



災害模擬與防護對策

從應急搶修到主動預防： 臺鐵北迴線小清水溪橋搶修改建工程 之韌性策略與整合實務

陳浩秋／國營臺灣鐵路股份有限公司花蓮工務段 段長

熊德育／國營臺灣鐵路股份有限公司花蓮工務段 施工組組長

許文杰／國營臺灣鐵路股份有限公司花蓮工務段 助理工程師

周行健／國營臺灣鐵路股份有限公司工務處 助理工程師

林舜元／中興工程顧問股份有限公司結構工程部 技術經理

呂斌豪*／中興工程顧問股份有限公司工程管理部 技術經理

林政宇／中興工程顧問股份有限公司工程管理部 工程師

2024 年臺灣東部先後遭受 0403 花蓮強震與凱米颱風之複合型災害，導致臺鐵北迴線西小清水溪橋（K53 + 500）遭土石流沖毀，造成花東交通幹線西正線中斷。工程團隊以韌性導向取代原型復舊，採 40 公尺單跨不落墩下路式鋼桁架橋，將主梁底緣抬高 85 公分、通洪斷面提升約 10%，並以疏運需求為時程控制點，歷時 149 日（提前 7 日）完成，恢復西正線通車。搶修期間於康芮颱風後勘查現地，顯示梁底距淤積面僅約 80 公分惟橋體未受波及，提供橋型轉換後在極端水文條件下的現地驗證。同期間透過西正線之搶修揭露東小清水溪橋橋墩損傷與安全虞慮，臺鐵公司以「預防性管理思維」利用清明疏運後至端午節前的窗口期間辦理停駛進行預防性改建，惟停駛前預先完成橋墩帽梁擴建、纜線遷移及鋼構預製等前置條件，使 42 天停駛窗口得以精準執行，全案僅用 94 日（提前 4 日）完成。2025 年 5 月 18 日西大清水溪橋再遭遇突發災害而封鎖停駛時，東正線新橋即時投入應急調度，驗證預防性改建已轉化為區域鐵路系統韌性的具體能力。

關鍵詞：複合型災害、韌性橋梁設計、疏運導向時程管理、預立思維、不中斷營運改建、系統韌性

前言

臺鐵北迴線為連結臺灣本島西部與花東地區的唯一鐵路幹線，全線自蘇澳新站至花蓮站，全長 79.2 公里，是花東居民通勤、就學、就醫及物資運輸的核心

交通命脈。其中小清水溪橋路段（K53 + 500）位於，和仁至崇德間，緊鄰清水斷崖，橋址位於石公溪出口附近，東側面臨太平洋、西側為高陡山壁，是北迴線地形條件最為嚴峻的路段之一，亦為整條路線最難以繞行替代的關鍵節點，相關位置如圖 1 所示。

