

# 先進多通道動態應變監測技術在國道6預力箱型梁之應用

呂文玉<sup>1</sup>、黃俊豪<sup>2</sup>、王祐璋<sup>3</sup> 陳建旭<sup>4</sup> 王建泓<sup>5</sup> 林宜清<sup>6</sup> 蔡欣局<sup>7</sup> 葉承軒<sup>8</sup>

<sup>1</sup>交通部高速公路局中區養護工程分局 分局長

<sup>2</sup>交通部高速公路局中區養護工程分局 副分局長

<sup>3</sup>交通部高速公路局中區養護工程分局南投工務段 段長

<sup>4</sup>交通部高速公路局中區養護工程分局南投工務段 副段長

<sup>5</sup>交通部高速公路局中區養護工程分局南投工務段 幫工程司

<sup>6</sup>中興大學土木工程學系 教授

<sup>7</sup>財團法人中華顧問工程司 主任

<sup>8</sup>財團法人中華顧問工程司 正工程師

## 摘要

本文將介紹先進的多通道同步動態應變計在國道 6 預力混凝土箱型梁之實務應用。動態應變監測可以解決傳統靜態應變監測受環境溫度變化干擾嚴重之問題，此乃因為車輛通過橋跨之時間都是幾秒鐘而已，溫度可視為沒有變化，故車輛通過引起之純粹力學應變反應就可以被擷取到。本研究採用先進的 4 通道同步動態應變計來監測橋梁某特定斷面之中性軸位置，作為損傷辨識之用，由於每通道都是每秒取樣 100 筆資料，所要傳輸與分析的資料量非常巨大，因此應用 AI 邊緣運算創新技術，只傳送每一分鐘內最大的車輛應變反應之關鍵數據，來大量降低資料量之傳輸，構成一套現場高效率且穩定的無主機 NB-IoT 動態監測系統。研究結果顯示國道 6 石灼橋 PE4-PE5 橋跨的中性軸位置有因裂縫存在而出現偏高之現象，經箱梁外目視檢測確實發現監測點附近存在撓曲裂縫。後續應用具有邊緣運算功能之動態位移計來監測裂縫寬度之變化，監測結果顯示裂縫寬度變化之歷時反應，主要是溫度變化在主導，變動量都在 0.035 mm 以內；至於車輛通過引起之裂縫寬度張開最大變化量都在 0.02 mm 以內，表示各橋跨之撓曲勁度與目前預力狀態尚足以抑制裂縫寬度之成長。

## 一、前言

新建與老舊橋樑的結構健康狀態現行採用的目視檢測到非破壞檢測技術，都屬於較被動的在特定時間點來檢視評估橋梁結構的健康狀態；近年來因為微機電與通訊技術在手機普及化的推波助瀾下蓬勃發展，使得屬於主動的即時結構健康監測(Structural Health Monitoring，簡稱 SHM)技術成為橋梁安全管理的首選。

橋梁結構健康監測(SHM)乃在現場結構上配置各類型感測器(例如加速規、傾斜儀、位移計、應變計、荷重計、溫度計…等)，作為監測結構對外在刺激所產生之反應[1-3]。橋梁結構健康監測的發展歷史已經超過 30 年，可惜的是受限於環境溫度變化對橋梁物理行為有明顯影響[4, 5]，讓各種常用的監測物理量指標，例如橋梁振動頻率、靜態變位、靜態應變…等，都無法用來作為量化橋梁結構健康指標之用，只能藉由各種統計分析方法來進行定性的趨勢分析。換句話說，國內外在此領域發展一直無法獲得明確的「定量」指標，作為「即時」橋梁安全管理之用。

由於車輛通過橋梁的時間非常短，通常只有幾秒鐘，在此短時間內主梁上產生的動態應變不太可能受到溫度變化的影響。因此，由車輛負載引起的應變變化可以被視為純粹的力學應變。這種由車輛引起的力學應變與主梁的剛度密切相關。因此，近年來有許多研究使用動態應變作為結構健康監測指標 [6-8]。此外，主梁的中性軸 (N.A.) 位置與斷面剛度的中心相關，因此中性軸位置也對主梁的局部損傷高度敏感，這方面已有大量研究 [9-12]。

中性軸 (N.A.) 位置指的是在垂直外力作用下，梁的橫斷面內正向應力/應變為零的位置。要監測梁橫斷面的中性軸位置，需要至少安裝兩個應變計，然後利用梁斷面彎曲應變線性分佈的基本假設，推算應變為零的位置。當車輛通過橋梁時，會引起動態應變反應。通常，取樣頻率超過 40 Hz (每秒 40 個數據點)，即可完整且準確地記錄由車輛通過引起的動態應變反應，這些數據可用於後續橫斷面中性軸位置的分析。連續監測需要面對多通道動態應變計的大量數據輸出之挑戰，因此，傳統上都會在現場配置電腦主機與 4G 通訊卡來運作，然而，電腦主機與 4G 資料傳輸都屬於耗電量很大的裝置，且容易出現熱當機，須經常跑現場進行維修。

本文將介紹先進的多通道同步動態應變計在國道 6 預力混凝土箱型梁之實務應用，多通

道動態應變計的智慧節點具有 AI 邊緣運算能力，不再傳送連續波形，而只傳送每一分鐘內最大的車輛應變反應之關鍵數據，來大量降低資料量之傳輸，用 NB-IoT 通訊卡即可，以構成一套現場高效率且穩定的無主機動態應變監測系統。

