



鋼箱圍堰之規劃與施工挑戰

盧建州／台灣世曦工程顧問股份有限公司 工務所主任

楊晟豪／台灣世曦工程顧問股份有限公司 計畫工程師

謝克岱／台灣世曦工程顧問股份有限公司 計畫副理

金門大橋工程（以下簡稱本工程）為國內少見之大型跨海橋梁，其建設目的為提供大、小金門間全天候陸運交通服務，以解決小金醫療匱乏、土地利用失衡及水路交通限制等問題，並期達到活化大小金門與促進觀光產業發展之願景。本工程位於烈嶼端引橋段部分水深較深墩位，以及金烈水道深槽區主、邊橋單元等範圍所採用之樁帽鋼箱圍堰工法，為國內首見之圍堰施工方式，本工程執行迄今已累積一定程度之鋼箱圍堰施工成果，藉由施工經驗分享冀望可為後續國內相關鋼箱分項作業順利推展略盡棉薄之力。

金門大橋工程圍堰系統規劃考量

本工程路線全長約 5.41 公里，其中橋梁段部分長 4.77 公里（詳圖 1），基礎構造均採樁基礎型式設計，在考量景觀、施工性及工程費用等因素下，關於樁帽高程之規劃，在主橋段與邊橋段以退潮時露出樁帽但不露出基樁為原則（樁帽底緣高程 E.L. - 4.2 m），在引橋則以退潮時不露出樁帽為原則（樁帽底緣高程 E.L. - 5.7 m）。

金烈水道深槽區範圍之海床高程分佈約自 E.L.

-12.8 m 至 E.L. -22.7 m，平時平均潮位介於 E.L. + 2.24 m 及 E.L. - 2.25 m 間，於此懸空構築樁帽環境下所施作之鋼箱圍堰，其主要目的係在維持樁帽及橋墩施工期間，如樁頭處理、鋼筋綁紮、混凝土澆置搗實及橋墩升層等作業進行時，均可於乾式施工環境下進行。本工程設計階段考量樁帽施工時臨時圍堰之施工性及經濟性，原則上當橋墩樁帽底緣距海床面達 1.3 m 以上時，即設計採用鋼箱圍堰系統施工；本工程總計有七種不同尺寸型式之鋼箱圍堰系統，其所對應之樁帽尺寸詳表 1。

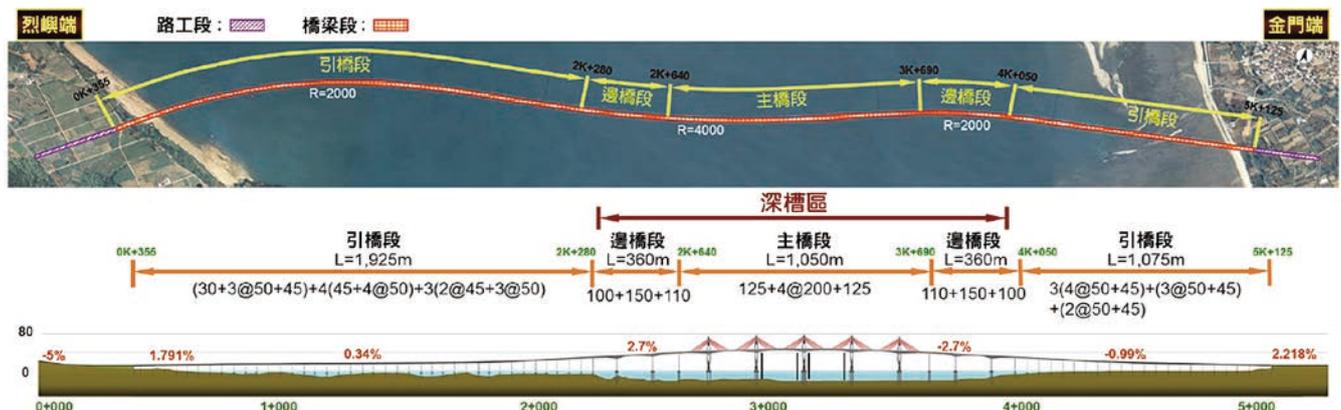


圖 1 金門大橋工程橋梁段範圍示意圖

表 1 金門大橋鋼箱圍堰系統型式

橋型	樁帽尺寸 (m)	樁帽厚度 (m)	墩數
引橋	11.0 × 11.0	2.5	3
	11.0 × 9.0	2.5	10
	7.5 × 7.5	2.5	2
邊橋	18.4 × 16.8	4.0	4
	16.8 × 13.6	4.0	2
主橋	23.0 × 21.0	5.0	3
	29.0 × 21.0	5.0	1
	29.0 × 23.0	5.0	1

