

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

February
2016

經濟部



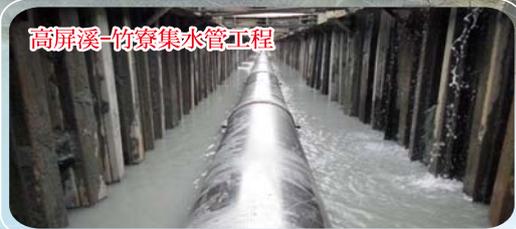
自來水工程建設

提供您我優質用水

雲林-湖山淨水場



高屏溪-竹寮集水管工程



高屏溪-竹寮集水管抽水機



新北市-三鶯水管橋



台灣自來水公司

TAIWAN WATER CORPORATION

廣告

ISSN 0253-3804



NT\$300



9 770253 380006



Volume 43, No. 1

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

專輯

結構監測

美濃地震勘災紀實

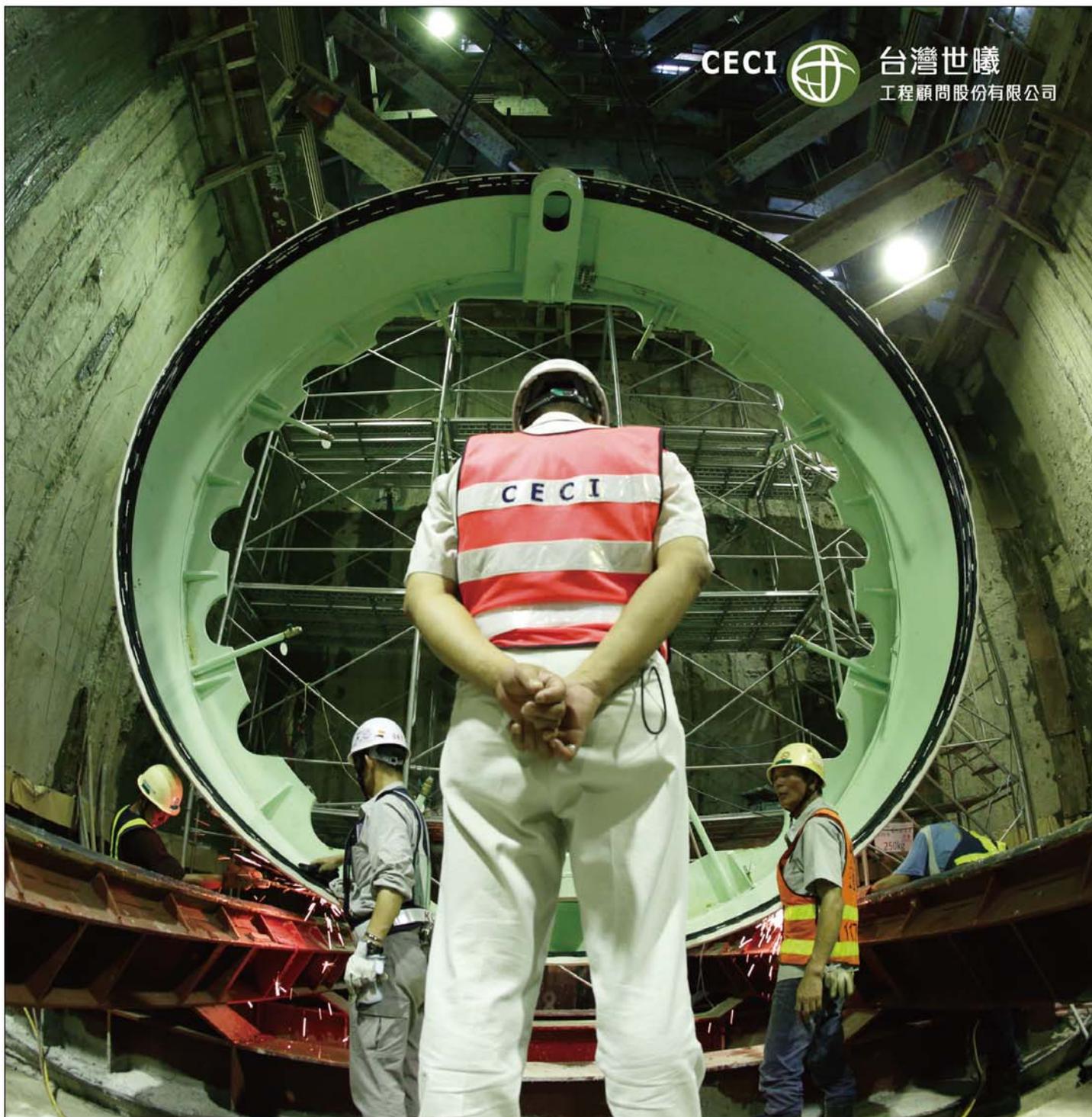
特別報導

CECI



台灣世曦

工程顧問股份有限公司



用心 做好每一件事情

匠心，才得以淬煉「專業」品質

誠心，才足以貫徹「人本」信念

悉心，才可以恢宏「關懷」情懷

台灣世曦永遠以「心」為出發

持續履行對土地、對人民不變的承諾

一個環境永續的生態樂園

一個幸福溫馨的生活家園



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

台北市11491內湖區陽光街323號

No. 323 Yangguang Street, Neihu District, Taipei City 11491, TAIWAN

Tel:(02) 8797-3567 Fax:(02) 8797-3568

<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw



台灣自來水公司
TAIWAN WATER CORPORATION

電話：(04) 2224-4191 傳真：(04) 2224-4201
地址：40455台中市雙十路二段2-1號
網址：http://www.water.gov.tw

土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



發行人：呂良正

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：宋裕祺 (國立台北科技大學土木工程系教授、編輯出版委員會主任委員兼總編輯)

副主任委員：王華弘 (明新科技大學土木工程與環境資源管理系副教授)

委員：王昭烈、何泰源、李順敏、李維森、林鎮洋、徐景文、曾昭衡
曾惠斌、黃尹男、廖肇昌、劉格非、鄭家齊、謝尚賢

(依姓氏筆劃排序)

定價：每本新台幣300元、每年六期共新台幣1800元 (航郵另計)

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：100055 台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：http://www.ciche.org.tw

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161 新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十二屆理監事

理事長：呂良正

常務理事：曹壽民 張荻薇 楊偉甫 歐善惠

理事：王昭烈 朱旭 李元唐 宋裕祺 沈景鵬 林其璋 吳瑞賢
胡宣德 高宗正 莫若楫 許泰文 陳仲賢 陳彥伯 陳國慶
廖學瑞 歐來成 劉恒昌 謝啟萬

常務監事：周南山

監事：李建中 李順敏 林志棟 張培義 楊永斌 壽克堅

秘書長：倪惠妹

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠營建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水部分會
- 土水東部分會

中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第518號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第0248號

美濃地震勘災特別報導

📖 國震中心地震災害應變作業報告

葉芳耀／吳俊霖／林哲民／邱聰智／陳俊仲／許尚逸
翁元滔／宋裕祺／鍾立來／黃世建／許健智／張國鎮 4

📖 土木技師勘災紀實

施義芳／陳玫英／莊均緯／賴建宏／梁詩桐 16

📖 結構技師動員報告

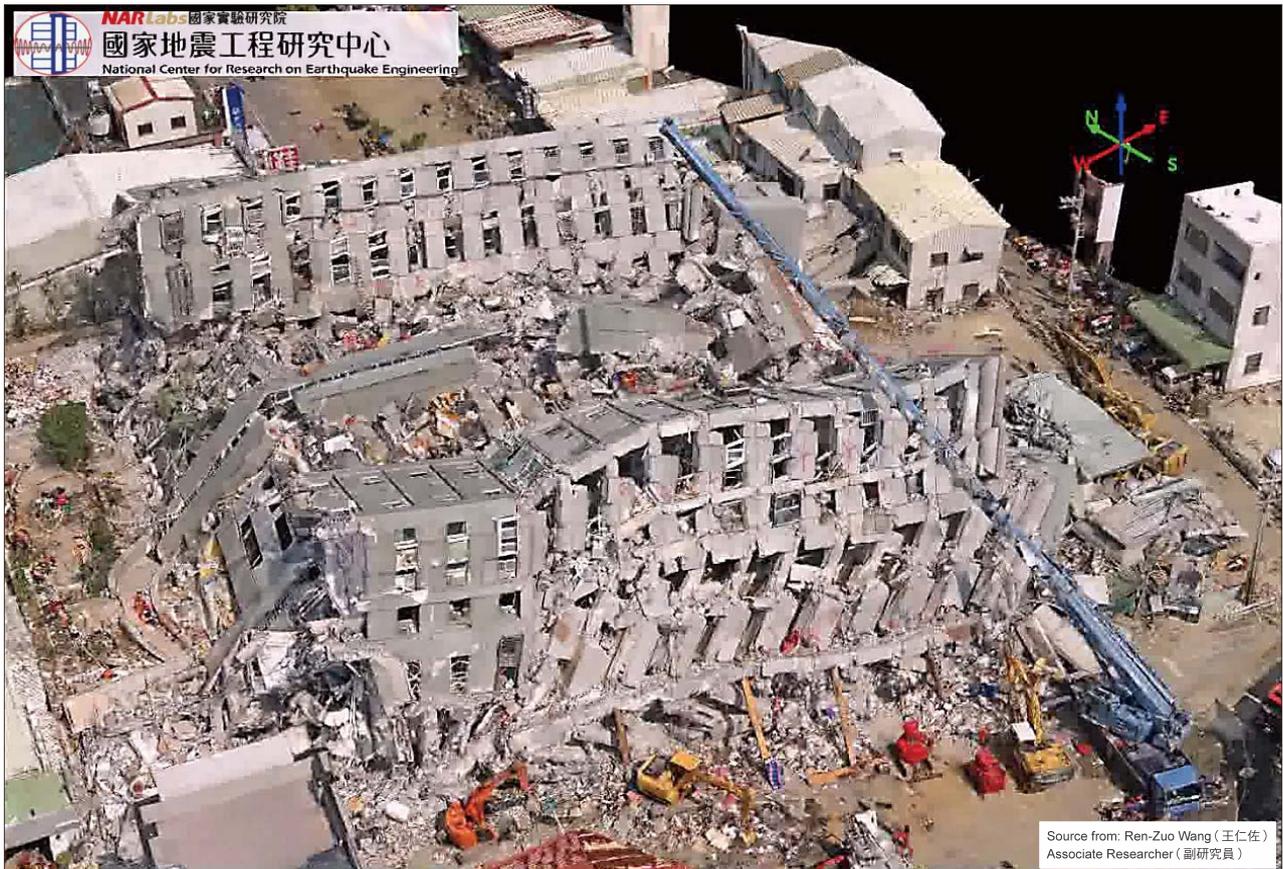
蔡榮根／婁光銘／江世雄 19

📖 大地技師災後投入

陳江淮 19

📖 2/15美濃地震勘災討論會

國家地震工程研究中心 20



2016年2月6日上午3時57分，規模6.4的高雄美濃地震重創台南，永康區維冠金龍大樓倒塌，釀成重大災情。土木工程各界在災情發生後立即動員，國家地震工程研究中心與各專業技師公會在第一時間，紛紛成立任務編組投入救災。他們放棄春節假期輪番駐守，貢獻工程專業以期減少災情，與中央及地方政府全力合作安撫民心，土木人的表現深受各界讚賞。本期特別報導介紹相關單位緊急動員情況，還原當時救災策略研議的現場，藉由這篇報導我們向土木人致敬！

工程焦點

- 📖 臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 鍾維力 22

結構監測專輯

(客座主編：鄭家齊／朝陽科技大學營建工程系教授兼系主任)

- 📖 專輯序言：防範於未然 — 結構監測最新發展及案例 鄭家齊 26
- 📖 人行吊橋之橋梁安全監測 王仲宇／陳志賢 27
- 📖 橋梁健診系統建置與評估 張嘉峰／邱信諤／賴澄燦／鄭丁興 34
- 📖 橋梁安全監測系統介紹 — 以芙谷峩橋為例 黃進國／葉啟章／王正中／鄭書恒／邱毅宗／黃秋揚／陳嘉盈 41
- 📖 光纖光柵在地工安全監測之應用 黃安斌／何彥德／王建智／吳崑瑋 48
- 📖 光柵感測技術在橋梁安全監測與管理上的初步應用 李政寬 53
- 📖 無線感測器監測技術之開發 林宜清／童建樺／李宗翰 58
- 📖 影像量測於結構監測之應用 黃仲偉／紀乃文／陳北亭／楊元森／林詠彬 66
- 📖 微波雷達系統於橋梁監檢測實務案例之應用 許耿蒼／鄭家齊／江支弘 75

學會資訊看板

- 📖 第九屆（2015）公共工程非破壞檢測技術研討會 鄭家齊 84

廣告特搜

- 台灣自來水公司 — 自來水工程建設 · 提供您我優質用水 封面
- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 用心做好每一件事情 封面裡
- 森泰儀器有限公司 — 唯一通過工研院認證的[網路RTK] 86
- 福清營造股份有限公司 — 多元服務 · 基業長青 封底裡
- 潤泰營建團隊 — 跨時代整合服務 封底

美濃地震勘災特別報導

國震中心地震災害應變作業報告

葉芳耀／國家地震工程研究中心研究員

吳俊霖、林哲民、邱聰智／國家地震工程研究中心副研究員

陳俊仲、許尚逸、翁元滔／國家地震工程研究中心副研究員

宋裕祺／國立台北科技大學土木系教授、國家地震工程研究中心橋梁組組長

鍾立來／國立台灣大學土木系教授、國家地震工程研究中心建物組組長

黃世建／國立台灣大學土木系教授，國家地震工程研究中心副主任

許健智／國家地震工程研究中心副主任

張國鎮／國立台灣大學土木系教授、國家地震工程研究中心主任

摘要

本文以美濃地震動員勘災為例，介紹國家地震工程研究中心之地震災害應變作業。文中首先對美濃地震做簡單說明；其次介紹國震中心之地震災害應變作業及其作業程序與任務編組；接著以美濃地震動員勘災為例，說明國震中心地震災害應變作業之過程與初步勘災成果，包括：建築物及非結構災害調查、校舍建築災害調查、橋梁災害調查、大地工程災害調查、協力機構動員狀況及美濃地震勘災討論會；最後彙整初步災害調查結果及美濃地震勘災討論會之會議結論，以供與地震工程相關之產、官、學、研各界參考。

美濃地震概述

民國 105 年 2 月 6 日凌晨 3 時 57 分 27.2 秒（世界時間 2 月 5 日晚上 7 時 57 分 27.2 秒），臺灣地區於高雄市美濃區發生一起芮氏規模 M_L 6.4 之地震，根據交通部中央氣象局地震測報中心（以下簡稱氣象局）

第 105006 號地震報告所公布之地震速報震源參數資料顯示，震央位置在北緯 22.93 度、東經 120.54 度（屏東縣政府北偏東方 27.4 公里處），震源深度 16.7 公里。氣象局即時站資料顯示，台灣全島最大震度達 7 級，為距離震央 24.2 公里的台南市新化測站（站碼 CHN3）所觀測到東西向加速度峰值 401cm/s^2 ；雲林縣草嶺震度也達 6 級。震度 5 級地區包括：屏東、高雄、台南、嘉義；震度 4 級地區包括：台東、南投、彰化、台中等，其他地區除台北外，皆達震度 1 級以上。財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心（以下簡稱國震中心）即時監測站也於距離震央 13.9 公里的台南市南化區埔仔測站觀測到最大加速度峰值為 408cm/s^2 。依據氣象局和美國地質調查所公布之震源機制解資料，配合國震中心 TELES 震災模擬推估及實際災情分布，主震震源推測為近東西走向並向北傾之斷層破裂面，錯動方式主要為平移帶逆衝型態。綜整氣象局與國震中心即時網實測紀錄所繪製之地震動分布圖如圖 1 所示。

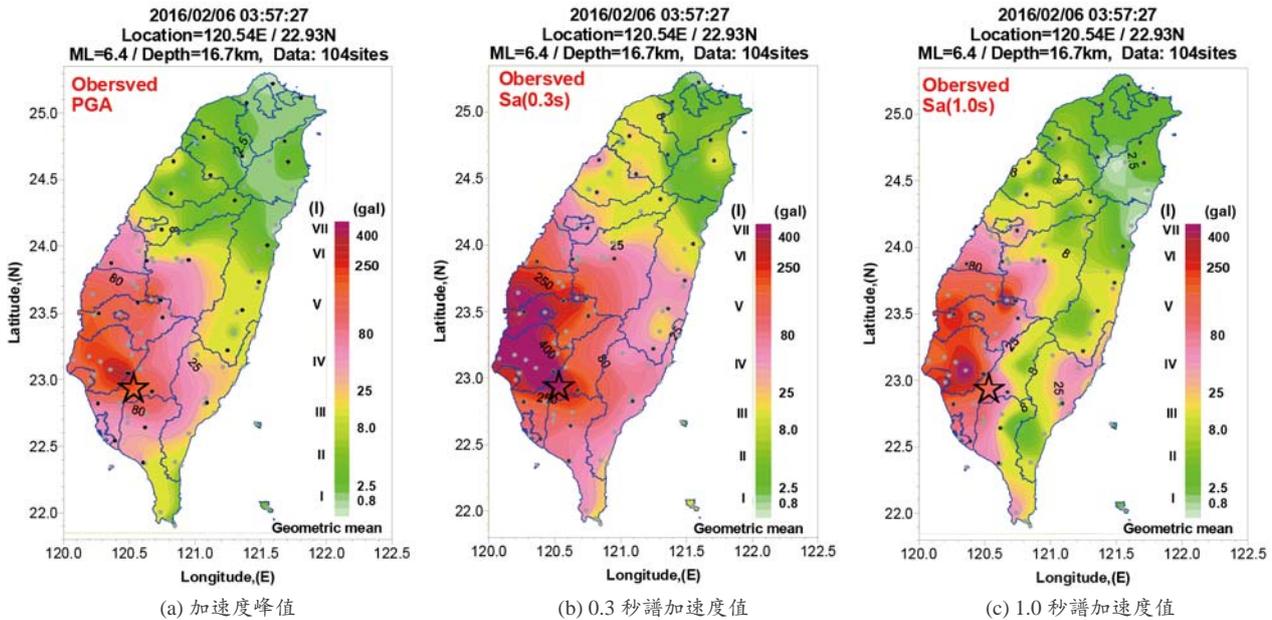


圖 1 依據即時站實測紀錄繪製之地震動分佈圖

國震中心地震災害應變作業

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心地震災害應變作業手冊^[1]（以下簡稱作業手冊）訂定之主要目的，為支援震災中央災害應變中心，執行地震災害之分析研判及相關決策採行措施之建議。依據作業手冊之規定，結合國震中心同仁以及協力單位相關人員成立地震災害應變支援組共同作業，使國震中心各組工作人員能夠依既定流程執行地震災害之災情評估、災情彙整以及震後勘災的工作，發揮本中心震災緊急應變與支援之運作效能。

應變階段與作業重點

國震中心針對地震災害應變所需之作業程序，將作業程序分為減災、整備、應變支援、復建四個階段（各階段開設之原則與依據如表 1），各階段作業重點分別如下：

減災、整備階段

- (1) 地震減災相關之資料庫的收集、建置與維護。
- (2) 地震災害損失評估之分析軟體的開發、更新與測試。
- (3) 與各協力機關單位間資訊傳輸系統之建置與測試。
- (4) 應變作業之硬體設備，包含作業場地空間、電力與通信系統、物資備援等應變支援作業相關環境之規劃與加強。
- (5) 緊急動員方式、震後勘災計畫、新聞

媒體聯繫互動等應變支援作業相關運作計畫之訂定。

- (6) 與各協力機關單位共用傳輸資料格式之訂定。
- (7) 儀器設備系統的維護保養。
- (8) 應變支援人員之編組訓練。
- (9) 不定期進行無預警之模擬演練與動員。
- (10) 國內外相關地震災情與整備資料作為參考。
- (11) 勘災作業相關表格之訂定。
- (12) 工作人員聯繫資料之確認與更新。
- (13) 相關物資之清點確認與更新。

應變支援階段

- (1) 震災早期評估系統自動啟動進行震災規模研判，依據作業手冊開設原則（如表 1）啟動震災應變作業程序。
- (2) 通訊聯繫系統自動開始動員國震中心所有應變人員。
- (3) 於警戒階段，應變人員可就地進行資料蒐集、評估及相關應變工作。
- (4) 若提昇為部分動員階段，應變人員須立即回到中心，執行相關應變工作。
- (5) 為區分不同災害規模所需的動員人數，故區分部分動員和全部動員。但應變作業流程和要項，部分動員和全部動員相同。
- (6) 綜合整理震災損失評估結果之資料，隨時向中央災害應變中心進行簡報。
- (7) 災情彙整資料蒐集，並回傳中央災害應變中心與消防署進行比對參考，避免遺漏或重複資料。
- (8) 與各協力機關單位取得聯繫，交換相關資訊。
- (9) 災情資訊側錄彙整系統立即起動。
- (10) 警衛保全人員管制人員出入及控管空間的使用。

表 1 國震中心應變支援各階段開設原則

開設階段	開設依據		
減災、整備階段	為平時未發生災害地震時段或國內地震未達國震中心之警戒階段標準		
應變支援階段	國內地震達國震中心之警戒階段標準以上。立刻啟動國震中心災害應變支援小組，同時待命支援中央災害應變中心		
復建階段	中央災害應變中心撤除之後，進入震後勘災與重建規劃階段		
	警戒階段	部分動員	全部動員
Le：早期評估人員傷亡	≥ 1	≥ 10	≥ 15
Ls：詳細評估人員傷亡	--	≥ 5	≥ 10
Lr：實際傷亡	≥ 1	≥ 5	≥ 10
I：最大震度	≥ 6 級	--	--
M-in	$M_L \geq 6.3$ 且 $Depth \leq 20KM$	--	--
M-out	$M_L \geq 6.8$ 且 $Depth \leq 30KM$ 且 $Distance \leq 30KM$	--	--

復建階段

(1) 整理國震中心應變支援作業環境，使之恢復減災與整備狀態。(2) 震後勘災人員執行災區相關之勘災計畫。(3) 持續進行震災媒體資訊之蒐集。

作業架構與各組任務分工

國震中心依據工作性質與任務的不同，將中心工作人員分為五個工作組，分別為(1)災情評估組、(2)災情彙整組、(3)勘災行動組、(4)應變支援組(機電、行政、資訊、物資、公關)以及(5)決策綜整組。各工作組別的任務如下：

災情評估組

(1) 視地震災害程度啟動本中心應變機制。(2) 與本中心應變進駐小組保持密切聯繫，充分溝通資訊。(3) 綜合整理災情評估資料，供本中心提報中央災害應變中心討論與決策。(4) 災情評估之軟硬體設備規劃與人員分工編制。(5) 建議本中心應變支援作業之撤除時機。

災情彙整組

(1) 災情彙整與統計分析。(2) 與相關災情彙整單位保持密切聯繫，確保資訊溝通順暢。(3) 電視新聞側錄儀器裝置之規劃。(4) 媒體資料蒐集與後續整理工作。

勘災行動組

(1) 地震災害初期資訊之蒐集整理。(2) 勘災決策訂定之幕僚作業。(3) 協調與組織其他團體機構。(4) 勘災

隊伍成員編組及輪值。(5) 建立勘災臨時辦公室。(6) 進行現地災害調查。(7) 準備勘災調查報告。(8) 對後續勘災之支援與組織。

決策綜整組

(1) 配合中央災害應變中心之開設，代表本中心進駐支援。(2) 本中心災情評估小組提供災情研判相關資訊，以協助中央災害應變中心進行分析研判作業及建議採行因應措施。(3) 蒐集並回傳中央災害應變中心之作業情況、即時災情與決策相關資訊，以助本中心災情評估與研判之作業。(4) 依據地震災情資訊，協同主任判斷應變作業之層級與動員規模。

美濃地震災害應變

國震中心災害應變動員情形

此次美濃地震於凌晨 3 時 57 分發生後，4 時 5 分 TELES 系統以簡訊傳出早期評估人員傷亡約 12 人(可能區間 5 ~ 30 人)及 1045 個村里警戒，隨即依作業手冊各階段開設之原則與依據(如表 1)啟動國震中心地震災害應變作業程序。震災中央災害應變中心於凌晨 4 時 59 分傳來簡訊，要求各應進駐單位指派適當層級人員，立即完成進駐，本中心即指派決策綜整組柴駿甫博士進駐震災中央災害應變中心。

災情評估組及災情彙整組進駐中心後，即進行美濃地震相關資訊及災情彙整與資料蒐集，第 1 版「高雄美濃地震概要」於 105 年 2 月 6 日上午 7 時 16 分產出，內容包括：中央氣象局高雄美濃地震報告、等震度圖與 PGA 分佈、近震源地震站即時波形、震源機制解、餘震活動、附近區域重要歷史地震、推估各地地表最大加速度、推估各地譜加速度、推估人員傷亡數、推估鄉鎮區全半倒棟數、平面及電子媒體的災情資料等，綜合整理震災損失評估結果之資料，提供決策綜整組及中央災害應變中心參考。第 2 版「高雄美濃地震概要」於 2 月 6 日上午 8 時 51 分產出，內容新增：高雄美濃地震之實測紀錄之地震動分佈圖與地震歷時與加速度反應譜。第 3 版「高雄美濃地震概要」於 2 月 6 日上午 9 時 58 分產出，內容更新建物、校舍、公路等災情彙整。第 4 版「高雄美濃地震概要」於 2 月 6 日上午 11 時 51 分產出，內容新增重大災情彙

整及校舍推估受震地表加速度。第 5 版「高雄美濃地震概要」於 2 月 8 日凌晨 0 時 18 分產出，內容更新強地動分析資料及校舍勘災資料^[2]。後續「高雄美濃地震概要」版次則依實際災損情形適時更新，提供決策綜整組及中央災害應變中心參考。震災中央災害應變中心於 2 月 14 日 16 時撤除，各進駐同仁歸建，恢復平時應變機制。

另於於 2 月 6 日上午 7 點多即電邀土木技師公會全國聯合會施義芳理事長、台北市結構技師公會婁光銘理事長、台灣省結構技師公會江世雄理事長、台灣世曦工程顧問股份有限公司王炤烈總經理及工程界資深專家等於上午 10 時正式開會，與本中心張國鎮主任、許健智副主任、橋梁組宋裕祺組長、強地動組溫國樑組長及決策綜整組長官與同仁，開會研商建立震災緊急應變處理平台。就地震災損情形，如何進行緊急應變及緊急動員，並對救援與勘災行動進行任務分配，以降低地震所造成的災害與損失。

然而此次地震恰巧發生在農曆春節之前，大部份中心同仁可能已返鄉過年。若依照原先排定震災應變任務編組之排班表與勘災人員組織分工表之緊急勘災人員輪值表進行動員，因高鐵交通中斷由北向南只能到台中，將嚴重影響緊急動員及勘災行動。經與本中心許健智副主任討論，決定採用「就近徵召」為原則，各組需至中心報到之人員，動員目前還在北部地區且無需返回中南部過年之同仁立即回到中心，執行相關應變支援作業。勘災行動組則動員已返回南部過年之同仁及位於南部地區之協力機關與單位，緊急動

員及擬定震後勘災計畫，進行勘災行動等應變支援作業。國震中心即以通訊聯繫系統自動開始動員所有應變人員，進行地震災害應變作業，緊急動員勘災及災害調查分述如下：

建築物及非結構災害調查

本次地震造成的建築物災害主要集中在台南地區，國震中心人員於地震發生後立即蒐集網路媒體報導災害資訊，彙整本次建物主要災害發生地點（如圖 2），並結合 (1) 國立成功大學建築系姚昭智教授、杜怡萱教授、鍾育霖教授、國立成功大學土木系張文忠教授；(2) 高雄第一科技大學營建系郭耕杖教授；(3) 長榮大學邵佩君教授；(4) 內政部建築研究所；及 (5) 結構技師等協力機關與單位，於 2 月 6 日即進行初步勘災，主要目的為確認災害地點、損壞機制與初步評估災害情況。

建築物震損

(1) 永康區維冠金龍大樓

維冠金龍大樓位於台南市永康區永大路二段，此大樓為地上 16 層、地下 1 層建築物。該大樓興建年代約於 1994 年（民國 83 年），主要用途為住商混合之集合住宅。維冠金龍大樓於此次地震中不幸發生建築物倒塌之現象（如圖 3），造成共 115 人罹難，是臺灣有史以來在單一建築物倒塌事件中，罹難人數最

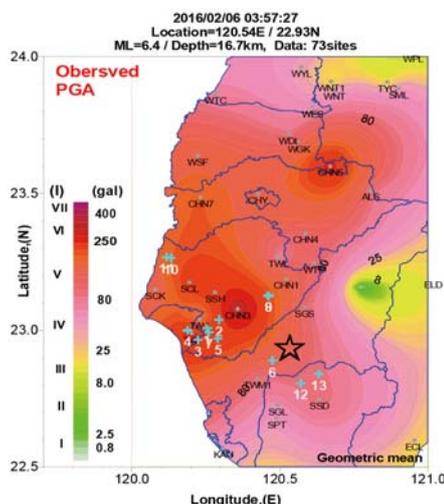


圖 2 建築物災害主要勘災地點

No.	0206 主要災情點
1	台南市永康區維冠金龍（燦坤）大樓
2	台南市新化區京城銀行
3	台南市東區大智市場
4	台南市中西區風神廟
5	台南市歸仁區信義北路 & 大仁街口
6	高雄市旗山天后宮
7	台南市仁德區太子路
8	台南市玉井區民族路
9	台南市玉井國中
10	台南市北門國小玉湖分校
11	台南市北門國小



(a) 續接器位置於同一平面



(b) 柱箍筋量不足

圖 3 永康區維冠金龍大樓震損照片

多的一次。維冠金龍大樓倒塌的因素相當眾多，但主要原因在於低矮樓層因商場使用關係，移除大量隔間牆，形成結構系統之軟弱層；此外，建築施工不當亦影響結構耐震能力，引致如此慘重之傷亡。

(2) 新化區京城銀行

京城銀行位於台南市新化區中山路，此大樓為地上十層、地下一層建築物。該大樓興建年代約於 1996 年(民國 85 年)，主要用途為住商混合之出租住宅。京城銀行大樓因一二層為銀行，因此於底層挑空且挑高，故使底層柱承受極高之軸力，遂造成車道出口附近之柱，發生軸力破壞進而使建築物倒塌(如圖 4)。



(a) 底層垂直桿件破壞



(b) 1 樓柱軸力破壞

圖 4 新化區京城銀行震損照片

(3) 台南市東區大智里菜市場

大智里菜市場位於台南市東區長東街，此建築為地上四層、地下一層之混合住宅。此建築為一連棟之公寓，因菜市場使用需求，可發現一樓幾乎無任何隔間牆，故一樓柱同樣承受較大之軸力，使柱於地震後產生軸力破壞、倒塌之行為(如圖 5)。



(a) 建築物倒塌現況



(b) 柱軸力破壞

圖 5 台南市東區大智里菜市場震損照片

(4) 台南市中西區風神廟

風神廟位於台南市中西區民權路三段，此為地上一層之廟宇。此建築主要為磚石構造，故耐震力較差，主要破壞現象為鐘鼓樓倒塌(如圖 6)。



(a) 建築物原貌



(b) 倒塌現況

圖 6 台南市中西區風神廟震損照片

(5) 台南市歸仁區信義北路與大仁街口公寓

此棟建築位於台南市歸仁區信義北路，為 7 層樓公寓，興建年代約於 2000 年（民國 89 年）。此建築因一二樓為商業用途，牆體數量較少，形成軟弱層，故僅一二樓發生坍塌，上部結構完整。並且，此結構因位處於路口轉角處，結構系統易發生剛心偏離所引致之超額意外扭轉，導致建築倒塌（如圖 7）。



(a) 倒塌現況 (b) 柱軸力破壞

圖 7 台南市歸仁區信義北路與大仁街口公寓震損照片

(6) 高雄市旗山天后宮

天后宮位於高雄市旗山區永福街，此處為一牌樓倒塌，其構造為磚造牌樓，同樣於地震時發生面外倒塌之行為（如圖 8）。



(a) 建築原貌



(b) 牌樓倒塌現況

圖 8 高雄市旗山天后宮震損照片

(7) 台南市仁德區太子路公寓

此公寓位於台南市仁德區太子路，為地上三層並加蓋一層鐵皮屋之建築，興建年代為 1980 年（民國 69 年）。因興建年代較為久遠，故其垂直桿件耐震能力不足，且因結構系統配置不良，導致結構系統產生扭轉之現象，故發生軟弱層崩塌之現象（如圖 9）。



(a) 建築原貌 ↑

(b) 倒塌現況 →

圖 9 台南市仁德區太子路公寓震損照片

(8) 台南市玉井區民族路民宅

此建築位於台南市玉井區民族路，為地上三層之一般街屋，興建年代約為 1989 年（民國 78 年）。此棟建築並未發生建築倒塌之行為，但於屋內清楚可見隔間磚牆之剪力破壞現象（如圖 10）。



(a) 磚牆剪力破壞 ↑

(b) 磚牆 X 型剪力裂縫 →

圖 10 台南市玉井區民族路民宅震損照片

非結構破壞

錦繡世界大樓

此建築位於台南市南區大德街，為地上十三層之鋼筋混凝土大樓。此棟大樓於地震後勘災發現，位於大樓內之非結構牆產生剪力破壞之現象，亟需災後針對非結構桿件之修復（如圖 11）。



(a) 非結構牆之剪力破壞 ↑

(b) 梯間牆剪力破壞 →

圖 11 錦繡世界大樓震損照片

校舍建築災害調查

地震後國震中心隨即與國立成功大學組成勘查小組進行建築物以及非結構物震損情形之調查，其中一組人員主要針對臺南地區受損校舍展開實地勘查，相關資訊係依據台南市、高雄市及屏東縣政府教育局（處）承辦人提供，2月6日當天總計前往3所國中小學校，與震央之相對位置如圖12所示，各校之經緯度位置及受震程度整理於表2。以下各節將針對各校分別描述校舍之災損情況。

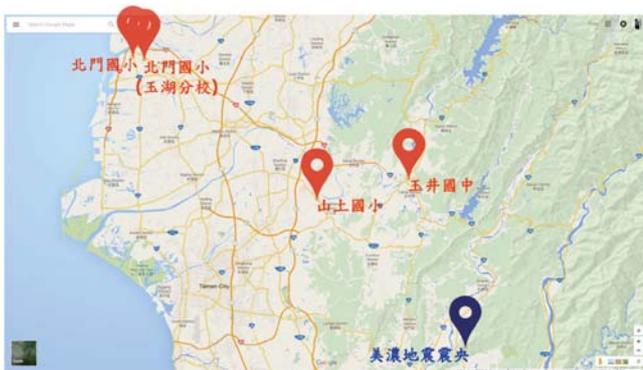


圖 12 高雄美濃地震校舍勘災地理位置圖

表 2 各校地理位置及受震程度

項次	縣市別	學校名稱	經度*	緯度*	最大地表加速度† (PGA)
1	臺南市	玉井國中	120.4705	23.1238	183.39
2		北門國小	121.3066	25.0069	105.51
3		北門國小 (玉湖分校)	120.1392	23.2616	116.80
4		山上國小	120.3553	23.1008	176.28

* 採 WGS84 座標系統。

† 依據中央氣象局強震即時速報站量測資料內插計算所得。

台南市玉井國中

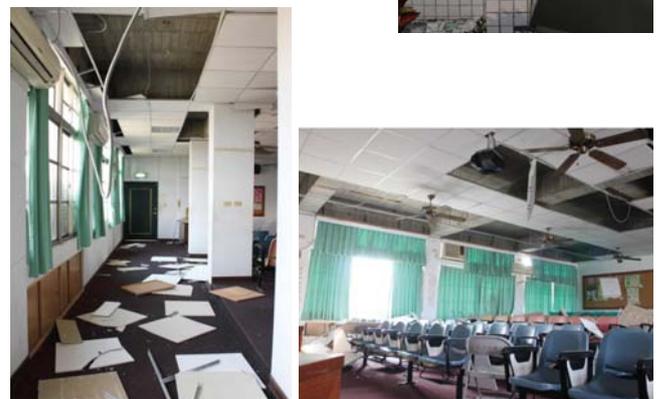
玉井國中位於台南市玉井區大成路，經緯度座標為東經 120.4705 度，北緯 23.1238 度。該校現有「專科教室」、「活動中心」、「勤勞樓」、「至善樓」以及「樸實樓」，共計 5 棟校舍。國震中心推算該校之震度為 5 級，本次地震震損校舍為「專科教室」及「活動中心」。

「專科教室」為地上三層之鋼筋混凝土造建築，屬單邊走廊但走廊部分有柱之結構型式，興建年代約為民國 87 年。該棟校舍於民國 99 年 0304 甲仙地震後出現部分磁磚掉落，教室隔間牆僅有輕微裂縫。本次現場勘查時，學校已先行封鎖危險區域加以隔離，此次地震使得一樓窗台柱均出現斜向剪力裂縫（如圖 13a），尤以背面側之窗台柱最為嚴重，研判柱體因上下



(a) 一樓窗台柱均出現斜向剪力裂縫↑

(b) 背面側之窗台柱因窗台束制產生嚴重剪力裂縫，開裂程度已可清楚看到鋼筋→



(c) 輕鋼架天花板掉落

圖 13 台南市玉井國中專科教室震損照片

兩端受到窗台束制，出現嚴重之斜向剪力裂縫，開裂程度已可清楚看到鋼筋（如圖 13b）。除此之外，該棟校舍之二樓與三樓輕鋼架天花板因地震搖晃，造成靠近建築物邊緣處之天花板掉落（如圖 13c）。

「活動中心」為地上 3 層之鋼筋混凝土造建築，屬單邊走廊且廊外有柱之結構型式，於民國 86 年興建。進入活動中心後，首先發現地板有大量紅磚塊碎片，經勘查後發現為管道間兩側紅磚禁不起地震晃動而掉落（如圖 14a），再者，靠近看台最上方位置可以發現梁底與紅磚交界面明顯開裂（如圖 14b）；另該棟校舍有多處柱體與相鄰之磚翼牆出現斜向裂縫，受損位置之另一側亦可觀察到斜向裂縫（如圖 14c）。內部受損情形勘查結束後，接著至活動中心建築物外側勘查受損情形，發現牆面上磁磚脫落，窗戶則因受到擠壓而掉落地面（如圖 14d），窗戶外框之混凝土塊搖搖欲墜，窗戶玻璃破損，當天已請學校緊急封鎖此區域，避免人員因掉落物而受傷（如圖 14e）。除上述建築物受損外，另有多處水塔受損（如圖 15）。



(a) 管道間因地震造成大量紅磚掉落

(b) 梁底與下方磚牆交界面開裂



(c) 牆面出現斜向裂縫，另一面亦出現裂縫



(d) 牆面磁磚脫落，部分窗戶受擠壓掉落地面↑

(e) 窗戶外框混凝土塊搖搖欲墜，窗戶玻璃破損→

圖 14 台南市玉井國中活動中心震損照片



圖 15 台南市玉井國中多處水塔受損照片

台南市北門國小

北門國小位於台南市北門區北門里，經緯度座標為東經 120.1251 度，北緯 23.2651 度。該校現有「西棟」、「前棟」、「後棟教室」、「活動中心」、「司令台」及「廚房」，共計 6 棟校舍。國震中心推算該校之震度為 5 級，本次地震震損校舍為「西棟」。

「西棟」為民國 59 年興建之地上一層之加強磚造建築，結構型式為單邊走廊但走廊無柱之結構型式。經現場勘查發現，該棟校舍有 2 處教室柱體出現開裂情形（如圖 16a），研判可能與學校鄰近海邊有關，該棟建築物前方並無任何遮蔽物，長期受到海風侵襲，柱內鋼筋可能早已有鏽蝕膨脹情形，此次地震來襲使得柱體開裂，經敲擊已開裂混凝土，發現為空心狀態。除此之外，走廊側有 1 處梁出現混凝土剝落情形，且清楚可見內部鋼筋（如圖 16b），初步判定可能為鋼筋鏽蝕膨脹造成混凝土開裂，本次地震後使得混凝土掉落。

台南市北門國小（玉湖分校）

北門國小（玉湖分校）位於台南市北門區玉湖里，經緯度座標為東經 120.1392 度，北緯 23.2616 度。該校現有「西棟」、「南棟教室」及「北棟教室」，共計 3 棟校舍。國震中心推算該校之震度為 5 級，本次地震震損校舍為「西棟」。

「西棟」為民國 73 年興建之地上一層之加強磚造建築，結構型式為單邊走廊但走廊無柱之結構型式。



(a) 西棟柱體出現垂直向裂縫，疑似內部鋼筋鏽蝕膨脹，本次地震後出現開裂



(b) 西棟走廊側梁底混凝土剝落，可見梁內鋼筋已生鏽（研判非本次地震造成）

圖 16 台南市北門國小震損照片

本次現場勘查時，發現該棟校舍有 3 根教室柱早期以鋼板包覆補強，其耐震補強時間不詳，未補強處之教室柱有 1 處出現垂直裂縫（如圖 17），該裂縫型式非典型地震力作用造成，研判內部鋼筋可能已有鏽蝕膨脹情形，本次地震使得混凝土開裂情形加大。



西棟柱體出現垂直裂縫，疑似內部鋼筋鏽蝕膨脹，地震作用後裂縫加大

圖 17 台南市北門國小（玉湖分校）震損照片

台南市山上國小

山上國小位於台南市山上區南洲里，經緯度座標為東經 120.3553 度，北緯 23.1008 度。該校現有「南一棟」、「南二棟」、「電腦教室」、「學生活動中心」、「廚房」、「北一棟」、「廁所」以及「體育室」，共計 8 棟校舍。

「南一棟」為地上二層之鋼筋混凝土造建築，屬單邊走廊且走廊外側有柱之結構型式，興建年代約為民國 54 年。該棟校舍正處於耐震補強工程期間，工期為民國 104 年 12 月至 105 年 3 月，地震發生時已完成翼牆及擴柱之結構體施作，尚待後續外觀裝修（如圖 18），本次地震並未造成結構體受損，顯示耐震補強確實有效，減少地震造成之災害。



南一棟已完成翼牆及擴柱結構體施作，並未於地震中受損

圖 18 台南市山上國小照片

橋梁災害調查

2 月 6 日美濃地震當天經媒體和公路總局工務段轉知，於台南市內門區台 3 線東勢埔橋及歸仁區台 86 線 24 號橋有震損情況發生，所幸並未造成用路人傷害。配合應變作業，國震中心即動員就近同仁前往橋梁震損現場進行勘查，初期動員 3 人分工進行，1 人前往東勢埔橋現場勘查，其震損災害為橋面下陷約 15 公分，引道路面有裂縫產生，下陷橋面伸縮縫處護欄有損壞，P1 帽梁有輕微損傷，當日工務段採緊急修復路面措施後，即單線開放通行減少交通衝擊。另 2 人前往台 86 線 24 號橋，該橋受地震影響造成橋面向東位移，經工務段量測最大位移約 50 公分，並有 5 處橋墩支承損壞及 1 處橋墩頂部混凝土破損（如圖 19），為此次地震相對較重大之橋梁震損事件，工務段顧及用路人安全，當日即進行預警性封閉，禁止通行。於震後數天，針對台 86 線 24 號橋，橋梁災害調查小組陸續動員 6 人次，以無人飛行載具



圖 19 台 86 線 24 號橋橋梁災害調查 (劉光晏及許家銓提供)

(UAV) 及手持式光達 (LIDAR) 掃描方式，就各損壞支承和損傷的橋梁構件做完整勘查紀錄，供後續研究工作參考，並研擬配合公路總局需求，協助橋梁修復建議方案擬定及必要之現地試驗規劃。

美濃地震並未造成橋梁重大災情的發生，提昇社會大眾對公共工程橋梁服務品質的信心，而透過歷次災害調查工作資料收集，對強化橋梁震害因應對策及橋梁耐震能力研究有莫大助益。

大地工程災害調查

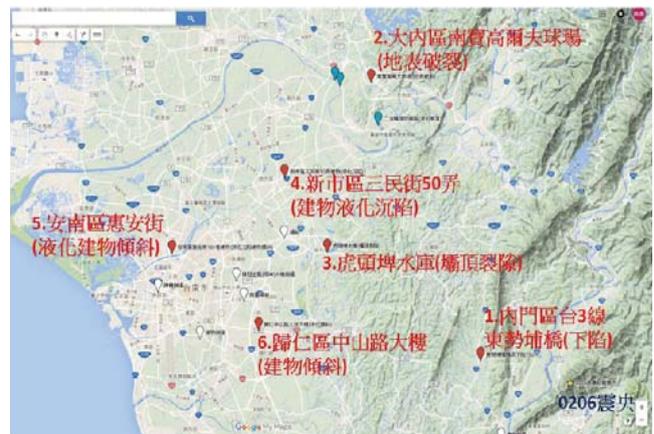
勘災動員與勘災標的路線

本次地震造成的大地工程災害主要包含台南市區土壤液化及其引致建物下陷傾斜、堤岸護坡滑移破壞、虎頭埤壩頂產生裂隙等災情，國震中心大地組人員於地震發生後立即蒐集網路媒體報導災害資訊，彙整本次地震重大地工災害與發生地點，並在本中心顧問陳正興教授與大地組組長黃俊鴻教授指揮下，於 2 月 11 日首次赴

