

金門大橋主、邊橋 PC 箱型梁預鑄節塊懸臂吊裝工法設計

黃健碩¹ 劉以毅² 彭康瑜³

¹ 林同棧工程顧問股份有限公司 結構工程師 jshuang@tylin.com.tw

² 林同棧工程顧問股份有限公司 副總工程師 yyliou@tylin.com.tw

³ 林同棧工程顧問股份有限公司 副總經理兼總工程師 kypeng@tylin.com.tw

摘要

金門大橋西起烈嶼鄉(小金門)后頭湖埔路,橫跨金門海道,東至金寧鄉(大金門)湖下南方慈湖路,路線全長約 5.4 公里,其中約 4.7 公里位於海上,深槽區約 1.8 公里長,最大水深約達 23 公尺。本工程海上施工,需面臨潮差、強勁東北季風、洋流、濃霧等惡劣海洋環境,並維持小三通航道通行不受干擾。承包商東丕營造股份有限公司考量深槽區橋梁上構 PC 箱型梁原設計採「場鑄」節塊懸臂工法施工,必須在海面上高空進行現場澆鑄混凝土作業,有工安風險高、品質控制不易及工期長等問題需克服,故委由美商同棧國際工程顧問股份有限公司台灣分公司針對位於深槽區的主橋(脊背橋)及邊橋上構 PC 箱型梁,在維持外型不變前提下,變更設計為「預鑄」節塊懸臂吊裝工法。

本設計變更除需考量承包商的海上施工風險、船機設備能量及經費控制外,如何確保橋梁結構安全性、耐久性,避免海洋鹽害環境影響橋梁使用年限,更是設計考量重點。本設計參考了國外相近規模跨海大橋 PC 預鑄節塊橋梁的防蝕作法,包含橋面防水、預鑄節塊間接縫及預力套管銜接處的防蝕設計、預鑄節塊套管續接器(Segmental Duct Couplers)、局部增加預力鋼腱避免節塊間開裂...等,以阻絕外在腐蝕因子。金門大橋是台灣第一座採預鑄節塊設計施工的跨海大橋,期待本設計成果與經驗可供未來跨海大橋設計參考。

關鍵字: 金門大橋、預鑄節塊懸臂吊裝工法、預鑄節塊套管續接器

一、前言

金門大橋西起烈嶼鄉(小金門)后頭地區湖埔路，跨越烈嶼鄉濱海大道後，東行經金門嶼南側礁石區，進入金寧鄉湖下南方，至慈湖路止，工程位置詳圖 1-1。路線全長約 5.4 公里，其中約 4.7 公里位於海上，深槽區約 1.8 公里長，最大水深約達 23 公尺。大橋兩端分別與烈嶼鄉湖埔路、金寧鄉慈湖路平面相交，提供烈嶼與金門地區全天候的交通聯繫，並肩負提升觀光效益。工程主要內容包括主橋段 1,050m、主橋兩側邊橋 720m 及兩端引橋 3,000m；兩端引道土方填築、排水及擋土牆工程、景觀植栽及其他相關配合工程。本工程海上施工，需面臨潮差、強勁東北季風、洋流、濃霧等惡劣海洋環境，並維持小三通航道通行不受干擾。承包商東丕營造股份有限公司考量深槽區橋梁上構 PC 箱型梁原設計採「場鑄」節塊懸臂工法施工，必須在海面上高空進行現場澆鑄混凝土作業，有工安風險高、品質控制不易及工期長等問題需克服，故委由美商同棧國際工程顧問股份有限公司台灣分公司針對位於深槽區的主橋(脊背橋)及邊橋上構 PC 箱型梁，在維持外型不變前提下，變更設計為「預鑄」節塊懸臂吊裝工法。本文即為介紹本跨海大橋工程變更設計為「預鑄」節塊懸臂吊裝工法之主要設計考量及細節。



圖 1-1 金門大橋工程位置圖

二、工程內容簡介

2.1 原設計說明

金門大橋原設計將橋梁區分為主橋段、邊橋段及引橋段，其中主橋段(第 10 單元)配合 5000GT 客貨輪航道寬度須求，並考量深槽急流區域施工困難度高，減少於深水區域內落墩，採用大跨徑之場鑄懸臂工法之預力混凝土箱型梁脊背橋型式設計，跨徑配置為 $125+4@200+125=1,050$ 公尺；主橋兩側各配置一個邊橋單元(第 9、11 單元)，考量主橋跨徑之銜接及海上基礎施工的困難性，同樣採大跨徑橋型配置，並採場鑄節塊懸臂工法施工，兩座邊橋橋跨配置皆為 $100+150+110=360$ 公尺；引橋段為第 1~8、12~16 單元，位於礁石區及淺灘區，橋長共 3,000 公尺，採用中跨徑預力混凝土箱橋配置，以支撐先進工法施工。[1]

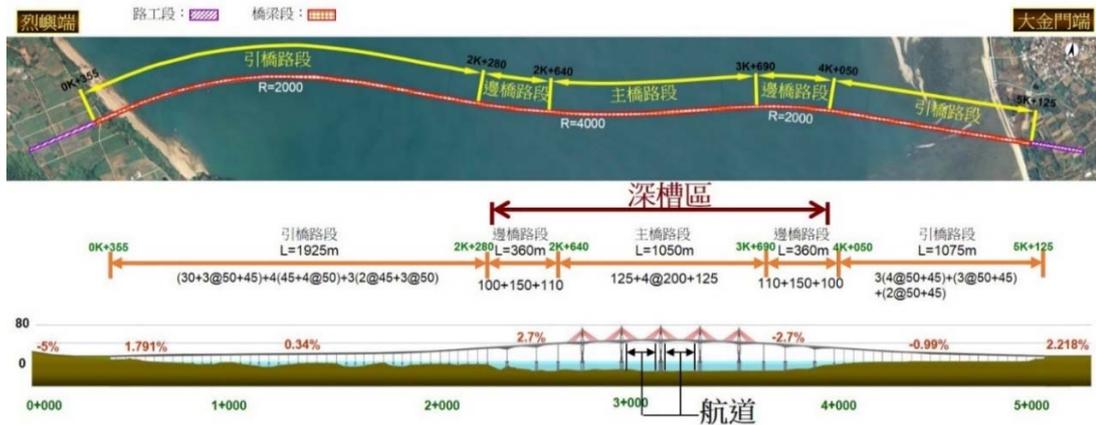


圖 2-1 金門大橋配置平立面圖

表 2-1 原設計橋梁配置表

橋名	起、迄里程	跨徑配置	橋長 (M)	上部結構型式 施工方法
烈嶼端 引橋	0K+355~2K+280	(30+3@50+45)+4@(45+4@50)+3@(2@45+3@50)	1,925	P.C.BOX 支撐先進工法
烈嶼端 邊橋	2K+280~2K+640	(100+150+110)	360	P.C.BOX 場鑄懸臂工法
主橋	2K+640~3K+690	(125+4@200+125)	1,050	P.C.BOX 場鑄懸臂工法
金門端 邊橋	3K+690~4K+050	(110+150+100)	360	P.C.BOX 場鑄懸臂工法
金門端 引橋	4K+050~5K+125	3@(4@50+45)+(3@50+45) +(2@50+45)	1,070	P.C.BOX 支撐先進工法