鋼箱側壁主要功能是止水，故側壁頂緣高程之選定須注意於施工期間海水不可湧入工作面，一般建議宜依工址最高潮位及季風期間可能浪高而定。例如本工程主橋單元之樁帽鋼箱側壁頂緣，即依工址最高高潮位 (H.H.W.L., E.L. + 3.16 m)、可能浪高及加計防濺濺高度等項考量，側壁頂緣高程定於 E.L. + 5.00 m 進行系統尺寸規劃。

側壁型式分有單壁及雙壁中空兩種，單壁式鋼箱具備用鋼量少、加工簡單現場易於組拆轉用等優勢，相對則有定位調整較難、勁度小容易漏水等施工障礙，而雙壁中空式鋼箱之利弊則恰與單壁式鋼箱相反。實務上鋼箱側壁區分單元設計，除須考量強度與安全之要求外，應需具備易於轉用及組裝拆解之需求，以利海上及水中作業。本工程按工址特性及樁帽尺寸等考量，選用單壁型式鋼箱進行設計及施工規劃。

鋼箱圍堰雖屬構築樁帽之臨時性假設工程，但其可靠性意義重大，為了確保鋼箱結構強度、勁度及穩

定性符合需求，鋼箱圍堰系統之分析檢核應考量鋼箱自重、樁帽混凝土自重、施工活載重與衝擊載重、抽水後所產生之浮力及施工期間各項環境載重（諸如靜水壓力、水流力、風力、波浪橫力、...），模擬各項構件及邊界條件進行三維有限元素分析方能得證，此部分有別於一般圍堰系統使用二維半無限平面分析即可評估安全與否之方式，在設計實務上應予注意；本工程有限元素模型示意如圖 2。

鋼箱圍堰系統組構件簡介

鋼箱圍堰結構不論型式差異，一般乃由底板系統、側壁與內支撐系統、懸吊下放系統、定位束制及載重轉換裝置等五大部分所組成，本工程所規劃之鋼箱圍堰主要組構件如圖 3 所示，接下來將配合施工流程分項說明其功能及注意事項。

鋼箱圍堰主要施工階段

本工程鋼箱圍堰主要施工階段分別為：

(1) 基樁外套鋼管續接及加設頂蓋 (圖 4)

- 部分基樁外套鋼管續接加高至預定高程，以供後續頂部安裝懸吊及下放千斤頂使用。
- 其餘基樁外套鋼管整平至頂部齊平。
- 所有基樁外套鋼管頂部均設置加勁蓋板。
- 低潮位時於基樁外套鋼管銲接支撐托架，以供後續鋼箱底板系統進行現場組裝工作時使用。

