

中華技術

CECI

ENGINEERING

TECHNOLOGY

147

July/2025

2025.07.31 出版

脆弱國土、科技防災 新世代之防災應變

《人物專訪》

科技與韌性並進，打造對抗災害的公路網
專訪交通部公路局陳文瑞局長

《工程論著》

應用數位影像相關法調查大規模崩塌之運移行為

《專題報導》

0403震後太魯閣國家公園災損調查及應變防災

花蓮港外港區0403震後調查評估與整建修復

台11線花蓮大橋2018震後斷層變位災損與改建

地震之震損調查與建物管線緊急應變

沉積環境還原歷史液化之判釋—臺南、彰化例

北迴鐵路和平崇德段震後豪雨衍生災損評析

因應極端氣候變遷之復建工程調適策略

空間資訊應用於臺鐵邊坡調查

三維地質模型與AI監督式學習應用於軟弱地層之探討

《特稿》

日本自駕車發展案例回顧



財團法人中華顧問工程司 發行

CECI



台灣世曦工程顧問股份有限公司 企劃

July/2025

147

脆弱國土、科技防災
新世代之防災應變

中華
技術
CECI

ENGINEERING
TECHNOLOGY



中華技術 CECI ENGINEERING TECHNOLOGY

No.147

July/2025

目錄

Contents

匠心獨運

- 004 不只是補強，更是進化！
開啟臺灣韌性工程的新科技時代

人物專訪

- 008 科技與韌性並進，打造對抗災害的公路網
專訪交通部公路局陳文瑞局長

工程論著

- 016 應用數位影像相關法調查大規模崩塌之運移行為



中華顧問
中華技術電子書平台



台灣世曦
中華技術電子書平台

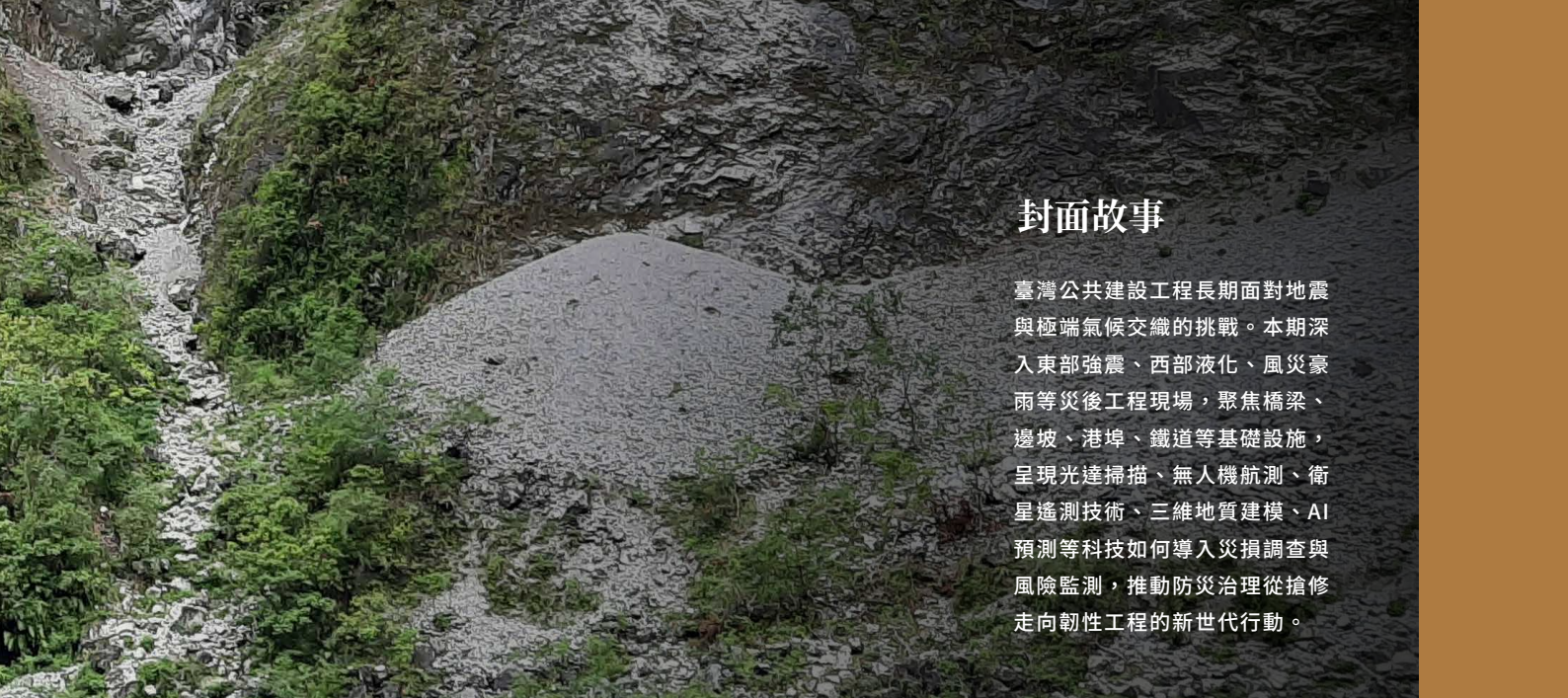
本刊文章為作者提供，內容正確性及法律
責任概由作者自行負責

發行人 蔡宗倫
發行所 財團法人中華顧問工程司
地址 台北市辛亥路二段 185 號 28 樓
電話 (02)8732-5567
網址 <http://www.cec.org.tw>
ISSN 1818-4464

編審工作小組

總召集人 鄭運鵬
副總召集人 廖學瑞

147 期召集人 蔣啟恆
147 期審查委員 陳聰海、劉宏道、陳明谷
歐文爵、鄭宏達
總編輯 陳聰海
副總編輯 周永川
企劃 台灣世曦工程顧問股份有限公司
設計編輯 天下雜誌股份有限公司
地址 台北市內湖區陽光街 323 號
電話 (02)8797-3567
網址 <http://www.cec.com.tw>



封面故事

臺灣公共建設工程長期面對地震與極端氣候交織的挑戰。本期深入東部強震、西部液化、風災豪雨等災後工程現場，聚焦橋梁、邊坡、港埠、鐵道等基礎設施，呈現光達掃描、無人機航測、衛星遙測技術、三維地質建模、AI 預測等科技如何導入災損調查與風險監測，推動防災治理從搶修走向韌性工程的新世代行動。

專題報導

東部地震

- 032 0403 震後太魯閣國家公園災損調查及應變防災
- 052 花蓮港外港區 0403 震後調查評估與整建修復
- 072 台 11 線花蓮大橋 2018 震後斷層變位災損與改建
- 086 地震之震損調查與建物管線緊急應變

西部地震

- 102 沉積環境還原歷史液化之判釋—臺南、彰化例

風災豪雨

- 116 北迴鐵路和平崇德段震後豪雨衍生災損評析
- 132 因應極端氣候變遷之復建工程調適策略

科技應用

- 150 空間資訊應用於臺鐵邊坡調查
- 166 三維地質模型與 AI 監督式學習應用於軟弱地層之探討

特稿

- 180 日本自駕車發展案例回顧
-

不只是補強，更是進化！

開啟臺灣韌性工程的新科技時代

位處環太平洋地震帶的臺灣，每年至少經歷上千次有感地震，且多數地區屬砂質土壤，在高地下水位環境下，一旦遇到地震震動，導致孔隙水壓力增加，土壤失去承载力，就會出現土壤液化現象。另一方面，全球暖化加劇，每年夏季侵臺颱風伴隨的強降雨，讓各類公共工程面臨更嚴峻的挑戰。

幸運的是，政府與工程界積極導入不斷演進的新科技與施工法，能即時監測天災對大型工程可能造成的破壞，提前預警並啟動有效應變程序，災後亦能迅速執行補強措施。正如本期專訪交通部公路局陳文瑞局長所言，公路局積極運用智慧監測系統、AIoT 技術、3D 航拍模型與氣象地震預警系統，全方位強化邊坡與橋梁安全監控，同時持續提升耐震設計與橋梁補強技術，搭配精密防災作業流程與人員無腳本演練，逐步建構具高度韌性與安全性的智慧公路網，方能有效抵禦極端氣候與強震帶來的威脅。

光達技術上線，快速重建三維災區樣貌

災後應變與重建階段同樣仰賴新科技的關鍵運用。光達掃描技術（Light Detection and Ranging, LiDAR）能快速且高精度重建災區三維模型，大幅提升災情掌握與工程設計效率。

例如，2024 年 4 月 3 日花蓮外海發生芮氏規模 7.2 強震，導致臺鐵北迴線和平至崇德路段發生邊坡岩屑崩滑、落石與土石流等災害。為精準估算巨石體積及破壞程度，協助災後評估與工程設計，運用 iPhone LiDAR 掃描重大落石，並比對震前、震後衛星影像，分析崩塌率，全面掌握崩塌範圍及潛在風險。

該地震亦造成花蓮港外港 #17 至 #25 碼頭嚴重損壞，其中 #23 至 #25 碼頭出現鋪面開裂、差異沉陷、沉箱滑動與消波塊移位，#25 碼頭更出現法線外推，影響船舶靠泊安全。災後重建階段，技術團隊整合地面與水下光達、聲納技術，建立三維碼頭損壞模型，加速評估與設計作業。

不只花蓮，高雄市桃源區台 20 線明霸克露橋作為南橫公路重要交通節點，因地質及水文條件極為不穩定，長期受地震、豪雨及颱風侵襲。尤其 2021 年盧碧颱風及 2024 年凱米颱風兩次重大災害，造成橋梁全面毀損。災後工程單位導入 LiDAR 高精度地形測繪，分析淤積與沖刷變化，結合數值地形模型（DTM）、坡度與坡向分析，評估邊坡穩定性與水文行為，為災後建置監測資料庫、河道動態模擬與預警系統提供解決良方。

臺鐵邊坡調查亦結合空載 LiDAR、無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）、應用衛星等載具進行廣域與局部調查，繪測精度大幅提升。空載 LiDAR 可使解析度提升至 0.3m（約 10 點雲／ m^2 ），UAV 高解析 LiDAR 甚至達 0.1m，甚至是 400 點雲／ m^2 ，有效補強人工巡查和地工儀器的限制，強化預警效率及邊坡管理與災害應變的韌性。

儘管新興技術不斷進步，傳統的地質鑽探與微分區分析仍在災後重建中發揮關鍵作用。例如，經濟部地質調查及礦業管理中心曾委託台灣世曦團隊，針對花蓮地區進行 30m 以內的地層鑽探與微分區調查，據以繪製地層剖面圖與液化潛勢圖，協助掌握震區地下構造與潛在液化風險，為災後評估、重建規劃與防災設計提供關鍵基礎資料。

防災科技所運用的感測、通訊與資料整合技術，正逐步成為各類智慧基礎設施的重要核心組成部分。例如，本期特稿中介紹的日本柏葉地區車聯網自動駕駛計畫，結合路側光達、影像監視、號誌系統與車載多重感測器（如 LiDAR、GPS、WiFi／4G 通訊），並透過資料共享伺服器進行即時資料整合與運算，成功在複雜的都市環境中展開自動駕駛場域測試。這種系統架構與當前防災場域所推動的「多源感測＋雲端整合」模式遙相呼應，充分展現新世代科技治理的共同趨勢與方向。

AI 輔助分析，從災後判讀走向風險預測

為加速災後應變與復建，精密的地質調查是不可或缺的基礎，唯有持續投入資源更新微分區資料，才能奠定防災工程的穩固根基。隨著 AI 技術快速發展，現今能在短時間內精準評估災損情形，並預測未來風險潛勢。

例如，新北市工務局攜手台灣世曦，整合新北市境內 756 筆鑽探資料及近五年 138 筆道路坍塌資料，導入 AI 監督式學習，預測未來高風險區域。經由機器學習中五大模型篩選與訓練，結果顯示支持向量機（Support Vector Machine, SVM）表現最佳，能有效分類潛在風險區域。

在臺鐵邊坡調查方面，AI 同樣發揮關鍵作用。結合光學影像、LiDAR、巡檢紀錄與工程資料，建立邊坡變化圖與微地形模型，並運用演算法實現風險邊坡的自動判讀與辨識，有助強化預警能力並提升工程決策品質，以有效因應極端氣候帶來的災害挑戰。

遙測技術快速掌握地形變異，應變更即時

除了 AI 與光達掃描技術，能在短時間內獲取大範圍、多元資料的遙測技術，同樣是當代災害應變不可或缺的利器。

以 2024 年 4 月 3 日花蓮外海芮氏規模 7.2 強震為例，太魯閣國家公園震度達 6 級，造成大規模落石、岩屑崩滑與步道損毀。為即時掌握災損情況，太魯閣國家公園管理處結合衛星遙測、無人機航測與 LiDAR，迅速建構三維地形模型，精準分析崩塌範圍與土石流潛勢區域，特別針對砂卡礑、燕子口與布洛灣等六大熱門步道進行地形變異比對和熱區分析。

此外，在調查 2016 年 2 月 6 日芮氏規模 6.6 美濃地震對臺南市安南區惠安街造成的土壤液化災害時，經濟部地礦中心與台灣世曦團隊運用歷史圖資與遙測影像套疊分析，將不同年代地形圖、航空照片與衛星影像進行套疊與时序變遷追蹤，揭示土地利用與自然環境演變軌跡，最終確認液化重災區多集中於早期魚塢回填區，凸顯地貌歷史對液化災情的深遠影響。

無人機加值應變效率，打造高解析監測模式

除了 AI、LiDAR、遙測技術外，無人機在大型工程的科技監測與智慧應變中，也扮演不可或缺的關鍵角色。交通部公路局陳局長表示，該局已針對邊坡風險實施分級管理，並優先於高風險邊坡設置監測儀器，透過比對模型變化，即時掌握地形異動狀況。

另外，公路局亦建立五階段防災作業機制，包括預判、部署、預警、通告與應變，並導入智慧化技術與即時數據驅動決策。一旦災害發生，就會運用無人機自動航拍勘災，快速建立航拍座標、災情判斷，在最短時間內精準制定搶通工法。

而在本期工程論著中，台灣世曦與臺大土木系組成的研究團隊，引入無人飛行載具結合數位影像相關法（Digital Image Correlation, DIC），進行全場地表變形分析，不僅突破傳統監測的侷限，亦大幅提升時空解析度。

研究顯示，無人飛行載具結合數位影像相關法，在大規模邊坡監測上展現高

度潛力，不僅能彌補傳統點位監測的不足，還能有效分析整體變形趨勢與空間分布，進一步辨識潛在滑動區塊與其互制關係，為邊坡分區分塊、整治設計提供參考依據。

創新補強工法加持，耐震設計成工程必備標配

在極端氣候與強震頻仍的時代，耐震設計規範與創新補強工法，已成為國內大型工程的基本配置。交通部公路局自 1995 年起推動公路橋梁韌性耐震設計，到最新 2019 年版本，已提升耐震力約 2.3 倍，同時也針對 3,500 多座橋梁進行耐震總體檢，不合格者編列預算進行耐震補強，確保橋梁不倒塌。

2018 年 2 月 6 日花蓮外海芮氏規模 6.2 強震，花蓮大橋一代橋、二代橋雖未倒塌，卻出現止震塊破裂、伸縮縫與欄杆損壞等情況。為強化橋梁耐震韌性，台灣世曦委託國家地震工程研究中心進行斷層錯動量評估研究後，採用大跨徑簡支鋼梁橋型，降低斷層錯動的影響，橋墩設計則避開斷層主破裂區，減少地表錯位帶來的基礎破壞風險。至於基礎型式，則從沉箱改為樁基礎，提高抗震與耐久性，而補強工程則著重於墩柱耐震補強與鋼板包覆、防撞能力的提升。

從災害監測到災後復建，從 AI 預判到自動化應變，臺灣不再是只能被動因應天災的島嶼，而是朝向能主動對抗天災威脅的智慧韌性國家邁進。在每一次挑戰中強化工程體質、累積科技能量，正是我們築起安全未來、守護人民生命財產的最佳防線。



科技與韌性並進， 打造對抗災害的公路網



專訪交通部公路局 陳文瑞局長

(陳局長於 2025 年 7 月 16 日調任交通部高速公路局局長)

5300、3525、377、1893——這不是密碼，而是交通部公路局管理養護的公里數、橋梁、隧道與邊坡數量。光是這些數字，便足以想像背後龐大的維護工作量。尤其近年極端氣候與地震災害頻仍，公路局人員經常得與時間賽跑、與大自然抗衡。「很辛苦，但能守護臺灣重要的公路網，保障國人行的安全，意義重大。」交通部公路局陳文瑞局長語帶堅定地說。

2024 年 4 月 3 日，花蓮發生震度 6 強級強震，許多人對當時的畫面仍記憶猶新——蘇花公路與中橫公路多處路段因落石崩落、路面坍塌而暫時封閉，數百名民眾受困在花蓮太魯閣山區。其後餘震不斷，每逢劇烈天候變化，蘇花與中橫的道路風險便隨之升高，危機往往一觸即發。

餘震陰影猶在，2025 年 5 月，蘇花公路和仁至崇德路段再度面臨考驗。儘管當時還未達到公路局設定的降雨量警戒值，但公路局多方觀察氣象雷達回波與雨量預測後，還是發布可能封路之通告，結果一發布沒多久，大量土石流突然宣洩而下，導致 79 輛車受困於崇德隧道約兩個小時。

面對極端氣候及頻繁地震的大自然考驗，如何打造具有防災能力的韌性公路，成為公路局最大挑戰，「尤其豪大雨下得又急又快的情況愈來愈常見，預測有時還是無法跑在大自然之前。」陳局長坦言，因此，公路局必須滾動式修正防災與離災策略，並不斷導入新科技，以提升危機預測與應變能力。

強化監測科技，搶先掌握異常徵兆

當大自然環境劇烈變遷，國土日益脆弱已不可逆，如何有效監控公路與橋梁的細微變異，成為公路局必須積極面對的重要課題。

一直以來，公路局針對多災路段設置傾度管、水位觀測井與水壓計等監測儀器進行長期監控，並於潛在大型危岩區域設置告警與監測系統，包括落石告警系統，以及在蘇花公路試辦智慧防災系統，設置風險訊息推播、路側風險告示、落石告警與人車受困偵測等四道防線，全面強化防災能力。



智慧防災四道防線

資料來源：交通部公路局

此外，針對台7線大曼路段曾發生大規模坍方的經驗，公路局進一步在現場設置「落石微地動監測系統」，專門偵測落石類型，由系統判斷風險等級，並以偵測結果發出告警。目前這套系統經過252天測試，每次偵測結果幾乎與現場實際狀況完全吻合，其燈號驗證準確度為1.0，具有相當的防災能力。

針對具有潛在危機的邊坡，公路局則訂定了邊坡分級管理制度，把邊坡風險區依危急程度由高至低劃分為A、B、C+、C、D等五個等級，先針對A、B、C+優先建置監測儀器，C級邊坡進行基本監測，D級邊坡基本上不監測。

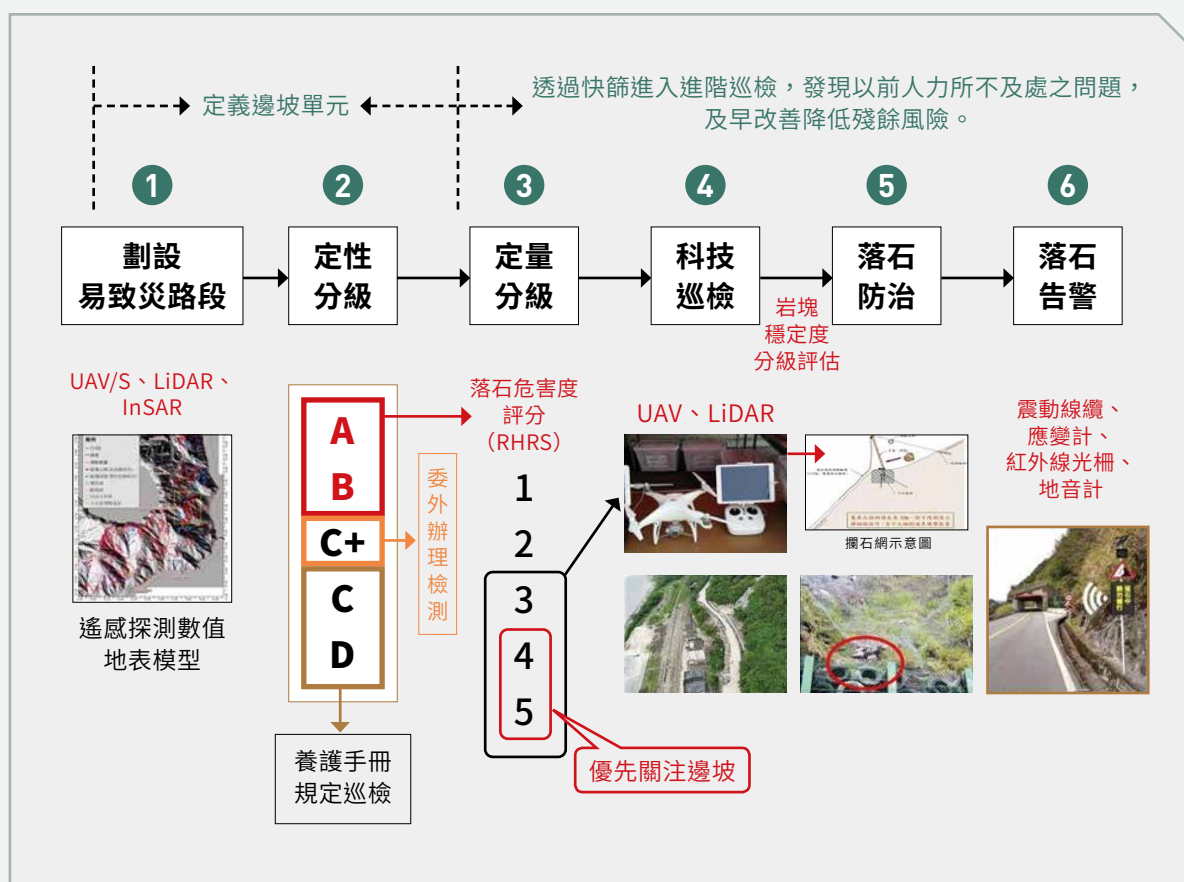
修訂日期：2023 年 9 月

邊坡分級	2 年內災害紀錄	5 年內災害紀錄	護坡設施	邊坡不穩定徵兆	遠端致災因素
A	有	-	復(興)建中	明顯	-
B	有	-	無法設置	疑似	-
C+	-	-	-	-	有
C	-	有	-	無	-
D	-	未有	-	無	-

- A** 2 年內有災害紀錄，且尚未復建完成，或有明顯不穩定徵兆之邊坡
- B** 2 年內有災害紀錄，且因地形地質因素無法設置護坡設施，或有潛在不穩定徵兆之邊坡
- C+** 經復建完成，但具遠端致災因素之邊坡
- C** 5 年內有災害紀錄，後續無明顯不穩定徵兆之邊坡
- D** 5 年內未有災害紀錄，且無明顯不穩定徵兆之邊坡

交通部公路局邊坡分級方式

資料來源：交通部公路局

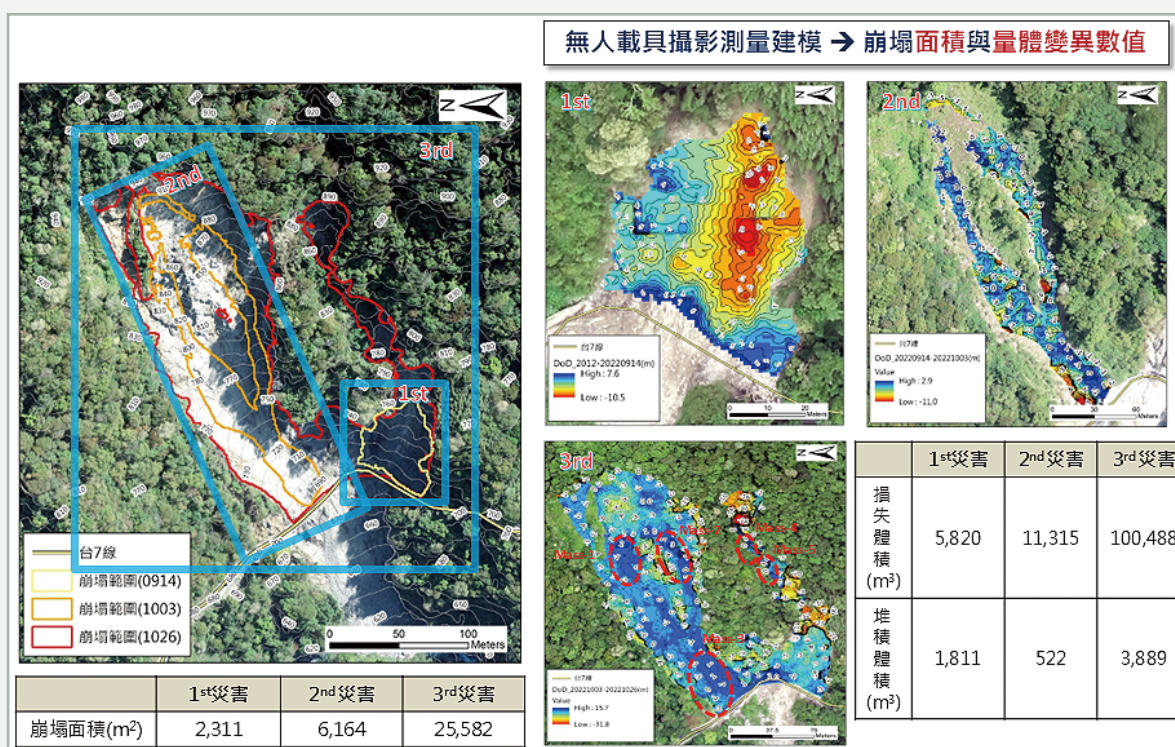


交通部公路局邊坡養護科技管理制度

資料來源：交通部公路局

然而，大自然的力量還是不容小覷。2024 年 6 月，基隆潮境公園突然發生大面積土石崩落狀況，畫面一曝光引起諸多討論，其實這裡原本被公路局設定為 C 級邊坡風險區，沒想到因受到多次地震與大雨侵襲，讓這個表面看似無立即危機的山坡路段，在一瞬間發生落石災害。

為了更精準掌握地形變異分析，陳局長指出，公路局出動無人機定期針對多災路段進行 3D 航拍，並以蒐集來的圖資製作 3D 建模，持續比對不同時期的模型差異，一旦發現有變異產生，公路局就會啟動更嚴密的監控機制，提前預防災害發生。



監測科技應用—地形地貌變異分析

資料來源：交通部公路局

導入風險治理，提升橋梁與山區應變能力

因應氣候與環境變遷，近年來公路局不斷更新防災體系，譬如自 2011 年開始推動公路防災預警機制，全面導入流域管理思維監控橋梁，同時以風險管理思維加強監控山區道路。此外，管理系統也啟用即時監視系統（CCTV）與車牌自動辨識設備（AVI），期望達到道路使用零傷亡之境界。

對此，陳局長指出，橋梁斷裂危機多來自橋墩基礎受到沖刷侵襲，而橋梁上游的天候與流水量變化可能影響中、下游橋梁的穩固性，為避免災害，公路局運用降雨量歷史紀錄與橋址處水位資料，設定出橋梁上游集水區平均雨量預警、警戒與行動值，再加上氣象署的定量降水預報來執行預警性封橋。

針對山區道路，公路局則採取風險管理思維，不僅列管 73 處易致災路段，並各別建立降雨管理值，再依此區分出「注意」、「警戒」與「行動」三種管理等級。其中，「注意」是提醒用路人注意路況，「警戒」是勸導用路人不要進入該路段，「行動」則是實施封閉管制，整體目的都是保障人車用路安全。

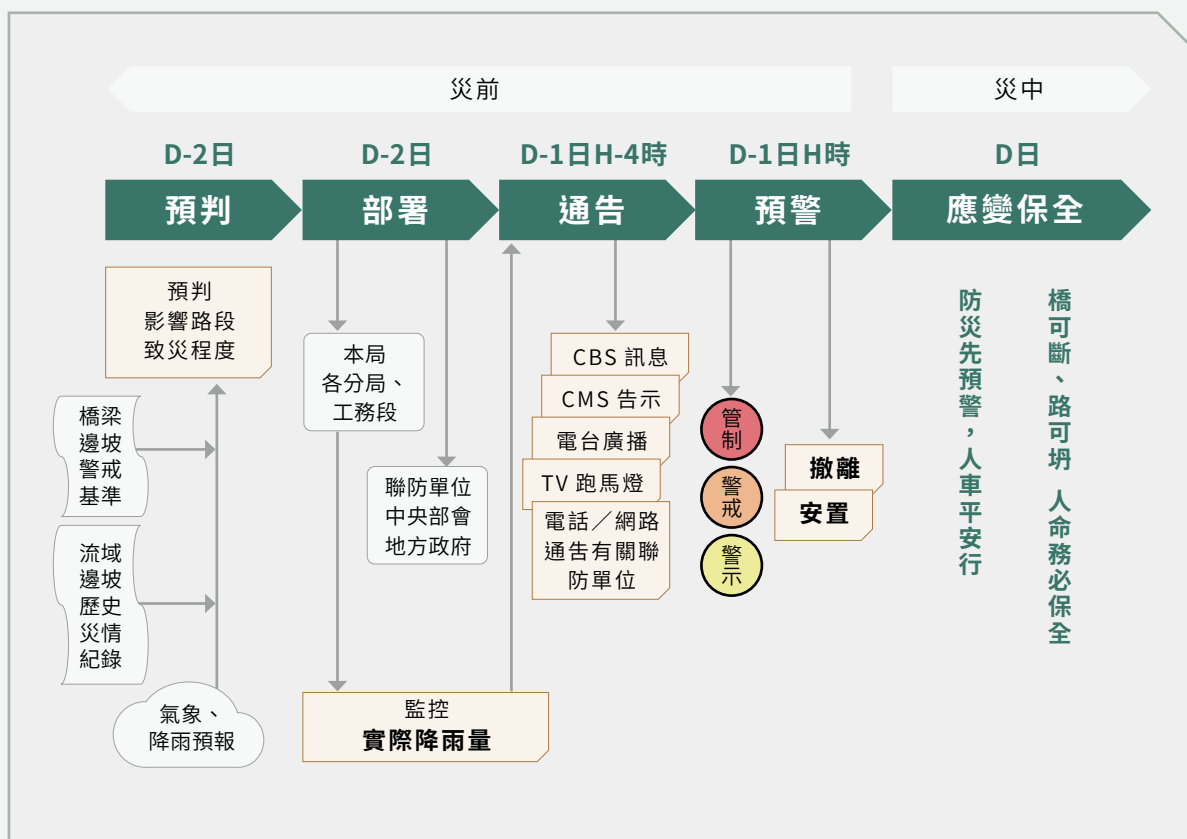


道路即時監視系統

資料來源：交通部公路局

建立預警機制，精準啟動五階段應變流程

除了樹立明確管理思維，公路局還制定了防災預警作業機制，透過具體作為避免與救援災害。這套機制依照順序分成五個階段，包括預判、部署、預告、通告與應變，各有專責人員、友軍部門協助完成作業，其中，陳局長坦言：「只要減少人車進入危險，就可以減少傷害，因此精準預判是重要關鍵。」



公路防災預警機制

資料來源：交通部公路局

環顧臺灣現況，雨量、地震是造成公路災害的兩大危險因子，為即時掌握雨量與地震情形，公路局近年陸續導入多項新興智慧科技，促使這五個作業階段逐步走向智慧防災，效益也不斷提升。

以雨量觀測為例，公路局自 2011 年起委請氣象署，以劇烈天氣監測系統（QPESUMS）為基礎，為公路局客製化監控路段即時示警網頁，後來 QPESUMS 還結合地理資訊系統（GIS）視覺化圖像技術，升級改版為 QPEplus，大幅提高公路局 73 處監測路段的預判準確度。

再以地震偵測而言，公路局在易致災路段架設監視器隨時監看，並與氣象署合作建立地震速報系統，一旦某路段偵測到 4 級以上地震，就會啟動巡查應變機制，並與當地政府機關、警察及民防單位保持密切聯繫，確認是否有人通報災害，即時派員前往排除障礙。

面對不同災害，現在公路局分別以 QPEplus、地震速報系統進行全天候 24 小時監控，並以此資料作為預判的重要依據，一旦雨量、地震級數超過警戒值或行動值，公路局作業機制就會進入部署、預警、通告與應變等階段。

在部署階段，若預判可能發生颱風或豪雨等劇烈天候，公路局各段人員必須立刻整合資源，在 4 小時前將搶修機具與人力進駐到指定地點附近，原則是將災後救援提升至災前部署，力求縮短災後搶通時間。

當預警階段啟動後，發生劇烈天候變化時，公路局會針對致災路段進行黃橙紅等三級管制燈號，讓用路人明確知道路況，提前改道或避免行駛危險路段，只要用路人能知災，即能避災。

但用路人如何知災？通告階段時，公路局主要透過 GMP（Government 政府、Media 媒體、People 人）三個關鍵管道，傳遞道路通阻資訊。根據經驗統計，公路局通告後，大約可降低 68% 車流，「只要人車減少進入危險，就能增加安全保障。」陳局長指出。

進入應變階段後，交控人員會運用監視系統觀察車流狀況，緊急應變中心也會不斷地滾動式修正作業，甚至視風雨、地震等級，執行預警性封橋、封路，以確保危險封閉路段人車淨空。

此外，為強化山區公路災害應變效率，公路局在台 7 線、台 7 甲線等山區路段試辦車輛清查系統，利用影像辨識（AI）與雷達感測（IoT）的 AIoT 技術，強化低能見度或惡劣天候下的車輛偵測穩定性，並藉此確認在危險路段中是否還有人車滯留，降低用路傷亡發生率。

一旦公路遭遇災害，公路局就會展開救援階段。為縮短救災時間，公路局已針對全臺 7 條可能變成孤島的路段，設置自動航攝勘災系統，先以無人機（UAV）試航，收錄最準確的航軌座標。如此一來，當災害真的降臨，公路局不僅可縮短勘災時間，也可精準判斷搶通工法與時間。另一方面，公路局也會將這些資訊分享給台水、台電等民生管線單位，共同投入救援工作。



公路局陳文瑞局長(左三)與台灣世曦施義芳前董事長(右三)就智慧防災與韌性工程建設交流，展現政策與專業的正向對話，共同強化公共防災能力。

從根本落實耐震設計規範

公路局為打造韌性公路，提升應變能力，從公路建設根本出發，為此，「公路橋梁耐震設計規範」歷經了幾次改版。陳局長指出，從 1995 年起，交通部修訂「公路橋梁耐震設計規範」時，就已經提出韌性設計觀念，目標是公路橋梁面對中度地震要保持相當彈性，以避免崩塌。

2009 年，交通部進一步修訂「公路橋梁耐震設計規範」，新增鋼橋墩的結構韌性，後來 2019 年又新增多項細節規範，經過與時俱進修訂設計規範後，公路局已將公路橋梁設計的耐震能力逐步提高 2.3 倍，成效顯著。

不僅新道路橋梁設計需依循耐震設計規範，2023 年起，公路局依規範原則，針對全臺灣管理養護的 3,525 座橋梁進行總體檢，目前有近 3,000 座橋梁通過初評，還有 500 多座橋梁必須進行詳評，若無法檢測過關，就會編列預算進行耐震補強，確保橋梁不崩塌。

其實，過去幾年歷經莫拉克風災、0403 地震等災害，臺灣許多美麗的山區、沿海道路都遭到強烈破壞，對此，公路局的原則都是儘速搶通，但考量安全至上，有些無法再修的路段就會改道重建，務求公路行駛安全無虞。



公路局針對全臺灣管理養護橋梁進行總體檢作業

無腳本兵棋推演展現防災能力

積極制定作業機制與設計規範同時，人員思考到位也是打造韌性公路的關鍵，陳局長驕傲直言：「公路局的兵棋推演很有真實感，效率也很高。」

整體而言，公路局執行兵棋推演有兩項目的：其一是重新檢視應變計畫是否仍可行，其二是重新確認所有友軍部門聯繫管道。唯有完成雙重確認，才能確保災害來臨時，公路局可在第一時間做出最佳應變行動。

近年來，公路局特別打破傳統的腳本式推演，過去每個角色都按著劇本講台詞，如今則在汛期前進行無腳本推演，「當大家不再需要腳本，就表示所有行動都已經內化到每個人心中。」陳局長直言，尤其現在災害發生通常是一瞬間，這時人員若還要翻閱手冊才能行動，往往就會錯失第一搶救時間。

截至 2025 年 4 月底前，公路局已完成本年度兵棋推演，不僅工程部門負責災害現場的救援工作，連人事、會計與總務等後勤單位也同時參與，肩負起聯繫溝通等工作，且推演場面不再是一個人接著一個人念稿，而是狀況一出，就會有 40、50 個人同時分工合作，一起完成應變行動。

積極對抗大自然環境變遷，滾動式修正公路防災作為，談起公路局未來願景，陳局長回答：「人車不受安全威脅，就是公路局最重要的工作目標。」防災重於救災，遠離災害重於防災，公路局透過智慧科技導入，與加強人員作業訓練，正堅定穩固地踩著這條安全第一的理念路上。



公路局透過無腳本兵棋推演優化防救災應變體系效能

應用數位影像相關法調查 大規模崩塌之運移行為

關鍵詞 Keywords

- # 大規模崩塌 Large-scale Landslide
- # 光華崩塌地 Guanghua Landslide
- # 數位影像相關法 Digital Image Correlation, DIC
- # 時間序列分析 Time-Series Analysis
- # 邊坡運動行為 Kinematics Behavior of Landslide

台灣世曦工程顧問股份有限公司
大地工程部

工程師

張桂瑛

國立臺灣大學
土木工程學系

教授

林銘郎

邊坡災害為臺灣長期存在且亟需應對之問題，尤其當大規模崩塌一旦發生，常導致嚴重的生命與財產損失。為有效規劃監測與整治策略，掌握崩塌地之活動性與變形特徵至關重要，其中地表位移即為關鍵指標之一。隨著無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）技術發展，不僅克服了傳統監測方法受地形限制之困難，亦提升資料取得之效率與廣度。

本文以光華崩塌地為例，應用數位影像相關法（Digital Image Correlation, DIC）分析多期 UAV 正射影像，獲得大規模崩塌潛勢區於不同時期之全場平面位移場，並結合 GPS、雨量計等監測資料，探討邊坡運動行為之時序變化。研究結果顯示，於 2021 年 5 月以前，邊坡呈現持續且漸變式的移動，而自 2021 年 5 月後，則轉為需具備環境觸崩因子方驅動其產生明顯位移。

整體成果除提供全場邊坡運移變遷資訊外，並進一步推測邊坡塊體間之相互作用與受力特性，作為未來工程設計與災害防治策略參考。



壹、前言

臺灣許多社區與道路依山而建，邊坡穩定性與民眾安全息息相關。國家災害防救科技中心於 2015 年提出「大規模崩塌災害防治行動綱領」，定義大規模崩塌係指「崩塌面積超過 10 公頃或土方量達 10 萬立方公尺或崩塌深度在 10 公尺以上的崩塌地」。全臺灣目前有 9,948 處具大規模崩塌潛勢之區域，並篩選出 315 處作為優先調查對象。

然而，大規模崩塌影響範圍廣闊，邊坡監測常用的 GNSS 測站，雖可記錄特定位置之位移，但其安裝極易受地形條件限制，不易於崩塌地全面布設，且所得資料僅於監測設備附近區域具備信心，難以完整掌握邊坡整體之變形行為。

近十年來，UAV 技術快速發展，大幅提升災害調查之空間與時間解析度，為大規模崩塌運動學研究提供了優勢。

貳、光華崩塌地

光華崩塌地位於桃園市復興區華陵里，於 2018 年被列入大規模崩塌優先調查區域之一（編號桃園市－復興區－T002），其範圍如圖 1 所示，崩塌潛勢區面積約 12.3 公頃。

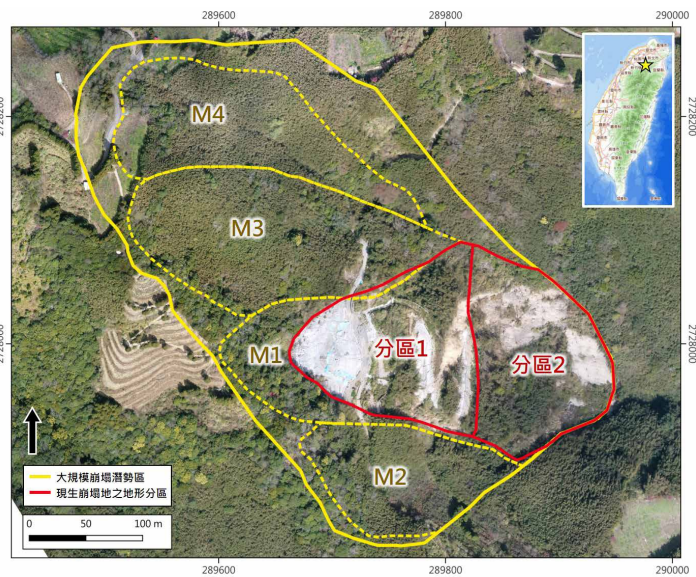


圖 1 光華大規模崩塌潛勢區與現生崩塌範圍之地形分區（改編自青山工程顧問公司，2021）

此處地層為巴陵層，岩性由暗灰色至灰色硬頁岩與板岩組成為主，偶夾薄層細粒砂岩，岩層中有發育良好之劈理，其附近地質構造有一無名背斜與檜山斷層。根據林于超（2022）研究指出，崩塌地位於背斜軸西翼，為一逆向坡。露頭位態顯示該區域葉理走向方位角約 28° 、向西傾斜，傾角於邊坡下方之光華道路約 34° ，而於光華農路上則逐漸趨緩至 15° ，此變化推測為邊坡受重力變形導致岩體傾倒破壞。

目前，光華崩塌潛勢區依照山脊與蝕溝地形劃分為 M1～M4 四個分區（黃線），現生滑動範圍（紅線）主要位在 M1 區域內。M1 分區呈一楔型塊體且為遷急地形，根據

坡度再將紅線範圍進一步分成兩個子分區：分區 1 坡度較緩，約 $30 \sim 40^\circ$ ；分區 2 坡度較陡，坡度約 $40 \sim 55^\circ$ 。於潛勢區範圍內有多條蝕溝發展；現生滑動範圍的南、北邊界亦為兩條主要蝕溝流經並且匯流於光華邊坡趾部。此外，分區 1 之冠部與遷急線附近皆有觀察到崩崖的存在，具老崩塌地之地形特徵。

自 2008 年起，即觀察到光華崩塌地有明顯滑動現象，迄今累積位移超過 50m，通過坡面的農路也因持續變形而進行過兩次重建。為掌握邊坡活動性並即時監控其變化，此處設置了多項監測儀器。然而，分區 2 因地勢陡峭，難以進行儀器佈設與現地調查，致使現有監測作業多集中於分區 1，導致分區 2 之行為仍為未知。

為掌握光華邊坡之全場位移，Liu et al. (2022) 利用粒子影像測速法（Particle Image Velocimetry, PIV）分析為期一個月內所拍攝之 7 期 UAV 影像。研究結果指出，地表位移方向與坡向一致，最大變形發生於下邊坡植生區，位移量超過 9 m。Kuo et al. (2025) 則採用 DIC 演算法，分析橫跨一年九個月、共 21 期之光學衛星影像，並以計算所得之速度與加速度，訂定初始與警戒監測門檻值，作為不穩定邊坡預警機制之依據。

相較於上述研究，本文同樣運用 DIC 分析全場位移的時序變化，惟研究著重於位移向量的空間分布與方向分析，嘗試辨識邊坡內部受張力與壓力控制之區域，並推估可能存在之塊體數量與互制關係。此外，本文亦結合 GPS 等現地監測資料，討論單點監測的位移特徵與整體變形行為之對應關係。有鑑於大規模崩塌具有範圍廣闊與

行為複雜之特性，需先掌握其破壞機制並進行適當分區，方能有效規劃針對性之監測與整治策略。因此，本文成果可作為未來探討崩塌機制以及對大規模崩塌分區分塊之基礎。

參、研究方法

一、影像與監測資料蒐集

本研究於光華崩場地共蒐集 52 期 UAV 拍攝之正射影像以及各項現地監測資料，包括 GPS、GNSS、雨量計與封層水壓觀測井等，所有資料皆自農村發展及水土保持署資料平台大規模崩塌開放資料專區 (2023) 下載取得。

由於後續影像分析需基於一致之解析度，因此對所有正射影像進行重新採樣至 0.1 m / pixel。而監測資料方面，則主要採用 GPS 與 GNSS 監測成果，搭配雨量計與封層水壓觀測井資料進行研究，監測儀器設置位置如圖 2 所示。於光華地區共設有 6 處單頻 GPS 與 4 處 GNSS 測站，儀器於水平方向之精度約為 $\pm 2 \sim 3$ cm、垂直精度約為 ± 5 cm。

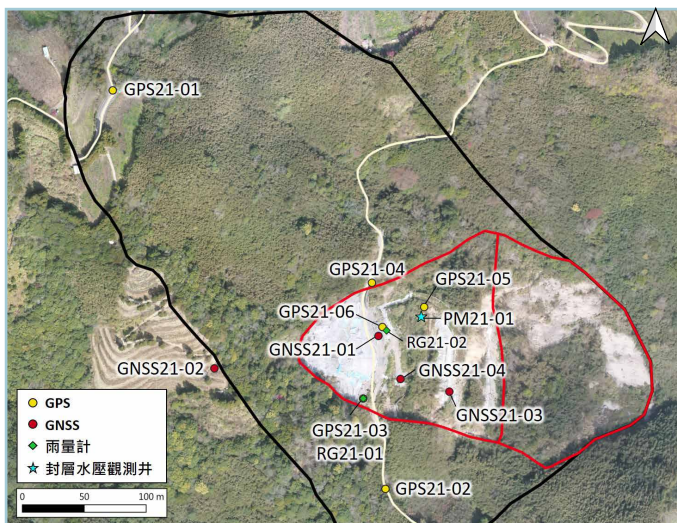


圖 2 監測儀器設置位置

考量儀器設置位置和資料記錄時段，選擇 GPS21-05、GPS21-06 與 GNSS21-01、GNSS21-03、GNSS21-04 之位移資料作為劃分邊坡不同活動性階段之依據，並以 GPS21-05 與 GPS21-06 之資料驗證分析結果正確性。由於監測過程中可能因環境影響或人為因素導致資料出現異常值，將位移資料採 3 小時之移動平均，當監測值大於移動平均值時即視為異常並予以剔除。正射影像採集時間與各項監測儀器記錄區間則如圖 3 所示。

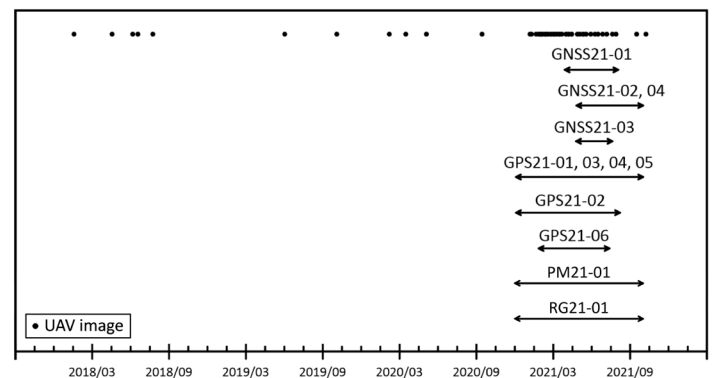


圖 3 監測資料與 UAV 正射影像資料記錄時間

二、數位影像相關法

Digital Image Correlation (DIC) 最早於 1980 年代提出，為一種非接觸式的全場量測技術，可用於追蹤不同時序影像之平面位移場。其優點在於計算位移時，不僅考慮了特徵點的平移，亦計入影像變形之影響。於工程領域中，DIC 常應用於冰川移動、長期滑移之觀測。