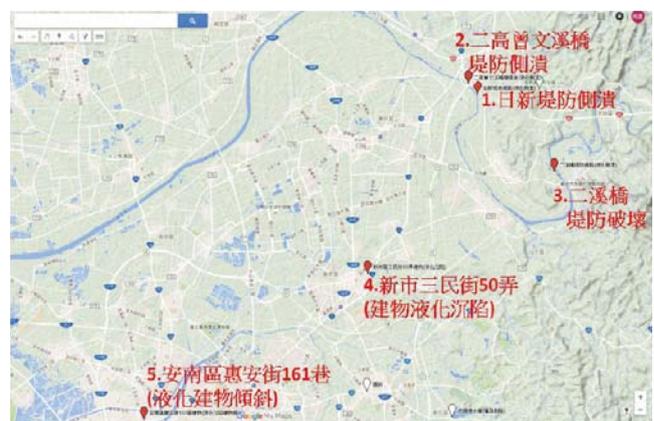
台南地區進行初步勘災，主要目的為確認災害地點範圍與初步評估災害情況。

2 月 11 日首次勘災成員包含 3 位國震中心研究人員並邀請暨南大學土木系王國隆副教授參加，並協助進行小型無人飛行系統 (Mini Unmanned Aircraft System) 之空拍作業，勘查標的依序為高雄市內門區台 3 線東勢埔橋、台南市大內區南寶高爾夫球場、虎頭埤水庫、台南市新市區三民街 50 巷與安南區惠安街 161 巷附近 (參見圖 20a)。

彙整初步勘災成果以及新增曾文溪沿岸堤防災情資訊後，確定 2 月 13 日進行第 2 次勘災除國震中心顧問陳正興教授、大地組組長黃俊鴻教授及 4 名博士級研究人力外，還邀請暨南大學土木系王國隆副教授、台灣大學土木系邱俊翔助理教授、中興大學土木系蔡祜欽副教授、協力廠商台安工程張龍騰總經理、陶林數值測量工程有限公司與大合基礎工程機構等，再針對曾文溪沿岸日新堤岸、曾文溪橋與二溪橋堤岸側潰及前述液化引致建物沉陷傾倒地區 (包含新市區三民街、安南區惠安街等地) 進行更詳細的勘災調查測繪與後續鑽孔規劃 (參見圖 20b)。



(a) 2 月 11 日勘災路線



(b) 2 月 13 日勘災路線

圖 20 大地工程災害勘災地點

2月15日國震中心人員會同台灣大學土木所與中央大學土木所研究生，於前述新市區三民街、安南區惠安街及曾文溪沿岸液化災情嚴重地區進行土砂取樣，可供後續室內現地土樣的物理性質與動力性質試驗。

大地工程災害調查初步成果

根據國震中心此次地震大地工程災害調查結果，針對台南地區液化引致街屋建物沉陷傾斜與曾文溪沿岸堤防破壞等較重大災情，初步彙整如下：

(1) 台南市新市區三民街 50 巷 10 弄區域

在三民街 50 巷、三民街 50 巷 10 弄與三民街 10 巷之區域範圍（約 60m × 60m）內，因土壤液化導致此區透天厝建物產生下陷傾斜（圖 21a），現場量測到液化噴砂高度約有 150cm（圖 21b），屋內一樓地板與巷道高程之沉陷量約有 47cm（圖 21c），沿建物基地周圍之排水人孔溝蓋、電線杆及防火巷排水溝等處皆可見液化後泥沙噴出，此區建物除了一樓門前搭建的停車棚與圍牆有損毀、主體建物有沉陷與些微傾斜外，並無明顯結構損壞情況。一旦出了此區範圍如三民街 50 巷、三民街 10 巷對街建物就沒有勘查到其他災情，訪談當地居民及蒐集中研院台灣百年地圖後得知此區原為池塘回填地，因此鄰近區域只有此處發生嚴重液化災情。



(a) 建物傾斜下陷



(b) 液化噴砂高度約 150 cm



(c) 一樓地板沉陷約 47 cm

圖 21 台南市新市區三民街 50 巷 10 弄液化引致建物傾斜下陷（陳家漢提供）

(2) 台南市安南區溪頂里一帶

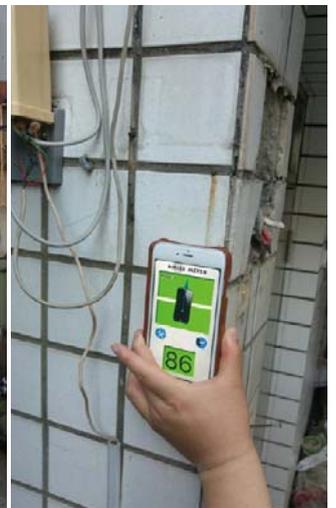
台南市安南區溪頂里靠舊台南市北邊、夾在嘉南大圳排水線南岸、北安路二段東側與鹽水溪北岸一帶，此區在地震時液化災情嚴重，尤其是惠安街至府安路四段一帶，隨地可見排水溝、人孔蓋、電線杆底部有大量泥沙噴出痕跡，而此區因地層液化引致建物下陷傾斜災情以惠安街 161 巷最為顯著。惠安街 161 巷建物（圖 22a）因屋後地層液化產生沉陷，往後傾斜約 5 度；惠安街 161 巷另一建物甚至因液化產生嚴重下陷約有半層樓高（圖 22b），根據現場量測結果此屋前傾角度可達 4 度（圖 22c）。由於此區靠近鹽水溪研判地層應相當軟弱，比對中研院台灣百年地圖後也可發現溪頂里一帶多為舊埤塘，因此在本次地震時此區受災相當嚴重。



(a) 惠安街 161 巷建物



(b) 惠安街 161 巷另一建物



(c) 房屋前傾角度量測

圖 22 台南市安南區惠安街 161 巷液化引致建物傾斜下陷（許尚逸提供）



圖 23 協力廠商於日新堤岸側潰處進行數位地形掃描測繪 (許尚逸提供)



圖 25 2月15日於曾文溪堤岸側潰處進行液化土砂取樣 (楊炫智提供)



圖 24 南二高曾文溪橋堤岸側潰破壞情況 (許尚逸提供)

(3) 曾文溪沿岸堤防側潰破壞

本次地震台南區曾文溪沿岸大內橋日新堤岸(圖 23)與南二高曾文溪橋橋頭右岸堤防(圖 24)均發生大規模側潰滑移破壞災情，二溪橋右岸之堤防也有混凝土護坡開裂、堤岸道路扭曲下陷等災情發生。曾文溪堤岸側潰災點在原護坡坡址處亦發現了大量液化砂土，國震中心也派人進行取樣工作(圖 25)，供後續室內試驗之用。

大地災害調查心得及建議事項

根據本次大地災情勘查初步結果顯示，因液化而下陷傾倒的建物結構樑柱體本身並未發現破壞，甚至二、三樓牆面也甚少有裂縫(如圖 22a、22b 所示)，反而是因結構物自重加載使得主結構下陷較多，與其他附屬結構體(如前院圍牆、車庫門、遮陽棚等)及一樓管線接管處產生差異沉陷，造成這些附屬建物及民生管線破壞(如圖 21a 所示)。

大地震所引致之地工災害如區域液化沉陷、堤岸側潰滑移或邊坡地滑等災情，往往是大面積、大範圍的全面性破壞，災害發生地點甚至為非人力所能及，對於此類大地災害調查所需之全面性與即時性需求，



圖 26 本次調查於新市區三民街進行空拍作業準備 (張為光提供)

此次勘災王國隆副教授所提供之遙測空拍圖像就扮演了相當重要的角色(如圖 26)，提供現場災害範圍勘查及災情判識的即時參考依據，在此特別致謝。

參考文獻

1. 財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心地震災害應變作業手冊，第 11 版，2013 年 8 月。
2. 「高雄美濃地震概要」，國家地震工程研究中心，第 5 版，2016 年 2 月 8 日。(http://www.ncee.org/EarthquakeInfo/2016-0206/20160206_高雄美濃地震彙整簡報 V5.0.pdf)

土木技師勘災紀實

施義芳／中華民國土木技師公會全國聯合會理事長

陳玫英、莊均緯／中華民國土木技師公會全國聯合會暨台灣省土木技師公會技師

賴建宏、梁詩桐／中華民國土木技師公會全國聯合會暨台灣省土木技師公會技師

105年2月6日清晨3:57:27，高雄美濃發生芮氏規模6.4地震，地震深度為16.7公里，其中台南地區震度為5級，並有多棟大樓嚴重傾斜與倒塌，尤其位於永康區維冠金龍大樓倒塌造成人員傷害之大，爰此，本文特摘錄土木技師公會於災害發生後的動員及相關準備作業，期供工程先進指教。

2月6日清晨災變發生當時台南市土木技師公會鄭明昌理事長，即接到台南市工務局救災通知。鄭理事長旋即帶領十幾位技師，進駐「維冠金龍大樓」前進指揮所，配合市政府，提供搶救作業之建物安全評估，並隨特種搜救隊進入坍塌現場，評估搜救安全路線。

另於台北，則有中華民國土木技師公會全國聯合會施義芳理事長，一早即與國家地震中心相關專家學者會議研商災後處置，並指示為參與救災技師投保勘災意外險，施理事長同時啟動「災害後危險建築物緊急評估作業」的整備及動員。續於全聯會召開土木技師、結構技師公會聯席會議，商討賑災人力支援事宜，亦成立由鄭明昌理事長及陳福元理事長負責的南部救災指揮中心及發佈聯合新聞稿，提供「居家安全免費諮詢服務」，更決議由土木及結構技師公會各捐款新台幣50萬元，以供台南市政府賑災之需。

2月7日，鄭明昌理事長由賴清德市長任命為機械搶救總指揮，協助搜救過程的作業安全。土木技師們也持續進行現場搶救的協助作業，並分區分組不分日夜，全力投入現場損壞結構的安全判定，以利搜救人員入內救出受困者。同時台南市政府立即與司法單位合作，由高分檢張檢察長率領地檢署張檢察長、襄閱

主任檢察官、承辦的主任檢察官，列案蒐證調查。並由地檢署委託土木技師公會參與鑑定調查，除了救災也併同進行鑑定工作，以保全證據，保障受災人員權益。

2月8日，施理事長親自投入維冠大樓震災現場，並與賴清德市長、鄭明昌理事長、台南市政府工務局長研討救災處置事宜外，更慰勉現場的土木技師們及加油打氣。為表達土木技師公會，願意協助市府救災、災後處理與危險建物評估作業的決心。當日，救災過程較為特殊者，為一男子受困過久，原先擬由骨科醫生進入現場進行截肢手術，但因空間過於狹小，而功敗垂成；最後由土木技師進入現場結構評估後，提出由樓板下方往上鑽洞而成功營救處理。



災害發生當時由鄭明昌理事長拍攝之現場照片



全聯會召集土木及結構公會聯席會議

2月9日、2月10日進行大鋼牙救援作業，土木技師並配合搜救人員採4個區、6個工作面進行救援活動，並從東西兩端開始作業，儘可能避開任何危及生命安全的程序，如發現生命跡象，機具即停止操作，搜救人員接續搶救。搜救完後，大鋼牙再繼續作業，如此反覆，進行搜救任務。



維冠大樓倒塌救災現場內部（土木技師隨同入內拍攝）

2月11日，土木技師接續進行24小時不停歇的救災工作，並持續提供搜救人員結構安全判斷。該日施理事長再次南下勘災，為技師們加油打氣，並與賴市長及高雄市陳菊市長一同商討救災事宜。

2月12日與13日，土木技師仍持續24小時堅守崗位，輪班進行救災工作，救難人員配合大型機具全力搶救。而至13日下午搜尋出最後一位罹難者後，維冠大樓搶救工作正式告一段落。由台南市長賴清德召開記者會，感謝全國各縣市救難人員投入搶救工作，及國際社會的關心與支持，現場默哀1分鐘，表達對不幸罹難民眾的哀思。



施理事長與鄭理事長與市府工務局長會議討論

← 施理事長、賴市長、陳菊市長商討救災事宜



風雨無阻搜救持續進行



土木技師偕同夜間搜救作業



最後階段清理現況



2月16日於台南市政府辦理災害後危險建築物緊急評估講習會場

2月6日至13日土木技師公會動員含施理事長、鄭理事長共85人，計212人次支援維冠大樓救災行動，包含考量作業連續性，救災現場是以12小時為人力的輪班交接。

另外，台南市政府工務局亦啟動「災害後危險建築物緊急評估」作業，施理事長派員於2月12日與工務局會商，由台灣省土木技師公會統籌土木技師的人力動員，並分別於2月16日上午於台南永華市政

中心、2月16日下午於台灣省土木技師公會台中辦事處、2月19日下午於台灣省土木技師公會以全省視訊方式，辦理「災害後危險建築物緊急評估」作業講習會，包含台南市區公所人員、結構技師、大地技師、建築師，共計358人受訓。

2月18日至2月25日土木技師公會共動員86人、167人次支援建築物緊急評估作業，總評估件數1,805戶。

結構技師動員報告

蔡榮根／中華民國結構工程技師公會全國聯合會理事長

婁光銘／台北市結構技師公會理事長

江世雄／台灣省結構技師公會理事長

結構技師公會亦於2月6日至2月8日動員結構技師24人次(如表1)進駐維冠大樓倒塌現場,協助搜救隊判斷前進路線障礙物可否排除。因2月8日晚上大鋼牙進場施作,現場已無需結構技師公會協助,於是輪值至2月8日晚上,將重心轉向受災戶勘災。2月6日至2月12日共動員結構技師166人次,於台南市各區進行157棟建築物勘災及災後危險建築物緊急評估作業,相關動員狀況如下:

(1) 2月11日上午9:00,至各區公所或國小前集合,任務分配如下:

- A. 仁德區公所:仁德區共66棟(向仁典帶隊、沈勝綿、吳政德、周宏一、楊金生)
- B. 歸仁區文化國小:歸仁文化街共86戶(施忠賢帶隊、陳純森、謝松林)
- C. 新化區公所:新化區共16棟(吳順福帶隊、黃怡禎、許恭維)

(2) 2月6日至2月13日震災後即刻動員公會技師採「隨報隨勘」或隔天勘災的方式進行,經與市府取得共識,從2月14日以後由市府彙整,再由里幹事帶領技師至災戶勘災,以增加勘災效益。

表1 台南市結構工程技師公會-0206維冠大樓倒塌協助輪值表

日期	時間	輪派技師
2/6	2100-2400	鄭東旭、陳裕賓
2/7	0000-0300	向仁典、吳順福
	0300-0800	陳福元、許守良
	0800-1200	黃嘉瑞、蔡萬來
	1200-1600	鄭東旭、陳裕賓、周志安
	1600-2000	向仁典、施忠賢
2/8	2000-2400	陳福元、許守良
	0000-0600	黃嘉瑞、蔡萬來
	0600-1200	鄭東旭、陳裕賓
	1200-1800	施忠賢、向仁典、丁英哲
	1800-2400	黃嘉瑞、蔡萬來

註:本輪值表為協助搜救隊判斷前進路線障礙物可否排除。因2/8晚上大鋼牙進場施作,現場已無需本會協助,於是輪值至2/8晚上,將重心轉向受災戶勘災。

大地技師災後投入

陳江淮／中華民國大地工程技師公會副理事長

2月8日下午1點台南地檢署及台南市政府召開各單位及各公會聯合會議,決議統一由土木技師公會負責救災及調查鑑定工作,大地公會及其他公會等,並未直接參與搶災及救災,惟鑑定報告完成後,由其他公會共同協助審閱討論。

2月15日大地技師公會參與內政部依行政院長指示之會議,負責辦理土壤液化潛勢區公開之因應對策研擬。規劃在液化潛勢區之縣市政府設立液化工位站,由大地工程技師公會派員,接授民眾臨櫃或電話

諮詢,必要時再進行現場初評工作。第一階段預定公布液化潛勢區之都會區包括宜蘭縣、台北市、新北市、新竹市、新竹縣、台南市、高雄市及屏東縣八縣市。預定進度為3月2日提報內政部,3月7日向院長報告,3月14日對外界說明。目前方案仍在研擬中,待3月7日內政部定案決定後,縣市政府液化工位站將隨之設立。後續液化潛勢區的公告,中央、地方及大地工程專業技師的動員等,屬國內重大工程議題,大地工程專家及技師們均會審慎辦理。

2/15 美濃地震勘災討論會



2月15日國震中心召開美濃地震勘災討論會，邀集土木技師公會（陳玫英理事、洪啟德監事）、結構技師公會（婁光銘理事長、江世雄理事長）、建築師公會（楊檔巖建築師、陳德耀建築師、林建築師、江建築師）、台灣世曦工程顧問股份有限公司（王炤烈總經理）、國立成功大學建築系（姚昭智教授）及土木系（胡宣德教授）、內政部建築研究所（陳建忠組長、陶其駿主任、李台光博士）、國家災害防救科技中心（李維森主任秘書、李中生博士）、中國土木水利工程學會（呂良正理事長、倪惠姝秘書長）、中華民國結構工程學會（呂良正理事長）及工程界資深專家等，就此次地震初步勘災調查結果及後續因應對策進行討論。討論議題包括：

- (1) 美濃地震強地動特性與地表反應譜。
- (2) 美濃地震結構物震損機制與破壞模式探討。
- (3) 震後勘災、救災與緊急應變方案之探討。

勘災討論會之結論與建議

綜整此次美濃地震勘災發現之災損破壞機制及美濃地震勘災討論會獲得之主要結論與建議如下：

- (1) 依據校舍及部份區公所之耐震補強成效，證實建築物之耐震補強確為有效，能在有限的時間內，大規模提升耐震能力，減緩地震造成之災情。
- (2) 公有建築物例如公有市場、鄉鎮區公所、警消廳舍等，應加速推動耐震補強工作。
- (3) 私有供公眾使用（如賣場、商店、電影院或住商混合等）之建築物，應優先清查以確認其耐震能力，以確保進入該建築物使用公眾之安全。
- (4) 建築物之非結構牆（例如隔間牆等）若需變動需經專業技師簽證，以確保此變動不影響建築物之耐震能力。
- (5) 未來針對樓高 50 公尺以上，且低樓層作為商業用

途之高樓建物，應按現行建築耐震設計規範附錄之耐震工程品管專章，強制要求進行耐震工程品管。

- (6) 地震所引致土壤液化，會使建築結構物產生沈陷與傾斜等剛體變形，一般梁柱等主要結構桿件不會受損，但是非主結構體（如磚牆、一樓地坪等）則可能產生龜裂破損。由於液化土壤會喪失承载力，建築結構物會緩慢的沉陷與傾斜，直到液化土壤中孔隙水壓完全消散完畢才會停止變形。此種緩慢的剛體變形，居民比較不會有嚴重的傷亡。
- (7) 公佈災害潛勢（如土壤液化潛勢等）是與民眾溝通之基礎，災害潛勢應更透明化，但亦應思考其相關適法性及適用性，以免造成誤解與誤用。

土木技師藉此呼籲災害防救法的中央主管機關內政部，為減少災害發生或防止災害擴大，各級政府平時應依權責實施下列措施：

- (1) 定時辦理災害防救教育、訓練及觀念宣導，儲備災害救援人力與蓄積援救能量，另強化防災觀念深植民眾生活。
- (2) 辦理老舊建築物、重要公共建築物與災害防救設施或設備檢查，遇有不足處則賡續進行補強及維護，並強化都市災害防救機能。
- (3) 提供災害防救團體、災害防救志願組織輔導及協助、獎勵。
- (4) 定期召集專家學者研議災害後危險建築物緊急評估作業相關辦法及表單，並每年辦理講習會以建立人力庫。

誌謝

此次地震發生在農曆春節之前，大部份參與勘災之先進已返鄉過年，然而大家本於對結構物耐震安全之職責，犧牲奉獻假期協助本次勘災與震害調查，特別感謝下列單位及人員之協助：

建築物、非結構及校舍建築災害調查

- (1) 國立成功大學建築系：姚昭智教授、杜怡萱教授、鍾育霖教授、吳姿瑤、陳正榮等。
- (2) 國立成功大學土木工程系：張文忠教授、陳威中等。
- (3) 高雄第一科技大學營建系：郭耕杖教授等。
- (4) 長榮大學：邵佩君教授、邵俊豪、邵佩琪等。
- (5) 內政部建築研究所：蔡宜中、蕭慧玲、吳崇豪、陳柏安、林子傑、涂昭仔等。
- (6) 結構技師劉子暉先生。
- (7) 國震中心參與建物、校舍及非結構災害調查之同仁等。

大地工程災害調查

- (1) 台灣大學土木工程系：陳正興教授、邱俊翔教授等。
- (2) 中央大學土木工程系：黃俊鴻教授等。
- (3) 暨南大學土木工程系：王國隆教授等。
- (4) 中興大學土木工程系：蔡祈欽教授等。
- (5) 台安工程張龍騰總經理等。
- (6) 陶林數值測量工程有限公司等。
- (7) 大合基礎工程機構等。
- (8) 國震中心參與大地工程災害調查之同仁等。

橋梁災害調查

- (1) 交通部公路總局第五區工程處新化工務段先進們。
- (2) 台灣世曦工程顧問股份有限公司先進們。
- (3) 國震中心參與橋梁災害調查之同仁等。

協力機構動員協助救災及參與災害調查

- (1) 土木技師公會：施義芳理事長、鄭明昌理事長、曾傳來理事、許引絃理事及參與美濃地震動員之所有技師先進們。
- (2) 結構技師公會：蔡榮根理事長、婁光銘理事長、江世雄理事長、陳福元理事長及參與美濃地震動員之所有技師先進們。

謝謝您們的熱心參與及付出，特此感謝！



臺灣桃園國際機場

聯外捷運系統建設計畫

鍾維力 / 交通部高速鐵路工程局總工程司

計畫概述

臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫路線起自桃園國際機場二期航廈，往東經林口、新莊、三重，後進入臺北市臺北車站特定專用區，往南經高鐵桃園車站至中壢中豐路與環北路交口，全長約 51.03 公里，共設置 22 座車站，包括 15 座高架車站、7 座地下車站；並設置青埔與蘆竹兩處維修機廠。主要行經臺北市（大同區、中正區），新北市（三重區、新莊區、泰山區、林口區）、桃園市（龜山區、蘆竹區、大園區、中壢區）等 10 個行政區，工程規模達 1138.5 億元。

土建工程主要特色

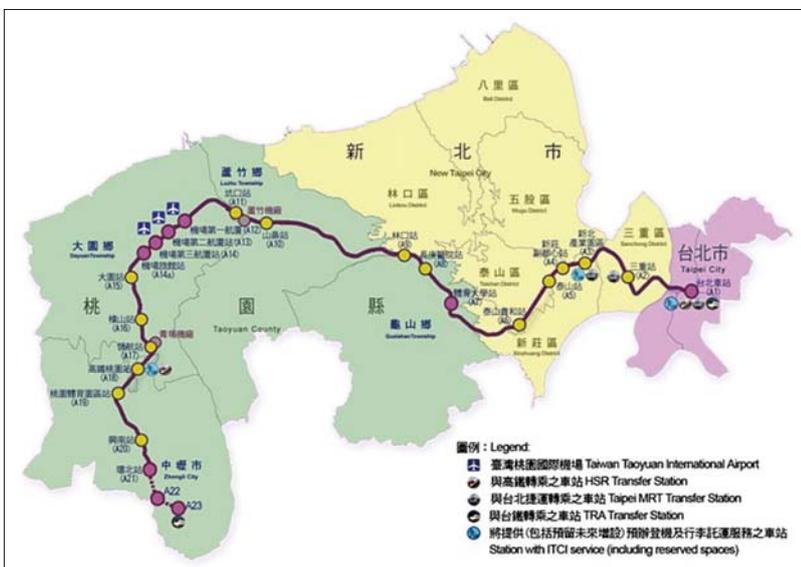
- 機場捷運由台北市端點站穿越淡水河，過河段工程為避免傳統雙孔單圓潛盾在河床下方施作聯絡通道

的風險，採用國內首次引進之雙圓形潛盾隧道（DOT）技術，除確保於淡水河下方之施工安全，也將國內潛盾技術提升至新的水平。

- 機場捷運三重路段，為避免人口密集都會區內用地徵收及房屋拆遷問題，規劃與二重疏洪道堤防共構；除可避免民眾徵收拆遷抗爭外，未來民眾搭乘機場捷運，亦可飽覽二重疏洪道及大台北都會區景觀。機場捷運路線與台一線採共用交通路廊方式設計，為國內首座捷運與公路共構橋，採捷運在上、公路在下之共構辦理案例，除了與既有交通用地共用，亦避免用地拆遷問題。
- 機場捷運青山路段為林口台地一部分，邊坡坡度約為 25° ~ 50°，考量沿線地形為丘陵地，工址坡度較陡，橋梁基礎若採傳統工法施作，除施工困難、工程費較高外，亦將嚴重破壞生態景觀，故參考國外

案例，引進國內首度採用之竹削型結構物開挖技術，以最小範圍進行開挖作業，可降低基礎之長期側向土壓力，同時解決邊坡穩定及擋土支撐的問題，將工程對環境景觀生態之影響降至最低；就景觀性、環保性、施工性、經濟性及安全性等，竹削型結構物開挖工法皆優於傳統工法，可提供國內橋梁工程於邊坡基礎開挖之技術參考。

- 機場捷運穿越中山高速公路時以二座 V 型橋墩置於分隔綠帶上，且因中山高速公路五股楊梅段跨越本計畫橋樑上方，故橋樑之設計，除須考量橋面



機場捷運路線示意圖



雙孔潛盾隧道隧道鑽掘

以上之淨高，亦須考量高速公路用路人之行車安全及視覺感受，因此其結構配置及外觀具備輕、巧、簡的效果；施工期間更需分階段搭設臨時支撐桁架，以進行上部結構施工，連結橋墩間之箱型梁用懸臂工法施工，維持下方現有中山高速公路行車順暢與安全。



機場捷運與二重疏洪道堤防採雙柱堤防共構

- 在林口台地往桃園側之水保區段屬溪谷地形，地形複雜且地面高差大，為避免路線由林口台地下降至此溪谷之縱坡過大，路線結構主要以高橋墩方式配置，最高橋墩約為 43 公尺。施工中之臨時排水及完工後之橋面排水處理等，分段截流安全導水經滯洪沉砂設施調節後，放流至赤塗崎溪。且因地質敏感，邊坡易因坡角擾動而崩滑，為求邊坡穩定，橋墩基礎採井式基礎，以降低開挖面積及開挖對鄰近地質之擾動。坡面以噴凝土自由梁加勁處理並配合草種噴植保護。機場

在完工後之橋面排水處理等，分段截流安全導水經滯洪沉砂設施調節後，放流至赤塗崎溪。且因地質敏感，邊坡易因坡角擾動而崩滑，為求邊坡穩定，橋墩基礎採井式基礎，以降低開挖面積及開挖對鄰近地質之擾動。坡面以噴凝土自由梁加勁處理並配合草種噴植保護。機場



竹削型結構物施工照片



捷運與新北大道公路橋梁共構



青山路段明挖隧道完工情形

捷運工程完工後，現地依原地貌復舊，包含赤塗崎溪兩側蛇籠護岸，步道、涼亭等均逐一復原，維持水保區之自然原始風貌，展現交通工程與自然生態，共存共榮之環境。

- 在桃園國際機場特定區，機場捷運路線係以地下方式通過，並設置四座地下車站與明挖覆蓋隧道的擋土開挖工程及潛盾隧道的鑽掘工程。施工期間為確保桃園機場的營運及結構安全，規劃採用最高規格的監測及保護措施，包括自動化監測系統、建物保護及地盤改良。由於機場捷運潛盾隧道穿越桃園國際機場既有滑行道及塔台管制區下方，為確保飛航安全，施工期間採用自動化監測系統，透過自動化擷取及集錄設備，可即時回饋施工對地盤與建物所造成的影響，以採取相關因應對策；此外，採用具備即時背填灌漿功能之潛盾機，並於指定保護建物進行加強背填灌漿。在既有滑行道及塔台管制區，利用二次灌漿及微型樁遮斷壁加強保護。在潛盾機出發與到達端及聯絡通道，則以雙環塞工法進行地盤改良。施工階段，除以加強背填灌漿及二次灌漿之方式加強保護東、西飛機滑行道及塔台管制區下方外，並於潛盾機盾殼內全程施作機上灌漿，以有

效再降低施工中之即時沉陷量。在塔台區及潛盾隧道通過位置間，並打設微型遮幕樁，以降低潛盾掘進時對塔台可能造成之影響，進一步確保塔台安全。

- 桃園國際機場路段地質屬卵礫石層，潛盾機之切削及推進系統均需特別設計，以因應及克服地質之挑戰。除配合地層特性增加潛盾機出土口開孔率外，亦考量潛盾機於卵礫石層切削之刃齒磨耗，選擇於聯絡通道位置進行刃齒之檢查、更換作業，以確保施工安全及掘進工率，為目前國內軌道工程，使用潛盾機穿越卵礫石層，規模最大之工程建設。
- 機場捷運在中壢及大園地區地勢平坦，結構以制式橋配置，因施工重複性高，可達縮短工期及提昇工程品質之效益。制式橋梁柱間採用剛性接頭，構架式結構可提高結構韌性，降低設計地震力，且因減



V型橋完成情形（上方為五楊高架道路）



高橋墩水保區橋梁結構完成情形



高橋墩井基施作情形



中壢中豐北路高架橋完成情形

少下構量體，使橋梁造型輕盈美觀。另考量交通用地共用原則，避免人口密集都會區內用地徵收及房屋拆遷問題，機場捷運路線結構於中壢大園路段係規劃設置於既有道路中央分隔島上。除可避免民眾徵收拆遷抗爭外，未來民眾搭乘機場捷運，於此路段，亦可透過既有橋下道路，達到方便轉乘之目的。

- 機場捷運施工期間並有 3 標工程獲得行政院公共工程委員會金質獎，及 4 標獲得行政院勞委會推動勞工安全衛生優良公共工程獎。此外，全線 22 座車站，除台北車站（A1）、機場第二航廈站（A13）、機場第三航廈站（A14）三座因位於特定區共構車站外，其餘 19 座車站均已申請綠建築標章。

計畫預期效益

- 改善機場聯外交通，建設機場聯外捷運系統，以連結台北車站、臺灣桃園機場、高鐵桃園車站等交通運輸樞紐，期使國際航線與國內交通網路得以緊密連結。
- 機場為國家門戶，提供臺灣桃園機場進出旅客安全、便利、快速、舒適、高水準的捷運服務，為先進國家之重要表徵。
- 兼具都會捷運效能，配合沿線既有都市發展計畫，提供安全、便捷、舒適之捷運系統，帶動地方繁榮，以期城鄉均衡發展，並增加捷運系統之營運收入。



防範於未然 — 結構監測最新發展及案例

專輯客座主編 鄭家齊／朝陽科技大學營建工程系教授兼系主任

本期專輯是以結構監測作為主題，土木設施的損傷有其可預知及不可預知性，可預知的破壞是漸進的，例如結構體施工設計不良或長期環境侵蝕造成加速老劣化的過程。某些漸進的破壞可由定期目視檢查中外表損害的狀況作初步的嚴重性分級評估，但如斜張橋及脊背橋的鋼纜預力及地錨預力損失以及邊坡滑移狀況等，則需由儀器長期監測或檢測；不可預知性的破壞可能是由交通超載、颱風、地震或洪水等環境不可預知的因素所造成，結構體在災害來臨在短時間內即產生破壞，極可能造成民眾生命財產的損失。

為提升民眾住與行的安全，最佳的解決方式是在重要土木結構或危險地質區域設置監測系統，長期記錄結構與地質變化的狀況，訂定警戒值及行動值。一方面可由長期紀錄結構或地質逐漸改變的歷程預測結構之生命週期，決定最符合經濟效益的維修及整建的方法與時機；二方面在不可預知的災害來臨時，能及時通知業管單位進行封橋、封路及人員疏散的動作，降低災害的損失。

去年 10 月 29 及 30 日，土木水利工程學會、朝陽科技大學非破壞檢測中心以及中央大學橋梁中心主辦了「第九屆公共工程非破壞檢測研討會」，研討會的主題為「公共工程非破壞檢測、監測與診斷」，其中與監測相關之講題有五場，各個演講主題除了由不同面向介紹最新監測方法及儀器的發展，並分享許多實際監測案例，引發在場台上講者與台下工程先進熱烈的討

論，本專輯特別邀請這次研討會的四位專家學者將演講內容改寫成土水月刊的專題論著。

本期專輯內容包含三個橋梁監測系統建置的實際案例：包括中央大學橋梁研究中心王仲宇教授團隊的碧潭吊橋監測，台灣營建研究院張嘉峰副所長領導團隊的台北某重要橋梁監測系統建置，以及中興工程顧問公司半穿式鋼拱橋 — 芙谷峯橋的監測案例；兩篇與光纖光柵應用相關：包括交通大學土木系黃安斌教授研發光纖光柵儀器應用於地工安全監測，以及國家地震中心李振寬博士介紹光柵感測技術在橋梁安全監測與管理上的初步應用；另外三篇包括中興大學土木系林宜清教授的團隊最新發展的傾斜儀及地錨無線感測器監測技術，國家地震中心林詠彬博士介紹影像量測於結構監測之應用，以及朝陽科技大學非破壞檢測中心許耿蒼博士介紹以非接觸式微波雷達系統監測多年的兩座橋梁之實務案例。

監測儀器與分析技術的發展日新月異，包含光、紅外線、溫度、電磁、應力波傳、結構振動等作為檢測媒介，並須與無線傳輸、物聯網甚至雲端及霧端儲存作即時的訊號傳輸，而土木相關監測的標的亦遍及橋梁、水利設施、地工設施及軌道等，對岸亦投入大量資金進行長跨距橋梁及高速動車系統的監測技術開發，希望藉此專輯吸引政府主管機關及業管單位更進一步了解國內近來土木結構監測技術的發展，並鼓勵專家學者結合跨領域的專才共同投入參與相關主題的研究。



人行吊橋之橋梁安全監測

王仲宇／國立中央大學土木工程系教授

陳志賢／國立中央大學橋梁工程研究中心博士後研究員

摘要

在台灣，吊橋已成為觀光風景區重要的景點，常常吸引眾多的人潮，頻繁使用下如何確保結構安全是值得關注的議題。歷史上曾發生過數起吊橋倒塌的事故，且多是因為人為疏失造成，顯見吊橋維護管理的重要性。結構安全監測透過電子儀器 24 小時進行監控，可有效掌握結構的變形行為與特性，及早發現結構異常現象，避免災害發生。本文介紹碧潭吊橋監測系統的設計以及相關監測資料分析與應用，包含索力、舒適度、溫度與橋塔傾斜等分析方法，期望在既有的儀器設備條件下，能透過訊號分析獲得更多有用的資訊。

前言

台灣是一個多山的島嶼，山地、丘陵面積約占總面積 2/3，人行吊橋因建造所需材料與人力少，完工後可供行人、機車或小型牽引車使用，成為台灣早期串連溪谷兩岸的重要交通設施。對早期的山區居人而言，吊橋是不可或缺的交通命脈，經濟發展以後，鋼橋、混凝土橋逐漸取代人行吊橋的交通功能，人行吊橋漸漸失去交通上的價值，轉而成為觀光風景區的重要景點，主管機關搭建新的吊橋來串連區域的景點，提高地區觀光的發展，例如南投竹山鎮的天梯（梯子吊橋）與屏東的山川琉璃吊橋，都是相當成功的案例。

民國 98 年 6 月，新北市平溪區靜安吊橋，發生整建工程的施工意外，肇因為錨座扣環鋼棒斷裂，主索力量無法傳遞至錨座，造成橋面跌落至河床中。民國 99 年 6 月，台東縣達人鄉的土坂吊橋完工後驗收前發生橋塔基座倒塌意外。民國 99 年 4 月，興建中的基隆暖暖溪人行吊橋因疑似作業疏失，造成橋塔主索滑動

以致鋼構橋塔向前傾斜，吊橋主體垂降事故^[1]。以上事故均發生於新建工程或整修工程中，未發生民眾傷亡，民國 102 年 11 月，新北市三芝區根德吊橋因垂吊索鏽蝕斷裂造成橋面塌落，共計 4 人輕重傷，引起社會大眾對吊橋安全的重視。台灣吊橋的維護管理長久以來一直缺少統一的制度與標準，不若公路橋梁依據「公路橋梁養護手冊」需每兩年進行一次目視檢測，並有「臺灣地區橋梁管理系統」統一的管理與查詢機制，在無政策依據之下，便疏於妥善地檢查與維護。依據中華顧問工程司的調查^[1]吊橋管理單位包含交通部觀光局風景管理處、農委會林務局、內政部營建署國家公園管理處、原住民管理單位、縣市政府、鄉鎮市公所、乃至台灣電力公司等，過於分散的管理單位，可能也是造成目前吊橋沒有統一管理制度的主要原因之一。

著名景點的吊橋使用程度高，常有密集的人潮通過，為確保路人的安全，更須要有妥善維護與管理，定期的目視檢測有助於管理單位掌握吊橋狀態，能及早發現變形、鏽蝕、損傷等異常情況，評估造成之原因，並予以維修改善。部分老舊吊橋，因其歷史價值無法改建，又使用頻繁者，可透過結構監測更清楚了解橋梁在不同載重下的變形行為與結構特性，以期在早期發現結構出現異常時，進行診斷與分析，確保結構安全。

吊橋的力學行為

要合理的選擇監測項目與感測器安裝位置，必須清楚結構的受力與變形行為。吊橋是目前世界上跨度最長的橋梁結構形式，主要構件包含主索、垂吊索、橋塔、錨定基礎與橋面版（如圖 1）。行人載重 P 施加

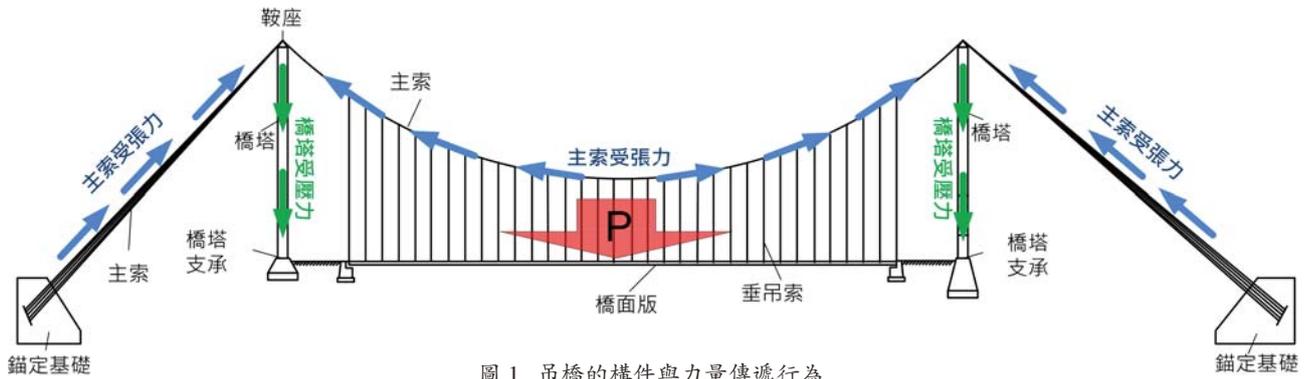


圖 1 吊橋的構件與力量傳遞行為

於橋面版，透過垂吊索傳遞至主索，主索受拉力，索力在跨中最低點處最小，在鞍座處最大，一部分力量透過橋塔傳遞到橋塔基礎，另一部分則由錨定基礎承受。橋塔主要承受軸壓力而錨定基礎需抵抗來自主索的拉力，換言之，吊橋是以鋼索傳遞力量，而結構系統的穩定性則仰賴橋塔與錨定端，在材料無損傷的情況下，當橋塔傾斜過大或錨定端無法承受主索拉力而失去平衡時，便會導致結構失效。

橋塔依照支承種類可分成搖擺式與固定式兩種結構形式，如圖 2 所示，其目的是使橋塔僅承受軸壓力，避免承受過大彎矩。搖擺式結構橋塔與基礎間採用鉸接支承，可自由轉動，此類型結構橋塔受主索變形帶動而產生傾斜，因此鞍座需採用固定式設計，即主索與鞍座間不允許產生相對位移，否則可能造成橋塔傾倒；固定式結構橋塔與基礎為固接，因此鞍座採用滑動式設計，主索可在鞍座上自由滑動，並使主索與鞍座間的摩擦力降到最低，避免摩擦力在橋塔底部產生過大的彎矩。

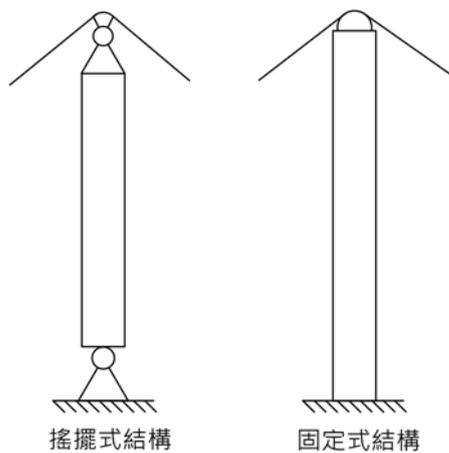


圖 2 橋塔結構形式

碧潭吊橋監測系統

碧潭吊橋為新北市碧潭風景區著名的地標，橋長 200 公尺，橋塔底部採用鑄鋼球軸承工法（圖 3），可自由轉動，為其結構之一大特色。碧潭吊橋建於 1937 年，迄今共進行 4 次較大規模的整修，並於 2010 年由新北市政府委託財團法人中華顧問工程司規劃建置橋梁安全監測系統。監測系統包含現地量測系統、中央控制系統、遠端監控系統等 3 個子系統，如圖 4 所示，以下針對個別系統做一簡單介紹。

現地量測系統

包含感測器與資料擷取器，監測資料透過網路傳送到現地量測主機，感測器配置如圖 5 所示，包含兩橋塔頂部及橋跨中央共三組風速風向計、橋塔傾斜角 θ_y （對 Y 軸旋轉，順時針為正）、主索與橋塔溫度、橋面版振動加速度、即時影像監控等。

中央控制系統

包含現地量測主機與資料庫主機，現地量測主機用於控制資料擷取器，取得監測資料，進行管理值判斷與警報發送之工作。另外，為執行長期監測評估，監測資料之保存為必要之需求，將監測資料庫建立於資料庫主機上，不僅可以提供評估系統分析之資料，更可給予相關人員進行查詢監看結構物狀況之服務。

遠端監控系統

為達到使用者管理便利的目的，遠端監控採用網際網路環境，讓使用者可透過網際網路遠端視覺化控制，提高系統管理效率；使用者可透過網際網路連線系統網頁，通過使用者權限管理認證後，可隨時隨地監看系統運作狀況，且提供歷時資料及完善的報表功能以供使用者查詢，即時了解結構狀態。



