



4 工作心得及研究報告

中山高速公路橋梁耐震補強 高壓噴射樁、鋼管樁、 基礎補強工法簡介

摘要

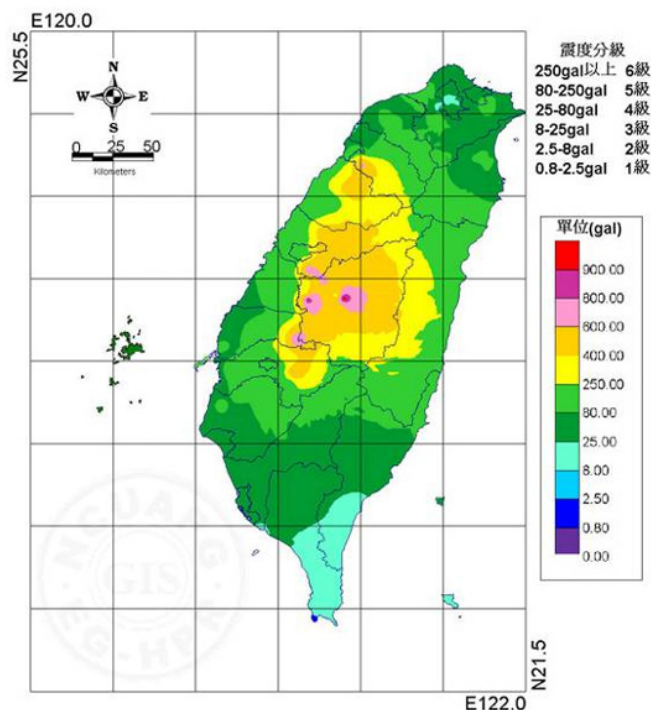
自921集集大地震後，橋梁結構物之耐震安全已成為國家防災計畫中非常重要的課題；由於國道高速公路為台灣地區南北交通的大動脈，對於國家整體經濟發展及民生生活影響甚鉅。因此高公局以交通部84年頒「公路橋梁耐震設計規範」及交通部89年4月7日交技89字第003577號函頒修正之各章節，重新檢核及評估國道高速公路之新舊橋梁等結構物，對於不符合最新耐震規範之橋梁進行耐震補強，期能於日後大地震時可達到減少損害、避免傷亡之主要目標，並透過「小震不壞、中震可修、大震不倒」的設計理念，提供21世紀國家經濟持續發展所需之高安全性基礎交通建設，達成國家整體防災計畫之永續發展總目標。

橋梁下部結構耐震補強，為考量配合既有結構及現地施工限制因素，而發展出不同的補強工法，本文特針對高壓噴射樁、鋼管樁及基礎補強工法，就設計概要、施工方式及施工過程中應注意之施工重點等做一簡介，並提供日後從事橋梁耐震補強工程界同仁具體且建設性之參考。



一、前言

自921集集大地震後，橋梁結構物之耐震安全已成為國家防災計畫中非常重要的課題；由於國道高速公路為台灣地區南北交通的大動脈，對於國家整體經濟發展及民生生活影響甚鉅，雖於此次震災中並未遭受太大的損害，然而為防範於未然，國道高速公路局乃積極研擬完整的橋梁耐震補強建設計畫，對於中山高速公路及第二高速公路等已完工通車之橋梁結構物，以交通部84年頒「公路橋梁耐震設計規範」及交通部89年4月7日交技89字第003577號函頒修正之各章節重新檢核及評估國道高速公路之新舊橋梁等結構物，對於不符合最新耐震規範之橋梁進行耐震補強，期能於日後大地震時可達到減少損害、避免傷亡之主要目標，並成功擔負起大地震後緊急救災之生命線道路重任。

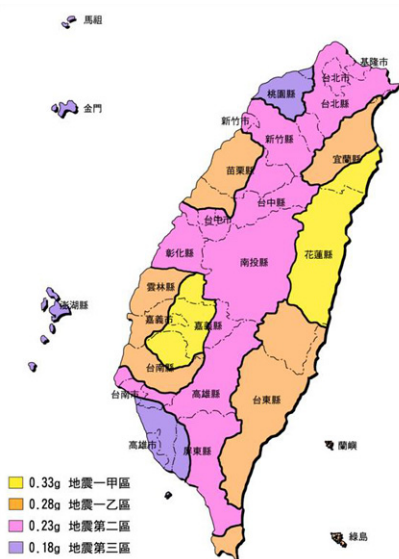




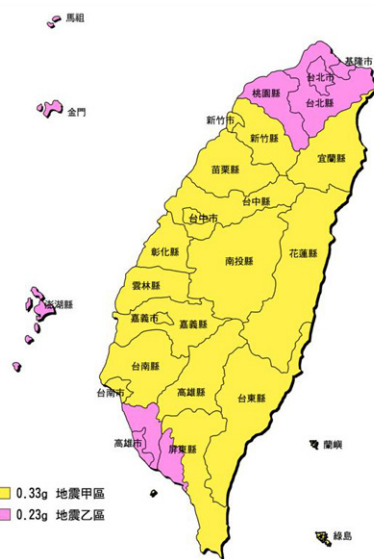
交通部89年4月修正「公路橋梁耐震設計規範」部份有關章節，其中特將震區重新劃分調整如下：

