



金門大橋工程進行預鑄節塊提升作業

金門大橋預鑄節塊懸臂工法 精進海事工程

蔡俊鏡 林同棧工程顧問股份有限公司 技術總監／博士
黃健碩 林同棧工程顧問股份有限公司 結構工程師

避免海上施工風險 主梁改採預鑄節塊設計

2022 年 10 月 30 日金門大橋完工通車，該橋西起烈嶼鄉（小金門），橫跨金門港道，東至金寧鄉（大金門），路線全長約 5.4km，跨海段約 4.7km，深槽區約 1.8km，最大水深約 23m。本工程在海上施工，面臨潮差、強勁東北季風、洋流、濃霧等惡劣海洋環境，並需維持小三通航道通行正常。主梁原設計採場鑄施工，須在海上高空進行澆鑄混凝土作業，具有施工風險高、品質控制不易及工期長等問題。

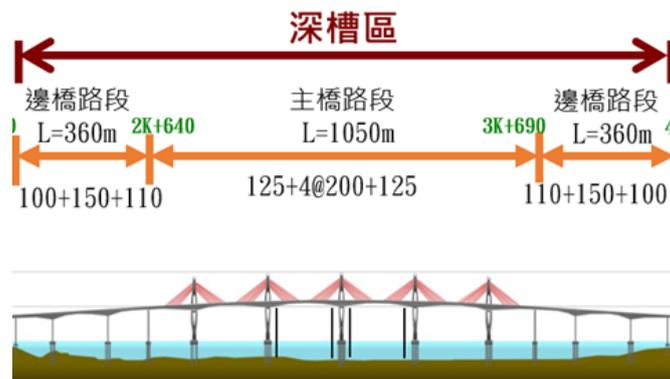
《封面故事》

承包商東丕營造股份有限公司特別委託美商同棧國際工程顧問股份有限公司臺灣分公司，在維持外型不變前提下，針對主橋及邊橋主梁變更設計為預鑄節塊懸臂工法。主橋配置主跨 200m 六跨連續脊背橋，邊橋配置主跨 150m 三跨連續梁橋，預鑄節塊長約 2.7m~5.0 m，重量約 75tf~268 tf，節塊數量共計 376 塊，預鑄工期較場鑄縮短約 6 個月。本變更設計需考量海上施工風險、船機設備能量及經費控制，重點在確保橋梁結構安全性、耐久性，為避免海洋鹽害影響橋梁使用年限，特別參考國外跨海大橋預鑄節塊橋梁的防蝕方式。預鑄場經檢討無法設置於金門，改設於高雄興達港旁，藉由拖船運至橋址（距離約 260km），再以主梁懸臂工作車吊裝節塊。金門大橋是臺灣首座採用預鑄節塊設計施工的跨海大橋，本文旨在分享設計經驗，供未來跨海大橋之參考[1]。

工程內容

一、原設計

金門大橋分主橋、邊橋及引橋，其中主橋及邊橋位深槽區(圖一)，主橋配合 5000GT 客貨輪航道，跨徑配置 $125+4@200+125=1,050\text{m}$ ，脊背橋主梁採用場鑄懸臂工法。邊橋跨徑配置 $100+150+110=360\text{m}$ ，採用場鑄節塊懸臂工法。引橋長共 3,000m，採用場鑄支撐先進工法[2]。



圖一 金門大橋主橋及邊橋跨徑配置圖

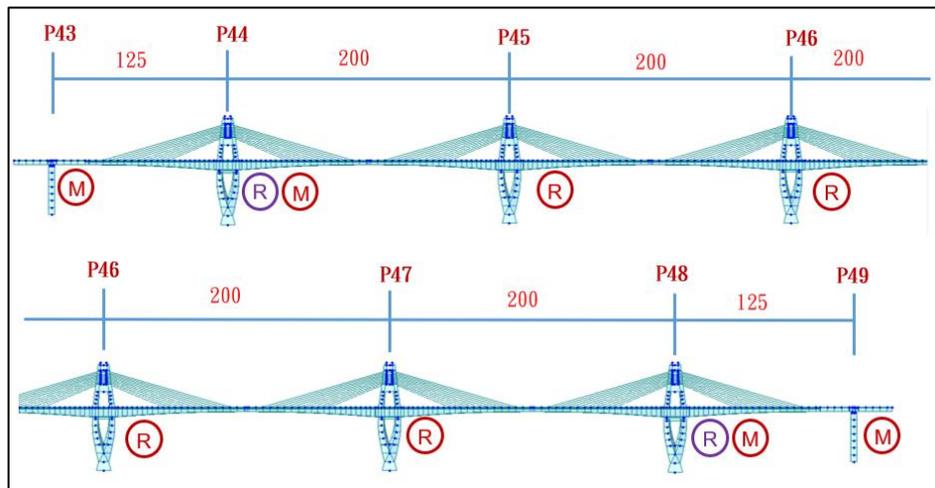
《封面故事》

二、替代方案

金門大橋主要施工要徑為跨越深槽區橋梁，承包商為如期完工提出替代方案（變更設計），主梁由場鑄節塊改為預鑄節塊吊裝施工，柱頭節塊仍維持場鑄施工。引橋已打設施工棧橋，仍按原設計場鑄支撐先進工法施工。主梁改採預鑄節塊可與下部結構並行作業，有效縮短海上高空現場作業時間，並降低施工風險。

