



蜀道 天路 雅西高速公路奇觀

王祥騷／台灣營建研究院營建知訊月刊大陸觀察專欄主筆

蜀道難於上青天 開路創新挑戰

筆者於今年五月隨中國土木水利工程學會參訪團前往四川成都參加該學會與四川省科學技術協會合辦的兩岸工程界交流活動，這次活動以高速公路的工程技術為主題，參訪的重點是剛在2012年通車的雅西高速公路。在參訪的過程中透過四川省交通運輸廳公路規劃勘察設計研究院（四川省公路院）的專題報告及陪同解說，我們發現這條在大陸被新聞界稱為「逆天工程」的高速公路確實經歷了許多技術挑戰，值得深入了解。首先這條公路通過成都平原與青藏高原之間的過渡地帶，兩個端點的高差雖然僅有1,000 m，但是其間的地形變化劇烈，既要穿越高山峻嶺，還要藉道河谷而行，為了解決縱坡過大的問題，只好在主線上增設了兩個螺旋路段以拉長路線。不過路線問題的解決也注定了需要興建更多的高橋梁及長隧道，而活躍的地殼運動及其所帶來的地質危害將技術挑戰提升到另一個層次，解決方案勢必突破傳統思維，因而引發了技術的創新。基於上述的認識，筆者在獲得四川省公路院庄衛林副院長協助提供資料之後寫就本文以饗讀者。

雅西高速公路小檔案

所屬高速路網	京昆高速公路（G5）
起點	四川省雅安市雨城區雅安南交流道
終點	四川省涼山彝族自治州冕寧縣瀘沽交流道
通車里程	240 km
車道數	雙向四車道，標準車道寬度 3.75 m
設計時速	80 km
行車速限	70 ~ 110 km，依路段而定
開工	2007年3月19日
通車	2012年4月28日
總投資	人民幣 206 億元

翻山越嶺上高原 挑戰路線規劃

在北方絲綢之路開通兩個世紀之前，一條跨越西南高原通往印度的南方絲綢之路就已經存在了。這條對外通商貿易的陸路通道以成都為起點，向南大致可歸納為中、西、東三條路線，其中的西線稱為靈關道經由現今的雅安、瀘沽、西昌通往大理就是雅西高速公路所使用的路廊，不過當時人馱馬拉對於通行條件的需求自然遠低於現今高速公路的標準。雅西高速公路也稱雅瀘高速公路是京昆高速公路（G5）的一個路段，通車里程240 km，行車時間約為4小時，其位置見圖1所示。京昆高速公路由北京經西安、成都至昆明，全程2,716 km，

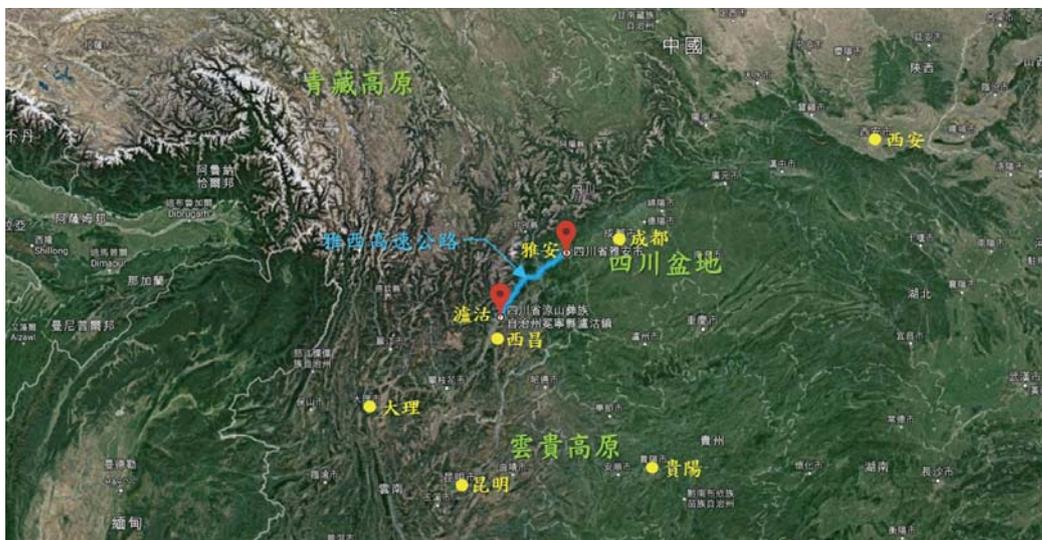


圖1 雅西高速公路位置圖

是以北京為中心向外輻射的七條國道高速公路之一。雅西高速公路建成之前，這個路段的交通是利用京昆國道（G108）通行，由於路線曲折，加上爬坡路段多，行車時間至少需要 8 小時，遇到冰雪雨霧等不良天候時行車安全更是堪虞。