84年版耐震設計規範	89年4月版修正之耐震設計規範
地震一甲區(z=0.33)	地震甲區(z=0.33)
地震一乙區(z=0.28)	地震乙區(z=0.23)
地震二區(z=0.23)	
地震三區(z=0.18)	

註：z：工址水平加速度係數



84年公路橋梁耐震設計規範



89年4月交通部頒布震區調整



二、設計概要說明

(一)、橋梁耐震補強對策

依據中山高速公路橋梁之類別與特性，設計係參酌國內外之補強經驗及最新之研發工法，於進行耐震補強之規劃與設計方案研擬時，採用下列基本原則：

1. 耐震補強時，以最適當且經濟的方法，將耐震能力提昇至足夠之標準。
2. 依據耐震能力評估結果，進行耐震補強分析與設計，及支承系統耐震能力之改善。
3. 橋梁耐震補強方法眾多，包括增加構材的韌性或強度、增設止震塊、增加梁端防落長度及防落設施、基礎補強、地盤改良、降低液化潛能及改變橋梁結構系統等。
4. 橋梁經耐震補強分析與設計後，為檢核無其它耐震弱點產生，必要時再次進行詳細耐震能力評估，以確保整體耐震能力均已提昇至足夠之標準。
5. 補強計畫將使橋梁上、下部結構及基礎等整體結構系統耐震能力之均衡提昇。
6. 原則上將藉由橋柱的補強，來增進橋梁之強度與韌性，使橋梁得以抵抗更大之地震。
7. 在工址地質條件符合規範的要求下，檢討採變更橋梁結構系統之可行性，以反力分散、增加阻尼或週期延長來減輕地震慣性力。
8. 設計所採用之補強基本對策，詳如圖2.1-1所示。

