

# Prestressed Concrete Box Girder Strengthened with CFRP Laminates and External Tendons in Wuxi No. 1 Bridge on National Highway 3

## 國道 3 號烏溪一號橋預力箱型梁碳纖維貼片及外置預力補強

鍾孟剛<sup>1</sup> 陳建宏<sup>2</sup> 吳明興<sup>3</sup> 彭康瑜<sup>4</sup> 林生發<sup>5</sup>

### 摘要

隨著預力橋梁數量之成長，以及已通車使用時間之增長，預力箱型梁維護補強之需求亦漸增。本文以國道後續路段橋梁耐震補強工程（區段 2-1）中之國道 3 號烏溪一號河川橋預力箱型梁補強為案例，介紹該案從橋梁現況調查、評估、補強設計到完工後監測各階段之執行方式與考量。本橋採用碳纖維貼片進行大梁及頂板撓曲與剪力補強，為確認其補強成效，於施工階段同時辦理 CFRP 之貼片錨碇性能試驗及縮尺之 CFRP 補強斷面力學行為試驗，以回饋補強設計。另本橋搭配增設外置預力補強，以調整改善箱型梁之應力狀態；其設計參考 fib 及 PTI 對防蝕保護等級之分類，採用 PL3 等級標準，運用了真空灌漿、電氣隔離鋼腱（EIT）、鋼腱張力磁通量感測器（EM Sensor）、可更換後拉外置預力系統等技術，以提供外置預力鋼腱之耐久性，以及完工後之可監控及可抽換性。本工程並規劃有完工後之監測系統，可透過補強後橋梁行為為監測，以驗證整體補強成效，並提供相關資料以利後續管理及養護參考依據。

關鍵詞：預力梁補強、碳纖維貼片、外置預力、真空灌漿、電氣隔離鋼腱、可更換後拉預力系統

### 一、前言

國道 3 號烏溪一號河川橋全長約 2,155 公尺，採預力混凝土箱型梁，以場鑄懸臂工法施作，屬第二高速公路國道 3 號彰濱快官段第 C326 標工程，於民國 92 年 12 月完工，93 年元月開放通車。本橋南北雙向橋面結構分離，各向橋面為 3 車道，詳見圖 1。河道範圍內之 P1~P23 橋墩採沉箱基礎，其餘橋墩採直接基礎。雙向橋梁各分 7 個振動單元，每單元為 3~5 跨連續，主跨標稱跨徑約為 90 公尺，端跨標稱跨徑約為 71.5 公尺。

本橋完工通車後橋面即持續產生變形下垂現象，其中以北線 PN21 與南下線 PS17 伸縮縫前後路段較為明顯，最大凹陷量約 24cm。由於伸縮縫前後路面凹陷，導致伸縮縫處相對凸出，行車舒適性不佳，用路人屢次陳情反應，故曾辦理施拉外置預力、橋護欄加高、混凝土裂縫修補、橋面 AC 高程調整等改善措施，惟依據監測成果，改善後撓度仍有繼續發展之趨勢，如圖 2<sup>[1]</sup>所示。

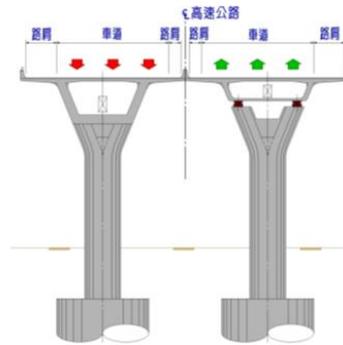


圖 1 烏溪一號河川橋斷面示意圖

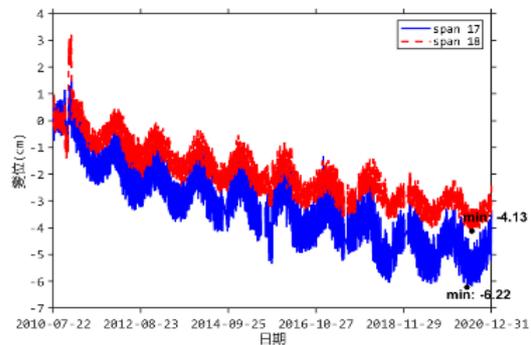


圖 2 前期改善完工後變位監測成果<sup>[1]</sup>

<sup>1</sup> 林同棧工程顧問股份有限公司結構部工程師 (mkchung@tylin.com.tw)

