

講師簡介



張 震 宇

交通部高速公路局
第二新建工程處 第五工務所
簡派正工程司兼主任

◆ 學歷

逢甲大學 土木工程學系研究所

◆ 專長

橋梁工程、隧道工程

◆ 經歷

1989~1998 公路總局 第二區養護工程處、東西向快速道路中區工程處

1998~2018 國工局 第二區工程處 嘉屏工務所

2018~迄今 高公局 第二新建工程處 第五工務所



◆ 簡報摘要

金門大橋橫跨大、小金門間的金烈海域，在一個類廊道的環境，無法掌控的瞬間強風及無法閃避的東北季風，是金門大橋深槽區主、邊橋上構施工的一大考驗，為降低風浪對上構施工作業的風險，採用預鑄節塊懸臂吊裝工法施工，大幅降低施工人員長時間暴露在高風險的作業環境。歷經1139個日子，預鑄節塊施工團隊頂着南台灣的烈日與酷熱，終於在110年12月8日完成全部節塊生產。期間經歷39趟次的船舶運送，跨越260公里的黑水，載運着376塊的節塊，將一塊一塊的節塊如同珠鍊般串聯大小金門。111年6月29日運送最後1船節塊回到金門，並在111年7月21日將金門大橋最後一塊橋梁拼圖拼合。施工過程的點點滴滴，都將是工程人的寶貴經驗。





金門大橋預鑄節塊施工簡報

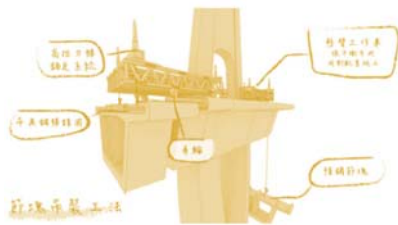


簡報單位：高公局第二新建工程處
簡報人：張震宇

1



簡報綱要



壹

前言

貳

工程概要

參

預鑄節塊施工規劃

肆

預鑄節塊製程及品管

伍

節塊運輸

陸

預鑄節塊吊裝

柒

外置預力施工

捌

結語

2



壹、前言



3

壹、前言



標號	契約依據	替代方案使用範圍
CJ02	特訂條款第0123A章	引橋、邊橋上部結構箱型梁
CJ02-C	特訂條款第0123A章	引橋、邊橋上部結構箱型梁
CJ02-2C	特訂條款第0123A章	引橋、邊橋、主橋上部結構箱型梁

金門大橋考量長跨距懸臂節塊之拱度施工控制技術未臻純熟，CJ02、CJ02-C 二標主橋段仍以場鑄施工方式設計，105年CJ02-2C標重新發包並檢視設計，經檢討預鑄工法在長跨距之懸臂橋梁之拱度調整施工技術已可有效控制，本工程契約同意主橋段可採替代方案預鑄節塊工法施工。

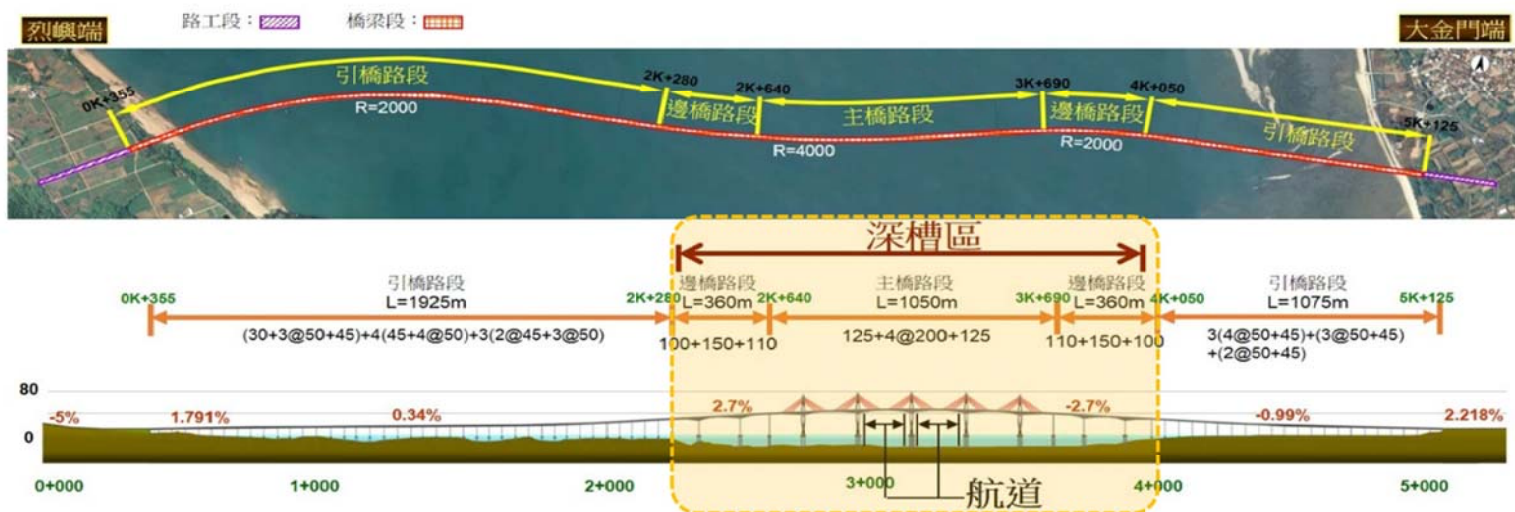
4



貳、工程概要



貳、工程概要 – 施工範圍



貳、工程概要 – 引橋



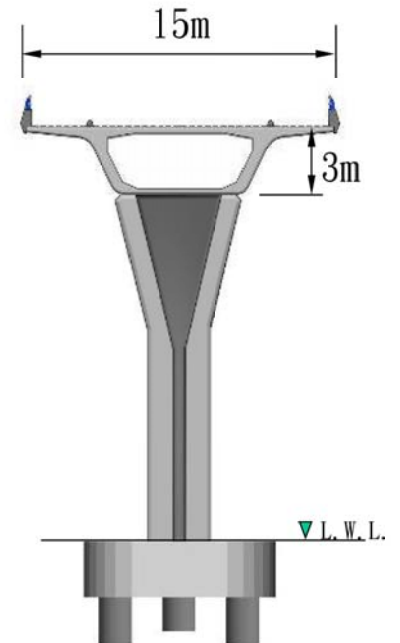
引橋為等梁深預力箱形梁橋，橋墩跨距30m~50m，兩端總長3,000m，共13單元，採**支撐先進工法**施工。



大金端引橋



小金端引橋

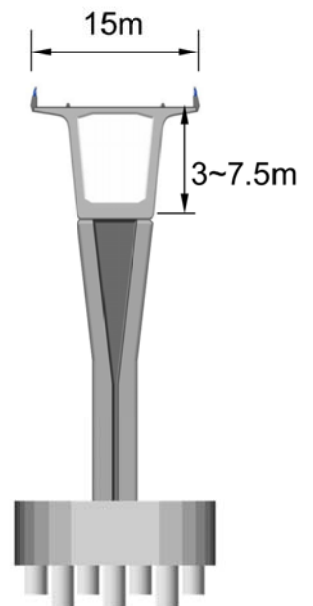


引橋橋墩及箱梁型式

貳、工程概要 – 邊橋



邊橋為變梁深預力箱形梁橋，每側長360m，兩側全長720m，原設計採場鑄懸臂工法，承包商為加速工進推展，採**替代方案預鑄節塊吊裝工法**施工。

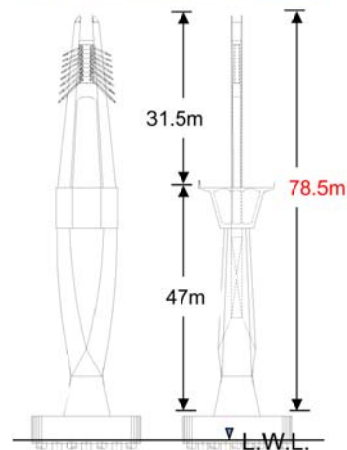


邊橋橋墩及箱梁型式

貳、工程概要 – 主橋



主橋為五塔六跨預力箱形梁脊背橋，原設計採場鑄懸臂工法，承包商採替代方案預鑄節塊吊裝工法施工。



主橋橋墩及箱梁型式

參、預鑄節塊施工規劃



參、預鑄節塊施工規劃－預鑄場位置



參、預鑄節塊施工規劃－場區平面



參、預鑄節塊施工規劃－場區平面配置



13

參、預鑄節塊施工規劃－預鑄節塊類型



本預鑄節塊採長線接合鑄造法施工

節塊類型	梁寬(m)	梁深(m)	節塊長(m)	自重(tf)	數量
主橋懸臂預鑄節塊	18.8	3.3 ~ 7.0	3.25 ~ 5.0	<268	218
主橋閉合預鑄節塊	18.8	3.3	2.7	<110	6
邊橋懸臂預鑄節塊	15.0	3.3 ~ 7.5	3.0 ~ 5.0	<178	146
邊橋閉合預鑄節塊	15.0	3.0 ~ 3.3	2.7、4.7	<75	6
預鑄節塊合計：376節塊			預鑄場內可堆置節塊數：235節塊		

