



4 工作心得及研究報告

中山高拓寬第561、561T、561C合併標 既有橋梁耐震補強 施工簡介

一、前言

台灣地區於1999年921大地震後，其地震分區由原來之四區劃分為二區，且將震區水平加速度由四級劃分為二級，部分區域之既有橋梁結構物為因應水平加速度係數調整，必須重新檢討其原有耐震功能。

中山高速公路之既有穿越橋、跨越橋、河川橋之橋墩、橋台基礎，因震區調整及水平加速度係數調高，且上部結構傳遞至基礎之水平橫力亦增加，造成原有基礎承載安全性不足，故需進行補強，以提升其耐震能力，增加基礎土壤承載力及抗液化能力。另耐震補強施工期間，仍需維持高速公路主線正常與安全使用，且受限於橋梁淨高及河川防汛期之限制，其施工方式及規畫，須用心考量。





二、工作項目概述

本工程既有橋梁耐震補強施工如下表所示：

項次	橋名	橋台	橋墩	橋面板	備註
1	332.5k 六甲溪河川橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	--	
2	336.2k 二仁溪河川橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	炭纖維貼覆	
3	338.3k 路竹IC穿越橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	--	
4	339.7k 跨越橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	--	
5	347.2k 跨越橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	--	
6	348.5k 阿公店溪排水橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	--	
7	348.6k 跨越橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	--	
8	349.4k 岡山IC穿越橋	超微粒水泥灌漿	增樁擴基、鋼板包覆	--	

以二仁溪河川橋(主線橋)為例，其耐震補強工作項目計有「橋面版底碳纖維貼覆補強」、「橋墩基礎擴大」、「橋墩柱鋼板包覆」及「橋台基礎超微粒水泥灌漿」等項目；另跨越橋耐震補強工作項目計有「混凝土擴柱」、「擴柱鋼板包覆外加預力鋼棒」及「基礎擴大」等項目，詳細內容分述如下：

(一)、橋面版底以碳纖維貼覆補強

A、施工內容

橋面版裂縫除灌注環氧樹脂，另於橋面版底黏貼二層碳纖維(二層相互正交)，每層單位面積重250g/cm²。其施工先做底層處理，以砂輪機將混凝土表面裂化層除去並研磨至粗骨材出現，將粉塵及鬆動物質去除，並將銳利隅角部份磨成圓弧R角，以避免圍束時造成應力集中，降低補強效果；另凹角部位先以環氧樹脂砂漿修整，使表面平滑，以利貼覆。

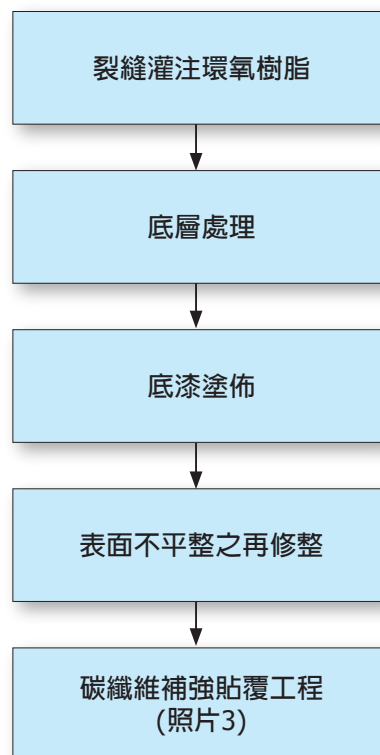
底層處理後，表面保持乾燥，再以適當底漆材料針對上述之處理後施工面進行底漆施工，待底漆乾燥後，再針對尚存之較小凹洞，以



補土材料再將表面不平整處再修整光滑，以利貼片貼覆。

施工表面修整光滑後，以漆筒毛刷均勻塗佈樹脂，將纖維貼片平順貼合其上，並用刮刀沿纖維方向用力刮平，以除去氣泡和貼平貼片，再用滾輪沿纖維方向來回滾壓以充分含浸樹脂及除去氣泡。再於已貼妥之纖維貼片上，再度重覆塗佈樹脂及貼片之步驟，做第二層貼片黏貼。