DIC 運算原理為：首先將影像切割成多個子影像，並提取各子影像內之灰階分布特徵。接著比對參考影像與變形後影像，搜

尋灰階分布最相似之子影像（如圖 4），即可獲得局部相關性，並進一步計算出位移、應變等物理量。

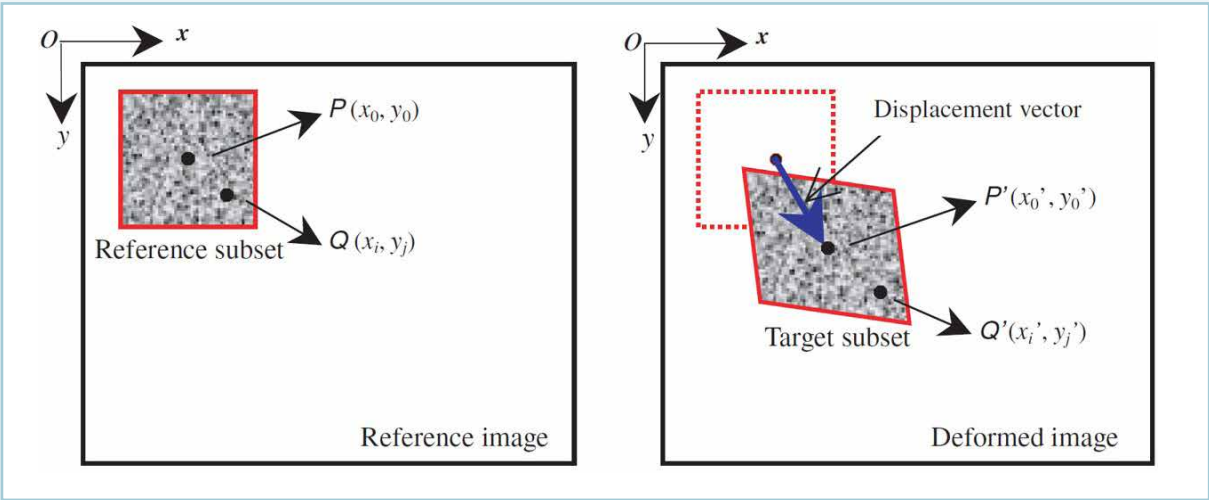


圖 4 數位影像相關法原理 (Pan et al., 2009)

本研究採用 V. T. Bickel & A. Manconi (2020) 所提供的開源程式 (https://github.com/bickelmps/DIC_FFT_ETHZ) 於 Matlab 環境中進行分析，該程式是基於快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 演算法運算。

DIC 中主要之設定參數與定義如表 1 所示；於本文研究中，搜索視窗大小初始設定為 256 pixels、搜索步長為 32 pixels。

表 1 DIC 分析之參數與意義

參數	參數意義
搜索視窗大小 (Window sizes)	搜索特徵點之範圍大小，當搜索視窗愈大，涵蓋之影像特徵點愈多，其計算結果之誤差較小，但可能會導致結果平滑化，無法凸顯局部細節；反之，設定值愈小所包含之特徵點較少，比對結果誤差可能會增大，但相對得可辨識出影像細部之位移。
搜索步長 (Step sizes)	係指搜索視窗的移動距離，當步長愈小，所得之分析結果密度愈高；步長愈大，密度則愈低。

透過比對不同時序所拍攝之兩期影像，可得該時間區間內之位移情況。根據分析目的的不同，選擇前後期影像的方式如下：

(一) 按時間序列分析，圖 5 (a)

每期影像皆與前期影像比對，以獲得所有時期之分析結果，將位移累加後，主要用於與監測資料比較，藉此驗證方法學與分析成果之正確性。

(二) 按階段性運動行為分析，圖 5 (b)

首先基於 GNSS 測站紀錄，將影像資料所覆蓋之時間，依照不同移動速率特性劃分為多個時間段（階段），分別取各階段內的第一期與最後一期影像進行分析，以觀察不同速率特徵所對應之邊坡運動變形行為。

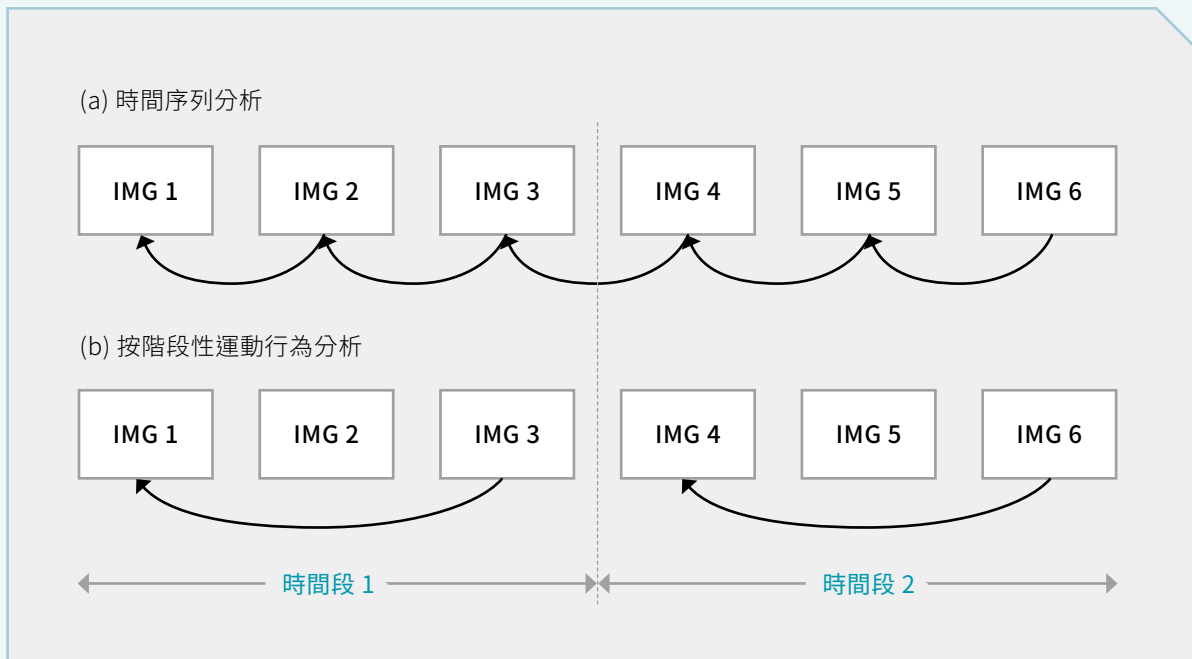


圖 5 影像分析方式示意圖

肆、研究結果

一、監測資料解釋

光華崩塌地於東西、南北與垂直方向之累積位移量如圖 6。於 2021 年 1 月至 10 月期間，光華崩塌地大幅朝東移動，累積位移量最大超過 10m；南北方向之位移

則相對較小，多介在 2m 以內；同時，邊坡亦出現明顯下陷之情況，下陷深度約為 5 ~ 10m。整體而言，東西向為優勢移動方向。

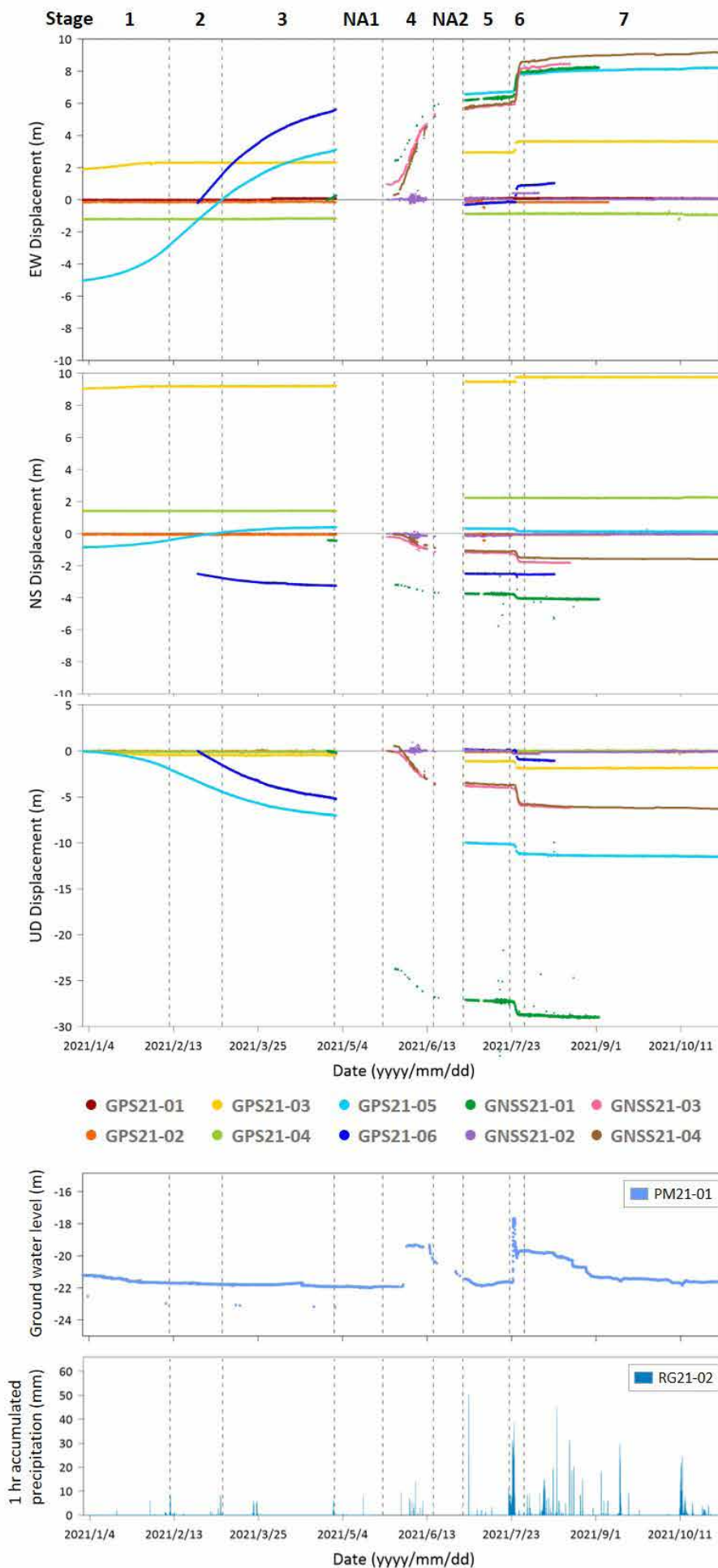


圖 6 GPS 與 GNSS 記錄之累積位移量、地下水高度與一小時累積雨量監測值

以東西方向位移量進行微分，獲得隨時間發展之移動速率。根據 Hungr et al. (2014) 之山崩速度分類，光華崩塌速率屬於「slow」至「moderate」類別。本文進一步依照不同速率特性，劃分成 7 個有監測資料與影像紀錄的階段 (Stage 1 ~ 7)，以及 2 個有影像資料、無監測涵蓋之階段 (Stage NA1 ~ 2)，各階段的時間區間與運動描述如表 2。

表 2 基於監測資料劃分之不同運動特徵時間段

Stage	時間區間	描述
1	2021/01/01 - 2021/02/11	加速
2	2021/02/12 - 2021/03/08	等速
3	2021/03/09 - 2021/04/30	減速
NA1	2021/05/01 - 2021/05/23	無監測資料
4	2021/05/24 - 2021/06/16	急遽加速
NA2	2021/06/17 - 2021/06/30	無監測資料
5	2021/07/01 - 2021/07/22	穩定
6	2021/07/23 - 2021/07/29	急遽加速
7	2021/07/30 - 2021/10/31	穩定

將東西向位移與封層水壓觀測井所記錄之水位變化，以及雨量站之一小時累積雨量進行比較。在 Stage 1 至 Stage 3 期間，邊坡位移量呈現「先漸增，再轉為漸減」的連續滑動過程，此期間內並無明顯降雨事件，一小時累積雨量皆低於 10mm，地下水位亦穩定於地表下約 22 ~ 23m。

相較之下，Stage 4 至 Stage 7 則表現出不同的運動行為，其中 Stage 4 與 Stage 6 皆在短時間內發生較大的位移量，最大移動速率分別可達 0.021 與 0.061m/hr。同時，亦觀察到此時有較大累積降雨量，地下水也較穩定狀態時分別抬升了約 2.1m 與 3.75m。降雨過後，地下水逐漸洩降，可觀察到 Stage 5 與 Stage 7 之邊坡運動也趨於穩定。

綜上所述，Stage 1 至 Stage 3 的邊坡滑動應與降雨和地下水位無明顯關聯；而 Stage 4 至 Stage 7 期間，則是有較大降雨事件發生時，會使地下水位快速抬升，並觸發邊坡滑動加速。推測隨時間發展，邊坡運動行為和機制已有所改變。惟現有監測儀器皆設置於遷急線以上之邊坡，對於下邊坡之變形行為仍缺乏完整掌握。

二、光華崩場地運移變遷

為探討邊坡隨時間發展之運動行為與變化，首先按時間序列分析驗證 DIC 分析成果，結果如圖 7。由於 2021/05/01 ~ 2021/06/30 有資料不連續之情況，因此僅關注 4/30 前之分析成果。

與 GPS21-05 比較計算東西、南北方向之 RMSE 皆在 0.15m 以內，而與 GPS21-06 比較之 RMSE 東西與南北方向分別為 0.35m 及 0.25m。雖其表現出相對較大的值，但可觀察到，在前期之分析結果與監測資料高度吻合，隨時間發展，DIC 結果才逐漸低於監測值，推測其原因是邊坡持續滑動，而計算各期 DIC 結果仍是以監測儀器之初始位置計算，才導致後期累積位移被低估。

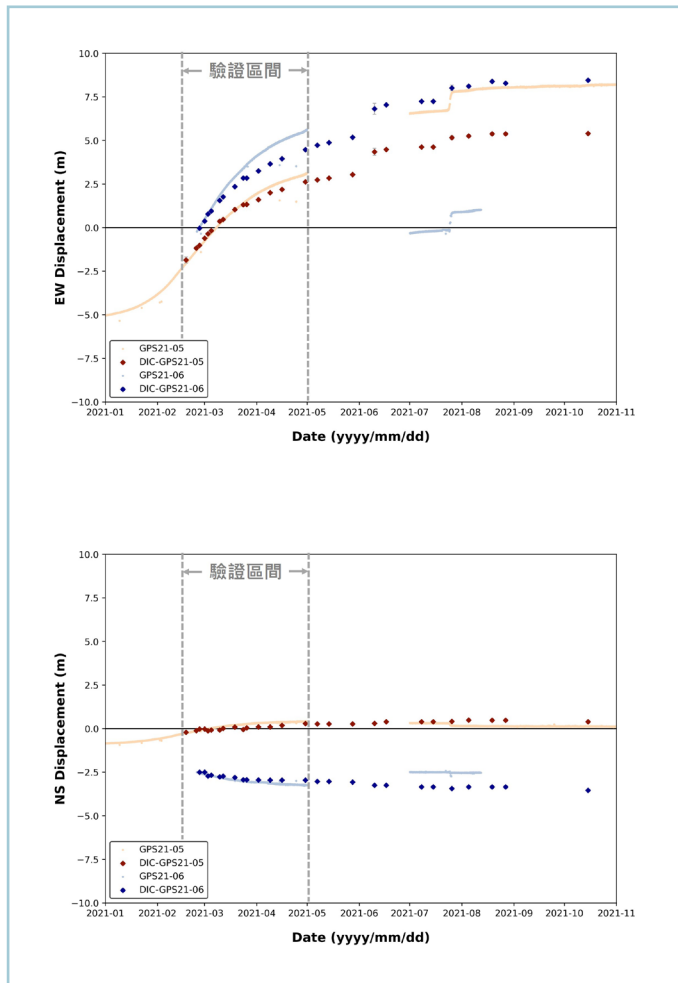


圖 7 DIC 結果與監測資料（GPS21-05、GPS21-06）於東西、南北方向之驗證

此外，還進一步將分析結果轉換成格柵檔，並投影到邊坡剖面（P-P' 剖面），剖面位置如圖 8，為現生滑動塊體之中央剖面。觀察沿剖面方向之運動行為，可協助辨識邊坡受壓力與張力之區域，方向則為此區硬頁岩葉理傾向（方位角約 298°）。

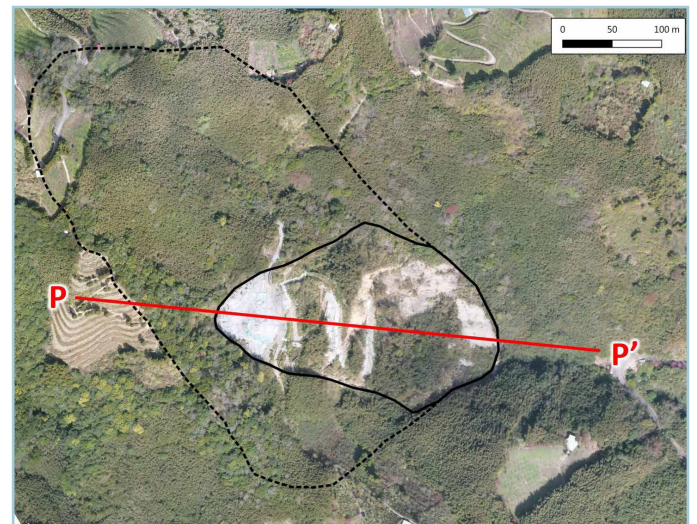


圖 8 中央剖面位置

接著採階段性分析來獲得各階段之位移場分布情況，其中 Stage 1 雖有監測資料紀錄，但時間範圍內的兩期影像拍攝時間僅間隔 3 天，無法確認其分析結果可代表該時間段內之運動特性，因此暫無分析此階段之位移。

透過 DIC 分析獲得位移向量後，可能因影像覆蓋範圍差異、影像有陰影或過曝情況而產生異常的分析值，因此設定 DIC 分析所得的 RMSE 若大於 0.4m，或合位移大於 10 m 則濾除此向量。

（一）邊坡隨時間之位移變化

圖 9 呈現 Stage 2 ~ Stage 7 以及 Stage NA1、Stage NA2 期間，崩塌地中央剖面之位移大小，紅點代表東西方向、藍點代表南北向之位移（向東、北為正），對於邊坡位移大小隨時間變化之描述如表 3。

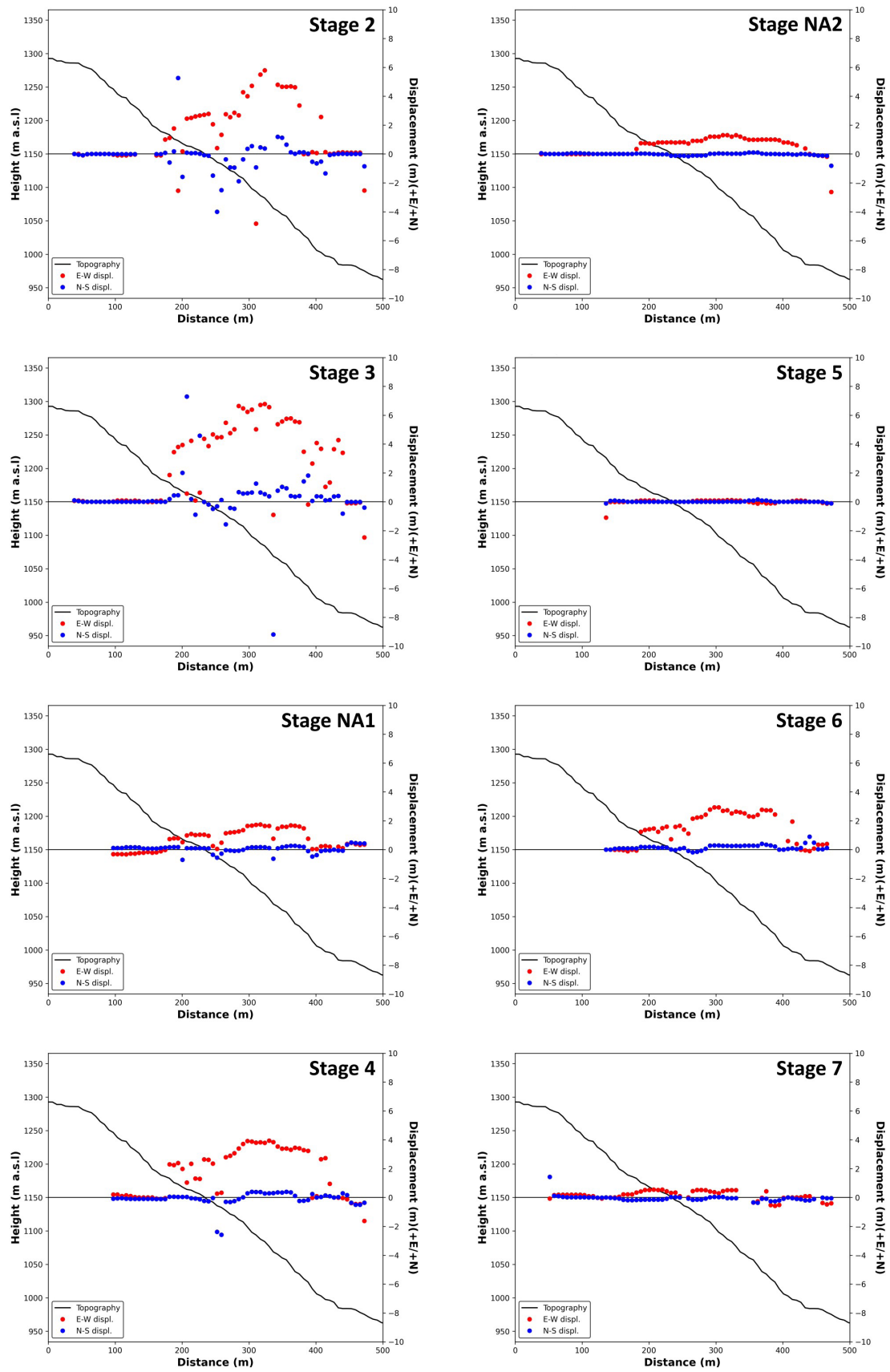


圖 9 各階段 DIC 分析之位移場投影於中央剖面 P-P'

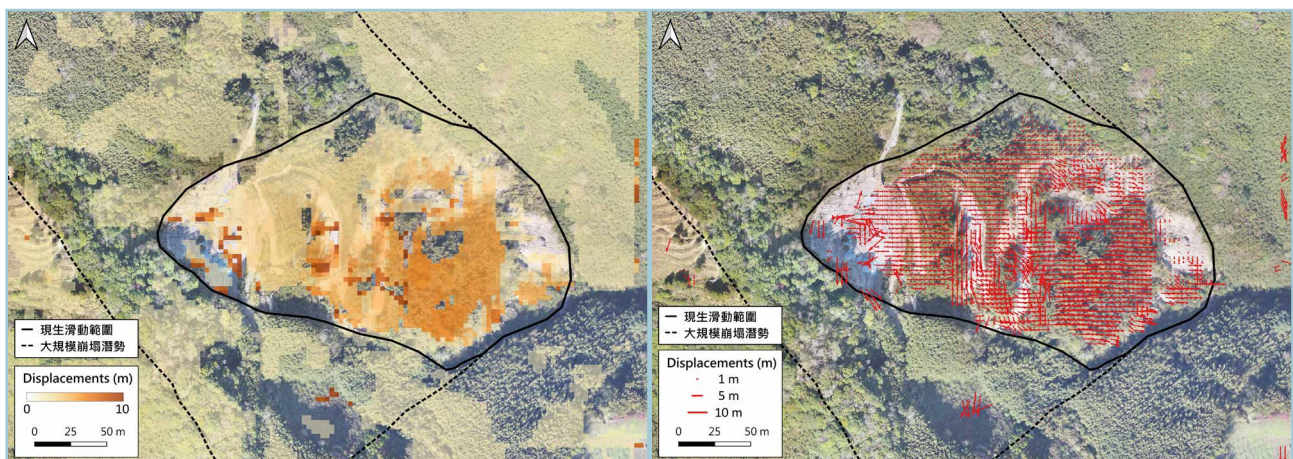
表 3 光華崩場地於不同時間階段之位移行為

階段	描述
Stage 2 (等速)	自邊坡冠部至遷急線範圍之位移大小近似，地表朝東南方移動，向東有約 2.7 m 之位移；隨坡高下降位移急遽增加，最大值可達 5.8 m，顯示此區受強烈張力作用；於最大值後，位移量則朝坡趾方向逐漸遞減，推測此區受擠壓作用。
Stage 3 (減速)	整體位移呈現與 Stage 2 相似之分布，但可觀察到於此階段的下邊坡最大位移約為 6.8 m，較 Stage 2 增加約 1 m；而上邊坡則達 4.6 m，增加幅度近 2 m。推測於 Stage 2 是由下邊坡率先趨動，進而帶動上邊坡運移；而減速時亦是由下邊坡先趨緩，而上邊坡還未及時反應減速，導致上下邊坡差異減小。
Stage NA1	下邊坡位移略大於上邊坡，但位移量已呈漸進變化，約介於 0.7 ~ 1.7 m 之間，推測從此階段開始，邊坡之變形行為與機制可能已發生改變。
Stage 4 (急劇加速)	於短時間內發生顯著位移量，於 15 天內累積最大位移近 4 m，且伴隨較大的降雨事件發生。其下邊坡位移雖仍大於上邊坡，但其量值並沒有出現跳躍性的差異，而是趨於相近並呈漸進式之變化。
Stage NA2	沿剖面線各點位移量非常相近，約介於 1 ± 0.3 m。
Stage 5 (穩定)	邊坡活動顯著減緩，無明顯位移變化。
Stage 6 (急劇加速)	位移行為與 Stage 4 相似，7 天內累積最大位移近 3 m，亦伴隨降雨事件發生。
Stage 7 (穩定)	邊坡活動顯著減緩，無明顯位移變化。

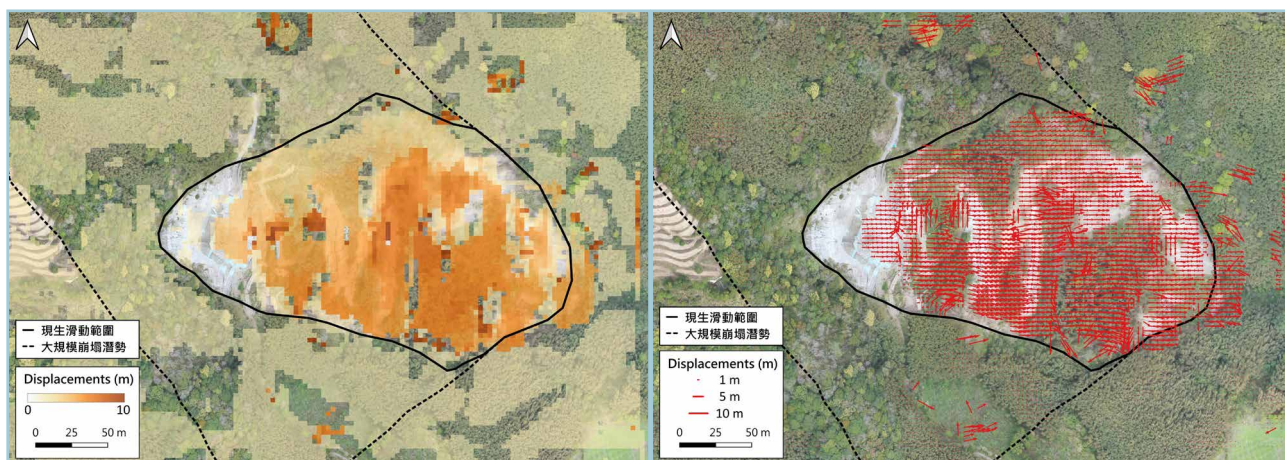
(二) 邊坡之空間位移場分布

除位移隨時間之變化情形外，將進一步探討地表位移的空間分布特性。針對不同運

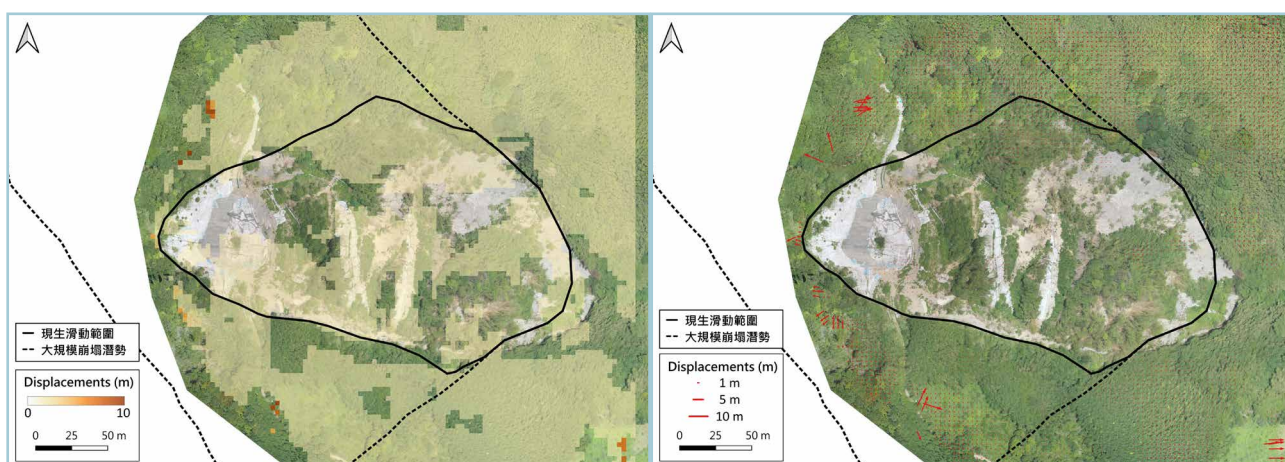
動特徵，圖 10 展示了光華邊坡於 Stage 2（等速）、Stage 3（減速）、Stage 5（穩定）及 Stage 6（急遽加速）各階段的全場位移分布情形，詳細描述如表 4 所示。



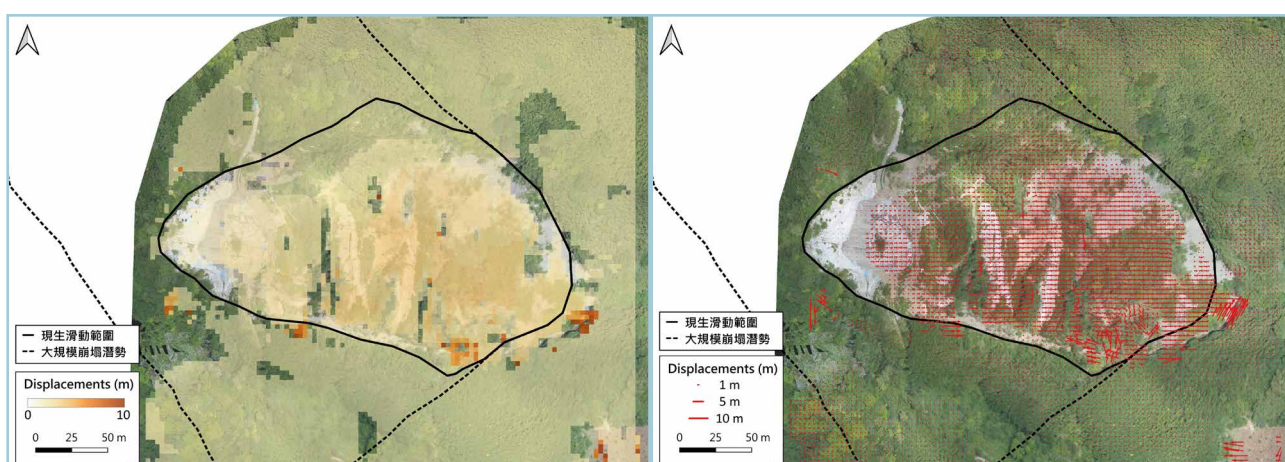
Stage 2（等速）



Stage 3 (減速)



Stage 5 (穩定)



Stage 6 (急遽加速)

圖 10 各階段 DIC 分析之合位移大小(左)與位移向量(右)

表 4 光華崩塌地於不同時間階段之空間位移分布

階段	描述
Stage 2 (等速)	對上邊坡而言，位移量自遷急線附近向西北方向逐漸遞減。而最大位移發生於下邊坡植被覆蓋區域，下坡位移自植被區向坡趾方向逐漸遞減。最大位移邊界對應至正射影像上，可觀察到地表於此階段初期即已出現一條東北—西南走向之張力裂縫，並隨時間演變成為長達約 100 m 的崩崖。就運移方向而言，上邊坡北側區塊主要朝方位角約 70°~90°方向移動，南側區塊則朝方位角約 90°~105°方向移動，兩區分界明顯，推測上邊坡可能至少存在兩個運動塊體。而下邊坡的北側區域往正東方向運動為主，其餘區域則沿地形分別朝正東或東南方向移動。
Stage 3 (減速)	位移空間分布及運動方向與 Stage 2 相似。
Stage 5 (穩定)	幾乎無位移發生，僅於滑動體北側與靠近趾部之植被覆蓋區域有出現約 0.1~0.3 m 的微小位移，搭配人工判釋影像推測這些位移為兩次影像拍攝時，樹木受環境影響所導致。
Stage 6 (急劇加速)	位移大小與方向較等速與減速階段一致，部分區域已無明顯的受張或受壓區域，僅在移動方向上有較明顯之差異。東北側塊體往方位角 50°~90°移動，愈靠北側往北偏移角度愈多；東南側塊體則往正東移動。南側的上、下邊坡的位移大小與方向皆相近，朝方位角約 90°~100°移動。

本文利用 DIC 分析克服了地形限制，成功補足無監測資料紀錄期間以及無監測儀器設置位置之位移場資訊。綜合上述分析結果，推測於 Stage 2 與 Stage 3 時，光華邊坡整體處於不穩定發展階段，即便在無顯著降雨條件下，仍可觀察到大量位移現象發生。

此期間各塊體有不同之運移行為，但彼此相互牽連影響，呈現由下邊坡率先運移、進而帶動上邊坡塊體滑動之特徵；其上邊坡主要受張力作用影響，下邊坡則以擠壓作用為主。此外，根據運移方向推測，上邊坡至少可辨識出兩個滑動塊體，而下邊坡因缺乏明顯的方向分界，僅從平面位移場難以明確區分塊體數量。

隨時間發展至 Stage NA1 之後，推測邊坡內部應力分配達相對穩定狀態，無雨時邊坡位移幾乎停滯，位移行為與降雨事件呈密切關聯，需特定觸崩因子才會引發邊坡運動。此時期上、下邊坡運移行為發生轉變，位移大小趨近相似。

三、光華大規模崩塌潛勢區之全場位移場

前面僅針對 M1 範圍內的現生滑動塊體進行討論，並無涵蓋整個大規模崩塌潛勢區圈繪範圍。為了解整個潛勢範圍之活動性，以 DIC 分析了 Stage 2、Stage 3、Stage NA1、Stage 4 與 Stage NA2 之位移場，其他階段則因影像覆蓋範圍不足而沒有進行分析。結果如圖 11，除現生滑動範圍外，M2 至 M4 各區域於上述五個階段皆未觀察到明顯位移現象。

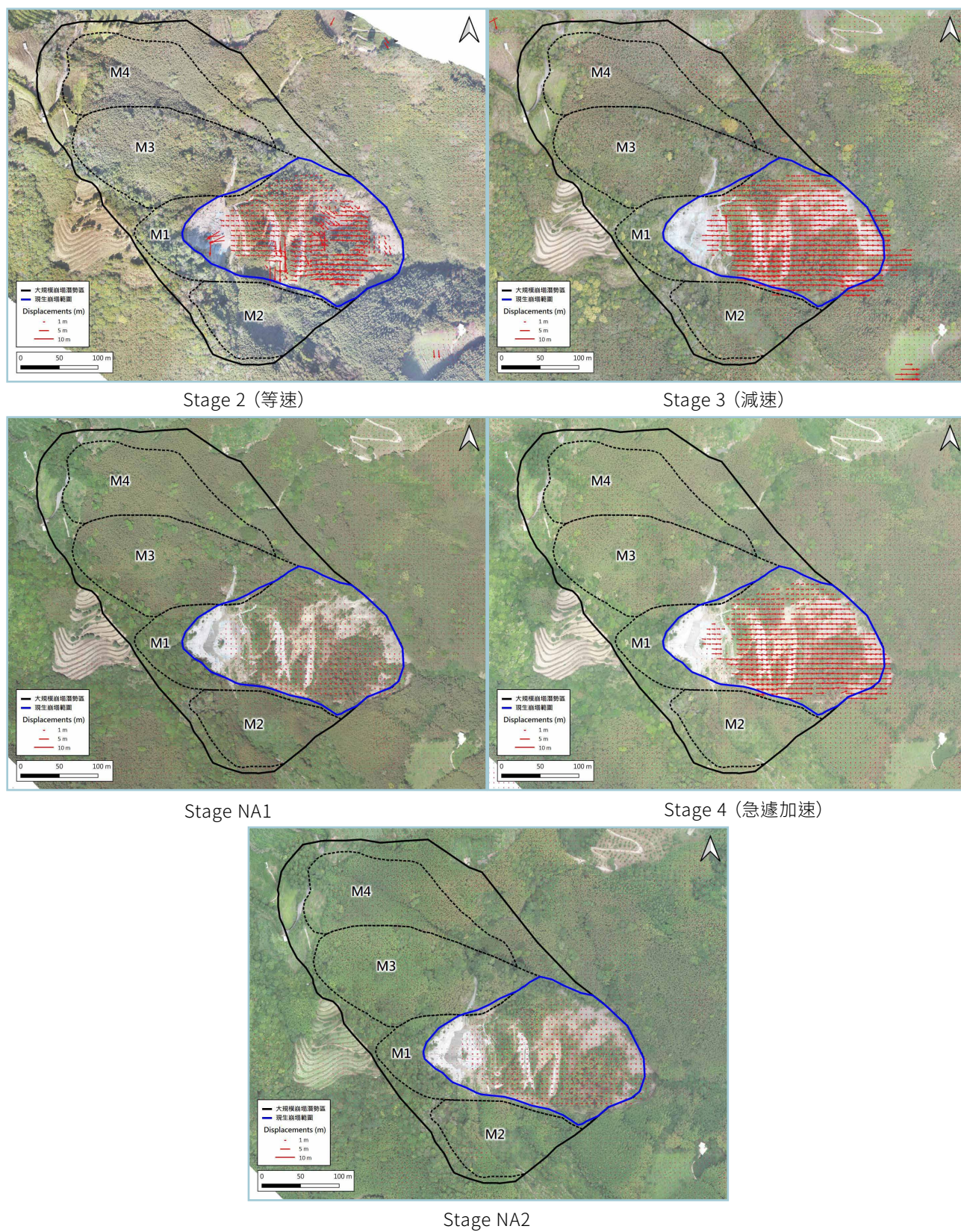


圖 11 光華崩場地各階段之全場位移場

伍、結論

透過 DIC 分析重建了大規模崩塌在無監測儀器區域與無資料紀錄時間之活動性，並進一步討論了邊坡隨時間之運動行為變化，與監測資料比對結果也證明該分析方式的準確性。

全場位移分析結果顯示，光華崩場地目前主要的活動區域僅集中於 M1 分區，M2 至 M4 分區皆未觀察到明顯位移。其中，在 M1 分區的現生滑動範圍內，觀察到長期且連續的滑動，並根據監測資料將其活動特徵劃分為 7 個階段。在 Stage 2 與 Stage 3 期間，即便在無降雨的環境下，邊坡仍發生顯著位移，並且由下邊坡先移動或趨緩，再帶動上邊坡受拉運動。

當發展至 Stage NA1 之後，推測邊坡內部應力分配趨於穩定，需特定觸崩因子才會驅動邊坡運移，且此時上、下邊坡轉為同步運動。本文說明 DIC 分析能有效掌握大規模崩塌的活動性與運移變遷，並初步區分現生滑動範圍內之塊體數量與受力行為，可作為後續崩塌潛勢評估、監測及工程規劃之重要參考依據。

參考文獻

1. 青山工程顧問股份有限公司，「110 年度雪霧鬧及光華地區潛在大規模崩塌調查監測計畫」，農業部農村發展及水土保持署委託研究案（2021）。
2. 林于超，「裂隙地下水滲流及排水穩定工法對岩體邊坡變形影響以光華崩場地為例」，國立臺灣大學土木工程學研究所，碩士論文（2022）。
3. Liu, C.-H., Ho, J.-Y., Chu, C.-R., Chang, C.-H., & Chen, H., “A pixel analysis technique and unmanned aircraft system for horizontal displacement in the landslide potential area.”, *Geoscience Letters*, 9 (1), 17 (2022) .
4. Kuo, H.-L., Lin, G.-W., Lin, T.-Y., Liu, C.-H., Chu, C.-R., Chang, C.-H., Lin, C.-W., & Chen, H., “Displacement evolution of failure and non-failure sliding rock slopes.” *Landslides*, 22 (4), 1213-1226 (2025) .
5. 農村發展及水土保持署資料平台大規模崩塌開放資料專區（2023）。
6. Bickel, V. T., & Manconi, A., “Digital Image Correlation using a Fast Fourier Transform approach”（2020）.
7. Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A., “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review.”, *Measurement Science and Technology*, 20 (6), 062001 (2009) .
8. Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L., “The Varnes classification of landslide types, an update.”, *Landslides*, 11 (2), 167–194 (2014) .



圖片來源：拍攝者／溫靖瑀



0403 震後太魯閣國家公園 災損調查及應變防災

關鍵詞 Keywords

太魯閣 Taroko

落石 Rock Fall

大理岩 Marble

邊坡風險 Slope Risk

內政部國家公園管理署
太魯閣國家公園管理處

處長

劉守禮

科長

黃皓軒

科員

李敏俊

台灣世曦工程顧問股份有限公司
大地工程部

經理

周永川

正工程師

紀建宇

正工程師

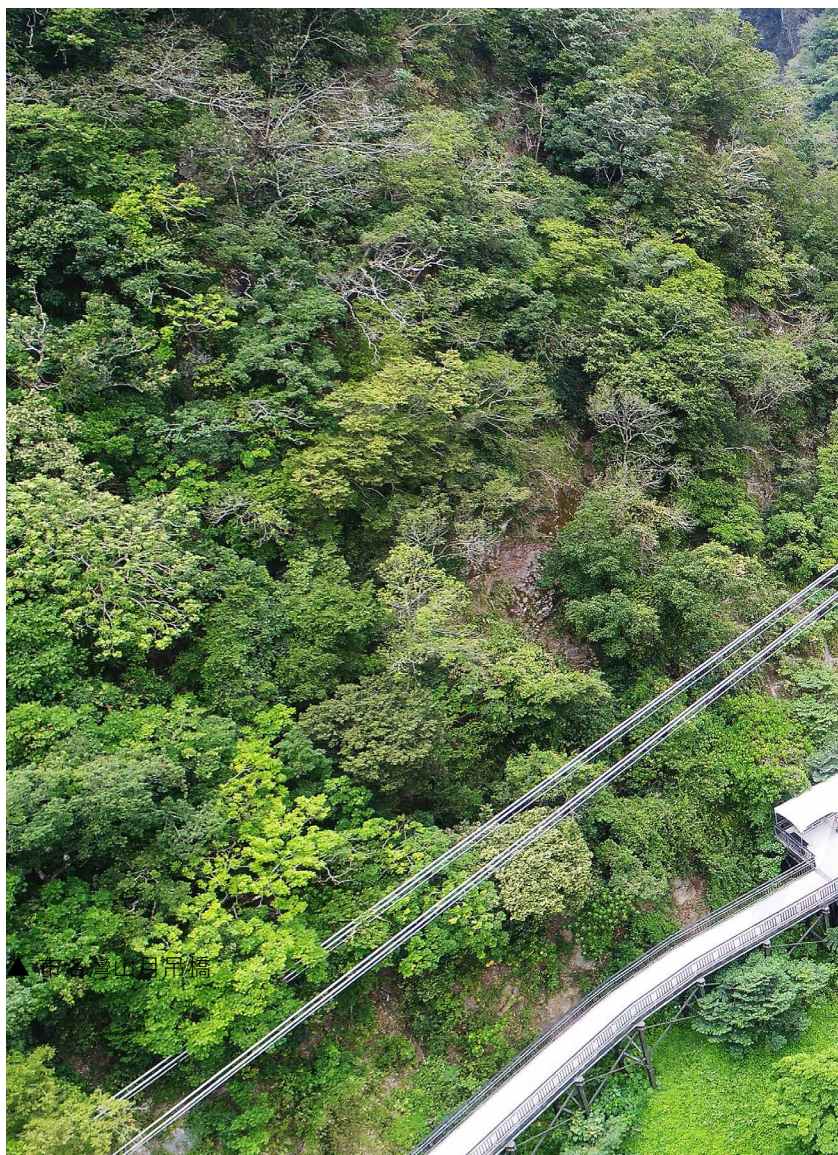
林信宏

工程師

張桂瑛

協理

陳聰海



2024 年 4 月 3 日，花蓮外海發生芮氏規模 7.2 地震，太魯閣國家公園震度達 6 級，最大地表加速度達 1,491.1gal，強烈震動造成園區內陡峭邊坡上之落石、岩屑崩落，嚴重損壞台 8 線公路主線，以及園區內步道、遊憩區等相關設施，亦造成全臺灣總共 16 人死亡、1,155 人受傷。

囿於餘震、颱風影響，二次災害持續衍生變化，故台 8 線迄今仍採管制方式通行，園區內步道亦暫未開放。太魯閣園區內以變化多樣的大理石岩盤與高聳峽谷地形景觀聞名，但地質變異、範圍廣、地形陡峭等特性，致調查甚為困難。

為了解園區範圍潛在問題與安全性，本計畫採用多元化衛星遙測技術、UAV 及光達等科技，進行快速調查與邊坡風險評估。本文將針對各熱門步道之震後災損狀況進行說明，並作初步破壞解析，供各界借鏡參考。



壹、前言及園區概況

太魯閣國家公園之管理範圍，包括以立霧溪峽谷、東西橫貫公路沿線及其外圍山區為主，包括合歡群峰、奇萊連峰、南湖中央尖山連峰、清水斷崖、立霧溪流域及三棧溪流域等，全區面積九萬二千公頃。計畫範圍涵蓋台 8 線太魯閣閘口牌樓至洛韶，以及台 9 線崇德至和仁段，包括 19 條步道、13 處遊憩區及 3 處一般管制區（如圖 1）。本次強烈地震對園區造成嚴重災損，其中以砂卡礑步道、燕子口、布洛灣等熱門景點受損最為嚴重，以下針對園區環境現況進行說明。

一、地理位置及水系、氣象

太魯閣國家公園位於臺灣東部，全區地跨花蓮縣、臺中市與南投縣三個行政區，總面積達 92,000 公頃。園區面臨太平洋、背鄰合歡群峰，從近海平面之立霧溪至最高的南湖大山，海拔落差達 3,742m。

立霧溪穿越園區中央地帶，因下切作用極為旺盛，形成太魯閣峽谷的特殊地形。園區全區共有立霧溪、大甲溪、濁水溪、三棧溪與花蓮溪等五個集水區。

根據園區內氣象站與雨量站的統計資訊顯示，年雨量均在 2,000mm 以上，夏季主要



圖 1 園區之計畫步道、遊憩區及管制區範圍

降雨來源為對流性雷陣雨與颱風帶來之豪雨，降雨主要集中於 7 月至 10 月，冬季則以東北季風為主要降雨來源。

二、地形、地質特性

台 8 線道路自海拔 0m 爬升至 1,100m，園區內山區高程可達約 2,300 至 3,000m，地形坡度普遍大於 30 度，其中布洛灣至綠水合流區域內為峽谷精華地帶，其普遍坡度皆大於 60 度；而砂卡礑至長春祠地區，坡度亦多大於 50 度（如圖 2）。因台 8 線為東西向修築之道路，且多修築於北側邊坡，因此計畫範圍內的坡向多為南向邊坡，而南北向之步道，則坡面多為向西傾斜之邊坡為主（如圖 3）。