## 二、國道 6 石灼橋預力混凝土箱型梁之中性軸監測

### 2.1 多通道同步動態應變計之介紹

採用電阻式應變計以 1/4 橋接進行電路設計如圖 1 所示，該電路將以內建可程式控制放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)之類比數位轉換器 (ADC) 為主，以串列數位匯流排由節點微控制器控制放大倍率及 ADC 參數，如此可將類比訊號線縮到最短，可有效免除電磁雜訊及導線的溫度效應干擾。訊號轉換器選擇 24-bit Delta-Sigma 類型 ADC，可在所需取樣動態頻率範圍內大幅提昇訊號解析度，並獲得較低雜訊的轉換結果。電橋部分(R1、R2、R4)將引入超低溫度係數的高精度電阻，降低環境溫度對電橋影響，且可免除傳統並聯校正電阻可能引致的飄移與故障，直接由韌體進行歸零。

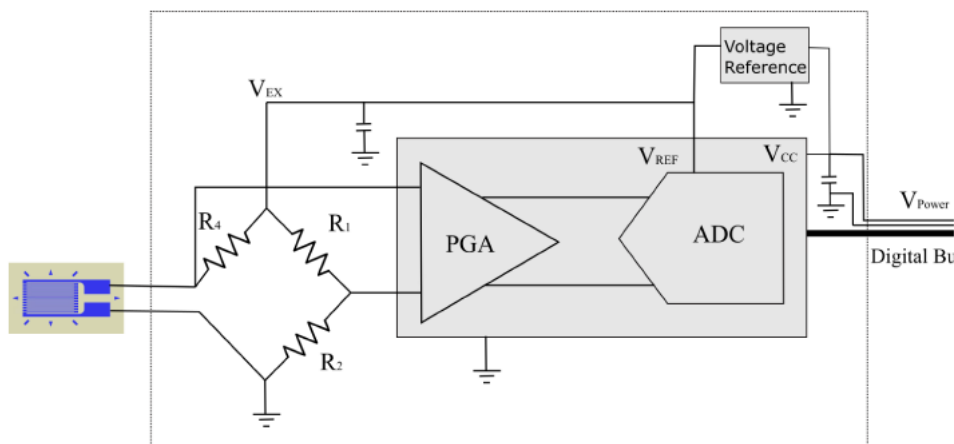


圖 1 高精度動態應變訊號擷取電路

具邊緣運算功能之感測器節點需要處理器、記憶體進行數據運算，需要根據標準工業通訊介面與周邊裝置溝通，需要數位 I/O 控制通訊模組及應變擷取電路，亦需要電源供應電路驅動整個節點運作。本團隊以 RISC (Reduced Instruction Set Computer)技術之微控制器做為核心進行系統開發，該晶片已內建處理器、記憶體、通訊及 I/O 介面。藉由精準時脈以及計時器中斷(timer interrupt)韌體設計，以 SPI (Serial Peripheral Interface)介面連接多組高精密度動態應變訊號擷取模組，控制 PGA 及 ADC 之運作並接收數位化後之資料，節點與應變訊號擷取模

組間全部走數位訊號，以標準 Ethernet 連接，應變擷取訊號將完全不受外部電磁干擾。在與雲端伺服器通訊部分，節點將藉由 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 介面與 NB-IoT 通訊模組連接，由微控制器發送 AT commands 進行連線控制，使節點可直接與雲端伺服器連線。

為免除電源飄移造成量測結果的偏差，橋式電路的激發源( $V_{EX}$ )及 ADC 的參考電壓( $V_{REF}$ )採軌對軌(rail-to-rail)設計。在同時兼顧省電及高精度的考量，與傳統電阻式應變計以 LDO (Low-Drop Regulator) 為供電電源設計不同，本計畫以精準參考電壓 (Voltage Reference) IC 供應  $V_{EX}$  及  $V_{REF}$ ，可同時降低耗電、自發熱效應並提高穩定度。值得注意的是，傳統電阻式應變計處理電路，因考量長導線造成的衰減及雜訊，大多採用 12 V 以上的激發電壓，除造成高耗電問題，也只能使用輸出電壓變異較大的 LDO 做為電源，所以就算使用高解析度的 ADC，還是無法將雜訊降低至  $1 \mu\epsilon$  以下。本團隊的創新設計，已大幅降低導線的干擾，可將  $V_{EX}$  及  $V_{REF}$  降低至 2.5 V。以一般 120 歐姆之電橋電路來算，供應電流僅需 20 mA，因此可使用高精度的參考電壓 IC 直接供電，其初始輸出誤差一般可降到 0.01%，而遠低於傳統 LDO 的 1~5%。

接著說明多通道動態應變計同步之韌體開發與測試，圖 2 為多通道同步擷取車輛引起之動態應變示意圖，以 CH1 為主要監測應變通道，CH2 及 CH3 為次要監測應變通道，韌體開發時因 MCU 記憶體偏小之限制，不會儲存所有資料，而是將時間軸切割成固定區間例如 1 秒，然後每次取樣時比對或記錄 CH1 該區間 1 秒內的相對最小與最大值及其對應發生的時間，稱為區間的關鍵數據。以圖 3.20 車輛通過橋梁引起之應變反應為例來說明，從時間點  $t_i$  起到  $t_{i+1}$  止會有 100 個點(取樣頻率為 100 Hz)，僅儲存區間最大應變於  $La1(i+1)$  與最小應變於  $Lb1(i+1)$  中。接著，在 CH1 的區間相對最大應變與最小應變出現時間點，CH2 與 CH3 會紀錄當時的應變值於  $La2(i+1)$ 、 $La3(i+1)$  及  $Lb2(i+1)$ 、 $Lb3(i+1)$  當中。同樣的程序，以 sliding window 方式往前進行不同區間之搜尋與記錄各區間相對最小與最大值及其對應發生的時間，利用動態儲存  $n$  個區間的關鍵數據，該  $n$  個區間應該要涵蓋車輛通過橋梁引起之應變反應。