圖 3 橋塔底部鋼球軸承

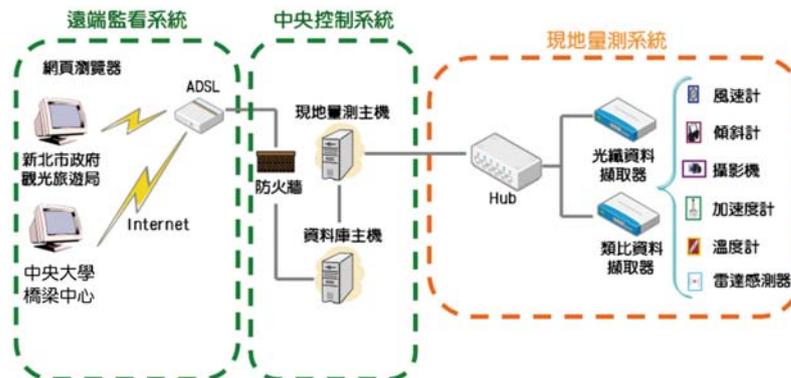


圖 4 監測系統組成架構圖

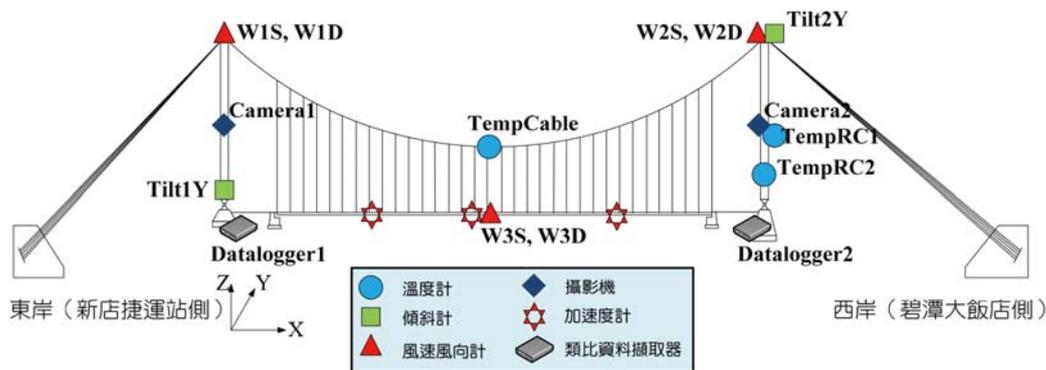


圖 5 感測器配置

監測資料分析

索力

主索索力為重要的監測項目，吊橋的容許拉力通常為 0.45 倍的極限拉力，以避免產生過大的鬆弛量^[2]。依照碧潭吊橋的橋塔結構特性，主索受力變形後將帶動橋塔傾斜，索力與傾斜量為線性關係，兩者之對應關係可由數值模擬分析求得，數值模擬結果如圖 6 所示，主索索力隨位置改變，最大索力發生於鞍座處，相關數值模型參數與分析流程請參考文獻^[3]。由傾斜量對照關係曲線即可得知主索的受力狀況，但因傾斜計安裝時已是成橋狀態，傾斜角度僅能對應活載造成的索力，還須加上成橋的初始索力與溫度造成的索力後才是真正的索力值，在分析時應特別留意。

橋面振動

吊橋的自重輕、細長比高、勁度低，因此易因行人與風引發振動。許多吊橋橋面高度較高，更容易因為振動引發行人的不舒適，感甚至是感到恐慌。對於交通設施而言，除了提供安全的環境之外，舒適度也是一項重

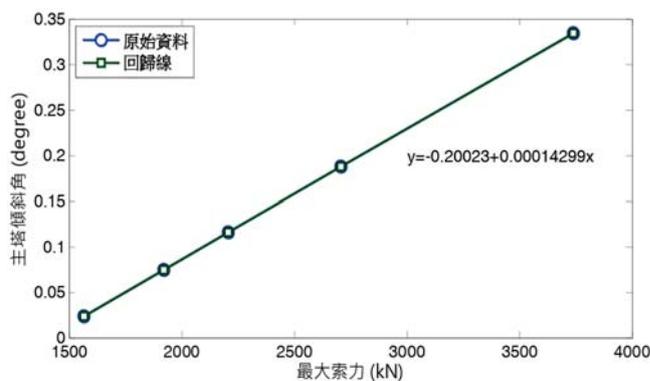


圖 6 最大索拉力與橋塔傾斜角關係曲線

要的課題。研究^[4-6]指出人的行走造成的垂直荷載頻率介於 1.2 ~ 2.4Hz，造成的橫向荷載頻率為垂直向的一半，即 0.6 ~ 1.2Hz，吊橋的自然頻率如果介於此範圍內，則可能因為共振而產生劇烈的振動反應，因而國際上有許多規範對於人行吊橋的自然振動頻率與舒適度制定標準，相關資料整理於表 1，除了 ISO 10137 是以基準曲線定義 1/3 八度音倍頻帶 (one-third octave band) 中心頻率的加速度值外，其餘採用定值，若吊橋自然振動頻率小於頻率上限時，則需要進一步進行限制橋梁加速度值。

表 1 國際規範之舒適度準則

規範名稱	垂直加速度	水平加速度	垂直向 頻率上限	水平向 頻率上限
BS 5400 ^[7]	$a_{max} \leq 0.5 \sqrt{f_0} \text{ m/s}^2$	無	$\leq 5 \text{ Hz}$	$\leq 1.5 \text{ Hz}$
Eurocode ^[8]	$a_{max} \leq 0.7 \text{ m/s}^2$	$a_{max} \leq 0.2 \text{ m/s}^2$	$\leq 5 \text{ Hz}$	$\leq 2.5 \text{ Hz}$
ISO 10137 ^[6]	$a_{rms} \leq K$ 倍的基準曲線 ^(註1) (圖 7(a))	$a_{rms} \leq K$ 倍的基準曲線 ^(註1) (圖 7(b))	無	無
Bro 2004 ^[9]	$a_{rms} \leq 0.5 \text{ m/s}^2$	無	$\leq 3.5 \text{ Hz}$	無

註 1：如果行人為走動狀態， $K = 60$ ；如果行人為站立狀態， $K = 30$ 。
 f_0 ：自然振動頻率

振動監測可於橋面外懸橫梁上安裝加速度計，BS 5400 或 Eurocode 規範採用最大加速度，ISO 10137 與 Bro 2004 規範則採用均方根值平均加速度，取固定時間長度的加速資料進行平均。在實務上加速度計可能因為突波訊號或行人在感測器附近跳躍使加速度突然增加，造成判讀錯誤，採用平均值則可降低此類訊號的干擾。

碧潭吊橋橋面振動採用 Bro 2004 作為舒適度標準，以 10 分鐘為區間計算平均加速度值，並以星期一至星期日為時間軸，例如 1 日與 8 日同為星期五，則依時間區隔標示在相同 X 座標處，如此便能觀察出每日與每週的振動週期變化。圖 8 為一垂直加速度的分析資料，如以日為週期，振動量呈現 M 型分布，兩個峰值位於早上上班與下午下班時段，西岸居民經由吊橋至東岸捷運站時造成；若以一週為週期，最大振動量發生於週末或假日。這些規律的變化顯示吊橋振動量隨行人數量增加而上升。另外也受到風速的影響，

圖 8 中框示處的紅點為受到颱風影響，造成加速度超過舒適度標準。

溫度與橋塔傾斜角

溫度變化主要影響主索長度進而改變橋塔傾斜角，依照設計圖橋塔與背拉主索之幾何關係如圖 9，其中背拉索長 L ，因溫度上升伸長後的長度為 L' ，因橋塔為鉸支承，此時橋塔產生的旋轉角為 q 。依據此一幾何關係可推導出背拉索應變 ($\epsilon = \Delta L/L = (L'-L)/L$) 與橋塔傾斜的關係公式，如公式 (1) 所示，當溫度上升 ΔT 度時，主索因溫差產生之應變 $\epsilon_T = \alpha \Delta T$ ，令 $\epsilon = \epsilon_T$ ，可得橋塔因溫差產生的傾斜角 θ 與 ΔT 之關係式，如公式 (2)。假設鋼索的熱膨脹係數 $\alpha = 12E-6/^\circ\text{C}$ ，利用 (2) 式可得到主索溫度與橋塔傾斜角之轉換係數為 0.0022，代表主索溫度每上升 1°C 造成橋塔的傾斜量，當熱膨脹係數增加或減少 $1E-6$ 時，分別使轉換係數增加與減少 0.0002。

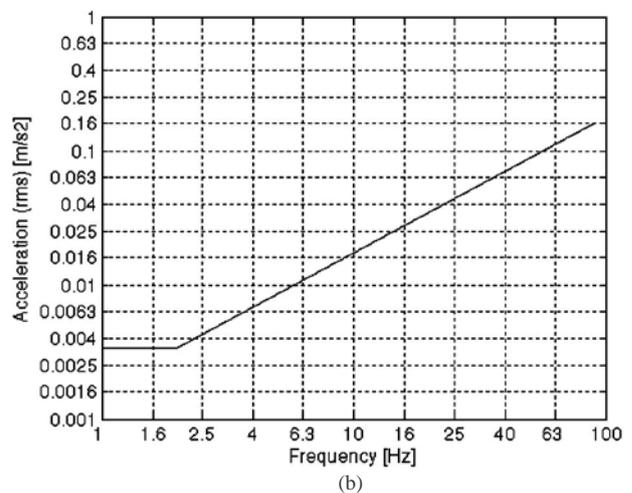
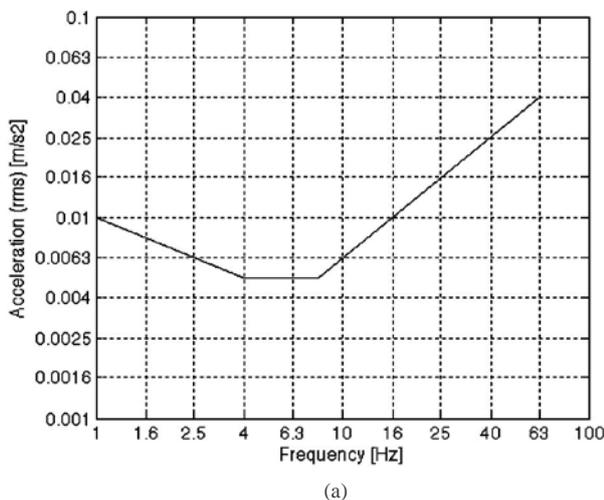


圖 7 ISO 10137 加速度基準曲線，(a) 垂直向，(b) 側向

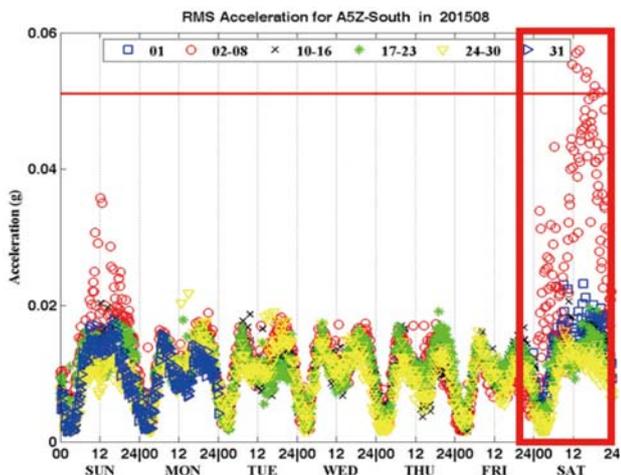


圖 8 橋面版加速度舒適度分析，框示處為因颱風造成振動起越舒適度標準。

進一步將結果與監測資料進行比對，圖 10 為 7 日的主索溫度與橋塔傾斜角監測資料，可發現橋塔傾斜角大致上隨主索溫度變化，同時也與行人載重相關，例如 10 月 3 日與 10 月 4 日為週末，遊客較平日提高許多，在溫度變化相似之下，兩日的橋塔傾斜量大幅增加。為降低行人的干擾，取一年監測資料中凌晨 2:00 至 4:00 的資料進行回歸分析，所得結果如圖 11 所示，回歸線斜率為 0.0019 即為監測資料計算出的轉換係數 R，與理論值相當接近。一般鋼材的熱膨脹係數介於 $11E-6/^{\circ}C \sim 13E-6/^{\circ}C$ 之間，由前述計算結果可知熱膨脹係數影響轉換係數計算結果相當明顯，為理論值與監測值差異的原因之一。

$$\varepsilon = \frac{\left[(L \cos \phi + 20 \sin \theta)^2 + (L \sin \phi - 20(1 - \cos \theta))^2 \right]^{\frac{1}{2}} - L}{L} \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{\left[(L \cos \phi + 20 \sin \theta)^2 + (L \sin \phi - 20(1 - \cos \theta))^2 \right]^{\frac{1}{2}} - L}{\alpha L} \quad (2)$$

橋塔傾斜角與行人數

行人是吊橋主要外力來源之一，除了增加纜索、橋塔與錨定基礎受力外，也會造成橋面更大的振動量，降低行人舒適度。國內對人行吊橋設計無明確規範，結構設計時多會參考日本道路協會「小規模吊橋指針同解說」^[10]，其中規定橋面設計活載重為 300 kg/m^2 ，若假設每人重 75 kg ，相當於 1 平方公尺內站立 4 人之多，實務上難以發生。但材料會隨時間劣化，結構強度需作適當折減，承載能力與可承載人數便會降低，此時就要對人數進行控管；另外若因人數過多造成舒適度超過規範時，也應對人數進行控管。

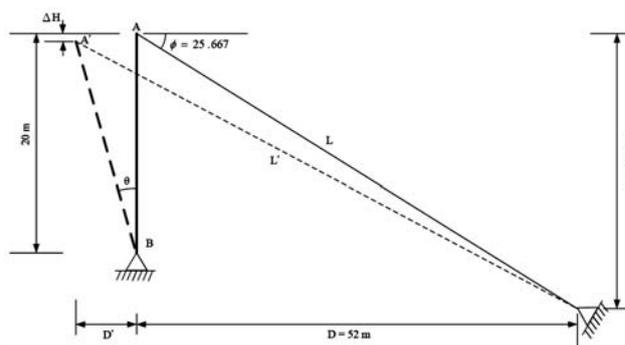


圖 9 橋塔與背拉斜索變形示意圖

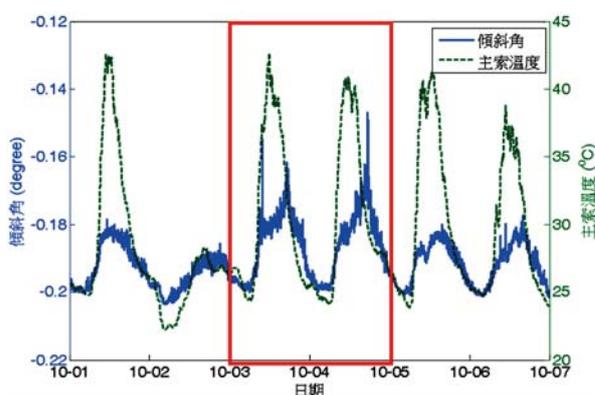


圖 10 主索溫度與橋塔傾斜角，圖中框示處為週末人潮較多造成傾斜量增加。

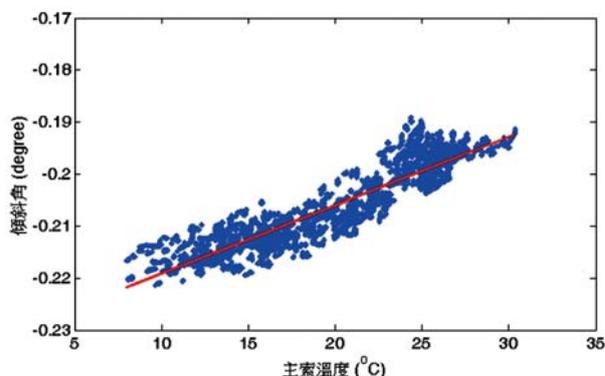


圖 11 主索溫度與橋塔傾斜角之回歸關係 (斜率 0.0019)

人數計算方法是以吊橋整體為地磅的概念，利用橋塔傾斜量推估橋上的承載人數。首先以人工的方式觀看某例假日的影像記錄，統計當日早上 9 點至下午 6 點東西岸進出口的通行人數與橋上停留人數，人數統計結果如圖 12，最多有 231 人同時在橋上。橋塔傾斜角主要受到溫度與活載的影響，要分析橋塔傾斜角與人數的關係，需先將溫度造成的傾斜角扣除，由前述溫度與橋塔傾斜角之關係可知，每上升 $1^{\circ}C$ 橋塔傾斜角增加 0.0019 度 ($R = 0.0019 \text{ 度}/^{\circ}C$)。取當日凌晨 3:00 起 24 小時的傾斜角與主索溫度資料進行分析，假設凌晨 3:00 時橋上無人，以第 1 筆為初值歸零，再利用主索溫度資料與轉

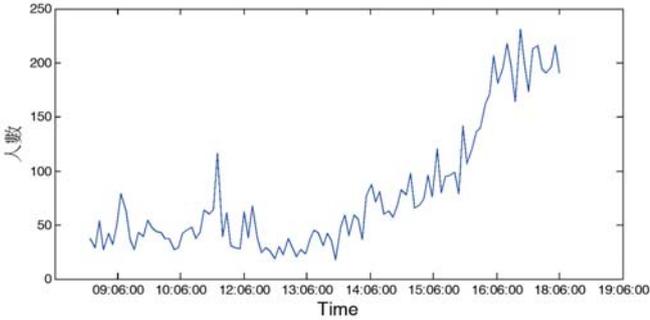


圖 12 橋上停留人數統計資料

換係數 R 扣除傾斜角內之溫度效應，所得結果圖 13 所示。分別為東岸及西岸，為了方便分析將西岸傾斜角乘以負號，使其與東岸之方向一致。圖中藍色虛線為原始資料，綠色實線為扣除溫度效應後之結果，圖中溫度與傾斜角均為相對值。

將修正後的傾斜角資料與人數繪製於同一圖上，東岸與西岸的橋塔傾斜與人數關係圖如圖 14 所示，上圖為人數與傾斜角隨時間之變化圖，圖中藍色實線為人數，綠色虛線為扣掉溫度效應後之傾斜角，可發現傾斜角隨人數增加而遞增，下圖為人數與傾斜角之關係圖，可發現人數與傾斜角有不錯之線性關係， R^2 可達 0.86 與 0.81。回歸線之斜率代表人數與橋塔傾斜的關係係數，由分析結果發現兩岸的關係係數相當接近，東岸為 1.03×10^{-4} 度/人，西岸為 1.05×10^{-4} 度/人。分析成果可應用於橋上人數的反算，人數與傾斜角關係係數由線性回歸得到，反算人數結果在 95% 的信賴區間內約有 ± 50 人的統計誤差，但實際誤差目前無法估計，需有更多的人數與傾斜角資料互相對應，才能更準確反算人數。

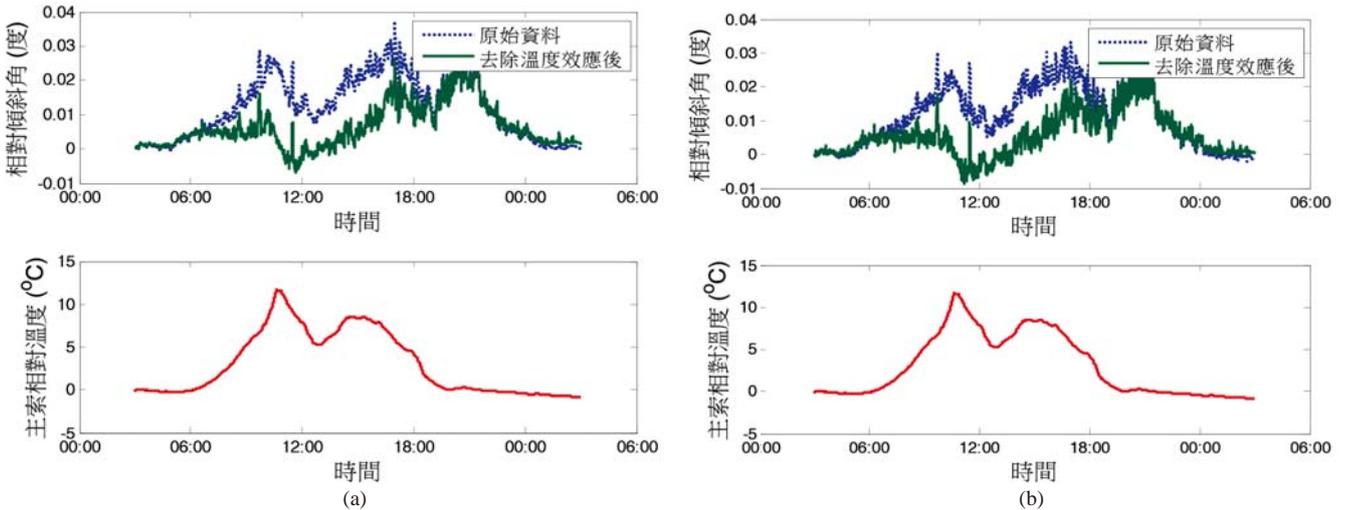


圖 13 (a) 主索溫度與東岸（捷運站側）橋塔傾斜角，(b) 主索溫度與西岸橋塔傾斜角，溫度與橋塔傾斜角均為相對值，以當日 3:00 之資料為初始值歸零。

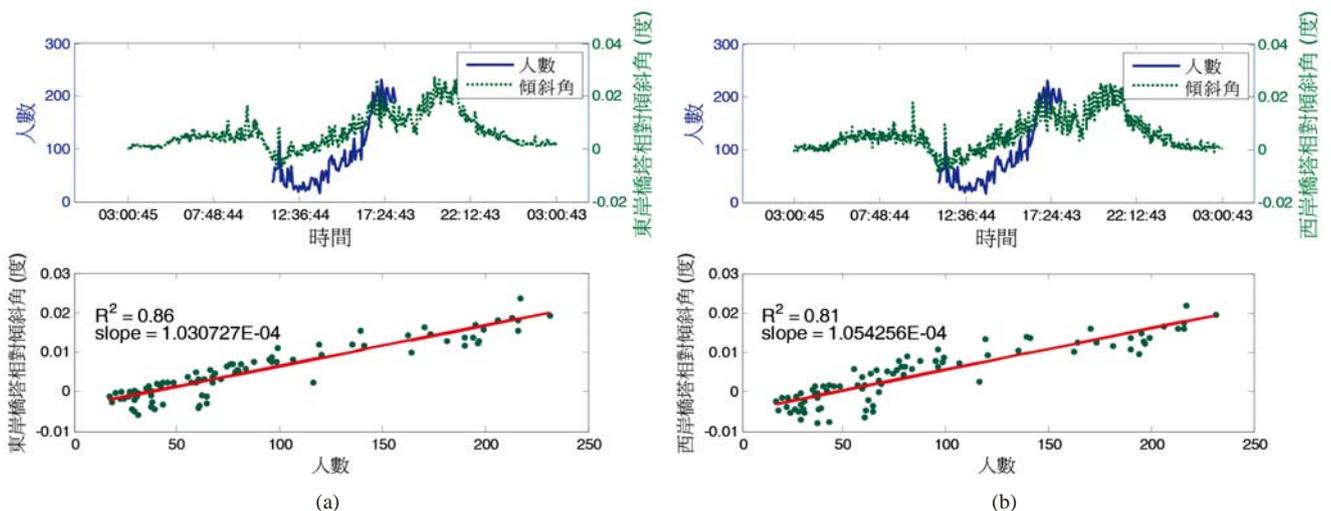


圖 14 (a) 東岸（捷運站側），(b) 西岸，橋塔傾斜角與橋上人數之關係。

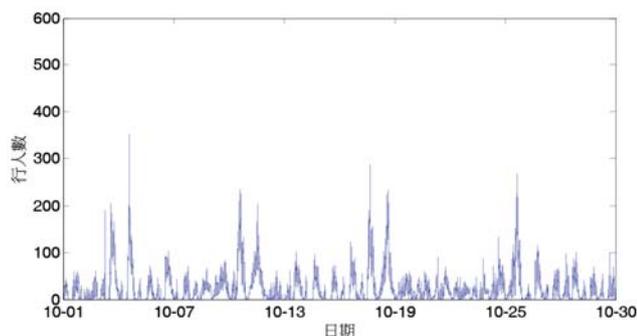


圖 15 以橋塔傾斜角估算橋上人數

結論與建議

台灣吊橋因管理單位眾多，且沒有統一的檢測制度與標準，在維護管理上易造成疏漏，為避免再次發生吊橋倒塌的意外，主管機關應儘速建立相關維護管理制度。

在吊橋監測中，溫度是必要的監測項目之一，其影響主索索力與橋塔傾斜變化，在計算監測系統管理值時，應考慮溫度效應的影響。

在碧潭吊橋監測案例中，橋塔傾斜角是最重要的監測項目，透過結構分析與訊號分析方法，可將橋塔傾斜角與人數及索力建立轉換關係，獲得更多有用的資訊。

參考文獻

1. 財團法人中華顧問工程司，「記錄台灣吊橋」，財團法人中華顧問工程司，臺北市，第3頁、第136-139頁（2013）。
2. Gimsing, N.J. and C.T. Georgakis, "Cable Supported Bridges: Concept and Design 3rd Edition," John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom, pp. 111 (2012).
3. 王仲宇，陳志賢，李承儒，「吊橋的監測與診斷」，第九屆公共工程非破壞檢測研討會論文集，台北（2015）。
4. Bachmann, H. "Lively Footbridges a Real Challenge," Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Paris, France, pp. 18-30 (2002).
5. Bachman, H., A.J. Pretlove, and H. Rainer. "Dynamic forces from rhythmical human body motions, in Vibration Problems in Structures: Practice Guidelines," Birkhäuser, Basel, appendix G (1995).
6. ISO, "Bases for design of structures Serviceability of buildings and pedestrian walkways against vibration," ISO/CD 10137, International Standardization Organization, Geneva, Switzerland (2005).
7. "Design Manual for Road and Bridges: Design Criteria for Footbridges: BD 29/04," Highway Agency, London, February, 2004.
8. Eurocode 5, "Design of Timber Structures Part 2: Bridges, EN1995-2: 2004," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium (2004).
9. Bro 2004, "Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar. Svensk Byggtjänst," Stockholm, Sverige (2004).
10. 社團法人日本道路協會，「小規模吊橋指針・同解說」，(1996)。



敬邀您加入本學會會員



www.ciche.org.tw

學會是 ...

- 一個凝聚產官學土木專業知識的團體
- 一個國際土木組織最認同的代表團體

- 一個土木人務必加入的專業學術團體
- 一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體

會員可享多項優惠 ...

- 申請學生獎學金
- 得到國際專業組織承認
- 參加國際交流活動
- 免費贈送一年六期會刊

- 本會出版品七折優待
- 本會學刊訂閱優惠
- 主辦研討會優先參加及大幅優惠

橋梁健診系統建置與評估

張嘉峰／財團法人臺灣營建研究院工程技術與管理研究所副所長

邱信諺／財團法人臺灣營建研究院工程技術二組助理工程師

賴澄燦／天行工程有限公司總經理

鄭丁興／爾捷國際股份有限公司技術顧問

摘要

橋梁扮演著經濟脈絡互相連通不可或缺的角色。近年來經濟成長快速，各大產業皆蓬勃發展，由於過度的使用以及頻仍的天然災害，導致橋梁結構已進入老劣化階段，不僅降低橋梁之使用壽命，亦影響其發揮正常功能性，進而導致用路人行車安全。國內橋梁主管單位因后豐橋斷橋致人車掉落後，積極針對不同結構特性與其所處的環境建置自動化監測系統。為此，本文針對臺灣北部地區某橋梁因其鉸接端下陷，建置橋梁健診系統，透過分析橋梁長期的結構變化趨勢，確保橋梁安全性並發揮最大效益。

前言

位於臺灣北部地區某橋梁全長 671 m，橋面總寬度為 34.6 m，其平、立面圖如圖 1 所示，本橋採節塊懸臂式施工，上部結構為三室預力混凝土箱型梁，下部結構為鋼筋混凝土構造，PA、PB、PE 採用預力混凝土基樁，PN、PS 採用反循環鑽掘樁，PC、PD 採用掘井式基礎。該橋自完工開放通車後即陸續出現鉸接處伸縮縫拉伸、擠壓，及鉸接處沉陷等劣化異狀，依據民國 81 年之監測資料顯示鉸接處最大沉陷量達 62.9 cm，另依據民國 88 年之伸縮縫間隙量測成果顯示鉸接處伸縮縫最大拉開量為 18.7 cm。因此，透過橋梁健診系統分析橋梁長期的結構變化趨勢，確保橋梁安全性並發揮最大效益，實為目前重要的課題，本文以下將就該橋現況、監測系統架構、儀器配置、輔助檢測技術與現有成果做一說明。

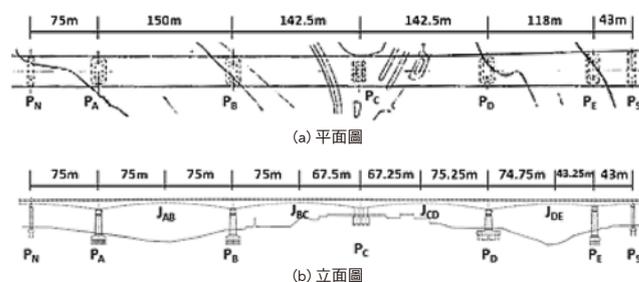


圖 1 橋梁平、立面圖

橋梁現況

針對該橋梁歷年檢測、維修與補強資料分述如下，大事紀如表 1 所示。

表 1 大事紀要表

日期	摘要重點
69 年夏季	調整 JAB 及 JDE 伸縮縫之有效伸縮量
69 年底	實施預留鋼鍵補施預力
72 年底	為縱坡調整加鋪瀝青混凝土
87 年 4 月	橋梁檢測及鋼箱補強
88 年 5 月	橋梁檢測及鋼箱補強完成
89 年 6 月	進行橋梁安全監測 (為期 5 年)
94 年 5 月	完成橋梁安全監測
100 年 2 月	進行橋梁耐震補強
102 年 2 月	完成橋梁耐震補強

於民國 67 年 7 ~ 9 月間發現 JAB 及 JDE 鉸接處之伸縮縫有受擠壓而損壞的情形，至民國 68 年夏季該伸縮縫受擠壓損壞程度有擴大之勢，且懸臂梁沉陷亦有顯著增加，經多次觀察判斷為完工後因預力混凝土之乾縮、潛變及鋼鍵之鬆弛等導致鉸接處過度沉陷。然民國 69 年 2 月之檢測成果顯示其最大沉陷量已大於原有預拱

量，且較設計標高約低 13 cm；民國 81 年之監測資料顯示，JAB 之總沉陷量達 62.9 cm（原預拱量為 20.1 cm）；民國 88 年之伸縮縫間隙量測成果顯示，JAB 及 JDE 二處伸縮縫皆呈頂部閉合，底部拉開現象，而 JBC 及 JCD 二處伸縮縫則呈拉開現象，其底部拉開量甚大，最大已達 18.7 cm（原設計斷面中央處拉開量為 4 cm，原有繫拉鋼鍵預留鬆弛量為 6.5 cm）；惟由民國 94 年資料顯示，各鉸接處伸縮縫之沉陷量趨於穩定；因此監測本標的橋梁鉸接端之沉陷確有必要。

針對於此，橋管單位於民國 69 年至 72 年陸續針對鉸接處伸縮縫劣化狀況，曾進行：(1) 調整 JAB 及 JDE 伸縮縫之有效伸縮量，(2) 預留鋼鍵補施預力以改善下垂情形（惟效果不彰，實際僅抬高 1.4 ~ 1.9 cm），(3) 加鋪瀝青混凝土改善路面縱坡。另民國 100 年 3 月針對耐震補強，曾進行：(1) 端隔板補強，(2) 增設預力鋼腱，(3) 橋墩鋼板包覆補強，(4) 中空柱灌注混凝土，(5) 基礎補強，(6) 新設就地澆注混凝土基樁。

另針對鉸接處沉陷量、水平位移及橋墩應力變化，自民國 89 年起進行為期 5 年之長期安全監測。由民國 94 年之監測成果報告顯示，鉸接處之垂直變位各點仍有微小持續下垂情形，但其下垂量仍在預期範圍內，鉸接處之相對水平變位位移量均不及 1 cm，亦即

鉸接處之垂直、水平變位已趨於穩定，而結構體應變監測值雖有略微增加趨勢，但其值不大，無結構安全性問題，仍應持續長期監測以確保使用之安全性。另依據民國 101 年 5 月 ~ 103 年 6 月之橋面高程測量資料顯示，於鉸接處附近下垂量變化最為明顯，且日間與夜間相較，夜間下垂量較日間大。

監測作業內容

橋梁健診系統架構

本文所介紹之橋梁健診系統具備完整監測項目、系統可靠耐用、傳輸效率佳與即時展示等功能，以真正有效地監測橋梁之安全性。其主要架構分為現地端、網際網路及使用端，如圖 2 所示，為各自可運作的兩套監測系統以無線網路將所得資訊傳回遠端監控中心電腦主機（設於臺灣營建研究院），一旦有異常再通過警戒通報程序讓主管單位有效掌握。

監測儀器配置

為能有效掌握本標的橋梁之結構安全現況，就該橋之結構特性（鉸接端下陷）進行監測儀器配置，主要集中於 JAB ~ JBC 與 JCD ~ JDE 共兩個部分，作為主要監測區域，如圖 3 所示，相關安裝成果如圖 4 所示。

監測儀器種類及功能

本標的橋梁主要安裝之監測儀器種類及功能如表 2 所示。

系統建置

本標的橋梁所建置之橋梁健診系統，係以 HTML 與 JavaScript 語言撰寫，並結合結構安全監測系統、全測站經緯儀量測系統與智慧型結構監測系統（Smart Box）於現地蒐集並儲存資料後，會

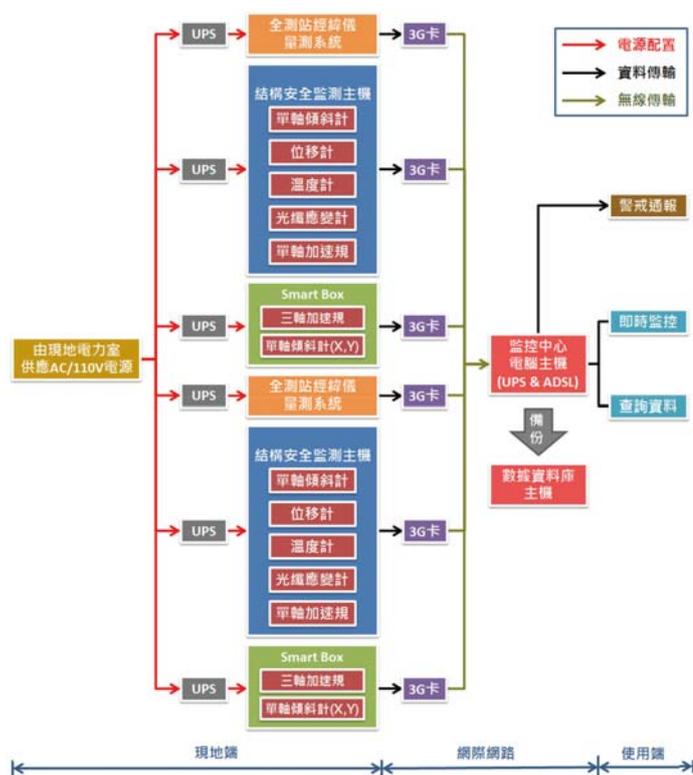


圖 2 橋梁健診系統架構圖

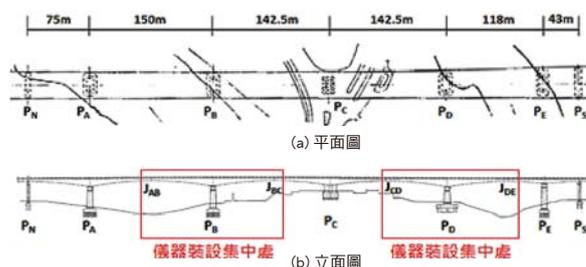


圖 3 監測儀器配置區分圖

表 2 監測儀器種類及功能表

頂次	儀器種類	功能
1	全測站經緯儀量測系統	鉸接點沉陷量及水平雙向相對位移監測。
2	結構安全監測主機	可整合項次 3 ~ 7 之設備，並內建傳輸介面及 20GB 紀錄器。
3	光纖應變計	安裝於梁之支承端、梁體及節塊交接處，以量測應變（梁變形）。
4	電子式單軸傾斜計	鉸接點相對轉角監測。
5	電子式位移計	鉸接點水平相對位移監測。
6	電子式溫度計	量測斷面上方，側面與下方溫度變化，以提供監測數據之改正與分析。
7	電子式單軸加速規	安裝於鉸接處，以量測垂直向振動資料
8	智慧型結構監測系統 (Smart Box)	針對帽梁外三軸向振動及單軸向傾角 (X,Y) 進行量測。



圖 4 監測儀器安裝成果圖

經由 3G 傳輸模組將資料回傳至監控中心主機，並由數據資料庫主機自動進行備份，橋梁主管單位透過網路瀏覽方式，即可進行遠端連線監控及系統操作等功能。

藉由即時監測模組，能即時監看所有監測儀器之量測值，如圖 5 所示。

藉由儀表板模組以圖形化之顏色區分警戒值（黃色）與行動值（紅色），判斷監測儀器量測值是否在正常範圍（綠色），如圖 6 所示，一旦超過警戒值或行動值時，除可啟動電腦之警報系統外，並可同時發出簡訊及 E-mail 通知相關人員。

藉由示波器模組，可透過波形圖即時顯示量測值動態波形，以檢視監測儀器訊號正確性，亦可自行修改監測儀器觀測值之更新秒數（系統預設為每 2 秒更新一次），進而瞭解其變化範圍（-6.802 mm ~ -7.098 mm），如圖 7 所示。

監測預警機制

除了透過監測系統可隨時掌握橋梁狀況外，當監測數據出現異常，可立即派員至現場勘查進行狀況研判，其預警機制流程如圖 8 所示，茲將各種情況分述如下：

監測數值超過警戒值

- 發佈簡訊通知，立即派員至現場勘查，並由緊急應變小組判讀其正確性。
- 若為誤報，則取消狀況，並通知系統維護人員分析原因。
- 若非誤報，則立即通報工程司，現場派人警戒。

監測數值超過行動值

- 發佈簡訊通知，立即派員至現場勘查，並由緊急應變小組判讀其正確性。

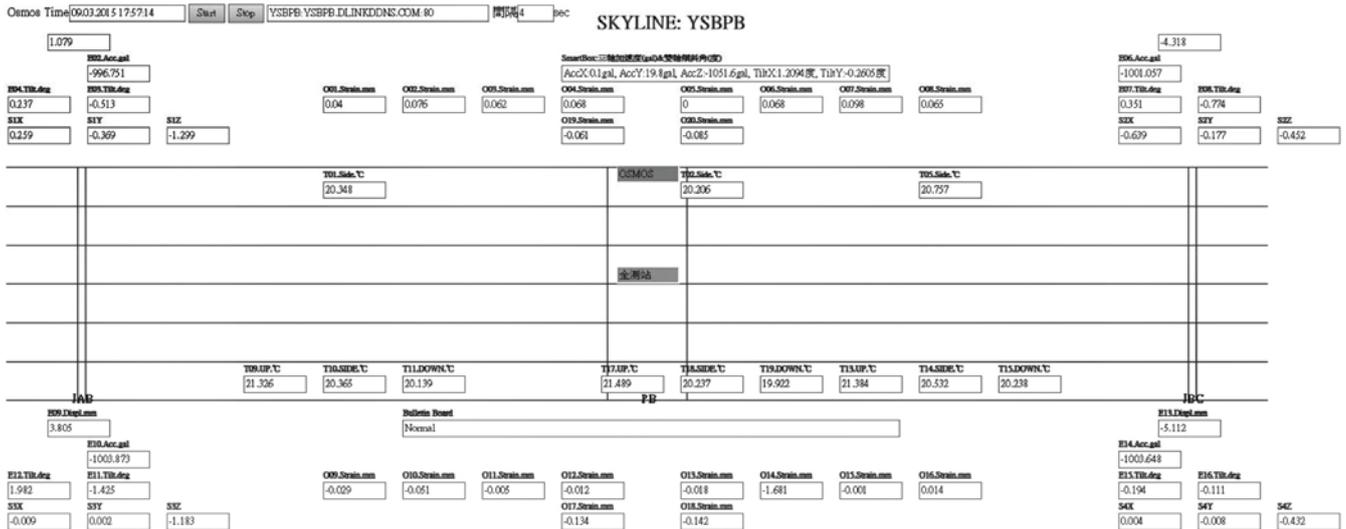


圖 5 即時監測模組示意圖 (以 PB 墩為例)

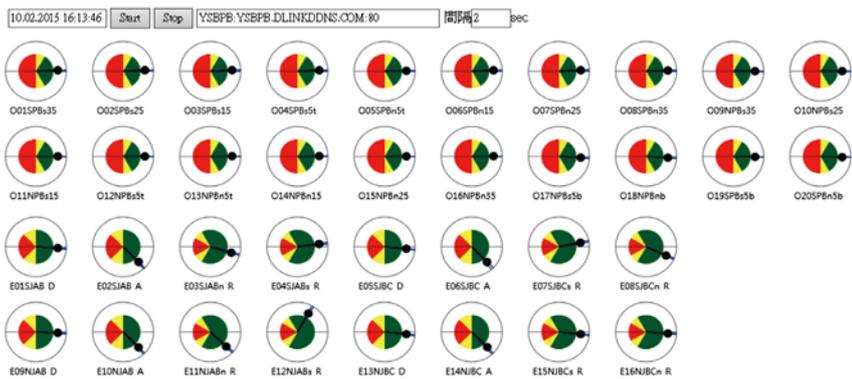


圖 6 儀表板模組示意圖

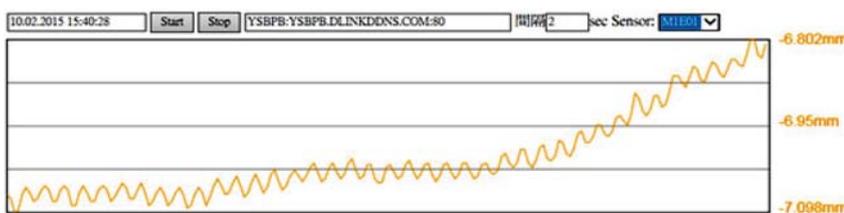


圖 7 示波器模組示意圖

天然災害

- 視現地狀況進行系統快速檢查等協助分析研判之相關事宜。

解除警報

- 依據搶修工程或補強改善後之監測資料，判斷是否解除警報。

監測資料分析

依據民國 103 年 12 月至民國 104 年 11 月間之監測資料進行說明，以供未來監測資料分析其趨勢變化參考之用，分述如下。

鉸接點沉陷量趨勢分析

針對鉸接點沉陷量趨勢分析資料，其中各鉸接點南下車道與北上

- 若為誤報，則取消狀況，並通知系統維護人員分析原因。
- 若非誤報，則立即通報工程司，現場派人警戒，準備進行限速、限重或封橋後續相關事宜。

限速、限重及封橋

- 初期建議於接近該橋之路肩設置警示燈號及標語，提醒用路人行車速度及重量限制。
- 若到達封橋標準，建議於交流道口進行交通管制，嚴禁車輛通行，並設置替代道路標語，提供用路人行車資訊。

車道的沉陷量歷時圖走勢相當一致，而如圖 9 所示，JCD 南下與北上車道的鉸接點沉陷量變化範圍最大，約介於 3 cm ~ -4.7 cm 之間。

鉸接點伸縮縫水平位移趨勢分析

針對鉸接點伸縮縫水平位移趨勢分析資料，如圖 10 所示，其中鉸接點伸縮縫水平位移變化範圍以 JBC 北上車道、JCD 南下車道與 JCD 北上車道變化約達 45 ~ 48 mm 為較大；JAB 南下車道變化約達 15 mm 為較小。

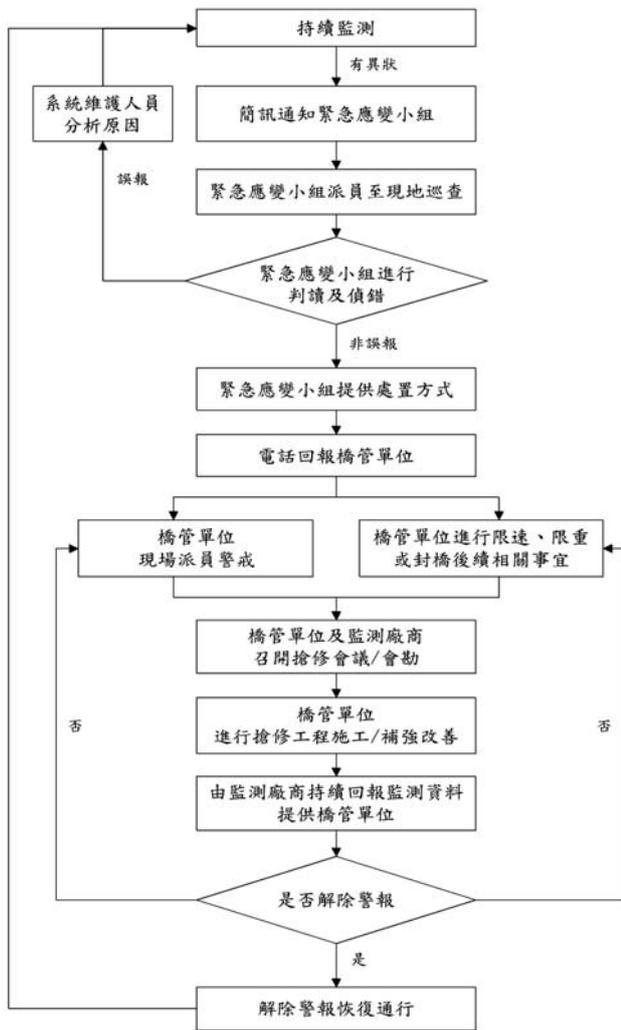


圖 8 預警機制執行流程

鉸接點振動趨勢分析

針對鉸接點振動趨勢分析資料，如圖 11 所示，其中各鉸接點加速度約為 $-1g$ 左右，變化不大。

鉸接點相對轉角趨勢分析

針對鉸接點相對轉角趨勢分析資料，如圖 12 所示，其中各鉸接點相對轉角變化範圍介於 0.12 度 ~ -0.35 度之間，變化不大。

鉸接點沉陷量與溫度之趨勢分析

針對鉸接點沉陷量與溫度之趨勢分析資料，如圖 13 所示，以 JCD 南下與北上車道為例，當溫度上升時鉸接點呈現沉陷狀態，當溫度下降時鉸接點呈現上揚狀態。另外相同斷面的溫度變化，因頂版處之溫度較底版處來得直接，故其溫度變化較為顯著。