2.2 契約對承包商提出替代方案(變更設計)之規定

金門大橋替代方案(變更設計)主要對主、邊橋上部結構做調整，考量深槽區主、邊橋段為本工程主要施工要徑，承包商團隊提出主、邊橋上部結構預力混凝土箱型梁施工由原設計「場鑄節塊」改為「預鑄節塊吊裝」施工；引橋部份則因前承包商已施作逾半且現場已打設施工棧橋，施工困難度較低，故按原設計場鑄支撐先進工法施工。此外，上部橋梁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。

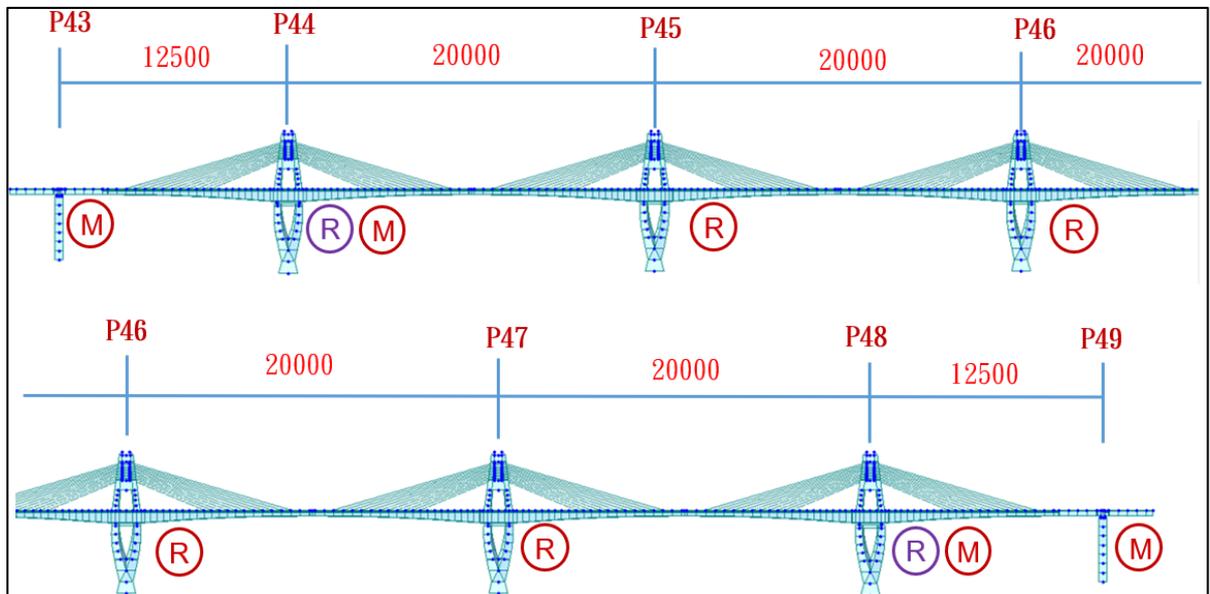
依原設計特訂條款之規定，本工程可替代方案(變更設計)範圍如下：

- (1) 限於本工程引橋、邊橋及主橋之上部結構箱型梁(不含支承)。
- (2) 可替代範圍為引橋(烈嶼端第四~八單元、金門端第十二單元)、邊橋(同時含金門端

- 及烈嶼端)及主橋(上構箱型梁)。
- (3) 前述橋梁之平縱面線形、橋面寬度、箱型梁外形尺寸等不允許替代。
 - (4) 替代方案之上部結構傳遞至各橋墩的載重不得大於原設計之載重。

三、預鑄節塊設計考量

本變更設計範圍包含主橋及邊橋，橋跨配置分別為 $125+4@200+125=1,050$ 公尺、 $100+150+110=360$ 公尺，詳圖 3-1、圖 3-2。以下將對「場鑄」節塊懸臂工法變更為「預鑄」節塊懸臂吊裝工法的結構設計考量作介紹，包含預鑄節塊結構配置、預力鋼腱配置、預鑄節塊剪力樁設計、施工步驟模擬及鋼腱防蝕考量。



註：○施工中邊界條件，○完工後邊界條件

圖 3-1 主橋結構立面圖

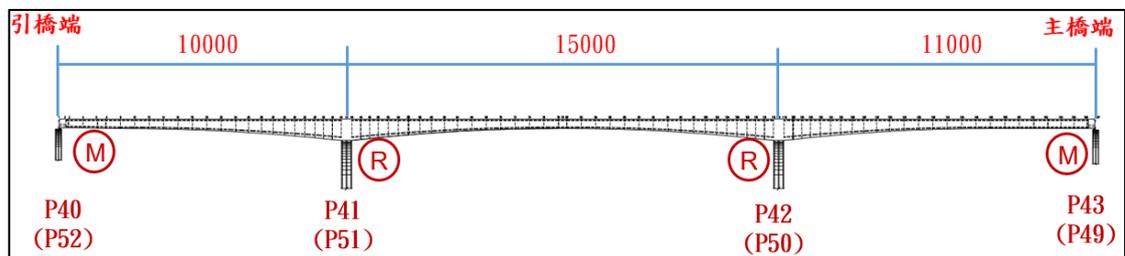


圖 3-2 邊橋結構立面圖

3.1 預鑄節塊結構配置

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、邊橋平衡懸臂吊裝段節塊配置基本上亦依照原設計場鑄節塊方式配置。主橋單一個節塊最大重量為 268T，符合專業施工廠商工作車的承載荷重小於 300 T 的限制條件。[2]

橋墩 P43、P49 是主橋與邊橋之銜接橋墩，原設計橋墩兩側場鑄節塊採用現場支撐方式施作，兩側現場支撐架合計長達 32.8m，詳圖 3.1-1，海上施工風險高；本變更設計則改為預鑄節塊及懸臂吊裝工法施作，橋墩兩側場撐段長度大幅縮減為約 11.7m(提供吊裝工作車組立空間需求)，橋墩 P43、P49 分別採 4@450cm 及 4@500cm 的節塊配置做懸臂吊裝，詳圖 3.1-2，再搭配閉合節塊及濕接縫銜接主橋、邊，除可減少邊跨場鑄工期亦可降低深槽區場撐施工難度及風險。橋墩 P40、P52 為邊橋與引橋之銜接橋墩，邊橋端邊跨上構箱梁同樣改為預鑄節塊，因此處緊鄰引橋水深稍淺，現場搭設支撐架的難度較低，故仍維持原設計採場撐方式施工，詳圖 3.1-3。

