



即時監測 與 長期診斷： 實務案例探討 橋梁健康管理 新模式

許耿蒼*／朝陽科技大學營建工程系 副教授、非破壞檢測研發中心 主任

林宜清／國立中興大學土木工程系 教授

鄭家齊／朝陽科技大學營建工程系 教授

柯盈慈／朝陽科技大學非破壞檢測研發中心 研究員

洪嘉鍵／朝陽科技大學非破壞檢測研發中心 研究員

橋梁為國家土木工程基礎建設中重要的設施，國內交通路網不斷發展，致使全國橋梁總數量也隨著交通建設的推動而逐年漸增，為永續管理橋梁，各管理機關莫不注重橋梁檢、監測與維護管理技術之提昇。本文中之橋梁工程檢監測案例為因應交通量需求，快速道路需新設匝道，因應工程之所需，需在快速道路既有橋梁銜接國道聯絡匝道，匝道設計採鋼箱梁方式跨越原快速道路，橋梁在施工期間仍為交通開放狀態，在施工過程中鋼箱梁在吊裝期間，需暫撐於既有快速道路上方，以進行後續鋼箱梁接合鎖固作業，此額外加載之巨大重量，可能對既有快速道路箱型梁結構造成影響，為瞭解可能之影響情況，有必要進行施工期間之即時監測與長期診斷作業以釐清既有橋梁在額外受力後健康狀況，在施工作業完成後，依據監測結果顯示，橋梁在經施工後之健康狀況良好，符合原橋梁設計安全，亦確認了橋梁之健康狀況。

前言

概要與需求

橋梁為國家土木工程基礎建設中重要的設施，國內交通路網不斷發展，致使全國橋梁橋梁總數量也隨著交通建設的推動而逐年漸增，台灣橋梁自新建高峰期迄今已 40 餘年，隨著橋梁邁入高齡化的時代橋梁功能及服務品質因材料老劣化而下降，所衍生之老劣化問題日趨嚴重，為永續管理橋梁，各管理機關莫不注重橋梁檢、監測與維護管理技術與觀念之提昇^[1-2]。

本工程為興建快速道路銜接國道之聯絡匝道，採鋼箱梁方式跨越快速道路及地面道路，鋼箱梁在吊裝

後，需暫撐於既有快速道路上方以進行接合鎖固作業，施工內容可能對既有快速道路箱型梁造成影響，為瞭解可能之影響情況，有必要進行監測作業。本監測案例採用分散式資料擷取系統，分散式系統已經在感測器端完成數位化工作，再利用發展快速之通訊技術（物聯網），將所有感測器都無線化，會比傳統上採用有線的方式布設感測器方便很多降低成本，非常適合應用於橋梁之結構健康監測，基於無線感測器網路（Wireless Sensor Network, WSN）的監測技術已經成為無法阻擋的趨勢^[3-5]。

圖 1 為吊裝鋼箱梁暫撐於既有快速道路時所配置在箱梁上方、箱梁內部與箱梁下方的臨時支撐架示意圖，吊裝鋼箱梁將暫放置於快速道路箱梁上方進行接

* 通訊作者，frankhsu@cyut.edu.tw

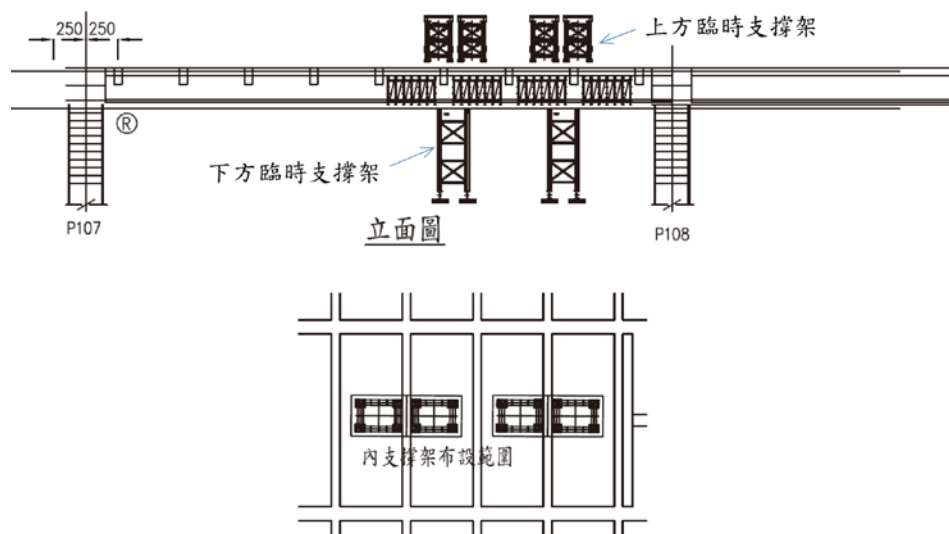


圖 1 吊裝鋼箱梁快速道路箱梁上方、箱梁內部與箱梁下方的臨時支撐架示意圖

合鎖固作業，圖 2 為臨時支撐架配置之斷面示意圖，圖 3 為箱梁斷面三維剖面圖。為了有效傳遞鋼箱梁的重量至地上，故在快速道路箱梁的內部與下方配置與箱梁上方支撐架對應位置的臨時支撐，以直接來傳遞暫撐鋼箱梁的重量至地上而避免對既有快速道路箱梁造成損壞。

施工期間監、檢測規劃

橋梁在施工期間仍為交通開放狀態，鋼箱梁在吊裝後，需暫撐於既有快速道路上方以進行接合鎖固作

業，預估將有超過 100 公噸重量會壓在既有快速道路預力混凝土箱梁上，為了確保鋼箱梁的暫撐施工過程不會對既有箱梁產生損壞，必須有效將鋼箱梁重量透過臨時支撐架傳遞到地面上。

