



Morandi 橋崩塌帶來的省思與建議

王炤烈／社團法人中國土木水利工程學會 理事長、台灣世曦工程顧問股份有限公司 總經理

宋裕祺／國立臺北科技大學土木系 教授兼工程學院院長、國家地震工程研究中心 組長

林曜滄／台灣世曦工程顧問股份有限公司 總工程師

彭康瑜／林同棧工程顧問股份有限公司 副總經理兼總工程師

黃炳勳／台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部 資深協理

由本橋瞬間崩塌事件，舉世震驚，造成當地用路人重大傷亡，對於國家有形與無形的損傷，既深且遠，國內橋梁工程界不能不深自反省。台灣的橋梁總數約近二萬八千座，老、中、青各個年代、各種橋型都有；加上國內位處環太平洋地震帶，地震頻繁；又屬亞熱帶地區，氣候高溫多濕，腐蝕環境嚴苛；更面臨氣候變遷的影響，颱風、暴雨侵襲日趨嚴重。我們更應深切檢討，重視橋梁全生命週期管理，以免重蹈覆轍。茲提出橋梁全生命週期各階段應注意的要點，供各界參考與努力方向。

規劃設計階段

- 應採用具有贅餘度高的結構系統，莫蘭迪大橋在結構系統上有個先天弱點，其懸吊系統採用了單根預力斜材，且全橋結構系統的贅餘度 (Redundancy) 亦低，若有稍許損害即造成全橋倒塌。現代橋梁設計應要注意結構系統的好壞，對斜張橋設計亦要採用多股式的鋼纜，以增加整體橋梁結構的贅餘度，避免結構產生脆性破壞。
- 注意耐久性的規劃設計，橋梁腐蝕因子主要為水及鹽分（氯鹽、硫酸鹽等），若橋梁工址位於近海，屬嚴重腐蝕環境。以現今技術，位於腐蝕環境的橋梁，其混凝土可使用 C3A 含量適度之 TYPE II 水泥添加卜作嵐材料（飛灰、爐石上限 45%）、或 IS (MS) 高爐石中度抗硫水泥、IP (MS) 卜作嵐中度抗硫水泥；混凝土應採用較高強度，例如上構採 420 kgf/cm²、下構 350 kgf/cm²，以增加其水密性；鋼纜採同步射出之聚乙烯 (HDPE) 內套管並灌注油脂之鍍鋅單根鋼絞線 (Co-extruded mono-strand)；鋼纜外套管為抗紫外線 (UV) 處理之高密度聚乙烯 (HDPE) 之多重防蝕系統；鋼筋可採鍍鋅鋼筋或 Epoxy 鋼筋及增加保護層厚度等方式，來加強材料與結構之耐久性。
- 鄰近海域受氯鹽侵蝕的混凝土橋梁，在規劃設計階段，對其耐久性設計、檢測與維護的完整體系，應該先要建立整體管養策略，全面加強結構的可維護性，盡量做到「可達、可檢、可修、可換」的目標。
- 橋梁結構系統的設計，除注意結構贅餘度 (Redundancy) 與穩固性 (Robustness) 外，應重視預留日後橋梁檢測與維修的通道。

施工階段

- 莫蘭迪橋塔單元之場鑄節塊懸臂施工，當推進至斜張鋼纜架設完成後，施工中之臨時懸臂鋼腱即予取消，而混凝土箱型梁內部的預力鋼腱，僅局部配置在常時載重的負彎矩區域，導致當預力斜材因損傷變形時，大幅改變彎矩變化後，極易造成混凝土箱型梁斷裂破壞，故工法之選擇及對長期結構之使用安全，應更妥適之考量。
- 工程施工階段，對於材料之品質管控，要落實品質管理制度，確實嚴格執行，對於材料之來源，也應做好查證及檢驗，並留下完整紀錄。對於混凝土結構保護層尺寸、施工縫處理、鋼構材料之防蝕施工，都應遵守作業規定，以確保結構之耐久性能。

營運階段

- 由莫蘭迪橋的崩塌事件，可知橋梁檢測與維護的重要性，目前國內有多座大跨度預力混凝土橋梁，因受長期混凝土乾縮潛變、預力鬆弛等影響，有過大下垂變形問題，以及嚴重腐蝕，或是沖刷、基礎裸露問題...等。除了建立長期的安全監測系統外，更重要的是「起而行」，推動具體的維修補強工程，或是因應可能需要之橋梁改建，及早研擬合宜的交通動線規劃，以利進行橋梁更新的推動，確保用路人的方便與安全。
- 橋梁監測執行：國內橋梁所處環境日趨惡化，復以橋梁管理單位人力不足，維修補強經費有限，國內橋梁劣化或損害以及其安全狀態已成為國人重視之問題。對於重點橋梁而言，對其進行長期健康監測與健康診斷實屬重要，期待相關橋梁維護管理單位，能夠投入更多心力於橋梁監測，以延長橋梁使用年限、發揮橋梁服務功能、降低橋梁結構損壞與避免橋梁崩塌造成生命財產損失的機率。
- 預力混凝土橋梁的鋼腱或鋼纜腐蝕損傷，易造成有效預力損失，甚至突然斷裂，一般傳統的檢測方法，很難確實評估其損傷程度，所以，發展更可靠的非破壞預力檢測技術，更顯重要與急迫。
- 對於檢測項目及內容應妥善規劃，若須委外辦理也應注意編列合理費用，要與工作內容相對應，不要因費用不足因素，產生劣幣驅逐良幣情況。
- 不易接近或隱藏於水中或裝飾板內的橋梁結構構件，如山谷中高橋墩、箱梁內部、橋梁支承、水下基礎、具裝飾板的橋梁，建議應在檢測規範中要求每適當年限內，須作一次檢測，確實深入的檢查到橋梁的每一部位。至於適當年限，可由橋管單位依其實務及所處環境綜合考量訂定檢測頻率。
- 對於有疑慮之橋梁，應盡速進行詳細檢測與安全評估，確實掌握每座橋之使用及安全現況。
- 開發橋梁檢測技術，運用無人機 (UAV)、影像辨識、人工智慧 (AI) 技術，讓科技發展，導入人力密集、外業作業環境嚴苛的橋檢工作；並落實定期橋梁巡查、檢測作業，對橋梁每一結構構件，須詳實記錄損傷及劣化情況，並追蹤或提出改善措施。
- 對檢測人員資格與訓練規定應進行檢討，檢測人員建議登錄系統並管理考核，就猶如人的健檢，會選擇優質可靠的單位及有經驗的醫師。
- 評估後須要維修改善或補強之橋梁，應編列預算執行，且在未完成維修改善或補強前，也應有緊急監測與預警等防災措施。
- 補強採用之工法、補強後之各項承載能力的提升，也應進行驗證，確認其補強效益與目標，注意別提升了 A 項能力、卻影響 B 項能力。
- 汲取國外先進技術，多與先進國家進行技術交流，並持續不斷精進與提升補強技術與開發。
- 各橋管機關因應橋梁日益老舊，橋管人力普遍不足，建議先進行橋梁快篩分析 (Quick Screen)，找出危險及老舊橋梁，進行分級管理，建立短、中、長期減災規劃及預算匡列。
- 建議橋管單位加速開放橋梁基本資料成開放資料 (open data)，可參考如美國國家橋梁資料庫 National Bridge Inventory (NBI) 公佈 2017 年美國橋梁有 615,002 座，每座橋有 116 項基礎資料為 open data，讓更多關心橋梁之民間企業、學研單位從事相關橋梁防減災研發與開發工作，為提升台灣韌性、永續發展的環境奉獻心力。