

# 中 | 華 | 技 | 術 | 111

CECI ENGINEERING TECHNOLOGY

2016. 7. 31 出版

## 橋的防災與延壽



國內  
郵資已付

台北郵局許可證  
台北字第3758號

專訪人物／

臺北市工務局彭振聲局長

新北市政府工務局朱惕之局長

國立臺灣大學土木工程學系呂良正系主任

極端氣候下臺灣橋梁防災之設計與考量

橋梁之震後快速安全檢測之作法與省思

橋梁耐震補強工法之創新與應用

橋梁防災之新觀念—東日本311大地震之回顧與省思

公路橋梁耐震評估與補強規範之演進



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





# 橋的防災與延壽

# CONTENTS

中華技術111

## 目錄

### 專輯前言

#### 1 | 人物專訪

6. 訪臺北市政府工務局局長彭振聲談  
臺北市工程建設及永續發展.....

... 整理：張英發、張凱堯 · 攝影：詹朝陽

18. 訪新北市政府工務局局長朱惕之  
談新北市橋梁之防災與延壽.....

..... 整理：陳光輝 · 攝影：詹朝陽

28. 訪國立臺灣大學土木工程學系系主任  
呂良正談培育新世代土木工程人才

..... 整理：曾榮川 · 攝影：詹朝陽



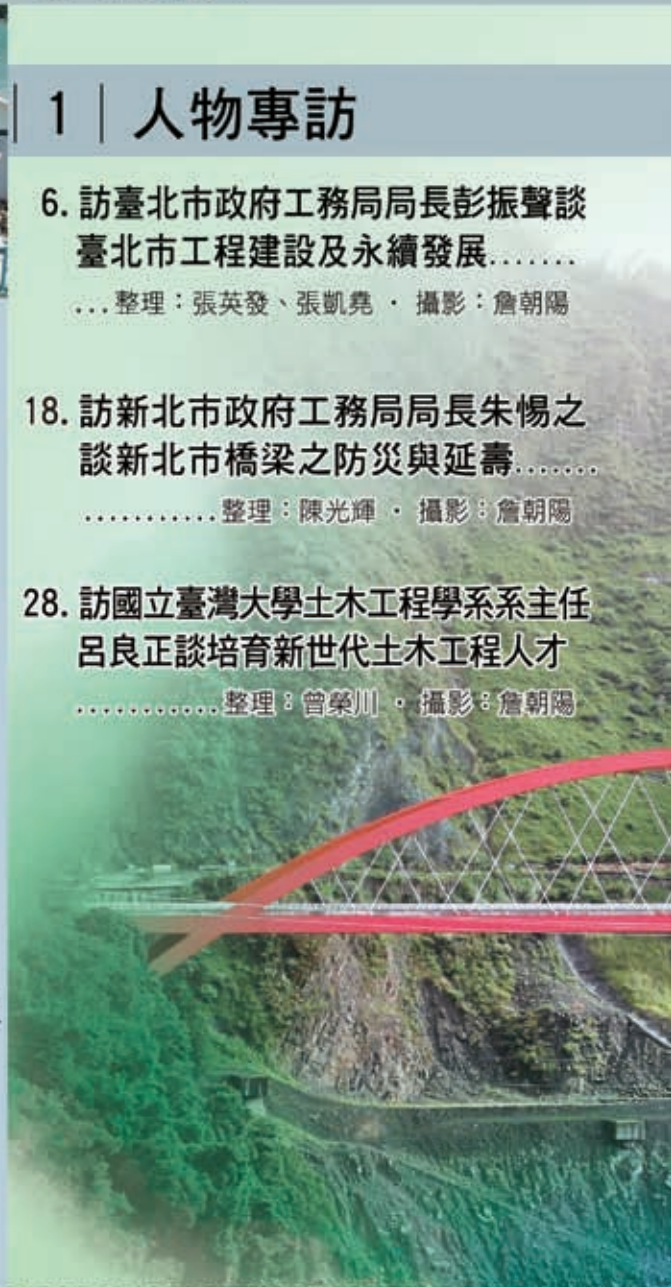
發行人 尹承蓬  
主任委員 陳茂南  
發行所 財團法人中華顧問工程司  
地址 台北市辛亥路二段185號28樓  
電話 (02) 8732-5567  
網址 <http://www.ceci.org.tw>

本期定價新台幣480元，全年四期新台幣1,600元

#### 編審工作小組

總召集人 李建中  
副總召集人 張荻薇  
111期召集人 廖學瑞  
111期審查委員 曾榮川、黃炳勳、吳文隆  
總編輯 周昌典  
副總編輯 李志宏  
執行編輯 袁雅玲  
編輯 詹朝陽、劉彥男、吳小苓、季竺貞  
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 ◎





## 2 | 工程論著

42. 橋梁結構安全與養護管理檢監測技術研發與應用.....  
.....張國鎮、宋裕祺、陳俊仲、許家銓、李政寬

124. 公路橋梁耐震評估與補強規範之演進.....  
.....王炤烈、蔣啟恆、戚樹人、蘇進國

## 3 | 專題報導

54. 極端氣候下臺灣橋梁防災之設計與考量.....  
.....張荻薇、曾榮川、吳淑珍、王泓文

136. 美濃地震橋梁災害之調查與修復設計以台86線24號橋為例.....  
.....陳嘉盈、陳新之、吳弘明、林勤福、陳彥豪

70. 橋梁之震後快速安全檢測之作法與省思.....  
.....王炤烈、林曜滄、張英發、林正偉、蔡欣仰

86. 橋梁耐震補強工法之創新與應用.....  
.....張荻薇、林曜滄、張志斌、蔡建民、  
賴震川、張肇華



102. 橋梁防災之新觀念—東日本311大地震之回顧與省思.....  
.....張荻薇、曾榮川、黃炳勳、蘇彥彰



148. 橋梁基礎土壤液化災害與補強.....  
.....吳文隆、蕭秋安、張嘉興、王景平

## 編後語



# 專輯前言

隨著國內經濟蓬勃發展後，臺灣的橋梁建設逐漸由高峰趨向飽和，由交通部統計資料，截至103年底，各縣市公路橋梁約達12,900餘座，多數早期建設之橋梁，其橋齡亦逐日步入老舊狀況。此外，臺灣地處環太平洋地震帶，為地震頻繁的區域，且每年會受到颱風侵襲，再加上全球氣候變遷促使極端規模之天然災害發生頻 增加。既有橋梁除了建造當時的設計標準可能不符合現今橋梁設計規範之要求外，亦可能因相關之材料劣化現象，導致抗災能力下降而大幅縮短其使用壽命。因此，對既有橋梁進行定期檢測及適當維修補強工作，已成為現今橋梁維護管理之迫切課題，也是橋梁工程永續發展不可或缺的一環。

本期主題即為橋的防災與延壽，將本公司長期參與橋梁防災設計所累積的工作心得與技術成果，提供工程先進參考；內容涵蓋橋梁之防災設計新思維、震後快速檢測作法、耐震評估與補強規範演進、耐震補強工法應用、基礎土壤液化與補強等各面向。另外，特別專訪推動臺北市及新北市重大公共工程建設之首長，包括臺北市工務局彭振聲局長分享臺北市橋梁之美化、防災與延壽之展望；新北市工務局朱惕之局長分享新北市橋梁之建設、發展與願景。二者由市政角度闡述橋梁防災與延壽策略，及運用新技術與創新、美化的新思維，面對未來日益嚴苛的環境挑戰，

提昇公共工程品質及防災功能，提供居民更便利及安全的生活空間；並邀訪中國土木水利工程學會理事長暨國立臺灣大學土木工程學系主任呂良正教授，分享臺大土木系近六年來結合實作課程與產業接軌，以培育具備工程專業知識、掌握工程實務技術、充實溝通整合能力、培養持續學習態度，並且認知社會責任及尊重多元，而進行具高度競爭力的土木工程人才的課程改革成果。

本期「中華技術」藉由專訪機關首長與專家學者，以及匯集本公司在橋梁防災設計所累積的工作心得與技術成果，期盼與工程先進分享。藉由新思維、新技術的交流，重視橋梁全生命周期，從規劃、設計、施工、營運、維護管理直到除役的每一個環節，共同打造高效率與高品質的永續橋梁工程；而對於既有橋梁也能透過定期檢測工作確實掌握劣化狀況與各項性能，加強維護管理，達到橋梁延壽目的。



台灣世曦工程顧問股份有限公司

副總經理

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters.

1

人物專訪

| 中 | 華 | 技 | 術 |

INTERVIEW



訪臺北市政府工務局局長

**彭振聲**

**談**

**臺北市工程建設  
及永續發展**



## 壹、前言

彭振聲局長，臺北市政府工務局局長，為國立高雄第一科技大學工程科技研究所博士，曾任高雄市政府工務局下水道工程處處長、高雄市政府工務局新建工程處副處長及總工程司，參與各種城市建設業務近40年，公務行政歷練完整，工程專業與實務經驗非常豐富。今年於新年期間甫完成的忠孝橋引橋拆除作業及年初面臨的土壤液化問題及未來中正橋改建等，正是工務局推動執行的工程業務。

臺北市為首善之都，任何工務推動均為國人注目焦點，而臺北市的許多重大工程建設之推手均為工務局，本期刊很榮幸於民國105年7月1日專訪彭振聲局長，談臺北市工程建設及永續發展，包含如何因應極端氣候變化下的衝擊，積極推動海綿宜居城市，及前些日子大家最關心的土壤液化問題。

## 貳、訪談紀要

問：臺北市為首善之區，商業活動繁忙，工務局目前正積極推動海綿宜居城市，請問是否可以詳述該項工作的推動狀況？

答：都會區高度都市化開發人口集中，早已成為國際各主要城市的寫照，傳統的公共建設著重於相關基礎建設對於民眾的服務性，常常忽略對於環境生態與水文的影響，特別是面對極端氣候挑戰的今日，都市水環境的議題在氣候旱澇交替頻繁之際，更是面臨嚴峻挑戰。臺北市人口密度於國際各大都會區名列前茅，高度都市化亦衍生市區建築林立不透水鋪面四處可

見，衍生都市保水透水不易洪氾風險增加、水資源供給日趨緊張、民眾親水空間以及水環境生態棲地缺乏等問題。



為解決上述都會區水環境問題，於柯市長上任後即推動本市海綿宜居城市政策，以「韌性水調適」、「永續水利用」、「友善水環境」為民眾勾勒出本市水環境3大願景，



並將「健全都市水循環」、「提升防洪容受度」、「穩定供水有效用水」、「多元活絡水利用」、「民眾親水去處多」、「生態多樣水棲地」等做為後續推動工作的6大目標，透過包含工程措施及管理手段的14項推動策略，分由本府相關權責機關提出執行計畫推動執行，使本市在面對極端降雨事件時能吸納保水減低洪氾風險，於水資源匱乏時仍能提供民眾及事業穩定多元之水源，成為一個民眾可親水且具有豐富多樣水環境生態之海綿宜居城市。



### 3大願景聯集來達成海綿城市

原始之天然綠地、湖泊消失殆盡，所能提供之入滲功能從50%的入滲量降低至15%，無法入滲的雨水則在地面間竄流，故原地表逕流量從10%增加到55%，洪峰增量了45%，更加劇了下游低窪區積水風險及防洪排水設施能量不足之憂慮，故本局規劃以海綿宜居城市多面向策略手法來減緩都市滂災之水害，以達成韌性水調適、友善水環境及永續水利用3大願景。臺北市目前各項重要推動進程簡述如下：



(左)彭振聲局長

1. 對於人行道透水鋪面推動部份，至105年5月累計完成3萬7,804平方公尺之透水鋪面施作。另本局持續推動人行環境改善工作，分別於新生南路3段、羅斯福路5、6段、和平西路3段、松江路及復興南北路等路段設置透水性鋪面，預計至105年底可達成約10萬2,930平方公尺。



羅斯福路5、6段



(右5)廖學瑞副總經理 (右4)林曜滄資深協理 (右3)曾榮川協理 (右2)楊國雄副理 (右1)張英發經理



復興南北路西側人行道拓寬

2. 於104年完成內湖區陽港3調洪沉砂池，可調洪量約2萬7千立方公尺，並配合上、中、下游集水區整體規劃治理，並於該年正式命名為「金瑞治水園區」。

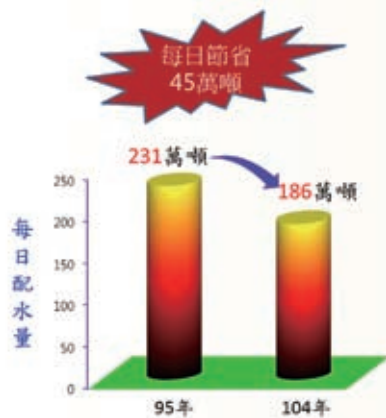


金瑞治水園區

3. 目前刻正於文山區辦理「文山區辛亥路憲兵營區停車場滯洪池新建工程」及「文山區運動中心北側用地滯洪池新建工程」之施工作業，有效調洪量體分別約4萬6千立方公尺及6千立方公尺。



4. 透過智慧水管理及節水宣導，至104年每人每日生活用水量由96年352公升降低為330公升，共降低22公升，換算每日可節省45萬噸自來水量。另減少管線漏水部分，漏水率從95年初26.99%降到104年15.58%，降低11.41%。

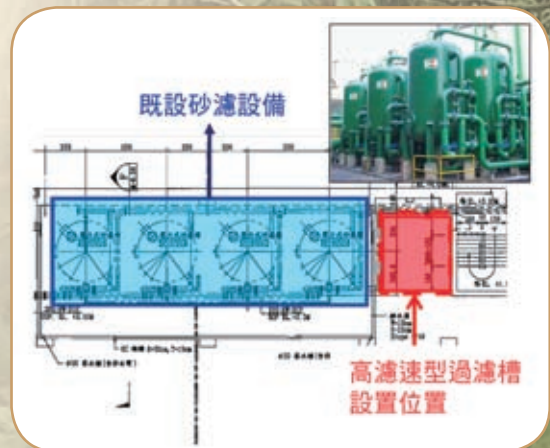


5. 推動翡翠水庫集水區治理及專管計畫，除加強水庫集水區山坡地水土保持、復育及保育，除確保維護水質外，並可在颱風暴雨影響下，達到穩定供水目標。



6. 推動迪化污水處理廠再生水槽增設纖維快濾桶設置，提升再生水水質水量，可提高再生水產量達1,000CMD，總產量達11,000CMD，並提升再生水質。另增加可持續利用面向，經纖維快濾槽處理後的再生水約200CMD作為廠區

除臭系統補充水，餘800CMD另於廠區設一取水口供外部取用。



7. 為改善基隆河的水質及親水環境，於105年4月完成提升成美礫間場污水進流工程，完成後可將長壽雨水抽水站周邊雨水下水道系統內的晴天污水引入成美礫間場淨化，充分運用成美礫間場設計每日9,000立方公尺之處理容量。污水流經礫間場內填充礫石之淨化處理槽後，污水與礫石表面的生物膜接觸反應，使放流水符合設計標準及水質淨化目標，補助基隆河基流量提供更佳的生態棲地環境。

8. 推動本市重要濕地「南港202兵工廠及其周邊濕地」保育利用計畫，辦理環境與生態調查，並針對重要濕地系統功能進行分區、擇定核准濕地明智利用之項目，訂定水資源保護、利用管理、緊急應變及恢復措施等計畫，另針對既有濕地(如關渡自然公園、華江、社子島等濕地)透過棲息地之微整理及清疏維護，以



1

人物專訪

彭振聲局長談金瑞治水園區



減少濕地陸域化、棲地劣化，並維持棲地環境清潔，保護及穩定生態生物多樣性。



9. 提供河濱民眾親水活動的服務品質，105年度完成雙園自行車橋，長67公尺，寬達6公尺，僅供自行車和民眾步行使用，將人車分流，民眾騎自行車或散步，都比以往更安全和舒適，新店溪美景盡收眼底。另臺北市河濱公園共有10處自行車租借站，統計至104年底一般使用租借人數達1,649,405人次，並與新北市整合跨市相關租借服務，如跨市甲地乙還、整合雙北租車費率等，隨者服務品質提升，租借人次逐年上升。



問：全球因為極端氣候變化而產生不少的災情，特別是水文的極端現象，不僅每

年颱風侵襲次數增加，即使非颱風季節，大豪雨或暴雨的出現頻率也較過去明顯，臺北市政府要如何因應？

答：面對全球氣候變遷帶來極端水文條件之挑戰，臺北市政府近年來也積極推動「智慧城市」(Smart city)，強化智慧洪災管理，透過水利防災科技應用於都市洪災管理，以資通訊技術的優勢，彌補傳統都市洪災管理應變能力之不足。

發展智慧城市已是全世界先進都市的趨勢，主要是以資通訊基礎建設與公開資料平台為基礎，透過政府有效規劃都市發展願景，結合市民實質需求來完成解決方案。智慧城市策略之發展，透過智慧政府、智慧市民、智慧公共基礎建設與服務、智慧治理、智慧交通、智慧能源及智慧水源等，期待善用資訊通訊技術優勢，解決城市所面臨的議題，於各方面帶給市民最大的便利，使城市成為更安全、便捷、宜居的城市。

針對全球極端氣候變化所帶來的水文極端現象，臺北市政府積極進動「智慧洪災管理」，透過水利防災科技應用的導入，結合資訊通訊技術(ICT)來強化管理技術，提升既有排水抗洪設施效能。臺北市目前透過建置完善之內、外水水情監測(視)系統、河川與市區水位





減少社會成本及民眾生命財產之損失。

臺北市的「智慧防災管理」架構主要是藉由水利防災科技及資通訊技術之結合應用，就內外水加強水情之「監測」與「預測」、設備之「監控」、防救災之「管理與決策」及「資訊公開與回饋」，將所有雨量、水情監測及設施操作等數據資料皆整合於「水情監測資訊平台」及「臺北市水情資訊APP平台」，可讓第一線防救災人員於第一時間掌握正確可靠之資訊，亦可應用於「災害決策支援系統」作為決策者分析、判斷及下達防救災應變決策。

一般民眾可透過臺北市政府消防局「臺北市防災資訊網」、「地圖化資訊系統」等網站或於手機下載「臺北市行動防災APP」查詢最新、最正確之防災及避災資訊，勘災人員則可利用「臺北市行動勘災APP」上傳回災情資訊。

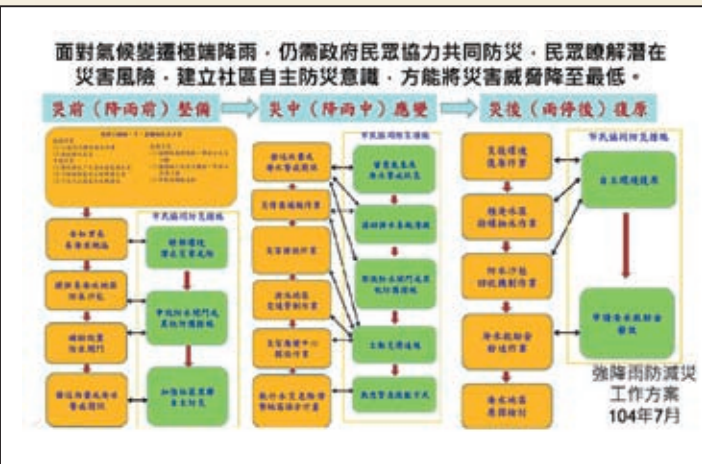
而臺北市抽水站除加強排水機組設備功能及抗洪保護設施外，運用已建置完成之雨水下水道監測系統及水情整合監視系統之即時資訊，結合自動化監控系統的建置，藉由即時水情資訊串聯自動化操控機制，提升抽水站管理效能及操作準確性、強化應變指揮能力、減少系統負荷、降低發生積淹水風險、並減少人為因素導致操作失敗情形之發生等目標，提升市

區防洪排水保護，確保護市民生命與家園免於水患。



目前本市已律定每年5月1日至11月30日為防汛期，期間之各種颱風、降雨事件是可以預料發生的，持續平時的防洪工事，提升排水系統排放能力，並積極擬定流域治理對策、推動海綿城市，促進流域合理使用，惟全球氣候變遷，造成極端事件之頻率與強度增加，也因工程防災能力是有其極限，超出保護標準之事件，則以防救災措施補其不足，透過智慧防災之監控、預警、通報、應變。另於強降雨防減災工作方案，透過「災前整備」、「災中應變」及「災後復原」之防災作業及簡訊資訊通報，使民眾理解且自主性的進行協力防災準備。面對氣候變遷極端降雨，仍需政府民眾協





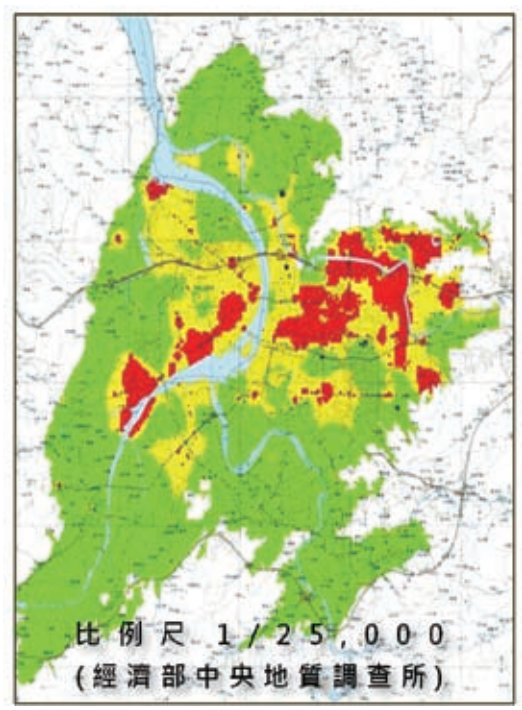
共設施選址、都市防災及大規模的避難規劃用途。

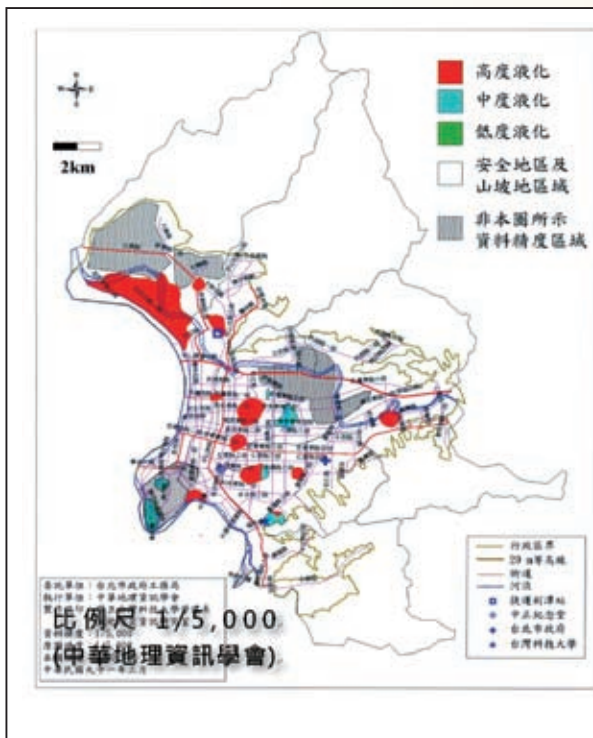
本局為因應土壤液化對臺北市恐造成之衝擊，業於91年委託中華地理資訊學會辦理「臺北市地質鑽孔資訊化計畫」並製作臺北市平原地區液化潛能圖，該液化分析採用3,444孔鑽探資料，圖資結果指出本市計有16處液化潛能區，包括10處高液化潛能區。惟此圖使用鑽孔資料僅至91年以前，為提升評估之準確性，需再加入近16年新增鑽孔資料。爰本局計劃公開本市中級精度土壤液化潛勢圖，比例尺精度達5千分之一，收集超過7,811孔鑽探資料，並進行多種不同土壤液化分析方法及交叉比對後，更新為本市最新土壤液化潛勢圖，預計105年8

力共同防災，民眾瞭解潛在災害風險，建立社區自主防災意識，方能將災害威脅降至最低。

問：經濟部中央地質調查所於今年3月14日於網路公開土壤液化圖資，請問工務局後續作為？

答：本次經濟部中央地質調查所於網路上所公開的土壤液化圖資，主要是精度初級區域性圖資，其比例尺為2萬5千分之一，可應用於公





1	社子島	6	光華數位新天地
2	石牌派出所	7	大安森林公園北側
3	士林橋	8	青年公園
4	捷運民權西路站	9	信義路四段
5	行天宮	10	南港分局

(參考：91 年台北市平原區液化潛能圖)

月底完成，預期可提供本府未來在都市計畫及都市防災規劃時使用。

本局 105 年 8 月最新版臺北市土壤液化潛勢圖查詢系統，將以網頁方式提供市民透過地籍地號或門牌方式作定位查詢，網頁內容還包含液化發生機制說明、土壤液化 Q&A、液化改善對策等資訊，讓民眾能隨時都能查詢所關心區域之土壤液化評估結果。

土壤液化潛勢圖層套疊查詢的地理資訊系統(GIS)功能採 ESRI ArcGIS 圖資平台架構進行設計開發，初步規劃查詢系統網頁底圖圖層包括臺北市電子地圖、都發局航測影像(含門牌)及國土測繪地圖(含門牌)，動態圖層選取則包括



土壤液化潛勢圖層、鑽探資料點位及臺北市地籍圖層三種。



(左1)楊國雄副理 (左2)張英發經理 (左3)廖學瑞副總經理 (右3)彭振聲局長 (右2)林曜滄資深協理 (右1)曾榮川協理

另外，因應地調所日前公布土壤液化潛勢圖資，臺北市建管處刻正配合內政部營建署土壤液化改善配套措施，提供坐落於高度液化潛勢區之私有建築物申請老屋健檢初評工作，並統一委由工程專業技師公會派員進行診斷，提供補強建議。

市府並召開府級會議研商「地方政府辦理土壤液化改善示範計畫」，內容包含劃定明確土壤液化潛勢區範圍、補充地質鑽探、公私有建物耐震能力評估、地質改良、基礎補強、公共工程補強等項目，積極爭取中央預算補助，協助市民解決土壤液化相關問題。

## 後記

承蒙彭局長於百忙之中撥冗接受專訪，特別是專訪時間尚在本期的市議會會期中，在空檔中抽空與我們會面。

在訪談過程中，我們深切感受到彭局長對於臺北市的工程建設非常深入了解，對於如何推動海綿宜居城市與智慧城市等重要永續發展工作，依其嫻熟工程經驗及前瞻視野，逐步落實於各項市政建設工程。

1

人物專訪

| 中 | 華 | 技 | 術 |

INTERVIEW



訪新北市政府工務局局長

**朱揚之**

**談**

**新北市橋梁之  
防災與延壽**

## 壹、前言

新北市政府工務局朱惕之局長畢業於國立臺灣工業技術學院營建工程系、營建工程研究所博士，歷任行政院公共工程委員會工程管理處科長及簡任技正、桃園縣政府工務局副局長、技監、工務局長、副秘書長等重要公職，學經歷完整經驗豐富。

朱局長長年參與國內公共工程的推動，於擔任行政院公共工程委員會工程管理處科長、技正期間，致力於推動公共工程計畫執行品質管理制度，以及建立公共工程資訊體系；於任職桃園縣政府工務局期間，推動路平躍昇方案、工程品質躍昇方案、道路品質行動管理APP、建築管理服務智慧化及建築環境品質提昇計畫等，大幅提昇公務行政效能，並使桃園縣政府在102年榮獲「公路養護作業績效督導考核」、「金路獎」及「第五屆道安交通工程創新貢獻」三個獎項第一名；於103年12月受朱立倫市長延攬至新北市擔任工務局局长，以效率、品質、地方發展及環境永續的理念，作為新北市政府推動公共工程的核心價值，使新北市政府工務局所施作之橋梁不論在工程品質或是美感設計方面均深獲各界肯定，其中新社后橋新建工程更獲得「104年度公共工程品質優良獎優等」的殊榮。

## 貳、訪談紀要

問：新北市轄管面積達2052.57km<sup>2</sup>，幅員相當廣闊，且人口約有397萬人，為國內人口最多的直轄市，由於地理環境及極端氣候影響，面臨颱風、地震、土石流等天然災害的威脅，因此對於都市防災、避難輸送及緊急救災救護等之路線規劃益顯重要，可否請局長說明新北市政府在防災路網方面之規劃情形？

答：新北市地屬臺灣北部，北、東、西部三面環海，轄內山坡地遍布，平地地區則高樓建築

物櫛比鱗次，各型工廠密布設立，人口大量聚集於都會區，實質環境包含了都市、行政區、海邊等地域特性，主要河川流域為淡水河流域及其支流，且本市境內擁有全臺灣核能電廠分布最多的一個縣市，於金山區、萬里區兩地皆各設核能電廠一座。由核能電廠潛在的危害性，再加上全市自然環境的複雜，使災害防救工作更顯其重要性。防災之工作領域是相當廣泛，且大部分工作事項需地方政府加以著手規劃，為確實達到預防功效及減災目的，本市各相關單位須於災害前進行防災準備工作，惟有事前努力做好防範措施，才能降低或減緩災害帶來之衝擊，甚至化解掉一場災難的發生。



在防災路網規劃方面，本市交通網路發達，除了本市境內135條區道、20條市道及台1、台2、台3、台5、台9、台15線等省道系統之外，另外還有中山高速公路及第二高速公路為兩條南北聯繫之國道系統；近年陸續開發東西向快速道路八里新店線(台64)、五股土城線(台65)及華翠橋、萬板大橋、台1線等高架道路，使市區交通量的疏通及連外通行更為便捷，對都市防災、避難輸送及緊急救災救護路線方面，著實有很大的幫助。

本市人口分布不平均，有約80%集中在10個區(板橋區、三重區、中和區、永和區、新莊區、新店區、樹林區、汐止區、土城區及蘆洲區)，這些都市由於早期發展過速，舊有都市計畫道路缺乏妥善規劃與管理，使得市區建築過於密集，道路及巷道變為相對狹窄，且容量趨於飽和，行車空間不足，每每造成交通異常壅塞之情形，影響救災路線之規劃至鉅，目前已逐年編列預算進行改善。

問：隨著都市的快速發展，橋梁除了肩負交通運輸、經濟活動等基本功能外，也是民眾維生、災害救援之主要關鍵，可說是都市防救災路網的重要環節。目前新北市轄管橋梁約一千三百多座，隨著耐震設計規範演進、橋梁



(左1)張志斌副理 (左2)陳光輝經理

日漸老舊劣化影響，造成部分橋梁可能無法承受大地震時之荷載而發生破壞，另部分跨河橋梁依最新河川治理計畫檢討，梁底高程不足將影響防洪功能，請問新北市政府對於轄管橋梁在震害、洪害等災害之防制以及延長既有橋梁使用年限之作法為何？

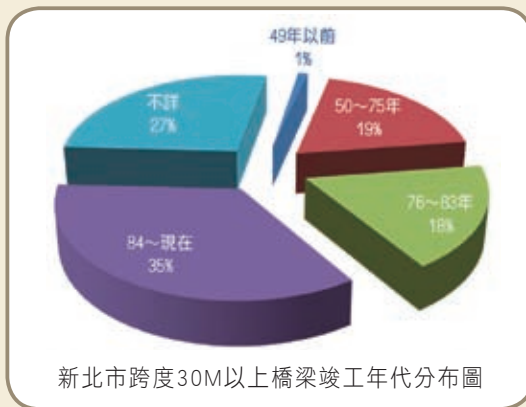
答：目前新北市轄區內跨度30M以上之橋梁約有412座，其中27%橋齡不詳、1%為49年以前竣工、19%為50-75年竣工、18%為76-83年竣工、35%為84年以後竣工，橋齡超過50年者約



(右4)曾榮川協理 (右3)林曜滄資深協理 (右2)廖學瑞副總經理 (右1)朱揚之局長

占30%，其中多數橋梁位於交通要道，如採原址改建執行相當困難，且改建費用龐大，市府財政也無法負擔，因此對於老舊劣化及耐震能力不足之橋梁，本府已研擬相關災害防制與延壽之作法，包括橋梁安全檢測與維修工作及橋梁耐震能力評估與補強工作。

在橋梁安全檢測與維修工作方面，新北市在台北縣時期(民國97年至99年)即開始每年委託顧問公司辦理轄區橋梁之資料調查、目視安全檢測作業、重要橋梁耐震構件檢查、重要橋梁防汛期檢查及建議維修次序、維修方式等，



至100年升格新北市後，則改為每兩年委託顧問公司辦理橋梁檢測技術服務(100年、102年、104年)，以維護橋梁之安全與功能，並能達到災害防制及延長橋梁服務年限之目標。由於市府同仁的盡心盡力，使本市榮獲交通部評

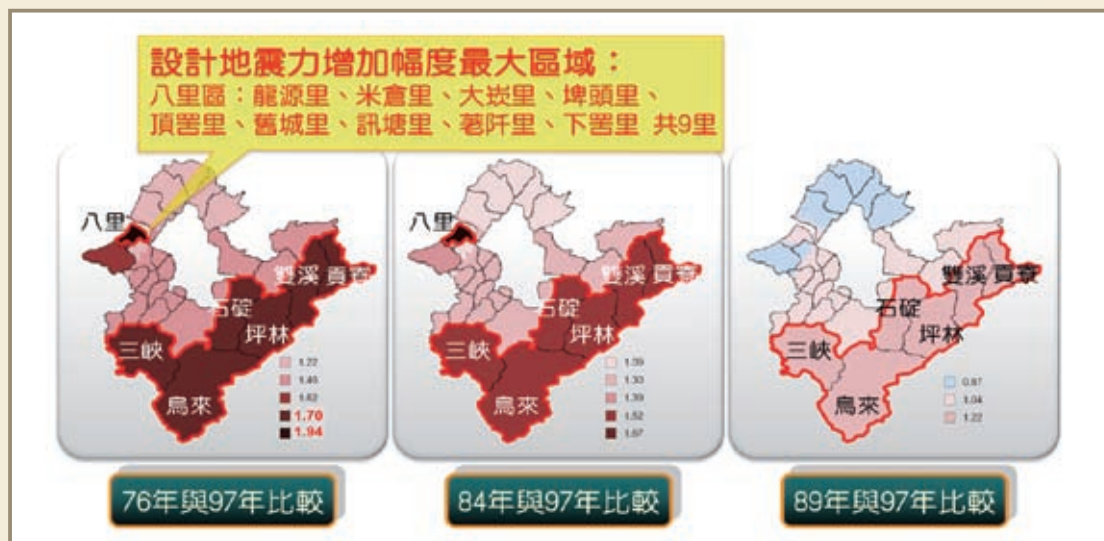


鑑為「103年度橋梁維護管理全國第一名」之殊榮。

在橋梁耐震能力評估與補強工作方面，國內公路橋梁設計規範經過多次修訂後，工址地表加速度及震區劃分均有變動，經比較新北市各行政區舊有耐震設計規範與現行耐震設計規範的設計地震水平譜加速度係數，僅有部分區域譜加速度減少，代表此區結構物可能不需補強；其餘大部分地區之譜加速度係數均為原設計規範之1.04倍到1.94倍不等，也就是現行規範之設計地震力較舊有規範放大了1.04倍至1.94倍，導致既有橋梁原設計的耐震能力可能不足，為解決既有橋梁耐震能力不足問題，本市於101年辦理「101年度新北市轄區內橋梁耐震分析評估委託技術服務」，並依據評估結果與建議，針對大漢橋等13座橋梁分三期於103年、104年及105年辦理耐震補強施工，目

前已完成重陽橋等10座橋梁耐震能力提升，今年下半年將推出「106年度新北市轄區內橋梁耐震分析評估及設計委託服務」，服務內容分為三個階段，第一階段針對選定之橋梁（60座）進行耐震初評，第二階段則依據第一階段成果，選定15座進行耐震詳細評估，第三階段針對耐震詳評結果進行耐震補強設計，後續配合預算分標進行耐震補強作業，期能全面提升轄管橋梁之耐震及防救災能力。

另外對於部分橋梁梁底高程不足影響防洪功能問題，新北市政府目前已與經濟部水利署攜手合作，配合基隆河整體治理計畫需求，採符合200年頻率防洪標準及河中不落墩，總計辦理7座橋梁改建工程，分別是已完工的新江北橋、新長安橋、前年完工的汐止聯絡道橋，及去年9月剛完工通車的新社后橋工程，瑞峰橋是基隆河上第5座完成改建的橋梁，於



新北市各區既有橋梁現行規範設計地震力與原設計差異比較圖





1  
人物專訪

朱錫之局長



去年12月完工通車，另外還有施工中之猴硐介壽橋及國芳橋2座。這7座橋梁當中除猴硐介壽橋外，其餘6座都是由 貴公司設計及監造，執行成果本府相當滿意，且屢獲獎項，包括：新江北橋(新北市政府公共工程優質獎)、新長安橋(101年新北市政府公共工程優質獎、101年度公共工程品質優良獎入圍)、汐止聯絡道橋(103年度公共工程品質優良獎佳作、103年國家工安獎優等)、新社后橋(104年新北市政府公共工程優質獎、104年度公共工程品質優良獎優等)及瑞

峰橋(104年新北市政府公共工程優質獎)。

問：新北市政府工務局所施作之橋梁不論在工程品質或是美感設計方面均深獲各界肯定，除了肩負交通運輸需求外，也是城鄉的地標，是否可談談您對新北市橋梁建設之未來展望？

答：對於新北市橋梁建設的未來展望，我想可以「光雕之美、點亮新北」、「導入BIM、永續建設」、「人本建設、體貼市民」及「鐵馬御風、低碳環保」等四個主題來說明：

一、光雕之美、點亮新北：新北市近年來致力於整頓轄區河岸環境，以提供市民更多樣的休閒遊憩環境，水岸空間早已成為民眾生活

空間之一環，而橋梁除肩負交通功能外，亦可串聯兩岸延伸市民生活空間，目前本市已完成轄區三角湧大橋等45座橋梁夜間光雕，採用數位控制之LED燈，讓橋梁化身為璀璨絢亮的彩虹，串聯新北水岸美麗廊道，並兼具節能、觀光、藝術、遊憩、環保等多功能，讓市民於休閒遊憩之餘，亦能欣賞一場場美麗的視覺饗宴。



光雕之美—新社后橋



光雕之美—汐止聯絡道橋



光雕之美—新長安橋



光雕之美—新月橋



光雕之美—平埔橋



光雕之美—三角湧大橋



瑞峰橋人行道及觀景平台



鐵馬御風—三角湧大橋



鐵馬御風—新長安橋



鐵馬御風—柑園二橋

二、導入BIM、永續建設：BIM技術已是國際間發展趨勢，具有提供業主及非專業工程人員視覺化的成果實境功能，亦可偵測設計錯誤與減少施工衝突，發揮溝通協調特性，提升營建生產力，並有助於管理營運的資訊應用與整合。目前本市已要求於三鶯大橋及柑城橋等二橋梁改建工程中試辦，如試辦成效良好，後續將要求一定金額以上之橋梁工程均須辦理。

三、人本建設、體貼市民：前面提到的7座跨河橋梁為了彌補舊橋人行空間不足，部分新橋規劃時特別加大了兩側人行道寬度，體貼地方長者及學童通行安全與舒適性，同時工務局也聽取地方意見，例如於瑞峰橋跨中間設置可供行人休憩及觀賞河景的觀景平台，讓民眾可以悠閒地駐足欣賞沿途景緻，充分展現人本精神。這些橋梁完成後除符合河川水理需求外，



(左1)張志斌副理 (左2)陳光輝經理 (左3)林曜滄資深協理 (右3)朱楊之局長 (右2)廖學瑞副總經理 (右1)曾榮川協理

同時可提升橋梁耐震能力，對紓解基隆河兩側交通及促進區域繁榮發展有相當大的助益。

**四、鐵馬御風、低碳環保：**自行車兼具交通運輸、休閒娛樂及運動強身等功能，且為節約能源、無空氣污染具有環保概念的綠色交通工具。新北市政府為提倡民眾使用自行車習慣，朝環保、節能的永續運輸系統環境發展，已沿轄區各河濱區域闢建多條自行車道，然而受制於溪流阻隔，必須仰賴跨河橋梁來串聯兩岸自行車路網。目前本市橋梁建設在相關條件允許下，多已要求新建橋梁須配合自行車路網設置專用車道，如三角湧大橋、瑞峰橋、國芳橋、新社后橋、新長安橋、新江北橋、柑園二橋、三鶯大橋等，成效相當良好。

## 後記

朱局長的公務員資歷完整，是少數政務官中曾經在中央及地方都任事過的，因此訪談過程中，他除了對目前掌舵的新北市工務局業務非常熟稔之外，就連以前他在中央推動的全國性業務也都侃侃而談如數家珍，讓採訪團隊印象深刻。

朱局長領軍後的新北市工務局已締造出多項全國性的榮耀，他強調，一個工程的誕生最重要的就是基礎，只要基礎紮實，向上建設就會穩固牢靠，不畏天災人禍。他更期待帶領工務局年輕的團隊為國家孕育工程人才種子，創造單位新價值。

1

人物專訪

| 中 | 華 | 技 | 術 |

INTERVIEW



訪國立臺灣大學土木工程學系系主任

**呂良正**

**談**

**培育新世代土木工程人才**

## 壹、前言

呂良正教授，1987、1989年獲臺灣大學土木工程學系學士、碩士學位，1994年獲美國康乃爾大學力學所博士學位。自1994年起任教於台大臺灣大學土木工程系，現任臺灣大學土木工程學系教授兼系主任，兼任中華工程教育學會（IEET）副秘書長及認證委員會副執行長、中國工程師學刊土木組召集人及結構工程期刊主編、中華民國結構工程學會及土木水利工程學會理事長。曾任臺灣大學土木工程學系副系主任、臺灣大學地震工程研究中心主任、土木水利雙月刊總編輯及UCLA訪問學者。研究領域主要包括結構最佳化設計、建築物理模擬（綠建築）、計算力學、結構健康監測、地震工程及結構可靠度分析。

呂教授於系主任期間，致力於各項課程之創新教學，以理論基礎為本，帶入動手實作與設計實務，激發學生潛力及興趣，使學習更為全面化，對於培育人才不遺餘力，本文將就「培育新世代土木工程人才」專訪呂教授。

## 貳、訪談紀要

問：呂主任不僅長期從事教學與研究，也參與工程實務並擔任土水及結構工程學會的理事長，在今日科技日新月異且工程環境與以往截然不同的時代，土木工程人員宜具備哪些專業能力與特質？

答：這個問題由個人閱讀過的一本翻譯書籍可作最好說明，在「未來在等待的人才」一書（原著書名: A Whole New Mind，作者: Daniel H. Pink）闡述未來的人才要具備六項感性的力量，才能有高度競爭力，這六項分別是：不只有功能，還重設計；不只有論點，還說故事；

不只談專業，還須整合；不只講邏輯，還給關懷；不只能正經，還會玩樂；不只顧賺錢，還重意義。過去我們強調功能、論點、專業、邏輯、正經、賺錢；但未來的人才除了這些，若要能勝出，更要具備這六項感性的力量：有設計能力、會說故事、有整合能力、有關懷的心、懂得玩樂、做有意義的事。

美國土木工程師學會(ASCE)提出土木工程師應了解的議題與應具備的15項核心能力，分別是設計(Design)、永續(Sustainability)、當代及歷史議題(Contemporary & Historic Issues)、風險及不確定性(Risk & Uncertainty)、專案管理(Project Management)、專業技能(Technical Specification)、溝通能力(Communication)、公共政策(Public Policy)、商業及公共行政



(Business & Public Administration)、全球化(Globalization)、領導能力(Leadership)、團隊合作(Teamwork)、態度(Attitudes)、終生學習(Lifelong Learning)、專業及倫理責任(Professional & Ethical Responsibility)。

也就是說，除了高感性的6種能力外，做為一個未來的土木專業人才，其所須具備的能力更為廣泛。比起其他工程領域，上述這15項核心能力大多數是共通的，比較是土木特有的應該是：當代及歷史議題、公共政策、商業及公共行政。這15項核心能力的培養，除了靠學校教育之外，進到職場後的學習也很重要。

問：大學是專業領域重要的初學場所與時期，所謂“好的開始是成功的一半”，為達到培育主任剛才所談的15項核心能力，應如何導引及確認國內各大專院校提供這樣的師資與場所？

答：提到大學對於核心能力培育的情況，可由10多年來國內教育認證的情況來了解。目前國內工程、技術、資訊、建築及設計相關領域的大專校院科系，多數已經接受中華工程教育學會(IEET；網址：[www.ieet.org.tw](http://www.ieet.org.tw))的認證，以工程領域學士班為例，目前認證比例高達80%。IEET創立於2003年，已是多項國際協定



(左)呂良正系主任

的會員，包括華盛頓協定(工程教育認證)、雪梨協定(技術教育認證)、首爾協定(資訊教育認證)，同時也是坎培拉協定(建築教育認證)準會員。學系通過IEET認證，其畢業生學歷可以為協定會員國所承認，增加畢業生國際移動力；以工程教育之華盛頓協定為例，目前已經有18個會員國，因此國際移動更顯重要。

那認證與學生能力的培育關係為何呢？認證是依據規範，以工程教育認證為例，其中最重要的規範3即是談到學生畢業當下應具備的核心能力。IEET 2014年版的規範3如下：3.1運用數學、科學及工程知識的能力；3.2設計與





(右5)廖學瑞副總經理 (右4)林曜滄資深協理 (右3)曾榮川協理 (右2)張英發經理 (右1)陳光輝經理

執行實驗，以及分析與解釋資料的能力；3.3 執行工程實務所需技術、技巧及使用現代工具的能力；3.4設計工程系統、元件或製程的能力；3.5專案管理（含經費規劃）、有效溝通、領域整合與團隊合作的能力；3.6發掘、分析、應用研究成果及因應複雜且整合性工程問題的能力；3.7認識時事議題，瞭解工程技術對環境、社會及全球的影響，並培養持續學習的習慣與能力；3.8 理解及應用專業倫理，認知社會責任及尊重多元觀點。

可以清楚看到IEET認證規範3中8項核心能力所涵蓋的層面相當廣，多數與ASCE 15項核

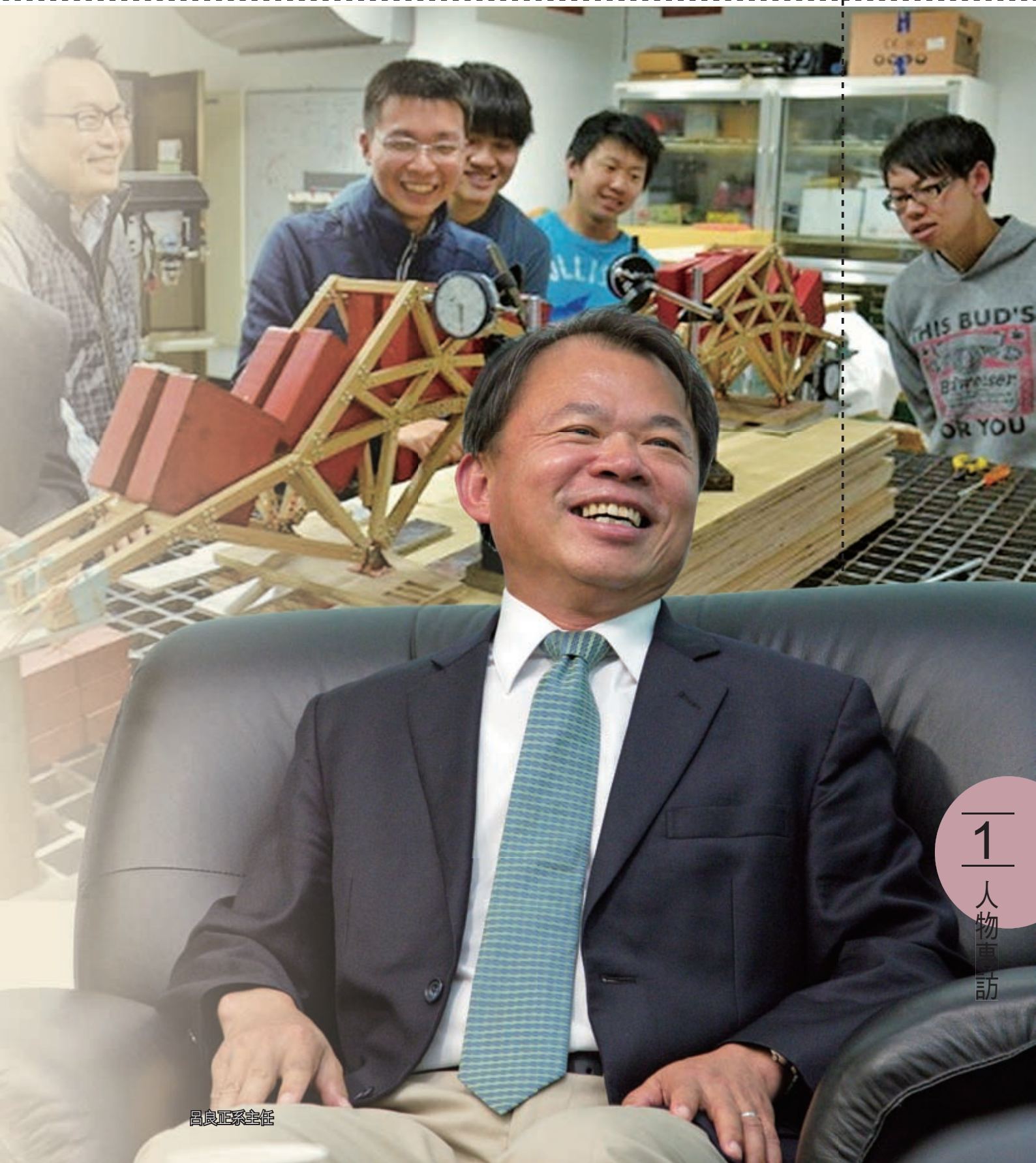
心能力相當，差異是ASCE更具體訂定土木工程特有的能力。受到認證的影響，國際上對於教學的成效評量，目前都已走向學生成果導向，也就是藉由課程培育學生核心能力，並搭配一套評估機制了解達成度，最後反饋於課程設計及改革等。我們可以了解許多核心能力的培育並不是過去傳統課程可以達到的，經驗顯示許多感性或是軟實力相關的核心能力，其培育透過實作課程(Hands-on Courses)是更為有效的。正因為如此，臺大土木系過去6年來設計了一系列的實作課程，也初步看到了成效。



問：迄今教授擔任臺大土木系主任已近6年半，可否談談這幾年來培育新世代土木工程人才的經驗與心得，讓產官學研界能分享此一寶貴的經驗。

答：以臺大土木系為例，近6年來積極推動課程改革，最主要的成果是推出一系列實作課程，包括大一（上）必修的「土木工程概念設計」及大一（下）必修的「土木工程基本實作」（奠基石：Cornerstone）；大二（下）必修的「結構與流力實驗」（核心石：Keystone）；大三、大四選修（目前已改為必修）的「土木工程設計實務課程」（頂石：Capstone）。以上我們稱之為實作課程三部曲。根據我們的觀察，若學生有受過Cornerstone或Keystone實作課程的訓練，往後Capstone的成效更好。其實對於任何建築系的學生來說，由大一到畢業一連貫的實作（建築設計）課程訓練是很一般的，然而工程領域卻少有這樣連續性的實作課程設計。而臺大土木系所發展的一系列實作課程，由Cornerstone、Keystone到Capstone，相對上在工程領域科系上是較少見的。以下將分別說明Cornerstone、Keystone及Capstone實作課程的主要施行方式與成果；詳細有關土木系的實作課程成果報導，我們不定期撰文刊登於臺大土木系發行之杜風電子報(<http://www.ntuce-newsletter.tw/>)。

就首部曲—Cornerstone實作課程，臺大土木系教師認為，如何在大一時加強土木相關教育並激發學習興趣是非常重要的。另外即使尚未學到相關土木分析、設計課程，但透過「做中學」（Learning by Doing）的學習方式，是積極有效的。為此系上開設大一（上）的「土木工程概念設計」（Cornerstone #1）及大一（下）「土木工程基本實作」（Cornerstone #2）兩門必修課，基本上都是採小班教學，並讓學生分組實作。在「土木工程概念設計」課程中，學生三個星期上課二次，每次三小時，一次是以案例介紹和探討為主，另一次是學期報告的studio課。過去課程上的案例介紹包括雪梨歌劇院、舊金山金門大橋、員山子分洪及臺灣高速鐵路，學系也特別將此四個案例整理設計成精美小冊。對於每個案例，首先授課老師會簡要介紹，強調工程師在案例中所扮演的角色以及他們面對的問題，藉此訓練學生認識解決問題的能力。然後學生會分組討論一個事先擬定之議題，例如介紹雪梨歌劇院時之討論議題為想像2060年之建築形式，學生須於課程中當場畫圖並由組員上臺報告，後由邀請之與談人評論學生的報告和進行相關演講。此課程的另一重點是學期設計，主要是在studio時段完成，藉由模型製作來實際感受設計、調整設計。每年我們都會嘗試不同題目，包括設計臺大校園內任兩棟建築物的連通道、在校園內設計一個戶外的表演舞臺、設計一個校園腳踏車



