

中|華|技|術|139

CECI ENGINEERING TECHNOLOGY

2023. 07. 31 出版

社會時空脈動 VS. 橋梁建設蛻變



台北郵局許可證
台北字第3758號

專訪人物／
交通部高速公路局陳國隆副局長
中國土木水利工程學會宋裕祺理事長

生命線橋梁的延壽加固—國道橋梁耐震補強工程
新舊共榮、風華再現—臺北市中正橋改建工程之設計與施工
生態友善工程—國內首座預力吊床版橋的誕生
從金門大橋完工談未來國內跨海大橋展望



財團法人中華顧問工程司 發行

CECI



台灣世曦工程顧問股份有限公司 編製



社會時空脈動
VS. 橋梁建設蛻變

CONTENTS

目錄

中華技術 139



專輯前言

1 | 人物專訪

8. 訪交通部高速公路局副局長陳國隆
談「國內橋梁工程新材料新工法之
推展」.....

..... 整理：陳明谷・攝影：詹朝陽

16. 訪中國土木水利工程學會理事長
宋裕祺談「臺灣橋梁建設發展」
.....

..... 整理：張英發・攝影：詹朝陽

2 | 工程論著

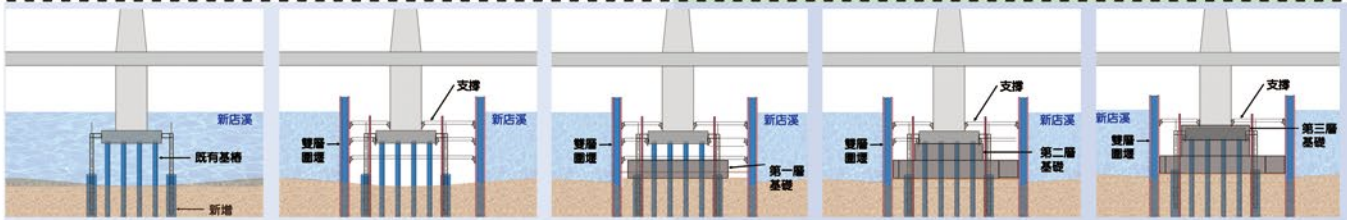
26. New RC應用於橋梁探討.....
..... 歐昱辰、吳振維

40. 超高性能混凝土(UHPC)材料與
結構應用..... 顏誠喆、洪崇展

發行人 周永暉
發行所 財團法人中華顧問工程司
地址 台北市辛亥路二段185號28樓
電話 (02)8732-5567
網址 <http://www.ceci.org.tw>

編審工作小組
總召集人 施義芳
副總召集人 廖學瑞
139期召集人 黃炳勳
139期審查委員 蔣啟恆、曾榮川
總編輯 張鈺輝
副總編輯 李志宏
執行編輯 袁雅玲
編輯 詹朝陽、吳妍瑱、李綺馨、許舜雅
設計 台灣世曦工程顧問股份有限公司
地址 台北市內湖區陽光街323號
電話 (02)8797-3567
網址 <http://www.ceci.com.tw>

◎ 經刊登之文章，文責由作者自負 ◎



3 | 專題報導

56. 生命線橋梁的延壽加固—國道橋梁耐震補強工程..... 陳柏宏、林裕家、戚樹人、吳弘明、陳炳宏、黃炳勳

74. 兼顧變與不變的耐震補強—深河槽區基礎補強的設計與施工..... 張英發、張志斌、蔡建民、邱益成、曾笠維

90. 新舊共榮、風華再現—臺北市中正橋改建工程之設計與施工..... 曾榮川、張英發、蔡建民、張永勳、陳傳興、郭玉仙、詹名成

104. 挑戰極限作業時間的側推工法—北勢溪鐵路橋梁改建..... 彭知行、吳宣欣、劉雲生、羅逸建、王玉璋

116. 漁港風情、重生永續—南方澳跨港大橋重建工程..... 蔣啟恆、劉珊、黃延年、蘇彥彰、李振璋

132. 藏橋於林的蜿蜒巨龍—南迴公路安朔高架橋..... 鄔安凱、陳韋丞、何傳裕、湯允中、蔣啟恆

144. 生態友善工程—國內首座預力吊床版橋的誕生..... 吳淑珍、楊景華、李俊偉、陳傳興

158. 從金門大橋完工談未來國內跨海大橋展望..... 黃炳勳、蔣啟恆、陳明谷、吳弘明、方俊華、許肇安



4 | 特稿

172. 橋梁水下檢測作業之國外回顧與國內展望..... 王鶴翔、王仲宇、蔡欣局、周姿良

198. 個體旅次需求響應快運系統 - DDRT / TDRT介紹..... 張堂賢

編後語



專輯前言

橋梁技術的進步與世界文明的發展息息相關，古今中外橋梁建設更是代表當時社會政治、經濟、軍事、科技及文化的水準；橋梁材料由木橋、土橋、磚橋，演進到近代的鋼筋/預力混凝土橋、鋼結構橋等，橋梁型式也發展出梁橋、拱橋、吊橋、斜張橋等樣式。橋梁除了跨越有形地理障礙的兩端，也因為加速溝通、互相瞭解，串聯了無形心理障礙的隔閡，帶動社會的繁榮興盛，更顯見橋梁建設與社會脈動的緊密關係。

近年來，由於社會經濟發展、公共工程大量興建，使得台灣橋梁技術突飛猛進，不僅只是達到經濟、安全、美觀的基本功能，同時也兼顧以人為本、生態保育、永續發展及循環經濟等先進社會的需求；更有多項重大指標型橋梁建設，榮獲IRF（國際道路協會）、REAAA（亞澳道路協會）等國際學協會獎項肯定，足見我國橋梁建設已達國際技術水準。

本期中華技術以「社會時空脈動vs.橋梁建設蛻變」為主題，除了橋梁工程新材料、新工法的應用分享外，更多的內容在闡述橋梁建設的新思維，舉凡延壽加固、耐震補強、新舊共榮、重生永續、融合環境、生態友善等，在在都實現工程建設的最高指導原則-「傾聽大自然的聲音，與大地對話，創造人與土地的和諧與永續」。此外，對於跨海大橋技術的展望與期待，我們更是腳踏實地、按部就班，由目前的實際經驗，來追求更好更遠的目標。

在兩位人物專訪上，邀請交通部高速公路局副局長陳國隆談「國內橋梁工程新材料新工法之推展」，陳副局長以一位熱情的工程前輩身分，述說勇於面對挑戰且務實解決問題的精神，以及提出對於新建橋梁、舊橋補強、跨海大橋工程等新材料、新工法推動之期許。而另一位是國內少有跨足產、官、學、研四個領域

的國立台北科技大學教授，同時也是中國土木水利工程學會理事長宋裕祺，與我們分享他在橋梁工程實務與理論間的經驗與想法，宋老師藉由他所率領團隊建置的橋梁即時監測雲端平台，闡述橋梁防災的重要性，文末亦提出如何重塑年輕人對於土木工程熱情之建議。

本期八篇專題報導摘錄如下：

「**生命線橋梁的延壽加固—國道橋梁耐震補強工程**」：將高速公路橋梁依新版公路橋梁耐震設計規範，重新檢核及評估，萬一大地震發生時，將損害程度降至最低並擔負整體防災計畫運輸維生功能重任；並整理節錄相關工程案例，供後續橋梁耐震補強工程參考與經驗分享。

「**兼顧變與不變的耐震補強—深河槽區基礎補強的設計與施工**」：即聚焦於因應跨河橋梁基礎裸露造成耐震能力不足，同時又要兼顧橋梁交通功能及河川疏洪功能情況下，如何進行深河槽區的橋墩補強作業並提昇橋梁耐震能力，作為日後跨河橋梁基礎補強設計的參考案例。

「**新舊共榮、風華再現—臺北市中正橋改建工程之設計與施工**」：對於承襲台北市豐富人文歷史的中正橋，在改建時如何保有「永和八景、網溪泛月」的時空背景意象，並以優雅的弦月形狀做為設計概念，以弦月帶給人的寧靜感來撫平城市的喧囂，整體景觀以「琴瑟和鳴」作為設計概念主軸，來分享讀者。

「**挑戰極限作業時間的側推工法—北勢溪鐵路橋梁改建**」：則是南迴鐵路電氣化工程，受限臨時軌布設困難、必須維持鐵路營運等條件下，採用側推工法，並結合運、工、機、電工程人員密切合作，依序進行各專業工作，方能於最短時間拆除舊橋、堆放新橋定位啟用，恢復鐵路營運。



專輯前言

「漁港風情、重生永續—南方澳跨港大橋重建工程」：對於舊橋無預警倒塌，造成漁港航道受阻及民眾傷亡事件的警惕，所以在新橋的重建上必須慎選橋型，並考量工址位置、設計年限等，進行耐久性設計。同時，在橋梁造型上，配合在地的漁港風情及南方澳鯖魚故鄉之美名，景觀設計特別以鯖魚、海浪兩種元素作為概念主題。

「藏橋於林的蜿蜒巨龍—南迴公路安朔高架橋」：對於南迴公路易致災路段，以截彎取直、新闢路線的方式，來取代原路拓寬的思維。安朔高架橋布設於叢林茂密的山坡及溪谷邊，工程師面臨最嚴苛的挑戰，是如何將橋梁融入於森林中，且施工時必須兼顧生態環境保護，以達到最大建設效益與最小生態影響的目標。

「生態友善工程—國內首座預力吊床版橋的誕生」：則是於南科高雄園區滯洪池中，設置國內首座人行吊床版橋，結構分析設計採用吊索理論，以輕薄的橋版將垂直外力轉換成軸力，橋身輕盈、量體小，融入自然環境中。施工則以混凝土將預鑄橋面版節塊及吊索灌注成為一體，透過預埋於橋面版內之鋼鍵進行預力二次施拉，藉以控制其懸垂量，以軸向勁度展現特殊柔性結構。不但是新工法，亦是生態友善工法。

專題報導的壓軸「從金門大橋完工談未來國內跨海大橋展望」：即是將台灣首座大規模跨海橋梁－金門大橋，由工程設計開始，施工遭遇的困難，及如何一一克服的寶貴經驗，回饋至未來國內跨海橋梁(例如馬祖大橋)工程設計施工參考。而且經由金門大橋累積的豐厚經驗與信心，建立台灣本土跨海橋梁造

價資料，可供後續相關海事橋梁工程經費評估參考使用，亦對於後續跨海橋梁之規劃設計工作，更能掌握關鍵項目，提昇國內海上橋梁工程的設計及施工技術水準。

本期最後則是以橋梁工程新材料為主題的邀稿，分別邀請國立台灣大學土木工程學系歐昱辰教授發表「New RC應用於橋梁探討」，以及國立成功大學土木工程學系洪崇展特聘教授發表「超高性能混凝土(UHPC)材料與結構應用」。此等新材料目前皆於國內逐步推動中，相關設計規範與工程技術亦日趨成熟，相信在不久之未來，即可大量應用到實際工程實務中。這些新材料對於橋梁工程勢必將有革命性的突破，不論在結構量體、跨徑配置等會有顯著的效益，同時可增加施工性、縮短工期及提高工程品質，在國內少子化趨勢及人工短缺之現實環境下，採用高性能材料，不但可以提昇國內橋梁工藝，趕上世界水準外，高性能材料結合自動化施工，更可大幅減少未來施工人力需求，絕對是橋梁材料的使用趨勢。

舊橋延壽補強，重現風華；新橋原址重建，新舊共榮；金門跨海大橋，再創高峰。希望藉由兩位橋梁專家的訪談內容，兩位知名年輕教授的新材料介紹，與兩個結構部8篇橋梁工程的介紹，讓讀者能一窺台灣橋梁工程的發展。



台灣世曦工程顧問股份有限公司

副總經理

黃炳勳



訪交通部高速公路局副局長

陳國隆

談

**國內橋梁工程新材料
新工法之推展**

整理：陳明谷 ■ 攝影：詹朝陽

壹、前言

陳國隆副局長畢業於美國華盛頓大學土木工程(結構組)碩士，工程生涯從民國75年高公局北二高工程處工程司開始，至民國79年國工局成立後歷任結構組橋梁科科长、結構組副組長、三區工程處副處長、規劃組組長兼高公局技術組組長、國工局兼高公局副總工程司、總工程司，於民國108年1月接任高公局副局長迄今。在國道橋梁工程的技術發展過程，甚至是國內橋梁工藝的成長上，陳副局長扮演了關鍵角色。本刊很榮幸於民國112年5月15日專訪陳副局長，與我們暢談他個人工程生涯經歷及經驗分享。

貳、訪談紀要

問：國內橋梁工程新材料、新工法技術發展，最早應該是由國工局開始推動引進，而由國工局到高公局階段，陳副局長皆擔任關鍵角色，可否請副局長分享一路走來之心路歷程。

答：國工局主要負責的工作為國道的興建，而國道工程一般規模龐大，且橋梁佔極大的比重，若採用傳統工法，不僅不適用，且效率不佳，因此藉著興建國道工程龐大橋梁規模的機會，我們積極引進新工法、新材料來提升建造時的效率，也藉機推昇國內的橋梁技術。

在推行的過程中，長官的支持是很重要的
一個因素，歷屆的局長對於新材料新工法都持

正面的態度，支持局裡的同仁能盡情的發揮。初期階段很辛苦，因為國內並無相關規範，甚至沒有生產材料的廠商，因此推行的過程需分階段進行，主要分為三個階段。首先，第一階段就是單純引進先進國家的材料或工法，於國內工程試行；再來第二階段則是鼓勵材料或工法的本土化，在這個階段，我們需要花時間熟悉並研擬相關的設計及施工規範，另外，也要明確訂定材料製造的規格要求，例如要求製造廠商需與國外公司合作，或須納入專業顧問，並經工程司審核同意等規定。透過局裡同仁的共同努力，也逐漸發展出一套S.O.P.。在嘗試新材料或新工法時，先評估其效益及可行性後，一般先辦一個Pilot Project進行實作，經評估及測試，後續才大範圍採用。Pilot Project首先應用於範圍較小之工程，可以選擇於國道非主線的部分先行試作，透過工程實作能夠



1

人物專訪

在設計及施工時提前了解問題，再針對問題進行改善，往後在大範圍施作時，因已有相關經驗，在規劃與設計階段就能儘量避免重複的問題產生；最後，第三階段則全面開放，只要符合訂定的規範及相關試驗要求，即可採用。上述新工法、新材料引進的相關例子，如早期的支撐先進工法、剛接懸臂工法、與中後期的全預鑄橋梁工法(註：大梁及墩柱皆用預鑄節塊)、多螺箍鋼筋墩柱等系統化橋梁施工法，及適用於特殊橋梁需求的脊背橋(註：陳副局長所命名)、波型鋼腹板複合梁橋、混合梁工法橋、橫肋梁工法-大斷面單箱室橋，以及新材料運用的LRB隔震橋、高阻尼系統橋、輕質混凝土橋、自充填混凝土SCC墩柱、高性能鋼板之鋼橋等。譬如，輕質混凝土的推廣，記得第一次使用於國道六號，當時現場施工時輕質混凝土泵送時發生塞管的問題，最終採用最傳統吊桶的方式來進行施工才順利完成。有這個前車之鑑，後來設計國道四號豐潭段計畫時，就建議將輕骨材先浸水，即解決了澆置時塞管的問題。目前在輕質混凝土施工上已能順利的進行，我們也規劃未來鋼橋RC橋面板都能夠採用輕質混凝土，以更有效減輕上部結構重量進而縮小基礎設計尺寸。至於多螺箍鋼筋，這種使用一筆箍方式施工，近來也受到許多關注，國內原有使用於建築工程，利用自動化的施工設備生產一筆箍，取代原本要靠人力一根一根綁紮的橫箍筋及繫筋。橫箍筋及繫筋綁紮不僅



(左1) 陳明谷經理 (左2) 蔣啟恆資深協理

耗時、耗力、耗量外，高橋墩職安的風險也較高，橋柱斷面比建築柱大，須配合採多螺箍進行設計，並經自動化施作後，可以提升經濟性、施工性，我們也與國震中心合作，驗證相關耐震性能，在橋梁工程中，這種工法也首次用於國四豐潭段橋墩施工，並在施工得到了很好的設計回饋，例如將橋柱主筋於基礎底部之L型筋改用T型鋼頭以方便施工等。雖然目前實際橋梁應用上僅使用於等斷面直柱，現也正以國四工程的施工經驗回饋與業界研討，朝後續工程能拓展到擴頭式橋柱，來充分發揮其營



(後左1) 陳炳宏經理 (後左2) 陳光輝經理 (後左3) 黃炳勳副總經理 (後左4) 廖學瑞總經理 (右) 陳國隆副局長

建自動化的效益。

從過往的案例經驗，除了局內的長官大力支持以外，顧問公司(如貴公司)及施工廠商願意配合更是促成技術發展的關鍵因素。藉由國內規模較大的工程，由業主引導大型的顧問公司，再到承包商，大家透過不斷的嘗試與溝通讓工程順利進行，最後也透過研討會或案例分享等將技術推行到國內其他工程單位，才能確實將國內工程的技術再提昇。

問：國道橋梁工程從早期以新建工程為主，而隨著道路橋梁工程漸趨飽和、可新建腹地不足、既有橋梁老化等因素，近年來亦逐漸開始關注在既有橋梁的耐震補強延壽上，可否請副局長分享身為國道橋梁主管單位所面臨之挑戰？

答：原本國工局與高公局的任務不同，主要負責的工程內容也不相同，國工局主要任務為國道的新建工作，而高公局則多是以國道的養護



1

人物專訪

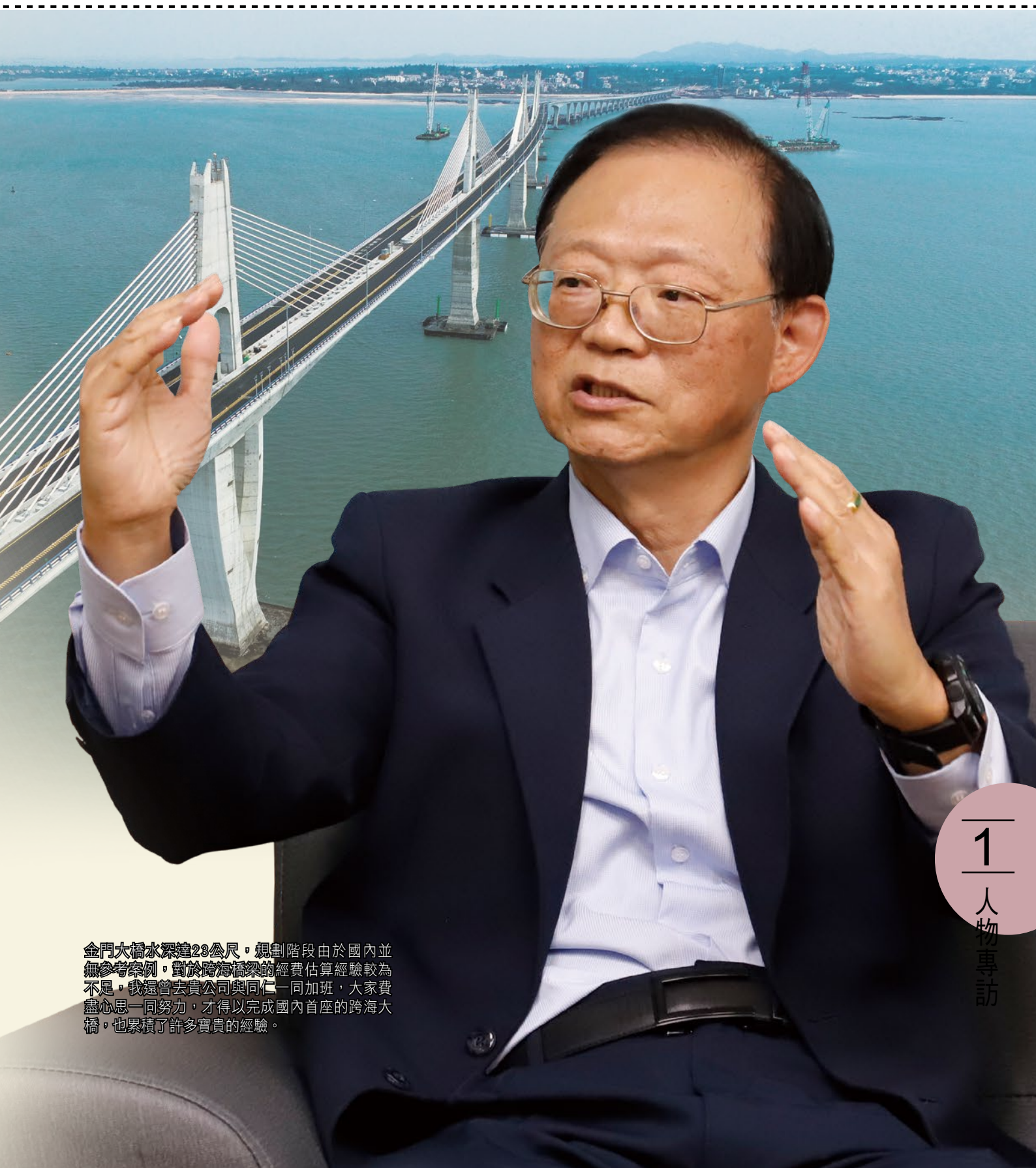
及拓建為主。新建工程因規模大、牽涉專業範圍廣，國工局因應這樣的需求，所以專業分工較細。而早期傳統橋梁的維護工作較為單純，所以高公局內原來的編制較單純。隨著橋梁工程技術的演進，各種新工法、新材料的推行，耐震規範的演進以及極端氣候造成的威脅，橋梁維護管理所面對的問題越來越複雜。另隨著國內橋齡日漸增長，既有橋梁維護管理及耐震補強的工作需求也日漸增加，如田寮3號高架橋、烏溪橋、中沙大橋、圓山橋..等，原高公局的編制已日漸不敷需求，因此，當兩局於民國107年1月整併後，順勢將原本屬於新工單位的人員併入，高公局組織編制上也做調整，有較充足的專業人力資源，可以處理國道維護管理的問題。另外於兩局合併後的作業範疇由興建施工涵蓋到完工後續的維護工程，一個工程的生命週期皆在同個單位內來進行管理，主辦者需要有更全面的角度，在設計上不只要顧慮施工的層面，更要思考到後續維護管理的部分，是工程人員的挑戰也是很好的學習機會。

另外，近年來國內工程規模逐漸大型化，目前許多大型公共工程仍在進行中，未來也會持續增加，但少子化導致人力不足的問題卻愈發嚴峻。除了在設計方面人手短缺，監造部分尤其明顯。針對這方面的問題，我們近期嘗試無紙化的監造模式，目前國道一號汐止交流道增設南入匝道的工程就以這種方式來進行現場

的施工監造，貴公司以前在五楊段採用的PMIS系統應也是類似的經驗。無紙化是透過共享平台來建立一套管理系統，不僅增加施工效率及工程品質，也讓知識與經驗得以傳承，是一套能同時結合監造表單需求、實務操作與跨領域思維的系統，藉以降低人力不足的問題，目前這新技術的應用，雖尚有一些技術問題待突破解決，未來透過業主主導、顧問公司及現場施工廠商進行配合，三方一起努力，一起學習成長，希望對人力不足問題有良好助益。

隨著交通建設的發展，國內橋梁的橋齡也日增加，對於國道建設關注的議題不再僅限於新建工程，既有橋梁的老化、橋梁耐震補強及橋梁延壽也是重要的一環，各個橋梁所面臨的問題也不同，需深入了解問題成因，方能根絕問題。這些工作都需依靠各專業的合作，及配合引用新材料、新工法，因此，我們在專業人員的編制與新技術、新觀念的引進也要與時俱進，例如功能性支承的研究、基礎補強方式、地質改良的運用..等，才能以有限的資源有效應對我們所面臨的挑戰。

問：金門大橋為國內首座跨海大橋，金門縣政府於民國99年開始委託國工局代辦，期間一波三折，多次變更建設計畫，主橋工程歷經3個施工廠商才完



金門大橋水深達23公尺，規劃階段由於國內並無參考案例，對於跨海橋梁的經費估算經驗較為不足，我還曾去貴公司與同仁一同加班，大家費盡心思一同努力，才得以完成國內首座的跨海大橋，也累積了許多寶貴的經驗。

1

人物專訪



成，可否請副局長分享這一路走來的甘苦談，以及對於未來台灣跨海橋梁（如馬祖大橋）執行之建議。

答：金門大橋是國內首座大規模跨海大橋，橫跨了金烈水道銜接起大、小金門島，主橋為五塔六跨的脊背橋，主跨徑200公尺，是國內跨徑最大的脊背橋，相當具指標性，也是與貴公司一同努力完成非常具有代表性的作品。金門大橋水深達23公尺，地質為堅硬的花崗岩，而且花崗岩的風化程度變化大，工址又位處偏遠離島，人、機、料的動員較台灣本島的工程困難許多，規劃階段由於國內並無參考案例，對於跨海橋梁的經費估算經驗較為不足，所以在設計階段吃足苦頭，工程發包多次流標，經務實檢討設計成果後配合辦理建設計畫變更。印象最深的是當時因為經費不足，需進行工程減量設計調整，針對主橋採5塔、3塔及2塔配置方案評估比較，我還曾去貴公司一同假日加班，檢討確認主橋橋塔配置，並調整主跨徑取消原採混合梁主跨的中間段鋼梁等，大家費盡心思一同努力，才得以完成國內首座的跨海大橋，也累積了許多寶貴的經驗。這些難得的經驗，應可回饋應用在未來跨海橋梁的案例上。譬如未來馬祖大橋的興建，就我了解水深更深，水深達60米，在施工船機的能量需求上會較金門大橋更大，設計階段建議要詳實掌握

船機的來源。另外在方案設計上，國內雖然目前沒有相當水深的經驗，建議可參考國外的案例，例如希臘的Rion-Antirion跨海大橋，水深也達60餘公尺，雖然該橋址屬於軟弱地質，與馬祖大橋面臨的挑戰並不完全相同，但仍能透過國外的經驗回饋至未來馬祖大橋的設計。

問：最後可否請陳副局長以橋梁工程師的角色，依您自身的經驗，提供建議給目前參與或準備投入在橋梁工程領域的工程師。

答：回想工程生涯，時間真是過得很快，記得剛進高公局北二高工程處時，機關長官要求國道2號這一段要自辦設計，因當時無工具程式可以使用，一開始我們幾個年輕工程師用手算的方式，從I型梁、3跨連續梁再到下部結構，與同仁一同演算及手繪設計草圖，並配合查閱設計及施工規範，以深入了解規範規定及結構理論細節。後續我們將相關計算過程自行寫程式，將設計流程電腦化，因這個契機及舞台讓我們可以歷練，不僅磨練基本工，也能很扎實的建立工程師的基本觀念，回想這段自辦設計及自行加夜班寫程式的過程真的很辛苦但收穫很多。我也將之前的手算例子及自行開發的程式留局裡，建議工程人員能有機會多磨練基礎工，透過職場給予的平台，在經辦各項工程



(左1) 陳炳宏經理 (左2) 陳光輝經理 (左3) 曾榮川資深協理 (左4) 廖學瑞總經理 (中) 陳國隆副局長
(右3) 黃炳勳副總經理 (右2) 蔣啟恆資深協理 (右1) 陳明谷經理

時能更深入了解這些設計的理念與緣由。每個工程會遇到的問題及面臨的挑戰皆不相同，經歷每一個工程都是學習的機會，透過工程執行過程的討論及經驗累積內化為自己的工程素養。國道未來的工程，包含國7、國1甲、國1楊頭段拓寬、國5接蘇花改…等計畫的新建，工程規模相當龐大，橋梁比例也甚高，期望參與的橋梁工程師仍能延續國道工程以往對於新材料新工法積極引進的精神及多思考營建自動化的運用，利用未來這些年大型工程規模的機會，繼續推展國內橋梁工程的技術，並提昇國

內橋梁設計施工的精緻度及橋梁的美學表現。

後記

承蒙陳副局長於百忙之中撥冗接受本刊專訪，於訪談中可以深切感受陳副局長對於工程的熱情，以及勇於面對挑戰且務實解決問題的精神，相信是這樣的特質讓陳副局長能在國內橋梁工程新材料新工法推展扮演重要的角色，也是後輩工程師學習的對象。



訪中國土木水利工程學會理事長

宋裕祺

談

臺灣橋梁建設發展

整理：張英發 ■ 攝影：詹朝陽

壹、前言

宋理事長曾服務於公路局西濱北工處及中華顧問工程司，之後任教於台北科技大學並曾任工程學院院長，目前擔任中國土木水利工程學會理事長與行政院公共工程委員會委員、中國工程師學會理事與地震工程學會理事。亦曾擔任中華民國結構工程學會理事長與國家地震工程研究中心橋梁組組長等職務，集結產、官、學與研等各方面之經歷，具備土木技師與結構工程技師資格，長期從事與橋梁建設相關的工作，是一位兼具實務、研究、行政與學術的專家學者。

貳、訪談紀要

問：宋理事長長期從事與橋梁建設相關的服務，產、官、學、研經歷兼具，可否請理事長分享一下個人經驗，尤其在橋梁技術變遷方面。

答：我在台北工專念書時，曾經修讀公路局副總工程師賈駿祥老師的橋梁工程、高公局胡留璋老師的橋梁設計與曾清銓老師的鋼結構設計等幾門重要的課程，奠定橋梁工程專業訓練的入門基礎。工專畢業考上公務人員高考，退伍後進入公路局服務，參與台二線與台十五線工程的預力混凝土橋梁設計，實現工程師生涯中第一次設計的橋梁。爾後清華大學動力機械研究所畢業，進入中華顧問工程司結構部從事鋼

橋設計工作，受教於曾清銓副總經理、張荻薇經理與諸位同事先進們的指導，在橋梁工程技術領域收穫頗豐，在職11年有幸參與重大工程設計諸如：台北市東西向快速道路工程(市民大道)、高屏溪斜張橋工程、東西向快速道路漢寶草屯線E408標貓羅溪斜張橋工程、台北市基隆路正氣橋改建工程與台北市洲美快速道路工程等，學習如何主持大型公共工程與領略工程專業判斷等知識，培養了宏觀的橋梁工程實務涵養，對於建構日後審查重大公共工程的知識網絡助益相當大。

台灣在半世紀前處於農業時代與工業時代的轉型期，受限於國家經濟發展，在推動公共工程建設時多以”先求有再求好”的策略作為圭臬，橋梁設計與施工多以具備安全性能為基本考量。但這三十年來，隨著工程技術日益進



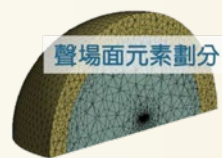
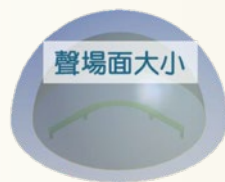
1 人物專訪

步、永續理念逐步深化，橋梁工程已從以往單純的設計與施工演變到全生命週期的思維，整個生命週期包括規劃、設計、施工、監造、營運、維護等，每個階段都有它應該做的事情。設計者不僅須著重於工程規劃與設計等問題，對於日後營運與維護也須提出預為因應之道，但這必須配合橋梁管理者之需求，設定管理策略，這些策略當然也跟管理單位的人力編制與財務預算有關，可採取的因應方式並非唯一。若管理人力與預算較少時，初始設計可能須採較高標準來降低日後運維的需求，但初期工程成本會較高；若建設經費亦不充裕時，則可能會採取設計標準略低設計，再搭配有效的管理策略來達成橋梁的安全與服務性能。

日本現在採取一種名為預防式管理的方式，在橋梁性能退化曲線不是降減到很低時即須進行維護工作，其所對應每次付出的維修費用相對較少也較穩定，政府財政支出比較可以均勻化。因此，在橋梁規劃設計階段，設計者即須與管理者溝通，配合管理的需求擬定合宜的全生命週期設計方案。也因此，橋梁工程師所需具備的專業知識也比以前更為淵博。

早期橋梁設計著重在承載能力與耐震能力的各項設計細節，但隨著防災需求日益提升、橋梁防洪設計、耐風設計與耐久性設計的重要性也逐漸凸顯，此外都會區的高架橋工程亦須

注重振動與噪音防制，因此橋梁設計專業範疇



高架橋工程的振動與噪音分析模型



(左1)彭知行經理 (左2)蔣啟恆資深協理 (左3)曾榮川資深協理

已遠遠超過以往固體力學的領域，對於流體力學甚至是流固耦合問題均已無可迴避，橋梁設計的專業需求更顯多元。

分析方法也從傳統的線性靜力分析、反

應譜分析進化到非線性靜力分析、非線性動力



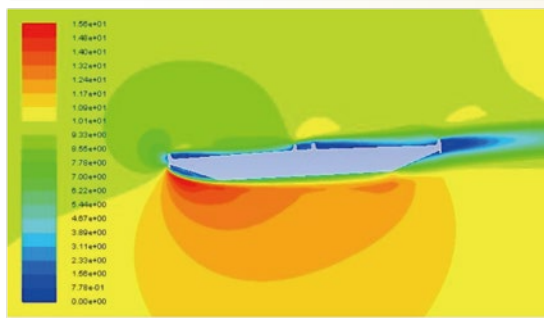
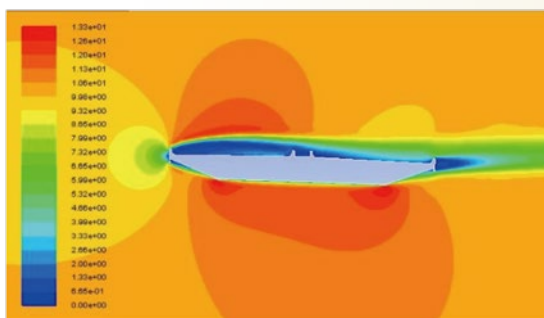
捷運劍潭站 Z 向模態振型



(中)宋裕祺理事長 (右3)廖學瑞總經理 (右2)黃炳勳副總經理 (右1)劉珊經理



歷時分析與計算流體動力(Computational Fluid Dynamic, CFD)分析等，分析程序愈趨複雜，電腦運算速率也隨之愈顯重要。因此，具備使用電腦運算解決橋梁工程的問題已成為現代橋梁工程師應具備的基本能力之一。

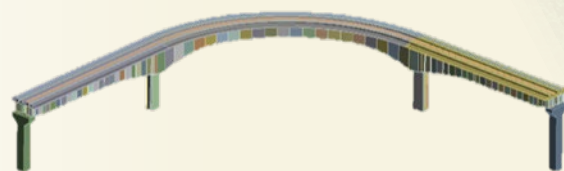


高屏溪斜張橋CFD數值模擬

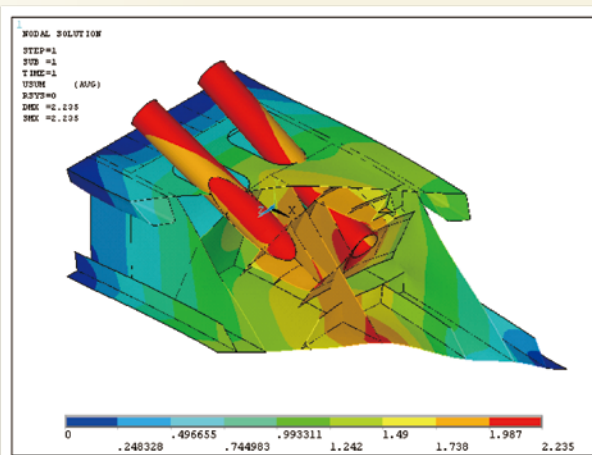
問：電腦運算與AI科技的發展一日千里，其對橋梁工程會有甚麼樣的影響與改變，可否分享您的看法。

答：這個問題可以從幾個層面來檢視。首先在設計和模擬方面，工程師利用電腦強大的計算能力和先進的模擬技術，可以更快速與精確地進行橋梁設計和分析。以往設計橋梁需要大量的人工手算和經驗判斷，現在可以使用電腦輔助設計（CAD）工具和有限元素分析（FEA）

等技術來加速設計過程，並確保橋梁的安全性和可靠性。



瞬態分析模型



鋼索錨碇處有限元素分析

其次是結構最佳化設計，AI可以藉由大數據分析生成更經濟、節能和可持續的結構設計方案以實現更好的性能和成本效益。再者，利用雲端計算和協同工具，不同地域和專業背景的團隊可以通過雲端平台共享設計資源、模擬結果和數據，實現更高效的設計和協作過程，有助於提高設計的創造力和效率。

在監測和維護方面，感測器和監測系統可以即時收集橋梁的數據(如溫度、振動、變位與應變等)，使用機器學習和數據分析來檢測任何潛在或異常的問題，有助於提前發現結構



1 人物專訪

宋裕祺理事長訪談中表示，使用電腦運算解決橋梁工程的問題已成為現代橋梁工程師應具備的基本能力之一。



變異的徵兆，並採取適當的維修和保養措施，進而確保橋梁的安全性與延長使用壽命。在橋梁施工與管理部分，亦可採用機器學習和計算機視覺技術，自動檢測施工過程中的缺陷和品質問題，進而提高施工品質和效率。未來AI技術也可以應用於橋梁的自動化施工，利用機器學習和機器人技術，可以開發出能夠自主執行施工任務的機器人系統，減少人力成本和工期。

電腦運算和AI科技的發展為橋梁工程帶來了更高效率與智能化，可以提升橋梁設計、監測和維護效率。

問：隨著人文社會與自然環境急速改變(包括少子化與氣候變遷等)，現今橋梁建設與維護，應如何來因應。

答：因應人文社會和自然環境的變化，橋梁建設與維護可從以下幾個層面思考：

首先應該是推動技術創新，積極開發和應用新的技術和材料，以改善橋梁的安全性和耐用性。技術創新能夠提高橋梁的可靠性和可持續性，同時減少維護和修復的需求。其次為強化維護和監測系統，建立更完善的橋梁維護和監測系統，以即時檢測橋梁的狀態和性能。利用先進的技術如無人機、感測器和人工智慧分析等，及早發現橋梁結構的問題，並進行即時維修。此外亦應制定橋梁長期維護計畫，確保橋梁的安全和可持續性，包括定期檢查、維修和更新橋梁結構構材和設備，根據實際使用情況作大數據分析以預測未來需求，排訂適當的維護時間表與編列相關預算。最後可進行災害風險評估，考慮氣候變遷對橋梁的影響，包括極端天氣事件等因素，以評估潛在的風險和橋

專案管理

資料視覺化

資料集中管理

資料科學分析

警戒/異常通報

評估報告

台4線崁津大橋及台7線巴陵大橋委託
即時監測服務工作雲端管理平台

自動化

雲端化

智慧化

橋梁監測管理平台



橋梁維護和監測系統

梁結構所需採取的適應措施。

問：橋梁設計、施工與維護如何考量零碳排。

答：在橋梁設計階段，可以採用減少碳排放的設計原則，包括選擇可再生材料與低碳混凝土等，盡可能減少橋梁的總體重量，以降低施工和運輸階段的能源消耗。其次，在施工過程中，可以採取節能措施以減少能源浪費，優化施工計畫以減少機械運作時間和不必要的能源消耗。在橋梁照明和其他電氣系統中使用綠能(如太陽能和風能等)以減少對傳統能源的依賴，降低碳排放。

在施工過階段應透過有效的施工管理達到減少材料的浪費。此外，工地也須採取循環再利用和回收的方法，減少廢棄物和資源浪費。

在橋梁的維護階段，採用綠色維護方法。這包括使用環保產品和材料進行維修和保養，確保維護過程中不產生額外的碳排放。以上種種都是可以努力的方向。

問：目前年輕人對土木工程缺乏動力與熱誠，橋梁工程產、官、學、研各界應該如何合作，來改善這樣的現象與趨勢，理事長您的期許與建議為何。



答：確實，土木工程對於現在的年輕人比較沒有吸引力，主要是薪資較電子、資訊及科技業低很多，此外近年來社會各界對於從事土木工程專業人員之要求及究責均較以往嚴苛，造成青年學子對於選擇土木工程做為終身職業的意願較低。

相對於高科技產業而言，土木工程師的薪資確實相對偏低，但以人生工作職涯的規劃而言，土木工程師應該比較具有永續性，這也是我們目前一直在對青年學子們解說的重點，因此為土木工程師謀求更好的土木工作環境是吾輩目前亟需努力的工作之一。

吸引年輕人對土木工程的重視，具體作法至少包含以下各項：

- **提供教育和宣傳：**橋梁工程產業可以與學術界和教育機構合作，提供關於土木工程和橋梁工程的教育資源和宣傳活動，包括舉辦研討會、工作坊和展覽等，以吸引年輕人對橋梁工程的興趣。
- **實習和職業培訓計畫：**建立與學校的合作夥伴關係，提供橋梁工程的實習和職業培訓計畫，使年輕人在實際工作中體驗和學習橋梁工程的知識和技能。

- **激勵創新和研究：**政府機構和研究機構可以提供資金和支持，鼓勵橋梁工程領域的創新和研究，激發年輕人積極參與並培養其在解決現實挑戰與發揮創造力的潛能。

- **建立經驗傳承平台：**建立橋梁工程專業人士、學術界代表和年輕人跨界對話和交流的平台，以促進知識分享和合作，並鼓勵年輕人參與和貢獻。

為改善土木工程環境，鼓勵青年學子踏入土木工程職涯，土木水利工程學會結合國內各工程業者，於民國111年6月完成自發性研究「公共工程採建造費用百分比法之設計費率合理性分析」，針對國內設計費率提高研擬出具體作法，向政府建言，部分建言已獲政府採納，後續仍需持續努力。

此外，為提升學生們對於土木工程的學習興趣，目前土木水利工程學會邀集各大學土木水利相關系所與業界代表編撰科普式土木水利工程概論，期待藉由此書籍之問世，能夠使高中生、大學生與家長們對於土木水利工程有更深切的認識與了解，鼓勵投入土木工程領域，培育解決民生工程的未來工程師，為土木工程的人才永續發展。



(中)宋裕祺理事長 (右4)廖學瑞總經理 (右3)曾榮川資深協理 (右2)彭知行經理 (右1)張英發經理
(左1)陳明谷經理 (左2)劉珊經理 (左3)蔣啟恆資深協理 (左4)黃炳勳副總經理

土木水利工程學會也積極舉辦工程創意競賽、學生BIM建模比賽、工程科技辯論賽、英文簡報比賽等，增進產業人力結構的健全及提升從業人員對土木工程產業的認同感。此外，青年也辦理工程師論壇，產官學研前輩們分享職涯經驗，藉由不同領域的經驗視角，提供在學生及青年工程師在職涯規劃上的藍圖指引，點燃年輕工程師們的「工程魂」，協助其築夢踏實。

希望藉由這些努力能夠喚起年輕人對土木工程的热誠。

後記

宋理事長集結產、官、學與研等各方面之經歷，同時也具備土木技師與結構工程技師資格，長期從事橋梁設計、監測與維護等相關的建設及研究工作。從彼此互動的訪談中，瞭解到他的專業多方面向，且對於改善土木工程環境及如何激起年輕人對土木工程的熱忱亦有較具體的想法與作法，為一位兼具工程實務、學術研究與產業推廣的土木人。

New RC應用於橋梁探討

Application of New RC in Bridges

關鍵字(Key Words)：New RC、橋梁(Bridges)、鋼筋混凝土(Reinforced Concrete)、高強度鋼筋(High-Strength Reinforcement)、耐震(Seismic)

國立台灣大學／土木工程學系／教授／歐昱辰 (Ou, Yu-Chen) ①

國立台灣大學／土木工程學系／博士後研究員／吳振維 (Wu, Jhen-Wei) ②

摘 要

運用高強度鋼筋與混凝土於高層建築的New RC計畫已於國內推動逾十年，相關設計規範與工程技術已日趨成熟，即將公告的新版建築物混凝土結構設計規範將納入SD 490W、SD 550W與SD 690高強度鋼筋之使用，國家地震工程研究中心New RC研究團隊所出版的高強度鋼筋混凝土結構設計手冊則更進一步涵蓋SD 690E與SD 790高強度鋼筋。本文首先對New RC技術與應用於橋梁之研究進行扼要文獻回顧，再回顧臺灣與美國建築與橋梁規範關於鋼筋與混凝土材料強度之限制，接著探討構材設計使用高強度鋼筋之額外規定，最後透過橋柱設計之案例說明使用高強度鋼筋之效益。本文建議，可優先考慮推動New RC於橋梁下部結構使用，可考慮使用SD 490W或SD 550W高強度主筋與SD 490W、SD 550W或SD 690高強度橫向鋼筋，搭配 $f'_c \geq 28\text{MPa}$ 之混凝土，可有效降低鋼筋用量，進而可增加施工性、縮短工期與提高構材品質，且較有利於自動化施工之推動。



Abstract

The New RC project in which high-strength reinforcement and concrete are developed for high-rise buildings has been conducted in Taiwan for more than ten years. Related design guidelines and engineering techniques have become increasingly mature. The upcoming national reinforced concrete design code for buildings will incorporate SD 490W, SD 550W, and SD 690 high-strength steel reinforcement. The design guidelines published by the New RC team of the National Center for Research on Earthquake Engineering further include the use of SD 690E and SD 790 high-strength reinforcement. In this article, a literature review on New RC techniques and related research on bridges is first presented, followed by a review of the strength limits of steel reinforcement and concrete of building and bridge design codes of Taiwan and the USA. Then, new requirements for member design are discussed when high-strength reinforcement is used. Finally, design cases of bridge columns using high-strength reinforcement are presented, and the benefits of using high-strength reinforcement are discussed. Based on the review and case study, it is suggested that New RC can be first applied in the bridge substructure. SD 490W or SD 550W can be considered for longitudinal reinforcement, and SD 490W, SD 550W, or SD 690 can be considered for transverse reinforcement. Concrete is used with $f'_c \geq 28\text{MPa}$. Using these materials is expected to decrease the amount of steel reinforcement, thus increasing the constructability, shortening the construction time, and increasing the member quality. Moreover, reducing the amount of steel is beneficial for construction automation.

壹、前言

日本建設省建築研究所於1988-1993年推動「使用高強度混凝土與鋼筋之先進鋼筋混凝土建築發展計畫」[1]，該計畫簡稱New RC計畫，該計畫主要目的係為提高鋼筋與混凝土之材料強度，以使鋼筋混凝土建築高度獲得大幅提升之同時，仍可將構材尺寸與鋼筋用量分別控制在建築使用與施工可行之範圍內。迄今，日本高層建築使用 $f_y=685$ MPa之主筋與 $f_y=785$ MPa之橫向鋼筋已有多年經驗，混凝土 f'_c 最高也逐步提高至150 MPa [2]。

臺灣則自2008年起，由國家地震工程研究中心發起臺灣New RC計畫，結合產、官與學界資源，研究New RC所需的高強度材料、構件行為、結構分析與設計，以及施工方法。經過數年努力，於2017年出版高強度鋼筋混凝土結構設計手冊(簡稱New RC設計手冊) [3]以及施工手冊[4]，之後國震中心持續進行New RC之研究，並於2022年發行第二版設計手冊[5]，主要修訂內容涵蓋臺灣最新的New RC技術，並考量新版建築物混凝土結構設計規範之相關內容。臺灣New RC設計手冊主要適用於建築工程，所涵蓋的主筋 f_y 最高為690 MPa (SD 690E鋼筋)，橫向鋼筋 f_y 最高為790 MPa (SD 790鋼筋)，混凝土 f'_c 最高為100 MPa。New RC設計手冊雖非國家規範，但已被用於內政部建築新技術新工法新設備及新材料認可之申請，並應用於實際建築設計中。

隨著New RC技術多年的發展，其相關技術也逐步納入國家建築結構設計規範，2017年公告的內政部混凝土結構設計規範[6]，修訂了部分預鑄建築條文，首度納入SD 490W鋼筋($f_y=490$ MPa)，此修訂係反應國內預鑄產業已有多年成功使用SD 490W鋼筋之經驗。即將於2023年公告的新版建築物混凝土結構設計規範[7] (以下簡稱新版建築RC設計規範)，則進一步將SD 550W($f_y=550$ MPa)納入耐震設計用主筋，另納

入SD 690鋼筋($f_y=690$ MPa)，主要適用於橫向鋼筋。在混凝土 f'_c 方面，部分的設計規定有70 MPa之上限，例如伸展長度之計算等。新版建築RC設計規範內容可參考中國土木水利工程學會出版之土木401-110 [8]以及即將出版之土木401-112 [9]，相較於土木401-110，土木401-112針對鋼筋伸展長度與特殊結構牆設計等條款有部分修訂，土木401-112內容將與新版建築RC設計規範相同。

以上可知，建築New RC技術與規範之發展已漸趨成熟，國內建築使用SD 490W與SD 550W、甚至是SD 690鋼筋之工程也逐年增加，有呈現蓬勃發展之勢。反觀國內橋梁工程，受限於公路橋梁設計規範[10]之規定，鋼筋之 f_y 最高為4200 kgf/cm² (414 MPa)，且根據公路橋梁耐震設計規範[11]，抵抗地震力構材之混凝土 f'_c 不宜高於420 kgf/cm² (41.2 MPa)，導致New RC技術之推動較為緩慢。誠然橋梁工程不同於高層建築工程，一般無高樓層所帶來的高力量需求，但以橋柱為例，一般橋柱斷面尺寸大，當力量需求較大時，縱向鋼筋配置於柱四周，合併塑鉸區剪力與圍束需求，常造成鋼筋之擁擠，影響施工性、工期與施工品質。此時，若能適當提升鋼筋強度，將可降低鋼筋用量，提升施工性、縮短工期與提高構材品質，另由於用鋼量之降低，較有利於預組鋼筋籠等施工自動化措施之推動，另可協助節能減碳，有助於社會之永續發展。

貳、文獻回顧

一、高強度鋼筋

CNS 560已於2018年[12]納入SD 490W、SD 550W以及SD 690三種高強度鋼筋，該三種鋼筋亦將納入新版建築RC設計規範[7]，其中SD 490W與SD 550W為可鉚鋼筋，且可用於抵抗

地震力之主筋，另根據新版建築RC設計規範，SD550W鋼筋節底部接鋼筋表面處之曲率半徑應不小於該處節高之1.5倍，以避免過早的低週次疲勞破壞疑慮，螺紋節鋼筋通常能符合此規定，該規定不適用於SD 490W鋼筋，因其強度較低，一般韌性較佳，較無過早低週次疲勞破壞之疑慮。CNS 560之SD 690鋼筋為不可鐸鋼筋，且不允许用於抵抗地震力之主筋，係因其抗降比(f_u/f_y)之規定不符合至少1.25之要求，對構材塑鉸長度之發展不利，不利於構材韌性之發揮。為此，New RC設計手冊[5]另訂SD 690E規格之鋼筋，同樣為不可鐸鋼筋，但其抗降比符合至少1.25之要求，因此可用於抵抗地震力之主筋，惟作者另建議，該種鋼筋節底部接鋼筋表面處之曲率半徑宜不小於該處節高之1.5倍，以避免過早之低週次疲勞破壞。

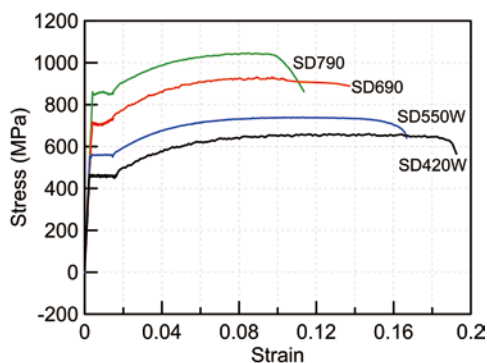
New RC設計手冊另有SD 790規格之鋼筋，該種鋼筋並未納入CNS 560，也未納入新版建築RC設計規範，SD 790適用於圍束或抵抗剪力與扭力之橫向鋼筋，不適用於構材之主鋼筋。

圖1(a)比較傳統SD 420W鋼筋以及三種高強度鋼筋(SD 550W、SD 690與SD 790)之應力應變曲線，一般而言，鋼筋的極限應變有隨強度增

加而下降之趨勢。圖1(b)為國產SD 550W竹節鋼筋，另有螺紋節鋼筋可供選擇。

二、高強度鋼筋混凝土於橋梁結構之應用

相較於傳統強度的鋼筋($f_y \leq 420$ MPa)，高強度鋼筋($f_y \geq 490$ MPa)的使用雖有降低鋼筋用量的好處，卻也衍生其他設計上應注意的事項，如圖2所示。鋼筋用量的降低，會造成構材開裂後較低的勁度與較大的變位；高強度鋼筋有較高的降伏應變，反應出了較大的彈性應變與較低的塑性能量消散，一般也會伴隨較低的鋼筋極限應變(如圖1(a)所示)。同時，使用高強度鋼筋於構材中會反應出較大的鋼筋拉、壓應力，將增加了鋼筋的握裹需求與挫屈潛勢，且較易產生較大的構材裂縫。規範以混凝土壓應變達0.003當作構材軸力與撓曲的極限狀態，在此狀態下高強度鋼筋是否能充分發揮其降伏強度，也是需要加以關注的。另現有設計公式於高強度鋼筋之適用性，需仰賴更多試驗資料加以探討。過去New RC相關的研究，對前述事項皆有所探討，並提供相關設計指引，其中針對高強度鋼筋額外產生的規定且與橋梁較相關的部分，將於後續章節中加以扼要說明。



(a) 傳統與高強度鋼筋應力應變曲線



(b) 國產SD 550W鋼筋

圖1 高強度鋼筋

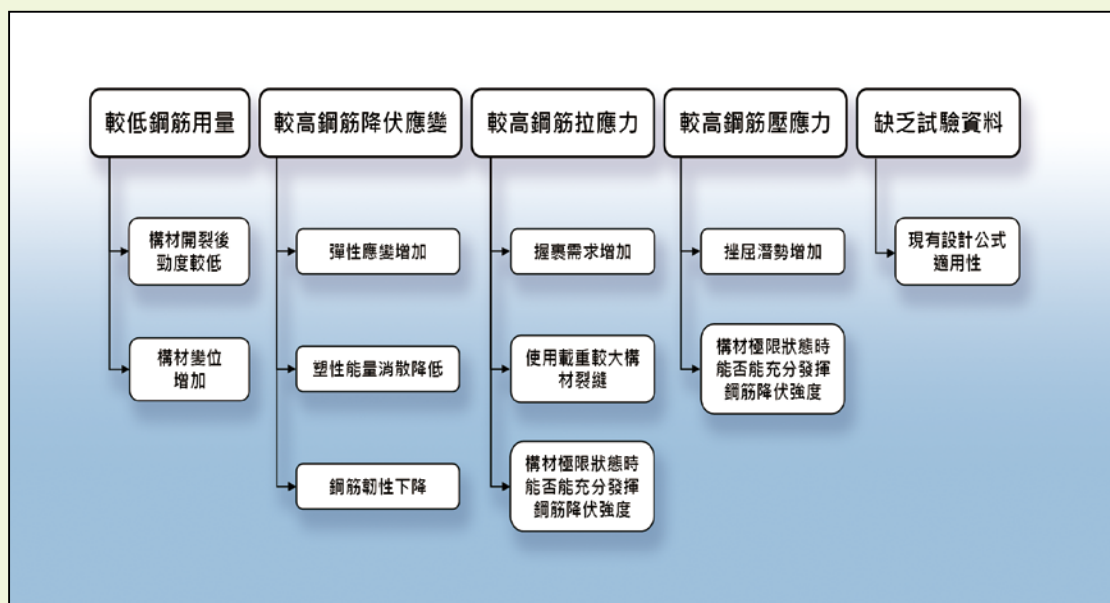


圖2 使用高強度鋼筋設計上應注意事項

鋼筋混凝土橋梁之上部結構一般採預力構造，在撓曲設計方面，係以預力控制其使用載重下之應力，再以預力鋼筋(鋼腱)單獨或搭配非預力鋼筋之方式，提供極限狀態足夠的撓曲強度，一般而言，撓曲設計係由使用載重之應力需求控制，因此提升非預力鋼筋之強度較無效益。在剪力或扭力設計方面，高強度橫向鋼筋的使用可能會導致過早的混凝土斜向開裂，因此高強度鋼筋之使用可能效益不大，這點作者也正進行相關之研究中。

高強度鋼筋於橋梁下部結構(例如橋柱與帽梁等)之應用可能較具效益，此係因橋柱為橋梁抗震消能的主要構材，需配置充分的撓曲、剪力與圍束鋼筋，因其斷面常較大，導致鋼筋之擁擠，高強度鋼筋的使用可有效降低鋼筋之擁擠，提升施工性。且因柱一般在使用載重下受壓，因此無高強度鋼筋之使用可能導致裂縫過大之問題。

劉光晏等人[13][14]進行New RC單柱式橋墩反覆載重試驗，在軸向載重不變的情況下，透過使用高強度鋼筋(主筋 $f_y=685$ MPa；箍

筋 $f_y=785$ MPa)與高強度混凝土($f'_c=70$ MPa)，得以縮減斷面尺寸以及降低鋼筋用量，試驗結果顯示與傳統橋柱(主筋 $f_y=420$ MPa；箍筋 $f_y=280$ MPa； $f'_c=28$ MPa)相比，New RC柱具備相似的撓曲設計強度，惟勁度較低，此主因斷面縮小之故，該研究建議或可採中空斷面，於斷面積縮減時，仍能適當維持橋柱之勁度。

Barbosa等人[15]試驗採用ASTM A706 Grade 80 (ksi) 鋼筋($f_y=550$ MPa)之橋柱耐震性能，ASTM A706鋼筋類似於我國CNS 560 [12]中帶有W字母的鋼筋，具可鉚性且適合耐震設計使用，因此其Grade 80鋼筋相當於CNS 560之SD 550W鋼筋。橋柱試體包括採ASTM A706 Grade 60 ($f_y=420$ MPa)縱向與橫向鋼筋之傳統橋柱以及採Grade 80高強度縱向與橫向鋼筋之橋柱，混凝土實際 f'_c 為25-32 MPa，兩種橋柱具相同斷面積，且設計為具相似抗彎強度，由於鋼筋強度較高，Grade 80鋼筋橋柱之縱向鋼筋用量僅為傳統橋柱之75%。試驗結果顯示，Grade 80鋼筋之橋柱與傳統橋柱具有相似的抗彎強度與位移容量，位移韌性皆大於4.0，惟因較低的鋼筋用量，Grade 80鋼筋之橋柱具稍低的勁度與消能能力。以作者之

觀點而言，Barbosa研究顯示Grade 80鋼筋橋柱具應用之可行性，與傳統橋柱相較，其雖有較低的開裂後勁度以及消能能力，但差異不顯著；另Barbosa研究顯示Grade 80鋼筋可與普通強度混凝土搭配，仍能充分發揮其強度。

參、鋼筋混凝土規範材料強度限制

隨著相關研究的持續進展，有別於較早期整本規範規定單一鋼筋 f_y 最大設計值，如公路橋梁設計規範[10]之 4200 kgf/cm^2 (414 MPa)，較新版的規範逐漸細分不同設計類別應有不同的鋼筋 f_y 上限，以下扼要回顧國內外重要的建築與橋梁規範關於混凝土 f'_c 與鋼筋 f_y 限制值之規定。

一、混凝土與鋼筋設計強度上限

(一) ACI 318-19與新版建築RC設計規範

由於較高強度混凝土的測試數據不足，規

範規定單向剪力、雙向剪力、扭力與伸展長度之混凝土 f'_c 不得超過70 MPa，惟當梁具有最少剪力鋼筋時，其單向剪力之計算不受此規定之限制。

在鋼筋 f_y 最大設計值方面，表1與表2分別羅列ACI 318-19 [16]與臺灣新版建築RC設計規範[7]不同設計類別應遵守的上限，其中值得注意的是，於ACI 318-19之規定中，特殊抗彎矩構架(梁柱系統)之 f_y 上限值為550 MPa (Grade 80 (ksi))，而特殊結構牆之 f_y 上限(包括抵抗撓曲與軸力以及剪力)提高為690 MPa (Grade 100 (ksi))，惟美國Grade 100鋼筋尚未納入ASTM A706標準，因此實際上美國尚未準備好可用於抵抗地震力主筋用之Grade 100鋼筋，我國的CNS 560亦有類似的狀況，尚未有SD 690W規格之鋼筋，因此新版建築RC設計規範將特殊耐震系統之鋼筋 f_y 最大設計值統一為550 MPa。

另外，用於特殊耐震系統之圍束鋼筋 f_y 上限值為690 MPa，相較於現行建築RC設計規範

表1 ACI 318-19 [16]之鋼筋 f_y 最大設計值

用途	應用		f_y 最大設計值(MPa)
撓曲、軸力、收縮及溫度	特殊耐震系統	特殊抗彎矩構架	550
		特殊結構牆	690
	其他		690
縱向鋼筋之側向支撐、 混凝土圍束	特殊耐震系統		690
	螺箍筋		690
	其他		550
剪力	特殊耐震系統	特殊抗彎矩構架	550
		特殊結構牆	690
	螺箍筋		420
	剪力摩擦		420
	肋筋、箍筋、閉合箍筋		420
			550 (銲接鋼線網)
扭力	縱向與橫向		420
錨栓錨定鋼筋	特殊耐震系統		550
	其他		550
以壓拉桿模式設計之區域	傳遞拉力之繫桿		550
	其他		420

表2 新版建築RC設計規範[7]之鋼筋 f_y 最大設計值

用途	應用	f_y 最大設計值(MPa)
撓曲、軸力、收縮及溫度	特殊耐震系統	550
	其他	550
縱向鋼筋之側向支撐、 混凝土圍束	特殊耐震系統	690
	螺箍筋	690
	其他	550
剪力	特殊耐震系統	550
	螺箍筋	420
	剪力摩擦	420
	肋筋、箍筋、閉合箍筋	420
		550 (銲接鋼線網)
扭力	縱向與橫向	420
錨栓錨定鋼筋	特殊耐震系統	550
	其他	550
以壓拉桿模式設計之區域	傳遞拉力之繫桿	550
	其他	420

[17]之420 MPa有大幅度的提升；用於剪力設計時，若載重組合含地震力，則 f_y 上限值為550 MPa，若不含地震力時，則為控制長期使用載重下的裂縫寬度， f_y 上限值下調為420 MPa。因此，設計者可採用SD 690作為橫向鋼筋，在不同設計類別時採用不同 f_y 上限值，這點是新版建築RC設計規範的重點特色。

由以上回顧可知，建築設計已(美國)或即將(臺灣)全面開放ASTM A706 Grade 80或SD 550W鋼筋之使用。另於新版建築RC設計規範中，當柱軸壓比超過30%或柱混凝土 f'_c 超過70 MPa時，圍束鋼筋用量將隨軸壓比或 f'_c 之增加而上升，預期於前述情況時，使用SD 690鋼筋作為橫向鋼筋將顯現其利基。

(二) AASHTO LRFD 2020與CALTRANS SDC 2019

AASHTO LRFD 2020 [18]之混凝土 f'_c 基本的上限為70 MPa，惟其於許多設計類別將 f'_c 之上限提高為100 MPa，例如撓曲、軸力、單向剪力、鋼筋直線受拉伸展、彎鉤受拉錨定與受拉搭接等。

在鋼筋 f_y 最大設計值方面，AASHTO LRFD 2020的基本上限為520 MPa，但對於位於低度地震危害區(seismic zone 1)之橋梁，則允許提高 f_y 至690 MPa，該提升主要源自NCHRP 679之研究成果[19]，該研究利用ASTM A1035 Grade 100與120抗腐蝕鋼筋，進行廣泛的橋梁構材研究，惟該種鋼筋無顯著降伏平台，因此不適合用於抗震構材。對於 f_y 介於520-690 MPa之鋼筋，若欲用於耐震設計，則需業主之認可，且需符合AASHTO LRFD Seismic [20]之規定，而根據其規定，位於強震區之韌性構材，例如橋柱，應採用ASTM A706之鋼筋，事實上，AASHTO LRFD 2020亦有規定當韌性或銲接有所需要時，應採用ASTM A706之鋼筋。如前所述，目前ASTM A706高強度鋼筋僅有Grade 80 ($f_y=550$ MPa)一種等級。

CALTRANS SDC 2019 [21]已開始認可ASTM A706 Grade 80鋼筋之使用，惟因相關研究在CALTRANS SDC 2019年版本發表時仍在進行中，因此CALTRANS SDC限制Grade 80鋼筋僅能用於受容量設計保護之構材(例如上部結構、帽梁與基礎等)，耐震關鍵構材(seismic critical members，

例如橋柱)則僅能使用A706 Grade 60之鋼筋。

由以上回顧可知，美國橋梁設計已逐步開放高強度鋼筋之使用，作者預估，耐震帶橋梁之設計，應該在不久的將來會開放ASTM A706 Grade 80鋼筋之全面使用。

(三) New RC設計手冊(第二版)

第二版New RC設計手冊[5]之材料上限列於表3。在混凝土 f'_c 方面，除了結構牆與連接梁的最大設計值為70 MPa，其餘設計類別(梁、柱、梁柱接頭、鋼筋伸展長度與續接)最大設計值為100 MPa。

與新版建築RC設計規範[7]相比，主筋的 f_y 最大設計值由550 MPa提升至690 MPa，如前所述，適用的鋼筋種類為SD 690E，在此需注意的是，由於混凝土受壓最大應變為0.003，主筋受壓 f_y 之最大值將受限於前述應變乘上鋼筋之彈性模數，其值為600 MPa。剪力鋼筋 f_y 最大設計值提升為600 MPa，惟需進行使用載重下裂縫控制的設計，方法為設計混凝土與鋼筋在靜載與活載下之應力，使其不超過容許應力值，以使剪力裂縫最大寬度小於0.4 mm。圍束鋼筋 f_y 最大設計值提升為790 MPa，適用的鋼筋種類為SD 790鋼筋。在應用上，以柱圍束為例，由於圍束用量

常控制箍筋用量，因此橫向鋼筋可採SD 790鋼筋，並於圍束設計時 f_y 採790 MPa，充分利用其高強度性質，再於剪力設計時 f_y 採600 MPa，最後進行剪力裂縫控制。

以上回顧可知，New RC設計手冊之主筋與橫向鋼筋等級皆較新版建築RC設計規範為高，主筋由SD 550W提升為SD 690E，橫向鋼筋由SD 690提升為SD 790，強度的進一步提升將更能應對高層建築高力量載重之需求，惟對橋梁應用而言，由於受力不若高層建築臨界，且圍束鋼筋用量需求較低，因此作者認為SD 690E與SD 790應用的可能性將較為受限。

二、混凝土與鋼筋強度比值之下降

為避免混凝土 f'_c 與縱向鋼筋 f_y 之比值過低，可能導致潛在握裹不足的問題，New RC設計手冊[5]建議混凝土 f'_c 應高於縱向鋼筋 f_y 之1/15，意謂若採SD 550W鋼筋，則混凝土 f'_c 至少為35 MPa，惟此規定係基於工程實務應用之經驗，並非基於嚴謹的研究結論。

新版建築RC設計規範[7]未對混凝土 f'_c 與縱向鋼筋 f_y 之比值設定下限，惟其對 f'_c 設有限制，以確保混凝土提供足夠的強度與耐久性性能，如表4所示，對一般與耐震設計而言， f'_c 之

表3 New RC設計手冊(第二版)[5]之材料最大設計值

範圍	f'_c (MPa)	主筋 f_y (MPa)	剪力鋼筋 f_y (MPa)	圍束鋼筋 f_y (MPa)
梁	100	690	600	-
柱	100	690	600	790
梁柱接頭	100	690	-	790
牆與連接梁	70	690	600	790
鋼筋伸展與續接	100	690	-	-

表4 新版建築RC設計規範之混凝土 f'_c 之下限與鋼筋 f_y 之上限

應用	最小混凝土 f'_c (MPa)	最大縱向鋼筋 f_y (MPa)	最大橫向鋼筋 f_y (MPa)
一般	21	550	690
特殊耐震系統	28	550	690

下限分別為21與28 MPa，此兩值在ACI 318-19 [16]中分別為17.5與21 MPa，此兩值在我國規範中予以提高，以進一步提升混凝土耐久性與耐震性。在一般應用中， f'_c 下限之規定主要為確保混凝土結構之耐久性，在耐震設計中， f'_c 下限之進一步提高，係為強化鋼筋錨定，以及降低極限狀態中性軸深度，以提升構材韌性。在耐震設計中，縱向與橫向鋼筋 f'_c/f_y 最高可分別使用至550與690 MPa，吾人可計算其 f_y 對應之最小比值分別為1/20與1/25，顯見新版建築RC設計規範有較New RC設計手冊更寬鬆的規定。

肆、構材設計使用高強度鋼筋之額外規定

針對高強度鋼筋使用後，構材設計應加以調整的部分，最新建築規範(ACI 318-19 [16])與新版建築RC設計規範[7]較最新橋梁規範(AASHTO LRFD 2020 [18])之考慮更為完整，因此在此以新版建築RC設計規範關於高強度鋼筋之額外規定為例，扼要說明與橋梁有關的構材設計上應注意的事項。

對應不同設計類別，鋼筋 f_y 之設計值應有對應之上限，以考量鋼筋於構材極限狀態下強度的發展以及控制使用狀態下的裂縫，此點已於前章節中詳述。

在鋼筋握裹方面，直線伸展的計算公式已可適當考慮高強度鋼筋之高應力，惟用於搭接計算時，由於搭接效率隨搭接長度增加而降低，而高強度鋼筋之搭接長度較長，因此需將搭接長度再加以放大，對受拉搭接而言，需再放大 ψ_g 倍，針對不同 f_y ， ψ_g 分別為： $f_y=490$ MPa、 $\psi_g=1.08$ ； $f_y=550$ MPa、 $\psi_g=1.15$ ； $f_y=690$ MPa、 $\psi_g=1.30$ 。規範的新受拉標準彎鉤伸展公式以及受拉擴頭鋼筋伸展公式之推導，皆已考慮高強度鋼筋之效應，因此無須再有額外參數考慮

