

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

June
2025

CECI 台灣世曦
工程顧問股份有限公司



監測和安全 零距離的接軌

台灣世曦所開發的機械狗「世曦1號」，在台南橋梁耐震補強工程中減少勞工進入局限空間作業之需求，幫助工程人員監測結構物的安全降低發生工安的機率。

ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 52, No. 3

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

永續低碳
與
宜居城市

趨勢報導

工程技術及發展

國道1號
北外環交流道工程

橋梁監測、檢測
與診斷管理

專 輯



大台南
會展中心



翡翠原水管工程



國道四號C713標



福清營造 全域獨到



福清營造
SINCE 1975

台北市內湖區行善路48巷15號7樓
02-2796 3949
www.for-tune.com.tw



勞動部職業安全衛生署
OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, MINISTRY OF LABOR

第14屆公共工程金安獎



113年度台北市政府公共工程卓越獎

第24屆 公共工程
金質獎

土木類 佳作



監測和安全 零距離的接軌
台灣世曦工程顧問股份有限公司

土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



發行人：高宗正

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：周頌安（中興工程顧問股份有限公司總工程師、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十六屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：高宗正

常務理事：朱惕之 余信遠 廖學瑞 賴建信

理事：王宇睿 王昭烈 林子剛 林祐正 林聰利 胡宣德 高銘堂

張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃一平 楊正君

楊偉甫 歐善惠 謝尚賢 謝震輝

常務監事：宋裕祺

監事：王藝峰 吳文隆 呂良正 沈景鵬 邱琳濱 賴建宏

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠營建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第518號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第0248號

「橋梁監測、檢測與診斷管理」專輯 (客座主編：余志鵬教授)

專輯序言：橋梁監測、檢測與診斷管理	余志鵬	3
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／黃俊豪／王祐瑋／陳建旭／王建泓／林宜清／蔡欣局／葉承軒	4
由臺中鐵路高架橋談橋梁檢測與監測	顏宏宇／林宜清／宋昌國／張文彬／朱我帆／陳仕昇	12
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／林宜清／鄭家齊／柯盈慈／洪嘉鍵	21
人工智慧橋梁檢測車之研發與應用	李坤哲／傅立祥／郭清水／黃志杰／曾蕙如	33
數位孿生分析模式於鋼索橋0403震後之即時診斷	蔡欣局／黃進國／鐘立庭／鄧兆廷／王仲宇	41
監測訊號異常的自動化處理與分類：以橋梁加速度監測為例	黃謝恭／林天邠	47

工程技術及發展

國道1號北外環交流道工程(第I105S標)之施工解析	潘小珍／譚博元／賴凱祥／林建志／盧志宏	55
----------------------------	---------------------	----

趨勢報導

永續低碳與宜居城市—第八屆亞洲地工合成材料會議及布里斯本散記	周南山	61
--------------------------------	-----	----

廣告特搜

中興工程顧問股份有限公司 — 水資源開發	封底
福清營造股份有限公司 — 福清營造 全域獨到	封面裡
真毅營造有限公司 — 潛盾工程	封底裡
交廣工程顧問有限公司 — 誠信・創新・品質・服務・永續發展	54
社團法人台灣循環經濟學會 — 期待您的加入	69
亞新工程顧問股份有限公司 — 台北 台中 高雄 仰光 曼谷 新加坡 香港 北京	70
臺北市政府捷運工程局 — 臺北捷運 6線齊發 ^{2.0} 智慧綠色運輸 全環串聯更便捷	70
安固工程股份有限公司 — 安得固 建築修復結構補強	71
林同棧工程顧問股份有限公司 — 專業・品質・信賴	71
義力營造股份有限公司 — 義呈實諾 力呈卓越	72
華光工程顧問股份有限公司 — 專業・人本・樂活	72



橋梁監測、檢測 與診斷管理 專輯序言

專輯客座主編 余志鵬* / 國立中興大學土木工程學系 教授

隨著社會經濟與公共工程需求穩定成長，國內因基礎建設發達與日益老化衍生不少待解決的問題。其中，隨著橋梁數量與年限同步成長，結構老化逐漸危害使用需求，已成為不可忽視的課題。傳統橋梁的檢測方式以目視為主，常因人工風險高、資料較零碎、難以即時回應橋況，已無法滿足高效率與高準確性的維護營運要求。此外，近年將物聯網、無線傳輸及 AI 智慧監測等優勢觀念導入，已成為必然趨勢。針對橋梁健康管理系統在技術與觀念上，各界皆提出需適切革新的呼籲，企盼能具體研議出新科技在橋梁檢測的應用方式。

本期專輯聚焦於「橋梁智慧監測、檢測與診斷技術」之發展與應用，廣泛介紹從邊緣運算技術提升監測效能、AI 智慧導入橋梁檢測與監測系統、數位孿生於震後診斷的應變效能，到異常訊號的自動化辨識方法等前沿議題，並佐以具代表性實務案例的成果驗證，揭示目前國內橋梁維護科技的技術能量與實際成效。

專輯中的前三篇文章介紹近年已臻成熟的動態應變技術，於橋梁監測上獲得良好實證成果的代表案例，文中所應用的創新監測概念是由中興大學土木系林宜清教授團隊所提出，並於第一篇文章以國道六號之應用實例進行概念介紹；接續其後為兩篇於鐵路與公路橋梁之相關案例，分別由翏盛工程顧問公司與朝陽科技大學非破壞檢測中心執行與撰寫。此三篇文章扼要介紹如何運用動態應變監測的優勢來解決傳統上遭遇溫度效應影響量

測結果的困難，尤其是在解決大量監測數據方面提出邊緣運算的應用與優勢，使建構出現場高效率且穩定的無主機動態監測系統。

第四篇針對「人工智慧橋梁檢測車之研發與應用」之文章中，黎明工程顧問公司重點剖析橋檢現場實測之關鍵問題，並以實例詳細說明其團隊累積多年現場橋檢經驗所開發出之人工智慧橋梁檢測車系統；接續其後為兩篇新式分析技術的介紹，由中華顧問工程司蔡欣局主任團隊及中興大學土木系黃謝恭教授團隊撰寫，分別針對「數位孿生分析技術應用於震後即時診斷」與「監測訊號異常的自動化處理」進行專文介紹。前者介紹如何將實體系統（橋梁）的數位模型建立在虛擬空間，透過即時數據與模擬技術診斷和分析實體系統運行狀況，並說明其結合結構健康監測（SHM）系統的優勢。後者說明一般（SHM）長期監測工作產生大量數據下，因惡劣環境、元件損壞、校正錯誤或感測器故障會產生異常數據及影響資料品質，便可能導致對橋梁狀況的錯誤判斷，文中以斜張橋加速度監測資料為示範案例深入淺出介紹「人機協同迭代修剪損失最小化」技術的概念與優勢。

由上述六篇文章所介紹的創新技術及實例說明，相信可以讓讀者初步了解到：所介紹之新式技術對於提升橋梁養護管理效率、安全性和精準性，皆提供了新的概念、標準和評估工具。這些產學研單位將新技術與新觀念導入於橋梁檢測、監測應用上的具體嘗試，彰顯了適當融合相關科技於診斷作為中，將有助於逐步提升與落實具永續性的橋梁設施管理的技術需求。 

* 通訊作者，cpyu@nchu.edu.tw



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／交通部高速公路局中區養護工程分局 分局長

黃俊豪／交通部高速公路局中區養護工程分局 副分局長

王祐璋／交通部高速公路局中區養護工程分局南投工務段 段長

陳建旭／交通部高速公路局中區養護工程分局南投工務段 副段長

王建泓／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

林宜清*／中興大學土木工程學系 教授

蔡欣局／財團法人中華顧問工程司 主任

葉承軒／財團法人中華顧問工程司 正工程師

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，表示各橋跨之撓曲動度與目前預力狀態尚足以抑制裂縫寬度之成長。

前言

新建與老舊橋梁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

* 通訊作者，yiching@nchu.edu.tw

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。

國道 6 石灼橋預力混凝土箱型梁之中性軸監測

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。

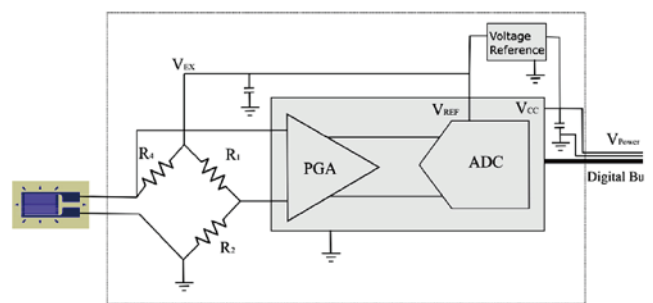


圖 1 高精度動態應變訊號擷取電路

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 2 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 $L_{a1}(i+1)$ 與最小應變於 $L_{b1}(i+1)$ 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 $L_{a2}(i+1)$ 、 $L_{a3}(i+1)$ 及 $L_{b2}(i+1)$ 、 $L_{b3}(i+1)$ 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。

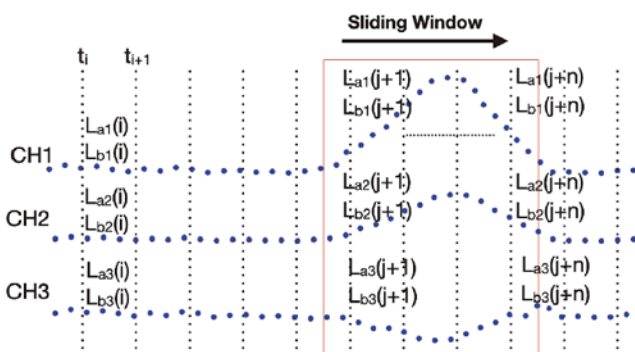


圖 2 多通道同步擷取車輛引起之動態應變示意圖

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。

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

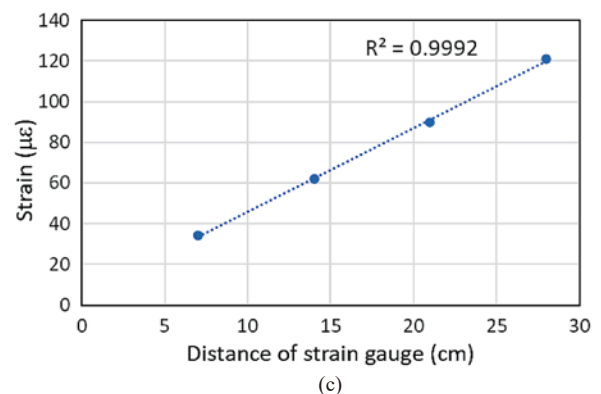
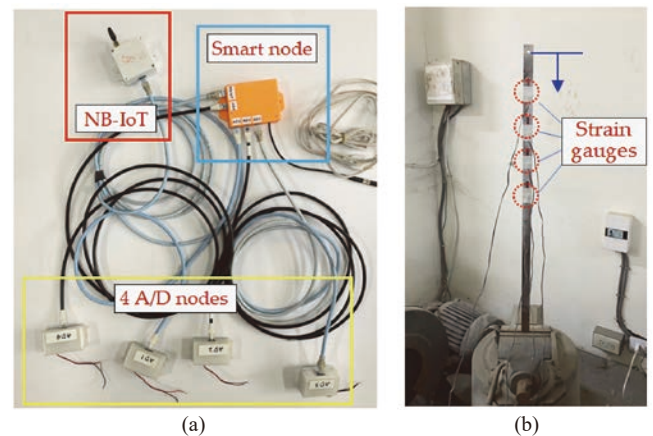


圖 3 多通道同步擷取車輛引起之動態應變示意圖

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。

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)、圖 4 (b) 與圖 4 (c) 分別為立面圖、斷面圖與斷面理論中性軸位置。根據圖 4(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 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。

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 R2 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

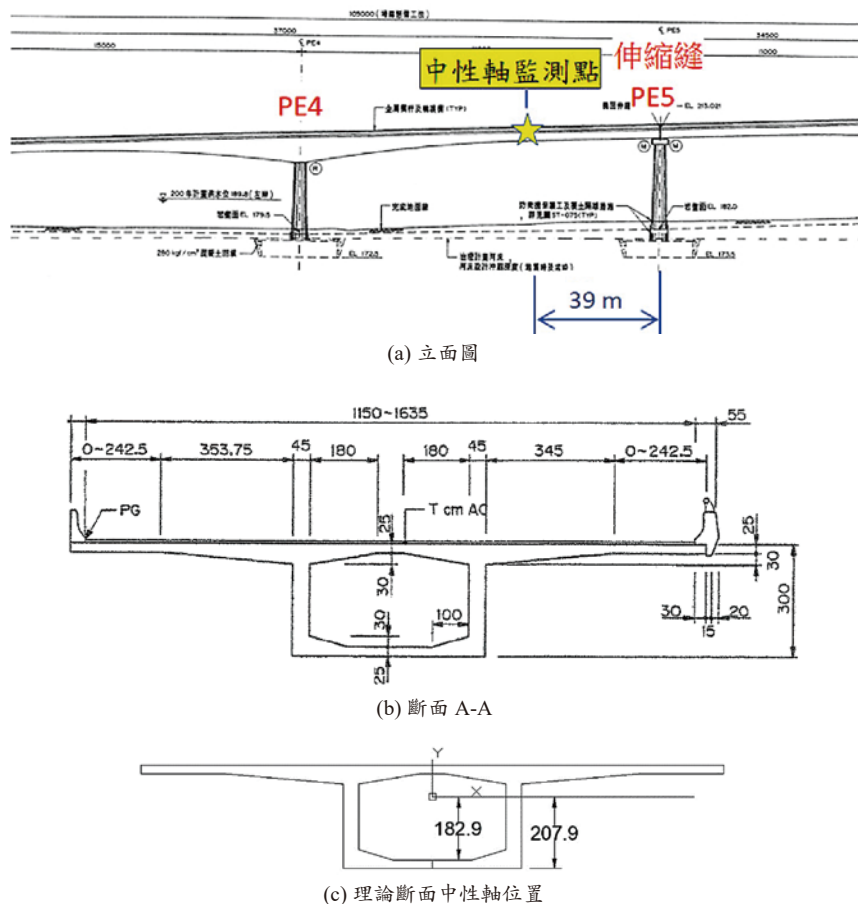


圖 4 石灼高架橋 PE4-PE5 橋跨

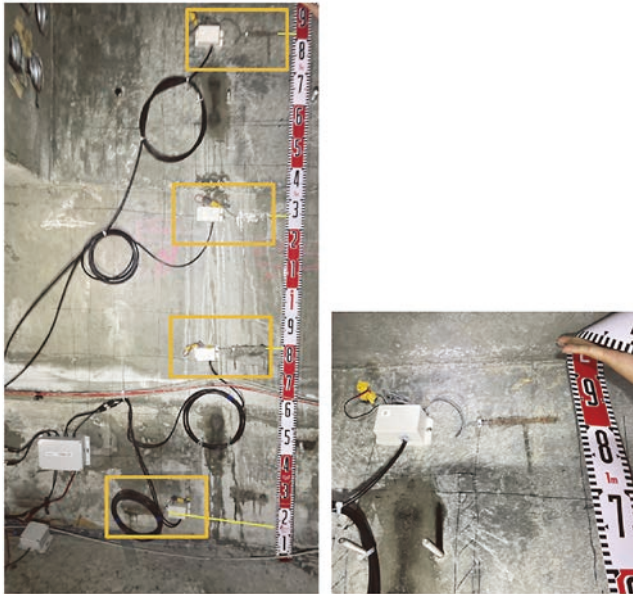


圖 5 石灼高架橋 (PE4-PE5) 4 通道斷面中性軸位置監測儀器之安裝

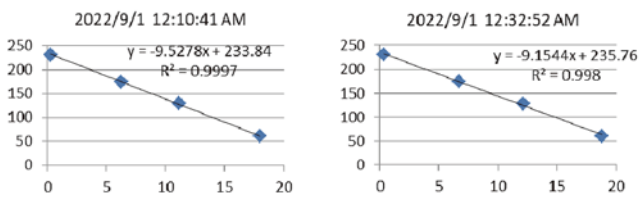


圖 6 斷面中性軸位置監測資料範例

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。

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 (μm)、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。

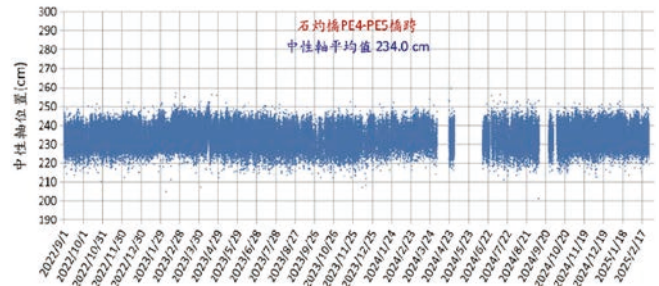


圖 7 石灼高架橋 PE4-PE5 箱型梁斷面中性軸位置監測結果



圖 8 石灼高架橋 PE4-PE5 箱型梁撓曲裂縫之目視檢測

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。

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

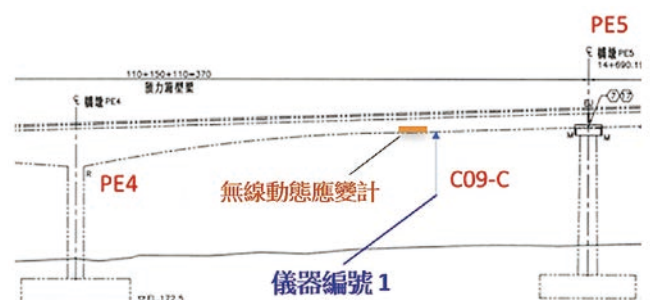
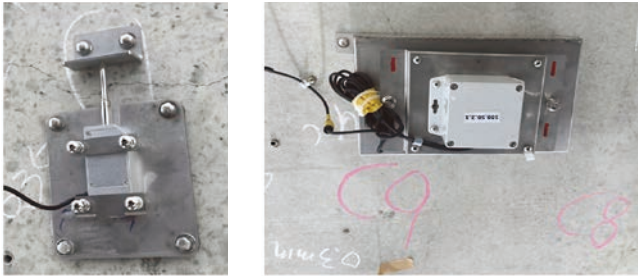


圖 9 動態應變計與裂縫寬度計配置示意圖



(a) 位移計橫跨在裂縫上 (b) 保護蓋與通訊模組之安裝

圖 10 監測儀器之安裝

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。

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。

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 天之訊號比較，很清楚地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。

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。

就橋梁的結構安全而言，更需要關注的是車輛（活載重）通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 15 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。

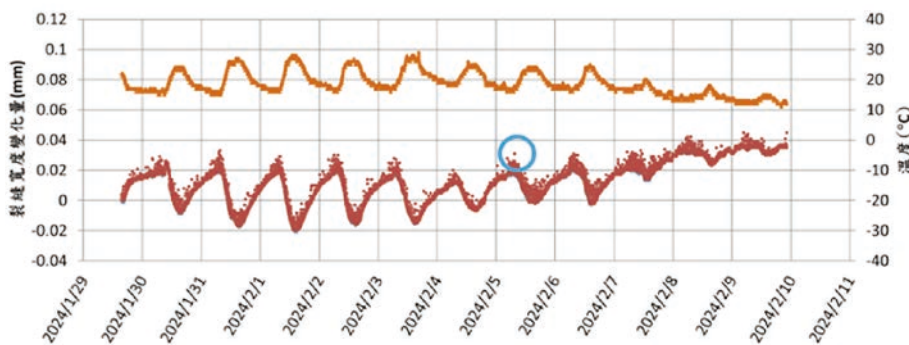


圖 11 裂縫寬度變化與溫度變化之關係

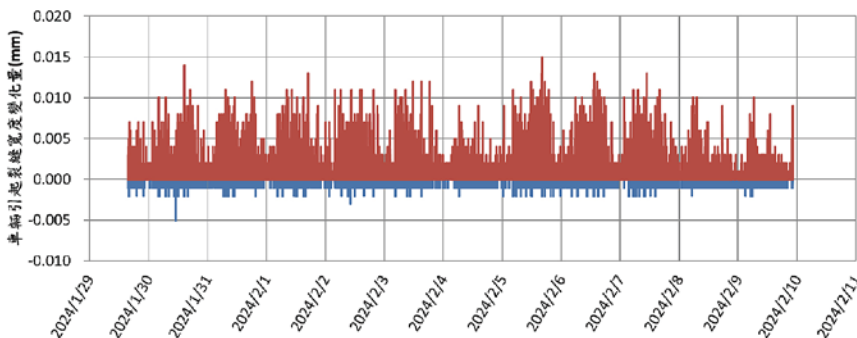


圖 12 消除溫度效應後車輛引起裂縫寬度之變化

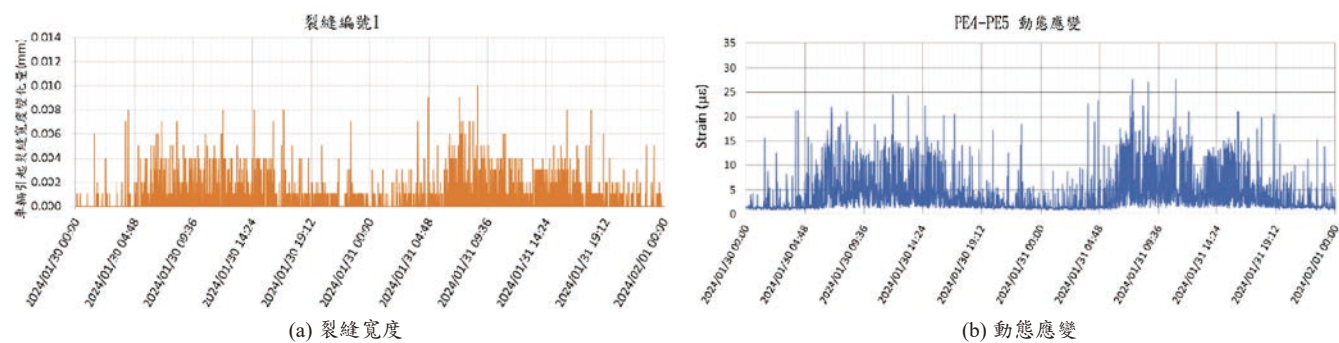


圖 13 車輛引起之裂縫寬度變化與動態應變之比較

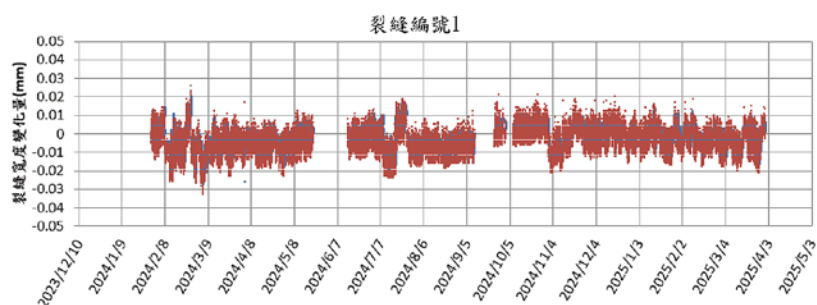


圖 14 裂縫寬度於 2024/1/29 ~ 2025/3/31 之歷時反應

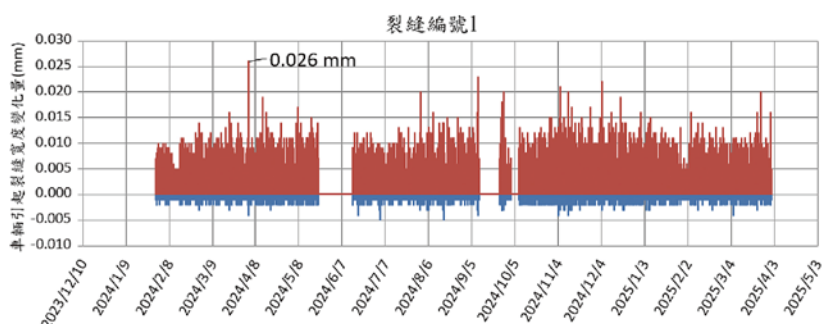


圖 15 車輛引起裂縫寬度變化 (2024/1/29 ~ 2025/3/31)

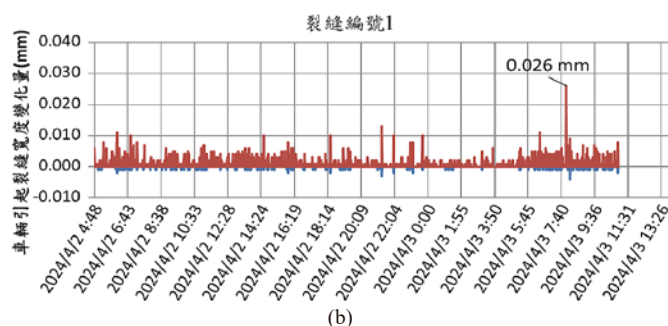
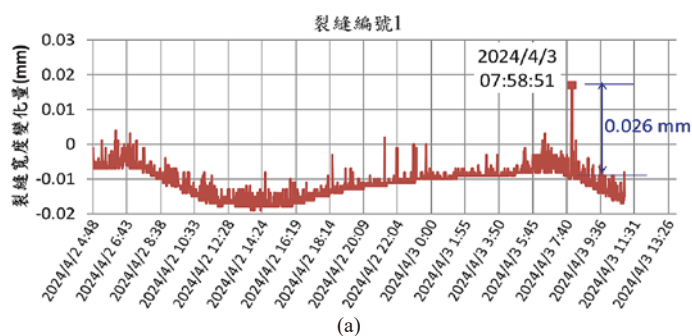


圖 16 地震作用裂縫寬度變化 (2024/4/03)

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, and Liu SC. Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure, Structural Health Monitoring 2003, 2, 257-267.
2. Farrar CR, and 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 infrastruc-

- ture, Phil. Trans. R. Soc. A 2007, 365, 589-622
4. Xia Y, Chen B, Weng S, Ni YQ, and 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., and 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. and 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., and 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.ymssp.2021.108332>.
9. Sigurdardottir, D.H. and Glisic, B. Neutral axis as damage sensitive feature. Smart Mater. Struct. 2013, 22, 075030.
10. Sigurdardottir, D.H. and 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., and 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., and 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>. 