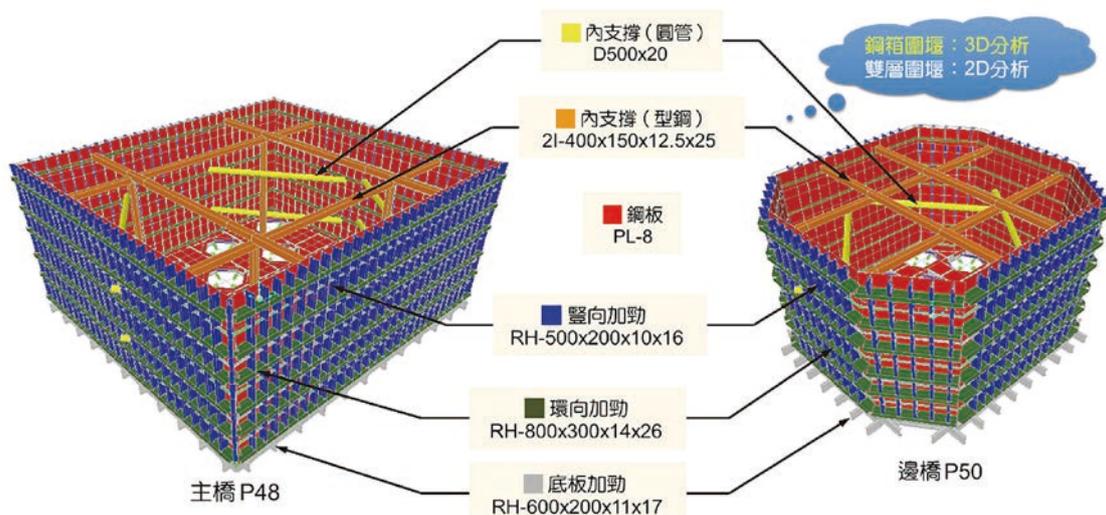
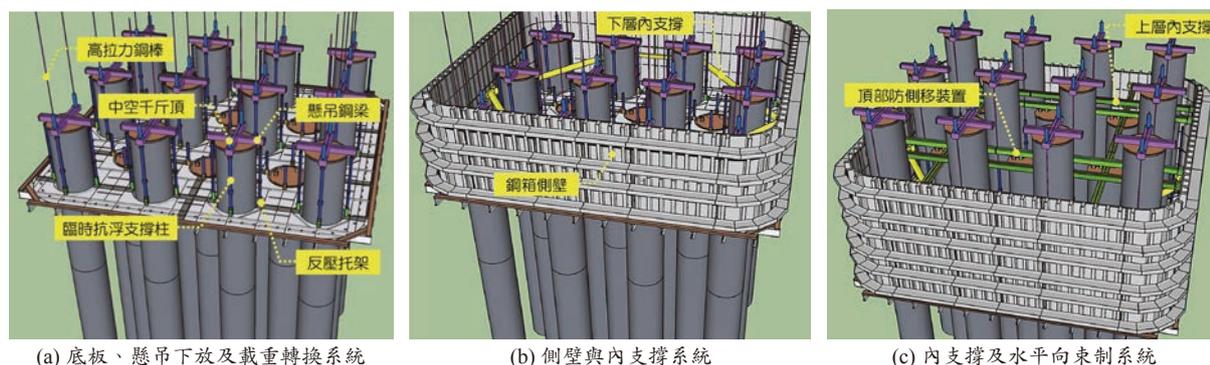