其影響。另對於梁或柱的縱向鋼筋，若 $f_y \geq 550$ MPa，則於其鋼筋伸展或搭接範圍內，應配置橫向鋼筋，使其圍束指標 K_{tr} (式25.4.2.4b [16])提供至少0.5倍鋼筋直徑之值，以增進劈裂破壞之韌性，對於鋼筋受拉伸展與鋼筋續接設計而言，若 $f_y \geq 550$ MPa且中心距小於15 cm時，亦需符合前述規定。

在箍筋圍束設計方面，現行規範[11][17]皆有圍束箍筋間距不得大於主筋直徑6倍之規定，此規定係為抑制主筋受壓時過早產生挫屈。由於高強度鋼筋受壓時應力會較高，更易於產生挫屈，為抑制此挫屈潛勢，對於高強度鋼筋而言，此6倍應分別降低為： $f_y=490$ MPa、5.5倍； $f_y=550$ MPa、5倍； $f_y=690$ MPa、4倍。因新版建築RC設計規範無 $f_y=690$ MPa之規定，此處4倍之規定係參考自New RC設計手冊[5]。

在受壓構材的軸力強度(P_o)計算方面，鋼筋所能發揮的應力將受到混凝土受壓極限應變之限制，因此規範規定 P_o 計算中 f_y 之上限值為550 MPa。

對一般強度鋼筋的續接器試驗而言，高塑性反覆負載試驗程序中的塑性倍率(n)為6，塑性倍率即加載位移與降伏位移之基本比例，考量鋼筋塑性容量會隨 f_y 之增加而降低，因此高強度鋼筋之 n 值應較低，以避免試驗程序對高強度鋼筋有過於嚴苛的情形，不同的 f_y ，其 n 值分別為： $f_y=550$ MPa、 $n=5$ ； $f_y=690$ MPa、 $n=4$ 。

伍、橋柱採高強度鋼筋設計案例

在此探討3個使用不同鋼筋 f_y 的橋柱設計案例，以探討鋼筋 f_y 對鋼筋使用量的影響，本案例考慮軸力與撓曲聯合需求、剪力以及圍束需求。本案例所使用的符號定義可參見符號表。表5為橋柱的設計參數，3個案例之橋柱皆具相

同柱高、斷面尺寸與軸力比($P/A_g f'_c$)，混凝土強度採35 MPa，如前所述，根據New RC設計手冊[5]，其可搭配之縱向鋼筋 f_y 最高為525 MPa，但根據新版建築RC設計規範[7]，按表4特殊耐震系統的 f'_c/f_y 推論，其可搭配的縱向鋼筋與橫向鋼筋 f_y 最高分別為700 MPa與875 MPa。

案例1橋柱為傳統橋柱，縱向與橫向鋼筋皆採SD 420W等級鋼筋。案例2為高強度鋼筋柱，縱向與橫向鋼筋分別採SD 550W與SD 690等級鋼筋，此兩等級鋼筋分別為新版建築RC規範所允許用於耐震構材的最高強度等級之縱向與橫向鋼筋。案例3亦為高強度鋼筋柱，縱向與橫向鋼筋分別採SD 690E與SD 790等級鋼筋，此兩等級的鋼筋分別為New RC設計手冊允許用於耐震構材的最高強度等級之縱向與橫向鋼筋。

(M_{ny})的條件下，透過高強度鋼筋的使用，案例2可將 ρ_l 由2.92%降低至2.01%，降低的百分比為31%，鋼筋支數可大幅降低至160根，因而可取消內圈鋼筋，如圖3(b)所示，可大幅提升施工性；案例3可將 ρ_l 進一步降低至1.17%，鋼筋根數下降為136根，可增加外圈束筋的間距，進一步提升施工性，如圖3(c)所示，表6列出三個案例的設計結果比較。由於本案柱在長時載重時為受壓，因此無撓曲裂縫控制的需求。

若對鋼筋 f_y 提升的效率加以觀察，表6中的百分比表示與前一案例相較，強度或用量改變之百分比，表中可見，相較於案例1，案例2鋼筋之 f_y 提升31%，降低31%；相較於案例2，案例3鋼筋之 f_y 提升25%， ρ_l 卻只降低15%，可見由使用SD 550W鋼筋(案例2)之效率高於SD 690鋼筋

表5 橋柱設計參數

案例	柱高 (cm)	斷面 (cm×cm)	$\frac{P}{A_g f'_c}$	混凝土強度 (MPa)	縱向鋼筋強度 (尺寸)	橫向鋼筋強度 (尺寸)
1	1200	400×200	0.085	35	SD420 (D36)	SD420 (D16)
2					SD550 (D36)	SD690 (D16)
3					SD690 (D36)	SD790 (D16)

案例之設計採公路橋梁規範[10]與公路橋梁耐震設計規範[11]之公式，並輔以新版建築RC規範與New RC設計手冊關於高強度鋼筋之額外規定。本文僅針對斷面弱軸方向進行設計。

假設為了符合軸力與彎矩之需求，案例1需設計2.92%的縱向鋼筋比(ρ_l)，縱向鋼筋採D36，共需232根鋼筋，配置結果如圖3(a)所示，於柱最外圈採兩根一束配置，再於內側配置一圈單根鋼筋。在提供與案例1相似的弱軸彎矩強度

(案例3)，此係因SD 690鋼筋之降伏應變較高，甚至高於混凝土受軸壓的極限應變0.003，導致其在本案例的強度提升效率不若SD 550W鋼筋。

在剪力設計方面，剪力需求採 $1.3 M_{ny}$ 對應的剪力，非圍束區與圍束區混凝土剪力強度以及鋼筋剪力強度公式分別如式(1)、(2)、(3)所示。橫向鋼筋降伏強度(f_{yh})上限採600 MPa，此為New RC設計手冊之規定，由於案例為橋柱，長時載重為受壓，因此無剪力裂縫控制之需求。剪

表6 縱向鋼筋設計

案例	鋼筋強度	鋼筋數量與尺寸	ρ_l (%)	M_{ny} (tf-m)
1	SD420	232-D36	2.92	10,401
2	SD550 (+31%)	160-D36	2.01 (-31%)	10,003
3	SD690 (+25%)	136-D36	1.71 (-15%)	10,197

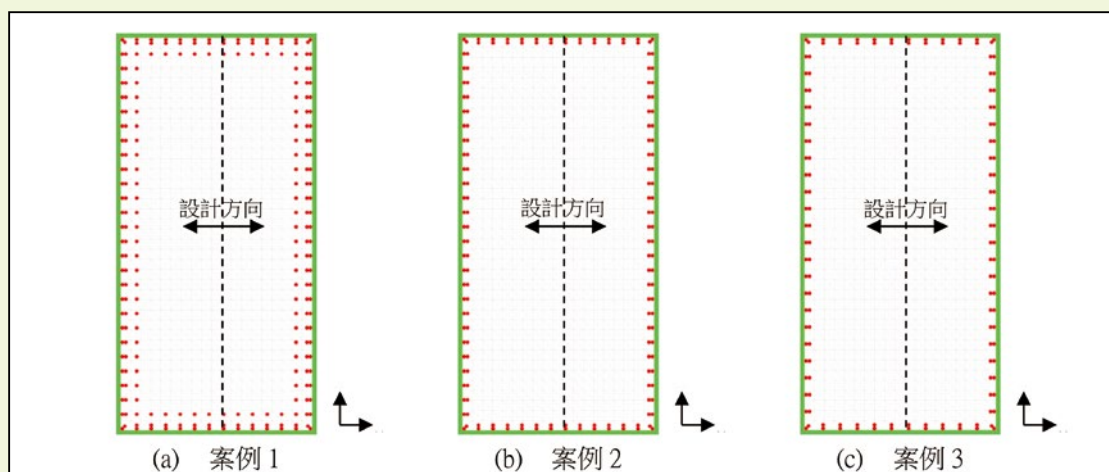


圖3設計例橋柱斷面

力鋼筋的設計結果如表7所示，設計結果顯示，相較於案例1，案例2橫向鋼筋每一層的根數於非圍束區與圍束區，可分別下降33%與36%，此降低低於鋼筋 f_{yh} 提升的比例(64%)，此係因 f_{yh} 的上限為600 MPa，低於案例2使用的SD 690橫向鋼筋的 f_{yh} 。相較於案例2，案例3的設計無法再降低橫向鋼筋根數，此係因 $f_{yh}=600$ MPa之上限，使得案例2與3皆只能使用600 MPa計算鋼筋剪力強度，導致兩案例相同的剪力鋼筋使用量。

$$V_c = 0.53 \left(1 + \frac{N}{140A_g} \right) \sqrt{f'_c} \times A_e \quad (1)$$

$$V_c = 0.53 \left(0.33 + \frac{N}{140A_g} \right) \sqrt{f'_c} \times A_e \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yh} d}{s} \quad (3)$$

$$f_{yh} \leq 600 \text{ MPa [5]}$$

對於圍束鋼筋的設計，其用量以式(4)加以計算，式中 f_{yh} 之上限採790 MPa，此係根據New RC設計手冊之建議。表8顯示圍束鋼筋之設計結果。相較於案例1，案例2圍束鋼筋用量有顯著的下降(降低35%)，相較於案例2，案例3亦有下降(降低18%)， $f_{yh}=790$ MPa之上限可充分利用SD 690 (案例2)與SD 790 (案例3)橫向鋼筋的降伏強度。表中顯示案例2與3中圍束鋼筋用量下降的比率低於鋼筋 f_{yh} 增加的比率，此係因圍束用量公式中 f_{yh} 位於分母之故。

在此另需注意，案例2採SD 550W主筋，如前小節所述，圍束鋼筋最大間距不得超過5倍主筋直徑，即17.9 cm，案例3採SD 690主筋，圍束鋼筋最大間距不得超過4倍主筋直徑，即14.3 cm。為使案例3符合前述規定，且為案例間比較方便，三個案例之橫向鋼筋間距因此皆採14 cm。

表7 剪力鋼筋設計

	鋼筋強度	鋼筋數量、尺寸與間距(cm)		標稱剪力強度(tf)	
		非圍束區	圍束區	非圍束區	圍束區
Case 1	SD420	6-D16@14	11-D16@14	1379	1419
Case 2	SD690 (+64%)	4-D16@14 (-33%)	7-D16@14 (-36%)	1351	1322
Case 3	SD790 (+14%)	4-D16@14 (-0%)	7-D16@14 (-0%)	1351	1322

$$A_{sh} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0.30ah_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \\ 0.12ah_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(0.5 + \frac{1.25P_e}{A_g f'_c} \right) \end{array} \right\} \quad (4)$$

$f_{yh} \leq 790 \text{ MPa [5]}$

d = 斷面有效深度。
 f'_c = 混凝土抗壓強度。
 f_y = 鋼筋降伏強度。
 f_{yh} = 橫向鋼筋降伏強度。
 h_c = 橫箍柱柱心在所考慮方向之尺寸(算至兩外側箍筋之中心)。

表8 圍束鋼筋設計

	鋼筋強度	圍束需求斷面積 (cm ²)	圍束提供量	
			鋼筋數量、尺寸與間距(cm)	A_{sh} (cm ²)
Case 1	SD420	較大值{8.63, 33.27}	17-D16@14	33.74
Case 2	SD690 (+64%)	較大值{5.26, 20.25}	11-D16@14	21.83 (-35%)
Case 3	SD790 (+14%)	較大值{4.59, 17.69}	9-D16@14	17.86 (-18%)

結論

New RC運用於橋梁設計，以目前的文獻回顧成果以及本文之案例分析顯示，可優先考慮推動於橋梁下部結構使用，可考慮使用SD 490W或SD 550W高強度主筋與SD 490W、SD 550W或SD 690高強度橫向鋼筋，搭配 $f'_c \geq 28 \text{ MPa}$ 之混凝土。構材設計因高強度鋼筋的使用需額外考慮的事項，可參考新版建築RC設計規範以及New RC設計手冊之規定。本研究的案例顯示，高強度鋼筋使用可降低鋼筋用量，因而可增加施工性、縮短工期與提高構材品質，且較有利於施工自動化措施之推動。

符號說明

a = 橫向箍筋之垂直間距。
 A_c = 柱心之面積(算至螺箍筋、閉合箍筋或橫向箍筋之外緣)。
 A_e = 柱有效斷面積，可取0.8。
 A_g = 柱之全斷面積。
 A_{sh} = 沿某方向箍筋的總面積(包含輔助箍筋)。
 A_v = 橫向鋼筋於 距離內之總斷面積。

K_{tr} = 橫向鋼筋指標。
 M_n = 斷面標稱彎矩。
 N = 軸力，壓力時取正值。
 n = 高塑性反覆負載試驗程序中的塑性倍率。
 P = 柱之軸力。
 P_e = 柱之因數化軸力。
 P_o = 無偏心時之軸力強度
 s = 橫向鋼筋垂直間距。
 V_c = 混凝土之標稱剪力強度。
 V_s = 橫向鋼筋提供之標稱剪力強度。
 ρ_l = 縱向鋼筋斷面積與垂直於該鋼筋之構材總斷面積之比值。
 ψ_g = 鋼筋級數不同時之伸展長度修正因數。

致謝

國科會透過研究計畫111-2625-M-002-009-提供本研究所需經費，國家地震工程研究中心New RC研究團隊對本研究提供建議與協助，臺灣大學土木工程研究系博士後研究員Nguyen Van Bao Nguyen與博士生Dwi Prasetya提供本文撰寫的協助，在此予以致謝。

參考文獻

1. 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物之超軽量化・超高層化技術の開発(New RC)，平成四年度構造性能分科会報告書，(財)国土開発技術研究センター，1993。
2. Kimura H. Application of high-strength and ultra-high-strength concrete in Japan.
3. 中華民國結構工程學會，高強度鋼筋混凝土結構設計手冊，2017年。
4. 中華民國結構工程學會，高強度鋼筋混凝土結構施工手冊，2017年。
5. 中華民國結構工程學會，高強度鋼筋混凝土結構設計手冊(第二版)，2022年。
6. 內政部，混凝土結構設計規範，2017年。
7. 內政部，建築物混凝土結構設計規範，2023年。
8. 中國土木工程學會，混凝土工程設計規範與解說(土木401-110)，2021年。
9. 中國土木工程學會，混凝土工程設計規範與解說(土木401-112)，2023年。
10. 交通部，公路橋梁設計規範，2009年。
11. 交通部，公路橋梁耐震設計規範，2018年。
12. 中華民國國家標準(CNS)，2018年，CNS 560鋼筋混凝土用鋼筋，經濟部標準檢驗局，台灣。
13. 劉光晏、張國鎮、宋裕祺、林冠禎、陳紀維，2013，「高強度鋼筋混凝土單柱式橋墩耐震行為之研究」，中國土木水利工程學刊，第25卷，第3期，第183-192頁。
14. 劉光晏、宋裕祺、張國鎮，2014，「應用高強度鋼筋與高強度混凝土於橋墩耐震設計之可行性研究」，結構工程，第29卷、第3期，第5-25頁。
15. Barbosa AR, Link T, Trejo D. Seismic performance of high-strength steel RC bridge columns. J Bridge Eng 2016; 21(2): 04015044.

16. ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete (ACI-318-19) and commentary (ACI 318R-19). Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute; 2019.

17. 內政部，混凝土結構設計規範，2021年。

18. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2020.

19. Shahrooz BM, Miller RA, Harries KA, Russell HG. Design of Concrete Structures Using High-Strength Steel Reinforcement. NCHRP Report 679 2011, Transportation Research Board, Washington, D.C.

20. AASHTO Guide specifications for LRFD Seismic Bridge design. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2011.

21. Caltrans seismic design criteria version 2.0. State of California Department of Transportation; 2019.



超高性能混凝土(UHPC) 材料與結構應用

Materials and Structural Applications of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)

關鍵字(Key Words)：超高性能混凝土(UHPC)、橋梁工程應用(Bridge Applications)、耐久性(Durability)、力學性質(Mechanical Properties)、永續(Sustainability)

國立成功大學／土木工程學系／研究助理／顏誠皓 (Yen, Cheng-Hao) ①

國立成功大學／土木工程學系／特聘教授／洪崇展 (Hung, Chung-Chan) ②

摘 要

超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, 簡稱UHPC) 具備一般混凝土四倍以上的抗拉與抗壓強度, 其材料配比組成可達到緻密的微觀結構, 同時其內含短纖維, 可大幅強化UHPC抗裂能力, 因而具有優異之耐久性, 當用於易腐蝕環境時, 可使得有害物質不易入侵到混凝土內部, 可大幅延長構造物之服務年限。有鑑於此, UHPC於國際間已廣泛應用於橋梁工程中, 無論為補強或新建橋梁工程, 皆能有效提升橋梁之耐震與耐久性、並同時達成簡化設計與施工。此外, 各國持續倡導土木工程之永續性, UHPC於許多研究均顯示具備提升橋梁永續性之潛力, 包含減少鋼筋與混凝土材料使用、延長服務時間、以及簡化施工與運輸等。本文整理UHPC的材料力學與耐久性, 並簡介UHPC於國外橋梁工程應用的案例。



Abstract

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) has been recognized internationally as a third choice of construction material alongside conventional concrete and steel. UHPC possesses mechanical properties that are several times superior to those of conventional concrete. Its dense microstructure and crack resistance significantly enhance durability, preventing the intrusion of harmful substances into the interior of the concrete. As a result, the service life of structures can be extended. By virtue of this, UHPC can be effectively applied in bridge engineering, whether for retrofitting or new construction, to enhance seismic resistance and resistance to corrosion. Moreover, aligning with the global sustainability agenda, UHPC has been shown in numerous scientific studies to have the potential for carbon reduction. This potential includes reducing the use of steel reinforcement and concrete materials, extending service life, and simplifying construction and transportation processes. In this article, the material mechanics and durability of UHPC are summarized, along with the presentation of case studies showcasing its application in bridge engineering overseas.

壹、前言

超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, 簡稱UHPC) 於國際間被視為強化建築與基礎建設最具可行性之方案，屬於高性能纖維混凝土(High Performance Fiber Reinforced Concrete, 簡稱HPFRC)的特別分支，其屬於高力學特性之新型態水泥基複合材料，相較一般混凝土，能展現更超群之力學特性。其基礎理論為，透過提高膠結材料、添加化學摻料並捨棄或使用少量粗粒料以提升微觀結構緻密性，其堆積密度通常介於0.825至0.855之間[1]，此外，水膠比設計於0.15至0.25，使抗壓強度可達到1200 kgf/cm²以上，約為一般混凝土的4倍以上。此外，相似於HPFRC[2-11]，UHPC透過科學化的配比設計與內部添加纖維加勁材料得展現擬應變硬化(Pseudo Strain-Hardening)特性，如圖1所示，其原理類似於高韌性水泥基複合材料(Engineered Cementitious Composites, 簡稱ECC)[12-21]。透過添加適量纖維，藉由纖維所提供之橋接效應(Bridging Effect)，可提升抗裂與韌性能力[22]，其極限拉應變可達到6%，約為一般混凝土的一百倍以上，且單軸抗拉強度可提升至60 kgf/cm²以上、撓曲強度達150 kgf/cm²以上[23-30]。

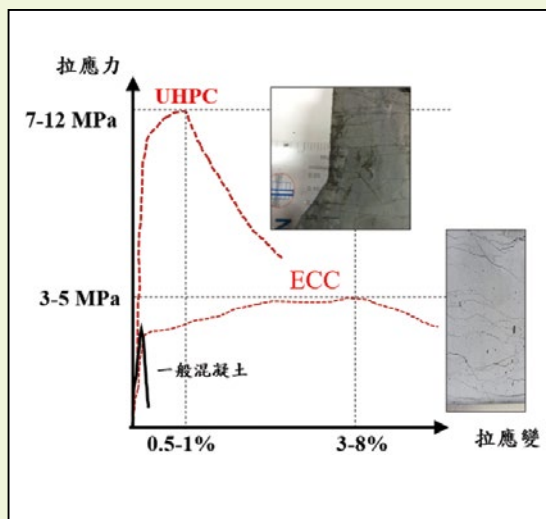


圖1 超高性能混凝土拉力性質[26]

UHPC除了具備優異之力學性質，緻密的微觀結構使其可阻卻有害物質入侵，二氧化碳、氯化物、水及硫酸鹽類均難以滲透進入UHPC中，除此之外，優異耐久性可延長服務年限，同時減少維護成本。在永續工程的層面上，近年來國際積極推廣碳足跡概念，為了減少傳統混凝土工法所為人詬病的大量碳排放，憑藉優異力學與耐久性，UHPC結構構件可製作的更佳輕薄，自重僅為一般混凝土構件之50%，可大幅減少混凝土材料使用量，亦可縮短施工時間，因此能有效降低整體所產生的碳排放量[31-34]。

貳、UHPC材料性質

一、UHPC力學性質

材料力學強度為混凝土結構主要的設計標準，UHPC優異的力學性質使其得以縮減構件尺寸，並可作為美觀結構應用之理想材料[35]，UHPC的抗壓、抗拉與抗彎強度可分別高於1200 kgf/cm²、60 kgf/cm²與150 kgf/cm²，差異具體取決於配比成分、澆置工藝與養護條件[36]。一般而言，在一般混凝土(Normal Strength Concrete, 簡稱NSC)中，設計上忽略拉力強度之貢獻，在UHPC構件中，抗拉強度可考慮入設計中，然而，現階段仍缺乏的標準之應力應變關係，因此設計上UHPC多採用多段壓縮應力分佈[37]。由於UHPC的力學性質相對複雜，於設計上應特別注意，因此許多研究針對其基礎力學與耐震行為進行科學研究。

因為UHPC有添加適量纖維，可提升剪力強度，但亦使得剪力傳遞機制相對複雜[24]。洪崇展與溫國威[38]研究UHPC剪力強度，其抗剪強度貢獻分為：混凝土剪力強度 V_c 、剪力鋼筋貢獻 V_s 及纖維貢獻 V_f ，實驗結果顯示高跨深比之UHPC構件可以提供比ACI 318規範高四倍以上的

混凝土剪力強度。Bermudez等人[39]研究並指出無論剪力傳遞機制是由拱效應(Arch Action)或梁效應(Beam Action)控制，添加鋼纖維與聚乙烯醇纖維（簡稱PVA纖維）均可有效提高UHPC梁的剪力強度。此外，使用複合纖維能將剪力破壞轉換為具韌性之撓曲破壞。Shao與Billington[40]透過實驗與數值研究鋼纖維體積含量對UHPC梁的彎曲性能與延展性的影響，結果指出在低鋼筋比下，減少纖維量會增加梁構件之延展性並於破壞前有較顯著之警訊。Chao等人[41]指出UHPC彎曲構件不僅具有非常高的彎曲強度，且即使縱向鋼筋比較高亦能展現較大的位移延性。鋼筋比較高可以使鋼筋變形較小，從而最小化裂縫寬度，此外較高的配筋率可以顯著增加開裂強度，因為當配筋率達到一定的臨界值時，鋼筋能夠有效提供承載力，並防止微裂縫的生成與互相連接。Fehling與Ismail [42]評估UHPC梁扭矩之行為，指出添加鋼纖維可增加開裂與極限抗扭能力，並提升梁受扭矩作用下之變形容量、開裂後勁度及

韌性。Li等人[43]研究UHPC方形梁之抗扭行為，指出添加1.5%體積比以上之鋼纖維可以替代箍筋。

當應用UHPC於耐震軸壓構件時，可簡化或減少圍束鋼筋之使用[44-47]，並降低混凝土剝落問題。洪崇展等人[48, 49]研究開發新式UHPC柱補強工法，包含場鑄與預鑄版貼覆補強工法（圖2(a)），可在有限度增加或不增加斷面下，提升柱構件側向強度與層間位移，此外，將原本不具韌性之剪力破壞轉換為具韌性之撓剪破壞型式。Hsiao等人[50]研發預鑄式UHPC斜撐補強技術（圖2(b)），經實驗證實UHPC斜撐有效提高了原構架的初始剛度、峰值強度及消能能力。洪崇展與蕭信睿[51]結合UHPC與鋼筋網，目的為補強傳統非韌性配筋之梁柱接頭（圖2(c)），用以提升梁柱接頭之耐震行為，補強工法包含場鑄與預鑄版貼覆工法，結果顯示UHPC補強後使非韌性接頭強度足以使梁發揮撓曲強度，補強後



(a) 預鑄版貼附補強[48]



(b) 斜撐補強[50]



(c) 梁柱接頭補強[51]



(d) 噴漿補強[52]

圖 2 超高性能混凝土創新補強工法

尖峰強度提升30%以上且極限層間位移可達到5.0%。洪崇展與王昱棋[52]成功開發超高性能混凝土噴漿補強(圖2(d))，透過UHPC噴塗在磚牆面上，結果指出補強後大幅提升牆體面內與面外之強度與變形韌性，有效提升抗倒塌能力，此外，透過噴漿可免除模板之組立，簡化施工與人力成本。

二、耐久性質

UHPC內部緻密的微觀結構與抗裂縫之能力使其具備更優異之耐久性，洪崇展與黃皇川[53]利用電阻抗試驗量化UHPC耐久性指標，於28天電阻係數可達 $300\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上，於120天更可高達 $700\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ，約為市售抗滲混凝土的10倍，根據AASHTO的標準，UHPC已達到可完全忽略侵蝕的層級。滲透性是用於評估流體進入與通過混凝土的指標，在微觀結構中之孔隙大小與連續性會影響滲透性。因此，UHPC具備微小且不連續孔隙，隨著水化作用的持續進行，相互連接的孔隙會被C-S-H膠體填充，使滲透係數相對較低[54, 55]。UHPC之抗透水性受到水膠比、膠結材料、孔隙與孔隙連通性有關[54, 56]，UHPC之吸水係數為 $0.2\text{kg}/\text{m}^2$ ，遠低於一般混凝土之 $2.7\text{kg}/\text{m}^2$ [25]。Wang等人[57]研究指出UHPC的透氣係數相較NSC減少三個數量級。UHPC氯離子滲透係數介於 0.2×10^{-3} 至 4.1×10^{-3} ，具體取決於水膠比、養護方式、鋼纖維體積比與齡期，然而，相較高性能混凝土(HPC)與NSC低了一個數量級[58]。氯離子引起的鋼筋劣化是常見的混凝土結構隱憂，由於UHPC中的氯離子滲透性極低，因此UHPC具有很高的耐腐蝕性。Ghafari 等人[59]利用加速腐蝕試驗評估HPC與UHPC中鋼筋之腐蝕速率，研究指出HPC開裂時間點約為UHPC之一半，此外，UHPC 中鋼筋的腐蝕速率為 $0.01\mu\text{m}/\text{年}$ ，遠低於上限值之 $1\mu\text{m}/\text{年}$ 。混凝土中性化亦是使鋼筋容易鏽蝕之另一項原因，因為中性化會降低混凝土的鹼性，因此破壞鋼筋表面的鈍化膜。由於UHPC具備緻密的基質，

使 CO_2 難以侵入UHPC中，因此，UHPC具有優異的抗中性化性能。經由實驗證實三年後UHPC中性化深度為 1.5mm 至 1.7mm ，相較HPC與NSC減少2.5至4.5倍[60]。

UHPC透過減少毛細管孔隙率使其提升抗凍融之能力，經研究證實UHPC經過300或600次凍融循環[61]，甚至800次皆沒有劣化現象，質量損失幾乎為零[58]。Lee等人[62]研究UHPC之抗磨蝕能力，經過500與1000次磨損後，UHPC僅分別損失5%與8%之質量，反觀，HPC與NSC之質量損失為四倍與八倍。具防火特性是鋼筋混凝土結構相較鋼結構之優勢之一，添加適量鋼纖維可延緩UHPC於火害後強度之衰減，此外，相較HPC與NSC，UHPC內層與外層之溫度梯度小，因此UHPC內部熱應力較低，且UHPC之總質量損失亦小於HPC與NSC，表明UHPC防火性能較為出色[63]。

三、永續性質

現今，工程界與主流社會都意識到以永續發展為導向的基礎設施具重要性。混凝土作為一種廣泛使用的營建材料，對全球環境產生了重大影響，水泥產業佔全球二氧化碳排放總量的7%。UHPC作為新世代混凝土材料，藉由優異的力學特性減少混凝土使用量，透過提升耐久性來延長構造物使用年限。Dong[31]利用生命週期評估法(Life-Cycle Assessment)作為比較UHPC與一般混凝土結構之永續性值，研究指出在施工階段使用UHPC的優勢並不明顯，然而，UHPC的維護與修復工作較少，二氧化碳排放量減少了約48%。Shao等人[64]研究一般混凝土梁與UHPC梁碳足跡，結論指出在相同的服務勁度與極限變形能力下，UHPC梁斷面尺寸可減少50%且鋼筋設計量減少30%至53%，同時間與一般混凝土梁之碳足跡相同，然而若不改變斷面僅減少配筋率，碳排放量相較NSC梁增加166%。Larsen等人[65]指出UHPC橋梁之全球暖化潛勢

(Global Warming Potential)為NSC橋梁之84%。Lande與 Thorstensen[66]建議五種策略提升UHPC之永續性，包含有效率使用水泥與纖維、使用工業副產物、在地化之材料供應、以及精準使用UHPC於構件中。

參、UHPC橋梁結構與應用

橋梁工程為UHPC於國際間應用最為廣泛之領域[67, 68]，相較於一般混凝土，使用UHPC可大幅提升橋梁構件之勁度、強度及耐久性，若搭配預力，可設計並製作出更細長之構件，並達成整體材料的減量。

一、橋梁結構

Li等人[69]應用UHPC於T型梁，結果指出其可強化韌性、開裂強度以及彎矩強度，若增加預力鋼腱數目將可充分利用UHPC超高抗壓之特性，更進一步提升彎矩強度。El-Helou與Graybeal等人[70]結合UHPC與I型梁，並成功證明其可應用於跨度為90公尺之橋梁。箱型梁之應用可以克服橋梁結構有深度限制之區域，與傳統橋面板相比，箱型梁為一種具經濟性之方案，並可減少所需的混凝土數量。Li等人[71]結合波形鋼腹板與UHPC製作預力箱型梁，透過彎矩試驗與數值模擬證實其具備更優異的抗剪與抗彎強度，並進一步指出這類新型箱型梁可減輕自重、設計長跨度並加速施工。Su等人[72]研究實尺寸UHPC箱型梁結構行為，結果指出其展現更佳之延展性與抗彎強度，且同時滿足服務與極限設計標準，此外，預力鋼腱之配置影響抗彎行為最大，因此鋼筋之配置率可以大幅降低，縮減施工成本。Zhu等人[73]研究使用UHPC作為預鑄節塊箱型梁連接材之長時間行為，結果指出可減少橋梁撓度與旋轉角約20%，預力損失減少28%。美國聯邦公路總局[74]開發超高性能混凝土 π 型梁之原型，並透過實驗研究

其彎矩、橫向彎矩以及剪力能力，結果指出相較於AASHTO LRFD，抗剪承載力比需求高出75%。

Zhu等人[75]探討UHPC雙向托梁板(Waffle Deck)與鋼構梁之複合行為，實驗結果指出即使橫向鋼筋率僅0.33%，仍能展現設計撓曲強度，且未出現明顯之縱向劈裂裂縫。Hakeem[76]研究UHPC與一般混凝土之複合中空板系統的撓曲行為，試驗結果顯示無配筋之UHPC系統可適用於剪力非主要考量之單向板中。Lachance等人[77]研究使用UHPC與高性能纖維混凝土(HPFRC)於預鑄橋面板，結果指出若結合UHPC與HPFRC可以減少約55%之鋼筋量，相較於全斷面HPC橋面板試體，UHPC托梁板可減少64%鋼筋量與36%自重。在20萬次疲勞荷載實驗下，UHPC與HPFRC結合之複合橋面板可抑制裂縫寬度於0.15mm以下，而HPC橋面板之裂縫寬度則超過加拿大規範之0.25mm，上限值達到0.48mm。

Wang等人[78]提出一種新型抗震超高性能混凝土橋柱，超高性能混凝土應用於核心區與周圍四邊可替換蓋板上，並安裝可替換之消能金屬元件，在中度地震發生時，可快速進行損壞更換。Mohebbi等人[79]製作全尺寸橋柱搭配插銷(Pocket Connection)基礎接合，UHPC應用於塑鉸區，試驗透過振動台，橋柱採用脫層處理的碳纖維增強聚合物(CFRP)筋進行後預力，試驗結果表明，橋柱的位移比與位移延展能力分別為6.9與13.8%，且殘餘位移可忽略不計。此外，插銷接合可有效地使柱形成塑性鉸，而不會造成連接處損壞。Li等人[80]研究UHPC後拉預力式預鑄節塊橋柱，結果指出相較一體式之NSC橋柱，UHPC節塊橋柱展現較小的殘餘位移，由於UHPC材料的高損傷容限與後預力優異的自復位能力，可以有效避免剛度下降，此外UHPC節塊橋柱初期成本約增加2.6%，但在高地震區更具經濟性，在地震回歸期2475年與5000年下長期損失約為一體式NSC橋柱之92%與

84%。

Yuan等人[81]利用UHPC鋪面於鋼橋面板上，目的為改善大交通量所帶來的疲勞破壞，試驗證實鋼橋面板加裝UHPC鋪面有效提高抗疲勞壽命且未出現裂紋。Teng與Khayat[82]指出橋面板鋪設UHPC鋪面後，可抑制裂縫於0.1mm以下，且展現良好的介面黏結特性並無滑移產生，相較傳統鋪面層(Latex-Modified Concrete)，其開裂強度提高295%至395%，抗彎承載力提高35%至75%。傳統伸縮縫由於錨固材的力學與耐久性不足，常使下部橋梁結構出現裂化情形，亦造成行車安全疑慮，美國逐步推行無縫式橋梁結構，其中以「連接板系統(Link Slab)」為其中一項，藉由連接板系統直接將兩邊橋面板進行連接，使頂部之兩橋面板間並無任何縫隙，FHWA[83]的報告指出使用UHPC作為連接板材料時，長度約介於60至120公分，相較一般混凝土的180cm至270cm可大幅縮短50%以上，此外UHPC連接板可以做得更薄並減少鋼筋量。

二、橋梁應用案例

德拉瓦州政府採用快速橋梁組件工法(Accelerated Bridge Construction，簡稱ABC工法)結合UHPC翻修舊有陸橋(圖3(a))，不僅增加橋梁耐久性，亦減少交通黑暗期。相較傳統工法，新式工程技術增加成本約37%，然而施工時間減少約67%，且其帶來之效益可延長橋梁生命週期，並減少往後之維護成本[84]。馬來西亞應用UHPC於一座新建的橋梁，借重其優異抗剪能力，大梁中之剪力鋼筋完全被取代，相較原來的鋼結構設計版本，UHPC無須設計橋墩於河中，可提升橋梁整體美觀性，此外，碳排放量相較原設計減少57%，整體造價減少27%[85]。UHPC可在有限度增加斷面大小的前提下，達成良好之補強成效。加拿大的Mission橋，既有橋之耐震能力不足，且在中度地震下有倒塌風險。於評估階段時，若採用傳統混凝土

土與鋼構材，需要較大尺寸，且將造成補強勁度過大，視覺上亦相對突兀，因此，設計者採用UHPC補強橋墩(圖3(b))，藉由UHPC包覆補強成功提升墩柱塑鉸區的韌性，並避免開裂與剝落[86]。韓國積極推動UHPC於橋梁工程之應用，並於2002年完成第一座UHPC拱橋(圖3(c))，斷面 π 型梁，頂板厚度僅為3公分，主拱造型由六個預鑄節塊透過預力與現場澆置UHPC做接合，此拱橋的建成為UHPC應用在提高拱橋力學性能、施工性能及效率方面的一個新里程碑[68]。

捷克於2013年建造一座全長156m的人行斜拉橋(圖3(d))，由於不允許從河道上落墩，業主決定設計成斜拉橋。橋梁主梁設計為板梁系統，寬3.6m，高60cm。中間板厚度僅為6cm。橋梁主梁採用懸臂施工法。使用超高性能混凝土作為主梁的構造材料，預鑄段長度為12m，由於使用UHPC，上部結構的重量與橋塔上的分佈載重顯著減輕，此座橋成為優雅與輕量化的經典案例。袁家河橋為中國第一座採用超高性能混凝土 π 型梁的複合式橋梁。在橫向設計七根UHPC預鑄 π 型梁。每個UHPC預鑄 π 型梁單元，其頂板最薄處僅5cm。值得注意的是，UHPC預鑄 π 型梁的自重僅為相同斷面積之傳統空心梁的一半。因此，組立時間可顯著縮短。此外，上部結構自重減輕，可減少基樁結構的負擔，從而降低基礎工程的材料用量與施工難度。因此，總體成本並不會顯著增加[68]。

在瑞士一座橫跨Morge河的橋梁使用厚度3公分之UHPC鋪面進行補強，用以阻止水分與氯離子持續入侵下部結構，在大約10年的使用後，對成效進行評估，發現僅在UHPC鋪面的頂部0.25公分內發現氯化物含量，原本腐蝕的狀況並未惡化[87]。瑞士利用UHPC鋪面修復橋齡60餘年之混凝土箱型梁結構(圖3(e))，既有橋梁因鹼骨材反應與過度交通荷載而持續惡化，瑞士政府因為耐用性與防水性而選擇UHPC，設計厚

度為4至5公分，補強後正彎矩與負彎矩強度分別增加33%與73%，且成本相較一般混凝土或CFRP僅為20%[88]。

鋼梁端部的劣化是橋梁普遍之問題，此劣化樣態，通常以鋼材腐蝕的形式出現，歸因於上部結構水分滲漏所造成，腐蝕導致梁端的腹板、翼板及加勁板斷面損失，此狀態降低主梁的抗剪能力與承載能力，若要替換主梁將導致上層構件或橋面需要頂升或封閉車道，相當具有挑戰性。UHPC為傳統修復解決方案提供了一種創新替代方案，利用UHPC澆置在梁腹板上，包裹鋼材的腐蝕部分，此設計可以有效地建立一個新的傳遞力之路徑，避開鋼材的劣化區域

並恢復主梁失去的承載與抗剪能力，此技術已實際被康乃狄克州交通部所採用。加拿大政府使用預鑄UHPC公路護欄，目的是解決長期凍融造成的劣化，在減少一半的厚度下，預鑄UHPC公路護欄提供良好之使用性與耐久性[89]。臺南都會區北外環道路工程率先於國內橋梁工程中採用UHPC(圖3(f))，用於取代傳統伸縮縫中容易受損之錨固材，此工程選三處之橋面伸縮縫採用UHPC(1200kgf/cm²)取代高強度無收縮混凝土(420kgf/cm²)，分別有部分與全取代之應用。考量UHPC具有耐久性，可大幅降低維修頻率與成本[90]。



(a) 德拉瓦州陸橋[85]



(b) 加拿大Mission橋[86]



(c) 韓國拱橋[68]



(d) 捷克人行斜拉橋[68]



(e) 瑞士鋪面修復[88]



(f) 北外環道路伸縮縫錨固材[90]

圖3 UHPC橋梁工程應用案例

結論

UHPC為當前國際最具影響力的新型混凝土營建材料，憑藉出色的力學與耐久性，可有效減少構件的尺寸與鋼筋用量、簡化構件與鋼筋設計，並延長服務年限，因此得以大幅降低工程之長期修繕及補強等相關時間與成本。此外，在考量整體服務年限時，利用UHPC於橋梁工程中可有效降低碳排放量，且永續指標亦大幅優於傳統橋梁工法，因此UHPC可定義為具有超高性能之永續綠色材料。近年來國際上已廣泛運用UHPC於建築工程、耐震補強、耐久性補強、交通工程、橋梁工程、預鑄工程等，本文蒐集與簡介國外使用UHPC於橋梁工程之案例，資料顯示應用UHPC以提升橋梁工程之結構性與永續性已是當前趨勢，企盼透過本文所回顧國外成功之UHPC橋梁案例，推廣國內更多橋梁工程採用UHPC，以提升整體公共工程之服務與永續性質。

參考文獻

1. Du J, Meng W, Khayat KH, Bao Y, Guo P, Lyu Z et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*. 2021;224:109220.
2. Yang C, Chen S-C, Yen C-H, Hung C-C. Behaviour and detailing of coupling beams with high-strength materials. *Journal of Building Engineering*. 2022;47:103843.
3. Hung C-C, Yen W-M. Experimental evaluation of ductile fiber reinforced cement-based composite beams incorporating shape memory alloy bars. *Procedia Engineering*. 2014;79:506-12.
4. Hung C-C, Su Y-F, Yu K-H. Modeling the shear hysteretic response for high performance fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2013;41:37-48.
5. Hung C-C, Li S-H. Three-dimensional model for analysis of high performance fiber reinforced cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*. 2013;45:1441-7.
6. Hung C-C, El-Tawil S. Seismic behavior of a coupled wall system with HPFRCC materials in critical regions. *Journal of Structural Engineering*. 2011;137:1499-507.
7. Hung C-C, El-Tawil S. Hybrid Rotating/Fixed-Crack Model for High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 2010;107.
8. Hung C-C, El-Tawil S. Seismic behavior of a coupled-wall system with HPFRCC coupling beams. *Structures Congress 2010* 2010. p. 1864-73.
9. Hung C-C, El-Tawil S. Cyclic model for high performance fiber reinforced cementitious composite structures. *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures* 2010. p. 1341-52.
10. Hung C-C. Computational and hybrid simulation of high performance fiber reinforced concrete coupled wall systems: University of Michigan; 2010.
11. Shao Y, Hung C-C, Billington SL. Gradual

Crushing of Steel Reinforced HPFRCC Beams: Experiments and Simulations. *Journal of Structural Engineering*. 2021;147:04021114.

12. Hung C-C, Chen Y-S. Innovative ECC jacketing for retrofitting shear-deficient RC members. *Construction and building materials*. 2016;111:408-18.

13. Hung C-C, Hung H-H. Potential of sodium sulfate solution for promoting the crack-healing performance for strain-hardening cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2020;106:103461.

14. Hung C-C, Su Y-F. On modeling coupling beams incorporating strain-hardening cement-based composites. *Computers and Concrete*. 2013;12:565-83.

15. Hung C-C, Su Y-F. Medium-term self-healing evaluation of engineered cementitious composites with varying amounts of fly ash and exposure durations. *Construction and Building Materials*. 2016;118:194-203.

16. Hung C-C, Su Y-F, Hung H-H. Impact of natural weathering on medium-term self-healing performance of fiber reinforced cementitious composites with intrinsic crack-width control capability. *Cement and Concrete Composites*. 2017;80:200-9.

17. Hung C-C, Su Y-F, Su Y-M. Mechanical properties and self-healing evaluation of strain-hardening cementitious composites with high volumes of hybrid pozzolan materials. *Composites Part B: Engineering*. 2018;133:15-25.

18. Hung C-C, Yen W-M, Yu K-H. Vulnerability and improvement of reinforced ECC flexural members under displacement reversals: Experimental investigation and computational analysis. *Construction and Building Materials*. 2016;107:287-98.

19. 袁宇秉, 洪崇展. 應用高韌性纖維混凝土 (ECC) 邁向永續基礎設施工程. *中國土木水利工程學刊*. 2020;32:713-20.

20. Do TDD, Yen K-J, Yen C-H, Hung C-C. Impact of tension stiffening on the tensile and flexural behavior of ECC ferrocement. *Construction and Building Materials*. 2022;329:127201.

21. Hung C-C, Hsiao H-J, Shao Y, Yen C-H. A comparative study on the seismic performance of RC beam-column joints retrofitted by ECC, FRP, and concrete jacketing methods. *Journal of Building Engineering*. 2023;64:105691.

22. Xin T, Zhi F, Teng Z, XIANG Y. Behavior and constitutive model of ultra-high-performance concrete under monotonic and cyclic tensile loading. *Construction and Building Materials*. 2023;389:131634.

23. Hung C-C, Chen Y-T, Yen C-H. Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers. *Construction and Building Materials*. 2020;260:119944.

24. Hung C-C, El-Tawil S, Chao S-H. A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design. *Journal of Structural Engineering*.

2021;147:03121001.

25. Li J, Wu Z, Shi C, Yuan Q, Zhang Z. Durability of ultra-high performance concrete - A review. *Construction and Building Materials*. 2020;255:119296.

26. 洪崇展, 戴艾珍, 顏誠皜, 溫國威, 張庭維. 新世代多功能性混凝土材料-高性能纖維混凝土. *土木水利*. 2017;44:33-51.

27. Hung C-C, Li H, Chen H-C. High-strength steel reinforced squat UHPFRC shear walls: cyclic behavior and design implications. *Engineering Structures*. 2017;141:59-74.

28. 顏誠皜, 韋靜雅, 溫國威, 洪崇展. UHPC 材料性質與工程應用. *中國土木水利工程學刊*. 2022;34:89-97.

29. 顏誠皜, 洪崇展. 超高性能混凝土 (UHPC) 材料與結構應用及文獻回顧. *土木水利*. 2022;49:43-7.

30. 顏誠皜, 李宜璋, 洪崇展. UHPC 材料設計與製程. *中國土木水利工程學刊*. 2022;34:99-107.

31. Dong Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. *Construction and Building Materials*. 2018;167:414-25.

32. Randl N, Steiner T, Ofner S, Baumgartner E, Mészöly T. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. *Construction and Building Materials*. 2014;67:373-8.

33. Sheheryar M, Rehan R, Nehdi ML. Estimating CO2 Emission Savings from Ultrahigh Performance Concrete: A System Dynamics Approach. *Materials*. 2021;14:995.

34. Yu R, Spiesz P, Brouwers H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*. 2015;55:383-94.

35. Yang R, Yu R, Shui Z, Gao X, Xiao X, Zhang X et al. Low carbon design of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating phosphorous slag. *Journal of Cleaner Production*. 2019;240:118157.

36. Ipek M, Yilmaz K, Şener M, Sarıbiyik M. Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase. *Construction and Building Materials*. 2011;25:61-8.

37. Hung C-C, Lee H-S, Chan SN. Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes. *Composites Part B: Engineering*. 2019;158:269-78.

38. Hung C, Wen K. Investigation of shear strength of ultra-high performance concrete beams without stirrup. *Proc, 17th World Conf on Earthquake Engineering, 17WCEE Tokyo: International Association for Earthquake Engineering* 2020.

39. Bermudez M, Wen K-W, Hung C-C. A comparative study on the shear behavior

of UHPC beams with macro hooked-end steel fibers and PVA fibers. *Materials*. 2022;15:1485.

40. Shao Y, Billington SL. Impact of UHPC tensile behavior on steel reinforced UHPC flexural behavior. *Journal of Structural Engineering*. 2022;148:04021244.

41. Chao S-H, Kaka V, Shamshiri M. Toward A Non-Prestressed Precast Long-Span Bridge Girder Using UHP-FRC. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*: Iowa State University Digital Press; 2019.

42. Fehling E, Ismail M. Experimental Investigation on UHPC Structural Elements Subject to Pure Torsion. *Proceeding: Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete* 2012.

43. Li C, Zhou J, Ke L, Yu S, Li H. Failure mechanisms and loading capacity prediction for rectangular UHPC beams under pure torsion. *Engineering Structures*. 2022;264:114426.

44. Hung C-C, Hu F-Y. Behavior of high-strength concrete slender columns strengthened with steel fibers under concentric axial loading. *Construction and Building Materials*. 2018;175:422-33.

45. Hung C-C, Hu F-Y, Yen C-H. Behavior of slender UHPC columns under eccentric loading. *Engineering Structures*. 2018;174:701-11.

46. Hung C-C, Yen C-H. Compressive behavior and strength model of reinforced UHPC short columns. *Journal of Building Engineering*. 2021;35:102103.

47. 洪崇展, 郭家維, 黃丞毅. 超高性能纖維混凝土於非韌性柱包覆補強工法之有效性. *中國土木水利工程學刊*. 2020;32:693-9.

48. Shao Y, Kuo C-W, Hung C-C. Seismic performance of full-scale UHPC-jacket-strengthened RC columns under high axial loads. *Engineering Structures*. 2021;243:112657.

49. Hung C-C, Kuo C-W, Shao Y. Cast-in-place and prefabricated UHPC jackets for retrofitting shear-deficient RC columns with different axial load levels. *Journal of Building Engineering*. 2021;44:103305.

50. Hsiao P-C, Chou S-C, Hung C-C. A novel seismic strengthening method for RC frames: Precast ultra-high performance concrete braces. *Journal of Building Engineering*. 2023:106592.

51. 蕭信睿. 超高性能纖維混凝土於梁柱接頭耐震補強之效用, 國立成功大學土木工程學系碩士論文, 洪崇展指導 2020.

52. 王昱棋. 超高性能混凝土 (UHPC) 噴漿工法於含磚牆 RC 構架之耐震補強, 國立成功大學土木工程學系碩士論文, 洪崇展指導 2021.

53. 黃皇川. 超高性能混凝土抗壓性質與耐久性隨齡期之變化關係, 國立成功大學土木工程學系碩士論文, 洪崇展指導 2019.

54. Tam CM, Tam VW, Ng KM. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*. 2012;26:79-89.
55. Matte V, Moranville M, Adenot F, Richet C, Torrenti JM. Simulated microstructure and transport properties of ultra-high performance cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2000;30:1947-54.
56. Poon C-S, Kou S, Lam L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and building materials*. 2006;20:858-65.
57. Wang W, Liu J, Agostini F, Davy CA, Skoczylas F, Corvez D. Durability of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under progressive aging. *Cement and Concrete Research*. 2014;55:1-13.
58. Liu J, Song S, Wang L. Durability and micro-structure of reactive powder concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*. 2009;24:506-9.
59. Ghafari E, Arezoumandi M, Costa H, J lio E. Influence of nano-silica addition on durability of UHPC. *Construction and Building Materials*. 2015;94:181-8.
60. Alonso C, Castellote M, Llorente I, Andrade C. Ground water leaching resistance of high and ultra high performance concretes in relation to the testing convection regime. *Cement and Concrete Research*. 2006;36:1583-94.
61. Alkaysi M, El-Tawil S, Liu Z, Hansen W. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*. 2016;66:47-56.
62. Lee M-G, Wang Y-C, Chiu C-T. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Construction and building Materials*. 2007;21:182-9.
63. Sanchayan S, Foster SJ. High temperature behaviour of hybrid steel - PVA fibre reinforced reactive powder concrete. *Materials and Structures*. 2016;49:769-82.
64. Shao Y, Parks A, Ostertag CP. Carbon Footprint between Steel-Reinforced Concrete and UHPC Beams. *Journal of Structural Engineering*. 2023;149:06023001.
65. Larsen IL, Aasbakken IG, O' Born R, Vertes K, Thorstensen RT. Determining the environmental benefits of ultra high performance concrete as a bridge construction material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2017. p. 052096.
66. Lande I, Thorstensen RT. Comprehensive sustainability strategy for the emerging ultra-high-performance concrete (UHPC) industry. *Cleaner Materials*. 2023;8:100183.
67. Xue J, Briseghella B, Huang F, Nuti C, Tabatabai H, Chen B. Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. *Construction and Building Materials*. 2020;260:119844.

68. Zhou M, Lu W, Song J, Lee GC. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering. *Construction and Building Materials*. 2018;186:1256-67.
-
69. Li H, Li L, Fan X, Ye M, Shao X, Yi L. Experimental and numerical investigation on the flexural behavior of a large-scale prestressed UHPC T-Shaped girder. *Engineering Structures*. 2022;272:115027.
-
70. El-Helou RG, Graybeal BA. The ultra girder: A design concept for a 300-foot single span prestressed ultra-high performance concrete bridge girder. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*: Iowa State University Digital Press; 2019.
-
71. Li H, Li L, Du C, Ye M, Shao X, Zhou C. Experimental Study on the Flexural Behavior of a Novel Nonprismatic Prestressed UHPC Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs. *Journal of Bridge Engineering*. 2023;28:04023045.
-
72. Su J-z, Ma X-l, Chen B-c, Sennah K. Full-scale bending test and parametric study on a 30-m span prestressed ultra-high performance concrete box girder. *Advances in Structural Engineering*. 2020;23:1276-89.
-
73. Zhu Y, Meng D, Zhang Y, Hussein HH, He S. Long-term performance of a continuous box-girder bridge constructed using precast segments with wet ultra-high-performance concrete (UHPC) joints. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;17:e01285.
-
74. Graybeal BA. Structural behavior of a prototype ultra-high performance concrete pi-girder. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure ...; 2009.
-
75. Zhu J, Guo X, Kang J, Duan M, Wang Y. Experimental Investigation of Flexural Behavior of Steel - UHPC Composite Beam with Waffle-Slab System. *Journal of Bridge Engineering*. 2021;26:04021011.
-
76. Azad AK, Hakeem IY. Flexural behavior of hybrid hollow-core slab built with ultra high performance concrete faces. *Materials and Structures*. 2016;49:3801-13.
-
77. Lachance F, Charron J-P, Massicotte B. Development of precast bridge slabs in high-performance fiber-reinforced concrete and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Structural Journal*. 2016;113:929.
-
78. Wang Z, Wang J-Q, Tang Y-C, Liu T-X, Gao Y-F, Zhang J. Seismic behavior of precast segmental UHPC bridge columns with replaceable external cover plates and internal dissipaters. *Engineering Structures*. 2018;177:540-55.
-
79. Mohebbi A, Saiidi MS, Itani AM. Shake table studies and analysis of a PT-UHPC bridge column with pocket connection. *Journal of Structural Engineering*. 2018;144:04018021.
-
80. Li S, Zhao T, Alam MS, Cheng Z, Wang J-q. Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of a seismic resistance

bridge system with post-tensioning precast segmental ultra-high performance concrete bridge columns. *Engineering Structures*. 2020;225:111321.

81. Yuan Y, Wu C, Jiang X. Experimental study on the fatigue behavior of the orthotropic steel deck rehabilitated by UHPC overlay. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019;157:1-9.

82. Teng L, Khayat KH. Effect of overlay thickness, fiber volume, and shrinkage mitigation on flexural behavior of thin bonded ultra-high-performance concrete overlay slab. *Cement and Concrete Composites*. 2022;134:104752.

83. Administration TFH. Case Study: Eliminating Bridge Joints with Link Slabs - An Overview of State Practices. 2020.

84. Dean N, Stevens C, Hastings J. Accelerated Bridge Construction Methods for Bridge 1-438 Replacement. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*: Iowa State University Digital Press; 2019.

85. Lei V-Y, Nematollahi B, Said ABM, Gopal BA, Yee TS. Application of ultra high performance fiber reinforced concrete - The Malaysia perspective. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2012;3:26-44.

86. Kennedy D, Habel K, Fraser G. Ultra High-Performance Concrete Column Jacket Retrofit for the Mission Bridge. 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering 2015.

87. Denari E. Pont sur la Morge - campagne de caractérisation de l'état de l'ouvrage 9.5 ans après intervention [Bridge over the River Morge - Investigation of the Bridge Condition 9.5 Years After Rehabilitation]. Report No MCS. 2015;23:05-1.

88. Brühwiler E, Bastien Masse M. Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC. *IABSE Conference Geneva 2015 'Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges'*: IABSE; 2015. p. 1171-8.

89. Núñez A, Patiño J, Arango S, Echeverri W. Review of First Structural Applications of UHPC in Colombia. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*: Iowa State University Digital Press; 2019.

90. 洪崇展, 吳瑞安, 蔣啟恆, 陳明谷, 吳秉益, 顏誠皜. 臺南都會區北外環道路-超高性能混凝土 (UHPC) 伸縮縫之國內首例應用. *中國土木水利工程學刊*. 2022;34:53-62.



生命線橋梁的延壽加固——國道橋梁耐震補強工程

關鍵詞(Key Words)：補強(Retrofitting)、隔震支承(Seismic Isolation Bearing)、力量分散裝置(Shock Transmission Unit)、斷層(Fault)、基礎阻尼(Foundation Damping)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫工程師／陳柏宏 (Chen, Po-Hung) ①

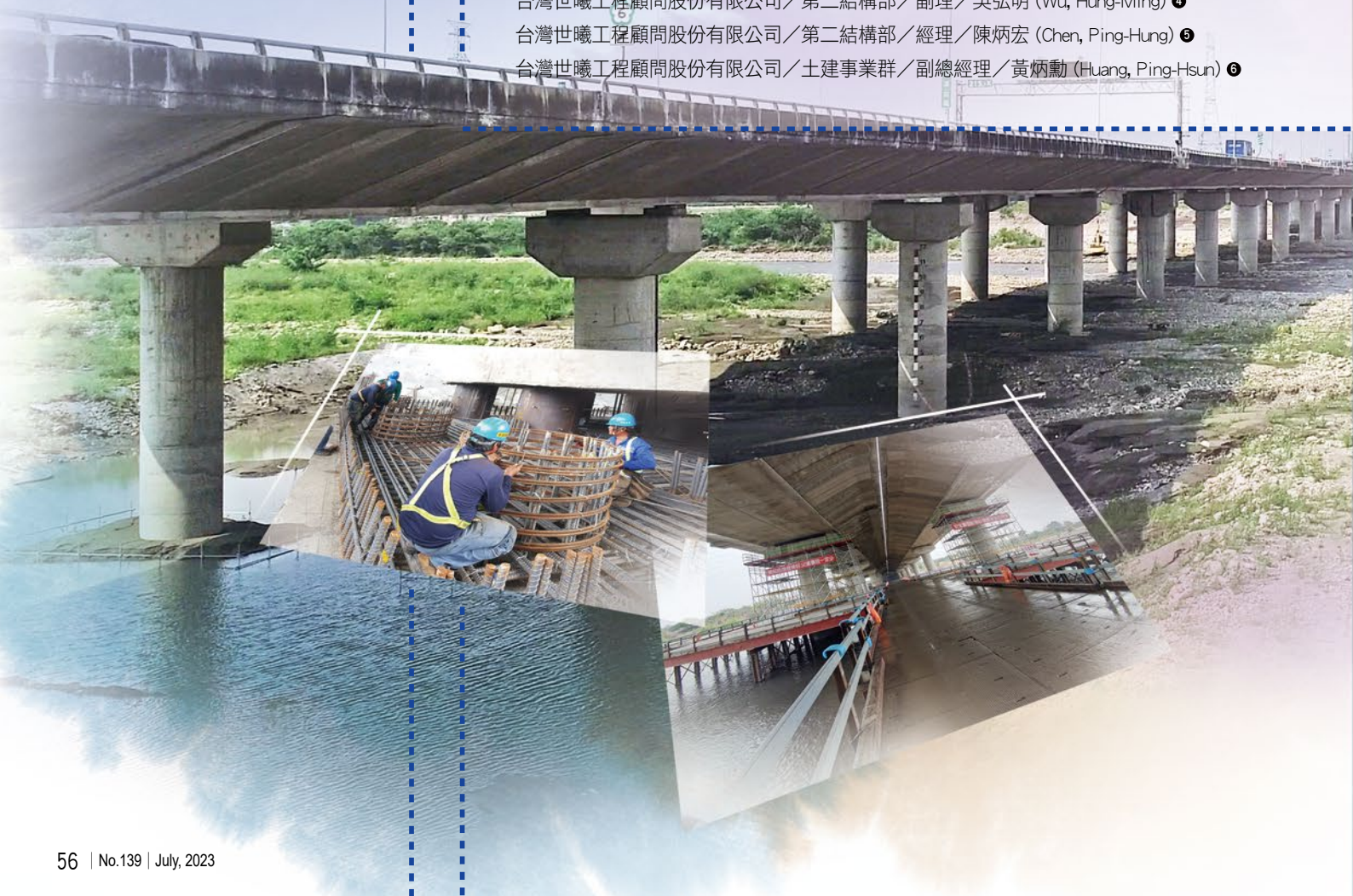
台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫副理／林裕家 (Lin, Yu-Chia) ②

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫工程師／戚樹人 (Chi, Shu-Jen) ③

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／副理／吳弘明 (Wu, Hung-Ming) ④

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／經理／陳炳宏 (Chen, Ping-Hung) ⑤

台灣世曦工程顧問股份有限公司／土建事業群／副總經理／黃炳勳 (Huang, Ping-Hsun) ⑥



摘要

交通部高速公路局自民國89年起依據新版公路橋梁耐震設計規範，重新檢核及評估高速公路既有橋梁耐震能力，對於不符合最新耐震設計規範之橋梁進行耐震補強工程，期能於日後大地震發生時，將損害程度降至最低，並擔負整體防災計畫運輸維生功能重任。

本公司自民國105年後參與相關高速公路橋梁耐震補強工程，本文整理節錄相關工程案例，提供做為後續橋梁耐震補強工程參考與經驗分享。



Strengthening and Service Life Extension for Lifeline Bridge – Freeway Bridges Seismic Retrofitting Projects

Abstract

Since 2000, Freeway Bureau, MOTC evaluated all Freeway bridges to the latest seismic design specification requirements, and carried out seismic retrofitting works for Freeway bridges that not meet the latest seismic design specification requirements, hoping that they will be able to sustain major earthquakes in the future. It is necessary to minimize the earthquake damage and take on the responsibility of the overall disaster prevention plan of the Lifeline transportation for Freeway bridges.

CECI has participated in the seismic retrofitting projects of Freeway bridges since 2016. In the paper the representative engineering cases are provided as reference and experience sharing for other bridge seismic retrofitting projects.