根據前述之演算法則，韌體僅需在每一個視窗移動時(每 1 秒)，從 CH1 最新的  $n$  組區間的關鍵數據中，判讀該擾動是否超過門檻，若超過門檻即稱為擾動事件，將最

新的  $n$  組區間內求得該擾動事件的最大應變量。由上述的演算紀錄方式可知，當 CH1 最大應變量發生的區間極值發生時間點，會與 CH2 與 CH3 紀錄的時間點是一致的。韌體再由 CH1 的各區間關鍵資料，計算出未受擾動區間資料之平均值作為個別通道的應變變化之計算參考應變值，這樣經由擾動事件的最大應變減去未擾動參考應變值就可以得到個別通道在該擾動事件之最大應變變化量。在每一分鐘內主要通道(CH1) 會相互比較觸發事件裡面尋找最大應變變化量者，以及該對應時間點的次要通道的應變變化量作為關鍵資訊傳送至雲端。

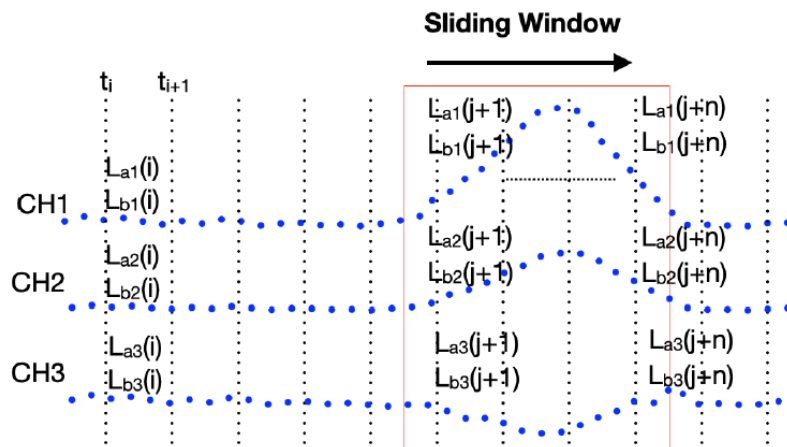


圖 2 多通道同步擷取車輛引起之動態應變示意圖

為了驗證上述邊緣運算多通道動態應變計之同步功能，將圖 3(a)所示 4 通道動態應變資料擷取模組安裝在一根貼有 4 個應變計之懸臂梁上如圖 3(b)所示，試驗前先記錄各應變計與施力點(如圖 3(b)藍色線標示位置)之距離分別為 7、14、21 與 28 cm，在施力點給予一個歷時約 3 秒的擾動，試驗得到邊緣運算結果 4 個應變計個別對應之應變分別為 34.31、62.07、89.79 與 120.84  $\mu\epsilon$ ，將應變計離施力點的距離以及對應量測到之應變分別設定為橫座標與縱座標，可以繪製得到圖 3(c)之關係曲線，如預期的應變反應與距離成線性行為，表示 4 個通道所輸出的動態應變確實為同步。

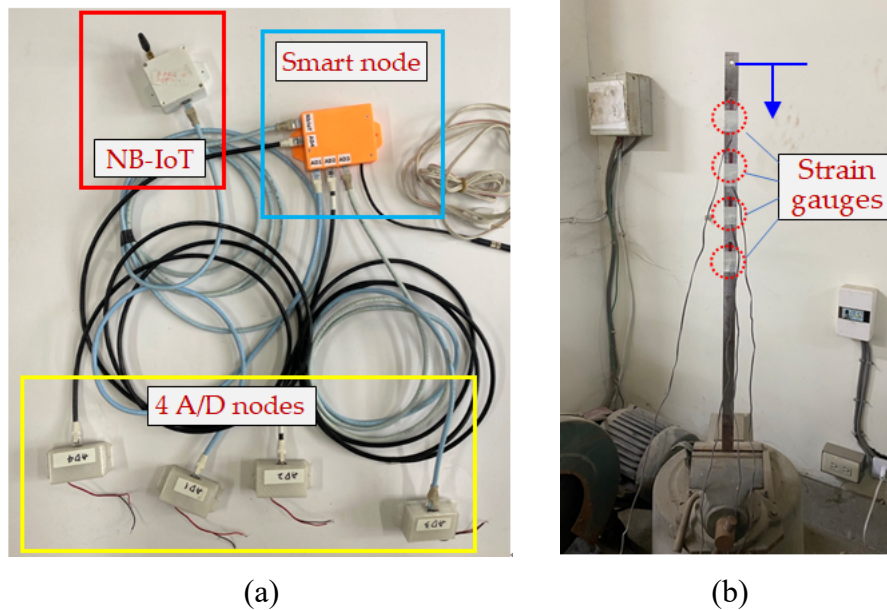


圖 3 多通道同步擷取車輛引起之動態應變示意圖

## 2.2 多通道同步動態應變計在中性軸位置監測之應用

中性軸位置之監測橋跨為國道 6 石灼高架橋的 PE4-PE5 橋跨，圖 4(a)、(b)與(c)分別為立面圖、斷面圖與斷面理論中性軸位置。根據圖 2.37(c)箱型梁斷面之尺寸，可以得到箱型梁監測斷面之理論中性軸位置在距離底部 207.9 cm。