歡迎加入學會



下載入會申請書

網址：<http://www.ciche.org.tw>

e-mail: service@ciche.org.tw

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260

土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以整清版權問題。



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

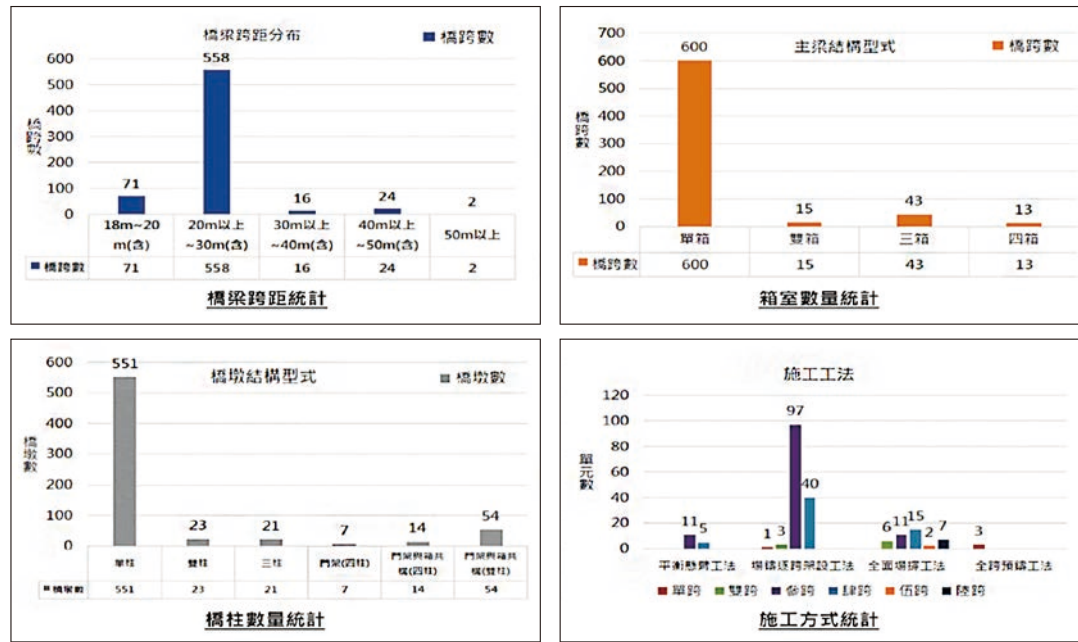


圖 1 臺中鐵路高架橋資料統計圖

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。

- 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%。
- 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

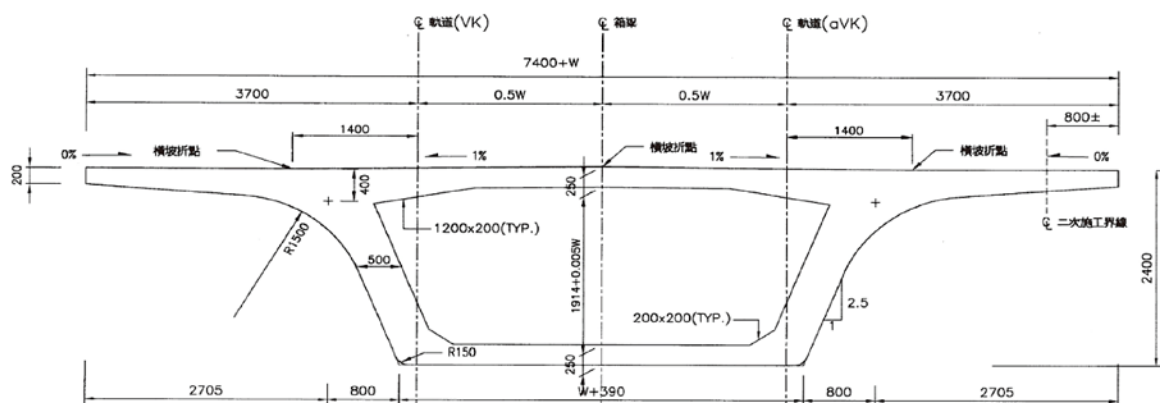


圖 2 臺中鐵路高架橋單箱室標準橫斷面圖

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。

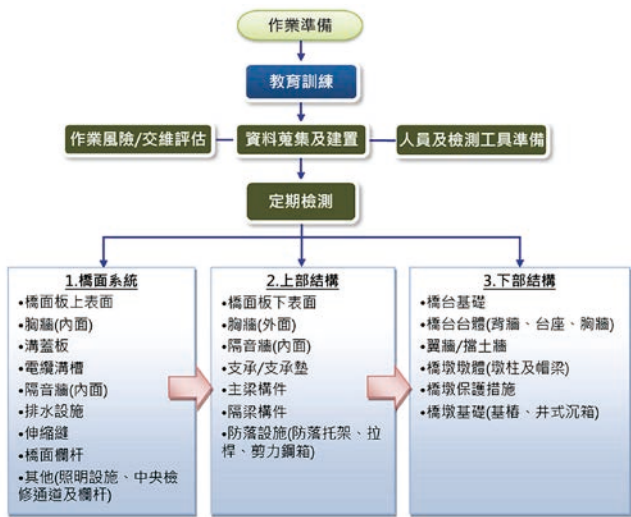


圖 3 檢測作業程序圖

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

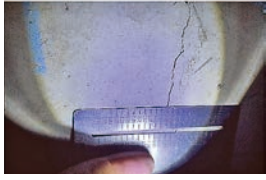
橋梁構件缺失可區分為施工缺失及環境劣化兩類，本計畫整理常見缺失樣態及相應改善對策，詳情如表 4 所示（劣化樣態照片非來自臺中鐵路高架橋案）。

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
鋼筋外露鏽蝕		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 $3 \times 30\text{ m} = 90\text{ m}$ ，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

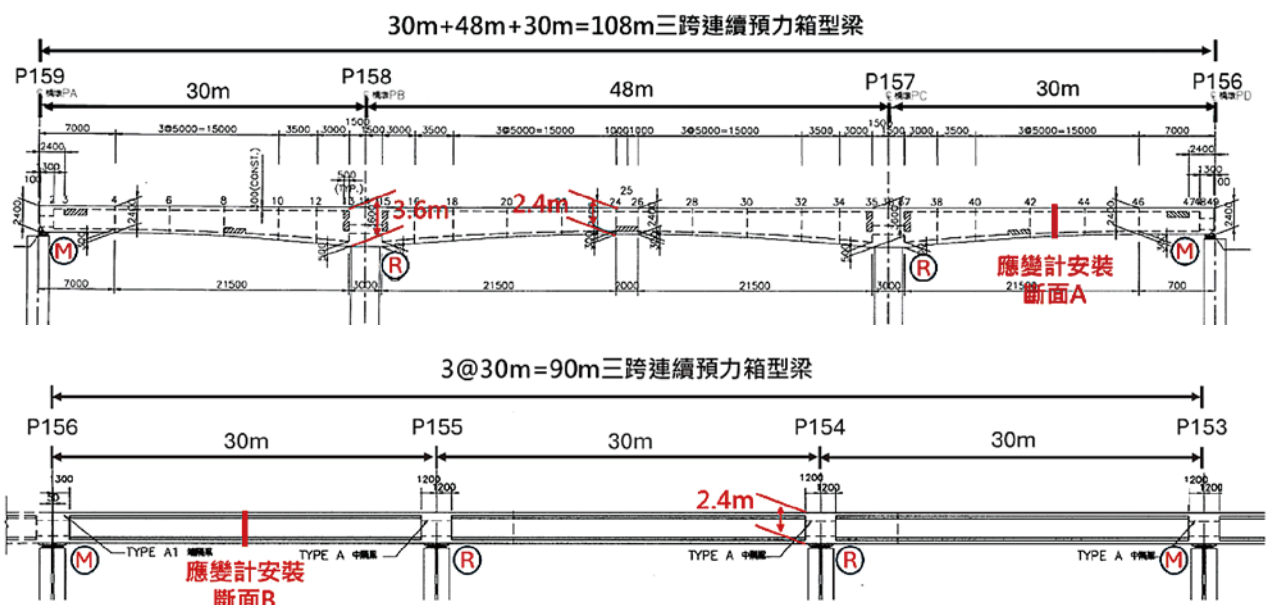


圖 6 安裝監測儀器位置箱梁縱斷面圖

- 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，可同時間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

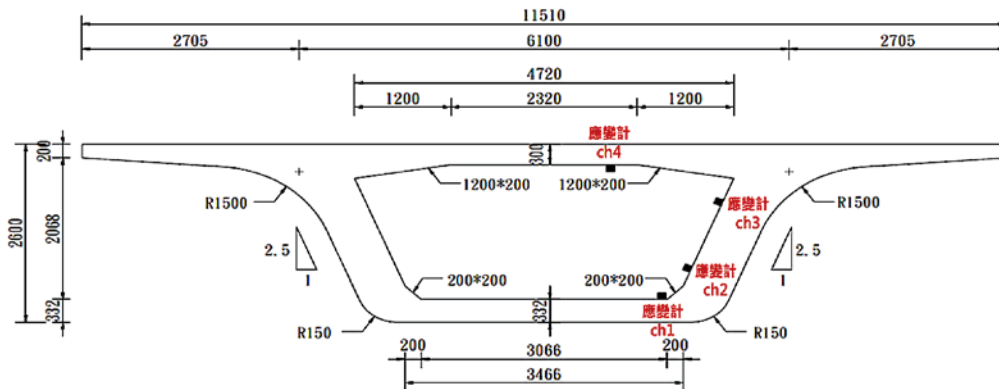


圖 10 應變計位置 A 儀器位置橫斷面圖

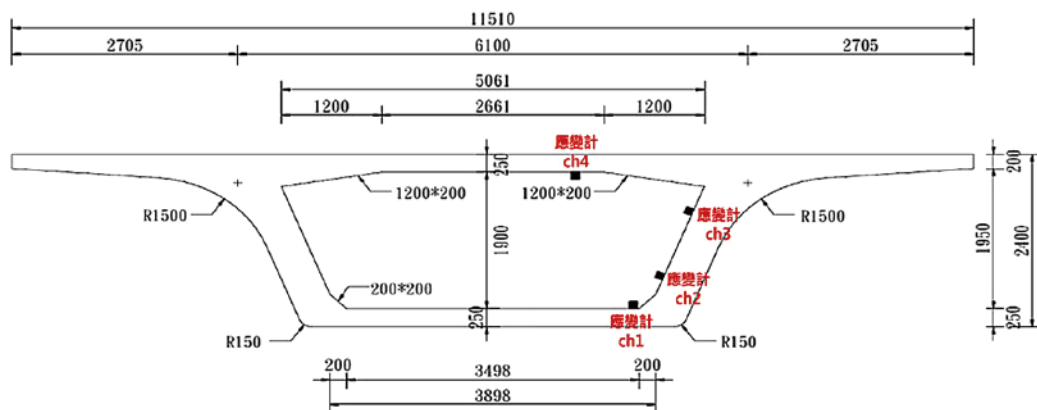


圖 11 應變計位置 B 儀器位置橫斷面圖

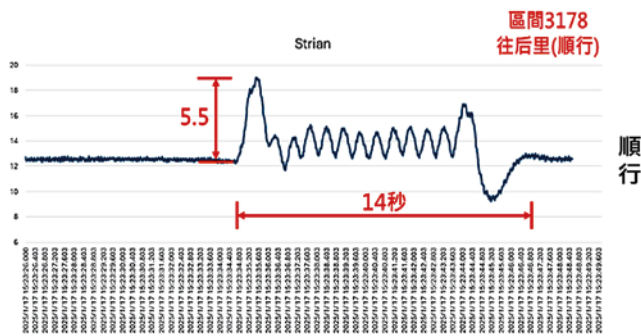


圖 12 區間列車順行向連續波形樣態圖

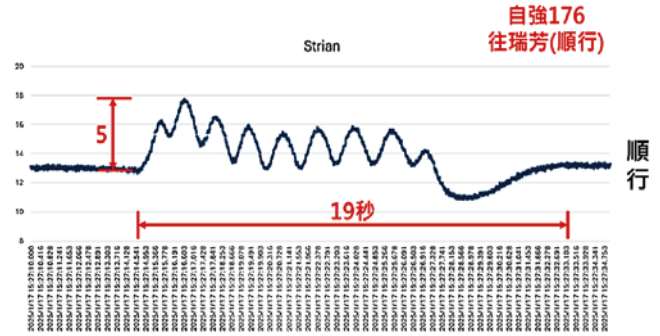


圖 14 自強列車順行向連續波形樣態圖

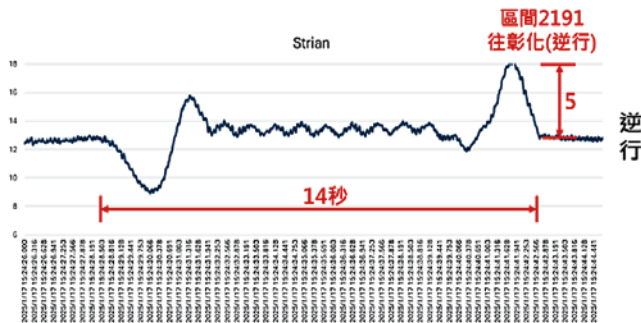


圖 13 區間列車逆行向連續波形樣態圖

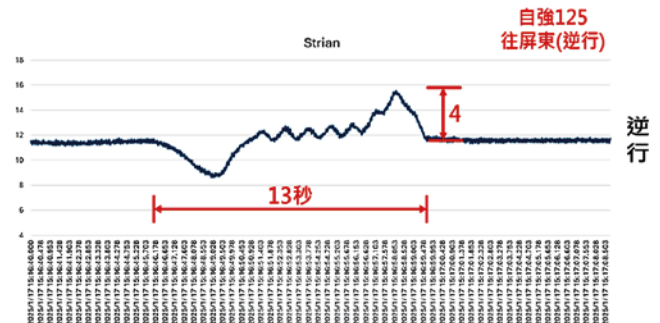


圖 15 自強列車逆行向連續波形樣態圖

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，因此列車引起的應

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

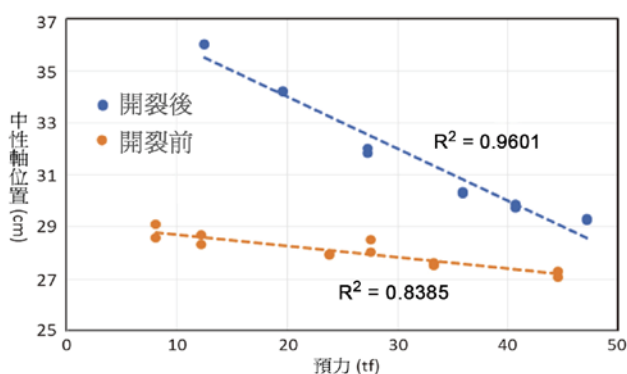


圖 16 中性軸位置與預力及開裂梁之關係

資料來源：林宜清^[4]

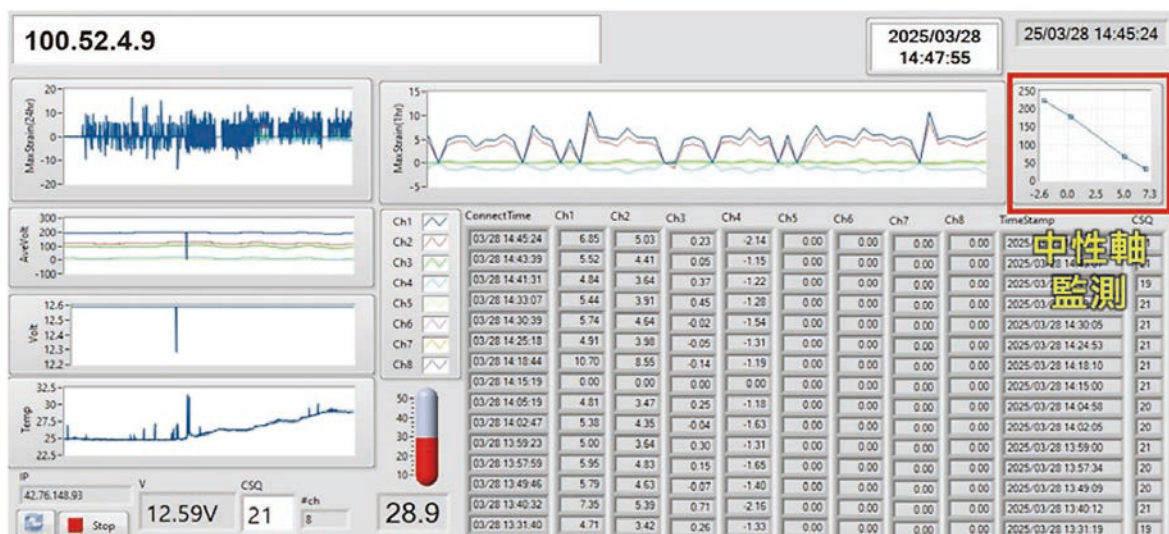


圖 17 應變計位置 A 雲端監測實例圖

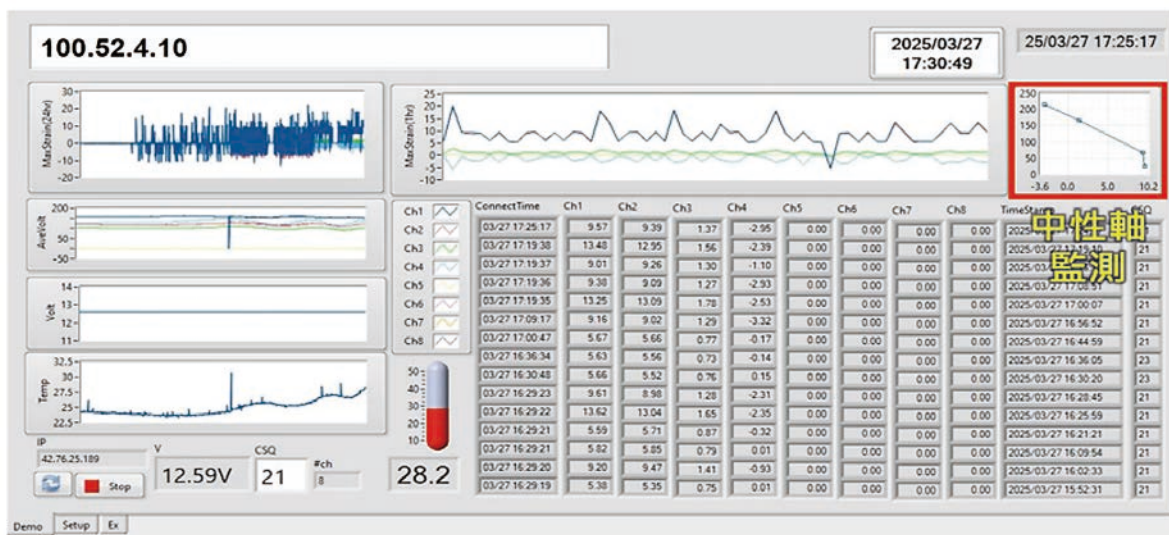


圖 18 應變計位置 B 雲端監測實例圖

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)。



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

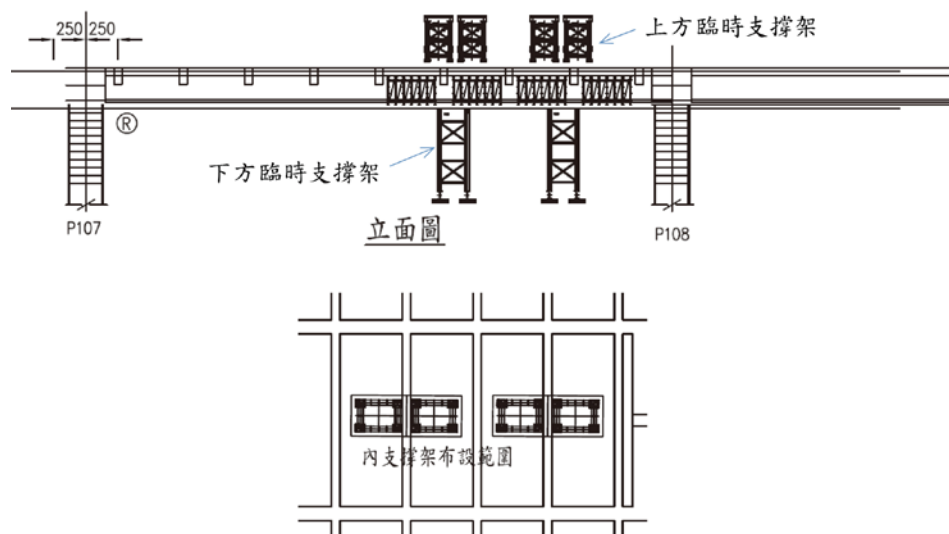


圖 1 吊裝鋼箱梁快速道路箱梁上方、箱梁內部與箱梁下方的臨時支撐架示意圖

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

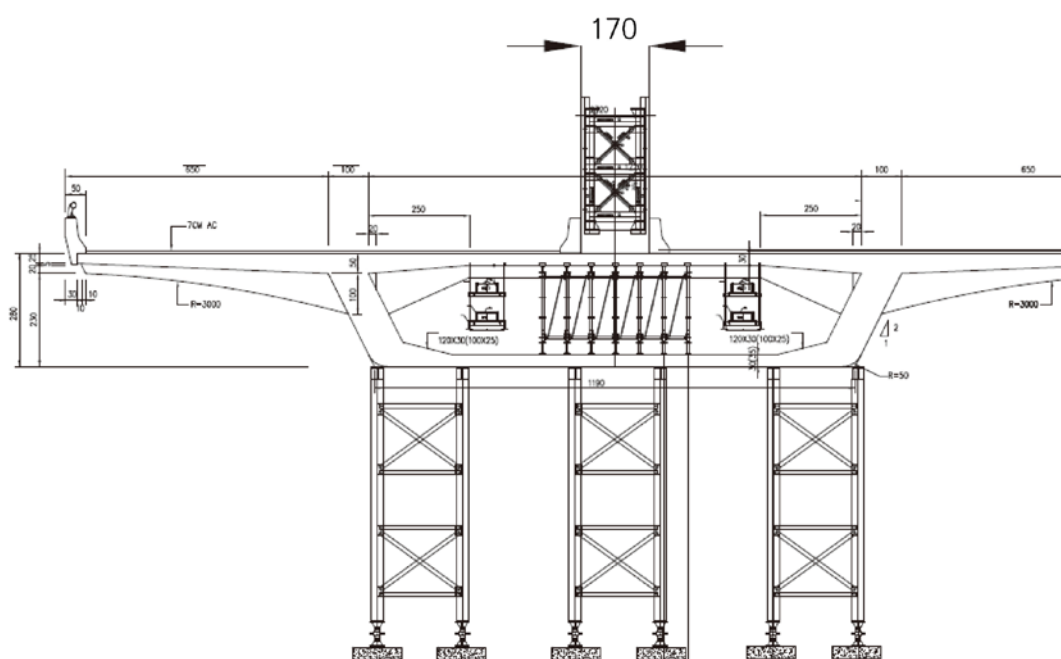


圖 2 既有快速道路混凝土箱形梁的上方、內部與下方臨時支撐架配置之斷面示意圖

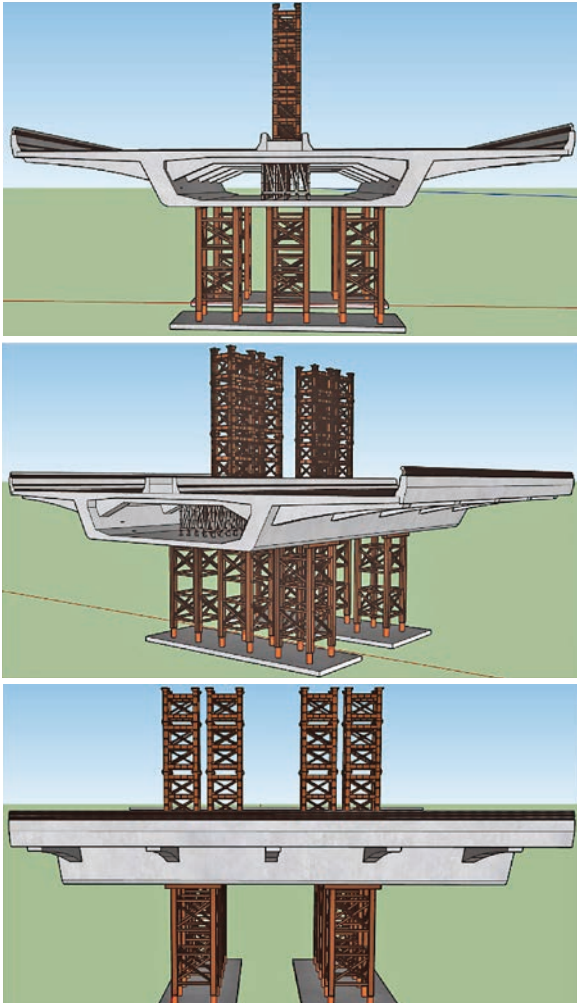
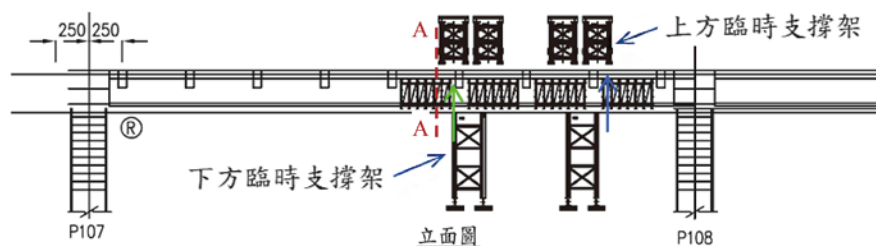


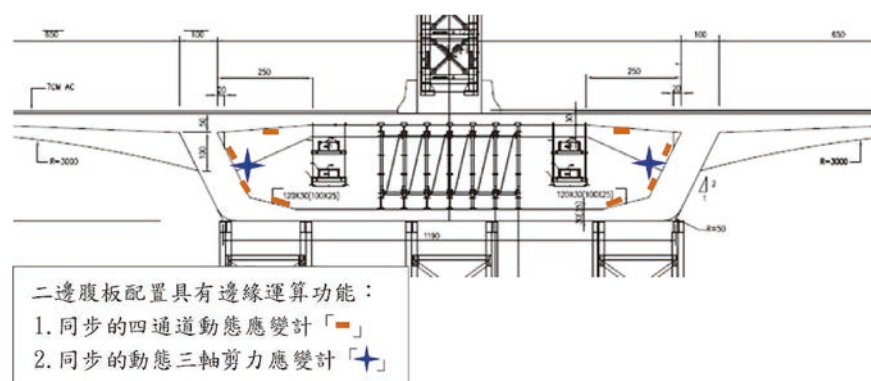
圖 3 既有快速道路混凝土箱梁斷面三維剖面圖

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

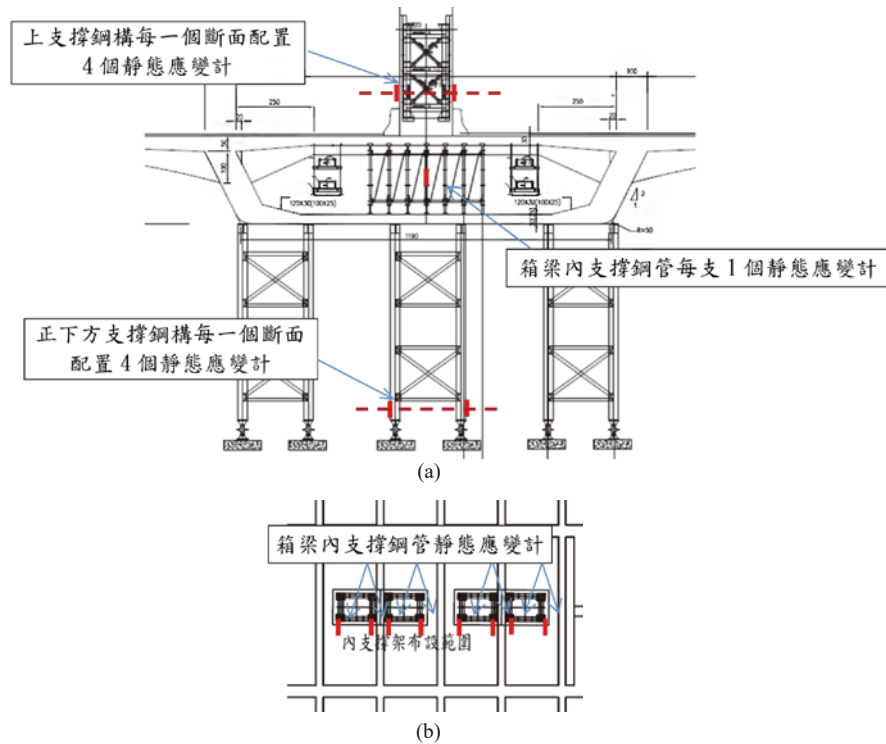


圖 5 既有快速道路混凝土箱形梁的上方、內部與下方臨時支撐架之應變計配置示意圖

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

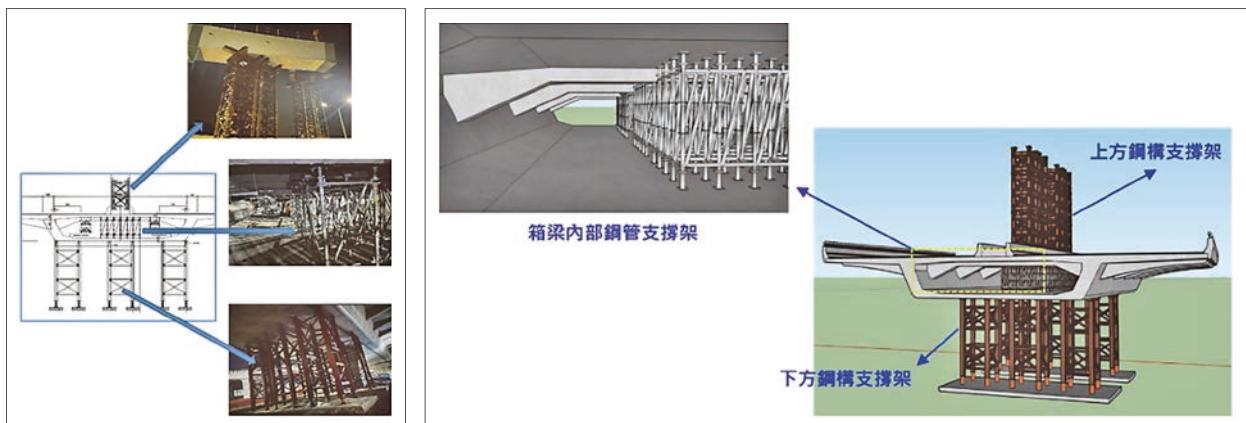


圖 7 鋼箱梁吊裝現地監測作業監測區域圖

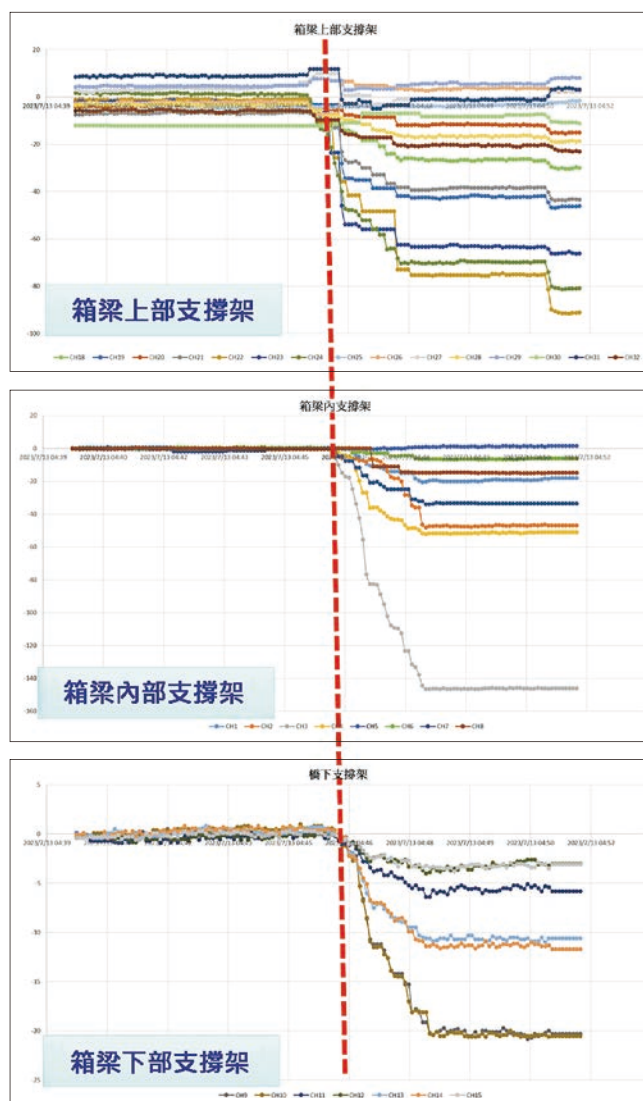


圖 8 鋼箱梁吊裝應變計應變歷時曲線

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，施工時額外加载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

