

台88線 萬大大橋 橋梁先建後拆 換底工法之設計與分析

林俊和／交通部公路總局第三區養護工程處高雄工務段段長

胡傑信／交通部公路總局第三區養護工程處高雄工務段主辦工程司

蕭天任／林同棧工程顧問股份有限公司專案工程師

前言

台灣位於環太平洋地震帶及亞洲颱風鏈島上，常受地震、強風及暴雨之威脅，且台灣河川坡陡流急，令橋梁基礎遭洪水沖刷而裸露，加上許多老舊橋梁不符現行耐震規範之標準，造成耐震及耐洪能力不足。是台灣許多跨河橋梁的典型問題。

高雄市與屏東縣間主要跨越高屏溪之橋梁為：里嶺大橋、高屏大橋、萬大大橋及雙園大橋，自雙園大橋斷橋後，台88線成了主要替代道路，車輛改道導致道路服務水準不佳，服務水準已降至E級，而周邊道路如台1線、台21線、縣道188之道路服務水準也有明顯之下降。

台88東西向快速公路西端位於高雄市鳳山區銜接中山高速公路，東行至竹田鄉與南二高相連，全長約20.5公里。沿線經高雄市鳳山、大寮、大發工業區、屏東縣萬丹及潮州等地，計畫工址「萬大大橋」為台88線及188縣道跨越高屏溪路段，總長2.4公里，為往來高雄與屏東縣主要橋梁之一（圖1）。

台88線萬大大橋經歷莫拉克風災，大量洪水夾帶土石沖刷萬大大橋（圖2），其洪水量超過200年重现期距，造成部份橋墩基礎因沖刷而裸露達3公尺，經評估後，顯示萬大大橋深槽區之橋墩耐震及耐洪能力不足（圖3），包含：橋柱耐震能力不足、基樁強度不足、基樁承载力不足及通洪斷面不足等等。



圖1 台88線萬大大橋位置圖



圖2 莫拉克風災時萬大大橋與洪流照

橋梁改建與原橋補強方案評估

原橋補強方案

在優先考量不影響橋上交通之條件下，一般橋墩補強工法包括：RC 包覆補強、鋼板包覆補強、FRP 包覆補強等（圖 4），以增加其橋柱強度及韌性。

而基礎補強方面，一般採用增樁方式補強其承載力，但是因為向外增樁的關係，將導致通洪斷面更加縮小，並使沖刷加劇，裸露情形將更加嚴重（如中沙大橋，圖 5），日後仍需持續辦理基礎補強，故此一補強方式恐治標不治本。

原橋改建方案

如考量橋梁使用之長遠性則採用橋梁改建方案，半半施工為降低橋上交通衝擊之施工方式。本案依據萬大大橋之橋梁配置特性及交通流量，因當時雙園大橋已遭沖毀阻斷，故考量 2 種情境進行分析：情境一為雙園便橋尚未完成；情境二為雙園便橋通車。分析成果彙整於下表 1。

由表 1 可知，無論雙園便橋通車與否，台 88 線之服務水準皆為 F 等級，故本案若採「半半施工」之方式進行改建，除了影響台 88 線及 188 縣道之車行速度外，更將波及其他聯外道路，如台 1 線或台 17 線等，恐引起民怨並增加民眾繞行之油耗及時間上之社會成本，本方案對該地區造成之衝擊有待克服。

表 1 各情境下半半施工之交通流量分析成果

路線編號	方向	雙園便橋未通（情境一）				雙園便橋通車（情境二）					
		施工階段	尖峰小時流量	道路容量	V/C	等級	施工階段	尖峰小時流量	道路容量	V/C	等級
台 88 線	往東	一	2,998	1,600	1.87	F	一	2,463	1,600	1.54	F
	往西	一	2,996	1,600	1.87	F	一	2,531	1,600	1.58	F
縣道 188	往東	二	1,580	1,300	1.22	F	二	1,082	1,300	0.83	E
	往西	二	1,343	1,300	1.03	F	二	1,055	1,300	0.81	E

