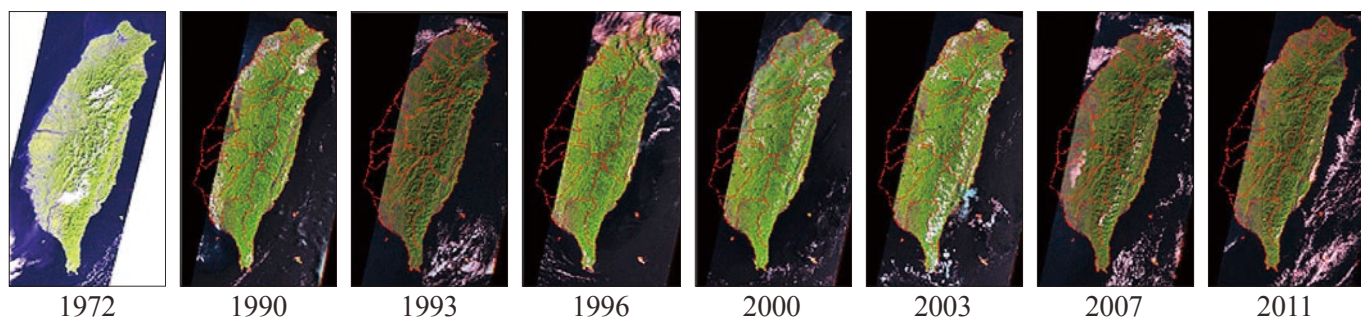
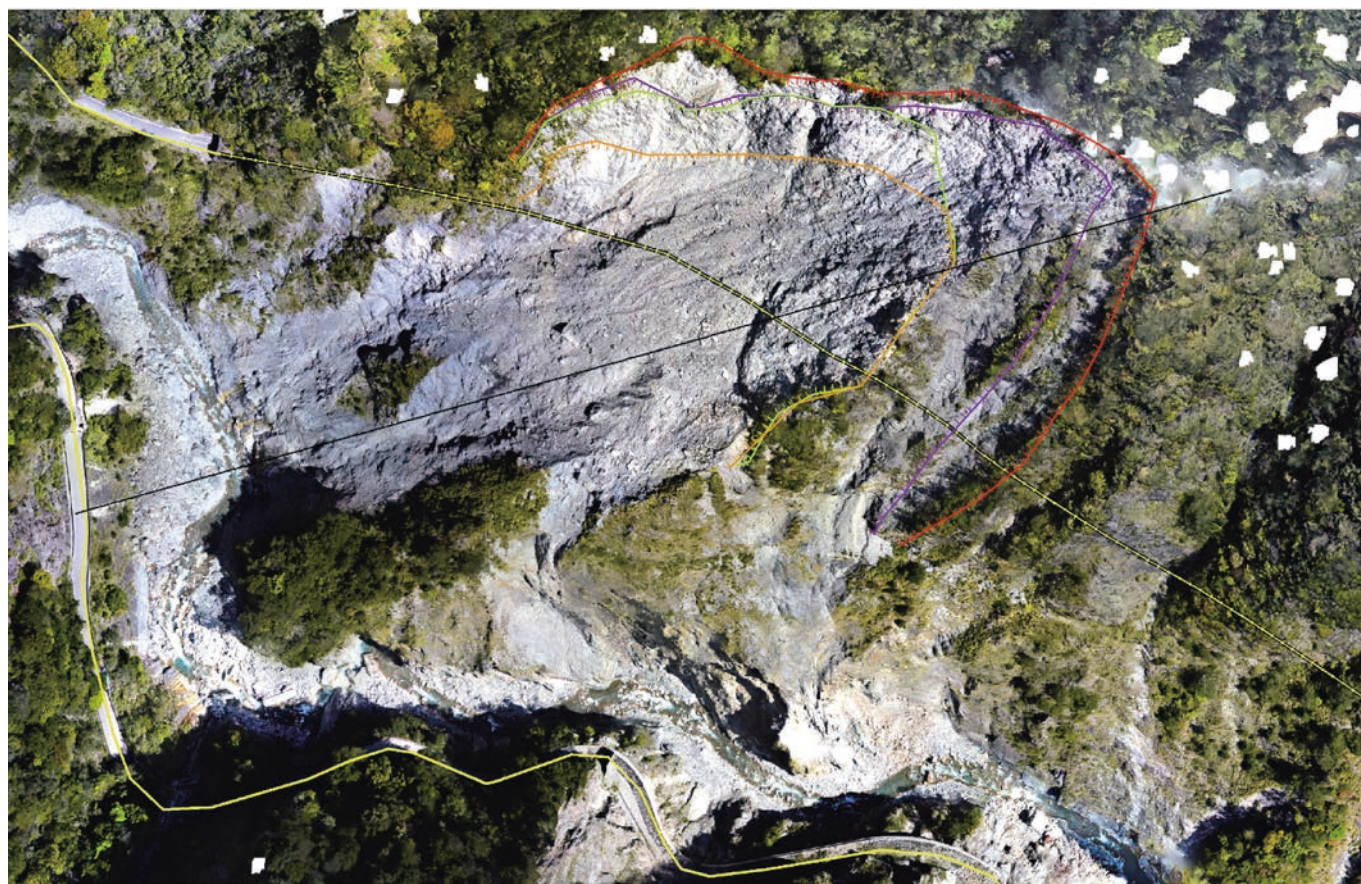


土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

June
2018

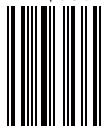


ISSN 0253-3804



9 770253 380006

NT\$350



Volume 45, No. 3

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

工程報導

學會資訊看板

木鐸集

土木工程的人文關懷

新世代空間
資訊技術於
土木水利工程之
整合應用

專輯

中國土木水利工程學會

107年各獎項評選公告

社團法人中國土木水利工程學會 公告

機關地址：100 台北市仁愛路 2 段 1 號 4 樓
聯絡人：程崑裕
聯絡電話：(02) 2392-6325#21
傳真：(02) 2396-4260

日期：中華民國 107 年 5 月 23 日
字號：(23) 土木發字第 1070078 號
主旨：公告辦理本學會 107 年度「工程獎章」受獎候選人提名推薦。
依據：本學會「工程獎章」頒發辦法。

公告事項：

- 一、為獎勵對土木水利工程學術或事業有特殊貢獻之會員，本學會特訂定「土木水利」工程獎章頒發辦法(如附件)。
- 二、自即日起至七月三十一日止，為本年度「土木水利」工程獎章受獎候選人提名推薦日期。
- 三、推薦書須有會員五人連署推薦。
- 四、工程獎章計五類：終身成就、學術研究、工程事業、優良設計及優良施工獎。推薦書應載明推薦之工程獎章種類。
- 五、候選人推薦書及候選人相關資料乙份，請以掛號郵寄至台北市仁愛路二段一號四樓本學會收，並請註明「土木水利」工程獎章候選資料(截止日期：七月三十一日，郵戳為憑)。
- 六、空白推薦書如附件，如需電子檔請上本學會網站(<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=6942>)下載。
- 七、上述榮譽將於 107 年年會中(訂於 107 年 12 月 8 日(星期六)假高雄市「高雄運籌會館」舉辦)，頒發金質獎章。

理事長



工程獎章推薦 (截止日期：107 年 7 月 31 日)

社團法人中國土木水利工程學會 公告

機關地址：100 台北市仁愛路 2 段 1 號 4 樓
聯絡人：程崑裕
聯絡電話：(02) 2392-6325#21
傳真：(02) 2396-4260

日期：中華民國 107 年 5 月 23 日
字號：(23) 土木發字第 1070081 號
主旨：公告辦理本學會 107 年度「程禹傑出工程師獎」候選人提名推薦。
依據：本學會「程禹傑出工程師獎」設置辦法。

公告事項：

- 一、為紀念程禹先生，並表彰本學會從事土木與水利等工程實務優異之工程師會員，本學會特訂定「程禹傑出工程師獎」設置辦法(如附件)。
- 二、自即日起至七月三十一日止，為本年度「程禹傑出工程師獎」候選人提名推薦日期。
- 三、候選推薦須由任職或曾任職之服務單位及本學會理事或監事三人以上推薦。
- 四、推薦表及相關資料乙份，請以掛號郵寄至台北市仁愛路二段一號四樓本學會收，並請註明「程禹傑出工程師獎」候選推薦(截止日期：七月三十一日，郵戳為憑)。
- 五、空白推薦表如附件，如需電子檔請上本學會網站(<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=6944>)下載。
- 六、上述榮譽將於 107 年年會中(訂於 107 年 12 月 8 日(星期六)假高雄市「高雄運籌會館」舉辦)，頒發獎牌及獎金。

理事長



程禹傑出工程師獎推薦 (截止日期：107 年 7 月 31 日)

社團法人中國土木水利工程學會 公告

機關地址：100 台北市仁愛路 2 段 1 號 4 樓
聯絡人：程崑裕
聯絡電話：(02) 2392-6325#21
傳真：(02) 2396-4260

日期：中華民國 107 年 5 月 23 日
字號：(23) 土木發字第 1070080 號
主旨：公告辦理本學會 107 年度榮譽會員候選人提名推薦。
依據：本學會「會士」設置辦法。

公告事項：

- 一、為表彰本學會會員在土木、水利工程及相關工程領域之傑出工程人員及傑出學者，並對本學會有重大貢獻者，本學會特訂定「會士」設置辦法(如附件)。
- 二、自即日起至七月三十一日止，為本年度會士候選人提名推薦日期。
- 三、推薦書須由會士五人以上連署推薦。
- 四、請填具推薦書及會士資料表乙份，請以掛號郵寄至台北市仁愛路二段一號四樓本學會收，並請註明「會士」候選人提名資料(截止日期：七月三十一日，郵戳為憑)。
- 五、空白推薦書暨會士資料表如附件，如需電子檔請上本學會網站(<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=6939>)下載。
- 六、上述榮譽將於 107 年年會中(訂於 107 年 12 月 8 日(星期六)假高雄市「高雄運籌會館」舉辦)，頒發當選證書。

理事長



會士推薦 (截止日期：107 年 7 月 31 日)

社團法人中國土木水利工程學會 公告

機關地址：100 台北市仁愛路 2 段 1 號 4 樓
聯絡人：程崑裕
聯絡電話：(02) 2392-6325#21
傳真：(02) 2396-4260

日期：中華民國 107 年 5 月 23 日
字號：(23) 土木發字第 1070079 號
主旨：公告辦理本學會 107 年度榮譽會員候選人提名推薦。
依據：本學會「榮譽會員」舉薦辦法。

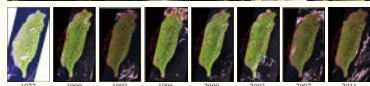
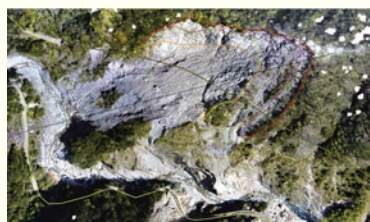
公告事項：

- 一、為尊崇對土木水利工程事業、學術或教育方面有公認卓越成就之傑出人員，本學會特訂定「榮譽會員」舉薦辦法(如附件)。
- 二、自即日起至七月三十一日止，為本年度榮譽會員候選人提名推薦日期。
- 三、推薦書須有會員二十人以上之連署。
- 四、填具推薦書乙份，並檢附論文或著作、研究報告或事蹟報告，以郵政掛號寄至台北市仁愛路二段一號四樓本學會收，並請註明「榮譽會員」舉薦候選(截止日期：七月三十一日，郵戳為憑)。
- 五、空白推薦書如附件，如需電子檔請上本學會網站(<http://www.ciche.org.tw/wordpress/?p=6946>)下載。
- 六、上述榮譽將於 107 年年會中(訂於 107 年 12 月 8 日(星期六)假高雄市「高雄運籌會館」舉辦)，頒發當選證書。

理事長



榮譽會員推薦 (截止日期：107 年 7 月 31 日)



上：東南部某案例邊坡歷史航照與 UAV 空拍相片分別產製 DSM 後製作正射影像，可供判釋分析邊坡運動歷程

下：1972 年至 2011 年臺灣地區假色影像（WRS Path: 117, Row: 43-45）

土木水利半月集

先進工程

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

永續發展

- 永續發展
- 水資源工程
- 海洋工程
- 景觀工程
- 能源工程
- 工程美化
- 國土發展
- 大地工程
- 環境工程
- 綠營建工程
- 天然災害防治工程
- 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
- 土木史
- 大學教育
- 學生活動
- 終身學習
- 工程教育認證
- 技專院校

學會活動

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

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利半月刊

分會

- 土水學會
- 土水中部分會
- 土水南部分會
- 土水東部分會

土木水利

社團法人中國土木水利工程學會會刊



發行人：王炤烈

出版人：社團法人中國土木水利工程學會

主任委員：劉格非（國立臺灣大學土木學系教授、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定價：每本新台幣 350 元、每年六期共新台幣 1,800 元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥 00030678 號 社團法人中國土木水利工程學會

會址：10055 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

社團法人中國土木水利工程學會第二十三屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：王炤烈

常務理事：陳仲賢 楊偉甫 歐來成 歐善惠

理事：朱旭 余信遠 吳瑞賢 宋裕祺 沈景鵬 林呈 林其璋
胡宣德 胡湘麟 高宗正 張荻薇 許泰文 陳彥伯 黃炎龍
廖學瑞 劉沈榮 劉恒昌 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：李元唐 李建中 周功台 陳清泉 楊永斌 薛春明

中國土木水利工程學會任務

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。

中國土木水利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

「新世代空間資訊技術於土木水利工程之整合應用」專輯 (客座主編：韓仁毓教授兼副系主任)

專輯引言：新世代空間資訊技術於土木水利工程之整合應用	韓仁毓	3
雷達衛星輔助工程環境監測 — 開放資料的潛力與機會	曾國欣／蔡富安／李睿綺／張中白	4
應用UAV影像於河岸基腳保護工辨識之研究	林彥廷／張喆／陳思恩／李豐佐／賴進松／韓仁毓	13
無人飛行載具發展現況與未來趨勢	楊明德／蔡慧萍	23
以傳奇衛星探索大地的歷史傷痕 — 山坡地長期崩塌地監測	蘇元風	30
以數值地形及三維地質資料評析石門水庫匹亞崩塌地	蕭震洋／李易叡／周立生	34
多元整合空間資訊技術於地層下陷監測與防治之應用	洪偉嘉／陳怡安／黃金維	45
結合雷射掃描影像與BIM技術進行隧道安全與管理	張嘉峰／廖惠菁／彭念豪／莊子毅	51
精細三維測繪世代的岩盤工程地質調查展望	王泰典	57

本鐸集：土木與文明

土木工程與文化 (三) 土木工程的人文關懷	洪如江	67
-----------------------	-----	----

工程報導

非破壞性探勘技術應用於道路沉陷緊急搶修之探討 — 以鄭州路、環河北路口事故為例	彭振聲／楊明祥／張凱堯／邱志榮	74
--	-----------------	----

學會資訊看板

公告四則：工程獎章、程禹傑出工程師獎、會士、榮譽會員 7/31截止推薦	封面裡
4/12 2018 水工程國際研討會	82
4/16 福州水利學會來訪	86
5/4 花蓮地震之省思與探討研討會	86
5/18-20 2018 亞太城市建設與管理實務論壇	83
6/1 2018 台日交流研討會	84
6/13 山東水利學會參訪中興顧問公司	86
6/15 潤泰水泥企業參訪	86

廣告特搜

中興工程顧問股份有限公司 — 正派經營・品質保證・追求卓越・創新突破	封底裡
台灣電力公司 — 在供電之外 努力	封底



新世代空間資訊技術於 土木水利工程之整合應用

專輯引言

專輯客座主編 韓仁毓／國立臺灣大學土木工程學系 教授兼副系主任

在大數據的時代潮流之下，如何更智慧、且更有效率的精準掌握資訊，以提升工程規劃、建設、營運以及維護等任務之品質，為現代土木水利工程專業人員所需面對的關鍵課題。以人為喻，一個聰明的人，必須具備能聽能看能讀等資訊感知能力，而一項成功的工程應用任務，則需仰賴良好的資訊感測收集與分析技術，空間資訊觀測技術便在此處扮演關鍵的角色。而近年來隨著新世代空間觀測技術的進步，其對於土木水利工程之應用效益也漸漸變得廣泛而顯著。

本專輯收錄來自國內各教學研究單位、政府機構以及相關產業文章共八篇，數量雖然不多，但在技術層面上涵蓋了無人飛行載具、遙感探測影像、

衛星定位、干涉合成孔徑雷達和光達掃描等新式測繪工具，而在應用主題方面則包括集水區坡地崩塌、河岸防波堤變遷監測、岩盤工程地質及隧道襯砌調查、沿海地層下陷與防治等廣泛土木水利重要議題。藉由本特刊文章各作者的無私分享，可讓土木水利人員瞭解新世代空間資訊技術之特性與可應用範圍，不僅滿足相關應用任務對於高品質空間觀測數據之需求，並希望觸發思考更多樣化的應用可能。而展望可預見的未來，搭配人工智慧技術的漸次成熟，新式空間資訊技術所取得低成本且高品質的大量空間觀測數據，預期將會成為土木水利工程智慧化、自動化發展的關鍵推力之一。📱



雷達衛星 輔助工程環境監測 — 開放資料 的潛力與機會

曾國欣／國立中央大學太空及遙測研究中心 助理教授、土木工程學系 合聘助理教授

蔡富安／國立中央大學太空及遙測研究中心 教授兼中心主任、土木工程學系 合聘教授

李睿綺／國立中央大學地球科學學系 碩士班研究生

張中白／國立中央大學太空及遙測研究中心 教授、地球科學學系 合聘教授

臺灣工程環境受制於複雜的地質構造與土地利用，地表受到地震、斷層活動與地層下陷等變化影響，於短中長期對工程設計、施作與後續維護等全生命週期的永續經營造成不確定因素，因此具有時空上經濟效益的衛星觀測模式逐漸用以輔助工程環境上許多參數的監測。衛星遙測技術經歷多年的研究與驗證，資料品質日趨穩定且傳輸交流迅速，已逐步邁向營運化與實用性的導向。以光學為主的被動式遙測已在國土利用、分類與監測相關領域成為不可或缺的基礎資料源，而以雷達為主的主動式遙測技術也隨著資料開放的趨勢，成為系統性大範圍監測土地利用與地表形變的潛在工具。本篇文章將介紹利用歐洲太空總署於 2014 及 2016 年發射的 Sentinel-1A/B 兩顆雷達衛星，利用再訪影像中不同相位所組成的短基線合成孔徑雷達干涉技術（Small Baseline Subset Differential Synthetic Aperture Radar, SBAS DInSAR）分析，可用以監測臺灣西南平原的地層下陷速度、範圍與週期。後續經由全球衛星導航定位系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）連續追蹤站的點狀地面位移校正雷達成果，可填補地面觀測密度不足的地區，對地表變動的即時監測與長期趨勢預估提供了低成本且高效益的新選項。

前言

土木工程環境上需監測的項目繁多，其中包含地表錯動與沈陷等非均質變化。臺灣因為複雜的地質構造以及高密度土地利用，導致部分地區產生差異位移，長期累積對於人為建物造成巨大風險，因此若能建立經濟、有效的監測機制，對於工程設計的事前評估與後續補強，將能提供額外的輔助資訊。目前對於工程環境如斷層活動與地層下陷等參數掌握，主要透過一般現地工址調查、區域水準測量以及較大範圍的全球衛星導航定位系統（GNSS）連續站點狀監測。然而上述方法多在精度、範圍與效益中取捨，時空上高

密度的資料較難透過傳統方法呈現，因此透過衛星觀測穩定再訪、大幅寬成像的資料特點，可望成為彌補季節性以上高頻率週期與空間覆蓋空缺的可行方法。

細論臺灣的複雜地質環境，因其位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交界處，受到板塊長期且持續的擠壓，地表破裂面形成斷層，並導致頻繁的地震活動。活動斷層的定義為過去十萬年內曾活動，未來可能再度活動的斷層，為此中央地質調查所於 2010 年普查了全臺斷層位置，進而數化本島上總共 33 條活動斷層，其中 20 條位於臺灣西南部（苗栗以南）。這 20 條斷層之中，13 條為第一類活動斷層（距今一萬年內曾發生

錯移，圖 1 紅色實線），7 條為第二類活動斷層（距今十萬年內曾發生錯移，圖 1 紅色虛線）。從 1736 年至 1999 年，14 個死亡人數超過百人的地震，有 12 個位於臺灣西南部^[1]。而斷層活動亦常造成工程上複雜度，如近年因旗山及龍船斷層造成國道三號中寮隧道的錯動，即是利用 GNSS 監測輔助維護補強的案例。若能持續監測斷層活動緩慢的變化進程，將有助於防患未然，避免潛在的工程災害。

此外，另一個地表形變較明顯的地方為西南部平原。因為彰化、雲林、嘉義一帶為密集農業區，種植灌溉需要大量用水，加上沿海地區魚塢養殖的水源需求，地層下陷是西南平原嚴重的工程災害成因。由於降雨時間及空間上分布不均，水庫蓄水量有限且平地可用的水資源不足，迫使居民必須抽取地下水以補足地面上可用水的短絀，在超量抽取地下水的狀況下，造成持續性的地層下陷，後續勢必導致土地鹽化、危害建築物、影響交通設施，以及地上及地下管路破壞等。雖然近年水利法透過劃定地下水管制區限制抽取與開發，然而對於長期下陷的趨勢是否真能有效減緩，仍須透過持續性的監測加以評估。

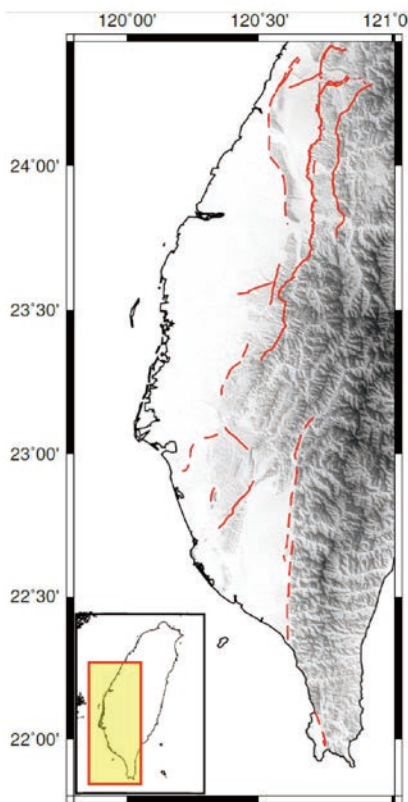


圖 1 臺灣西南部活動斷層分布。紅色實線為第一類活動斷層，紅色虛線為第二類活動斷層。

綜合上述，不論是斷層滑移與地層下陷的差異速率變化，甚或是事件型如地震引發的同震、震後位移，都可利用衛星影像加以量化短期變動與長期趨勢，而在多樣化衛星觀測方法中，又以合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）不受天氣環境限制的產品較能提供地表變遷資訊。透過雷達干涉圖提供面狀的地表變形監測，搭配臺灣密集的 GNSS 測站資料，能有效掌握工程環境上不同尺度的變化。過往受限於雷達資料成本較高且不易處理、分析，少有大範圍且系統性的使用，近年受惠於各國衛星資料開放政策，越來越多高品質的資料得以用於環境監測，並搭配地理資訊系統進行疊圖與環域分析，因此衛星觀測也逐漸成為決策單位必備的基礎資料之一，針對不同的標的與項目可彈性擇定所需的產品與監測頻率。

衛星資料應用面向

遙感探測（簡稱遙測）衛星根據其接收電磁波的能量源分為被動與主動兩類。被動式多以太陽輻射為能量源，針對地表或大氣中反射特定波長的電磁波強度進行物質分類、量化，其拍攝上受限於當地時（local time）的日間且容易受到雲霧遮蔽影響，單一顆重複軌道衛星可能須時一個月以上才能清楚地收集到地表狀態。被動式遙測主要透過類似光學攝影感測元件的方式成像，在不同波長的頻道如可見光、近紅外、中遠紅外，乃至於熱紅外線進行能量解析，進而針對該像元所在的地表位置進行地物識別與變遷分析。因為拍攝時缺乏傳遞時間與角度等測距資訊，除非在特殊需求下利用帶有傾角的拍攝與航空攝影測量中立體像對概念，才能將地表三維模型建立，且精度多限制在公尺級以上。

相對於依賴陽光的被動式感測器，主動式衛星多以雷達為能量源，透過本體酬載所產生的訊號，計算發射、反射至接收之間的時間差或訊號相位，並用以獲得空間中距離與反射面粗糙度等幾何訊息。主動式衛星利用數公分至數十公分波長的微波訊號傳遞，受到大氣狀態的影響輕微，因此可提供相當規律且精準的地表形變資訊。商用雷達衛星可追溯至歐洲太空總署（European Space Agency, ESA）於 1991 年 7 月發射的 ERS-1 衛星，利用 C 波段（波長 5.6 公分）

垂直極化 (VV) 雷達偵測 35 天間隔的再訪影像。後續 ERS-2 自 1995 年起在同樣軌道參數下提供延續性的時間序列，同年加拿大太空局也開始發展 C 波段的 Radarsat 系列。2002 年 ESA 發射 Envisat 衛星並搭配 ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) 酬載，除了以相同的 C 波段取像，更增加了不同水平垂直偏極 (polarization, 如 VV、VH、HV、HH) 以利地物判釋。爾後，日本地球觀測計畫亦在 2006 年發射了 Advanced Land Observing Satellite (ALOS) 衛星，使用 PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) 的 L 波段訊號，利用其長波長地物穿透性較佳的特性，對於植被覆蓋區的地表高程模型 (Digital Terrain Model, DTM) 與變化有較完整的資訊。上述地球資源衛星在二、三十年的進程中，累積了眾多地表觀測應用，不論在陸地的地物判釋、變遷分析、高程潛變，乃至於海面的海冰監測、污染控制等，隨著演算方法精進與資料源品質提升，衛星資料已從試驗階段逐步邁入營運式 (operational) 的品質要求，對於環境監測上也提供了可靠的參考資訊。

雷達衛星開放資料

雷達衛星因機構複雜且造價高昂，不受天氣影響而品質穩定，又可提供回波強度、極化反射特性與相位測距等多重物理參數，因此向來影像單價偏高，若是有任務型拍攝要求 (Tasking)，則五十公里見方的單張影像動輒花費一、二十萬新台幣，與次米級地表解析度的光學影像相當。且雷達影像所感測的物理參數不如可見光影像一目了然，往往需要有經驗的使用者協助資料處理與判讀，因此在影像的取得性與使用頻率上遠遠不及光學衛星。然而自 2014 年起，ESA 發射了 Sentinel-1A 雷達衛星，自此逐漸改變了遙測領域衛星使用上的習慣。Sentinel 群星任務為 ESA 哥白尼地球觀測計畫中多年期的星系，設計中包含了以雷達為主的 Sentinel-1 系列，以 10 公尺光學解析度為主的 Sentinel-2 系列，針對雷達測高與水色觀測的 Sentinel-3/-6 系列，以及以大氣與氣膠為主的 Sentinel-4/-5 系列。在這個星系設計中每個系列都有二至四顆在軌道上平均間隔的衛星，因此能有效縮短再訪週期，更重要的是，哥白尼計畫多數產品皆配合資

料開放政策，無償提供給使用者，並提供適當的免費軟體與線上教學，意在推廣衛星資料的普及度，鼓勵製作加值產品進而造福相關產業與應用端。

在 Sentinel 系列中最受人矚目的莫過於提供雷達衛星的無償影像。Sentinel-1A 搭載 12 公尺長的 C 波段雷達天線，在寬干涉模式 (Interferometric Wide swath mode) 拍攝下於軌道沿徑對 250 公里幅寬的地表可產製 5×20 公尺解析度的網格影像。其軌道設計為 12 天再訪週期，因此在 2016 年 4 月 Sentinel-1B 成功發射後，雙星能提供每六天、短空間基線 (兩次拍攝過程衛星位置的距離)、近全球同區再訪的週期性影像。有別於以往雷達任務動輒一個月以上的取像間隔，干涉像對內常因地物變遷而降低同調性 (coherence)，造成像對內相位落差過大而無法評估變動，又或是地表週期性與一次性訊號的交疊造成混淆。Sentinel-1 的高品質、低成本影像帶來了突破性的發展潛力，世界各國紛紛開始利用該衛星對於高頻率的地表變動建立完整的監測機制。

大尺度工程環境監測

在臺灣西南部地區利用合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometry SAR, InSAR) 觀測斷層活動已有為數不少的研究文獻。因為雷達衛星成像時需要有良好的反射點作為地表變形參考點，因此以臺南台地為例，由於都市建築物密度高，提供穩定的表面與強反射，增加兩幅影像之間的同調性並獲得良好干涉影像，進而能解算高解析度的地表變形資訊。根據前人研究，在 1996 ~ 2000 年間利用 ERS 衛星影像搭配合成孔徑雷達差分干涉技術 (Differential SAR Interferometry, DInSAR) 顯示臺南台地抬升作用明顯^[2-4]，並驗證該現象與周遭鄰近斷層的活動相關。而在 Huang *et al.*^[5] 的研究中，其結果與 Fruneau *et al.*^[2] 以及 Huang *et al.*^[3,4] 相當吻合，也證實臺南台地在地質上的輕微抬升現象。此外，Huang *et al.*^[5] 的研究中利用 ERS 及 Envisat 衛星分別截取 1995 至 2001 及 2005 至 2008 的影像，計算每年平均視衛星方向 (Line of Sight, LOS) 的地表位移，範圍涵蓋苗栗以南的西南部地區。此研究指出在臺灣西南部的斷層周圍也能利用合成孔徑雷達取得斷層活動資訊，例如梅山斷層、

左鎮斷層、後甲里斷層、旗山斷層、鳳山斷層等，皆有觀察到長期活動的證據。

除了臺南地區，嘉義市周遭也在斷層活動潛勢區，過去 1906 年曾發生梅山地震，造成 1237 人死亡，是臺灣史上傷亡第四大的地震^[1]，此地有複雜的斷層和褶皺系統，因此持續觀測此地的地表變形有其必要性，以預警並降低可能發生的災害。Yen *et al.*^[6] 利用疊加合成孔徑雷達干涉結果觀測地表變形，研究指出嘉義市位於雙傾伏褶皺上方，並以每年一公分的速率向上抬升。然而自 2008 年 Envisat 衛星退役後，較少利用合成孔徑雷達針對臺灣西南部進行地表變形研究，直到 2016 年 2 月 6 日美濃地震後，西南部地區的斷層活動再次得到重視，藉由長時間的時間序列變化，可觀測局部地表變形並加以分析同震與震後速度變化，減緩未來可能因地震引起的災害。

此外在地層下陷方面，臺灣西南部以彰化、雲林、屏東地區地表沉降的情況最為嚴重，根據水利署地層下陷防治資訊網之資料，彰化地區民國 81 年至 105 年累積最大下陷量達到 210 公分，平均 8.4 cm/yr，雲林地區民國 81 年至 105 年累積最大下陷量也達到 160 公分，平均 6.4 cm/yr。而在屏東地區民國 83 至 105 年累積最大下陷量達到 100 公分。儘管近年來政府透過加強管制使得地層下陷速度已明顯減緩，但情況仍須持續觀測，以降低民生、工業及交通安全上的疑慮。

在過去 20 幾年來臺灣西南部地區地層下陷的相關研究中，有不少的報告利用合成孔徑雷達影像進行下陷監測^[5,7,8]，多數研究皆利用 ESA 的 ERS-1/2 及 Envisat/ASAR 雷達衛星進行下陷的速率估算，這些結果與現地的 GNSS、水準測量和井測資料都有良好的吻合度，例如在雲林地區利用 ERS-1/2 影像於 1996 至 1999 年之間的永久散射體雷達干涉 (Permanent Scatterer InSAR, PSInSAR) 所量測到下陷量最大可達到 7.8 cm/yr，其結果與水準測量僅差大約 1 cm/yr^[7]，在 Lu *et al.*^[8] 的研究中也顯示下陷速度在 1993 至 2003 年較快，在 2005 至 2008 年下陷速度減慢，顯示了近年來地層下陷速度的確有所趨緩。

在屏東平原區域，由於降雨時間分布不均造成乾濕季分明，在 Chang *et al.*^[9] 與 Hsieh *et al.*^[10] 的研究中

顯示在乾季 (冬季) 下陷量明顯大於濕季 (夏季)，在乾季的平均下陷速度達到 3.37 cm/yr，在濕季的平均下陷速度有 0.31 cm/yr，乾季的下陷速度比濕季大了 10 倍。儘管近年來沿海地區的地層下陷速度已明顯趨緩，但地層下陷的狀況與面積仍然未明，利用合成孔徑雷達監測地層下陷可以取得面狀的速度場，不同於水準測量或是 GNSS 測量僅能提供局部或點狀資料，雷達影像能使我們了解不同地區在時間與空間上的位移分布。

短基線雷達干涉技術

雷達干涉技術主要是利用兩次衛星再訪時接收到不同相位的相位差計算地表變形量，如圖 2^[11] 所示，紅線與藍線分別為衛星第一次與第二次 (無需連續) 通過時的軌道與地表位置，透過計算相位變化化算至地表於這個時間段內在視衛星方向 (地表與衛星位置的連線方向) 的高度變化。然而相位差不僅包含了地表變形，也包含了軌道誤差、地形影響、電離層延遲與大氣層干擾等相位誤差，因此在解算過程中需經過適當改正以降低其他干擾因素造成地表變形的誤判。

Sentinel-1 雷達影像最重要的一項優點在於其軌道穩定性，透過良好的軌道控制，可以讓再訪軌道的距離偏差在五十公尺以內，如此一來可提升取像品質並增進干涉圖成功率。以下敘述全幅影像及自動化處理流程，用以觀測臺灣西南部平原的地表變形，研究方法為使用雷達影像進行短基線干涉技術 (Small Baseline Subset DInSAR, SBAS DInSAR) 分析，此流程可透過電腦程式自動化處理，從伺服器端利用開放的應用程式介面 (Application Programming Interface, API) 搜尋下載並預處理影像，輔助偵測潛勢區內的變形異常。

雷達衛星開放資料產製地表變形

首先在開放資料庫中搜尋目標區曾經拍攝過的影像，並判斷影像品質以及軌道偏差等 (如圖 3 之流程圖)，若在預定時間基線內收集到較短基線長的影像對，則把該影像納入後續短基線干涉技術的計算，反之則予以捨棄。因為 Sentinel-1 每 6 天就有一幅升軌或降軌影像，兩者搭配起來涵蓋目標區的影像數量非常多，因此將品質欠佳、大氣與電離層修正量過大或是同調性較低

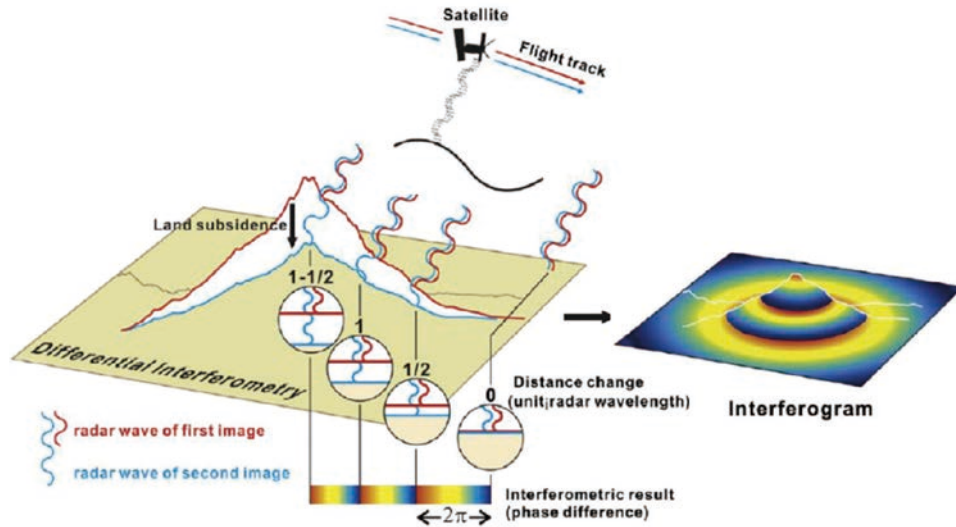


圖 2 雷達干涉示意圖 (摘自 Chang *et al.*,^[11])

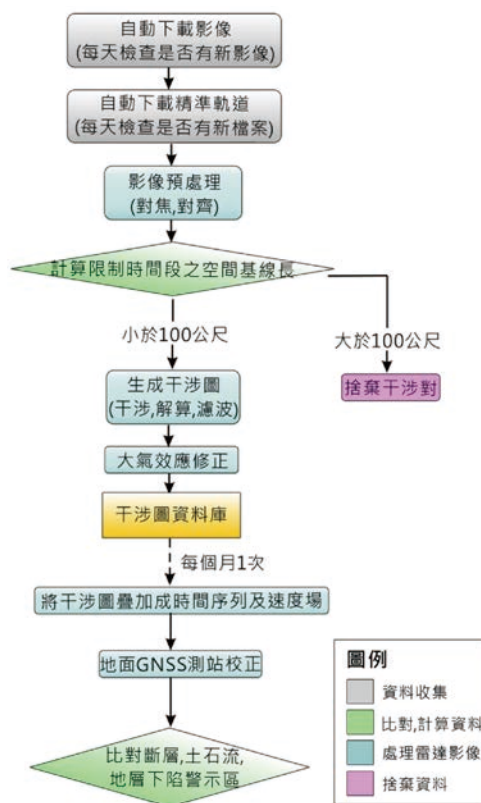


圖 3 利用雷達影像開放資料建立時序地表變形分析流程圖

的資料剔除後仍然有高頻率的影像得以計算時間序列。在每個月至少保留一至二幅干涉像對的原則下，將可以一個月一次的頻率針對反射特性良好的地表像元計算位移時間序列與速度場，後續經過地面 GNSS 測站的校正與三維方向分量拆解，可估計垂直方向的地表變形。

短基線干涉法為 Berardino *et al.*^[12] 提出的影像收集與時間序列計算流程，主要用以觀測長時間的地表變形，此方法強調利用空間及時間基線小的影像對做干涉圖，將多幅不同時間段的影像製作干涉圖後利用最小二乘法 (least squares) 得到依時間變化的地表變形。我們所使用的 Sentinel-1 衛星重返週期短，可容許在短時間基線內獲得更多可以進行干涉的影像對，且 Sentinel-1 衛星軌道精準，大部分符合時間基線內的影像對也會落在空間基線可容許的範圍。

在此我們利用 2016 年 11 月至 2017 年 6 月之間的 20 張臺灣地區升軌 (ascending) 影像作為範例，圖 4 為此系列影像拍攝時間與空間基線關係圖。將每幅影像預處理並湊成影像組做干涉處理後，經過解纏 (unwrap)、濾波 (filtering)，可得到 81 組解纏後的地表變形圖，將這些不同時間區段的地表變形利用最小二乘法處理後，可得到在影像拍攝的每個時間點上視衛星方向累積地殼變形量 (如圖 5)，最後將這些位移量疊加後可得這段時間內在視衛星方向的平均地殼變形速度 (圖 6a)，其速度均方根誤差皆小於 1 mm/yr。由於測試的時間僅有八個月且大多為乾季月份，因此在彰化雲林地區所得沿衛星方向的速率較大。由圖 5 的時序變化中我們可以發現，雲林地區在主影像 (2017/01/27) 時間後開始出現較明顯的沉陷，且在五月到達峰值，此現象與地層下陷在乾季較為顯著的季節性相符，如此高頻率且面狀的變動在過往研究中難以利用其他資料觀測而得。

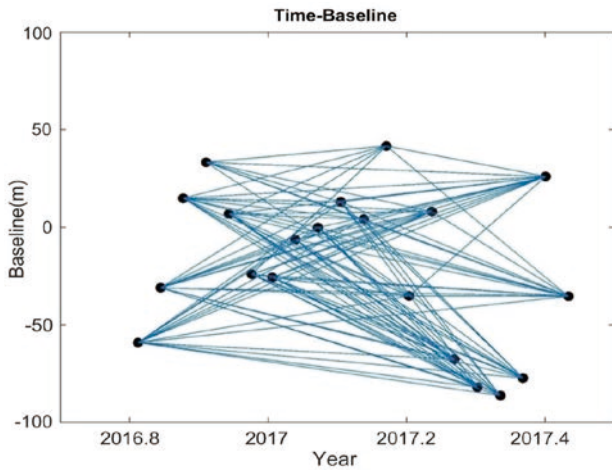


圖 4 時間空間基線分佈圖

如前述相位差計算限制，合成孔徑雷達資料中可能存在如軌道與介質影響等誤差，且利用合成孔徑干涉法疊加得到的速度，僅是相對於該影像區域的平均速度，所以需要利用地表上 GNSS 測站所得資料進行校正。GNSS 速度場在空間中為點狀的資料，密度取決於設站數目，而合成孔徑干涉雷達影像為面狀的資料，因此透過校正能提供空間上高密度的覆蓋。此外，因為地表在三維方向有非均勻變形，因此在視衛星方向的位移觀測量也有包含水平向位移的貢獻。因此我們利用中研院地球科學研究所收集到的測站變形資訊（以下稱 GNSS 速度場）進行校正。由 GNSS 速度場我們可得三

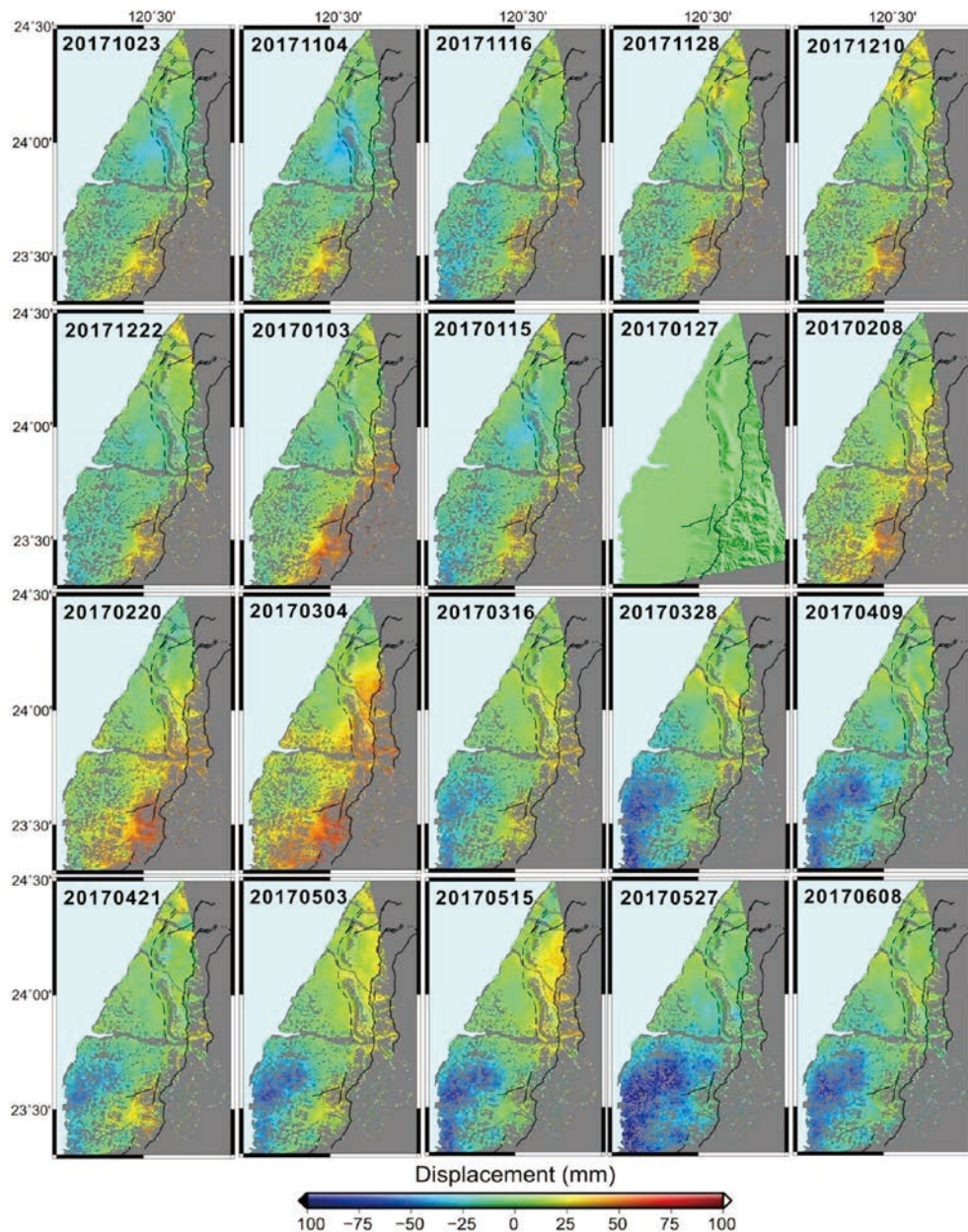


圖 5 視衛星方向地表變形之時間序列變化

維方向分量，將與衛星像對同時間區段之各方向日平均坐標分別擬合後，將個別方向的合成視衛星（Line of Sight, LOS）方向速度場（式 (1)， α 為衛星飛行方位角（azimuth）， θ 為衛星觀測入射角（incidence angle）），再利用類似 Hung *et al.* [13] 所使用的資料綜合方法，將合成孔徑干涉雷達及 GNSS 資料結合。此方法為算出研究區域內的 GNSS 速度與合成孔徑雷達干涉法所得點該測站速度之差值，再利用克利金內插法 [14] 將此差值內差成面狀資料並在合成孔徑雷達干涉成果內予以扣除，便可得到校正後研究區域內合成孔徑雷達干涉疊加的速度資料。

$$[LOS] = [\cos\theta \quad -\cos\alpha \sin\theta \quad -\sin\alpha \sin\theta] \begin{bmatrix} GPS_U \\ GPS_N \\ GPS_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

如圖 6a 所示，在校正前視衛星方向的速度場於南北向有一明顯的梯度偏差（ramp），在經由地面站校正後圖 6b 透影至垂直向速度與地面實測資料吻合（因利用同資料作為參考修正）。而此觀測方法主要目的在於提供 GNSS 測站外大範圍的變形量，進而評估沉陷區域範圍以及觀察斷層兩側是否出現差異位移。由圖 6 中可以得到雲林一帶在 2017 年初乾季時經歷的地層下陷約達 6 至 9 公分，且範圍與地下水管制區十分吻合。

資料限制與精進空間

雖然利用地面 GNSS 測站校正的方法可以減緩因外部因素造成的相位問題，然而過程中卻有可能消除了部分真實訊號，因此較完善的方法仍須將干涉像對進行適當修正。舉例來說，當雷達波傳遞時會受到電離層影響，並在干涉圖上產生相位超前，進而影響到測量地表變形的精度。電離層對於相位產生的影響與頻率成平方反比，因此在前人相關研究中皆提到電離層對不同頻率的雷達波皆會造成影響，尤其對較低頻率的 L 波段會有更明顯的延遲 [15,16]。在 Gomba *et al.* [17] 研究中顯示較高頻率的 C 波段也會受到電離層的影響，進而增加地表變形監測的不確定性。由於前人針對臺灣西南部地區的研究之中觀測區域較小，電離層濃度在數十公里內小範圍上較無梯度變化，而不會在干涉圖上產生明顯的相位影響，故無針對電離層效應進行修正。但在處理整個臺灣西南部地區全幅影像時，上百公里範圍的電離層濃度變化會比小範圍來的明顯，未妥善修正可能帶有 10 至 20 全電子含量單位（Total Electron Content Unit, TECU）殘留，此電離層效應造成相位變化顯示在干涉圖上，因此必須加以去除以增加測量精度。