<sup>2</sup> 林同棧工程顧問股份有限公司能源與設施部技術經理

<sup>3</sup> 林同棧工程顧問股份有限公司結構部經理

<sup>4</sup> 林同棧工程顧問股份有限公司副總經理

<sup>5</sup> 交通部高速公路局規劃組組長

## 二、橋梁現況補充調查

橋梁現況條件為數值分析模型建立、大梁劣化研判、評估與補強設計等作業之依據，為使評估與補強設計盡量反映橋梁實際狀態，除原設計、竣工資料外，亦蒐集歷年改善、維護、檢監測資料，並建請業主同意辦理相關補充調查。

表 1 現況補充調查內容彙整表

項次	調查項目	說明
1	橋面 AC 厚度	採車載三維透地雷達探查，雙向各 4 條測線
2	橋面板厚度	車載三維透地雷達探查，搭配敲擊回音法檢測、微鑽孔驗證
3	混凝土裂縫	含新增及已修補之裂縫
4	裂縫深度	由裂縫調查成果中研判劣化程度較嚴重者進行深度檢測
5	混凝土彈性模數	以敲擊回音法推估
6	箱梁有效勁度	微振量測
7	梁內外置預力	1. 外置預力現況目視檢測 2. 以振動法進行預力檢測 3. 套管內填充檢測（敲擊回音法）
8	箱梁鋼筋探測	二維透地雷達探測作業

## 三、箱型梁評估與補強設計

以竣工圖說所載之材料、施拉預力以及乾縮潛變等條件，配合現況調查成果，加載瀝青混凝土鋪面載重與混凝土橋面板額外載重進行分析評估，評估結果箱型梁有剪力、彎矩強度不足、斷面應力超過容許值以及頂板橫向撓曲強度不足造成板底縱向裂縫等問題。

針對箱型梁剪力強度不足問題，考量以條狀鋼板進行貼附補強，將增加箱型梁呆重負荷，且箱梁內已有前期補強外置預力錨碇塊，鋼板搬運不易，並需於箱梁上鑽孔，施工放樣較為困難、及補強後外觀等因素，最後採用碳纖維強化聚合物複合材料（Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP）進行補強，其配置為於箱型梁腹板內外側以間隔 30 公分寬 50 公分之橫向帶狀 CFRP 貼片進行補強；箱梁撓曲強度不足問題，則於底板進行縱向 CFRP 貼片補強；頂板橫向撓曲強度不足造成板底縱向裂縫問題，則於箱梁內頂板底部以間隔 30 公分寬 50 公分之

橫向帶狀 CFRP 貼附進行補強，詳見圖 3 及圖 4。

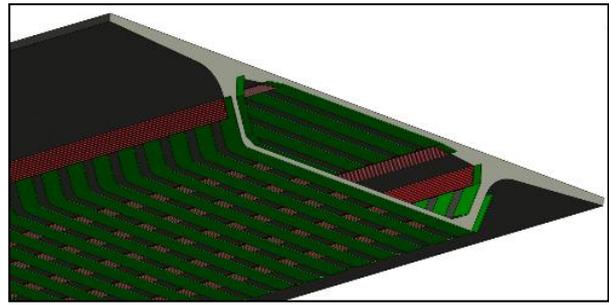


圖 3 箱型梁 CFRP 補強模擬圖



圖 4 箱型梁 CFRP 補強施工照片

CFRP 補強貼片兩端之錨定方式決定其可發揮之強度，經評估不同的錨碇工法，錨栓錨碇法（Spike Anchor）及表面溝槽鑲嵌錨碇法（Near Surface Mounted Anchor, NSM）等錨碇方式均需於已裂損之箱梁上鑽孔或開槽，故採用壓條貼片錨碇法（Patch Anchor）設計。

另為確保工程設計成果之嚴謹，合理掌握與探討以 CFRP 補強之性能，本工程於施工階段同步委託國家地震工程研究中心進行 CFRP 之貼片錨碇性能試驗，如圖 5，以及 CFRP 之斷面力學行為試驗，如圖 6，以回饋橋梁補強設計成果評估之參考。