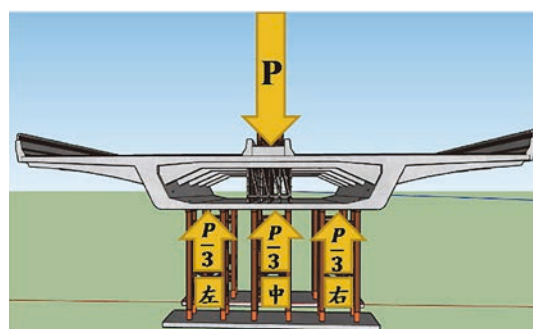


圖 10 臨時支撐架受力傳遞示意圖

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。

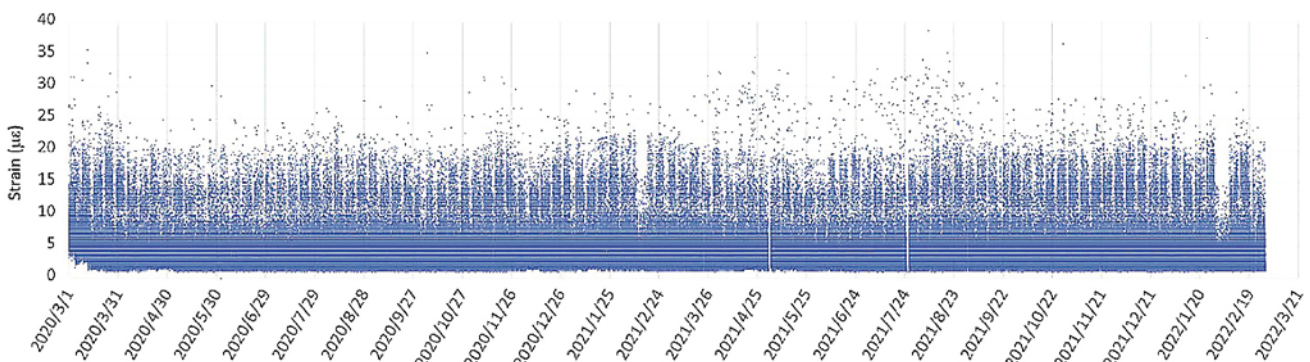


圖 11 某橋跨將近二年之動態應變監測結果

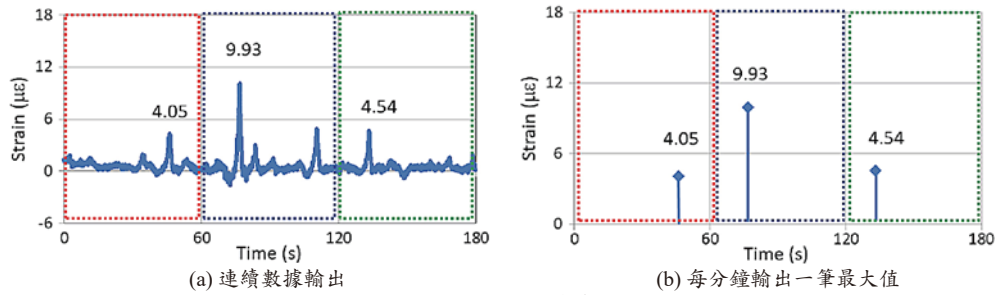


圖 12 橋梁的動態應變

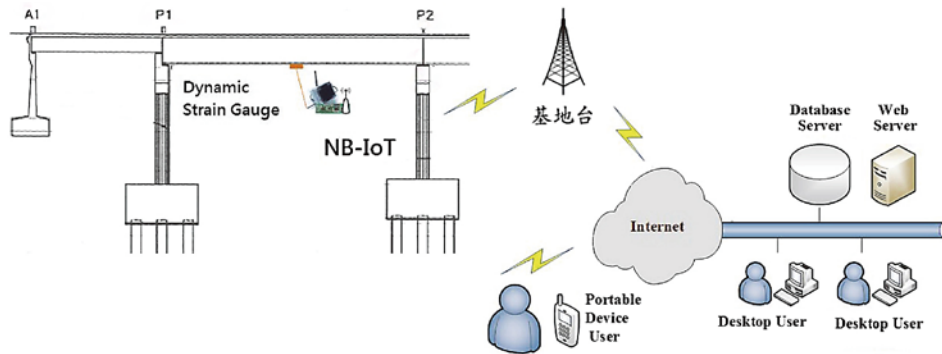


圖 13 NB-IoT 無線動態應變計監測架構示意圖

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

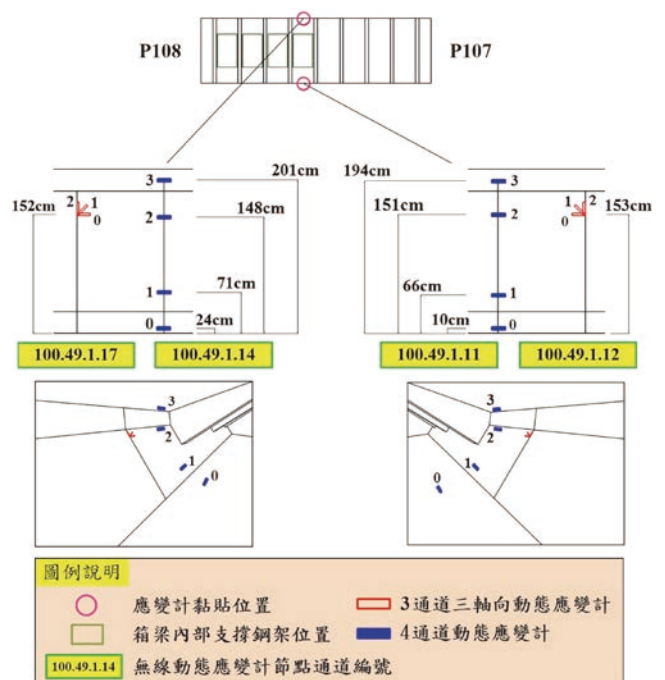


圖 14 無線動態應變計安裝位置示意圖

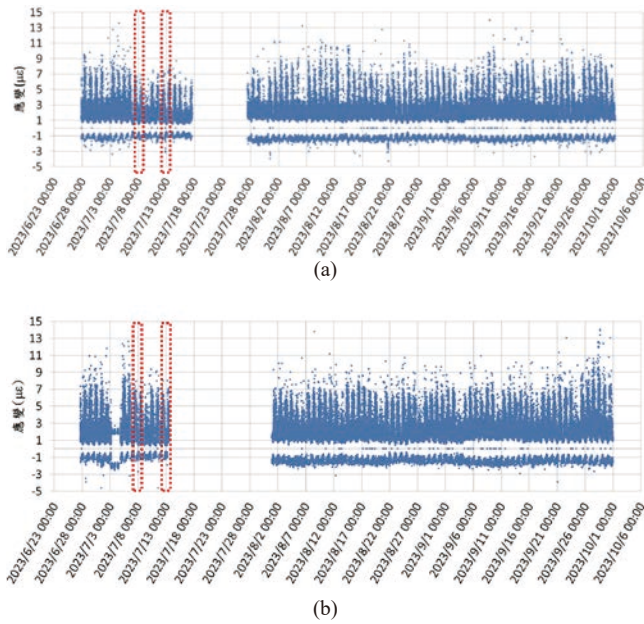


圖 15 無線動態應變計箱梁監測撓曲反應時間歷時圖

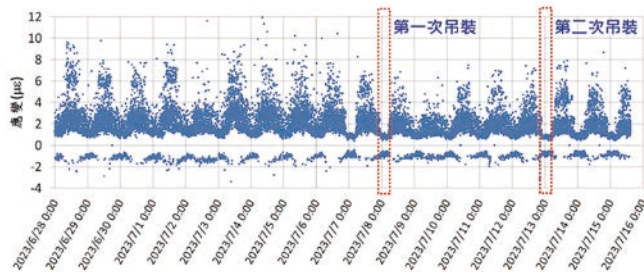
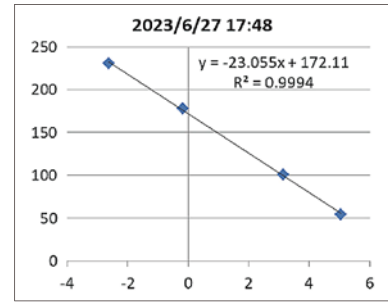


圖 16 無線動態應變計箱梁監測撓曲反應時間歷時圖

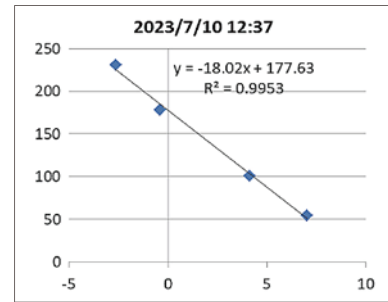
輛中重量不一，其應變反應隨著通行車輛之重量差異有不同程度之變化，二次吊裝期間由於為交通封閉狀況，所以其應變值變化就相對變低，在鋼箱梁吊裝作業完成後，可看出撓曲反應又會恢復到平時通車反應，二次鋼梁吊裝前後，車輛通行引起之撓曲應變反應無明顯改變，顯示既有箱梁沒有受到吊裝作業影響。

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

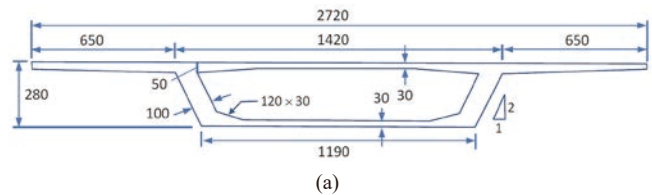


(a)

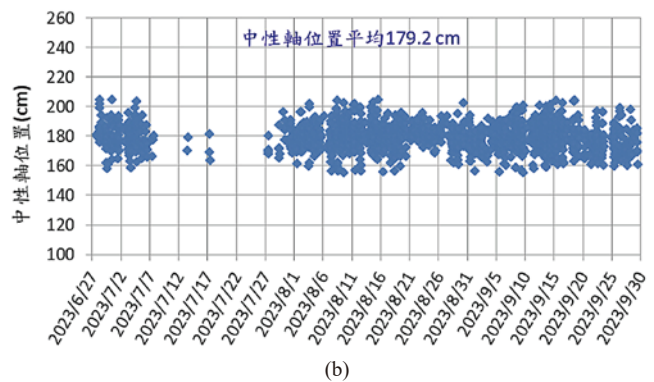


(b)

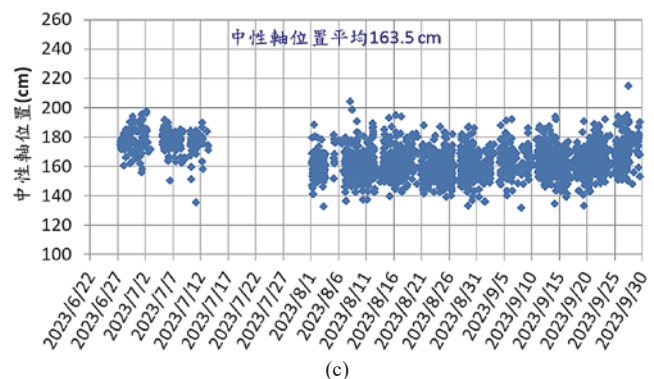
圖 17 多通道動態應變計監測箱梁斷面中性軸位置迴歸分析範例



(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。

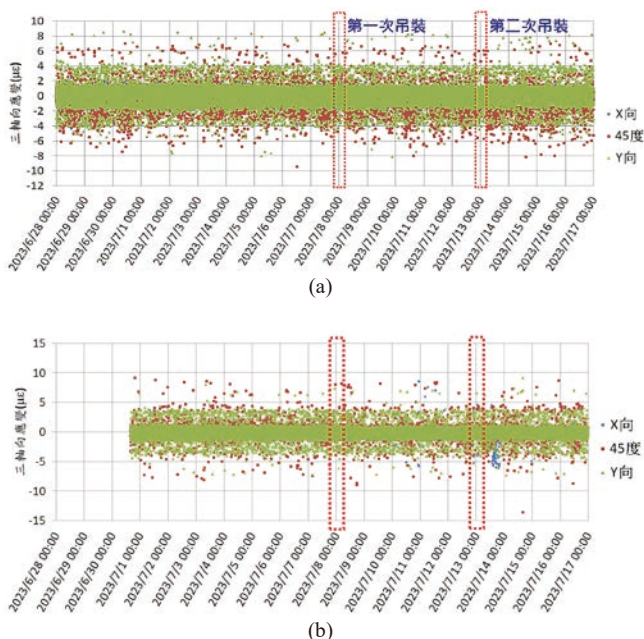


圖 19 無線動態應變計箱梁監測剪力三軸應變反應歷時圖

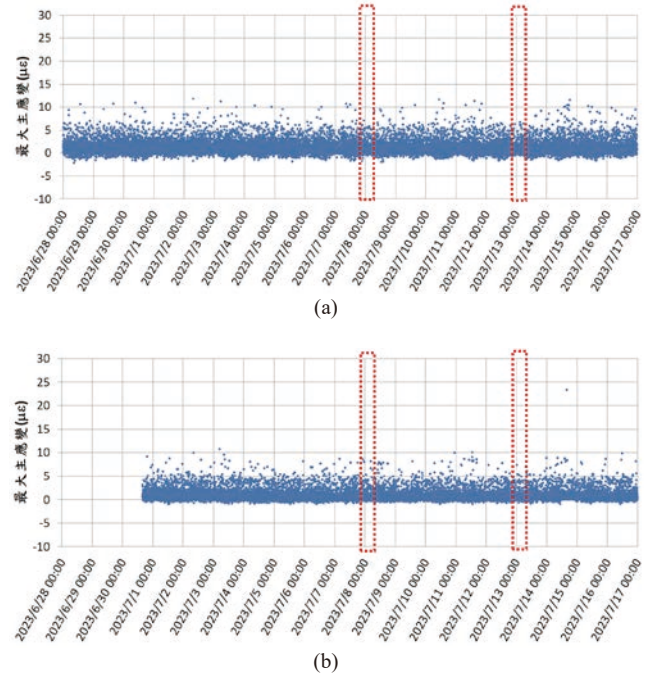


圖 20 無線動態應變計箱梁監測剪力最大主應變反應歷時圖

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

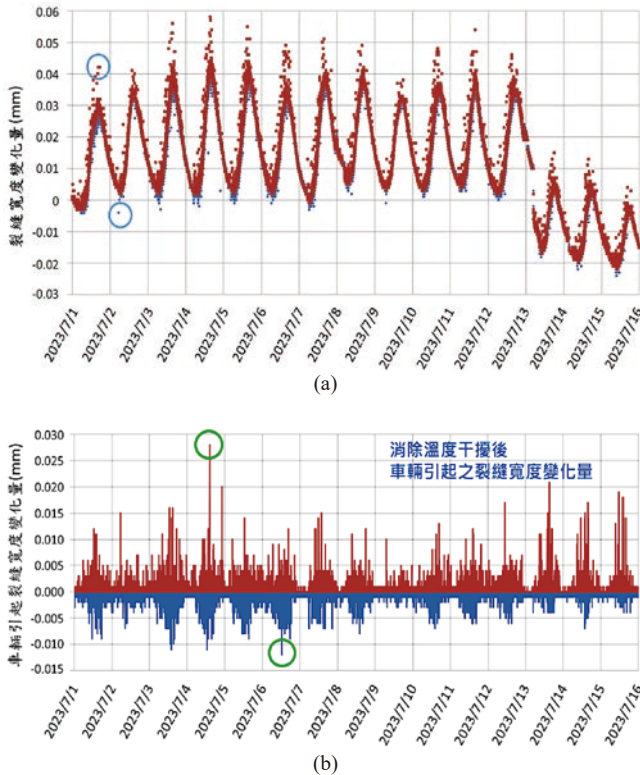


圖 21 箱梁既有裂縫動態位移計監測訊號圖

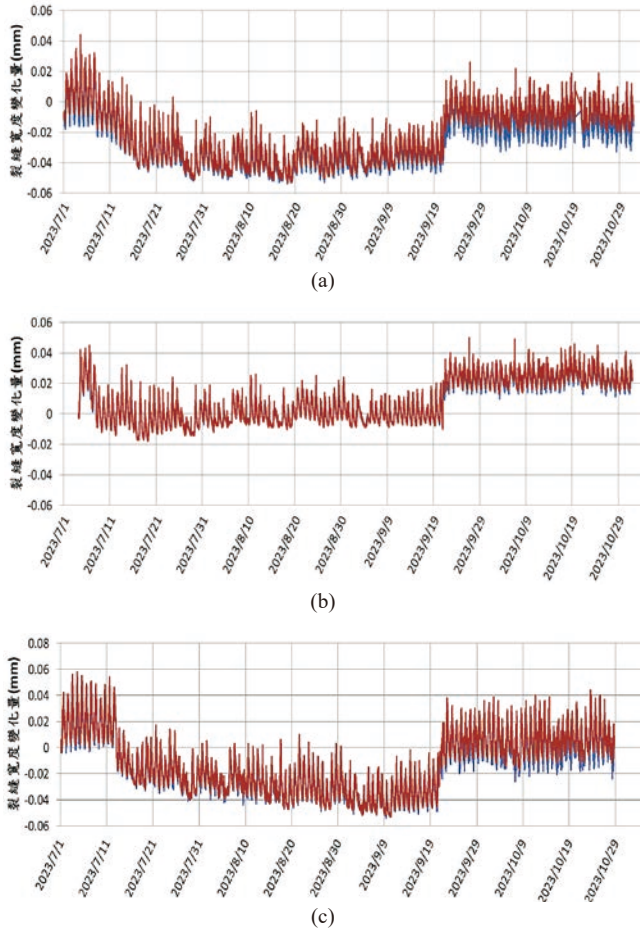


圖 22 箱梁既有裂縫動態位移計長時間監測訊號圖

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。

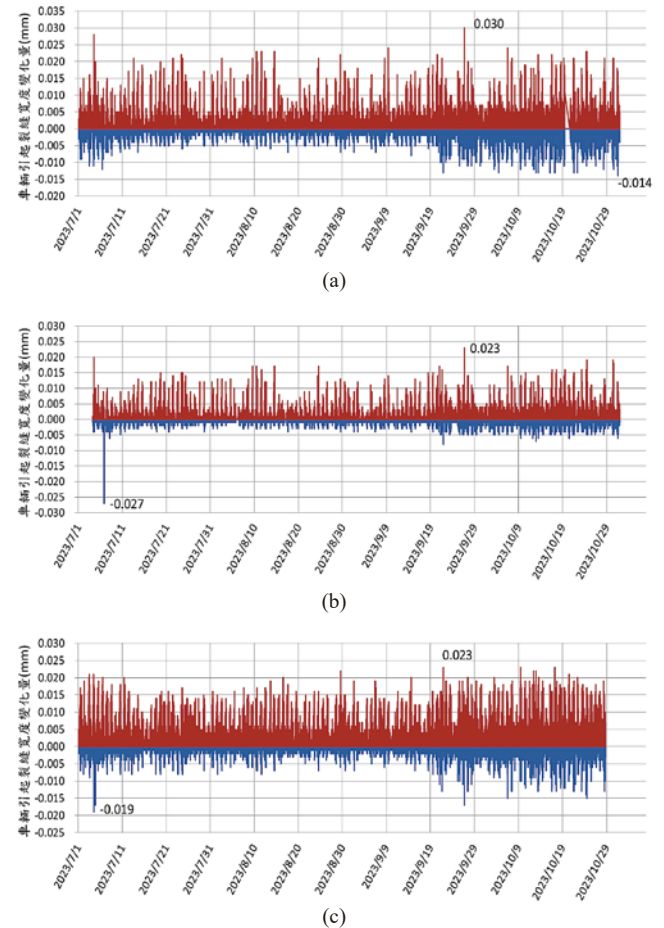


圖 23 車輛通過引起箱梁既有裂縫寬度變化之歷時

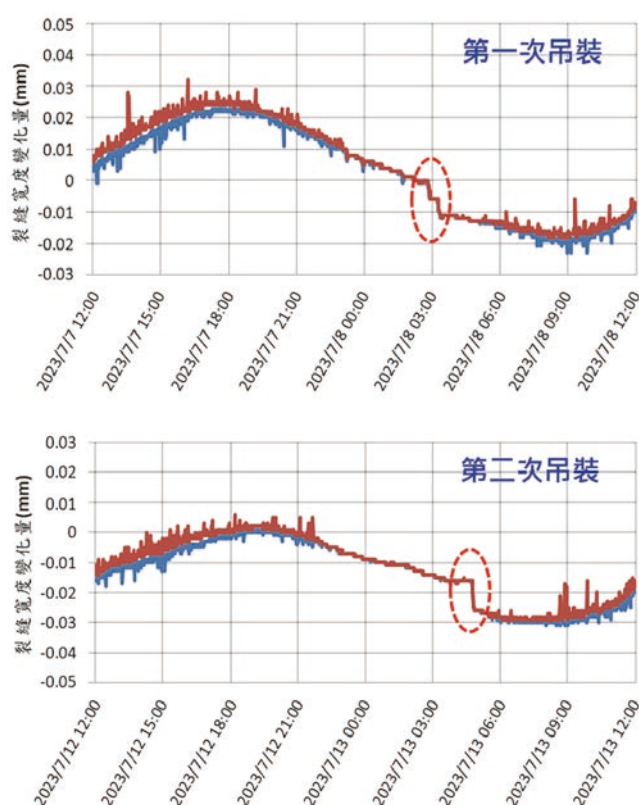


圖 24 箱梁既有裂縫動態位移計吊裝過程歷時曲線

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检测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. 



人工智慧橋梁檢測車之 研發與應用

李坤哲* / 黎明工程顧問股份有限公司 副總經理

傅立祥 / 交通部公路局中區養護工程分局 分局長

郭清水 / 交通部公路局雲嘉南區養護工程分局 分局長

黃志杰 / 黎明工程顧問股份有限公司 主任

曾蕙如 / 工業技術研究院 經理

臺灣橋梁正逐漸面臨高齡化問題，應及早發現橋梁結構劣化，進行維修補強，以延長橋梁使用年限。依據交通部頒佈之「公路橋梁檢測及補強規範」，橋梁定期檢測方式以直接目視或間接目視檢測為主，然檢測人員於橋面徒步作業時，經風險評估屬車輛撞擊之極高風險等級，即使依規定佈設交維設施，相關橋面施工之職安事故仍時有所聞。本研究開發 AI 智慧橋梁檢測車，結合車載影像擷取系統與 AI 影像辨識技術，並針對角鋼及齒型伸縮縫等稀缺劣化樣本同時進行 AI 生成擴增及實體模擬。AI 智慧橋梁檢測車作業時 1 名檢測員駕駛車輛，另 1 名負責操作 AI 影像擷取辨識系統，以時速 40~80 公里行車方式辦理橋面構件檢測，達到橋梁檢測全自動化，可提升橋檢效率及安全性並大幅降低影響交通程度。

前言

橋面檢測作業面臨之風險及困難

臺灣有近 2 萬 3 仟座車行橋梁，其中橋齡逾 30 年之數量超過 3 成，若未能及時檢測與維護，可能導致橋梁功能下降，甚至發生安全事故。

交通部頒佈之「公路橋梁檢測及補強規範」為我國橋梁檢測之重要依據，其規定定期檢測構件包含：伸縮縫、橋護欄、排水設施、主梁、橫隔梁、橋面板、支承、防落設施、橋台、橋台基礎、橋墩墩體、橋墩基礎、翼牆 / 擋土牆、河道、引道路堤、引道路堤保護設施、引道護欄、橋墩 / 橋基保護設施及其他附屬設施等總共 19 項目。

另規定：「定期檢測方式採直接目視或間接目視檢測為主，檢測人員以徒步儘可能接近檢測構件，必要時搭乘輔助載具，或使用其他觀測、量測設備取得相關資訊，判斷構件是否有劣化或異常情況」。檢測人員在辦理伸縮縫、橋護欄及排水設施等 3 項檢測時，目前是以徒步沿橋梁路肩進行目視檢測及量測（圖 1），此種檢測方式存在以下風險與困難：

檢測人員作業風險高

由於橋面檢測作業緊鄰車道，檢測人員易遭受行駛車輛撞擊。尤其高速公路及快速公路交通量大且車速快，以及山區道路狹窄蜿蜒，駕駛應變視距短時，經分析風險發生之「可能性」及風險後果之「嚴重度」，屬極高風險等級。

近年來，車輛先進輔助駕駛系統（Advanced Driver Assistance Systems, ADAS）逐漸普及，加上部分駕駛

* 通訊作者，Kenny@li-mi.com.tw

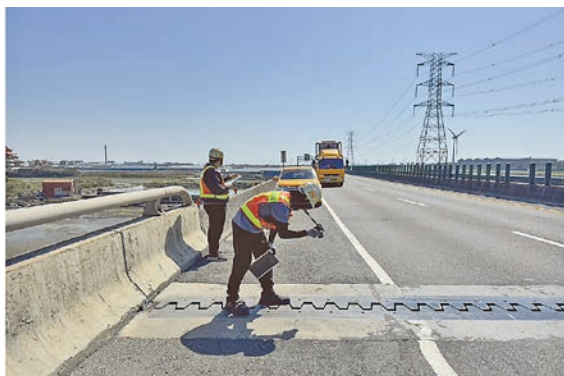


圖 1 橋面徒步檢測作業及交維設施

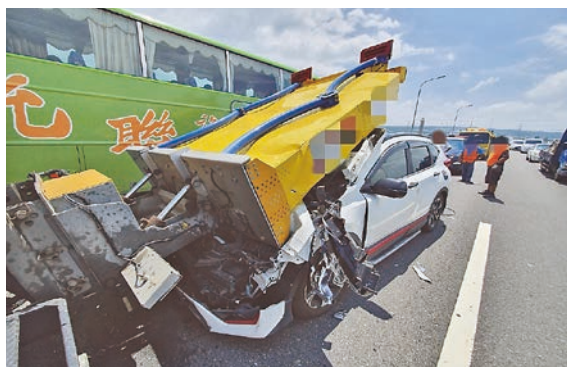


圖 2 施工車輛追撞事故

過度依賴其功能，導致路面施工人員、車輛等遭撞事故數量連年攀升。依據國家運輸安全調查委員會「112 年度運輸安全改善建議評估報告」，統計 110～112 年期間國道施工車輛遭撞事故共計 321 件，平均每 4 天就有 1 起事故發生（圖 2）。

