

北宜高速公路橋梁設計簡介

陳國隆¹、羅天健²、陳俊仲³

- 1.國道新建工程局設計組 副組長
- 2.國道新建工程局設計組 橋梁科科长
- 3.國道新建工程局設計組 工程員

一、 簡介

北宜高速公路全長 55 公里，分為南港頭城段及頭城蘇澳段，其中南港頭城段行經山區，構造型式以橋梁及隧道為主，主線橋梁計有 18 座，總長約 6km 約為全長之 17.3 %；頭城蘇澳段行經蘭陽平原，構造型式以橋梁為主，除起點 0.5km 為路堤外，其餘 23.2km 均為橋梁，為路線全長之 97.9%。又南港頭城段係於民國 80 年完成設計，頭城蘇澳段於民國 90 年設計完成，二段於設計時間及地理環境均有極大的差異，因此橋梁設計理念亦有相當程度不同，本文僅就此二段之橋梁外型設計及結構設計特色作一簡要報告。

二、 南港頭城段橋梁設計簡介

(一) 地理背景

南港頭城段路線起點由南港系統交流道往東南行至頭城礁溪間，其間經過石碇、坪林地區均屬山區，又因台灣地區山脈為南北走向，而本路線線形係與其約略正交，非沿等高線前行，因此路線與地面之高差變化大。為免挖填過大造成地形變化，橋梁為主要之構造方式，於山區地形橋梁設計主要理念應為避免破壞地形並融入地景。

(二) 橋梁設計理念及成果

早期橋梁設計之基本要求為安全經濟，但在本段設計時期，國內環保及工程美學意識已逐漸抬頭，因此如何減少地形的破壞並與地景融合為設計追求的目標。在經過多次討論後，決定主線橋梁以雙向共構之單柱梁橋、上構採用自動化工法，線型並儘量配合地形佈設為原則，因此有關橋梁配合環境設計為本段橋梁

之設計主要理念。

1. 雙向共構單柱橋梁

本段車道數配置為南下北上各雙車道，依以往之設計方式多為將南下與北上橋梁各設計為獨立之結構體，唯如此將造成基礎之開挖量較大，為此於設計階段研議採用雙向共構之結構型式，以減少基礎之開挖，降低施工期間對環境之衝擊。另雙向共構之橋梁由於橋墩數較少，橋梁整體外型亦較為簡潔優美為其另一優點。本段除隧道洞口之路段須配合隧道佈設採分離線外，石碇高架橋、潭邊橋、烏塗溪橋等橋梁均配合前述原則採用雙向共構橋梁(圖 1)。