呂良正系主任



停車空間等。學生學期一開始即進行選址，可選在自己認為適合的校園任意一處，其後進行模型製作及作品海報設計。海報設計過程中，會讓同學先報告初步結果，由老師予以講評，最後再修訂及繳交成果海報，並進行評審，評審除授課老師參與外，也邀請結構技師及建築師共同參與。同時我們也將學生的海報作品張貼於土木館的二、三樓中庭公布欄，並於寒假期間展出一個月，同時也將作品編輯成冊。



自編教材 (Cornerstone #1)



培育學生設計與表達能力 (Cornerstone #1)



Studio實作空間 (Cornerstone #1)



設計成果展覽 (Cornerstone #1)



校園戶外表演舞台設計 (Cornerstone #1)



腳踏車停車空間設計 (Cornerstone #1)

大一(下)的「土木工程基本實作」是第二門Cornerstone實作課程，主要目的是銜接「土木工程概念設計」，這門課是強調做中學的精神，學生雖然還沒有學習到土木工程分析、設計等課程，但是透過動手製作模型、實驗室載重試驗，到最後的競賽，常常可以激發出他們的學習潛能，進而提高學習興趣。由於

此門課程都以小班教學、分組實作進行，因此學生與老師及助教的互動變得更多了，團隊合作精神也在無形中養成。在期末問卷中，學生也確實有很好的回應，約80%的人都希望有更多類似的實作課程。每年授課老師也會改變基本實作的內容，例如兩年前的阻尼器結構模型製作與振動台試驗、去年的開合橋設計及遙控小汽車控制設計及今年的具控制開合功能的巨蛋設計。



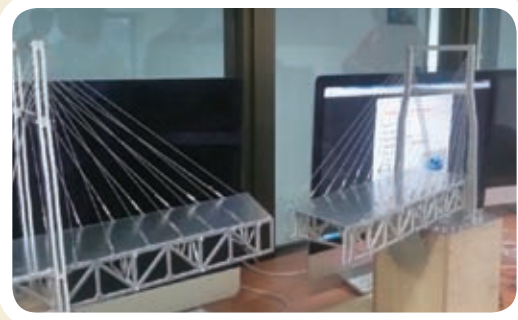
空間結構製作 (Cornerstone #2)



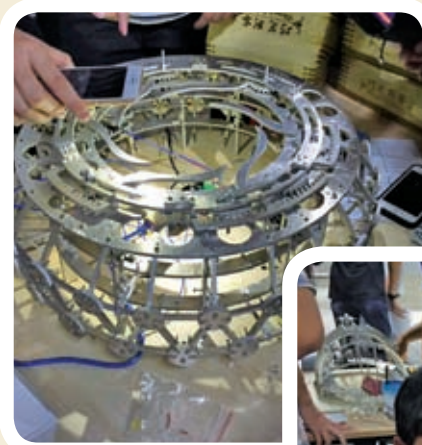
空間結構承載力試驗 (Cornerstone #2)



含阻尼器結構之振動台試驗 (Cornerstone #2)

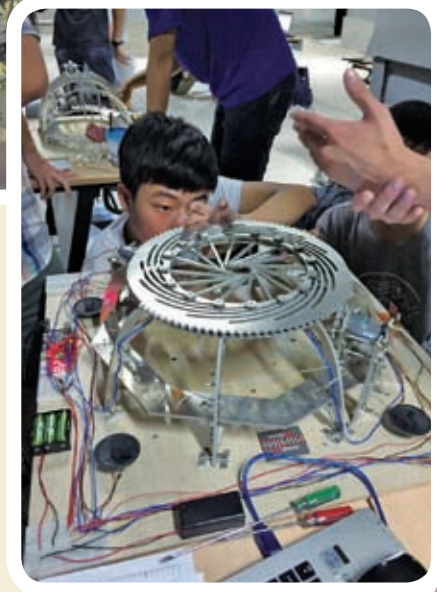


開合橋測試 (Cornerstone #2)



具控制開合功能的巨蛋之1 (Cornerstone #2)，上圖

具控制開合功能的巨蛋之2 (Cornerstone #2)，右圖



其次談到二部曲—Keystone實作課程，臺大土木系以往的「結構學」及「流體力學」這兩門課是開在大二（下），其實驗部分（必修課）則是大三（上），基本上學生是按照實驗手冊做些標準實驗，規模不大，花的時間也不多。自100學年度第二學期開始，系上嘗試將結構及流體實驗配合上課在同一學期進行，



但由於規模較大，也很耗時間，因此先以一班試行，往後幾年也都是這樣的模式。由於是自發性選讀這班，因此學生參與度很高。學生在此門實驗課中，前半學期是做一個木橋設計，後半學期為氣動力浮體設計。在木橋設計部分，臺大土木系的學生和實踐大學建築系學生合作，每一組約有10-12名學生，一半是實踐建築系，一半是臺大土木系。木橋設計的規模很大，學生的作品要能承載組員重量之外，也要兼顧到結構合理性、建築美觀及使用性等。學生一般會試作縮尺模型，先測試其結構合理性，然後再做實際尺寸；學期結束時也會進行評選與頒獎，讓學生的作品可以受到鼓勵。後半學期為氣動力浮體設計，主要是希望利用流體力學的原理，以銅為材料設計一個氣動力浮體，最後於臺大舟山路的生態池測試。



可承載團隊成員的木橋實作 (Keystone)



像兩把扇子收合自如 (Keystone)



銅製浮體製作 (Keystone)



結合氣動力的浮體 (Keystone)

最後是三部曲—Capstone 課程，而透過總整性(Capstone)課程驗證學生學習成果已成為國際趨勢，特別是各國工程教育認證機構近年來都紛紛將總整性課程納入認證規範，例如IEET在2014年版的規範已納入總整性課程的規定。實際上動手實作的學習模式早已廣為美國大學所採用，甚至美國小學都已經開始積極激發學生「動手做」的能力，從小培育學生創新的精神以啟發真學習。在大學工程教育方面，早在1995年，美國學者即透過問卷方式了解到，許多美國的工程學系皆有開設Capstone課程，此類課程不僅受業界支持，教師也一致認為對學生學習有相當大的助益。

學系通常關注的焦點是在如何安排Capstone課程的師資和經費等，每個學校每個

# 1

## 人物專訪

學系或許因資源和生態之不同會有不同的規畫方式，但整體而言，為落實Capstone課程及其該有的成效，以下幾個面向是值得深入探討的：課程的必要內涵、課程的規畫及設計、課程的實施及學生學習成果的評量；以下會針對這三個面向來說明與探討。

Capstone課程的必要內涵: Capstone 課程不同於其他實作課程，基本定義是必須具備整合性質，讓學生有機會透過嘗試解決一個工程問題，整合在校所學，藉以驗證其具備該有之知識、技術和態度。所以本質上，Capstone的目的並非培育學生新知識或技能，而是確認所學並予以加強。課程的目的是讓學生嘗試以專業人員身分（例如工程師），解決一個實際且無標準答案的專業問題，藉此進行學習總檢視，並同時了解其不足的知識、技術或態度；學系透過此課程檢視和佐證畢業生具備該有的核心能力。修習Capstone課程的學生是已修習完多數課程（含基礎設計課程），具備一定的知識和技能的大三或大四學生。所以常常Capstone被喻為「最後一哩」。至於課程長度，至少一學期3學分為宜；上課方式讓學生分組，實際動手操作，引發其主動學習的動機，避免教師過多的講授。

我曾於2012年代表華盛頓協定(Washington Accord)去審查韓國認證機構ABEEK的認證過

程，ABEEK對於實作課程要求很明確，通過認證學程必須有12學分的設計或實作課程，且必須包括一個Capstone課程。因此，ABEEK的認證委員常會就Capstone課程內容和學系深入討論，若發現Capstone課程有過多的教師授課情形，會直指該課程非Capstone課程。另外，就觀察到的經驗，學系也不一定要開設新的課程以滿足Capstone要求，可由既有的課中選出一門較具整合性的課程，將之稍微擴大延伸，提供學生動手設計並嘗試解決問題的機會。Capstone課程最重要的要能對應到多數系上所訂的畢業生核心能力，若僅對應到少數的核心能力，不能被視為Capstone課程。學系透過這個課程檢視和佐證畢業生具備該有的核心能力，尤其是解決問題（彰顯執行設計）的能力。此外，也可檢視和佐證學生的團隊合作、領域整合（和不同專長或領域人士合作）、有效溝通和專案管理等能力。

問：承如主任所說的，實作課程三部曲是培育新世代土木工程人才不可或缺的，可否以臺大土木工程為例，說明如何落實，並與工程實務聯結。

答：現在不少學生於學習上常有一種感覺，就是不曉得如何將課程上學的各種分析與設計方法應用於實務工作上，這也直接影響到學生



上課的興趣。為此，臺大土木系希望結合老師的研究專長及業界工程師的專業，擬定案例，來讓學生嘗試進行分析與設計。課程修習的對象以大三、大四學生為目標，學生分組（約3-5人一組）進行專案研究，其角色相當於顧問公司承攬一個規劃設計案。此課程的名稱為「土木工程設計實務」，每學期上課的實際內容會於前一學期的期末事先公布，讓有興趣的學生可以組隊來修課。為規劃及執行此門課，系上提供的資源包括相關之辦公室與實驗室空間、進行現地踏勘調查之交通住宿費等補助；授課老師與顧問公司工程師針對相關主題提供課程講授，研究上由研究生、教授、顧問公司工程師提供指導、電腦模擬與各種軟硬體支援及相關各種技術文件與資料之提供。最後學生成果除以海報展示外，另完成一本期末報告，類似服務建議書，當然過程中的口頭進度報告與期末成果簡報都是不可或缺的。99學年度第一學期的課程，選定兩個題目來進行，包括：

- （1）臺大溪頭自然教育園區纜車系統可行性評估與規劃興建；和
- （2）霧社水庫排砂防淤系統初步規劃及可行性評估。我們嘗試了兩種不同的教學模式：纜車組-業界的專家和教師提供技術指導以及在各個設計階段都給予學生意見；水庫組-校外專家過程中不參與，僅於期末的評選會上給予意見，教師也不主動提供清淤方法的技術指導，僅針對想法提供建議及相關資源，給予學生更多的發揮空間。根據臺

大土木系於期末進行的問卷顯示，這兩個議題的學生對於課程內容、就業幫助及整合所學幾乎全部都填「滿意」。但是對於教學方法滿意度方面，纜車組的學生僅有一半滿意，而水庫組則全部滿意。追究其中差異，主要是纜車組的老師及專家之指導較為積極，過程中每個階段都會給予意見與指導，造成學生覺得主動創新的機會相對變少，特別是期初學生想法較不成熟時，常因負面意見受挫。而水庫組則是由學生主動提出解決方法，老師及專家是被動諮詢對象。因此業界專家之參與雖然重要，但宜適度。

「土木工程設計實務」除了以上最早兩個議題外，陸續幾個學期推出的議題有：臺大人文大樓規劃設計檢討、土木系學會交誼空間改造計畫、荖濃溪洪水監測與緊急撤離之便橋設計、土木系學會交誼空間結構補強、管理學院舊圖書館屋頂更新設計及結構補強、溪頭人行橋設計、石門水庫壩體的安全評估與災害的應對方案、國民運動中心規劃設計與委外經營、森林系航測館結構修繕及空間活化、都市道路鋪面工程實務探討、南機場一期整宅公寓建築活化再利用、湖山水庫安全影響評估。最後5個議題是104年度所開授的，主要是開給大三、大四的學生來修習。





霧社水庫現地踏勘與測量 (Capstone)



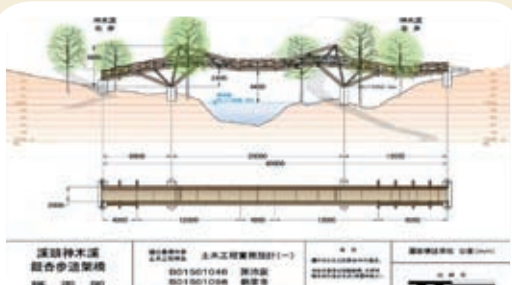
自製機器人檢測老濃溪便橋 (Capstone)



系學會空間改造設計 (Capstone)



系學會空間結構補強設計試驗 (Capstone)



溪頭神木溪行人橋設計 (Capstone)



溪頭神木溪行人橋模型載重試驗 (Capstone)

基本上「土木工程設計實務」開放給所有系上老師提出上課議題，只要提前於開課前半學期公告上課內容即可，以便讓學生了解內容以決定是否選修。過去無論是哪個主題，修課人數大約是15~20人，雖然人數不多，但都是對該主題有興趣者才修習，因此滿意度都很高。臺大土木系早期(5、6年前)的學生沒有接受Cornerstone、Keystone實作課程的訓練，最近的學生則有，因此近一年來，我們特地比較早期及最近修習「土木工程設計實務」學生的

表現，發現有Cornerstone、Keystone實作課程訓練的學生，表現普遍較為優異，主要是他們已經有實作的基礎，熟悉整個實作過程，對於相關軟體、設備等之操作較為熟悉，上手更快。因此，如果系上資源足夠，應該要規劃Cornerstone及Keystone課程，有助於Capstone課程的成效。

IEET已於2014年版之認證規範中要求，未來參與認證的大學部學程必須具備整合設計能



力的專題實作課程（Capstone課程），而此項規範是要求103學年度(2014年)起入學的大一生，必須於畢業前修習該項課程。臺大土木系已經將「土木工程設計實務」列入2013年之後入學的學生必修課，比IEET的認證要求提早一年。雖然臺大土木已有多年的Capstone課程執行經驗，但由選修改為必修還是一項很大的改變，畢竟修課人數由一年30-40人增加到約120人；另外，學生到了高年級，對於未來研究所想要走的領域通常已有既定想法，以研究所來說，臺大土木有七個領域分組：結構、大地、水利、交通、營管、電輔設計及測量。因此，如何選定普遍學生都有興趣的主題也是很重要的。此外，如何落實IEET對於該課程的相關要求，比如以該課程檢視學生核心能力達成度及於課程中導入專案管理等，也是需要加強的部分。目前臺大土木系是規劃一年有大約5個主題(也就是開授5個班)，而這些主題基本上其聯集可以涵蓋到以上7個領域，也就是說學生一定可以找到其有興趣的主題來修習。

學生學習成果的評量是教學過程中相當重要的一環，教師通常會在課程綱要中界定該門課程的評量方式，例如考試、實體模型或成品、口頭報告等。在一般課程中，執行評量的當然是任課教師，但針對Capstone課程，任課教師除了是主要的評量者外，許多教師還會邀請業界人士參與，從業界角度提供學生學習的

回饋與建議。有時甚至邀請業界人士參與授課，在學生修習課程的過程中即時提供建議。對學生而言，有業界人士參與雖然有時是一種壓力，但卻也是實務經驗的增長和累積。

過去教師在評量學生的專題或類似課程中，多數是給學生或學生小組一個分數。在IEET認證的引導下，配合Capstone課程所對應的核心能力（每項核心能力的權重可能不同），教師給予學生的分數將可明確的說明學生在每項核心能力上的表現。當教師整合全班同學的成績後，更可進一步顯示全班同學在核心能力上的整體概況，例如學生在那些核心能力上的學習較好，那些核心能力必須加強等。這些資訊將提供教師具體的課程調整和改進方向參考。有關以Capstone課程來檢視學生的核心能力，是臺大土木系目前正在進行的方向。

臺大土木系實作課程推動6年來，獲得不少具體成效，當然還有不少可以努力的地方，特別是Capstone課程改成必修之因應及如何落實核心能力之評量。我想能有今天的成果，許多老師積極熱情投入是最重要的關鍵，另一方面，系上的行政與經費全力支援也不可或缺。基於不錯的成果，我們陸續獲得一些肯定，例如本系為2013年臺大唯一獲得「教育部補助大學校院推動課程分流計畫」-創新模式類型計畫補助的系所，計畫由2013年12月到2016年



(左1)陳光輝經理 (左2)林曜滄資深協理 (左3)呂良正系主任 (右3)廖學瑞副總經理 (右2)曾榮川協理 (右1)張英發經理

2月，總經費840萬，教育部補助500萬，系上配合款340萬。另外，於2014年8月北二區總整課程競賽中，我們也獲得銀牌獎。此外2015年11月由工程技術顧問商業同業公會、土木水利工程學會及IEET共同舉辦的2015全國大專院校工程創意競賽，本系同學所組的團隊之一獲得金牌獎。而2015年11月商業周刊部落格教育專欄文章「誰說大學不能「學以致用」？大一就要做出「耐震停車塔」，載越重、搖越大，分數越高！」報導了我們大一（下）「土木工程基本實作」的成果。

我常有機會到國內、外的學校或相關會議中報告臺大土木系的實作課程，總是受到不少好評，大家也普遍認為這是一種很好的人才培育模式。在這些演講中，我經常以前言提到的“未來在等待的人才”這本書所闡述的六項高

感性的力量來做結尾，我認為透過這些實作課程，應該有更多的機會去培育未來人才所該具備的高感性的力量。我也相信前言中所提到的ASCE 15項核心能力和IEET 8項核心能力，除了一般專業課程外，若能搭配這些實作課程來培育，成效會更為顯著。

## 後記

土木工程是國家建設的磐石，而人才更是工程建設良莠的關鍵，感謝呂主任在百忙之餘撥冗接受專訪，就因應現今科技的發展及工程環境的改變，與我們分享如何培育新世代土木工程人才的經驗與心得，期盼經由產官學研的共同努力，提高國內工程建設的技術與品質，並更有能力與機會爭取參與國外的工程建設。

# 橋梁結構安全與 養護管理檢監測 技術研發與應用

◎ 關鍵字：橋梁管理、結構監測、結構檢測、橋梁劣化評估

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心／主任・國立臺灣大學／土木工程系／教授／張國鎮 ❶

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心／橋梁組／組長・台北科技大學／土木工程系／教授／宋裕祺 ❷

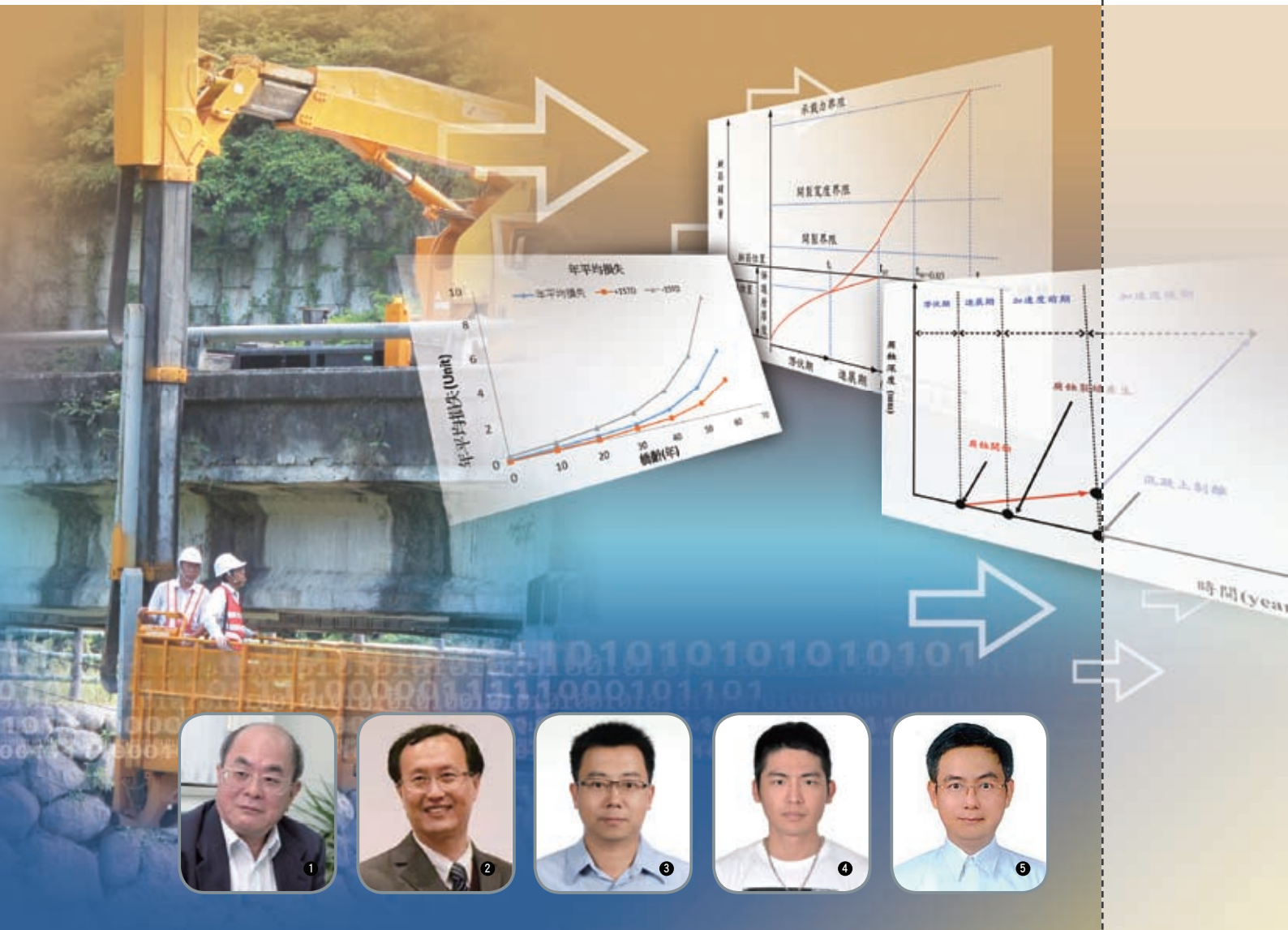
財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心／橋梁組／副研究員／陳俊仲 ❸

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心／橋梁組／助理研究員／許家銓 ❹

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心／橋梁組／副研究員／李政寬 ❺

## 摘要 ABSTRACT

國家為提升全民生活品質並保障人民生命財產安全，在持續推動經濟建設之同時，必須確保各項公共工程之使用性與服務安全。而橋梁為公共工程重要的結構體，連結著各公路與鐵路等交通運輸網路，在社會經濟活動扮演著非常重要的角色。本文闡述研究團隊近年在橋梁結構安全與養護檢監測技術之相關研發與應用成果，包括規劃的全生命週期橋梁防災管理系統建置研發架構，並概述橋梁劣化模式於橋梁管理系統之應用，最後以光纖橋梁高程線型自動化監測系統技術為說明，藉由橋梁養護管理、結構劣化評估技術及長期安全監測三大項目導引，設定研發目標為整合橋梁結構生命週期各階段所需技術，期待建構有效且完整之橋梁防災安全管理服務平台。



## 壹、前言

橋梁結構連結著各交通運輸道路，是促成社會經濟活動發展不可或缺的基礎建設，如何有效提升橋梁結構安全並落實長期養護工作，進而延長橋梁使用服務年限，為目前橋梁管理單位主要面臨的課題之一。尤其近年來以生命週期之觀點，應用新思維與新技術導入橋梁評估檢測與管理工作，已深受各先進國家的重視，均積極投入相關研究與開發資源。在此趨勢下，鑑於台灣橋梁已逐漸邁入高齡化，對於各橋梁構件結構服務能力隨時間之變化，更應加強研究瞭解與掌握。依據交通部統計資料，我國橋梁目前約三萬座，分別由鐵路局、高公局、公路局、觀光局、營建署及各縣市政府負

責管理。由於橋梁類別及型式眾多，服務與功能特性不一，交通部為整合各橋梁管理單位之橋梁資料，並協助各單位有效執行橋梁管理及防災業務，於民國八十九年由交通部運輸研究所開發臺灣地區橋梁管理系統(Taiwan Bridge Management System，下稱TBMS)，提供給各橋梁管理機關使用。藉由TBMS內部資料庫儲存橋梁資訊，協助各橋梁管理機關具有掌握橋梁基本狀況之工具，滿足橋梁管理工作最基本要求，開啟了台灣橋梁管理業務。然而隨著社會經濟發展以及天然災害發生次數和規模日益擴大，橋梁管理業務仍持續面臨許多困難和挑戰。首先隨著時間演進，新舊橋梁基於該橋與

建當時設計規範不同，因應設計之耐震能力標準亦有不同，如何藉由發展可靠的檢監測系統與制度及相應資料處理評估方法進行有效管理，是非常重要的但必須解決的議題。此外，台灣本島由於地理氣候及地形條件，跨河橋梁橋墩受到河川坡度及橋址上游水利設施影響，經常造成橋基冲刷裸露進而影響橋梁結構安全之問題，即使相關單位持續投入資源於橋基保護建置工程，仍僅能勉強保障橋梁短期之安全，長期而言對橋梁受冲刷課題尚缺乏有效具體之因應措施。再者，由於橋梁管理單位在必要時必須封閉橋梁通行，以避免用路人受到可能之橋梁災害，但此管制措施直接影響了交通便利性，必須仰賴更可靠且更有效的橋梁監測預警系統以及務實健全的橋梁管理防災資訊系統。加上目前政府財政同樣面臨許多困窘的情況，橋梁管理單位僅能編列相當有限之預算進行橋梁養護維修作業，更增橋梁結構安全與養護工作之挑戰和困難度。

鑑於前述台灣橋梁既存之問題與挑戰，財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心研究團隊，持續以橋梁耐震及延壽技術為長期性研究重點，目的為改進橋梁耐震評估與補強技術、研發橋梁新工法與新技術、提昇橋梁耐震技術，增進既有橋梁與新建橋梁之耐震性能與壽命，達到橋梁結構永續發展之目標。同時配合整體研發目標之方向，針對橋梁結構因應震前準備、震時應變、震後復建之需求，強化耐震減災工法之研發與應用，發展震災模擬與風險評估、監測預警與快速診斷、災害應變與災後復原等技術，且因應複合型災害，從單一災害防治走向多重災害研究。藉此，研究範圍包括橋梁耐震技術研發、橋梁複合式災害防治技術提昇之研究、橋梁全生命週期防災管理與檢監測技術研發以及新型式橋梁快速工法之研發與應用計畫，特性係針對橋梁結構耐震性能提昇及延壽相關技術(新技術、新材料、新工法及生命週期管理維護與安全防災)進行研究工作，相關研發成果有助於提昇橋梁耐震能力及達到結構延壽之功能。

本文係針對橋梁養護管理、結構劣化評估技術及長期安全監測這三大項目進行闡述，說明研究團隊近年在橋梁結構安全與養護檢監測技術之相關研發與應用，包括規劃的全生命週期橋梁防災管理系統建置研發架構，並概述橋梁劣化模式於橋梁管理系統之應用，以及光纖橋梁高程線型自動化監測系統技術。期讓讀者能認識相關技術之規劃與研發現況，透過相關技術應用說明，有機會將研發技術成果效益擴大，長期目標設定為整合橋梁結構生命週期各階段所需技術，建構有效且完整之橋梁防災安全管理服務平台，優先協助國內各橋梁管理養護單位，滿足其在橋梁結構安全與養護檢監測技術之需求。





## 2

工程論著

## 貳、橋梁管理課題-橋梁防災管理系統之建置研發架構

現行由交通部建置的TBMS，現況各單位使用上仍以橋梁基本資料查詢，以及針對橋梁檢測維修紀錄進行資訊管理與統計分析功能為主，如何強化橋梁管理系統對耐洪能力、耐震能力、載重能力及老舊劣化情形之掌握，實為當前重要課題。有鑑於此，研究團隊規劃整合橋梁結構、管理、資訊等各領域學者與專家，並結合理論和實務經驗，強化與落實橋梁管理系統對橋梁耐洪能力、耐震能力、載重能力及老舊劣化情形之評估技術，因此研提系統規劃做為後續持續應用研究發展之基礎。目前橋梁檢測作業項目與評估工作架構，對檢測者與評估者之角色分工不甚明確，然透過應用思維，可簡化並修訂橋梁現場檢測項目架構，將檢測與評估進行系統性區隔與邏輯的分工，提高工程執行面的可行性，達到技術上的創新。研究規劃開發一套符合實務現況使用之橋梁生命週期防災管理系統，稱為NCREE-BMS，目標為提供國內橋梁管理及維護相關單位使用，協助其瞭解橋梁構件劣化趨勢，包括耐久能力、耐震能力與耐洪能力等因素，同時對於構件劣化改善提供有效的因應對策、管理建議與具體執行做法。藉由規劃開發之系統，將讓系統使用單位更能精確掌握橋梁生命週期成本評估分析結果，協助其進行有效管理橋梁防災業務，減少因橋梁災害對社會產生的損失，讓台灣橋梁評估檢測與管理和世界各先進國家同步甚至超前。

### 一、系統特色

系統基本包含之橋梁檢測資料庫，其目的不僅在於更新與突破現有橋梁管理系統之管理機制，更希望結合資訊技術能讓橋梁管理更為便利與有效，以達到落實橋梁安全管理之目的。考量研究與應用之需要，建置之系統具備

以下之特色：

- (一) 系統模組化擴充設計：改善系統封閉不易擴充之問題，藉由資訊技術應用，提高系統擴充與應用之靈活度，以達到應用單位對於耐洪能力、耐震能力、載重能力及老舊劣化評估模組可以彈性擴充之目的，並考量橋梁管理系統未來雲端佈署之可能性，提供資訊匯流之程式介面，可以供其他應用系統存取資料，進一步協助使用者進行分析與管理之應用。基於此特色，系統建置結合了地震與洪水災害離災模組，當地震或洪水發生時，可即時於系統提供必要之資訊提供離災警示及先期應變作業評估功能。
- (二) 行動資訊連結技術整合：行動裝置已普及，應考量如何應用行動技術於橋梁檢測工作，以達到便利檢測資料建立之目的。現階段已初步完成平板系統行動化表單模式介面，持續配合資訊科技技術開發，將進一步結合無人載具等新式行動化硬體設備。
- (三) 空間資訊擴充技術整合：完整的空間資訊亦是橋梁安全管理重要的一環，包含二維甚至三維之構件模型，均是強化橋梁安全評估的重要資訊，系統已考量相關資訊的管理方式與擴充介面，以利後續擴充應用。
- (四) 規範檢測項目及劣化樣態資料庫整合：考量橋梁檢測成果應符合交通部頒規範，故於研發階段即參照交通部104年「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」及97年「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」所規定橋梁檢測作業需完成之檢測項目，將各



檢測項目、表格參數及相關子表和圖說，建置於研發之系統資料庫，除方便電子化表單建置外，亦簡化橋梁檢測作業人員於現場查閱紙本資料之作業時間，並確保經由NCREE-BMS檢測模組完成之檢測報表能完整符合規範要求。

## 二、系統基本架構

研發之橋梁管理系統依據不同的管理與應用方式，可區分為網路層級、專案層級與構件層級。構件層級是其它層級應用的基礎，所以構件管理是橋梁管理系統的基礎功能，包含橋梁構件管理與圖形管理。通常進行橋梁檢測作業時，檢測人員已使用紙本及平立示意圖說，標記橋梁損壞狀況，此記錄與評估方式若能結合行動裝置，並藉由構件模型顯示技術，除將目視檢測資料直接建檔之外，亦可以構件模型整合，將更有利於專家對於損壞狀況的判讀。而在系統規劃方面，使用關聯式資料庫一直是實現橋梁構件管理的主要方式，除了橋梁構件化的屬性資料之外，時間序列管理亦是重要的一環，欠缺時間序列管理，就不易反應出構件

損壞及維修歷史狀況及計算構件的維護成本。

除構件資料模型之資料庫建構外，研發的系統朝向服務導向架構設計，在資料層面提供完整網路服務應用程式介面，建構成NCREE-BMS資料匯流的整合概念(參考圖1所示)。透過NCREE-BMS資料匯流提供之服務程式介面，NCREE-BMS主系統可與耐震能力評估模組、耐洪能力評估模組、載重能力評估模組、老舊劣化評估模組等應用系統整合，透過此服務整合方式，系統與其他擴充功能系統的設計將更有彈性，可以使用系統擴充的方式建置在一起，也可以個別建置，保有個別系統可以獨立維護之彈性，減少大幅調整系統架構之成本。

通常橋梁檢測人員在現地透過編輯工具，並可配合量測輔助工具，如結構裂縫影像識別模組，詳實標記構件劣化樣態，並拍攝照片以標記檢測之構件，方便後續進行評估與瀏覽。NCREE-BMS系統研發架構特色之一，即嘗試建立專業之分工作業模式(參考圖2所示)，將由橋梁檢測團隊依循部頒規範及管養單位制定之作業手冊，完成符合評估需求之橋梁檢測紀錄，並將檢測紀錄上傳至後端管理系統資料庫後，

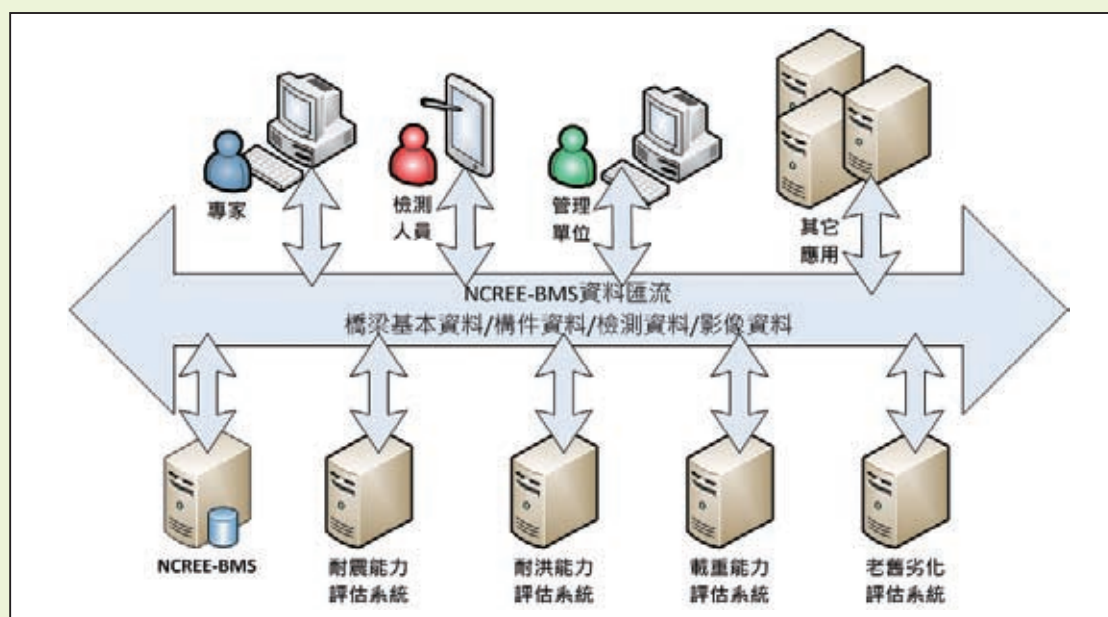


圖1 NCREE-BMS資料匯流概念

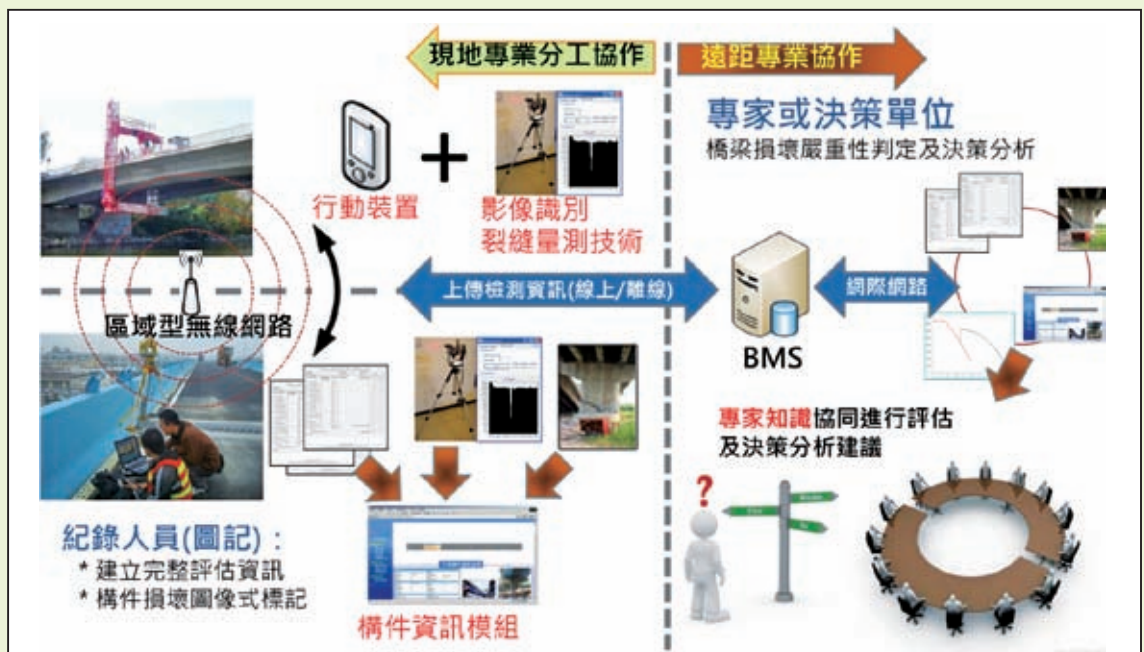


圖2 檢測與評估專業分工作業模式

再由系統協助完成檢測成果評估自動化報表，可節省橋梁檢測作業人員在現地進行評估所需之時間，降低現場作業風險，並透過後端標準化之評估資料庫以及專家決策系統，提高檢測成果之客觀性。現階段NCREE-BMS整合式系統尚屬研發雛型，依功能區分多個不同模組，包括橋梁基本資料、檢測紀錄、專家系統、離災警示、維護管理、成本效益、系統設定及資料交換等模組，目前檢測模組已進入現地作業試辦階段，可協助橋梁檢測工程師於現場以高效率模式詳實紀錄檢測成果。

### 參、橋梁劣化評估課題-橋梁劣化模式於橋梁養護管理之應用

前述說明建置規劃中的橋梁管理系統基本架構，其系統內部必須引入適當之結構劣化模式，才得以進行劣化評估，於第二部分將針對橋梁結構劣化模式如何應用於橋梁管理系統進行說明，目前系統考量之劣化橋梁結構特性，包括鹽化及中性化兩部分，分別說明如下：

#### 一、劣化橋梁結構特性

鋼筋混凝土劣化將會降低混凝土對鋼筋的保護能力，而隨著劣化時間的增加，混凝土及鋼筋之有效斷面積將逐漸減少，導致鋼筋混凝土橋之耐震能力隨著使用時間而降低。迄今為止，影響混凝土耐久性的主要因素根據重要性遞減順序排列是：鋼筋銹蝕、凍害、物理化學作用。而混凝土中鋼筋腐蝕可由兩種因素誘發，其一為海水中Cl<sup>-</sup>侵蝕所造成之鹽害；二是大氣中的CO<sub>2</sub>導致之混凝土中性化。

##### (一) 鹽害橋梁理論分析模式

目前鋼筋混凝土結構物在現今環境中大量被使用，然而台灣四面環海，長年飽受海風侵襲；另外，高濕度環境下，大部分沿海建築物飽受氯鹽侵蝕，隨服務年限增長，而結構安全性與使用性逐年降低。龔永健(2007)經由混凝土試驗得知，氯離子會破壞水泥水化產物C-S-H膠體，形成高溶解性的CaCl<sub>2</sub>後析出混凝土，增大混凝土

孔隙、混凝土滲透性，促使各種混凝土損傷劣化的機率因而增加。

### 1. 氯離子擴散

莊育泰及邱建國(2012)等人指出擴散原理在不同介質中，分子由濃度高往濃度低移動之現象，因此物質擴散的濃度會隨著不同位置而改變；而Fick第一定律為一維系統中，單位時間與單位面積下氯鹽流通量，其與濃度梯度及擴散係數有直接關係。Weyers(1998)指出，混凝土之鹽害深度與混凝土表面氯離子濃度及氯離子擴散係數有關，如下式所示。

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right]$$

$$\log D_c = -6.77(w/c)^2 + 10.1(w/c) - 3.14$$

式中， $C(x,t)$ 為時間 $t$ 時與混凝土表面距離 $x$ 處之氯離子濃度； $C_i$ 為混凝土中氯離子起始濃度； $C_s$ 為混凝土表面氯離子濃度； $\operatorname{erf}(z)$ 為誤差函數； $D_c$ 為氯離子擴散係數， $W/C$ 為水灰比。

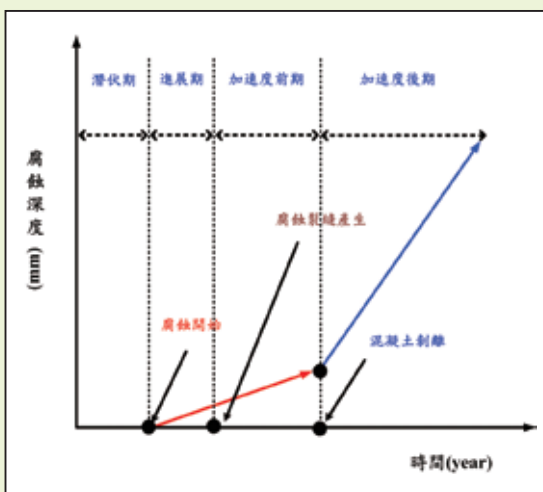


圖3 鹽害造成鋼筋腐蝕階段

### 2. 鋼筋受氯離子作用之鹽害腐蝕預測模式

當氯離子滲透混凝土表面後，會在鋼筋附近累積，而當氯離子含量超過臨界氯離子含量時，鋼筋開始發生腐蝕。莊育泰(2012)將鹽害腐蝕過程分成四大階段，潛伏期、進展期、加速期前期、加速期後期，如圖3所示。

### (二) 中性化橋梁理論分析模式

外界環境中的酸性氣體或液體侵入混凝土中，與水泥中的鹼性物質發生化學作用，使混凝土中pH值下降的現象稱為混凝土中性化(Neutralization)。由於台灣地狹人稠，部分都會區及石化工業區之環境 $CO_2$ 含量較高，故碳化(Carbonation)是造成台灣混凝土構件中性化最普遍之原因。混凝土中性化使存在內部鋼筋表面的鈍態膜(Passive Film)趨向不穩定，若加以存在適當的環境因素，鋼筋即會發生銹蝕。

#### 1. 中性化深度預測模式

以一般大氣環境為前提，混凝土的中性化通常為一緩慢過程。根據大量試驗室試驗及實際現場觀察，中性化速度與混凝土滲透性及大氣的 $CO_2$ 濃度，大致上符合Fick擴散定律。而在各派理論模式和經驗模式中，多數是根據Fick第一定律所建立之中性化預測模式。

環境中的 $CO_2$ 利用擴散方式侵入混凝土內部，並與混凝土中可碳化物值發生化學反應之過程，為混凝土中性化，其中性化速度主要受混凝土中的 $CO_2$ 濃度梯度控制。由Fick第一擴散定律可求得混凝土中性化深度 $D_c$ ：

$$D_c = K\sqrt{t}$$

式中， $K$ 為中性化速度係數； $t$ 為橋齡。

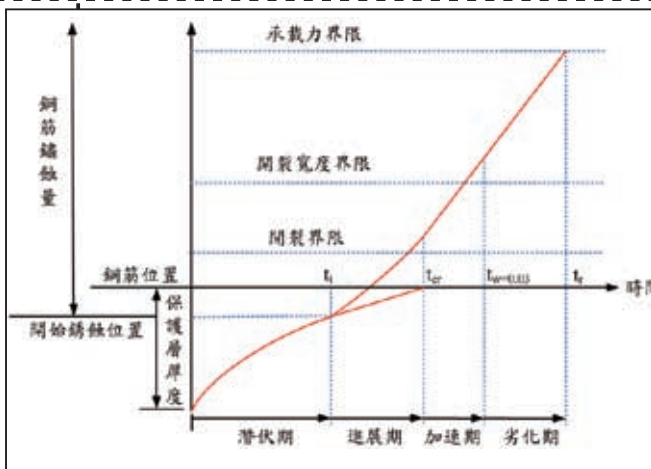


圖4 混凝土中性化過程示意圖

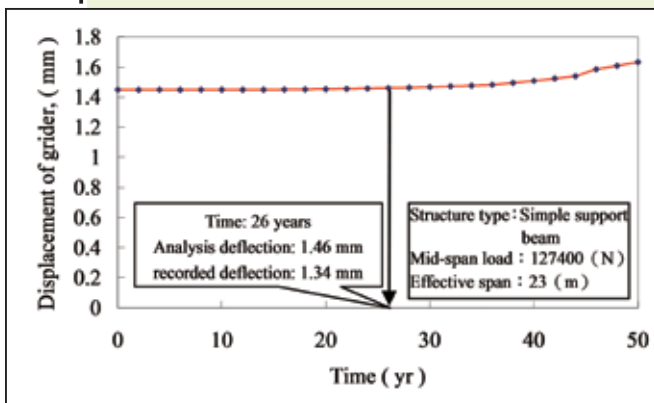


圖5 案例分析結果比較

## 2. 鋼筋鏽蝕量估計

一般環境下，若混凝土發生中性化反應，隨之發生的鋼筋鏽蝕是影響結構物耐久性的主要因素。新澆置混凝土初始呈現強鹼性，其pH值一般介於12~13，鋼筋在此條件下會在表面生成與鋼筋可密結的鈍態膜（鈍態氧化鐵），可防止本身的鏽蝕。不過，一旦有CO<sub>2</sub>等物質從混凝土表面透過孔隙侵入內部中和混凝土中的Ca(OH)<sub>2</sub>，使得混凝土的pH值下降，直至pH值小於9，鋼筋表面的鈍態膜逐漸被破壞而產生鏽蝕情況。隨著鋼筋鏽蝕情況越來越嚴重，將導致混凝土保護層開裂、鋼筋與混凝土之間的握裹力變差與鋼筋斷面積減少等現象，並使結構承載能力下降。

由牛荻濤(2003)及蘇進國(2008)依鋼筋鏽蝕發展進程，將混凝土中性化過程分成潛伏期、進展期、加速期、劣化期四大階段，如圖4所示，透過不同階段之鋼筋腐蝕速率，即可計算不同使用年期之鋼筋斷面積損失率。

### (三) 案例分析與驗證

為驗證上述提出之混凝土劣化模式之正確性，本文針對一位於台灣西南部之鋼筋混凝土簡支橋車載試驗結果進行驗證。試驗橋梁跨距23公尺，興建於1971年，於1997年進行車載試驗，平均保護層厚度為4cm，年平均溫度為24.7°C，年平均濕度為77%，其餘參數如表1所示。

表1 案例橋梁資訊

Section Shape	RC-T beam type
Compressive Strength, $f'_c$	34.6, MPa
Yield Strength of Reinforcement, $f_y$	420, MPa
Yield Strength of Ties, $f_{yh}$	420, MPa
Section Dimensions	700×2250, mm
Span	23, m
Cover Thickness	40, mm
Arrangement of Reinforcement	6 - $\psi$ 64
Spacing of Ties	$\psi$ 13@300, mm
Transverse Load	127400, N

分析結果如圖5所示，於橋梁中點之變位為1.46mm，較試驗結果1.34mm為大，此結果表示本文提出之混凝土劣化分析模式應可滿足實際工程實務應用需求。

## 二、劣化橋梁年平均損失評估模組

### (一) 劣化橋梁強度衰減特性

受鹽害或中性化作用之鋼筋混凝土構件，不僅造成鋼筋斷面積損失，還直接對

構件的力學特性產生影響。以鋼筋發生均勻鏽蝕的情況下，鋼筋失重率與鋼筋的斷面積損失率幾近等同，而鋼筋極限拉應力的降低量與鋼筋的斷面積損失率大致上呈正比關係。因此，本文參考牛荻濤(2003)建議之公式如下式：

$$\eta(t) = \left[ 1 - \frac{A_{s,left}(t)}{A_{s,total}} \right] \times 100\%$$

$$f_{y,corr}(t) = [1 - 1.077\eta(t)] \times f_y$$

式中， $f_{y,corr}(t)$ 為鏽蝕鋼筋之降伏強度； $f_y$ 為鋼筋初始降伏強度； $\eta(t)$ 為鏽蝕鋼筋之斷面積損失率； $A_{s,total}(t)$ 為鋼筋鏽蝕前之斷面積； $A_{s,left}(t)$ 為鋼筋鏽蝕後之斷面積； $t_i$ 為鋼筋開始鏽蝕之時間。

本文藉由迴歸分析，建立斷面積損失率與劣化橋梁耐震能力之迴歸關係式，透過此關係式即可藉由橋梁基本資料(斷面資料、地理環境等)與地震危害曲線，求得橋梁年平均損失(如圖6所示)。

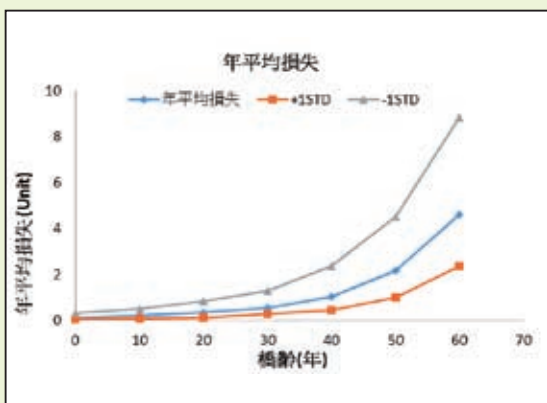


圖6 劣化橋梁年平均損失

## 肆、橋梁監測課題-以光纖式橋梁高程線型自動化監測系統說明

前述第二和第三部分分別就橋梁管理系統架構以及劣化模式做說明，屬於掌握橋梁長期

性結構安全與養護管理之技術，若欲瞭解橋梁即時性的結構安全和服務使用性，則必須仰賴可靠的橋梁監測技術與系統。本文最後部分介紹由研究團隊自行研發的光纖式橋梁高程線型自動化監測系統。

鑒於橋梁高程線型變化可反應橋梁結構承受各式荷重，例如行車載重、溫差載重、風力、地震力等外力對結構本體產生之影響，亦可用為掌握及評估橋梁結構使用狀態的指標之一。其中車載、溫度變化和風力，可歸類為日常荷載，對橋梁服務使用性與結構安全性通常不具有立即性危害，但是，量測橋梁高程線型變化探討橋梁結構日常荷載行為，仍有其必要性與意義，包括藉由測量與統計橋梁日常荷載與反應，可輔助定義橋梁服務安全之「基準值」或「安全界限值」指標，以及日常荷載反應觀測儀器，因此若能自動化長期觀測橋梁結構變化，則可協助橋梁管理者進一步掌握及監控橋梁安全保護用路人。以建築工程而言，其工址規模和結構量體較小，一般採用水準儀直接進行水準測量仍可有效率地得到所需測量點位之高程資訊，然而，對於橋梁、隧道、水壩、邊坡擋土設施等大型結構體，進行完整且全面性的水準測量作業經常耗時費力。因此，針對大型工程量體，如何有效率地進行水準量測資訊的收集，有賴一套能滿足工程經濟性且務實可靠的水準量測系統。此外，長期紀錄定期或不定期之水準量測資訊，可提供為評估結構安全性之參考，當進一步縮短水準量測資料處理及判讀時間，則水準量測系統可視為垂直位移監測系統，提供即時性結構垂直位移變化量測與紀錄功能。

### 一、光纖感測技術及光纖式沉陷計概述

光纖是傳輸介質本身並不具感測功能，研發採用的感測元件是布拉格光纖光柵(fiber bragg grating)，以下簡稱FBG，為一段直接連接於光纖

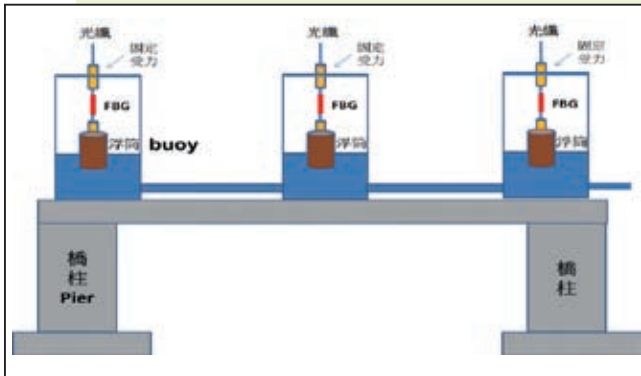


圖7 光纖式沉陷計量測機制

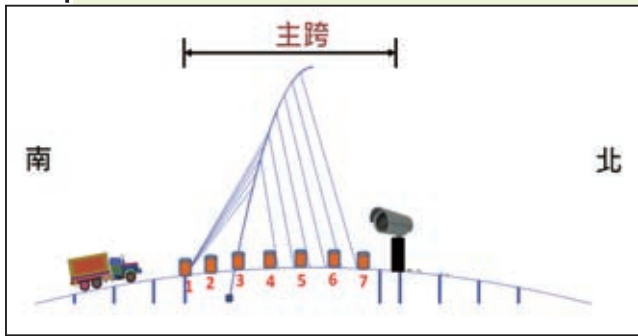


圖8 光纖式橋梁高程線型自動化監測系統配置

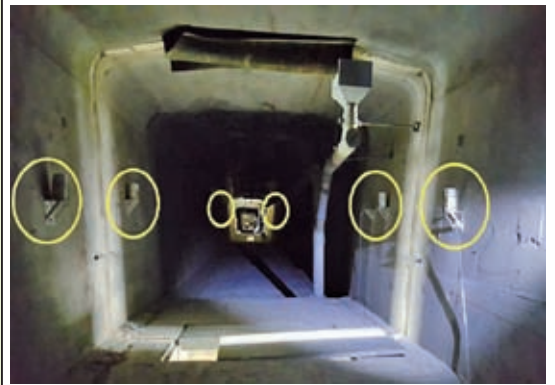
的感測元件。於光纖的一端打入寬頻光，FBG會將特定的窄頻光反射，當FBG承受力量或溫度變化時，光纖光柵反射中心波長會產生變化，藉由量測此反射中心波長變化可推算相對應的物理量，作為感測器使用，其量測表現之功能頗類似於傳統應變計，經設計機構加工後，便可成為特定的感測儀器，如圖7之光纖式沉陷計，利用連通管原理與浮力原理，右側水筒上升或下降時，左側的FBG承受的拉力因而減小或增大，於是這樣的機構就形成了可量測結構相對高程變化之光纖式沉陷計。

團隊研發之光纖式沉陷計，可串列組構成橋梁高程線型自動化監測系統，提供橋梁結構安全性長期監測應用，圖8為光纖沉陷計沿橋梁主跨中央分隔島佈設之案例，經由程式軟體數據分析，能即時繪示反應大梁高程變化。各組的管筒，有水管相連通，當橋面高程改變時，各組管筒、水管內的水流動，將使得光柵距離

讀數改變。以某位置為參考零點，經疊加計算，則可得其他點位的相對高程。



(a) 路堤高程沉陷監測系統



(b) 橋梁高程線型變化監測系統

圖9 光纖式沉陷監測系統現地建置案例

## 二、光纖式沉陷計結構安全監測應用例

目前開發之光纖沉陷監測系統，亦曾應用於軌道路堤改善工程安全以及橋梁主梁高程線型變化之即時監測，驗證系統穩定且可滿足現地工程安全即時監測需求。圖9(a)為現地路堤高程沉陷監測系統建置情形，同時監測系統之資料並與人工高程水準測量結果比對，監測系統之量測值與水準測量結果相當符合，可取代人工測量作業，即時提供高程監測安全資訊。圖9(b)為安裝於現地橋梁箱梁內之光纖沉陷計配置，系統可即時量測路堤高程變化資訊，並於現地建置資料收集系統，透過無線傳輸網路將資料上傳至雲端資料庫，於遠端進行資料分析

與監測資料呈現，協助施工單位即時掌握路堤改善工程安全。

## 伍、結論

本文分別闡述研究團隊規劃之橋梁防災管理系統建置研發架構，以及橋梁劣化模式於橋梁管理系統之應用，最後則說明光纖橋梁高程線型自動化監測系統技術，針對所述及的橋梁結構安全與養護檢測技術之相關研發與應用現況。期待藉由橋梁養護管理、結構劣化評估技術及長期安全監測與這三大項目，邁向整合橋梁結構生命週期各階段所需技術，以建構有效且完整之橋梁防災安全管理服務平台為目標。在橋梁防災管理系統建置部分，涉及廣泛的技術領域並屬於實務應用型的服務平台，建置之模組需持續測試開發及應用試辦改善，尤其劣化評估模組部分，期藉由長期橋梁檢測紀錄，進行劣化評估模式之驗證與修正，同時橋梁防災管理系統，亦將納入橋梁監測系統提供之橋梁結構安全資訊，以滿足全方面橋梁防災管理業務之需求。同時，研究團隊提出了一套自製開發的串列式光纖高程線型自動化監測系統原型，該系統具有構造簡單、安裝容易、系統穩定且資料可靠度高、適合大型結構量體長期與短期量測以及可連續性自動記錄等特色，並已於部分現地工址試驗成功應用和驗證。

## 參考文獻

1. R. E. Weyers, "Service life model for concrete structures in chloride laden environments", ACI Materials Journal, 95(4):445-453, 1998.
2. 牛荻濤，「混凝土結構耐久性與壽命預測」，科學出版社，2003。
3. 莊育泰，「劣化RC牆生命週期耐震能力研究」，碩士學位論文，國立臺灣科技大學，臺北，臺灣，2012。
4. 蘇進國，「模糊遺傳算法在橋梁耐震性能設計之應用與耐震維修補強生命週期成本最小化之研究」，博士學位論文，國立台北科技大學，臺北，臺灣，2008年6月。
5. 龔永健，「受震後新築混凝土現地檢測技術評估與案例探討」，碩士學位論文，中原大學，桃園，臺灣，2007年7月。
6. 趙坤茂，「數位內容新世紀」2006年第三季季刊，台灣大學資訊工程研究所，2006
7. 何岳峰、黃濬彥、謝孟勳，「應用 HTML 5 及版本控制技術提昇Web-based營建資訊管理系統使用效率之研究」，2010 營建管理研討會，2010
8. 「臺灣地區橋梁管理系統」，交通部運輸研究所，參考網址：<http://tbms.iot.gov.tw/bms2/>
9. Paul D. Thompson, "A NEW BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM FOR ONTARIO", Brian Kerr, ITX Stanley Ltd., Canada
10. Reed M. Ellis, Paul D. Thompson, Rene Gagnon, Guy Richard, "Design and Implementation of a New Bridge Management System for the Ministry of Transport of Quebec", Stantec Consulting Ltd.