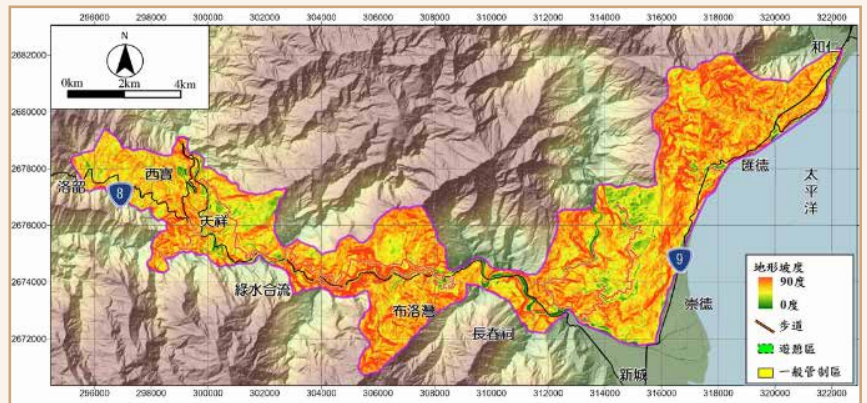


圖 2 園區地形坡度圖

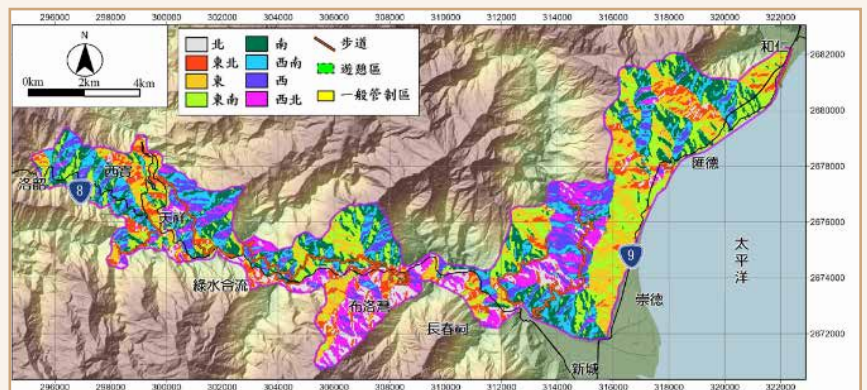


圖 3 園區地形坡向圖

地質分區屬脊樑山脈東翼大南澳片岩之太魯閣帶，附近地層包含階地堆積層 (t)、沖積層 (a)、白楊片岩 (Py)、谷園片岩 (Ku)、天長大理岩 (Tb)、九曲大理岩 (Cu)、德克利片麻岩 (Tr) 與開南岡片麻岩 (Kg)。

由於變質與變形作用影響，發育許多褶皺與斷層構造，且岩石變質度由西向東逐漸升高。許多小型褶皺組成的包絡面褶皺形成了數個複背斜與複向斜，其中三錐複背

斜軸部有九曲大理岩與德克利片麻岩出露，天祥複向斜軸部則有谷園片岩及白楊片岩出露。

由路線地質剖面可得知（圖 4），地形坡度較陡區域（如布洛灣至綠水合流、長春祠至砂卡礑步道、匯德至崇德）多為九曲大理岩之出露位置，反映大理岩自立性良好特性，而在其他大理岩與片岩交互出現路段，地勢則相對較為平緩。

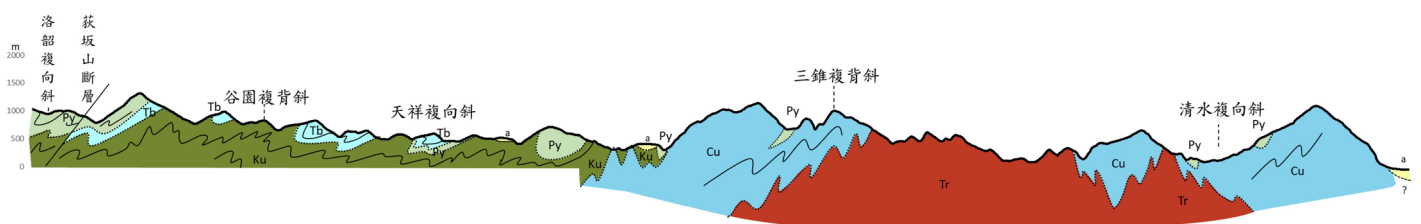


圖 4 園區範圍東西縱向地質剖面圖

三、活動斷層、地震與地質敏感區

園區無活動斷層穿越，惟於花蓮縣北部活動斷層有米崙斷層與嶺頂斷層兩條，皆為第一類活動斷層。米崙斷層為左移斷層兼具逆移分量，呈現南北走向；嶺頂斷層亦為左移斷層兼具逆移分量，呈北北東走向。其中米崙斷層曾於 1951 年發生規模

7.1 和 7.0 地震，並於 2018 年發生規模 6.4 地震，均對東部地區造成重大災情。

此外，園區存在多處山崩與地滑地質敏感區（L0017 花蓮縣），遍布於中央山脈地形區上之各處（圖 5），0403 地震後，更出現許多裸露的崩塌地，為土石流、落石等崩壞作用提供更多材料。

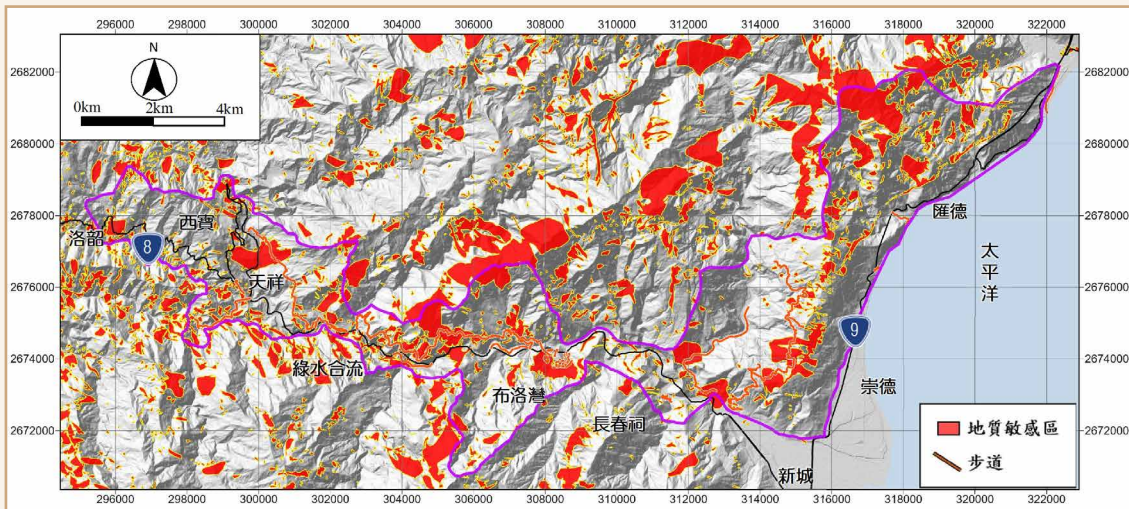


圖 5 園區周遭地質敏感區

四、震後應變處理

（一）園區步道緊急調查及處理

地震發生後，太魯閣國家公園管理處緊急動員至各步道巡檢及協助救災，以掌握災情。經查，秀林鄉富世得卡倫步道 300 m 處有 7 人遭落石砸傷及 3 死、小錐麓步道 1 死、砂卡礑步道 6 死、秀林鄉大清水遊憩區（台 9 線 161K+300）小客車 1 人死亡。

而園區內之砂卡礑、長春祠、燕子口、九曲洞、布洛灣及白楊步道等六條關注步道，經比對 0403 地震前後的衛星影像與航空照片可發現，震後大規模邊坡災害已致使地形、地貌大幅改變，且受災地區大部

分仍處於不穩定狀態。各步道震後現勘後之災情統計彙總如表 1。

（二）災後緊急應變處理及救助

依據中央災害應變中心彙整之「0403 花蓮地震災害應變處置報告第 21 報（最後一報）」（2024/04/10），指出 6 日消防署及各縣市計出動 95 台車輛、416 人次、9 隻搜救犬，空勤總隊搜救機（NA713）自花蓮機場起飛，搭載數位發展部技術員 1 名與低軌衛星通訊設備（130 公斤），至天祥晶英酒店停車場載運民眾 28 人返回太管處對岸停車場，並由花蓮縣政府派員接駁及安

置；7日再出動車輛至天祥晶英酒店撤離民眾 125 人、自駕 23 人；空勤總隊搜救機並至大禮部落吊掛 2 名行動不便患者，及大同部落受困居民 7 人，撤離總計 305 人。砂卡礑步道及和仁礦區中和礦場失蹤國人 4

人、外籍 2 人，出動怪手 1 輛、消防人員 2 名、義消 1 名及花蓮特搜 6 名、1 搜救犬至五間屋落石群搜索。本次 0403 地震在全臺灣共造成死亡 16 人、受傷總計 1,155 人、失聯 3 人。

表 1 園區內六處關注步道震後現勘災情統計

步道	災情說明	災害類型	災害潛勢占步道總長度 (%)			
			低	中	高	加總
砂卡礑	步道長 4.1k，0.45-0.6 k、2.1-2.3 k、2.4 k 等 3 處大型崩塌土石掩埋步道，持續崩塌暫無法修復。	岩屑崩滑	42	37	-	79
		落石	-	11	10	21
長春祠	步道長 2k，三聖佛至祠堂護欄設施受損。祠堂左右兩側有明顯崩塌。	落石	-	-	75	75
		岩屑崩滑	18	7	-	25
燕子口	步道長 1.37 k，3 處土石大量堆積，沿線落石，防護棚毀損 50m。	落石	-	46	32	78
		岩屑崩滑	-	17	-	17
九曲洞	步道長 0.7 k，水景步道入口毀損，2 處明顯坍方，於半開放形式步道內可見規模大小不等落石災害殘跡。	落石	-	20	80	100
布洛灣	1 處邊坡坍方，道路開裂 50m。布洛灣台地落石，造成房舍毀損。	落石	-	48	52	100
白楊	步道長 2.1 k，1.7 k 處土石崩落，水簾洞口巨石掉落，右側邊坡滑動，水簾洞內疑似有新的橫向裂痕。	岩屑崩滑	17	52	31	100
		落石	-	15	8	23



▲ 布洛灣山月村巨大落石砸毀民宿房舍

貳、震後災損狀況調查

0403 震後於園區步道造成的災害主要為落石掉落，加以震後造成坡面材料鬆動，在後續颱風及強降雨事件中，甚易造成土石流、岩屑崩滑及河水暴漲沖刷路面基礎等二次災害。彙整太魯閣熱門步道於震後及後續颱風影響下之災損調查成果：

一、長春祠步道及聯外道路

長春祠步道及聯外道路，地震時的災害主要為落石及岩屑崩滑，如聯外道路上方蝕溝之岩屑崩滑（點位 1）、長春祠步道零星落石砸損步道及建物（點位 4）、聯外道路

之落石柵損毀（點位 6）及岩屑崩滑（點位 7）等災害。整體之災害，在長春祠步道範圍內尚屬輕微，較大的災害發育在聯外道路上。

然而，在地震過後的雨季及颱風作用影響下，造成多處二次災害，如立霧溪因颱風溢淹到路面導致路基流失（點位 2）、舊長春橋橋墩沖毀（點位 3），道路則因大量雨水將坡面上的不穩定材料沖刷到路面，造成多處災害擴大，如觀音洞旁蝕溝擴大（點位 5）、聯外道路之落石防護柵損毀等（圖 6）。



圖 6 長春祠步道遊憩區災損

二、燕子口步道

燕子口步道位於太魯閣峽谷地形區段，本路段的立霧溪沿岸為高陡的峭壁地形，因此台 8 線多以隧道通過，步道則沿舊台 8 線及立霧溪通行。震後，本路段落石掉落情況非常嚴重，尤其如步道東段邊坡崩塌（岩錨護坡遭破壞）、落石砸損木棧道及防落石棚（點位 4 至 7）。步道西段雖因有較多明隧道保護，而有較好的路況，但於透

空段仍有明顯落石掉落（點位 2）。

此外，後續降雨及颱風事件亦引發多處二次災害，如東段邊坡崩塌因颱風之河水暴漲，掏刷下邊坡造成基礎流失（點位 3、7）之狀態，而在步道西段（點位 1），則因有零星的河階地，造成部分岩屑崩坍（圖 7）。



圖 7 燕子口步道遊憩區災損

三、九曲洞步道

九曲洞步道位於太魯閣峽谷地形中的精華區，本路段之台 8 線及步道多數皆以隧道或明隧道通過，因此步道設施在本次地震

中受損相對輕微。部分明隧道的護欄，有遭到來自對岸邊坡落石破壞之情況。

另，九曲洞隧道西口的明隧道頂部遭落石損毀，亦導致緩衝材明顯損壞（點位 1），

而在步道沿線，則時有明隧道上方護坡遭拉扯破壞之現象（點位 2、5）。部分步道路段因無隧道防護，路面堆積大量落石（部分落石來自對岸邊坡），顯示地震時的落石來自對岸飛越掉落之數量驚人（點位 3、4）。

另於點位 6 上方存在一條蝕溝，雖地震時無明顯問題，但在後續颱風期間，由於挾帶大量土砂及洪水，曾將明隧道頂部擊穿而產生破洞（圖 8）。



圖 8 九曲河西段步道地震及颱風災損狀況

四、布洛灣遊憩區

布洛灣遊憩區主要可分為聯外道路、竹林步道、吊橋步道等區段，其中聯外道路係位在舊崩場地及階地堆積層上，經本團隊初步現勘並整合基本圖資與地質敏感區範圍後發現，布洛灣遊憩區本身並不位於潛勢區域，但周圍仍受到潛勢區包圍。依歷

年之巡檢紀錄與震後快速調查，此處為落石頻繁區。

臺地南側邊坡坡頂處發生新生崩塌，提供底下溪溝大量土砂材料，後續可能造成土石流災害；聯外道路東南側邊坡亦發生明顯崩塌，並於之後的康芮颱風後，發生更嚴重的土石流衍生災害如圖 9，接近山稜線

處可見大範圍崩塌地。崩塌前緣處包括 4 處發育較為明顯的蝕溝線型，其中 2 條蝕溝可見落石堆積，並有落石隨蝕溝運移至道路上，堆積在溝內的土石材料、岩屑，可能經由蝕溝往下移動，對布洛灣聯外道路之安全造成影響。

另由圖 9 中顯示，布洛灣西側邊坡為落石熱區，此為造成山月村民宿砸損的原因之一，從圖 9 也可以看到落石可能來源以及移動軌跡；南側邊坡則有落石、岩屑崩滑以及向源侵蝕等風險。



圖 9 山月村竹林步道落石可能路徑示意圖

此區域的聯外道路受損最為嚴重。在 0403 地震前期，布洛灣聯外道路東南側已可見數道侵蝕溝發育線型。地震後，數顆巨石（直徑約 6m 以上）可能沿著蝕溝滾落至道路上，道路邊坡大量崩塌產生之不穩定崩

積材料堆積於坡面上。另外，2024 年 10 月底之康芮颱風於布洛灣測站測得 802mm 雨量，造成蝕溝 E 周遭坡面崩塌，大量土石沖毀路基，多顆直徑 5m 以上之巨石堆積於坡面與道路上（如圖 10）。



圖 10 康芮颱風後布洛灣聯外道路現場調查成果

五、白楊步道

步道起點位於台 8 線 166k+500 處，由台 8 線上的一號隧道進入。步道前身為台電施工道，後來演變為現在的白楊步道。步道沿線設有二座版橋、一座吊橋和七座隧道，沿線大都位於地質敏感區，常年均有落石風險。

依 0403 震後衛星影像判釋成果報告顯示，白楊步道內有崩塌 45 處，並有 6 處與步道相交的蝕溝，終點的白楊瀑布位置約有面積 16.7 公頃的崩塌；康芮颱風後，原本已經嚴重受損的白楊步道進一步遭到破壞，

造成如 0.75 ~ 0.8k、1.2k 路基沖毀、步道沿線倒木、崩塌材料堆積、版橋及吊橋沖毀等災害（如圖 11）。



圖 11 白楊步道 0.75 ~ 0.8k 現場調查成果



六、砂卡礑步道

砂卡礑步道入口位於台 8 線砂卡礑大橋下，終點位於三間屋。步道沿著砂卡礑溪沿岸鋪設，前身為日治末期所建，主要是為了發展立霧溪的水力發電。沿線多有

岩層裸露出現，主要為大理岩及片岩。在 0403 震災後，步道沿線發現三處大規模崩塌，造成步道流失或阻斷，崩塌面積約為 0.8 ~ 8.9 公頃（如圖 12）。



圖 12 砂卡礑步道 0k+500 大崩塌情形 (公路局太魯閣工務段，2024/4)

七、台 9 線步道及遊憩區

台 9 線上共計有 3 條步道與 1 處遊憩區，隸屬於太魯閣國家公園管理處，由北至南分別為和仁步道、大清水遊憩區、匯德及崇德步道。和仁步道入口位於台 9 丁線 66k，國家公園和仁界址碑北側約 100m

處，主要受到公路上邊坡土石流影響，導致鄰近步道處之邊坡遭受土石流掩埋。

大清水遊憩區本身並無受到損害，僅鄰近的台 9 線邊坡可能產生落石影響，公路局已於上邊坡設置多道消能式落石防護網，目前尚屬安全。匯德位於匯德隧道北口

100m 處，沿蘇花公路北行，出隧道後靠右即可抵達。惟鄰近觀景台之上、下邊坡崩塌，導致步道中斷（圖 13）。

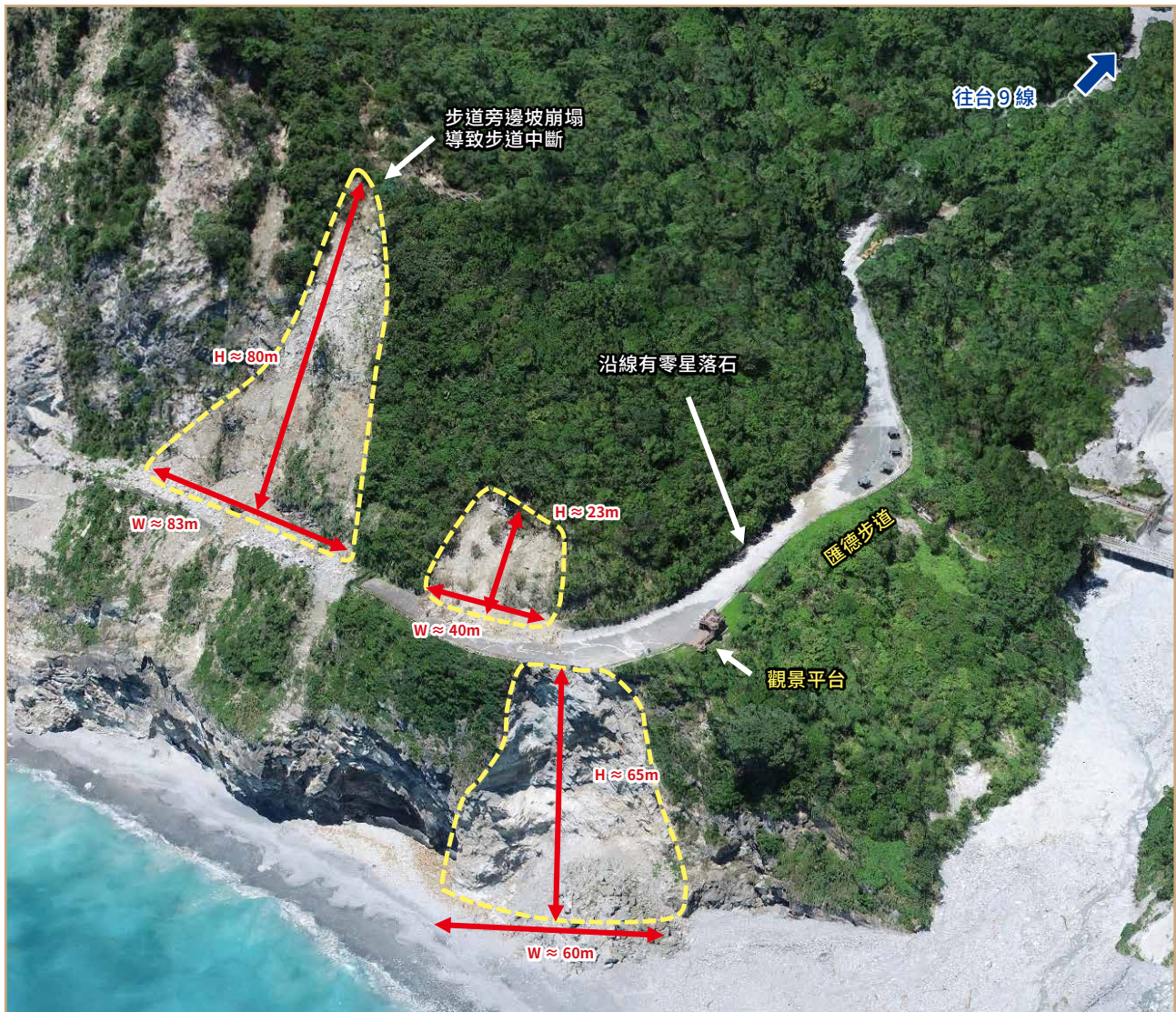


圖 13 匯德步道邊坡崩塌狀況

崇德步道入口設於崇德隧道北口觀景台旁石階下方，目前步道受到台9線上邊坡落石堆積與下邊坡崩塌影響（圖14），導致步道損毀，已無法通行。



圖 14 崇德步道邊坡崩塌狀況

參、歷史災害、破壞類型及評估

一、歷史災害

園區步道各路段地形多變，具有高陡坡、全倒懸、局部倒懸、岩隧及緩坡等地形，不同地形之落石危害度或落石型態並不相

同，由歷年之步道巡檢紀錄統計，落石災害於步道內經常發生，尤其是白楊步道、燕子口步道及砂卡礑等路段，多有歷史災害點。自 1944 年起，園區內之重大歷史災害事紀彙整如圖 15。

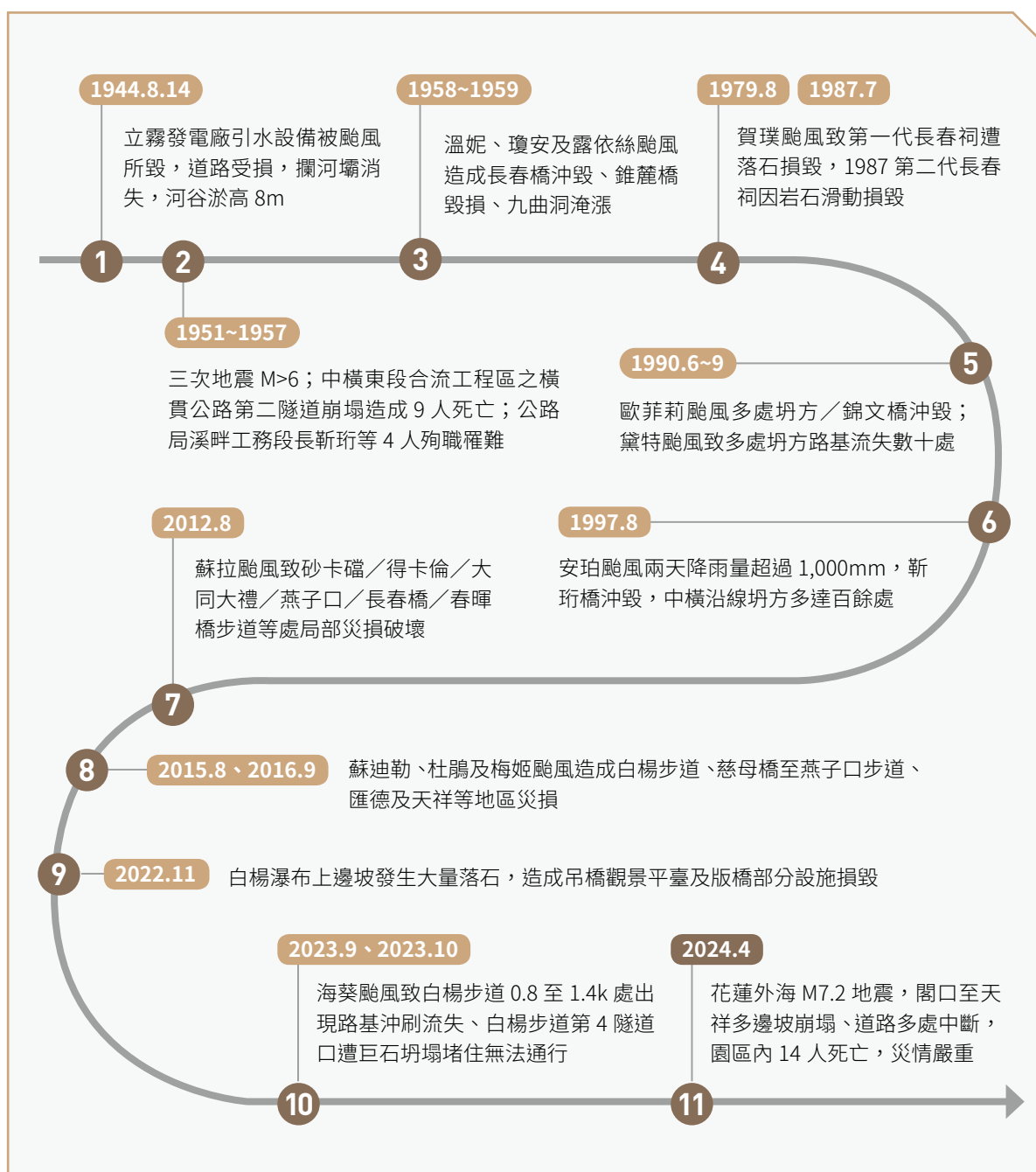


圖 15 園區內歷史災害事紀彙整（1944 年迄今）

二、破壞類型及機制

經初步踏勘成果顯示，區域路段主要災害可分為落石、落盤、岩屑崩滑及蝕溝等類型，針對主要類型之破壞機制與地形特徵說明如下。

(一) 落石、落盤（地形特徵示意如圖 16）

因峽谷壁之解壓節理與自然風化作用，加上不連續面風化、複合斜面與岩層發達之片理等不連續面而逐漸分離，再受自重、地震力或降雨時裂隙滲入水所造成靜水壓力、地表逕流水等外力影響，逐步擴大裂解成數個不同尺寸之岩塊，而成為落石來源。

此種地質弱面也發生於岩隧頂拱與側壁，加上岩層片理等不連續面發達，造成岩隧內之岩楔產生不同規模的落盤現象（如九曲洞）。另，解壓節理岩隙開裂及植物著生，促進風化作用，使岩石即使於無地震與風雨的情況下，仍然會自然崩落。

落石大小則受到層面及葉理解壓節理切割所控制，若岩層較薄時，受重力影響，會出現較大的壓縮變形，故其解壓節理較緊密，形成之岩塊尺寸亦較小；若岩層較厚，其相對解壓節理間距較寬疏，崩落岩塊大小亦相對較大。本計畫範圍由於各路段的地形及地質條件差異，落石來源及尺寸均不相同。

(二) 岩屑崩滑（地形特徵示意如圖 17）

地形坡度平均在 55° 以下的地區，坡面上多存有岩屑材料大量堆積於坡面，則可能發生岩屑崩滑（如布洛灣聯外道路）。

(三) 蝕溝（地形特徵示意如圖 18）

沖蝕作用初期，在坡面上切割所形成的深溝，為部分工址之具代表性的地形特徵（如長春祠、布洛灣等）。因蝕溝形成後，即會因下切、橫向沖蝕與向源侵蝕之同時擴張，而使坡面之穩定條件急劇破壞，造成大量的土石沖刷。

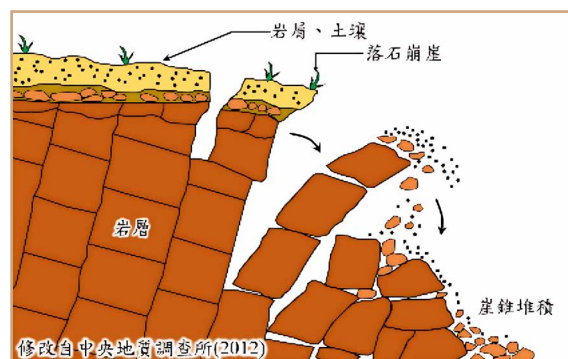


圖 16 落石

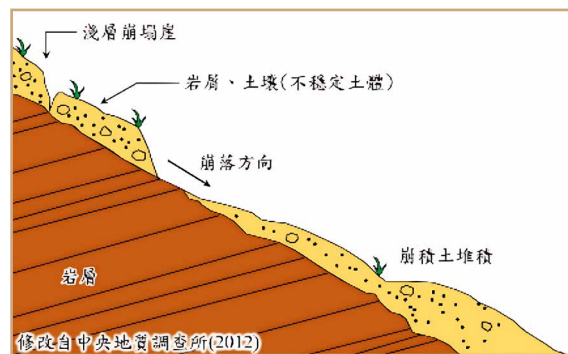


圖 17 岩屑崩滑

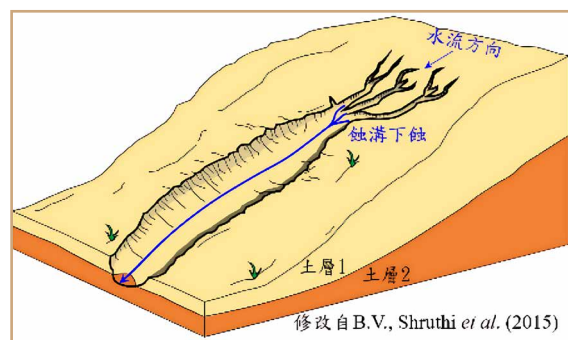


圖 18 蝕溝

三、潛勢及安全評估

常見的致災原因，包含落石、岩屑崩滑、岩體滑動及土石流等。原則上，可透過無人航空載具（Unmanned Aerial Vehicle,UAV）及地面光達建立三維模型，並輔以光達產製之數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）進行特徵辨識（圖 19）。先釐清坡面上崩崖、蝕溝、落石、不穩定土體及地質構造等特徵，再透過 UAV 與現場會勘，確認實際致災成因與災損。

以長春祠步道及周邊聯外道路為例（圖 21），透過 UAV 進行高聳邊坡探查，可了解普遍存在落石災害風險（圖 20），部分坡面上的蝕溝因堆積較多落石，因此有岩屑崩滑的風險，如聯外道路上方及長春祠步道上蝕溝部分，而土石流部分則發生於禪光寺聯外道路。

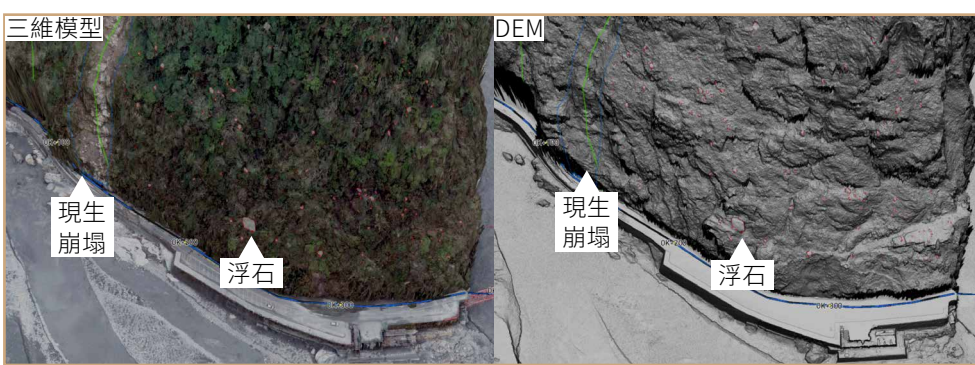


圖 19 正射及 UAV 光達點雲判釋成果



圖 20 高聳邊坡 UAV 探查

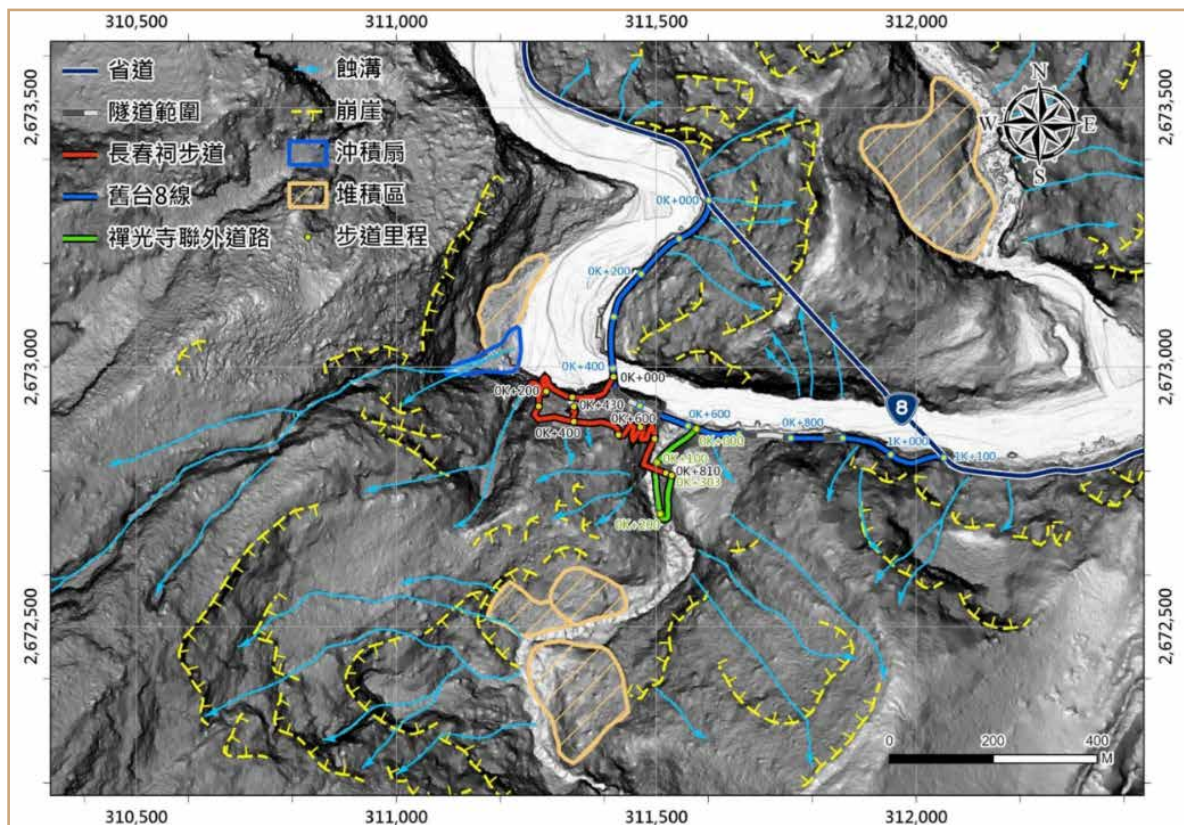


圖 21 長春祠步道及聯外道路微地形判釋例

由於災害具有重複致災特性，各步道安全性，除須進行各種基本資料及歷史致災資料蒐集與分析外，亦需進行空拍測量，取得高精度 DEM 或數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM)，進行微地形判釋，並搭配現地岩體調查，綜合「重複致災特性因子」、「微地形判釋因子」、「步道設施現況因子」及「岩體評分」等方式，進行高、中、低之各區段步道脆弱度與安全性劃分。針對重要景點區位，則可進行落石模擬，搭配脆弱度分析進行風險評估。

肆、防災規劃策略與工法規劃

一、策略

針對步道所掌握災況狀態，初步可區分有 A～D（風險高至低）等四類分級，並依

潛勢擬定後續步道處理方式。一般可採工程手段處置與非工程手段處置，惟本計畫工址環境具地形險峻、地質差、施工困難及風險高等特性，短期所採工法應無法完全消弭災害致因，且短期修復後即可能再破壞致效益有限，故宜逐年配合滾動管理與調查評估，編列預算再進級強化修復；長期對策之施工期長、費用高，但維護較省力耐久，故可考量原分級，依安全需求及各方條件細分等級，完成階段性環境保護、降低風險及提升安全性，園區開放分級原則及策略檢討可詳表 2。

二、工法

修復工法方面，針對落石、岩屑崩滑、蝕溝及非工程手段分別提出。落石方面可採主動式或被動式防護方式，如刷坡、消

表 2 步道開放分級原則及策略

步道分級	等級分類原則	安全評估	處理策略
A	步道嚴重損毀難以修復	● 致災風險極高 ● 難以現有工程技術克服狀況	● 禁止通行
B	步道災損及範圍分布較多，須以工程技術處理後，部分可開放、部分採限制進入	● 致災風險高 ● 限制或有條件管制進入	● 暫不開放或管制處理 ● 智慧人流監控 ● 以工程技術逐階段防護 ● 提供避難空間
C	步道部分災損，步道以工程處理或改線	● 致災風險中等 ● 可修復與防護	● 工程技術防護 ● 步道修復後，可開放通行 ● 進入管制或部分管制
D	步道無異狀或輕微損壞，處理後持續觀察	● 致災風險低 ● 簡易施工可處理	● 可開放通行 ● 科技巡查監測

能式防落石網、口袋式（簾幕式）防落石網、防落石棚及明隧道等；岩屑崩滑可採掛網岩栓、岩坡金屬網及無框架式護坡等；蝕溝主要以攔阻方式，採梳子壩或潛壩；非工程手段以 CCTV 監看、劃設高風險警戒範圍、RFID 人員管制等方式處置。

伍、結語

地震災害難預料，0403 震後看著園區四處滿地的落石，不難想像地震當時落如雨下四方濺飛而來的各尺寸落石，末日來臨的場景彷彿已到眼前，驚恐可見；震後，園區增添了幾分破壞後的蒼涼，但叢山依舊壯麗，綠水仍未停止奔流，面對大自然的巨變，後續重建復舊的執行應是困難、艱辛和複雜，本文謹記錄相關之 0403 震後災後紀實與破壞狀態，期提供未來環境防災之深思檢討參考；相信太魯閣韌性依舊，未來不久，你我仍可在青山綠水中，微笑再相遇。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「太魯閣國家公園 0403 震災後風險評估、工程規劃及專案管理案」初步調查報告，內政部國家公園署太魯閣國家公園管理處（2024）。
2. 中央災害應變中心，「0403 花蓮地震災害應變處置報告第 21 報（最後一報）」，內政部消防署（2024）。
3. 經濟部中央地質調查所，「五萬分之一臺灣區域地質圖（新城圖幅）」，經濟部中央地質調查所（2010）。





花蓮港外港區 0403 震後 調查評估與整建修復

關鍵詞 Keywords

- # 地震損壞 Earthquake Damage
- # 沉箱滑動 Cassion Sliding
- # 土壤液化 Soil Liquefaction
- # 碼頭修復 Wharf Repair
- # 耐震強化 Seismic Reinforcement

台灣世曦工程顧問股份有限公司
港灣工程部

計畫工程師

吳亮均

計畫工程師

鄭怡文

副理

林俊達

副理

陳榮嵩

臺灣港務股份有限公司
花蓮港務分公司

工程處處長

鄭璟生

總工程司

鍾權宏



2024 年 4 月 3 日，花蓮縣發生芮氏規模 7.2 強震（簡稱 0403 地震），引發花蓮港外港區不等程度災損。其損壞趨勢以 # 23 碼頭往 # 25 碼頭方向愈為嚴重。經水下調查及高密度點雲測量顯示，地震造成碼頭本體與消波方塊滑動、鋪面差異沉陷，損壞肇因複合多重因素，包含近斷層、地盤隆起、液化現象與波浪淘刷等。

本次整建以 # 23 及 # 24 碼頭為例，主體結構雖無傾覆及強度不足之虞，但遭逢強震仍有滑動風險。因此，整建分為中程及長期計畫，中程以復舊為目標，確保碼頭作業與船舶泊靠安全，其中 # 24 碼頭進一步淺層置換改良地質，局部強化耐震性能。未來可進行耐震強化，並設置監測儀器追蹤碼頭沉陷與傾斜變化，確保長期營運與安全。



壹、前言

花蓮港位屬東部貨物進出口重要樞紐，並肩負觀光遊憩港的角色，為郵輪跳島旅運基地之一，卻也是各港中颱風湧浪靜穩不佳及最強地震侵害的區域；港區分為內港區及外港區，內港以商港作業、漁業、娛樂活動為主，外港則供散雜貨、石材、貨運作業及大型郵輪上下。0403 地震對內港區幾無影響，主要損害集中於外港區的 # 17 至 # 25 碼頭。花蓮港是國內填海造地唯一歷經 2 次強震，產生大規模震陷區域，本文將就地震發生後，動員調查、探究損壞原因，並評估快速修復方式及未來因應對策。

貳、調查與損壞原因分析

一、損壞狀況說明

本次地震損壞分為三大區域，分別是平行海岸線的 # 17 至 # 22 碼頭、垂直海岸線的 # 23 至 # 24 碼頭及最外海的 # 25 碼頭。3 區共同現象均有面層開裂及後線高低落差，差別在於落差平均值不同，由近岸 15 公分到外海側達 50 公分，受損情況整理如表 1 及圖 1，另最外圍的 # 25 碼頭尚有法線外推，影響靠船之情事，後線回填處亦有明顯噴砂現象。

二、震後調查及檢測

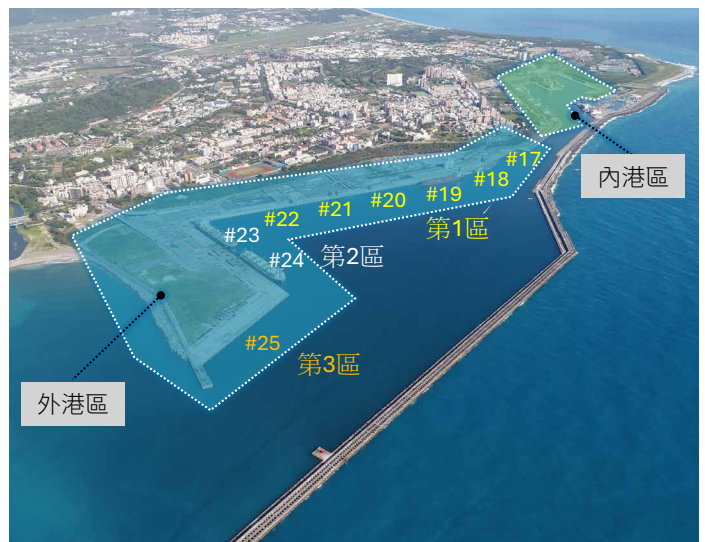
(一) 現地調查

陸上採用地面光達及測量，水下採高密度水深測量及船載光達，船載測量由海面上更開闊的視野測掃港灣地形與港埠設施，可彌補陸上測站無法施測之視線盲點，同

時與地面 3D 雷射掃描及水下多音束水深測量成果結合，能夠完整測繪碼頭構造，並使測繪資料接續不間斷，快速建構出完整的碼頭受損資料及地形圖資，並比對現場測量結果及原設計資料。

本次受損情形包括碼頭後線明顯高低落差、鋪面開裂翹曲；水下部分包含沉箱前緣護基方塊鬆動、消波方塊滑動、沉箱間隙開縫，詳圖 2～3。另後線油管於歷年地震有破裂漏油情形（詳圖 4），整建修復工法宜避免影響輸油。

表 1 外港受損情況及說明



第 1 區	# 17 ~ # 22	1. 法線平直，不影響靠船 2. 後線開裂，高低落差平均 15 公分
第 2 區	# 23 ~ # 24	1. 法線均勻外推 0 至 30 公分，不影響靠船 2. 後線高低落差平均 30 公分
第 3 區	# 25	1. 法線不規則外推，影響靠船 2. 後線高低落差平均 50 公分

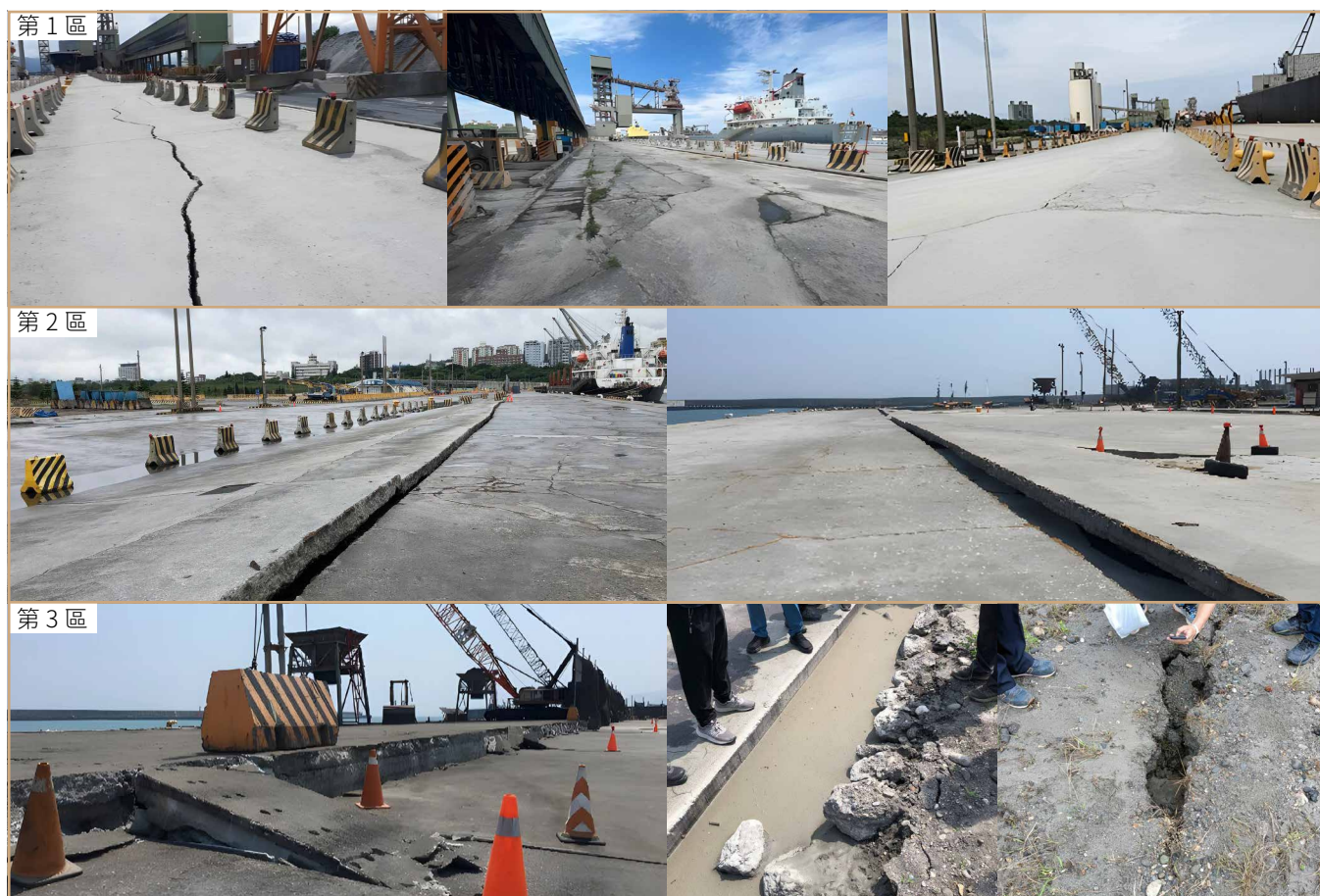


圖 1 各區損壞狀況

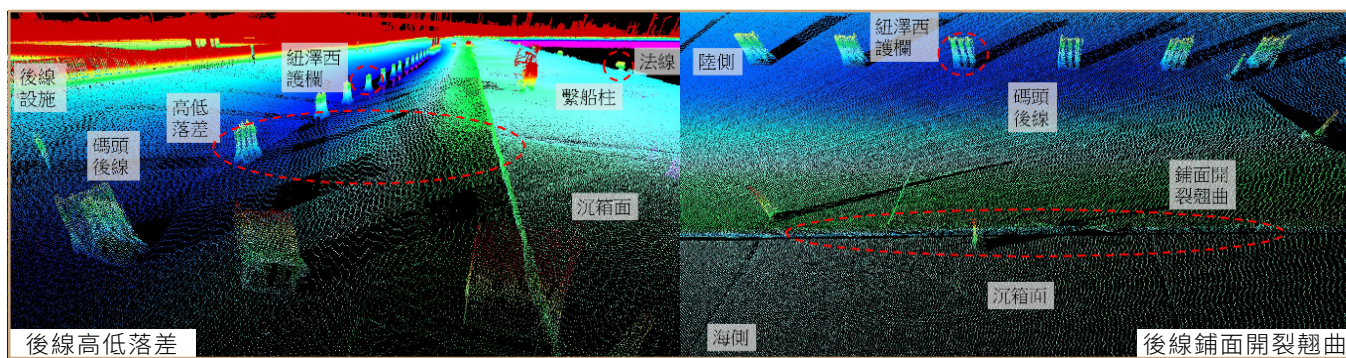


圖 2 陸上，地面光達



圖 3 水下，高密度水深測量。

資料來源：臺灣港務公司花蓮分公司提供



圖 4 碼頭後線管線調查

(二) 檢測初評

採《港灣構造物維護管理手冊》震後特別巡查進行檢測，並以國際航海學會 (PIANC) 之性能評估法 (詳表 2)，量化損壞等級，經評估沉箱壁體傾斜角及後線岸

肩傾斜角均屬等級 I (列舉 # 23 及 # 24 碼頭初評成果，詳表 3)，結構無安全之虞，可恢復船舶繫靠，屬可使用範圍。

表 2 重力式結構損害評估標準 (PIANC,2001)