3

專題報導

壹、前言

高速公路為台灣地區南北交通大動脈，並連結各條東西向快速道路，形成最重要之交通運輸網路。交通部高速公路局自民國89年起依據新版公路橋梁耐震設計規範，重新檢核及評估高速公路之既有橋梁，對於不符合最新耐震設計規範之橋梁進行耐震補強，期能於日後大地震發生時，將損害程度降至最低並擔負整體防災計畫運輸維生功能重任。

高速公路局歷年辦理國道橋梁耐震補強工程，各項工程內容說明如下：

- 一、「國道1號員林高雄段拓寬工程」為高速公路第一階段橋梁耐震補強工程，91年11月規劃設計，95年12月開工，98年5月完工。
- 二、「高速公路(通車路段)橋梁耐震補強工程(第1期)工程」94年1月規劃設計，95年12月開工，99年4月完工。
- 三、「國道2號拓寬工程(含補強)」94年1月規劃設計，98年3月開工，101年5月完工。
- 四、「高速公路(通車路段)橋梁耐震補強第2期工程計畫第1優先路段」100年3月規劃設計，101年5月開工，105年6月完工。
- 五、「高速公路後續路段橋梁耐震補強工程(區段1-1、區段1-2)」105年2月規劃設計，106年10月開工，110年10月完工。
- 六、「高速公路後續路段橋梁耐震補強工程台南路段」106年3月規劃設計，107年12月開工，112年4月完工。
- 七、「高速公路後續路段橋梁耐震補強工程(區段2-1、區段2-2)」107年3月規劃設計，

109年10月陸續開工。

八、「高速公路後續路段橋梁耐震補強工程里港至旗山段」108年2月規劃設計，110年8月開工。

九、「高速公路後續路段橋梁耐震補強工程(區段3-1、區段3-2)」109年3月規劃設計。

本公司除編號2、4項工程未參與外，其餘工程均有參與。

貳、設計規範演變對橋梁耐震能力之影響探討

耐震補強首需考慮耐震設計規範的演進，瞭解地震力的設計考量及韌性細節規定，並瞭解掌握各行政區地震力之增幅，須特別檢核橋梁耐震能力。民國76年至108年歷次「公路橋梁耐震設計規範」修訂主要內容差異比較，詳表1。

由表中可以發現設計地震力可區分為設計地震水平譜加速度係數、橋梁振動單元靜載重及結構彈塑性和韌性行為三個部分，其中76年規範尚無韌性設計及地震危害度分析之工址水平加速度係數概念，於84年規範以後開始規定等係數表現結構彈塑性和韌性的行為，並始於98年規範規定設計地震水平譜加速度係數，考量地震微分區(行政區)、工址地盤放大係數、斷層近域調整因子等三項因子之加乘關係，即成為影響設計地震力的重要參數。於108年規範將設計目標地震分三等級：等級I地震(中度地震)、等級II地震(設計地震)和等級III地震(最大考量地震)，增列地調所2012年公告之第一類活動斷層，並修正行政區水平譜加速度係數及近域效應資訊等。

表1 歷次「公路橋梁耐震設計規範」主要內容差異比較表

頒布年份	76 年	84 年	89 年	98 年	108 年
設計地震力	$V = ZSIC_0 \cdot W$	$V = \frac{ZICW}{1.2\alpha_y F_v}$	$V = \frac{ZICW}{1.2\alpha_y F_v}$	$V = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{S_{a0}}{F_{a0}} \right) W$	$V_{II} = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{S_{a,II}}{F_{a,II}} \right) W'$
震區劃分	強震地區 (甲、乙) 、中震地區 、弱震地區	一甲區(0.33g) 一乙區(0.28g) 二區(0.23g) 三區(0.18g)	甲區(0.33g) 乙區(0.23g)	地震微分區(行政區) 0.32g, 0.28g, 0.24g, 0.20g	地震微分區(行政區) 0.32g, 0.28g, 0.24g, 0.20g
韌性折減係數 F_v	無韌性設計及土層液化 評估規定	依橋梁單元之結構系統、工址地盤分類及橋單元基本振動週期，決定地震力之韌性折減係數 F_v			
重要符號 說明	Z ：震區係數 S ：地層係數 C₀ ：標準設計震力係數	Z ：設計地表水平加速度係數 C ：工址正規化水平加速度反應譜係數		S_{a0} ：設計地震水平譜加 速度係數(結合地震 微分區、工址地盤放 大係數、斷層近域調 整因子，三項加乘)	S_{a,II} ：等級 II 地震水平譜加 速度係數(結合地震微 分區、工址地盤放大 係數、斷層近域調整 因子，三項加乘)

參、耐震性能準則

高速公路橋梁耐震補強標準以再服務年限 50 年為原則，並考慮河川冲刷與邊坡穩定之影響，橋梁耐震性能目標係依據「公路橋梁耐震設計規範」(民國 108 年 1 月)橋梁耐震性能規定及「公路橋梁耐震評估與補強設計規範」(民國 110 年 3 月)。以耐震性能為基準之橋梁補強，將耐震性能目標依地震發生之均布危害度分析而訂定三等級，如表 2 所示。

依據「公路橋梁耐震評估與補強設計規範」對於地震等級 II 及等級 III 之耐震性能檢核，須對橋單元整體結構系統及構材之變形進行橋梁耐震性能檢核，橋單元結構耐震補強後之位移容量 Δ_B 及 Δ_C ，應確保大於地震等級 II 至等級 III 所引致之結構變形需求，即 $\Delta_{II} \leq \Delta_B$ 及

$\Delta_{III} \leq \Delta_C$ ，如圖 1 所示；性能狀態 B 及 C 之譜位移容量 Δ_B 及 Δ_C 依橋梁結構非線性分析結果計算決定，詳表 3 所示之非彈性譜位移與非彈性譜位移容量之比值。

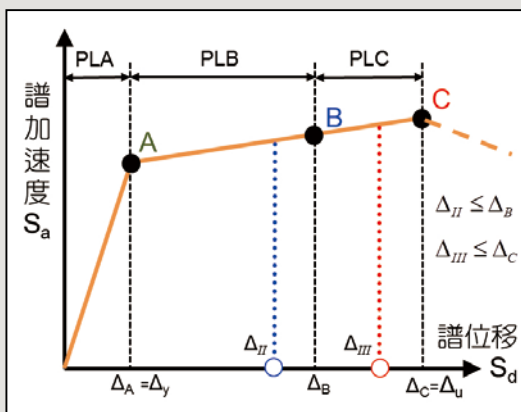


圖1 橋梁耐震性能目標檢核示意圖

表2 橋梁耐震補強之性能要求

地震等級	性能等級	耐震理念(安全性)	服務性能(使用性)	損壞等級(修復性)
I (中度地震)	PLA	結構保持彈性	震後 正常通行	輕微
II (設計地震)	PLB	構件產生塑鉸， 發揮韌性容量	震後 有限通行	可修復
III (最大考量地震)	PLC	結構韌性容量完全發揮， 橋梁避免落橋、崩塌	震後 緊急通行	嚴重

其中服務性能(Service Levels)說明如下：

震後正常通行(Immediate)：地震後於 24 小時內，橋上交通可正常通行。

震後有限通行(Limited)：地震後於幾天內，橋上可通行有限的交通(如車道縮減、輕型救災車輛等)。

震後緊急通行(Emergent)：地震後於幾天內，利用緊急臨時支撐系統(可能需封閉局部交通搶修)，橋上可通行有限的交通(如車道縮減、輕型救災車輛等)。

表3 性能狀態B及C之非彈性譜位移與非彈性譜位移容量之比值

橋址/設計規範年代 橋梁重要性	性能狀態B(475年)				性能狀態C(2500年)	
	一般震區及斷層近域		台北盆地		一般震區及斷層近域	台北盆地
	84及以後	76及以前	84及以後	76及以前		
一般橋梁	2/3	3/4	1/2	2/3	-	-
重要橋梁	1/2	2/3	1/3	1/2	1	1

肆、橋梁耐震補強案例分享

本公司自民國105年後參與高公局國道橋梁耐震補強工程(前述編號5~8項)已完成之規劃設計成果中節錄具代表性之下列六案例經驗分享，包含結構系統改善、隔震支承及力量分散裝置應用、河川橋樑基礎冲刷補強、跨斷層補強考量及基礎阻尼評估應用等，至於編號9項工程目前進行規劃設計中。

案例1・結構系統改善-M37G標國8台南系統交流道匝道橋6(台南路段)

匝道橋6詳圖2，於P10~P13跨越鹽水溪排水溝渠及匝道5單跨PCI橋，經評估鉸接端橋墩P11、P12基礎縱向耐震性能不足，需基礎補強。橋墩P11基礎座落於鹽水溪排水溝渠護坡內(詳圖3)，橋下施工空間受匝道5單跨PCI橋影



圖2 國8台南系統交流道匝道橋6現況

響，不利鋼板樁圍堰及補強基樁打設作業，另如涉及基礎補強需破堤施工，需考量河川公地申請之困難性等。經研擬改採於橋墩P11更換為雙向活動支承及增設防落止震裝置方案，並於兩側伸縮縫橋墩P10、P13增設縱向止震裝置(詳圖4)，將上構縱向地震力移轉至P10或P13橋墩，避免P11橋墩基礎破堤施工與橋下淨高不足問題。本案例經前述系統改善補強分析，P10及P13既有基礎可承受移轉來之地震力，不需進行補強。

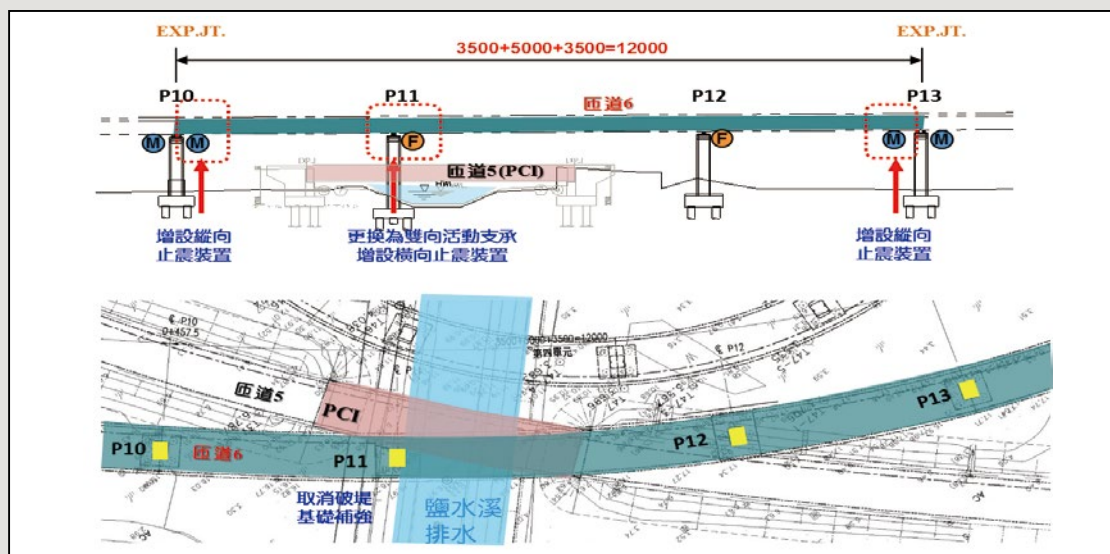


圖3 系統改善補強案例(台南系統交流道匝道橋6)平立面圖

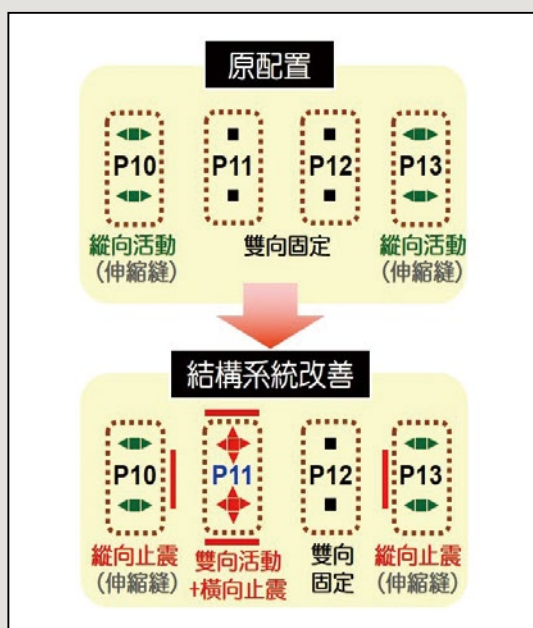


圖4 系統改善補強案例(台南系統交流道匝道6)結構配置

案例2・隔震支承-M37G標國3烏山頭高架橋 (台南路段)

隔震裝置需具備垂直向能完全承受結構垂直載重、提供適當水平柔性勁度以及自復位能力。利用隔震裝置水平向柔性勁度低，延長結構系統振動週期，且藉遲滯阻尼能減少因週期延長增加之位移反應，使大地震時降低上構慣性力及加速度反應，進而降低下構耐震設計需求。國內隔震橋梁多採用鉛心橡膠支承墊(Lead-Rubber Bearing, LRB)，為積層橡膠與多層鋼板加上高純度鉛心組合而成，鉛心為低降伏性金屬，受震時降伏產生遲滯行為，且鉛心具有再晶化能力，受震後能自我恢復不因反覆變形而破壞，遲滯迴圈可假設為理想之雙線性化模型，如圖5。

國3烏山頭高架橋橋寬為16.1公尺(圖6)。民國83年設計，採用民國76年公路橋梁設計規範設計，民國89年竣工。南北雙向各7個單元，上構為預力混凝土箱形梁，除第一單元(U1L及U1R)因跨越嘉南大圳為懸臂工法橋梁外，其餘

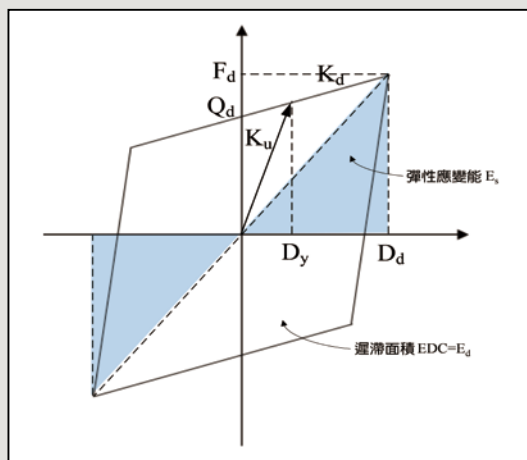


圖5 鉛心橡膠支承墊理想化雙線性遲滯迴圈

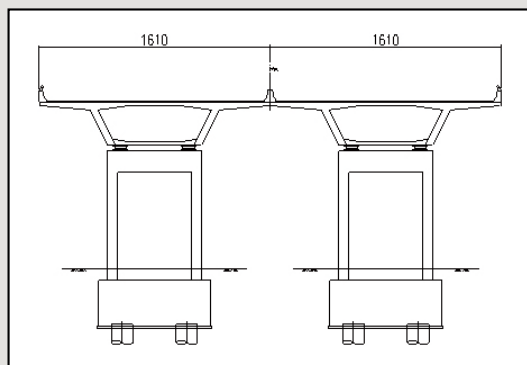


圖6 國3烏山頭高架橋標準斷面

單元採跨徑為40~45m之場鑄逐跨或支撐先進工法施作。下構除懸臂工法單元為實心橋墩外，其餘均為空心橋墩，橋墩水平方向勁度高；部分活動端橋墩基礎採用60cm PC樁，其餘則採用120cm、150cm場鑄RC基樁。從本案例橋中挑選6個等橋寬單元(南、北向各3單元)進行隔震補強評估，其中U2L/R為獨立隔震橋梁單元，U4L/R、U5L/R為連續隔震橋梁單元，補強內容為將既有盤式支承更換為LRB隔震支承，期可增加橋單元系統阻尼及延長基本振動週期之降低地震力效益外，亦可達均勻分散各橋墩地震力的功能。

對於隔震橋單元於橋橫向需考量隔震單元與相鄰非隔震單元處橋面伸縮縫功能，避免單元間橫向水平相對變位，於此伸縮縫端橋墩頂可增設橫向位移束制裝置；對於連續隔震橋梁

單元伸縮縫端間，上構箱形梁內部亦須考量增設鋼製連桿(縱向自由滑動，橫向連動)，於橫向地震時連續單元間隔震支承能夠產生位移發揮消能效益。連續隔震橋梁單元之地震橫向變位將趨近如圖7，各墩隔震支承橫向位移差異大，為確實掌握整體隔震橋梁橫向地震反應，應採非線性歷時分析。

依縱向靜力分析所得LRB性質模擬非線性元素，並建立隔震橋梁分析模型圖，如圖8、圖9。進行模態分析以瞭解隔震前後之基本振動週期變化，整理如表4所示。原結構基本振動週期約0.6~1.0sec，隔震補強後可延長至1.2~1.4sec，

系統等效阻尼比為20%。依耐震設計規範規定之加速度反應譜 $S_a(g)$ 與振動週期 T 關係圖(如圖10)，當基本振動週期由0.6sec延長至1.3sec時，最大考量地震(MCE)加速度反應譜值將由1.0g降至0.53g，如再考量LRB阻尼貢獻，則降至0.35g，本案例於換裝LRB支承後，對於地震慣性力抑制效果明顯。

綜整各單元分析結果，隔震前後柱底剪力分布變化(圖11~15)，原設計固定端(鉸接端)橋墩，如U2單元P7-P9橋墩，橋縱向水平力降幅約50%(圖11、13)，原活動端橋墩則因更換為LRB支承後，亦開始分擔地震力。另觀察橋梁橫向

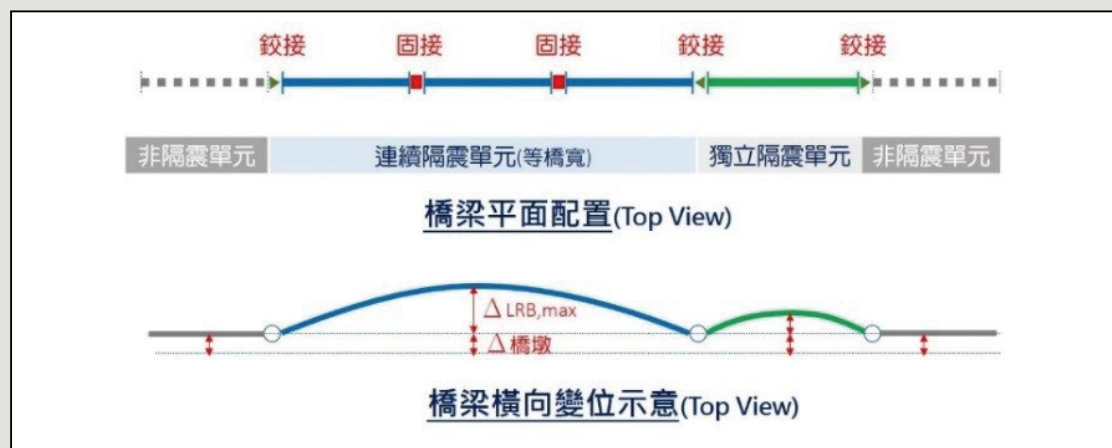


圖7 隔震橋梁橫向變位示意圖

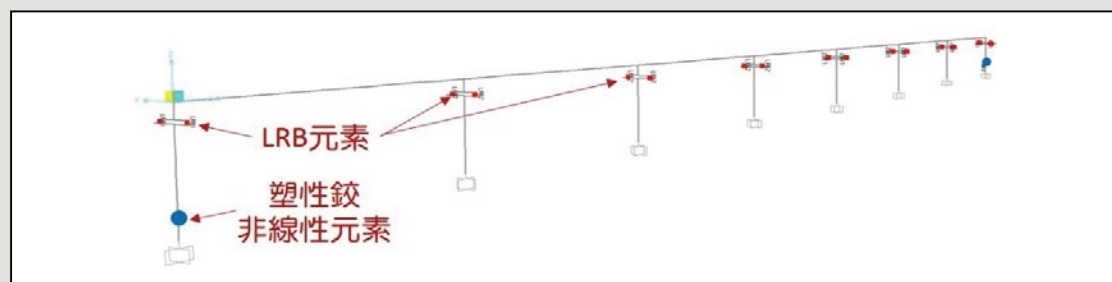


圖8 U2單元隔震橋梁分析模型

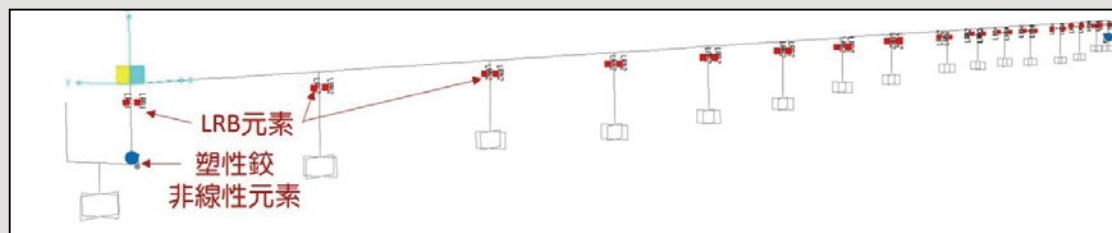
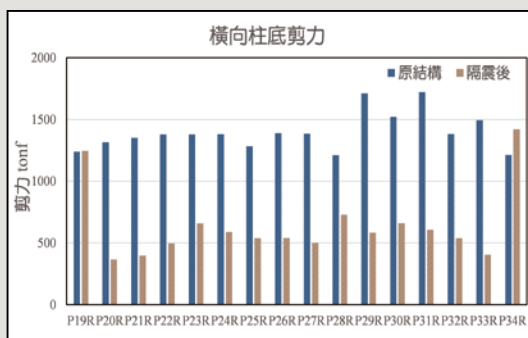
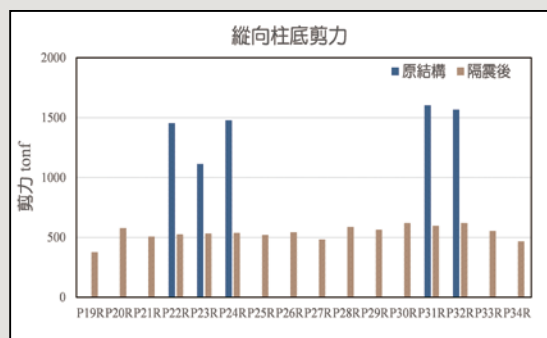
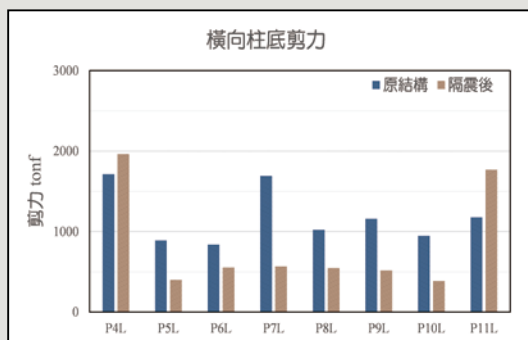
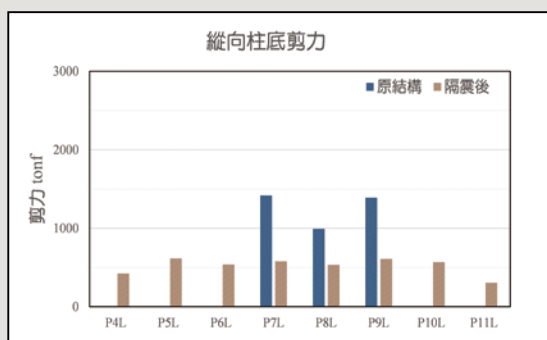
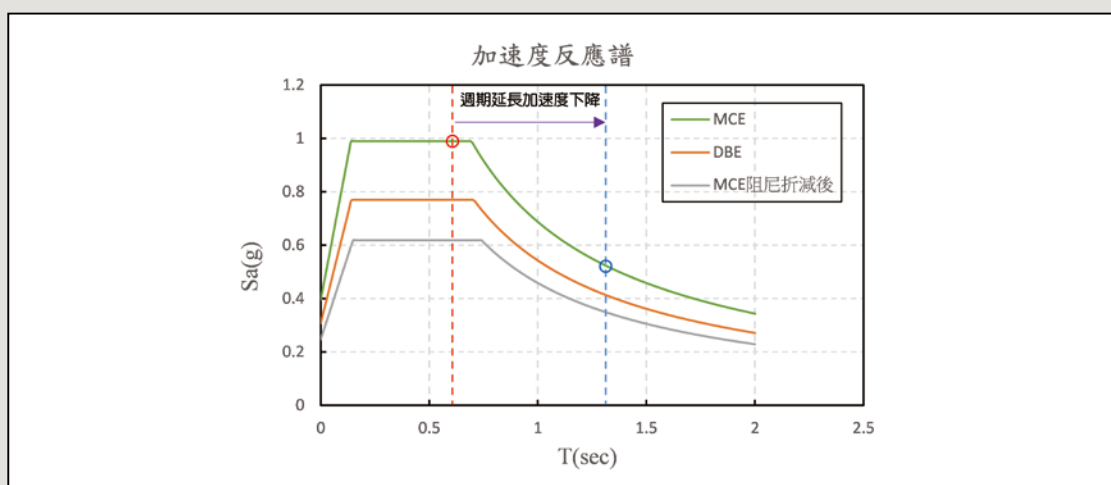


圖9 [U4-U5]單元隔震橋梁分析模型

表4 隔震橋梁基本振動週期彙整

振動單元	縱向		橫向		ξ system (系統等效阻尼比)
	原結構(sec)	隔震後(sec)	原結構(sec)	隔震後(sec)	
U2	0.717	1.407	0.63	1.235	0.2
U4	0.73	1.348	0.612	1.381	0.2
U5	1	1.404	0.638		0.2



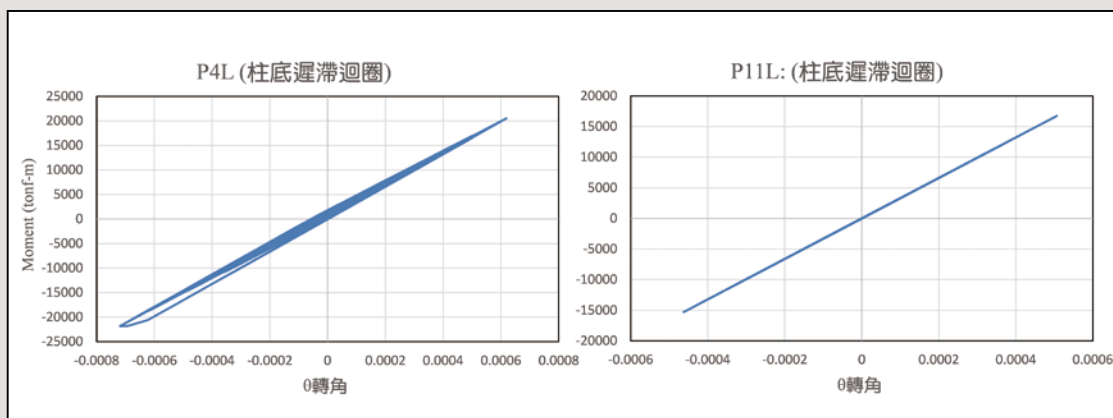


圖15 隔震補強後柱底塑鉸遲滯迴圈

柱底剪力分布情形(圖12、14)，由於隔震單元前後兩端需增設橋橫向位移限制裝置，使得此處之LRB受到拘束無法產生變形消能，惟中央處LRB均可自由變位，因此地震力無明顯集中之現象。進一步檢核隔震後柱底是否已進入非彈性段，結果顯示，除橫向最大考量地震等級(MCE)歷時分析，單元前後兩端橋墩產生塑性鉸外，其餘橋墩均仍在彈性範圍內(圖15)，多數橋墩均可有效降低地震力，並減少基礎補強規模。

案例3·地震力分散裝置- M38D2標國3甲辛亥路高架橋(區段2-2)

地震力分散裝置STU(亦稱Lock-up Device)設置於橋梁上構與下構間，藉由流體阻尼力吸收地震引致之瞬間作用力，使得上構與下構間形成剛性連接(Rigid Link)，並產生鎖定效果(Lock-

up Effect)，在常時狀態下(如溫差、潛變及收縮等)所產生之小位移，可在小於最大拖曳力下產生緩慢移動，使得結構保持在活動狀態，此裝置優點為並未改變橋梁常時支承束制條件，而於地震時將地震力分散於較多之橋墩一起承受，可降低結構風險。本文以國3甲辛亥路高架橋為例，介紹橋墩構材韌性比不足時，以地震力分散裝置改變結構系統之補強方案，期能有效降低國道橋梁補強經費。

國3甲辛亥路高架橋於85年12月竣工，橋址位於臺北市大安區，橋梁立面配置圖詳圖16。國3甲辛亥路高架橋東行線3單元之跨徑配置分別為2@37m、3@37m、28+40+28m，總長281m，西行線2個單元之跨徑配置分別為4@37m、33+45+33m，總長259m。

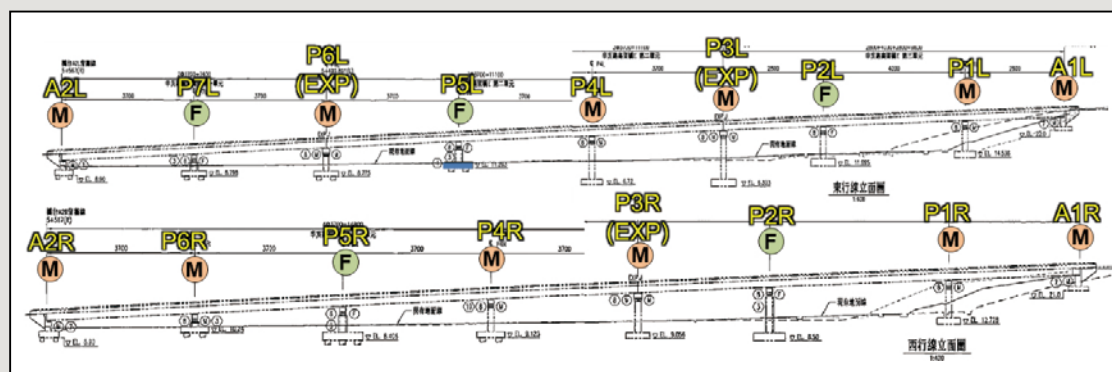


圖16 國3甲辛亥路高架橋立面配置圖

依據交通部108年頒布「公路橋梁耐震設計規範」，本橋範圍(臺北市大安區黎元里)之地震微分區屬台北三區，無鄰近第一類活動斷層，水平譜加速度 S_S^{II} 、 S_1^{II} 、 S_S^{III} 及 S_1^{III} 分別為0.6、0.35、0.8及0.5。

國3甲辛亥路高架橋經評估後其中東行線單元U3L及單元U2L、西行線單元U2R及單元U1R行車向等級 II 地震和等級 III 地震之整體耐震能力不足，需進行橋墩包覆補強，如表5所示。

惟U3L單元之P7L橋墩及U2R單元之P5R橋墩採用RC包覆補強後，橋墩之容許韌性比仍超過上限值，如表6所示。

本橋梁於P6L及P4R增設地震力分散裝置

後，各橋墩之縱向容許韌性比與耐震能力如表7所示，已可符合耐震性能需求。

案例4·河川橋樁基礎沖刷補強-M37E標國3烏溪三號橋(區段1-2)

河川橋可能受天然或人為因素影響，導致橋址附近河床因沖刷或向源侵蝕下降，造成橋梁基樁或沉箱結構體裸露，受水流力或地震力作用之結構行為改變，且貫入土層深度減少，進而降低了橋梁之耐洪與耐震能力。河川沖刷之橋基補強應蒐集河川歷年航照圖、歷年測量斷面圖及河川治理規劃等資料，研判河道特性及變遷範圍，並考量河川長期變化對橋梁安全所造成影響。本文以國3烏溪三號橋為例，提出橋梁基礎於深槽區及高灘地之補強策略。

表5 國3甲辛亥路高架橋整體耐震能力評估結果

橋梁名稱	振動單元名稱	縱向耐震能力之容量需求比	
		等級II地震(C/D)	等級III地震(C/D)
辛亥路高架橋	U1L	1.48	1.37
	U2L	0.63(N.G.)	0.54(N.G.)
	U3L	0.91(N.G.)	0.83(N.G.)
	U1R	0.90(N.G.)	0.78(N.G.)
	U2R	0.49(N.G.)	0.43(N.G.)

表6 國3甲辛亥路高架橋橋墩採RC包覆後橋墩縱向容許韌性比與耐震能力

振動單元名稱	橋墩	構材容許韌性比		縱向耐震能力之容量需求比	
		等級II地震(μ_{II})	等級III地震(μ_{III})	等級II地震(C/D)	等級III地震(C/D)
U2L	P5L	2.52	3.46	1.68	1.72
U3L	P7L	3.38(N.G.)	5.24(N.G.)	1.07	0.99(N.G.)
U1R	P2R	1.54	2.15	1.37	1.3
U2R	P5R	3.03(N.G.)	4.04	1.00	0.98(N.G.)

表7 國3甲辛亥路高架橋增設力量分散裝置後橋墩縱向容許韌性比與耐震能力

振動單元名稱	橋墩	構材容許韌性比		縱向耐震能力之容量需求比	
		等級II地震(μ_{II})	等級III地震(μ_{III})	等級II地震(C/D)	等級III地震(C/D)
U2L	P5L	2.52	3.46	1.68	1.72
U3L	P7L	2.44(OK)	4.01(OK)	1.31(OK)	1.21(OK)
U1R	P2R	1.54	2.15	1.37	1.3
U2R	P5R	2.14(OK)	3.03(OK)	1.19(OK)	1.14(OK)

烏溪三號橋計約4,132公尺，全橋區分為17個單元，每單元含3~7個跨徑，工程位置詳圖17。

因本段河道(大里溪匯流口至烏溪橋)較為



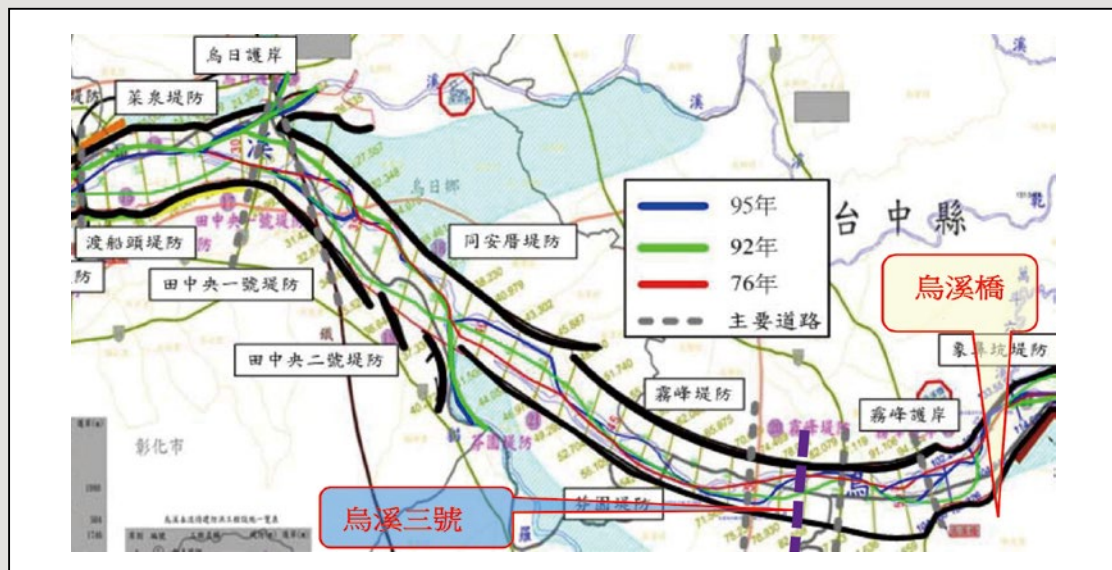
圖17 第M37E標烏溪三號橋工程位置

順直，主深槽頗為集中，較下游段流路變動為小，大體而言仍沿凹岸運行(圖18)。惟國3下游

流路有迫近左岸芬園堤防現象，因此水利主管機關已辦理堤防基礎加強工程。經比對歷年來測量資料、衛星空拍影像資料及「南投段及斗南段轄區橋涵隧道檢測工作(106年)報告」顯示河道之平面擺盪範圍及冲刷情況，主深河槽由北岸往南岸移動趨勢，屬變遷河道(辦狀河川)，如圖18~20所示。

烏溪三號橋於非汛期時檢測發現，P59橋墩處因基礎冲刷裸露並造成基樁受損而鋼筋外露，為避免橋梁持續劣化或造成耐震性能降低，建議進行基礎耐震補強。

考量主河槽可能變動性及主河槽區內之河床高程高低差大，基於保守安全考量，橋梁結構安全評估時取橋墩P58~P61為深槽區、橋墩P44~P57為高灘地進行耐震補強設計。基礎補強工法選用增設樁徑150公分全套管基樁補強，橋墩P44~P57採用增樁擴基、基礎增厚0.5公尺補強；橋墩P58~P61則採基礎底向下增加1.5公尺增樁擴基補強，其中P59採用向下3.7公尺補強，如圖21所示。



資料來源：摘自「烏溪本流河床穩定與治理對策之研究」(經濟部水利署，民國95年12月)

圖18 大里溪匯流口至烏溪橋段主深槽歷年變遷(民國76-95年)



資料來源：摘自「南投段及斗南段轄區橋涵隧道檢測工作(民國106年)報告」

圖19 烏溪三號橋歷年航照圖比對圖

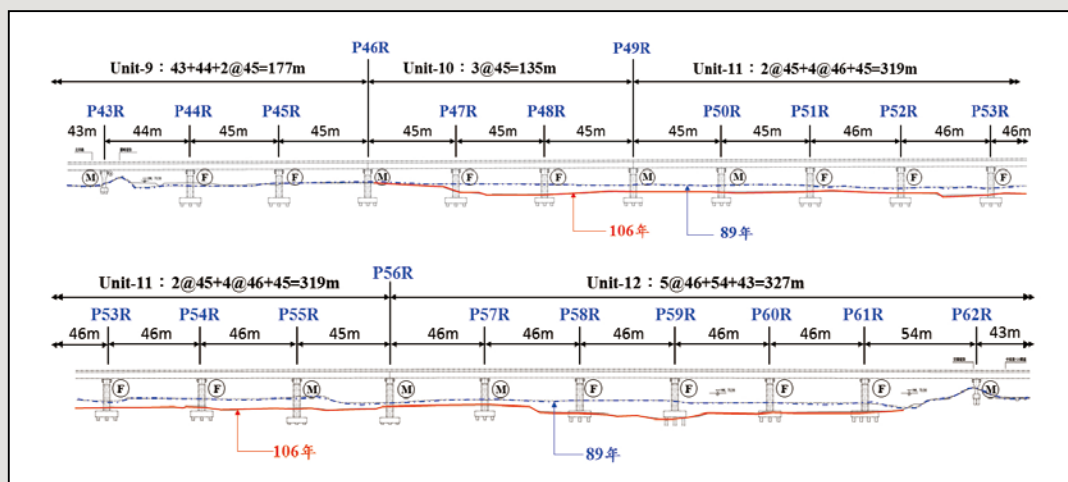


圖20 烏溪三號橋竣工圖與本計畫測量資料比對圖

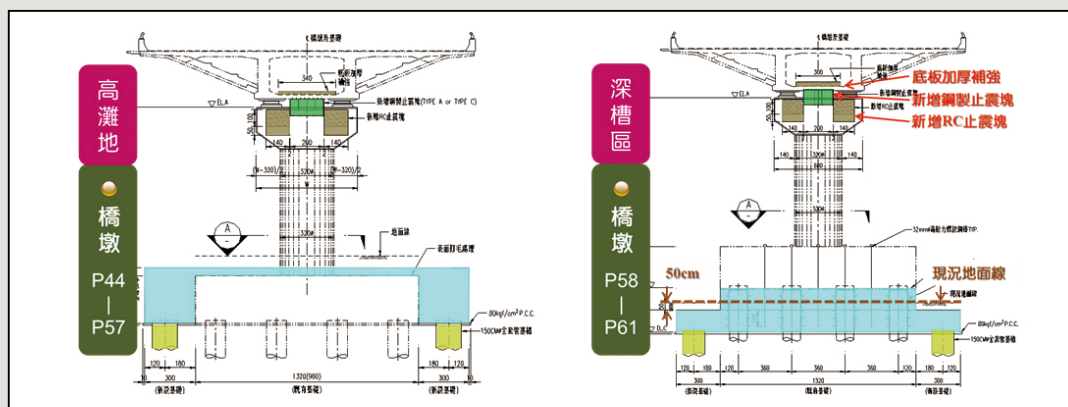


圖21 烏溪三號橋增樁擴基補強示意圖

河川橋耐震補強設計，除須詳細考慮河道特性及高灘地與深槽區變遷範圍外，尚須考慮補強後之量體是否增加阻水斷面，進而加劇橋基沖刷深度，故需於河床沖刷及橋梁耐震能力提昇間求得一平衡點。因此，河川橋耐震補強時應以「河橋共治」的理念，同時考量河川長期變化對橋梁安全所造影響，及橋梁補強可能對河床沖刷及河川防洪治理之影響。

案例5·跨斷層補強考量- M41標國4豐原高架橋(區段1-2)

國內橋梁耐震設計規範於民國98年除新增最大考量地震(回歸期2500年)作用下，允許結構物產生極限塑性變形至結構韌性R外，另開始考量活動斷層近域效應，導入斷層近域調整因子 N_A 、 N_V ，相較於民國84年公路橋梁設計規範，地震力係數大幅提高。活動斷層錯動引致大規模地震，在近斷層區域產生相當大的地震動及劇烈之地變形。其地表錯位及長週期脈衝效應

產生的大速度和譜速度需求，對分布性構造及地下結構，例如地下管線、橋梁、隧道等構成更嚴重之威脅。本文以國道4號豐原高架橋為例，提出因應鄰近斷層橋梁之補強策略，期能於震後國道橋梁仍可維持防災運輸能力。

第M41標國4豐原高架橋於民國91年2月完工，橋址位於臺中市神岡區及豐原區，所鄰近之斷層由西向東分別有屯子腳斷層、三義斷層及車籠埔斷層，其中三義斷層於朴子穿越豐原高架橋，依交通部頒「公路橋梁耐震設計規範」規定，必須考量第一類活動斷層之近域效應。豐原高架橋基本資料及結構型式詳如圖22及表8所示，其中台13線以西橋梁(含橋墩P132及P133)採用民國76年公路橋梁設計規範設計，台13線以東則以民國84年公路橋梁耐震規範設計。本橋於施工期間遭遇921地震影響，致部分施工完成之箱形梁位移，盤式支承及支承座損壞，橋墩鋼筋變形等，台中系統路段損傷較為嚴重，歷經6個月時間修復。



圖22 第M41標近斷層300公尺範圍橋梁

表8 第M41標橋梁一覽表

橋梁名稱	橋長 (m)	平均 橋寬 (m)	上部結構		下部結構				橋梁分類		設計 規範
			連續	工法	橋台 型式	橋台 基礎	橋墩 型式	橋墩 基礎	TYPE	種類	
豐原高架橋 (西向)	6966	15.15	連續-鉸接/ 連續-鋼接	就地澆注逐跨工法/支 撐先進工法/預鑄預力 混凝土I型梁工法	扶 壁 式	直 基	單 柱	直 基	5	穿 越 橋	76/ 84
豐原高架橋 (東向)	6966	15.15									

三義斷層屬於逆斷層，對本案豐原高架橋可能之斷層錯動量，經國震中心模擬評估結果，其錯動量平均值 D_m 約在0.74-0.83公尺，提出建議錯動量約0.83公尺，詳如表9。其中斷層錯動量 D_m 為沿斷層破裂面之滑動距離，其水平向及垂直向之斷層錯動量與斷層淺地表之幾

何傾角相關。三義斷層之淺地表傾角 (θ) 為 25° ，其水平向、垂直向斷層錯動量可分別以 $D_m \cdot \cos(\theta)$ 、 $D_m \cdot \sin(\theta)$ 估算之。本案建議豐原高架橋對於三義斷層之上下盤位置錯動量影響範圍如圖23所示：

表9 三義斷層對國道4號豐原高架橋建議斷層錯動量一覽表

橋梁名稱	上下盤位置 (三義斷層)	建議斷層錯動量 (公尺)	水平向斷層錯動量 $D_m \cdot \cos$ (θ) (公尺)
豐原高架橋	下盤 (0-50公尺)	0.83	0.75
	下盤 (50-100公尺)	0.42	0.38
	上盤 (0-100公尺)	0.83	0.75
	上盤 (100-200公尺)	0.42	0.38

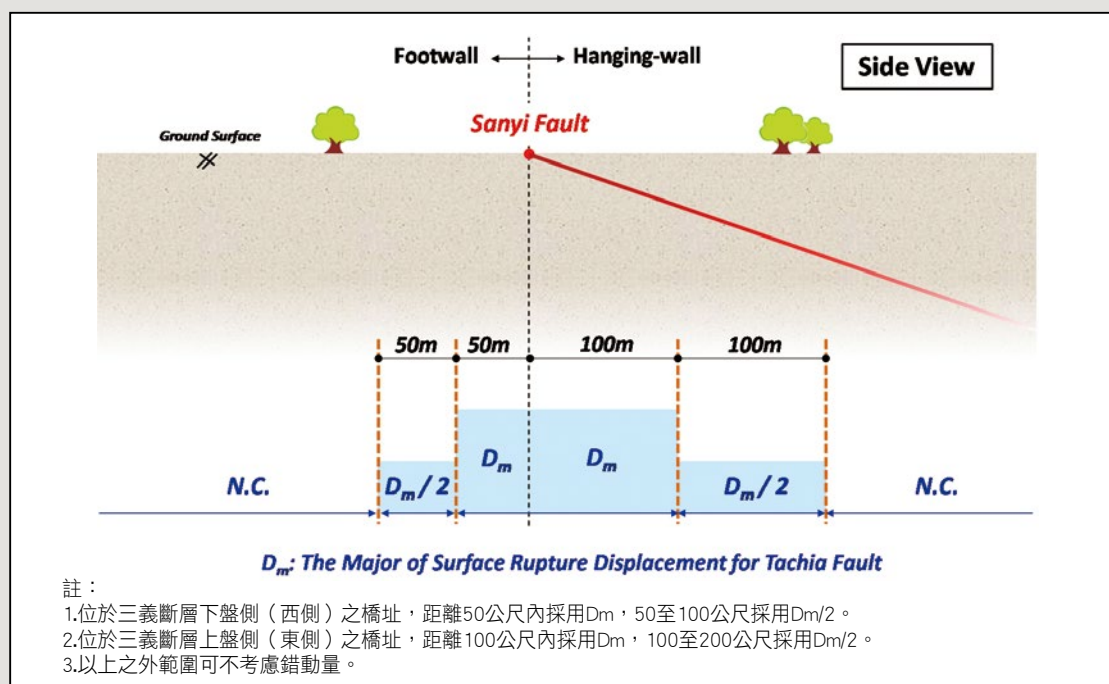


圖23 建議三義斷層之主斷層錯動量工程考量範圍示意圖

依據地調所公告之三義斷層活動斷層地質敏感區與豐原高架橋橋址套繪結果如圖24所示，三義斷層帶大約座落於橋墩P152至P160之間。引用前節建議之錯動量考量範圍，三義斷層下盤往西側影響約至橋墩P150，上盤往東側影響約至橋墩P165。

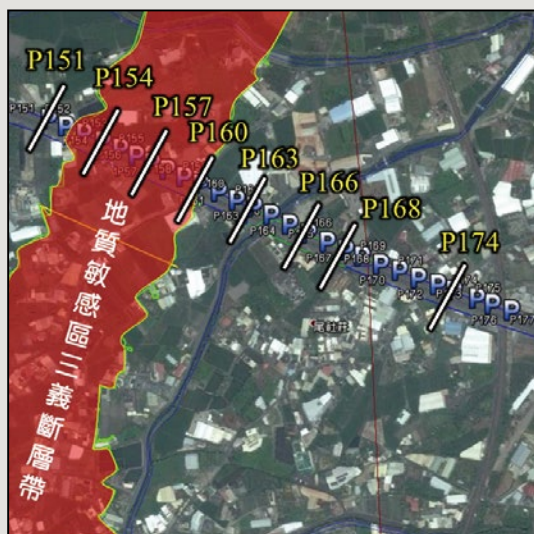


圖24 地質敏感區三義斷層與豐原高架橋位置示意圖

豐原高架橋最大考量地震作用下 u_R 約為23cm，實際防落長度與考量表9三義斷層水平向斷層錯動量之計算結果彙整如表10，其中P154及P157防落長度需求不足13cm。為避免斷層

表10 國道4號豐原高架橋防落長度計算彙整表

橋梁	橋墩	上下盤位置	實際防落長度(cm)	$1.2L_{N,min}$ (cm)	$1.2(u_R + u_G)$ (cm)	補強前C/D	補強後C/D
豐原高架橋	P151	下盤(50~100公尺)	105	91	74	1.15	2.03
	P154	下盤(0~50公尺)	105	91	118	0.89	1.57
	P157	上盤(0~100公尺)	105	91	118	0.89	1.57
	P160	上盤(100~200公尺)	105	91	74	1.15	2.03
	P163	上盤(不考慮斷層錯動量範圍)	105	91	50	1.15	2.03

錯動造成落橋情形產生，且斷層帶範圍較廣及斷層錯動量評估係以平均值計算，不確定性較高，故設計考量仍以保守為宜。因此於橋梁伸縮縫處（P151、P154、P157、P160、P163）增加混凝土防落長度80cm，補強後防落長度為185cm，並增加抽換防震拉條等補強工項。

案例6·基礎耐震評估考量基礎阻尼常數折減係數 C_D - M38FZ標國10高雄環線高架(二)橋(區段2-2)

M38FZ標國10高架(二)橋於89年3月完工，橋址位於高雄市仁武區，起訖里程為2k+423~7k+979，以第15單元(橋墩P123~P129)為例，其跨徑配置為2@39+43+3@39m，全長238m，橋梁立面配置圖詳圖25。

依據交通部108年版「公路橋梁耐震設計規範」及110年版「公路橋梁耐震評估與補強設計規範」，國10高架(二)橋範圍(高雄市仁武區)之地震微分區屬第三類地盤，並近旗山斷層，水平譜加速度 S_S^{II} 、 S_1^{II} 、 S_S^{III} 及 S_1^{III} 分別為0.80、0.45、1.00及0.55， $N_{A,II}$ 、 $N_{v,II}$ 、 $N_{A,III}$ 及 $N_{v,III}$ 分別為1.08、1.09、1.09及1.16。

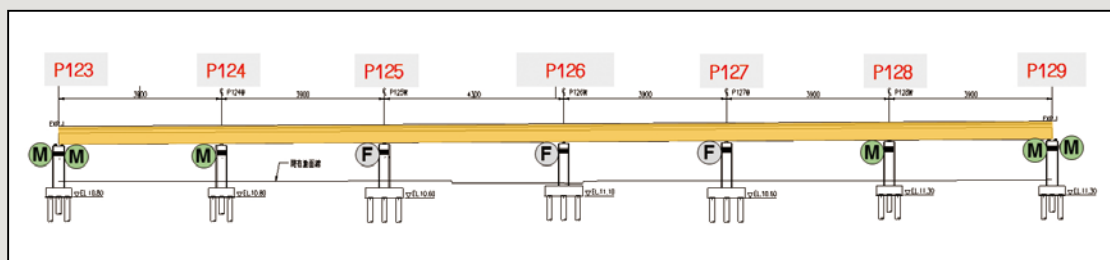


圖25 國10高架(二)橋第15單元立面配置圖

國10高架(二)橋，經評估後其縱向整體耐震能力不足，主要為新頒耐震規範中新增旗山斷層，造成地震力需求增加，導致縱向容許韌性比與耐震能力不足。因此，採橋柱鋼筋混凝土包覆方式進行圍束補強，補強後可符合規範規定之等級 II 和等級 III 地震力檢核。另以P127橋墩基礎為例，進行基礎耐震能力評估。P127橋墩為鉸接端，下部結構採單柱式RC截角矩型橋墩，基礎採用樁基礎，為120cm場鑄基樁，樁長35.5m，基樁主筋為24-29 ϕ ，其配置如圖26所示。

P127橋墩樁基礎分析時，於基樁樁頭最大彎矩範圍設定連續塑鉸並進行基礎側推分析，如圖27所示。將其評估結果利用等能量原理將彈性地震力之三角形面積轉換為非彈性位移，如圖28所示。依據110年耐震補強規範表C4-3中於等級II及等級III地震之場鑄基樁容許塑性率，檢核結果亦皆為N.G.。評估結果如表11所示。

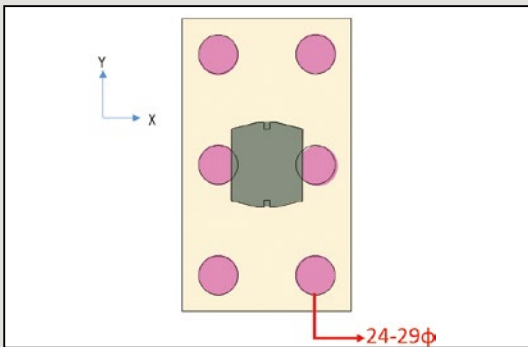


圖26 P127橋墩基礎配置

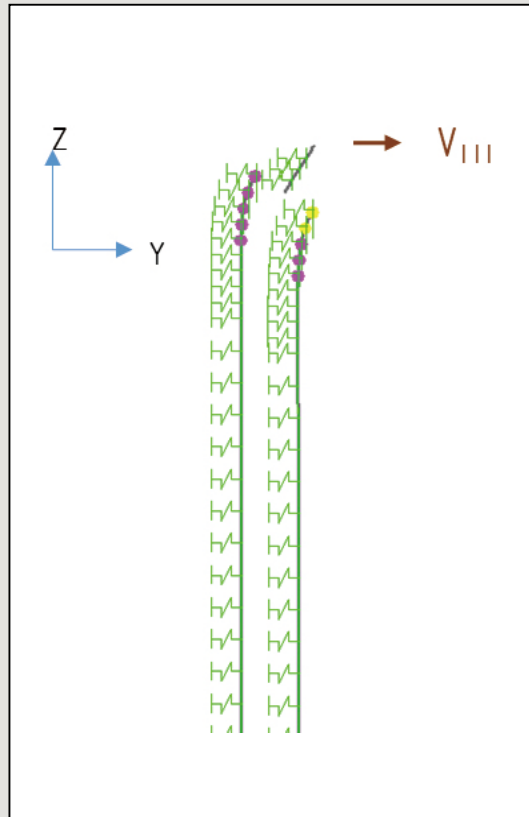


圖27 基樁樁頭範圍設定連續塑鉸

表11 評估結果

	容許塑性率(μ)	基礎頂轉角
等級II地震	5.11>3.0 (N.G.)	0.0204>0.02 (N.G.)
等級III地震	7.68>6.0 (N.G.)	0.032>0.02 (N.G.)

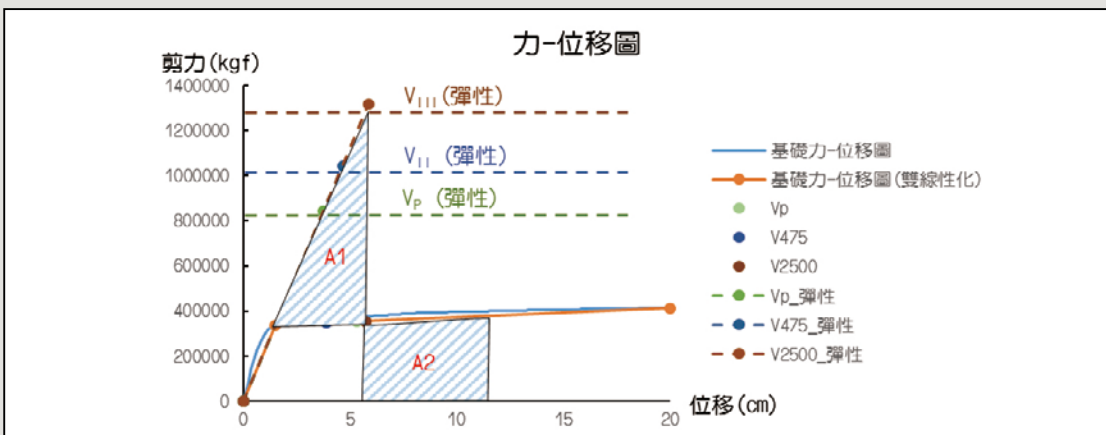


圖28 力-位移圖利用等能量原理轉換結果

國10高架(二)橋下有多條重大管線經過，且位於交通流量大之都會區，進行基礎補強施工不易，故「公路橋梁耐震評估與補強設計規範」參考日本道路協會「道路橋示方書-耐震設計編」之基礎阻尼相關規定，於大地震作用時基樁會優先發生塑鉸進入基礎塑性容量之情況下，考量橋基若為深基礎型式者，大地震作用時，基礎系統於降伏點前的期間，向側方地盤於振動能量之耗散、基礎主體及地盤抵抗之非線性，而訂定基礎阻尼常數折減係數 C_D 值為 $2/3$ ，將 C_D 值乘以柱底傳遞至基礎之等級II及等級III地震水平譜加速度作用力，並與橋柱底產生塑鉸時之作用力比較並取小值，以及基礎板之地表水平譜加速度作用力亦乘以 C_D 值折減，據以檢核基礎結構容量、基礎塑性率與基礎頂面旋轉角變位。

因P127橋墩基礎側推曲線已進入基礎系統之塑性容量，可考量基礎阻尼常數折減係數 C_D 值 $2/3$ 進行基礎側推分析，將其評估結果利用等能量原理將彈性地震力之三角型面積轉換為非彈性位移，如圖29所示。透過評估成果進而求得其等級II及等級III之容許塑性率(μ)及基礎頂轉角，檢核結果皆可符合規範容許值。評估結果如表12所示。

表12 考慮基礎阻尼之評估結果

	容許塑性率(μ)	基礎頂轉角
等級II地震	2.59<3.0 (OK)	0.011<0.02 (OK)
等級III地震	3.80<6.0 (OK)	0.016<0.02 (OK)

高速公路屬於生命線救災道路，為避免震後橋梁產生過大變形及易於巡檢，原則不考慮基礎阻尼常數折減係數 C_D 值，惟基礎補強因受限空間、交通及重大管線等議題無法進行補強者，可經由考量評估整體各因素後同意採用基礎阻尼折減，據以降低基礎結構檢核之需求。

結語

耐震補強工程依據規範及現場環境條件下，進行各種補強方案評估，研選出最適合方案進行施工，尤其是涉及基礎補強方案更是須審慎評估，以降低工程費，可說是一門藝術；本文整理本公司自民國105年後，參與高速公路後續路段橋梁耐震補強工程經驗，提供做為後續橋梁耐震補強工程參考。

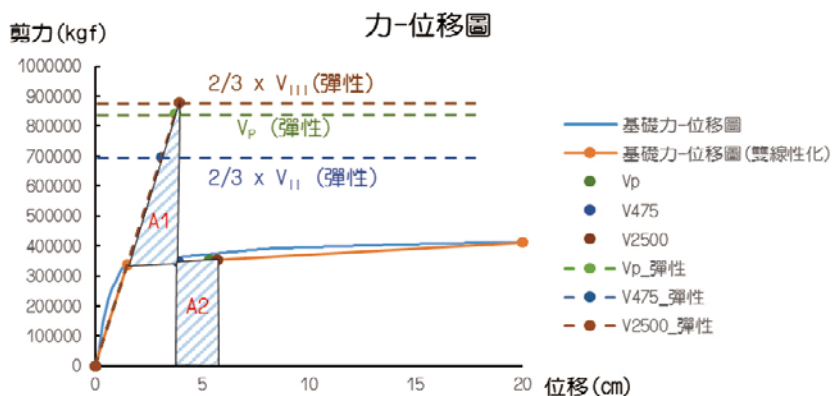


圖29 考慮基礎阻尼之力-位移圖利用等能量原理轉換結果



3

專題報導

兼顧變與不變的 耐震補強——深河 槽區基礎補強的 設計與施工

關鍵詞(Key Words)：光復大橋 (Guangfu Bridge)、耐震評估 (Seismic Resistance Evaluation)、基礎補強 (Foundation Reinforcement)、斜張橋 (Cable-Stayed Bridge)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／技術經理／張英發 (Teo, Eng-Huat) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／副理／張志斌 (Chang, Chih-Pin) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／監造工程師／蔡建民 (Tsai, Chien-Min) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／工程師／邱益成 (Chiu, I-Cheng) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／工程師／曾笠維 (Tzeng, Li-Wei) ❺

摘要

台灣位處地震活動頻繁地帶及颱風侵襲路徑上，且河川坡陡流急，部分跨河橋梁橋基因老舊或橋基嚴重裸露，造成橋基耐震能力與穩定性不足，對橋梁安全產生威脅。相關主管機關因此進行各種橋基補強工程，以保障橋梁安全。然而在進行補強工程時，為了達成有效且長久的目標，需先就補強原因及環境限制條件深入探討，包括橋梁既有交通功能、河川的疏洪功能、橋梁的跨度配置或結構型式，以及施工作業空間等環境及橋梁本身無法改變的因素。另一方面，在極端氣候的環境載重與河床沖刷、河床降低導致橋梁穩定性與基礎承载力降低，以及耐震概念的演進與耐震規範的更新，均屬環境及橋梁本身已經改變的因素。

針對以上變與不變的因素，如何因應跨河橋基裸露造成耐震能力不足情形，採用有效可行的耐震補強工法，實值國人研究探討。本文將以新北市光復大橋的基礎補強工程為例，說明如何在兼顧橋梁交通功能及河川疏洪功能情況下，進行深河槽區的橋墩補強作業並提昇橋梁耐震能力，以作為日後跨河橋梁基礎補強設計的參考案例。



Innovation in Aseismic Reinforcement: Design and Construction of Foundation Reinforcement in a Deep Channel Area

Abstract

Taiwan is located in an area with frequent earthquakes and on the path of typhoons, with the rivers steep and flowing fast. Due to aging or severely exposed bridge foundations, some river crossing bridge foundations result in insufficient earthquake resistance and stability, posing a threat to bridge safety. The authorities have carried out various bridge foundation reinforcement projects to ensure bridge safety. In order to achieve effective and long-term goals when carrying out reinforcement projects, it is necessary to conduct further discussions on the reasons for the reinforcement and environmental constraints. This includes existing traffic functions of the bridge, the flood drainage function of the river, the span configuration or structural type of the bridge, and the construction workspace, which are the unchanged factor of the environment and the bridge itself. On the other hand, the environmental loads and riverbed erosion under extreme climate trends, lowering of riverbeds lead to decreasing bridge stability and foundation bearing capacity, as well as the evolution of the earthquake resistance concept and the revision of earthquake resistance standards, which all belong to the fact that the environment and the bridge itself have changed.

Based on the above-mentioned changing and unchanged factors, how to deal with the lack of earthquake resistance caused by the exposed river crossing bridge foundations, and adopt effective and feasible earthquake resistance reinforcement methods, is worth researching and discussing. This article will take the foundation reinforcement project of the Guangfu Bridge in New Taipei City as an example to explain how to strengthen the piers in the deep river channel area and improve the seismic resistance of the bridge while considering the traffic function of the bridge and the flood drainage function of the river. This can be used as a reference for future bridge foundation reinforcement design projects.

壹、前言

台灣地狹人稠，綿密之交通路網遂成為區域聯繫及經濟發展之主要依據，而受限於地形起伏變化，橋梁的功能維持更是確保交通運轉及經濟活動之主要關鍵。然而台灣位處地震活動頻繁地帶及颱風侵襲路徑上，且河川坡陡流急，部分跨河橋梁橋基因老舊或橋基嚴重裸露，造成橋基耐震能力與穩定性不足，因此須辦理橋基補強工程。為使補強工程確實有效，需先探討補強原因及環境限制條件，包括：

一、環境及橋梁本身無法或不能改變的控制因素

- 橋梁通常肩負重要交通任務，補強過程中必須維持其既有交通功能，否則將付出極大社會代價，亦即補強施工過程不能大幅影響結構強度及穩定性。
- 河川具有排洪疏洪功能，跨河橋梁補強作業時，不能影響河川的通洪面積及河床穩定性。
- 補強作業僅能就系統及構件進行補強，對於橋梁的跨度配置或結構型式(如梁橋或拱橋)並不易改變。
- 補強作業係對於既有結構進行施工，通常會有緊鄰結構、空間狹小等情況，因此作業空間難以改變，導致能採用的工法及施工機具經常有所限制。

二、環境及橋梁本身已經改變的控制因素

- 受近年來極端氣候影響，台灣發生超大豪雨的機率漸趨頻繁，且暴雨規模亦遠超過以往紀錄，因此橋梁的環境載重與河床的沖刷情況已明顯改變。

- 台灣河川坡陡流急，再加上近年極端氣候影響，暴雨造成河床沖刷，復以下游砂石開採過度，造成河床下降，導致基礎裸露，橋梁穩定性與基礎承载力已與原設計時不同[1]。

- 台灣921地震之後，隨著地震資料的完整蒐集，以及耐震概念的演進與耐震規範的更新，設計地震力與耐震細節有所改變，既有橋梁的耐震能力已不符最新耐震規範規定。

針對以上變與不變的因素，如何因應跨河橋基裸露造成耐震能力不足情形，採用有效可行的耐震補強工法，實值國人研究探討[2][3][4]。

新北市光復大橋跨越新店溪、串連新北市及臺北市，且為防災救災重要橋梁。本橋於民國66年竣工通行使用距今已達46年，跨河主橋為四跨連續斜張橋，造型簡潔，斜張造型引人注目。主橋段原設計係採60cm×60cm方形預鑄預力混凝土空心樁，由於基礎沖刷嚴重，耐震評估後基樁彎矩強度無法滿足現有耐震規範需求，經耐震評估後辦理下部結構墩柱的鋼板包覆補強及基礎基樁補強。

本工程係於深河槽內的橋墩補強，基樁採雙層套管方式施工，基礎則結合雙層鋼板樁圍堰施工。補強作業淨高受限且施工期間面臨河道高低水位的來回衝擊及河床有局部沖刷等影響，使得本橋墩耐震補強施工面臨很大的挑戰。

本文將以光復大橋深河槽區基礎補強的設計與施工案例作說明，同時針對深槽區的橋墩設計與施工挑戰作介紹，作為未來橋梁基礎及基樁補強設計之參考。

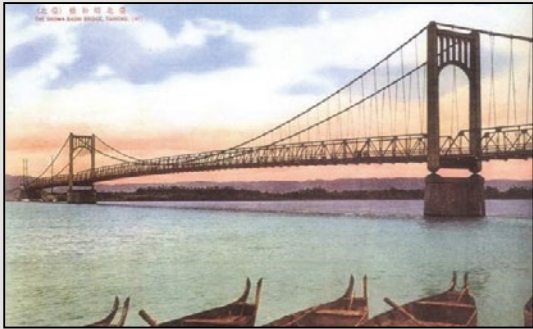
貳、光復大橋簡介及補強工程概要

光復橋前身為昭和橋，民國22年竣工，為橋長369m、寬4.5m之吊橋，當時為台北城四大名橋之一，如圖1所示。臺灣光復後改名為「光復橋」。

一、光復大橋結構型式與配置

民國66年12月1日光復大橋改建通車，採斜張式吊橋預力混凝土構造，是當時遠東地區首座採斜張式設計的橋梁，迄今橋齡超過46年，現況相片如圖2。

光復大橋跨河主橋為四跨連續斜張橋，主橋402m，跨徑配置為67m+ 134m+134m+67m，淨寬20m，包括15m四線車道及兩側各2.5m人行道，上部結構主梁型式為預力T型梁，下部結構為框架式混凝土橋墩，橋墩基礎型式為預鑄預力混凝土樁基礎。



相片來源：國家圖書館網站

圖1 昭和橋，1933（現名光復橋）



圖2 光復大橋現況相片

二、耐震評估與補強作業

本公司於105年辦理光復大橋耐震能力評估，本橋原設計採60cm×60cm方形預鑄預力混凝土空心樁，在基礎冲刷情況下，基樁彎矩強度無法滿足現有耐震規範要求，下部結構須進行墩柱的鋼板包覆及基樁補強，故針對主橋段橋墩進行基礎及基樁補強。

本橋係屬特殊的斜張橋橋型，耐震分析時須進行較為詳實的分析；橋墩補強施工係在維持現有橋梁正常通車條件下進行，施工時有橋下淨高限制，且須滿足河川及相關主管單位的要求，故須採特殊的施工工法進行補強作業。

叁、耐震分析與評估結果

一、耐震能力分析作業

（一）橋梁配置

光復大橋由多座橋梁組成，分成台北端引橋、跨河主橋及新北端引橋等，其中台北端引橋係屬臺北市政府工務局新建工程處管轄，已配合辦理相關補強作業完成，而新北端引橋部分則於99年由新北市政府改建完成。因此，本橋結構耐震評估單元係以光復大橋主橋(橋墩編

號P8-P12)為主，其橋塔與橋墩為固接結構(R為固接)，斜張橋兩側則配置可動式支承(M為可動式支承)，而橋塔及橋塔之間橋面以外懸鉸接方式進行接合，其設計配置圖如圖3，簡化後示意圖如圖4，其中編號P9及P11為主橋段兩側橋塔，編號P10為深槽區中橋塔。

(三) 耐震分析作業

本橋工址分屬台北盆地之台北二區及一區，無斷層經過。本橋的結構分析評估之整體結構模型如圖5所示。其中，主塔墩柱為中空結構，以SAP2000進行分析及評估作業。

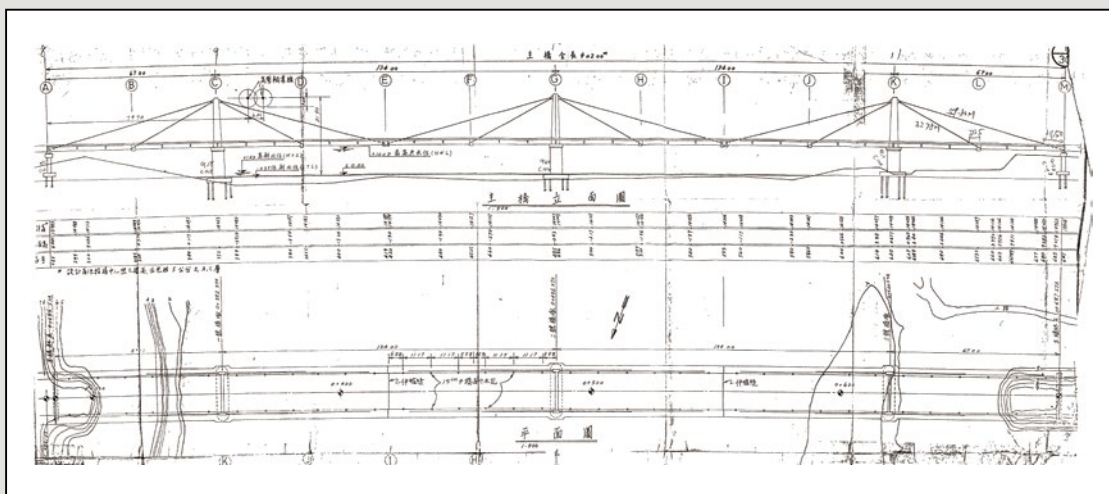


圖3 光復大橋跨河主橋設計配置圖

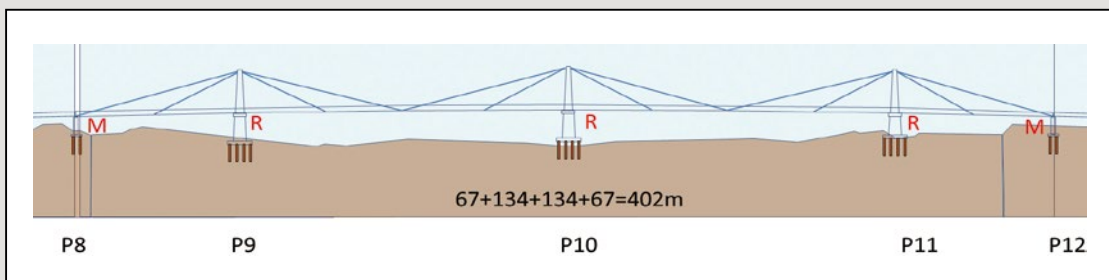


圖4 光復大橋跨河主橋結構配置示意圖

(二) 材料性質

依據本橋原設計圖中之材料說明，預力梁及塔柱採用之混凝土強度為 350kg/cm^2 ，橋墩及橋面採用之混凝土強度為 280kg/cm^2 ，鋼筋強度(f_y)為 2800kg/cm^2 ，鋼索最低極限強度為 $19,000\text{kg/cm}^2$ 。

本橋進行結構耐震分析時，在考量分析軟體的穩定性及結構週期、屬性的不同，原則上係採上部結構與下部結構分開的二個個別結構模型進行分析，但為確認下部結構對上部結構的影響，將新增基樁等轉換成等值彈簧，於分析模式下進行結構分析，如圖6所示。

為求謹慎及比對不同柱底模式下的耐震評估成果，於結構分析過程中，考量柱底為固接或彈簧兩種模式進行分析，分析結果如圖7所

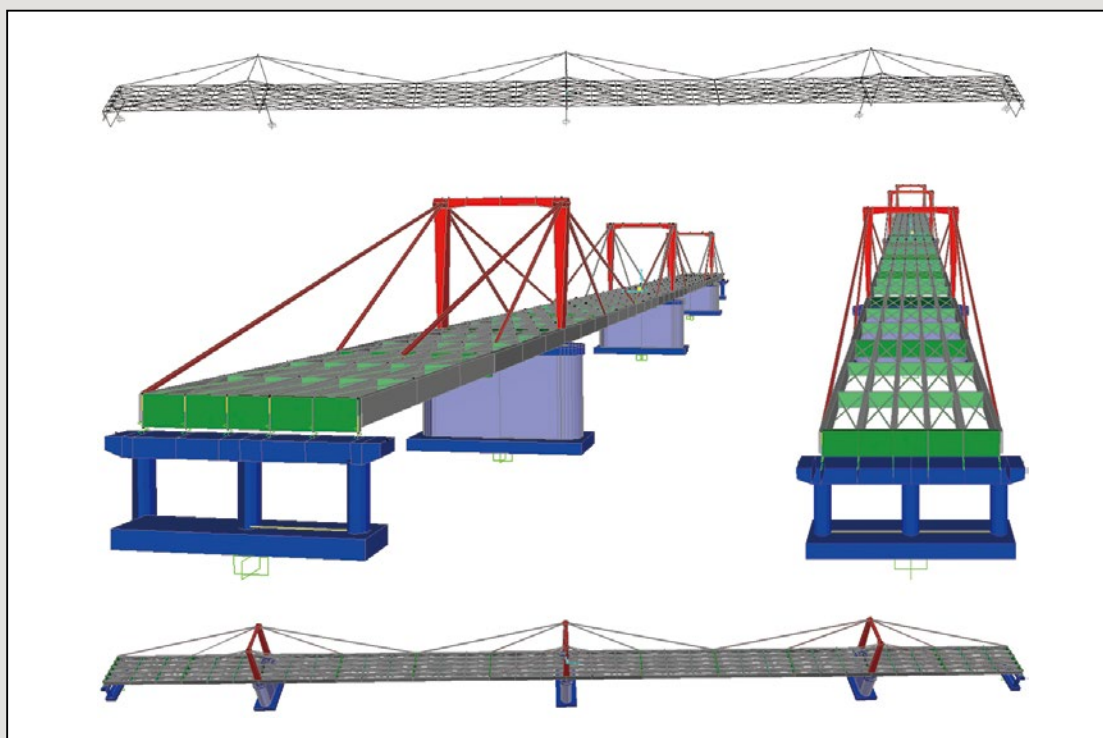


圖5 光復大橋跨河主橋整體結構模型

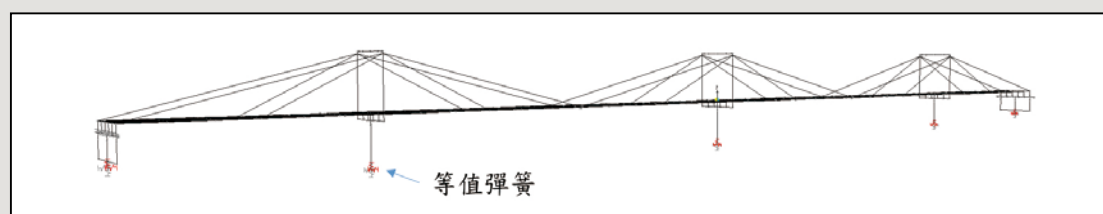


圖6 下部結構採等值彈簧之分析模型

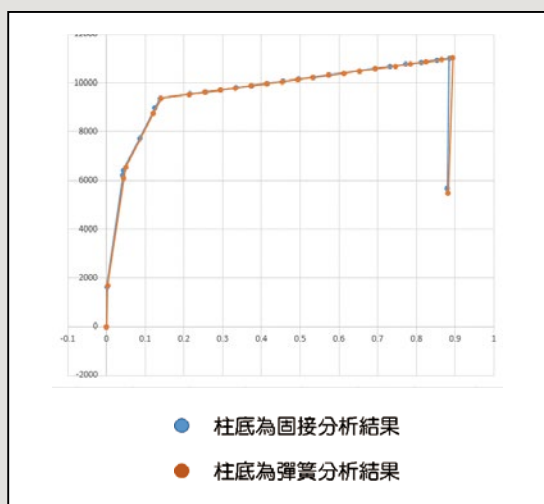


圖7 考量柱底為固接及等值彈簧之分析比對圖

示。由圖中結果進行比對，其結果差異不大，表示採用柱底為固接模式，仍可符合本案耐震分析需求。

二、耐震評估結果及補強建議

經採側推分析後，其行車向及垂直行車向的塑性鉸分佈圖如圖8所示。另以「等降伏能量法」雙線性化技巧決定容量震譜之降伏點，獲得性能狀態之譜位移容量，其有效最大地表加速度(Effective Peak Acceleration, EPA)與譜位移關係圖如圖9所示，顯示其上部結構的耐震能力尚符耐震規範判斷標準要求之耐震性能。