交通維持作業影響交通順暢

為保障檢測人員人身安全，進行橋面檢測時需事先於橋梁路肩或外車道佈設相關交通維持設施，此措施雖可保障檢測人員安全，但同時亦會對交通流量造成影響，導致交通阻塞，並增加檢測作業成本。

檢測效率受限

傳統人工檢測方式效率相對較低，且移動性施工車隊移動速度緩慢，難以快速且全面的完成大範圍橋梁檢測作業。

降低橋面檢測風險之交通措施

為降低檢測人員於橋面檢測之作業風險，公路主管機關已採取多項措施，如：

緩撞車導入

交通部高速公路局從 109 年開始導入國外盛行的



圖 3 LED 標誌緩撞拖車

「緩撞車」（圖 3），預防路面工程人員作業時直接遭受後車撞擊，佈設於施工車隊最後面作為第一道防線，在工程隊伍不慎被駕駛撞上時，避免引發重大傷亡。

訂定交通管制規範

交通部公路局為維護快速公路施工時用路人行車及工作人員作業之安全，訂定「快速公路施工交通管制手冊」。於快速公路辦理橋梁檢測作業時，以外側路肩移動施工為原則，於工作隊伍之前設置 LED 標誌警示車及 LED 標誌緩撞拖車（圖 4），並於施工前通知警廣及登載施工資訊於公路交通資訊顯示板（CMS）（圖 5）。



圖 4 快速公路移動施工配置



圖 5 CMS 施工交通資訊

加強車流分析與監控

台 61 線西濱快速公路縱貫全台西部沿海，其中區及雲嘉南區路段行經台中港、彰濱及麥寮等工業區，交通量大且重車比例高。交通部公路局要求施工車輛裝載行車影像即時傳輸及 GPS 定位設備，由監看人員即時掌握車距及行車動態，以降低快速公路重車事故發生機率及嚴重程度（圖 6）。



圖 6 快速公路施工車隊監控

人工智慧應用於橋梁檢測相關研究

交通部公路局、交通部公路局中區養護工程分局與黎明公司合作研發 AI 無人機智慧橋梁檢測系統，112 年起已實際應用於 14 座橋梁之跨河段之現地檢測，以無人機搭配人工智慧（Artificial Intelligence, 以下簡稱 AI）自動偵測橋梁劣化構件並完成劣化評等（圖 7）^[1,2]，研究成果影片請參考下方連結及 QR code。

https://www.limi.com.tw/project_13_30.aspx

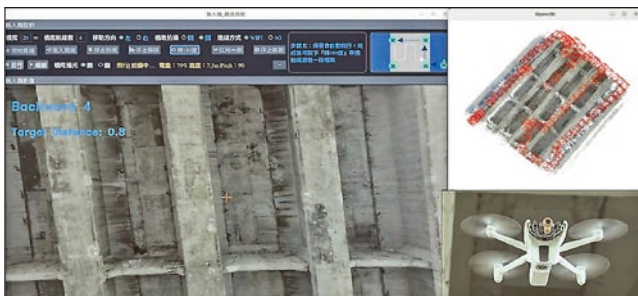


圖 7 AI 無人機智慧橋梁檢測作業

問題及對策

依據交通部民用航空局「遙控無人機管理規則」第 28 條規定：「操作人從事遙控無人機飛航活動時應遠離高速公路、快速公（道）路、鐵路、高架鐵路、地面或高架之大眾捷運系統、建築物及障礙物三十公尺以上」，為避免無人機於橋面檢測因飛安事故造成路人車傷亡，故不能於高速公路、快速公路上方使用無人機辦理橋面構件檢測。

為解決上述橋面檢測作業風險及困難，本研究以車行方式取代傳統徒步方式檢測作業，透過車載影像擷取系統與 AI 影像辨識技術進行橋面系統構件劣化偵測。

人工智慧橋梁檢測車檢測標的

本研究開發之人工智慧橋梁檢測車，旨在取代傳統檢測人員徒步直接目視檢測之【橋護欄】、【排水設施】及【伸縮縫】等 3 項橋面構件。因 AI 影像辨識技術主要係透過影像進行深度學習與劣化偵測分析，故本研究自「公路橋梁檢測補強規範」之橋面構件劣化評等表中，篩選常見且可透過影像辨識之劣化類型作為主要檢測標的。例如：

1. 橋護欄：「混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、鏽蝕」、「螺栓損傷、欠缺或鬆動或護欄脫落」、「生鏽或腐蝕」、「護欄損傷」（圖 8）。
2. 排水設施：「排水設施阻塞或功能性降低」、「排水設施損傷」（圖 9）。
3. 伸縮縫：「伸縮縫間雜物堆積」、「伸縮縫間隙異常」、「高低差」、「伸縮縫裝置損傷」（圖 10）。



圖 8 橋護欄檢測標的



圖 9 排水設施檢測標的

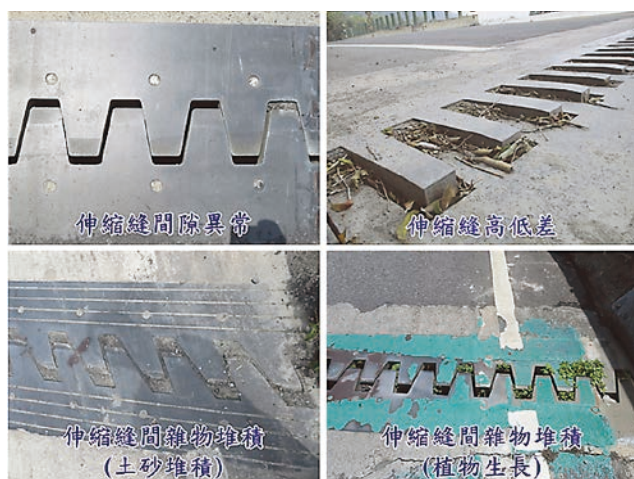


圖 10 伸縮縫檢測標的

檢測車設計與檢測流程

本研究以車行方式拍攝橋面構件影像，開發檢測車裝載 5 組攝影鏡頭，分別安裝於車頭前方、車頂左右兩側、車尾垂直向下，以及車尾仰角 30 度等位置，其中車頭及車尾鏡頭負責拍攝記錄「伸縮縫」影像，左右側鏡頭負責拍攝記錄「橋護欄」及「排水設施」影像（圖 11）。

檢測車後座左側設置 GPS 模組及電腦主機，於進行橋面車行檢測時，電腦主機將同步擷取多鏡頭影像及拍攝位置資訊，並透過 AI 進行劣化偵測，即時呈現於螢幕上供車上後座右側之檢測人員檢視（圖 12 和圖 13）。檢測結束後系統將自動彙整劣化偵測結果，整合每個劣化影像及位置於 KMZ 檔案，檢測人員可使用 Google Earth 程式瀏覽橋梁劣化位置及影像，快速掌握橋梁狀況（圖 14 和圖 15）。



圖 11 車載攝影鏡頭配置圖



圖 12 車上影像擷取辨識系統

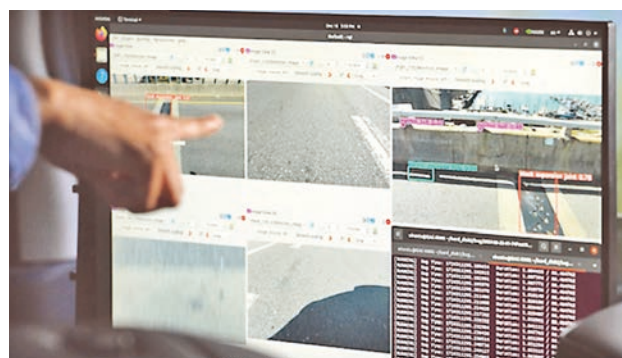


圖 13 車行檢測即時偵測畫面

為將檢測車導入快速公路及高速公路，本研究以高速公路中線車道最低速限 80 公里為目標，於 113 年完成攝影鏡頭及電腦硬體更新整測，相機快門種類由滾動式快門（rolling shutter）更新為適合高速拍攝之全局快門（global shutter），幀率（Frame Per Second, FPS）由每秒拍攝 30 幀提升為 45 幀，檢測車若以時速 80 公里速度進行拍攝時，每 0.49 公尺擷取 1 幀影像，影像重疊率達 50% [3]。

AI 影像深度學習

為訓練 AI 模型使其具備自動化檢測橋面構件劣化之能力，本研究針對橋護欄、排水設施及伸縮縫等構件，先蒐集前述檢測標的之劣化類型影像共計 46,561 張，再由人工標記劣化範圍建立影像資料庫，作為 AI 深度學習之基礎。

本研究劣化偵測模型採用 YOLOv8s，起初採用平面道路橋梁蒐集的劣化標記資料，並導入官方權重（official weight）建立預訓練模型（pretrain model），經實際場域驗證其偵測能力符合檢測需求後，導入快速公路路段（如：台 61 線、台 72 線、台 74 線等）之劣化標記影像進行偵測模型微調，加強偵測模型針對快速公路構件型式之偵測效果（圖 16）[4]。

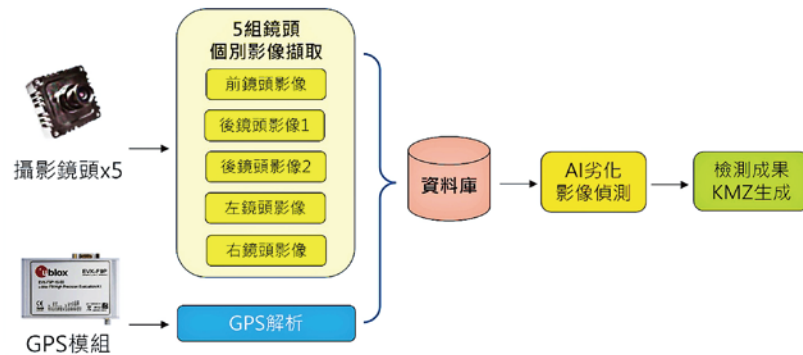


圖 14 AI 橋梁檢測車檢測流程

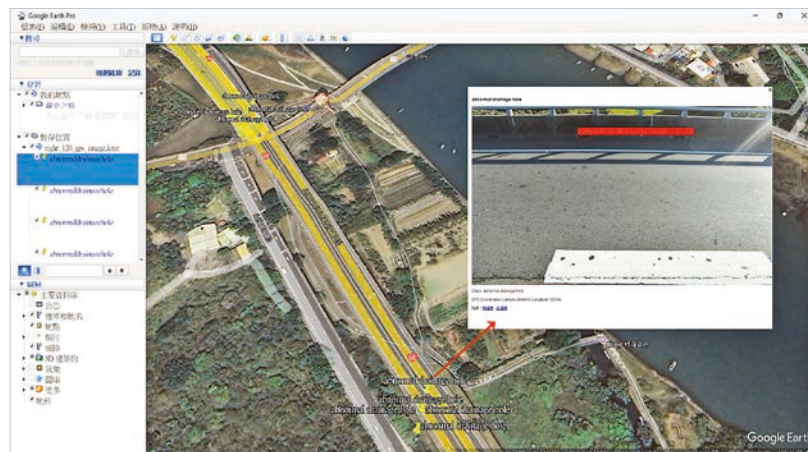


圖 15 Google Earth 瀏覽檢測成果

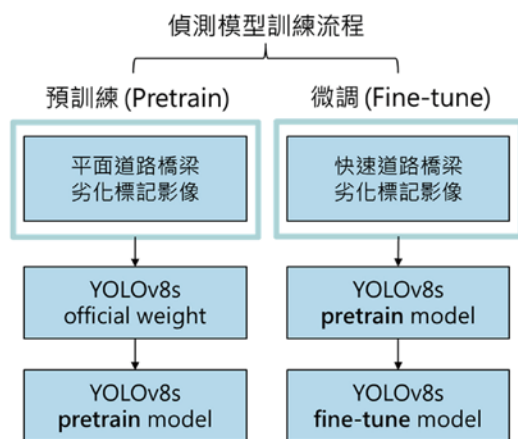


圖 16 偵測模型訓練流程

稀缺樣本擴增

本研究蒐集劣化影像時發現伸縮縫「間隙異常」及「高低差」兩種劣化類型樣本數量相對稀缺，訓練資料不足會導致偵測模型難以有效學習異常伸縮縫之特徵，進而影響偵測模型對劣化構件的檢測能力。本研究同時以生成式 AI 及實體伸縮縫模型模擬劣化情境，增加可投入模型訓練之劣化樣本，說明如下：

生成式 AI 擴增訓練樣本

因橋梁現地可蒐集之劣化影像數量有限，為有效增加訓練樣本數量，本研究採用 ControlNet 生成式 AI 生成高品質之伸縮縫「間隙異常」劣化樣本。

ControlNet 是一種能夠依照特定條件生成圖片的技術，其運作方式是在原本的 Stable Diffusion 模型裡加上一個可以「控制」影像生成的機制，使 AI 在產生圖片時不只是隨機創作，而是能夠參考輸入的條件，確保生成影像與原始結構相似，並可依照使用者需求調整細節，使生成之圖片既真實又符合特定要求。因此，在本研究中利用 ControlNet 的這項特性，控制橋梁伸縮縫的結構特徵，產生具有劣化特徵且高品質樣本，強化檢測分析（圖 17）。

實體伸縮縫模型擴增訓練樣本

為擴增伸縮縫劣化樣本數量，本研究使用實體角鋼及齒型伸縮縫模型，模擬「間隙異常」及「高低差」劣化類型進行拍攝，大幅增加不同劣化程度樣本供模型深度學習（圖 18 和圖 19）。

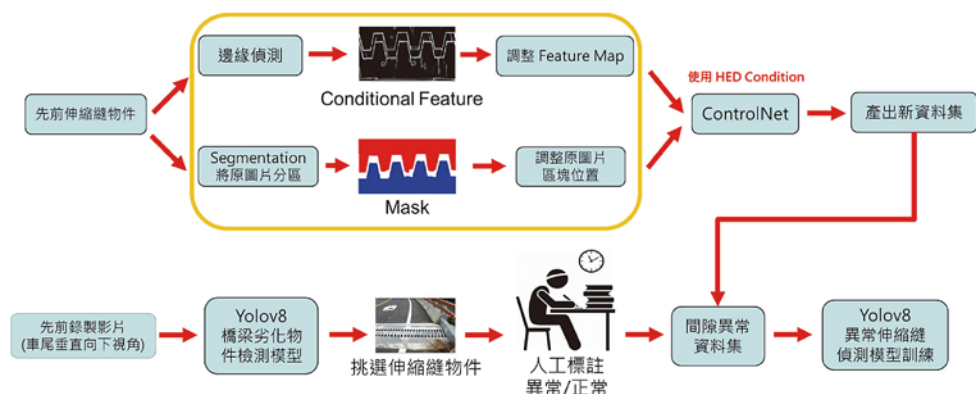


圖 17 導入 ControlNet 進行模組訓練流程



圖 18 實體角鋼伸縮縫劣化樣本蒐集



圖 19 齒型伸縮縫模型劣化樣本蒐集

劣化情境模擬係依據實際橋檢人員於橋梁現地檢測劣化構件之標準進行樣本蒐集，伸縮縫「高低差」劣化樣本自 10 mm 開始，每次增加 5 mm 直至嚴重高低差且影響行車安全程度。伸縮縫「間隙異常」則模擬兩側伸縮縫接觸閉塞，無足夠伸縮量之情形，其中齒型伸縮縫又分為側向及縱向閉合兩種劣化類型（圖 20 和圖 21）。

研究成果

AI 劣化偵測成果

本研究依據前述列出的主要檢測標的進行偵測模型訓練，為驗證 AI 橋梁檢測車於現地環境偵測準確率，實際於台 16 線、台 18 線及台 61 線、台 72 線、台 74 線等快速公路進行場域驗證，「橋護欄脫落」及「排水設施」



圖 20 實體角鋼伸縮縫劣化情境模擬

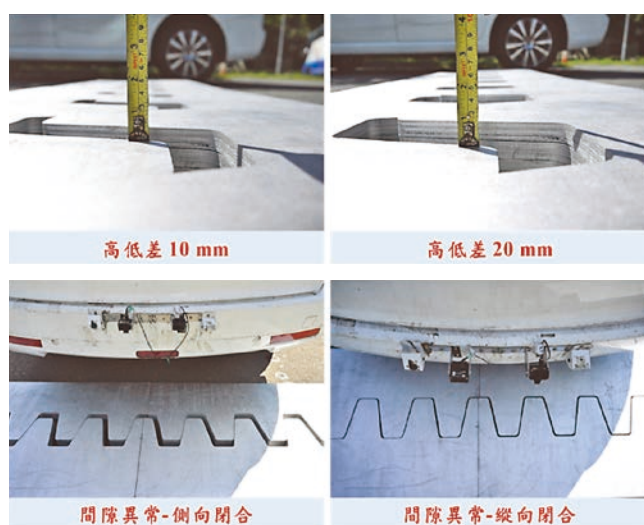


圖 21 齒型伸縮縫模型劣化情境模擬

等劣化偵測準確度可達 77.9% 以上；「伸縮縫」劣化偵測準確度可達 61.1% 以上（表 1）（圖 22 至圖 24）。

表 1 主要檢測標的 AI 偵測準確度

偵測構件	偵測類型	準確度
橋護欄	正常螺栓	95.2%
	混凝土剝落、鋼筋外露	93.7%
	護欄基座螺栓生鏽	100.0%
	鋼管護欄生鏽	77.9%
	橋護欄脫落	89.6%
排水設施	正常排水設施	92.9%
	排水設施阻塞	91.0%
伸縮縫	正常伸縮縫	96.5%
	伸縮縫間雜物堆積	92.4%
	間隙異常	72.0%
	高低差	61.1%

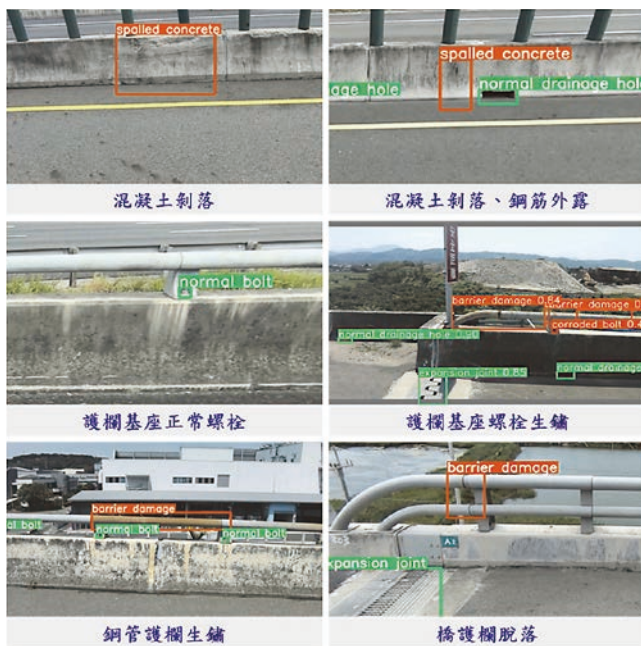


圖 22 橋護欄劣化構件 AI 偵測成果

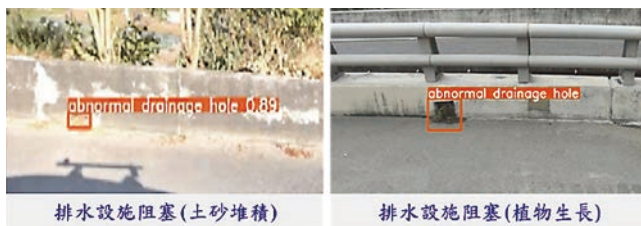


圖 23 排水設施劣化構件 AI 偵測成果

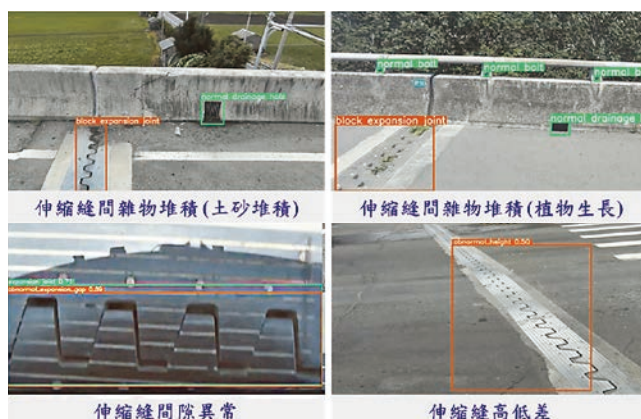
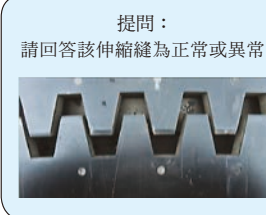


圖 24 伸縮縫劣化構件 AI 偵測成果

導入生成式 AI 之影像劣化判釋與成果

為加強伸縮縫「間隙異常」及「高低差」之劣化偵測準確率，本研究使用去識別化影像測試 ChatGPT 是否可成功辨識劣化狀況，實驗結果顯示 GPT 對伸縮縫的理解具一定程度（圖 25），但如果要再提升判斷可靠性，須提供更詳細數據。另由於 GPT 係依據使用量計費，對於大量橋檢影像分析會衍伸額外的成本，且可能會有隱私安全、網路依賴性等問題。

為改善上述議題，本研究改於本地端部署開源大型語言模型 LLaVA（Large Language and Vision Assistant），LLaVA 是基於 LLM（Large Language Model，大型語言模型）發展而來的多模態 AI 模型，能夠同時處理文字與影像，在圖像理解、視覺問答、圖片描述等任務上表現優異。根據研究測試結果發現，目前針對存在高低差的伸縮縫偵測效果尚可（圖 26），然而對無高低差的正常伸縮縫偵測效果較不理想，後續將持續對模型進行調校，以達到更佳的效果。



回答：

根據提供的圖片，該伸縮縫的間隙看起來較為整齊，但要判斷是否異常仍然需要考慮一些因素，例如：

1. 間隙大小：根據圖片，該伸縮縫的間隙看起來適中，並沒有明顯的過大或過小的跡象。
2. 伸縮縫內部情況：從圖片中，伸縮縫內部似乎有一些污垢或碎屑，但這通常不會影響其功能。需要確保這些碎屑不會導致伸縮縫的卡塞或阻塞。
3. 結構整齊度：伸縮縫的鋸齒形狀看起來對稱且無明顯的損壞或裂縫，這是正常的設計。

總結來說，該伸縮縫看起來是**正常**的，並無明顯異常的跡象。如需更詳細的評估，可能需要了解具體的設計規範或參考更多現場資料。

圖 25 GPT 伸縮縫劣化判釋回應

請問：
橋梁伸縮縫是否有高低差？



回答：

是的，橋梁伸縮縫確實有高度差異。伸縮縫的**左側比右側高**。這可能是由於地基不均勻沉降、不同的熱收縮，或其他結構性問題造成的。這類差異應由結構工程師來處理，以確保橋梁的安全性和耐久性。

圖 26 LLaVA 伸縮縫劣化判釋回應

AI 橋梁檢測車應用場景及效益

AI 橋梁檢測車應用於山區道路或快速公路，僅需 2 名檢測人員在車內即可完成檢測作業，1 名負責駕駛車輛，另 1 名負責操作 AI 影像擷取辨識系統。無需額外佈設交維設施，既可確保作業安全，亦能減少對車流的干擾，大幅降低整體作業有形及無形之成本。

本研究先後於台 18 線芙谷峩橋（山區道路）及台 76 線貓羅溪斜張橋（快速公路）兩交通敏感路段辦理場域驗證（圖 27 和圖 28），前者為阿里山國家森林遊樂區主要聯外道路，後者為南投聯絡彰化之重要快速公路。AI 橋梁檢測車於上述路段皆能以車行方式成功檢出劣化構件，成果與檢測人員之徒步檢測相符。



圖 27 台 18 線芙谷峩橋檢測成果



圖 28 台 76 線貓羅溪斜張橋檢測成果

結語

傳統橋面檢測作業以人力徒步方式進行，不僅檢測效率低，檢測人員更面臨車輛撞擊之高度作業風險。本研究成功開發 AI 智慧橋梁檢測車，透過車載影像擷取系統與 AI 影像辨識技術，以時速 40 ~ 80 公里行車方式檢測橋面構件，產生檢測報表，達到檢測全自動化。

此外，針對伸縮縫「間隙異常」及「高低差」等劣化類型樣本稀缺問題，本研究同時以生成式 AI 及實體伸縮縫模型等模擬劣化情境來擴增稀缺劣化樣本，成功強化 AI 影像辨識模型之學習能力，提升橋面劣化構件檢測之準確性。

AI 智慧橋梁檢測車已實際於快速公路及山區公路進行場域驗證，檢測成果與人工檢測成果相符，證實本系統於實際應用上確實可行，可為橋梁檢測作業提供更安全、有效率之解決方案。

誌謝

本研究之發想源自與交通部公路局合作開發的 AI 無人機智慧橋梁檢測系統，以該計畫之 AI 劣化偵測技術為基礎，延伸開發 AI 橋梁檢測車，為 AI 橋梁檢測補上最後一塊拼圖。感謝交通部公路局中區工程養護分局員林工務段及交通部公路局雲嘉南區工程養護分局阿里山工務段協助提供場域辦理資料蒐集與驗證，使本研究臻於完善。

參考文獻

1. 劉世桐、陳毅銘、李坤哲、黃志杰、陳國睿（2021），「非接觸式量測及 AI 自動偵測裂縫於橋梁檢測之應用」，臺灣公路工程，第 47 卷第 3 期。
2. 范佑誠、陳毅銘、李坤哲、黃志杰、周業凱（2024），「AI 無人機智慧橋梁檢測系統」，臺灣公路工程，第 50 卷第 5 期。
3. 李坤哲、黃志杰、鄭安凱、曾蕙如（2024），「AI 智慧橋梁檢測車於橋面檢測之應用」，技師報，第 1436 期。
4. 曾蕙如、陳世哲、曾恕康、吳依玲、李坤哲、黃志杰（2024），「AI 橋面劣化偵測應用」，電腦與通訊，第 197 期。





數位孿生 分析模式於 0403 震後之 即時診斷

蔡欣局* / 財團法人中華顧問工程司設施技術中心 主任

黃進國 / 財團法人中華顧問工程司設施技術中心 正工程師

鐘立庭 / 財團法人中華顧問工程司設施技術中心 正工程師

鄧兆廷 / 國立中央大學橋梁與軌道工程研究中心 研究員

王仲宇 / 國立中央大學土木工程學系 教授

數位孿生 (Digital Twin) 是將實體系統的數位模型建立在虛擬空間中，透過即時數據與模擬技術來診斷和分析實體系統的運行狀況。在橋梁安全維護管理中，數位孿生技術能夠有效結合結構健康監測 (Structural Health Monitoring, SHM) 系統，依賴各種傳感器來持續更新橋梁的結構健康狀況，收集關鍵數據如振動、應變、撓度等，並將這些數據傳送至數位孿生模型中進行即時校正。這些即時的數據分析和模擬結果可以幫助管理者迅速發現潛在的結構問題，進而制定及時的維護策略。本文將以一座鋼索拱橋為例，透過數位孿生概念的應用，進行該橋於民國 113 年 0403 花蓮地震後之安全診斷與評估，透過監測數據及數位孿生模型的分析結果，可精準掌握受損橋梁之行為及現況，快速提供橋梁管理單位之維護決策支援。

數位孿生技術應用概況與難題

數位孿生在不同產業中可能具有不同的定義與應用方式，如離岸風電場運維優化的應用，已是近年來研究的焦點，包括探討數位孿生在風電場全生命週期中的角色，特別是在狀態監測、故障診斷、預測維護與決策優化等方面的應用。數位孿生技術透過即時數據收集與高精度模擬，能夠實現風力渦輪機與相關基礎設施的健康監測，提高運行的可靠性。其次，數位孿生結合機器學習與大數據分析技術，有助於識別故障模式並預測可能發生的異常情況，從而降低突發故障的風險。此外，透過數位孿生驅動的預測維護，運維決策更可精確地平衡成本與風險，延長設備壽命並減少非計畫性停機時間。