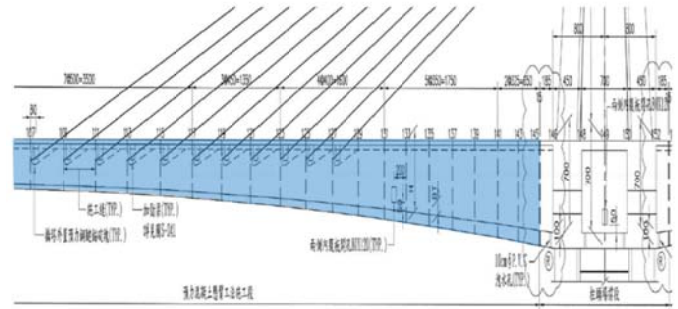
14

參、預鑄節塊施工規劃 – 設計特殊性(1)



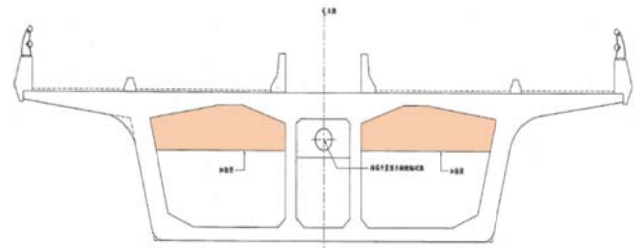
節塊長度配置

- 主、邊橋單元預鑄箱梁節塊長度計有 2.7m、3.25m、3.5m、4.0m、4.5m、5.0m 等變化，每節塊之梁深、腹板厚及底板厚亦為**逐塊變化**，產製難度較傳統預鑄工法高。



主橋預鑄節塊加勁

- 設置外置預力之主橋節塊，設計**橫向加勁梁**作為箱梁斷面補強，配合加勁梁的設置，主橋節塊內模系統製作、組拆、推進等作業較一般預鑄工法較為複雜及困難。



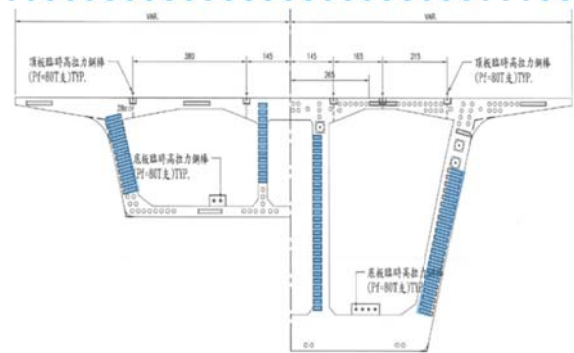
15

參、預鑄節塊施工規劃 – 設計特殊性(2)



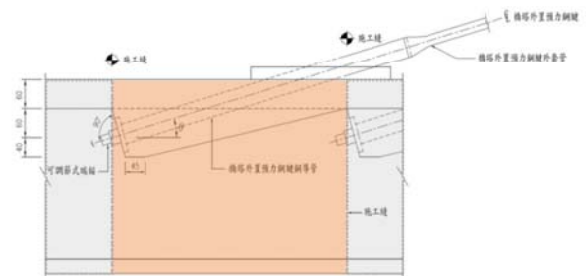
內置預力與剪力樁配置

- 每一節塊**剪力樁數量**依節塊梁深漸變，因每節塊之套管數量亦為漸變，預埋套管或錨碇座易與剪力樁位置衝突。



外置預力鋼導管角度變化

- 主橋每節塊預埋之外置預力鋼鍵**鋼導管角度不同**（每邊11股橋塔外置預力鋼鍵，角度約自16.3度變化至25.0度），須準確埋設，節塊吊裝後橋塔外置預力鋼鍵方能順利完成設置。



16

主、邊橋上構節塊梁深、板厚配合線型呈現三向漸變。

底板厚度(0.3~1m)

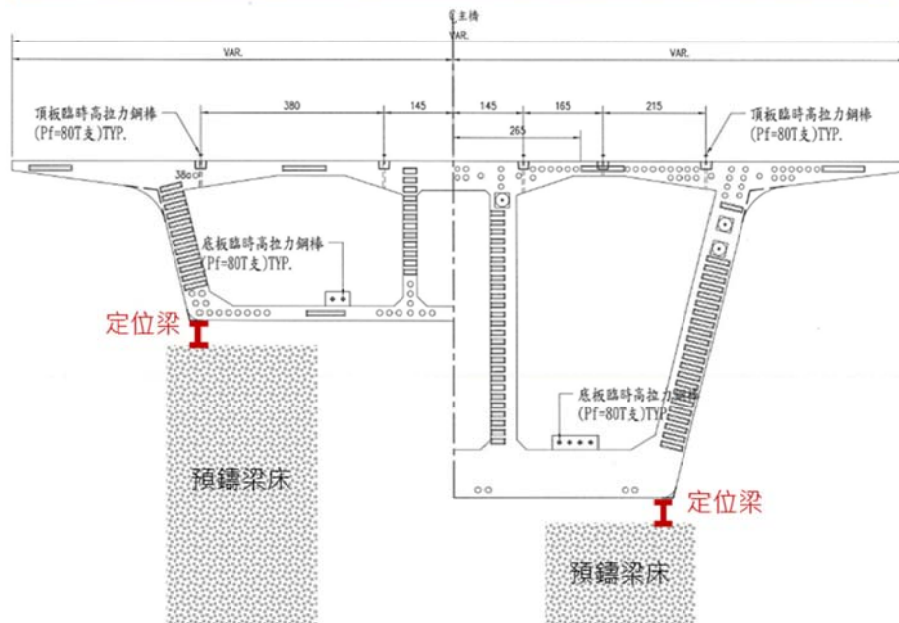
(内腹0.3~0.55m)



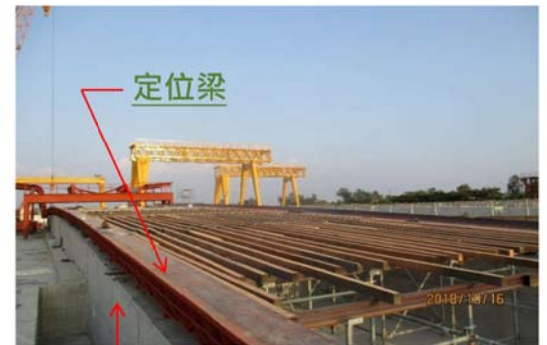
肆、預鑄節塊製程及品管－設施與裝備(1)



梁床設置：依據橋梁懸臂線型建置RC結構梁床
定位梁：微調節塊線型與高程



RC梁床建置



RC梁床

肆、預鑄節塊製程及品管－設施與裝備(2)



設備諸元

- ① 設備重量：60 T
- ② 起吊能量：600 T
- ③ 裝運功率：1~15m/塊



節塊裝船碼頭

設備諸元

- ① 設備重量：50 T
- ② 起吊能量：25 T
- ③ 移運功率：15m/min



節塊生產線門型天車

設備諸元

- ① 設備重量：30 T
- ② 起吊能量：270 T
- ③ 搬運功率：15m/min



節塊裝運多輪軸板車

設備諸元

- ① 設備重量：210 T
- ② 起吊能量：280 T
- ③ 吊運功率：15m/min



提梁機搬運節塊

肆、預鑄節塊製程及品管－設施與裝備(3)