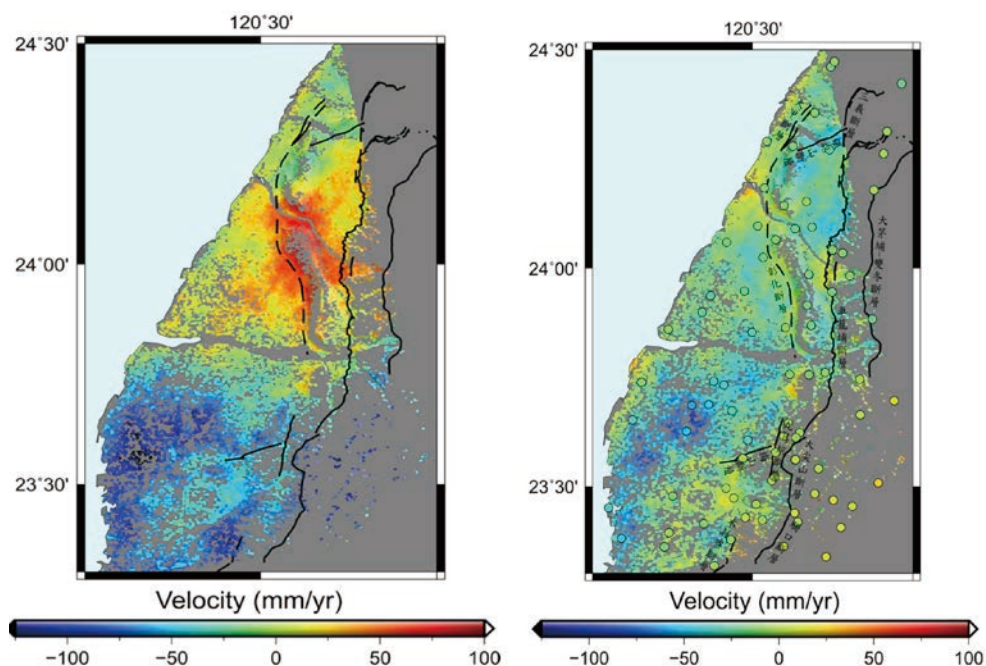


圖 6 (a) 未經 GNSS 校正視衛星方向速度場，(b) 經 GNSS 校正後反投影至垂直向速度場

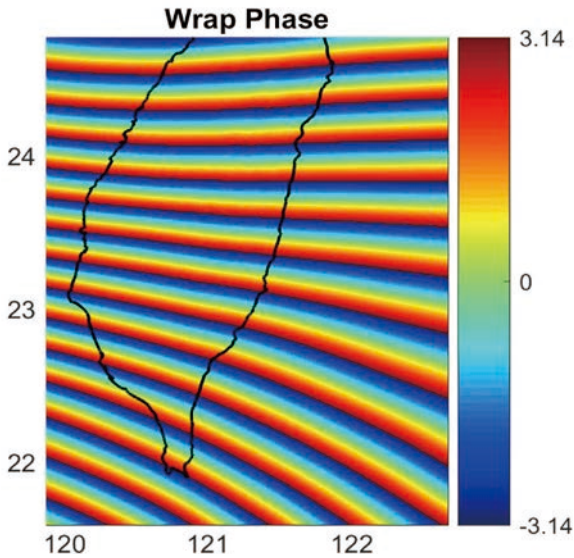


圖 7 在美濃地震前後升軌影像對中，電離層造成相位延遲所產生的多餘干涉環

臺灣西南部地區位於電離層赤道異常區 (Equatorial Ionization Anomaly Region)，而造成臺灣由南到北電離層濃度的下降梯度變化，若干涉圖前後兩張影像在同一區域的電離層 TEC 差異過大，會導致干涉圖中沿著衛星飛行方向 (azimuth) 有相位延遲產生。且衛星影像的獲取時間也會影響到電離層濃度，Sentinel-1 的降軌 (descending) 和升軌 (ascending) 分別在當地時間 6 點和 18 點通過臺灣地區，而電離層的濃度會受到太陽的影響，在太陽升起後逐漸升高，約在 12 至 14 點會達到最高值，之後持續下降，因此在降軌獲取影像時的電離層濃度還很低，兩幅影像之間電離層濃度的差異不太明顯，多數無需進行修正。然而在升軌獲取影像時，兩幅影像之間電離層濃度已產生差異，尤其在春秋季電離層活動明顯時變化更甚，因此必須針對電離層的影響進行修正。

以 Sentinel-1 而言，單張影像可涵蓋台中以南至臺灣本島最南端的西部平原區域 (沿衛星飛行方向近 300 公里)，相較前人在臺灣的合成孔徑雷達干涉研究中多使用局部影像，Sentinel-1 的影像沿衛星飛行方向 (azimuth) 影像長度較長，因此若無修正電離層相位延遲，在解纏 (unwrap) 時，沿衛星飛行方向 (azimuth) 會有很大的誤差值產生。以美濃地震前後干涉圖為例 (圖 8a)，電離層全電子含量差異在干涉圖前後兩張影像的兩個時間段，南北方向差異為 15 TECU，反映在沿衛星飛行方向有數十個強度的相位延

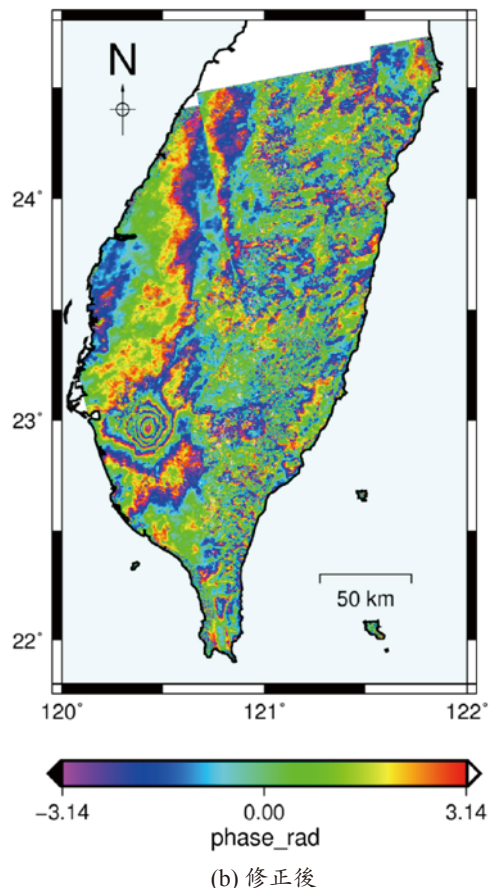
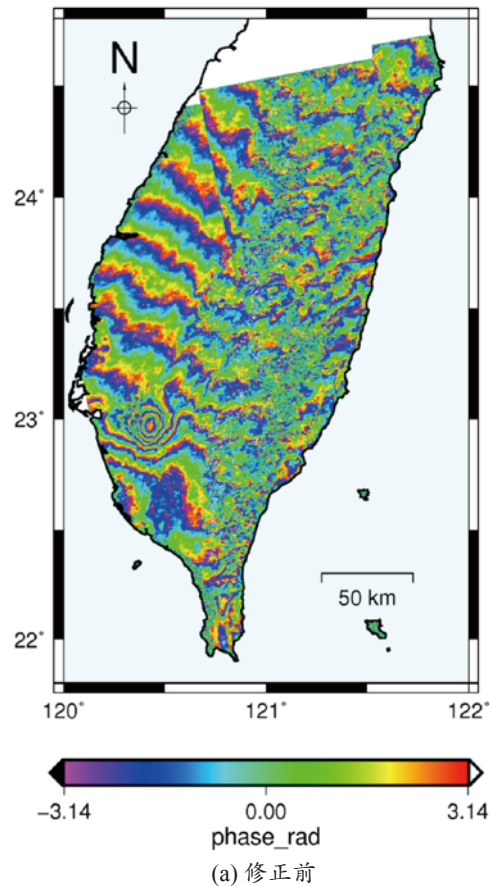


圖 8 美濃地震前後升軌雷達影像干涉圖

遲，如圖 8 中東北至西南向的週期性相位變化。在此我們使用中央大學 Ionospheric Radio Science Lab (ISRL) 利用地面站所建立電離層垂直全電子含量進行校正，利用 Gomba *et al.* [17] 中所提出修正相位的方法，將電離層產生之相位延遲進行修正（圖 8b）。由此修正成果可以見得，在系統性建立地表變形觀測時間序列時，仍須考量不同環境因素造成的誤差並予以移除，方能獲得較為穩定與可靠的觀測量。

結語

衛星資料於過往因經濟或技術上的使用門檻較高，主要以研究試驗性質的產品為主，較少用於大範圍、高頻度的監測。拜開放資料政策所賜，ESA Sentinel-1 星系提供了絕佳的潛力與機會供世界各國針對土地利用與變遷進行監測。臺灣地處地質環境複雜、變動頻繁的環太平洋地震帶，地狹人稠且土地利用型態日益轉變，除了地面調查外亟需衛星資料的輔助監測以提供工程環境上許多基礎資料的建置。相較於其他國家少有像臺灣如此高密度且維護良好的 GNSS 連續觀測站，這些地面觀測可扮演衛星資料的控制點，使雷達影像對解算出面狀地表變形更具準確性與實用性。因此我們可以善用資源，適時適度地將已成熟的衛星資料加以標準化並推廣至緊急應變、短期地質災害、長期地表變動等不同面向，以利決策單位的判斷。

參考資料

1. 鄭世楠等人 (2014)，臺灣地區歷史地震文獻資料庫 (<http://tec.earth.sinica.edu.tw/TEM/hisevent/>)。臺灣地震模型組織委員會
2. Fruneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C. T., Wang, H. T., and Chang, C. P. (2001), Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 28(16), 3071-3074.
3. Huang, M. H., Hu, J. C., Hsieh, C. S., Ching, K. E., Rau, R. J., Pathier, E., and Deffontaines, B. (2006), A growing structure near the deformation front in SW Taiwan as deduced from SAR interferometry and geodetic observation. *Geophysical Research Letters*, 33(12).
4. Huang, M. H., Hu, J. C., Ching, K. E., Rau, R. J., Hsieh, C. S., Pathier, E., and Deffontaines, B. (2009), Active deformation of Tainan tableland of southwestern Taiwan based on geodetic measurements and SAR interferometry. *Tectonophysics*, 466(3), 322-334.
5. Huang, M. H., Bürgmann, R., and Hu, J. C. (2016), Fifteen years of surface deformation in Western Taiwan: Insight from SAR interferometry. *Tectonophysics*, 692, 252-264.
6. Yen, J. Y., Chen, K. S., Chang, C. P., and Boerner, W. M. (2008), Evaluation of earthquake potential and surface deformation by differential interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 782-795.
7. Tung, H. and Hu, J.-C. (2012), Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. *Tectonophysics*, 578, 126-135.
8. Lu, C. H., Ni, C. F., Chang, C. P., Chen, Y. A., and Yen, J. Y. (2016), Geostatistical Data Fusion of Multiple Type Observations to Improve Land Subsidence Monitoring Resolution in the Choushui River Fluvial Plain, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 27(4), 505-520.
9. Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kuo, C. H., and Chen, K. S. (2004a), Land-surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan. *Mathematics and Computers in Simulation*, 67(4), 351-359.
10. Hsieh, C. S., Shih, T. Y., Hu, J. C., Tung, H., Huang, M. H., and Angelier, J. (2011), Using differential SAR interferometry to map land subsidence: a case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. *Natural hazards*, 58(3), 1311-1332.
11. Chang, C. P., Chen, K. S., Wang, C. T., Yen, J. Y., Chang, T. Y., and Lin, C. W. (2004b), Application of space-borne radar interferometry on crustal deformations in Taiwan: A perspective from the nature of events. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3), 523-543.
12. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E. (2002), A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
13. Hung, W. C., Hwang, C., Chen, Y. A., Chang, C. P., Yen, J. Y., Hooper, A., and Yang, C. Y. (2011), Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 957-967.
14. Cressie, N. A. C. (1993), *Statistics for Spatial Data*. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Son, Inc.
15. Meyer, F., Bamler, R., Jakowski, N., and Fritz, T. (2006), The potential of low-frequency SAR systems for mapping ionospheric TEC distributions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(4), 560-564.
16. Jung, H. S., Lee, D. T., Lu, Z., and Won, J. S. (2013), Ionospheric correction of SAR interferograms by multiple-aperture interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5), 3191-3199.
17. Gomba, G., González, F. R., and De Zan, F. (2017), Ionospheric phase screen compensation for the Sentinel-1 TOPS and ALOS-2 ScanSAR modes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1), 223-235.



應用 UAV 影像 於 河岸基腳保護工辨識之研究

林彥廷／國立臺灣大學土木工程研究所測量與空間資訊組 博士候選人

張 喆／國立臺灣大學土木工程研究所測量與空間資訊組 博士候選人

陳思恩／國立臺灣大學土木工程研究所測量與空間資訊組 碩士生

李豐佐／國立臺灣大學水工試驗所 助理研究員

賴進松／國立臺灣大學水工試驗所研究員暨生物環境系統工程學系 兼任教授

韓仁毓／國立臺灣大學土木工程研究所空間資訊組 教授

近年來極端氣候影響，驅使河川洪水流量及土砂運移量加遽現象，致使河道上人工構造物（堤防、取水工、橋梁…等）之基腳保護工容易發生沖刷破損、傾倒、位移甚至消失等情況。眾多的基腳保護工不論清查或管理，若採用人工作業調查，需花費相當人力與時間成本。因此本研究希望透過快速現地調查，以無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）進行影像資訊蒐集，利用河岸自然環境與人工構造物於光譜影像中明顯的差異性，採用影像形態學與 SVM（Support Vector Machine）二元影像等分類方法，進行半自動化圈選與辨識基腳保護工之應用。分析過程採用紋理分析方法，尋找影像中具辨識力紋理，再藉由二元影像分類得到基腳保護工區域與非基腳保護工區域。另外，分類成果亦包括雜訊與分類錯誤，後續納入影像形態學中封閉運算法，尋找最大外包絡多邊形。將最大外包絡區域視為基腳保護工區域，圈選與計算面積。藉由本研究建立程序，以半自動化圈選基腳保護工所在位置，對於基腳保護工區域調查作業，提供便捷分析效益，同時兼具成本考量與調查之精確度，掌握資訊利於後續養護工程進行。

背景說明

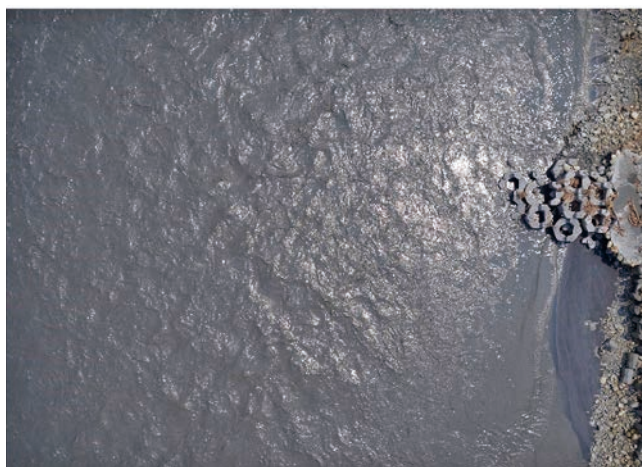
臺灣河川坡陡流急，地質多屬脆弱鬆軟，每遇颱風暴雨洪水時，河道上人工構造物（堤防、取水工、橋梁…等）之基腳保護工常遭水流沖刷破損、傾倒、位移甚至消失等情況，甚而破堤致災。近年來氣候變遷導致極端水文事件頻傳，對於人民生命安全產生威脅，尤其河岸及海岸地區居民，深受水位急遽變化影響。因此，基腳保護工的設置，攸關沿岸地區人民的生命與財產安全保護之重要決策。基腳保護工為人工構造物，以其幾何形狀、排列方式及抗沖蝕材料等方式

減少水流、泥砂及漂浮物之衝擊，達到保護堤防、固床工、取水工等人工構造物之基腳。根據水利署河川復建工程工法之分類，基腳保護工包含石籠護坦工、混凝土塊、格框護坦工等數種工法，而本研究以混凝土塊為主要研究對象。混凝土塊基腳保護工種類繁多，個體重量一般可分為 5 噸、10 噸與 15 噸等 3 種，其重量選用原則與河道設計流速或河道坡度有關，常見個體尺寸約為 1.5 m × 1.5 m 到 2.5 m × 2.5 m。混凝土塊型式又可分為混凝土塊護坦工及丁壩工其中，丁壩工主要為保護堤防基腳使用，丁壩工種類相當繁多，

諸如排列方式、結構、壩高、間距等，各因河道條件不同而有差異；目前臺灣對於丁壩工法之設計準則主要參考水利工程技術規範及水土保持技術規範，舉凡丁壩之種類、方向、間距、壩長及適用範圍等，皆訂定有相關設計準則供參^[1]。其材料為混凝土結構，常見的混凝土塊丁壩工多屬於短丁壩型，單座丁壩工由橫向 8~12 排、縱向 6~8 排之混凝土塊體所組成基腳保護工，其平面布置係沿著堤防基腳前每隔一定距離設置數座丁壩工，藉以形成丁壩群，達到微幅挑流及保護堤防不受水流正面衝擊之效果（如圖 1 所示）。



(a) 名竹大橋上游丁壩群



(b) 名竹大橋丁壩工上視圖

圖 1 混凝土丁壩工

任何形式的護坦工及丁壩工，會因長時間安置在河岸或海岸，受到大水沖蝕，造成結構上破壞或遺失，防護功能逐漸或迅速下降，相對增加沿岸居民生命財產之風險，顯示基腳保護工養護及維修工程之重

要性，然而現行基腳保護工養護及維修工程，採人工調查方式，不僅成本耗費高且調查時間長，加上基腳保護工布設區域廣泛，尤其不規則擺設區域更屬不易靠近，使得探勘成果難以符合效益和需求，如何有效進行基腳保護工維護及整治正面臨技術上挑戰。

隨著航空攝影測量技術發展成熟，透過高空定位拍攝，不僅顯示地面影像資訊，亦提供拍攝區域之三維空間資訊，若將航測技術應用於基腳保護工調查，亦可大幅降低人工調查時間與成本，成果透過影像處理分析技術，較傳統人工調查獲得更精確之調查資料，達成全面性快速整治調查需求；然而，航測拍攝單張像幅範圍廣大，基腳保護工塊區域僅涵蓋局部小範圍，加上飛行機動性低，不易針對基腳保護工進行資料調查蒐集。近年來無人飛行載具（UAV，Unmanned Aerial Vehicle）發展，不僅載具成本低廉且取得容易，可針對待測物進行多次性機動拍攝，拍攝影像能以高解析數值呈現。

UAV 發展及應用範疇

21 世紀之後，國際社會開始致力於 UAV 發展，無人飛行載具技術日新月異，從單一的軍事應用擴展到民生領域，例如：建築物和結構物之監測及檢測、陸海空三種環境監控、以及協助即時救災的資料蒐集等，所觸及範圍不勝枚舉。由此可知，無人飛行載具之應用已深入生活，成為輔助各項艱困任務的得力幫手。

近十多年以來，國內發展 UAV 產業的風氣鼎盛，從監測與檢測到防災與救災等項目都是相關人士努力的目標，盼能經由無人機協助，使任務執行過程相對簡易並且更加迅速。UAV 定期於海岸線空拍再結合影像校正作業，有助於追蹤監測沙灘之消長，且可詳細記錄海岸的變化過程、濱線變化量測以及比較不同時期濱線之變化，透過歷史航空照片及現有之海岸與海底地形資料蒐集，可進行歷史濱線變化的比對，監測同時可達到檢測目的^[2]。此外，於公路之防災與救災運用 UAV 協助，透過空拍之高解析度照片，有效觀察公路工程工址現況及評估外在環境影響風險，達到災前調查或災後重建規劃，減輕防救災之時間壓力^[3]。

UAV 影像可針對某一地區，進行多次性拍攝蒐集資料，因此拍攝影像數量相當可觀，若採用人工辨識

方式，需花費較高人力成本，且辨識效率不彰。若能採用自動化或半自動化人工輔助辨識方式，能大幅度減少人工作業增進效率。現有影像自動化辨識與半自動化辨識研究中，藉由 SPOT 資料結合影像自動分類、綠度與亮度植生指數，初步研判台灣中、北部的崩塌地區；再疊合 3D 透視影像與地形圖資訊，輔助螢幕判釋及數化向量資料，完成崩塌地辨識及範圍修正^[4]；另外，應用於自動車牌辨識系統，分析包括車牌字元萃取與辨識等核心計算，而此項技術已應用在高速高路自動收費及停車場收費^[5]；再者，以影像為基礎進行交通標誌標線自動化辨識與幾何重構，複合式門檻建立適應戶外環境之後選物件偵測，達到交通標誌與標線辨識，協助公路養護作業^[6]；其他研究針對於地下水區與濁水溪沖積扇相關地下水數值模擬，以影像辨識技術推估濁水溪不同時期之水面寬度，求得河道面積，提供地下水數值模式中河川模組（River Package, RIV Package）之關鍵參數設定^[7]。

前期相關研究顯示，自動化影像辨識已相當多元，從坡地災害、河道與地下水偵測與車牌或道路標示等皆已採用此技術，若將自動化影像辨識技術，應用於基腳保護工變遷分析，將大幅提升自動化調查技術。由於基腳保護工塊色彩灰度值與河岸土砂相近，故將依其固定幾何形狀大小及影像展現紋理，作為自動化辨識之依據。

本研究將透過 UAV 進行基腳保護工影像資料蒐集，利用紋理分析與影像處理技術建立系列流程，採取半自動化圈選基腳保護工區域，並獲得該區基本資訊，利於後續基腳保護工變遷監測與養護作業。

研究方法

現行基腳保護工養護及調查方法分為兩種，主要藉由人工至現場調查基腳保護工狀況，或藉由影像進行人工辨識基腳保護工狀況，以上兩種方式皆需高人力及時間成本。本研究針對自動化辨識需求，提出紋理分析、影像分類與影像形態學等方法搜尋基腳保護工區域，達到基腳保護工變遷分析。研究流程如圖 2 所示，共分為三大部分，包括影像正射化、紋理影像分類分析及二元影像形態學處理等，經套疊正射影像，圈選並辨識正確基腳保護工區域範圍。

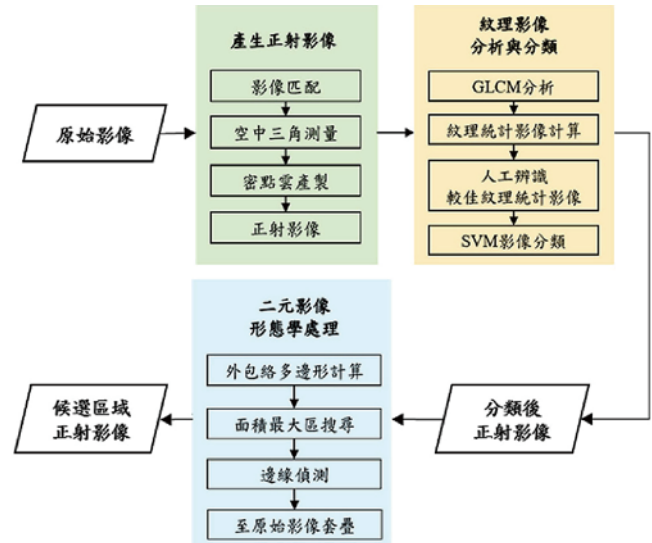


圖 2 半自動化基腳保護工區域圈選流程圖

研究分析藉由前後重疊影像匹配，進行空中三角測量平差，建立影像與地面控制點相對關係，獲取物空間坐標，進而產製密點雲與正射化影像。基腳保護工為固定形狀之人工構造物，於影像中呈現固定紋理特色，其特性可穩定提供灰階共生矩陣（Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM）計算紋理影像，透過不同紋理影像統計，選擇明顯基腳保護工（丁壩）區域，進行 SVM 二元影像分類。影像分類成果中，除了基腳保護工辨識區域，可能涵蓋許多雜訊區域，因此計算各區域分類面積作為候選區域，並將候選區域面積最大者作為目標區域。影像型態學處理中，以搜尋最大外包絡多邊形為目的，並比較各塊面積大小，經目標區域確認後，將該區域邊界套疊於正射影像上，並框示目標範圍。

影像正射化

UAV 影像正射化屬於資料前處理部分，藉由重疊影像與影像匹配技術，獲得影像與影像之間相對關係。而後加入控制點坐標，進行空中三角測量（Aerotriangulation）。空中三角測量係指攝影測量過程中，利用 UAV 影像與物空間目標之間的空間幾何關係，根據已知地面控制點及影像間對應連結點（tie point），以共線式的原理進行光束法空中三角測量平差計算，同時解算航拍影像於物空間的成像位置、姿態（即外方位參數）及連結點之地面坐標。若將像機參數（內方位參數）視為未知數，並於空三平差過程中

一併解出，稱為自率光束法空三平差。攝影測量基本原理為共線條件式^[8]，以透視投影中心、像點與物點三者位於同一直線上，表示攝影過程中光線沿直線方向前進(式(1))。

$$\begin{aligned} x_a - x_0 &= -f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_P - X_L) + m_{32}(Y_P - Y_L) + m_{33}(Z_P - Z_L)} \right] \\ y_a - y_0 &= -f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_P - X_L) + m_{32}(Y_P - Y_L) + m_{33}(Z_P - Z_L)} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

其中 x_a 、 y_a ：點位影像坐標， x_0 、 y_0 ：像主點位影像坐標， X_A 、 Y_A 、 Z_A 、 X_L 、 Y_L 、 Z_L 為對應物點之物空間坐標與透視中心物空間坐標， f 為焦距。係數 m 為三方向方位角所組成之旋轉矩陣，分別對物空間 X 、 Y 、 Z 軸旋轉。

藉由共線式描述物像空間關係，以光束法平差解算獲得物空間模型（坐標），依物空間模型修正拍攝影像偏移、變形等問題，達到影像正射化處理。傳統正射化使用轉換函數，過程中需配合數值地形模型產生之正射影像，不僅校正幾何變形，同時解算各像點之地面坐標。現行拍攝的 UAV 影像解算中，因高解析度影像拍攝，加上高重疊率，計算後能獲得大量密點雲坐標資訊，豐富的密點雲資訊亦能提供作為模型，幫助影像進行正射化處理。UAV 影像正射化過程，以密點雲物空間坐標及影像色彩為主要資訊，依共線式逐像元將灰度值（色彩）倒投影於一空白平面影像中，轉換過程若影像坐標為非整數，可由重新取樣計算獲得灰度值，再將該灰度值回填至空白影像中（圖 3）。

紋理分析

基腳保護工塊屬於固定形狀、大小人工構造物，於影像呈現較自然環境更具穩定紋理特徵，較容易於影像中搜尋獲得基腳保護工塊之區域。紋理分析主要分為結構型與統計型。結構型，僅適用於非常規則紋理；統計型，以灰階共生矩陣（Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM）進行數值計算^[9]。應用對象基腳保護工塊本身結構雖非常規則，但其擺放方法，依照現場的狀況而有所不同，因此保守採用統計型紋理分析。

影像灰階值統計方式可分為一階（first-order）與二階（second-order），其中一階統計包括灰階平均值、變異數及直方統計等，一階統計方式優點為簡單明瞭且計算快速，但是卻不足以完整描述影像整體；二階統計如 GLCM 矩陣，能完整提供影像灰階值空間分布資訊，但需進一步量化為單一數值形式，提供電腦分析作使用。1970 年代亦有學者提到十四種可量化 GLCM 矩陣，配合移動視窗及摺積（convolution）對原始影像進行紋理量化，求得各種不同紋理影像（textural image）^[10]。

產生 GLCM 影像過程如圖 4 所示，原始影像大小為 11×11 ，其量化範圍為 2bit，灰階值範圍介於 0 至 3 之間，而 GLCM 移動視窗大小為 5×5 。接著以量化範圍 2 bit 為維度，建立 4×4 的 Co-occurrence 矩陣。Co-occurrence 矩陣是根據 GLCM 移動式窗內與像元空間關係所產製，其中包含兩個變數，像元與像元間的距離（ d ）以及角度（ θ ），如圖 5 是以 $d = 1$ ， $\theta = 45^\circ$ ，所產生 Co-occurrence 矩陣，當距離越小，越能描述局部紋理規則。一般而言，距離 $d = 1$ 最為普遍，並考慮其

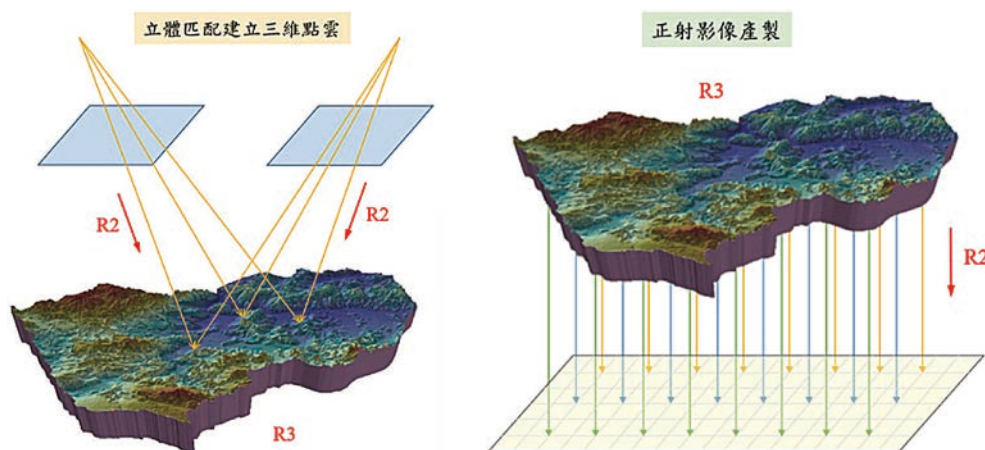


圖 3 立體影像匹配與影像正射化示意圖

2	1	2	0	2	3	2	1	2	1	1
1	2	3	2	2	2	3	1	3	2	3
1	2	0	0	2	2	3	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	2	1	3	2	2
2	2	2	2	3	1	3	2	1	3	1
2	2	2	2	3	1	1	2	2	3	1
2	2	2	2	3	1	2	0	0	1	0
3	2	3	2	1	2	1	0	0	1	1
2	2	2	0	1	3	2	2	3	2	1
0	2	2	3	0	2	2	2	0	3	0
2	2	2	3	1	2	2	0	2	0	0

圖 4 灰階值 0 至 3 原始影像

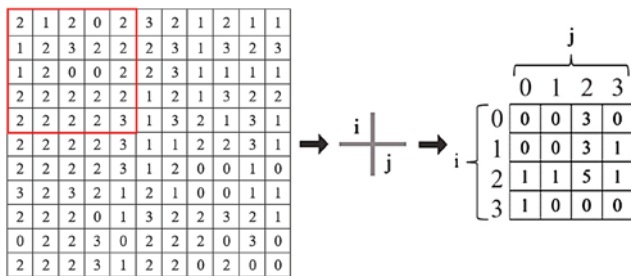


圖 5 Co-occurrence 矩陣產製示意圖

對稱性挑選角度；Co-occurrence 矩陣建立，採取四個方向平均值，並進而計算 Co-occurrence 矩陣中計算統計指標。

本研究提出六種統計指標，包含 Angular Second Moment (ASM)、Contrast (CON)、Entropy (ENT)、Homogeneity (HOM)、Variance (VAR) 及 Correlation (COR)。ASM 由 GLCM 各元素值的平方和 (式 (2))，用來量測灰階變化的均勻性，當影像上某區域越均勻時，GLCM 影像值會集中在對角線上，其他則接近於 0；CON 表示影像的對比性，其值與對比程度成正比 (式 (3))。ENT 則描述影像的紋理雜亂程度 (式 (4))，若影像的圖樣隨機性越高，其值越大；HOM 亦稱為 Inverse Difference Moment，為衡量影像的均調性 (式 (5))；VAR 則是以變異量描述影像的紋理性質 (式 (6))，而 COR 以相關性描述影像的紋理性質 (式 (7))，最後再將計算統計值回填於影像中，建立光譜影像。

$$ASM = \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G [p(i, j)]^2 \quad (2)$$

$$CON = \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G p(i, j)(i - j)^2 \quad (3)$$

$$ENT = \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G p(i, j) (-\ln[p(i, j)]) \quad (4)$$

$$HOM = \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G \frac{p(i, j)}{1 + (i - j)^2} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_i = \sqrt{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G p(i, j)(i - \mu_i)^2} \\ \sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G p(i, j)(j - \mu_j)^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$COR = \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G p(i, j) \left[\frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \right] \quad (7)$$

其中 G : GLCM 維度大小， $p(i, j)$: Co-occurrence 矩陣元素值， μ 為最或是值。

SVM 分類

影像分類有非常多種類的方法，本研究目標將影像分為基腳保護工區與非基腳保護工區等兩種區域，屬於二元分類，其中支持向量機分類為二元分類優秀方法之一。支持向量機具分離非線性問題之能力，解決傳統分類器過度學習和維度轉換問題。相關學者於高光譜影像分類研究中，透過增加影像波段進行影像分類，分類方法包括最大似法、決策樹、類神經網路和支持向量機等四種方法^[11]，成果顯示支持向量機法於精度上有較佳的表現。此外，支持向量機分類法在高維特徵空間中，使用線性函數並進行空間分割區學習系統，於複雜性的模型資訊和學習能力，根據有限樣本尋求最佳分類^[12]。支持向量機方法可分為三種，線性可分支持向量機、線性不可分支持向量機、非線性可分支持向量機。SVM 分類屬於統計理論中監督式機器學習方法，其流程包含輸入數筆人工分類資料、製作機器學習印本資料，再以演算法撰寫程式，並善用特徵性質。

SVM 透過一個超平面 (hyperplane)，將兩個不同的集合分開，以二維例子解釋，目標能以一條線將黑點和白點分開，且期待這條線距離兩集合邊界越大越好，如此一來能明確分辨各點所屬集合 (圖 6)，並經由尺度調整，使得超平面與集合距離在 ± 1 以內，式 (8) 為超平面定義之平面方程式。

$$W \times X - b = 0 \quad (8)$$

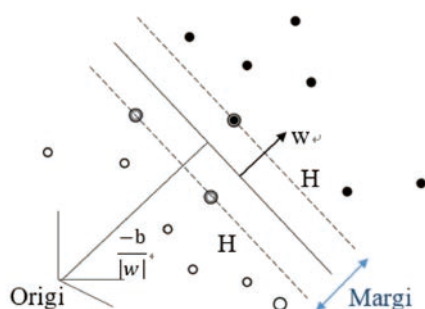


圖 6 SVM 理論示意圖

其中 W 為超平面上單位法向量， X 為超平面上任一點坐標向量， b 為常數 $b \in (-1.0)$ 。

超平面與集合之距離定義為 d ，計算如 (式 (9)) 所示，可得知集合與集合邊界距離為兩倍的 d ，即 $\frac{2}{|W|}$ 。由 (式 (9)) 搜尋支持向量機分類法中最大可能之距離邊界，並確定超平面之位置，最後由計算之超平面，將影像中所有像元點進行分類，如區分基腳保護工與非基腳保護工之區域。

$$d = \left| \frac{b+1}{|W|} - \frac{b}{|W|} \right| = \frac{1}{|W|} \text{ if } b \notin (-1, 0) \quad (9)$$

二元影像形態學

影像分類中容易呈顯雜訊及分類錯誤區域，這些區域對於基腳保護工辨識可能造成辨識錯誤。因此本研究採用二元影像形態學尋找基腳保護工區域最大外包絡多邊形，希望透過外包絡的多邊形，將基腳保護工區域整合，而定義其他區域為非基腳保護工範圍。依據 Gonzalez 與 Woods 書本上說明^[13]：影像處理的形態學 (Morphological Image Processing) 屬依據數學形態學應用之一，並以數學理論作為運算基礎^[14]。影像形態學主要用於二值化後影像，依使用者目的凸顯影像形狀特徵，如邊界和連通區域等。除此之外，運算子也會同時細化、修剪毛刺，常用於圖像預處理和後處理。形態學操作結果除了影像本身，也和結構元素的形狀有關，結構元素和空間域操作類似於濾波概念類似，以奇數矩視窗如 3×3 、 5×5 、 7×7 較常見使用。

影像形態學主要行為分為侵蝕 (Erosion)、膨脹 (Dilation)、斷開 (Opening) 及閉合 (Closing)。侵蝕與膨脹皆能去除雜訊及連接破碎前景物功能 (圖 7)，其中侵蝕運算使影像收縮，去除不必要元素，運算過程以輸入像素及其周圍像素，相對結構元素為 1 的像

素皆為 255 者，則輸入像素值設為 255；膨脹用來填補隙縫，使影像看起來擴大，運算過程以輸入像素及其周圍像素，相對於結構元素為 1 的像素值有一個以上為 255 時，則將輸入像素的值設為 255。換言之，當 A 集合 (輸入影像) 受 B 集合 (結構元素) 侵蝕，以 $A \ominus B$ 表示；反之，當 A 集合受 B 集合膨脹時，以 $A \oplus B$ 表示。

由上述介紹運算子膨脹擴大影像、侵蝕收縮影像，兩種運算子可以組成更重要的形態學運算，如開放運算及封閉運算。開放運算先對結構元素 B 進行侵蝕運算，再進行膨脹運算，其中侵蝕運算先將弱區域或小區塊雜訊濾除，再經由膨脹運算將平滑輪廓。整體開放運算使輪廓平滑，消除細小部份斑點、填補輪廓缺口及截斷窄短連結部位，運算如式 (10) 所示。

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (10)$$

封閉運算對結構元素 B 進行膨脹運算，再進行侵蝕運算 (式 (11))，其中膨脹將區域旁小雜訊合併，但遠離區域的雜訊仍呈孤立狀態，再經由侵蝕運算，去除遠距離雜訊，透過封閉運算也可使輪廓平滑化。

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (11)$$

本研究中基腳保護工區域存在較細長連結區域，故採取封閉式運算結合附近較小區域，再藉由侵蝕運算消除遠離區域雜訊。封閉運算過程中，將形成多個候選外包絡多邊形，皆視為候選基腳保護工區域，再由各候選外包絡多邊形面積計算，以最大面積區域作為基腳保護工目標區域，藉此條件搜尋防坡堤範圍。

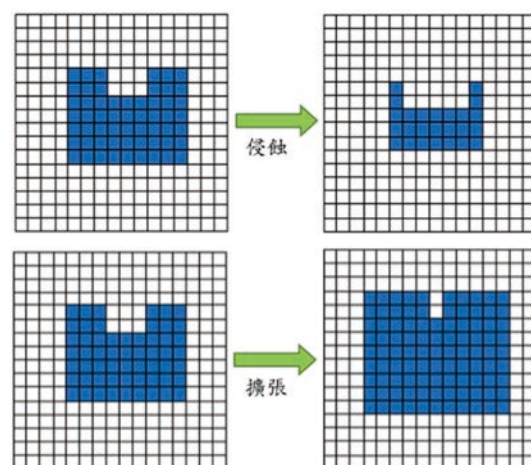


圖 7 侵蝕與膨脹示意圖

邊緣偵測

透過基腳保護工區域搜尋成果，以多尺度邊緣偵測基腳保護工輪廓，並套疊輪廓於原正射影像。多尺度邊緣偵測 (multiscale edge detection)，以不同尺度平滑濾波器與原始影像作迴旋積計算，得到不同尺度濾波影像，再抽取其邊緣，最後疊合所有尺度邊緣資訊，集合為邊緣影像。邊緣偵測法以 Canny 邊緣偵測法應用最為普及，透過像素最大梯度值搜尋影像邊緣點，其中梯度計算採高斯濾波器導數，並使用雙臨界值檢測強邊緣與弱邊緣，並輸出強邊緣連接的弱邊緣^[15]。Canny 邊緣偵測法能有效偵測影像邊緣，但受銳角與交點存在斷裂、多重標度等條件限制，而本研究採用最大外包絡多邊形，多邊形屬於凸多邊形，大幅減少銳角與斷裂點發生機會。因此本研究將於邊緣偵測分析中，採用 Canny 邊緣偵測方法，搜尋基腳保護工區域邊界，並將邊緣偵測成果套疊於原正射影像上，完成半自動化基腳保護工偵測。

研究成果分析

研究區域

台灣以濁水溪為最大溪流，每當颱風季節來臨，大量洪水沖刷侵蝕河岸；枯水期受季風吹拂，河岸移動漂砂改變河道及流向，顯著流量變化影響河岸堆置防波堤之穩定性，因此本研究選定台灣南投縣濁水溪鄰近名竹大橋之河岸區域 (圖 8)，進行 UAV 影像蒐

集，並進行基腳保護工塊辨識分析。實驗採用大疆科技有限公司 DJI Phantom 4 空拍機，搭載 2,000 萬像素一英吋之 CMOS 影像感測器，沿河岸約 300 公尺，以高度約 100 公尺連續拍攝，像幅重疊率縱向達 70 至 80%、橫向達 80 至 90%，地面解析度達 10 公分等級。

UAV 單張影像 (圖 9) 經過裁切與正射化處理，紅色框區域為本研究中實驗目標區域。圖 10 顯示基腳保護工區域色調與河岸相接近，將採基腳保護工規則紋理特徵進行分類。

辨識與分類成果

辨識基腳保護工區域流程，先將原始彩色正射影像轉灰階影像 (圖 11)，助於後續 GLCM 與紋理統計影像分析 (圖 12)，紋理統計影像選擇，包含紋理統計式及視窗大小，將影響分類成果。本研究於紋理統計中，選擇 variance、correlation、dissimilarity、entropy、second moment 與 dissimilarity 等六種統計指標，進行基腳保護工塊區域辨識，接續進行影像分類。

透過 SVM 監督式分類方法，並挑選紋理影像視窗大小，依照目標物大小決定，本研究共建立 3×3 、 5×5 、 7×7 、 9×9 、 11×11 、 13×13 以及 35×35 等視窗大小的 GLCM 統計影像，因研究目標為基腳保護工塊擺放形狀，若小於基腳保護工塊的紋理，可假設為分類錯誤



圖 8 濁水溪名竹大橋



圖 9 濁水溪名竹大橋基腳保護工區



圖 10 研究區域

或是雜訊，其中 35×35 為最大視窗大小，亦是基腳保護工顯示於影像上大小。分類成果如圖 13 所示，六種紋理統計影像以等權方式，放入 SVM 分類器中，將影像資料分類成基腳保護工區域與非基腳保護工區域。



圖 11 研究區域灰階影像

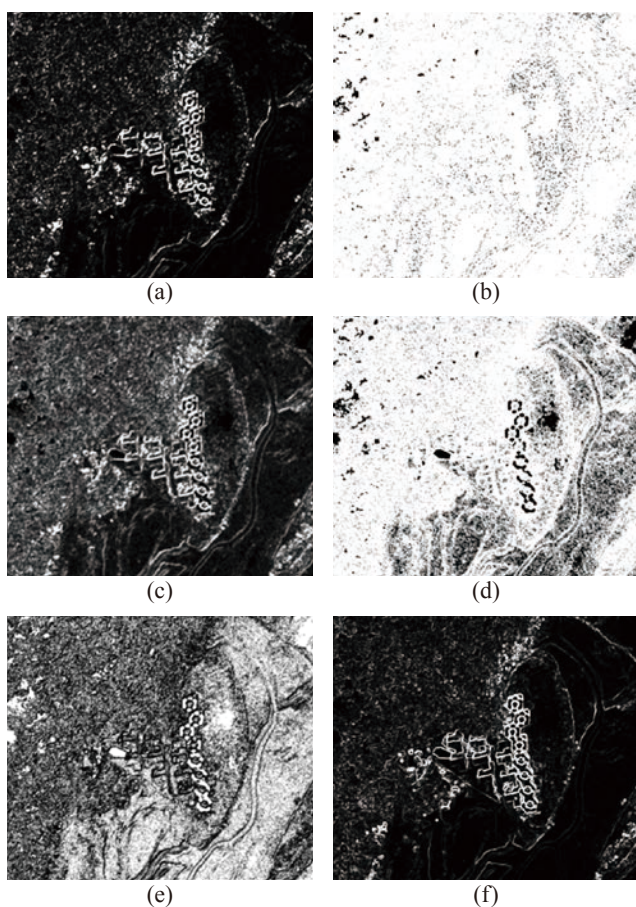


圖 12 (a) GLCM 3×3 影像；(b) Variance 影像；(c) correlation 影像；(d) dissimilarity 影像；(e) entropy 影像；(f) second moment；(g) dissimilarity

影像分類成果顯示，當視窗越大則破碎區塊越少，相對降低雜訊；然而，基腳保護工區域受非基腳保護工區域影響，導致分類成果整體區域超過原有基腳保護工區域。此外，當視窗過大（如視窗 35×35 ），目標區域中許多部分細節因統計計算而消失，並導致形狀嚴重變形，不符後續成果分析使用。綜合上述判斷，視窗大小選擇必須衡量細節與非目標物多寡之平衡。本次實驗中，以 13×13 （一半目標物是窗大小）為較佳視窗大小，同時兼具雜訊濾除與保留大部分細節，且目標物分類形狀符合接受範圍，因此後續將採用該視窗大小作為分析使用。

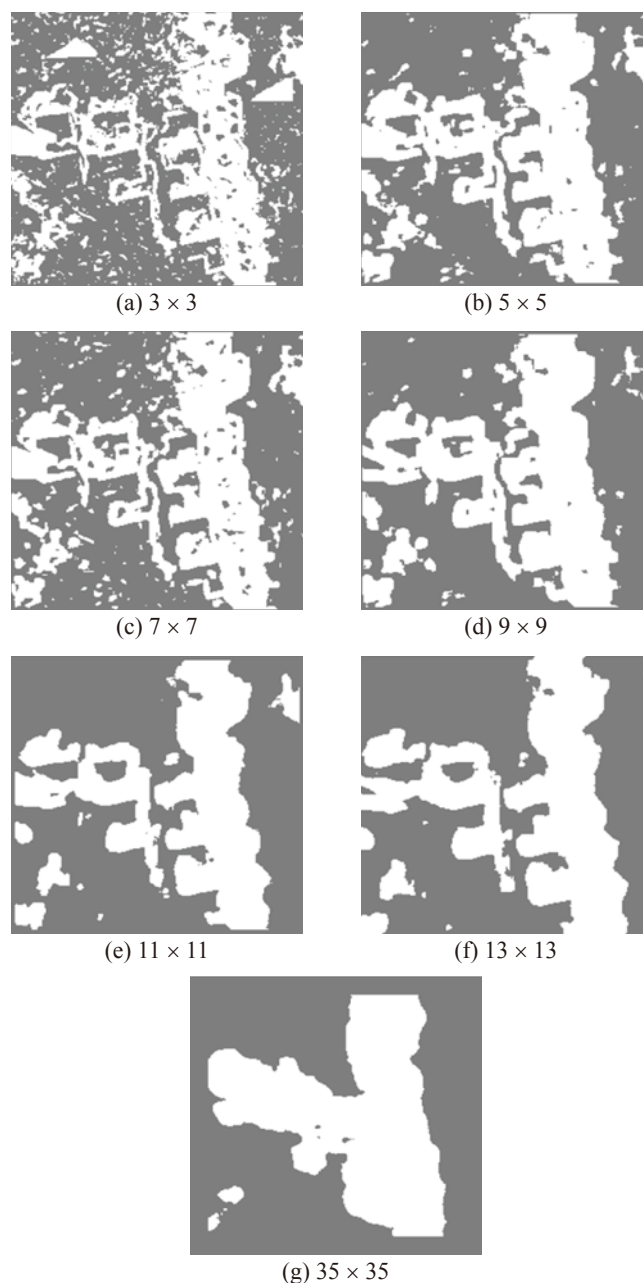


圖 13 不同 GLCM 視窗 SVM 分類成果影像

以 13×13 視窗大小，採用紋理統計影像進行 SVM 分類，如圖 14 所示。初步分類成果能顯示基腳保護工區域形狀與範圍，但圖幅中仍有許多破碎區塊被視為基腳保護工區域，因此透過影像形態學之封閉運算子，利用先膨脹後收縮方式，將基腳保護工破碎區域進行聚合，同時雜訊部分會受該運算子影響，分別聚合成不同區塊。經測試，影像上面積小於 1,000 pixel 影像，可視為雜訊進行消除，成果如圖 15 所示。由於封閉計算與雜訊消除後的成果，可得多個候選基腳保護工區域，經由計算各多邊形之區域面積，並保留最大面積區域作為目標區域，其成果如下圖 16。再藉由 canny 邊緣偵測區域邊界（圖 17），並套疊在正射影像上並匯出最小矩形提供使用者快速辨識（圖 18），即可完成基腳保護工區域辨識。



圖 14 六種紋理統計影像 SVM 分類



圖 15 使用封閉計算消除雜訊



圖 16 消除非基腳保護工區域



圖 17 canny 邊緣偵測



圖 18 半自動化基腳保護工區域偵測成果

自動化圈選將基腳保護工區域納入，提供維護者快速圈選，表 1 為人通辨識基腳保護工區域（真實範圍）與自動化辨識區域面積統計表，真實範圍於影像中涵蓋 19,172 pixel，自動辨識圈選區域為 24,818 pixel，顯示自動化圈選區域大於真實範圍，主要因為基腳保護工塊於實驗區域密集排列，之間較小孔隙透過封閉計算，併入基腳保護工範圍中；而自動辨識基腳保護工所在位置與真實情況相符合，透過表 2 評估半自動化圈選成果顯示，正確圈選占 92.5%，非基腳保護工區域且無圈選占 98.1%，兩者正確率達九成以上，能夠穩定且正確提供使用者自動辨識基腳保護工。

表 1 基腳保護工區域與自動化辨識區域面積統計表

	面積 (pixel)
真實範圍	19172
自動辨識圈選區域	24818

表 2 半自動化基腳保護工區域圈選成果量化表

	應圈選區域 (pixel)	不應圈選區域 (pixel)
有圈選	17727 (92.5%)	7091 (1.9%)
無圈選	1445 (7.5%)	373577 (98.1%)

結論與建議

本研究整合應用影像分類、紋理影像分析技術、影像形態學與邊緣偵測等多種技術，針對基腳保護工區域進行半自動化圈選與偵測，自動化程序降低人工圈選時間與調查成本，作為前後期基腳保護工區域辨識比較，達到高效率基腳保護工養護與監測作業。基腳保護工塊為人工構造物，影像上保有顯著紋理特色，透過紋理影像與搜尋視窗有效偵測基腳保護工範圍，當視窗大小為目標物一半大小時，可避免因視窗果過小導致影像分類上雜訊過多或基腳保護工塊上的細節不被納入等問題。完成分類，以影像形態學將目標區域進行連結與雜訊濾除，合併影像中以面積最大者為最後基腳保護工區域，最後藉由邊緣偵測，並將範圍套疊於原始影像上。成果顯示圈選辨識正確率達 9 成以上，雖有部分圈選辨識錯誤，若能改善影像分類精度便能再提升辨識品質。未來可嘗試機器學習，提高影像分類精確程度，並且針對不

同時期基腳保護工影像，進行多時期基腳保護工區域變遷研究；再者，測試其他區域影像，修正或改善自動化程序，分析壩提變遷情況，提供高效能且高精度基腳保護工辨識技術。

誌謝

本研究由科技部專題研究計畫補助（計畫編號 MOST 106-2625-M-009-006、MOST 106-2119-M-002-021 以及 MOST 106-3011-F-002-003），特此誌謝。

參考文獻

1. 葉克家（2013），濁水溪現行丁壩工法於側向侵蝕與縱向冲刷之效能檢討(2/2)，經濟部水利署第四河川局委託研究計畫成果報告書。
2. 黃昭雄、徐逸祥、朱子豪（2005），無人載具（UAV）應用於海岸濱線追蹤調查以鹽寮福隆沙灘為例。台灣地理資訊學會年會暨學術研討會論文集，10月27日至28日，臺灣台中市。
3. 楊宗岳、羅國峯、林永仁、黃勤財（2009），應用無人飛機於公路防、救災之可行性探討。臺灣公路工程，第35卷第12期，頁2-9。
4. 蕭國鑫、尹承遠、劉進金、遊明芳、王晉倫（2003），SPOT 影像與航照資料應用於崩塌地辨識之探討，航測及遙測學刊，8（4）頁29-42。
5. 林欣平（1998），車牌字元萃取。國立交通大學電機與控制工程研究所碩士論文，臺灣新竹市。
6. 阮宗憲、韓仁毓（2015），以影像為基礎之公路標誌自動化辨識技術。第三十四屆測量與空間資訊研討會，8月27-28日，臺灣宜蘭市。
7. 楊深惠、張良正（2012），應用衛星影像辨識與河道水理演算於濁水溪沖積扇地下水數值模擬。國立交通大學土木工程學系碩士論文，臺灣新竹市。
8. Wolf, P. R., and Dewitt, B., 2000. Elements of Photogrammetry – with Applications in GIS (Vol. 3). New York: McGraw Hill.
9. Beliaikov, G., James, S. and Troiano, L., 2008. Texture recognition by using GLCM and various aggregation functions. In Fuzzy Systems, 2008. FUZZ-IEEE 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Conference on (pp. 1472-1476). IEEE.
10. Haralick, R. M., and Shanmugam, K., 1973. Textural features for image classification. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, (6), 610-621.
11. Pal, M., and Mather, P. M., 2003. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. Remote sensing of environment, 86(4), 554-565.
12. Bartlett, P., and Shawe-Taylor, J., 1999. Generalization performance of support vector machines and other pattern classifiers. Advances in Kernel methods—support vector learning, 43-54.
13. Gonzalez, R. C., and Woods, R. E., 2002. Digital Image Processing. 3rd Edition, Prentice Hall, India.
14. Vapnik, V. N., 1999. An overview of statistical learning theory. IEEE transactions on neural networks, 10(5), 988-999.
15. Canny, J., 1987. A computational approach to edge detection. In Readings in Computer Vision (pp. 184-203).



