

**國道1號五股至楊梅段拓寬工程計畫
第C910標校前路鋼管桁架鋼拱橋設計與施工**

**Design and Construction of Steel Pipe Truss Arch Bridge of
Xiaoqian Road, Chungli-Yangmei section in National Freeway No.1
Wugu to Yangmei Widening Program, C910**

楊政儒¹ 張志明¹ 李俊頌^{1*} 洪永贊² 劉敬德³

¹林同棧工程顧問股份有限公司 結構部工程師

jclee@tylin.com.tw 台北市仁愛路三段136號12樓 TEL:02-27840988

²林同棧工程顧問股份有限公司 施工監造經理

³林同棧工程顧問股份有限公司 結構部經理

摘要

「國道1號五股至楊梅段拓寬工程計畫」終點楊梅收費站前既有校前路跨越橋因墩位與本拓寬工程衝突，故納入本計畫「第C910標中壢楊梅段北上線工程」改建。新橋橋型採國內首座鋼管桁架鋼拱橋，以形塑五楊入口門戶意象。此外，考量施工維持既有交通，並降低衝突干擾，採先建後拆方式，於南側先行施作鋼拱橋，再將舊橋拆除後，以頂昇橫移工法將鋼拱橋移至定位，亦為此工法應用於特殊型式橋梁之首例。本文旨在以此橋為例，說明本橋梁規劃考量、設計施工重點及現場執行狀況，期與工程界分享經驗及未來類似工程之參考。

關鍵字：五楊高架拓寬工程、鋼管桁架鋼拱橋、橋梁頂昇橫移工法

Abstract

The Yangmei toll station, which is the end point of Chungli-Yangmei section in National Freeway No.1 Wugu to Yangmei Widening Program, conflicted with the piers of Xiaoqian Road

Overpass. Therefore, this project of reconstruction of the bridge was integrated in the program of the north bound of Chungli-Yangmei section. The shape of the bridge, the first steel pipe truss arch bridge in Taiwan, formed the image of the entrance of the widening program.

Besides, the approach which teardown after rebuilding was used in order to maintain the existing traffic and avoid construction conflicts. After building the new bridge in the south side, the old one was tore down and the new one which is the steel arch bridge was relocated by using the lifting-sliding construction method. This is also the first application to special type bridge. The purpose of this paper is to take this bridge as an example to describe the considerations of the plan, key points of construction design, and situation of construction site to share our experience.

Keywords: National Freeway NO.1 widening project plan, Steel Pipe Truss Arch Bridge, Lift sliding method

1. 前言

楊梅校前路跨越橋位於中山高里程70k+900處，原有橋型式為三跨連續預力箱型梁橋，橋址處兩側地勢屬楊梅台地，中山高採路塹方式經過，跨越橋落墩於中山高兩側路塹邊坡。因此，為滿足五楊高架拓寬工程終點匯入平面中山高速公路拓寬需求，原有校前路跨越橋必須配合拆除改建為單跨60m之新橋。為形塑楊梅地區及五楊高架入口門戶意象，新橋橋型採國內首座中央單弦鋼管桁架鋼拱橋，施工法考量維持既有交通，並降低衝突干擾，採先建後拆方式於南側先行施作鋼拱橋，再將舊橋拆除後以頂昇橫移工法將鋼拱橋移至定位，以最短時間恢復交通。

中央單弦式鋼管桁架拱橋主要藉由鋼管桁架拱以吊索懸吊中央主鋼箱梁構成全橋結構承載骨幹，在拱體穩定及組成構材強度足夠條件下，整體系統仍類同於簡支梁，托承於上構兩端支承處，即可進行全橋頂昇橫移，為此工法應用於特殊型式橋梁之首例。先前本公司辦理中山高員林至高雄段拓寬工程，即首次將頂昇橫移工法引入國內，應用於該工程多座主線PCI橋及橫交跨越鋼橋，達成最少中斷交通之效益，本工程即參據此成功經驗[1]、[2]，應用於校前路跨越橋改建工程。



圖1 楊梅校前路跨越橋位置示意圖



圖2 原有校前路跨越橋平面區位圖



圖3 校前路跨越橋拓寬改建鋼拱橋示意圖

2. 工程規劃構想

2.1 整體規劃考量

校前路鋼拱跨越橋之規劃構想概要說明如下：

- (1) 橋址位於五楊高架終點，進出楊梅台地，基於形塑入口門戶意象，橋型設計應考量景觀意涵。
- (2) 橋梁整體景觀考量應兼顧地方民眾及主線用路人之視覺觀點。
- (3) 配合五楊高架拓寬工程終點匯入平面後中山高雙向拓寬需求，避免主線上設置橋墩柱，應以單一跨徑配置。並因應未來增設上、下匝道需求，預留拓寬可行性及載重容量。
- (4) 避免原有跨越橋拆除改建長期中斷交通，並考量節省臨時便橋施作費用，採新橋先建作為舊橋拆除階段改道使用，待舊橋拆除且新橋橋台完成後，以頂昇橫移工法將新鋼拱橋移至校前路橋位中心。