根據上述說明，監測項目主要分成下列二項分別說明如下：

1. 既有快速道路預力混凝土箱形梁在吊裝前後之結構狀態監測
2. 鋼箱梁吊裝後暫放置在臨時支撐架上之力量傳遞監測

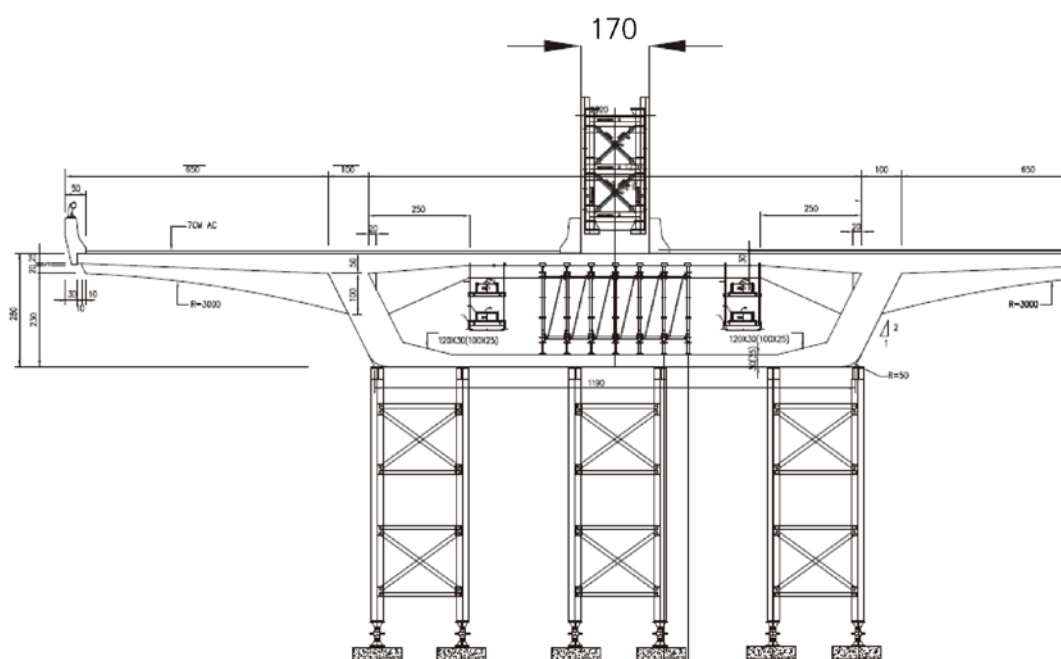


圖 2 既有快速道路混凝土箱形梁的上方、內部與下方臨時支撐架配置之斷面示意圖

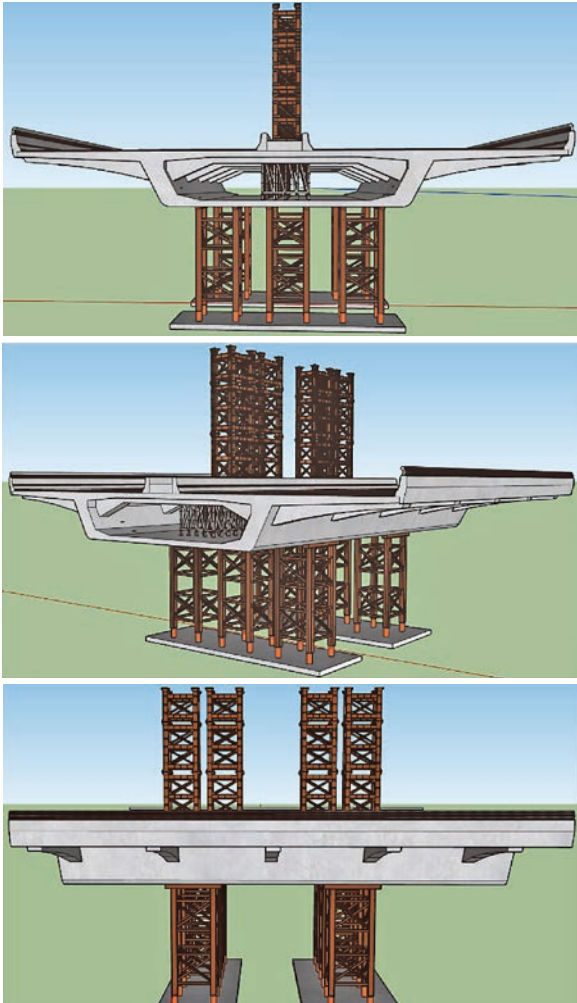
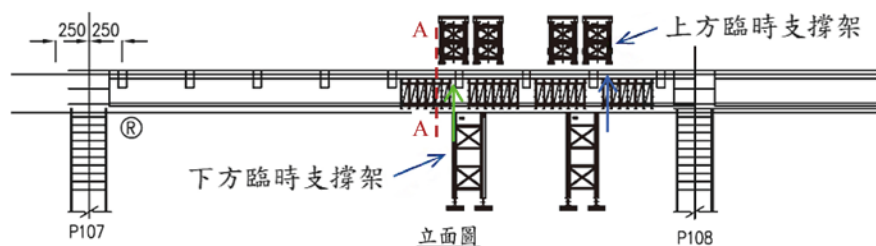


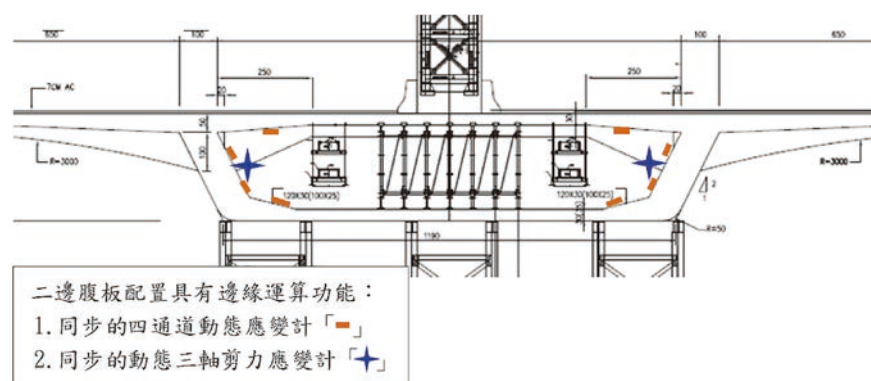
圖 3 既有快速道路混凝土箱梁斷面三維剖面圖

針對既有快速道路預力混凝土箱形梁在吊裝前後之結構狀態監測方面，由於既有箱梁的上方與下方為了鋼箱梁吊裝暫撐用都會架設臨時支撐架，而該臨時支撐架將會改變既有預力混凝土箱型梁之撓曲與剪力行為，而力學行為影響比較明顯的是在靠近橋跨中點之臨時支撐架附近，故將在靠近橋跨中央緊鄰臨時支撐架如圖 4(a) 所示的斷面 A-A 處箱梁內配置，監測儀器如圖 4(b) 所示。其中在腹板不同高度配置同步的四通道動態應變計來監測既有混凝土箱型梁在車輛通行下之撓曲應變反應以及斷面中性軸位置，另外在腹板靠近中性軸位置配置同步的動態三軸向應變計來監測既有箱型梁在車輛通行下之剪力應變反應。上述二項撓曲與剪力應變監測必須在吊裝施工前就開始執行，以得到此二項監測資料之基準值，等吊裝施工後繼續監測一段時間，以獲得施工後之監測資料，經過施工前後之箱梁撓曲與剪力應變反應相比較就可以知道吊裝鋼箱梁施工是否有對快速道路箱梁造成影響。

針對鋼箱梁吊裝後暫放置在臨時支撐架上之力量傳遞監測方面，主要是採用無線多通道應變計分別配置在既有快速道路混凝土箱形梁的上方、內部與下方之臨時支撐架上，圖 5 為無線應變計之配置示意圖，其中上方臨時支撐架共有 4 座，每一座的 4 根支柱各配置一個應變計，故合計有 16 個應變計；下方臨時支



(a) 立面圖顯示監測斷面 A-A 位置



(b) 斷面 A-A 之儀器配置示意圖

圖 4 快速道路預力混凝土箱形梁之結構狀態監測

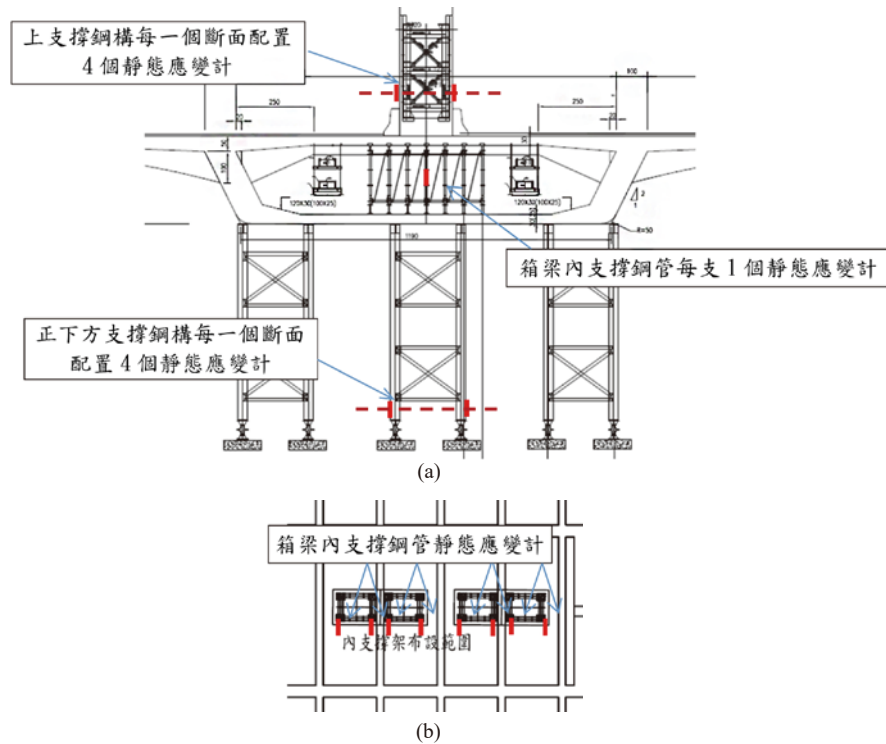


圖 5 既有快速道路混凝土箱形梁的上方、內部與下方臨時支撐架之應變計配置示意圖

撐架斷面上有 3 座前後 2 座共計有 6 座，考量主要軸力傳遞是以中間前後那二座為主，故在中間那二座臨時支撐架的 8 根支柱各配置一個應變計，合計有 8 個應變計。