最後，在決策支持方面，數位孿生能模擬不同的運維策略，幫助管理者制定最佳維護計畫，進一步提高風電場的經濟效益與可持續性^[1-3]。

在橋梁工程的應用，Ghahari 與 Malekghaini 等人透過結合貝葉斯有限元素模型的更新 (Bayesian Finite Element Model Updating) 及電腦影像辨識技術，建構時間域的有限元素模型，擴展應用到橋梁運行條件下的損傷識別架構。文中橋梁裝設了無線加速度計和交通攝影機，透過電腦視覺技術進行分類和追蹤，檢視橋上交通狀況，包括車輛類型和位置，並以同步的交通和加速度計數據，以及橋梁的初始有限元素模型，作為貝葉斯有限元素模型更新過程的輸入，用於共同估算動態車輛荷載和有限元素模型參數。隨後通過不斷校正更新數位模型，減少預測的不確定性，以達定位和量化橋梁損傷的目標^[4-6]。

* 通訊作者，hsinchu@ceci.org.tw

然而，從各文獻研究結果可知，對於交通設施（如橋梁）等大型結構物，如果為了達到數位孿生模型即時分析及反饋的目標，通常必須適度的假設及簡化模型的參數與邊界條件，才能在監測系統取得即時數據後，立即調整數位孿生模型參數，使得模型與現實中的橋梁狀態近似，進而準確評估橋梁安全狀態，甚至預測未來生命週期中各類情境的安全容許值。然而，過多的參數假設與簡化，面對的問題就是孿生模型難以反應真實橋梁的現況，也造成對於安全評估或未來預測的結果具有較高的不確定性。因此，「即時分析」與「準確預估」橋梁現況，兩者之間存在著互相抵觸的問題，也就是數位孿生技術應用面臨的難題。

不過對於土木結構而言，不像離岸風機、自駕車輛、飛行載具等機械設備，或都市交通變化模擬的應用，隨著周遭環境與條件的影響而迅速變化。橋梁結構在沒有颱風、洪水、地震等天然災害，或超載、撞擊等特殊事件下，老劣化的速度往往是緩慢而不顯著，因此數年長期監測數據通常也是呈穩定的狀態，亦間接代表數位孿生模型隨著監測數據即時更新、反饋的需求與急

迫性相對較低；反觀，如何在定期或因應特殊事件下，調整數位孿生模型及準確預估（反饋）橋況則相對重要。

本文將以一座鋼索拱橋為例，介紹如何建置有限元素之數位孿生模型，以及依循相關試驗結果進行調校的標準程序，使數位孿生模型能真實反應橋梁靜、動態特性，並以民國 113 年 0403 地震事件中，橋梁災損及監測數據出現異常時，如何立即調整數位孿生模型進行診斷評估，以供養管機關臨時處置決策支援之案例，闡述數位孿生概念於震後快速評估之應用。

鋼索橋監測系統架構與配置

本文案例橋梁為單拱肋之鋼索橋，橋址位於花蓮縣秀林鄉，為單跨鋼拱橋設計，高程約 143 ~ 150 m。橋梁上部結構主要由拱肋、主梁、橋面板、橫梁與鋼纜所組成，其支承型式採用盤式支承，搭配側向人造橡膠防震板及車行向阻尼器。下部結構為兩側橋台，其立面及平面圖，如圖 1 所示。全橋橋長為 110 m，橋面全寬為 9.5 m，拱肋高為 26.91 m。本橋採用的鋼纜共有 22 束，有兩種規格，分別為 10 股與 12 股 15.2

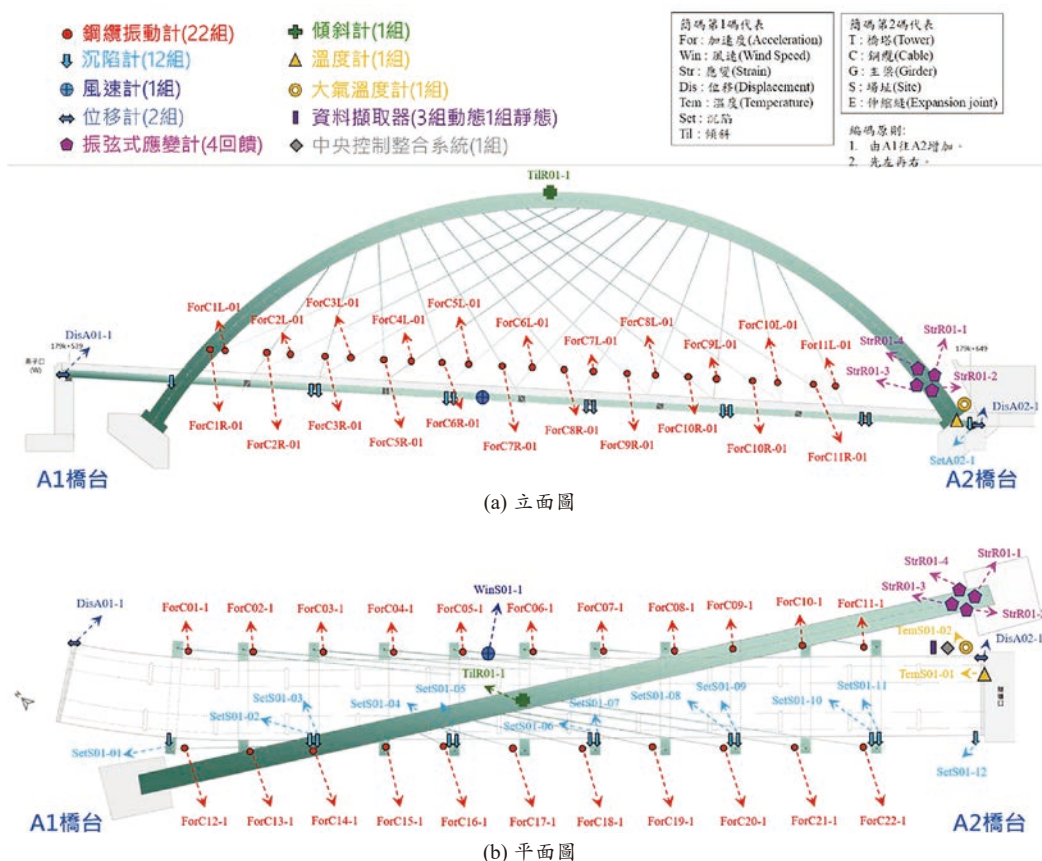


圖 1 監測儀器配置示意圖

mm ϕ 之 7 線低鬆弛預力鋼絞索所組成，固定於橫梁處。主梁係由兩鋼箱型梁組合而成，梁深為 1.6 m，支撐 20 cm 厚混凝土橋面板及 5 cm 厚 AC 鋪面 m。

該橋監測系統架構，分別包括現地監控系統、雲端監控平台、遠端監控系統及診斷評估系統四部分。現地監控系統主要由感測器、資料擷取器、監控電腦、通訊系統及不斷電供電系統所組成。量測項目有鋼纜索力、橋面撓度、拱肋雙向傾角及拱肋底部斷面應變、兩端伸縮縫位移，以及環境溫度與風速等項目，相關感測器配置如圖 1 所示。各項目監測數據經 4G 網路回傳至雲端資料庫與監控平台，以供資料的轉存、運算及基本統計，使用者可透過遠端監控系統網頁登入檢視即時監測數據與橋況，一旦有感測設備或數據異常，系統將自動發布警訊給相關維管人員，以盡速排除異常或故障事件，確保系統持續穩定運作。

監測系統架構中的診斷評估系統，可視為 SHM 系統中之人工智慧 (AI)，將是決定 SHM 能否發揮功效的關鍵要素，倘若系統取得大量的數據而無法知其隱含的物理特性，亦無法判定什麼情況屬異常、危險，那 SHM 就失去其建置的目標與功能。診斷評估系統通常包含「數據的合理性分析」及「數位孿生模型診斷評估」兩部分，本文著重於孿生模型的調校與災後診斷評估之應用，將分別於以下兩節進行說明。

數位孿生模型之建置與調校

結構健康監測結合數位孿生模型要達到安全的監

控與預警的目標，必須仰賴模型進行相關的情境（破壞）模擬分析，瞭解各構件容許的應力或變位範圍，才能研訂監測項目的安全管理值。而該安全管理值是否妥適於監控橋梁，是否與實際臨界容許反應接近，將取決於模型的擬真程度。為了提高模型的擬真度，則需依賴一套嚴謹的狀況評估與管理值研定程序，建議如圖 2 所示。

完整的程序包括 (1) 模型的建置與調校：配合一系列試驗所進行的模型參數調校流程，如車載試驗、橋梁結構微振試驗及鋼纜模態量測試驗等，才能使模型分析的反應與實際橋梁反應接近，進而使後續情境模擬分析的結果有一定的可信度；(2) 情境模擬分析：執行各類現實中橋梁可能遭遇的劣化或災害情境，評估各情境對不同橋梁構件的影響程度；(3) 關鍵破壞模式：透過步驟 2 的分析結果，可進行不同載重或模擬案例的組合，了解橋梁可能的關鍵構件與破壞模式，作為步驟 (4) 安全管理值研訂的參考依據。透過執行完整的狀況評估與管理值研定程序，將可協助建構 SHM 系統的安全監控管理值，並於界接即時監測數據時，即可判定橋梁是否有立即的危險或潛在的劣化趨勢，達到 SHM 確保橋梁及用路人安全的目標。

本文分析案例透過 Midas Civil 有限元素分析軟體建置鋼索橋模型，首先配合橋梁結構微振試驗結果進行檢核或調校，其重力方向 (Z 向) 之前三階模態如圖 3 所示，試驗量測頻率與模型分析頻率的比對如表 1 所示，結果顯示兩者前三階模態頻率近似。

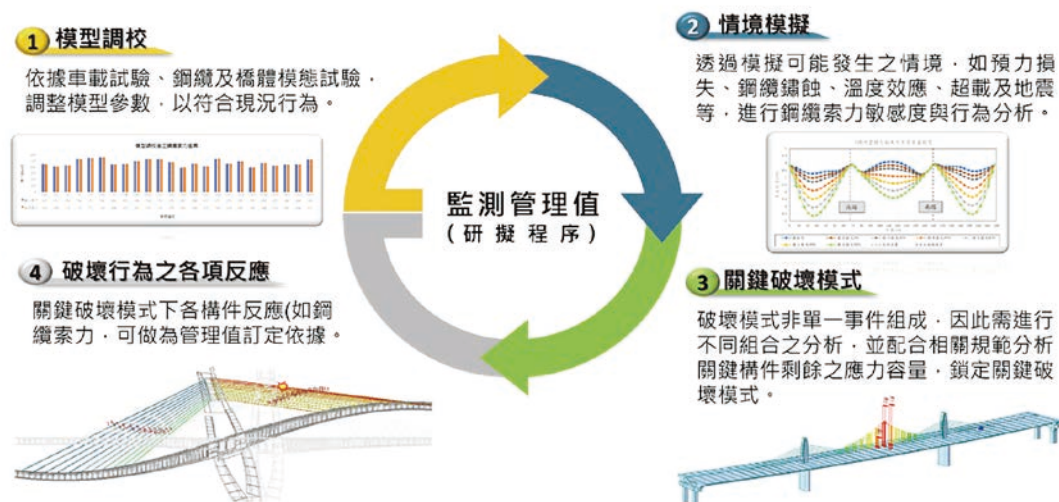


圖 2 狀況評估與管理值研訂程序

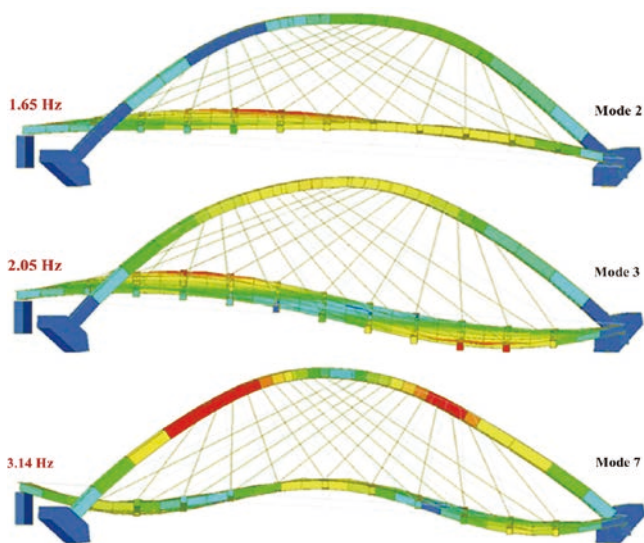


圖 3 橋梁結構模型重力向前三階模態

表 1 橋梁模態比對結果

模態	量測頻率 (Z 向)	分析頻率 (Z 向)	差值
Mode 1	1.50	1.65	-0.15
Mode 2	1.86	2.06	-0.20
Mode 3	3.17	3.14	0.03

車載試驗部分，橋梁現地分別執行橋梁跨中加載單輛、兩輛及四輛卡車之案例，以及兩輛卡車分別逐一於吊索支撐橫梁處加載的案例（如影響線），並於試驗後進行比對調校，如圖 4 所示。其中黑色圓點線曲線為水準測量結果，紅色三角點線為模型分析結果，經比對結果顯示，模型分析與水準測量結果大致吻合，代表調校後模型整體勁度上已具有一定程度可掌握橋梁特性。在橋梁整體勁度調整完成後，接續配合鋼纜模態試驗取得的索力值進行調校，如圖 5 所示，調校完成後大部分鋼纜索力分析值已與量測值吻合，全橋索力總和差異百分比僅為 1.2%。

本案例模型經前述狀況評估與管理值研訂程序 (1) 各項試驗調校比對後，分析的結果確實已與橋梁現況吻合。下節將接續介紹實際於 0403 地震情境模擬分析的應用，也將進一步證實依循本文建議的程序調校模型，確實可建構監測標的橋梁的數位孿生模型，以供災害發生後立即搭配監測數據進行診斷評估。

0403 震後即時診斷

台灣地區時間 113 年 4 月 3 日上午 07 時 58 分於

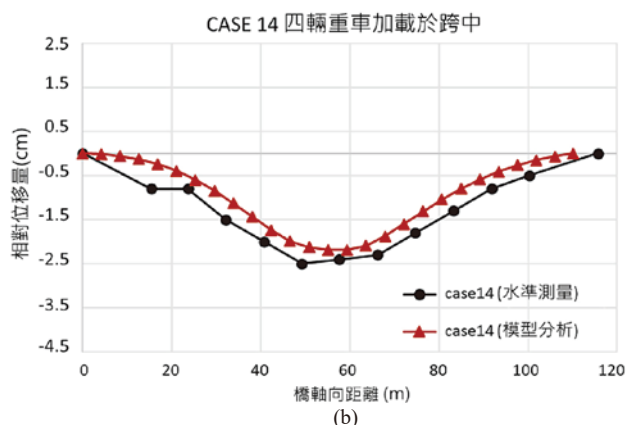
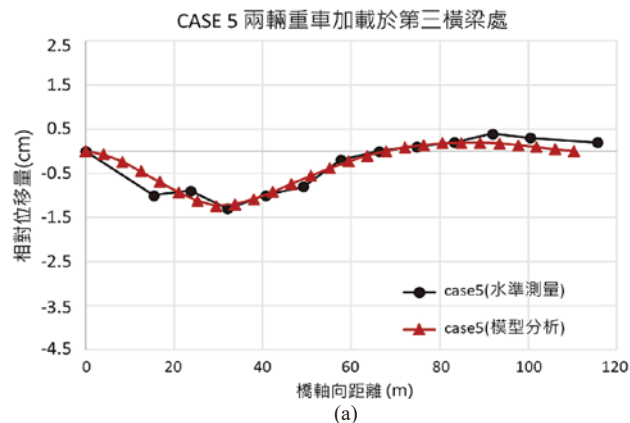


圖 4 車載試驗比對結果

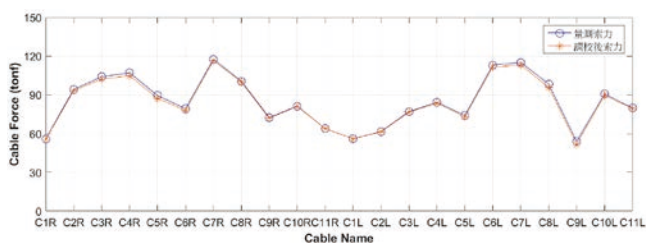


圖 5 鋼纜索力比對結果

花蓮縣政府南南西 14.9 公里處，發生芮氏規模 7.2 的強震，花蓮秀林鄉震度達 6 強，造成花蓮地區災情嚴重，特別是太魯閣國家公園，邊坡土石崩落、道路中斷，以及部分老舊橋梁倒塌損毀。本案例鋼索橋在 0403 地震亦產生局部損壞，經維管機關及檢測人員立即啟動特別檢測後發現，主要為 A2 橋台左側之固定式盤式支承，在地震過程中抗拉拔裝置損壞，支承錨定螺栓斷裂，造成支承底座鋼盆脫離錯位。由於此固定支承為本橋唯一縱向束制的支承，且 A1、A2 橋台間具高程差（如圖 6），因此支承損壞後造成整體橋面往 A2 橋台方向橫移並產生殘餘位移，間接造成 A1 橋台處伸縮縫間距過大，A2 橋台處伸縮縫擠壓且具微小高程差。

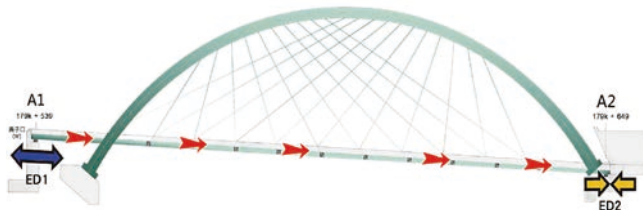


圖 6 震後橋面縱向位移示意圖

因本鋼索橋有裝設 24 小時安全監測系統，震後可由監測數據發現，兩端伸縮縫位移計確實可觀測到橋面有縱向殘餘位移的情形，如圖 7 及圖 8 所示。A1 橋台處伸縮縫被拉開 4 公分之位移量，A2 橋台處伸縮縫則有推擠 5 公分的殘餘位移。由於此橋橋面與拱肋為分開的兩個結構單元，兩者間透過鋼索吊掛連結，因此在橋面產生縱向位移時，也間接造成兩扇索面鋼纜拉伸或縮短，使得索力有明顯之改變。如圖 9(a) 為左側鋼纜的監測索力變化情形，由圖中可見，約略以 CA8 ~ CA9 鋼纜為界，CA1 ~ CA8 鋼纜因為橋面縱向位移（右移），鋼纜因縮短而索力下降，CA9 ~ CA11 則因鋼纜伸長而索力增加，變化的幅度最大達 15%。由於本橋兩扇鋼纜

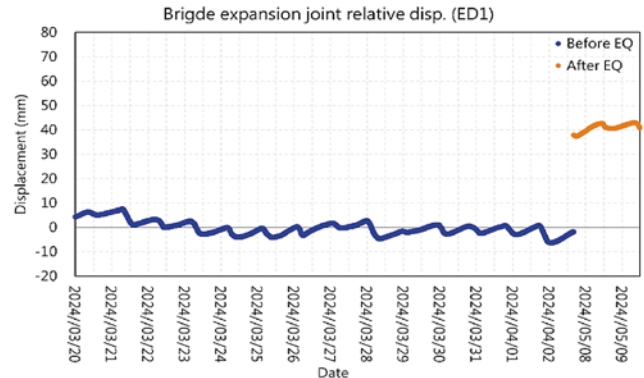


圖 7 橋台（A1）處伸縮縫位移計監測數據

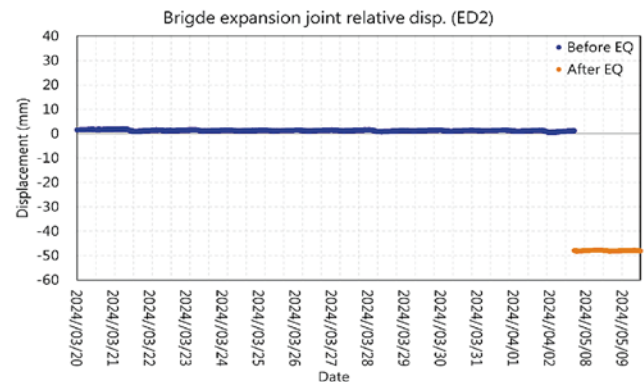
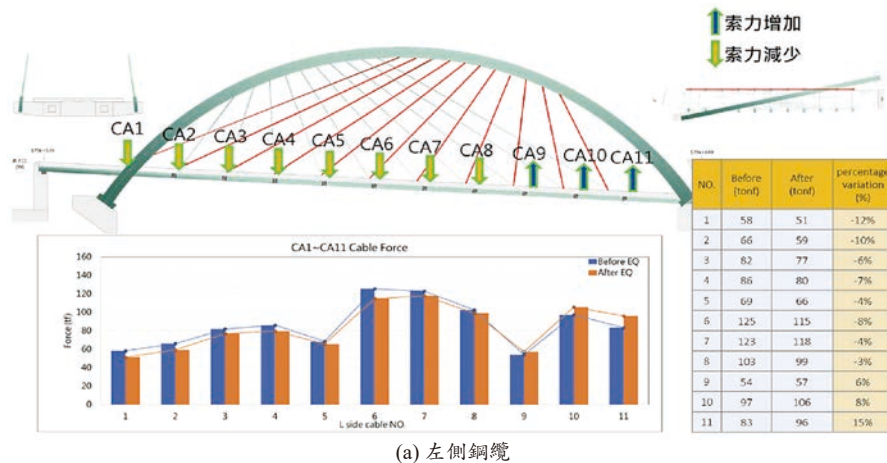
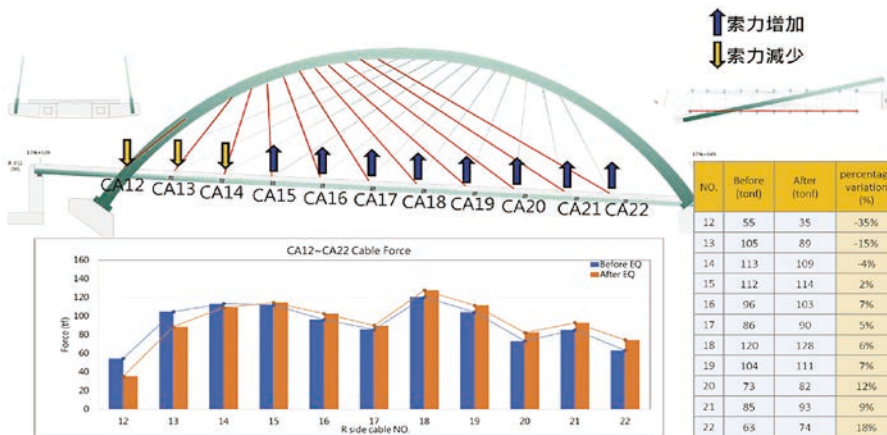


圖 8 橋台（A2）處伸縮縫位移計監測數據



(a) 左側鋼纜



(b) 右側鋼纜

圖 9 地震前、後鋼纜監測索力變化情形

配置為反對稱型式分布，因此可於圖 9(b) 觀測到右側鋼纜監測索力變化，確實為反對稱的分布情形，CA12 ~ CA14 鋼纜因橋面右移縮短而索力下降，CA15 ~ CA22 則因鋼纜伸長而索力增加，索力變化幅度最大達 35%，但仍在鋼纜索力容許應力範圍內。

為了確認橋梁現況是否安全，並維持通車使用，本團隊透過前述建置的數位孿生模型，快速進行診斷評估。考量現有支承損壞，已造成模型邊界條件改變，因此數位孿生模型同步調整，將 A2 橋台左側之固定支承變更為活動支承，僅提供重力向的束制，然後進行模擬分析。分析結果顯示，在邊界條件調整後，橋梁因自重作用下，無額外加載任何外力的情況下，橋面確實因自重產生朝 A2 橋台方向的縱向位移，如圖 10 所示，位移量（4 cm）與監測系統位移計測得的位移量相同。此外，在橋面有殘餘位移的狀態下，輸出孿生模型中索力的變化量，可發現模型分析的索力變化分布及幅值與監測索力的變化量相當接近，如圖 11 所示。

經由本節模擬分析與監測數據的比對結果，除了證實本監測數據之合理性，同時也間接代表調校後的數位孿生模型，確實可準確評估災後的橋梁狀況，因此後續進行橋梁構件應力檢核，以及容許變位檢核等相關結果，將具較高的可信度，可供養管機關決策參考與支援。

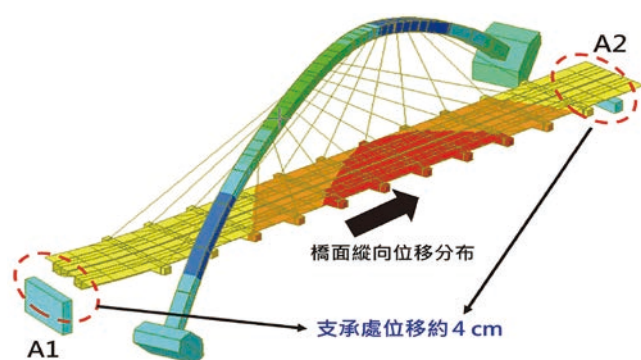


圖 10 震後橋面殘餘位移分析

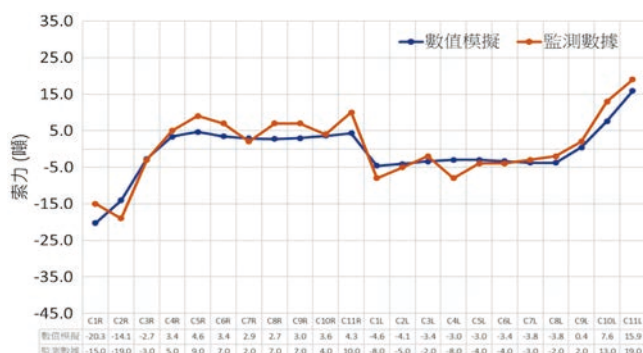


圖 11 地震前、後鋼纜索力變化量分析

結語

本文以一座鋼索拱橋於民國 113 年 0403 花蓮地震後的應變處置為例，說明數位孿生技術於橋梁震後診斷與安全評估中的實際應用成效。透過事前建置並經多項實地試驗調校完成之有限元素模型，在地震發生後可立即配合監測系統所回傳的索力與位移等數據，快速模擬橋梁的實際受力與變形行為，精準掌握構件損傷位置與影響範圍。本案例中，模型依據震後橋梁現況調整邊界條件後，可準確分析橋面縱向殘餘位移與鋼纜索力變化，模擬結果與監測數據高度一致，不僅驗證監測資料的合理性，也證實數位孿生模型具備即時診斷災後橋況之能力，為橋梁管理單位提供重要決策依據。藉此應用顯示，在災後搶通與通行安全評估的時效壓力下，若能預先建構具備高度擬真能力的橋梁數位模型，結合結構健康監測系統即時回饋的數據，將可顯著縮短人工評估時程，提升應變效率與科學依據。未來，隨著監測技術與模型整合方法持續優化，數位孿生有望進一步成為橋梁全生命週期管理的重要工具，從平時的劣化監控到災後的快速診斷，均能提供即時、可信且量化的技術支援，協助主管機關提升橋梁資產管理的智慧化與韌性。

誌謝

本文感謝交通部公路局東區養護工程分局計畫經費支持，太魯閣工務段指導及合作團隊協助。

參考文獻

1. Zhang, X. and Noshadravan, A., (2023). "Efficient Lifecycle Reliability Assessment of Offshore Wind Turbines using Digital Twin", Proceedings of the 14th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Sept. 12-14, Stanford University, Stanford, USA.
2. Xia, J. and Zou, G., (2023). "Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: A review," Ocean Engineering, 268:113322.
3. Wang, Y., Liang, J., and Fu, Y., (2023). "Towards Dynamic Digital Twin for Monopile-Supported Offshore Wind Turbines", Proceedings of the 14th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Sept. 12-14, Stanford University, Stanford, USA.
4. Malekghaini, N., Ebrahimian, H., Ghahari, F., Sachidanandam, V., Bowers, M., and Taciroglu, E., (2023). "Operational Health Monitoring of Bridges Using Bayesian Model Updating and Computer Vision Techniques", Proceedings of the 14th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Sept. 12-14, Stanford University, Stanford, USA.
5. Ghahari, F., Malekghaini, N., Ebrahimian, H., and Taciroglu, E., (2022). "Bridge digital twinning using an output-only Bayesian model updating method and recorded seismic measurements", Sensors. 22, 1278.
6. Malekghaini, N., Ghahari, F., Ebrahimian, H., Bowers, M., Ahlberg, E., and Taciroglu, E., (2023). "A Two-Step FE Model Updating Approach for System and Damage Identification of Prestressed Bridge Girders", Buildings. 13.