2.2 橋型配置概述

校前路鋼拱跨越橋跨徑60公尺配置雙向四車道，其中外車道寬5.0公尺，內車道寬3.5公尺，中央分隔帶2.5公尺供佈設鋼拱吊索，內、外側護欄各0.5公尺，並於兩

外側設置1.5公尺寬人行道，橋梁全寬24.5公尺。

上部結構共佈設5支縱向主梁，包括第一階段改道通車階段中間3支鋼箱梁，移橋後再配合未來增設上、下匝道拓寬需求，於拱橋兩外側再設置各2支I形鋼板梁，大梁深1.5公尺，每隔約4.5公尺以鋼箱形橫梁串連。中央單弦鋼管桁架拱拱高12.5公尺，以3支直徑508mm鋼管為主構件，結合其他次要鋼管斜撐組成拱體，配置10支垂直吊索連結中央主鋼箱梁；下部結構為重力式橋台。橋梁立面圖如圖4所示，標準斷面型式如圖5所示。

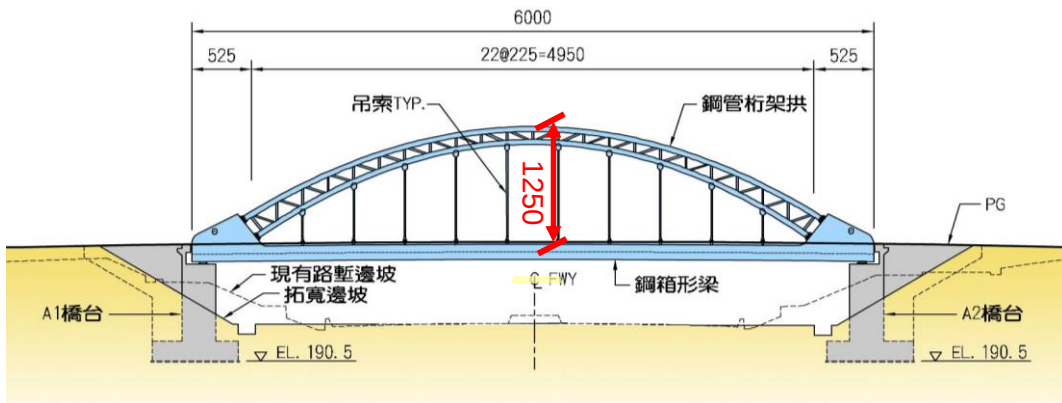


圖4 橋梁立面圖

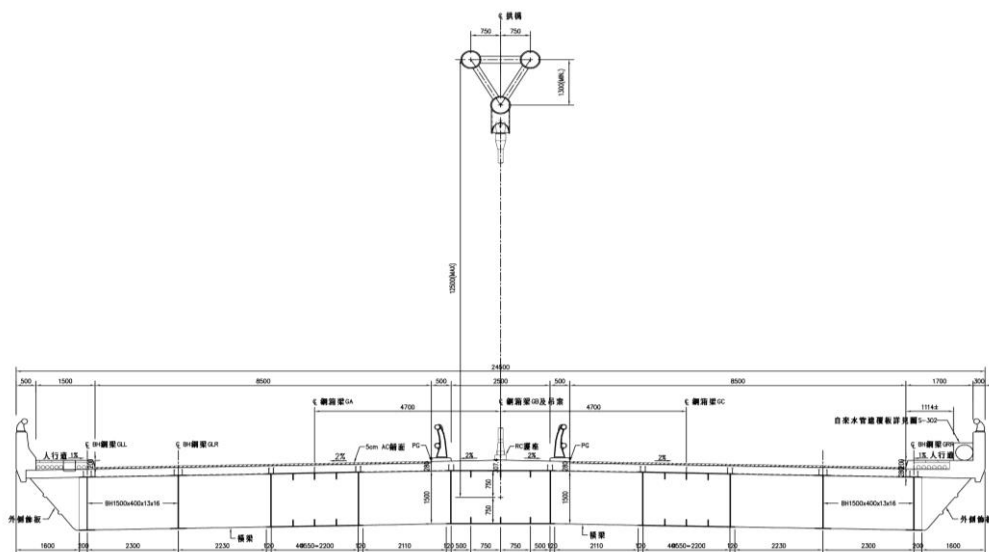


圖5 橋梁標準斷面圖

3. 橋梁結構分析設計

3.1 結構系統特性

下路式連結拱(Tied Arch)橋梁型式乃藉由拱體承受壓力，連結梁承受拉力以平衡外力作用，具備有高結構效率，楊梅校前路鋼拱跨越橋即為此橋型。惟基於整體造型考量，配置中央單弦式鋼管桁架拱，藉由鋼管桁架拱以吊索懸吊中央主鋼梁構成全橋勁度骨幹。橋面結構5支縱向主梁可承擔拉力，中央桁架拱以3支鋼管形成3角形桁架承受拱壓力，惟鋼管拱材斷面積較主梁小許多，鋼管因而承受更大壓應力，且單弦式桁架拱缺少有效之側向支撐，故使鋼管桁架具有足夠之斷面強度與挫屈穩定性係本橋設計關鍵重點。