# 極端氣候下臺灣 橋梁防災之設計 與考量

關鍵詞：極端氣候、多重災害、橋梁設計

台灣世曦工程顧問股份有限公司／副董事長／張荻薇 ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／協理／曾榮川 ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／副理／吳淑珍 ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／正工程師／王泓文 ❹



## 摘要 ABSTRACT

受地球暖化影響，近年來台灣強降雨頻傳，每逢颱風豪雨，必造成道路橋梁毀損、中斷。尤其台灣河川坡陡流急、地質風化破碎，加上土地超限利用，颱風豪雨來襲時，造成災害愈趨嚴重與受災範圍擴大，並產生土砂複合型式的災害型態。因此，過去橋梁設計所遵循的準則及經驗不再一體適用，須詳實檢討潛在災害型態，訂定適合之防災設計原則，使橋梁建設能發揮預期之效益。



### 壹、前言

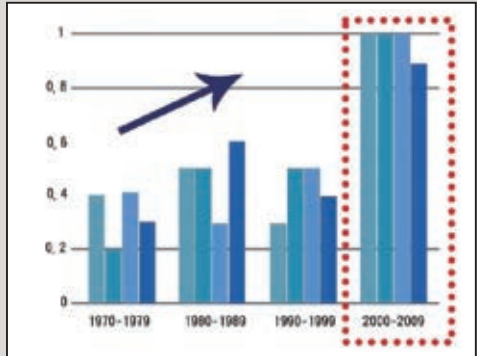
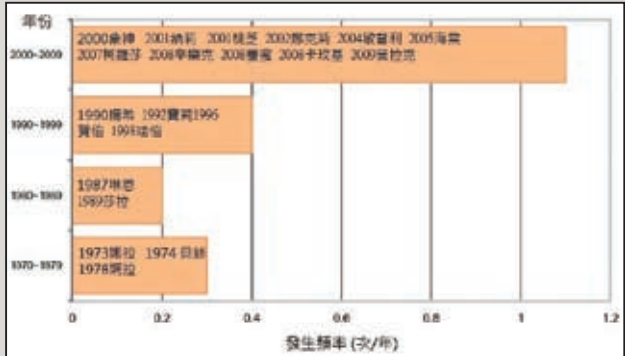
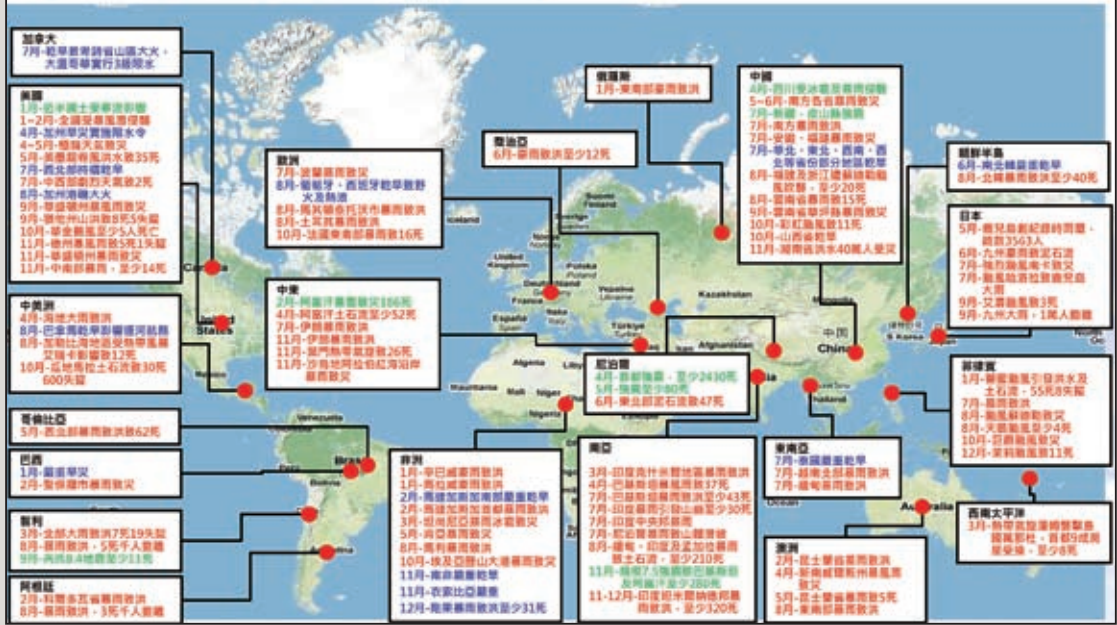
自1950年觀察到地球暖化以來，暖化所帶來氣候環境的改變，近年已日趨明顯，即暖化越嚴重，降雨分布不均的趨勢越顯著，並造成全球性的災害(圖1)。台灣地區自不例外，極端強降雨颱風事件發生機率愈趨頻繁(圖2、圖3)，此些極端事件(圖4)往往造成重大災害。

2013年「IPCC氣候變遷第五次評估報告-給決策者摘要」指出，豪大雨事件發生的頻率、強度及/或降雨量的增加，進一步變遷的可能性，在21世紀的早期是“許多陸地是可能的”，至21世紀晚期則是“大部分中緯度陸地地區及潮濕熱帶地區是非常可能的”[1]。換言之，極端氣候所帶來災害之頻率及嚴重性，將更甚於以往。

而臺灣位於地震帶，天然環境的特殊性(地質、河川)，以及社會環境的變遷，更加大極端氣候下災害的嚴重程度[2]。根據2005年世界銀行統計，臺灣屬於高災害風險區域，災害因子達4種，包括洪水、颱風、山崩、地震等，有73.1%的土地及人口暴露於3種以上之災害風險中，災害型式為水土複合型災害[3]，對道路及橋梁而言，在河川區域有洪水沖刷災害，在山區則有坡地災害及土石流災害，部分橋梁甚至有洪害與土石流災害交替出現的情形。

1923年日本關東大地震後，由於崩坍地數量激增，隨後之颱風引發大規模土石流。1999年台灣921大地震亦增加達7,000多公頃之崩坍地，同樣因颱風豪雨引發中部山區大規模土石流災害。此外，2016年日本熊本發生規模7.3強

### 2015國際重大天然災害



風災事件	最大降雨量(mm/hr)	總降雨量(mm)	影響範圍 (km <sup>2</sup> )	死亡人數(人)		
90.7.28 桃芝颱風	147	基隆最大暴雨	73.7	無任何傷亡	254	
90.8.27 納莉颱風	142	宜蘭最大降雨	1,462	宜蘭最大雨量	24,000	334
91.8.30 聖嬰颱風	137	基隆最大降雨	2,026	基隆最大雨量	9,500	41
94.7.28 海葵颱風	177	屏東最大降雨	2,124	屏東最大雨量	1,208	15
94.8.11 茉莉颱風	119	基隆最大降雨	766	基隆最大雨量	1,207	5
97.7.22 麥莎颱風	95	屏東最大降雨	1,013	屏東最大雨量	408	1
96.08.15 碧絲颱風	122	屏東最大降雨	1,399	屏東最大雨量	2531	1
97.07.16 水災暴風	101	台南最大降雨	1,027	高雄最大雨量	179	26
97.08.10 泰利颱風	97	南投最大降雨	1,608	台中最大雨量	1,987	22
98.08.08 鳳凰颱風	140	嘉義最大降雨	1,060	嘉義最大雨量	24,775	693
99.9.19 凡那那颱風	125	高雄最大降雨	1,128	屏東最大雨量	16,568	2
99.10.21 佛羅倫斯	182	宜蘭最大降雨	1,195	宜蘭最大雨量	3,453	38

圖4 近年台灣颱風災害特性與規模改變  
資料來源：中研院環境變遷研究中心

震後，環太平洋地震帶之厄瓜多、緬甸、阿富汗等國相繼發生強震。有地質學家認為，環太平洋地震帶已進入活躍期。由於，台灣亦位於該地震帶，在面對極端氣候的同時，亦會面臨地震活躍期的影響，其相乘效果，可能引發之道路、橋梁災害的規模及範圍實不容忽視。

近年來之天然災害事件，包括極端颱風降雨事件中名列第一的莫拉克颱風之雙園大橋斷橋事件、辛樂克颱風之後豐大橋斷橋事件、海棠颱風之楓港大橋遭洪水沖毀、賀伯颱風之全台60座橋梁毀損等，橋梁之抗災能力受到極端氣候之嚴苛挑戰，為達到永續建設的目標，在設計上如何考量以因應未來之氣候變遷，為目前工程師所面臨之重大課題。

## 貳、極端氣候下之臺灣橋梁災害分析

台灣橋梁災害的成因除了極端氣候、自然環境等的影響外，還與人為環境的變遷有關，茲說明如下[4]：

一、極端氣候事件：颱風極端強降雨發生頻率在1970~1999年間，平均3~4年發生一次，在2000年以後則平均每年發生一次，如圖3。另外，颱風降雨佔總雨量比例從1970年代之15%，提高到2000年代之30%。近40年來整體年降雨量無明顯變化，但降雨集中及降雨強度增加，未來趨勢也是如此[2]。

二、自然環境：臺灣河川短、坡降大、流速快；地質年輕，73.6%以上土地屬於山坡地及高山林地。

三、環境變遷：大地震後土石鬆動、山區過度開發與建設、經濟發展需求等。

基於前述之氣候、自然環境及環境變遷等因素，在平原地區之橋梁易遭遇洪水災害，橋基淘刷造成橋梁耐洪能力不足，甚至斷橋事件，而洪水夾帶之土砂、石塊或漂流物，亦常造成橋墩之損傷。由於台灣地震頻仍，以及大地震之後續效應(圖5)，山區之橋梁在颱風豪雨

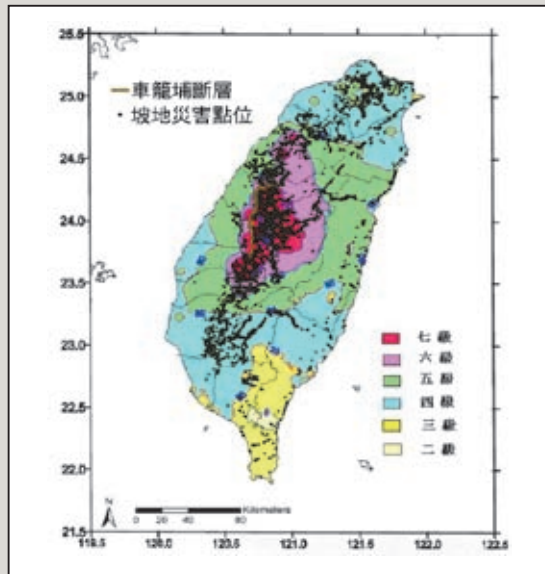


圖5 921地震震度與坡地災害點位(1999~2008)

資料來源：國家災害防救科技中心

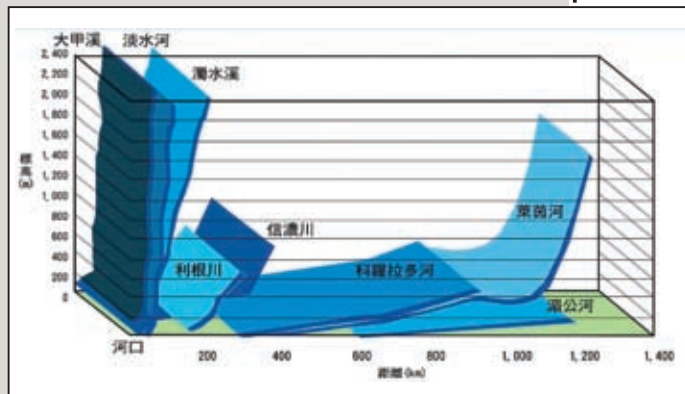


圖6 台灣河川特性

資料來源：經濟部水利署「水利建設因應全球氣候變遷白皮書」

下，引發山區土石流，造成橋梁災害。橋梁水害及土石流災害之原因分別說明如下：

### (一) 橋梁水害

台灣河川坡陡流急(圖6)，上游坡降常超過1/1000，下游多在1/500~1/1000，長期沖刷結果，造成河床下降，影響橋梁安全，在颱風豪雨中甚至造成斷橋(圖7)，主要危害如下[5]：



竹東大橋-斷橋  
1996年賀伯颱風



里港大橋-斷橋  
1996年賀伯颱風



高屏大橋-斷橋  
2000年碧利斯颱風



溪州大橋-基礎裸露  
2001年桃芝颱風



基隆河鐵路橋-斷橋  
2001年納莉颱風



東溪大橋-斷橋  
2004年敏督利颱風



后豐大橋-斷橋  
2008年辛樂克颱風



雙園大橋-斷橋  
2009年莫拉克颱風

圖7 颱風豪雨造成橋梁水害

1. 河床下降，使得橋梁基礎貫入河床深度不足。在極端降雨的情形下，河川水位快速升高，流速增加，使原本橋基已裸露之橋梁，在動床效應下，失去河床土層支撐，因而在洪水期間發生橋墩傾斜、傾倒、斷橋等情形。
2. 因河道變遷，原本位於高灘地之橋墩，變成位於深槽區，使得基礎貫入深度不足，橋梁穩定度下降，因而在洪流中毀損。
3. 橋梁跨徑不足，使局部沖刷加劇，橋基裸露。
4. 橋梁位於河流彎道、分流或河流處，流向複雜，凹岸處易遭洪流攻擊。
5. 橋梁位於河川寬度較窄處，河道束縮，流速增加，使得橋梁易受損害。

#### (二) 橋梁土石流災害

土石流的發生是由山區地形地質、降雨量及強度、地震等多重條件所引發。由

1923年日本關東大地震之經驗，引發土石流之臨界降雨量，約為地震前之一半，且經過近四、五十年，才恢復到大地震前之水準[6]，如圖8所示。1996年賀伯颱風最大累積雨量為1987mm，引發橋梁土石流災害，而1999年921大地震後，中部山區崩落地數目的急速增加，隨後2001年桃芝颱風土石流災害重創台灣，最大累積雨量為757mm即引發橋梁土石流災害，亦印證此現象。

台灣土石流潛勢溪流在1996年有485條，屬於溪流型土石流，經921大地震後，至2001年桃芝颱風增加至1420條，除溪流型，還增加了坡面型土石流，足見土石流的發生與地震、颱風降雨有密切之關係，如圖9所示。

橋梁受到土石流災害有淤埋、沖刷、磨蝕、堵塞、撞擊、彎道沖毀及坡岸崩塌等，由於土石流夾帶泥土、砂石，密度高，流動時慣性強，橋梁受衝擊時，破壞程度大且立即顯現(圖10)，橋梁主要受災原因如下[6] [7] [8]：

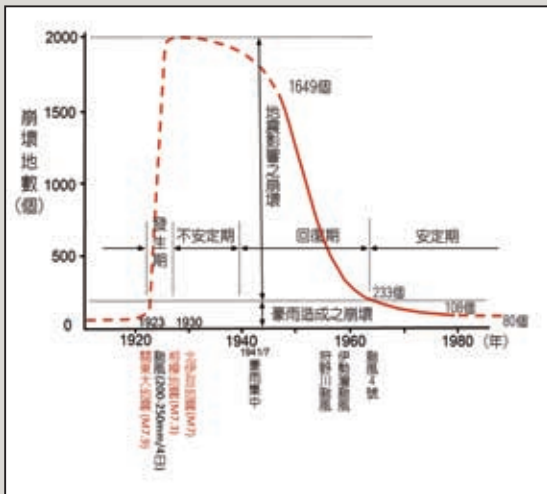


圖8 日本關東地震後崩塌地數與時間關係圖

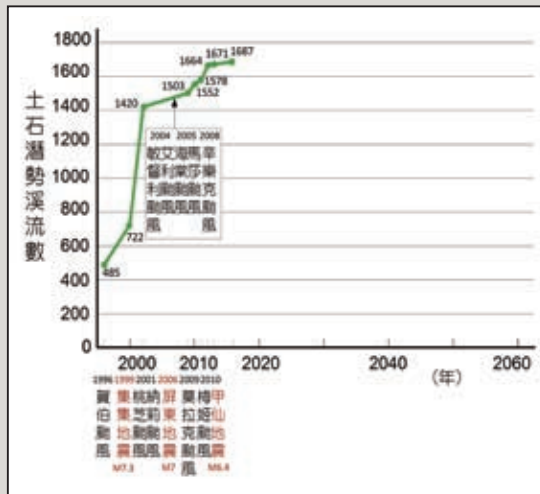


圖9 集集地震後土石流潛勢溪流數與颱風、地震關係圖



圖10 颱風豪雨造成橋梁土石流災害

1. 橋梁長度不足，束縮土石流通過範圍，造成兩側橋台或引道沖毀，或橋梁毀損、流失。
2. 橋梁高度不足，土石流通過斷面不足，橋梁遭石塊、浮木衝撞毀損。
3. 橋梁位於河流彎道、分流或匯流處，土石流運動直線性很強，在彎道處超能力大，能越岸淤埋或沖毀橋梁，凹岸處橋梁易遭土石流攻擊。
4. 橋梁墩柱受土石流衝擊毀損，基礎淘刷。
5. 橋梁位於邊坡，可能受上邊坡崩坍地形成土石流而毀損或流失。

## 參、橋梁防災之設計與考量

### 一、橋梁洪害防治之設計考量

因應極端氣候引致之極端降雨產生之橋梁洪水災害，在設計上之考量重點如下說明[5]：

- (一) 適當的橋梁選址：早期工程建設基於建設經費經濟性，橋梁選址常位於河道寬度較窄河段，惟該處河道因束縮沖刷相對不利，宜避開。另外，彎曲河道凹岸、分流或匯流處，橫向流發達，亦應避開。在蜿蜒河道上，會因水流流量大小而有不同的衝擊方向改變，而導致河岸、堤防潰堤及橋梁攻角，應儘量避免在蜿蜒河道設橋，倘

需設置，美國HEC-20建議橋址位置選在蜿蜒半徑大於2.5倍河寬以上的河道(圖11)[9]。

(二) 延伸橋梁範圍：為避免因橋梁設於河寬不足或河道束縮的河段時，洪流沖毀護岸，引道形成阻水，可將橋梁範圍適度延伸。

(三) 橋梁跨徑：加大跨徑，減少河中落墩數，以減少通水面積遮斷率及河川沖刷。

(四) 提升橋梁淨高：梁底高程應考慮水路出水高度，主要河川要維持1.5m以上，以利漂流物通過，避免撞擊橋梁。

(五) 抗沖刷的深基礎：深基礎除因橋梁承

載所需，要預考量河川沖刷深度，加長或加深橋梁基礎，此外，橋墩基礎版應置於河床之下，以免成為阻水構造。

(六) 考量衝擊力：橋墩要考量流水壓力，若預估將有大量漂流物會流經橋墩時，應考量其效應。

(七) 橋梁防撞措施：洪流中夾帶石、礫、浮木及漂流物等，易造成橋墩之磨損，應設置保護措施。

(八) 橋墩方向及形狀：橋墩方向以與洪水主流方向平行為原則，橋墩斷面形狀以採圓形及長橢圓形為宜，其長軸向須與主流方向平行；流向複雜者，以採用圓形橋墩為原則。



六龜大橋總長308m  
選址處應大於770m

大津橋總長250m  
選址處應大於625m

圖11 六龜大橋與大津橋河道蜿蜒半徑示意圖

資料來源：交通部運輸研究所“莫拉克颱風造成橋梁損壞之探討”，本文整理



圖12 土石流造成台21線橋梁災害(2001年桃芝颱風)

## 二、橋梁土石流防治之設計考量

從台21線的橋梁災害經驗(圖12)可知，橋梁土石流災害防治之首要對策為路線選址，路線要遠土石流攻擊區及其洩流口，並適度抬高路線高程，以降低土石流災害之風險。在橋梁設計上之考量雖有部分與洪害橋梁相同，但條件更加嚴峻，說明如下[6][7][8]：

- (一) 橋址選定：橋址宜避免設於惡劣地形、地質敏感地帶，並注重工址鄰近野溪及上游沖蝕之整治情形，以減少土石流之土石料源，防止土石流沖積扇之產生或擴大，若無法避免時，應考慮採用搶修容易、迅速之橋梁型式。此外，選址時要避開河道彎道處，避免直接受土石流直接攻擊。
- (二) 橋梁方向：橋梁之橋軸方向應與水流方向正交，若為斜交時，應將跨度加大，以提供足夠之通水斷面；橋墩之橋軸直角方向則應與流水方向平行，可減少背水高及沖刷。
- (三) 橋梁跨度：採用長跨徑橋型為原則，橋梁跨度(L)愈小、橋墩之橋軸方向寬度(B)愈大時，不僅增加阻水面積，且橋墩之局部沖刷將趨激烈，一般而言， $L/B \geq 15$ 為宜。橋梁跨度與計畫洪水量有關，如 $Q \geq 8000 \text{m}^3/\text{sec}$ 之河川，跨度宜大於60m。若為斜橋或曲線橋時，則跨度應加大。野溪橋儘可能採大跨距，橋台宜置於溪床外，以加大土石流通水斷面。
- (四) 橋梁長度：橋梁長度宜大於河寬，橋台應設置於溪床之外，儘量避免束縮河道，而造成束縮沖刷至局部河床急速下降及橋台暨兩側引道被沖失。

- (五) 橋梁高度：梁底應高於計畫堤防之高度，並至少應在溪床高程外加最大粒徑之高度以上，以防止流木、流石、浮流物之撞擊。
- (六) 橋墩形狀：流線型的橋墩形狀，可減少阻水更可減輕沖刷。水流方向不定之河川，宜採用圓形橋柱。此外，橋墩基礎版應置於河床之下，以免成為阻水構造，惡化橋墩之局部沖刷。
- (七) 橋墩位置：儘量不要在溪床中設立橋墩，若萬不得已須於溪床設立橋墩時，橋墩應避免設立於溪床中央處。
- (八) 土石流作用力：橋墩設計應考慮流水壓力及巨石、流木之撞擊力。
- (九) 橋墩基礎貫入深度：基礎深度應足夠，以防止河床沖刷與外力撞擊所產生之不利影響。
- (十) 減緩河床坡度：對橋梁處河床坡度過大，有形成沖刷危險的橋梁，於橋梁下游近處興建潛壩(或興建連續潛壩)，藉以淤積砂石改善橋梁處河床局部的坡度至較安全之範圍，以維護橋梁之安全。

## 三、橋梁位於邊坡地滑路段之設計考量

極端氣候下之公路邊坡災害，因為連續豪雨，使得坡地地下水位上升，地表逕流增大，沖刷力驟增，加上河川山洪暴發，道路下邊坡河岸側刷，常引發大規模邊坡災害，如圖13。大多數破壞公路邊坡破壞模式，以運動型態可概分為落石、滑動、流動、翻覆、複合型[10]。

道路橋梁選線應以避開重大滑動、重複致災或高度環境敏感區域為優先考量。如無適

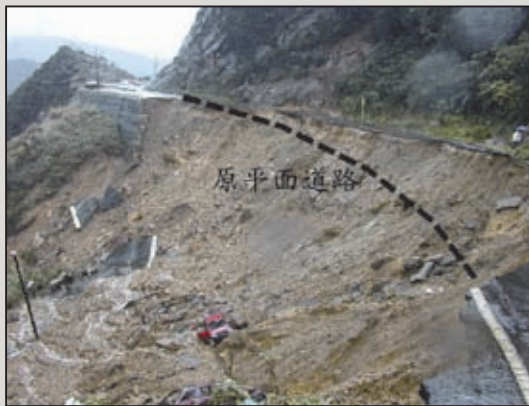


圖13 北29線汐萬路邊坡災害(2000年象神颱風)

當路線可迴避，則應透過資料蒐集、地質水文調查監測等作業，研析原址災害路段之致災原因、邊坡災害模式，在滿足車輛使用道路需求下，儘量減少道路路幅，避免大規模土方挖填作業。而沿邊坡路段設置之橋梁，應考量下列設計事項：

- (一) 橋梁採用大跨徑以避開邊坡崩坍範圍，必要時橋墩須設置防衝擊設施。
- (二) 橋梁高程要考量落石通過空間。
- (三) 橋梁維持與邊坡適當的水平距離，避免落石影響。
- (四) 橋墩基礎所在位置之邊坡的穩定性需檢核，以維持長期安全，如有疑慮，需採取保護措施。

## 肆、橋梁災害復建案例說明

### 一、雙園大橋改建

#### (一) 災害原因

原橋址河床受河道自然沖刷，河床高程下降，2001年桃芝颱風過後，深漕區橋

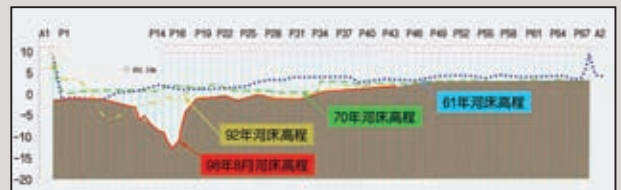


圖14 雙園大橋歷年河床沖刷情形

墩樁基礎有較嚴重之裸露，如圖14所示。2009年莫拉克颱風中，橋墩P1~P16間，長約460m的橋梁被洪水及漂流木沖毀，林園堤防局部潰堤[13]。

原橋跨徑小(30.6m、31.6m)且兩排橋墩並列，基樁直徑76~90cm，洪水期間因彎岸挑流、集中沖刷，水流攻角變動，漂流木掛淤，使河床沖刷加劇，動床作用下，基樁自由段加長，漂流木對橋梁造成之衝擊力，使基樁承受額外之彎矩與剪力，造成基樁破壞、橋梁坍塌[11][12][13]。

#### (二) 改建考量因素與對策

1. 加大跨徑，減少橋墩數量，減少阻水及漂流物之衝擊。
2. 加深基礎並考量沖刷深度，加大基礎口徑以抵抗及漂流物之衝擊。
3. 橋墩要避免磨損造成破壞。

#### (三) 改建說明

1. 考量橋梁兩端銜接原路堤，路線佈設在上游側，遠離原橋殘骸(圖15)、便橋，較利於施工。並提高橋梁高程，增加通洪空間，如圖16所示，完工照片如圖17。
2. 河川內原橋墩柱67墩減少至19墩，採鋼床板鋼箱型梁橋跨徑96~120m，跨徑配



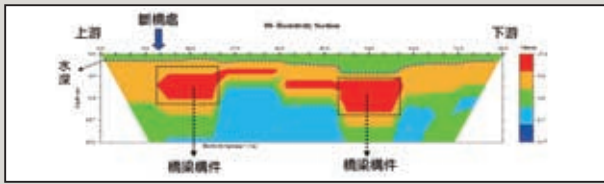


圖15 雙園大橋水上地電阻法探測河床



圖16 雙園大橋改建選址



圖17 雙園大橋完工照片

置為 105+2@120+96+3(96+2@120+96)+105+2@120+96=2178M。

3. 採船型基礎及直徑2m、長68m之基樁，基礎基礎外圍排列消波塊保護，基礎頂部高程EL-5.5，低於計畫河床溪谷高EL-5.32。

4. 橋墩柱採圓形外側包覆鋼鈹。

## 二、台21線十八重溪橋、陳有蘭溪橋及筆石橋改建工程

### (一) 災害原因

2001年桃芝颱風將十八重溪橋第一、二、三孔橋面被東北側崩塌之土石淹埋及堵塞其橋孔，並向下游推移，且因河道被

土石堵塞河寬縮窄後，河流改道沖向南端橋台，致橋台沖毀，橋面下陷，如圖18。陳有蘭溪橋與筆石橋兩橋中心原相距約700公尺，中間原有路基約為五百多公尺，土石流將陳有蘭溪橋全橋沖失，筆石橋沖失一孔，兩橋間之路基則全被土石覆蓋，筆石溪河道並改道[6][14]，如圖19。



圖18 十八重溪橋災害照片



圖19 陳有蘭溪橋及筆石橋災害照片

### (二) 改建考量因素與對策

1. 三座橋梁均遭土石流沖毀，且工址鄰近道路亦受土石流沖毀，須通盤考量整體改線方式。
2. 為避免十八重溪橋以北路段再遭受土石流災害，改建路線起點移至豐丘明隧道北端洞口之前，並沿陳有蘭溪水道治理計畫線外之灘地及敦福路佈設。
3. 於原十八重溪橋下游側約250公尺處跨

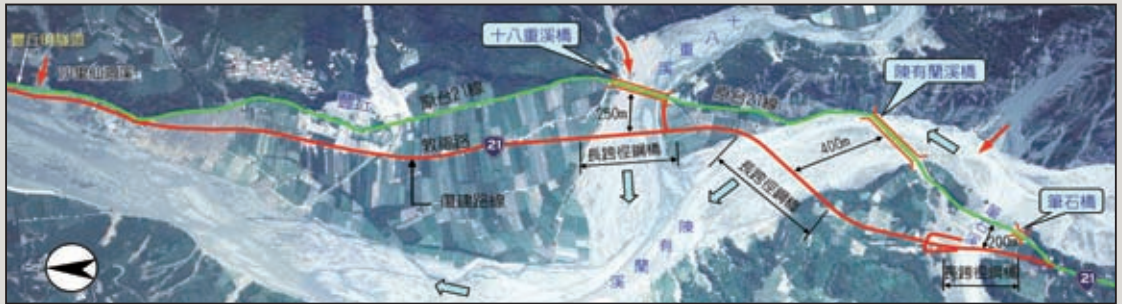


圖20 台21線十八重溪橋、陳有蘭溪橋及筆石橋復建路線



圖21 台21線十八重溪橋、陳有蘭溪橋及筆石橋完工照片

越十八重溪，向南沿台21線西側佈設，於跨越陳有蘭溪路段，則配合筆石溪附近台地現況，往下游側調整(圖20)。

4. 陳有蘭溪與筆石溪間路採局部路堤方式，路堤需避開桃芝颱風所引起土石流災害範圍及現有建築物。
5. 跨越十八重溪、陳有蘭溪及筆石溪之橋梁，採大跨徑配置，以減少河中落墩數，尤其筆石溪考量其土石流量與粒徑，不宜於河中立墩。另應儘量採用低梁深之橋型，以提高土石流通過之空間。

### (三) 改建說明

1. 路線：北起自豐丘明隧道北端洞口前岔出走河側，沿陳有蘭溪水道治理計畫線外灘地，跨越沙里仙洞溪土石溪流後，至敦福路口前200公尺處叉出，沿敦福路南行，於十八重溪橋下游側約250公尺處向南跨越十八重溪、陳有蘭溪後銜接地區道路，續向南跨越筆石溪後順接回台21線，全長約5公里，另於十八重溪南岸附近設聯絡橋銜接原台21線。
2. 主要橋梁配置：跨越十八重溪採70m+3@92m+70m=416m五跨連續鋼箱型梁

橋；跨越陳有蘭溪採82m+3@100m+82m=464m五跨連續鋼箱型梁橋；跨越筆石溪採80m+110m+100m+70m=360m四跨連續鋼箱型梁橋，完工照片如圖21。

### 三、台8線篤銘橋改建工程

#### (一) 災害原因

篤銘橋位於大甲溪及十文溪匯流口，跨越大甲溪，跨徑30m。過去因河川沖刷，河床下降，橋基嚴重裸露。2004年敏督利颱風及艾利颱風引發土石流，部分河床淤積高達12公尺，造成橋址處河川之通水斷面不足，兩端引道沖毀流失(圖22)。本橋受到土石流破壞的模式包括沖刷、堵塞、淤埋[6][15]。

#### (二) 考慮因素與對策

1. 921大地震後，大甲溪中上游產生大規模的崩場地，未來如發生較大豪雨，大量土石將繼續向下游堆積，導致大甲溪

河床持續淤高。

2. 為提高通水斷面，且避開易遭洪水沖損及有落石發生之引道段，橋梁必須往上游側移設。
3. 路線避開谷關端上邊坡坍塌、路基流失的引道。
4. 橋台儘量遠離河岸，並研選地質穩定之位置。
5. 考量地形與地質條件，以及道路用地取得相關問題。
6. 本河段大甲溪之河床高差變化相當大，如果於河中立墩，基礎高程無法決定，宜採用河中不立墩之大跨徑橋型。

#### (三) 改建說明

1. 路線：於原篤銘橋東勢端橋頭之前左轉，沿河岸引道於十文巷口右轉跨越大



圖22 篤銘橋水害及土石流災害

甲溪，並於進入谷關市區前順接匯入台8線。新橋橋址約位於原橋上游側150公尺，如圖23。

2. 橋梁配置：避免於河中立墩，採用跨徑155M雙拱肋鋼拱橋，如圖24。



圖23 台8線篤銘橋復建路線



圖24 台8線篤銘橋完工照片

#### 四、台18線71.1k路段坍方復建

##### (一) 災害原因

2009年莫拉克颱風造成阿里山公路71.1k路段附近邊坡整體性滑動，道路崩塌。由於豪雨作用，地表逕流沖刷，岩層破碎及高度風化，土石泡水軟化，溪流向源侵蝕，坡腳掏空，如圖25。邊坡滑動之致災主因係暴雨造成土石大規模坍滑(圓弧

滑動為主，平面滑動次之)[16]，如圖26。



圖25 台18線71.1k邊坡災害(2009年莫拉克颱風)



圖26 台18線71.1k邊坡災害分析

##### (二) 考慮因素與對策

1. 此路段邊坡陡峭，且局部路段腹地不足，難以採用路工方案，故採新建橋梁避開崩塌區。
2. 橋梁方案路線需考量地質條件及落墩之可行性，儘量減少擾動邊坡及環境衝擊。
3. 橋梁縱坡高程須考量邊坡土石坍塌災害情形及擬採用之橋梁型式等因素與條件。
4. 為減少基礎施工對現有地質擾動及傳遞至地層之力量，同時提升橋梁之抗災能力，宜儘量減輕上部結構之靜載重。

5. 受限山頭轉彎，橋台(墩)座落位置之上、下邊坡仍須保護處理。
6. 運輸距離長，且設置預拌混凝土廠困難，宜儘量減少混凝土之使用量。
7. 崩塌區具深谷之地貌，橋型需考量施工與吊裝架設條件。

### (三) 改建說明

1. 路線順接明隧道後截彎取直，跨越崩坍區域，並整治崩坍區域上下邊坡，如圖27。



圖27 台18線71.1k道路復建路線

2. 本路段道路彎曲繞行，橋梁段兩端皆位於曲線上，且銜接至明隧道，須採曲線鋼梁方式克服。
3. 採用半穿式鋼拱橋以降低吊裝高度，避開崩坍區域落墩，並配合兩端曲線線形，側跨配置為19公尺，主跨徑為160公尺，拱高32M，如圖28。



圖28 台18線71.1k橋梁完工照片

## 伍、結論

台灣大部分土地位在易發生多重災害的區域，受極端氣候下暴雨的影響，道路橋梁中斷、毀損伴隨颱風豪雨不斷發生，尤其橋梁常為交通運輸的動脈，其建設不若平面道路迅速，受災時，復原較耗時，故攸關民眾生活與經濟活動至深。因此，橋梁設計思維要優先著眼於災害發生之防範，尤其在道路選線之初，即應避開地質敏感區位以及河寬縮減、河道蜿蜒等水理不利區位，實為防災設計之首要考量。

對於處在年輕地質及地震帶的台灣，既無法免除極端氣候所帶來之災害，惟有體認台灣環境特性，掌握致災型式，在規劃階段慎選工址，詳實調查地質、邊坡、河川特性、斷層活動，易致災路段建置監測預警系統，並汲取過去災害的經驗，採用容易修復的橋型等，來降低極端氣候所帶來的威脅。

## 參考文獻

1. Climate Change 2013 The Physical Science Basis, IPCC Working Group I Contribution to AR5, IPCC, 2013
2. 台灣氣候變遷科學報告2011，國科會，2011
3. Disaster Risk Management Series No. 5, Natural Disaster Hotspots A Global Risk Analysis, The International Bank for Reconstruction and Development /The World Bank and Columbia University,2005
4. 張荻薇，氣候變遷下台灣路、橋的天然災害及其因應對策，99年國科會自然處永續學門防災科技研究計畫成果研討會，2011
5. 張荻薇「橋梁颱風水害之成因分析與防治對策」，土木技術創刊號，pp.118-131，1998。
6. 張荻薇，王炤烈，曾榮川，橋梁土石流災害之成因分析及其復建對策，中華顧問工程司，2006
7. 施邦築、陳榮河、劉格非、謝正倫、鄭光炎、張荻薇等人，「土石流溪流橋涵設計準則之研究」，交通部科技顧問室(1999)。
8. 施邦築、劉格非、林呈等人，「土石流高潛勢區橋梁設計及管理」，行政院公共工程委員會(2002)。
9. 莫拉克颱風造成橋梁損壞之探討，交通部運輸研究所，2012
10. 吳進興，吳文隆，蕭秋安，周坤賢，極端氣候下公路邊坡災害復建工程設計探討，中華技術第105期，2015
11. 林曜滄，林呈，劉醇宇，吳宣欣，跨河橋梁沖刷與土砂新型災害之受災成因與因應對策-以八八水災南部地區橋梁為例，第十一屆結構工程研討會暨第一屆地震工程研討會，2012
12. 台灣世曦，八八水災南部地區跨河橋梁沖刷與土砂新型災害成因與對策(II)



13. 黃炳勳，蔣啟恆，吳弘明，廖永忠，台17線雙園大橋重建工程，第十一屆結構工程研討會暨第一屆地震工程研討會，2012

---

14. 張荻薇、曾榮川、李姿瑩、陳光輝，「桃芝颱風橋梁災害概要及成因研析」，第六屆結構工程研討會(2002)。

---

15. 曾榮川、張英發、張肇華、陳玫君，台8線篤銘橋改建工程之規劃與設計，第十屆中華民國結構工程研討會，2010

---

16. 林曜滄，曾榮川，林正偉，林彥君，蔡建民，陳玫君，賴世寶，蔡宗成，莫拉克風災台18線71K道路復建工程(芙谷峩橋)設計與施工，鋼結構協會第五十一期鋼結構工程，2014

---



# 橋梁之震後快速 安全檢測之作法 與省思

關鍵詞：震後檢測、緊急調查、搶修、復舊

台灣世曦工程顧問股份有限公司／總經理／王炤烈 ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／資深協理／林曜滄 ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／經理／張英發 ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／計畫工程師／林正偉 ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／計畫工程師／蔡欣仰 ❺



## 摘要 ABSTRACT

大地震災害發生常會造成建築物或橋梁倒塌及人員傷亡，往往亟需人員救援或物資、材料的運送，而橋梁更是跨越河川與道路的快速通道，是交通路網不可或缺的一環，更是災害發生時重要的維生線。

為因應大地震發生時的搶救災需求，重要的聯外道路及橋梁更要加強維護管理，以維持其正常營運功能下，確保搶救災的運作。而道路為地震後採取緊急行動所需要之最重要的基礎建設，地震發生後務必儘速確保道路交通之順暢，因此平常就須預先建立道路震災對策。

本文章參考美國、日本等地，對道路震災對策之相關調查研究，及過去寶貴之經驗及知識，提供維護橋梁的正常營運，達到救災的目標，並針對橋梁震後快速安全檢測的作業及程序作進一步探討，可供大地震發生時減輕道路災害及災後交通確保之技術指導及參考。



### 壹、前言

臺灣位處環太平洋地震帶，地震發生頻繁，終年受到地震災害的威脅，如1999年9月21日發生芮氏規模7.3之集集大地震、2016年2月6日發生芮氏規模6.4美濃大地震等。而在大地震災害發生所造成的建築物倒塌、道路中斷及人員的傷亡，往往亟需人員救援或物資、材料的運送，而橋梁更是跨越河川與道路的快速通道，是交通路網不可或缺的一環，更是災害發生時重要的維生線。

因此，為因應大地震發生時的搶救災需求，重要的聯外道路及橋梁更要加強維護管理，以維持其正常營運功能下，確保搶救災的運作。道路本來就是發生地震之後，採取緊急行動所需要之最重要的社會基礎建設，地震發生後務必儘速確保道路交通之順暢，因此平常

就須預先建立道路震災對策。圖1為大地震所造成不同程度的橋梁震害相片，部分橋梁於地震發生後仍要維持其通行功能，故橋梁震後須搭配快速安全檢測，以確保通行安全。

為減輕地震發生時的道路災害，及作為災後交通之技術指導，參考美國、日本等地對道路震災對策之相關調查研究及過去寶貴之經驗及知識，並針對國內橋梁震後快速安全檢測的作業及程序作進一步探討，提供維護橋梁的正常營運，達到救災的目標。就以臺北市為例，特別規劃市區救援道路，參照最近公路橋梁耐震設計規範進行橋梁耐震性能檢核[1]，救援道路上的橋梁之補強後耐震能力應達到最新耐震規範新設計橋梁的標準，確保救災路網線上橋梁於地震災後的可使用性，詳如圖2。



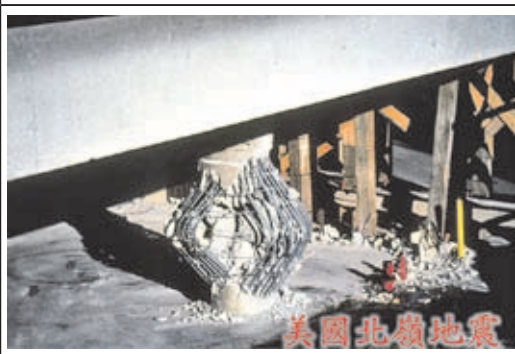

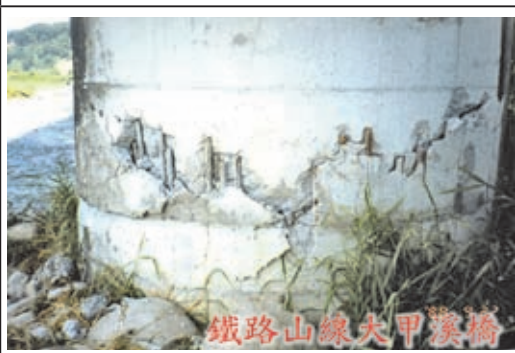



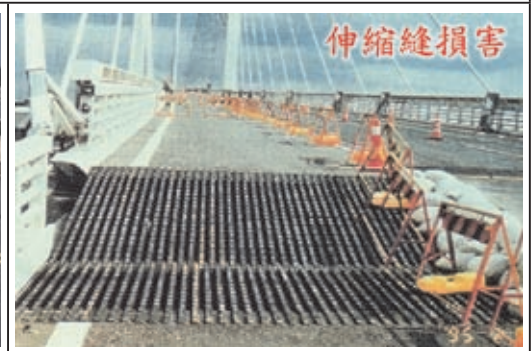
破壞程度	損壞照片	
橋梁倒塌	 <p>石圍橋</p>	 <p>桶頭橋</p>
橋墩嚴重受損	 <p>美國北嶺地震</p>	 <p>日本阪神地震</p>
橋墩中度受損	 <p>鐵路山線大甲溪橋</p>	 <p>日本阪神地震</p>
附屬結構倒塌造成交通中斷	 <p>日本新幹線</p>	
橋梁附屬結構受損造成交通阻礙	 <p>伸縮縫損害</p>	 <p>伸縮縫損害</p>



