再創國內施工新紀元—機場捷運青山路陡坡段大跨徑大曲率橋梁支撐先進工法探討

關鍵詞：支撐先進工法 (Advanced Shoring Method)、推進 (Launching)、跨距 (Span)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／營建管理部／工務所主任／謝國楠 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／營建管理部／計畫副理／李天佐 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／營建管理部／副理／黃春淦 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／營建管理部／技術經理／吳俊龍 ❹

摘 要 ABSTRACT

國內重大交通工程自第二高速公路、北宜高速公路、東西向快速公路、高速鐵路工程等建設陸續完成後，包含城鎮間之區域道路及捷運工程等用地已漸趨難尋，故近年來交通建設路線之規劃、設計及施工之基礎條件較以往更趨於困難，如近期完工通車之中山高速公路五股楊梅段拓寬等工程，無一不是需克服特殊地形、特殊路線及多種施工障礙之工程，其施工條件除跳脫以往設計條件外，更需面臨艱難嚴苛之環境以及依賴特殊設備及工法方能完竣。臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫CE01D施工標雖僅長約3.3公里，但是主要工程項目除包括山岳隧道外，高架橋梁段主要由支撐先進工法、懸臂節塊工法及場鑄工法三種型式所構成，基礎型式分為沉箱式基礎、樁基礎、井筒式基礎等類型，而施工中之邊坡保護措施更分為格框式護坡、竹削式護坡及組裝橫板條等多元施工法。本文將以該工程為例，針對陡坡段大跨徑、大曲率橋梁採用支撐先進工法探討高架橋施作之成功案例作整體性介紹，並以施工中面臨困難之挑戰及採取之對策作概要性之說明，以提供作為未來工程界相關工程之參考。

❶

❷

❸

❹

壹、前言

臺灣桃園國際機場聯外捷運系統，簡稱機場捷運，為服務桃園國際機場聯外交通為主之大眾捷運系統。起自台北車站，經由桃園國際機場、止於中壢市，其中CE01D施工標雖僅長約3.3公里長，但是約有96%位在丘陵地，為克服路線之地形高差及陡峭邊坡地形(圖1)，主要工程項目除山岳隧道外，高架橋梁段主要由支撐先進工法、懸臂節塊工法及場鑄工法三種型式所構成，基礎型式分為沉箱式基礎、樁基礎、井筒式基礎等類型，而施工中之邊坡保護措施更分為格框式護坡、竹削式護坡及組裝橫板條等施工方式多元且複雜。而橋梁工法中，為了減少落墩，並儘量減少大量拆遷民宅及降低對青山路交通衝擊等因素，以及須克服橋面平均高度約達36公尺之難度，故橋梁上部結構約有70%採用較安全可靠之支撐先進工法。

圖1 陡峭邊坡地形

貳、工程概述

一、工程內容

機場捷運CE01D施工標，工程範圍自省道台一線天祥街口(里程A6 1+017) 至工程終點(里程A6 4+318)止，由高架橋、明挖隧道及山岳隧道等結構工程串連組成，該路線段工程於中山路與天祥街口附近轉向，以高架橋沿青山路側邊坡佈設，跨越啞口坑溪、青山路，於長庚大學前，改採明挖覆蓋隧道及直徑6.2公尺之山岳隧道穿越山麓，於文化一路銜接CU01標之A7車站，全長3,301公尺(圖2)。

主體工程自民國98年2月開始進行橋墩興建工程至102年4月結構完成，前後歷時約3年2個月。

高架橋梁段主要由支撐先進工法、懸臂節塊工法及場鑄工法三種型式所構成，基礎共49座，結構型式分別為沉箱式基礎5座、樁基礎23座、井筒式基礎21座(主要結構項目，如表1)。

二、特殊地形、路線與橋梁配置概述

本標段高架橋梁總長為2,453公尺，施工路線係沿著青山路路側邊坡上行設置高架橋梁，跨越啞口坑溪、青山路，因計畫路線係沿著路側邊坡上行，其路線長度約有96%位在丘陵地，且沿線之地形從25公尺爬升至250公尺，落差達225公尺，路線縱坡坡度達4.93%，橋面平均高度約達36公尺(最高橋面高度為45.9公尺)，

圖2 橋梁配置平面圖

表1 主要結構項目分類表

項次		工作項目	單位	契約數量
1	假設	施工棧橋	m^2	7,934
2	下部結構	全套管基樁D=1.5m	支	233
3		全套管基樁D=1m	支	183
4		沉箱基礎	座	5
5		樁基礎	座	23
6		井式基礎	座	21
7		竹削護坡	座	15
8		墩柱帽梁	座	43
9	上部結構	支撐先進及逐跨架設工法	跨	32
10		場撐	跨	7
11		懸臂節塊	塊	115
12	隧道工程	山岳隧道開挖	m	1413
13		山岳隧道(仰拱襯砌)	m	1413
14		山岳隧道(頂拱襯砌)	m	1413
15		箱型明挖覆蓋隧道	m	136.4