B、施工流程





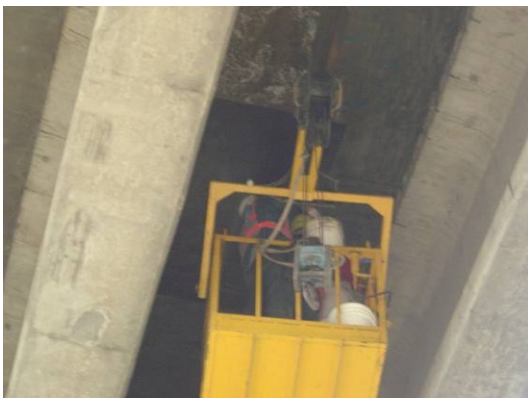
C、施工照片



1. 裂縫調查



2. 編號



3. 碳纖維塗刷貼覆



(二)、橋墩基礎擴大

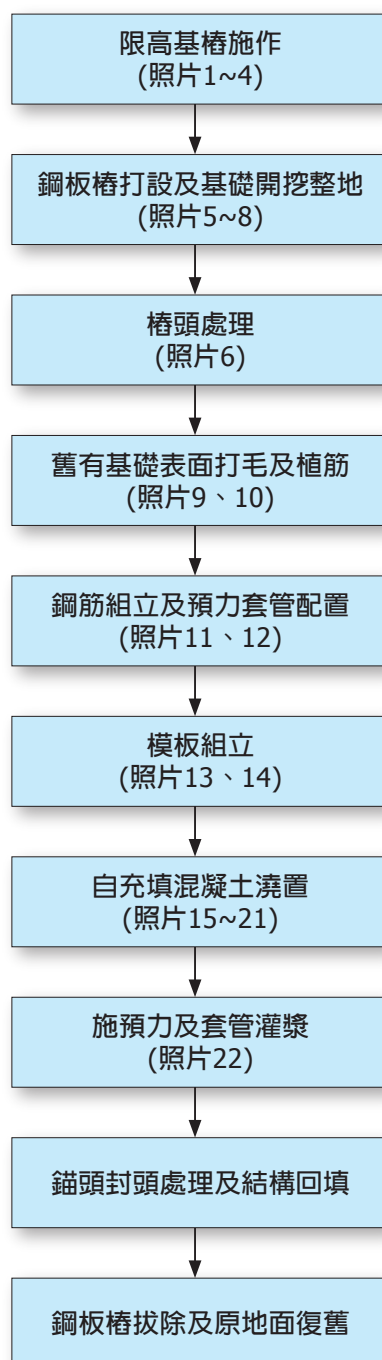
A、施工內容

橋墩基礎，以增加基樁、擴大基礎方式補強。首先於基礎兩側(南北向)增設100cm ϕ 或150cm ϕ 基樁，採用全套管工法施作，因施工地點位於既有橋梁下方，受淨高限制，需採用適當高度之機具施作，其中搖管機由一般25°之搖管機改採360°全迴旋式搖管機，因其360°全迴旋，可降低套管與土層間之磨擦力，提高其精準度；又其為自走式，不須與吊車連結，可因應橋下狹小之施工空間，提高其工作性及機動性；另因應高度限制，吊車桁架由一般15M長改為9M長、鯊魚頭抓斗由一般3M長改為2M長；套管及鋼筋籠長度因應淨空限制，調整分段長度，鋼筋籠連接採鋼套環焊接方式對接。

舊基礎降挖至基礎底下方裸露1M，於舊基礎面打毛、植筋及加預力方式，與舊橋基礎整體結合。為使新灌注之混凝土與舊橋基礎緊密結合，採用自充填混凝土(SCC)灌注。此種混凝土之特性，包含強度、彈性模數、工作度、流動性、穩定性、耐久性、耐磨性、水密性、完整性及其他特殊功能(如低水化熱)等，其工作性均較普通混凝土佳。自充填混凝土對構造物耐震能力之提昇來自兩方面，一方面是自充填混凝土可提高鋼筋的有效握裹力，二方面是自充填混凝土可使鋼筋之圍束力更接近理論值，主要應用在原有橋墩基礎結構之補強。



B、施工流程



C、施工照片



1.限高基樁施作



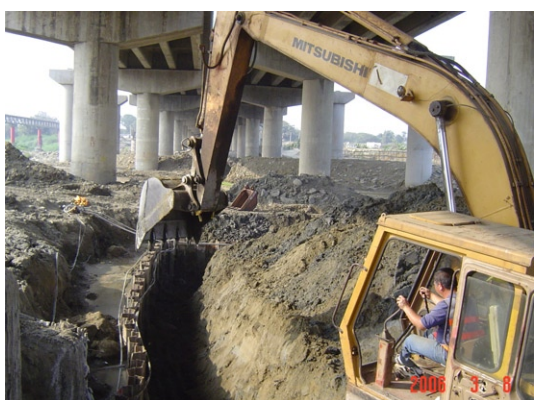
2.鋼套環焊接



3.UT檢驗



4.澆置



5.基礎開挖



6.樁頭處理



7.舊基礎底掏空1M



8.舊基礎底掏空1M



9.舊有基礎打毛



10.植筋拉拔試驗



11.鋼筋綁紮



12.紮筋完成



13. 模板組立



14. 組立完成



15. 澆置前清理



16. 自充填混凝土澆置



17. 自充填混凝土澆置



18. 坍流度試驗



19.間隙通過性試驗



20.V型漏斗流下試驗



21.澆置完成



22.施預力



(三)、橋墩柱鋼鈹包覆

A、施工內容

跨越橋之壁式橋柱採用混凝土擴大斷面外加預力鋼棒方式補強，係將原有墩柱表面打毛、植筋並清理乾淨後，紮筋、組模、澆置混凝土擴柱，待拆模後，再包覆鋼鈹外加預力鋼棒，於鋼鈹內灌注環氧樹脂，完成補強。

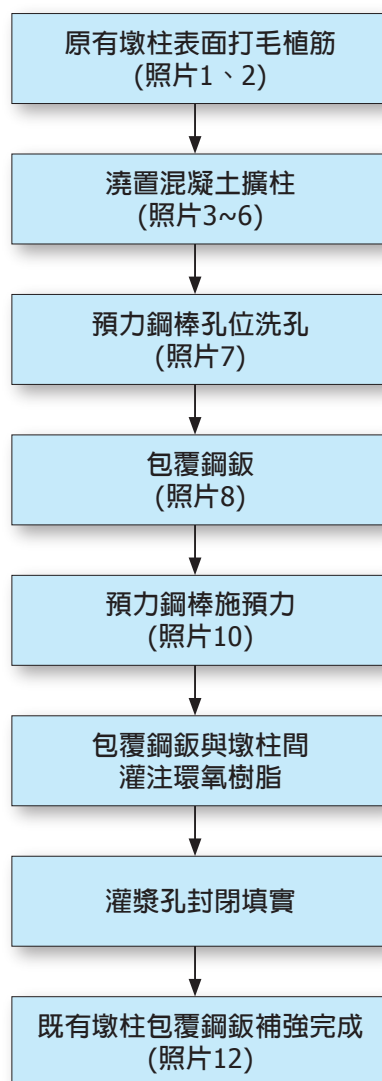
主線橋梁採用鋼鈹包覆補強，主要是針對圓形橋柱進行環向之圍束，係將原有墩柱表面打毛並清理乾淨，將鍍鋅完成之鋼鈹，依照圖說尺寸要求，包覆橋墩柱，並進行鋼鈹焊接處理，完成後之焊道檢查，採超音波檢驗，於鋼鈹內灌注無收縮水泥砂漿，再將焊道表面磨平並塗刷鍍鋅漆，完成補強。