圖1 橋梁於大地震中遭受不同程度損壞照片

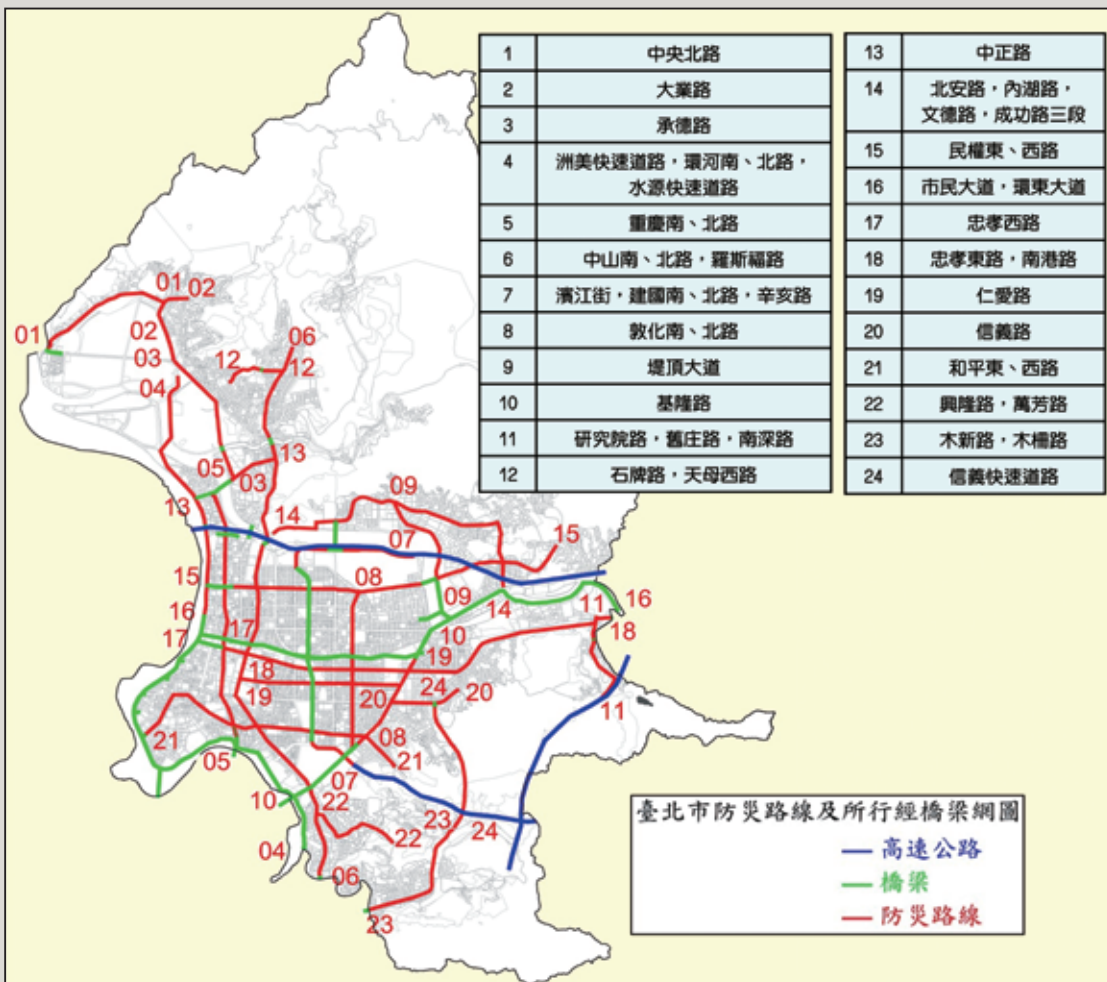


圖2 臺北市防災路線及所行經橋梁網圖

## 貳、美國的橋梁震後檢測作法

美國地區橋梁震後檢測以紐約州為例，其

橋梁震後檢測作業程序如圖3所示，該州依據地震規模( $M_w$ )與影響範圍定義四種應變等級，其分類如下：

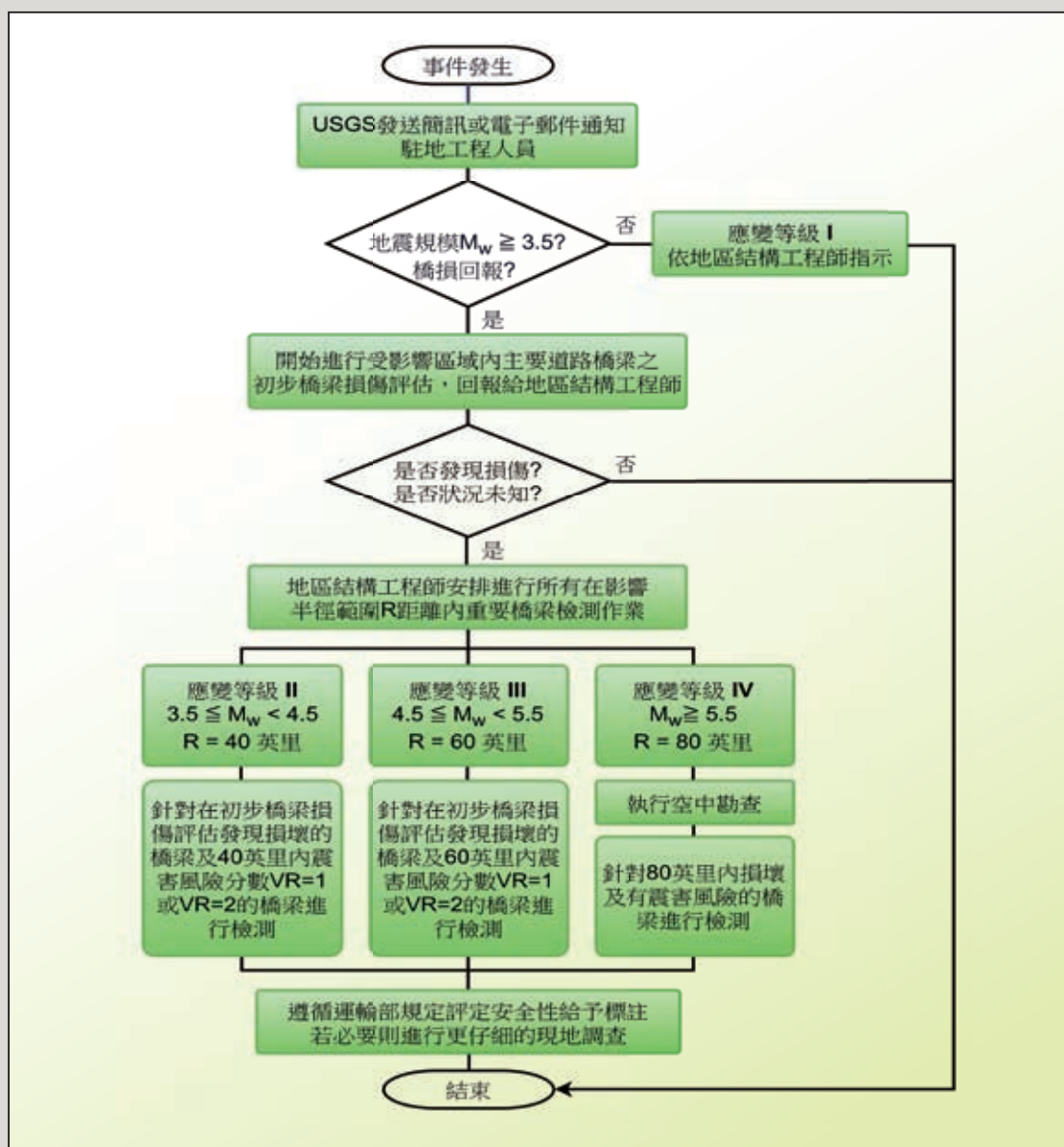


圖3 美國紐約州橋梁震後檢測作業程序

- 一、應變等級I：地震規模 $M_w < 3.5$
- 二、應變等級II：地震規模 $3.5 \leq M_w < 4.5$ 、檢測範圍半徑40英哩
- 三、應變等級III：地震規模 $4.5 \leq M_w < 5.5$ 、影響範圍半徑60英哩
- 四、應變等級VI：地震規模 $M_w > 5.5$ 、檢測範圍半徑80英哩

上述四種應變等級所對應之橋梁檢測及應變說明詳見表1，其中震後檢測方式主要可分為四大項，包括空拍勘查、初步橋梁損傷評估(PBDA)、震後特別檢測(SPEBI)、與進一步勘查。有關檢測方式說明，包含目標、範圍、方法、人員需求、時間性、及所得結果與文件處理等說明，詳見表2。其中，初步橋梁損傷評估(PBDA)與震後特別檢查(SPEBI)之表格內容詳見圖4及圖5。[2]

表1 美國紐約州橋梁震後應變等級說明

應變等級	地震規模	影響半徑	應變說明
I	$M_w < 3.5$	-	無應變的計畫或需求。如果有損害的紀錄，區域工程人員再通知結構工程師。依個案情況，結構工程師需確定是否完成特別震後橋梁檢測(SPEBI)。結構工程師審慎檢查特別脆弱或靠近震央的關鍵橋梁。
II	$3.5 \leq M_w < 4.5$	40mi	區域工程人員將立刻啟動初步橋梁損傷評估(PBDA)。所有路徑內依優先順序執行所有橋梁調查。有損傷或有疑慮情況應立即通報。綜合報告於每日結束前需提送給結構工程師。初步橋梁損傷評估期間，如沒發現損傷，震後應變可被終止。 結構工程師盡可能使用地震時脆弱橋梁的優先列表，安排特別震後橋梁檢測。特別震後橋梁檢測於影響半徑內進行： <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 結構工程師認為非常重要的</li> <li>■ 損傷在PBDA已記錄</li> <li>■ 需要熟練或有經驗的人評估</li> <li>■ 1或2地震易損性評分</li> <li>■ 認為脆弱或特別重要</li> </ul> 如果橋梁損傷的報告落在預設的影響半徑外，結構工程師將增加影響半徑，並相應調整檢查程序。
III	$4.5 \leq M_w < 5.5$	60mi	除了使用較大半徑外，其餘與應變等級II標準一樣。
IV (高)	$M_w > 5.5$	80mi	NYS的事故指揮系統(ICS)將啟動高級應變，確保區域、主要辦事處與其他機構之間的協調工作。區域工程人員將立即對路線進行初步橋梁損傷評估及結構工程師盡可能儘速安排影響半徑內所有橋梁的特別震後橋梁檢測。

表2 美國紐約州橋梁震後檢測方法說明

型式	空拍勘查(應變等級IV)	初步橋梁損傷評估(PBDA)	震後特別檢測(SPEBI)	進一步勘查
目標	全域描述	路線勘查	詳細震後橋梁檢測	特別研究定義損傷
範圍	影響區域內所有橋梁	影響區域內主要道路橋梁	依特定工址或地震規模定義範圍	依特定工址必要性定義範圍
檢測方法	直升機或小型固定翼飛行器	開車並短暫停留巡查	橋樑檢測車及檢測所需之裝備或器具	任何檢測所需之特殊裝備或器具
執行人員	1至2位交通主管單位人員	地區工程人員	橋樑檢測團隊	專家陪同，如結構、大地、材料工程等
完成時間	立即(24小時內)	立即(數小時內)	越快越好(通常8小時內)視必要持續進行	配合震後檢測需求後續作業
產出結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 定義損傷範圍</li> <li>■ 識別道路不通或交通瓶頸處</li> <li>■ 定位已產生主要損害或明顯不安全之橋梁</li> <li>■ 建議須執行地面檢測之橋梁先後順序</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 定義損傷範圍</li> <li>■ 識別道路不通或交通瓶頸處</li> <li>■ 封閉倒塌或危險橋梁</li> <li>■ 提列震後特別檢測之危險或可能危險橋梁</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 如必要標定危險程度</li> <li>■ 封閉倒塌或危險橋梁</li> <li>■ 提供通行管制、維修、或進一步勘查之建議</li> <li>■ 決定是否開放已封閉之橋梁通行</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 如必要標定危險程度</li> <li>■ 詳細分析評估</li> <li>■ 提供必要通行管制或維修之特殊建議</li> <li>■ 概估復舊工作所需經費</li> </ul>
歸檔文件	附相片或影片之勘查報告	初步橋梁損傷評估表	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 震後檢測報告</li> <li>■ 每日彙整報告</li> </ul>	特別勘查報告

美國加州運輸署(Caltrans)對於震後檢查，也制定「震後檢測團隊手冊」(Post Earthquake Investigation Team (PEQIT) Manual)，其中震後

檢測依其程序確認單作檢查外，同時也要填寫震後橋梁檢測表，詳如圖6。本表格主要分為5大部分，包含A.橋梁基本資料表、B.損壞狀況評



**SAMPLE POST-EARTHQUAKE EVALUATION FORM**

POST EARTHQUAKE BRIDGE EVALUATION FORM		Sheet Number _____																															
Inspector's Name _____		Affiliation _____																															
Date _____		Time _____																															
Earthquake Name _____		Country _____ Region _____																															
<b>DESCRIPTION OF BRIDGE</b> Bridge Name _____ Br. # _____ Route # _____ Location _____ Bridge Bearing _____ Length _____ Number of Spans _____ Simple Spans _____ Continuous _____ Hinges yes   no _____ Locations in spans _____ River Xing _____ RR Xing _____ Interchange _____ Other _____ Suspension _____ Cable Stay     Steel Truss _____ Steel Arch _____ Steel Box Girder _____ Steel I Girder _____ Concrete Box Girder _____ Concrete T Girder _____ Concrete Slab _____ Precast _____ Girder _____ Concrete Arch _____ Timber Arch _____ Timber Truss _____ Timber Girder _____ Bascule _____ Lift _____ Swing _____ Other _____		<b>DESCRIPTION OF DAMAGE</b> Overall Rating _____ No Damage _____ Minor Damage _____ Moderate Damage _____ Major Damage _____ Collapse _____ Dropped Spans yes   no   spans _____ Span Movement _____ Girder Damage _____ Other Superstructure Damage _____ Indications of soil movement _____																															
<b>BEARING TYPES</b>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Damage</th> <th>Location</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Restrainer Hinge Joint</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Bearings Shear Key Abutment</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Bent Bent Cap</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Column</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Footing</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> </tbody> </table>	Damage	Location	Description	Restrainer Hinge Joint	_____	_____	Bearings Shear Key Abutment	_____	_____	Bent Bent Cap	_____	_____	Column	_____	_____	Footing	_____	_____	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Roll #</th> <th>Frame #</th> <th>Photo Log</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> </tbody> </table>	Roll #	Frame #	Photo Log	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
Damage	Location	Description																															
Restrainer Hinge Joint	_____	_____																															
Bearings Shear Key Abutment	_____	_____																															
Bent Bent Cap	_____	_____																															
Column	_____	_____																															
Footing	_____	_____																															
Roll #	Frame #	Photo Log																															
_____	_____	_____																															
_____	_____	_____																															
_____	_____	_____																															
<b>Abutments</b> Seat Type _____ Diaphragm _____ Other _____ <b>Piers</b> Concrete Walls _____ Single Col. _____ Multicol. _____ Steel Tower _____ Single Col. _____ Multicol. _____ Other _____ <b>Foundations</b> spread _____ pile _____ pileshaft _____ caisson _____ other _____ Retrofit yes   no   Shear Keys _____ Catcher Blocks _____ Restrainers _____ Abutments _____ Bents _____ Other _____ Additional Comments _____ _____ _____		<b>SKETCH DAMAGE</b> _____ _____ _____																															

圖6 美國加州交通運輸署震後橋梁檢測表

估、C上構損壞紀錄、D支承及下構損壞紀錄及E其他構件與補充紀錄。[3]

**參、日本的橋梁震後檢測作業程序**

日本近20年來發生了不少強烈大地震，包括1995年阪神大地震、2004年新潟中越地震、2011年東日本大地震與2016年熊本大地震等，皆造成重大傷亡與財產損失。日本道路協會汲取歷次地震經驗，於1988年出版「道路震災對

策便覽」震前對策篇與震災復舊篇，1996年另出版震後對策篇，2002年時針對震前對策篇與震災復舊篇進行改版，發生新潟中越地震後，於2006年再次改版，東日本大地震後再將震後對策篇之內容與危機管理計畫整合，於2012年改版並更名為震災危機管理篇，頻繁地修訂內容可見日本對於震災對策的重視。[4,5,6]

「道路震災對策便覽」將震災應對分為三個階段，第一階段為「震前對策篇」，主要內容為制定災害預防計畫、道路橋梁耐震性調



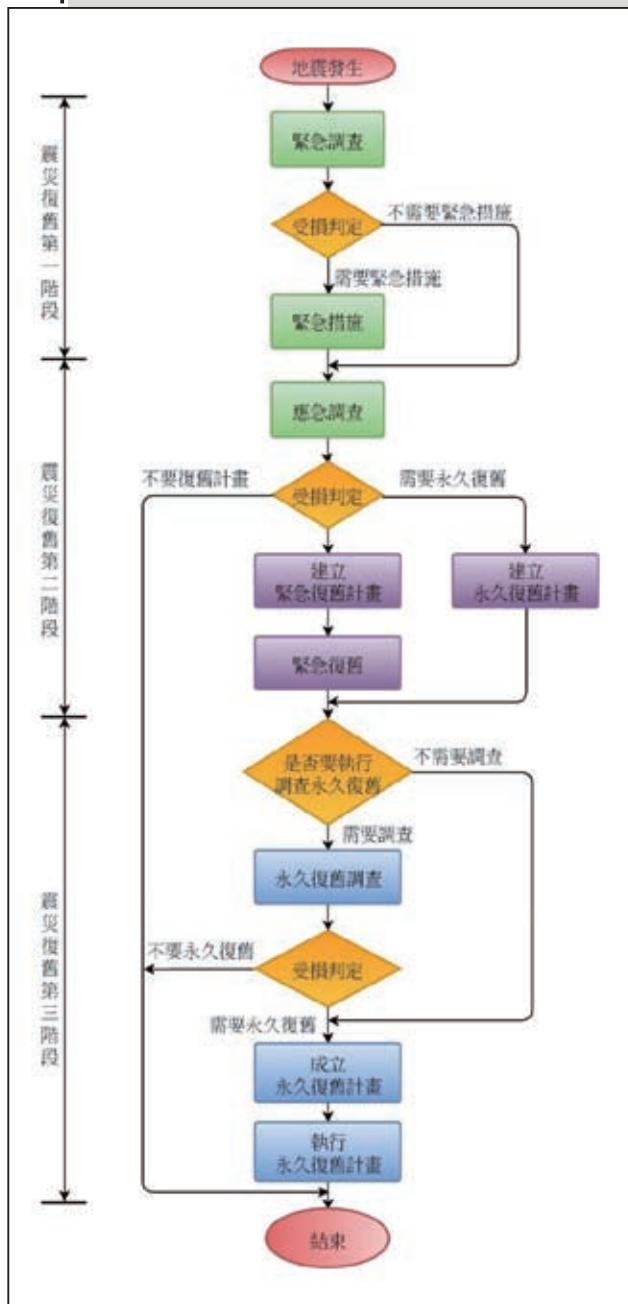


圖7 日本震災復舊的基本流程

查、與災害應對預演等；第二階段為「震災危機管理篇」，主要內容為緊急調查與緊急措施，緊急調查的目的為蒐集受災狀況，掌握是否發生重大災害，確認路網是否可通行，並進行緊急措施防止災害擴大。第三階段為「震災復舊篇」，包括永久復舊調查與永久復舊工作等，以確保道路長期性之機能及耐載能力。

在震災復舊上，考量地震後的聯外道路若無法發揮其正常功能下，將會造成受災地區復舊的困難及阻礙該地區的復興，對受災區域的生活起居及經濟活動的影響很大。因此，危機管理計畫中，對於相關單位的連繫，必須快速地掌握道路的災損狀況，有必要進行道路震災的快速修復。

當地震發生時且其地震震度在4級以上，必須依指示作緊急調查。日本的震災復舊大致可分為三階段，其流程如圖7所示。其中，第一階段為緊急調查及緊急措施，第二階段為應急調查、應急復舊及復舊計畫案的成立。第三階段為永久復舊方案調查及永久復舊。[7]

第一階段震災復舊，進行緊急調查以掌握概略的受損狀況及有無重大的災害，訂定通行規則，實施防止災害擴大措施(防止二次災害)等緊急措施。同時對於判斷有倒塌危險性相當高的受損構造物要採取必要的緊急對策。

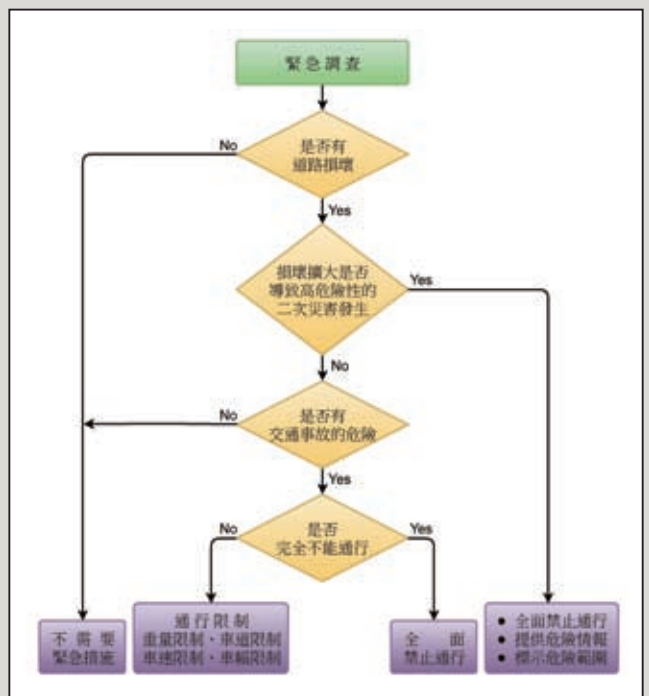


圖8 日本地震發生後緊急應變流程圖



有關地震發生後的道路緊急應變流程如圖8所示，而作為緊急調查的主要項目如表3中所示。其中在橋梁部分，除落橋外，若發現有下列的損壞情況時，立即禁止通行，包含，

- 一、橋台及橋墩的異常傾斜、沉陷
- 二、鋼筋混凝土橋墩、橋台的龜裂
- 三、鋼橋墩的龜裂、銲接處破斷，目視有明顯的撓度、變位及挫屈
- 四、上部結構(混凝土)：可看到鋼筋混凝土的大龜裂，較大的混凝土剝離及脫落
- 五、下部結構(鋼橋)：翼板的破壞、腹板的局部挫屈、桁架的構材破斷

六、支承部的破損

七、伸縮縫損壞不能通行，產生高低差

八、防止落橋構造的破壞及變形

第二階段震災復舊，調查道路構造物全體的受損狀況，檢測損傷狀態作為防止二次災害對策，依據道路交通的緊急優先順序進行應急復舊。同時，依據路線的重要性、構造物的受損度及復舊的難易度進行復舊計畫的成立。

橋梁的緊急調查方式，主要為外觀調查的損傷位置、損傷範圍、損傷狀況的量測結果，及照片攝影為主。調查的橋梁各構造部位包含基礎、橋墩、橋台、上部構造、支承部、防止落橋裝置、伸縮縫裝置、挖填方基礎及其他等。

表3 日本緊急調查的主要項目

對象設施		調查項目
道路(平坦道路)		大型路面凹陷、龜裂、路面有障礙物
邊坡		大規模邊坡崩壞、大型落石、土石坍方
路堤段		大型路面凹陷、路體下沉、回填土流出
橋梁	整體	落橋
	橋面	護欄、水平錯動變形
		縱斷面產生折角
		伸縮縫開裂、擠壓、產生高低差
	上部結構	不連續的變形
	下部結構	沈陷、傾斜、大型裂縫、混凝土剝落、鋼筋裸露變形
	支承	支承損壞、螺栓損壞
防止落橋裝置	破損、變形	
隧道		隧道洞口周邊坍方、隧道內壁大規模坍方
其他道路構造物	共同管道	路面突起(從地面巡查) 結構體損壞(由各管理單位負責進入共同管道內檢查)
	地下箱涵道路	擋土牆開裂、傾斜、壁體上浮、湧水、大型路面塌陷
	擋土牆	擋土牆開裂、傾斜、被填土坍方、湧水
	明隧道	落石坍方、雪崩、結構體損壞、傾斜、大型裂縫
	人行陸橋	落橋、橋柱損壞
	穿越箱涵人行地下道	大型路面凹陷、接縫開裂
	邊溝	大範圍坍方、大型裂縫、混凝土剝落、壁體上浮、湧水
非道路構造物	沿路設施	道路邊建築物崩塌對道路設施的損害影響
	附屬設施	對交通之影響
	其他	大規模淹水、有無海嘯、有無大規模火災、車輛滯留狀況

對於橋梁結構安全之判定標準，與承載力有關的災損程度分為5級，而與道路通行有關的災損程度則分為3級，分別如表4及表5所示。其中，涉及承載能力部分為基礎、橋墩、橋台、上部構造、支承部及防止落橋裝置等6項，而涉及通行部分則與伸縮縫裝置、挖填方、車輛防護欄杆等有關。有關混凝土橋柱基部產生損傷時受災程度之評估表如表6所示。

第三階段震災復舊，依據道路構造物受損狀況的詳細調查結果成立復舊計畫，災損地區的復建計畫執行，須確保道路設施的機能及必要的耐震水準，實施本階段的復舊工程。本階段的震災復舊，除災害對策的目的外，也要針對日常生活通行的必要性的交通需求進行復舊。各道路設施的耐震性、道路路網的多重性與替代性的提升。同時，道路原本機能的再建構，必須考慮環境、景觀的協調。

表4 日本橋梁承載力災損程度

災損符號	災損程度	災損說明
As	落橋	橋梁全倒或半倒
A	嚴重損壞	橋梁發生承載力顯著降低之損傷，使落橋等致命性災害發生的可能性高
B	中度損壞	橋梁發生承載力降低之損傷，但在不會有進一步餘震作用或過高活載作用之狀態下，仍可能可以通車。
C	輕度損壞	橋梁發生短時間內不影響承載力之損傷
D	無損壞	無影響承載力之損傷

表5 日本道路通行災損程度

災損符號	災損程度	災損說明
a	禁止通行	無法通行之場合
b	限制通行	雖有異常狀況，但仍可通行之場合
c	正常通行	並無影響行車安全性之異常狀態

表6 混凝土橋柱基部產生損傷時受災程度之評估表

觀測到之損傷		①軸向鋼筋破斷及彎曲傾斜	②鋼筋鼓出	③混凝土保護層剝落	④貫通之斜向龜裂	⑤未貫通之斜向龜裂	⑥水平龜裂	
損傷狀況	一般情況 $\rho \geq 0.5\%$	側面圖						
		正面圖						
	軸比 較小 鋼筋時 $\rho < 0.5\%$	側面圖						
		正面圖						
受災程度		A:大損害	B:中度損傷	B:中度損傷	C:小損傷	C:小損傷	C:小損傷	
殘留強度		$P_y$ 以下	$P_u$ 以下	$1.0P_y$	$1.1P_y$	$P_u(1.1P_y-1.3P_y)$	$P_u(1.1P_y-1.3P_y)$	
殘留變形性能 $\delta_u - \delta / \delta_u - \delta_y + 100(%)$		0%	0%	10%	30%	50%	70%	
		$P_y$ :降伏耐力	$P_u$ :極限耐力	$\delta_u$ :極限變位	$\delta_y$ :降伏變位	$\delta$ :最大變位		

日本在經歷數次大地震的衝擊後，累積相當多之震後緊急救災經驗，不僅對於橋梁震後緊急救災技術、作業程序、通報與動員機制也相對成熟，同時在緊急補強工法部分也多有研究並實際應用於橋梁上。「道路震災對策便覽(震災復舊編)」中，針對橋梁災損受損部位，包含基礎、橋墩、橋台、上部結構、支承部、伸縮縫裝置及其他等，提出相關的緊急補強工法，例如橋墩及橋台的應急復舊工法，有架設臨時支撐架、RC橋柱緊急補強工法、鋼橋柱挫屈部位緊急補強、環氧樹脂灌注法、添加補強加勁材或代替局部構件設置、簡易防落設施、路面修復及安全監測系統設置等，避免受災橋梁在餘震作用或限制通車情況下造成二次災害。

#### 肆、國內的橋梁震後檢測作業程序

受限於地形特性及環境，現有台灣的橋梁超過3萬座，平均為每平方公里約0.83座橋，國內橋梁相較於日本、美國等地的密度來得高。此外，國內的橋梁維管單位眾多，包含高公局、公路總局、臺鐵局、林務局及各地方政府等。因此，各養護管理機關各自發展相關橋梁檢測評估手冊[8]、維修養護手冊、維修材料規範及使用手冊，也使得震後橋梁之檢測時機、重點及作業方式等程序並未統一。

國內目前已有公路相關養護、檢測及補強規範，同時橋梁管理位也制訂相關的養護手冊，如交通部103年12月頒布之「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」[9]、101年2月頒布之「公路養護規範」[10]及97年12月頒布之「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」[11]、公路總局101年3月「公路養護手冊」[12]及高公局102年2月修訂之「高速公路養護手冊」[13]。

「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」於公路鋼筋混凝土結構一般性橋梁之檢測、評估、維修與補強作業，內容包括檢測準備作業、檢測一般規定、目視及儀器檢測、結構安全評估以及維修與補強對策與工法。對於特殊或重要性之橋梁，可由公路養護管理機關或單位另訂之。其中於第四章特別檢測中，對於地震後特別檢測，規定公路養護管理機關或單位應依事先訂定之檢測作業相關規定進行地震特別檢測。



交通部頒布之「公路養護規範」，主要為原則性、政策性或宣示性之技術規定為原則，如屬實際操作面之詳細規定，則由各執行單位制定。該規範主要是提供各級公路養護管理機關，施行公路及其附屬設施養護作業之依循。其中第五章「橋梁」提及橋梁的檢測，包括定期檢測及特別測檢，而特別檢測為當重大災害發生後，為了解災損程度及防止災害再擴大而實施之檢測。



「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」則適用於公路一般鋼結構橋梁之檢測、評估及維修補強作業，內容包括檢測準備作業、檢測一般規定、目視及儀器檢測、結構安全評估以及維修補強對策與工法。該規範檢測部分為配合當時橋梁管理系統所訂



定之，維修與補強部分則國內外的相關報告及手冊，再配合國內現況訂定之。其中，第五章特別檢測為橋址發生地震災害、土石流災害、水災、火災及其他重大事故後之災害後檢測。地震後特別檢測包括三個階段：(1)緊急勘查；(2)搶修階段之檢測；(3)復舊階段之檢測。緊急勘查目的係為了解道路通行使用性，作為是否進行限速、限重或封橋等交通管制之緊急措施的判斷依據。接下來，橋梁管理機關則可依緊急勘查結果，進行下一步的搶救階段及復舊階段。搶救階段之檢測目的主要係為掌握全盤性受災狀況，作為搶修之判斷依據。復舊階段之檢測目的則作為復舊之判斷依據。

公路總局「公路養護手冊」依省道公路養護需求及特性，分別就養路巡查、已完工之路基及邊坡、鋪面、橋梁、隧道、排水設施、交通工程設施、交控設施、沿線路權內附屬設施、景觀及植栽等各項設施及其分類構造物，敘明其內容、養護注意事項、檢測或清查作業及相應之養護方法等，並訂明各項公路設施之巡查方式、頻率項目、注意事項與各類參考表格供參。另因應近年來異常氣候常致重大公路災害，亦強化

表7 橋梁特別檢測評估表(公路養護手冊)

路線	橋梁名稱	天氣狀況	評估等級/損壞程度			備註
			安全	須補強	危險	
檢測單位	檢測日期	橋梁編號				
竣工年月	檢測事由					
檢測項目	損壞狀況	評估等級/損壞程度			備註	
		安全	須補強	危險		
整體穩定性	<input type="checkbox"/> 結構傾斜 <input type="checkbox"/> 沉陷 <input type="checkbox"/> 土壤液化					
上部結構(RC·PC)	<input type="checkbox"/> 大梁破壞 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移有落橋潛勢					
上部結構(鋼構)	<input type="checkbox"/> 主要構件受損 <input type="checkbox"/> 次要構件受損 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移					
橋墩(RC·PC)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 墩柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞					
橋墩(鋼構)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 鋼板凹陷鼓脹 <input type="checkbox"/> 鋼柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞					
橋台	<input type="checkbox"/> 翼牆損壞 <input type="checkbox"/> 橋台護坡坍塌 <input type="checkbox"/> 橋台傾斜位移					
基礎	<input type="checkbox"/> 基礎傾斜 <input type="checkbox"/> 基礎沉陷 <input type="checkbox"/> 基礎裸露 <input type="checkbox"/> 基礎殘餘水平變位					
引道擋土牆	<input type="checkbox"/> 牆上牆身損壞 <input type="checkbox"/> 牆上牆傾斜					
橋台(引道)	<input type="checkbox"/> 傾斜位移 <input type="checkbox"/> 結構受損 <input type="checkbox"/> 引道下陷					
支承	<input type="checkbox"/> 裝置受損 <input type="checkbox"/> 傾斜滑動 <input type="checkbox"/> RC 處破壞 <input type="checkbox"/> 防落裝置受損					
伸縮縫	<input type="checkbox"/> 縱向開離 <input type="checkbox"/> 左右錯離 <input type="checkbox"/> 上下落差 <input type="checkbox"/> 擠壓破壞					
河道	<input type="checkbox"/> 河道淤積 <input type="checkbox"/> 河道變寬 <input type="checkbox"/> 深水區改變 <input type="checkbox"/> 河床降低 <input type="checkbox"/> 橋基保護工破壞					
橋墩保護設施	<input type="checkbox"/> 完全沖毀 <input type="checkbox"/> 部份流失 <input type="checkbox"/> 嚴重位移 <input type="checkbox"/> 撞擊損傷					
附屬設施	<input type="checkbox"/> 設施受損倒塌 <input type="checkbox"/> 管線受損 <input type="checkbox"/> 欄杆受損 <input type="checkbox"/> 胸牆受損 <input type="checkbox"/> 其他					
評估過程附記事項：						
評估結果						
限重(t)		限速(km/h)				
單位主管		檢測人員				
維修完成日期		維修後評估結果				
維修後限重(t)		維修後限速(km/h)				



橋梁檢測、橋墩保護等作業規定。於第五章橋梁中，訂定特別檢測。明定於震度5級有受損橋梁，或震度6級以上地區所有橋梁都要進行特別檢測。特別檢測項目包含整體穩定性、上部結構、橋墩、橋台、基礎、引道擋土牆、橋台引道版、支承、伸縮縫、河道、橋墩保護設施、附屬設施等12項，其所採用的橋梁特別檢測評估表如表7所示。

高公局「高速公路養護手冊」為高速公路養護單位依據高速公路現況及實際需要訂定之養護計畫。手冊分別就路基及邊坡、鋪面、橋

梁、隧道、排水設施、交通安全設施、交通控制及通信設施、沿線路權內附屬設施、景觀及植生、養路車輛機械等各項養護工作，說明其應辦理巡查之方式、頻率、巡查時應檢查之項目、注意事項與各類表格，以及相關之處理方式、維護方法等。當地震(地區震度4級以上)發生後，可能損傷橋梁結構安全或行車安全，須作特別檢測，其所採用的橋梁特別檢測評估表如表8所示。



表8 橋梁特別檢測評估表(高速公路養護手冊)

公路編號： \_\_\_\_\_ 天氣狀況(晴/陰/雨)： \_\_\_\_\_ 日期： 年 月 日

檢測單位	橋梁名稱	橋梁編碼	評估等級/損壞程度			備註
			安全	須補強	危險	
檢測項目	損壞狀況					
整體穩定性	<input type="checkbox"/> 結構傾斜 <input type="checkbox"/> 沉降 <input type="checkbox"/> 土壤液化		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
上部結構 (RC、PC)	<input type="checkbox"/> 大梁破壞 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移有落橋潛勢		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
上部結構 (鋼構)	<input type="checkbox"/> 主構件受損 <input type="checkbox"/> 次要構件受損 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
橋墩 (RC、PC)	<input type="checkbox"/> 傾斜 <input type="checkbox"/> 沉降 <input type="checkbox"/> 墩柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
橋墩 (鋼構)	<input type="checkbox"/> 傾斜 <input type="checkbox"/> 沉降 <input type="checkbox"/> 鋼板凹陷鼓脹 <input type="checkbox"/> 鋼柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
橋台	<input type="checkbox"/> 翼牆損壞 <input type="checkbox"/> 橋台護坡坍塌 <input type="checkbox"/> 橋台傾斜位移		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
基礎	<input type="checkbox"/> 基礎傾斜 <input type="checkbox"/> 基礎沉降 <input type="checkbox"/> 基礎殘餘水平變位		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
引道橋土牆	<input type="checkbox"/> 擋土牆牆身損壞 <input type="checkbox"/> 擋土牆傾斜		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
橋台 (引道)	<input type="checkbox"/> 傾斜 <input type="checkbox"/> 位移 <input type="checkbox"/> 結構受損 <input type="checkbox"/> 引道下陷		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
支承	<input type="checkbox"/> 裝置受損 <input type="checkbox"/> 傾斜滑動 <input type="checkbox"/> RC 座破壞 <input type="checkbox"/> 防落裝置受損		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
伸縮縫	<input type="checkbox"/> 縱向開離 <input type="checkbox"/> 左右錯離 <input type="checkbox"/> 上下落差 <input type="checkbox"/> 擠壓破壞		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
附屬設施	<input type="checkbox"/> 設施受損倒塌 <input type="checkbox"/> 管線受損 <input type="checkbox"/> 欄杆受損 <input type="checkbox"/> 胸牆受損 <input type="checkbox"/> 其他		<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
評估過程附記事項：						
評估結果： <input type="checkbox"/> 安全可通車 <input type="checkbox"/> 緊急補強後可通行 <input type="checkbox"/> 危險禁止通行						
檢測人員：		主管：				

除此之外，臺北市政府亦訂定「地震後橋梁緊急安全檢查通報作業流程」，將臺北市全區分為4個工作責任區，分別由不同的顧問公司最多負責2區，於地震發生震度4級以上時，

進行橋梁安全檢查作業，依地震後橋梁安全檢查表之檢查項目進行安全檢查及評估工作。若遇有橋梁受損須封閉時，立即以電話通知；若為安全可通行，亦要於規定時限內回報。而新北市的轄區內橋梁安全檢測及系統資料更新，將新北市29個行政區、合計1,363座橋梁，分為A、B兩區，同時規定於震度4級以上地震後進行橋梁快速安全檢查。

## 伍、震後快速安全檢測作法比較及省思

為減輕地震災害及對震後復舊作業之實施有所助益，擬訂震後因應對策有其必要性。參照美國及日本的作法，國內震後橋梁的檢測都訂定相關測檢項目、結構安全評估及維修補強等對策及工法，均可實際應用。但是，對於震後的特別檢測的執行作業方法及要項訂定，略有不足。

日本近年來經歷了不少大地震後，除將震災因應對策分為震前對策篇、震災危機管理篇及震災復舊篇等三階段外。當地震震度達4級以上，必須進行3階段調查，包含緊急調查、應急調查及復舊調查。

交通部訂定的「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」及「公路養護規範」均規定由公路養護管理機關或單位依事先訂定之檢測作業相關規定進行地震特別檢測。而於「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」中則明定地震後特別檢測包括緊急勘查、搶修階段檢測及復舊階段檢測3階段進行。因此，震後的檢測作法宜比照日本及公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範作法，進行三階段作業，以確保救災進行及資源的有效應用。

### 第一階段緊急勘查：

為掌握地震發生後之災情及進行受災區的搶救作業，管理單位必須於第一時間內掌握災情狀況及道路災損，以利作為救災作業之調度及掌控，因此必須進行緊急調查作業。該項調查應於地震發生後數小時至約一天期間，以掌握道路災損概要及防止二次災害為目的。對於道路有災害之處所及可能會導致二次災害之處的地方，應採取相關的緊急措施，必要時尚需進行應急施工。同時，配合搶救災需求，必須進行地震後道路緊急應變流程，必要時進行緊急運送車輛的管制，避免大量車流湧入，影響相關救災作業的進行。

### 第二階段搶修階段檢測：

本階段進行比緊急勘查更為詳細的應急檢測，除更精準掌握全盤性受狀況之同時，也進行應急復舊之實施及決定永久復舊方案為目的的調查。依據詳細調查來發現於第一階段勘查時，無法勘查區域內是否有其他的災情。如有發現重大災情時，應立即採緊急措施。相關的調查資料可作為永久復舊方案擬訂之參考及依據。

### 第三階段復舊階段檢測：

本階段的所進行的震災復舊為永久復舊，所進行檢測調查要點及復舊工法，基本上與第二階段的應急復舊雷同，惟前階段的重點保持應急橋梁機能並防止損傷之顯著擴大，而永久復舊則須作整體性規劃復舊外，其重點在於確保長期性的橋梁機能及耐震能力，同時配合景觀、現境及長期發展需求作設計考量。永久復舊可概分為原狀復舊、提高耐震性且變更構造、改善耐震力但不變更構造及不需永久復舊等方式。對於補修工程在技術上及經濟上沒有太大效益時，則可考慮重建方式辦理。

受惠於現有科技的進步，最新研發的相關急救設備及技術，如衛星通訊車、衛星通訊設備等，可應用橋梁定期檢查及震後快速安全檢測，可縮短檢查期程並可降低成本。例如採用時下最流行的空拍機(UAV)、光纖或3D影像等作法，於近期的地震發生後發揮了很大的功效。以今年0206台南美濃大地震為例，空拍機就可以發揮很大的功能。空拍機可藉由電腦來取代人員，可以飛到檢查人員、車子都難到達的橋梁位置作拍照、錄影，省時、省成本且顧及檢查人員安全。



## 陸、結論

對於橋梁的防災，新建橋梁要有良好構造細節設計使結構發揮韌性，舊橋更要作好耐震評估及補強，確保不會崩塌落橋。但是，地震的發生並非工程師所能預知及掌控，因此，建立良好的震後檢測程序及相關作業方法更顯其重要性。當地震發生時，相關單位及作業人員即可依程序及作業方法進行，有助於救災的進行及減少災害損失。本文章僅就國內外的橋梁震後快速安全檢測作一比較，同時探討其作法讓作業更趨完整，相關作業可作為橋梁主管單位及檢測工程師的參考。

## 參考文獻

1. 交通部頒布，「公路橋梁耐震設計規範」，97年11月。
2. MCEER / University at Buffalo, Post-Earthquake Bridge Inspection Guidelines, Jerome S. O'Connor, P.E., 2010.10。
3. Caltrans Office of Earthquake Engineering, Post Earthquake Investigation Team (PEQIT) Manual, 2013.3。
4. 社團法人日本道路協會，「道路震災對策便覽(震前對策篇)」，平成18年9月。
5. 社團法人日本道路協會，「道路震災對策便覽(震災復舊編)」，平成19年3月。
6. 社團法人日本道路協會，「道路震災對策便覽(震災危機管理編)」，平成22年10月。
7. 張荻薇、王炤烈，「震後橋梁之耐震診斷與震災復舊」，1999年
8. 交通部臺灣區國道高速公路局，「公路橋梁耐震能力評估及補強準則(草案)」，103年10月。
9. 交通部頒布，「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」，103年12月。
10. 交通部頒布，「公路養護規範」，101年2月。
11. 交通部頒布，「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」，97年12月。
12. 交通部公路總局頒布，「公路養護手冊」，101年3月。
13. 交通部臺灣區國道高速公路局技術規範，「高速公路養護手冊」，100年2月第一次修訂。

# 橋梁耐震補強工法 之創新與應用

關鍵詞：補強策略、系統補強、換底工法、樁柱式構架橋墩

台灣世曦工程顧問股份有限公司／副董事長／張荻薇 ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／資深協理／林曜滄 ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／副理／張志斌 ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／計畫副理／蔡建民 ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／主任工程師／賴震川 ❺

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／正工程師／張肇華 ❻



## 摘要 ABSTRACT

台灣地區山川數量眾多且分布廣泛、地形起伏變化大，而橋梁具有跨越山谷、河川等障礙物之功能，在交通路網中具有重要地位，也是大地震後救災及復建工作是否能順利進行不可或缺的決定因素。經由橋梁震害經驗之汲取，以及橋梁耐震技術的研發進步，國內外皆對於橋梁耐震設計規範持續修訂更新、與時精進，以符合需求。而既有橋梁在早期設計年代，對於設計地震力大小及相關結構細節之要求較不完善嚴謹，加上橋梁的老舊劣化，常造成老舊既有橋梁耐震能力不足之情形，也因此，先進國家無不將交通路網中橋梁的耐震能力提升列為重要且迫切的工作。

有關國內橋梁耐震設計，民國84年交通部首次頒布「公路橋梁耐震設計規範」，並於民國89年921地震後，調整震區劃分修正規範、民國97年頒布(98年修訂)之規範，加入考量斷層近域調整因子。惟國內多座地區橋梁為84年前興建完成，無法滿足現行耐震設計規範要求，其中除少部分因老舊或災害不堪使用而進行改建外，其餘多數仍持續使用中。

由於台灣地震頻繁且氣候潮濕、環境充滿腐蝕因子，因此既有橋梁耐震補強工作刻不容緩。以往橋梁耐震補強較常採用型式包括增設防落裝置、加長防落長度及橋墩包覆補強等，傳統方式通常具有工作繁瑣、施工困難、效果侷限、無法全面提升耐震強度以及影響景觀等缺點。本文提出創新的耐震補強工法，包括結構消能與系統補強、換底工法等，除改善傳統方式的缺點外，亦可提升橋梁整體耐震能力。希望藉此拋磚引玉，提供各界參考。



## 壹、前言

臺灣地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界，屬環太平洋地震帶，地震頻仍，終年受到地震災害的威脅。1999年921集集大地震造成國內重大經濟損失，許多橋梁損毀、道路中斷，部分地區的搶救災工作更因此受到嚴重的影響。2011年日本東北發生芮氏規模9.0超大地震，亦造成日本巨大災情，顯示地震來襲極可能導致之生命財產的重大損失。因此，為了確保橋梁在地震時維持應有功能，應思考如何能汲取災害經驗及教訓，針對現有橋梁之耐震能力予以檢討補強，以防患災害於未然。

台灣公路橋梁設計所使用之地震力，首次係在民國43年中國工程師學會台北分會袖珍工程手冊中規定，將台灣地區設計地震力係數 $K_h$ 分為0.1及0.15分為兩種震區。而政府興建第一高速公路時，依據技術顧問建議，將高速公路

橋梁之設計地震力係數 $K_h$ 分為0.1、0.15及0.2等三種。1987年交通部頒布的「公路橋梁設計規範」中，參考了日本1980年日本道路協會相關規範，對於地震力的規定方有較一致之標準及詳細規定。隨著國內外橋梁耐震技術發展、橋梁震害經驗的累積及地震工程的研究成果，交通部為建立符合台灣環境特性所需之設計依據，於民國84年首次頒布「公路橋梁耐震設計規範」，復經民國88年921大地震，於民國89年修正頒布台灣地區的加速度係數、震區劃分及其反應譜。後持續依據包括台灣地區地震微分區及相關耐震研究相關成果，現行民國97年頒布(98年修訂)之規範，加入考量斷層近域調整因子。其主要沿革彙整如表1所示。

國內橋梁多數設計建造於98年「公路橋梁耐震設計規範」頒布之前，隨橋梁老舊不同，採用之設計規範不同，或隨時間受環境影響而造成劣化現象，可能使部分橋梁無法滿足現行

表1 公路橋梁耐震設計規範沿革

民國43年	民國60~69年	民國76年	民國84年	民國89年	民國98年
中國工程師學會台北分會袖珍工程手冊，台灣地區分兩種震區，地震力係數分別為0.1及0.15。	第一高速公路興建時，依據技術顧問建議，地震力係數分為0.1、0.15及0.2等三種。	「公路橋梁設計規範」有關地震力之規定，主要參考日本道路協會之相關規範訂定。	首次頒布「公路橋梁耐震設計規範」。	經921大地震，修正頒布台灣地區的加速度係數、震區劃分及其反應譜。	依相關研究成果，進行修訂「公路橋梁耐震設計規範」。



圖1 傳統橋梁耐震補強方式

耐震設計規範之規定。由於台灣地震頻繁且環境充滿腐蝕因子，因此為了降低橋梁在地震時損毀的機率，對於既有橋梁有效之耐震補強作業，確有其必要性與急迫性。在傳統實務上，國內橋梁耐震補強較常採用的方式主要包括橋墩補強及基礎補強，其中橋墩補強型式包括增設防落裝置、加長防落長度及橋墩包覆補強等，基礎補強型式則包括地盤改良及基礎擴座等，詳如圖1[1]。

前述方式通常都是針對單一需求進行補強，因此效果較侷限，不易有全面提升橋梁耐震強度之效果，亦有可能影響橋梁景觀。而台灣地區由於耐震規範的演進過程以及特殊的工址環境條件，經常發生老舊橋梁整體耐震強度

及韌性不足，以及跨河橋梁因河床沖刷導致整體穩定性不足等現象。因此，針對台灣地區獨特的橋梁耐震補強需求，本文提出創新且具效率的補強方式，包括結構系統補強與橋梁換底工法等，以改善以往傳統補強工法不足之處。本文介紹之補強工法，可在兼顧橋梁景觀情況下，提升整體橋梁耐震能力；大幅提升補強效益，達到橋梁延壽的補強目標。

## 貳、耐震補強原則及策略

### 一、補強目標

橋梁耐震補強原則應兼顧橋梁之安全性、

表2 耐震補強後橋梁之性能水準

性能水準	安全性	使用性	修復性	
			短期*(服務性)	長期**(安全性)
PLA	結構保持彈性防止落橋	與震前交通機能相同	簡易維修	經常維修
PLB	防止落橋與允許橋柱產生可修復之塑性變形	短期搶修可恢復震前交通機能	依既有緊急搶修工法，完成短期搶修	依既有修復工法，完成長期修復
PLC	防止落橋與避免橋柱過大殘留變形	短期搶修可限重限速恢復通行	更換受損構件或進行結構補強	封閉橋梁，進行局部重建
PLD	防止落橋與避免橋柱崩塌	得禁止通行，以替代道路或臨時便橋取代	得全橋或局部拆除重建	得全橋或局部拆除重建

\*短期搶修：使橋梁恢復服務性；\*\*長期修復：使橋梁恢復至震前之結構安全性

表3 耐震基本理念

地震大小	預期之性能水準	使用年限50年超越機率	地震迴歸期	工址地表加速度
中度地震	結構保持彈性	80%	30年	$0.4S_{DS}/3.25$
設計地震	構件產生塑鉸，發揮容許韌性容量	10%	475年	$0.4S_{DS}$
最大考量地震	結構韌性容量完全發揮，但橋梁不會落橋、崩塌	2%	2500年	$0.4S_{MS}$

表4 橋梁之耐震性能目標

橋梁分類及地震等級	採用之設計規範版本					
	84及89年版		49及76年版		49年版以前	
	一般 $I=1.0$	重要 $I=1.2$	一般 $I=1.0$	重要 $I=1.2$	一般 $I=1.0$	重要 $I=1.2$
中度地震	PLA	PLA	PLA	PLA	PLA	PLA
設計地震	PLB	PLB	PLC	PLC	PLD	PLC

使用性及修復性，故應考量橋梁之耐震性能水準，訂定不同的耐震性能目標，以便研擬出最適切的補強方案。參考交通部公路總局98年研擬「公路橋梁耐震能力評估及補強準則(草案)」(以下簡稱「補強準則(草案)」)以耐震性能為基準之橋梁補強，表示補強後橋梁於不同等級地震作用下有其各別期望之性能水準，依橋梁安全性、使用性與可修復性共定義有四種性能水準，如表2所示。安全性係考慮結構體耐震能力，在地震力作用下必須能保持不產生落橋與橋柱崩塌；使用性係期望地震後橋梁能繼續保有交通運輸與救災服務的功能；修復性則強調在不需大規模拆除重建的原則下，選用經濟合適的修復補強工法恢復橋梁原有功能。至於耐震補強設計需要達到的性能水準，必須依據地震力大小及

橋梁重要程度劃分。對於強度不同的地震，其超越機率、迴歸期、地表加速度及預期之性能水準亦不同，一般而言，耐震設計規範基本理念如表3所示。將其與「補強準則(草案)」進行整合，可依橋梁重要性、橋齡與橋梁現況等因素考量訂定不同之耐震性能目標，如表4所示。橋梁耐震補強方針即可依表3和表4所示耐震性能目標進行補強設計，補強後之橋梁耐震能力需大於規範規定設計地震力 $0.4S_{DS}$  [2] & [3]。

## 二、橋梁耐震性能需求

橋梁耐震性能需求可由三項要素組成：安全性、使用性與修復性。一般而言，設計單位著重於安全性的考量，以相關規範之規定為

主；而道路養護主管機關則對橋梁的使用性與修復性較關心。如就道路養護主管機關觀點來看補強策略，則有不同之考量：

(一) 維持服務機能：對道路養護主管機關而言，震災後首要目標為快速安全的恢復交通。如何使橋梁在震災時損壞最少，將破壞模式控制在可修復範圍，亦即將結構性破壞轉移至一般性破壞，再以快速方式修復，避免拆除重建影響交通及經濟損失。

(二) 易於修復：從修復的觀點，損壞若可控制在容易修復之橋梁構件上，例如伸縮縫、支承及橋台背牆等附屬構件，較易被橋梁養護主管機關接受且易於掌握。如需在主要結構桿件發揮消能機制，例如橋墩墩底，除應滿足設計規範所規定之主筋不得挫屈、不得發生剪力破壞等相關韌性考量外，更需考量破壞模式變位及轉角，以縮短修復橋梁所需時程。

(三) 具備經濟性：經濟性是道路養護主管機關的重要考量因素。目前一般常見之補強工法多採橋墩包覆補強來增加韌性，或以補樁及擴大基礎方式來增加基礎承载力等。此種補強方式雖將各構件補強至規範標準，然所需經費較龐大。為減少經費較大之基礎補強數量，基於強度韌性補強之傳統補強邏輯與工法應值得再討論。例如採功能性支承補強，有可能透過結構系統的改變，避免基礎補強的龐大費用。

### 三、橋梁耐震補強策略

為達成補強目標以滿足橋梁耐震性能需求，耐震評估及補強的流程均須配合前述目標訂定。其中耐震評估流程應將耐震分析分成上部子結構(含橋柱)及基礎子結構(含土壤彈簧)等兩份子結構系統。首先建立上部子結構系統並以靜態側推或非線性動力分析後，再依據地盤種類及性能目標以耐震性能曲線評估橋梁強度及韌性是否足夠；接著以基礎子結構系統進行非線性靜力分析，檢核基礎強度及穩定性，如