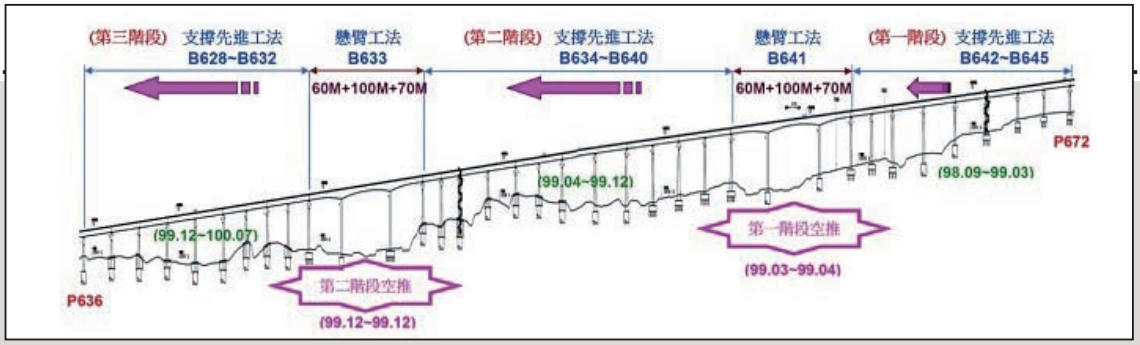


圖3 橋梁配置立面圖

高架橋上部結構屬支撐先進工法橋梁者共有16單元計30跨，合計總長1,585公尺，多為兩跨連續且具極小曲率半徑之高架橋梁，最大單元跨徑配置為兩跨60公尺之連續箱型梁，部分施工路線最小曲率半徑為450公尺，為大跨徑、大曲率橋梁之結構，且非全部連貫，其間隔有兩段懸臂工法橋梁，共分為三階段施工，分別為：

第一階段施工，墩柱編號P036~P046，計5單元，10跨。

第二階段施工，墩柱編號P049~P061，計7單元，12跨。

第三階段施工，墩柱編號P064~P072，計4單元，8跨。

其間須跨越之兩段大跨徑懸臂橋長度分別為(60M+100M+70M)=230M、(70M+105M+70M)=245M，故本工程支撐先進工作設備尚須克服無法連貫施工之困難(圖3)。

參、支撐先進工法選用之評估

一、工法簡介

(一) 為克服地勢險惡地形或都市交通流量大的地區，並為提高品質、縮短工期、降低成本，故採用施工機械化，具有週期循環性，施工品質較易控制，施工時不受橋下地形或交通之影響，且受路線線型之限制較少，初期雖機械成本較高，惟如橋長達一定規模時，其造價則較一般工法為經濟，故採用支撐先進工法為主要選擇工法之一。

(二) 支撐先進工法係將系統模板組立於支撐架上，並於完成每一橋孔之鋼筋綁紮、預力鋼腱配置、混凝土澆置及施拉預力後，將整組支撐先進工作車、模板及支撐鋼架推進至下一跨定位，再構築整跨徑之橋梁，如此逐跨循環施築直至全部橋梁完成為止。

(三) 本工法自1955年德國首次採用，國內於民國80年首次於北二高桃園內環線之大湳高架橋引進使用，隨後國內橋梁採用本工法設計施工，包括南二高的台南環線及高雄環線、第二高速公路、北宜高速公路、東西向快速公路、高速鐵路工程等均曾採用(圖4)。