圖 4(b)設計圖上所示底板與腹板交接處存在一個斜面，但施工後其高度無法確定是否為設計圖標示的 30 cm，圖 5 為 2022 年 9 月 1 日完成 4 通道動態應變計安裝完成之照片，4 個應變計安裝位置由捲尺 0 起算高度分別為 11、79、124 與 181 cm，再由現場捲尺量測得到箱梁內上斜面與下斜面之距離為 195 cm 如圖 5 右邊照片所示，可以推求得到下斜面之高度應為 25 cm。因此 4 個應變計安裝位置加上斜面高度 25 cm 與底板厚度 25 cm，由箱梁底板外側最

下緣起算 4 個動態應變計的距離實際分別為 61、129、174 與 231 cm。

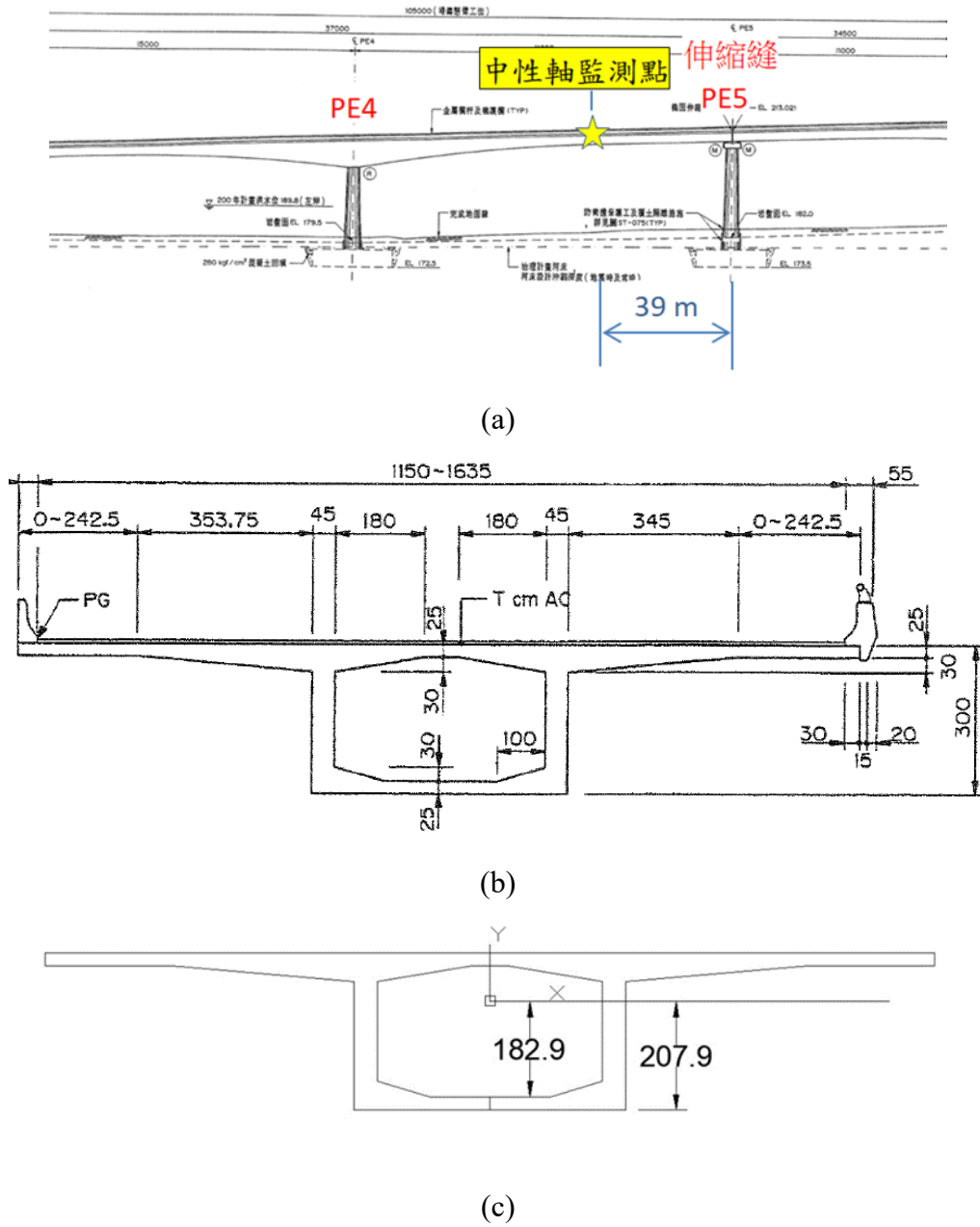


圖 4 石灼高架橋 PE4-PE5 橋跨：(a)立面圖；(b)斷面 A-A；(c)理論斷面中性軸位置



圖 5 石灼高架橋(PE4-PE5) 4 通道斷面中性軸位置監測儀器之安裝

圖 6 為 4 個特定時間車輛通過引起之 2 個動態應變反應之線性迴歸結果範例，2 個動態應變與斷面高度之關係圖，根據定義應變為 0 之處即為中性軸位置，故 4 個範例所得中性軸位置分別為 233.84 與 235.76 cm。