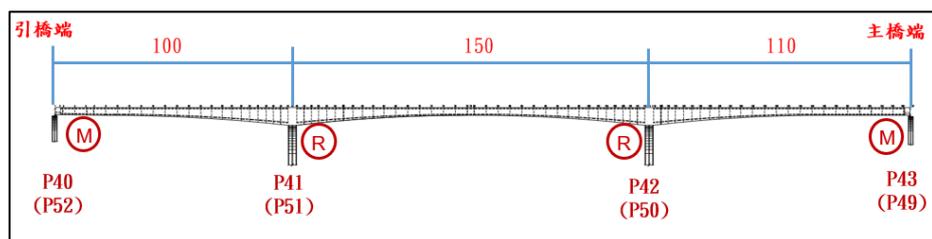
預鑄節塊設計

本變更設計範圍包含主橋及邊橋（圖二、圖三），預鑄節塊懸臂工法設計重點包含預鑄節塊配置、預力鋼腱配置及防蝕設計。



註：○施工中邊界條件，○完工後邊界條件，M 活動支承，R 固接橋墩

圖二 主橋結構立面圖（單位：m）



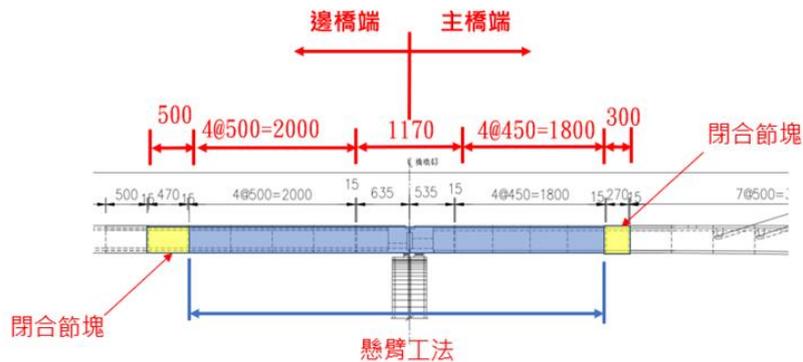
圖三 邊橋結構立面圖（單位：m）

《封面故事》

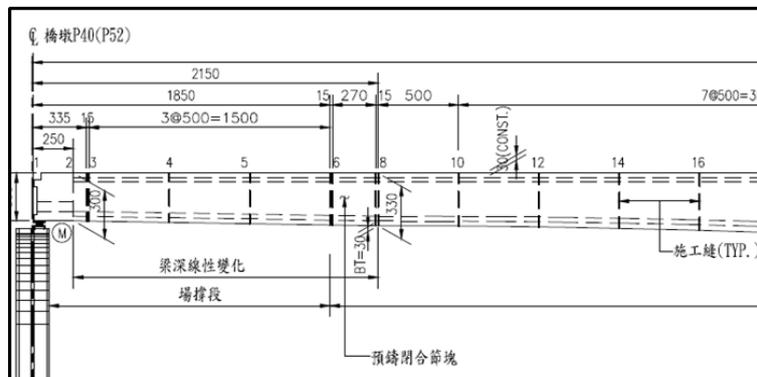
一、預鑄節塊配置

依原設計特訂條款之規定，橋梁之橋面寬度、箱型梁外形尺寸不允許替代，且橋梁邊界條件(盤式支承)亦不允許變更。在此條件下，預鑄節塊維持原有外型尺寸及斷面不變，主橋及邊橋懸臂段節塊亦依據原設計場鑄節塊方式配置。主橋節塊最大重量為 268 tf，小於工作車承載 300 tf 的限制條件。

主橋與邊橋之銜接橋墩 P43、P49，原設計橋墩兩側場鑄節塊採用現場支撐，支撐架合計長達 58m，變更設計場撐段長度縮減為 11.7m (圖四)，滿足懸臂工作車組立需求，改為預鑄節塊懸臂工法，兩側主梁分別採 4@450cm 及 4@500cm 節塊配置。邊橋與引橋之銜接橋墩 P40、P52，主梁改為 3@500cm 預鑄節塊並採場撐方式施工(圖五)。