小清水溪橋為雙線分離式橋梁，東、西正線各為

* 通訊作者，ahow@mail.sinotech.com.tw

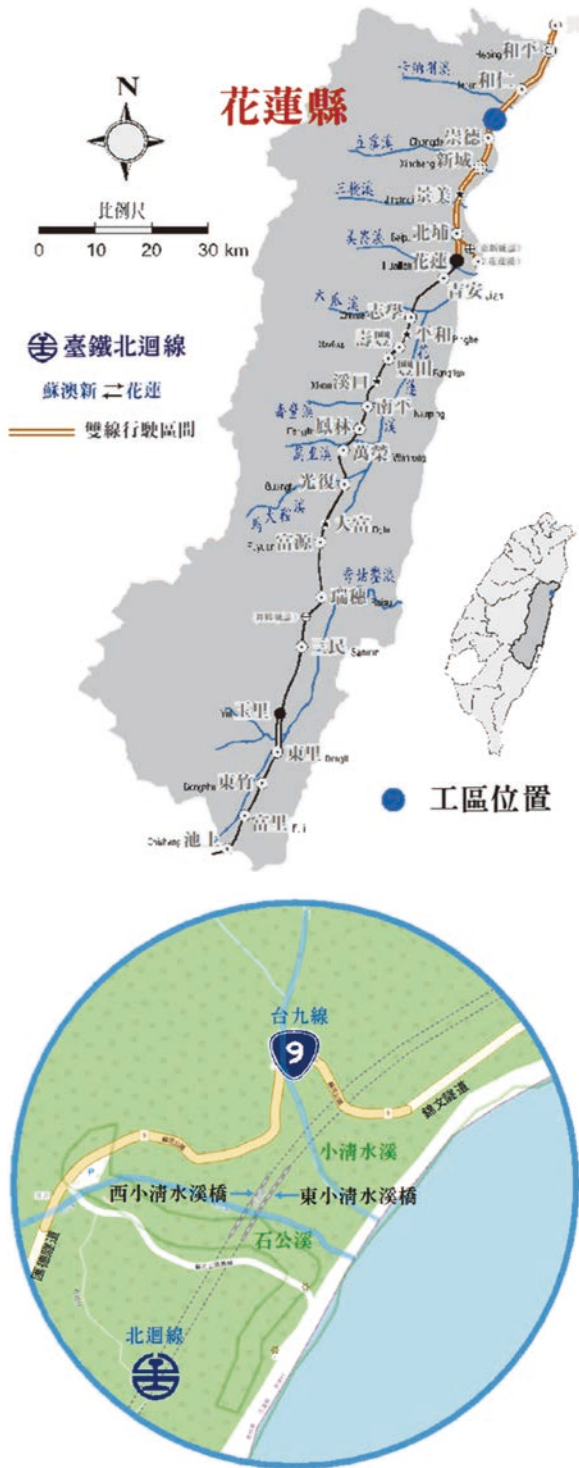


圖 1 本工程工區位置圖

獨立橋梁結構，均屬預力混凝土 I 型梁構造，河道中央設有落墩：西正線建於 1999 年，總長 39.6 公尺；東正線建於 1977 年並於 2003 年完成大梁改建，總長 79.2 公尺。兩橋共用同一橋址，任何一線受損即直接影響北迴線整體運能；若雙線同時中斷，花東地區對外之鐵路交通將完全停擺。正因如此，本橋址任何工程決策均兼具橋梁工程與鐵路系統運能管理的雙重屬性。

2024 年臺灣東部先後受 0403 花蓮強震與凱米颱風影響，形成複合型連鎖災害^[1]。地震造成石公溪流域上游坡地條件弱化，後續極端降雨觸發大規模土石流^[2]，導致西小清水溪橋橋墩遭沖潰、上部結構全面落橋，北迴線西正線中斷，路段僅能依靠東正線單線雙向運轉，災後現場照片如圖 2 所示。而西小清水溪橋施工過程中透過同步清淤時發現，東小清水溪橋之橋墩即使已完成兩層防撞鋼板包覆，仍在衝擊下出現明顯結構損傷。此一結果顯示，原橋型的問題並非單一構件強度不足，而是多跨落墩橋型在高含砂、高流速且夾帶塊石的土石流環境下，河道內橋墩本身即為最脆弱的受力位置；梁底淨空不足亦無法有效因應極端水文事件。原型復舊將重蹈相同的結構邏輯缺陷。

面對此複合型挑戰，工程團隊確立兩項核心方向：其一，以橋型轉換取代原型復舊，從結構邏輯層次消除脆弱點；其二，將工程時程與元旦、春節、清明及端午等疏運需求整合為施工計畫的骨架，使施工管理同時服務於完工目標，交通系統恢復與再災風險降低。本文即從設計策略、施工管理、鐵路營運限制及流域防治等面向，藉以說明由單點搶修轉化為系統韌性實踐的工程實務經驗。



圖 2 小清水溪橋凱米颱風災後受損照片

西小清水溪橋搶修復原工程

疏運目標驅動的時程框架

西小清水溪橋搶修工程自啟動之初，即以「於元旦及春節疏運前恢復雙線行車」為時程管理的主導目標，而非單純追求「儘速完工」。工程團隊以 2024 年 12 月 28 日為原訂恢復通車節點，向前推算各工序之最

晚完成期限，並將中秋連假與國慶停工等限制條件納入整體排程，使工序安排成為疏運需求與施工風險共同作用下的必要條件。

提前完成各分階段工序，既代表施工效率提升，亦代表颱風、豪雨或道路中斷來臨前現場具有更大的撤離與調整緩衝。本案之時程管理，係疏運導向與防災導向相互結合的施工治理模式。

韌性導向的橋型選擇與設計邏輯

西小清水溪橋橋址因受前後隧道銜接、高程差與線型彎曲等條件限制，無法另覓替代橋位，僅能依原橋址重建。設計團隊在此制約下，從結構施工性、韌性設計、經濟效益與景觀協調性四個面向進行橋型評估，選項包括戰備鋼橋、鋼拱橋與鋼桁架橋三種方案。

在結構施工性方面，戰備鋼橋需重建橋墩，河道施工高風險；鋼拱橋吊裝精度要求高且空間受限；鋼桁架橋採無落墩設計，模組化預製、吊裝彈性佳，現場作業時間最短。在韌性設計方面，戰備鋼橋通水斷面反而減少約 6%；鋼拱橋與鋼桁架橋均可實現梁底抬升 85 公分、通洪斷面提升約 10%，但前者後續維護空間受限，後者開放式構造檢修便利性較佳。在經濟效益方面，鋼桁架橋因河道無須落墩、可利用既有橋台，人機與材料成本最低。在景觀協調性方面，鋼桁架橋的開放式構造視覺穿透性佳，與清水斷崖山海地景較能融合。

綜合評估後定案採用 40 公尺單跨不落墩下路式鋼桁架橋。設計將河道內橋墩自通洪空間中移除，主梁底緣抬高約 85 公分，使通洪斷面相較原橋型提升約 10%。設計載重納入豪雨狀態下水流速及漂流物衝擊力，採用 A709 高強度鋼材，重新設計止震塊及剪力鋼棒以符合耐震需求，橋梁結構高度控制在約 4.05 公尺，無設置上部橫向構件，整體輕量化亦有利電車線設施配置。此橋型係臺灣鐵路橋梁史上首次採用，全橋鋼構重量約 180 噸。設計同步配合供應鏈條件進行動態調整：施工團隊盤點鄰近鋼構廠庫存規格後即時回饋，設計單位優先採用庫存規格調整構件斷面，避免特殊規格採購所造成之時程延誤；構件分段尺寸亦受蘇花公路運輸寬度與熱浸鍍鋅槽體尺寸上限雙重約束，設計確認後方劃定分段位置。此設計與供應鏈雙向回饋機制，使工廠製作得以在設計定案後即刻啟動，為全部構件 42 天內完成製造提供關鍵前提。鋼構組件於鋼構廠內進行假組立以驗證製造精度之照片，如圖 3 所示。