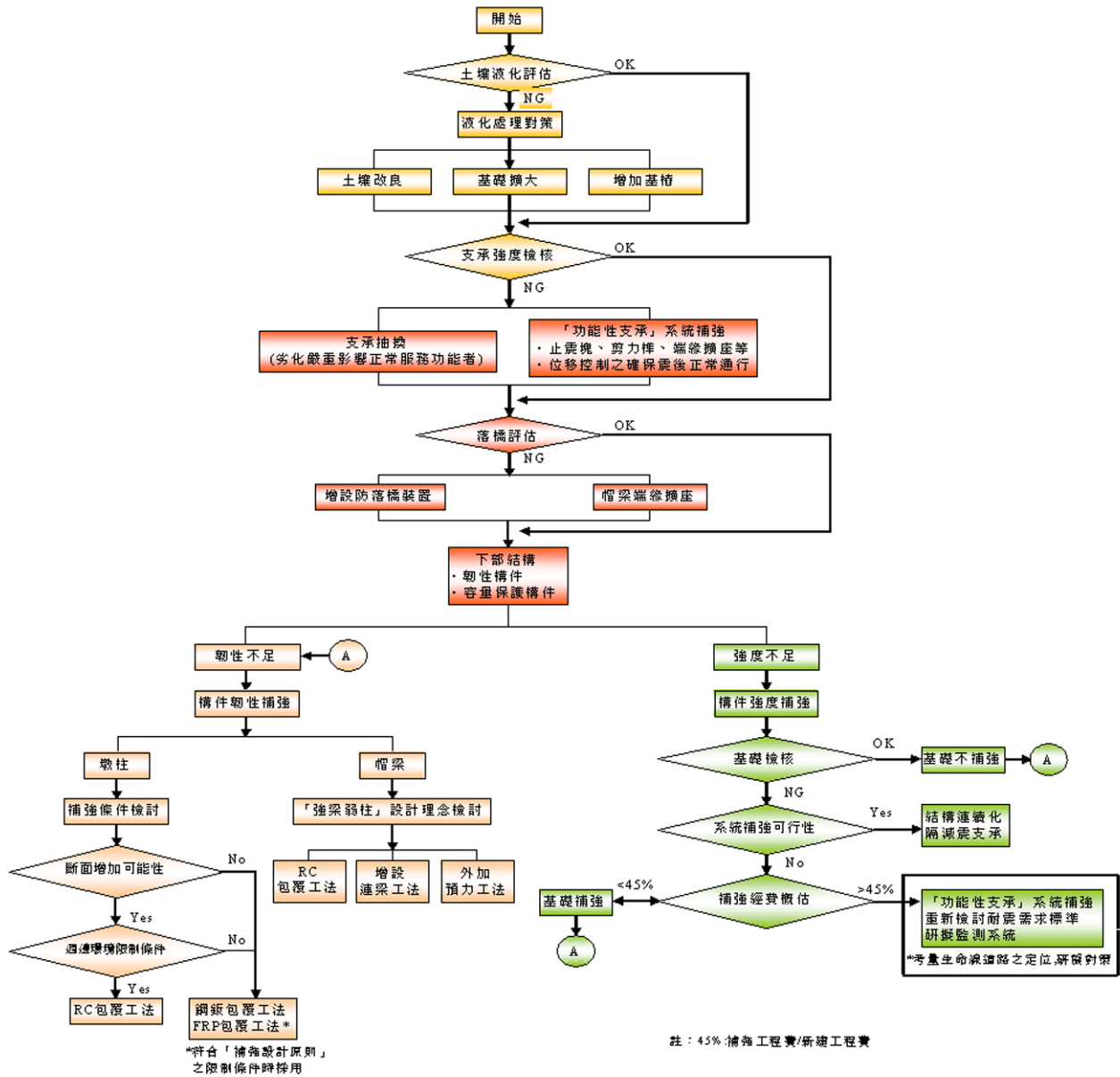


圖2.1-1 橋梁耐震補強對策



(二)、橋墩(台)基礎補強

針對基礎補強，使用之主要補強型式如下：

1. 基礎擴大並增補基樁工法

採用基樁型式依不同施工條件計有全套管基樁 (1.0m ϕ & 1.5m ϕ)、610mm ϕ 鋼管樁、微型樁等。

新舊基礎間之連結以表面打毛、原基礎底層筋焊接延伸、化學黏著錨筋及增補預力方式處理。示意圖詳圖2.2-1。

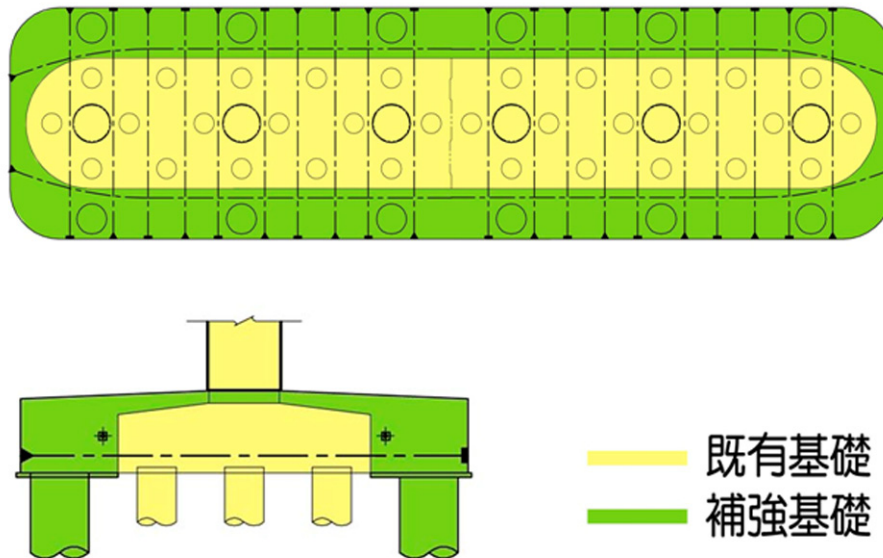


圖2.2-1 橋墩(台)基礎增補基樁工法



2. 地盤改良工法

採用高壓噴射樁補強原基礎四周。示意圖詳圖2.2-2。

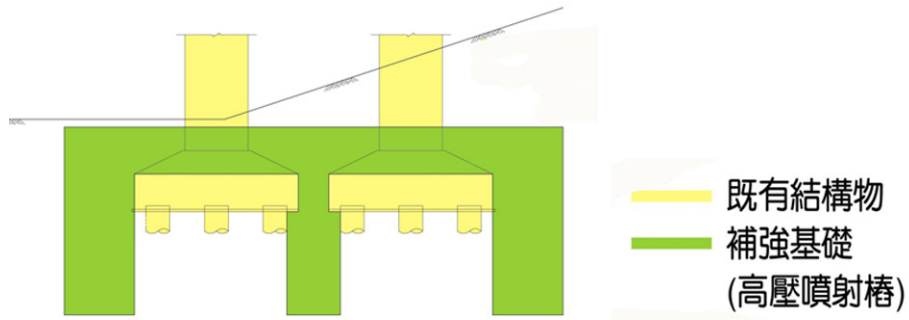


圖2.2-2 地盤改良工法

3. Encasement補強工法

採用地盤改良(高壓噴射樁)與排樁圍束併用方法。示意圖詳圖2.2-3。

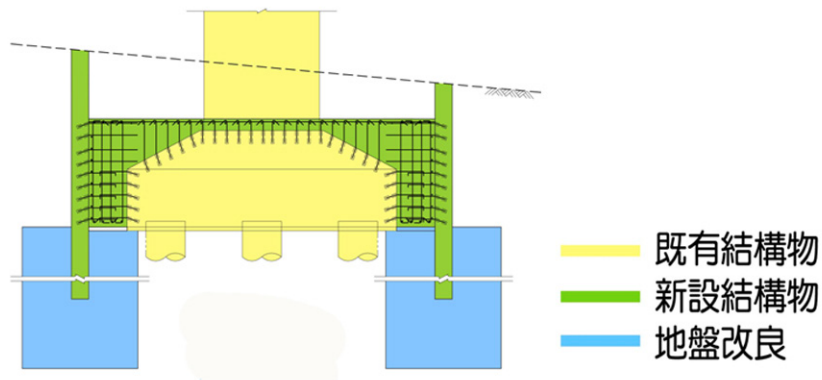


圖2.2-3 Encasement補強工法

本文則主要針對高壓噴射樁、鋼管樁及基礎補強作一論述。



(三)、地盤改良工法

大地工程界在地盤改良的應用依目的不同，分為固結灌漿、填縫灌漿、擠壓灌漿、高壓噴射樁等工法；因硬化劑材料的不同，分為化學灌漿及水泥灌漿等；上開工法為滿足各工程不同需求常須使用適當施工設備、鑽灌程序並搭配高低灌漿壓力使用以得其成效。表2.3-1為各灌漿工法的限制條件、適用地質、改良成效、使用材料、施灌方法、工程應用等綜合一覽表。