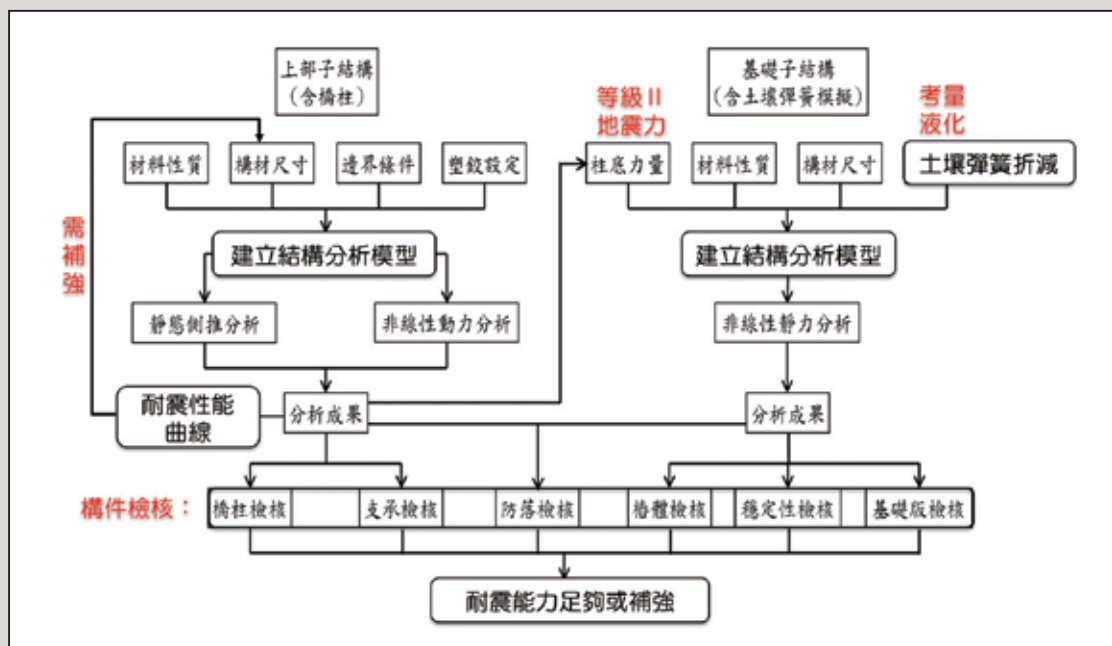


圖2 耐震評估流程

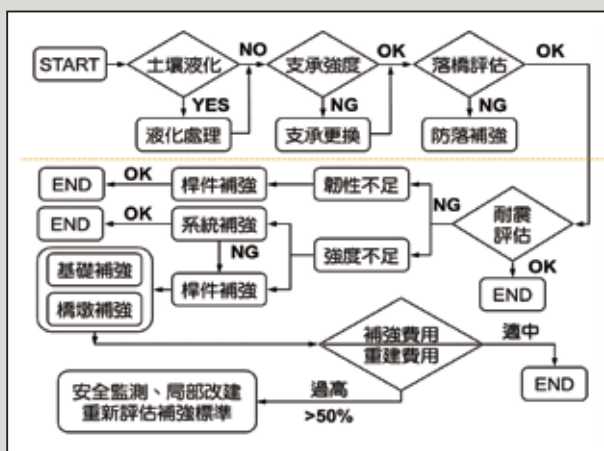


圖3 耐震補強流程

圖2所示。耐震評估後若橋梁必須補強，則依據圖3所示流程進行補強。當韌性不足時，通常可採墩柱包覆等樑件補強方式；當強度不足時，橋墩需補強主筋，常以植筋擴柱、擴大基礎版及補樁方式辦理，所需費用較高且施工範圍大，基礎補強時常因涉及開挖擋土及補樁時橋下空間不足等現地條件而不易施作，因此一般強度補強方式皆優先評估採改變結構系統方式辦理，當採系統補強仍無法達到應補強目標時，再考慮採基礎補強方式。

## 參、系統補強

依據前節耐震補強策略，橋梁強度不足時應先評估系統補強之可行性。本節將以關渡橋引橋耐震補強方式為例[4]，說明系統補強的考量與作法。

### 一、橋梁結構系統

關渡橋八里端引橋P9~P11單元，詳圖4及圖5，經靜態側推耐震評估(pushover)結果顯示行車向P10橋墩強度及韌性不足，需進行耐震能力補強，本橋梁結構體耐震補強之原則是希望能以最適當且經濟的方式提昇耐震能力至規範規定，即維修最小化，並須考量施工之可行性來



圖4 關渡橋引橋P9~P11現況



圖5 關渡橋引橋P9~P11結構系統

選擇適當之方案後，進行補強分析與設計，原橋結構特性說明如下：

(一) 設計年代與性能目標：民國72年竣工，依據民國98年「公路橋梁耐震能力評估及補強準則」，中度與設計地震作用下之性能目標分別為PLA、PLC。

(二) 地震力參數：

1. 新北市八里區，屬台北二區，無斷層近域效應。

2. 震區係數： $D_S^0 = 0.6$ 、 $D_1^0 = 0.78$ 、 $F_a = 1.0$ 、 $F_V = 1.0$ 、 $S_{DS} = F_a D_S^0 = 0.6$ 、 $S_{D1} = F_V D_1^0 = 0.78$ 、 $D_0^0 = 1.3$ 。

(三) 結構斷面

1. 上部結構：跨徑35m+35m，P9~P10間7根預鑄U型梁，P10~P11間6根預鑄U型梁。

2. 下部結構：P9至P11為框架式RC橋墩，而SP1與WP1為單柱式RC橋墩，柱斷面直徑與鋼筋配置如表5所示。

表5 關渡橋引橋P9~P11斷面性質及鋼筋配置

柱編號	P9	P10	P11	SP1	WP1	
柱高(m)	12.6	12.4	9.2	12.85	9.5	
橋墩直徑(m)	2.5	2.3	2.3	2	2	
柱頂配筋 (圓柱)	主筋	72-32D	72-32D	60-32D	72-32D	60-32D
	箍筋	D19@20cm	D16@15cm	D16@15cm	D16@15cm	D16@15cm
柱底配筋 (圓柱)	主筋	108-32D	144-32D	60-32D	144-32D	120-32D
	箍筋	D19@20cm	D16@15cm	D16@15cm	D16@15cm	D16@15cm

(四) 材料強度與結構系統：主梁預力混凝土 $f_c' = 350 \text{ kgf/cm}^2$ ，墩柱混凝土 $f_c' = 240 \text{ kgf/cm}^2$ ，竹節鋼筋 $f_y = 2800 \text{ kgf/cm}^2$ 。結構系統為二跨簡支梁，支承邊界條件為：M-(FF)-M，分析模型取整座橋梁為振動單元進行縱橫向耐震能力評估。

P11，原橋僅P10為固定支承、P9及P11為活動支承。由於軸向地震力主要由P10橋墩承擔，經分析設計地震力下P10橋墩中度地震力下橋墩進入塑性，強度不足，且設計地震力下韌性亦不足，皆需進行橋墩強度及韌性補強，整體評估橋梁耐震能力不足。

## 二、系統補強方式

本工法主要是變更橋梁之結構系統以達到耐震補強的功效，本橋行車向振動單元P9~

依據前節耐震補強流程評估，可採慣性力分散裝置改變結構系統，將其餘橋墩(P9、P11)一併納入分擔地震力，以達反力分散的目的。經現地勘查P11位於公路總局西濱北工程處二棟辦公室之間，詳圖6，補強橋墩時施工空間受限，且需開挖覆土(約2m)至基礎板頂，開挖過程恐影響鄰房安全，因此建議僅在P9橋墩加設慣性力分散裝置，地震下可與P10共同承擔軸向地震力，另配合橋墩鋼板包覆補強橋墩韌性，如此同時提升橋梁強度及韌性，使符合規範規定。補強前後結構分析模式詳圖7。



圖6 關渡橋P11現況

## 三、耐震補強效益

本橋梁單元軸向振動單元，補強前下部結

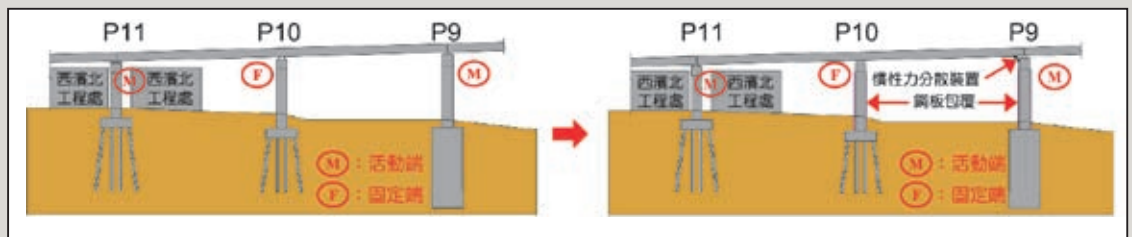


圖7 關渡橋引橋P9~P11補強前後結構分析模式

構僅含橋墩P10、補強後則包括橋墩P9及P10；由於勁度增加，補強前後軸向週期由1.203sec縮短至0.927sec、軸向設計地震力由765t增加至778t。雖然整體地震力增加，但個別柱底反力卻下降，且小於補強後之設計強度(PLB)。表6所列為結構系統補強前後柱底反力比較，以P10-A柱為例，補強後柱底彎矩由4400t-m下降至2519t-m、剪力由306t下降至175t，約為補強前之57%。圖8所示為補強前後P10-A柱之EPA-譜位移關係圖及容量譜曲線，由圖中顯示橋墩P10-A柱於補強前強度與韌性皆不足，補強後在中度地震時可符合PLA耐震性能水準、設計地震

時可符合PLB耐震性能水準(依據表4耐震性能目標，關渡橋於72年完工，設計地震時耐震性能目標僅需達PLC)，顯示本系統補強方式效果顯著。表7為補強前後耐震性能比較。

表7 補強前後耐震性能比較

	耐震性能	
	補強前	補強後
中度地震	>PLA 強度不足	PLA
設計地震	>PLC 韌性不足	PLB

表6 補強前後柱底反力比較

	補強前		補強後	
	M3(T-m)	V2(T)	M3(T-m)	V2(T)
軸向振動周期(sec)	1.2033		0.9271	
軸向地震力係數(Kh)	0.1827		0.1857	
軸向地震力(T)	765		778	
力量比較	M3(T-m)	V2(T)	M3(T-m)	V2(T)
P10-A柱	4400	306	2519	175
P10-B柱	4478	315	2571	181
P9-A柱	0	0	2765	188
P9-B柱	0	0	2500	163
SP1	1944	144	949	71

#### 四、反力分散裝置(消能元件)

本系統補強工法於橋墩P9裝置之反力分散裝置，通常可採用如圖9所示之消能器型式(Shock Transmission Unit, STU)，即可達到補強設計之目的。消能器具有消能、反力分散及基本週期延長等功能，可用於降低或分散上部結構傳遞至下部結構之地震力。STU主要結構包含二部份，一為流體消能腔；另一為錨碇結構。

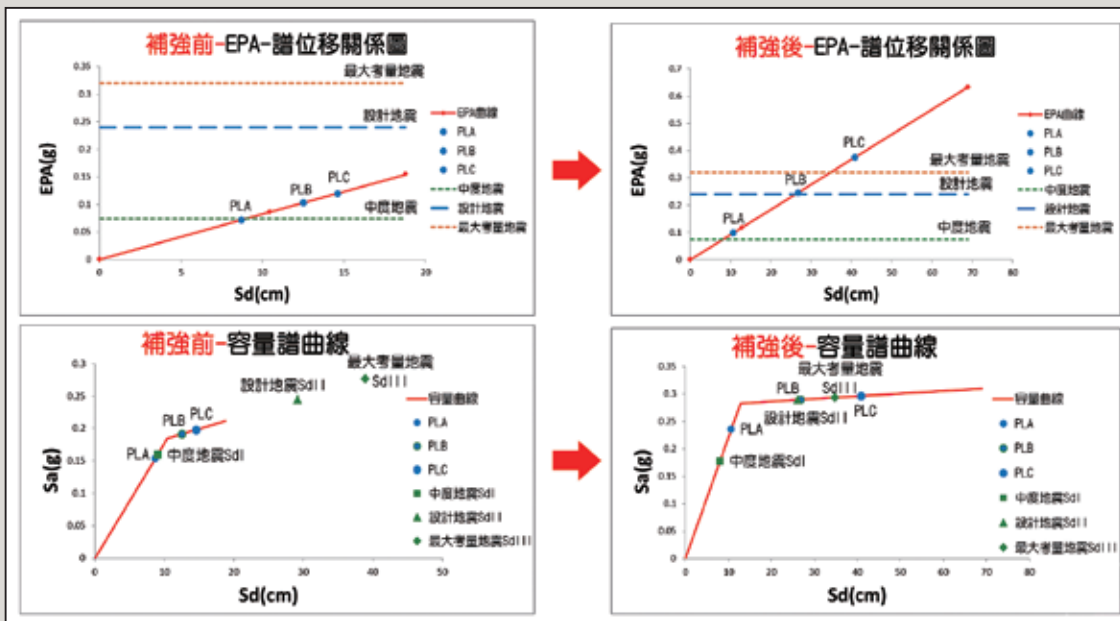


圖8 補強前後EPA-譜位移關係圖及容量譜曲線

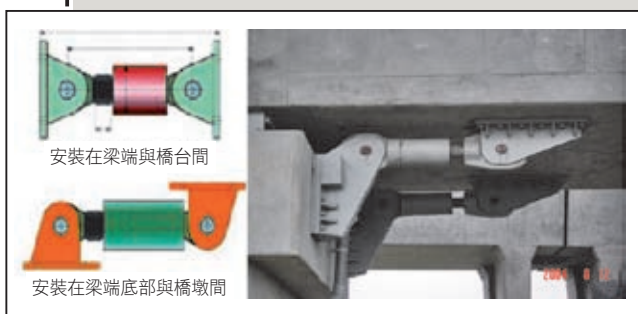


圖9 消能器(STU)之構造

流體消能腔主要由兩個腔室以及活塞所組成，腔室填滿了矽油，矽油藉由經活塞上閥門於左右兩個腔室間流動以消耗承受之動能。STU設置於橋梁上部結構與下部結構之間，其功能為藉由流體阻尼轉化消散地震力引致之瞬間作用力，使得上部結構與下部結構間形成剛性連接(Rigid Link)，並產生鎖定效果(Lock-up Effect)。當STU與所連結之結構物間，因溫差、潛變及乾縮等微變位量累積所產生緩慢之位移時，STU僅提供輕微阻力(≤裝置設計荷載10%)，使得結構保持在活動狀態，使梁結構不會因緩慢收縮之行為而承受額外之力量。

圖9所示之消能器除可作為反力分散裝置外，亦可作為隔減震設施或位移限制裝置，可在耐震設計中提供特定功能，達到耐震目標。

### 肆、換底工法在耐震補強之應用

台灣位屬環太平洋地震帶，並處颱風路徑要衝，不僅地震頻繁，也常遭受水害。加上本島河川坡陡水急，上游常有水壩與攔河堰等攔阻砂石量下輸。造成近年來河川橋梁因河床下降及沖刷而導致橋基裸露愈趨嚴重，並衍生橋梁耐震及耐洪能力不足，而有安全上之疑慮。有鑑於河床加固保護工及橋基加固補強工法仍無法完善解決橋基嚴重裸露所造成之問題，且為因應各種橋梁使用狀況、交通維持需求及施工限制條件等，以及由歷次橋梁洪害經驗的汲

取，對於既有橋梁橋基耐震及耐洪能力提升之問題，有了新的技術發展與思維。其中，橋基換底工法即為在此環境背景下創新的工法，並有實際施工之案例。本文介紹3座目前已完工的換底工法成功案例，包括台1線溪州大橋[5]&[8]、鐵路大甲溪橋[6] &[8]及台61線中彰大橋[7]。由於每座橋梁的工址現況及橋梁結構不同，因此換底工法配合橋梁限制條件不同，而有不同的考量與作法，分別說明如下：

#### 一、台1線溪州大橋

溪州大橋跨越濁水溪，為連接彰化與雲林間之重要橋梁，民國83年2月完工通車，橋長3,030m。為二座獨立並列之預力I型梁橋，每座橋寬13m，總寬26m，主孔跨徑35m。下部結構為單柱式混凝土墩柱，基樁為直徑60cm，長度28m之空心PC樁。本橋完工後歷經了民國85年賀伯颱風及90年桃芝颱風等颱風侵襲，造成固床工嚴重損壞或流失，深槽區河床下降5m以上，橋基嚴重裸露，最大達10m。因橋基嚴重裸露，影響橋梁結構安全，爰辦理台一線溪州大橋橋基加固工程，並以國內創新之橋梁換底工法進行橋基加固，施工過程詳圖10所示，本橋施工步驟為：

- (一) 施築直徑1.5公尺之全套管基樁並於樁頂插入鋼柱。
- (二) 以插入基樁之鋼柱為主幹，架設安全支撐構架及帽梁托架。
- (三) 裝設千斤頂，進行頂升作業，將橋梁載重移轉至安全支撐構架。
- (四) 裝設化學錨栓固定帽梁，使橋梁上部結構之作用力可平均傳遞至帽梁托架。
- (五) 在預定施設新基礎版四周先打設擋土





圖10 溪州大橋換底工法照片

用鋼板樁，再人工拆除原有墩柱混凝土保護層及柱底部。

(六) 基礎開挖至設計深度後，構築新基礎版，並向上續築新橋柱。

(七) 新舊橋柱接合處澆築約3公尺高度之早強無收縮混凝土，以確保不同材齡之混凝土結合良好。

(八) 當新橋柱與原有墩柱完成接合，拆除安全支撐構架及帽梁托架，完成換底。

### 三、鐵路大甲溪橋

鐵路臺中線大甲溪橋跨越大甲溪主河道，橋梁全長約829公尺，共計26跨，民國85年完工。本橋全寬10.5公尺，上構為預力混凝土簡支梁，下構為單柱鋼筋混凝土T型橋柱，基礎則為



照片1：原橋沉箱基礎裸露



照片2：施築新基礎及底柱



照片3：架設鋼斜撐桿件及水平臨時桿件



照片4：施作新帽梁，混凝土包覆鋼斜撐桿件



照片5：舊有墩柱分離，載重移轉至新橋柱



照片6：橋梁換底完成

圖11 鐵路大甲溪橋換底工法照片

沉箱基礎，其中P1沉箱長度為17公尺、P2~P6沉箱長度為24公尺、P7~P13沉箱長度為20公尺、P14~P26沉箱長度則為16公尺。本橋址因上游石岡壩，攔阻砂石量下輸，加上921大地震造成河道地貌大幅改變，使得橋址上游河段北側之河床下降，導致河道束縮、沖刷加劇。民國97年辛樂克颱風豪雨侵襲，造成沉箱基礎裸露，使本橋耐震、耐洪能力及穩定性嚴重不足。為同時解決橋梁耐震能力不足及沉箱裸露洪害問

題，故採換底工法辦理本橋橋基加固保護工程。施工過程詳圖11所示，本橋施工步驟為：

- (一) 裝設監測系統後，再於既有沉箱外側施築全套管基樁，並於頂部插入一節鋼柱。
- (二) 於新基礎施作位置實施降挖，架設地面以上鋼柱，並於沉箱頂部架設沉箱

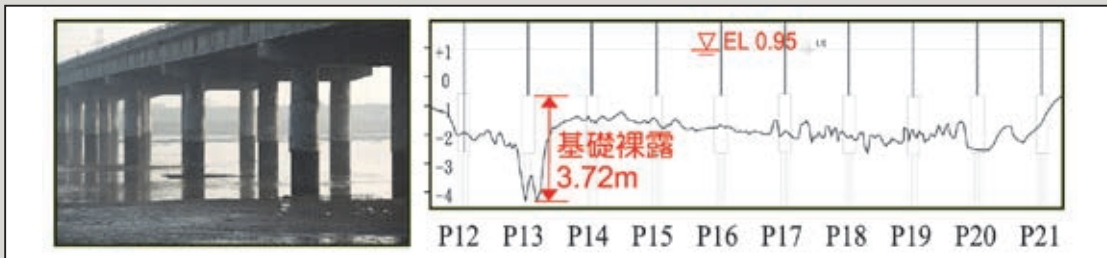


圖12 台61線中彰大橋深槽區橋墩及河床現況

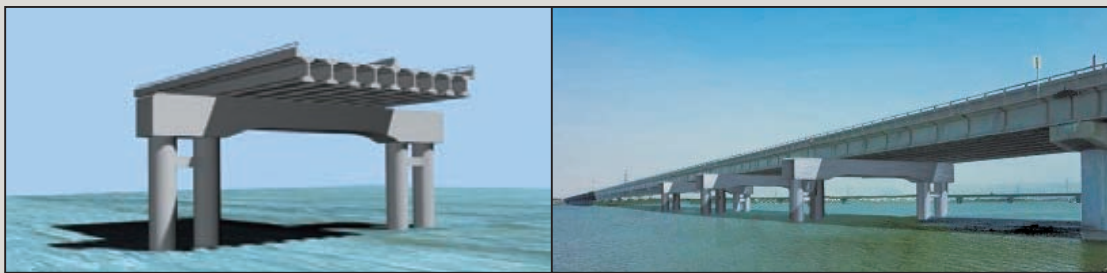


圖13 台61中彰大橋橋換底後模擬圖(本工程設計中)

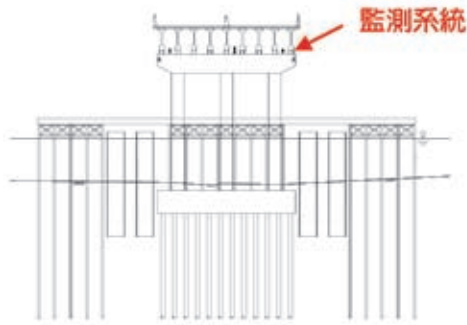
支撐構架。

- (三) 打設擋土設施，並開挖至新基礎設計高程。
- (四) 施築新基礎及底柱後拆除部分沉箱支撐構架，並回填至河床原地面高度。
- (五) 施作上段橋柱，再以混凝土施築橋柱上方兩側帽梁，並預埋鋼斜撐及水平桿件接頭。
- (六) 安裝並固定預埋接頭間之鋼斜撐桿件及水平臨時H型鋼支撐。
- (七) 施作新帽梁並以低震動工法分離舊有墩柱，並拆除新墩柱與舊有沉箱連結之鋼梁。
- (八) 裝設水平橫撐構件，拆除臨時鋼支撐，並以鋼筋混凝土包覆水平橫撐，完成橋基保護作業。

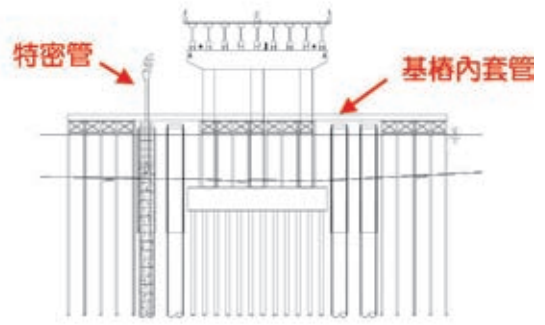
### 三、台61線中彰大橋

台61線中彰大橋跨越烏溪，位於烏溪出海口，民國84年7月完工。橋梁上部結構為預力I型梁橋，下部結構則為鋼筋混凝土框架式橋墩及PC樁基礎。本橋於檢測時發現河道深槽區橋墩中央產生垂直裂縫、鋼筋腐蝕，且河床沖刷、基礎裸露(詳圖12)，橋梁耐震、耐洪能力不足。經由沖刷潛勢分析發現P12~P22基樁裸露風險較高，故以換底工法辦理深河槽區P12~P22橋墩之換底工程，以徹底消除本橋安全疑慮，並提昇整體耐震能力。由於本計畫位於烏溪出海口，橋墩換底範圍常時基礎均位於水面下，平日潮差約4.5m，漲退潮時水流速度快，對下部結構及臨時支撐構架衝擊力大；且橋下空間有限，大型基樁施工機具設備難於橋下作業，因此採用創新之樁柱式橋墩換底工法，並將樁柱配置於橋面投影面積外側，詳圖13。本橋目前尚處於設計階段，完工後將成為首座免設開挖擋土及基礎版之換底工法，施工步驟詳圖14所示。

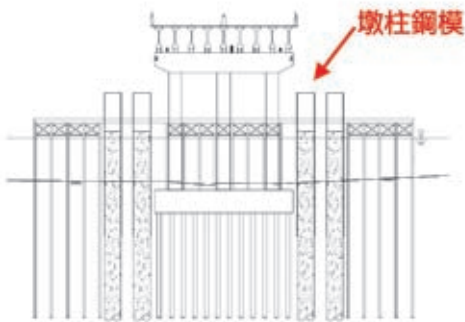
1. 架設施工便橋及構台，並於樁柱預定位置打設內徑2.6公尺之鍍鋅鋼套管。



2. 於鋼套管內施作直徑2.5公尺之全套管基樁至鋼套管頂端後，拔除內套管。



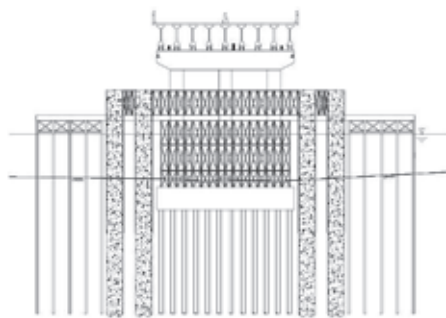
3. 由基樁向上施作樁柱並裝設鍍鋅防撞鋼套管，完成底柱。



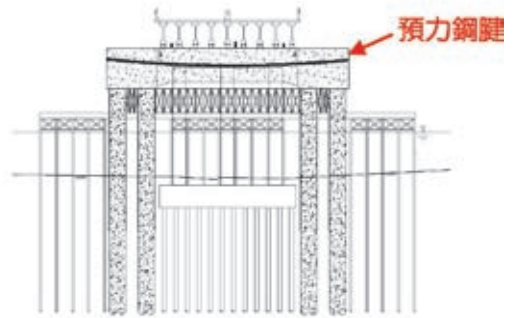
4. 再施作上端新墩柱。



5. 利用既有基礎版頂及構台架設帽梁支撐架。



6. 以混凝土包覆新舊帽梁並施加預力。



7. 以低震動工法分離舊墩柱，拆除帽梁支撐架。



8. 拆除舊有墩柱及基礎，完成橋墩換底作業。

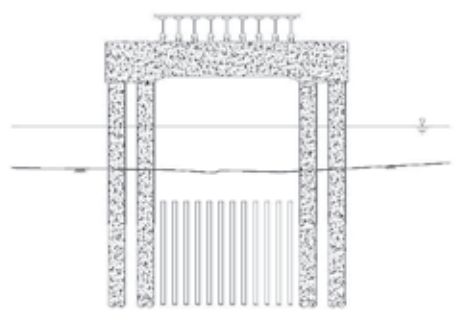


圖14 台61線中彰大橋換底工法施工步驟



圖15 換底工法專利證書

#### 四、換底工法之比較

換底工法之使用必須配合橋梁結構及工址現況條件等因地制宜，故各橋梁換底方式及過程皆有所不同，有關溪州大橋、鐵路大甲溪橋及台61線中彰大橋換底工法的特性及重點考量說明如下：

- (一) 溪州大橋：本橋由於換底時橋齡較新，因此保留原有帽梁及上部墩柱，

表8 各橋梁換底工法之比較

主要差異	台1線溪州大橋	鐵路大甲溪橋	台61線中彰大橋
地質	多為砂質礫石、粉土質砂	砂質礫岩及砂岩	砂土層夾沉泥質黏土
保留原橋結構	上部結構、帽梁及墩柱上部	上部結構及帽梁	上部結構及帽梁
支撐構架	立體鋼構架及帽梁托架	沉箱支撐構架	無
頂升作業	1. 支撐於既有RC帽梁底面 2. 千斤頂頂升帽梁托架	無	無
新舊結合	1. 化錨結合帽梁與帽梁托架 2. 新舊柱間填無收縮混凝土	1. RC帽梁包覆既有帽梁 2. 架設水平及斜撐桿件	以無收縮混凝土包覆既有帽梁並施加預力
下構型式	單柱式橋墩	構架式橋墩	樁柱構架式橋墩
換底順序	先拆後建	先建後拆	先建後拆

將改建範圍最小化，因此有新舊柱接合處理問題。因為採先建後拆方式，故需設置臨時支撐構架，並以頂升作業將原有橋梁載重轉移至臨時構架。本橋為首座成功橋墩換底之案例，本公司並申請獲得專利，如圖15。

- (二) 鐵路大甲溪橋：本橋因屬鐵路橋梁，變位限制較為嚴格，為降低施工風險，採先建後拆方式，且於帽梁與新設墩柱間架設斜撐，以降低舊橋墩拆除時之變位。又由於原橋沉箱基礎較淺，新基礎施工開挖時，需先施作沉箱支撐構架。為首座先建後拆之換底工法案例。

- (三) 台61線中彰大橋：本橋位於烏溪出海口，換底範圍終年有水且潮差大，洪氾期間水流衝擊力強勁，易造成支撐構架及開挖擋土等臨時構造損毀。因此採用無須架設臨時支撐構架及開挖擋土的樁柱式橋墩，以降低施工風險。為首座免設開挖擋土及基礎版之換底工法。

有關溪州大橋、鐵路大甲溪橋及台61線中彰大橋換底工法的比較詳表8所列。

## 伍、換底工法特色

- 一、換底工法可在維持原橋交通的情況下進行，可減少工程推動阻力，並降低因交通維持或車輛改道等社會成本；且可保留原橋上部結構，將改建範圍最小化，節省工程經費。
- 二、對橋基耐洪及耐震能力不足問題，採用更換新橋墩的換底工法，可將具有足夠承載能力的新基礎降至經長期沖刷後之河床面下，改建後的橋梁可符合最新耐震設計規範的要求，與一般橋墩局部補強工法不同。
- 三、本工法拆除橋基裸露部份，可增加通洪斷面、改善河川排洪功能；且新設橋墩可同時兼具橋墩造型，提昇橋梁景觀並延長橋梁使用壽命，提高經濟效益。
- 四、本工法需考量原橋上部結構型式及河川特性。例如，鐵路橋對於變位限制較嚴格，宜採先建後拆方式；或橋址處河川水流沖擊力大，易造成臨時構造物損毀，宜採免設安全支撐構架及開挖擋土之樁柱式橋墩等。
- 五、本工法拆除舊橋柱時，須先以低振動工法分離舊有墩柱，以避免因振動損傷既有結構；載重轉移過程中，須詳細考量橋梁幾何一致以及力量傳遞路徑，避免導致橋梁額外變位。
- 六、換底工法必須針對各橋梁條件研訂嚴謹及詳細的施工步驟與施工管理重點，包括近接施工(新築基樁、人工拆除帽梁頂部使與上部結構分離、拆除橋基部份等)、橋梁安全監測、轉移橋梁載重的千斤頂同步頂升作業、臨時支撐設施的安全強化、新橋基與既有結構間的接合(新舊帽梁或墩柱之結合)等。

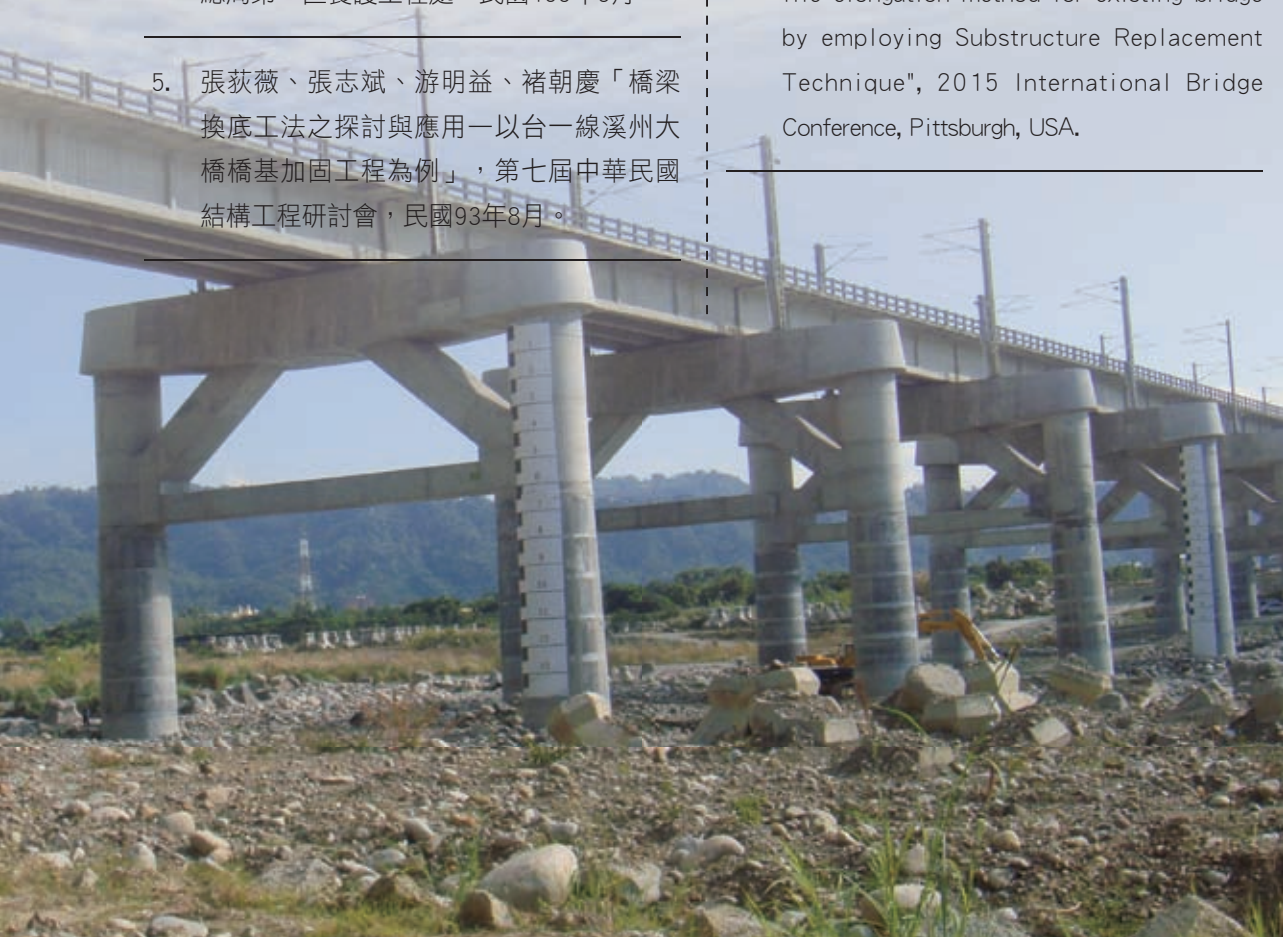
## 陸、結語

本文介紹創新的耐震補強工法，包括結構消能與系統補強、橋梁換底工法等，可突破以往傳統方式效果侷限、無法全面性補強的限制，並滿足台灣橋梁獨特的耐震補強需求；可在兼顧環境景觀情況下，提升橋梁整體耐震能力，大幅提高補強效益。其中結構系統補強，可藉由裝設反力分散裝置或消能設施，降低柱底彎矩與剪力，有效提高耐震性能；而換底工法係將裸露橋基，更換為河床面以下之新基礎，改建後的橋梁除可符合最新耐震設計規範的要求外，亦可改善河川排洪功能、提昇橋梁景觀。以上耐震補強方式，不僅具有顯著補強效益，且皆具有實際施工之可行性。本文尚祈各界先進不吝賜教，希望經過不斷檢討改進，期使老舊橋梁的耐震補強工作，益加精進。



## 參考文獻

1. 陳志鴻、朱坤煌、呂正宗，「橋梁結構耐震補強」中華技術期刊第八十七期(99年7月)。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「新北市橋梁耐震補強工程計畫定稿本」，新北市政府養護工程處，民國102年9月。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「臺北市橋梁耐震評估工作總結報告」，臺北市政府工務局新建工程處，民國103年10月。
4. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「台15線關渡橋耐震能力評估及維修補強委託設計工作 耐震能力評估報告」，交通部公路總局第一區養護工程處，民國105年6月。
5. 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」，第七屆中華民國結構工程研討會，民國93年8月。
6. 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暨第一屆地震工程研討會(101年9月)。
7. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「台61線中彰大橋P2~P62部分橋墩補強、P13~P21橋墩換底工程委託測量、設計及地質探查服務工作初步設計報告」，交通部公路總局第二區養護工程處，民國105年6月。
8. Dyi-Wei Chang, Dzong-Chwang Dzung, Chih-Pin Chang, Ming-Yi Yu, "Seismic and Flood-Resistance capacity promotion and service life elongation method for existing bridge by employing Substructure Replacement Technique", 2015 International Bridge Conference, Pittsburgh, USA.



# 橋梁防災之新觀念—— 東日本311大地震 之回顧與省思

關鍵詞：橋梁、防災、東日本311大地震

台灣世曦工程顧問股份有限公司／副董事長／張荻薇 ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第一結構部／協理／曾榮川 ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／協理／黃炳勳 ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／蘇彥彰 ❹



## 摘要

## ABSTRACT

2011年3月11日14時46分(日本時間)，日本東北地方太平洋外海發生日本有史以來最大規模( $M_w=9.0$ )的地震，並引發巨大海嘯，也造成最高核災等級(Level 7)的核輻射外洩災害。這前所未有的廣域複合式災害，在日本造成生命財產重大的損失。死亡與失蹤者約1萬8千5百人，經濟損失高達16~25兆日圓，嚴重衝擊了日本的社會經濟發展與人民的正常生活。鑒於台灣與日本同屬位居環太平洋地震帶，地理環境及工程建設型態與日本類似，本公司(CECI)於該地震後即積極蒐集相關資料，三度赴日勘災，並於災後三年多赴日進行日本東北地方災後重建現地考察。今年正值東日本大震災災後滿五年，本文特摘要回顧東日本311大地震之橋梁災害、復原與震後復興措施之歷程，兼敘日本於東日本大地震災後之橋梁防災新觀念，提供工程界同好參考。



## 壹、前言

2011年3月11日14時46分(日本時間)，日本東北地區太平洋外海發生 $M_w=9.0$ 地震，震央距日本牡鹿半島東南東約130km、震源深約24km，為日本有史以來最大規模的地震，震源斷層錯動範圍達約500km×200km，並引致大海嘯，湖上高度最大達38m，陸地浸水面積達約560km<sup>2</sup>，造成嚴重且大範圍的災害。海嘯也導致福島第一核電廠嚴重受損，進而引發核輻射災害。依據日本警察廳統計，本次大震災造成眾多建築物損毀或流失，以及道路、橋梁、港灣、機場、儲油槽等設施的損壞，死亡人數近16,000人，失蹤人數仍有約2,500餘人<sup>[1,2,3,4]</sup>，經濟損失高達16~25兆日圓<sup>[5]</sup>，是日本有史以來經濟損失最大的天然災害。

鑒於台灣的地理環境及工程建設均與日本

類似，本次廣域複合式災害應可提供重要且寶貴的經驗與借鏡，CECI在災後2個月，於2011年5月9日~13日組團赴日進入宮城、岩手縣等主要重災區勘災，並提出勘災報告供國內各界參考<sup>[6,7]</sup>；於災後六個月2011年9月15日~17日再度赴日勘察小名浜、大船渡、釜石等地區港灣災損及復建情形，同時綜整相關資料提出震後六個月的勘災報告<sup>[8,9,10]</sup>。同時於災後一年之2012年3月5日~7日至仙台、東松島、石卷、南三陸、氣仙沼、一關、花卷等主要災害地區，勘察與瞭解災後一年的復建與廢棄物處理情形，綜整相關資料提出災後一年勘災報告<sup>[11]</sup>。三度勘災之勘災區域如圖1所示。

於東日本大震災災後逾三年之2014年，為更進一步瞭解日本對於大範圍災區之復舊與復興之推動進程，觀摩與探究國外先進技術與防

災思維及構想，故於2014年10月21日~23日再度組團赴日進行日本東北地方災後重建現地考察，考察地點主要為宮城、岩手縣境內之重

災區，包括仙台、岩沼、石卷、南三陸、氣仙沼、陸前高田、大船渡及田老等地區，災後重建現地考察區域如圖2所示。



圖1 勘災區域示意圖



圖2 災後重建現地考察區域示意圖



圖3 震害橋梁位置示意圖

今年正值東日本大震災災後滿五年，本文特摘要歷次勘災與災後重建現地考察所見，回顧東日本311大地震之橋梁災害、復原與震後復興措施之歷程，兼敘日本於東日本大地震災後之橋梁防災新觀念，提供工程界同好參考。

## 貳、橋梁災害復原與災後復興

本次大地震對橋梁所造成之災害，就災害原因基本上可歸納為由地震直接造成的災害及海嘯造成的災害等兩大類別。本節將分別以橋梁地震災害、橋梁海嘯災害在災後二個月及災後一年之兩次勘災所見摘要整理，藉以說明橋梁災害於災後一年之復舊情形；同時以災後逾三年半時點之勘察所見，說明災區復原之橋梁重建。

### 一、橋梁地震災害與復原<sup>[1,12,13,14]</sup>

歷次勘察所見震害橋梁之位置如圖3所示，破壞之型態與阪神大地震之橋梁震害不同，並無崩塌情形。以下僅就勘察之東北新幹線第1中曾根BL、東北新幹線第2小田原高架橋、東北新幹線花京院橋等，說明東北新幹線之橋梁震害及復舊情形。

#### (一) 東北新幹線第1中曾根BL(圖4~8)

本次橋梁震害以本路段高架橋最為嚴重，此高架橋為立體剛構架結構，破壞位置主要產生於端柱的柱頭部，不僅產生包含剪力破壞的嚴重損毀，並導致柱心混凝土破碎，僅靠主鋼筋支撐。但由於其結構為高度靜不定，未發生倒塌情形。本橋依損壞程度緊急修復，其他未受損橋柱後續則以鋼板包覆作永久性補強。

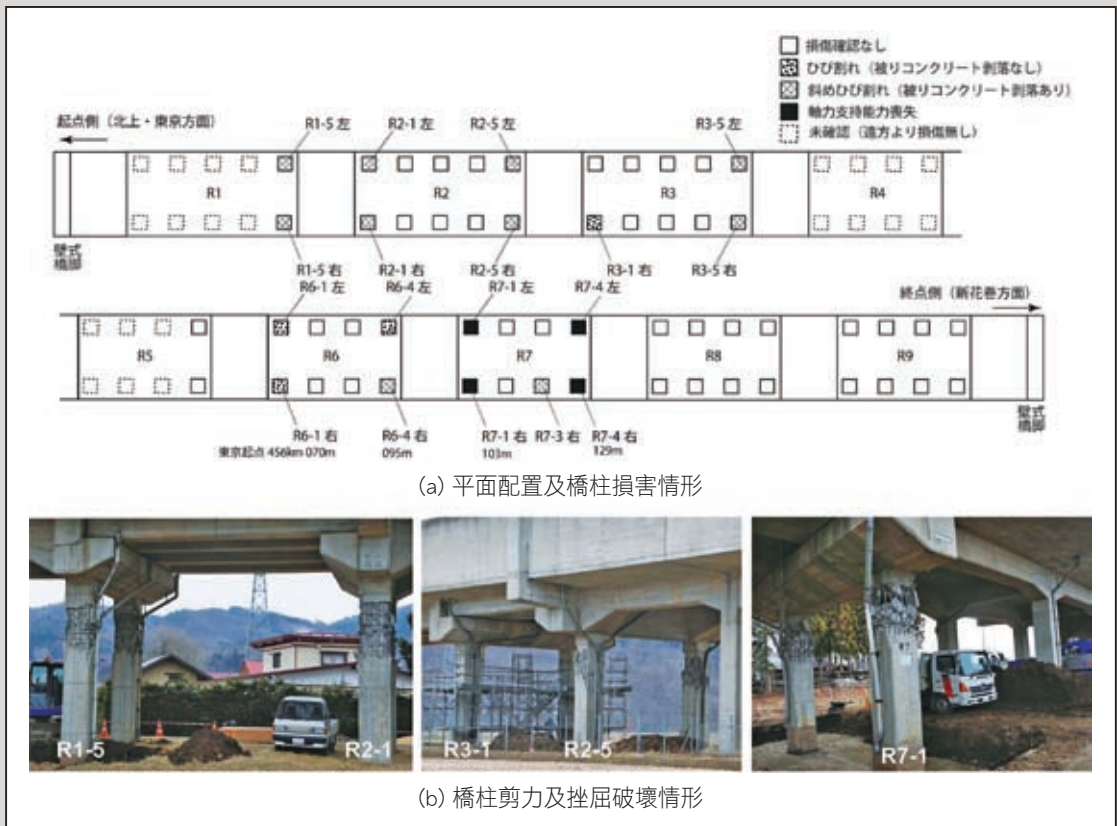


圖4 東北新幹線第1中曾根BL震害

資料來源：高橋良和，“新幹線の被害(主に岩手県内の被害を中心として)”，東日本大震災被害調査団(地震工学委員会)緊急地震被害調査報告會，日本土木学会，2011.04.11

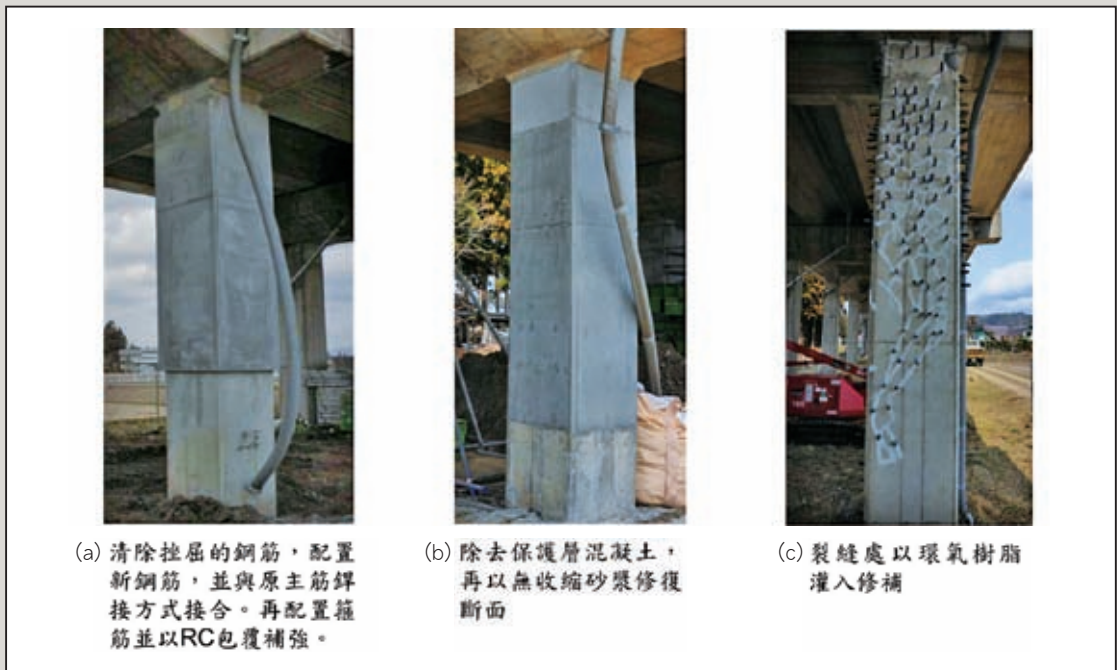


圖5 東北新幹線第1中曾根高架橋震害緊急補強方式

照片(a)來源：高橋良和，“新幹線の被害(主に岩手県内の被害を中心として)”，東日本大震災被害調査団(地震工学委員会)緊急地震被害調査報告會，日本土木学会，2011.04.11



圖6 東北新幹線第1中曾根高架橋震害、緊急補強及永久補強情形(一)

照片(a)來源：高橋良和，“新幹線の被害(主に岩手県内の被害を中心として)”，東日本大震災被害調査団(地震工学委員会)緊急地震被害調査報告會，日本土木学会，2011.04.11



圖7 東北新幹線第1中曾根高架橋震害、緊急補強及永久補強情形(二)

照片(a)、(b)來源：高橋良和，“新幹線の被害(主に岩手県内の被害を中心として)”，東日本大震災被害調査団(地震工学委員会)緊急地震被害調査報告會，日本土木学会，2011.04.11



圖8 東北新幹線第1中曾根高架橋震害、緊急補強及永久補強情形(三)

照片(a)來源：高橋良和，“新幹線の被害(主に岩手県内の被害を中心として)”，東日本大震災被害調査団(地震工學委員會)緊急地震被害調査報告會，日本土木学会，2011.04.11

(二) 東北新幹線第2小田原高架橋(圖9)

位於仙台車站附近，為雙層門架式多跨連續高架橋，多根垂直橋軸方向的中層橫梁產生相似的斜向裂縫。裂縫處以無收縮砂漿或環氧樹脂灌入修補。

(三) 東北新幹線花京院橋(圖10)

與第二小田原高架橋相鄰，為簡支鋼

箱型梁橋。地震造成支承破壞，垂直橋軸方向並產生約15cm位移。緊急修復係以設置臨時支撐座，利用千斤頂推移回復，後續並設置橫向變位限制措施。

(四) 東北新幹線之復舊

JR東日本自阪神大地震以後，第一階段先針對剪力破壞型之橋柱進行耐震補強，新幹線於2007年度完成補強，在來線

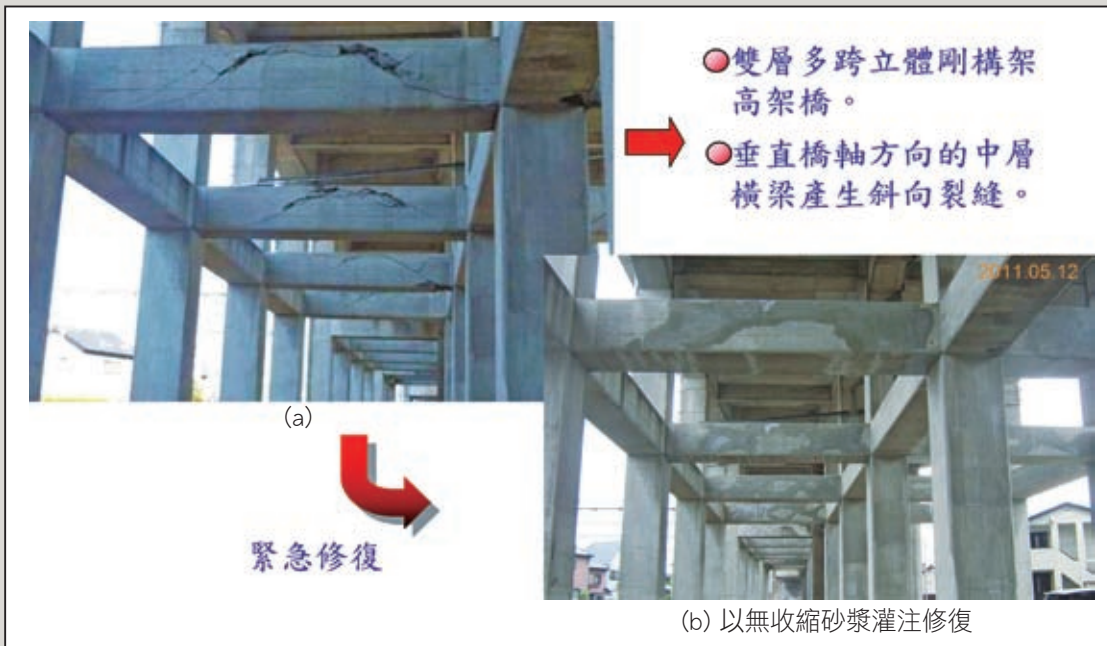


圖9 東北新幹線第2小田原高架橋震害

照片(a)來源：日本土木学会，「土木學會東日本大震災特別委員會總合調査団調査速報會報告」，2011.04.08



圖10 東北新幹線花京院橋震害

照片(a)來源：日本土木学会，「土木學會東日本大震災特別委員會總合調査団調査速報會報告」，2011.04.08



圖11 橋梁海嘯災害位置示意圖

與仙台地區亦於2008年度完成補強；當東日本大地震發生時，JR東日本正進行第二階段之撓曲破壞型橋柱之耐震補強。東北新幹線於本次大地震並無落橋之重大破壞，可歸功於阪神大地震與新潟中越地震以後之持續進行之耐震補強對策之成效。

然而本次地震橋梁產生震害之分布範圍廣，為能儘速恢復通車，採行計畫性之復舊作業，依據損傷程度，橋梁損傷緊急修復方法大致分成三類：

方法1：清除挫屈的鋼筋，配置新鋼筋，並與原主筋銲接方式接合，再配置箍筋並以RC包覆補強。

方法2：除去保護層混凝土，再以無收縮砂漿修復斷面。

方法3：裂縫處以無收縮砂漿或環氧樹脂灌入修補。

而永久修復則以鋼板包覆補強方式為主。

## 二、橋梁海嘯災害與復原

因海嘯所導致之橋梁災害，初步研判主要係因波浪水位超過橋梁，橋梁受浮力及漂流物衝撞，導致遭沖走流失。較高之橋梁因橋下空間可讓水流通過，受損情形較輕微，但阻水的填土路堤，則因抵擋不住海嘯的侵襲而遭沖毀。歷次勘察所見海嘯災害橋梁之位置如圖11所示，以下將就JR氣仙沼線鐵路橋、新北上大橋、歌津大橋及小泉大橋等之災害與復原提出說明。