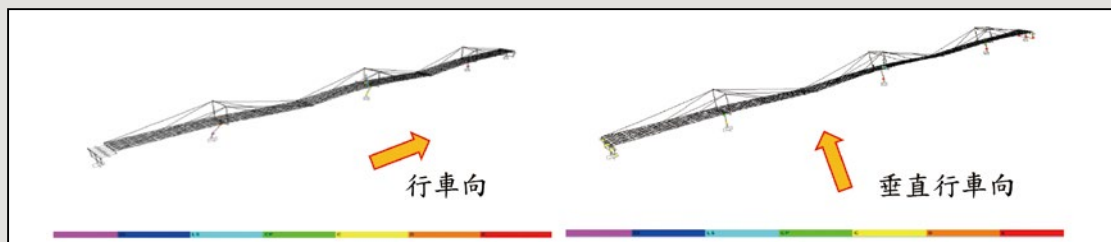


圖8 側推分析下之塑性鉸分佈圖

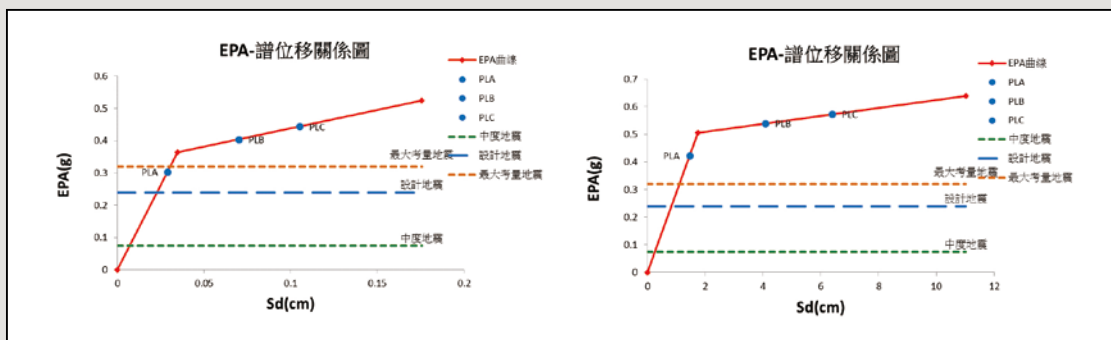


圖9 有效地表加速度(EPA)與譜位移關係圖

現有橋墩為中空結構，鋼筋於墩底塑鉸區搭接並開設人孔，且現場橋墩已局部產生裂縫，評估可於墩柱內部灌注部分混凝土及外部鋼板包覆，以避免較大地震發生時產生結構破壞。另P8橋墩鄰近現有堤防及防汛道路，因墩柱周遭均作為休閒空間使用，經長期壓密及打設混凝土地坪，經評估其地質條件較原始土壤條件佳。經由主橋塔柱的勁度提升及分擔邊跨的橫向作用力，分析結果P8橋墩的基礎可不需補強作業。

對於橋墩基礎的分析，考量柱底受力及基礎版上方長期穩定之覆土重或其它靜載重下，基礎版高度效應以3個節點及2個元素剛性桿件模擬，基礎版本體則以桿件元素模擬；樁以桿件元素模擬，節點可採上部較密、下部較疏方式，以減少自由度。對於土壤彈簧模擬，基礎版土壤模擬僅考慮水平變位前方土壤水平向效應，樁土壤彈簧考慮樁底鉛垂向、鉛垂向摩擦、水平向等效應。本工程各橋墩基礎耐震分析之結構模型如圖10所示。

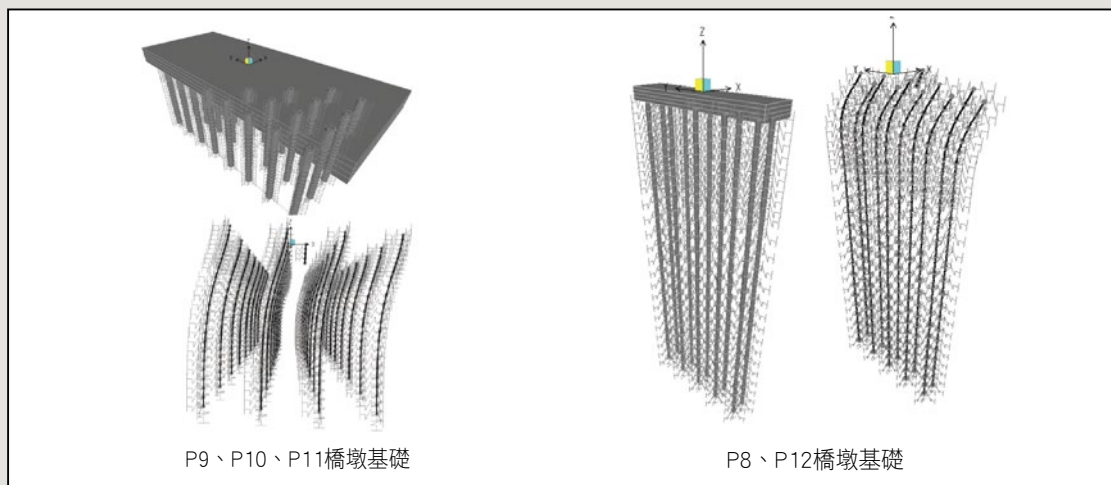


圖10 各橋墩基礎耐震分析結構模型

橋墩基樁經耐震分析後，橋墩編號P9、P10及P11之樁頂設計地震力，經綜合橋軸向與橫向部分，其地震作用受力如表1所示。其中P9及P11基樁最大彎矩為33.6 tf-m，而P10在考量河床冲刷下基樁最大彎矩為154 tf-m。另參考TL-500PC基樁規格，本橋基樁採42根5mm鋼線，其總面積為8.23cm²，其極限彎矩強度約為25.1至39.1 tf-m。因此，在考量在冲刷深度最深時，當地震發生，基樁所能承受彎矩是有所不足，故配合進行補強作業。

經由上述評估結果，建議橋墩進行基礎補強，其中P9、P10及P11各增設12支1.5m直徑場鑄基樁，其補強位置在橋墩行車向前後各6支；而P12增設4支1.5m直徑場鑄基樁，其補強位置在橋墩垂直行車向各2支，其基樁位置示意圖如圖11所示。經考量補強基樁後重新進行耐震分析，各橋墩基礎耐震分析之結構模型如圖12所示。

表1 補強前各橋墩基樁於設計地震力作用下之受力

P9、P11	軸力[tf]	剪力[tf]	彎矩[tf-m]
壓力樁	-172~342	26.5~27.6	27.2~33.6
P10	軸力[tf]	剪力[tf]	彎矩[tf-m]
壓力樁	-319~386	38~39	138~154

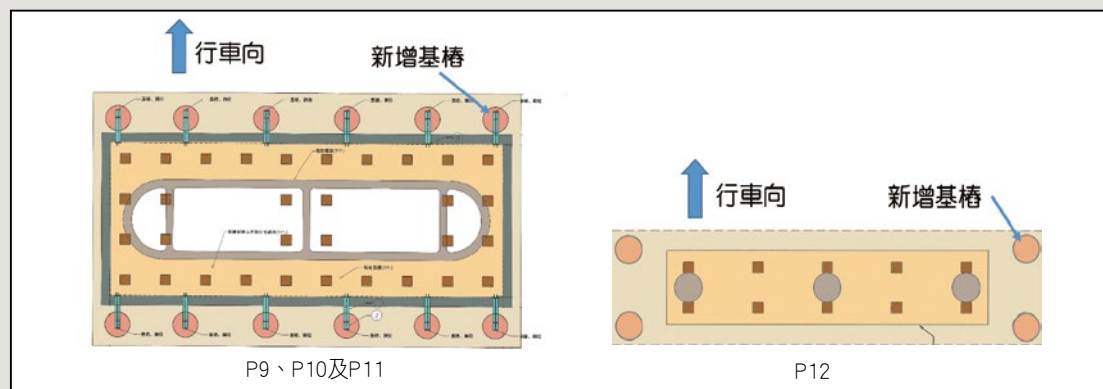


圖11 各橋墩增設基樁位置示意圖

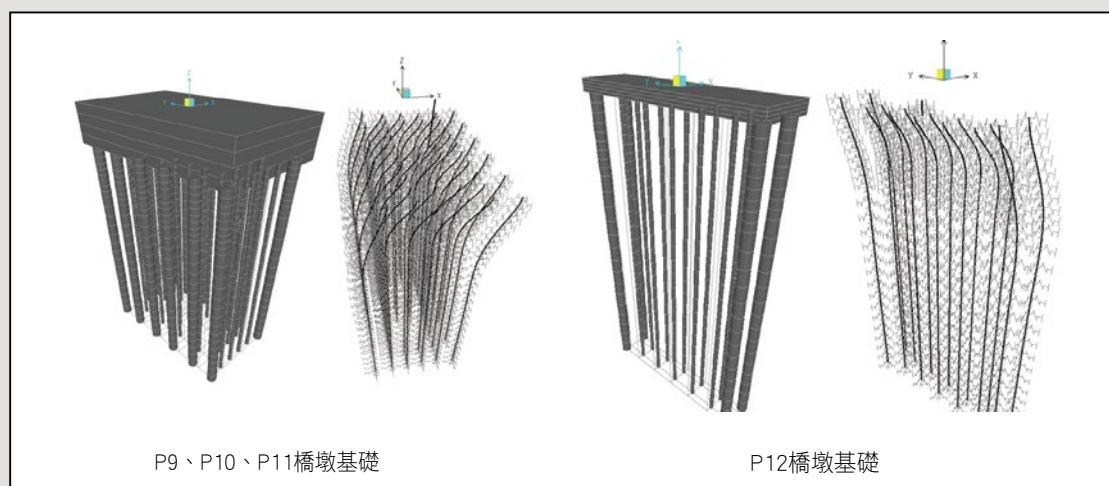


圖12 各橋墩基礎補強後之耐震分析結構模型

表2 補強後既有基樁於設計地震力作用下之受力

P9、P11	軸力[tf]	剪力[tf]	彎矩[tf-m]
壓力樁	-222~-252	4.9-24.9	19.1~43.2
P10	軸力[tf]	剪力[tf]	彎矩[tf-m]
壓力樁	-224~-254	4.8-25.3	18.1~42.8

表3 補強後新增補強基樁於設計地震力作用下之受力

P9、P11	軸力[tf]	剪力[tf]	彎矩[tf-m]
壓力樁	-652~-626	22.9-149.7	164.1~423.5
P10	軸力[tf]	剪力[tf]	彎矩[tf-m]
壓力樁	-644~-617	22.5-149.4	158.5~411.0

其中，既有的上部結構及基礎載重須考量由既有基樁來承受其作用力外，其餘補強後之基礎及地震力可由補強基樁來分擔。補強後分析結果如表2所示，P10既有基樁受力於補強後已大幅下降，而補強後新增補強基樁的受力如表3所示，整體可符合耐震需求。

肆、補強設計與工程特色

一、墩柱補強方案

本橋經耐震分析後，須進行本橋的基樁、基礎及墩柱進行補強作業，其中墩柱須進行耐震能力補強。對於RC橋柱耐震能力不足的補強方式，國內常用的橋柱補強方法，大致可採用三種方法，分別為混凝土RC包覆工法、鋼板包覆工法及碳纖維包覆工法。本橋因墩柱位處河道中，長期會與河水接觸，受限於碳纖維材料遇水會劣化，本處不適合採用碳纖維包覆工法；另RC包覆工法須要較大的包覆空間與尺寸，恐會對河川水流造成阻礙與影響。因此本工程橋墩補強，主要係採鋼板包覆工法，以提供墩柱圍束力並增加韌性，如圖13所示。

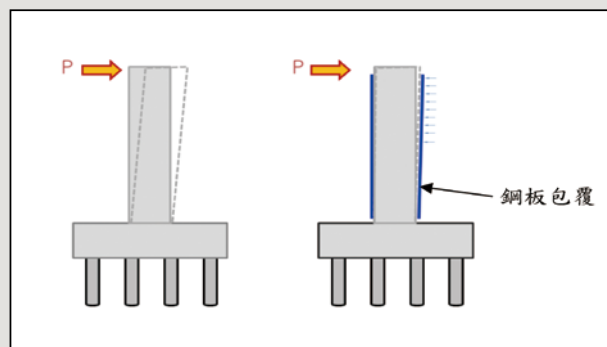


圖13 墩柱鋼板包覆之補強前後受力與變形示意圖

二、基礎補強方案

本橋跨越新店溪，主橋段橋墩位於河道，如圖14所示。其中主塔墩柱編號P9及P11位於兩側的高灘地上，而P10位置則位於深河槽。本工程的墩柱基樁與基礎補強作業，為減少補強後基礎結構量體以維持通水面積，新舊基礎結合以不增加過多結構體造成阻水為原則。因此，新增基樁施築於基礎外側後，開挖至舊有基礎下方後再將新舊基樁結合成一體。為達到原設計目標，橋墩基礎採用托底方式來進行補強，其施工作業示意圖如圖15所示。

本橋基樁與基礎補強，主塔墩柱編號P9、P10及P11各新增12支1.5m直徑場鑄混凝土基



圖14 墩柱基樁補強現場

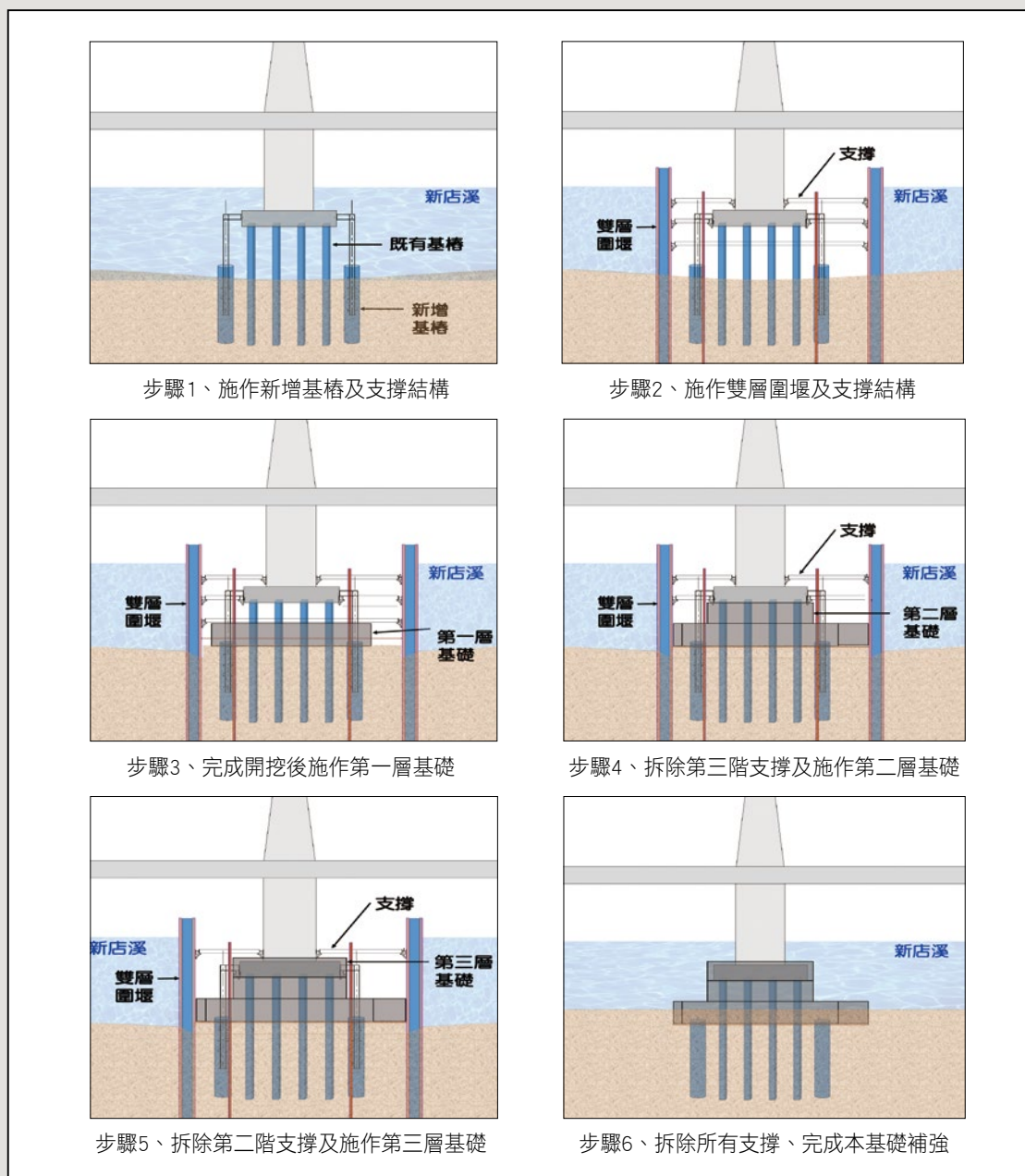


圖15 基樁補強施工步驟示意圖

樁，墩柱編號P12新增4支1.5m直徑場鑄混凝土基樁，並須將新基樁與既有基礎結合在一起。本工程河中墩柱P10位於深河槽中，該橋墩柱於補強施工作業時，須施作施工便橋及架設施工構台到河中進行基樁施工及後續圍堰施工。設計階段亦針對各種圍堰工法進行工期及經費評估，在評估淨高受限條件及工址施工環境等因素，經討論及審查後，最終以工程經費最省的雙層鋼板樁圍堰工法施作。

三、基礎補強特色與困難點

本工程的補強特色，包含了淨高限制的基樁施工、雙層套管基樁施工、開挖階段安全支撐及基礎開挖雙層圍堰等。以下就本工程特色與克服工程困難作概要介紹與說明。

(一) 淨高限制下的基樁施工

本補強基樁配置於行車向，因既有橋梁高度限制使得基樁施工淨高受限，增加施工困難

度。深河槽區的墩柱P10常時有水，須配合新店溪的河水潮位來調整施工便橋與施工構台高程，構台高程須避免於高潮位時遭淹沒，惟亦須考量施工淨高的最大需求，以利基樁施工。有關施工便橋及施工構台配置如圖16所示。

由於橋下淨高受限下，須採用合宜大小的施工機器，而基樁鋼筋的搭接亦為設計重點。主筋搭接過長會減少其可施作長度，而增加過多的搭接數會造成施工效率低。因此本基樁鋼筋搭接係採鋼套環方式處理，其搭接方式如圖17所示。



圖17 基樁鋼筋搭接施工相片



圖16 墩柱P10之施工便橋及施工構台配置

(二) 雙層套管基樁施工工法

本次補強基樁採1.5m直徑場鑄混凝土樁，橋墩P9及P11的基樁採一般橋梁工程常用之全套管基樁施工，如圖18所示。而橋墩P10因位於深槽區中，水深達12公尺，配合橋墩處的河床高程及水位高度，無法採用一般的全套管基樁施工，其最上端的混凝土會遭遇河水水流衝擊流失無法成形，如圖19所示。本墩柱所採用的雙套管施工，即於一般單層套管的外側再套一層外套鋼管，其深度深入土壤約3公尺深，外套鋼管具有阻水效果，使內部可以施作基樁，基樁

澆注完成後保留至基礎施工時，於開挖後再移除。

(三) 開挖階段安全支撐

為確保橋梁於基礎開挖階段的整體安全性，及避免影響基礎穩定性，設計時就考量增設臨時支撐作為開挖時的補償支撐。首先，於場鑄基樁施工階段內插入型鋼，以作為開挖時安全支撐使用，如圖20所示。當完成第一階支撐後，即開始進行安全支撐的安裝，將基礎可能承受之地震力傳遞至新的基樁。本項安全支



圖18 墩柱P9及P11基樁施工示意圖及相片

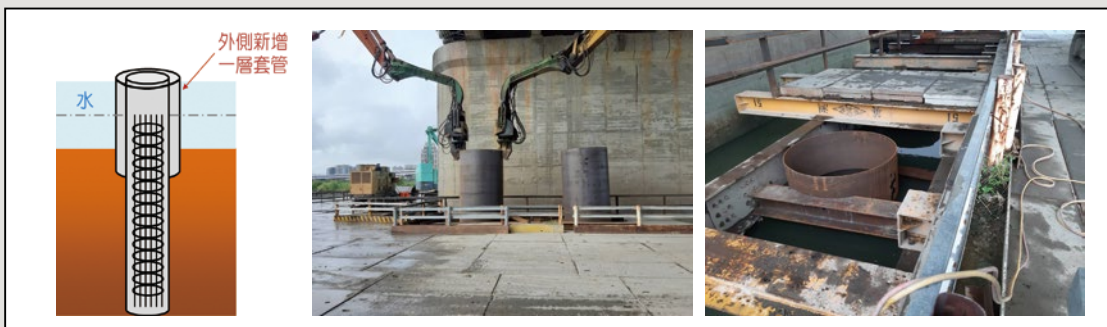


圖19 墩柱P10雙層套管基樁施工示意圖及相片



圖20 墩柱安全支撐示意圖及施工相片

撐於第二層基礎澆注完成後即可拆除，完成其提供基礎穩定性的任務。

(四) 雙層圍堰

新舊基礎係在既有基礎下方結合，施工時須採雙層圍堰工法將施工區域的水排除後，以利於其下方施工，包含其配置鋼筋及灌注混凝土。本橋墩所使用的圍堰工法，即利用雙層鋼板樁、板樁間內填土壤的方式，將圍堰外側的水阻隔於外，俟內側的水抽乾後，於內側進行開挖、配置鋼筋、組模及澆注混凝土，讓基礎結構可以結合在一起，達到橋墩耐震補強能力。

墩柱P10的雙層圍堰配置圖如圖21所示，其中雙層圍堰打設雙層SP-IV鋼板樁，長度23m、間距約為1m，中間填充土壤阻隔河中滲流至內部。除此之外，因本圍堰深度較深，為加強其勁度需求，於圍堰外側各加設長30m的H型鋼樁（H300x300x10x15），以確保開挖的安全性。

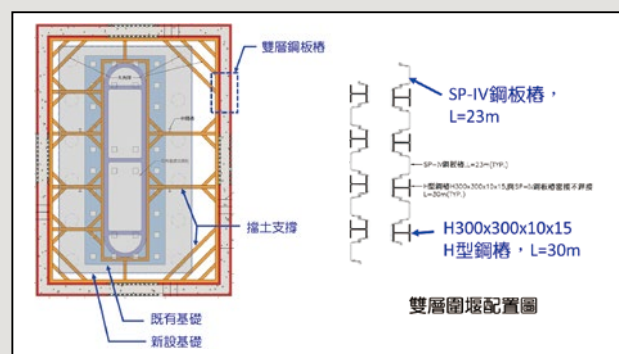


圖21 墩柱P10雙層圍堰配置圖

四、基礎補強施工

(一) 施工便橋與構台

本工程高灘地的橋墩基樁可採用局部降挖方式來增加施工作業淨高，但墩柱P10位於深河槽中，須配合本橋址新店溪的河水潮位來調整施工便橋與施工構台高程，以利基樁施工。構台高程須避免於高潮位時遭淹沒，但也考量施工淨高的最大需求，詳如圖22。由圖中可看



圖22 墩柱P10之施工便橋及施工構台配置

出，施工便橋由墩柱P11高灘地河岸較高處往P10施工構台逐漸降低。由於施工構台的高程不僅須考量河水潮位，也須兼顧施工空間需求，因此經權衡之後，在同時遭逢高水位及大潮的情況下，將有部分較低的施工便橋會被河水淹沒至構台面。

(二) 基樁

本橋橋下淨高約為5m，使得基樁原鋼筋長度縮短至4m，在淨高受限下，施工機具須配合高度調整以避免損及上部結構及墩柱，如圖23施工時相片所示；主筋搭接採鋼套環方式續接處理，由於搭接數較一般基樁多，因此工作量增加、施工進度較為緩慢。基樁施工相片如圖23所示。

(三) 基礎版

在完成基樁施築及雙層鋼板樁支撐結構後，開始進行打底混凝土灌注。其中，於第三階支撐施工時，其支撐構件不僅要架設於既有基礎的下方，同時須穿過基礎下方的基樁且不能損及其結構。既有基樁為60公分的矩形基樁，根數高達32根，因此支撐施作及基礎鋼筋綁紮等作業相當困難；另為避免混凝土澆築造成原結構基樁之短柱效應，故配合採用保麗龍板隔離原有基樁。有關執行第一層基礎鋼筋施工及混凝土灌漿，如圖24-圖27所示。

第二層基礎施工及混凝土灌漿及養護，則遭遇既有基礎及施工高度受限等情況，同時各鋼筋主筋皆須避開原有基樁，施工困難度提



淨高受限之基樁挖掘施工作業



淨高受限下之基樁套管接合施工



淨高受限之鋼筋籠搭接施工



淨高受限下之基樁灌注混凝土作業

圖23基樁施工相片



圖24 墩柱P10第一層基礎底層鋼筋施工



圖25 墩柱P10第一層基礎上層鋼筋施工



圖26 墩柱P10第一層基礎組模施工



圖27 墩柱P10第一層基礎混凝土澆注施工



圖28墩柱P10第二層基礎鋼筋施工



圖29 墩柱P10第二層基礎組模



圖30 P10第二層基礎基礎混凝土澆注



圖31 墩柱P10第二層基礎養護

升，施工相片如圖28~圖31所示。第二層基礎完成後，進行墩柱的水刀清洗及第三層基礎施工及鋼板包覆，如圖32所示。



圖32 墩柱P10水刀清洗作業施工

結語

光復大橋由於上部結構經評估尚屬功能良好，承載能力亦符合規範要求，因此僅就下部結構辦理耐震補強，補強經費僅需約2億元，補強後即提供市民可安全通行的橋梁。光復大橋若採改建新橋方式辦理，約需30億元的經費，不僅遠高於本補強工程實際使用經費，且施工期間亦將對交通造成較大的衝擊，因此更顯現本工程採用工法之效益。

本工程施工期間承蒙新北市政府各級長官的督導，與劉賢琳、陳賜賢及葉連發等委員的寶貴意見，在參與本工程之所有工作夥伴們齊心努力下，順利安全完成本工程之基樁與基礎補強作業。由於本補強工法具有特色，110年獲

得中華民國地震工程學會之結構耐震補強工程技術獎。本文說明本工程設計與施工過程，以作為工程師設計施工案例參考。完工後的光復大橋如圖33所示。

參考文獻

1. 新店溪中上游治理規劃報告，民國八十七年四月，台灣省政府水利處。
2. 張荻薇、張志斌、游明益、褚朝慶，「橋梁換底工法之探討與應用-以台一線溪州大橋橋基加固工程為例」，中華民國第七屆結構工程研討會，民國93年8月。
3. 林曜滄、陳光輝、張志斌、游明益，「橋梁換底工法於耐震補強之應用-以台3線烏溪橋橋基改建工程為例」，中華民國第十屆結構工程研討會，民國99年11月。
4. 張荻薇、王炤烈、曾榮川、林彥君、蔡建民，「鐵路橋梁換底工法之設計與施工-以臺鐵大甲溪橋為例」，中華民國第十一屆結構工程研討會，民國101年9月。



圖33 光復大橋完工相片

新舊共榮、風華再現 ——臺北市中正橋改建 工程之設計與施工

關鍵詞(Key Words)：鋼拱橋 (Steel Arch bridge)、透空拱肋 (Hollow Arch Rib)、中正橋 (Chung Cheng Bridge)、川端橋 (Kawabata Bridge)、歷史建築 (Historic Building)

台灣世曦工程股份有限公司／第一結構部／資深協理／曾榮川 (Dzeng, Dzong-Chwang) ①

台灣世曦工程股份有限公司／第一結構部／技術經理／張英發 (Teo, Eng-Huat) ②

台灣世曦工程股份有限公司／第一結構部／監造主任／蔡建民 (Tsai, Chien-Min) ③

台灣世曦工程股份有限公司／第一結構部／監造工程師／張永勳 (Chang, Yung-Jui) ④

台灣世曦工程股份有限公司／建築部／副理／陳傳興 (Tan, Thuan-Heng) ⑤

臺北市政府工務局新建工程處／規劃設計科／科長／郭玉仙 (Kuo, Yuh-Shian) ⑥

臺北市政府工務局新建工程處／大運工務所／主任／詹名成 (Chan, Ming-Cheng) ⑦

摘要

臺北市中正橋為銜接臺北市及新北市的重要交通通道，橋體為由多個不同年代所建造構成，面臨橋梁老舊、耐震與耐洪能力不足及交通動線不良等問題。其中，於1937年建造完成的橋體(當時名為川端橋)距今已約86年，為臺北市歷史建物。承襲豐富的地方人文歷史，跨河主橋規劃設計以「永和八景、網溪泛月」為時空背景，並採「舊橋恢復成原貌」及「原址旁新建新橋」興建，以優雅的弦月形狀做為設計概念，以弦月帶給人的寧靜感來撫平城市的喧囂，整體景觀以「琴瑟和鳴」作為設計概念主軸。透過結合中正橋新橋及川端橋的風華再現、相互呼應，一起彈奏著專屬於雙北城市的生活協奏曲，來達成文化資產審議委員會的要求及各界的期許，同時改善既有橋梁所面臨的問題。

本改建橋梁採大跨度三點支承不對稱鋼拱橋，並採通透視高的透空式拱肋，且舊橋部分拆除恢復至川端橋原貌。橋梁完成改建後，將可重現川端橋的原有風貌，展現新舊共榮成為新的橋梁地標。本工程規劃設計獲得內政部營建署與中華民國景觀學會2020年第八屆台灣景觀大獎佳作，同時也獲得2020年國家卓越建設獎規劃設計類金質獎，及中華建築金石獎金石首獎等多項殊榮，顯見本案於道路及橋梁設計上，具有其獨特性且獲得各界肯定，期本橋完成後再現地區繁榮，讓臺北市及新北市鄰近區域的風華再現。



Co-prosperity Between the Past and Present to create a Resurgence of Elegance and Brilliance for The Design and Construction of Chung Cheng Bridge in Taipei

Abstract

Chung Cheng Bridge is an important traffic channel connecting Taipei City and New Taipei City, however having the problems such as aging, insufficient seismic capacity and flood resistance, as well as poor traffic flow due to the increasing traffic. The KawaBata Bridge, which is known as the old Chung Cheng Bridge, on the downstream side was built in 1937. It is a structure of monumental or historic architectural value and had been reported and registered as a historical building in Taipei City. The creative proposal review meeting was held by the Taipei City Government, and "renew the old bridge to its original appearance" and "build a new bridge nearby" are the creative proposal that can be implemented after the selection.

In order to meet the requirements of the Cultural Assets Review Committee, and to satisfy the flood protection requirements, no pier within deep river channels, seismic resistance, and consideration of local traffic, a three-point asymmetrical steel arch bridge with large-span, hollow arch ribs is adopted. A steel deck system for the bridge slab system is introduced to reduce the depth and weight of the main girder. The arch ribs of the arch bridge adopt a hollow type design in order to reduce the volume of the arch structure. At the same time, steel pipe structures are used to connect the arch ribs to form a truss system.

The design concept of the main bridge crossing the river of this project takes "eight sceneries of YongHe and moon of WangXi" as the historical background, and uses the crescent moon shape as the design concept to soothe the hustle and bustle of the city with the sense of tranquility brought by the crescent moon. The overall landscape is based on "harmony" as the theme of the design concept, combining the Chung Cheng Bridge and Kawabata Bridge just like playing a life concerto unique to the Taipei city and New Taipei city.

The completion of this bridge will recurrence the original style and features of KawaBata Bridge, also create co-prosperity between the past and present and become the new landmark. This project won the 8th Taiwan Landscape Award in 2020 from the Department of Construction, Ministry of the Interior and the Taiwan Institute of Landscape Architects. At the same time, it also won the 2020 FIABCI-Taiwan Real Estate Excellence Awards Best Design and Planning Gold Award and the first prize of Chinese Architectural Golden Stone Award. It is obvious that this project has its uniqueness and is affirmed by the committee in road planning and bridge design. It is expected that the completion of this bridge can create a resurgence of elegance and brilliance in the ChungCheng and WanHua area.

壹、前言

中正橋位於臺北市的西南側，跨越新店溪，分別銜接臺北市中正區重慶南路及新北市永和區永和路，橋寬24.5m，雙向各配設2快車道及1混合車道。本橋並設有匝道銜接臺北市水源快速道路及新北市環河快速道路，為臺北市

與新北市間的重要通道，工程位置詳如圖1。本橋為多代同堂的橋梁結構，其中年代最久部分為1937年興建之川端橋，後於1962年拓寬，1963年因應防洪需求於新北市端再延長，並於1972年再拓寬至現有的24.5m寬度，其興建歷史如圖2所示。



圖1 中正橋改建工程位置圖

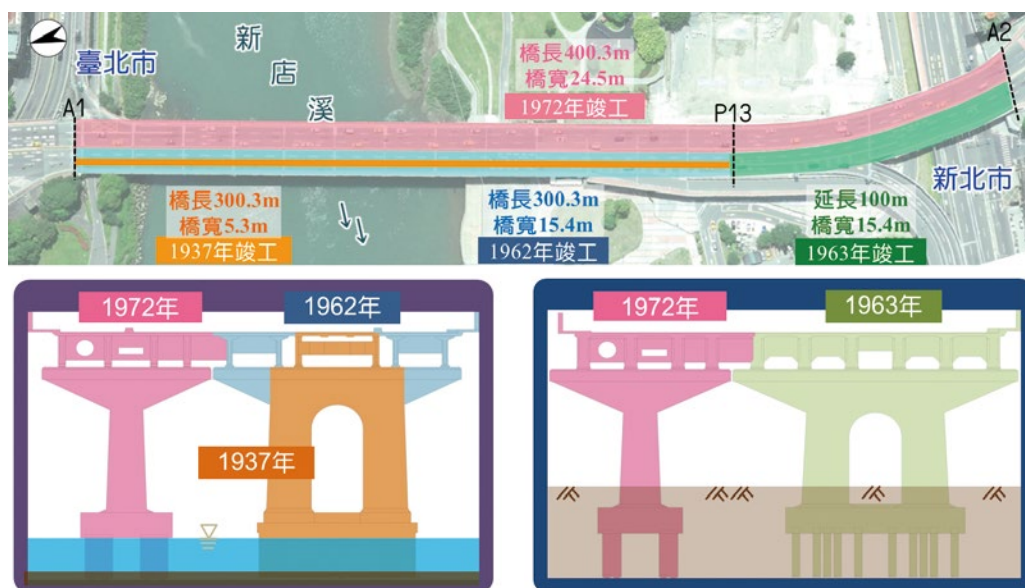


圖2 中正橋各年代施作示意圖

本橋汽機車交通流量大，部分橋體建造年代久遠，加上梁底防洪高程不足，面臨橋梁老劣化、耐震與耐洪能力不足及交通動線不佳等問題。有鑑於此，臺北市政府工務局新建工程處乃於民國100年辦理「中正橋改善工程可行性評估工作」，並以橋梁全生命週期研擬包括保留原橋結構補強、局部拆除改建或全橋改建等各種方案進行評估，經評估結果以原橋址全橋改建方案最佳，並為各界接受[1]。惟於103年9月22日民眾陳請，認為部分橋體係於1937年興建完成，具有歷史保存價值，要求中正橋改建必須將舊橋保留。為此，臺北市政府文化局邀集相關單位召開會議及辦理現場會勘，於104年3月17日文化資產審議委員會第67次會議，將中正橋登錄為本市歷史建物[2]，並於104年6月23日辦理idea Taipei創意提案評選會議，依據可執行性、創意性以及優先性等標準，評選出可被落實的創意提案為「舊橋恢復成原貌」及「原址旁新建新橋」。

為達成臺北市文化局文化資產審議委員會的要求，將日據時代的川端橋原址保留，而基於中正橋於新北市端之引道及環快匝道甫興建完成，並綜整考量各種因素下，本工程橋梁改建範圍至該橋墩處(編號為P15)。此外，兼顧施工期間的交通維持及防洪、深河槽中不落墩等需求，依工址環境及匝道交叉條件配置了大跨徑鋼橋，跨越新店溪。

另重慶南路高架橋下空間之使用漸趨沒落且大部分已廢棄不用，乃利用中正橋改建契機，一併拆除重慶南路高架橋，並回復為平面道路，希望配合中正橋的改建，能夠更新再造與重塑更符合人本的都市景觀。

本工程依工址特性可分為二大工區，分為重慶南路的平面段及河中的高架段，興建工程包含三大工項，分別為重慶南路拆除及平面道路鋪設、興建新橋及川端橋保存再利用等。有關本工程的工區分佈及工項示意圖如圖3所示。[3]



圖3 中正橋改建工程工區及工項示意圖

貳、規劃設計理念

跨河主橋為滿足深河槽中不落墩的河川防洪，及達成文化資產審議委員會的川端橋保留要求，同時須維持現有交通動線及原有車道數下，原規劃二跨不對稱斜張橋橋型已不適用於本計畫。因此，在考量橋址環境、人文歷史及橋梁意象下，主梁以曲線線形配置於原橋的下游側，同時橋面寬度配合現有匝道的匯入，全線寬度均為變化值。因此，配合深河槽不落墩配置的跨徑配置，跨河主橋採用透空拱肋鋼拱橋。

橋型以永和八景-網溪泛月為時空背景，以優雅的弦月形狀構思發展，將弦月帶給人的寧靜感來撫平城市的喧囂，同時保留原有川端橋，規劃設計構想如圖4所示。整體景觀以“琴

瑟和鳴”作為設計概念主題，透過結合中正橋新橋及川端橋的風華再現、相互呼應，一起彈奏著專屬於雙北城市的生活協奏曲。

在舊橋意象上，以川端橋風華再現、錦瑟華年為出發，重現川端橋日治時期立面風貌為目標，並在橋面上導入綠美化、歷史解說與休憩活動，建構第一座台灣橋梁古董寶盒意象，拉近市民生活與城市文化資產間的距離。在新橋意象上，以琴舞月光為構想，其造型配合道路線型架構，以畫過天際的柔美弧線拱橋作為此區地景特色，透過自然的涼風吹拂而過，鋼索猶如一條條的琴弦演奏著樂章，重新定義昔日“網溪泛月”的美景。本工程完成之願景圖如圖5所示。[4]



圖4 中正橋橋型發展構想



圖5 中正橋願景圖

參、橋型配置及分析考量

跨河主橋採大跨徑鋼拱橋，主梁長為189.5m，而拱肋端點距離為215m，以雙拱合併成單拱方式辦理。主橋拱肋係採用透空型式，同時雙拱肋間係採鋼管相連接，構成一桁架系統。主梁採用多室鋼箱型梁，雙向配設有各三車道，快車道及機車道外，亦配設各3m淨寬之人行道及自行車道等，橋面寬度為漸變且位於曲線上，寬度由31m變化至44.5m；臺北市端橋上採汽車與機車實體分隔方式佈設，並在水源快速道路匝道交會處採立體交叉方式辦理。有關橋梁平面、立面配置圖詳見圖6。

鋼拱橋非屬典型標準拱橋，拱肋由雙拱肋漸變成單拱肋，其中主橋配置及其結構系統如圖7所示，P3處的拱肋除設有橫梁外，其支承為雙向固定，可承受軸向水平力及橫向力。而P2R為橫向固定，僅能承受橫向力而無法承受軸向水平力。本橋分析時的結構模型如圖8所示。

對於主梁及拱肋之斷面應力檢核，採用下列的檢核公式進行各構件的檢核，其檢核係數定義如下：

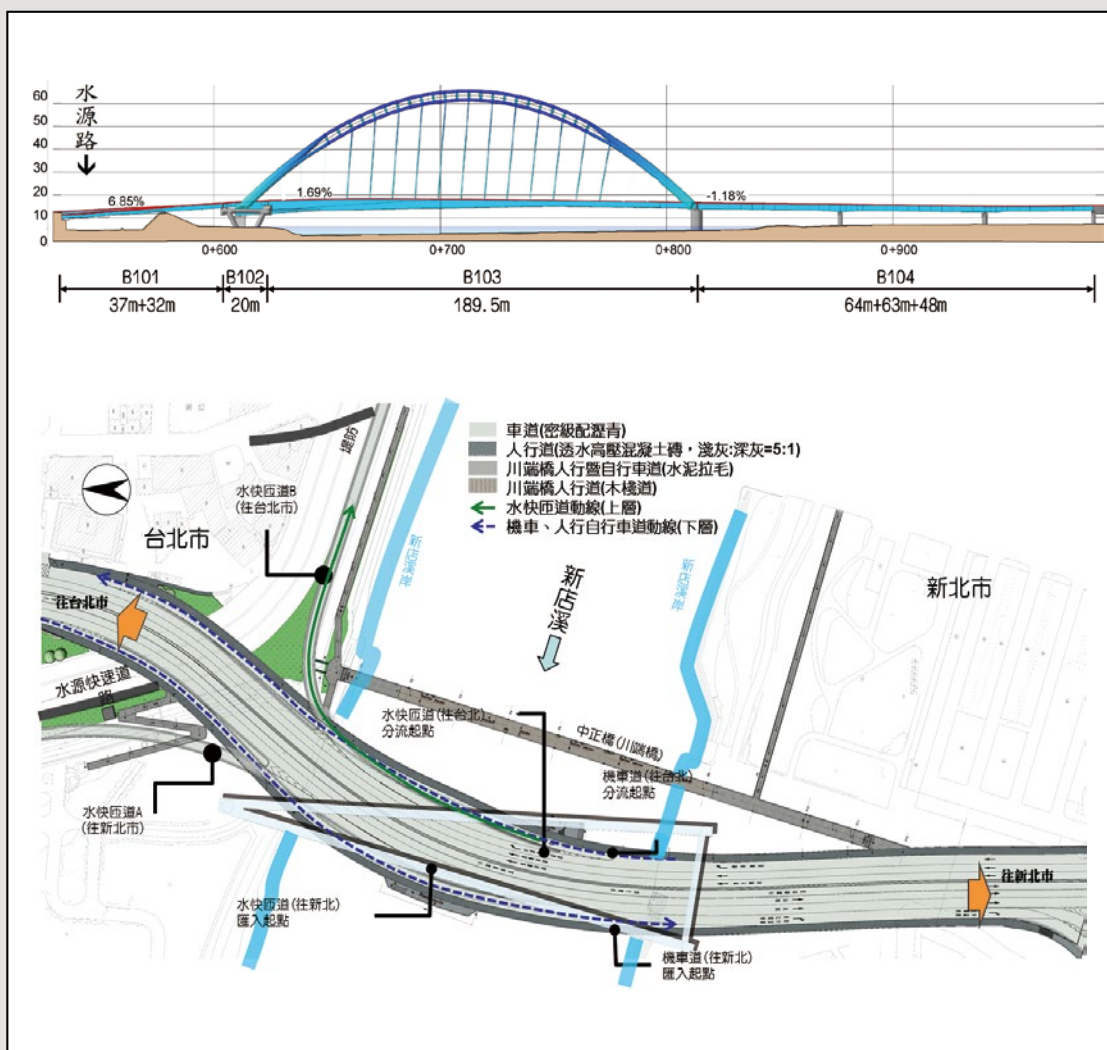


圖6 中正橋平面、立面配置圖

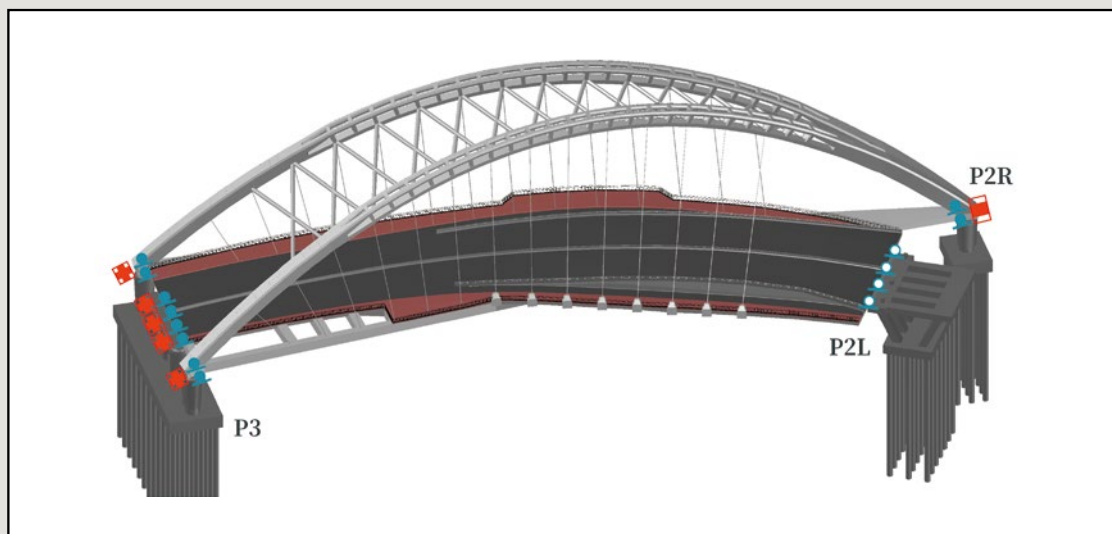


圖7 主橋配置及結構系統

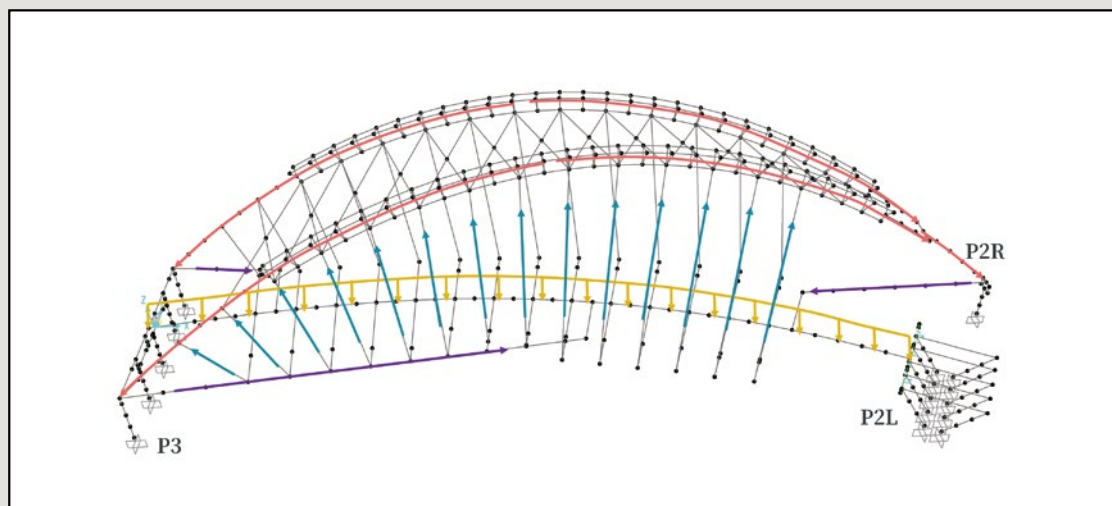


圖8 分析結構模型

檢核主承載系統：

$$\alpha_1 = \frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0$$

檢核主承載系統及剪應力：

$$\alpha_2 = \left(\frac{f_a + f_{b1}}{0.55F_y} \right)^2 + \left(\frac{f_v}{F_v} \right)^2 \leq 1.2$$

檢核軸壓應力及撓曲應力：

$$\alpha_3 = \left(\frac{f_a}{F_a} \right) + \left(\frac{C_{my} f_{by}}{1 - \frac{f_a}{F_{ey}}} F_{by} \right) + \left(\frac{C_{mz} f_{bz}}{1 - \frac{f_a}{F_{ez}}} F_{bz} \right) \leq 1.0$$

檢核軸壓應力、撓曲應力及剪應力：

$$\alpha_4 = \left(\frac{f_a + f_{by} + f_{bz}}{0.55F_y} \right)^2 + \left(\frac{f_v}{F_v} \right)^2 \leq 1.2$$

本橋進行整體結構分析後，將作用於主梁、橋塔等載重，依規範進行不同的載重組合後，並進行各構件之斷面應力檢核，其檢核結果為各構件之應力比皆小於1.0，均可滿足應力檢核之要求。上部結構依公路橋梁設計規範進行檢核，檢核結果如圖9所示。其中，主梁於兩端突出繫梁以外部分，因受力已轉換至繫梁致使主梁軸力大幅減少，致使構件應力檢核值較小。

肆、工法與施工

本工程由春原營造股份有限公司承攬本工程，由本公司承辦監造工作，於2019年5月6日開工。本工程依工址特性可分為二大工區。第一工區主要的工項為舊有重慶南路高架橋及自強市場進行拆除作業後，將重慶南路打造成景觀大道。本項作業流程如圖10所示，首先進行重慶南路高架橋下方的自強市場拆除作業，並利用109年春節期間的長假期，進行高架橋的拆除及平面道路鋪設，以利於假期過後可立即恢復通行。

本工程重慶南路高架橋拆除後，將原有被擋住的天際線打開，大幅改善當地的道路景觀。重慶南路上的高架橋及自強市場拆除後，原高架橋空間改為平面道路配置，讓重慶南路三段可沿續重慶南路二段的車道路型配置，同時留設寬約3.55m或4m使用空間給行人及自行車使用，並於各路口處依規定設置

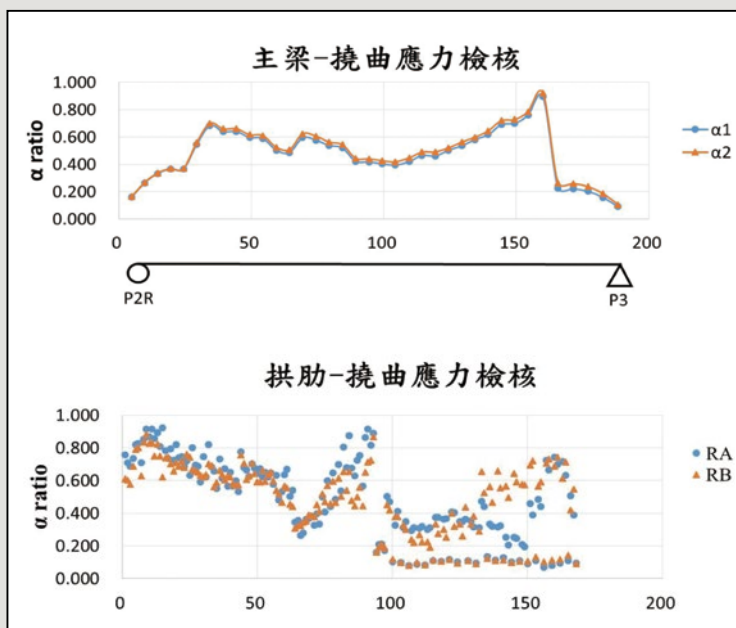


圖9 主梁及拱肋撓曲應力檢核結果

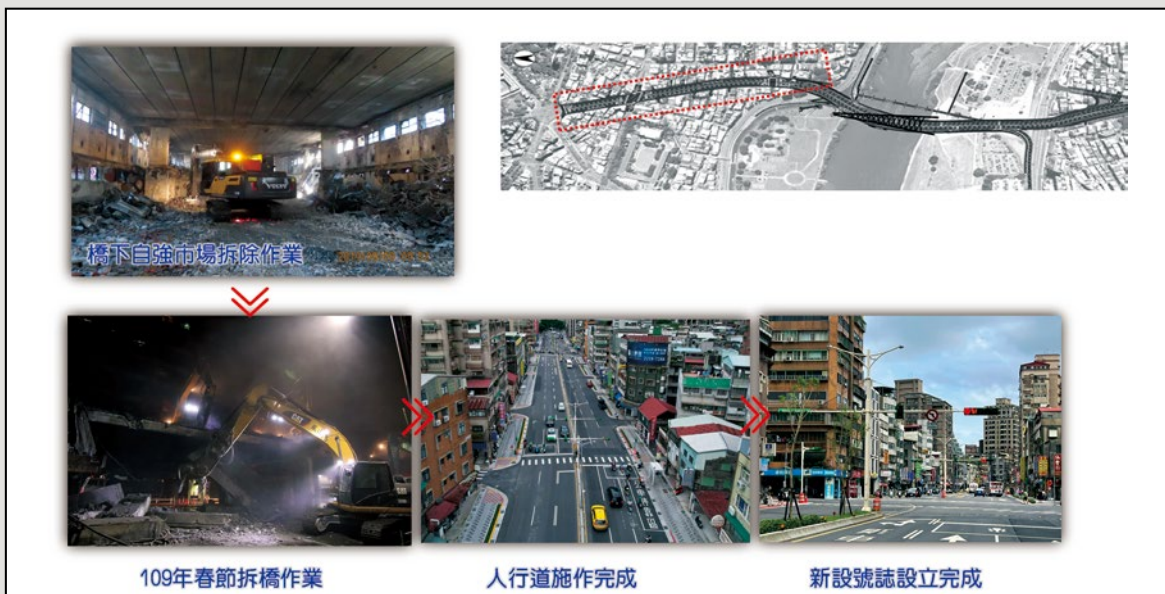


圖10 重慶南路高架橋拆除及施工作業流程圖

無障礙坡道，有助於人行通行及行車視野，人行道打造人本道路，促進區域繁榮、帶動地方商業經濟發展。本路段高架橋拆除前後之對照相片如圖11所示。

程要求。

因此，跨河主橋之推進支堡須平行於現有橋墩，使得支堡間距跨徑加大至23公尺，施工



圖11 重慶南路高架橋拆除前及拆除後之照片

河中段工區則包含了兩大工項，分別為興建新橋及川端橋的保存再利用，其中川端橋的保存再利用須配合於新橋興建後再進行主梁提昇及恢復原有橋梁風貌。但有鑑於近年來極端氣候影響，且新店溪屬淡水河域重要河川，為避免新建橋梁造成對水流的影響，本工程於設計階段採用大跨徑橋梁、深河槽不落墩，減少阻水面積同時提昇抗洪能力。此外，考量施工階段的臨時構造物場撐立柱及施工便橋等可能會造成阻礙河川水流，甚而影響雙北人民生命財產安全，因此，施工階段採最嚴格的水理分析標準為要求基準，在既有橋梁之舊橋梁底防洪高程已略有不足下，在維持現有橋梁正常營運下，須將完成後的橋墩及施工階段各項臨時構造物同時納入考量，須滿足200年的洪水位高

構台縮小至最小化，高灘地上的交維便橋加大跨徑至20m以上，同時配合於防汛期間將施工便橋之橋面板及主梁撤除，方可滿足水理要求，如圖12所示。施工團隊研擬了夾推工法來克服施工階段的困難，以符水理要求。

主梁吊裝採用之夾推工法為國內首次採用曲線夾推工法，配合新橋曲線線形配置，採多根軌道、曲線同心圓推進，其主要目的為縮減施工平台尺寸以符水理需求。本工法軌道群共有6條軌道採同心圓線形配置，但軌道梁可採折線連接方式辦理，如圖13所示。

本工法最大夾推節塊長約148公尺，最大重量約4,625公噸。為確保施工期間的安全及架



圖12 中正橋施工階段之水力分析挑戰

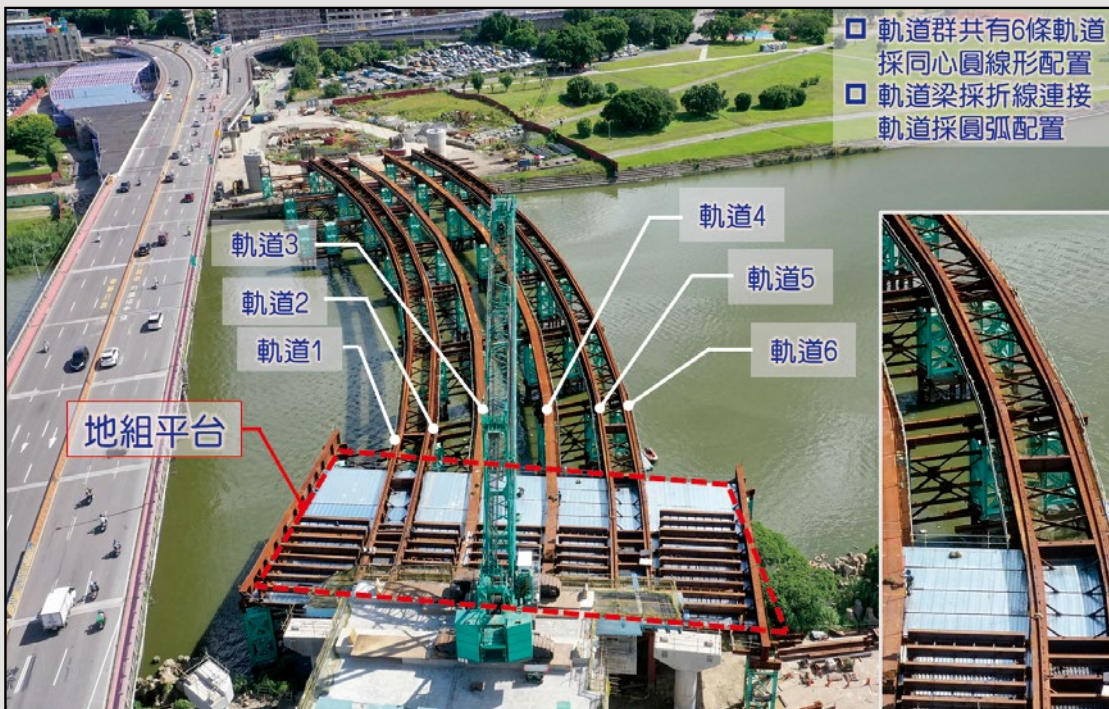


圖13 國內首次採用之曲線夾推工法

設精度，支堡上設有即時監測系統，可監測主梁變位及支撐的反力變化。本工程施工便橋、支堡及組裝平台架設施工相片如圖14所示；主梁於組裝平台完成後即進行各主梁構件組裝，並配合進行主梁推進作業，如圖15所示。

拱肋安裝則配合安裝程序分成現場支撐吊裝段及地組提升段二大構件安裝。其中現場支撐吊裝段又稱場撐段，以支撐方式將構件安裝定位，無須再挪動位置；而地組提升段則在橋面上以較低的支撐進行拱肋構件的組裝，再將整體的提升段拱肋整體提升，完成鋼拱橋的拱肋吊裝。有關拱肋吊裝的施工相片如圖16所示。



施工便橋架設



施工便橋及支堡架設



支堡及推進軌道梁架設



構件組裝平台架設完成

圖14 施工便橋、支堡及組裝平台架設施工相片



主梁節塊G19及G18組裝推進



主梁節塊G19-G9組裝推進



主梁節塊G19-G5組裝推進



節塊組裝推進完成

圖15 主梁各階段之節塊組裝推進施工相片



場撐段拱肋吊裝



場撐段拱肋及提升段拱肋吊裝(構件A11-A13)



場撐段拱肋及提升段拱肋吊裝(構件A10-A15)



拱肋構件組裝全景

圖16 拱肋組裝及地組作業施工相片

結語

由於社會經濟的發展及生活型態的改變，重慶南路高架橋下空間之使用已漸趨沒落，已漸不符合以人為本的現代生活，並淪為環境髒亂之場所，對鄰近區域發展之不良影響日益加重。新建工程處利用中正橋改建契機，一併拆除重慶南路高架橋並回復為平面道路，希望配合中正橋的改建，能夠更新再造與重塑更符合現代人民生活的都市景觀。

為滿足深河槽中不落墩，及符合川端橋的保留要求，本工程整體景觀係以“琴瑟和鳴”作為設計概念主題，透過結合中正橋新橋及川端橋的風華再現、相互呼應，一起彈奏著專屬於雙北城市的生活協奏曲。跨河主橋採用曲線主梁配置非典型對稱三角拱橋，同時採用透空拱肋鋼拱橋，以優雅的弦月形狀做為設計概念，讓弦月帶給人的寧靜感來撫平城市的喧囂。

本工程建設目標效益臚列如下：

- 一、提昇抗洪耐震能力，確保使用安全。
- 二、保留傳統歷史建物，再造都市風華。
- 三、活化地區使用空間，促進區域繁榮。
- 四、創造地方特色地標，提升河岸景觀。

本工程參與2020年第八屆台灣景觀大獎，並獲得佳作獎。本橋尚在施工中，預計可於2023年局部先行通車，將使中正橋成為臺北市地標性橋梁之一，橋梁完成願景圖如圖17所示。



圖17 中正橋改建工程完成願景圖

參考文獻

1. 臺北市政府工務局新建工程處，中正橋改善工程可行性評估工作總結報告，2014年6月。
2. 臺北市政府文化局，臺北市政府公報104年第174期，2015年9月。
3. 臺北市政府工務局新建工程處，「中正區中正橋改建工程」新舊橋梁併存方案規劃報告書，2019年5月。
4. 臺北市政府工務局新建工程處，「中正橋改建工程」新建工程都市設計及土地使用開發許可審議報告書，2018年2月。



3

專題報導

挑戰極限作業時間 的側推工法——北勢 溪鐵路橋梁改建

關鍵詞(Key Words)：鐵路橋梁改建(Railway Bridge Reconstruction)、側推工法(Side Launching Method)、臨時軌(Temporary Rail)、托軌工程梁(Rail Lifting Beam)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／技術經理／彭知行 (Peng, Chih-Hsing) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／計畫副理／吳宣欣 (Wu, Shuan-Shin) ❷

交通部鐵道局／南部工程處／處長／劉雲生 (Liou, Yun-Sheng) ❸

交通部鐵道局／南部工程處／第一工務段段長／羅逸建 (Luo, Yi-Jian) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／高工處／計畫經理／王玉璋 (Wang, Yu-Jang) ❺

摘要

國內鐵路橋梁改建必須維持鐵路營運，同時考量緊鄰鐵路施工、保持電氣化淨空等作業要求，施工條件日趨嚴苛，工法必需與時俱進不斷檢討更新，安全性與經濟性方能符合社會期待。位於屏東縣枋寮車站北端之北勢溪橋，為滿足防洪需求，納入臺鐵南迴鐵路電氣化建設計畫進行改建。因該橋梁北側緊鄰台1線平交道，而南側則鄰接枋寮車站，受工址條件限制，橋梁改建如採傳統設置臨時軌方式，包括枋寮車站在內之局部路段均須大幅調整，工程經費龐大，且耗時擾民。經綜合檢討評估，北勢溪橋改建採用側推工法，除可維持鐵路營運、撙節經費、縮短工期之外，同時避免設置臨時軌影響沿線居民。惟本工法首次應用於國內鐵路橋梁改建，橋梁側推當晚，必須拆除舊橋，將新橋側推至定位，並須同時結合運、工、機、電作業人員密切合作，依序進行各專業工作，方能順利完成啟用新橋，恢復鐵路營運。本文藉此工程案例，為國內鐵路橋梁改建所遭遇困難與問題，提出創新作法與解決方案，供工程界參考。



A Time Challenging Side Launching Method - Beishixi Railway Bridge Reconstruction

Abstract

The reconstruction of the railway bridge in Taiwan shall maintain the non-stop operation of the existing railway, consider the construction neighboring the operating railway, and shall also fulfill the electrified clearance requirements, which makes the construction condition much more complicated, the construction method should progress with time and constantly review and renew, that the safety and economy can then fulfill the social expectation. The Beishixi Railway River Bridge, located in the northern Fangliao station of Pingtung County, is planned as a part of the Taiwan south-link railways electrification project to proceed with the reconstruction to fulfill the requirements of flood control. The northern part of the bridge is close to the level crossing of No. 1 Provincial Road and the southern part connects the Fangliao station. With the restricted condition, if the reconstruction adopts the traditional way with temporary rail, part of the railway including the Fangliao station needs to be adjusted with great construction expenses and turbulence toward the society. After a detailed evaluation, the Beishixi Rail Bridge adopt the side launching method, which not only can maintain the operation of the railway, save the construction cost, and shorten the construction period, but also can avoid setting up temporary rail which will influence the residents along the route. This construction method is first adopted in the railway bridge reconstruction in Taiwan. The old bridge had to be demolished and the new bridge had to be launched in position in one single night, with the close cooperation between transportation, construction, mechanic and electric division to proceed with each professional work, can then complete the reconstruction work, enable the new bridge and get the railway back in operation. This article takes Beishixi Railway Bridge as an example, introduces the difficulties and issues that will face during the reconstruction in Taiwan, and explain the innovative method and solution, hope can be the reference for the future related project.