校前路鋼拱跨越橋使用SAP 2000進行結構分析，建立之立體模型如圖6所示。

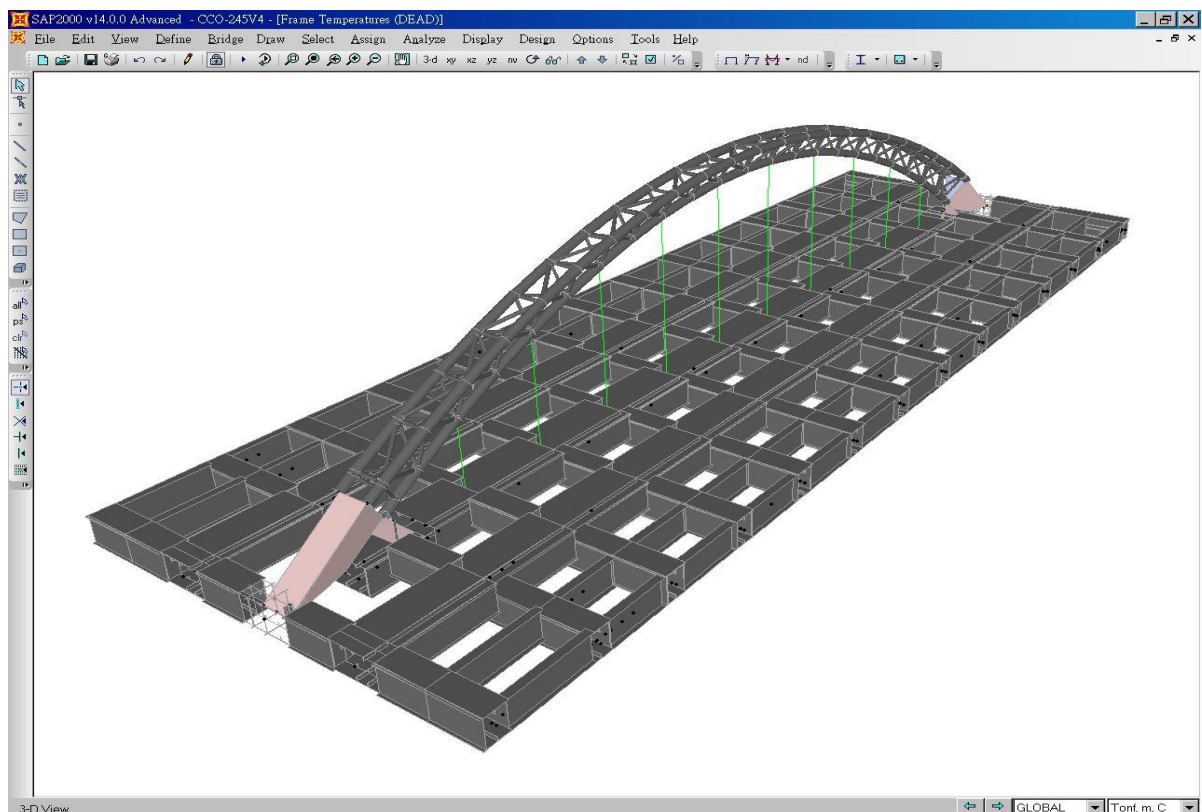


圖6 橋梁立體結構模擬圖

3.2 吊索型式及設計

本橋吊索最大標稱長度約11.1m，屬短索，依需要長度在工廠完成整索成品製作，包含吊耳、端錨、鋼絞線防蝕被覆及高密度聚乙烯(HDPE)外護套等，運至現場直接安裝即可，施力端錨處以螺牙及螺母型式配合千斤頂進行施拉或放鬆調整作業。本橋吊索最大設計載重包含初始預力約150tf，使用19t-15.2mm ϕ 之鋼絞索，破斷強度至少500tf，安全係數>3。吊索系統亦依PTI規範規定，通過200萬次反覆載重之疲勞及極限應力試驗。

吊索主要將橋面載重傳遞至鋼管桁架拱，上端以眼桿(Eye Bar)穿樞軸(Pin)吊掛於拱下層主鋼管，下端延伸入主箱梁內錨碇，可於吊索底部錨碇端施加預力，藉以調整結構桿件內力分佈，為減少階段性調整吊索預力進入箱梁內之作業之不便，於鋼管桁架拱及橋面鋼梁架設完成初始狀態即一次導入吊索設計預力，使鋼梁及組成桁架拱之鋼管應力在施工架設至完工通車後皆能承受所有設計載重。

3.3 鋼拱橋結構設計

本橋結構系統特性鋼構材除承受雙向彎矩外，尚有軸向力，其斷面應力分析應組合三向應力作檢核，鋼管桁架拱為主要承受軸壓力構材，除檢核其斷面強度外，並須檢核其挫屈穩定性。

3.3.1 鋼箱梁應力檢核

依據「公路橋梁設計規範」表9.8結構鋼材之容許設計應力，使用ASTM A709 Gr.50 鋼材，降伏強度 $F_y = 3500 \text{ kgf/cm}^2$

容許之軸向拉應力 $F_a = 0.55F_y = 1925 \text{ kgf/cm}^2$

容許鋼梁之軸向壓應力 $F_a = 0.472F_y = 1652 \text{ kgf/cm}^2$

(1) 三向合應力檢核：

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1$$

其中 F_{bx} = 容許之X軸彎曲應力

F_{by} = 容許之Y軸彎曲應力

f_{bx} = 計得之X軸彎曲應力

f_{by} = 計得之Y軸彎曲應力

檢核結果，所有鋼梁三向合應力比值組合皆小於1，具備足夠結構強度。

(2) 剪應力檢核：

$$\text{垂直剪應力 } f_{vs} = \frac{V_2}{(2 \times t_w \times D_w)}$$

$$\text{扭轉剪應力 } f_{vt} = \frac{T}{(2 \times A_m \times t_w)}$$

$$\text{總剪應力 } f_v = f_{vs} + f_{vt} \leq F_v$$

其中 V_2 = 箱梁垂直應力

T = 箱梁扭矩

F_v = 容許剪應力

t_w = 箱梁腹板厚度

D_w = 箱梁腹板深度

A_m = 箱梁包圍面積

檢核結果，所有鋼梁總剪應力檢核皆小於容許剪應力，滿足規範要求。

3.3.2 桁架拱鋼管斷面應力檢核

鋼管桁架立體組合如圖7，鋼管尺寸如表1所示

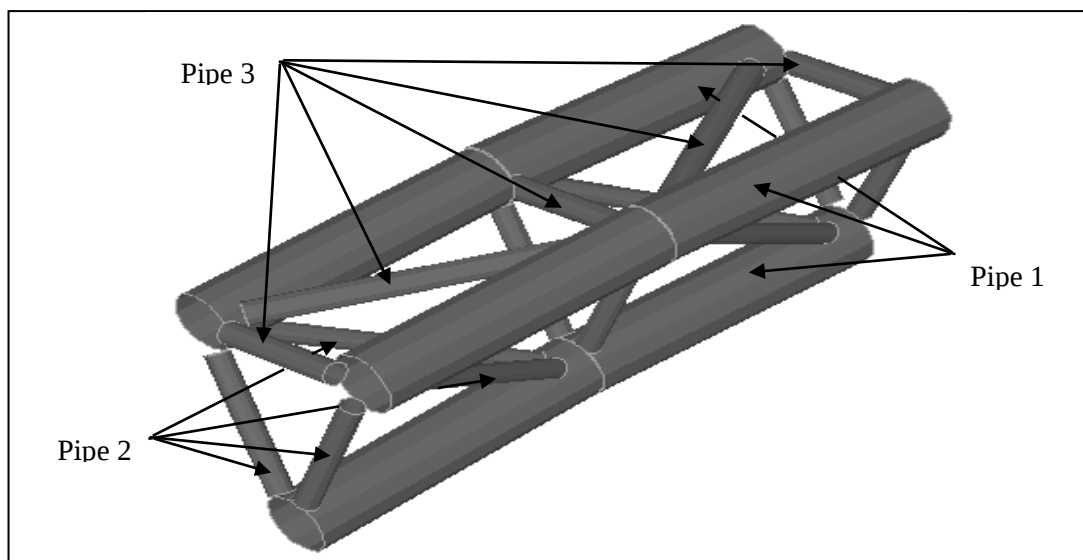


圖7 鋼管桁架拱立體組合圖

表1 鋼管尺寸表

鋼管	主鋼管PIPE 1	PIPE 2	PIPE 3
外徑 (mm)	508	165.2	190.7
板厚 (mm)	25	7.1	8.2

依據日本道路橋示方書，使用STK 500鋼管，降伏強度 $F_y = 3600 \text{ kgf/cm}^2$ ，所有鋼管細長比 $KL/r < C_c = 107$

$$\text{鋼管容許軸向壓應力 } F_a = \frac{F_y}{2.12} \left[1 - \frac{(KL/r)^2 F_y}{4\pi^2 E} \right]$$

$$\text{鋼管容許軸向拉應力 } F_a = 1900 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{鋼管容許彎曲應力 } F_a = 1900 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{鋼管容許剪應力 } F_v = 600 \text{ kgf/cm}^2$$