表2.3-1 灌漿工法比較表

工 法	固結灌漿	填縫灌漿	擠壓灌漿	高壓噴射樁
適用地盤	N<5粘質土 N>5砂、礫石	N<5粘質土 N>5砂、礫石	N<5粘質土	任何地盤
硬化劑	溶液型藥液、水泥漿	水泥漿、水泥砂漿	水泥砂漿、混凝土	溶液型藥液、水泥漿
噴嘴	-	-	-	噴流式
使用機械	雙連式泵、一般油壓鑽機	雙連式泵、一般油壓鑽機	空壓機	高壓泵、全自動油壓鑽機
灌入後形狀	分散	分散	球體	圓柱體
28天單軸強度	2~10kg/cm ²	2~10kg/cm ²	2~5kg/cm ²	5~30kg/cm ²
施工方式	分段低壓灌漿	單管低壓灌漿	引孔灌漿後二次加壓固化	單管（雙或三重管）邊噴射邊提昇
用途	地盤改良、止水	地盤改良	地盤改良	地盤改良、止水



1. 高壓噴射樁工法選擇及設計

高壓噴射樁地盤改良於本工程第M11標係應用於汐五高架段部份構築於高速公路路堤邊坡下方的橋墩基礎，於第M12標係應用於圓山南引橋(STA.23K+487)部份構築於現有堤防下方基礎。第M11標及第M12標高壓噴射樁地盤改良應用說明如下：

(1) 第M11標

第M11標耐震補強設計採用高壓噴射樁地盤改良的橋墩包括汐五拓寬段PU6D~PU8D、PU13D、PU19D、PU24D~PU26D、PU31D、PU32D、PD10D、PD19D~PD24D、PD27D、PD30D、PD34D、PD36D等，各橋段之地質條件，汐五高架段自地表以下包括厚度0.5~4m的回填層、厚度1~20m不等之粉質黏土層。採高壓噴射樁地盤改良係考量以排樁作為耐震補強結構之被動阻抗的提高。耐震基礎補強設計除沿既有基礎四周構築45cm ϕ 排樁，樁距90cm、排樁長度嵌入補強基礎下方6~8m，高壓噴射樁地盤改良範圍為排樁兩側各150cm，改良深度則自補強基礎底版至排樁樁下方180cm。

(2) 第M12標

第M12標耐震補強設計採高壓噴射樁地盤改良的橋墩包括圓山南引橋STA.24K+475南下側橋墩P3~P6、北上側橋墩P6~P13等，各橋段地質條件，圓山南引橋地表下方0.6~4.5m的回填層、1~7m的粉質砂土層、15~30m粉質黏土層。採高壓噴射樁地盤改良係考量基礎補強施工不得全面破壞堤防，故針對上述橋墩基礎補強方式改以高壓噴射樁地盤改良。耐震基礎補強設計係於原基礎周圍1.5m採高壓噴射樁以改良基礎周圍土層提高土質條件並提供束制作用。



2. 常用高壓噴射樁工法簡介

目前已發展出各種高壓噴射樁工法，國內常用如表2.3-2所列：

表2.3-2 國內常用高壓噴射樁工法

工法全名	Chemical Chumimg Pile Method	Jumbo Special Pile Method	Jumbo-Jet Special Grout Method	Column-Jet Grout Method
工法簡稱	CCP工法	JSP工法	JSG工法	CJG工法
常用壓力	180~200kg/cm ²	180~200kg/cm ²	200kg/cm ²	400kg/cm ²
水泥吐出量	25 L/分	25 L/分	50 L/分	140~180 L/分
鑽桿形式	單管	雙重管	雙重管	三重管
空氣	不使用	視情況可使用或不使用	7kgf/cm ²	7kgf/cm ²
成形直徑	30~40cm	60~80cm	80~200cm	80~200cm
排泥量	無	少量	約原體積70%	約原體積90%
施工深度	20m	20m	25m	40m



(四)、內灌混凝土鋼管樁(Cast-in-Steel-Shell piles，簡稱CISS piles)

本基樁工法已成功應用於中山高速公路大林新營段十七座橋梁耐震補強工程，其係在既有基礎周邊增設610mmf內灌混凝土鋼管樁($t=12.7\text{mm}$) (如圖2.4-1所示)。