圖 3 小清水溪橋鋼構件於鋼構廠進行假組立照片

本案全橋之鋼構件採全螺栓接合工法，不進行現場焊接，係考量山區峽谷陣風與高濕環境對現場焊接品質之影響，並利用螺栓接合在工廠假組立階段即完成精密定位，使現場吊裝後可直接鎖固，大幅縮短高空作業時間，且具備日後可拆卸更換的維護優勢，如圖 4 所示。並在防蝕設計上，鋼構件工廠加工後施作熱浸鍍鋅（附著量達 650 g/m^2 以上），再回廠施作油漆；螺栓與螺帽鍍鋅附著量達 381 g/m^2 以上。油漆之選用兼顧材料取得可及性，並利用電腦軟體模擬配色，達成與清水斷崖地景之視覺協調。橋面版預留檢修通道與作業空間，使日後油漆補強或構件更換等養護作業可無須動用大型機具。

既有橋台保留再利用方面，現場勘查確認南、北兩側橋台主體無嚴重損壞後，設計單位採植筋方式銜接原有橋台，以外箍鋼筋擴大基座並增設鋼筋混凝土托座以銜接新設支承構件。此設計免除橋台拆除及大規模河岸開挖作業，以最精簡的現場土木工程規模達成施工時效最大化，亦為施工人員安全之防災與加速工程進度之重要決策。



圖 4 西小清水溪橋鋼構件現場吊掛施工照片

施工環境特性與鄰線行車安全管制

西正線施工的基本條件，是在自身線路已斷電斷軌的狀態下進行橋梁重建，工作區域內無列車通行。然而東正線仍緊鄰施工現場持續通車通電，形成「一線斷電施工、鄰線維持行車」的並存環境。兩線間距極近，吊裝機具之迴轉半徑、支撐架基礎選點及施工材料堆置範圍，均可能影響東正線行車安全，構成施工配置之首要制約。

依臺鐵公司施工規定，電化區間鄰線施工原則上須離軌道中心 5 公尺以上；機具、工具、車輛不得侵入建築淨空（距軌道中心 1.9 公尺以內）。鋼桁架吊裝因作業範圍較廣，須事先確認 500 噸吊車於各作業角度均不侵入東正線淨空，並於必要位置設置防護措施；臨時支撐架基礎施作位置亦須在符合淨空規定的前提下選定。工區全程均配置瞭望員，持行控無線電與行車調度保持通聯，即時通報列車動向，確保施工人員得以迅速反應。前進指揮所與跨部門協調群組的持續運作，使工務、電務、電力及設計監造各單位得以即時確認每道工序對鄰線之影響。

在天然災害監視方面，由於東正線持續通車，一旦正線因災害有妨礙運轉之虞，鐵路機構即應採取安全防範措施或預防性停駛。工程期間建立的三層預警網絡，包含：(1) 衛星影像掌握上游地貌、(2) 無人機空拍比對河道斷面、(3) 現場雨量計與水位計即時監控，除服務於工地人員安全，亦同步作為支援東正線行車安全判斷的資訊基礎。多次預警性撤離均依此機制觸發，確保工程作業與東正線行車安全同步受控。

施工完成後，依鐵路規定新建或整修完畢之路線須經檢查，必要時試運轉後方得使用。西正線自 2024 年 12 月 13 日起依序實施分速試運轉（40 km/h → 115 km/h → 130 km/h），完成法定行車安全確認程序，並於 12 月 21 日正式通車，完成工程完工至鐵路行車安全認可之完整驗證。

本工程有三項施工重要指導原則：(1) 減少現場土木工程規模；(2) 將高風險工項移轉至工廠製作；(3) 預先完善施工便道^[3]。而在鄰線通車環境中亦具有明確之工程安全管理邏輯，包含：縮減現場作業規模即降低對東正線臨軌安全之潛在干擾；工廠預製使高空吊裝作業集中且短促，有效降低長時間於鄰線安全邊界內作業之累積風險。本工程於凱米颱風災後，於 2024 年

8 月 9 日透過跨單位協調群組成立，工務、電務、電力、設計、監造及施工廠商迅速集結；8 月 20 日前進指揮所設立，現場作業正式展開。鋼構廠自 8 月 16 日開工，於 42 天內完成全部構件製造、工廠假組立、鍍鋅及油漆，依吊裝順序進場；現場以 500 噸輪式吊車搭配四組臨時重型支撐架，自北向南分組吊裝，並於 10 月 29 日即完成西小清水溪橋之全橋鋼構吊裝作業，展現良好之協調及現場施工管理效益。

河道同步清淤之管理作為

西小清水溪橋搶修工程全程伴隨石公溪河道清淤作業同步推進，凱米颱風所帶來之大量土砂沉積於橋址上下游，不僅壓縮通洪斷面，更直接威脅工區人員及機具安全。為此，工程團隊將河道清淤納入施工管理的一環，與橋梁搶修作業同步執行，而非於搶修完成後另行辦理，現場清淤狀況如圖 5 所示。

清淤作業依河道淤積監測成果滾動調整，工程團隊定期以無人機空拍建立河道斷面點雲模型，透過數位地表模型前後比對掌握淤積量體變化。每次颱風豪雨過後，均即時評估河道再淤積情形，並視需要安排後續清疏。此外，臺鐵公司亦配與公路單位、縣市政府、水利單位及國家公園共同推動聯合清淤與防災協作，使河道清疏從單一工址的即時應變，提升為跨單位協力的流域管理作為^[4]，相關空拍模型之點雲比對河道斷面的案例圖形如圖 6 所示。

