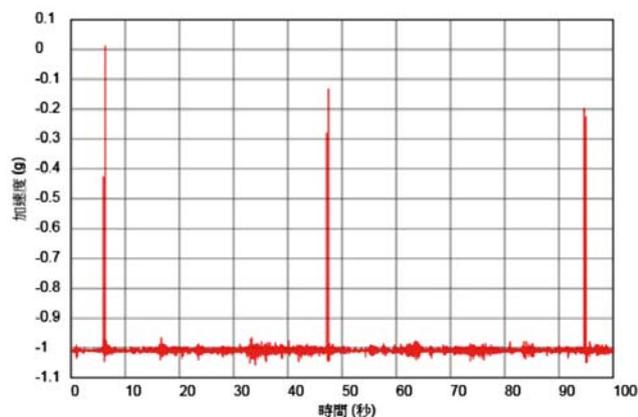


圖 15 JBC 北上車道加速規歷時波形圖

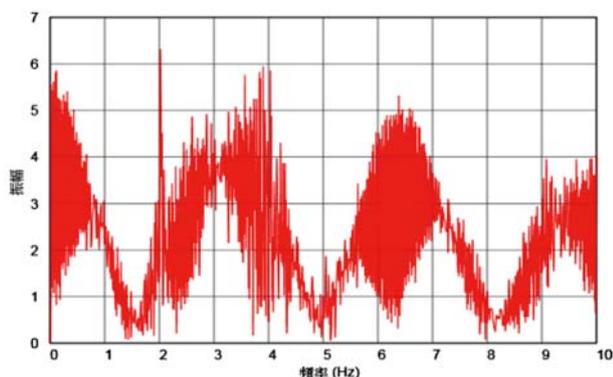


圖 16 JBC 北上車道加速規頻譜與振幅圖

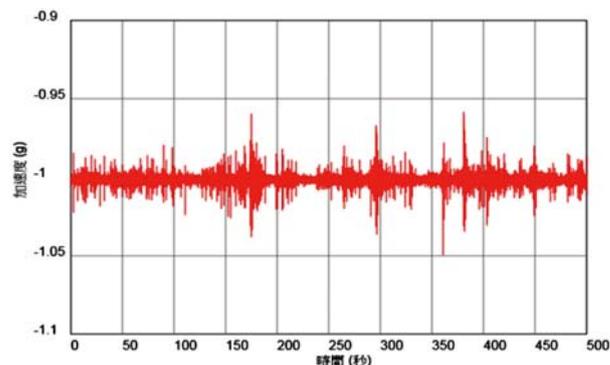


圖 17 JBC 北上車道加速規歷時波形圖 (春節期間)

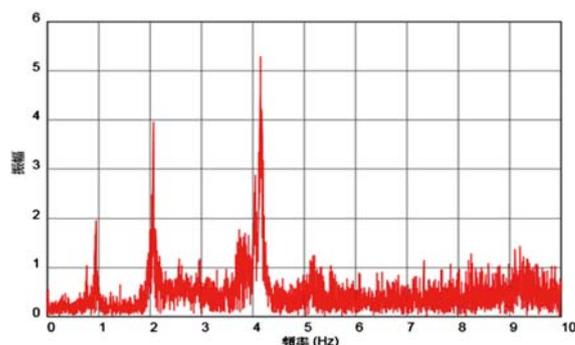


圖 18 JBC 北上車道加速規頻譜與振幅圖 (春節期間)

外界干擾少，而較為突顯；另外 $2.0\text{ Hz} \sim 2.1\text{ Hz}$ 的頻率始終存在，可作為後續頻率比對之用。

結論

藉由橋梁健診系統之建置、監測運作與評估，可瞭解橋梁之鉸接點沉陷趨勢、鉸接點伸縮縫劣化趨勢、鉸接點沉陷與溫度之關係等，充分掌握橋梁之結構安全現況。未來配合長期監測數據趨勢分析成果，及適當之預警機制與應變方針，提供現地橋梁維護管理人員更充裕的時間應變，以確保橋梁之結構與行車安全。

參考文獻

1. 期刊 1. 陸景文，陳振川、張國鎮，詹穎雯，「台灣地區溫度對混凝土橋梁影響之監測與分析」，中國土木水利工程學刊第十三卷第三期 (2001)。
2. 學位論文 1. 王顯霖，「橋梁健康診斷量測技術之研究」，國立中央大學 (2011)。
3. 研究報告 1. 財團法人臺灣營建研究院，「臺北市橋梁災害防治專業服務」，臺北市政府 (2014)。2. 財團法人臺灣營建研究院，「國道 3 號濁水溪橋沖刷監測之研究」，交通部臺灣區國道高速公路局 (2010)。3. 陳振川、蔡益超、張國鎮等，「橋梁監測預警系統及沖刷保護措施及補強等策略之研究」，交通部公路總局 (2006)。
4. 財團法人臺灣營建研究院，「高速公路橋梁延壽評估及案例分析委託研究計畫」，交通部臺灣區國道高速公路局 (2005)。