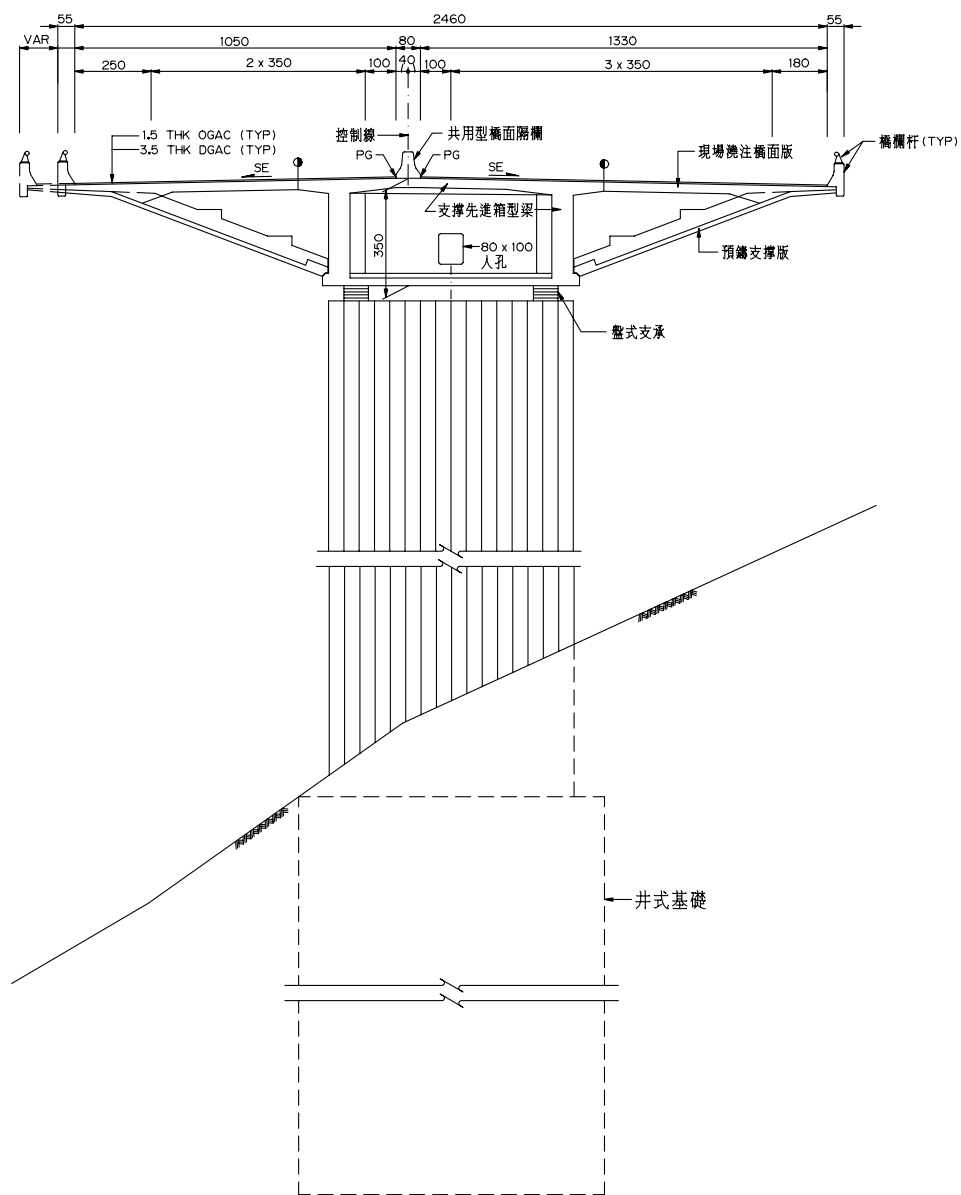


圖 1 北宜高速公路雙向共構橋梁標準斷面圖

另為降低雙向共構橋梁施工階段施工設備之規模及重量，橋梁上部結構斷面設計採預鑄斜撐板設計，將斷面之施築分為二部分，第一階段利用支撐先進工法施築箱形梁核心之部分，其後再利用預鑄斜撐板加寬橋面。如此第一階段支撐先進工法之施工設備即可較為輕巧，此二上部結構施工階段對於橋下幾無影響。

2. 高橋墩橋梁

本路段由於行經山區，地形起伏複雜但為滿足線形之要求，因此橋梁高度較高，平均橋梁高度多在 30m 以上，而烏塗溪橋最高橋墩(P3)達 65.5m 為目前已完成國道之最高橋墩(圖 2)。



圖 2 北宜高速公路烏塗溪橋 P3 橋墩

高橋墩橋梁在設計上除承受較大之自重外，對於結構穩定性檢核亦為一

個重點。另高橋墩橋梁之施工性亦需於設計階段考量，因此上部結構之施工法原則以採用毋需現地支撐之支撐先進工法或懸臂工法等為主。

3. S 型曲線

坪林一、二號高架橋沿坑子口溪溪谷佈設，設計階段為不破壞原有地貌及為使橋梁線型與現地地形配合，採橋梁線型與山谷走向吻合之 S 型曲線設計，另為減少開挖及避免影響水流，橋面採分立於河道兩側之分離式設計，並配合山谷變化，兩向橋面高程亦採高低差方式設計，使用路人可同時欣賞沿途美麗的景觀(圖 3)。



圖 3 北宜高速公路坪林高架橋

4. 工法選擇

(1). 下部結構工法

本路段除從南港至坪林沿線主要行經山區，地質上多屬岩層，作為橋樑基礎承载力並無問題，覆蓋層亦不厚，因此基礎配置在地形平緩地方多採用直接基礎，而在地形變化起伏大的地方，則因考量減少開挖，以降低對周遭環境的衝擊，採用井式基礎(圖 1 及 圖 4)。本路另於河川