上述補強方式，其補強效果可增加橋柱之軸向抗壓強度、抗彎強度、剪力強度與韌性。



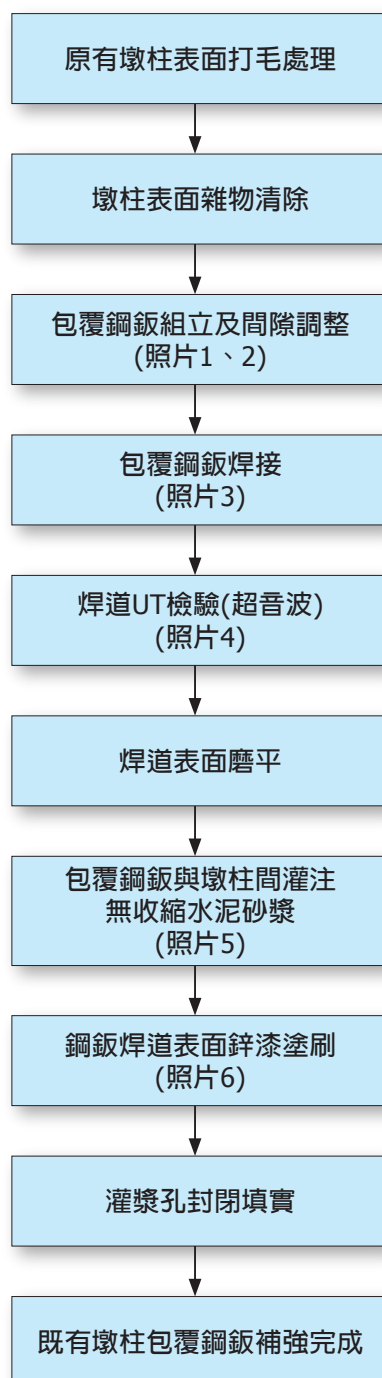
B、施工流程

1. 跨越橋





2. 主線橋



C、施工照片

1. 跨越橋



1.墩柱表面打毛



2.植筋



3.第一升層模板組立



4.第一升層澆置



5.第二升層模板組立



6.第二升層澆置



7.預力鋼棒孔位洗孔



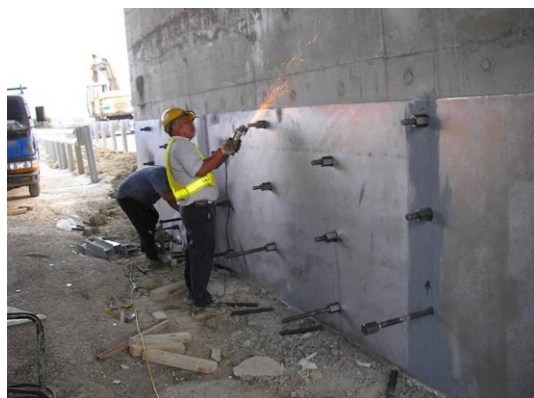
8.鋼鈑包覆



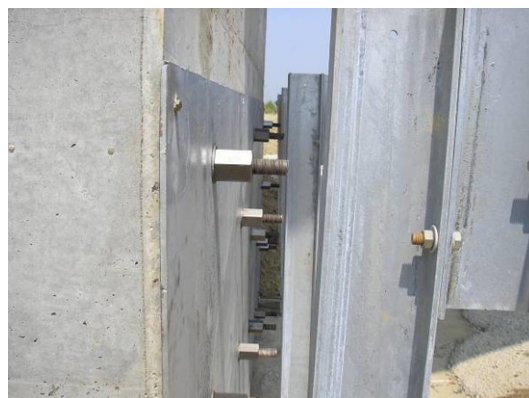
9.預力鋼棒安裝完成



10.施預力



11.鋼棒切除



12.施作完成

2. 主線橋



1. 鋼板包覆



2. 鋼板包覆完成



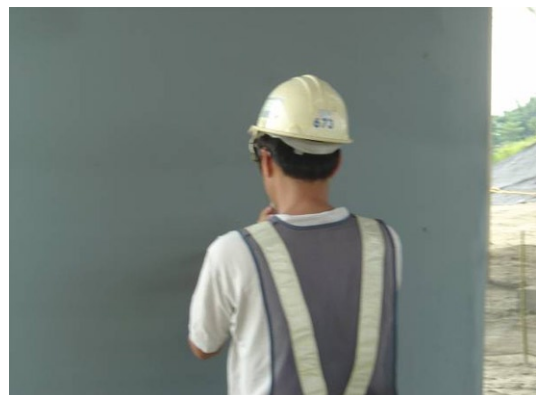
3. 焊接



4. 焊道檢驗



5. 無收縮水泥砂漿灌注



6. 塗刷鋅漆



(四)、橋台基礎超微粒水泥灌漿

A、施工內容

為增加地層強度、減少地下水滲透性及增加土壤抗液化能力，橋台基礎採用超微粒水泥灌漿補強。根據既有橋台地質調查結果，分析其土壤性質，對於地表下改良範圍(深度約基礎底下10~20公尺範圍)，可能會產生液化之砂性土層，佈設適當之灌漿孔距、排列、漿液配比、施灌壓力、灌漿速率及灌漿孔之順序等，以高滲透性之超微粒水泥漿液，採用低壓滲透、分段固結灌漿方式，實施超微粒水泥灌漿補強，以改善基礎土壤天然缺陷，以期增強其承載力及抗液化潛能。灌漿完成後28日，鑽孔取樣，其試體單壓強度需 $\geq 10\text{kg/cm}^2$ (軟岩程度)，達到改善效果。

