



國道4號 豐原潭子段橋梁

通過三義活動斷層之國際首例

陳國隆／交通部高速公路局 副局長

羅財怡／交通部高速公路局 簡任正工程司

郭呈彰／交通部高速公路局第二新建工程處 處長

張瑜超／交通部高速公路局第二新建工程處第四工務所 主任

曹永德／中興工程顧問股份有限公司三鶯捷運工程處 副經理

林素芳／中興工程顧問股份有限公司結構工程部 工程師一

黃能偉／中興工程顧問股份有限公司大地工程部 地質師一

國道4號臺中環線豐原潭子段第C714標潭子高架橋(1)有2個橋梁單元通過三義活動斷層，分別為橋台A1～橋墩P3單元通過支斷層(跨徑配置為 $66+103+73=242$ 公尺)，橋墩P3～橋墩P7單元通過主斷層($82+140+106+68=396$ 公尺)。而三義斷層被歸類為第一類活動斷層，且本路線與該斷層約略正交，在此區域之斷層帶寬度約300公尺，也由於路線通過三義斷層路段之路面與地表之高程差較大，若採路堤型式填築所需用地範圍較大，將造成龐大之拆遷規模，為降低對沿線居民之影響，選擇以橋梁型式通過三義斷層應是最佳方案。在沒有國際前例可循的情況下，本計畫透過詳細地質調查與危害度分析，採用大跨徑鋼床板箱形連續梁及混凝土雙柱橋墩之橋梁型式，設計可克服斷層活動可能產生1.1公尺錯動量之影響，並完全跨越斷層帶且無損橋梁之交通功能，故本文僅簡要說明設計概念，作為後續工程推廣應用之參考。

前言

1999年9月21日南投縣集集鎮發生芮氏規模7.3之地震，此地震為車籠埔斷層錯動所造成，台灣中部橋梁大量的落橋及損毀，大地震的破壞力帶給我們無法想像的體驗。震後有大量的勘災、重建等工作，也帶動產、官、學界多次的研討會，研擬未來橋梁規範與設計的改進作法，大致簡略為(1)道路路線盡量避開斷層線，(2)避無可避的情形下，路線避免平行斷層線，必要時相交於一點，可減低災害的程度，(3)路線相交於斷層線時，盡量以路堤或路塹的方式通過，受災可以快速復原，(4)橋梁以簡支梁(Simply supported beam)型式相交且跨越斷層線，可減低災害的範圍並容易復原。可見震後初期多以減低災害的觀點，採用穩健保守的思考方式，進行工程的規劃與設計。

前交通部臺灣區國道新建工程局(以下簡稱「前國工局」，已於民國107年2月12日併入高速公路局)參據「國道4號臺中環線豐原潭子段綜合規劃」之成果辦理後續工程設計暨配合工作，並成立「國道4號臺中環線豐原潭子段工程設計暨配合工作」(以下簡稱本計畫)，並於民國103年12月委託中興工程顧問股份有限公司辦理本項服務工作。

車籠埔斷層自北而南大致沿臺中盆地東側丘陵區之山腳處，縱貫本計畫區，發生於1999年之921集集大地震即是車籠埔斷層活動所引起，故被歸類為第一類活動斷層。該次地震產生之地表破裂長達約92公里，於計畫區域內造成垂直位移量約4~5公尺，局部地區伴隨有水平位移量約2.5~5公尺。

三義斷層線自北而南大致沿臺中盆地東緣之平原

區分布，約略平行車籠埔主斷層線且縱貫本計畫區，其大致於潭子交流道東北側約1公里處與計畫路線交會；三義斷層與車籠埔斷層皆為逆衝斷層，亦被歸類為第一類活動斷層。

本計畫在豐原區平原路段以路堤通過車籠埔斷層地表裂跡（第一次），豐原區丘陵路段以路堤 / 路塹通過車籠埔斷層地表裂跡（第二次），潭子區平原路段以橋梁型式通過三義斷層，符合(1)路線盡量避開斷層線，(2)避無可避的情形下，路線與斷層線相交於一點，(3)路線相交於斷層線時，盡量以路堤或路塹的方式通過；然而，路線通過三義斷層路段，因路面與地表之高差約40餘公尺，路堤填築會造成鄰近鎌村社區龐大之拆遷量，僅能選擇以橋梁型式通過三義斷層，經評估位移量比車籠埔斷層小，但也是本計畫橋梁設計的最大考驗。

區域與路線之地質構造概況^[1,2]