3

專題報導

壹、前言

北勢溪橋位於臺鐵屏東線之枋寮車站北端，舊橋有正線及側線兩股道，橋梁上部結構鋼梁個別獨立，分別建於民國28年及59年。舊橋為4跨簡支跨徑13.5公尺之下路式鋼板梁橋，橋梁全長約54公尺，三座壁式橋墩座落於河中，造成嚴重阻水問題，如圖1所示。依據「易淹水地區水患治理計畫」，舊橋通水能力僅達2年重現期保護標準，單跨跨度13.5公尺亦不符合「申請施設跨河建造物審核要點」跨距不得小於40公尺之原則。此外，橋墩處河床有明顯冲刷現象，尤其北岸緊鄰橋台上游有大型排水箱涵匯入，使得北側橋墩之冲刷情形加劇，橋梁結構安全潛在風險日漸提高，維護管理漸難於因應。

針對國內鐵路橋梁改建問題，一般對策係在橋址旁設置臨時軌及臨時便橋，將鐵路切換至臨時軌營運後，再於舊橋原址新建鐵路橋梁。惟本案橋址之北側緊鄰台1線平交道、南側鄰接枋寮車站，如採傳統設置臨時軌方式改建橋梁，需大幅調整枋寮車站站場之軌道配置、車站設施及移設鐵路平交道，工程經費龐大，且耗時擾民。經綜合考量評估，為維持鐵路營運、撙節經費、縮短工期、降低施工風險及避免設置臨時軌影響沿線居民，北勢溪橋改建採用側推工法。此工法首次應用於國內鐵路橋梁改建，新建橋梁側推當晚，先卸除電車線、吊離舊鋼橋，並清除新橋台之間障礙物；再利用預先安裝多組千斤頂、滑軌床及滑靴等側推設備，將新橋側推至定位；之後進行軌道銜接、砸道作業、電車線與號誌系統復原等，整體側推工法結合運、工、機、電各專業工班，協調依序進場作業，合計耗時約12小時，順利恢復鐵路營運。藉由本案例整合鐵路各專業界面之成功經驗，解決側推工法應用於鐵路橋梁改建所遭遇問題，成為可行且大幅撙節經費、縮短工期之創新技術。



圖1 北勢溪舊橋(下路式鋼I型梁橋)



圖2 北勢溪新橋(下路式鋼桁架橋)

貳、改建簡介及側推工法概要

北勢溪舊橋因橋墩阻水、通洪斷面不足、河床冲刷嚴重、橋梁老舊，經評估橋梁承載能力及耐久性不足，且補強困難，乃納入臺鐵南迴鐵路電氣化建設計畫進行改建。改建橋梁配合屏東縣政府公告河川治理計畫，計畫河寬增加為60公尺，因河道與鐵路斜交，新橋採鋼桁架橋型，橋梁跨距76公尺，單跨跨越北勢溪，河中不落墩；另配合橋上佈設道岔，採下路式雙面鋼桁架橋內含2股道，如圖2所示。新橋自108年6月開始施工，於110年4月24日夜間側推，隔日上午完成啟用。鋼桁架橋主體鋼重約1,260公噸，側推作業期間整體橋梁含混凝土橋面板及軌道設施等總重約2,100公噸。

側推工法在公路橋梁改建應用上，較鐵路橋梁改建更為容易且廣泛，其施工步驟概述如下：

- 一、於舊橋橋址旁空地施作臨時橋台及新橋上部結構。
- 二、新橋上部結構完成後，將道路臨時改道至新橋通行。(公路線形較不受限)
- 三、拆除舊橋，於舊橋原址施築永久橋台。(公路改道施作永久橋台)
- 四、以側推工法將新橋上部結構側推至舊橋原址。(無需當日通車)
- 五、重鋪永久橋台銜接至既有道路，將道路改道至新橋通行。

鐵路橋梁改建採用側推工法較公路橋梁困難之原因，依據前述側推工法施工步驟檢討，歸納主要因素有下列3項：一、鐵路線形限制條件多，路線驟然改道不易；二、鐵路營運設施多，軌道切換作業繁複；三、鐵路營運不可中斷且無替代路線，側推工法必須利用夜間施工當天完成。概要說明如下：

- 一、鐵路線形較公路線形設計條件限制多且嚴格，尤其鐵路特甲級線之曲線半徑要求1000公尺以上，致使鐵路營運路線改道，需要較長線形調整範圍。
- 二、鐵路營運路線改道，須配合軌道切換作業，調整鐵路營運設施，除了土建主體結構工程外，尚需考量軌道、電車線、號誌及通訊纜線等，必須動員大量人力、機具共同作業。
- 三、鐵路需維持營運，不可中斷營運，且無替代路線，因此，鐵路側推工法必須利用夜間斷電封鎖，於1個晚上完成土建及系統機電各項配合作業，具挑戰性及施工困難度。

參、工法特色及施工考量重點

本工程北勢溪橋改建同時，配合「易淹水地區水患治理計畫」北勢溪橋及枋寮車站站場設施均需將軌面高程抬升及重建月台。經檢討，施工期間為維持鐵路營運，前述枋寮車站及北勢溪橋改建工程，需同時配合採半半施工方式辦理。此施工條件讓側推工法在北勢溪橋改建工程應用上，產生絕佳契機，即鐵路無需改道營運，利用半半施工及托軌工法即可施作永久橋台(包含基樁、基礎、牆體)。茲將北勢溪橋改建側推工法之施工步驟概述如下：

- 一、舊橋配合枋寮車站站場抬高工程，採半半施工將舊橋抬升，同時於鐵路原路線下方分階段施作永久橋台之基樁。
- 二、利用托軌工法於鐵路原路線下方施作永久橋台基礎及牆體。(如圖3)
- 三、於舊橋橋址旁空地施作臨時橋台及架設鋼桁架橋。(如圖4)
- 四、鋪設橋上軌道、安裝側推工法設備及進行側推測試。(如圖5)
- 五、拆除舊橋，將鋼桁架橋側推至舊橋原址，銜接軌道及復原系統機電設施。

有關北勢溪鐵路橋側推工法特色及施工考量重點臚列如下：

一、鐵路橋梁改建工程採用側推工法大幅節省經費、縮短工期

北勢溪橋位於台1線中山路平交道及枋寮車站之間，若採傳統鐵路橋梁改建方式，於舊橋旁設置臨時橋梁及臨時軌，進行橋梁改建，則枋寮車站之站場軌道及設施必須配合臨時軌大



圖3 利用托軌工法於原路線下方施作永久橋台基礎及牆體



圖4 舊橋旁空地施作臨時橋台及架設鋼桁架橋



圖5 鋪設橋上軌道、安裝側推工法設備及進行側推測試

幅調整，且需租用沿線土地及拆遷補償。經評估，傳統設置臨時軌方式改建橋梁與側推工法改建北勢溪橋所需工程經費，概估如表1及表2所示，設置臨時軌方案較側推工法方案至少增加工程費6億元。此外，設置臨時軌及調整枋寮站場設施，亦至少需增加2年工期。為擷節經費、縮短工期，避免設置臨時軌對沿線居民影響，本工程採側推工法改建橋梁為最佳方案。

表1 傳統設置臨時軌方案之概估工程經費

工項	工程內容	工程費(億元)
一	租地及拆遷補償費	0.9
二	假設工程(含臨時軌)	6.3
1	引道路基及臨時便橋	1.5
2	臨時枋寮站場設施工程	2.4
3	臨時軌道及系統機電工程	2.1
4	軌道切換及其他配合工作	0.3
	合計	7.2

表2 側推工法方案之概估工程經費

工項	工程內容	工程費(億元)
一	租地及拆遷補償費	0.0
二	假設工程	1.2
1	側推工法設施	0.3
2	托軌工程梁(施作橋台)	0.1
3	軌道及系統機電配合作業	0.3
4	替運設施及其他配合工作	0.2
	合計	1.2

二、施工期間維持鐵路營運及配合抬升軌道高程

枋寮車站屬於易淹水地區，北勢溪橋梁改建前，先採半施工將枋寮車站站區及舊橋之軌道高程抬升，後續新橋改建完成，梁底高程較高，具較佳防洪能力。此外，本工程施工期間需維持鐵路營運，各項作業多緊鄰營運鐵路施工，均屬高風險作業，工程具挑戰性。

三、北勢溪改建橋梁之新橋台基樁分2階段施作

為維持鐵路營運，前項枋寮站場及舊橋軌道抬升工程採半施工，新橋之橋台基樁亦配合分2次(東側、西側)進場施作，均屬近接鐵路施工，施工難度高，具挑戰性。

四、下路式鋼桁架橋河中不落墩提升防洪能力

為增加橋梁通洪斷面及避免橋墩基礎沖刷，新北勢溪橋採單跨簡支鋼桁架橋，河中不落墩。另為增加梁底高程，除了採用下路式鋼桁架橋外，並採鋼床板系統以減少梁深。

五、新橋於側推前先鋪設軌道，節省側推工法作業時間

側推工法先於電化鐵路旁的北勢溪河床上，架設臨時施工構台及暫撐架，施工構台主要作為運輸動線及材料堆置使用，再將鋼桁架橋構件吊裝於暫撐架上，鋼桁架橋組裝完成，並澆置橋面板及鋪設軌道後，再架設滑軌床及滑靴等側推設備，最後利用夜間斷電封鎖期間，將橋梁側推至定位，可大幅節省側推工法定位後再鋪設軌道之作業時間。

六、考量多方因素決定側推時間

因側推工法當晚施工機具需下至河床進行舊橋拆除作業，北勢溪橋距出海口僅1.3公里，需考量潮汐影響，選擇退潮時段作業，利於拆橋作業進行。另配合臺鐵局環島營運班次、車輛調度及重大工程審查，以及避免影響通勤旅客及學生，側推時間選在週六晚上跨週日辦理，並配合側推作業當晚鐵路減班及公路替運措施。

七、同步拆除舊橋側推新橋難度高具挑戰性

整體側推作業流程，包含拆除電力及號誌系統、拆除舊橋、側推新橋，側推定位後銜接軌道及砸道，再復原及測試電車線、號誌系統等，側推作業全程總計花費12小時。

八、北勢溪橋鋼桁架橋側推定位方式

(一) 鋼桁架橋縱向位置定位說明

鋼桁架橋於側推前，縱向位置定位方式，可於鋼梁固定端與橋台背牆縫隙，利用夜間降溫鋼梁收縮後，以鋼墊板塞滿縫隙，隔日升溫鋼橋自動往活動端伸長。以此原理重複進行調整，使固定端與橋台背牆縫隙達設計值，無須以千斤頂作業。

(二) 鋼桁架橋側推作業之支承安裝方式，經評估有下列兩種方案

方案一：先安裝固定於鋼桁架橋下方同步側推

1. 鋼梁頂升高度：橋台混凝土支承座高+支承高+10cm。

2. 支承底座螺栓先置於橋台混凝土支承座之預留鋼筋內。

3. 橋台混凝土支承座於定位後澆置，鋼橋臨時支撐於12小時後拆除，移轉載重。

方案二：先安裝於橋台混凝土支承座

1. 鋼梁頂升高度：橋台混凝土支承座高+支承高+10cm。

2. 定位後支承頂板採焊接或螺栓(精度不易控制)接合。

3. 橋台混凝土支承座亦可定位後澆置。

考量施工性、結構可靠度及安裝精度等，採方案一先安裝固定於鋼桁架橋下方同步側推，如圖6所示。



圖6 支承先安裝固定於鋼桁架橋下方同步側推

肆、鐵路橋梁側推工法施工步驟

本工程採用側推工法改建北勢溪橋，同時

配合辦理枋寮車站站場及北勢溪橋抬高工程，整體工程之施工步驟如圖7所示，依序摘要說明如下：

一、東側軌道施工及第1次軌道切換

(一)東側舊橋抬升

配合枋寮站場抬高，於東側舊橋墩上增設RC基座，將舊橋及軌道抬升50-60公分至設計高程。

(二)東側基樁施工

施作新橋台東側基樁(南、北端各4支)(樁徑1.5公尺、樁長64公尺)。

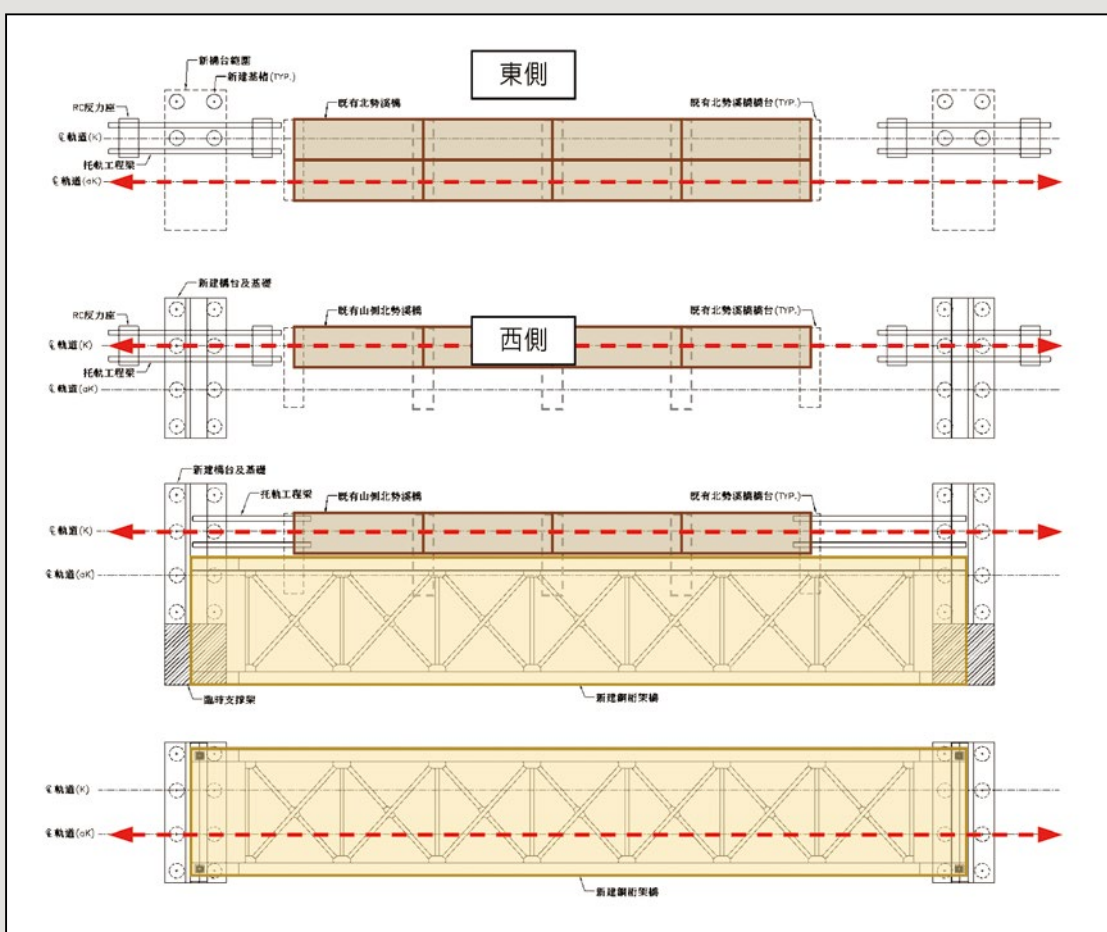


圖7 側推工法之施工步驟

(三)東側設置托軌工程梁

於東側新橋台範圍設置托軌工程梁，支撐軌道，俾後續開挖施作新橋台及基礎。

(四)第1次軌道切換

配合枋寮站東側之第二月台及第三月台啟用，切換至東側軌道營運。

二、西側軌道施工及第2次軌道切換

(一)拆除西側舊橋及新橋台施工

拆除西側舊橋，施作新橋台西側基樁(南、北端各4支)(樁徑1.5公尺、樁長64公尺)，採鋼板樁及二階水平支撐進行深開挖，並設置托軌工程梁支撐軌道，施作新橋台及基礎，接續於西側施作臨時橋台(新橋組立及滑軌床支撐使用)。

(二)搭設施工構台及組裝鋼桁架橋

於西側搭設施工構台及暫撐架，地組及吊裝鋼桁架橋、澆置橋面板及鋪設軌道(詳圖8)，東側橋台後方技術回填，並完成RC引進板，俾側推後鋪設銜接軌道。

三、確保東側舊有鋼橋安全吊離

因鋼桁架橋試推後距離舊橋僅1公尺，單座舊橋重量估計約22噸，舊橋吊離屬側推前關鍵作業，為使當晚吊裝順利，先行模擬及現勘大型吊車可停駐位置及動線，最終採2台400噸吊車及1台300噸吊車，確保舊橋吊離作業順利完成。

四、試推1公尺作業

側推工法之千斤頂、滑軌床及滑靴安裝完成後，於正式側推作業之前，先進行鋼桁架橋試推1公尺作業(由距離軌道中心約8公尺推進至

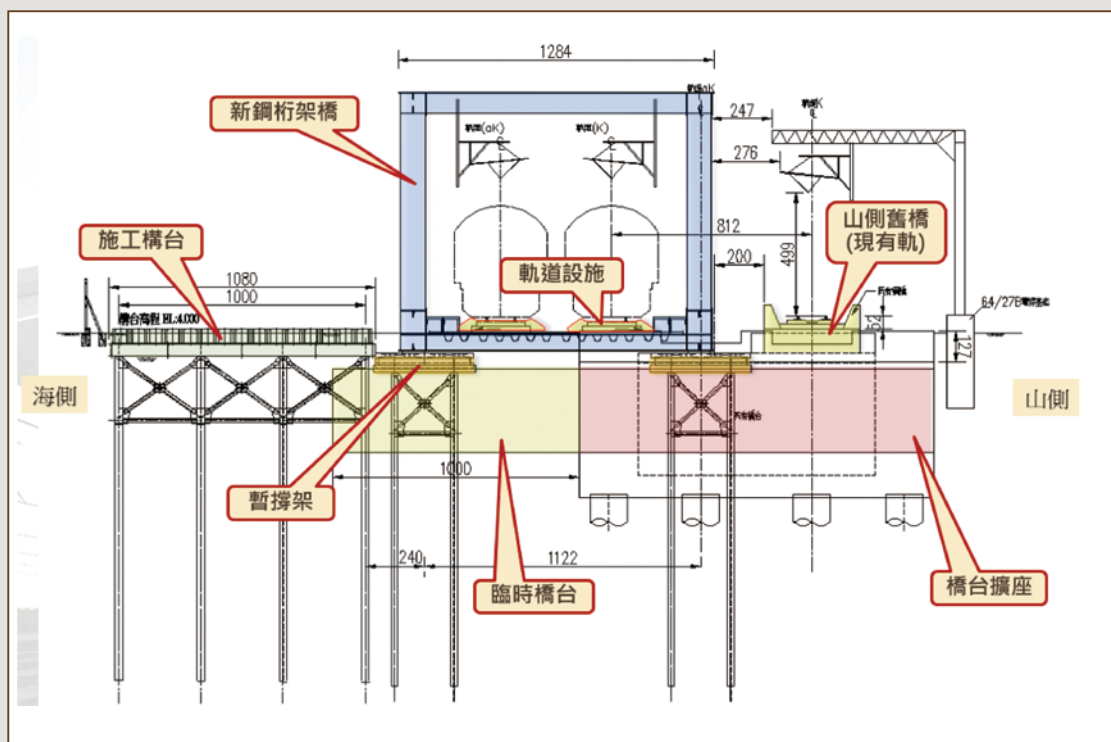


圖8 側推前橫斷面示意圖

7公尺)，以確認千斤頂能量(180噸×2)、滑軌床及滑靴等設備符合需求。

五、鋼桁架橋側推及第2次軌道切換

側推作業當晚，先拆除東側舊橋、吊離托軌梁及拆除新橋台間既有障礙物，如圖9所示。之後進行鋼桁架橋側推，側推長度約7公



圖9 側推前置作業拆舊橋、吊離托軌梁及拆除障礙物

尺。橋梁側推至定位後，以滑靴內250噸與375噸之頂升千斤頂搭配型鋼墊塊，將橋梁調整至設計高程，並予以臨時固定，最後澆置盤式支承基座之早強無收縮水泥砂漿，如圖10及圖11所示。此外，橋面上同步進行軌道銜接及砸道作業，以及電車線及號誌系統復原、測試，待各系統確認無虞，即完成新橋啟用準備，如圖12~圖16所示。

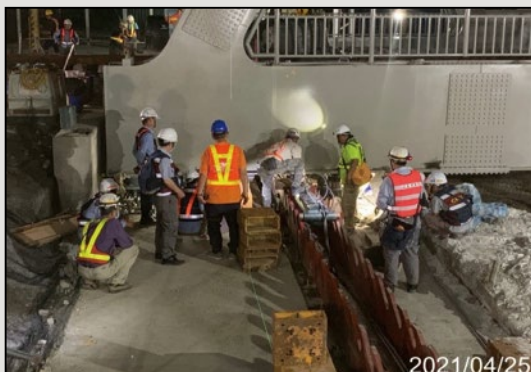


圖10 進行側推作業及控制同步側推位移量



圖11 側推定位後設置臨時支承及永久支承墊灌漿

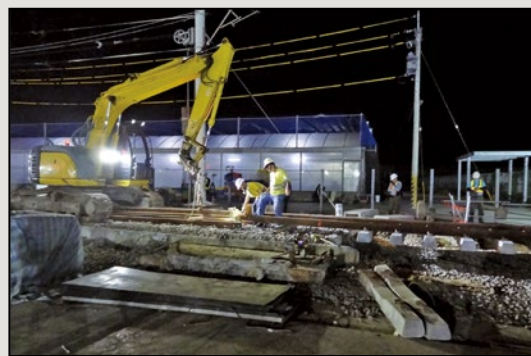


圖12 側推定位後進行軌道銜接作業



圖13 軌道銜接作業完成後進行砸道作業



圖14 砸道作業完成後進行電車線架設作業



圖15 側推定位後進行號誌系統復原作業



圖16 軌道鋪設完成後進行軌旁號誌設備安裝作業

六、第3次軌道切換

北勢溪橋西側南、北端鋪軌，配合枋寮站第一月台啟用及切換，改由鋼桁架橋西側軌道進入枋寮車站。

伍、鐵路橋梁側推工法之施工關鍵重點

一、預留側推設備安裝空間

原設計橋台頂面寬度僅170公分，盤式支承已占據大部分空間，考量安裝側推系統設備所需空間，另於橋台頂面之邊緣增設寬度約190公分RC擴座，以解決側推設備安裝空間不足問題。

二、鋼梁內部加勁補強

考量側推工法於千斤頂及滑軌支撐處之鋼梁需承載橋梁靜重，於鋼橋製造時即需於下弦鋼梁內部增設加勁板，避免應力集中造成鋼梁結構變形。

三、鋼桁架橋臨時支承穩定性

為組裝鋼桁架橋支承所需，於永久橋台之西側施作臨時橋台，兩者間以植筋連結；另考量永久橋台樁基礎與臨時橋台直接基礎可能產生差異沉陷問題，於臨時橋台底部灌漿改良地盤，確保側推過程順利。

四、降低側推過程摩擦阻力

鋼桁架橋總重約2,100噸，採用2組180噸側推千斤頂，於滑軌床採電鍍鋼板，滑靴底面鋪設HDPE板，並於滑軌床塗抹二硫化鉬降低摩擦係數。二硫化鉬於負荷重載及高溫作業條件下，有良好的潤滑效果，且具負荷壓力愈大摩擦係數愈小之優越特性，其摩擦係數約為 $\mu=0.03\sim0.09$ 。因此，保守考量摩擦係數為 $\mu=0.09$ 的條件下，計算側推所產生摩擦阻力如下：

$$R_f = \mu \times N = 0.09 \times 2,100 = 189 \text{ 噸}$$

以189噸/2=94.5噸計算，每組側推千斤頂採用180噸側推能量，即可滿足需求。

五、橋梁側推設備精進

側推工法如採傳統千斤頂反力座(詳圖17)，每一衝程完成後，均需以人力拆裝及鎖固，側推作業所需時程長且不易掌控，每一衝程所需時間約15分鐘；經創新改良採滑軌(含鯊魚齒U形溝槽)及反力座型式(詳圖18)，不需使用人力拆裝及鎖固，藉由千斤頂本體伸縮，即可自動

完成推進，每一衝程所需時間約9.3分鐘；以鋼橋側推距離7公尺計算，每次衝程45公分共需16次衝程，側推所需時間可由240分鐘縮短為150分鐘。

六、橋梁支承座採早強無收縮水泥砂漿

考量橋梁側推定位後，當天即須恢復列車通行，盤式支承座需採早強無收縮水泥砂漿，避免列車經過產生振動，影響結構強度，經試拌抗壓結果3小時即可達350kgf/cm²之設計強度需求。

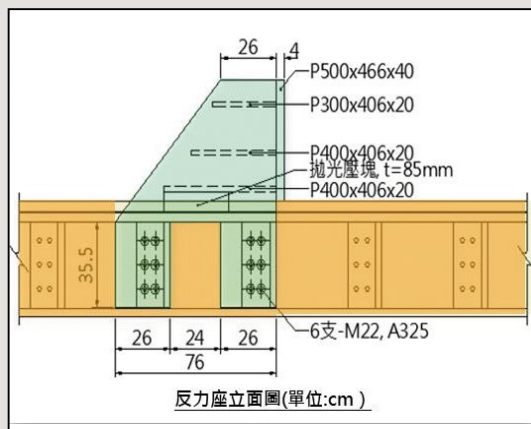


圖17 傳統千斤頂反力座示意圖

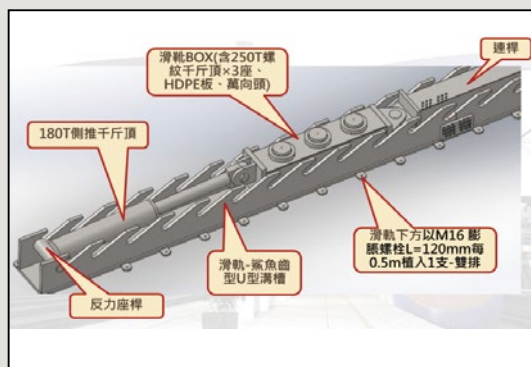


圖18 創新千斤頂反力座示意圖

陸、鐵路橋梁側推工法特色及科技應用創新作為

一、空拍機攝影輔助監造作業降低施工風險

北勢溪鋼桁架橋之高度達10公尺，緊鄰營運中鐵路吊裝及施工，具有高度風險，且鋼橋位於跨河段，監造人員不易就近查看，適合以空拍機攝影監看及定期紀錄施工歷程，如圖19所示；此外，亦可藉空拍機大範圍監看工區鐵路沿線軌道路基及邊坡之完整性，確保鐵路營運安全。



圖19 北勢溪橋改建工程施工期間空拍圖

二、施工動畫模擬及縮時攝影

北勢溪橋改建採用側推工法，於側推作業前，利用詳實動畫模擬，細部分解施工步驟，預先檢視施工界面、動線、時序可能衝突情形，先行研擬解決方案，如圖20所示；並藉施工動畫模擬，針對現場施工人員進行側推前教育訓練，增加施工團隊默契及熟悉度，使側推當晚順利完成任務。此外，橋梁施工及側推作業期間，利用縮時攝影紀錄橋梁施工過程，包含鋼橋組立及側推作業等，進行系統性整理，作為爾後教育訓練及相關工程參考。

三、鄰軌側設置紅外線感知安全預警系統

鋼桁架橋於營運軌道旁吊裝組立風險高，為預防物料、機具及人員意外侵入軌道淨空，現場除瞭望員及指揮人員外，同時於鄰軌側設置紅外線感知安全預警系統，如圖21所示，如有異物侵入軌道時，即會發出預警聲響，確保鐵路營運安全。

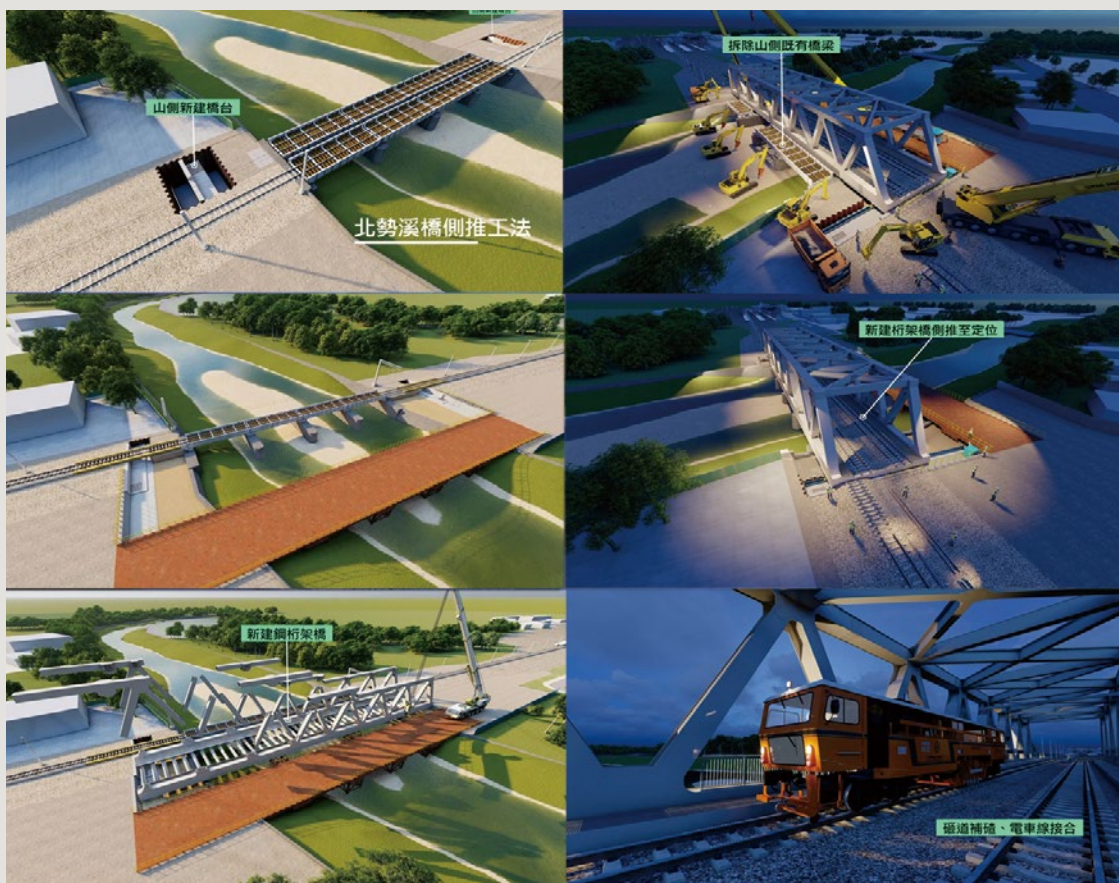


圖20 北勢溪橋改建採用側推工法之模擬動畫



圖21 鐵路營運軌旁設置紅外線感知器

結語

北勢溪橋改建工程為撙節經費、縮短工期、避免設置臨時軌影響沿線居民等，採用橋梁側推工法。因鐵路營運路線之單一性不容失敗，透過工程團隊的精進有效作為，於側推作業前模擬各項細節，解決相關疑義及問題，包含橋台增設擴座及地盤改良，鋼梁內側增設加

勁板、鋼橋試推作業、精進側推設備及盤式支承基座採早強無收縮水泥砂漿等，使側推當晚各項工作順利完成，為國內鐵路橋梁工法寫下歷史新頁。

參考文獻

1. 彭知行、劉雲生、羅逸建、王玉璋，「國內首座鐵路橋創新側推工法—臺鐵南迴鐵路電氣化計畫北勢溪橋施工」，中華民國第16屆結構工程暨第6屆地震工程研討會(2022)。
2. 王玉璋、羅逸建、劉雲生，「台灣首座鐵路橋創新側推工法-以南迴鐵路雙軌化北勢溪橋工程為例」，技師報1290期(2021)。

漁港風情、重生永續—南方澳跨港大橋重建工程

關鍵詞(Key Words)：重建工程(Reconstruction)、耐久性(Durability)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／資深協理／蔣啟恆 (Jiang, Chi-Heng) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／技術經理／劉珊 (Liou, Shan) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／副理／黃延年 (Huang, Yan-Nian) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫副理／蘇彥彰 (Su, Yan-Jang) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫工程師／李振璋 (Li, Jen-Wei) ❺

摘要

108年10月1日宜蘭縣蘇澳鎮「南方澳跨港大橋」無預警倒塌造成漁港航道受阻及民眾傷亡事件，為盡速完成橋梁重建，交通部隨即辦理新橋之設計施工，在施工期間必須維持漁船通行、降低環境干擾，完工後，除恢復原有通行功能外，更希望提供安全耐久之橋梁，並提升觀光效益。

本工程總長796.53公尺，橋梁長度595公尺，為本工程主要項目，西側引橋配置預力U型梁吊裝工法，跨越南方澳漁港航道採用預力箱型梁懸臂工法，東側引橋配置預力箱型梁場鑄逐跨工法銜接至既有道路。本工程工址位於臨海區域，海水、海風等外在條件易對橋梁結構造成侵蝕危害，考量橋梁耐久性，於規劃設計階段依照公路橋梁設計規範耐久性章節，依據工址位置、設計年限進行耐久性設計。



Customs, rebirth and sustainability of fishing ports - the Reconstruction Project of Nanfang'ao Bridge

Abstract

The Nanfang'ao Bridge collapsed on October 1, 2019. It caused the blocking of the waterway of the fishing port and the casualties of the people. In order to complete the bridge reconstruction as soon as possible, the Ministry of Transportation and Communications immediately entrusted the design and construction of the new bridge. During the construction period, it is necessary to maintain the passage of fishing boats and reduce environmental disturbances. After the completion, in addition to restoring the original traffic function, it is hoped to provide a safe and durable bridge and improve the benefits of sightseeing.

The total length of this project is 796.53 meters, and the length of the bridge is 595 meters. The bridge engineering is the main project of this project. The bridge on the west side is designed with the prestressed U-beam of hoisting method, the bridge across the waterway of the fishing port is designed with the prestressed box girder of balanced cantilever method, and the bridge on the east side is designed with the prestressed box girder of span-by-span method to connect to the existing road. The site of this project is close to the sea, and external conditions such as seawater and sea breeze are likely to cause erosion hazards to the bridge structure. In the planning and design stage, the durability design shall be carried out according to the location of the site and the service life in accordance with the durability regulations.

3

專題報導

壹、工程概述

本工程位於宜蘭縣蘇澳鎮南方澳大橋原址辦理重建，工程總長共796.53公尺，新建橋梁主體全長約595公尺，工程起點銜接移山路口，路線於里程0K+150~0K+420路段為碼頭區，南側鄰近南方澳第三漁港拍賣市場與蘇澳安檢站，路廊東側豆腐岬端地形變化較大，且里程0K+565~0K+590北側鄰近山崩地滑地質敏感

區，工程終點順接跨港路線，過既有路口往南即可通達豆腐岬風景區，本工程範圍詳如圖1所示。

本工程主要內容包含拆橋工程、橋梁工程、擋土牆工程、道路工程、排水工程及其他配合工程。橋梁段長度為595公尺，可區分為西側引橋、主橋與東側引橋三區域。主橋採懸臂工法，跨徑配置為80+140+80=300m，上部結



圖1 工程範圍示意圖

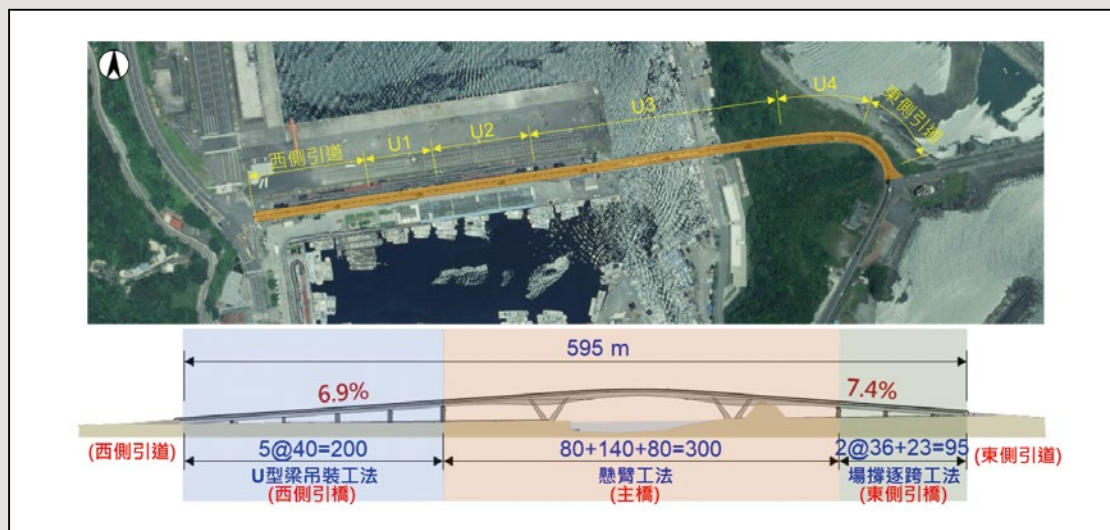


圖2 橋梁配置圖

構形式為預力混凝土箱型梁；西側引橋採用U型梁吊裝工法，共2單元，跨徑配置為2@40=80m與3@40=120m，上部結構形式為預鑄預力U型梁；東側引橋採用場鑄逐跨工法，共1單元，跨徑配置為2@36+23=95m，上部結構形式為預力混凝土箱型梁。橋墩與基礎採用場鑄鋼筋混凝土構造，基礎形式採用150cm直徑之全套管基樁，橋梁配置圖詳如圖2所示。

貳、南方澳大橋歷史

一、跨漁港航道高架橋時期（65年10月－89年4月）

早年從南方澳第三漁港到對岸造船廠需繞行經過內埤或搭乘渡輪，較為不便，故於十大建設蘇澳港建港時期建設一跨港橋，由南方澳第三漁港南碼頭跨越60公尺航道，直到坡仔腳下，為南方澳第一座跨越漁港航道的橋梁。此橋為鋼筋混凝土橋，橋高9公尺、橋寬8.1公尺，總長60公尺分為5個各12公尺的跨距，中間橋面抬高使橋體呈現拱形，因此漁民稱其為駝背橋。後續由於跨距太窄及橋下高度過低，導致大船無法順利進出，漁船及其雷達天線通過時也常有碰撞。在地方人士爭取之下，臺灣省政府同意補助1億多元在第三漁港北岸新建跨港大橋。本橋於89年4月動工拆除。駝背橋照片詳圖3所示。



圖3 駝背橋照片

二、舊南方澳大橋時期（87年－108年10月）

舊南方澳大橋由臺灣省政府建設基金專案補助，基隆港務局委託宜蘭縣政府農業局代辦施工，由亞新工程顧問股份有限公司設計監造、立永營造有限公司施工，採雙叉式單鋼拱橋型式，以耐候性高強度低合金鋼的鋼材打造。在85年1月27日開工，耗時2年在87年6月20日完工。通車當時是亞洲第一座、世界唯二的雙叉式單拱橋。南方澳大橋主橋長140公尺、寬15公尺，橋面離海平面18.5公尺，解決大型漁船無法通行的困境，使南方澳漁港得以長遠發展。舊南方澳大橋照片詳圖4所示。



圖4 舊南方澳大橋照片

參、重建歷程

108年10月1日宜蘭縣蘇澳鎮「南方澳跨港大橋」無預警倒塌造成漁港航道受阻及民眾傷亡事件；108年10月7日交通部黃次長於「跨港大橋災害處理小組第六次執行會議」中指示：「請公路總局、航港局、港務公司進行後續施工場地安排，相關計畫由公路總局主政，兩週完成代辦契約簽訂及初步計畫書預計一個月上網完成招標規劃橋梁興建時，請航港局、港務公司應就地方反應意見及發展做整體考量，與交通部先行討論。」；108年10月7日行政院吳政務委員於「南方澳大橋坍塌案損害賠償及復原工程規劃會議」中指示：「…地方人士殷切

期盼南方澳跨港大橋復原工程早日完工，請交通部加速辦理，並注意跨徑、淨高要符合漁船進出需求淨高，採購作業請本院公共工程委員會全力協助。」；108年10月15日交通部林部長於斷橋事件後續處理簡報會議中，聽取交通部公路總局有關「重建工程規劃推動情形報告」後指示：「有關橋梁重建之規劃應考量納入人行步道、觀景等功能，並傾聽地方意見與發展需求…。」

本工程主辦機關為港務公司，委由公路總局蘇花改工程處代辦，依政府採購法第22條第1項第3款「遇有不可預見之緊急事故」之規定，得採限制性招標，於108年10月31日委由台灣世曦設計、監造。

108年11月14日蘇花改工程處辦理「南方澳跨港大橋重建工程」設計階段民眾說明會，會議中地方團體及民眾陳情建議「北移重建橋址」，以致重建橋址與工程用地無法確定。經相關權責單位多次會商後，於行政院公共工程委員會109年3月18日召開「中央地方建設協調會報-南方澳大橋重建橋址(第2次)」會議，裁示橋梁採原址重建並於北側新增二線平面車道之方案，至此重建方案獲得確立。

肆、設計理念

新南方澳跨港大橋以安全、美觀與快速為出發點，施工階段採用快速施工工法，不影響漁港運作，完工後提供東、西兩岸安全通行道路，並形成觀光新景點。

高架橋全長595公尺，以南方澳「鯖魚的故鄉」為設計發想，擷取鯖魚的造型轉化為設計元素，並結合當地既有特色景觀元素及造型，塑造橋梁自明性並融入自然環境。

一、安全考量

本橋梁主要構件皆以設計年限100年進行設計，結構造型選用流暢、圓順結構外型，並配置合適結構尺寸，控制裂縫發展。耐久性設計方面，依據公路橋梁設計規範耐久性章節之規定，本工程屬於臨海地區，雖未有橋墩直接位於海水之中，但考慮橋墩於港區中，基礎長期受潮汐影響，且工址長期遭受強烈海風吹拂，基於安全考量，全橋以『極嚴重鹽害區』進行耐久性設計，採用提高混凝土強度、最大水膠比及保護層厚度等作為，讓橋梁主要構件達100年使用年限，本工程混凝土及鋼筋保護層詳如表1所示。另外混凝土使用C3A含量適度之TYPE II水泥，可抵抗中度硫酸鹽侵蝕。

橋梁設計地震力則依108年1月「公路橋梁耐震設計規範」規定辦理，橋址所屬行政區考慮之震區堅實地盤短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數 S_s^I 、 S_1^I 與最大考量水平譜加速度係數 S_s^{III} 、 S_1^{III} 如表2所示。

二、快速施工

設計階段已考量在施工階段，皆須維持第3拍魚市場運作之原則。

- 舊橋拆除階段：採用鏈鋸切割工法，降低環境污染又不影響魚市場安全。
- 基礎與橋墩施工階段：採跳島式施工，規劃施工順序，搭配交維移設，降低對魚市場之衝擊。
- 上部結構施工階段：三拍魚市場側，設計PCU梁吊裝工法，以縮短施工時程。

至於在跨航道水域則採用大跨徑懸臂工法預力箱型梁設計，航道不落墩，採懸臂工作車

表1 混凝土及鋼筋保護層

橋梁部位		28天最小抗壓強度 f_c' (kgf/cm ²)	最大水膠比	最小保護層厚度(cm)		備註
預力混凝土	箱型梁橋、U型梁橋	420	0.4	橋面板頂面	7.5	施預力時之起始抗壓強度 ≥ 336 kgf/cm ²
				箱型梁外側	7.5	
				箱型梁內側及隔梁	4	
鋼筋混凝土	橋墩	350	0.4	橋柱	10	自充填混凝土
				鋼筋混凝土墊	10	
	橋墩基礎	350	0.4	10		自充填混凝土
	橋台	350	0.4	軀體、翼牆	10	自充填混凝土
				基礎	10	
				進橋板頂面及側面	7.5	
				進橋板底面	10	
	場鑄基樁	350	0.4	10		水中混凝土設計強度 350kgf/cm^2 28天規定抗壓強度 f_c' 依據補充施工說明書第03050章第2.1.1節辦理
	橋護欄、分隔島	280	0.5	4		
	緣石	280	0.5	4		
	U型梁橋面板	350	0.4	頂面	7.5	
				底面	7.5	
	擋土牆	350	0.4	牆身	10	
				基礎	10	
無筋混凝土	重力式擋土牆	≥ 210				
	基礎墊底	80				

表2 震區短週期與一秒週期之設計與最大考量水平譜加速度係數

縣 市	鄉鎮市區	S_S^{II}	S_1^{II}	S_S^{III}	S_1^{III}	臨近之斷層
宜蘭縣	蘇澳鎮	0.8	0.45	1.0	0.55	無

施作，施工期間亦不影響漁船進出，也無須在水域搭設大規模便橋，影響水域生態；另在里程0K+565-0K+590北側鄰近山崩與地滑地質敏感區，使用懸臂工法亦可避免對山崩地滑地質敏感區進行開挖或支撐。地質敏感區套疊成果如圖5所示，懸臂工法施工照片如圖6所示。

三、美觀設計

配合在地的海洋漁港風情及南方澳有鯖魚故鄉之美名，本工程之景觀設計將以鯖魚、海浪兩種元素作為概念主題，將結構形式、欄杆、街道傢俱、造型燈具、鋪面圖型等多項橋

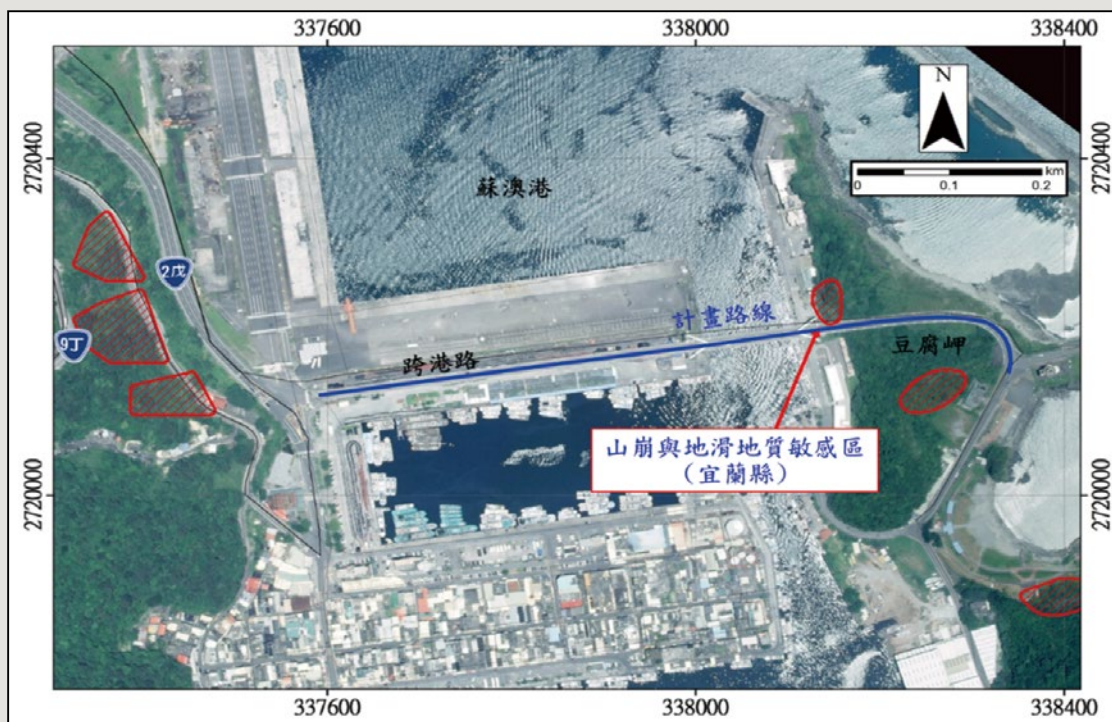


圖5 地質敏感區套疊成果



圖6 懸臂工法施工照片



圖7 既有環境景觀特色示意照片

梁設計元件，配合主題故事鋪陳，以突顯整體景觀意象，並以簡潔重複的造型單元進行設計，以達整體風格與設計語彙統一，成功融入當地漁港聚落地景。既有環境景觀特色示意照片如圖7所示。

以南方澳「鯖魚的故鄉」為設計發想，擷取鯖魚的造型轉化為設計元素，並結合當地既有特色景觀元素及造型，塑造橋梁自明性並融入自然環境。

四、整體設計主題

本工程主要橋梁設計造型以鯖魚為主題元素，整體重建路段搭配以海洋元素作為配景，以增加全線景觀活潑性，並利用日間自然光影與夜間照明的色彩變化來強化層次，塑造『魚悠遊於大海』的整體景觀意象。整體設計構想概念示意圖如圖8所示。

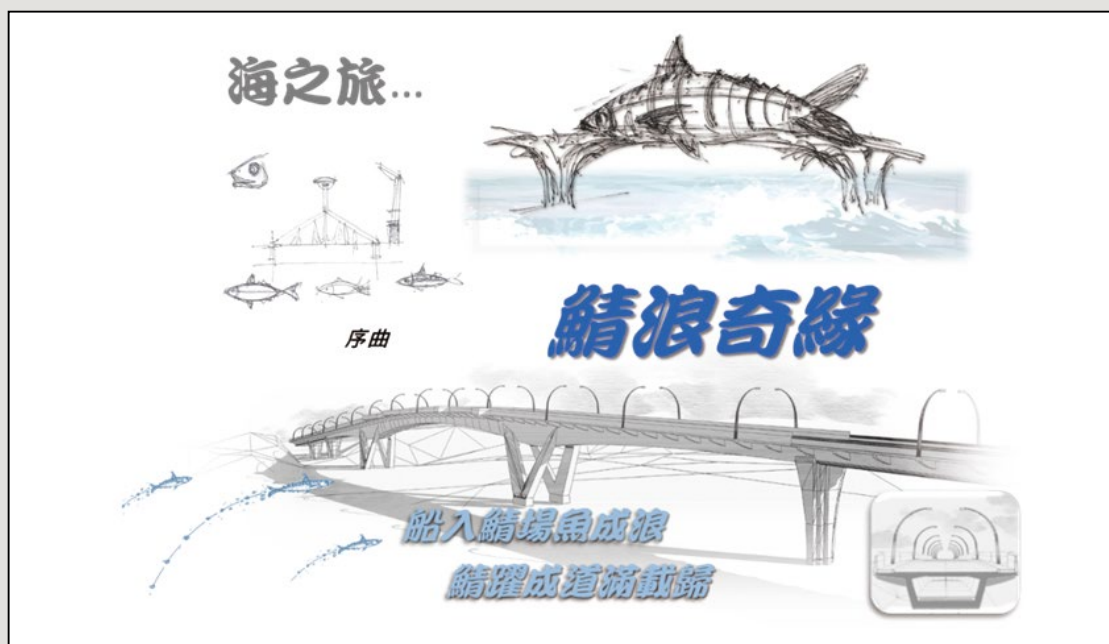


圖8 整體設計構想概念示意圖

五、橋梁造型主題

主題源自於南方澳為鯖魚故鄉的美名，以

鯖魚作為橋梁造型主題，擷取鯖魚魚體各部分的特色，轉化為橋梁造型特色元素，相關配置與設計示意如下，詳圖9所示。

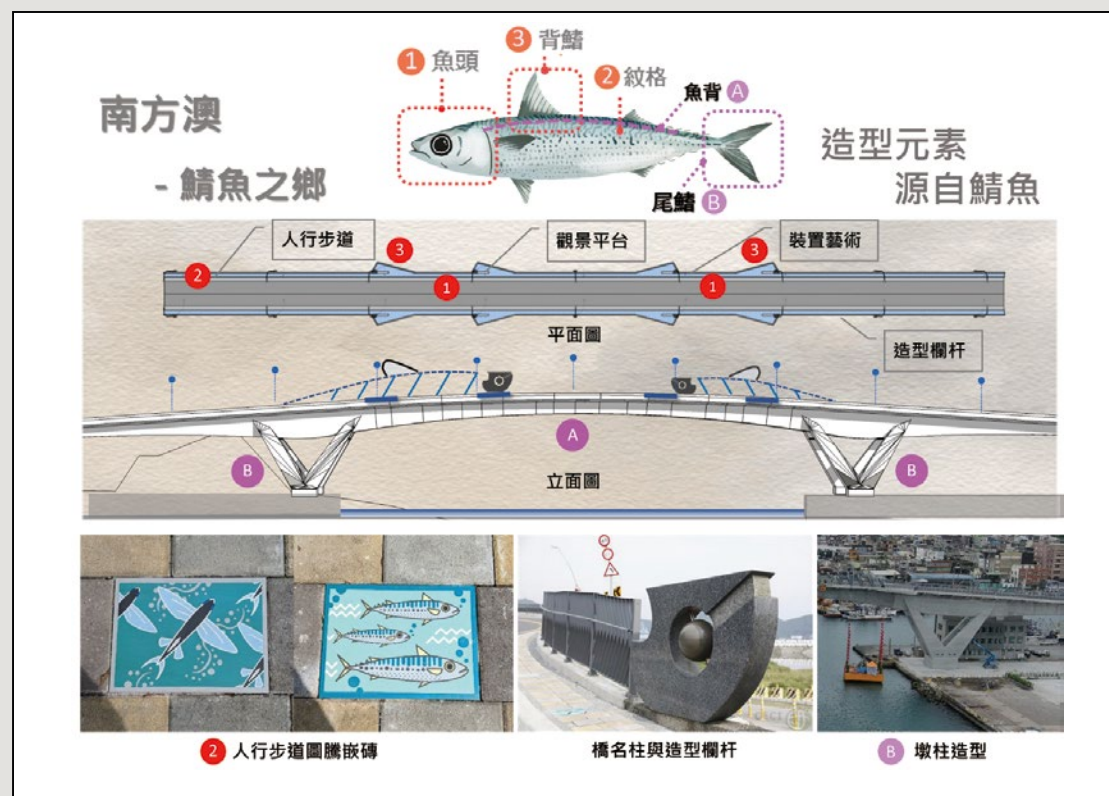


圖9 未完，接下頁



3 觀景平台

A 橋梁曲線

1 裝置藝術

圖9 橋梁造型設計配置示意圖

伍、維護管理

因本工程工址鄰近海洋高腐蝕環境，故本工程皆設計混凝土橋梁以降低維管需求，另外橋上鯖魚裝置藝術、欄杆以不銹鋼加上烤漆設計，減低維修更換頻率。

另考量鄰近第3拍魚市場的橋墩，因完工後橋下空間開放使用，車輛進出頻繁，特地將洩水管採內嵌方式設計，藉此減少洩水管因外力損壞之維修頻率。橋墩洩水管預留槽詳圖10所示。

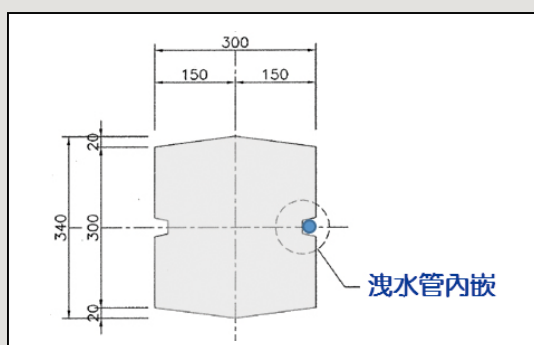


圖10 橋墩洩水管預留槽

橋梁完工後，顧問公司協助撰寫維護管理手冊，方便後續管養單位定期檢測橋梁構件時參考使用。橋梁設計階段箱型梁隔梁皆留設人孔，確保主橋段之檢修通道順暢，人孔高度設計加大，並考量人體工學設置必要爬梯與扶手，便於巡檢人員通行。箱梁人孔示意圖詳圖11所示。

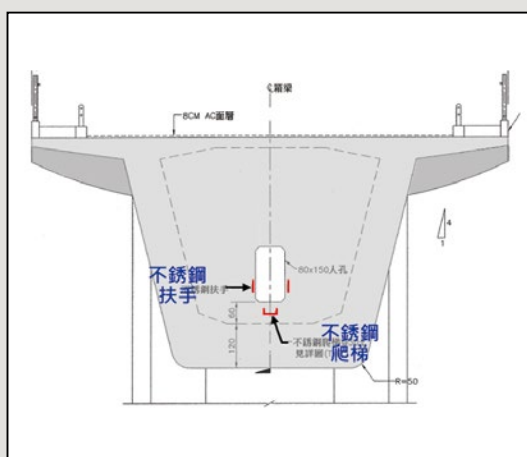


圖11 箱梁人孔示意圖

陸、拆橋規劃

舊南方澳跨港大橋無預警倒塌後，除主橋因阻擋漁船航道，已盡快移除外，其餘引橋及引道皆維持原狀，所以在新橋施工之前必須先進行拆橋工程。

考量第3拍魚市場幾乎全年無休，因此須於安全考量下以最迅速之方式拆除既有橋梁。設計規劃舊橋拆除採用鏈鋸切割工法，除可提昇安全性及加快拆橋速度外，亦可降低環境衝擊。設計規劃先以架設臨時支撐後，利用鏈鋸切割橋梁成單元節塊，再利用海運將其運至東岸回填區後進行打除，打除後的混凝土經處理後，可用於填海造陸，達到資源再生與節能減碳的目標。拆橋規劃與施工照片詳圖12所示。



圖12 拆橋規劃與施工照片

柒、施工階段遭遇困難

一、工址氣候、海水漲退潮

因工址屬於臨海區域，現況海風強烈，依氣象局資料開工至111年12月18日共886天，降雨天數多達284天，施工期間約有1/3比例為下雨天，整體施工環境不佳，大幅影響施工進度。

另基礎擋土開挖工程因海水漲退潮問題，導致施工期間基礎開挖會有湧水情況，需進行抽水作業，方可維持施工環境，大幅影響施工難度。

二、疫情

施工期間遭逢嚴重特殊傳染肺炎三級警戒，影響人力安排與出工規劃，影響工進。待疫情趨緩後，採增加設備與人力全力趕工。

三、地下回填物(填海造地)

因工址西側碼頭(第3拍魚市場前)屬於舊有堤防填海造地而成，其舊有堤防係於50多年前完成，後經多次增、修建，地下障礙物難以預測，導致A1-P3基礎擋土支撐施工時，遭遇許多

無法預知之混凝土地下障礙物，以致鋼板樁無法順利打設。後續施工廠商採用變更工法，以氣動錘排除舊堤防障礙物，再補打鋼板樁擋土設施。鋼板樁打設遭遇地下障礙物照片如圖13所示，混凝土地下障礙物如圖14所示。



圖13 鋼板樁打設遭遇地下障礙物



圖14 混凝土地下障礙物

四、P6橋墩基礎開挖

110年1月21日~23日，施工廠商為了避免預疊樁水泥砂漿滲流，導致海域遭受污染，故決定P6橋墩基礎臨海側改採鋼板樁加上引孔工法替代預疊樁施作，其餘維持原設計以預疊樁方式施工。110年2月17日~19日進行臨海側鋼板樁引孔及打設時，遭遇地下障礙物無法順利引孔達到預定深度。待預疊樁全部完成，110年3月7日~9日改採用螺旋鑽桿機引孔及H型鋼引孔，擊打拋石方式大致克服困難，貫入設計深度。惟東南角隅因遭遇不明構造物，現場判斷為既有堤防地下混凝土塊石堆疊方式有入侵基礎範圍等情形，致該區鋼板樁因此有無法貫入設計深度之情形。P6橋墩基礎擋土支撐照片如圖15所示。



圖15 P6橋墩基礎擋土支撐照片

在P6橋墩基礎擋土支撐完成後，因東南角隅無法貫入設計深度，於基礎開挖過程中，因漲退潮發生基礎底部多處冒水最後演變為砂湧情形，先以設置排水管導至集水井，設置抽水設備共8部，且打設350kgf/cm²水中混凝土封底等處理。惟東南角隅仍持續發生湧水情形，依110年5月31日會議中專業廠商所提灌漿計畫先行執行，積極於110年6月04日灌漿設備及化學材料進場，並於110年6月16日完成止水化學灌漿，經降水後成效良好。P6基礎與止水灌漿施工示意圖如圖16所示。

五、懸臂工法P7橋墩第7節塊工作車下陷

施工廠商於111年5月27日進行P7懸臂西車第7節塊混凝土澆置，於澆置過程中，因發生工作車支撐千斤頂滑脫，節塊支撐瞬間陷落，並造成該節塊嚴重扭轉傾斜，單側下陷達34cm。工作車鋼墊塊變形照片如圖17所示，工作車下陷後橋面現況照片如圖18所示。

由工地現場施工相片可知，陷落時混凝土澆置面上仍有裸露之預力套管及鋼筋。經由工程處邀集設計、監造及廠商共同討論，現場試驗後，雖然取樣試驗顯示該節塊仍符合使用強度，但考量南方澳跨港大橋為使用百年之重要

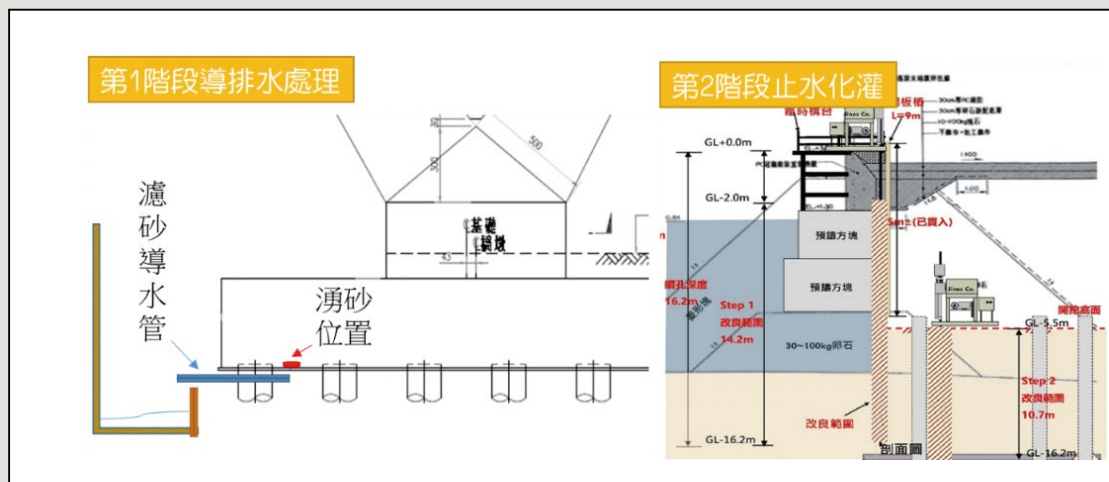


圖16 P6基礎與止水灌漿施工示意圖



圖17 工作車鋼墊塊變形

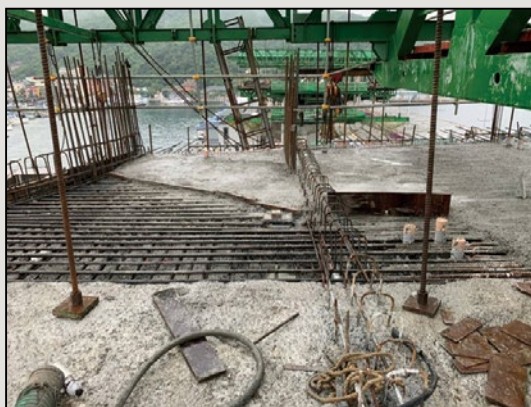


圖18 工作車下陷後橋面現況

橋梁，不該存在任何安全疑慮，故決定將該節塊拆除，重新施作。

由於P7橋墩懸臂西車第7節塊位於河道上方，考量不影響河道通行，故施工廠商提出鏈鋸切割成小塊節塊搭配吊車吊離方式施作，以此方式拆除至鋼筋搭接範圍內時，改以採用人工鑿除(氣動水泥破碎機，液壓劈裂機，水刀等)，將1.1M範圍混凝土鑿除，並將鋼筋保留，復原之鋼筋採銲接搭配螺栓鎖緊型鋼筋續接器進行搭接處理。節塊打除作業如圖19及圖20所示。

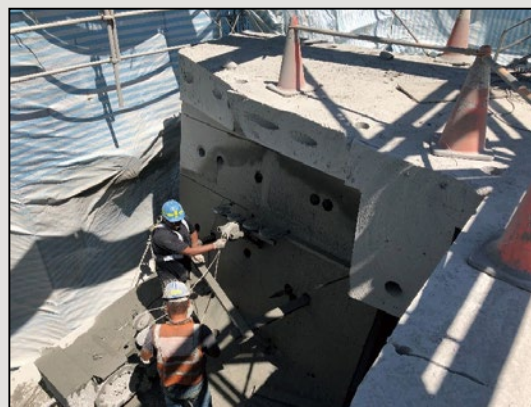


圖19 節塊打除作業(一)



圖20 節塊打除作業(二)

捌、通車效益

舊南方澳大橋發生無預警倒塌後，造成南方澳漁港西岸與東岸通行不易，而漁港東岸除有許多造船廠外，近年又新增眾多遊憩設施(豆腐岬海水浴場、南方澳討海文化館與國家帆船訓練中心等)，造成在地居民與觀光人潮前往東岸皆需繞行漁港內地方道路，對地方交通造成嚴重衝擊。

新南方澳大橋於111年12月18日通車後，提供了一條安全、快速往返東、西兩岸之道路，順暢緩解地方交通。同時新橋景觀呼應在地元素，成為漁港內熱門新景點，可串聯南方澳漁港、討海文化館、國家帆船訓練中心、豆腐岬海水浴場等觀光景點，形成一個觀光路網，提昇地方發展。

結語

本工程為全國矚目之重建工程，雖然設計時程很短，但本公司設計團隊仍然全力規劃出一座對於整個環境友善，符合業主、當地居民期待的安全橋梁。

新橋將鯖魚融入設計元素，打造一座符合功能性與景觀性之橋梁，冀望能熱絡南方澳漁港之觀光，讓地方商圈更繁榮，交通便利順暢。

在有限的時程下，由公路總局蘇花改工程處、施工廠商、監造單位與設計單位團隊合作，克服各式困難，本橋終能不辱使命，於111年12月18日順利通車。

完工照片詳圖21~圖24所示。



圖21 南方澳跨港大橋完工照片(一)



圖22 南方澳跨港大橋完工照片(二)



圖23 南方澳跨港大橋完工照片(三)



圖24 南方澳跨港大橋完工照片(四)



藏橋於林的蜿蜒 巨龍——南迴公路 安朔高架橋

關鍵詞(Key Words)：台9線南迴公路(South Link of Provincial Highway No. 9)、安朔高架橋(Anshuo Viaduct)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫工程師／鄔安凱 (Wu, An-Kai) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫副理／陳韋丞 (Chen, Wei-Cheng) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／計畫工程師／何傳裕 (Ho, Chuan-Yu) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／副理／湯允中 (Tang, Yun-Chung) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／資深協理／蔣啟恆 (Chiang, Chi-Heng) ❺

摘要

既有台9線南迴公路受限於地形條件，道路設計標準偏低、線形不佳、縱坡起伏大且路寬不足，加上高路堤及高邊坡多，易因災害受損而交通中斷，除人命財產損失外，亦對區域經濟及產業運輸造成重大影響。交通部公路總局配合國內產業東移、平衡區域發展等政策，積極推動台9線南迴公路拓寬改善後續計畫；自台東端安朔至屏東端草埔以截彎取直方式，並以長橋及長隧道型式闢建新路線，全線長約11公里；並於2018年5月全線貫通及2019年12月正式通車。其中，長橋段稱為安朔高架橋，即為本文分享工程，起自台東縣達仁鄉台9線與安朔路交叉口旁，沿安朔溪左岸堤防興建長約1,460公尺之路堤段；跨越安朔溪後，沿其支流五福谷溪左岸續向南行、蜿蜒而上，至草埔隧道北口，此段採新建橋梁(長約4,840公尺，即「安朔高架橋」)方式辦理，為陡峭山坡地及濱溪生態敏感區。分別採用逐跨架設、支撐先進及懸臂工法施作，最大跨徑150m、橋墩最高57.82m、井基最深42.6m，其中至草埔隧道北口前，配合雙孔隧道銜接、採雙向分離橋梁配置(約400m)，並於隧道洞口前設置橋梁迴轉道(約30m)、以供緊急事故人車避難疏散。完工後橋梁融入於森林中，達到最大建設效益、最小生態影響的目標。



Winding Big Dragon Hiding in The Forest - The Anshuo Viaduct Improvement Project of South-Link Provincial Highway No.9

Abstract

The original South Link of Provincial Highway No. 9 is limited by the terrain conditions, the road design standards are low, alignment is not good, longitudinal slope is large, width is insufficient, and many high embankments and side slopes are easy to be damaged by disasters. In addition to the loss of human life and property, the traffic interruption also has a major impact on the regional economy and industrial transportation. Therefore, the Directorate General of Highways, MOTC actively promotes the improvement project of the South Link Highway in conjunction with policies such as the eastward movement of domestic industries and balanced regional development. This project was launched for building a safer route to shorten the length from 16.2km to 11.0km, and eliminate the road's dangerous bends by using a long tunnel and viaduct structure. It was completed in May 2018 and officially opened to traffic in December 2019. The bridge project starts from the intersection of Provincial Highway No. 9 and Anshuo Road, and builds an about 1,460 meter- long embankment along the left bank of Anshuo River; after crossing Anshuo River, continues southbound along the left bank of Wufugu creek, and meander up to the north entrance of Caopu Tunnel, this section along the steep hillside and the ecologically sensitive area by the stream is adopted a new bridge (about 4,840 meters long, namely "Anshuo Viaduct"), the span-by-span erection, advanced shoring and free cantilever method are adopted respectively, the maximum span is 150m, the highest pier is 57.82m, and the deepest well foundation is 42.6m. In front of the north entrance of Caopu Tunnel, a two-way separation bridge (about 400ms long) is used to connect the double-hole tunnel, and a turnaround bridge (about 30ms long) is installed for emergency evacuation of people and vehicles. After completion, the viaduct is integrated into the forest to achieve the goal of maximum construction benefit and minimum ecological impact.