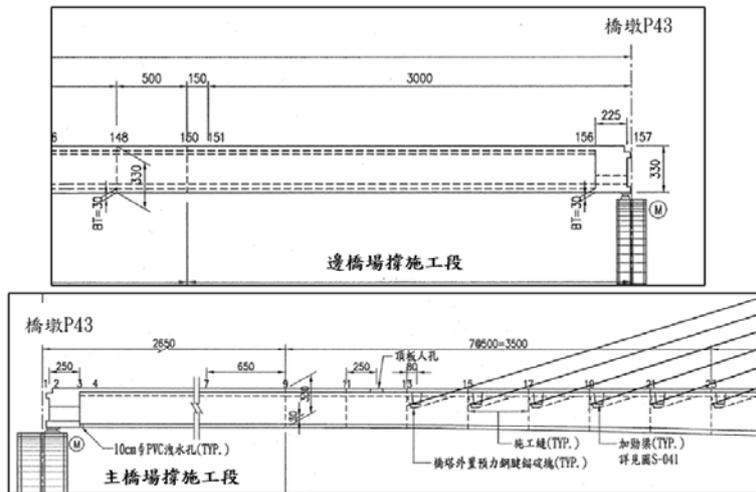


圖 3.1-1 原設計 P43、P49 兩側場撐施工段配置圖

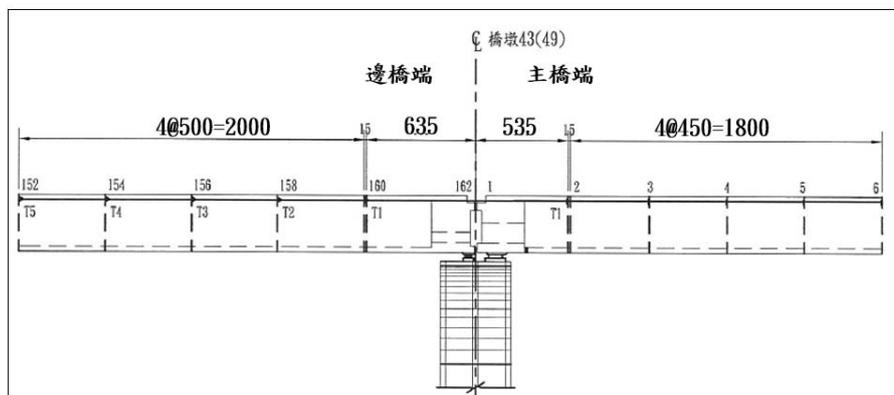


圖 3.1-2 變更設計 P43、P49 兩側預鑄節塊配置圖(懸臂吊裝工法)

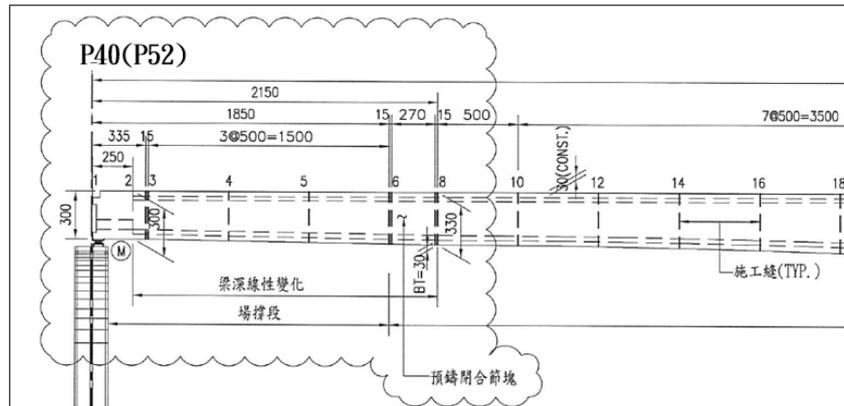


圖 3.1-3 變更設計 P40、P52 邊橋側預鑄節塊配置圖(場撐段)

柱頭節塊於兩側各配置 15cm 濕接縫，以利後續節塊安裝精度控制。跨徑中間閉合塊原設計配置 300cm(場鑄節塊)，變更為預鑄節塊後則改為 270cm，並於節塊兩側留設 15cm 濕接縫作閉合時之調整，詳圖 3.1-4。邊橋柱頭及跨徑中間閉合塊同主橋方式配置濕接縫。

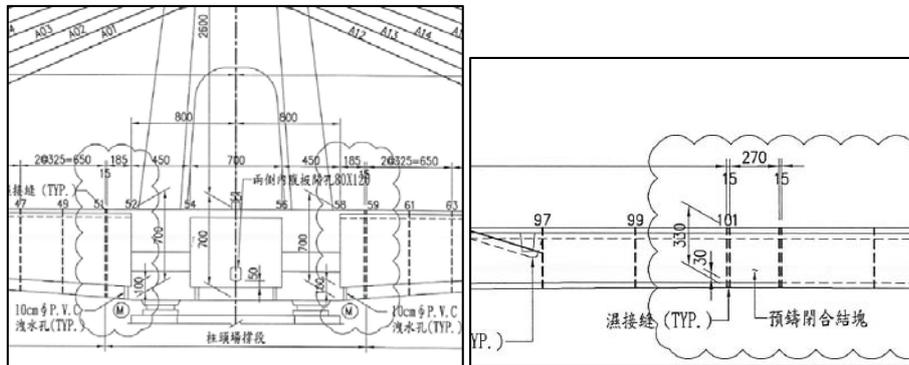


圖 3.1-4 主橋濕接縫(左圖：柱頭節塊，右圖：跨徑中間閉合節塊)

變更設計主橋節塊重量約 200~260T，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 130~165T，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 3.1-1。

表 3.1-1 主、邊橋上構節塊配置統計表

節塊類型	寬(M)	高(M)	長(M)	重(T)	數量
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

3.2 預力鋼腱配置

主、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)，如圖 3.2-1，變更設計為預鑄節塊後，頂板懸臂鋼腱依原設計方式配置可維持施工中及完工後預力需求，腹板鋼腱則因為多數與腹板剪力樺衝突而影響箱梁的剪力樺配置需求，故將原設計配置於腹板的鋼腱調整至底板，如圖 3.2-2。

考量各預鑄節塊間之鋼筋無連續，雖於結構分析時已檢核上構於各載重組合情況下無張應力產生，但為了確保未來大橋營運階段節塊間無張開之虞，故除了結構分析需求之預力鋼腱外，於箱梁頂、底板額外配置局部連續鋼腱，使各預鑄節塊間頂板及底板至少都有一對鋼腱連結，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。

施工中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 2.8kgf/cm²)，因此增設頂、底板臨時預力鋼棒，施預力使施工階段節塊間能維持一定之壓應力，如圖 3.2-3。頂板臨時預力鋼棒考量施工之便利性，採鋼製托架方式設置於橋面頂板上，托架可重複使用，不增加橋梁自重；底板臨時預力鋼棒則採傳統的 RC 錨碇座方式設計。

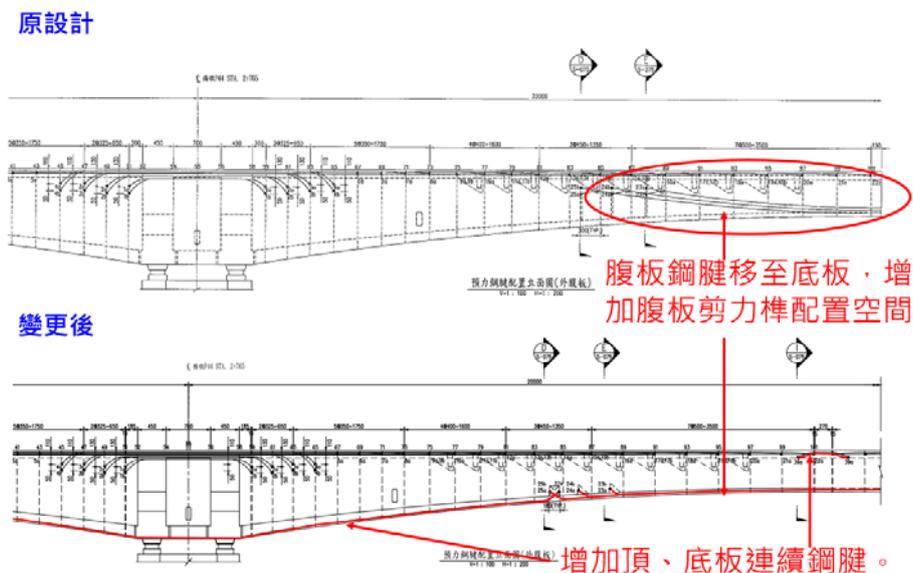


圖 3.2-1 主橋鋼腱配置立面圖

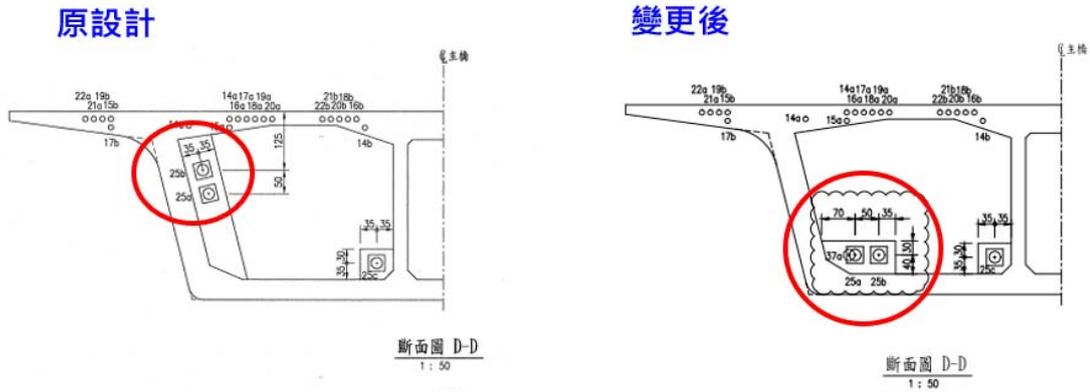


圖 3.2-2 原設計腹板配置鋼腱調整至底板

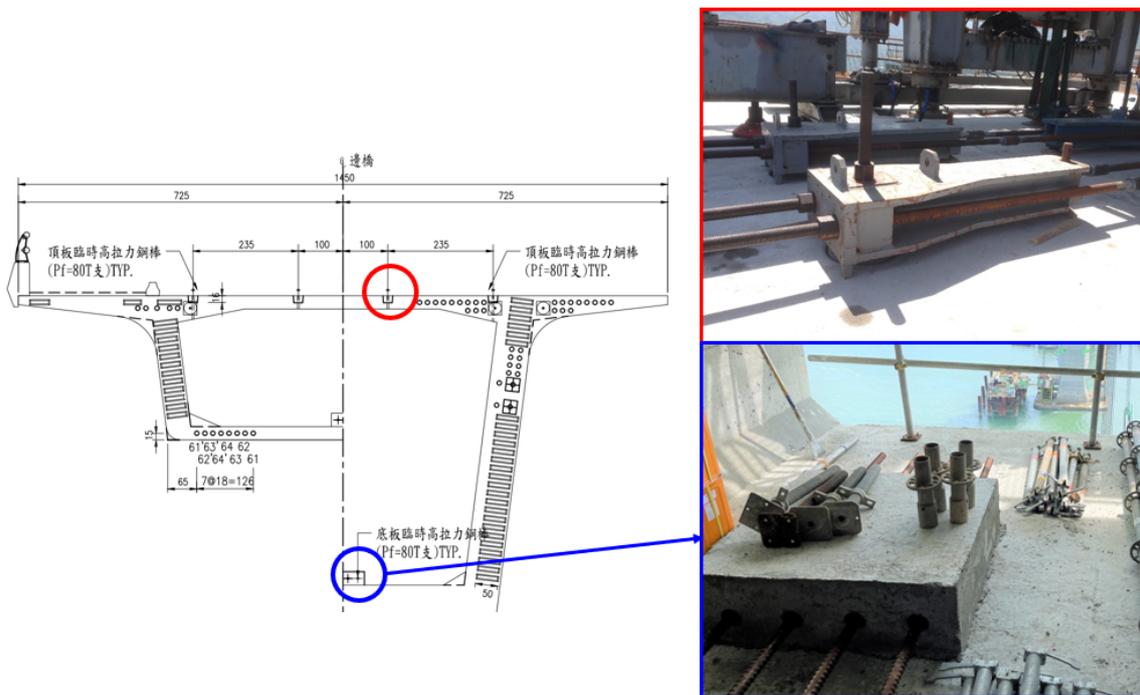


圖 3.2-3 頂板臨時預力鋼棒鋼製托架及底板臨時預力鋼棒錨碇座

橋墩 P43、P49 為主橋及邊橋界面橋墩，變更設計將此處上構亦改為預鑄懸臂吊裝工法施作。因橋墩兩側原場撐段長度略有差異，在配置懸臂節塊時節塊大小有所不同，柱頭兩側場撐段(為提供吊裝工作車組立空間需求)留設 11.7m，懸臂節塊分別採 4@500 及 4@450 吊裝，詳圖 3.2-4。本處上構頂板臨時懸臂鋼腱採 22T-15.2mm 施作。

橋墩 P43、P49 柱頭處在懸臂吊裝時邊界條件需改為臨時固定，端隔梁間縫隙採 420 kgf/cm² 混凝土填充以傳遞力量，隔梁與柱頭間則以臨時預力錨碇鋼腱接合，將懸臂吊裝之力量傳遞至橋墩，並在盤式支承之間做臨時混凝土支承墊塊協助分散傳遞上構