圖 2 金門大橋工程鋼箱結構分析模型



(a) 底板、懸吊下放及載重轉換系統

(b) 側壁與內支撐系統

(c) 內支撐及水平向束制系統

圖 3 金門大橋工程鋼箱結構主要組成

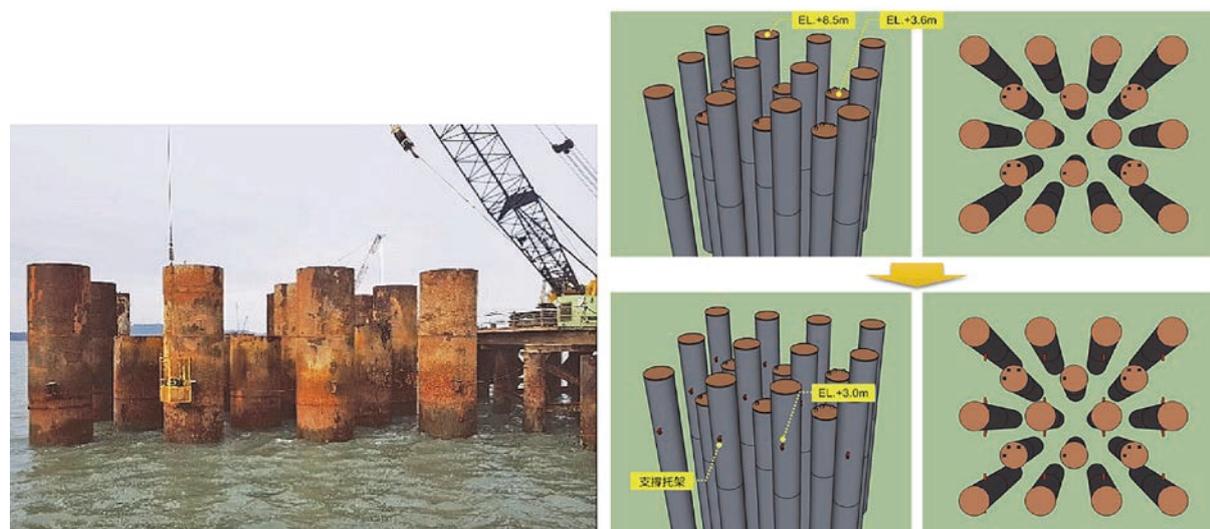


圖 4 基樁外套鋼管加高作業

(2) 鋼箱底板施工 (圖 5)

- 鋼箱底板系統區分單元於工廠製作，再運至現場依序吊裝於支撐托架上。

- 相鄰單元以螺栓或銲接方式連結。
- 安裝底板單元間之頂部接合鋼板，並與底板大梁、小梁及相鄰鋼板銲接連結。



圖 5 鋼箱底板施工

鋼箱底板之功用為承載及傳遞如混凝土自重、浮力等項垂直載重，施工時除結構安全要求外，應特別注意各單元間之密接性，以防後續封底混凝土澆置時發生漏漿疑慮。

(3) 安裝下兩層側壁及支撐 (圖 6)

- 安裝限位梁及定位角鋼。
- 安裝鋼箱下、中層側壁 (共 3 層、每層高度約 3.6 m)，及底層內支撐。
- 預組止漏封板，俟下放完成後再行水下密封施工。

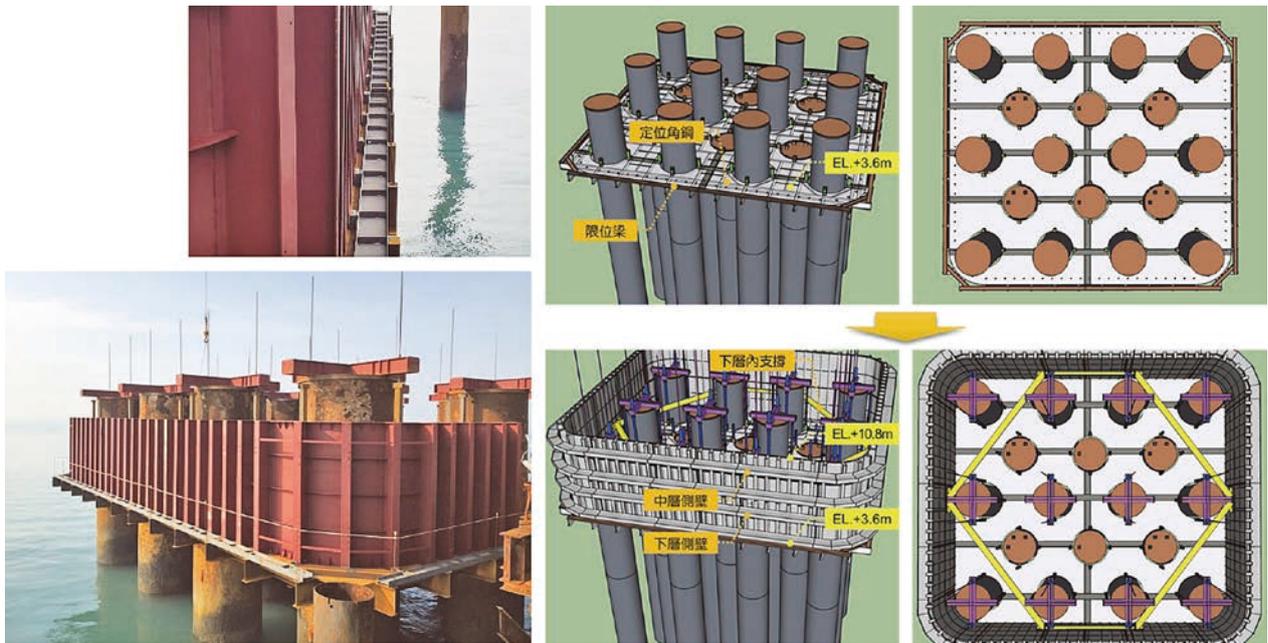


圖 6 下層側壁及限位梁組裝情形

為考量樁帽構築完成後可於水下順利拆解鋼箱側壁，側壁與底板間之接合方式通常不會採用銲接固定，而是使用簡單接合方式進行固定，本工程則以榫接方式連結側壁與底板，另各側壁單元間則是使用高強度螺栓進行接合。止漏封板功能為密封底板系統及基樁外套鋼管間為下放作業所預留之空隙，於下放完成後應水下確實密封以防止封底混凝土澆置時滲漏。

(4) 安裝下放系統 (圖 7)

- 安裝下放系統，包括套管頂部懸吊鋼梁、懸吊鋼棒 (高拉力鋼棒)、臨時抗浮支撐柱下層、中空千斤頂及油壓設備等。
- 因下放過程中高拉力鋼棒須逐段以鋼棒續接套筒接續，爰中空千斤頂之選用另須注意夾具、內缸及千斤頂底部基座之尺寸。

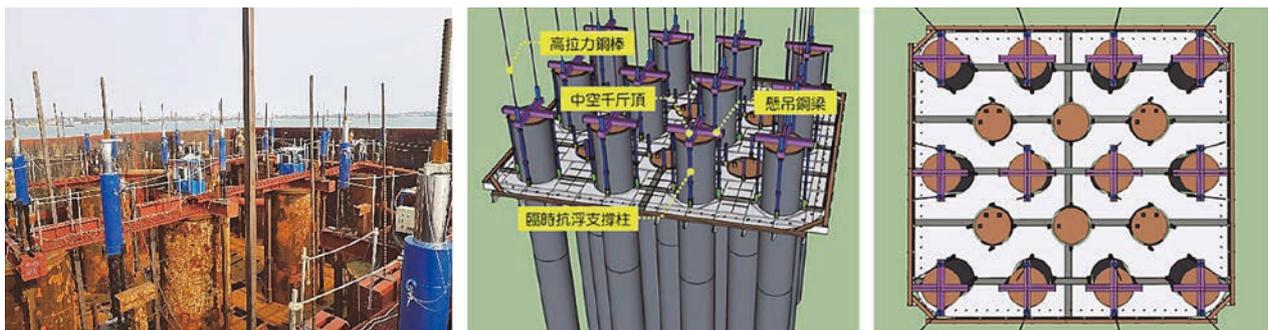


圖 7 下放系統組裝情形

(5) 首次下放鋼箱 (圖 8)

- 試提作業完成後，切除臨時支撐托架。
- 控制下放系統同步均衡下放，下放過程須維持鋼箱內外水位平衡。
- 將鋼箱下放 7.0 m 至第一階段預定高程 (底部高程自約 E.L. + 3.6 m 下放至 E.L. - 3.4 m 處)，並調平鋼箱。