同步清淤所積累的河道斷面資料，亦成為東小清水溪橋橋墩損傷評估的重要依據，直接促成後續東正線預防性改建之決策。清淤作業與搶修工程的整合推進，更兼顧了橋址環境安全與流域動態的綜合應對。



圖 5 小清水溪橋工程河道同步清淤之現場照片

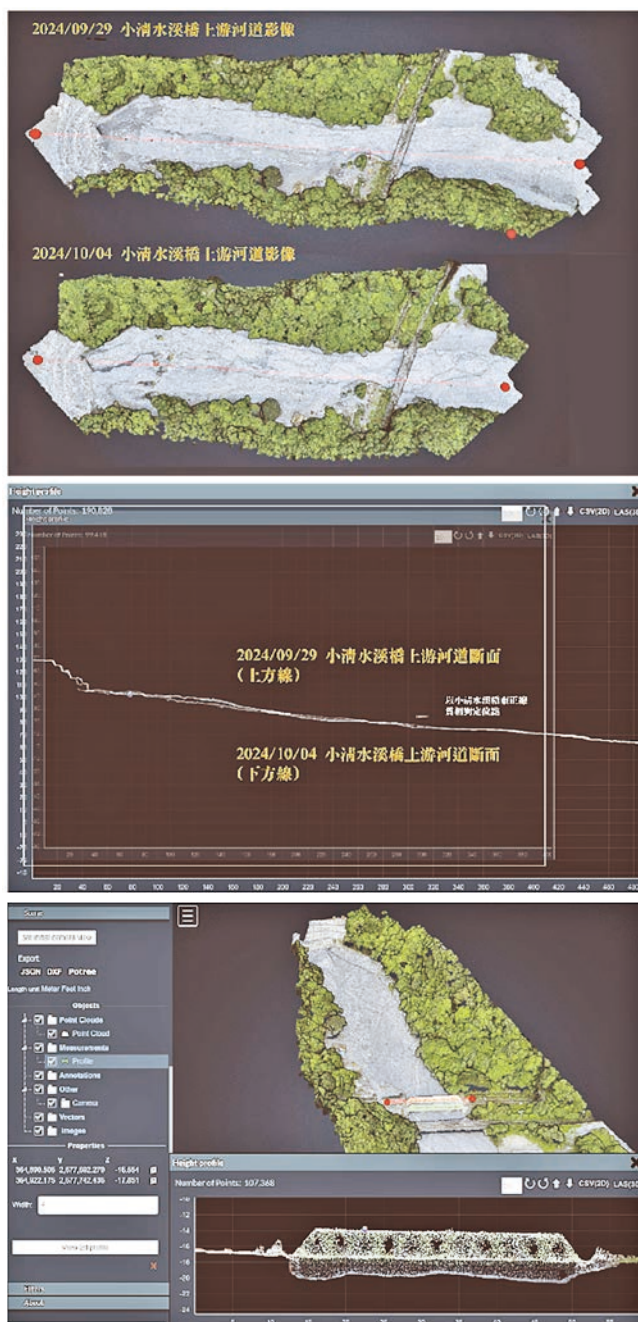


圖 6 空拍模型之點雲比對河道斷面案例

連續颱風事件下之設計韌性驗證

施工期間接連歷經山陀兒及康芮颱風侵台，提供了對於仍處於施工階段的橋梁設計韌性之實地驗證。2024 年 10 月 30 日康芮颱風登陸前夕，施工團隊完成橋面版混凝土澆置後立即撤離；11 月 3 日回現場勘查，發現上游山側最狹隘處距梁底僅約 80 公分，如圖 7 所示，顯示已疏濬河道在極端降雨後仍可能快速再淤積。惟橋梁下弦梁及橋台未見泥水痕跡，研判土砂未漫入橋體範圍^[5]。此一現地觀察記錄說明新橋於高淤積



圖 7 康芮颱風後河道淤積現場狀況

條件下仍保有較原橋型更大的通洪安全餘裕，也提供了「單跨不落墩、梁底抬升」設計策略在極端水文條件下的實證^[6]。

後續於 2024 年 12 月 13 日起啟動試運轉，車速逐步提升至 130 km/h，各速度等級均通過安全確認。2024 年 12 月 21 日正式恢復通車，較原訂目標提前 7 日，總工期 149 日；雙線恢復行車後假日可增開加班車 14 班，春節期間運能亦獲顯著改善。

東小清水溪橋預防性改建工程

從被動搶修到主動預防的決策邏輯

西小清水溪橋搶修期間，河道清淤確認東小清水溪橋 P1 與 P3 橋墩之損傷程度超出原先認知，其橋型同屬多跨落墩配置，與西小清水溪橋共享相同之通洪脆弱性。東正線雖尚可維持通車，但面對下一汛期風險，局部補強或持續觀察均無法有效控制不確定性。臺鐵因此於西正線通車後主動啟動東正線預防性改建，展現從「被動應變」到「主動調適」的策略升級。

此一決策標誌著工程治理思維的轉換：西正線是災害發生後不得不採取之應急搶修，東正線則在既有經驗基礎上主動建立下一道防線。前者驗證橋型轉換與施工整合之可行性，後者將同一套邏輯深化為事前布局，使工程由回應單次災害轉型為系統性風險預防。