### (一) JR氣仙沼線鐵路橋(圖12、13、14)

JR氣仙沼線鐵路部份路段係靠海岸佈設，因大海嘯來襲，使得柳津站～氣仙沼站間包括多座橋梁有相當長度的範圍，遭沖毀流失，而當時行駛中的列車亦遭沖走。由於復舊所需經費龐大，且涉及海嘯重災區域整體重建政策及是否改線問題，勘災時可以看到復舊狀態僅止於清除災後廢棄物，大多仍處廢棄狀態。





(a) 散佈漂流廢棄物(2011.05.10)



(b) 漂流廢棄物已清除(2012.03.06)

圖12 氣仙沼線鐵路橋海嘯災害—南三陸町清水浜車站路段



(a) 散佈漂流廢棄物(2011.05.10)



(b) 漂流廢棄物已清除(2012.03.06)

圖13 氣仙沼線鐵路橋海嘯災害—小泉大橋上游路段



(a) JR氣仙沼車站之BRT路線圖(2014.10.22)



(b) 氣仙沼車站BRT公車與電車共站(2014.10.22)



(c) 行駛非專用道之BRT公車(2014.10.22)



(d) 行駛專用道之BRT公車(2014.10.22)

圖14 氣仙沼線BRT臨時復舊

JR氣仙沼線與大船渡線同屬海嘯災害最嚴重之鐵路，受災範圍極廣，復舊牽涉課題複雜且困難，因此目前係以BRT進行臨時復舊。BRT運行路線包括專用道與非專用道，專用道係利用原鐵路路線用地整備而成，另對於鐵路路基受沖毀而復舊困難之路段等，則以非專用道方式行駛於現有公路。

(二) 新北上大橋(圖15)

位於石卷市跨越北上川，橋梁型式為鋼桁架橋，共計6跨，下部結構為RC壁式橋墩。本次海嘯越過橋面，橋面堆滿漂流物，左岸兩跨上部結構被沖毀，橋墩則仍立於原位置。2012年3月6日現勘時，已在沖毀橋段下游側施築便橋，並銜接未被沖毀橋段，維持交通。2014年10月21日現勘時，新北上大橋已經開始進行永久復舊工程之既有橋梁之補修。



(a) 新北上大橋海嘯災害情形



(b) 便橋已完成並通車(2012.03.06)



(c) 永久復舊施工情形(2014.10.21)

圖15 新北上大橋海嘯災害與復舊

新北上大橋之永久復舊自2014年6月開始，以車道全寬8m及人行步道2.7m之配置復舊，復舊工程之橋墩，係利用原海嘯災害受損之橋墩加以修補。

### (三) 歌津大橋(圖16、17)

國道45號歌津大橋共有12跨，上部結構為預力梁橋，下部結構為RC壁式橋墩，建造完成於1972年。本次海嘯災害有中間段8跨上部結構遭沖毀，橋墩則仍立於原位置。由於鄰近有地區道路可供替代通行，因此災後並未於原國道45號路線上施築便

橋復舊。

國道45號歌津大橋路段之永久復舊，納入歌津伊里前地區之城鎮再造計畫，並需與防潮堤、二線堤等計畫作整體考量，因此如圖17所示，國道45號將由災前之藍色原有路線、災後臨時復舊之綠色臨時路線，最終復舊為紅色之永久路線。

### (四) 小泉大橋(圖18、19)

位於氣仙沼市本吉町，為跨越津谷川之國道45號橋梁，橋梁型式為鋼鈹梁橋，



(a) 橋址處堆滿漂流廢棄物(2011.05.10)



(b) 漂流廢棄物尚未清除(2011.05.10)



(c) 漂流廢棄物已清除(2012.03.06)



(d) 橋址橋墩拆除後整地情形(2014.10.21)

圖16 歌津大橋海嘯災害與復舊



圖17 國道45號歌津大橋路段之復舊復興

(資料來源：日本國土交通省東北地方整備局仙台河川國道事務所網站)

共計6跨，總橋長182m，下部結構為RC壁式橋墩，於1974年竣工。上部結構全遭海嘯沖毀流失，部分漂流至上游側約400m處，另河道中央橋墩亦遭沖毀流失。於災後二個月勘察時，原橋址下游側正施築便橋，便橋跨徑與原橋相同，一年後勘察時已完成並通車。

國道45號小泉大橋路段之永久復舊，需與縣之防潮堤、二線堤等計畫作整體考量，因此如圖19所示，於舊有橋梁與便橋之下游側，另行興建橋寬13.3m、橋長455m之7跨連續鋼箱型梁橋。

### 三、災後復興<sup>[15]</sup>

日本東北地區建設中之三陸縱貫自動車道「三陸沿岸道路」，為連結宮城、岩手、青森等太平洋沿岸各縣之總長359km之重要計畫，在東日本大震災發生當時已通車路段約129km，工程進行中約82km，其餘路段則尚處調查階段。由於本路線之規劃根據過去之海嘯災害經驗，將路廊設置於離海岸較遠之高地，因此已通車路段能免於地震與海嘯之災害；同時於本次震

災中，已通車路段除發揮人員支援與物資輸送之緊急輸送道路之主要機能外，對於海嘯淹水範圍擴大之防止、避難場所之提供，亦發揮了附屬之次要機能。

東日本大震災發生後，有鑑於三陸沿岸的高速公路通車率僅有約36%，且廣泛受災之國道45號於災後面臨便道改道與壅塞問題而影響區域復興進度，因此日本政府於「東日本大震災復興構想會議」中將「三陸縱貫自動車道」、「三陸北縱貫道路」、「八戶・久慈自動車道」等道路定位為由東日本大震災邁向早期復興之復興道路(圖20)，提出儘早完成以強化支持地域活動之基礎建設建議案。國土交通省則於2011年7月開始，於二個月內決定未興建路段之路廊，並經評估程序後於2011年11月21日成立預算，開始全線進行工程。至2016年4月，三陸沿岸道路全線359km中，通車路段已達158km，建設中有201km(其中148km為東日本大震災後緊急興建路段)。

以下僅就三陸沿岸道路設計理念及實地考察之大船渡市吉浜復興道路，說明日本東北地區之災後復興建設。

(一) 三陸沿岸道路六項設計理念

1. 強韌性之確保：當大地震與海嘯發生時，面對可能發生之廣域災害，有必要

確保道路之強韌性，以確保道路交通機能而不中斷是重要的。三陸縱貫自動車道之路線有95%迴避海嘯浸水區域，於本次震災中無災情，而能適時發揮救



(a) 下游側便橋施築中(2011.05.10)



(b) 遭沖毀鋼梁漂流至上游約400m處(2011.05.10)



(c) 便橋已完成並通車(2012.03.06)

圖18 小泉大橋海嘯災害與復舊



圖19 小泉大橋之重建

(資料來源：Google網站地圖加筆)



圖20 復興道路與復興支援道路  
(資料來源：日本國土交通省東北地方整備局網站)

災之功能；因此道路選線時迴避海嘯浸水區域，或以具足夠高度之橋梁方式通過，以確保對於災害之強韌性。

2. 低造價之實現：修訂原本之4車道與喇叭型交流道之設計，依據地域之交通狀況

與土地利用狀況，以2車道進行整備，並修訂為簡易(Compact)型之交流道，以期能降低造價全線同時施工。

3. 復興城市規劃之支援：與城市復興計畫及相關聯之土地利用加以整合，在規劃進出匝道時確保復興城市出入之可及性與便利性。
4. 交流道之彈性配置：考量平時與災害時之便利性，針對水產業與工商業設施、防災據點設施等之進出通道，以及連結醫院之緊急車輛出入口等，彈性配置交流道。
5. 避難機能之強化：在本次大震災中，基於三陸沿岸道路提供作為避難場所以及緊急避難道路之連通功能等經驗，因此地方上對於三陸沿岸道路之後續整備，提出須具備災害時之避難機能。因此於規劃上強化道路之避難機能，例如設置緊急避難路與避難階梯等。
6. 災害時道路可通行性之掌握：利用ICT(資訊通信技術)掌握道路之通行可能性，於災害時靈活運用ITS站點與民間行車資訊等，提供駕駛可通行之路徑。

## (二) 大船渡市吉浜復興道路(圖21、22、23)

「吉浜道路」為三陸沿岸道路之一環，由大船渡市三陸町越喜來(三陸交流道)至大船渡市三陸町吉浜(吉浜交流道)，設計速率80km/h，為全長3.6km之汽車專用道路，本路段包括橋梁工程、隧道工程、路堤工程等。

2014年10月參訪之越喜來高架橋，為吉浜道路之橋梁，工程概要如表1。參訪當

時，越喜來高架橋已經完成A1~P1與P5~A2跨徑，於P2~P4橋墩以三組懸臂工作車同時進行施工。吉浜道路於2015年11月29日全線開通，本路段開通後之效益如下<sup>[16]</sup>：

1. 消除不良線形，提升行車性與安全性：該區間路段之國道45號之小半徑( $R \leq 150m$ )及陡坡( $i \geq 5\%$ )之區間佔約3成。常使大型車速度降低，影響行車性，同時也會發生正面對撞之重大事故。經由三陸沿岸道路之整備，可期待能提升行車性，減少重大事故。

2. 確保緊急輸送道路之信賴性：該區間路段常因颱風及集中豪雨引致之土石崩塌而交通中斷，且由於附近沒有替代道路，於311東日本大震災後需繞道遠處，耗時為通常時間的2倍。經由三陸沿岸道路之整備，解除災害時之繞道遠處，形成強韌耐災害而具有高信賴度之路網。

3. 支援緊急醫療確保生活安全：由釜石市之管轄範圍外之緊急醫療轉送，約有四成會經由本區域往南轉送至縣立大船渡醫院，經由本路段開通可迴避線形不良的區

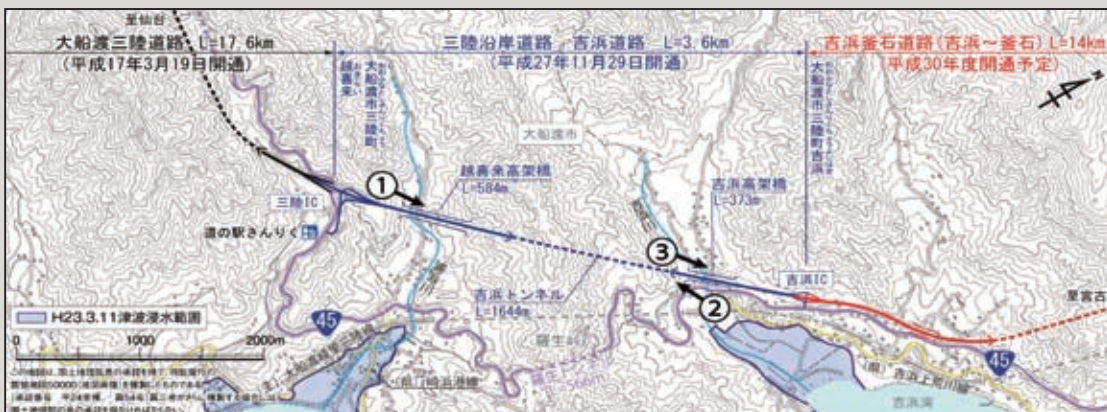


圖21 吉浜道路路線概要圖

(資料來源：日本國土交通省東北地方整備局網站)



圖22 吉浜道路2015年11月29日全線開通

(資料來源：日本國土交通省東北地方整備局網站)



圖23 越喜來高架橋施工考察照片

表1 越喜來高架橋工程概要

參訪工程名稱	國道45號吉浜道路上部工工事 (越喜來高架橋)
路線名稱	國道45號吉浜道路
工程位置	岩手縣大船渡市三陸町越喜來～吉浜
業主	國土交通省 東北地方整備局 南三陸國道事務所
參訪 施工廠商	川田建設・安部日鋼工業・日本高圧 コンクリート 特定建設工事共同企業体
工程內容	六跨徑連續PC箱型梁橋 橋長：584m 橋寬：12.67m

間，提供迅速且安定之緊急醫療支援。

- 支援地區產業之復興：佔全國海帶芽產量四成之岩手縣，約有4成由大船渡市與釜石市生產，經由本路段開通可縮短釜石市至大船渡市加工廠之運送時間，維持海產物之鮮度並提升其品質，有助於地區產業之復興。
- 支援觀光產業之復興：經由三陸沿岸道路之開通，改善區域交通之進出可及性，



配合復興國立公園之指定及震災學習活動之推動，提升區域觀光產業之復興。

## 參、橋梁防災新觀念之發展與導入

2011年日本東北地方太平洋外海發生有史以來最大規模(Mw=9.0)的地震，並引發巨大海嘯，造成廣域之橋梁震害與海嘯災害，從而導引出橋梁設計者於進行橋梁規劃設計時，必須思考並面對超出耐震設計規範所規定假想現象之課題。東日本大地震發生後隔年之2012年，日本道路橋示方書與鐵道構造物等設計標準，同解說之耐震設計編進行了修訂，二者同時於規範條文中要求降低橋梁耐震設計中未考慮現象之危險度，並強調構造計畫之重要性，本節將就此相關修訂要點概述如下。

### 一、道路橋示方書2012年版修訂<sup>[17]</sup>

日本根據阪神大地震之震災經驗，於1996年版之道路橋示方書中全面修訂並強化耐震設計法及其細部規定；同時於2002年版全面修訂為性能規範，增訂確保耐久性之性能條文。如貳、一節所示之橋梁地震災害，根據1996年以後之耐震基準進行設計或補修之橋梁，於本次大地震中並未產生致命性之地震災害，從而確認了新修訂耐震規範提升橋梁耐震性之效果。

然而，本次東日本大地震之規模達超乎預期程度之Mw=9.0，且屬於斷層錯動範圍廣達500km×200km之連動型地震，從而深切認知到有別於以往型態之預期外之地震是有可能發生的。同時，如貳、二節所示之橋梁海嘯災害多為橋梁結構被沖毀流失，除造成交通中斷與災後救災困難外，災後重建復舊又牽涉到地區重建計畫等複雜問題，因此重新體認到道路路網及橋梁建設於規劃階段，即應與地區防災計畫加以整合之重要性。

因此2012年版道路橋示方書之修訂，特別著重於維護管理相關事項以及東日本大震災經驗之因應等規定，摘要說明如下：

#### (一) 維護管理相關事項

##### 1. 強調維護管理之確實性：(共通編 1.3節)

以往的示方書僅規定維護管理之容易性，因此於設計時預先決定檢查之位置，同時考量未來預先設定檢查位置之方便性；但由於未考慮預期外之狀態，無法達成儘量減少維護管理時不可及部位之設計理念。因此本次修訂特別強調於設計階段即應考量維護管理之「確實性」，儘量減少難以進行檢測之部位。

##### 2. 維護管理設施之設置：(共通編 1.6.2節)

設置必要之維護管理設施，以供平時之檢查及事故災害時之橋梁狀態評估調查之用。對於供用期間內預期會進行更新之構件，預先考量可確實且容易進行更新之維護管理之方法與計畫。

#### (二) 東日本大震災經驗之因應

##### 1. 橋址與構造型式之選定：(共通編 1.5.1節)

增訂橋梁建設於計畫階段，對於橋址與構造型式等，應與地區之防災計畫及相關連道路之路網計畫加以整合。橋梁為道路的一部份，橋梁位置的選定須配合路線線形；然而為充分發揮計畫道路之防災功能與災害耐受性，於計畫階段即應考量包括橋梁、路堤路塹等道路構造物之安全可靠。

於路線計畫時若過度重視線形的結果，

往往產生橋梁於設計、施工、維護管理層面上不佳的計畫，例如斜角過小之斜橋、橋寬或曲線變化太大之橋梁、不安定地盤上之橋梁、災害時或預想外之損傷時難以維持通行之橋梁等。因此路線規劃時，應對上述事項特別注意。

## 2. 耐震設計未考慮現象之考量：(耐震設計編2.1節)

雖然影響橋梁耐震性能之強地動發生機制之調查研究持續有所進展，但仍存有未明之點；因此以地震引致橋梁震害之觀點，於耐震設計中已考慮之現象，係根據以往地震震害經驗及相關調查研究為基礎，進行耐震設計之規定；然而即便以過去所觀測到之最強地震來作設計，亦無法否定未來發生超過以往強度地震之可能性。

地震引致而於耐震設計中未考慮之現象，除了超越設計考量地震強度之地震外，其他諸如大規模之海嘯、橋梁周邊之地表斷層變位、邊坡滑動等，亦會造成橋梁之災害。例如2011年日本東日本大地震及2004年印尼蘇門達臘地震後之大海嘯所引致之橋梁沖毀流失，1999年土耳其伊茲米特地震、台灣集集大地震之大規模地表斷層變位所引致之橋梁落橋、2016年熊本地震之大規模邊坡滑動所引致之橋梁崩塌等。由於這些現象之預測技術尚待確立，且在結構上所能因應之範圍與合理性仍有其限度，因此在目前之橋梁耐震設計上仍無法將其充分地納入考量。

因此於本次修訂中，特別重視規劃橋梁構造時之地區防災計畫考量，除須考量地形、地質、地盤條件、工址條件外，亦增訂對於海嘯之考量。對於防災計畫中，於

災後須確保道路路網可通行及須迅速回復機能之橋梁，基於強化減災機能之考量，須於路線之規劃階段，即應對於耐震設計未考慮現象，檢討其發生之風險，並尋求能將風險最小化，使能與區域之防災計畫能一體化。

## 二、鐵道構造物等設計標準・同解說 耐震設計2012年版修訂<sup>[18]</sup>

日本於阪神大地震後之1999年版鐵道構造物等設計標準・同解說 耐震設計(以下簡稱「鐵道構造物耐震標準」)，全面修訂並導入2階段設計法檢核耐震性能之規定。隨著耐震設計相關研究成果之累積，由2006年開始進行1999年版鐵道構造物耐震標準之檢討與修訂準備，並預定於2011年春天頒布；但受到2011年東日本大地震發生之影響，而重新檢視修訂後，頒布了2012年版之鐵道構造物耐震標準。

本次修訂主要包括性能檢核型設計法之轉移、設計地震力之修訂、地震反應值計算方法之修訂、海嘯等「地震隨件事象」之考量等。以下僅就2011年東日本大地震發生後之橋梁防災新觀念之修訂摘要說明。

### (一) 地震隨件事象(2.1節)

2012年版鐵道構造物耐震標準提到之「地震隨件事象」，係指鐵道構造物耐震標準中規定須進行耐震性能檢核之地震力以外，隨伴地震產生而會造成橋梁破損的現象，亦即道路橋示方書中描述之耐震設計未考慮現象。影響鐵道構造物之地震隨件事象，包括鐵道構造物周邊邊坡之滑落、海嘯、地表斷層變位、餘震等。

由於對於地震隨件事象仍有許多未解明之點，因此鐵道構造物耐震標準與道

路橋示方書相同，並未針對地震隨件事象設定為性能目標之檢核對象，而是強調於構造物規劃階段，即應對於這些隨伴地震產生而會造成橋梁破損之現象作適當的考量。亦即，由確保構造物安全性之觀點，對於路線與構造型式作適當之規劃，以減小地震隨件事象之影響。例如路線規劃時即避開海嘯或地表斷層變位之影響區域，無法避開時應選擇能減少其影響之構造型式等。

對於數公尺等級之大規模地表斷層變位或大規模之海嘯，無法單以結構方式因應來確保其安全性，則可導入早期地震警報系統等，以軟體層面及硬體層面之對策加以組合來作因應。例如使列車能儘早停靠於安全處所及確保避難逃生通道等之適切手段，以減少人命傷亡之風險。

## (二) 危機耐性(附屬資料1-1；3.2節)

2012年版鐵道構造物耐震標準導入之「危機耐性」概念，亦即對於危機之耐受性或耐受能力，係汲取於風險管理領域之觀點；進行橋梁規劃設計時，對於超越耐震標準假想等級之地震力或地震隨件事象(危機)，與其探討其發生之機率，不如以會發生為前提，關注其發生後之影響，避免產生毀滅性之破壞而能儘早回復道路橋梁體系之機能(耐性)。

2012年版之鐵道構造物耐震標準所規定之L2地震力，設定為構造物工址之最大等級地震，目前簡易之最大等級假想地震包括斷層最短距離60km、 $M_w=8.0$ 之海溝型地震，以及 $M_w=7.0$ 之內陸活斷層之直下型地震。但無可否認地，目前對於震源地層之破壞過程、破壞領域等仍存在許多不確定之因素，預測結果根據理論不同仍有相

當大的差異，而無法排除超越L2地震力發生之可能性。例如東日本大地震約為4個震源域連動而產生 $M_w=9.0$ 規模之地震，而此規模等級之地震為超越此區域以往所假想可能發生地震規模之「想定外」地震。

因此於2012年版鐵道構造物耐震標準「附屬資料1-1性能檢核之基本考量方式」之敘述中，導入「危機耐性」之新概念；對於構造物之耐震設計，當然應滿足L2地震所要求之性能，但對於超越假想L2地震之巨大地震，亦應具有避免引致災難性破壞之危機耐受性，使整體構造體系之機能可於災後儘早回復。

在2012年版鐵道構造物耐震標準中導入之「危機耐性」，仍屬定性之概念，並未直接構築此項性能之檢核體系，而係於耐震構造規劃階段中加以考量。目前，日本對於危機耐性之耐震設計體系仍在研究發展中，例如於2016年3月1日由日本土木學會主辦之「東日本大震災5周年Symposium」之研討會中，亦有一場會議以「危機耐性之耐震設計體系」為主題，對於試行方案與實際施行可能面對之課題等進行研討。

危機耐性之概念，可將危機耐性與耐震設計視為互補集合之關係來作說明。耐震設計係針對假設之地震力等，檢核構造物之安全性、使用性、復舊性等是否滿足規範所要求之性能；危機耐性為耐震設計之補集合，為減小耐震設計「想定外」現象所引致災害風險之危機耐受性。在耐震設計聯集危機耐性之母集中，對於超越設計地震力之巨大地震，強化耐震設計及耐震補強，可以擴大耐震設計能掌握之範圍，但終究無法將耐震設計之補集合化為零，且須付出相當大的成本代價；因此

在尋求巨大地震災害最小化時，須同時提升耐震餘裕度及危機耐性，減小耐震設計「想定外」現象所引致之災害風險。提升危機之耐受性以減小危機災害之風險，除包含結構層面之硬體對策外，亦包含構造計畫等軟體層面之因應方式。因此在2012年版鐵道構造物耐震標準中，於2.2節強調了耐震構造計畫之重要性，於橋梁規劃階段，即應對於地震隨件事象加以考量，以提升橋梁構造之危機耐性。

## 肆、結語

日本311東日本大地震，不僅引發巨大海嘯，並導致核電廠發生嚴重的核輻射外洩災害，是一種前所未有的廣域複合式災害，除災害發生當時救災困難外，災後仍面臨重建艱難、復興進程緩慢等複雜問題，與1995年阪神地震後能迅速復建，有相當大之差別；因此日本政府於2014年6月3日內閣會議中訂定了「國土強韌化基本計畫」，以人命保護、國家社會重要機能可維持而不遭受致命性破壞、國民財產及公共設施災害最小化、迅速復舊與復興等為計畫目標。為實現國家社會對於災害耐受之強韌性，在基本施行方針上需要硬體層面與軟體層面相互配合；因此，作為生命線道路之橋梁，對於災害發生時之「危機耐性」更加顯得重要。

由東日本大地震之橋梁地震災害了解到，根據1996年以後之耐震基準進行設計或補修補強之橋梁，於本次大地震中並未產生致命性之地震災害，從而確認了現今耐震規範對於橋梁耐震性提升之效果，以及耐震補強之重要性。也因為從阪神大地震以後至東日本大地震發生前，持續推動的橋梁耐震設計強化與既有橋梁結構補強，方能於短短一周內以「梳齒作戰」方式搶通幹線道路，進入廣達數百公里的東北地方沿太平洋岸之海嘯重災區，順利進行緊急

救援與緊急復舊。基於此次震災之寶貴經驗，日本國土交通省積極推動日本全國土高規格幹線道路之整備，提高都市間移動之速達性，經由替代路網之建設提升抗災能力，以為未來可能再次發生之廣域災害作準備。

然而由超乎預期規模之地震以及所引致發生之海嘯橋梁災害體認到，對於可能發生之「地震隨件事象」，現行耐震規範仍有不足之處。因此為了提升橋梁之「危機耐性」，減小「地震隨件事象」造成災害之風險，除了加強橋梁構造設計之硬體層面考量外，仍須於橋梁規劃階段就針對橋梁工址中可能發生之「地震隨件事象」加以考量，分析橋梁在產生預期外破壞情況下之可能損壞過程，藉由提高橋梁構造之贅餘度以確保其強韌性，同時輔以軟體層面之適切道路橋梁構造計畫之考量，與地區防救災計畫相結合，方能於災害發生時仍能發揮道路橋梁於原規劃設計時所設定應具有之防救災功能，從而有助於達成國家社會對於未來廣域複合式災害之強韌化。

## 伍、誌謝

歷次災後勘災復建考察團隊承蒙大日本コンサルタント株式会社(Nippon Engineering Consultants Co., LTD.)、日本工營株式会社(NIPPON KOEI)之協助安排與專人陪同，同時獲得各參訪工區之各單位協助，包括川崎重工業株式會社東北支社、石卷市復興事業部、株式會社安部日鋼工業東北支店、古河産機システムズ株式會社東北支店、川田建設・安部日鋼工業・日本高圧コンクリートJV、田老まちづくりJV工務事務所、大島汽船等的鼎力協助，謹致謝意。

另為使本文內容更完整，以達成防災教育、防災研究及災害防治等社會公益目標，文內部份圖表、照片參考引用相關地震紀錄、災

害測報及災害照片等各方勘災及刊登之資料，在此謹向這些引用單位(如文內資料來源所示)的日本各學術團體、學協會、研究機構、雜誌刊物及政府機關等單位表示誌謝之意，也期望此次大地震的災後重建能早日順利完成。

## 參考文獻

1. 日本土木學會，“土木學會東日本大震災特別委員會總合調查團調查速報會報告”，2011.04.08。
2. 日本東北大學，“東北大学による東日本大震災1ヶ月後緊急報告会報告”，2011.04.13。
3. 日本氣象廳網站：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>。
4. 日本警察廳網站：<http://www.npa.go.jp/>。
5. 日本內閣府網站：<http://www.bousai.go.jp/>。
6. 張荻薇、曾榮川、王泓文、蘇彥彰，“2011年東日本大震災—勘災說明會資料集”，台灣世曦專題講座，台灣世曦工程顧問股份有限公司，2011.07。
7. 張荻薇、曾榮川、王泓文、蘇彥彰，“2011年東日本大震災勘災報告”，中華技術，第91期，財團法人中華顧問工程司/台灣世曦工程顧問股份有限公司，2011.07.31。
8. 張荻薇，“2011年東日本大震災—廣域性複合式災害”，2011年結構與地震工程研討會，中華民國結構工程學會，2011.12.10。
9. 張荻薇、廖學瑞、丁金彪，“2011年東日本大震災—震後六個月(港灣及海岸)”，台灣世曦專題講座，台灣世曦工程顧問股份有限公司，2012.01。
10. 張荻薇、廖學瑞、丁金彪、何泰源、陳俊樺、蘇彥彰、周永川，“2011年東日本大震災震後六個月勘災報告”，中華技術，第93期，財團法人中華顧問工程司/台灣世曦工程顧問股份有限公司，2012.01.31。
11. 張荻薇、周功台、曾榮川、蘇玫心、蘇彥彰、張鈺輝，“2011年東日本大震災災後一年勘災報告”，中華技術，第95期，財團法人中華顧問工程司/台灣世曦工程顧問股份有限公司，2012.07.31。
12. 日本土木學會，“土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書”，2011.05.09。
13. 日本土木學會地震工學委員會，“土木學會東日本大震災被害調査團(地震工學委員會)緊急地震被害報告會報告”，2011.04.11。
14. 日本國土交通省網站：<http://www.mlit.go.jp/>。
15. 日本國土交通省東北地方整備局網站：<http://www.thr.mlit.go.jp/>。
16. 日本國土交通省東北地方整備局南三陸國道事務所，吉浜道路開通記者發表資料，2015.10.07。
17. 日本道路協會，道路橋示方書，2012年版
18. 日本鐵道總合技術研究所，鐵道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012年版

# 公路橋梁耐震 評估與補強規範 之演進

關鍵詞：性能水準、性能目標、耐震補強

台灣世曦工程顧問股份有限公司／總經理／王炤烈 ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／經理／蔣啟恆 ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／戚樹人 ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／蘇進國 ❹

桶頭橋

烏溪橋

石圍橋

名竹大橋

## 摘要 ABSTRACT

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。考量台灣位處環太平洋地震帶，地震頻仍，民國88年921集集大地震及今年的0206美濃大地震均造成國內重大經濟和人民財產損失，尤其集集地震造成許多橋梁為之損毀、交通運輸之中斷，救援資訊、人力、物品無法及時運送，其所產生後續之損失往往倍數於地震發生瞬間產生的災損。因此，對於現有橋梁安全評估及有效之耐震補強作業，除能於未來地震發生時，降低因橋梁損毀，造成交通運輸中斷，社會經濟衝擊之機率外，保持道路橋梁之暢通，更能大幅減少地震後所導致之國家總體損失，同時能加速災後工商業社經活動之恢復腳步。爰此，本文將簡述國內橋梁耐震評估與補強相關規範之演進歷史及緣由，冀能供為橋梁工程實務及學術研究之參考。



## 壹、公路橋梁耐震設計規範演進

交通部始於民國76年頒布「公路橋梁設計規範」，並開始規定橋梁之設計地震力，當時規範僅考量容許應力設計法及強度設計法，對於構材之韌性階段未作著墨。民國84年頒布「公路橋梁耐震設計規範」開始著重韌性設計之觀念，並按各種不同結構系統之韌性行為作為地震力折減之依據，以決定其設計地震力；該規範之耐震設計理念除須符合在工址回歸期475年之大地震作用下，橋梁不得崩塌之原則外，尚須考量在中度地震作用時，橋梁結構不得過早降伏，另外並配合相關耐震構造細節之嚴格規定來確保結構韌性。民國88年發生921集集大地震後，交通部為因應全台實際震度狀況，於民國89年4月修訂橋梁耐震設計規範部

分章節，除震區重新劃分外，另製作台北盆地之加速度反應譜，並增列設計垂直地震力之規定，及增列水平雙向地震效應與垂直地震效應之組合等規定。而民國98年6月所頒布之橋梁耐震設計規範係依地震危害度分析所得最新之研究成果，並參考活動斷層位置與過去大地震發生之紀錄，重新整合工址加速度係數( $Z$ )與正規化加速度反應譜係數( $C$ )，改以設計地震水平譜加速度係數( $S_{D}$ )進行震區劃分，且新增「鋼橋墩構材之韌性要求」及「隔震與消能設計」章節。相關耐震設計規範之演進詳如表1所示。

表1 公路橋梁耐震設計規範背景說明一覽表

年代	設計規範	設計地震力	重要沿革或變更說明	防落橋設施
76年以前	<ul style="list-style-type: none"> <li>43年中國工程師學會編印之袖珍工程手冊訂定</li> <li>49年交通部頒「公路橋梁工程設計規範」</li> <li>63年內政部頒「建築技術規則」</li> </ul>	(I) 43年： $V=K_h \cdot W$ $(K_h=0.1$ 弱震區及 $0.15$ 強震區，詳圖1) <ul style="list-style-type: none"> <li>V：設計地震水平力</li> <li><math>K_h</math>：水平地震力係數</li> <li>W：靜重</li> </ul> (II) 63年： $V=K_h \cdot W$ $(K_h=0.075$ 弱震區、 $0.1$ 中震區及 $0.15$ 強震區，詳圖2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>本階段建造之橋梁，部分橋梁設計資料無可考，部分橋梁由橋梁工程師依據學理及設計規範自行設計。</li> <li>63年~68年公路局編製公路橋梁設計範例(一)~(三)供橋梁工程師設計參考。</li> <li>72年~74年公路局編製橋梁工程標準圖(RC版橋、RCT梁橋、PCI梁橋及下部結構)供橋梁工程師設計參考。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部分橋梁未設置防落橋裝置。</li> <li>72年橋梁工程標準圖附有剪力鋼棒及止震塊標準圖，部分橋梁已配合設計剪力鋼棒及止震塊等防落橋裝置。</li> </ul>
76年 ~ 84年	<ul style="list-style-type: none"> <li>76年交通部頒「公路橋梁設計規範」</li> </ul>	$V=K_h \cdot W=$ $\begin{cases} ZSIC_o \cdot W (h \leq 15m) \\ \beta ZSIC_o \cdot W (h > 15m) \end{cases}$ $\geq 0.1W$ $(K_h \text{約}=0.1 \sim 0.27)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>Z：震區係數(0.6、0.8、1.0及1.2)</li> <li>S：地層係數</li> <li>I：重要性係數</li> <li><math>C_o</math>：標準設計震力係數</li> <li><math>\beta</math>：調整係數</li> <li>W：靜重</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>主要係依AASHTO1977年版為藍本，並參照1983年版進行修改。</li> <li>開始納入耐震理論觀念，並將地質與動力反應因素列入考量。</li> <li>80年公路局修訂橋梁工程標準圖(RC版橋、RCT梁橋、PCI梁橋)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大部分橋梁已參考橋梁工程標準圖設計剪力鋼棒及止震塊等防落橋裝置。</li> </ul>
84年 ~ 89年	<ul style="list-style-type: none"> <li>84年交通部頒「公路橋梁耐震設計規範」</li> </ul>	$V = \frac{ZI}{1.2\alpha_y} \left(\frac{C}{F_u}\right)_m W$ <ul style="list-style-type: none"> <li>Z：工址地表水平加速度係數(0.18、0.23、0.28及0.33，詳圖3)</li> <li>I：用途係數(1.0及1.2)</li> <li>C：工址正規化水平加速度反應譜(分第一、二、三類地盤及台北地盤)</li> <li><math>F_u</math>：結構系統地震力折減係數</li> <li><math>\alpha_y</math>：起始降伏地震力放大倍數</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐震設計係以面對工址回歸期475年地震為目標。</li> <li>橋梁結構須作韌性設計。</li> <li>須考量水平兩直交方向地震效應之載重組合。</li> <li>72~84年公路局編訂之橋梁工程標準圖已不符84年版耐震設計規範。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大部分橋梁防落長度符合84年規範規定並設置剪力鋼棒及止震塊等防落橋裝置。</li> <li>部分橋梁加設防震拉條。</li> </ul>
89年 ~ 98年	<ul style="list-style-type: none"> <li>89年交通部頒「公路橋梁耐震設計規範」部分章節修正</li> </ul>	$V = \frac{ZI}{1.2\alpha_y} \left(\frac{C}{F_u}\right)_m W$ <ul style="list-style-type: none"> <li>Z：工址地表水平加速度係數(0.23及0.33，詳圖4)</li> <li>I：用途係數(1.0及1.2)</li> <li>C：工址正規化水平加速度反應譜(分第一、二、三類地盤及台北地盤)</li> <li><math>F_u</math>：結構系統地震力折減係數</li> <li><math>\alpha_y</math>：起始降伏地震力放大倍數</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>考量921集集大地震發生規模，修正工址地表水平加速度係數。</li> <li>橋梁新增考量垂直地震力。</li> <li>須考量水平兩直交方向及垂直方向地震效應之三方載重組合。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋梁防落長度須符合規範規定並設置剪力鋼棒及止震塊等防落橋裝置。</li> <li>部分橋梁加設防震拉條。</li> </ul>



年代	設計規範	設計地震力	重要沿革或變更說明	防落橋設施
98年 迄今	<ul style="list-style-type: none"> <li>98年交通頒「公路橋梁耐震設計規範」</li> </ul>	$V_D = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left( \frac{S_{aD}}{F_{uD}} \right)_m W$ $V_M = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left( \frac{S_{aM}}{F_{uM}} \right)_m W$ $V_{min} = \frac{IS_{aD}}{3.25\alpha_y} W$ $V = \text{Max}(V_D, V_M) \geq V_{min}$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>S_{aD}</math>：設計地震水平譜加速度係數</li> <li><math>S_{aM}</math>：最大考量地震水平譜加速度係數</li> <li>I：用途係數(1.0及1.2)</li> <li><math>F_{uD}</math>：設計地震結構系統地震力折減係數</li> <li><math>F_{uM}</math>：最大考量地震結構系統地震力折減係數</li> <li><math>\alpha_y</math>：起始降伏地震力放大倍數</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分一般工址、活動斷層近域及台北縣市區域三種情況計算。</li> <li>台北盆地設計地震微分區劃分由原先1區調整為3區。</li> <li>橋梁振動單元垂直地震力由上部結構與下部結構分開計算。</li> <li>橋梁結構須作韌性設計。</li> <li>針對鋼材材質、橋柱細部及接頭細部作原則性說明。</li> <li>詳細規定隔震相關設計、分析及試驗標準。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋梁防落長度須符合98年規範規定並設置剪力鋼棒及止震塊等防落橋裝置。</li> <li>部分橋梁加設防震拉條</li> </ul>

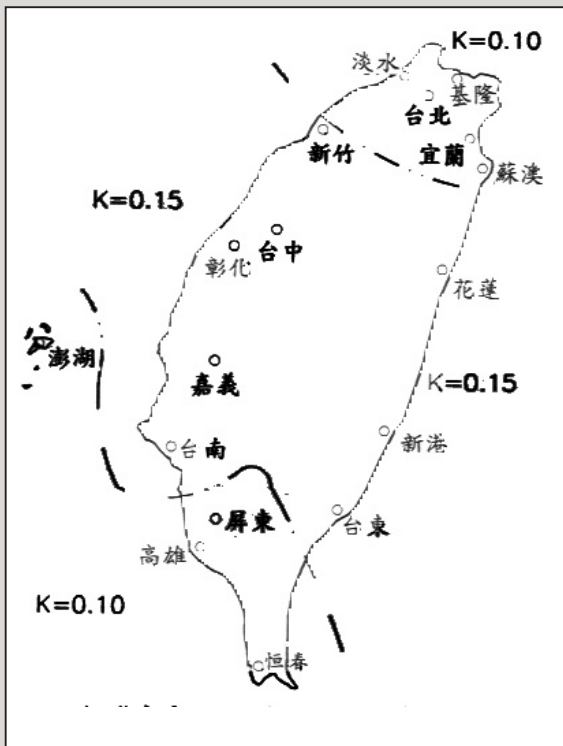


圖1 民國43年中國工程師學會編印之震區劃分圖

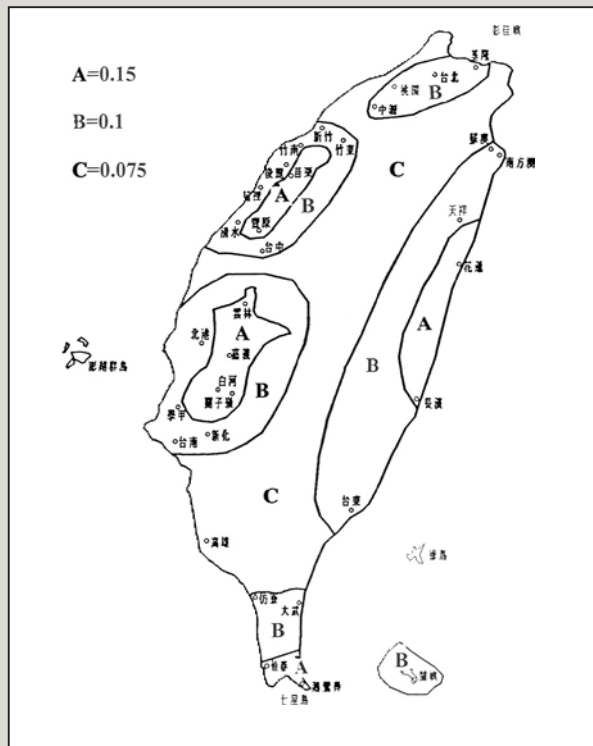


圖2 民國63年內政部頒佈建築技術規則之震區劃分圖

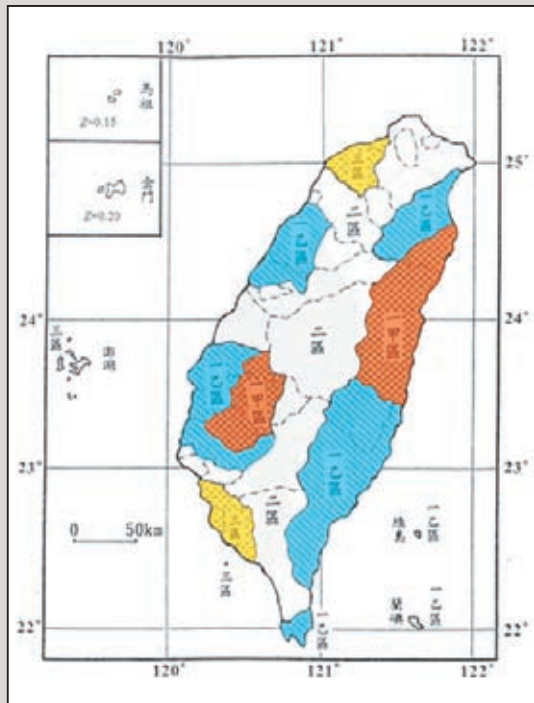


圖3 民國84年橋梁耐震規範之震區劃分圖



圖4 民國89年橋梁耐震規範修正後之震區劃分圖

## 貳、橋梁耐震能力評估與性能目標探討

### 一、電信與運輸系統之耐震安全評估與補強準則

民國85年交通部委託台灣大學地震工程中心研擬之「電信與運輸系統之耐震安全評估與補強準則」係為最早確立的耐震評估標準。其主要係以結構之尺寸、配筋與設計材料強度為依據，針對正規化加速度反應譜係數、結構系統地震力折減係數、工址水平加速度係數以及對韌性設計相關需求，計算橋梁結構之強度

與韌性，並以此來決定其發生各種破壞模式時所對應的地震地表加速度值，進而判別原結構是否需進行補強。評估之各種破壞模式，應包括根據強度、韌性所推估之破壞模式，以及落橋、支承破壞、土壤液化等之破壞模式，在求出橋梁在各種破壞模式下所對應之崩場地表加速度，再以危害度評估之觀念，求出橋梁在預期使用年限內所對應之設計地表加速度，以此為標準評估橋梁耐震能力是否足夠。橋梁耐震能力評估方法及步驟(如圖5)如下：

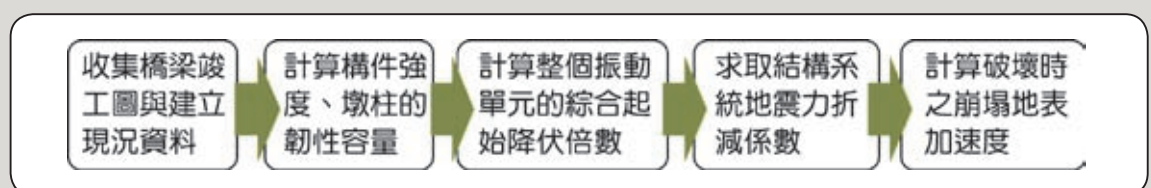


圖5 耐震安全評估與補強準則之橋梁耐震能力評估流程

### (一) 確立耐震評估標準

現有橋梁型式依據地震危害度推估尚可使用年限為T年，則其耐震能力足夠與否的標準係以T年內超越機率10%之地震地表加速度為準。其對應的回歸期 $T_r$ 依下式計算：

$$T_r = \frac{1}{1 - 0.97^T}$$

而回歸期 $T_r$ 對應之地表加速度值 $a_{gr}(g)$ 可由下式推算：

$$\frac{a_{gr}}{a_g} = \left(\frac{T_r}{475}\right)^k$$

上式中 $a_g(g)$ 為使用年限50年內超越機率10%之475年回歸期之地表加速度值，k值介於0.30至0.45之間。橋梁再使用年限內之耐震評估標準，係以其回歸期 $T_r$ 計算對應之設計地表加速度值 $a_{gr}(g)$ ，再加乘橋梁重要性係數(I)。

### (二) 墩柱剪力容量檢核

計算地震時墩柱剪力容量，係依墩柱實際尺寸及箍筋配置情況，並且配合各項材料實測強度，計算出柱斷面之標稱剪力強度。對於墩柱反覆彎矩作用形成塑鉸時，倘若墩柱軸力過小，將會使得混凝土的抗剪能力急遽降低，因此在墩柱構材降伏後，依據規範規定計算塑鉸區之剪力強度及檢核。

### (三) 建立結構分析模式

利用有限元素分析程式建立橋梁結構數值模型，經符合橋梁真實受力之靜力分析後，求得靜載重作用下柱底之軸力與彎

矩值，並求出在0.1g地震地表加速度作用下，彈性分析所得之墩柱軸力與彎矩值。

### (四) 各破壞模式崩塌地表加速度推估

分別計算橋梁在各個破壞模式下所對應的地表加速度值，包含：(A) 根據構件強度、韌性推估之破壞；(B) 落橋破壞模式之耐震能力；(C) 支承破壞模式之耐震能力；(D) 基礎結構之耐震能力；(E) 液化潛能評估。其中，分析流程首重整個振動單元的綜合起始降伏倍數及結構系統地震力折減係數之評估。

## 二、公路橋梁耐震評估及補強準則(草案) (省道公路橋梁)

交通部公路總局委託台灣世曦工程顧問股份有限公司於97年9月完成「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」成果報告，後續公路總局委託國家地震工程研究中心於98年12月完成「公路橋梁耐震評估及補強準則之研究」成果報告及訂定準則草案，於草案中橋梁可依據安全性、服務性與可修復性，定義出PL3、PL2、PL1、PL0等四種性能水準，如表2所示。耐震性能水準PL3代表橋梁之降伏點，與表中所述結構保持彈性相同；耐震性能水準PL2代表橋梁已產生塑性變形，惟其量達至極限點全部塑性變形之1/3(若台北盆地為1/4)，與表中所述允許橋柱產生可修復之塑性變形相同；耐震性能水準PL1代表橋梁已產生塑性變形，惟其量達至極限點全部塑性變形之2/3(若台北盆地為1/2)，與表中所述避免橋柱過大殘留變形相同；耐震性能水準PL0代表橋梁已產生塑性變形，惟其量達極限點全部塑性變形(若台北盆地為3/4)，與表中所述避免橋柱崩塌相同。若以結構受力與變形關係描述各性能水準，可簡示如圖6所示。

表2 橋梁之性能水準

性能水準	安全性		修復性	
			短期(服務性)	長期(安全性)
PL3	結構保持彈性防止落橋	與地震前交通機能相同	簡易維修	經常維修
PL2	防止落橋與允許橋柱產生可修復之塑性變形	短期搶修可恢復震前交通機能	依既有緊急搶修工法，完成短期搶修	依既有修復工法，完成長期修復
PL1	防止落橋與避免橋柱過大殘留變形	短期搶修可限重限速恢復通行	更換受損構件或進行結構補強	封閉橋梁，進行局部重建
PL0	防止落橋與避免橋柱崩塌	得禁止通行，以替代道路或臨時便橋取代	得全橋或局部拆除重建	得全橋或局部拆除重建

此外，橋梁耐震性能目標之基本原則為中度地震下橋梁結構須保持彈性，震後無明顯之損壞及不需修復且可保有震前之交通機能；設計地震下橋梁依橋齡及用途係數容許產生不同程度之損傷，但須避免產生落橋或崩塌。民國97年新版耐震規範頒布後，當時省道公路橋梁之補強標準係依公路橋梁耐震評估及補強準則(草案)，考量不同橋齡之設計年代，將既有橋梁以其所採用之設計規範區分為三類，分別為：

- (一) 採用84年版或89年版部頒耐震設計規範設計。
- (二) 採用49年版或76年版部頒規範設計。
- (三) 採用49年版部頒規範公布前設計。

此三種不同設計規範年代之橋梁可有著不同之性能目標，以表3重要性橋梁為例(用途係數 $I=1.2$ )，無論採用何種年代之版本規範，發生中度地震時，橋梁性能水準須保持彈性，須小於橋梁性能水準PL3；發生設計地震時，若採用84及89年版耐震規範設計橋梁，僅允許塑性變形達1/3(若台北盆地為1/4)，為橋梁性能水準PL2，若採用76年版以前之耐震設計規範者，則允許塑性變形達2/3(若台北盆地為1/2)，為橋梁性能水準PL1，如圖6所示。

表3 重要橋梁(耐震設計規範之用途係數 $I=1.2$ )之性能目標

地震等級	採用之耐震設計規範版本		
	84及89年版	49及76年版	49年版以前
中度地震	PL3	PL3	PL3
設計地震	PL2	PL1	PL1

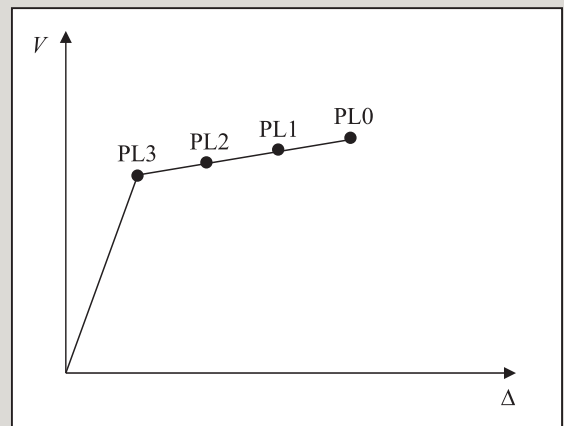


圖6 各種結構耐震性能水準對應之結構反應狀態

### 三、橋梁耐震評估及補強設計原則(國道高速公路橋梁)

國道高速公路既有橋梁之耐震補強標準應符合耐震規範規定之地震需求等級，地震等級以地震回歸期表示，其係透過均布危害度分析而訂定，並應考慮河川沖刷與邊坡穩定之影響，而橋梁耐震性能目標則參考交通部公路總局98年研擬「公路橋梁耐震能力評估及補強準

表4 國道高速公路橋梁耐震之性能要求

地震等級	性能狀態	耐震理念(安全性)	服務性能(使用性)	損壞等級(修復性)
I	PLA	結構保持彈性	震後正常通行	輕微
II	PLB	構件產生塑鉸，發揮容許韌性容量	震後有限通行	可修復
III	PLC	結構韌性容量完全發揮，橋梁不會落橋、崩塌	震後緊急通行	嚴重

說明：

1. 服務性能(Service Levels)：

- (1) 震後正常通行(Immediate)：地震後於24小時內，橋上交通可正常通行。
- (2) 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)；橋上全面通行則需數個月的時間復舊搶修。
- (3) 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)；橋上全面通行則需數個月的時間復舊搶修。

2. 損壞等級(Damage Levels)：

- (1) 輕微(Minimal)：地震時，橋梁結構保持在彈性階段。
- (2) 可修復(Repairable)：地震造成橋梁構件之損壞，可在不損失其主要功能下修復；如韌性構件產生塑鉸，發揮至容許韌性容量為限。
- (3) 嚴重(Significant)：地震可能造成橋梁構件之嚴重損壞，但應避免崩塌(No Collapse)；如韌性構件產生塑鉸，發揮至極限韌性容量。

表5 地震等級

地震等級	規模定義	使用50年超越機率	地震迴歸期	工址地表加速度
I	中度地震	80%	30年	$0.4S_{DS}/3.25$
II	設計地震	10%	475年	$0.4S_{DS}$
III	最大考量地震	2%	2500年	$0.4S_{MS}$

則」(草案)以及國工局「公路橋梁耐震性能設計規範」(草案)複審成果報告書(102年11月)以耐震性能為基準之橋梁補強，表示補強後橋梁於不同等級地震作用下有其各別期望之性能準則，並依橋梁安全性、服務性與修復性定義三種性能要求，如表4所示。

安全性係考慮結構體耐震能力，在地震力作用下必須能保持不產生落橋與橋柱崩塌；使用性係期望地震後橋梁能繼續保有交通運輸與救災服務的功能；修復性則強調在不需大規模拆除重建的原則下，選用經濟合適的修復補強工法恢復橋梁原有功能。至於耐震補強設計需要達到的性能水準須依據地震等級，而地震力的需

求應依最新耐震設計規範中行政分區之水平加速度反應譜係數值及最新(2012)地調所公布第一類活動斷層相關資訊辦理，於橋梁鄰近第一類活動斷層橋梁之近域效應調整因子，應與現行交通部「公路橋梁耐震設計規範」與「公路橋梁耐震性能設計規範」(草案)複審成果報告書做比較，取其大值。對於強度不同的地震等級，其超越機率、迴歸期、地表加速度，如表5所示。