圖4 工作車全貌

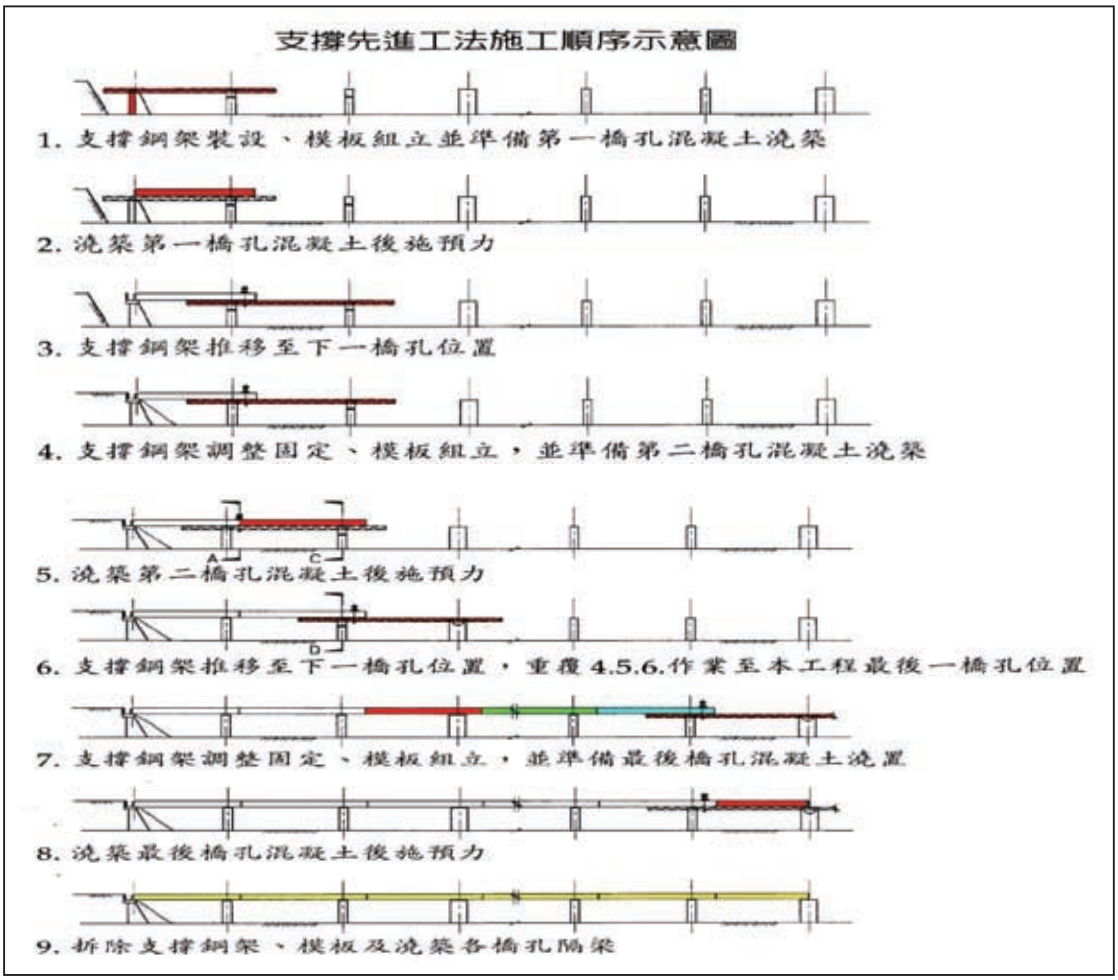


圖5 工作車推進施工順序示意圖

支撐先進工法(Advancing Shoring Method)係將系統模板組立於支撐架(工作車)上，並於完成每一橋孔之鋼筋綁紮、預力鋼腱配置，混凝土澆置並施拉預力後，將整組支撐鋼架及模板推移至下一橋孔，再構築整跨徑之橋梁，如此逐孔反複施築直至全部橋梁完成為止(圖5)。

二、工法優點

(一) 毋需架設地面支撐(支撐托架除外)，適合都市區域，跨越鐵、公路或河川、深谷時採用。

(二) 系統化、機械化、自動化施工，工人熟練度高，減少影響施工安全的不確定因素，施工的規劃與管理較容易，進度與品質亦容易控制。

(三) 施工機械作業便捷，重覆操作，節省大量人力，減低成本，縮短工期。

(四) 可利用已完成橋面作為人員、材料與機械之運輸通道，減少鄰近環境的污染與衝擊。

(五) 於特殊天候影響期間尚可架設篷架、施工不受天候影響，易於掌握工期。

三、工法適用性

一般而言，支撐先進工法因須配合推進或支撐架、模板之施工設備機械化循環性施工，

上部結構須採等斷面設計，因此較適用於中跨徑橋梁。惟該工法仍有其適用性條件之限制。

就適用性及經濟性而言，採用支撐先進工法所須考慮事項敘述如下：

(一) 路線線形：平面線形之曲率半徑宜大於400公尺。

(二) 橋梁規模：本工法橋長1200公尺以上時，方具經濟性。

(三) 跨徑配置：箱型梁橋，主跨徑配置一般在35～50公尺間，若跨徑大至60公尺部分必須加設臨時支撐。

(四) 考量工作車組裝場地位置：工作車施作起始位置，一般建議由低點往高點推進，視工作車主梁推進能量、摩擦力及煞車系統而定，縱坡以不超過2%為原則。

四、主要設備說明

工作車主要設備說明，如表2。

表2 工作車主要設備說明表

主梁（Main Girders） 主梁設有兩組，分置橋墩之左、右兩側，為箱梁結構，製造時將主梁分成數段，便於運送，組合時再以高拉力螺栓將各段結合連接。	
鼻梁（Nose） 鼻梁係延伸裝設於主梁前後兩端，作為支撐設備向前一跨推進時使用，一般為桁架結構，與主梁結合處為固定方式連結；然而為求推進過程順利，與主梁結合處亦可以設計插銷連結，便於旋轉。	
支撐托架 (Supporting Bracket) 支撐托架為裝置於橋墩上之桁架結構，為支持主梁之重要設備，至少需設置三套，於預力混凝土箱型梁結構施工階段，其中兩套支承需須能承受工作車及混凝土等全部之荷重，另一套則用於工作車推進階段預備移動至下一單元之先導。	
支撐橫梁系統 (Cross Beams) 支撐橫梁結構採懸臂梁方式與主梁結合，與主梁結合處採活動式，以利主梁推進時作為調整空間之利用。於垂直主梁方向間隔4或6公尺，裝設支撐橫梁系統，主要將結構體、模板等荷重傳遞至主梁。	