鐵路營運中施工之根本限制

東正線預防性改建的預立期，與西正線搶修時「一線斷電、鄰線通車」的環境有本質差異。西正線搶修

期間，施工線路本身已斷電斷軌，只需維護鄰近東正線的臨軌安全距離；東正線帽梁增建則直接在通電通車的橋墩本體上進行，列車於橋面繼續慢行通過，電車線全程帶電。此施工環境下，橋墩下方之結構施作雖不影響橋面板，得以在列車慢行通過之下持續進行，然現場安全管控要求較一般鄰線作業更為嚴格，施工期間全程加強警戒，以確保行車與施工安全並行。

帽梁增建之各工序，依其對電力系統之影響程度適用不同的管制程序。電車線電桿移設因直接影響電力供應，須申請路線封鎖並斷電後方可施作，完成後須在首班列車前完成復電確認及解除封鎖，封鎖申請程序須先經綜合調度核准，現場須配置通訊設備及旗燈備用。橋墩本體之帽梁鑽孔、植筋、鋼筋綁紮及模板組立等工序在橋下進行，不影響橋面板，列車得以慢行持續通過，無需申請封鎖，但仍適用嚴格的臨軌作業管制。

施工期間不論工序性質，工區全程均配置瞭望員，持行控無線電即時掌握列車動向並通報工區人員，施工人員於列車接近時立即暫停振動型作業。鑑於東正線施工現場位於行車線路之下方，各施工階段均須嚴格管制作業區域內之鬆散材料、施工廢棄物及各類輕質物件，防止因風力或操作疏失造成物品散逸至行車區域，此一管制要求貫穿預立期施工全程。

混凝土澆置為連續性作業，須確保在同一施工時段內不間斷完成，以維持結構整體性。列車通過時產生之動態荷重與振動亦影響鄰近混凝土之養護品質，故澆置時機之選定須配合行車班次較疏之時段，並於澆置前確認各項施工條件均已就位。

每個施工階段的完成，是行車安全責任在不同系統主體之間的正式轉移。2025 年 4 月 8 日停駛後，東正線斷電停駛，施工環境轉為與西正線搶修相似的「本線斷電、鄰線（已完工西正線）通車」狀態，施工條件在此節點顯著改善。預立思維的工程意義，正在於認清通車通電期間施工的嚴格限制，並在停駛前把所有受此限制的工作提前消化，使停駛後的 42 天得以在斷電環境下直接高效執行已備妥的工序。

疏運期程作為改建時序的結構依據

東正線改建受兩項條件約束：其一，改建前必須維持行車，不得長時間停駛；其二，須於 2025 年汛期

前完成，以降低土石流再度影響之風險。工程團隊因此將疏運規劃轉化為時序設計邏輯：以清明連假結束後（2025 年 4 月 6 日）作為拆橋起點，以端午節前恢復雙線通車作為目標，使旅運需求回落的清明後空檔得以作為整橋更換的施工窗口，端午前通車則可銜接後續夏季旅運高峰。疏運規劃因此不再只是工程的外部限制，而是施工計畫本身的結構性依據，各工序節點從一開始即以交通服務不中斷與高峰期前恢復運能為核心，而非先有工程時程再配合疏運空檔調整。

預立思維：以 44 天的通車前置，換取 42 天的精準兌現

東正線總工期 94 日，其中 2025 年 2 月 20 日至 4 月 7 日為停駛前之預立期（44 日），2025 年 4 月 8 日至 5 月 24 日為停駛後之兌現期（42 日）。兌現期施工效能之所以得以最大化，關鍵在於預立期間已於通車狀態下完成停駛後高效率施工所需之前置條件。本文所稱「預立思維」，即在行動窗口開啟前預先完成行動所需之一切準備。

此一思維具體體現在以下四個面向：

1. 橋墩帽梁預先增建

東正線轉型為單跨設計須先擴建 P1、P3 橋墩帽梁。由於原電車線電桿基礎係以斜撐形式固定於橋墩側緣，直接施作將干擾電桿穩定性並危及行車安全；設計解方是在橋面設置臨時鋼製電桿基座，使電車線維持穩定支撐，帽梁增建作業在橋下平行推進，兩個作業面互不干擾。

在結構設計上，帽梁採用植筋銜接既有橋墩、再增建混凝土帽梁的方式，配置預力鋼腱以補強整體構造之彎矩與剪力抵抗能力。預力施拉採兩段式執行：第一段於帽梁混凝土澆置完成並達到設計強度後施拉，確保帽梁結構在停駛前即具備基本受力能力；第二段則安排於停駛後橋面板澆置完成時施拉，由整體系統在新載重條件下完成最終的受力狀態調整，相關橫向施拉預力狀況如圖 8 所示。這種分段施拉的安排，使帽梁結構得以在通車狀態下完成大部分預力建立，有效縮短停駛後的關鍵工期。全部帽梁結構於停駛前 9 日完成。停駛後鋼橋得以直接落座於預立完畢的支承面上，無需任何結構前置作業。