土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段1號4樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家1~2人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需300dpi以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。



無人飛行載具發展現況與未來趨勢

楊明德／國立中興大學土木工程學系 特聘教授

蔡慧萍／國立中興大學土木工程學系 助理教授

無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 最初於 1970 年代由美國國防部發展使用於軍用途，簡單定義為沒有搭載飛行員的航空器。UAV 之機動性高，且產製之影像較傳統衛星影像和航空攝影有更高之地面解析度 (Ground Sampling Distance, GSD) (圖 1)。近年來民用 UAV (Civil UAV) 的發展隨著相關核心技術的開發，低成本製作技術的研發，飛行安全性的提升，民用 UAV 日漸普及且運用領域愈來愈廣，商業應用效益也愈來愈高。根據美國聯邦航空總署 (Federal Aviation Administration, FAA) [1] 預估，2020 年美國無人飛行載具將有約 700 萬部；而 2022 年時，在美國領空執行任務的商用無人飛行載具數量將上看 45 萬架 (US FAA, 2018)。目前 UAV 之操作已由早期人工於地面手動操作，進步到可於 UAV 上搭載微型飛行控制電腦，同時整合全球定位系統 (Global Positioning System, GPS)、慣性測量單元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 和地面控制站或控制器等，透過無線通訊系統進行半自動或全自動導航飛行，此整合的 UAV 飛行系統由美國 FAA 稱之為無人航空系統 (Unmanned Aerial System, UAS)。

UAV 技術

載體

UAV 類型依飛行滯空時間可分為微型、迷你型、近距離、短距離、中距離、高空長滯空型；依飛行方式可分成定翼型及旋翼型。定翼型 UAV 具有較佳續航力、飛行範圍廣、穩定性高等特性；旋翼型 UAV 可垂直起降、停懸於空中定點，適合於地形起伏大、障礙物多之地區飛行，兩者比較如表 1。由於民間業者積極投入研發，台灣開發多樣式定翼及旋翼型機型，具備 GPS、IMU、自動飛行控制、即時影像及資訊傳輸等功能，已可達到監測、監控及搜索等需求。

飛行控制系統 (Flight Control System)

UAV 之飛行控制系統功能類似於人類大腦，具備讀取傳感器數據和計算與控制飛行時 UAV 姿態之功用。一般而言，UAV 之飛行控制系統包含控制器、陀螺儀、加速度計和氣壓計等傳感器。各種 UAV 之飛行

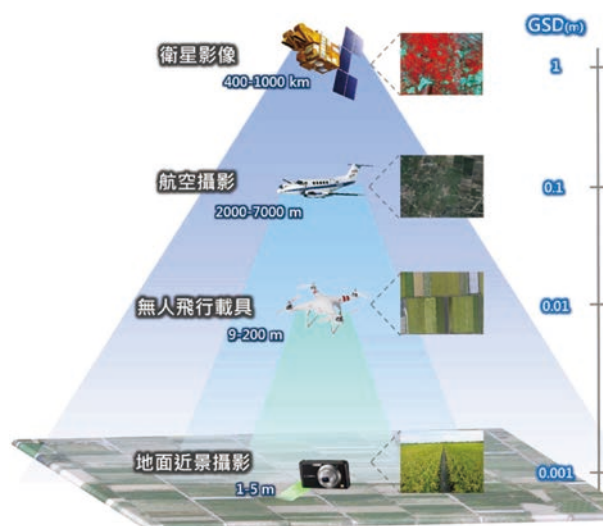


圖 1 遙測影像與飛行載具之地面解析度比較

控制系統皆有其寫入之韌體，韌體分為開源與閉源兩種，開源韌體如 APM 與 Pixhawk 可提供改動飛行參數之功能；閉源韌體如 DJI-NAZA-M 和 DJI-WooKong 及 DJI-A2 等僅支援同品牌之飛機與配件。

表 1 定翼型與旋翼型 UAV 比較表

UAV 種類	定翼型	旋翼型
圖片		
飛航範圍	較廣	較小
續航力	較長	較短
氣候影響	不易抗風	相對穩定
起降方式	跑道或彈射	垂直起降
飛行模式	航線飛行	可定點停懸
震動	較小	較大
適合地區	空曠地區	狹窄或地形起伏較大地區

感測器 (Sensor)

UAV 之感測器功能類似於人類的感知器官，不同機型 UAV 之載重能力與飛行能力皆不盡相同。一般型消費機種 UAV 多搭載可見光相機，涵蓋光譜的範圍為紅綠藍光波段。而在高階或開發型之 UAV 機種，可依據需求搭載多光譜、高光譜、熱影像鏡頭或光達 (LiDAR) 等不同性質、不同等級之感測器。

UAV 影像處理

● 影像分類

傳統影像分類方法可分為監督式與非監督式兩大類，但隨著影像判釋理論與技術之進步，陸續發展出如類神經網路分類 (Neural Networks Classification)、次像元分類 (Subpixel Classification) 以及知識庫分類法 (Knowledge Classification) 等分類方法。在監督式分類方法的應用上，程序為影像分析者先行選定所需類別或分級，然後選擇訓練樣區。訓練樣區的選擇必須具有每一類別之代表性，且訓練資料所導出之每一種分類的統計值，以作為分類時之根據。如果分析者所選定之類屬能夠在光譜空間上有所隔離，並且各類訓練樣區能代表整個的空間資料組，則分類處理通常皆能相當成功。簡而言之，監督式分類法最重要的成功關鍵，即須確保特定之覆蓋類屬其在光譜空間上大致是光譜分離的，常用之監督式分類法包括高斯最大概似分類法 (Gaussian Maximum Likelihood Classifier)、最短距離分類法 (Minimum Distance to Means Classifier)、平行六面體法 (Parallel-piped Classifier) 等。非監督式分類則依據事先給定的類別個

數和各波段之影像像元灰階值，利用數值迭代方式進行影像叢級分類 (Clusters)，常用之非監督式分類法包括 ISODATA 和 K-means 兩種。非監督式分類方法之優點為快速且只需考慮類別數目和迭代之設定的收斂狀況，但缺點為缺乏類別變異度之考量^[2]。

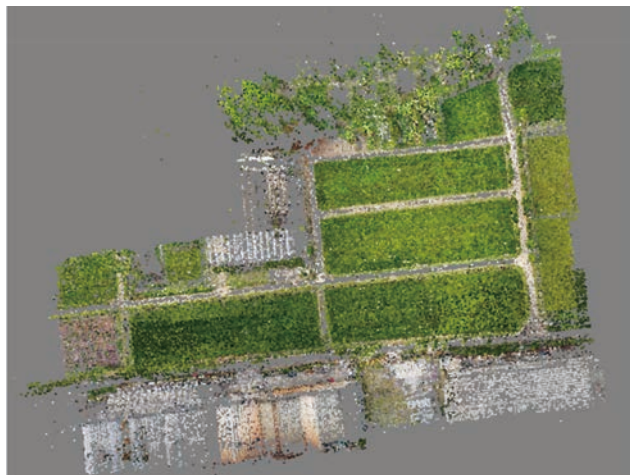
類神經網路分類法利用類神經學習的功能，同時可加入其他資訊輔助判釋，例如空間資訊^[3]，目前以倒傳遞類神經網路 (Back-propagation Neural Network, BPN) 應用較廣^[4]。次像元分類之原理類似於監督式分類，但加入了特徵推導 (Signature Derivation) 進行影像分類^[5]。知識庫分類則為依據專家知識經驗與技術之整合，透過邏輯推演與正規化，將專家知識轉換為知識庫進行分類^[6]。

● 點雲產製

UAV 影像可透過影像式三維模型重建技術中之 SfM (Structure from Motion)，對影像進行類似自我率定之演算，計算出影像拍攝時的內外方位參數；利用不同視角的影像及拍攝時相機軌跡與內外部攝影參數計算影像的對應與投影關係，將相機間的對應關係投射至空間中，並將其投射的三維點投射回相機所拍攝的影像上，以獲得空間中相對應的空間點雲 (疏點雲)。再對 SfM 所產生的成果進行密度優化，產生密點雲。密點雲可再經過網格製備生成三維模型 (圖 2)。

● 影像式三維模型重建技術 (Image-Based Modeling, IBM)

影像式三維模型重建技術包含多種電腦視覺、電腦圖學、影像處理、光學等領域之演算方法^[7,8]，其中以 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)、SfM (Structure from Motion)、Visual Hull 以及 MCOSR (Minimum cuts for optimal surface reconstruction) 演算法應用較廣泛。SIFT 是一種尋找影像特徵點的演算法，利用金字塔分層的方式，把計算量相對大的工作在初期步驟完成，降低計算量方便後續的計算^[9]。SIFT 演算法在資訊量豐富的影像中具有提取大量特徵點且均勻分佈，並提供足夠的資訊以完成物件匹配與識別。SfM 藉由 SIFT 從多張重疊影像部分匹配相同的特徵點位，以核幾何 (Epipolar Geometry) 原理反算出相機拍攝與物體的相對關係，再恢復相機在不同拍攝位置的內外方位參數，並推算出物體明顯邊界結構的稀疏三維點雲，



(a)



(b)



(c)

圖 2 UAV 影像範例：(a) 疏點雲，(b) 密點雲，與 (c) 三維模型

獲取場景的三維空間坐標^[10,11]（圖 3）。Visual Hull 演算法於 1991 年由 Aldo Laurentini 提出，藉由多張不同視角照片，經交集運算得最接近真實物體的近似值^[12]。

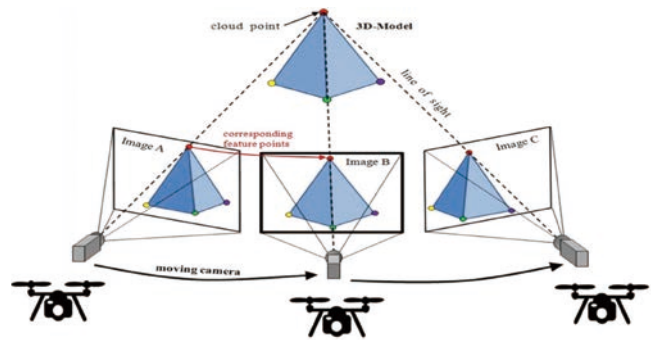


圖 3 SfM 演算法之特徵點運算原理示意圖

點雲建置完成後，需使用三角網格面（Mesh Triangles）方式，進行網格製作。Delaunay 三角測量表面重建為一製作網格的方法，MCOSR 演算法可改善 Delaunay 的表面重構法^[13,14]，並優化 Delaunay 的四面體，有益於網格製作。

● 相關軟體與應用程式

UAV 相關之商用軟體與應用程式（Applications, APPs）種類繁多，大致可分為飛行前置作業、航線規劃、影像建模、點雲瀏覽與後製美化等種類。飛行前置作業中，瞭解禁航區和限航區資訊非常重要，SkySentry 軟體可提供目前所在的位置是否在禁航區內。另外 Vaavud Wind Meter 風速計可即時量度現場環境的風速和風向，以選擇最佳的飛行路線，降低飛行器被破壞的風險。在航線規劃類別中，DJI GS Pro（Ground Station Pro）是一款可控制 DJI 飛行器實現自主航線規劃及飛行的 iPad 應用程式，具虛擬護欄功能，可讓飛行器在指定區域內飛行，保障飛行安全。Litchi for DJI Phantom/Inspire 提供追蹤（Tracking）與聚焦（Focus）功能，可讓使用者設好要拍攝的目標，讓鏡頭追蹤對焦設定目標拍攝，也另有飛行點任務的規劃功能。Altizur 可透過 DJI SDK 控制 DJI 的無人機在指定路徑上飛行並進行定時採集圖像，其自動航拍功能除了採集垂直拍攝圖像用於生成鳥瞰圖，還會採集傾斜拍攝圖像用於產生三維實景模型，圖像也可上傳到 Altizur 網站自動生成三維模型。

在建模方面，Pix4Dmapper 是航遙測的專業軟體之一，可精確至公分級並自動完成所有率定。Agisoft PhotoScan 可應用平面影像進行 3D 模型建立，可對任意照片進行處理；無需控制點，也可透過給予的控制點生成真實坐標的三維模型。Actue3D（Context Capture）

基於高階解析度航空影像、計算機視覺與幾何計算演算法的基礎之下進行三維資訊重建。Meshmixer 於 2011 年間世，目前已被 Autodesk 收購，提供 3D 物件製作並結合 3D 列印功能。MeshLab 可進行多種 3D 檔案格式的瀏覽、轉檔、基本編輯、修復與優化等功能。點雲瀏覽有兩個免費軟體 Potree 和 CloudCompare 廣受使用；Potree 是一種基於 WebGL 的點雲數據可視化解決方案，包含點雲數據轉化，以及進行可視化的源碼（source code）。Potree 對點雲數據進行多尺度管理，優化數據傳輸和可視化功能。CloudCompare 是一個三維點雲（和三角網格）的處理軟體，最初設計用於三維點雲（例如用雷射掃描儀獲得的點雲）之間或點雲與三角網格之間的比較，在大量點雲顯示與加載方面表現良好。3D 場景後製渲染工具如 Lumion 可進行即時的 3D 可視化，用於製作電影和靜幀作品，透過渲染功能，可快速進行 3D 場景的虛擬現實之視覺化。

UAV 應用

農業應用

農業為自然環境影響極大之產業，UAV 搭載不同型式感測器進行影像拍攝，再搭配影像分析技術，以協助農作物生長監測、農作物災損判釋與農作物產量預估。台灣最重要的糧食作物為水稻，但其常因颱風或豪雨事件發生水稻倒伏，影響水稻產量與農民生計（圖 4）。許多國家對自然災害造成的農業損失採取補償措施^[15,16]，但都以人工判定方式進行農地現場災害評估。台灣根據「農業天然災害救助辦法」，鄉鎮公所必須在災後 3 天內進行初步災情評估，並在 7 日內完成全面的災情調查。向縣政府報告後，鄉鎮公所必須在 2 週內進行抽樣調查。單一坵塊倒伏率 20% 以上的水稻田才被認定為災區，在抽樣調查中必須達成準確率 $\geq 90\%$ 才可發放補償金。由於土地面積廣大和人力限制，所有評估均通過估算和隨機抽樣進行。因此，礙於時間和人力勞動限制，評估通常會有準確和損失報告逾期的問題。此外，不規則的受損農田很難透過人為判定就直接計算出面積。再者，受影響的農民必須在評估過程中保存證據，至少在 2 週內不可復耕，影響農民災損處理及後續生計重大。不準確的損失報告則會影響災害控制和救災政策。因此，為了提供定量

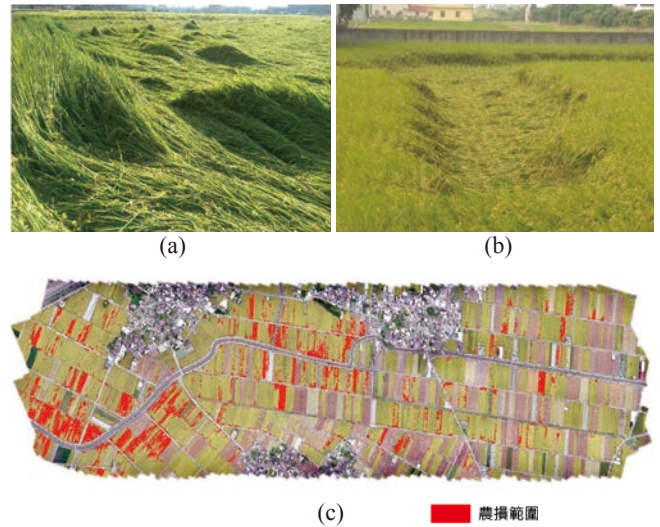


圖 4 UAV 影像應用於農業水稻倒伏管理範例：(a) 倒伏現地照片、(b) 倒伏現地照片與 (c) 農損範圍判釋

評估和快速減輕農民負擔，應用 UAV 進行影像拍攝，根據農作物與各種地物的光譜反映不同，以 UAV 影像的光譜信息與影像式三維模型重建技術（IBM）所產製之數值地表模型（digital surface model, DSM），配合紋理分析與影像之特徵機率計算等分析，可提供科學證據受損農地面積精確計算，全面且有效率地協助評估農業災損且加速救災進程^[17]。

農作物產量預估也可應用 UAV 影像協助（圖 5），例如西瓜田可依據西瓜的尺寸與形狀進行影像判釋，推估西瓜產量。預估產量有助於農業總量管理與市場穩定調配機制。對於農作物生長狀態也可利用 UAV 進行不同生長時期之拍攝（圖 6），判釋出植株位置與相關環境影響因子之套疊分析，後續可追蹤每株生長狀態。

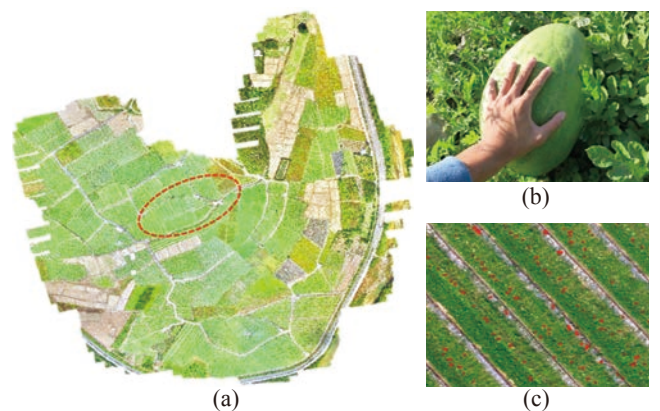


圖 5 UAV 影像應用於西瓜田產量監測範例：(a) 西瓜田正射影像、(b) 西瓜實際尺寸照片與 (c) 西瓜判釋成果

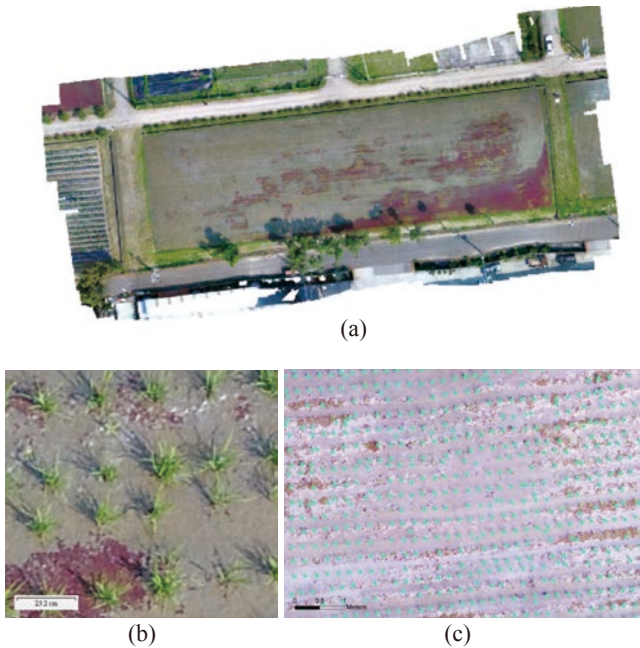


圖 6 UAV 影像應用於水稻稻株生長管理範例：(a) 水稻田正射影像、(b) 水稻植株近照與 (c) 水稻植株判釋成果

漁業應用

漁業受天然條件影響極大，逢遇颱風等氣候事件也常發生大面積災損（圖 7）。目前，漁業災損評估也是以人為評估方式進行，評估過程大約需要 40 到 50 天。首先，鄉鎮公所需要在災後 3 天內進行初步的現場損害評估。隨後，當地縣政府在 30 天內進行抽樣調查，抽樣準確度需 $\geq 90\%$ ，再向中央政府報告結果。之後，中央政府宣布就地損失評估結果，相關漁民需要在 10 天內申請補貼。在人為評估過程中，鄉鎮和當地縣政府的工作人員需與相關漁民一起乘坐竹筏或漁船，進行現場災損評估^[18]，現場災損評估的方式甚為主觀且容易受到漁民的意見左右。又因於漁業養殖的面積廣大，現場災損評估耗時耗力，人為評估結果也經常有爭議，產生偏差的災損評估，進而使政府提供財政援助的速度與標準受到質疑。應用 UAV 進行影像拍攝，除了可拍攝大面積的災損範圍，加上影像分析與套疊漁業權，可精確評估受損面積與確立賠償對象，協助快速評估漁業災損^[19]。

環境監測

UAV 可搭載空污無線偵測儀，可於不同飛行高度內偵測空氣污染物，包括一氧化碳（CO）、一氧化氮

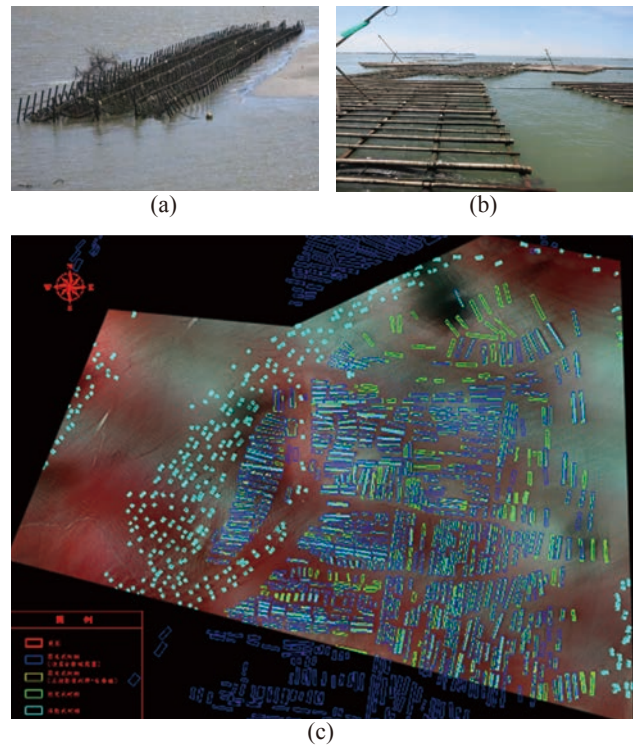


圖 7 UAV 影像應用於漁業蚵棚管理範例：(a) 固定式蚵棚、(b) 浮筏式蚵棚與 (c) 蚵棚災損判釋結果

（NO）、二氧化硫（SO₂）、PM₁、PM_{2.5} 等，並即時回傳資料，協助稽查人員快速精確找到空氣污染源。2008 年北京奧運期間之嚴重的空氣污染，為人詬病並成為國際焦點。相關組織遂與美國先進陶瓷研究公司合作，使用無人飛行載具進行空中照相，監測北京上方空氣污染源及污染程度。另外廣西環境監測中心也發展出無人機氣體監測系統，搭配氣體檢測儀，進行包括 CO、SO₂ 與可燃氣體等 23 種氣體檢測；此系統也具備人工智慧（AI）技術，可自動偵查污染點。目前桃園市環保局以觀音工業區為示範場域，開發單架次 UAV 巡邏監測空氣品質，未來也將規劃以無人飛行機隊，進行大範圍長時間之偵測巡邏。

坡地災害監測

台灣天然災害種類繁多，其中堰塞壩潰決常於颱風雨季時造成大量的土砂災害，影響民生安全。UAV 可精進傳統測量，呈現地形地物資訊的二維影像，應用 IBM 技術進行三維模型建置，提供細部體積與尺寸變化資訊，對於研究壩體結構穩定度與相關潰壩機制相當重要。惠蓀林場潰壩實驗為世界首座原尺寸之堰塞壩實驗，目前已應用 UAV 進行堰塞壩三維模型建置與壩體體積精度之評估（圖 8）^[20]。

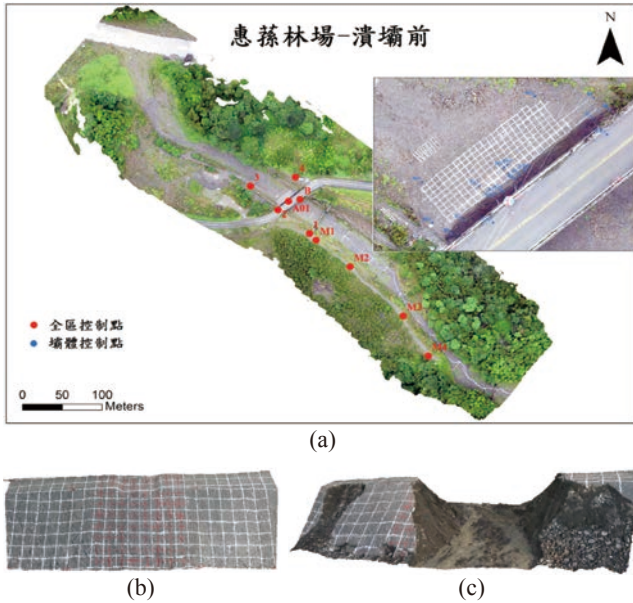


圖 8 惠蓀林場堰塞壩體影像三維模型：(a) UAV 產製之全區與壩體正射影像（含控制點）、(b) 潰壩前與 (c) 潰壩後

2013 年 6 月 2 日台灣發生芮氏規模 6.3 級地震，造成南投縣鳳凰谷鳥園上游南清水溝流域內邊坡崩塌（圖 9），阻礙南清水溝溪形成一天然堰塞壩。為分析此崩塌之堆積土方量及堰塞壩穩定性，評估其對下游住戶之影響性，使用 UAV 拍攝現場照片，以影像式三維模型重建技術（IBM）快速重構崩塌邊坡與堰塞壩之三維場景模型，經線性約制後可獲得一絕對尺度，但為相對坐標系之模型，再利用所獲得之三維資訊，使用無因次阻塞指標（Dimensionless Blockage Index, DBI）計算崩塌土方量，並進行崩塌影響範圍安全評估。成果顯示崩塌土方量為 136,588 m³，堰塞壩 DBI 值為 3.37，屬不穩定的狀態，此成果可提供管理單位作為鳳凰谷崩塌邊坡與堰塞壩後續處置依據^[21]。

UAV 操作相關法規

UAV 的相關軟硬體產業正在蓬勃發展，UAV 的應用也逐漸地被多元開發，有關無人載具的安全與個人隱私保護議題也屢受挑戰。立法院已於 2018 年 4 月 3 日通過《民用航空法》部分條文修正，增訂「遙控無人機」的控管專章與有關罰則。此修正之條文參酌許多美國聯邦的航空法規，包括 250 公克以上的遙控無人機皆須辦理註冊，並將註冊號碼標明在機體上明顯處；遙控無人機的操作者必須經過測驗合格，由民航局發給操作證後才能夠操作遙控無人機；另外在飛行場域、飛行高

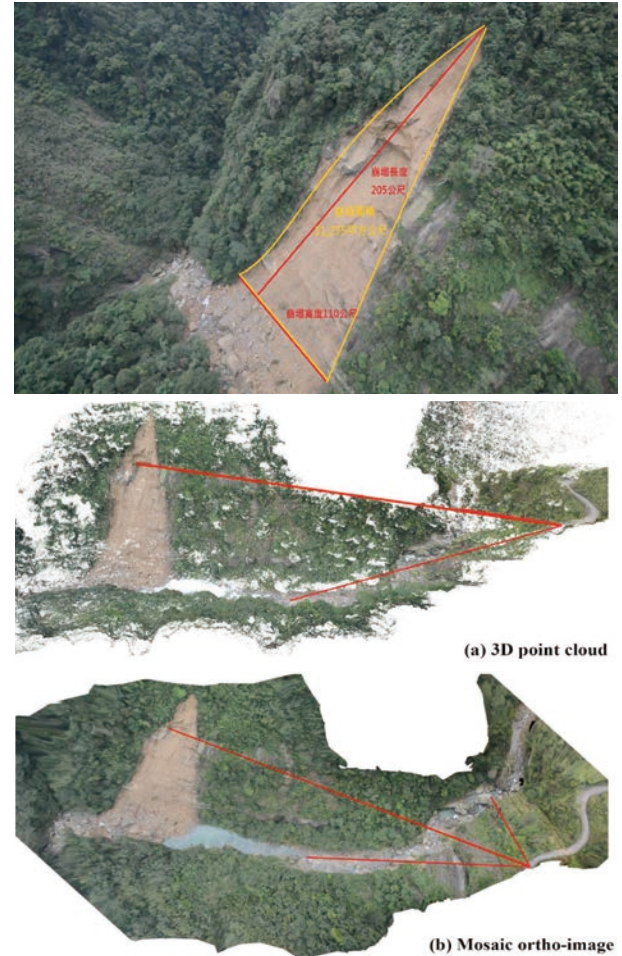


圖 9 UAV 影像監測鳳凰谷堰塞壩範例：(a) 3D 點雲與 (b) 正射影像

度、飛行時間和裝載物品方面皆有詳細規範。但為使產學研各界仍能在合理安全的環境下進行無人載具的創新應用發展，行政院會於 2018 年 5 月 18 日通過「無人載具科技創新實驗條例草案」^[22]，引進監理沙盒精神（Regulatory Sandbox），主旨希望於實際場域進行無人載具的科技、服務及營運模式的創新實驗時，能暫時排除適用相關監理規範，促進相關產業發展，以因應無人載具科技興起及國際發展趨勢，營造合理且安全的創新測試場域。此條例將由經濟部召開審查會議，原則上對無人載具給予 1 年創新實驗期，必要時可申請延長 1 年，若經審查全程最多以 4 年為限。此條例也希望成為首例科技沙盒典範，建立無人載具技術供應鏈體系，帶動台灣產業發展。

UAV 未來趨勢

UAV 影像解析度高且機動性強，可針對特定時間與地點進行拍攝，應用領域越來越廣。目前於 UAV 影像即時傳輸發展和運算上，5G 技術和 Edge Computing

已展開一傳輸速率之新紀元，未來於需要即時偵測與即時反饋之行動任務上，例如防救災現場需要快速搜救，UAV 上搭載之感測器可利用 5G 技術即時傳回影像，並利用裝載於 UAV 上的微型電腦進行 Edge Computing 初步影像分析篩選，再依據分析結果進行自動化的 UAV 行動模式。在 UAV 產製的資料中，點雲為具備空間資訊的最小單元，未來可透過分析點雲特性進行分類，於疏點雲階段進行特徵篩選，可根據分類目標進行點雲加密，以節省資料運算與儲存空間。未來 UAV 更可與生活結合，例如智慧城市（smart city）中可應用 UAV 搭載不同感測器，進行溫濕度、噪音、亮度等不同項目監測，利用其機動性高的優點，推動智慧城市中空域的整體規劃。

隨著國家綠能政策推動，風能與太陽能可利用 UAV 進行巡檢，透過 UAV 搭載的可見光與紅外線熱像儀，配合 GPS 定位可判斷光電板溫度並找出異常區域，例如彰濱工業區之設置 140 公頃（34 萬片）的太陽能光電板，日漸蓬勃發展且面積越來越大，利用 UAV 進行有效率且大範圍的巡檢，可達到省時省工的目的。另外，風機的維護運作也是台灣目前面臨的挑戰，由於風機高度有 70 至 100 公尺高，葉片長度也有 30 公尺，造價高且替換新品不易，未來可應用 UAV 進行巡檢，監測葉片是否有龜裂現象，以便及早規畫修復，降低損壞率。對於陸域風機與離岸風機也應規畫不同的 UAV 巡檢流程，以配合環境條件不同之需。另外在清掃輸電線路礙子方面，目前皆透過直升機搭配人工進行，安全性不佳，未來可透過具穩定懸停功能之 UAV，替代人工方式進行清掃，降低人員風險。

UAV 的相關軟硬體開發雖有一定的技術門檻，但土木人還是有一定參與的角色，如空間資訊與測量人員可參與 3D 模型方法開發與 UAV 影像處理暨分析。然而，UAV 的多元應用更是人人可以投入，包括結構、水利、大地、交通、營管等領域，都有待開發應用情境。

參考文獻

1. U.S. Federal Aviation Administration (FAA) (2018). Aerospace Forecast Fiscal Years (FY) 2018-2038, https://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=22594
2. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2014). Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
3. Zhang, H., Li, Y., Zhang, Y., & Shen, Q. (2017). Spectral-spatial classification of hyperspectral imagery using a dual-channel convolutional neural network. *Remote Sensing Letters*, 8(5), 438-447.
4. Li, L., Chen, Y., Xu, T., Liu, R., Shi, K., & Huang, C. (2015). Super-resolution mapping of wetland inundation from remote sensing imagery based on integration of back-propagation neural network and genetic algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 164, 142-154.
5. Lu, T., Li, S., Fang, L., Jia, X., & Benediktsson, J. A. (2017). From subpixel to superpixel: A novel fusion framework for hyperspectral image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(8), 4398-4411.
6. Shukla, A., & Ali, I. (2016). A hierarchical knowledge-based classification for glacier terrain mapping: A case study from Kolahoi Glacier, Kashmir Himalaya. *Annals of Glaciology*, 57(71), 1-10.
7. Yang, M. D.; Chao, C. F.; Lu, L. Y.; Huang, K. S.; and Chen, Y. P. (2013). Image-based 3D scene reconstruction and exploration in augmented reality. *Automation in Construction*, 33, 48-60.
8. Yang, M. D.; Chao, C. F.; Huang, K. S. (2013). 3D model construction on imagery shot by mobile devices, *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 45(3), 219-224.
9. David, G. L. (1999). Object recognition from local Scale-invariant features. *Computer Vision*, 2, 1150-1157.
10. Noah S., Steven, M. S. and Richard, S. (2007). Modeling the world from internet photo collections, *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210.
11. Okutomi, M. and Kanade, T. (1993). A multiple-baseline stereo system. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(4), pp. 353-363.
12. Aldo, L. (1994). The visual hull concept for silhouette-based image understanding. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(2), 150-162.
13. David, N. (2004). An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(6), 756-770.
14. Yasutaka, F. and Jean, P. (2009). Carved visual hulls for image-based modeling, *International Journal of Computer Vision*, 81, 53-67.
15. Chang, H.; Zilberman, D. (2014). On the political economy of allocation of agricultural disaster relief payments: Application to Taiwan. *European Review of Agricultural Economics*, 41, 657-680.
16. Jia, Y.; Su, Z.; Shen, W.; Yuan, J.; Xu, Z. (2016). UAV remote sensing image mosaic and its application in agriculture. *International Journal of Smart Home*, 10, 159-170.
17. Yang, M. D.; Huang, K. S.; Wan, J.; Tsai, H. P.; Lin, L. M. (2018). Timely and Quantitative Damage Assessment of Oyster Racks Using UAV Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2839767(in press)
18. Lin, W. and Huang, Y. (2014). Automatic recognition of oyster racks in the aerial image, *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, 2014 IEEE 9th International Conference on, 2014, pp. 1-6.
19. Yang, M. D., Huang, K. S., Kuo, Y. H., Tsai, H. P., & Lin, L. M. (2017). Spatial and spectral hybrid image classification for rice lodging assessment through UAV imagery. *Remote Sensing*, 9(6), 583.
20. 楊明德、陳韋廷、黃凱翔 (2016)，「應用 UAV 影像建置現地堰塞壩三維模型」，*中華水土保持學報*，46(2)，88-95。
21. 楊明德、黃凱翔、趙智凡 (2018)，「應用 UAV 影像於鳳凰谷崩塌與堰塞壩之分析」，*中華水土保持學報*，49(1)，40-48。
22. 行政院 (2018)，行政院新聞：行政院會通過「無人載具科技創新實驗條例」草案，<https://www.ey.gov.tw/Page/9277F759E41CCD91/60a8e74e-d09e-4fac-b7c8-a0f1b3c2e1ab>。



以傳奇衛星探索大地的歷史傷痕—— 山坡地長期裸露地監測

蘇元風／國家災害防救科技中心坡地與洪旱災害組 副研究員

2016 年底自然雜誌刊登了一篇文章，文章中使用了 300 萬幅衛星影像，追蹤全球 32 年來水體的分佈，以及其隨著時間的變化^[1]，該文章作者使用的影像正是來自於美國的傳奇衛星——大地衛星（Landsat）。從 1972 年發射的大地衛星 1 號，到現在的大地衛星 8 號，近 50 年中以蒐集了約 700 萬幅影像，被廣泛應用在地球自然資源監測，大大提升了生態、水資源、災害等領域的研究視野。本文蒐集 1972 年至 2018 年之 Landsat 系列衛星，監測山區裸露地的長期變動趨勢，以曾文水庫集水區為例。

前言

開放大數據（Open Big Data）的時代正湧湧地朝我們而來，自從 2008 年美國地質調查局（U. S. Geological Survey, USGS）開放大地衛星（Landsat）自 1972 年所拍攝的衛星影像後，至今已被下載超過 2 千 5 百萬圖幅（圖 1），科學家使用這些影像於生態、水資源、森林火災、淹水、崩落地、糧食等領域之研究，大大提升了研究的視野。據統計，在 2011 年共有 238 萬幅 Landsat 影像下載數，其為美國帶來的經濟效益達 180 萬美元的效益，而這僅是美國境內的數據^[2]。

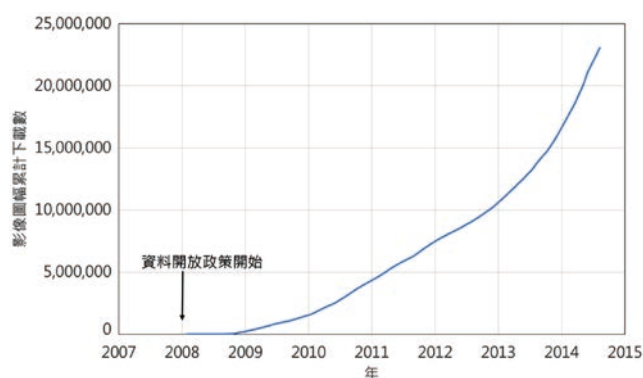


圖 1 Landsat 影像圖幅累計下載次數（重繪自 USGS）^[3]

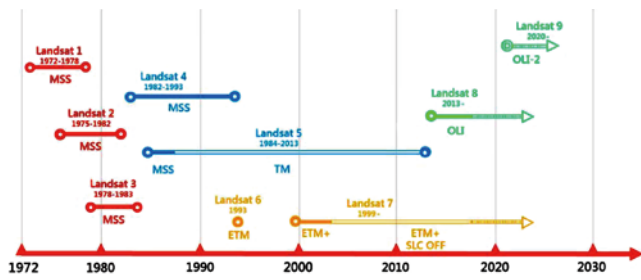
大地衛星的傳奇事蹟

近半世紀的守候，綜觀全覽的觀察

大地衛星有哪些傳奇事蹟？列舉如下：

- Landsat 1 是全球第一個地球資源觀測衛星，於 1972 年 7 月 23 日發射。
- Landsat 5 的設計壽命為 3 年，但在科學家的努力下，自 1984 年 3 月開始到 2013 年 6 月，整整運行了 28 年 10 個月，是金氏世界紀錄中運行時間最長的單顆地球觀測衛星。
- Landsat 系列衛星是目前運行最久且影像資料紀錄最完整的衛星，至 2018 年已運行 46 年，且 Landsat 9 衛星規劃於 2020 年底發射，可望使運行年限的紀錄超過半個世紀（圖 2）。

大地系列衛星自 1972 年發射第一顆 Landsat 1 衛星後，至今 40 多年期間，大地系列衛星共拍攝了超過 700 萬張影像，各衛星所拍攝的數量以 Landsat 5 最多，共約 250 萬張影像。雖然大地衛星的軌道涵蓋全球各地，然而受到氣候影響，在全球各地所拍攝的影像數量也不盡相同，以美加地區、東亞、澳洲等地重複拍攝數量最多^[5]。

圖 2 大地衛星系列時間線 (重繪自 USGS)^[4]

大地衛星的特性

察你所不察，及你所不能及

人眼所能感測的電磁波段稱為可見光 (visible light)，波長範圍約為 0.4 ~ 0.7 微米 (= 10^{-6} 公尺) 之間，衛星感測器能感測的範圍通常較人眼廣，且通常有超過三個波段，故稱為多光譜感測器 (multi-spectral

radiometer)。表 1 為 Landsat 系列衛星感測器之波段所對應之電磁波長範圍。由表可發現 Landsat 1 ~ 4 的 MSS 感測器，只有四個波段；而 Landsat 8 的 OLI 感測器則有 11 個波段，這些波段的別名如表所示，其反應出該波段的特性，例如：Cirrus 代表該波段可用於感測捲雲；TIR-2 則為第二個熱紅外光波段。空間解析度的部分，MSS 感測器之影像產品為 60 公尺，TM、ETM+、OLI 等感測器之影像產品為 30 公尺；另外，全譜態波段 (Panchromatic) 則為 15 公尺。這些不同波段的影像可分別反映出不同地表物體的在該波段的反射特性，若以藍光、綠光、紅光波段組合為彩色影像，即為真色影像 (true color image)，若以其他波段組合為彩色影像，即為假色影像 (false color image)，如圖 3 為 1998 年 Landsat 5 拍攝之臺灣地區影像，分別以不同波段組合之彩色影像呈現臺灣不同的樣貌。

表 1 Landsat 系列衛星感測器波段之波長

(單位：微米 = 10^{-6} 公尺)

Sensor	Landsat 1 MSS	Landsat 2 MSS	Landsat 3 MSS	Landsat 4 MSS	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI
Coastal Blue							0.43 ~ 0.45
Blue					0.45 ~ 0.52	0.45 ~ 0.52	0.45 ~ 0.51
Green	0.50 ~ 0.60	0.50 ~ 0.60	0.50 ~ 0.60	0.50 ~ 0.60	0.52 ~ 0.60	0.52 ~ 0.60	0.53 ~ 0.59
Red	0.60 ~ 0.70	0.60 ~ 0.70	0.60 ~ 0.70	0.60 ~ 0.70	0.63 ~ 0.69	0.63 ~ 0.69	0.64 ~ 0.67
Panchromatic						0.52 ~ 0.90	0.50 ~ 0.86
NIR*	0.70 ~ 0.80	0.70 ~ 0.80	0.70 ~ 0.80	0.70 ~ 0.80	0.76 ~ 0.90	0.77 ~ 0.90	0.85 ~ 0.88
NIR-2	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10			
Cirrus							1.36 ~ 1.38
SWIR-1*					1.55 ~ 1.75	1.55 ~ 1.75	1.57 ~ 1.65
SWIR-2					2.08 ~ 2.35	2.09 ~ 2.35	2.11 ~ 2.29
TIR*					10.40 ~ 12.50	10.40 ~ 12.50	10.60 ~ 11.19
TIR-2							11.50 ~ 12.51