本計畫路廊於台中市豐原區鎌村里南側已廢棄之新田營區靶場一帶，三義斷層南段以南北向通過部分計畫路廊，兩者相對位置如圖1所示，其約略平行於車籠埔主斷層線西側且縱貫本計畫區，與計畫路線以大角度相交於潭子交流道東側。而三義斷層可分為南、北兩段，北段略呈東西走向，由苗栗縣大湖鄉大窩，向西延伸經雙連潭、重河至三義，長約8公里；南段呈南北走向，由三義向南延伸經鯉魚口、中城至大甲溪，並繼續沿臺中盆地東緣之平原區往南延伸至豐原、潭子地區，長約25公里。由既有地質文獻資料顯示，大甲溪與新山線鐵路交會處西方約300公尺有明顯三義斷層露頭^[3]，上盤桂竹林層有相當發達的層間滑動及小型褶皺，並發育有數條分支斷層逆衝至河階礫石層上，而礫石層中亦發育有另一條分支斷層錯移一低位河階面及一層灰黑色土壤層，故研判三義斷層在全新世可能活動過，因而被歸類為第一類活動斷層。經濟部中央地質調查所於民國104年公告三義斷層之活動斷層地質敏感區範圍。

在本計畫中，針對三義斷層南段完成8孔地質鑽探調查、1條電阻影像剖面探查、以及1處槽溝開挖調查工作，相關位置與相關地質鑽孔資訊分別詳見圖2、表1。依據地質調查與鑽探資料成果顯示，由岩心所觀察到之劇烈剪裂位置配合地表露頭，研判本區域礫石層受到

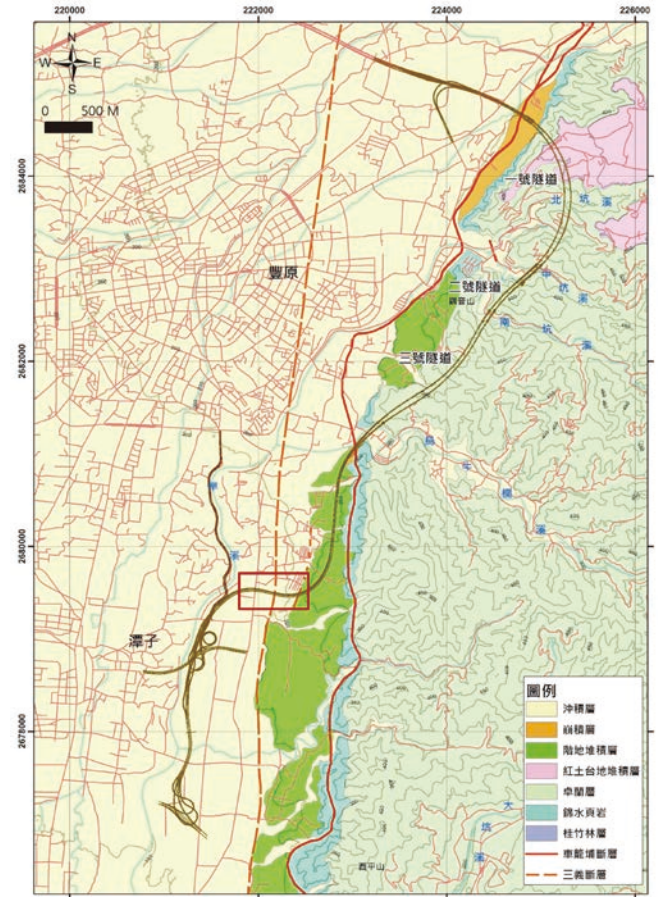


圖1 計畫路線與三義斷層相對位置圖

兩條向西逆衝之斷層所截切，造成岩盤逆衝並覆蓋至礫石層之上。位於西側之斷層應即為三義斷層主斷層，斷層面於近地表處向東傾斜約60度，上盤的桂竹林層往西逆衝至巨厚卵礫石層之上，斷層面被厚數十公尺之卵礫石層所覆蓋，故在地表未見有明顯之斷層通過證據，斷層面之地表投影位置與計畫路線近乎正交於里程25K+400左右（圖3）。在三義斷層主斷層東側約300公尺處另有一條支斷層，與主斷層屬性近似，同樣為大致呈南北走向，斷層面向東傾斜約40度之逆斷層，上盤的桂竹林層往西逆衝至巨厚卵礫石層之上，斷層面局部在地表出露，與計畫路線大角度相交於里程25K+140左右。

由於三義斷層南段可能通過鑽孔PH-26及鑽孔PH-27之間，故辦理1處槽溝開挖調查，槽溝形貌為地表下四階式開挖，其長度約40公尺，寬度約15公尺，四階總深度約8公尺，槽溝開挖作業相關影像參見圖4，槽溝北、南兩側牆面開挖之地質剖面圖與送往美國貝塔分析公司（Beta Analytic Inc.）之9組碳十四年代分析樣本位置圖分別詳圖5及圖6。藉由岩層截切或傾動與碳十四定年分析成果，可推估得三個古地

