



雙索面脊背橋之規劃與設計案例介紹

Planning and Design of Extradosed Bridge with Cables on Both Sides

蔡伯中／萬鼎工程服務股份有限公司 土建工程部主任工程師

賴順政／萬鼎工程服務股份有限公司 土建工程部经理

孫維政／萬鼎工程服務股份有限公司 土建工程助理總工程師

本計畫路線位於屏東縣車城鄉西側，沿海岸線佈設，包含福安大橋及龜山大橋兩座橋梁，屬「屏東生活圈道路交通系統建設計畫」之一環，完工後將作為台 26 線之替代道路，以期有效疏緩例假日遊客來往墾丁所造成之車流壅塞情形。萬鼎工程承蒙內政部營建署委託，進行「屏東縣車城鄉海口至射寮龜山沿海道路景觀橋及景觀綠美化工程」規劃設計，其工作內容包括福安大橋及龜山大橋。

福安大橋及龜山大橋分別跨越四重溪及保力溪，鄰近河流出口，橋址環境開闊，且附近海岸觀光資源豐富，路線終點即可到達國立海洋生物博物館，考量景觀需求及減少河道落墩，福安大橋及龜山大橋結構型式分別採二跨及三跨之脊背橋，橋長分別為 210.96 公尺（105 m + 105.96 m）及 315 公尺（90 m + 135 m + 90 m），為國內首座將塔柱設置於橋面二側之「雙索面脊背橋」。本橋橋塔造形融入海洋節肢動物意象，橋塔及纜索設置夜間景觀照明，並於橋面鄰海側設置人行及自行車道，完工後此兩座景觀橋將成為當地重要觀光景點，帶動區域經濟發展。本文將針對橋梁之結構設計、施工規劃及景觀照明等摘要說明，作為日後類似橋型之設計參考。

前言

鑑於墾丁、鵝鑾鼻遊客日漸增多，每逢假日恆春至墾丁之屏鵝公路常有塞車情形，現有道路拓寬或新替代道路之開闢刻不容緩。本計畫「車城鄉海口至射寮龜山沿海道路工程」屬「屏東生活圈道路交通系統建設計畫」之一環，位於屏東縣車城鄉西側，沿海岸線佈設，包括橫跨四重溪及保力溪之福安大橋及龜山大橋。計畫道路緊鄰海岸線，附近海洋資源豐富，故朝景觀橋方向進行規劃，以期成為本路段之觀光景點，與路線起點的福安宮及終點的國立海洋生物博物館相銜接，建立觀光旅遊新動線，促進計畫範圍內相關產業，並使車城鄉之交通系統、觀光資源及遊憩據點得以有效的串聯，計畫路線詳圖 1 所示。

計畫工程起點為車城鄉福安村海墘路，與第一期道路銜接（民國 94 ~ 97 年完成），沿線橫跨四重溪及保力溪，至射寮龜山與屏 153 道路銜接，全長約 2,071 m，計畫寬度 25 m，主要工程項目包括平面道路及跨越四重溪、保力溪之福安大橋及龜山大橋。橋梁型式考量建造及維護成本、當地環境（鄰海洋特性），且需兼具景觀需求，經業主核定採預力混凝土脊背橋，本文主要針對此兩座橋屬「脊背橋」單元之規劃及設計過程進行說明及探討。

結構配置

福安大橋

本橋跨越約 170 m 寬之四重溪及其左右岸防汛道路，結構配置考量要點包括：跨四重溪梁底高程須高於



圖 1 計畫路線平面圖

計畫堤頂高程 (EL.6.00)，左右岸防汛道路淨高需求，橋墩柱底高程須位於低水河槽區最低處及計畫河床高以下，盡量減少河中落墩採大跨徑配置。依據水理及景觀需求，福安大橋之橋跨配置採 $2@30\text{ m} + 105\text{ m} + 105.96\text{ m}$

m (STA. 0 + 365 ~ 0 + 635)，其中北側之 $2@30\text{ m}$ 引橋段採 PCI 型梁橋，主橋段 $105\text{ m} + 105.96\text{ m} = 210.96\text{ m}$ 採 PC 箱型梁 (雙箱室) 配合施拉外置預力斜索之「二跨脊背橋」，詳圖 2。