*NIR：近紅外光；SWIR：短波紅外光；TIR：熱紅外光

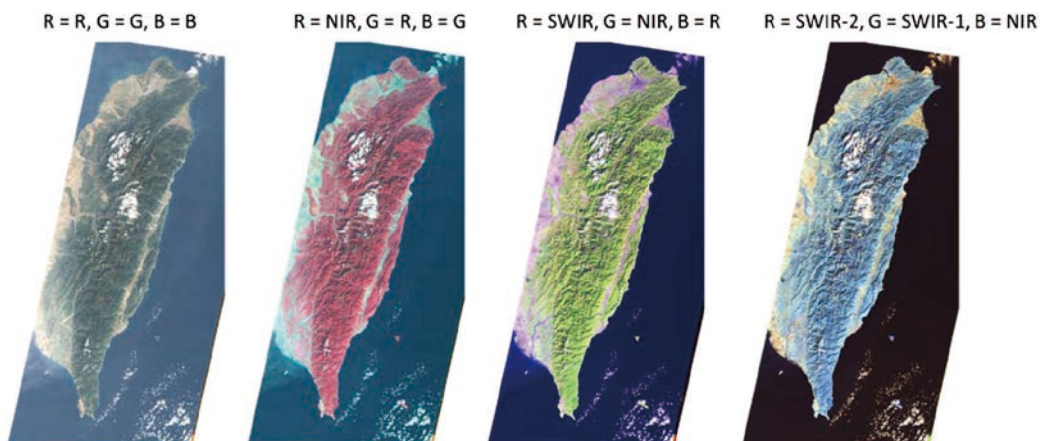


圖 3 1998 年 Landsat 5 拍攝之臺灣地區影像，左圖為真色影像，其他三圖為不同波段組合之假色影像 (WRS Path: 117, Row: 43-45)

集水區裸露地監測

近 20 年來受到颱風、豪雨、地震、人為開發等影響，山區裸露地逐年增加，然而其長期的增加趨勢為何？空間分布為何？為回答上述的問題，本文以曾文水庫集水區為研究區域，蒐整 1972 年至 2011 年間臺灣地區的 Landsat 影像（圖 4）。

由衛星影像分析土地覆蓋的方法很多，在此不詳述，影像分析的步驟摘要如下：

1. 影像拼接：將 Path: 117、Row: 43-45 的條帶影像圖幅拼接，拼接後影像大小 8000×14000 。
2. 幾何校正：影像下載後本身具有經緯度坐標系統，然而與臺灣地區常用的 97 二度分帶有些微差異，故透過地面控制點將影像定位為 97 二度分帶。
3. 切出研究區域影像：研究區域為曾文水庫集水區。
4. 圈選訓練樣本：本文選擇以 2009 年 8 月 27 日的影像挑選訓練樣本（圖 5），土地覆蓋類別分為六類：裸露地、植被、水體、漂流木、雲遮、陰影。
5. 分類方法為貝氏分類法（Bayesian Classifier）：以紅光、近紅外光、短波紅外光等波段組合為輸入變數。
6. 輸出為前述之六種土地覆蓋類別。

分析後挑選出 1984 年至 2011 年的土地覆蓋分類圖（圖 6），發現曾文水庫集水區在 2009 年莫拉克颱風

後，裸露地大量增加，其空間分布可由圖 6 看出；時間上的趨勢則可圖 7 中看出，其中累積百分比為整個集水區的各種土地覆蓋佔整個集水區的累積比例，植被所佔比例由 1984 年的 96.3% 下降至 2011 年的 92.9%；裸露地則從 1 ~ 2% 增加至 3 ~ 4%，特別是在 2009 年莫拉克颱風之後即上升至 4.07%；水體所佔比例則無明顯增加或減少趨勢，水體面積受到水文乾濕季節水庫蓄水量高低影響較顯著。

傳奇還會再延續？

Landsat 影像開放資料政策帶來許多好處，使得許多經費有限的科學家或機構有大量且珍貴圖資可供使用；然而，也由於此資料的大受歡迎，2018 年 4 月的一篇 Nature 期刊新聞顯示，美國政府正考慮要針對 Landsat 影像下載收費^[6]，若真的實施收費政策，勢必將使得 Landsat 影像使用率下降，部份使用者可能轉向其他免費衛星影像。例如：歐洲太空總署（ESA）運作的 Sentinel 系列衛星影像。Sentinel 系列衛星任務為歐洲哥白尼（Copernicus）計畫之主要任務之一，其中 Seneinel-1 衛星提供 C 波段之雷達影像；Sentinel-2 則提供多光譜光學影像，與 Landsat 系列衛星類似，具有 30 公尺之空間解析度；Sentinel-3 則主要設計針

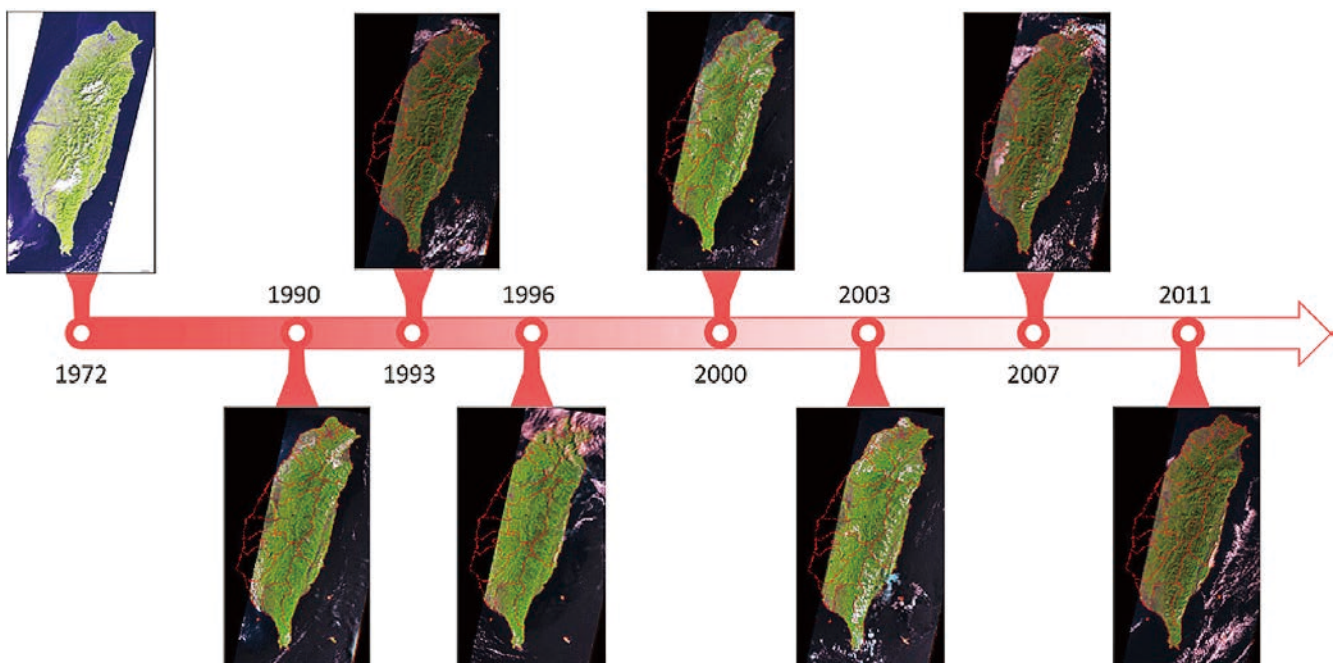


圖 4 1972 年至 2011 年臺灣地區假色影像（WRS Path: 117, Row: 43-45）

2009239

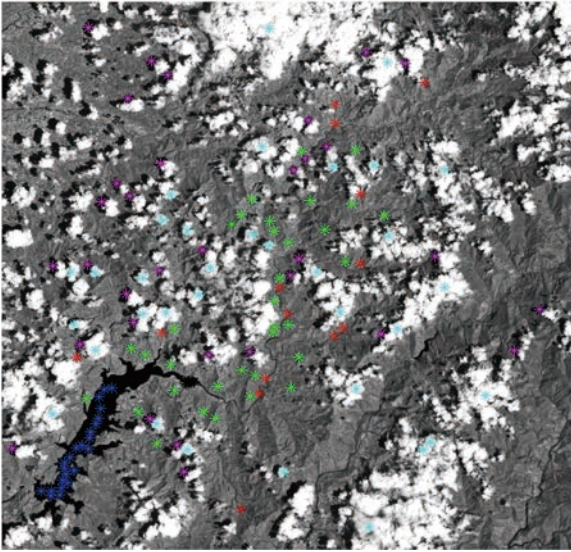


圖 5 土地覆蓋訓練樣本（2009 年 8 月 27 日之假色影像，圖中方格標示出各類別訓練樣本點之位置，紅色：裸露地，綠色：植被，深藍色：水體，黑色：漂流木，淺藍：雲遮，粉紫色：陰影）

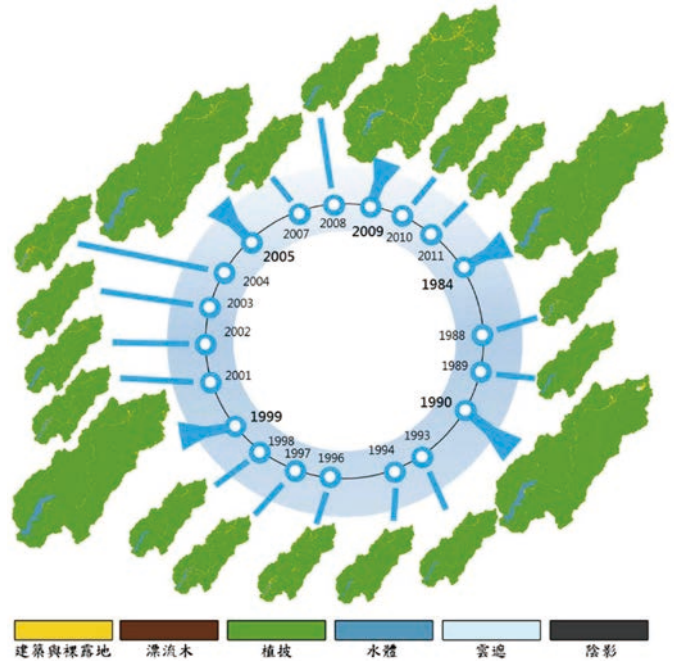


圖 6 1984 年至 2011 年曾文水庫集水區土地覆蓋分類結果圖

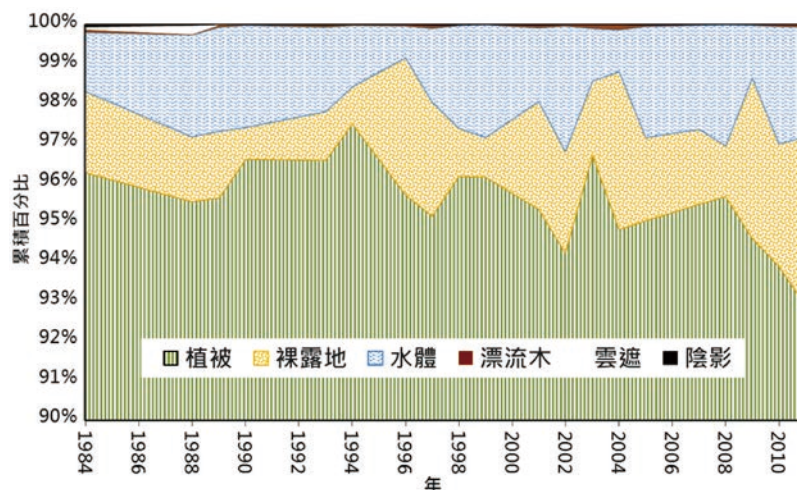


圖 7 1984 年至 2011 年曾文水庫集水區土地覆蓋佔研究區域之累積百分比時序

對海洋觀測的衛星；Sentinel-4, -5 則供大氣相關之觀測使用。歐洲太空總署自 2014 年發射 Sentinel-1A 之後，陸續發射了 Sentinel-1B、Sentinel-2、Sentinel-3A、-3B、Sentinel-5P，積極布署地球資源衛星，未來將成為 Landsat 系列衛星的最高競爭者，美國的大地衛星傳奇還能否再延續？

參考文獻

1. J.-F. Pekel, A. Cottam, N. Gorelick & A. S. Belward, 2016, High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, Vol. 540, pp. 418-422. DOI: 10.1038/nature20584.
2. John Loomis, Steve Koontz, Holly Miller, Leslie Richardson, 2015, Valuing Geospatial Information: Using the Contingent Valuation Method to Estimate the Economic Benefits of Landsat Satellite Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, pp. 647-656. DOI: dx.doi.org/10.14358/PERS.81.8.647.
3. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-benefits-u-s-economy-by-1-8-billion-per-year/>
4. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/>
5. Michael A. Wulder, Joanne C. White, Thomas R. Loveland, Curtis E. Woodcock, Alan S. Belward, Warren B. Cohen, Eugene A. Fosnight, Jerad Shaw, Jeffrey G. Masek, David P. Roy, 2016, The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 185, pp. 271-283. DOI:10.1016/j.rse.2015.11.032.
6. US government considers charging for popular Earth-observing data, <https://www.nature.com/articles/d41586-018-04874-y>



以數值地形及三維地質資料評析 石門水庫匹亞崩塌地

Assessment and Analysis the Pi-Ya Landslide in Shihmen Watershed by Using DEM and 3-D Geological Data

蕭震洋 Cheng-Yang Hsiao／財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 研究員

李易叡 Yi-Rui Lee／財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 研究員

周立生 Li-Sheng Chou／財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 研究員

近年在全球氣候變遷影響下，造成極端天氣越趨顯著，使得臺灣山坡地之崩塌災害現象頻生。本文以石門水庫集水區匹亞崩塌地為例，使用高精度 DEM 判識崩塌地地表特徵；接著，使用 PIV 方法分析坡地潛在滑動量；再者，以不同期數值地形分析不穩定土砂所在區域及量體；最後，參考地質資料建立三維地質模型，分析崩塌之機制及可能成因。研究成果可提供政府相關單位後續治理或監測規劃之參考。

ABSTRACT

In recent years, under the influence of global climate change, extreme weather has become more and more obvious, resulting in the frequent landslides of hill slopes in Taiwan. This paper took the Pi-Ya landslide in Shihmen Reservoir watershed as an example, using high resolution DEM to identify landslide surface features. And the PIV method was used to analyze the potential slips on the hill slope. In addition, also compared the DEM in different periods to analyze the unstable sediment area and volume. Finally, this paper used geological data to establish a 3D geological model, analyzing the mechanism and potential causes of landslide. The research results can provide reference for government agencies as follow-up governance or monitoring plans.

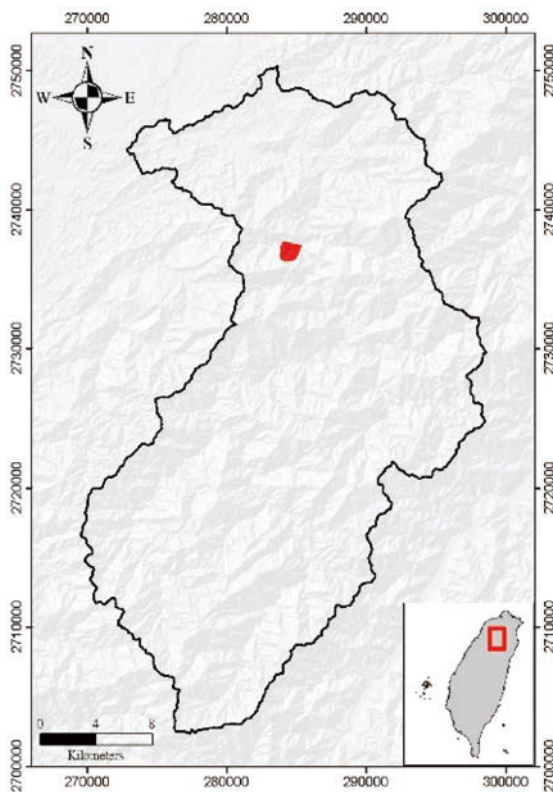
前言

山坡地約佔台灣全島面積 73%，且人口密度高，使平地土地不敷使用，山坡地開發成為常態，但山坡地常有潛變、滑動、崩塌等問題，同時，受氣候變遷影響，極端天氣出現頻率加劇，致使山坡地經常發生崩塌。以往採用等高線、分層設色、彩繪明暗圖或正射影像判釋崩塌地表特徵時，常受陰影影響，而導致判釋或分析成果有所遺漏。

山區之地質狀況往往比平地或是丘陵區複雜，因造山帶除了地層會受到擠壓產生大規模之變形及構造，地層之岩性也會受到不同程度的變質作用，而山區的侵蝕作用較高，形成複雜的地形，也增加了整合現地地質資料之難度。山區地質資料的取得一般透過現地之露頭調查、鑽井或是槽溝開挖，間接的地下地質則透過地物探勘（震測、地電阻剖面）方式推估，呈現上通常是將分散之調查點位整合，依開發之需要繪製不同比例尺之區域平面地質圖，並搭配線狀分布之地質剖面或立體地層柵狀圖。這些地質資訊除了不易與不同工程界面人員溝通之外，也不易分析坡地之崩塌機制及坡地之地下各地層細部位態及滲水等狀況。

近年來，空載光達已普遍使用於地形測繪，其具有高精度及高密度特性，故能不受陰影影響，提供具有地表細節之數值地形（Digital Elevation Model，DEM），同時，視覺化展示工具 MVS（Mining Visualization System）能以鑽井岩芯及露頭位態資料建構真實三維之地下地質模型。鑑此，本文應用空載光達掃描點雲及同步航拍所產製 95 年 6 月、97 年 11 月、98 年 10 月、99 年 11 月、

101 年 10 月及 104 年 7 月等共計 6 期之 DEM 及正射影像，另，地質岩性及位態資料則參考地調所五萬分之一地質圖，進行後續崩塌地相關分析。首先，以 DEM 分別計算地形開闊度及坡度後，產製各期紅色立體地圖，再進行崩塌表面特徵判釋，接著，透過質點影像測速法（Particle Image Velocimetry, PIV）計算前、後兩期紅色立體地圖間之水平位移場，進而評估崩塌位移量，再者，分析前、後兩期數值高程模型間之地形差異量，藉以評估不穩定土方區位及量體，最後，以 MVS 配合地質資料建構三維地質模型，進而分析崩塌可能成因，並嘗試套疊含地表高程之紅色立體地圖及正射影像，後續可供相關治理機關訂定工程治理及監測等策略之參考。



(a) 匹亞崩塌地與石門水庫集水區



(b) 匹亞崩塌地與鄰接道路

圖 1 研究區域位置圖

研究區域概述

本文以鄰接台 7 線之匹亞崩塌地為研究區域（如圖 1），其位於石門水庫榮華壩下游之匹亞溪集水區，96 年至 97 年間接連數起颱風造成坡面左右兩側之蝕溝寬度擴大，並皆持續向源侵蝕，至 101 年蝕溝兩側邊坡失穩，致使崩塌持續擴大（如圖 2），已影響有多戶居民之內奎輝原住民部落惟一聯外產業道路及石門水庫重要道路台 7 線之用路人安全，且大量泥砂移運至下游，亦影響石門水庫營運。

崩塌地表特徵判釋

崩塌地表特徵可從現地調查或遙測資料判釋得知^[1,2]。然而，現地調查雖正確性高，但常有見樹不見林之憾，而早期解析度較差的遙測資料，隨著科技日漸提升，目前已可應用空載光達取得高密度及高精度的地形三維點雲資料及同步航拍影像，足以應用於地形及地貌判釋。

崩塌發展的過程中，會在地表留下地形徵兆，故可使用適當的工具或方法判釋具有崩塌潛勢的地點，本文以千葉達朗及鈴木雄介^[3]提出建議方式，以 DEM 製作紅色立體地圖，並判釋崩崖、裂隙及蝕溝等崩塌地形特徵，藉以圈繪潛在崩塌區。紅色立體地圖其結合陰影及分層設色圖的優點，不受模擬光照方向及陰影影響，能正確呈現地形凹凸之特徵，已廣泛應用於地形學及地質學等領域。橫山隆三等人^[4]先以 DEM 依序分別計算各位置之突出地面及深入地底的程度，並加以結合（如圖 3），能以立體感顯示地形平緩或傾斜等特徵，亦稱為地形開闊度圖（Opennesses）。千葉達朗及鈴木雄介^[3]則進一步整合地形坡度（Slope）產製紅色立體地圖（如圖 4），更便於以肉眼輕易地判釋出地表特徵。爾後，許多研究人員^[5-10]在紅色立體地圖的技術概念下，嘗試用解析度更好的地形資料、各式的坡度計算方法、地形開闊度的轉換函數、顯示色彩及值域，都是為能提高地形特徵細節，藉以增加地形特徵判釋或分類的豐富度及正確性。

自 95 年起即可以紅色立體地圖（如圖 5）判釋出匹亞崩塌地之崩崖、裂隙及蝕溝等崩塌地表特徵，97 年 11 月時，兩條蝕溝已有向源侵蝕及向下刷深現象，

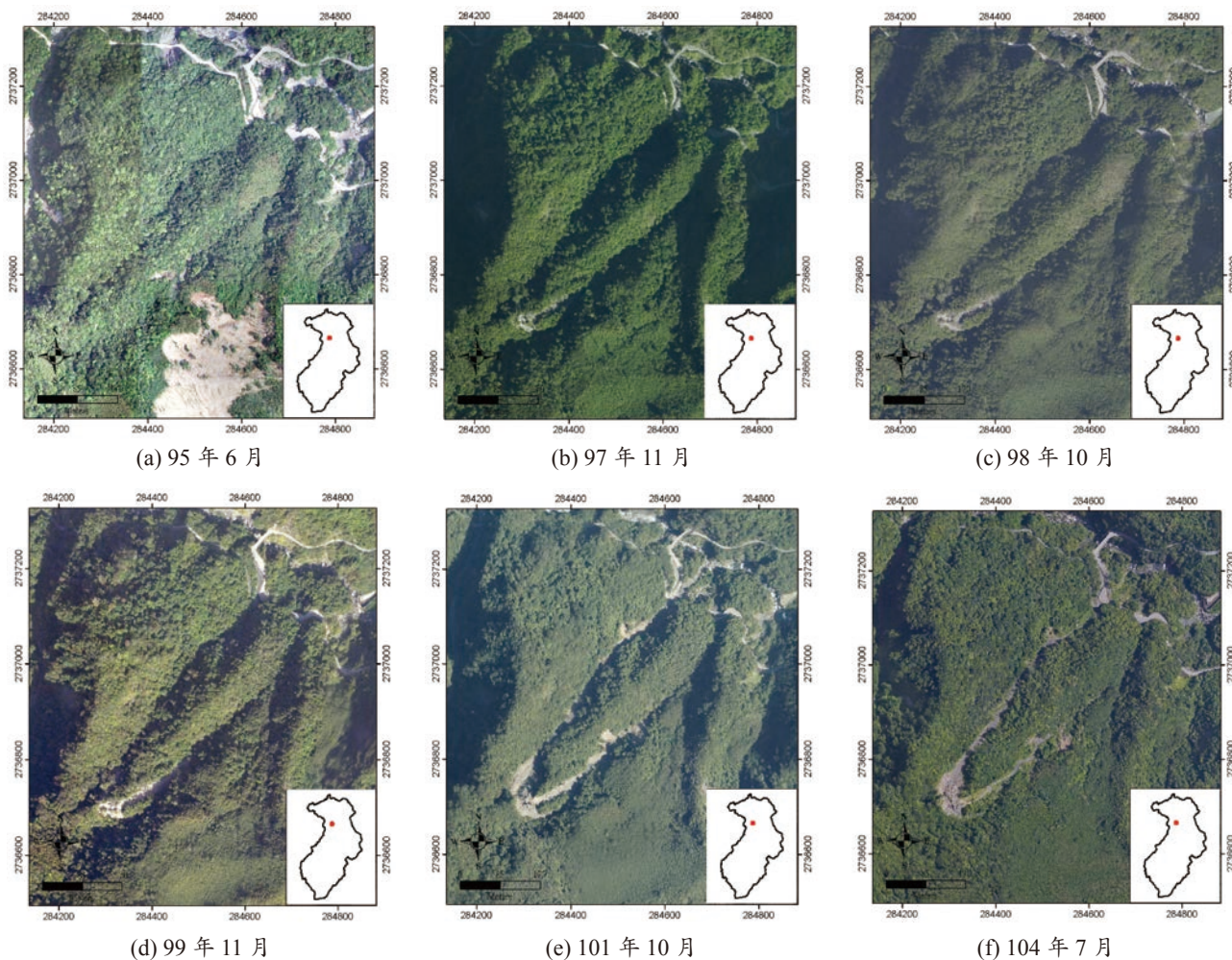


圖 2 研究區域歷年正射影像圖

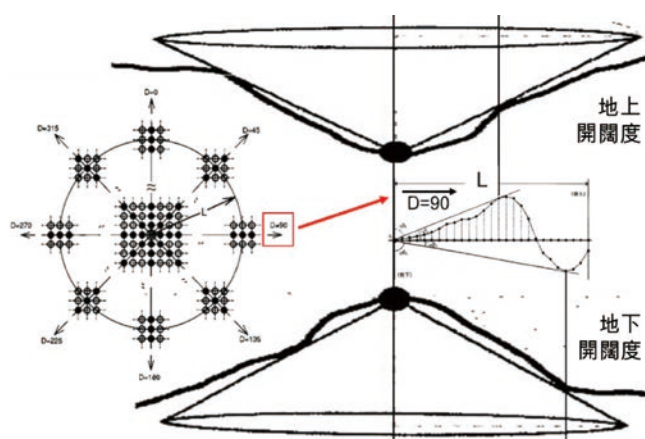


圖 3 地形開闊度計算概念圖 (改繪自橫山隆三等人^[4])

101 年 10 月地表裂隙特徵已明顯增多且蝕溝有明顯擴寬現象 (如圖 6)，顯示紅色立體地圖較正射影像更適合做為崩塌發展過程之地表特徵判釋資料來源。

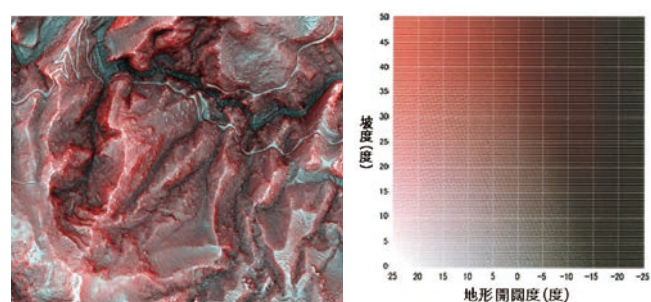


圖 4 紅色立體地圖示意圖 (右圖為配色原則建議，摘自千葉達朗等人^[11]；左圖紅色立體地圖係本文產製，以匹亞崩塌地為例)

崩塌滑動位移量評估

崩塌滑動位移量可透過現地佈設地表伸縮儀、傾斜儀及傾斜管等儀器，即時監測地表及地中之滑動時間及移動距離，或透過雷達、光達或影像等遙測資料，比對前、後兩期地表特定點的移動距離，若坡面

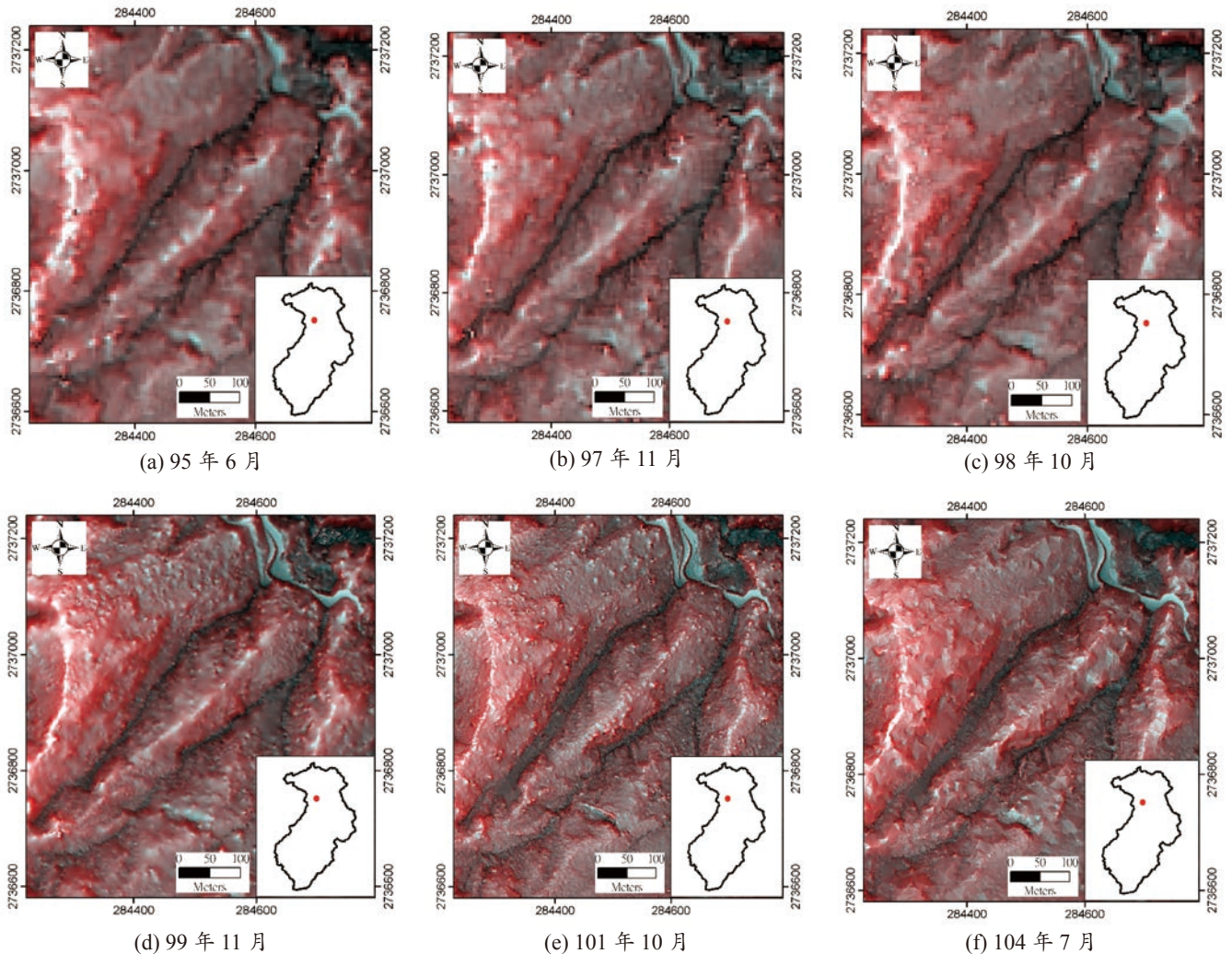


圖 5 研究區域歷年紅色立體地圖

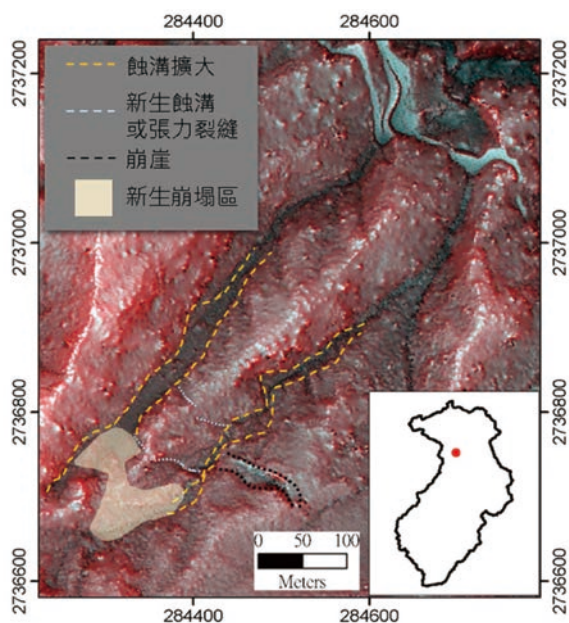


圖 6 以 101 年 10 月紅色立體地圖進行地表特徵判釋成果圖

恰好有適當樹種，亦可採用樹年輪判斷可能滑動時間 [12-14,1]。但儀器架設後始有監測資料紀錄，且不易有立即成效，坡面上又並非一定有適當樹種，而遙測技術中，以能穿透植被之光達較能取得地表資訊進行崩塌滑動位移量評估。

本文採用 PIV 分別運算並疊加各期紅色立體地圖或正射影像之各像元相關係數，可獲得機率密度向量場分佈，故能有效降低地表上植被等雜訊影響，並以機率密度場最高點為像元位移方向及距離，推算各像元運動方向及距離（如圖 7），故可分析崩塌地之變動方向及距離。

比較紅色立體地圖（99 年至 104 年等三期）及正射影像（95 年至 104 年等六期）分別之 PIV 分析成果（如圖 8 及圖 9），正射影像可能由於拍攝使用相機、

時間、航線、日照皆有所不同，且並非屬於使用同期地形資料進行微分糾正（Differential Rectification）之真實正射影像（True Ortho），導致各期正射影像有些微變形、陰影及色差，使 PIV 誤判地貌有所變化，故產生許多雜訊向量、或獲得受到照片立體扭曲所致反映影像變形之向量場（如圖 8）；反觀使用同樣坐標系統之各期 DEM 製作紅色立體地圖，因不受模擬光照方

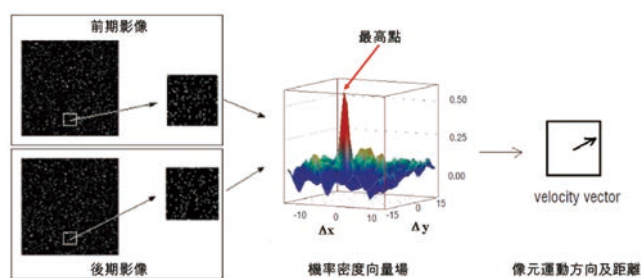


圖 7 PIV 原理說明圖（改繪自 C. Brossard *et al.* [15]）

向及陰影影響，能在相同位置上顯示地形特徵，故 PIV 雜訊較低、向量場一致性較高，且能夠反映地形特徵之變位量，利於進行崩塌滑動位移量評估，但仍受到 DEM 製作品質、樹高扣除差異所影響。

本文根據原始影像解析度，與實際空間長寬比決定合適分析網格大小、向量機率密度場大小、濾除原則等，決定航照 PIV 分析採用參數（如表 1）。

由圖 8 觀察可發現 97 年 11 月至 104 年 7 月共五期航照之前後期航照間差異非實際地形變化導致，為航照拍攝航高、角度、日照、陰影、鏡頭參數等造成影像拍攝不均勻扭曲，因此 PIV 判釋結果向量場雖一致但非正確向量場。由圖 9 觀察可發現 99 年 11 月、101 年 10 月、104 年 7 月三期 DEM 品質均略有差異，但整體而言構造明顯、判讀容易，經過 PIV 分析比對構造特徵移動狀況顯示之向量場，相對合理且方向一

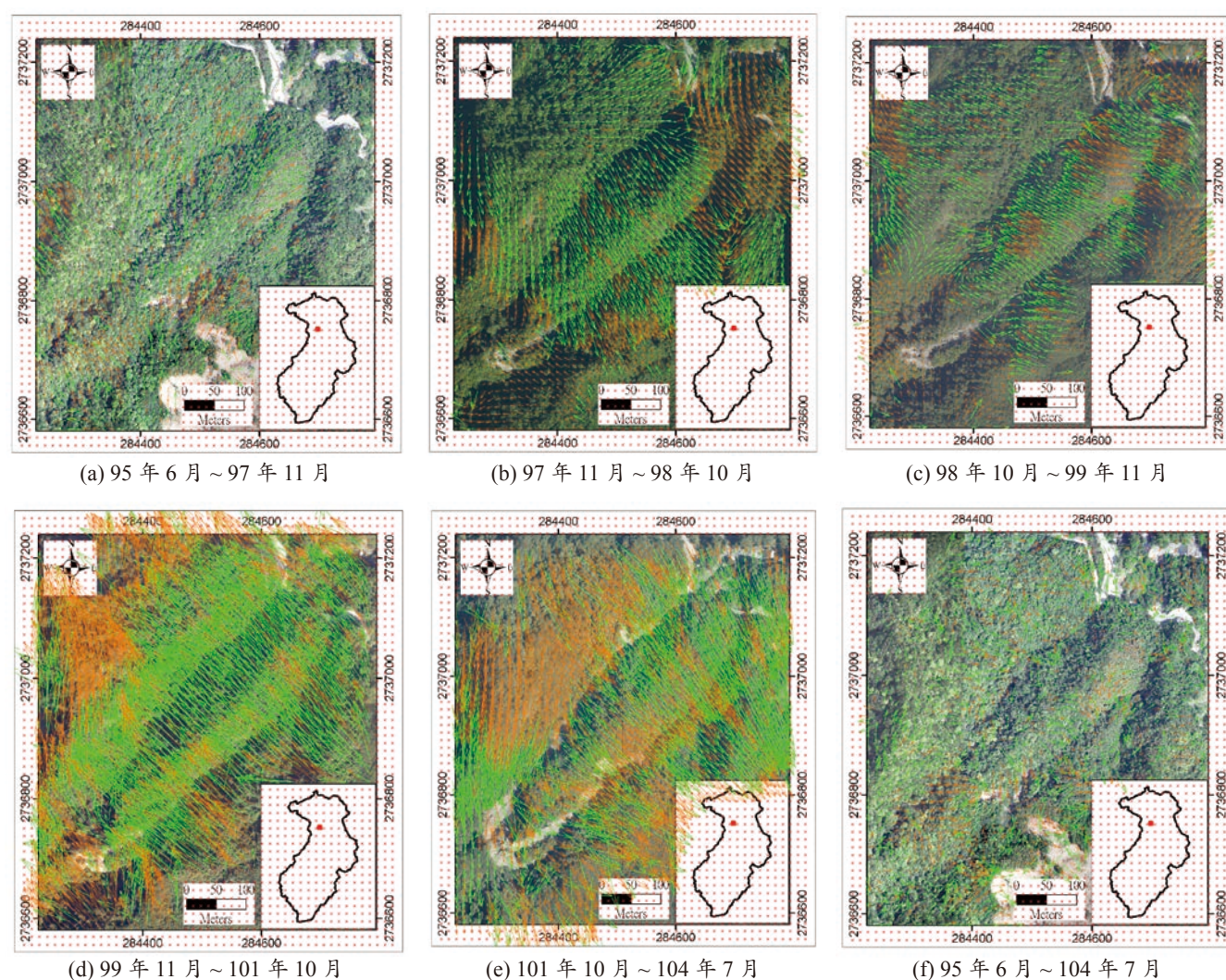
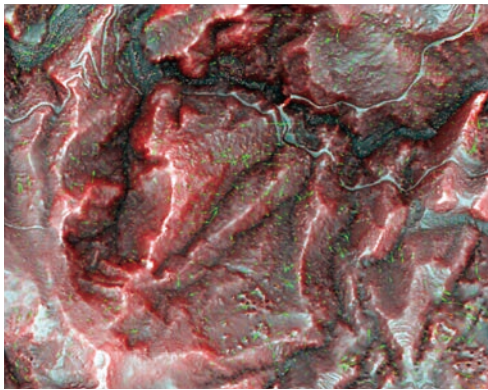


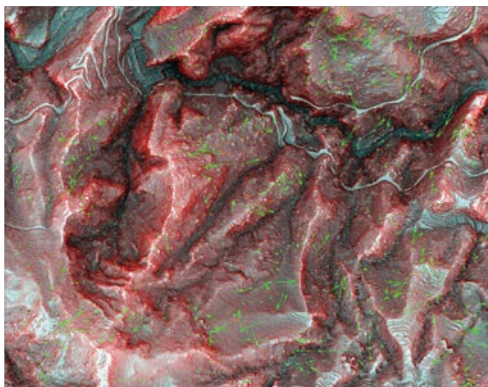
圖 8 研究區域前後期正射影像 PIV 分析成果（以前期航照為底圖）

表 1 本文質點影像測速法 (PIV) 分析使用參數表

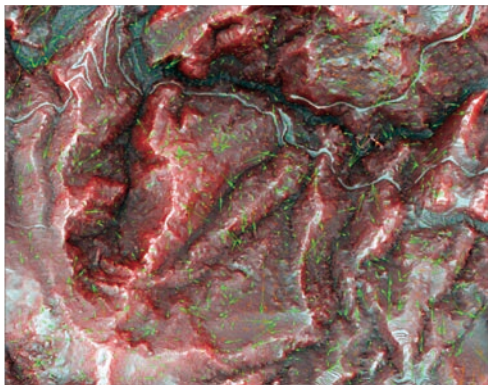
參數項目	航照圖採用數值	紅色立體地圖採用數值
向量場分析網格距	64 pixels	128 pixels
機率密度場搜尋範圍	128 × 128 pixels	64 × 64 pixels
影像長寬	1620 × 1824 pixels	1468 × 1253 pixels
實際長寬	570 × 660 公尺	1468 × 1253 公尺
像素與長寬比	3 pixels / m	1 pixel / m
向量濾除原則 (Filter)	航照圖濾除原則	紅色立體地圖濾除原則
方向	不濾除	不濾除
向量大小標準差 (STD)	2 倍標準差以上	2 倍標準差以上
中值濾波 (Local Median Filter)	門檻 (Threshold) : 3	門檻 (Threshold) : 1



(a) 99 年 11 月至 101 年 10 月分析結果 (99 年 11 月 DEM 為底圖)



(b) 101 年 10 月至 104 年 7 月分析結果 (101 年 10 月 DEM 為底圖)



(c) 99 年 11 月至 104 年 7 月分析結果 (104 年 7 月 DEM 為底圖)

圖 9 研究區域前後期紅色立體地圖 PIV 分析成果

致，崩塌區域以外分析判釋之移動向量甚微，主要向量雜訊來自於 DEM 品質差異，如空載光達掃描點不足造成椎狀平滑化影響兩期間 PIV 分析結果、樹高扣除方式不理想造成雜訊，或河道、道路因空載光達點雲分布差異造成邊界線性略有偏移等。以三期 PIV 分析判釋結果比較，99 年 11 月與 101 年 10 月等兩期 DEM 品質較為一致，崩塌周圍向量方向均朝向蝕溝發育，冠部崩崖區域之向量主要與坡向及蝕溝發育方向相符合，經濾除 2 倍標準差雜訊後，向量大小多集中於 0 ~ 3 公尺，尚屬合理；而 104 年 7 月 DEM 則因植被下品質不一，故 101 年 10 月與 104 年 7 月、99 年 11 月與 104 年 7 月之 PIV 分析結果，向量雜訊相對較多，但趨勢仍大致類似，惟 101 年 10 月至 104 年 7 月間之地表變異不大，故向量並不顯著。

不穩定土方區位及量體分析

為判斷不穩定鬆散土方之區域及其量體，可比對崩塌裸露地範圍內的地形高程差異量，一般採前、後期數值地形相減方式（如圖 10）。但各期數值地形之間可能存有系統性的誤差，在做差異比對前，應於相同基準下比較同性質資料才具意義，此時應利用同樣條件，消除共同誤差，亦稱之為差分 (Differential)，例如比較穿著不同鞋子的兩個人之身高差異，需要知道兩個人穿鞋時的高度（或高度差）及兩雙鞋的高度差等兩個條件，即可計算兩個人正確的身高差異，鞋的高度差就是系統性的差量（如圖 11）。也就是說可以在沒有高程變動的地點先計算出前、後兩期數值地形的高程系統性差量，就能在增加或扣除系統差量後，計算出前、後兩期間變動區域的正確高程差異量。

本文採用水保局^[16]及 Hsiao *et al.*^[17]所提出不同期產製數值地形比對前之差分校準法 (Procedure of calibrating multi-temporal DEMs)，先將數值地形校準後，才進行前、後期地形差異分析，即可正確判斷崩塌料源及堆積等不穩定鬆散土方之區域及其量體。

各期間地形高程差異分析結果如圖 12 及表 2。95 年 6 月至 104 年 7 月間，一開始僅坡頂有些微崩塌並運移至鄰近下方區域堆積後，蝕溝逐漸往上游襲奪，兩側蝕溝有部分土砂向下游運移，至 99 年 11 月至 101 年 10 月間，主要崩塌區域位於兩側蝕溝上游匯集源

頭處，且蝕溝兩側坡面有多處崩塌產生，下刷最深達 15 m，且外移土砂量達 24,909.1 m³，為 95 年至 104 年評估期間最大的土砂運移事件，外移土砂約占評估期間總量的 68%，經查詢中央氣象局各颱風事件累積降雨量，可能是 101 年蘇拉颱風於 8 月 1 日至 3 日間，由於每日於該崩塌地皆有降下超過 200 mm 以上的累積雨量所造成，101 年 10 月至 104 年 7 月間，前期滯

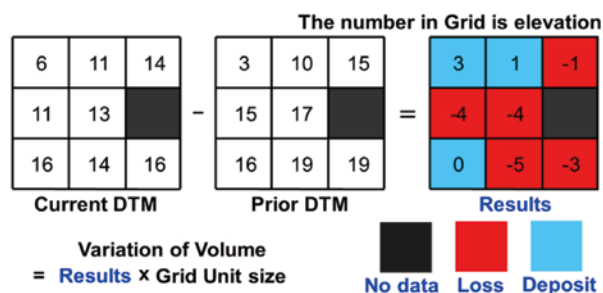


圖 10 前後期 DTM 比對方式示意圖 (摘自 Hsiao et al. [17])

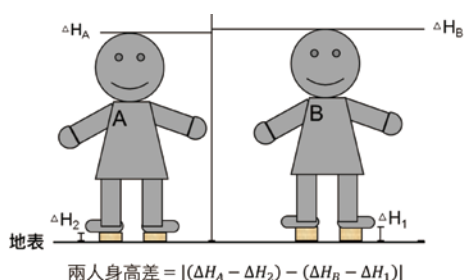


圖 11 比較兩人身高差前須先各別扣除各自的鞋子高

表 2 研究區域前後期地形高程差異量分析成果

期間	堆積區		下刷區		移出量 (m ³)
	堆積最深 (m)	堆積量 (m ³)	下刷最深 (m)	下刷量 (m ³)	
95 年 6 月 ~ 97 年 11 月	4.2	1,686.2	-10.6	-4,543.4	-2,857.2
97 年 11 月 ~ 98 年 10 月	1.7	124.6	-8.7	-5,247.6	-5,123.0
98 年 10 月 ~ 99 年 11 月	4.5	591.5	-4.6	-1,442.3	-850.8
99 年 11 月 ~ 101 年 10 月	10.7	17,970.2	-15.0	-42,879.3	-24,909.1
101 年 10 月 ~ 104 年 7 月	2.9	1,115.0	-6.6	-4,216.3	-3,101.3
95 年 6 月 ~ 104 年 7 月	10.1	17,401.6	-16.9	-54,243.1	-36,841.5