設計方案評估

為免橋梁改建方案施工期間衍生龐大之社會成本，又需排除傳統補強方案造成日後橋梁管理維護額外花費，經評估後以「橋河並治」理念，從「生命週期整體考量」思考，採取原橋補強方案，上部結構不改建，但以「下構改建」方式達到「耐洪」及「耐震」能力提昇之目的。

其中新建之下構是依最新之耐震設計規範設計，故能整體提昇萬大大橋之耐震能力。並且重新進行水力分析，將基礎下降，以增加其通洪斷面，從根本解決橋梁耐洪能力不足之問題。

國內首座先建後拆下構改建工法

工程概述

由於莫拉克颱風造成台 88 線萬大大橋橋墩基礎裸露，經評估極需補強墩柱基礎自 P4 至 P25 墩，如圖 6 所示，本案所需經費約 10 億元，施工期程規劃為 2 年。

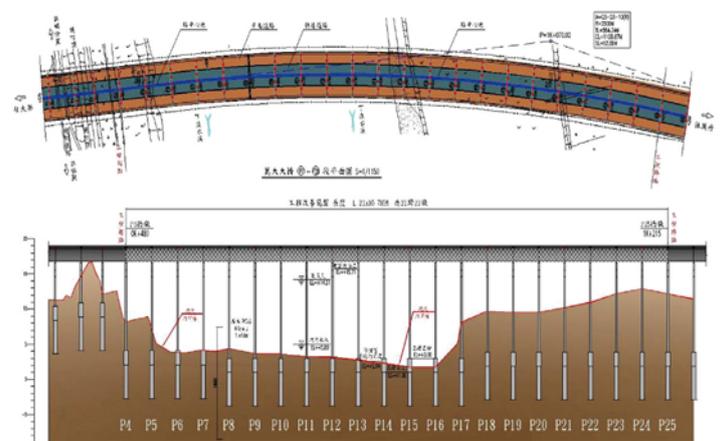


圖 6 萬大大橋補強工程範圍圖

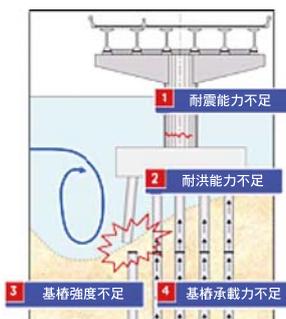


圖 3 萬大大橋橋墩耐震及耐洪能力不足



圖 4 傳統 RC 包覆及鋼板包覆補強示意圖



圖 5 基礎增樁使沖刷加劇

工法說明

如何在不影響上部結構及車行之情況下進行下部結構改建，是本案是否可行之關鍵課題，故本案採用的是國內首座帽梁施加預力之「先建後拆下構改建工法」，以下針對此一工法進行說明。

原萬大大橋是屬於 4 支獨立之單柱橋柱，本案之改建是於原萬大大橋兩旁及中間設立新基礎及橋柱後，施作擴大式帽梁連結舊帽梁，成為 7 柱式門架結構。並於新帽梁內施拉預力之後依序切除舊橋柱並打除，即完成下部結構改建。其施工順序示意圖如圖 7 所示。

施工變位控制

由於本案在切除原橋柱時上方仍維持車輛通行，故本案利用於帽梁內施加預力，以控制切除舊橋柱後的帽梁變形。

依據等值載重理論，我們配置折線線型的預力鋼腱並施加預力，使鋼腱折角處產生四個集中力以抵抗原橋柱及上部結構的重量（圖 8），最後分析的結果顯示：切除舊橋墩後帽梁僅變形 0.3 公分，不影響上部結構及用路人安全。

安全檢核

為確保施工中及完工後之結構安全，本案利用 SAP 2000 V14 進行施工步驟模擬，並針對各階段之應力逐一檢核。於各施工步驟中，混凝土應力需依據 98 年 12 月所頒布「公路橋梁設計規範」第八章之內容進行檢核，其中壓應力不得大於 $0.55f_{ci}'$ ；拉應力不得大於 $2\sqrt{f_{ci}'}$ ，施拉預力時各混凝土強度如下：新澆鑄時混凝土強度為 350 kg/cm^2 ；原結構混凝土強度為 280 kg/cm^2 ，施工中容許應力彙整於表 2 所示。