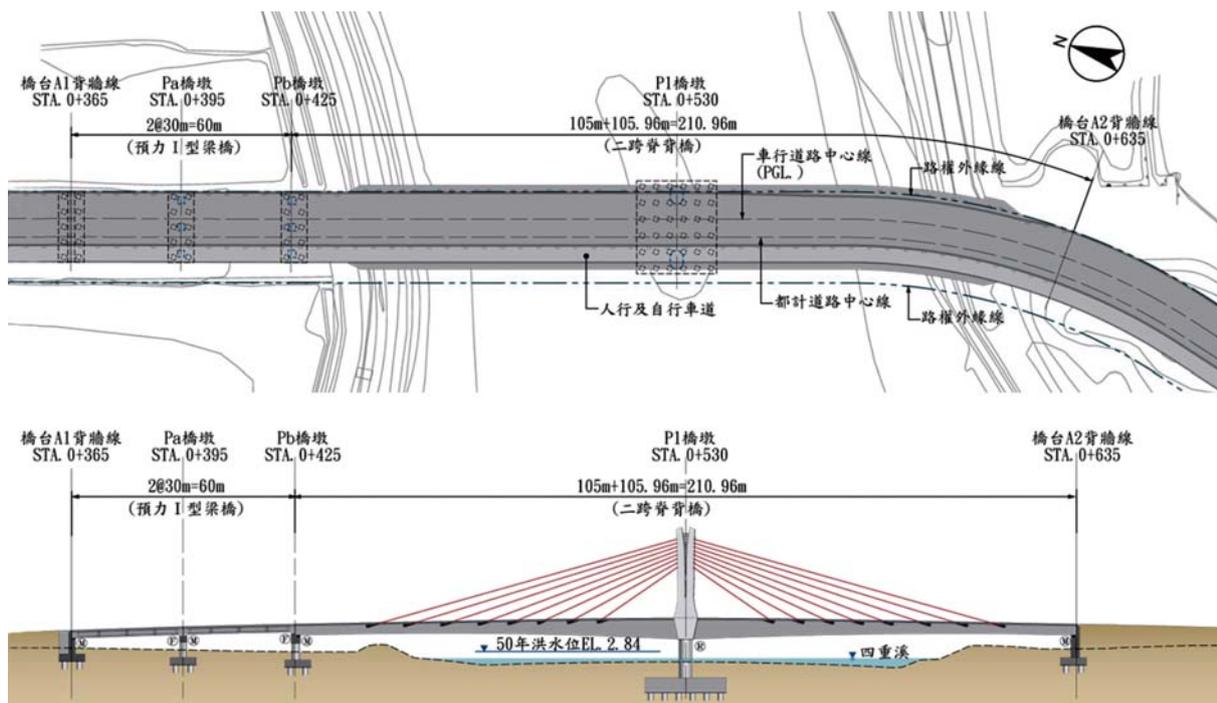


圖 2 福安大橋平立面圖

龜山大橋

本橋跨越約 300 m 寬之保力溪河川治理計畫用地範圍，結構配置考量要點包括：跨保力溪梁底高程須高於上游現況堤頂高程 (EL.3.70)，橋墩柱底高程須位於低水河槽區最低處及計畫河床高以下，盡量減少河中落墩採大跨徑配置。依據水理及景觀需求，龜山大橋之橋跨配置為 30 m + 90 m + 135 m + 90 m (STA. 1 + 355 ~ 1 + 700)，其中北側之 30 m 引橋段採 PCI 型梁橋，主橋段之 90 m + 135 m + 90 m = 315 m 採 PC 箱型梁 (雙箱室) 配合施拉外置預力斜索之「三跨脊背橋」，詳圖 3。

道路線形及橫斷面配置

本計畫路段屬都市計畫道路，依據屏東縣車城鄉都市計畫樁位資料進行道路平面線形佈設，計畫道路總長度約 2,071 公尺，路權寬度 25 公尺。

道路線形部分，縱坡線形考量跨越計畫堤頂高程及滿足計畫洪水位之出水高度需求，整體規劃福安大橋引道段最大縱坡度為 3.58% (< 8%)，龜山大橋引道段最大縱坡

度為 2.71% (< 8%)，平面線形福安大橋於南側約 59 m 之範圍配合路線線形佈設 R = 168 m 之平曲線 (> 150 m)，龜山大橋平面線形則屬直線段。考量本計畫橋梁型式為脊背橋，橋梁設計時須配合路線線形檢核外置預力斜索下方之車道淨高需求。

橫斷面配置部分，道路平面段需銜接前期道路，故於路權寬度內規劃東側 15 m 之主車道 (雙向各一線快車道及一線混合車道) 及西側 10 m (鄰海側) 之景觀綠帶，詳圖 4。引道段及橋梁段考量本計畫整體建設經費，結構體全寬較路權寬度縮減 1.9 m ~ 5.5 m，配合平面段亦於東側佈設 15 m 之主車道，西側則考量推動觀光旅遊之需求，規劃 2.5 m 寬腳踏車道及 2 m 寬人行道，詳圖 5 及 6。

基於前述橋梁段橫斷面配置之非對稱性，若脊背橋塔柱設置於中央，將會產生橋面車道配置不對稱，或上部結構單側懸伸較大之情形，經綜合研析後本計畫脊背橋將塔柱設置於橋面二側，使整體橋梁結構力學行為更為妥適，也因此本計畫橋梁成為國內首座之「雙索面脊背橋」。