損壞等級		等級 I	等級 II	等級 III	等級 IV
		可使用	可修復	瀕臨破壞	倒塌破壞
壁體	朝海側傾斜角	$< 3^{\circ}$	$3^{\circ} \sim 5^{\circ}$	$5^{\circ} \sim 8^{\circ}$	$> 8^{\circ}$
	不均勻沉陷量	$< 3 \sim 10\text{cm}$	-	-	-
岸肩	岸肩與後線沉陷量	$< 30 \sim 70\text{cm}$	-	-	-
	朝海側傾斜角	$< 2^{\circ} \sim 3^{\circ}$	-	-	-

表 3 碼頭性能等級評估彙整表

碼頭				
	沉箱壁體		岸肩水平	
	實測	等級 I 標準	實測	等級 I 標準
	# 23	$< 1^{\circ}$	約 0.5°	$< 2^{\circ} \sim 3^{\circ}$
# 24	$< 1^{\circ}$	$< 3^{\circ}$	約 1°	

(三) 鑽探調查

原有鑽探資料 (S-8 ~ S-10) 顯示，由地表至地表下 1.4 ~ 2.3m 為回填土夾卵礫石砂層 (N 值約 11 ~ 50)，1.4 ~ 10.0m 間為卵礫石夾砂土層 (N 值約 7 ~ 50)，詳圖 5 所示。由於既有鑽探孔位分散，且數量及深度不足，液化潛勢過往均認定為輕度，未能反應本次震陷狀況。

為建立港區完整地質特性資料庫，並降低震害影響，0403 地震後對外港區進行地質調查 (C01 ~ C06)，每座碼頭增加 2 至 3

孔鑽探，共 21 孔。鑽探深度主要分為兩類：較淺之鑽孔以調查回填層為主，確保表面層地質狀況，藉以奠定路基安全標準；較深之鑽孔以調查既有地層為主，並確認 20m 深度範圍內土壤狀態，藉以作為液化之合理性分析。

由震後所調查之鑽探成果所示 (圖 5)，鑽探深度 25.55m 範圍內的地層分布主要可區分成三大層次：

1. 地表面至地表下 0.6m 間，主要為混凝土面層。

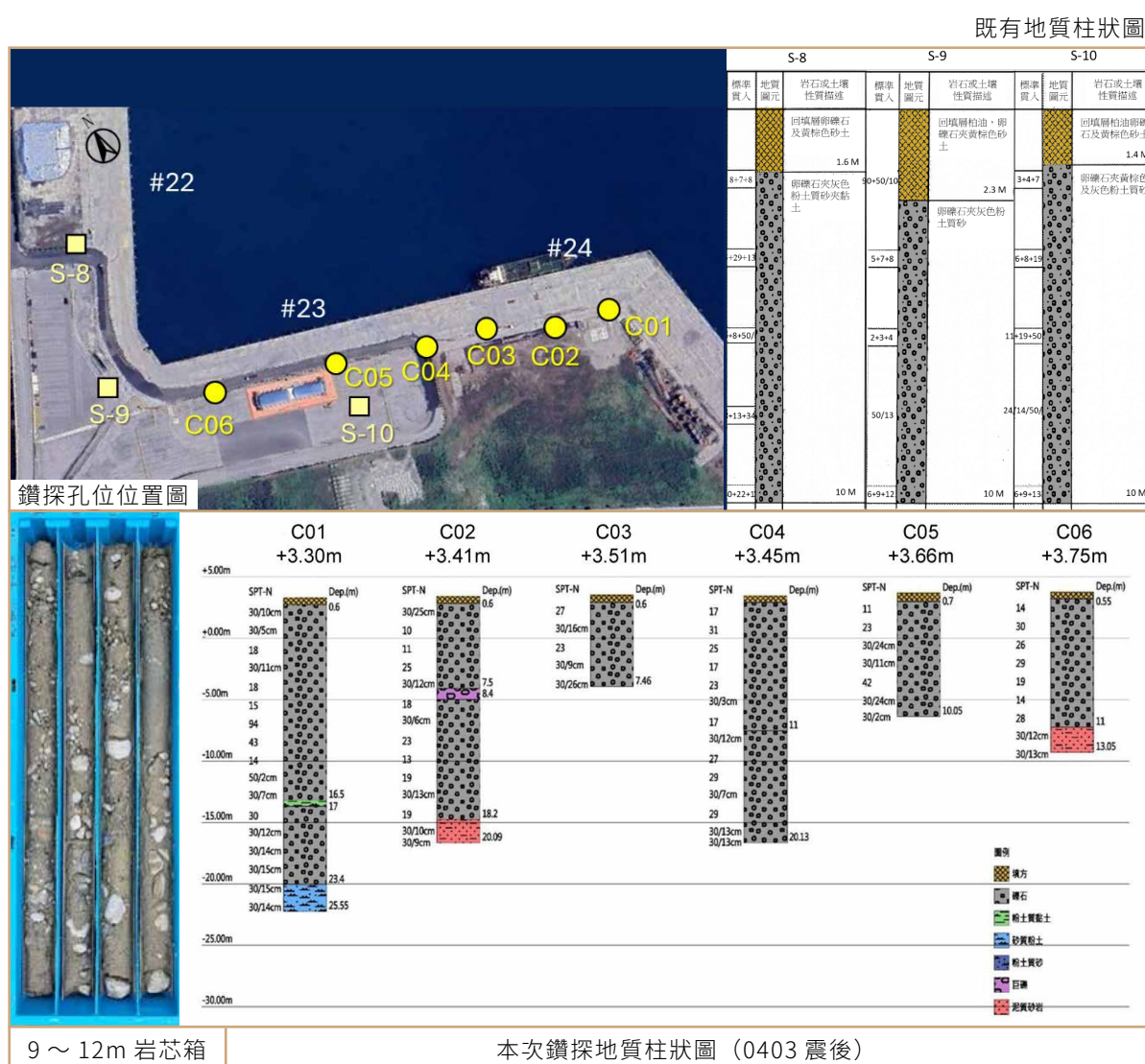


圖 5 鑽探孔位置及地質柱狀圖

資料來源：臺灣港務公司花蓮分公司提供

2.0.6m ~ 23.4m 間，為主要回填料，料源多來自木瓜溪，以砂礫石為主，礫石夾砂比例約 30 ~ 50%，由於膠結料含量高，將主控港區工程地質特性，N 值為 10 至大於 50。

3. 泥岩或頁岩，分別出現於地表下 11m、18.2m 及 23.4m，N 值 >50，屬堅硬岩層。

三、損壞原因分析

(一) 結構特性之影響

花蓮港地層以堅硬岩盤為主，具良好承載力，適用重力式結構。外港碼頭水深分別

為-12m（# 17、# 18）、-14m（# 19至# 24）及-16.5m（# 25）。其中，# 17、# 18碼頭為方塊，# 19至# 25碼頭為消波沉箱，依水深分採4艙及5艙沉箱，而消波方式又可分為消波方塊（# 19至# 24）及消波艙（# 25），詳如圖6所示。

沉箱結構具量體大且形狀方正特性，在常時作業以垂直載重為主，提供優良抗滑動及傾覆能力，但因沉箱質量大，故伴隨地震愈大，相應的慣性力也隨之加大，因此，震時滑動及傾覆係數將顯著低於常時。以本區沉箱大小及地質狀況分析，震時以沉箱滑動主控，滑動伴隨地震歷時長

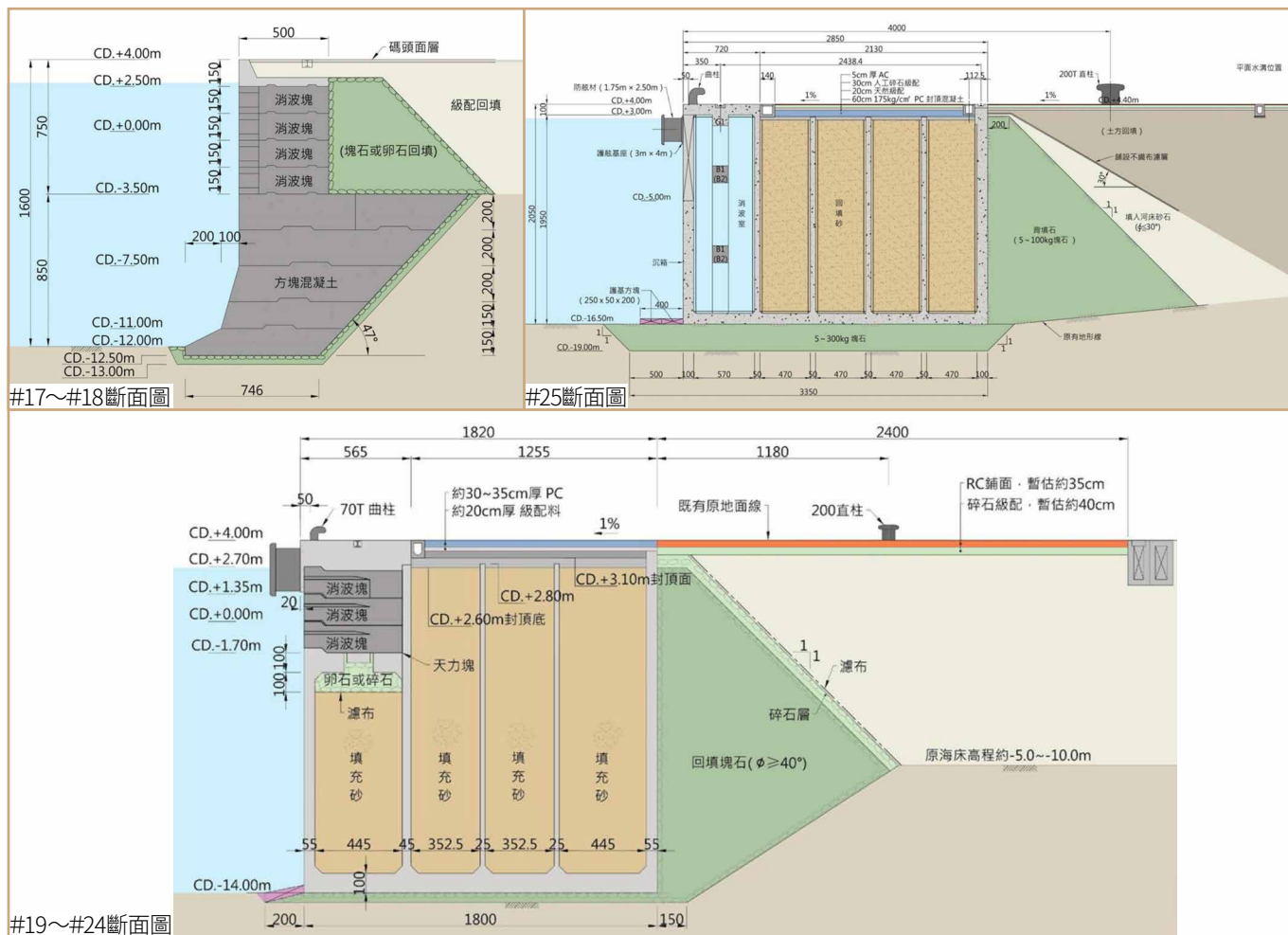


圖 6 外港區各碼頭斷面圖

短不同，產生的滑動量有所不同，由於沉箱與後線鋪面結構體不同，強震滑動時產生不同結構體間的開裂，但本身穩定性由現場調查顯示尚可。

(二) 地震規模及地震特性之影響

1. 近斷層效應

工址緊鄰米崙斷層，屬第一類活動斷層，為左移斷層兼具逆移分量，約呈南北走向，由七星潭海岸向南延伸至美崙山西南側，其位置與工址最近距離約 1.3km，測

量結果顯示地盤也相對抬升，加上近斷層效應放大 1.1 倍地震效應，產生沉箱水平滑動，加大水平裂縫及後線相對高差。

2. 地震好發頻率調查

統計花蓮港近 10 年內 5 級以上（0.25g，含改制後 5 弱及 5 強）歷史資料，超過 5 級以上共有 16 次，其中有 2 次更超過設計地震，即災損顯著之 2018 年 0206 地震及 2024 年 0403 地震具代表性（統計列舉最大 3 次地震詳表 4）。

表 4 近 10 年花蓮港歷史地震蒐集表

項次	地震時間	規模	震度	加速度 PGA	備註
1	2024/4/3	7.2	6 弱	0.458	0403 地震
2	2018/2/6	6.2	7	0.434	0206 地震
3	2021/7/14	5.4	5 弱	0.254	僅次於 0206

資料來源：中央氣象署，本計畫整理



3.0403 地震與 0206 地震比較

以最接近工址測站所測得之最大地表加速度比較兩次地震，0206 地震達 0.434g (PGA)，0403 地震則高達 0.458g (PGA)，如圖 7 所示。本次地震的加速度不僅大於

0206 地震，更超過目前部頒工址地表加速度峰值 0.44g。此外，地震延時長達 40 秒以上，推斷為造成本次碼頭災損、後線土壤液化及顯著震陷量之主因。

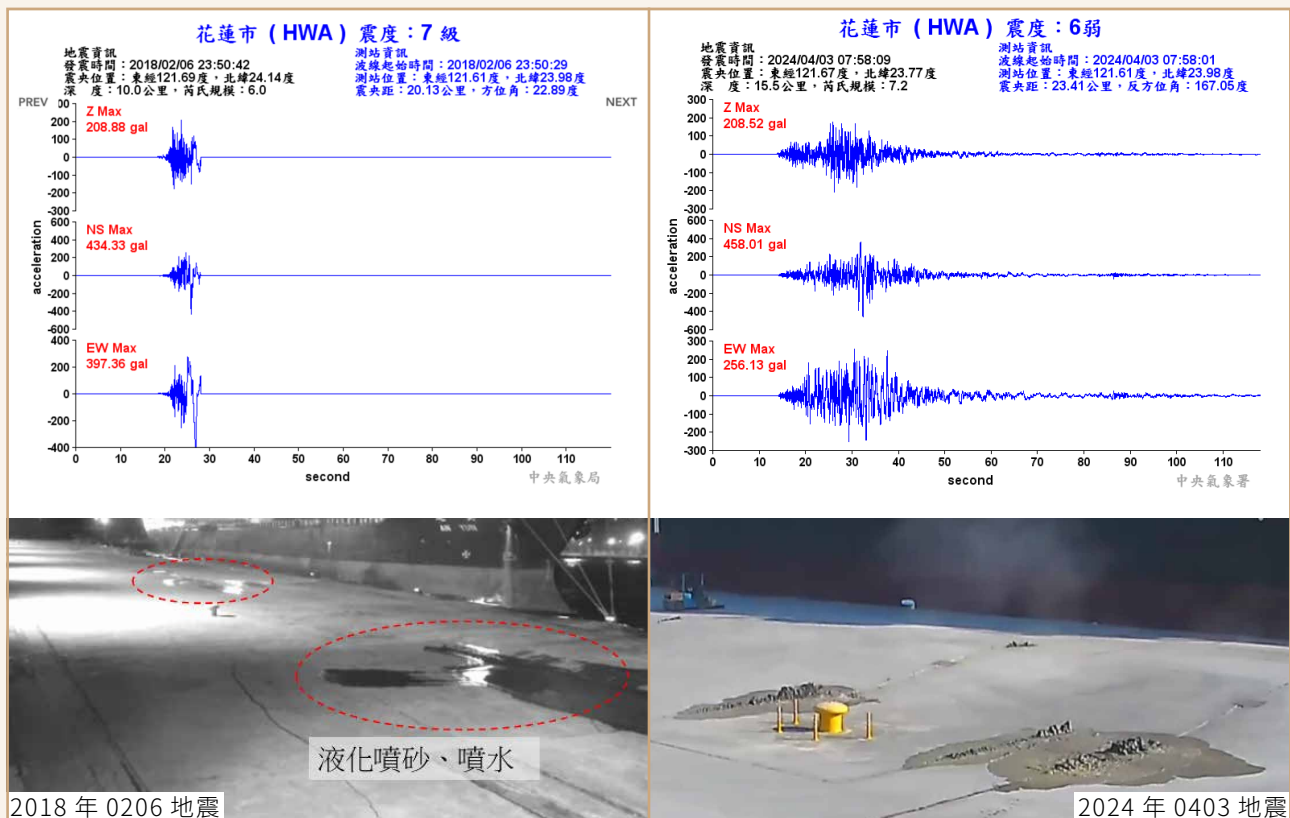


圖 7 0403 地震與 0206 地震歷時及液化紀錄

(三) 花蓮港建港歷程影響

外港區擴建工程 (1978 年至 1991 年底) 完工距今已超過 30 年，原設計地震採 0.4g，略低於最新部頒工址地表加速度 0.44g，且 # 17 至 # 22 碼頭以平行原海岸線陸域擴建，後隨 # 23 至 # 25 碼頭往外海延伸以

完成圍堤造地 (詳圖 8)，由歷史施工照片 (圖 9) 可看出伴隨地形水深加深，# 23 碼頭往 # 25 碼頭方向回填層厚度由淺變厚，推斷此為造成本次地震液化震陷往 # 25 碼頭方向愈為嚴重之主因。

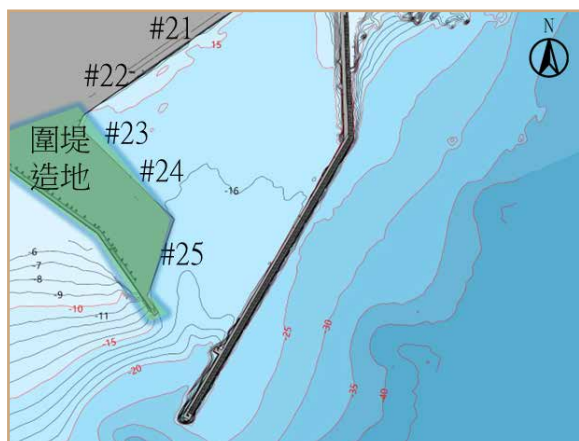


圖 8 花蓮港擴建與水深填地關係圖



圖 9 擴建工程歷史照片

資料來源：花蓮港務警察總隊網站

本次震害屬多重複合因素所致，主要原因包括外海圍堤興建碼頭、後線回填厚度不一且複雜，加上鄰近斷層，地表抬升，致使近斷層放大地表加速度，超出原設計地震標準。導致重力式沉箱結構產生不等之錯動，且後線填地孔隙水壓激發，造成混凝土鋪面翹曲下陷，甚至出現斷裂變形，失去表層保護。

後續颱風越浪更加速鋪面路基保護流失，加大下陷量。惟主體結構為重力式構造，伴隨強震產生之滑動不致喪失穩定性，初步評估可採修復方式快速恢復碼頭運作。

參、整建修復構想

外港區碼頭共 9 座，為盡速恢復港區營運，搭配使用功能、使用率及使用風險性，採不同方式修復及補強。其中，# 23 碼頭為客運兼散雜貨碼頭，# 24 碼頭主要為散雜貨碼頭，兩者為使用頻率最高之深水碼頭，並具損壞代表性，係以這兩座碼頭為例，進行安全性詳細評估及修復補強構想，詳如後所述。

一、安全性詳評

(一) 作業安全性

23 及 # 24 碼頭屬特種貨物（大理石等石材）指定碼頭裝卸作業區，石材最大可達 60 公噸，面載達 12T/m^2 ，且重載車及吊車使用頻繁，須保持碼頭及後線面層坡度平整。本次地震造成後線下陷，原有路基顯有掏空，且表層浮泥，降低路基壓密度，需重新整理夯實路基以維護作業安全。

(二) 液化潛勢分析

採美國國家地震工程研究中心（NCEER）修正 Seed 等人所提出的簡易經驗法（2001）進行本案評估。於設計地震（ $A=0.44g$ ）下，抗液化安全係數隨深度變化，分析結果顯示在 20m 深度範圍內，大部分土層會液化，碼頭後線液化現象詳如圖 10 所示。另依 Iwasaki 等人（1982）提出以液化潛能指數 P_L 評估土壤液化嚴重程度，如表 5，在設計地震與 0403 地震下，# 23 及 # 24 碼頭屬於嚴重液化潛勢。



圖 10 # 24 碼頭後線液化現象

推測因碼頭後線地層以回填木瓜溪砂礫石料為主，由鑽探岩心箱可見土壤膠結料含量高，形成礫石夾砂土或粉土質砂之地層，造成較高的液化潛勢。另加上早期回填料源之複雜性，可能是造成同個深度下，各孔液化安全係數較無一致性之原因。

依紀雲曜（1997）方法對液化發生後的地表下陷量進行預測評估，分析震陷量結果如表 5 所示。在設計地震及 0403 地震下，# 24 碼頭相較 # 23 碼頭液化震陷量大。比對 2020 年及 2024 年實際測量結果，# 24 碼頭後線約沉陷 30 公分，# 23 碼頭後線約沉陷 20 公分，經驗式計算成果與實際測量結果兩者趨勢相同。

表 5 液化潛能與震陷量

碼頭	孔號	設計地震			0403 地震		
		Amax=0.44g			Amax=0.458g		
		液化潛能指數 P_L	損害程度	震陷量 (cm)	液化潛能指數 P_L	損害程度	震陷量 (cm)
# 24	C01	18.03	嚴重	15.02	20.21	嚴重	15.72
	C02	28.23	嚴重	28.85	30.78	嚴重	29.54
	C03	1.78	輕微	0.69	2.91	輕微	0.74
# 23	C04	24.51	嚴重	15.62	27.59	嚴重	16.70
	C05	9.24	中度	2.41	9.72	中度	2.51
	C06	19.09	嚴重	9.58	21.11	嚴重	9.95

註：C03、C05、C06 鑽探深度未達 20m

(三) 整體穩定性分析

1. 滑動及傾倒穩定性

沉箱於常時無滑動之虞，惟不滿足現行規範設計地震要求，而 0403 地震又較現行規範大，顯示沉箱有產生滑動現象，但傾覆均能通過規範要求（詳表 6）。

2. 承載力

考慮常時、地震之情境，底部土壤依鑽探成果保守採 SPT-N 值為 19，顯示各情境下均安全無虞，檢核成果如表 6 所示。

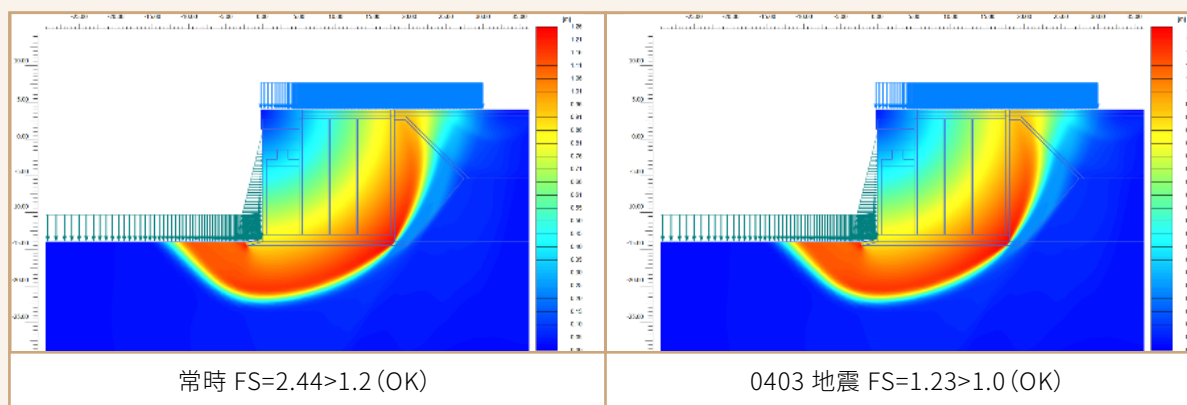
表 6 穩定性檢核表

情境	反力 (t/m^2)	滑動檢核	傾倒檢核	承载力檢核
常時	32.2	$5.42 > 1.2$ (OK)	$2.31 > 1.2$ (OK)	容許承载力 $141.3 \text{ t/m}^2 > \text{反力}$ (OK)
設計地震	61.2	$0.94 < 1.0$ (NG)	$1.39 > 1.1$ (OK)	
0403 地震	63.4	$0.91 < 1.0$ (NG)	$1.37 > 1.1$ (OK)	

3. 圓弧滑動

依 PLAXIS 計算圓弧滑動穩定性，結果顯示在常時及地震之安全係數皆符合法規，圓弧滑動分析結果如表 7 所示。

表 7 圓弧滑動分析



(四) 局部構件穩定性分析

調查顯示，# 23 與 # 24 碼頭沉箱第一艙頂部以 3 層消波方塊堆疊，消波方塊局部有外推情形。經檢核分析，消波方塊於震後皆有可能產生滑動，且愈下層之方塊會

因動水壓力增加，而增加滑動風險。除因單次大地震所產生之滑動情形，亦有可能因海上吊裝方塊過程產生誤差，並經年累月船舶停靠撞擊與各大、小規模地震作用下而持續累積滑動，須強化其抗滑能力，如圖 11 所示。

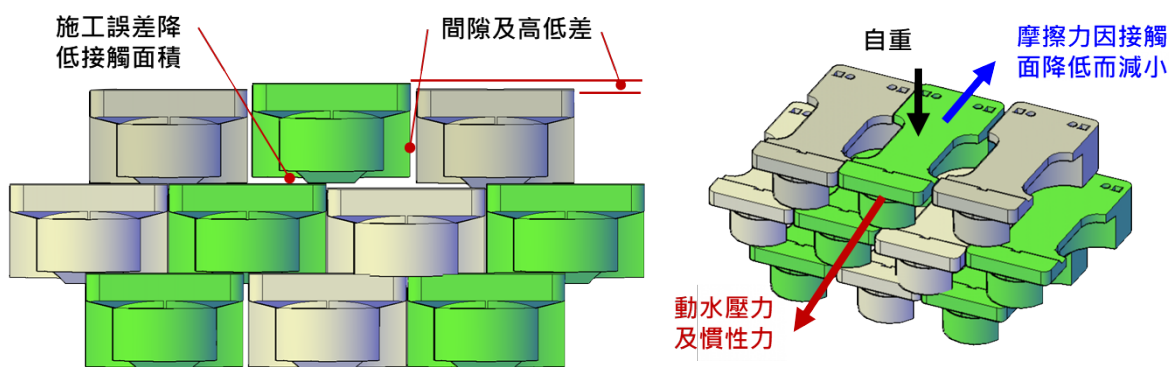


圖 11 消波方塊滑動行為示意圖

(五) 結構強度檢核

採用本次地震進行強度檢核，沉箱頂面載重將經由外牆、內隔牆傳遞至底版，致版底拋石反力使底版形成彎矩。因此，首先確認沉箱版底結構強度，再檢核當側牆因

地震下外力增加，外牆下方區域因外力增加所造成之彎矩增量，而隔牆主要為軸壓力增加，結構分析顯示，底版、隔牆及外牆均未超過既有鋼筋量，仍屬安全，詳如圖 12 所示。

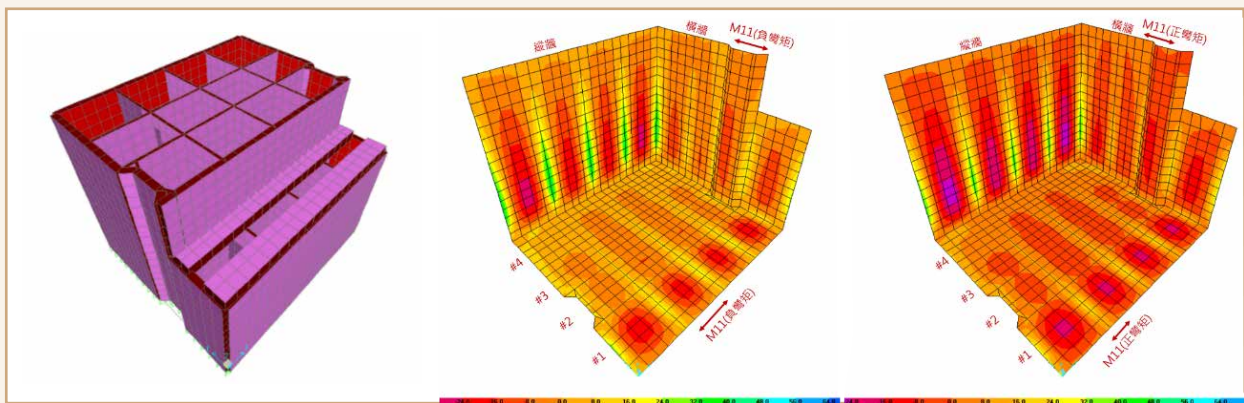


圖 12 結構三維分析結果

(六) 危害度分析

結構物在特定使用年限內的地震遭遇機率，可透過「地震危害度分析」進行量化評估。從分析中可推算特定地表加速度的回歸期及使用年限內的遭遇機率，據以作為風險評估與管理之基礎。

以沉箱滑動安全係數 1.0 為標準，對應之 PGA 為 0.413g，再根據港區地震危害度曲線（圖 13）對應年超越機率，回歸期為 105 年，以 $PE=1-e^{-APE \times L}$ （其中 PE= 遭遇機率、APE= 年超越機率、L= 使用年限），推算其 50 年使用年限內遭遇機率約為 37.8%。意即每 105 年可能發生一次引致沉箱滑動之地震；或 50 年使用期內，近四成機率會遭遇該等級地震。

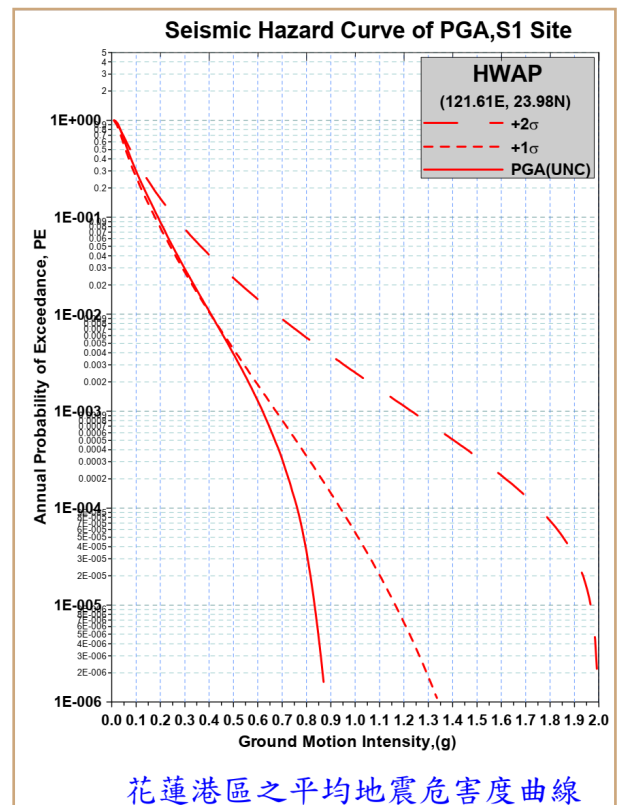


圖 13 花蓮港區地震危害度曲線

資料來源：港灣地區地震潛勢及港灣構造物耐震能力評估之研究 (2/4)，2009 年

液化及震陷為本次碼頭後線災損因素之一，為掌握其再現風險，由歷年統計地震表及歷史災損資料調查，花蓮港建港至今僅 0206 及 0403 地震產生震陷，除這兩次地震外，所受最大地表加速度為 0.254g，

對應年超越機率約為 0.039，其回歸期約 26 年 ($=1/0.039$)，代表未進行地改情況下，遇 26 年發生 1 次之地震應無明顯液化之災損，上述說明整理詳如表 8 所示。

表 8 PGA 與超越機率彙整表

情境	地震加速度 PGA (g)	年超越機率 APE	回歸期 T (year)	使用年限 L (year)	遭遇機率
沉箱滑動	0.413	0.0095	105	50	37.8%
0206 外的最大地震	0.254	0.039	26	50	85.8%

後續設計策略，除配合業主營運調度等需求外，亦可適度對土壤液化問題進行改善，並訂定監測管理系統藉以控制風險；沉箱產生滑動之遭遇機率相對較低，因此沉箱抗滑提升則可納入遠程之強化補強構想。

藉由詳細的耐震評估，# 23 及 # 24 碼頭雖有滑動，但重力式構造伴隨地震尖峰地表加速度後停止滑動，整體穩定性及結構體強度恢復原有狀況，無安全之虞。惟沉箱第一艙上方消波方塊屬各別獨立結構，地震及長期靠泊碰撞均有逐漸滑移現象，可能影響靠泊及岸上作業安全。後線鋪面則因路基軟化，恐影響特種石材吊裝作業安全。

囿於外港區 9 座碼頭受損修復排程緊湊，經由地震危害度分析，排定中程及遠期整建計畫。中程以控制地震風險，恢復原有碼頭功能為要，修復及局部強化為目標。遠期則依港區整體規劃需求，綜合考量強化 1 座碼頭作為維生碼頭。

二、修復補強構想

(一) 中程目標，維持碼頭使用功能

以修復補強方式，確保後線路基穩固及前緣消波方塊穩定性。工程項目分 (1) 後線鋪面、直柱拉高，排水改善；(2) 串接消波方塊以提升穩定性。另為能去化本次港區震害所產生之營建混凝土棄方，利用淺層置換方式局部強化路基，降低液化潛勢。

(二) 配合營運調度，最短時間恢復運作

為達 2025 年 6 月全面恢復外港區碼頭正常運作目標，施工期間須配合船舶調度保持部分碼頭維持運作。由於 # 23 及 # 24 碼頭位處港區重要出入動線，為長期計畫改建為維生碼頭首選。惟 # 23 碼頭需配合郵輪旅遊季如期啟用目標，須優先且盡可能縮短工期施作，因此以 # 24 碼頭作為維生碼頭首選，本次除進行修復外，另行局部強化該碼頭，以提高未來強震時，碼頭能以最短時間恢復運作。

(三) 確認路基穩固，善用震損破碎料

原有鋪面的翹曲與破裂，採全面清除並重新整理路基，以確保基礎穩固。最易發生液化的地表下約 4m，以回收破碎料置換，用於強化 # 24 碼頭。善用破碎料，可達淨零碳排目標，並降低液化潛勢及液化震陷量，詳如表 9 所示。

(四) 串聯消波方塊，避免重新排放

避免將碼頭冠牆打除，吊移既有方塊，重新製作新的消波方塊吊排，增加臨海作業風險，可以旋鑽洗孔，固定樁串接，及水泥砂漿包覆型鋼樁施作（如圖 14）。

表 9 # 24 碼頭液化潛勢分析表

碼頭	孔號	設計地震 (Amax=0.44g)					
		震後			施工後		
		液化潛能指數 P_L	損害程度	震陷量 (cm)	液化潛能指數 P_L	損害程度	震陷量 (cm)
# 24	C01	18.03	嚴重	15.02	13.47	中度	13.48
	C02	28.23	嚴重	28.85	13.20	中度	21.18
	C03	1.78	輕微	0.69	0.00	無	0.00

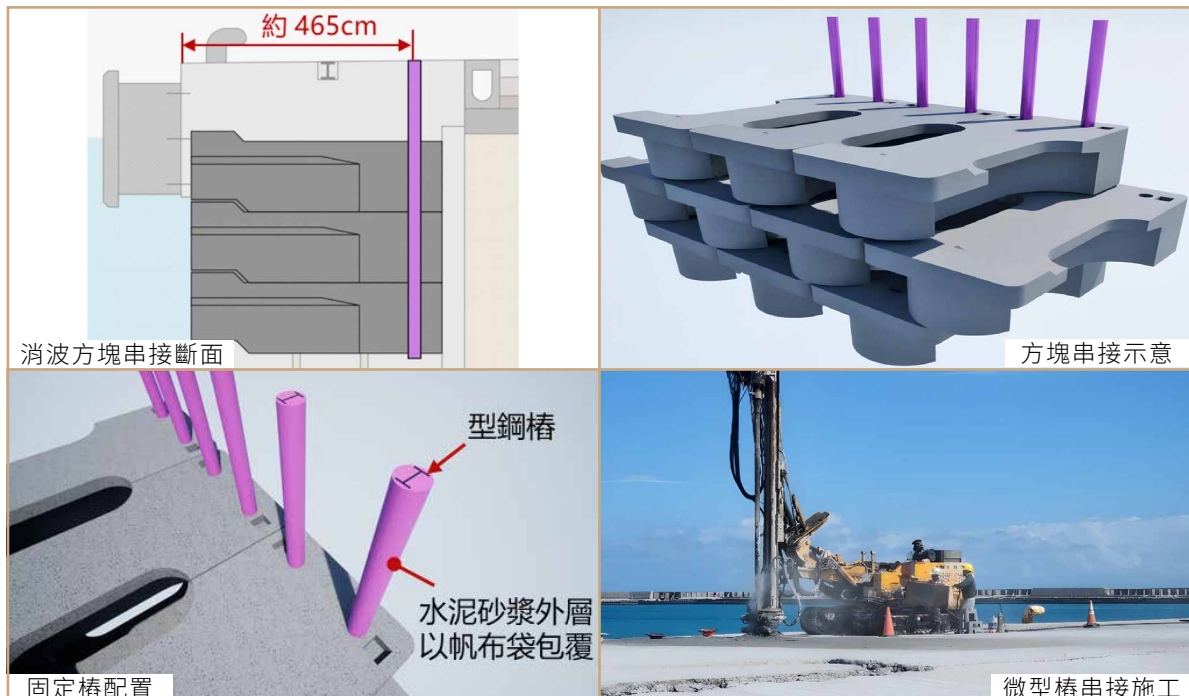


圖 14 方塊串接示意及施工

(五) 配合作業需求，選擇鋪面重建

主要重建範圍配合路基整理範圍，為沉箱後方 24m 範圍，鋪面考量其中石材作業範圍 11.8m，需具備高耐磨性、耐重載及平整度，採混凝土剛性鋪面，剛性鋪面以 5m 為原則設計伸縮縫，而其他 12.2m 則保留作為後線車行通道，以 AC 鋪面重建，以利後續管線維護。

本次 # 23 碼頭修復標的為維持碼頭使用功能，# 24 碼頭則局部提升抗震能力，於後線淺層置換改良（既有混凝土破碎再利用），可改善鋪面液化震陷量及液化潛能，並提高地面承载力供大理石裝卸作業使用，相關斷面詳如圖 15 所示。

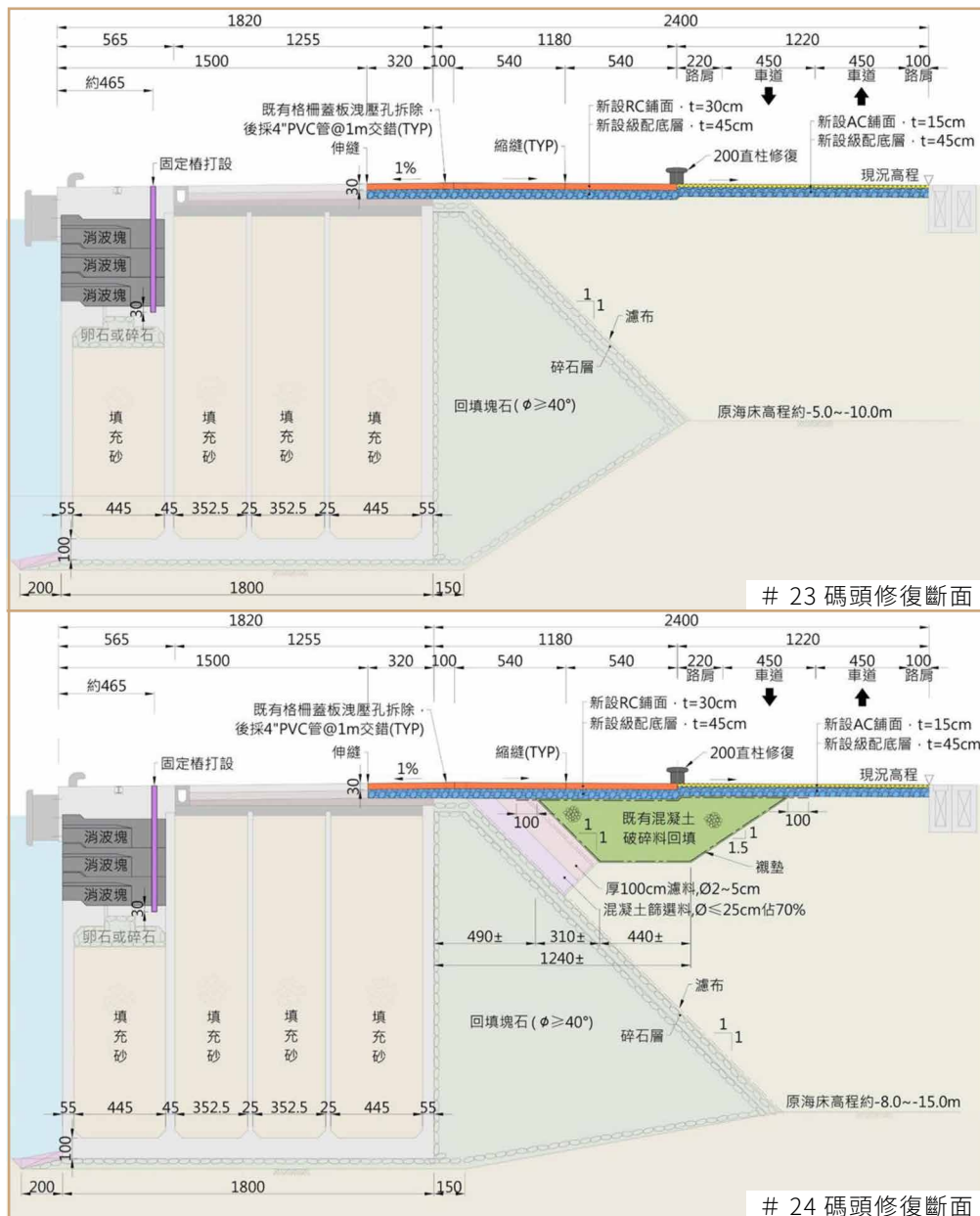


圖 15 碼頭修復斷面圖

三、長期強化維生計畫

長期目標係以 # 24 碼頭作為花蓮港維生碼頭，強化其耐震能力，提升現有碼頭抗滑動能力，並確保後線不液化，以達強震過後維持港區交通運補功能。所選用工法及型式，考量後線鋪面緊鄰中油油管，採低振動工法因應。

沉箱抗滑能力提升可（1）遠離油管，於海側打設鋼管板樁；（2）陸側後線以植入鋼管避免影響油管，並以背拉桿件連結沉箱；（3）沉箱背填開挖減壓降低側向土壓力，並新設棧橋提供碼頭作業承載詳如圖 16 所示。

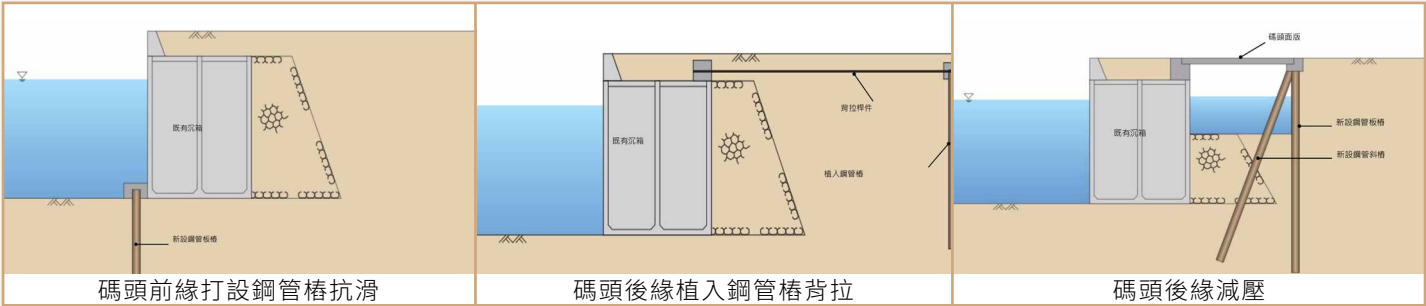


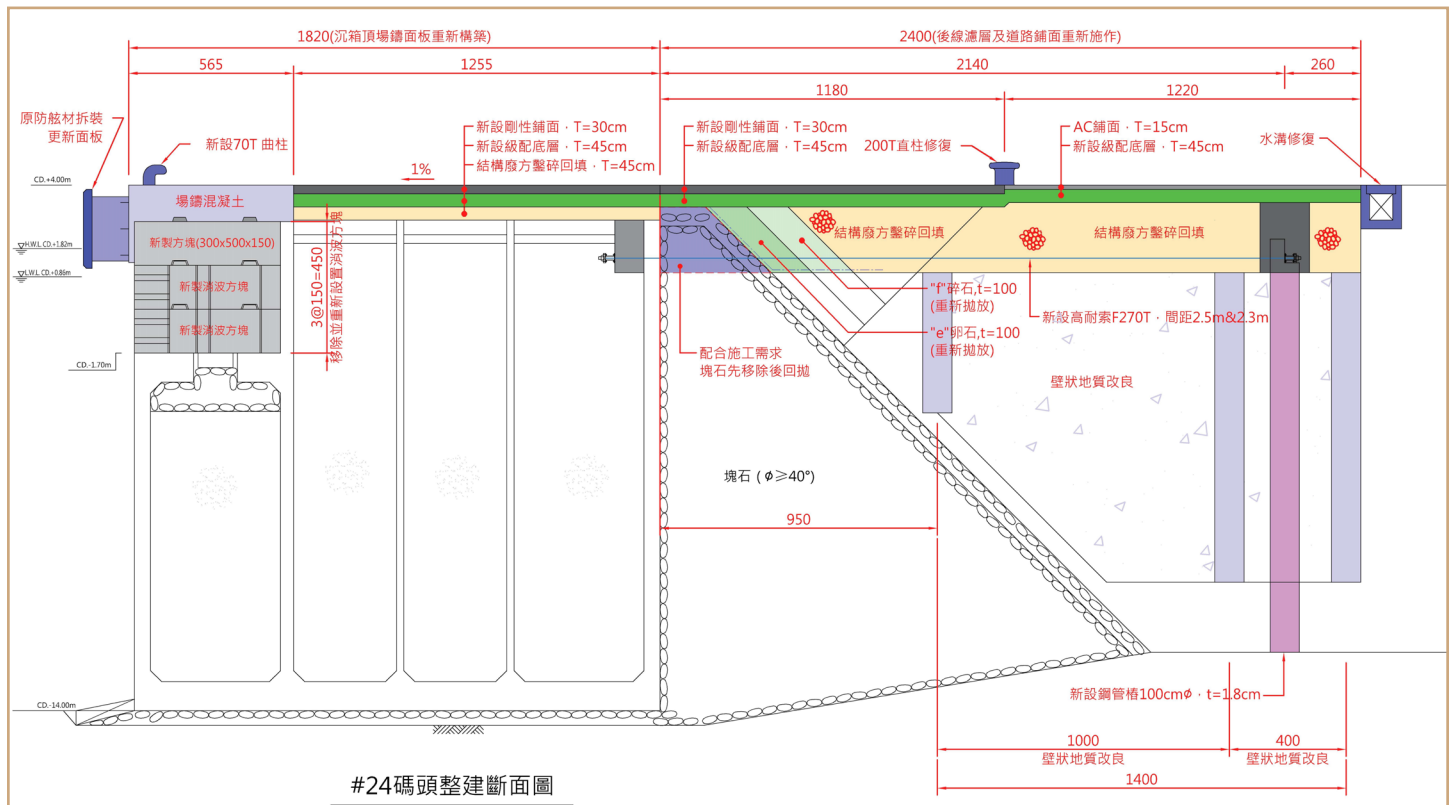
圖 16 提升沉箱抗滑方式概念圖

後線液化地質改良，若採港區常用之擠壓砂樁，恐因振動而影響管線安全，並需協調管遷或清管暫停使用，故可採（1）高壓噴射樁施作；（2）壁狀地質改良，然高壓

噴射樁費用較高，或可採壁狀地質改良解決（詳表 10）。整體強化碼頭整建概念如圖 17。

表 10 地質改良工法比較表

工法	擠壓砂樁	高壓噴射樁	壁式地質改良
費用	中	高	低
工期	最慢	次快	最快
適用性	震動大， 影響中油管線	灌漿壓力大， 影響中油管線	震動小 適用深度：16m 礫石層施工機具磨耗率高
評比	3	2	1



四、訂定監測計畫

因地震仍有碼頭滑移風險，建議於沉箱面設置地表沉陷觀測點及傾斜儀（各 8 處），作為沉陷觀測及傾斜變位用，管理標準值依據「港湾構造物の維持・補修マニュアル」，沉陷觀測點警戒值 25 公分、行動值 30 公分；傾斜量警戒值 4°、行動值 5°，其配置示意詳如圖 18 所示。