監測訊號異常的自動化處理與分類 以橋梁加速度監測為例

黃謝恭* / 國立中興大學土木工程研究所結構工程組 副教授

林天邠 / 荷語魯汶大學機械工程研究所機電動力系統組 博士班研究生

橋梁的結構健康監測 (Structural Health Monitoring, SHM) 與結構完整性管理 (Structural Integrity Management, SIM) 技術，是隨著科技進展下，人們憑藉實現永續建設與維護的方法，進而獲得廣泛應用。然而隨之而來的便是大量的數據，並且伴隨著許多異常數據，若是使用人工檢測與分類異常訊號，既費力又乏味，而且效率相當低下，因此，本次監測使用一座大跨徑斜張橋為示範案例，導入一種機器學習技術，稱為模式識別網路 (pattern recognition network)，用來取代人工檢測與分類的過程，並且使用統計資料來避免龐大且較無效率的機械學習模型。另外，針對訓練資料集中出現標記錯誤的問題，本次示範案例中改善傳統的迭代修剪損失最小化 (Iterative Trimmed Loss Minimization, ITLM)，利用人機協同 (Human-In-The-Loop, HITL) 的機械學習技術來施行人工輔助校正，結果顯示在使用不平衡資料集的情況下，人機協同的迭代修剪損失最小化能夠提升整體效能，更適合用於異常訊號的檢測與分類。

前言

橋梁的結構健康監測 (Structural Health Monitoring, SHM) 與結構完整性管理 (Structural Integrity Management, SIM) 是智慧城市發展中最重要的一項技術，也是利用科技實現永續建設與維護的創新範例，因此一直以來備受關注，目前兩項技術已經廣泛應用於持續且長期的監控結構健康狀況，並且及時偵測基礎建設的早期劣化，尤其是大型結構，例如建築物、水壩和隧道 [1-3]。

上述兩項技術在持續且長期的監測過程中會產生大量的數據，而惡劣的環境、損壞的元件、校正錯誤或是感測器故障都會損壞量測資料，影響資料品質 [4]，異常數據可能在後續處理過程中扭曲資訊、在系統識別過程中擷取不正確的特性、在損傷偵測過程中產生錯誤結論，並且最終在橋梁的結構健康監測或結構完整性管理

中導致對橋梁狀況的錯誤判斷。一般而言，及時檢測異常訊號並將其分類可為監測系統的維護工作提供指引；然而，這些工作通常都是由人工執行，既費力又乏味，而且效率相當低下，無法達到自動有效的檢測與分類。

近年來基於人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 與機械學習 (Machine Learning, ML) 所開發的檢測與分類被證實是準確高效且容易自動化的，尤其是在結構健康監測的技術上，例如使用卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) 來直接偵測量測資料的異常 [5-7]。雖然基於人工智慧與機械學習之策略可以達到自動有效的檢測與分類，但仍面臨許多挑戰，例如高度仰賴計算力、需要大量且標記正確的訓練資料集 … 等等 [8]，尤其是在實際應用中完全標記正確的訓練資料集往往是不可得的，尤其是在大量資料的前提下，亦即標記錯誤是不可避免的，因此模型效能通常會受到限制 [9]，為此有數種技術被提出來改善機械學習模型的效能，例如 Ren

* 通訊作者，skhuang@nchu.edu.tw

等人嘗試使用不同的權重，在一組有標記錯誤的訓練資料集上常識訓練與學習^[10]。

在本次監測示範案例中，針對橋梁二個月的監測資料來基於機械學習發展準確且自動有效的檢測與分類技術，該類神經網路（Artificial Neural Network, ANN）是衍伸過去發展之機械學習模型^[8]，為一種透過統計資料對於現地所量測到的資料進行特徵提取（feature extraction），讓基於機械學習的模型能夠自動且有效的學習各類別的資料特徵，進而達到異常數據與訊號的檢測與分類，最後將所訓練出來的模型在不同月份下的性能，以及修正的結果施行觀察與討論，進而得到整體的結論。

監測示範案例簡介

本次監測示範案例為一座大跨徑斜張橋，量測資料均來自於全球結構健康監測的國際競賽，1st International Project Competition for Structural Health Monitoring (IPC-SHM)^[11]，本座斜張橋主跨長 1,088 公尺，兩邊副跨長 300 公尺，兩座橋塔高達 306 公尺。斜張橋一共安裝 16 顆雙軸向加速度計和 2 顆三軸向加速度計，其中雙軸向加速度計 14 顆分別安裝在大橋的橋面板上（頻道編號 1 至 28 號），2 顆分別安裝在兩座橋塔的塔頂（頻道編號 29 至 32 號），而在兩座橋塔的底部各有安裝 1 顆三軸向加速度計（頻道編號 33 至 38 號），如圖 1 所示。

該橋之監測系統以 20 Hz 為取樣頻率，本次監測示範案例總共使用兩個月共計 1,440 小時 54,720 筆的資料，每一筆資料為一小時，收集到的所有資料還有進一步的前處理，以便給予監督式學習的標籤。在兩

個月的量測資料內，分為 6 種不同標籤，包含一種正常訊號（normal data），與五種異常訊號，包含遺失訊號（missing）、微弱訊號（minor）、離群值訊號（outlier）、方波訊號（square）與飄移訊號（dnft），可以看到無論是那個資料集，在各個標籤分布上是非常不平衡的，兩個月中各標籤所佔數據與比例如圖 2 所示，兩個月的資料整體來看正常訊號分別佔了 48% 與 49%，五種異常訊號分別佔了 2% 至 20% 不等，這種典型的不平衡資料集是讓機械學習要達到準確且自動有效的檢測與分類中需要克服的一大難關。

監測資料一筆為一小時，共 72,000 點，若是直接使用時域（time-domain）的加速度數據進行學習、檢測與分類，會讓機械學習模型龐大且較無效率，而本次監測示範案例所使用資料包含 54,720 筆，巨大的資料量無法達到快速的訓練以及學習，因此建議使用統計資料作為輸入來讓模型學習^[12]。案例使用一個典型的模式識別網路（pattern recognition network）來對統計資料進行監督式學習，模式識別網路是一個多層前饋（Multi-Layer Feedforward, MLF）的類神經網路，可以透過預先給定的目標標籤進行訓練用以區分輸入資料的特定模式。訓練時，每筆監測資料的統計數值將被當作模式識別網路的輸入資料，其中包含：機率分佈（probability distribution）、資料範圍（range）、算術平均數（arithmetic mean）、標準差（standard deviations）、四分位數（quartile）與標準分數（standard score，又稱 z-score、z 分數或標準化值）… 等共十一個統計數值作為訓練輸入。

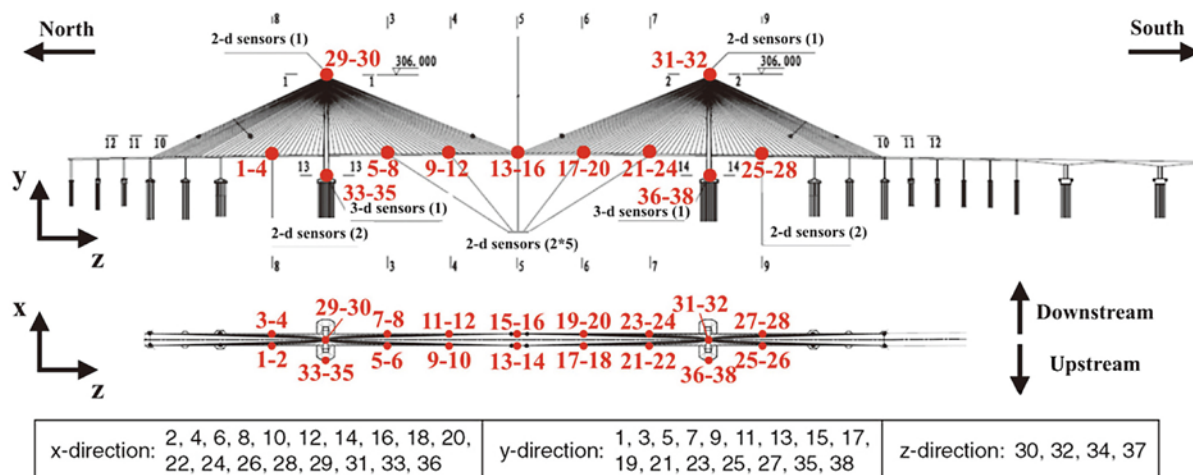


圖 1 本次監測示範案例與加速度計安裝位置示意圖

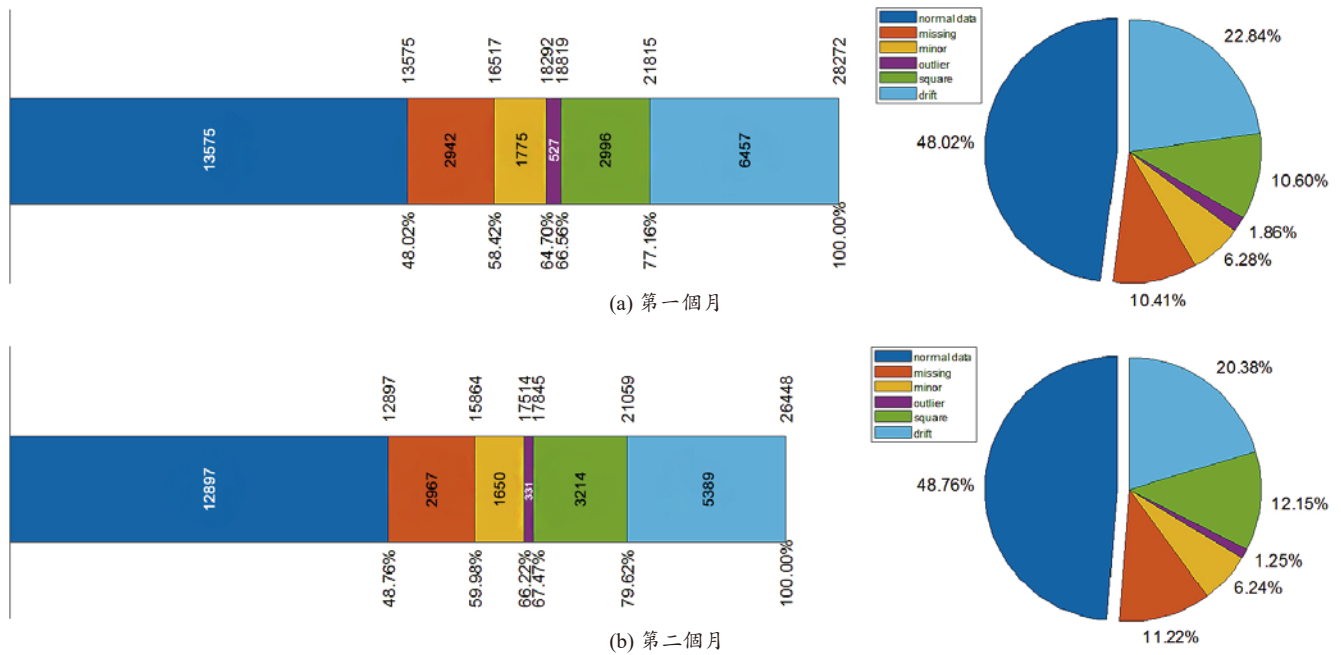


圖 2 整體資料在不同類別中所佔數據與比例

初步檢測與分類結果

模式識別網路是典型的淺層（shallow）類神經網路，相較於近期流行的深層（deep）模型，可以享有小巧、效率高與可移植的優點，案例中各個網路層的連接均是使用全連接層（Fully Connected Layer, FCL），其中在輸入層與四層隱藏層中間使用雙曲正切（hyperbolic tangent）作為激活函數（activation function），在輸出層則是使用 softmax 當作激活函數。同時，使用交叉熵誤差（cross-entropy error）作為損失函數（loss function），使類神經網路能夠對於不好的預測產生較大損失，給予類神經網路較多的修正，最後通過激活函數轉化為各個標籤機率，此為分類中最常使用的損失函數之一，也適合應用於本示範案例之多標籤分類（multi-label classification）的問題。

這裡學習停止的標準採用檢查訓練是否達到最小梯度（gradient）或是達到取大期數（epoch），為了適當避免過擬合（overfitting，又稱過度學習）問題，例如學習結果雖然在損失函數的最終表現良好，但卻無法分類不是在訓練資料內的其他資料，也就是缺乏泛化性（generalization），案例採用驗證（validation）資料集^[13]的方式，預先將部分資料隔離，當隨著學習的進行，訓練資料集的損失函數減小但驗證資料集的損失函數卻逐漸變大時，檢查相似情形是否連續經過一

定期數時，此時會提早結束訓練並使用過去最佳的網路模型。透過分成訓練及驗證資料集的方式，能夠維持模式識別網路模型的泛化能力，進而使類神經網路模型可以較廣泛的被使用在同樣的領域中，換句話說就是能夠維持模型對不同資料的適應性。

在監督式學習的類神經網路中，混淆矩陣（confusion matrix）是常用來衡量模型分類的評估標準^[14]，能夠確實瞭解模型預測結果和真實標籤之間的對應關係，如表 1 所示。混淆矩陣主要分為真陽性（True Positive, TP）真陰性（True Negative, TN）假陽性（False Positive, FP）與假陰性（False Negative, FN）四類，進而可以衍生出在機器學習領域中常用的 3 種評估指標，例如：

- 準確率（accuracy）表示分類完全正確的比例，是指模型分類到正確標籤的樣本數除以總樣本數，以比例表示。

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

- 精確率（precision）表示分類為該標籤的樣本中，真正是該標籤樣本的機率。

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

- 召回率（recall）表示在真實該標籤的樣本中，被分類為該標籤的機率。

表 1 混淆矩陣各項評估標準之定義

Confusion Matrix Actual Condition Positive		Actual Condition	
		Actual Condition Negative	
Predicted Condition	Predicted Condition Positive	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Predicted Condition Negative	False Negative (FN)	True Negative (TN)

$$\text{recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

(3)

其中精確率與召回率可能在不同的情況中被個別看重，例如召回率也可說是在真實的事件中有多少被成功找出來，精確率也可說是在所有被分類為真實的事件中有多少可信。

圖 3 為本次示範案例初步之混淆矩陣，其中最下行（第七行）為召回率而最右列（第七列）為精確率，行列交點（第七行第七列）為準確率。由第一個月與第二個月的準確率可以瞭解使用模式識別網路進行學習、檢測與分類，能夠正確的區分正常訊號與各種異常訊號，個別準確率達到 98.9% 與 99.4%，然而若往進階評估標準來看，兩個月的離群值訊號均未被妥善檢測與分類，例如第一個月的召回率與精確率分別為 75.5% 與 83.1%，第二個月的召回率為 78.5%，僅有第二個月的精確率稍微超過 90%（92.5），然而相較於其他異常訊號，精確率仍不算高。因此，從示範案例兩個月的初步結果可以總結如下：利用模式識別網路進行學習、檢測與分類大跨徑斜張橋的加速度數據基本可行，正常訊號與各種異常訊號能夠使用淺層類神經

網路高效區分，唯獨離群值訊號的分辨上使用初步結果較為不好，在精確率與召回率上略有疑義。

分類不正確結果之檢討

在監測示範案例中，模式識別網路能夠高效區分正常訊號與各種異常訊號，僅在單一異常訊號的分辨結果較為不好，為了更深入瞭解淺層類神經網路在離群值訊號的精確率與召回率較為低迷之具體原因，逐步檢視各個時域的加速度數據，得到一些較為特別的觀察。

圖 4 為本次示範案例中分類不正確之錯誤標籤，橫軸為時間單位為分鐘，例如圖 4(a)、圖 4(b) 和圖 4(c) 顯示了三個不同的加速度數據，這些資料的標籤分別應為微弱訊號、微弱訊號和離群值訊號，但是最終都被標記為正常訊號；圖 4(d) 標記為離群值訊號，而圖 4(e) 則標記為微弱訊號，但是這兩個加速度數據在經過檢查後都應該歸類為正常訊號；圖 4(f) 顯示一個可以被標記為微弱訊號亦可以標記為離群值訊號的範例，但是這個加速度數據最終都標記為微弱訊號。除此之外，遺失訊號、方波訊號和飄移訊號也有少數標記錯誤，例如圖 4(g) 所示的方波訊被標記錯誤為正

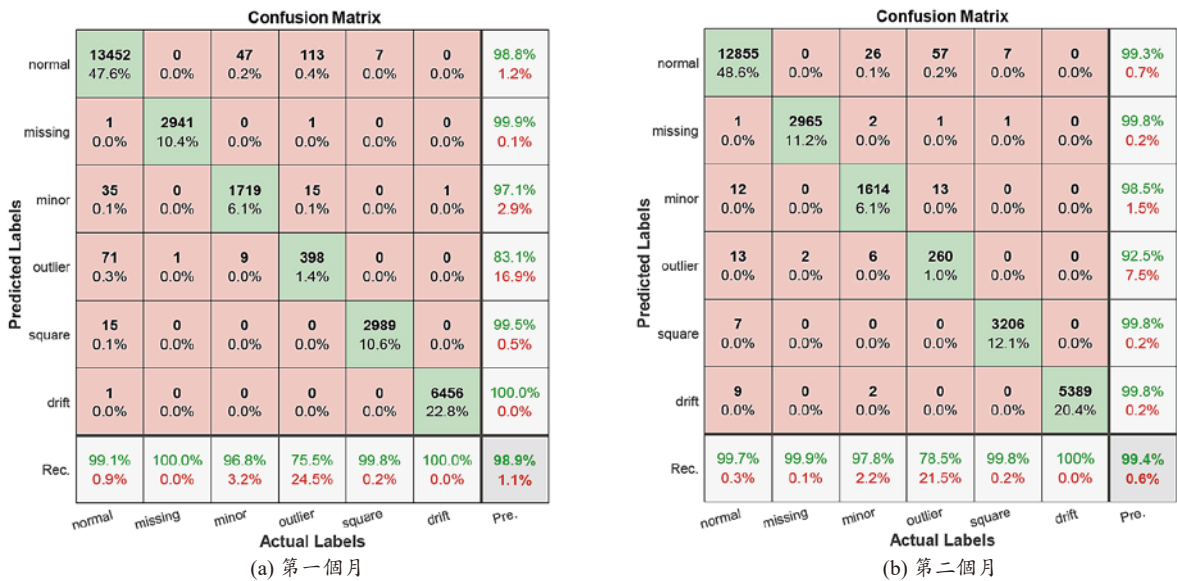


圖 3 本次監測示範案例兩個月初步之混淆矩陣

常訊號，儘管資料在 45 分後遺失，因為每一筆資料為一小時，在整段時域的加速度數據含有兩種標籤的例子比比皆是，這些資料應被歸類為多重標籤，類似例子如圖 4(h) 和圖 4(i) 中的加速度數據在其記錄的開始和結束時展示出不同的標籤，但是最終僅被標記為正常訊號，圖 4(j) 和圖 4(k) 顯示兩個正常訊號在一小時

內變化成遺失訊號，但是最終僅被標記為遺失訊號。最後一個範例如圖 4(l) 所示，最終標記為遺失訊號，但是時域數據應先標記為遺失訊號，然後在最後幾分鐘內改為方波訊號，上述所有標籤錯誤都會直接影響建議模式識別網路在區分正常訊號與各種異常訊號時的正確性。

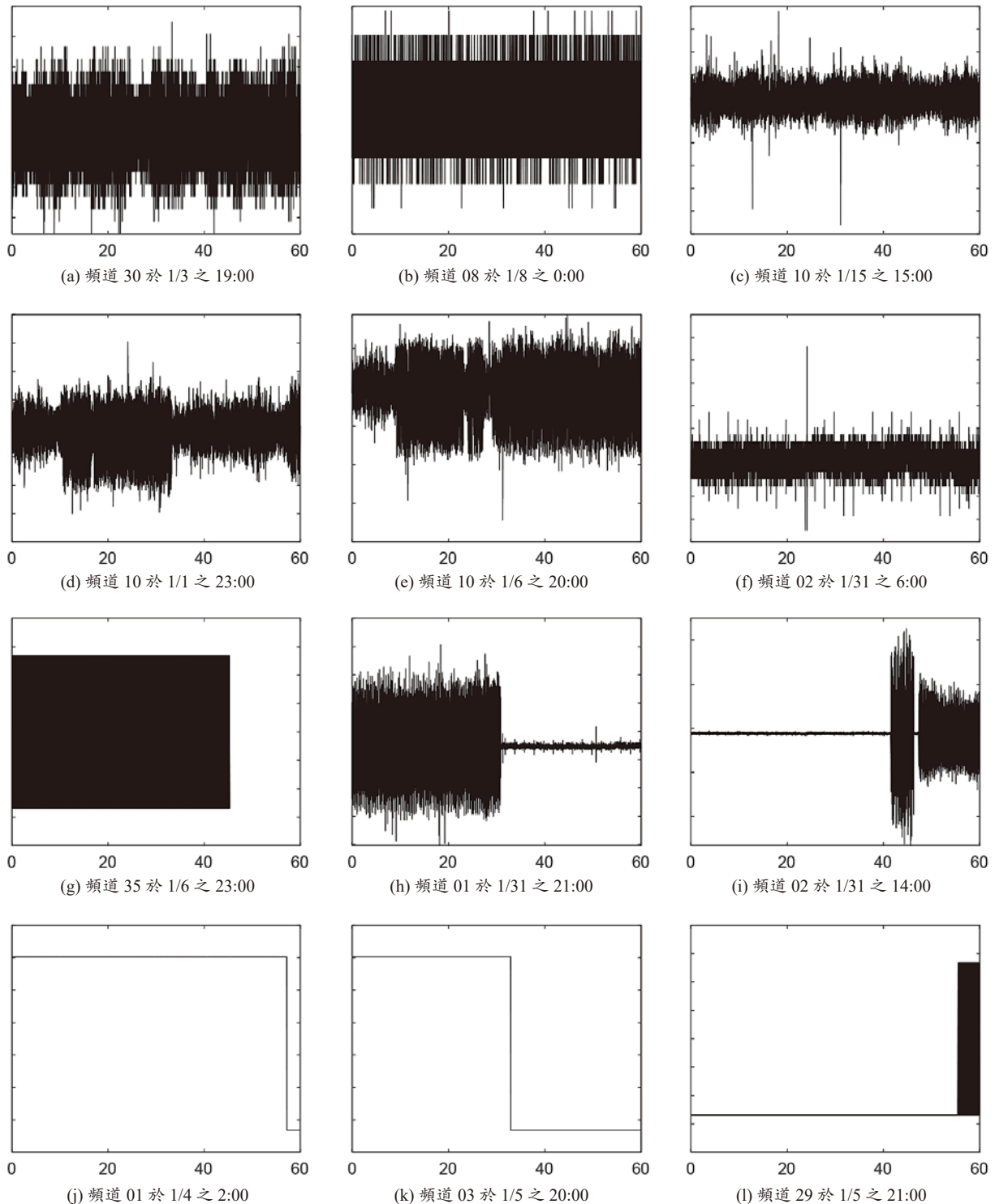


圖 4 分類不正確之錯誤標籤的展示與檢討

基於機械學習所開發的分類器（classifier）對於訓練資料集的品質非常敏感，也就是說，如果訓練資料集是一團糟或是充滿標記錯誤，區分正常訊號與各種異常訊號的結果將會很差，反過來說若有足夠數量的訓練資料集，且資料集中標記錯誤的標籤比例不高，機械學習本身泛化性就能很好地處理標記錯誤問題。然而，安排高品質的訓練資料集來進行學習是困難且昂貴的，例如本次監測示範案例的初始標籤是由多人同時協助標記完成，雖然事前有著充分的溝通與一致的共識，但是在實際操作時仍會因為種種原因標記錯誤，因此應用一些修正技術來確保學習過程的有效性，並產生訓練良好的類神經網路模型是極其必要的。

人機協同（Human-in-the-Loop, HITL） 機械學習與改善後之結果

在訓練資料集中，每一小時加速度數據的標籤都是由人工所標記完成，因此，難免出現由於人工標記所產生的失誤，或是標記過程中標準有所差異的情形發生，另外時域數據含有多種標籤的例子可以在許多資料中觀察得到，使得人工標記時容易產生混淆的情形。現今有許多基於機械學習的技術可以提升模型對於正確標籤模式（pattern，亦即特徵）的學習，而迭代修剪損失最小化（Iterative Trimmed Loss Minimization, ITLM）就是一個非常好的例子^[15,16]。

迭代修剪損失最小化的技術是基於機械學習的一個現象，即類神經網路模型在訓練時傾向嘗試學習較

為明確且清楚的模式，尤其是在訓練初期的時候，這些明確且清楚的模式通常存在於標記正確的乾淨資料集中，因此迭代修剪損失最小化的技術不再最小化整個訓練資料集的損失，而是嘗試最小化修剪損失（trimmed loss），而修剪損失就是從具有清楚明確模式的有限資料而來，至於不具備清楚明確模式的其他資料，在訓練時就不將被採用。迭代修剪損失最小化的技術憑藉在訓練的初期階段，擁有標記正確的資料，其學習曲線通常比標記錯誤的資料更好，只需要估計標記正確的資料所占之數量或百分比，並只需要專注於這些損失較小的資料即可，具體來說迭代修剪損失最小化的技術保留原始訓練流程，但在初期階段就提早終止，之後選擇損失相對較小的資料來計算修剪損失，並使用這些資料重新訓練模型，以將注意力放在較乾淨的資料集上，最終透過多次重複執行修剪損失，即可篩選出錯誤標籤，進而提升分類器的效能，如圖 5(a) 所示。

傳統的迭代修剪損失最小化專注於標記正確的資料，並且在相關的研究中被證明是有效的，僅僅經過幾次迭代就能提供高效的分類器^[17]。然而傳統的迭代修剪損失最小化對於不具備清楚明確模式的其他資料，在訓練時摒棄不再採用，無法根本解決標記錯誤的問題，因此本次監測示範案例導入人機協同的迭代修剪損失，人工介入損失較大的訓練資料，施行輔助校正，確認標記正確與否或修正標記錯誤的資料（如圖 5(a) 所示），確認與修正標記著重在損失較大的訓練資料，並且人機

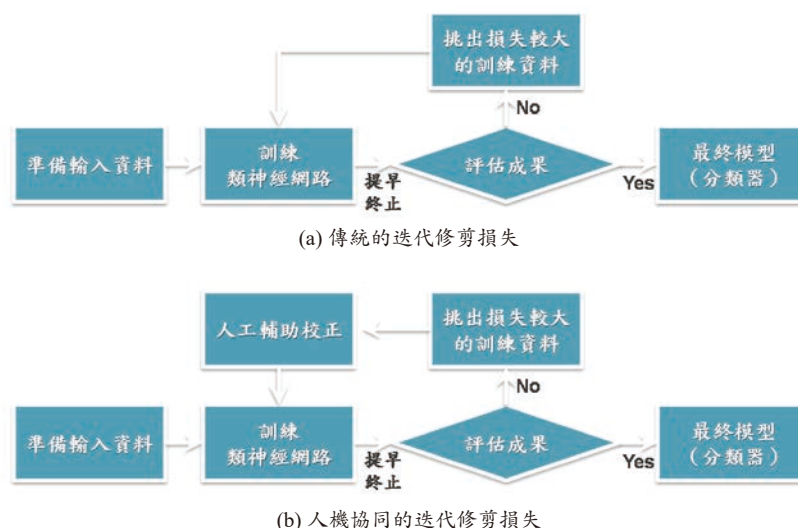


圖 5 傳統的與人機協同的迭代修剪損失之流程比較

協同的迭代修剪損失仍然最小化整個訓練資料集的損失，以求同時保證訓練效果與乾淨資料集。

圖 6 顯示在迭代修剪損失施行人工輔助校正的詳細流程，假設本次監測示範案例標記正確的資料占比約為 95%，因此每次迭代中都會以人工介入確認與修正最後 5% 的資料，首先檢查個別資料是否

具有任何未定義的標籤（本示範案例並未發現其他標籤），其次檢查個別資料是否有多重標籤（例如圖 4(f) 至圖 4(l) 均屬於此），由於統計資訊將會捨棄時間資訊，因此在記錄的開始和結束時展示不同標籤的資料可以分為兩組獨立的資料，不過為了簡單起見，本次監測示範案例保持每一筆資料為一小時並且直接排除這些資料，最後檢查資料是否有標記錯誤，例如圖 4(a) 至圖 4(e) 所示，這些資料經過調整後，會再次納入訓練資料集，以改善訓練以及學習過程，另一方面，將標記正確的資料重新納入訓練資料集，以促使類神經網路模型重新學習模式。