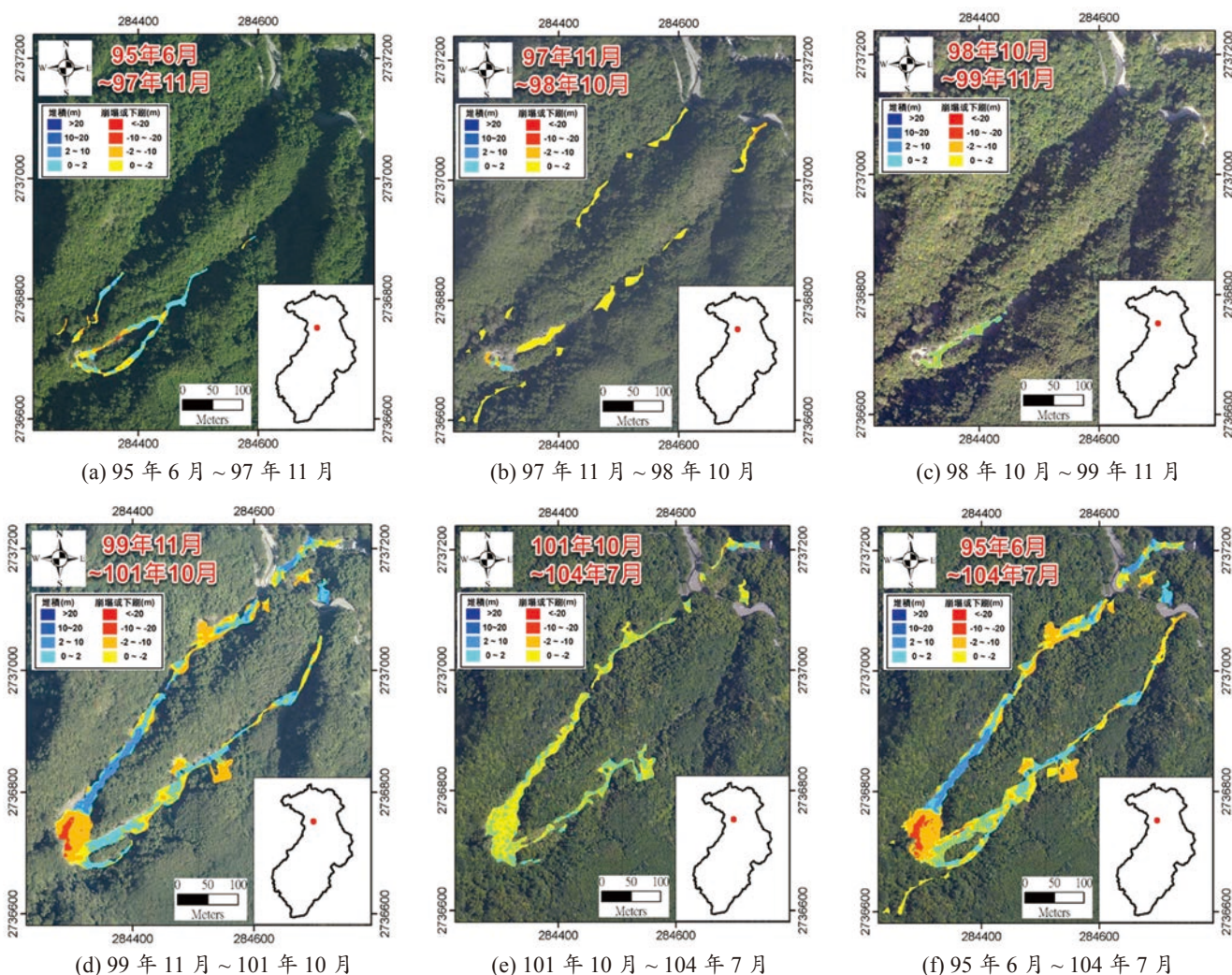


圖 12 研究區域前後期地形高程差異分布圖

傳統地質圖資的展示方式主要是以平面圖為主，包括等高線圖、等物理量分布圖或是地層等深線圖，要了解現地的地下地質構造則是以剖面圖資作為展示之手法，例如地形剖面圖、構造平衡剖面、震測剖面、地電阻分布圖以及鑽井之地層柵狀對比圖等等，隨著地理資訊系統（GIS）的發展與三維資料軟硬體處理技術的進步，已可將複雜的平面地質圖資或大量的地質調查資料以三維立體化、視覺化、數量化等方式呈現，經由 GIS 系統將其數化並整合之後，藉由三維視覺化軟體的展示及建模便可以呈現出現地之三維地下構造。三維地質模型的建置不僅可提供專業地質工程人員以數值化的地質資訊與不同工程界面人員溝通；對於重要工程建設所面臨的地質問題，透過三維視覺化的處理，可將複雜的地質議題能簡易的讓社會大眾了解，增加政府與民眾的溝通效率，亦能滿足人民知的權利。三維地質模型具有易於觀察地層、岩性、地下水或構造於面狀分佈合理性，並可依據缺疑部分規劃新增孔位及深度。

以往鑽井規畫是以線性分布為主，建立地質鑽井剖面圖（如圖 13），或結合數條線狀剖面建立立體地層柵狀圖（如圖 14），但若是規畫面域不夠廣泛，便不易與三維的地形資料結合，也不易計算量體。現藉由 MVS，即可將面狀分布之鑽井地下資料建立成三維地質模型（如圖 15），因此在鑽井位置之選取上，無需受限於條帶或是線狀分布，反而可以針對調查區域進行廣域、平均分布的鑽井選址。此外，透過結合地形及三維地質模型，更可達到分析崩塌成因、崩塌材料、崩塌可能深度及潛在量體估算之目的。鑑此，本文使用美國 C-Tech 公司所發展的 MVS 軟體作為三維地質模型的建置與展示工具，是一套真實三維（true 3D）

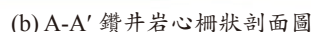
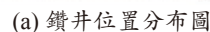
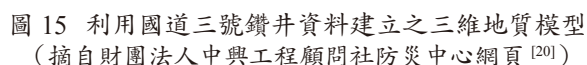


圖 13 鑽井位置及剖面示意圖 [18]



視覺化分析展示工具，由於 MVS 能與 GIS 系統（如 ArcGIS）進行無縫整合，使得建置在空間資料庫中的地質資料，能直接作為建立三維地質模型及分析資料來源，並可達到 (1) 真三維（True 3D）視覺化分析及顯示；(2) 三維斷層圖塊產生；(3) 三維地質資料空間克里金（Kriging）統計分析。

三維地質模型雖可結合高精度 DEM，直觀的呈現現地之地層於地表之分布情形，也可從地質模型剖面中判斷其滑動機制。然而，本研究區域因受限於鑽孔範圍之數量及深度不足（如圖 16），且鑽孔點位並未涵蓋三維地質模型範圍，故先參考地調所五萬分之一地質圖中地質剖面圖，因本研究區及鄰近範圍位於插天山背斜之軸部及西翼（圖 17），依此初步建立三維地質模型，藉以確定區域之地層位態分布情形，接著，因本區地層為漸新世乾溝層，岩性為硬頁岩夾薄至厚層砂岩，同時，位於本區鄰近之鑽井岩心，主要為厚層頁岩偶夾薄層粉砂岩，據此粗估頁岩及粉砂岩之厚度比例，建立三維地質模型，如圖 18 所示。同時，地質模型可結合 DEM、正射影像（圖 19）或是紅色立體地圖（圖 20）進行地表之地形判釋及呈現，也可呈現地層岩性於地表面之分布情形（圖 21）。在模型中也可切割剖面觀察坡面與地層之關係，判斷其滑動機制，如圖 22 所示。

若鑽孔點位能平均分布於調查區中，便可降低推估之不確定性，在三維地質模型中進一步建立地表崩

積層及土壤層之厚度，進而可配合各期歷史 DEM，計算前後期間之崩塌主要岩層及量體，甚至可能可做為歷史崩塌模擬的材料參數來源之一。但一般山坡地之調查受限於經費，僅有少量鑽孔數量，且深度常未達百公尺，故不易建立完整三維地質模型。若要建立深部地層分布之三維地質模型，則需間接透過地質剖面圖、岩層位態分布或是面狀分布之地球物理測線調查成果，此外，更可依此三維地質模型作為後續安排鑽孔增加調查數量、分布及深度之參考。

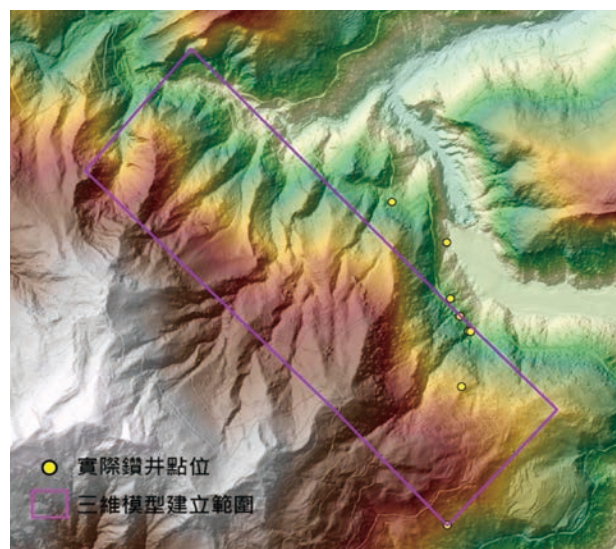


圖 16 鑽井點位與模型範圍分布圖

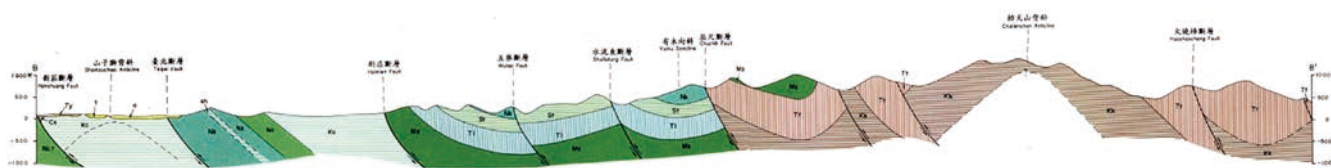


圖 17 研究區地質剖面圖（摘自地調所五萬分之一地質圖桃園圖幅^[21]）

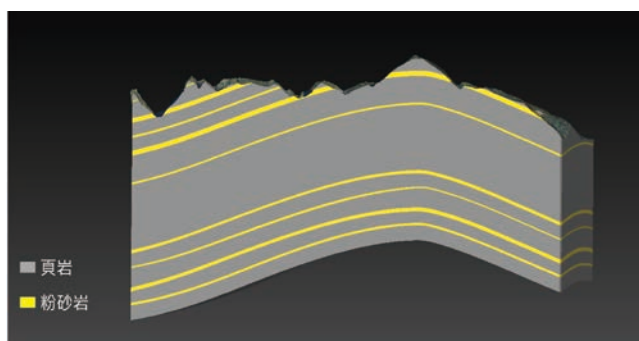


圖 18 參考地質剖面圖建立插天山背斜形貌之地質模型

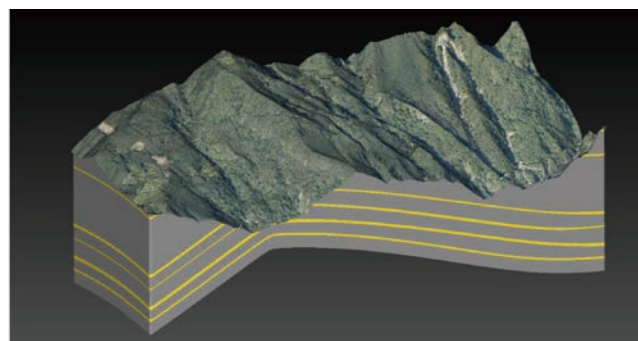


圖 19 三維地質模型套疊 DEM 及航空照片

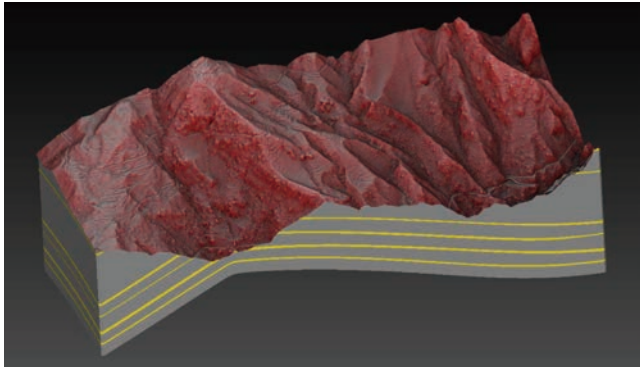


圖 20 三維地質模型套疊 DEM 及紅色立體地圖

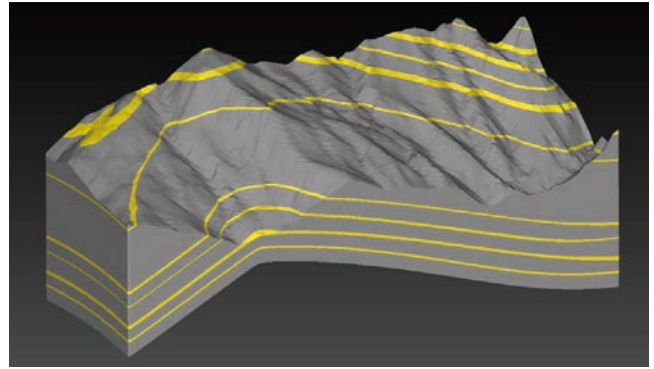


圖 21 三維地質模型地層分布

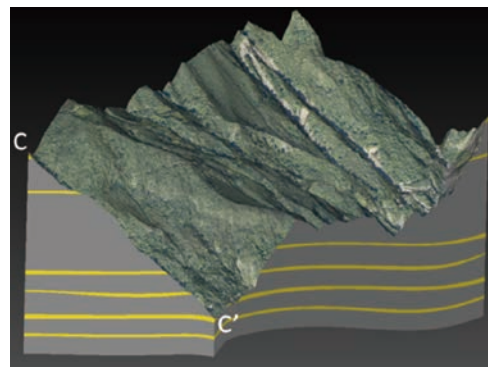
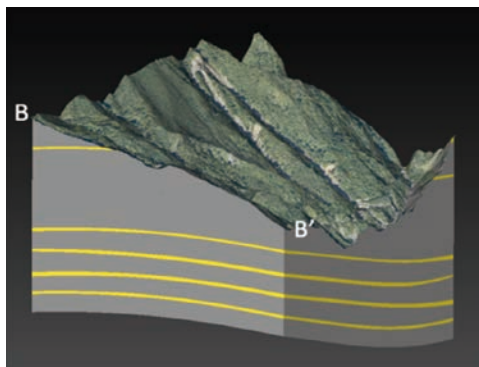
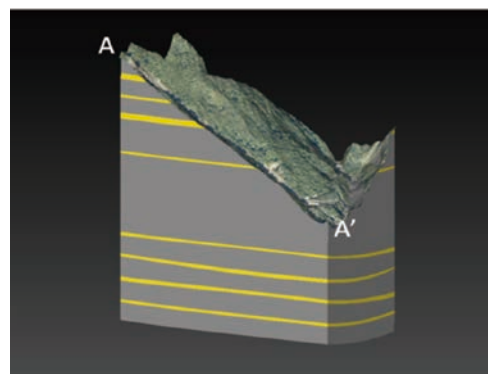
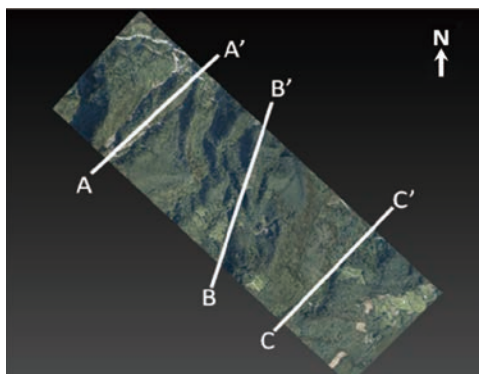


圖 22 三維地質模型可切任意方向之剖面，觀察坡面與地層面之關係

根據研究區域三維地質模型，研判坡面和地層對應關係後，匹亞崩場地應不屬於順向坡地形機制。

結論與建議

本文以空載光達之高精度及高密度施測成果產製 DEM 轉繪成不受模擬光照方向及陰影影響之紅色立體地圖，能有效呈現地形凹凸，便於判釋崩崖、裂隙及蝕溝等等崩場地地形特徵。因目前能取得皆非屬於真實正射影像（True Ortho），導致各期正射影像有些微變形、陰影及色差，使 PIV 產生許多雜訊向量，導致分析成果並不理想，但使用 PIV 分析前述紅色立體地

圖之向量場，均分布於 0 ~ 3 公尺，尚屬合理，顯示 PIV 若配合紅色立體地圖分析為可行之視覺化、特徵追蹤量化處理方法。匹亞崩場地地形差異分析 99 年 11 月至 101 年 10 月間之成果顯示，主要崩塌區域位於兩側蝕溝上游匯集源頭處，且蝕溝兩側坡面有多處崩塌產生，下刷最深達 15 m，且外移土砂量達 24,909.1 m²，約占 95 年至 104 間之外移土砂總量的 68%，為評估最大的土砂運移期間，經分析，應為日累積降雨量皆超過 200 mm 之 101 年蘇拉颱風所造成，目前仍有多數不穩定土方仍滯留於蝕溝上游側，應特別關注。本研究區域因受限於鑽孔範圍之數量及深度不足，且鑽孔點

位並未涵蓋三維地質模型範圍，故本文三維地質是依照地質圖資訊推估地層之位態，以及現有之鑽孔岩心記錄推估頁岩及粉砂岩比例所建成，並依此研判匹亞崩塌應不屬於順向坡地形機制。同時，參考崩塌位移量分析結果，匹亞崩塌較可能屬於蝕溝發育所造成崩塌。此外，以少量鑽孔、地質剖面圖、岩層位態分布或是面狀分布之地球物理測線調查成果所建立三維地質模型，可作為後續安排鑽孔增加調查數量、分布及深度之參考。

建議未來正射航照圖進行 PIV 分析前，仍需經過影像變形校正，以減少 PIV 分析得到影像變形向量場，而非地表地形變形向量場之可能性；但反向思考，PIV 分析方法可以量化影像之不均勻變形，若有參考點，亦可輔助校正影像間的變形誤差調整之參考。建議仍需針對 DEM 之平面、樹高扣除等問題進行校正，且產製品質應盡量一致，可有效減少地表地形不真實所造成之雜訊向量，方能獲得良好 PIV 分析成果。目前應用 UAV 拍攝高解析度影像已非常普遍，其可產製超高密度的點雲資料，及應用同期地形製作真實正射影像，建議後續可產製細節更高之紅色立體地圖及正射影像進行相關研究。後續更建議能增加不同區域的三維地質模型研究以提升適用性外，還可嘗試以較多的鑽孔資料建立精度較高之地下地質模型，推估不同岩性之歷史崩塌量，做為歷史崩塌事件模擬的材料參數，進而分析其可行性。

誌謝

本文過程承蒙農委會水土保持局及中興工程顧問社同仁提供相關參考資料及建議，僅此一併申謝。

參考文獻

- Jeff Keck, Cheng-Yang Hsiao, Bor-Shiun Lin, Ming-Hsun Chan, William Wright (2014), Spatiotemporal Landslide Activity Derived from Tree-rings: The Tieliku Mingsui Landslide, Northern Taiwan (103 年中華水土保持學報, 45(1): 36-48).
- 林伯勳、蕭震洋、柯傑夫、詹明勳、冀樹勇 (2014)，樹年輪地形學評估崩塌歷史活動度之應用案例探討。103 年中興工程季刊，第 124 期，第 71-84 頁。
- 千葉達朗、鈴木雄介 (2004)，赤色立體地圖 — 新しい地形表現手法。用測量論文集，第 15 期，第 81-89 頁。
- 橫山隆三、白沢道生、菊池祐 (1999)，開度による地形特 の表示，「真測量とリモートセンシング」Vol. 38, No.4, 26 – 34.
- 張玲、楊曉平、魏占玉、黃偉亮 (2014)，三維數據的二維可視化方法綜述。地震地質，第 36 卷，第 1 期，第 275-284 頁。
- Chiba, T., Kaneta, S. I., and Suzuki, Y. (2008), Red relief image map: new visualization method for three dimensional data, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, pp. 1071-1076.
- Lin, Z., Kaneda, H., Mukoyama, S., Asada, N., Chiba, T. (2013), Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey, Geomorphology, 182, pp. 104-115.
- 陳奕中、侯進雄、謝有忠、陳柔妃、吳若穎 (2014)，高解析度空載光達資料結合地形開闊度分析於構造特徵之應用。航測及遙測學刊，第 18 卷，第 2 期，第 67-78 頁。
- Wang, K., Wang, C., Zhang, Q., Ding, K. (2015) Loess shoulder line extraction based on openness and threshold segmentation, Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 44, pp. 67-75.
- 郭耀駿 (2016)，以自製紅色地圖輔助地形判釋。國立中興大學碩士論文。
- 千葉達朗、鈴木雄介、平松孝晋 (2007)，地形表現手法の諸問題と赤色立体地圖。地圖，第 45 卷，第 1 期，第 27-36 頁。
- Paolini, L. and Villalba, R. (2010), Rainfall Up, Mountain Down?, Tree Rings and Natural Hazards, Springer, London, New York, pp. 121-125.
- Carrara, P. E. and O'Neil, J. M. (2002), Tree-Ring Dated Landslide Movements and Their Relationship to Seismic Events in Southwestern Montana, Quaternary Research, Vol. 59, pp. 25-35.
- Lopez, S. J, Corona C, Stoffel, M, Astrade L, Berger, F., and Malet J. P. (2012), Dendrogeomorphic Reconstruction of Past Landslide Re-activation with Seasonal Precision: the Bois Noir landslide, Southeast French Alps, Landslides, Vol. 9, No. 2, pp. 189-203.
- Brossard, C., Monnier, J.C., Barricau, P., Vandermoot, F.X., Le Sant, Y., Champagnat, F., Le Besnerais, G. (2009), Principles and applications of particle image velocimetry. Optical Diagnostics of Flows, pp. 1-11.
- 水保局 (2011a)「石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估」。
- Hsiao, C. Y., Lin, B. S., Chen C. K., and Chang, D. W. (2014), Application of airborne LiDAR technology in analyzing sediment-related disasters and effectiveness of conservation management in Shihmen Watershed. Journal of GeoEngineering, Vol. 9, No. 2, August, pp. 55-73.
- 陳文山、游能悌、楊小青 (2013)，重要活動斷層構造特性調查研究計畫斷層活動特性分析與評估 (3/4)。經濟部中央地質調查所報告第 102-9 號，共 90 頁。
- 羅仕榮、徐祥宏、沈顯全 (2007)，儲集層整合分析與研究。2007 台灣地球科學聯合學術研討會。
- 胡剛與毛爾威 (1996)，桃園及圖幅說明書。五萬分之一台灣地質圖幅，第 8 號。經濟部中央地質調查所，共 39 頁。
- 財團法人中興工程股同社防災中心網頁 (<http://dptcr.sinotech.org.tw/>)。
- 邵國士、李易叡、洪世勳、林貴崑、鄭錦桐、俞旗文、焦中輝、黃連通 (2011)，地質空間資訊的三維展現與應用。中興工程季刊，第 110 期，第 73-81 頁。



多元整合空間資訊技術於 地層下陷監測與防治之應用

洪偉嘉／國立交通大學土木工程學系 兼任助理教授

陳怡安／國立中央大學地球科學系 博士候選人

黃金維／國立交通大學土木工程學系 講座教授

台灣濁水溪沖積扇（行政區域包括彰化縣與雲林縣）在地質條件上富含易壓縮土壤，加上不當過量抽用地下水，導致該區域為台灣目前最嚴重的地層下陷區，尤其高速鐵路正通過該地區最嚴重的下陷中心，地層下陷將會對高速鐵路結構安全產生影響，使得地層下陷防治成為目前一個急需解決的重要議題。

政府為改善當地嚴重地層下陷問題，大力投入相關地層下陷防治工作，本文主要介紹台灣地區應用多元整合空間資訊技術監測濁水溪沖積扇的地層下陷，其中多元整合空間資訊監測技術的監測方法包含全球定位系統（Global Positioning System，GPS）、永久性雷達干涉技術（Persistent Scatterer Interferometry，PSI）、水準測量、磁環分層式地層下陷監測井（以下簡稱地陷監測井）與地下水位井等，分別從空中、地面及地下不同面向來監測三維變形。

前言

由於世界人口與經濟的持續成長，人類對於水資源的需求亦不斷提昇，當地面水資源不足時將轉而使用地下水資源以彌補不足，但不當超量抽用地下水將會導致地層下陷，進而產生其他衍生性災害，如地表變形、建物傾斜或龜裂、積水不退、海水入侵與土壤鹽化等，此一問題已普遍存在於各已開發或開發中國家^[1-3]，而台灣亦是其中之一。台灣西部平原地區由於經濟快速發展，水資源需求大幅增加，加上地下水取用方便，使得平原區超抽地下水的情形普遍，導致西南沿海地區嚴重的地層下陷問題，其中又以濁水溪沖積扇區域最為嚴重。

就區域地質而言，濁水溪沖積扇由濁水溪沖積而成，北起烏溪，南至北港溪，東起八卦山台地西麓和斗六丘陵，西止於台灣海峽，面積約 2,000 平方公里，

是台灣西部最重要的農業地區，同時為台灣最大沖積扇，以行政區域劃分則可分為彰化縣和雲林縣，圖 1 為濁水溪沖積扇地形分區圖。

圖 2 為濁水溪沖積扇之水文地質概念模型^[4]，濁水溪最重要的地下水補注區位於東側之扇頂，以厚層礫石為主，分層並不明顯，沒有主要的阻水層（泥層），地下水上下流通並無限制。西側扇頂以外部份，深度 330 m 範圍內由上而下有四個含水層（Aquifer）及四個阻水層（Aquitard）。就地層組成材料而言，濁水溪沖積扇之扇頂部份地層主要由礫石及粗砂所構成，根據土壤力學資料，這些地層具有較高的強度及透水性，不僅可壓縮性低，也容易獲得地表水之補注，因此地層下陷的潛能較低。相反的在扇央及扇尾部份，地層沉積物顆粒越來越細，尤其到了沿海地區，地層主要由細砂及黏土構成，屬於軟弱土壤，因

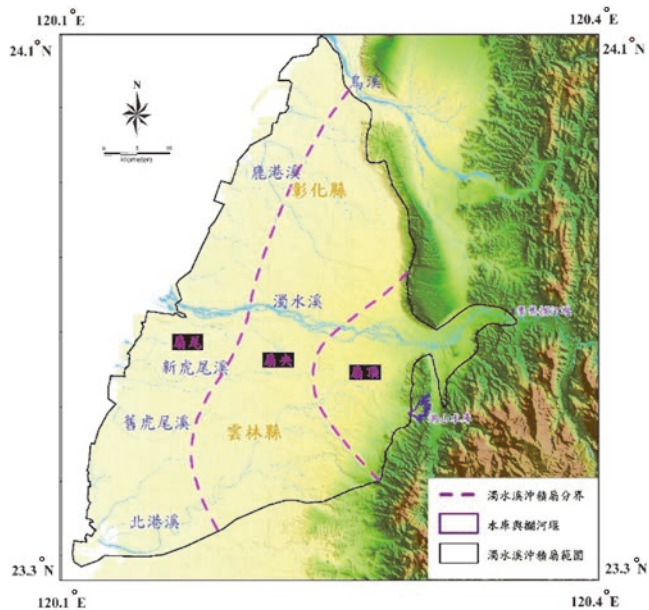


圖 1 濁水溪沖積扇地形分區圖。主要由濁水溪沖積而成，分布範圍涵蓋彰化縣及雲林縣等地區，為臺灣西部最重要的農業區域（修改自水利署 [5]）。

此當地下水受到超抽時，地下水位將因補注不及而造成水位降低，進而引起地層壓縮變形，歸納上述濁水溪沖積扇之壓縮潛能如表 1。

表 1 濁水溪沖積扇壓縮潛能統計表。

沖積扇位置	主要土壤組成	壓縮潛能
扇頂	礫石及粗砂	低
扇央	介於扇頂與扇尾之間	高
扇尾	細砂及黏土	高
壓縮潛能差異說明		
粗顆粒土壤，具有高強度及高透水性，不僅可壓縮性低，且容易獲得地表水之補注，因此地層下陷的潛能低。		

監測方法

圖 3 為多元整合空間資訊監測技術的示意圖，其中包含有 GPS 固定站、雷達干涉、水準測量、地陷監測井與地下水位站，分別從空中、地面與地下不同面向來監測整個地層下陷（濁水溪沖積扇整體的監測設備分布如圖 4），因為每個監測設備的優缺點不同，空間解析度與時間解析度亦不相同（詳如表 2），因此本研究利用其監測設備之特性，使其彼此之間可以互補與交互驗證；利用水準測量與雷達干涉監測成果，找出整個調查區的下陷範圍、下陷中心與下陷趨勢面；在嚴重的地層下陷中心，結合 GPS 固定站、地陷監測

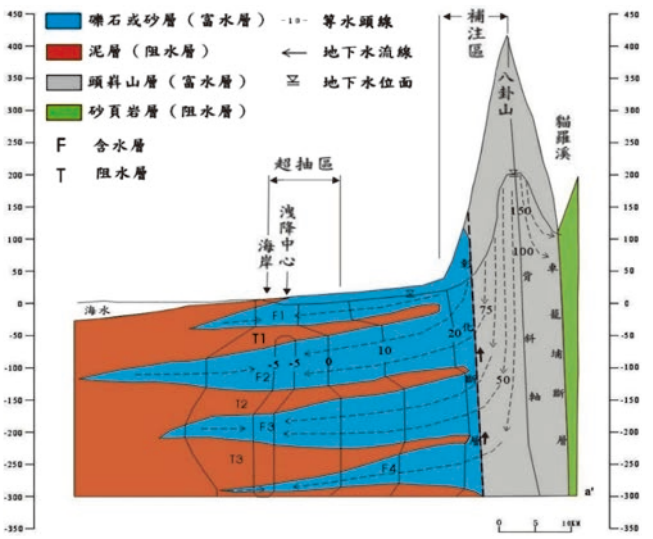


圖 2 濁水溪沖積扇之水文地質概念模型。由上而下有四個含水層及四個阻水層，扇頂部份地層主要由礫石及粗砂構成，地層沉積物顆粒越往下游越細，至沿海地區地層已改由細砂及黏土為主（修改自賴典章等 [4]）。

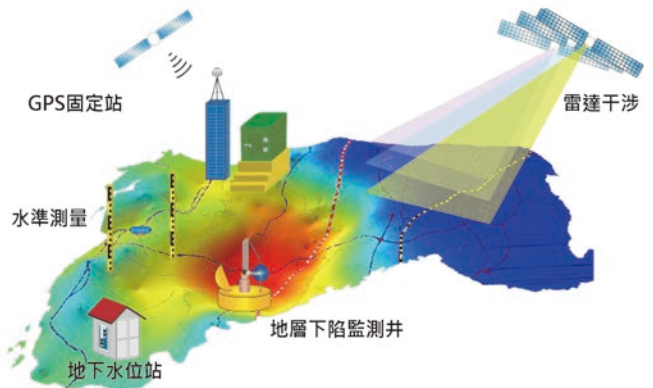


圖 3 多元整合空間資訊監測技術示意圖。分別由空中（InSAR、GPS）、地面（水準測量）與地下（地層下陷監測井、地下水位站）三個層面進行監測。

井與地下水位井，分析下陷中心的下陷機制與預測其未來之下陷量。透過現象的分析與機制的瞭解，最後提出減緩地層下陷的可能方案與建議。

表 2 多元整合空間資訊監測技術之解析度與量測精度比較表

項目	水準測量	GPS 固定站	地陷監測井	InSAR
空間解析度	1.5 ~ 2 km	10 ~ 15 km	5 ~ 10 km	6 ~ 25m
時間解析度	1 year	1 day	1 month	12 days (以 Sentinel 衛星為例)
垂直變動量測精度	0.5 ~ 1 cm	0.5 ~ 1 cm	0.1 ~ 0.5 cm	0.5 ~ 1 cm



圖 4 濁水溪沖積扇監測點位分佈圖。圖中綠色圓點為水準樁，紫色、橘色與黃色方形分別為 GPS 固定站、地陷監測井與水準測量參考點，桃紅色三角形為 GPS 與地陷監測井共站處，藍色實線為水準測線，紅白線段為高鐵路線，綠色空心線為中山高速公路。

監測成果

水準測量

濁水溪沖積扇的水準路線總長 970 公里，水準測量的量測精度為 $3 \text{ mm } \sqrt{K}$ (K 代表距離，單位：公里)。本研究使用的水準儀為 Trimble Dini 12 的水準儀，搭配原廠配置的鋼鋼尺，同時在鋼鋼尺上加裝溫度計，量測溫度以利後續誤差改正。測量誤差改正則包括有視準軸誤差改正 (collimation error correction)、地球曲率改正 (curvature correction)、水準尺溫度 (rod temperature correction) 改正與折射誤差改正 (refraction error correction)。平差計算採用不等權最小二乘法進行整體平差，其中以距離倒數為權，為確保整體觀測量品質及可靠度，本研究採用 Baarda 之 “Data Snooping” 理論 [6,7]。整體平差報表的各觀測量標準化改正數 W_i 計算方法為：

$$W_i = \frac{V_i}{\delta V_i} \quad (1)$$

其中 V_i 及 δV_i 分別為第 i 個觀測量之殘差及其後驗標準偏差。選擇信心區間為 0.01，則 data snooping 的臨界值為 3.3，即當 $W_i > 3.3$ 時，判定在該顯著水準下第 i 個觀測值予以淘汰剔除，以確認每次水準測量成果與品質。

利用每次獲得的水準測量高程計算下陷量後，再利用地質統計內插方法 (Kriging) 內插下陷等值線，最後獲得每年的下陷量圖，將上述成果累計之後，得到累積下陷量圖。圖 5 為 1992 ~ 2017 年雲林地區地層下陷累積下陷量圖，由圖中顯示整個雲林地區在過去 25 年中，最大累積下陷已超過 160 公分以上，主要沉陷位置發生在內陸的虎尾鎮、土庫鎮、元長鄉與褒忠鄉等四個鄉鎮，高速鐵路正通過最嚴重的下陷中心。

GPS 固定站

本研究結合經濟部水利署、中央地質調查研究所、內政部地政司、中央氣象局與工業技術研究院等五個單位共 40 個 GPS 固定站，組成聯合 GPS 監測網 (圖 6(a))；同時利用瑞士伯恩斯大學所發展之 Bernese 軟體，每日自動化對該監測網分析各站之三維坐標變化。

根據 GPS 固定站於 2010 年 4 月至 2017 年 4 月的觀測結果 (圖 6(b)) 顯示，在雲林虎尾鎮 (GFES)、土庫鎮 (TKJS) 與元長鄉 (KTES) 下陷最為顯著，年下陷速率最高達到每年 6 公分/年，其監測下陷變形的成果與水準測量相當一致。由於 GPS 具有連續性觀測的優點，未來可利用時間序列分析 (例如：主成

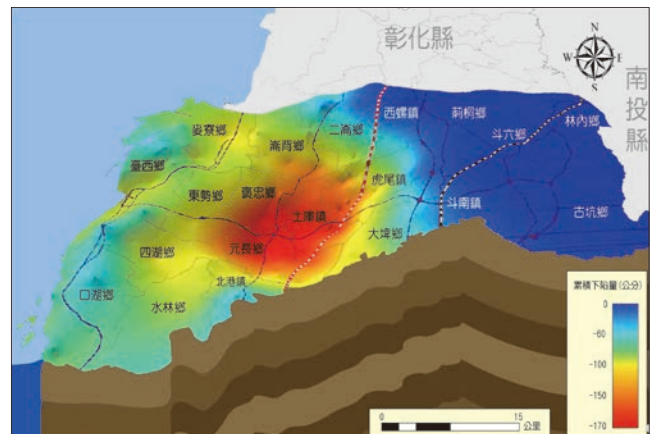


圖 5 1992 ~ 2017 年雲林地區累積下陷量圖。主要沉陷區域集中在虎尾鎮、土庫鎮、褒忠鄉與元長鄉等區域。

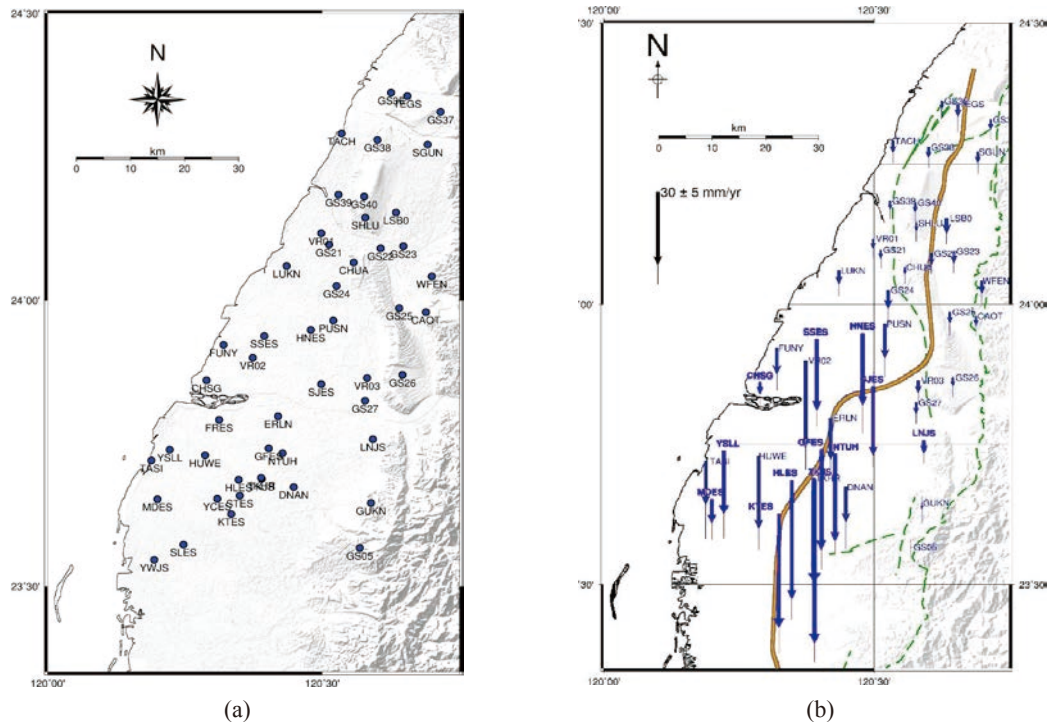


圖 6 (a) 雲彰地區 GPS 固定站分布圖；(b) 2010 年 4 月至 2017 年 4 月 GPS 高程變化圖。

分分析法，Principal Component Analysis)，精確地分析地層因季節性的變化與地下水的豐枯期造成地表高程的變化。

地陷監測井

如同第一節所敘述，濁水溪沖積扇的水文地質條件複雜，各個含水層也具有不同特性，為能監測地層下不同含水層的壓縮量，因此透過地陷監測井（參考圖 7）可釐清地表下不同地層之壓縮量。地陷監測井的原理，主要是依據現場鑽探的資料與地球物理探勘的方法，在地層下不同深度土層的分界位置設置磁環（每口地陷監測井設置約 20 ~ 26 個磁環），透過量測磁環位置的變化，可獲得不同深度的土層壓縮變化量，該監測井的量測精度經由量測不確定統計分析，可達到優於 1 mm 的監測精度^[8]，截至民國 106 年底在濁水溪沖積扇則已設置 31 口地陷監測井（監測井分佈位置參考圖 4）。

圖 8 為雲林縣土庫國中地陷監測井的量測成果（相關位置參考圖 4），由圖中顯示，該地區主要的壓縮深度發生在地下 200 公尺以下，該深度之土層主要為砂層與泥層之薄層相互交疊而成，因此只要抽水，

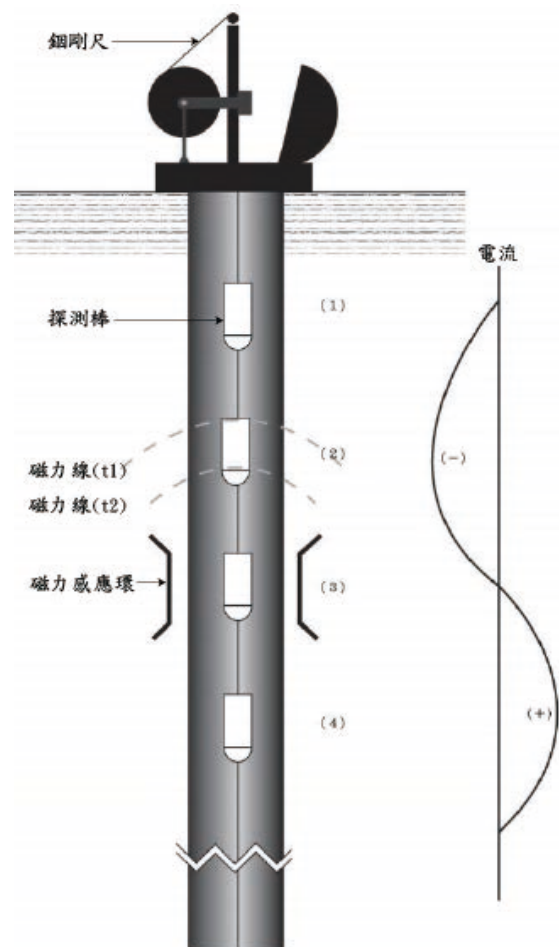


圖 7 地陷監測井示意圖

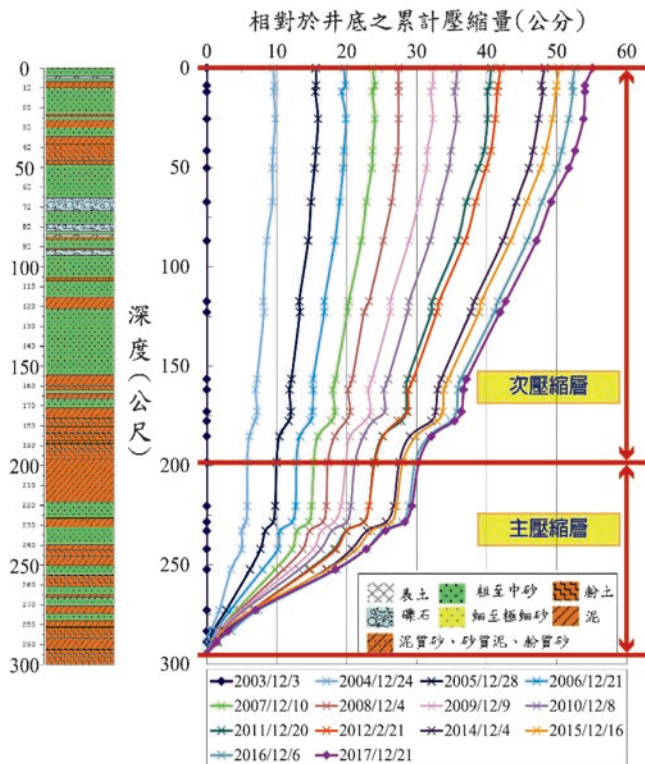


圖 8 土庫國中地陷監測井歷年累積壓縮量圖

因為厚度較薄，會有快速壓縮的效果，次要壓縮層主要發生在地底下 0 至 200 公尺之間。由圖 8 亦顯示該款的地陷監測井可以獲得地底下多個地層的壓縮量，進一步釐清可能的抽水來源，例如：如果主要壓縮深度發生在深層地層，則抽水主要來源可能為工業用水與民生用水，如果主要壓縮深度發生在淺層地層，則抽水主要來源可能為農業用水，因此透過地陷監測井資料，則可以有效掌握造成土壤壓縮的應力來源，進一步擬定防治措施減緩地層下陷。

雷達干涉技術

多時域雷達干涉技術 (Multi Temporal InSAR, MT-InSAR) 技術為涉及多時期影像之雷達干涉處理方法，不僅可提供高密度面狀資訊，同時在精度亦可達釐米等級，即與傳統測量方法相當之精度，具快速監測大範圍之地表形變之特性，目前在台灣地區主要使用三種 MT-InSAR 技術，主要包括 (1) Hooper *et al.* [9] 提出利用強度值與相位分析來辨識永久散射體之永久散射體差分干涉技術 (Persistent Scatterers InSAR, PSI)，目前該方法成功應用於彰化雲林地區的地層下陷監測 [1]。(2) Berardino [10] 提出短基線子集差分干涉技術

(Small Baseline Subset Differential method)，它能夠解決 DInSAR 技術中因基線過長導致的幾何去相關性誤差，並利用所有獲取的數據以提高取樣的時間解析度，確保變形的時間序列分析具有較高的空間密度，同時也適合對非都市區域地表變形場時間演化進行分析。(3) Zhang *et al.* [11] 提出的時域相關點雷達干涉 (Temporality Coherence Point InSAR, TCPInSAR)，該方法主要不使用相位解纏，改以最小二乘法解算，獲取長時間之地表變形速率，目前該方法成功應用於嘉義地區的地層下陷監測 [12]。

本研究利用上述三種方法中的 SBAS 法，對於濁水溪沖積扇進行實驗，同時利用水準測量成果進行校正，獲得永久散射體密度可達 77 像素/平方公里，而相同區域內之水準測量樁點位密度僅 0.2 個/平方公里，透過 210 個的監測點交叉驗證 PSI 與水準測量的成果顯示兩者的均方根誤差 (RMS) 達到 0.8 公分，顯示雷達干涉技術可獲得大範圍與高精度的地表變形量。同時藉由資料融合處理方法，更可有效結合「重複觀測」之水準測量與 SBAS 成果，提高整體監測精度，進而獲得更真實之地表變形趨勢面。

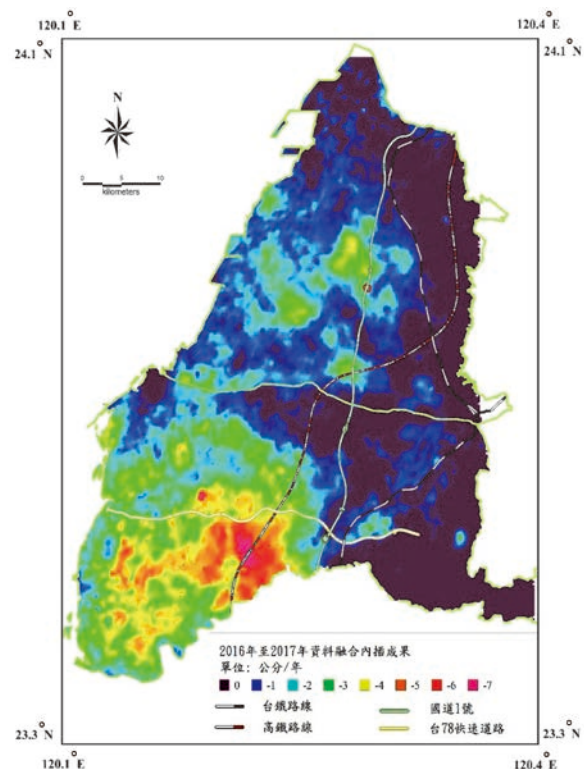


圖 9 2016-2017 年 SBAS 法與資料融合處理之雷達干涉成果。

圖 9 為藉由資料融合處理後之 2016 至 2017 年雷達干涉成果監測成果顯示，濁水溪沖積扇地區主要下陷區域分布於中山高速公路沿線以西地區（即扇央與扇尾地區），其中以彰化縣溪湖鎮、溪州鄉、二林鎮與大城鄉，雲林縣虎尾鎮、土庫鎮、元長鄉、褒忠鄉、四湖鎮與口湖鎮等區最為明顯，上述成果與水準測量成果一致。