此外，鑒於液化為本次碼頭損壞主要因素之一，港務分公司偕同經濟部地質調查及礦業管理中心，於 # 23 至 # 25 碼頭後方

建置土壤液化監測站（詳圖 19），並導入自動化監測系統。主要監測設備包括：地表加速度計、動態水壓計及地表沉陷計，可分別量測震時地表加速度、偵測孔隙水壓動態變化，及地下 20m 內液化後之地層沉陷量。地震發生時，可即時回傳數據進行雲端運算分析，快速計算各深度土層之液化安全係數，評估液化可能性，並於第一時間啟動巡查作業，有效達成震後快速評估與應變之目的。

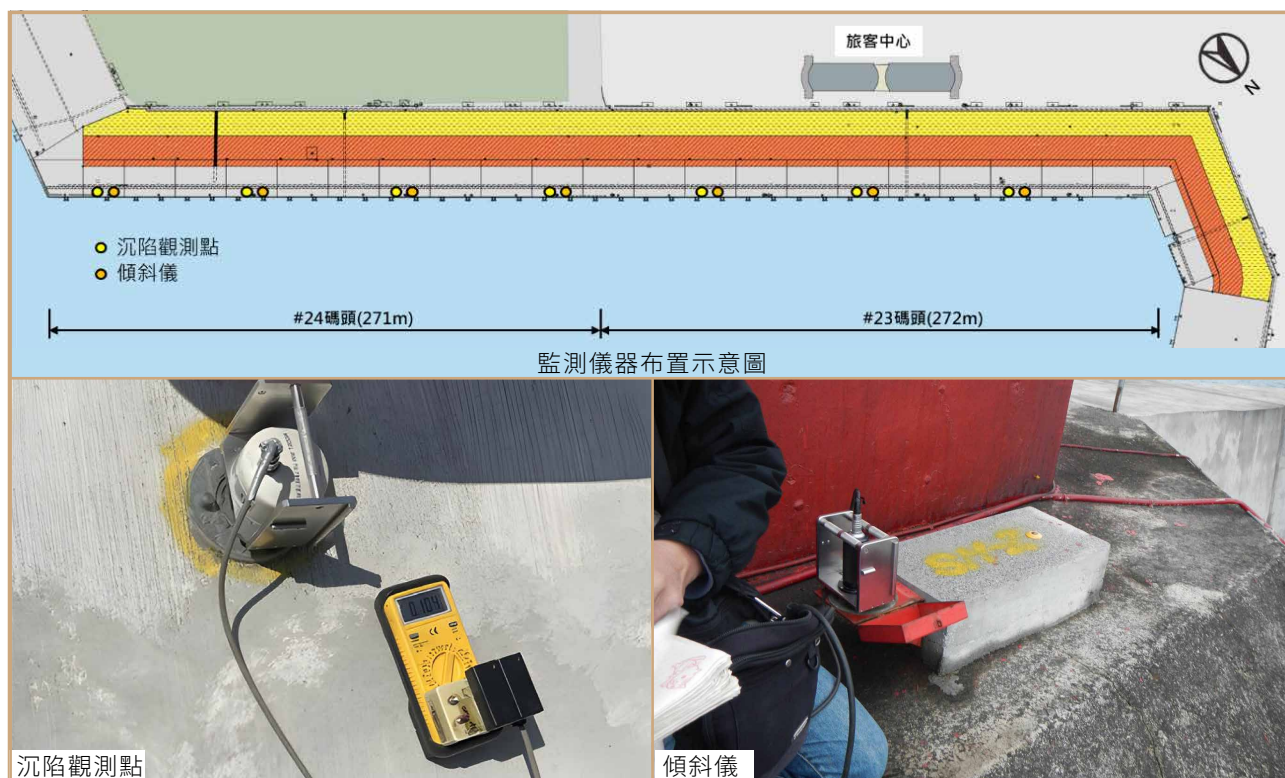


圖 18 監測儀器佈置及現場照片

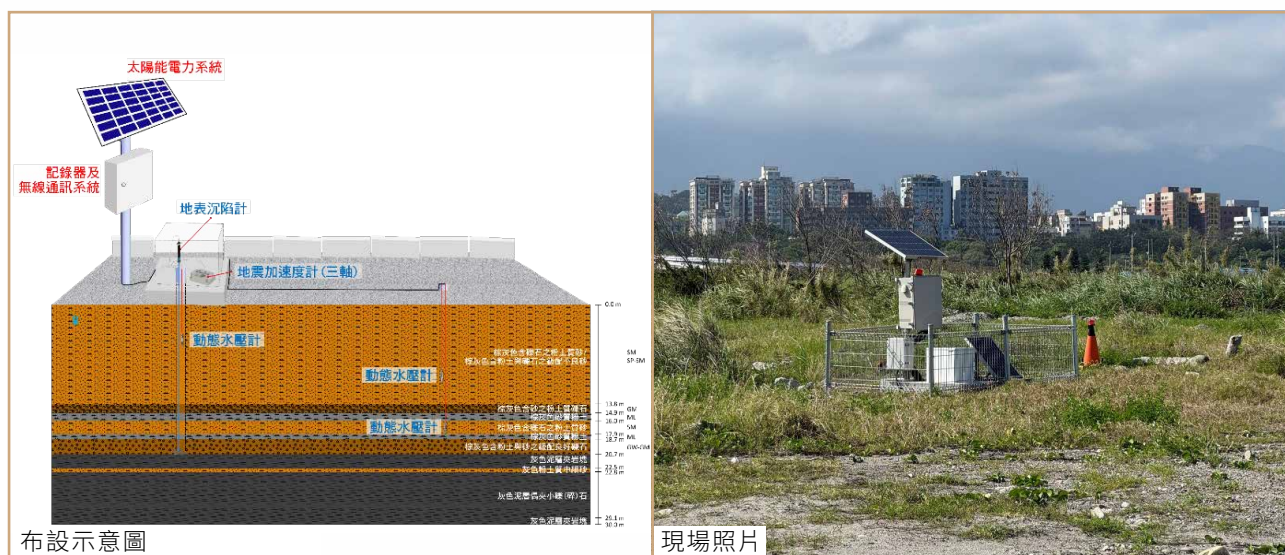


圖 19 花蓮港土壤液化監測站

肆、結語

0403 強震對外港區所造成之災損，主因包括鄰近斷層、地震加速度超越設計值、土壤液化及波浪淘刷等複合因素所致。雖沉箱本身未傾覆，惟震時滑動風險已逼近規範臨界值，消波方塊亦有滑動趨勢，後線部分區域則有液化潛勢。

採用光達及高密度水深測量等方式與現場詳細調查比對，可安全、有效且快速提供搶修及修復所需判斷。花蓮港是國內唯一歷經兩次強震，填海造地產生大規模震陷區域，本次重新鑽探取樣，建立港區地質資料庫，有利後續追蹤區域地質特性。

本案修復策略係為「中程目標：恢復碼頭使用功能及局部耐震強化」。考量 # 24 碼頭為重要出入動線，長期計畫將其改建為維生碼頭，於該區先進行淺層置換改善，以局部提升其抗震能力，並可達到去化港區整修所產生之破碎料源，達淨零碳排放目標。

未來 # 24 作為花蓮港維生碼頭，以「耐震強化」為目標，採取背拉桿件與地質改良結

合強化沉箱抗滑能力，並設置監測系統，長期掌握碼頭與後線沉陷或傾斜等變化，藉此全面提升碼頭耐震能力與災後維生營運韌性，作為花蓮港防震抗災及永續營運之重要基礎。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「花蓮港 # 22A ～ # 24 碼頭結構安全性評估報告書」（2025）。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「碼頭承載能力提升評估報告書」（2023）。
3. 謝明志、林雅雯、陳正興、黃富國、徐松圻、邱俊翔、鄭魁香、葉錦勳、簡文郁、柯永彥、許尚逸、楊鶴雄、張毓文，「港灣地區地震潛勢及港灣構造物耐震能力評估之研究（2 / 4）」，交通部運輸研究所（2009）。
4. 財団法人 沿岸開発技術研究センター，「港湾構造物の維持・補修マニュアル」（平成 11 年 6 月）。





台 11 線花蓮大橋 2018 震後斷層變位災損與改建

關鍵詞 Keywords

花蓮地震 Hualien Earthquake

橋梁 Bridge

活動斷層 Active Fault

台灣世曦工程顧問股份有限公司

代理副總經理

蔣啟恆

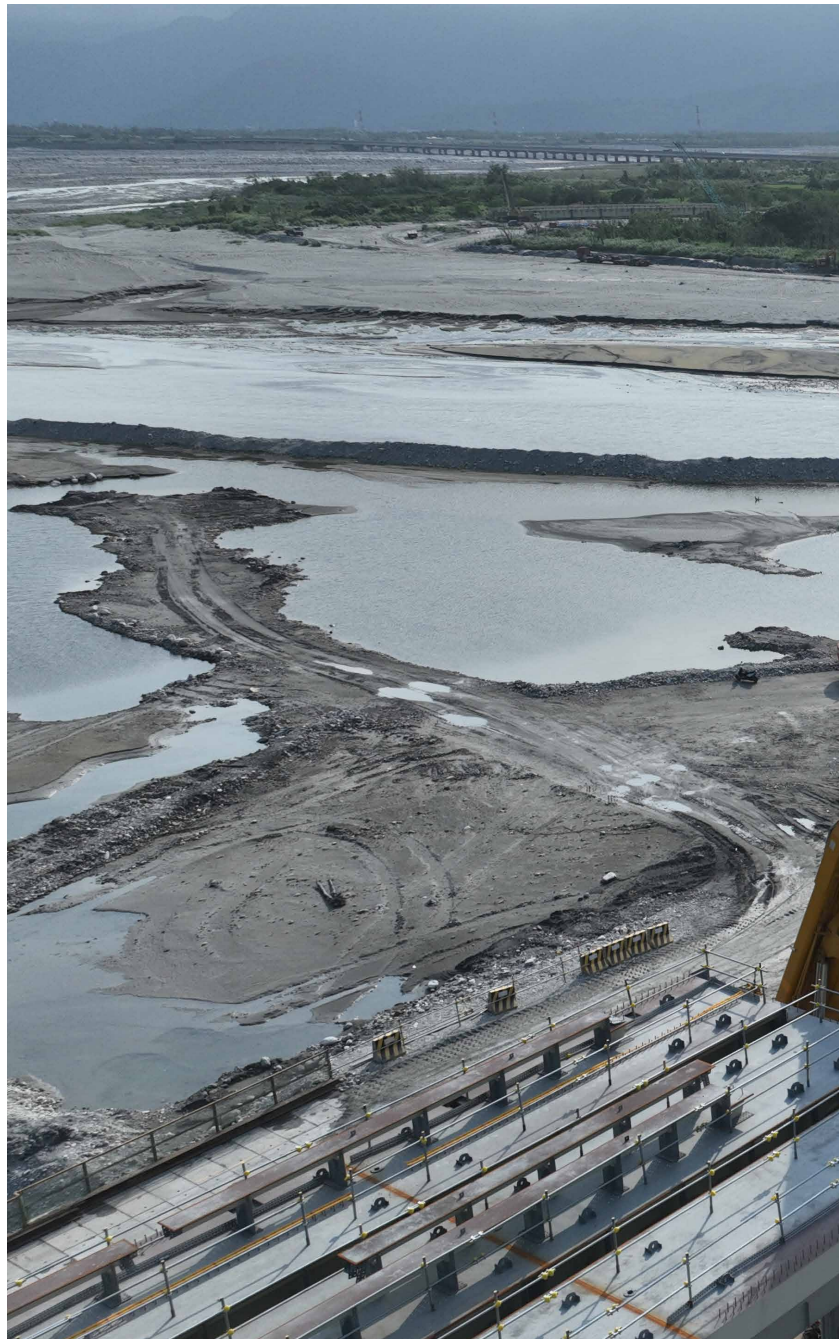
第二結構部

經理

劉珊

正工程師

羅博智



2018 年 2 月 6 日，花蓮外海發生芮氏規模 6.2 強震，導致花蓮大橋一代橋及二代橋部分受損，除止震塊破裂、伸縮縫損壞及欄杆等附屬設施損壞以外，橋梁的部分橋跨出現水平錯動位移約 60cm，故辦理全橋改建。花蓮大橋改建工程設計階段為掌握跨越活動斷層之近斷層效應影響，特別委託國家地震工程研究中心進行斷層錯動量評估研究，並依據研究成果進行橋型方案研擬、耐震設計與安全評估。本文主要介紹跨斷層橋梁因斷層錯動後花蓮大橋震損情形，及改建設計時考量橋梁跨越斷層之耐震性能確保。



壹、花蓮大橋簡介及震損

台 11 線海岸公路全長約 178km，於花蓮縣吉安鄉及壽豐鄉路段，以花蓮大橋跨越花蓮溪，為前往花東濱海地區重要橋梁（圖 1），橋址位於花東縱谷平原區花蓮溪出海口的沖積扇上，東側臨近海岸山脈處隨即轉換為丘陵地形；根據經濟部地質調查及礦業管理中心（以下稱地礦中心）之臺灣活動斷層資訊網資料顯示，嶺頂斷層（第一類活動斷層）通過工址下方，其為平移兼具逆衝斷層。

因 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分，於花蓮外海發生芮氏規模 6.2 強震，造成花蓮大橋橋損，故地礦中心於 2019 年 12 月 30 日公告「活動斷層地質敏感區（F0020 嶺頂斷層）」（如圖 2），經套繪計畫範圍，新橋墩 P10 ~ P13 落於敏感區範圍內。

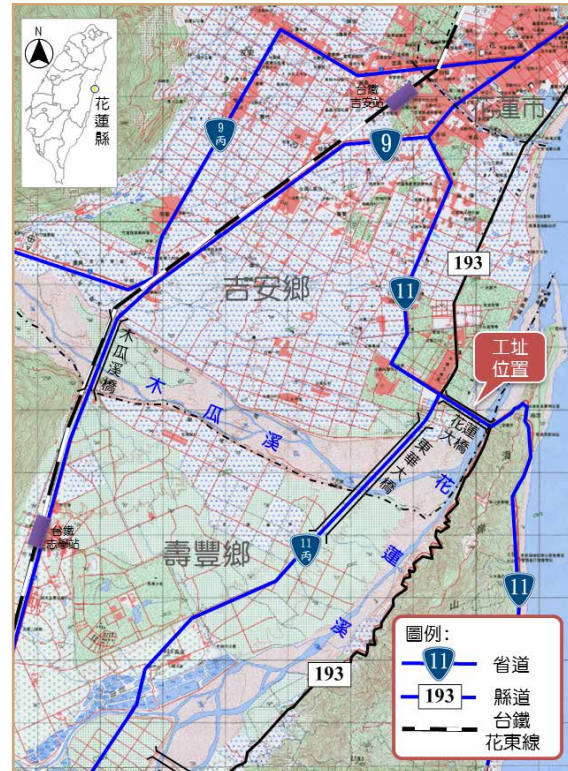


圖 1 工程位置圖

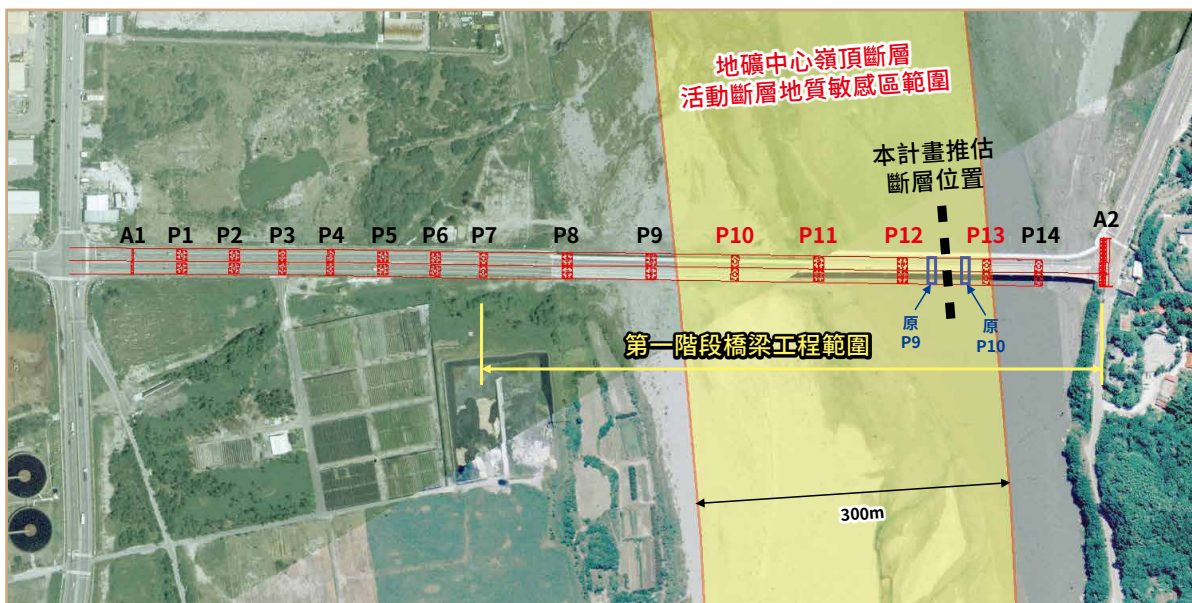


圖 2 嶺頂斷層地質敏感區範圍

一、花蓮大橋簡介

(一) 橋梁背景回顧

1. 第一代橋

橋寬約 8.1 ~ 11.45m，橋跨配置 13@40m，橋長總計 520 m，1968 年完成。

2. 第二代拓寬橋

於第一代原始橋下游側新建橋梁，橋寬 10.7 ~ 20.06 m，橋跨配置 12@40m + 25m + 15m，橋長總計 520m，2002 年完成。

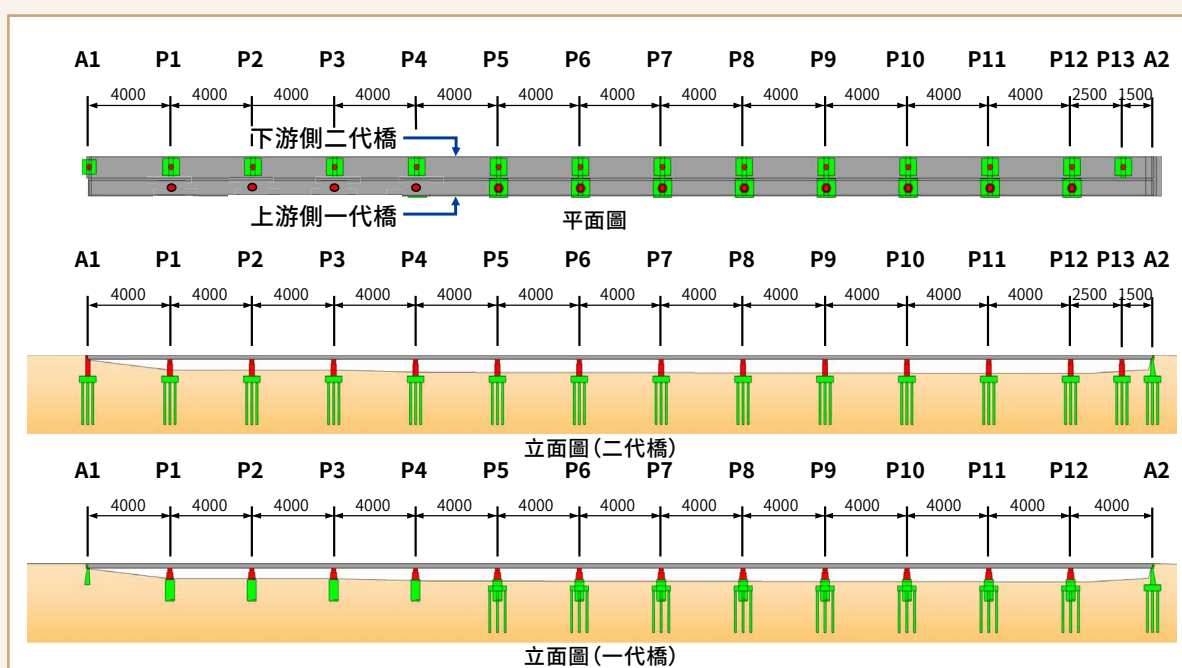


圖 3 花蓮大橋一代、二代橋平立面

(二) 橋梁結構型式

1. 第一代原始橋

上部結構為 3 支預力 I 型梁（梁深約 1.85m）；下部結構為單柱圓形橋墩（直徑 3.0 ~ 3.5m），柱高約 5.70m，基礎為直徑 4.5m 圓形沉箱。

2. 第二代拓寬橋

A1 ~ P12 上部結構為 6 支預力 I 型梁（梁

深 1.85m）間距 1.74m，P12 ~ P13 上部結構為 5 支預力 I 型梁（梁深 1.50m）間距 1.92 ~ 2.60m，P13 ~ A2 上部結構為 8 支混凝土 T 型梁（梁深 1.05m）間距 1.60 ~ 2.50m；下部結構 P1 ~ P12 為單柱圓形橋墩（直徑 2.6m），柱高約 8.0m，基礎為 8.2x8.2m 樁基礎（樁徑 1m、樁長 20m），P13 為單柱圓形橋墩（直徑 2.2m），基礎為 6.2x8.2m 樁基礎（樁徑 1m、樁長 20m）。

(三) 橋梁補強

2013 年已針對第一代及第二代橋之下部結構進行耐震能力補強，補強示意圖如圖 4，主要補強工項如下：

1. 第一代橋

止震塊補強、墩柱植筋補強及鋼板圍束包

覆，另 P5 ~ P12 沉箱基礎頂下方約 3m 處擴展為 9x9m 樁基礎（樁徑 1m、樁長 20m）。

2. 第二代橋

墩柱植筋補強及防撞鋼板包覆，基礎分別向兩側擴 60cm，除 P13 加厚 70cm 外，餘皆加厚 80cm。

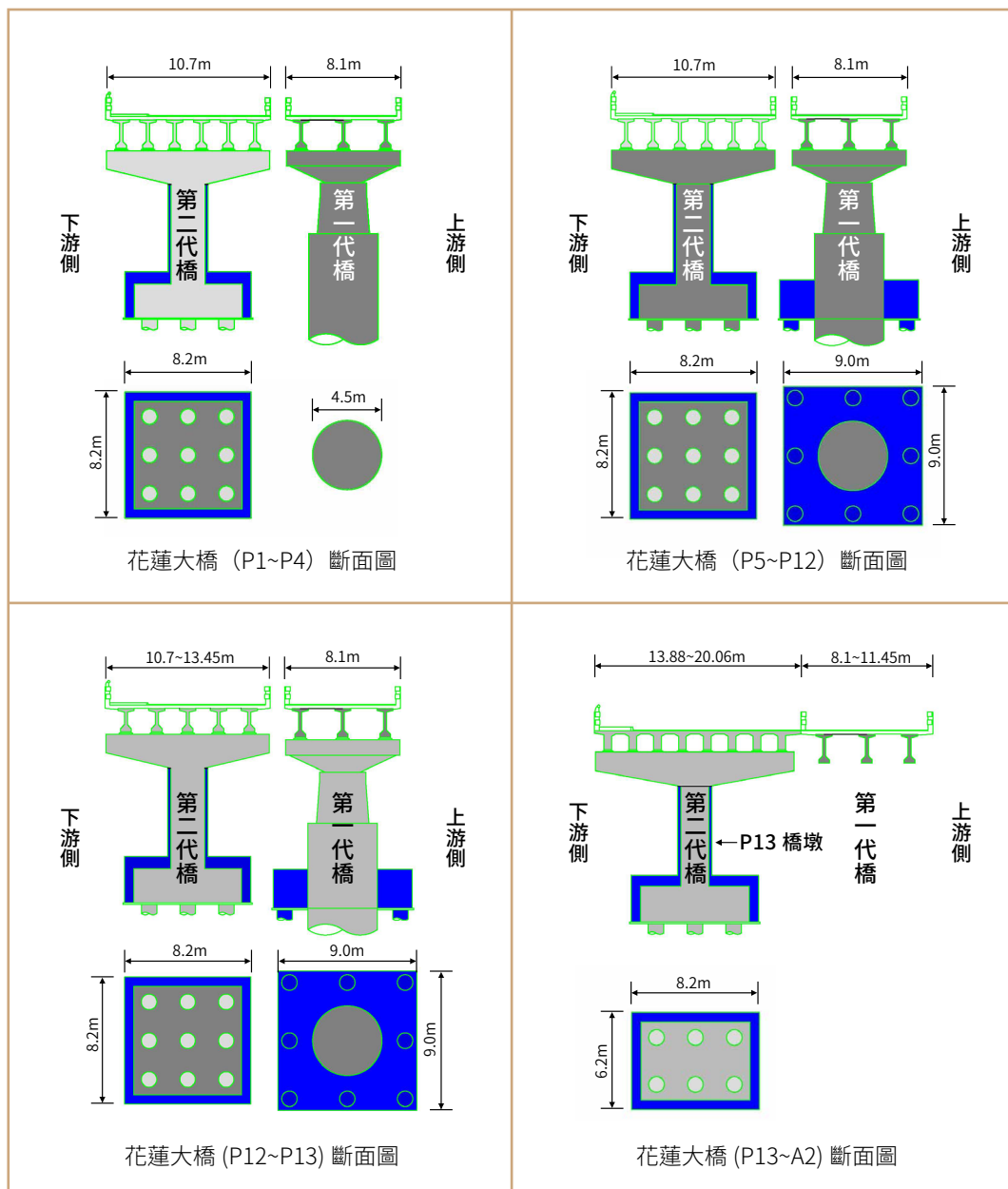


圖 4 一代、二代橋補強示意圖

二、0206 花蓮大橋震損

2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分，花蓮外海發生芮氏規模 6.2 強震，花蓮地區省道在台 9 線與台 11 線公路、橋梁有數處災情，負責本路段之公路局東區養護工程分局（原公路總局第四區養護工程處）花蓮工務段在短時間內全數搶修完畢。有關橋梁災損以台 11 線花蓮大橋最受矚目，據公路局「0206 花蓮 7 級地震省道災情報告」，主要受損

部分為 1、2 代橋在 P9（5k+700）至 P10（5k+740）橋墩間之 S10 橋跨疑跨斷層造成水平錯動位移約 60cm 的滑移量（水平錯動量），以及 P9 至 P12（5k+820）橋墩止震塊碎裂及橋面伸縮縫因碰撞擠壓損壞，惟主體結構無明顯破壞，震後立即進行搶修後恢復臨時通行。台 11 線花蓮大橋因 0206 花蓮地震致橋梁損傷部位之說明及照片詳見圖 5。



圖 5 花蓮大橋震後災損照片

有關此次地震造成的地質破壞調查，根據地礦中心「20180206 花蓮地震地質調查報告」所述，本次地震雖非地表淺部的米崙斷層與嶺頂斷層活動引致，但地震後在此兩條斷層沿線均發現了地表破裂與噴砂的現象，而嶺頂斷層地表破裂與噴砂主要分布於花蓮溪河道，地表變形特徵以左移運動為主。

在大地測量方面，嶺頂斷層跡線兩側在同震變形的水平方向與垂直方向均有顯著的變化。花蓮大橋 P9、P10 橋墩左移形式錯動約 60cm，照片詳見圖 6。花蓮大橋周邊變形分布，範圍寬達 180m，大致可延伸

分為 3 道破裂。分析結果顯示，於嶺頂斷層西側縱谷地區的同震位移呈現抬升，同震位移量由西向東逐漸增加，量值約 3.9 至 163.6mm；向東經花蓮大橋至嶺頂斷層東側同震位移則轉為沉陷，量值約 0 至 45.5mm。

綜合地礦中心與公路局調查資料，此次可能為琉球隱沒帶系統之斷層錯動引起的 20180206 花蓮地震，在花蓮大橋附近造成約 60cm 的滑移量（水平錯動量），並帶有約 20cm 之垂直向錯動量（斷層西側抬升，東側沉降）。



圖 6 花蓮大橋水平位移照片



貳、花蓮大橋復舊及策略

公路局花蓮大橋改建工程設計案係委託本公司執行，因 20180206 花蓮地震引致花蓮大橋在 P9 至 P10 橋墩間之跨斷層造成水平錯動，據經濟部地質調查及礦業管理中心「20180206 花蓮地震地質調查報告」調查顯示，嶺頂斷層實際位置應位於 CGS

及 TEM 所定斷層線間，亦即原花蓮大橋 P9、P10 橋墩間。為快速復舊改善及恢復交通，規劃仍於花蓮大橋原址改建跨越嶺頂斷層，故橋梁復舊須確實掌握斷層可能的錯動量，遂委託國家地震工程研究中心進行花蓮大橋斷層錯動量評估研究。

一、斷層錯動量評估

國家地震工程研究中心進行花蓮大橋斷層錯動量評估研究係以定值法為主，評估特定活動斷層可能產生的地表變形量 (On-fault Displacement)，作為擬定近斷層、跨斷層橋梁耐震設計與耐震安全評估基準地震參考。評估工作內容，將參酌學者建立之經驗模型，包含斷層之地表破裂面 (線) 最大錯動量、平均錯動量與地震規模 (Mw)、斷層破裂長度、破裂面寬度、面積的相互關聯經驗式 (Wells and Coppersmith, 1994)。本文以定值法及地震經驗模型進行標的斷層地震錯移量評估，作為後續花蓮大橋改建工程橋型方案研擬、耐震設計與安全評估之依據。其研究成果與應用說明於下：

(一) 斷層潛變量

地表潛移為重要的斷層滑移行為，其透過無震滑移釋放能量，為了解斷層長期潛移行為，蒐集嶺頂斷層周圍於 2004 至 2006 年的全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 資料與地質剖面圖 (陳文山等, 2008) 詳如圖 7 顯示，嶺頂斷層兩側於平行斷層方向 (方位角約 30 度) 的水平速度場於跨斷層處有相對水平滑移現象，約 6 至 7mm/yr；垂直斷層方向 (方位角約 300 度) 的水平速度場則無明顯差異，約 1 至 2mm/yr，目前地礦中心將嶺頂斷層列為第一類活動斷層。

由於花蓮大橋橋軸向為垂直嶺頂斷層走向的水平速度場並無明顯變化，約 1 至 2mm/yr，橋軸向跨斷層兩側不具有太大的壓縮量或伸張量；橋橫向跨斷層兩側可能發生相對水平滑移約 6 至 7mm/yr，可能會發生輕微地斷層水平滑移潛變現象。

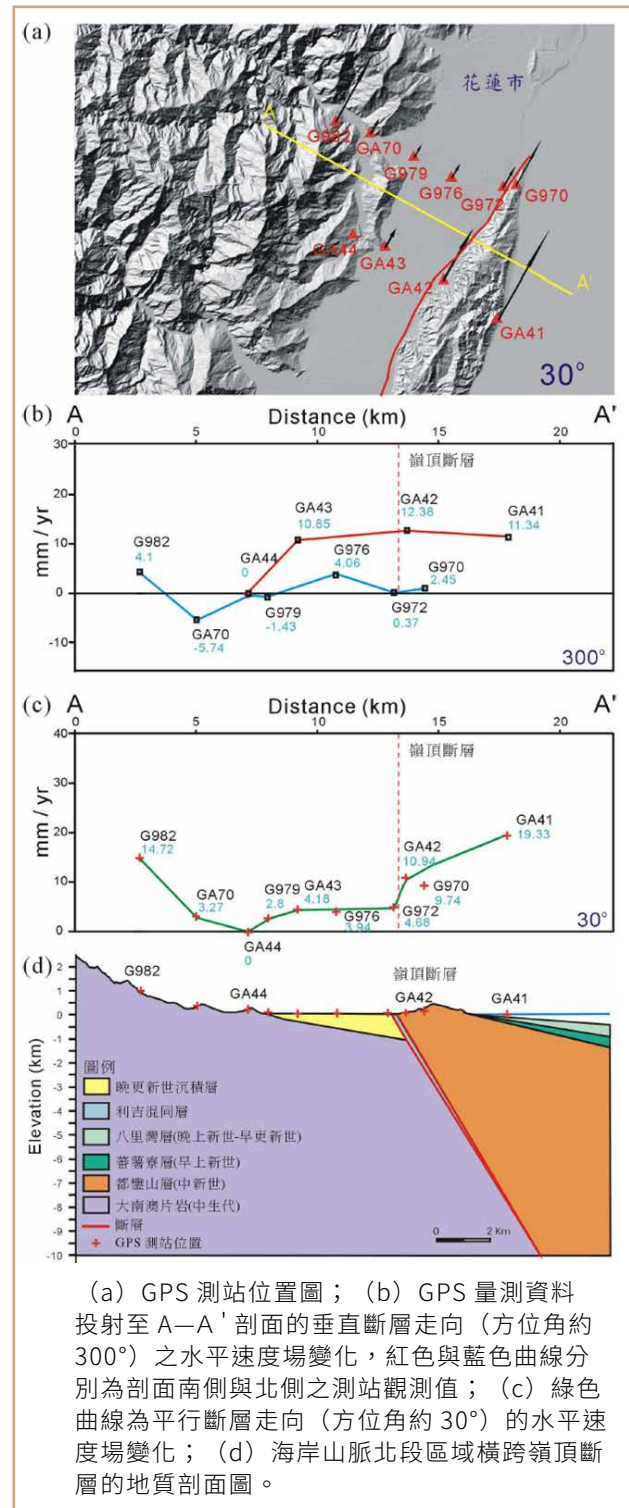


圖 7 嶺頂斷層周圍 GPS 資料與地質剖面圖

因此，建議以鋼橋大跨徑簡支梁結構型式跨越斷層，可降低橋梁上部結構對於地層水平滑移潛變引致相對錯動之影響。

(二) 斷層錯動量

斷層錯動後往往伴隨地震發生及地表變形，工址位於嶺頂斷層上，嶺頂斷層錯動機制以走向滑移 (Strike-slip Fault) 為主，但亦兼含逆衝分量。為完整評估斷層可能造成花蓮大橋的錯動量，破裂模式亦須考量相關斷層連動的可能性，包含嶺頂斷層北端米崙斷層及南端瑞穗斷層，其斷層總破裂長度可達 97km，採用學者專家保守建議，取滑移角 30 度為斷層滑移方向，考量滑移角與傾角效應，進而評估可能造成之錯動量。研究成果建議本工址斷層橋橫向、橋軸向與垂直向之錯動量設計基準如下列，以及考量錯動量影響範圍詳圖 8 所示：

1. 橋橫向

平行斷層方向之水平錯動量 200cm。

2. 橋軸向

垂直斷層方向之水平錯動量 45cm 之壓縮量 (擠壓)。

3. 垂直向

垂直向之錯動量約 90cm。

(三) 斷層錯動位置之不確定性與可能範圍

學者 (Petersen, 2011) 蒐集 9 個國際上走向滑移機制之斷層地震 (Strike-slip Faults, 地震規模 M6.5 ~ M7.6) 地表破裂調查資料，進行斷層地震引致地表錯位、破裂分析。相關案例與調查研究顯示：

1. 對具有簡單清晰斷層跡之斷層，其主要之地表破裂潛勢都發生在主斷層兩側約 150m 範圍內。

2. 對斷層跡複雜或不明顯之斷層，其主

要之地表破裂潛勢都發生在主斷層兩側約 300m 範圍內。

經 0206 花蓮地震後調查結果顯示，嶺頂斷層地表水平錯動之破裂潛勢位置明確，因此，建議後續設計時，考量本斷層帶錯動量之影響範圍為主斷層兩側約 150m 範圍內。若為新建橋梁，建議於花蓮地震地表錯位處採大跨徑橋型配置，橋墩配置應遠離此一範圍 (P9 至 P10 橋墩)，以降低斷層錯動面及地表錯位之直接影響，並且考量充分之防落橋長度及防落措施。

二、橋梁形式評估

綜整斷層特性及錯動量評估成果，橋梁跨越斷層之橋型方案評估：

(一) 考慮斷層可能發生以走向滑移及兼含逆衝分量類型、斷層帶寬度以及現地地質條件等各種影響因素，選擇適當的橋梁結構型式。建議採用簡支大跨徑梁橋，且基樁位置依據鑽探資料，遠離斷層可能錯動面，儘量降低跨越斷層之影響範圍。

(二) 考量地殼變動及震後橋梁修復難易性，上部結構選擇構造簡單、修復容易、韌性佳的橋梁結構型式，利於震後搶修與重建，而採用簡支鋼箱型梁。

(三) 為抵抗斷層錯動後的地層位移，避免震後發生落橋，跨越斷層橋梁應增加防落長度及防落橋設施。綜合上述，花蓮大橋於跨斷層橋型上選用簡支大跨徑 80m 鋼箱型梁橋，鋼材韌性佳可配合大跨徑、簡支梁結構型式，不僅降低橋梁上部結構對於斷層錯動及水平滑移潛變引致之影響，且為避免震後發生落橋崩塌，橋墩帽梁因應斷層錯動量，增加防落長度及防落橋設施等多重保障。

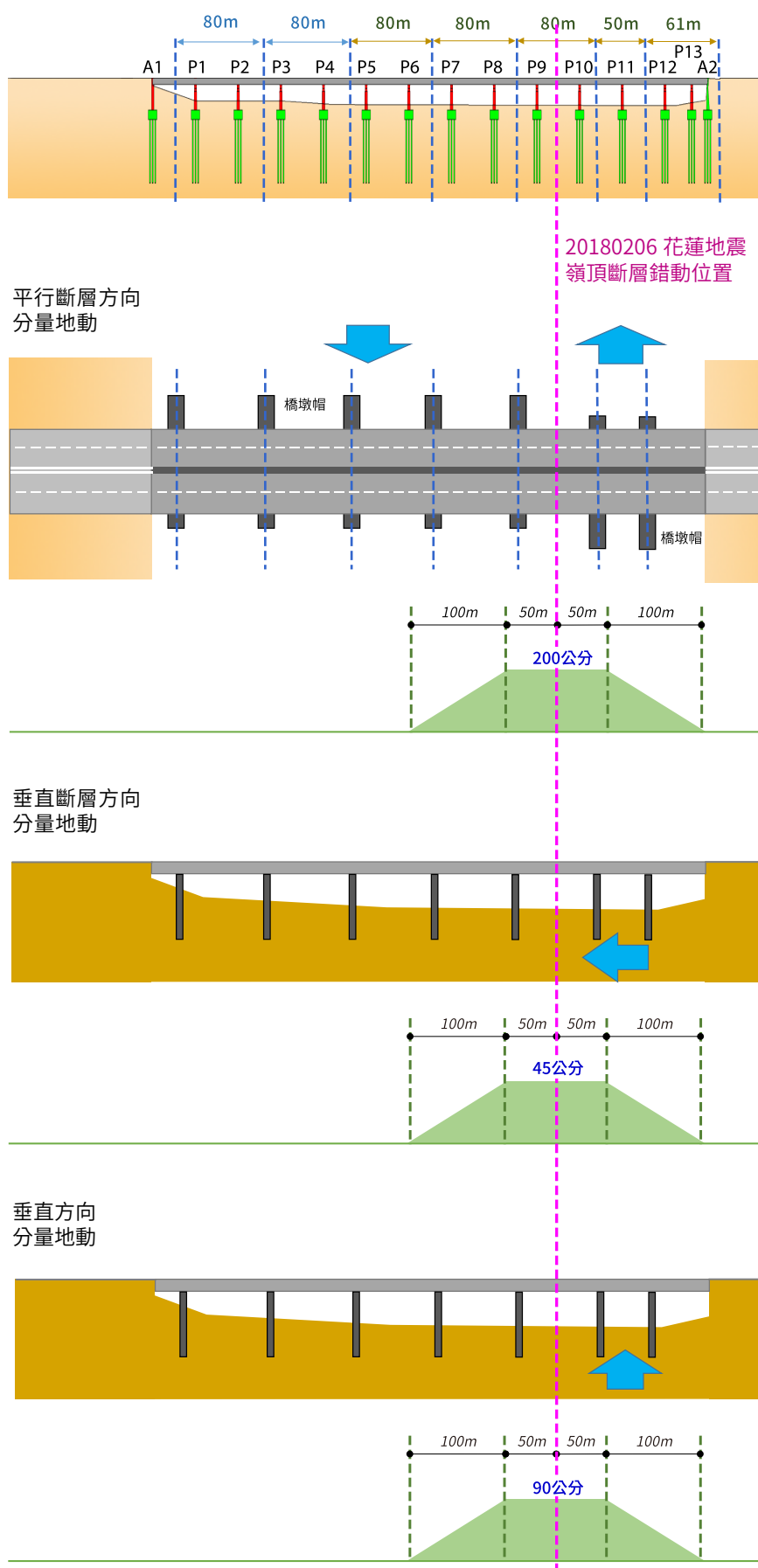


圖 8 本工址斷層橋橫向、橋軸向與垂直向之錯動量設計基準

參、花蓮大橋耐震設計考量

一、橋梁耐震性能原則

橋梁耐震性能由三要素組成，第一為安全性、第二為使用性、第三為修復性。安全性強調結構體耐震能力，在地震力作用下，必須能保持不產生落橋與橋柱崩塌；使用性強調地震後橋梁能繼續保有交通運輸與救災服務功能；修復性強調在不需大規模拆除重建的原則下，選用合適修復補

強工法恢復橋梁原有功能，亦隱含經濟層面考量。

公路橋梁最新耐震設計規範已朝向性能導向的設計理念，並將相關規定落實於設計規範中。本工程橋梁復舊搶災設計作業，依據橋梁耐震規範規定辦理，橋梁地震力設計等級與耐震性能關係詳表 1。

表 1 橋梁地震力設計等級與耐震性能關係

地震力等級 (耐震性能)	回歸期 超越機率	耐震理念 (安全性)	服務性能 (使用性)	損壞等級 (修復性)
等級 I 地震 (中度地震)	30 年 50 年 -80%	結構保持彈性	震後正常通行	輕微
等級 II 地震 (設計地震)	475 年 50 年 -10%	構件產生塑鉸，發揮容許韌性容量	震後有限通行	可修復
等級 III 地震 (最大考量地震)	2,500 年 50 年 -2%	結構韌性容量完全發揮，但橋梁不會落橋、崩塌	震後有限通行	嚴重

二、橋梁耐震設計

(一) 橋梁近斷層之設計地震力

花蓮大橋原橋址改建跨越嶺頂斷層，除須考量斷層錯動量影響外，其地震動設計基準（設計反應譜）亦應適當評估斷層之影響。一般而言，鄰近斷層之重大工程皆須對工程所在工址進行地震危害度評估，確實反映近斷層地震特徵，作為決定設計基準地震參考。工程及建物結構之耐震設計，仍以相關耐震設計規範為依據。我國目前耐震設計規範所研訂設計基準地震，

以近斷層調整因子（ N_A 、 N_V ）反映因工址鄰近斷層而提供放大地震動強度效應。現行 2019 年版「公路橋梁耐震設計規範」中，花蓮大橋橋址位於花蓮市吉安鄉及壽豐鄉，行政區鄰近花東縱谷斷層，橋梁工程以耐震規範規定之地震力為設計依據，相關花東縱谷斷層地震強度及放大調整因子如表 2 及表 3 所示，並無考量與近斷層距離之關係。

經查國內耐震規範中，內政部國土署最新版「建築物耐震設計規範及解說」之近斷層設計基準，其中放大調整因子有納入考量與近斷層之距離關係，經查規範中距離斷層最近範圍之震動強度放大調整因子如表

2 所示。本案大橋跨越斷層，採用表 3 中「建築物耐震設計規範及解說」考量與斷層最近距離關係 ($r \leq 2 \text{ km}$) 之地震強度放大調整因子，而將等級 II 及等級 III 地震力需求放大，以進行相關橋梁耐震設計作業。

表 2 「公路橋梁耐震設計規範」(2019 年版)

縣市	鄉鎮市區	S_s''	S_1''	S_s'''	S_1'''	臨近之斷層
花蓮縣	吉安鄉、壽豐鄉	0.8	0.45	1	0.55	花東地區斷層

表 3 耐震設計近斷層調整因子 (N_A 、 N_V)

斷層	耐震規範	斷層距離	等級 II 地震		等級 III 地震	
			N_A	N_V	N_A	N_V
花東縱谷地區 斷層	公路橋梁耐震設計規範 (2019 年)	—	1.21	1.29	1.16	1.29
		$r \leq 2 \text{ km}$	1.42	1.58	1.32	1.58
	建築物耐震設計規範及解說 (複審)	$2 < r \leq 5 \text{ km}$	1.37	1.53	1.26	1.48
		$5 < r \leq 8 \text{ km}$	1.28	1.38	1.10	1.30
		$8 < r \leq 12 \text{ km}$	1.14	1.12	1.02	1.16
		$r > 12 \text{ km}$	1.0	1.0	1.0	1.0



(二) 避免基樁深入斷層錯動的岩盤內

由集集地震之車籠埔斷層作用與橋梁互制經驗來看，在岩盤中的斷層作用可以直接錯斷位於斷層面上的基樁，而在沖積層中的樁，斷層作用可以使沖積層中的樁傾斜、位移、旋轉但不致於剪斷。因此針對

花蓮大橋的基礎，每墩皆有進行鑽探，避免將基樁深入到可能遭斷層錯動的岩盤內，經檢核鑽探資料，新橋墩 P7 ~ P13 橋墩基樁皆未深入岩盤內，詳示意圖9所示：

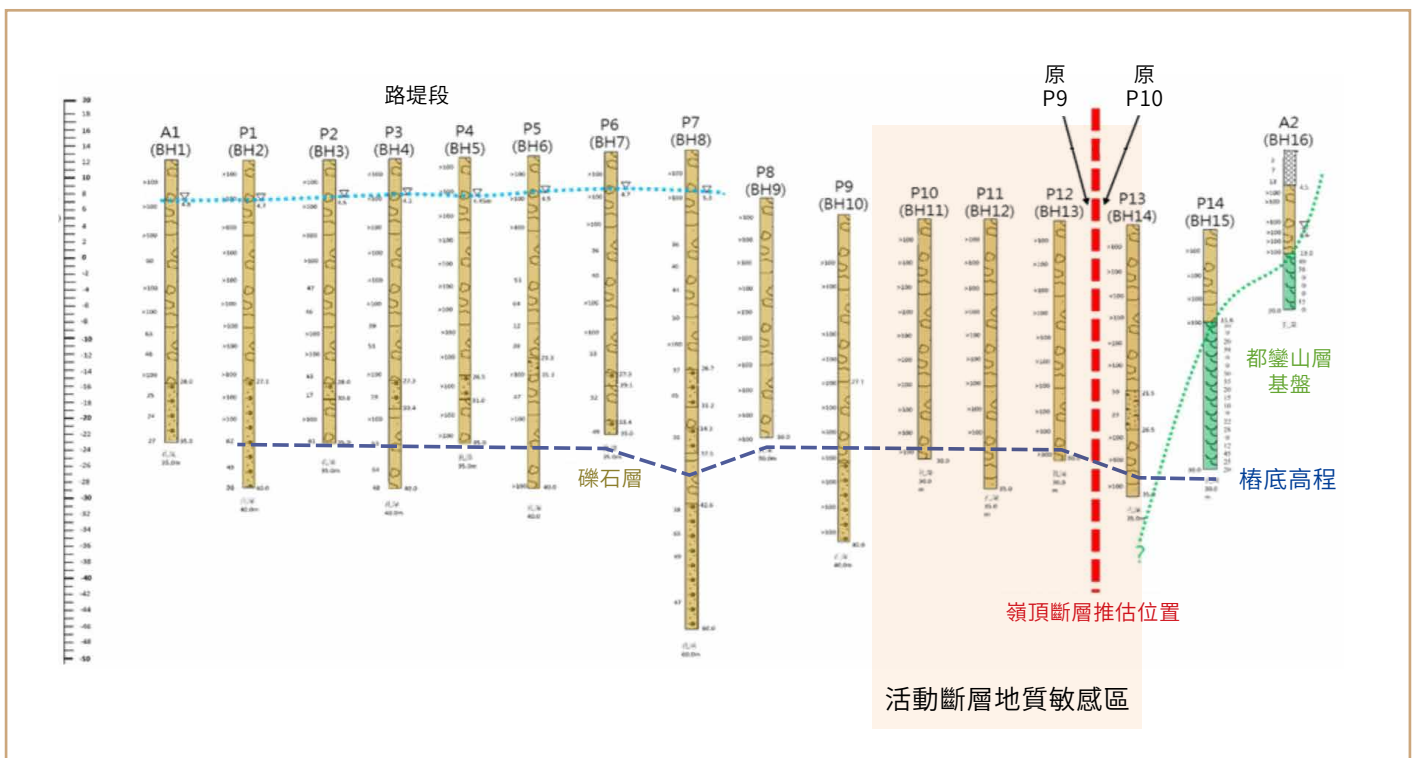


圖 9 檢核位於地質敏感區橋墩基樁

(三) 防落橋長度及防落設施

依國家地震工程研究中心研究成果，建議本工址斷層橋橫向、橋軸向與垂直向之錯動量設計基準如下列，據以增加橋墩頂帽梁水平兩向防落長度因應：

1. 橋橫向

平行斷層方向之水平錯動量 200cm。

2. 橋軸向

垂直斷層方向之水平錯動量 45cm 之壓縮量（擠壓）。

3. 垂直向

垂直向錯動量約 90cm。

為提高橋梁抗震能力，防止上部結構因受地震而產生落橋情事，依「公路橋梁耐震

規範」規定設計足夠的防落橋長度，另考量橋軸向地層錯動量增加梁端間距 46cm（圖 10），避免主梁因地層錯動碰撞損壞；考量地層水平兩向錯動量，增加帽梁防落長度 289cm（圖 11），防止主梁水平向落橋。斷層垂直向錯動對大跨徑橋梁之路工線型影響不明顯，若以橋跨徑 80m 估算，1.1%