外模板（Outer Formwork） 外模板包含底模、腹板模、懸臂板模等，整跨距之外模系統，配合機具推移需要，以縱軸中心線分割成左、右側對稱構造，除了橋墩週邊模板為特殊尺寸構造外，其餘每單元標準模板皆以4或6公尺長材料配合組成。	
內模板（Inner Formwork） 內模包括頂模、腹版模、支撐桿件、模板移動工作車、軌道等設備，每一內模組裝單元長也為4公尺或6公尺。	
推進設備系統（Launching System） 推進設備系統包括有控制主梁前進之設備、控制主梁可水平方向橫移之滑動裝置，及可往復夾推並具煞車功能之設備。	
內模台車（Inner Formwork Cart） 主要為拆卸內模並移動至定位後組立內模之自動化設備，為模板自動化作業工程中不可或缺之設備之一。	

肆、支撐先進設備推進施工

一、設備製作考量

互助營造股份有限公司為CE01D施工標之承攬廠商，支撐先進工作設備係委由Weicon工程顧問公司辦理設計，並由國內之新峰機械股份有限公司在台灣製造及組裝，由黑石工程有限公司負責施工。

(一) 工作車設計時考量施工條件

施工團隊在包含施工、設計及監造等多元專業成員之結合下，全力對於本套支撐先進設備於施工面臨問題及設備結構之設計、製作方面先行考量及模擬各種樣態，做大量之分析與實體模型模擬後，大致歸類為以下問題作為本設備設計之基本要件。

1、橋梁最大跨徑(S)=60M，最小曲率半徑(R)=450M，

2、橋梁偏心跨徑 e=1.0m，支撐大梁受力不均，設備主梁採較保守設計，以安全荷重加載20%設計。

3、考量工期因素，採一部工作車施工，因最長橋梁結構單元為兩跨皆為60公尺跨徑之連續梁結構(施工單元長為72M+48M)，該工作車主梁長74M，另為適用空推穿越105M跨徑長之懸臂工法大跨徑路段，採前後皆為40M之鼻梁，總長計154M(圖6)。

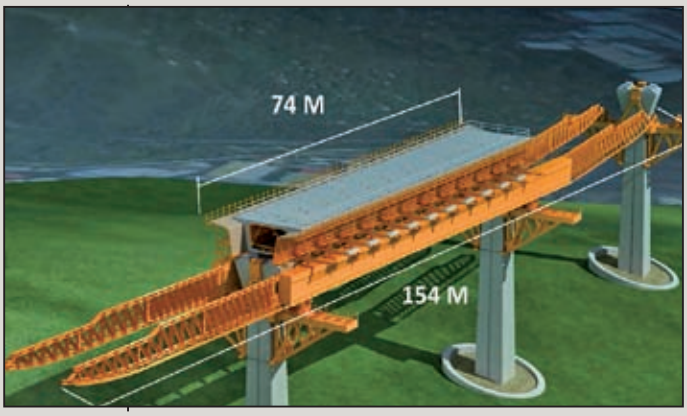


圖6 工作車尺寸示意圖

4、橋墩高度達20~40公尺，高度甚高且高低變化大，帽梁為喇叭頭設計，故不採傳統之支撐式托架，而以懸吊扣件吊掛托架，將所有施工荷載 (含工作車及橋梁結構)藉由托架傳遞至帽梁承擔。

圖7 位於交通繁忙之台一省道，且鄰近大樓

5、工址最低處為交通繁忙之台一省道，且鄰近大樓，工作車組裝受限腹地不足(圖7)，故採由高處往低處方向推進漸進施工，其推進中之煞車系統設計，將極為重要。

(二) 設備載重設計及結構安全檢核

1、主要材料

(1)主大樑及托架　結構鋼材：A572等級 (Fy=345MPa)

(2)鼻梁及模版　　結構鋼材：A36 等級 (Fy=250MPa)