階段分析中之應力如下所示：

步驟一、原萬大大橋興建及拓建

原萬大大橋於民國 81 年 5 月完工，其懸臂帽梁施

拉有 1281.6 Ton 之預力；隨後在 87 年 1 月拓建完成側車道，上部結構皆為簡支 PCI 梁。經過分析，其既有帽梁之最大壓應力 (σ_{\min}) 為 -80 kg/cm^2 符合規範所規定；而最大拉應力 (σ_{\max}) 為 35.3 kg/cm^2 ，發生於拓建之 RC 帽梁（圖 9）。

步驟二、包覆舊帽梁建立新下構

建立新橋柱後包覆舊帽梁，成為 7 柱式門架結構，如圖 10 所示。整體結構僅增加新帽梁及新橋柱自重，對原帽梁內預力影響輕微。

步驟三、施拉預力

於 7 柱式門架橋墩情況下施拉新預力，新預力將導入原帽梁內（圖 11），需檢核主橋內帽梁應力，最大壓應力 (σ_{\min}) 為 -130 kg/cm^2 ，依然符合規範要求，而最大拉應力 (σ_{\max}) 為 1.0 kg/cm^2 。

步驟四、拆除舊橋墩

依順序拆除舊橋墩：當拆除舊橋墩時，其力量將轉移置未拆除結構（圖 12）。拆除完成後，其梁頂及梁底應力均符合規範之要求（圖 13）。

各階段之力量轉移

表 2 混凝土容許應力表

原結構僅考慮上構重量時，主橋及側橋分別承受 1050 Ton 及 670 Ton 之軸力，建立新橋柱及連接帽梁時，

項目	應力 (kg/cm^2)	
	舊帽梁	新帽梁
f_{ci}'	280	350
拉應力	33.5	37.4
壓應力	154.0	192.5

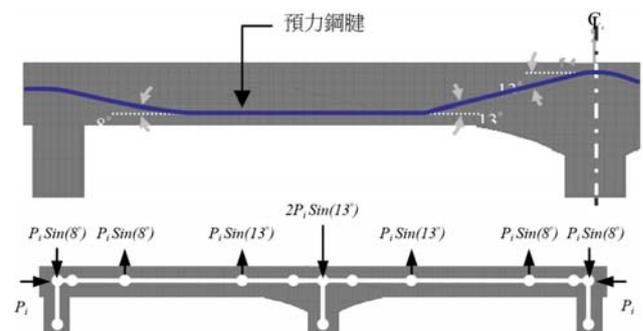