橋受沖刷影響較大之橋墩(如北勢溪橋)採用沉箱基礎。



圖 4 北宜高速公路井式基礎施工

(2). 上部結構工法

由於路段地形起伏，不利採用場撐工法施作，且為維持橋下現地景觀及水流交通等，上部結構工法以採自動化工法為原則，本段所使用之自動化工法計有支撐先進工法、懸臂工法及節塊推進工法等。其中於烏塗隧道以北之合併線路段，因橋面較寬，採用支撐先進工法施作箱梁核心部分，其後再利用預鑄斜撐板加寬橋面(圖 5)，如此第一階段支撐先進工法之施工設備即可較為輕巧。選擇機械化工法施工階段，對於橋下幾無影響，於石碇高架橋下之石碇長老教會於施工過程得以保存完整。



圖 5 北宜高速公路上構施工

(三) 橋梁結構設計

公路橋梁設計一般依交通部頒公路橋梁耐震設計規範辦理，惟本段橋梁設計之基本設計顧問 AEC(Asian Expressway Consultants)，於設計初期另參考國外先進設計規範，訂定橋梁設計準則，其較部頒規範主要不同之處為(1)增加溫度梯度載重、(2)參考 CATRANS 之韌性設計作為耐震準則。

1. 溫度梯度

溫度梯度係考量梁深區間內因為溫度不同而產生之內應力，設計單位參考國外相關規範訂定如圖 6 之溫度變化，作為設計依據，此為國內橋梁設計首先使用考量此項載重者。

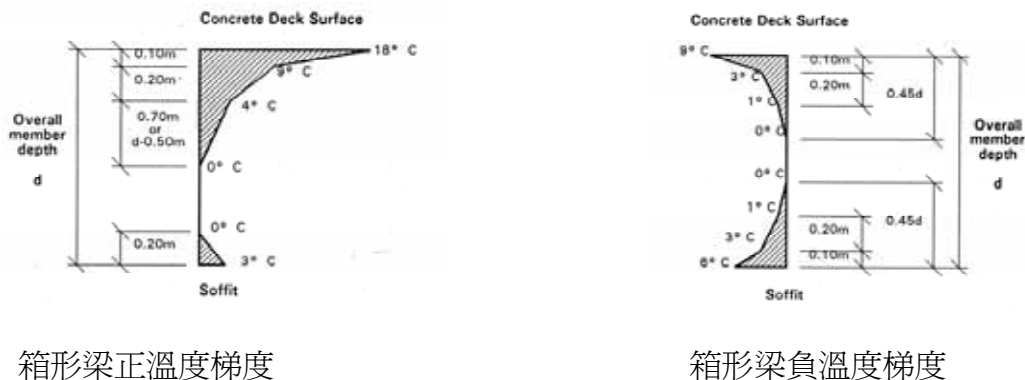


圖 6 混凝土箱形梁溫度梯度變化圖

2. 耐震設計

本段 80 年 10 月開始辦理細部設計時，韌性設計已為國外耐震設計之潮流，交通部亦已進行耐震設計規範研修。考量若仍依 76 年版規範採彈性設計，日後可能面臨結構需再補強之問題，因此基本設計顧問乃建議依美國加州州政府交通局（CALTRANS）耐震設計規範，訂定本段耐震設計準則。其耐震設計基本精神與其後交通部於 84 年頒布之「公路橋梁耐震設計規範」精神約略相同，採用韌性設計理念，因此本路段於交通部規範頒行前即採韌性耐震設計，可謂國內橋梁首先使用韌性設計規範之工程。

CALTRANS 之基本設計理念主要考量為：結構物於中小地震時應維持不壞，而於大地震時允許橋梁結構有小破壞但不容許崩塌，且結構必須提供足夠的韌性以消散地震的能量。故其設計的地震力，採橋址可能發生的最大地震力。

地表加速度係依地震危害度分析所得之 475 年回歸期(相當 50 年內超越機率 10%)之地表加速度，作為設計地表加速度，其值由起點(南港)之 0.23g 變化至終點(頭城)0.39g，詳如表 1 所列。又 84 年交通部「公路橋梁耐震設計規範」頒布後本局即請設計顧問就本路段橋梁耐震設計準則與 84 年部頒耐震設計規範做一比較，相關規定比較結果詳如表 2，另依設計顧問評估比較結論「北宜細設成果依 84 年部頒規範檢核應屬安全」。

表 1 尖峰地表加速度 A

地點	尖峰地表加速度 A
南港隧道北洞口以北	0.23g
石碇隧道南洞口與彭山隧道北洞口之間	0.26g
彭山隧道南洞口與雪山隧道北洞口之間	0.30g
雪山隧道南洞口以南	0.39g

另於 921 地震後，配合內政部於 88.12.29 內營字第 8878473 號函修正台灣地震分區改為地震甲、乙兩區，工址水平加速度係數分別為 0.33 及 0.23 之規定，檢討施工中之橋梁結構耐震能力後，其中第二標石碇高架橋、潭邊橋及烏塗溪橋共三座橋梁上構採預鑄斜撐板設計部分，變更增設斜撐板防落裝置，做為耐震第二道防線(圖 7)。

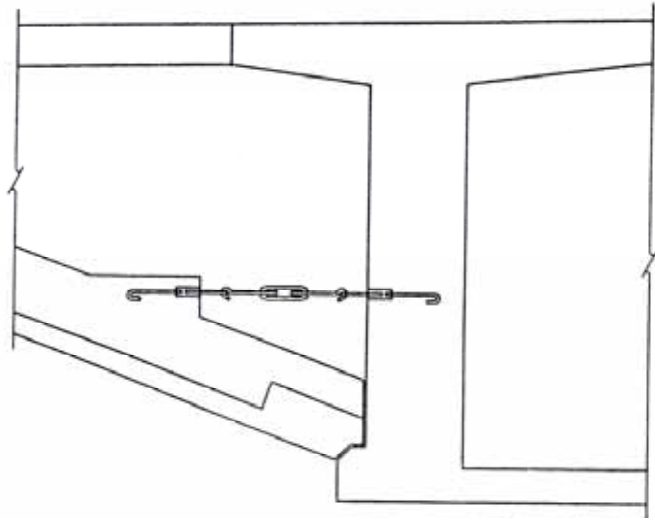


圖 7 預鑄斜撐板防落裝置示意圖

表 2 南港頭城段橋梁耐震設計準則與 84 年部頒耐震設計規範比較表

設計規定事項	84 年部頒耐震設計規範	南港頭城段橋梁耐震設計準則
最小設計水平地震力	$V = \frac{ZICW}{1.2 \times \alpha_y \times F_u}$	$V = \frac{ARS}{Z}$
地表加速度	ZI(頭城高架橋計算結果： ZI=0.28×1.2=0.336)	A(頭城高架橋計採用 A=0.39)
水平加速度反應譜係數	C(頭城高架橋計採用 C=1.25)	RS (頭城高架橋計採用 RS=2.1)
折減係數	1.2 α _y F _u (頭城高架橋計採用： 1.2 α _y F _u =3.96)	Z(空心墩柱一律採用 3.0，頭城 高架橋設計採用 Z=5.16)
水平雙向地震效應組合	地震力考慮縱向或橫向時必須同時加上另一向 30%之向量	(同左)
載重組合	有容許應力法及強度設計法 2 種載重組合	CALTRANS 之地震力設計僅 列 1 種為強度設計法載重組合
塑鉸產生後構材所需強度	墩柱設計剪力V=M _p /h，接合 之設計強度應考慮橋柱產生 塑鉸後，引致之所需強度	(同左)
橋端防落長度	N=50+0.25L+1.0H	(同左)
墩柱主筋量規定	0.06 < ρ < 0.01	(同左)
橫向圍束鋼筋間距	間距 s ≤ 15cm	(同左) (惟其中頭城高架橋由於鋼筋 設計較密，為考慮施工性，其 間距採 20 cm)
基礎接觸壓力	未規定 (但本局參考國外規範，實際 設計時規定同右)	由塑鉸產生之力作用於基腳 時，基腳至少應有 50%之面積 受壓

註：本表資料來源：84.05.12 財團法人中興工程顧問社所提『北宜高速公路頭城高架橋及北勢溪橋耐震評估報告』。

三、 頭城蘇澳段橋梁設計簡介

(一) 地理背景

頭城蘇澳段由頭城交流道往南行至蘇澳馬賽，其間經過礁溪、宜蘭、羅東及蘇澳地區，均屬平原地區，由於位處民眾活動密集地區，為避免造成區域阻隔及避免南北行之路線對東西向之水流造成阻水現象，全線以高架橋方式構築。

(二) 橋梁設計理念及設計成果

基於前述地理環境，本路段橋梁設計理念主要為：(1)結構外觀應降低對平原地區天際線視野之衝擊；(2)為土地充分利用，橋下將佈設側車道，而橋梁構造體由於民眾可及性高，橋梁外型應精緻處理；(3)跨越冬山河為宜蘭著名風景區，有設置地標橋梁之條件。

依上列考量，除河川橋(跨宜蘭河 110m、跨蘭陽溪 90m、跨冬山河 187m、)採較大跨徑配置外，一般高架橋以採中等橋高(約 10~15m)及中等跨徑(約 40~45m)之梁橋為主，其他具體佈設說明如下：

1. 雙向共構單柱橋梁及精緻化處理

考量平行本路段之橋下設有側車道，為橋下側車道之空間需求，橋體採上構雙向共構配合單柱橋墩進行佈設(圖 8 及圖 9)，而由於側車道之行人或車輛可直接近距離接觸本段之橋梁，橋梁設計時考量減少壓迫感及增加精緻度為設計重點之一。為此本段之雙向共構箱梁之懸臂板部分，儘量加長懸臂長度並採曲線線條設計，以減少壓迫感，另橋面洩水孔亦採用內埋於懸臂板及墩柱內之隱藏式設計，以避免外露之洩水管影響橋梁表面之平順，另墩柱外側配置凹型飾條以增加精緻性的視覺感受。

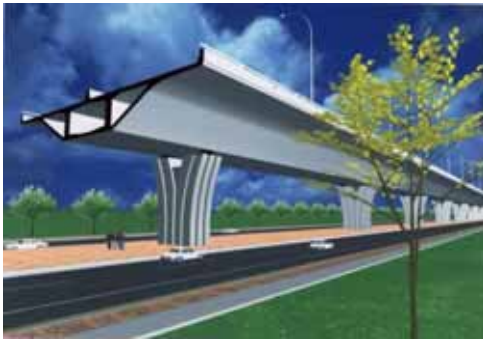
2. 工法選擇

(1). 下部結構工法

本路多位於蘭陽平原沖積層，地質多為砂土及粉土所構成，局部位置並夾有黏土及有機物。由鑽孔資料顯示，本路段地層大多軟弱，適於作為承載層之地層多位於地表下 40m~50m 以下，且因本路段位於強震區，基礎承受極大的側向力，因此為抗側向力及水平變位，主線使用 1.5m 直徑之全套管基樁，樁長約 35~55m 為主，另於路線末端約 1.1km 及蘇澳交流道，因沖積層較淺，基樁樁徑採 1.2m 直徑，樁長在 16~35m 間。

(2). 上部結構工法

本段由於橋梁連續長度長且除交流道區外多為等斷面，規模適合採用機械化工法，工法選擇主要考慮兼顧橋梁工程技術之進步及現有機具設備之充分利用。本路段工法選擇除跨越河川因大跨徑需求採懸臂工法外，其餘主線部分採預鑄節塊懸臂工法（C510 及 C511 標）（圖 8）及支撐先進工法為主（C512~C515 標）（圖 9）。

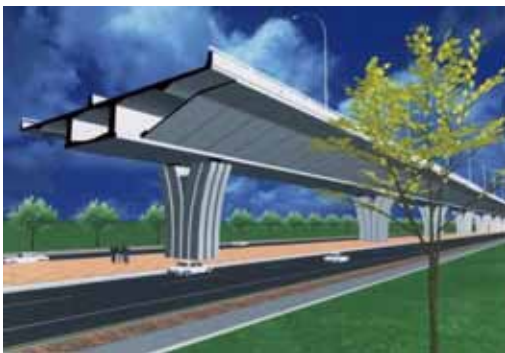


(a)透視圖



(b)完工照片

圖 8 預鑄節塊三箱室預力箱形梁橋透視圖及完工照片



(a)透視圖



(b)完工照片

圖 9 場鑄預力箱形梁預鑄斜撐板橋透視圖及完工照片

3. 冬山河橋

(1) 橋型選擇

考量冬山河橋為宜蘭地區之景點，有設置地標橋梁之條件，宜蘭縣政府亦要求採景觀橋方式設計，因此設計階段研擬四種橋梁方案：

方案 1：預力混凝土箱形梁加勁式拱橋（圖 10）

方案 2A：非對稱預力混凝土箱形梁斜張橋（圖 11）

方案 2B：雙塔交錯式非對稱鋼箱梁斜張橋（圖 12）

方案 3：鋼筋混凝土箱形梁半穿式拱橋（圖 13）

考量橋址地形廣濶，不宜有太突出之人工構造物，以利橋梁與週遭地理環境融合，決定採用方案 1 河中不落墩主跨 155m 之拱橋方案。



圖 10 方案 1 預力混凝土箱形梁加勁式拱橋透視圖



圖 11 方案 2A 非對稱預力混凝土箱形梁斜張橋透視圖



圖 12 方案 2B 雙塔交錯式非對稱鋼箱梁斜張橋透視圖



圖 13 方案 3 鋼筋混凝土箱形梁半穿式拱橋透視圖

(2) 跨度加大及精緻化處理:

92 年元月國家水上運動中心擬拓寬冬山河河道以達國際 B 級划船比賽場地標準，因此本橋主跨徑須配合由 155m 變更為 187m，橋跨配置配合結構性修正為 94+187+94，橋梁型式仍維持原橋型方案，變更設計階段並對本橋表面之精緻度再予加強，包括橋墩增設部分線條以造型模板施作，直桿及門型小拱圈之位置採逐次向內退縮使之產生層次感（圖 14、圖 15）。



圖 14 冬山河橋完工照片



圖 15 冬山河橋主橋墩上之層次設計及橋墩造型模板完工照片

(3)景觀照明:

考量配合夜間辦理節慶活動之需求，本橋設有景觀照明，燈具採多色燈組，色系及亮度可以程式控制，達到多種燈光變化之效果。在景觀照明之規劃理念考量點、線、面的概念，點的部分以彩色燈光投射，對橋拱內外作洗柱處理；橋面護欄以整排 BB 嵌燈加濾色，塑造帶狀光線，此為線的部分；面的表現則在橋墩外側柱面及橋腹側面設置投光燈表現。有關夜間照明之模擬及實際成果如圖 16。

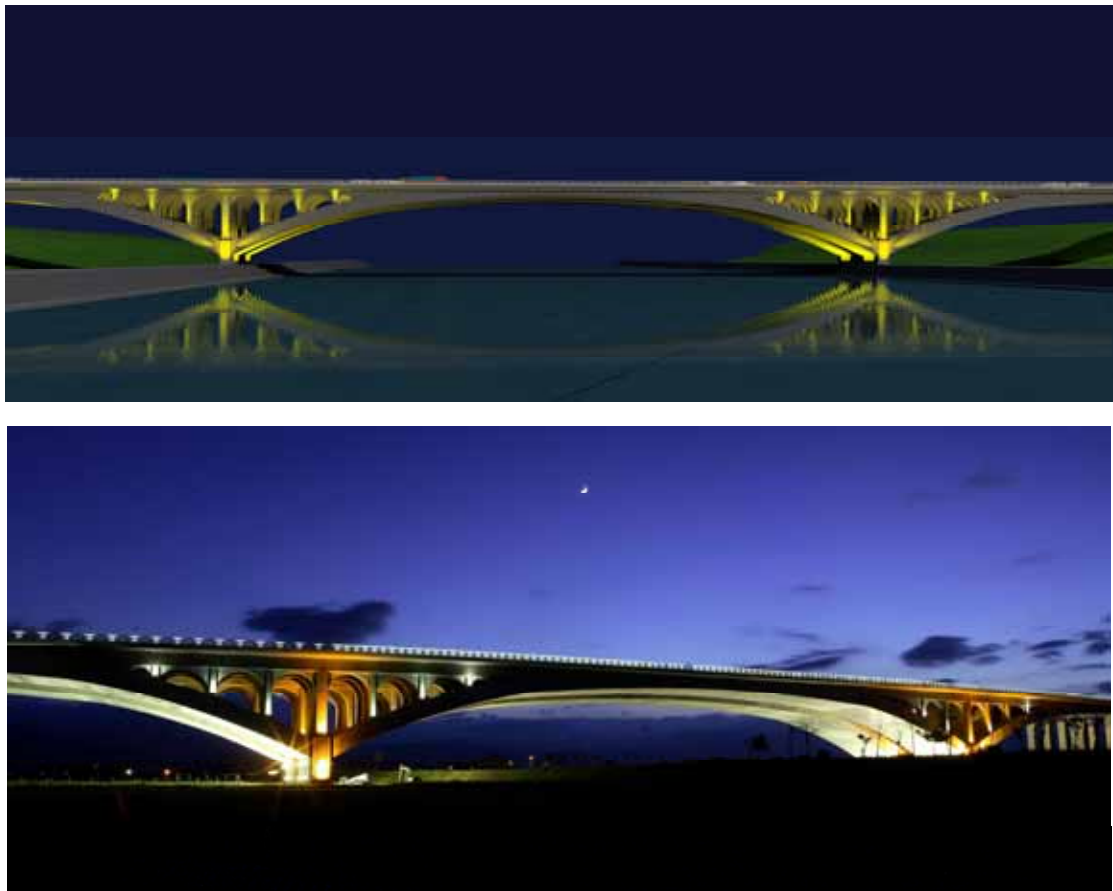


圖 16 冬山河橋夜間照明之模擬及實際成果

(三) 橋梁結構耐震設計

本路段橋梁不高，惟因地質較為軟弱、結構基本週期較長，不適合採隔減震設計，因此本段橋梁耐震設計主要為依據 89 年交通部頒之公路橋梁耐震設計規範辦理，依規範之主要精神為中小地震時沒有任何損壞，大地震時容許產生塑鉸及一些韌性損壞，但不可崩塌。其定義之大地震為 475 年回歸期之地震(50 年超越機率 10%)，於此地震力作用下，橋墩結構可進入韌性階段，利用結構塑性變位之應變能之原理以降低結構所受力，為使選定之塑鉸區可以完全發揮其功能，設計須考量塑鉸區以外之其他構件應能承受塑鉸產生之各種力量。另國道為重要之生命線，因此於設計階段更對於地震力之傳遞機制及防落對策作深入探討，以確保橋梁之安全，詳如下述。