至於箱梁內之應變計配置，則考慮箱梁內之支撐鋼管的受力乃是因為箱梁內頂板與底板之相對位移所造成，而在鋼箱梁吊裝後暫放在臨時支撐架時，既有箱梁的頂板之變位應該是發生在前後二座臨時支撐架之軸線上，因此應變計之配置將沿著此軸線之鋼管配置 8 個應變計如圖 5(b) 所示，值得一提的是此 8 個應變計量到之應變分布就可以推算箱梁內頂板與底板之相對位移變化。另外施工時先將箱梁內之鋼管支撐預先施加適當預力頂住頂板是一個重點，施加預壓力讓鋼管之底座卡樁可以預壓緊，可避免後續吊裝鋼箱梁壓在臨時支撐架傳過來的力量讓既有混凝土箱型梁頂板產生明顯變位而受損。

監測項目與儀器規格

橋梁監測項目

根據前述監測規劃以及既有箱梁內部既存的裂縫寬度監測，可以將所需要的監測項目、監測儀器、安裝位置、數量與監測目的彙整於表 1。

橋梁監測儀器規格

根據監測規劃所要達到之目的，監測儀器所需要達到的硬體與取樣頻率規格彙整於表 2。

施工期間鋼梁吊裝監測結果

鋼箱梁吊裝期間即時監測

鋼梁吊裝分二次作業，現地監測照片如圖 6 所示。依照規劃於現地吊裝作業進行實際行吊裝支撐架監測作業，本次作業於上部 4 個臨時支撐架每個腳位進行監測，故共 16 個位置，箱梁內支撐於箱梁中間位置鋼管佈設 8 個應變計，下部支撐箱梁中間區域之兩座臨時支撐架共 8 個腳位，佈設 8 應變計，如圖 7 所示。

鋼箱梁吊裝施工作業進行時監測作業同步進行，以重量較大之吊裝作業為例，吊裝時之力學傳遞行為靜態應變計監測如圖 8，分別為箱梁上部、箱梁內部、箱梁下部臨時支撐架之應變歷時曲線。圖中之紅色虛線位置可看出，三區域之構件結構應力均同時同步增加，顯示在本次為吊裝作業設計之支撐結構系統為應力有效傳遞狀況，應力順利由上而下傳遞加載力量。圖 9 為本次臨時支撐架尺寸，經計算此次上部臨時支撐架吊裝加載力量為 94.2 噸時，箱梁下方中央臨時支撐架經監測受力為 29.3 噸，大約與下方臨時支撐架均勻分布之推估值

表 1 監測儀器安裝數量一覽表

項次	監測項目	監測儀器	安裝位置	監測目的	數量
	既有快速道路箱型梁撓曲力學行為監測	4 通道動態應變計	既有箱梁腹板不同高度位置	比較施工前後之監測資料作為評估既有箱梁之結構狀態	單一工區於箱梁內左側佈設 4 個應變計，右側 4 個應變計，共 8 個位置。
	既有快速道路箱型梁剪力行為監測	3 通道三軸向動態應變計	既有箱梁腹板靠近中性軸位置	比較施工前後之監測資料作為評估既有箱梁之結構狀態	單一工區於箱梁內左側佈設 3 個應變計，右側 3 個應變計，共 6 個位置。
	臨時支撐架之力量傳遞監測	單軸應變計	臨時支撐架	由箱梁上方、內部與下方臨時支撐架之軸力監測	1. 單一工區上部 4 個支撐架每個腳位進行監測，共 16 個位置。 2. 箱梁內支撐於箱梁中間位置鋼管佈設 8 個應變計。 3. 下部支撐箱梁中間區域之兩座支撐架共 8 個腳位，佈設 8 應變計。
	快速道路箱型梁既有裂縫寬度監測	動態位移計	主要開裂裂縫處	比較施工前後之監測資料作為評估既有裂縫寬度是否有變動	選取箱梁內部既有裂縫進行監測

表 2 監測儀器之硬體與取樣頻率規格

編號	監測儀器	硬體規格	取樣頻率
	動態應變計	量測範圍： $\pm 3000 \mu\text{strain}$ 解析度： $\leq 0.2 \mu\text{strain}$ 操作溫度範圍： $-10^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$	每秒取樣 100 筆資料， 每 1 分鐘輸出 1 筆重車引起之最大應變值。
	單軸向應變計	量測範圍： $\pm 3000 \mu\text{strain}$ 解析度： $\leq 0.2 \mu\text{strain}$ 操作溫度範圍： $-10^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$	每 5 秒取樣一次
	位移計	量測範圍：12 mm 解析度： $\leq 1 \mu\text{m}$ 操作溫度範圍： $-25^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$	靜態取樣： 每 5 分鐘取樣一次



圖 6 鋼箱梁吊裝現地監測作業

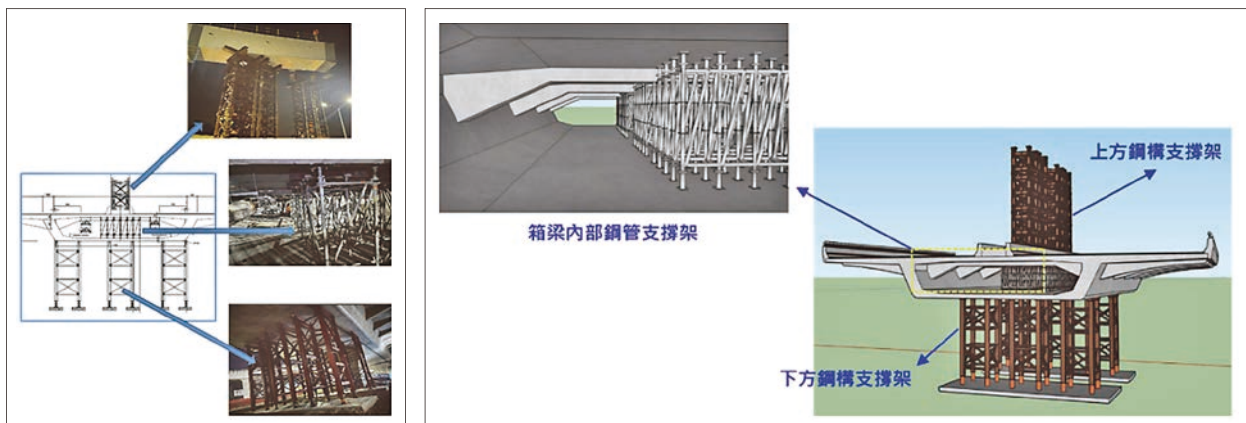


圖 7 鋼箱梁吊裝現地監測作業監測區域圖

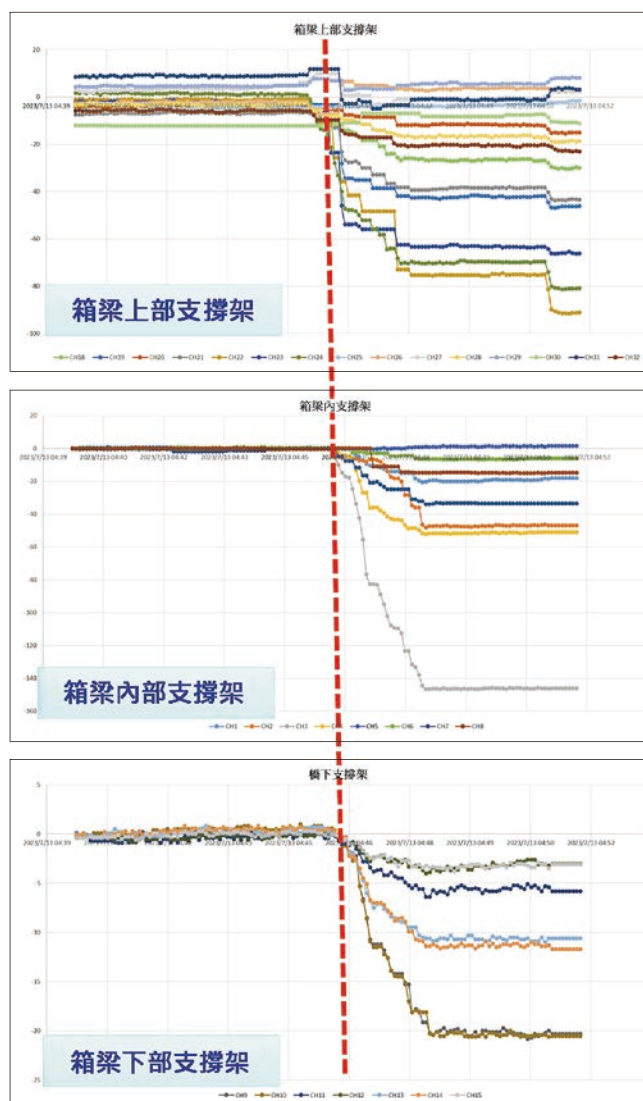


圖 8 鋼箱梁吊裝應變計應變歷時曲線

31.4 噸接近，由於下方區域僅監測中央位置之箱梁下部臨時支撐架由所計算出之力量值估計（ $94.2/3 = 31.4$ ），進一步說明如圖 10 所示，監測所得 29.3 噸約等於圖中下方臨時支撐架 $P/3$ 之力量，即為橋梁下部結構左中右都有支撐的狀況下，施工時額外加載之力量在受力後有分散下去，且均勻分布，箱梁內部支撐也有發揮作用，將上部支撐的力量分散下去，顯示箱梁在經內部支撐加勁後，其受行為均勻，鋼箱梁吊裝期間所增加之額外應力可順利均勻傳遞。

動態應變計於吊裝前後之監測

本次箱梁吊裝作業為避免施工期間對原本快速道路造成損傷，使用箱梁上部、箱梁內部、箱梁下部臨時支撐架進行暫撐作業，而該臨時支撐架將會改變既有預力混凝土箱型梁之撓曲與剪力行為，故針對原本

$$\text{橋下 } (30 \times 2) \times 2 + (30 - 4) \times 2 = 172 \text{ cm}^2$$

$$\text{橋上 } (25 \times 1.5) \times 2 + (25 - 3) \times 1.5 = 108 \text{ cm}^2$$

$$\text{圓管 } ((6.05 \times 6.05) - (5.25 \times 5.25) \times 3.1415926) / 4 = 7.12 \text{ cm}^2$$

圖 9 各臨時支撐架尺寸

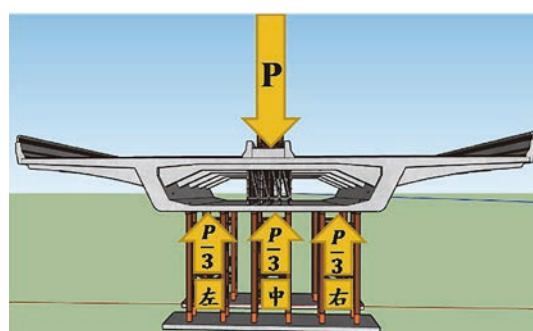


圖 10 臨時支撐架受力傳遞示意圖

快速道路箱梁結構進行長期之動態應變計監測作業以了解箱梁在吊裝前後對於快速道路箱梁結構是否有損傷出現，故於箱梁結構腹板不同高度配置同步的四通道動態應變計，來監測既有混凝土箱型梁在車輛通行下之撓曲應變反應，腹板靠近中性軸位置配置動態三軸向應變計，來監測既有箱型梁在車輛通行下之剪力應變反應以及吊裝期間箱梁內之裂縫寬度監測，後續針對此次監測成果做一說明。

監測原理與效能

動態應變量測之優點有：(1) 不受溫度變化影響；(2) 可以直接感應各類型車輛通過引起之動態應變；(3) 可監控橋梁預力損失情況。

本監測採用 4 通道動態應變計作為現場儀器配置，除了可以監測活載重引起之橋梁斷面中性軸位置（結

構健康指標)以外,也可以監測到某特定位置之撓曲動態應變反應,至於撓曲動態應變反應也可以作為預力橋梁結構健康之重要指標。撓曲動態應變監測優點在於訊號分析可以避開環境溫度變化之干擾,此乃因為車輛通過橋跨之時間都是幾秒鐘而已,故該時段之溫度可以視為相同,車輛引起之應變反應並不會有溫度雜訊,例如圖 11 即為某橋跨將近二年之動態應變監測結果,圖上可以看到每天車輛通行引起之動態應變相當規律,中小型車與重車之間有明顯的空白界線,該界線呈現相當穩定結果,並沒有因為季節溫度變化而起伏,顯示橋跨之動態應變反應相當穩定,因此監測期間之橋梁結構健康狀態維持良好。假如動態應變反應之規律性發生改變,就必須留意橋梁的結構健康狀況。

雖然監測橋梁的動態應變可以感應各類型車輛通過引起之橋梁反應,可「即時」掌握橋梁的結構健康狀態,進行有效的安全管理。由於動態應變監測技術需要面臨二大問題:(1)動態應變監測所需要記錄的資料量相當大,對現場監測系統會造成極大負荷,可能衍生出耗電以及系統不穩之問題;(2)大量資料進入資料庫將產生資料管理與分析之困難。

本監測計畫將採用邊緣運算的創新技術^[6],來解決既有動態應變監測系統的龐大資料量傳送所衍生之問題。邊緣運算(Edge computing)是一種分散式運算的架構,將雲端伺服器的資料運算工作移至邊緣節點(感測器節點),其最大優點為減輕網路和伺服器上的負荷。分散式感測器內部都會配置 MCU,MCU 本身會有中央處理器(CPU)、記憶體、計時器以及各種輸入輸出介面,其最大優點是體積小成本低,可放在儀器內部。

邊緣運算技術應用在橋梁結構健康監測主要概念說明如下:由於車輛通過橋梁會引起橋梁的暫態應變(strain)反應,可以在橋梁跨度中點處安裝動態應變計,以監測各種車輛通過引起之最大動態應變反應,作為結構健康監測指標。動態應變計的數據輸出方式有二種可能,第一種是傳統上的作法,就是將所有記錄到的應變數據全部傳送到伺服器,再由伺服器來進行資料的判讀;第二種則是運用創新的邊緣運算技術在感測器節點進行資料處理與判讀,最後只傳送關鍵數據(例如只傳送每分鐘車輛通過橋梁引起之局部相對最大應變值)給伺服器。上述二種數據輸出方式與分析的差異性可以用圖 12 來說明。圖 12(a)為某一 180 秒(3 分鐘)時段的動態應變連續輸出的數據,從圖上可以清楚看到大小車經過橋梁引起大小不一的動態應變反應,圖 12(a)是每秒擷取 100 筆資料,該連續輸出數據合計有 18,000 筆,龐大的數據輸出,會對現場監測系統造成極大負荷,可能衍生出耗電以及系統不穩定之問題。

第二種輸出方式只要將某特定時間範圍內之關鍵數據輸出即可,例如圖 12(b)就是利用物聯網邊緣運算技術,將圖 12(a)三分鐘連續輸出的動態應變數據,只輸出每分鐘內局部相對最大應變反應及其發生時間之關鍵數據,例如第 1 分鐘、第 2 分鐘與第 3 分鐘分別為 5.71、9.69 與 5.22,輸出結果將如圖 12(b)所示。因此可以將原本 3 分鐘內需要輸出 18,000 筆資料大幅下降只要輸出 3 筆,如果時間延長為一天,則本來需要輸出 8,640,000 筆資料,利用第二種數據輸出方式一天只要輸出 1,440 筆,如此監測系統就可以輕鬆穩定的持續運作。

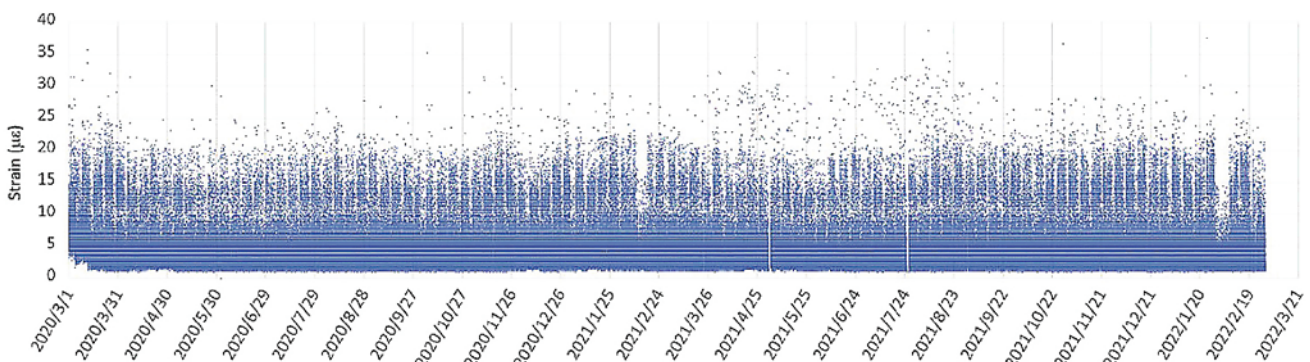


圖 11 某橋跨將近二年之動態應變監測結果

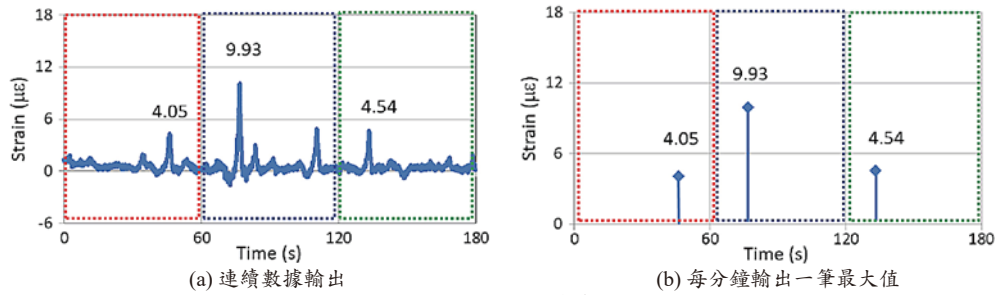


圖 12 橋梁的動態應變

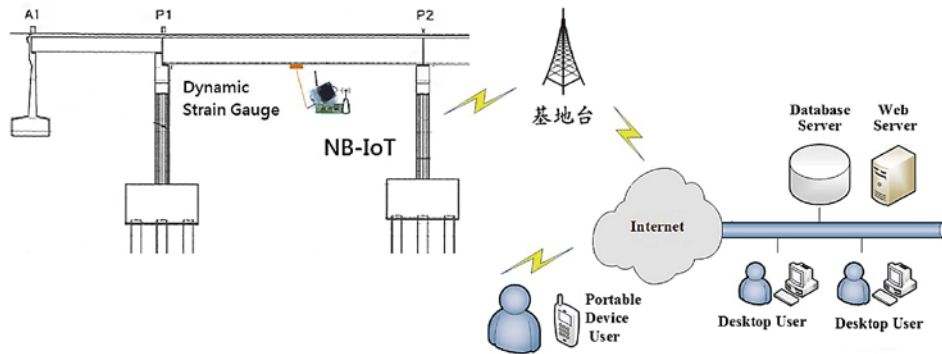


圖 13 NB-IoT 無線動態應變計監測架構示意圖

經由邊緣運算可以大幅降低動態應變的傳輸資料量，因此可以利用屬於低耗電廣域物聯網 NB-IoT 通訊模組作為遠端資料無線傳輸用。圖 13 為現場橋梁 NB-IoT 動態應變計監測架構圖，黏貼在預力梁跨度中點之動態應變計配備 NB-IoT 通訊模組，量測結果可以由 NB-IoT 直接將訊號傳送到電信商的基地台，再傳送到網際網路，此種監測系統不需要在現場配置主機，自行可以成為一個高效能、穩定性佳、可獨立運作之無線動態應變監測系統。

既有箱型梁撓曲與剪力行為監測結果

為了監測快速道路既有箱梁在鋼梁吊裝過程是否因為臨時支撐架作用改變箱梁之力學行為而受到影響，在鄰近支撐架邊緣附近規劃配置 4 通道之斷面彎矩應變量測與 3 通道之剪力應變量測如圖 14 所示，所配置的多通道動態應變計可以用來監測車輛通過引起之應變反應。

鋼梁吊裝分二次作業：第一次在 112 年 7 月 7 日夜間至 7 月 8 日清晨、第二次在 112 年 7 月 12 日夜間至 7 月 13 日清晨。圖 15 為 4 通道最底部動態應變計於 112 年 6 月 28 日至 9 月 30 日期間監測到車輛通過引起之動態應變反應，圖中每一個點都代表該時間一分鐘內最重的車輛引起之動態應變反應，紅色虛線區域為

兩次吊裝的時間區間，整體來看，長時間的撓曲動態應變呈現規律性。

為了能更清楚看到兩次吊裝前後動態應變計監測到箱梁撓曲應變反應時間歷時圖，將時間軸縮短到 7 月 16 日如圖 16 所示，圖中紅色虛線區域為兩次吊裝的時間區間，可觀察到在平時交通開放時由於通行車