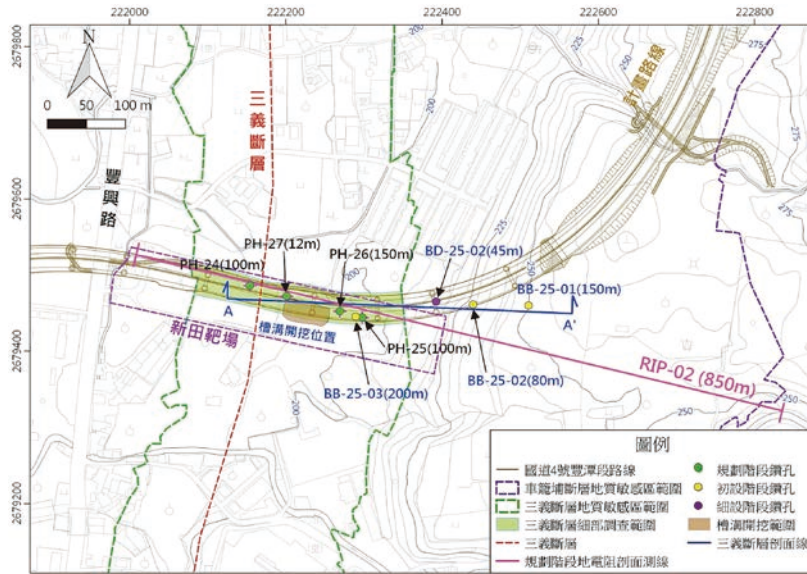


圖 2 三義斷層相關鑽孔及槽溝開挖位置圖

表 1 三義斷層與路線交會處相關地質鑽孔資訊表

鑽孔編號	鑽孔座標		鑽孔深度 (m)	鑽孔方向	取樣方式
	E	N			
DB-25-02	222393.187	2679464.669	45	垂直	HQ
BB-25-01	222510.715	2679460.832	200	垂直	HQ
BB-25-02	222439.756	2679461.309	80	垂直	HQ
BB-25-03	222293.982	2679444.669	150	垂直	HQ
PH-24	222153.930	2679486.140	100	垂直	HQ
PH-25	222297.620	2679444.180	100	垂直	HQ
PH-26	222269.060	2679452.550	150	70度斜孔向西	不取心
PH-27	222200.590	2679472.160	12	垂直	HQ

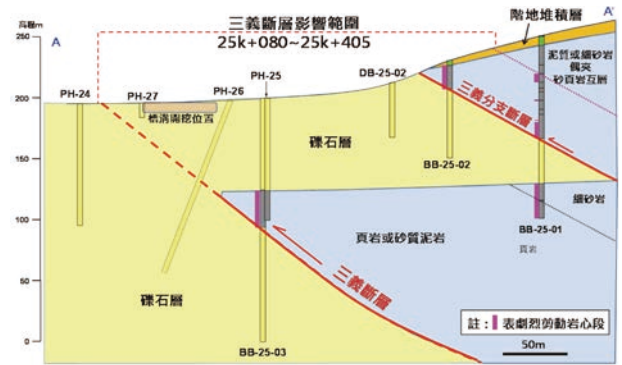


圖 3 三義斷層與路線交會處地質剖面圖(沿計畫路線)