力量，詳圖 3.2-5。待主、邊橋閉合成橋後，配合解除頂板臨時懸臂鋼腱，再敲除端隔梁間隙混凝土及臨時混凝土支承墊塊。

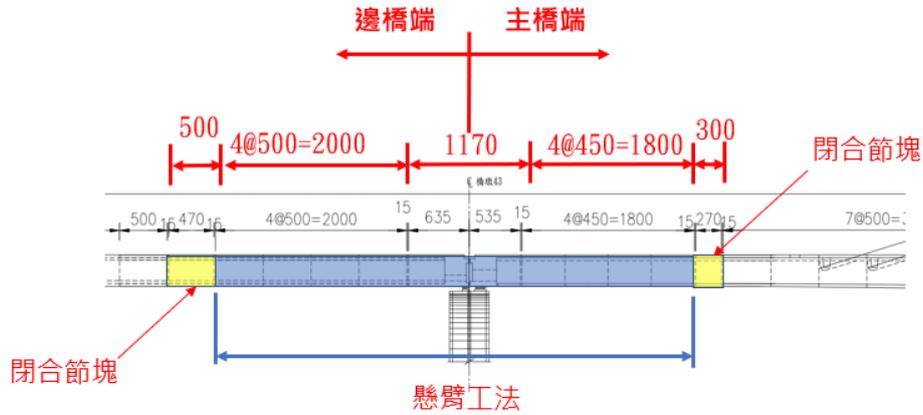


圖 3.2-4 主、邊橋界面橋墩 P43、P49 採預鑄節塊懸臂工法吊裝施作

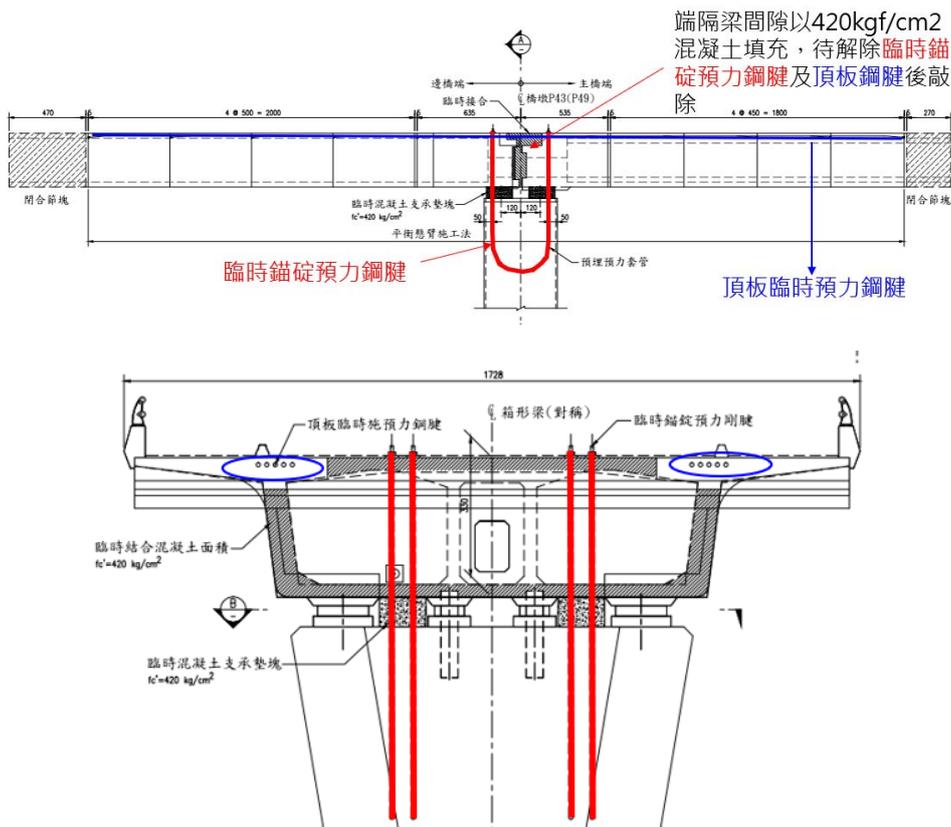


圖 3.2-5 橋墩 P43、P49 臨時固定裝置示意圖

此外，為避免日後橋梁上構預力鋼腱不預期的預力損失，另有設計預留外置預力 (Future Tendon)，包含外置預力錨碇座及轉向座的預留，以延長金門大橋使用年限，詳圖 3.2-6。

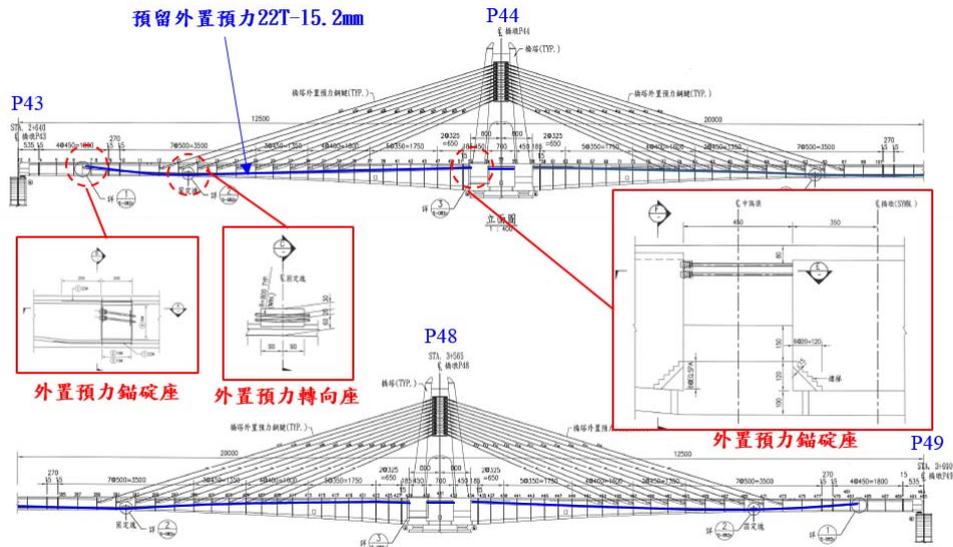


圖 3.2-6 主橋預留外置預力配置圖

3.3 預鑄節塊剪力樺設計

預鑄節塊間之剪力樺設計為預鑄節塊設計重點，依照 AASHTO 剪力樺剪力設計規定，需分別考量施工中及通車後剪力樺的抗剪力容量(shear capacity)，施工中主要載重來於節塊自重，其剪力容量計算如下：

$$V_u = 1.1(V_{DC} + DIFF) \quad (3-1)$$

$$\frac{V_u}{\phi} = V_c \quad (3-2)$$

$$V_n = A_k \times v \times n \quad (3-3)$$

$$V_n \geq V_c \quad (3-4)$$

V_{DC} ：單一個節塊自重所產生的剪力

$DIFF$ ： $V_{DC} \times 2\%$

ϕ ：強度折減係數=0.9

A_k ：單個剪力樺面積

v ：單個剪力樺提供之剪力， $0.53\sqrt{f'_c}$ (kgf/cm^2)

n ：剪力樺數量

完工通車後依據 AASHTO 剪力樺設計規定如下：

$$V_{uj} = \phi_j * V_{Nj} \quad (3-5)$$

$$V_{Nj} = A_K \times \sqrt{f'_c} \times (12 + 0.017f_{pc}) + 0.6A_{sm} \times f_{pc} \quad (3-6)$$

ϕ_j ：強度折減係數=0.75

A_K ：節塊單面所有剪力樺面積(in^2)

f'_c ：混凝土強度(psi)

f_{pc} ：預力(損失後)提供節塊所承受之壓應力(psi)

A_{sm} ：相鄰兩節塊接觸面積(in^2)