鉸接點伸縮縫與溫度之趨勢分析

針對鉸接點伸縮縫與溫度之趨勢分析資料，如圖 14 所示，以 JCD 南下與北上車道為例，當溫度上升時鉸接點呈現沉陷狀態，當當溫度上升時鉸接點伸縮縫呈現壓縮狀態，當溫度下降時鉸接點伸縮縫呈現拉伸狀態。另外相同斷面的溫度變化，因頂版處之溫度較底版處來得直接，故其溫度變化較為顯著。

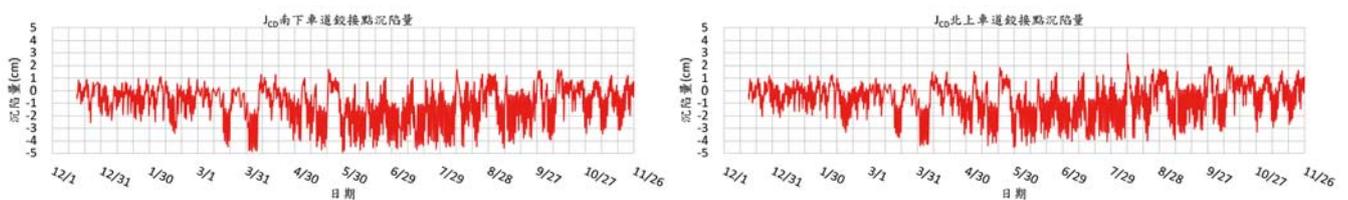


圖 9 鉸接點沉陷量趨勢監測資料

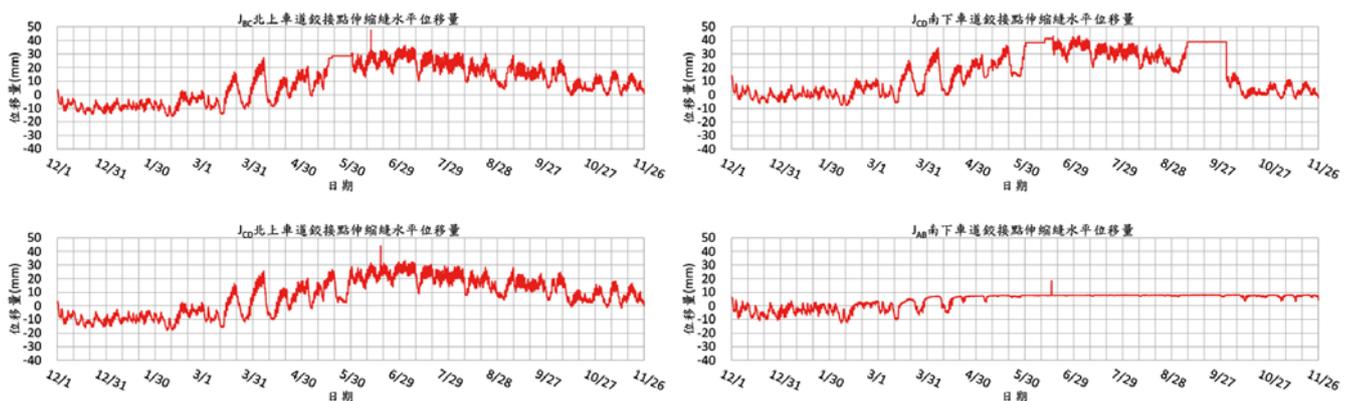


圖 10 鉸接點伸縮縫水平位移趨勢監測資料

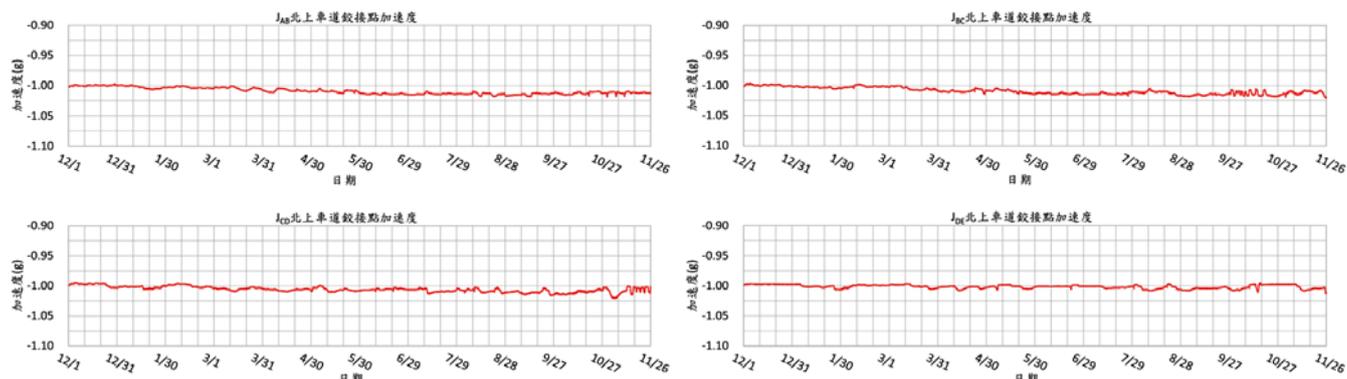


圖 11 鉸接點振動趨勢監測資料

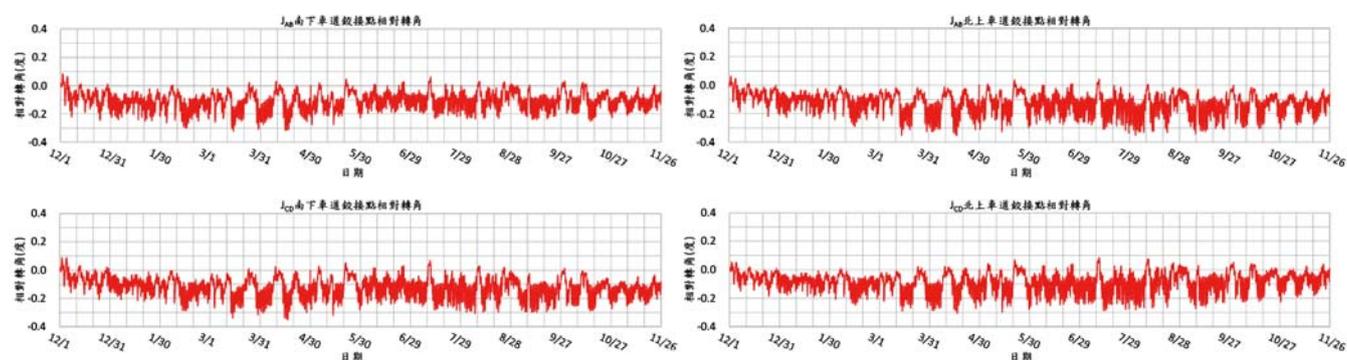


圖 12 鉸接點相對轉角趨勢監測資料

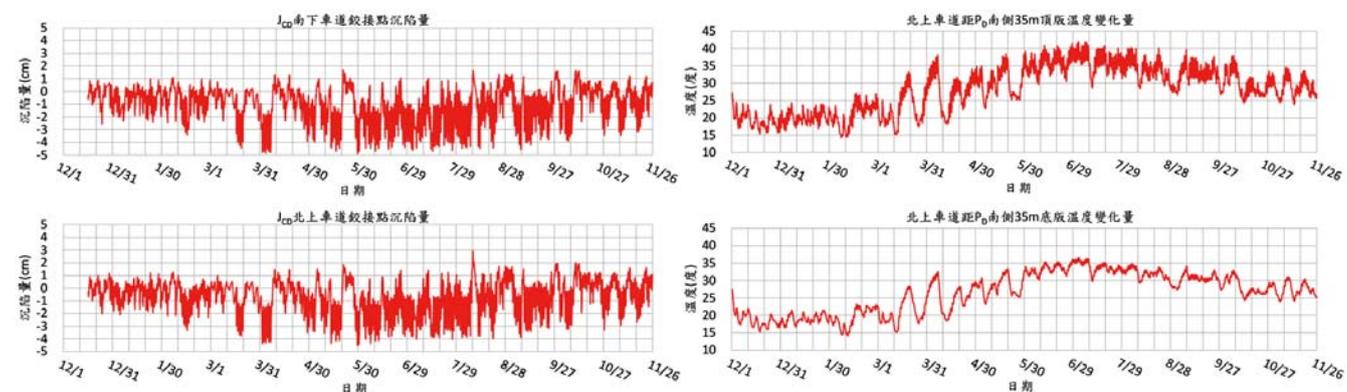


圖 13 鉸接點沉陷量與溫度之趨勢對照資料

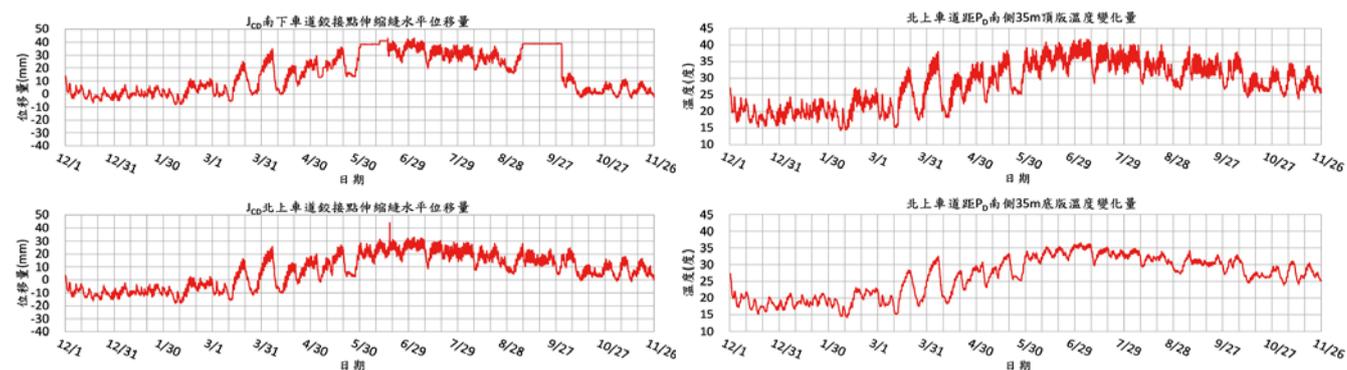


圖 14 鉸接點伸縮縫與溫度之趨勢對照資料

動態分析

針對本標的橋梁鉸接端進行動態量測，於 JBC 北上車道共記錄到 3242 次超過振動變化範圍 ($\pm 80\text{gal}$) 資料，初步研判為瞬間衝擊車載重所造成。因此，針對其最大變化範圍之振動資料進行動態分析，並將其加速規歷時波形經由快速傅利葉轉換成頻域分析，其分述如下：

振動資料分析

平時車載作用下

圖 15 為平時 JBC 北上車道加速規振動資料，圖中顯示其變化範圍介於 $0.013\text{ g} \sim -1.058\text{ g}$ ，其對應頻率約為 2.0 Hz 左右，如圖 16 所示。

春節期間

圖 17 為春節期間 JBC 北上車道加速規振動資料，圖中顯示其變化範圍介於 $-1.050\text{ g} \sim -0.959\text{ g}$ ，其對應頻率約為 0.94 Hz 、 2.1 Hz 與 4.2 Hz 左右，如圖 18 所示。

結構物自然頻率

藉由春節期間由於車流量較少，車輛載重對橋梁干擾較少，與平時的結果相較，其中 0.94 Hz 的頻率因

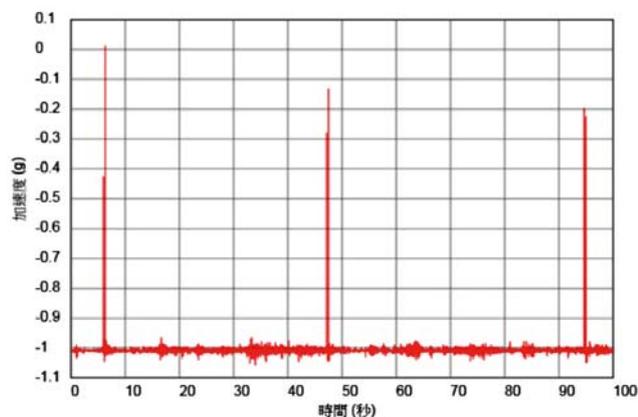


圖 15 JBC 北上車道加速規歷時波形圖

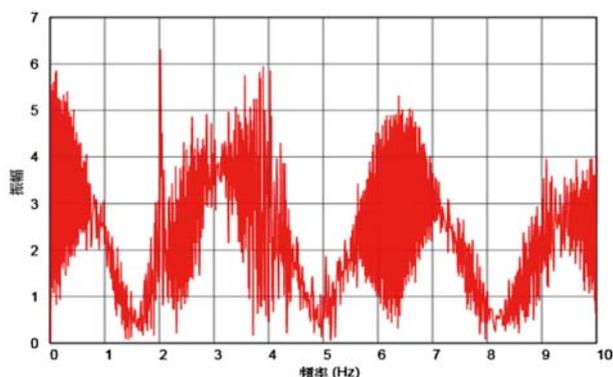


圖 16 JBC 北上車道加速規頻譜與振幅圖

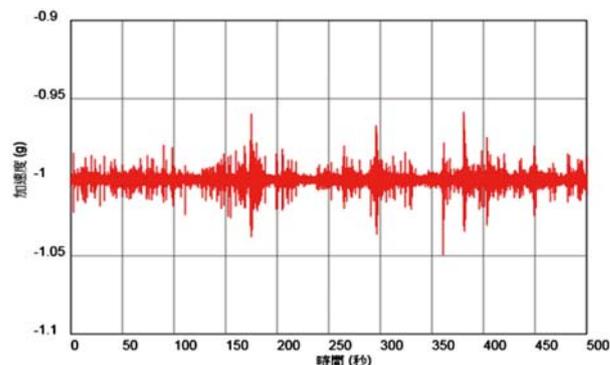


圖 17 JBC 北上車道加速規歷時波形圖 (春節期間)

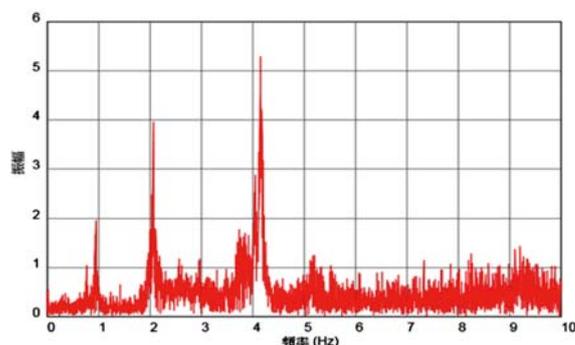


圖 18 JBC 北上車道加速規頻譜與振幅圖 (春節期間)

外界干擾少，而較為突顯；另外 $2.0\text{ Hz} \sim 2.1\text{ Hz}$ 的頻率始終存在，可作為後續頻率比對之用。

結論

藉由橋梁健診系統之建置、監測運作與評估，可瞭解橋梁之鉸接點沉陷趨勢、鉸接點伸縮縫劣化趨勢、鉸接點沉陷與溫度之關係等，充分掌握橋梁之結構安全現況。未來配合長期監測數據趨勢分析成果，及適當之預警機制與應變方針，提供現地橋梁維護管理人員更充裕的時間應變，以確保橋梁之結構與行車安全。

參考文獻

1. 期刊 1. 陸景文，陳振川、張國鎮，詹穎雯，「台灣地區溫度對混凝土橋梁影響之監測與分析」，中國土木水利工程學刊第十三卷第三期 (2001)。
2. 學位論文 1. 王顯霖，「橋梁健康診斷量測技術之研究」，國立中央大學 (2011)。
3. 研究報告 1. 財團法人臺灣營建研究院，「臺北市橋梁災害防治專業服務」，臺北市政府 (2014)。2. 財團法人臺灣營建研究院，「國道 3 號濁水溪橋沖刷監測之研究」，交通部臺灣區國道高速公路局 (2010)。3. 陳振川、蔡益超、張國鎮等，「橋梁監測預警系統及沖刷保護措施及補強等策略之研究」，交通部公路總局 (2006)。
4. 財團法人臺灣營建研究院，「高速公路橋梁延壽評估及案例分析委託研究計畫」，交通部臺灣區國道高速公路局 (2005)。

橋梁安全監測系統介紹

— 以美谷義橋為例

黃進國／中興工程顧問股份有限公司結構工程部工程師

葉啟章／中興工程顧問股份有限公司結構工程部計畫主任

王正中／中興工程顧問股份有限公司結構工程部技術經理

鄭書恒／中興工程顧問股份有限公司結構工程部部門經理

邱毅宗／國立臺北科技大學土木工程系博士生

黃秋揚／交通部公路總局第五區養護工程處阿里山工務段段長

陳嘉盈／交通部公路總局第五區養護工程處處長

摘要

橋梁扮演著兩地文化交流、經濟貿易、交通運輸的重要角色，一旦橋梁發生倒塌事故，常常造成無法估計的人民資產及社會經濟嚴重損失。本文採用數值模擬搭配即時監測系統進行橋梁安全狀態評估，系統上規劃了吊索振動加速度（索力）、橋台傾斜角監測以及即時 CCTV 影像監視，藉此確保用路人的安全。

ABSTRACT

Bridge plays the important roles between two regions for cultural exchange, economy, trade and transportation. In case bridge crash, it caused serious loss on people's properties and social economy. In this paper, it used numerical simulation with real-time monitoring system to evaluate bridge safety condition. The planned system including accelerometers to monitor cable vibration frequencies (thus cable forces), inclinometers to monitor, inclination of abutment, and CCTV images. Base on these to make sure safety of road users.

前言

受到氣候劇烈變化的影響，台灣的公共工程所受到的環境影響越趨於嚴苛，近年來常常發生颱風豪雨

侵襲，導致山區發生邊坡崩塌、土石流侵蝕、洪水沖刷等，導致橋梁破壞，因此橋址的選擇便顯得相當重要，本文橋梁所在橋址於 2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風發生時，山坡地受到暴雨的侵襲，產生了嚴重的道路邊坡大規模坍滑，導致原有道路通行中斷，然而此路段邊坡陡峭，局部路段的腹地不足，難以採用路工方案復建，故交通部公路總局在該橋址附近規劃了一座長跨徑的鋼拱橋直接跨越侵蝕溝，避開邊坡崩坍區（如圖 1 所示），藉此消除用路人通行時受到零星落石的威脅。本文中橋梁為半穿式鋼拱橋，全長 198 m，拱高 32 m，路面寬 10 m（淨寬 9 m），橋跨跨距分別為 14 m-170 m-14 m，兩側各配置 18 根斜吊索^[1-3]。本文中的鋼拱式橋梁，其橋面版、橋護欄、路面 AC 及車流的重量主要透過斜吊索傳遞到鋼拱梁，再傳遞至兩側拱圈下側的基礎，由此顯示斜吊索在本橋扮演著相當重要的力量傳遞角色，參考前人研究成果^[4-10]，規劃了橋梁安全監測系統，監測內容包括斜吊索振動加速度（索力）監測、橋台傾斜角監測、CCTV 即時影像監視，透過監測系統即時掌控橋梁吊索振動加速度（索力）變化、橋台傾斜角變化，並搭配數值分析程式之模擬，瞭解橋梁的健康狀況，來達到確保用路人行車安全的目的。



圖 1 台 18 線芙谷峩橋現況

數值模型

為瞭解該橋梁結構系統整體特性及吊索振動特性，本文採用商用套裝數值模擬軟體建構出該橋梁之數值模型，如圖 2 所示，該橋梁之平、立面圖，如圖 3、圖 4 所示。該橋全長 198 m，拱高 32 m，路面寬 10 m（淨寬 9 m），橋跨跨距為 A1-P1-P2-A2（14 m-170 m-14 m），兩側各配置 18 根斜吊索，透過數值模擬挑選出橋梁兩側各 6 根斜吊索進行監測。單根吊索採用 13 股高拉力 7 線鋼絞索（ $\phi 15.2$ mm），單絞索內部灌注油脂（Grease），

外面包覆 HDPE 套管，13 股單絞索外層再包覆 HDPE 套管，單根鋼纜斷面積為 1803.1 mm²，極限抗拉強度為 345.8 tf，吊索構造如圖 5 所示。考量橋梁相關尺寸及材料參數，預先模擬得到監測吊索的局部模態（如圖 6 所示），再於模型中以調整吊索索力的方式，採二次式關係式（ $T = a \times f_1^2 + b \times f_1 + c$ ）描述第一階模態頻率（ f_1 ）與索力（ T ）之關係，如表 1、表 2 所示，建構出吊索第一階模態頻率（ f_1 ）與索力（ T ）關係圖，如圖 7、圖 8 所示。

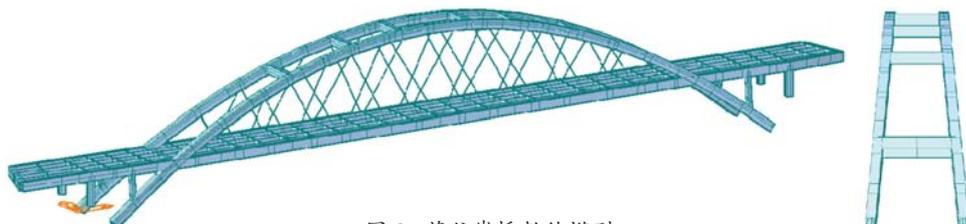


圖 2 芙谷峩橋數值模型

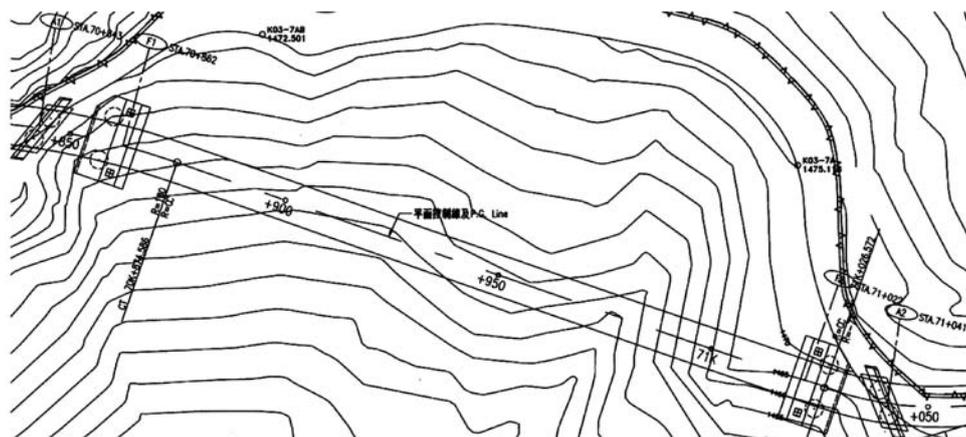


圖 3 芙谷峩橋平面圖

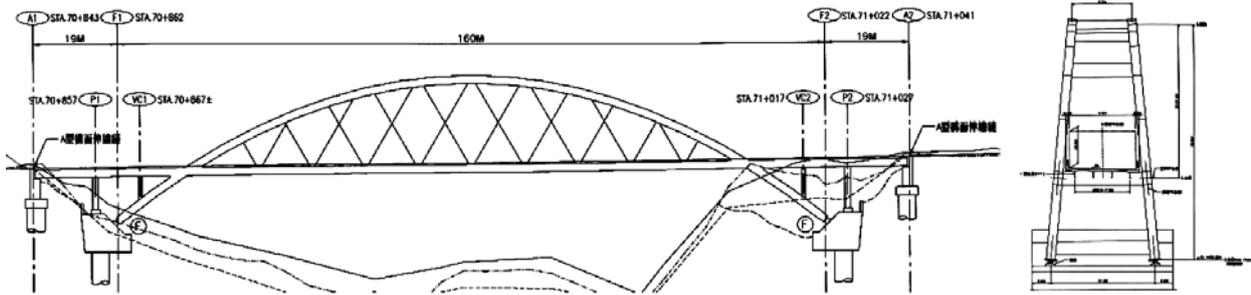


圖 4 芙谷峽橋立面圖

圖 7 下游側吊索第一階模態頻率 (f_1) 與索力 (T) 關係圖

吊索編號	索長 (m)	a	b	C	R - Square
R03	13.308	979.57	-321.54	969.8	1
R08	23.530	2849.3	549.35	-954.42	1
R09	22.641	3092.4	296.22	-296.61	0.9999
R10	22.641	3130.3	-108.91	365.83	1
R11	23.225	2907.1	75.449	-31.958	0.9999
R16	12.510	961.87	-157.61	364.46	1

圖 8 上游側吊索第一階模態頻率 (f_1) 與索力 (T) 關係圖

吊索編號	索長 (m)	a	b	C	R - Square
L03	13.308	959.01	-40.171	47.097	1
L08	23.530	2855.1	551.5	-1057.8	0.9999
L09	22.641	3086.2	315.46	-277.18	1
L10	22.641	3099.1	179.36	-237.42	1
L11	23.225	2827.9	691	-1196.9	1
L16	12.510	955.66	-79.734	133.1	1

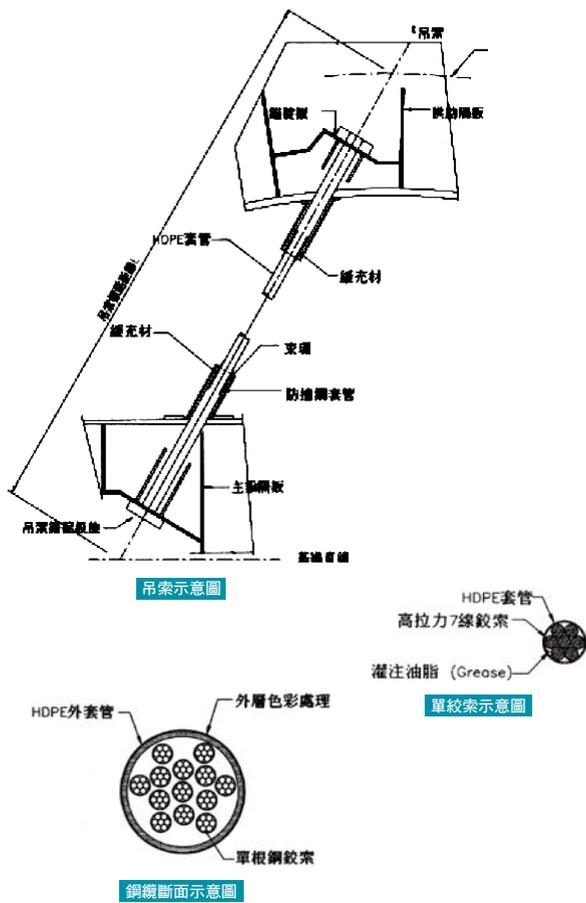


圖 5 吊索構造示意圖

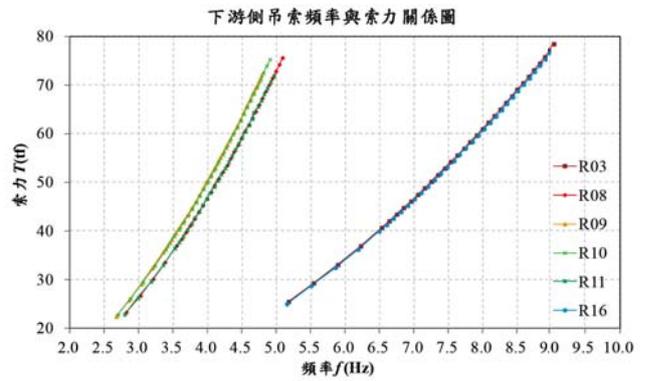


表 1 下游側吊索第一階模態頻率 (f_1) 與索力 (T) 回歸公式係數表

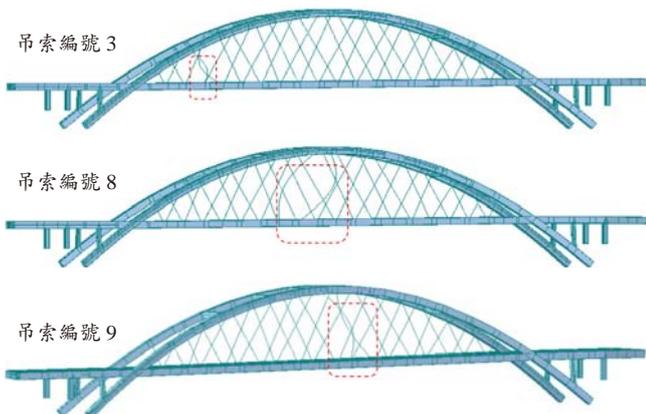


圖 6 吊索局部振動模態

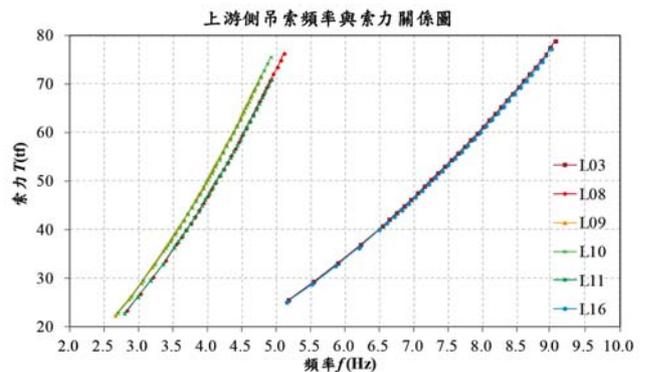


表 2 上游側吊索第一階模態頻率 (f_1) 與索力 (T) 回歸公式係數表

橋梁安全監測系統規劃

本橋梁規劃之監測系統包含：(1) 單軸向加速度計（量測範圍： $\pm 2\text{ g}$ ，靈敏度： 5 mV/Gal ）、(2) 雙軸向傾斜計（量測範圍： ± 15 度，解析度： 10 秒）、(3) 攝影機、(4) 動態資料擷取器（取樣率： $2000\text{ samples/sec (max)/ch}$ ，頻道數： 8 ch/台 ）、監測主機、(5) 監測網頁展示平台，各儀器設備安裝位置如圖 9 所示，廠牌、型號、數量、安裝位置及用途如表 3 所述。整體監測系統包含四大區塊。包含現地監控系統（含資料分析處理）、監控中心平台、遠端監控系統、警訊發佈及緊急處理作業，如圖 10 所示。現地監控系統（含資料分析處理）主要為安裝感測器於橋梁結構上，藉此擷取結構靜、動態行為訊號、並由監測主機即時分析處理擷取所得的訊號；再透過無線網路將分析結果傳輸至雲端展示平台，即時展示各感測器監測訊號分析結果，並於結構發生異常時，透過警訊發佈及緊急處理作業發送簡訊或電子郵件至相關權責管理單位，提供管理者行動判斷依

據。遠端監控系統可以讓使用者於遠端透過無線網路，使用電腦、智慧型手機登入監測網頁平台（如圖 11 所示），即時查看監測橋梁現況。

橋梁安全監測系統安裝

依據規劃之監測儀器安裝位置進行管線配置（包含電線、訊號線）、感測器（加速度計、傾斜計、攝影機）、監測箱（內部放置資料擷取器、監測主機、通訊模組）等之安裝，安裝照片如圖 12 所示。於儀器安裝前須先佈設交通維持設施及人工旗手（如圖 12a），以確保車流通行順暢及施工人員安全。由於加速度計安裝須透過舉高車在高空中作業，所以需先將加速度計組裝於保護盒內（如圖 12b），同時可先進行線路配置（如圖 12c），待加速度計保護盒組裝完成後，再使用舉高車將施工人員抬升至加速度計安裝高度，將加速度計連同保護盒牢固的安裝於吊索上（如圖 12d）。傾斜計安裝在橋台台身處（如圖 12e），攝影機安裝於

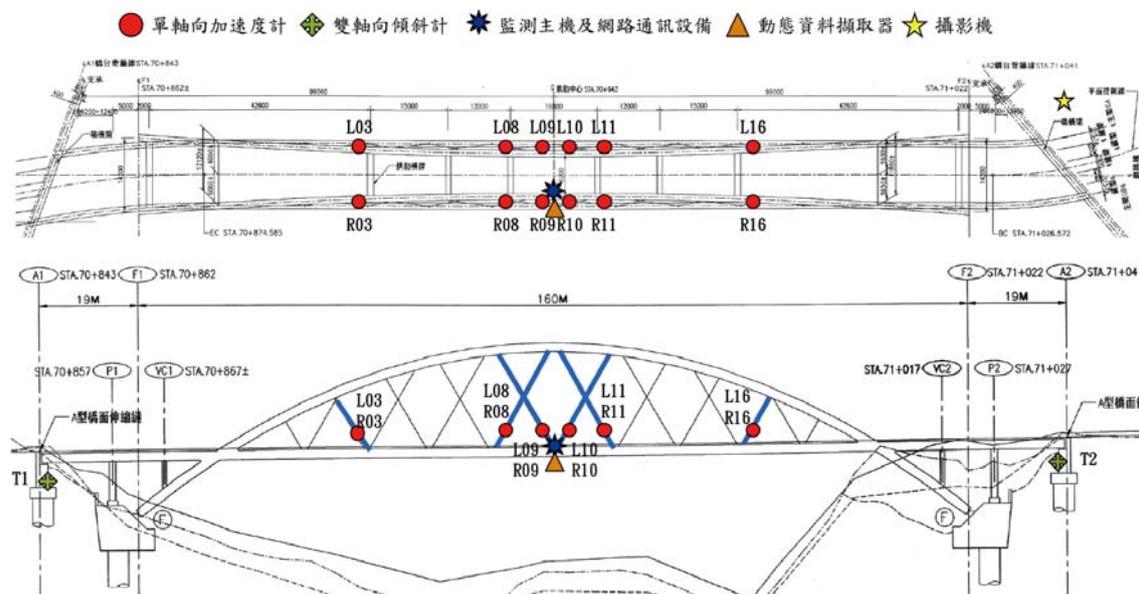


圖 9 監測儀器設備配置圖

表 3 監測系統之儀器設備規格、數量及用途

項目	廠牌	型號	數量	安裝位置	用途
單軸向加速度計	Tokyo Sokushin	AS-2000	12 個	上 (L)、下 (R) 游側斜吊索 (編號 3、8、9、10、11、16)	監測斜吊索振動加速度 (索力) 變化
雙軸向傾斜計	Geomaster	MTM-15D	2 個	A1、A2 橋台	監測橋台傾斜角變化
攝影機	Lilin	IPS4308E	1 台	上游側 A2 橋台附近	監視橋梁即時影像
動態資料擷取器	Geomaster	DSPL-24	2 台	橋梁下游側跨中處護欄外側監測箱內	擷取監測資料
監測主機及網路通訊模組	Lenovo	M93p	1 台	橋梁下游側跨中處護欄外側監測箱內	儲存監測資料，即時運算分析處理
監測網頁展示平台	-	-	1 式	雲端平台	即時展示監測分析結果及橋梁現況

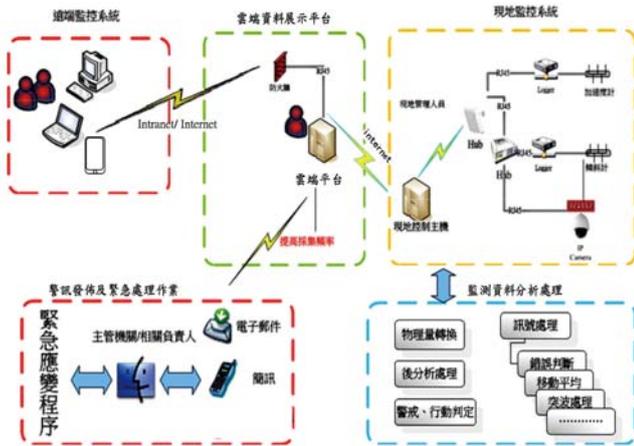


圖 10 監測系統構架

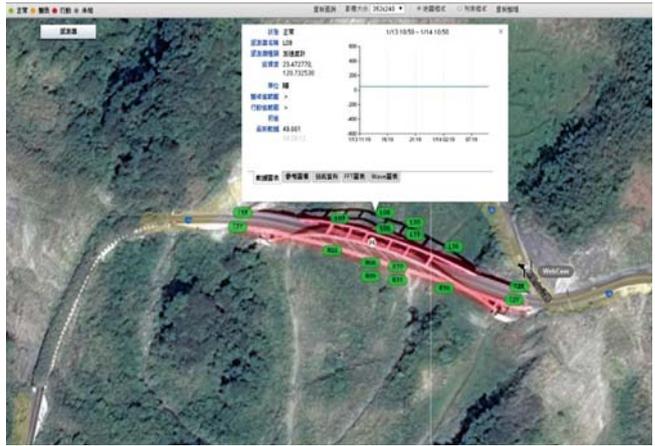


圖 11 監測網頁平台

A2 橋台上游側保護邊坡的擋土牆上（如圖 12f），監測箱則安裝於下游測跨中處護欄外側（如圖 12g），資料擷取器、監測主機、通訊模組則放置於監測箱內（如

圖 12h），於線路及感測器安裝完成後，便須立刻測試監測主機、資料擷取器、感測器之間的連線及網路通訊狀況是否良好。



圖 12 監測系統安裝照片

監測訊號分析

本文採用的監測資料擷取設定方式為每 30 分鐘記錄一筆 5 分鐘的資料，取樣頻率為 200 samples/sec。圖 13 為 12 月 1 日上游 (L) 側各監測吊索加速度振動歷時曲線，圖中顯示車流狀態下，加速度最大值均低於 0.016 g，其中 L03、L08、L09 振動幅度相當、L10、L11、L16 振動幅度相當。圖 14 為整理 12 月 1 日、12 月 2 日各 3 筆監測資料進行頻譜分析的結果，分析時採用 214 = 16,384 點 (81.92 秒) 資料進行分析。分析結果顯示 L03 吊索主要頻率為 6.76 HZ，L08 吊索主要頻率為 3.93 HZ、7.84 HZ，L09 吊索主要頻率為 4.37 HZ、8.89 HZ，L10 吊索主要頻率為 4.17 HZ、8.33 HZ，L11 吊索主要頻率為 2.92 HZ、6.23 HZ、9.50 HZ，L16 吊索主要頻率為 7.87 HZ。

表 4 為監測資料分析結果與設計值比較之索力分析，表中顯示由數值模型與弦理論公式推算之索力值與初始設計索力值大致相近，顯示透過數值模型或弦理論公式等方式計算索力，可有助於達到比對及驗證監測成果的目的。

表 4 索力值 (單位: tf)

吊索編號	L03	L08	L09	L10
初始設計值	43.4	43.7	44.9	43.2
數值模型 $T = af_1^2 + df_1 + c$	43.6	48.6	55.8	50.8
弦理論公式 $T = 4mL^2 (f_n/n)^2, n = 1$	39.3	41.5	47.4	43.2

結論與建議

本文顯示藉由橋梁監測系統及數值模型的建立，可以有效輔助橋梁營運安全管理。以竣工圖所紀錄結構尺寸、材料參數等資料，建立橋梁數值模型，再透過模態分析及監測資料分析，可以有效的比對出橋梁的主要監測頻率。最終目的係以調整數值模型中吊索索力的方式，預先建立頻率 (f) 與索力 (T) 關係資料表，如此便可由監測資料即時推算出吊索索力的變化情形。透過即時的橋梁安全監測系統，便可透過電腦、智慧型手機遠端登入監測平台，並即時取得颱風、豪雨事件發生前、中、後橋梁的狀況，提供為橋梁管理人員評估橋梁安全的依據，有效提升管理效能及檢測勘查作業的安全性，並達到確保用路人安全的目的。

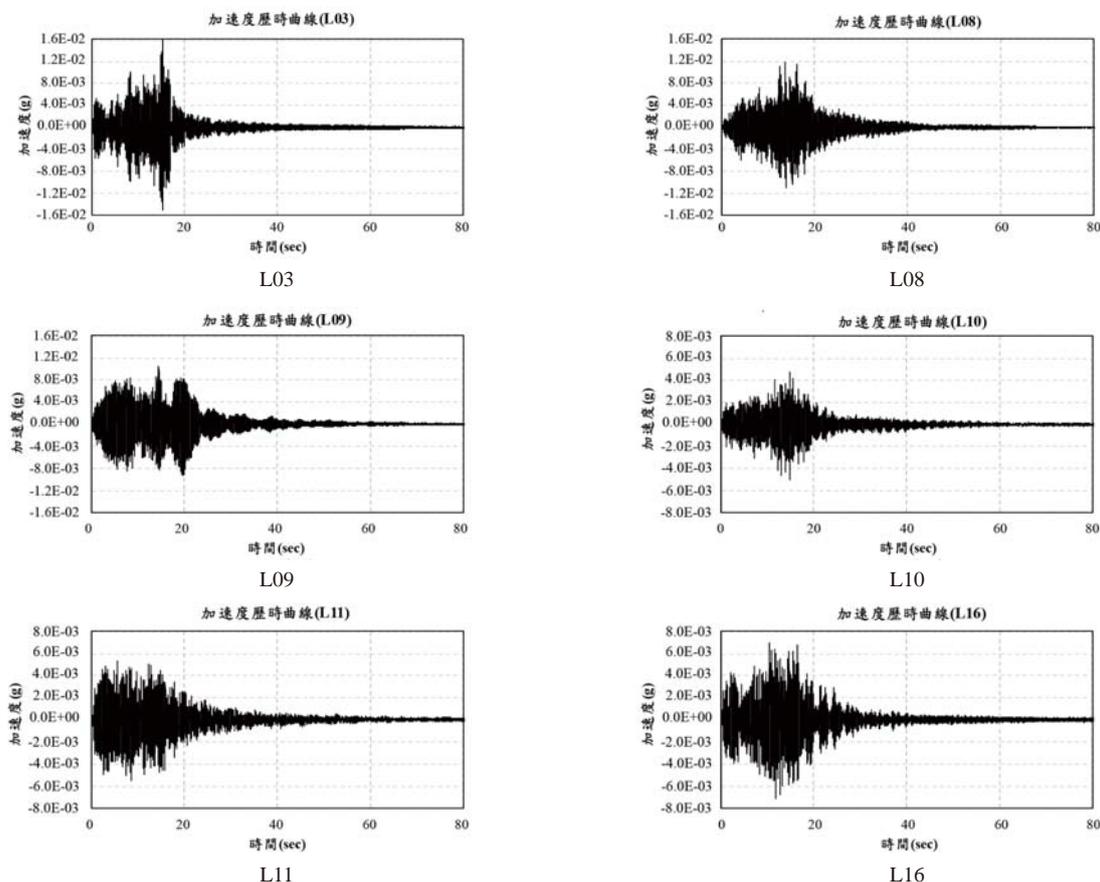


圖 13 車流狀態下上游側各吊索加速度振動歷時曲線

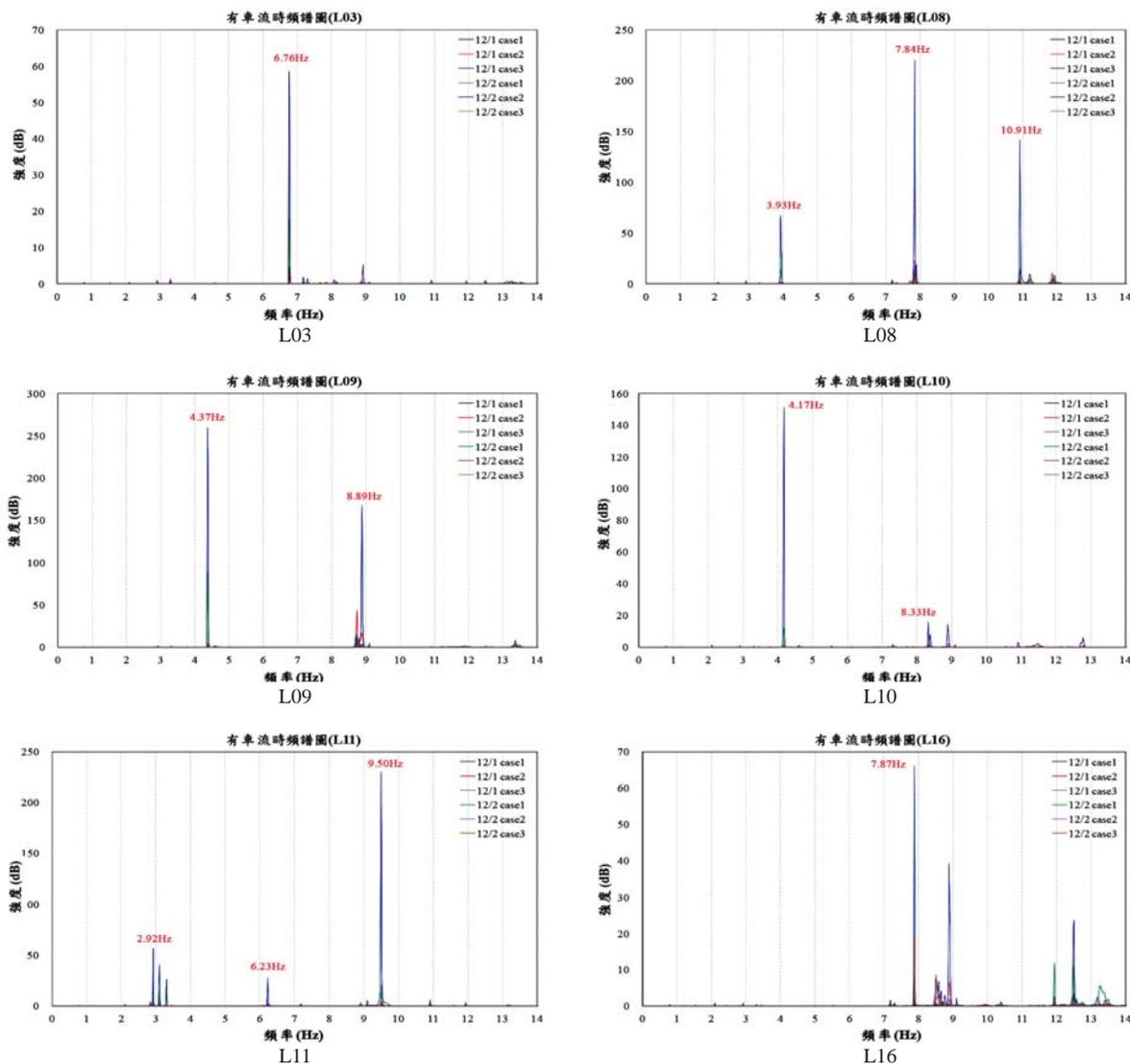


圖 14 車流狀態下上游側各吊索振動頻譜圖

誌謝

感謝交通部公路總局第五區養護工程處提供本計畫經費，阿里山工務段指導及崧澔科技有限公司協助監測系統之安裝。

參考文獻

1. 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，第 160-173 頁 (2015)。
2. 蔡宗成、賴世寶、陳致遠，「莫拉克風災台 18 線 71K+100 芙谷峽橋設計與施工」，台灣公路工程，第 40 卷第 8 期 (2014)。
3. 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 (芙谷峽橋) 道路復建工程設計與施工」，鋼結構工程，第 51 期，第 9-27 頁 (2015)。
4. Chang, K.C. Lee, Z. K. and Chen, C. C., "Structural Assessment of a repaired cable bridge damaged in 1999 Chi-Chi earthquake," Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, pp. 1822-1833 (2012).
5. Debora, S. N. Parivallal, S. Ravisankar, K. and Hemalatha, G., "Evaluation of Cable Tension Using Vibration Based Methodologies for Health Monitoring of Structures," International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, No. 6, pp. 506-514 (2015).
6. Caetano, E. and Cunha, A., "Dynamic testing of cable structures," Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Duebendorf, Switzerland, 01002-pp. 1-15 (2015).
7. Nguyen, K.D. and Kim, J. T., "Vibration-Based Monitoring of Stay-Cable Force Using Wireless Piezoelectric-Based Strain Sensor Nodes," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 32, No. 6, pp. 669-677 (2012).
8. Yang, M. Ma, H. Zeng, Q. Y. Yang, J. J. and Chen, Z. S., "Short-Term Deformation Monitoring Analysis for a Large Span Cable Stayed Bridge," Modern Applied Science, Vol. 8, No. 6, pp. 37-46 (2014).
9. Sim, S. H. Li, J. Jo, H. Park, J. W. Cho, S. Spencer Jr, B. F. and Jung, H. j., "A wireless Smart Sensor Network for Automated Monitoring of Cable Tension," Smart Materials and Structures, Vol. 23, pp. 1-10 (2014).
10. Yu, C. P. Lai, J. Cheng, C. C. and Chiang, C. H., "Direct Evaluation of Effective Lengths of Vibrating Cables Using Responses from Dual/Three Transducers," Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 51-60 (2013).