本次監測示範案例最終總共進行了四次人工輔助校正，以第一個月的資料來看，在四次迭代後預測錯誤的標籤數目從最初的 402 個逐步下降為 243、207、127 與 108 個，準確率從最初的 98.5% 逐步上升為 99.1%、99.3%、99.6% 與 99.6%，可以判斷預測錯誤的標籤數目與準確率都達到收斂，此學習過程終止，整體來說人工介入總共調整了 979 個預測錯誤的資料，只佔總資料的 3%，此外最終只有 50 個具有多重標籤的資料被排除在訓練資料集之外，只佔總資料的 0.18%，顯示所提出的類神經網路模型能夠成功地從總資料的 99.82% 中學習到各個標籤之模式。若往進階評估標準來看，各個標籤也都有明顯提升，例如離群值訊號精確率與召回率從較為低迷的結果分別提高 16.12% 與 8.6%，最終，所提出的分類器在所有進階評估標準和標籤上的表現都高於 92%，其中大部分都達到 99% 以上，如圖 7 所示。最重要的是，人機協同的迭代修剪損失不僅提供了一個高效的類神經網路模型，還透過加入人工輔助校正功能提

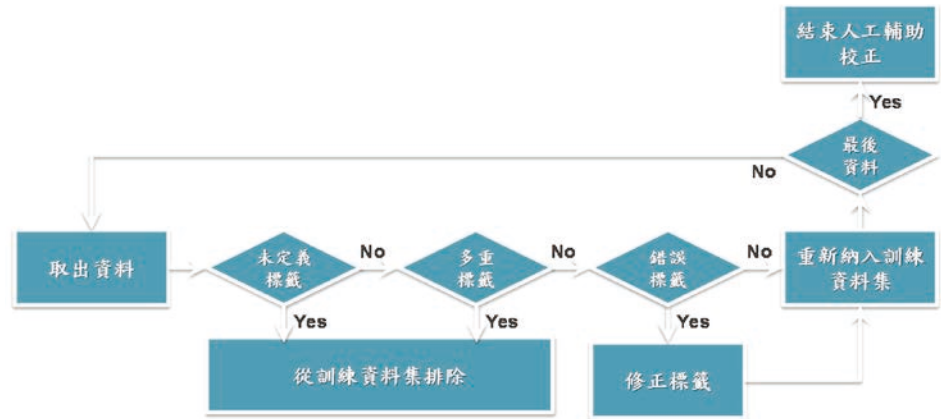


圖 6 在迭代修剪損失施行人工輔助校正的詳細流程

供一個高品質的資料集，以上其實是一個主動學習的迴圈；迭代修剪損失的技術提供擷取功能來尋找標記錯誤的資料，而人工輔助校正則充當人類專家來註解所選的範例，因此基於機械學習的技術可以從較乾淨的訓練資料集中學習到最正確的模式。

		Confusion Matrix						
Predicted Labels	normal	13541 48.0%	0 0.0%	16 0.1%	29 0.1%	2 0.0%	0 0.0%	99.7% 0.3%
missing	0 0.0%	2939 10.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
minor	10 0.0%	0 0.0%	1823 6.5%	1 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	99.4% 0.6%
outlier	26 0.1%	0 0.0%	8 0.0%	377 1.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	91.7% 8.3%
square	3 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	2993 10.6%	0 0.0%	0 0.0%	99.9% 0.1%
drift	0 0.0%	0 0.0%	1 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6453 22.9%	0 0.0%	100.0% 0.0%
Rec.	99.7% 0.3%	100% 0.0%	98.6% 1.4%	92.6% 7.4%	99.9% 0.1%	100% 0.0%	99.7% 0.3%	
		normal	missing	minor	outlier	square	drift	Pre.
		Actual Labels						

(a) 第一個月

		Confusion Matrix						
Predicted Labels	normal	12926 49.0%	0 0.0%	6 0.0%	2 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	99.9% 0.1%
missing	0 0.0%	2963 11.2%	0 0.0%	1 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100.0% 0.0%
minor	3 0.0%	0 0.0%	1609 6.1%	4 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	99.6% 0.4%
outlier	4 0.0%	0 0.0%	2 0.0%	243 0.9%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	97.6% 2.4%
square	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3211 12.2%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
drift	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	5399 20.5%	0 0.0%	100% 0.0%
Rec.	99.9% 0.1%	100% 0.0%	99.5% 0.5%	97.2% 2.8%	100% 0.0%	100% 0.0%	99.9% 0.1%	
		normal	missing	minor	outlier	square	drift	Pre.
		Actual Labels						

(b) 第二個月

圖 7 本次監測示範案例兩個月改善之混淆矩陣

結語

在持續且長期的監測過程中會產生大量的數據，其中不乏許多異常數據，本次監測使用一座大跨徑斜張橋為示範案例，導入模式識別網路來取代人工檢測與分類的過程，監測資料一筆為一小時，若是直接使用時域的加速度數據進行學習、檢測與分類，會讓機械學習模型龐大且較無效率，因此案例使用統計資料作為類神經網路的輸入資料。初步檢測與分類結果顯示模式識別網路能夠高效區分正常訊號與各種異常訊號，僅在單一異常訊號的分辨結果較為不好，經過逐步檢視各個時域的加速度數據，揭示標記錯誤的影響。接著，示範案例導入人機協同的迭代修剪損失來人工介入損失較大的訓練資料，施行輔助校正，確認

標記正確與否或修正標記錯誤的資料，最終改善機械學習模型的效能，並且同時確保標記正確的訓練資料集，因此分類器可以從較乾淨的資料集中學習到最正確的模式。

參考資料

1. Brownjohn, J.M. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365 (1851), 589-622.
2. Karbhari, V.M. and Ansari, F. (Eds.). (2009). Structural health monitoring of civil infrastructure systems. Elsevier.
3. Toh, G. and Park, J. (2020). Review of vibration-based structural health monitoring using deep learning. Applied Sciences, 10(5), 1680.
4. Yi, T.H., Huang, H.B., and Li, H.N. (2017). Development of sensor validation methodologies for structural health monitoring: A comprehensive review. Measurement, 109, 200-214.
5. Bao, Y., Tang, Z., Li, H., and Zhang, Y. (2019). Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring. Structural Health Monitoring, 18(2), 401-421.
6. Tang, Z., Chen, Z., Bao, Y., and Li, H. (2019). Convolutional neural network based data anomaly detection method using multiple information for structural health monitoring. Structural Control and Health Monitoring, 26(1), e2296.
7. Nong, X., Luo, X., Lin, S., Ruan, Y., and Ye, X. (2023). Multimodal Deep Neural Network-Based Sensor Data Anomaly Diagnosis Method for Structural Health Monitoring. Buildings, 13(8), 1976.
8. Chou, J.Y., Fu, Y., Huang, S.K., and Chang, C.M. (2022). SHM data anomaly classification using machine learning strategies: A comparative study. Smart Structure System, 29, 77-91.
9. Jiang, X., Liu, J., Wang, J., Nie, Q., Wu, K., Liu, Y., and Zheng, F. (2022). Softpatch: Unsupervised anomaly detection with noisy data. Advances in Neural Information Processing Systems, 35, 15433-15445.
10. Ren, M., Zeng, W., Yang, B., and Urtasun, R. (2018, July). Learning to reweight examples for robust deep learning. In International conference on machine learning (pp. 4334-4343). PMLR.
11. Bao, Y., Li, J., Nagayama, T., Xu, Y., Spencer Jr, B.F., and Li, H. (2021). The 1st international project competition for structural health monitoring (IPC-SHM, 2020): A summary and benchmark problem. Structural Health Monitoring, 20(4), 2229-2239.
12. 林天邨、黃謝恭、周肇昱 (2022)，使用機器學習和統計資訊進行異常訊號檢測和分類，結構工程期刊，第三十七卷，第四期，第 41-63 頁。
13. Tetko, I.V., Livingstone, D.J., and Luik, A.I. (1995). Neural network studies. 1. Comparison of overfitting and overtraining. Journal of chemical information and computer sciences, 35(5), 826-833.
14. Stehman, S.V. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. Remote sensing of Environment, 62(1), 77-89.
15. Shen, Y. and Sanghavi, S. (2019a). Learning with bad training data via iterative trimmed loss minimization. In International Conference on Machine Learning (pp. 5739-5748). PMLR.
16. Shen, Y. and Sanghavi, S. (2019b). Iterative least trimmed squares for mixed linear regression. Advances in Neural Information Processing Systems, 32.
17. Huang, S.K. and Lin, T.X. (2025). Development of data anomaly classification for structural health monitoring based on iterative trimmed loss minimization and human-in-the-loop learning. Structural Health Monitoring, 24(1), 548-565.



交廣工程顧問有限公司

誠信 | 創新 | 品質 | 服務 | 永續發展

【專業技術整合，橫跨多元領域】

交廣工程顧問秉持「誠信、創新、品質、永續發展」理念，整合結構、土木、排水、橋梁與耐震補強等專業技術服務，深度參與國內重要公共工程，累積豐富實績。

【投入公共參與，重視社會連結】

長期投入公會事務、災後勘災與社會公益，展現對社會的責任與參與。我們致力打造前瞻、安全、永續的工程環境，與夥伴攜手共創價值。

【前瞻創新應用，引入AI與數位工具】

因應數位轉型，公司積極導入AI模型檢核與智慧作業平台，提供AI輔助的室內空間資訊優化服務，實現結構智慧安全。

服務
項目

- | | |
|----------------|---------------|
| 01. 公共工程規劃設計 | 05. 水土保持工程 |
| 02. 工程專案管理監造 | 06. 自來水及下水道工程 |
| 03. 私有建物耐震弱層補強 | 07. 大地及隧道工程 |
| 04. 房屋安檢鑑定 | |

台北總公司

☎ 02-2709-0716

🌐 www.jgce.com.tw

📍 台北市大安區忠孝東路三段52號2樓

桃園分公司

☎ 03-357-2323

🌐 www.jgce.com.tw

📍 桃園市桃園區莊二街24號7樓



國道1號 北外環交流道工程 (第1105S標)之 施工解析

潘小珍／交通部高速公路局第二新建工程分局第三工務所 主任

譚博元／宸茂營造有限公司 總經理

賴凱祥／宸茂營造有限公司 主任

林建志*／台灣世曦公司嘉南工程處 技師

盧志宏／台灣世曦公司嘉南工程處 主任

臺南科學園區成立後引進大量就業人口，為有效紓解國道1號永康交流道及國道8號交通負荷，提供臺南核心地區快速進出國道系統，交通部高速公路局於國道1號台南系統交流道與永康交流道間興建北外環交流道，藉由連結北外環道路之匝道工程，強化區域道路串聯，建構完善運輸服務，預計115年完工後可紓解永康交流道車潮及民眾進出國道之便利性^[1]。揆諸本案國道建設，其管理策略、設計理念、監造品質、施工技術等經驗，更勝以往，藉由實務分享，期在資源有限與成本效益的考量下，使用經濟合理費用，滿足路安、橋安、人平安的服務水準，冀望為後續橋梁工程，貢獻心力。

關鍵詞：臺南科學園區、國道1號、北外環交流道

前言

高速公路局（以下簡稱高公局）於國道1號（以下簡稱國1）台南系統交流道與永康交流道間興建北外環交流道（圖1），藉由國1連結北外環道路之匝道工程，強化區域道路串聯，建構完善運輸服務，未來完工後可紓解永康交流道車潮，節省20～30分鐘旅運時間，提供安平、安南、永康及北區民眾進出國道之便利性。本工程112年9月16日開工，預定115年11月28日竣工（工期1,170日曆天，契約金額13.98億元），增設南下北上各一匝道，並將國1部分路段拓寬為雙向各五車道（圖2），透過分散車流、增加道路容量與優化匝道，提升國道服務水準。

主要工程內容包括：

新設北外環道路 L1 及 R1 匝道

1. L1 匝道（長度 905 m，橋墩 18 座）共分為 6 個單元，除跨越國1採鋼箱梁吊裝外，其餘採場鑄預力箱型梁。
2. R1 匝道（長度 616 m，橋墩 14 座）共分為 4 個單元，為場鑄預力箱型梁。

拓寬臺南系統交流道南入（Ramp6）及北出（Ramp4）匝道

1. Ramp6 匝道採增設 PCI 梁並延伸橋梁懸臂版方式辦理拓寬。
2. Ramp4 匝道以既有路堤填築方式進行路面拓寬。

國1主線車道配置調整

配合北外環交流道新建及國道8號匝道拓寬，將既有3主線+1輔助車道調整為3主線+2輔助車道（316k+000～317k+640）。

* 通訊作者，pqzk@ceci.com.tw



圖 1 工程平面圖



圖 2 現況及完工後車道對照圖

北外環 RD7 及人行（自行車）道施作

配合主體工程重新構築北外環橋下道路，並設置簡易休憩區。

其他配合工程

包括施工便道、施工便橋及構台等假設工程、照明設備工程、周遭景觀工程、交控工程、管線遷移工程及其他各項附屬設施。

工程特色

勞動部自民國 96 年起，為提升整體營造施工安全，推動職業安全衛生優良工程金安獎選拔，獎勵推動職業安全衛生優良之工程。爰此，工程團隊導入營建五化，自規劃設計階段，實施風險評估、選用安全

工法、規劃相關安全衛生設施；施工階段，落實安全衛生管理等，建立完整系統化的職安衛管理機制，以期施工各階段均具備優質的安全衛生文化，達到持續減災、零職災的目標。揆諸本工程營建五化具體作為，臚列如下。

1. 設計標準化：高架橋樁徑一致（1.5 m）、橋墩尺寸統一。
2. 構件預鑄化：預製鋼橋（跨國道段）、鋼構廠製造。
3. 施工機械化：監測模組、機械化施工（樁機、吊具，搭載行車視野輔助系統）。
4. 人員專業化：教育訓練、證照認證、專業分工。
5. 防災科技化：8 套即時影像傳輸監視設備、BIM 衝

突檢核 (Building Information Modeling, 建築資訊模型, 簡稱 BIM)。

施工過程運用營建五化, 由專業團隊群策群力, 在生態保育、永續經營等面向, 兼顧國道建設的永續發展 (ESG), 一步一腳印, 深入台南每一角落, 為南科生活家園的便捷與舒適, 擴大幸福文明的視野, 提升社會經濟發展與整體競爭力; 同時, 接地氣深耕台南、服務人群, 體現傾聽大自然的聲音, 與大地對話, 創造人與土地的和諧永續。

下部結構施工 (以基樁為例)

本工程採全套管混凝土樁 (樁徑 1.5 m) 施工, 此工法已十分普及, 取代打擊式基樁及反循環基樁, 可減少水污染、空氣污染、土壤污染, 有效降低噪音及震動, 國內廠商具有足夠之機具可供調度, 相關高風險危害及執行對策 (圖 3)、施工要點如下:

1. 配合交通維持計畫, 善用基礎間之場地作為施工場所, 審慎規劃施工機具動線 (繪製機具現場配置圖, 循序滾動更新)。
2. 預先協調管線單位辦理遷移作業 (仰賴訓練有素的工程團隊, 平時即就圖說、規範及疑義澄清主動檢討), 關鍵在「超前部署, 未雨綢繆」。
3. 妥善規劃營建剩餘土石方處理計畫, 噪音及震動等污染防治作業 (敦親睦鄰)。

上部結構施工 (場鑄預力箱型梁、鋼箱梁)

場鑄預力箱型梁

1. 本橋型採場鑄逐跨施工方式, 底部設置減振支架, 兼顧行車安全與舒適性, 減少對橋下交通影響。
2. 場鑄逐跨工法具有經濟性高, 且可靈活配合現況等優點, 惟需利用橋下空間設置支撐架。
3. 新舊橋面以固接銜接, 取代縱向伸縮縫。
4. 澆置早強無收縮混凝土 (齡期強度規定, 4 小時達 200 kgf/cm² 以上、48 小時達 280 kgf/cm² 以上、28 天達 420 kgf/cm² 以上)。
5. 新舊橋面銜接, 過往採鋪設防水膜以達防水需求, 考量養護經驗回饋, 通車後營運階段與瀝青鋪面黏結力不佳, 導致路面損壞造成養護困擾, 於新舊混凝土交界處改採 ASTM D41 防水瀝青黏層, 以提升施工性及耐久性。

鋼箱梁 (圖 4)

1. 鋼梁於鋼構廠製造 (源頭管理), 與下部結構並行作業, 縮短工期 (分進合擊, 雙管齊下)。
2. 鋼構橋梁跨越國 1 主線, 跨度達 85 m, 施工挑戰性高, 規劃於路肩外國道閒置場域進行地組作業, 吊裝採分階段夜間封閉國道施工 (22:00 ~ 06:00), 於中央分隔島綠帶空間設置臨時支撐架, 日

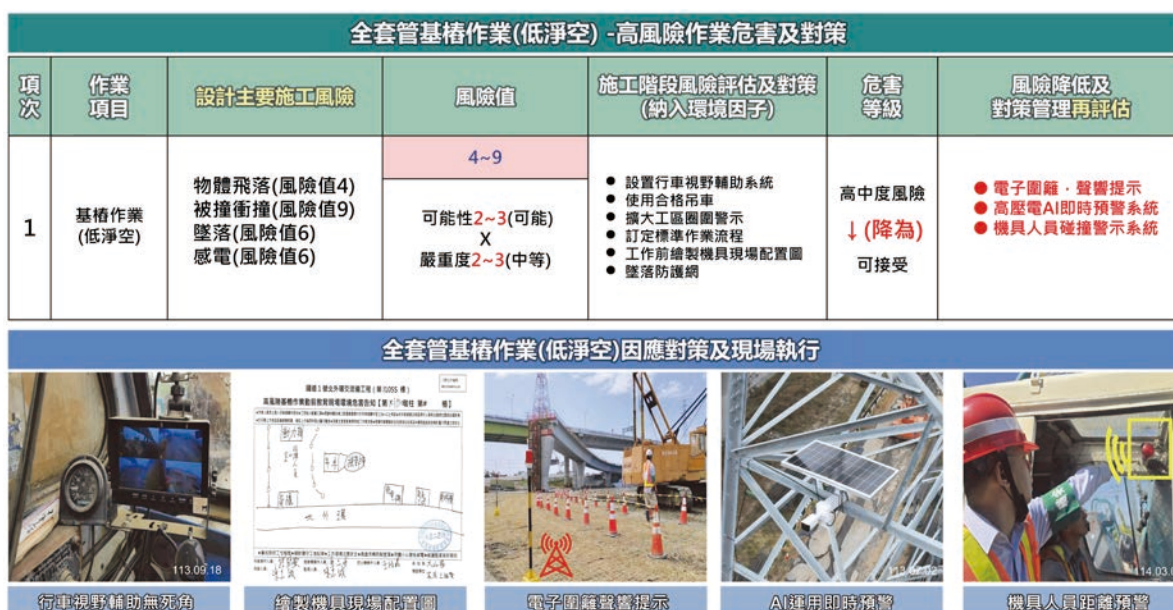


圖 3 高風險作業危害及執行對策 (以基樁為例)



圖 4 上部結構施工（以鋼橋為例）

間不影響交通運行，以減少吊裝荷重，有效降低作業風險（穿著衣服改衣服，因地制宜）。

- 鋼橋管理依循 PDCA，包括（Plan）鋼板進場材料納入施工計畫送審核定、（Do）依計畫執行材料清點、（Check）每月進度會議滾動檢討、（Action）檢驗確保成品品質；施工期間，高公局、監造偕洽廠商召開施工月會，製表列管「廠製數量、銲道品質、NDT 成效、假安裝期程」，定期辦理新進工班教育訓練（開工至今已辦理 4 次），說到做到，一次到位。

維護管理策略與計畫（圖 5）

本工程為高架橋，施工過程需考量營運階段管養人員檢測需求，包括橋梁外觀（混凝土或鋼材）及附屬設施（支承、欄杆、路面等）；綜觀全生命週期之橋

梁維護管理策略特點有四：

- 推廣橋梁延壽及維護管理觀念，建立橋梁生命週期導向之養護與安全監測，達成預防性維護、資訊回饋、延長橋梁使用壽年與生命週期評估。
- 確立橋梁構件預防性定期維護工作範圍，合理有效的依各橋梁特性建立所處環境中之週期曲線，循序率定改善範圍。
- 蒐集定期檢測資料、維修工法、成本單價資料庫，綜整歷年已完成工程案例，建立分析評估標準、構件維修紀錄，落實生命週期管理。
- 登錄橋梁管理系統（Taiwan Bridge Management System，簡稱 TBMS）記載橋梁基本資料及檢測維修資訊，藉由資料庫統計分析，研判橋梁使用特性，提出有效管理對策，掌握橋梁結構與用路人之安全狀況。



說明：高公局納管橋梁及邊坡基本資料、竣工圖資、歷年之檢（監）測、巡查及養護紀錄，確實掌握橋梁結構、邊坡與設施現況，做為後續維管依據。

圖 5 維護管理作為

高公局攜手台灣世曦公司、宸茂公司，投入橋梁防災技術開發，建置包括「橋梁維護管理模組、橋梁災害管理模組、InSAR^[註1]安全監測管理模組」之國家級災害管理平台^[2]，冀望在公共工程減災、預警、監測方面，發揮專業知能，回饋社會，善盡企業社會責任。此外，藉由世曦防災中心與管理機關建立技術交流之合作平台，未來亦可協助橋梁管養機關建置相關橋梁維管資訊與防災計畫，加速安家固園工作，建構永續國土安全環境，作到人人作防災、達成家固國強的目標。

[註1] InSAR 知識科普

- 干涉合成孔徑雷達 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)
- 透過衛星觀測地表變化量，根據地表與衛星間距離的改變所造成雷達回波相位的差異，以同一地區、同軌道、不同時間之多幅雷達影像進行干涉，再經由相位回復取得地表變化量 (衛星觀測頻率 1 次 / 雙週)。

RFID 晶片應用^[3,4]

本工程混凝土試體導入 RFID 晶片 (無線射頻辨識, Radio Frequency Identification)，將晶片埋入試體中，監造透過 RFID 掃描器，讀取識別碼 (TID)，可追蹤試體流向、系統化存取檔案、監控防弊，具有「降低人力負擔、減少混凝土試體送樣時間、減少試體遭調換」的優點 (圖 6)，解決傳統紙張保存及抄寫出錯發生率，有效識別讀取追蹤，提高效率。

RFID 原理，係將晶片以水平方式植入試體表面

(深度離表面 1 ~ 2 cm 為原則)，由讀取器發射特定工作頻率之無線訊號，感應電流獲取能量，再解碼處理完成鑑別，使試體具有身分辨識，達到整體生命週期資料保存與後續維護管理 E 化效益。

施工遭遇困難與解決對策 (以管線為例)

本工程國道基礎施工，面臨既設管線群 (如中油 26 吋天然氣管、12 吋輸油管、台電特高壓電力管) 遷移障礙，為確保工進不致受管線影響，除依例辦理試挖外，亦可在設計、施工階段，直接面對管線進行處理，即調整結構施作方式及工序，完成墩柱開挖，以減少管線遷移影響工進之風險。

本案墩柱緊鄰管線條狀施工帶，各工區工作相互掣肘，施工首重動線，基樁、開挖施工時間冗長，機械物料繁多堆滿橋下施工空間，估計自配合機具施工臨時擋土措施起至支撐系統完成恢復動線止，工期至少超過六個月，倘若起始動工或施工過程中遭遇不可抗力因素問題而展延，將嚴重影響工程進度，故本區段分別與中油公司、內政部國土署、台南市政府等，協調管遷及施工便道，並將工區範圍外擴作為施工動線，始能啟動施作。

施工團隊經與各單位誠懇溝通 (敦親睦鄰)，天然氣幹管遷移順利並提早 3 個月完成，橋下各障礙問題的處理逐步開展，相關施工障礙排除方式，歷程如圖 7。



圖 6 應用 RFID 於混凝土試體



圖 7 管遷遭遇困難與解決對策

結語

1. 本案施工過程，仰賴團隊組織完整且專業人力足夠，做實事、接地氣，超前部署管控人、機、料，主動輔導廠商辦理品質管制工作，說到做到，做到有效，持續守護橋梁安全。
2. 本案組成國道技師團（機關、監造、廠商）並常駐工地，除保障用路人之行車安全，更確保施工環境安全，用心、盡心做好每件事，團隊真的揪甘心。
3. 凡事豫則立，不豫則廢，成功永遠是給予做好準備的人，主辦機關、顧問公司、營造廠三位一體，持續維持道安、推動多項精進作為，品質的盡心付出、安全的貼心作為，台南民眾都看在心裡，藉本文給辛苦的工程人員，讚美喝采。

誌謝

本文承蒙交通部高速公路局第二新建工程分局與第三工務所之指導及支持，謹致謝意。

參考文獻

1. 交通部高速公路局，「橋梁耐震補強設計注意事項」，第 3-43 頁（2024/04/01）。
2. 熊德維、潘小珍、莊明哲、謝政璋、林建志、黃永輝、魏子洋，「營建施工品質及安全管理之精進作為（以國道 8 號耐震補強工程為例）」，中華技術 141 期，第 80-93 頁（2024/01/31）。
3. 何明錦、王隆昌、林祐正、梁家郡、顏漢輝，「無線射頻辨識（RFID）置入於營建材料與構件之應用研究」，內政部建築研究所協同研究報告，第 3-52 頁（2007/12/01）。
4. 林佩誼、黃永輝、林建志，「國 8 橋梁永續建設之創新思維－以 112 年雙金耐震補強工程為例」，技師期刊 105 期，第 73-82 頁（2024/06/01）。





永續低碳與宜居城市—— 第八屆亞洲地工合成材料會議 及布里斯本散記

周南山／臺灣大學土木工程學系 兼任教授、中國土木水利工程學會工程永續與環境美學委員會 主委

2025 年 6 月 8 日應邀參加了亞洲第八屆地工合成材料會議（GeoAsia 8），在澳洲布里斯（Brisbane）舉行。

雖然此時澳洲已入初冬，天氣乾爽微涼（約攝氏 10 至 20 度），但仍艷陽高照，安全舒適，頗適合會議及旅遊。

布里斯本城與布里斯本河

布里斯本城市被一條秀麗且曲折蜿蜒的布里斯本河切割為二，北岸為中央商業區（CBD），南側則為住宅及休閒區（圖 1）。布里斯本是 2032 年奧運會的舉辦地，風光明媚，宛如世外桃源（圖 2 和圖 3）。

Geosynthetics 與 IGS

所謂地工合成材料（Geosynthetics）是指用於土壤工程中的合成材料，主要包括地工織物（geotextiles）、地工膜（geomembranes）、地工格網（geogrids）、地工墊層（geocomposites）等。這些材料被廣泛應用於基礎



圖 1 布里斯本城被蜿蜒的河流分割為二，北部為中央商業區（CBD），南側為休閒區及住宅區



圖 2 夕陽下的布里斯本河



圖 3 美麗的布里斯本河及故事橋 (Story Bridge)

建設、土壤加固、排水、污染控制等多個領域，以改善土壤性能、增加結構穩定性和耐久性，並降低工程成本。這方面的發展日新月異，而且因具節能減碳的特性，因此近年來特別受到土木工程界的重視。

會議是由國際地工合成材料學會 (International Geosynthetic Society, IGS) 主辦。IGS 是一個專注於推廣土工合成材料研究、應用與教育的國際性專業組織。IGS 定期舉辦全球性會議 (包括亞洲的 GeoAsia 會議)、研討會與展覽，促進科學交流與技術創新。臺北在三年前曾主辦亞洲第七屆地工合成材料會議 (GeoAsia 7)。

本次會議在南岸 (Southbank) 的布城會議中心舉行，主題為討論各種地工合成材料 (Geosynthetics) 及其在土木、水利、環工、礦業方面之創新應用，約有亞洲各國代表共 450 人參加。

我的主題報告 (Keynote Speech)

我有幸受邀擔任主題報告人 (Keynote Speaker)，被安排住在會議中心旁的 Redges Hotel，非常方便。

大會共邀了十一位 Keynote Speakers，其中四位是華人，包括堪薩斯大學的韓杰教授、新加坡大學的周順和教授、同濟大學的徐超教授和我。

我在第一天上午發表：Sustainable Geosynthetic Engineering: Applications in Green Reinforced Soil Walls and Sponge Cities (地工合成材料之永續應用：綠色加固土壤結構與海綿城市)，為時五十分鐘 (圖 4)。主要