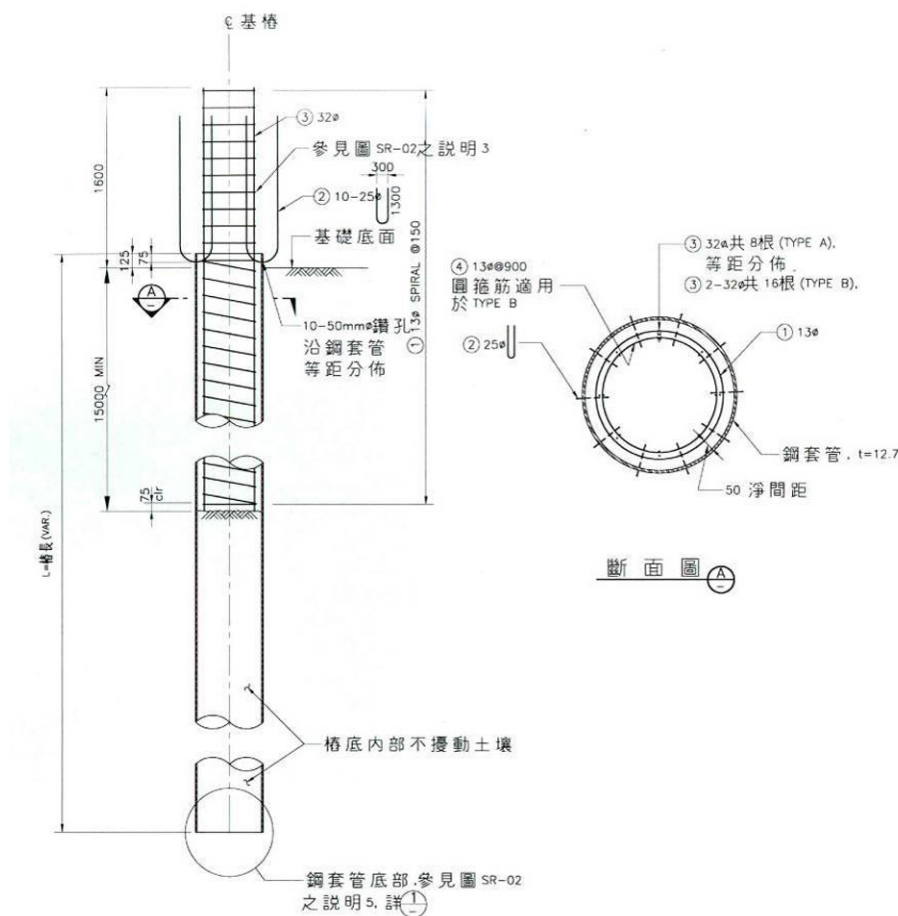


圖2.4-1 610mmf內灌混凝土鋼管樁

由於新設基樁須於橋下淨空不足處施工，需採用低淨空式樁機施做，然為何選用610mmf內灌混凝土鋼管樁？主要的考量邏輯是：要在橋下低淨空條件下施工，小口徑基樁(610mmf)所需之樁機能量應較小，機械設備改裝或引進之門檻亦較低，相對的施工成本應較可掌握；採用鋼管樁則是因為RC全套管場鑄基樁有基樁頂部塑鉸區鋼筋續接的困擾及套管拔



除費時對工率之影響，而RC反循環基樁則有坍孔影響舊橋基礎之疑慮；另於樁頭15m範圍內設置鋼筋籠形成「鋼管鋼筋混凝土」複合斷面，可有效增加其彎矩容量；此基樁工法是美國加州自1971年San Fernando地震以來基礎耐震補強常用的方法，其耐震性能並已經獲得UCSD之縮尺試驗證實，參見圖2.4-2。

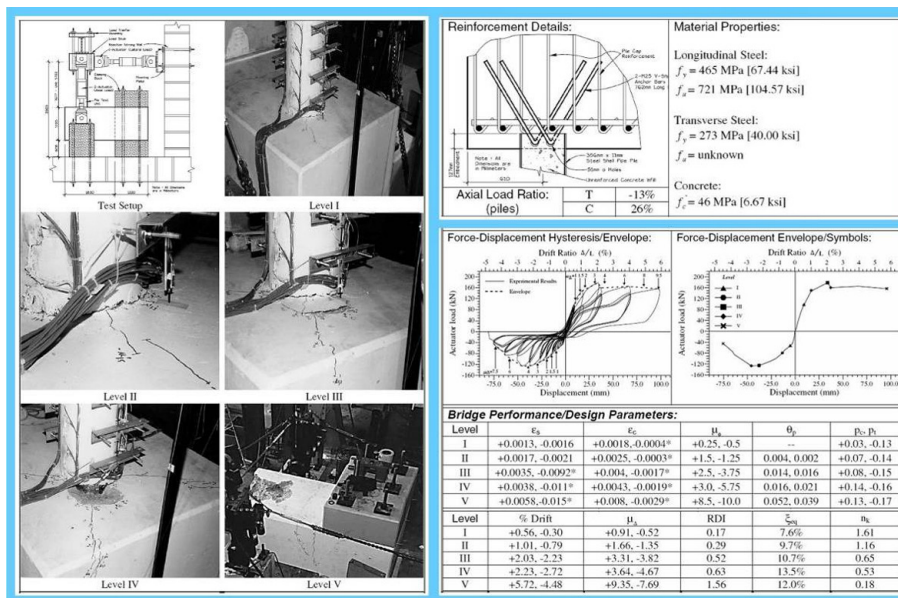


圖2.4-2 內灌混凝土鋼管樁之縮尺試驗

資料來源：Silva, P.F., Seible, F., and Priestley, M.J.N., 1997, Response of Standard Caltrans Pile-to-Pile Cap Connections Under Simulated Seismic Loads, Structural Systems Research Project, 97/09, University of California, San Diego, La Jolla, November.