鋼管三向合應力檢核公式

$$\left(\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m f_b}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_e}\right) F_b}\right) + \left(\frac{f_v}{F_v}\right)^2 \leq 1$$

其中 f_a = 鋼管計得之軸向應力

f_b = 鋼管計得之最外纖維彎曲合應力

f_v = 鋼管計得合剪應力

$$F'_e = \frac{\pi^2 E}{2.12(KL/r)^2}$$

$$C_m = 0.85$$

檢核結果，所有鋼管三向合應力比值組合皆小於1，具備足夠強度。

3.3.3 桁架拱面內挫屈檢核

桁架拱面內挫屈變形受吊索束制，有效長度取為吊索間拱肋長度，最大

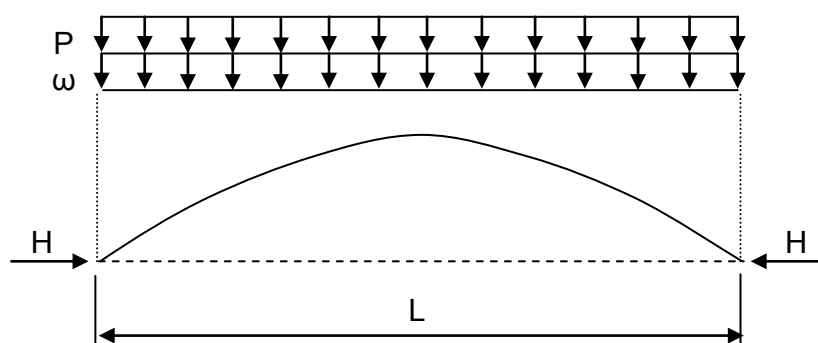
$KL=519\text{cm}$ ，檢核最大合應力比值：

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m f_b}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_e}\right) F_b} < 1.0 \quad \text{OK}$$

本橋滿足規範，不致產生桁架拱面內挫屈。

3.3.4 桁架拱面外挫屈檢核

依據日本道路橋示方書鋼橋篇



$$(1) \text{ 檢核 } \frac{H}{A_g} \leq 0.85\sigma_{ca} = \sigma_{cr}/2 \quad (\text{取面外挫屈安全係數} v=2.0)$$

其中P：作用於主構造之靜重負荷

ω ：作用於主構造之均佈負荷

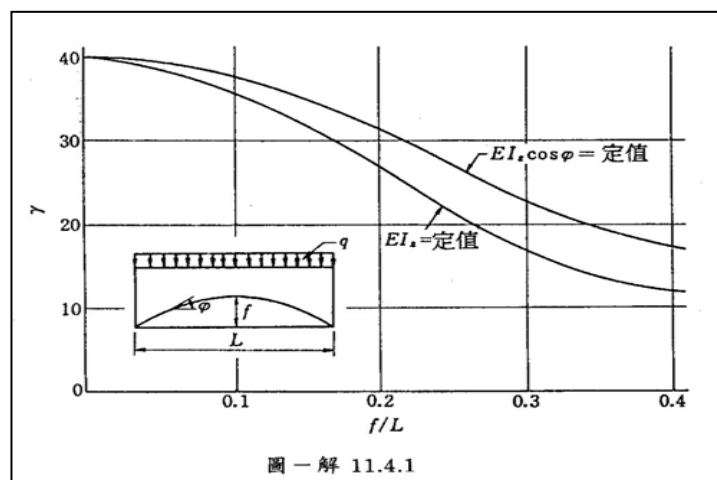
$\sigma_{ca} = \sigma_{cr}/1.7$ ：拱肋組材的L/4點之容許軸方向壓縮應力(tf/m²)

$\sigma_{cr} = 0.763f_y = 2746.8 \text{ kgf/cm}^2$ ：依據示方書計算所得本橋桁架拱之挫屈應力

經斷面應力檢核本橋亦不致產生桁架拱面外挫屈。

(2) 檢核面外挫屈之極限水平力 H_{cr}

$$H_{cr} = \gamma \frac{EI_z}{L^2}$$



其中 γ ：面外挫屈之挫屈係數

$I_z = 0.046 \text{ m}^2$ 桁架拱斷面之慣性矩(1/4處斷面)