雅西高速公路起點雅安市的標高約為 630 m，終點瀘沽鎮的標高約為 1,630 m，按全程 240 km 計算縱坡僅約 0.4%，但兩地之間並沒有貫通的廊道可供佈設一條平緩的路線，必須穿山越嶺或者跨水渡河。圖 2 所示是公路的縱坡線型，由北向南先要穿越峰頂標高 3,235 m 的泥巴山（大相嶺），然後下降至標高約 800 m 的大渡河河谷，接著再爬升穿越峰頂標高 2,860 m 的拖烏山，最後逐漸下降至終點，路線規劃最大的挑戰就是連續縱坡的問題。圖 2 列出三個連續縱坡路段的數據，規劃過程中為了將拖烏山北坡的縱坡控制在 3% 以內，必須將路線拉長，其策略就是在技術可行、成本合理及行車安全的前提下找到一條迂迴的路徑。經過三個方案比選之後決定採用雙螺旋方案，利用橋梁及雙孔隧道以半徑約 600 m 的螺旋型路線在干海子及鐵寨子兩處穿越或環繞山體，拉長約 8km 路線，擔負了約 220 m 的爬升任務，見圖 3 所示。為了維持安全的行車視距，隧道內車道的內路肩加寬 400 mm，外路肩加寬 200 mm。

三段連續縱坡是在安全、舒適及成本三項因素綜合考慮下的結果，過程中特就安全性及舒適性建立了一套路線線型良窳的量化評估系統，以運行車速、線

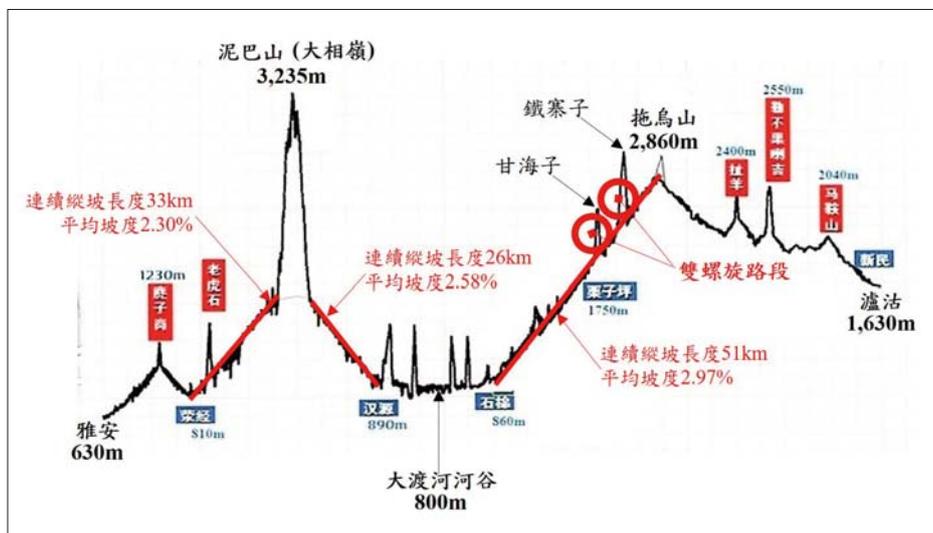
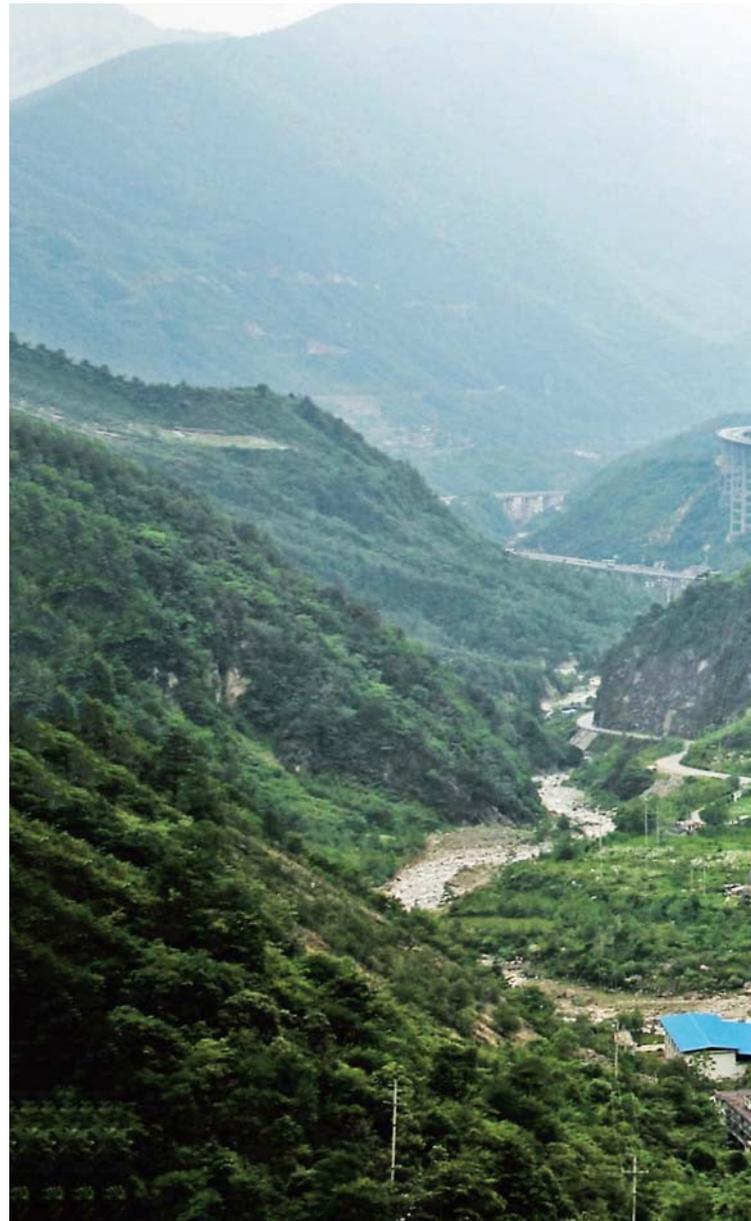