(五)、基礎補強施工

基礎補強依其補強橋梁既有基礎型式、橋梁屬性、及評估結果決定其補強方式，主要分為向上補強及向下補強兩種方式。

1. 向上補強

一般用於穿越橋，且以增樁工法搭配補強之基礎，藉由增加基礎版寬度及厚度，來增加其韌性，其優點是開挖深度與原基礎相同，缺點是需進行大量植筋，較耗費時間，如圖2.5-1。

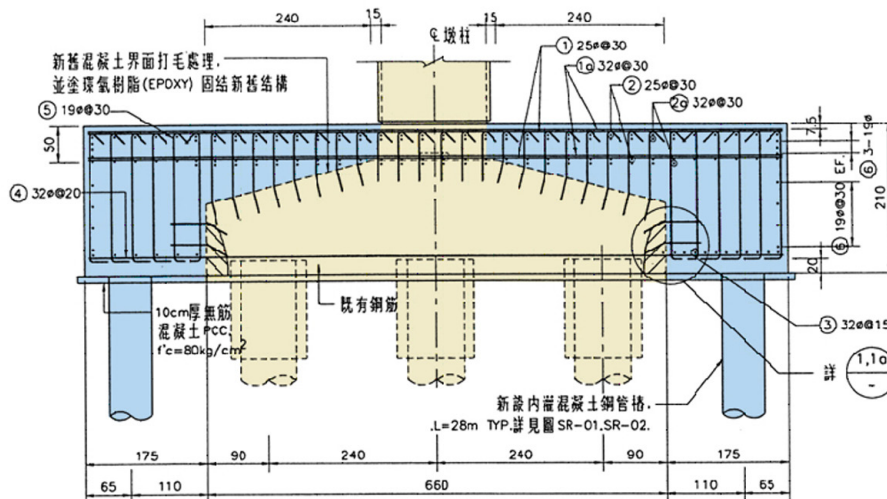


圖2.5-1基礎向上補強示意圖



2. 向下補強

一般用於河川橋，必需考量河川治理線問題，採自充填混凝土澆灌，以克服原基礎下方無法搗實之問題，如圖2.5-2。

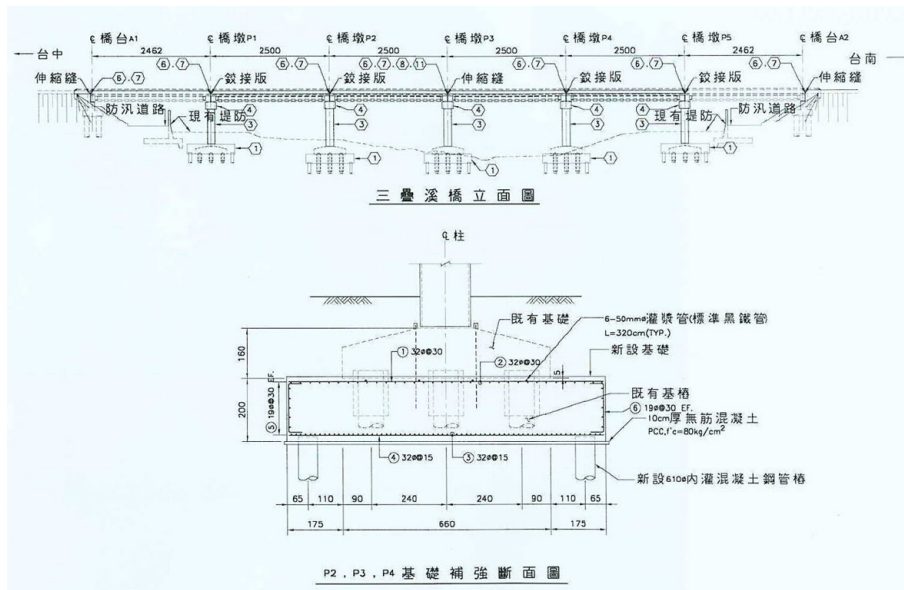


圖2.5-2基礎向下補強示意圖



三、補強工法與施工說明

(一)、高壓噴射樁

1. 高壓噴射樁施灌方式

高壓噴射樁施灌方式，其順序如下：

- (1) 利用鑽孔機鑽桿前端裝置之噴嘴，迴轉噴水鑽孔至設計圖所示之深度，保持超高壓泵之吐出壓力在 30kg/cm^2 左右。
- (2) 保持鑽桿之迴轉速度在 $10-15\text{R.P.M.}$ 左右，並變換開關以便噴射硬化漿液，然後將超高壓泵之壓力升高至 180kg/cm^2 以上，一面噴射硬化漿液，一面以自動控制器控制鑽桿使其自動迴轉上昇，上昇速度保持在 $5\text{cm}/15-20$ 秒，鑽桿上升應為自動連續迴旋上升而非跳升，以避免形成斷續之樁體。
- (3) 當鑽桿前端噴嘴上昇至噴射樁頂部之設計高程後停止噴射硬化漿液，並一面抽出鑽桿，一面以漿液填充所留孔洞，離地面後，則變換開關噴水洗淨鑽桿內之漿液，即完成一孔之灌注作業。
- (4) 鑽心取樣所遺留之管孔，應以相同配比之漿液回填。噴射樁中心在水平方向之偏差不得超過 5 公分。