2、採用設計軟體

(1) PROKON - 結構分析軟體設計分析鋼細部接頭、鋼筋混凝土、預力混凝土。

(2) 以STAAD.Pro - 結構分析與設計軟體檢核彈性模型體及設計支承。

(3) 以Microsoft Office Excel and VBAExcel試算表作處理分析。

3、工作車設備結構設計包含結構荷重、風力、地震力之檢核，整套設備總重量達1580公噸，為國內曾使用工作車之最(如表3、表4、圖8)。

表3 主要設備結構設計參數表

結構 荷重	主要箱型鋼樑荷重= selfweight * 1.3 推進鼻梁荷重 = selfweight*1.2 內模版荷重= 16 kN/m 外模版荷重= 34 kN/m
側向載重(側向混凝土壓力)	混凝土密度: γc= 25 kN/m3，澆置速率比R=3.0 ，混凝土平均溫度T=16°C 計算
風力	依據AASHTO-LRFD 極限設計法 p160 = 2.4 kPa ， p70 = 0.44 kPa (採 0.5kPa) 計算
地震力	依據台灣鐵路橋梁設計規範，回歸期為475 年之工址地表加速度為Sd=0.5g，計算對應靜態分析之水平力Fh。 針對施工期約三年之臨時設備設計，考慮回歸期為30年所對應之水平地震力為靜態分析之水平設計力 • kh = Sd/3.25*Fa*W（採Fa=1.2 ） • kh=0.185*W（採 0.2W）
計算載重：Qi 載重係數： γ i (=1.25) 標稱強度或結構或對於特殊載重結構構件之抵抗力：Rn Rn不確定因素係數： ϕ 強度檢核： γ i. Qi≦ ϕ .Rn 設計檢核之需求/容量比DC = Q/Rr ≦ Limit	

表4 工作車各主要構件重量表

項次	部 位 名 稱	重量
1	主梁(Main Girder)	525 Tons
2	鼻梁(Nose)	150 Tons
3	橫梁(Cross Beam)	90 Tons
4	工作台車(Support Chair)	60 Tons
5	托架(Support Bracket)	330 Tons
6	外模(outer Formwork)	287 Tons
7	內模(Inner Formwork)	138 Tons
設 備 總 重 量		1580 Tons

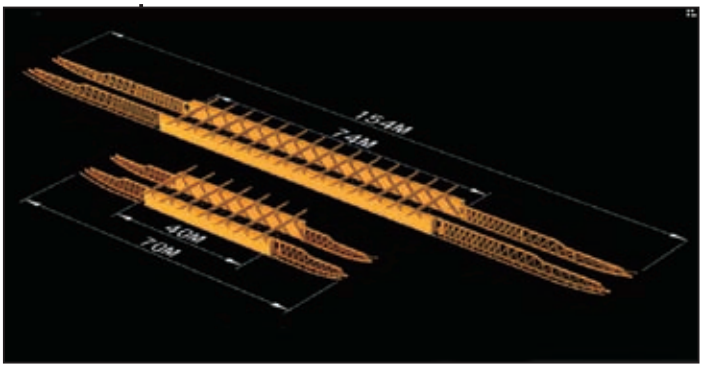


圖8 工作車與一般工作車比較示意圖

(三) 對既有結構物衝擊之安全檢核

1. 托架對帽梁混凝土承壓應力檢核

本支撐先進設備採懸吊扣件吊掛托架，將所有施工荷載（含工作車及橋梁結構)藉由托架傳遞至帽梁承擔，須先檢核該載重是否影響橋墩結構安全。

2. 工作車推進對墩柱結構衝擊安全檢核

支撐先進工作車推進階段，產生之水平及垂直負荷，須檢核其對既有墩柱結構之衝擊。

二、施工步驟

於施工前進行模擬動態施工模式，就各層面可能發生之問題及危害提出研商，針對施工階段提出下列應注意事項。

(一) 工作車降模、推進、頂升、閉合階段操作人員之高空作業安全維護。

(二) 推進過程中左、右兩側工作車之平衡及下坡推進之速度限制。

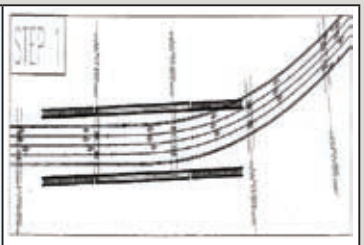
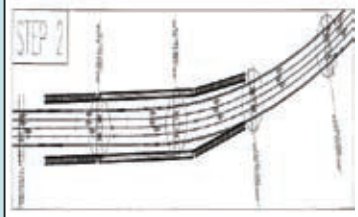
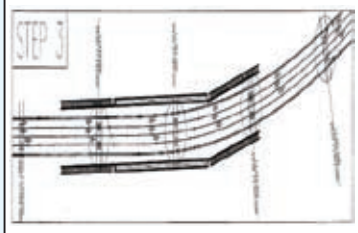
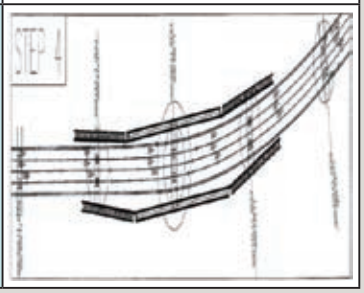
(三) 托架組拆操作人員之高空作業安全維護、吊車設備安全、能量之考量及維護。