$f = 12.5 \text{ m}$ (拱高)， $L = 60 \text{ m}$ (跨徑)

$$\frac{f}{L} = \frac{12.5}{60} \approx 0.2 \rightarrow \gamma \approx 27 \text{ (圖-解11.4.1)}$$

經檢核承載穩定性本橋亦無產生桁架拱面外挫屈。

4. 橋梁施工規劃與頂昇橫移工法

4.1 施工規劃

校前路跨越橋拆除改建為降低施工交通衝擊，遂採用先建後拆方式，首先於舊橋南側新建寬13.9公尺永久性跨越橋上部主要結構，可供舊橋拆除前作臨時交通改道使用，俟一併拆除舊橋並完成新建之橋台後，再採用頂昇橫移工法將新建跨越橋上部主要結構北移至新建橋台之原校前路跨越中心軸線定位，恢復臨時中斷之交通，後續第二次施工於新建跨越橋兩側予以拓寬至24.5公尺，同時遷移自來水管至跨越橋南側人行道。校前路跨越橋改建作業流程如圖8所示，實景俯瞰施工步驟模擬示意如圖9所示。

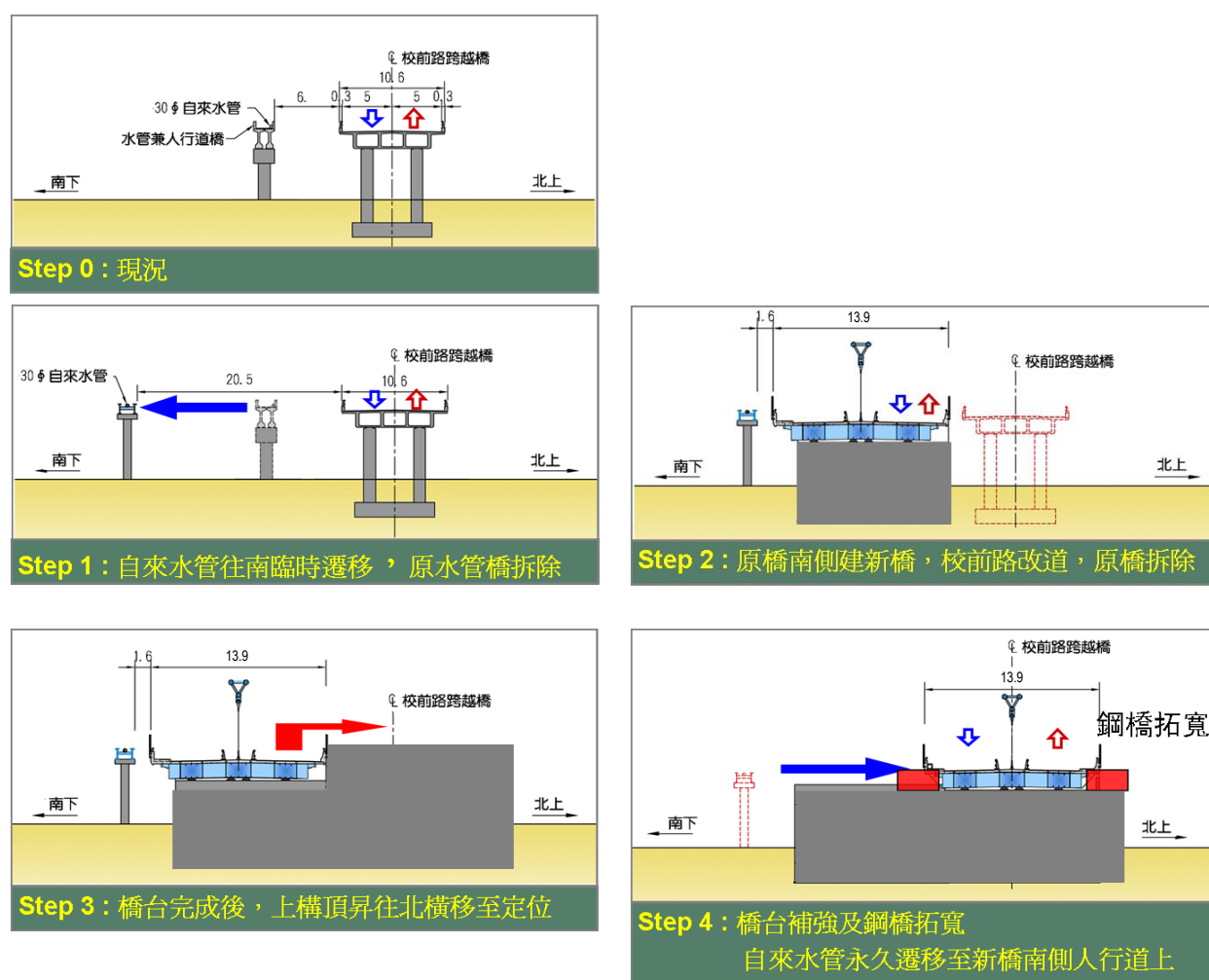


圖8 校前路跨越橋拓寬改建作業流程示意圖

Step 1：臨遷水管橋、拆舊水管橋



Step 2：南側建新橋，交通改道