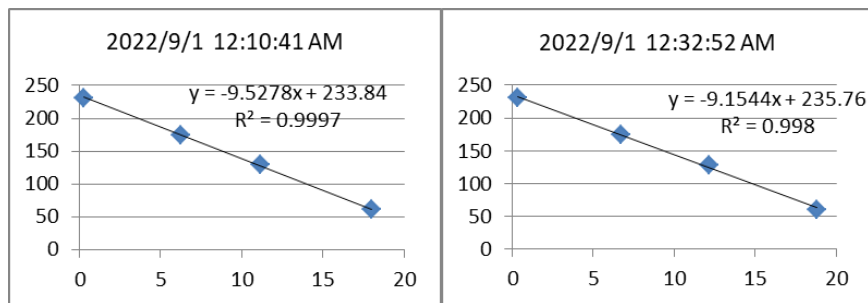


圖 6 斷面中性軸位置監測資料範例

由於每一分鐘就會有一筆中性軸位置的資料輸出，為了降低量測訊號雜訊對中性軸位置計算之影響，設定車輛引起之最大動態應變反應必須大於  $5 \mu\epsilon$  且四點迴歸方程式的  $R^2$  需大於 0.995 才納入中性軸位置計算用之資料。圖 7 為石灼高架橋 PE4-PE5 箱型梁 2022/09/01 至 2025/02/28 的現場監測資料經過迴歸分析所得中性軸位置之歷時變化資料，監測結果顯示中性軸位置距離梁底介於 220 至 245 cm 之間跳動，平均值約為 234.0 cm 已經在理論中性軸位置 207.9 cm 的上方，可以推論本橋跨應該已經出現撓曲裂縫。經目視檢測確實發現該橋跨在監測斷面附近已經出現多條撓曲裂縫如圖 8 所示。再由圖 7 中性軸位置的長期監測結果來看，

自 2022 年 9 月至今中性軸位置一直屬於穩定狀態，表示這些撓曲裂縫應該已經存在一段時間，但並沒有持續惡化。

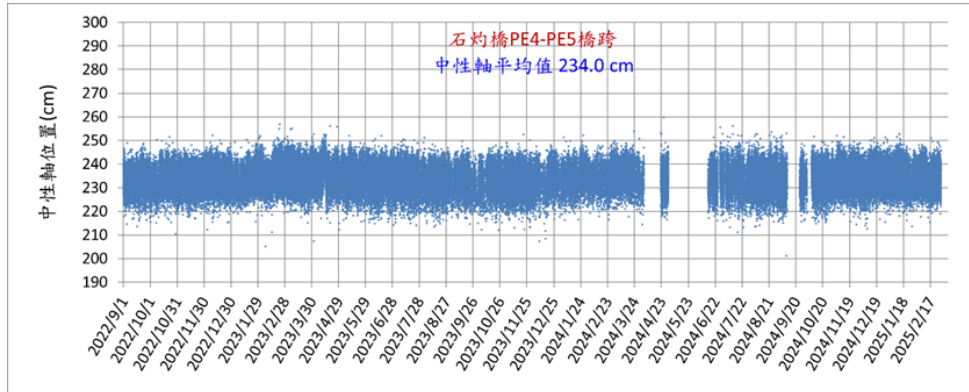


圖 7 石灼高架橋 PE4-PE5 箱型梁斷面中性軸位置監測結果



圖 8 石灼高架橋 PE4-PE5 箱型梁撓曲裂縫之目視檢測

### 三、裂縫寬度之動態監測

前一節的中性軸位置監測結果發現國道 6 石灼橋 PE4-PE5 橋跨箱梁外有出現撓曲裂縫，為了追蹤裂縫是否會因車載作用而有持續劣化之現象，啟動裂縫寬度之動態變化監測，採用之儀器為具有邊緣運算功能之動態位移計，來監測短時間內車輛載重與地震作用引起之裂縫寬度變動量，以及長期環境因子作用造成橋梁劣化引起之裂縫寬度變化。監測儀器為無線動態位移計，其量測範圍：12 mm、解析度：1 微米( $\mu\text{m}$ )、邊緣運算：每 1 分鐘可輸出 1 筆重車引起裂縫寬度之最大張開與閉合變化量、取樣頻率：60 Hz、工作溫度：-25~85 °C、通訊：NB-IoT 通訊模組。

圖 9 為監測的裂縫位置(編號 C09-C)，該裂縫的寬度為 0.3 mm、裂縫深度由敲擊

回音法非破壞檢測得到為 10.6 cm。該裂縫位置附近的箱梁內也有配置動態應變計可以監測到車輛通過之動態應變反應。

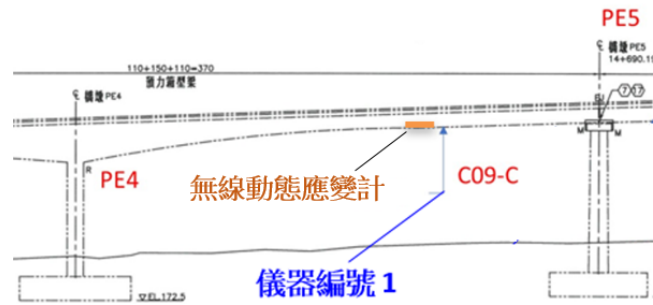


圖 9 動態應變計與裂縫寬度計配置示意圖

將動態位移計的位移探針橫跨在裂縫上，再利用壁虎將位移計主體與位移探針擋板鎖固在混凝土表面上如圖 10(a)所示，最後進行保護蓋與通訊模組之安裝如圖 10(b)所示。位移計的量測行程為 12 mm，故會將位移計的起始值設定在 6 mm 附近，如此可以監測到裂縫之張開與閉合變化情況。本監測為了解決動態量測出現龐大資料量傳送之問題，採用邊緣運算(Edge computing)的創新技術，可自動計算每一分鐘最重車輛通過引起之裂縫寬度變化量，再將此關鍵數據傳送到雲端，也就是將雲端伺服器的資料運算工作移至感測器節點，其最大優點為減輕網路和伺服器上的負荷。以本監測案例而言，每一秒取樣 60 筆，一天將有 5,184,000 筆資料，經過邊緣運算處理後一天只要傳送 1,440 筆資料。