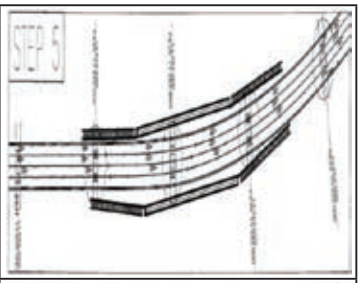
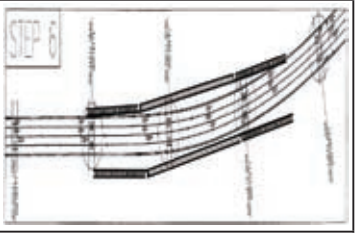
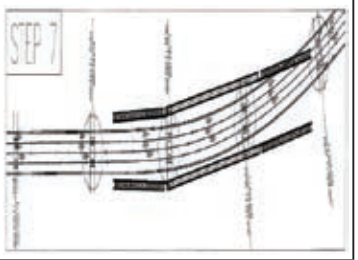
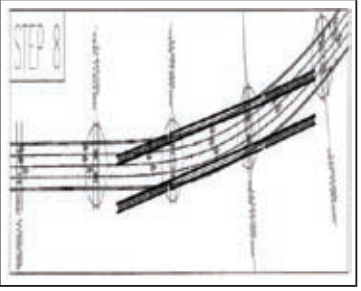
(四) 工作車穿越青山路段，下方車道之安全防護。

(五) 曲率半徑小路段、空推過懸臂段之推進作業注意事項。

表5為推進過程之八階段24步驟推進作業注意事項(表5)。

表5 工作車推進作業注意事項

階段一 1.完成預力施拉作業。 2.下降工作車至推進高程。 3.拆除橫梁連接插銷。 4.橫移工作車至推進位置。(必須注意安全性並逐步進行) 5.橫移完成後鎖定橫移油壓缸。	
階段二 6.驅動前方旋轉油壓缸，轉動鼻梁至適當角度以準備進入前方之托架台車。 (注意：最大旋轉角度限制為10度，必須嚴格遵守！) 7.完成角度調整後務必鎖定旋轉油壓缸。 (注意：必須隨時注意旋轉油壓缸是否正常運作!)	
階段三 8.固定托架台車之角度，使鼻梁順利進入台車椅座。 9.推進工作車使鼻梁進入下一個托架台車。 10.確認兩側鼻梁前端均已完全進入，並座落於托架台車上(輔以導向機制以發揮束制功能)。 11.解除後方旋轉油壓缸之鎖定(以利自由轉動)。 (注意：此時所有台車之橫移油壓缸以及前方轉動油壓缸必須是鎖定狀態)	
階段四 12.左右兩側交替向前推進工作車。 (注意1：此時後方尾梁因向前推進，將自動產生旋轉角度) (注意2：基本上兩側工作車應儘可能同時同步向前推進，如實際操作不容許時，則兩側工作車推進之進度差異最大不可超過一個跨距)	

階段五 13.主梁進入下一個托架台車前以及尾梁尚未脫離尾部托架台車前，暫停推進。 14.鎖定後方旋轉油壓缸。 15.鎖定後方旋轉油壓缸後，鬆解前方之旋轉油壓缸。 (注意：此時所有台車之橫移油壓缸以及後方轉動油壓缸務必是鎖定狀態!)	
階段六 16.交互橫向移動前、後方托架台車，將鼻梁轉成直線。 17.鼻梁與主梁形成直線狀態後，鎖定前方之旋轉油壓設備。 18.鎖固前方托架台車之轉動機制，以利主梁進入台車。	
階段七 19.台車鎖定轉動以及鼻梁一直線狀態後，則向前推進主梁以使工作車通過托架台車。 20.於主梁進入台車後，釋放托架台車之轉動鎖定。 21.持續向前推進直到下一個單元位置。	
階段八 22.工作車完成推進後即進行橫移並閉合。 23.安裝鎖定所有橫梁插銷連接。 24.驅動主油壓缸以頂昇主梁至澆置高程，以進行調模及鋼筋綁紮。	

三、施工挑戰與對策

(一) 陡坡下推

1. 縱向坡度最大達4.93%，須加強推進方向之煞車機制，採油壓夾缸作為推進動力及防滑設備之自動化操作設備，有其安全考量之必要(圖9)。

圖9 工作車推進油壓夾缸

2. 制動及煞車系統量能檢核

以保守設計油壓煞車系統且採用自動化遠端控制操作系統，現場並採用摩擦係數較大之支承平面樹脂板控制工作車推進之能量，於工作車組裝完成後，以現場實際模擬測試方式反復操作，確認較原設計之煞車系統安全係數高達4倍以上(圖10)。