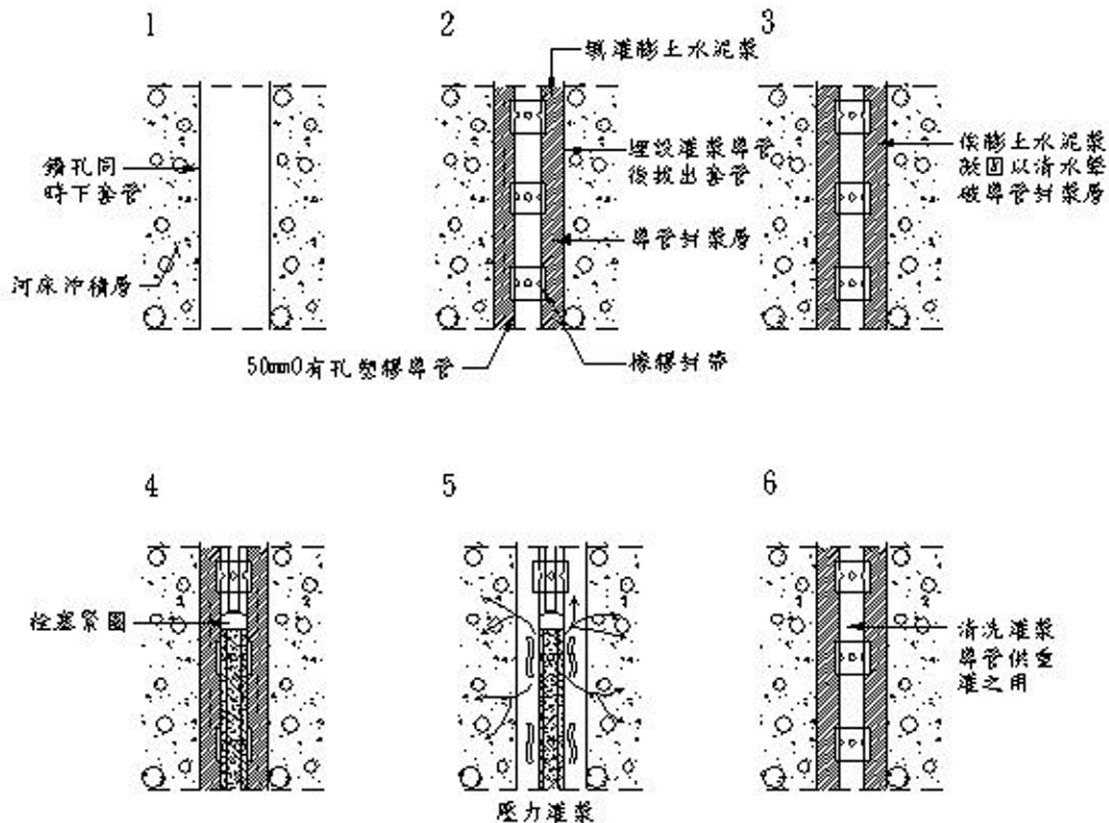
1. 材料特性：

超微粒水泥系漿液係由超微粒水泥、水攪拌混合，再加入約1%之附加劑充分攪拌均勻。附加劑係為助流劑，以增加灌漿時之工作性，避免塞管情形發生。漿液之配比採用水灰比(W/C)4~5及附加劑。

超微粒水泥之特性如下：

- (1).水泥細度(比表面積)試驗 $\geq 8000\text{cm}^2/\text{g}$ (CNS2924)
- (2).抗壓強度試驗 $\geq 200\text{kg/cm}^2$ (3天) (CNS1010)
 $\geq 300\text{ kg/cm}^2$ (7天) (W/C)
 $\geq 450\text{ kg/cm}^2$ (28天)
- (3).最大粒徑不得大於 $40\mu\text{m}$ 、通過 $20\mu\text{m}$ $\geq 95\%$ 。
- (4).真比重(真比重 ± 0.1)= 3.0 ± 0.1

2. 灌漿作業：



- (1)將鑽孔機定位，以 $\phi 4''$ 外套管和 $\phi 73\text{mm}$ 內鑽桿，雙套並以清水向下鑽掘至預定深度。
- (2)拔除內鑽桿，並放入外皮漿(CB漿、皂土系水泥漿)灌漿導管，灌入外皮漿。
- (3)置入1 1/2" PVC灌漿管(每間隔50cm鑽4孔灌漿孔，外層包覆橡皮緊圈)，拔除外套管以清水擊破導管封漿層。
- (4)放入內灌漿管至預埋之灌漿外管內，由下往上之方式，灌入超微粒水泥漿。另為避免漿液外流至改良範圍以外，先進行底部封底灌漿及四周之圍束灌漿。