除腹板配置的剪力樺外，頂、底配置 2~4 個剪力樺作為校正節塊定位之用途，其剪力之貢獻並未考量於設計中，詳圖 3.3-1。

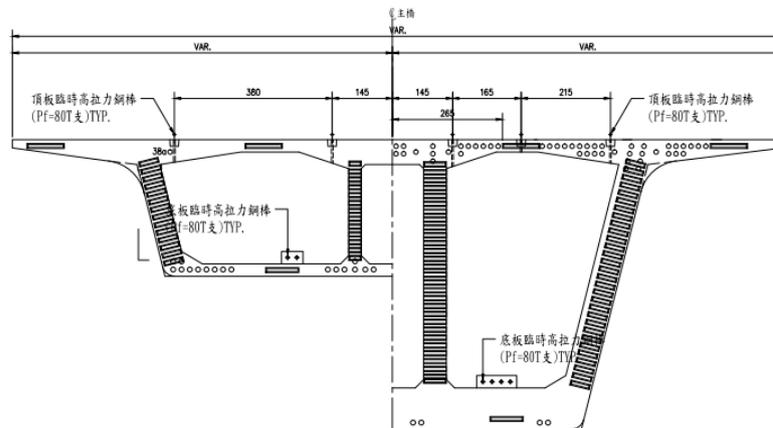


圖 3.3-1 主橋剪力樺配置圖

3.4 施工步驟模擬

主、邊橋模擬採用 Midas Civil 2012 軟體進行分析，邊橋施工步驟模型除建立邊橋本身外，由於施工中界面橋墩(P43、P49)處上構以臨時懸臂鋼腱連續並臨時固定於墩柱，如圖 3.2-4 及 3.2-5，需同時將主橋邊跨建立於模型內考量，邊橋主要施工步驟如下：

- (1) 建立邊橋各墩柱及主橋第一跨橋墩
- (2) 懸臂吊裝橋墩 P41(P51)、P42(P52)兩側預鑄節塊
- (3) 懸臂吊裝橋墩 P43(P49)兩側預鑄節塊
- (4) 施作邊橋主橋端閉合節塊
- (5) 閉合主橋邊跨節塊後，解除 P43(P49)臨時預力鋼腱及臨時固定裝置
- (6) 施作中間跨閉合節塊，最後施作邊橋引橋端閉合節塊

施工步驟模擬除懸臂鋼腱及底板鋼腱外，另額外將預鑄節塊間臨時預力鋼棒也建立至模型中，確保施工中節塊接縫之壓應力能大於 2.8 kgf/cm^2 ，並考量其拆除時機，邊橋施工步驟模擬示意圖詳圖 3.4-1~3.4-2。

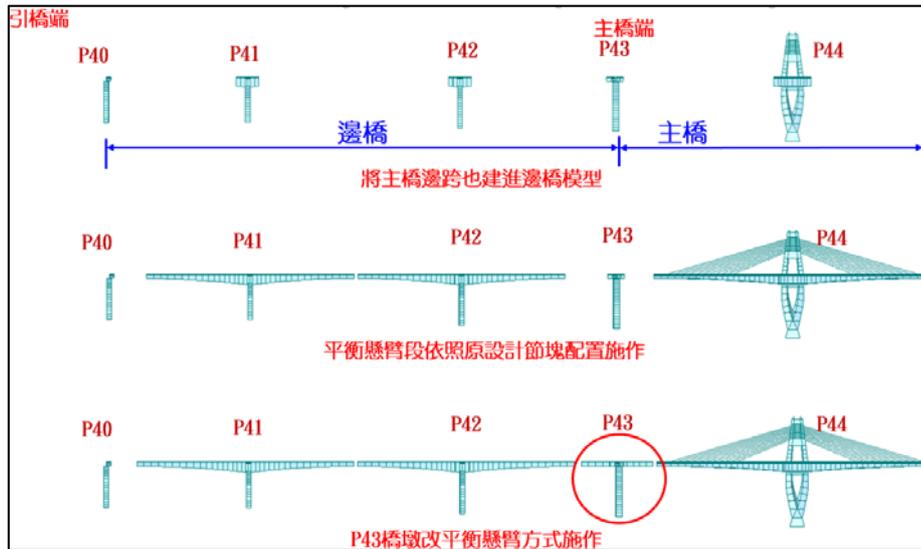


圖 3.4-1 邊橋施工步驟(一)

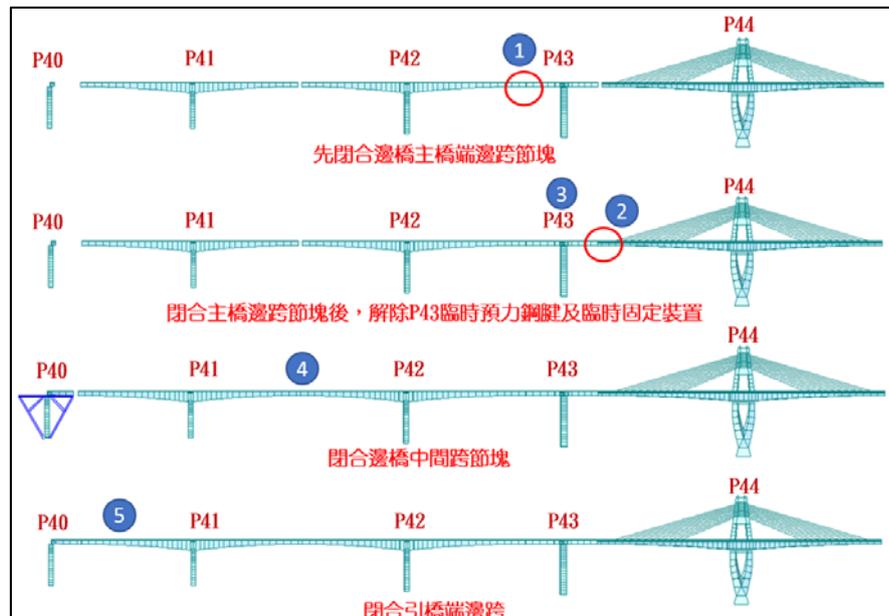


圖 3.4-2 邊橋施工步驟(二)

主橋施工步驟同上述邊橋施工步驟，除建立主橋本身外，亦同時將邊橋建立於模型內考量

3.5. 預鑄節塊防蝕設計

金門大橋橫跨金門港道，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，均已防蝕考量，不再贅述。本文僅針對預力箱梁變更為預鑄節塊需額外增加的防蝕設計做說明。首先參考近期國內外類似規模的預鑄節塊橋梁防蝕設計案例，國外主要包括：港珠澳大橋香港端、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，國內則參考西濱快速道路大安大甲高架橋，簡述各案例相關預鑄節塊之防蝕設計如下：

(1) 港珠澳大橋香港端

- A. 預鑄節塊接縫處橋面加鋪 50cm 寬防水層，詳圖 3.5-1(圖上半)
- B. 套管採旋楞塑料套管，節塊間套管無特殊接頭銜接，詳圖 3.5-1(圖左下)
- C. 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，詳圖 3.5-1(圖右下)
- D. 預鑄節塊間接縫採環氧樹脂塗布