圖 5 CFRP 之貼片錨碇性能試驗



圖 6 CFRP 之斷面力學行為試驗

另針對斷面應力超過容許值之部分，研擬採增設外置預力補強方式，提供大梁壓應力及向上垂直分力，以調整拉應力至規範容許值內。考量外置預力偏心率、箱梁內前期改善工程已設既有外置預力及錨定塊剩餘空間、預力施拉及未來抽換空間需求等因素，經評估採用於箱梁外增設外置預力進行補強，詳見圖 7。



圖 7 箱型梁外增設外置預力補強

本橋增設外置預力補強，參考 fib 及 PTI 對防蝕保護等級 (Protection levels of tendons) 之分類<sup>[2,3]</sup>，採用 PL3 等級標準設計，以提供外置預力鋼腱之耐久性，以及完工後之可監控及可抽換性。本工程外置預力設計特色包括：

1. 套管內採真空灌漿 (Vacuum Grouting)，以確保套管內灌漿品質，減少孔隙。
2. 電氣隔離鋼腱 (Electrically Isolated Tendon, EIT) 在歐洲已有一段長期且成功的運用紀錄，美國 FHWA 亦已開始推廣該技術。主要除傳統鋼腱及塑料套管，另採塑料喇叭套管、絕緣板、量測導線組成，除提供保護，避免雜散電流腐蝕；施工階段可以驗證鋼腱隔離效果 (封裝品質)，並提升對各構材儲存、加工、安裝的小心程度；完工後，更可透過 LCR 阻抗分析儀 (LCR meters) 量測鋼腱及

外側鋼筋間之電阻值，隨時進行鋼腱狀況之非破壞性檢測評估。

3. 部分鋼腱於預力施拉前即設置張力磁通量感測器 (EM Sensor)，以獲得預力初始值，及提供後續監控鋼腱預力量。
4. 採用可更換式後拉外置預力系統，轉向座及端錨座均配合設計，並預留未來抽換空間。

#### 四、補強後之監測

鑑於預力混凝土橋梁因長期老劣化可能影響橋梁安全，本橋長期監測系統之建置，可透過補強後橋梁行為監測，以驗證整體補強成效，並提供相關資料以利橋梁管理單位後續管理及養護參考依據。另考量監測資料之延續性，因此本案監測系統建置計畫，針對交通部高速公路局中區養護工程分局原有監測跨之所在 4 個單元 (N6、N5、S5 及 S4) 進行規劃，以利後續大梁變形趨勢之比對，及監測資料之延續。

本工程規劃針對橋梁之上構沉陷、溫度及新設墩柱頂部大梁之位移量進行監測。摘要說明如下：

1. 參考現況既有之監測資料，橋梁邊跨沉陷變形較為明顯，故規劃於各邊跨佈置 3 處沉陷計，中間跨佈置 1 處沉陷計，用以即時監測橋跨沉陷變形，並進行長期沉陷趨勢安全評估。
2. 由於監測資料須考量環境溫度效應，規劃於箱梁內佈置溫度計，以適當納入溫度補償調校，詳實反映橋梁結構特性。
3. 於增設橋墩帽梁上規劃佈置位移計，用以監測增設橋墩帽梁和上方橋跨之相對位移，即時監測橋跨沉陷變形，進行長期沉陷趨勢之安全評估。
4. 以預力廠商依約提供之資料擷取設備，定期進行量測 EIT 電阻值與 EMS 拉力值。

#### 五、結論與建議

本工程預力箱型梁補強設計，運用了壓條貼片錨碇法 (Patch Anchor) 進行 CFRP 貼片補強，增設外置預力補強則採用真空灌漿、電氣隔離鋼腱、鋼腱張力磁通量感測器、可更換式後拉外置預力系統等技術，目前正在施工中，其設

計、施工、試驗、監測結果及經驗，可提供未來  
相關深化研究及工程運用之參考。

### 參考文獻

1. 國道 3 號烏溪 1 號河川橋後續變位監測維護工作期末報告（民國 107 年 1 月至民國 110 年 3 月）。高速公路局中區養護分局。中華民國 110 年 4 月
2. fib Bulletin 33 : Durability of post-tensioning tendons
3. PTI/ASBI M50.3-19 : Specification for Multistrand and Grouted Post-Tensioning (2019)