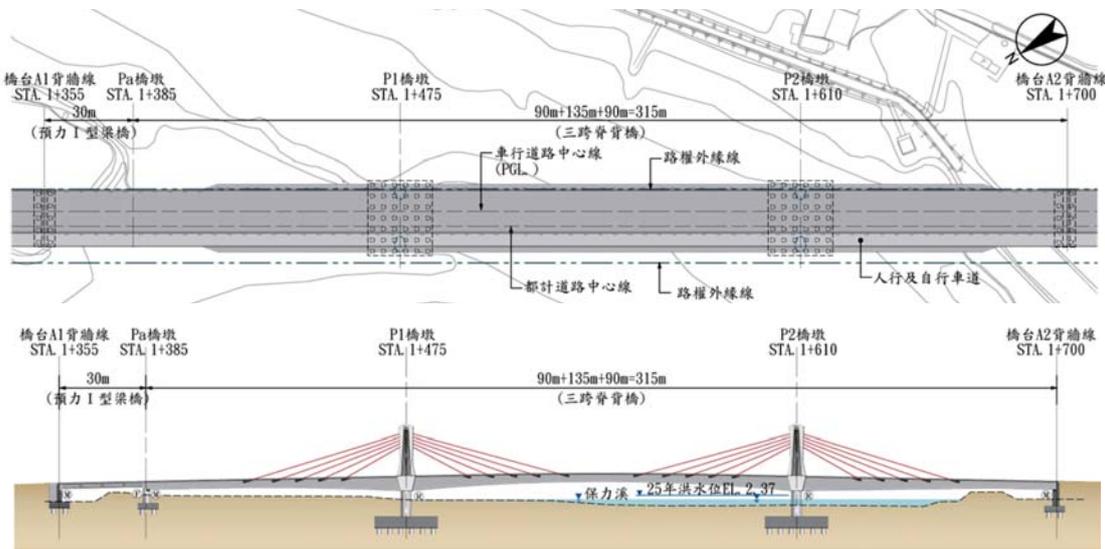


圖 3 龜山大橋平立面圖

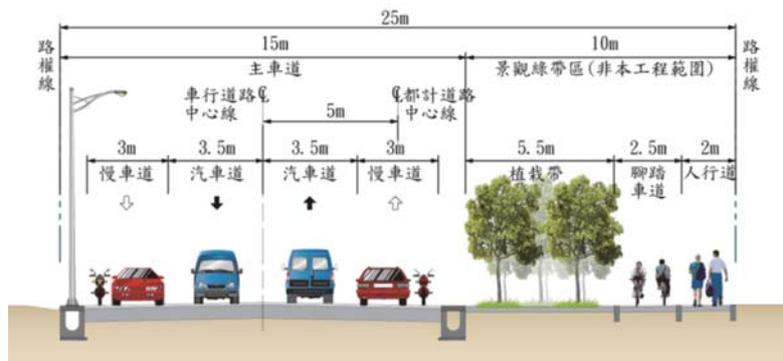


圖 4 平面路段車道配置橫斷面圖

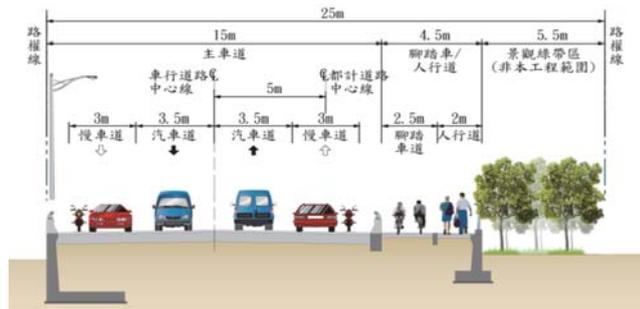


圖 5 引道段車道配置橫斷面圖

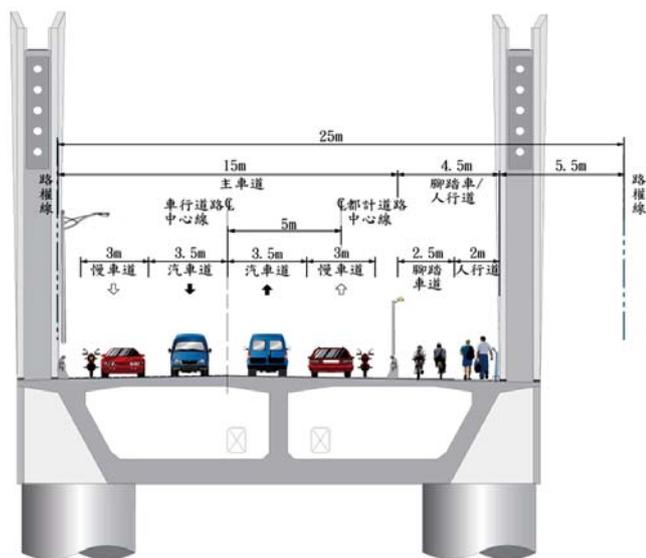


圖 6 橋梁段車道配置橫斷面圖

結構設計

脊背橋整體結構分析

本計畫橋梁採用 MIDAS 及 RM 結構分析軟體分別進行設計及檢核，配合施工規劃於各階段施拉內置預力鋼腱及外置預力斜索（詳圖 7）。地震力加載部分，除進行靜力及反應譜分析外，亦選用靠近橋址附近測站（KAU038、KAU039 及 KAU081）於 2006 年 12 月 26 日恆春地震所收錄之地震資料，經調整符合「公路橋梁耐震設計規範」之規定後進行地震歷時分析。上部結構分析結果，施工及服務階段之混凝土容許應力檢核（詳圖 8），皆符合公路橋梁設計規範規定。