底模及封頭模



內模1



鋼筋地組樣架



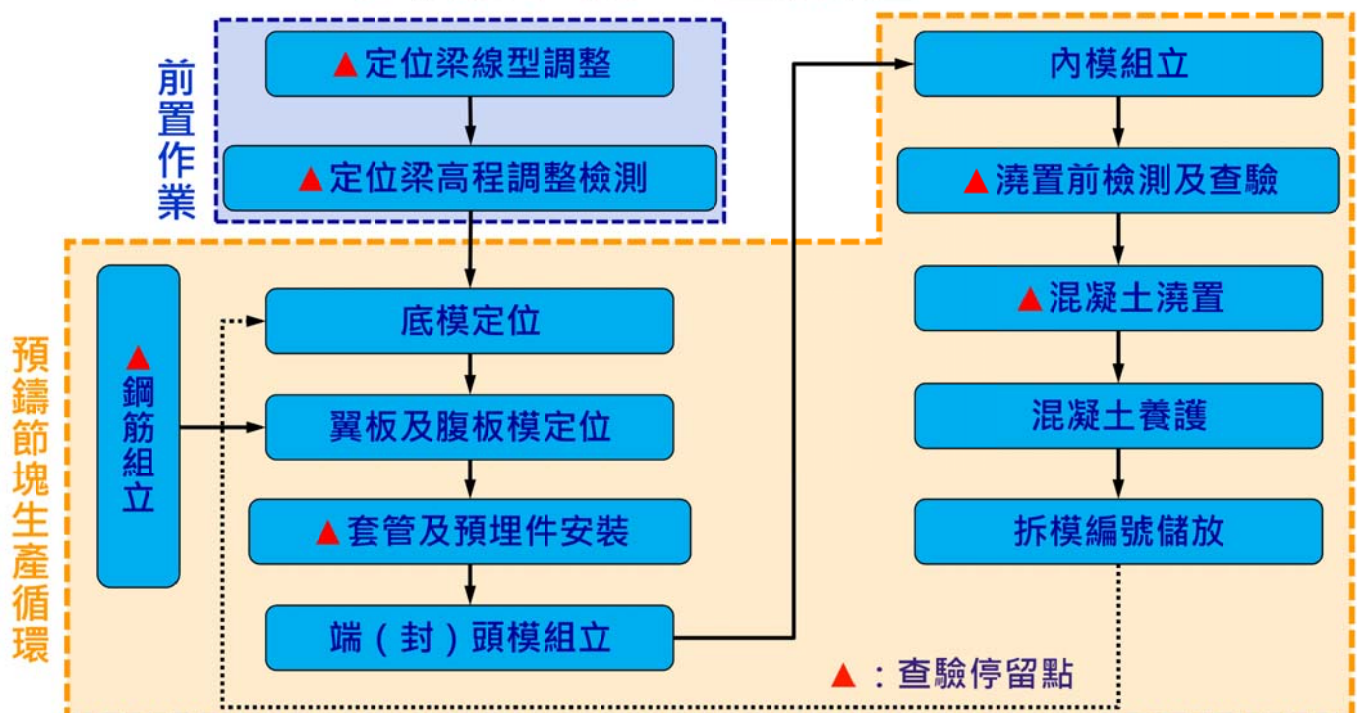
內模2

21

肆、預鑄節塊製程及品管－製程(1)



預鑄節塊生產流程



22

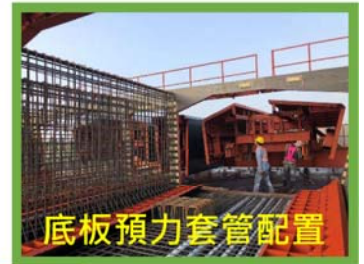
肆、預鑄節塊製程及品管 – 製程(2)



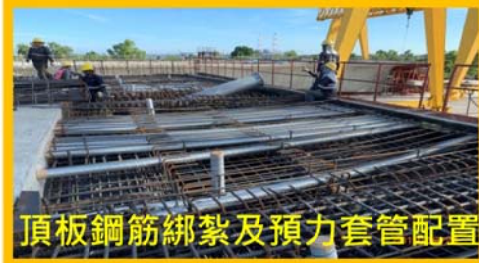
底腹板模定位



地組鋼筋吊放



底板預力套管配置



頂板鋼筋綁紮及預力套管配置



內模定位



混凝土澆置



長線預鑄節塊完成



預鑄節塊吊移暫置

23

肆、預鑄節塊製程及品管 – 節塊暫置縮影



24

肆、預鑄節塊製程及品管 – 品管重點(1)



1 節塊接合鑄造， 確保密合接觸

品管重點：

- 本工程採用長線接合鑄造法進行節塊生產，完成相鄰節塊前後接觸面密合之要求。
- 本工程設置三床預鑄床（主橋2床，邊橋1床），並以半跨長線接合鑄造方式產製預鑄節塊。



預鑄梁床



主橋預鑄節塊產製



模組化設計端頭鋼模



樣架地預組鋼筋

25

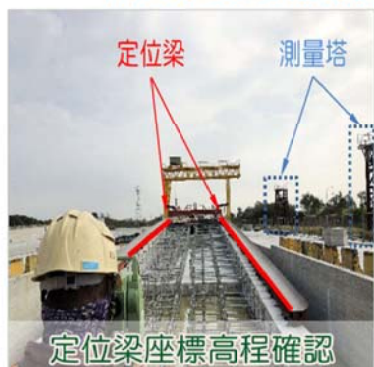
肆、預鑄節塊製程及品管 – 品管重點(2)



3 準確幾何控制， 確保完成線形

品管重點

- 預鑄節塊產製高程=設計縱坡+預拱值（吊裝各階段之拱值累加值）
- 設置測量塔以控制全床定位梁之線形及高程，再以定位梁控制各預鑄節塊之各斷面控制點，以確保各預鑄節塊斷面之變化確符設計。



定位梁座標高程確認



橡膠材質剪力樺模具



接合面防黏合薄膜塗佈



節塊拆模後接合面完整

26

肆、預鑄節塊製程及品管 – 品管重點(3)



5

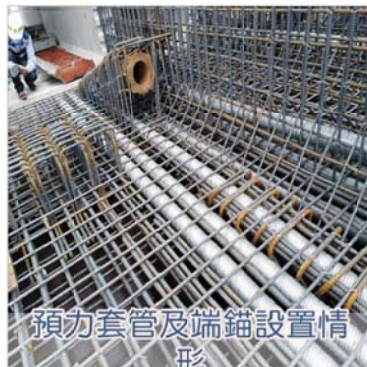
預力套管順接
及漏漿防治

品管重點：

- 承包商以特製橡膠塞頭確保節塊間之預力套管之位置一致，確保預鑄節塊間之預力套管順接，防止混凝土灌漿漿體滲入套管內影響預力穿線作業。



特製橡膠塞頭設置情形



預力套管及端錨設置情形

6

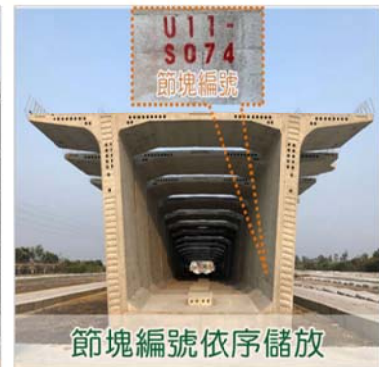
節塊編號儲存，
確保吊運正確

品管重點：

- 各節塊依序施工，於箱梁內側標示編號，俾利辨識。
- 每單元預鑄節塊於梁床全部完成鑄造後，達規定強度後吊至儲存區存放。



提梁機場內搬運情形



節塊編號依序儲放

27



伍、節塊運輸



28

伍、節塊運輸－提梁機



284T 提梁機



29

伍、節塊運輸－節塊陸運及海運



20200913~14



30

伍、節塊運輸－海象掌控



預鑄場與金門工區相距260公里，預鑄節塊須採海運方式運送至金門工區，運送過程受海象及天候影響甚鉅。

作業重點：

- 承包商須妥適規劃運送計畫並模擬驗證成效。
- 密切掌握天候狀況，利用海象穩定時段密集運輸，避開夏季之颱風季節及冬季之東北季風。

31

伍、節塊運輸－節塊運輸縮影



32



陸、預鑄節塊吊裝



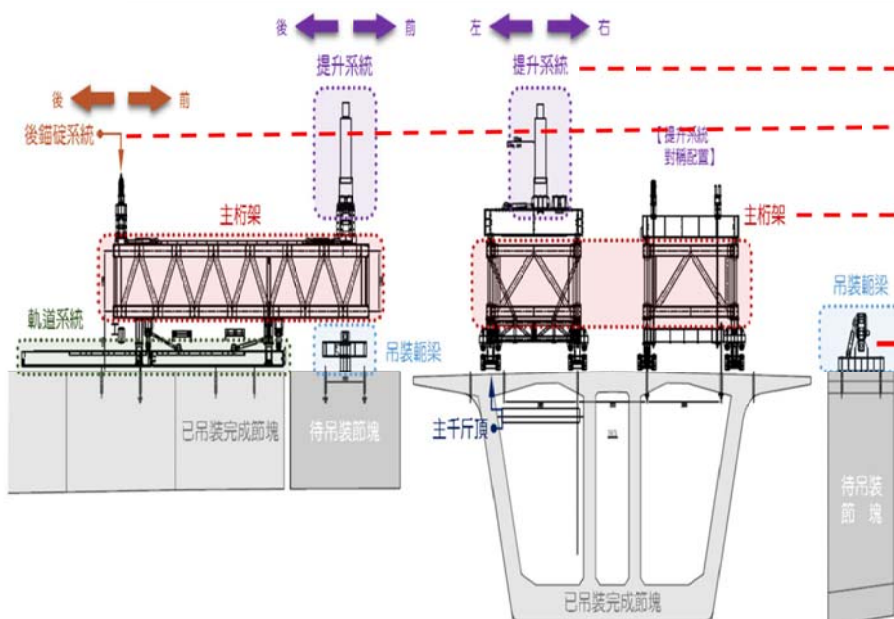
33



陸、預鑄節塊吊裝－吊裝設備(1)

預鑄節塊懸臂吊裝工作車主要組成構件

- 主要構件：主桁架、軌道系統、吊裝軀梁、提升系統。
- 提升能量：每座提升千斤頂可提升300噸。



34



陸、預鑄節塊吊裝－吊裝設備(2)

預鑄節塊懸臂吊裝工作車附屬設備

- 附屬設備：傘形轉向器、集線器、預力平台，及控制箱與油壓幫浦等。
- 附屬設備總重約12噸。



- ◆ 主要附屬設備包含傘形轉向器、集線器、預力平台，為節塊吊升作業必要設施；工作車另有控制箱、發電機及油壓幫浦等輔助設備。
- ◆ 節塊吊升過程中，鋼絞線係經由設置於工作車前方上橫梁上之傘形轉向架及集線器收納。



35

陸、預鑄節塊吊裝－吊裝設備(3)



工作車分析諸元

■ 工作車自重(DL) 鋼材單位重：7850 kgf/m³

- 構件自重於分析程式內依斷面規格自動計算。
- 吊裝附屬設備：總重約12 tf，額外加載於模型節點。

■ 預鑄節塊載重(CSL)

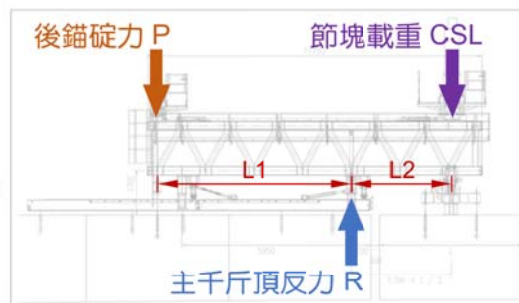
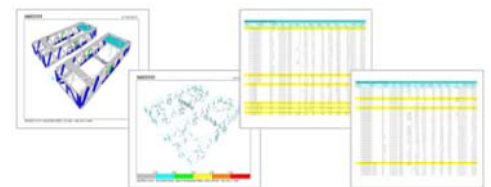
- 邊橋節塊重量：136.1 tf～177.7 tf。
- 主橋節塊重量：198.4 tf～271.9 tf。
- 提升過程之衝擊載重：加計節塊重量之15%。

■ 施工活載重(LL) 50 kgf/m²

■ 風力載重(W)

- 工作車構件水平向風力載重：25 kgf/m²。
- 預鑄節塊垂直向風力載重：50 kgf/m²。

■ 地震力(E) 0.1g



備註：
d：主千斤頂中心至承載節塊前緣間之距離
L1：後錨碇鋼棒中心至主千斤頂中心間之距離
L2：主千斤頂中心至待吊裝節塊吊點中心間之距離

節塊編號	節塊長度(m)	L1(m)	L2(m)	d(m)
...
15	5.0	5.15	3.50	0.70
...

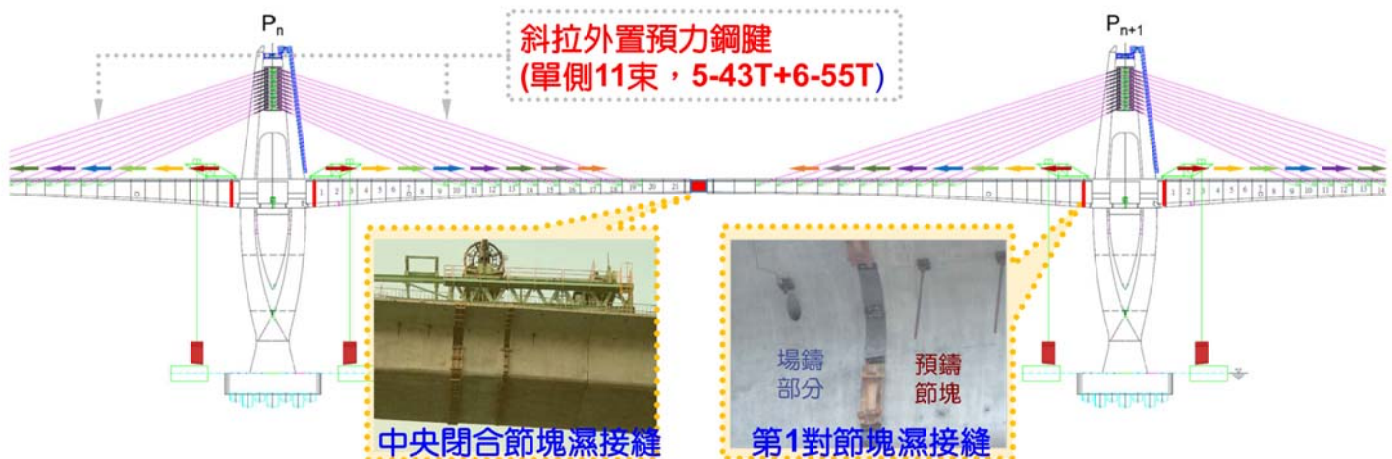
36



陸、預鑄節塊吊裝 – 全跨吊裝作業步驟

預鑄節塊全跨懸臂吊裝

- 場鑄柱頭節塊施工完成後，組裝懸臂吊裝工作車。
- 第1對預鑄箱梁節塊定位完成，場鑄與預鑄節塊間以濕接縫接合。
- 第2對至第21對預鑄箱梁節塊，依長線鑄造順序對接，循環施工至閉合前。
- 跨徑中央預鑄節塊閉合採濕接縫閉合方式施工，完成預力施拉後拆解工作車。



37



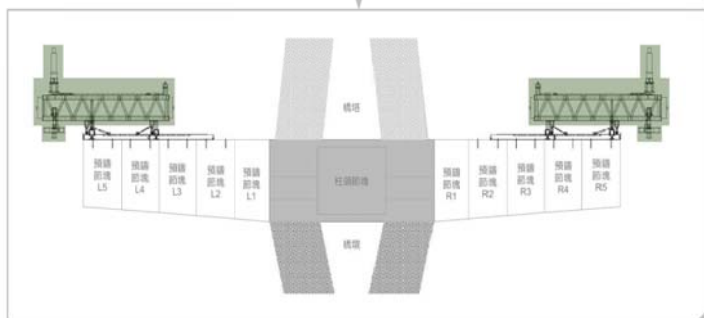
陸、預鑄節塊吊裝 – 吊裝工序(1)

預鑄節塊懸臂吊裝



流程1

- 軌道系統推進後錨碇



流程2

- 主桁架推進後錨碇
- 調整吊裝梁架、提升系統

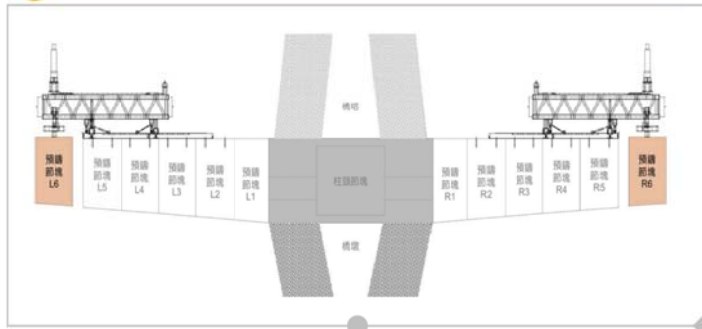


38



陸、預鑄節塊吊裝－吊裝工序(2)

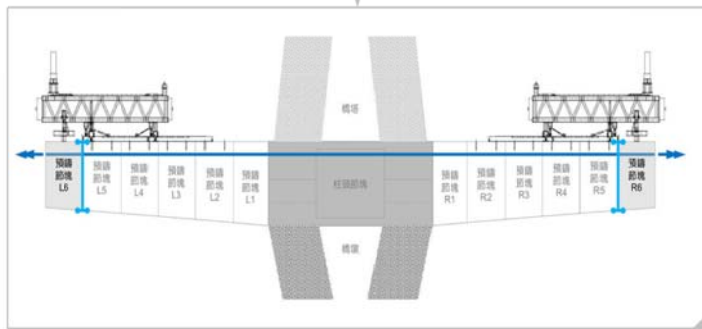
預鑄節塊懸臂吊裝



流程3



- 自節塊運輸船提升預鑄節塊
- 假接合確認吊裝精度
- 接合面塗佈環氧樹脂



流程4



- 預鑄節塊拉近接合
- 鋼棒施加臨時預力
- 預力鋼腱穿線及施拉
- 進行下一對平衡節塊吊裝循環

39

陸、預鑄節塊吊裝－吊裝工序(3)

預鑄節塊吊裝作業循環



預力平台外推、吊裝軛梁下放



預鑄箱梁節塊起吊



預鑄箱梁節塊懸臂平衡提升



接合面塗佈環氧樹脂黏劑



接合後施加臨時預力



穿線施拉預力

40



陸、預鑄節塊吊裝－吊裝作業重點(1)

環氧樹脂凝結時間控制

- 接合面所塗佈之黏劑厚度須達**1.6mm**以上，並於膠凝時間（Gel Time）前接合完竣。
- 每天接合作業前一小時，須取**3.7853公升**黏劑進行施工現場膠凝時間（Gel Time）測試，其結果須符合至少**30分鐘**之規定。



A、B劑環氧樹脂配比試拌



環氧樹脂凝固測試



節塊接合環氧樹脂塗佈



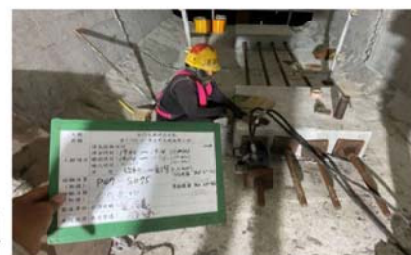
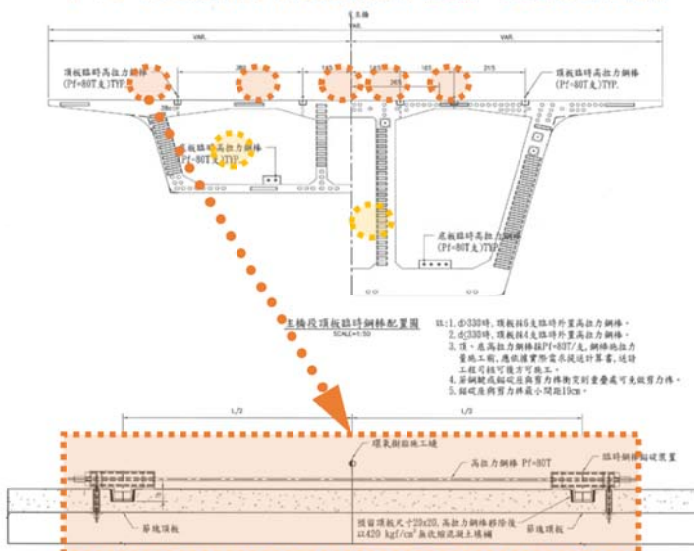
作業前環氧樹脂拌和

陸、預鑄節塊吊裝－吊裝作業重點(2)



頂、底板施加臨時預力

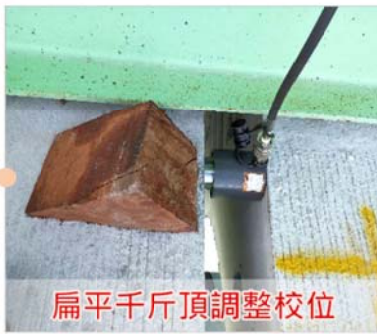
- 每個接觸面塗抹環氧樹脂黏劑後，應於環氧樹脂黏劑接觸時間（Open Time）終了前，完成節塊斷面**2.8kgf/cm²**最低壓力之臨時預力。
- 依梁深不同而配置不同支數之頂板與底板高拉力鋼棒（主橋計8~14支、邊橋計6~8支），平均每隻鋼棒需施加約**45tf~80tf**預拉力。



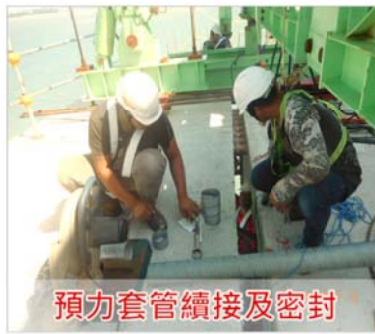
陸、預鑄節塊吊裝－濕接縫(1)



柱頭節塊溼接縫



扁平千斤頂調整校位



預力套管續接及密封



濕接縫封模及混凝土澆置

- ◆ 柱頭節塊採場鑄施工，與預鑄箱梁節塊因分屬不同鑄造單元，須於其介面以現場施作濕接縫方式作為接合。
- ◆ 第一對預鑄箱梁節塊之定位準確與否影響全跨吊裝精度。原因在於橋梁軸線若存有角度誤差，則經由跨徑加乘所造成之位移偏差量（Tangent Displacement），將遠大於一般撓度或施工誤差之總和，不可不慎。
- ◆ 本工程以扁平千斤頂及高拉力鋼棒錨碇方式多次循環三維度調整第一對節塊，確認定位無誤後，進行預力套管續接、濕接縫模板組立及現場澆置混凝土等工作。
- ◆ 濕接縫混凝土材料選用早強及無收縮性質，以免影響後續節塊吊裝工進、精度及品質。

43

陸、預鑄節塊吊裝－濕接縫(2)



閉合節塊溼接縫

- ◆ 閉合節塊吊放定位，頂、底板利用臨時鋼棒與兩側節塊進行連結固定防止晃動。
- ◆ 利用型鋼壓梁收斂閉合節塊與兩端節塊高程差距，
- ◆ 閉合節塊濕接縫預留寬度15~60cm，封模完成進行鋼筋綁紮及預力套管對接，接續完成420kgf/cm²早強無收縮混凝土澆置。

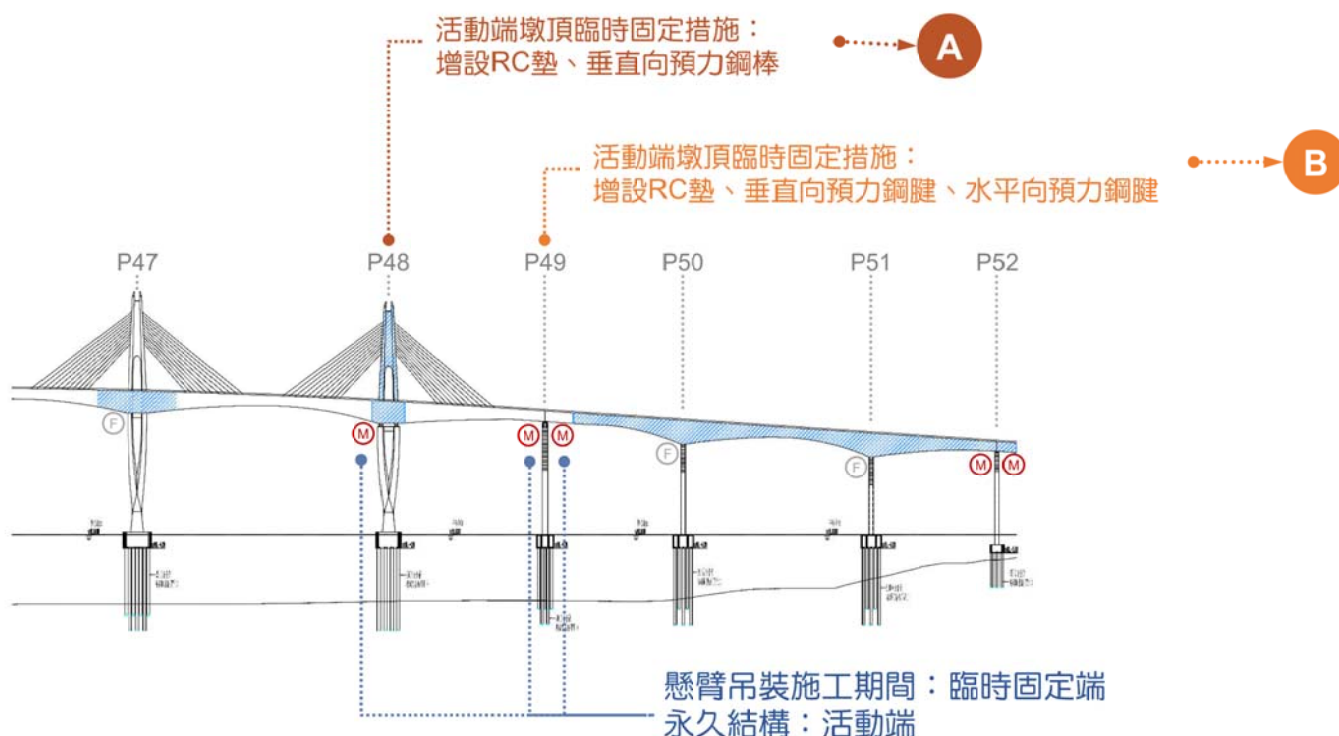


44

陸、預鑄節塊吊裝－活動端固定(1)



活動端臨時固定



45

陸、預鑄節塊吊裝－活動端固定(2)



懸臂吊裝分析檢核－活動端固定

- 預鑄節塊懸臂吊裝期間，墩頂臨時固定措施之施工設計與分析檢核，依據施工技術規範第03436章規定，過程中所考量載重分列如下，並須依公路橋梁設計規範載重組合規定，以及吊裝期間之臨界載重狀態區分橋軸向及橫向等兩向進行分析檢核：

- 懸臂靜重假設兩邊差異2% (DIFF)。
- 懸臂兩邊差異一個節塊之施工進度所致不平衡吊裝節塊載重 (U)。
- 單側不平衡上揚風力 25kgf/m^2 作用於懸臂的短邊 (WUP)。
- 懸臂兩邊分別有 25kgf/m^2 (短邊) 及 50kgf/m^2 加懸臂端3tf (長邊) 之垂直差異施工活載重 (CLL)。
- 懸臂吊裝工作車及設備自重 (Xt)。
- 其他如縱坡及線形所產生之影響。



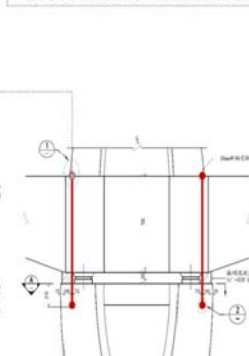
增設之RC墊，其功用為：

- 懸臂吊裝節塊期間，抵抗垂直及水平向所有載重，及抵抗傾倒潛勢。
- 垂直向載重包括所有節塊（含兩側差一節塊之不平衡吊裝載重）、橋塔、橋面設備機具等重量。
- 水平向載重包括環境載重、縱坡與線形等之影響。



垂直向預力鋼棒，其功用為：

- 懸臂吊裝節塊期間，輔助抵抗傾倒潛勢。



46

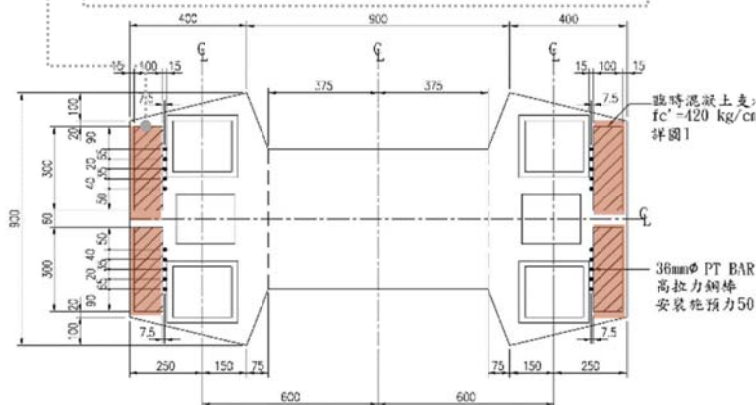
陸、預鑄節塊吊裝－活動端固定(3)



活動端臨時固定

增設之RC墊，其功用為：

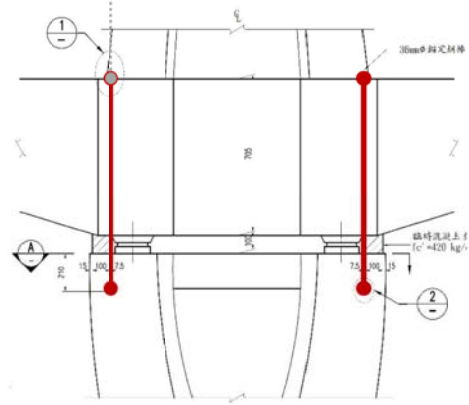
- 懸臂吊裝節塊期間，抵抗垂直及水平向所有載重，及抵抗傾倒潛勢。
- 垂直向載重包括所有節塊（含兩側差一節塊之不平衡吊裝載重）、橋塔、橋面設備機具等重量。
- 水平向載重包括環境載重、縱坡與線形等之影響。



P48墩頂配置平面示意圖

垂直向預力鋼棒，其功用為：

- 懸臂吊裝節塊期間，輔助抵抗傾倒潛勢。



P48墩頂配置立面示意圖

陸、預鑄節塊吊裝－線型控制(1)



預鑄節塊懸臂梁橋線形控制

3 節塊吊裝階段

■ 柱頭－第1節塊之濕接縫施工控制

- 第1預鑄節塊須確實定位定向，以免後續因跨徑加乘所造成之位移偏差量（Tangent Displacement）效應造成無法修正之高程或線形誤差。

■ 逐對吊裝，分階回饋檢討修正

- 依續逐對吊裝並收方，分階檢討以免吊裝誤差累積至閉合階段，必要時以增設濕接縫方式因應。
- 收方作業須注意溫度效應影響。



柱頭－第1節塊濕接縫施工



吊裝期間收方情形

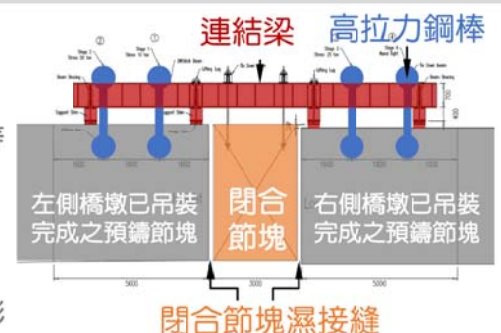
4 單元閉合階段

■ 設置連結梁

- 目的：限制預鑄閉合節塊兩側已完成吊裝端之變位，以避免如溫度、風力等現場環境因素，於施工期間可能之高程線形變化差異。
- 連接梁具備消弭微量閉合誤差功能。

■ 閉合節塊濕接縫澆置控制

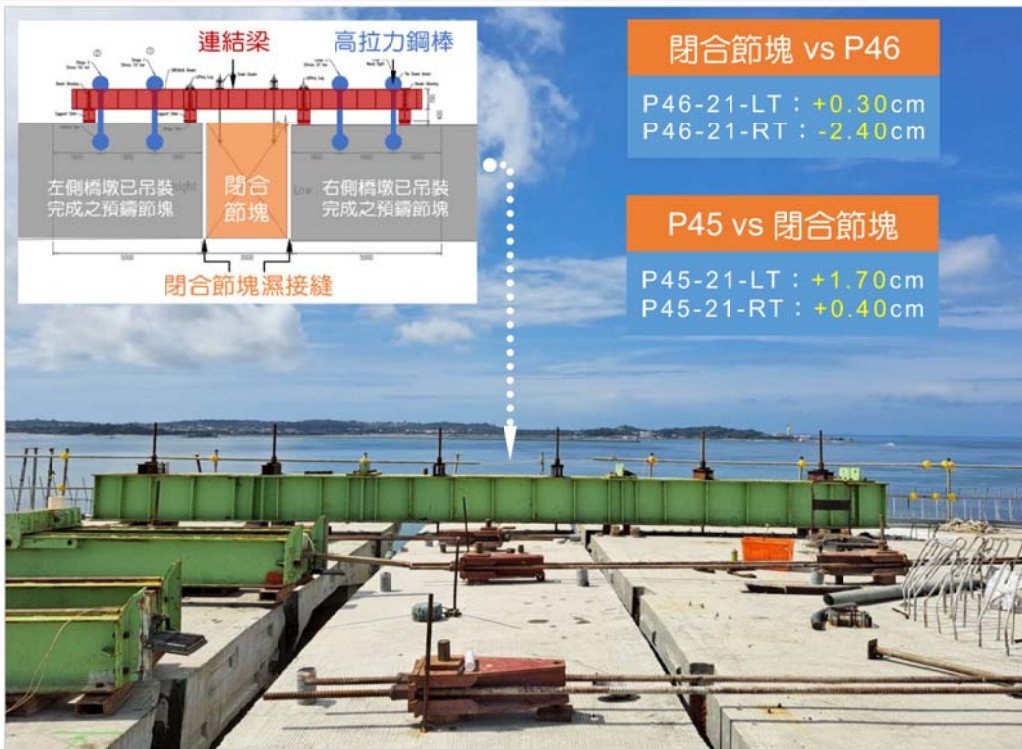
- 須使用具備無收縮早強之混凝土。
- 現場澆置閉合節塊濕接縫應控制在日出後2小時前澆置完成，以降低溫度影響。



陸、預鑄節塊吊裝－線型控制(2)



節塊吊裝後線形控制成果(1)



P46-P47

P46-21-LT : +1.30cm
P46-21-RT : -0.80cm
P47-21-LT : +0.60cm
P47-21-RT : -2.10cm

P47-P48

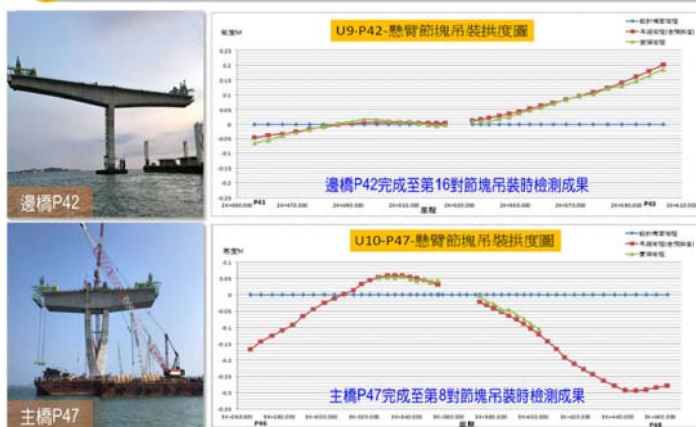
P47-21-LT : +4.40cm
P47-21-RT : -2.00cm
P48-21-LT : -1.10cm
P48-21-RT : -1.70cm

49

陸、預鑄節塊吊裝－線型控制(3)



節塊吊裝後線形控制成果(2)



50



51



柒、外置預力施工



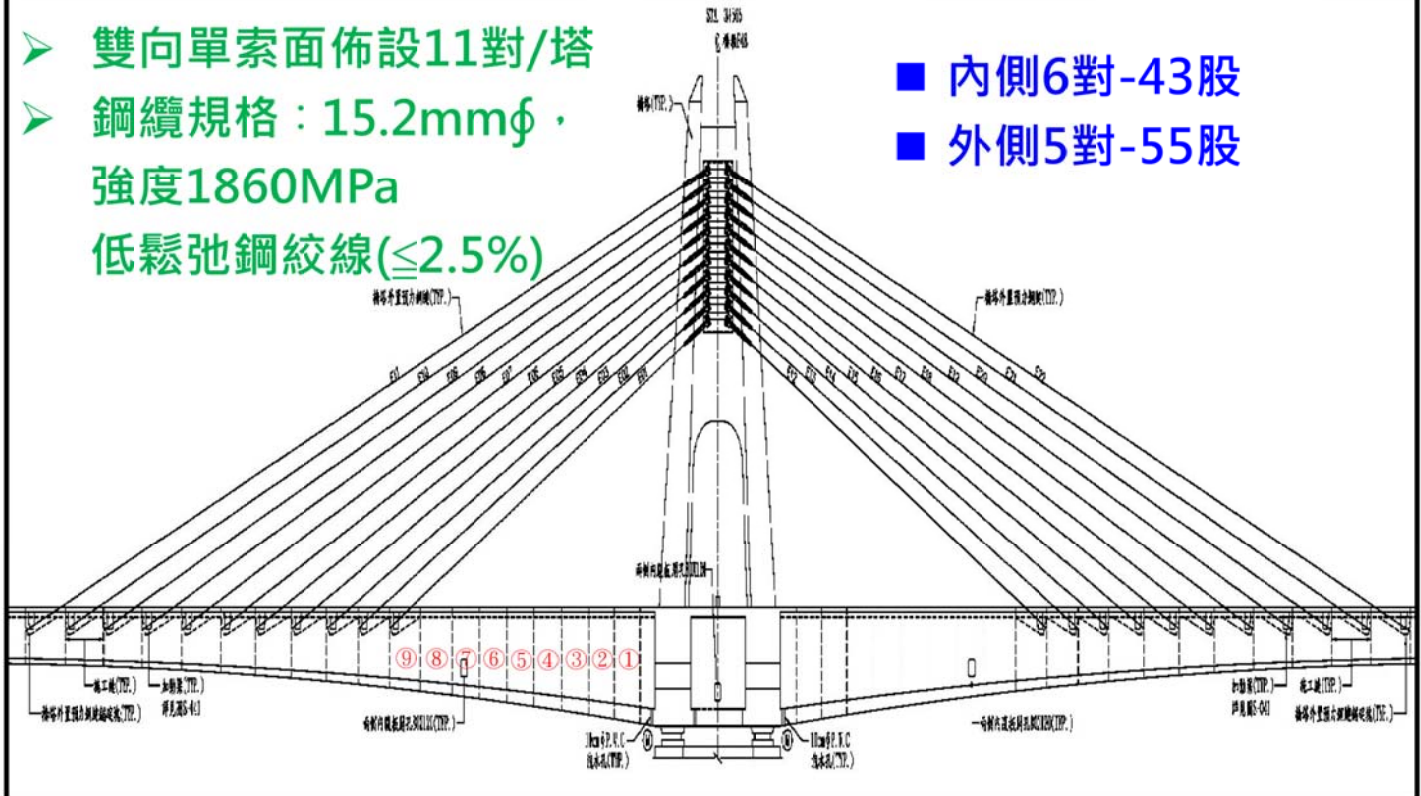
52



柒、外置預力施工 – 外置預力配置

- 雙向單索面佈設11對/塔
- 鋼纜規格：15.2mm ϕ ，強度1860MPa
低鬆弛鋼絞線($\leq 2.5\%$)

- 內側6對-43股
- 外側5對-55股



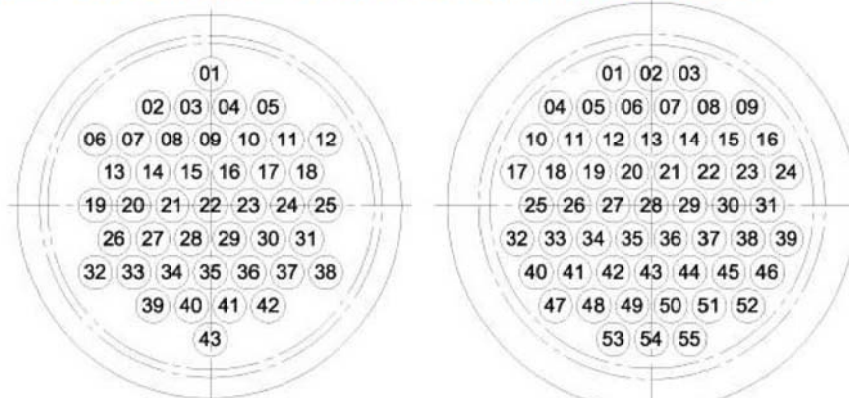
53



柒、外置預力施工 – 鋼絞線

◆ 鋼絞線安裝順序

- 從上而下：留設下部空間做為穿索通道
- 2側同步張拉
- 預力施拉循環：
 1. 逐根施加0.5倍設計索力值，直至全部鋼絞線穿線完成
 2. 自第1根鋼絞線施加100%預力值，直至全部鋼絞線張拉完成
 3. 循環施拉至每根鋼絞線趨近於相同索力(誤差值2.5%)



43股

鋼絞線安裝順序圖

55股

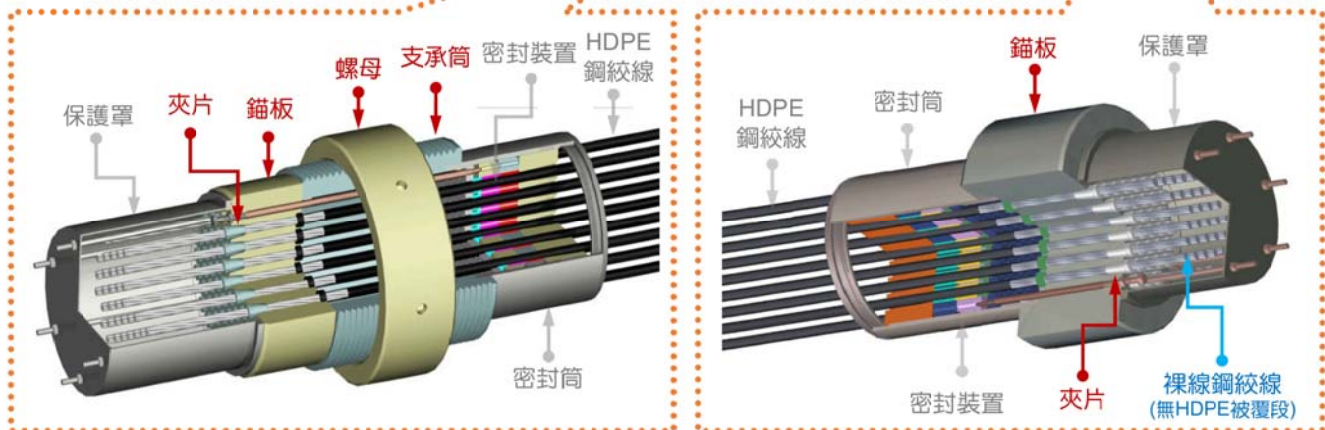
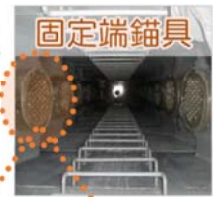
54

柒、外置預力施工 – 外置預力系統(1)



整束外置預力鋼腱可分為
錨碇段(Anchored Section)、
轉換段(Transition Section)、
自由段(Free Section)等三部分

A. 錨碇段構成組件



55

柒、外置預力施工 – 外置預力系統(2)

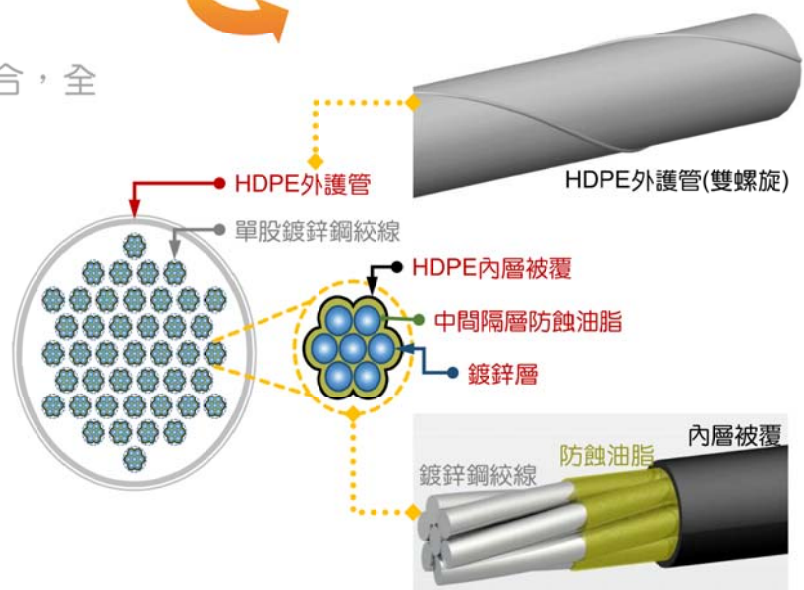


B. 轉換段構成組件

- 減振裝置
- 索箍裝置 (內襯柔性襯墊)
- 防水罩 (與HDPE外護管緊密結合，全防水處理)



C. 自由段構成組件



56

柒、外置預力施工 – 斜索施工流程(1)



前置作業



橋塔鋼殼安裝 (固定端錨具先行安裝)



HDPE套管熱熔對接



伸縮管與配件安裝



橋面施拉端錨具安裝



伸縮管組安裝於HDPE套管



鋼絞線剝皮與清理

57

柒、外置預力施工 – 斜索施工流程(2)



起管穿線施拉



HDPE套管曳引鋼索安裝



HDPE套管起管安裝



逐根安裝鋼絞線



單股預力施拉 (逐股量測記錄)



整體索力量測 (EM Sensor)³⁹



安裝索箍、減震器及防水罩

58

柒、外置預力施工 – 斜索施工流程(2)



近期施作情形



P48第13對節塊內置預力施拉作業
(後接續行進行第3對外置預力施拉作業)



P48第9對外置預力作業



P48第10對外置預力作業

59



捌、結語



60

捌、結語



- 金門大橋預鑄節塊產製過程除鑄造步驟需周延外，線形定位與放樣之準確性、節塊接合過程每一細節的確實，均為預鑄節塊成功與否之關鍵，鑄造完成的376塊節塊經由海運，總計進行39趟次的運送作業，克服台灣海峽惡劣海象的風險並安全運送到金門，最後一船節塊於111年6月29日到達工區，並在111年7月21日完成大橋最後一節塊的吊裝合龍。歷經2032天終於完成金門大橋主體結構，金門大橋主、邊橋預鑄節塊懸臂吊裝工法的寶貴施工經驗，應可提供爾後國內海事工程橋梁結構更佳之規劃參考。