此外，對於橋梁耐震性能檢核要求而言，須對橋單元整體結構系統及構材之變形，採用定量分析進行橋梁耐震性能評估，以符合表4及表5所預期之耐震性能要求。橋單元結構耐震評估後之位移容量 $\Delta_A$ 、 $\Delta_B$ 及 $\Delta_C$ ，應確保大於地震等級I至等級III所引致之結構變形需求。地震等級I之檢核，係確保橋梁具備足夠強度抵禦地震力，各構材在地震等級I作用下均保持彈性，且地震等級I作用所引致之位移需求，應小於性能狀態PLA所限定之位移容量，即 $\Delta_I \leq \Delta_A$ 。地震等級II及等級III之檢核，則為確保橋梁具備足夠韌性展現非線性變形與消能能力，即 $\Delta_{II} \leq \Delta_B$ 及 $\Delta_{III} \leq \Delta_C$ ，如圖7所示。

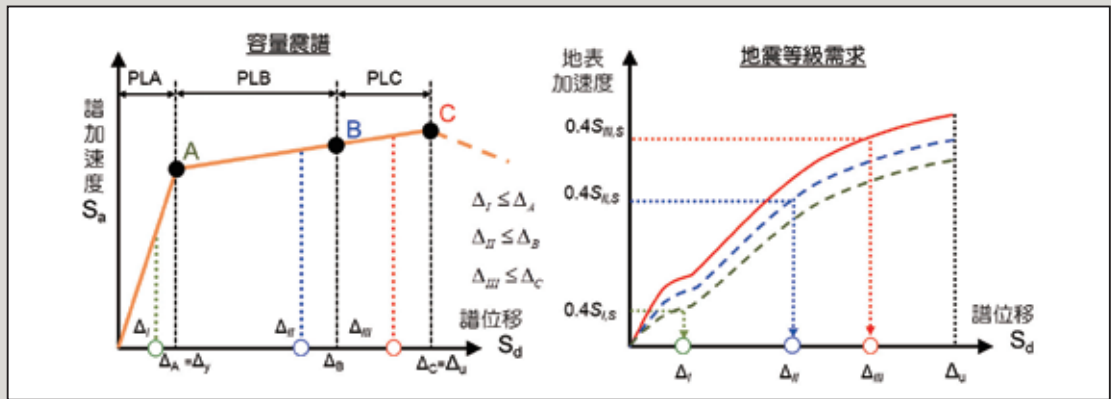


圖7 橋梁耐震性能目標之檢核示意圖

(註： $\Delta_B = \Delta_y + (\Delta_u - \Delta_y) / 1.5$ )

表6 省道橋梁依使用年限制算地震需求之折減

設計使用規範	橋齡	預期補強後 使用年限(超越機率10%)	$T_r$ (回歸期)	$\left(\frac{T_r}{475}\right)^k$	
				k=0.3(上限值)	k=0.45(下限值)
49年或更久	40年以上	20年	190年	0.760	0.662
76年以前規範	25~40年	30年	285年	0.858	0.795
76年規範	10~25年	40年	380年	0.935	0.904
84年以後規範	10年以下	50年	475年	1.0	1.0

## 參、橋梁耐震補強目標與補強對策探討

### 一、不同橋齡之省道橋梁補強標準

民國98年頒布橋梁耐震設計規範後，針對省道橋梁耐震補強標準之制定，曾引發專家學者廣泛討論，主因在於若考量以新橋服務年限50年之設計標準作為老舊橋梁耐震補強之標準，對某些老舊橋梁可能無法達到標準或在補強施工有困難時，可能須面臨拆除之命運，況且以此作為標準，可能導致大部分橋梁需大量的構件補強及基礎補強(多採用擴基或增樁方式進行)，或某些橋齡已達四、五十年者還要補強至新橋等級之耐震標準，而導致需龐大之工程經費來進行補強工作，因此，若補強工程費超過同型式橋梁新建工程費之50%時，則考量橋梁直接改建的方案。由於政府財政情況日益拮据，以龐大的經費來作全省橋梁之補強亦是一

項困難工作，故從經費之觀點上，應從補強之目標原則與補強方案來評估如何減少經費，而又能達補強效果，減少震害之損失來著眼。

爰此，省道橋梁係以橋梁設計規範或橋齡來釐訂不同預期使用剩餘年限，而超越機率統一制定為10%，並依「電信與運輸系統之耐震安全評估與補強準則」以回歸期 $T_r$ 計算475年設計地震需求之折減(如表6所示)，如此各橋梁依其預期再使用年限不同，所對應之地震回歸期亦不相同，則其所需補強抵抗之地震規模等級也不盡相同。

### 二、國道橋梁耐震補強標準

考量國道高速公路為全台最重要之生命線救災道路，故其既有橋梁之耐震補強標準係以再服務年限達50年為原則，並應考慮河川沖刷與邊坡穩定之影響，相關耐震補強性能準則與

表4原則相同。於進行橋梁之耐震評估與補強設計時，若其補強工程費超過同型式橋梁新建工程費之45%，則需進一步檢核評估補強設計之合理性，若經詳細檢討各補強方案之工程實務性及經濟性後，仍造成不經濟或不合理的結果時，應檢討其再服務年限或性能標準，並追縱後續檢測評估或監測等配套措施。

此外，對於橋址鄰近活動斷層之既有橋梁而言，因經濟部中央地質調查所於近年逐步更新斷層分布資料，許多既有高速公路橋梁平行、跨越或鄰近第一類活動斷層，故而需要特別考量活動斷層近域效應。不同等級地震之地表水平加速度可歸納如下：

(一) 設計地震等級：

$$Z_D^{475} = F_a(0.4S_S^D N_A)$$

(二) 最大考量地震等級：

$$Z_D^{500} = F_a(0.4S_S^M N_A)$$

式中， $S_S^D$  為震區短週期之設計水平加速度係數， $S_S^M$  為震區短週期之最大考量水平加速度係數， $F_a$  為反應譜等加速度段之工址放大係數， $N_A$  為反應譜等加速度段之斷層近域調整因子。各工址放大係數與斷層近域調整因子可參酌現行公路橋梁耐震設計規範或相關研究成果進行評估。

### 三、橋梁補強對策探討

國內橋梁耐震補強技術，在面對大地震

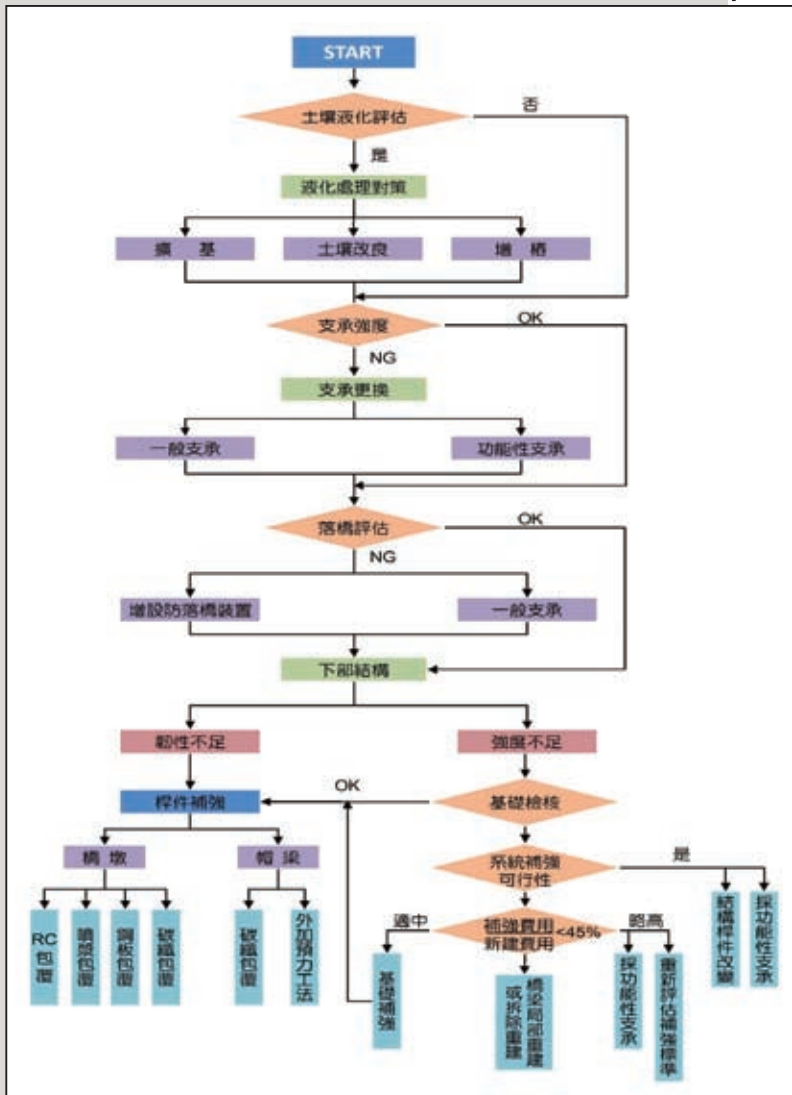


圖8 橋梁耐震補強方案評估之流程

襲擊與考驗後，皆感仍有所不足而持續發展與改進，尤其如何面對橋梁結構系統之特性與國內施工環境之限制，在經費預算限制下，考量橋梁生命週期成本之理念，研擬最佳的橋梁耐震補強方案，滿足橋梁耐震性能目標，係為補強對策之重點工作。參考國內傳統耐震補強工法，以及歐洲、美國、日本已成功運用之新材料與新工法，可彙整如圖8之補強流程，而各種補強方案可簡述如下：

(一) 構件補強方案：橋柱補強、帽梁補強、基礎補強。

(二) 增加構件方案：增設止震設施(RC止震塊、鋼製止震裝置)、增設防震拉條、增加防落長度。

(三) 系統補強方案：改變橋單元結構系統、隔減震支承補強、地震力分散裝置、位移拘束工法、功能性支承等補強理念。

## 肆、結論

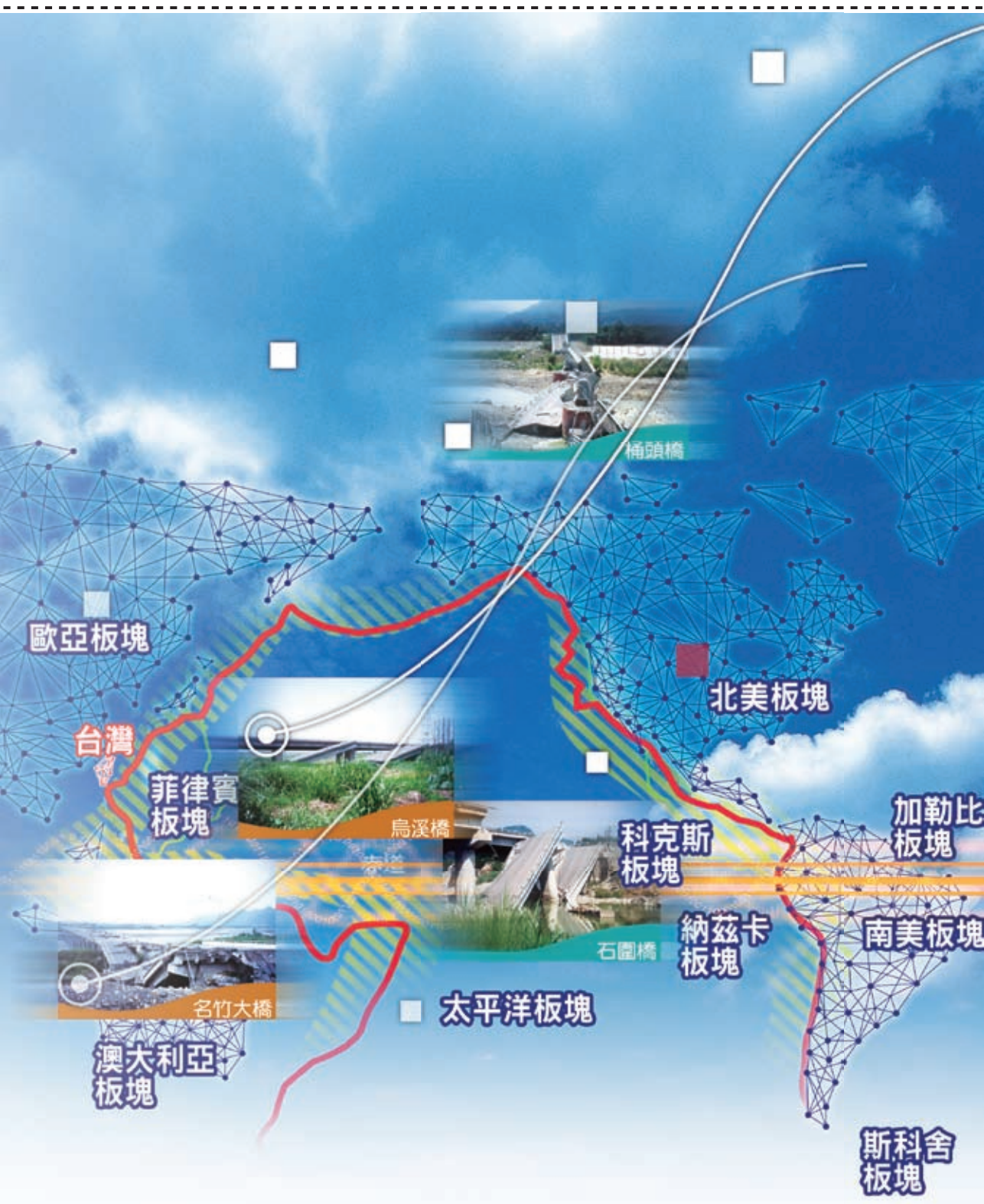
近年國際發生地震規模7以上之大地震多出現在「環太平洋地震帶」(Pacific volcanic seismic zone)，日本九州熊本縣4月16日發生規模7.3強震後，近期緬甸、阿富汗、印尼蘇門答臘島附近海域紛傳強震，位於南美洲的厄瓜多4月17日也遭規模7.8地震襲擊。由於台灣與日本、菲律賓、中南美洲等國家同處「環太平洋地震帶」，各國之地震學者專家紛紛感到憂心，環太平洋地震帶已進入活躍期。

在台灣整體防災計畫中，國道及省道係扮演最重要之防災運輸生命線，災變時將擔負維生線之功能，成為輸送救災物資、傷患與災民之交通主動脈，顯示橋梁係人民維生線上不可或缺之一環，進而影響搶救災害及復健工作之進行。隨著耐震概念的演進及耐震規範的更替，現有公路橋梁已無法滿足現行耐震需求，而須儘速依最新耐震規範予以檢討評估。地震工程耐震減災策略之趨勢，已由最基本的「小震不壞、中震可修、大震不倒」需求，進而發展至「震後功能性的維持」，並逐步再演進為現今的「強化國家震後恢復力」的橋梁耐震性能設計與補強工作，期能於日後大地震發生時，將損害程度降至最低且能滿足震後仍能維持緊急通行，並擔負整體防災計畫之運輸維生功能的重任。

## 參考文獻

1. 交通部，「公路橋梁設計規範」，交通技術標準規範公路類公路工程，民國76年1月。
2. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範」，交通技術標準規範公路類公路工程，民國84年1月。
3. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範」，交通技術標準規範公路類公路工程，民國89年4月。
4. 交通部公路總局，「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」，期末報告，民國97年9月。
5. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範」，交通技術標準規範公路類公路工程，民國98年6月。
6. 交通部公路總局，「公路橋梁耐震評估及補強準則之研究」，成果報告，民國98年12月。
7. 交通部臺灣區國道新建工程局，「公路橋梁耐震性能設計規範」(草案)，複審成果報告書，民國102年11月。
8. 交通部臺灣區國道高速公路局，「橋梁耐震評估及補強設計原則」，國道高速公路後續路段橋梁耐震補強工程，民國104年12月。





3 專題報導

# 美濃地震橋梁災害之調查與修復設計以台86線24號橋為例

關鍵詞：大梁頂升橫移、支承更換

公路總局第五區養護工程處／處長／陳嘉盈 ①

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／技術經理／陳新之 ②

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／副理／吳弘明 ③

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／林勤福 ④

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／陳彥豪 ⑤



## 摘要

## ABSTRACT

2016年2月6日凌晨發生於高雄美濃規模6.6的地震，對台南部分地區造成相當大的災情，而在距離震央約24公里之省道台86線24號橋，大梁結構在P7伸縮縫處向外錯位最大達到59cm，且多處支承受損。24號橋盤式支承因採用舊規範的設計標準，且本次地震力亦超過舊規範的規定值，故有明顯的破壞發生。公路總局第五養護工程處隨即應變，封閉受損嚴重的東行線，緊急委由台灣世曦進行復建及補強設計；經過工程人員全力投入，遂於5月20日修復達通車標準並開放通行。本文主要說明在震後的調查及緊急復建工作中盤式支承更換、大梁頂升復位的規劃及耐震補強方案的選擇。



## 壹、前言

2016年2月6日凌晨發生於高雄美濃地震，於台南地區產生之震度達到5級以上，而新化測站更是測到7級震度(圖1)。本次地震造成距離震央約24公里之省道台86線24號穿越橋受損(圖2)，原東西行線分離的橋面板結構由中央分隔護欄向外錯位最大達到59cm(圖3)，當天經公路總局第五區養護工程處新化工務段緊急會勘後發現多處支承嚴重受損，伸縮縫橋墩RP7的支承更因過大的橫向位移而陷落，支承嚴重受損集中於東行線RP5~RP9及西行線LP5~LP9，LP8橋墩上方則是因盤式支承錯位導致大面積的保護層混凝土掉落。工程處在考量橋梁結構嚴重受損及維護用路人行車安全下，隨即封閉側向位移嚴重的東行線，並緊急以重型支撐架臨時加固，次日則是邀集公路總局及台灣世曦工程師進行會勘(圖4)，並由趙局長主持後續工作檢

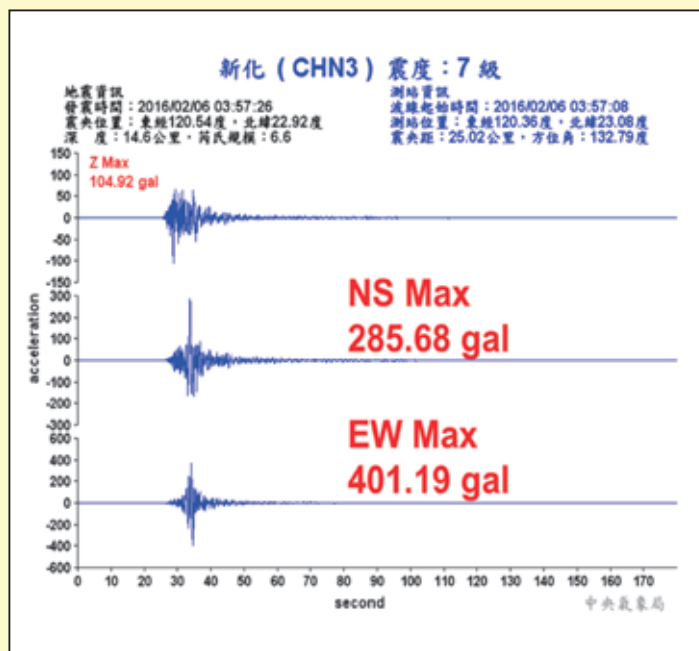


圖1 中央氣象局高雄美濃地震新化測站地表加速度紀錄

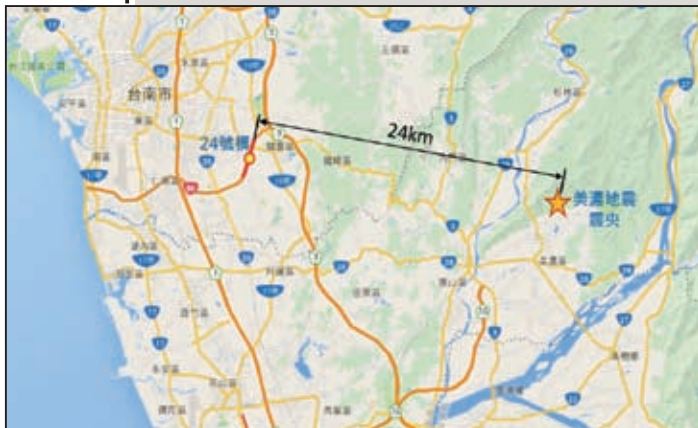


圖2 美濃地震震央與台86線24號橋位置示意圖



圖3 大梁向外位移現況照



討會議，擬定修復工作計畫。台灣世曦在2月19日銜命辦理本橋之緊急復建及耐震補強工程之設計工作，同時國家地震工程研究中心(以下簡稱：國震中心)則受託進行震後橋梁特別檢測及車輛載重試驗。

本工程須儘快確認橋梁結構安全及儘早恢復通車為目標，設計時程非常的急迫，因此在國震中心進行詳細目視檢測同時，復建及耐震補強工程便同步進行。台灣世曦在進行細設前即進行必要的檢測，以釐清橋梁損傷是否達到重建的程度。考量本案時程及現場施工的可行性，施工分為兩階段進行，第一階段為受損的盤式支承更換作業及大梁復位限期完工，並在通車前由國震中心進行車載試驗，以確認上部結構的安全性，而第二階段則是進行耐震能力補強工作。

## 貳、24號橋結構配置

24號橋為東西行線分離的結構系統，共



圖4 震後公路總局與台灣世曦團隊赴現場勘查照片

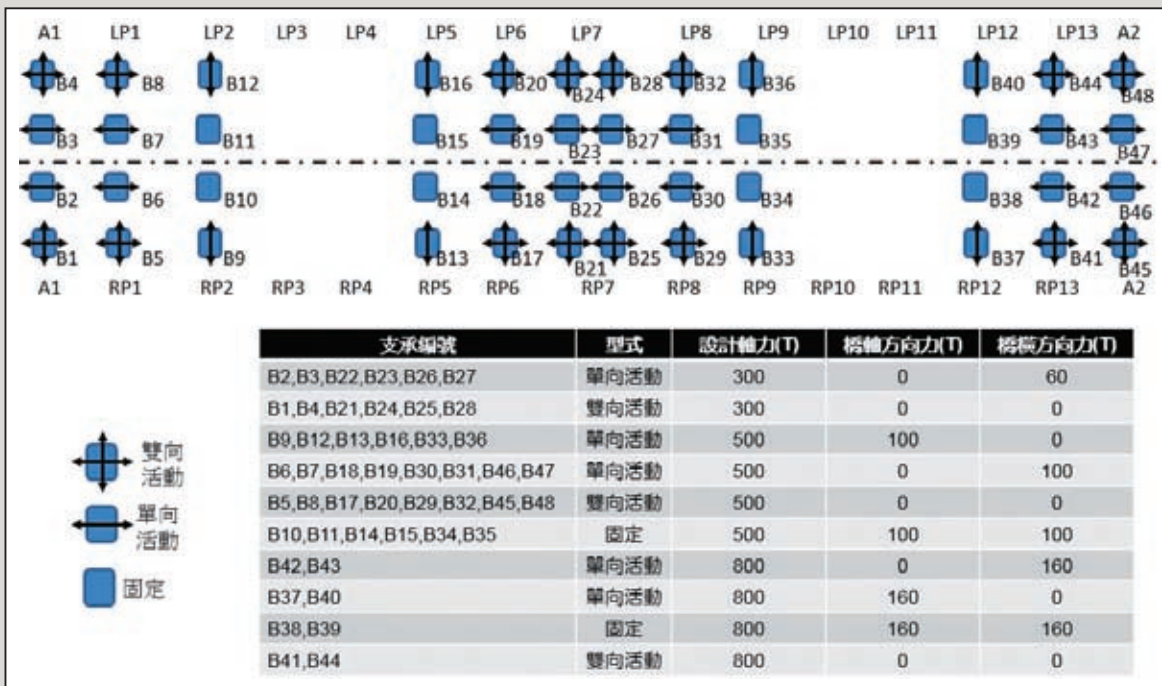


圖5 24號橋支承配置

有4個振動單元，每個單元為7跨連續的預力箱型梁，橋梁上部結構為梁深2.0m之預力箱型梁，一般斷面採單箱室設計，靠近A2橋台側變橋寬則採雙箱室配置。橋跨徑配置由A1橋台(16k+080)依序為西行線5@40+2@37.5=275.0m，2@37.5+2@40+50+40+35=280.0m；東行線7@40=280.0m，3@40+50+3@35=275.0m，全橋長為555.0m。各單元皆為M-M-H-R-R-H-M-M的支承配置方式，在行車方向由4根橋柱承受水平力，而橫向水平力則由各墩分擔，各橋墩的支承配置如圖5所示。

下部結構為單柱橋墩，墩柱標準斷面為1.5m×3.0m，柱高約為4.5~7.0m，基礎型式為全套管式基樁。

### 參、橋梁災害調查

受本次地震影響橋梁上部大梁有明顯的橫移破壞，東行線及西行線橋梁盤式支承皆有程度不一的損傷，且於上下部結構發現多處裂

表1 24號橋東行線支承位移統計表

橋墩	RP5	RP6	RP7	RP8	RP9
最大位移	14.4cm	30.7m	49.6cm	26.9cm	12.6cm

橋墩	LP5	LP6	LP7	LP8	LP9
最大位移	-2.1cm	6.7cm	9.1cm	5.2cm	0.3cm

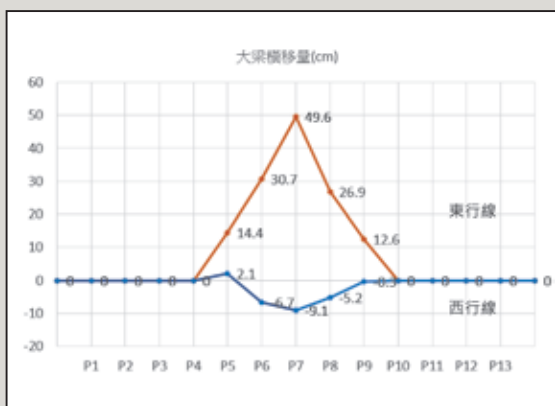


圖6 24號橋東行線上部結構位移示意圖

縫。以東行線RP7伸縮縫處的支承損害最為嚴重，支承全面破壞並且大梁有陷落的現象。經國震中心現地測量結果顯示東行線大梁最大偏移量為49.6cm，西行線大梁最大偏移量約為9.1cm，詳表1及圖6。

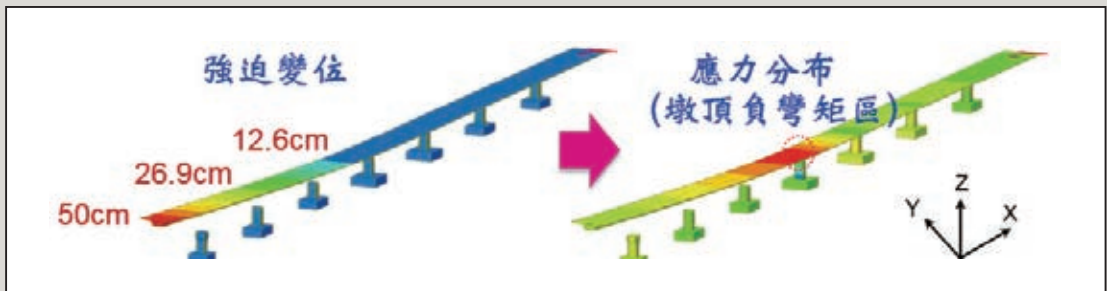


圖7 最大變位下橋梁內力結構分析示意圖

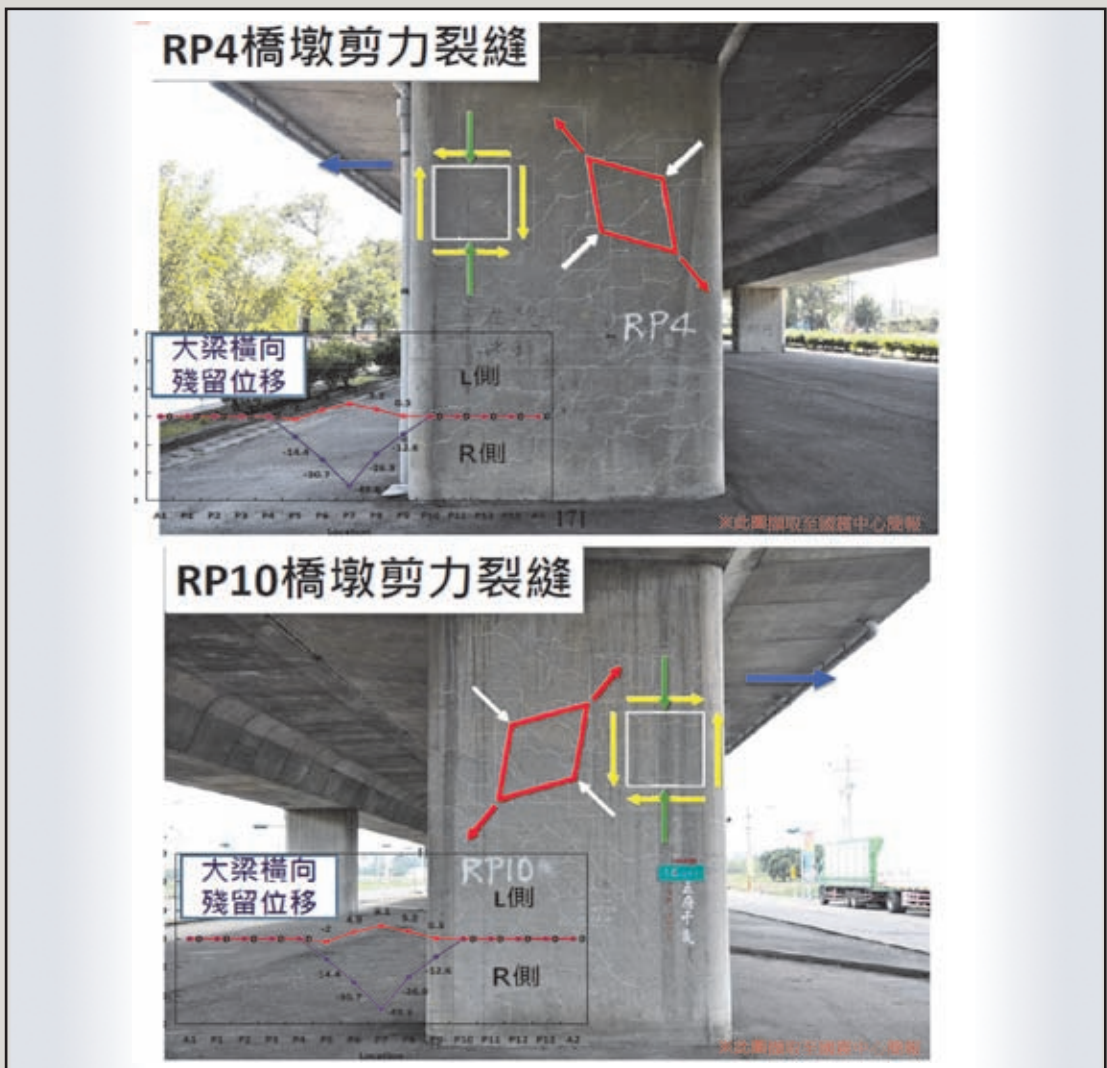


圖8 下構裂縫與受力狀況研判

台灣世曦在地震發生後配合細部設計需求，必須檢視橋梁主要損傷狀況，因此著重於受力最大處結構的損傷狀況的調查，而全橋詳細檢視則由國震中心另案辦理。透過橋梁受損橫移的現況可以反算構件的內力(圖7)；根據變

位可知在固接橋墩P4及P10處存在最大內力，現場損傷調查亦在此處發現較明顯的結構損傷(圖8)，且裂縫方向與受力方向吻合，而嚴重損壞支承則分佈於P4~P10之間(圖9)。



圖9 橋梁損傷照片

#### 肆、盤式支承更換設計考量

根據竣工圖說進行檢核發現盤式支承的設計軸力符合需求，但設計水平力皆不符最新規範的要求。24號橋設計完成年代為民國85年，所採用的設計規範雖有參考84年版橋梁耐震設計規範，但研判支承的設計水平力仍沿用76年版公路橋梁設計規範，因設計水平力僅為垂直

力的10~15%，屬於弱支承的設計考量。84年版的公路橋梁耐震設計規範開始導入韌性設計的觀念，允許橋柱產生塑鉸消能，支承則需以強支承的方式設計，以便塑鉸可以順利產生。各時期規範支承的設計目標差異如圖10所示。

規範	kh	盤式支承設計目標	材料強度
76年	0.120	設計水平力：ZSICW	0.55Fy
		地震力係數C：0.15	
		震區：中震區	
84年	0.153	設計水平力： min[ <b>塑鉸力</b> ， <b>彈性地震力</b> ]	Fy
		震區係數Z：0.23	
		震區：第二區	
現行(98年)	0.193	設計水平力： min[ <b>塑鉸力</b> ， <b>彈性地震力</b> ]	Fy
		震區：歸仁區(Z=0.28)	
		設計水平增加速度係數 $S_2^D=0.7$ ； $S_1^D=0.4$	

圖10 各規範支承設計目標的差異

有鑒於支承的水平抵抗力存在明顯的差異，新設置的支承若要滿足現行規範的規定，下錨定板螺栓的數量及深度皆會大幅度增加，大梁端的上錨定螺栓亦需補強，因此採用功能性分散的方式設計新的盤式支承；新設置的盤式支承採用雙向活動，僅承受垂直力，而水平力則全部由新設置的鋼製止震塊承受。此方案可大幅度減少柱頭打除的深度，更可避免大梁支承處的補強工作，且新設置的鋼製止震塊可於先於工廠加工製作，縮短現場作業的時程。新設置的鋼製止震塊配置另詳圖11所示。

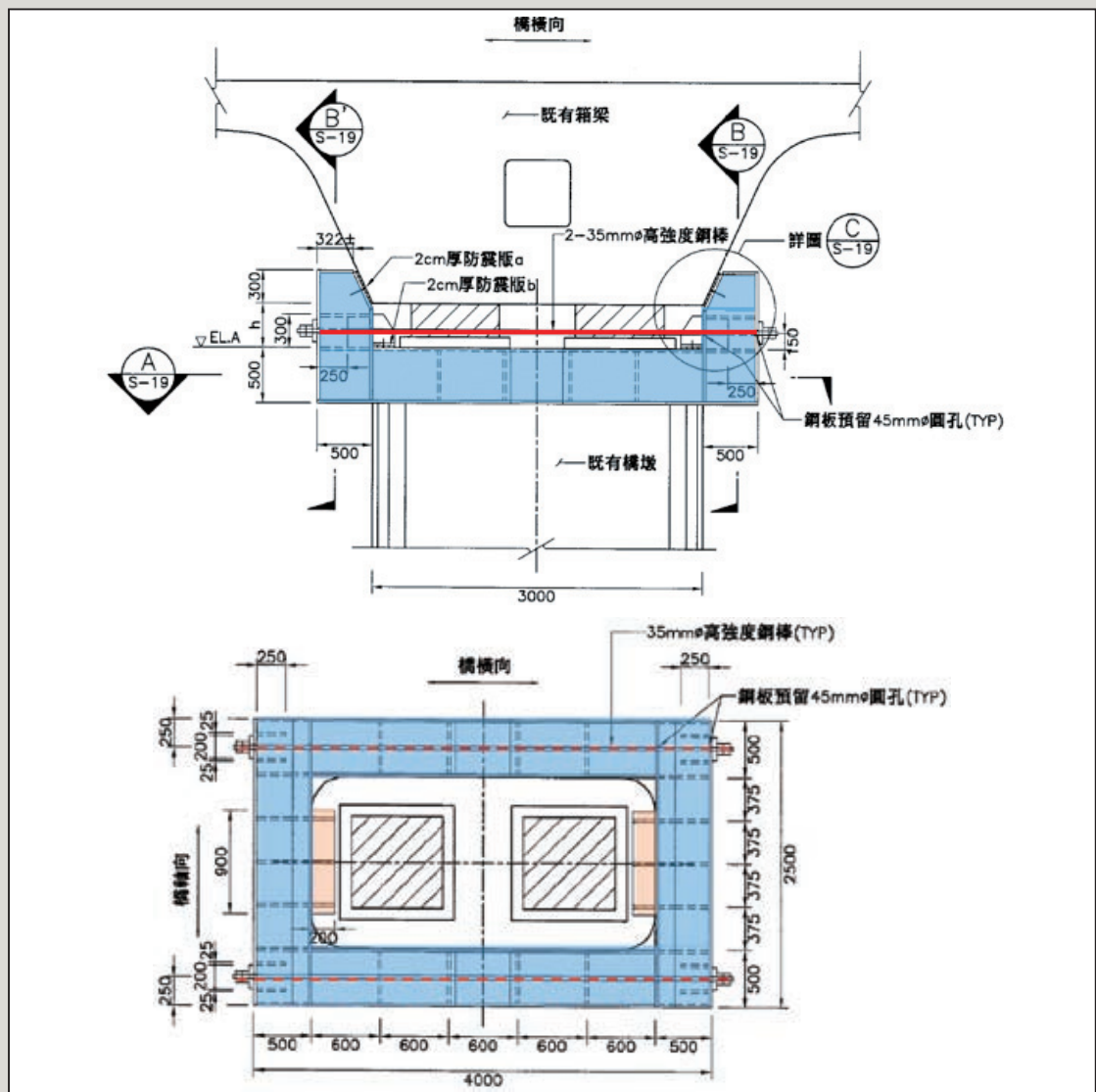


圖11 水平抵抗裝置(鋼止震塊)配置示意圖



## 伍、大梁頂升橫移規劃

頂升復位工作必須先確認在目前變位下，大梁的損傷仍屬輕微可復舊為前提，因此在現場調查則著重於RP3~RP5及RP9~RP11受拉側腹板的裂縫調查，另外，透過結構分析模型檢視支承損壞後橋梁變形與受力的情形。因為大梁配置了預力鋼腱，大梁的內力應保留施工階段之內力，再進行支承系統變更與強制變位等步驟。根據分析結果，斷面上的應力值部分超過開裂應力，但大梁垂直撓度初步檢視並無發現異常，因此有必要在大梁橫移復位後，透過國震中心的車載試驗檢視預力是否有受損。

結構模擬分析中，於RP7處之上部結構指定強迫變位量，除可觀察其他相關位置之位移量是否與現實相符，用以佐證分析過程之準確性，亦

可藉由分析成果反推橋梁復位所需之回推值(約為圖12所示之主梁橫向剪力值 $V$ )。爰此，規劃強迫變位值以每5cm為間隔，最大至現況所發生之50cm變形，相關評估結果詳如表2所示。由表2可知，當RP7上方主梁強迫變位50cm時，於RP6及RP5所產生之橫向變位為28.2cm和10.4cm，比對表1所示之現場量測結果(31cm及14cm)顯示，兩者雖有些微差異，但數值分析成果仍可供修復時之參考依據。另觀察因強迫變位所產生之主梁橫向剪力中，當RP7上方主梁橫向位移5cm時，上部結構約受10.2tf之橫向剪力；若主梁橫向位移50cm時，上部結構則約受101.8tf之橫向剪力，因構件內力仍在彈性範圍內，因此可預期將來移除已損傷之支承系統時，主梁會緩慢彈性復位，但仍可能留存殘餘變形。透過此分析成果，亦可快速推算上部結構可能之內力，並作為千斤頂橫移時的重要考量因素。

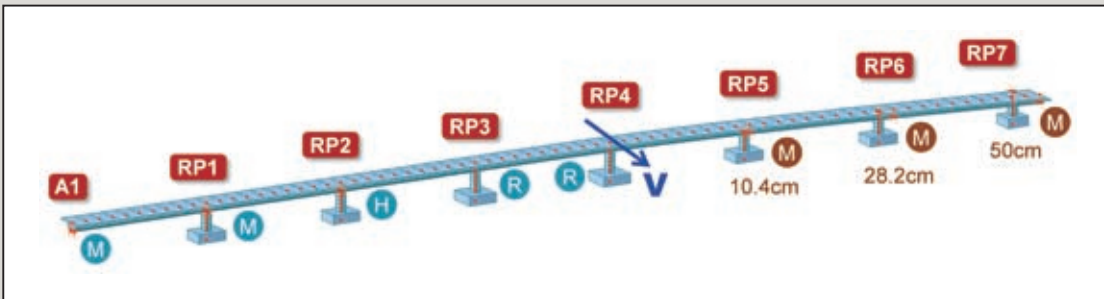


圖12 橋梁橫向變形與受力示意圖

表2 數值分析結果比較表

橋墩	RP7	RP6	RP5	橋墩	RP4
主梁橫向位移 (cm)	5	2.8	1.0	主梁剪力 (tf)	10.2
	10	5.6	2.1		20.4
	15	8.5	3.1		30.5
	20	11.3	4.2		40.7
	25	14.1	5.2		50.9
	30	16.9	6.2		61.1
	35	19.7	7.3		71.3
	40	22.6	8.3		81.4
	45	25.4	9.3		91.6
	50	28.2	10.4		101.8

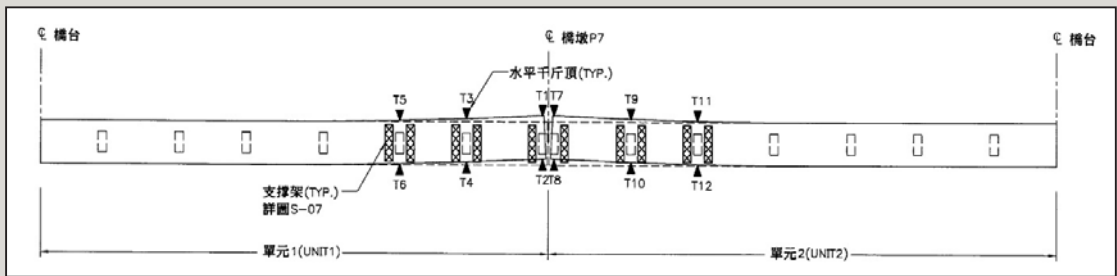


圖13 支撐架及水平千斤頂配置示意圖

在規劃頂升橫移工作尚存在一些不確定因素，以致於增加了施工的困難度。主要不確定主因有三：一、結構物損壞程度；二、邊界不確定性；三、橫移系統的選擇。根據上述不確定因素分述如下：

一、結構物損壞程度：因為混凝土結構本身並非均質等向性材料，施工過程、老劣化等皆會引致裂縫，而此次地震部分應力亦超過開裂應力，大梁結構的受損狀態初步無法完全掌握，以致於結構物受損後勁度折減不確定。

二、邊界不確定性：大梁在P7伸縮縫處向外變位，P7~P5及P7~P9的支承破壞，甚至於P7處大梁有陷落的狀況。整體的變形猶如懸臂梁，而在P4及P10亦發現柱身有明顯的扭剪裂縫(圖8)，故固接橋墩對大梁的拘束力無法完全掌握。損壞的支承與破碎的支承墊摩擦力亦無法量化，且地震前支承是否已經存在損傷皆不確定，因此，結構模擬分析無法完全與實際狀況吻合。

三、橫移系統(設備)的選擇：目前常見的頂升橫移設備都是處理剛體移動的案例，被移動的物體並不存在內力，為剛體平移的運輸過程，然而本案橋梁受損後因為陷落及損壞盤支的拘束，導致頂升橫移設備不止需承受被移動結構體本身的重量，尚須承受額外的拘束力，因此頂升橫移設備如何支撐導引或機具量能亦會影響頂升橫移的進行。

根據上述不確定因素，頂升橫移最後決定採用頂升自復位移的方式修復，當清理受損支承、釋放拘束力後，藉由大梁本身的彈性變形回到穩定位置，因為上述諸多不確定因素，最終穩定位置理論上不會正好在原設計的橋墩中心軸，而不回推至墩柱中心軸則主要是考量永久釋放因地震導致的額外內力。而在規劃頂升復位的施工步驟則是要考慮逐步釋放力量，以期施工的安全性，相關施工步驟規劃如下，配置規劃示意圖如圖13所示：

上構頂升橫移工作：

(一) 先安裝橋梁前後兩側之垂直重型支撐架(現場支撐架型式如圖14)，並順利轉移垂直力至重型支撐架系統後進行東行線(R側)P5~P9水平反力座安裝，將大梁兩側以千斤頂固定，水平力由千斤頂傳遞至墩柱結構。



圖14 現場設置之重型支撐架系統

(二) RP7橋面伸縮縫拆除。

(三) 垂直千斤頂向上頂升1.0cm或支承達脫離狀況，千斤頂須保持均勻受力，油壓表之總反力參考表3所示，並於各墩配置位移監控裝置。

(頂升及橫移回推仍以位移做為主要監測及檢核值，千斤頂承壓力為輔助數據，承包商仍需依說明之要求執行橫移回推工作)

表3 垂直及水平千斤頂施力表

橋墩編號	千斤頂油壓施力總值 (靜載重條件下)(tf)
RP5、LP5	800
RP6、LP6	800
RP7、LP7(單側)	400

垂直千斤頂總反力值

P7上構殘留 位移 Δ(cm)	水平千斤頂 總推力(tf)
50	100
40	80
30	60
20	40
10	20

水平千斤頂施力對應表

(四) 清除RP7單側(UNIT1)損傷支承後，水平千斤頂(T1&T2)回油解壓，使大梁自行緩慢復位，待千斤頂已無持續變位即可再將千斤頂固定。

(五) 依序清除RP6(UNIT1)損傷支承後，水平千斤頂(T1~T4)回油解壓，使大梁自行緩慢復位，待千斤頂已無持續變位即可再將千斤頂固定。

(六) 同步驟(五)，清除RP5(UNIT1)損傷支承後，水平千斤頂(T1~T6)回油解壓，使大梁自行緩慢復位，待千斤頂已無持續變位即可再將千斤頂固定。

(七) 檢視殘餘的變形量，根據表3水平力與殘餘變位建議之水平力緩慢施加於各橋墩，並紀錄回復量並檢視殘留變形量。若水平總推力已達表3建議值，但大梁尚未復位則不得再強行回推，最終將水平千斤頂(T1~T6)固定。

(八) 同理，參照步驟(四)~(七)進行UNIT2的橫移工作。

(九) 根據橫移後最終的橋梁線型放樣支承位置，打除柱頭支承墊並配筋。

(十) 更換新的盤式支承。

(十一) 待盤支基座養護完成後，垂直千斤頂解壓，將力量轉換置新設盤式支承。

(十二) 水平千斤頂裝置待鋼製止震塊安裝完畢後即可拆除。

(十三) 同理，重複步驟(四)~(十二)進行西行線(L側)的上構橫移及支承更換工作。原則上西行線橫移過程中交通仍保持暢通，不進行LP7伸縮縫拆除。因西行線變位較小，承包商得根據千斤頂系統的附載能量調整，可考慮兩個單元(UNIT1 & UNIT2)同時橫移，惟橫移的方式仍以回油解壓進行。橫移過程中若遭預阻礙需打除伸縮縫，需通知設計單位及工地工程司會勘後裁示辦理。

## 陸、耐震補強方案研析

由設計規範沿革可以發現既有橋梁耐震能力恐無法滿足現行規範規定，本橋配合盤支更換及橫移工作一併進行耐震能力補強工作。根據公路總局98年12月「公路橋梁耐震能力評估及補強準則」(草案)進行本橋的耐震能力詳細評估及補強設計。考量到橋梁耐震能力不足可運用系統補強的方式提升，故補強工作配合盤支更換提出了3個可行方案，並根據優選排序選擇了方案A.(雙向活動支承+外加止震塊+鋼板補強)作為最後細設提送的方案。以下簡敘各方案的內容：

方案A.(雙向活動支承+外加止震塊+鋼板補強)：損壞支承改採雙向活動支承可以減少大梁支承處補強及柱頂支承的水刀鑿除範圍，其工期、工程經費、施工難易度皆為最佳方案。

方案B.(原設計支承配置+外加止震塊+鋼板補強)：採用與既有配置相同的支承條件會導致錨定的螺栓數量與深度增加，錨定於大梁的支承上錨定螺栓亦會因為地震需求提高而需

補強，將會額外增加施工工期，且施工難易度較高。

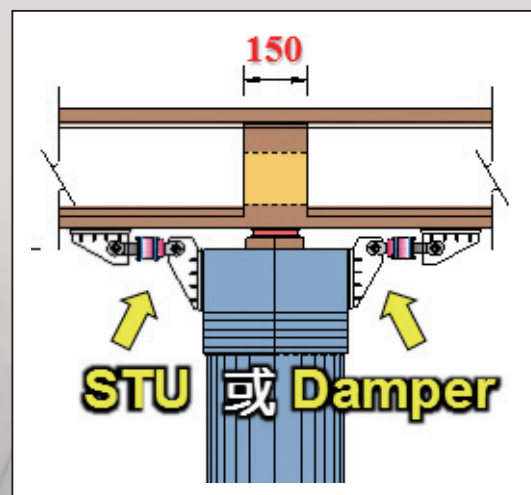


圖15 反力分散裝置示意圖

方案C.(雙向活動支承+反力分散裝置+鋼板補強)：藉由整體系統補強，以反力分散裝置(圖15)使原本活動端的支承一併抵抗水平力將可以提高橋梁整體的耐震性能，且反力分散裝置額外提供的阻尼亦可使整體的耐震性能提升，但因為工程經費較高故不採用。

各種補強方案評選的比較表如表4所示。

表4 補強方案初步比較表

方案	方案A(設計圖方案) 雙向活動支承 外加止震塊 鋼板補強	方案B 原設計支承配置 外加止震塊 鋼板補強	方案C 雙向活動支承 反力分散裝置 鋼板補強
恢復通車時間	預計5/25	再增加20天(約6/15)	預計5/25
工期	1.00	1.16	1.15
經費	1.00	1.20	1.30
施工難易度	低	高	中
耐震能力	1.00	1.00	1.10
主要工作	雙向活動降低錨定數量 增加施工性 鋼止震塊承受100%水平力 橋柱韌性補強	地震力需求大幅提高 支承錨定數量、長度增加 鋼止震塊承受部份水平力 橋柱韌性補強	雙向活動減少敲除部位 反力分散至所有橋墩 耐震能力可再提升 橋柱韌性補強

建議方案

## 柒、結語

台86線24號橋在設計過程中針對頂升橫移進行許多討論，惟考量專業承商各有其獨特的橫推設施，故將重點放在規定頂升橫移過程的安全性，儘可能在頂升橫移步驟中闡述注意事項。實際執行時，專業承商頂升橫移設備為同一個系統設備，因此當受損支承由P7橋墩處逐墩清除，便可觀察到大梁因自身的彈性變形緩慢復位。更新的盤式支承考量施工性改採雙向活動，並配合新設置的鋼製止震塊縮小既有結構鑿除的範圍，確實達到縮短施工時程，在預定時程內完成工作。

台86線24號橋為國內第一座通車中震損橋梁橫移復舊的案例；地震發生後，公路總局及台灣世曦隨即投入相當的人力，犧牲假期進行調查工作；期間在工程處明確的指示下順利交付設計成果，並在新化工務段監督及承商日夜趕趕下完成第一階段的工作，順利於5月17日交付國震中心進行車載試驗，並於同月20日早上開放通行。在如期、如質的共同目標下，各單位盡力趕赴，而本次寶貴的經驗亦可作為未來橋梁災害復舊的重要參考。



圖16 施工期間各單位長官親赴現場指導的照片

# 橋樑基礎土壤 液化災害與補強

關鍵詞：地震災害、土壤液化、基礎耐震補強

台灣世曦工程顧問股份有限公司／地工部／協理／吳文隆 ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／地工部／技術經理／蕭秋安 ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／地工部／副理／張嘉興 ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／地工部／正工程師／王景平 ❹

## 摘要 ABSTRACT

臺灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊縫合帶，地震活動頻繁，伴隨劇烈的地盤變位及地表振動，往往造成建物倒塌、橋梁斷裂、山崩及土壤液化等地震災害。國內既有橋梁逐漸面臨結構老化及橋梁安全性不符新的耐震規範要求等問題，其修復補強工作確有其必要性，藉由妥善之維護管理進而提高其安全性及使用年限，有效管理國家資產。土壤液化為地震時造成橋梁等工程結構物受損之重要因素之一，本文就土壤液化影響與災害、橋梁基礎液化補強對策、補強工法，並以臺灣、日本實際案例介紹其成果，提供各界參考。



## 壹、前言

臺灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊縫合帶，屬於環太平洋地震帶的一部分，由於菲律賓板塊以每年約7~8cm之速率向西北方向擠壓，由東向西產生一系列呈東北—西南走向之褶皺與斷層，因而造成西部麓山帶及花東縱谷等地區之地震活動頻繁[4]，如圖1所示。

1999年9月21日臺灣中部發生規模7.3的集集大地震，震央附近之南投、臺中地區震度達7級，劇烈的地盤變位及地表加速度，造成建物全倒及半倒3萬8千餘戶、人員傷亡1萬餘人、多處橋梁斷裂及邊坡崩坍，其中屬地盤破壞之土壤液化災害以南投、員林、霧峰及社頭等地區較為嚴重；據政府相關部會統計，集集地震災害造成總體經濟損失達新臺幣1,000億元。