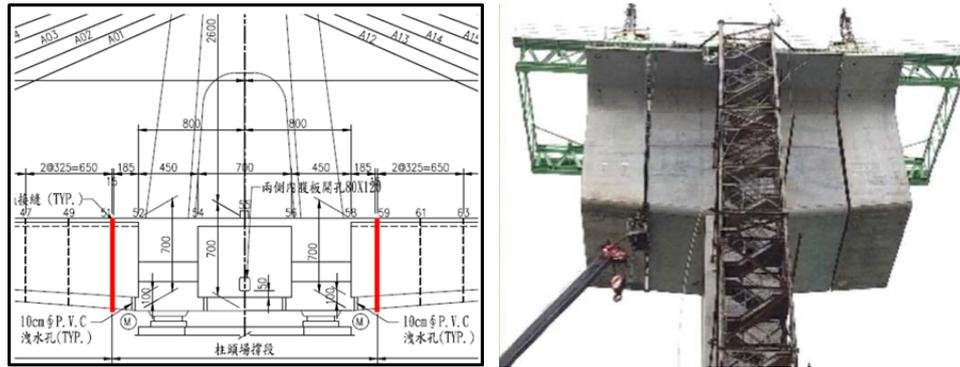
圖四 P43、P49 兩側預鑄節塊配置圖 (懸臂工法) (單位：cm)



圖五 P40、P52 邊橋預鑄節塊配置圖 (場撐段) (單位：cm)

《封面故事》

主梁柱頭節塊於兩側各配置 15cm 濕接縫 (圖六)，以利後續節塊安裝精度控制。跨徑中央閉合塊原設計配置 300cm (場鑄節塊)，變更為預鑄節塊改為 270cm 及兩側 15cm 濕接縫，邊橋柱頭及跨徑中央閉合塊同主橋配置濕接縫。



圖六 主梁柱頭節塊濕接縫

變更設計主橋節塊重量約 200~260 tf，最大寬度為 18.3m，長度 3.5~5m，高度最大約 6.84m。邊橋節塊重量約 130~165 tf，最大寬度為 14.5m，長度 3~5m，高度最大約 7.14m。預鑄節塊數量主橋為 224 塊、邊橋為 152 塊，共計 376 塊，除柱頭及濕接縫為現場組模澆置混凝土外，節塊均採預鑄吊裝施工，主橋及邊橋數量彙整如表一[3]。

表一 主橋及邊橋節塊統計表

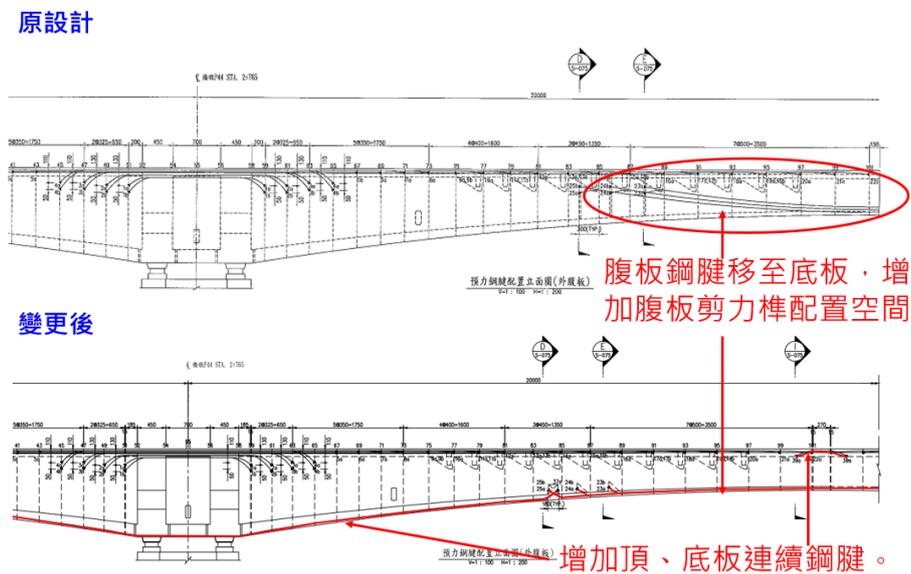
節塊類型	寬(m)	高(m)	長(m)	重(tf)	數量(塊)
主橋懸臂節塊	18.8	3.3~7	3.25~5	<268	210
主橋閉合節塊	18.8	3.3	2.7	<110	6
主橋邊跨懸臂節塊	17.28~18.8	3.3	5	<200	8
邊橋端隔梁節塊	15	3	2.5	<147	4
邊橋懸臂節塊	15	3.3~7.5	3~5	<178	128
邊橋閉合節塊	15	3~3.3	2.7、4.7	<75	6
邊橋場撐節塊	15	3~3.3	4.5~5	<140	14

《封面故事》

二、預力鋼腱配置

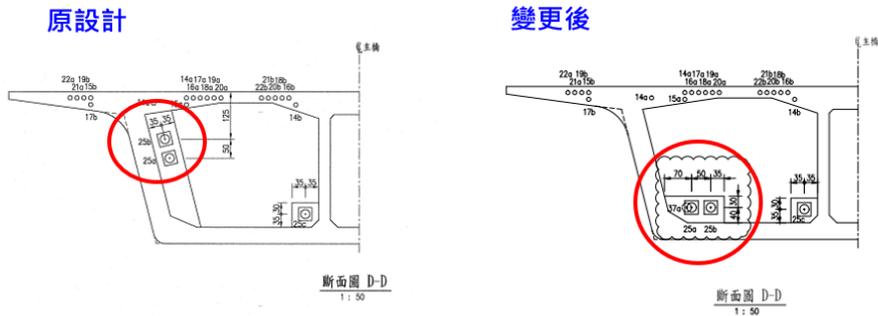
主橋及邊橋鋼腱原設計主要配置頂板懸臂鋼腱(19T-15.2mm)及腹板鋼腱(22T-15.2mm)(圖七),頂板懸臂鋼腱仍依原設計配置,以維持施工中及完工後預力需求,腹板鋼腱因與腹板剪力樺衝突,影響剪力樺配置需求,故調整腹板鋼腱至底板(圖八)。

完工階段檢核上構於所有載重組合無張應力產生,由於預鑄節塊間之鋼筋無連續,為確保未來營運階段,節塊間無張開之虞,於箱梁頂、底板額外配置局部連續鋼腱,使節塊間滿足永久壓應力($>10 \text{ kgf/cm}^2$)。施工階段為使預鑄節塊間環氧樹脂緊密接合,依照 AASHTO 規定壓應力需大於 40psi(約 2.8 kgf/cm^2),因此增設頂、底板臨時預力鋼棒,節塊間維持壓應力。頂板臨時預力鋼棒採鋼製托架方式,設置於橋面頂板上,底板臨時預力鋼棒則採傳統的 RC 錨碇座方式設計(圖九)[4]。

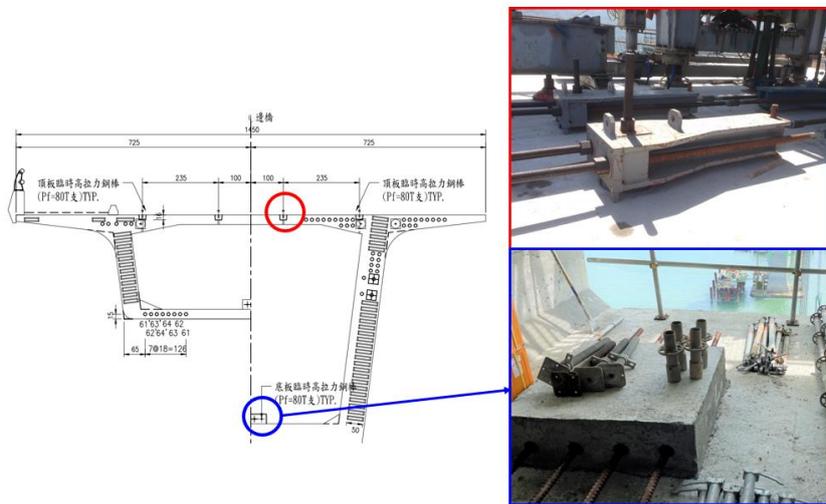


圖七 主梁原設計及變更後鋼腱配置圖

《封面故事》



圖八 原設計腹板配置鋼鍵調整至底板

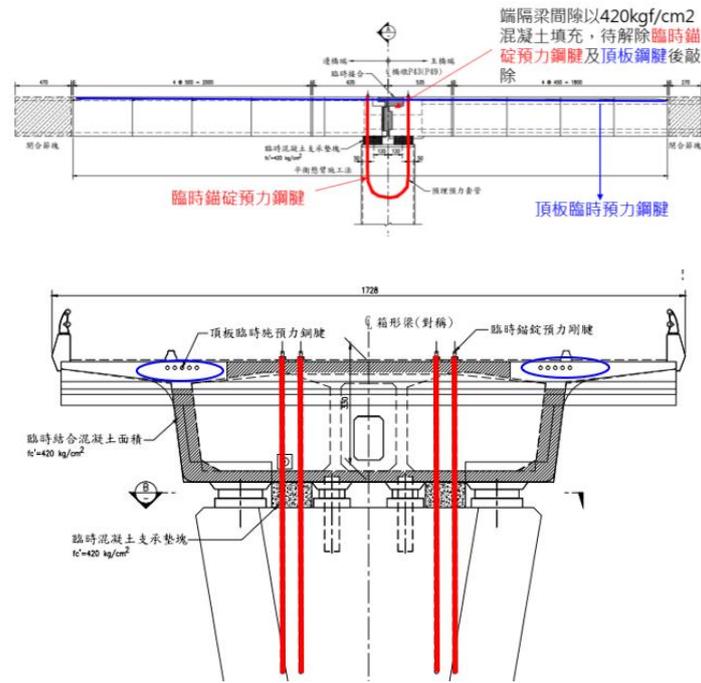


圖九 頂板預力鋼棒鋼製托架及底板 RC 錨碇座

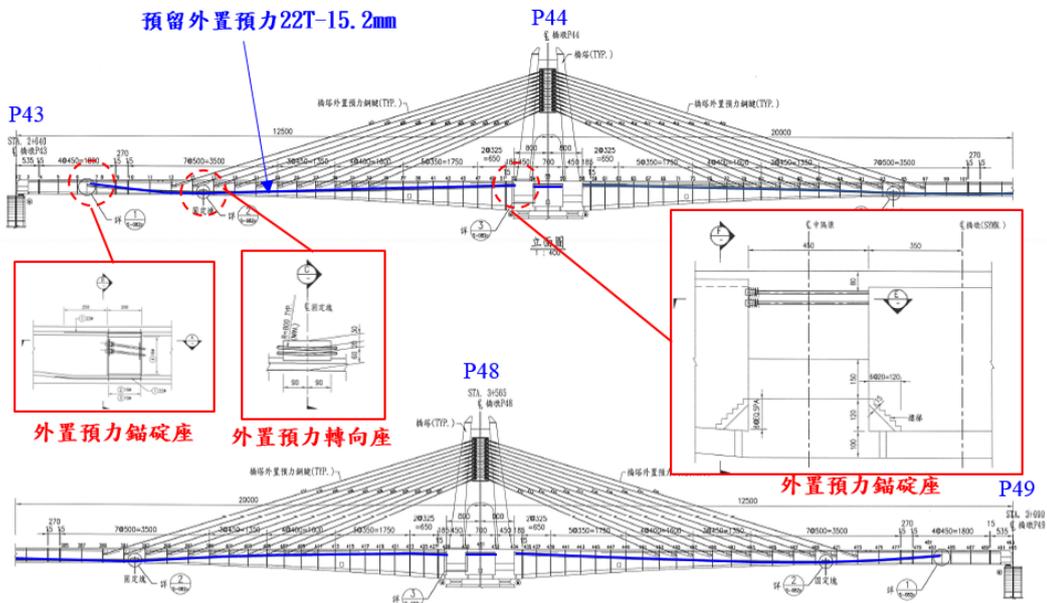
橋墩 P43、P49 柱頭處在懸臂吊裝時邊界條件需改為臨時固定，端隔梁間隙灌注 420 kgf/cm² 混凝土，主梁與柱頭間以臨時錨碇鋼鍵固接，並在盤式支承間設置臨時混凝土支承墊塊（圖十）。待主橋及邊橋閉合成橋後，解除臨時錨碇鋼鍵，再敲除端隔梁間隙混凝土及混凝土支承塊。

此外，為避免日後橋梁上構預力鋼鍵的預力損失，另設計預留外置預力（22T-15.2mm），包含外置預力錨碇座及轉向座，以提供未來預力損失後補拉預力（圖十一）。

《封面故事》



圖十 橋墩 P43、P49 臨時固定裝置示意圖



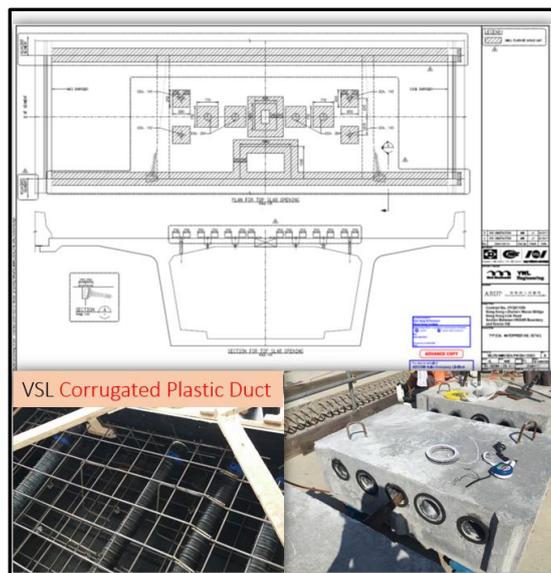
圖十一 主橋預留外置預力配置圖

三、防蝕設計參考

金門大橋跨越金門航道，受海水飛沫之影響，屬嚴重腐蝕環境，原設計對於混凝土使用水泥種類、添加卜作嵐材料與最大水膠比限制、混凝土強度、保護層厚度等，均已有防蝕考量。預鑄節塊需額外增加防蝕設計，參考國外案例包括港珠澳大橋、舊金山—奧克蘭海灣大橋 (San Francisco - Oakland Bay Bridge) 及佛羅里達州傑克遜維爾都會區環城公路 (I-95/I-295 North Flyover, Jacksonville, Florida) 等三座橋，國內則參考西濱快速道路大安大甲高架橋，茲簡述其防蝕設計如下：

(一) 港珠澳大橋 (圖十二)

1. 預鑄節塊接縫處橋面加鋪 50cm 寬防水層。
2. 套管採旋楞塑料套管，節塊間套管無特殊接頭銜接。
3. 採用 3mm 厚 O-ring，避免 Epoxy 擠入套管內、防止套管灌漿時漏漿及阻絕外在腐蝕因子。
4. 預鑄節塊間接縫採環氧樹脂塗布。

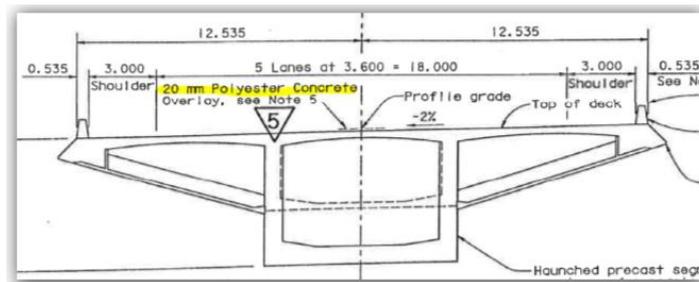


圖十二 港珠澳大橋防蝕設計

《封面故事》

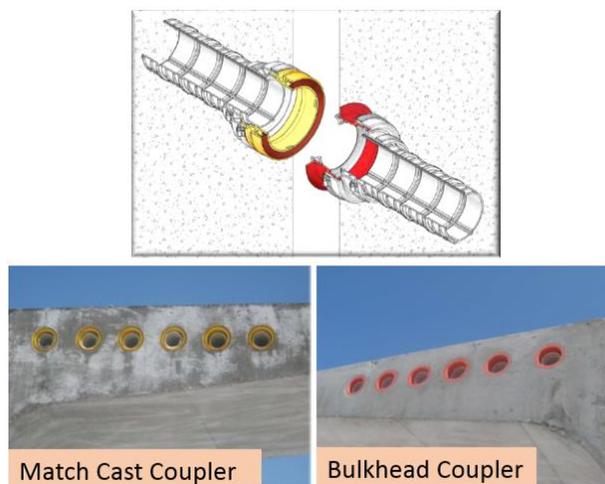
(二) 舊金山—奧克蘭海灣大橋 (San Francisco - Oakland Bay Bridge)
(圖十三)

1. 箱梁頂板橋面 20mm Polyester Concrete (聚酯纖維混凝土) 覆蓋。
2. 增加頂、底板連續鋼腱，取代預鑄節塊間無法連續之鋼筋，同時亦確保節塊間壓應力使其結合更緊密，避免不預期開裂。
3. 預鑄節塊間接縫採環氧樹脂塗布。
4. 採鍍鋅旋楞鋼套管。



圖十三 舊金山—奧克蘭海灣大橋防蝕設計

(三) 佛羅里達州傑克遜維爾都會區環城公路 (I-95/I-295 North Flyover, Jacksonville, Florida) (圖十四)



圖十四 旋楞塑料套管特殊接頭

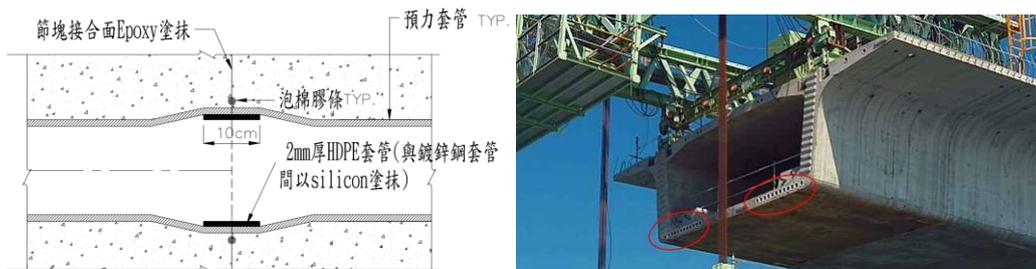
《封面故事》

1. 旋楞塑料套管且套管間有特殊接頭 (Corrugated Plastic Duct & GTI Duct Couple)。
2. 增加頂、底板連續鋼腱，取代預鑄節塊間無法連續之鋼筋。
3. 預鑄節塊間接縫採環氧樹脂塗布。

(四) 西濱快速道路大安大甲高架橋

1. 採鍍鋅旋楞鋼套管。
2. 增加頂、底板連續鋼腱，取代預鑄節塊間無法連續之鋼筋。
3. 預鑄節塊間接縫採環氧樹脂塗布。
4. 橋面全面鋪防水性能黏層 (液化地瀝青符合 ASTM D41 規定) 。

金門大橋參考上述防蝕案例，共採取下列五項防蝕措施 (圖十五)：



圖十五 鍍鋅鋼套管銜接處理示意圖

1. 於節塊兩端鍍鋅旋楞鋼套管擴孔，每邊約擴孔 5mm，長度約 5cm，內置 2mm 厚之 HDPE 管，作為套管續接用，HDPE 管與旋楞鋼套管間塗抹 Silicon，防止套管灌漿漏漿並阻絕外在腐蝕因子。針對可能卡線疑慮，於鋼絞線端部加裝子彈頭因應。

《封面故事》

2. 鋼套管外圍設置 O-ring (泡棉膠條)，避免環氧樹脂擠入套管內、防止套管灌漿時漏漿及阻絕外在腐蝕因子，並規定承包商須先進行實體試驗 (Mockup Test) 以確認其功能。
3. 預鑄節塊間接縫塗布環氧樹脂。
4. 增加頂、底板局部連續鋼腱，取代預鑄節塊間無法連續之鋼筋，並調整預力確保節塊間壓應力 ($>10.0 \text{ kgf/cm}^2$)。
5. 橋面全面鋪防水性能黏層(液化地瀝青符合 ASTM D41 規定)。

預鑄節塊施工[5][6][7]

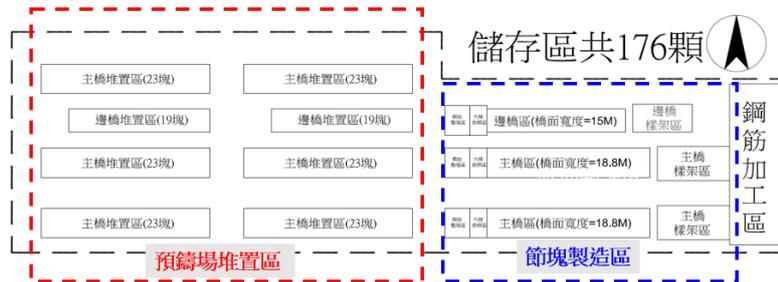
一、預鑄場

本工程預鑄場原先規劃在金門后豐港東碼頭，但因碼頭土層軟弱沉陷量及施工精度難以掌控，場地改良費用昂貴，經洽高雄市漁業局同意租用興達港區內土地約 9.6 公頃，作為本工程預鑄節塊場地 (圖十六)。預鑄場長約 470m、寬約 140m，設置三床節塊製造區，節塊堆置區長約 260m、寬約 140m，可儲存 176 塊預鑄節塊 (圖十七)。預鑄節塊生產分為三條長線鑄造 (主橋兩條，邊橋一條)，生產線節塊完成時，相當完成假組裝，測量成果可回饋為吊裝參考數據。每個預鑄節塊製作約需 4 天，全部 376 塊用三條生產線約需 21 個月。



圖十六 預鑄場位置圖

《封面故事》



圖十七 預鑄場配置圖

二、預鑄節塊運輸

本工程預鑄節塊於鑄床生產完成後，利用 260 tf 門型吊車吊運至堆置區儲存。考量門型吊車高度及避免影響吊裝順序，採單層堆置儲存。堆置區預鑄節塊以 300 tf 門型天車（申請額定重 260 tf 吊升荷重 270 tf 安檢），吊放至運梁車上（圖十八），板車與節塊間放置楔型枕木墊座臨時支撐，並配合鋼索將節塊固定於托板車上，箱梁轉角處將用半圓鐵件保護以避免鋼索磨損（圖十九）。



圖十八 運梁車與預鑄節塊



圖十九 節塊放置枕木墊座及半圓鐵件保護

《封面故事》



圖二十 運梁車運輸路線

利用運梁車載運節塊前往碼頭（圖二十），再利用海上起重機，吊放節塊至運輸船上（圖二十一），經由海上運輸至橋址。



圖二十一 節塊吊放至運輸船

本工程節塊共計 376 塊，海上運輸採平台船載運節塊，由興達港出發，經臺灣海峽直接至主邊橋施工現場，運輸距離約 260km，航行時間約需 30 至 36 小時。考量吊裝及運輸連貫作業，於海象平穩時，採用 2~3 大型平台船，配以 2~3 艘（2000P-4000P 級）拖船前進（圖二十二），若臺灣海峽風力超過 8 級即暫停海上運輸作業。一艘平台船每趟載運約 3~4 對節塊，每對吊裝完成預計需 2 天，到達至離開約 6~8 天，採滾動式運輸。考量節塊重複吊放容易使節塊受損，修補不易，故金門地區不另設暫置場。運輸及吊裝時將密切注意海象報告，若有突發性惡劣氣候，運輸船將駛進金門后豐港避風。