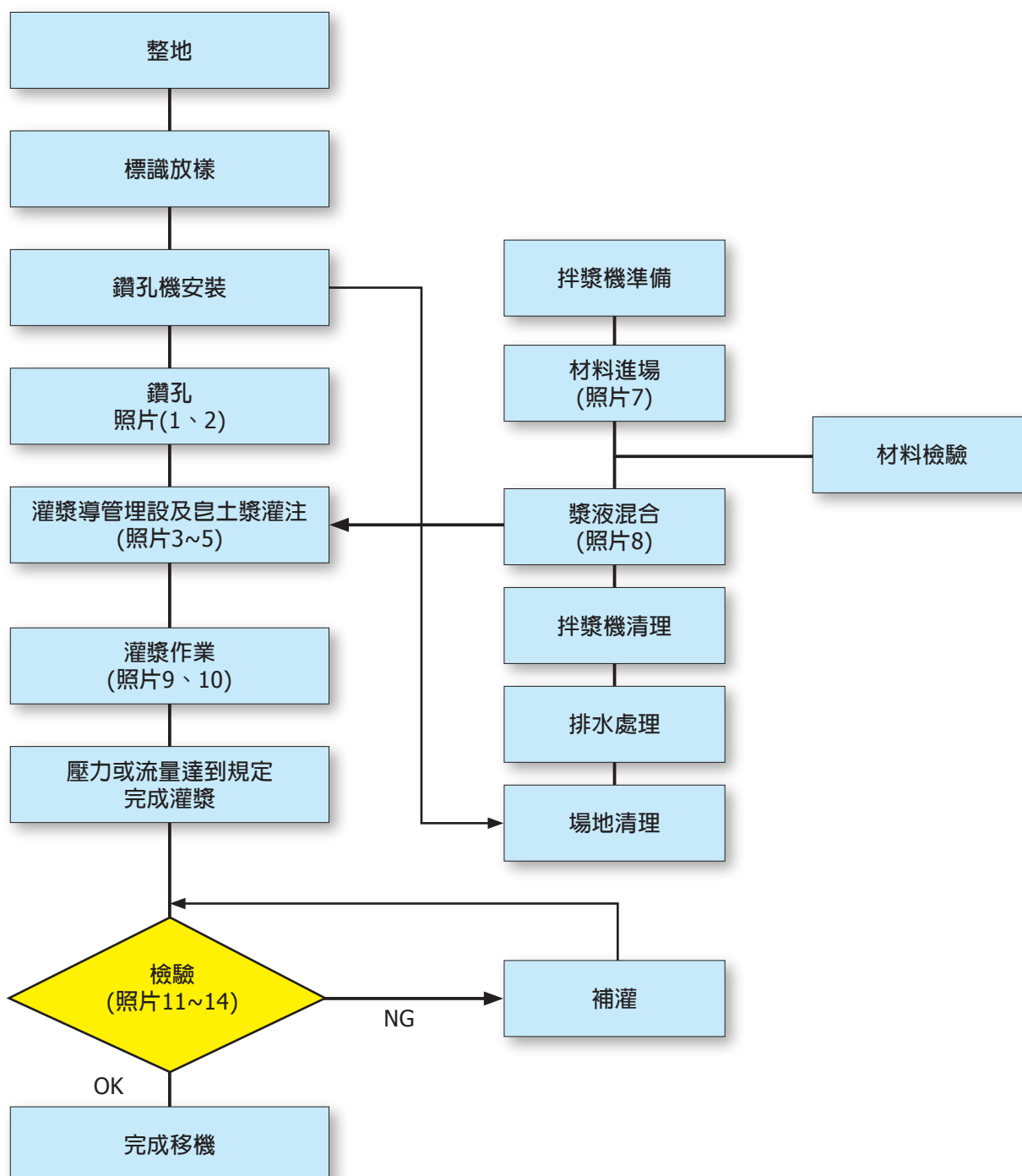
- (5)每階段之超微粒水泥灌漿量以設計之壓力及時間內階段灌漿完成，向上提升至下一階段(每階段50cm)，直至灌漿設計深度。
- (6)灌漿完成後將預埋管孔內之殘留漿液以清水洗淨，以便隔日或重複灌漿使用。
- (7)灌漿中若吃漿量未有明顯降低趨勢時，即以設計注漿量47 % 為第一次灌漿量；待漿液凝固後再行複灌，若到達設計要求收斂條件即停止灌漿，若吃漿量仍未有明顯降低趨勢時，則逐階增加注入率。注入率以灌漿成果滿足設計之收斂條件為原則。設計之收斂條件如下表，工地仍可視實際情況規劃灌漿計畫，再予調整。

灌漿完成時之壓力與時間表(參考)

壓力(kgf/cm ²)	時間(min)	吃漿量(L)
3.5以下	20	5L
3.5~7.0	15	5L
7.0~14.0	10	5L
大於14.0	5	5L



B、施工流程





C、施工照片



1.灌漿孔角度量測



2.鑽孔



3.灌外皮漿(CB漿)