結論與未來發展

長期地層下陷已經使得國土安全產生影響，台灣地區目前已發展多元化監測系統，分別從空中、地面與地下不同面向來監測地層下陷，除了可以快速掌握地表變形量，同時可以掌握主要應力的來源（地表深層或淺層的應力與變形量），搭配政府的地層下陷防治對策，以有效的減緩地層下陷速率，降低持續下陷面積。未來整體地層下陷監測也將朝向大範圍自動化監測的方向來發展，其中包括將應用全台 400 個全自動連續觀測的 GPS 固定站，瞭解重點地區的三維變化量，同時結合衛載的雷達干涉技術，快速掌握地表變形，利用資料融合技術精確瞭解地層下陷的影響範圍。

參考文獻

1. Hung, W.C., Hwang, C., Chen, Y.A., Chang, C.P., Yen, J.Y., Hooper, A., & Yang, C.Y. (2011), Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 957-967.
2. Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. (2011), Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy. *J. Geophys. Res.*, 116, B08407.
3. Ng, A.H.M.; Ge, L.L.; Li, X.J.; Abidin, H.Z.; Andreas, H.; Zhang, K. (2012), Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR. *International J. Appl. Earth Obs. Geoinform*, 18, 232-242.
4. 賴典章、費立沅、江崇榮（2003），台灣地下水分區特性，水文地質調查與運用研討會論文集。
5. 經濟部水利署（2014），103 年度多元化監測及整合技術應用於台北、彰化及雲林地區地層下陷監測。
6. Koch, K.R. (1987), *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*. Springer, Berlin, 378 pp.
7. Caspary, W.F. (1988), *Concepts of Network Adjustment and Deformation Analysis*. Monograph 11, Scholl of Surveying, University of New South Wales, Kensington, NSW, Australia, 183 pp.
8. Hung, W.C., Hwang, C., Liou, J.C., Lin, Y.S., & Yang, H.L. (2012), Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan. *Engineering Geology*, 147-148, 78-90.
9. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004), A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), 611-615.
10. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002), A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 40, 2375-2383.
11. Zhang, L., Ding, X., & Lu, Z. (2011), Ground settlement monitoring based on temporarily coherent points between two SAR acquisitions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66, pp. 146-152.
12. Hung W.C., Hwang C., Chen, Y.A., Zhang L., Chen K.H., Wei S.H., Huang D.R., Lin S.H. (2018), Land subsidence in Chiayi, Taiwan, from compaction well, leveling and ALOS/PALSAR: aquaculture-induced relative sea level rise, *Remote Sensing*, 10, 40; doi:10.3390/rs10010040 



中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260

e-mail: service@ciche.org.tw

一個凝聚產官學土木專業知識的團體
一個土木人務必加入的專業學術團體
一個國際土木組織最認同的代表團體
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體

歡迎加入學會



<http://www.ciche.org.tw>

請上網下載入會申請表



結合雷射掃描影像與 BIM 技術 進行隧道安全與管理

張嘉峰／財團法人臺灣營建研究院 博士

廖惠菁／財團法人臺灣營建研究院 工程師

彭念豪／程昱科技有限公司

莊子毅／國立臺灣大學土木工程研究所 博士

隧道襯砌變形監測為評估隧道穩定及安全性的程序之一。然而，除了設置感測器進行長期監測之外，隧道定期巡檢多採取人工目視，繪製襯砌損傷區域、損傷屬性並拍攝照片進行後續比對處理。對於規模較大的隧道，維護工作的執行與數據儲存往往需耗費大量時間、人力與成本。有鑑於此，本文說明以主動式感測的光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）掃描技術進行非接觸式的三維數據蒐集，在不受光源局限下快速獲得隧道襯砌的幾何資訊，並透過適當處理獲致雷射掃描影像，進行直覺化展示與空間資料處理，提升自動化作業之程度。此外，基於永續經營的目的，對於隧道施工階段的設計、工法、地質與岩體評分等資料，以及營運階段的歷年檢測報告、維修補強紀錄等龐大資訊皆應完整地記錄。因此，運用建築資訊模型（Building Information Modelling, BIM）技術於隧道工程設計、建設、營運之全生命週期的管理儼然成為必要趨勢。因此，本文著重在建構可整合於 BIM 模型中的隧道襯砌掃描影像資料庫管理系統，基於光達掃描資料，提供隧道襯砌掃描的目視檢查及非破壞檢測量化成果，並可與多時期既有襯砌損傷資料進行比對，掌握襯砌損傷的分布現況與劣化情形，促進隧道結構安全檢測之成效。

簡介

考量台灣地質環境結構複雜，隨著都市開發與基礎建設的發展，隧道工程在國道、鐵路及捷運等民生交通建設中皆扮演重要的環節^[1,2]。隧道結構的安全性除了與施工品質直接關聯外，周圍岩體地質特性、地下水分布及地震外力均可能造成結構體的擠壓變形、襯砌裂縫、剝落、滲水、混凝土劣化等影響。因此，營運中隧道安全檢測通常著重於調查隧道襯砌潛在的異狀並同時追蹤既有異狀變化，以確保隧道安全性與耐久性^[3-5]。其中，非破壞檢測技術為基於襯砌表面及其剖面幾何資訊進行隧道的診斷與評估。國際隧道協會

隧道營運小組將非破壞檢測技術區分為光學技術、導電與電子技術、物理波動技術與放射性技術四大類。其中，唯有光學檢測技術乃基於三維的空間資訊，包含目視、影像（光學或熱影像）拍攝、雷射掃描等檢測方式。其中，瑞士 Amberg 集團子公司 Spacetec 於 1981 年發展之 TS360 隧道掃描系統，結合影像掃描儀、紅外線熱像掃描儀及雷射掃描儀，大幅度地提升隧道檢測之技術水準。該掃描系統可放置於沿隧道前進之移動載具，隨著載具行駛穿越受測隧道斷面時，可獲得隧道全斷面灰階影像、溫度分佈影像及淨空剖面。另外，近年來光達雷射掃描系統發展迅速，可在

短時間內自動獲取環景掃描資料，產製高密度、高精度的三維點雲以描述隧道襯砌之幾何^[6-8]。同時，可搭載光學感測鏡頭來提供目標物的色彩紋理資訊。

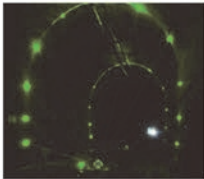
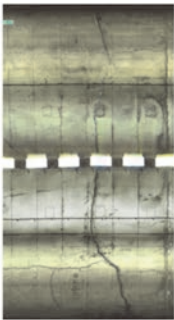
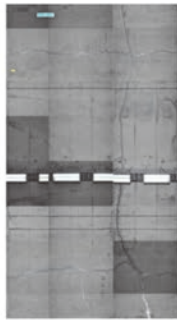
傳統隧道的安全巡檢仍是以目視檢測為主，並定期運用全測站進行導線測量，針對隧道單一襯砌剖面逐點進行三維量測^[9-11]。然而，為避免造成營運中隧道交通的衝擊，在有限的作業時間內往往只能對該剖面進行有限的取樣量測，因此可能造成未取樣處的變形訊號遺失。台灣自1993年起陸續辦理隧道結構安全檢測，採用目視測繪與全斷面掃描方式進行裂縫及滲水調查，並針對異狀顯著處進一步採用透地雷達實施襯砌厚度檢測，或採用混凝土強度錘進行襯砌局部強度調查，並針對嚴重處實施混凝土鑽孔取樣及強度試驗等必要補強措施。除此之外，地下捷運系統的結構可能因外在外力變化、襯砌材質劣化、漏水或其他因素而在結構弱位處產生外在或內在的異狀。因此，每5至6年可以隧道影像掃描技術進行隧道壁面異狀記錄，並配合現地詳細檢測作業，據以作為隧道安全評估與維修補強之依據。隧道影像掃描技術^[12,13]乃以照

相或攝影方式記錄襯砌表面影像，搭配高解析雷射掃描器快速記錄隧道壁狀態以進行襯砌表面異狀判釋。

隧道檢測作業所蒐集的數據，可能因採用不同的設備而產生不同的資料類型、格式以及不同的資料儲存及展示形態。早期之隧道影像掃描包括一般照相檢測、日本 CCD 隧道影像攝影系統、德國 Spacetec 公司 T2 與 T3 (TS360) 隧道影像掃描系統、瑞士 Amberg 公司 GRP5000 與 Tunnelscan 隧道影像掃描系統及日本 TIPS 隧道影像掃描系統等，而近年 GRP5000 與 TIPS 系統則被應用於國內地下捷運系統的全斷面隧道影像掃描。表1分別比較這兩系統、地面光達掃描 (Z+F Imager 5010) 及國內開發的影像量測技術之應用性。

然而，不論採用何種掃描技術，單次檢測作業即會產生龐大的資料量。因此，有效的隧道襯砌檢測管理系統對於定期檢測作業可有效地進行分析並且可與歷年的資料紀錄進行比對，來獲得合理的安全評估與適當的管理規劃，並亦可進一步將系統整合於管理隧道完整生命週期的建築資訊模型 (Building Information Modelling, BIM)^[14]。

表 1 隧道影像掃描技術比較

	GRP 5000	TIPS	Z+F Imager 5010	影像量測技術
系統設備				
作業速度	500 ~ 2000 (公尺/小時)	500 ~ 2500 (公尺/小時)	100 ~ 300 (公尺/小時)	100 ~ 200 (公尺/小時)
解析度	優於 1 公厘			
空間定位誤差	< 3°	< 5°	< 2°	< 5°
斷面淨空測量	同時進行	無法同時進行	同時進行	無法同時進行
影像展開圖				

隧道襯砌檢測管理系統

管理系統旨在整合展示不同時期同一區段內不同型態之資料，幫助管理者瞭解隧道特定區段之狀態，並藉由相關功能之設計，達成資料查詢、分析、比對、統計、警示等目的。考量不同時期隧道檢測作業可能產製不同類型、位置、用途且高度相關的龐大資料，因此系統自建資料庫以有效地儲存相關資料，提升查找資訊的便利性，並在資料匯入及匯出的同時維持資料的獨立性及完整性。此外，本系統除了展示平面影像及文字資料外，更透過環景影像的方式呈現隧道內的真實情況，使管理者可如同身歷其境一般，模擬現場作業人員身處隧道時的視角，提供更直觀的資料查閱方式。

系統架構

如圖 1 所示，為滿足上述各項需求，系統模組分為資料整合模組、全景影像展示模組、異狀資料管理模組、變形程度管理模組以及資料匯入／匯出模組。各資料模組分別說明如下。



圖 1 系統架構圖

系統模組功能

資料整合模組

如圖 2 所示，針對各個區段的檢測作業，系統將產生襯砌表面展開圖、異狀描繪圖、異狀套合成果圖、全景影像及異狀資料列表等資料。多種資料類型主要是用以描述襯砌在檢測時的狀態以及異狀區域於襯砌表面上分布的情況。藉由系統的資料整合模組，管理者不需要在不同的資料存放位置尋找特定檔案進行比對分析，進而大幅提升作業效率。

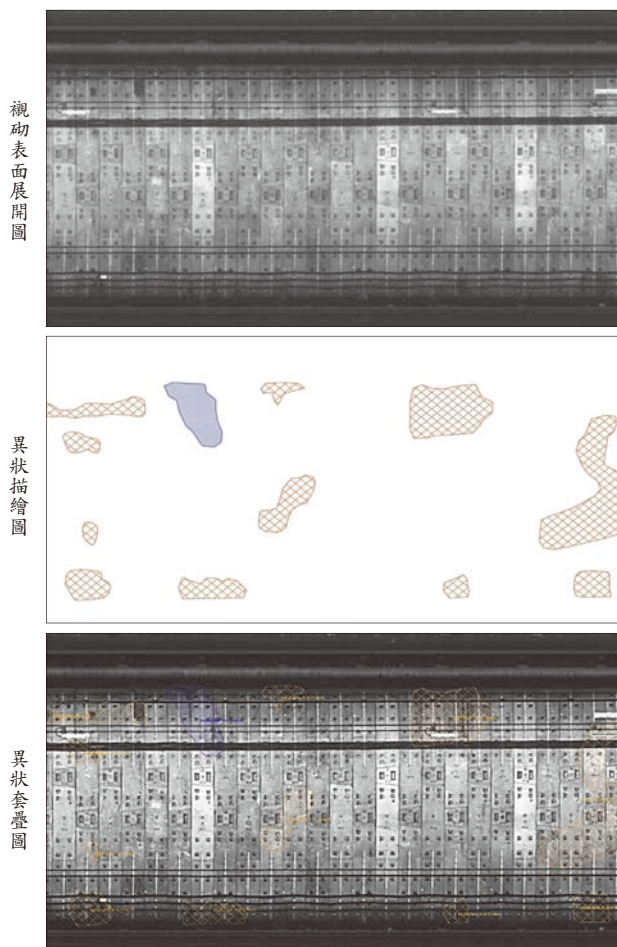


圖 2 系統所包含資料類型

同時，藉由圖形資料索引編輯介面（如圖 3 所示）可快速的在大量的原始資料中，搜尋並開啟特定區段的資料，提高資料查閱的效率，並降低檔案尋找錯誤的狀況。

全景影像展示模組

雷射掃描作業所獲得的原始點雲資料，基本上包含空間中各點位的三維坐標及其反射強度值，若有搭載光學鏡頭的設備則另包含每個點位上的紅、綠、藍三個色彩值。不同於二維平面圖資，點雲可清楚呈現空間中各點位的相對幾何關係。惟點雲的資料量龐大，即時展示對於系統運算會產生相當的負荷，因此本系統將點雲資料依據空間關係進行投影轉換，將資料由離散點轉換為全景影像，並以全景影像展示模組進行呈現（如圖 4 所示），透過模擬現場人員視角，使管理者有身歷其境的感受，可更快速地得知異狀區域在空間中分布的關係，並且可針對感興趣的區域進行放大檢視。



圖 3 圖形資料索引編輯介面

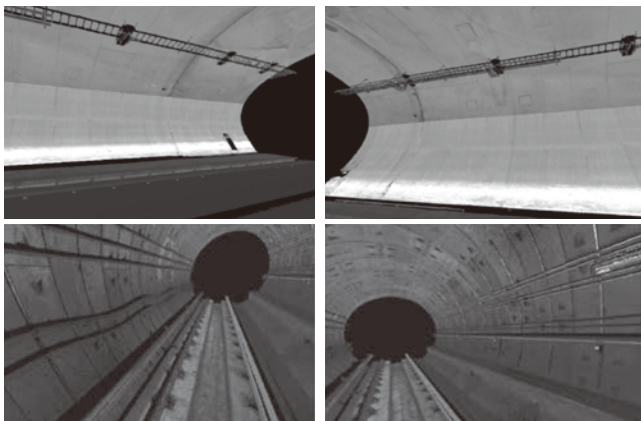


圖 4 掃描現場 720 度全景影像多角度視圖

除此之外，考量上述單一檢視區段所包含的資料，即襯砌表面展開圖、異狀描繪圖、異狀套合成果圖、全景影像及異狀資料列表。如圖 5 所示，系統提供一資料展示介面，將上述數種資料整合於畫面中，並提供隧道里程略圖來得知當前查看資料位於區段總長度內之相對位置，並可在略圖上點選右鍵，快速開啟平面圖資進行查閱。



圖 5 資料展示介面示意圖

異狀資料管理模組

隧道襯砌上的異狀與結構體的健康程度息息相關，因此系統除了以圖形化的方式展示襯砌異狀的資料型態外，亦可產製文字表格，紀錄異狀相關屬性資料（如圖 6 所示），如此方可系統性的管理掃描區段內的所有異狀。透過管理模組可根據特定異狀類型或特定里程區間等條件進行資料篩選，幫助管理者在龐大的原始資料中，擷取出感興趣異狀的數量及所在位置。此外，藉由觀察同一異狀之不同時期的變化，可推估隧道是否持續遭受破壞，對隧道安全性評估而言，是一重要資訊，因此，本系統開發襯砌異狀比對功能，藉由異狀名稱、大小、破壞型態等資訊，比對兩筆不同時期的異狀量化數據（如滲水面積之前後期差異量），並依據異狀坐標資訊，尋找並展示兩期異狀圈繪成果，讓管理者從文字數據及影像資料兩個層面，明確瞭解到異狀隨時間之差異與變化（如圖 7 所示）。



圖 6 異狀列表管理介面

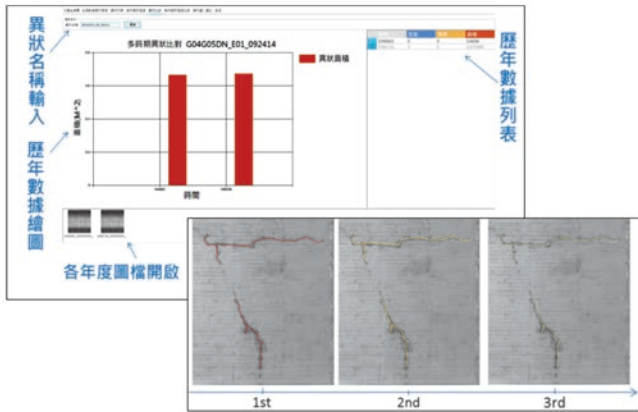


圖 7 異狀比對介面與前後期比對示意圖

變形程度管理模組

隧道結構體的健康程度除了可藉由襯砌上異狀的數量及變化程度來評判外，亦可對隧道進行斷面檢測，取得該斷面的形狀及尺寸，比對結構體設計參數，以得知結構體是否發生變形。變形程度之計算方法眾多，以點雲資料為計算基礎的方法，可擷取點雲資料中特定斷面的所有點位資料後，擬合該斷面的中心點位置，接著計算中心點到各特定角度點位的距離，或是擷取斷面中特定點位的坐標，並計算點與點之間的相對距離，藉由距離量的變化，來推估隧道是否發生變形。透過變形程度管理模組介面，管理者可以依據位置區間篩選變形程度資料，查看特定位置的變形程度分析成果。圖 8 為變形程度資料查看介面，管理者輸入里程起訖區間，系統會自動搜尋該區間內的變形資料圖表，並製作檔案列表呈現在畫面左方，

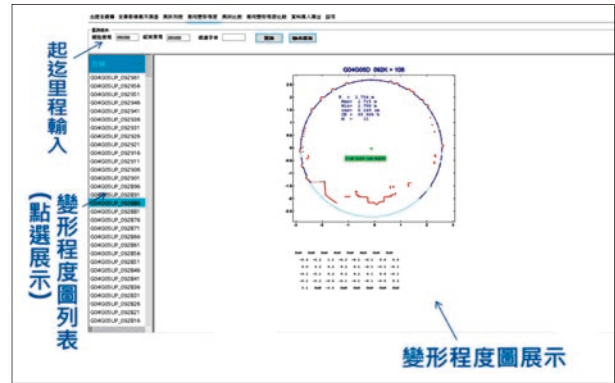


圖 8 變形程度查看介面

管理者點選左方列表內之欄位，系統會在畫面右方展示該變形程度檔案，供管理者查看。除了以點雲計算之變形程度資訊可供展示外，系統亦支援輸入既有之檢測報告，供管理者於查詢介面一併搜索展示，如圖 9 所示，在變形程度列表的欄位中按右鍵後，系統會搜尋符合此里程位置的既有資料，並提供按鈕讓管理者點選開啟，開啟檔案之示意圖如圖 10 所示。

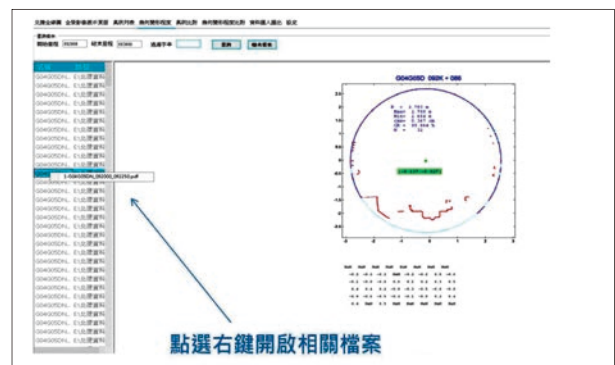


圖 9 既有資料開啟介面

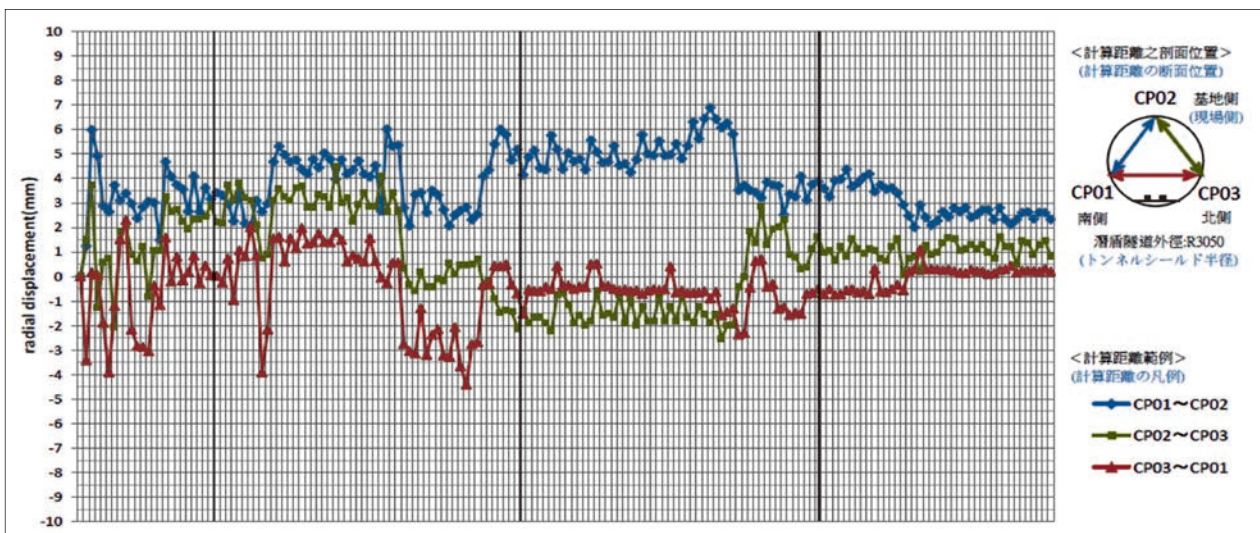


圖 10 既有資料展示

圖 11 為變形程度比對功能介面，管理者輸入段名及里程，系統自動搜尋各期資料，若有多期該里程之變形資訊存在，便會進行資料展示，繪製套疊圖表在畫面左方區塊，協助管理者快速辨別此里程變形程度的變化，並在畫面的右方區塊內繪製各期差異量折線圖表，告知管理者數據量的變化，下方則可點選開啟此變形程度之檔案，供管理者查閱。

由於圖 11 為單一里程的變形程度變化比較，無法描述大區域的整體變形，所以本系統亦提供區段變形程度之比對功能，提供管理者查看指定區段內的變形程度變化，圖 12 為區段變形程度比對介面，管理者可點選區段、基準期數及比較期數等三項資訊，系統會畫出如畫面右側的圖表，圖中由左至右是里程增加方向，最右側有各顏色代表的數值，越靠近藍色指的是凹陷越多，越靠近紅色指的是凸出越多，在此圖上可點選右鍵，開啟各里程位置的比對資料顯示於畫面右側，藉由查看畫面左側的圖，管理者可由顏色的變化，得知此區段內是否有區域變形發生，進而達到禁限建管理的使用目的。

資料匯入／匯出模組

隧道掃描資訊展示系統內包含多種型態的資料，然而，隨著結構體使用時間增加，檢測成果亦會不斷產出，因此，新產出資料如何快速且正確的輸入至系統

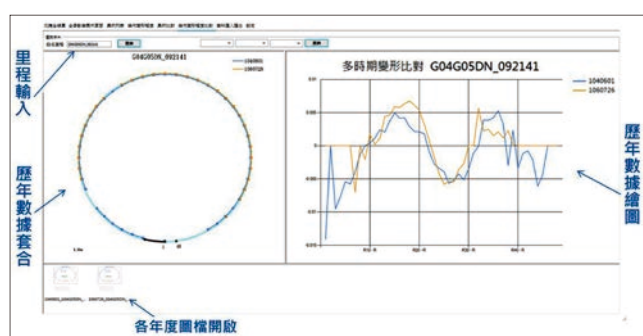


圖 11 不同期變形程度比較介面

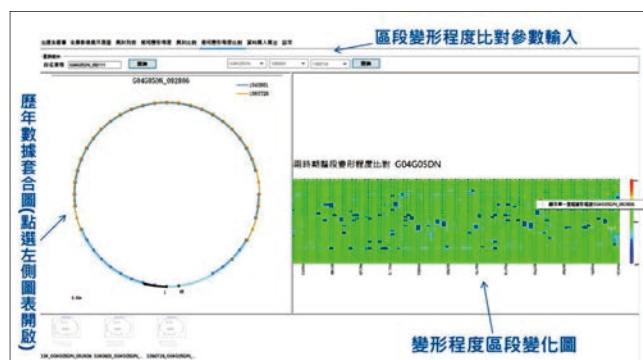


圖 12 區段變形程度比對介面

中，為一重要課題。藉由資料匯入／匯出模組之開發，管理者可透過系統功能新增檢測資料，在系統的介面設計指引下，確保管理者欲新增的資料被存放到正確位置，且符合系統展示需求之檔案規格。此外，此模組亦支援資料匯出功能，匯出之資料主要為存放在資料庫內各資料表的內容資訊，以做為資料備份之用。

結論與建議

本文介紹基於雷射掃描影像的隧道襯砌檢測管理系統，系統具備快速搜尋、展示、比對隧道多區段多時期的檢測資料，顯示系統進行實務數值分析與評估的功能性。藉由此管理系統可以大幅提升隧道檢測資料蒐集後的分析處理作業時間，並可進行不同時期資料之整合分析。同時，本研究開發的管理系統可被應用於以 BIM 技術進行隧道全生命週期管理的重要模組。

參考文獻

1. 中興顧問社 (2013)，國道隧道維護管理系統，高速公路局北區工程處。
2. 洪銘遠、李順敏、侯嘉松、周永川、林志權 (2012)，「臺北捷運系統全線隧道維護檢測探討」，中華技術，第 93 期，第 88-95 頁。
3. 何泰源、黃燦輝、鄭富書 (1999)，「隧道之維護管理方式－調查、安全評估及維修方式之探討」，隧道自動化安全檢測、維修與補強技術，31-54 頁。
4. Huang, K.P., Wang, T.T., Huang, T.H., Jeng, F.S. (2010), Profile deformation of a circular tunnel induced by ambient stress changes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (3), 266-278.
5. Wang, T.T. (2010), Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes, *Engineering Geology* 115 (1-2), 80-95.
6. 王泰典、黃燦輝、鄭富書、薛文城、傅子仁 (2007)，「台灣隧道襯砌異狀類別之探討」，隧道建設，第 27 卷，第 87-92 頁。
7. Han, J.Y., Guo, J., Jiang, Y.S. (2013), Monitoring tunnel profile by means of multi-epoch dispersed 3-D LiDAR point clouds. *Tunnelling and Underground Space Technology* 33, 186-192.
8. Zhou, Z., and Gong, J. (2018), Automated Analysis of Mobile LiDAR Data for Component-Level Damage Assessment of Building Structures during Large Coastal Storm Events. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 00, 1-10.
9. Kontogianni, V., Tzortzis, A., Stiros, S. (2004), Deformation and failure of the Tymfristis tunnel, Greece. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (10), 1004-1013.
10. Özbek, A., Türkmen, S., Gül, M. (2003), The deformation evaluation of Kızılac, T3A tunnel (Osmaniye, Turkey). *Engineering Geology* 67 (3), 309-320.
11. 李國榮、洪士勳、高憲彰、林賜忠、王進成 (2014)，「國道隧道維護管理系統之規劃與開發」，中興工程，第 124 期，第 3-12 頁。
12. 葛文忠、俞旗文 (2005)，三維隧道影像掃描儀應用於老舊隧道安檢，第 11 屆大地工程研討會。
13. 黃燦輝、林銘郎、王泰典 (2008)，隧道非破壞性檢測技術之開發總結報告書，交通部鐵路改建工程局東部工程處。
14. Succar, B. (2009), Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction* 18, 357-375.





精細三維 測繪世代的 岩盤工程 地質調查展望

王泰典／國立臺灣大學土木工程學系 教授

地形展現國土人文及自然特徵，更是各類工程建設的基本資料。地質學發展二百餘年來，現地調查皆仰賴地形圖記錄不同礦物、化石、乃至於岩層層序、構造及不連續面的空間分佈，提供後續推論地質模型或是評估岩盤工程特性的依據。地形圖傳統上多以二維等高線形式呈現，提供做為工作底圖的地形圖比例尺，基本上決定了地質調查的精度上限。近年測繪技術突飛猛進，包括地形幾何的測定方法、地圖製圖技術及呈現，皆有跨世代的變革，不只快速、精細，而且三維立體，岩體工程的地質調查，也將有嶄新的作業方式與呈現方法。

前言

地形測量及地質調查為基礎建設的第一步，提供工程環境基本資訊。傳統的地形測量是現代化測繪學的濫觴，最早至少可以追溯至西元前六世紀畢達哥拉斯和西元前四世紀亞里士多德對於地球是圓的「地圓說」的探討。西元前三世紀透過日影觀測，推算地球半徑及子午圈長度，是目前所知「弧度測量」最早的方式。直到17世紀末，牛頓和惠更斯基於力學原理，認為地球應是南北兩極方向稍扁的橢球體；19世紀拉普拉斯和高斯則提出地球並非完美的橢球；1873年利斯汀提出大地水準面的概念，以與包圍地球的靜止海面重合的一個重力等位面表示地球的形狀。1945年莫洛堅斯基利用地球重力測量數據，才確定了地球的真實形狀。

理學領域確定了地球是表面不規則的橢球體，欲轉化為實務所用，卻得投影到二維平面展現地貌特徵與地形細節。三維橢球體表面地貌投影到二維平面地圖的變形問題，在日影觀測弧度測量後約莫五百年，也就是西元二世紀才受到關注，特別是羅馬時期托勒密所著「地理學指南」以及西晉裴秀所著「禹貢地域

圖」書中分別提到有關投影方法，以及比例尺、方向與距離等「製圖六體」程序規範，此後東西方的地圖可靠性才逐漸提高。再往後一千五百年，大航海時代（age of discovery）發明了望遠鏡，測繪作業逐漸脫離以短尺、繩尺等簡單工具測距的方式。1617年威理博斯涅提出「三角測量法」，開創了角度測量。1730年，西森研製出測角用的經緯儀，在航海盛行的十八世紀廣為應用於定位船隻。十九世紀中期，洛斯達首創攝影測量法；二十世紀後，航空攝影隨著飛機的發明，成為大範圍地圖測繪的主要方法；直到人造衛星升空、全球衛星定位系統（Global Positioning System，GPS）以及遙感探測技術廣泛應用，測繪再度回到起初以整個地球為觀測主體的世代，但數百公里外衛星觀測的解析力、二萬公里外衛星定位的精度，卻達令人瞠目結舌指掌之間的精細程度。

地質學的發展可以追溯到西元前三世紀古希臘、古羅馬探討岩石、礦物、金屬等地球的物質成分。中世紀伊斯蘭世界及中國皆有關於山脈、陸地形成以及地震原因的探討；透過觀察岩層所含礦物及化石，比

對岩層層序的地層學卻直到十八世紀末期才發展成獨立的科學，並逐漸演變成岩石地層、生物地層以及年代地層學三大分支。

工程地質學則在約莫一百年後首見於 1880 年 William Penning 出版的專書。隨後，歐美各國現代化基礎建設發展迅速，Terzaghi 在 1925 年出版土壤力學一書，提及土壤力學係工程地質學的分支，並於 1929 年再與 Redlich 及 Kamp 合著工程地質教科書。國際土壤力學及基礎工程學會、國際岩石力學學會以及國際工程地質學會先後於 1936、1962 以及 1973 年成立，並陸續建議了現代化工址調查的作業程序^[1]。

測繪技術進展簡述

傳統測繪

測繪工作依據測區大小，可區分為大地測量與平面測量。前者測區廣大，作業及製圖須考慮地球表面曲率；後者通常基於有限測區範圍內，地球球體表面彎曲有限，常視為平面處理。大地測量通常採用空中攝影測繪作業，產製大範圍地圖作為基本圖，如 1/5000、1/10,000 像片基本圖、1/25,000 經建版地形圖等，提供製作各類地圖或其他應用。平面測量則採用水準儀、經緯儀、電子測距儀等儀器觀測地物之間的高程、角度、距離等，傳統工程測量多屬此類。

我國內政部於 1981 年發布臺灣地區基本圖測製管理規則，規範空中攝影測繪、製圖作業及成果等，歷經多次修正，迄 2003 年廢止；隨後，依據國土測繪法於 2007 年再發布施行基本測量實施規則，內容涵括測量基準及參考系統、測量基準之測量、基本控制測量、加密控制測量之實施方式及精度規範。

地圖是呈現測繪成果的主要方式，地圖製圖技術的提昇，反應測繪學理與科技的進步，以及提供其他應用領域參考的空間資訊的進展。托勒密以及裴秀繪製紙圖後將近二千年，二維平面地圖一直是測繪成果最主要的類型，標註地物表現平面相對關係，並透過內（外）插計算的等高線，呈現三維高度資訊。直到 20 世紀 70 年代地理資訊系統出現以前，雖有部分紀錄疾病、地下管線分佈等不同類型的三維圖資，應用並不普遍。

20 世紀 90 年代計算科技高速發展，地圖測製融

入資料庫、識別及管理資訊系統概念，逐步建構成地理資訊系統的基本元素。地理資訊系統結合全球衛星定位系統與遙感探測技術，帶來全新觀看地球的視野，並且逐漸影響，甚至改變了傳統地圖測繪與製圖的架構。地理資訊系統將空間資訊分為兩大類：空間資料為與空間元素有關的幾何特性；屬性資料則提供空間元素的其他資訊。現實世界的物件依據數字化的連續性，被劃分為二個抽象概念：離散物件（如房屋）和連續的物件領域（如高程），並分別用網格和向量兩種方式儲存資料。

網格資料由一系列行、列組成儲存單元，每一儲存單元代表現實世界的一塊區域或是一個實物，其儲存值可以是單純的量值（如面積）、類型資料（如土地使用分區），空值（無紀錄或無用資訊），甚至是一連續的值（如降雨紀錄）。網格資料的解析度取決於其代表的現實世界地面單位的尺度。向量資料透過點、線、面幾何圖形的位置向量形式，儲存物件資料。

傳統地圖透過等高線展現代表不同的高程值，在地理資訊系統中則可以向量資料記錄等高線位置，給予不同的屬性資料（高程值）；或是在整個區域的儲存網格記錄高程值，需要時再計算展現。看似極為簡單的資料儲存處理方式，卻改變了傳統照準觀測的認知，深遠地影響了測繪技術的發展。

近期發展

測繪技術在二十世紀末出現了多元發展，傳統平面測量設備精度提升，並有測設、覘標追蹤自動化功能；航空攝影測量引入數位相機，搭配 GPS 以及慣性保持裝置 IMU 求得精密飛行軌跡，內外方位參數得以建置在拍攝的影像中一併儲存，空中三角測量解算程序大幅簡化。另一方面，衛星影像解析力提高，已達公尺等級，甚至更精細，並且結合雷達測繪技術，透過接收兩幅或多幅回波相位差資料，產製合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）影像圖及地表高程模型，觀測地表形變。而其中影響最為廣泛者，莫過於光學雷達檢測及測距（Light Detection And Ranging, LiDAR，簡稱光達）及無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）測繪技術。

光達係一種利用雷射進行測距或量測物體物理特性的光學遙測技術，依據載具可分為衛載、空載、車載、船載以及地面光達等。雷射依使用目的，有不同波段的選擇；由發射器發生的脈衝雷射，打到植生、建物或地面後引起散射和反射，一部分雷射反向散射返回到載具上的接收器中，將光信號轉變為電信號記錄下來，量測脈衝雷射自發射到被接收時間，即可計算載具與反射目標物間的距離。相對於傳統空中攝影測量，光達採用自體光源（雷射）施測，搭配 GPS 以及 IMU 求得精密飛行軌跡與姿態，無需於測區擺設任何接收儀器，屬於主動式測距技術之一種^[2]。

相對於航空攝影測量，空載光達具有幾個特點：

(1) 高準確性，垂直方向準確度約 0.10 ~ 0.15 m，水平方向約 0.5 ~ 1.0 m；(2) 高密度資料，雷射發射頻率達每秒數萬次以上，可在很短的時間內收集到非常高密度的資料，這些資料可以呈現量測目標的微小變化，例如蝕溝、山崩造成的 1 ~ 2 m 的微小地形落差；(3) 氣候狀況影響較低，可於夜間或受霾氣及薄霧影響下作業；(4) 有濾除植被的能力，雷射脈衝具有多重反射訊號，可精確地測得植被覆蓋區的地表及地面真實高程，可提供不同的地上物特徵；(5) 快速測繪及相對成

本較低，不需布設大量控制點，對於大範圍的測區能快速的完成掃描，且成本低於傳統測量方式^[3]。

UAV 搭配穩定且相對低廉的非量測型數位相機，取得高解析度的航拍影像，代替傳統飛機搭載量測型相機的航空攝影測量，則是近年來小區域地形圖測繪常見的作業方式。除了飛行載具及空拍設備差異外，產製數值地表模型所需的相機率定及影像變形修正、控制點基準校正、飛行軌跡解算、空中三角測量、航測製圖、地理定位與精度分析等作業流程大致相同。UAV 空拍地面影像產製數值地表模型（Digital Surface Model, DSM）相對於傳統航測成本低廉、極具彈性與機動性，接近地表數十公尺飛行拍攝解折度優於 0.1 m 影像，產製 DSM 高程內部精度可優於 1 m，水平誤差在 0.5 m 以內，並可針對特定範圍局部精細化，因而廣為應用。

地質調查

地質調查的目的不同，調查項目與作業的方法不同，所得結果的整理方式以及繪製的地質圖亦不相同。表 1 以最常見的基盤地質圖、環境地質圖以及工程地質圖為例，說明不同地質圖的測繪目的，並列舉基本的調查項目。

表 1 常見地質圖展現重點與測繪製圖主要調查項目（整理自^[1,4-9]）

圖幅		基盤地質圖	環境地質圖	工程地質圖
展現重點 測繪目的		地層分類、地層層序與地質構造分佈等地質資料，可以闡釋成岩（沉積）環境、地質構造演變、古氣候變化等構造地質史	地質災害現象與潛能，提供國土開發、保育與地質災害防治的依據	場址工程地質特性，提供規劃設計作業所需分段或分區工程特性參數、工程行為資訊，以及施工安全監測、補充地質調查與風險管理依據
調查項目	岩性	1. 一般岩性 2. 化石 3. 產狀 4. 地層上下界限、接觸情形、層序 5. 地質年代 6. 地層之變形 7. 岩石之變質或換質	1. 一般岩性 2. 露頭破壞類型 3. 歷史災害事件 4. 破壞規模、影響範圍 5. 地形、地理位置	1. 一般岩性 2. 災害區域 3. 可能遭遇的地質災害 4. 歷史災害事件 5. 地形地貌（高差、坡度） 6. 崩積層厚度
	構造 不連續面	1. 褶皺 2. 斷層 3. 裂隙 4. 劈理 5. 節理 6. 片理 (描述破裂情形、位態、數量、程度)	1. 層面位態（順向坡、逆向坡、斜交坡） 2. 節理位態（落石、楔形、翻倒） 3. 斷層類型及延伸方向 4. 褶皺類型及延伸方向	1. 位態 2. 間距 3. 延續性 4. 粗糙度 5. 抗壓強度 6. 張開度 7. 充填情況 8. 滲流情形 9. 組數 10. 岩塊大小
	水文 條件	×	○	○
	保全 對象	×	○	○

基盤地質圖

基盤地質圖通常展現地層分類、地層層序與地質構造分佈等地質資料，可以闡釋成岩（沉積）環境、地質構造演變、古氣候變化等構造地質史。其測繪的基礎為路線地質圖，主要的野外調查項目包括岩性與不連續面兩大類。岩性的調查項目有：一般岩性、化石、產狀、地層上下界限、地質年代、地層的變形、岩石的變質或換質等，並常需透過室內試驗確定岩石的沉積年代輔助解釋。不連續面的調查項目針對褶皺、斷層、裂隙、劈理、節理與片理等，多採定性描述其位態、數量、破裂程度或情況。傳統常用的地質調查方式為沿著林道、施工道路、登山小徑、稜線、溪谷等路線進行露頭調查，並將觀察所得露頭的位置、岩性與分布範圍、不連續面位態等標示於地形底圖上，再於室內進行內業資料處理，利用製圖法進行岩層與構造線的延伸，最後針對岩性及構造交界帶等重點位置繪製剖面圖，說明其於地面下的空間分布情形。我國目前通行的基盤地質圖包括經濟部中央地質調查所出版的「五萬分之一臺灣地質圖說明書」，全台灣離島共分為 76 幅（部分尚在測繪中），以及比例尺更小（如 1/100,000 ~ 1/500,000）的地質圖。由於基盤地質圖的比例尺太小，且測繪過程通常忽略成岩地層的地表動態地質演變，如崩積層、地表土壤分佈範圍與深度等，因此對於土木工程、大地工程與水土保持等提供的資訊為廣域的區域地質環境，不易精確反應工址的工程特性。

環境地質圖

環境地質圖展現地質災害現象與潛能，提供國土開發、保育與地質災害防治的依據。其測繪的基礎通常基於基盤地質圖，調查繪製地表地質災害的分佈，例如土石流、山崩、岩層崩滑、順向坡、蝕溝、河岸侵蝕等。環境地質圖的調查程序方面，通常先進行航空照片、衛星影像等遙感探測所得資訊判釋作業，掌握地質災害發生的位置、類型、規模與範圍後，再研擬現地調查與驗證的計畫；現地調查除了查核遙測影像判釋結果的正確性並加以局部修正外，通常評估危害程度、再次發生的可能、有無保全對象以及防災與

減災的對策。地質災害位置與鄰近範圍的岩性與不連續面亦為環境地質圖的調查項目之一，岩性部分常著重於一般岩性及其界面與地質災害的相關性，不連續面方面則量測層面、節理、地質構造位態等。我國地質災害規模大且發生頻率高，環境地質圖須時常更新，目前較常見的版本為 1985 年工業研究院調查測繪的「台灣省重要都會區之環境地質資料庫」與 2002 年中央地質調查所測繪的「坡地環境地質基本圖」及「坡地環境地質災害敏感區分布圖」。

工程地質圖

工程地質圖展現工程計畫所在位置的場址工程地質特性，提供規劃設計作業所需的分段或分區工程特性參數評估、工程行為研判等資訊，以及施工過程執行安全監測、補充地質調查與風險管理的依據。工程地質圖的測繪通常結合遙感探測技術、地球物理探查、地表地質與鑽孔探查等方式，以提昇調查精度與作業效率。在各項探查技術中，地表地質調查常配合鑽孔探查，取得更精確工程特性分段或分區位置、以及工址特性參數，因此對於影響岩體工程特性參數的岩性與不連續面兩大因素，調查工作更需精細。岩性調查除一般岩性外，通常觀察其風化程度，並調查地形地貌、崩積層厚度等廣義的岩性分佈；不連續面調查則以國際岩石力學學會（International Society of Rock Mechanics, ISRM）建議的 10 項半定量方法^[10]最為完整，包括層理、葉理與節理等不同形成機制、各組不連續面的位態、間距、延續性（露頭調查判斷所得分級描述）或延續度（測線法調查所得轉換為量化描述）、粗糙度、岩壁單軸壓縮強度、隙寬（fracture width，或稱張開度）、充填情況、滲流情形、組數、岩塊大小，並繪製適當的調查結果示意圖或整理為表格型式，以評估代表性參數，藉以評估工程施工的穩定性或危害的類型等。露頭狀況不佳或工址多鬆散堆積物者，則以強度係數、聲波速度、風化係數、點載重指數、史密特錘回彈值為指標評估之。我國工程地質圖多數分幅展示地層分佈、主要斷層或剪裂帶位置，亦有考慮工程結構與配置位置者，透過地理資訊系統整合繪製案例^[11]，可以提供工程設計與施工更精確的資訊。

精細測繪地形對地質調查的影響

本文以幾個案例，探討精細測繪地形成果對地質調查作業的影響。

岩性井錄及空間位置

露頭調查為地質圖測繪最基本、卻也是最重要的工作。在道路、小徑、稜線、溪谷等路線沿線岩石出露位置，觀察岩性與分布範圍、不連續面位態等，記錄資料並標示於地形底圖上，提供內業處理進行岩層與構造線的延伸，再繪製基盤平面圖與剖面圖，為典型的工作流程。

岩性觀察與判釋目前仍仰賴地質師親力為之，不僅需近距離研判，更常需「觸診」，甚至採樣進行室內實驗確認^[6]。岩性在地表的空間分佈，則需透過露頭觀察所得製作岩性變化井錄，再依據不同露頭的岩性井錄，比對並釐清更大範圍的岩層層序，以至於地層層序。因此，大比例尺的地形底圖為精細岩性井錄以及其位置記錄的必要圖資。當露頭範圍有限、連續性不佳、甚至出露在溪谷、稜線等地形崎嶇處時，調查作業環境相當惡劣，精細的記錄常是一大挑戰。

露頭所見的岩性厚度受到地形影響，為其在視傾角方向的厚度。若露頭表面不平整，調查岩性厚度時需連帶記錄出露位置的坡度，以供修正至層面真傾角方向得到真實的岩性厚度變化。因此地質師隨身攜帶的野簿通常提供簡易的三角函數轉換值，方便現場修正並直接記錄不同區位的岩性厚度。

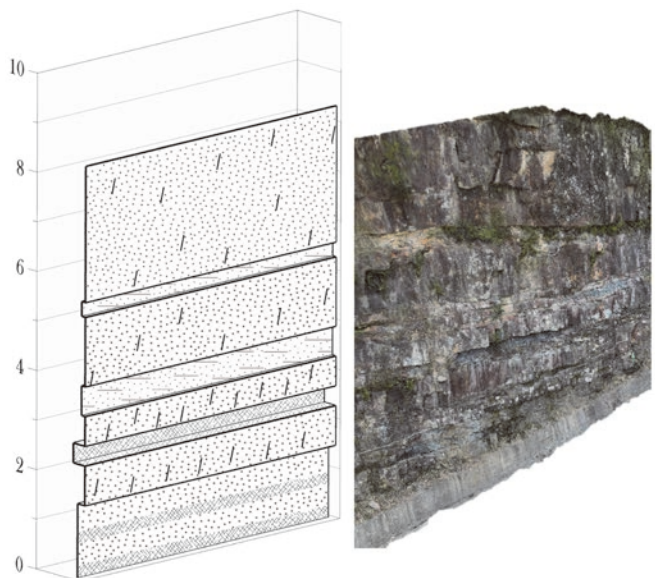
精細測繪的數值地表模型，提供測量不同岩性厚度的利器。圖1為宜蘭牛鬥橋附近一處垂直邊坡露頭影像，數值地表模型透過地面近景攝影配合 UAV 空拍影像產製，影像解析度優於 5 mm，產製 DSM 水平向均方根誤差 61 mm，垂直向 58 mm，三維誤差 84 mm，不僅可以突破以往人力所達約 2 m 高度的量測範圍，測繪變質砂岩以及硬頁岩至板岩的厚度至公分等級，更能精確地記錄其空間位置。結合更廣域範圍其他露頭紀錄進行比對，地層層序的量化資訊將更為精緻。

不連續面調查與描述

ISRM 建議了岩石不連續面現場調查與描述的作業方法。在露頭新鮮、可及性與工作性皆良好的情況



(a)