光纖光柵在地工安全監測之應用

黃安斌／國立交通大學土木工程學系教授

何彥德／奇博科技有限公司總經理

王建智／國立交通大學土木工程學系博士候選人

吳崑璋／國立交通大學土木工程學系研究生

摘要

光纖光柵 (optic fiber Bragg grating, FBG) 是多種光纖感測技術中的一種, FBG 體積小, 耐久性高, 光纖訊號可長距離傳輸而不受電磁波或短路之影響, 同時可以在同一光纖上做多點式的監測。FBG 本身就是一個非常優良的應變計或溫度計, 透過機構的設計也可以利用 FBG 做成感測器 (transducer) 做為量測其他物理量之工具。因為 FBG 之特性, 以 FBG 為核心之感測器相較於傳統電子式感測器有更高穩定性與耐用性之優勢, 尤其是在地層內使用。交通大學光纖感測試驗室在過去十數年研發成功多種 FBG 感測技術, 並應用於大地工程監測。本文首先介紹 FBG 之基本原理, 然後敘述一些 FBG 使用之案例, 並討論此間測技術在未來大地工程結構安全監測可能之發展。

光纖光柵基本原理

光纖光柵的製造係利用高能量同調雷射在光纖曝光造成折射率永久改變, 成為一系列週期為 Λ 的明暗條紋, 此稱之為光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG)。當一寬頻光耦合進入此一光纖時, 除了滿足布拉格條件 (Bragg condition) 的特定波長會產生反射外, 其餘波長都會因為相位差而相消^[1]。

布拉格反射波長 λ_B 為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

其中：

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖 1 為光纖光柵反射原理示意圖, 光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合, 當寬頻光束通過這些透鏡組合時, 造成某特定頻率光波被反射, 而其他頻率光波則繼續向前傳導 (圖 2), 而這些透鏡的間距不同, 則被反射光波頻率亦不相同。

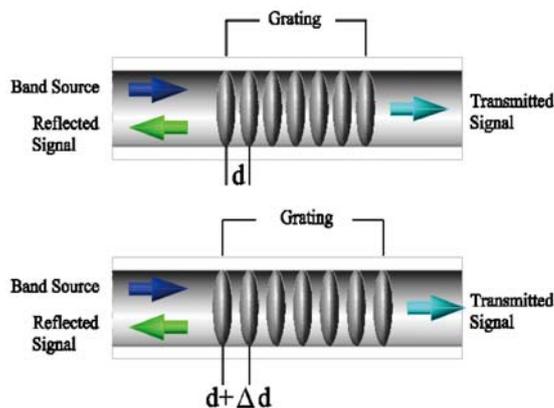


圖 1 光纖光柵感測機制示意圖^[2]

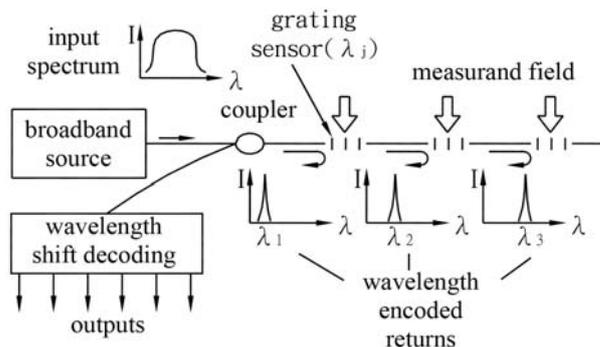


圖 2 光纖光柵串列反射原理示意圖^[3]

當光柵受到外力產生軸向應變時，則造成光纖光柵原本間距 Λ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入公式 (1) 式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta\Lambda \quad (2)$$

應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (3)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right) l = \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right) \left(\frac{2n}{2n} \right) l \quad (4)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

在室溫條件下， 1°C 的溫度變化約使得布拉格波長飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ nm}$ 。現有之 FBG 解讀技術其解析度可達 1 pm ($1 \text{ pm} = 10^{-3} \text{ nm}$, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)，FBG 做為溫度計可以有 0.08°C 左右之解析度。基於以上原因，FBG 具有與應變計同樣的功能。但與傳統電子式應變計不同的是，多個 FBG 可以用同一光纖做訊號傳遞，只要各 FBG 之 L 有足夠差距，既使在有應變的情況下，各 FBG 所反射之波長 λ_B 仍然不會重合，因此可以根據 λ_B 來辨識每個 FBG 訊號之來源。但與傳統電子式應變計類似，FBG 必須做溫度變化之修正。使用現有技術，在單一光纖上通常可以安裝 10 個以內之 FBG，而同一 FBG 解讀系統可以安裝 8 條以上之光纖，所以 FBG 感測系統有相當高之監測能量。透過機構的設計也可以利用 FBG 做成感測器 (transducer) 做為量測其他物理量之工具，例如壓力計、位移計與加速度計等。以下介紹一些 FBG 感測技術之應用實例。

FBG 在地工結構安全監測之應用

使用 FBG 應變管做基樁橫向載重變形監測

傳統應變管 (pipe strain gage, PSG) 是將電子式應變計，延軸向之方向黏貼在一均勻斷面之軟管上，根據應變 (ε) 量測與軟管相對於管底橫向位移 (y) 之數學關係來估算此軟管隨軸向位置 (x) 之橫向位移分佈。此應變與位移之關係如下：

$$y = \frac{1}{r} \iint \varepsilon dx^2 \quad (6)$$

其中

r = 應變管半徑

x = 延軸向之距離

作者於雲林麥寮六輕工業區中，在一預鑄混凝土基樁橫向載重試驗中使用 FBG 應變管量測此基樁橫向位移隨深度之分佈。本次試驗總共使用 60 個光纖光柵，分別分佈在一 28 mm 直徑，20 m 長之 PVC 管兩側，FBG 間距 50 cm，製作完成應變管如圖 3 所示。試驗樁為預鑄預力混凝土樁，長 20 m、外徑 50 cm，內徑 32 cm。基樁貫入地層後其中空部分再放入鋼筋籠、傳統地層移動監測用之傾斜管、及 FBG 應變管，以混凝土灌漿填滿。灌漿後傾斜管及光纖光柵應變管相對關係如圖 4。

圖 5 顯示加載 3、9、15 噸期間，FBG 應變管所承受的應變分佈，以及 FBG 應變管讀數經計算所得變形量與使用傳統手動式傾斜儀量測所得變形量之比較結果。結果顯示應變大多集中在地表下 5 m 以內，樁身位移量也大多由此段區域開始大幅度增加，符合長樁之一般行為。FBG 與傾斜儀量測結果有相當高的一致性，雖然傾斜儀數據之穩定性比較差。



圖 3 製作完成之 FBG 應變管

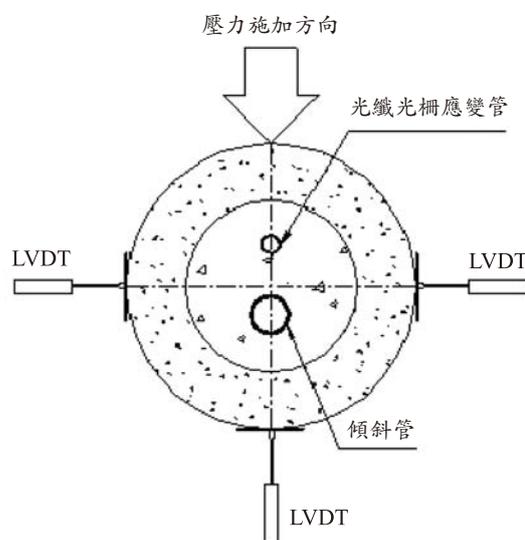


圖 4 樁試驗中位移監測設備配置

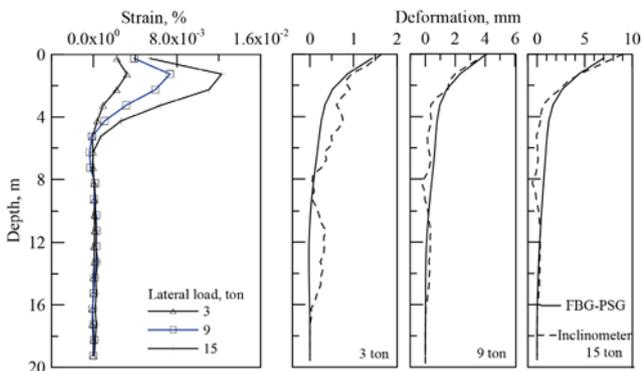


圖 5 FBG 應變管之應變與位移分佈

使用 FBG 做潛盾隧道環片應變監測

台北市捷運信義線隧道施工採用潛盾工法，關於潛盾隧道結構之設計，各顧問公司並無統一，也無所謂「正確」的分析方法，只是一種長久以來「約定俗成」的分析流程及方式，由於缺乏可靠的量測資料來確認分析的結果及安全性，故在台北市信義線隧道環片裝設光纖光柵進行量測。作者在隧道環片組裝及混凝土預鑄前於鋼筋上黏貼 FBG 做應變量測，為隧道襯砌環片從製作到安裝完成進行長期監測，以進一步了瞭解施工中及日後營運通車時，隧道環片之受力情形。

作者於環片預鑄廠內完成 FBG 安裝作業（圖 6），於環片的上（長鋼筋）、下（短鋼筋）端各安裝 4 個 FBG 感測器，其中 3 個為 FBG 應變計，1 個為 FBG 溫度計，所以單一環片內共安裝有 6 個 FBG 應變計與 2 個 FBG 溫度計。在長鋼筋、短鋼筋上也各安裝一個電子振旋式（vibrating wire, VW）應變計做相互比較之用。裝有 FBG 感測器之環片於 2006 年底製作完成，2007 年初進行單片載重試驗，並將 FBG 與 VW 應變讀數做相互比較，如圖 6 所示。

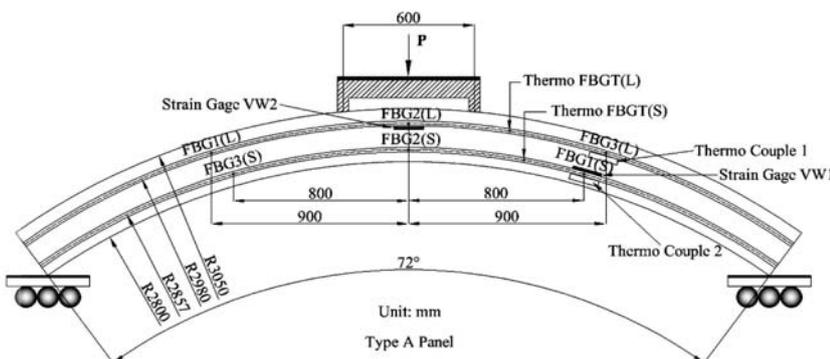


圖 6 FBG 應變計安裝與環片載重試驗示意圖 [4]

圖 7 與圖 8 展示載重試驗中短、長鋼筋上 FBG 讀數與電子式應變計量測結果。由圖 7 顯示 FBG 與 VW 應變計在類似位置有接近的量測結果與相同的變化趨勢，此監測結果表示 FBG 應變計與電子式應變計能相輔相成、互相率定。FBG 應變計與 VW 應變計的差別在圖 8 可明顯看出，當下層短鋼筋降服後，載重轉為上層長鋼筋承受，FBG 此時變化很明顯，VW 應變計則是緩緩上升，由此可看出 FBG 之高靈敏度特性。

受工程延誤影響，裝有 FBG 感測器環片之現場安裝於 2008 年 3 月完成。圖 9 展示一環片在安裝初期應變讀數之變化，此時感測器就在潛盾機旁邊，VW 應變計讀數受電磁波影響無法辨識。圖 10 展示在安裝自動記錄系統後所從 2008 至 2012 年因信義線通車而停止記錄前之應變讀數。圖 10 顯示環片內之應變除隨季節性溫度變化做波動外，受環片周圍土壓力逐漸增加之影響而緩面增加其壓應變。其他相關之結果分析請參考 Huang et al. [4]。

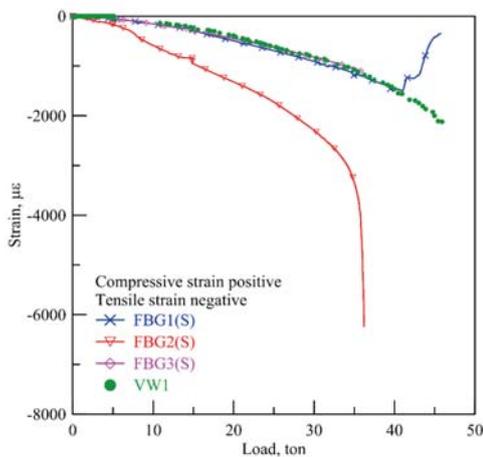


圖 7 短鋼筋上 FBG 與 VW 應變計量測結果 [4]

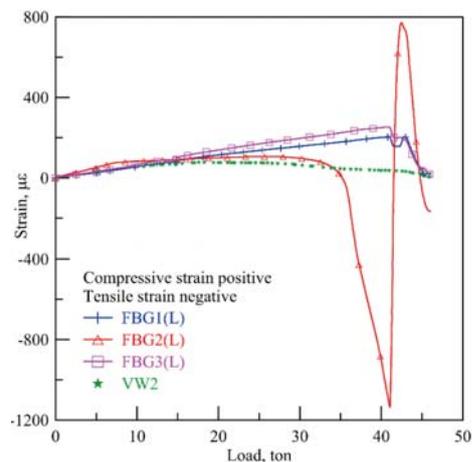
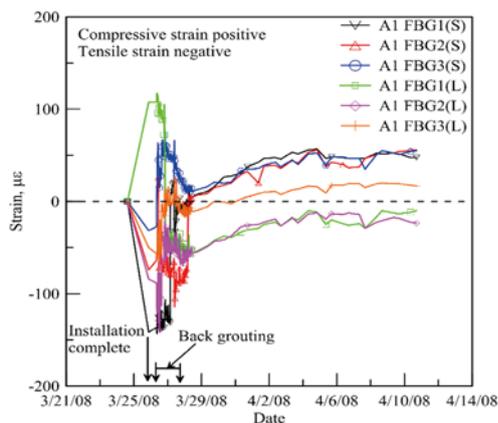
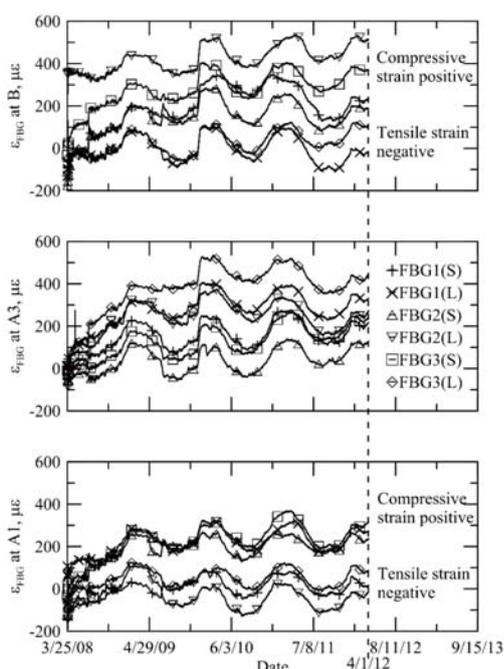


圖 8 長鋼筋上 FBG 與 VW 應變計量測結果 [4]

圖 9 環片安裝初期讀數^[4]圖 10 環片長期應變讀數^[4]

FBG 在坡地安全監測之應用

經驗指出，在沒有地震力影響情況下，天然邊坡崩塌最主要的因素是降雨造成地層內水壓的增加。降雨期間邊坡地層內水壓與滲流現象是一水力與土壤力學互制的複雜行為。有限之量測數據指出^[5]地層內可能存在動物坑道、植物根生長與壞死所遺留之孔隙、或破裂岩層等，稱之為巨孔隙 (macro-pore) 或土管 (soil pipe)，其水力傳導係數遠大於上下周圍地層，因此量得之水壓經常與隨深度做線性增加之趨勢 (靜態水壓分佈) 相差甚遠。Johnson and Sitar^[5]指出，邊坡地層內之滲流特性不只是有區域之特性 (site specific) 而且在同一地點也可能因降雨型態以及來自於上邊坡地層內之入滲特性或地層內滲流管道之堵塞等因素，隨時間而改變 (time

specific)。傳統邊坡崩塌預警常考慮降雨或地層位移，此兩者與邊坡崩塌在時間上並沒有理論關係，因此使用這兩種指數做邊坡崩塌預警都屬於經驗法則，缺乏可靠性。水壓可能是做為邊坡崩塌預警最有效之參數。Johnson and Sitar^[5]指出，若要評估與邊坡穩定相關之水力行為，一個明顯但不簡單的方法，就是在潛在不穩定區域監測孔隙水壓。傳統水壓量測大多使用傳統開口式水位計，由於封層不易，在同一 100 mm 直徑鑽孔中通常最多只能安裝兩個水位計。近來有用電子式水壓計放入水位計內以便於自動記錄水位之變化。但若要發揮預警功能必須大量增加水壓量測點以充分反應水壓隨深度之分佈與變化，進而評估邊坡之水力行為。作者研發出使用 FBG 水壓計串列做地層內水壓分佈的方法來做邊坡穩定監測與崩塌預警。

FBG 水壓計^[6]是以圓柱型中空鋼材為外殼，內部含有一 FBG 與一彈性金屬模組成，如圖 11 所示。改變彈性鋼薄片直徑以及/或厚度可以調整水壓計之量測範圍與解析度。作者首次將此種技術於阿里山五彎仔試驗場址做現場測試，在 60 m 深鑽孔內以 5 m 間隔置入 10 個 FBG 水壓計。所有 FBG 水壓計事先依照規劃之間距固定在一外徑 35 mm 之 PVC 套管內，PVC 管接頭向內徑突出，因此整個 PVC 管外部沒有突出部分。FBG 水壓計所在位置之 PVC 管有鑽孔以便透水，PVC 管槽溝外圍以不織布包裹做為濾層。PVC 與鑽孔間之空隙使用特密管放置白皂土做封層，FBG 水壓計所在位置周圍 PVC 與鑽孔間之空隙使用礫石回填。圖 12 展示 FBG 水壓計串列在現場之安裝。

Collins and Znidarcic^[7]將邊坡簡化成無窮長而破壞面與表面平行，推導出地層內壓力水頭 (h_p) 分佈與邊

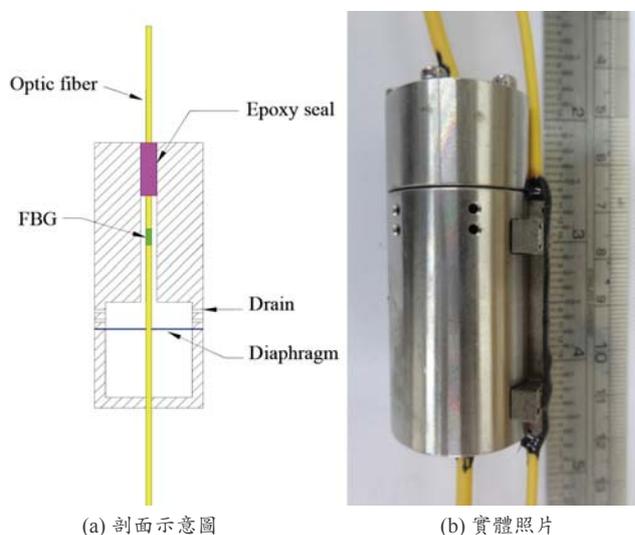


圖 11 FBG 水壓計



(a) PVC 管封裝 (b) 特密管封層
圖 12 FBG 水壓計串列封裝與現場安裝

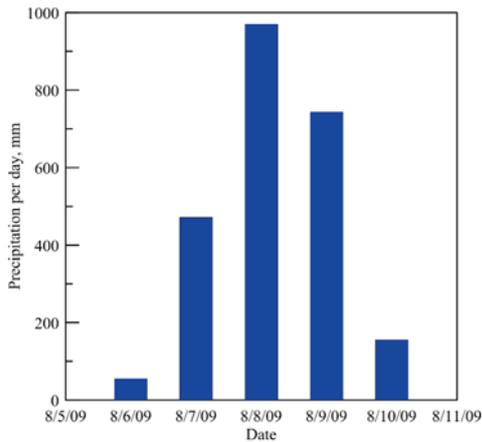


圖 13 莫拉克颱風期間降雨紀錄

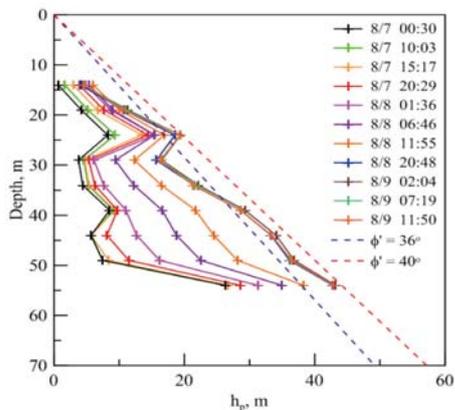


圖 14 莫拉克颱風期間壓力水頭分佈變化

坡安全係數之關係。使用 FBG 水壓計串列，可以直接將水壓量測所得，透過此一關係來預警邊坡之崩塌。FBG 水壓串列感測系統於 2007 年 10 月完成，至今已經歷經辛樂克、莫拉克與凡那比等三個重要颱風以及大或超大豪雨，在三次颱風期間之地層內水壓分佈也都有完整之紀錄。在此只展示莫拉克颱風期間之數據。圖 13 與圖 14 分別展示降雨及壓力水頭 (h_p) 分佈隨時間之發展。莫拉克颱風在此區域之累積雨量接近 3,000 mm。根據 Collins and Znidarcic^[7] 之理論， h_p 分佈曲線在深度 24 與 54 m 處碰觸或趨近對應於 $\phi' = 40^\circ$ 所對應之破壞包絡線。如果阿里山五彎仔地層內之 ϕ' 低於 40° ，監測地點

就會發生崩塌。

關於使用 FBG 水壓計串列做邊坡穩定監測之進一步細節與數據請參考 Huang et al.^[8]。

結論

FBG 是一種部分分佈之監測方法，雖然在同一光纖上可以有多點之 FBG 監測，但是只有 FBG 之處才有監測之功能。布理淵時域監測法 (Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR) 是一種全分佈式之光纖感測方法，在 BOTDR 系統下，光纖上任何一點都可做應變與溫度感測，未來在大地工程之應用極有潛力，唯目前在解析度與使用成本上還未達實用之地步。

FBG 水壓串列系統可以與 FBG 位移感測器結合，做整合式水壓與地層下陷分佈之監測。作者也將 FBG 水壓串列與地電阻電極結合安裝於地層內，如此水壓在某一間測點之分佈 (1D 數據) 情形可以與地電阻斷面量測 (2D 數據) 結合，使得兩者功能互補。

因為 FBG 之耐用性與訊號之穩定性，FBG 感測技術也正在積極的應用於離岸結構基礎，例如離岸風機之監測。

參考資料

- 李瑞庭，「光纖光柵讀取系統軟體之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹 (2005)。
- 簡旭君，「光纖光柵應變管之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹 (2003)。
- Kersey, A.D., 1992, "Multiplexed fiber optic sensors," Proceedings, Fiber Optic Sensors, Boston, Massachusetts, Eric Udd, editor, sponsored by SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp. 200-227.
- Huang, A.B., Wang, C.C., Lee, J.T., Ho, Y.T., and Chen, C.H., 2014, "Long-term Field Monitoring of Shield Tunnel Lining," Geotechnical Research, ICE, Vol.1, Issue 3, pp. 99-108.
- Johnson, K.A., and Sitar, N., 1990, "Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, pp. 789-801.
- Ho, Y. T., Huang, A. B., & Lee, J. T., 2008, "Development of a chirped/differential optical fiber Bragg grating pressure sensor," Journal of Measurement Science and Technology (19):6pp, doi:10.1088/0957-0233/19/4/045304.
- Collins, B.D., and Znidarcic, D., 2004, "Stability analyses of rainfall induced landslides." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130: 362-372. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(362).
- Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y., 2012, "Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides through Pore Pressure Profile Measurements," Soils and Foundations, Vol. 52, No. 4, pp. 737-747. 

光柵感測技術在 橋梁安全監測與管理上的初步應用

Application of Optical Fiber Sensor on Bridge Safety Monitoring and Management

李政寬／國家地震工程研究中心副研究員

Zheng-Kuan Lee / Associated Research Fellow, National Center for Research on Earthquake Engineering

摘要

本文目的在介紹應用光纖光柵感測元件，監測「長距多跨」橋梁。希望經由本文的介紹，讓更多橋梁工程師了解「光纖光柵感測與通訊技術」在防災與工程方面的應用潛力。文章首先回顧台灣天然災害對橋梁安全造成的危害事件，說明橋梁管理需要一套經濟、高效率的監測系統。其次介紹，光纖光柵結合簡易的機構原理或物理原理，可製作精準的感測器。最後，透過實例應用，說明監測系統如何運作。

ABSTRACT

Technology for the real-time monitoring of bridge safety is required by bridge management authorities and one task the National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) has continually researched and developed. How to conduct real-time monitoring of long-range, multi-span bridges economically and effectively has remained the most significant challenge for the related research and development. In recent years, NCREE has significantly improved the manufacturing of fiber optic sensor instruments, fiber optic welding, and communication capabilities, allowing the center to conduct real-time monitoring of long-range, multi-span bridges.

前言

台灣地理環境特別，位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交會處，地震發生頻繁，並常威脅橋梁；台灣也正好

位在西太平洋颱風行徑帶上，平均每年約有三至四個颱風侵襲而帶來豐沛雨水，過多的雨水甚至會引起洪水與土石流而危害橋梁。因此，台灣橋梁的設計、興建、養護管理作業，要同時考慮地震與洪水等環境因素，所面對環境條件確實較其世界各國嚴酷許多。除了地震與洪水威脅外，台灣的橋梁還有超載使用以及材料老劣化等的問題。依據交通部運輸研究所資料顯示，全台二萬八千多座橋梁平均橋齡已近二十多年^[1]，老舊橋梁的耐久性與安全性日益堪慮，所以橋梁的安全檢測工作日益重要。交通部臺灣區國道高速公路局橋梁檢測作業要點^[2]，規定了關於橋梁安全檢測的頻率、時機、與重點（公路總局亦類似），如表1摘要整理，目前這些工作都依靠人力目視檢測或手持工具測繪，如遇洪水或地震等特殊時機時，工作人員身陷危險而且工作效果不好，2008年后豐大橋與2009年雙園大橋，橋斷人亡事件（圖1），顯現人力巡守長距離橋梁時的困難和侷限^[3]。因此有必要開發一套經濟、耐用、「長距多跨」全面性的監測系統，協助橋梁主管機關，隨時隨地有效地了解橋梁現況。

表1 高速公路局與公路總局橋梁檢測作業要點摘要

經常性檢測	定期檢測	臨時檢測
日檢測：橋面以上與行車安全和服务性有關之構件。	每年或每兩年對橋梁所有構件全面檢測。定期檢測之重點在了解橋梁整體狀況，工作量及所需人力大，由轄區工程處委外辦理。	颱風、豪雨、地震等天災，檢測構件劣化情形。（高速公路局）於颱風、洪水或地震災害後視受災情況辦理，由各級養路人員以目視或簡單之量測器具進行之檢測。（公路總局）
半年檢測：對橋梁安全性有影響之河道狀況。		



圖 1 (a) 2008 年后豐大橋橋斷事件 (b) 2009 年雙園大橋橋斷事件

台灣常見的橋梁破壞模式與本研究「主觀建議」的監測方法

歷經 1999 年集集地震與多年洪害經驗，橋梁崩塌破壞多經歷圖 2 過程：伸縮縫拉開，橋面落橋；基礎或橋柱破壞，橋面沈陷變位。台灣橋梁破壞鮮少發生大梁從中間斷裂之破壞模式。因此，如果一座橋梁的河川水位高度在警戒線以下、伸縮縫和高程形狀沒有超過容許值、也沒有超過平常的統計值，那麼我們可認定這一座橋梁目前沒有立即性的安全疑慮，這是基於「穩定式平衡」的概念，破壞的發生需要能量、需要時間，如圖 3 示意。在這設定的前提下，對台灣絕大多數的傳統橋梁而言，監測河川水位、橋梁伸縮縫、橋梁高度或傾斜，是經濟有效率「防範意外狀況初初發生卻不知情」之方法。

監測河川水位、橋梁伸縮縫、橋梁高度或傾斜，只要將感測器安裝在上部結構物，如圖 4 所示。因此可



圖 2 台灣常見的橋梁崩塌破壞模式

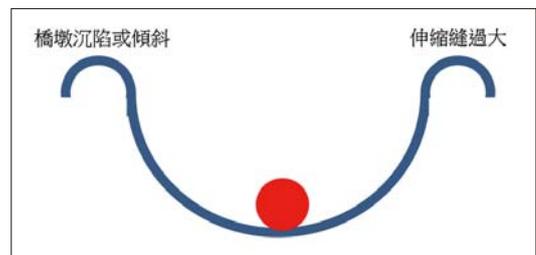


圖 3 「穩定式平衡」示意

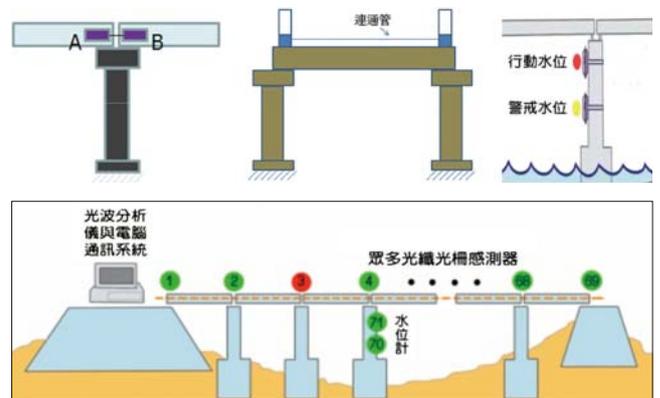


圖 4 眾多的感測器，監測河川水位、橋梁伸縮縫、橋梁高度或傾斜

隨時檢視、修護、更換失效的感測儀器。這樣監測儀器的安排，缺點是無法直接知道洪水時候橋墩土壤沖刷深度，但基於前述的穩定式平衡概念下，橋梁崩塌之前，需要時間並經歷過：伸縮縫逐漸拉開，橋面逐漸沈陷變位，因此橋墩沖刷深度的直接量測，並非不可或缺的（除非，沖刷深度監測這項工作是簡單易執行、能廣泛佈設在眾多橋梁上、而且經濟上可行）。

不過，研究少數幾座特定橋梁，克服困難，直接量測橋墩沖刷深度，建立洪水高度、流速與沖刷深度的關係，仍有研究價值，因為對工程學理而言，可回饋日後工程設計參考，關於基礎深度。目前已有數組研究團隊

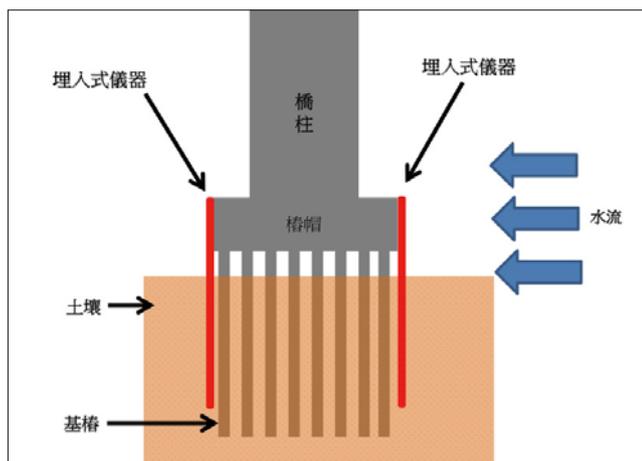


圖 5 「埋入式」感測器監測橋墩覆土深度

建置沖刷感測器，方法是在基礎旁安裝「埋入式」感測器（如圖 5），直接量測洪水時，土壤深度變化。此方法最大的風險是，洪水嚴重威脅儀器的存活度，如果儀器失去功能，將很難再拔出修復。再者，河道經常變遷，若為全部橋墩安裝「埋入式」感測器，經濟上有困難。因此，關於沖刷深度的直接量測，如何增加儀器的存活能力、降低安裝費用、大量佈設等問題，仍有待解決。

總言之，本文「主觀地」認為台灣傳統預力混凝土橋梁是個穩定式平衡的建築物，在高度與伸縮縫改變之後才會發生崩塌。在這樣的觀念下，在橋梁每一跨上部結構安裝感測器，監控高度線形、角度、伸縮縫、水位高，替代傳統人力測繪作業，應是兼顧經濟與效益的作法。

光纖感測器的原理簡介

光纖，是光導纖維的簡稱，是利用「全反射原理」，傳輸光能和訊號。目前常用的通訊光纖是單模石英纖維，光損失率大約為每公里 0.2 dB，通訊波段大致在 1510 nm ~ 1590 nm。本文所使用的感測原件是布拉格光纖光柵（fiber bragg grating），簡稱為 FBG。FBG 如圖 6 所示，是一段連接於光纖的感測元件。

於光纖的一端打入寬頻光，FBG 會將特定的窄頻光反射（由光柵柵距決定），「剩餘的」寬頻光繼續前進。當 FBG 承受拉力時，柵距變寬，反射窄頻光的中心波長會增加，光譜向右移動；當光纖光柵承受壓力時，柵距縮短，窄頻光反射的中心波長減小，光譜向左移動，此外 FBG 亦受溫度影響而改變其柵距，可以

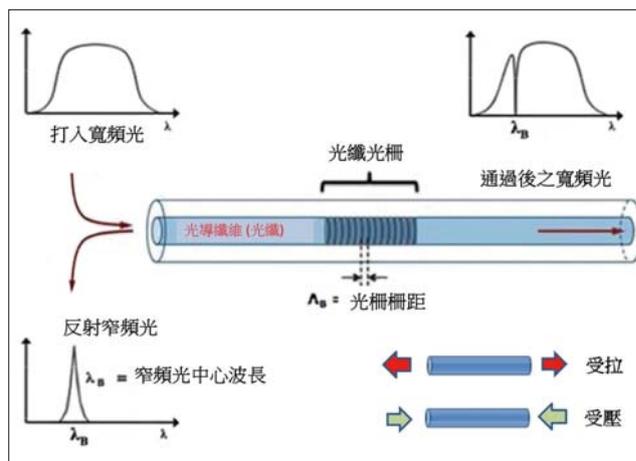


圖 6 布拉格光纖光柵感測作用

數學式式 (1) 表達相關物理量：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = C_S \Delta\varepsilon + C_T \Delta T \quad (1)$$

其中 λ_B 是窄頻光反射的中心波長， $\Delta\varepsilon$ 為光柵承受應力所產生的應變， ΔT 為光柵溫度的改變量， C_S 與 C_T 分別是相關係數。理論上，欲分辨 $\Delta\varepsilon$ 與 ΔT 對 $\Delta\lambda_B$ 的影響，需要同時間同地點使用二個 FBG，其中一個 FBG 處於無受力狀態（Stress Free）；實務上，只要 ΔT 的影響量不到 10%，工程應用可合理地忽略溫度效應，以避免過多 FBG 數量。再者有時候透過儀器機構設計原理， ΔT 的影響量甚至是可消除的。

從前面的討論可知，FBG 基本上可視為一枚光學式應變計，經過機構加工後，便可成為特定的感測儀器，如位移計、沈陷計等等。本文的加工方式，是於 FBG 的兩端，以熱收縮套管夾住光纖，熱收縮套管作為外力導入 FBG 的媒介^[4]，如圖 7 示意。這樣的局部組織，形成儀器元件，有了接頭便可施加預力，作為感測原點，如圖 8 示意。

圖 7 局部組織，可結合其他機構或物理原理，共同構成儀器。例如圖 9(a)，加了一條彈簧，提供緩衝功能與變形能力，形成了位移計。圖 9(b)，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高度沈陷計。圖 9(c) 是水位計，一質塊與探針，探針上黏著 FBG，當河水觸及探針，FBG 突受擾動，光波長因而改變，於是可知河水達到警戒水位。

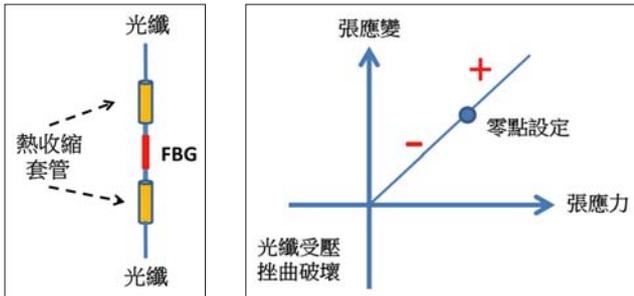


圖 7 製作接頭，外力導入 FBG 圖 8 施加預力，感測原點新設定

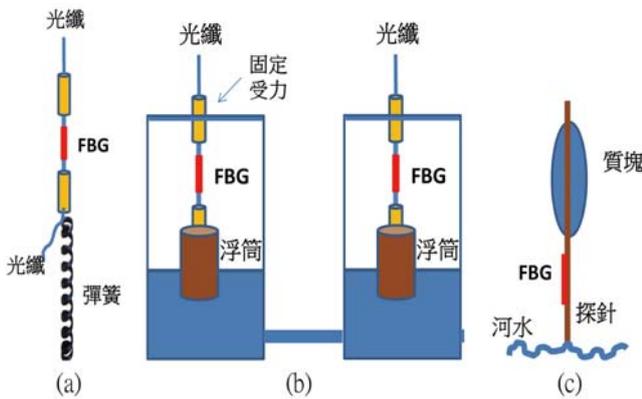


圖 9 光纖感測器 (a) 位移計、(b) 高度沈陷計、(c) 水位計

光纖熔接事宜

國震中心儀器設備 Micron Optics Si-425 具有十六頻道 (channel)，一頻道連接一條光纖，至於一條光纖能串接多少個 FBG 感測儀器卻不一定，這取決於光纖的熔接品質。好的熔接品質，在擷取器上顯示的光能譜，如圖 10(a)，是逐漸小幅減小的；差的熔接品質，如圖 10(b)，於某處突然變小，而使擷取器讀不到之後的 FBG。所以，要能充分利用擷取器的頻寬，增加感測器數量，必須有良好的熔接品質。關於熔接品質，現地環境與實驗室相比通常惡劣很多，譬如現地煙塵飛揚造成熔接品質不良、日曬高溫不利技術人員執行熔接作業，使得有效熔接之 FBG 儀器數量僅能數個左右。為了提升感測器觀測數量，應改變作業方式，於事前在橋梁現場調查光纖應預留長度，之後在塵害較少的實驗室中執行熔接，能提升一條光纖承載二十個以上的感測器。一整條光纖與全部儀器都完成熔接作業之後，再整體帶至現場執行儀器固定安裝作業。如此作業，便可充分運用擷取器的頻寬，增加感測器的數量，減輕現場熔接困難與減少作業時間。

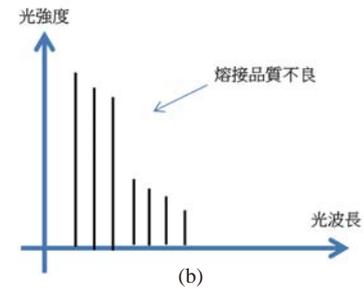
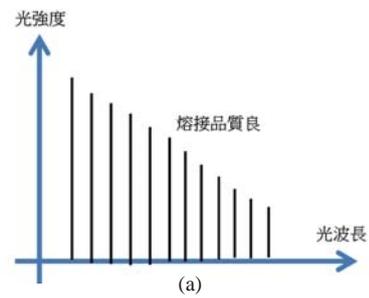


圖 10 擷取器光能譜判讀熔接品質，(a) 熔接品質良好，(b) 熔接品質不良

現今商售的光纖資料擷取器^[5]，擷取器感測頻道可多達十六個，如果每頻道承載二十個儀器，則感測器總數量可達三百二十個，此數量可應付二公里長（約六、七十跨）跨河長橋之監測需要。

光纖監測應用案例： 大直橋高程線形即時監測

2012 年 9 月台北市政府惠允國震中心橋梁實驗，於大直橋佈設光纖監測系統，包括水位計、位移計、高程沈陷計、鋼纜振動計等感測儀器。本文僅就光纖沈陷計，說明其佈設與功用。光纖沈陷計沿主跨中央分隔島佈設，如圖 11，經由程式軟體分析數據，能即時繪示反應大梁高程變化。圖 11 中七組高程計，各組

