



大跨度曲線人行橋之設計與施工 — 高美濕地景觀橋

闕山仁／揚盛工程顧問股份有限公司 負責人

郭中天／揚盛工程顧問股份有限公司 技師

長期以來，橋梁主要功能是作為交通連繫的生命線，但隨著時代演進，人們漸漸賦予它更多不同型的角色及意義，讓橋梁不再只是冷冰冰的結構量體，更希望它能連結當地歷史、文化、景觀及生態，作為融入周邊環境的公共藝術，並進而推動地方觀光與產業的發展。本橋位於臺中市清水區高美濕地，為配合市政府推動海線雙星的觀光發展政策，並呼應當地特有生態環境與景觀特色，經討論採用雙弧線、雙橋塔之斜張橋設計，為國內首創之橋型。由於造型頗為特殊，相關的載重、結構配置及分析都必須詳加考量，設計時不僅要考量橋梁結構安全外，更須考量當地風力載重下之行為檢核。特別是本工程位於濱海區域，冬季時當地東北季風相當強烈，因此特別委託其他單位作了橋梁風洞試驗，以確保相關結構之安全性。

本工程由於工區緊鄰生態保護區域，施工期間除須掌握橋梁結構特性以外，更要謹慎作好相關環境監測作業，並於瞭解現場施工條件下，研擬出最妥適的施工對策。本文為介紹高美濕地景觀橋之設計與施工考量，以及設計、施工期間對於結構特性所獲得之經驗與心得，提供各界作為參考。

計畫緣起

本工程計畫緣起說明如下：

1. 為保護高美濕地並發展海洋國家政策及落實藍帶發展構想，台中市政府選定台中港北側之清水及高美等地區規劃休閒遊憩區及聯外道路，並在 95 年 3 月公告『變更台中港特定區計畫（配合濱海遊憩公園及高美濕地周邊公共服務設施整體規劃）』。
2. 為加強該區域建設，目前正積極推動「高美濕地周邊公共服務設施整體規劃」及「特 8-50」道路等公共設施，為能配合前開建設整體景觀意象，計畫將沿公 68 西側及北側之現有海堤路美化改善，並興建景觀橋將跨越清水大排，打造屬於高美濕地之濱海景色。

因此台中市政府推動「興建景觀橋暨海堤路景觀美化改善工程」（即本工程），來達成前述之遠期目標。

工程位置及內容

本計畫工址位於台中市清水區，如圖 1 所示，工程內容主要分為兩大項，說明如下：

1. 「景觀橋工程」計畫興建供人行及自行車使用之景觀鋼橋，跨越清水大排，設計之造型將考量與海景前後呼應，維持觀賞濱海景色，營造出融入大自然之景觀橋梁。
2. 因現有沿河道路海堤路為柏油路面，為考量高美濕地遊客中心興建完成後整體景觀能延伸至清水大排，故「海堤路景觀美化改善工程」計畫辦理道路鋪面、欄杆、街道家具等景觀美化，並配合公 68 打造整體景觀視覺饗宴。

本工程總預算約為 2.3 億元，包含設計監造費、工程費等，屆時可將沿公 68 西側及北側之既有海堤路美化改善總長約 900 公尺，並透過景觀橋將跨越清水大

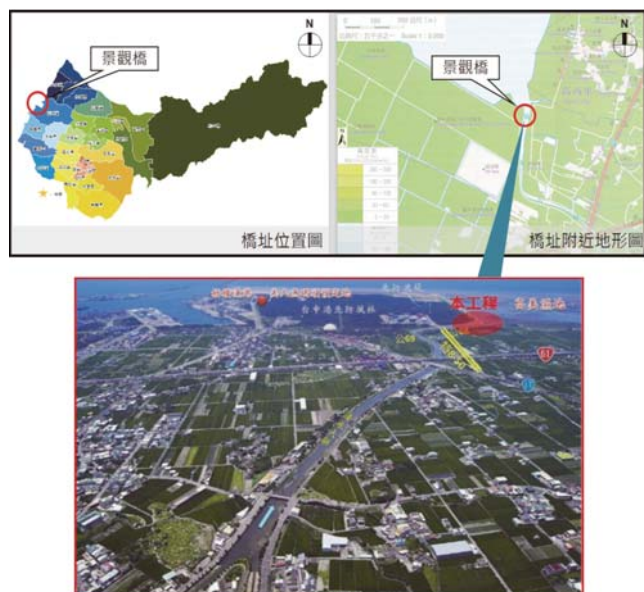


圖 1 工程位置圖

排，打造屬於高美濕地之濱海景色，建立完整自行車路網與遊憩觀景空間。於 103 年 6 月 16 日開工，於 105 年 3 月 31 日完工，並於 105 年 9 月 1 日辦理啟用典禮。另本案景觀橋工程參加國家卓越建設獎評選，榮獲「2016 年最佳規劃設計類—公共建設金質獎」殊榮。