- 鎖固鋼箱上緣及底部上下兩層之限位千斤頂以臨時固定鋼箱，避免因潮汐或波浪影響導致鋼箱底板與基樁外套鋼管相互碰撞而衍生構件或接合破壞。

所謂試提作業，意即利用下放系統數次試提升鋼箱整體，使底板與支撐托架脫離，主要工作為確認鋼箱整體系統之各部接合無虞，並使各下放點受力平均。

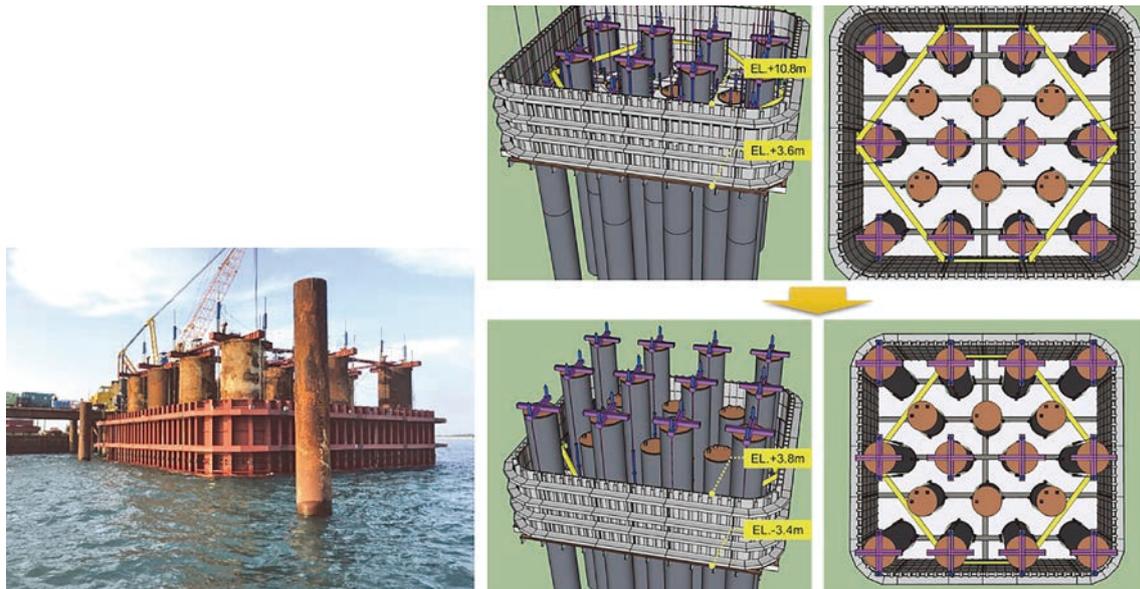


圖 8 首次下放鋼箱施工情形

(6) 安裝上層側壁及支撐 (圖 9) :

- 安裝中層內支撐。

- 安裝鋼箱上層側壁 (約 3.6m 高)，並安裝頂層內支撐。
- 續接懸吊鋼棒及臨時抗浮支撐柱。

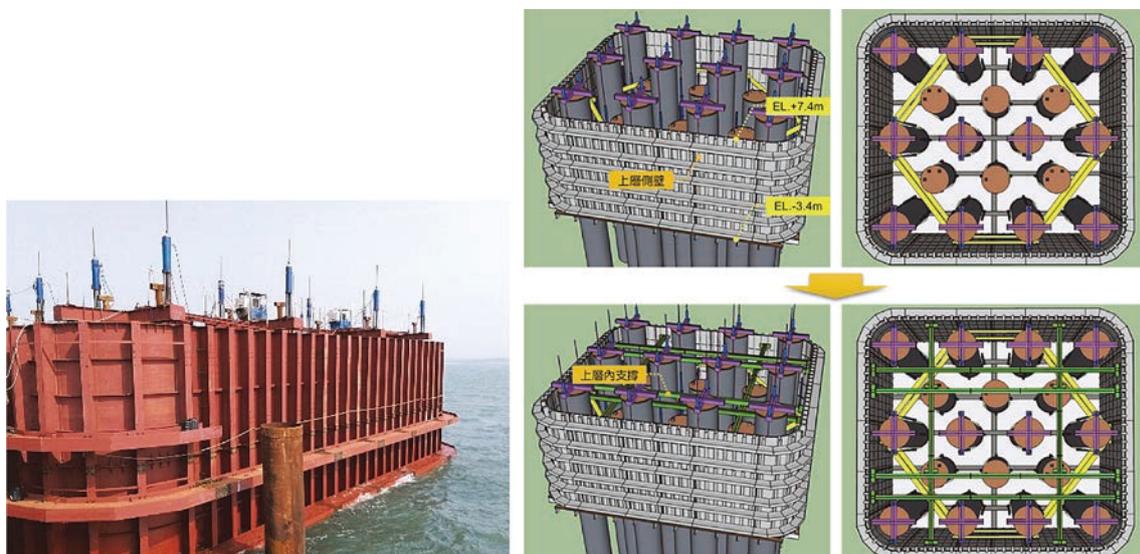


圖 9 上層側壁安裝情形

(7) 第二次下放鋼箱 (圖 10)