4.放入灌漿外管



5.拔除外套管



6.試水



7.超細水泥進場



8.超細水泥拌漿



9.灌漿情形



10.灌漿設備



11.鑽孔取樣



12.取樣成果



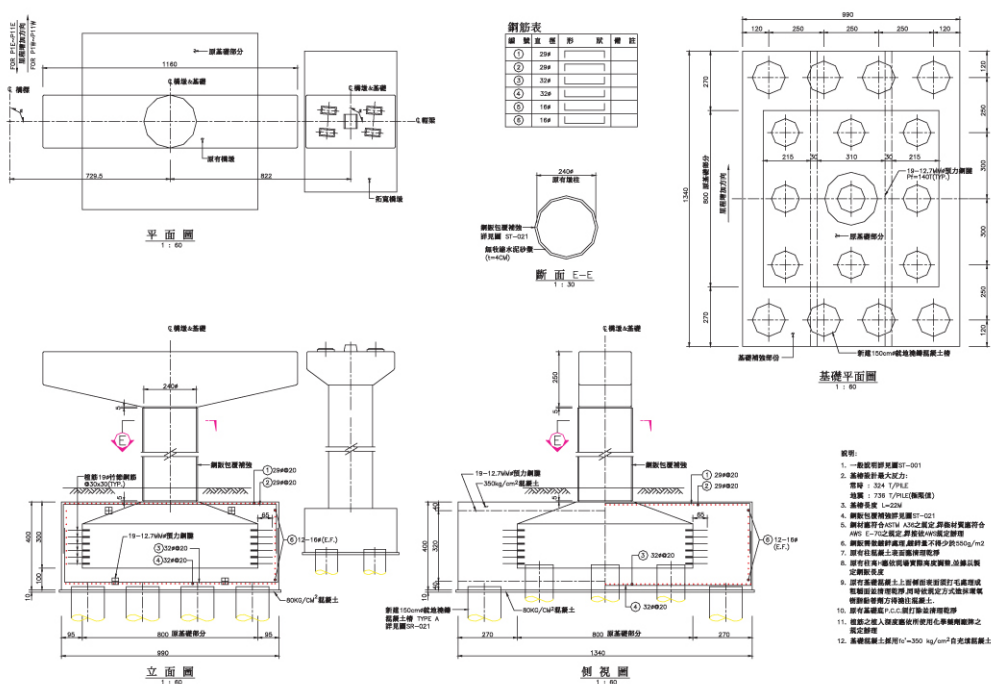
13.試體單壓強度試驗



14.試體破壞情況

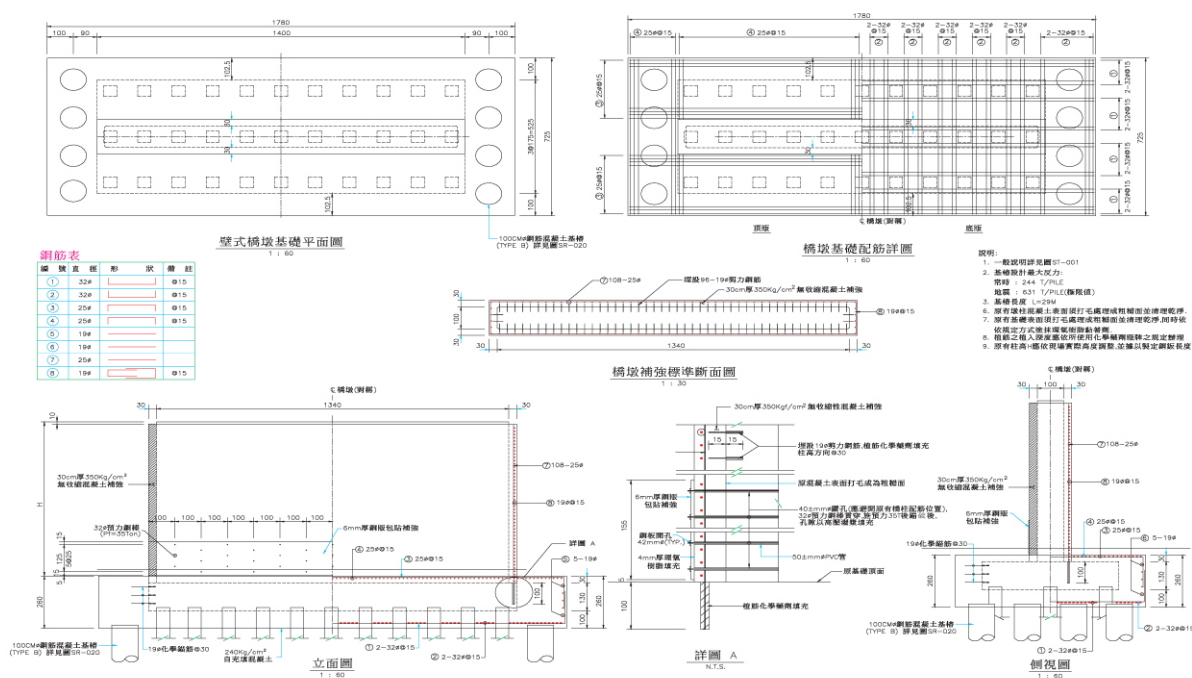
(五)、設計圖

A、主線橋(二仁溪河川橋)橋墩補強設計圖

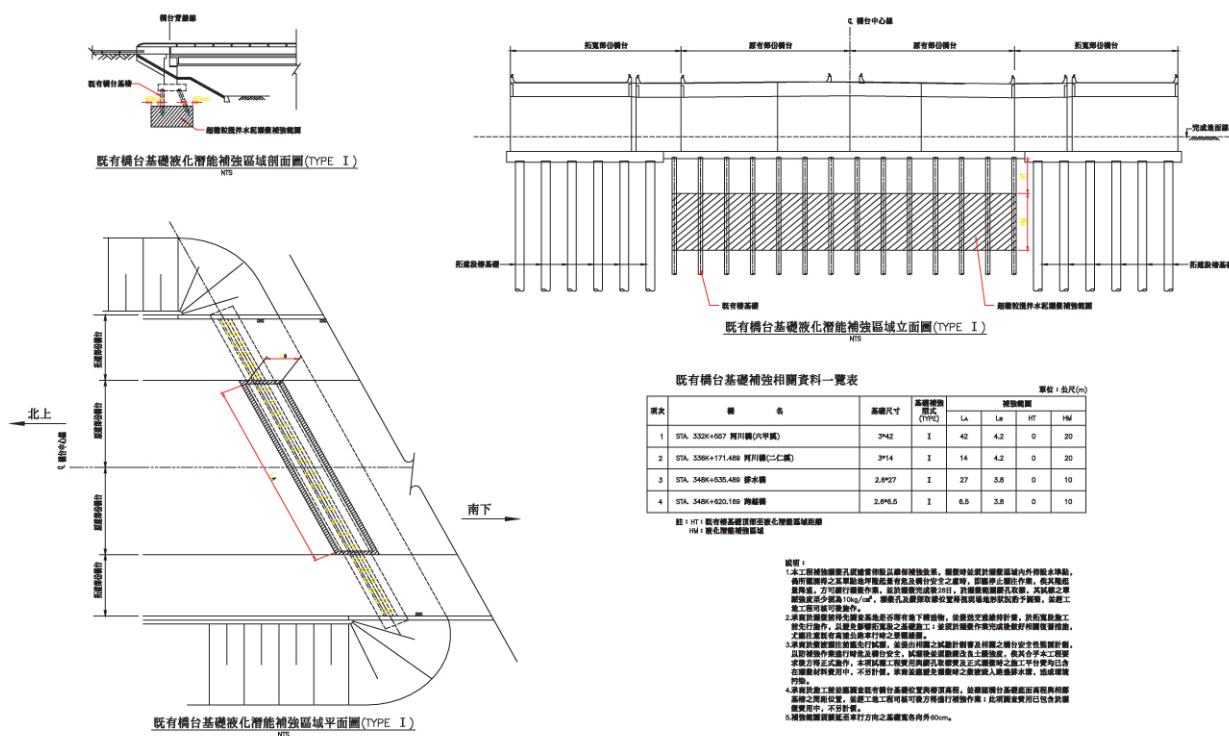




B、跨越橋橋墩補強設計圖



C、既有橋台基礎液化潛能補強設計圖

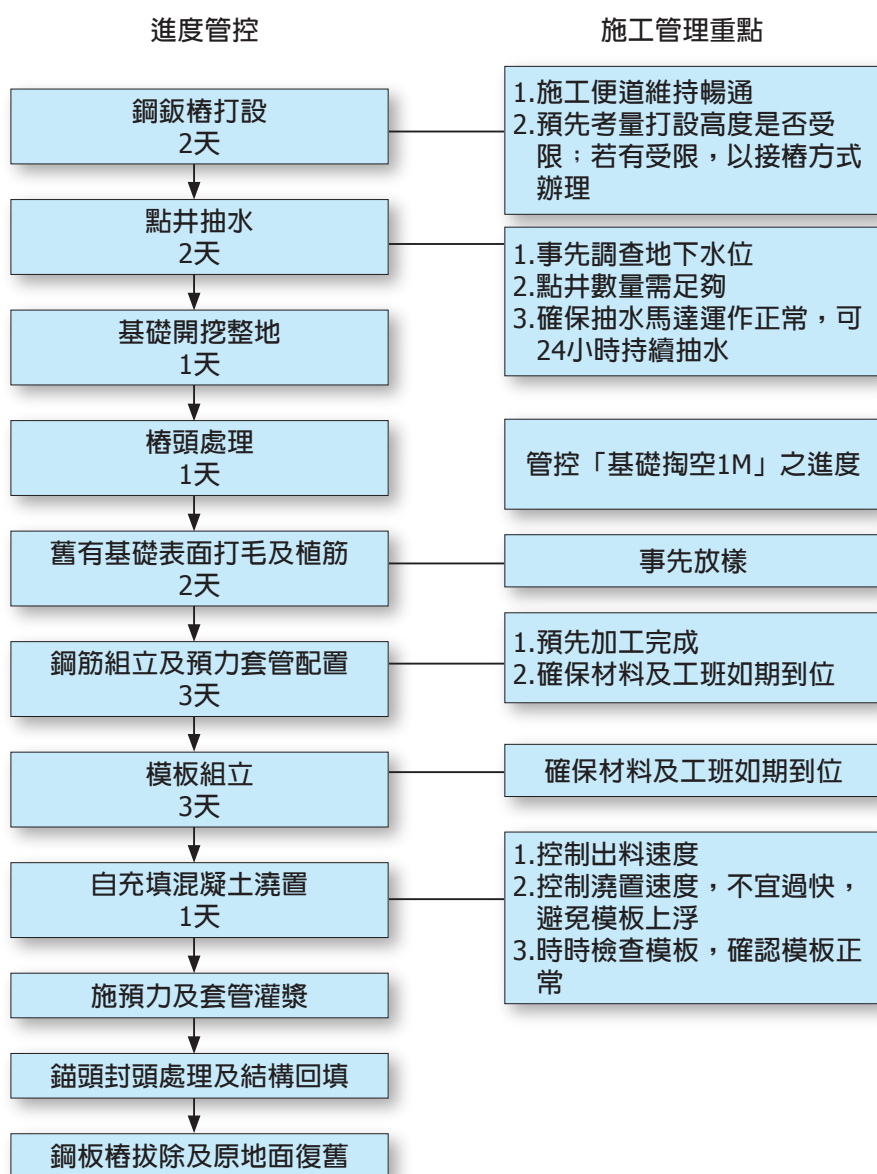




三、施工管理

(一)、橋墩基礎擴基補強

耐震補強基礎擴基，大部分於河床地施工，常受制於地下水位、天候因素及防汛期之影響，而有所延誤。以二仁溪河川橋為例，平均乙墩耐震補強基礎擴基，自基礎開挖至完成自充填混凝土澆置，約需15個工作天，其進度管控及施工管理之重點如下表所示：





澆置完成至施預力，至少須養護7日，為期工作連續，應事先規畫施作順序，跳墩施作，故至少需安排兩組鋼鉸樁，預先開挖紮筋完成，俾利第一墩澆置完成拆模後，可立即移至第二墩組模，繼續施作。