圖 8 東小清水溪橋橋面板澆置後施拉預力照片

2. 系統纜線預先遷移

東正線橋上設有電務通訊系統四條主要纜線。花蓮電務段通訊組於停駛前夜間封鎖時段分三夜（2025 年 3 月 3 日至 5 日）完成全數纜線切換拆收；民營電信業者亦於 2025 年 3 月 15 日前完成東正線範圍內之纜線遷移。4 月 8 日停駛拆橋啟動時，橋上已無任何系統纜線，施工機具可立即推進橋面版敲除，排除跨系統等待時間。

3. 鋼構工廠預先製作

東正線鋼桁架橋在停駛前即已於鋼構工廠完成全數構件製作、假組立、鍍鋅及油漆，並依吊裝順序排列待運。工廠製作所需時間完全在停駛窗口以外消化，42 天的停駛期間得以全數集中於高效率的現場作業。

4. 施工動線與作業面預先整備

重型吊車進場路線確認、臨時支撐架基礎施作位置規劃、施工便道維護等事項均於停駛前完成，確保停駛日機具到達現場時，所有作業條件已就緒，無需額外的場地準備時間。

停駛後 42 天：序列作業的精準執行

於 2025 年 4 月 8 日零時 18 分，東正線停駛作業正式啟動，電力段完成電車線斷電及接地後，清晨即完成電車線拆除與交付；工務段接續完成切軌，拆橋機具正式進場。整體節奏呈現高度序列化，顯示各系統單位已形成明確之工序接力關係，而非僅是平行配合。停駛後之主要工序節點如表 1 所示。

表 1 東正線停駛後主要工序節點

日期	主要工序	關鍵事件說明
4/8	電力設施拆除、鋼軌切除	00:18 電力段斷電接地；05:52 電車線交棒；06:43 切軌完成，拆橋機具進場
4/8~4/11	橋面版敲除、PCI 梁吊除	既有橋梁結構共 205 立方米拆除；舊 PCI 梁轉作河道邊坡護岸
4/12~4/24	鋼桁架橋節塊吊裝	鋼構依序吊裝，4/24 全數構件安裝完成
4/28	橋面版混凝土澆置	完成 61 立方米澆置
4/29~5/12	預力施拉、版式軌道、道床澆置	5/12 道床混凝土澆置完成
5/15~5/16	鋼軌焊接、電力電務復原	南北四口焊接完成；各系統接力完成復原
5/18~5/19	因應新災緊急啟用	西大清水橋淹沒，東正線以柴聯車緊急應急；5/19 凌晨 03:24 開通
5/24	正式通車	較原訂 5/28 提前 4 日，決標至通車共計 94 日

設計前瞻性的非預期驗證

2025 年 5 月 18 日花蓮地區再度發生強降雨，臺鐵北迴線 K51+300 之西大清水溪橋橋面遭土石流淹沒而無法通行，北迴線和仁至花蓮方向中斷。當時東正線新橋雖尚未完成正式啟用前之全部程序，但軌道已鋪設完成，因而得以採柴油車緊急投入應急運輸，並於 2025 年 5 月 19 日凌晨 3 時 24 分開通；2025 年 5 月 29 日恢復雙線通車，現場空拍之照片如圖 9 所示。

此一事件使東小清水溪橋改建之工程價值，從「降低下一次災害風險」擴展為「支撐系統於新災中維持運作能力」。預防性改建的價值不只在於橋梁本體更新，更在於為區域交通系統預留了面對下一次災害時仍可運作的應急能力。

土石流防治對策與流域韌性佈局

東小清水溪橋的防治對策，並非僅止於橋梁本體的結構更新。橋梁改建是最直接可控的工程介入，但橋梁作為構造物，本質上是被動承受來自上游的力量。若上游土砂生產機制未獲控制，橋梁設計所提供的僅係延緩再災的結構餘裕，而非根本性的風險消除。本案之防治策略因此自單一橋址延伸至流域尺度，形成涵蓋橋梁本體強化、場域導流疏通、流域跨機關治理及預警監控的多層次工程韌性架構。



圖 9 小清水溪橋工程雙線通車空拍照片

橋梁本體層：通洪斷面提升與結構韌性強化

由於東、西正線新橋均採單跨無落墩構造，全面取消河道內橋墩，並將主梁底緣抬高約 85 公分，使通洪斷面相較原橋型提升約 10%。此設計之要旨在於降低橋梁對水流及土砂輸移的阻礙效應：取消落墩消除土砂受阻壅積的物理節點，梁底抬升則增加漂流物與淤積土砂的通洪緩衝空間。

依 2024 年康芮颱風後現地觀察，已疏濬河道仍再次淤積，最狹隘處距梁底僅約 80 公分，惟橋體未見受損，顯示橋型轉換確具實質通洪效果。此一現地記錄揭示，在本橋址，單次颱風事件即可能使河道淤積量逼近梁底，橋梁本體之韌性設計須以持續清疏及上游土砂管理為配套，方能維持長期防護效能。

在橋墩防護方面，即使新橋已採無落墩之設計，但東正線工程施工期間橋址附近仍存有舊橋拆除後的殘餘結構物，以及尚未清除完畢的河床砌石。為避免殘餘構造在洪汛期間形成漂流物及土石之受阻節點，工程對關鍵殘餘結構施作鋼板包覆保護，作為流域土砂量體尚未完全消解前之過渡性防護措施。