圖 2 雅西高速公路縱坡線型

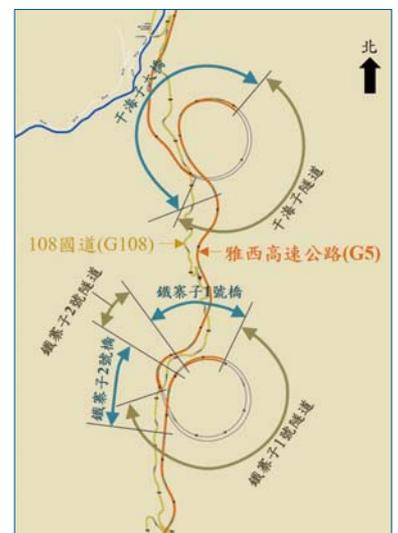


圖 3 拖烏山北坡雙螺旋路線圖



照片 1 依谷環山而行的雅西高速公路
(參訪團團員林本騏先生提供)

型連續及地形協調為參數逐段進行評估，以決定各路段所需要採取的額外安全措施，目的是在既定的線型條件下控制行車風險或降低意外損傷。其中對於重型車輛的行車安全尤為重視，因為重型車輛在長時間處於爬坡或煞車的狀態下機件故障的機率極高，發生意外所衍生的損害也較高，需要特殊的防護。上述額外的安全措施包括設施及管理兩方面，以下將作進一步說明：

- 在連續縱坡的關鍵地點包括起點、終點及轉彎處設置警告標誌及電子看板，提供靜態及動態的警示資訊。在泥巴山及拖烏山北坡經常出現冰雪雨霧的路段或駕駛人容易鬆懈的地點再加設警示燈以加強警示效果。
- 於全線設置 12 處避險車道以引導失控的車輛駛入減速區，由於地形的限制及成本的考慮，避險車道除了鋪設傳統的阻滯性路面之外，並安裝了機械式的阻尼器，以網索攔截車輛協助減速，避險車道的長度因此可以減少 30%。
- 在不同的路段設置多種改良式護欄，以強化防撞及減速的功能，其中有一種消能護欄高度達 1,300 mm，上端橫檔具有高度彈性並向車道側突出。另外標準護欄改採「強梁弱柱」的設計概念，以避免弱梁變形或破壞後的強柱阻擋了車輛的滑行。
- 在全線設置了 8 處緊急出口銜接京昆國道（G108）或地方道路，以備在連續縱坡路段發生交通事故時進行緊急疏散及快速救援。

除此之外行車安全及道路管理監控系統的設置，及連續縱坡路段隧道內的照明設計等均有創新的解決方案。

深谷及地震 挑戰橋梁設計

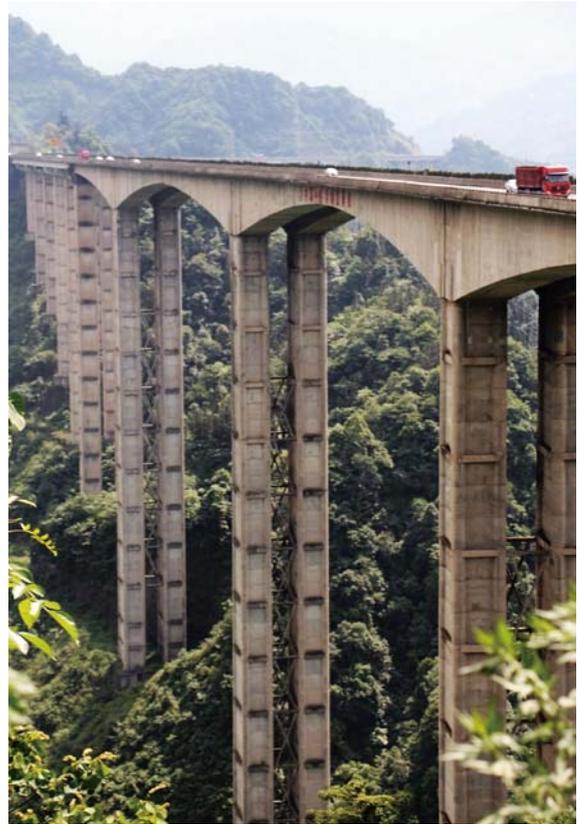
雅西高速公路由於通過的區域地形劇烈起伏，全線共有大小橋梁 270 座，總長度 91 km，超過全部里程的三分之一，其中不乏改進或創新的設計。以下將就最高橋墩達 182.5 m 的臘八斤大橋以及位於小半徑曲線上抗震設防達到九度的干海子大橋加以介紹。

