



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，運維決策可更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，以達成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，其支撐型式採用盤式支承，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

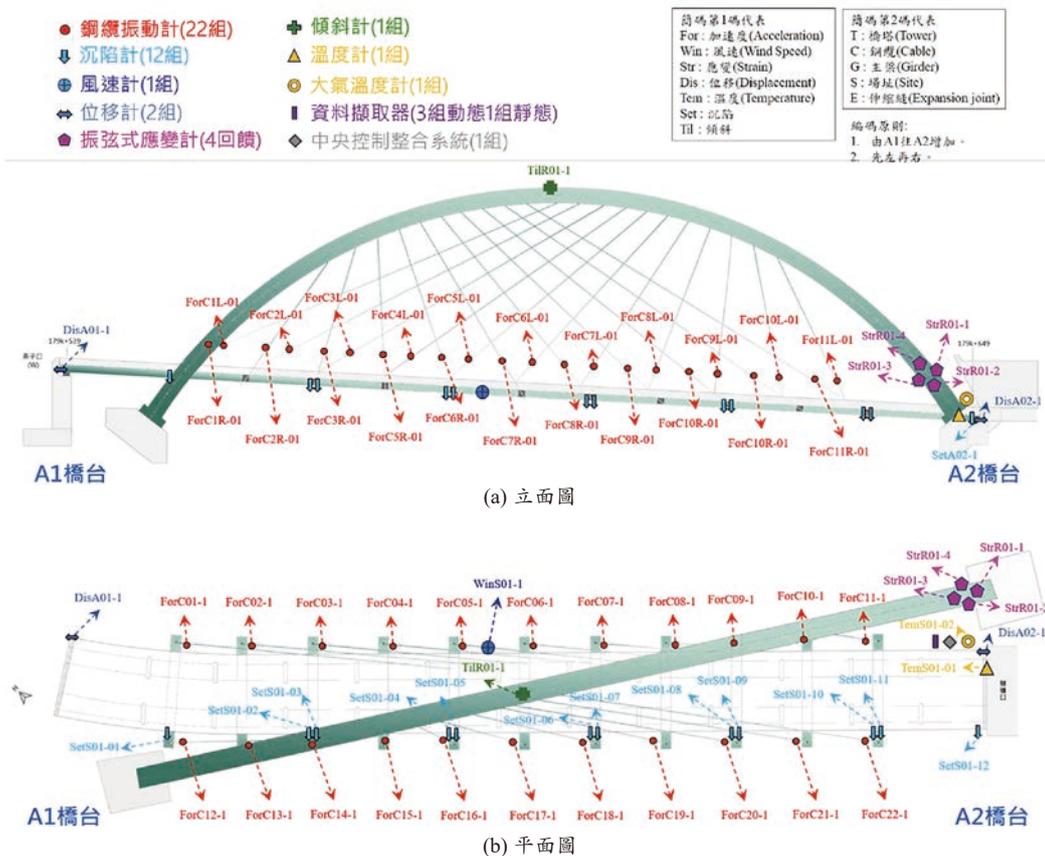


圖 1 監測儀器配置示意圖

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訂程序，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訂程序，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。