1. 耐震設計規範重要參數

(1) 工址水平加速度係數(Z)

本段本工程所有路段震區均屬地震甲區，依規範規定工址水平加速度係數值為 0.33。

(2) 工址正規化水平加速度反應譜係數(C)

本路段因地盤軟弱均採設計規範所列之第三類地盤反應譜曲線設計(如圖 17)。

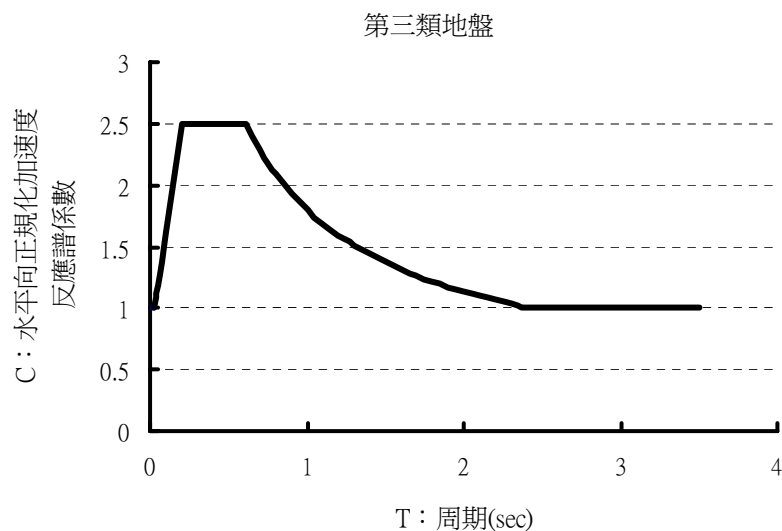


圖 17 第三類地盤水平向正規化加速度反應譜係數與周期關係

2. 設計垂直地震力

本路段工址垂直加速度係數，依規範取為 $\frac{2}{3}Z$ 即 $\frac{2}{3} \times 0.33 = 0.22$ ，另本段支撐先進或場撐逐跨工法之一般預力梁，因配置適當縱向鋼筋及一般箍筋，但未配置圍束箍筋，因此 R^* 值取為 2.0；另預鑄節塊施工法，屬縱向鋼筋不連續之結構， R^* 取 1.0。

3. 地震力傳遞機制

考量本路段位於強震區，其地震水平力甚大，考量以固定式盤式支承傳遞水平力恐引致支承本體過大之問題，因此於本路段採用鋼製剪力樺方式傳遞地震力及抗拉拔力(圖 18)，其剪力樺之設計除本體之強度外，尚須考量承壓混凝土之強度以及上構與下構間之轉角等。採剪力樺傳遞地震力之方式時則可使支承僅承受垂直力，因此支承尺寸較小，設計較為簡便。惟墩頂空間將更顯不足(除支承及剪力樺外，尚須考慮洩水管之設置空間)，另因剪力樺之設置將使墩頂之橫向主筋中斷，均為設計階段應注意之問題。