臘八斤大橋

臘八斤大橋的南端與泥巴山大相嶺隧道的北端銜接，基於隧道長度、隧道埋深與橋梁高度的綜合考慮，當大相嶺隧道的埋深定在 1,650m 之後，臘八斤大橋就注定了要採用 150m 級以上的高橋墩。依據四川省公路院的調查，150m 級以上的高橋墩大多採用鋼筋混凝土箱形斷面，在完工之後甚至施工中就經常出現大量的裂紋，而且還不斷擴展，即使經過修補也未見有效改善，是橋梁安全上的隱憂。而且鋼筋混凝土構造的高橋墩自重過大，抗震能力被削減，在強震區並非理想的結構形式。

臘八斤大橋全長 1,106 m，主橋是 105 m + 200 m × 2 + 105 m 四跨連續樑橋，採用懸臂施工法現場澆鑄，最高橋墩達 182.5 m。每座橋墩由兩支橋柱組成，兩支橋柱之間在高度方向上的中段部分以鋼管水平支撐及交叉斜撐相互聯結。橋柱呈矩形斷面，四個角落各設一根 $\phi 1,320$ mm 的鋼管，內部以自填方式灌注 C80 高強度混凝土，外部則包覆厚度 200 mm（較矮的橋墩僅有 150 mm）的 C30 鋼筋混凝土。橋柱在橋軸縱向的兩根鋼管呈 1/70 傾斜，其間以型鋼水平支撐及交叉斜撐組成桁架式的結構；在橋軸橫向的兩根鋼管呈垂直向，其間僅設型鋼水平支撐。四根鋼管之間在高度方向上每隔 12 m 打設一片厚度 1,000 mm 的 C50 鋼筋混凝土橫隔板，然後在橫隔板的外緣繞設鋼絞線對版體施加預力。由鋼管柱、支撐及橫隔板組成的構造是橋墩承擔垂直及水平荷重最主要的結構體。

* 註：大陸標號 C80 混凝土的強度為 80 Mpa，但因為採用正方體試體進行強度實驗，所得結果較圓柱體試體為高，因此換算為台灣的強度時大約須打八折，其他標號的混凝土亦同。



照片 2 臘八斤大橋
(參訪團團員林本騏先生提供)

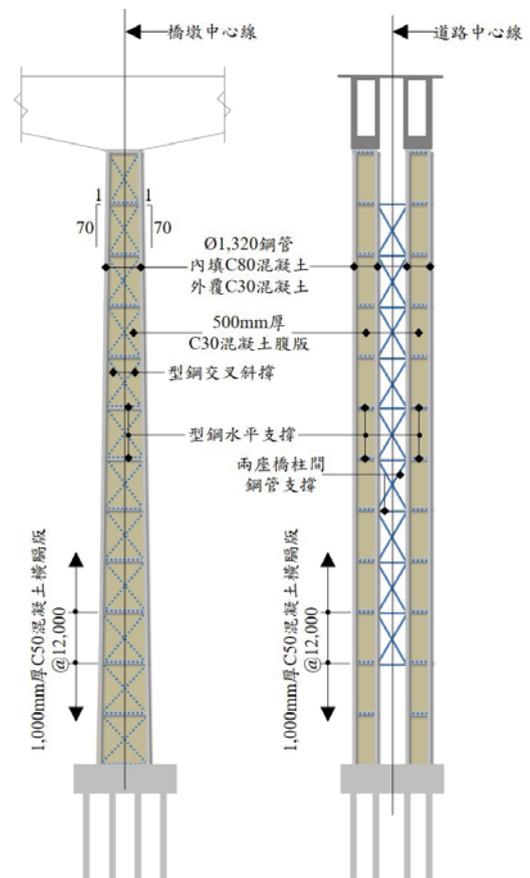


圖 4 臘八斤大橋橋墩構造圖

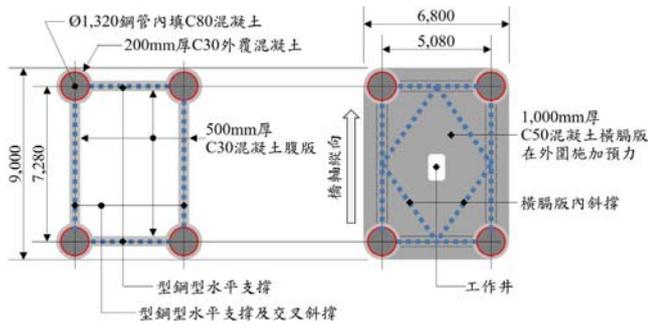


圖 5 臘八斤大橋橋柱斷面圖

除了上述主要的結構體之外，在橋柱所有外立面的兩根鋼管之間及兩階橫隔板之間再打設一道厚度 500 mm 的 C30 鋼筋混凝土腹板，將前述的水平支撐及交叉斜撐包覆在內，並與鋼管的外覆混凝土鑄成一體。雖然在斷面上這些腹板似乎形成一個箱形構造，但實際上只是一種輔助的結構體，目的在增加主要結構體的剛度，以減少側向位移。當遭遇強烈地震時，這些腹板允許開裂以吸收能量，保障主要結構體不致破壞倒塌。臘八斤大橋的橋墩構造及橋柱斷面見圖 4 及圖 5 所示，這種創新的橋墩構造與傳統的鋼筋混凝土箱形構造相比，可以減少自重 28%。