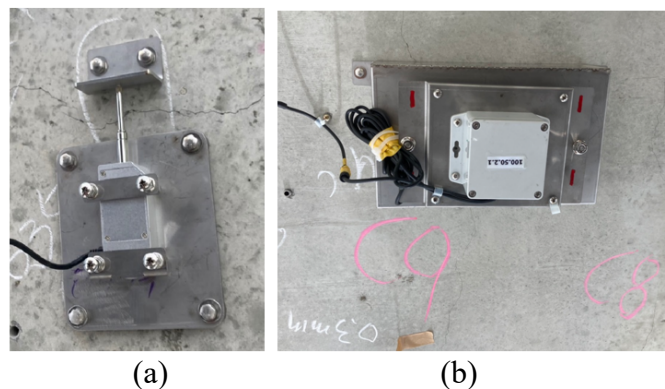


圖 10 監測儀器之安裝：(a)位移計橫跨在裂縫上；(b)保護蓋與通訊模組之安裝

儀器架設完成的當下位移計指標處即為起始值，後續資料減去起始值可以得到裂縫寬度變化資料(紅色線)。圖 11 為歷經 11 天的監測資料顯示裂縫寬度的變化主要是

受日夜溫差變化(橘色線)所主導，由於本案採用動態位移計，故也可以監測到車輛通過時引起之裂縫張開或閉合之現象，例如圖上的主要曲線外的每一點(如藍色圓圈所標示)都是代表那一分鐘車輛引起之最大裂縫寬度張開與閉合量。由於車輛通過引起之裂縫寬度變化是屬於短暫之反應，而溫度是緩慢變化，故可以利用圖 11 之目前資料減去前一筆資料就可以將歷時曲線扣除掉溫度效應，而得到車輛引起之暫態裂縫寬度變化量如圖 12 所示。

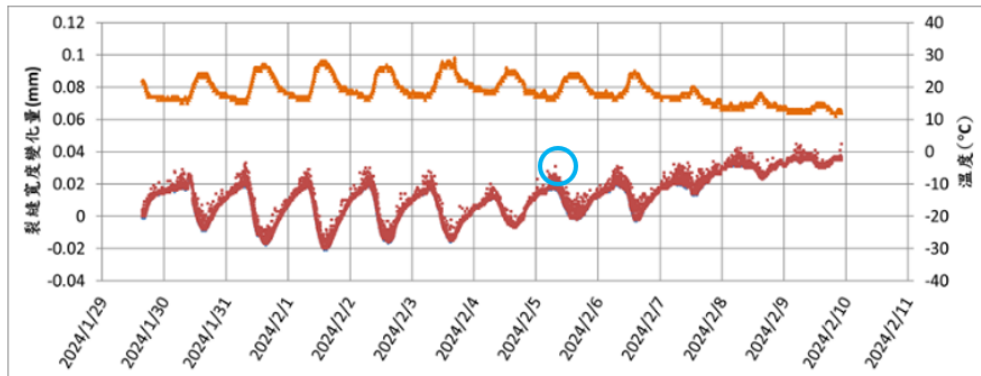


圖 11 裂縫寬度變化與溫度變化之關係

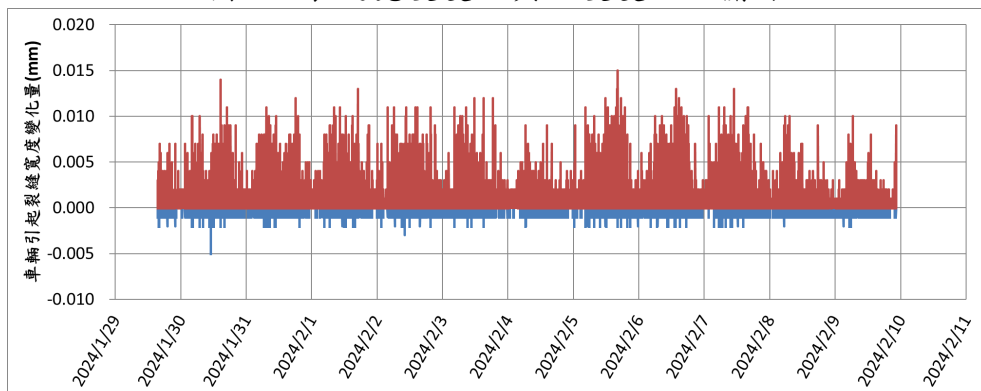
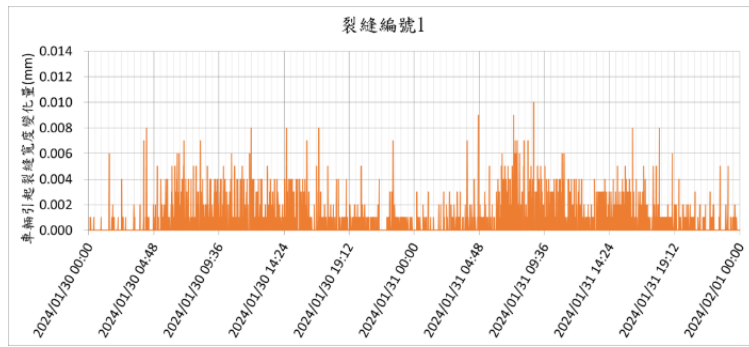
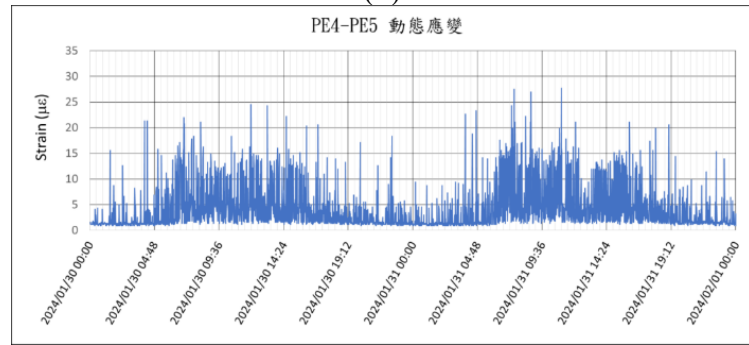