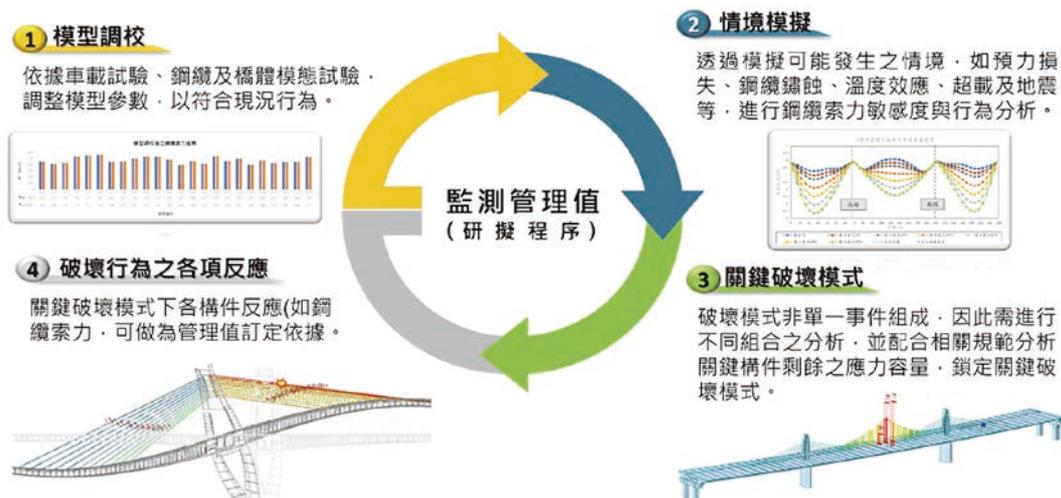


圖 2 狀況評估與管理值研訂程序

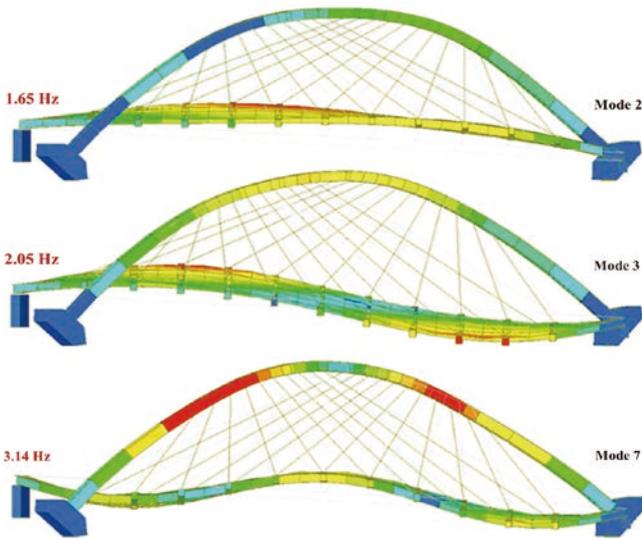


圖 3 橋梁結構模型重力向前三階模態

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

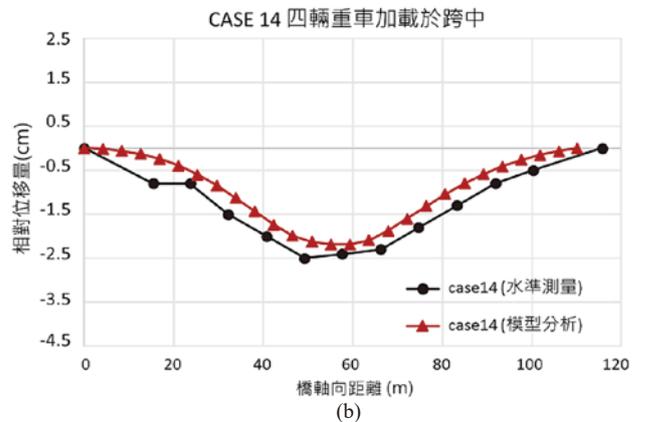
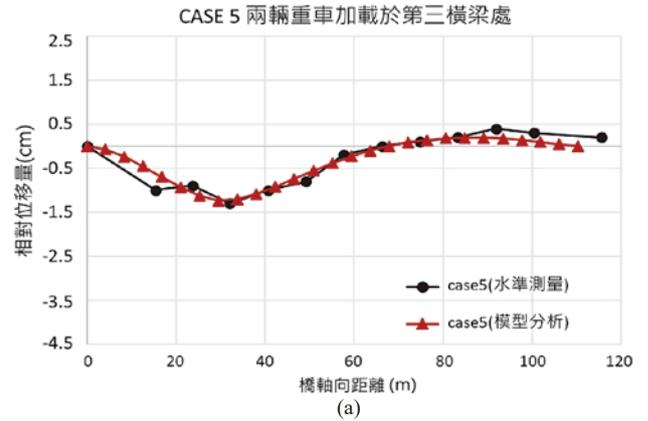