Step 3：拆除舊橋、建新橋台



Step 4：頂昇橫移回原址，恢復交通



圖9 校前路跨越橋拓寬改建步驟實景俯瞰模擬示意圖

4.2 橋梁頂昇橫移工法

4.2.1 頂昇橫移施工步驟

頂昇橫移工法施工流程概分為頂昇作業→橫移作業→下降作業，如圖10。

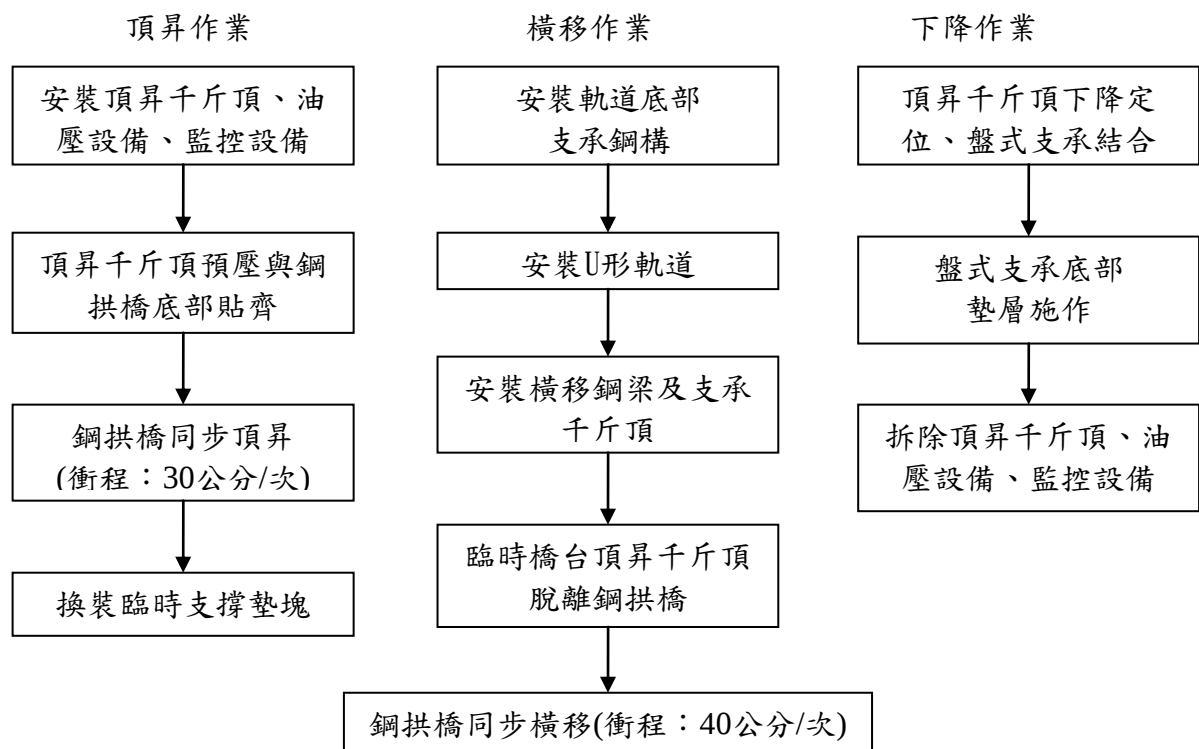


圖10 頂昇橫移施工流程圖[3]

4.2.2 施工設備

頂昇橫移施工主要設備有頂昇監控及油壓設備、千斤頂、臨時支撐墊塊、PTFE滑動板、U形軌道、橫移鋼梁等，詳見圖11。



圖11 頂昇橫移施工設備

4.2.3 作業階段安全機制

- (1) 在鋼橋頂昇及下降階段：利用橋台背牆作為反力端，於頂昇橫移U型軌道底部支撐墊塊與橋台背牆間填塞木板，抑制地震時可能發生的縱向錯

動導致之支撐墊塊傾倒，以作為縱向防震機制。

- (2) 在鋼橋橫移階段：橋台兩側之橫移機構設計，在U型軌道以上為整體構造(橫移梁)，兩側的橫移機構各利用橫移千斤頂以一推一拉方式共同施力，在千斤頂橫移行程轉換時，每側橋台之橫移千斤頂應輪流更換固定點並至少保持一支橫移千斤頂固定，以防地震力或瞬間強風導致鋼拱橋自由滑動之可能。