圖 12 消除溫度效應後車輛引起裂縫寬度之變化

為了確認所量測到之裂縫寬度變化確實是車輛通過所致，量測結果與該橋跨圖 9 所示的動態應變計之訊號輸出進行比較，圖 13 為二者 2 天內之訊號比較，很清楚看到車輛通過引起橋跨之動態應變反應的相對應時間也都有觀察到裂縫寬度受車輛作用所產生之裂縫寬度變化。



(a)



(b)

圖 13 車輛引起之裂縫寬度變化與動態應變之比較：(a)裂縫寬度；(b)動態應變

圖 14 為動態位移計之長期(2024/1/29~2025/3/31)裂縫寬度變化歷時反應，很明顯整個歷時曲線都是溫度變化在主導裂縫寬度變化，其起伏變動量都在 0.035 mm 以內。監測資料也顯示裂縫寬度雖然受每天日夜溫度變化有張開與閉合起伏現象，但是都可以回到 0 的位置，亦即裂縫寬度並未有擴大之情形。

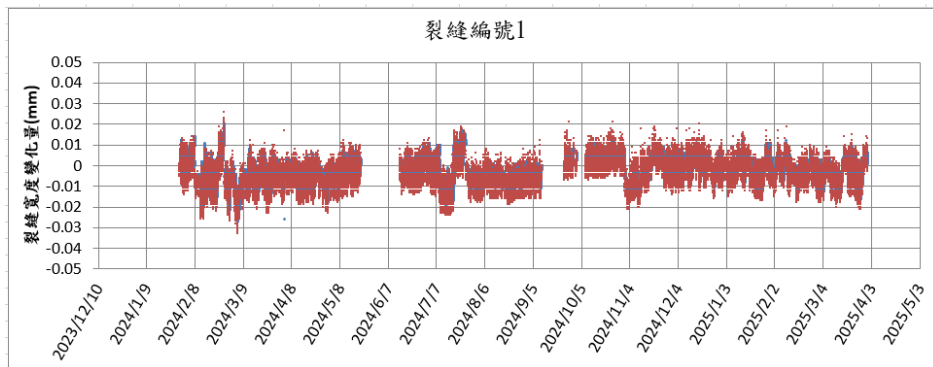


圖 14 裂縫寬度於 2024/1/29~2025/3/31 之歷時反應

就橋梁的結構安全而言，更需要關注的是車輛通(活載重)過橋梁引起之裂縫寬度變化，圖 15 為圖 14 消除溫度干擾後車輛引起之裂縫寬度變化歷時反應，圖 14 顯示車輛通過引起之裂縫寬度張開最大變化量都在 0.025 mm 以內，此一監測結果顯示各橋跨之撓曲勁度或是預力狀態足以抑制裂縫寬度之成長。值得一提的是，圖上裂縫寬度張開最大變化量 0.026 mm 發生在 2024/04/03 上午 7 時 58 分 09 秒，此乃花蓮芮氏規模

7.2 地震所引起，為了更清楚描述 0403 花蓮地震對裂縫寬度監測之影響，圖 16(a)將裂縫寬度變化歷時圖繪出，圖 16(b)則為消除溫度影響之裂縫寬度變化曲線圖，圖上顯示 2024/04/03 上午 07:58:51 監測到地震作用引起之裂縫寬度張開 0.026 mm；由花蓮地震發生到監測橋梁所在地的距離約為 130 km 與時間差為 42 秒，計算地震 S-波速度約為 3.10 km/sec。