(二)、橋台超微粒水泥灌漿補強

超微粒水泥灌漿期程，視各橋台下方土層種類、改良範圍、工程位址地形等因素影響，其施工管理之重點如下：

A、試灌作業

超微粒水泥灌漿，設計注入率為47%，其灌漿結果需視超微粒水泥材料、水灰比、灌漿壓力及灌漿地點土壤性質等因素而定，是否設計之注入率可達成改良效果，於施作前均為未知數，故於正式施工前，需先辦理試灌作業。試灌作業之試驗目的，在於了解現地土層狀況及灌漿行為，據以規畫正式施作時，灌漿之配比及最適宜之灌漿孔距排列方式，進而瞭解所需工料、預估工程數量、安排施工進度及確認處理方針。

B、補充地質鑽探資料

「預期有效改良範圍」較最初「試驗室以標準砂施作Column Test之改良範圍」小。檢查孔取樣後發現，有些區段並無漿體，經土壤物性分析，該區段為顆粒極細之黏土，以致超微粒水泥無法滲入，或因土層中含黏土，導致超微粒水泥無法均勻浸透土層。因此，需再縮小灌漿孔之有效改良半徑，亦即需再增加灌漿孔數目，亦將延長灌漿期程。另根據文獻，沉泥質黏土或黏土夾層，其灌漿滲透範圍有限，且於反覆載重及地震下，並無液化問題存在，故此類地層不須灌漿補強。故應於各橋台施作前，先進行補充地質鑽探，並將鑽探結果納入參考判定。