高壓噴射樁鑽孔及灌漿



2. 高壓噴射樁效果檢驗

高壓噴射樁改良後樁體之成效是否符合設計所需，須依工程設計要求，包括強度、止水性、均質性等多種，並規定應於施工後依規範規定就選擇之改良樁體作連續取樣、試體抗壓試驗或試體透水試驗等，其結果應達設計要求。高壓噴射樁改良後樁體工程設計強度要求如下所列：

設計係考量強度增加需求，針對灌漿效果檢驗編列單軸抗壓強度試驗作為檢驗依據。取樣頻率採每30支噴射樁取樣一支，取樣位置在樁體中心至有效徑邊緣之中心點或樁體重疊部分或工程師代表指定位置，試體28天齡期抗壓強度(q_u)以設計圖示內容為準，7天齡期抗壓強度則不得低於28天齡期抗壓強度之70%，否則承包廠商須在已施工之噴射樁周圍經工程司代表指定之位置再做補救措施以達設計需求。前述設計圖內容，第M11標的樁體強度 q_u 需大於 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ，第M12標的樁體強度 q_u 需大於 $30\text{kg}/\text{cm}^2$ 。



高壓噴射樁樁體取樣及試驗



(二)、鋼管樁

1. 施工機具與工法

施工機具與工法如下所述

- (1) 美國加州之Tubex piles工法。
- (2) 日本「迴轉工法」之SPACE21工法。
- (3) 日本「中掘工法」之Pile-Man1820工法等。
- (4) 國內尚未有專為鋼管樁低淨空施工之樁機，惟將既有之全套管基礎搖管器加以局部改裝及調整施工程序，亦可作為鋼管樁之低淨空式樁機，或配合施工現場自行研發施工機具。



Tubex piles工法



SPACE21工法



國內自行改裝工法—震動打擊式



2. 鋼管管材說明

由於植入鋼管屬特殊鋼材，鋼材應符合ASTM A252 Grade3（JIS A5525 SKK490或CNS 7934 STK490）之規定，其碳當量(CE)依AWS D1.1 Section X 15.1之規定，不得超過0.45，含硫量(Sulfur)不得超過0.05%。且鋼管樁係指由無縫鋼管或經電弧電焊(含螺旋接縫管)所製成之鋼管。

3. 施工步驟

鋼管樁之施工步驟如下所示：

- (1) 定位
- (2) 打設及鑽掘並植入第一節鋼樁
- (3) 第二節鋼樁組合焊接
- (4) 重覆植入所有鋼樁並施做焊道檢驗
- (5) 鑽掘取土
- (6) 鋼筋籠續接吊放
- (7) 水中混凝土澆置



測量定位及鋼樁植入



鋼樁組合及焊接



超音波檢測及取土



鋼筋籠吊放及澆置水中混凝土



(三)、基礎補強工法

1. 向上補強施工

耐震補強基礎施作與一般基礎做法方法大同小異，向上補強工法所須施做的額外工項是原基礎表面打毛、植筋及底層鋼筋敲出與補強基礎鋼筋焊接連結，以確保新舊基礎可連結為一體。

如設計上採預力方式穿透既有基礎，則尚需施作鑽孔、穿線、施拉預力、套管灌漿等作業。



原基礎打毛與植筋



基礎鋼筋綁紮

2. 向下補強施工

由於在原建基礎下方補強，擋土及開挖作業完成後，需進行原基礎底面及基樁表面清除作業，同時為利新舊基礎連結，於既有基礎於墩柱周邊需鑽孔並埋設螺栓。



向下補強基礎鋼筋綁紮及灌漿(自充填混凝土)



四、施工注意事項與遭遇問題探討

(一)、高壓噴射樁

高壓噴射樁在國內已數屬使用相當廣泛之工法，運用於耐震補強作業並無特殊要求，以下針對高壓噴射樁較常發現之施工缺失及其注意事項彙整如下：

1. 高壓噴射樁樁徑與間距

由於採用不同之高壓噴射樁工法，其適用之樁徑不同，為求得地盤改良效果有其完整及一致性，故施作之間距安排相當重要，最好能有一定程度之重疊，如圖4.1-1所示。

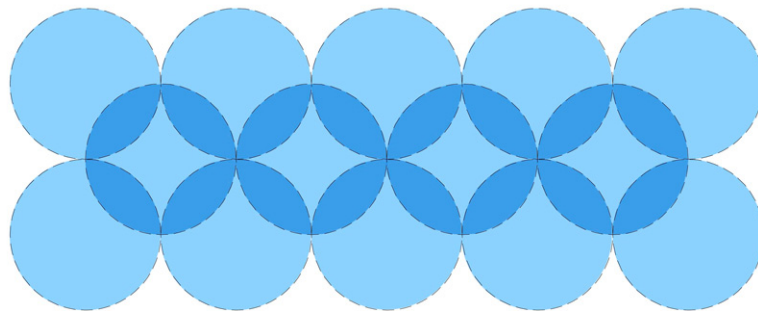


圖4.1-1 高壓噴射樁施作位置示意圖

2. 樁體連續性

雖然於規範要求須做鑽心試驗並需達一定之強度才算合格，然試驗進行階段已是區域行高壓噴射樁完成後，如有缺失其補救方式困難，故於高壓噴射樁注漿時，需詳細紀錄注漿壓力、注漿管轉速及上升速率、預估注漿量是否達成等進行管控。