槽溝開挖



槽溝清理作業



槽溝開挖完成全貌



LiDar 掃描測量

圖 4 槽溝開挖作業影像

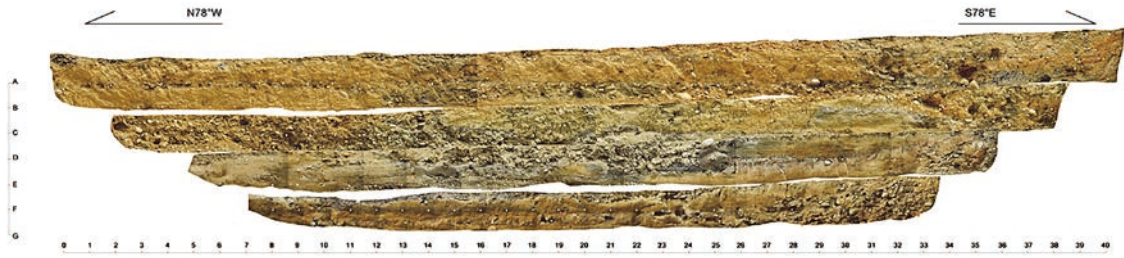


圖 5 槽溝北牆面地質剖面圖



圖 6 槽溝南牆面地質剖面圖

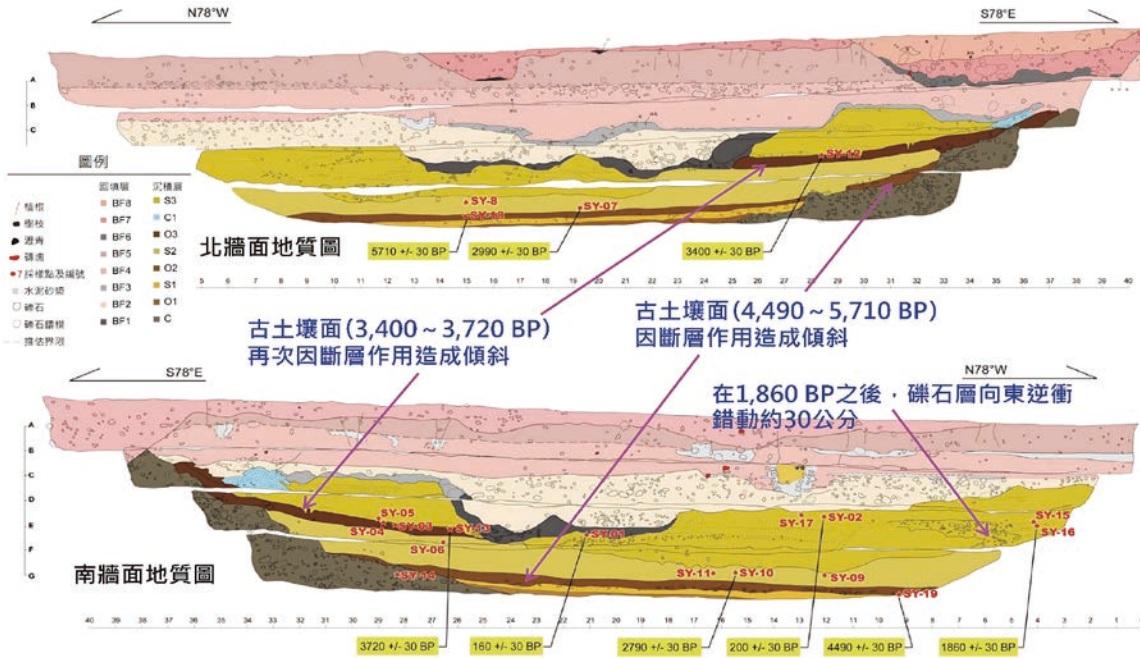


圖 7 槽溝中含碳物質破十四定年成果及地質事件解釋圖

震活動事件，其定年成果及地質事件解釋詳見圖 7。最早一次為 4,490 ~ 5,710 BP 之後，第二次事件在 3,400 ~ 3,720 BP 之後，第三次事件則在 1,860 BP 之後，前兩次造成沈積層的局部傾斜，第三次則造成一處礫石層被逆衝錯移約 30 公分。此外，配合受影響之沉積層定年資料，推算得斷層活動再現週期約為 1,620 年，然

實際之再現週期可能更小。以本槽溝剖面中分層之最大位移落差與可能活動年代估算，其垂直抬升速率約 0.78 公厘 / 年；依推估斷層面角度約 60 度推算，則沿斷層面之滑移速率約為 0.9 公厘 / 年，實際滑移速率可能更大。綜合槽溝及相關地質鑽孔資料，推算得三義斷層活動性相關參數如表 2 所示。

表 2 三義斷層活動性相關參數推估表

斷層名稱	斷層角度	斷層性質	最近可能發生年代 (BP)	垂直變動速率 (mm/yr)	長期滑移速率 (mm/yr)	再現周期 (年)
三義斷層	近地表處約為 60 度； 以下推估約 40 度。	逆衝	1,860BP 之後	0.78	0.9	小於 1,620 年

斷層位移危害度分析及設計位移量 [2]

位移危害度評估之目的為計算工址遭受斷層錯動可能引發之地表位移大小，評估方法可區分為機率式以及定值式。定值式分析為利用位移量與地震規模、斷層機制以及斷層距離等參數之迴歸公式，推估斷層發生設計地震時，工址之位移量大小；機率式分析除了計算位移量外，並配合歷史地震之統計資料，將地震發生機率與位移量進行連結，提供位移量之發生機率。而本計畫採用地震法機率式斷層位移危害度分析及定值式位移分析法進行比較分析。

經活動斷層調查所得參數進行危害度分析，三義斷層之機率式位移危害度曲線如圖 8 所示，依耐震設計規範之地震水準，表 3 列出設計地震（回歸期 475 年，年平均發生次數 0.0021）與最大考量地震（回歸期 2500 年，年平均發生次數 0.0004）之斷層位移量。三義斷層於設計地震情況下可能遭受之地表位移量遠小於 1 公分，於最大考量地震情況下可能遭受之地表位移量約 1 公分。

表 3 三義斷層設計地震與最大考量地震位移量

斷層	地震水準	
	設計地震	最大考量地震
三義斷層	<< 1 cm	約 1 cm

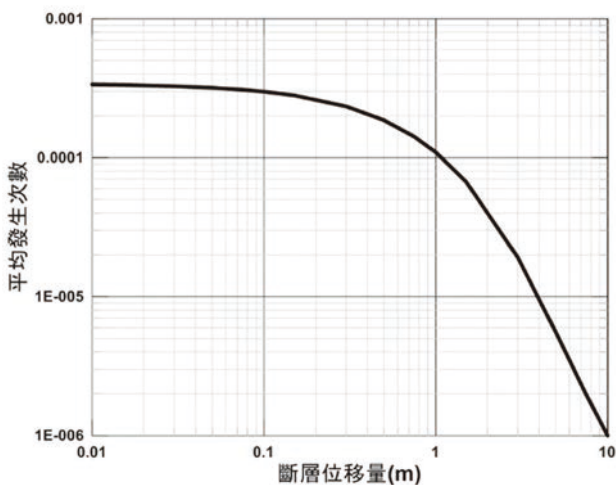


圖 8 三義斷層之機率式位移危害度曲線

而定值式分析結果彙整如表 4 所示，三義斷層採用之地震規模，採用特徵地震規模 6.85 及 6.95，計算所得位移量介於 0.79 公尺至 1.08 公尺。

本計畫之斷層設計位移量，參照美國加州運輸部之斷層位移量取捨建議，採用機率式分析與定值式分析結果之較大值進行設計，故本計畫針對三義斷層之設計位移量建議採用 1.1 公尺。

表 4 三義斷層定值式位移量分析成果表

斷層	地震規模 Mw	位移預測公式	位移量 (m)	位移量範圍 (m)
三義斷層	6.85	Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.79	0.79 至 1.08
		Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.84	
		Wells and Coppersmith (1994)		
	6.95	Moss and Ross (2011)	1.01	
		Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.94	
		Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.99	
Wells and Coppersmith (1994)				
		Moss and Ross (2011)	1.08	

設計說明

結構概述

國道 4 號臺中環線豐原潭子段第 C714 標主線潭子高架橋 (1) 之第一橋梁單元為橋台 A1 ~ 橋墩 P3 通過支斷層，跨徑配置為 66 + 103 + 73 = 242 公尺，第二橋梁單元為橋墩 P3 至橋墩 P7 通過主斷層，跨徑配置為 82 + 140 + 106 + 68 = 396 公尺，東、西行線為雙向共構之鋼床板箱形梁，橋梁平面及立面如圖 9 及圖 10 所示；橋寬 27.72 ~ 34.35 公尺，梁深 2.6 ~ 6.5 公尺，上部結構剖面如圖 11 所示；下部結構為混凝土雙柱橋墩，柱高 5.85 ~ 41.0 公尺，橋墩平、立面如圖 12 所示；橋台型式為懸臂式橋台，基礎型式為井式基礎，該標工程於 2017 年 12 月開工，預計於 2022 年 11 月完工，橋梁現況如圖 13 所示。

連續梁橋具有結構穩定性較佳（靜不定度較高）的優點，可相對降低地震時落橋之機率，較能保障路人的安全。

因鋼材除具有優良之抗壓、抗張、材料强度高、韌性佳等能力，與混凝土橋比較具有質量輕之特點，可減少下構所受地震力造成之巨大彎矩及剪力。

梁柱接合採鉸接型式，在帽梁設置工作平臺及預留可調整橋面高程的機制，以備斷層錯動後的復原之用。

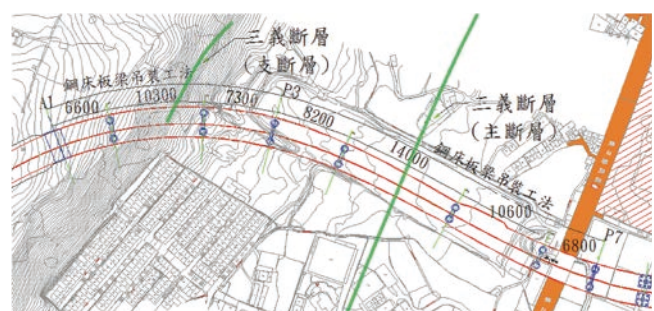


圖 9 潭子高架橋 (1) 橋台 A1 ~ 橋墩 P7 平面圖

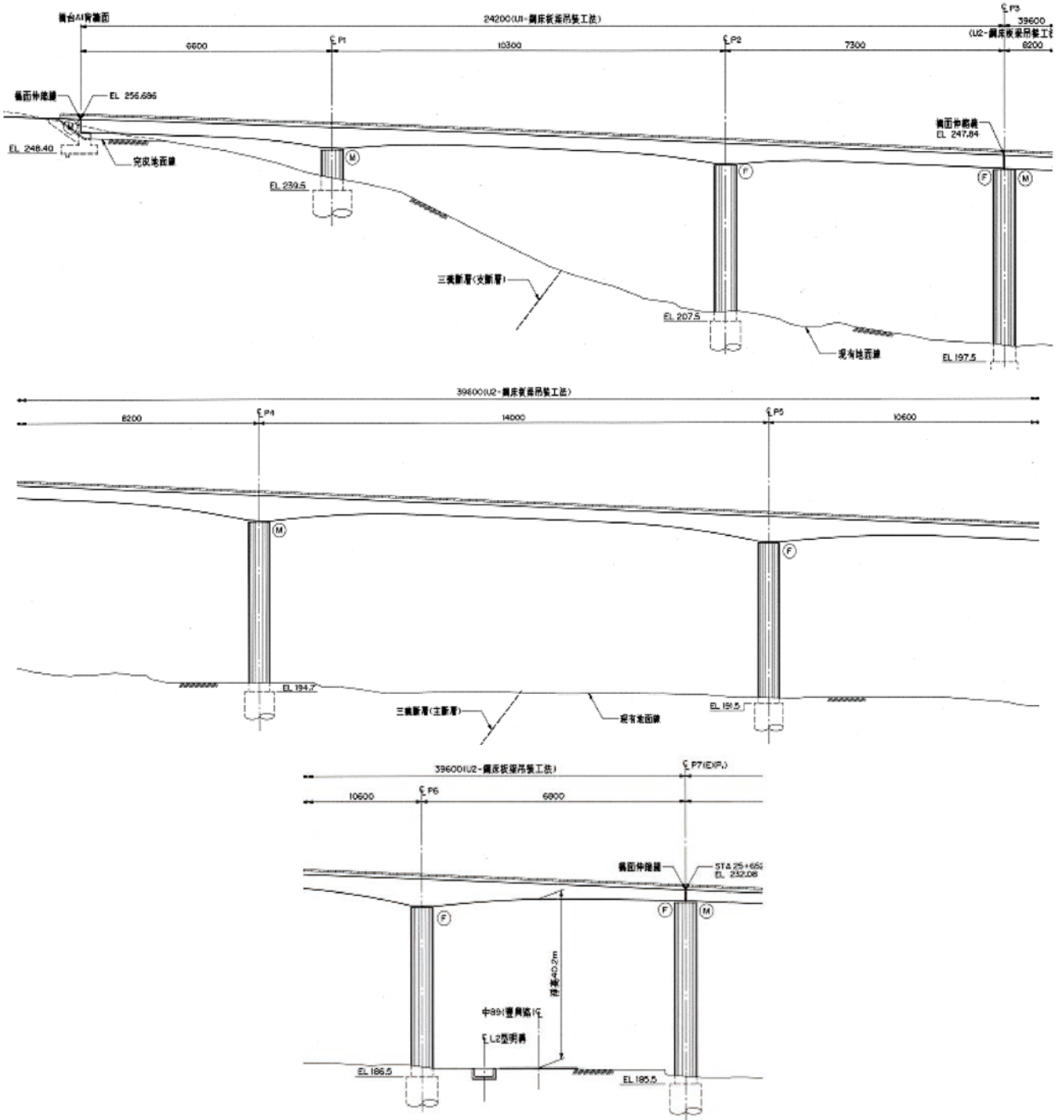


圖 10 潭子高架橋 (1) 橋台 A1~橋墩 P7 立面圖

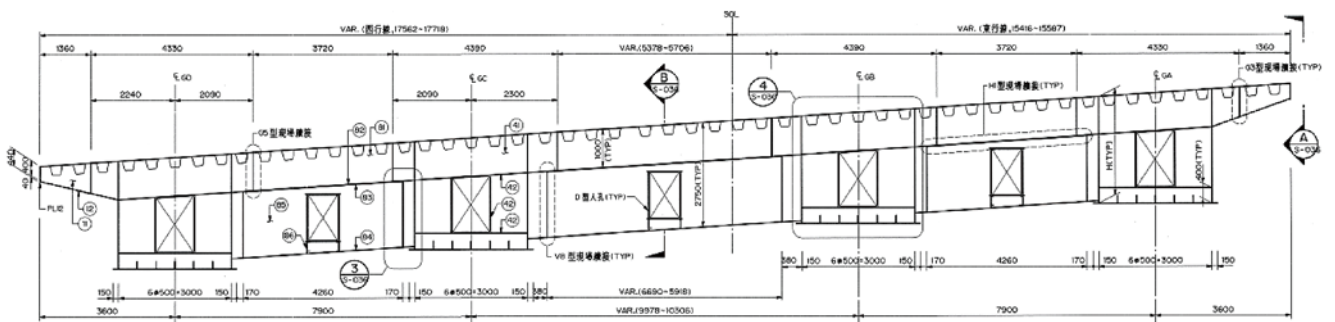


圖 11 潭子高架橋 (1) 上部結構剖面圖

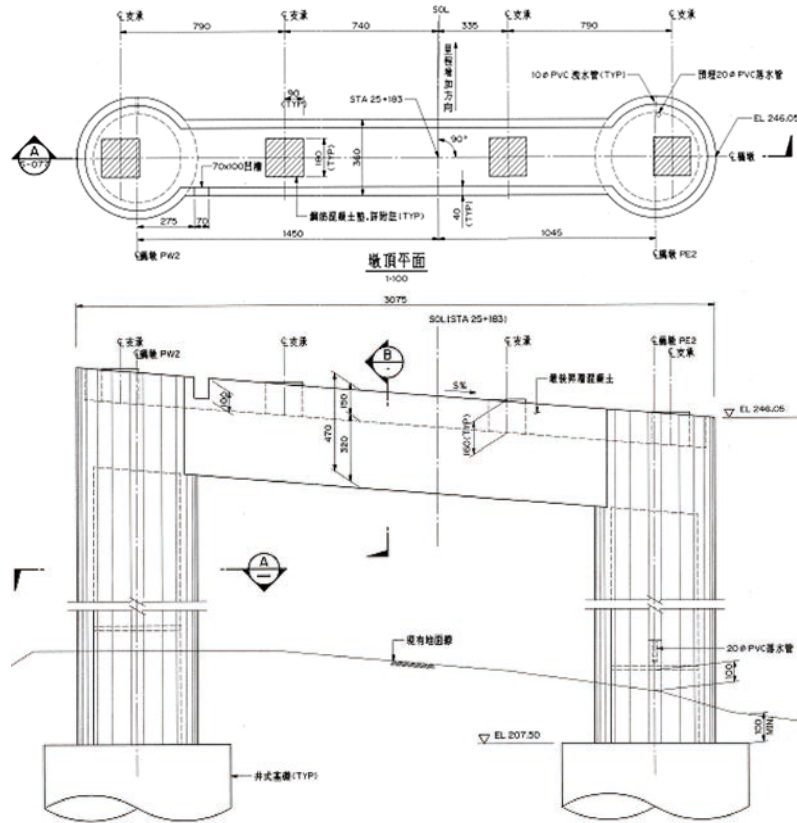


圖 12 潭子高架橋 (1) 橋墩平、立面圖



圖 13 潭子高架橋 (1) 橋台 A1~橋墩 P7 現況圖

在經濟性及施工安全性的考量下採用混凝土雙柱橋墩及帽梁，落墩位置以橋墩距離支斷層及主斷層較遠為原則，考量大跨徑配置以符合落墩位置的原則，故主跨徑 103 公尺跨越支斷層以確定 P1 與 P2 的墩位，主跨徑 140 公尺跨越主斷層以確定 P4 與 P5 的墩位，其餘邊跨配合主跨以經濟性為考量，大約為 0.6 ~ 0.7 倍主跨的長度，以確定 P3 的墩位。另以跨徑 106 公尺跨越此處的地質敏感區以確定 P6 的墩位，以跨徑 68 公尺跨越中 89 豐興路以確定 P7 的墩位。