橋址場域層：導水牆主動導流與清淤同步推進

橋梁本體強化與導水牆設計分別對應兩個尺度的問題：前者處理橋梁結構的受力邏輯，後者改變水流在橋址附近的行為模式，兩者共同決定橋址的長期安全。

橋址附近施作的導水牆，透過構造介入主動引導洪峰水流方向，使水流動能導離橋台及近橋墩坡面，降低土砂在橋址附近的沉積速率，並減少洪峰水流對橋台坡趾的直接衝刷。此措施體現「主動導流重於被動承受」的設計邏輯：透過構造介入調整水流行為，使衝擊力道在抵達橋梁前即被分散引導，較單純強化橋梁結構更具主動防護效益。

工程期間同步推動石公溪與大清水溪的分期清疏作業，以維持河道通洪斷面的動態暢通。清疏係針對河道持續再淤積特性所採取的定期性干預措施，而非隨橋梁竣工即可停止之一次性工程。工程團隊以無人機空拍影像建立河道斷面點雲模型，透過數位地表模型前後比對，精確掌握河道斷面的淤積量體變化，並以衛星多光譜影像比對上游裸露地範圍，研判流域土砂生產的潛在風險趨勢，為清疏時機與規模的決策提供資訊依據。

東正線拆除的既有 PCI 梁轉作石公溪橋址下游段河道邊坡護岸，在延續構材服務功能的同時提供河岸被動保護外，並強化減碳之工程效益。

流域治理層：多層級跨機關防災體系

從流域治理的視角觀之，臺鐵北迴線橋址在地形上位處石公溪的出海口附近，是整個流域土砂輸移路徑的最終受體。無論是地震造成的山坡裸露、颱風帶來的崩塌土砂，還是野溪河道的長期淤積，最終都可能以土石流的形式抵達橋址。此種「上游產砂、下游受災」的流域特性，顯示單靠橋梁本體之結構強化，不足以從根本消除再災風險；須在整個流域空間中建立多層級治理分工，方能使工程韌性發揮實效。

本案透過工程會擔任統籌平台，建立從上游到下游的空間分工治理架構：上游野溪以上範圍由林務署負責，確保水土涵養與坡地穩定；野溪管理由地方政府主責，並獲得經濟部的經費支援，強化區域排水能力；鐵公路之間的廊道區域由公路局與臺鐵協調合作，建立共同防災機制；橋梁本體及橋址周邊清淤整治則由臺鐵負責執行。此由上而下釐清權責並建立相互支援機制的分工架構，係各層級工程措施整合為系統性防護網絡的制度基礎。

預警監控層：從工程管理到防災預警的資訊整合

工程完成後之長期防護效能，除有賴靜態結構設計外，尚須仰賴能夠感知環境變化、及早發出預警的動態監控機制。本案在工程期間即導入三層次的空間資訊整合系統：

「宏觀層」整合防災預警資訊（水土保持署土石流警戒系統）、氣象署雨量及颱風路徑資料、公路局省道即時監控影像，並疊合 GIS 空間分析平台與 Sentinel-2 衛星多光譜影像之 NDVI 植生指數變化，進行多元資訊的跨層比對，全面掌握石公溪上游流域地貌變化及土砂生產趨勢；「中觀層」以無人機空拍定期建立點雲模型，透過數位地表模型前後比對精確掌握河道斷面變化；「即時層」透過現場 CCTV 即時監控、臨時雨量計及水位計，結合臺鐵公司與氣象署共同開發之 QPEplus 劇烈天氣系統平台，提供沿線氣象監測站的即時資訊，形成施工期間的預警觸發機制。

施工期間多次依此系統發布警戒並執行預警性撤离，均成功確保人員零傷亡，驗證了資訊整合架構在高動態環境中的實際防災效能。工程完工後，此一監控體系持續作為北迴線沿線的常態防災預警機制運作，支援

預防性停駛等標準作業程序的啟動決策，使工程防災的成效延伸至橋梁全生命週期的營運維護階段。

綜合上述四個層次，東小清水溪橋的防治對策呈現一個清晰的韌性思維邏輯：橋梁本體強化是第一道防線，消除了最直接的結構脆弱點；場域尺度的導流與清疏是第二道防線，降低了土砂在橋址的累積速率；流域尺度的跨機關治理是第三道防線，從土砂的源頭進行長期控制；動態監控預警是第四道防線，使人員與系統能夠在損害發生之前採取因應行動。任何單一防線都不足以應對極端氣候下的複合型災害；四者整合，才能從根本上提升北迴線在此段的系統韌性。

整合效益

工程與營運效益

本案西、東正線搶修改建工程均達成提前通車目標，並在橋型轉換、通洪能力、施工時程與運能效益等面向取得具體成效。兩工程在工程性質上雖分屬緊急應急與主動預防，然橋型設計邏輯一致，形成橋址系統性的韌性升級。

橋型轉型方面，東、西正線均由多跨落墩預力混凝土梁橋改建為 40 公尺單跨無落墩下路式鋼桁架橋，主梁底緣均抬高 85 公分，通洪斷面較原橋型提升約 10%，為橋址提供更充裕的通洪餘裕。兩座新橋所採用的 A709 高強度鋼材，搭配「鍍鋅＋油漆」雙重防蝕系統，顯著提升橋梁在高濕高鹽霧環境下的耐久性，降低後續維護頻率及長期維護成本。在開放通透的鋼桁架橋構造形式下，橋梁後續之定期目視巡檢、塗裝補強及構件更換等維護作業，均較原預力梁橋型更為便利。