C、增加灌漿機組設備及延長工時

灌漿作業必需依據其灌漿設備之壓力及流量表，是否出現異常，再加以判斷是否暫停灌漿或持續灌漿，故對於灌漿期程之管控，較為困難。另在初期灌漿時，經常出現漏漿及塞管情形，當兩種情況同時發生時，工地必需暫停灌漿作業，實為灌漿期程管控之不確定因素。工地應視需要，增加灌漿機組設備及延長工時因應。



四、困難與克服

(一)、地下水

橋梁耐震補強大部分於河床地施工，耐震補強基礎施工常常因地下水位過高，產生基礎底部湧砂現象，如何降低地下水位成為首要課題。故擋土鋼板樁打設完成後，於基礎週邊以點井方式先行降水，以利基礎開挖，避免基礎底部出水或積水，影響施工。以二仁溪河川橋為例，其舊基礎尺寸為 $L \times W \times H = 8 \times 8 \times 3 \text{M}$ ，擴基後新基礎尺寸為 $L \times W \times H = 13.4 \times 9.9 \times 4 \text{M}$ ，施工過程中需點井四口、每口約7M深(至新基礎底下方約3M深)，持續抽水至少約2天，才可有效降水，進行基礎開挖，若中途遇降雨或上游降雨，地下水位升高、水量增加，則抽水期程將延長，是以雨季期間，施工困難度極高。

(二)、舊基礎底部掏空1M

擴基之設計，自充填混凝土需包覆至既有基礎底下1M，因基礎底部土壤長期受壓異常堅硬，故如何快速有效清理基礎底部之堅硬土壤，實為施工人員之課題。以二仁溪河川橋為例，經現場勘查，其舊基礎下方皆為堅硬泥岩，若純以小型挖土機具及人工挖掘，非但耗時費工，且又受限舊有基樁限制施作空間，根本毫無功效。經研議測試，施工人員採用「水刀式高壓沖洗機」，將既有基礎底下1M之堅硬土壤沖洗乾淨，再將產生之泥水以抽水機排出基礎外，施作成效良好、迅速、安全。



(三)、模板支撐

以二仁溪河川橋為例，耐震補強基礎板厚約4M，且在狹小之開挖空間中施工，模板支撐系統困難程度頗高。又自充填混凝土約需7小時才得初凝、約需24小時才得終凝，故於開始澆置至完成，整個過程中仍未初凝，稍有不慎(澆置速率過快或模板底部有間隙)，即易產生模板上浮、甚或爆模，導致澆置失敗。為克服前述困難，施工人員經檢核後，採用重型支撐架搭配鋼管支撐方式施工，防止模板支撐不足，避免爆膜及變形產生。另於澆置過程中，速率應循序漸進、定速灌注，嚴禁澆置速率忽快忽慢，導致側向壓力瞬間增加，發生爆模及變形。

(四)、超微粒水泥灌漿

A、圍幕與封底

初期灌漿時，單一灌漿孔常出現注入率超出原設計注入率，研判係該灌注孔為開放空間，以致無法形成隔幕而造成漿液外流。施工人員於灌漿起始，先進行底部封底及四周圍幕灌漿，造成阻隔效果、避免漿液外流。惟若因拓寬工程先行施作拓建基樁而擾動舊有橋台、破壞護坡，將導致灌漿時產生漏漿現象，將折減圍幕與封底之效果。故建議於原有結構物未遭破壞前，先進行超微粒水泥灌漿補強施工，效果較佳。

B、灌漿量與改良強度之關係

由於地層的複雜性、變異性及設計強度的要求，灌漿注入率為達成改良目的，所需之灌漿材料注入量並非固定不變，且會隨著灌漿效果的期望程度而異。故高水灰比之超微粒水泥灌漿耐震補強工程，其注漿量需經由不同地質狀況下幾個橋台完整補強改良後，才能予以合理的推估並檢討灌漿量與改良強度之關係，以回饋於後續施作橋台補強灌漿控制之依據。以二仁溪河川橋為例，設計注入率為47%，惟實作為60%才達收斂條件，才達成改良效果。



五、結論

公路系統包含許多組成元件，包括橋梁、路堤、邊坡、鋪面等，其中最易遭受震害之部份即為橋梁結構，且對於社會成本及生命安全常造成重大威脅。故老舊橋梁淘汰改建及針對既有橋梁補強其抗震能力，實為一重要課題。本文介紹之補強方式-RC擴柱、鋼鈑包覆墩柱、擴基、超微粒水泥灌漿等，皆能有效提升橋梁之耐震能力，包括增加墩柱之抗彎強度、剪力強度與韌性、基礎的容許承載力及橋址下方土壤之抗液化潛能。惟補強工作需做全盤考量，避免補強局部元件後，其鄰近元件卻成為明顯弱環，而成為下一個震害之受害對象，例如二仁溪河川橋除施作墩柱及基礎補強，亦施作橋面版底碳纖維貼覆補強。另補強方式、補強材料之選擇，仍需事先做完善之工址調查，再加以選擇適宜之工法，以利施作。身處地震頻繁之台灣，仍需持續努力研究。

參考文獻

1. 公路總局，「921集集大地震公路重要橋梁復建設計與施工」。
2. 李有豐，「RC橋柱補強理論與實務」，國立台北科技大學土木與防災研究所。
3. 陳正勳、楊式昌、周功台、陳福勝，「既有跨越橋梁基礎之耐震補強工法探討」，中華顧問工程司。
4. 美國FHWA，「針對北嶺地震橋梁耐震設計經驗之短篇報告重點節錄」。
5. 柴崎光弘、下田一雄，「最新・藥液注入工法の設計與施工」，山海堂株式會社，昭和62年。