- (3) 同步頂昇及同步橫移機制：

- (a) 本頂昇橫移工程使用IPC接收監測儀器之信號，進而控制液壓系統千斤頂之電磁閥作動，以達到同步之目的。
- (b) 各頂昇點承載重量雖有不同，但因使用獨立的位移感測器電磁閥及力值顯示裝置，控制上以行程控制為主，力值控制為輔的方式並加裝方向逆止裝置，高負載的壓力流無法回流到同橋台另一側低負載千斤頂內，故在同步頂昇控制上是安全的。

4.2.4 相對作動差異管理

- (1) 鋼橋頂昇及降下階段，經施工階段結構檢核計算之假設分析結論，其各作動支點之垂直相對高差於1公分時，對鋼橋結構之整體影響仍為安全，就本案採用之控制系統，於施工過程中操作可達控制各點相對垂直高差於0.5公分內，故其頂昇或下降階段，均可確保鋼拱橋結構行為之安全。
- (2) 鋼橋橫移階段是以橫移千斤頂拉進橫移梁於U型軌道內，其橫移方向已被限制於U型軌道排列方向，而U型軌道之佈設可透過測量時掌控精度(A1與A2橋台方向須為平行)，可有效控制鋼橋橫移過程方向之精度。



鋼拱橋假組立



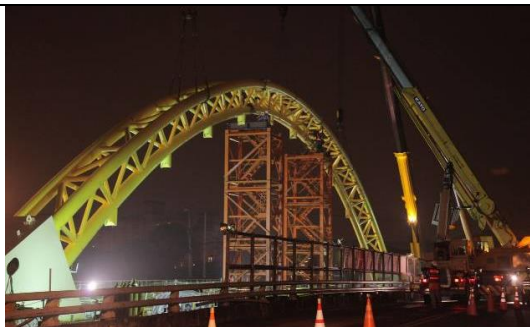
油漆塗裝



60M特殊運梁車



鋼箱梁吊裝



鋼管桁架吊裝



吊索檢驗



吊索安裝



新建跨越橋臨時交通改道



舊跨越橋拆除



新建跨越橋頂昇橫移

圖11 施工紀錄照片

5. 結論

- (1) 本工程校前路跨越橋為國內首座下路式單弦式鋼管桁架鋼拱橋，其結構系統及特殊造型具備橋型創新之指標性意義，優美的鋼拱外型綴以明亮之黃色油漆塗裝，已然成為楊梅地區之新地標，更代表五楊高架入口門戶意象，展現工程建設與地方發展相輔相成之非凡意義。
- (2) 楊梅校前路跨越橋改建採先建後拆方式，鋼管桁架鋼拱橋以頂昇橫移工法施工，有效降低施工對校前路及中山高速公路之交通衝擊，為此工法應用於特殊型式橋梁之首例，施工方式可做為跨越國道等重要道路橋梁改建甚佳優選方案，施工經驗亦可做為日後同型橋梁施工之參考。
- (3) 校前路跨越橋改建屬「國道1號五股至楊梅段拓寬工程計畫第C910標中壢楊梅段北上線工程」範圍，由林同棧工程顧問股份有限公司辦理設計及監造工作，大陸工程股份有限公司承攬施工，藉由縝密完善的規劃設計及有效的施工品質與進度管控，如期如質達成交通改善目標，除為地方及五楊形塑入口門戶意象，並有效降低施工交通衝擊外，亦成功將新橋型與新工法結合應用，具體提昇台灣橋梁工程技術水準，並為橋梁頂昇橫移工法邁出一新里程碑。

6. 誌謝

本工程設計及施工等階段，承蒙業主交通部國道新建工程局及第一區工程處、中壢工務所等各級長官與工作伙伴指導，以及國道高速公路局、桃園縣政府、楊梅市公所等各單位在施工交維等方面的協調與協助，使本工程得以順利圓滿完成，特此誌謝。

7. 參考文獻

- [1] 交通部臺灣區國道高速公路局拓建工程處96年度年報，“橋梁上構橫移工法報告”，臺灣，2007，pp.336-363
- [2] 林同棧工程顧問股份有限公司，“中山高員林至高雄段拓寬工程八掌、急水、曾文溪河川橋改建工程”及“中山高速公路員林至高雄段拓寬工程大林~新營段拓寬工程”，臺灣，1998
- [3] 大陸工程股份有限公司“校前路鋼拱橋頂昇橫移施工計畫書”，台灣，中壢，2011
- [4] 王如鈺、王雲程 in：“鋼橋文化叢書2- 橋梁吊索講義”，憬藝企業出版，1996
- [5] 王如鈺、王雲程 in：“鋼橋文化叢書4- 拱橋”，憬藝企業出版，1996
- [6] 社團法人日本道路協會 in：“道路橋示方書（II鋼橋篇）”，日本，平成2年
- [7] 交通部 in：“公路橋梁設計規範”，台灣，2009