在工期管控方面，西正線歷時 149 日完成，提前 7 日於元旦及春節疏運前恢復雙線通車，假日得增開加班車 14 班，春節期間旅客運能明顯改善；東正線歷時 94 日完成，提前 4 日於端午節前恢復雙線行車，使雙線運能較單線運轉提升約 26%。兩次提前通車均精準銜接疏運節點，充分體現疏運導向之時程管理模式對公共服務的直接貢獻。

在環境效益方面，兩座新橋均採單跨無落墩設計，大幅減少混凝土用量；並再利用既有橋台結構，免除大規模拆除重建；東正線拆除之既有 PCI 梁亦轉作河道護岸^[7]，並減少碳排放量。並同步彙整東、西正線工程效益之主要指標於表 2 供對照參考。

表 2 小清水溪橋東、西正線工程效益比較

效益面向	西正線 (西小清水溪橋)	東正線 (東小清水溪橋)
工程性質	災後緊急搶修復原	預防性主動改建
橋型轉型	多跨落墩→ 單跨無落墩	多跨落墩→ 單跨無落墩
梁底抬升	85 公分	85 公分
通洪斷面	提升約 10%	提升約 10%
主鋼構用量	180 噸 (A709)	192 噸 (A709)
總工期	149 日 (開工至通車)	94 日 (決標至通車)
提前完工	提前 7 日 (原訂 12/28)	提前 4 日 (原訂 5/28)
運能效益	假日可增開加班車 14 班	雙線運能較單線 提升 26%
節能減碳	合計兩橋估計減碳 逾 18.5 tCO ₂ e	

疏運管理目標的實現

西正線於 2024 年 12 月 21 日提前通車，使北迴線得以於元旦及春節前恢復雙線營運，假日可增開加班車，春節期間運能亦顯著提升；東正線則於 2025 年 5 月 24 日正式通車，使雙線於端午與後續夏季旅運高峰前完整恢復。兩次提前通車不只是工期績效，更是对特定疏運節點公共服務需求的精準回應。

景觀融合與協調性

兩座新橋均採單跨鋼桁架橋形式，結構高度約 4.05 公尺，無上部橫向構件，開放通透的幾何特性有利于通洪與電車線系統配置，亦使橋梁視覺輪廓與清水斷崖山海地景維持協調。油漆色彩選用在兼顧材料取得可及性的前提下配合地景利用電腦軟體模擬色調，使橋梁在功能與環境之間取得平衡。

結語

本文系統整理臺鐵北迴線小清水溪橋改建工程由西正線應急搶修到東正線預防性改建之完整歷程，並提出兩項管理概念。其一為「疏運導向之時程框架」，將假期疏運需求轉化為工序規劃與節點控制的結構依據；其二為「預立思維」，即在停駛窗口開啟前完成所有必要前置條件，使有限的施工時段得以最大化發揮效能。這兩項概念不是事後歸納，而是貫穿整個工程之實際決策邏輯。

從現地驗證觀之，山陀兒颱風主要反映施工環境與便道維持的壓力；康芮颱風後已疏濬河道再次淤積、梁底淨距縮小，則更具體顯示橋址仍面對高動態輸砂條件，但新橋已展現較原橋型更佳的通洪與安全餘裕。再加上 2025 年 5 月 18 日西大清水溪橋新災時，東正線新橋得以及時投入應急調度，說明本案工程成果已超越單一橋梁層級，轉化為區域交通系統之韌性能力。

面對極端氣候常態化與山區河道高不確定性並存的未來，工程技術固然重要，但更關鍵的是：能否在有限時間內整合設計、施工、監造、電力、電務與營運需求，將不確定環境中的多重限制轉化為可執行之決策與節點。本案所展現者，不只是橋型創新或工期管控，而是在複合型災害條件下，將工程設計判斷、時程治理、風險辨識與系統整合落實於現場的整體工程能力，亦是本案對後續鐵路防災及不中斷營運改建最具參考價值之處。

誌謝

本工程之完成，仰賴花蓮工務段、宜蘭工務段、花蓮電務段、宜蘭電力段和平分駐所、中興工程顧問股份有限公司、旭盛營造公司及各協力單位全體同仁之共同投入。於歷次颱風、地震及新發災害處置期間，各級主管持續提供必要支援與協調，對工程如期推進與順利完成具有關鍵作用，謹此致謝。

參考文獻

- 歐昱辰、吳俊霖、柴駿甫、姚昭智 (2024)，「2024 年 4 月 3 日花蓮地震震災報告」(NCREE-24-006)，國家地震工程研究中心。
- 國家災害防救科技中心 (2024)，「113 年凱米颱風災情彙整報告」，國家災害防救科技中心。
- 呂斌豪、周行健、林舜元、陳宗宏 (2024)，「由專案管理原則思考工程搶修策略」，現代營建，第 12 期。
- 陳宗宏、周行健、林舜元、呂斌豪 (2025)，「從臺鐵西小清水溪橋搶修復舊案例探討二次災害防治思維」，地工技術，第 184 期，第 93-103 頁。
- 陳仲俊、周行健、林舜元、呂斌豪 (2025)，「臺鐵西小清水溪橋災後重建工程紀實」，臺灣鐵路 TRJ 季刊。
- 呂斌豪、林舜元、林芳輝、周行健 (2026)，「以小清水溪橋搶修復舊案例一談工程創新應用整合思維」，土木水利，第五十三卷第一期，第 4-13 頁。DOI: 10.6653/MoCICHE.202602_53(1).0002 