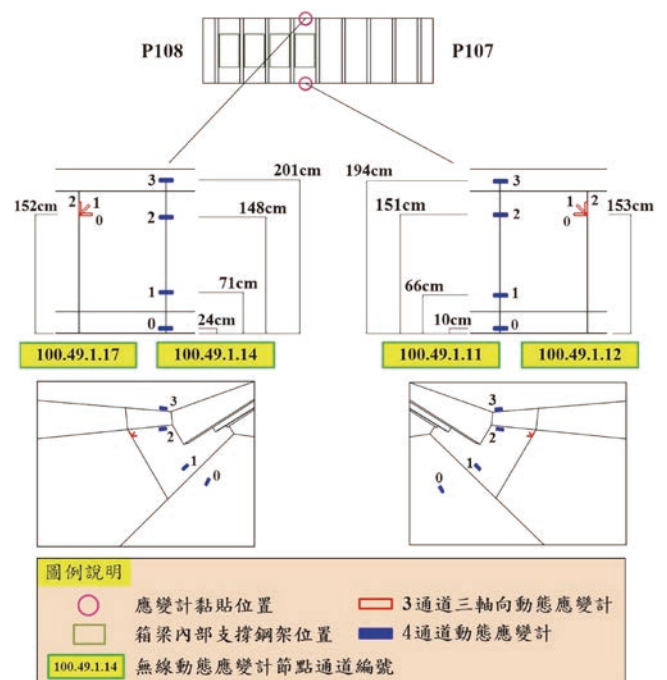


圖 14 無線動態應變計安裝位置示意圖

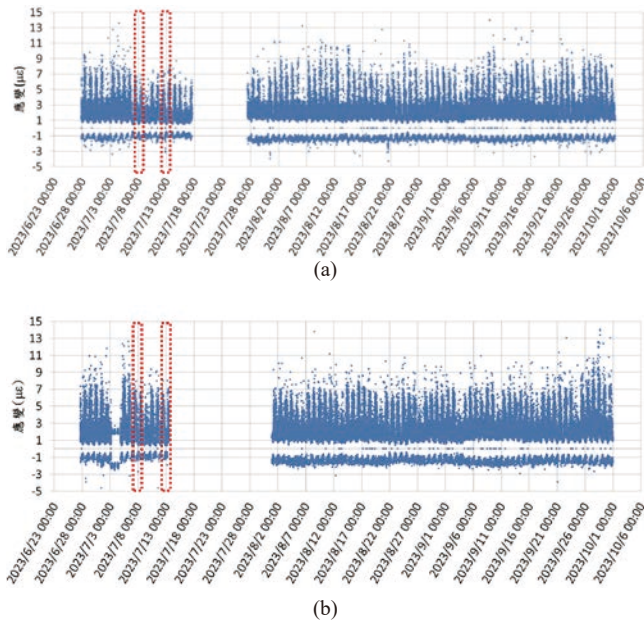


圖 15 無線動態應變計箱梁監測撓曲反應時間歷時圖

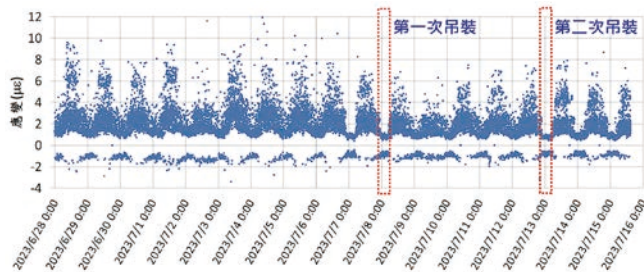
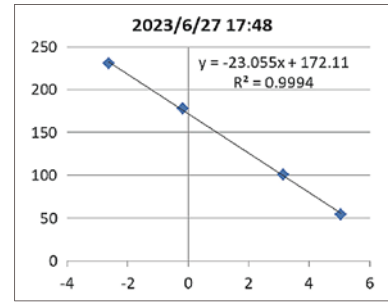


圖 16 無線動態應變計箱梁監測撓曲反應時間歷時圖

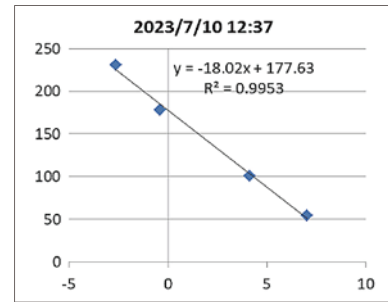
輛中重量不一，其應變反應隨著通行車輛之重量差異有不同程度之變化，二次吊裝期間由於為交通封閉狀況，所以其應變值變化就相對變低，在鋼箱梁吊裝作業完成後，可看出撓曲反應又會恢復到平時通車反應，二次鋼梁吊裝前後，車輛通行引起之撓曲應變反應無明顯改變，顯示既有箱梁沒有受到吊裝作業影響。

除了觀察撓曲動態應變反應之外，還可以透過多通道之動態應變反應來求得監測斷面之中性軸位置^[7]，圖 17 為車輛通過引起多通道動態應變進行迴歸分析範例，將圖 17 之迴歸方程式設定 x （應變）為 0 所得中性軸位置為 172.11 cm 與 177.68 cm。

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 $4 \mu\epsilon$ 且迴歸方程式的 R^2 需大於 0.990 才納入中性軸位置計算用之資料。圖 18(a) 為箱梁之斷面尺寸圖，可以由已知斷面尺寸計算得到理論中性軸位置為 181.3 cm，圖

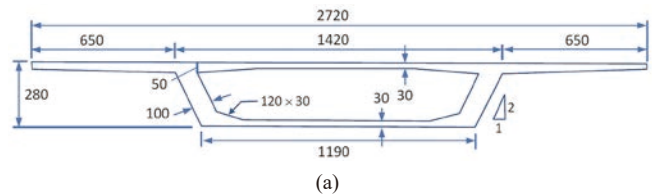


(a)

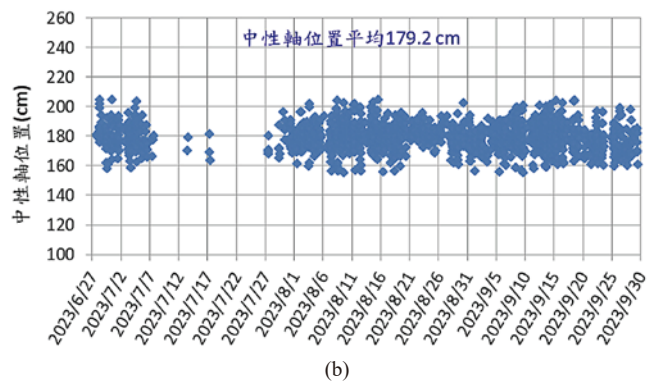


(b)

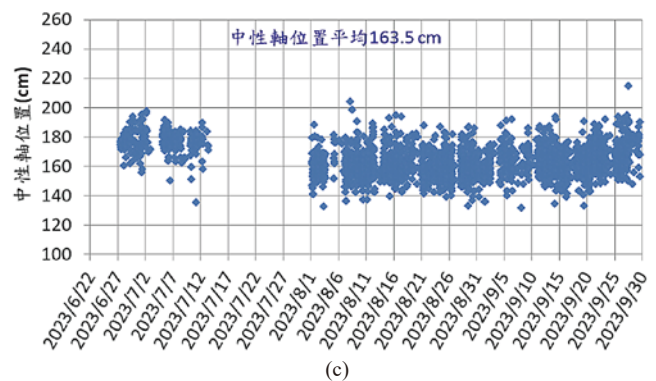
圖 17 多通道動態應變計監測箱梁斷面中性軸位置迴歸分析範例



(a)



(b)



(c)

圖 18 無線動態應變計箱梁監測撓曲中性軸位置歷時圖

18(b) 與圖 18(c) 則為箱梁斷面二側多通道動態應變計監測得到之中性軸位置歷時圖，圖上顯示監測期間中性軸位置在距離梁底 160 至 200 cm 之間跳動，二側平均值分別為 179.2 cm 與 163.5 cm，二者有明顯差異，應該是與箱室屬於扁寬型有關；若與理論中性軸位置 181.3 cm 相比較，監測得到之中性軸位置在理論中性軸位置的下方，此乃因為預力作用影響所致。如果既有箱型梁在監測位置（支撐架附近）出現撓曲裂縫，則監測到之中性軸位置就會明顯的向上移動而超過理論中性軸位置，因此可以推論該箱型梁並未存在有撓曲裂縫。更重要的是，監測期間的資料顯示中性軸位置呈現穩定狀態，也就是代表這段時間該橋跨沒有受到鋼箱梁吊裝暫放之影響。

圖 19(a) 與圖 19(b) 為箱梁二側腹板監測得到之剪力三軸應變時間歷時圖，以三軸應變計之變化中觀察，二次鋼梁吊裝前後，車輛通行引起之剪力三軸應變反應無改變，顯示既有箱梁沒有受到吊裝影響。

再將圖 20(a) 與圖 20(b) 二側腹板剪力三軸應變轉換成最大主應變如圖 20(a) 與圖 20(b) 所示，很明顯腹板靠近中性軸位置之最大主應變反應在二次鋼梁吊裝前後，都維持一致性，表示既有箱梁沒有受到吊裝影響。另外，從圖 20 也可以觀察到車輛通行引起之腹板靠近中性軸位置之最大主應變（拉應變）大都在 $10 \mu\epsilon$ 以內，略小於圖 15 所示車輛引起之撓曲拉應變反應。