3

專題報導

壹、前言

台9線南迴公路為台灣東部花東地區與南部高屏地區之主要通行運輸幹線，惟受限於地形條件，既有道路設計標準偏低、線形不佳、縱坡起伏大且路寬不足，加上高路堤及高邊坡多，易因災害受損而交通中斷，除人命財產損失外，亦對區域經濟及產業運輸造成重大影響，故而地方民眾對此路段多次提出改善要求。交通部公路總局有鑑於民意殷殷期盼，並配合國內產業東移、平衡區域發展等政策，遂積極推動台9線南迴公路拓寬改善後續計畫，並依據可行性評估結果建議安朔至草埔部分路段以長隧道及長橋型式截彎取直辦理(四車道)拓寬。經交通部2004年10月29日陳報行政院，並奉行政院2004年11月3日核復：「原則同意」。公路總局據此辦理環境影響評估，於2010年8月23日初審核可，同年9月20日環保署環評審查委員會第198次會議審查通過，並於12月27日取得環保署核定函。建設計畫並已於2011年6月27日第1411次會議審議通過。計畫完成後，將可改善「安朔-草埔」既有運輸瓶頸，使現有及已拓寬運輸系統發揮既定建設目



圖1 本計畫位置圖

標，並提供花東及高屏地區便捷聯絡道路，以配合產業東移計畫(圖1)。

其中長橋段即稱為安朔高架橋，為本文分享工程，起自台東縣達仁鄉台9線與安朔路交叉口，止於至草埔隧道北口，全長約6.3 km。

貳、工程設計

一、規劃原則

為提升用路人安全性及路網運轉效率，台9線南迴公路安朔高架橋設計理念說明如下：

- 本計畫範圍山區路段因路線蜿蜒，一邊是山壁、另一邊是河谷，改善難度高，近年僅能在部分路段設置超車道，改善空間相當有限。由於就地改善難度太高，且僅能以繼續挖山壁增加破壞面，本計畫路段遂改線採截彎取直方式闢建雙向四車道公路。
- 本路段雖屬山區路段，但依交通部頒布規範規定，四級路山嶺區設計速率40公里/小時，係指最低設計速率。經研判，沿溪岸路線線形尚稱平順，如提升設計標準，並不會增加經費或造成環境衝擊，另考量北側台9線大武安朔段設計標準亦為60公里/小時，故本段亦採60公里/小時設計標準。
- 設計速率60公里/小時，採中央分隔斷面，滿足停車視距建議值半徑為420公尺。本路線方案之半徑皆大於420公尺，可滿足建議停車視距。
- 安朔端起點配合槽化設計，提供車流轉向，並可創造門戶地標。

二、設計方案

本工程路線沿安朔溪及五福谷溪布設，跨越河川及崩場地，所以對於結構型式及工法選擇極為重要。結構型式研選，經研析工程範圍內之各項因素與必要資料(如水文、水路、橫交道路、地形地質資料等)，除滿足安全、經濟與施工性之最基本要求外，尚應融合地域景觀、歷史人文、居民意見等，甚至成為地標或當地文化資產。茲將安朔高架橋考量之因素臚列如下：

- 橋墩配置避開現有水路、橫交道路及地形變化較大之區域。
- 結構輕量化以縮小基礎尺寸，減少開挖對邊坡之破壞。
- 施工條件、工期長短及經濟性。
- 為防止落橋，採用多跨連續性橋梁結構。
- 配合自然地域景觀、融入地區需求，期使橋梁能與週遭環境融合。
- 提昇地域景觀，促進結構工程技術之提昇。

依以上橋梁結構型式及工法選擇原則，本安朔高架橋採中、大跨徑橋梁構想配置詳圖2，並說明如下。

(一) 上部結構

1. 橋梁跨徑

(1) 大跨徑橋梁

本工程自安朔社區附近開始布設橋梁，跨越安朔溪後沿安朔溪支流五福谷溪左岸而行，沿線經過多處濱溪生態敏感區及陡峭之山坡地，至隧道北口處，長度約4.84公里，為考量減少破壞自然生態景觀及地貌變化，選擇以大跨徑懸臂工法配置，其配置路段說明如下：

- 跨安朔溪 1k+715~2k+025：利用1單元 55+2@100m+55之懸臂工法先後跨越既有堤防及安朔溪，並於高灘地落墩，以減少水流衝擊。
- 跨五福谷溪(安朔溪支流) 2k+690~3k+210：此路段利用2單元懸臂工法連續二次跨越安朔溪支流及濱溪生態敏感區，其跨徑配分別為65+120+65=250及70+130+70=270
- 於4k+205至隧道北口前，路線遇多處地形變化大之陡峭山坡，並跨越五福谷溪，故連續配置7單元懸臂工法(含2單元分離橋面)，以減少自然生態景觀破壞，其最大跨徑為150m。

(2) 中跨徑橋梁

地形變化較小之路段，則可採用標準跨徑45~55m之中跨徑等梁深多孔連續橋

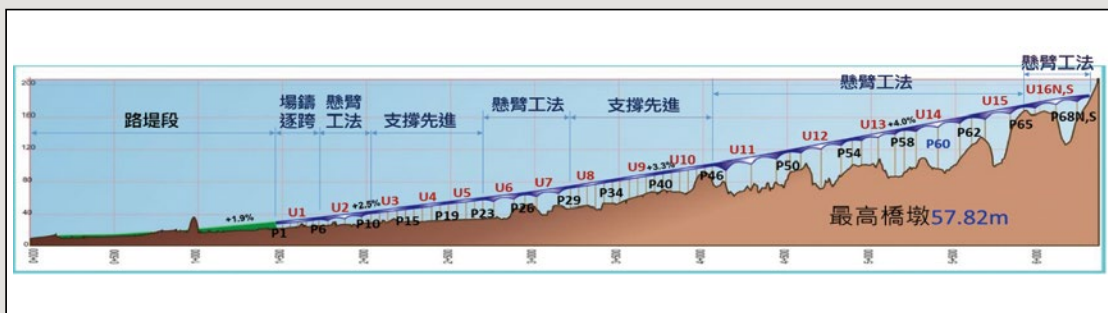


圖2 安朔高架橋橋梁配置方案

梁配置，橋梁以逐跨架設及支撐先進工法施工，可兼顧景觀及經濟，其施工法規劃說明如下：

- a. 於橋梁起點 1k+460 處至跨安朔溪前，由於安朔地磅站之出口道路匯入，需配置變化橋寬之橋梁，且此區地形平緩，墩柱平均淨高約 8.5m，適合利用逐跨架設支撐施工。
- b. 跨越安朔溪後，考量橋面與現有地面高差漸增，及橋梁斷面已具一致性，可採支撐先進工法，減少現地支撐架過高之施工風險。

2. 橋梁斷面

橋梁斷面方案則考量以簡潔、輕巧、流暢，兼顧結構安全、降低視覺衝擊及展現路段特色為原則，研擬採用之橋梁方案為預力混凝土箱型梁橋。各方案橋梁之結構型式及工法特性詳圖 3。

(二) 下部結構

橋墩配合上部結構型式，採單柱式橋墩設計，外觀利用圓滑造型減緩景觀衝擊，使橋梁整體展現平順優美及輕巧之外觀，在視覺上呈現連續性之美感及在地的印象，詳見圖 4。一般而言，於大跨徑且高橋墩路段，其橋墩斷面需求大幅增加，如仍採實心橋墩顯不經濟，故設計為中空橋墩，除可減輕橋墩結構量體，並能降低基礎承載負荷。

(三) 基礎型式

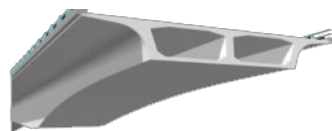
本工程橋梁沿安朔溪及五福谷溪河谷布設，橋墩基礎座落於河床、河階地或邊坡等不同地形上。於陡坡上，因不利於大型機具進場施作，採用井式基礎；當承載層深度較大或基礎有冲刷之虞者，應考量河川治理計畫及冲刷深度，優先考慮樁基礎設計，並選用直徑 1.5 公尺之基樁。本案實際配置橋梁基礎型式如表 1 所示。

中大跨徑預力混凝土箱型梁橋

1. 箱型梁外腹板內斜，搭配圓弧化處理，縮減結構視覺量體
2. 圓弧化線條連結，具整體流線順暢之美感



跨越山谷或地質敏感區，採用大跨徑之平衡式懸臂工法



地形平坦路段，採用標準跨徑 45~55m，配合支撐先進及逐跨架設工法

圖 3 中大跨徑橋梁方案

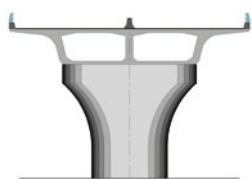


圖 4 橋墩造型方案

表1 橋墩基礎型式一覽表

橋墩編號	基礎型式	樁基礎尺寸	承載力	備註
A1、P1-11、P16-26、P28	樁基礎	$\phi=1.5\text{m}$ $L=20\sim42\text{m}$	常時380~950t/支 地震900~1300t/支	
P12-15、P27、P29-71、A2	井式基礎	$\phi=8\sim12\text{m}$ $L=15\sim25\text{m}$	60~120t/m ²	

(四) 橋梁耐震及防震設施

1. 橋梁耐震設計原則

橋梁結構設計大多由地震載重控制，近年來耐震設計的發展已朝向性能導向的設計理念，並逐步落實於設計規範當中。隨著國內外耐震工程與相關科技的快速發展，公路橋梁最新耐震設計規範亦已提出。本工程橋梁規劃設計，酌參上述規範辦理，橋梁地震力需求等級與耐震性能關係詳表2。

夠外，更可考量同時設置止震塊、防震拉條、防震連桿等多重具耐衝擊之防止落橋設施。

參、工程特色

一、藏橋於林，最大建設效益 最小生態影響

本工程路線沿安朔溪及五福谷溪布設，跨越河川及崩塌地，考量橋梁工程之大型施工機

表2 橋梁地震力需求等級與耐震性能關係

地震力等級 (耐震性能)	回歸期 超越機率	耐震理念 (安全性)	服務性能 (使用性)	損壞等級 (修復性)
中度地震 (耐震性能 I)	30年 50年-80%	結構保持彈性	震後 正常通行	輕微
設計地震 (耐震性能 II)	475年 50年-10%	構件產生塑鉸，發揮容許韌性容量	震後 有限通行	可修復
最大考量地震 (耐震性能 III)	2500年 50年-2%	結構韌性容量完全發揮，但橋梁不會落橋、崩塌	震後 有限通行	嚴重

2. 防震設施考量

- (1) 妥善規劃結構系統，使橋梁具有合宜的結構贅餘度，確保橋梁耐震性能。
- (2) 為確實防止落橋，除梁端防落長度應足

具進出及施工，對本山區及溪谷敏感棲地及森林之影響，故沿既有溪谷旁採用大量之施工便橋設計，以減少對土地植被破壞，詳圖5及圖6。橋梁結構並以中大跨徑型式布設，儘量避開原有生物覓食路徑，以降低對本區域保育類動物生態之干擾，詳圖7及圖8。



圖5 既有高邊坡處新建施工便橋



圖6 既有溪谷旁新建施工便橋



圖7 溪谷採用大跨徑橋梁布設



圖8 邊坡採用中跨徑橋梁布設

二、竹削護基與井式基礎使用

護基與井式基礎，以減少開發面積，降低施工對當地生態環境之影響，詳圖9。

本工程位於陡峭山坡之橋墩，皆採用竹削

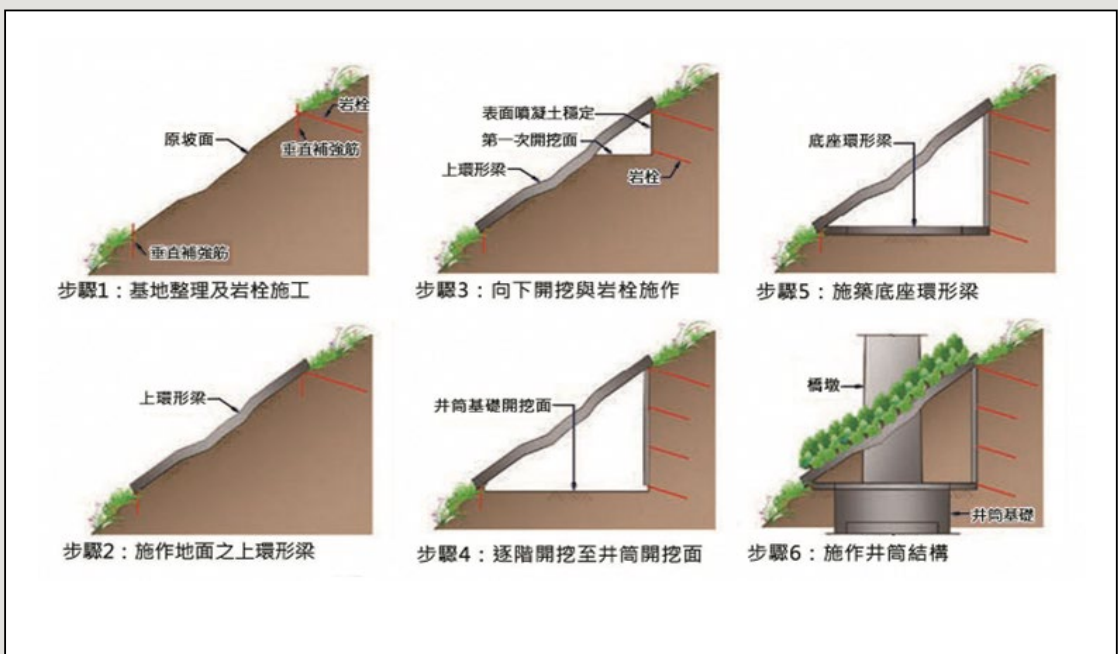


圖9 竹削護基工法示意圖

三、營建四化

本工程設計階段已儘量考慮採用施工營建四化，以提高施工效率及施工安全性。

(一) 設計標準化：橋梁結構均採箱型梁設計(詳圖3)。

(二) 構件預組(鑄)化：墩柱鋼筋採鋼筋籠模組化預組施工(詳圖10)。



圖10 墩柱鋼筋採鋼筋籠模組化預組施工

(三) 施工機械化：橋梁上部結構大量採用支撐先進工法及懸臂工法，工法自動化、機械化(詳圖11及圖12)。

(四) 人員專業化：工班專業化，提高施工安全性。



圖11 橋梁上部結構採用支撐先進工法

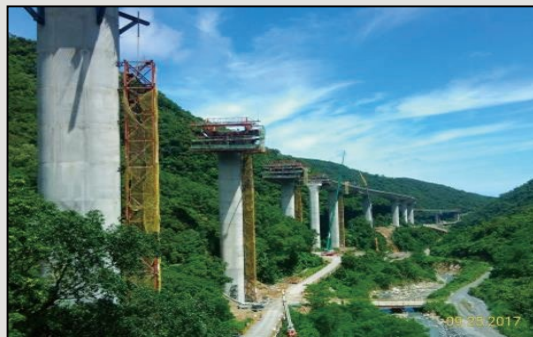


圖12 橋梁上部結構採用懸臂工法

四、節能減碳，綠色內涵

本安朔高架橋於設計階段即辦理工程碳足跡碳排放量之推估，並於施工全程，依據ISO-14067產品碳足跡之標準及程序，辦理工程碳盤查作業；並於完工後，經由第三方查證單位頒發碳足跡查證聲明書(詳圖13)，可與世界節能減碳潮流接軌；同時將盤查成果建置本土化碳排



圖13 安朔高架橋工程碳足跡查證授證典禮

放係數資料庫，為未來工程碳排放量計算建立基礎。

本工程於設計階段採用符合環保、節能概念之綠色工法、綠色材料、綠色環境等設計方式，並融入節能減碳觀念及永續經營之理念，採用綠色內涵之設計，並儘量採最小營建規模、高效能營建材料之應用、自然生態環境保護、現地材料優先使用、機電設備能源與效率提升等方向。同時在工程碳排放量檢討時，採混凝土利用爐石粉/飛灰替代水泥用量、加勁擋土牆取代懸臂式擋土牆、土方近運利用等方式落實節能，預估約可減少18,437TonCO₂e碳排放量，約佔本工程總碳排放量之7.55%；其中以混凝土利用爐石粉、飛灰替代水泥用量之方案可減少約15,415 TonCO₂e碳排放量，效益最為卓著。

另於施工階段採取以下節能減碳措施：

- 就地取材(人、機、料)，自設混凝土預拌廠

- 妥善安排機具操作排程，減少怠速時間
- 機電設備使用具有節能標章或以電力取代燃油
- 減少資源用量(用水、用電)及廢棄物量
- 橋梁採自動化工法施作
- 加強環境保護(綠化)措施

施工期間不但降低對環境干擾，且碳足跡盤查結果，實際總減碳量達23,173TonCO₂e，相當於種植210萬棵樹，為節能減碳提供極大貢獻。

五、以高強度混凝土減少水泥與砂石之用量

- 減少結構量體，避免資源浪費及環境破壞，可大幅減少資源使用並增加耐久性(使用壽命)，詳圖14。



圖14 以高強度混凝土減少箱型梁量體

- 墩柱混凝土強度由280kgf/cm²提高至350kgf/cm²，減少混凝土體積15%。
- 箱型梁混凝土強度由350kgf/cm²提高至420kgf/cm²，減少混凝土體積11.5%。

六、保育有對策，生態能永續

- 本工程區域為國內少見保育類動物及稀有植物豐富區，設計階段本公司自費邀請生態保育人士採24hr紅外線攝影觀察，調查生物活動區域及覓食路徑，詳圖15及圖16。



圖15 24hr紅外線攝影觀察紀錄



圖16 生態調查結果及處理原則

- 墩位避開生物活動區域、最小化施工面積。
- 溪谷採用中大跨徑橋梁布設，避開覓食路徑，維持生物通道。
- 施工階段便道、便橋亦納入生態保護考量設計。

結語

台9線南迴公路安朔高架橋位於植被茂密之原始山區，設計理念以「安全、永續、人本、景觀、發展與新技術」為目標，以低管養維護需求之預力混凝土箱型梁橋布設，並採用最先進之系統工法、無須現地支撐方式，以降低對工址自然環境之衝擊。本工程除確實改善道路線形、提昇道路容量，確保行車安全與便利外，並可帶動區域的經濟發展與交流，改善目前台灣東西部往來的不便。

本工程與後段的長隧道完工通車後已逐漸顯現效益，由原先計畫目標之避開原南迴公路地質脆弱段，截彎取直，提高用路人安全與作為防災替代路線，為台東居民提供一條安全、穩定回家的道路外；更藉由改善南迴道路線型，提高速限，節省車行時間20分鐘以上，提高運輸服務績效，提升服務品質，未來更希望可以串聯沿線旅遊景點，活絡原鄉觀光產業，帶動觀光經濟。

安朔高架橋工程，設計採用機械化、自動化之中大跨徑橋梁工法，沿安朔溪及五福谷溪布設，兼顧經濟美觀及環境特性；橋梁基礎多位於邊坡上，研擬如竹削工法（擋土開挖）及高橋墩施工之材料及工法，除減少環境破壞外，亦提供施工效率及安全。橋面以多孔隙透水瀝青PAC鋪設，提昇行車安全。



至於對施工區域生態環境保護之努力，設計階段於現場採24hr紅外線偵測，確認保育類動物覓食通道，並於圖說上要求施工廠商於覓食路徑區須採施工便橋，保持覓食道路；以及由各專業之資深工程師於現場沿線勘查，確認橋梁跨徑及墩位，將生態影響降至最低。另外，全橋採低照度需求之導引燈，以減少光害；另於橋下設置油水分離井、採礫間淨化，減少橋面行車排水汙染等保護環境措施。最後，為落實節能減碳、友善環境，施工階段全面進行碳足跡盤查作業，建立工程碳足跡資料庫，作為後續工程規劃執行之參考數據，推動產業節能減碳，以達成低維護管養、全生命週期、節能減碳、友善環境之目標。

參考文獻

1. 交通部公路總局第三區養護工程處 (2010). 台9線南迴公路拓寬改善後續計畫環境影響說明書
2. 交通部公路總局 (2011). 台9線南迴公路拓寬改善後續計畫安朔至草埔段規劃報告
3. 交通部公路總局(2011). 台9 線南迴公路拓寬改善後續計畫建設計畫



生態友善工程—— 國內首座預力吊 床版橋的誕生

關鍵詞(Key Words)：預力吊床版橋(Prestressed Ribbon Bridge)、吊索理論(Catenary Theory)、人行橋(Footbridge)、生態工程(Ecological Engineering)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／副理／吳淑珍 (Wu, Shu-Chen) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／正工程師／楊景華 (Yang, Chin-Hua) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／正工程師／李俊偉 (Lee, Chuan-Wei) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／建築部／副理／陳傳興 (Tan, Thuan-Heng) ❹



摘要

本橋址位於南科高雄園區滯洪池觀景廣場及螢火蟲棲息地間，為水域最窄處，此規劃可縮短環湖距離與減少鳥類棲地干擾，引導人潮集中於滯洪池北側活動，將滯洪池南側的區域保留給已開發復育完成之環頸雉及燕鴿等地鳥類棲息。橋型選擇時，除了注重與景觀之融合外，亦須評估施工期間對環境生態之影響，因此採用施工時不需臨時支撐之吊床版橋。吊床版橋是以輕薄的橋版將垂直外力轉換成軸力，無傳統橋梁之主梁來承受彎矩，因此橋身輕盈、量體小，自然融入環境中。結構分析採用吊索理論，施工則以混凝土將預鑄橋面版節塊及吊索灌注成為一體，透過預埋於橋面版內之鋼鍵進行預力二次施拉，藉以控制其懸垂量，以軸向勁度展現特殊柔性結構。施工過程利用設置於橋面內之鋼鍵，作為橋面版運輸及定位，俟所有橋面版節塊結合後，再將橋梁兩端與橋台結合束制，以傳遞水平力。本橋為國內首座吊床版橋，縱向平滑曲線展現柔軟和細長之輕量化視覺感受，並提供融入生態環境的人行步道。



The Birth of The First Prestressed Ribbon Bridge in Taiwan

Abstract

The bridge is located in Kaohsiung Science Park between the viewing plaza and the firefly habitat at the narrowest part of the water area. This design can shorten the distance around the detention basin, allowing people activities on the north side of the pond, thus avoiding human interference and the destruction of bird habitats. The southern area of the detention basin is designated as a bird habitat. In addition, the selection of bridge type needs to consider not only the landscape integration and minimizing habitat disturbance during construction. Therefore, a pedestrian ribbon bridge was constructed without the need for temporary support. The pedestrian ribbon bridge utilizes lightweight and thin decks to convert external vertical forces into axial forces without relying on traditional bridge girders to bear bending moments. As a result, the bridge structure is light and compact, seamlessly blending into the surrounding landscape. The bridge design incorporates the principles of catenary theory for structural analysis, and it integrates precast deck segments and suspended cables through concrete infusion. The inclusion of prestressed steel tendons within the embedded deck segments enables secondary tensioning to control its sag and demonstrate the special flexible structure with axial stiffness. During construction, a cable was used for transportation and positioning of the deck segments. After the decks were combined, the two ends of the bridge were bound to the abutment so that they can withstand horizontal forces. The bridge is the first domestic ribbon bridge. After completion, the longitudinal line is a smooth curve, showing a soft and slender lightweight feeling, and providing pedestrian walkway integrated into the ecological environment.

3

專題報導

壹、緣起與計畫目標

南科高雄園區開發遵守環評承諾，建構並保留自然荒野棲地，整體環境看似荒廢樣貌，實為園區營造的多樣性生態環境。本區是晝夜輪替、蟲鳴鳥叫、生老病死、充滿競爭及高低食物鏈關係族群的演替永續環境，與一般公園井然有序之美麗景緻不同。其中，滯洪池預計達成之目標如下：

- 一、找回本基地或附近原本生存於此的螢火蟲。
- 二、讓原生活於此的燕鴿及環頸雉可以在此找到適合生存的環境與食物，使其族群數量趨於穩定。
- 三、建構濕地、雜木林、野草地環境，讓原適生魚類、兩棲類、昆蟲、蛇類、鳥類…等，建構一個初步具有食物鏈關係的生態體系。
- 四、期許本區開始時以中高度人力維管棲地，在營運多年後，可以成為低維管又穩定的生態棲地環境。

考量當地滯洪池及螢火蟲棲息地的特殊環境，為讓主要步道不要環湖設置，於該基地水域最窄處配置一座景觀人行橋，引導人潮集中於滯洪池北側活動，將滯洪池南側的區域保留給環頸雉及燕鴿等在地鳥類棲息，避免人為干擾。橋址除避開鳥類棲地外，橋梁宜採輕量化結構，使與環境景觀相融合，讓此環境成為園區的生態觀察站，全區配置如圖1。

經評估，研選採用直路式預力吊床版橋，該橋型及結構迷人之處，在於無支撐跨距間所採用的橋面版相當輕薄，有別於傳統具撓曲勁度的結構，它是具軸向勁度的懸垂曲線結構，可單純以吊索理論來完成設計，惟須考慮幾何非線性，才能解析其結構特性。

日本於1969年大阪萬國博覽會完成9號橋-吊床版橋的施工後，實際採用吊床版橋的案例相當多，跨度甚至長達100公尺以上。1996年(平成8年)完工並獲得日本田中賞的日本廣島芦田湖步道橋「夢吊橋」，最大跨度達147.6公尺，橋寬為2.5公尺，橋面版厚度僅為25公分。

由於此等橋型風格簡約，力學行為明確，故於本計畫引進採用。本橋跨度配置為30公尺，橋梁全寬3.2公尺(淨寬2.5公尺)，橋面版厚

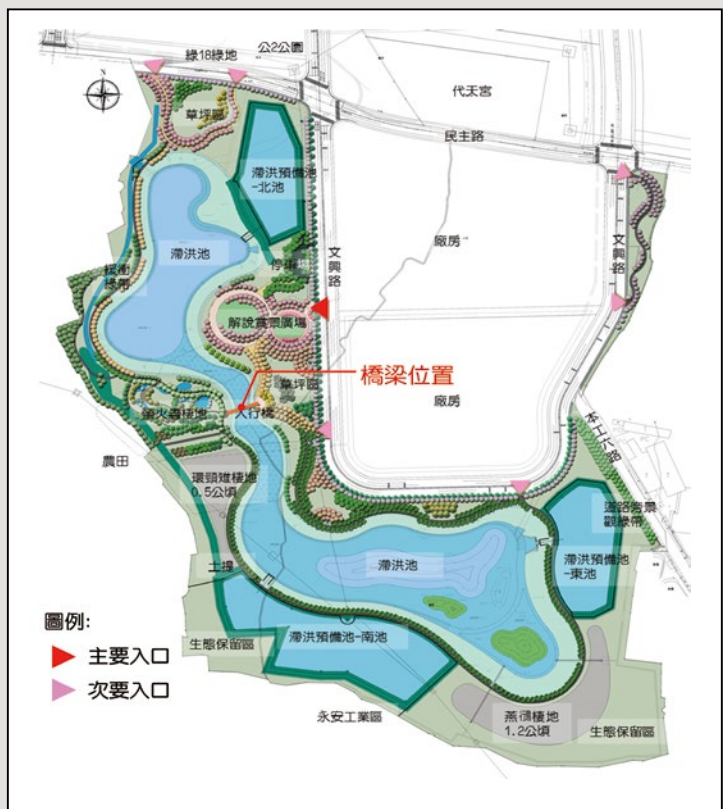


圖1 滯洪池全區配置圖



圖2 台灣首座吊床版橋

度僅有20公分，鋪面採5公分厚度瀝青混凝土。橋體施工時，不須使用大型機械設備，且橋面版採預鑄再於現場組裝，可大幅降低環境擾動範圍、減少生物棲地的干擾並縮短工期。本橋為國內首座吊床版橋，完成後之縱向線形為平滑曲線，展現柔軟和細長之輕量化視覺感受，並提供舒適的人行步道。本橋已於111年5月完工，如圖2所示。

貳、吊床版橋設計

一、設計概念

在設計吊床版橋時，是採用吊索理論來進行結構分析，該理論可應用於軸向勁度為主傳力系統的柔性結構。此類型橋梁依其結構型式的不同，可分為直路式吊床版橋及上路式吊床版橋，如圖3所示。吊床版橋兩端與橋台銜接，跨徑中間最大撓度處的變位稱為懸垂量，為設計時重要參數，如圖4所示。

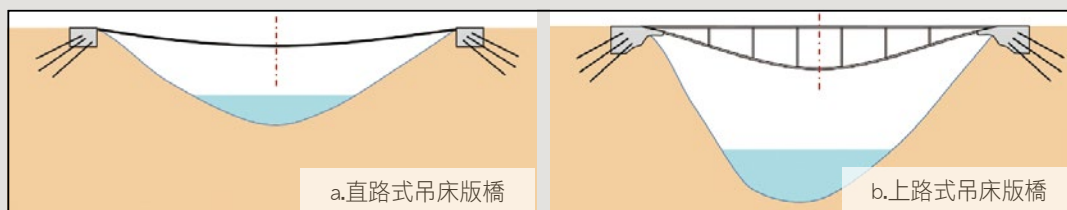


圖3 吊床版橋梁型式-橋台採地錨背拉

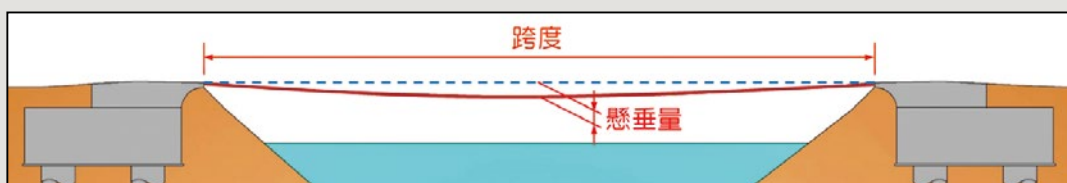


圖4 吊床版橋配置示意圖-橋台採基樁型式

吊床版橋之端部固定方式，依構造之不同可分為二種，分別為剛接構造及鳥嘴構造(銜接)，如圖5所示。另配合施工性，橋面版由沿縱向分割為數個節塊所組成，橋面版節塊採先預鑄再組裝。節塊縱向分割長度之規劃，主要是考量小型吊車能吊裝之程度，將節塊吊放至第一組鋼鍵(吊索)上安裝，因此，節塊自重不宜過大，以確保施工性。

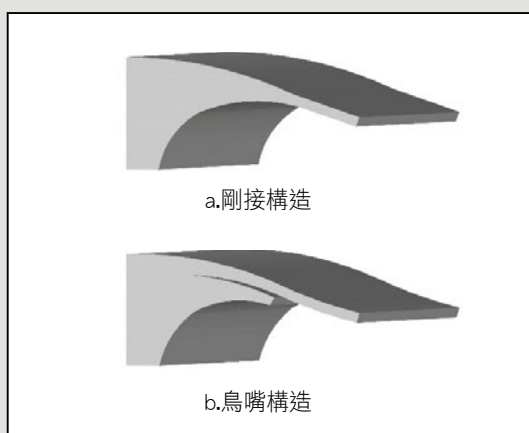
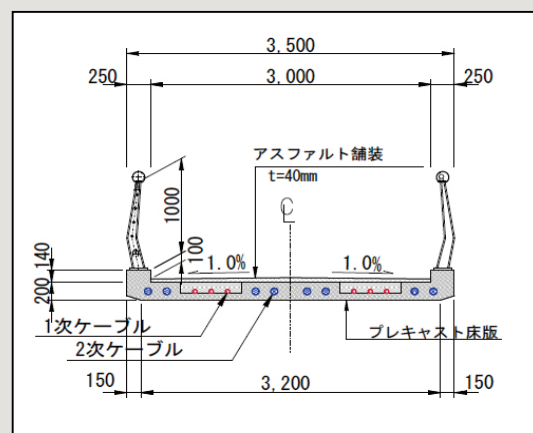


圖5 吊床版橋端部構造示意圖

基於施工考量，兩端橋台完成後先架設第一組鋼鍵(吊索)，所施拉力係用以平衡節塊混凝土自重，並作為施工中吊索，用以運輸橋面節塊至定位。所有橋面節塊組裝好後，再於橋面開槽部澆置混凝土，並施拉第二組鋼鍵，續施作AC、欄杆及其他附屬設施。第一組及第二組鋼鍵之配置示意如圖6所示，施工採用懸垂架設工法，施工順序如圖7所示。



出處：第23屆日本預力混凝土工程學會學術討論會論文集(2014年10月)

圖6 吊床版橋斷面示意圖

施工示意圖	施工步驟	結構分析
	施作兩端橋台，包含錨碇構造或基樁等。	兩側橋台設為固定端。
	安裝第一組鋼鍵，施拉擬承受索力並加以固定。	第一組鋼鍵於端部施拉水平力。(吊索元素)
	混凝土橋面版吊裝及架設，橋面版採預鑄方式施工。	橋面版架設。(梁元素)
	將橋面版固結成一體後，施拉第二組鋼鍵。	第二組鋼鍵施拉(吊索元素)
	施作橋欄杆、AC及其他附屬設施。	橋梁完成後加載附屬載重、活載重等。

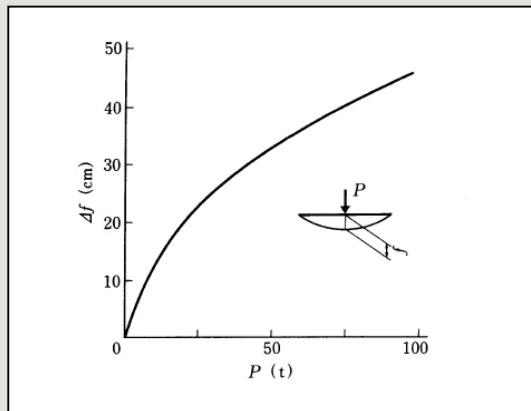
圖7 吊床版橋的施工步驟及結構分析

二、理論與分析

在構造上，吊床版橋是由預鑄版在空間上連接延伸形成懸吊結構，在節塊連接後形成了懸吊曲線的形狀。橋梁跨度中心垂度若控制在較小值，橋梁兩端須相對施加較大拉力，因此，結構需具有良好的軸向勁度以抵抗水平力及控制較小垂度。

由於吊床版橋的結構特性，橋梁垂度會隨著外加载重(欄杆、鋪面、行人)作用於橋面，造成橋梁縱面線形曲率的改變，進而增加橋梁軸向力。此種橋梁結構，載重與位移並呈非線性關係，如圖8所示。

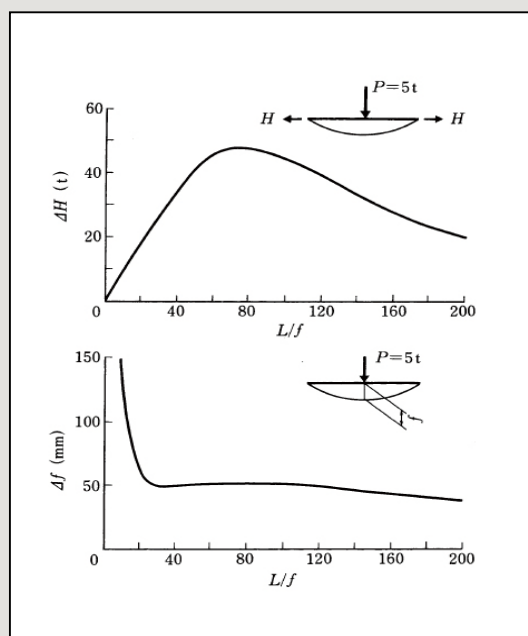
透過吊索理論分析，當垂度改變時，集中載重作用所產生的水平力與垂度變化為一



圖片摘自新井英雄・錦英樹：吊床版橋
圖8 集中垂度變化量

曲線，如圖9所示。當 L/f 約為70以上時，垂度變化量幾乎為定值，且拉力變化量逐步減小。而 L/f 約在30~40區域，垂度與拉力變化量也很小。因此，設計時選擇曲線變化趨於水平走向區域，增加橋梁懸垂量 f 以獲得較小的水平拉力 H ，為較經濟的設計手段。

參考日本預力混凝土技術協會第12屆研討會論文集(2003年10月) - 「吊床版橋設計研究」及「PC吊床版橋設計施工規準(案)」之垂度建議(詳表1)，本工程橋梁垂度跨度比採用 $L/f=50$ ，節塊厚度採用20公分作為設計基準。



圖片摘自新井英雄・錦英樹：吊床版橋
圖9 集中載重作用產生之水平力與垂度變化曲線

表1 吊床版橋垂度跨度比設計參數

	跨度長 (m)	垂度跨度比 f/L	橋面版厚度 (mm)		
有限變形解析 (剛接合)	50	1/50	200	260	330
		1/40			
		1/33			
	75	1/50	200	260	330
		1/40			
		1/33			
	100	1/50	200	260	330
		1/40			
		1/33			

在吊床版橋的結構分析參數及流程上，由於吊床版橋分析係以吊索理論為基礎，其中吊索變化曲線及微小分量示意圖如圖10所示，其吊索的微小斜邊長度 ds 可由畢氏定理計算而得，如式(1)所示。

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dx \cdot f'(x))^2} \dots\dots\dots(1)$$

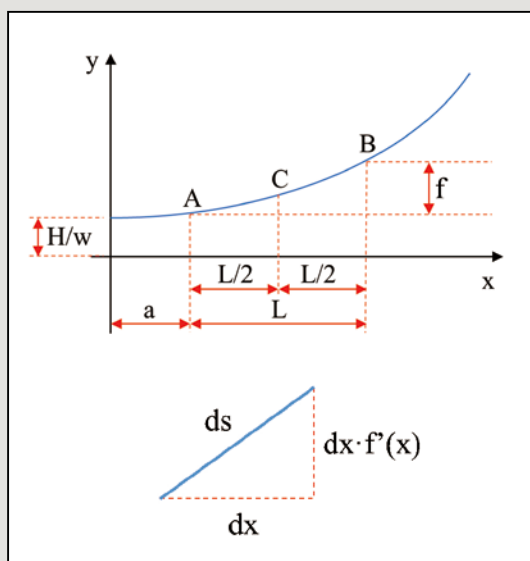


圖10 吊索變化曲線及微小分量示意圖

在承受吊索自重情況下，吊索的高度變化方程式如式(2)所示。

$$y = f(x) = H/w \cdot \cosh(w/H \cdot x) \dots\dots\dots(2)$$

其中， H 為吊索拉力水平分量， w 為吊索單位重， f 為高度變化量或簡稱垂度變化量。

因此，吊索長度 S 可由微小分量取積分得之，計算如下：

$$\begin{aligned} S &= \int_a^{a+L} ds \\ &= \int_a^{a+L} \sqrt{(dx)^2 + (dx \cdot f'(x))^2} \\ &= 2H/w \cdot \cosh(w/H \cdot (2a + L)/2) \\ &\quad \cdot \sinh(w/H \cdot L/2) \end{aligned}$$

同時，

$$\begin{aligned} y_A &= H/w \cdot \cosh(w/H \cdot a), y_B \\ &= H/w \cdot \cosh(w/H \cdot (a + L)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f &= y_B - y_A \\ &= 2H/w \cdot \sinh(w/H \cdot (2a + L)/2) \cdot \\ &\quad \sinh(w/H \cdot L/2) \end{aligned}$$

藉由，

$$\begin{aligned} S^2 - f^2 &= \left[\frac{2H}{w} \cdot \sinh\left(\frac{w}{H} \cdot \frac{L}{2}\right) \right]^2 \cdot \\ &\quad \left[\cosh^2\left(\frac{w}{H} \cdot \frac{2a+L}{2}\right) - \sinh^2\left(\frac{w}{H} \cdot \frac{2a+L}{2}\right) \right] \\ &= \left[\frac{2H}{w} \cdot \sinh\left(\frac{w}{H} \cdot \frac{L}{2}\right) \right]^2 \end{aligned}$$

因此，

$$S = \sqrt{\left[\frac{2H}{w} \cdot \sinh\left(\frac{w}{H} \cdot \frac{L}{2}\right) \right]^2 + f^2} \dots\dots\dots(3)$$

當垂度變化量趨向零時，式(3)計算式中的 h 值為零，可得

$$S = \frac{2H}{w} \cdot \sinh\left(\frac{w}{H} \cdot \frac{L}{2}\right) \dots\dots\dots(4)$$

另外，依其承受之水平力 H 來計算其吊索的伸長量 ΔS ，計算如下：

$$\Delta S = 2 \int_0^{S/2} \frac{T}{EA} ds \dots\dots\dots(5)$$

其中，式中

$$\begin{aligned} T &= H \times \cosh \frac{wx}{H}, \text{代入式(5)可得} \\ \Delta S &= H^2/2EAW \cdot [\sinh(w/H \cdot L) + w/H \cdot L] \\ &\quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

其中， E 為吊索彈性模數， A 為吊索斷面積， L 為吊索水平長。

因此，吊索無應力狀態下的長度可以 $SS=S-\Delta S$ 表示之。

三、演算流程

在橋梁計算過程中，任何階段載重作用皆不會改變橋梁跨度(L)。但橋梁長度(S)則會隨著各階段載重之導入發生變化，如圖11所示。而

各階段載重情境下之橋梁長度是透過初始載重情況下的長度來表示，如圖12所示。因此，依據各階段加載情況之初始長度與長度之間的關係進行計算。

有關吊床版橋的設計參數如圖13所示，各設計參數定義接著透過表2公式(2)所示。橋梁分析步驟為先假設 f 、 α 、預力值，接著透過公式(2)

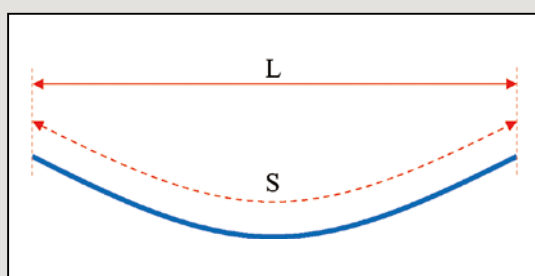


圖11 吊床版橋跨度及橋長示意圖

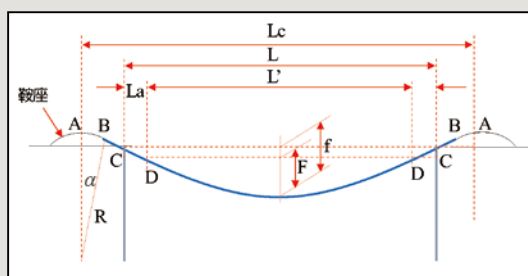


圖13 吊床版橋設計參數示意圖

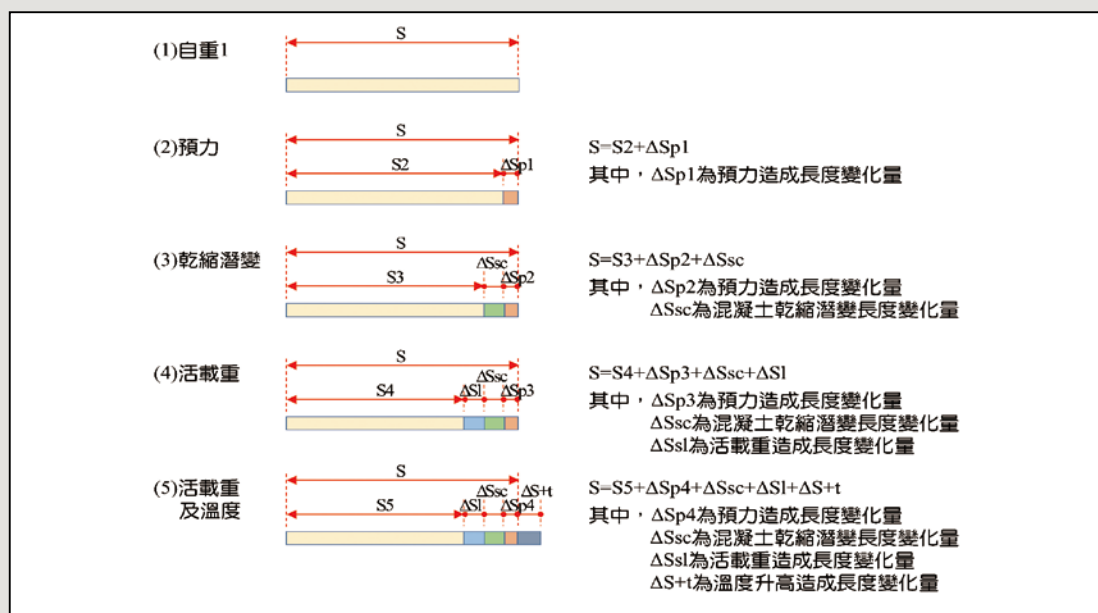


圖12 各載重情境之橋長示意圖

表2 吊床版橋的設計參數定義

參數定義	符號	設計使用數據	備註
跨徑 (span)	Lc	34 m	鞍座間的距離
	L	32 m	不動點距離
	L'	30 m	自由端距離
垂度(sag)	f	0.683 m	不動點間垂度
	F	0.600 m	自由端間垂度
垂度比(sag ratio)	L'/F	50	自由端之垂度比
跨度端點長度 (length of span end)	La	1.0 m	
鞍座曲率(saddle curvature)	R	5.0 m	

至公式(6)及幾何關係可求得垂度(f)、吊索1張力(T_1)、吊索2張力(T_2)、無應力狀態橋長(S_0)、無應力狀態吊索長(SS_0)及各階段載重導入之橋長等。前述假設之參數經反覆計算疊代，以達各載重導入階段之橋長須等於無應力狀態之橋長，計算結果敘述如後。

考量本橋址跨越小規模滯洪池，橋梁跨度約為30m，依據日本「PC吊床版橋設計施工規準(案)」建議值，本橋垂度比採用50進行設計，吊索垂度控制於0.683m。橋梁端部與鞍座之銜接，採長1.0m變斷面剛接結構，兩側鞍座採橋台樁基礎型式配置，以抵抗橋梁軸向拉力及彎矩。本計畫吊床版橋節塊淨寬2.5m(全寬3.2m)、縱向節塊長2.0m、厚20cm，共15節塊組裝而成，每節塊重量約3 Ton，便於利用小型機具進行吊裝施工。橋梁斷面兩側採斜向順風設計，主要目的在降低風力對橋梁造成之微振動，改善行人舒適度，斷面配置如圖14所示。吊床版橋依上述吊索方程式，並考量各載重導入狀況，反覆計算疊

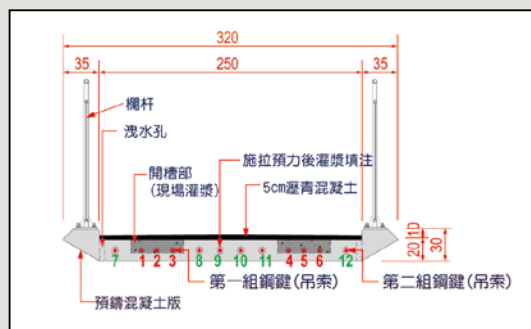


圖14 吊床版橋附屬設施配置斷面圖

表3 各階段載重導入及說明

階段	不同階段之載重導入	備註
第一階段	第一組鋼鍵安裝	6-F130 (1號-6號)
第二階段	橋面版節塊安裝	
第三階段	自重DL1導入	橋面版自重
第四階段	第二組鋼鍵安裝及預力施拉	6-7S12.7 (7號-12號)
第五階段	自重DL2導入	AC、欄杆
第六階段	預力鋼鍵鬆弛狀況	
第七階段	混凝土發生乾縮潛變狀況	
第八階段	活載重作用(L)	
第九階段	L+T活載及溫度變化(+15°C)	
第十階段	L+T活載及溫度變化(-15°C)	

代，各階段載重導入說明如表3所列。

吊床版橋為一柔性結構，因此，應進行耐風檢核。依據日本「PC吊床版橋設計施工規準(案)」規定，單跨直路式吊床版橋若能滿足 $L/B < 30$ ，其中， L 為跨度， B 為橋梁斷面總寬度，同時其欄杆的透空率在70%以上，則不須進行風力載重檢核。

吊床版橋的結構分析，可分為4步驟來進行，如圖7所示，吊索配置詳圖15。

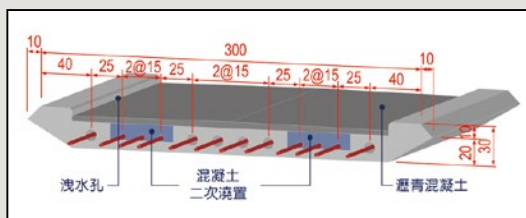


圖15 吊床版橋吊索配置斷面圖

步驟1：於吊索元素施拉水平力，並於施拉後將端部束制，以承受後續加載之水平力。

步驟2：架設橋面版，此時吊索將會承受預鑄橋面版的垂直載重，梁元素也開始成形。

步驟3：橋面版開槽灌注混凝土，使得各橋面版能結合成整體的橋面版。

步驟4：第二組鋼鍵施拉作業，此時主梁內亦內置鋼筋，已形成一體結構。

四、分析檢核

由於吊床版橋結構特殊，其特性與一般常見橋梁比較，主要的差異為吊床版橋撓曲勁度雖小卻相對具有較大的軸向勁度；在施工方面，其工法並不是採用常見的場撐、懸臂或推進施工，而是採用吊索(鋼鍵)支撐橋面版節塊之

懸吊工法施工，故各階段外加载重的導入與預力鋼鍵施拉及垂直度控制等，息息相關(乾縮潛變完成後，橋梁垂度需趨近預設值)。橋梁分析時須逐一考量各階段之載重作用，進行吊索應力分析、混凝土節塊受力分析及混凝土節塊裂縫控制分析等，計算結果如表4至表6所示。

表4 吊索於各階段載重作用下之應力

各階段載重	F (m)	i (%)	σ_1 (N/mm ²)	σ_2 (N/mm ²)	T1 (kN)	T2 (kN)	跨徑 Lc或L (m)
Stage 1 吊索1	0.040	0.466	281.3	-	1,166	-	34
Stage 2 混凝土節塊	0.731	8.605	562.8	-	2,333	-	32
Stage 3 自重1	0.800	10.320	623.3	-	2,584	-	32
Stage 4 吊索2+預力	0.754	9.436	606.0	861.1	2,513	3,570	32
Stage 5 自重2	0.761	9.526	611.5	866.6	2,535	3,593	32
Stage 6 鋼鍵鬆弛	0.763	9.540	603.2	854.5	2,501	3,543	32
Stage 7 乾縮潛變	0.683	8.539	545.0	796.2	2,260	3,301	32
Stage 8 活載重	0.706	8.834	561.5	812.8	2,328	3,370	32
Stage 9 溫度(+15°C)	0.743	9.289	559.2	810.5	2,318	3,360	32
Stage 10 溫度(-15°C)	0.669	8.362	564.3	815.4	2,339	3,380	32

表5 混凝土節塊於各階段載重作用下之彎矩

各階段載重	σ_{cN} (N/mm ²)	$\frac{d^2y}{dx^2}$ $=8F/L^2$	$\Delta d^2y/dx^2$	I	Z _u	Z _l	M= $\Delta d^2y/dx^2 \cdot E_c I \cdot M_i$ (kN-m)
Stage 1 吊索1	-						
Stage 2 混凝土節塊	0						
Stage 3 自重1	0	6×10^{-3}					
Stage 4 吊索2+預力	5.8	6×10^{-3}	3.6×10^{-4}	2.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	19.5
Stage 5 自重2	4.9	6×10^{-3}	3.1×10^{-4}	2.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	15.8
Stage 6 鋼鍵鬆弛	4.8	6×10^{-3}	2.9×10^{-4}	2.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	15.3
Stage 7 乾縮潛變	3.3	5×10^{-3}	9.2×10^{-4}	2.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	55.8
Stage 8 活載重	0.6	6×10^{-3}	7.4×10^{-4}	2.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	43.8
Stage 9 溫度(+15°C)	1.0	6×10^{-3}	4.5×10^{-4}	2.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	25.4
Stage 10 溫度(-15°C)	0.2	5×10^{-3}	1.0×10^{-3}	2.1×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	63.0

表6 混凝土節塊之裂縫控制

各階段載重	$\sigma_{cN} + \sigma_{bu}$ (N/mm ²)	$\sigma_{cN} + \sigma_{bb}$ (N/mm ²)	σ_{bu} (N/mm ²)	σ_{buS} (N/mm ²)	$\sigma_{SE} = \sigma_{bu} - \sigma_{buS}$ (N/mm ²)	裂縫w (mm)
Stage 1 吊索1						
Stage 2 混凝土節塊						
Stage 3 自重1						
Stage 4 吊索2+預力	4.9	6.7	-	-	-	-
Stage 5 自重2	4.2	5.7	-	-	-	-
Stage 6 鋼鍵鬆弛	4.0	5.5	-	-	-	-
Stage 7 乾縮潛變	0.7	6.0	-	-	-	-
Stage 8 活載重	-1.4	2.8	7.2	124.1	116.9	0.118
Stage 9 溫度(+15°C)	-0.1	2.3	-	-	-	-
Stage 10 溫度(-15°C)	-2.7	3.3	8.3	178.3	170.0	0.172

由上述分析結果顯示，本橋在各階段載重作用下，其吊索應力值介於281N/mm²至866N/mm²間，皆小於容許應力 $0.7\sigma_u = 1,298 \text{ N/mm}^2$ 。在混凝土裂縫控制部分，可依日本「PC吊床版橋設計施工規準(案)」建議公式檢核，其計算公式如下所列。

$$w = 1.0[4c + 0.7(C_s - \phi)](\sigma_{SE}/E_s + \varepsilon'_{csd}) \dots\dots\dots(7)$$

其中，**c**為混凝土保護層厚度
C_s為鋼筋至混凝土表面距離
φ為鋼筋直徑
E_s為鋼筋彈性模數
ε'_{csd}為混凝土收縮量

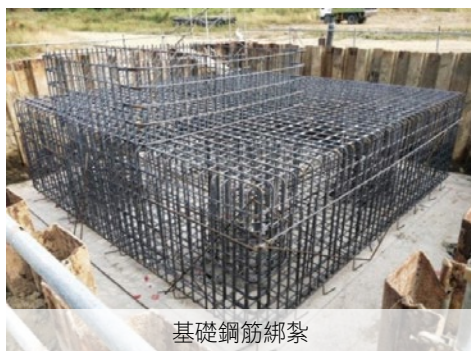
另外，依日本規範要求，對於位處一般環境中之鋼筋混凝土結構之建議值為0.005c，即

橋面版裂縫寬度需小於0.175mm為宜。藉由橋梁自重產生的彎矩**M_i**及吊索二次施拉預力產生的彎矩**M**，可計算得裂縫寬度。經檢核，在活載重作用及溫度下降情況，混凝土裂縫寬度為0.118mm及0.172mm，皆符合上述規範規定。

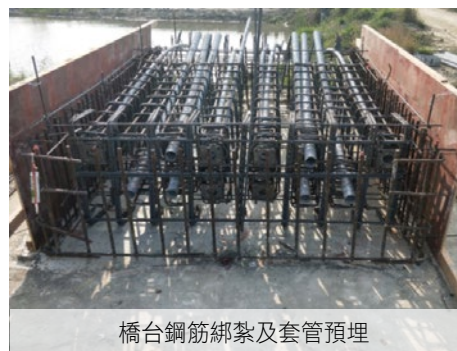
參、工法與施工

本吊床版橋為國內首座，國內尚無施工經驗，因此，施工時特別注意施工流程及品質。本橋兩端的橋台基礎與橋體剛接，負責穩定整體結構，因肩負施工中鋼鍵(吊索)錨碇任務，故於橋體施工前須先完成，施工相片如圖16所示。

本橋之橋面版採預鑄工法施築，施工包含鋼筋綁紮及預留第二組鋼鍵配置等，施工相片如圖17所示。



基礎鋼筋綁紮



橋台鋼筋綁紮及套管預埋

圖16 吊床版橋基礎施工



橋面版鋼筋綁紮



完成後之橋面版

圖17 橋面版預鑄施工

兩側橋台完成後，進行第一組鋼鍵(吊索)裝設及預力施拉。施作完成後之鋼鍵為平行且略有下垂，但其下垂量並不大。接著進行預鑄橋面版的安裝，施工相片如圖18所示。本橋之預鑄橋面版採懸吊工法施作，即將預鑄橋面版藉由第一組鋼鍵(吊索)推至定位，安裝相片如圖19所示。

預鑄橋面版安裝完成後，進行二次施工部

分之橋面版鋼筋綁紮及混凝土澆置，如圖20所示。橋面版完成後，進行第二組鋼鍵的安裝及施拉，鋼鍵拉力經檢核後，進行端錨的保護及鋼鍵套管的灌漿，如圖21所示。

第二組鋼鍵預力施拉完成後，即可進行瀝青混凝土鋪設施工，及續進行欄杆等附屬工程，施工相片如圖22所示。

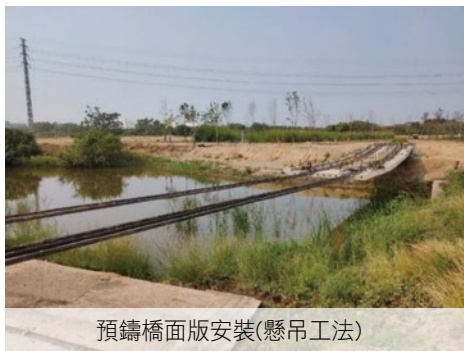


第一組鋼鍵(吊索)裝設



鋼鍵預力施拉

圖18 吊索安裝



預鑄橋面版安裝(懸吊工法)



預鑄橋面版安裝

圖19 橋面版懸吊工法施築



橋面版鋼筋綁紮



二次澆置完成後之橋面版

圖20 橋面版二次施工



二次吊索安裝



二次吊索施拉

圖21 第二組鋼鍵安裝及預力施拉



瀝青混凝土鋪設施工



欄杆裝設

圖22 吊床版橋鋪面鋪設及欄杆安裝

結語

本橋型研選從友善生態環境的立場出發，簡單而柔和，與環境相融合，靜靜的構成本橋最原始之設計理念——“簡而柔，柔而美”。

“直路式預力吊床版橋”結構系統，具有挑戰性並能提升工程技術，亦為力學簡而柔之表現。自然懸垂之橋梁微笑曲線與量體最小化，具體體現節能減碳與環境友善相處的態度，充份表達園區科技領先，愛護地球的理念。橋梁“一抹微笑”的設計，無需過多的裝飾。

吊床版橋隱身設置於生態自然的環境中，柔性的結構造型能與環境現況相匹配。同時，施工時無須使用大型機械設備來施築、橋面版採先預鑄再組裝施作、降低施工噪音、縮短工期、友善棲地等等，均在設計之初已詳加規劃。

日本的吊床版橋案例已達一百座橋以上，長度達150公尺，在國內則為第一次採用，完工照片如圖23。由於本橋梁輕盈、量體小，可與環境相融合，施工時不需臨時支撐，對環境干擾小，同時可減少材料使用，落實節能減碳目標。希望藉由本工程引進之新技術，國內未來也能更加廣泛地應用此類橋型。



圖23 直路式預力吊床版橋完工照片

從金門大橋完工 談未來國內跨海 大橋展望

關鍵詞(Key Words)：跨海橋梁 (Cross-Sea Bridge)、橋梁規劃設計(Bridge Plan and Design)、海上施工(Offshore Construction)

台灣世曦工程顧問股份有限公司／土建事業群／副總經理／黃炳勳 (Huang, Ping-Hsun) ❶

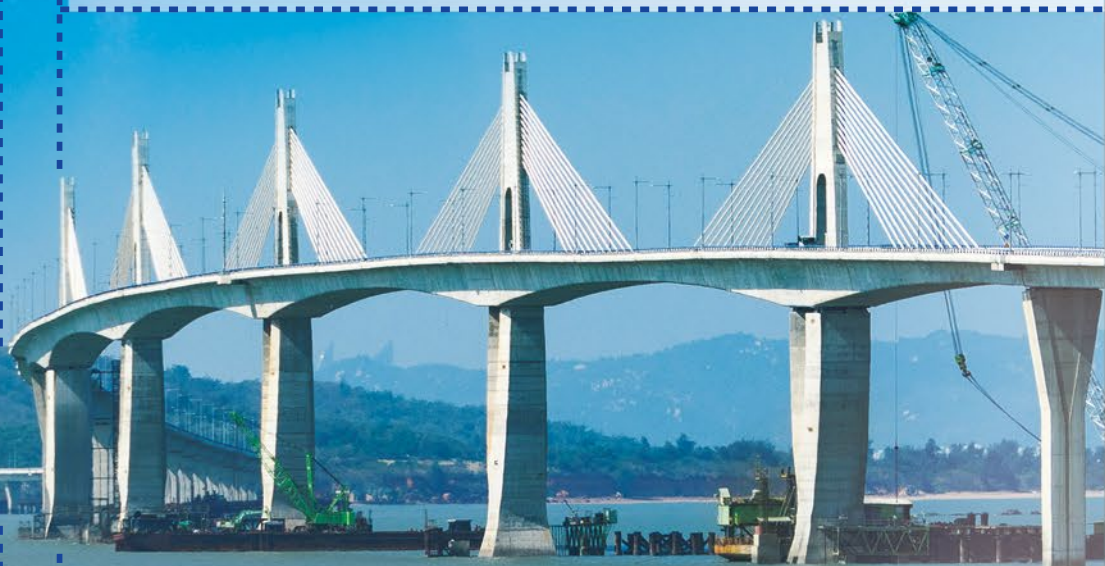
台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／資深協理／蔣啟恆 (Chiang, Chi-Heng) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／技術經理／陳明谷 (Chen, Ming-Ku) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／副理／吳弘明 (Wu, Hung-Ming) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／方俊華 (Fang, Chun-Hwa) ❺

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／許肇安 (Hsu, Chao-An) ❻



摘要

金門大橋跨越金門港道銜接大、小金門島，橋梁全長5.4公里，工址海域水深達23公尺，為台灣首座大規模跨海橋梁，工程設計、施工歷經約十三年完成，期間遭遇許多困難，台灣世曦集結各專業部門組成設計及監造團隊，將相關困難一一克服，獲得許多寶貴經驗。本文主要說明金門大橋工程內容及設計階段遭遇之挑戰及因應方案，也透過金門大橋設計及施工累積相關經驗，回饋至未來國內跨海橋梁(馬祖大橋)規劃設計之參考。



Perspectives of Cross-Sea Bridges in Taiwan Following the Completion of the Kinmen Bridge

Abstract

The Kinmen Bridge crosses the Kinmen Channel to connect the islands of Kinmen and Lieyu (the Little Kinmen). With a total length of 5.4 km, the maximum water depth at the site reaching 23 m, it is the first large-scale cross-sea bridge in Taiwan. The project required over 13 years for the completion of the design and construction stages, during which a number of challenges were encountered and successfully overcome. CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan, as the bridge design and construction supervision consultant, assembled a team which included professionals from various departments and disciplines to contend with these challenges in due order. This article describes the Kinmen Bridge project, discusses the problems encountered in its execution, as well as the solutions developed to successfully tackle them. Lastly, with the project now completed and a great deal of invaluable experience accumulated in the process, the perspectives of future Taiwan's cross-sea bridge design and construction (e.g., for the Matsu Bridge) are further examined in this article.

3

專題報導

壹、金門大橋工程概述

金門大橋工程範圍西起烈嶼（小金門）后頭地區、東迄金寧鄉湖下地區，路線全長5.414公里，其中約4.5公里位於海上，工程相關位置如圖1所示。

大；另於鑽孔柱狀圖亦可發現各深度的花崗岩風化程度變異性亦大(詳見圖3)，大幅提高本工程基礎施工困難度。



圖1 工程位置示意圖

一、工址地形及地質

本工程路線跨越金門港道，深槽區水深達23公尺，深槽區寬度約1,800公尺，詳見圖2。工址基盤為花崗岩，其上層為沖積層，依據補充鑽探成果顯示，於深槽區同一墩位布設2孔鑽孔，2孔間水平方向距離25公尺，岩盤深度差異竟達10公尺以上，顯示工址花崗岩層深度變化

二、平立面線型

本工程為跨海大橋，橋梁跨越金門港道銜接金門島與烈嶼島，為呼應本計畫「三分交通、七分觀光」的建設宗旨，路線平面線形於海上採三組半徑2,000公尺以上的反向圓曲線搭配緩和曲線設計而成，避免長直線的布設導致線形單調，提供用路人動態視覺感受，也可有

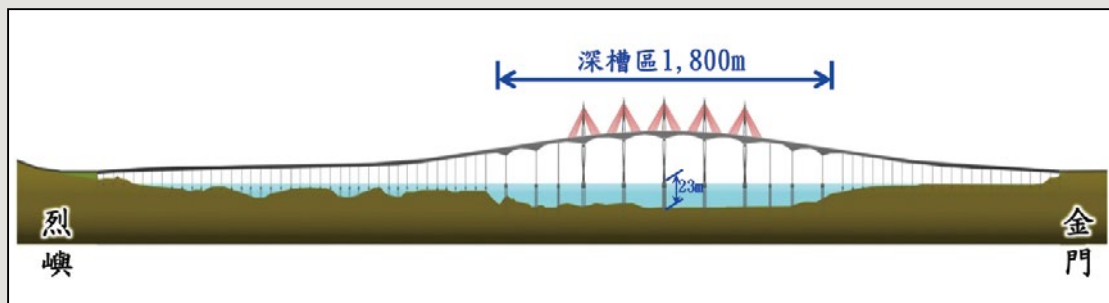


圖2 水深地形圖

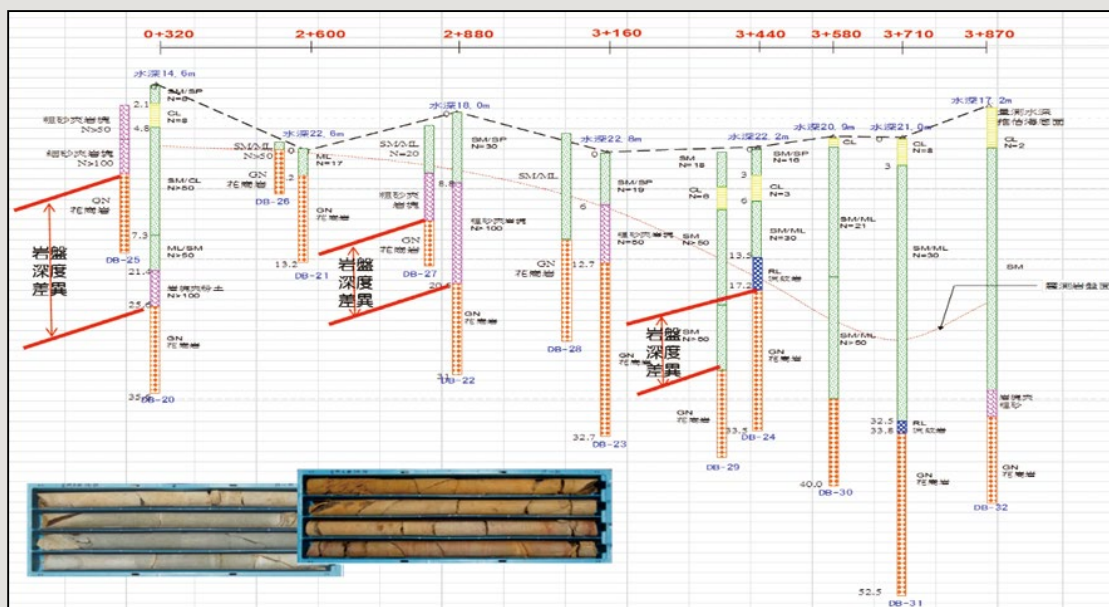


圖3 岩盤深度及風化程度差異

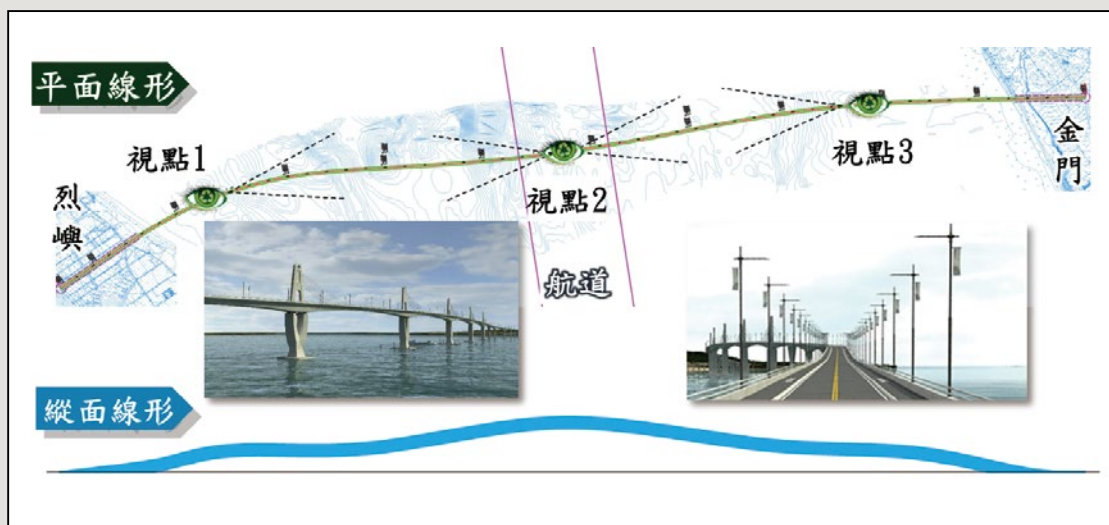


圖4 平立面線型規劃示意圖

效避免東西向道路長時間受日照眩光的影響。路線縱面設計考量二次爬升，兼顧經濟性與金門港道航道淨高需求、陸域地形的順暢銜接、橋梁之景觀性及排水、既有道路的跨越、橋頭兩端都市計畫的整體發展等，詳見圖4。

三、斷面配置

橋梁全寬15公尺，完工初期配置雙向各1車道及人行/自行車道，若後續交通量增加時，可將人行/自行車道改採吊掛於懸臂橋面板下方，橋面調整為雙向各2車道，詳見圖5，結構設計已預留考量相關吊掛載重。

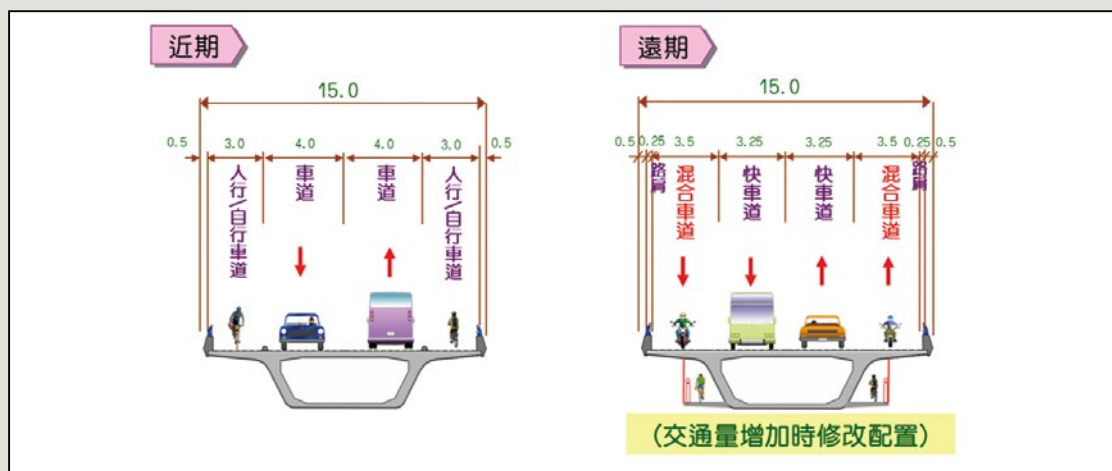


圖5 斷面配置考量

四、橋梁配置

橋梁型式考量位於海域之位置區分為主橋段、邊橋段及引橋段(詳圖6)，依據沿線各路段環境特性、施工條件、工期及工程經費等因素，分段說明如下：

配合5000GT客貨輪航道寬度需求，及考量深槽急流區域施工之困難度，儘量減少於深水區域內落墩原則，採用大跨徑預力混凝土箱型梁脊背橋型式，須搭配懸臂工法施工。

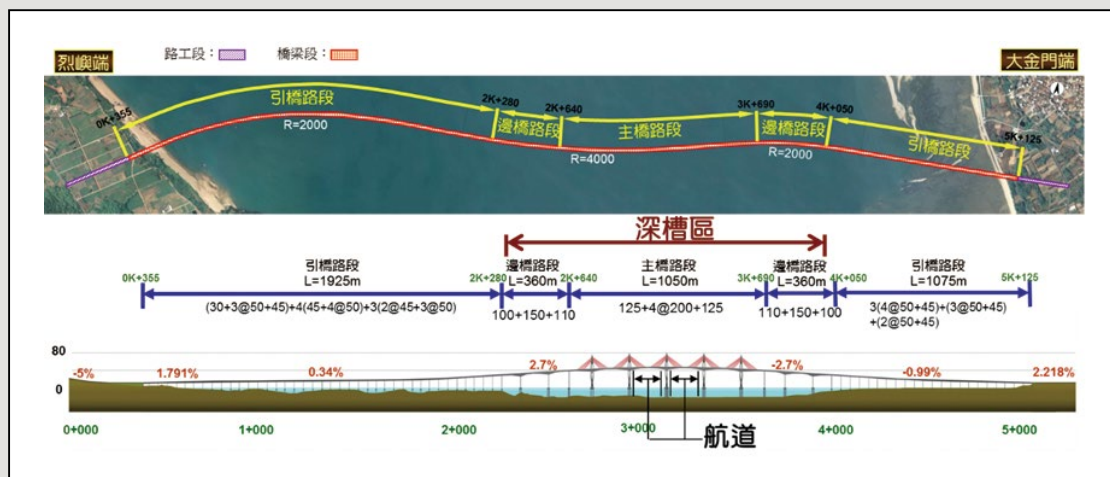


圖6 橋梁平、立面圖

(一) 主橋段

主橋段主要跨越通航航道及深槽區海域，主橋橋梁型式除考量航道淨寬及淨高需求外，尚須考量塑造金門地區另一新的優美地標，提昇金門之觀光資源，且須考量施工性、經濟性、景觀性、管養維護難易度等因素。主橋段

(二) 邊橋段

邊橋位於主橋兩側各一橋單元，金門端邊橋與烈嶼端邊橋皆位於深槽區，考量主橋跨徑之銜接及海上基礎施工的困難性，採大跨徑橋型配置，延伸主橋之超大跨徑及銜接引橋之中長跨徑，使橋梁跨徑由大而中到小漸進優美的

變化。考量跨徑需求及施工性，採主跨徑為150公尺之懸臂工法預力箱型梁橋，橋墩採矩形單柱式橋墩。

(三) 引橋段

引橋段為銜接海上橋梁至陸域引道，金門端引橋位於淺灘區中潮位水深約2公尺，烈嶼端引橋位於礁岩區水深約2~13公尺，考量經濟性及施工性，採用中跨徑預力混凝土箱型梁橋，配合支撐先進工法施工，橋墩採矩形單柱式橋墩。

五、橋梁基礎

本工程橋梁基礎型式之選擇，除考量地形、地質狀況、水位、施工條件、施工環境、荷重條件、基礎特性及經濟性等研擬適用之基礎型式，尚需考量海上施工安全。

跨海橋梁基礎依施工、結構方式不同，可分為樁基礎、沉箱基礎、鋼管板樁井筒基礎等類型，本工程針對各基礎型式評估比較，主要考量如下，沉箱基礎由於工址岩盤深度差異大穩定性不佳，深水作業施工較危險；鋼管板樁井筒式則考量基礎板樁需打設入岩，施工困難且風險高，以樁基礎之基礎型式無需深水作業，易因應地盤變化為主要考量，詳如圖7。