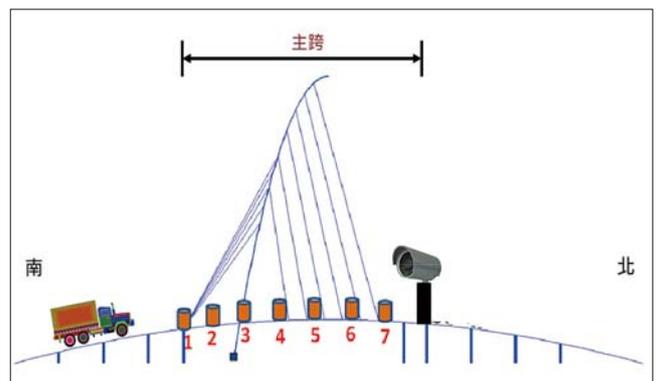


圖 11 光纖沈陷計沿主跨佈設

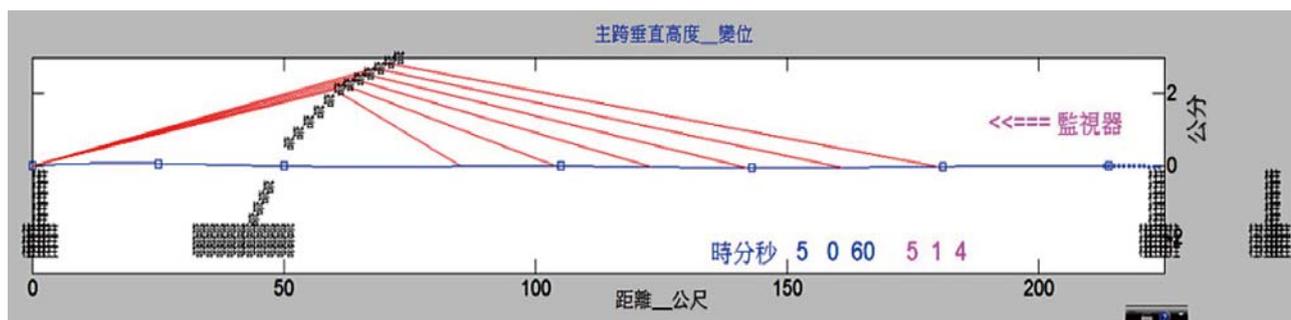


圖 12 主跨高程線形即時反應圖

儀器有水管相連通，當橋面高程改變時，各組儀器與水管內流動的水，使得 FBG 光柵柵距讀數改變。我們以點 1 設為參點零點，經由疊加計算，可得其他七個點位的相對高程。

圖 12 是主跨監測數據，繪示橋梁高程線形即時圖，當重車駛過橋梁或地震發生，在沒有發生結構破壞情況下，高程線形會暫時改變，隨後恢復原高程線形。若強烈地震擾動造成橋柱破壞歪斜或土壤液化橋墩沈陷，或是河床沖刷橋柱歪斜，監測的高程線形將改變。因此，高程線形是判讀橋梁是否安全的重點觀測。

光纖監測系統與傳統電子監測系統在特性、成本、功效上的比較

光纖材料以石英光纖為核心而以塑料等材質為保護層，使其耐候性的表現（不怕雷擊影響、耐酸鹼、不生鏽），優於傳統電子監測系統。兩系統之間物理化學特性的比較，整理如表 2。

成本的比較方面，目前國內使用的傳統電子監測系統，包括資料擷取器、感測器，多為國外進口品；而光纖監測系統，目前僅資料擷取器需要從國外進口，因此，「長距多跨」橋梁安全監測在相同的儀器佈設條件下，光纖監測系統的成本大約只有電子監測系統的一半費用。

功效方面，配合自行撰寫的分析程式，能使軟應硬的充分整合，並且因光纖感測儀器構造簡單，橋梁工程人員可以自行維護或修復。反觀，電子式監測系統的感測器若是從國外進口，當遇到故障、維護事件需送回國外處理，反而增加監測作業困擾。

從上述分析可知，在「長距多跨」橋梁安全監測

表 2 光纖監測系統與傳統電子監測系統物化特性比較

物化特性	光纖監測系統	傳統（有線電子儀器）
集束線	簡潔	複雜
電源性	單一	多點
雷擊與受潮風險	無	嚴重
電磁干擾	無	時常有且不明來源
訊號品質	優	普通
長距離	無影響	影響訊號
耐候性	佳	普通

應用，光纖監測系統的耐候性、經濟性、維護性，確實具有優勢和潛力。

結論與建議

本文思考如何將光纖感測技術，應用於一般多跨橋梁安全監測。本文從儀器的製作原理、熔接感測器的數量、橋梁的現場應用、分析軟體的建置，說明了光纖感測技術可滿足「長距多跨」橋梁的監測需求。這樣的監測系統可以應用在公路、鐵路、捷運、高鐵等交通系統。未來國家地震工程研究中心將推廣這套監測系統，協助橋梁主管單位提升大眾用路安全。

參考文獻

- 王仲宇、張國鎮、張荻薇、黃俊鴻、姚乃嘉、陳賜賢、陳銘鴻、李維峰、曾志煌、鄔德傳、巫柏蕙，「橋梁政策白皮書之研擬」，交通部運輸研究所，2012。
- 交通部臺灣區國道高速公路局，「交通部臺灣區國道高速公路局橋梁檢測作業要點」，2001。
- 聯合報新聞報導，后豐斷橋二公僕無罪，2011年06月16日。
- 李政寬，「全光纖式全橋橋梁安全監測整合系統之感測方法」，中華民國發明專利第 I-507585 號，2015 年 11 月 10 日。
- 美國 Micron optics 公司，<http://www.micronoptics.com/>

無線感測器監測技術之開發

林宜清／中興大學土木工程學系教授

童建樺／弘光科技大學資訊工程學系副教授

李宗翰／台中教育大學資訊工程學系副教授

摘要

台灣山坡地災害與公路橋梁損傷事件頻傳，對相關預警監測工作有急迫需求，由於監測所需配置感測器數量多且分布廣，以傳統有線方式布設感測器會產生眾多缺失，無線分散式資料擷取系統將是發展主流，無線感測器（wireless sensor）更是此主流中最重要之成分，其組成可分為感測器、微處理器與無線傳輸器，電源供應必須自給自主，現階段大都採用小型電池加上節能設計，在每分鐘傳送一筆監測資料情況下，可以維持運作 6 個月已算難得。本文介紹自行開發設計之無線感測器，在兼顧節能與獵能情況下，電源模組可以讓所開發之無線感測器得於免換電池終身有效。後續無線感測器要應用在橋梁振動監測上，只需搭配有足夠記憶體之微控制器與誤差在微秒內之同步量測機制即可。

前言

台灣處在歐亞板塊及菲律賓海板塊的交界帶，地震頻繁，又加上河川及地勢陡峭，於夏季時雨量豐沛及颱風侵襲，導致邊坡災害與公路橋梁損傷事件頻傳，因此在土木工程界一直對山坡地與橋梁結構安全監測工作有殷切之需求。

近幾年結構健康監測（Structural Health Monitoring，簡稱 SHM）為相當熱門之議題，SHM 乃在現場結構上配置感測器，監測結構對外在刺激所產生之響應，經由結構系統特性分析，達到檢測結構損傷或劣化的目的。結構健康監測系統一般包括感測

器系統、資料擷取系統、監控中心以及訊號診斷識別技術。

不管是山坡地或是橋梁安全監測，都有一個共通點就是感測器配置數量多，且分布範圍寬廣，以傳統方法採用有線布設感測器將有下列重大缺失^[1]：(1) 訊號線與保護管路布設成本過高，有時候可佔儀器安裝總費用之 50%^[2]；(2) 現場感測器安裝費時費力效率很低；(3) 感測器與 data logger 間之訊號線被干擾與破壞風險增加；(4) 未來擴充與調整缺乏彈性。相較於傳統上採用有線的方式布設感測器，無線感測器因其有安裝方便、維護成本低和部署靈活等特點，非常適合於山坡地與橋梁監測領域，故基於無線感測器網路（Wireless Sensor Network, WSN）的監測系統已經成為近年來國內外學術界和工程界關注的焦點。

現今錢幣大小之微處理器可以具備有運算、儲存與通訊功能，搭配微機電感測器（MEMS sensor）就可以量測加速度、傾斜角度、應變、力量、雨量、溫度…各種物理量，若將此等感測器無線化，則此等無線感測器將有安裝容易且成本低之特點，可增加布設密度與提高資料收集之空間解析度，進而提升坡地災害與橋梁結構損傷之評估品質。但是無線感測器之開發遇到最大的挑戰是電源供應問題，目前以採用小電池供電方式最為普遍，不過大都只能維持幾天至幾個月，取決於感測器與資料無線傳輸之節能設計。

本文將針對無線感測器監測技術之開發進行介紹，開發中需面臨之三大議題為：如何架構資料擷取系統、如何選用感測器類型與如何供電給無線感測器，本文後續就針對此三大議題進行分析探討。

資料擷取系統架構與遠距離無線資料傳輸系統

資料擷取系統架構

原則上感測器之訊號輸出應該都是屬於連續的類比訊號，但是類比訊號不利於後續資料儲存、分析與傳送之用，因此都會進行類比／數位轉換之取樣 (sampling)。市售感測器分二類，第一類為數位輸出之感測器，其內部已配備類比／數位轉換器 (Analog-to-Digital Converter, ADC)，第二類為類比輸出之感測器，其需經由外接資料記錄器 (data logger) 來將類比訊號轉換為數位訊號。

類比訊號在傳送過程將會有明顯訊號衰減與雜訊干擾等問題，然過去受限於市售類比／數位轉換器體積偏大與價格昂貴，常將類比／數位訊號轉換動作整合放在多頻道之資料記錄器來執行，以致於感測器與資料記錄器之間常需要配置甚多獨立之電纜線來作聯結，形成了傳統常見的集中式資料擷取系統架構，此等集中式資料擷取系統有如下之嚴重缺失：(1) 大量佈線導致成本增加與保護困難；(2) 電纜線長度過長引起之訊號衰減與干擾；(3) 不利於未來系統之擴充。

近年來資料擷取系統已逐漸把大型的集中式系

統分解成模組化的分散式系統，建立更小更便宜的子系統，就算其中一個系統故障，也可以輕鬆替換或維護。圖 1 為分散式資料擷取系統之示意圖，各子系統可以由一條通訊線 (例如 RS485) 串接不同數量之感測器連接到主機 (central unit)，主機經通訊線提供電源給各感測器，各感測器藉由同一條通訊線將監測資料傳回主機，再由主機透過資料傳輸單元以無線或有線方式將監測資料傳送至遠端伺服器。

相較於集中式資料擷取系統，分散式架構可提供多種優勢^[3]包括：(1) 提高量測準確度，因為分散式系統之感測器與類比／數位轉換器之接線相當短，能夠避免雜訊、干擾、訊號損耗等情況；(2) 分散式架構可透過單一通訊線連接至分散式子系統，不必配置數百條感測器接線，有助於減少接線成本；(3) 具有靈活的擴充與調整功能；(4) 維修成本低；(5) 分散式資料擷取系統可配備內建運算分析用智慧型功能，使感測器訊號上傳到中央系統之前先縮減資料，只剩下關鍵數值。

雖然有線的分散式資料擷取系統已經遠比集中式更具優點，除了大幅減少佈線數量外，更重要的是各感測器之監測資料皆已經數位化，資料傳送過程都是數位資料，可避免訊號衰減與雜訊干擾之問題。既然分散式資料擷取系統已經屬於數位資料之傳送，再加

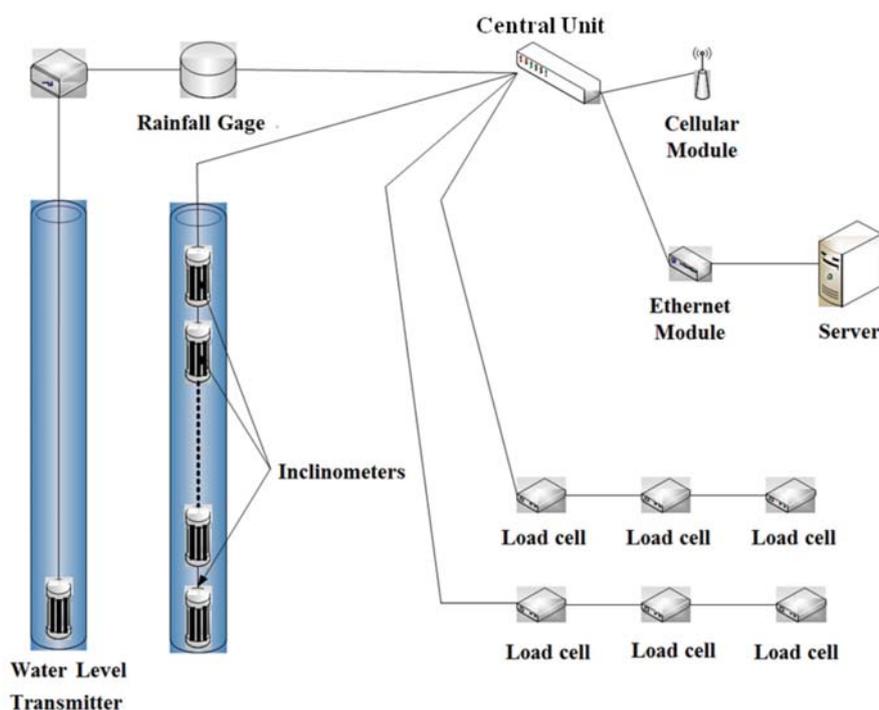


圖 1 分散式資料擷取系統示意圖

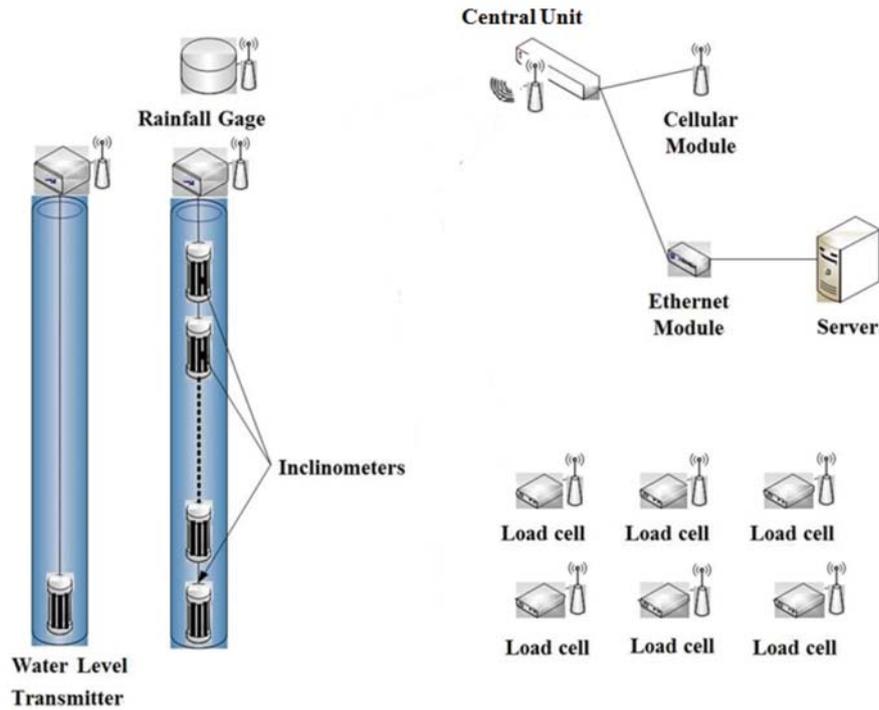


圖 2 無線分散式資料擷取系統示意圖

上無線通訊技術進步相當快，使得山坡地與橋梁監測系統有無線化之趨勢。

圖 2 為無線分散式資料擷取系統之示意圖，各子系統感測器與主機（central unit）之間都採無線通訊技術，不再配置通訊線，使得無線分散式資料擷取系統在感測器布設施工與維修上更具便利性，無線感測器（wireless sensor）是無線分散式資料擷取系統之最重要成分，無線感測器之組成可分為感測器、微處理器與無線傳輸器三個基本單元如圖 3 所示，而這三個基本單元都需要電源供應，由於無線化以後電源就無法由主機端提供，必須自給自主，現階段大都採用小型電池，其可以供電時間長短取決於感測器、微處理器與無線傳輸器之節能設計，目前較佳節能設計在每分鐘傳送一筆監測資料情況下，可以維持運作 6 個月已算不錯了，但是還是要面臨更換電池之不方便性，因此無線感測器之電源供應必須兼顧節能與獵能，才可以達到最佳的免更換境界。

考量現場條件，為能維護無線感測器之資料無線傳輸品質與效率，網絡（network）之配置通常可分為 single-hop 與 multi-hop 二類，若現場監測條件單純且感測器種類與部署數量不多情況下，則可考慮 single-hop 之簡易網絡布設即可，但若遇到感測器部署種類與數量偏多情下，則可考慮採用 multi-hop 之網絡布設。

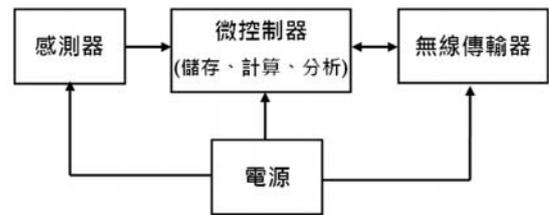


圖 3 無線感測器之組成

遠距離無線資料傳輸系統

感測器與資料擷取系統可以將現場監測到之資料彙整到主機，為了達到自動化與監測預警功能，必須將主機收到之監測資料第一時間利用遠距離無線資料傳輸系統傳送到遠端伺服器進行監控。物聯網（Internet of Things, IoT）與霧端運算（Fog Computing）技術很適合於坡地與橋梁安全監測上作為遠距離無線資料傳輸用。

物聯網在 2005 年由國際電信聯盟所發表的網際網路報告為物聯網作了以下定義：今日網路化的時代將邁入新的階段，以往人們能在任何時間及任何地點透過網路與人互相聯繫，並與物件進行資訊的交換，同樣的任何物件之間可藉由網運算建構出資訊互通平台。

霧端運算與雲端運算採用不同的策略，因雲端運算採用集中式管理，除需配備有運算能力強大之叢集

式主機外，還需要高速的網路頻寬做為資料流的分享與傳遞。然而透過雲端到現地監測設備的資料傳輸過程而言，現在的高速行動網路，如 3G (HSPA) 及 4G (LTE) 的網路頻寬仍有待加強。在現場應用上，霧端運算無須配備強大的運算處理設備，取而代之的是採用具有低耗電特性以及低運算能力的嵌入式系統，作為處理現地的資料收集、分析、儲存與傳輸等工作。

遠距離無線資料傳輸系統可以細分為物聯網霧端運算處理平台、遠距離無線傳輸發送器以及物聯網圖形化監控系統等三項元件，嵌入式物聯網霧端運算處理平台運行嵌入式 Linux 系統，並結合物聯網與霧端運算技術，本元件除本身能提供無線區域網路、高速乙太網路外，可透過遠距離無線傳輸發送器，依照現地無線通訊品質，選擇適合的 3G 或是 4G 網路來提升物聯網連線品質，並將 Live Beacon 行動網路之上下行頻寬監測與轉換傳輸數據量等資訊回報給物聯網圖形化監控系統，以確保資料遠距離無線傳輸系統之正常運行。

另外，當無線行動網路服務供應商，如中華電信、遠傳電信或台灣大哥大電信，僅提供內部私有網際網路位置 (Private IP address) 時，嵌入式物聯網霧端運算處理平台將可改以自建的資訊流通道 (Data Flow Tunnel)，作為現地資料無線傳輸單元與外部網際網路雙向傳輸之介面如圖 4 所示，該雙向傳輸功能可以執行遠端重開機以及現場監測儀器之控管。

感測器類型與比較

目前應用最為廣泛的感測器仍屬電子式感測器，電子式感測器之基本偵測方法有：(1) 電容式 (利用電

容量的改變來偵測激源變化)；(2) 電阻式 (利用電阻值之改變)；(3) 電感式 (利用線圈電流改變產生感應電壓)；(4) 磁阻式 (永久磁鐵或電磁線圈之磁通量的改變被磁阻干擾而改變通過之路徑)；(5) 光傳導式 (利用相對運動來感應電壓量測電壓變化)；(6) 磁抗式 (固態材料受光照射其內部電阻值會與照度成正比)；(7) 光伏特式 (兩種不同材料做成接合面受光照產生電壓)；(8) 電位計式 (透過可變電阻分壓值取得激源變化)；(9) 壓電式 (石英晶體被擠壓形狀改變產生電壓)；(10) 應變計式 (導體受力量改變幾何形狀產生電阻值改變)；(11) 熱電式 (利用熱產生電阻值改變)；(12) 磁致伸縮式 (利用磁致伸縮材料之波動效應)；(13) 振弦式 (利用弦線震盪頻率)；… 陸續開發中。

本文以土木結構最常應用之應變量測來說明感測器類型與比較其優缺點。目前應變量測最主要的三種量測方法為電子箔片 (Electrical foil)、電子振弦 (Electrical vibrating wire) 與光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG)，其原理簡要說明如下：

金屬箔片電阻式應變計，如圖 5(a) 所示，是經由金屬導體長度變化與電子電阻之間的關係測得應變。要精確量測金屬導體電阻的微小變化，必須透過常用的 Wheatstone 電橋與訊號放大器 (OP) 來完成。金屬箔片應變規感測器的優點是精度高、測量範圍廣、壽命長、結構簡單、頻率響應特性好，能在惡劣條件下工作，易於實現小型化、整體化和品種多樣化。但是此種金屬箔片應變規在早期遷就於 data logger 價格昂貴，皆採用集中式多頻道之資料擷取系統，在現場就要布設很多長短不一的訊號線，也就產生被人詬病的訊號衰減與電磁波干擾問題。但是在近幾年電子產業技術不斷提升，資料擷取架構已經趨向分散式，在感測器端已經進行類比/數位轉換，故已能夠克服訊號衰減與電磁波干擾等問題。

振弦式應變計，如圖 5(b) 所示，乃利用弦線震盪頻率來推求得到弦線之張力與對應之應變，激發弦線之震盪方式為導入驅動電流穿過弦線附近的線圈產生磁場，並因其極性而有排斥或吸引弦線之作用，一旦弦線震盪達穩定狀態，

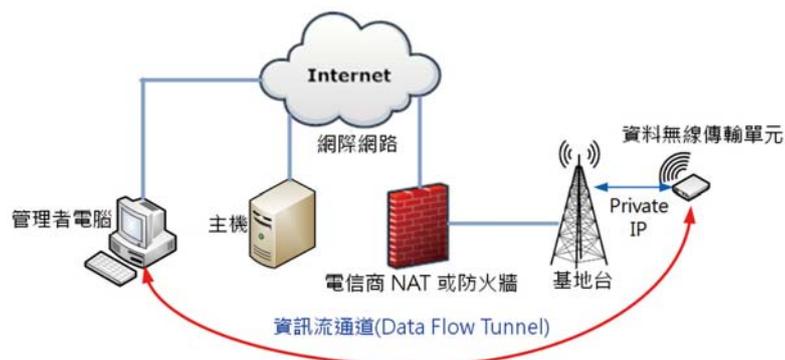


圖 4 透過資訊流通道與資料無線傳輸單元進行雙向傳輸監測系統之架構

再透過同一線圈量測其震盪頻率。振弦式應變計由於是量測弦線之振動頻率，在集中式資料擷取系統中可以比較不受訊號衰減與電磁波之干擾。

光纖光柵應變計，如圖 5(c) 所示，是利用光線進入光纖光柵感測器時，即由光柵屬性而反射特定波長。在光纖光柵延展的同時，這些光柵之間間隙亦隨著變大，進而改變反射光的波長，由測得反射光之波長漂移轉換為應變值。與前二款電子式應變計比較，光纖光柵屬於光學感測系統並未使用電子導體可以不受電磁波干擾之影響，另外，FBG 光學感測是透過「頻率」而非「振幅」，不需訊號處理亦可達極長的距離，為其二大優點。

上述三種常見應變計之發展歷史，以電阻式變計最早被提出已經有超過 60 年之應用，但因早期受限於類比／數位轉換器之體積與價格昂貴，大都採用集中式資料擷取系統，即俗稱之多頻道 data logger，造成大量佈線，並延伸出訊號衰減與電磁波干擾問題；於是約 30 年前有振弦式應變計之提出，其輸出訊號為頻率，抗干擾能力強、對電纜規格要求低，可以進行遠距離之傳輸；接著近 10 年來隨著光纖光柵應變量測技術的精進與製作成本降低，使得光纖光柵技術之應用開始快速成長。雖然振弦式與光纖光柵應變計都有很好的抗電磁波干擾能力，但是他們二者在結構動態量

測上與感測器無線化之發展就比較緩慢，反觀金屬箔片電阻式應變計之動態量測可輕鬆達到 1 kHz 之動態量測範圍，又加上類比／數位轉換器之微小化與低單價，使得電阻式應變計可輕易的以低成本方式完成無線分散式資料擷取系統，也就解決了其在早期集中式資料擷取系統所令人詬病之訊號衰減與電磁波干擾問題，因此在無線感測器之開發上就佔有優勢。表 1 為三種常見應變計之綜合比較，由表中可以看出電阻式應變計搭配無線分散式資料擷取系統有相對較佳之綜合優勢，尤其是在佈線施工性、動態量測與成本上之優勢更加明顯。

無線感測器之開發

從前面之討論，可以確定資料擷取系統已經由集中式往分散式發展，各感測器皆有能力完成類比訊號轉換成數位訊號，如此後續之數位訊號傳輸可以維持高訊號品質，也很有彈性，可以選擇有線或無線方式來進行數位訊號之傳輸，當然無線傳輸絕對優於有線傳輸，因其有安裝方便、維護成本低和部署靈活等特點，非常適合於山坡地與橋梁監測領域，故基於無線感測器網路 (Wireless Sensor Network, WSN) 的監測系統已經成為主流。但是開發無線感測器所要面臨之

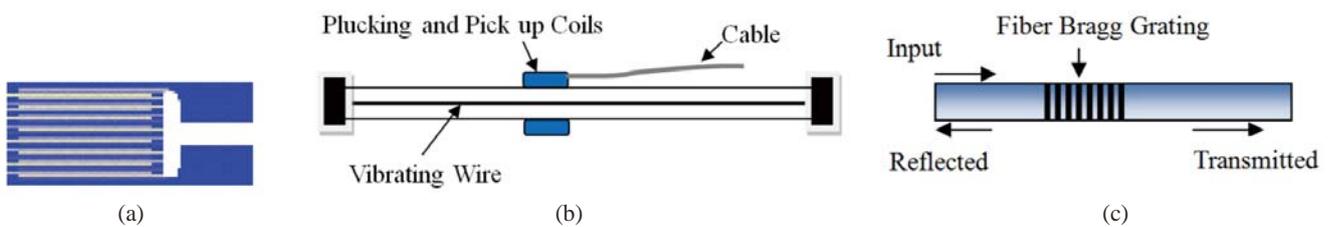


圖 5 常見的三種應變計：(a) 電阻式；(b) 振弦式；(c) 光纖光柵

表 1 三種常見應變計之綜合比較

	電阻式應變計		振弦式應變計	光纖光柵應變計
	集中式資料擷取系統	無線分散式資料擷取系統		
佈線施工性	差	優	差	普通
訊號品質	差	優	佳	優
動態量測	優	優	普通	普通
溫度補償	佳	佳	佳	佳
電磁波干擾影響	大	小	小	無
長距離傳輸	差	佳	尚可	優
成本 (含佈線)	高	低	中	高
維修難易度	難	易	中	高

主要問題有：(1) 電源供應問題；(2) 連續動態資料傳輸中遺失（掉包或碰撞）問題；(3) 各感測器時間同步問題；(4) 高取樣速率 100 Hz 產生大量資料之處理。

一般而言，要開發無線感測器有二種方式，第一種為直接購買已架構好的商用開發平台（mote），例如 UC Berkeley 開發已商品化之 Tmote Sky 或 U of Michigan Lynch 教授實驗室之 wireless sensor nodes 或可以由網路搜尋到甚多 wireless sensor nodes，當然選購商用無線感測器可以縮短開發時間，但是缺乏彈性與擴充性，也很難解決既存電源供應問題。第二種則為自行開發，雖然所需開發時間較長，不過可以滿足客製化之各種功能需求，下面即介紹自行開發無線感測器進行介紹，最大訴求即要解決上述無線感測器開發所要面臨之主要問題。

為了讓感測器之資料擷取更具相容性與擴充性，自行開發多功能微型智慧節點（smart node）如圖 6 所示，smart node 為混合訊號微控制器與訊號擷取及數位串列通訊電路模組所組成的智慧型工業感測器訊號擷取節點，其可接受工業標準感測器常用的類比或數位訊號，例如電壓輸出、4-20 mA 電流輸出、橋式電路輸出、RS485、RS422 等，並將上述訊號轉換為數位通訊封包格式，傳給協調器（coordinator）彙整後輸出至網路、PC 或 data logger。由於封包內含節點 ID、感測器型別及對應物理量等資訊，所以在同一通訊匯流排上，可串接大量不同類型與不同廠牌的感測器，其數位化的資訊可經由 coordinator 匯整後紀錄或傳出。監測系統基於本架構，可大幅降低跨廠牌及多類別的感測器整合複雜度，並具備高彈性的感測節點擴充功能。



圖 6 智慧節點（smart node）其尺寸為 74 × 19 mm



圖 7 訊號放大與類比數位轉換器（OP+AD）

利用圖 6 之智慧節點（smart node）即可對數位感測器直接進行資料擷取，若搭配訊號放大器（OP）與類比數位轉換器（AD）如圖 7 所示，即可對微小訊號輸出之感測器例如電阻式荷重計進行資料擷取，採用之類比數位轉換器（AD）具有 100 kHz 取樣速率及 16 bit 解析度，訊號放大器之輸出電壓為 0-5 V。

無線傾斜計之開發

將 smart node 與傾斜感應晶片結合（如圖 8(a) 所示）可構成結構物傾斜量測之基本單元，再加上圖 8(b) 所示 smart node 之電源供應與資料輸出電路板與圖 8(c) 所示之無線傳輸發送器，即完成結構物傾斜量測用之無

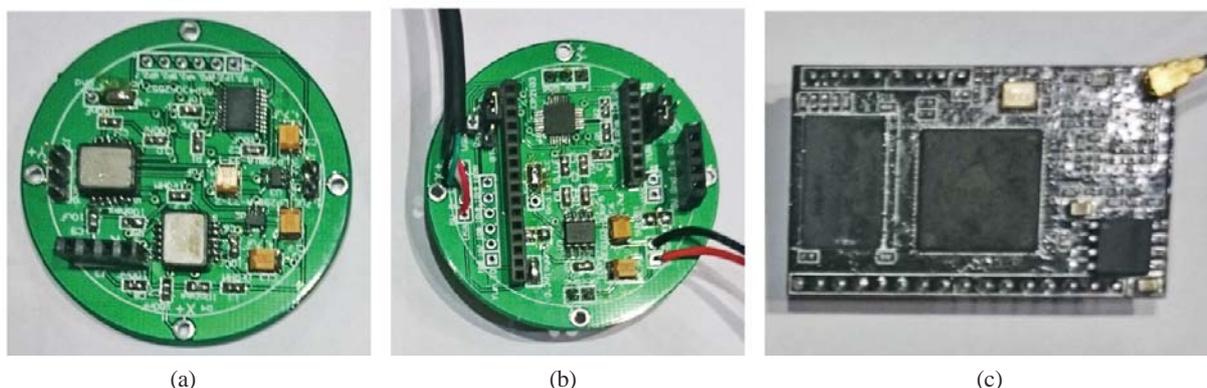
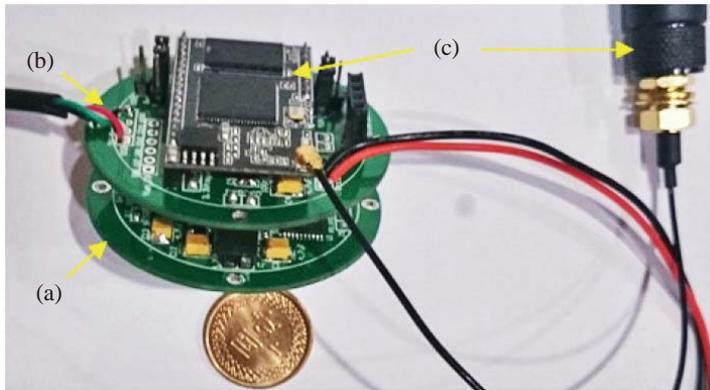


圖 8 無線傾斜計之組成單元：(a) smart node + 傾斜感應晶片；(b) 電源供應與資料輸出電路板；(c) 無線傳輸發送器



(a)



(b)

圖 9 無線傾斜計：(a) 電路組裝圖；(b) 現場安裝圖

線傾斜計原型電路板組合如圖 9(a) 所示，圖 9(b) 則為封裝完成後現場安裝圖，現場已將電源模組安裝在傾斜計上方，該電源模組採用 0.5W 之太陽能充電板（尺寸 55 × 70 mm），電源模組在太陽光照射下只要充電 5 分鐘即可充飽，既使在陰天也只要幾個小時就可充飽，在充飽情況下，該電源模組可以提供無線感測器每一分鐘丟一筆資料連續運作 5 天，換句話說，電源模組不管是晴天陰天，都可讓無線感測器持續運作，故所開發之無線感測器得於免換電池終身有效，當然此免換電池技術乃在各單元電路設計時已考量調整到最佳之省電模式才能達到。圖 10 為無線傾斜計之現場監測資料，由監測資料可以清楚看到 MEMS 傾斜計之輸出值會受溫度變化所影響，可以利用傾斜計溫度補償功能進行修正，而得到消除溫度影響之監測結果。

無線荷重計之開發

地錨常為邊坡防護工程或開挖支撐工程使用的工法之一，但因其結構體埋置於地層中，無法進行維護保養，又因地下水及地質環境之多重因素影響下，可能發生錨頭銹蝕／脫、錨碇水漿開、鋼絞線銹蝕／斷等破壞，在國道三號七堵段發生大規模崩塌事故後，引起國內工程界對地錨預力監測之重視。

安裝荷重計做為地錨預力監測可以說是最直接的監測方法，無線荷重計之開發只要利用圖 6 之 smart node、圖 7 之訊號放大與類比數位轉換器與圖 8(c) 無

線傳輸發送器，再搭配市售電阻式荷重計即可完成如圖 11 所示之無線荷重計，圖 12 為無線荷重計之現場監測資料，荷重計內部配置虛（Dummy）應變計來提供溫度補償，因此監測結果不會受日夜溫差所影響。

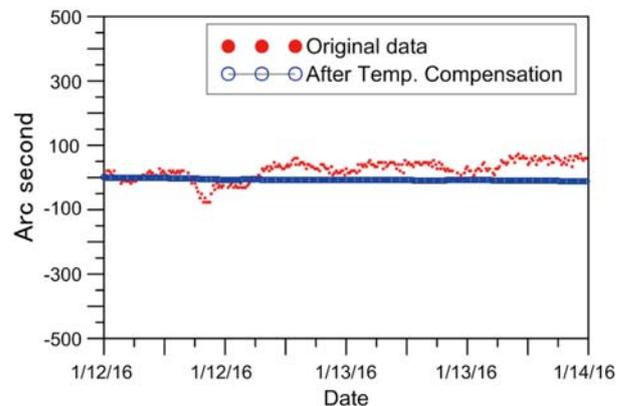


圖 10 無線傾斜計監測資料歷時圖



圖 11 無線荷重計現場安裝圖

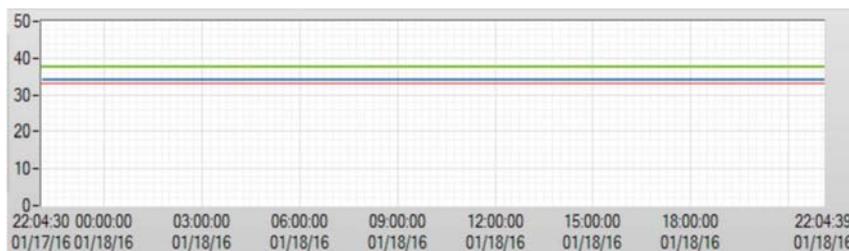


圖 12 荷重計監測資料歷時圖

無線感測器開發之關鍵議題

前二節展示的無線傾斜計與無線荷重計只是無線感測器開發之範例，其節點間之無線傳輸距離可達 500 公尺，同樣的開發架構後續可以擴充至無線加速度計、無線位移計、無線沈陷計、無線索力計、無線水壓計…等。其中無線加速度計在結構健康監測上之應用扮演非常重要角色，大都應用於振動監測，其必須能連續記錄與傳輸振動資料，故要藉助高速網路傳輸能力或搭配有足夠記憶體之微控制器，現場量測之取樣頻率假如為 100 Hz，單筆資料以 2 bytes 擷取，對三軸加速度計而言，一秒將產生 600 Bytes 資料量，一分鐘所需記憶體為 36 kB，此連續記錄長度，可得頻率解析度為 0.0167 Hz。目前開發之無線感測器設定之資料擷取頻率為平時每 10 分鐘監測一次，但在地震與颱風作用下，當無線加速度計振動幅度超過某一門檻值時，系統將自行啟動監測功能，以取得第一時間的現場資料，可作為安全預警機制之用。

雖然已開發免換電池終身有效之無線感測器電源模組，但是從結構振動監測角度來看，無線感測器所要面臨問題還有：(1) 連續動態資料傳輸中遺失（掉包或碰撞）問題；(2) 各感測器時間同步問題；(3) 高取樣速率 100 Hz 產生大量資料之處理。在無線訊號傳輸資料封包漏失避免機制部分，由於各感測節點內建充足的記憶緩衝空間，類比一數位轉換後的資料可佔存於該記憶體中，交由無線傳輸模組分批傳送，可避免因緩衝不足造成的資料漏失。另外，在無線傳輸協定部分，可藉由收發兩端的交握（hand shaking）機制，確保資料完整送達。至於無線感測節點間的時間同步，可藉由節點內建精準 RTC（Real Time Clock）與時間同步訊號廣播之搭配，實現微秒等級的時間同步機制。無線訊號接收節點定時向各節點廣播時間同步封包，各感測節點在收到該封包後，據此作為內建 RTC 時間

基準之校正。因此，後端訊號處理系統將可藉由各感測節點傳回之訊號與校正參數，精準還原所有訊號的時間相對原點。最後有關高取樣速率 100 Hz 產生大量資料之處理，最有效的方法應該是在無線感測器內部建置邏輯運算處理器而成智慧無線感測器，例如可將振動量測資料進行快速富利葉轉換（FFT）與尖峰頻率判讀，最後僅傳送運算處理後之特徵數值，即可大量降低資料量之傳輸與儲存。

結語

本文介紹自行開發之無線感測器，為未來山坡地或土木大型結構相關安全監測提供容易安裝、增加布設密度與提高資料收集空間解析度之良好解決方案，進而可提升坡地災害與橋梁結構損傷之評估品質。所開發之無線感測器已完全解決電源供應問題，可以應用在每隔 10 分鐘傳送一次資料的山坡地滑動或結構健康監測上。無線感測器若要運用到布設密集的橋梁振動監測上，則需搭配有足夠記憶體之微控制器與誤差在微秒內之同步量測機制，最後可以朝無線感測器內建邏輯運算處理器而成智慧無線感測器方向發展，以解決布設大量感測器所產生之振動量測巨大數據量的問題。

參考文獻

1. G.D. Zhou¹ and T.H. Yi, "Recent Developments on Wireless Sensor Networks Technology for Bridge Health Monitoring," *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2013, Article ID 947867, 33 pages, <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/947867/>
2. M. J. Chae, H. S. Yoo, J.Y. Kim, and M. Y. Cho, "Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring," *Automation in Construction*, vol. 21, no. 1, pp. 237–252, 2012.
3. 小樵, 「資料擷取系統架構的變化」, 電子工程專輯網站 (www.eettaiwan.com), 2015 年。

影像量測於結構監測之應用

黃仲偉／國家地震工程研究中心副研究員

紀乃文／台灣大學土木工程學系博士後研究員

陳北亭／中原大學土木工程學系博士

楊元森／臺北科技大學土木工程系副教授暨國家地震工程研究中心兼任副研究員

林詠彬／國家地震工程研究中心研究員

摘要

近年來影像量測方法已被廣泛應用在各種實驗力學，相較於傳統貼附感測器的量測，影像量測提供一種非接觸式的量測技術，可在不干擾待測物的情況下進行全域性的量測。本文旨在介紹影像量測的相關理論，並自行開發雙相機系統探討三維位移場與應變場之量測以及表面裂縫偵測與診斷，透過靜態拉伸實驗、振動台實驗與混凝土軸壓實驗加以驗證。實驗結果顯示影像分析軟體可精確至像素，與傳統應變計的量測結果的相對誤差可在 5% 之內。本文並提出目前影像的一些限制與未來發展方向，可供國內各單位推廣或應用影像量測於結構監測參考。

ABSTRACT

Digital image measurements have been widely used in experimental mechanics to measure displacement and strain fields in recent years. Compared with strain gages and displacement sensors, digital image technology provides non-contact and full-field measurements without interfering objects. In this paper, the theories of image measurements are introduced and an in-house dual-camera system was developed to study the three-dimensional displacement/strain fields on the specimen. The developed system was verified by the static tensile tests, vibration tests on the shaking table, and concrete compressive tests. Experiments results demonstrate that the developed system has a pixel precision and the relative errors with the results from

strain gages can be less than 5%. Finally, the current limitation and future potential developments of image measurement are proposed, which could help engineers to spread or apply image measurements in structural health monitoring.