圖 8 預力鋼腱線型及等值載重示意圖

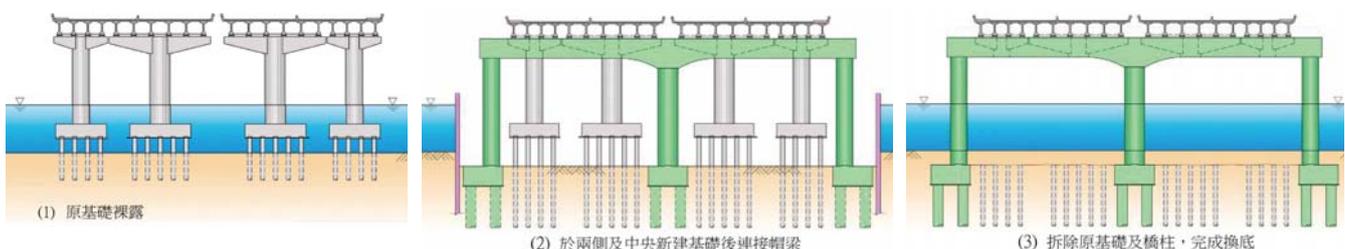


圖 7 先建後拆下構改建工法施工步驟示意圖

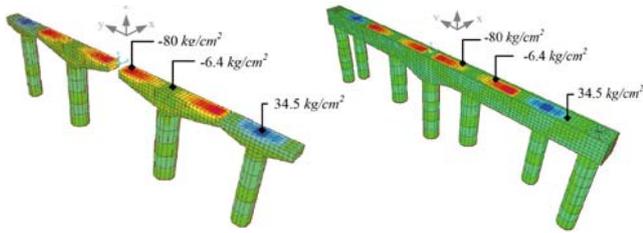


圖 9 原萬大大橋應力圖

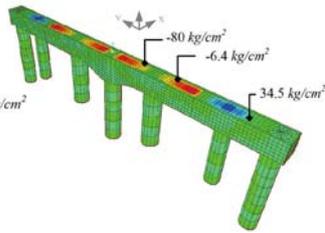


圖 10 新建新橋柱及外擴帽梁階段應力圖

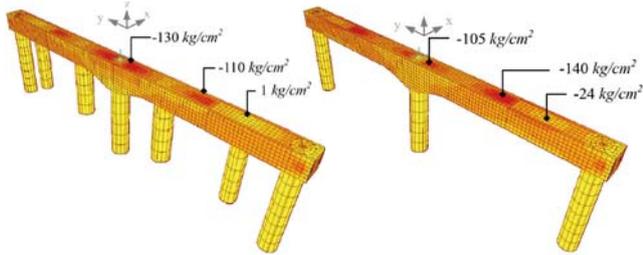


圖 11 施拉預力後應力圖

圖 12 拆除完成後結構應力圖

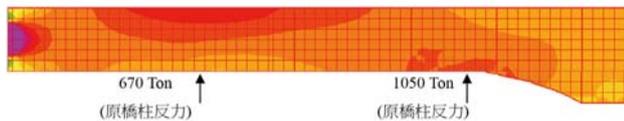
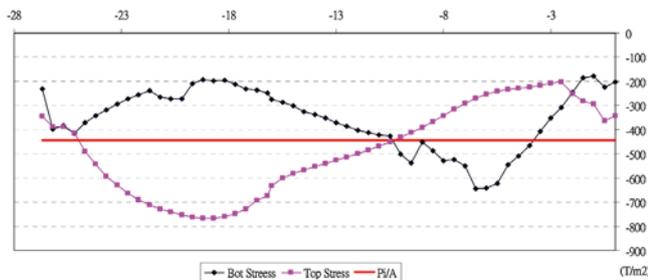


圖 13 施工完成梁頂及梁底應力圖

新帽梁之自重將分配至 7 柱式結構，舊橋柱依然承受大部分之力量，其軸力彎矩如圖 14 所示。

當新帽梁施拉預力後，其預力效果將導入 7 柱式門架結構：因預力之等值效益，其將產生 4 個向上之力量於舊橋柱 P-1~P-4，原 P-1、P-4 之軸力由 834 Ton 降至 365 Ton；P-2、P-3 之軸力由 1245 Ton 降至 415 Ton，藉此將力量由舊橋柱轉移至新橋柱。

此時切除 P-1 ~ P-4 原橋橋柱，切除時使用鏈鋸切割，其橋柱勁度將慢慢下降，其橋柱之力量將隨勁度之下降轉移至其他未切除橋柱，最後力量將如圖 16 ~ 圖 19 所示。