圖1 臺灣活動斷層及災害地震分布圖

2016年2月6日高雄市美濃區發生規模6.6地震，因地質之場址效應，臺南地區之震度達5級以上，造成多處建物倒塌，人命傷亡慘重，而土壤液化災害範圍廣泛，以安南區最為嚴重，破壞種類有噴砂、建物沉陷傾斜、地板隆起與牆面裂縫、維生管線與排水系統受損等，土壤液化災害雖未直接造成民眾傷亡，但建物及相關設施之使用性卻已明顯下降或甚至無法使用[13]。

另國內既有橋梁逐漸面臨結構老化及橋梁安全性不符新頒的耐震規範要求等問題，本公司多年來亦積極參與政府推動之老舊橋梁修復或補強工程。本文將依序介紹土壤液化影響與災害、橋梁基礎土壤液化補強對策、補強工法，並以實際案例介紹其成果，提供各界參考。

## 貳、土壤液化影響與災害

### 一、臺灣地震與土壤液化災害

土壤液化為地震時工程結構物受損重要因素之一，主要發生機制為：飽和土壤內孔隙水壓因受地盤震動作用而上升，引致土壤剪力強度減小，當孔隙水壓上升至與土壤之有效應力相等時，即產生土壤液化現象，而造成嚴重之損壞，依土壤變形程度常分為液化(liquefaction)及反覆流動(cyclic mobility)兩種情況。

近來臺灣遭遇之大地震，包括1999年921集集地震(地震規模7.3)、2010年0304桃源地震(或稱甲仙地震，地震規模6.4)及2016年0206美濃地震(地震規模6.6)，均引發規模大小不等的土壤液化現象，現場主要損害情形包括：地表冒水噴砂、結構物差異沉陷、結構物傾斜、地下結構物上浮、路堤(堤防)下陷或地盤側向流動等[14]，如圖2所示。

### 二、日本地震與土壤液化災害

日本與臺灣同樣位於環太平洋地震帶，於1995年發生之「兵庫縣南部地震」(阪神大地震)，地震規模達7.2，係1923年關東大地震後最嚴重震災，造成神戶、大阪、京都地區之鐵、公路交通系統重創，橋梁結構主要災害類型為橋墩破壞(剪力破壞、混凝土壓碎、鋼筋挫屈等)、防止落橋裝置或支承損壞，另Port Island地區橋墩處地面與周邊道路因土壤液化而產生下陷[1,3]。此次地震對於位處不良地形、軟弱土層及人工造地等區域的橋梁造成之災害顯著，故於「兵庫縣南部地震受害道路橋復舊辦法」之「主要耐震對策」中提醒需“重視土壤液化、地盤側向流動對橋梁基礎之影響”；於「耐震設計之基本方針」中要求“基礎應具有橋柱同等以上之耐震能力及抗變形能力”；於「道路橋示方書」中亦規定當“土壤液化使下部結構產生大變位之虞之橋梁”需加大梁端防落長度。

2011年3月11日發生日本有史以來最大規模的「東日本大震災」(Mw=9.0)，引發巨大海嘯，也造成最高核災等級(Level 7)的核輻射外洩災害，為一種前所未有的廣域複合式災害[9,10,11]。本次橋梁地震災害主要係由海嘯所造成，因地震直接造成之橋梁震害並不多，多為橋柱挫屈或剪力破壞，但無橋梁崩塌或落橋之情形，主要震害原因為斷層破碎帶通過、近斷層效應、土壤液化、海嘯的浮力與衝擊等。大部分受損橋梁集中於早期建造、未經耐震補強之JR東北新幹線高架橋，其中栗原市附近高架橋下部結構曾作耐震補強，於震度7級作用下高架橋並無受損情形，可顯見耐震補強的有效性。另外，港灣設施亦因大面積土壤液化及地盤側向流動造成護岸嚴重位移及路面下陷(小西浜港、大船渡港及釜石港等)，而距震央甚遠之千葉縣沿海填土造陸地區，因地震延時長(約5分鐘)，東京灣岸地區之土壤液化災害程度與範圍





(1)地表冒水噴砂(臺南惠安街，2016年美濃地震)



(2)地表冒水噴砂(臺南惠安街，2016年美濃地震)



(3)結構體下陷破壞(臺南惠安街，2016年美濃地震)



(4)結構體傾斜破壞(臺南旺林飯店，2016年美濃地震)



(5)人孔結構體上浮破壞(浦安市，2011年東日本地震)



(6)土堤破壞(南投小溪橋，1999年集集地震)



(7)地層滑動破壞(臺中一江橋，1999年集集地震)



(8)側向流動導致之破壞(臺中港，1999年集集地震)

圖2 地震及土壤液化災害[14]

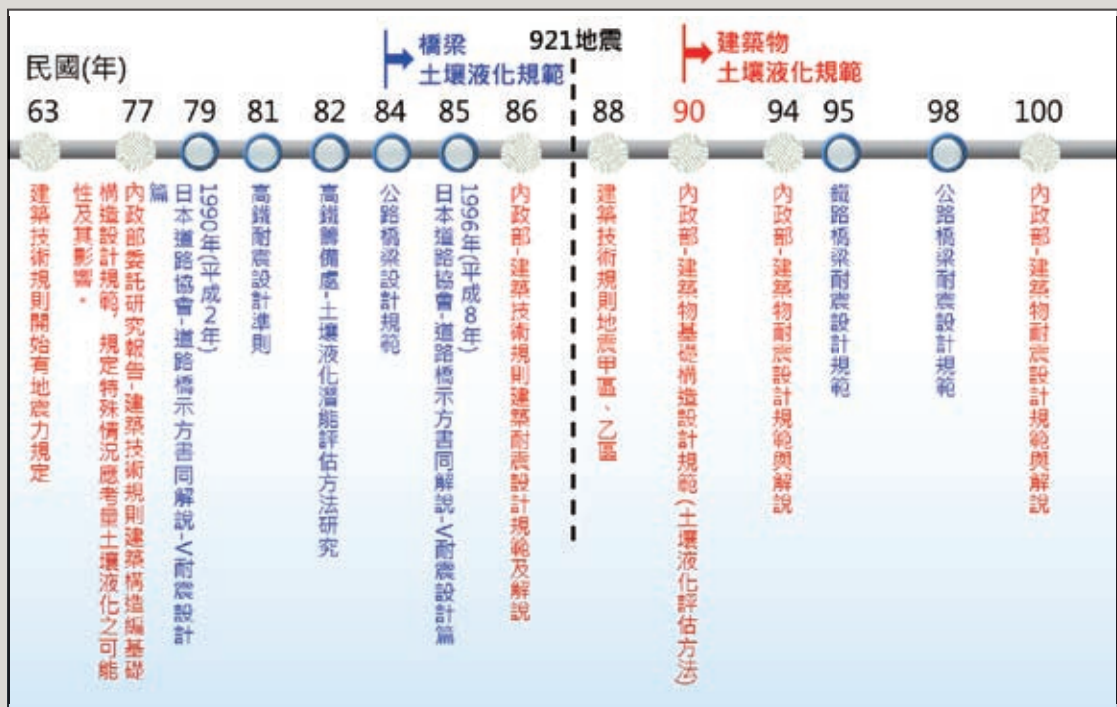


圖3 臺灣耐震設計及土壤液化潛勢評估規範演進

前所未見，噴砂厚度堆積達1公尺以上，造成土層下陷及人孔浮起，導致地工結構與維生管線的嚴重損壞。

### 三、臺灣耐震設計及土壤液化潛勢評估規範演進

耐震設計規範的沿革，除了源自理論研究與實驗室實驗的發現外，大部分來自地震災害經驗的歸納。從規範的沿革改變可觀察地震工程研究的發展軌跡。1974年臺灣開始有耐震設計的相關規定，依據地震發生的機率、規模與震度，將臺灣各地劃分成不同的震區，並依此規定各區設計地震力係數。1989年鑒於1985年墨西哥大地震的盆地效應震害，及1986年花蓮外海地震造成臺北地區因盆地效應發生嚴重災情，耐震設計規範增訂盆地效應的考量，將臺北盆地另外劃分為特別震區。1997年鑒於1995年日本阪神大地震的嚴重土壤液化災情，耐震設計規範增訂土壤液化評估方法，並且嚴格規定鋼筋混凝土的施工細節。1999年921集集地震

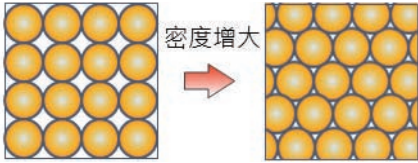
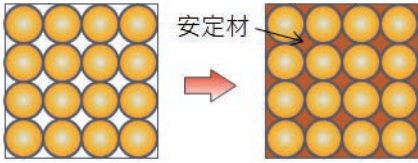
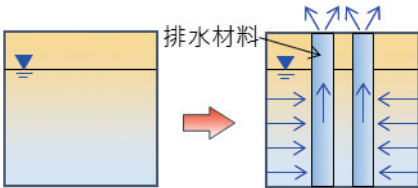
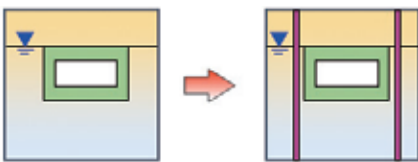

後，依據經濟部中央地質調查所公告更新之活動斷層分布圖，提升相關震區的設計地震力，於2005年再次調整震區劃分，並根據921集集地震中的觀測增訂近斷層效應[15]。臺灣耐震設計及土壤液化潛勢評估規範演進，如圖3所示。

## 參、橋梁基礎土壤液化補強對策及工法

### 一、土壤液化處理原理及對策

參考日本建設省土木研究所「液狀化對策工法共同研究成果概要」[2]，為因應土壤液化造成路堤、建築物、地中結構物之損壞，可採用(1)提高土體密度及強度、(2)固結地盤、(3)加速超額孔隙水壓消散、(4)阻斷及抑制土體變形、(5)降低地下水位及(6)加強構造物耐震能力等對策，以達到防治土壤液化的發生、減輕土壤液化之影響的目的。土壤液化處理原理及對策如表1所示。

表1 土壤液化處理原理及對策(修改自[2])

原理	對策說明	
提高土體密度		藉由施加震動或衝擊力以壓實砂質地盤，使孔隙比下降，提高土體密度及強度
固結地盤		於地盤中添加水泥系等安定材料，將其攪拌與地盤混合，或使注入材浸透土壤結構，以達到固結的目的
加速超額孔隙水壓消散		於地盤中增設礫石、砂或塑膠製排水材料，以縮短排水路徑、增加地盤滲透性，防止土壤液化發生
阻斷及抑制土體變形		利用擋土壁(連續壁、鋼板樁或深層攪拌樁)圍束地盤，以抑制土體變形，防止構造物因土壤液化而受損
降低地下水位		藉由設置點井等方式抽降地下水位，達到增加有效應力、防止土壤液化的效果

有關基礎之修復與補強，依工程性質及目標不同，可概分為(1)新建結構物、(2)耐震能力不足之既有結構物、(3)震後受損之既有結構物等三類，基礎修復與補強流程如圖4所示[14]。新建結構物依現地條件檢討地震狀態下之承載能力及穩定性，並採取相應之預防對策，則震後基礎受損之機率將大為降低；對於耐震能力不足之既有結構物，當其位於土壤液化潛勢較高之工址，則需考量上部結構之耐震補強及必要之地盤改良與基礎補強；針對震後受損之既有結構物，則需依原有結構物之使用機能，依致災原因及損害型態，選擇適宜之修補工法，達到復舊與補強之目標。

## 二、土壤液化防治及基礎補強工法

依土壤液化處理對策及原理，為達到防治土壤液化的發生或加強構造物耐震能力的目的，相應之補強或防治工法如表2所示，對於新建結構物或既有結構物之工法適用條件選擇如表3，考量結構物之基礎型式不同(直接基礎或樁基礎)，相關防治工法之工程配置如表4(a)、(b)所示[5]。

地震作用時，發生土壤液化現象之地盤，若因地形高差或其它因素而有偏土壓作用時，就有可能發生地盤側向流動現象，其防治工法之策略，係採增加結構支承力，或遮斷流動路徑、抑制液化地層變位方式，相關防治工法之工程配置如表4(c)所示。

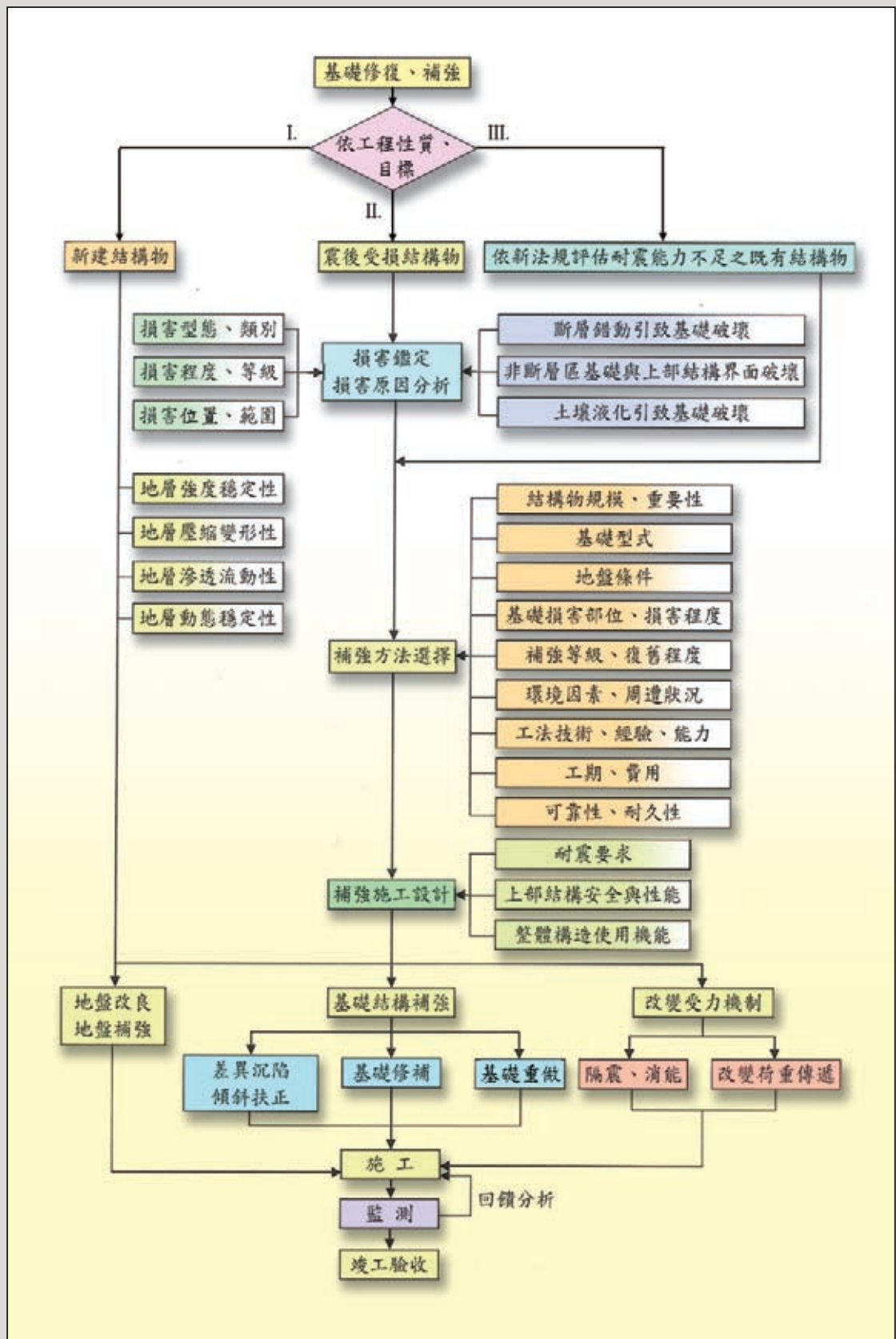


圖4 基礎修復與補強流程圖(修改自[14])

表2 土壤液化防治及結構補強工法(修改自[2])

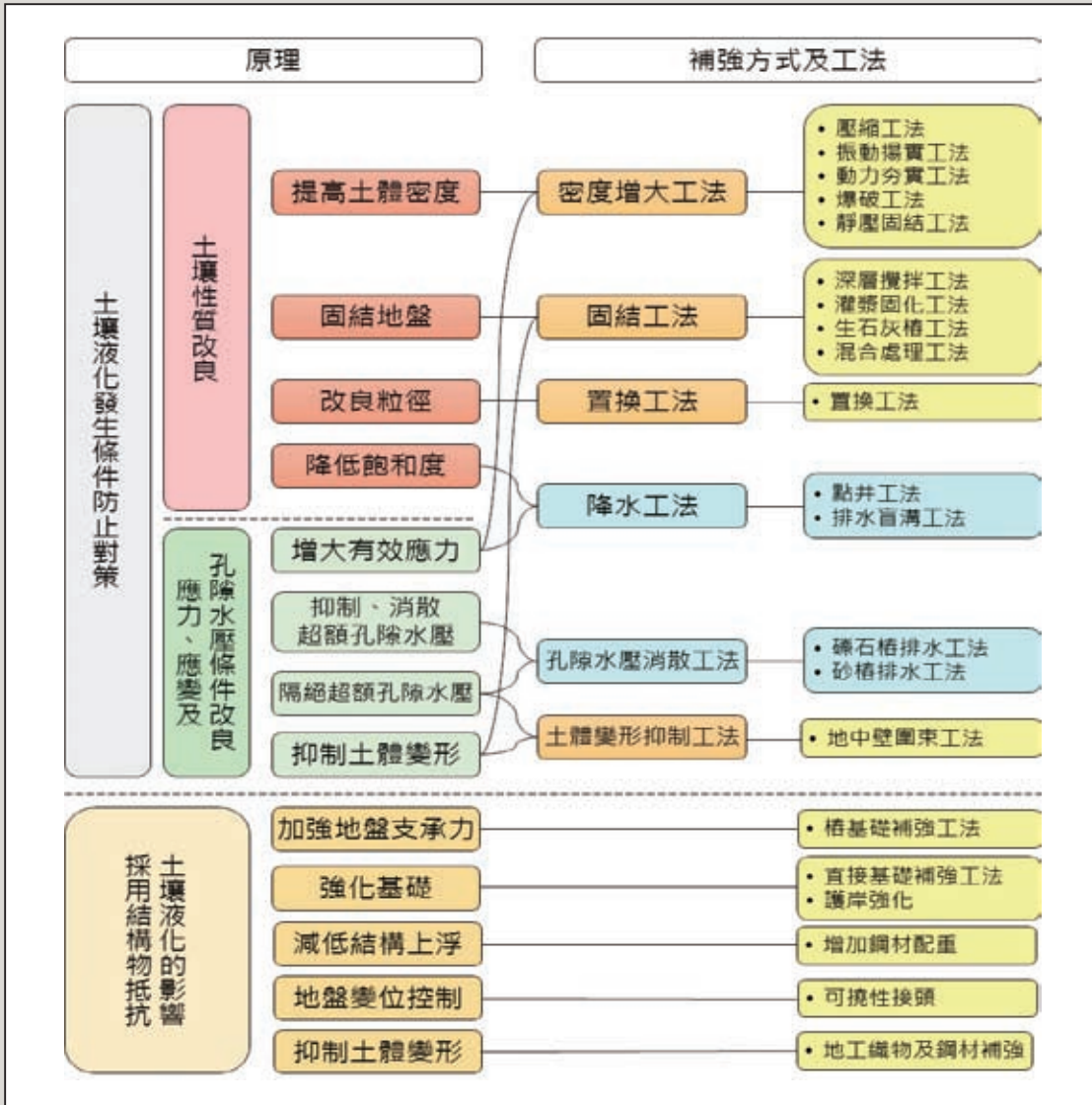


表3 土壤液化防治及結構補強工法適用表(修改自[2])

工法名稱	土堤構造物		地中構造物		大規模
	新設	既設	新設	既設	
壓縮工法	●	●	●	●	
生石灰樁工法	●	●	●	●	
靜壓固結工法		●		●	
深層攪拌工法	●	●	●	●	
灌漿固化工法		輔助工法		●	
排水工法	●	●	●	●	
地中壁圍束工法	●	●	●	●	
其它	土工織物補強				降水工法

表4 土壤液化及地盤側向流動災害防治工程配置(修改自[5])

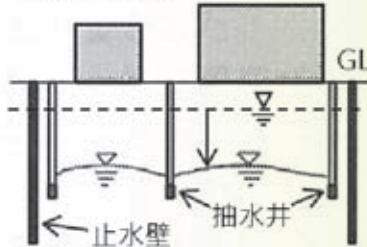
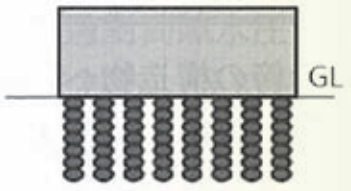
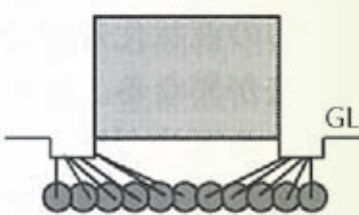
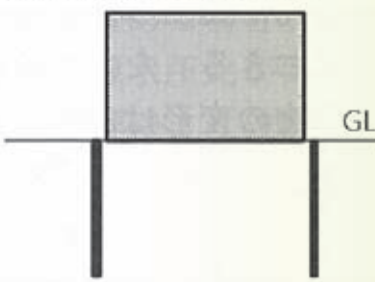
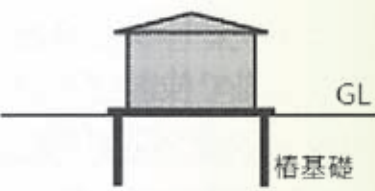
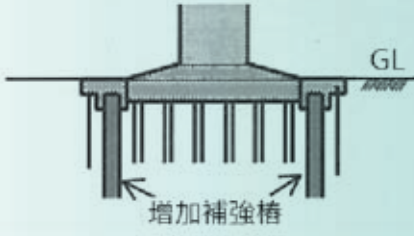
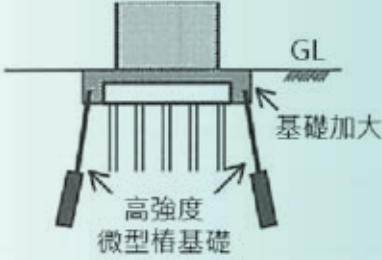

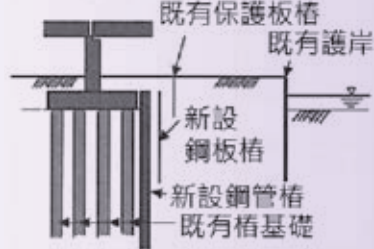
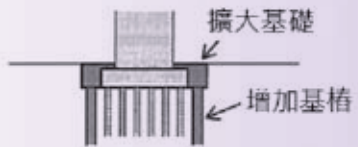
(a) 既有直接基礎構造土壤液化防治	(b) 既有樁基礎構造土壤液化防治
<p>(1) 利用抽水井或排水盲溝降低地下水位</p>  <p>(2) 自底板開口並灌入藥液，採靜壓固結工法</p>  <p>(3) 自結構物周圍採斜向灌注藥液，固化土壤</p>  <p>(4) 採用地中擋土壁抑制變位</p>  <p>(5) 結構物基礎外緣增設樁基礎承載</p> 	<p>(1) 增加樁基礎</p>  <p>(2) 增加高強度微型樁基礎</p>  <p>(3) 樁基礎周圍增作地盤改良</p> 
	<p>(c) 既有構造物地盤側向流動防治</p> <p>(1) 樁基礎與護岸間打設鋼板樁</p>  <p>(2) 增設補強樁</p> 

表5 基礎耐震補強工法比較

補強工法		特性	優點	缺點
樁基礎補強	加大基礎尺寸及增加基樁		直接增加垂直及水平容許承載力	可能須採用低淨空施工機具及配合降挖
	鋼板或地中連續壁圍束		有效增水平承載力	垂直承載力改善效果較不佳
	地中連續壁補強		增加基礎整體之勁度，提升水平承載力及垂直承載力	工期及工程費高
	灌漿地盤改良		改善基礎下土壤強度，降低液化潛能	施工後成效較難評估及確認
淺基礎補強	淺基礎加大尺寸及加厚		施工較簡單，所需空間較小	基礎土壤軟弱時需較大的基礎面積
	灌漿地盤改良		改善基礎下土壤強度，降低液化潛能	施工後成效較難評估及確認

## 肆、案例分析與探討

### 一、臺灣公路橋梁補強案例

本案例之公路橋梁約為民國六十年間興建，其基礎之型式有直接基礎及小尺寸方型、圓型樁。依據原設計鑽探資料顯示，地表下20m內之地層為疏鬆砂質粉土、粉土質細砂或粉土質黏土[6]。

橋梁基礎因震區地震係數提高以致耐震能力不足，必須針對橋台(淺基礎)、橋墩(樁基礎)進行基礎補強，依據前節所述之土壤液化防治對策及工法概念，將較可能適用於本案例淺基礎、樁基礎之耐震補強工法評估如表5所示。就增樁工法而言，本路段的問題在既有穿越橋梁下淨高約5m，場鑄基樁的施工空間較狹小，需採用低淨空之施工機具並配合降挖地面後施工，所需工程經費將較一般者稍高。

本案例橋墩基礎除因土壤液化導致樁基礎垂直承載力不足外，尚因基樁樁體配筋量不足，無法抵抗受震產生塑鉸時之水平力。在同時提高既有基樁之垂直及水平承載能力，且工程費不致太高的原則下，以加大基礎尺寸及增樁(100cm $\psi$ )為最佳方案，屬3.1節所述增加結構物抵抗能力之方案，如圖5及6所示。且經詳實

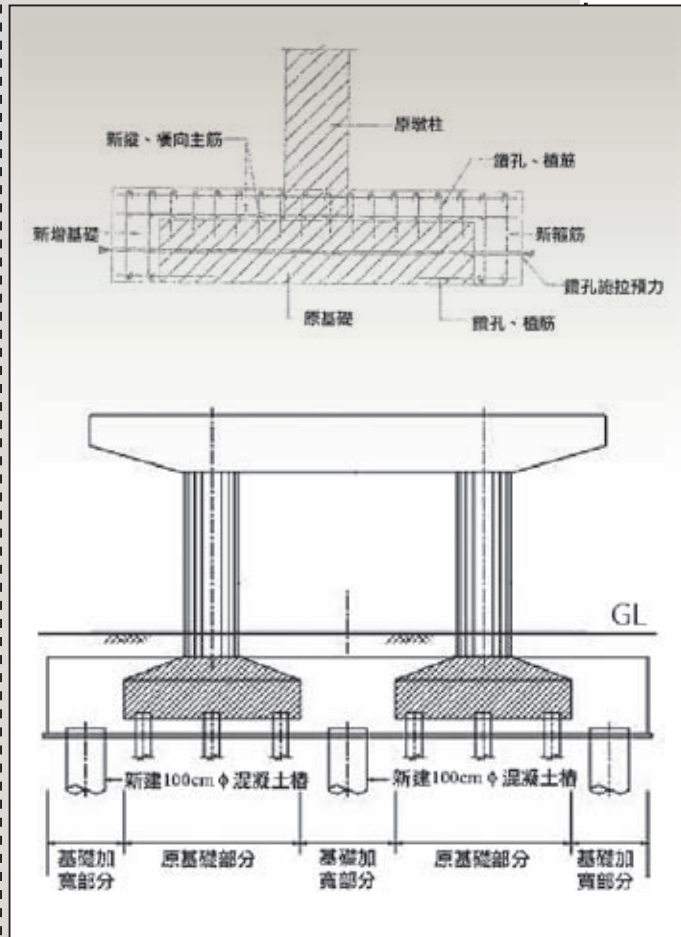


圖5 基礎擴大加厚及增加樁數之補強示意圖

調查結果，橋下施工空間、既有地下管線、交通維持及用地等問題均存在不同程度之施工障礙，設計階段均詳加考量，納入設計中，而施工中亦一一加以克服。



(a) 增設加樁



(b) 舊有基礎打毛



(c) 植筋拉拔試驗



(d) 基礎尺寸擴大及加厚

圖6 基礎擴大加厚及增樁施工照片

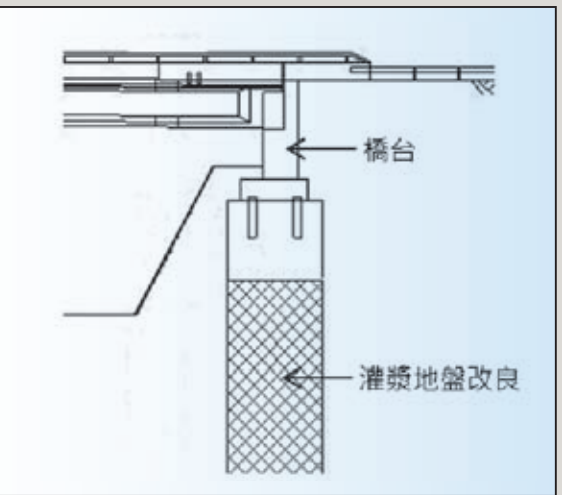


圖7 橋台液化補強採地盤改良施作

至於橋台(淺)基礎之土壤液化補強，因考慮施工期間仍須維持車輛安全通行，橋台不宜進行大規模開挖，故基礎補強採用灌漿地盤改良工法，並於橋下施工，本工法屬3.1節所述固結地盤之方案。改良深度約地表面下20m深度範圍內

之疏鬆砂性地層，正確範圍可依現場灌漿鑽孔施鑽時所得之地層層次狀況調整之，如圖7所示。

因須維持橋梁上車輛行車安全，與施工時減少對橋梁結構擾動或影響，本工程於指定位



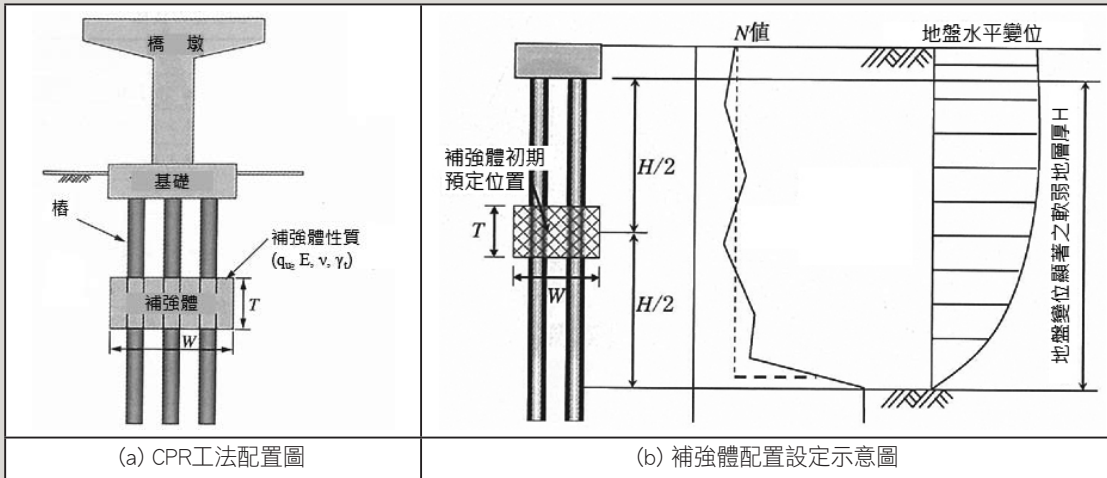


圖8 CPR工法示意圖

表6 補強體之設計參數

土質	單軸壓縮強度 $q_u$ (MN/m <sup>2</sup> )	彈性係數 $E$ (MN/m <sup>2</sup> )	包松比 $\nu$	土壤單位重 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )
砂土	3	300	0.35	同原土壤
黏土	1	100	0.35	同原土壤

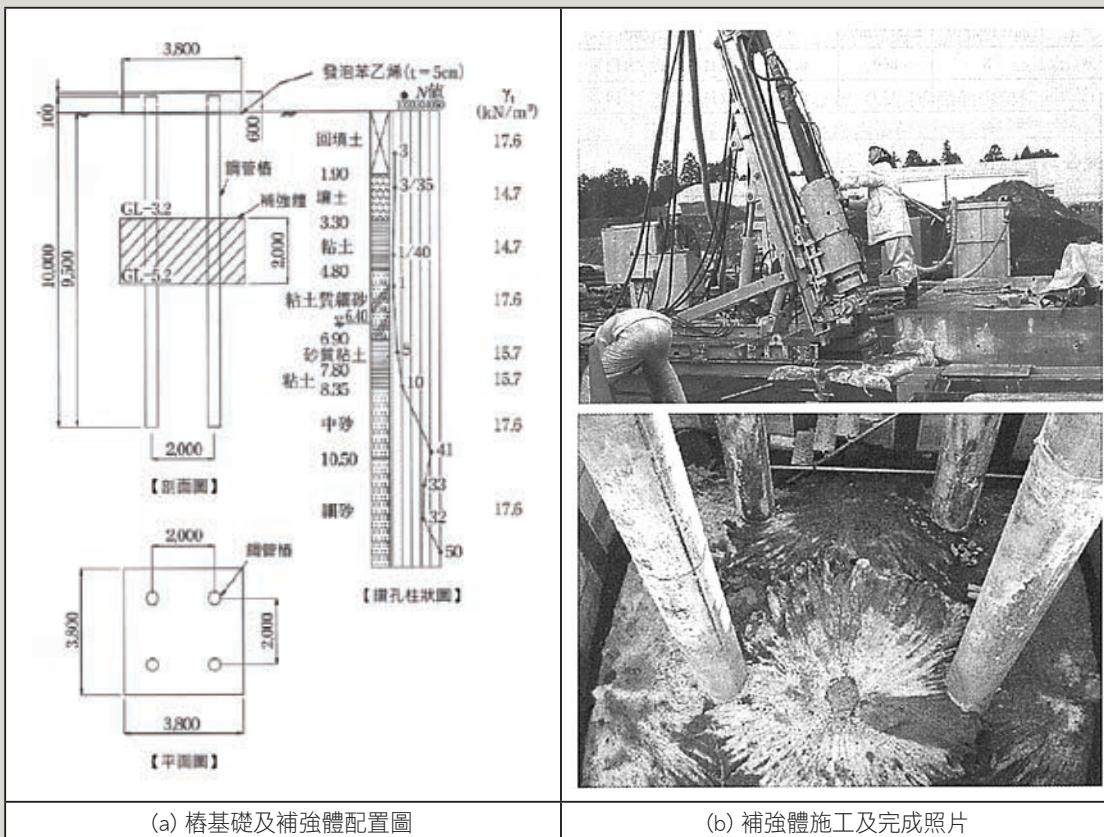


圖9 CPR工法現地施作試驗

置進行灌漿地盤改良補強，並加強安全監測，以控制灌漿作業過程對安全所產生之影響，監測成果可作為施工管理之依據及參考。

## 二、日本樁基礎補強CPR工法

CPR工法(Confining Pile Reinforcement)主要係於基礎下方土壤液化或軟弱地盤深度範圍，

於樁基礎周圍新增一補強體，以達到抑制基樁側向變化、增加地震水平抵抗力之目的[7]，如圖8所示，屬3.1節所述增加結構物抵抗能力、強化基礎之方案。

補強體之配置，初期假設於軟弱層厚度之中間深度，寬度W約等同於基礎寬度，與補強體厚度之比值T/W介於0.5~2之間(T最小厚度取2m)，補強體之設計參數如表6，並以有限元素法進行耐震分析，分析時調整補強體尺寸使得樁基礎變位、旋轉角及內應力值均小於容許值要求。

日本安藤(Hazama)技術研究所採用本工法於現地施作試驗，工址既有鋼管樁基礎及地層如圖9所示，現地地層屬N=1~10之黏土及黏土質砂互層，鋼管樁樁徑40.6cm、樁長10m，樁端深入N值約40之砂質承載層。現地試驗採地盤改良斜灌方式施作地中補強體，於完成後進行挖掘，結果顯示可於樁體周圍有效形成補強體，達到束制鋼管樁基礎之效果。

## 三、日本樁基礎補強SSP工法

SSP工法(Super Strengthening Pile Bents Method)係於既有樁基礎頂部範圍，採用壓入設備壓入補強鋼板，並於鋼板與既有樁間以無收縮混凝土充填，達到提升基樁耐震能力之目的[12]，如圖10所示，為3.1節所述增加結構物抵抗能力之方案。

本工法實際應用案例為日本東京灣岸道路上方142m跨徑之人行跨越橋，其上部結構為三跨連續鋼箱形梁，下部基礎為樁柱式基礎(三柱，鋼管樁樁徑1m、樁長31.5m)，因應新頒布的耐震設計規範進行耐震補強，採直徑1.3m之補強鋼板進行包覆(包覆長度18.8m)，施工配置及照片如圖11所示。

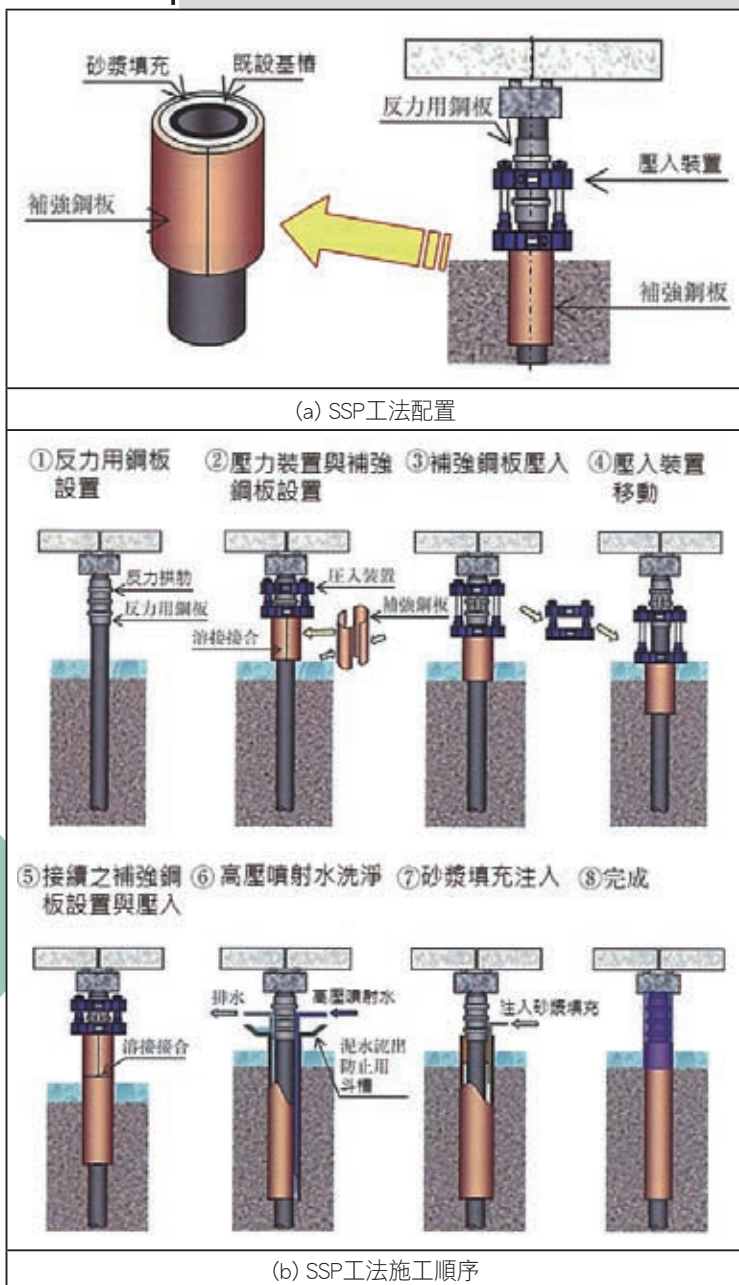


圖10 SSP工法示意圖

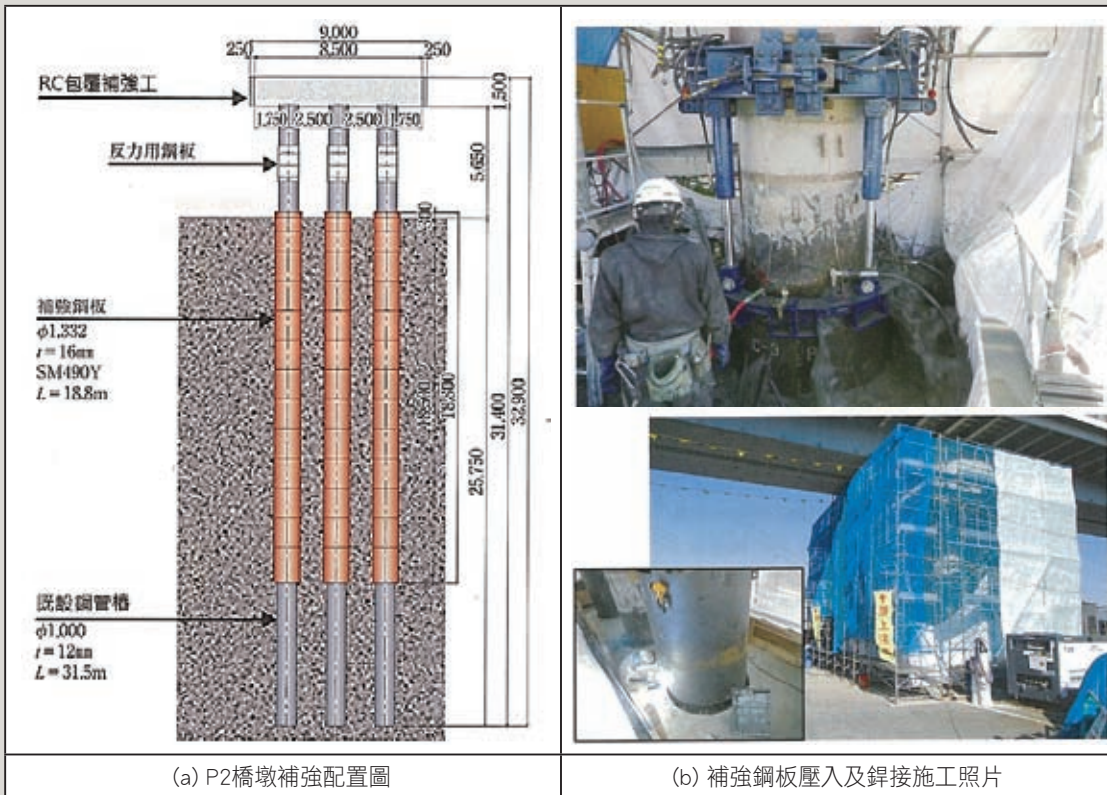


圖11 SSP工法配置及現地施作照片

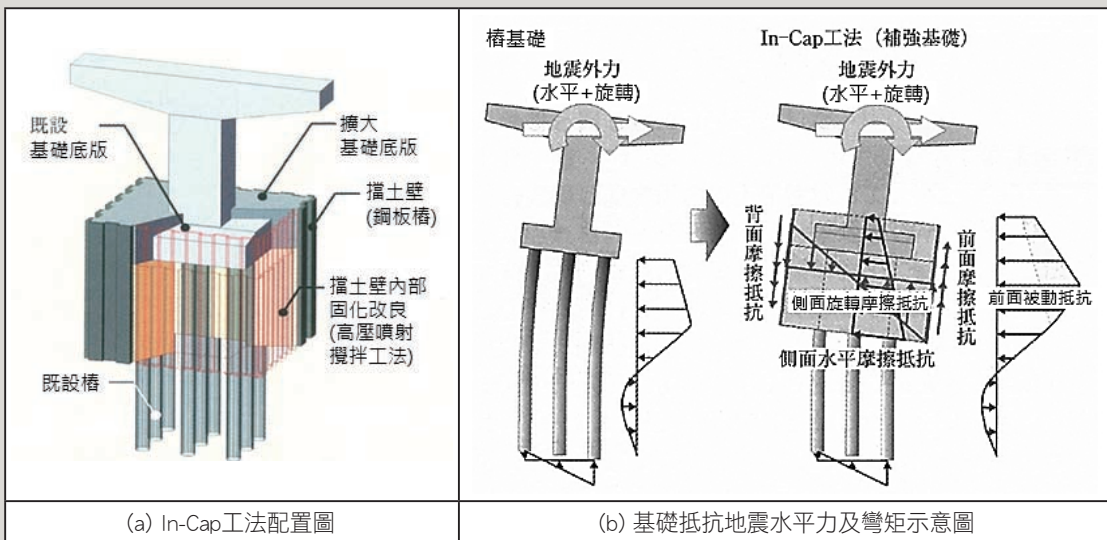


圖12 In-Cap工法示意圖

#### 四、日本樁基礎補強In-Cap工法

In-Cap工法之補強方式，係於樁帽範圍施作圍束鋼板樁，並於鋼板樁內部、基礎版下方採高壓噴射樁方式施作固化改良體，而後以擴

大樁帽方式連結既有基礎版，達到增加基礎抵抗地震水平力及彎矩之能力[8]。工法示意圖如圖12所示，屬3.1節所述固化地盤、抑制土體變位、強化基礎之複合方案。

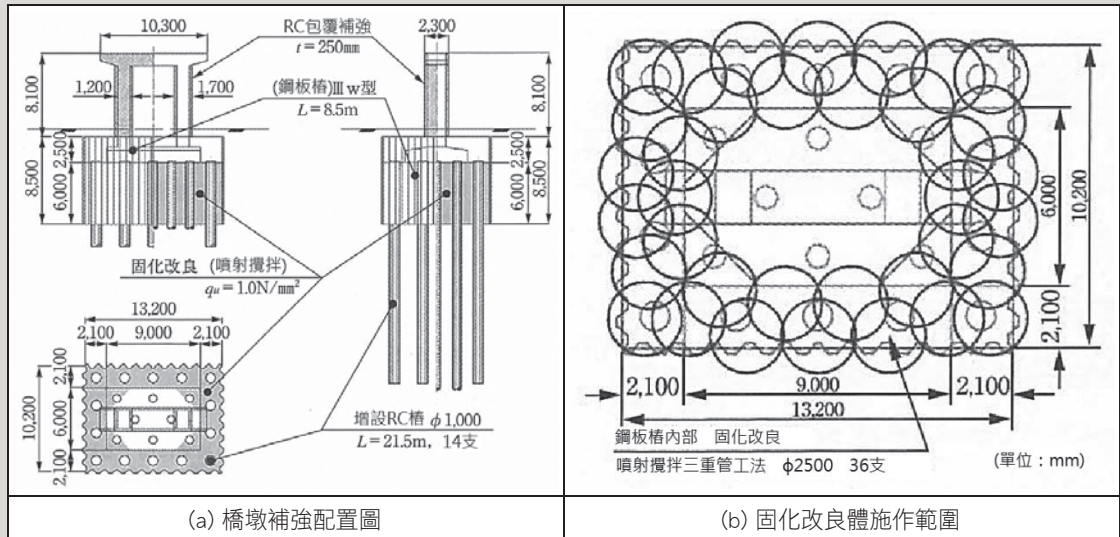


圖 13 In-Cap工法現地施作配置

本工法實際應用案例為日本1965年建造於利根川之跨越橋，橋長約170m，上部結構為6跨版梁橋，下部基礎為梅花型配置基樁8支，因現地淺層地層屬N值0~2之軟弱黏土層，至地表下20m為承載層，依新頒布之耐震設計規範進行檢算，顯示基礎地震時之承載力及水平變位皆未能達到耐震規範要求。

耐震補強工程採用In-Cap工法增進基礎抗震能力，考量施工中既有橋梁安全，以靜壓方式打設鋼板樁圍束基礎(長度為8.5m)，之後以噴射攪拌三重管工法施作固化改良(改良率100%，長度6m)，並增設14支RC基樁(樁徑1m、樁長21.5m)以增加基礎承載力，最後施作擴大樁帽連結既有基礎版。

為維持既有橋梁上車輛通行安全，施工時採用自動化系統進行監測，項目包括橋墩之三向度光學變位計、傾斜計及支承位置變位計等，結果顯示施工對既有橋墩無明顯影響。此外，比對耐震補強前後橋墩之地震計觀測資料，結果顯示採用In-Cap工法補強，確實減低地震時橋梁之受震反應。施工配置如圖13所示。

## 伍、結論

- 一、國內既有橋梁逐漸面臨結構老化及橋梁安全性不符新頒的耐震規範要求等問題，其修復補強工作確有其必要性，適時妥善之維護管理可有效降低橋梁設施之受震損害程度及風險，進而提高其安全性及使用年限。
- 二、土壤液化為地震時造成橋梁等工程結構物受損之重要因素，基礎耐震補強對策可概分為(1)提高土體密度及強度、(2)固結地盤、(3)加速超額孔隙水壓消散、(4)阻斷及抑制土體變形、(5)降低地下水位、(6)加強構造物耐震能力等六類，必要時可考慮採取複合式工法以達到最佳之防治功效。
- 三、為達到防治土壤液化的發生或加強構造物耐震能力的目的，相應之補強或防治工法之選擇，應考慮現地地層條件、既有基礎型式、補強工法成效、施工條件及限制等因素，依致災原因及損害型態，選擇適宜之修補工法，達到復舊與補強之目標。

## 參考文獻

1. 曾清銓、張荻薇(1995)，“1995年1月17日日本兵庫縣南部地震阪神、淡路大震災訪查報告”，中華技術第27期，第31～49頁。
2. 日本建設省土木研究所(1995)，“液狀化對策工法共同研究成果概要”。
3. 張荻薇(1996)，“日本阪神震災橋梁之修復與耐震補強考察報告”，中華技術第31期，第15～30頁。
4. 財團法人中華顧問工程司(2000)，“921集集大地震專輯再版”。
5. 基礎工(2006)，“既設構造物のための液狀化對策の考え方”，Vol.34，No.4，第5～7頁。
6. 蕭秋安、高邦基、周功台(2007)，“橋梁基礎修復補強設計與施工案例介紹”，地工技術第114期，第33～44頁。
7. 基礎工(2007)，“杭基礎の耐震補強—CPR工法の設計例”，Vol.35，No.2，第50～53頁。
8. 基礎工(2007)，“杭基礎の耐震設計・補強事例In-Cap工法”，Vol.35，No.2，第54～56頁。
9. 張荻薇、曾榮川、王泓文、蘇彥彰(2011)，“2011年東日本大震災勘災報告”，中華技術第91期，第198～234頁。
10. 張荻薇、廖學瑞、丁金彪、何泰源、陳俊樺、蘇彥彰、周永川(2012)，“2011年東日本大震災災後六個月勘災報告”，中華技術第93期，第250～302頁。
11. 張荻薇、周功台、曾榮川、蘇玫心、蘇彥彰、張鈺輝(2012)，“2011年東日本大震災災後一年勘災報告”，中華技術第95期，第106～152頁。
12. 基礎工(2015)，“有明コロッセムブリッジ耐震補強工事”，Vol.43，No.4，第48～51頁。
13. 張荻薇、王炤烈、廖學瑞、林曜滄、張英發、蔣啟恒、蕭秋安、謝慶和(2016)，“2016年二月六日美濃地震勘災報告”，中華技術第110期，第144～175頁。
14. 中華民國大地工程技師公會(2016)，“液化區基礎修復補強工法對策說明書”。
15. 國家地震工程研究中心網站：<http://www.ncree.org/SafeHome/>

# 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

橋梁或跨越山谷、河川、路口，克服地形的障礙、縮短兩地的距離，往往也成為維繫交通的樞紐，人類文明的象徵，其重要性不言而喻。而隨著國內基礎建設逐漸完備，大型橋梁工程建設已逐年減少，對於既有橋梁防災設計、延壽策略以及檢測技術、維護管理作業的瞭解與掌握，儼然成為橋梁工程師必須具備的核心職能。希望藉此技術分享與了解，讓各界能更關注橋梁防災與延壽議題，共同打造永續及高品質的生活空間。

謹此特別感謝臺北市工務局彭振聲局長、新北市工務局朱惕之局長及國立臺灣大學土木工程學系呂良正系主任能在百忙之中接受專訪，指引橋梁防災與延壽的積極作為與未來方向，以及撰寫專題報導的諸位作者貢獻心力，提供寶貴資料並分享實務經驗。

## 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三份及原稿電子檔，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。
- 112期中華技術專輯主題／系統機電創新突破  
出刊日：2016年10月31日



台北市10637辛亥路二段185號28樓  
28F., No.185, Sec. 2, Sinhai Rd., Taipei 10637, TAIWAN  
Tel: (02) 8732-5567, Fax: (02) 8732-8967, <http://www.ceci.org.tw>