之縱坡差異，震後可以 AC 鋪面調整路面縱坡順修為原則。橋址位於花東地區，地震發生頻繁，將規劃設置防落裝置及鋼筋混凝土止震塊，於鋼箱型梁橋伸縮縫端銜接處，設置防落連桿裝置作為第二道防落裝置（圖 10），以防止落橋情事發生，保障震後救災及通行功能。

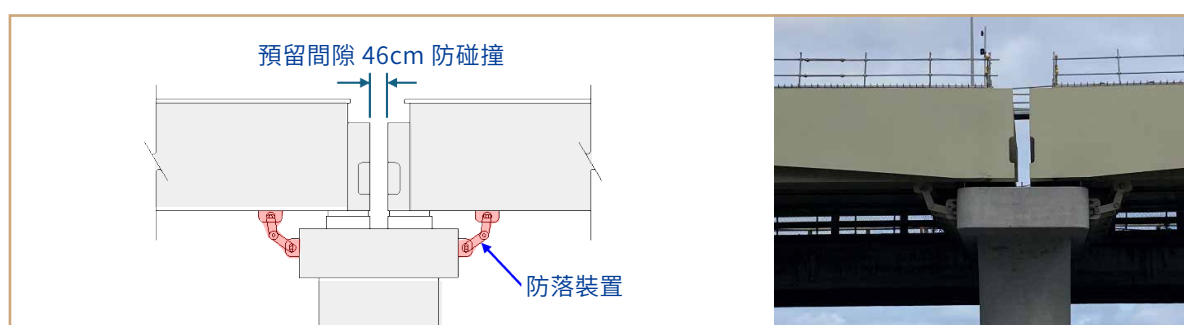


圖 10 預留橋軸向梁端間隙及防落連桿示意圖

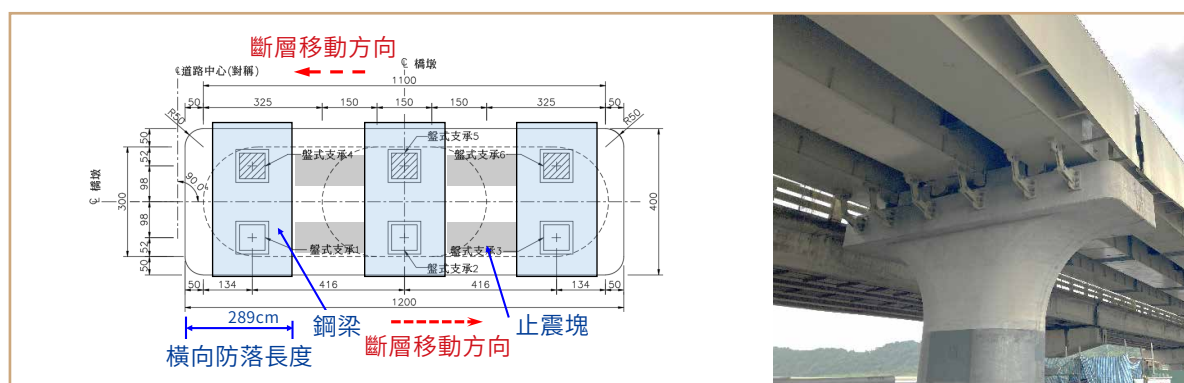


圖 11 橫向防落長度及止震塊示意圖

肆、結語

花蓮大橋改建工程設計階段與國家地震工程研究中心合作，充分掌握嶺頂斷層錯動量，採大跨徑簡支鋼梁橋，降低未來斷層錯動影響，另加強橋梁防落長度及防落橋設施等多重考量，確保橋梁提升耐震性能。目前上游側橋梁已接近完成，預計 2026 年 10 月全橋完工，期待透過本文章分享跨斷層橋梁設計構想，作為後續跨斷層橋梁之設計參考。

參考文獻

1. 財團法人國家試驗研究院國家地震中心，「花蓮大橋斷層錯動量評估研究成果報告書」（2018.9）。
2. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「20180206 花蓮地震地質調查報告」（2018.3）。



地震之震損調查與建物 管線緊急應變

關鍵詞 Keywords

- # 地震災害 Seismic Hazard
- # 土壤液化 Soil Liquefaction
- # 管線災損 Pipeline Failure
- # 建物震損 Seismic Structural Damage
- # 緊急應變 Emergent Recovery

台灣世曦工程顧問股份有限公司
大地工程部

經理

周永川

正工程師

葉佳鴻

經理

陳正勳

工程師

沈楷庭

花蓮縣政府

建設處

處長

鄧子榆



▲ 統帥大樓震後拆除

臺灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，構造活動頻繁，地震災害因而成為常態性風險。其中花東地區位處縱谷斷層帶，受地震影響尤為明顯。近年來，該區接連發生數起具代表性的大型地震，包含：2018 年花蓮地震（芮氏規模 6.2）、2022 年池上地震（芮氏規模 6.8）與 2024 年花蓮大地震（芮氏規模 7.2）等，均對當地建物、基礎設施與社會運作造成嚴重衝擊。

本文針對上述三起震災進行系統性彙整與分析，包含地質情況、災損情形與災後應變等面向，期能勾勒出東部地區近年震災之災害特徵與復舊實態，進而提供工程界、防災規劃單位與地方治理單位具參考價值之資訊，作為未來地震防減災、緊急復舊政策與韌性城市建構之參考。



壹、前言

臺灣地震活動頻繁，而東部地區首當其衝，究其原因，與地體構造和板塊活動特性密不可分。長年累積之大地應力透過斷層活動釋放，每每引發強震，造成巨大傷亡與財產損失，彷彿印證「順天應人」之無奈宿命。惟面對此類難以預防之災害，仍應跳脫消極應對之思維，尋求降低災害衝擊之可行途徑。

爰此，實有必要重新檢視歷年重大地震災損與歷程。本文將針對 2018 年花蓮地震（芮氏規模 6.2）、2022 年池上地震（芮氏規模 6.8）與 2024 年花蓮大地震（芮氏規模 7.2）等三起地震所造成之災害狀況進行探討及歸整應變復舊作為，作為未來防災精進方向參考。

一、東部區域地質與環境微分區

臺灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊聚合處，菲律賓海板塊以每年約 7～8cm 之速度朝西北方向逆衝於歐亞板塊之上，形成臺灣造山運動主要推力，並使臺灣本島整體構造呈南北走向；於臺灣東部，菲律賓海板塊則沿琉球海溝向北隱沒至歐亞板塊之下，形成琉球隱沒帶。其構造轉換增添地質複雜性，亦為活躍地震之主因。

花東地區係由兩側山區及縱谷平原所構成：

（一）西側中央山脈

岩性以經歷造山運動擠壓之變質岩所構成，包含片岩、片麻岩與大理岩等。

（二）東側海岸山脈

以安山岩質之島弧系統為主。

（三）縱谷平原

列於中央山脈與海岸山脈之間，由未固結之河川沖積物所組成，總體寬度約 4～6 km，亦為兩大板塊交界之縫合帶。

構造方面，本地區最主要活動斷層為縱谷斷層，由北至南可分為嶺頂、瑞穗、池上、卑南等次斷層，其特色為向東傾斜、左移兼逆衝之斷層，部分斷層兼具潛移特性（如池上斷層）；每年均造成 2～3cm 潛移滑動；另，亦有研究聚焦於向西傾斜之高角度斷層系統（即中央山脈斷層）是否存在問題，此於 2022 年池上地震獲得趨勢之印證。目前兩條主要斷層系統交互作用與相關研究尚屬萌芽階段，仍待進一步探討，整體活動斷層分布詳圖 1。

進一步探討花蓮地區沖積平原區特性，可發現其地層分布牽涉河流演育及地表地質作用，花蓮為臺灣東部地區核心人口居住區，本公司曾於 2019 年起受經濟部地礦中心（前中央地質調查所）委託，進行全面且系統性之鑽探調查，藉以繪製土層地質微分區（如圖 2）與液化潛勢圖，地表以下 30m 沉積物組成可詳表 1。

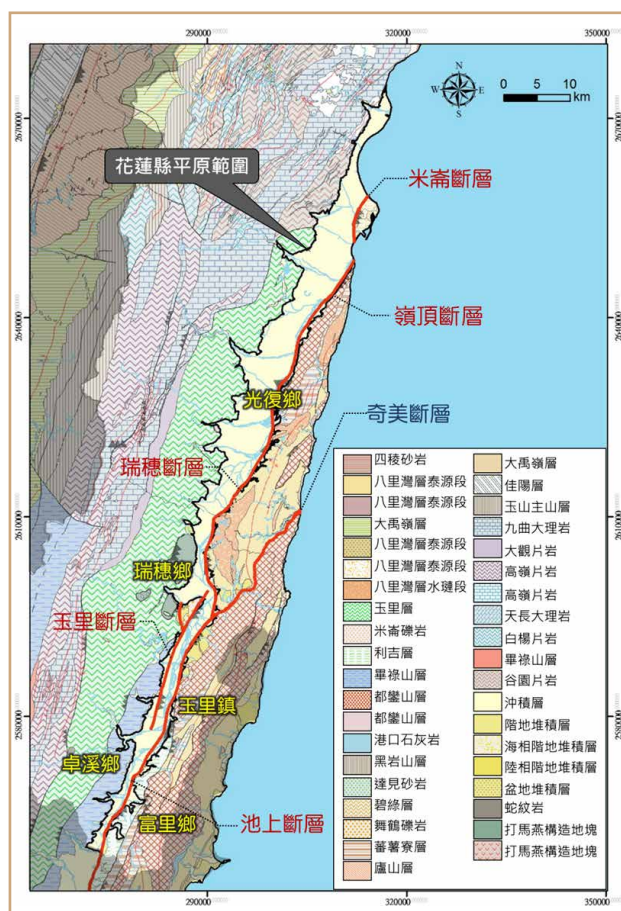


圖 1 花蓮縣區域地質及活動斷層分布圖

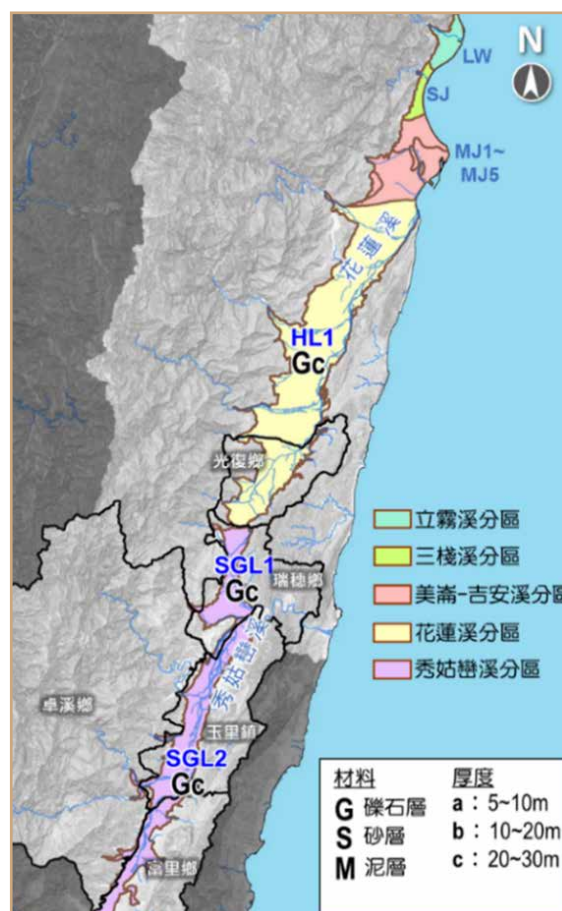


圖 2 花蓮縣沖積平原區地質微分區

表 1 花蓮縣沖積平原區工程地質特性

地質分區	微分區	30m 內沉積物組成		主要分布位置
		垂直堆疊碼	岩性分布概述	
立霧溪 (LW)	LW1	Gc	厚超過 30m 礫石夾砂	立霧溪北岸往南至三棧溪一帶
美崙——吉安溪 (MJ)	MJ1	Sc / Ga	上部砂層厚度約 10~25m，局部下方有厚約 5m 礫石層	花蓮市北側
	MJ2	Gc	厚超過 30m 礫石夾砂	美崙山北側及東側
	MJ3	Mc	厚超過 30m 泥層	美崙山西側
	MJ4	Gb / Sa	上部厚超過 20m 礫石層，下方為 5~10m 厚砂層	美崙溪谷口至海邊之扇狀地區
	MJ5	Sc	厚超過 30m 砂層	花蓮市西南側山麓邊
花蓮溪 (HL)	HL1	Gc	厚超過 30m 礫石夾砂	木瓜溪北岸往南至富源一帶
秀姑巒溪 (SGL)	SGL1	Gc	厚超過 30m 礫石夾砂，夾 2~3 層砂透鏡體	富源至舞鶴臺地以北
	SGL2	Gc	厚超過 30m 礫石夾砂	舞鶴臺地以南至花蓮縣與台東縣交界

二、地震歷史與風險

根據中央氣象署地震測報中心統計，近 10 年東部地區芮氏地震規模達 6.0 以上地震高達 12 起，其中不乏造成重大災損之強震（詳表 2）。

同時，由國科會（原科技部）推動之「臺灣地震模型（Taiwan Earthquake Model, TEM）」與馬國鳳教授團隊，亦針對地表加速度發生機率分布進行探討（詳圖 3）。

表 2 花蓮縣近 10 年規模 ≥ 6 之歷史地震

	日期	與縣府距離 (km)	規模	震源深 (km)	震度 (級)
1	2015.03.23	29.7 (外海)	6.2	38.4	5~6
2	2018.02.06	16.9 (外海)	6.2	6.3	6~7
3	2019.04.18	8.9 (內陸)	6.3	20.3	5~7
4	2021.04.18	20.4 (內陸)	6.2	14.4	5
5	2022.01.03	56.1 (外海)	6.0	22.4	3
6	2022.05.09	92.9 (外海)	6.2	16.8	3
7	2022.09.18	86.2 (內陸)	6.8	7.0	4~6
8	2022.10.11	61.0 (外海)	6.0	21.0	4
9	2022.12.15	32.8 (外海)	6.5	16.3	4~5-
10	2024.04.03	13.6 (內陸)	7.2	19.7	4~6+
11	2024.04.03	15.7 (內陸)	6.5	13.4	4~5-
12	2024.04.23	18.0 (內陸)	6.1	11.7	4~6-

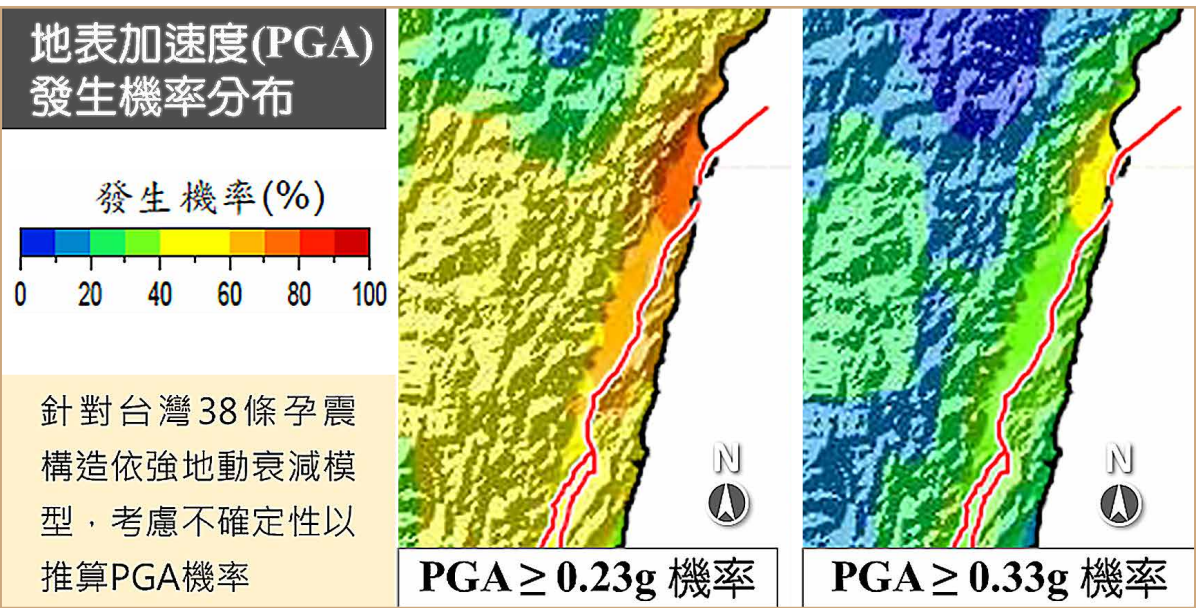


圖 3 地表加速度 (PGA) 發生機率分布 (Wang et al, 2016)

根據地礦中心頒布之臺灣水平速度場及斷層活動潛勢圖，花東地區多處活斷層在未來 50 年內發生規模 6.5 以上地震之孕震機率高達 30% 以上（詳圖 4），其中池上斷層與鹿野斷層帶之潛勢更被列為國內優先監測與防減災規劃區域。

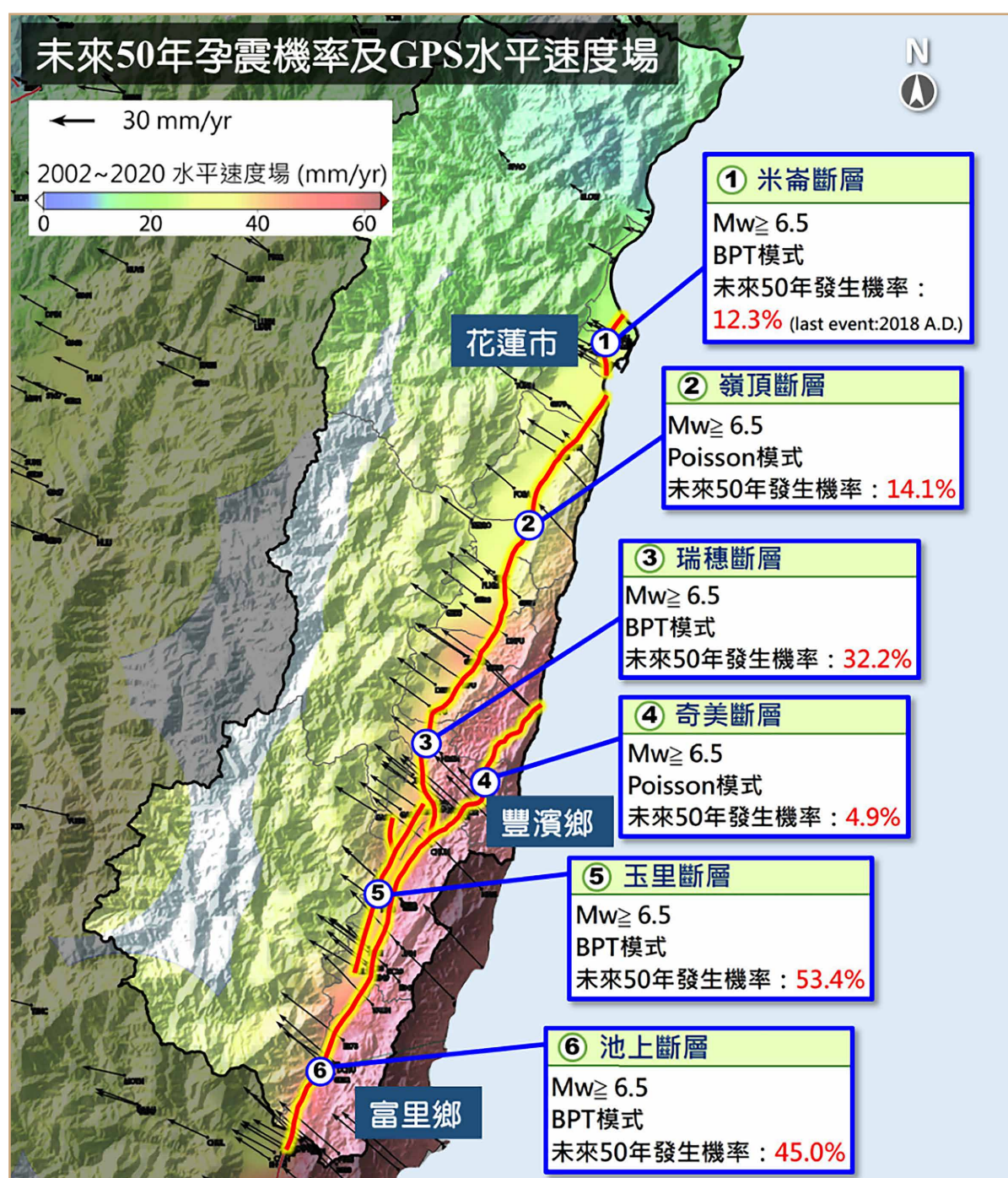


圖 4 臺灣水平速度場及斷層活動潛勢圖（重繪自地礦中心，2021）

貳、近年三起重大地震與災損

一、基本資料

(一) 2018 花蓮地震

2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分發生於花蓮東北方，芮氏地震規模 6.2，造成 17 人死亡、21 人重傷、270 人輕傷，房屋全倒 195 戶（共 4 棟）。震央位置 24.10°N 、 121.73°E ，震源深度 6 km，詳圖 5 (A)。經調查，顯著土壤液化共記錄 33 處。

(二) 2022 池上地震

2022 年 9 月 17 日 21 時 41 分與 9 月 18 日 14 時 44 分連續發生兩起主震，震央位於臺東關山與池上，芮氏地震規模分別為 6.6

及 6.8，造成 1 人死亡、107 人輕傷，民房 1 棟全倒、166 棟半倒，全臺共計 594 學校受損，其中春日國小部分校舍倒塌較為嚴重。主震震央位置 23.14°N 、 121.2°E ，震源深度 7.8 km，詳圖 5 (B)。顯著土壤液化現象共 5 處。

(三) 2024 花蓮地震

2024 年 4 月 3 日 7 時 58 分發生於花蓮壽豐，芮氏地震規模 7.2，造成 18 人罹難、1,155 人輕重傷與 3 人失聯，房屋倒塌 1 棟，半倒或牆柱損毀超過 300 棟（根據內政部國土管理署紅黃單資訊）。震央位置 23.77°N 、 121.66°E ，震源深度 15.5 km，詳圖 5 (C)。顯著土壤液化現象有 4 處。

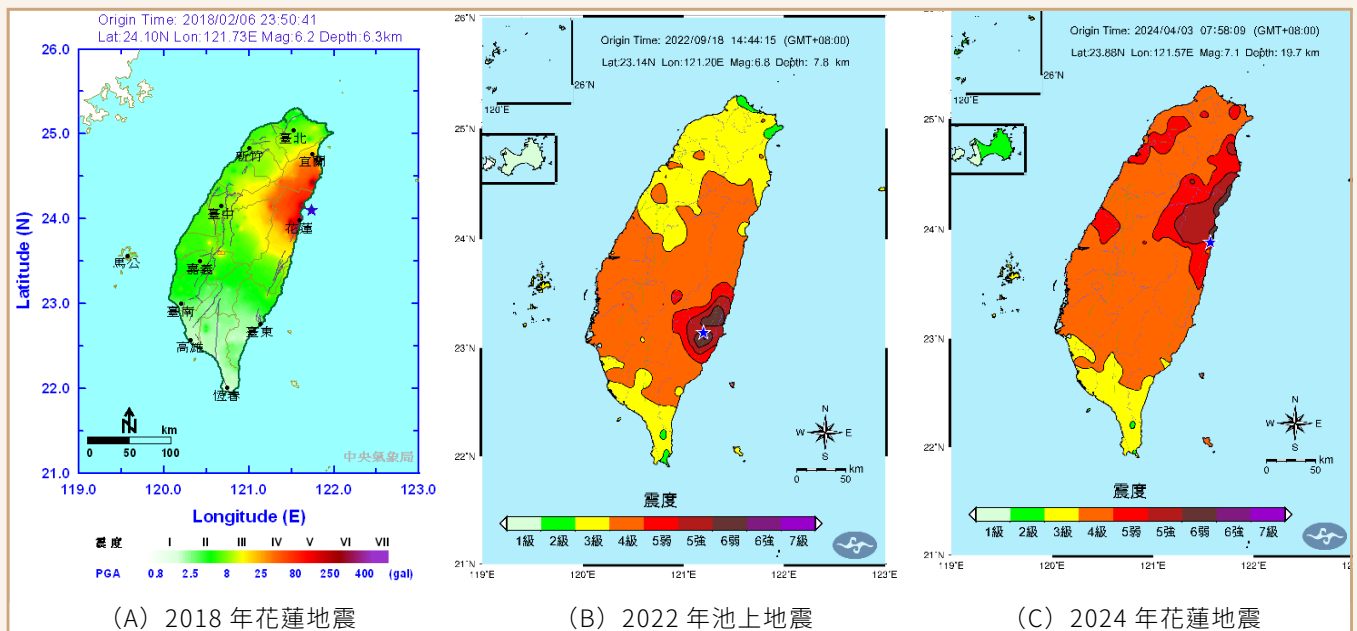


圖 5 近年花東三起大地震震度分布圖（摘自中央氣象署）

二、震動資料與觀測紀錄分析

針對上述三起具代表性大型地震進行比較，其震源深度多屬淺源型，斷層類型以

逆斷層與走向滑移斷層為主，相關震動資料及強地動震波圖彙整如表 3 與圖 6。

表 3 近年花東地區 3 起大地震資料比較一覽表

地震事件	規模	震源深度 (km)	錯動斷層	最大震度 (測站 / 強度)	最大地表 加速度 (PGA)	影響
2018 花蓮地震	6.2	6.3	米崙斷層 嶺頂斷層	花蓮市 7 級 太魯閣 7 級	442 gal(NS) 485 gal(NS)	道路斷裂，電力中斷， 港口損壞
2022 池上地震	6.6/6.8	7.0	池上斷層 玉里斷層	池上 6 強 玉里 6 弱	425 gal(NS) 501 gal(NS)	鐵路變形，交通中斷， 電力受影響
2024 花蓮地震	7.2	19.7	未知斷層 (花蓮外海)	和平 6 強 太魯閣 6 弱	364 gal(NS) 1,491 gal(NS)	道路、橋梁、鐵路受損、 海嘯警報

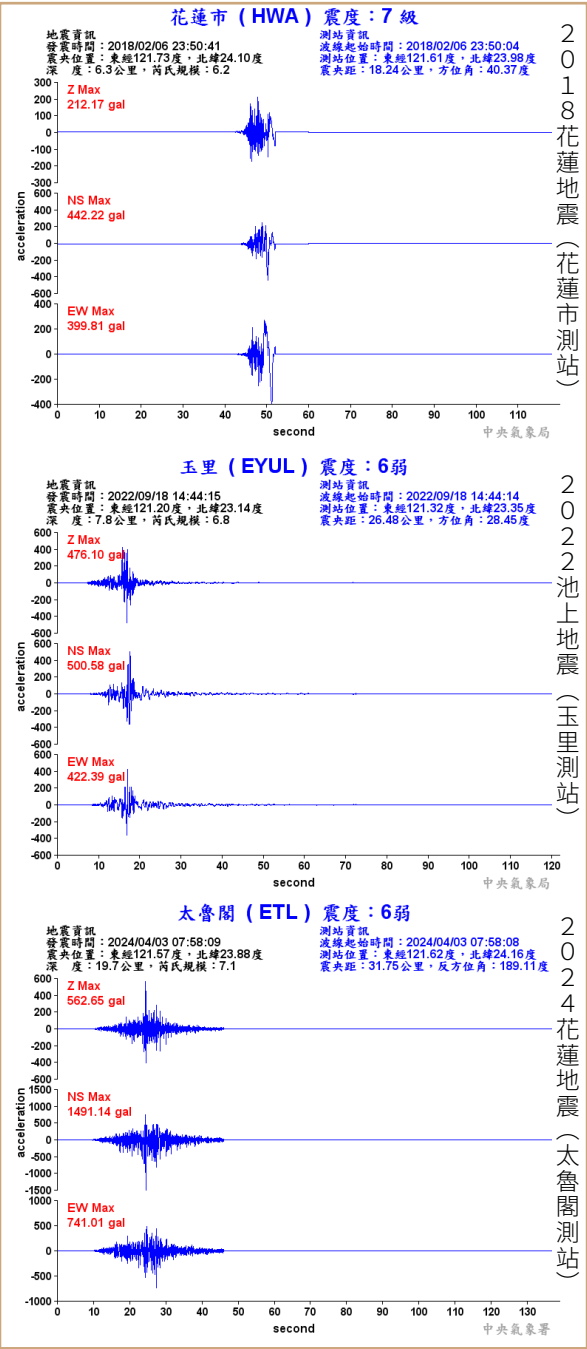


圖 6 近年花東三起大地震強地動震波圖 (摘自中央氣象署)

其中，2018 年花蓮地震為米崙斷層與嶺頂斷層活動所致，震度高達 7 級，對花蓮市區高樓結構影響顯著。

2022 年池上地震為雙主震組合事件，斷層錯動造成玉里與池上地區沿線一連串地表破裂，短週期地表加速度導致多起建物與橋梁損壞。

2024 年花蓮地震則為近年最大規模地震，全臺有感，花蓮多處測站記錄最大 PGA 超過 400gal，太魯閣測站甚至測得 1,491gal 數值，近斷層效應明顯。此次地震造成多棟高樓構造與基礎設施損壞，為近年來最嚴重震災事件。

參、震損勘查

一、建物及橋梁震損

(一) 2018 年花蓮地震

本次地震造成房屋全倒共 4 棟，包括雲門翠堤大樓、統帥大飯店、國盛六街的「白金雙星」與「吾居吾宿」，及舊遠東百貨大樓，其共同特色為中高樓層建築，且低樓層作為大廳或停車場等開放空間使用，牆體較少，具有結構中不利耐震之「軟腳蝦」現象（詳圖 7）。

此外，根據災損點空間分布，可發現受損建物幾乎分布於米崙斷層兩側，若考慮地

震地表加速度延時歷程，研判建物破壞與近斷層效應關聯性高；如分析低矮建築受損情形，多半受到地表斷層錯動或土壤液化影響，造成基礎差異沉陷等情事，亦連帶造成梁柱或牆體結構損壞。

(二) 2022 年池上地震

本次地震特色為池上斷層及玉里斷層沿線地表破裂，強地動造成多處建物損壞。此次震災，台灣世曦公司於第一時間派員隨同經濟部地礦中心前往現場勘災，並彙整各類災害調查成果。

經現地調查，此次地震雖震央位於臺東縣池上鄉，但多數受災地點皆位於花蓮縣玉里、卓溪、富里等三個鄉鎮。災害類型包含建物民宅震損、橋梁道路毀損、交通受阻、農路破裂、溝渠與擋土牆毀壞等。

其中，高寮大橋翻覆斷裂、春日國小校舍亦損壞倒塌等情形怵目驚心，詳圖 8。此外，玉里國小操場之地表破裂，恰與 1951 年縱谷地震序列中災損地點對應，顯示此處重複致災之特性。

(三) 2024 年花蓮地震

本次地震較受矚目的房屋倒塌（詳圖 9 及表 4）有天王星大樓與統帥大樓傾斜。其中，天王星大樓於 2018 年花蓮地震已被黃單列管，此次因塌陷傾斜角度持續擴大，基於安全考量，遭強制拆除。

整合過去花蓮市區受損建物特性，嚴重災損建物多為 4 樓以上集合住宅，且 1 至 2 樓界面有發現梁柱之混凝土爆裂、鋼筋挫曲彎折、柱底塑鉸與牆體剪裂之大型破壞。可能原因之一為其屋齡多超過 40 年，早年設計規範強度已不敷現今設計所需。

表 4 2024 年花蓮地震後主要受損之 RC 建物彙總表

No.	建物名稱	構造概況	No.	建物名稱	構造概況
1	天王星大樓	地上 10 層、地下 1 層	8	更生日報	地上 6 層
2	統帥花蓮大樓	地上 10 層、地下 1 層	9	馥邑京華	地上 10/12/15 層、地下 2 層
3	北濱街 6 號	地上 5 層	10	山海觀大樓	地上 15 層、地下 2 層
4	吉安麥當勞	地上 6 層	11	蓮花大樓	地上 17 層、地下 1 層
5	國軍英雄館	地上 6 層、地下 1 層	12	華爾街大樓	地上 12 層、地下 2 層
6	博愛街 52 號	地上 5 層	13	鋼管紅茶	地上 4 層 (加強)
7	翰品酒店	地上 10 層	14	花蓮女中綜合大樓	地上 4 層





圖 7 2018 年花蓮地震建物震損分布圖



圖 8 2022 年池上地震建物震損分布圖

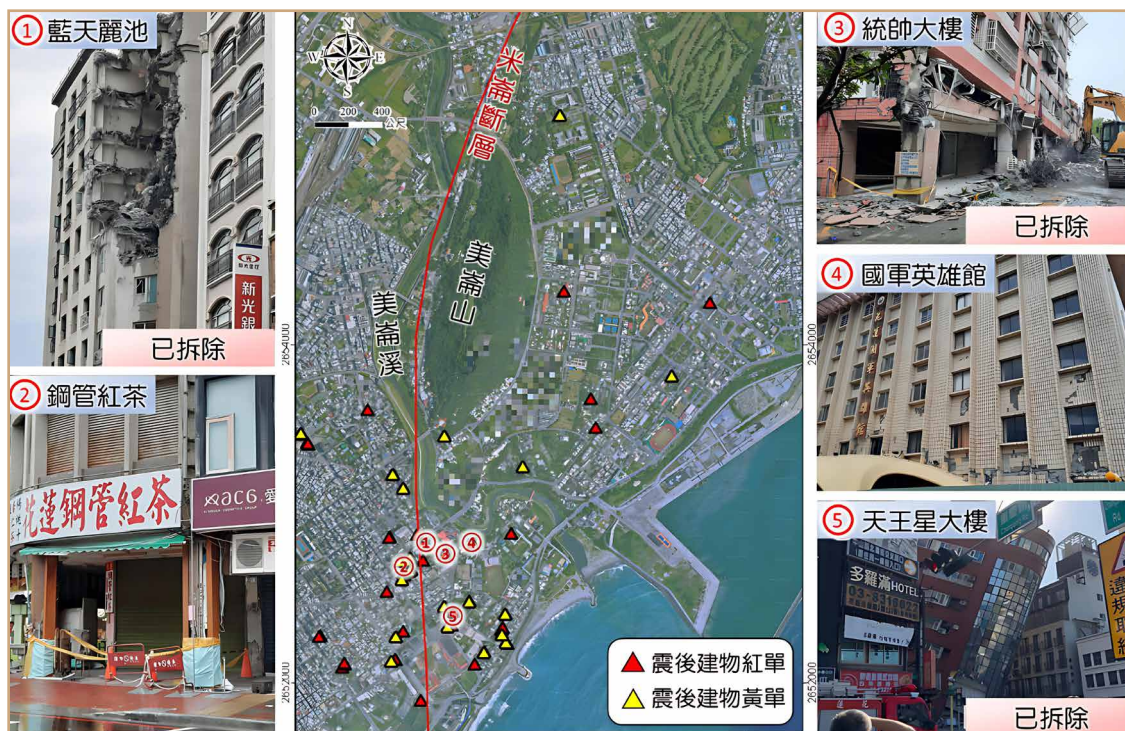


圖 9 2024 年花蓮地震建物震損分布圖

二、土壤液化

(一) 2018 年花蓮地震

0206 花蓮地震除強地動造成建物損壞之外，亦發生多處土壤液化現象。彙整各單位勘災紀錄之土壤液化情形，包含建物周

遭液化噴砂、室內地坪沉陷破裂、港灣設施沉陷、橋樑樁基震損及河堤側向流動破壞等，並有部分地點出現礫質土液化現象，於花蓮港有記錄液化噴砂曾噴出最大粒徑近 10cm 之礫石，詳圖 10。

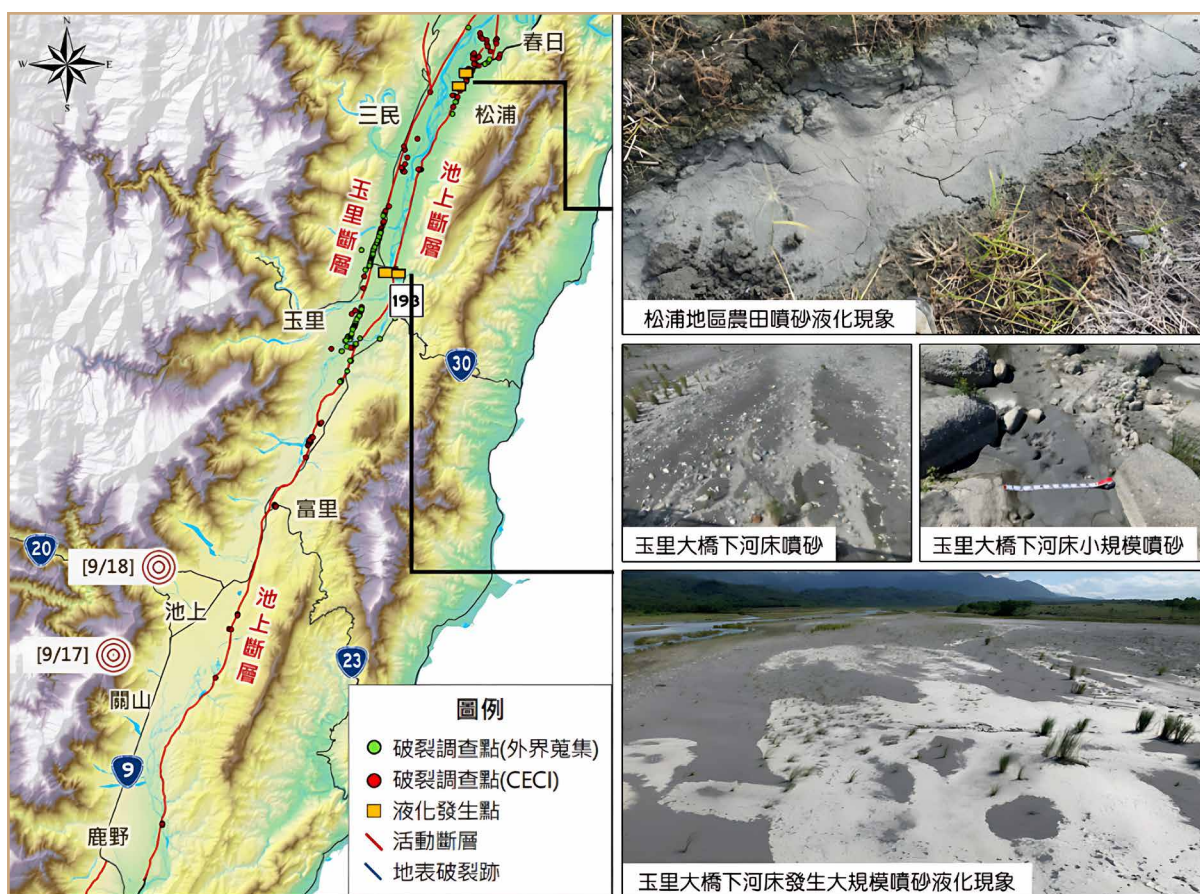


圖 10 2018 年花蓮地震液化地點分布圖

(二) 2022 年池上地震

0918 池上地震除強地動造成建物損壞之外，亦發生幾處土壤液化現象。調查土壤

液化情形及發生地點，於春日松浦地區之農田上噴砂現象，與玉里大橋河床下發現大規模土壤液化噴砂現象，詳圖 11。



(三) 2024 年花蓮地震

根據國震中心及地礦中心在震後的地震地質調查報告，在花蓮美崙溪左岸發現疑似噴砂現象（詳圖 12 左），可能有土壤液化的發生，該處在 0206 花蓮地震時也曾發現

明確土壤液化現象；花蓮大橋北側至花蓮溪河口間，可觀察到沙洲側潰伴隨噴砂現象（詳圖 12 右）；液化現象最遠直到箭瑛大橋南側才消失。在這些液化區域中，以月眉大橋南北兩側所見液化範圍最廣。



圖 12 2024 年花蓮地震液化地點分布圖

三、管線及其他震損

震災事件中，各類維生管線之損害影響民眾生計甚鉅。上述三個地震中，又以 2024 年花蓮地震造成管線損害最為嚴重，依中央災害應變中心 0403 花蓮地震災害應變處

置報告及台灣世曦公司調查探訪結果，管線災損影響民生較大之類別以自來水、電力兩大管線為主，分達 12 及 37 萬戶，震後災損統計可詳表 5。茲簡要說明如下：

表 5 2024 年花蓮地震各類維生管線災情（中央災害應變中心統計至 2024.4.10）

項目	影響戶數 (戶／處)	搶修完成 (戶／處)	待修復 (戶／處)	修復率 (%)	備註
1 自來水	122,241	122,241	0	100	
2 電力	372,947	372,904	43	99.9	震災過後一週，仍有 43 戶停電，惟均非民生用電。
3 瓦斯	523	460	57	87.9	震災過後一週，僅剩局部地區（台北市 57 戶）仍處停氣狀態。
4 電信 (基地台)	80	51	29	63.7	多數地區已於震災後第一時間搶通，並協調電信業者完成架設 6 台衛星基地台。

資料來源摘自：經濟部、國家通訊傳播委員會資料

(一) 自來水系統

花蓮地區自來水系統由台水公司九區處轄管，2018 年花蓮地震就因米崙斷層錯動導致輸水幹管損壞嚴重；2024 年花蓮地震影響範圍更廣，秀林鄉及花蓮市供水轄區均導致短暫停水，此外市區中正橋 Ø600DI 南北側兩端接頭均脫接、華西路 Ø300DIP 接頭脫接漏水、富世高地區因原水管遭落石砸毀破裂無水等，受影響戶數高達 12.2 萬戶，如圖 13 ～ 14。

(二) 電力系統

0403 地震當日，即有和平、台中、國光、海湖等機組故障，此外，電廠及變電站受強震破壞或管路扭曲變形，因而發生停電、饋線跳脫與機組損傷，故緊急停機；後續餘震不斷，更影響修復作業之難度；



圖 13 富世原水管遭落石砸毀(資料來源：自來水公司九區處)



圖 14 中正橋 Ø600DI 過橋管脫接漏水
(資料來源：自來水公司九區處)

花蓮地區以外，台中電廠 7 號機亦因鍋爐管發生破管而停機檢修；輸電線路部分，345kV 均正常無礙、161kV 線路跳脫四回線、69kV 跳脫五回線。上述情事導致全國電力設施電源跳脫，減少約 320 萬瓩之供電能力，共約 37 萬戶發生停電情事，惟整體電力系統尚屬穩定，未觸發低頻率卸載機制。(資料來源：經濟部及經濟日報)

肆、震後應變、處理與復舊：以 2024 年花蓮地震為例

花東地區在三次較大的地震中，以 2024 花蓮地震所造成的災損最為嚴重，大規模的自來水系統及電力系統受到影響，以及建物結構之破壞，且後續餘震不斷，皆嚴重影響民眾生活以及安危，為避免餘震造成二次傷害，中央聯合地方迅速成立災害應變中心，進行後續應變、處理及復舊。

一、建物部分

(一) 緊急應變與評估

發生裂損之大樓，花蓮縣府迅速邀請技師及專家學者，針對結構狀態進行緊急危險評估 (如圖 15)，更考量是否已無法再抵抗後續餘震或未來地震。為避免已嚴重破壞之大樓持續變形傾倒，縣府同步配合緊急加撐與拆除作業，以避免衍生影響。



圖 15
震後建物緊急評估

較高樓層大樓 (如統帥)，為利拆除，配合填土作業 (10 ~ 12m) 填築土堤便道，以利拆除機具與頂部站立，破碎高層混凝土樓板與剪斷鋼筋，拆除作業並即時灑水，避免粉塵瀰漫 (如圖 16)。

另，地震發生一週後，花蓮縣府連續 11 天召開「耐震弱層補強說明會」，向緊急評估後張貼紅、黃單建物所有權人說明耐震補強之觀念及補助規定，過程中委由國震中心協助專業說明。

後續中央亦訂定「中華民國一百十三年四月三日賑災張貼危險標誌住宅耐震弱層補強補助作業規定」，提高補助集合式住宅上限至每棟 1,500 萬元 (6 層樓以下為 750 萬元)、透天住宅上限至每棟 200 萬元，政府補助比例為 85%，使受災戶可用優渥條件進行結構耐震補強。

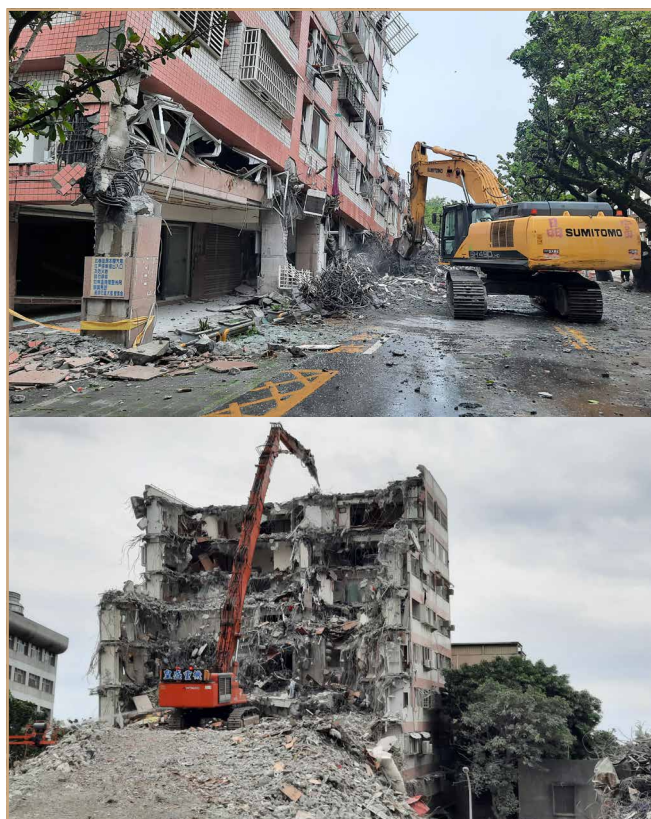


圖 16 統帥大樓震後傾斜、柱頭挫曲及填土拆除 / 灑水作業

(二) 重建審查與災民安置補助

在法令層面部分，花蓮縣府與內政部國土管理署、國震中心等單位多次召開討論會議，針對上述須補強之住宅，建請公共工程委員會就相關法令函覆說明補強工程可不適用政府採購法第 4 條規定，減少後續發包工作行政流程。

對震災時，因危險已遭強制拆除之住宅，縣府與內政部國土管理署則持續列案管理，逐案召開重建相關說明會，亦透過「危老重建輔導團」、「都更自主更新輔導團」等單位協助各項工作，如申請補助、專人駐點提供法令諮詢等。

對於需安置住戶，縣府提供縣有住宅區土地，由慈濟基金會協助援建完成大愛屋後，捐贈與縣府，除作為中繼住宅，未來賑災任務完成後，則續轉作為社會住宅使用。

二、管線部分

(一) 自來水系統

台水公司九區處於災後隨即成立緊急應變中心，由震災總處協調跨區處成立檢漏班，攜帶相關儀器設備啟動支援作業。地震發生次日於管末、高地區增設加水站，達到「有水可供」之基本供水程度，緩解民眾緊急需求。

此次應變復舊汲取 2018 年與 2022 年地震經驗，台水於行動之初已可掌握災後管線漏水及最脆弱之漏水處，多數為用戶的內線接點（如廚房增建的新舊管接點）損壞，故造成社區局部供水量驟增。後續復舊即對症下藥，首先利用供水量研判漏

水嚴重程度，主動關閉漏水嚴重的四個小區，以維持美崙地區（縣府所在地）及其他地區水壓穩定；而後再利用每兩小時水壓值提升與動態觀測等方式，作為供水復舊以及後續漏水檢測作業指標。