新舊混凝土設計細節

本案帽梁接合處，新舊混凝土澆鑄時間不同，且兩者界面平滑，為使力量能有效傳遞，其接合方式亦為此工法成功與否之重要關鍵之一（圖 20）。

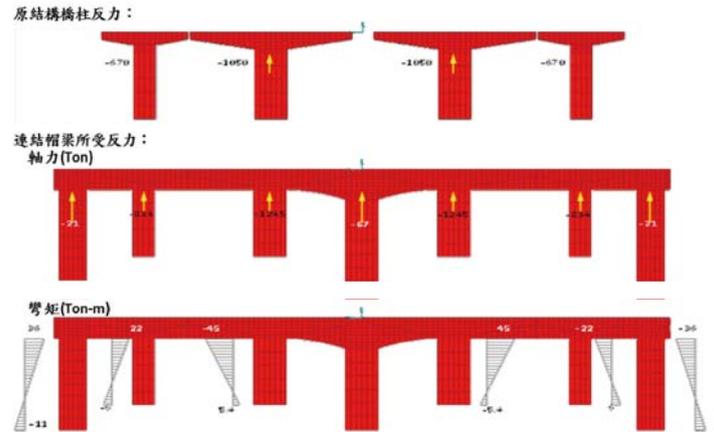


圖 14 力量轉移（一）

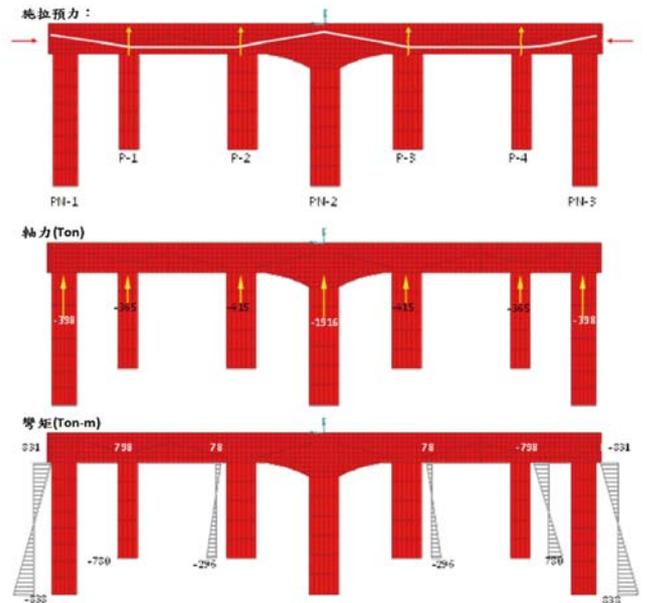


圖 15 力量轉移（二）