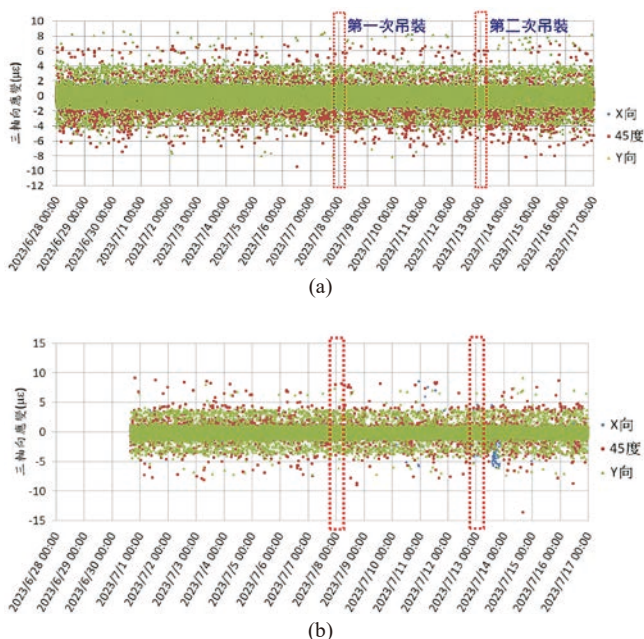


圖 19 無線動態應變計箱梁監測剪力三軸應變反應歷時圖

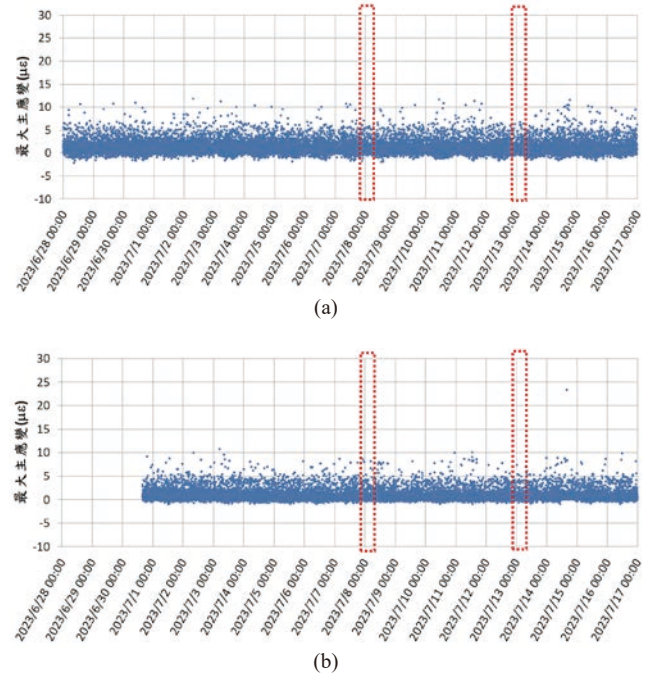


圖 20 無線動態應變計箱梁監測剪力最大主應變反應歷時圖

箱梁內裂縫寬度動態監測作業成果

本次動態裂縫寬度監測為全國首創之監測機制，其特色為位移計解析度高達 1 微米 (μm)、動態資料擷取（每秒 64 筆）、物聯網邊緣運算得每分鐘重車引起裂縫寬度之最大張開與閉合變化量、可以同時監測溫度變化以及車輛載重引起之裂縫張開閉合變化量。圖 21(a) 為動態裂縫寬度變化監測資料，圖 21(a) 顯示裂縫寬度的變化主要是受日夜溫差變化所主導，由於採用動態位移計，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（如輕藍色圓圈所標示）都是代表那一分鐘車輛引起之最大裂縫寬度閉合量或張開量。

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 21(a) 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 21(b) 所示。

圖 22(a)、圖 22(b) 與圖 22(c) 分別為本案選定之三個動態位移計之長期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 $\pm 0.06 \text{ mm}$ 以內。理論上，裂縫寬度受溫度變化影響，應該在溫度恢復到原本溫度時，裂縫寬度也要能恢復到原本寬度才是，但是結果顯示裂

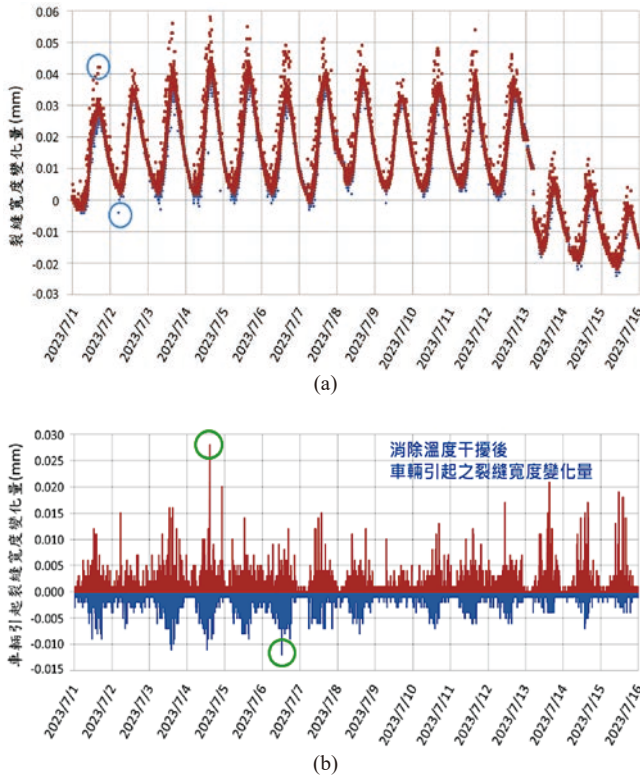


圖 21 箱梁既有裂縫動態位移計監測訊號圖

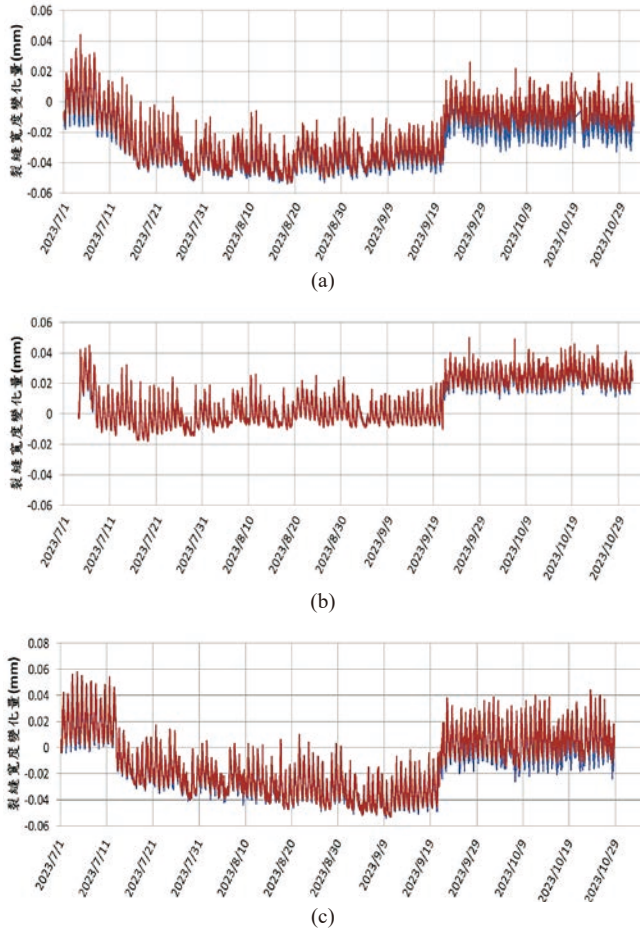


圖 22 箱梁既有裂縫動態位移計長時間監測訊號圖

縫寬度與溫度變化之間並非如預期那樣，也就是二者之間出現了非線性關係。就橋梁的結構安全而言，更需要關注的是活載重車輛通過橋梁引起之裂縫寬度變化，圖 23(a)、圖 23(b) 與圖 23(c) 分別為圖 22(a)、圖 22(b) 與圖 22(c) 消除溫度干擾後車輛引起之裂縫寬度變化歷時反應，圖 23(a)、圖 23(b) 與圖 23(c) 顯示車輛通過引起之裂縫寬度最大張開量與閉合量分別為 0.030 與 0.027 mm，相當小；且在鋼梁吊裝二次作業（112 年 7 月 7 日夜間與 7 月 12 日夜間）前後，裂縫寬度變化沒有明顯差異，表示既有箱梁沒有受到鋼梁吊裝暫放之影響。