圖10 工作車煞車系統檢查

(二) 大曲率轉彎

1. 工作車長達154M，曲線段推進時鼻梁、尾梁將與橋墩發生衝突，主梁與鼻梁及尾梁皆須配合曲率轉折，工作車須增設轉動樞鈕機制(圖11)。

圖11 工作車轉動機制設備

2. 主梁於推進時與托架之夾角變化過大，工作台車必須設計轉軸以供旋轉(圖12)。

圖12 工作台車設計轉軸以供旋轉之設備

3. 主梁與鼻梁、尾梁於轉折後，因重心偏離易發生傾覆之情況，工作台車必須設計防傾覆裝置(圖13)。

圖13 工作台車設計之防傾覆裝置

(三)空推段

本工程B641,B633兩懸臂段橋梁處現地動線不足、墩柱高度過高、考量工作車量體龐大且拆卸、搬運再組裝之時程過久等因素，選用空推越過(圖14、圖15)。

圖14 工作車空推作業(白天)

圖15 工作車空推作業(夜間)

空推長度:

B641單元 (60M +100M +70M) 三跨共230M

B633 單元 (70M+ 105M+70M) 三跨共245M

兩懸臂段空推施工，分別於100M及105M之跨距中各設置臨時支撐塔柱乙處(圖16)，以下就B633單元為例說明：

B633單元為三跨連續，共245M之懸臂工法橋梁結構，空推方式分四階段完成(如表6說明)：

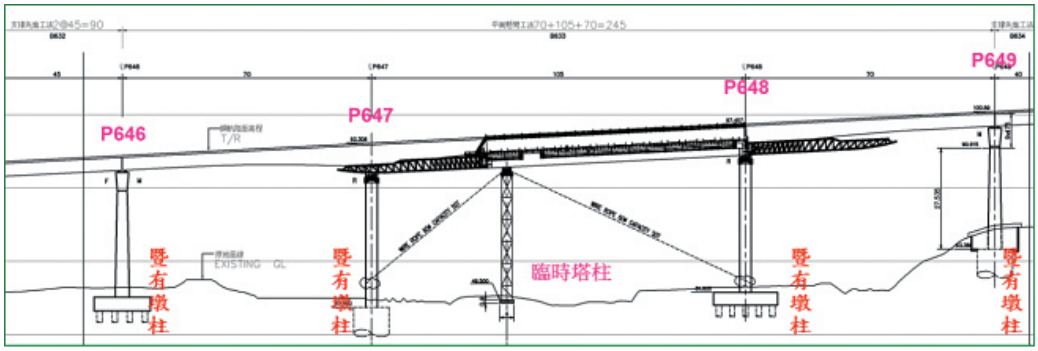


圖16 空推段立面示意圖

表6 空推四階段說明

第一階段　自P649推進至P648，計70M。	第二階段　自P648推進至臨時塔柱，計63M。
第三階段　自臨時塔柱推進至P647，計42M。	第四階段　自P647推進至P646，計70M。

表7 空推段困難與排除

	遭 遇 問 題	處理方式及對策
1	工作車推出後就無法在半途閉合，受限於托架的套數，每推一個跨徑後需等拆前一組托架，向前一跨安裝好後方能繼續推車。	將所有工班分為托架拆卸、搬運及安裝小組，及工作車推進小組，並搭配緊急支援小組提供物資、設備之支援，採分班24小時日夜施工。
2	於懸臂柱頭節塊處，因結構型式不同，原吊掛托架改以鋼絞線懸吊支撐托架。	進行托架懸吊設備安全檢核，確認安全無虞。
3	搭設臨時支撐塔柱受限地形限制，部分基礎落於啞口坑溪側。	進行臨時支撐塔柱基礎之支承力及結構安全檢核，為增加塔柱穩定度再增設4組鋼絞線斜拉並固定於兩側墩柱，確認安全無虞。
4	推進至最小曲率半徑R=450處，鼻梁旋轉對工作車整體設備平衡須特別注意。	進行工作車推進傾覆安全檢核，並確認安全無虞。