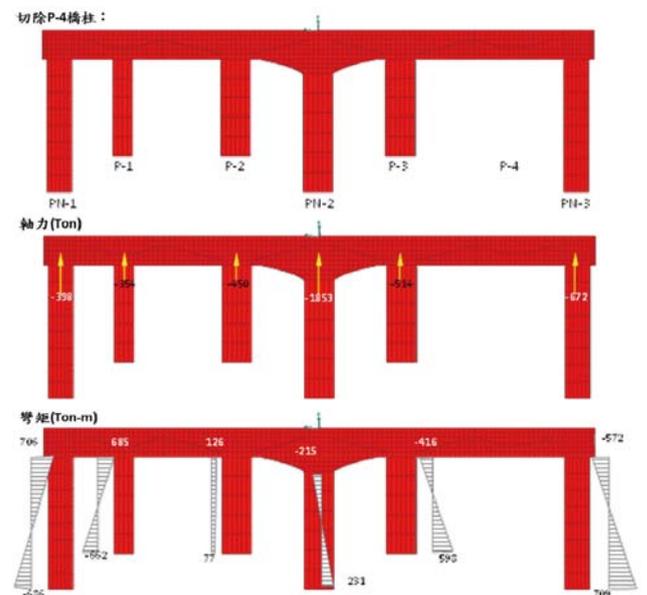


圖 16 力量轉移（三）

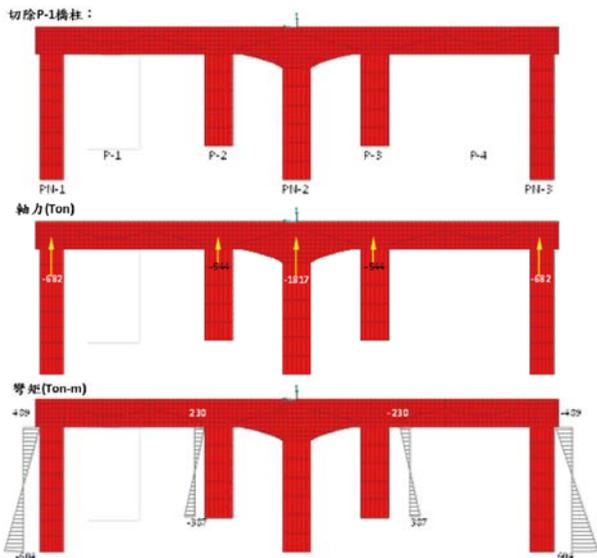


圖 17 力量轉移 (四)

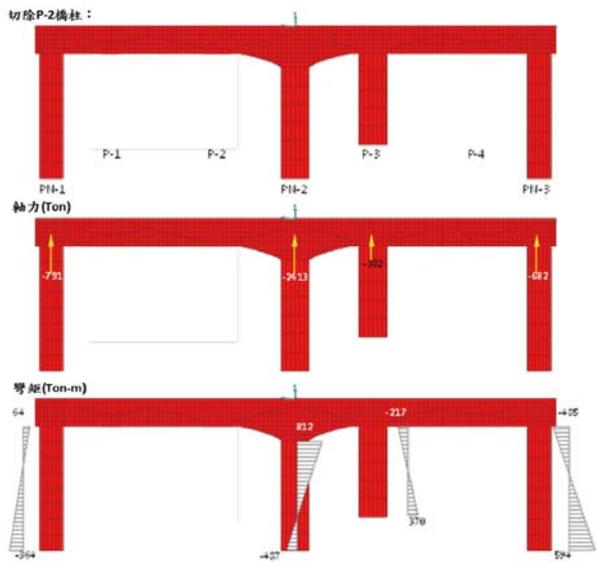


圖 18 力量轉移 (五)

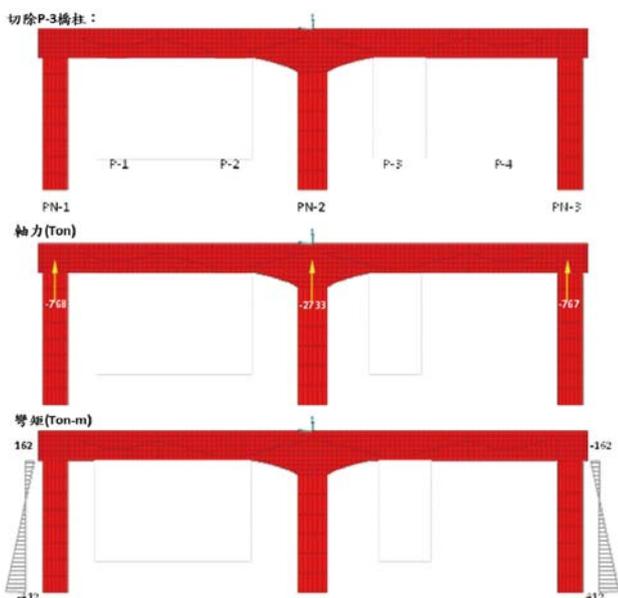


圖 19 力量轉移 (六)