本次自來水管線受損最嚴重者，當屬已無原水可供的富世淨水場，其取水口位於太魯閣牌坊後的台 8 線內，惟災後道路中斷且搶通日期未定，故於災後 2 日內緊急啟動新興淨水場備援水井設備，恢復該地區 1,231 戶之供水；此外花蓮市區中正橋 Ø600DI 過橋管脫接，亦採明挖方式進行搶修。

事後重新檢討，震災發生當下，多數自動化監測回傳數據皆發生震盪失真情形（如水壓、瞬間流量、水位），故於大震初始即要求廠所即刻回報相關災損及明確停水戶數，確有其難度，可為未來精進方向；所幸台水公司近年推動降低漏水率計畫（2013 至 2024 年），九區處各供水系統廣設監測系統，覆蓋率逾 90%，且老舊塑膠管線亦逐步汰換為耐震管種，比例達 73%，故 2024 年花蓮地震破管件數相較往年災害減少許多，復水速度效率顯著增加，供水韌性大幅提升。

(二) 電力系統

同樣以 2024 花蓮強震為例，事發後，台電公司動員超過 6,500 人次全力搶修，於震後 4 小時內，立即恢復超過 95% 停電戶數，12 小時內達到 99.7% 的復電比率。其主要措施包含啟動水力發電預備機組、部分用戶端配合降載等方式，以維持穩定供電能力。

伍、反思與結語

花東地區地震活動頻繁，發生頻率高於臺灣西部地區。對建物與基礎設施構成長期威脅，但由於人口密度低、行政資源有限，加上交通動線受制於蘇花公路系統，倚靠鐵路運輸緩不濟急，一旦發生重大災害，常出現人力調度困難、資源投送延遲等問題。此外，地方政府在經費預算編列上，多仰賴中央補助，災前整備與災後復原作業不易，對地方整體防震韌性形成挑戰，是未來亟待解決之課題。

地震災損對民眾心理與生理影響甚深，目前各縣市建立「建築管理資訊系統」，透過GIS、大數據分析等方式，整合行政區內歷史圖資、建管資料，並推動其加值應用，可即時調閱查詢建管資料與設施狀況，亦供災後調度支援與決策輔助功能，為往後建物耐震補強決策提供依據，為一低人力、高效率之作業平台。東部地區雖久經震災摧殘，然透過科技導入與制度更新，復舊之路可再現東昇曙光。

參考文獻

1. Chan, C. H., Ma, K. F., Shyu, J. B. H., Lee, Y. T., Wang, Y. J., Gao, J. C., Yen, Y. T., & Rau, R. J., Probabilistic seismic hazard assessment for Taiwan: TEM PSHA2020. Earthquake Spectra, 36 (1 Suppl) , 137–159 (2020) .
2. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「20180206 花蓮地震地質調查報告」(2018)。
3. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「20220917 關山地震、0918 池上地震地質調查報告」(2022)。
4. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「20240403 花蓮地震地質調查報告」(2024)。
5. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「池上地震災後查報告」(2022)。
6. 中央災害應變中心，「0403 花蓮地震災害應變處置報告第 21 報（最後一報）」，內政部消防署 (2024)。
7. 國家地震工程研究中心，「2024 年 4 月 3 日花蓮地震勘災調查報告」(2024)。
8. 內政部，「中華民國一百十三年四月三日震災張貼危險標誌住宅耐震弱層補強補助作業規定」(2024)。
9. 花蓮縣政府，「0403 震災專區」新聞稿 (2024)。
10. 台灣自來水公司九區處，「2024 年花蓮 0403 大震供水復舊紀實」簡報 (2024)。



沉積環境還原歷史液化之判釋 ——臺南、彰化例

關鍵詞 Keywords

土壤液化 Soil Liquefaction

沉積環境 Depositional Environment

精進調查 Advanced Investigation

經濟部地質調查及礦業管理中心
應用地質組

組長

盧詩丁

簡正

邱禎龍

台灣世曦工程顧問股份有限公司
大地工程部

協理

陳聰海

副理

周坤賢

副理

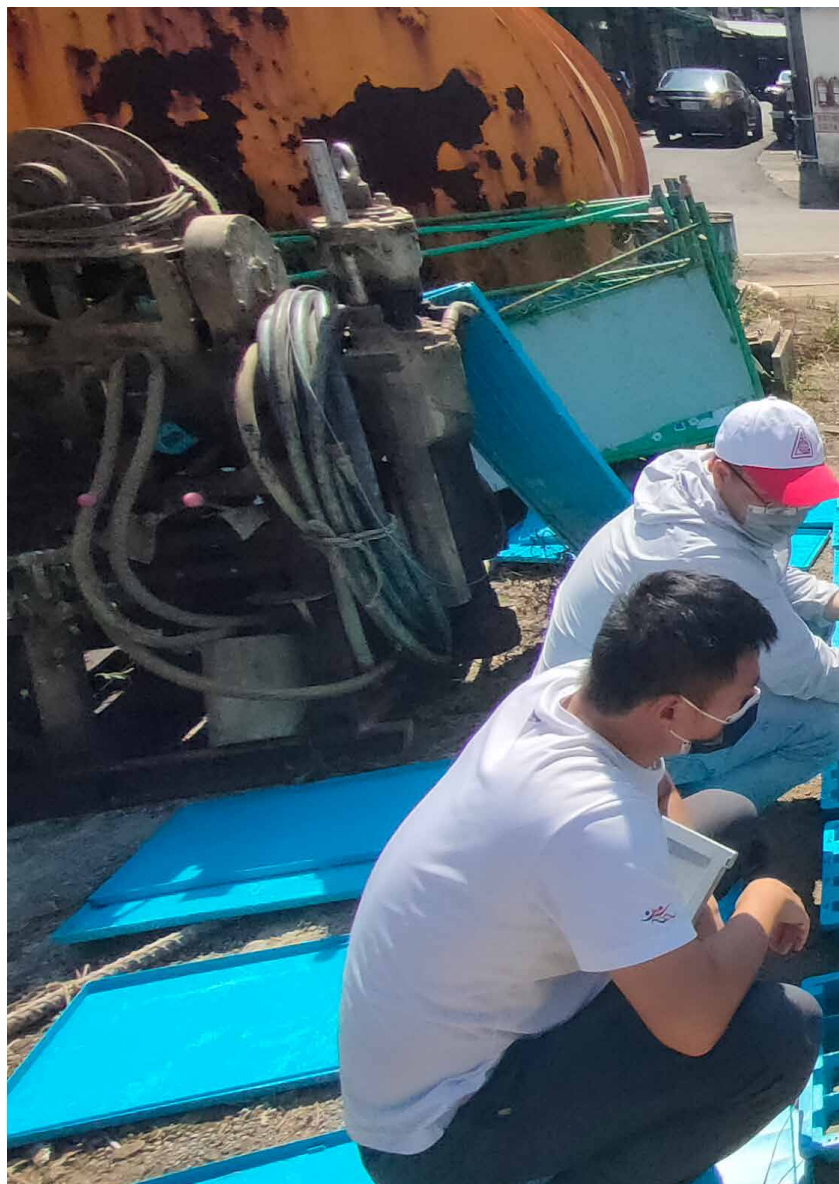
楊智堯

正工程師

葉家志

工程師

林宜修



臺灣的土壤液化災害呈現複雜性與空間變異性，本文以臺南市安南區惠安街（0206 美濃地震案例）與彰化縣員林市崙雅里（921 集集地震案例）之兩處歷史液化區為例進行深入探討。探討研究整合全取樣鑽探、岩芯判釋、岩象分析、歷史圖資套疊及水文分析等精進調查方法，以釐清影響液化行為的關鍵場址因素。

調查結果顯示，臺南市惠安街的液化災害與淺層魚塢回填土的性質、高且敏感的地下水位、舊地形邊界及建物型式密切相關；而彰化縣崙雅里的液化則主要受控於疏鬆細砂層、受局部阻水層局限的高水位，以及地震引發的水壓效應。

透過這些精進的調查方法與應用，不僅能有效還原沉積環境，亦有助於釐清局部地質、水文與人為干擾因子，可供歷史液化事件解析與防災精度提升的重要考量。



壹、前言

臺灣地處環太平洋地震帶，活躍的板塊運動導致地震頻繁。廣闊的西部平原主要由年輕、疏鬆的沖積層構成，加上豐沛的降雨，使得地下水位普遍偏高，這些自然條件使臺灣成為土壤液化的高潛勢區域。

土壤液化是指飽和、疏鬆的砂質土壤（如粉土質砂、細砂）在強震作用下，孔隙水壓急劇升高，導致土壤有效應力喪失，暫時失去剪力強度，而呈現類似液體的狀態。此現象的發生需要強烈地震動、易液化土層及高地下水位等三個要素同時存在。

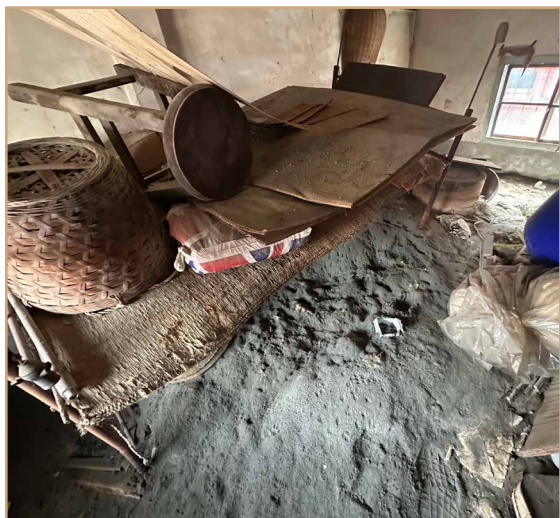


圖 1 集集地震造成彰化縣員林市崙雅里(芳社內)液化噴砂現象。

回顧臺灣歷史，多次強震都伴隨了土壤液化災情。例如，1999 年的 921 集集地震，不僅造成嚴重的結構破壞，也在中臺灣的山麓沖積扇地帶，如彰化縣員林市崙雅里（舊稱芳社內）等地，引發了大規模的灰黑色砂土噴湧（圖 1）與地層下陷。而 2016 年 0206 美濃地震，則對臺南市安南區這類沖積平原及潟湖回填區造成了觸目驚心的災害，特別是在溪頂里惠安街一帶，許多房屋嚴重下陷達 1m 以上，基礎周圍發現滿溢噴出的砂土（圖 2）。

然而，深入觀察這些災害事件，特別是 0206 美濃地震案例，可以發現液化災害的分布並非均勻一致。在臺南安南區溪頂里，嚴重液化的區域常呈現高度集中的現象，甚至在僅一街之隔的範圍內，災損程度就可能出現顯著差異。這種高度的空間變異性，無法單純用地震動強度或區域性地層條件來完全解釋，它強烈暗示了局部場址的細微條件，包括精細的地層變化、特殊的水文動態、人為的土地利用變遷（如魚塢回填歷史）以及地上建物的特性等，在控制液化是否發生、如何發展乃至最終致災程度上扮演了關鍵角色。

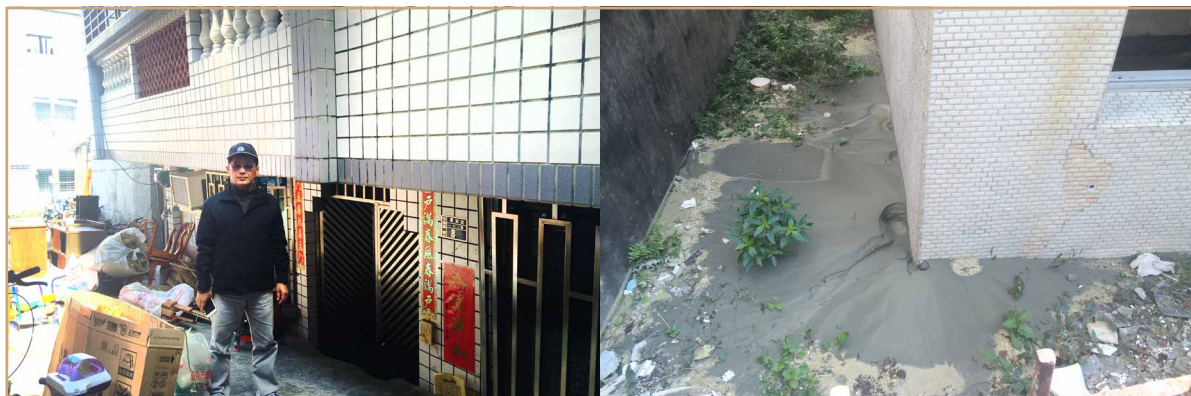


圖 2 美濃地震造成臺南市安南區惠安街房屋下陷及噴砂情形

這也凸顯了傳統、較大尺度的液化潛勢評估方法，在預測與解釋此類局部災害熱點上的潛在局限性。

為此，本文選定兩處具代表性的歷史液化災害地點——臺南市安南區惠安街周邊（0206 地震案例）與彰化縣員林市崙雅里（921 地震案例），進行深入的精進調查與評估。這兩處地點分別代表了濱海平原／潟湖回填區與山麓沖積扇兩種不同的地文環境。

本研究的核心目的，即是運用包含全取樣鑽探、岩芯紀錄判釋、岩象薄片分析、歷史圖資與航照套疊、地下水位分析等多元精進方法，細緻地探討並釐清影響這兩處特定場址液化行為與災害程度的關鍵控制因子，期望能為理解複雜液化機制及提升未來防災工作的精度提供具體參考。

貳、臺南市安南區惠安街案例分析

一、環境背景與地形變遷

根據歷史圖資與地質紀錄，惠安街地區的地貌經歷了劇烈的變遷。約 4,000 年前，此處屬於海洋環境。到了 17 至 18 世紀（荷治、清初），海岸線位於現今東側，惠安街一帶則為臺江內海的潟湖環境。19 世紀，因洪水導致舊曾文溪改道、臺江內海淤積，此區逐漸陸化，形成河道、自然堤防及堤後濕地。

日治至民初，部分舊河道及濕地被開墾為養殖魚塢。到了 1980 年代，隨著都市擴張，建商將部分魚塢進行重劃，回填低窪地後，興建為密集的住宅社區。比對歷史航照圖與地籍圖，可以發現現今許多道路，如惠安街部分路段，恰好是當年魚塢之間的土埂；而發生嚴重液化的區域，多位於早期魚塢回填的範圍內（圖 3）。

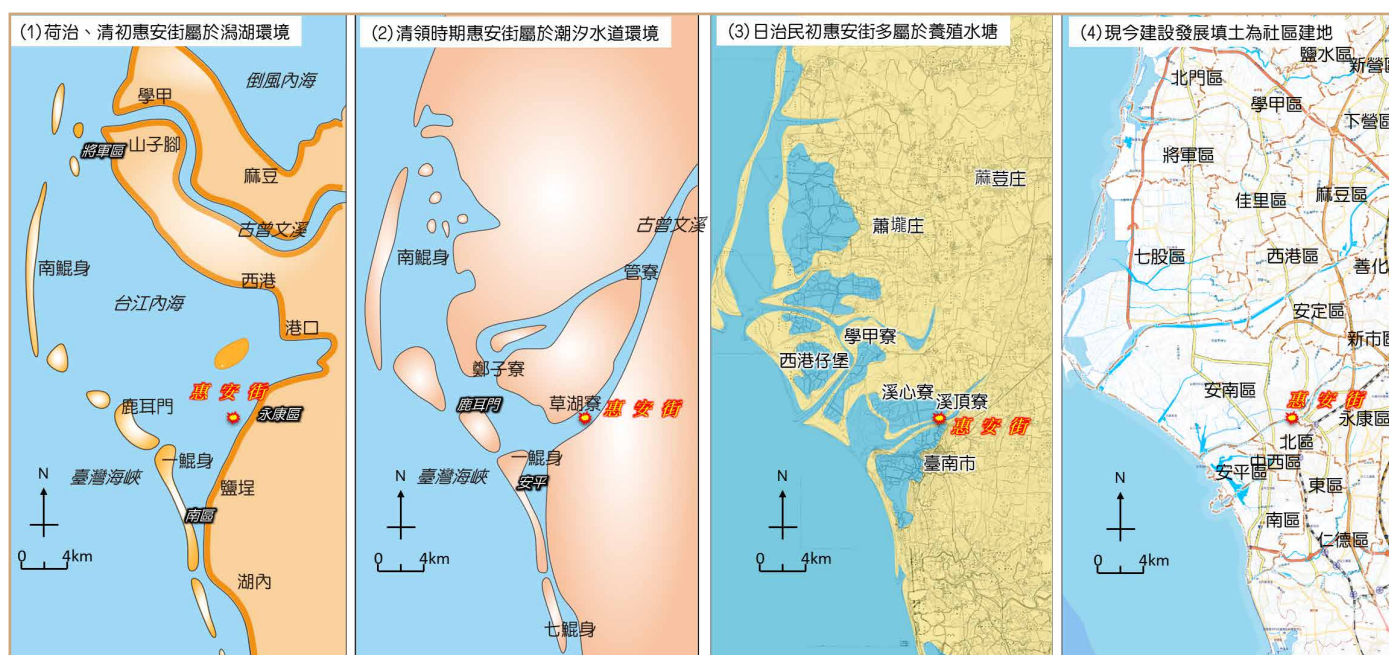


圖 3 惠安街歷史圖資套疊（修改自張瑞津等 1997）

惠安街周邊多為 1970 年代興建的 2 至 3 層樓老舊透天厝，普遍缺乏地下室或深基礎。大部分房屋為連棟式建築，但在部分開發畸零地，則有較晚期興建的獨棟建物，這些獨棟建物樓層常較高（多為 3 層樓），且其用地多落在魚塭回填區。

二、地質調查與沉積環境

美濃地震後，相關單位在惠安街災區及周邊進行了多孔鑽探調查。綜合標準貫入試

驗（SPT）及全取樣結果（圖 4），本地區地層由上而下大致可分為數層。最上層為厚度變化大的表層回填土或沖積層（約 1 至 7.5m），主要為粉土質砂（SM）或砂質粉土（ML）。其下為一層厚約 3～10m 的軟弱細顆粒土層（ML 或 CL），N 值低（2～5）且含水量高，此層被認為是主要的液化發生層，可能對應早期潟湖沉泥或魚塭底部。更下方至 30m 則為 N 值較高（15～30）的中等緊密砂土層。

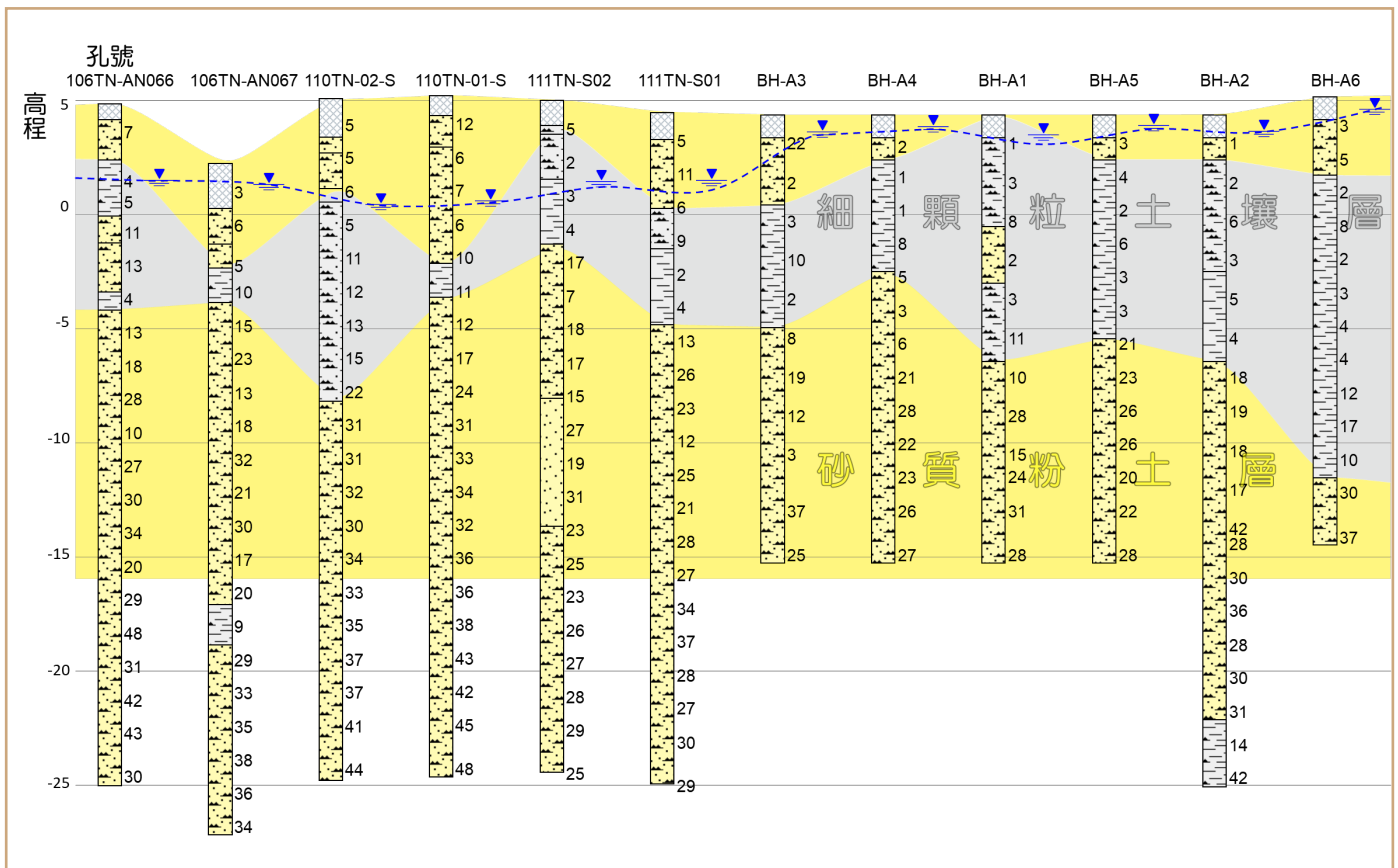


圖 4 惠安街鑽探調查地層剖面

透過全取樣岩芯分析可更細緻地劃分沉積環境（圖 5），由上而下大致可分為：

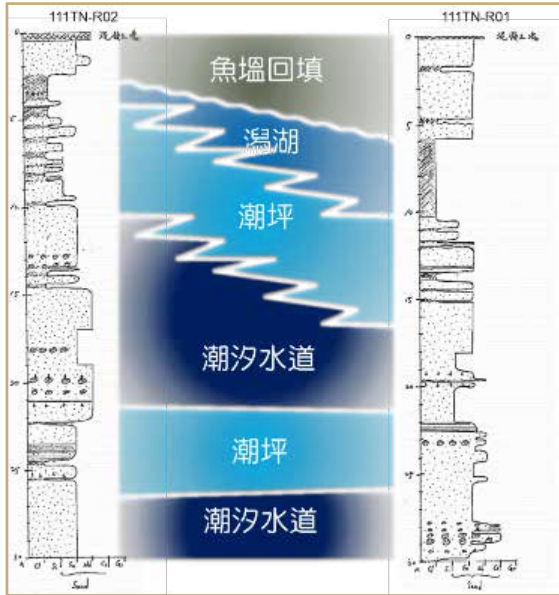


圖 5 惠安街沉積環境分析

（一）魚塭回填層

混雜的棕黃色與灰色砂質粉土，無明顯層理。

（二）潟湖層

厚層黏土，具水平層理，沉積環境能量低。

（三）潮坪層

細砂粉土夾薄層黏土，具緩角度交錯層理。

（四）潮汐水道層

中至粗砂，具明顯交錯層理（魚骨狀），能量較高，含貝屑。

此外，將震後採集的噴砂土樣與全取樣岩芯進行比對，發現噴砂（棕黃色細砂，石英含量高）的外觀、粒徑（多介於粉土至細砂）及顆粒型態（圓度、球度），與鑽孔岩芯中深度約 0.3 ~ 1.8m 的回填砂層最為相似，推測淺層回填土是本次液化噴砂的主要來源之一。然而，部分研究透過粒徑分布曲線比對，指出噴砂的細料含量（<#200 篩）相對較低，此特徵或與更深層的砂土有關，暗示噴砂來源可能不只一層，或有混合情況發生。

三、地下水特性分析

惠安街地區缺乏長期的地震前地下水位紀錄，但參考鄰近水利署「安慶」觀測站資料，美濃地震時，該站水位瞬間上升約 1.1m（圖 6），顯示地震可能引發區域性水位抬升。震後利用既有鑽孔設置觀測井，發現本地區地下水位約在地表下 1.6m 左右，且水位歷線呈現明顯的週期性波動，與沿海潮汐變化高度相關，顯示此區地下水文易受外部水體影響，水位敏感性高（圖 7）。

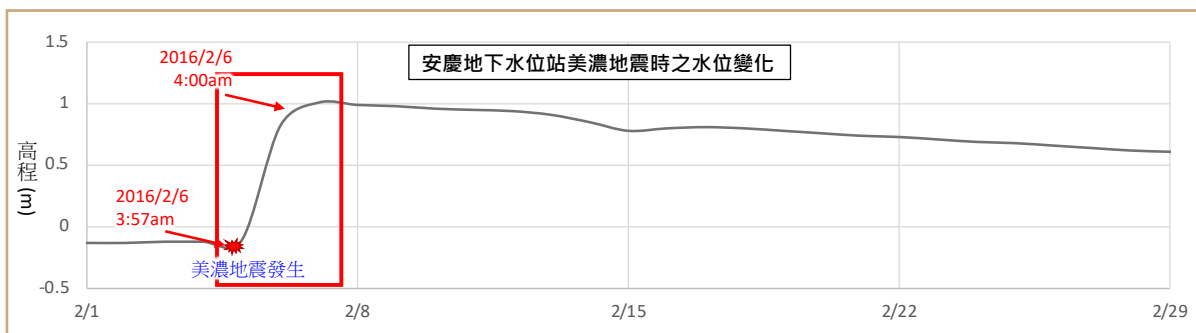


圖 6 美濃地震時安慶站地下水位變化

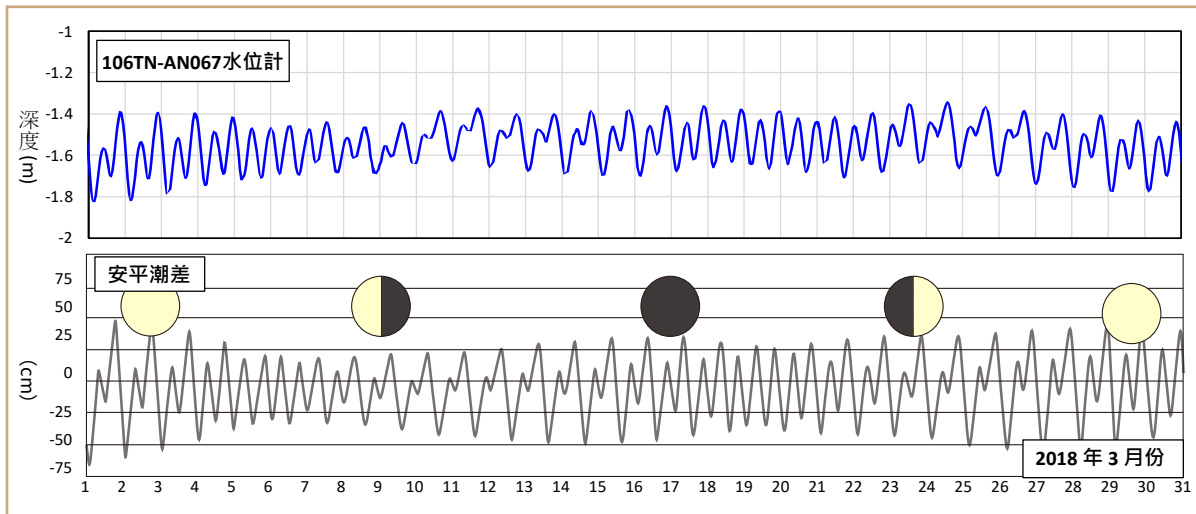


圖 7 惠安街地下水位與沿海潮汐關係變化

四、綜合致災因素分析

綜合各項調查結果，推測惠安街液化災害及建物沉陷的關鍵因素包含：

(一) 淺層疏鬆回填土

早期魚塭回填區域是液化主要發生地。回填材料（多為粉土質砂）本身可能較疏鬆，且不同區域的回填時間、材料來源、施工品質不一，造成強度差異。噴砂土樣比對，也指向淺層回填土是液化來源之一。

(二) 敏感的地下水位

本區地下水位易受潮汐影響，且地震時可能發生異常抬升，接近地表。淺層飽和的疏鬆砂土極易在地震下液化。

(三) 地形與地質介面

災情嚴重區常位於舊魚塭邊界或土埂附近，這些區域可能是不同時期回填的交界，或回填土與原土埂的介面，這些介面

可能形成地質弱面，影響應力傳遞與孔隙水壓消散路徑。地震時，噴砂可能沿著這些介面或地形高程差（如惠安街側與府安路側約 50cm 高差對應舊魚塭邊界）噴出，導致特定區域嚴重沉陷。

(四) 建物型式與載重

災損程度與建物類型有明顯關聯。惠安街 161 巷後排多為獨棟 3 層樓建物，載重較大，基礎獨立，在下方土層液化失去承載力後，容易發生顯著的差異沉陷。而前排多為連棟 2 層樓建物，雖然也發生噴砂，但連棟結構基礎相連，整體勁度較大，抵抗沉陷的能力較佳，故災損相對輕微。

參、彰化員林市崙雅里案例分析

一、環境背景

崙雅里位於八卦山台地西側山腳下的平原區，屬於濁水溪沖積扇的一部分。921 地震時，該區是彰化液化災情最嚴重的區域之一，聚落內（芳社內）發生大規模噴砂，灰

黑色細砂泥水從地面、舊水井冒出，覆蓋地表，並造成多處房舍因地基液化而沉陷破壞。據當地居民口述，本地區在強降雨後，偶爾也會見到地面流砂的現象，且當地舊地名中有「出水里」，暗示本地區可能有地下水易於湧出的特性。

二、地質調查與沉積環境

921地震後，國震中心等單位進行了調查。早年研究（林美聆，2000）透過比對鑽孔資料與周遭古井深度、民宅噴砂土樣的粒徑分析，初步判斷液化主要發生在地下約4.9～7.9m的砂土層（圖8）。

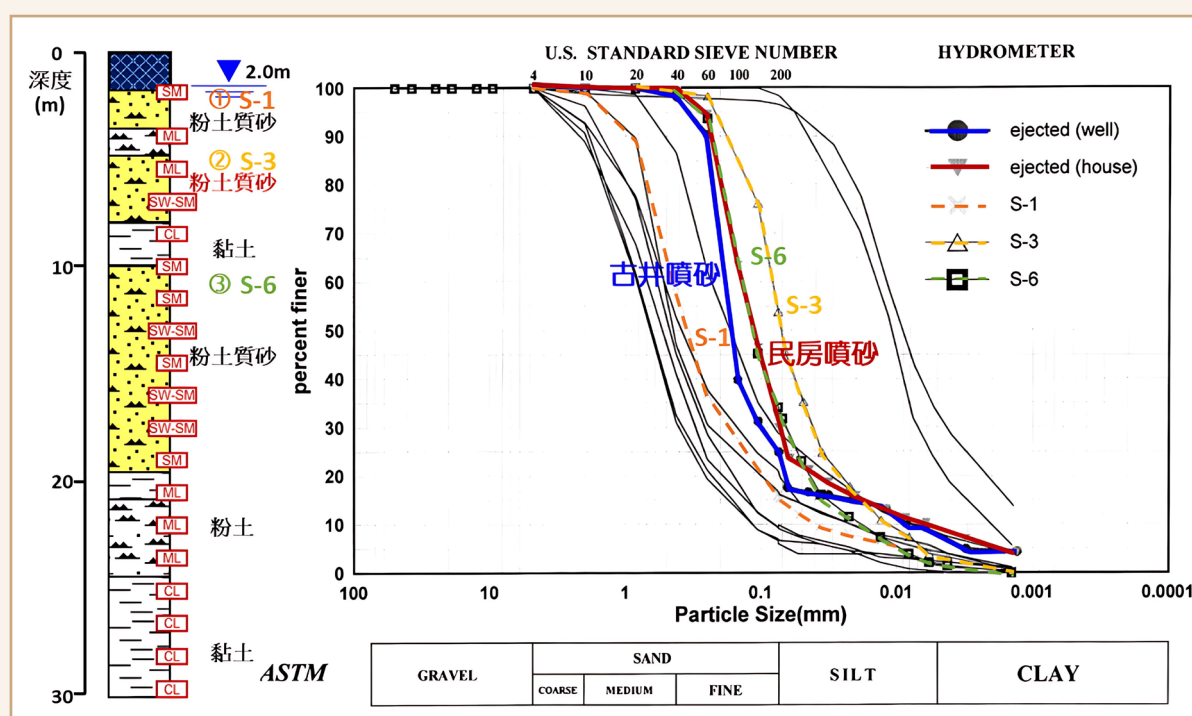


圖8 崙雅里既有資料調查內容

為更深入了解，近年執行了補充調查，包含多孔 SPT 鑽探及全取樣岩芯分析。根據全取樣岩芯判釋，崙雅里地下 30m 範圍內的沉積環境，主要由河相至山麓沖積扇相所構成。可辨識出至少三個沉積層序（圖9，由下而上，層序界面暫稱 SB1、SB2）。每個層序代表一次地質環境的改變。

整體而言，本地區沉積物以砂土為主，夾有少量礫石（尤其東側靠山區）。從全取樣

岩芯觀察，層序3（較上部）的土壤顆粒較細，多屬細砂等級，與921地震噴出的灰黑色細砂特徵相符。在地下9.6m處採集含微量炭屑的土樣進行碳十四定年，結果約為距今 $2,320 \pm 30$ 年（BP），此年代大致對應層序界面 SB2 附近，有助於重建本地區的沉積歷史。判釋認為 SB2 界面（約2,000年前）對應當時濁水溪支流的「溢堤扇」沉積環境，沉積物以中粗砂為主。隨著時間演進，河流逐漸遠離，沉積物顆粒由下而上逐漸變細。

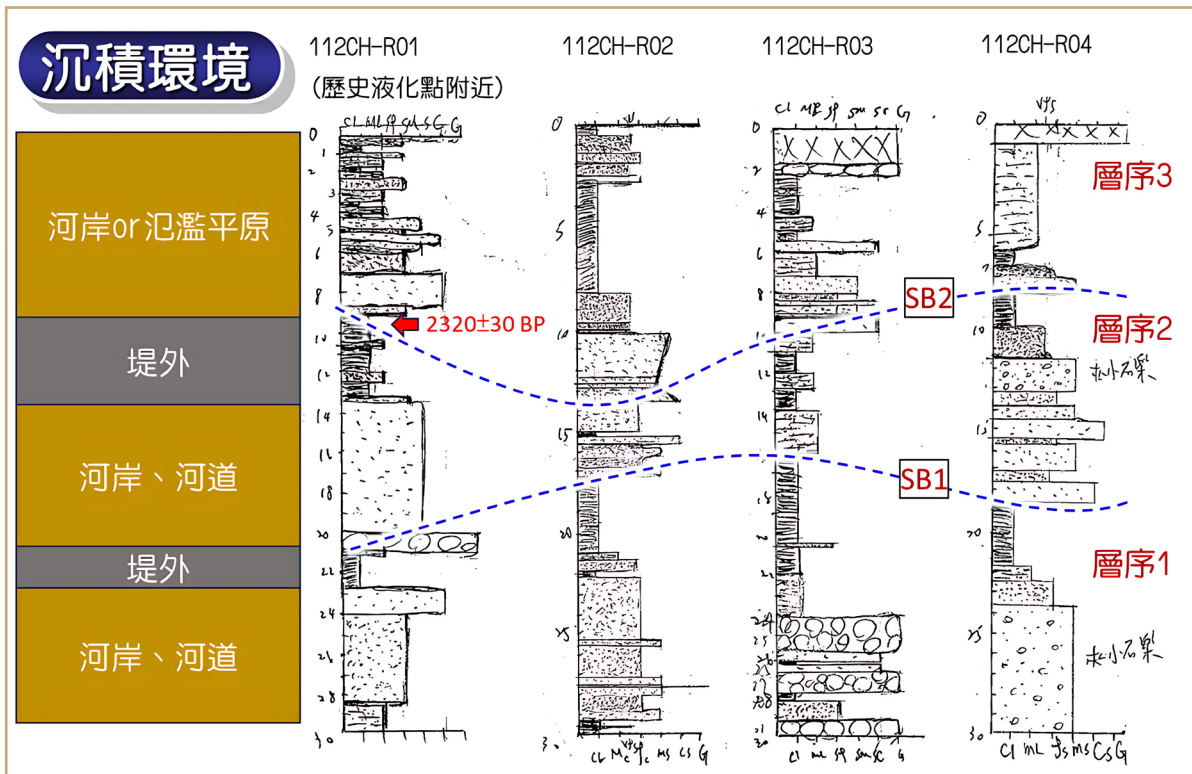


圖 9 崙雅里沉積環境分析

此外，透過岩象薄片分析比較噴砂樣與岩芯樣，發現崙雅里 921 地震噴出的砂樣主要為灰黑色細砂。岩象薄片分析顯示，其礦物組成中含有高比例（達 43%）的板岩和變質砂岩岩屑，這些來自中央山脈變質岩區的碎屑，是砂土呈現灰黑色的主因，且顆粒多呈扁平狀。

選取全取樣岩芯中不同深度的砂層製作岩象薄片，與噴砂樣本進行礦物組成百分比和粒徑特徵的比對。結果顯示，深度約 4.5m 左右的砂層樣本（變質岩屑含量 >40%）與噴砂樣本的特徵最為接近（圖 10）。綜合判斷，921 地震的噴砂，主要來自於地下約 4.5m 深度的疏鬆灰黑色中細砂層。

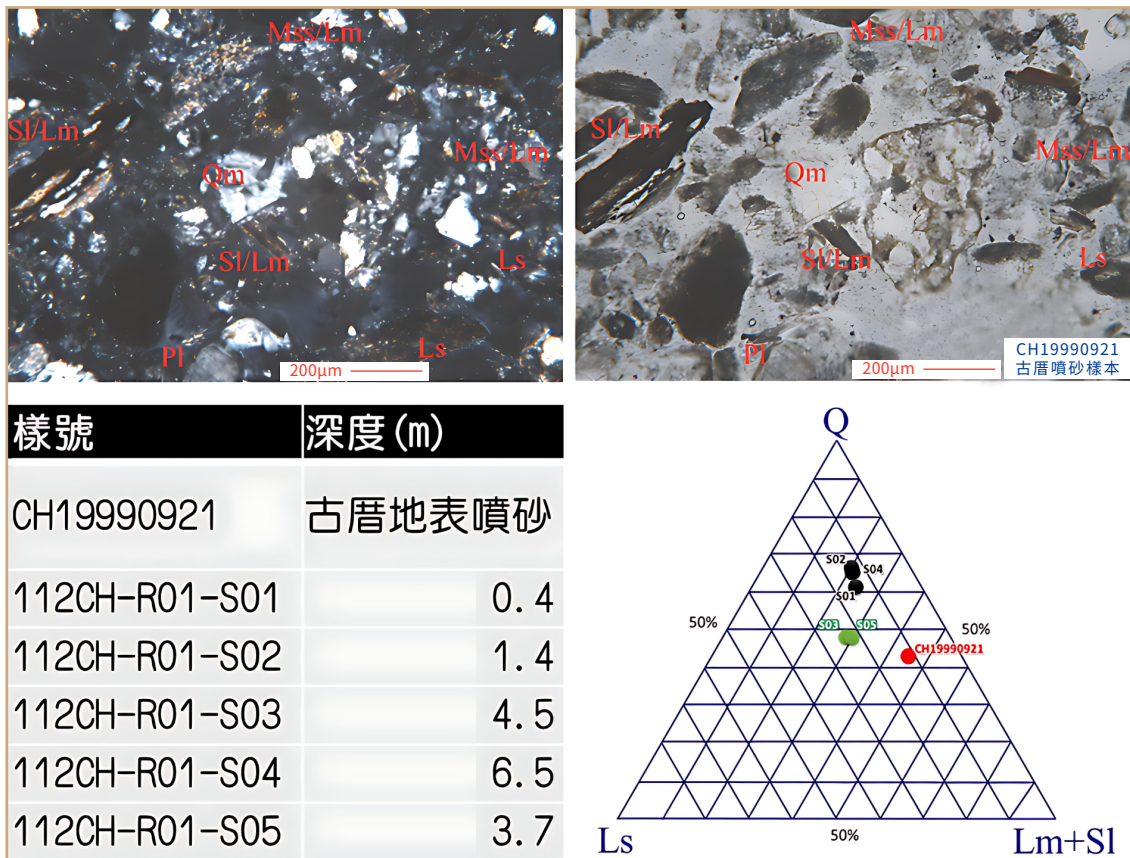


圖 10 崙雅里岩象薄片顆粒材料分析成果圖

三、地下水特性分析

崙雅里東側緊鄰八卦山麓，山麓地帶的地質以透水性良好的礫石層為主，是重要的地下水補注區。來自山區的地下水向西側平原流動。鄰近地下水位觀測井顯示，本地區的常時地下水位約在 3～4m 深。然而，更西側員林市區的水利署觀測井，在 921 地震發生時，該井水位曾瞬間劇升達 6m。

崙雅里地區的地質剖面顯示，在地下約 7m 處，存在一層相對不透水的黏土層（可能對應層序界面 SB2 附近的細顆粒沉積物），形成一個「上層滯水層」。來自東側山區的地下水補注，被此阻水層部分局限在淺

層，導致本地常時水位維持在較淺的 2～3m（與古井深度相符）。這種水文條件，使得淺層砂土長期處於飽和或接近飽和狀態。

四、綜合致災因素分析

綜合地質、水文及地震資料，崙雅里土壤液化及噴砂的致災機制與因素可歸納如下：

（一）易液化土層

地下約 4.5～7.9m 範圍內，存在一層相對疏鬆的細砂層，其顆粒組成與 921 噴砂樣本高度符合，是主要的液化潛在層。

（二）高飽和水位

由於東側八卦山麓的地下水補注，以及下

方存在阻水黏土層，導致淺層常時地下水位偏高，使得易液化的細砂層長期處於飽和狀態。

(三) 地震觸發

921 集集地震的強烈地動，提供了觸發液化的能量。

(四) 水力梯度與滲流壓力

崙雅里位於山麓與平原交界帶，推測本身可能存在由東向西的地下水水力坡降。地震引起的劇烈搖晃，除了直接引發孔隙水

壓升高外，也可能導致來自補注區的水壓快速傳遞。鄰近觀測井在 921 地震所記錄到的水位劇升，也暗示本地區在地震時，可能發生顯著的水壓升高或湧水現象。這種水頭差產生的滲流壓力，會進一步降低砂土層的有效應力，提高液化及噴砂的可能性。

總結來說，崙雅里的液化災害是疏鬆的飽和細砂層、高地下水位（受局部阻水層與山區補注影響）以及強震動共同作用的結果（圖 11），且地震引發的瞬時水壓升高或水力梯度變化，可能扮演了關鍵角色。

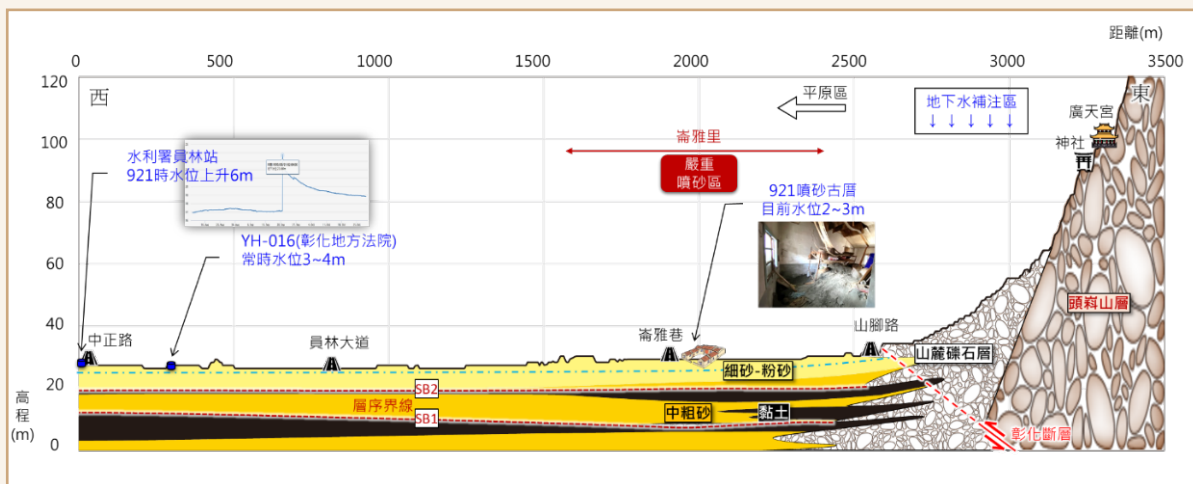


圖 11 綜合崙雅里土壤液化地質特性

肆、精進調查方法與應用

傳統上，土壤液化潛勢評估主要藉由取得的 N 值，配合土層分類與地下水位進行經驗公式計算。然而，從臺南惠安街和彰化崙雅里的案例可以看出，這種方法在解釋液化災害的局部差異性、精確判斷液化層次與噴砂來源等方面仍有所限制。為了更深入理解液化機制與致災細節，近年來引入了多種精進的調查與分析方法：

一、全取樣鑽探

相較於 SPT 主要獲取擾動土樣和 N 值，全取樣旨在獲取連續且相對未受擾動的岩土芯。可直接觀察土層的顏色、結構、層理、沉積構造、接觸關係等，進行更精確的地層劃分與比對。

透過岩芯觀察沉積物的特性（如顆粒大小、淘選度、圓度、層理型態、生物擾動或遺骸等），可以判讀該地層形成的古沉積環境（如河道、氾濫平原、潟湖、潮坪、沖積扇等），有助於理解地層的空間分布與特性成因。

二、岩象薄片分析

將土樣製作成極薄的切片，置於偏光顯微鏡下，觀察其礦物組成、顆粒形態、結構及膠結物等微觀特徵。可準確鑑定砂土中的礦物種類（如石英、長石、岩屑等），並估算其相對含量百分比，特定礦物組合或岩屑類型，能反映沉積物的來源地質區域。

透過比對噴砂樣本與不同深度岩芯樣本的礦物組成百分比與微觀特徵，可以更精確地鎖定噴砂的來源層。崙雅里案例即利用此方法，確認噴砂主要來自地下約 4.5m 的砂層。

三、歷史圖資與遙測影像套疊分析

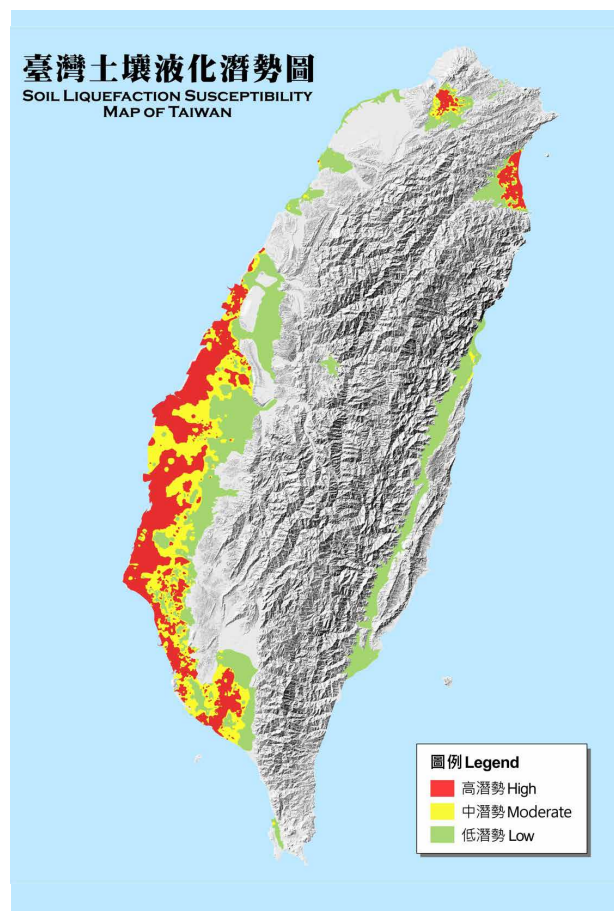
蒐集不同年代的地形圖、地籍圖、航空照片與衛星影像等，進行地理配準與套疊。可追溯區域地貌的歷史演變過程，如河道變遷、海岸線進退、土地利用變化（如農田變魚塭、魚塭變建地）等。精確定位人為活動（如填土、開挖）的範圍與時間。