圖 4 車載試驗比對結果

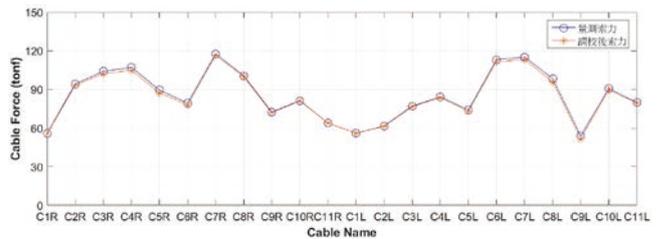


圖 5 鋼纜索力比對結果

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。

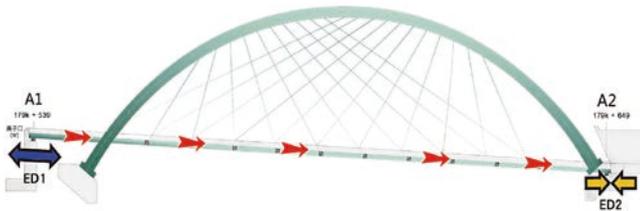


圖 6 震後橋面縱向位移示意圖

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

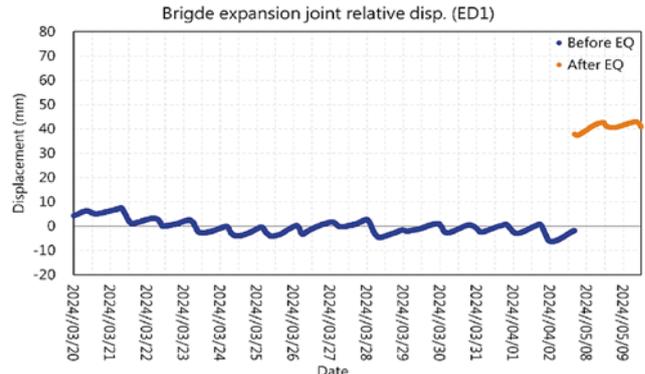


圖 7 橋台 (A1) 處伸縮縫位移計監測數據

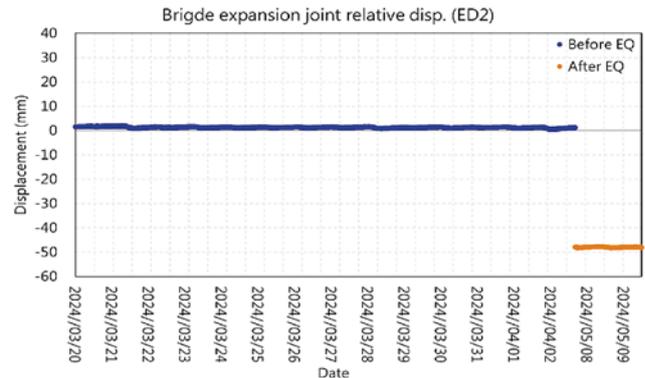
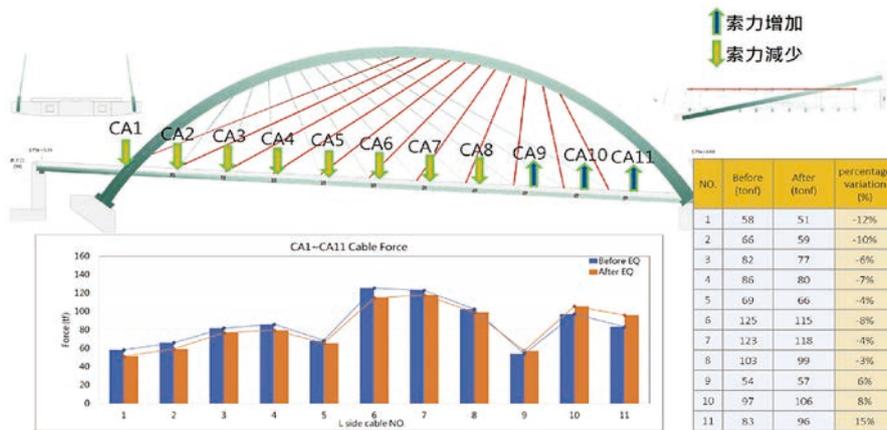
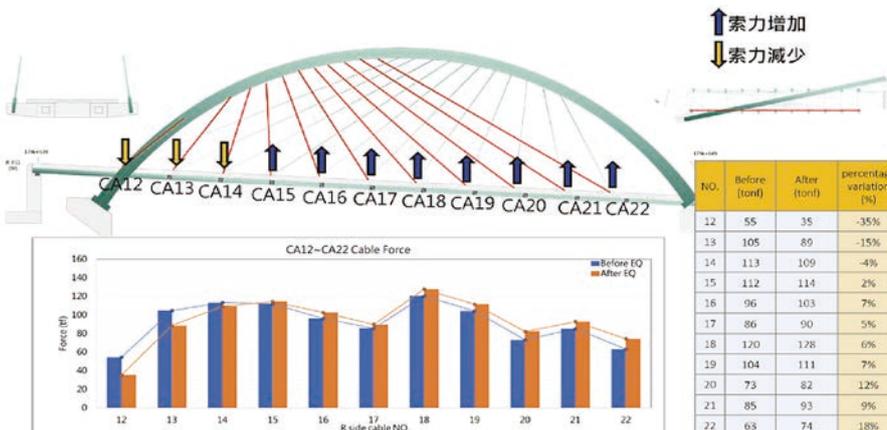


圖 8 橋台 (A2) 處伸縮縫位移計監測數據



(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。

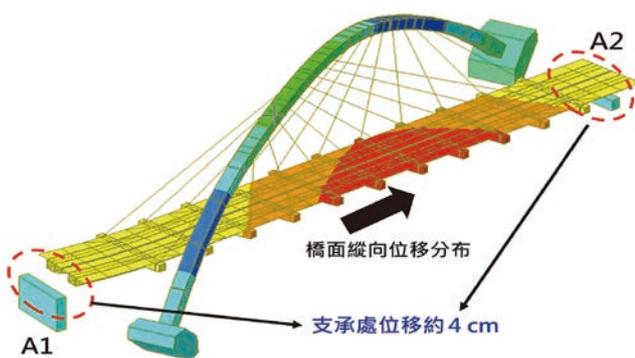


圖 10 震後橋面殘餘位移分析



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

- 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.
- Xia, J. and Zou, G., (2023). "Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: A review," Ocean Engineering, 268:113322.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.