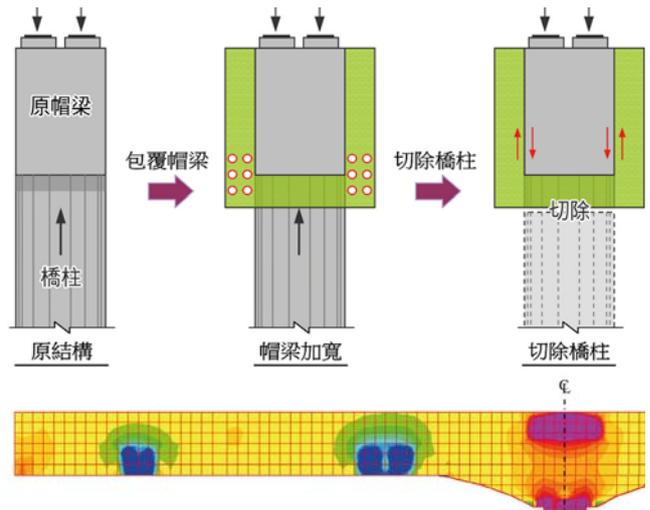


圖 20 新舊帽梁間剪力分佈

為連接帽梁並施拉預力，原帽梁將於兩邊各擴大 87.5 cm，於拆除舊橋柱及施拉預力時，新舊帽梁間將藉由垂直剪力傳遞自重及預力，分析發現：剪力多半由原柱頭處承受，其中最大承受 8.8 kg/cm² 之剪力。

若不進行 3D Solid 分析，可假設原橋柱所受之自重 (1050 Ton) 將完全由柱頭處部份混凝土面積 (3 m × 2 m) 承擔，計算所得之混凝土面剪應力為 8.75 kg/cm²，與有限元素分析結果相近。

為抵抗此自重及預力所造成之垂直剪力，需於舊帽梁表面打毛 0.6 cm 以增加接觸面之摩擦力，並打設化學錨筋，其中化學錨筋係於利用改性環氧類或改性乙烯基酯類 (包括改性氨基甲酸酯) 的膠粘劑，將鋼筋錨植於原結構上，使鋼筋與原結構產生握裹力，從而達到預埋效果的施工技術。而化學錨筋之使用量則由剪力摩擦計算而得，其原理係由於鋼筋之拉力為正向力，並藉由混凝土面之摩擦力以抵抗剪力。

依據公路橋梁設計規範 7.3.6 節第 4 項內容所示：

$$v_n = A_{vf} f_y \mu$$

其中：

A_{vf} = 錨筋面積

f_y = 錨筋降伏強度

摩擦係數 $\mu = 1.4\lambda$ (整體澆鑄混凝土)

1.0 λ (澆鑄於已硬化混凝土，表面粗糙處理)

0.6 λ (澆鑄於已硬化混凝土，表面未粗糙處理)

0.7 λ (錨定於型鋼表面)

$\lambda = 1.0$ (常重混凝土)

0.85 (輕質混凝土)

0.75 (全輕質混凝土)

除了強度上之考量，外界氯離子亦可能會經由新舊混凝土交接面侵入導致鋼筋腐蝕，故需於外界接觸面塗佈環氧樹脂，並利用對穿鋼筋或預力鋼棒使新舊兩混凝土交界面壓接在一起，如圖 21 所示，一方面係保護錨筋不受氯離子侵蝕，另一方面亦可提供正向力以抵抗新舊混凝土間剪力。