(四)空推段困難與排除

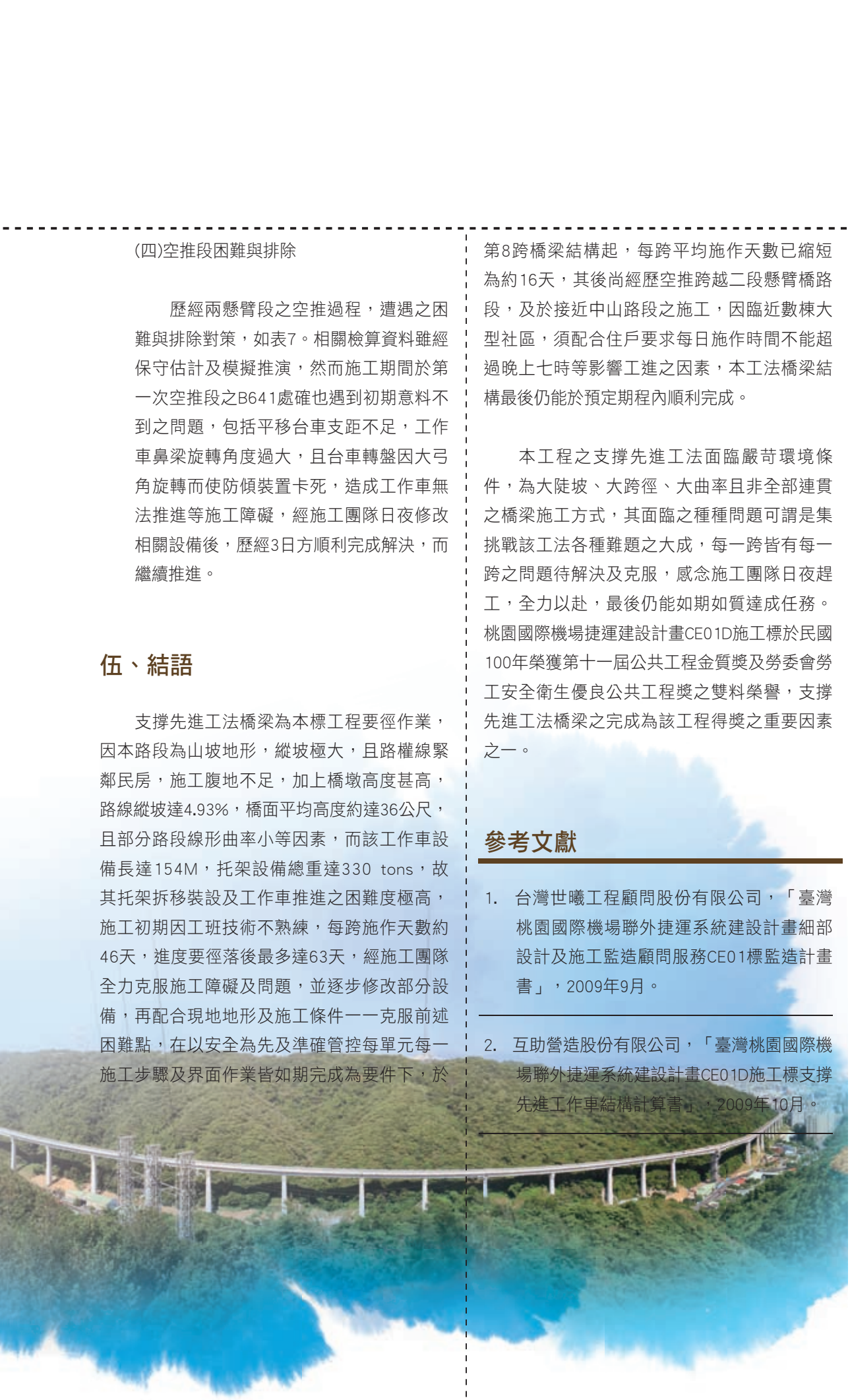
歷經兩懸臂段之空推過程，遭遇之困難與排除對策，如表7。相關檢算資料雖經保守估計及模擬推演，然而施工期間於第一次空推段之B641處確也遇到初期意料不到之問題，包括平移台車支距不足，工作車鼻梁旋轉角度過大，且台車轉盤因大弓角旋轉而使防傾裝置卡死，造成工作車無法推進等施工障礙，經施工團隊日夜修改相關設備後，歷經3日方順利完成解決，而繼續推進。

伍、結語

支撐先進工法橋梁為本標工程要徑作業，因本路段為山坡地形，縱坡極大，且路權線緊鄰民房，施工腹地不足，加上橋墩高度甚高，路線縱坡達4.93%，橋面平均高度約達36公尺，且部分路段線形曲率小等因素，而該工作車設備長達154M，托架設備總重達330 tons，故其托架拆移裝設及工作車推進之困難度極高，施工初期因工班技術不熟練，每跨施作天數約46天，進度要徑落後最多達63天，經施工團隊全力克服施工障礙及問題，並逐步修改部分設備，再配合現地地形及施工條件一一克服前述困難點，在以安全為先及準確管控每單元每一施工步驟及界面作業皆如期完成為要件下，於第8跨橋梁結構起，每跨平均施作天數已縮短為約16天，其後尚經歷空推跨越二段懸臂橋路段，及於接近中山路段之施工，因臨近數棟大型社區，須配合住戶要求每日施作時間不能超過晚上七時等影響工進之因素，本工法橋梁結構最後仍能於預定期程內順利完成。

本工程之支撐先進工法面臨嚴苛環境條件，為大陡坡、大跨徑、大曲率且非全部連貫之橋梁施工方式，其面臨之種種問題可謂是集挑戰該工法各種難題之大成，每一跨皆有每一跨之問題待解決及克服，感念施工團隊日夜趕工，全力以赴，最後仍能如期如質達成任務。桃園國際機場捷運建設計畫CE01D施工標於民國100年榮獲第十一屆公共工程金質獎及勞委會勞工安全衛生優良公共工程獎之雙料榮譽，支撐先進工法橋梁之完成為該工程得獎之重要因素之一。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫細部設計及施工監造顧問服務CE01標監造計畫書」，2009年9月。

2. 互助營造股份有限公司，「臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫CE01D施工標支撐先進工作車結構計算書」，2009年10月。