橋柱的鋼管採用一致的管徑以確保應力的平順傳遞，也便於施工，管壁厚度則依照斷面荷重調整，但維持徑厚比在 100 以下。在外圍施加預力的橋柱橫隔板可以約束鋼管的位移，折減鋼管柱的細長比，進而提升鋼管柱的穩定度。鋼管的內注及外覆混凝土除了

提高鋼管柱的軸向承載力之外，也可以降低鋼管斷面內變形及局部挫屈的機率。不過因為外覆混凝土的強度遠低於鋼管及內注混凝土的強度，所以承擔的荷重極小，再加上抗收縮添加劑的作用，預期可以大幅減少混凝土開裂的可能性。

干海子大橋

本文在前節曾經說明，拖烏山北坡為了降低路線縱坡，在主線上加設了兩個螺旋路段，這兩個螺旋路段的一部分是以隧道穿過山體，一部分是以橋樑繞行山體，橋梁部分就是干海子大橋及鐵寨子大橋，橋梁與隧道的平面線型見圖 3 所示，其中干海子大橋的最高橋墩也達到 107 m。

位於泥巴山北坡的臘八斤大橋雖然橋墩較高，但落在八度抗震設防地區，橋梁的水平軸線接近直線，結構的振動模式比較單純，所以抗震的課題集中在橋墩的設計。干海子大橋位於九度抗震設防地區，所蘊含的地震加速度是八度地區的兩倍，而更大的挑戰是橋梁位於螺旋路段的圓曲線、緩和曲線及 S 曲線上，最小半徑只有 356 m，非對稱結構的振動模式就要複雜得多，所以設計方案必須將上下部結構合併考慮。首先要決定的是跨徑，由於曲率半徑太小，只有中等跨徑比較適用，經評估之後決定採用 44.5 m 及 62.5 m 兩種跨徑，但上部結構的深度相同以展現簡單明快的外型。



照片 3 干海子大橋
(四川省公路院提供)

干海子大橋抗震設計的主要策略在輕量化，因此上下部結構都儘量採用鋼構造，而且以鋼管組成的桁架式結構為主，並在主要的鋼管構件中填塞混凝土。圖 6 所示是上部結構的標準斷面，主梁由呈 V 形配置的兩排鋼管桁架及預力混凝土橋面板構成，桁架下端採用 $\phi 813$ mm 的鋼管，內部灌注 C50 混凝土，腹管採用 $\phi 406$ mm 的鋼管，內部不填塞混凝土。干海子大橋全長 1,811 m，上部結構以伸縮縫分為三段，第一段長 486.3 m，跨徑配置為 11 @ 44.5 m；第二段長 1,045.1 m，跨徑配置為 4 @ 44.5 m + 11 @ 62.5 m + 4 @ 44.5 m；第三段長 279.6 m，跨徑配置為 6 @ 44.5 m。44.5 m 及 62.5 m 跨徑的主梁全高均為 4,400 mm，不同之處是 44.5 m 跨徑的主梁在橋墩處為簡支，62.5 m 跨徑的主梁在橋墩處與下部結構呈固結，圖 7 所示為上下部結構的兩種接合方式。