水平方向混凝土接合方面，可將新舊混凝土斷面視為一合成梁，由材料力學可知兩斷面間存在有劈裂之潛能，期間剪力應力如下所示：

$$\tau = \frac{VQ}{IB}$$

此剪應力由穿過潛在破壞面之鋼筋承擔，經由箍筋及化學錨筋之拉力提供混凝土潛在破壞面之正向力，再以此正向力產生水平方向之摩擦力抵抗其水平剪力（圖 22）。

結論與建議

萬大大橋深槽區之基礎由於受洪水沖刷而裸露 3 公尺，若採一般補強方式恐造成更嚴重的掏刷，並非

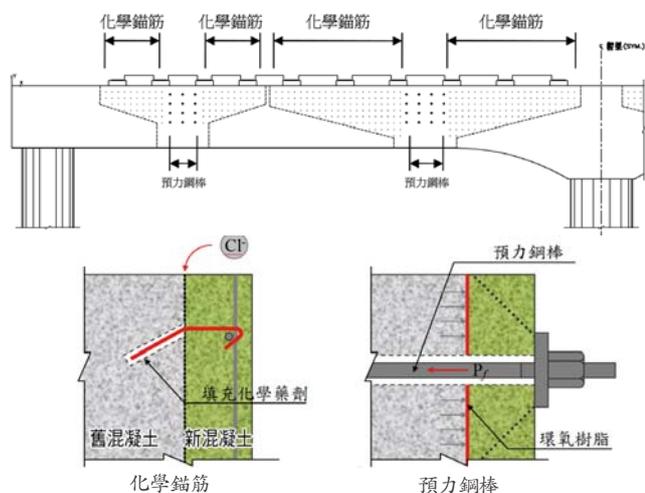


圖 21 化學錨筋與預力鋼棒設置示意圖

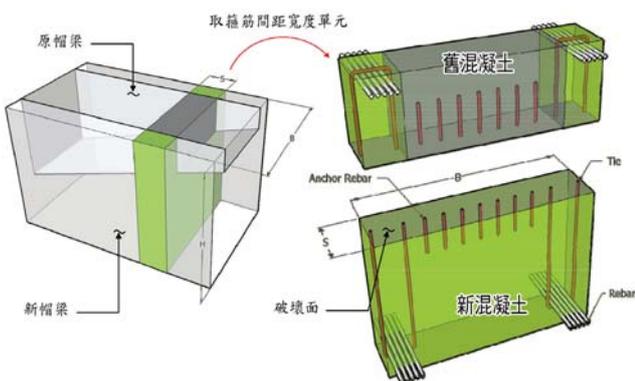


圖 22 垂直化學錨筋示意圖

治本之方法。故本段以「橋河並治」理念，從「生命週期整體考量」思考，並不建議以傳統方式補強，而是以「下構改建」方式達到「耐洪」及「耐震」能力提昇之目的。

採取的方式是創新之「先建後拆下構改建工法」，此一工法工程技術高，且施工過程將受限於橋下淨高，施工空間狹小，並不是一項容易的工程，但萬大大橋位於交通要道，肩負著高雄一屏東地區的聯繫任務，尤其是在雙園大橋斷橋後，此工法能在不影響上部結構及車行之情況下進行一場「無痛」的再造工程，除了能達成萬大大橋的耐震耐洪能力提昇之目的，也展現了公路總局對於「自然環境」及「道路使用者」的用心及細心。

萬大大橋現已完工，證明了本改建工法之可行性，足供日後施工之參考，施工及切除過程中並不影響用路人，節省因橋梁改建而交通改道需花費之龐大社會成本，其工程效益單就交通量之影響粗估結果，節省時間成本約 93 億元、車輛油耗成本約 45 億元、及降低排碳量約 7 萬噸。希望能以此成功的案例作為範本，推廣至其他有相同問題之橋梁。

參考文獻

1. 許資生，「潛變、乾縮、溫度對預力混凝土結構之影響」，國立台灣大學土木工程學研究所，博士論文，(1996)。
2. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code 90", CEB-Bulletin d' Information, (1991).
3. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI (1997).
4. Magura et al., "A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcements.", Journal Prestressed Concrete Institute, Vol. 9, No.2, p13-p57, (1964).
5. A F Daly, W Witarnawan, "Strengthening of Bridges using external post-tensioning", EASTA '97, (1997).
6. Waleed A. Thanoon et al., "Structural Response of Initially Loaded RC Beam to Different Retrofitting Techniques", Pertanika J. Sci. & Technol. Vol. 12 No.1, p103-p113, (2004).
7. Tarek Alkhrdaji, Jay Thomas, "Structural Strengthening Using External Post-Tensioning Systems.", STRUCTURE magazine, July 2009.
8. 交通部運輸研究所，「橋基保護工設計規範（草案）」，交通部運輸研究所，(2010)。
9. 張荻薇等，「換底工法於沖刷水害橋梁之應用—以台一線溪州大橋橋基加固工程為例」，中華技術，No. 71, p110-p121，財團法人中華顧問工程司，(2006)。
10. 交通部，「公路橋梁設計規範」，幼獅文化事業股份有限公司，(2009)。
11. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範」，幼獅文化事業股份有限公司，(2009)。
12. AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", (1992)。