前言

對於結構監測而言，如何快速、便利、有效地量測結構體的全域變形是業界與學界不斷致力發展與研究的目標。量測時一般可依儀器之使用方式區分為「接觸式」與「非接觸式」兩種類型。傳統的感測器多屬於接觸式，在實務過程中常遭遇安裝困難、價格昂貴、僅能提供量測點位資訊或因感測器本身的存在反而影響結構真實反應等限制。相較之下，非接觸式感測器則嘗試利用待測物周遭環境（如光、微波、超音波、磁力、氣壓）的變化組成各式的量測系統，在不接觸待測物的情形下透過環境的變化反推待測物的物理量。本文的重點則是探討影像量測在結構監測之應用。

近年來影像感光元件的解析度平均以兩年為其倍增週期，目前千萬畫素的高階數位相機已經成為平價的普及器材；加以個人電腦記憶容量與處理器速度的提昇，允許進行更複雜的分析程序，因此影像量測的解析精度與應用範圍亦不斷持續提昇。數位影像量測係根據物體在變化前、後兩張影像間的相對位置分析物體表面資訊推估所欲探求的物理量。舉例而言，藉由影像中特徵點位空間資訊的變化，可進而推算出待測物表面的位移場與應變場；或藉由灰階值的變化，可推估待測物表面裂縫產生與否以及裂縫的量化資料。

影像量測方式的特性在於量測的尺度範圍取決於像素與真實長度之間的轉換，而非單純的長度單位。故配合不同鏡頭，吾人可進行微奈米等級的變形量測，也可以進行大型結構乃至大地變形量測。影像的來源也可以相當廣泛，諸如一般尺度下的光學相機影像，高速相機影像；大至空拍影像、衛星影像；小至電子顯微鏡、原子力顯微鏡所得影像；甚至雷射掃描或超音波掃描後所得強度轉換的灰階影像都可以當作影像量測的對象。透過影像像素與真實距離之間的轉換關係，吾人即可透過影像分析計算影像上點位的變化再轉換得到點位在真實空間中的變化。

其次，對於非均勻材料或不可預測結構破壞點等問題，全域量測所需的應變計或位移計數目可能高達數百個，不僅成本昂貴、安裝費時，甚至感測器的傳輸線也可能阻礙研究人員和工程師順利地觀察結構物的表面。且在某些較危險或不易接觸的區域，使用接觸式的感測器有其困難甚至不可行。相較之下，影像適用的應變量測範圍大，目前應用上自萬分之一到近百分之百應變都可計算，且不侷限於特定方向。可透過數位影像解析物體表面全域的應變分佈，影像量測的設備成本遠低於傳統以點或線佈置的儀器系統。

本篇旨在介紹影像量測的原理，包含座標轉換、圖樣識別、三角定位、位移與應變計算，以及裂縫偵測與診斷；根據前述理論建立三維影像量測的流程以及自行開發相關所需的軟、硬體，並以靜態平板拉伸實驗、振動台振動實驗以及混凝土圓柱抗壓實驗作為驗證，將所得結果與應變計、位移計相比較。最後針對影像量測目前在結構監測方面的限制做一說明，希冀能推廣影像量測在各方面檢測之應用。

影像量測相關理論

影像座標轉換

十六世紀所發展出的黑箱相機可謂是光學影像裝置的濫觴，後世的影像裝置多是建立在改良黑箱相機的基礎上發展而成。黑箱相機的理論依據主要是透視投影法 (perspective projection)，儘管透視投影法相當簡化，但它仍然被廣泛使用在近代的影像處理過程中。為方便後續推導先建立所謂的相機座標系統，其座標原點 O 在針孔處 (參見圖 1)，並令其對應的 X_c - Y_c 平面

平行於影像裝置的影像擷取平面 Π' (亦即感光元件所在平面)。影像平面 Π' 與相機座標的 X_c - Y_c 平面之間的距離也就是相機的焦距 f ，通過 O 且與 Π' 平面垂直的直線即為光軸 (optical axis)，也就是相機座標的 Z_c 軸。光軸穿透影像平面 Π' 的 C' 點則為影像中心 (image center)，此交點可作為影像座標系統 X_i - Y_i 的原點。若 (x_p, y_p, z_p) 為相機座標系統中的物點座標， (x_i, y_i) 為其投影至影像平面之座標，透過幾何可以得到如下關係：

$$\begin{cases} x_i \\ y_i \end{cases} = \begin{bmatrix} f & 0 \\ 0 & f \end{bmatrix} \begin{cases} x_p / z_p \\ y_p / z_p \end{cases} \quad (1)$$

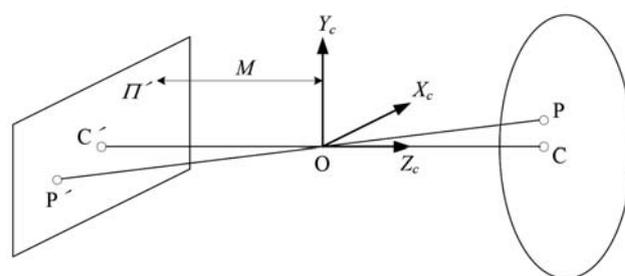


圖 1 針孔相機座標系統示意圖

上式的意義在於：若已知相機焦距 f 以及待測物到相機的距離 z_p ，則透過量測待測物在影像座標的長度或位置變化，可以推估影像在真實空間的長度或位置變化。然而前述的推導係假設待測物表面平行於影像擷取平面，但在實際量測過程中難以確保影像擷取平面與待測物表面平行，故又引進世界座標系統描述物體位置在真實空間中的三維座標。一般影像座標系統，相機座標系統與世界座標系三者之間有相互的關聯如圖二所示，其中若進一步考慮鏡頭可能非完美針孔的情況導致影像產扭曲，在扭曲程度不大的前提下，影像座標系統與相機座標系統之間的轉換式可寫為^[1]：

$$\begin{cases} x_i \\ y_i \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} f \cdot S_u & f \cdot S_u \cdot \alpha & x_0 \\ 0 & f \cdot S_v & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x_p / z_p \\ y_p / z_p \\ 1 \end{cases} \quad (2)$$

上式中 f 為焦距， S_u 、 S_v 的代表像素在感光元件上非正方形而存在比例關係， x_0 、 y_0 為影像座標系統的平移參數， α 為影像座標系統兩個主軸夾角，以上這六個參數稱為相機的內部參數 (intrinsic parameters)。另一方面，關於相機座標系統和世界座標系統轉換的參數稱為的外部參數 (extrinsic parameters)，包括三個旋轉角

和三個平移量，三個旋轉角可以組合成一個旋轉矩陣 \mathbf{R} ，而三個平移量則為平移矩陣 \mathbf{T} 。這兩個矩陣帶代表了世界座標系統與相機座標系統之間的轉換關係，轉換式如下^[1]：

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{Bmatrix} = [\mathbf{R} | \mathbf{T}] \begin{Bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3a)$$

$$(3a) \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(r_z) & \sin(r_z) & 0 \\ -\sin(r_z) & \cos(r_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(r_y) & 0 & -\sin(r_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(r_y) & 0 & \cos(r_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r_x) & \sin(r_x) \\ 0 & -\sin(r_x) & \cos(r_x) \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix} \quad (3c)$$

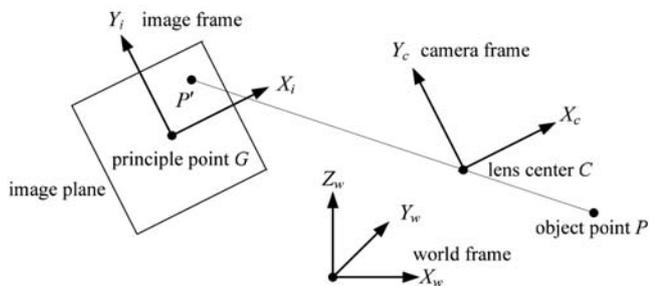


圖 2 不同座標系統示意圖

相機的內、外部參數可透過相機校正的步驟得到，而相機校正的原理都在於先建立世界座標系統中的三維空間點 \$(x_w, y_w, z_w)\$ 轉換至像素座標系統上二維平面點 \$(x_i, y_i)\$ 的數學模式，無論是利用前述之透視投影法或其他假設之函數。其次是拍攝一系列校正板（或其他已知空間中相對位置的物體）的照片。理論上校正板的各點（或其他已知空間中相對位置的物體）在影像座標中仍要維持某種對應的關係，藉由調整數學模式中的各參數值使成像平面所得之影像座標最佳化，亦即成像座標與假設之數學理論結果最接近。至於參數最佳化的方法又可分為：線性最小平方法^[2,3]與非線性最佳化方法^[4,5]兩大類。

圖樣識別

影像量測是根據物體變化前、後兩張影像的相對位置分析物體表面的位移場，其中一個重要的關鍵便是要識別出所欲探討之量測點在變形前、後兩張影像中的位置。搜尋影像中特定物的技術稱為圖樣識別（pattern recognition），使用者必須先提供參考影像（reference image）所欲搜尋的圖樣，影像分析程式再自動追蹤此標的圖樣在目標影像（target image）中的位置。文獻上對於圖樣識別常見的四種方法分別是：樣板匹配法（template matching）；統計分類法（statistical classification）；語句或結構匹配法（syntactic or structural matching）；類神經網路（neural network）^[6]。

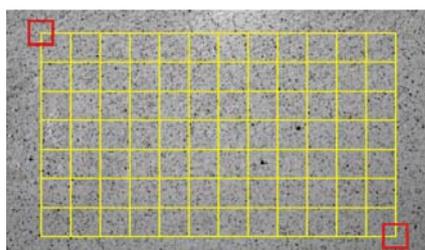
一般在結構監測上常用的影像識別多為樣板匹配法，若只需追蹤某些特定點位，則可在待測物之特定點位貼上規標，由影像分析程式自動追蹤目標影像上規標所在位置^[7,8]。若欲得到全域的分佈圖，文獻上常見的方式為數位影像相關係數法（digital image correlation method）^[9-11]。對於給定的參考影像與目標影像，數位影像相關係數法首先將參考影像劃分為 \$M \times N\$ 的區間（區間的大小可由使用者自行決定），圖中的格點即為所欲探討的量測點。其次為了追蹤參考影像上特定量測點 \$P\$ 在目標影像上的位置，在此選擇了矩形的子集合（subset）作為比對的目標（template），且子集合的形心恰落於 \$P\$ 點之上，如圖 3(a) 中的左上方之方格所示。利用矩形子集合取代原先的觀察點作為比對目標的原因在於一方面較於區分不同目標之間的差異；另一方面可以達到次像素的精確度。

參考影像上的子集合經過變形（含平移與旋轉）之後在目標影像上的位置與形狀可能改變，如圖 3(b) 與 3(c) 所示。若子集合夠小，則可假設子集合為均勻變形，亦即變形梯度為常數。數位影像相關係數法即是在目標影像上搜尋某一子集合，並找出一組變形向量 \$D\$ 使子集合在參考影像與目標影像之間的相關係數最大，其中影像相關係數之定義如下^[12]：

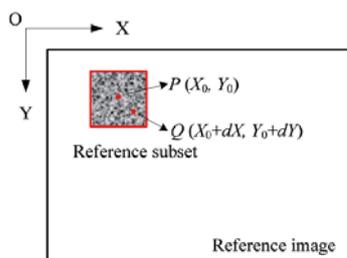
$$C = \frac{\sum_{s \in S, s' \in S'} [I_0(s) I_d(s')]}{\sqrt{\sum_{s \in S} I_0^2(s) \sum_{s' \in S'} I_d^2(s')}} \quad (4)$$

上式中 \$S\$ 代表參考影像上之子集合區域（subset），\$S'\$

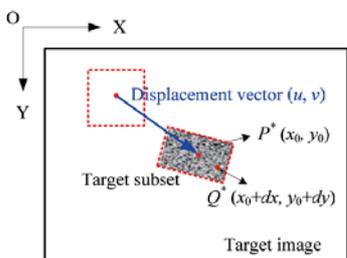
代表目標影像上之子集合。而 I_0 與 I_d 分別代表參考影像與目標影像之數位影像灰階值函數。對於任一小區域而言，若所假設的變形向量 \mathbf{D} 為最佳解，那麼這將會使 (4) 式中的 $C(\mathbf{D})$ 值為最大值，此時之 S' 形心即為所求。而為了讓各子集合具備足夠的特徵進行圖樣識別，通常實驗進行前會在待測物表面噴上顆粒漆或繪製任意不規則圖案，如圖 3(a) 所示。



(a) 參考影像上之區間



(b) 參考影像上之子集合



(c) 目標影像上之子集合

圖 3 數位影像相關係數示意圖

三角定位

在未知待測物與相機之間的距離下，吾人無法僅由單一相機影像以及方程式 (1) 決定物體的尺寸或點位空間資訊。以圖 4(a) 為例，不同尺寸但外觀相似的待測物在不同距離下所得之影像大小相同。然而若使用雙相機配合三角定位，則可決定待測物在空間的點位資訊或尺寸，如圖 4(b) 所示。所謂的三維影像量測係使用兩台以上的相機拍攝目標物，再藉由三角定位計算目標物在空間中的座標。以圖 4(b) 為例，若 P 點在兩台相機所得影像上之影像座標 $p_1(u_1, v_1)$ 與 $p_2(u_2, v_2)$ 為已知，則利用三角定位可以決定 P 點在空間中的座標 (x, y, z) 。

然而使用三角定位必須滿足兩個假設：首先，兩台相機的相對位置以及角度必須為已知，這些參數可透過相機校正步驟得到。其次， P 點在左右相機所得之兩張影像中的對應點位（即 p_1 與 p_2 ）必須正確，此一步驟可利用前述圖樣辨識達成。最後，利用三角定位公式或求解共線可得方程式可得物體在空間中之座標^[13-15]。

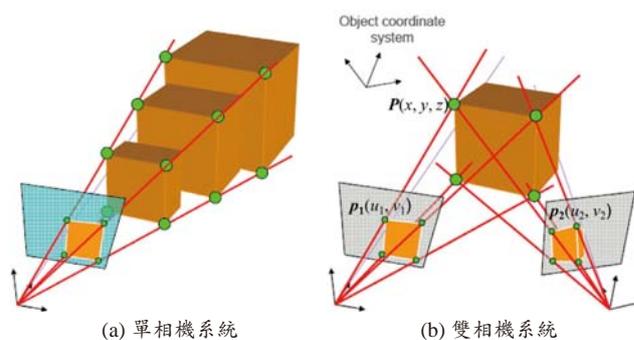


圖 4 單相機與雙相機系統示意圖

應變計算

在眾多的結構監測項目中，除了位移之外，應變亦是一項極為重要的參數。原因在於判斷材料的破壞與否，一般係利用應變或應力張量代入不同的破壞準則加以檢核。若利用影像量測定出待測物表面於影像上的格點在變形前、後的空間座標，便可利用點位的座標計算出各點位對應的位移向量，再進一步由位移向量計算應變張量。

由連體力學可知 Green-Lagrange 應變與位移之間的關係式如下^[16]：

$$\epsilon_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (5)$$

上式中 ϵ_{jk} 為二階應變張量 (strain tensor)，而 u_i 與 x_i 分別為位移向量與變形後的座標軸，而採用 Green-Lagrange strain 的主要原因是此種應變定義不受微小變形的限制。由於影像量測只能得到離散觀測點的位移向量，並無位移場的連續解析式，故無法按照方程式 (5) 的定義以偏微分計算應變張量，只能藉由數值的方式計算各觀測點位上的應變。結構監測中常見的應變計算方式為有限差分與有限元素，前者僅適用於規則點位，後者可應用於不規則點位。若採用圖 5(a) 所示規則點位為例，假設所有點位 x 向之間距均為 Δx ，則 A 點的之 x 向應變可按有限差分計算如後^[17]：

$$\epsilon_{xx}|_{x=A} = \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=A} = \frac{u(A+\Delta x) - u(A-\Delta x)}{2\Delta x} = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} \quad (6)$$

另一方面，若採用有限元素的方式計算應變，以平面線性等參元素 Q4 為例，其對應之應變可利用下式進行計算^[18]：

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/2\partial y & \partial/2\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \partial \mathbf{u} = \partial \mathbf{N} \mathbf{d} = \mathbf{B} \mathbf{d} \quad (7)$$

其中 \mathbf{u} 與 \mathbf{d} 分別代表位移場向量與節點位移向量， \mathbf{N} 為形狀函數矩陣。

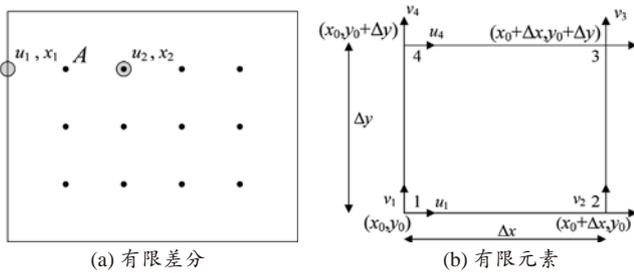


圖 5 應變計算方式示意圖

裂縫偵測

混凝土表面裂縫監測牽涉到兩個層面，亦即為裂縫偵測 (crack detection) 及裂縫診斷 (crack diagnosis) 兩個部分。裂縫偵測在於依據影像的形態特徵，利用敏適裂縫偵測之準則，用以確認結構物表面是否有裂縫存在，而非汙漬或其他黏貼物。而裂縫診斷則必須在裂縫偵測的結果確定後，才可進行後續裂縫特徵的計算，如量測裂縫的長度、寬度、方向、深度、間距等特徵。

文獻上利用影像處理技術進行裂縫偵測一般是以梯度運算偵測邊緣線 (諸如 Canny 法與 Sobel 法) 為主，然而此種方法的正確率普遍無法達到 80% 以上^[19,20]，或多或少仍需藉由人為方式輔助系統進行裂縫偵測的確認。此外，傅立葉或小波轉換法^[21,22] 以及利用影響特徵配合統計的方式^[23,24] 也可當作裂縫偵測的工具。綜合而言，以梯度運算為基底的裂縫偵測方法容易受到混凝土表面汙漬或其他黏貼物影響而產生誤判，以影像灰階值為基底的方法儘管能降低表面汙漬或其他黏貼物的影響，但對於既有裂縫則無法識別。目前文獻上已有一些研究利用類神經網路等人工智慧的方法來提升裂縫偵測正確度^[25]。

裂縫特徵

利用方法偵測出影像中的待測物表面裂縫後，一般可搭配影像形態學 (image morphology) 和影像分割 (image segmentation) 等方式進行裂縫特徵量化分析^[26]。目前利用影像技術計算裂縫長度、面積、密度等特徵的研究已相當成熟，唯獨裂縫寬度的計算仍存在爭議。原因在於裂縫寬度的定義並不明確：理論上裂縫寬度係指在垂直裂縫中心線方向上的距離，然而對於歪斜、分叉的裂縫，裂縫中心線並不容易定義；兼以影像的最小單位為像素，因此當裂縫寬度非像素整數倍數時都可能引致影像分析的誤差^[27]。

然而就混凝土構件而言，表面裂縫寬度往往是結構健康診斷的重要指標。為提升裂縫寬度計算的精確度，目前較可行的方式是將裂縫分段切割，把裂縫離散成多段來進行寬度的計算。將所有識別出的裂縫計算其中心線與水平軸的夾角，再將裂縫旋轉至水平向或是垂直向後計算寬度。另一替代的方案是取裂縫面積除以裂縫長度可得裂縫的平均寬度^[28]。

影像量測之應用

本研究根據前述理論建立對應的影像量測與分析系統，系統硬體主要由兩台單眼數位相機組成，軟體則主要是利用 Matlab 平台進行開發，再搭配相關既有的程式庫 OpenCV^[29] 與 Camera calibration tool box^[30]。並以靜態拉伸實驗、振動台實驗與混凝土試體軸壓實驗進行驗證，將影像量測的結果與應變計、位移計所得結果相比較。

靜態拉伸實驗

本實驗利用萬能實驗機進行鋁板拉伸測試，並將量測的結果與傳統應變計比較，測試三維影像技術在應變量測上之成效。實驗方式是以萬能試驗機在一個鋁製矩形平板兩端施加靜態 (慢速) 軸向拉力，平板的一面將噴上顆粒漆作為雙相機拍攝的待測物，俾利進行影像應變量測；另一面則是以貼上六組三軸應變計量測應變，再與影像量測結果相比較。實驗方式是利用萬能試驗機以拉-停的方式施加增量之軸向拉力，直到試體斷裂為止。實驗過程以位移控制，由位移零緩慢增加至位移為 6 cm，拍攝張數與試體拉伸位移的關係列於表 1。

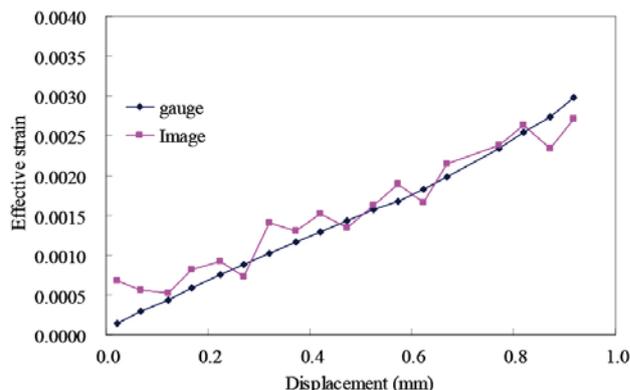
拉伸實驗結束再將相機所得影像輸出至電腦進行分析，同時將影像中平板試體之量測範圍細分成 40×20 的網格區間，俾利進行全域的位移場與應變場計算。由於在比較影像量測與應變計之結果時，無法確定應變計貼附處是否恰有對應的區間格點，故在影像分析中取接近應變計貼設位置的小區域，取 2×2 區間影像量測所得應變的平均值再與應變計量測值比較。此外，由於應變計的貼設方向不一定能完全符合拉伸方向，故本研究是將應變計與影像量測所得的平面應變皆換算成有效應變進行比較。礙於篇幅所限，本文僅列出一組應變計與對應該位置影像分析所得之結果。圖 6 (a) 與 (b) 分別為平板在拉伸位移達到 1 mm 與 10 mm 前分別利用應變計與影像量測所得的應變值，從圖 6(a) 中可以看到兩種方式所得的結果大致相符皆為線性的趨勢，唯影像量測的結果會約略在應變計所得的結果上、下跳動。圖 5(b) 則顯示應變計在平板有效應變達到 0.02 時開始陸續脫落，無法再提供相關數據；但影像量測不受到此限制，且在平板達到拉伸破壞之前皆可持續量測，而最終平板的破壞形式亦與數位影像計算的結果相符合（如圖 7 所示）。值得一提的是隨著平板拉伸至破壞，鋁板表面的噴漆已有脫落的情況，此時影像量測方法在執行影像識別的準確度已下降，故此時局部的應變值已非正確。

表 1 平板拉伸實驗規劃

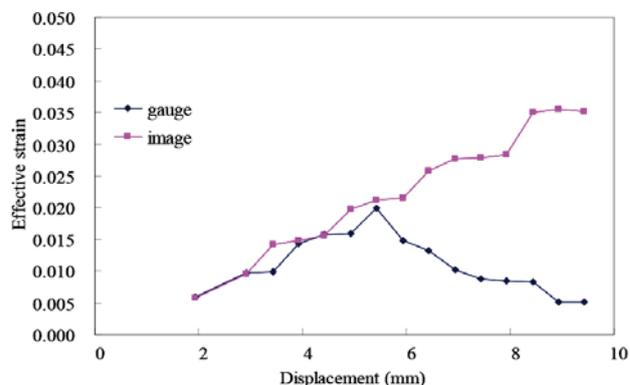
拉伸位移	拍照位移	拍攝數量 (張)
0mm ~ 1mm	每 0.05 mm 拍攝照片	20
1mm ~ 10mm	每 0.5 mm 拍攝照片	18
10mm ~ 60mm	每 2.5 mm 拍攝照片	20

振動台實驗

本實驗目的在於測試在不產生殘影以及訊號交疊的狀態下，數位相機攝影模式的影像量測所能追蹤的最大振動頻率為何。同時藉由影像量測的位移資訊與位移計 (LVDT) 的結果相比較，探討影像量測結構位移動態反應的精確度。實驗所規劃的進行方式是將鋁板安裝於振動台上，並在給定的振幅下令振動台進行簡諧運動，振動台的運動方向與平板所在平面垂直。兩台單眼數位相機採攝影模式記錄鋁板在振動下之反應。每秒的掃描頻率為 30 次 (30p)，每次錄影時間為十秒。

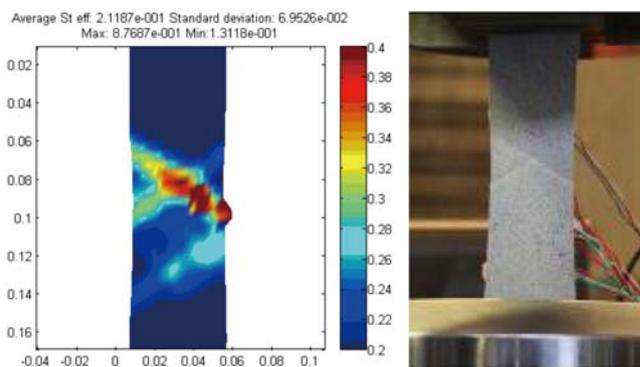


(a) 拉伸位移達到 1 mm 前



(b) 拉伸位移達到 10 mm 前

圖 6 鋁板拉伸實驗之應變結果



(a) 破壞時影像量測所得的應變場 (b) 破壞時的左相機所得之影像

圖 7 鋁板達到拉伸破壞時的應變場分佈與實際影像

圖 8(a) 至 (d) 為鋁板上特定點位在不同振幅與不同頻率的面外實驗中的運動歷時圖。此處選取的特定點位其一為位移計所在的點位，俾利影像量測的結果與位移計量測的結果相比對（圖中註記為 Image measurement 1）；其二選擇靠近振動台的點位（鋁板底部），影像量測的結果可與振動台輸入的振動訊號相比對（圖中註記為 Image measurement 2）。從圖 7 中可以看出：兩個影像量測點位與位移計所得之歷時曲線頻率大致相同，而靠近振動台之第二點位的振幅在振動

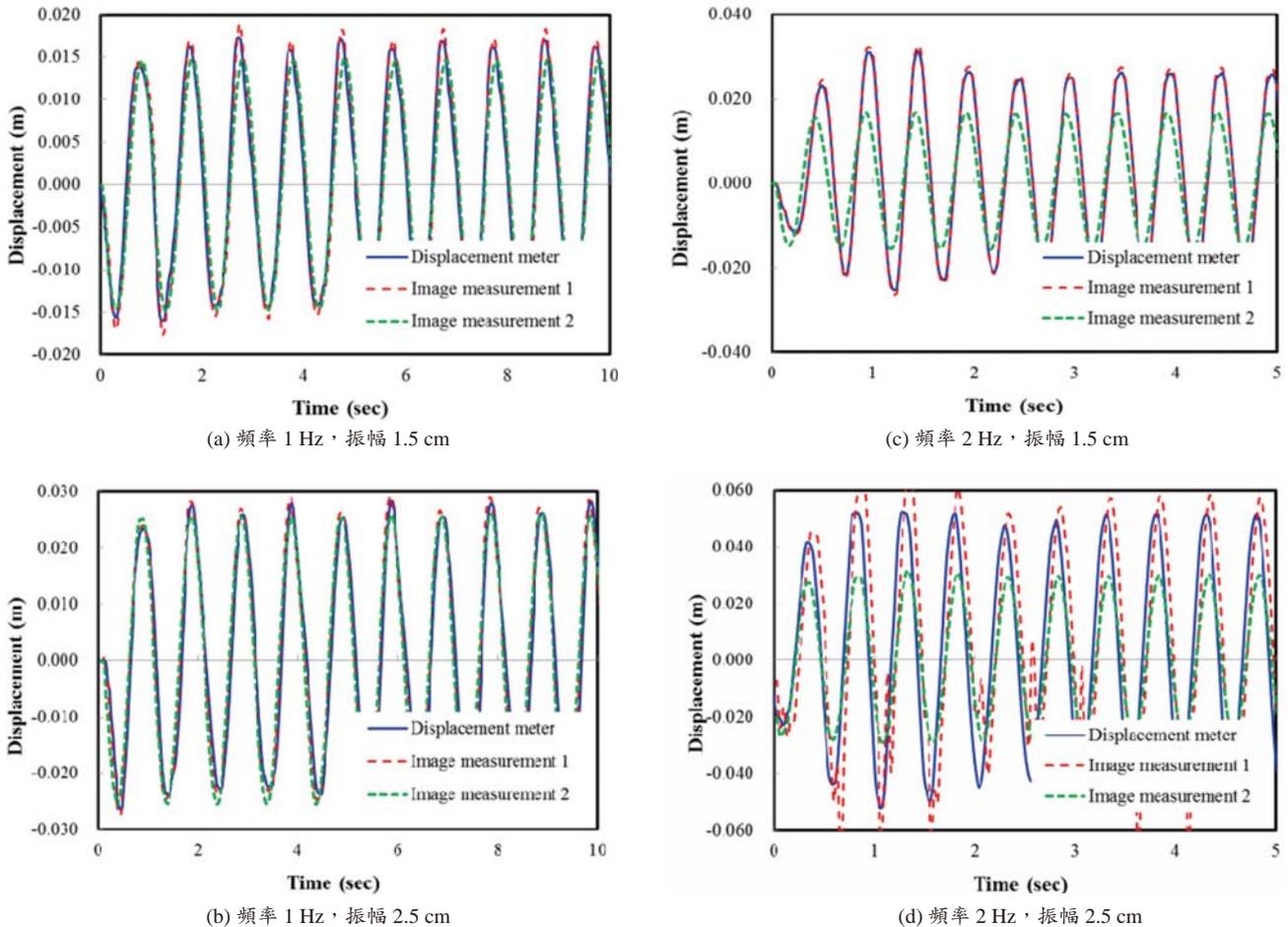


圖 8 平板面外運動特定位點之位移歷時圖

歷時中大致保持定值，但位移計所在點位（即第一點位）的振幅在振動歷時中並非定值而是略有高低。原因在於鉛板的變形除了隨振動台的剛體運動之外，還有因動力效應（慣性力、阻尼力和恢復力）引致之自然變形的部份。且結構在簡諧載重作用下達到穩態反應之前的瞬態反應，除了與簡諧載重的頻率有關之外，也與結構本身的自然振動頻率以及初始條件有關，因此其他點位的振動歷時反應會與靠近振動台點位的反應不盡相同。其次，影像量測在第一點位所得之振幅約略高於位移計量測所得之振幅，且影像量測與位移計兩者之振幅差異在頻率與振幅增大時更為明顯。

混凝土試體軸壓試驗

本研究採用光學影像強度相減法進行裂縫偵測，比較不同時期的光學影像可發現在裂縫產生處會伴隨灰階值的改變，可據此判定裂縫位置。此法的優點在於可輕易克服試體表面既有裂縫或汙漬造成的裂縫誤判，然而由於試體在監測過程中可能因加載或其他因素而偏離原位，故必須影像重合（image registration）的方式先行校正載進行影像強度相減。透過影像強度變化初步判定裂縫之後，再利用影像處理的方式移除其他可能的雜訊（如混凝土剝落、漆斑等等），整體的步驟包含：灰階化、影像疊合、影像相減、閉合連接、二值化、刪除顆

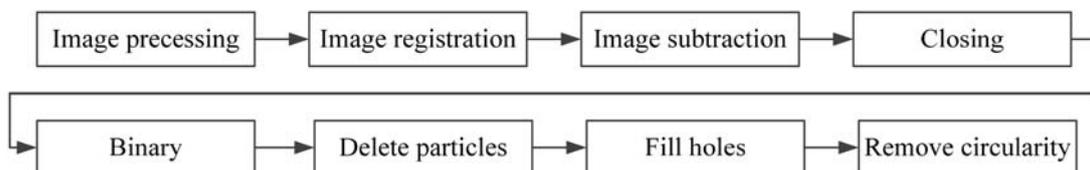


圖 9 裂縫影像分析流程

粒、物件連通、近圓捨去等，用以識別出影像中裂縫，關於裂縫偵測的整體流程如圖 9 所示。

實際將實驗所得之混凝土試體裂縫影像利用本研究開發之裂縫偵測程式進行測試：圖 10(a) 為原始的裂縫影像，圖 10(b) 則是將識別出的裂縫（以紅色標註）重新繪於影像之上。比較原始裂縫的光學影像可發現本研究所提之裂縫偵測程式具備相當高的裂縫鑒別度，但段段於若干試體上陰影部分的裂縫，則因影像像素強度變化不明顯，故無法正確識別。

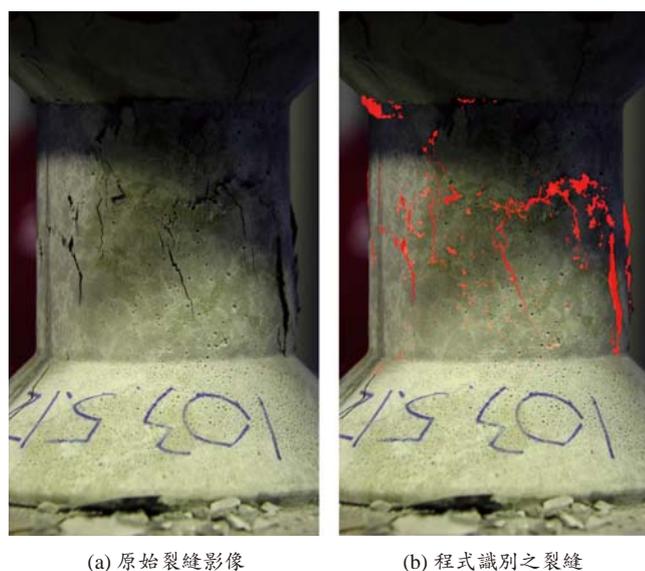


圖 10 裂縫偵測影像測試比較

影像量測遭遇的問題

相較於傳統感測器，目前影像量測所得之影像仍難做到即時線上的全域性位移場或應變場計算，主要是因為圖樣識別等步驟計算量過大。目前的克服方式包括將部分影像分析程式採用平行處理^[31]或改以嵌入式晶片^[32]取代，但在工程實務上仍有相當大的改善空間。

影像量測在結構監測應用上的最大限制在於相機必須在量測過程中維持不動，一旦相機移動便需要重新進行校正工作。因此如何確保相機在實驗量測過程中保持不動，避免因為戶外強風、腳架不穩固、非預期的碰撞等因素，造成相機偏移導致後續影像分析的嚴重誤差是亟待克服的問題。尤其對於結構物在動力下（特別是地震）的反應，如何突破相機在影像監測過程中確保不動的限制，是影像量測於結構監測之應用得以推廣普及的關鍵。目前較為可行的方式是透過固定的參考點位，隨時進行校正。但此法仍存在諸多限制。

對於待測物應變的計算，利用誤差分析可知有限差分法在應變計算上的誤差 $\sigma_\epsilon = 2\sigma_s/\Delta$ ；而採用有限元素法 Q4 元素在應變計算上的誤差 $\sigma_\epsilon = \sqrt{2} \sigma_s/\Delta$ 。其中 σ_s 為影像量測在位移計算上的誤差， Δ 為應變計算時所選取的網格尺寸^[33]。從誤差分析的結果可看出：當網格越細緻，應變計算的誤差量越大。然而工程實務上，吾人希冀得到越精緻的應變場分佈，所需的網格就需越細緻。因此如何更正確的計算應變，不會在網格細緻化的過程中引進過大誤差也是影像量測的課題。此外，前述有限差分和有限元素兩種由位移計算應變的數值方法，在待測物剛體旋轉過程中會引致虛擬的應變^[34]。可行的替代方案是利用線性轉換法^[35]或利用逆向運動的觀念^[36]，由待測物的變形資訊中正確識別剛體運動與自然變形。

目前利用光學影像來記錄混凝土結構表面的狀況，再以影像處理的技術分析表面裂縫各項特徵的技術已逐漸成熟。然而利用影像技術進行裂縫監測，最終只能得知混凝土表面裂縫的存在以及對應的特徵。吾人最關心的應該還是結構安全與否，故可否由裂縫特徵推估其對結構生命週期的影響是吾人仍需努力克服的問題。理論上裂縫特徵與混凝土構件之承載狀態（應力組合）息息相關，不同的應力組合可能會引致不同的破壞模式，導致伴隨不同的裂縫特徵（諸如裂縫角度與間距）。故裂縫的特徵與應力狀態的關係也是值得探討。

結論

數位影像量測的意義並非在於取代傳統的量測方式，而是提供另一種量測方法的選擇。目前利用相機或其他影像擷取儀器進行非接觸式的全域性量測，是結構監測上日益可行與普及的方式之一，且可有效地應用在各種不同規模與尺寸的工程實驗，特別對於存在大變形或相對高危險的實驗，影像量測可以安全且有效觀察變形與應變場。

本研究自行開發之影像量測系統從實際測試中已證實影像量測技術可適用在曲面與平面試體，整體測試顯示影像量測在位移計算上可以精確到次像素的等級，但對於高頻的運動可能會因攝影模式而喪失部分解析度。應變量測的結果與傳統應變計所得結果的相對誤差可控制在 5% 之內，且應變量測範圍更廣為並可得全域應變分佈。而在計算裂縫特徵的測試方面，即使面對連續轉變的曲線或分叉的線條，分析軟體基本上也可正確處理，並將誤差控制在像素等級。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會贊助研究經費，計畫編號為 NSC 99-2221-E-027-042 -MY3 與 NSC 102-2221-E-033-038，特此致上謝忱。

參考文獻

1. Faugeras, O., *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, MIT Press, London (1993).
2. Sobel, I., "On calibrating computer controlled cameras for perceiving 3-D scenes," *Artificial Intelligence Journal*, 5(2), pp. 184-198 (1974).
3. Wong, K. W., "Mathematical formulation and digital analysis in close-range photogrammetry," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 41(11), pp. 1355-1373 (1975).
4. Hartley, R. I., "An algorithm for self calibration from several views." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 94)*, pp. 908-912 (1994).
5. Heikkilä, J., and Silvén, O., "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 97)*, pp. 1106-1112 (1997).
6. Antani, S., Kasturi, R., and Jain, R., "A survey on the use of pattern recognition methods for abstraction, indexing, and retrieval of images and video," *Pattern Recognition*, 35(4), pp. 945-965 (2002).
7. Lee, J. J. and Shinozuka, M., "Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques", *Experimental Mechanics*, 46(1), pp. 105-114 (2006).
8. Shan, B. H., Zheng, S. J., and Ou, J. P., "Free vibration monitoring experiment of a stayed-cable model based on stereovision," *Measurement*, 76, pp. 228-239 (2015)
9. Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A., and Peters, W. H., "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics," *Experimental Mechanics*, 25(3), pp. 232-244 (1985).
10. Sutton, M. A., Cheng, M., McNeill, S. R., Chao, Y. J., and Peters, W. H., "Application of an optimized digital correlation method to planar deformation Analysis," *Image and Vision Computing*, 4(3), pp. 143-150 (1988).
11. Sutton, M. A., Bruck, H. A., and McNeill, S. R., "Determination of deformations using digital correlation with the Newton-Raphson method for partial differential corrections," *Experimental Mechanics*, 29(3), pp. 261-267 (1989).
12. Sutton, M. A., McNeill, S. R., Helm, J. D., and Chao, Y. J., "Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision," *Photomechanics*, 77, pp. 323-372 (2000).
13. Helm, J. D., McNeill, S. R., and Sutton, M. A., "Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement", *Optical Engineering*, 35(7), pp. 1911-1920, (1996).
14. Sheng, C., Dawei, T., Guozheng, L., and Juan, Y., "Fusing range and 2-D images in multi-sensor for robot vision," *IN TENCON'02. Proceedings of IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering*, 1, pp. 565-568 (2002).
15. Hartley, Z., and Zisserman, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edit., Cambridge University Press., Singapore, (2003).
16. Holzapfel G. A., *Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering*. Wiley, Chichester (2000).
17. Yang, Y. S., Huang, C. W., and Wu, C. L., "A simple image based strain measurement method for measuring the strain fields in an RC wall experiment," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(1), pp. 1-17 (2012).
18. Yoneyama, S., "Smoothing measured displacements and computing strains utilising finite element method," *Strain*, 47(2), pp. 258-266 (2011).
19. Yu, S. N., Jang, J. H., and Han, C. S., "Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel," *Automation in Construction*, 16(3), pp. 255-261 (2007).
20. Kabir, S., Rivard, P., He, D.C., and Thivierge, P., "Damage assessment for concrete structure using image processing techniques on acoustic borehole imagery," *Construction and Building Materials*, 23(10), pp. 3166-3174 (2009).
21. Mallat, S., and Zhong, S., "Characterization of signals from multiscale edges," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(14), pp. 710-732 (1992).
22. Chandan, C., Sivakumar, K., Masad, E., and Fletcher, T., "Application of imaging techniques to geometry analysis of aggregate particles," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1), pp. 75-82 (2004).
23. Hutchinson, T. and Chen, Z., "Improved image analysis for evaluating concrete damage," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 20(3), pp. 210-216 (2006).
24. Abdel-Qader I., Pashaie-Rad, S., Abudayyeh, Q., and Yehia, S., "PCA-based algorithm for unsupervised bridge crack detection," *Advances in Engineering Software*, 37(12), pp. 771-778 (2006).
25. Jahanshahi, M. R., Masri, S. F., Padgett, C. W., and Sukhatme, G. S., "An innovative methodology for detection and quantification of cracks through incorporation of depth perception," *Machine vision and applications*, 24(2), pp. 227-241 (2013).
26. Litorowicz, A., "Identification and quantification of cracks in concrete by optical fluorescent microscopy," *Cement and concrete Research*, 36(8), pp. 1508-1515 (2006).
27. Chen, Z., and Hutchinson, T. C., "Image-based framework for concrete surface crack monitoring and quantification," *Advances in Civil Engineering*, 2010.
28. Nishikawa, T., Yoshida, J., Sugiyama, T., and Fujino, Y., "Concrete crack detection by multiple sequential image filtering," *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(1), pp. 29-47 (2012).
29. Intel Corporation, "Open Source Computer Vision Library," (OpenCV), web page: <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv>, (accessed 2009).
30. Bouguet, J. Y., *Camera Calibration Toolbox for MATLAB*, Web page: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html, (accessed 2009).
31. Tong, X., Furukawa, T., and Taheri, S., "Speed enhancement of displacement and strain field measurement using graphics processing unit," *IASME 2012 Rail Transportation Division Fall Technical Conference*, pp. 37-44 (2012).
32. Lin, C., Tai, J. C., and Song, K., "Traffic monitoring based on real-time image tracking," *Robotics and Automation, Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference*, 2, pp. 2091-2096 (2003).
33. 蔡瑞豐, 「雙相機系統於應變量測之應用」, 碩士論文, 中原大學土木工程研究所, 桃園 (2011)。
34. Jagannathan, D. S., Christiano, P. P., and Epstein, H. I., "Fictitious strains due to rigid body rotation," *Journal of the Structural Division*, 101(11), pp. 2472-2476 (1975).
35. Han, J. Y., "Noniterative approach for solving the indirect problems of linear reference frame transformations," *Journal of Surveying Engineering*, 136(4), pp. 150-156 (2010).
36. Ting, E. C., Shih, C., and Wang, Y. K., "Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part II. plane solid elements," *Journal of Mechanics*, 20(2), pp. 123-132 (2004).