相關設計成果如表 1 所示，橋墩為雙柱式長橢圓型橋柱，基礎採樁基礎，樁長配合承載層位置（卵礫石偶夾砂礫石層）逐墩考量，兩座脊背橋之梁深／橋長及塔高／橋長比值約為 1/27 ~ 1/31 及 1/7.2 ~ 1/7.9，與國內外脊背橋工程案例之統計結果 1/25 ~ 1/35 及 1/8 ~ 1/15 大致相符。此外，由於計畫橋梁斜索施設於橋面兩側，故於橋梁斜索錨碇處之箱梁內皆設置隔梁，以利應力傳遞。

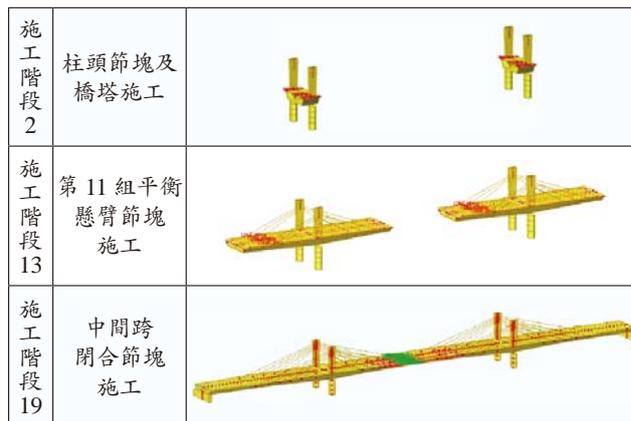


圖 7 龜山大橋各施工階段 3D 分析模型

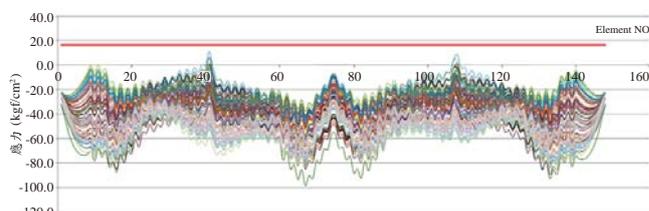


圖 8 龜山大橋服務階段所有載重組合之大梁頂版應力圖

表 1 脊背橋設計成果表

項目	福安大橋（脊背橋段）	龜山大橋（脊背橋段）
跨徑	105 + 105.96 = 210.96 m	90 + 135 + 90 = 315 m
主梁	PC 箱型梁（雙箱室） （梁寬：23.1 m， 梁深：2.8 ~ 5.5 m）	PC 箱型梁（雙箱室） （梁寬：23.1 m， 梁深：2.8 ~ 5 m）
橋墩	雙柱式長橢圓形橋柱 （5 m × 3.5 m × 10.5 m）	雙柱式長橢圓形橋柱 （5 m × 3.5 m × 9 m）
橋墩基礎	樁型礎 （25.5 m × 21.75 m × 4 m）	樁型礎 （25.5 m × 21.75 m × 4 m）
橋墩基樁	全套管基樁 （φ1.5 m，樁長 46 m）	全套管基樁 （φ1.5 m，樁長 50/56 m）
橋塔高度	24 m	17 m
外置預力斜索	2 索面 × 16 束 × 31T-15.2 mmφ	4 索面 × 10 束 × 31T-15.2 mmφ
內置預力鋼腱	19T-15.2 mmφ（單束）	19T-15.2mmφ（單束）
梁深／橋長*	約 1/31	約 1/27
塔高／橋長*	約 1/7.2	約 1/7.9

* 本表橋長係指外置預力斜索施拉範圍內之橋梁總長。

橋塔鋼殼有限元素分析

分析過程針對橋塔鋼殼進行完全剛接與單元結構間無焊接套疊（Metal touch）等兩種狀況進行有限元素分析，確保結構安全性能。依幾何尺寸設計結果，以有限元素分析軟體 ANSYS 模擬及求解此切割獨立結構塊體之三維應力問題，取得加載與局部變形關係、應力及應變分佈圖等相關資料，最後根據 Von Mises 降伏準則詳細計

算各元素的安全係數，作為鋼結構設計結果判別依據。

本計畫橋梁採 31T-15.2 mmφ 外置預力斜索，故以單束斜索最大預力值加載為 494.76 tf (0.6 Pu) 進行分析，且不考量鋼殼外部包覆鋼筋混凝土對橋塔勁度之貢獻。此外，於 Metal touch 之有限元素分析中，為考量鋼板在接合橫切面的平整度與施工中可能產生的誤差，在各馬鞍型單元結構間假設只有三點接觸，並存在最大 0.5 mm 的間隙，用以模擬結構分析中最不利情形。

本計畫橋梁之橋塔鋼殼採 ASTM A709 GR.50 鋼材，參照「Von Mises 降伏準則」及日本「本州四国連絡橋公団鋼上部構造の設計に FEM 解析き適用するためのガイドライン(案)」，依下列公式判別各元素之安全係數是否足夠，並作為加勁材設計依據：

$$\begin{cases} \sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \leq \frac{1.1\sigma_a}{FS_1} \\ \sigma_1 \leq \frac{\sigma_a}{FS_2} \\ \sigma_a = 0.8\sigma_y \end{cases}$$

$$\begin{cases} FS_1 = \frac{1.1\sigma_a}{\sigma_e} \\ FS_2 = \frac{\sigma_a}{\sigma_1} \end{cases}$$

其中： σ_y 及 σ_a 為鋼板之降伏及容許應力， σ_e 為結構分析結果之 Von Mises 降伏應力， σ_1 及 σ_2 為結構分析結果之最大及第二主應力， FS_1 及 FS_2 則為安全係數，檢核元素應力之安全係數皆須大於 1.0，鋼殼尺寸、有限元素模擬及分析結果，詳圖 9~14 所示（以福安大橋為例）。



圖 9 鋼殼完全剛接之有限元素

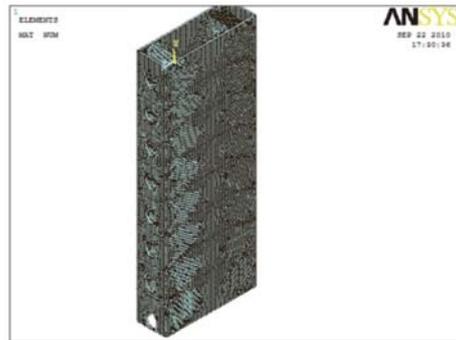


圖 10 鋼殼 Metal touch 之有限元素

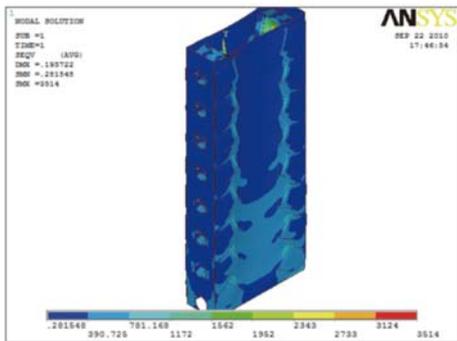


圖 11 鋼殼等應力線分佈圖（完全剛接）

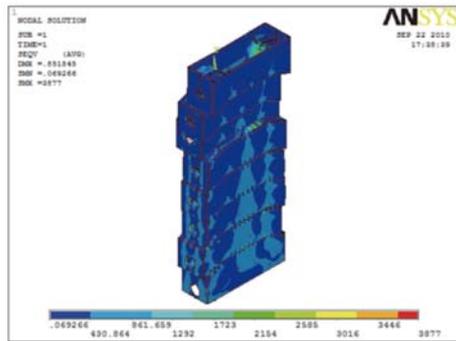


圖 12 鋼殼等應力線分佈圖（Metal touch）

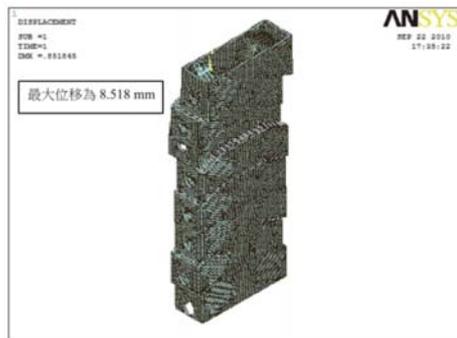


圖 13 鋼殼整體位移分佈圖（Metal touch）

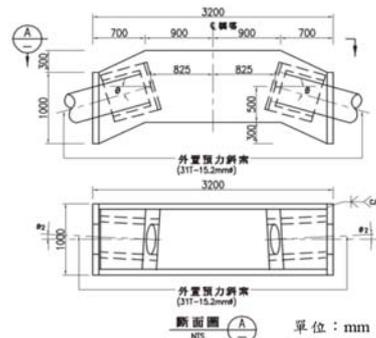


圖 14 鋼殼標準單元尺寸圖

外置預力斜索應力檢核

施工及服務階段之所有載重組合，外置預力斜索應力應小於 $0.55f'_s = 10450 \text{ kgf/cm}^2$ (詳圖 15 ~ 16)。疲勞應力 200 萬次反覆載重其上應力為極限抗拉強度之 55%，應力範圍為 $140 \text{ N/mm}^2 = 1427.1 \text{ kgf/cm}^2$ ，使用 DIN CODE 進行鋼索疲勞應力檢核，檢核公式如下，檢核結果皆符合規範規定。

$$\alpha_f < \alpha_{fa}$$

$$\alpha_f = \alpha_d + 0.5\alpha_{l,max}$$

$$\alpha_{fa} = \begin{cases} \alpha_d = 6400 \text{ kgf/cm}^2 & k \geq 0.681 \\ \frac{500}{1 - 0.895k} & k < 0.681 \end{cases}$$

$$k = \frac{\alpha_d + 0.5\alpha_{l,min}}{\alpha_d + 0.5\alpha_{l,max}}$$

其中： α_f 及 α_{fa} 為斜索疲勞應力及容許應力， α_d 為 DL 作用下斜索應力， $\alpha_{l,max}$ 及 $\alpha_{l,min}$ 分別為 LL 作用下最大及最小應力。

施工規劃

本計畫橋梁型式皆屬脊背橋，除三跨脊背橋另需澆置中央跨閉合結塊外，施工方式大致相同，茲以福安大橋(二跨脊背橋)為例，主要施工步驟如表 2 所示，施工照片詳圖 18 ~ 25，另摘要說明如下：

1. 橋梁下構：架設施工便橋，採圍堰方式施築基樁、基礎及墩柱等結構。
2. 塔柱：採造型鋼製模板施築，塔柱混凝土澆置需分二次施作，橋塔埋設鋼殼段以上之部分區域(詳圖 17)，須於步驟 IV 進行第二次澆置，避免外置預力斜索施拉後塔柱混凝土產生裂紋。
3. 預力箱型梁：施工採懸臂工法節塊推進完成，外置預力斜索配合節塊施工進度佈設，部份邊跨以場鑄方式施工。

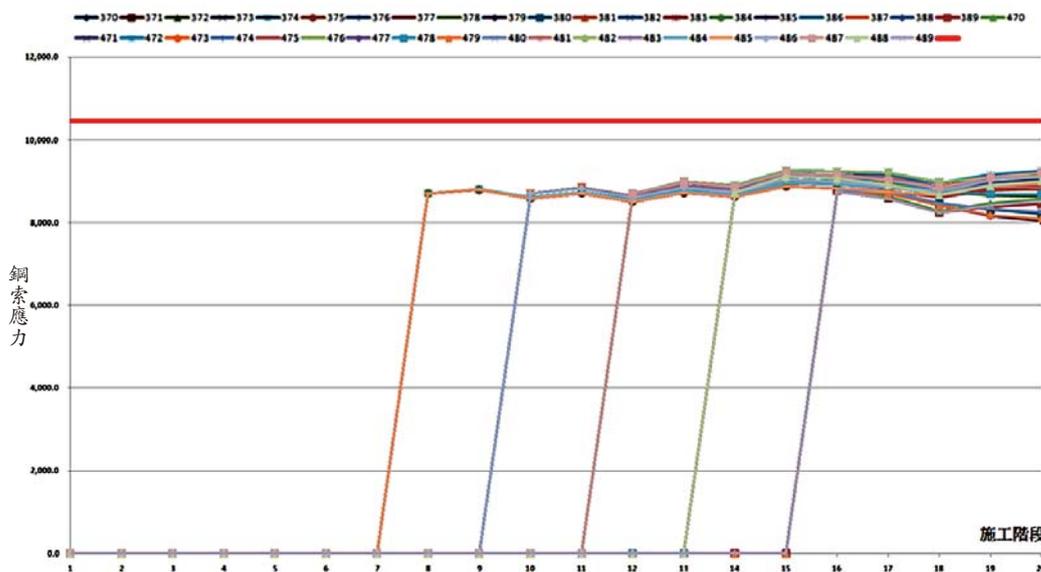


圖 15 龜山大橋施工階段斜索應力檢核

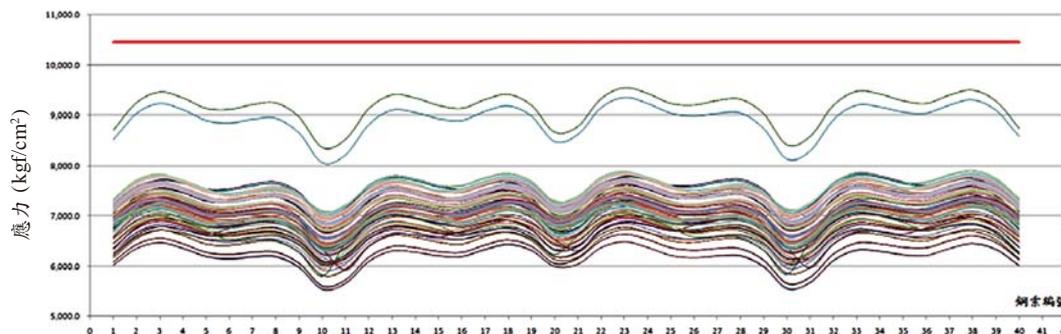
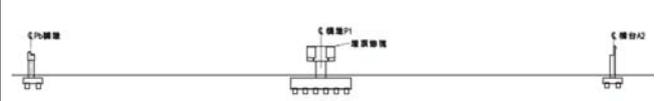
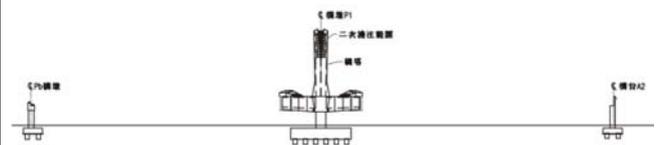
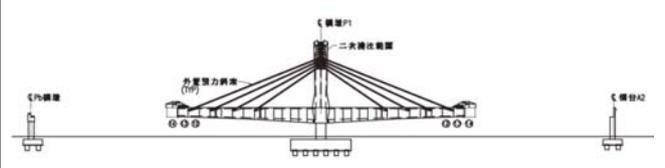
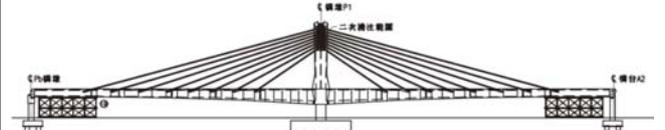
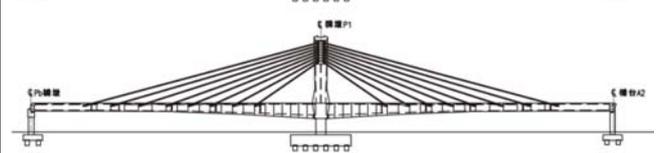


圖 16 龜山大橋服務階段斜索應力檢核

表 2 福安大橋主要施工步驟

施工步驟示意圖	說明
	I 1. 架設施工便橋，施築圍堰 2. 完成橋墩基樁、基礎、墩柱及柱頭節塊等施工
	II 1. 架設懸臂工作車 2. 平衡對稱依序施築兩側節塊 3. 完成塔柱施工
	III 1. 工作車構築含斜索外置預力節塊時，於工作車推進後未施築下一節塊前，施拉本節塊之前一節塊外置預力斜索
	IV 1. 邊跨場鑄段施工 2. 外置預力斜索全部施拉錨碇後，施築橋塔第二次澆置範圍
	V 1. 拆除邊跨支撐架 2. 橋面附屬設施施築 3. 完工

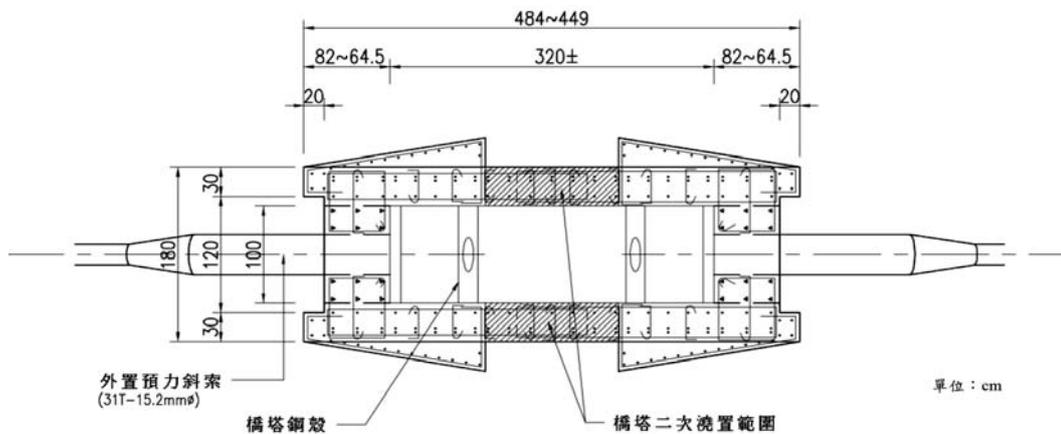


圖 17 橋塔二次澆置範圍示意圖



圖 18 圍堰及基礎開挖



圖 19 基樁及基礎施作



圖 20 橋墩施築



圖 21 橋塔鋼殼於鋼構廠假組立



圖 22 橋塔施築及平衡懸臂工法施作



圖 23 施設外置預力斜索



圖 25 橋梁段完成



圖 24 邊跨場鑄段施工

景觀、照明及綠色內涵

本計畫橋梁除提供道路運輸功能外，橋體本身屬大型量體之建物，所採用之雙索面脊背橋其獨特造型於日間將成為本地區之地標，為強化地方特色，於夜間增設景觀照明系統，除可進一步顯示建築及結構力

學之美，也能讓民眾感受到都市繁榮意象，增加來往遊客特殊印象。

本計畫路線緊鄰海岸線，橋塔造型特別融入海洋節肢動物意象，與橋址環境之自然生態相呼應，詳圖 26~27。

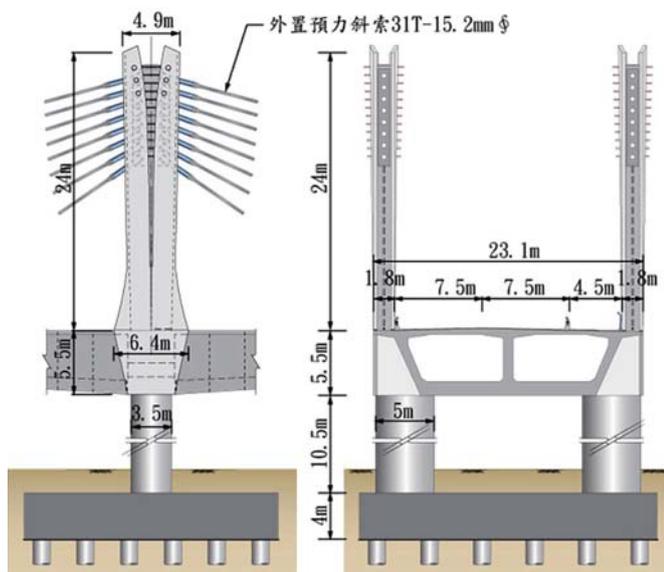


圖 26 福安大橋橋塔斷面圖

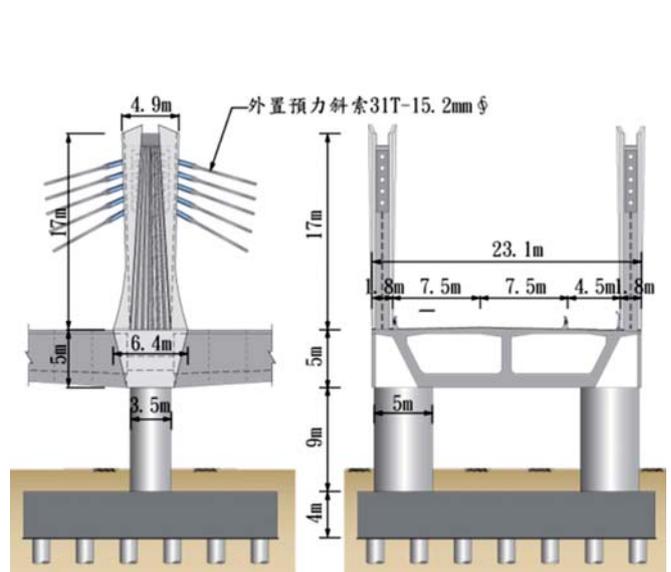


圖 27 龜山大橋橋塔斷面圖

夜間景觀照明部分，於橋梁上配置 LED 線性燈（斜索）及投射燈（橋塔），運用色光及層次變化，可於夜間進行光雕秀，打造橋梁新特色，並利用照明系統之時程控制器，調節照明、控制展演時段、區分節奏及韻律。平常日時，照明系統僅燈光顏色逐漸明暗變化（詳圖 28），例假日時，再配合燈光之律動，營造熱鬧迎賓氣氛（詳圖 29）。

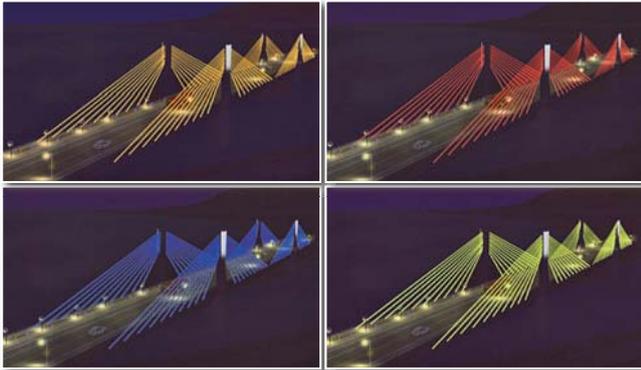


圖 28 景觀照明系統色光變化模擬圖

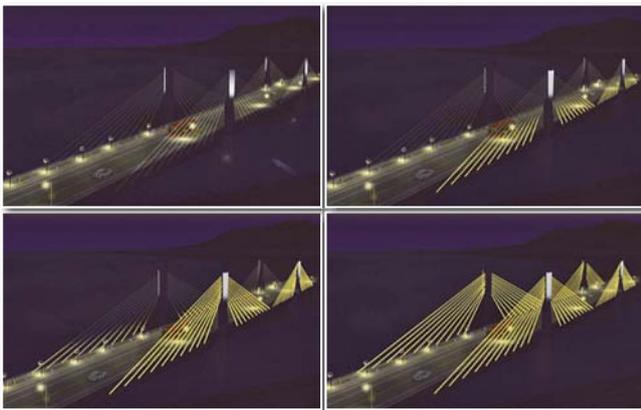


圖 29 景觀照明系統燈光律動模擬圖

本計畫於節能減碳、營造綠色環境及使用綠色能源或工法部分，於工程設計、施工及服務階段皆完整考量，其項目包括：

1. 綠色環境。平面道路單側保留 10 m 寬景觀綠帶（依設計階段審查結論，由車城鄉公所辦理），可種植喬木、草皮，提供人行、自行車道及遊客休憩空間。並於龜山大橋引道段設置生物廊道（穿越箱涵），供招潮蟹等近海動植物使用。
2. 綠色工法。橋體結構多採用 350、420 kgf/cm² 混凝土，混凝土採用爐石混凝土，添加爐石粉，減少水泥用量，增加耐久性。
3. 綠色材料。使用回收材料，包括再生級配碎石鋪築道路底層，再生瀝青混凝土鋪築道路面層，照明系

統則採用 LED 燈組（詳圖 30），降低服務階段養護單位之維護費用。



圖 30 福安大橋景觀照明系統竣工照片

結語

本工程業已於民國 103 年 1 月竣工，完工照片詳圖 31 及 32 所示，主要特色在於福安大橋及龜山大橋為國內首座「雙索面脊背橋」，設計過程除針對橋塔鋼殼及外置預力斜索等分析設計需特別考量外，由於福安大橋南側佈設 R = 168 m 之平曲線，設計時以 3D 模型檢核車輛動態包絡線是否與斜索衝突，做整體行車空間之檢討。此外，本工程亦完整思考整體景觀、夜間光雕照明、工程綠色內涵及服務階段之維護需求等，可作為日後類似工程案例之參考，並祈各界工程先進不吝賜教。



圖 31 福安大橋全景照片



圖 32 龜山大橋全景照片

參考文獻

1. 日本本州四國連絡橋公團，「鋼上部構造の設計に FEM 解析き適用するためのガイドライン（案）」（平成 5 年九月）。
2. 萬鼎工程服務股份有限公司，內政部營建署「屏東縣車城鄉海口至射寮龜山沿海道路景觀橋及景觀綠美化工程」細部設計報告書（2010）。