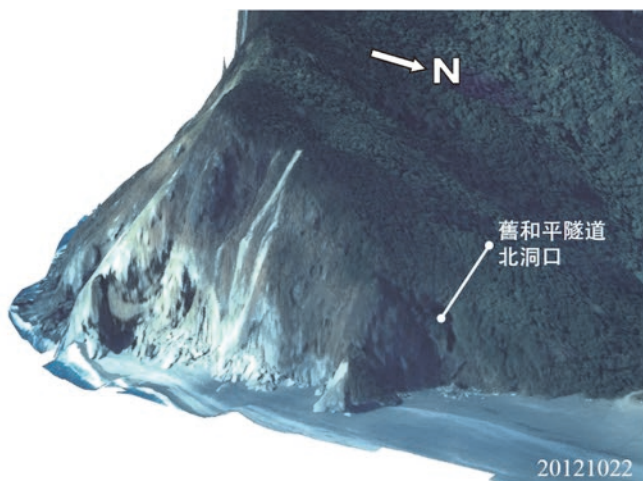


(b)

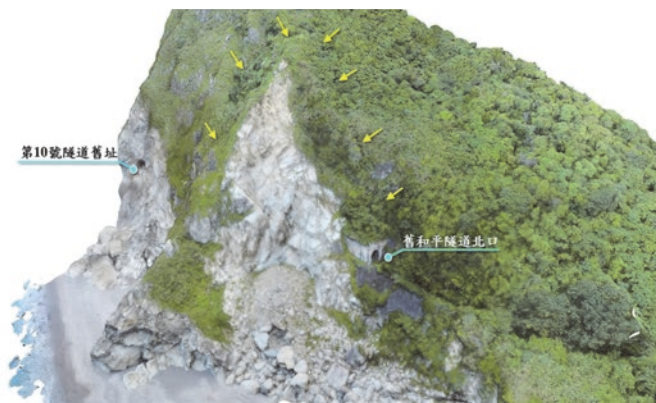
圖 1 (a) 宜蘭牛鬥橋附近一處邊坡露頭影像、(b) 數值地表模型及測繪岩石厚度井錄

下，按 ISRM 建議方法詳細且完整地調查與描述一個露頭，往往需要 1 個人日以上的野外工作時間。而欲掌握岩盤工程場址特性，常需要數個至數十個露頭資料，更遑論露頭風化、植被生長、可及性或工作性不佳的情況。換言之，工程地質調查最費時費力的部分即是龐大的野外工作，更有效率、更精準的調查工具與作業方法以及取得資料的評估方式，為工質地質調查及災害防救亟需改善的課題。

精細測繪的數值地表模型，可以大幅度地改善不連續面調查與描述的效率及精度。圖 2 比較傳統航空攝影與 UAV 空拍相片產製 DSM，近乎垂直拍攝的航照影像（圖 2a）解析度達 0.1 m，卻因邊坡陡峭，光軸與坡面夾角甚小，產製 DSM 有明顯的變形，無法辨



(a) 台 9 線舊和平隧道附近傳統航空攝影



(b) UAV 空拍相片

圖 2 產製數值地表模型 (DSM) 之比較

識不連續面。UAV 空拍 964 張相片，影像解析度約 15 mm，配合 14 個地面控制點產製 DSM，三維誤差約 40 mm，即可清楚地辨識崩塌裸露岩坡上的不連續面。

圖 3 進一步利用 UAV 空拍相片產製 DSM，調查並描述不連續面位態及間距。自 DSM 中辨識主要不連續面，擷取數個點，即可生成平面、計算位態，由位態相近的相鄰不連續面，即可量測間距。王泰典等^[12]自 DSM 中擷取隧道北洞口下方可及岩坡壁面上的不連續面坐標，計算其位態值，再比較現地地質羅盤量測的調查結果。統計檢定結果顯示，點雲判釋位態皆落在量測值的 95% 信賴區間，表示 UAV 空拍相片產製 DSM 點雲判釋不連續面位態結果具代表性。Chiu 等^[13]應用此 DSM 量測各組不連續面的間距。

王泰典與韓仁毓^[14]研發三維雷射掃描在工程地質調查計量化與坐標化技術，結合地面光達多站掃描點雲，判釋岩石不連續面位態、間距、延續度等，並提

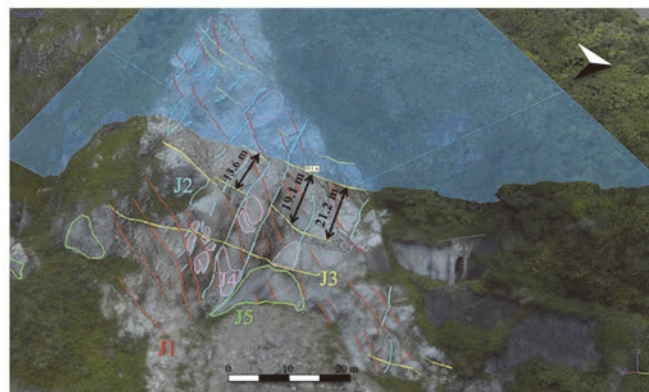


圖 3 應用 UAV 空拍相片產製 DSM 判釋不連續面位態，經統計檢定具代表性即可進一步量測各組不連續面間距

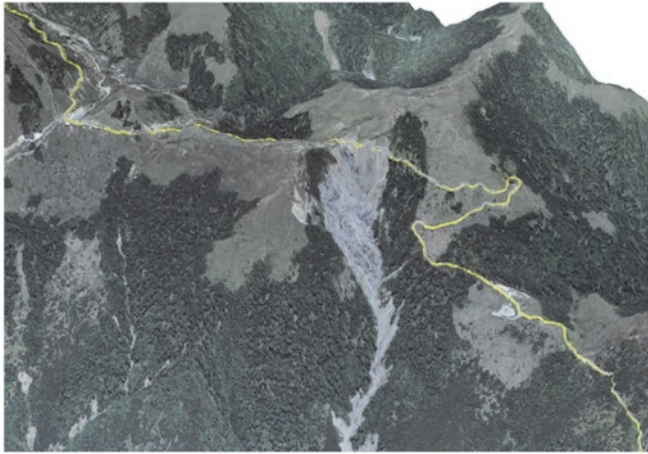
出統計檢定方法檢核判釋結果的代表性，可提供精準且高效率的岩盤工程地質調查應用。不連續面的空間分佈高度影響岩體工程特性。可以預期的，精細點雲足以判釋不連續面空間分佈，提供計量化與坐標化的調查成果後，岩體工程特性的評估方法，即將出現精緻化的進展。

微地形

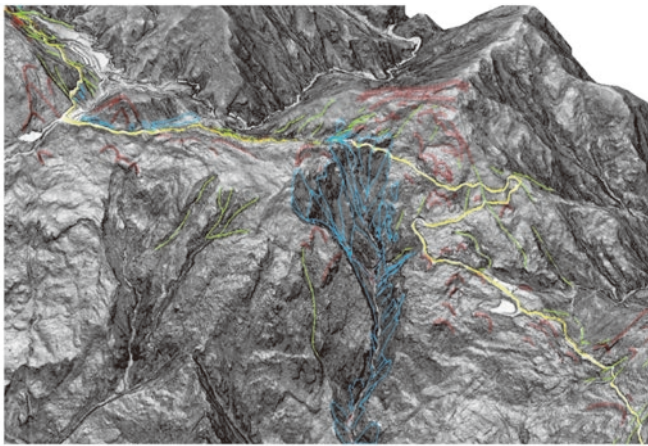
地形分析透過數學或統計途徑，解析地形面的坡度、坡向，繪製高度分佈、水系圖、連峰或連谷圖等，提供量化探討地表地貌特徵的資訊。地形分析因應測繪成果自等高線地圖至數值地表模型的演進，發展了許多不同的演算方法。然因地形圖精度限制，傳統的地形分析仍以廣域地貌的探討為對象。

空載光達測繪的數值地形，可以濾除建物與植生遮蔽，還原原始地面形貌，分別產製數值地表模型 DSM 與數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，且具足夠可靠的解析度與精度，足以應用於辨識規模較小的地表地貌特徵，諸如大規模崩塌的冠部崩崖、次崩崖、坡頂緩斜面、反斜崖、線狀凹地、圓弧型滑動體、坡趾隆起等^[3,15]。

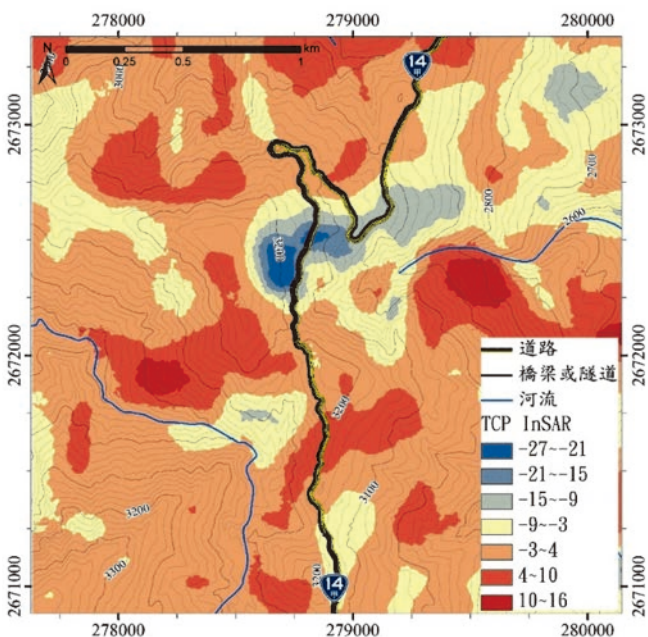
圖 4 以台 14 甲線克難關附近邊坡為例，說明精細測繪地形對於微地形辨識與公路防災的應用，此路段自 1980 年來屢發生路基掏空下陷、擋土牆錯動及路面開裂等現象，路基已回填約 10 m^[16]。圖 4(a) 為傳統航照影像經正射處理，搭配空載光達測繪點雲產製 DSM，塔次基里溪向源侵蝕相當明顯，造成公路路基下陷，路線向山 (西) 側偏移。圖 4(b) 為應用空載



(a) 傳統航照影像經正射處理，搭配空載光達測繪產製 DSM。



(b) 空載光達測繪產製 DEM，製成坡度圖判釋微地形後，再套疊回三維 DEM。



(c) ALOS 衛星 2007 年與 2011 年 TCP-InSAR 解算所得地表位移，圖例中單位為公尺，負值表下陷。

圖 4 精細測繪地形對於微地形辨識與公路防災的應用

光達測繪產製 DEM，製成坡度圖判釋蝕溝與崩崖等規模較小的地貌特徵後，再套疊回 DEM，邊坡崩塌範圍可以明顯地圈繪，現生崩塌邊界及潛在崩塌鄰近的崩崖、蝕溝，亦可清楚識別。圖 4(c) 比較 ALOS 衛星 2007 年與 2011 年 TCP-InSAR 解算所得地表位移，公路下邊坡塔次基里溪源頭存有現生崩塌堆積物，造成侵蝕溝向南、北兩側發育，對於公路而言，路基下陷範圍已悄悄向北移動。

邊坡運動監測

除了圖 4 例舉利用空載光達測繪 DSM 及 DEM 判釋向源侵蝕及潛在大規模崩塌鄰近的微地形特徵外，精細測繪地形亦可應用於土石流^[17]、淺層岩屑崩滑的觀測或監測，以至於應用至部分規模較大的落石邊坡。

圖 5 為東南部某邊坡案例，利用多期歷史航照分別產製 DSM，再製作正射影像，並比較 UAV 空拍相片所得，以利觀察運動歷程。圖 5(a) 為 2003 年航照產製正射影像，航照於邊坡崩滑不久後拍攝，圖中仍可見到溪流上方堰塞湖以及坡趾崖錐堆積，裸露邊坡上方正發育崩崖。圖 5(b) 為 2008 年航照產製正射影像，堰塞湖及坡趾崖錐堆積皆已不復見，而且崩滑向上發展，範圍明顯擴大，2003 年發育的崩崖東（照片中右）側已形成蝕溝。圖 5(c) 為 2016 年航照產製正射影像，河床明顯淤高，邊坡崩滑範圍加大，裸露殘坡坡面光滑。圖 5(d) 為 UAV 空拍相片產製正射影像，影像解析度明顯優於圖 5(a) 至圖 5(c)，然有部份位置因重疊率不足，以致形成空洞；河床面低於 2016 年，且在 2016 崩滑邊界的上坡側及下坡側，皆可見到崩崖發育，研判一個範圍更大的崩塌正在發育，既有裸露邊坡也可能醞釀另一更深的滑動面。圖 5(e) 一併示出各期影像判釋崩崖範圍，可以瞭解邊坡運動的歷程，做為研判邊坡失穩影響因素的參考。

台 8 線 168 k 附近，公路採明隧道通過落石區，2008 年發生落石，土石方約 2,500 m³，損毀明隧道長度約 20 m；經修復後，2009 年再度發生約 54,000 m³ 落石，損毀約 45 m 長明隧道。隨後實施一系列調查，包括空載、車載、地面光達掃描，露頭地質調查等。Tsao 等^[18] 年依據光達點雲判釋岩石不連續面，並以露頭調查所得檢定判釋成果具代表性；繼而分析歷史

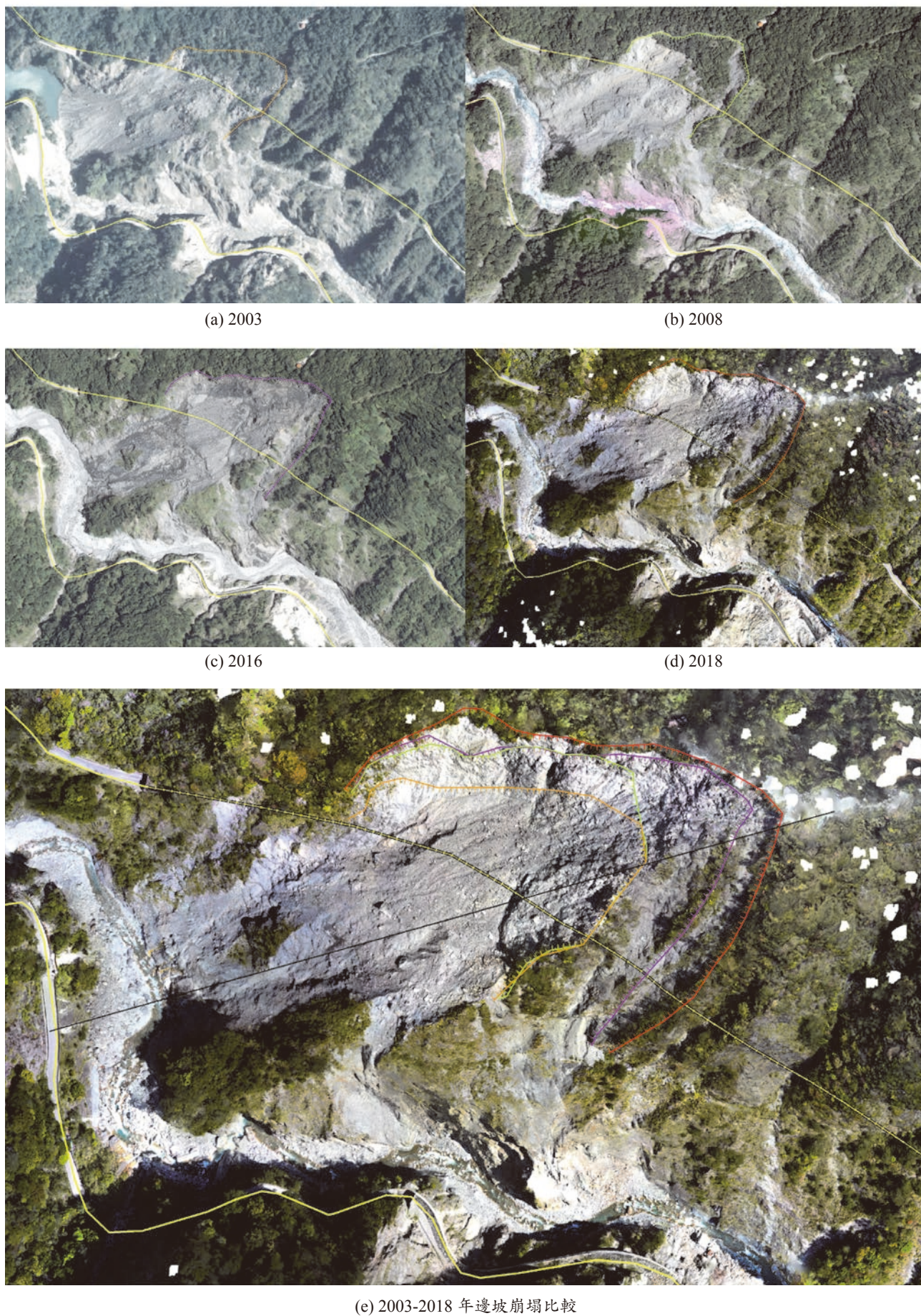


圖 5 東南部某案例邊坡歷史航照與 UAV 空拍相片分別產製 DSM 後製作正射影像，可供判釋分析邊坡運動歷程

航照產製 DSM，並參考落石過程錄影資訊，提出大量的落石起自淺層岩屑崩滑，誘發傾覆以及岩楔滑動所致。圖 6 為航照影像經正射處理後，疊合空載光達掃描點雲製成 DSM，闡釋邊坡失穩歷程。圖 7 則自空載、車載及地面光達掃描點雲疊合模擬的 DEM 中，辨識大量滑落岩楔位置。該坡面已清理浮石，並初步刷坡，然由精細點雲描繪的裸坡可以見到部分不連續面具有良好的延續度，仍構成潛在滑落的岩楔，可提供邊坡失穩監測參考。

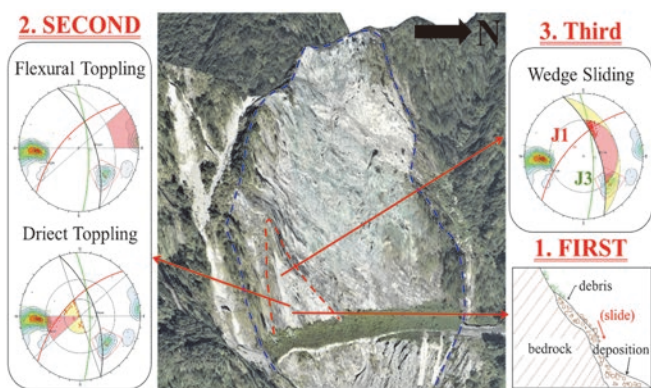


圖 6 台 8 線 168 k 附近邊坡 DSM，配合地面光達掃描點雲判釋不連續面位態以及失穩過程錄影，可闡釋邊坡失穩歷程

岩盤工程地質調查的展望

源自對地球的探索，測繪學及地質學俱為古老的科學。大航海時代以來近五百年，測繪技術因應海權擴張與軍事競爭，發展極為快速；全球衛星定位、遙感探測與地理資訊系統的普及化，以及現代化基礎建設與自然災害防治帶來的廣泛需求，測繪科技在國內外皆掀起一波高潮。大地測量可以產製精度優於公尺級的三維 DSM 及 DEM，測區較小的範圍，更可透過間距小於公分的點雲描繪，精度、準度俱佳，精細測繪世代已經來臨。地質調查，特別是現行工程地質調查，雖在近半世紀以來發展了許多調查技術與描述方法，然多數建立於傳統航測與等高線地圖的基礎上。本文簡要回顧測繪技術與地質調查的發展，並透過數個案例，展望精細測繪時代的岩盤工程地質調查。

1. 精細的 DSM 與 DEM 將成為地質調查的利器，岩性相對較複雜，仍由地質師親臨識別，然不同岩性的空間位置可以透過 DSM (DEM) 精細定位，露頭岩性并錄可自地質師人力可及、直接調查的位置，延伸至 DSM (DEM) 上連續可見的範圍，並精細量測不同岩性的厚度變化。透過地理資訊系統空間分析

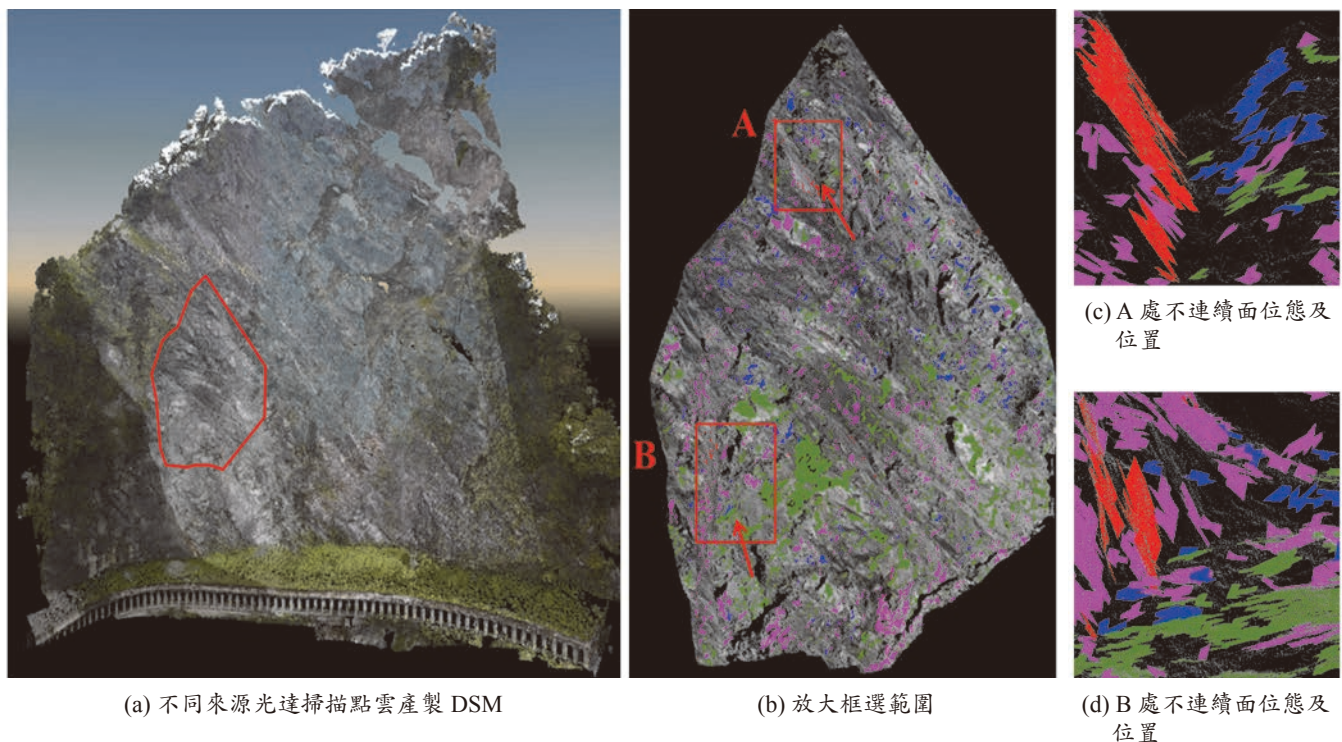


圖 7 台 8 線 168 k 附近邊坡疊合空載、車載及地面光達掃描點雲產製 DSM 中，可辨識前期大量滑落岩楔位置以及部分潛在滑落岩楔

等功能，有利於比對地層層序，並提升成果的量化資訊。

2. 精細描繪露頭的點雲，已足以判釋岩石不連續面的位態，透過統計分析決定不連續面組位態的平均值及標準差，進而量測間距與延續度等幾何參數；對於出露面積較大不連續面的粗糙度，亦可提供量化的表面起伏數據。利用點雲判釋岩石不連續面幾何參數，配合地質師現地量測結果，透過統計檢定程序驗證判釋所得，並據以計量化與坐標化記錄岩石不連續面，勢將為精緻化提昇岩盤工程地質調查的下一步；岩體工程特性的評估方法，必然也將出現更細緻化的發展。
3. 調查成果必然數位化，整合於三維坐標框架下，透過地理資訊系統或類似平台積累與分享資料，短期內即將實現。現行書面形式的地質調查紀實報告，特別是地質平面、剖面圖等特徵化場址特性的圖示方法，將逐漸轉換為三維視覺化模型擬真呈現；若結合歷史航遙測資訊、工程或是災害紀錄，調查報告即由傳統二維空間形態，進化為三維空間加上隨時間演化的四維資訊。
4. 數位視覺化的岩盤工程地質調查成果，將精緻化場址分區，並提昇工程特性參數的評估精度，有利於大地工程分析及設計，以及相關的監測作業。分析及設計成果將可基於三維視覺化模型，透過擴充實境方式呈現不同方案，監測成果亦可類比應用，提供後續建築資訊模型的基石。數位視覺整合的岩盤工程地質調查成果，不僅記錄各場址生命週期的完整資訊，並能提供大量數據彙整分析，提昇岩體工程特性調查評估、分析設計、建造以至於運營維管的精度與效能。
5. 然而，精細測繪地形欲應用至岩盤工程地質調查，同期巨量數據的品質、以及不同時期的精準度高度影響長期的應用性，目前有關地形測繪資料加值應用至地質調查、判釋分析等，尚缺乏可茲依循的品質標準與作業流程，成果檢核、資料呈現與保存方式欠缺規範，有待各界進一步共同努力促成。

誌謝

本文承邱雅筑博士、曹孟真博士候選人、羅百喬博士生，Mr. Senzo Ginious M. 協助繪圖得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

1. 洪如江 (1991)，初等工程地質學大綱，財團法人地工技術研究發展基金會，台北。
2. Ackermann, F. (1999), Airborne laser scanning – present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54.
3. 謝有忠、陳勉銘、費立沅 (2016a)，地質調查新趨向：光達俯看中央山脈湖泊，科學發展，524，42-46。
4. 徐鐵良 (1986)：地質與工程，中國工程師協會，第六版，台北。
5. 何春蓀 (1986)，臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所出版，臺北。
6. 陳培源 (1994)，野外及礦業地質學，正中書局，台灣。
7. 潘國樑 (2007)，工程地質學導論，科技圖書，臺北市。
8. 謝敬義 (2009)，地質學與大地工程，科技圖書，台灣。
9. 楊濟豪、曹孟真、詹尚書、李亮瑩、王泰典、許宗傑、柯承宏、陳怡頻 (2014)，地面光達應用於露頭不連續面調查與岩體工程特性評估探討，中華水土保持學報，第 45 卷第 1 期，第 1-18 頁。
10. Ulusay, R., Hudson, J.A. (2007), The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006.” Part 1, 3-50.
11. 廖志中、潘以文、林志平、徐志謙、王慧蓉、胡賢能、廖培明、楊光程 (2006)，整合性岩盤工址調查案例，岩盤工程研討會，台南，第 209-218 頁。
12. 王泰典、莊海岳、蘇威元、邱雅筑、羅百喬 (2017a)，無人載具攝影產製數值地表模型在隧道洞口段及倒懸邊坡崩塌調查的應用，地質，頁 36 卷第 3 期，第 55-60 頁。
13. Chiu, Y.C., P.C. Lo, W.Y. Su, H.Y. Chuan, T.T. Wang (2018), Investigating continual collapse of a coastal highway cliff, In: 10th Asian Rock Mechanics Symposium, Oct. 29- Nov. 3, Singapore.
14. 王泰典、韓仁毓 (2016)，三維雷射掃描在工程地質調查計量化與座標化技術研發，科技部補助產學合作研究計畫成果報告，MOST 104-2622-E-027-006-CC2。
15. 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋 (2016b)，地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋，航測及遙測學刊，第 20 卷第 4 期，第 263-277 頁。
16. 王泰典、曹孟真、羅百喬、陳柔妃 (2017b)，各種遙測技術觀測向源侵蝕影響高山公路的應用，三聯技術，第 104 期，第 2-7 頁。
17. 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉旻、龔樹勇 (2015)，微地形判釋應用於土石流災害之三維數值模擬，中華水土保持學報，第 46 卷第 2 期，第 96-105 頁。
18. Tsao, M.C., R.F. Chen, T.T. Wang (2017). Factors affecting roadbed subsidence in mountain area: Example of Kenangan section of highway No. 14A, In: 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Sep. 13-14, Taipei, 273-279.
19. 王泰典、李亮瑩、郭育安、許宗傑 (2016)，岩石隧道開挖面工程地質特性及開挖支撐快速量估評估新技術，大地技師，第 12 期，第 14-27 頁。



土木工程與文化(三)

土木工程的人文關懷

洪如江／國立臺灣大學土木工程學系 名譽教授、中國土木水利工程學會 會士

引言

土木工程的主要功能，依英國土木工程師學會 1828 年的會章，在於帶給人類福祉。

灌溉工程保障糧食充裕，而且使分工成為可能。秦朝李冰父子於 250BC 前後在四川所建的都江堰是最佳的典範。

築城防衛保障安全。最起碼的城，就是老百姓的住宅，不但遮陽、避風雨、免於野獸或盜賊的攻擊，也是老百姓家庭生活的樂園。

陸地絲路的暢通，使得中國所生產的瓷器及絲綢能夠大量外銷到中亞、西亞，及歐洲，提升中國老百姓的生活水準。而因國際貿易所引發的文化交流及文明接觸（例如佛教、回教、天主教、等等，進入中國），豐富中國及東亞國家（例如朝鮮、日本、越南）人民的精神生活，更使得中華文明大步躍昇。

本文，對交通運輸工程與其他土木工程（例如自來水工程、污水下水道工程、城市文化工程、校園工程、眾生平等情懷、等等）的人文關懷面向，加以討論。

交通運輸工程的人文關懷

對使用者的安全性及舒適度而言，軌道系統（鐵路）遠比公路系統優越。因意外事故所造成的人命傷亡，軌道系統（鐵路）也遠遠少於公路系統者。現有鐵路，如果容量不足（例如蘇澳花蓮段），可以增購列

車解決。

台鐵傑出的前局長 董萍先生，多次建議將窄軌系統改為標準軌，個人非常欽佩。舒適的標準軌火車，行車速度可以達到每小時 200 公里；而現行的窄軌火車，行車速度只能達到每小時 120 公里。

台北捷運系統，寬敞明亮的月台放在中間，任何不良份子的活動（搶劫或騷擾），立刻曝光，而且難以脫逃。許多國家的捷運系統，狹窄月台放在兩側，不良份子動手之後，容易從許多小門脫逃。這種安全、友善而且潔淨的空間，使用者善良的人性自然流露出來。上車自動排隊（圖 1）；博愛座留給老弱婦孺（圖 2）；殘障人士坐在輪椅，從地表步道旁電梯門口進入無障礙系統，直達捷運車廂（圖 3）。



圖 1 台北捷運系統，提供安全、友善的空間，使用者善良的人性自然流露出來：上車自動排隊（洪如江攝）



圖 2 台北捷運系統，提供安全、友善的空間，使用者善良的人性自然流露出來：博愛座留給老弱婦孺（洪如江攝）



圖 3 乘坐輪椅的殘障人士，可以從地表人行道經無障礙系統直達地下捷運車廂（洪如江攝）

城市裡的軌道式捷運系統，尤其是在建築密集的市中心區，多深埋地表之下，不見天日。

台北捷運系統蘆洲站，大廳雖在地下，但以凸出地表的圓頂天窗，溝通地下大廳與天空，參見筆者另文，土木工程與文化（二）土木工程之美，**土木水利 45-2** 之圖 3 至圖 8。

台北捷運系統大安森林公園站，天井與天空溝通，而且和大安森林公園連成一氣（圖 4）；穿堂層富藝術之美，外側通天井的陽光及新鮮空氣（圖 5），讓過往旅客，心曠神怡。站內休憩空間，成避暑勝地（圖 6）。



圖 5 捷運大安森林公園站穿堂層的藝術之美，外側通天井的陽光與新鮮空氣（洪如江攝）



圖 4 捷運大安森林公園站，不但與天空溝通，也和大安森林公園連成一氣（洪如江攝）



圖 6 捷運大安森林公園站內休憩空間，成避暑勝地（洪如江攝）

芬蘭的拉普蘭地區，野生動物（尤其是馴鹿，reindeer）也有權上公路。汽車駕駛在遠距離發現時，立刻降低車速；在近距離相遇，停車等待（或下車商量）馴鹿離開車道（圖 7）。美國黃石公園，汽車（其實是駕駛）禮讓北美野牛過路（圖 8）。其道路的規劃、設計、與使用，心存眾生平等的文明思維。



圖 7 眾生平等的文明工程：北歐拉普蘭（Lapland）地區公路的規劃、設計、與使用，都保留野生動物上路面的權利（洪如江攝）



圖 8 美國黃石公園，汽車禮讓北美野牛過路（洪如江攝）

現代文明國家，但凡開路，至少應有「補償」措施：建立適當數量的「生物廊道」（或生物通道），讓野生動物能跨越公路；或在路側補建適當數量的「生態濕地」，為生物多樣性略盡一份心力。

法國高速鐵路，切割野生動物棲地，阻隔維持雌雄野生動物交配繁殖機會；因而建設跨越鐵路的高架橋，方便野生動物親近。台灣的國道六號高速公路，建有生態池、生物通道、飛鳥警示圖像（老鷹）、透水鋪面，提供生物多樣性的環境。（參見筆者另文，土木工程與自然，**土木水利 44-6** 之圖 4 及圖 6）。

小國瑞士，寧願耗費極其龐大的物力及人力，鑿穿阿爾卑斯山，建設長隧道，供電氣化的高速鐵路使用，也不增建高速公路，以免污染環境。瑞士不但是世界公園，其經濟競爭力，反而高居世界第一或第二。

自來水工程的人文關懷

現代化自來水系統出現之前，曾經在世界各地爆發水媒疾病，尤其是霍亂（cholera）的流行，造成大量人畜死亡。

1829，英國雀兒喜（Chelsea）自來水公司的工程師 James Simpson 發明「慢濾法」，原水經淨水廠「慢濾池」細沙層的過濾之後幾乎所有的污染物質及水媒細菌皆已被攔阻於細沙層之中。John Snow 醫生，根據他對 1830 年代與 1840 年代倫敦蘇荷（Soho）地區霍亂的研究，證明霍亂與水污染的關係（Pannell, 1964）。此後，凡建立現代化自來水工程系統的地區，水媒性的傳染病就告絕跡，可見自來水工程系統對人類文明的貢獻。但仍然有許多落後地區，尚未建立現代化自來水工程系統，局部性的霍亂流行，尚難完全斷絕。

許多民主自由的國家，自來水多已經可以生飲。台灣的自來水，經自來水廠處理之後，已經可以生飲；但經過輸水、配水、進入用戶水池或水塔的過程之後，多已經受到某種程度的污染，不可以生飲。人文關懷的文化相當不足。

目前，大台北地區的水源在翡翠水庫，其 140 公尺高的拱壩為關鍵。翡翠水庫集水區，嚴禁濫墾濫伐、濫開道路、濫建道路，不發生許多水庫因泥沙淤積而成為蓄泥庫的問題。台灣水土保持的科技水準，舉世聞名。但台灣最重要的石門水庫與曾文水庫，泥沙淤積非常嚴重，任何人，只要不是白痴，到水庫集水區走一趟，就可以完全了解其原因。

污水下水道工程的人文關懷

污水下水道系統完善之後，絕大部分家鼠及家庭昆蟲，宣告絕跡。

城市中的家庭、工商業、公共場所、等等的污水，先進國家多已有完善的污水下水道及處理系統。接污水管至每一污染源（家庭、工商業、公共場所、等等），將污水抽送污水處理廠，處理至合乎法規之放流標準，再排放至天然水域。目前的趨勢，利用濕地（wetland）從事先期污水處理，去污率常可達 80% 以上。

台灣整體的污水下水道接管率，比印尼、馬來西亞等等國家還不如。就污水下水道接管率而言，台灣為不文明國家。台灣，偶而會發生由老鼠（及跳蚤）所傳染的病毒疾病，並非沒有原因。

城市文化的的人文關懷

目前所看到的古埃及工程，除了數量龐大的金字塔與神廟之外，看不到同時期的城市工程與民屋。

古希臘的城市建設，以開放思想主導的古典藝術著稱。但所有工程建設，由奴隸施工，談不上人文關懷。

古羅馬帝國對外侵略，除了環地中海地區之外，還遠達今之英國。為侵略，廣闊後人稱為條條大路通羅馬的所謂「羅馬之路」。其城市工程，除羅馬之外，也利用奴隸在征服地區興建城堡、自來水系統、澡堂，供將軍們享受。最殘暴的惡行是：由奴隸建造出極為龐大的競技場（Colosseum），訓練奴隸為格鬥士，與獅子格鬥，進而改由格鬥士互鬥至一人死亡。古羅馬獨裁專制的暴君，奴隸都是他的物品，生死由他決定。工程，只為征服者的安全、享受、與樂趣。羅馬帝國的滅亡，說成是被來自北方的蠻族所滅；實際上，暴君及其嘍囉，才是蠻族。

中華帝國，在周武王伐紂的文告（太誓）中，已經有『天視自我民視，天聽自我民聽。』的民主思想。孟子，將之引用（卷九第五章）；且進一步在卷十四第十四章提出『民為貴，社稷次之，君為輕。是故得乎丘民而為天子，，』的主張。遺憾的是，春秋時代的大思想家，尤其是道家的老子與莊子，儒家的孔子與孟子，雖然在週遊列國的時候，受到禮遇，卻不採納他們的王道思想。秦始皇統一六國之後，焚書坑儒，建阿房宮；杜牧有賦（阿房宮賦，825AD）為證：『六王畢，

四海一，蜀山兀，阿房出，覆壓三百餘里，隔離天日。．．．』。秦始皇死前，又建規模龐大的陵墓（尚未開挖）及兩個作為陵墓前衛的兵馬俑坑（已開挖一個）。

北京紫禁城，先為元大都。明成祖動用二、三十萬民工及軍工，費時 14 年（西元 1406-1420）擴建，南北長 961m，東西寬 753m，全城面積 72 萬 5 千平方公尺，建築面積約 15 萬平方公尺，護城河寬 52m，城牆高 12m，牆內殿宇，在明初有 1630 餘座，在清乾隆時期有 1800 座，現存 2631 座，房屋 8704 間（四根房柱所形成的空間）（參考「維基百科：故宮」）。老百姓，只能擠在簡陋的「胡同」。

現代城市，因人口密集，若再加上燃燒化石能源的工廠、發電廠、汽機車，排放超量懸浮微粒（PM2.5），造成大量人口喪傷亡。根據 Lelieveld, et al（2015）例示如下：

倫敦 2,800 人，巴黎 3,100 人，莫斯科 8,600 人，開羅 6,000 人

紐約 3,200 人，洛杉磯 4,100 人，墨西哥市 1,600 人

北京 13,700 人，上海 14,900 人，香港 2,600 人，東京 6,000 人

德里 19,700 人，孟買 10,200 人，雅加達 10,400 人

在我國行政院國家科學部的支持下，國立台灣大學公衛學院團隊研究論文（Ting-Chun Lai, et al., 2017, Burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure in Taiwan, Journal of the Formosan Medical Association Vol.116, Issue 1）顯示：

台灣在 2014 年因 PM2.5 而死亡者達 6281 人；其中，新北市 874 人，高雄市 829 人，台北市 619 人。

台灣北部空氣污染來源主要是交通運輸車輛，中南部空氣污染來源主要是工廠（包括石油化學工廠、燃煤火力發電廠、水泥廠），中部空氣污染部分來自境外。

根據 Mayor of London（2012）的 World Cities Culture Report，12 個參加論壇的城市，公共綠地（公園、花園）百分比（%）如下：

柏林 14.4%，伊斯坦堡 1.5%，約翰尼斯堡 24%，倫敦 38.4%，孟買 2.5%，紐約 14%，巴黎 9.4%，上海 2.6%，新加坡 47%，雪梨 46%，東京 3.4%，聖保羅 N/A

將上列城市公共綠地百分比(%)與市民因空氣污染而死亡人數交叉比對，六個城市的資料如下：

城市	公共綠地百分比(%)	因空氣污染而死亡人數
孟買	2.5%	10,200 人
上海	2.6%	14,900 人
東京	3.4%	6,000 人
巴黎	9.4%	3,100 人
紐約	14 %	3,200 人
倫敦	38.4%	2,800 人

由以上非常簡單的比對，大致上可以看出：城市的公共綠地(公園、花園)百分比(%)較高者，市民因空氣污染而死亡的人較少。

台灣空屋高達 80 多萬戶(空屋率約 14%，歐美國家約 5%)，許多年輕人卻因為買不起房屋而不敢結婚生子。

這些空屋，多在華麗的摩天大樓之內。這些空屋摩天大樓，相當於埃及古文明與馬雅古文明的金字塔。押注龐大的財富，佔用應該有的公園綠地與開放空間，也排擠教育、科技研發、基礎建設、社會福利、國防、等等急需的資源。中華民國，假使難以永續生存的話，這些新型態的金字塔會是最重大的原因之一。

新加坡的「住者有其屋」政策，是人文關懷的一大創舉與成就。進一步了解，建議參考公視影集「城市的遠見(林盛豐教授撰稿、訪問、講解)」。

歐洲城市，多有一座用幾百年時間所建造的大教堂(參見筆者另文：土木工程與文化(一)思想及宗教信仰與土木工程，土木水利 45-1)，顯現城市的神聖性。台灣，小廟非常之多，小店也多；一窩蜂的文化，益本比很低。

校園工程的人文關懷

學校教室，在上課時間，人數眾多；如有意外(例如火災、強烈地震)而必須逃生或待救的時候，師生安全最為重要，校舍層數不宜太多，且必須有寬敞及開放式的外走廊。

民國 88 年發生在台灣中部的 921 地震，中小學近 300 校全面崩塌，幸好地震發生在凌晨 1 點 57 分，否則可能有上萬學生遇難。地震災後校園重建，教育部動員新秀建築師們，以各族群的傳統文化為經，以

人文關懷的文化為緯，建設出對學童安全(圖 9 至圖 12)及快樂(圖 13)的校園，也提供社區居民友善的休憩空間(圖 14)。



圖 9 民國 88 年 921 地震災後校園重建，校舍多採開放式雙外走廊設計，方便火災或地震時的逃難或救災(洪如江攝)



圖 10 民國 88 年 921 地震災後校園重建，連接二樓教室與地面的開放式斜坡道，具逃難功能(洪如江攝)



圖 11 地面通往二樓的斜坡道，便利通行與逃生(洪如江攝)



圖 12 民國 88 年 921 地震災後校園重建，教室外拱形走廊，既堅固又方便火災或地震時疏散（洪如江攝）



圖 13 民國 88 年 921 地震災後校園重建後，快樂的學童（洪如江攝）



圖 14 民國 88 年 921 地震災後重建開放式校園，放學後成為社區居民的遊憩空間（洪如江攝）

陳紀澄（民國 64）在華裔錦冑一書中，讚嘆牛津大學校舍的一段話：

『至於一幢幢用石頭砌成的學院與寢室，真如銅牆鐵壁，龐然大物，大概再過一千年，也不會倒塌。』

筆者多次到牛津大學與劍橋大學參觀，判斷他們用巨石所建的校舍，耐久至少萬年以上。圖 15 為牛津大學基督書院正門照片。



圖 15 牛津大學基督書院正門（洪如江攝）

土木工程的眾生平等情懷

筆者多次到歐、美旅行，看到對弱者（尤其是兒童、病人、單身觀光客、野生動物）的愛護與尊重，感同身受。

有一次，從挪威首都奧斯陸（Oslo）出發，預定到另一觀光勝地，乘坐遠程公車，坐在靠近司機的前座。出城界之前，上來一個小女孩（大約5或6歲？），已經覺得有點訝異；到城外一個風景優美的荒郊野外，小女孩一人獨自下車，我的擔憂，被司機發現，回頭叫我放心，說：『挪威不會有人欺負小孩，她在風景看夠之後，會坐進城公車回家』。

在倫敦進修的兩年之中，常到海德公園散步。一次到公園中的人工湖邊，看到許多鳥、鴨、與遊客

（圖16），是和樂相處？還是各得其樂？。但眾生平等的景象（圖7，圖8），再一次湧進心頭。

環境與空間的營造，可能也是理想國（Utopia）形成的因素之一。

台灣國土空間的優化，土木工程師負有重大責任。Civil Engineering 的 Civil，本來就是 Civilization 的領頭字根。事實上，「土木工程就是文明工程」；而文化（思想、信仰、美、人文關懷）就是文明之中最大的一個面向。土木工程這一行業，是最有機會展現文化的行業。

新一代的土木工程師，除了雙手（科技，作業）與頭腦（文化）強壯之外；還要站起來，取得視野的高度（藝術）、深度（哲學）、與寬度（道法自然），推動新一代土木工程的「文藝復興」。



圖 16 倫敦海德公園人工湖邊眾生平等的景觀（洪如江攝）

參考文獻

1. 杜牧（825AD），**阿房宮賦**：「六王畢，四海一，蜀山兀，阿房出。覆壓三百餘里，隔離天日。……，楚人一炬，可憐焦土。……」。
2. 洪如江（民國76年），「永恆的岩石與千秋萬世的教育」，**地工技術雜誌**，第19期，第4-7頁，民國76年7月。
3. 洪如江（民國84年），「公共工程與公共建築的堅固與耐久性」，**營建管理季刊**，84年春季號第47-51頁。
4. 洪如江（民國83年），「公共工程愈舊愈耐用？」，**中國時報時論廣場**，民國83年11月3日。
5. 陳紀濤（民國64），**華裔錦霄**，地球出版社。
6. Society for the Art of Civil Engineering, 2006, **New Rail Link through the Alps: A Swiss Pioneer Achievement**, Museum for the Art of Civil Engineering, Ennenda, Switzerland. 



非破壞性探勘技術應用於道路沉陷 緊急搶修之探討 ——以鄭州路、環河北路口事故為例

彭振聲／臺北市工務局 局長

楊明祥／臺北市工務局 副局長

張凱堯／臺北市工務局水利工程處 總工程司

邱志榮／台灣世曦工程顧問股份有限公司 工程司

都會區發生道路沉陷將衝擊市區交通，造成用路人之不便，甚或嚴重影響安全，因此搶修工作往往是刻不容緩。本文案例應用非破壞式探勘技術，快速探查道路災損範圍、地下結構物與管線分布狀況，在改善方案研擬、地質改良效果確認上，有相當之成效。另簡要說明地下排水箱涵結構嚴重破損之緊急處置及後續重建過程，藉由本案例搶救經驗分享及精進作為探討，以提供工程界處理類似案件之參考。

ABSTRACT

Road subsidence will affect urban traffic, causing inconvenience or even affecting safety to pedestrians so that the emergency repairs are usually urgent tasks. Non-destructive exploration techniques are used to quickly explore road damages and distributions of underground structures and pipelines. In the improvement plan proposed and the effect of soil improvement, non-destructive exploration techniques have also achieved considerable results. A brief description of the emergency disposal of severely damaged underground drainage box culverts and the subsequent reconstruction process have also been presented in this article. By means of the rescue experience sharing and advance discussion, it is expected that the description of this article would be served as a reference basis for the similar engineering cases in the future.