貳、金門大橋執行遭遇之挑戰及解決方案

金門大橋為國內首座大規模跨海橋，且為國內首次於深水區域花崗岩地質施作基樁，故於計畫初期綜合規劃階段實無可供參考的國內工程案例，故工程造價評估實無合適的單價可供參考，僅能採國內陸域施工的類似橋型造價適當加成，造成完成細部設計後依實際數量、施工規劃及訪價結果所得的工程經費大增，須配合變更建設計畫甚至調整原工程設計內容，以符合匡列之經費需求，故工程經費之掌握為金門大橋執行過程遭遇之最大挑戰。

金門大橋主橋標CJ02標完成設計後，經過3次公開招標均無廠商投標而流標，經綜合檢討流標原因主要係預算金額偏低，及廠商對於現行法令有關海上施工船機是否可由大陸引進之規定不甚明確，難以估算投標金額等，設計團隊配合業主召開多次檢討會議，評估各種經費減省之可行性及因應措施，討論後相關因應對策如下：

- 一、提高預算金額，將部分間接工程費、配合費及結餘款納入發包工程費使用。
- 二、以不影響橋梁安全及通車為前提，減作及變更部分工作項目。

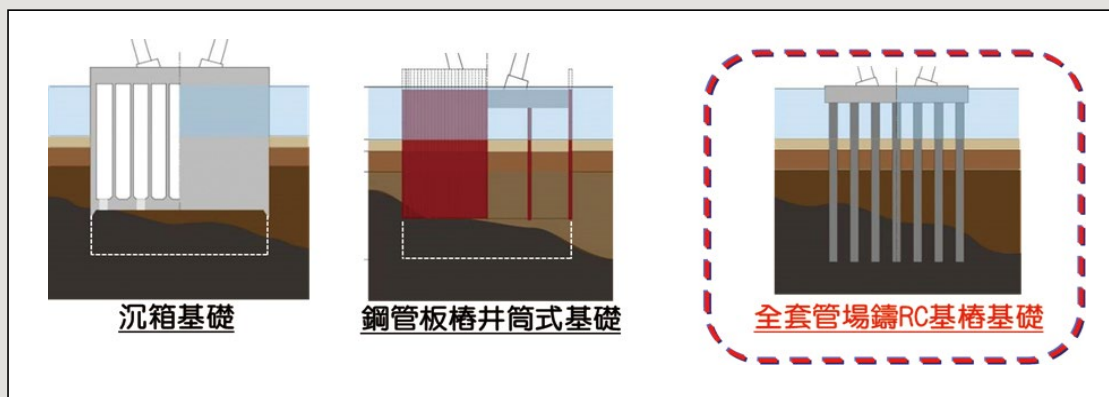


圖7 基礎型式示意圖

三、縮減橋寬與變更橋梁配置以減少工程經費。

四、配合交通部召開部會會議，同意本工程可專案許可引進大陸海上工作船。

其中主要之設計變更項目為橋面寬度由16公尺縮減至15公尺(詳見圖8)，橋面採雙向四車道配置時，快車道寬度由3.5公尺調整為3.25公尺，路肩由0.5公尺調整為0.25公尺，仍符合「市區道路及附屬工程設計規範」相關要求；另有關橋梁配置變更，主橋段主跨徑由280公尺縮減至200公尺，取消主跨間原設計80公尺長鋼箱梁段，另配合海域深槽區範圍縮短主橋兩側邊橋段橋長納入引橋段，改採中小跨徑配置(詳見圖9)。

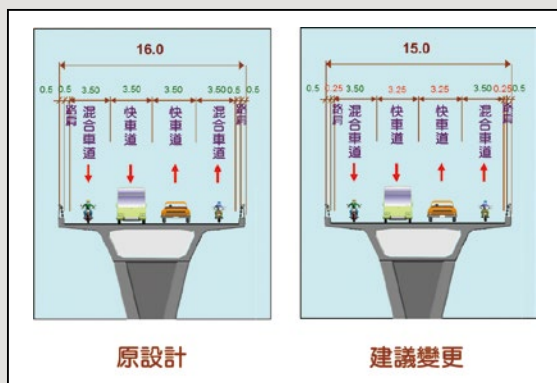


圖8 橋寬縮減1公尺車道配置示意圖

另，亦積極評估考量橋梁上構開放替代工法提高優質廠商投標意願，本工程橋梁施工規劃，考量工程經費受限且於設計階段尚無法明確提供預鑄場地，故橋梁規劃採場鑄施工方式，惟另考量工址海、氣象條件嚴苛，為提高優質廠商投標意願並降低施工風險，開放未來廠商得改採預鑄施工方式，故將廠商可於得標後提出替代工法納入招標文件，明確規定廠商提出替代方案之時限、範圍、程序及注意事項等相關規定，相關設計調整後工程方得順利決標。

參、回饋至未來跨海大橋設計應注意事項

依金門大橋設計及施工經驗，跨海大橋工程主要關鍵在於基礎施工，其中施工規劃及船機動員更是成敗關鍵，鑒於金門大橋於設計階段對於海事工程經費、船機設備需求及工率等掌握度因國內案例及規劃設計經驗不足，而致發包、施工等過程遭遇許多挑戰，未來辦理相關工程時，建議應針對下列幾點特別納入考量，以使跨海大橋規劃設計成果更趨完整。

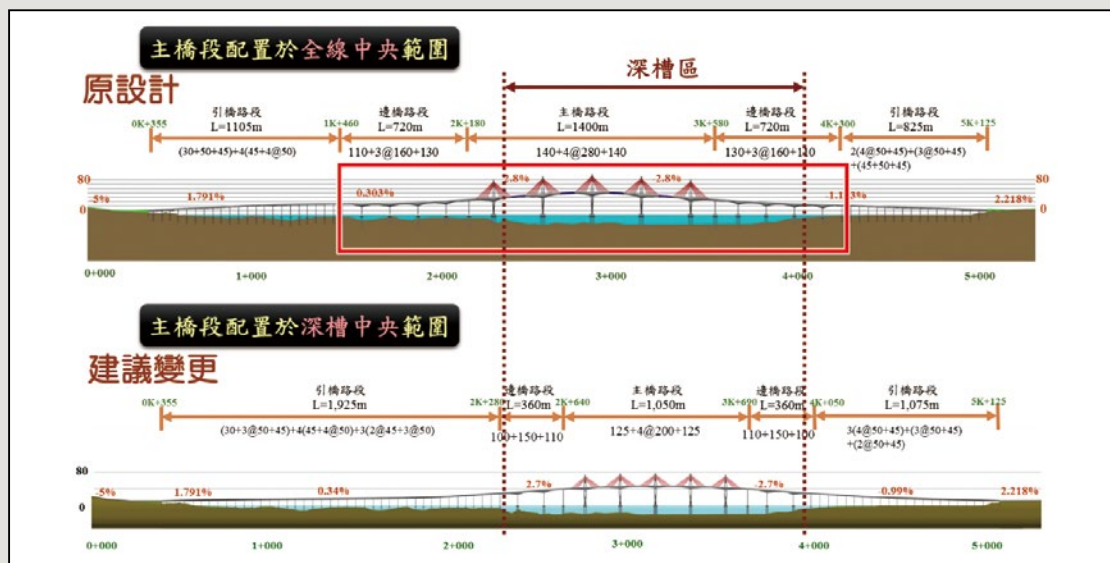


圖9 橋梁配置變更示意圖

一、工程經費與工期之合理評估

跨海大橋之工程經費與工期受水深、海象及地質條件影響甚鉅，欲合理評估工程經費、工期，建議仍需蒐集參考相近水深規模及地質條件之工程案例，初步設計分析基礎尺寸及估算工程量體，透過進一步工、料、船機設備及工期分析，並取得國內外具相關經驗廠商之報價，則可獲得更準確的估算結果。

二、基礎施工作業面規劃

依金門大橋經驗，基礎施工平台可採用海上施工構台型式或採頂昇式平台船型式(如圖10)，各有其適用性及優缺點，海上施工構台利用打設完成之基樁外套鋼管互相平聯，形成完整而牢固之海上作業平台，其優點為穩定性與安全性高，不受海面風浪影響，但設置耗時且成本高。頂昇式平台船以棒錨將平台船定位於墩位上，配合導向樣架施作基樁，優點為施工

作業面設置快速，但仍易受海面波浪影響。故工程規劃設計階段，應詳實掌握工址條件及施工機具需求，研擬適用之型式。

三、船機能量及動員之掌握

跨海大橋施工主要船機包括起重船(浮吊船)、頂昇式平台船、預拌船、拖船等(如圖11)，船機動員能力為海事工程施工成敗之重要關鍵，近年因各國離岸風電的蓬勃發展，且全世界大型施工船機數量有限，船機預訂期常需數月甚達數年以上，船機費用也占整體工程經費相當程度的比重，規劃設計應納入考量。

四、施工整備場地及碼頭之配合

海上施工應考量減少現場作業需求，朝向構件預製化、預組化，將小構件於陸域預組裝後，利用大型船機運輸及安裝，以縮減海上作業時間，故建議應於工址附近規劃合適作業場



海上施工構台



頂昇式平台船

圖10 金門大橋基礎施工作業面型式



圖11 海事工程主要施工船機



圖12 金門大橋施工整備場地、施工便橋及碼頭

地，一般於工址附近岸域尋找足夠開闢場地做為施工整備場地，並搭配施工碼頭提供人員及物料上下船隻使用，圖12為金門大橋岸域整備場地、施工便橋及碼頭照片。

肆、國內近期跨海大橋工程(馬祖大橋)規劃考量

繼金門大橋工程之後，國內近期最具指標的跨海大橋為銜接南、北竿島的馬祖大橋，馬祖大橋綜合規劃案由本公司辦理，相關規劃成果亦納入金門大橋工程寶貴的經驗，針對各重要面向之規劃考量進行說明如下：

一、路廊研選

南、北竿島間海域自然環境複雜，包括水深、海底地質、海(潮)流、波浪、氣象等施工環境及工程條件險峻，工程技術極具挑戰性。馬祖大橋在綜規階段，首先利用水深測量獲得工址海域水深資料，作為路線規劃之重要依據；另藉由海床震測調查，廣泛性瞭解海床岩層分布情形，並配合辦理海域鑽探，近一步比對確認海床震測結果判視之準確性，並瞭解工址岩性風化程度。經水深測量結果，南、北竿之間海域大部分水深介於20-60公尺，其中海域東北側之深槽區水深達60公尺，深槽區南緣有一南北長約700公尺之海中平台，水深僅約30公尺，詳圖13；而震測調查成果，則顯示馬祖大橋工址海域大部分覆土甚淺(小於5公尺)，僅部分範圍覆土層較厚(最深約23公尺)，岩層深度則約略位於覆土層下方，詳圖14及圖15。經震測及鑽探結果交互比對，震測顯示之覆土層為W3高度風化程度以上之地層，其下則為風化程度較低之W2岩層，可做為基樁承載層使用。綜合考量整體路線平均水深、地質條件等因素，最終路線獲核定採行經海中平台之路線，平均水深較淺工程經費及施工風險應較低，惟路線仍須行

經水深約60公尺之深槽區長度約600公尺，後續橋梁基礎型式及施工規劃為重要課題。

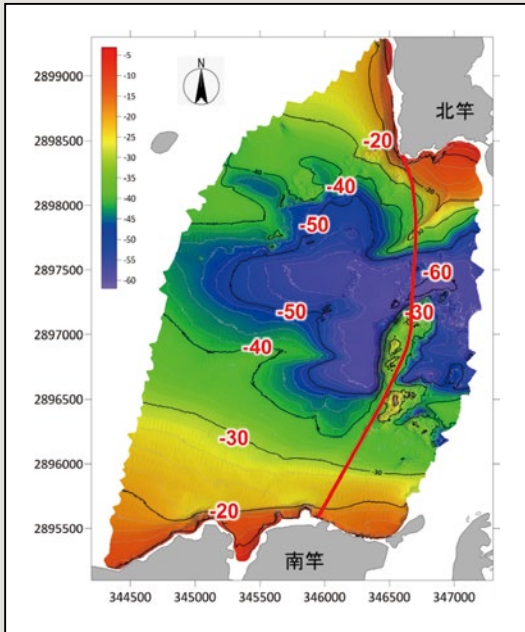


圖13 南、北竿之間海域水深測量結果

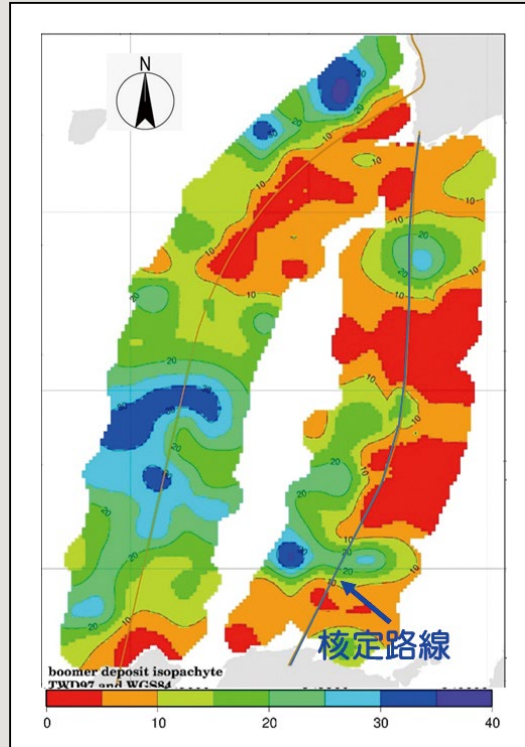


圖15馬祖大橋計畫路線覆土層深度圖

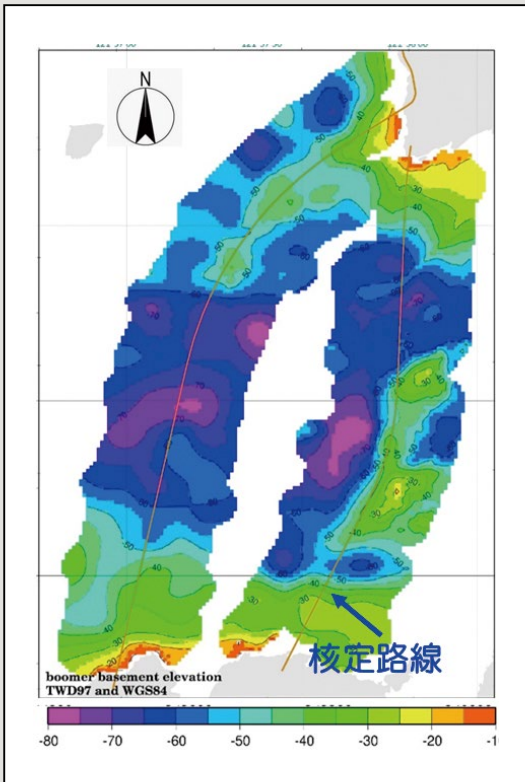


圖14 馬祖大橋計畫路線岩盤深度圖

二、橋梁及基礎型式

馬祖大橋橋址鄰近南、北竿機場，結構高度受機場航道限制，為確保北竿機場未來提升等級後之飛航安全，無法採用斜張橋或吊橋型式直接跨越600公尺長之深槽區，僅能採大跨徑梁橋，儘可能減少深槽區之落墩數。惟落墩於60公尺水深之基礎工程，在全球跨海大橋中亦非常罕見，經規劃團隊案例蒐集，主要可分別參考較早期之日本明石海峽大橋、希臘雅典的Rion Antirion橋，與近期中國大陸的平潭公鐵大橋(詳如圖16)，依案例整理資料顯示詳如表1。明石海峽大橋與Rion Antirion橋地形地質屬於較為平坦的沉積岩或軟弱土層；平潭公鐵大橋則與馬祖大橋條件較為相似，工址基盤屬於岩位變異性大之花崗岩。綜合考量地形地質條件、施工性、工程費等因素，評估採用樁基礎較易因應地形地質變化，且採基樁施工可大幅減少水下作業需求，降低施工風險，故初步研擬採用大口徑基樁做為本工程基礎型式。



日本明石海峽大橋



希臘Rion Antirion Bridge



中國大陸平潭公鐵大橋

圖16 國外大水深(>30m)橋梁案例

表1 國外大水深(>30m)橋梁案例資料

項次	橋梁名稱	橋型	水深	地質條件	基礎型式
1	明石海峽大橋 日本,1998	吊橋 (最大跨徑1992m)	30~50m	P2:砂礫層 P3:泥岩、砂岩互層	鋼殼沉箱
2	Rion Antirion Bridge 希臘,2004	斜張橋 (最大跨徑560m)	40~65m	軟弱土層厚,無入岩	重力式沉箱 (配合地改)
3	平潭公鐵大橋 中國,2019	斜張橋 (最大跨徑532m)	45m	基盤為花崗岩	5m鑽孔樁

另，配合工址自然環境條件，建置橋梁分析模型，擬訂結構尺寸，以掌握基樁結構及承載力需求，訂定基樁樁徑、入海床深度等，據以評估合理施工規劃及經費。

三、海中基礎施工規劃

參考中國大陸平潭公鐵大橋及甬舟大橋基樁施工規劃，考量降低海、氣象對於施工的影響，並提供足夠的作業空間，基礎施工配合設置施工構台，因工址水深達60公尺，施工構台構築期間的穩定性亦需納入考量，另配合運輸及吊裝能量需求，初步規劃將整體構台切割為數個單元，於陸域先行預組各構台單元後，配合大型浮吊船運輸至墩位處沉放、組裝。平潭公鐵大橋構台現場施工照片如圖17；本工程主橋橋墩之施工構台預計搭配起重能力2,000噸級以上浮吊船及載重能力2,000噸級平台船(長度約100公尺)，構台切分為四個單元進行運輸及安裝，如圖18。另外，於40公尺以內水深墩位，則可參考金門大橋採用頂昇式平台船取代施工構台，提升施工機動性。



圖17 平潭大橋施工構台單元運輸及安裝過程

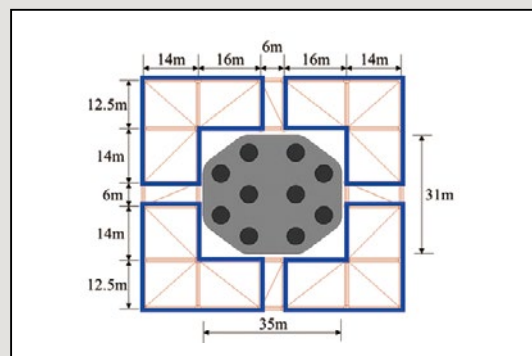


圖18 馬祖大橋主橋橋墩施工構台單元示意圖

有關全套管基樁施工規劃，原則上可參考金門大橋工程，惟本工程因水深較深，為提供

基樁穩定性及減少樁數，規劃採用4.5公尺大口徑基樁，相關船機設備能量須特別考量，如起重船、混凝土拌合船、基樁鑽掘設備等，初步評估外套鋼管於岸域整支完成加工後，需配合大型浮吊船及大能量震動樁錘打入海床；於大口徑基樁鑽掘機，初步掌握來源可採中國研發之KTY5000/KTY7000 RCD鑽掘機(Dmax=6.3m)、韓國SAMBOCMC鑽掘機(Dmax=7.5m)及英國LDD

鑽掘機(Dmax =8.0m)等。而基樁混凝土單次最大連續澆置數量約為1,350方，規劃採1,500方以上規模之拌合船供料，建議亦另設置1艘做為備用拌合船，以避免因意外狀況產生斷樁情形。綜合前述船機需求，本計畫團隊盤點目前全球可用之浮吊船(吊重大於2400噸)及頂升式平台船(適用水深40公尺以上)數量，詳如表2及表3。

表2 全球浮吊船(吊重>2400噸)彙整表

船機名稱	國家	吊車
Oroion	--	5,000
SEVEN BOREALIS	賽普勒斯(Cyprus)	5,000
OLEG STRASHNOV	巴哈馬 (Bahamas)	5,000
Aegir	巴哈馬 (Bahamas)	4,000
Swiber Kaizen4000	巴哈馬 (Bahamas)	3,800
Derrick Barge 50	巴哈馬 (Bahamas)	4,400
SAPURA 3500	巴哈馬 (Bahamas)	3,500
BOKALIFT 1	賽普勒斯(Cyprus)	3,000
LEWEK Constellation	巴哈馬 (Bahamas)	3,000
Swiber PJW 3000	巴哈馬 (Bahamas)	3,000
SAURA 3000	馬來西亞 (Malaysia)	3,000
Stanislav Yudin	賽普勒斯(Cyprus)	2,500
Saipem 3000	巴哈馬 (Bahamas)	2,400

表3 全球頂升式平台船(適用水深>40公尺)彙整表

船機名稱	國家	船機類型	適用水深
Apollo	盧森堡 (Luxembourg)	動力式	106.8
Seajacks Levathan	巴拿馬 (Panama)	無動力式	80.0
Pacific Osprey	賽普勒斯 (Cyprus)	動力式	70.0
Innovation	德國 (Germany)	無動力式	65.0
Seajacks Scylla	巴拿馬 (Panama)	無動力式	65.0
Blue Tern	馬爾他 (Malta)	無動力式	65.0
GMS Endeavour	巴拿馬 (Panama)	無動力式	65.0
Bold Tern	馬爾他 (Malta)	無動力式	60.0
Pacific Orca	賽普勒斯 (Cyprus)	動力式	60.0
SEA CHALLENGER	丹麥 (Denmark)	無動力式	55.0
Brave Tern	馬爾他 (Malta)	無動力式	55.0
Seajacks Zaratan	巴拿馬 (Panama)	無動力式	55.0
SEA INSTALLER	丹麥 (Denmark)	無動力式	55.0
Neptune	盧森堡 (Luxembourg)	無動力式	50.0
Vole au vent	盧森堡 (Luxembourg)	無動力式	50.0
TUO PENG	中國 (China)	無動力式	45.0
JB 118	中國 (China)	無動力式	45.0

除了前述施工船機設備需求外，施工整備場地對於工程的進行及工程經費亦有很大的影響，故在規劃設計階段，針對工址附近可用的整備場地予以盤點，並納入經費評估考量。南、北竿兩島係由火成岩形成之丘陵地形，既有碼頭後線腹地非常有限且狹小，故本計畫積極蒐集南、北竿兩島適用之沙岸、白沙港及福澳港周邊腹地，另亦考量工期相近之北竿機場跑道改善計畫，未來施工期間機場停車場時空間可否提供作為兩計畫共用之整備場地，透過與縣政府或民航局等機關多次研商討論，期能明確掌握未來可用之施工整備場地資源；而在工程經費編列上，則採用已初步獲得縣府同意，整體掌握度較高之方案-由縣府提供白沙港、福澳港部分碼頭及碼頭腹地，並由本工程於碼頭近岸施作海上構台以补足整備場地之需求，如圖19。

四、工程經費評估

跨海橋梁工程基礎型式為經費估算之重要項目，而海域基樁工程造價與水深有極大的相關性，故本計畫依水深規模將海域基樁工程經費區分為三段，分別參考相似工程案例進行評估，詳如表4。

橋梁之橋墩、上部結構造價受工址水深之影響較小，則參採金門大橋及中油三接棧橋國內已發包施工的案例進行評估。另外，考量工址環境條件複雜及海域施工風險高，故於相關補充調查費用、安衛費用及工程管理費等，也須特別考量提高。



圖 19 白沙港及福澳港施工整備場地利用示意圖

表 4 馬祖大橋基礎造價考量

墩位水深	造價評估考量
小於30公尺	小於30公尺水深之橋段，經評估應與金門大橋、中油三接棧橋之施工條件相似，經費可參考金門大橋及中油三接棧橋造價。
30~40公尺	此路段已大於金門大橋水深，相關環境條件與中國大陸的平潭公鐵大橋及甬舟大橋較為相似，故參考其基樁施工造價，並考量調整為台灣的人工及物價水準，另亦考量需配合動員引進基礎施工國外船機，相關需求皆納入考量。
60公尺	此超大水深路段，施工環境條件與中國大陸的甬舟大橋較為相似，故參考其造價，並考量調整為台灣的人、機、料物價水準，另亦考量動員引進基礎施工國外船機需求。

結語

金門大橋自民國99年開始設計工作，同年工程開工，歷經三個施工廠商，並辦理四次設計計畫變更，工程執行期間歷經眾多困難、嘗試、調整，終於於民國111年10月完工通車。期間感謝施義芳董事長，在工程遭遇困難時，常親臨工程現場掌握狀況，給予團隊最大的支持，及同仁實質的照顧，讓第一線同仁無後顧之憂，更讓金門大橋團隊能秉持鍥而不捨的精神，完成此指標性工作。

透過本工程執行，台灣世曦累積了豐厚的經驗與信心，建立台灣本土化之跨海橋梁造價資料，可供後續相關海事橋梁工程經費評估參考使用，亦對於後續跨海橋梁之規劃設計工作，更能掌握關鍵項目，提昇國內海上橋梁工程的設計及施工技術水準。



橋梁水下檢測 作業之國外回 顧與國內展望

關鍵詞(Key Words)：橋梁水下檢測(Bridge Underwater Inspection)、檢測類別(Type of Inspection)、檢測頻率(Frequency of Inspection)、橋梁水下檢測潛水員(Underwater Bridge Inspection Diver)、潛水檢測(Diving Inspection)、涉水檢測(Wading Inspection)、水下構件(Underwater Element)、儀器檢測(Instrumentation Inspection)、水下無人載具(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)

新中光物理探測公司／顧問／王鶴翔 (Wang, Helsin) ❶

國立中央大學／土木工程學系／教授／王仲宇 (Wang, Chung-Yue) ❷

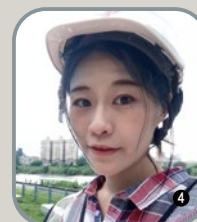
財團法人中華顧問工程司／設施技術中心／主任／蔡欣局 (Tsai, Hsin-Chu) ❸

財團法人中華顧問工程司／設施技術中心／工程師／周姿良 (Chou, Tzu-Liang) ❹



摘要

地震、洪水、沖刷、超載、腐蝕劣化作用所造成橋梁水下構件的損傷，其檢測與診斷素為國內外橋梁維護管理重點關注議題。本文彙整十三個國家的橋梁水下檢測制度，綜述各國橋梁水下檢測作業的檢測週期、檢測定位、檢測目的、檢測人員，以及相關配合儀器/設備等，其中特別詳述美國橋梁水下檢測之檢測人員資格與訓練認證、檢測項目、檢測對象、檢測週期、檢測等級、檢測類別等，說明傳統潛水檢測與儀器檢測共存的必要性，概述水下儀器檢測的三大類型，以及現有常用的定點式沖刷量測技術介紹，並回述臺灣現有橋梁水下檢測作業之相關規範與執行現況，針對國內橋梁水下檢測特性與需求，綜合梳理國內橋梁水下檢測未來努力發展的方向。



Foreign Review and Future Development in Taiwan for Bridge Underwater Inspection

Abstract

Earthquake, flood, scour, overloading, and corrosion deterioration cause severe damages on bridge underwater components. Its inspection and diagnosis have always been key concerns for bridge maintenance and management worldwide. This article summarizes the bridge underwater inspection systems in thirteen countries. The relevant description covers the inspection period, inspection position, inspection purpose, inspection personnel, and supporting instruments/equipment associated with bridge underwater inspection operations in various countries. Especially, more details of bridge underwater inspection involve the personnel qualification, training certification, inspection items, inspection objects, inspection period, inspection level, and inspection type developed in the United States. Moreover, this paper indicates the necessity of coexistence between traditional diving inspection and instrumentation inspection, an overview of three types of in-service underwater instruments, and a brief introduction on the commonly-used fixed-position scour measurement technology. This article also reviews the relevant specifications and implementation conditions on bridge underwater inspection operations in Taiwan. In response to the characteristics and needs of bridge underwater inspection, comprehensive opinions point out the future development direction and efforts on bridge underwater inspection in Taiwan.

壹、前言

交通部委託國立中央大學橋梁工程研究中心發展臺灣地區橋梁管理系統(Taiwan Bridge Management System, TBMS)，該系統於2000年底建置上線，提供作為全國各單位統一使用之橋梁管理系統，同時進行全國性橋梁普查，調查相關橋梁基本資料，並進行全面性之橋梁目視檢測評估，該次所有調查資料均輸入臺灣地區橋梁管理系統之中，2015年起啟動第二代「臺灣地區橋梁管理資訊系統」(TBMS2)。後續依交通部頒訂公路養護規範之規定[1]，原則上，橋梁管理機關每兩年進行一次橋梁目視檢測(Bridge Visual Inspection)，各橋管機關可視實際狀況需要延至四年，並將目視檢測結果登載於管理系統內，目前已有2萬8千餘座橋梁登錄於該系統中[2]。

橋梁水下結構劣化(Deterioration)狀態，以及周遭環境檢測(Inspection)與健康監測(Health Monitoring)，素為國內外橋梁防災工作所須突破之重點，亦以氣候變遷(Climate Change)肇致破壞力極大的天然災害(Natural Disaster)，外部荷載作用(External Loading)常超越當初設計規範值，均將加速橋梁結構劣化的速率，以致橋梁需要更經常性的檢測與維修(Maintenance)，方才確保橋梁的安全性(Safety)、服務性(Serviceability)，以及使用性能(Performance)。

美國聯邦公路總署(Federal Highway Administration, FHWA)編訂的橋梁檢測手冊[3, 4]，以及國內交通部頒訂的橋梁檢測相關規範中[5-7]，有關橋梁下部結構(Substructure)、水道(Waterway)，以及周遭環境等要項，包括河道變遷(Channel Migration)、引道(Approach)路堤與基礎(Foundation)處的冲刷(Scour)、下部結構保護設施(Protection Works)諸類檢測，無論是定性描述(Qualitative Description)或定量量測(Quantitative Measurement)，均涉及橋梁水下檢

測(Bridge Underwater Inspection)的範疇，對保障既有跨水橋梁(Overwater Bridge)的安全性，橋梁水下檢測作業有其不可或缺的地位。

國外橋梁破壞(Bridge Failure)相關案例研究顯示：(1)尤以自然災害的洪水(Flood)與冲刷相關兩項，即佔橋梁破壞因素的比重將近半數(47%)[8, 9]；(2)自然災害衍生的土石流(Debris Flow)或漂流木(Drifting Woods)對橋梁下部結構的磨蝕(Abrasion)與衝擊(Impact)，以及船隻或車輛因人為失誤對橋梁下部結構的事故撞擊(Accident Collision)，均會嚴重折損橋梁結構安全性[9]，成為橋梁破壞因素的次因；(3)對於跨水、感潮河段(Tidal Reach River)或跨海(Oversea)橋梁，其下部結構的混凝土(Concrete)破損(Fracture)或裂縫(Crack)，均極易誘發既有橋墩(Pier)內部的鋼筋銹蝕(Reinforcement Corrosion)，亦成為橋梁破壞的其它因素之一[9]。

國內重要橋梁因冲刷倒塌災害案例，例如：2000年碧利斯颱風造成高屏大橋斷橋事件，2001年桃芝颱風引發的臺中東門橋坍塌事件，2006年豪雨造成蘭勢大橋橋墩陷落，2008年辛樂克颱風洪水冲塌后豐大橋，2009年莫拉克颱風冲斷雙園大橋等，均造成人員傷亡與財產損失，均顯示橋梁水下檢測確有其迫切性與必要性。

貳、國外水下檢測概述

各國橋梁檢測在既有運作體制、執行人力(Manpower)、經費配置(Budget Allocation)、既有技術等限制下，發展其橋梁檢測制度(Bridge Inspection System)，以維護橋梁的安全性、服務性，以及使用性能，雖各國橋梁檢測制度有其個別的考量而不盡相同，但以管窺豹仍有益於我國相關橋梁維護單位或橋梁監理，不斷地改進現有橋梁檢測制度，並完善實際橋梁檢測運

作，以確保橋梁檢測的質量控制(Quality Control, QC)/質量查證(Quality Assurance, QA)的高度準確性與一致性。

本研究檢視美國、挪威、丹麥、瑞典、芬蘭、德國、法國、英國、澳洲、紐西蘭、日本、加拿大、中國大陸等十三國的橋梁檢測制度[3, 4, 10-25]，了解各國對於橋梁水下檢測的定位；綜合前開十三國的橋梁檢測制度，各國橋梁水下檢測的檢測週期(Inspection Period)、執行方式(Operation Approach)與說明彙整於表1，其中可知多數設定檢測週期的國家，大致每5或6年進行一次獨立的或附隨的橋梁水下檢測，而澳洲與加拿大分別可達8年與10年之久，概與其國家所處環境或位居乾燥少雨，或地處水淺少雨有關，故而採長週期檢測；其他部分國家則依構件評分狀況(Structural Rating)、特殊狀況(例如：洪水、沖刷、撞擊等重大意外事件)等需求，由法定(Legal)/契約(Contract)檢測負責人決定執行橋梁水下檢測的檢測週期或時機。橋梁水下檢測所採用之執行方式：除英國將潛水檢測(Diving Inspection)與涉水檢測(Wading Inspection)均納入橋梁水下檢測之外，其餘國家僅將潛水檢測劃定

為橋梁水下檢測範疇，涉水檢測則歸屬常規目視檢測方式之範疇。其餘說明詳見本文第叁節國外橋梁水下檢測作業的說明。

國外橋梁水下檢測的定位歸屬檢測類別摘述如表2所示[3, 4, 10-25]，大致可劃屬四種檢測類別(Type of Inspection)：美國、芬蘭、法國、加拿大等國將橋梁水下檢測定位為獨立的檢測類別，與水面以上的常規橋梁檢測具有同等橋檢位階；挪威、瑞典、德國、澳洲等國則將水下檢測列為主要檢測(Major Inspection)選項之一；丹麥、英國、中國大陸等國將水下檢測列為特別檢測(Special Inspection)選項之一；澳洲、紐西蘭、日本等國將水下檢測列為詳細檢測(Detailed Inspection)選項之一。

水下檢測在各國橋梁檢測制度的定位不同，故對水下檢測的執行強度(Operation Intensity)、人力需求、訓練要求(Training Requirement)、經費配置、裝備發展(Equipment Development)、檢測技術(Inspection Technique)等面向均有差異，不可全盤接納，需妥為參考引用。

表1 國外橋梁水下檢測週期一覽表(綜合[3, 4, 10-25])

國家	檢測週期	執行方式	說明
美國	60個月	潛水	獨立檢測，可報請聯邦公路總署批准，最高可延長至72個月
挪威	未設定	潛水	主要檢測的獨立檢測
丹麥	不設定	潛水	區域橋梁檢測員選擇橋梁和檢測週期
瑞典	6年	潛水	附隨主要檢測進行，授權檢測隊決定河道剖面檢測與否
芬蘭	5年	潛水	獨立檢測，分區橋梁工程師排程
德國	6年	潛水	附隨主要檢測進行
法國	6年	潛水	獨立檢測，另視需要進行水下調查
英國	不設定	潛水/涉水	特別檢測選項之一，承包商結構經理設定不同的檢測週期
澳洲	視構件狀況設 不同檢測頻率/ 不設定	潛水	各州自行制定檢測規定，昆士蘭州屬橋梁狀況檢測選項之一，依構件評等狀況給定1或8年不等的檢測週期，或列為詳細結構工程檢測選項之一；維多利亞州屬詳細工程調查選項之一
紐西蘭	6年	潛水	附隨詳細檢測進行，特殊狀況按橋梁檢測工程師指示進行檢測
日本	5年	潛水	附隨定期檢測層級下的詳細檢測進行
加拿大	60-120個月	潛水	各省自行制定檢測規定，近似獨立檢測
中國大陸	3-5年	潛水	特別檢測選項之一

表2 國外橋梁水下檢測定位歸屬檢測類別一覽表(綜合[3, 4, 10-25])

歸屬檢測類別	國 家
獨立的水下檢測	美國、芬蘭、法國、加拿大 §
主要檢測	挪威、瑞典、德國、澳洲*
特別檢測	丹麥†、英國、中國大陸
詳細檢測	澳洲*、紐西蘭、日本‡
備註： § 加拿大聯邦由各省運輸單位制定相關橋梁檢測規定，亞伯達省不將水下檢測納為常規檢測；安大略省雖將水下檢測列於專業檢測(Specialized Inspection)選項之一，但又允許獨立看待；魁北克省將水下檢測列為獨立的檢測類別。 * 澳洲聯邦由各州運輸單位制定相關橋梁檢測規定，昆士蘭州將水下檢測列為橋梁狀況檢測(Bridge Condition Inspection)，以及詳細結構工程檢測(Detailed Structural Engineering Inspection)選項之一；維多利亞州將水下檢測列為詳細工程調查(Detailed Engineering Investigation)選項之一。 † 丹麥對水下檢測並無特別規定，由區域橋梁檢測員(Region Bridge Inspector)決定施作時機。 ‡ 日本將水下檢測列為定期檢測(Routine Inspection)層級下的詳細檢測選項之一。	

參、國外橋梁水下檢測作業

因美國橋梁水下檢測制度發展已逾40年，橋梁檢測制度相對完善，亦以相關研究報告眾多，以及各州編訂更詳細的橋梁檢測手冊，擬單獨置於第肆節美國橋梁水下檢測作業中說明，本節僅就挪威、丹麥、瑞典、芬蘭、德國、法國、英國、澳洲、紐西蘭、日本、加拿大、中國大陸等12國家的橋梁水下檢測作業，就其檢測目的、檢測週期、執行檢測人員，以及相關配合儀器/設備等方面加以彙整說明如下各次節。

一、挪威

挪威公共道路總署(Norwegian Public Roads Administration; Statens vegvesen)設有中央辦公室，5個地區(Region)，以及30個分區(District)，採合約方式進行橋梁的興建(Construction)與維護工作；每個地區設一名專責工程師，負責該地區橋梁的管理(Management)、檢測、維護、整修(Rehabilitation)、補強(Strengthening)，以及施工等工作[12, 13]。

挪威公共道路總署採用基於風險(Risk-Based)的檢測思維，將橋梁檢測分為三階層及七種檢測類別架構，橋梁水下檢測劃屬主要檢測下的獨立檢測作業，橋梁水下檢測係以潛水檢

測方式進行，主要檢測目的為掌握水下結構構件狀況，以及河床(Streambed)狀況，用以決定維護作業的需求與費用[12-14]。

二、丹麥

丹麥道路總局(Danish Roads Directorate, DRD)設有獨立的橋梁處(Bridge Department)，該單位由一名經理(Manager)和六名分區橋梁檢測員(District Bridge Inspector, BI)組成。橋梁管理系統(Danbro)由一名橋梁資料專家(Bridge Data Specialist)與三名工作人員(Staff)維護，並由顧問協助相關工作[13]。

丹麥道路總局對橋梁水下檢測無特別規定，亦無固定的檢測頻率，由區域橋梁檢測員(Region Bridge Inspector)擇定橋梁與檢測週期，僱用相關經驗工作人員擔任潛水檢測，水下檢測員需具有良好的身體狀態(Physical Condition)、視力(Eyesight)，以及辨色能力(Color Perception)，採底部穿越(Underpassing)形式進行橋梁水下狀況評等[12-14]。

三、瑞典

瑞典道路總署(Swedish Road Administration, SRA; Vagverket)聘請兩名檢測專案經理

(Inspection Project Manager)，共同制定橋梁檢測策略、維護檢測手冊，以及指導檢測品質計劃。瑞典道路總署設有20名檢測隊隊長(Inspection Team Leader)，可自己執行或聘請橋梁檢測員(Bridge Inspector)進行橋梁檢測，以及執行品質控制[13]。

瑞典道路總署的橋梁水下檢測係屬主要檢測的一部分，通常每6年進行一次[12-14]；在日光或同等光照條件下，僱用合格的潛水員，在一隻手臂距離(Arm-Length)內，以視覺和觸覺方式檢查(Visual and Touch Inspection)水下結構構件，探測基礎周遭的冲刷坑(Scour Hole)，必要時採攝影機(Video)錄影[12, 13]。另外，河道剖面(Channel Profile)檢測則授權檢測隊(Inspection Team)決定執行與否[13]。

瑞典道路總署對水下檢測員的學歷、法規和材料知識等均有基本要求，但無正式的認證，水下檢測員亦需符合國家職業安全與健康委員會的潛水指引，潛水設備須經檢查和批准，並在檢測期間須遵循適當的潛水員安全措施[13]。

四、芬蘭

芬蘭道路總署(Finish Road Administration, Finra)負責監督承包商的設計(Design)、施工、維護，以及大部分檢測等工作，制定橋梁的國家標準，提供區域和地方道路機構的專家指導，並解決必須在國家層面協調的所有問題[13]。

芬蘭道路總署規定水下檢測係屬獨立檢測作業，一般每5年進行一次[12-14]，分區橋梁工程師(District Bridge Engineer)安排檢測時程表，由經特別受訓的具認證橋梁檢測員執行水下檢測，檢測目的主要針對流速(Flow Velocity)和冰損風險高的大河上橋梁，進行潛水的目視及觸診檢測，以俾了解鋼構(Steel)銹蝕(Corrosion)、

混凝土磨蝕，或木材(Timber)腐爛(Rot)造成的構件損失，或因船隻或碰撞造成的構件損壞，基礎周圍的河床剖面，基礎損傷(Damage)的位置與程度，以及整個河床剖面，並將檢測發現登載於橋梁登錄清單中[12]。

五、德國

德國聯邦交通、建築和都市事務部(Federal Ministry of Transport, Building, Urban Affair; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, BMVBS)轄下的道路建設和交通辦公室(Office of Road Construction and Traffic)僅管理聯邦等級公路，並發布標準DIN 1076：與道路相關的工程結構—檢測與測試和統一評估、記錄和分析指令(Engineering Structures in Connection with Roads— Inspection and Test and Directive for Uniform Determination Assessment, Recording, and Analysis of the Results of the Inspection of the Structures)，提供有關橋梁檢測與試驗文件的詳細指引；各州負責管理各州轄下的橋梁檢測，控制橋梁管理系統中的資料，並制定維護發展計畫[12, 13]。

其道路建設和交通辦公室規定橋梁水下檢測係屬主要檢測的一部分，通常每6年進行一次[12-14]；若橋梁已探知損傷，則可於3年為週期的次要檢測(Minor Inspection)中，安排橋梁進行水下檢測。水下檢測員可能是具備潛水員資格的土木工程師，但更為常見的是非工程師潛水員，在現場土木工程師的指導下，由一名潛水員攜帶攝影機，以視覺和觸覺方式檢查水下結構構件[13]。

六、法國

法國國家道路總局(French National Road Directorate)負責發展及營運橋梁管理系統，大區(Région)設備部機構(Direction Départementale

de l'Équipement, DDE)負責維修、特別研究與調查，地方(Local)機構負責定期檢測與維護。另設有數個技術機構，其中由17個區域公共道路與橋梁實驗室(Public Bridges and Road Laboratories; Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, LRPC)共同負責分配橋檢管理，執行橋梁的詳細檢測、試驗(Testing)、儀器與診斷(Diagnosis)，橋梁與道路中央實驗室(Central Laboratory for Bridges and Roads; Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC)進行橋梁研究，並提供橋梁專家技術建議[13]。

法國國家道路總局規定水下檢測係屬獨立檢測作業，一般每6年進行一次，檢測目的主要針對水下構件，在一隻手臂距離內，進行視覺和觸診檢測，探測基礎周遭的沖刷坑[12-14]。水下檢測的潛水員受僱於國家政府，並分配至各區域公共道路與橋梁實驗室(LRPC)內執行檢測。另根據需要，亦有水下調查(Underwater Investigation)可進行完整的測量、材料取樣(Sampling)或相關試驗[13]。

七、英國

英國運輸部(Department of Transport)於2021年進行第3次改革轄下的公路局(Highways Agency)，由公務部門轉型為國營機構國家公路(National Highways)。英格蘭地區的公路橋梁主要分為20區，由私人公司負責管理營運，承包商僱用檢測隊隊長(Inspection Team Leader)、橋梁檢測員(Bridge Inspector)、潛水員(Diver)，目前約有30名檢測隊隊長、120名橋梁檢測員，以及10名水下檢測員；英格蘭以外的地區，則由蘇格蘭、威爾斯和北愛爾蘭政府負責道路與橋梁的建設和維護工作[13, 15]。

英國國營機構國家公路原先規定每6年進行一次橋墩基礎的水下檢測，後將水下檢測改列於特別檢測選項之一[15]，由各區承包商

(Contractor)結構經理(Structure Manager)設定不同的檢測週期[13]，檢測目的主要針對提供水下結構狀況、河床剖面，以及沖刷狀況，並允許使用水下無人載具(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)或遙控潛艇(Remotely Operated Vehicle, ROV)進行攝影[15]。

八、澳洲

澳洲聯邦並無統一橋梁檢測事權的管理機構，係由各州運輸單位制定橋梁檢測相關規定，各州設有相似的橋梁資產管理系統(Bridge Asset Management System, BAMS)，系統內包括檢測系統(Inspection System)、橋梁資料系統(Bridge Information System, BIS)、維護系統(Maintenance System)、結構承載力(Structure Capacities)、財務管理系統(Financial Management System)、建議註記資料庫(Advice Notes Database)等子系統[16, 17]。

澳洲昆士蘭州(Queensland)政府將水下檢測列為橋梁狀況檢測(Bridge Condition Inspection)選項之一，檢測目的主要針對檢視結構狀況、材料、位置與構件評等，核對登載於橋梁資料系統的資料是否正確，並依水下結構構件評等狀況，給定1或8年不等的檢測週期，或將水下檢測列為詳細結構工程檢測(Detailed Structural Engineering Inspection)選項之一，整合詳細檢測、構件試驗、數值模擬(Numerical Simulation)，以及結構健康監測(Structural Healthy Monitoring)等，提報劣化樣態與預期劣化發展[16]。

澳洲維多利亞州(Victoria)政府將水下檢測列為詳細工程調查(Detailed Engineering Investigation)選項之一，對結構完整性或載重出現潛在影響的事故發生後，或於定期維護檢測(Routine Maintenance Inspection)與結構狀況檢測(Structure Condition Inspection)時，發現

具有潛在的承載力與穩定性危害時，綜合現地調查與理論分析，提供詳細狀況評等、載重評估、服務性能等訊息，另在複雜檢測(Complex Inspection)時，可使用遙控潛艇進行調查，節省成本與降低風險[17]。

九、紐西蘭

紐西蘭運輸局(New Zealand Transport Agency, NZ Transport Agency)針對國家道路系統，頒布橋梁檢測策略(Bridge Inspection Policy)，並設有橋梁描述登錄庫(Bridge Descriptive Inventory)，橋梁檢測工程師須呈報檢測、維護，以及調查報告給運輸專案經理(Transit Project Manager)與國家公路維護管理顧問，若狀況緊急，須立即建議運輸專案經理，若橋梁狀況產生變化，每季報告運輸計畫經理[18]。

紐西蘭運輸局將水下檢測列為詳細檢測選項之一，一般詳細檢測不超過6年進行一次，若橋梁基礎有磨蝕或撞擊危害，或量測出明顯沖刷狀況，則需進行水下檢測，按橋梁檢測工程師(Bridge Inspection Engineer)指示，由橋梁檢測員(Bridge Inspector)會同專業人員(Specialist Staff)進行檢測[18]。

十、日本

原先委由日本道路公團(Japan Highway Public Corporation, JH)制定橋梁檢測規定與手冊，2005年民營化後，改由三間日本高速道路株式會社(Nippon Expressway Company Limited, NEXCO)合組的日本(株)高速道路總合技術研究所(Nippon Expressway Research Institute Company Limited, NEXCO總研)負責發布橋梁檢測規定與手冊；日本國土交通省(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, MLIT)提供規範橋梁定期檢測要領[19-21]與相關參考

資料[22]，但內容僅概括性規範橋梁定期檢測的範圍、頻率、劣化樣態、評分原則、健全性診斷，以及結果紀錄等，並非涵蓋所有橋梁檢測類別與對應相關要求。

目前日本各橋管單位，包括三間日本高速道路株式會社、區域高速公路經營者、都府道縣地方政府等，多依日本(株)高速道路總合技術研究所(NEXCO總研)編訂的「保全点検要領—構造物編」[23]，以及國土交通省頒定的定期檢測要領與相關參考資料[19-22]，自行編訂自用詳細的橋梁檢測手冊。

橋梁水下檢測列為定期檢測層級下的詳細檢測選項之一，一般定期檢測時間間隔以不超過5年為原則[19-21]，選擇旱季(Dry Season)執行橋梁水下部分檢測，可近距離直接掌握構件與河床狀況，主要由橋梁外觀結構可見明顯之下沉(Settlement)、位移(Movement)或傾斜(Tilting)處，採用水面探棒量測(Probe Measurement)，潛水員水下的目視檢測、量測、觸診、水下相機(Underwater Camera)，各種船載水下聲納(Sound Navigation And Ranging, Sonar)、光達(Light Detection and Ranging, LiDAR)等檢測方式[20, 22, 24]，以掌握水下結構構件狀況，包括銹蝕、挫曲(Buckling)，以及開裂(Cracking)等、河床剖面，以及基礎與保護工之沖刷狀況[19-24]；潛水員最好能清除橋梁構件的飛濺區(Splash Zone)與淹沒區(Submerged Zone)上之附著物，以確認構件狀況[20]。

十一、加拿大

加拿大聯邦運輸部(Canada Transport)、基礎設施部(Infrastructure Canada)，以及加拿大運輸局(Canadian Transport Agency)分別負責橋梁的管理、興建，以及經濟事務，橋梁檢測工作則由各省運輸單位制定相關規定，亞伯達省(Alberta)、安大略省(Ontario)、魁北克省

(Quebec)等省均頒定各自橋梁檢測與維護手冊，各省橋管部門設有一名檢測計畫經理(Inspection Program Manager)一職，以及若干名區域檢測經理(Regional Inspection Manager)職，均須有工程學位、技師(Professional Engineer, PE)執照、通過橋梁檢測訓練，以及5或10年不等的橋梁檢測經驗，負責行政、檢測策略、訓練與認證，以及品質管制與品質查證等業務[13]。

亞伯達省約15%的橋梁需以涉水檢測方式檢查特定構件，水下檢測並未列入常規檢測類別，僅要求水下檢測員為經驗豐富的橋梁檢測員，或在橋梁檢測員的直接監督下執行工作[13]；安大略省約10%的橋梁需進行涉水檢測，僅有極少數橋梁需進行水下檢測，水下檢測頻率約60-120個月不等一次[13]；魁北克省僅對10%的水域橋梁進行涉水檢測與水下檢測，水下檢測頻率為120個月一次，並規定須僱用兩名官方人員，作為水下檢測的領隊者[13]；再者，安大略省和魁北克省均要求水下檢測隊隊長，須有工程學位、專業技師(Professional Engineer, PE)執照，並通過潛水訓練[13]。

十二、中國大陸

中國大陸交通運輸部針對中國大陸公路橋梁箱涵系統，統一頒布「公路橋涵養護規範」[25]，而橋梁檢測(原稱檢查)、監測與評定屬於橋涵養護的前導項目之一，根據檢測評分結果決定橋梁養護與維修的項目，提及各類災害防治，並橋梁基本資料、檢測資料、維護資料等均應納入橋梁資料管理庫內。

中國大陸交通運輸部規定，養護檢查等級為I、II級之較重要橋梁，其初始檢測需進行水下基礎、河床狀況之詳細檢測，一般藉由相關輔助手段，例如水下攝影機、水下銹蝕電位(Corrosion Potential)儀等進行檢測，確認構件損傷狀況；流速(Current)和能見度(Visibility)符合

要求時，亦採人工潛水檢測[25]。

橋梁水下檢測列述特殊檢測選項之一，一般根據水文(Hydrology)、地質環境(Geological Environment)、基礎型式(Foundation Type)，以及橋梁現況等因素，決定具體的檢測專案、頻率，以及內容。水下檢測的頻率通常為3~5年1次，倘若橋梁所處環境存在加速基礎狀況惡化時，例如：河床失穩、沖刷加劇、基礎有效埋置深度(Effective Embedment Depth)變淺、水質腐蝕性較強，以及所處河段有採砂等狀況，則需要提高檢測頻率[25]。

肆、美國橋梁水下檢測作業

一、概述

美國聯邦公路總署(FHWA)頒布國家橋梁檢測標準(National Bridge Inspection Standards, NBIS)[10]，制定結構檢測、檢測頻率、人員資格，以及檢測程序的規定，執行聯邦橋梁檢測計畫，規範或審查各州的橋梁檢測計畫。在聯邦法規範圍內行事的各州運輸廳(Department of Transportation, DOT)，則制定額外的橋梁檢測要求，並提供更詳細的橋梁檢測手冊與規劃[13]。

原則上，各州運輸廳遵循國家橋梁檢測標準(NBIS)水下檢測相關規定，然各州在實際執行面上，亦有各州額外附加的規定與要求[26]，例如：上述的國家橋梁檢測標準(NBIS)明確規定橋梁檢測計畫的四個工作人員職位，其中包括橋梁水下檢測潛水員(Underwater Bridge Inspection Diver)[10]，多數州運輸廳遵循該規定設有水下檢測隊隊長(Underwater Team Leader)與檢測員的職稱；有的州運輸廳則委由顧問公司處理水下檢測事務，若干州運輸廳設有合格的水下檢測隊隊長，通常於檢測隊隊長(Inspection Team Leader)資格上，增加潛水培訓與認證的

要求，或委由顧問公司完成水下檢測工作[13, 26]，有的州運輸廳則要求檢測隊隊長，需實際完成某個最少比例的水下檢測，甚至某些州運輸廳要求檢測員需通過適任考試(Competency Examination)[26]；水下檢測潛水員的健康狀況(Fitness)、視力(Vision)，以及辨色能力(Color Perception)，各州運輸廳均有不同程度的要求，但水下檢測潛水員須完成年度體檢，並維持潛水認證[13]。各州運輸廳需由獲得認證的潛水員，擔任檢測顧問的工作人員，但州運輸廳不參與潛水員認證工作[13]。

不論各州的州內法規如何，均須按國家橋梁檢測標準(NBIS)的聯邦要求，即水下檢測潛水員須參與橋梁檢測或水下橋梁檢測課程，並課後測驗成績達70分以上[10, 13, 26]，訓練課程可為下列之一：(1)聯邦公路總署轄下之國家公路中心(National Highway Institute, NHI)開設之訓練課程，種類為綜合性橋梁檢測課程、橋梁檢測在職訓練、橋梁水下檢測訓練等其中之一類的課程；(2)聯邦公路總署核定州運輸廳、聯

邦機構開設之訓練課程，課程內容須與國家公路中心開課課程一致；(3)聯邦公路總署核定其他機構開設之訓練課程，課程內容須與國家公路中心開課課程一致。

美國聯邦公路總署編訂的橋梁檢測員參考手冊(Bridge Inspector's Reference Manual, BIRM)[3]，提供一般橋梁檢測作業執行之依據，與橋梁水下檢測相關分述於兩部分：(1)有關橋梁下部結構本身部分一詳列混凝土、石砌(Masonry)、鋼構、木料材質各類型的缺陷(Defect)，目視判斷、實物觸摸與量測，以及進階檢測(Advanced Inspection Method)(即儀器檢測Instrumentation Inspection)的種類、時機與目的；(2)有關橋梁跨越水道部分一收集並了解水道的物理、地貌(Geomorphic)、變動特性，橋梁基礎的大小(Size)、形狀(Shape)與排列(Orientation)，水利設施(Hydraulic Countermeasure)狀況等，條列橋梁基礎可能形成之缺陷(Deficiency)類型，當涉水檢測不足以應付需求(如圖1所示)，方才進行所謂的潛水檢測



圖1 橋梁涉水作業[3]

(Diving Inspection)(如圖2所示)，並詳細羅列橋梁水下檢測裝備。



圖2 橋梁水下潛水檢測作業

從過去各州橋梁災害經驗發現，不僅長橋或具高冲刷潛勢(Scour Potential)跨水橋梁需要進行橋梁水下檢測，更多橋梁災害則是發生於短跨橋梁(Small-Span Bridge)，故而不少州運輸廳下調橋梁水下檢測的標準，或縮短橋梁最小跨度，或改採最小通水面積(Hydraulic Opening)為執行橋梁水下檢測的啟動依據[26]。

美國聯邦公路總署頒布的國家橋梁檢測標準，以及各州運輸廳頒布的公路相關橋梁/結構物檢測手冊[3, 4, 10, 11, 13, 27-30, 32, 34, 35]，將橋梁水下檢測明確定義為：「主要檢測橋梁下部結構的水下部分構件與周圍河道，在低水位時無法以涉水或探測(Probing)方式(如圖1所示)進行目視檢測，通常需改採潛水作業或其他適當的技術進行之檢測。」

橋梁水下檢測通常60個月檢測一次，但僅適用於狀況良好的結構，或該時間範圍內與當前條件下，無需頻繁地監測的結構；在

考慮橋梁建材(Construction Material)、周遭環境、結構年齡(Age of Structure)、冲刷特性(Characteristics)、過去狀況評等等因素，具有部分損傷、位於不穩定河道(Unstable Channel)，或具侵犯性環境(Aggressive Environment)中的水下構件，個別橋梁需採用較短的橋梁水下檢測週期[4]，甚至部分州運輸廳可依水下構件/河道/冲刷個別的劣化評等狀況，將水下檢測週期縮短為12, 24, 36或48個月不等[26, 29-36]。另外，各州運輸廳可經由聯邦公路總署批准之下，其橋梁水下檢測週期最高可延長至72個月[3, 4, 10, 11, 13, 26, 27, 30]，但目前並未有任何州獲得聯邦公路總署批准[268]。

按國會議案要求，美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)轄屬橋梁須符合國家橋梁檢測標準(NBIS)要求，故亦有與聯邦公路總署相似的橋梁檢測制度與規定[37, 38]，其中橋梁水下檢測的定義與聯邦公路總署相仿，惟明訂橋梁水下檢測的起始低水位深度為3英尺(約90公分)[37]。

二、水下檢測的等級

傳統人工水下作業(以下簡稱潛水)發展自近海潛水產業，原先約定俗成的檢測強度的等級(Level)劃分逐漸廣泛為各界接受(包括美國海軍)，之後聯邦公路總署的水下檢測手冊[4, 27]、美國土木工程師學會(American Society of Civil Engineers, ASCE)手冊[39]，以及美國陸軍工兵團(USACE)[39, 40]均採納該水下檢測等級的劃分方式，該檢測等級通常與水下工作量呈現高度相關，等級越高者工作量越大。目前以潛水方式進行之水下檢測等級概分為三級，詳述如下三個小節[3, 4, 27-29, 32, 36-41]。

(一) 第一級(Level I)檢測

近距離目視與觸摸檢測(Tactile Inspection)

(或稱觸診)，或稱游過檢測(Swim-by Inspection)，但應足夠詳細檢測水下構件明顯的損傷或劣化，並確認所有構件尺寸的連續性(Continuity)，以及探知應埋構件的外露(Exposure)或底部掏空(Undermining)部分，僅作最小程度的表面清理。

倘若河水能見度很差，以至於潛水檢查員無法目視檢測結構，則轉而進行觸覺檢查，以手和手臂進行系統性掃掠運動(Sweeping Motion)，完成整個水下結構檢測工作；第一級檢測可包括對相鄰河床有限度的探測工作。

第一級檢測結果需能概述下部結構的總體狀況，並能驗證實際竣工狀況，提出第二級或第三級檢測需求，界定更詳細檢測的範圍與位置[3, 4, 34-37, 39]。

(二) 第二級(Level II)檢測

屬於詳細檢測，針對水下構件關鍵的位置或構件，進行水生附著物(Biofouling)部分的擦拭(Wiping)或刮除(Scaping)等清理工作，缺陷與劣化尺寸有限度的量測，並明確記錄損傷種類、位置、範圍和嚴重程度(如圖3所示)，清除



圖3 第二級檢測清理H型鋼樁與量測缺陷尺寸[4]

位置的選擇，應盡量降低對結構造成損壞的可能性[3, 4, 35-37, 39, 40]。

相關檢測手冊均提及清除工作的位置與範圍：(1)位置通常靠近低水線(Low Waterline)、靠近河床泥線(Mudline)，以及低水位線與河床泥線間的中間位置；(2)圓樁型結構應在指定位置清除6~12英吋(15~30.5公分)的帶高，最好為10~12英吋(25~30.5公分)的帶高；(3)在矩形樁(Rectangular Pile)上，應清除至少三個側面；(4)在八角樁(Octagonal Pile)上，應清除至少六個側面；(5)在圓樁上，應清除至少四分之三的周長；(6)在H型樁上，應清除翼板(Flange)的外表面、一個翼板的內表面，以及腹板(Web)的一側[3, 4, 28, 35-37, 39, 40]。

第二級檢測旨在檢測和辨識可能被表面生物污垢(Biofouling Growth)，或腐蝕產物所隱藏的損傷和劣化區域，清潔的徹底性(Thoroughness)應取決於辨識底層材料狀況，通常不需完全移除所有的生物污垢生長或腐蝕產物[3, 4, 28, 36, 37, 39, 41]。

(三) 第三級(Level III)檢測

對關鍵結構或結構構件，或考慮進行大範圍維修或更換的構件，進行廣泛性的清理，使用非破壞性試驗(Non-Destructive Testing, NDT)(超音波檢測Ultrasonic Testing、現地硬度試驗In-Situ Hardness Testing等)(如圖4所示)，或部分的破壞



圖4 第三級檢測超音波厚度檢測[4]

性檢測(Partially-Destructive Testing, PDT, 即鑽心取樣Coring)等高強度的詳細檢測, 在關鍵結構區域、可疑區域, 以及能代表整個水下結構的區域, 探知隱藏的或迫近的(Imminent)損傷, 橫截面積的損失(Loss of Cross-Sectional Area), 並評估材料的均勻性(Homogeneity)[3, 4, 36, 37, 39-41]; 建議取樣尺寸最高上限為水下構件的5%, 至多30個構件[39]。

有關水下構件之取樣尺寸與抽樣比例, 則可參考澳洲新南威爾斯州政府(New South Wales Government, NSW Government)運輸廳(Transport for NSW, TfNSW)建議如下: (1)取樣直徑介於40-75公釐之間, 並確保取樣周界與埋置鋼筋(Rebar)之間, 保留至少有25公釐的距離[42]; (2)有關水下構件代表性選擇的清理與檢測, 則建議抽選數量/比例如表3所示, 在感潮河段的橋梁基礎, 一律採高壓水柱清理(High-Pressure Water Cleaning)水下構件表面, 以俾進行詳細檢測[42]。

表3 水下檢測建議抽選數量/比例(摘自[42])

基樁總數(根)	抽選代表數量或比例	高壓水柱清理比例
1~20	全部	50%
21-66	20根	
67-96	全部的30%(取最近整數)	
97-150	30根	
151以上	全部的20%(取最近整數)	

三、水下檢測的分類

美國聯邦公路總署編訂的橋梁水下檢測手冊[3, 4, 27]認為: 橋梁水下檢測需類比常規橋梁檢測的思維, 橋梁擁有者應針對橋梁水下構件, 制定相關標準以進行初始檢測(Initial Inspection)、定期檢測(Routine Inspection)、

深入檢測(In-Depth Inspection)、特別檢測(Special Inspection), 以及損傷檢測(Damage Inspection)。

(一) 初始檢測: 橋梁首次或登錄檢測成為橋梁登錄清單的一部分, 須提供所有的結構登錄清單(Structure Inventory)、評估資料(Appraisal Data), 以及其他相關數據, 建立橋梁結構狀況的基準值(Baseline)。當結構的配置發生變化, 例如加寬、加長或補強、橋梁替換, 或所有權變更時, 亦可能需進行登錄檢測。初始檢測與定期檢測要求相仿, 通常包括: 第一級檢測與第二級檢測, 以及沖刷調查。初始檢測可能表明需在某些區域進行深入檢測, 以確認第一級檢測與第二級檢測時發現的異狀, 或取得額外資料, 以便確切地評估橋梁結構狀況。

(二) 定期檢測: 確定橋梁的物理(Physical)和功能(Functional)狀況所需的觀察和測量, 以辨識現況與初始或前次檢測狀況間, 是否產生任何的變化, 並確保橋梁結構得以繼續滿足當前的服務要求。定期檢測應包括第一級檢測、第二級檢測, 以及沖刷調查, 相關配置如表4所示, 其中基本沖刷

表4 美國橋梁水下定期檢測配置表[4]

第一級檢測	100%水下構件
第二級檢測	10%水下構件
沖刷調查	河道橫斷剖面, 探測水下構件附近底部

調查應包括探測結構相鄰的河床狀況，並確定橋梁範圍的河道橫斷剖面[28-32, 35, 36]。定期檢測可能表明需在某些區域進行深入檢測，以確認第一級檢測與第二級檢測時發現的異狀，或取得額外資料，以便確切地評估橋梁結構狀況。

(三) 深入檢測：對水面以上或水下的一個或多個構件進行近距離檢查(Close-Up Inspection)，以辨識在定期檢測程序中，不易檢測的缺陷。對於水下構件，可包括額外的第二級檢測或第三級檢測。下述一種或多種情況可能表明需要進深入檢測：(1) 定期檢測的結果具不確定性；(2) 重要結構的損失將對生命或財產造成重大影響；(3) 結構獨特對結構性能造成不確定性；(4) 遇險的先前證據；(5) 考慮重新利用現有的下部結構，支撐新建的上部結構，或計畫對上部結構進行重大修復。對於某些橋梁，例如長期處於活躍腐蝕環境中的鋼樁結構，可能有必要將第三級檢測的非破壞性試驗(NDT)，列為定期檢測的一部分。

(四) 特別檢測：由橋梁擁有者自行決定安排的檢測，用於監測特定已知或可疑的缺陷。可能觸發需要進行之損傷檢測、深入檢測或特別水下檢測的條件或事件，包括但不僅限於以下項目：(1) 異常洪水；(2) 船隻撞擊(Vessel Impact)；(3) 不尋常的浮冰(Ice Floes)；(4) 船舶螺旋槳引發的渦流沖洗(Prop Wash)，可能導致沖刷水流；(5) 不利的環境條件，例如微鹹水(Blackish Water)、污染水，以及含有高濃度化學物質的水；(6) 橋墩或橋台(Abutment)處漂浮和堆積的碎屑(Debris)，可能導致局部沖刷(Local Scour)增加；(7) 發現水面上構件處劣化或位移的證據；(8) 發生重大地震或其他重大自然事件。

(五) 損傷檢測：非排程的檢測，用以評估由環境因素或人為行為造成的結構損傷。檢測的範圍應足以確定緊急載重限制(Emergency Load Restriction)的需要，並評估完成所需維修的效果等級。

伍、水下儀器檢測技術

一、概述

橋梁水下檢測作業常受水域的能見度、水流、天候(Weather)、水深、水上交通、攜行檢測工具，以及檢測可及性(Accessibility)等條件限制[3, 4, 36, 37, 39, 41-44]，而最關鍵因素是潛水員需在低能見度與高水流下，進行高風險性橋梁水下檢測，且檢測效果通常並不佳，拍照及攝影需視水中的透視度好壞而定。

採用潛水作業方式進行橋梁水下檢測，橋梁潛水檢測員需要以觸診，以及人工測量/記錄數個深度與寬度數據，雖然許多美國各運輸檢測單位仍沿用這些舊方法，但此一潛水檢測過程已被證明效率低下，且並不精確[26]。

再者，雖然美國聯邦公路總署(FHWA)頒布國家橋梁檢測標準(NBIS)[12]、美國聯邦公路總署編訂的橋梁檢測員參考手冊(BIRM)[3]與橋梁水下檢測手冊[4]，以及美國國家公路與運輸官員協會(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)編定的橋梁評估手冊(Manual for Bridge Evaluation, MBE)[11]均允許採用「其他適當的技術」，以便取得完整、精確的河道深度資料，以及水下構件的損傷狀況，倘若驟然採用所謂的「其他適當的技術」而省卻潛水作業，勢將違背美國橋梁水下檢測作業中既有的『水下檢測等級』觸診執行的要求。

目前美國聯邦公路總署不允許單獨以「其他適當的技術」的檢測成果，取代潛水作業方式取得的檢測成果[45]，換言之，「其他適當的技術」僅能扮演橋梁水下檢測的輔助角色，在考量潛水員安全性之下，用以彌補潛水作業方式的不足處。

以潛水作業方式的目視與觸診方式，依舊可獲得有價值的現況訊息[45]，故而目前美國聯邦公路總署並未有結論性的改進構想或方向，未因新的檢測技術的發展或引進，而淘汰既有的潛水作業方式，橋梁水下檢測仍維持潛水作業方式，以及其他適當技術兩種方式共存，並無相互取代的爭議。

二、儀器檢測技術

彙整水下檢測技術相關書籍、研究報告/論文，以及橋梁檢測手冊[3, 4, 20, 22, 24,

26, 35-37, 39-57]，儀器檢測(Instrumentation Inspection)技術可劃分為：(1)光學影像技術(Optical Imaging Technique)、(2)非光學影像技術(Non-Optical Imaging Technique)，以及(3)非/半破壞性試驗(NDT/PDT)儀器等三大類檢測技術，檢測技術概述如後。

光學影像技術概以水下照相與水下攝影最為廣泛，光學影像技術計有水下照相機、水下攝影機(Underwater Video)、照明(Lighting)、清水箱(Clearwater Box)、圖形比例尺(Graphic Scale)等設備(如圖5所示)，提供經濟、快速的檢測紀錄方式，可部分克服水中能見度、水流、碎屑阻隔等各種水中狀況[3, 4, 20, 22, 24, 31, 36, 37, 39-44, 49, 50]。

非光學影像技術包括：雷射、雷達(Radio Detection and Ranging, Radar)，以及聲納、水上地電阻影像(Electric Resistivity Tomography, ERT)