微波雷達系統於 橋梁監檢測實務案例之應用

許耿蒼／朝陽科技大學非破壞檢測中心副主任

鄭家齊／朝陽科技大學營建工程系教授兼系主任

江支弘／朝陽科技大學營建工程系教授

摘要

微波雷達系統其特性為可即時監測橋梁之即時垂直位移量且施作時不影響橋面交通正常運行，為目前發展中之先進檢測技術，此技術與傳統監測儀器不同，不需先將監測儀器裝設於橋梁上，可採隨到即測、測後即走之方式針對重點橋梁或有結構疑慮之橋梁進行監檢測作業，本文將針對此技術使用於橋梁監測作業實務應用上做一介紹，文中將以兩座監測多年之橋梁進行案例說明，而檢測後之結果可供管理維護單位後續方案擬定之用。

前言

橋梁為國家土木工程基礎建設中重要的設施之一。台灣之河川一般而言具有下列特徵，河身短、坡度大、水流急，枯水期的時候水量小，常成為野溪，降雨時洪峰流量十分龐大並夾帶許多之土石材料，台灣又位處於地震帶中，因此島內之橋梁結構皆可能遭受如地震、颱風、洪水，等外力作用之考驗。近年於美國明尼蘇達州 I35 州際公路跨河橋在傍晚交通尖峰時刻，發生突然斷裂坍塌事件，以及國內在辛樂克、莫拉克颱風來襲期間導致包括后豐大橋在內、多座重要橋梁斷橋，造成民眾生命財產損失事件，諸如此類相關類似事件一再於國內外發生。

在另一方面為均衡區域發展，國內交通路網不斷發展，致使全國橋梁橋梁總數量也隨著交通建設的推

動而逐年漸增，台灣橋梁自新建高峰期迄今已將近 30 年，隨著橋梁邁入高齡化的時代，橋梁功能及服務品質因材料老劣化而下降，所衍生之老劣化問題日趨嚴重，為永續管理橋梁，各管理機關莫不注重橋梁檢、監測與維護管理之提昇。

據交通部統計，國內大小橋梁近三萬座，台灣地區橋梁面臨問題包括；基礎沖刷、材料老劣化以及耐震強度普遍不足，一旦發生颱風、地震或洪災等大規模天然災害時，橋梁倒塌或斷裂的機率無法忽視。因此須有中央單位統籌橋梁管理系統，對橋梁依其重要程度做定期監測列管，以因應未來橋梁風險管理、預算分配、緊急災害搶救等。

檢測與維修橋梁一般分為三個步驟；第一步先進行目視調查以了解各橋梁基本狀況，如發現被掏空、劣化及橋面板損壞等，再進一步作較詳細的鑑定。第二步是以各種儀器進行監測，進一步分析橋梁狀況後，如需要修補，再進行第三步必要的工作，如封橋、修復或補強。國內目前常用之整體監測工具包括在橋梁上安置速度規或加速度規藉由橋體震動來計算橋梁結構共振頻率、阻尼、振形或衝擊係數等，或者以應變計、位移計、光纖光柵、線性位移計等量測橋體的變形，但這些方法均需固定參考點或必須進行數值積分方才能獲得絕對變位且儀器架設較費時，而新近發展之非接觸式微波量測系統 (IBIS-S)，可多點監測並即時同步顯示結構體動靜態位移，其位移精度可達 1/10 mm ~ 1/100 mm，動態擷取頻率可達 200 Hz，足以完整紀錄一般結構的模

態頻率。儀器的優點在於設置及操作快速容易，且日夜各種天候環境均不會影響量測結果。

主要或特殊結構橋梁在完工前即埋設多種監測儀器，可做長期監測，但所費不貲。對於既有老舊或典型或中短跨距橋梁，安設監測儀器並不符合成本，僅由目視檢測難以直接判定橋梁的承載受損狀況，因此本量測系統由於架設容易，隨到即測，無須在橋上進行複雜儀器安裝的特點，可提供管理維護單位篩選需要安裝長期監測儀器橋梁的依據。研究團隊已量測多種不同型式橋梁，包括吊橋、箱型連續梁、脊背橋、預力混凝土簡支橋梁跨及其橋墩等，並在多次現場試驗後歸納出各反射點均能量測準確位移訊號的經驗法則，本文中將針對較具代表性之兩座連續監測多年之橋梁結構成果進行探討。

檢測原理與儀器設備

近年發展之變頻雷達波技術已應用於遠距多點動態位移監測，可在 1 公里範圍內多點監測並即時同步顯示結構體靜態或 500 公尺範圍內監測動態位移，其位移精度可達 1/10 mm ~ 1/100 mm，動態擷取頻率可達 200 Hz，足以完整紀錄一般結構的模態頻率。儀器的優點在於設置及操作快速容易，且日夜各種天候環境均不會影響量測結果。此技術所發展的儀器可檢測橋梁上部結構、橋梁墩柱、高樓建築、風車桿、塔樓、

電桿等結構體的動力特徵及受載重時的變形輪廓。國外已有相當數量之學術報告證明此技術應用於量測橋梁、風車、及高樓結構的可行性^[1-5]。以下就此技術的檢測原理，儀器的檢測參數以及此儀器在橋梁檢測的應用實例做一說明。

遠距微波動態位移測量儀（見圖 1）可發射階梯頻率的連續雷達波（SFCW, step frequency continuous wave），圖 2 為連續雷達波之波形及頻譜示意圖，每一組掃描訊號均發射含有 n 個固定頻率差 (Δf)，總歷時為 T_{tone} 的連續電磁波（圖 2(a)），訊號會造成總頻寬為 B 、頻率間隔為 Δf 之離散頻譜（圖 2(b)）。SFCW 訊號設計之目的如下：由於離散頻譜在反傅立葉轉換後乃是固定時間間隔的脈波，其時間間隔 T 為頻率間隔的倒數 ($1/\Delta f$)，而其每一脈波延時 (τ) 約為總頻寬的倒數 ($1/B$)，在雷達波發射路徑兩物件所造成的反射波不造成前後脈波因延時造成資訊混淆的最小距離即為空間解析度 (ΔR)，可由公式 (1) 計算，其中 c 為光速。在天線的波束範圍內（見圖 3(a)），每一個解析度範圍（Range bin）內物件的反射訊號，均可轉換為位移訊號同時紀錄。對橋梁而言，如圖 3(b) 所示，其天線 -3dB 能量範圍之視角 (α) 內任何有反射訊號的凸出點，其間距在空間解析度以上均可計算出精確位移，因此可描繪出位移的一維剖面輪廓。

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \tag{1}$$



圖 1 遠距微波動態位移測量儀

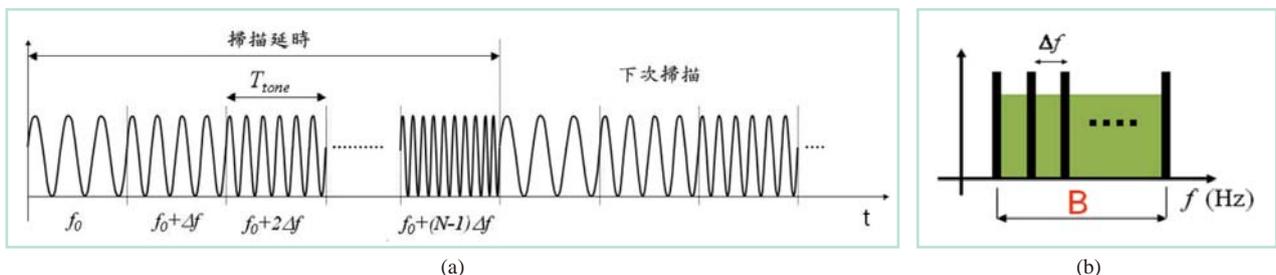


圖 2 階狀頻率連續雷達波之 (a) 波形及 (b) 頻譜示意圖^[6]

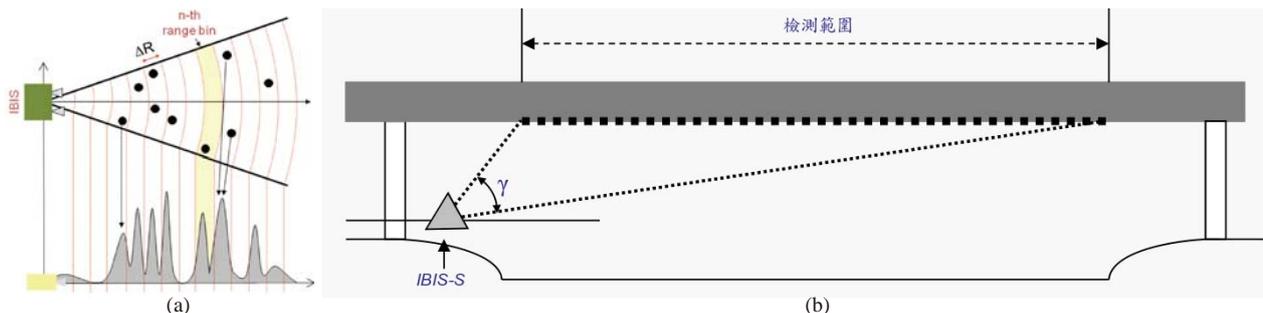


圖 3 雷達之 (a) 水平與 (b) 垂直有效檢測範圍 [6]

由於由物件反射的雷達波必須在上述之時間間隔 (T) 之內才不會與下一組到達的脈波相混，理論上可測之最遠距離 (R_{max}) 如公式 (2) 所示。

$$R_{max} = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2\Delta f} \quad (2)$$

位移量測方面，每一個解析度範圍所回傳的電磁波均包含振幅及相位資訊，固定點的變位 (Δ_r) 是由時間解析間隔所記錄的相位差 ($\Delta\phi$) 計算，如公式 (3) 所示，其中 f_c 及 λ_c 分別為雷達的中心頻率及波長，因此本儀器位移的精度應不隨儀器與受測點之距離而改變，然而當距離變遠時，儀器的訊噪比會增大而影響到量測的精確性，通常訊噪比必須大於 40 其檢測資料才有可信度。此外，由於相位差超過 2π (360°) 時將無法計算出正確位移，因此由公式 (3) 可知當一個時間解析間隔之變位差超過 $\lambda_c/2$ ，將使正確位移無法辨識。舉例而言，目前市售儀器其 $\lambda_c/2$ 為 8.76 mm。

$$\Delta r = \frac{c}{4\pi f_c} \Delta\phi = \frac{\lambda_c}{4\pi} \Delta\phi \quad (3)$$

在橋梁檢測時，位移量測儀是放置於橋的正下方，如圖 4 所示，儀器量測的位移為天線發射視線方向反射之電磁波相位差所計算的位移 (d_p)，而此位移大部分是由橋梁垂直方向位移所造成，因此在儀器位置與橋頂距離 (h) 及儀器與反射點之距離 (R) 可由 IBIS-S 直接量測已知的狀況下，可由公式 (4) 計算橋梁真正垂直位移 (d)。

$$d = d_p \cdot \frac{R}{h} \quad (4)$$

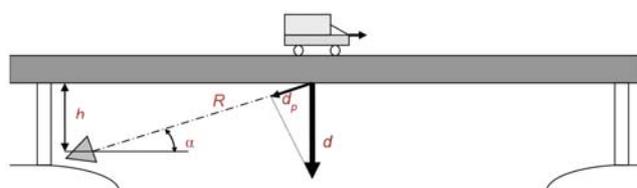


圖 4 遠距微波動態位移測量儀橋梁檢測之示意圖 [6]

本儀器的操作參數如表 1 所示，在實際檢測時首先設定 R_{max} 及 ΔR ，由公式 (2) 儀器即自動設定 Δf ，由公式 (1) 即可決定頻率帶寬 B 以及階狀頻率數目，此外必須量測儀器位置與橋頂距離 (h)，帶入公式 (4) 即可計算垂直方向位移。

橋梁監測實務案例

本章節針對兩座以微波雷達系統進行長期監測之橋梁做一說明，其中橋梁 A 為結構特性介於斜張橋與連續梁橋間之脊背橋，橋梁 B 為上部結構為懸臂設計之預力箱型梁橋，兩座橋梁研究團隊均針對其上部結構進行多年之監測作業。

脊背橋 — 橋梁 A

橋梁 A 結構形式為脊背橋，上部結構箱型梁體為 300 公尺之連續梁體，橋梁結構如圖 5 中所示，以遠距微波動態位移量測儀在正常交通所造成的環境激振 (ambient vibration) 下檢測箱型上部結構的動態位移訊號，以辨識箱型梁的振動模態振形、振態頻率。由於橋梁之箱型梁底平滑，沒有顯著的微波反射標的，

表 1 雷達操作參數規格

中心頻率 (f_c)	垂直方向 -3dB 範圍 視角 (α)	階狀頻率間隔 (Δf) 最大數目	最大模擬頻率 帶寬 (B)	最小模擬單一脈 波延時 (τ)	最大掃描延時
16.75 GHz	15°	2502	380 MHz	12.3 ms	30.76 ms

試驗時將自行研發的金屬三角錐形反射器伸出橋跨護欄並以 C 型夾固定於護欄上作為微波反射的規標，反射器規標間距約為 4 m，如圖 6 中所示，現地檢測時即可以微波雷達系統一次多點同時記錄到箱型梁之動態位移振幅值。本項檢測之取樣頻率為 103.07 Hz，總紀錄時間為 20 分鐘。舉例而言，圖 5 左跨檢測兩測線，圖 7 為試驗中其中三個反射器規標之時間位移關係曲線，其中 Y 軸為位移量，X 軸為時間，其中高低起伏的位移量即為正常交通時重量不一之車輛所造成，由於反射器規標之位置不同故所呈現之最大位移量也隨之不同，但可見其走勢大致上相近。

正常交通狀況所造成各反射規標動態垂直位移訊號是以 ARTeMIS 軟體中 FDD (Frequency Domain Decomposition) 方法加以分析^[1]，以辨識橋面板的振動頻率、模態振形。FDD 法是僅以輸出訊號作結構系統識別的有效分析方法，橋上交通載重所造成橋面板隨機性的輸入振動，在記錄時間夠長時，這些載重可視為每個頻率的機率均為 1 的環境激振 (ambient vibration)，利用檢測各點位移訊號之自能譜及互能譜求得能量譜矩陣，將每一個頻率能量譜矩陣作奇異值分解 (singular value decomposition, SVD) 即可取得此頻率的多重奇異值及各對應之奇異向量，在頻率接近

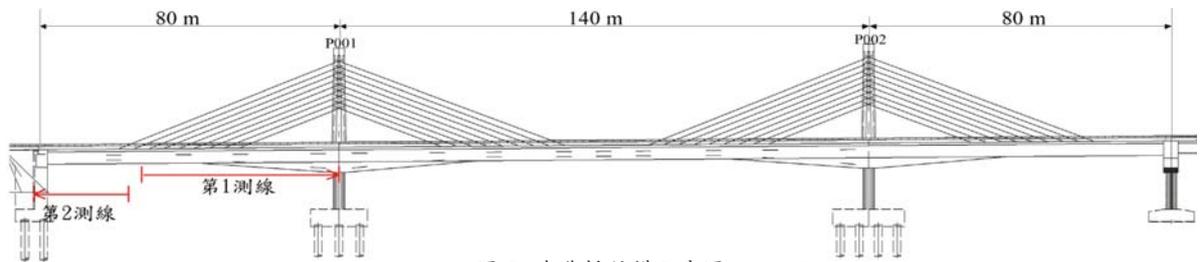


圖 5 脊背橋結構示意圖



圖 6 微波雷達系統現地檢測作業照片

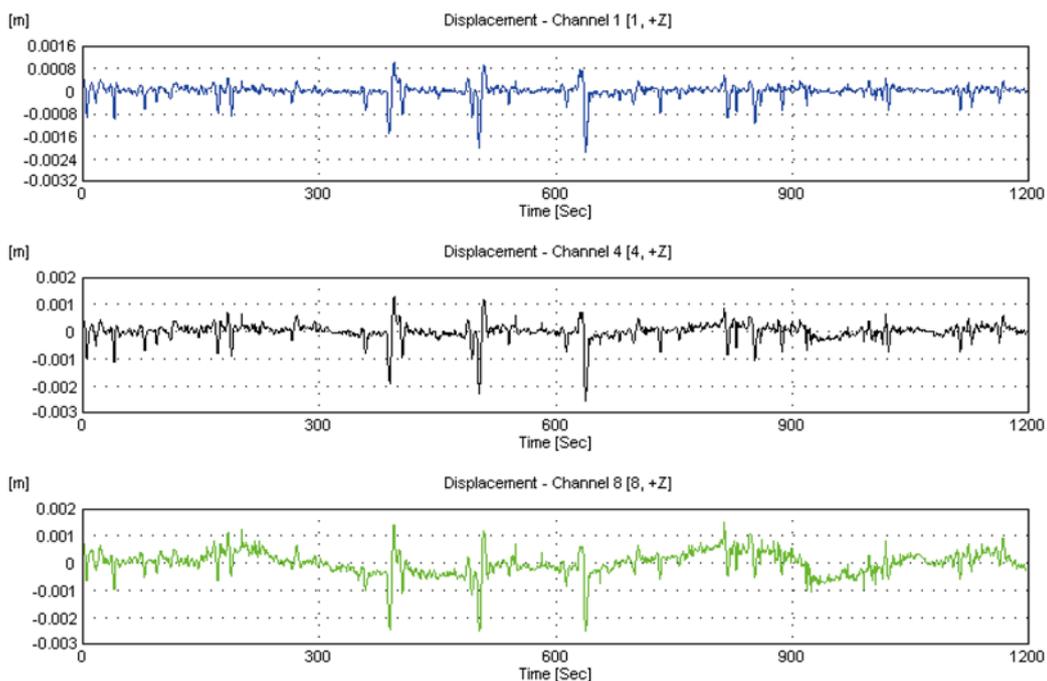


圖 7 反射規標時間位移曲線

結構的某個振態時，最大奇異值頻譜在振態頻率會顯示尖峰，其尖峰奇異值所對應之奇異向量通常即為其模態振形。上述兩測線位移訊號之最大奇異值頻譜如圖 8(a) 與 8(b) 所示，在頻譜可觀察到其最大奇異值頻譜之尖峰頻率大致上一致。

選定固定尖峰頻率，將測線之多點訊號以 FDD 法計算該頻率之模態振形，並將多條測線之振形相連接，可得到此頻率下橋跨的振形全貌。圖 9 為上述兩測線所計算之左跨所辨識的模態振形，圖 10 為全橋過去檢測所辨識的模態振形與橋梁數值模擬結果之對應圖。由圖 9 中可見 0.856 Hz、2.114 Hz 及 3.624 Hz 模態

頻率振形與相對應的全橋檢測所辨識的模態振形中 220 m 至 300 m 位置之橋梁振形均十分相似。

本座橋梁於 2010 年開始進行橋梁的監測作業，均是以正常交通狀況下紀錄各反射規標 20 分鐘的位移紀錄，將各期檢測之尖峰特徵頻率與其差異百分比整理於表 2 中，表中可見歷年來垂直向三個撓曲模態相關的頻率（0.856、2.114、3.624 Hz）監測的頻率變化差異量均在 3.4% 以內，由監測結果顯示本橋之檢測區域雖在監測期間檢測區域經歷四次 5 級以上之地震與 6 個強烈颱風考驗後，對本橋梁之結構之影響不大，顯示本橋梁仍在原設計結構安全範圍內。

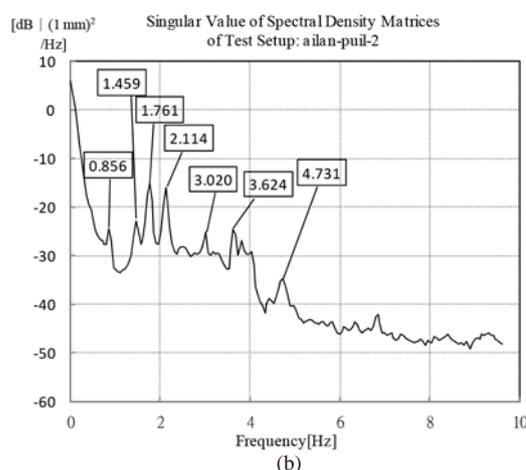
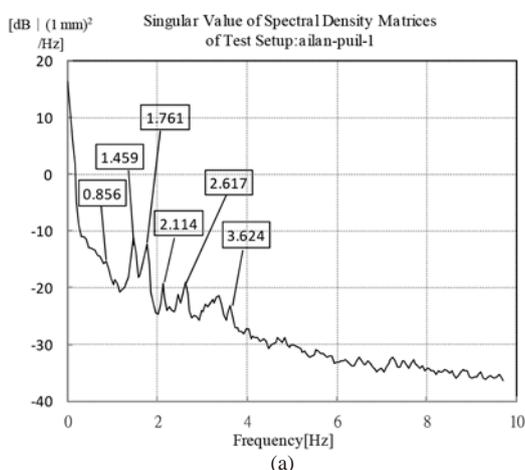


圖 8 各測線之最大奇異值頻譜 (a) 第一測線 (b) 第二測線

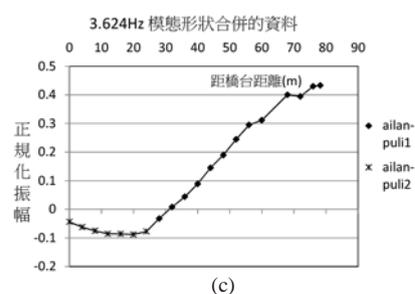
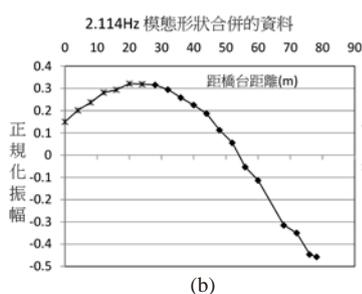
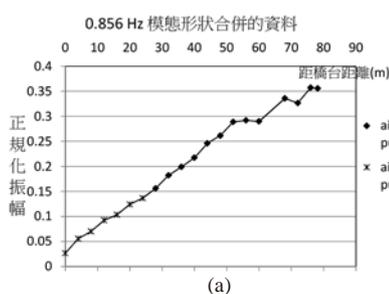


圖 9 本次量測各模態振形 (a) 0.856 Hz, (b) 2.114 Hz, (c) 3.624 Hz

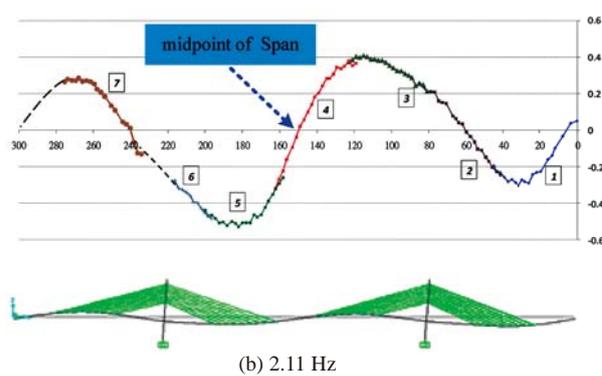
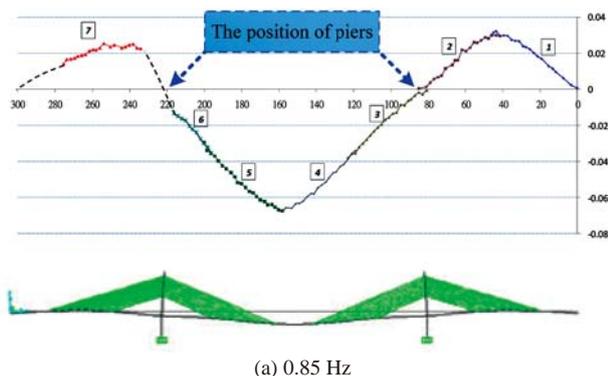


圖 10 微波雷達橋梁全跨量測模態振形與數值模擬比較圖 (a) 0.85 Hz, (b) 2.11 Hz

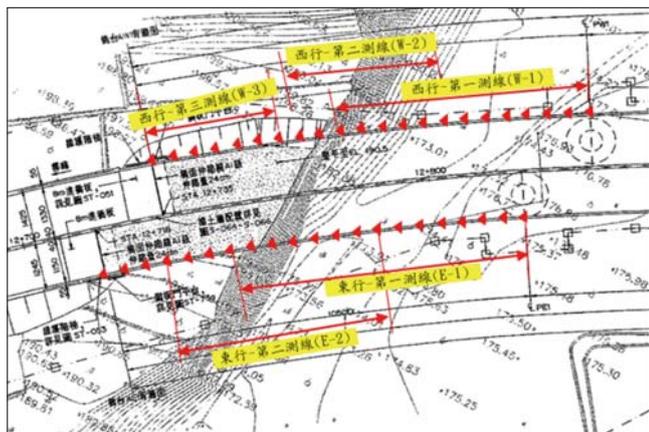


圖 13 角錐反射規標架設位置及測線布設位置示意圖

及 W-2 儀器架設於橋墩所在地平面，測線 W-3 儀器需架設於橋台整平處地面。

現場檢測時首先調整 IBIS 天線的角度，使天線高訊噪比的反應能延伸至最遠的範圍，但亦須考慮儀器

位置與橋頂距離及儀器與反射點之距離比 (h/R) 必須在 $1/10$ 以內又以 $1/5$ 以內較佳，儀器設定之最小空間解析度為 0.5 m ，訊號取樣頻率為 120 Hz 。量測是在正常交通狀況下進行，每一測線均紀錄 20 分鐘正常交通狀況下之垂直位移歷時。

各反射規標位置量測之車行橋梁振動如圖 14 所示，圖 14 為 W-1 測線上距第一橋墩水平距離 15 m 、 30 m 及 45 m 位置的位移訊號，可見當重車經過時會造成較大的位移，距離 45 m 位置反射規標較靠近橋跨中央，位移也最大，可達 -4 mm ，而距離 15 m 規標最大位移僅 -0.8 mm 。

正常交通狀況所造成各反射規標動態垂直位移訊號可再以 ARTeMIS 軟體中 FDD (Frequency Domain Decomposition) 方法加以分析^[1]，以辨識橋面板的振動頻率及模態振形。東行橋 E-1 測線及西行橋測線 W-1 不同位置的位移訊號以 FDD 法求取之最大奇異值頻譜分別顯示於圖 15 中並整理於表 3 與表 4 中，在頻譜可觀察到同橋

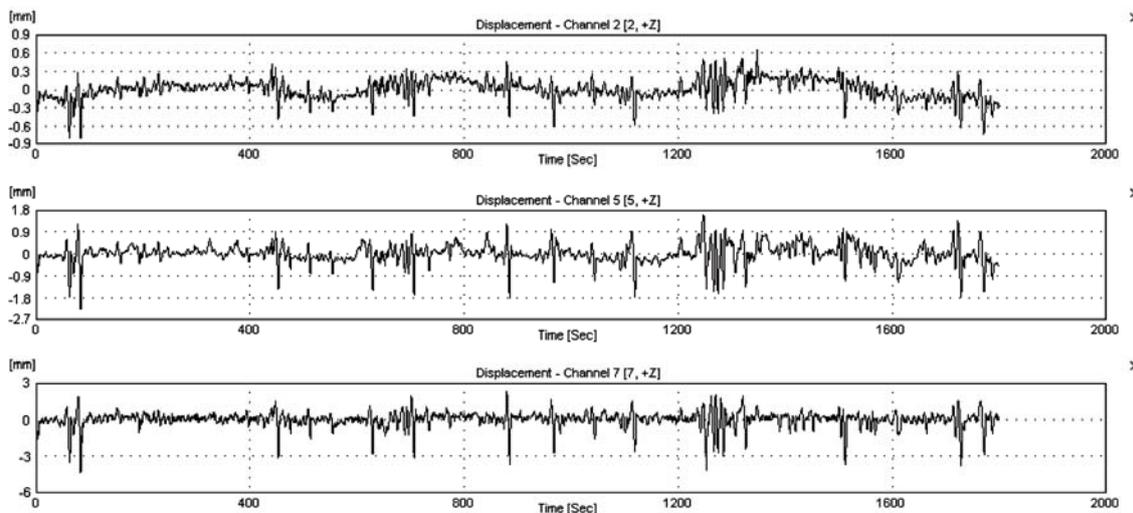


圖 14 W-1 測線距第一橋墩水平距離 15 m 、 30 m 及 45 m 位置的位移訊號

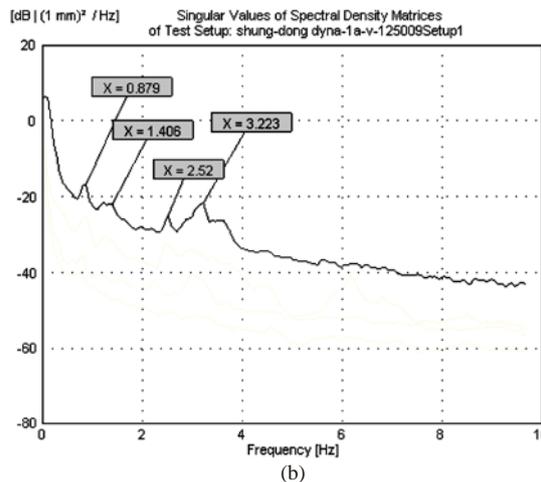
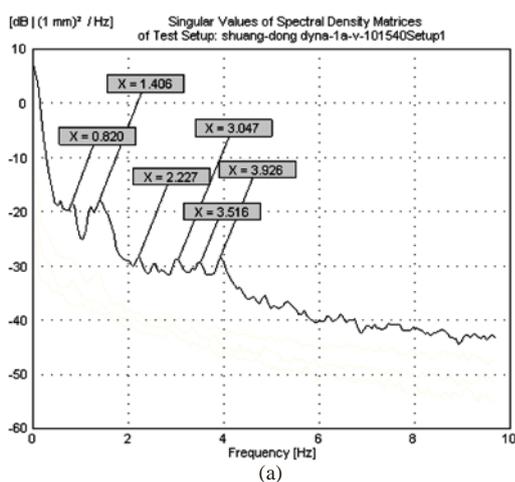


圖 15 最大特徵值頻譜 (a) 測線 E-1 (b) 測線 W-1

跨之最大奇異值頻譜之尖峰頻率一致，但不同橋跨頻譜尖峰頻率略有不同，將同橋梁各測線頻譜中同模態頻率所對應之特徵模態振形相連接，可得到此頻率在檢測範圍橋跨的振形全貌，如圖 16 中不同測線所連結之振形。

再觀察歷年資料中第一撓曲模態之頻率值經五年五次之監測後期監測頻率有逐年下降之現象，最多由第一年之 0.879 Hz 下降至 0.732Hz，頻率下降之百分

比最多達 16.72%，在確認橋梁邊界條件並無明顯之變化狀況下，顯著模態頻率之改變應與橋梁之質量、勁度、預力損失、完整性及邊界條件的變化有關，在近五年來之檢測數據，發現橋梁主要模態頻率有逐年下降之現象，亦代表上述性質有改變，因此建議本橋安裝儀器做長期監測，並進行有限元素分析探求影響模態頻率的關鍵損害部位。

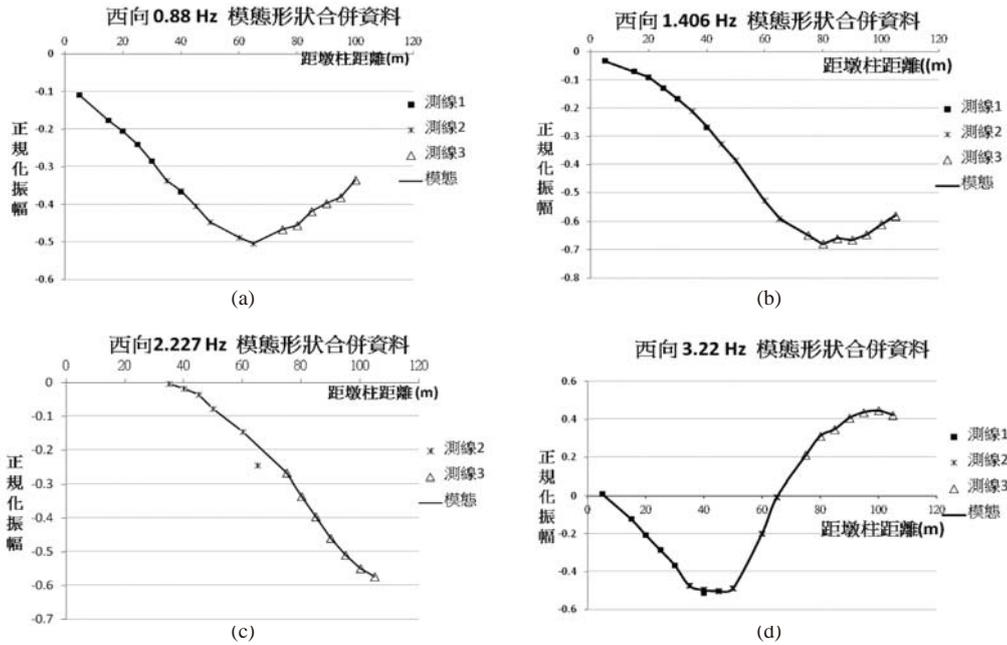


圖 16 西行高架橋可辨識模態振形 (a) 0.879 Hz, (b) 1.406 Hz, (c) 2.227 Hz, (d) 3.22 Hz

表 3 各測線最大奇異值頻譜之模態頻率比較

歷年測線監測		最大特徵值尖峰頻率 (Hz)				
		撓曲模態	扭轉振態	扭轉振態	撓曲模態	扭轉振態
W-1 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	-	3.223	-
	2012 年監測值	0.856	1.359	-	3.120	-
	2013 年監測值	0.805	1.409	-	3.020	3.422
	2014 年監測值	0.800	1.400	2.120	3.020	3.380
	2015 年監測值	0.732	1.302	-	3.174	-
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	-3.34%	-	-3.20%	-
	2013 年監測值差異百分比	-8.42%	0.21%	-	-6.30%	-
	2014 年監測值差異百分比	-8.99%	-0.43%	-	-6.30%	-
	2015 年監測值差異百分比	-16.72%	-7.40%	-	-1.52%	-
W-2 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	2.227	3.223	-
	2012 年監測值	0.856	1.409	2.214	3.171	-
	2013 年監測值	0.805	1.409	2.114	3.070	3.523
	2014 年監測值	0.800	1.420	2.120	3.060	3.480
	2015 年監測值	0.732	1.302	-	3.174	-
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-0.58%	-1.61%	-
	2013 年監測值差異百分比	-8.42%	0.21%	-5.07%	-4.75%	-
	2014 年監測值差異百分比	-8.99%	1.00%	-4.80%	-5.06%	-
	2015 年監測值差異百分比	-16.72%	-7.40%	-	-1.52%	-
W-3 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	2.227	3.146	-
	2012 年監測值	0.856	1.409	2.214	3.171	-
	2013 年監測值	0.856	1.409	2.214	3.171	-
	2014 年監測值	0.800	1.400	2.120	3.080	-
	2015 年監測值	0.732	1.302	-	3.174	-
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-0.58%	0.79%	-
	2013 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-0.58%	0.79%	-
	2014 年監測值差異百分比	-8.99%	-0.43%	-4.80%	-2.10%	-
	2015 年監測值差異百分比	-16.72%	-7.40%	-	0.89%	-

備註：差異百分比計算以 2011 年第一年之監測資料為基底進行計算

表 4 各測線最大奇異值頻譜之模態頻率比較

歷年測線監測		最大特徵值尖峰頻率 (Hz)				
		撓曲模態	扭轉振態	扭轉振態	撓曲模態	扭轉振態
E-1 測線	2011 年監測值	0.820	1.406	-	-	3.516
	2012 年監測值	0.805	1.409	-	-	3.475
	2013 年監測值	0.805	1.409	2.114	3.221	-
	2014 年監測值	0.780	1.400	2.140	3.180	-
	2015 年監測值	0.732	1.465	2.035	-	-
	2012 年監測值差異百分比	-1.83%	0.21%	-	-	-1.17%
	2013 年監測值差異百分比	-1.83%	0.21%	-	-	-
	2014 年監測值差異百分比	-4.88%	-0.43%	-	-	-
E-2 測線	2011 年監測值	0.879	1.406	-	-	3.516
	2012 年監測值	0.856	1.409	-	-	3.473
	2013 年監測值	0.775	1.409	2.063	-	3.322
	2014 年監測值	0.780	1.400	2.120	-	3.360
	2015 年監測值	0.732	1.465	1.953	-	3.174
	2012 年監測值差異百分比	-2.62%	0.21%	-	-	-1.22%
	2013 年監測值差異百分比	-11.83%	0.21%	-	-	-5.52%
	2014 年監測值差異百分比	-11.26%	-0.43%	-	-	-4.44%
2015 年監測值差異百分比	-16.72%	4.20%	-	-	-9.73%	

備註：差異百分比計算以 2011 年第一年之監測資料為基底進行計算

結論

本文中以實務上兩個案例說明微波雷達系統針對橋梁監測的方式，第一個案例中的脊背橋在建造時已有安裝多種監測設備，但在通車後幾年間均損壞不堪使用。因此以微波雷達定期檢測箱型梁身模態頻率及振形，加速度定期檢測外置鋼鍵振動頻率評估鋼鍵預力的方式，亦可持續監測橋梁是否有變異的狀況。第二座橋梁在五年定期監測過程中有顯著模態頻率值下降之狀況，因此建議管理單位在橋上設置長期連續性監測儀器，並進行更進一步的數值模擬分析，來做更進一步之狀況釐清。此技術與傳統監測儀器不同，不需先將監測儀器裝設於橋梁上，可採隨到即測、測後即走之方式針對重點橋梁或非重點橋梁進行監檢作業，此外此技術除結構頻率與模態振形外，亦可於靜態及動態載重實驗中量測橋梁位移，此外本研究團隊亦在進行研發微波雷達系統應用於橋梁監檢作業的新檢測方法應用，以期許針對國內橋梁管理維護與安全評估工作盡一份力量。

參考文獻

- Z. Zhou, L. D. Wegner, and B. F. Sparling, "Structural Health Monitoring of Precast Concrete Box Girders Using Selected Vibration-Based Damage Detection Methods", *Advances in Civil Engineering Volume*
- M. Pieraccinia, F. Parrinia, M. Fratinia, C. Atzenia, P. Spinellib, M. Michelonic, "Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry", *NDT&E International*, 40, 2007, pp. 208-214.
- M. Pieraccinia,*, G. Luzia, D. Mecattia, M. Fratinia, L. Noferinia, L. Carissimib, G. Franchionib, and C. Atzenia, "Remote sensing of building structural displacements using a microwave interferometer with imaging capability", *NDT&E International*, 37, 2004, pp. 545-550.
- M. Pieraccini, F. Parrinia, M. Fratinia, C. Atzenia, and P. Spinellib, "In-service testing of wind turbine towers using a microwave sensor", *Renewable Energy*, 33, 2008, pp.13-21.
- M. Pieraccini, M. Fratini, F. Parrini, G. Macaluso, and C. Atzeni, "Highspeed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures." *Electronic Letter*, 40, 2004, pp.907-8.
- Gentile C., Brnardini G., and Ricci P. "A New Interferometric Radar for Full-Scale Testing of Bridges: 2. Ambient Vibration Tests and Operational Model Analysis", *Proc. 12th Int. Conf. on Structural Faults & Repair (SF&R'08)*, Edinburgh, Schotland.
- Huang N.E, "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary time Series Analysis," *Nasa*. (Manuscript), 1996.
- Brincker R., Zhang L. and Andersen P., "Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition," *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas, USA. Park, K.T., Kim S.H., Park H.s., Lee K.W., "The determination of bridge displacement using measured acceleration", *Engineering Structures*, Vol. 27, pp. 371-378 (2005)。
- Zhu X.Q., Law S.S., "Wavelet-basd crack identification of bridge beam from operational deflection time history", *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2006, pp. 2299-2317.
- Yan Z., Miyamoto A. and Jiang Z. "Frequency slice algorithm for model signal separation and damping identification", *Computer and Structures*, 89, 2011, pp. 14-26.



第九屆（2015）公共工程非破壞檢測 技術研討會

鄭家齊／朝陽科技大學營建工程系教授

摘要

第九屆公共工程非破壞檢測研討會 10/29（四）、10/30（五）兩天於台北國家地震工程研究中心舉辦，並成功圓滿落幕。

中國土木水利工程學會非破壞檢測委員會及台灣非破壞檢測協會以協助政府推動經濟建設、加速提升工業及工程品質、建立非破壞檢測制度及促進破壞檢測技術之研究發展與交流為宗旨。公共工程非破壞檢測技術研討會自 1999 年以來，已經成功舉辦 8 屆，對公共工程品質管理與安全維護，提供一個有效的經驗與技術交流平台。

本屆研討會以「公共工程非破壞檢測、監測與診斷」作為主題，並訂定三個子主題，分別是橋梁檢測、監測與診斷，管線檢測以及水利設施之檢測與監測。透過學術界及工程實務在學及實際運用的現況介紹，提供業界及各工程設計、施工、檢測評估養護工作執單位對於土木非破壞檢測技術之功能與限制有一確切的認識，以確實達到控制工程品質及有效管理之目的，進而保證其符合維護設計及需求的安全性與服務性。

本次研討會報名人數達 115 名，邀請國家地震工程研究中心主任張國鎮教授開幕致詞。研討會共安排了 15 個場次的專題演講，香港理工大學倪一清教授與香港技術顧問黃啟遠博士，分別對中國高鐵橋梁最新的監測系統開發計畫以及香港主要橋梁腐蝕監測方法做精闢的演說。

國內學者邀請到王仲宇教授、彭朋畿博士、張嘉峰博士與李政寬博士演講主題為橋梁檢測、監測與診斷。

管線檢測議題由江支弘教授「管線非破壞檢測與

完整性評估技術」與楊旭光教授「導波在管線檢測的應用」演說。水利設施之檢測與監測則由許耿蒼博士、楊明德教授、林詠彬博士、林宜清教授、林志平教授、胡志昕總經理與鄭家齊教授等 7 位學者主講。



國家地震工程研究中心主任張國鎮教授致歡迎詞



倪一清教授專題演講



黃啟遠博士專題演講



王仲宇教授專題演講



彭朋畿博士專題演講



張嘉峰博士專題演講



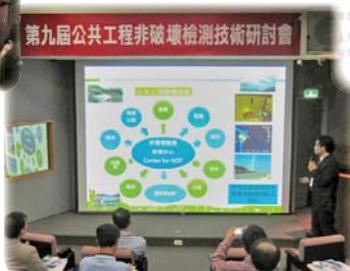
李政寬博士專題演講



江支弘教授專題演講



楊旭光教授專題演講



許耿蒼博士專題演講



楊明德教授專題演講



林詠彬博士專題演講



林宜清教授專題演講



林志平教授專題演講



胡志昕總經理專題演講



鄭家齊教授專題演講



SOKKIA

子彈機

GCX2



- 雙頻多星GNSS RTK接收儀
- 高達226頻道，具備衛星訊號優化技術
- 多通遠距離藍芽®RTK技術

GCX2
GNSS Receiver



- 內建8G記憶體，全機重量(含電池)僅375g

The lightest GNSS RTK Network Rover



Civil-NET

雙星eGPS差分訊號雲端服務網

唯一經國家認證的eGPS系統

唯一國際上承認的eGPS系統

唯一通過工研院量測中心-【精度與效能】

認證的【網路RTK】服務系統

- 絕佳 $< \pm 1\text{cm}$ 定位精度，30秒內收斂，經濟實惠的收費

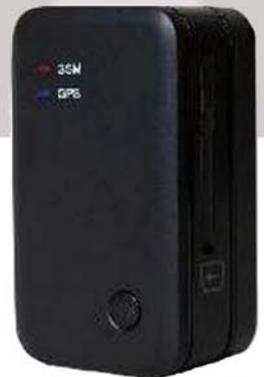


GN-201 秘書寶

預載Civil-NET差分定位服務，定位精度 $< \pm 1\text{m}$

遊園、登山、花博、風景區、逛街、尋人或調查... 等

皆可由手機APP查詢到精準位置



森泰儀器有限公司
CENTURY INSTRUMENT

地址:台中市西區台灣大道二段105號12樓
TEL:(04)2301-1000 FAX:(04)2301-0099
www.sokkia.com.tw



茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登地位	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3期9折， 4期以上8.5折	

刊登月份：

43.2 43.3 43.4 43.5 43.6 44.1 共 次
(4月) (6月) (8月) (10月) (12月) (2月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱： (請蓋公司印)

商號

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: mandy@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款 帳號	0	0	0	3	0	6	7	8	金 額 新台幣 (小寫)	仟	萬	拾	萬	仟	佰	拾	元
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	--------------------	---	---	---	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

報名費
 繳納 _____ 研討會
報名費 _____ 元

繳納會費
 常年會員年費 1,500元 (土木水利紙本)
 常年會員年費 1,200元 (土木水利電子版)
請留 email: _____
 初級會員年費 300元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期
 新台幣 1,800元
自第 _____ 卷第 _____ 期起，_____ 年期雙月刊 _____ 份

訂閱中國土木工程學刊，一年四期
 國內·會員 新台幣 800元
 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元
 國外·個人 美金 40元
 國外·機關團體 美金 100元
自第 _____ 卷第 _____ 期起 _____ 年期學刊 _____ 份

收款 戶名	社團法人中國土木工程學會	
姓名	寄 款 人	
地 址	主管：	
電 話	經辦局收款戳	

姓 名	
地 址	□□□□—□□
電 話	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款 帳號戶名	
存款 金額	
電腦 紀錄	
經辦 局收款戳	

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓名		款別 注：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費， <u>入會費一人僅需繳交一次</u>	報名費 <input type="checkbox"/> 繳納_____研討會 報名費_____元
會員證號碼			繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,500元 (土木水利紙本) <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元 (土木水利電子版) 請留 email: _____
身分證號碼			<input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
卡別 <input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 新台幣 1,800元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
信用卡卡號			訂閱中國土木水利工程學刊，一年四期 <input type="checkbox"/> 國內·會員 新台幣 800元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 40元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 100元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
信用卡簽名欄最後三碼			白天聯絡電話
信用卡有效期限 (月/年)			通信地址
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

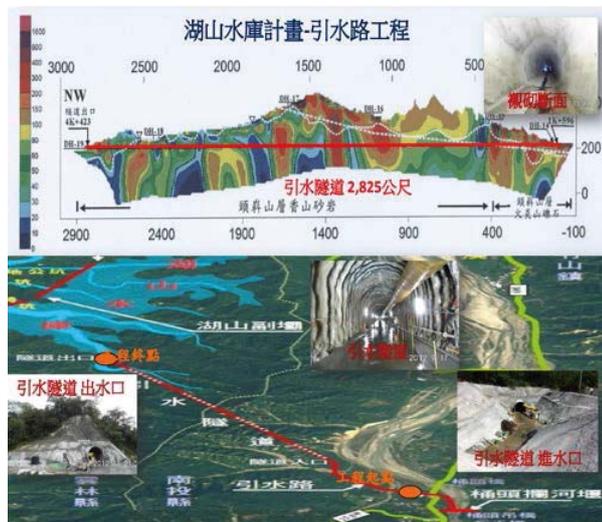
交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)

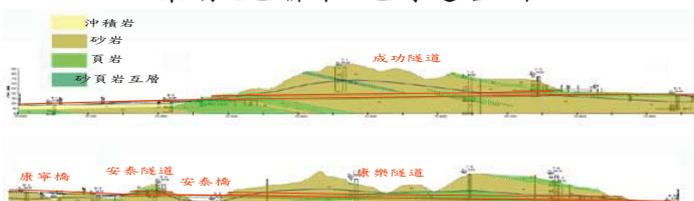


【多元服務 ● 基業長青】

64年創立至今，三十多年來秉持著基本專業，建立完善品質制度。



東湖地區聯外山區線道路工程



專業項目

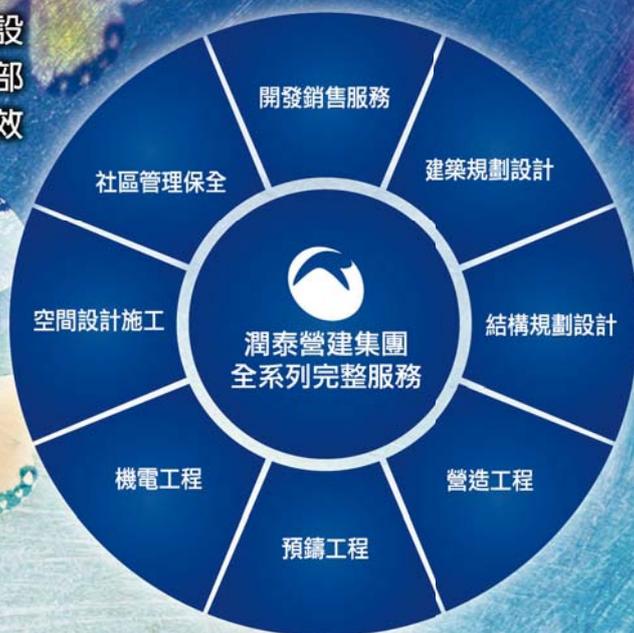
- 古蹟修護、土木建築、高級別墅
- 工業廠房、辦公大樓、隧道工程
- 建築廢棄物處理工程

地址：11490 臺北市內湖區民權東路六段 160 號 10 樓

網址：<http://www.for-tune.com.tw> / 電話：(02)2796-3949 / 傳真：(02)2791-4241

潤泰營建團隊 跨時代整合服務

潤泰將營建工程中所需的專業公司，包括開發/設計/建築/結構/機電/室內工程/保全管理等，全部設立於體系內，更能發揮垂直分工與水平整合的效益，是營建業少見的全方位工程團隊。



潤泰營建團隊

台北市 中山區 八德路二段308號10樓
(02)8161-9999 <http://www.ruentex.com.tw>