- 將鋼箱下放 2.4 m 至設計高程 (鋼箱底板上緣高程 E.L. -5.8 m 處)，期間須維持鋼箱內外水位平衡，完成時調平鋼箱至設計高程。
- 安裝頂部防側移裝置，並與外套鋼管連接固定，使鋼箱壁體能傳遞橫力。
- 調整鋼箱水平向位置後鎖固限位千斤頂，藉由外套鋼管固定鋼箱，使鋼箱底部能承受橫力。
- 鋼箱定位完成後移除油壓系統及中空千斤頂，及加裝懸吊鋼棒。
- 水下固定止漏封板，封閉底板與外套鋼管之間隙，以防封底混凝土澆置時漏失。



圖 10(a) 止漏封板預組

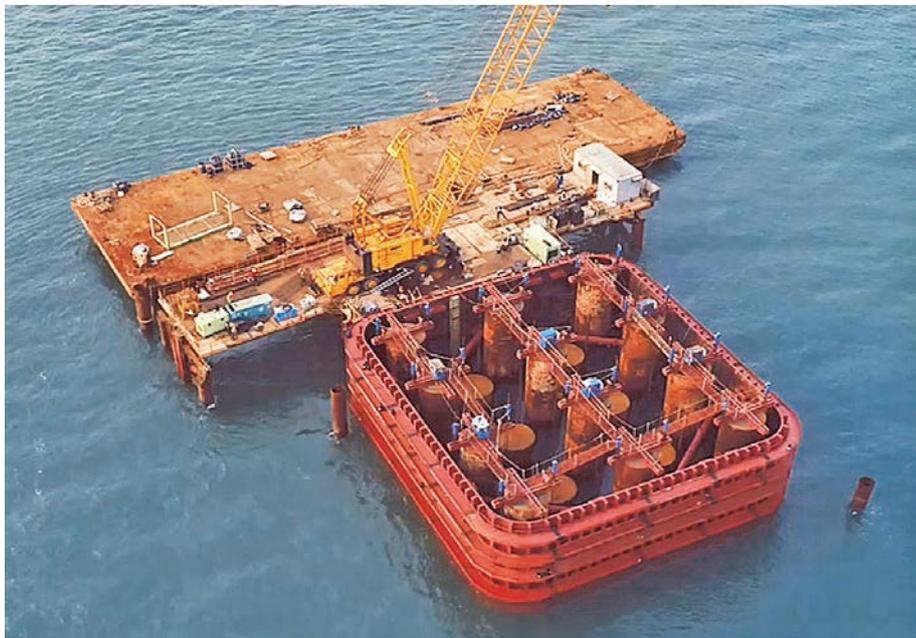


圖 10(b) 深槽區鋼箱圍堰系統下放完成情形

(8) 首次封底及逐階抽水 (圖 11)

- 第一次水下澆置封底混凝土，澆置完成後水下確認澆置成果。
- 封底混凝土達到設計強度後，封閉鋼箱側壁之通水孔，開始逐階抽水，每階降水時須鉚接臨時抗浮支撐後方可進行下一階段降水直至抽水完成。



圖 11(a) 水下確認澆置成果



圖 11(b) 逐階抽水及臨時抗浮支撐施工



圖 11(c) 抽水及臨時抗浮轉換完成

(9) 反壓托架及二次封底 (圖 12)

- 清理第一次水下澆置封底混凝土之表面雜物及浮漿，及基樁外套鋼管所附著之海中生物。
- 於乾式環境下銲接反壓托架，以將先前步驟所施作之臨時抗浮支撐，俾利於基樁外套鋼管切除後接續承擔鋼箱系統浮力。
- 鋼箱內部周邊宜設置集水溝，俾利樁帽作業期間可集中抽排溢入工作面之海水。
- 第二次澆置封底混凝土，澆置完成面須整平至樁帽設計高程 (主邊橋段 E.L. -4.2 m, 引橋段 E.L. -5.7 m)。