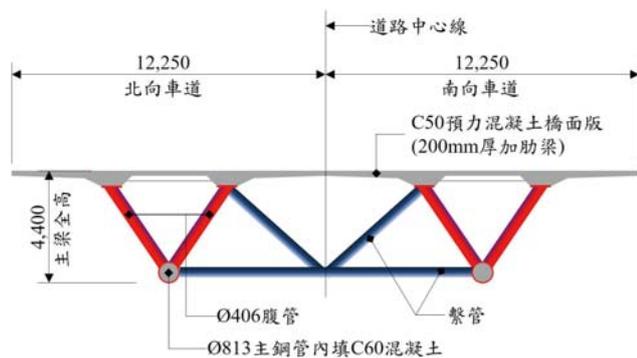


圖 6 干海子大橋上部結構斷面圖

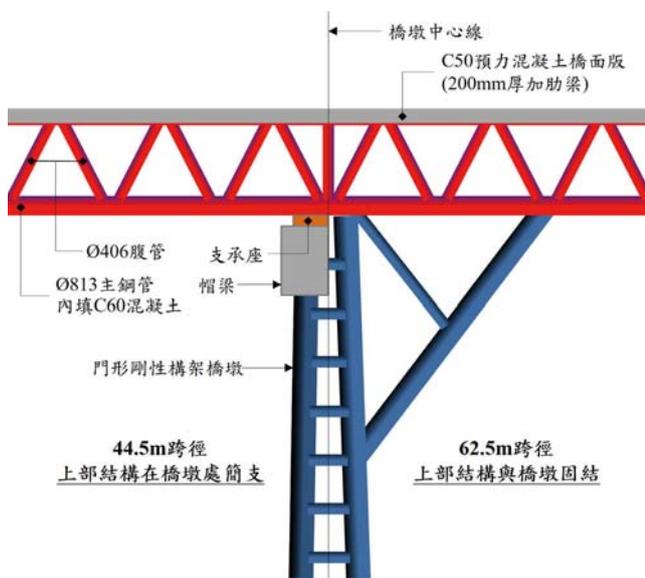


圖 7 干海子大橋上下部結構接合圖

干海子大橋的橋墩為門形剛性構架如圖 8 所示，四根主柱採用 $\phi 1,016$ mm 的鋼管，內部以自填方式灌注 C50 混凝土，其作用與臘八斤大橋的橋柱相同，其他鋼管構件的內部則不填塞混凝土。橋墩在橋軸縱向的兩根鋼管呈 1/50 傾斜，其間設置密集的鋼管橫撐；橋墩在橋軸橫向的兩根鋼管呈垂直向，其間設置桁架式鋼管橫撐。高度超過 60 m 的橋墩，在橋軸橫向的門形構架中加設鋼管斜撐，同時在橋軸縱向的構架底部 30 m 範圍內打設一道厚度 400 mm 的鋼筋混凝土腹板，其作用與臘八斤大橋橋柱的腹版相同。

由於干海子大橋適宜採用中等跨經，所以傳統的 25 m 及 40 m 預力混凝土簡支樑配以鋼筋混凝土箱形斷面的橋墩可以作為比較方案。如果以輕量化作為比較基礎，則最終採用的桁架式鋼管結構在混凝土用量方面減少了 64%，在各種鋼材用量方面減少了 23%，橋梁抗震的效能可以大幅提升。

深埋隧道 挑戰探勘技術

雅西高速公路的路廊通過成都平原與青藏高原之間的過渡地帶，這個地帶也正是四川盆地的邊緣，地形的多變化代表了地殼運動的複雜度。圖 9 所示是

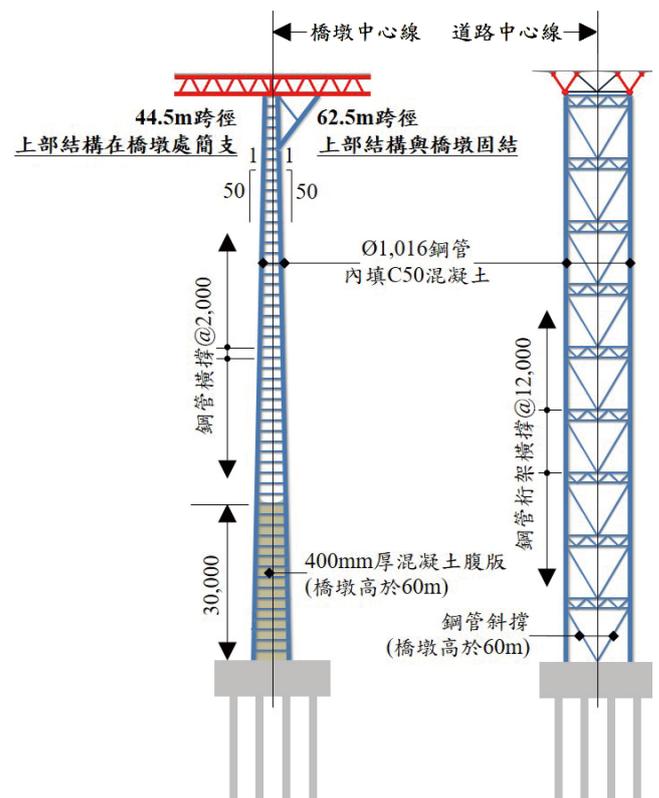


圖 8 干海子大橋橋墩構造圖

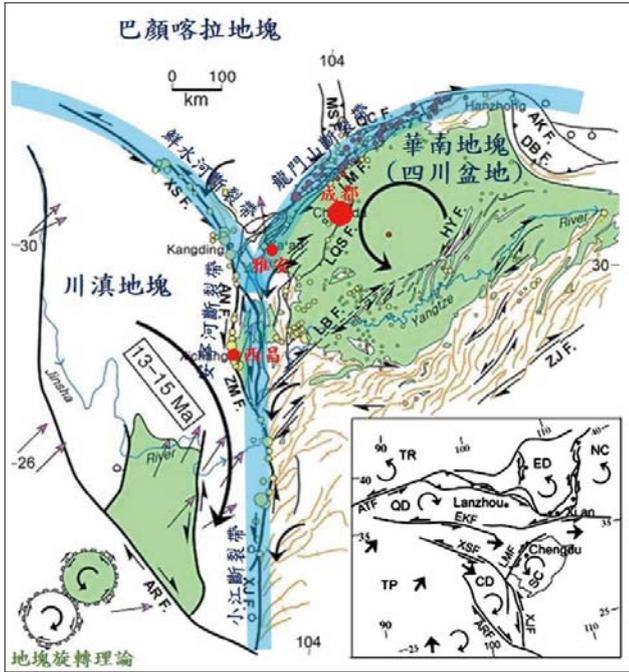


圖 9 雅西高速公路周邊地區地質構造圖
(資料來源：參考資料 [1])