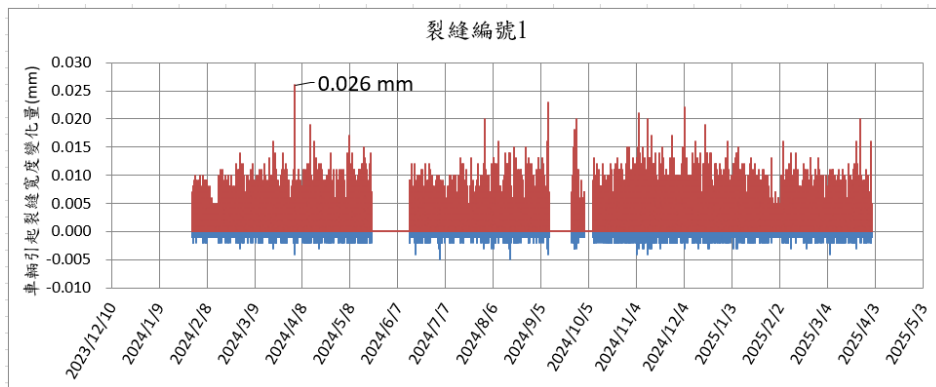
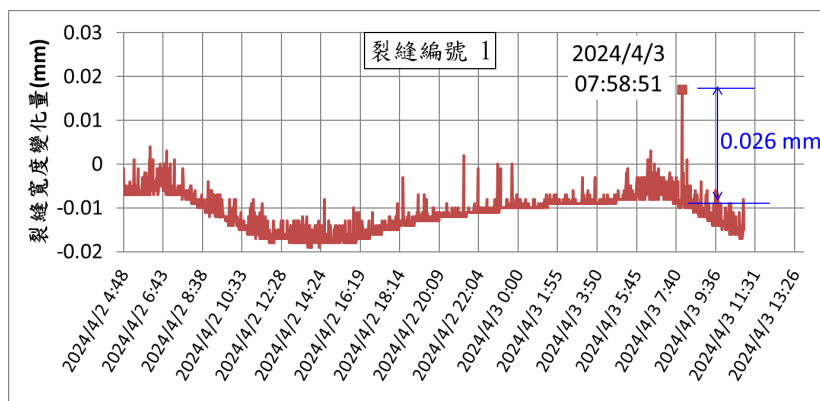
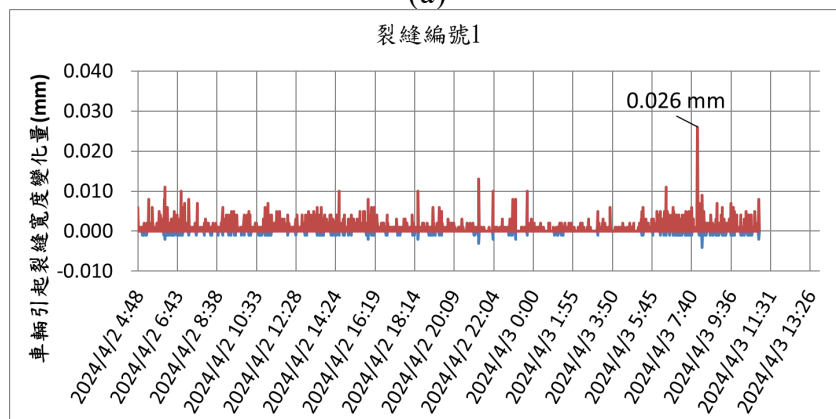


圖 15 車輛引起裂縫寬度變化(2024/1/29~2024/3/31)



(a)



(b)

圖 16 地震作用裂縫寬度變化(2024/04/03)

## 五、結語

本文介紹國道 6 石灼橋在橋梁養護方面之創新技術應用，為國內首度採用具有邊緣運算功能的多通道同步動態應變計作為中性軸位置監測之用，監測資料顯示中性軸位置有大於理論中性軸位置之現象，而發現石灼橋 PE4-PE5 橋跨箱梁外存在近距離目視檢查才可以看到的細微裂縫。後續應用具有邊緣運算功能之動態位移計來監測裂縫寬度之變化，長期監測結果顯示裂縫寬度變化之歷時反應，主要是溫度變化在主導，變動量都在 0.035 mm 以內；至於車輛通過引起之裂縫寬度張開最大變化量都在 0.02 mm 以內，表示各橋跨之撓曲勁度與目前預力狀態尚足以抑制裂縫寬度之成長。且監測資料也顯示裂縫寬度雖然受每天日夜溫度變化與車輛作用有張開與閉合起伏現象，但是都可以回到 0 的位置，亦即裂縫寬度相當穩定。

## 參考文獻

- [1] Chang PC, Flatau A, Liu SC. Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure, Structural Health Monitoring 2003; 2; 257-267.
- [2] Farrar CR, Worden K. An introduction to structural health monitoring, Philos. Trans. R. Soc. A 2007; 365; 303–315.
- [3] W. Brownjohn JMW. Structural health monitoring of civil infrastructure, Phil. Trans. R. Soc. A 2007; 365, 589–622
- [4] Xia Y, Chen B, Weng S, Ni YQ, Xu YL. Temperature effect on vibration properties of civil structures: a literature review and case studies. J Civ Structural Health Monit 2012; 2; 29–46.
- [5] Kromanis R. Structural performance evaluation of bridges: characterizing and integrating thermal response. 2015; University of Exeter
- [6] Zhao, H.; Ding, Y.; Li, A.; Ren, Z.; Yang, K. Live-load strain evaluation of the prestressed concrete box-girder bridge using deep learning and clustering. Struct. Health Monit. 2020, 19, 1051–1063.
- [7] Ni, Y.; Chen, R. Strain monitoring based bridge reliability assessment using

parametric Bayesian mixture model. *Eng. Struct.* 2021, 226, 111406.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111406>.

- [8] Li, S.; Xu, H.; Zhang, X.; Cao, M.; Sumarac, D.; Novák, D. Automatic uncoupling of massive dynamic strains induced by vehicle- and temperature-loads for monitoring of operating bridges. *Mech. Syst. Signal Process.* 2022, 166, 108332.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108332>.
- [9] Sigurdardottir, D.H.; Glisic, B. Neutral axis as damage sensitive feature. *Smart Mater. Struct.* 2013, 22, 075030.
- [10] Sigurdardottir, D.H.; Glisic, B. Detecting minute damage in beam-like structures using the neutral axis location. *Smart Mater. Struct.* 2014, 23, 125042.
- [11] Parka, J.W.; Moonb, D.S.; Simc, S.H.; Spencer, B.F. Equivalent neutral axis for structural condition assessment using multisensory fusion. *Eng. Struct.* 2019, 197, 109350.
- [12] Li, H.; Li, J.; Xin, Y.; Hao, H.; Le, T.D.; Pham, T.M. Prestress Force Monitoring and Quantification of Precast Segmental Beams through Neutral Axis Location Identification. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2756. <https://doi.org/10.3390/app12052756>.