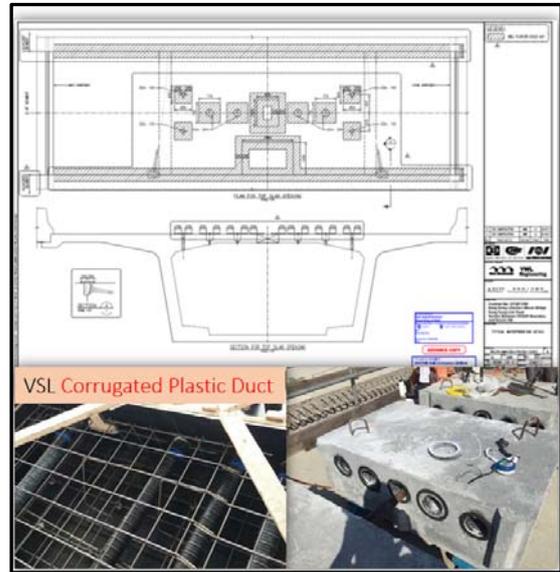


圖 3.5-1 港珠澳大橋防蝕設計

(2) 舊金山-奧克蘭海灣大橋(San Francisco - Oakland Bay Bridge)

- A. 箱梁頂板橋面 20mm Polyester Concrete(聚 酯 纖 維 混 凝 土)Overlay，詳圖 3.5-2(圖上半)
- B. 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，詳圖 3.5-2(圖下半)
- C. 預鑄節塊間接縫採環氧樹脂塗布
- D. 採鍍鋅旋楞鋼套管

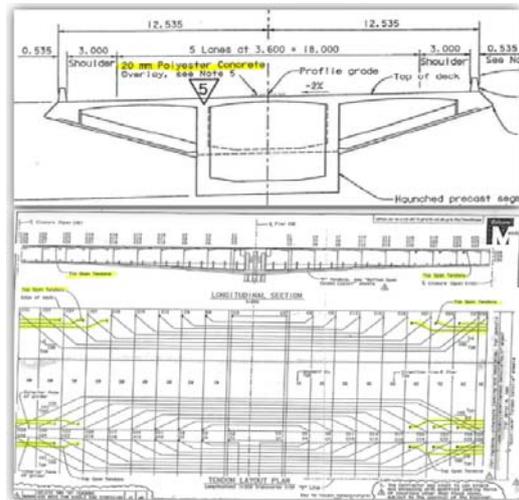


圖 3.5-2 舊金山-奧克蘭海灣大橋防蝕設計

(3.) 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)

- A. 旋楞塑料套管且套管間有特殊街頭銜接(Corrugated Plastic Duct & GTI Duct Couple) ，詳圖 3.5-3
- B. 增加頂、底板連續鋼腱，取代預鑄節塊間無法連續之鋼筋
- C. 預鑄節塊間接縫採環氧樹脂塗布

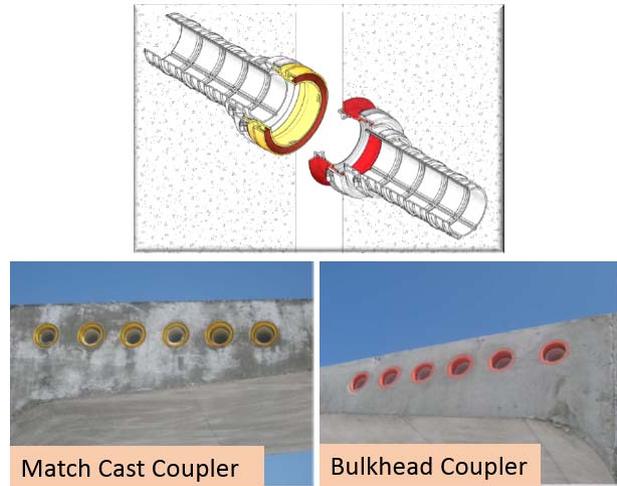


圖 3.5-3 旋楞塑料套管特殊接頭

(4.) 西濱快速道路大安大甲高架橋

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

金門大橋為國內首座跨海預鑄節塊橋梁，在防蝕上需做更謹慎的考量，參考上述案例，在合理增加工程經費範圍內做最佳化之防蝕設計，共採取下列五項防蝕措施：

- A. 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，又 HDPE 管與旋楞鋼套管間塗抹 Silicon，防止套管灌漿時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，詳圖 3.5-4(左圖)
- B. 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，詳圖 3.5-4(右圖)，並規定承包商須先進行實體試驗(Mockup Test)以確認其功能
- C. 預鑄節塊間接縫環氧樹脂塗布
- D. 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($>10.0 \text{ kgf/cm}^2$)，詳圖 3.2-1
- E. 橋面全面鋪防水性能黏層(液化地瀝青符合 ASTM D41 規定)

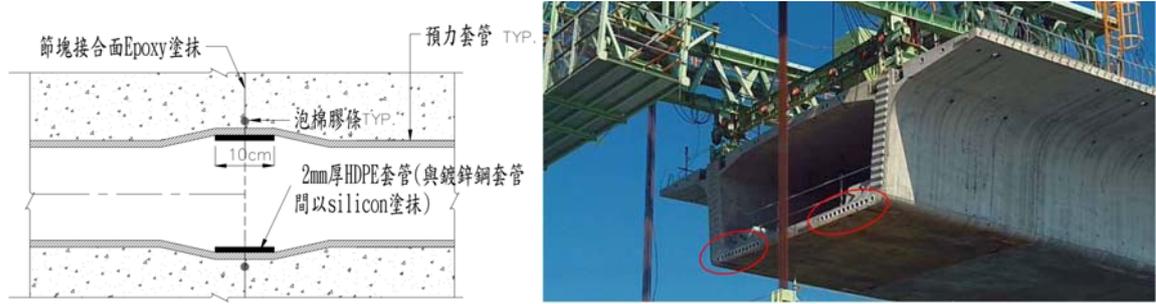


圖 3.5-4 鍍鋅鋼套管銜接處理示意圖

四、預鑄節塊製造、吊運及儲存方式

4.1 預鑄場及節塊製造

本工程預鑄場位置經洽高雄市漁業局同意租用興達港區內土地約 9.6 公頃，作為本工程節塊鑄造場地，詳圖 4.1-1 所示。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，配置如圖 4.1-2~4.1-5。