大陸西南部地區的地質構造圖，華南地塊、川滇地塊及巴顏喀拉地塊就在路廊的週邊地區相遇，其間形成龍門山、鮮水河及小江三條斷裂帶，鮮水河－小江斷裂帶的南端從西昌至攀枝花一帶就是知名的攀西大裂谷，西側還有一條安寧河斷裂帶。沿著這些斷裂帶地

震頻發，其中 2008 年汶川大地震及其序列餘震都發生在龍門山斷裂帶的沿線。雅西高速公路全線共有 25 座隧道，總長度 39 km，其設計與施工必須依賴可靠的探勘資料才能妥善進行，其中泥巴山隧道因為是深埋的長隧道，處於地質構造這麼複雜的地區，探勘工作本身就是一項嚴峻的挑戰。

泥巴山隧道是長約 10 km 的雙孔隧道，穿過大相嶺背斜及其兩翼急速轉折的向斜，地質構造呈 Ω 狀態。隧道最大埋深達 1,650 m，由於背斜的軸部寬厚，埋深超過 1,000 m 的部分也達 5.1 km。而工址一帶屬於原始林區，植生濃密、人煙罕至，缺少出入道路，因此無論是鑽探或地表調查都非常困難，加以深層鑽探不僅成本高，技術上也有待完善，因此四川省公路院發展了一套綜合研判的技術，以各種調查所獲知的地質構造損傷程度來評判隧道周圍岩體的完整性和力學性質。所謂地質構造損傷依照尺度大小涵蓋下列五項元素，分別採用定性或定量的方法進行評判：

- 所位於斷裂帶的位置及岩體變形的程度
- 主要斷裂的發育程度
- 次級斷裂的發育程度
- 岩體節理的發育程度
- 岩體細微裂隙的發育程度

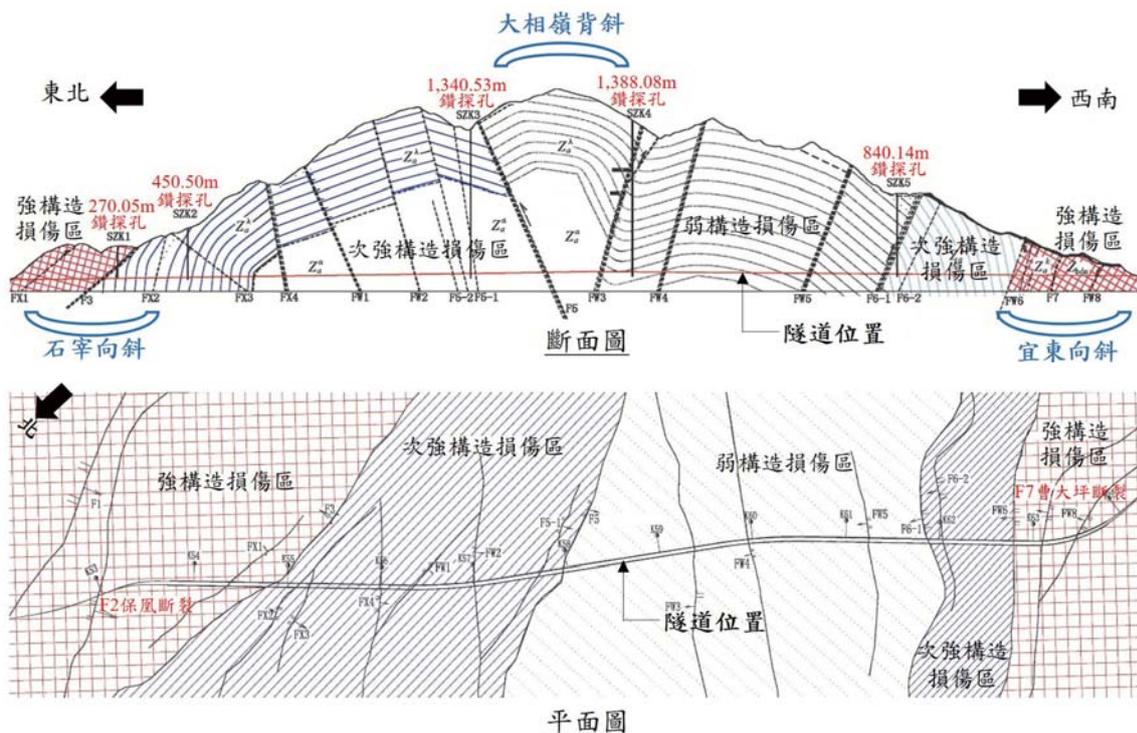


圖 10 泥巴山隧道工址地質構造損傷分區圖 (資料來源：參考資料 [2])



照片 4 在山水之間的大渡河路段
(四川省公路院提供)

在評判過程中，上列五項元素各賦予 0 ~ 20 的評分，總評分為 100。然後依照總評分將地質構造的損傷程度劃分為強構造損傷（評分超過 75）、次強構造損傷（評分介於 50 ~ 75）、弱構造損傷（評分介於 25 ~ 50）、輕構造損傷（評分低於 25）四個等級。