克服斷層錯動說明

三義斷層為逆衝斷層，逆衝斷層的下盤沿著斷層面相對於上盤逆衝移動，設計的斷層錯動量為 1.1 公尺，係沿斷層面之位移量。斷層角度近地表處約為 60 度，其下推估約 40 度。以 60 度角及錯動量 1.1 公尺的水平位移為 0.55 公尺及垂直位移為 0.95 公尺，以 40 度角及錯動量 1.1 公尺的水平位移為 0.84 公尺及垂直位移為 0.71 公尺，因應結構分析程式的考量，採取最大水平位移為 0.84 公尺及垂直位移為 0.95 公尺，納入橋梁的設計。

以第二橋梁單元之橋墩 P3 至橋墩 P7 通過主斷層為例，橋墩 P3 至橋墩 P4 位於斷層的上盤，與上部結構接合為滑動支承 (Sliding or Roller Support)，橋墩 P5 至橋墩 P7 位於斷層的下盤，與上部結構接合為固定支承 (Fixed or Hinge Support)。當主斷層有 0.95 公尺垂直位移相當於相鄰橋墩 P4 及 P5 的滑動或固定支承皆有約 0.35 度的相對轉動，如圖 14 所示；當主斷層有 0.84 公尺水平位移相當於橋墩 P4 往橋墩 P5 的方向移動 0.84 公尺，但橋墩 P4 的滑動支承同時滑動了 0.84 公尺，上部結構完全未受到擠壓縮短的力量，如圖 15 所示。以上述的機制克服斷層錯動量 1.1 公尺的挑戰。