預鑄節塊生產分為三條長線鑄造(主橋兩條，邊橋一條)，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。



圖 4.1-1 節塊預鑄場位置圖

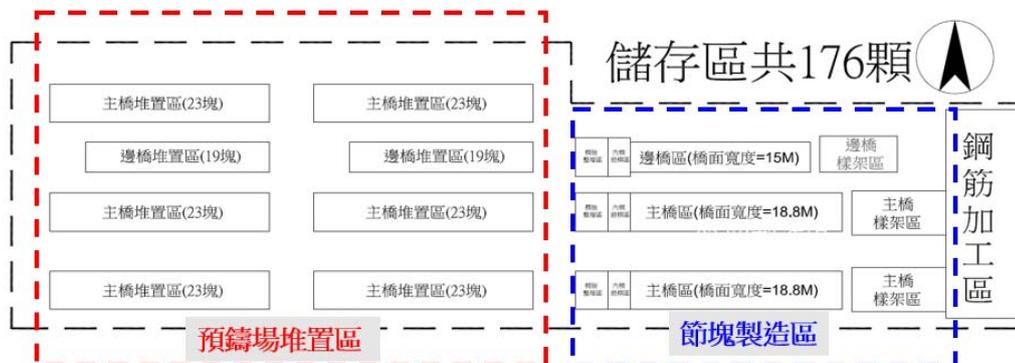


圖 4.1-2 節塊預鑄場配置圖

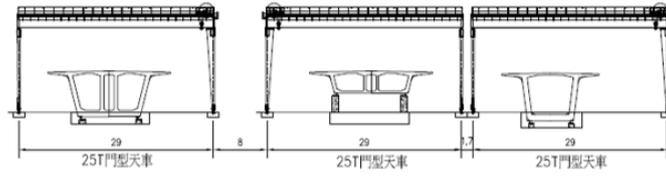


圖 4.1-3 節塊製造區立面配置圖

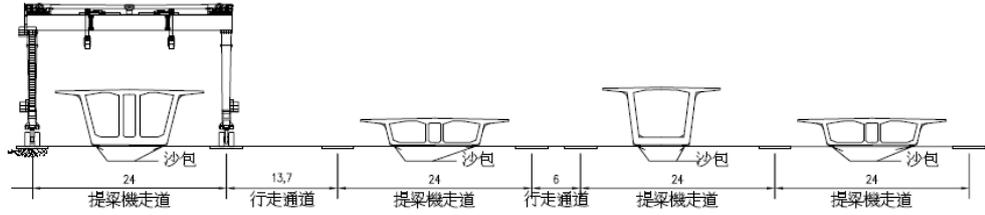


圖 4.1-4 節塊堆置區立面配置圖



圖 4.1-5 預鑄節塊製造區



圖 4.1-6 預鑄節塊堆置區

4.2 預鑄節塊運輸

本工程預鑄節塊於鑄床生產完成後，利用 260T 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。堆置區至碼頭：堆置區預鑄節塊以 300 噸門型天車(申請額定重 260 噸及吊升荷重 270 噸安檢)，吊舉放置運梁車上，運輸前並在板車與節塊之間放置楔型枕木墊座臨時支撐，以吸收板車運輸時所產生之震動並以手搖吊車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，如圖 4.2-1、4.2-2 所示。



圖 4.2-1 預鑄節塊吊舉放置運梁車



圖 4.2-2 左圖：板車與節塊之間放置枕木墊座臨時支撐

右圖：箱梁轉角處將用半圓鐵件保護

利用運梁車運載節塊並走運梁通道前往碼頭，再利用海上起重機，吊舉節塊至運輸船上，進行海上運輸，詳圖 4.2-3。



圖 4.2-3 運梁車運輸路線



圖 4.2-4 吊舉節塊至運輸船

本工程節塊共計 376 塊，詳表 3.1-1。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 260 公里，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，詳圖 4.2-5；若台灣海峽海象變化不平穩，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，運輸船未吊裝完成時，運輸船將駛進后豐港避風。

有關運輸時節塊的固定，考量變斷面梁身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；若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，控管滾動式雙週運輸，符合預鑄節塊吊裝順序規劃，預防延誤工進。



圖 4.2-5 預鑄節塊海運圖

4.3 預鑄節塊吊裝

橋塔處俟柱頭節塊完成，架設工作車，將兩側第一對節塊由運輸船上吊置施工平台，再由懸臂工作車吊提至定位後，調整第一對相鄰節塊方位高程，組模完成第一對濕接縫，俟混凝土達到施拉預力強度需求後，依需求完成預力施拉，使第一對節塊精確定位，則後續節塊吊裝精度較易控制，詳圖 4.3-1。經檢測節塊安裝成果，回饋分析整體線型及拱度值影響，作為次一對節塊吊裝控制調整依據。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超標時，評估跨間閉合誤差若大於 1/2000 時，可考量增加濕接縫調整補救。

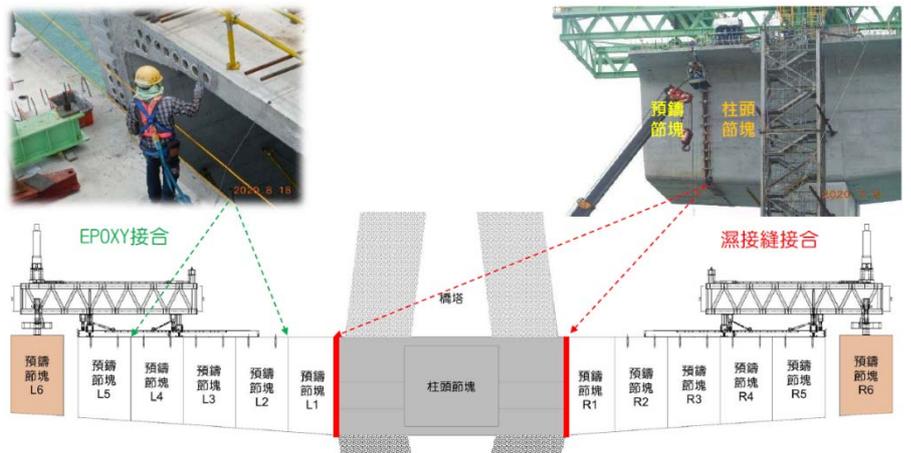


圖 4.3-1 預鑄節塊吊裝



圖 4.3-2 現場預鑄節塊吊裝施工照片

五、結論與建議

1. 本預鑄節塊變更設計因受 2.2 節契約條件限制，在設計預力配置上必須個別考量每個節塊的預力鋼腱位置是否會與剪力樁衝突，如無法避免與之衝突則必須檢核剪力樁能提供的剪力容量是否足夠，比一般的新建預鑄節塊橋梁的設計條件更為嚴苛。
2. 因本工程位於海上鹽害環境，本案針對預鑄節塊橋梁鋼腱共採取以下 5 項防蝕措施
 - (1) 於節塊兩端鍍鋅旋楞鋼套管擴孔，內置 HDPE 管銜接，作為套管續接用，防止套管灌漿時漏漿並阻絕外在腐蝕因子
 - (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
 - (3) 預鑄節塊間接縫環氧樹脂塗布
 - (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
3. 預鑄節塊從製造到運輸和吊裝都是國內最大宗的海上橋梁工程，從一開始的預鑄場選址，除了要有足夠的腹地堆置塊外，更要謹慎考量節塊運到港口的路線，挑選最短路徑減少陸上運輸時間，避免影響周遭交通；海上節塊運輸主要考量海象影響，若風力超過 8 級即暫停海上運輸作業；節塊吊裝是上構施工精度最重要的一環，於設計時在柱頭兩側便設置濕接縫用於調整節塊對位，讓後續節塊能更為精準，另在閉合節塊兩側亦設置有濕接縫，讓橋梁閉合時能做更平順的銜接。
4. 藉由設計國內首座海上大跨徑預鑄節塊吊裝橋梁經驗，除能提升台灣在預鑄節塊設計上的進步外，同時也能增進台灣海事工程的成長，並藉此預鑄節塊設計案例提供給未來其他跨海或跨河大橋做參考，精進預鑄工法在公共工程上的發展。

四、參考文獻

- [1] 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。
- [2] 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。
- [3] AASHTO Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges_2003 Interim
- [4] 盧建州，「金門大橋海上施工技術分享」第 15 屆優良工程金安獎實務研討會
- [5] 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
- [6] 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