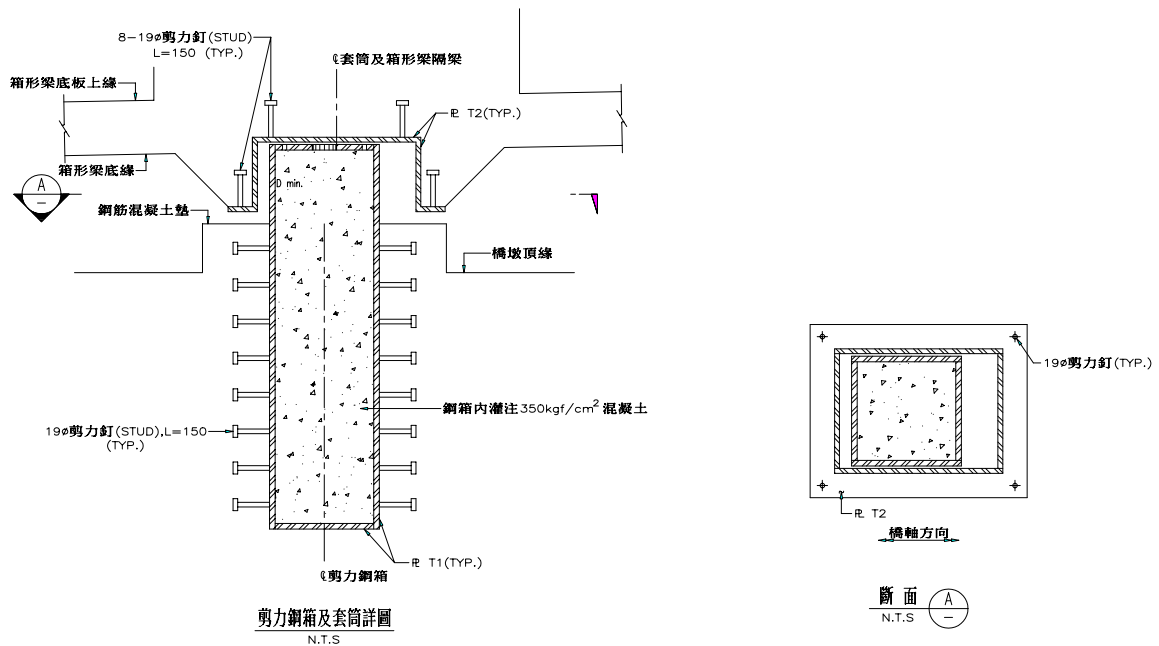


圖18 剪力鋼箱設計示意圖

4. 防落長度

落橋為橋梁耐震設計所不允許之破壞模式，且落橋將導致用路人受到極大之傷害，因此耐震設計必須避免落橋之發生。由於提供足夠之防落長度為防止落橋之最佳方法，因此本路段防止落橋之對策為加大防落長度為規範值

之 1.5 倍，另於上部結構每伸縮單元間均設置防震拉條，以作為防落之第二道防線。

四、 檢討與建議

精緻化並與現地融合，為近代之工程設計之趨勢，北宜高速公路因路線經過地理環境之不同，恰可作為後續類似案例之參考，整體而言北宜高速公路橋梁設計為一成功設計案例，但仍有下列二點建議可供參考。

(一) 橋梁跨徑之選擇：

南港頭城段橋梁為首次於複雜山區地形構築之國道工程，由於山區橋梁基礎工程之施工難度及造價均較高，就此部分而言配置較大跨徑橋梁或可減少橋墩數目，以達降低開挖之目標，惟大跨徑橋梁之上部結構造價較高，如何取得經濟、施工及環境維持之平衡，為後續山區橋梁設計之重要考量要素。

(二) 不同橋型界面之整合

頭蘇段冬山河橋係採加勁式拱橋分離橋面設計，惟與主橋銜接之前後橋梁為採梁橋雙向合併設計，於此二不同上構斷面之銜接點，設計有 7 根橋墩，致外觀產生柱林之現象；又本段受限工程經費，僅冬山河橋先行施作側車道，引橋側車道則未施作，致現階段外觀有一突變之處。此二者均對橋梁外型產生負面效果，此可作為後續類似案例設計之參考。

以上僅就北宜高速公路橋梁工程之設計作一摘要介紹，期能對北宜高橋梁有進一步之了解，並供爾後工程參考。