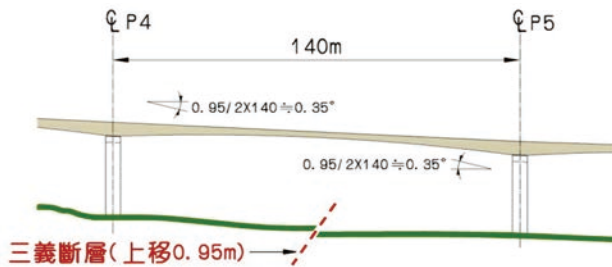


圖 14 斷層垂直位移量之橋梁構想圖

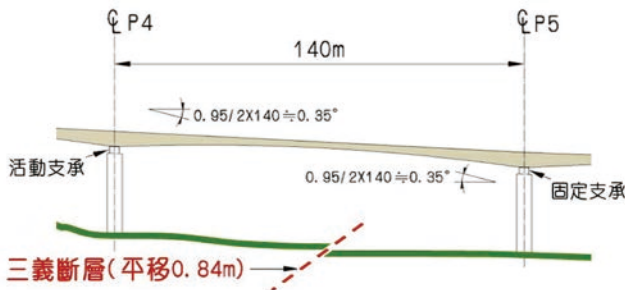


圖 15 斷層水平位移量之橋梁構想圖

橋梁設計之整體考量

1. 要求路線通過三義斷層盡量與斷層線垂直，以簡化位移量之考量，實際路線與主斷層線接近垂直，與支斷層線略有斜交角度，已是路線之最佳設計。
2. 橋梁以最大跨徑 140 公尺跨過主斷層，橋墩 P4 與橋墩 P5 盡量與主斷層線等距離；橋梁以最大跨徑 103 公尺跨過支斷層，橋墩 P1 與橋墩 P2 盡量與支斷層線等距離。考量橋墩距離斷層線越遠越好，維護橋墩的安全為首要考量。
3. 為維護橋墩的安全，採用量體及勁度最大的井式基礎為基礎型式。

4. 橋梁上部結構的 4 支鋼箱形梁皆以盤式支承抵抗地表振動的橫向地震力，規劃下部結構為混凝土雙柱橋墩，提供橋梁橫向較高的靜不定度及橋墩的剛度，橋墩為立體剛構架可形成力偶，提升橋梁橫向的耐震性。
5. 橋梁上部結構縱向規劃為多跨連續鋼箱形梁，提供橋梁較高之韌性，構想上部結構與下部結構連接適當的盤式支承型式，斷層上盤的橋墩及鋼箱形梁隨斷層錯動而動，斷層下盤的橋墩及鋼箱形梁皆不動，鋼箱形梁未受力而擠壓、挫屈 (Buckling) 或變形，橋梁能抵抗地表振動的縱向地震力及斷層錯動，不僅不會落橋及損毀，且能快速復原為高速公路要求 100 公里 / 小時的道路縱向線形，滿足安全的交通需求。
6. 雙柱混凝土橋墩頂部以帽梁連接，帽梁四周有女兒牆，考量橋梁復原之施工空間及安全；帽梁頂部有較高的鋼筋混凝土墊，以短柱受力為設計依據，可適當的增高或降低，可以較快速且安全的施工完成。

結論

國道 4 號豐原潭子段橋梁通過三義活動斷層之設計考驗，在細部設計投標期間遭遇種種難題，也沒有國際前例可循的情況下，中興工程顧問公司投入了大量的活動斷層調查與評估的工作，團隊合作並用盡腦力克服難題，當然也從中獲取不少的經驗；另一方面，也因為國內橋梁工程未曾有過此類的案例，高速公路局基於國內橋梁建設發展的理念，不吝將本工程之經驗分享各方專業單位及人員，也期望工程前輩及先進不吝指導。基於此信念，相信在可見的未來，受到高速公路局帶頭示範效應的影響，國內會有愈來愈多進步的橋梁設計，讓台灣的橋梁設計躍上國際工程舞台。

參考文獻

1. 「國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程設計暨配合工作」細部設計階段大地工程調查綜合評估報告 (2017)，交通部臺灣區國道新建工程局。
2. 吳富洵、鄒瑞卿、黃能偉、吳東錦 (2020)，公路工程活動斷層調查與評估案例介紹，大地技師，第 20 期。
3. 劉彥求、李奕亨 (2006)，三義斷層於大甲溪兩岸剖面與淺層震測結果比對分析，2006 年臺灣地區地球物理學術研討會摘要集，第 97 頁。