為了更清楚看到鋼梁吊裝時裂縫寬度之變化，將二次吊裝前後 24 小時之裂縫寬度變化繪製於圖 24，圖上顯示第一次吊裝鋼梁暫放在既有快速道路箱梁臨時支撐架上，引起之裂縫屬於微閉合（約 0.01 mm）狀況，影響相當小。第二次吊裝鋼梁暫放在既有快速道路箱梁臨時支撐架上，引起之裂縫屬於微閉合（約 0.01 mm）狀況，影響亦相當小。

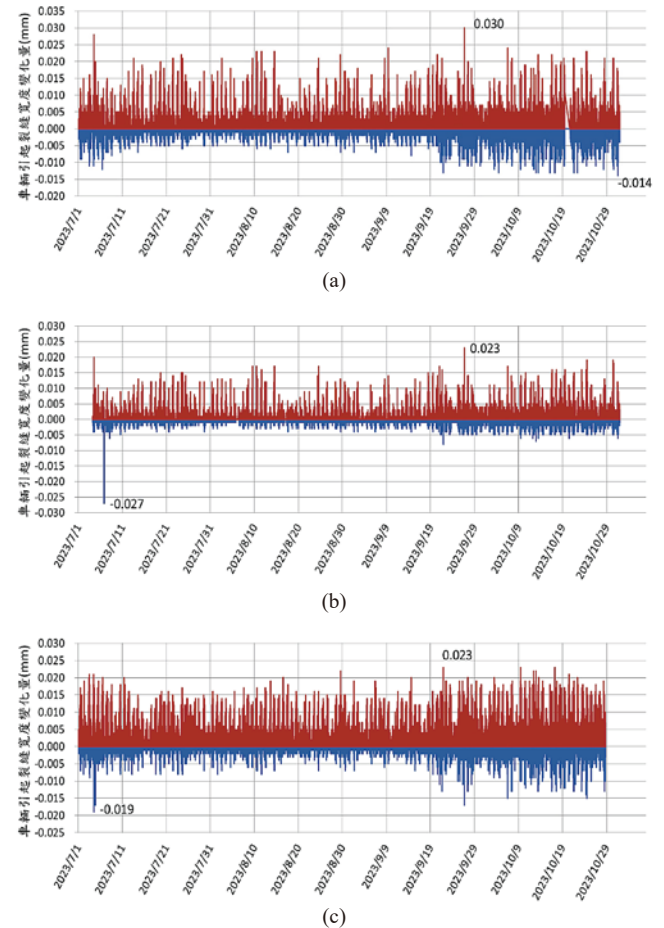


圖 23 車輛通過引起箱梁既有裂縫寬度變化之歷時

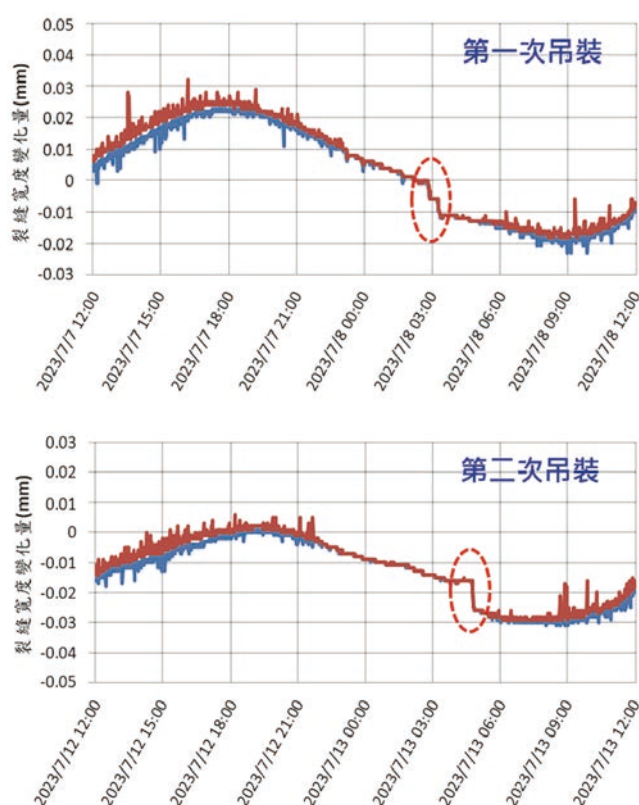


圖 24 箱梁既有裂縫動態位移計吊裝過程歷時曲線

監測成果結論與討論

本文中之橋梁工程檢監測案例為因應交通量需求，快速道路需新設匝道，因應工程之所需，需在快速道路既有橋梁銜接國道聯絡匝道，匝道設計採鋼箱梁方式跨越原快速道路，但在施工過程中鋼箱梁在吊裝期間，需暫撐於既有快速道路上方，以進行後續鋼箱梁接合鎖固作業，此額外加载之巨大重量，可能對既有快速道路箱型梁結構造成影響，為瞭解可能之影響情況，有必要進行施工期間之即時監測與長期診斷作業以釐清既有橋梁在額外受力後健康狀況。施工作業鋼梁吊裝分二次作業，經監測資料分析結果可得結論如下：

1. 由靜態應變計顯示在本次為吊裝作業設計之支撐結構系統為應力有效傳遞狀況，應力順利由上而下傳遞加载力量，且受力均勻。且吊裝作業完成後於箱梁內部結構與外部結構進行檢視，無出現新增裂縫於箱梁結構中。

2. 二次鋼梁吊裝前後，車輛通行引起之撓曲應變反應與剪力應變反應無改變，顯示既有箱梁沒有受到吊裝影響。
3. 鋼梁暫放在既有快速道路箱梁臨時支撐架上，引起之裂縫屬於微閉合（約 0.01 mm）狀況，顯示此加载反應對於結構之影響相當小，與第一點成果綜合分析，可以確定吊裝期間，上部、箱內與下部支撐架有發揮預期效果，能順利直接將吊裝鋼梁暫放在臨時支撐架之重量傳遞到地面上。
4. 本座橋梁在施工期間仍為交通開放狀態，經由即時監測與長期監測之成果顯示，在施工期間額外承受的外力對於既有橋梁沒有造成損傷狀況，顯示在施工計畫與暫撐作業有發揮原規劃功能，橋梁在經施工後之健康狀況良好，符合原橋梁設計安全。

參考文獻

1. 許耿蒼、鄭家齊、江支弘、余志鵬（2019 年 11 月），特殊橋梁結構健康監測方法及其實務案例應用，2018 中華民國力學學會年會暨第 42 屆全國力學會議。
2. 許耿蒼、江支弘、鄭家齊、柯盈慈（2018 年 09 月），遠距微波雷達在結構健康診斷之研究，第 19 屆非破壞檢測技術研討會。
3. Liu C, Teng J, and Wu N., A Wireless Strain Sensor Network for Structural Health Monitoring. Shock and Vibration 2015, pp. 13.
4. Somwanshi SS, Gawalwad BG, Monitoring Civil Structures with a Smart Wireless Sensor Network. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) 2015, 2(3), pp. 34-39.
5. Moreul F, Kim RE, Spencer BF, Railroad bridge monitoring using wireless smart sensors. Struct. Control Health Monit 2016.
6. Lin, Y., Hsiao, C.-Y., Tong, J.-H., Liao, C.-P., Song, S.-T., Tsai, H.-C., and Wang, J.-L. (2022.11), "Application of Edge Computing in Structural Health Monitoring of Simply Supported PCI Girder Bridges." Sensors 2022, 22, 8711.
7. Lin, S.-K., Lin, Y., Tong, J.-H., Cheng, H.-T., Tsai, H.-C., and Wang, J.-L. (2024.05), "Application of Multi-Channel Synchronized Dynamic Strain Gauges in Monitoring the Neutral Axis Position and Prestress Loss of Box Girder Bridges." Sensors 2024, 24, 3489. 