(二)、鋼管樁

鋼管樁自國道1號大林新營段開始使用，累積了相當多寶貴經驗，目前耐震補強第一期工程亦有多標進行施工中，其施工注意事項及可能發生之問題如下：

1. 鋼管採購規劃

由於鋼管樁管材需有低碳低硫特性，管材採購須與生產廠商預定時程，採購前需依工地實際淨高，並考量植樁設備作業空間，以確認鋼樁各節長度。

2. 鋼管置放空間及高度

鋼管之儲存地基須堅實而平坦，不得有沉陷之現象，避免管身變形，必要時得加裝變形防止設備。鋼管吊運、裝卸、堆置時，管身不得遭受衝擊或振動，以免因此損及管身。



鋼管堆置



3. 鋼管樁定位及垂直度檢驗重要

鋼管樁樁心及垂直度容許值為：

- (1) 垂直度 $\leq 1/100$
- (2) 樁位 \leq 樁徑 $1/4$ 或 10cm

由於鋼管係逐節焊接後植入土壤，當鋼樁植入後，若樁心或垂直度不合格，植入鋼樁必須再逐節取出，並將焊接處燒熔切開，殘餘焊材必須清除，若切開時不水平，日後接合後又有不密接之困擾，故鋼管植入第一節時必須詳細檢測樁心，每一節鋼樁吊放焊接時，亦必須仔細量測垂直度。

4. 鋼筋籠主筋續接方式

- (1) 採用鋼套環焊接方式，方式如圖4.2-1。

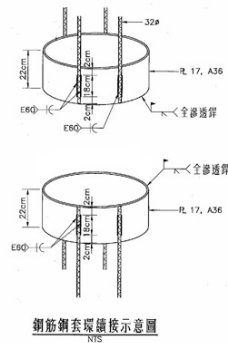


圖4.2-1 基樁鋼筋籠之鋼套環焊接示意圖



(2) 搭接施工

評估在橋下淨高大於10m狀況下使用，搭接區主筋長度2.88m，將造成搭接區佔鋼筋籠比例過大，箍筋施作不易之情形，方式如圖4.2-2。



圖4.2-2 基樁鋼筋籠之搭接示意圖

(3) 採用鋼筋續接器

鋼筋續接器雖然可行，但鋼筋籠施作時，主筋須固定於內箍筋，無法移動，若上、下鋼筋籠主筋無法對準，續接作業將耗費相當之時間，一般較少採用。

目前實務上大多採鋼環續接方式處理，惟必須增加焊接及焊道檢驗程序，安排作業時程時必須將此因素納入考量。



(三)、基礎補強工法

此部份施工重點主要在混凝土面打毛、清理及鑽孔作業，須注意之施工事項如下：

1. 原基礎混凝土面打毛作業，為避免損及原結構，需以人工方式進行，所需時程長，施工時需以足夠人員進行以縮短時程。
2. 向下補強基礎底面及基樁表面，由於開後挖後仍夾雜土砂，須先以高壓水柱清洗，再輔助以人工清理方式，以求新舊基礎間無其它不良物質。
3. 植筋與螺栓鑽孔作業

鑽孔前需先以鋼筋探測儀器，確認鑽孔位置無既有鋼筋，除可避免損及原結構，亦可減少重覆鑽孔耗廢時程之疑慮。

4. 向上補強工法需將原基礎底層筋敲出，施工作業需特別注意不得將鋼筋敲斷，鋼筋表面亦需將殘留混凝土完全清除，再進行焊接作業。

五、討論與結語

臺灣地狹人稠且所經河川眾多，設計橋梁做為運輸通路無可避免，經過了數十年使用，橋梁本身老化，復以耐震需求之提高，日後橋梁耐震補強工程勢必越來越多，筆者有幸參與中山高速公路橋梁耐震補強作業，將高壓噴射樁、鋼管樁及基礎補強工法於設計及施工上所知、所學與經驗，彙整於此文，期對日後進行耐震補強工程之先進有所幫助，並提昇臺灣橋梁於此領域之工程技術，以加速老舊及不符耐震需求之橋梁進行補強作業。



六、參考文獻

1. 中山高速公路員林至高雄(大林新營段)第531標設計圖/林同棧工程顧問股份有限公司設計。
2. 國道高速公路(通車路段)橋梁耐震補強工程(第一期)工程細部設計報告書/林同棧工程顧問股份有限公司設計。
3. 國道高速公路(通車路段)橋梁耐震補強工程(第一期)第M11及M12標設計圖/林同棧工程顧問股份有限公司設計。