工作面抽水後所產生的巨大浮力，主要應力傳遞路徑為自底板藉由特定連接設施傳至基樁外套鋼管，最終由海床提供抗拉拔承载力抵抗之。浮力轉換機制一般可以兩種方式為之，如於底板下方直接進行水下銲接連結之一次浮力轉換，或於底板上方以分階抽水、分階浮力轉換方式進行。本工程為儘量減少水下作業，遂以臨時抗浮支撐及最終反壓托架之分階方式完成浮力轉換作業。浮力轉換為鋼箱圍堰系統最重要之步驟，其施工品質直接影響圍堰系統成敗，無論實際以何種方式作業均應特別慎重。



圖 12(a) 反壓托架銲接



圖 12(b) 第二次封底澆置

(10) 切除套管、樁頭處理 (圖 13)

- 拆除懸吊鋼棒及懸吊鋼梁。
- 切除樁帽底部設計高程以上之基樁外套鋼管、臨時

- 抗浮支撐柱。
- 樁頭劣質混凝土處理。



圖 13 鋼箱圍堰工作面樁頭處理完成情形



圖 14 鋼箱側模變位情形

鋼箱圍堰施工建議事項

本工程鋼箱圍堰垂直向主要傳力機制係全部藉由反壓托架傳遞，而一般於鋼箱規劃設計時，封底混凝土與外套鋼管間之黏結力因水中混凝土硬固後考量乾縮效應，實務上建議不宜計入。

基樁外套鋼管因長期浸泡於海水中，極易附著海中生物，於各項銲接作業前應確實清理，以確保銲接強度。

封底混凝土除抵抗浮力之功用外，亦兼具提供整體鋼箱水平束制、穩定鋼箱側壁、底部止水及調整樁帽高程等功能，故其完整性應為施工之首要。水下組裝基樁外套鋼管與鋼箱底板空隙間之止漏封板，應注意確實水下組裝並填實縫隙，以防封底混凝土澆置時漏失。

封底混凝土宜應使用特密管水中澆置，並注意水中混凝土之流動覆蓋情形，隨時以水尺等工具量測澆置面高程，以確保混凝土可確實充填鋼箱內部及基樁外套鋼管間之所有空間。鋼箱底部易滲水區域一般常見於鋼箱角隅、外套鋼管周圍，及部分空間狹小混凝土不易充填之區域，如不幸發生時可用止漏樹脂灌漿方式進行補救，其工法略同隧道工程止漏灌漿技術，所選灌漿材料須具備高黏著強度、低黏滯度、凝結速度快、膨脹性、促滲作用、彎曲强度高、無毒等特性。

鋼箱底板與側壁接合為便於拆解，通常不會採用銲接固定，本工程則以樁接方式連結側壁與底板；倘

施工環境受其他外力因素，例如：船舶排浪、常時海象衝擊頻繁等，建議底板與側壁結合處適度設計螺栓或焊接固定，以免反覆作用致鬆脫後與封底混凝土間產生間隙導致滲水。

鋼箱內支撐設計時，需考量樁帽基礎澆置規劃，若需配合作業分階段拆除時，需考量側模支撐轉換機制，以免內支撐拆除後箱體勁度不足致側模變位。(圖 14)

結語

本工程鋼箱圍堰系統施工經驗累積至今，謹彙總施工心得如下，期望對讀者有所助益：

1. 審慎規劃：詳實評估載重、精確模擬分析。
2. 良好施工性：鋼箱各部易於安裝拆解、極力減少水下作業工項。
3. 浮力完整轉換：分階抽水分階臨時抗浮、反壓托架確實銲接施工。
4. 確實封底：封底澆置確實、準確控制高程。
5. 提升穩定性：圍堰各階段均穩固束制、施工期間有效抑制振動。
6. 掌握施工契機：配合海象研判最佳施工時機、臨界階段全力投入資源趕趕。

參考文獻

1. 徐偉，呂鳳梧（2009），「深水區域特大型施工平台與鋼吊箱結構分析方法」，北京：中國建築工業出版社。
2. 張鴻，劉先鵬（2005），「特大型橋梁深水高樁承台基礎施工技術」，北京：中國建築工業出版社。