探討採用可植生的回包式加固土壤結構符合當前減碳的趨勢 (圖 5 至圖 7)。此外也探討了地工合成材料在海綿城市的應用，包括滯洪池及 JW 透水鋪面。

不過因臨時加了一段小鳥以樹枝加固築巢，以及鳥懂得結構力學與部份飽和土壤力學的有趣故事 (圖 8)，一時興起而逾時。在介紹臺灣發展的 JW 透水鋪面

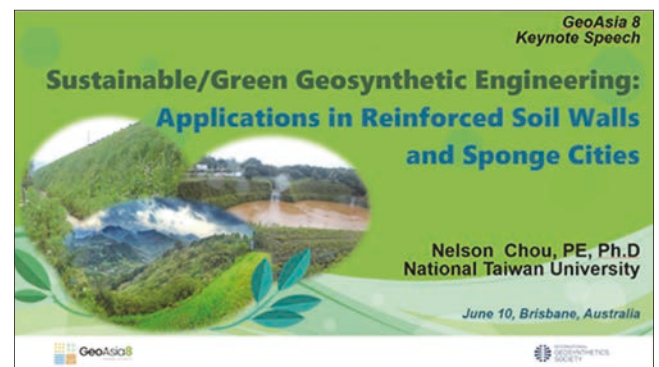


圖 4 筆者應邀在大會中主題演講 (Keynote Speech)，介紹地工合成材料的永續應用

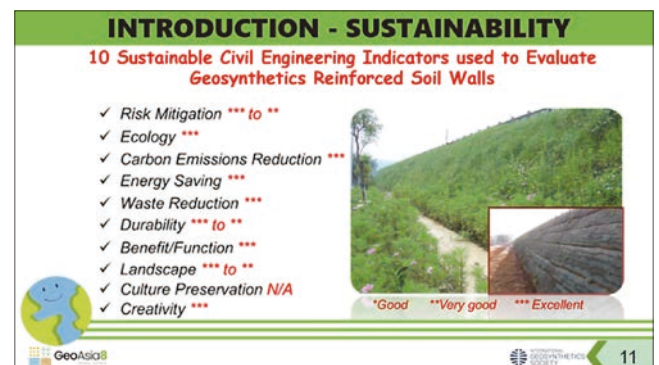


圖 5 以永續 / 綠色土木工程的十大指標評估加固土壤結構

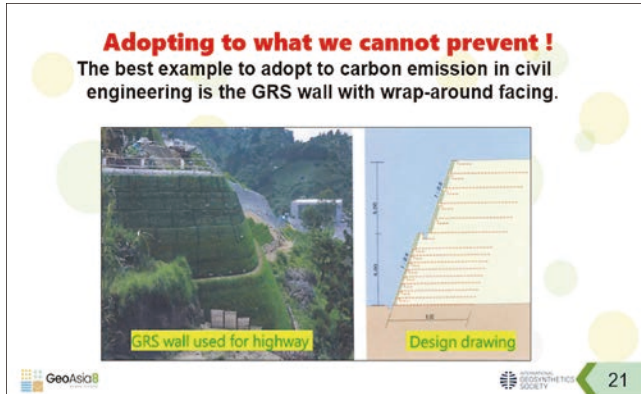


圖 6 加勁擋土牆的特色：可以植生綠化，減少碳排放量

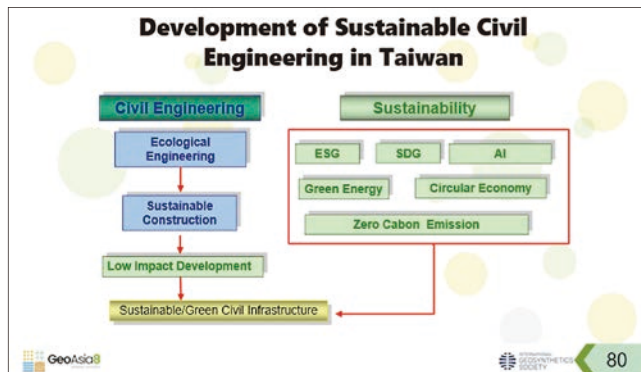


圖 7 臺灣近年來的綠色土木工程發展



圖 8 聰明的小鳥利用樹枝作為築巢的加勁結構，並且懂得拱形結構力學和非飽和土壤的原理，用口水讓鳥巢更具黏性

時，時間已到，只好以孟子梁惠王篇的

「斧斤以時入山林，柴木不可勝用也」
(Take ax and knife to the forest only in the fall,
then the firewood can be used forever)

作為永續 (Sustainability) 之結尾 (圖 9)。在土木工程的演講中順便宣揚中華文化，大陸學者認為頗有意義，且屬形而上的哲學理念。本段文字，英文翻譯比中文還清楚。原來「柴木不可勝用也」是「柴木可以勝用也」之意！中文還真不容易！

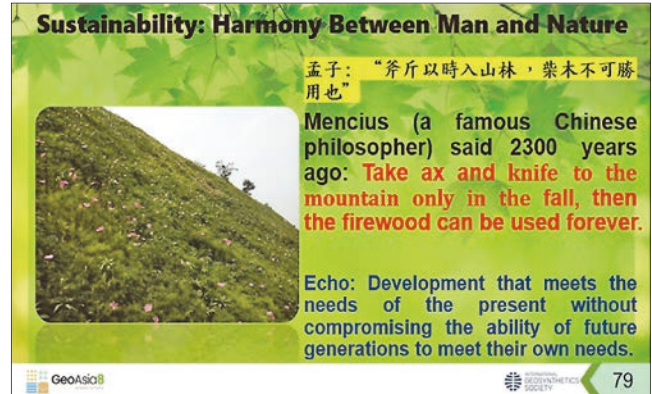


圖 9 結論：孟子曰：「斧斤以時入山林，材木不可勝用也」

除了我介紹了阿里山台 18 線附近的加勁式潛壩 (Check Dam, 圖 10)，台大楊國鑫教授的外籍學生和盟鑫公司的謝工程師也分別介紹了這座應是世界首例的加勁潛壩。相信不久之後，世界各國都會廣用加勁結構做為土石流的正向消能壩 (Check Dam) 或側向導流堤 (Diverting Dike)。



圖 10 阿里山台 18 線附近下游加勁潛壩 (Check Dam) 可能是全世界的首例

國際會議的趨勢

這次會議完全做到無紙化，沒有一大本論文集，連會議的節目單都不印出，完全存在 APP 中，一時還頗不適應，漏了不少該參加的節目。不過相信這會是未來國際會議的趨勢。

另二個國際會議的趨勢是：Un-conference 和 Speedy Consulting。

所謂 Un-conference 是指在原規劃的範圍外新增的專題討論，可能是最熱門的議題，報告者也不必在一年前交摘要或論文，可臨時報名參與討論。我主講的永續工程即是屬此類。

另一種 Speedy Consulting 則屬 Panel Discussion，由幾位專家組成，觀眾可即席提出任何問題，徵求專家意見，為時九十分鐘，遠比一般 Q&A 的時間長，可以充份討論。

我在此 Speedy Consulting Session 中提出加勁結構背填土應容許採用現地土壤（On-site Soils），而非美國 AASHTO 所規定的砂土限制。幾位 Panelists（如韓杰教授）都表贊成。大家都同意只要做好排水及夯實，現地土壤比較經濟、環保及節能減碳，符合目前永續低碳及循環經濟趨勢，並無不可。我也以臺灣的成百上千個案例證明其可行性，但前提是需做好內部及外部排水措施，及夯實時含水量要控制在最佳含水量正負 2% 以內。

現地的土壤也許並不完美（如粘性土），但若工程師將現地土壤棄置，而從老遠運來砂土，這正如同一位醫生看到病人情況不佳，即予放棄而不醫治一樣，都是怠忽職守。何況加勁土壤本來就是用加勁材料來彌補土壤之不足（如缺乏張力強度、剪力強度不強等），除非在河岸的常水位下，實不宜自廢武功。

我也代表中華臺北分會參加亞洲地區分會座談，報告了臺灣政府和民間近年來在近零碳排所做的努力。包括：投標廠商在綠色環境、綠色工法、綠色材料、綠色能源上之要求及獎勵，以及土工合成材料（尤其是在加勁土結構）的一些創新應用。包括：回包式植生加勁擋土牆的大量應用，以及泥石流在導流堤、潛壩、滯洪池的諸多世界首例應用。

我們認為：由於水泥一項就占了世界碳排放量的 1/10，推廣能植生的加勁擋土牆以替代 RC 牆，可以達到碳中和甚至負碳排（草和樹能釋放出氧以中和碳），是土木工程中非常罕見的負碳排技術，值得全球推廣。

兩岸的學者交流

除了徐超、劉華北等知名學者，在大會中也聽到幾位年輕學者的報告，如石家莊鐵道大學王志杰教授、哈爾濱工業大學林闖教授、加拿大維多利亞大學林城教授和臺灣大學吳俊緯博士生等。他們多曾在歐美留學，英語字正腔圓，內容以實驗成果為主，顯示未來接班人的卓越水準。另有一節 China Session，報告大陸的土工合成材料現況，不論研究、手冊或材料均頗為完整，尤以在礦區的應用，令人驚艷。

兩岸的學者在此國際場合熱烈交流，多以中文交談，沒有政治干擾，水乳交融。王志杰教授找到一張 2013 年韓杰教授、志杰教授和我 3 人在義大利博洛尼亞的一場加勁擋土結構會議初次會面的合照，這次三人再次聚首，乃站在原位置，另拍一張合照，兩相比對，看看 12 年後誰變化最多，非常有趣。（圖 11）



圖 11 韓杰教授（中）、王志杰教授（右）和筆者，12 年後再相聚是否有很大變化？

利用休息時，我們幾位教授也沿著布里斯本河的河道（River walk）散步。在南側公園居然發現孔子的雕像（圖 12），是由山東省濟南市贈送給布里斯本城市的。沿途繁花似錦，居民喜歡跑步及自行車運動，形成一幅美麗又安全的風景線。

大會展覽及晚宴

這次展覽區也以大陸廠商最多，約近四成。臺灣的參展廠商只有一家——盟鑫工業公司（ACE）。但位置居中的盟鑫公司王總經理（Amie Wang）以流利的英語穿梭在各種場合，人氣似乎最旺。盟鑫行銷達六、



圖 12 在布里斯本河南側公園有一座孔子的雕像

七十餘國，而且自費創設綠色工程教育園區於台中，供各界免費參觀。園區設施包括各類型的加勁擋土結構及各種地工合成材料的應用實例，規模龐大，嘉惠工程師與學生，非常用心。

晚宴在布里斯本河北岸的餐廳舉行，穿過波光豔影的人行橋，有燈光絢麗夜景襯托，是環境美學的極佳體驗（圖 13）。大會並進行頒獎，謝啟萬教授獲得了中華臺北分會的最佳服務獎（圖 14）。由於謝教授未能出席，由我代表領獎。大會主席也特別說明：地工合成材料是永續材料的最佳選擇（圖 15），看來英雄所見略同。



圖 13 布里斯本的美麗夜景，河的對面是會議的晚宴地點



圖 14 謝啟萬教授獲得了中華臺北分會的最佳服務獎



圖 15 大會晚宴主席特別說明：地工合成材料是永續材料的最佳選擇

美麗的錯誤

大會結束時，忽聞臺灣名詩人鄭愁予仙逝。我在大一暑期參加臺北的復興文藝營，曾親炙先生的詩教。大二時我們也曾邀請詩人前來成功大學演講，朗誦他那膾炙人口的「錯誤」：

我達達的馬蹄是美麗的錯誤
我不是歸人
是個過客

水泥身為重要的建材，達達的馬蹄也跨過了輝煌的世紀，奈何碳排太多，應該是美麗的錯誤，終將在永續低碳的趨勢下，不是歸人，而只是過客。

Less Cement, More Geosynthetics。若能採用更多的地工合成材料替代部分的水泥，對工程減碳將有很大的助益，也是綠色土木工程重要的一環。

布里斯本印象

布里斯本是澳洲的第三大城，人口含郊區衛星城約 250 萬。城市被蜿蜒的布里斯本河分割為南北兩岸。參加會議時是住在南岸的會議中心旁，會議結束後搬到北側的市中心區，因此得以從不同角度來欣賞這美麗的城市。

會後我們多停留了五天，除了訪友之外，也趁機會實地體驗他們採取的永續城市設計。安步當車，逛遍了布里斯本的中央商業區，包括植物園、袋鼠角人行橋、Queen St Mall、市政廳、博物館、中央車站等，也在 Riverside 乘船站兩度搭乘橫渡兩岸的 City tour 交通船（圖 16）。該船只需要 50 分澳幣（台幣 10 元）即可乘坐約 1 小時半的行程回到原點，沿途觀賞布城壯麗的夜景（圖 17）。這交通船居然能開到半夜 12 時才收工，可見治安良好，與美國 downtown 早早關門，大相逕庭。



圖 16 聯絡南北兩側的交通船每 15 分鐘一班，收費僅 50 分澳幣（10 元台幣）



圖 17 從交通船上欣賞故事橋夜景

比起美國來，這裡治安良好，沒有槍枝威脅，更沒有零元購，和我們 1970 年代來美國留學時的環境相似，但天氣更好。

下面是我對布里斯本的一些初步印象：

- (1) 城市整潔，沒有街頭流浪漢，沒有街邊垃圾，更沒有破破爛爛的違章建築。台北市的市容比起布城，還有一段距離。雖然人口數相差不多，而且布城沒有捷運，但在市中心區汽車數量似比台北少了很多，因為他們鼓勵搭乘公車，市中心區的停車收費非常貴。在某些熱鬧地區，甚至設置於地下隧道為公車專用道路，所以搭車時需要乘坐電梯進入地下室搭乘，類似我們搭捷運的方式，頗為罕見（圖 18）。



圖 18 公車專用道路設在隧道，所以搭車時需要乘坐電梯進入地下室搭乘

- (2) 街頭酒吧林立，且以年輕人為主要顧客群，甚至女生的比例也近一半。三五成群，嘻嘻哈哈，但似乎並非做生意的交際，而多是同事之間的聯誼聚會，尤其是在週五晚上更是明顯。可以看得出澳洲的年輕人是愉悅的，是滿意的，是樂於消費的。他們的待遇，據我的瞭解，比台灣高出很多，而且並不像台灣如此重視高科技，只要有一技之長，並不在意是否需進大學，藍領白領皆有出路，貧富差距不大。最重要的一點是，幾乎大家都是移民，只是先來後到而已，所以對華人不太會有歧視的現象。我們印象中的白澳政策其實在 1973 年即已停止，但黑人的確不多見。

(3) 這裡沒有颱風，沒有地震，降雨量也不多，算是天選之國，因此土木建築的設計也較為單純。但由於氣候變遷，幾年前也曾發生布里斯本河氾濫的情事。而跨越布河的橋樑，除了車行之外，也有許多專門為人行步道和自行車道而設計的橋樑，比較傾向於人本主義。我們住的酒店推窗即可看到人行步道的斜張橋跨越河岸，眩麗而壯觀（圖 19）。

而整個布里斯本城市的街道設計也充滿了鮮豔的色彩，尤其是在 Queen Street Mall 附近（圖 20）。

另外在 Riverside 附近看到樓梯與無障礙車道共構的設計（圖 21），頗有創意。



圖 19 旅舍推窗即可看到人行步道的斜張橋跨越



圖 20 Queen Street Mall 的現代裝置藝術

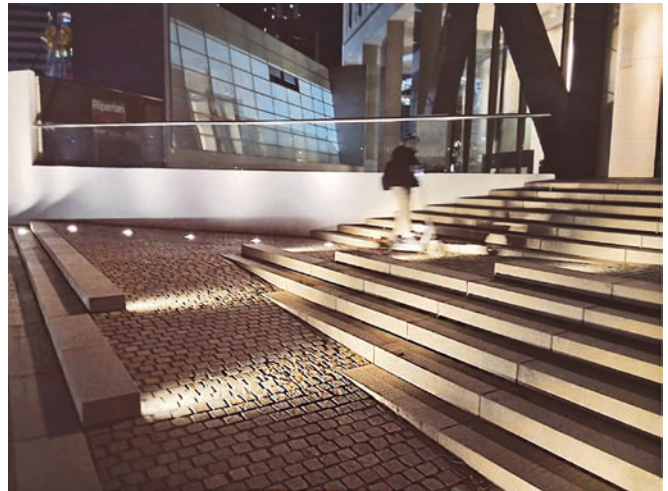


圖 21 樓梯與無障礙車道共構的設計

再會了，布里斯本河的波光艷影

雖然只是浮光掠影在此開會及短期駐留十天，但綜合印象，布里斯本是一個陽光普照、宜居安全、充滿活力的水岸城市，難怪 1988 年世界博覽會和 2032 年奧運會址選擇在此地。

徐志摩在再別康橋一詩對美麗的康河有下列描述：

那河畔的金柳，是夕陽中的新娘；
波光裡的艷影，在我的心頭蕩漾。

我們在布里斯本河的南北兩岸各住了四五天，布里斯本河波光裏的艷影的確在我的心頭蕩漾（圖 22）。

再會了，美麗的布里斯本，雖然不帶走一片雲彩，期待下次仍有機會與妳相遇！



圖 22 布里斯本河波光裏的艷影

宜居城市評比

我試著用宜居城市的指標，來評估曾經居住或熟

悉的台北、台中、丹佛、舊金山、上海、太原、洛杉磯和布里斯本做一比較，如表 1。

表 1 宜居城市比較表

比較項目	權重	台北	台中	布里斯本	丹佛	舊金山	上海	太原	洛杉磯
治安	10%	6	5	5	4	2	6	6	3
		0.60	0.50	0.50	0.40	0.20	0.60	0.60	0.3
交通便利 / 公共運輸	10%	7	5	5	2	4	7	3	4
		0.7	0.5	0.5	0.2	0.4	0.7	0.3	0.4
房價	10%	1	4	5	5	1	1	5	3
		0.10	0.40	0.50	0.50	0.10	0.10	0.50	0.3
氣候 / 天然災變	8%	4	7	7	4	5	3	4	7
		0.32	0.56	0.56	0.32	0.40	0.24	0.32	0.56
環保 / 空污	8%	5	2	7	6	6	3	5	4
		0.4	0.16	0.56	0.48	0.48	0.24	0.4	0.32
醫療保健	7%	6	5	4	4	4	4	4	4
		0.42	0.35	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
就業機會	5%	5	4	4	4	3	3	2	5
		0.25	0.20	0.20	0.20	0.15	0.15	0.10	0.25
基礎建設	5%	6	6	6	6	6	7	4	5
		0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.20	0.25
教育文化	5%	6	5	6	6	6	6	4	5
		0.30	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.20	0.25
市容	5%	3	5	6	5	4	6	4	5
		0.15	0.25	0.30	0.25	0.20	0.30	0.20	0.25
生活物價	5%	4	5	3	2	1	4	6	3
		0.20	0.25	0.15	0.10	0.05	0.20	0.30	0.15
旅遊景點	5%	4	5	5	5	5	6	4	7
		0.20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30	0.20	0.35
公園綠化	4%	4	5	6	5	5	4	4	4
		0.16	0.20	0.24	0.20	0.20	0.16	0.16	0.16
住宅品質	4%	2	4	6	6	4	2	2	4
		0.08	0.16	0.24	0.24	0.16	0.08	0.08	0.16
擁擠程度	3%	2	5	5	5	3	2	5	3
		0.06	0.15	0.15	0.15	0.09	0.06	0.15	0.09
族群包容	3%	5	5	6	4	5	4	5	5
		0.15	0.15	0.18	0.12	0.15	0.12	0.15	0.15
永續導向措施	3%	6	5	5	4	4	4	4	4
		0.18	0.15	0.15	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
總計	100%	4.57	4.78	5.36	4.41	3.83	4.30	4.26	4.34

評分標準：1 極差；2 甚差；3 差；4 普通；5 優；6 甚優；7 極優

在考慮權重的情況下，我個人的宜居城市評分，優選順序為：(1) 布里斯本；(2) 台中；(3) 台北；(4) 丹佛；(5) 洛杉磯；(6) 上海；(7) 太原；(8) 舊金山。除了布里斯本一枝獨秀及舊金山落後外，其餘城市各有千秋，總分相差不大，都屬於普通至優等級。

以上評分，已請教十餘位居住過該城市者之經驗，雖不是嚴謹的學術性系統調查分析，仍應有相當程度的參考價值。

誌謝

本文之宜居城市比較表，承蒙王隆昌教授、吳淵洵教授、張維仲董事長、汪荷清女士、王海廉先生、旅居台中的唐玄蕙女士、旅居上海的孟國慶先生、旅居洛杉磯的陳秉常先生、旅居布里斯本的簡湘芸女士、曾惠群女士、練榮勳先生等提供專家意見，特此致謝！



社團法人

台灣循環經濟學會

Taiwan Society for Circular Economy

為

促進台灣循環經濟於產業之應用，於2019年由臺灣營建研究院籌備號召，特邀產官學研專家及相關公司團體共同籌組。本學會以「結合從事工程、資源再利用、產業經濟之產官學研力量，最佳化自然資源利用及最小化廢棄物產出，共同促進循環經濟技術提升及產業升級，達到資源永續發展之目標」為設立宗旨。展望全球2050淨零排放目標，研究顯示循環經濟可以貢獻約一半減碳量，另一半有賴能源轉型。因此，臺灣在循環經濟推動上需要投入更多資源，並能訂定具體目標，加速各種創新技術及商業模式研發。本學會希望扮演一個有效的合作平台，結合產官學研的智慧，共同為臺灣的永續發展盡心盡力。

期待您的加入

您對循環經濟充滿熱忱嗎？是否想改變營建業的產業型態？趕快加入我們吧！本會經內政部108年8月22日台內團字第1080054010號函准設立，茲公開徵求會員，申請資料請至學會網址下載。



學會網址

會址：新北市新店區中興路2段190號11樓

電話：02-2912-1366

傳真：02-8919-5050

EMAIL: twsce2019@gmail.com





亞新工程顧問股份有限公司
MOH AND ASSOCIATES, INC.

台北 | 台中 | 高雄 | 仰光 | 曼谷 | 新加坡 | 香港 | 北京

運輸工程 | 大地工程 | 數位工程 | 結構工程 | 環水工程 | 專案及施工管理 | 建築、都市計劃、景觀及室內設計 | 機電工程



Tel: (886-2) 2696-1555

Fax: (886-2) 2696-1166

Website: www.maaconsultants.com

E-mail: maagroup@maaconsultants.com



臺北捷運

6線齊發^{2.0}

智慧綠色運輸

全環串聯更便捷



臺北市政府捷運工程局

臺北市中山北路二段48巷7號

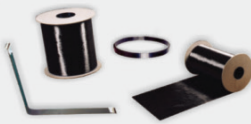
Tel: 886-2-25215550 <http://www.dorts.gov.taipei>



廣告



AD減隔震系列



AEC 碳纖維



AEG 錨固系列

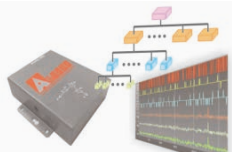


建築修復結構補強

STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM



AE結構補強系列



AM智能監測



AC無收縮水泥
AEX 樹脂砂漿



免費服務電話 台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
0800-009-666 桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw



TYLin

林同棧工程顧問股份有限公司
中棧工程顧問股份有限公司
美商同棧國際工程顧問股份有限公司 台灣分公司

橋梁工程/公路工程/鐵路工程/捷運工程/隧道工程/建築工程/
營建管理/土地開發/機場港灣/環境工程/水資源工程/檢測評估/城鄉規劃/
景觀工程/交通工程/建築資訊模型(BIM)/高科技廠房安全分析/風電綠能生態鏈整合/

台北市大安區仁愛路三段136號12樓1202室 • Tel: 02-27840988 • Fax: 02-27071430
高雄市新興區中正三路2號6樓A室 • Tel: 07-2356956 • Fax: 07-2356959
台中市西屯區市政路402號16樓之6 • Tel: 04-22548803





大豐至統安交流道 國道1號增設南下出口及北上入口匝道
台塑建設獎/ 2013鋼鐵土工程優良獎

義呈實諾 力呈卓越

義力營造創立於民國八十三年，甲等綜合營造業
深耕台灣，致力鑽研土木、環境、建築、區段徵收、開發工程
秉持追求全員工安、品質提升的精神
在誠信踏實的經營態度之下，堅守營建道德崗位
各項工程實績屢獲優良工程金安獎、公共工程金質獎



中沙大橋「全國最大跨河橋梁圍堰抽水換底補修」
金質獎特優/金安獎優等

- | | | | |
|------------------|-------------------------------|------------------|---|
| 土木
工程 | 機場、整地、道路、排水橋梁
圍籬、植樹景觀、管線工程 | 環境
工程 | 掩埋廢棄物分類清除、土壤污染改良
污水處理、復育工程、廢棄物分類減量製造 |
| 建築
工程 | 辦公大樓、廠房新建
特殊建築、集合住宅 | 區段
徵收 | 區段徵收工程
土地填削、公設工程監工 |
| | | 開發
工程 | 工業區開發
社區開發、租賃管理 |



臺中市北屯區中福路553號1樓
電話 04-222-00000
傳真 04-222-00001
E-mail: earthpower@msc-hinet.net
Website: www.earthpower.com.tw



卓越 | 誠信 | 安全 | 技術 | 品質

NOVA



華光工程顧問股份有限公司
CECI Nova Technology Co., Ltd.
HTTP://WWW.CECI-NOVA.COM.TW

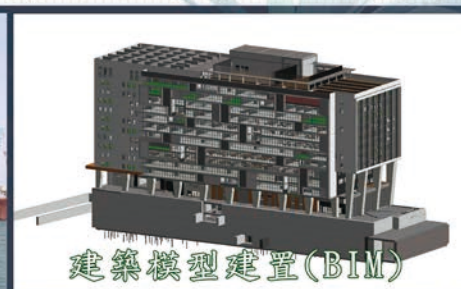
測務善驗
檢服改驗
設分析驗
規技分試
程工測料
工施監材
共商境建
公廠環營



工程規劃設計



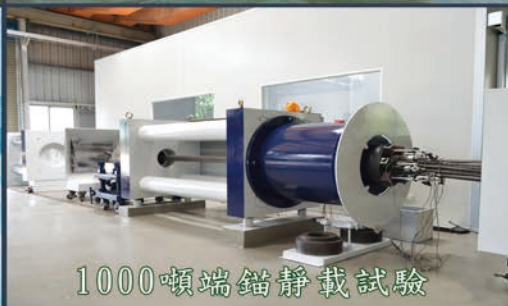
施工技術服務



建築模型建置(BIM)



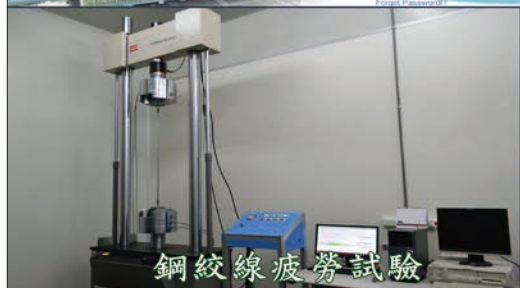
專案管理資訊系統(PMIS)



1000噸端錨靜載試驗



2000噸端錨動態疲勞試驗



鋼絞線疲勞試驗



鋼絞線彎折拉伸試驗



環境監測

潛盾工程

事事多防範
處處都安全

工安做得好
安全沒煩惱

承攬業務：

光電風電及儲能工程/建築工程
人孔管路/污水管線
曲線推管及潛盾工程
鐵塔架線工程/統包工程
潛鑽工程/管線更生汰換

榮獲
工程會108年度公共工程金質獎
經濟部112年度公共工程優質獎
經濟部113年度公共工程優質獎
勞動部113年度公共工程金安獎

通過 ISO45001 及台灣職業
安全衛生管理系統驗證

有效管理
安全第一
卓越品質
永續環保

 真毅營造有限公司

關係企業：展慶營造股份有限公司

80272 高雄市苓雅區六合路42之2號
TEL：(07)226-8989 FAX：(07)226-3722
E-mail：jypd@jenyi.com.tw
http：//www.jenyi.com.tw



水資源開發

掌握每一滴匯聚關鍵
成就人們更好生活而努力

> 本工程取水位置於大壩左岸
包括引水渠道、直立式取水塔、輸水渠道等土木設施
除供應用水需求，也兼具河道放水及緊急洩放庫水的功能
引水工程包括改善上坪壩，目的為減少水庫淤積，延長水庫壽命
並可滿足新竹地區公共給水與竹科園區高科技工業的用水需求。

新竹寶山第二水庫・規劃設計、施工諮詢、溢洪道加高之規劃設計及監造

SINOTECH