上述綜合研判的技術在泥巴山隧道中的應用包括以下的程序及方法：

- 首先將區域地質分析、地表地質調查以及物理探測所獲得的地質資料就上列五項元素中的前四項進行初步研判，然後依據研判結果就地質構造損傷的四個等級將泥巴山隧道的周圍岩體劃分為五個區段，每個區段各做一個深層鑽探，見圖 10 所示。
- 就深層鑽探取得的岩心樣本進行岩體細微裂隙的分析，細微裂隙的發育程度依其在岩心上呈現的總長

度及分布形式加以判定。然後將岩體細微裂隙的分析結果併同其他最新獲得的地質資料，再就五項元素進行構造損傷程度的評判。

- 最後依據岩體結構特徵、岩體完整性係數及岩體單軸極限抗壓強度判定隧道圍岩的級別，但如果位於斷裂帶範圍內也可以逕行判定為 V 級，表 1 所示是泥巴山隧道進行判定所使用的數據。

依據四川省公路院的說明，隧道現場開挖所獲得的資料證實，少量的深層鑽探結合上述的綜合研判技術在泥巴山隧道工程中推測到全部 15 條主要斷裂，推測到的斷裂位置也大致準確，僅有四條偏差超過 200 m，且埋深超過 700 m，證明該項技術具有一定程度的實用性。

表 1 泥巴山隧道圍岩級別的判定

隧道段落	岩體結構特徵	節理分析 所得 K _v	波速探測 所得 K _v	綜和評判 所得 K _v	單軸極限 抗壓強度	隧道圍岩 級別研判
K53+804~K54+650 強構造損傷區 流紋岩（進口段）	碎裂結構~鑲嵌碎裂 結構（含節理密集帶和 次級斷裂）	0.35 ~ 0.53	0.48	0.46	49.27MPa	IV 級為主， 斷裂帶為 V 級
K54+650~K59+130 次強構造損傷區 流紋岩	塊碎狀鑲嵌結構（含節 理密集帶和次級斷裂）	0.40 ~ 0.57	0.44~0.59	0.51	56.3MPa	IV 級為主， 斷裂帶為 V 級
K54+650~K59+130 次強構造損傷區 安山岩	塊碎狀鑲嵌結構（含節 理密集帶和次級斷裂）	0.40 ~ 0.57	0.60*	0.54	102.49MPa	III 級為主， 斷裂帶為 IV ~ V 級
K59+130~K62+620 弱構造損傷區 流紋岩	裂隙塊狀	0.53 ~ 0.62	0.74*	0.65	未取得完整 岩心	IV 級為主， 局部 III 級， 斷裂帶為 V 級
K62+620~K63+750 強構造損傷區 白云岩（出口段）	碎裂結構	< 0.35	0.38	0.34	未取得完整 岩心	V 級為主， 局部 IV 級

資料來源：參考資料^[2]

透過工程促進研發 值得借鏡

由以上各節的介紹可以體會雅西高速公路確實是一個深具挑戰性的工程計畫，不過工程上的挑戰是要付出實質的努力才能有所成就的，經由這次參訪我們得知，雅西高速公路在 2007 年工程開工之前兩年就與規劃設計工作同步展開了十四項科技研究項目，其經費分別來自中央及地方政府如表 2 所列，其課題涵蓋工程、環境及管理，部分課題還涉及比較理論性的分析與評估，使得技術與實務能夠相輔相成，透過工程促進研發，透過研發支援工程，非常值得我們借鏡。

參考資料

1. Erchie Wang, Kai Meng, Zhe Su, Qingren Meng, Jean J. Chu, Zhiliang Chen, Gang Wang, Xuhua. Shi, and Xinquan Liang, "Block Rotation: Tectonic Response of the Sichuan Basin to the Southeastward Growth of the Tibetan Plateau along the Xianshuihe-Xiaojiang Fault", Tectonics, AGU Publications 2014.
2. 程強、邵江、宋洪圖、劉尚成, 「大相嶺泥巴山隧道岩體構造損傷分析」, 工程地質學報, 1004 - 9665/2010/18 (suppl.) - 0037 - 10。

表 2 雅西高速公路科技研發項目

科技研發項目	經費來源	立項時間
雅瀘高速公路 * 修築關鍵技術研究及推廣示範應用	交通運輸部	2007
大相嶺泥巴山深埋特長隧道關鍵技術研究	交通運輸部	2007
公路隧道抗震及減震技術研究	交通運輸部	2007
西部高速公路生態型聲屏障技術應用研究	交通運輸部	2007
中等跨度鋼管混凝土桁架梁橋成套技術研究	交通運輸部	2008
高速公路螺旋型曲線隧道營運安全控制技術	交通運輸部	2008
活動斷裂區高速公路修築關鍵技術與應用示範	交通運輸部	2008
超高墩大跨預應力混凝土連續剛構橋樑設計與控制關鍵技術	四川省	2005
雅瀘高速公路 * 特殊路基修築技術研究	四川省	2006
生態脆弱地區公路環境保護研究	四川省	2006
泥巴山隧道重大工程地質問題分析及病害處治技術研究	四川省	2007
雅瀘高速公路 * 創新管理模式研究	四川省	2008
雅瀘高速公路 * 特殊路段運營安全保障體系研究	四川省	2009
雅瀘高速公路 * 科技示範工程效應評價體系研究	四川省	2009