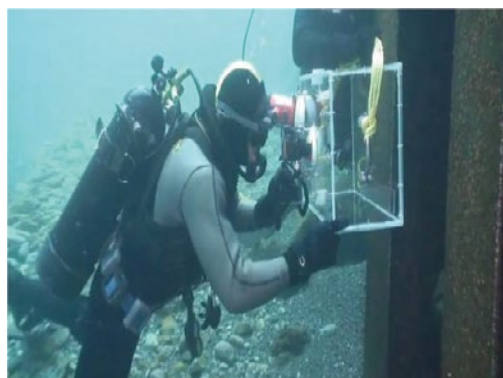
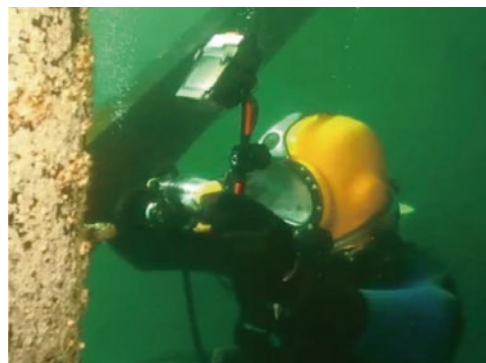


圖5 水下光學影像技術設備[4]：(左上)水下攝影機；(右上)水下照相機；(左下)透明水箱；(右下)圖形比例尺

等技術[22, 24, 45-52]，其中雷射(或稱光達)可產生極其準確的水下影像，但水的能見度較差時，光達探測範圍將受限，故光達廣泛應用於離岸(Offshore)海洋結構物掃描，因跨河橋梁的河水通常較為混濁，光達技術並不適合一般橋梁水下檢測之用，光達應用於橋梁檢測，多側重於水面以上橋梁與高灘地(Floodplain)的地表物體影像/地形掃描之用[24, 45, 53-56]，其餘非光學影像技術均可有效克服河水混濁能見度不足的問題，並可採傳統船舶(Traditional Manned Ship)或無人載具方式進行檢測。

上述非光學影像技術中，尤以聲納最廣為使用，聲納探測儀類型種類繁多，可針對水下構件缺陷劣化狀況、河床地形、冲刷回淤(Re-fill)、地層構造等進行掃描探測，其中多音束聲納(Multibeam Sonar)可隨著船舶移動進行大範圍掃描，多次掃描或重疊航行獲得更多的點雲密度，以及100%的河床覆蓋率，可判定水下異常或障礙物、水下構件剝落(Scaling)深度，或基礎掏空深度；圖6與圖7顯示由人工水下檢測結果發現橋墩基礎掏空外露，基礎表面混凝土劣化剝離(Spalling)，經緊急搶修，採用多音束掃描帶聲納探測，可清楚點繪橋墩補強前後，橋墩



圖6 以多音束聲納掃描帶聲納掃描橋墩基礎弱化與混凝土劣化三維點雲圖[57]

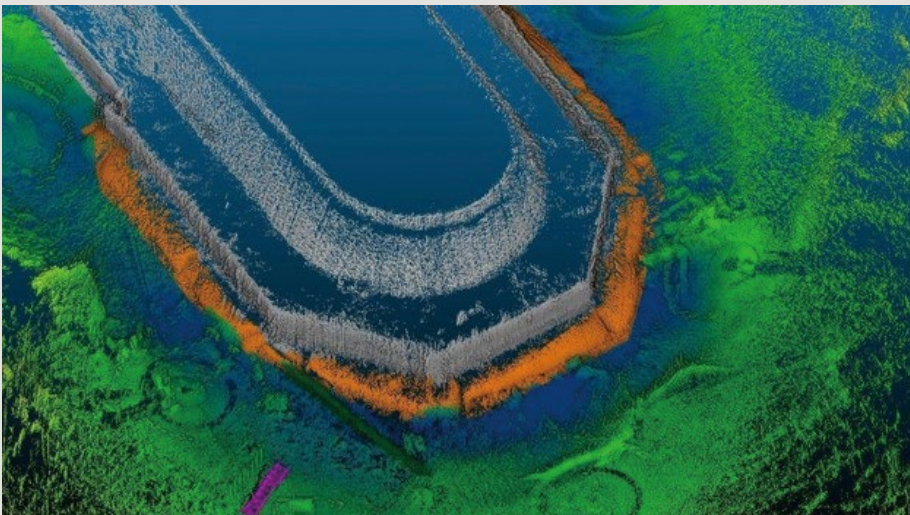


圖7 以多音束聲納掃描帶聲納掃描橋墩基礎補強後三維彩繪點雲圖[57]

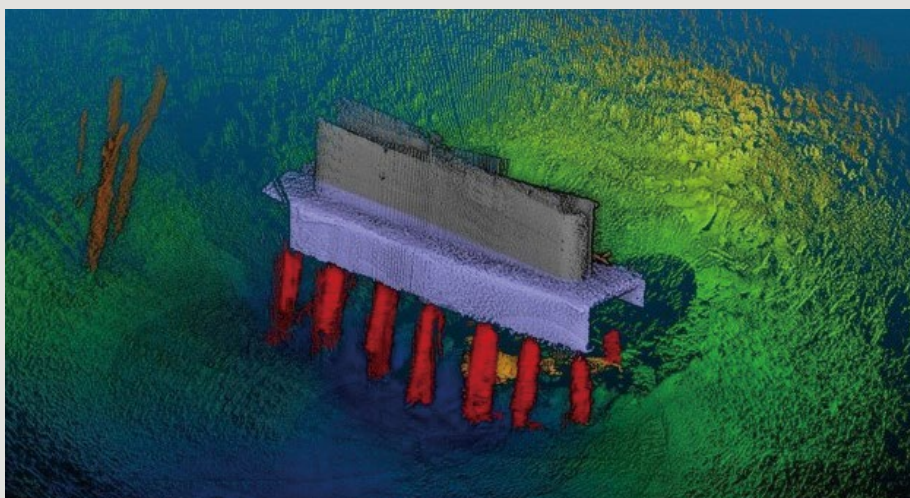
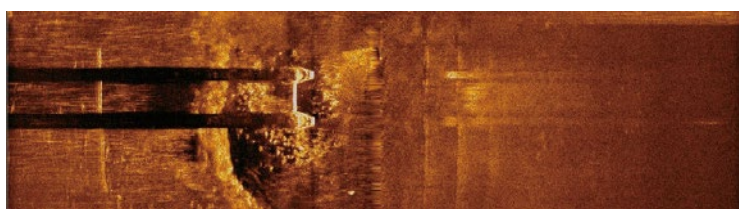


圖8 以多音束聲納掃描帶聲納掃描橋墩基礎嚴重冲刷之三維彩繪點雲圖[57]

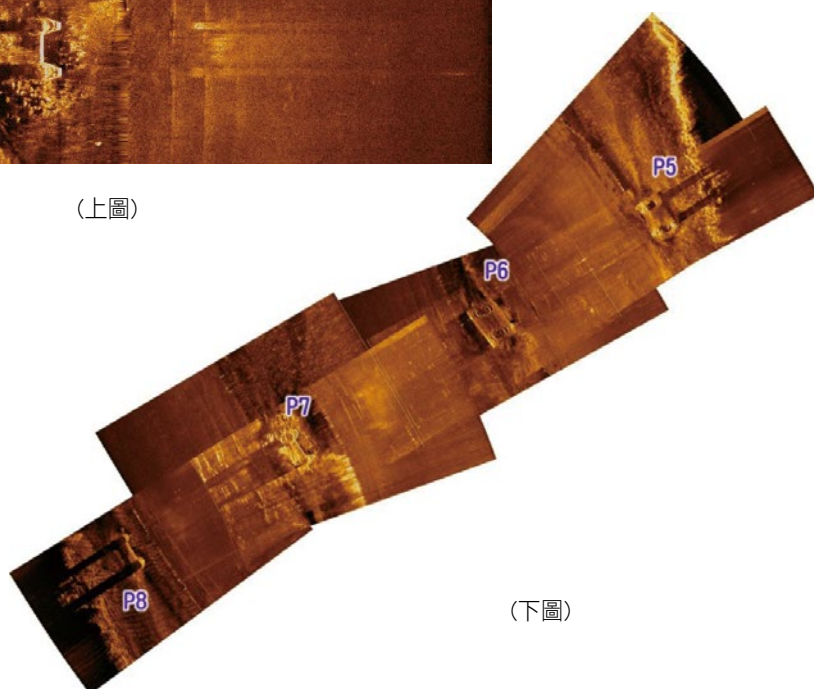
修復狀況[57]；洪災後橋墩基礎嚴重冲刷，透過多音束掃描帶聲納探測如圖8所示，可發現橋墩最嚴重深達2.4公尺深的基礎掏空，並漂流木堆積於基礎底部與周圍[57]。

側掃聲納(Side Scan Sonar)裝設於船舶的拖魚(Towfish)、測量船的橫梁或船身，或潛水

器上，隨船舶向前移動，側掃聲納向航線兩側發射扇狀脈衝波，具有快速有效探測大範圍河道底部圖像，提供河床堤岸與橋墩正視影像的能力，並可用於多種用途探測目的，如地質構造、水下構件、拋石、河道地形、水下碎屑物等，例如某座大橋在歷次橋梁檢測素有冲刷疑慮，圖9顯示側掃聲納結果[58]，可清楚標繪基



(上圖)



(下圖)

圖9 側掃聲納成像圖：(上圖)單條測線影像圖；(下圖)側掃聲納影像鑲嵌圖[58]

礎形狀，橋墩後有強烈的墩柱陰影，橋墩周圍有淺薄的沖刷坑陰影。

橋梁水下檢測使用的非/半破壞性試驗儀器，以提供鋼構與混凝土的水下第三級檢測需求，計有超音波厚度檢測儀(Ultrasonic Thickness-Measuring Device)、水下磁粒檢測設備(Underwater Magnetic Particle Testing Equipment)、超音波脈波速度計(Ultrasonic Pulse Velocity Meter; V-Meter)、施密特錘(Schmidt Hammer; Rebound Hammer)、鋼筋定位器(Rebar Locator; R-Meter)等儀器，以及鑽心取樣設備(Coring Equipment)(如圖10所示)[3, 4, 36-38, 40, 44, 59]。

另者，沿橋址處或於橋墩處，以儀器或人工方式量測基礎沖刷設備或裝置，本研究統稱為定點式沖刷量測技術(Fixed-Position Scour Measurement Technology)，雖非歸屬於橋梁水下檢測一環，亦非能充分代表橋墩基礎沖刷現

況，但仍為目前橋管單位面對橋梁基礎沖刷問題，最常採用的、最簡便的量測方式。

定點式沖刷量測技術種類繁多，例如：比對多次制式水準儀(Level)或測深儀量測河道斷面(Streambed Profile)變化，由河道剖面變化確認橋址處的沖刷位置，或於橋址河道埋設沖刷磚、埋入式無線電波漂浮裝置(Buried Float-Out Buoys)，固定於橋墩的重錘式沖刷計(Dropping Weight Scour Measurement)、重力鋼棒(Mechanical Sounding Rod)、磁性滑動套環(Sliding Magnetic Collar, SMC)、時間域反射儀(Time Domain Reflectometry, TDR)、光纖沖刷監測計(Optic Fiber Scour Monitoring System)、水下照相機、水下攝影機、壓電片沖刷監測計(Piezoelectric Film Type Scour Monitoring System)等數種沖刷量測裝置，定點量測橋墩或橋址處的沖刷深度(如圖11所示)[3, 9, 44, 48, 51, 52, 60]。

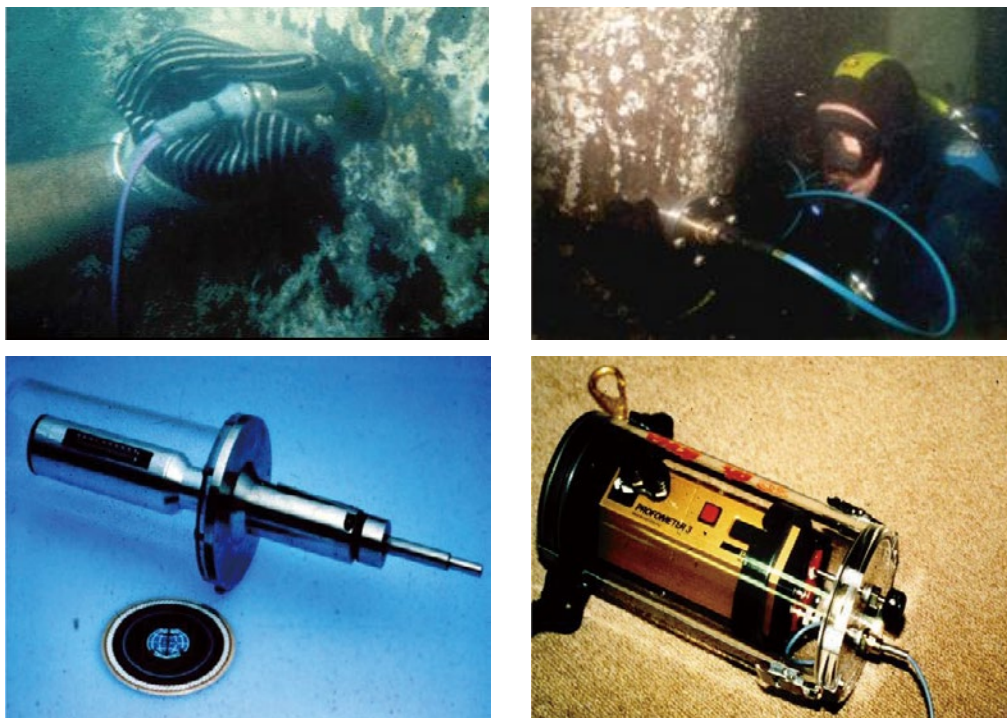


圖10 水下非破壞性試驗儀器[4]

(左上)超音波厚度檢測儀；(右上)超音波脈波速度計；(左下)施密特錘；(右下)鋼筋定位器

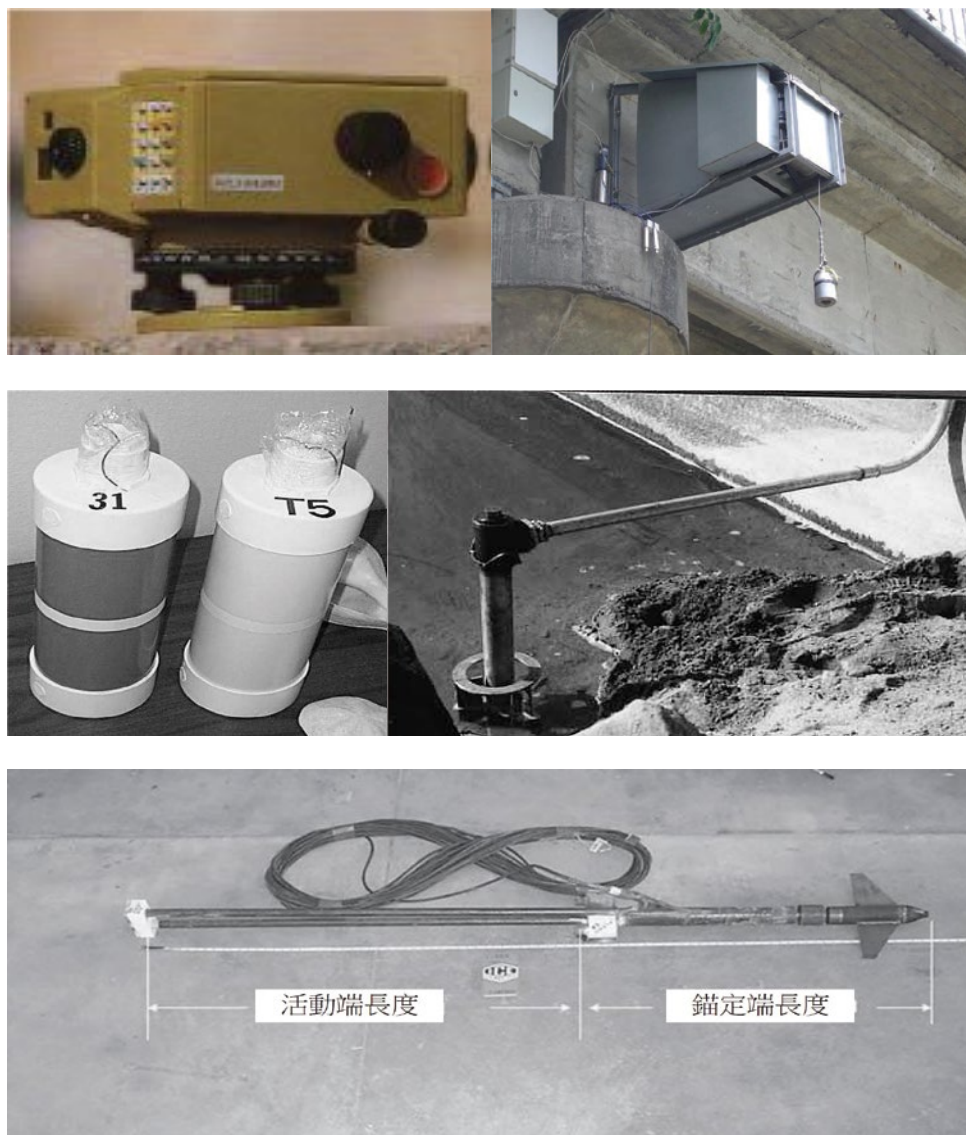


圖 11 定點式冲刷量測設備：(上左)水準儀[52]；(上右)重錘式冲刷計[52]；(中左)埋入式漂浮裝置[60]；(中右)磁性滑動套環[60]；(下)時間域反射儀[60]

陸、國內橋梁水下檢測制度

目前依交通部頒訂的公路養護規範[1]內容定義，橋梁水下檢測當屬橋梁檢測類別的詳細檢測選項之一，詳細檢測係於定期檢測或特別檢測後，若檢測人員對所發現之橋梁劣化現象無法確定其影響程度，或對可能發生但目視無法判斷是否劣化而有安全疑慮時，例如：裂縫之深度、混凝土內部鋼筋或鋼腱(Tendon)銹蝕狀

況、跨河橋梁(Cross River Bridge; River-Crossing Bridge)所在河道狀況、基礎冲刷情形等，需以儀器或相關設備進行局部破壞試驗(或稱半破壞試驗)或非破壞試驗等檢測，可根據不同目的選擇適當的工具(Tool)、儀器、設備，以及方法(Method)。

綜合交通部頒訂的公路橋梁檢測及補強規範[5]，以及橋基保護工設計規範[6]相關敘述，

橋梁水下檢測項目可區分為：(1)橋梁水下結構劣化缺陷狀態，(2)河道狀況，以及(3)臨水引道路堤基礎與橋梁基礎冲刷狀況等三類。

交通部頒訂的公路橋梁檢測及補強規範[5]，於詳細檢測特列「跨河橋梁所在河道狀況或基礎冲刷之檢測」一項，內容提及「常用檢測方法包含河道橫斷面測量(Streambed Profiling)、單音束測深(Single-Beam Echo Sounder)、多音束測深、側掃聲納、測海深光達(Bathymetric LiDAR)、水下無人載具(UUV)攝影或委由專業潛水人員(Professional Diver)進行等。」

目前我國橋梁水下檢測尚屬啟動階段，除船舶搭載聲納量測河道狀況較為普遍之外，其餘檢測項目均較少觸及，概與水下檢測環境相對危險、專業人力有限、檢測訓練要求未明、檢測經費配置較少、水下檢測市場生態封閉等因素，限制執行橋梁水下檢測的強度。

柒、國內橋梁水下檢測展望

本研究檢視美國、挪威、丹麥、瑞典、芬蘭、德國、法國、英國、澳洲、紐西蘭、日本、加拿大、中國大陸等十三國的橋梁檢測作業，針對國內橋梁水下檢測特性，綜合梳理出國內橋梁水下檢測未來努力發展的方向：

一、釐清橋梁水下檢測定義

我國相關橋梁檢測規範並未明確定義橋梁水下檢測相關內容，建議明確規範橋梁水下檢測相關範疇如後：「橋梁水下檢測主要係檢測橋梁下部結構的水下部分構件、周圍水道狀況(含水工結構物)，以及冲刷狀況，於河川枯水位期(或低水位期)，橋梁檢測員無法於岸上或橋上採用目視、簡單設備/儀器，或採涉水方式探知橋墩/橋台，以及橋墩/橋台基礎等水下構件、水

道(含水工構造物)等相關單元的缺陷劣化狀況，即未能以常規橋梁檢測進行之水下構件、水道等相關單元件的缺陷劣化狀況，需改採人工潛水作業(Manual Underwater; Diving/Dive)或儀器檢測技術進行之檢測。」

二、橋梁水下檢測施測對象

長橋與具高冲刷潛勢跨水橋(按訂定跨河橋梁橋基冲刷檢測作業規範(草案)之研究[9]定義之冲刷潛勢)需進行橋梁水下檢測，另建議針對一般短跨橋梁災損進行研究，是否縮短橋梁跨度，或改採最小通水面積為執行橋梁水下檢測的啟動依據。

三、針對在現有橋梁檢測規範下，即反應式檢測模式之下，建議橋梁水下檢測啟動時機

- (一) 依交通部頒訂的公路養護規範[1]所述定期檢測或特別檢測後，若檢測人員對所發現之橋梁劣化現象無法確定其影響程度，或對可能發生但目視無法判斷是否劣化而有安全疑慮時，例如：跨河橋梁所在河道狀況、基礎冲刷情形等，需以儀器或相關設備進行局部破壞試驗(或稱半破壞試驗)或非破壞試驗等檢測選項。
- (二) 交通部頒訂的公路養護規範[1]所述「定期檢測或特別檢測後，認為有必要時進行之」，其中「有必要時」可考慮當跨河橋(含跨水橋)以下狀況：(a)水面以上構件發生明確傾斜、位移、沉陷等證據；(b)橋墩或橋台基礎裸露、掏空達20%設計埋置深度以上；(c)發生異常洪水、重大地震事件有影響開放通車之虞；(d)橋墩或橋台處漂浮與堆積的碎屑，可能導致局部冲刷增加；(e)船隻撞擊；(f)發生異常洪水事件導致河道變遷，或橋址處水工結構物受損。

(三) 擬進行橋梁安全性評估或整建：(a)臺灣地區橋梁管理資訊系統(TBMS)資料庫內查無相關橋梁水下檢測紀錄，或曾執行水下檢測但遺失紀錄，但需了解橋梁水下構件與河道狀況，以俾進行橋梁相關安全性分析或建立初始資料；(b)考慮重新利用現有的下部結構，支撐新建的上部結構，或計畫對上部結構進行重大修復；(c)結構獨特對結構性能造成不確定性等狀況，建議啟動橋梁水下檢測；(d)不利的環境條件，例如：河口附近、感潮河段、沿海地區、污染水，以及含有高濃度化學物質的水。

四、橋梁水下檢測週期方向

考量臺灣地理環境特性，以及多數國家均有明定橋梁水下檢測週期，本研究建議未來宜明定橋梁水下檢測週期，即為預防式檢測思維，以下為建議的橋梁水下檢測週期方向：

(一) 橋梁下部結構的水下部分構件、周圍河道狀況，以及沖刷狀況，在低水位時無法以涉水或探測方式進行目視檢測，通常需採橋梁水下檢測為之，目前臺灣橋梁水下檢測屬於詳細檢測選項之一，然臺灣橋梁時受颱風與豪雨引發洪水之威脅極甚，倘若僅列於詳細檢測選項之一，恐難以反映橋梁水下現況，建議將橋梁水下檢測列入定期檢測一環，檢測最高週期為48個月一次，檢測週期報請主管機關核可後，容許放寬至60個月；顧及橋梁水下檢測的難度與專業性，建議與常規橋梁檢測作業標案切割辦理，可採數橋合併招標方式辦理；橋梁水下檢測時機建議於枯水期辦理，以俾一併檢視橋墩基礎裸露與水下構件損傷狀況。

(二) 前述橋梁水下檢測週期僅適用於狀況良好的結構，或該時間範圍內與當前條件下，

無需頻繁地監測的結構；考慮橋梁重要等級、沖刷特性、過去評等狀況、橋梁建材、周遭環境、結構年齡、海岸天候腐蝕等因素，具有部分損傷、位於不穩定河道，或侵犯性環境中(例如：河口、感潮河段、沿海地區等)的水下構件，個別橋梁需採用較短的橋梁水下檢測週期，可下調至36個月一次，倘構件損傷嚴重或沖刷狀況惡劣，或於重大洪水事件之後，檢測週期縮限至6~24個月。

五、河道/沖刷狀況之檢測範圍

目前臺灣僅在橋梁目視檢測提及需紀錄上下游各500公尺內構造物狀況，有關橋梁水下檢測作業，並無確切規範河床地形量測的範圍，然而鑒於臺灣橋梁分布密集，可採用同一流域多座跨河橋梁合併，進行河床斷面/沖刷量測；另，美國聯邦公路總署頒布之橋梁水下檢測手冊[4]，檢測範圍描述如下(原文為經驗參考分享性質，並未強制要求)：「通常實務做法為至少在每個下部結構單元周圍，以及沿著橋梁的上游與下游帶，以橋梁上游和下游每隔50英尺(約15公尺)、100英尺(約30.5公尺)，以及200英尺(約61公尺)的方式，進行河床地形探測作業；對於長橋，一些檢測員建議將河床地形調查範圍，延伸至橋梁上游與下游之距離均為河道寬度的兩倍。」相關說明可作為國內河道/沖刷狀況檢測範圍之參考。

六、橋梁水下檢測作業方式區分

考慮橋梁水下檢測時，因涉及檢測標的位置與範圍、有限的執行經費、可動用的檢測技術，以及業主的相關要求等主客觀條件，檢測團隊可能採取的橋梁水下檢測方式計有：(1)僱用傳統人工水下(潛水)手持檢測儀器/設備方式；(2)自有、租用或僱用傳統載人水面船舶固定、附掛、拖引或拖曳檢測儀器/設備方式；(3)

自有或租用水面及水下無人載具(包括水面無人船Surface Vessel Vehicle, SVU與遙控潛艇ROV)附設檢測儀器/設備方式，進行橋梁水下檢測作業。

七、橋梁水下檢測方式共存性

雖人工潛水作業檢測方式已被證明效率低，且並不精確，且亦有其他適當的儀器檢測技術可供選擇，然人工潛水作業方式的目視與觸診方式，仍可獲得有價值的水下構件缺陷劣化訊息；換言之，在潛水員安全考量之下，儀器檢測技術能扮演橋梁水下檢測的輔助角色，用以彌補潛水作業方式的不足處，故而世界各國橋梁主關單位未因新的檢測技術的發展或引進，而淘汰既有的人工潛水作業方式，橋梁水下檢測仍可維持人工潛水作業方式，以及儀器檢測技術兩種方式共存。

八、人工水下潛水檢測的制度合理化

人工潛水檢測屬高危職業，職業保險承保受限，目前人工潛水檢測的生態，均採承攬再承攬模式，由再承攬者自行招募潛水員執行實際潛水作業，人員資格、潛水裝備、人力配置、作業程序、操作方式等較無合宜有效的品質管控，潛水員熟悉當地水性較諸具備檢測專業技術重要，潛水員的健康、裝備、安全等方面衍生問題，幾乎均由潛水員自行承擔與吸收，有專業技術的潛水員不一定願意參與橋梁水下檢測，既有的法規與實際執行面之間存在相當的鴻溝，如何在潛水員的健康與安全前提下，結合相關產業的專業證照，相關部會需就此研修具可行性的法規，同時將安全潛水實務手冊(Safety Diving Practice Manual)，以及潛水作業計畫(Dive Operations Plan)(包括工作危害分析Activity Hazard Analysis、風險評估研擬Risk Assessment，以及應變管理計畫Emergency Management Plan)等安全保障措施，納入適當單

位審核與評估，逐漸將現有人工潛水檢測模式導引至合理的正軌上，係為未來人工潛水檢測亟待努力的方向。

九、橋梁水下檢測技術適用性

橋梁水下檢測作業常受水域的能見度、水流、天候、水深、水上交通、攜行檢測工具，以及檢測可及性等條件限制[3, 4, 36, 37, 39, 41-44]，而最關鍵因素係需在低能見度與高水流下，進行高風險性橋梁水下檢測，且檢測效果通常並不佳，光學影像技術需視水中的透視度好壞而定，非光學影像技術探測能力則可不受水中能見度影響。

誌謝

本文係財團法人中華顧問工程司「水面及水下無人載具自動橋梁檢測的評估和應用」研究案之部分成果，作者由衷感謝財團法人中華顧問工程司的支持與協助，在此一併申謝。

參考文獻

1. 交通部(2018)，公路養護規範，交通部頒布，臺北，臺灣。
2. 姚乃嘉，廖先格，莊友涵(2012)，「臺灣地區橋梁管理資訊系統」，橋梁維護管理技術種子教師培訓計畫—培訓課程論文集，臺北，臺灣，第251-338頁。
3. Ryan, T.W., Lloyd, C.E., Pichura, M.S., Tarasovich, D.M., and Fitzgerald, S. (2022), Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM), FHWA Report No. FHWA-NHI-21-002, National Highway Institute

(NHI), Federal Highway Administration (FHWA), Vienna, Virginia, U.S.A.

4. Browne, T.M., Collins, T.J., Garlich, M.J., O' Leary, J.E., Stromberg, D.G., and Heringhaus, K.C. (2010), Underwater Bridge Inspection, FHWA Report, Report No. FHWA-NHI-10-027, Office of Bridge Technology, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

5. 交通部(2018), 公路橋梁檢測及補強規範, 交通部頒布, 臺北, 臺灣。

6. 交通部(2011), 橋基保護工設計規範, 交通部頒布, 臺北, 臺灣。

7. 邱永芳, 謝明志, 柯正龍, 林雅雯, 王仲宇, 連惠邦, 楊明德, 李維峰, 陳銘鴻, 胡志昕, 劉興昌, 洪紹勛, 張為光, 柯永彥, 鄭世豪, 梅興泰, 黃進國, 蔡明邑, 羅冠顯(2011), 訂定跨河橋梁橋基冲刷檢測作業規範(草案)之研究, 交通部運輸研究所委託報告, 報告編號: MOTC-IOT-98-H1EB008, 臺北, 臺灣。

8. Chavel, B.W. and Yadlosky, J.M. (2011), Framework for Improving Resilience of Bridge Design, FHWA Report No. FHWA-IF-11-016, Office of Bridge Technology, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

9. Lee, G.C. (2013), "Development of Reliability-Based Bridge Limit States for Extreme Loads-Recent Progress," Proceedings of the 9th US-Taiwan Bridge Engineering Workshop, Taoyuan, Taiwan, pp. 15-32.

10. FHWA (2022), "National Bridge Inspection

Standards (NBIS)— 23 CFR Part 650," Federal Register, Vol.87, No.88, pp. 27396-27437.

11. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2018), The Manual for Bridge Evaluation (MBE), 3rd Edition, AASHTO, Washington, D.C., U.S.A.

12. Everett, T.D., Weykamp, P., Capers, H.A., Cox, W.R., Drda, T.S., Jensen, P., Juntunen, D.A., Kimball, T., and Washer, G.A. (2008), Bridge Evaluation Quality Assurance in Europe, FHWA Report, Report No. FHWA-PL-08-016, FHWA, Arlington, Virginia, U.S.A.

13. Hearn, G. (2007), Bridge Inspection Practices, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) No. 375, Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C., U.S.A.

14. 蘇振維, 張舜淵, 楊幼文, 江明益, 黃俊豪, 姚乃嘉, 王仲宇, 廖先格, 葉啟章, 許文科, 任以永, 魏薪怡(2018), 我國橋梁檢測方式之發展探究, 交通部運輸研究所委託報告, 報告編號: MOTC-IOT-105-PEB018, 臺北, 臺灣。

15. National Highways (2021), Design Manual for Roads and Bridges (DMRB)— Volume 3: Highway Structures: Inspection and Maintenance, National Highways, Guildford, United Kingdom.

16. Department of Transport and Main Roads, Queensland Government (2004), Bridge Inspection Manual, Registration Number: 80.640, 2nd Edition, Queensland Government,

Brisbane, Queensland, Australia.

17. VicRoads (2018), Road Structures Inspection Manual, Department of Transport, Victoria State Government, Melbourne, Victoria, Australia.

18. New Zealand Transport Agency (NZ Transport Agency) (2001), Bridge Inspection and Maintenance Manual, Manual Number: SP/M/016, NZ Transport Agency, Wellington, New Zealand.

19. 日本国土交通省(2019), 道路橋定期点検要領, 国土交通省道路局, 東京, 日本。

20. 日本国土交通省(2019), 橋梁定期点検要領, 国土交通省道路局国道技術課, 東京, 日本。

21. 日本国土交通省(2013), 総点検実施要領(案)—橋梁編, 国土交通省道路局, 東京, 日本。

22. 日本国土交通省(2019), 水中部の状態把握に関する参考資料, 国土交通省道路局国道技術課, 東京, 日本。

23. 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社 (2022), 保全点検要領—構造物編, 日本(株)高速道路総合技術研究所(NEXCO総研), 東京, 日本。

24. 岐阜県県土整備部(2022), 岐阜県橋梁点検マニュアル, 岐阜県県土整備部道路維持課, 岐阜, 日本。

25. 交通運輸部(2021), 公路橋涵養護規範, 標

準編號: JTG 5120-2021, 交通運輸部, 北京, 中國。

26. Strock, T. and Browne, T.B. (2009), “Overview and Comparison of Nationwide Underwater Bridge Inspection Practices,” Transportation Research Record, No. 2108, pp. 97-106.

27. Collins, T.J., Jarmakowicz, R.J., and Garlich, M.J. (1989), Underwater Inspection of Bridges, FHWA Report No. FHWA-DP-80-1, Demonstration Projects Division, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

28. Division of Maintenance, California Department of Transportation (Caltrans) (2018), Structures Maintenance & Investigations (SM&I) Inspection Procedures Manual, Division of Maintenance, Caltrans, Salinas, California, U.S.A.

29. Bridge Section, Idaho Transportation Department (ITD) (2022), Idaho Manual for Bridge Evaluation, ITD, Boise, Idaho, U.S.A.

30. Office of Bridges and Structures, Iowa Department of Transportation (IowaDOT) (2014), Bridge Inspection Manual, IowaDOT, Ames, Iowa, U.S.A.

31. Massachusetts Department of Transportation (MassDOT) (2019), Bridge Inspection Handbook, MassDOT, Boston, Massachusetts, U.S.A.

32. MnDOT Bridge Office (2017), State of Minnesota Bridge and Structure Inspection Program Manual, MnDOT Bridge Office,

Minnesota Department of Transportation (MnDOT), Oakdale, Minnesota, U.S.A.

33. Office of Structures, New York State Department of Transportation (NYSDOT) (2016), Bridge Inspection Manual, NYSDOT, Albany, New York, U.S.A.

34. Pennsylvania Department of Transportation (PennDOT) (2021), Bridge Safety Inspection Manual, 2nd Edition, PennDOT, Harrisburg, Pennsylvania, U.S.A.

35. Bridge Preservation Office, Washington State Department of Transportation (WSDOT) (2018), Washington State Bridge Inspection Manual, Manual No. M36-64.08, WSDOT, Olympia, Washington, U.S.A.

36. Bureau of Structures, Wisconsin Department of Transportation (WisDOT) (2017), Structure Inspection Manual, WisDOT, Madison, Wisconsin, U.S.A.

37. U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2020), Inspection and Evaluation of USACE Bridges, Engineer Manual No. EM 1110-2-1102, USACE, Department of the Army, Washington, D.C., U.S.A.

38. USACE (2020), USACE Bridges Safety Program, Engineer Regulation No. ER 1110-2-111, USACE, Department of the Army, Washington, D.C., U.S.A.

39. Childs, K.M. (2001), Underwater Investigations—Standard Practice Manual, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 101, American Society of Civil

Engineers (ASCE), Reston, Virginia, U.S.A.

40. Kelly, S.W. (1999), Underwater Inspection Criteria, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, U.S.A.

41. Chao, C. (2011), “History of Caltrans Underwater Investigations,” Proceedings of the 7th US-Taiwan Bridge Engineering Workshop, Taipei, Taiwan, pp. 245-276.

42. Transport for NSW (TfNSW) (2021), Underwater Bridge Inspections, QA Specification B350, TfNSW, Sydney, New South Wales (NSW), Australia.

43. Browne, T.M., Collins, T.J., Garlich, M.J., O’Leary, J.E., and Heringhaus, K.C. (2010), Underwater Bridge Repair, Rehabilitation, and Countermeasures, FHWA Report No. FHWA-NHI-10-029, Office of Bridge Technology, FHWA, Washington, D.C., U.S.A.

44. Lamberton, H.C., Sainz, A.J., Crawford, R.A., Ogletree, W.B., and Gunn, J.E. (1981), Underwater Inspection and Repair of Bridge Substructures, NCHRP No. 88, TRB, Washington, D.C., U.S.A.

45. Shen, J., Forsyth, R., and Kilgore, R. (2018), Underwater Inspection of Bridge Substructures Using Imaging Technology, FHWA Report No. FHWA-HIF-18-049, Office of Infrastructure Research and Development, FHWA, Arlington, Virginia, U.S.A.

46. USACE (2013), Hydrographic Surveying, Engineer Manual No. EM 1110-2-1003, USACE, Department of the Army, Washington,

D.C., U.S.A.

47. Sun, K., Cui, W., and Chen, C. (2021), “Review of Underwater Sensing Technologies and Applications,” *Sensors*, No. 21, Issue 23, 7879.
48. Wightman, W.E., Jalinoos, F., Sirles, P., and Hanna, K. (2003), *Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems*, FHWA Report No. FHWA-IF-04-021, Central Federal Lands Highway Division, FHWA, Lakewood, Colorado, U.S.A.
49. 社団法人全国地質調査業協会連合会 (1997), 橋梁下部構造の計測・診断技術の開発に関する共同研究報告書—橋梁基礎の洗掘調査マニュアル(案), 日本建設省土木研究所共同研究報告書第157號, 東京, 日本。
50. 社団法人日本道路協会(2000), 既設道路橋基礎の補強に関する参考資料, 社団法人日本道路協会, 東京, 日本。
51. 公益社団法人日本地盤工学会(2001), 地盤工程の地物探査技術応用事例集, 公益社団法人日本地盤工学会, 東京, 日本。
52. 中國土木工程學會非破壞檢測委員會 (2010), 橋梁檢測方法與應用, 科技圖書, 臺北, 臺灣。
53. Browne, T.M. (2010), “Underwater Acoustic Imaging Devices for Portable Scour Monitoring,” *Proceedings of the 5th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5)*, San Francisco, California, U.S.A., pp. 931-940.
54. Muste, M., Hauet, A., Ho, H.-C., and Nakato, T. (2008), *Quantitative Mapping of Waterways Characteristics at Bridge Sites*, Report No. IHRB TR-569, Iowa Highway Research Board (IHRB), IowaDOT, Ames, Iowa, U.S.A.
55. Turkan, Y., Laflamme, S., and Tan, L. (2016), *Terrestrial Laser Scanning-Based Bridge Structural Condition Assessment*, Part of Project No. DTRT13-G-UTC37, Midwest Transportation Center, Office of the Assistant Secretary for Research and Technology, U.S. DOT, Ames, Iowa, U.S.A.
56. Kocak, D.M., Dalglish, F.R., Caimi, F.M., and Schechner, Y.Y. (2008), “A Focus on Recent Developments and Trends in Underwater Imaging,” *Marine Technology Society Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 52-67.
57. DeWall, P., Bartelt, N., Owens, G., and Lovelace, B. (2017), *Multi-Beam Sonar Infrastructure Mapping Research*, MnDOT Report No. MN-RC 2017-40, MnDOT, St. Paul, Minnesota, U.S.A.
58. 國立中央大學(2022), 109年第一區養護工程處因應氣候變遷橋梁安全維持計畫—台15線關渡橋檢測、監測及整體安全評估工作, 公路總局第一區養護工程處, 樹林, 新北, 臺灣。
59. Purvis, R.L. and Smith, W. (1994), *Underwater Bridge Maintenance and Repair*, NCHRP No. 200, TRB, Washington, D.C., U.S.A.
60. Hunt, B. (2009), *Monitoring Scour Critical Bridges*, NCHRP No. 396, TRB, Washington, D.C., U.S.A.

個體旅次需求響應 快運系統 - DDRT/ TDRT介紹

關鍵詞(Key Words)：個人快捷交通(Personal Rapid Transit)，需求響應快運(Demand Responsive Transit)，自動導軌交通系統(Autoguide Rail Transit)，懸掛式快運系統(Suspended Transit System)，自動駕駛車(Automated Driving Car)，無人駕駛(Unmanned Driving)

國立臺灣大學／土木工程研究所交通組／教授(退休)／張堂賢 (Chang, Tang-Hsien)



摘要

交通為經濟之母。科技日新月異，各式先進設備、管理、服務不斷導入交通運輸系統。交通壅塞是城市的疾病，其帶來能源虛耗、空氣汙染、交通事故、及停車困難。基於科技進步，發展個人個性化公共交通快運系統是必然趨勢，各先進國已陸續研發中。本文首先探討國內當前交通建設困境及迷失，再說明小型個體化交通運具發展趨勢，進而介紹一種較理想的個體旅次需求響應快運系統DDRT/TDRT，並與輕軌系統做一比較。最後期望臺灣能聚集能量研究發展此技術，建構安全、便捷高效、綠色的交通體系，進而成為一個國際個體需求響應快運的交通產業中心。



Introductory to Individualized Trip Demand Responsive Transit System - DDRT/TDRT

Abstract

Transportation is the backbone of the economy. With the rapid advancement of technology, various advanced equipment, management, and services are continuously being introduced into the transportation system. Traffic congestion is a disease of the city, which leads to energy consumption, air pollution, traffic accidents, and parking difficulties. Based on technological progress, the development of personalized public transportation systems is an inevitable trend, and various advanced countries are already researching and developing such systems. This article first explores the current difficulties and confusion in domestic transportation construction, and then explains the trend of developing small-scale individualized transportation vehicles. It further introduces a more ideal individual travel demand-responsive transit (DDRT/TDRT) system and compares it with light rail systems. Finally, it is hoped that Taiwan can gather energy to research and develop this technology, build a safe, convenient, efficient, and green transportation system, and become an international transportation industry center that responds to individual demand.

壹、前言

交通為經濟之母。伴隨科技一直日新月異，各式先進設備、管理、資訊服務導入交通運輸系統，便利了用路人出行的需求，更有效率且安全的完成每個旅次行為。

臺灣高科技產業居於世界翹楚，但交通產業卻無足輕重，以下概指當前交通人必須正視之要。

一、當前交通建設困境及迷失

(一) 交通壅塞是世界各主要城市的通病，帶來能源虛耗、空氣汙染、交通事故、停車空位難得、用路人受阻於路網當中虛度光陰…，都是通勤中必要之惡。業界導入人工智慧技術推行智慧交通，試圖除卻上述之惡，行之多年卻無長足進展，城市生活缺乏幸福感。

(二) LRT（輕軌、有軌電車、ART智軌）因無專屬（封閉式）路權，仍需在混合車流中與通過路口之汽機車競爭綠燈秒數。此外，這類大眾運輸系統營運效率低，易與混合車流中其他運具發生事故，運具內毫無隱私，易行性（Mobility）和可達性（Accessibility）低，用地取得不易，路網擴充難，建設週期長，生命週期成本（Life Cycle Cost, LCC）高。地方政府競相爭取建設捷運，無顧日後恐致債臺高築延及子孫，生命週期成本無力自償的財務能力，必致系統荒蕪。

二、交通系統更迭暨建設趨勢

人工智慧於交通運輸之技術有長足的進步，例如：無人駕駛逐漸成熟、智慧感知、智慧控制、數位交通、大數據智慧調度、無感

（刷臉）支付、甚至元宇宙虛實體驗；再則無碳排的清潔能源如輪穀電動機、氫氣動力發展、碳交易實施，促成交通系統更迭。

過去，應用智慧運輸科技於私人運具企圖提升道路交通安全與效率並無顯著成效，競相建設捷運又無永續財力支撐。是故發展個人個性化公共交通快運系統是一種權衡之計，也因為兼顧個體需求和捷運特性，這種系統將會興起。

早在1976年美國賓州大學Vukan R. Vuchic教授即在他的Urban Public Transportation - Systems and Technology（1981）書中介紹了美國開發個人快捷交通Personal Rapid Transit（PRT）構思的例子。初期PRT的構想是用來取代汽車，有軌路（導引系統）、以小車廂（2-6坐）密集發車服務、一站直達目的站（中間不靠站）、完全自動駕駛、每小時可發300-500車次。如Stanray公司在Dallas機場建的軌上系統Jetrail（1968-1974）；Varo公司於華盛頓1972年運輸會展中展出軌上系統6人坐Monocab系統，後來被Rohr公司重新改造但並沒實現；法國Matra公司開發Aramis系統，4人坐，運能每小時1.5萬人，但被質疑其安全而無再有後續的開發；另外還有德國的Cabinenlift，日本的CVS等。這些都只有構想或初級的試驗而已，沒有達到真正系統實現。總言之，早期美國做為一個汽車製造大國，運輸系統建設自然以公路為金，當下並不看好PRT後來的前景。

近年隨著物聯網技術、邊緣計算、人工智慧、高能電池、軌道導引技術等技術變革，催生PRT交通系統在多國落地試驗或小規模營運。

荷蘭getthere公司，2002年荷蘭世界園藝博覽會上提供了4人座的簡易PRT，主要技術特徵是地面磁導模式。英國倫敦的Heathrow機場，於2011年UltraGlobal公司首次建成PodCars（設計速度40km/h，營運速率約25-30km/h）的

PRT系統，連接航站大廈和遠端汽車停車場。PodCars每車可搭載4人，膠輪式車輛自動駕駛，行駛於有獨立路權的混凝土車道面層，不與其它運具混流(圖1)。瑞典的Vectus公司於2013年在韓國順天灣國際園藝博覽會會場到順天灣城

區建造了無人駕駛軌道計程車，軌道全長4.64公里(圖2)。墨西哥仿美國Morgantown GRT (Group Rapid Transit, 1975) 導輪式軌道，改進打造出Modutram PRT系統。於2015年，墨西哥瓜達拉哈拉市建成一條PRT系統(圖3)。



資料來源：<https://newatlas.com/heathrow-ultra-prt-system/19493/>

圖1 倫敦Heathrow機場的PRT



資料來源：<https://newsroom.posco.com/en/koreas-first-personal-rapid-transit-prt-skycube/>

圖2 韓國順天灣國際園藝博覽會會場的PRT



資料來源：<https://zhuanan.zhihu.com/p/36483697>

圖3 墨西哥瓜達拉哈拉市的PRT

知乎 @张自由

微軟位於西雅圖的Redmond總部曾規劃園區級的PRT(Sky Web Express)，4人座車廂(圖4)。蘋果總部位於三藩市的Cupertino也曾規劃過一套園區PRT系統。美國北卡州立大學計畫建造的EcoPRT系統是設計行駛在專用軌道上的一種自動駕駛艙。

上述系統幾乎是軌上或道路面行駛的系統設計，也有一種軌下或廊道下的設計，美國新澤西州曾構想一種JPods，是採吊掛式(軌下系統)設計的PRT。Metrino公司也曾為阿聯酋設計一款吊掛式PRT系統Mister。但，終究沒實際試驗與實現的例子。

中國大陸近年也有幾家公司在嘗試研發PRT：微軌智行(軌下吊掛系統)、快速網軌(軌上系統)、超軌(軌上系統)、天滴系統

(軌下吊掛系統)、亞軌(獨立軌上及獨立軌下吊掛系統)、飛豆(軌下吊掛系統，圖5)、管聯網(軌上系統)、共軌(軌上系統)。但目前都僅是構思、研發階段，少有試驗線路，失敗者多，均未有真實運行實例。

然大陸成都天府機場之前仿倫敦Heathrow規劃了PRT接運系統，全場4800米，設計時速30-40千米/小時，5分鐘內就可以到達航站樓。系統由昆船資訊弱電公司花3年研發，在2021年12月交驗(圖6)。

綜上，儘管現今許多國家有些或曾經落地試驗未能持續發展、亦或有些僅有小規模商轉，我們不難發現世界越來越多交通運具公司關注到PRT的潛力。



資料來源：<https://zhuanlan.zhihu.com/p/36483697>

圖4 微軟於西雅圖Redmond總部曾規劃園區級的PRT



資料來源：私人檔



圖5 飛豆(軌下吊掛系統)



資料來源：
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1626774771557258202&wfr=spider&for=pc>
<https://www.meipian.cn/3xy3rth8>

圖6 成都天府機場規劃PRT接運系統

貳、個體旅次需求響應快運系統 DDRT/TDRT介紹

作者致力於交通運輸領域理論與實務工作40餘年，基於環境永續、社會永續和政治永續，提出：在可見的未來，PRT是運輸系統選擇的趨勢並漸成主流。然而，前文中既有系統，仍有待精進。

承上，本文重新設計「個體旅次需求響應快運系統」（DDRT/TDRT），其內涵說明如下。

DDRT代表的是Dual mode Demand Responsive Transit，也就是指可使用雙重運行

的需求響應快運系統，此雙重是快運車輛可以走廊道面上（以下簡稱廊上模式）也可以切換在廊道下面以吊掛方式行駛（以下簡稱軌下模式）。廊道可用鋼軌、鋼板、混凝土板或瀝青鋪面建構而成。車輛由轎廂與底盤或轉向架組成；廊上模式時，車輛是轎廂與底盤的組合；當要走吊掛模式時，車輛是由轎廂與轉向架組合。轎廂是乘客安置的空間。

Triple mode Demand Responsive Transit（TDRT）則是DDRT的進階應用，讓軌上模式車輛可穿梭於混合車流的C型路權車道。

表1列舉DDRT/TDRT性能與特質：

一、車輛尺寸及廊道/軌道敷設

DDRT/TDRT尺寸長寬大約是3.5m x 1.75m（m為公尺），基本是以A型路權（獨立路權）規劃，高架為主（至少離地面淨高5m）、地下為輔。主線架設以T型樑結構，左右便於佈置一去一回運行線路。其立柱占地小於1.5m²（平方公尺）。

表1 DDRT/TDRT特質

指標	TDRT-可三模運行的需求響應快運 TANGOS(Transit on an Autonomous Networking to Go System) 特質
廊道敷設方式及占地	A型路權(獨立路權)：高架為主、地下為輔。占地<1.5m(地面)
三模運行模式	廊上(軌上)模式與廊下懸掛(軌下)模式+一般汽車道
最高速率及平均運行	設計80km/小時；運行平均50km/小時
設站模式	離線車站模式，站到站直達、中途不停靠
最大爬坡能力	12%-15%
最小車頭距	3s(前期試運行)1.5s(後期成熟運行)
單列載客	4人座小車廂(可虛擬3車廂編組)，16-20人座長車廂
運輸能量	1.5-3.0(萬人/hr)
駕駛	無人駕駛，全自動
安全設計	車廂不會尾追直碰撞確保乘客安全，裝置緊急逃生空氣泵或Z連杆落地
營運時間	全天24hr運營，全年無休，依需求APP下單即時派遣
調度	大數據人工智慧調度系統，資源優化數理模式
乘客網約	APP叫車、無感支付
市場	全球：觀光景區、高鐵車站、機場捷運，發揮主幹交通網外的微血管交通作用
綠色交通	電能、軌道光伏板、碳中和，碳交易

二、三模運行模式

在DDRT形式是依地理環境建置廊上（軌上）運行模式或廊下吊掛（軌下）運行模式，在不停車下變換運行模式。第三形式運行TDRT是DDRT延伸模式，即為便於最後一哩路需求而設計能行駛於一般汽車道。當然車輛必需是類汽車的轎廂+底盤，且有如自動駕駛汽車般器件裝備。對於此模式的車輛是有限制其最大可走500m及20kph（每小時公里數）時速限制的。

三、行駛速率

DDRT/TDRT設計車輛（Design Vehicle）的設計速度定在80kph，商業運轉大致是50kph-60kph。

四、設站模式

車站不設在主線上，以離線方式設置。因此，在主線行駛的車可一站直達、中途不停靠，沒紅綠燈阻攔。

五、爬坡能力

DDRT/TDRT的車空重約0.8-1.0T（T為公噸），滿載約1.3-1.5T。採輪轂電機驅動，最大爬坡率12%-15%。基於城市不會有大的土地空間設站，又要講究運作效率，譬如要配合公車站乘客同月臺轉乘，DDRT/TDRT必需設計在短距離（30m內）能上能下5m高坡。轎廂內座椅有順應仰角自動調節裝置，乘客不致不舒適。

六、駕駛模式

DDRT/TDRT為全自動、無人駕駛車。

七、最小車間距

DDRT/TDRT基本可稱為類有軌的汽車，根據公路設計規範，最短煞停距離定在反應時間在高速公路/郊外公路是2.5s（s為秒）、在市區公路是1.5s。本DDRT/TDRT車頭時距初期運行設在3s（<2.5s），待系統穩定後會逐漸調進到2.5s，2.0s，以1.5s為目標，符合公路設計安全規範。

八、列車及編組

DDRT/TDRT單車是4人座設計，可在車站串列編組，技術上稱‘靜態編列’，基於車站市區地理空間及成本考量，設計量體限制以3廂一編為限；在主線行動中可完成自動控制4廂一列編組，稱‘動態編列’。長編列及12~16人座長轎廂是限制行駛路線及停靠特定車站的。

九、運輸能力暨載客容量

許多交通運輸行業人士都會關切，還有人疑問小小DDRT/TDRT能運多少人？學過交通運輸工程的人都會算，公路交通量單位是veh/hr（每小時車流量），其實以車頭時距來計算是一樣，就是veh/hr=3600s/t（t表示車頭時距，veh=1/t）。DDRT/TDRT初期按3s的車頭時距計算，每小時車流量為3600s/3s=1200輛，若每輛車搭載4人，每小時輸送人流是4800人/h（h是小時）；若3列靜態編，最大人流可達=3600/3*4人*3car=14400人/h。車頭時距會依系統漸進穩定採2.5s-2.0s~1.5s：於是我們得到單線單向最大運人流可達=3600s/1.5s*4坐*3廂=28800人/h，這是載客運輸容量，其中並未計算1輛動態編列車，也就是DDRT/TDRT的載運能力每小時近乎3萬人。若需求超過這個數就會發生延誤，若是常態性超過容量，就得考慮增線了。

十、安全設計

無疑安全是任何交通系統最重要的課題，

DDRT/TDRT從設計、原件組裝、工程、營運、車控等每個階段都必須十分講究。這裡我們無法一一表述，但有兩個應對危機的關鍵設計：

(一) 同軌列車運行是限制只同向行駛，DDRT/TDRT車子如同汽車駕駛擁有自主自動控制行駛權，於是同向行駛只怕追尾事故。我們的設計儘管多完善，萬一追尾，仍必需確保絕對不會發生前後轎廂互相撞擊。確保方式也即在轉向架及底盤前後必設有類保險杆裝置，而這裝置必包在廊軌內，一但發生撞擊，衝力是由保險杆及廊軌吸收，乘客方受傷害幾乎降到最低。

(二) DDRT/TDRT車的動力能源目前設計是採配鋰電池（2000kw），電池包裝在（吊掛模式）轉向架及（廊上模式）底盤頭部（如汽車）。因此最大危急莫過於電池發生自燃，於是如何協助乘客逃生是重要設計課題。我們對吊掛模式的做法是每台車都會裝Z型連杆件，在危急時，Z杆件可以手動讓轎廂下降至地面（約5公尺）；對廊上模式則是分離底盤，轎廂往後滑開，緊急逃生窗可手動推開。

十一、營運、網約及調度

DDRT/TDRT是全天候24小時營運、365天全年不休，顧客只要在APP下單叫車，系統雲端後臺即刻以大資料並數學優化演算法派遣最合適的車輛接客。乘客是先到站者上車掃碼即先行（FIFO），與預約時間先後無關。

十二、其它

基於DDRT/TDRT是採綠能電池，無碳排，可執行碳中和及碳交易。

參、DDRT/TDRT與其它輕軌系統（LRT）的比較

這裡我們列出一些比較突出的差異：

- 一、LRT幾乎是B型路權，如高雄、新北的輕軌，要與汽機車爭綠燈秒數。而DDRT/TDRT則是A型路權設置，沒紅綠燈。
- 二、LRT敷設軌道占地面積要3.7m~4.5m寬。而DDRT/TDRT只要1.5m。
- 三、LRT因常要通過紅綠燈路口，車速僅35kph，站站停，故均速只在20~25kph間；DDRT/TDRT車速可達80kph，不站站停，一站直達，均速在50~60kph。
- 四、LRT最大爬坡率6%，DDRT/TDRT可達12~15%。
- 五、發車方式及營運時間：LRT為依班表排班式發車，因為不能超車，都要靠站停車，班距最小得10分鐘，每天得營運不到15小時。DDRT/TDRT則是依客戶APP下單約車，機動派車，因是離線車站設置，過站不停靠，相當於超車，班班都是一站直達，且全天24小時營運。
- 六、運輸能量：LRT運輸能量約5000~10,000人/h；DDRT/TDRT可達15,000~30,000人/h。
- 七、施工及造價：在臺灣，捷運系統造價約60億/公里，LRT是捷運的1/5，12億/公里；而DDRT/TDRT基於幾乎可以廠鑄，現場安裝，現在建築多走鋼構廠鑄模式，DDRT/TDRT亦同。使得DDRT/TDRT施工期很短，造價大幅降低，約3億/公里，是LRT的1/4，捷運的1/15~1/20。

八、舒適度與私密性vs費率：LRT是傳統式大眾運輸工具，大家擠做堆，舒適性及私密性不如私家轎車，費率受政府管制而壓低，如政府不補貼，其財務通常是不可能收支平衡，久而久之，維護不足，服務低落。反觀DDRT/TDRT，打破傳統大眾運輸思維，轎車形式，舒適度與私密性都高。基於DDRT/TDRT造價低，費率可比照LRT或公車收費，可以不需政府財務補貼就可永續。

肆、交通產業的願景

時間並沒有變快，可是時代變化的特別快。近來ChatGPT及量子通訊6G就要翻轉人類新生活了，我們有沒有跟上？那是一種實力，惟交通是經濟建設發展之母，因此交通模式也到該演進的時候：堅持新發展理想，才有更人性化-以人為本高品質應用技術帶到交通建設，構建安全、便捷高效、綠色的交通體系，終會顯現其效益，讓臺灣再次展現實力，立足國際前沿。

前面已經介紹DDRT/TDRT，其是一種小型化、智慧化、共用化、個性化、零排放、無噪音無污染、無人駕駛，提供線網公共交通中途不停靠，可一站直達旅行服務的新型智慧交通系統-個人個性化公共交通快運系統。如能在臺灣打造其商業示範線，必定會為臺灣創造另一個奇蹟。

DDRT/TDRT的主體產業鏈大致包括：

一、路軌、立柱、道岔器

臺灣擁有多家鋼構公司，支撐臺灣鋼結構住宅、橋梁、交通設施等重大建設。DDRT/TDRT為輕載車，路軌標準較低，任務並不艱巨。土木工程建築多採用廠鑄模塊模式，施工快，可為DDRT/TDRT交通系統提供充足的工

程能力支援。道岔器是需要新開發的，過去國內鐵道的道岔都仰賴從國際大廠進口，DDRT/TDRT系統較輕載，轉軸力道小，道岔器可自行開發。據交通部已啟動在高雄燕巢成立鐵道技術研究及驗證中心，研發轉軸道岔器是重點任務。

二、車廂、安全設備

初期，尤其實驗測試階段，所需的車廂不會太多，小廠甚至鐵工廠就可以應付。或者，購買既有電動小汽車框架來改也可應付，待需求量產時，自有大廠參與。至於安全設備，沒有太高端要求，現在臺灣許多鐵工廠可以支援供應。

三、轉向架、底盤

轉向架及底盤是重要裝備，需要開發。可由已啟動的鐵道技術研究及驗證中心一起合作。臺灣既有幾家汽車廠對底盤應比較有經驗，當然購買小型電動汽車來改造也無礙。

四、輪轂電機、電池、充電樁、光伏儲能系統

鋰電池、充電樁、光伏儲能系統在臺灣都有大廠，不是什麼問題。唯臺灣推電動車、電動機車比較晚，沒有完整輪轂電機大廠，這方面需要台商借鏡國外技術。輪轂電機無噪音不造成空氣污染，臺灣目前有少量電動機車如gogoro就是採輪轂電機。

五、自動駕駛軟硬體

需具備自動運行，如自動泊車、自動完成上下客檢測、自動避撞、智慧網聯，同時可根據應用場景不同，提供可自動切換廊橋面或廊橋下（吊掛）或汽車路面行駛等功能。DDRT/TDRT無人駕駛車，行駛在專用廊道主要通過車內的車載傳感系統，包括裝配毫米波雷達

(Minimeter Radar)及超音波雷達感知障礙物資訊(不須用光達, Lidar)。並根據DGPS及RFID或3D攝影機等感知所獲得的道路、車輛位置及控制訊號做出判斷, 控制車輛的速度和轉向, 確保車輛能夠安全、可靠地在道路上正常行駛。車輛由中央控制系統自動調度, 為乘客提供點到點的私人化、專享化交通服務。車輛可容納2~4名乘客。

六、通訊及傳感系統

DDRT/TDRT管控平臺使用物聯網、移動互聯網、雲端控制及邊緣計算技術管理車、路、站及乘客互動和交易, 所提供的全面感知、綜合監控、智慧調度、自動化營運和運維都仰賴完善的傳感及通訊系統。其中對乘客需提供線上約車、進站上車、一站直達、開門下車、無感掃臉交易認證等便捷出行服務, 讓大眾享受“公車出行、專車服務”、“綠色交通、高效便捷”的智慧化出行體驗。滿足客戶個性化需求響應快捷的全過程一體化旅行服務。基本通訊由4G/5G互聯網交通專網(VPN)、NB-IoT、新一代加密Wifi、藍牙、內控光纖骨幹網等構成通訊網路, 實現快速、安全、高效的網路連接, 實現即時動態的資訊連接。

七、雲控平臺、邊緣計算

綜合運行雲平臺, 必需全面掌握DDRT/TDRT交通運行動態、調度指揮效率、交通服務品質和安全保障情況, 實現基礎設備設施和車輛管理的資訊化、線路調配的自動化、車輛調度和運行的智能化和運維保障的流程化及自動化。邊緣計算掌握區域交通的基礎設施狀態(如立柱水準觀測、轉轍器等)及安全保障情況。

八、交易認證及服務系統

為乘客使用者提供APP網路約車服務, 通過

使用者行為大數據分析和平臺自我學習能力, 不斷優化使用者旅運服務流程和策略, 提供線上約車、進站上車、一站直達的便捷出行服務, 讓乘客使用者享受智慧化旅運體驗。為公眾用戶通過平臺提供的手機APP享受DDRT/TDRT交通資訊查詢、約車服務, 並結合平臺提供的掃碼、掃臉及智慧匹配等配套功能享受高端的乘車服務。

總結

過去臺灣發展軌道系統幾乎完全受制於他國技術, 造價昂貴且至今仍無法獲得關鍵技術移轉。世界越來越多交通運具公司關注PRT發展且DDRT/TDRT技術正在萌芽, 臺灣有機會與各國在同一起跑點上競爭技術發展。期待能在臺灣打造全球DDRT/TDRT產業中心, 向世界輸出這個具有財務永續、社會永續、政治永續的運輸系統。深根技術發展的同時, 也為社會創造更多有前景的工作機會。

作者基於40年的經驗, 衷心提出建言: 「個體旅次需求響應快運系統」DDRT/TDRT將是最佳運輸系統。單在臺灣DDRT/TDRT就有許多應用場合, 例如臺北內湖科技園區、新北捷運連接輔助線、新竹科技園區、台南科技園區等。DDRT/TDRT施工快, 成本低, 24小時營運等特色, 必會帶給特區地方繁榮發展。規劃建設可採公私部門合作PPP模式, 如: BOT, BT, BO, BOO...。

文末溫馨提醒: 呼應世界潮流講究ESG, 我們力倡DDRT/TDRT這種可財務永續的運輸系統建設, 不債留子孫才有社會永續, 不好大喜功排擠其他部門預算才有政治永續。建設好比人們買車, 選配件並非一味追求高大上, 必得細細盤算是否負擔得起(Affordable)。若有需要深入了解或觀看影片, 聯繫本人。

稿約格式

一、文字：稿件應以中文或英文撰寫，中文及英文摘要以400字為限。

二、單位：所有含因次之量須採用SI單位公制。

三、打字：

來稿請使用電子檔（以Word編排）圖、文需以單欄橫向編排方式，共同排列在文稿內(過大的圖或表可以附件方式呈現)，論文之長度(含圖)字數限5-6,000字以內；左、右邊界2.5公分，上、下邊界3公分，內文字體為細明體12點字，行距為1.5倍行高。

四、題目／作者：

論文題目宜簡明，作者姓名、任職機構、部門、職稱、技師科別列於論文題之下方，其服務部門及職稱以1，2，3編號註記在首頁末，另附上作者之生活照高畫質之電子檔。

五、關鍵詞：在題目中須選出中文及英文二至四個關鍵詞，並置於作者姓名下方。

六、章節及標題：論文之章節標題須列於稿紙之中央對稱位置，且加編號。小節標題亦應加編號但必須從文稿之左緣開始，例

壹、大標題（居中）

一、中標題（齊頭）

（一）子標題（齊頭）

1、小標題（齊頭）

（1）次小標題（齊頭）

七、數學式：所有公式及方程式均須書寫清楚，其後標式號於圓括弧內。為清晰起見，每一式之上下須多空一列。

八、長度：論文之長度(含圖)，內文以不超過6,000字或其相當之長度為準(以A4規格約8頁(含圖)計算)。

九、插圖與圖表：不論在正文中或圖裡本身，所有圖表、照片必須附有編號及標題或簡短說明，其編號請用阿拉伯數字，不加括號表示。如圖1、表2；Table 1、Figure 2，表的標題置於表的上方中間，圖的標題置於圖的下方中間。

十、符號：內文所有符號須於符號第一次出現時加以定義。

十一、參考文獻：

所有參考文獻須按其在文中出現之先後隨文註號碼於方括弧內，並依序完整列於文末；文中引用提及作者時請用全名，未直接引用之文獻不得出現。

參考文獻之寫法須依下列格式：

(1)期刊

林銘崇、王志成，「河口海岸地形變化之預測模式」，中國工程學刊，第六卷，第三期，第141-151頁(1983)。

Bazant, Z. P., and Oh, B. H., "Strain-rate effect in rapid triaxial loading of concrete," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.108, No.5, pp.764-782(1982).

(2)書籍

張德周，「契約與規範」，文笙書局，台北，第177-184頁(1987)。

Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method," McGraw-Hill, London, pp.257-295(1977)。

(3)論文集

蔡益超、李文友，「鋼筋混凝土T型梁火災後彎矩強度之分析與評估」，中國土木水利工程學會71年年會論文集，臺北，第25-30頁(1982)。

Nasu, M. and Tamura, T., "Vibration test of the underground pipe with a comparatively large cross-section," Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, pp.583-592(1973)。

(4)學位論文

陳永松，「鋼筋混凝土錨座鋼筋握裹滑移之預測」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，台南(1982)。

Lin, C. H., "Rational for limits to reinforcement of tied concrete column," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin, Texas (1984).

(5)研究報告

劉長齡、劉佳明、徐享崑，「高屏溪流域水資源規劃系統分析之研究」，國立成功大學臺南水工試驗所研究報告，No.53，台南(1983)。

Thompson, J. P., "Fire resistance of reinforced concrete floors," PCA Report, Chicago, U.S.A., pp.1-15(1963).



編後語

隨著社會時空脈動的變化，國內橋梁建設的思維也隨之演進蛻變，對於危險、老舊橋梁的改善方案，傳統拆除重建的作法已不再是唯一的選項，而是須同時考量與歷史建物的共存、文化資產的傳承，以及延壽加固的永續作為；此外，橋梁的建設除須滿足交通運輸的基本功能以外，更應注重生態環境的維護、當地風土文化意象的展現、提升橋梁技術之新工法引進與新材料應用等，期能達到維護環境、文物傳承、節能減碳與永續發展的建設目標。本期介紹中正橋改建工程為國內首座歷史建物橋梁原址保留、新舊橋梁併存共榮的案例；光復橋、福和橋之基礎補強及國道橋梁耐震補強案例，提供橋梁不同危害因子的補強延壽對策；南科預力吊床版橋及南迴公路安朔高架橋為友善生態環境的展現；北勢溪鐵路橋側推工法在一夜之間完成關鍵橋梁路段改建，為鐵路橋改建開創新頁；金門大橋及南方澳跨港大橋橋體充分展現地方特色並具地標效果；金門跨海大橋的完工更是大幅提升國內橋梁技術，也讓世界看見台灣。

最後特別感謝交通部高速公路局陳國隆副局長接受專訪，暢談職涯期間推動國內重大橋梁建設及引進新技術的心路歷程；中國土木水利工程學會宋裕祺理事長接受專訪，分享對台灣橋梁建設發展的歷程與心得，以及AI技術應用於橋梁維管的作為及未來方向；台灣大學歐昱辰教授及成功大學洪崇展教授撰寫橋梁工程新材料專題報導及提供寶貴資料等。



附記：

本刊於每年一、四、七、十月份以季刊方式發行，來稿請備紙本稿件一式乙份及原稿電子檔，以掛號郵寄台北市11491內湖區陽光街323號10樓，台灣世曦工程顧問股份有限公司／企劃部轉『中華技術』編輯小組收。

 **財團中華顧問工程司**
CHINA ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

台北市10637辛亥路二段185號28樓
28F., No.185, Sec. 2, Xinhai Rd., Taipei 10637, TAIWAN
Tel: (02) 8732-5567, Fax: (02) 8732-8967, <http://www.ceci.org.tw>

夢想和幸福

零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

CECI



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw