



由 臺中鐵路高架橋 談 橋梁檢測 與 監測

顏宏宇 / 翊盛工程顧問有限公司 橋檢部副理
 林宜清 / 國立中興大學土木工程系 教授
 宋昌國* / 翊盛工程顧問有限公司 總經理
 張文彬 / 翊盛工程顧問有限公司 橋檢部經理
 朱我帆 / 國營臺灣鐵路股份有限公司 工務處 副處長
 陳仕昇 / 國營臺灣鐵路股份有限公司 臺中工務段 施工組組長

早期鐵路橋梁評估作業主要依據臺灣鐵路管理局（113年1月1日起改制為國營臺灣鐵路股份有限公司）所編制「橋梁檢查與評估手冊」，該手冊參考日本財團法人鐵道綜合技術研究所出版「建造物保守管理的標準、同解說－鋼構造物」作參考依據，與公路橋梁檢測所使用 DER&U 系統具有顯著差異，為使工程界對於規範使用具備一致性標準，交通部於民國 108 年頒布「鐵路橋梁之檢測及補強規範」採用 DER&U 目視檢測標準，本計畫將以臺中鐵路高架橋為例，說明橋梁檢測作業。另鐵路橋梁主要承受列車動態負載，包括高速列車加速、減速及震動，為降低動態效應對橋梁結構影響，鐵路橋梁對於結構勁度會有較高的要求，除特殊地形限制外，橋梁跨距通常設計在 40 m 以下，為瞭解列車通過橋梁時結構反應，本計畫於臺鐵高架橋跨越五權路段（臺中車站至五權車站）安裝監測系統，希冀獲取列車通過時動態反應數據。

臺中鐵路高架橋概要說明

臺中都會區鐵路高架捷運化計畫係為因應臺鐵轉型及臺中、豐原車站地區都市更新發展，並解決鐵路對市區的阻隔、平交道引發上下班交通堵塞問題，同時整合都會區運輸系統。該計畫北起臺中市豐原站以北 1.9 公里，南迄大慶站以南 1.4 公里，將現有平面鐵路改建為高架橋，總長度為 19.57 公里。臺中都會區鐵路高架化工程於民國 98 年 9 月動工，由台灣世曦工程顧問公司設計，中興工程顧問股份公司監造，土木標工程由大陸工程股份有限公司、德昌營造股份有限公司、安昌營造股份有限公司負責施工。全線於民國 109 年 6 月完工，資料整理如表 1 所示。

* 通訊作者，cksung22@gmail.com

表 1 臺中鐵路高架橋段工程資料整理表

工程簡介	CCL331松竹至大慶段 鐵路高架工程	CCL431 豐原至頭家厝段 鐵路高架工程	CCL231太原站至精武站間 鐵路高架工程
開工日	99年8月5日	99年12月8日	98年7月24日
竣工日	105年9月18日	106年5月5日	101年2月29日
契約金額	44億2,600萬元	39億3,600萬元	5億3,150萬元
承攬廠商	大陸工程股份有限公司	德昌營造股份有限公司	安昌營造股份有限公司
主要結構	預力混凝土箱梁橋		
施工方法	場鑄逐跨架設工法、全面場撐工法、平衡懸臂工法、全跨預鑄工法		

臺中鐵路高架橋結構採預力混凝土箱梁橋，依據橋梁跨距、上部結構型式、橋墩結構及施工方式等進行統計（資料整理如圖 1 所示），具體說明如下：

1. 橋梁跨距：臺中鐵路高架橋（不包括臺中車站）共計 671 跨，跨距在 30 m 以下橋跨數量最多，共 627 跨佔總橋跨數 93.4%。
2. 上部結構型式：主要差異在於箱室數量變化，分為單箱、二箱、三箱及四箱。臺中鐵路高架橋標

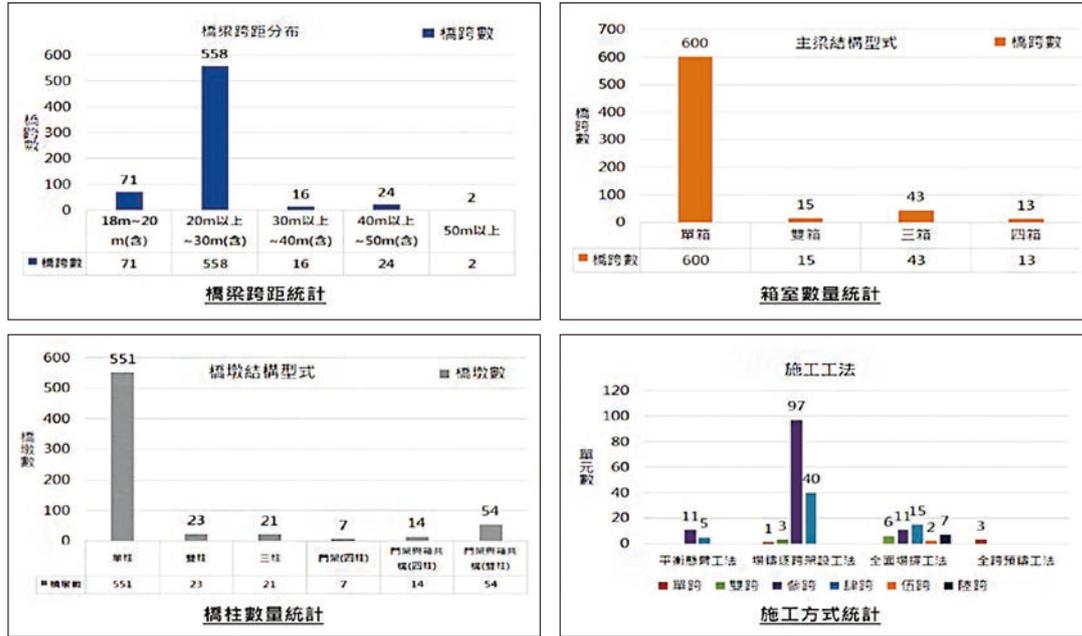


圖 1 臺中鐵路高架橋資料統計圖

準寬度為 11.51 m，採單箱室配置，數量約 600 跨佔總橋跨數 89.4%（標準斷面如圖 2 所示）；車站橋面最寬可達 28 ~ 29 m，採用多箱室配置，其餘為車站前、後銜接漸段段，亦採多箱室配置。

3. 橋墩結構：橋墩結構可分為單柱、雙柱、三柱及四柱，以單柱橋墩最多共 551 墩，佔總墩數 82.2%。
4. 施工方式：施工方法包括平衡懸臂工法、場鑄逐跨架設工法、全面場撐工法及全跨預鑄工法，其中場鑄逐跨架設工法使用最多共 97 單元，佔總數 48.3%。

橋梁檢測說明

橋梁狀況評估準則

橋梁檢測評估主要依據交通部 108 年頒布「鐵路橋梁之檢測及補強規範」以及國營臺灣鐵路股份有限

公司（前身為臺灣鐵路管理局）所編制「鐵路橋梁檢測作業手冊」進行 DER&U 評等，DER&U 評估系統說明如表 2，D 值為構建劣化程度，E 值為構建劣化範圍，R 值為構件劣化對橋梁結構影響程度，U 值為處置急迫性。為了使檢測人員能夠精確表達橋梁構件劣化現象，DER&U 評等系統將其分為 1 至 4 級，各等級代表意義詳見表 3。

表 2 DER&U 評估系統表

評等項目	說明
D 劣化程度(Degree)	構件劣化之嚴重程度
E 劣化範圍(Extent)	構件劣化範圍佔構件整體百分比
R 橋梁結構使用性及用路人安全性之影響(Relevancy)	構件劣化情況對橋梁結構安全性使用性及與耐久性之影響程度
U 處置急迫性(Urgency)	反映整體結構或部分構件維修處置順序及急迫性

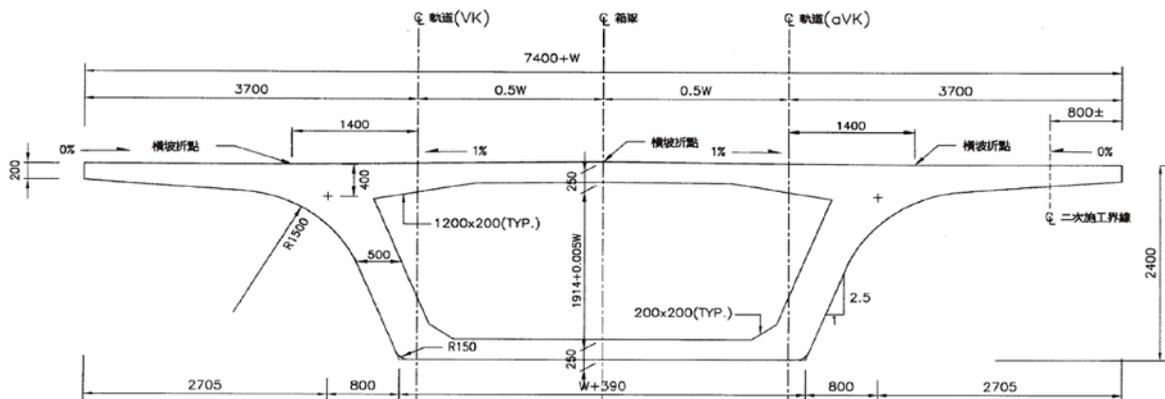


圖 2 臺中鐵路高架橋單箱室標準橫斷面圖

表 3 DER&U 評等準則表

	0	1	2	3	4
D	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損壞
E	無法檢測*	10%以下	10%~30%	30%~60%	60%~100%
R	無法判定重要性	微	小	中	大
U	無法判定急迫性	例行維護及追蹤		1~2年內維護	緊急處理維護

檢測作業準備及程序

在進行現地檢測前，應先備妥橋梁基本資料、歷年檢測資料及相關圖說並訂定檢測程序，以提升現地檢測作業流暢性，減少不必要時間浪費並降低檢測疏漏風險。檢測人員到達後，首先應確認檢測橋梁資料是否正確，然後進行橋梁整體性宏觀檢查，接著逐一構件進行檢查與評估，檢測程序設定為：(1) 橋面系統、(2) 上部結構、(3) 下部結構，具體檢測作業程序詳見圖 3。

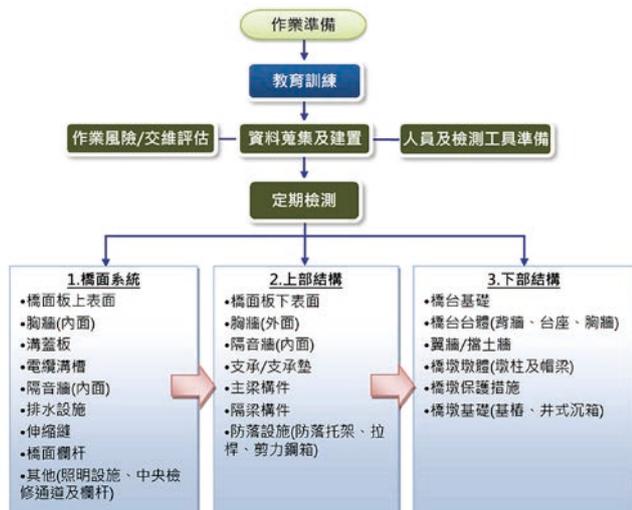


圖 3 檢測作業程序圖

橋梁檢測方法

檢測方式主要以目視檢測為主，檢測人員可通過徒步或搭配輔助載具儘可能接近檢測構件，並根據橋址環境、橋梁型式與結構檢測條件，採用近距離目視、遠距離目視或輔以可攜式器具與光學儀器設備進行間接目視檢測等方式。以臺中鐵路高架橋為例，橋下空間包含市區道路、停車場、綠地、自行車道及區域排水等環境，量測大梁結構與路面淨高為 3 ~ 14 m，為了讓檢測人員盡量近距離目視檢測使用高空作業車進行作業，如因地形限制無法使用高空作業車，會透過間接檢測方式進行，臺中鐵路高架橋檢測作業情形如圖 4 所示。



檢測預力箱梁腹板



檢測預力箱梁底板

圖 4 臺中鐵路高架橋檢測作業照片圖

預力混凝土箱型梁常見劣化樣態

橋梁構件缺失可區分為施工缺失及環境劣化兩類，本計畫整理常見缺失樣態及相應改善對策，詳情如表 4 所示（劣化樣態照片非來自臺中鐵路高架橋案）。

橋梁監測說明

計畫目的

臺中鐵路高架橋梁北起豐原車站南迄大慶站，全長約 19.57 km，橋梁型式為預力箱型梁。為瞭解列車通過橋梁動態反應，建立初步指標以供後續橋梁結構健康評估使用，計畫在臺中鐵路高架橋選擇 2 處位置安裝高精度無線動態應變計進行監測，通過監測預期可獲得下列橋梁結構健康指標：(1) 每天通過列車引起的動態應變反應規律性指標；(2) 斷面中性軸位置的穩定性指標。這些指標會隨著橋梁預力狀態變化或結構裂縫劣化的出現而發生變化，從而達到結構健康監測目的。

表 4 預力混凝土箱型梁常見劣化樣態表

項次	劣化樣態	發生原因	改善對策
混凝土剝落		鋼筋保護層控制不當，當鋼筋鏽蝕體積膨脹，造成混凝土開裂甚至剝落	將鬆動混凝土打除、表面處理並塗佈混凝土接著劑後，填補混凝土並整平、養護
蜂窩		混凝土澆置垂直距過高造成粒料析離；混凝土澆置搗實不良，搗實時間不足	表面處理並塗佈混凝土接著劑後，填補混凝土並整平、養護
鋼筋外露銹蝕		鋼筋保護層控制不當所致	將鬆動混凝土打除、鋼筋表面處理、塗抹防蝕塗料及混凝土接著劑後，填補混凝土並整平、養護
混凝土裂縫		當結構受力或溫度、濕度發生變化時，導致混凝土產生拉應力，如收縮裂縫係因混凝土養護不良、養護時間不足；當環境溫度發生變化，構件受到約束不能自由變形時產生溫度裂縫；應力裂縫係結構應力作用下，受拉側混凝土承受拉應力造成	確認是否為結構問題？有無補強必要？如屬表面裂縫，採用灌注環氧樹脂修補，環氧樹脂因物理性能優越，與混凝土粘著性良好，可將混凝土裂縫填實修復
滲水、白華		水份水氣與溼氣滲入混凝土縫隙中，將氫氧化鈣成分溶解透出，與二氧化碳、二氧化硫作用後形成碳酸鈣或硫酸鈣，水份蒸發後留下白色鹽類物質結晶即為白華	找出滲水原因並將裂縫修補，防止水份入滲
鋼筋凸出		施工階段未將工作鋼筋切除	切除鋼筋及混凝土表面處理
鳥類築巢		鳥類自梁端開口、人孔或排水孔進入箱內築巢	清除雜物並確實關閉人孔蓋，孔徑較大之排水孔增設攔阻網
雜物堆積		施工階段未依規定清除帶走箱內雜物及垃圾	雜物清除
箱內積水		箱內排水管接頭滲漏，箱梁底板無排水孔或排水孔阻塞造成箱內積水	排水管接頭處理及增設排水孔

計畫內容

本計畫採動態應變監測技術，因為車輛通過橋跨時間僅幾秒鐘，該時段內的溫度變化微乎其微，應變反應不受溫差影響為其優點；此外，由於監測系統每秒紀錄大量數據，為有效管理這些龐大數據量，本計畫採用雲端資料監控系統，包括雲端資料庫的存取及追蹤效能。為了解決大量資料傳輸問題，並減輕網路與伺服器的負擔，我們採用了邊緣運算（Edge Computing）分散式運算技術^[1,2]，相關說明如下：

1. 透過動態應變反應來取得中性軸位置，作為橋梁結構穩定性指標，規劃在跨越五權路的三跨連續預力箱型梁邊跨安裝一組 4 通道應變計（位置 A）；另為瞭解

同車載情況下，不同橋跨結構中性軸變化，在五權路口北側的三跨連續預力箱型梁內，也安裝一組 4 通道應變計（位置 B），監測儀器安裝位置如圖 5 所示。

2. 應變計位置 A 位於三跨連續預力箱型梁上，橋梁長度為 $30\text{ m} + 48\text{ m} + 30\text{ m} = 108\text{ m}$ ，橋梁寬度為 11.51 m ，大梁深度介於 $2.4\text{ m} \sim 3.6\text{ m}$ 間，箱梁頂板厚度為 30 cm ，箱梁底板厚度介於 $30\text{ cm} \sim 50\text{ cm}$ 間；應變計位置 B 同樣為三跨連續預力箱型梁，橋梁長度為 $3@30\text{ m} = 90\text{ m}$ ，橋梁寬度為 11.51 m ，大梁深度為 2.4 m ，箱梁頂板厚度為 25 cm ，箱梁底板厚度為 25 cm 。前述所提橋梁縱斷面詳見圖 6，箱梁橫斷面詳見圖 7 及圖 8。



圖 5 應變計安裝位置示意圖

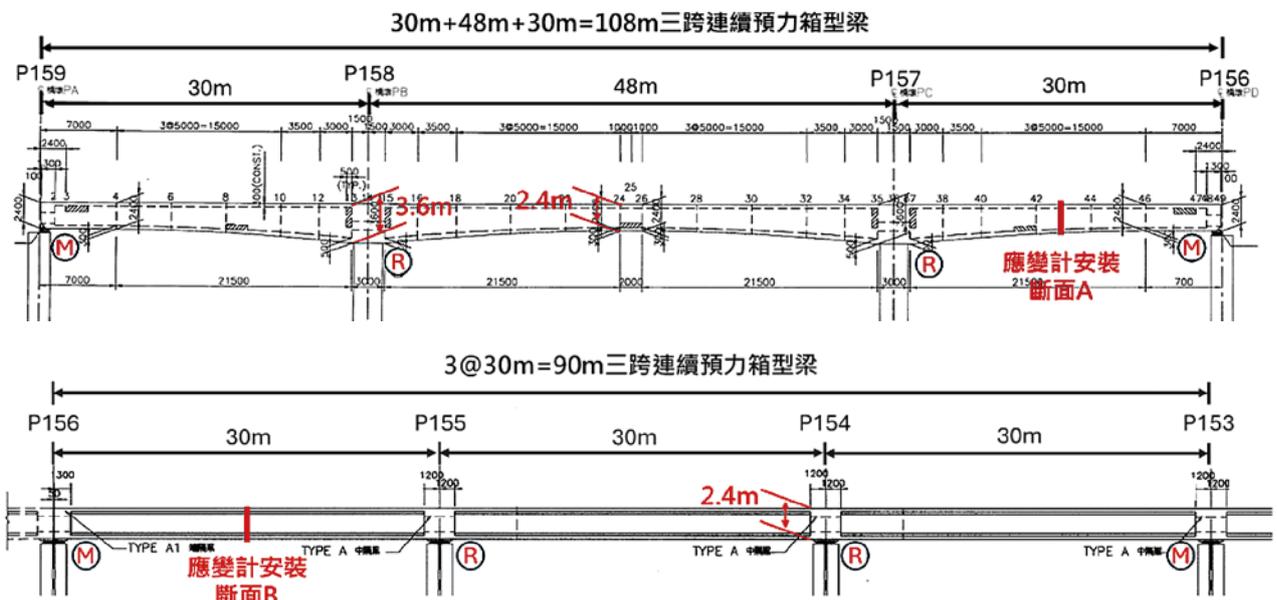


圖 6 安裝監測儀器位置箱梁縱斷面圖

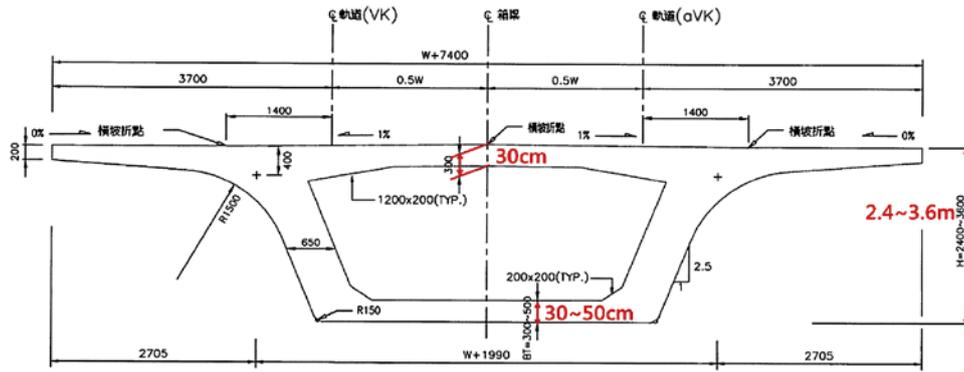


圖 7 應變計位置 A 預力箱梁橫斷面圖

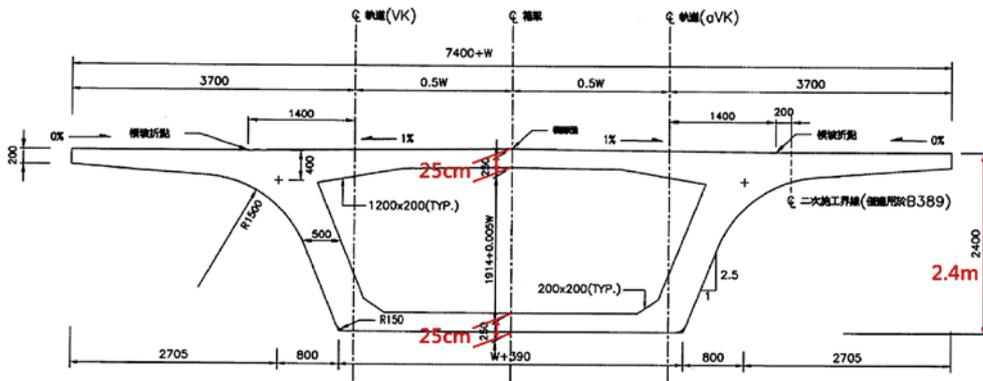


圖 8 應變計位置 B 預力箱梁縱斷面圖

3. 由於列車通過橋梁時間僅幾秒鐘且資料龐大(以每毫秒為單位),本計畫利用邊緣運算技術來識別列車引起的應變數據,通過比較找出相對最大應變

值,為確保雲端資料正確性,應變計位置 A 處額外安裝一片應變計,透過現場資料擷取連續波形與雲端資料系統進行比對,作業規劃詳見圖 9。



圖 9 本計畫監測系統作業圖

4. 本計畫在應變計位置 A 及 B 處箱室內分別配置一組 4 通道動態應變計（配置斷面如圖 10 及圖 11 所示）。4 通道動態應變計是一種用於量測結構或物體表面應變的儀器，該儀器由四個獨立應變計組成，安裝位置分別在頂板、腹板上側、腹板下側及底板，可同時接收來自四個不同應變計數據。

監測成果概要說明

列車動態反應

臺鐵公司列車區分為區間車（區間快車）、自強號（自強 3000）、普悠瑪號，區間車為 E 型電聯車（包含 E200 型和 E300 型），區間列車總長 100 m ~ 160 m，總重約 150 噸 ~ 180 噸，頭尾兩端的動力車廂最重約為 45 噸 ~ 50 噸，區間列車最高運行時速為 110 公里 / 小時，但由於區間車經常停靠較多車站，且行駛路段通常為短距離區間，因此實際運行速度較慢。自強號列車包括 EMU300 型、EMU700 型及 EMU3000 型，是臺鐵公司營運的高速列車，自強列車總長度約

為 200 m ~ 250 m，總重約 200 噸 ~ 250 噸，頭尾兩端的動力車廂最重約為 45 噸至 50 噸，列車最高運行時速 130 公里 / 小時。

本計畫在比對雲端資料正確性時，整理了應變計位置 A 處連續波形資料。對照列車時刻表我們發現列車順行向與逆行向連續波形呈現相反樣態，應變相對最大值出現在頭尾兩端，推估這與列車配置（頭尾兩端為動力車箱）有關，為了進一步驗證，後續計畫在應變計位置 B 處額外安裝一片應變計，並取得該處連續波形，然後將其與應變計 A 處的數據進行比較。關於應變計位置 A 處區間列車連續波形樣態，請詳見圖 12、圖 13；自強列車連續波形樣態，請詳見圖 14、圖 15。

斷面中性軸位置

由財團法人中華顧問工程司與中興大學林宜清教授共同合作執行「動態應變技術於動態地磅與預力損失監測之應用」^[1] 研究顯示，預力損失與撓曲裂縫會影響梁斷面中性軸位置，當混凝土梁斷面無開裂情況下，中性

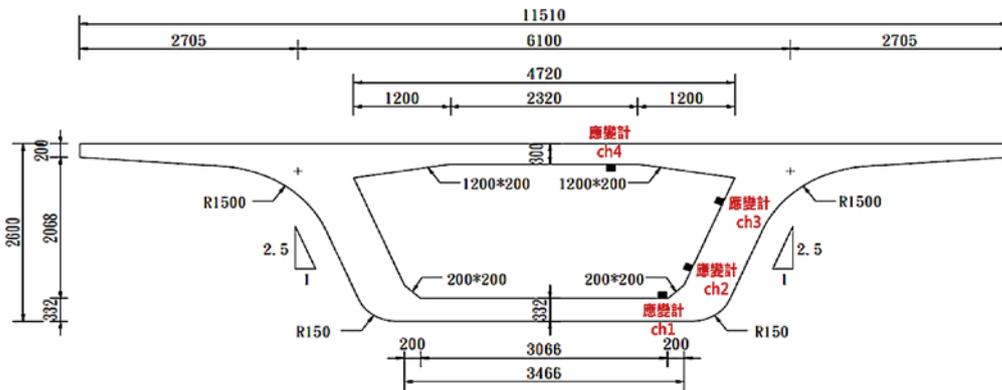


圖 10 應變計位置 A 儀器位置橫斷面圖

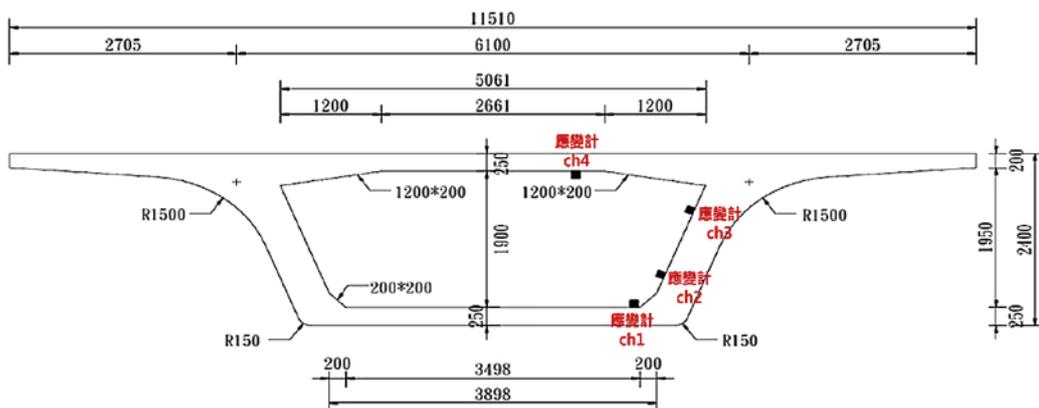


圖 11 應變計位置 B 儀器位置橫斷面圖

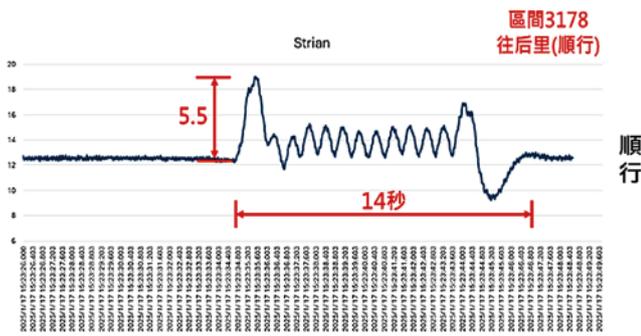


圖 12 區間列車順行向連續波形樣態圖

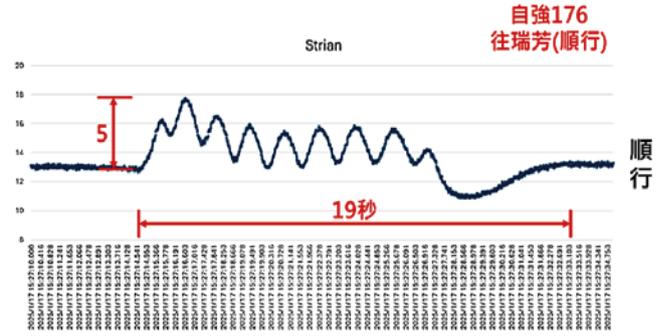


圖 14 自強列車順行向連續波形樣態圖



圖 13 區間列車逆行向連續波形樣態圖

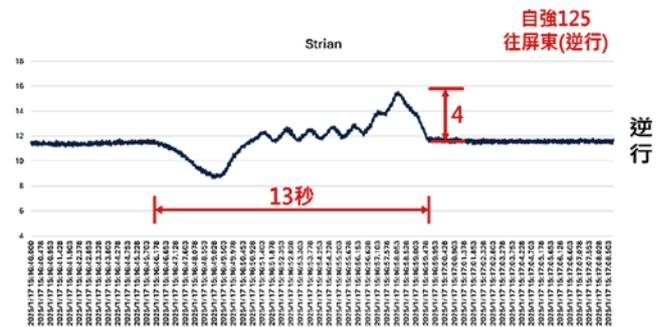


圖 15 自強列車逆行向連續波形樣態圖

軸位置會隨著預力的增加而變低，當混凝土梁斷面出現撓曲裂縫時，中性軸位置會因裂縫存在而明顯升高；預力構件的中性軸位置會隨著預力值變化而改變，預力愈大中性軸位置愈低（如圖 16 所示）。本監測採用 4 通道動態應變計作為現場儀器配置，能夠同時監測活載重引起橋梁動態應變反應以及中性軸位置，這二項訊號都是橋梁結構健康的重要指標 [3]。

動態應變監測優點在於訊號分析能夠避開環境溫度變化的干擾，由於列車通過橋跨時間僅幾秒鐘，在這段時間內溫度變化可視為微不足道，因此列車引的應

變反應不會受到溫度變化所帶來干擾。另列車通過時所獲得四組應變資料會隨著不同時段累積進行統計分析，通過線性迴歸方程式計算中性軸位置，應變計位置 A 及應變計位置 B 監測實例詳見圖 17、圖 18。

結論

1. 相關研究顯示，中性軸位置會因斷面裂縫的存在而明顯升高，或因預力構件隨著預力值變化而有所改變。本計畫在跨越五權路的預力箱型梁（應變計位置 A）及北側鄰跨的預力箱梁（應變位置 B）內，分別安裝 4 通道動態應變計，這些應變計將同時接收列車通過時反應，並將不同時段累積數據進行統計分析，藉由線性迴歸方程式來計算中性軸位置。
2. 原本計畫在應變計位置 A 處額外安裝一片應變計，以獲取動態應變連續波形，目的是用來比對連續波形與邊緣運算資料正確性。整理過程中發現，當列車通過時，順行向與逆行向的列車動態應變連續波形呈現相反樣態，且應變相對最大值出現在頭尾兩端，推測這與列車配置（頭尾兩端

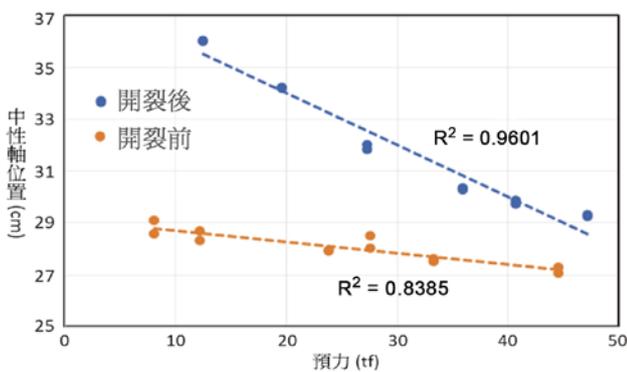


圖 16 中性軸位置與預力及開裂梁之關係

資料來源：林宜清 [4]

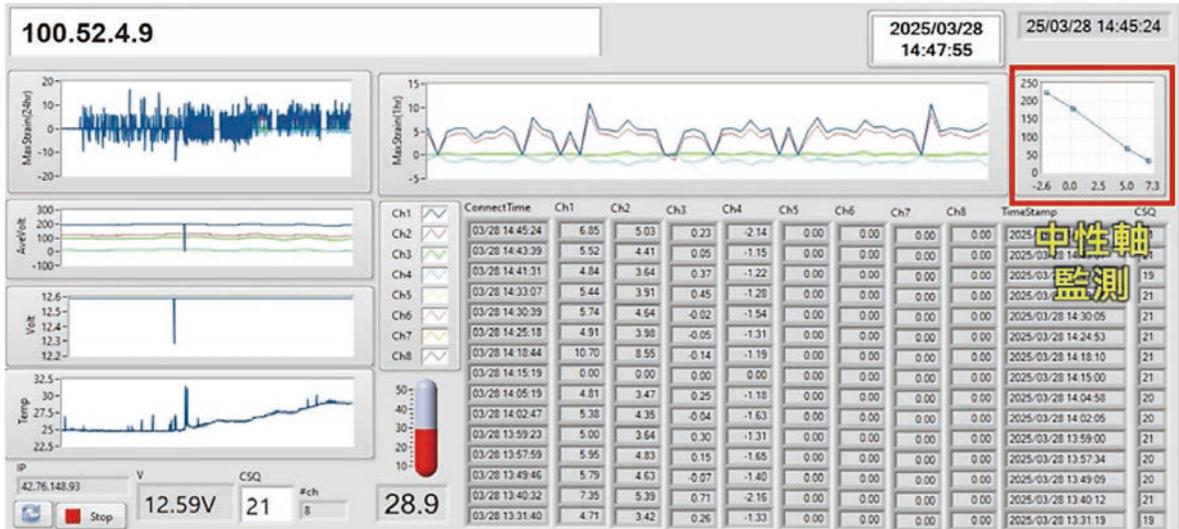


圖 17 應變計位置 A 雲端監測實例圖

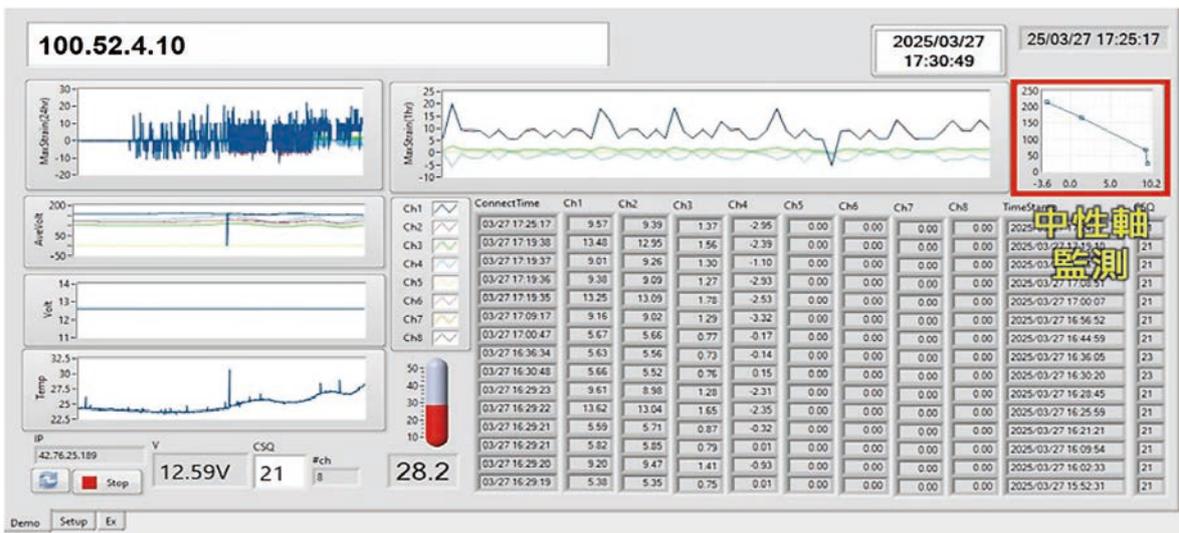


圖 18 應變計位置 B 雲端監測實例圖

為動力車廂)有關。為進一步研究，後續計畫在應變計位置 B 處額外安裝一片應變計，以獲取該處連續波形，並與應變計位置 A 數據進行比較。

誌謝

首要誠摯感謝國營臺灣鐵路股份有限公司信任與支持，給予承攬臺中鐵路高架橋檢測工作的機會，並提供本試驗場域，藉此累積寶貴實務經驗。同時，特別感謝國立中興大學土木系林宜清教授團對於執行期間提供專業意見與指導，得以深入瞭解動態應變量測、中性軸監測等理論應用在鐵路列車之實務操作，並證實可以有效應用於鐵路橋梁結構行為監測，使本項工作得以順利推進並圓滿達成，謹以此誌，致上最誠摯的謝意。

參考文獻

- 林宜清、童建樺、李宗翰 (2023)，動態應變技術於動態地磅與預力損失監測之應用，財團法人中華顧問工程司研究計畫報告 (計畫編號 10929)。
- Lin, Y.-C., Hsiao, C.-Y., Tong, J.-H., Liao, C.-P., Song, S.-T., Tsai, H.-C., and Wang, J.-L. (2022). Application of Edge Computing in Structural Health Monitoring of Simply Supported PCI Girder Bridges. *Sensors* 2022, 22, 8711.
- Lin, S.-K., Lin, Y.-C., Tong, J.-H., Cheng, H.-T., Tsai, H.-C., and Wang, J.-L. (2024). 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.
- 林宜清、林哲詠、陳俞華、林光偉、陳彥塏 (2024)，輕質混凝土預力箱型梁之動態應變監測 (第十七屆結構工程暨第七屆地震工程研討會)。