橋梁景觀特色考量

本橋梁在景觀上設定環境課題之四大目標，說明如下：

1. 河岸空間與生態景觀之連結性：自行車道串連視覺景觀與河岸生態景觀之連結性。
2. 營造地方化的生態景觀：推廣低衝擊無污染的生態遊憩網路，透過主題性的設計思維營造地方化的生態景觀。
3. 溼地環境合宜的生態互動環境設施：溼地的保育與生態教育的雙向推廣，環境標示系統的建構，親近水域棧道，多向度高程的觀景橋面平台。
4. 友善的人文生態知性空間：低生態衝擊、因地適宜之友善的人文生態空間設計，環境教育的培育場所與社區希望種子培訓。
5. 疏通聯外路網、降低交通衝擊。

因此橋梁在建築美學與創意設計上，以「高美浮橋+森林海



圖 2 橋梁完工後模擬圖及空拍現況照片

堤」的空間情境，感受陽光、海岸、溼地、自然生態的有機場域走進高美浮橋中，體驗漫遊在生態溼地上方的空中浮島，感受環狀無邊際的河岸景觀，漫遊森林海堤，穿梭在日光海岸與有機森林交織的水綠空間。將橋梁視為象徵生態環境的一部分，隱喻觀賞者走進生態環境中，橋面提供人行跨越、海口觀景平台、自行車道串連等功能。利用景觀橋串連兩側河岸景觀空間的人行動線，並成為區域遊憩景觀的路徑，圖 2 為橋梁完工後模擬圖及空拍現況照片。



設計原則及考量因素

橋梁結構型式參研工程範圍內之各項相關因素與必要資料（如地上及地下物、相關工程、地質資料等），除符合安全、景觀與施工性等需求外，並考量下列因素：

1. 於符合橋梁結構安全目標下，滿足整體景觀造型之需求。
2. 施工期間及完工後，須避免影響附近之濕地生態保護區。

3. 考量道路之交通動線及串連周邊自行車道之功能需求，以發揮觀光效益。
4. 橋梁位處清水大排排出口，以不落墩為原則，以降低水理衝擊。
5. 施工條件及工期、施工界面及時程等。
6. 施工期間之交通維持（包括運輸暢通、安全及對鄰近環境影響）。
7. 考量當地風力效應及其橋梁動力行為。

結構系統配置考量

由於工址緊臨高美濕地生態保護區，並跨越清水大排排出口，為考量生態、環境及水道水理特性等需求，高架橋採用整跨跨越，水中不落墩之鋼結構系統，以降低對地區周邊環境，及生態保護區之影響及衝擊，並未增加行水區內之阻水面積，可維持水道排水功能以符合相關水利法規要求。另外，為考量工區位處排出口，冬季東北季風相當強勁，因此橋梁斷面配置採用流線形封閉箱型梁斷面，以降低風力紊流效應影響。至於在景觀造型上，橋梁線形為曲度相當大的雙弧線結構，鋼梁扭矩效應須要作特別考量。因此，除了採封閉式斷面來增大箱梁扭轉慣性矩，以降低扭矩生成之剪應力之外，於橋梁跨距中央鋼纜配置於鋼梁兩側，以減輕扭矩力量。另外於橋梁端部兩側處，將鋼箱梁直接伸入 RC 橋台內部，形成固接的邊界條件行為，此設計方式可使箱梁兩端部較為穩固，大幅減小扭轉變位。於橋跨中央以兩側鋼纜平衡情形下，橋台兩端又提供穩固的固定端支撐，曲線橋梁扭

轉效應的不利因素因而有效降低。倘若，橋梁端部採用一般支承系統之邊界條件，支承必會產生拔力，必須設置抗拉拔裝置，該系統在人行活載重與風載重的長期振動之下，將引致後續橋梁支承、抗拉拔裝置等附屬結構之更換與維修等問題，因此不建議採用。至於下部結構部分，本工區土壤主要由回填土及粉土質砂土所組成。經綜合整理研判後，依照本次地層調查結果顯示，工區地層在鑽探深度內，由上而下可歸納成下列三個主要層次，茲分別將各層次之主要性質描述如下表：

表 1 工區土壤分層性質

層次	厚度 (m)	土層說明	N 值	γ_t (t/m ³)	w_n (%)	e	c (t/m ²)	ϕ (deg.)	k_p (t/m ³)
I	0.0 ~ 0.7	SF	-	1.90*	-	-	0.5*	30*	-
II	0.7 ~ 3.2	SM	3 ~ 6 (5)	1.84	24.3	0.81	0.5*	27*	750
III	3.2 ~ 20.0	SM	6 ~ 20 (12)	1.96	24.0	0.69	0.5*	30*	1800