前言

現代化城市因人口密集交通繁忙，市區道路負荷相對沉重，維生管線亦多密佈於道路下方，維生管線若有破損、沉陷甚至是脫管情況發生時，通常會導致路面沉陷，除影響用路安全外，甚至有瓦斯氣體外洩之疑慮。因此，維生管線之搶修工作往往是刻不容緩，且必須將道路影響降至最低。本文係以鄭州路、環河北路口道路沉陷事故為例，說明事故之處理過程，及導入非破壞性探勘技術（透地雷達、低頻電磁波）調查災損範圍、地下結構物與管線，作為案址改善工程輔助決策參考依據，以求在最短時間內迅速動員緊急救災物料及人力並限縮災損事故衝擊範圍。透過案例處理之經驗分享、未來維護管理精進作為及免開挖工法如：CIPP、SPR 等技術之討論，期待可提供類似案例之參考。

案例概述

北市大同區環河北路與鄭州路口於 106 年 12 月 6 日上午 9 時發生路面、人行道掏空下陷（詳見圖 1、圖 2）。經市府工務局新建工程處邀集相關單位，現場檢視權管設施後，發現鄭州路下方雨水箱涵側牆及底版有缺口、破損，需辦理改善（詳見圖 3）。水利工程處（以下簡稱水利處）除立即動員辦理緊急搶救工作，並委託國內具搶救災經驗之大型工程顧問公司，指派土木、結構及大地技師群，共同協助辦理搶救及後續修復工作。

事故處理

一般而言，緊急搶救事故，其主要之辦理原則可分為下列五點：

1. 調查並確認災損範圍，利用現場觀察既有結構裂縫、地形測量、地球物理探測、蒐集既有管線資料及鑽探等方式，確認事故影響之範圍。
2. 評估可能致災原因，透過上述調查成果，可初步辨識出可能致災原因，以辦理後續搶救作業，並於過程中加以確認。
3. 穩定地盤避免二次災害，以回填混凝土、緊急灌漿等方式，先行穩定地盤。避免地盤再次陷落，引發其他維生管線災害。針對箱涵結構嚴重破損部分，除緊急以鋼板補強，並於箱涵內安裝補強鋼框，同

時封閉慢車道以避免發生崩塌而危及用路人及搶修人員安全。

4. 建立安全監測系統，迅速於工址建立監測基準點及相關監測系統，擴大觀察災損區之變化及改善方案成效。
5. 研擬後續復舊方案，搶救階段應及早進行復舊方案之研悉與規劃，以調整搶救工法與施工程序，可降低未來復舊之難度。

本案例事故處理分為二階段分別辦理緊急搶救及箱涵復舊工作。其中，搶救階段以穩固鬆弛地盤及穩定箱涵結構為主，利用災損範圍之調查成果，安排第一階段灌漿範圍參見圖 4 及圖 5，第二階段灌漿範圍參見圖 6，箱涵安裝補強鋼框參見圖 7。



圖 1 事故工址範圍示意圖



圖 2 人行道掏空及道路下陷情況

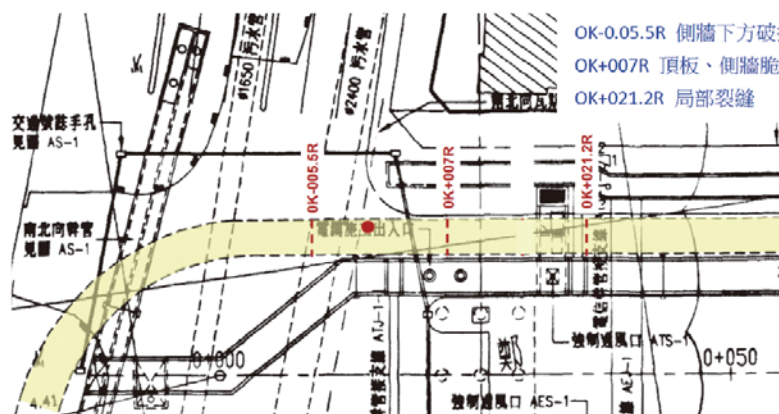


圖 3 排水箱涵內破損狀況

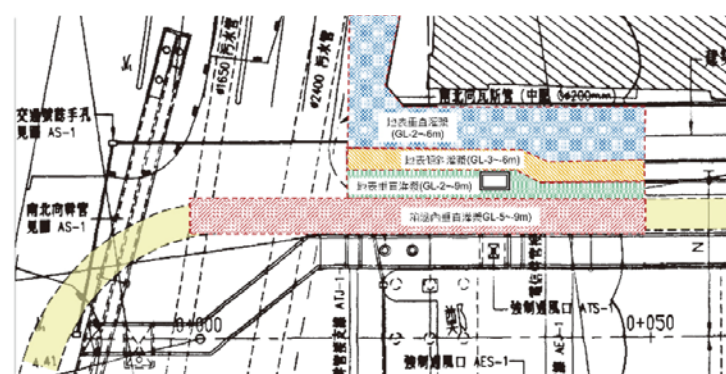


圖 4 第一階段灌漿範圍平面示意圖

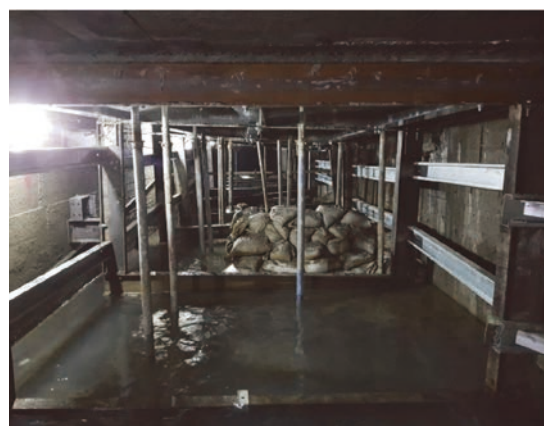


圖 7 箱涵安裝補強鋼框

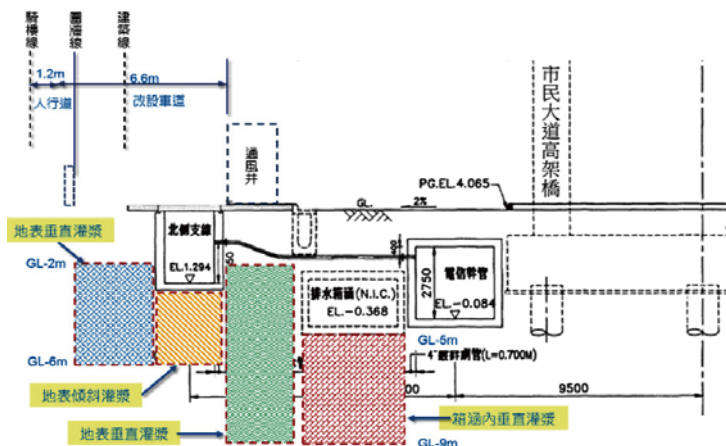


圖 5 第一階段灌漿範圍剖面示意圖

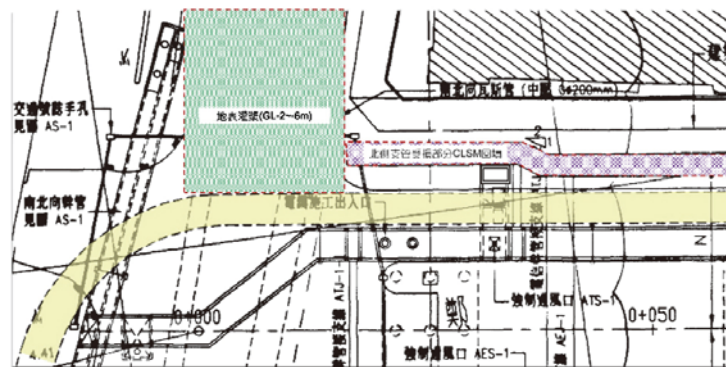


圖 6 第二階段灌漿範圍平面示意圖

復舊階段，考量部分箱涵結構受損嚴重，且需於汛期來臨前完成箱涵改建復舊工作，因此採用施工最為快速之明挖工法辦理施工。惟為降低該路段之交通衝擊，故將鄭州路局部向北遷移至人行道，維持 2 車道各 3.3 m 車道供車輛通行，並協調臨時拆除忠孝國中活動中心部分圍牆，以設置 1.2 m 人行道，詳圖 8。

各階段主要之工作紀要，已分別摘錄如表 1、表 2，可提供後續類似案例參考。

非破壞性探測

針對災損範圍調查部分，本案例於執行過程中除利用傳統透地雷達進行地球物理調查外，因透地雷達僅能探查淺層 2 ~ 5 m 左右之地層之狀況，針對工址較深層之空隙調查，特委託臺灣大學地理系協助以其近年所開發之低頻電磁波進行調查，以下將分別就其成果進行說明。

- ◆ 施工路段鄭州路西向車道，借用既有人行道向北遷移。
◆ 需協調忠孝國中法定退縮用地及駁除部分圍牆作為人行道。

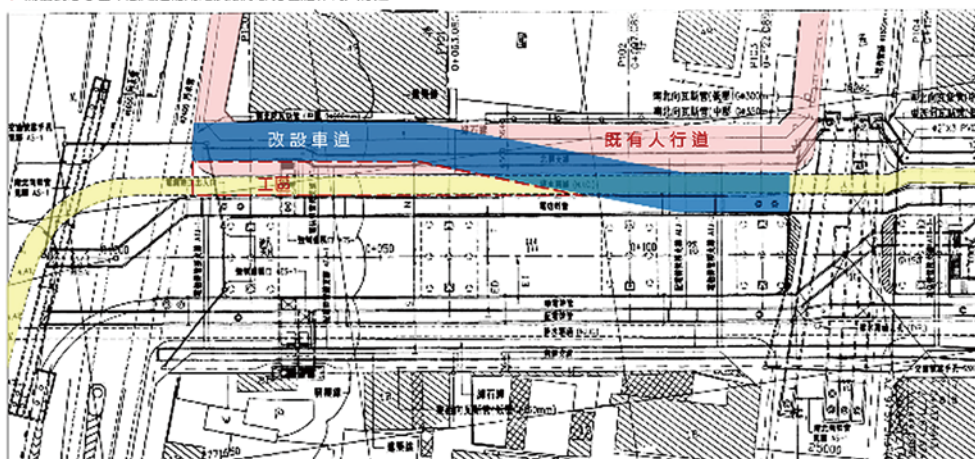


圖 8 復舊階段車道改道示意圖

表 1 緊急搶救階段紀要

日期	內容
106.12.06	1. 上午 9:00 會勘確認雨水箱涵破損。 2. 台大低頻電磁波進場調查。 3. 緊急開挖人行道箱涵側牆破損處，發現掏空長度約 15 m、寬度 1~2 m、深度大於 6 m，緊急回填灌漿 185 m ³ 混凝土。
106.12.07	1. 水利處緊急會議，研擬初步改善措施。 2. 透地雷達進場，調查人行道及箱涵底板、側牆。
106.12.08	1. 設置高程控制點，持續監測沉陷。 2. 地表沉陷區開始鑽孔回填灌漿。 3. 發現 0K + 5.5R 處底板破損嚴重，以鋼板封閉補牆，並進行箱涵內部止水灌漿。
106.12.10	1. 路口轉角人行道鋪面破除開挖，發現掏空約 3.5 m 深，緊急回填灌漿 27 m ³ 混凝土。 2. 增加灌漿機組。 3. 箱涵下方橫越鄭州路之 700 mm 污水管，遭灌漿材阻塞。
106.12.11	1. 相關單位會勘後發佈新聞稿，封閉排水箱涵上方外線車道。 2. 箱涵內補強鋼框進場安裝。
106.12.12	1. 調整施工順序及灌漿材料。 2. 共同管道北側支管受損狀況會勘。
106.12.13	1. 透地雷達補充調查環河北路及鄭州路道路現況。 2. 忠孝國中活動中心地下室現況勘查。
106.12.14	1. 辦理各管線單位會勘。
106.12.15	1. 緊急搶救及箱涵復舊方案核定。
106.12.16	1. 台大低頻電磁波進場調查。
106.12.18	1. 箱涵復舊交維改道方案會勘。 2. 第一階段緊急搶救灌漿完成。

表 2 箱涵復舊階段紀要

日期	內容
106.12.19	1. 公園處路燈及植栽移植辦理原則討論。
106.12.20	1. 台大低頻電磁波進場調查。 2. 忠孝國中活動中心委託辦理建物現況調查。
106.12.22	1. 發布新聞稿，說明交維改道事宜。
106.12.25	1. 箱涵復舊交維改道方案現勘討論。
106.12.27	1. 植栽移植完成。
106.12.28	1. 共同管道北側支管受損部 CLSM 回填。 2. 第二階段環河北路回填灌漿開始作業。
106.01.07	1. 切換替代道路。 2. 進行管線試挖。
106.01.08	1. 配合試挖成果調整擋土壁施作方案。
107.01.11	1. 箱涵重建段起迄點施作圍堰。
107.01.13	1. 箱涵重建段擋土壁施作完成。
107.01.16	1. 箱涵重建段覆土開挖。
107.01.18	1. 開挖後支撐架設完成。
107.01.19	1. 箱涵重建段箱涵頂板敲除。
107.01.21	1. 箱涵重建段起迄點圍堰補強。 2. 開始敲除箱涵底板。
107.01.24	1. 重建段箱涵敲除完成。 2. 重建段底部 PC 完成。
107.01.25	1. 第二階段環河北路回填灌漿作業完成
107.01.28	1. 重建段箱涵頂板澆置完成。
107.02.07	1. 鄭州路全面開放通車。

透地雷達調查成果

透地雷達探測針對事故範圍進行地表及箱涵內調查，主要目的為調查該區域地下地層狀態，以期能發現地面下異常區域分佈範圍，提供相關訊息作為後續施工建議之參考依據。

環河北路鄭州路口人行道，主要異常狀態包含：路基下陷、空隙、空洞區域、共同管溝及灌漿回填區，將路基下陷、空隙、空洞區域等異常區標示於測區平面圖上如圖 9 所示，各測線統計之空隙較發達範圍為深度 0.3 m ~ 0.65 m 之間。

排水箱涵，主要異常狀態包含：箱涵結構斷裂、掏空，將箱涵結構背後異常掏空區標示於測區平面圖上如圖 10 所示，各測線統計之預估掏空範圍為 0.2 m ~ 0.4 m 之間。

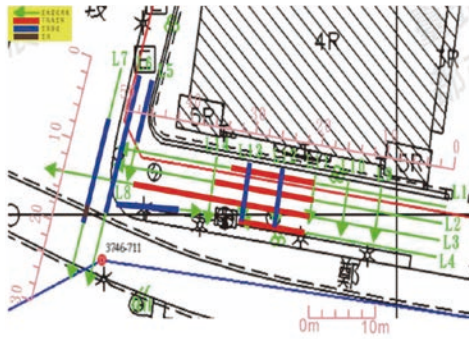


圖 9 透地雷達判釋異常位置圖 (106.12.07)

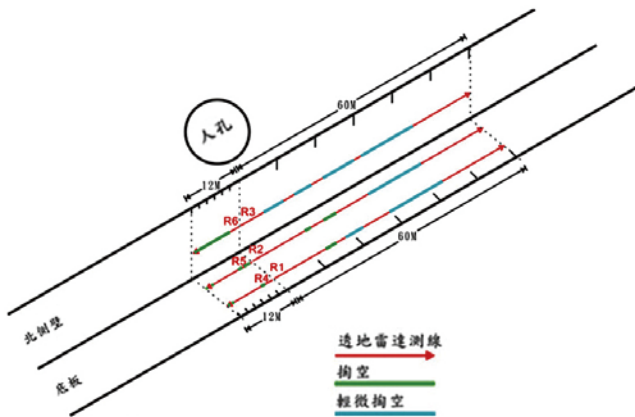


圖 10 排水箱涵測線異常區域分布圖 (106.12.07)

環河北路鄭州路口車道，主要異常狀態包含：路基下陷及疑似下陷、空隙發達區及灌漿回填區，將路基下陷及疑似下陷、空隙發達區及灌漿回填區等異常區標示於測區平面圖上如圖 11 所示。

低頻電磁波調查成果

低頻電磁波探勘儀主要係以天然電磁波概念出發，不發射電磁波，屬被動式遙測。探勘原理係以被動式方法由接收儀器 - 傳感器 (Transmitter) 接收反射回來的超低頻段電磁波，再轉換為電壓值 (V, 單位為毫伏特 mV) 與電磁電阻率 (ρ , 單位為 $\Omega\cdot m$)。基於量子力學 (Quantum Mechanics) 中的能量守恆不變原理，在一個物理系統內，反射回地表的這部分電磁波，其頻率的大小及量值 ($U = q \times V$) 的多寡、介面的深度，都與物性特徵有關。低頻電磁波探勘方法即是將地下反射回來的不同頻率之電磁波通過接收放大，轉變成「電壓值」，以擷取地下物質資訊。

低頻電磁波調查所使用的探測儀器為 SYT 物性地勘儀 (垂直解析度 1 m)、以及 DGT 工程探測儀 (垂直解析度 10 cm)。SYT 探測標的物以尺度較大的地下質

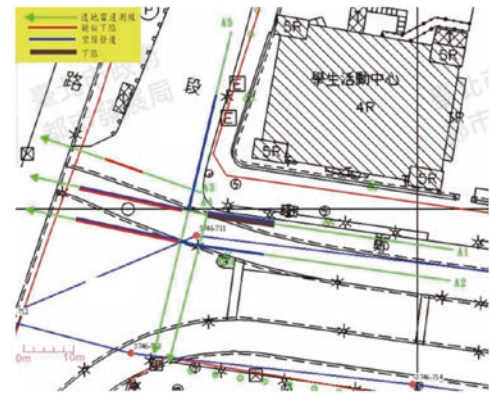


圖 11 環河北路鄭州路口異常區域圖 (107.12.13)

(地下物質之強弱區分)、含水狀況 (地下物質含水量之多寡) 為主，DGT 探測標的物以尺度較小的管線、管溝及人為結構物為主。

工址緊急灌漿前，使用低頻電磁波探勘儀 (DGT) 進行調查。探測位置忠孝國中西南側之人行道 (鄭州路與環河北口旁)，探測標的為地下質、含水量分佈狀況以及 700 mm 污水管位置，以探測資料找尋沉陷範圍。由圖 12 之視電阻率多為 70 以下可知，探測區相當鬆散，含水量高，易造成地下掏空。本探測區之疑似掏空範圍可分為四層，由以第一層的最為嚴重 (環河北路人行道)，掏空延伸至共同管道北側支管方向。第二層與三、四層有相互連接的情況，而第四層延伸至 700 mm 污水管的位置。

於人行道灌漿階段，使用低頻電磁波探勘儀 (SYT) 進行調查。探測標的為人行道與馬路 (環河北路) 之地質、含水量分佈狀況。由圖 13 之視電阻率多為 70 以下可知，探測區相當鬆散，含水量高，易造成地下掏空。A-C 測線已灌漿區域，呈現紅藍色的視電阻值較高，代表此區域物質較堅硬。

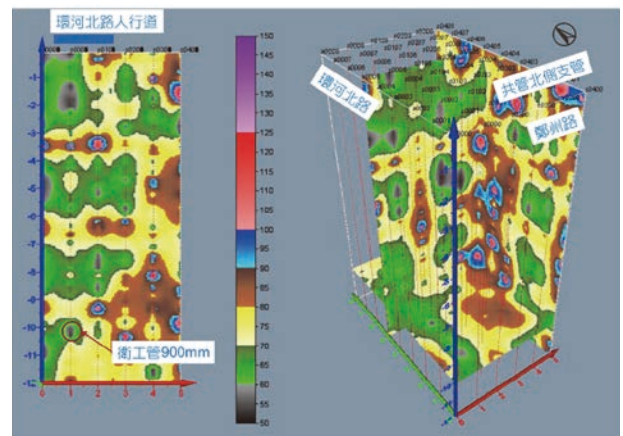


圖 12 灌漿前人行道 DGT 探測成果 (106.12.06)

於緊急搶救階段灌漿完成後，地表沉陷已穩定，分別使用低頻電磁波探勘儀（SYT）、低頻電磁波探勘儀（DGT）進行調查。由 SYT 工程探測儀在靠近圍牆的橫剖面中（圖 14），可顯示出疑似圍牆角落的沉陷區寬度約 11 m，沉陷深度約 12 m。由圖 9 中可明確的判釋出疑似沉陷區幾何形狀，周圍為高電阻值（藍至紅色），疑似沉陷區為中低電阻（綠至咖啡色），代表灌漿已改善沉陷區，但仍然含水多尤其在地表至下約 3.5 m 處。

由 DGT 工程探測儀（垂直解析度 10 cm），所測得結果可知，由視電阻率判釋出管線位置，剖面圖中除可提供管線的資訊，也能夠分辨出區域性的地質狀況，但並不能代表為整體的地下質狀況。由圖 15 以及本次的另外 4 條剖面中，可明確區分出地下有四層較為堅硬的物質（紅色的高電阻值）存在。

為確認第二階段重建工程施工時，環河北路地盤改良施作之必要性，特別安排以低頻電磁波探勘儀（DGT）進行補充調查，DGT 探測之測線東西向二條

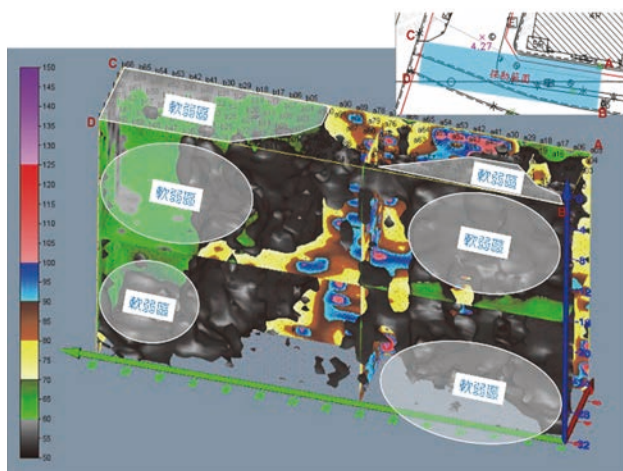


圖 13 灌漿階段 SYT 探測成果 (106.12.16)

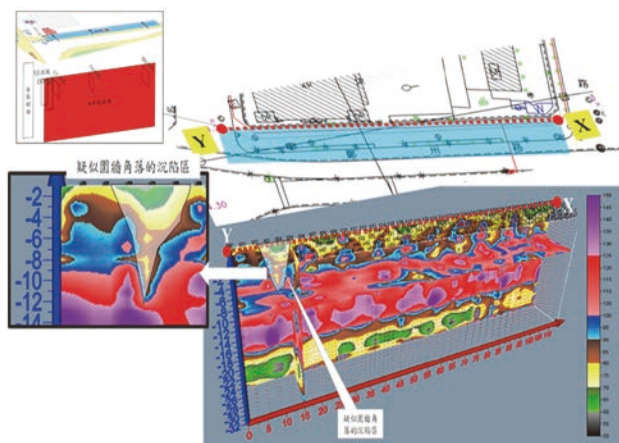


圖 14 人行道 SYT 探測成果 (106.12.20)

測線包含 GG、HH。由地表下 10 m 以上局部區域視電阻率為 70 以下得知，顯示該局部區域較為鬆散，含水量高。依 DGT 判釋成果，部分管線可依管線圖區分出來，部分無法判別者可能是地盤改良之目標範圍。

事故原因探討

工址地層經參考鄰近工程資料得知，地層之分佈情形屬砂粘土互層，地表回填層下方有一層粉質黏土，平均厚度約為 2 m 左右。其下為粉質細砂，偶夾小礫石，平均厚度約為 10 m 左右。工址範圍之工程性質主要為砂土所控制。因此，一旦地層有冲刷掏空情況發生，沉陷槽將快速傳遞至地表，並於地表道路、人行道產生立即沉陷。經檢視相關透地雷達、低頻電磁波之調查結果，與現場排水箱涵破損、實際灌漿數量研判，初步可將事故原因歸納為下面三點：

1. 本事故發生初期，除發現路面、人行道掏空下陷外，經現場排水箱涵發現側牆及底板有缺口、破損情況。其中底板破損可能是下方掏空所致，而靠近共管通風井旁 0k + 5.5R 位置之側牆缺口，經檢視發現外側土壤皆已遭冲刷形成抽坍孔洞。後續亦直接以灌漿方式回填 185m³ 之混凝土。

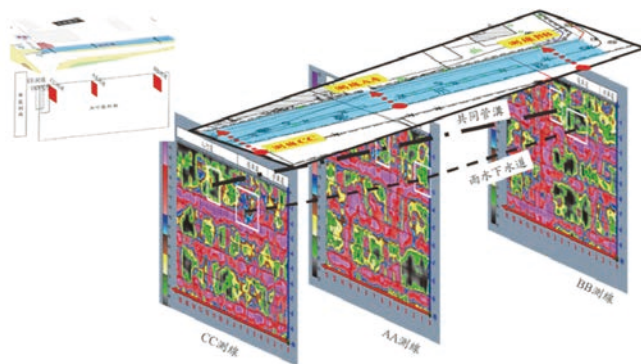


圖 15 管溝位態 DGT 探測成果 (106.12.20)

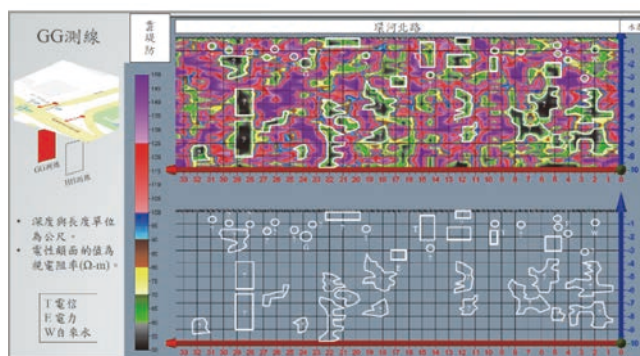


圖 16 GG 測線 DGT 探測成果

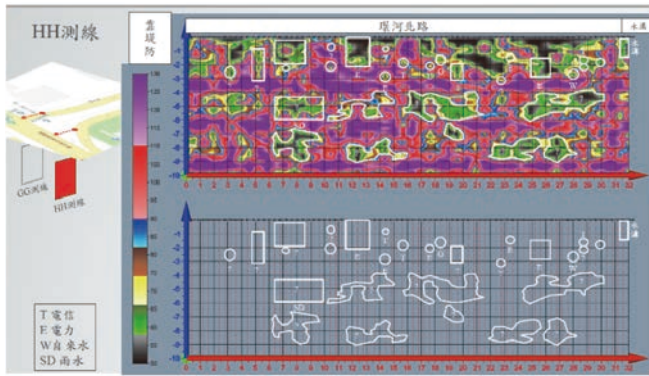


圖 17 HH 測線 DGT 探測成果

- 參考事故發生當日，低頻電波之探測成果，鄰近事故區之 700 mm 污水管上方地下孔隙相當發達（圖 12）。除地表回填混凝土 27 m³ 外，於後續第一、二階段，於此位置之灌漿，灌漿部分共灌注水泥約 4,000 包。此街口位置除 GL-7 ~ -9 m 範圍之 700 mm 污水管已知有脫管並遭灌漿阻塞外，下方 GL-16 ~ -19 m 範圍亦有 2,400 mm 污水管，亦不排除有破損掏空現象。
- 本工址範圍鄰近淡水河，且地表下 12 m 範圍內多為砂土，長期受潮汐影響可能導致管線下方多有土壤鬆弛現象。因環河北路及鄭州路上管線密佈，該土壤鬆弛帶並未發展至地表道路。但可能於地表下產生局部較疏鬆之排水通道，參見圖 15 黃綠色部分。長期而言，可能造成較大區域之平緩沉陷，惟若伴隨其他事故原因，將導致事故區域之沉陷量加大。

精進作為與展望

案址排水系統屬感潮段，在辦理雨水箱涵緊急搶修與重建過程中，需動員各單位密切聯繫及配合，觀察潮汐漲退情形適時操作抽水站開門，盡量降低箱涵內水

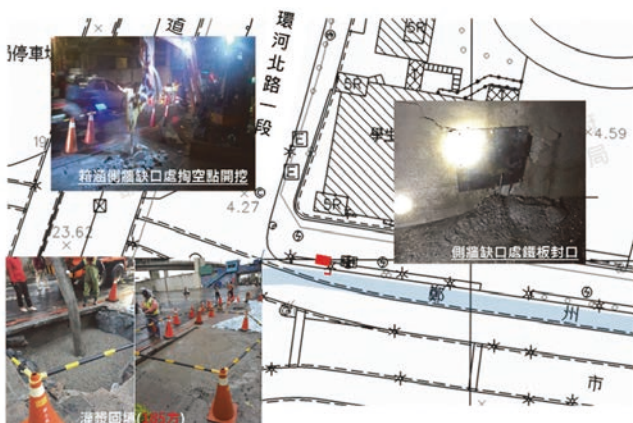


圖 18 箱涵側牆缺口處理示意圖

位以利增加施工時間及確保施工人員安全，施工現場需設置前進指揮所，現場指揮官應注意工地狀況及作適當的處理，以即時解決工地問題並達成提早完成箱涵重建恢復通車。本事故搶修已經告一段落，透過再次檢視過程、研提精進作為以減少類似案件再次發生之機率，爰將本案例搶救經驗及檢討、精進作為整理如下：

- 地下探測技術之運用：傳統透地雷達於地下探勘，係考量其探勘速度快、解析度高等特性，但卻有無法穿透較深層地層、遮蔽效應與干擾等影響探測效果之限制；而低頻電磁波解析度中高、探測速度較慢，惟其可探測至深層。本案例於執行過程中，導入兩種非破壞性探測技術，於初期利用透地雷達進行地球物理調查，以快速探查淺層地層異常區域分佈狀況外，另針對工址較深層之空隙調查，則採低頻電磁波進行調查，探測時間點包括沉陷發生、灌漿中及灌漿後，藉此作為改善方案研擬、施工改善效果等各階段作業參考依據。
- 落實定期縱走調查：為掌握雨水下水道結構情形並作必要之維護與改善，需定期辦理縱走調查，管徑較大之排水系統一般係以人員縱走方式進行調查，管徑較小者可採用 TV 檢視車（圖 19），俾利及早發現排水系統缺失並納入後續結構補強作業，惟於執行排水系統縱走調查作業時，常因雨水人孔降埋、或因受潮潮影響積水過深致人員難以進入調查，造成管理維護的盲點。故針對過去縱走調查遭遇困難部分應成立專案縱走調查計畫，投入跨單位資源將前述阻礙調查因素排除，以確實掌握箱涵狀況。
- 人孔下地政策之省思：臺北市已多年獲選為路平績優單位，路平管制與人孔降埋是提高行車安全及舒適度的重要策略。惟排水系統有維護與清疏需求，雨水人孔的適地及適量提升，應可再平衡檢討。為兼顧行車安全，臺北市已推動圓形切割人孔（圖 20）提升，可有效改善以往方形切割人孔對路面造成的裂化及安全的影響，另採用防氣掀式雨水人孔（圖 21），可避免人孔彈跳的風險，這些精進作法可作為後續人孔提升與降埋時之通盤考量。人孔適地適量提升後，即可賡續辦理排水系統縱走調查與後續維護改善作業，以期掌握問題並及早改善。
- 管線圖資掌握之重要性：過往地下管線圖資常見問題為資料正確性較為欠缺或散見於各管線單位難以即時整合，鑑此，臺北市已成立「臺北市道路管線



圖 19 小管徑排水系統 TV 檢視車與成果示意圖



圖 20 圓形切割雨水人孔圖



圖 21 防氣掀式雨水人孔圖

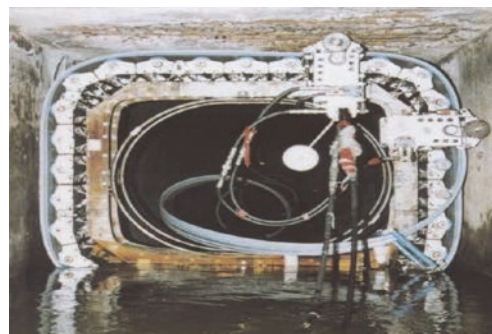


圖 22 自走式旋轉製管示意圖

使用之環帶均由 PE 製成，且板帶之表面具有公母卡榫設計，藉由製管機將環帶旋轉於舊管內成新管，環帶與舊管內壁之間還必須灌注水泥砂漿。

由於不同管徑環帶厚度為固定，管徑

大小與灌漿厚度可以由製管機直接調整，因此本工法管材不需根據現場條件生產，未來或可思考利用於緊急搶救作業。

由於國內運用免開挖更生工法於雨水下水道之案例較為欠缺，爰臺北市亦將於 107 年另案推動試辦，運用旋轉環帶製管工法於結構修補工作。

結語

古人有云：「前事不忘，後事之師。」本文以鄭州路、環河北路口事故為例，應用透地雷達與低頻電磁波等非破壞性探勘技術作為搶災及重建之輔助決策參考依據，獲得不錯成效，成功協助搶災及箱涵重建工作順利進行，將道路影響降至最低。

另透過本案例地下排水箱涵結構嚴重破損之緊急處置、重建過程分享及精進作為探討，期能提供工程界處理類似案件之參考。

參考文獻

1. 臺北市政府工務局水利工程處 (2017)，「鄭州路環河北路口排水箱涵緊急搶修重建工程大事紀」。
2. 台灣世曦工程顧問有限公司 (2017)，「排水箱涵復舊施工構想簡報」。
3. 台灣世曦工程顧問有限公司 (2018)，「環河北路與鄭州路口箱涵事故成因檢討報告」。
4. 朱子豪、翁志傑 (2018)，「非破壞式探勘技術應用於人為結構物及地下管線」。
5. 陳逸群、上垣潔志、張俊郎 (2011)，「PALTEM・Flow-Ring 中、大管徑免開挖更生工法之發展及應用」，地下管道 24 期，第 29-36 頁。

暨資訊中心」，整合各管線單位之 3D 圖資，本次事故發生後，透過道管中心各管線單位駐點人員的聯繫，在極短時間內將事故地點周邊管線單位會集釐清，迅速掌握地下管線情形，以做為事故原因研判及搶修施工之參考。

5. 結構修補工法之精進：本案例之箱涵復舊工作係採用明挖工法，惟該工法對交通衝擊甚大，未來除傳統工法外，宜引進其它維生管道之修復工法，例如採免開挖更生工法 (No-Dig Renewal Method) 於國外已是成熟的技術，在台灣下水道與自來水管線的應用亦有不少案例，免開挖更生工法種類繁多，較為國內所採用的主要為現地成形固化工法 (Cured-In-Place Pipe；CIPP) 及旋轉環帶製管工法 (Spiral Pipe Renewal；SPR)。

現地成形固化工法 (CIPP) 為國內實際運用較多的工法，主要施作方式分為氣壓反轉、水壓反轉兩種，前者輕巧靈便，後者則反轉能量較大，但兩者管材都必須根據舊管之損壞情況及載重條件計算內襯所需厚度，預先製成軟管，並於工廠進行樹脂含浸 (Impregnation) 加工後，才能於施工現場進行反轉及加溫固化作業；因此，現地成形固化工法之內襯軟管所需備料時間較長，並不適用於搶救作業。

旋轉環帶製管工法 (SPR) 主要施作方式分為元押式旋轉製管、自走式旋轉製管兩種，元押式旋轉製管一般適用於既設管徑 250 mm ~ 1500 mm，自走式旋轉製管適用於 900 mm ~ 5000 mm (參見圖 22)，兩者所

學術活動 — 2018 水工程國際研討會 107.4.12

107.4.12 在高雄鳳山行政中心與台大土木系、台大土木校友會合辦的「2018 水工程國際研討會」，圓滿成功。高雄市政府相當重視，趙建喬秘書長（左四），工務局副局長，水利局主任秘書都致詞及演講，現場共約 150 名聽眾。

演講議題有：澳門的風暴潮淹水災害與防治、台大的重現瑠公圳水路、都市雨水側溝減洪量化評估、高雄市生態滯洪之應用，都非常精彩，聽者迴響熱烈。



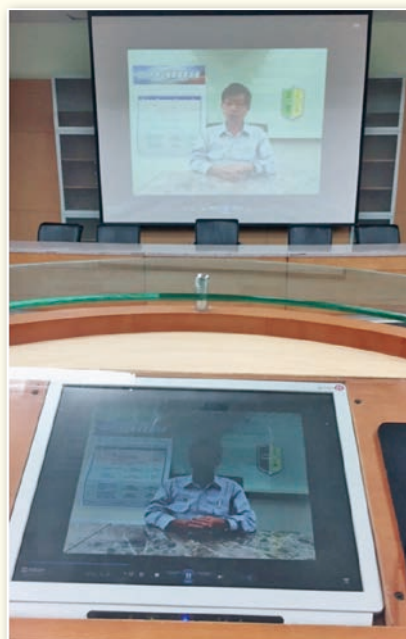
貴賓合照



四位演講人自左到右：區秉光博士、謝尚賢系主任、張駿暉教授、張世傑主秘



2018 水工程國際研討會研討會現場



特別感謝

感謝台灣世曦高辦處動員五位同仁、高雄市水利局大力幫忙，本會議方得以圓滿成功。

幕後也沒閒著

王理事長因為另有重要會議，不克出席。前一天在學會製作影片於現場播放。也是一項創舉。

兩岸交流 — 2018 亞太城市建設與管理實務論壇 @ 北京 107.5.18-20

本次論壇在北京建築大學盛大舉行，本學會由陳仲賢常務理事擔任團長，中興顧問社、中華顧問工程司以及台灣世曦均派代表，共九位出訪。



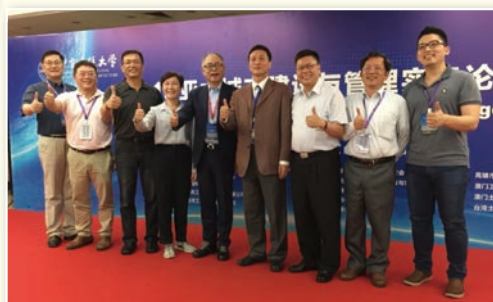
主辦單位北京建築大學張愛林校長致歡迎詞



所有區域代表互贈紀念品



開幕式大合照



張愛林校長與土水學會全體團員合照



四篇論文發表人(左到右)：石明璋正工程師、蕭勝雄技術經理、徐嘉駿正工程師、鄧大光正工程師



陳仲賢常務理事擔任團長並發表專題演講



中華顧問司吳盟分董事長專題演講



工程參訪



通州副中心



北京大興機場

台日交流 — 2018 台日交流研討會 107.6.1

自2016年起，CICHE與JSCE（Japan Society of Civil Engineers）每年輪流舉辦雙邊土木工程交流，2018年為第三屆，於6/1（五）在台中中科園區盛大舉辦。本次論壇之主題：Hazard's Risk Management & Innovation in Civil Engineering。上午進行專題演講，下午分四個場次。本次論壇內容精心策劃，並有年輕人手腦益智活動及專為年輕人而設的短論文發表，為論壇亮點。



2018 第三屆台日交流研討會圓滿成功



Special Activity for Young Engineers

6/1 安排參訪巨大集團全球企業總部與研發中心
6/2 安排參訪台中捷運及台中火車站



張鈺輝副秘書長（右）是此次研討會的幕後最大功臣

精彩議程如下：

Welcome & Opening Remarks

CICHE / Mr. Jaw-Lieh WANG, CICHE President, JSCE / Dr. Masahiro OUCHI, JSCE / Prof. Hiromi SHIRAHATA

Keynote Lectures

JSCE	Dr. Masaaki OKADA / Kindai University	Industrial Landscape and Local Community: Case Studies in Lime and Cement Industrial Cities (產業景觀和地方社群：礫都（石灰石礦業都市）的事例研究）
NCREE 國震中心	Prof. Shyh-Jiann HWANG / Director General of National Center for Research on Earthquake Engineering (黃世建)	Recent Research Activities of NCREE in Taiwan

Special Activity for Young Engineers

Organizer: Prof. Chien-Ho KO (柯千禾) / National PingTung University of Science & Technology 屏科大

[D-1] Natural Hazard and Risk Management

G.T. Int. 巨廷	Dr. Sheng T. (Paul) HSU (許勝田)	Renovation of Nanhua Reservoir for Sustainability
JSCE	Dr. Hiromasa Iwai	Constitutive Modeling For Gas-Hydrate-Bearing Soils Considering Hydrate Morphology
HSR Co. 高鐵公司	Dr. Hanwei YANG (楊恆偉)	The Measures Taken by Taiwan HSR to Cope with Natural Disasters under Extreme Weather Conditions
JSCE	Dr. Tetsuya IKEDA	ICHARM's Activities on Water-Related Disaster and Flood Management in Japan for Climate Change Adaptation
Sinotech 中興顧問	Dr. Chi-Ming Chen (陳啟明)	Potential Risks of Offshore Wind Farm Development by Typhoon
JSCE	Mr. Ryuichi IBUKI	Numerical Simulation Based on SPH-DEM Analysis for Pull-Out Experiment of Masonry Retaining Wall
NKUST 高科大	Prof. Huai-Houh HSU (許懷後)	Correlations between Maximum Shear Modulus and Physical Properties of Submarine Sediments
FCU 逢甲大學	Mr. Do Van Manh (杜文孟)	A Simulation Model to Explore Freeway Artificial Intelligence Ramp Metering

[D-2] Innovation in Earthquake Engineering

JSCE	Dr. Koji ICHII	Performance Based Seismic Design in ISO23469, and Its Possible Future Update
MAA Group 亞新	Mr. Chung-Ren CHOU (周忠仁)	Liquefaction Mitigation: Ground Improvement Techniques for Land Reclamation
JSCE	Dr. Masayuki YOSHIMI	Damage on Infrastructures due to Surface Rupture of the 2016 Kumamoto Earthquake (Mw7.0), Japan
CYUT 朝陽大學	Ms. Ying-Tzu KE (柯盈慈)	Application of Bridges Health Monitoring by Using Microwave Interferometer Technique
JSCE	Mr. Daichi ISHIKAWA	Three-Dimensional Effect on Seismic Stability of Embankment Based on SPH Simulation
NCREE 國震中心	Dr. Yu-Wen CHANG (張毓文)	Seismic Requirement for OWT in Taiwan
JSCE	Mr. Keishiro OTSUKA	Identification Accuracy of S-Wave Velocity from H/V Spectra Observed on Irregular Ground with Inclined Bedrock

[D-3] Innovation in Track, Foundation & Transportation Engineering

FCU 逢甲大學	Yi-Min HUANG (黃亦敏)	Development of Landslide Fragility Curves Model in Taiwan
JSCE	Dr. Kai-Chun CHANG (張凱淳)	Nonlinear Dynamic Analysis of Vehicle-Bridge Interactive System under Strong Earthquakes
Sinotech 中興顧問	Mr. Chien-Ming LAI (賴建名)	Evaluate the Impact on Adjacent MRT Station from Shield Tunneling by Numerical Analysis and Risk Management – Taking Taipei MRT Circular Line for Example
NCHU 中興大學	Prof. Shin-Tai SONG (宋欣泰)	Performance of Bridges with Foundation Exposure under Near-fault Seismic Demands
CECI 世曦	Mr. Hsiang-Yu Hsiao (蕭祥佑)	Design of Chung Cheng Steel Arch Bridges in Taipei
JSCE	Mr. Daniel MORIKAWA	Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation Using a Particle Method
NCNU 暨南大學	Prof. Edward LUO (羅慶瑞)	Bridge Scour and Related Countermeasures in Taiwan
CECI 世曦	Dr. Sy CHANG (張思)	The Noise and Vibration Prevention of the Trackwork - Floating Slab Track

[D-4] New Material, Technology and Construction Method for the Civil Works

CECI 世曦	Mr. Yuan-Yao TSAI (蔡淵堯)	Challenges of the Record Deepest Excavation Design for Taichung MRT Land Development Buildings
JSCE	Dr. Hiromi SHIRAHATA	Development of Monitoring System for Bridge Collapse Detection by Energy Harvest with Solar Cell
NPUST 屏科大	Dr. Chiwan Wayne HSIEH (謝啟萬)	Plastic Underground Water Storage Tanks Engineering Behavior Under Static and Cyclic Loads
JSCE	Mr. Tadashi MORI	Coalesce and Disappearance of Entrained Air in Self-Compacting Concrete at Fresh Stage
NCHU 中興大學	Mr. Yi-Po SHAO (邵亦柏)	Reduction for Run-up Height of Long-Wave-Induced Inundation by Submerged Barriers
JSCE	Ms. Mayu SUZUKI	Development of Wood Ash Concrete
JSCE	Mr. Kohei HARA	Verification on Collapse Process of Aso Bridge during the 2016 Kumamoto Earthquake by ASI-Gauss Method



6/2 晚宴氣氛熱絡



紀念品所附精美小卡

感謝中部分會林呈主任委員之學生團隊一肩扛起所有工作，更感謝羅慶瑞副主委（左）全程參與，熱誠招待，會後贈送每位外賓精美紀念品，令與會者及貴賓們賓至如歸，讚不絕口。

兩岸交流 — 福州水利學會來訪 107.4.16

4/16 福州水利學會一行七人來訪，當天由張培義前監事及陳清泉老師代表接待。會中討論兩岸之城鄉發展、水源管理、水費制定等等相關議題，廣泛交換意見。



學術活動 — 花蓮地震之省思與探討研討會

@ 中原大學 107.5.4

青年工程師委員會主辦

本研討會由青年工程師委員會主辦，對象主要是學生及年輕工程師。

研討會中報告地震災害現場應注意事項及如何防災等，進一步應用在生活中如何選擇一個安全的家，以及從地震法律爭議看新世代工程師之執業風險等。整個研討會共 120 位學員參加，氣氛熱烈，活動成功。



工程會顏久榮副主委
擔任研討會貴賓

兩岸交流 — 山東水利學會參訪中興顧問公司

107.6.13

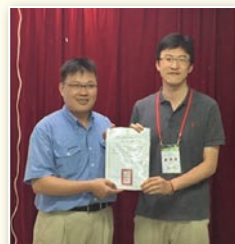
山東水利學會一行 25 人於 6/13 來訪，安排拜訪中興顧問公司，聽取台灣水利建設簡報及中興自行研發程式 HY-21 講解，交流熱絡。



感謝余信遠理事執行副總代表接待

企業參訪 — 潤泰水泥企業參訪 107.6.15

本活動共 80 位學員及學生參加



謝彥安主委致贈感謝狀給潤泰集團鄭瑞濱副總經理



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)

刊登位置	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：

○ 45.4 ○ 45.5 ○ 45.6 ○ 46.1 ○ 46.2 ○ 46.3 共 次
(8月) (10月) (12月) (2月) (4月) (6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: service@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	佰萬	拾萬	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 1,200 元

☐ 初級會員年費 300 元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

☐ 國內・會員 新台幣 300 元

☐ 國內・非會員及機關團體 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

寄 款 人

主管：

姓
名

地

址

電話

經辦局收款戳

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 註：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 ☐ 繳納_____研討會 報名費_____元
會員證號碼			繳納會費 ☐ 常年會員年費 1,200 元 ☐ 初級會員年費 300 元
身分證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 ☐ 國內・會員 新台幣 300 元 ☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 1,800 元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
卡 別 ☐ VISA ☐ MASTER CARD ☐ JCB			訂閱中國土木水利工程學刊，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
信用卡卡號			白天聯絡電話
信用卡簽名欄最後三碼			通信地址
信用卡有效期限 (月 / 年)			
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)



涓滴匯流出浩瀚成就

水利資源開發與管理 SINOTECH

潤澤大地與豐沛生命，水是萬物不可分離的自然要素。中興工程顧問公司是水資源的專家，從涓滴細水到澎湃奔流，從崇山峻嶺至地下水源，始終以專業掌握每一滴匯聚生命的關鍵，為成就人類更好的生活而努力。

台中電廠，自1991年運轉至今，已伴隨臺灣社會經濟發展近30年，目前全臺每5度用電就有1度來自台中電廠，而在確保供電穩定的同時，它也努力兼顧社會對於環境保護的更多期待，持續改善環保設備，過去以來，硫氧化物排放減少約8成、氮氧化物及粒狀物各減少約5成。

現在，台中電廠進一步推動空污改善計畫。

在
供
電
之
外

努力。



排煙脫硫吸收塔是硫氧化物排放防制設備，將燃煤發電產生的煙氣引接至塔內，以吸收作用去除硫氧化物，目前正進行設備更新升級，將脫硫效率提升至96.5%。

台中電廠空污改善計畫

Year • 2017

2018

2021

2023

台電將投入超過1500億元，改善台中電廠環保排放設備；在供電之外，持續努力。

1~4號機空污改善

排放
減量

粒狀物
↓20%

氮氧化物
↓35%

硫氧化物
↓50%

5~10號機 大修改善

降低粒狀物及
氮氧化物

降低揚塵

完成棚式
室內煤倉

能源轉型

新設潔淨
天然氣機組



台灣電力公司
TAIWAN POWER COMPANY

www.taipower.com.tw

廣告