《封面故事》

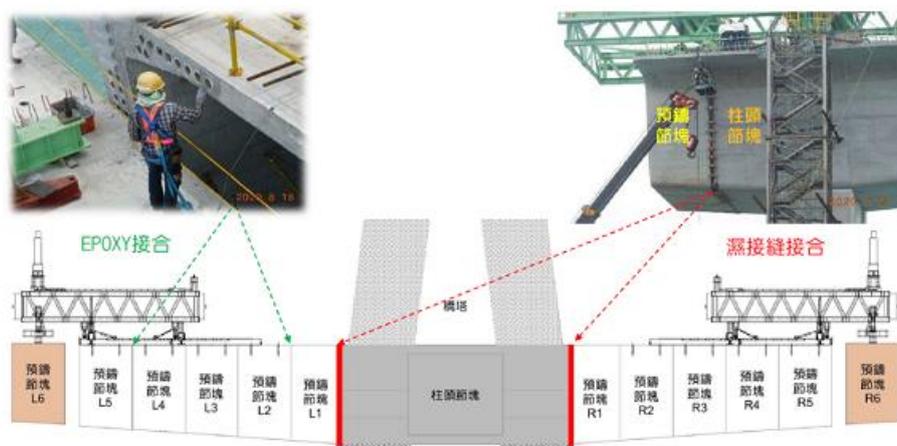


圖二十二 預鑄節塊海運圖

考量主梁節塊運輸之平衡穩定，於弧形梁底以楔型塊墊平，如摩擦力不足增加止滑橡膠墊，角隅處則輔以橡膠墊防止節塊受損。浪高影響海運平穩甚鉅，尤其冬季期間東北季風，須隨時注意中央氣象預報，妥為安排運輸作業。需掌握市場可用船機具資訊，以及申請作業程序，控管滾動式雙周運輸，符合預鑄節塊吊裝規劃，預防延誤工進。

三、預鑄節塊吊裝

橋塔處柱頭節塊完成後，架設懸臂工作車，將兩側第一對節塊由運輸船上吊至施工平台，再由懸臂工作車吊裝至定位，調整節塊高程，組模完成第一對濕接縫，俟混凝土達到強度完成預力施拉，第一對節塊精確定位（圖二十三）。經檢測節塊安裝成果，回饋分析整體線型及拱度值影響，作為下一對節塊吊裝控制調整依據。



圖二十三 預鑄節塊吊裝

《封面故事》

後續節塊依此程序進行吊裝，每對節塊接合時應為兩側節塊皆已吊裝預定高度，呈平衡狀態，方可進行接合作業。若各節塊吊裝發現高程及方位與設計值誤差大於 1/2000 時，可增加濕接縫寬度調整補救。

四、預鑄工法及場鑄工法比較

金門大橋主橋及邊橋主梁替代方案由場鑄改採預鑄節塊工法，有下列優點：在預鑄場完成節塊，施工品質與工期容易控制；架設遮雨棚製作預鑄節塊，施工不受天候影響；利用模組化設計，重複使用系統模板，具經濟性；主梁節塊預鑄，再進行吊裝，同時在橋址進行下部結構施工，可縮短整體工期，金門大橋主梁採預鑄工法較場鑄工法工期縮短約 6 個月，降低海上場鑄施工風險。

國內首座跨海預鑄節塊橋梁 精進工程技術

預鑄節塊工法為快速綠色建橋技術，具備縮短工期、提高質量、降低造價、延長耐久、增加安全、及節能環保等優點，並可降低海上施工風險。預鑄節塊工法須檢核剪力樁剪力容量及預力鋼腱衝突問題，並做多道防蝕措施保護，預力系統防蝕建議至少達 PL2 等級。預鑄場選址需考量足夠的腹地，節塊運輸路線挑選最短路徑，避免影響周遭交通。海上節塊運輸主要考量海象影響，風力超過 8 級即暫停海上運輸作業。節塊吊裝施工精度最重要，設置濕接縫以調整節塊對位，使橋面線型能更平順銜接。

本案為國內首座跨海預鑄節塊橋梁，除提升預鑄節塊工法技術外，也增進臺灣海事工程的成長，藉此設計案例提供給未來跨海或跨河大橋之參考，精進預鑄工法在公共工程上的發展。

參考文獻

1. 黃健碩、劉以毅、彭康瑜，「金門大橋主橋及邊橋 PC 箱型梁預鑄節塊懸臂吊裝工法設計」，台灣混凝土學會 2021 年混凝土工程研討會。
2. 張荻薇、黃炳勳、吳弘明、陳明谷，「金門大橋規劃與設計介紹」，中華民國第十一屆結構工程研討會暨第一屆地震工程研討會，101 年 9 月。
3. 東丕營造股份有限公司，「金門大橋建設計畫第 CJ02-2C 標金門大橋接續工程替代方案細部設計施工計畫書」，107 年 7 月。
4. AASHTO Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges_2003 Interim
5. 盧建州，「金門大橋海上施工技术分享」，第 15 屆優良工程金安獎實務研討會。
6. 梁正欣，「金門大橋職業安全衛生管理實務案例分享」，第 15 屆優良工程金安獎實務研討會。
7. 吳佳展，「金門大橋施工廠商簡報」，第 15 屆優良工程金安獎實務研討會。