* 為建議值 () 為平均值

經分析本工程建議採用 1.5 m 直徑全套管基樁作為橋台、橋塔之基礎。

結構分析設計概述

本工程為雙塔雙弧線形斜張橋，橋梁平、立、斷面圖詳見圖 3 ~ 圖 5，其結構型式簡述如下：

1. 橋梁基本資料：

- 橋梁曲線長度約 200 公尺，若包含中間雙弧曲線部分約為 265 公尺，水中不落墩。

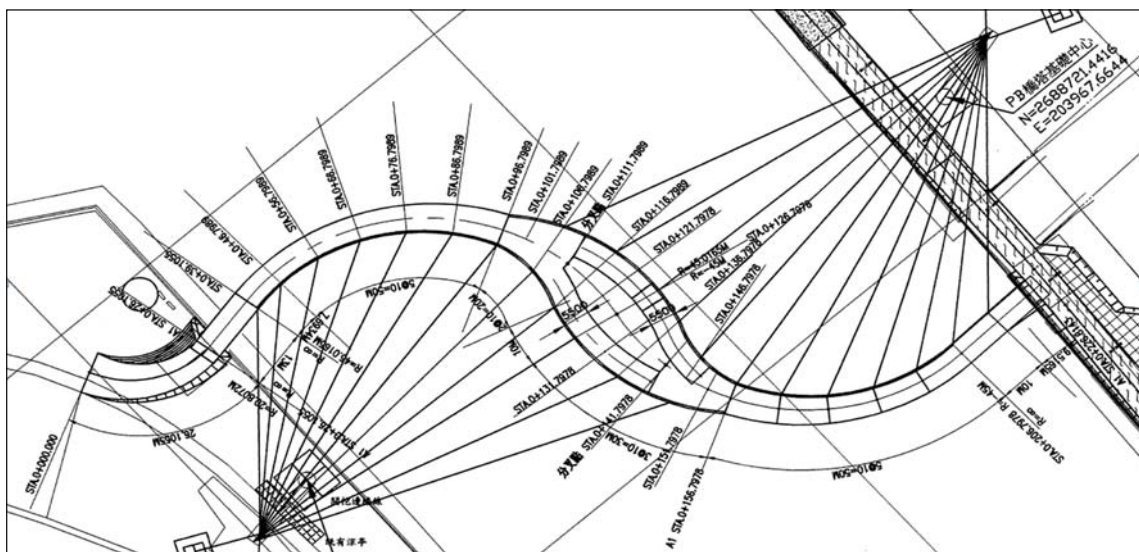


圖 3 橋梁平面圖

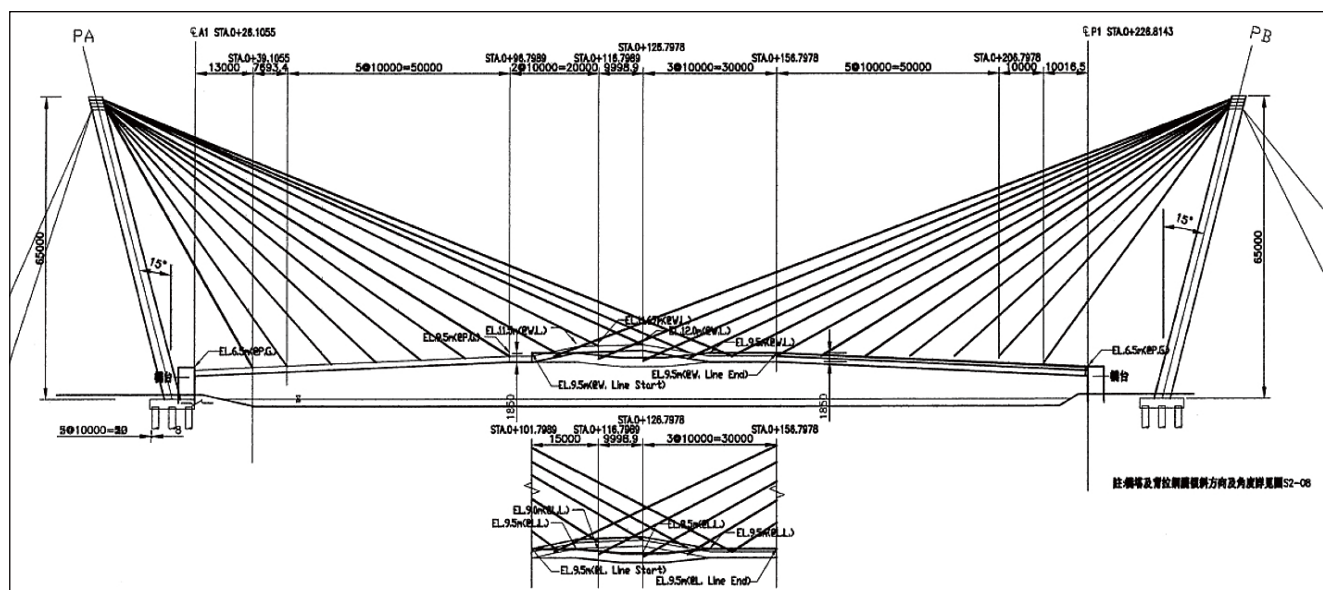


圖 4 橋梁立面圖

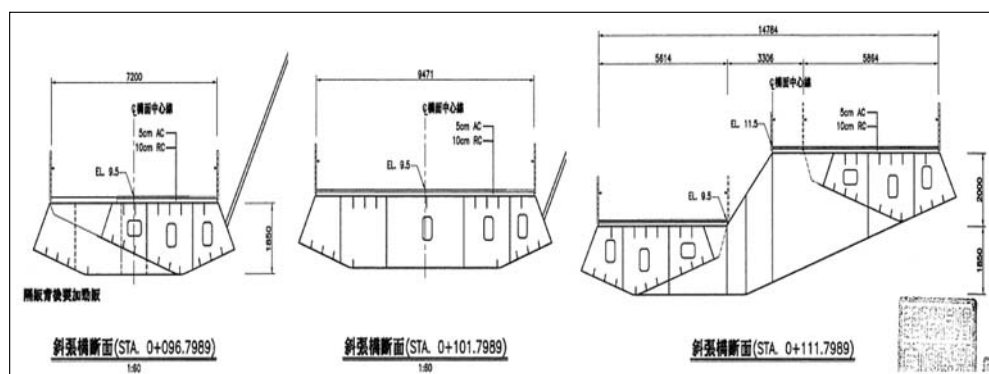


圖 5 橋梁斷面圖



圖 6 橋塔實景

- 主梁為封閉式鋼箱型梁斷面，深 1.85 公尺，若含 RC 橋面版及鋪面則有 2.0 公尺。部分托梁處設置玻璃地坪，橋面寬度為 5.76 公尺 ~ 14.78 公尺，採場撐方式吊裝施工。鋼梁起迄點預埋於橋台，該處鋼梁則開孔多處以利橫向、豎向鋼筋穿越，該鋼筋並與橋台及基樁鋼筋互相連結、焊接，以確保固接行為。
 - 橋塔為圓柱型斷面，外徑 3.0 ~ 3.5 公尺，橋塔向外後仰 15 度。此外，配合周邊風力電塔高度，橋塔之垂直高度自基礎版頂面至橋塔頂為 65 公尺，圖 6 為橋塔實景現況照片。
 - 橋面鋼纜為 19 股 15.2 mm ϕ 鋼絞線，因受腹地限制錨座基礎位置受限，橋塔背拉鋼纜線形較為陡直，為 114 股 15.2 mm ϕ 鋼絞線。鋼纜外套管為高密度聚乙烯 (HDPE) 包覆，並採螺旋紋路以降低風雨所形成之鋼纜振動。
2. 由於鋼梁預埋固接於橋台，並於橋梁跨徑中央部分配置左右側鋼纜，有效地降低了鋼梁的扭矩效應，經分析鋼梁扭轉角度及扭轉應力相當微小，不但減少了斷面分析的困擾，亦增加施工期間鋼梁的安全、穩定性，此一構想於施工期間充份得到驗證。
 3. 由於鋼梁在橋台兩端固接，溫度效應將使鋼梁的曲度產生變化，導致桿件內力（橫向彎矩）增加，經分析尚在容許應力範圍內。惟該鋼梁變形將使橋面欄杆、橋面板產生擠壓、拉伸等效應，所以橋面板及橋面欄杆每 5 ~ 6 公尺即配置伸縮縫，以避免上述行為產生破壞。本橋梁於冬天氣溫尚低時閉合，至今年夏天 6 月為止，尚未發現橋面欄杆、橋面板有破壞行為，如圖 7、圖 8 所示。
 4. 由於鋼梁在橋台固接原因，鋼梁在固接端會有較大



圖 7 橋面板伸縮縫



圖 8 欄杆伸縮縫

負彎矩產生，為消除此一不利狀況，經多次調整鋼纜預力值，使鋼梁彎矩分布較為均勻，其中靠近橋台處的 2~3 根鋼纜其拉力較其他鋼纜力量為大。

5. 橋梁分析結果包括結構分析模式（圖 9）、靜重 + 鋼纜力變位（圖 10）、靜重 + 鋼纜力構件之變化及彎矩、扭矩分布（圖 11~圖 14）等。

6. 依據動力分析，得到結構振態模式如圖 15~圖 18。

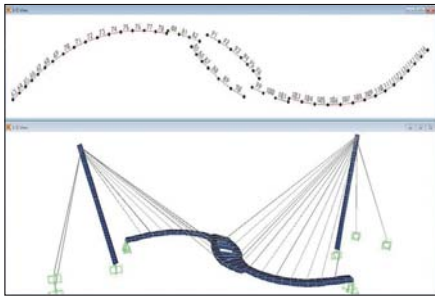


圖 9 結構分析模式

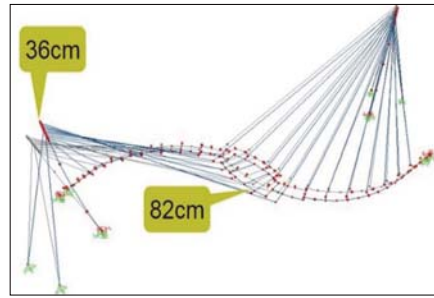


圖 10 靜載重變位

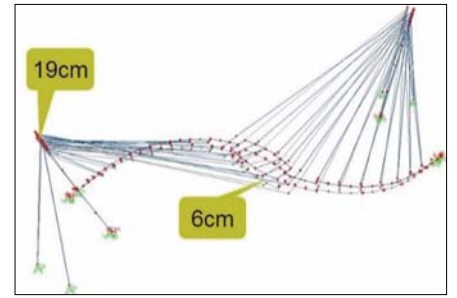


圖 11 靜重 + 鋼纜力變位

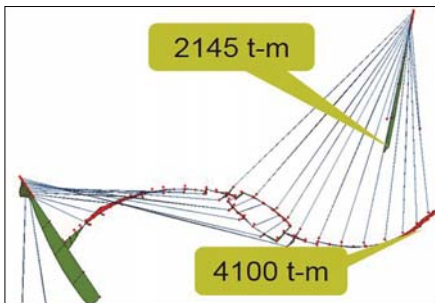


圖 12 靜重 + 鋼纜力豎向彎矩分布

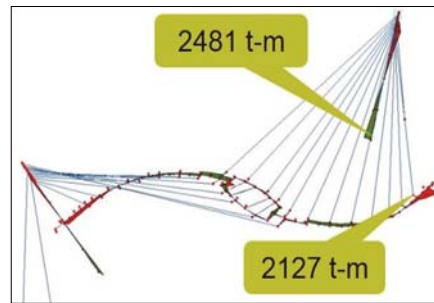


圖 13 靜重 + 鋼纜力橫向彎矩分布

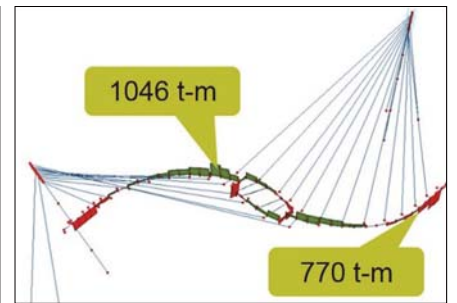


圖 14 靜重 + 鋼纜力扭矩分布

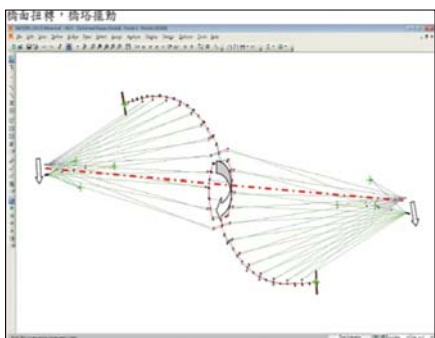


圖 15 第一振態變位圖

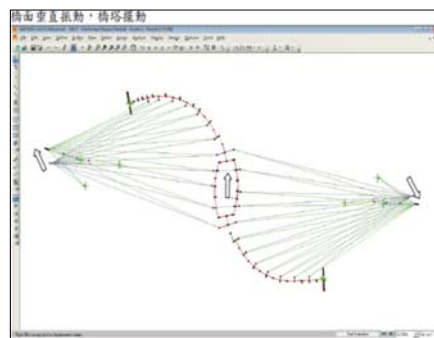


圖 16 第二振態變位圖

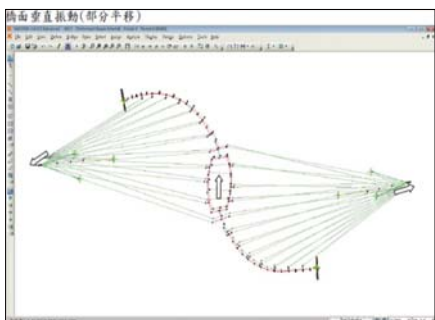


圖 17 第三振態變位圖

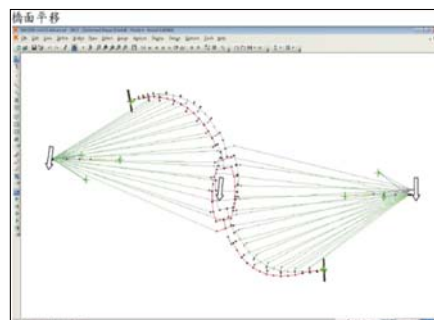


圖 18 第四振態變位圖

表 2 各振態頻率

模態	符號	頻率 (Hz)
一階豎彎	f_{v1}	0.5213
二階豎彎	f_{v2}	0.6809
一階側彎	f_{h1}	0.4818
二階側彎	f_{h2}	2.2658
一階扭彎	f_{t1}	1.2042
二階扭彎	f_{t2}	1.8512

7. 對於鋼梁斷面變化處，所有腹板、下翼板及加勁板都在截斷點處作適當延伸，使鋼梁應力可以平順傳遞，避免鋼板形成應力集中現象，如圖 19 所示。

8. 為使橋塔應力降低，橋塔背拉鋼纜位置、大小非常重要，經多次調整使背拉鋼纜之水平合力大小、方向，大約等於橋塔

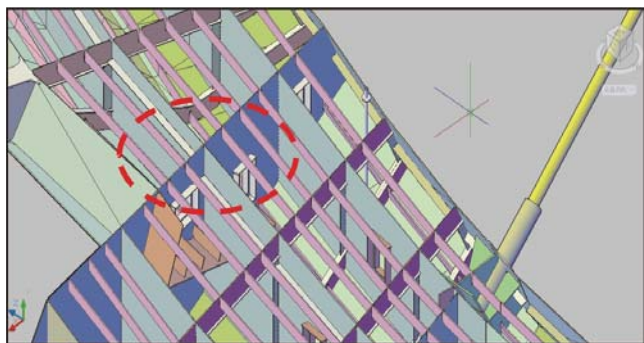


圖 19 鋼梁斷面變化處施工圖

前面所有鋼纜（與主梁連結）之總水平合力，以降低橋塔因不平衡力量引致的應力。

9. 由於橋梁造型因素，鋼纜於橋塔或鋼梁處之錨錠加勁板形狀、配置較為特殊，故其力量傳遞方式亦相對複雜，因此透過有限元素分析來瞭解其中機制，確定是否有應力集中現象。經過分析，鋼纜錨錠區元素之 vonMises 應力、軸壓力等皆小於容許應力，詳如圖 20 ~ 圖 23 所示。

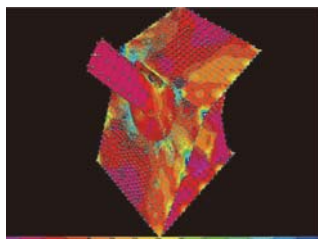


圖 20 主梁錨錠應力分布 (一)

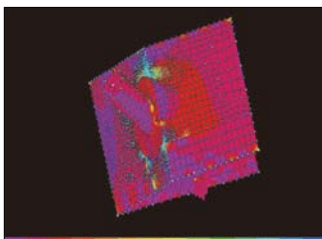


圖 21 主梁錨錠應力分布 (二)

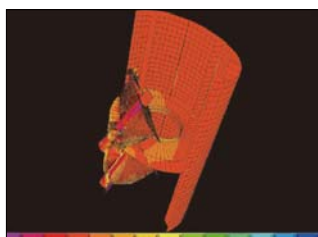


圖 22 橋塔錨錠應力分布

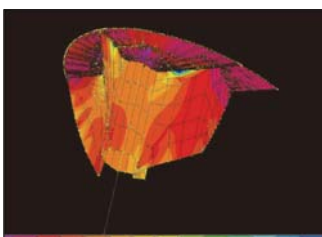


圖 23 橋塔背拉錨錠應力分布

10. 高美濕地景觀橋由於結構形式特殊，橋塔及主梁對風的作用敏感。同時由於結構設計特殊、設計標準高（按 100 年重現期），結構風載重動力效應沒有明確可依循的規範，從結構抗風角度考慮必須進行斜張橋的顫振穩定性、非線性靜風穩定性分析，以便採取相應的抗風措施。為確保橋梁的抗風安全性，委託上海同濟大學土木工程防災國家重點實驗室，進行橋梁的抗風性能及模型試驗專題研究，以檢驗橋梁設計方案的動力和靜力抗風穩定性，並採取措

施使非破壞性風載重振動（渦激振動及抖振）仍在允許振幅範圍內。本研究工作具體研究內容如下：
（圖 24 為風洞試驗模型照片）

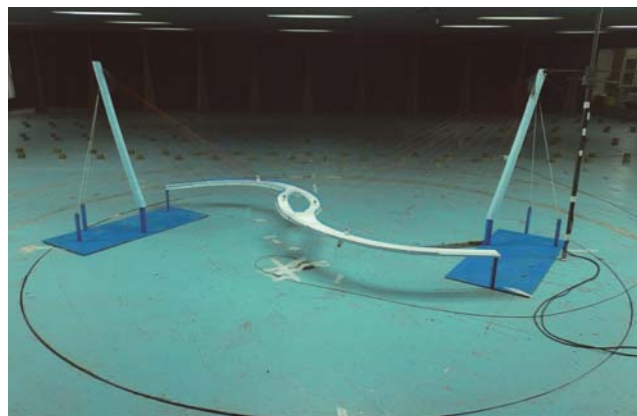


圖 24 橋梁風洞試驗模型

- (1) 建立全橋成橋運營狀態有限元模型，並計算相應結構動力特性。
- (2) 設計製作了幾何縮尺比為 1：60 的全橋氣彈模型，類比了全橋成橋運營狀態；其中流場涉及均勻流場和紊流場，攻角包括 0°、-3° 和 +3° 攻角，風偏角範圍 0° ~ 180°（間隔 15°）。風洞試驗共完成了 30 個吹風試驗工況。
- (3) 通過全橋氣彈模型風洞試驗對結構成橋運營狀態顫振穩定性能進行了測試和檢驗。
- (4) 通過全橋氣彈模型風洞試驗對全橋成橋運營狀態的風致位移回應進行了測試和分析。

針對橋梁結構成橋狀態，根據不同的風偏角和不同的風攻角，共進行了 30 個工況下的全橋氣彈模型風洞試驗，各工況顫振臨界風速如表 3 所示。試驗結果顯示上述 30 個工況下，結構成橋狀態的顫振臨界風速均高於該橋的顫振檢驗風速，因此結構在成橋狀態顫振穩定性能滿足設計要求。

在橋梁結構成橋狀態於均勻流場和紊流場風洞試驗中，均未觀測到明顯主梁豎彎渦振和扭轉渦振現象。在紊流場中，風偏角分別為 $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ （間隔 15°）時，主梁跨中和左、右四分點的豎向、X 向、Y 向和扭轉位移回應，其中，設計基準風速 32.4 m/s 時，所有工況下，主梁跨中、左四分點、右四分點、塔頂最大位移匯總如表 4 所示。扭轉位移單位為「°」，其他位移單位為「m」。

表 3 成橋狀態模型風洞試驗工況及顫振臨界風速

工況編號	結構狀態	流場	風偏角 β	風攻角 α	顫振風速 (m/s)		實橋檢驗風速 (m/s)
					模型	實橋	
C-1	成橋狀態	均勻流	0°	+3°	> 9.0	> 69.7	49.4
C-2			0°	0°			
C-3			0°	-3°			
C4 ~ C14			15° ~ 165°	0°			
C15			180°	+3°			
C16			180°	0°			
C17			180°	-3°			
C18 ~ C30		紊流	0° ~ 180°	0°	\	> 55.5	

表 4 成橋狀態、各偏角、設計基準風速作用下位移回應最大值 (紊流場)

風偏角	風攻角	跨中位移				左四分點位移				右四分點位移				塔頂位移	
		豎向	X向	Y向	扭轉	豎向	X向	Y向	扭轉	豎向	X向	Y向	扭轉	X向	Y向
0°	0	.0757	-.0431	.0160	-.090	.0941	-.0406	.0058	.113	.0472	.0381	-.011	.2564	.0340	.0675
15°	0	.0830	.0198	-.050	-.099	.0940	-.0268	.0433	-.111	.0512	.0328	.0363	.2388	-.034	.0573
30°	0	.0765	.0355	.0448	.1296	.1023	.0230	.0429	.123	-.0525	-.019	.0414	.1540	-.048	.0593
45°	0	.0718	-.0586	-.011	.1474	.0983	-.0531	.0088	-.126	-.0695	-.057	-.011	.1298	-.056	.0510
60°	0	.0694	.0335	-.058	.1448	.0999	.0338	-.046	.127	-.0697	.0391	-.045	.1896	-.067	.0446
75°	0	.0630	-.0206	-.046	.1235	.0807	-.0109	-.038	.102	.0493	-.011	-.060	.2013	-.064	.0364
90°	0	.0404	-.0413	-.009	.1163	.0606	-.0298	.0105	-.07	-.0519	-.031	-.019	.2015	-.059	-.031
105°	0	.0360	.0289	-.029	.0973	.0512	.0310	-.023	.076	-.0477	.0373	-.020	.1496	-.049	-.032
120°	0	-.0263	-.0060	.0285	.0728	.0324	.0072	.0253	.049	-.0352	-.010	.0318	.0905	-.037	-.024
135°	0	0.0293	-.0203	.0091	.0650	.0335	-.0193	.0140	.064	-.0282	-.014	-.013	-.045	-.029	-.026
150°	0	-.0447	-.0287	-.015	.0688	.0537	-.0287	-.016	.059	.0305	-.025	-.017	-.082	-.030	-.030
165°	0	-.0513	-.0130	-.036	.0811	-.056	.0114	-.032	.074	-.0408	-.020	.0390	.0720	-.035	-.034
180°	0	.0538	.0280	.0243	.0853	.0619	-.0194	-.027	-.127	.0488	-.023	.0283	-.085	-.028	-.031

工程施工概述

本橋基礎工程都規劃在清水大排之堤後坡施工，因此施工期間不受防汛期影響，亦無阻水問題，因此基礎施工部分尚屬順暢，如圖 25 和圖 26 所示。此外，施工期間為避免對溼地生態保護區造成衝擊，對於周邊環境的水質、噪音及生態物種皆有作定期監測管控，使影響降至最低。

在鋼構廠製作部分，由於鋼梁外形變化頗為複雜，因此施工圖製作採用 3D 電腦立體軟體繪製，經與設計及施工單位互相檢查討論，並確定沒有構件衝突及界面銜接問題之後，才去作展開圖及電腦放樣切割，以確保後續作業不會發生重大的錯誤。至於現場吊裝時，係利用施工便橋及臨時支撐架進行架設，施工人員並於現場進行測量作業以管控精度，並即時回饋鋼構廠，隨時修正微調後續施工圖，以確保後續鋼構吊裝的施工精度。由於鋼構現場吊裝部分係都在夏

季進行，此段期間工址風力都不強，相關作業亦尚屬順暢。至於橋塔吊裝施工部分，由於橋塔節塊採現場焊接作業，考量高空作業之危險性及風速等原因，橋塔節塊接頭採內側單邊開槽方式，焊接人員於橋塔內部作業施工，可確保人員安全，並防止高空風力過強影響現場焊道品質，如圖 27 ~ 圖 31 所示。惟本項施工作業期間，曾遭遇梅姬颱風的侵襲考驗，其最大陣風達十七級風，打破以往的最大風速記錄，所幸施工團隊確實作防颱安全措施，並未造成任何損害。

至於鋼纜安裝部分，由於施工當時為冬季東北季風最為強烈期間，套管及鋼纜安裝並不順利（如圖 32 所示），往往因風速過大而停工。不過，套管及鋼纜安裝完成後，後續施拉過程就相當順利，不到 5 天內即施拉調整完成。至於後續橋面板、欄杆、裝修及 AC 鋪設等，皆能依計畫順利如質完成（如圖 33 和圖 34 所示）。

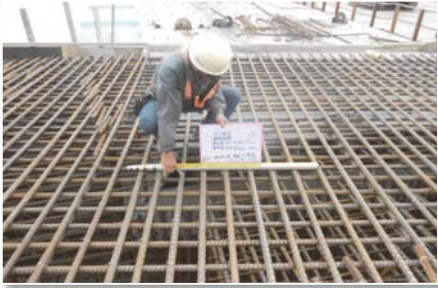


圖 25 橋台基礎鋼筋



圖 26 橋塔基礎錨座



圖 27 鋼構假安裝



圖 28 鋼梁吊裝施工 (一)



圖 30 橋塔吊裝

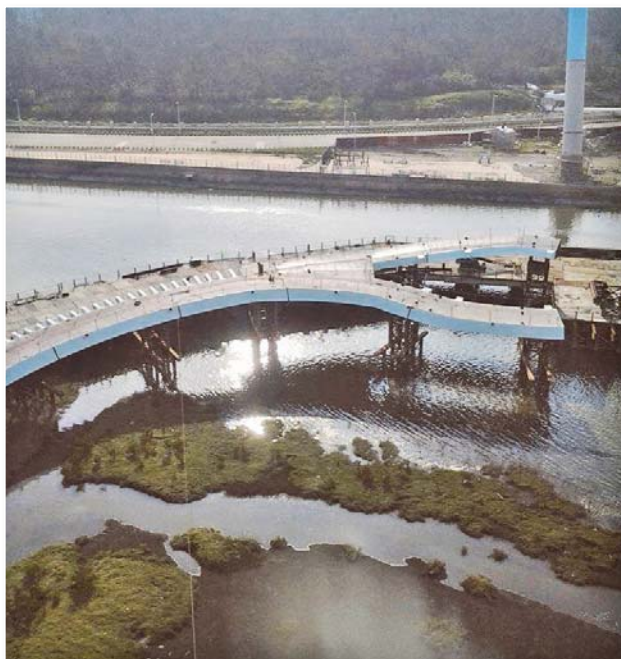


圖 29 鋼梁吊裝施工 (二)



圖 31 鋅鋁熔射補漆



圖 32 鋼纜安裝





圖 33 橋面板施工



圖 34 橋面 AC 及欄杆施工

結論

因為時代的演進，未來橋梁的景觀造型需求將益形重要，如何兼顧結構安全、美觀及創意，是橋梁工程相當重要的課題之一。本橋由於景觀造型特殊，因此在結構設計及施工上必須要有特別的考量，包括如何克服鋼梁扭矩效應、風載重之動力行為掌握、鋼構局部應力的加勁補強及鋼構施工安裝精度等等。本文希望藉由本工程設計及施工其間所獲得的一些經驗分享，作為工程界的參考，也希望各位同業先進不吝指教。

參考文獻

1. 揚盛工程顧問股份有限公司，「興建景觀橋暨海堤路景觀美化改善工程」細部設計圖（2013）。
2. 上海同濟大學土木工程防災國家重點實驗室，「興建景觀橋暨海堤路景觀美化改善工程抗風性能研究主橋結構氣彈模型風洞試驗研究成果報告」（2014）。
3. 日本土木學會第 57 回年次學術演講會，「鋼斜張橋的獨立塔部材の屋屈耐荷力および有效屋屈長に関する研究」。



MWH
美華集團

now
part of



Stantec

全球頂尖的全方位綜合服務企業

專注於服務全球「涉水基礎建設」(Wet Infrastructure) 的大型技術與管理顧問集團。我們提供客戶綜合性解決方案，包括策略規劃、可行性研究、規劃、設計、工程管理、工程建設、操作與營運管理、資產管理、災後重建、風險管理、財務與法務、稽查與評估等服務，業務範圍涵蓋水、污(廢)水、水資源、環境、生態、土壤與地下水、工業、水力、石油與天然氣、礦業、港灣、交通等專業領域

- 上下水道系統規劃設計
- 管線檢視修繕
- 污、廢水處理工程
- 漏水控制與用水削減
- 工業用水與廢水處理
- 履約管理督導與專案管理
- 管線資產管理系統規劃
- 地面水體污染防治規劃
- 生態水質淨化工程
- 水資源管理與規劃
- 土壤及地下水污染
- 工業與有害廢棄物處理



#1
Top International Design Firm
Wastewater Treatment
2015 Global Sourcebook,
Engineering News-Record



#1
Top International Design Firm
Sewer & Solid Waste
2015 Global Sourcebook,
Engineering News-Record



#1
Top Firms
Water
NCE Consultants File 2015
New Civil Engineer



#3
Top International Contractor
Wastewater Treatment
2015 Global Sourcebook,
Engineering News-Record