以惠安街案例而言，透過套疊分析，確認了液化重災區多位於早期魚塭回填範圍內，且現存道路常與舊魚塭土埂位置重疊。進一步將液化災情分布圖與歷史地貌、土地利用圖疊合，有助於分析災情分布與特定地形單元（如舊河道、回填區邊界）或人為界線（如土埂）之間是否存在空間關聯性。

四、整合水文地質調查

除了地質調查，更需關注地下水位的時空變化及其影響因素。透過長期連續監測，了解常時水位、季節性變化、以及對降雨、潮汐等外部因素的反應。結合地震紀錄與水位監測資料，分析地震對地下水位（或孔隙水壓）的瞬時影響（如湧升）。

這些精進的調查與分析方法，能夠提供比傳統 SPT 為主的調查更豐富、更細緻的地層資訊與環境背景，有助於深入剖析複雜條件下的土壤液化機制，釐清關鍵致災因子，從而為特定場址的風險評估與防災對策，提供更可靠的科學依據。



伍、結論與建議

綜合臺南惠安街與彰化崙雅里兩個案例的精進調查與評估，本文證實土壤液化災害的發生與嚴重程度是多重因素交互作用的結果，呈現高度的複雜性與局部性。惠安街案例凸顯了人為活動（如魚塭回填）對液化潛勢與災損分布的關鍵影響，回填土的不均勻性及舊地形介面是重要因素。崙雅里案例則顯示了區域地質構造（山麓、阻水層）與水文條件（補注、高水位）的緊密耦合關係對液化機制的控制作用。兩個案例均指出液化影響深度可能相對較淺，且建物基礎型式與載重顯著影響其沉陷反應。精進調查方法（如全取樣、岩象分析、歷史圖資疊合）對於釐清複雜機制至關重要。同時，地下水位的高度敏感性與不確定性，是液化評估中最需關注的環節。

基於上述結論，提出以下建議以提升土壤液化防災能力：

一、應建立全國性、系統性的地下水位長期觀測網，特別是在液化潛勢區，以獲取穩定可靠的水位資訊，俾利進行更準確的潛勢評估與研究。

二、對於地質複雜或有人為擾動的特殊區域，在進行調查評估時，應提高調查密度並優先採用全取樣等精進方法，潛勢圖資也應適度標註提醒。

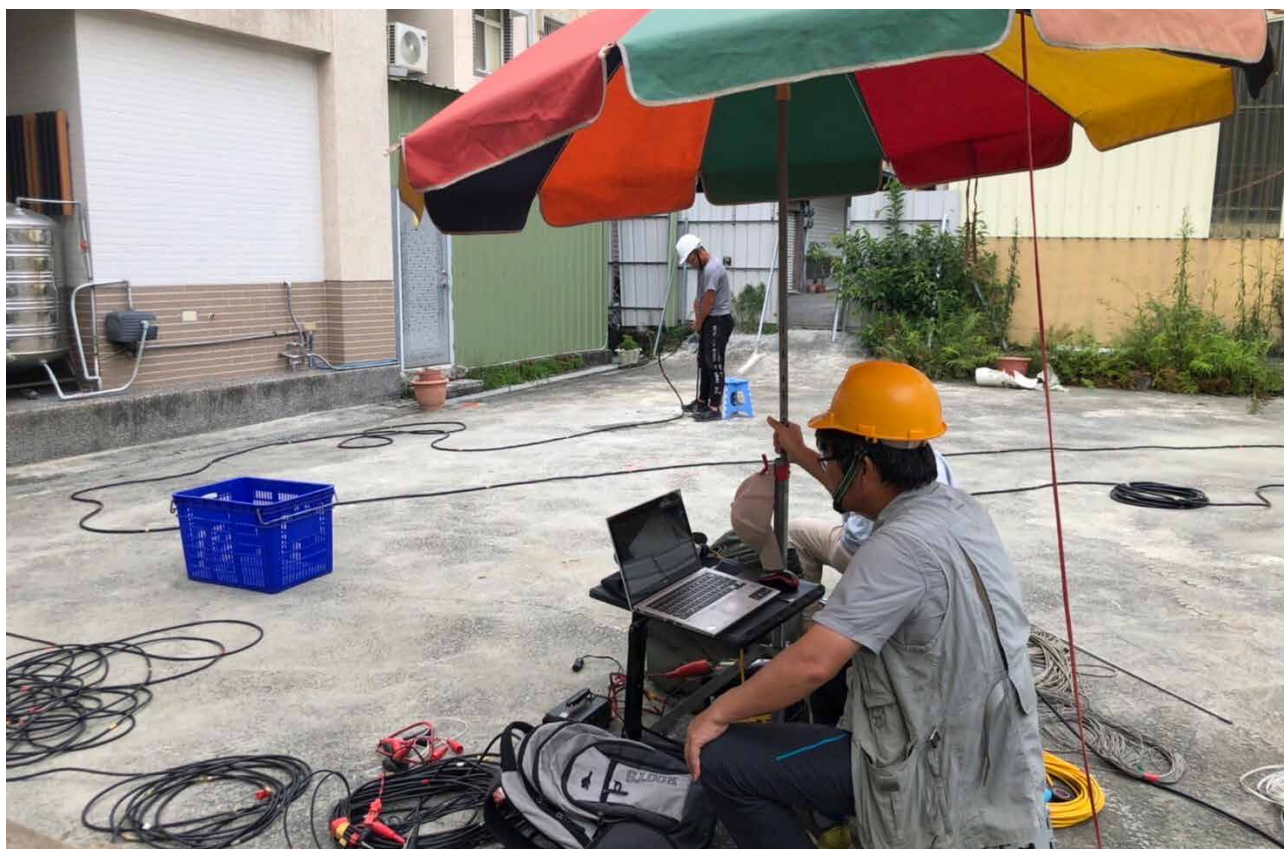
三、需建立土壤液化潛勢評估模型與圖資的常態化更新機制，納入最新的科研成果、調查資料與環境變遷資訊，使其與時俱進。

四、應加強跨領域整合研究與歷史案例資料庫建置，整合地質、水文、地震、工程

等多方面知識，為模型驗證與防災技術發展奠定堅實基礎。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「土壤液化潛勢調查分析與精進（5／6）成果報告」，經濟部中央地質調查所（2022）。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「土壤液化潛勢調查分析與精進（6／6）成果報告」，經濟部地質調查及礦業管理中心（2023）。
3. 盧詩丁、邱禎龍、蘇泰維、陳聰海、周坤賢、葉家志、楊智堯，「歷史土壤液化災害區之精進調查與評估探討」，地工技術第180期，第27-34頁（2024）。
4. 盧詩丁、邱禎龍、蘇泰維、周坤賢、楊智堯、葉家志、林宜修，「歷史土壤液化災害區之精進調查與評估」，土壤液化防治工程技術研討會暨國科會液化防災成果發表會論文集（2024）。
5. 林美聆，「九二一集集大地震全面勘災報告—大地工程震災調查」，國家地震中心（2000）。
6. 鐘令和，「美濃地震土壤液化現象初勘」地質35卷1期（2016）。
7. 張瑞津、石再添、陳翰霖，「臺灣西南部嘉南海岸平原河道變遷之研究」，國立台灣師範大學地理系地理研究報告（1997）。



風災豪雨



北迴鐵路和平崇德段 震後豪雨衍生災損評析

關鍵詞 Keywords

- # 0403 花蓮地震 0403 Hualien Earthquake
- # 臺鐵北迴線 North Link Rail Line
- # 複合型災害 Composite Disasters
- # 凱米颱風 Typhoon Kaimi
- # 落石危害度評估 Rockfall Hazard Analysis

台灣世曦工程顧問股份有限公司
鐵道工程部

工程師

林于超

計畫工程師

郭觀豪

副理

陳俊樺

國立陽明交通大學

土木工程學系

博士後研究員

林承翰

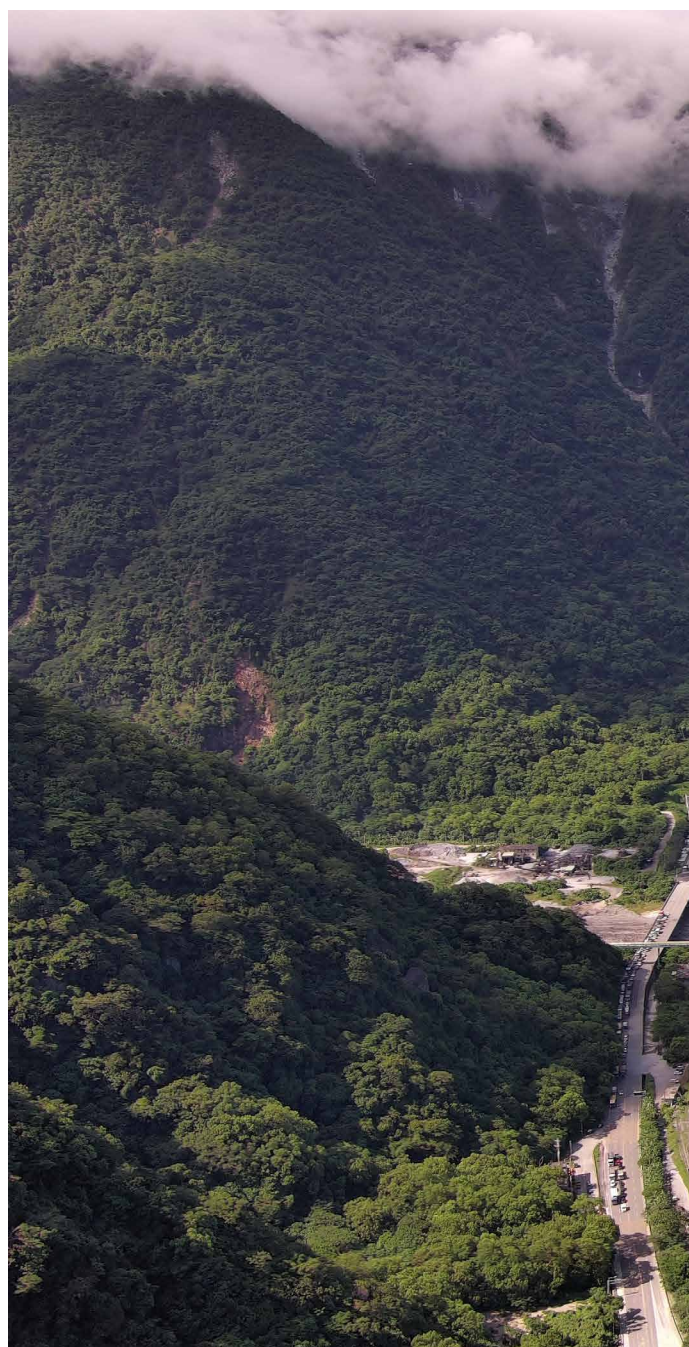
教授

翁孟嘉

國營臺灣鐵路股份有限公司

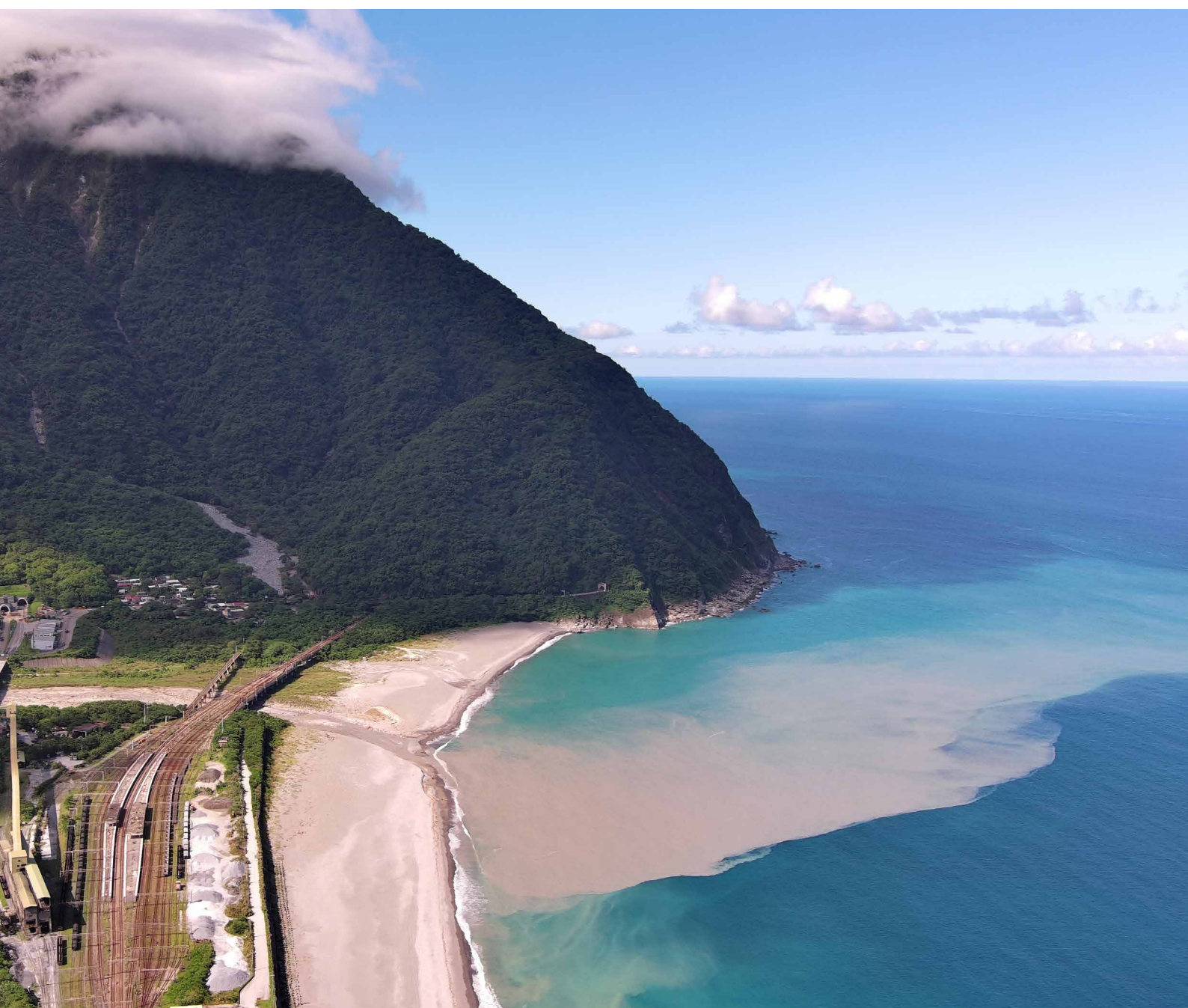
副總經理

陳宗宏



▲ 花蓮縣秀林鄉·臺鐵和仁車站

2024 年 4 月 3 日，花蓮大地震重創臺灣東部山區，特別是臺鐵北迴線和平至崇德路段，造成邊坡鬆動、落石與崩塌等災害，後續鋒面豪雨與凱米颱風更引發土石流與設施損毀等複合型次生災害，導致交通中斷與災損擴大。北迴線鐵路為東部交通命脈，其災損暴露出當前防災體系面對複合型災害之脆弱性，本研究透過災後調查及遙測影像比對，初步分析臺鐵里程 K40 至 K56 路段之災害型態與成因，以掌握潛在風險並強化防災韌性。研究指出，地震後山區進入不穩定期，崩塌活動與土砂運移劇烈，尤其是在極端氣候條件下，誘發災害之頻率與強度均顯著提升，因此建立具整合性與韌性的防災體系成為當務之急。



壹、前言

近年來隨著氣候變遷加劇與地震活動頻繁，臺灣東部地區之交通基礎建設面臨重大挑戰。2024 年 4 月 3 日發生花蓮地震，導致東部多處山區發生不同規模之落石災害，嚴重影響保全對象與主要交通幹線，並造成龐大經濟損失。地震所造成之直接破壞僅為初期衝擊，後續鋒面豪雨及颱風侵襲則進一步惡化原已脆弱之地質條件，觸發落石、二次坍方及土石流等次生災害，使得原有災損擴大，也增加搶修與重建的困難度。此次災害型態由單一地震事件演變為「地震—豪雨」之複合型災害，凸顯當前防災體系須強化韌性與整合性風險管理機制，以提升對複合災害之應變與防護能力。

臺鐵北迴線為東部交通運輸的重要命脈，具有不可取代的重要性。由於臺灣東部多山，公路運輸受限且易受天候影響，北迴鐵路提供一條穩定、安全且高效的交通路線，除可有效縮短宜蘭、花蓮與臺北間的距離外，亦支撐當地居民的通勤與就醫需求，更是觀光與物資流通的基礎，對於花東地區經濟發展與生活品質提升具有關鍵性作用。此外，在天然災害發生時，北迴鐵路更具備緊急疏散與物資調度的戰略功能，對國土安全維護與區域平衡發展至關重要。因此，當重大天災造成路線中斷時，更凸顯鐵路不僅是交通設施，更是連結人與生活、發展與安全的重要命脈。

本文聚焦於北迴線和平至崇德路段於地震後所引發之衍生災害，除進行初步災損評估與現地調查外，亦建構一套災害防護評估方法學，綜合納入環境條件、重現週期、防護工程及風險設施等關鍵因子。期

望透過本研析成果，為未來交通基礎設施之防災規劃與災後應變策略提供科學依據，進一步強化整體基礎設施的抗災韌性。

貳、臺鐵北迴線受災原因及歷程

地震發生後，山區邊坡會進入一段不穩定時期，比平時更容易產生崩塌與土石流等災害。震後山崩常見類型包括新生崩塌、崩塌地再活動及坡面土砂運移（詳圖 1）。以臺鐵北迴線和平站至崇德站區間為例，地震導致沿線上邊坡土石鬆動且部分集水區發生崩塌，再加上連續鋒面影響，該地區頻繁遭遇短時強降雨及強陣風等極端天氣，這些因素加劇地質不穩定性，導致多次落石及土石流等重大災害，對於鐵路行車安全及運輸效率構成嚴重威脅。

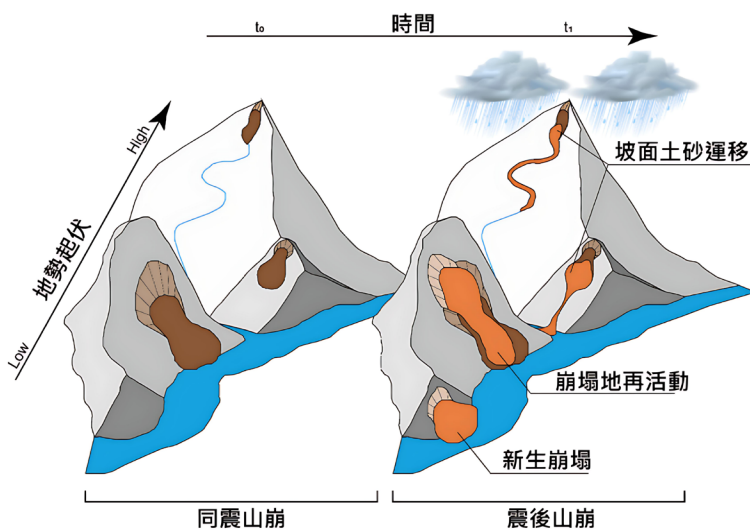


圖 1 地震後主要三種山崩類型 (改繪自 Tanyaş et al., 2021)

凱米颱風過後，該路段災情更加嚴峻。颱風期間，沿線山坡坍方總量約達兩萬立方公尺，土石流頻繁發生，部分路段發生溢淹軌道，甚至導致橋梁結構受損。這些災害多集中於和平站至崇德站間之露天段鐵路沿線，頻繁的落石和土石流不僅增加維修及搶修難度，也對交通安全造成極大挑戰。

受災影響路段大致可分為六個主要區域，分別為臺鐵北迴線里程 K40、K48、K51、K53、K56 及崇德車站附近，面臨的災害包括河道與過軌箱涵淤積、結構物受損、土石流、落石等（詳圖 2），對行車安全構成威脅。儘管臺鐵公司已經進行緊急搶救並恢復通車，且積極研議第一階段改善措施來修復災損設施；惟地震後上邊坡堆積

的大量鬆動土石，可能因後續強降雨及颱風，進而引發落石或土石流等次生災害，因此後續須審慎評估面對複合型天然災害之防護對策，以提升列車營運安全。

參、北迴線和平至崇德路段災損概況與調查

本團隊除於 0403 花蓮地震當日下午，立即前往臺鐵北迴線里程 K40 至 K51 路段實地勘查災情外，後續每逢天然災害發生後，亦均親赴 K40 至 K56 路段現地進行勘查與資料蒐集，持續掌握北迴線和平至崇德間之災損情形與演變歷程，並對災害事件進行綜整與紀錄分析，概述如下。



圖 2 臺鐵北迴線和平 - 崇德沿線受災情形及位置圖

一、0403 花蓮地震受災狀況

依據交通部中央氣象署地震報告（2024 年 4 月 3 日 07 時 58 分，詳圖 3），本次地震震央位於花蓮縣壽豐鄉近海，芮氏規模 7.1，花蓮縣和平地區測得最大震度 6 強，太魯閣及花蓮市區則為 6 弱。該地震造成臺鐵北迴線和平至崇德間鐵路沿線山側發生大規模崩塌及落石災情，嚴重威脅交通設施。此外，地震所釋放之高能震動引發岩體內部應力重新分布，導致岩盤出現新生裂隙，亦可能促使部分土壤結構鬆動，降低邊坡及地層之穩定性，導致後續降雨、餘震等

觸發因子形成高潛勢之次生災害。

（一）北迴線里程 K40 路段

K40 路段位於臺鐵和平車站南端，山側地形以高陡邊坡為主，地質主要由強度高之九曲大理岩及片麻岩所構成。根據地礦中心劃定，該區已被圈繪為地質敏感區，屬岩體破碎與崖錐堆積地形，即使在短期內可維持穩定，但在豪雨或地震等極端事件影響下，易誘發岩屑崩滑或土石流等地質災害。

0403 地震後，該路段發生大量巨型落石侵入鐵路與公路路廊（詳圖 4），導致沿線人

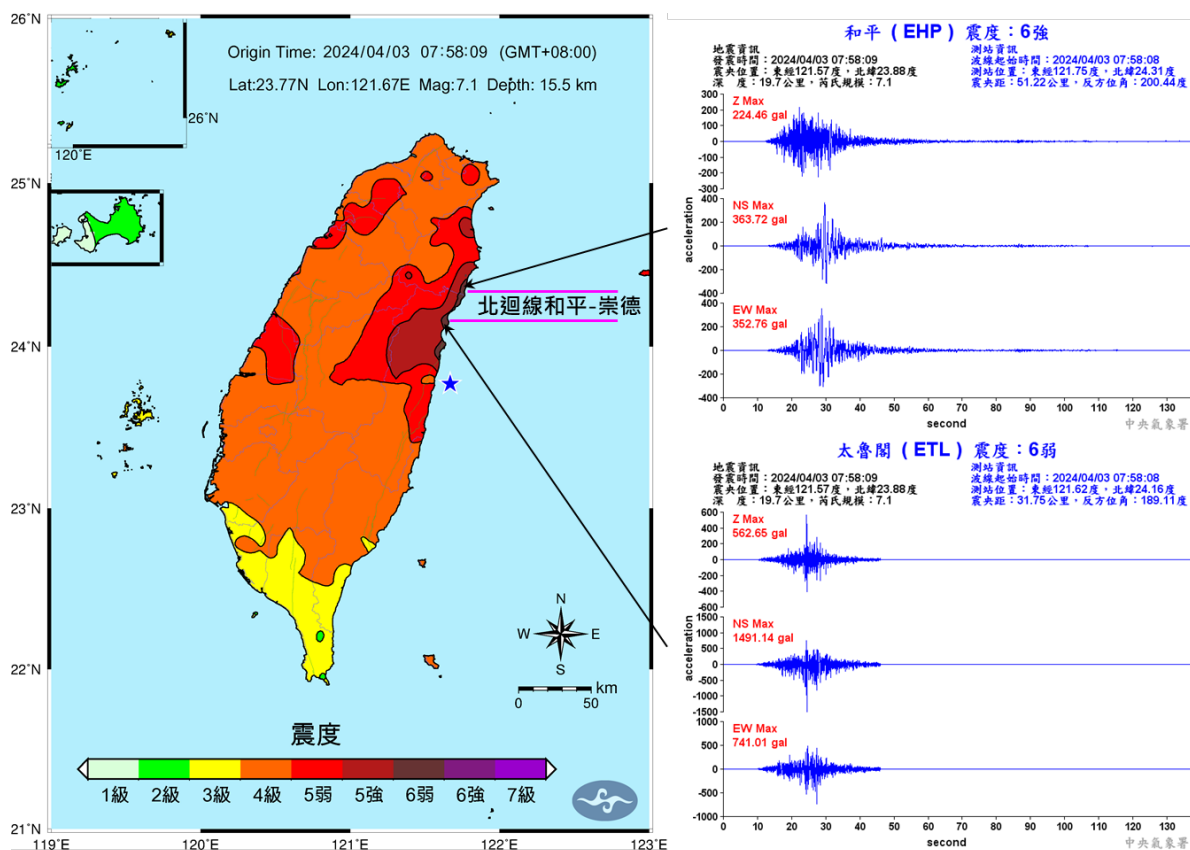


圖 3 0403 花蓮地震震度圖及和平與太魯閣測站資料 (改編自中央氣象署)

工設施受到嚴重損毀，包括公路山側落石防護柵、台 9 線路面及鐵路間之擋土牆等，對列車行車安全構成重大威脅。根據現地調查，掉落岩塊之岩性均屬九曲大理

岩，來源包含新生破裂岩塊與堆積塊體，部分岩塊於運動過程中遭到撞擊破裂成多個小岩塊，並於台 9 線路面造成明顯撞擊坑與滾動擦痕。

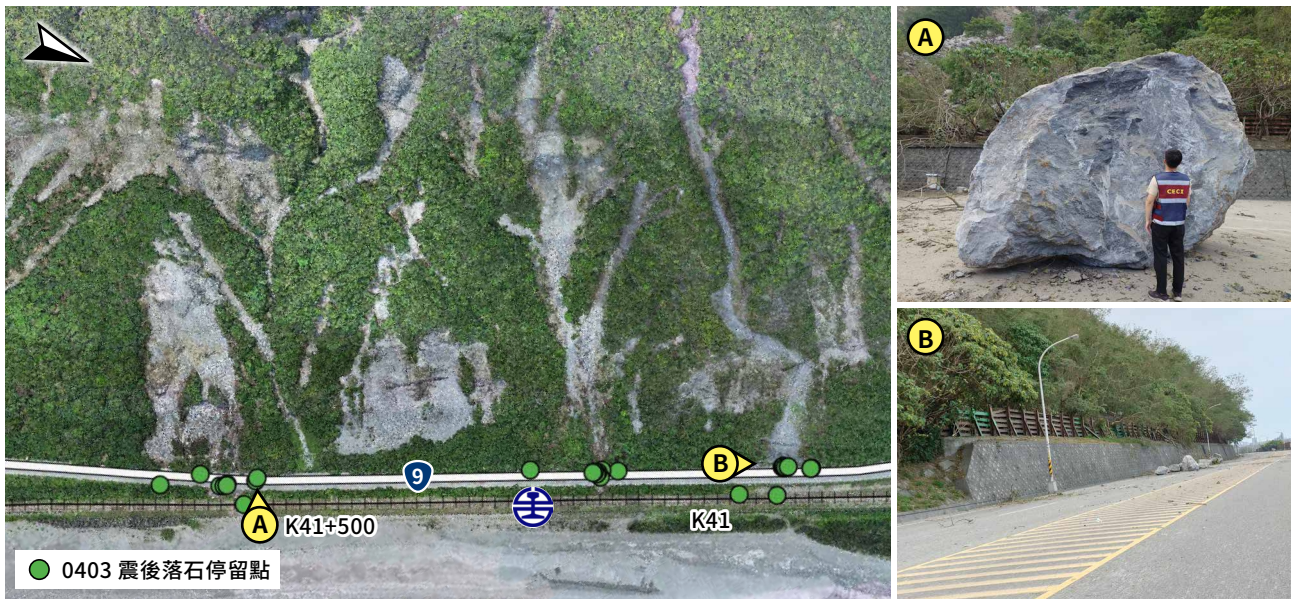


圖 4 地震後 K40 路段之落石停留紀錄點

本事件影響區域主要集中於臺鐵北迴線 K40+500 至 K41+700 間，其中三顆巨型落石穿越公路防護後侵入鐵道區，靠海側圍牆外仍可觀察到歷次落石入侵軌道之殘留痕跡，顯示該路段落石災害發生頻率高，潛勢風險顯著。另外，本路段上邊坡為高陡地形，存在大量孤石，部分危石位於地勢險峻、人力難以接近之處，長期影響台 9 線公路及北迴鐵路營運之安全。

(二) 北迴線里程 K51 路段

K51+200 至 K51+500 路段位於（新）和仁隧道與（新）清水隧道之間，主要出露地層為九曲大理岩，特徵為硬度高且節理間距大。本路段附近大富溪為農業部農村發展及水土保持署公告之土石流潛勢溪流（編號 DF024），且根據 2022 年環境地質圖顯示，上邊坡亦為公告落石潛勢區。

回顧歷史災害紀錄，本路段 K51+485 西正線上邊坡於 2016 年曾發生落石事件，滾落至軌道範圍之落石重量約 26 公噸；另根據公路局紀錄，台 9 線 158K+300 至 500 區間自 2020 至 2023 年間共發生 24 起落石事件，顯示該路段落石活動頻繁且活躍。

於 0403 地震期間，本路段發生大規模落石災害（如圖 5），落石穿越台 9 線，嚴重破壞落石防護柵，並掉落至東正線軌道範圍，甚至撞擊破壞明隧道頂部側牆，對行車安全構成重大威脅。圖 5-E 為勘災時所發現掉落在臺鐵北迴線範圍內的最大落石塊體，經手持 iPhone 之 LiDAR 掃描建模後估算，其體積約 17 立方公尺，推估重量約 46 公噸，該落石在運動過程中直接衝擊明隧道頂板及 RC 側牆，導致混凝土保護層損毀及鋼筋外露等結構損壞。

此外，根據臺鐵在本區域所建立落石告警系統畫面（如圖 5-F），當時有一落石穿越東正線軌道，雖最終未停留於軌道上，但已造成運動路徑上的軌道道床損壞，依現地勘查該落石撞擊痕跡且未於灘地發現該落石停留之塊體，因此推測其運動路徑：撞擊明隧道 RC 側牆頂部，彈跳入侵東正線軌道區，衝擊軌道板與旁邊擋落石牆，再滾動至下邊坡且受植被掩蔽，隱匿其最終停留位置。經綜合評估顯示，本路段邊坡落石災害潛勢較高，對台 9 線與臺鐵行車安全均構成實質威脅。



圖 5 地震後 K51 路段受損紀錄

二、震後連續鋒面及 0724 凱米颱風引致土石流災害

2024 年 7 月 24 日，凱米颱風登陸臺灣時為強烈颱風，根據國家災害防救科技中心報告，颱風在全臺造成 2,132 處新生崩塌，

總崩塌面積高達 1,064.74 公頃。而依據中央氣象署監測累積雨量圖（詳圖 6）顯示，北迴線和平至崇德路段當日累積雨量高達 400 毫米，於地震後已弱化之地質條件下，極端強降雨觸發一系列災害連鎖反應，形成典型的災害擴散效應。

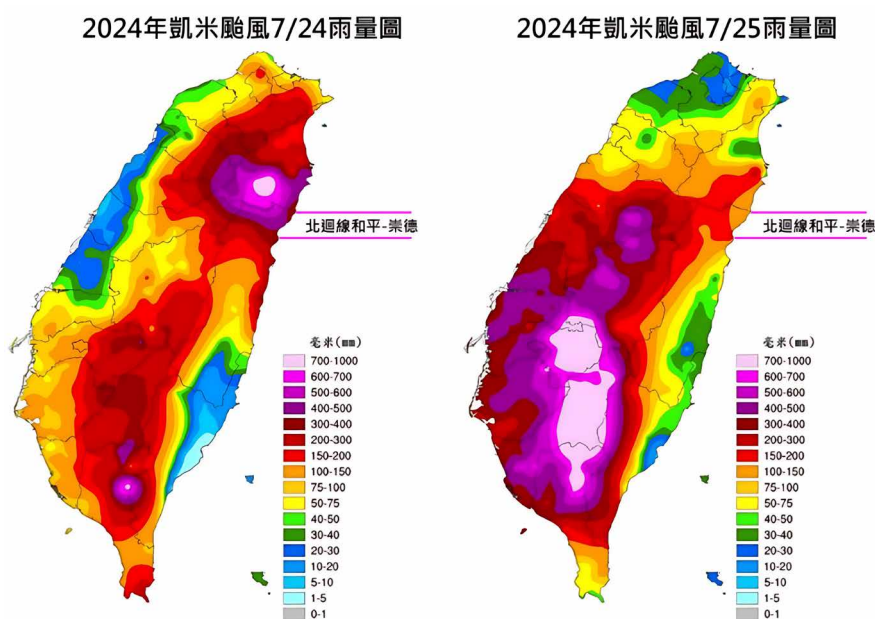


圖 6 2024 年凱米颱風 (7/24-25) 之雨量圖 (改繪自中央氣象署)

(一) 北迴線里程 K48 路段

K48+400 至 K48+770 路段主要地層為開南岡片麻岩，岩性節理發達且極易風化。雖於 0403 花蓮地震期間未造成直接災害，但根據震前與震後之衛星影像比對結果（詳圖 7），該路段上游集水區面積約 30 公頃，其中因地震誘發新增崩塌面積約 3.9 公頃，崩塌率高達 12.8%，顯示本區域為嚴重崩塌區，且大量崩塌物已堆積於上游河道內，造成潛在淤積與輸移之風險。

依據農業部農村發展及水土保持署於 2024 年公告資料，流經本路段之野溪已被列管

為高潛勢土石流潛勢溪流（編號 DF172）。受梅雨鋒面及強降雨事件影響，本區於 2024 年 4 月 22 日、6 月 29 日、7 月 1 日及 7 月 24 日發生多起土石流災情（詳圖 8），河道內淤積大量土石，並溢流入下邊坡區域，進一步影響公路與鐵道設施。其中尤以 2024 年 7 月 24 日凱米颱風影響最嚴重，土石流沖毀原設於鐵公路間之擋土構造，導致軌道區大量土石淤積，淤積高度逾 3 公尺（圖 8-C），嚴重影響鐵路行車安全。顯示本路段集水區未來存有高潛勢之土石流發生風險，須持續監測且評估防護工程之有效性。



圖 7 地震前後 K48 路段集水區之變化情形(改繪自農業部農村發展及水土保持署)



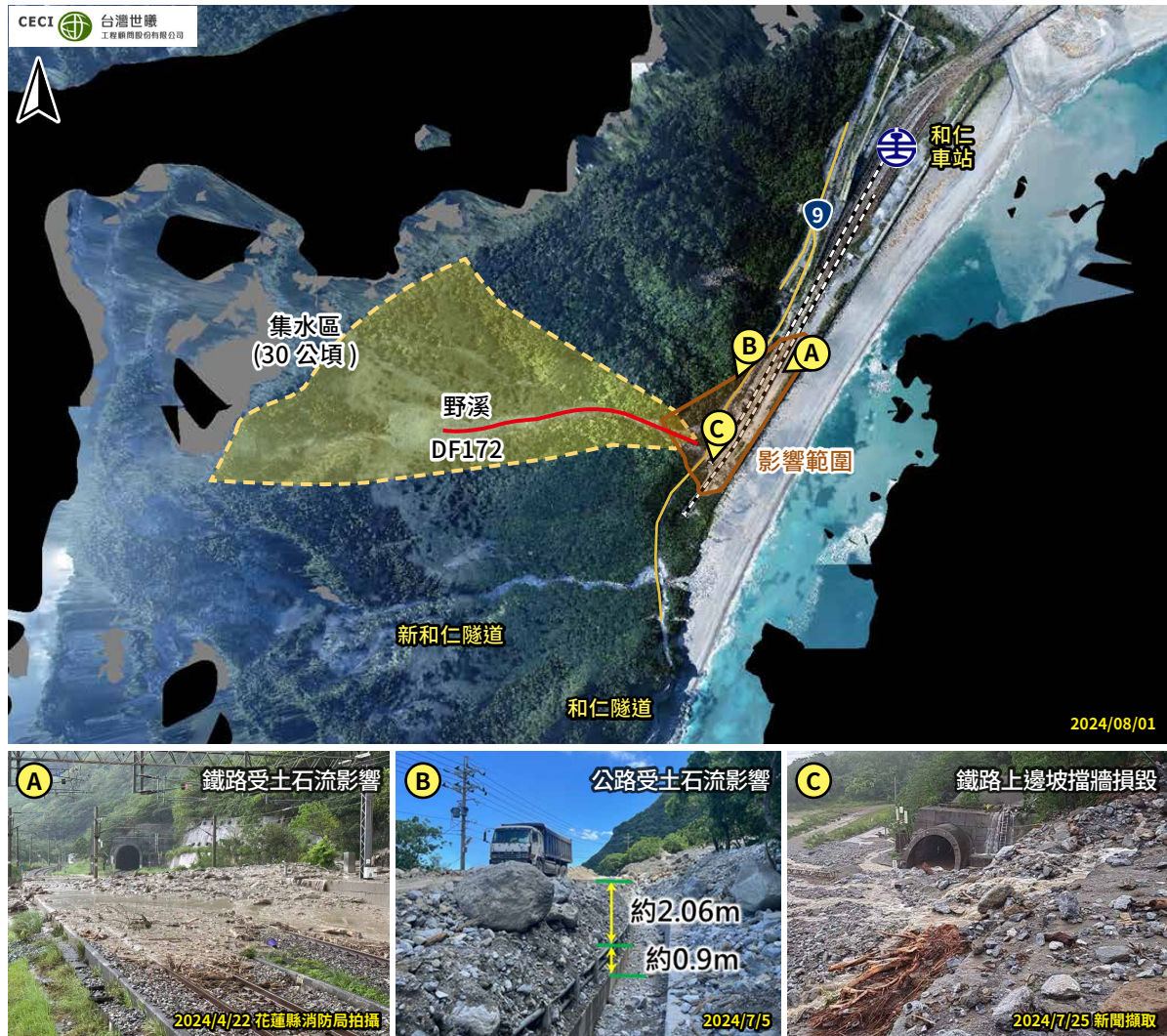


圖 8 災後 K48 路段受損情形

(二) 北迴線里程 K51 路段

K51 路段的大清水溪橋為跨大富溪之橋梁，大富溪為農村發展及水土保持署公告之土石流潛勢溪流（編號 DF024），集水區面積約為 529 公頃，源頭標高達 2,082 公尺。根據 0403 地震前後衛星影像比對結果（詳圖 9），源頭區出現至少兩處明顯崩塌地貌，新增崩塌面積約 31.7 公頃，崩塌率高達 6%，顯示本集水區為嚴重崩塌區。

2024 年 6 月 21 日 16 點 30 分發生大量土石流溢淹至西大清水溪橋（詳圖 10-C），導致列車出軌，依據鄰近清水斷崖雨量站

資料顯示，當日 24 小時降雨量僅 12 毫米，遠低於此區土石流警戒值（300 毫米）。為進一步掌握災後河道之地形變化及輸砂特性，本團隊於同月 27 日前往大富流域進行現地踏勘。沿下游段鐵路設施溯溪至中、上游區域，皆可觀察到大量堆積物堆積於主河道內（詳圖 10-B），除來自上游之料源，亦包含河道兩側大小不等之岩屑崩滑。再往上游移動，更可觀察到河道兩側受土石流影響，造成坡址已嚴重掏空（詳圖 10-A）之情形，未來極可能受持續切蝕作用而發展為不穩定崩塌溝渠，成為新的潛在土石流觸發點。



圖 9 地震前後 K51 路段集水區之變化情形(改編自農業部農村發展及水土保持署)

初步分析其原因，此為地震所觸發之集水區上游崩塌，產生大量鬆散土砂，成為本次土石流之主要料源。西大清水溪橋位於大富溪左岸彎道段，雖設有橋台保護工以防止基礎淘刷，但亦改變原有水流路徑，

使得河道轉彎半徑縮小，形成強烈轉彎效應，該處水流受轉向約束產生外側集中冲刷力，導致局部河床隆起及水流溢流，最終造成大量土石流溢淹至鐵路橋之橋面板上，可能為本次致災主因。



圖 10 災後 K51 路段受損情形

(三) 北迴線里程 K53 路段

K53 路段小清水溪橋為跨石公溪橋梁，於 0403 花蓮地震期間未造成直接災害；惟根據歷史資料顯示，石公溪曾發生土石流，且上游曾經採礦（東豐石礦場），利用震前與震後之衛星影像比對結果（詳圖 11），其集水區面積約 677 公頃，因地震誘發新增崩塌面積約 115 公頃，崩塌率高達 17%，顯示本區為嚴重崩塌區，且大量崩塌物已堆積於上游河道內，造成潛在淤積與輸移之風險。

2024 年 6 月本區域發生土石流災害，導致石公溪土石掩埋公路及匯德休憩區，並於下游臺鐵小清水溪橋之橋墩處形成嚴重淤積，透過 7 月 9 日衛星影像發現，石公溪上游因土砂堆積，導致溢流出河道而發展新路徑至下游側，直接衝擊台 9 線及匯德休憩區。隨後於凱米颱風期間，石公溪

與小清水溪流域再次爆發大規模土石流災害，台 9 線匯德隧道北口遭土石溢淹，淤積高度逾 5 公尺（詳圖 12-A），匯德休憩區亦再度遭到掩埋；位於下游側之鐵路西小清水溪橋則遭完全沖毀（詳圖 12-B），僅部分鋼軌與枕木懸掛於原位，東小清水溪橋橋面覆蓋大量土砂，經現場勘查後，靠近上游側之止震塊已被沖毀，顯示此次土石流具有極大破壞力。本次事件未造成行車事故，惟已大幅降低臺鐵北迴線整體運能；另小清水溪上游之土石亦持續溢流至清水隧道南洞口上方邊坡（詳圖 12-C），對東正線列車行駛安全構成重大威脅。



圖 11 地震前後 K53 路段集水區之變化情形(改繪自農業部農村發展及水土保持署)



圖 12 災後 K53 路段受損情形

(四) 北迴線里程 K56 路段

K56+620 至 K57+900 路段位於（新）崇德隧道南口與臺鐵崇德站間，雖然 0403 花蓮地震並未造成直接災害，但根據震前與震

後之衛星影像比對結果（詳圖 13），上邊坡新增兩處裸露區，顯示坡面穩定已逐漸失穩，後續受鋒面及颱風降雨之影響，崩塌區持續向南擴展，呈現惡化趨勢。



圖 13 地震前後 K56 路段上邊坡之變化情形 (改繪自農業部農村發展及水土保持署)

2024 年 7 月 1 日、7 月 24 日、7 月 27 日、9 月 8 日發生多起土石流災害，造成大量土石侵入公路與鐵路範圍，導致交通中斷。其中尤以凱米颱風期間災情最為嚴重，K56+650 至 K56+820 路段發生大規模土石流災害，土石湧入並淹沒鐵路軌道

區，淤積高度達 3 公尺（詳圖 14-B）。根據 2024 年 8 月 2 日空拍資料，未來源頭區之崩塌範圍仍可能向南延伸（詳圖 14 黃色區塊），將持續對下游側之鐵公路安全構成嚴重威脅。

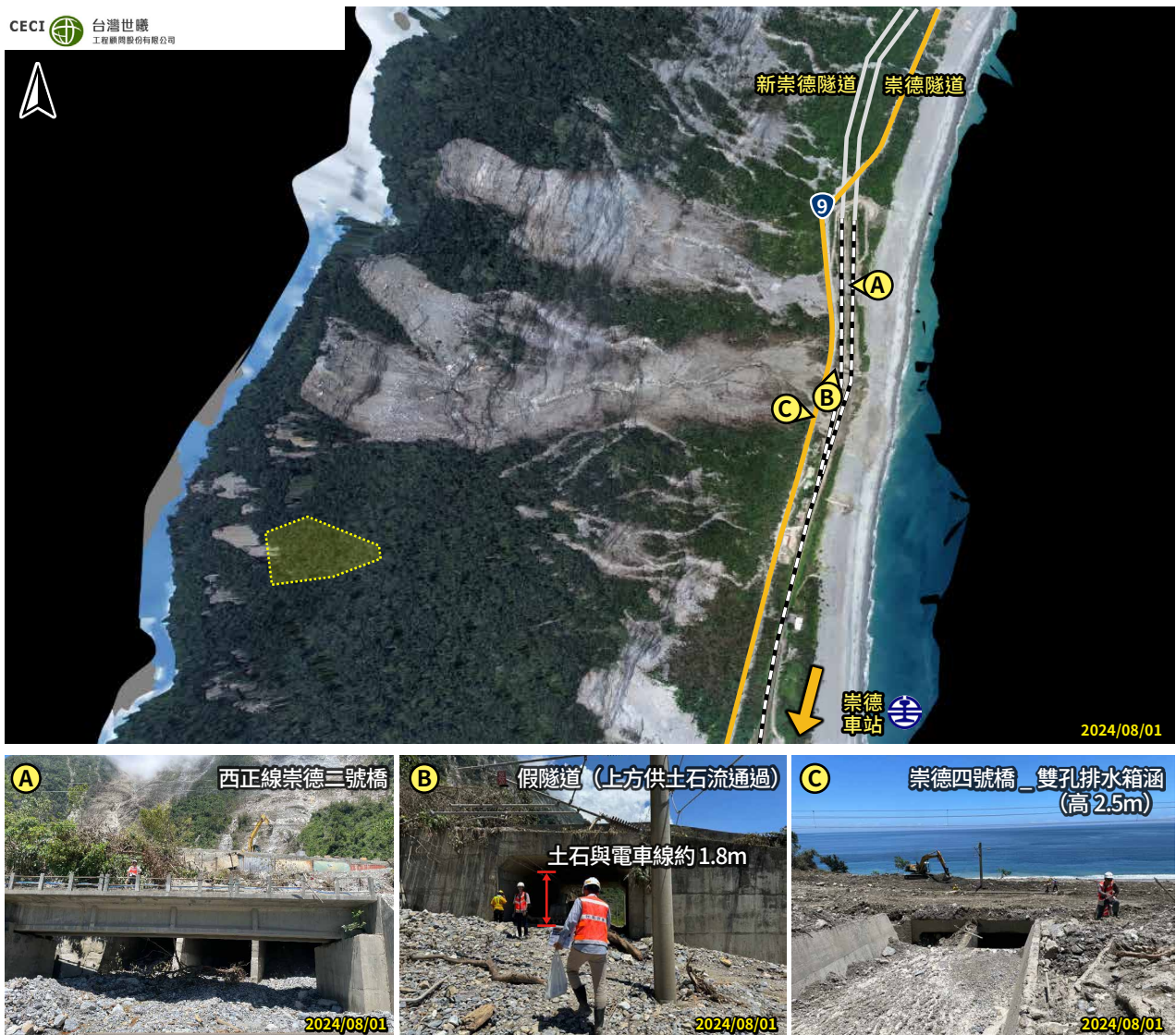


圖 14 災後 K56 路段受損情形

肆、案例調查與模擬及防護初步探討

一、調查與模擬概述

由於地震發生時可能帶來立即的落石危害，避災因應時間短，因此有必要了解落石災害之破壞機制，以利研擬防制對策並預先防範。本團隊選定落石災害代表性地點北迴線 K51 路段為研究場址，針對 0403 花蓮地震後本工區內發生之落石災害及受損之人工構造物進行調查（王國隆等人，2024），並透過野外調查蒐集較完整的落石岩塊模型、落石量體體積，建立事件型落石目錄，再藉由三維數值軟體模擬落石災害，評估落石危害度（詳圖 15），釐清北迴線 K51 路段受上邊坡落石災害之影響。

另本團隊根據震後 UAV LiDAR 資料判釋場址之潛在落石來源區，依循邱雅筑等人（2024）建議方法，考量蝕溝、植生陷落崖、陡坡、浮石等落石潛勢因子，共圈繪出 5 處潛在來源（詳如圖 15 藍色虛線範圍）。後續藉由情境分析成果，掌握可能入侵既有防護設施與軌道區的落石衝擊能量與運動特徵，提出相應可行的整治對策，並進一步評估既有與未來新建防護設施完成後之防落石性能有效性，亦能提供研擬整治對策的參考，及作為未來相關案例防護工法選擇與配置邏輯。

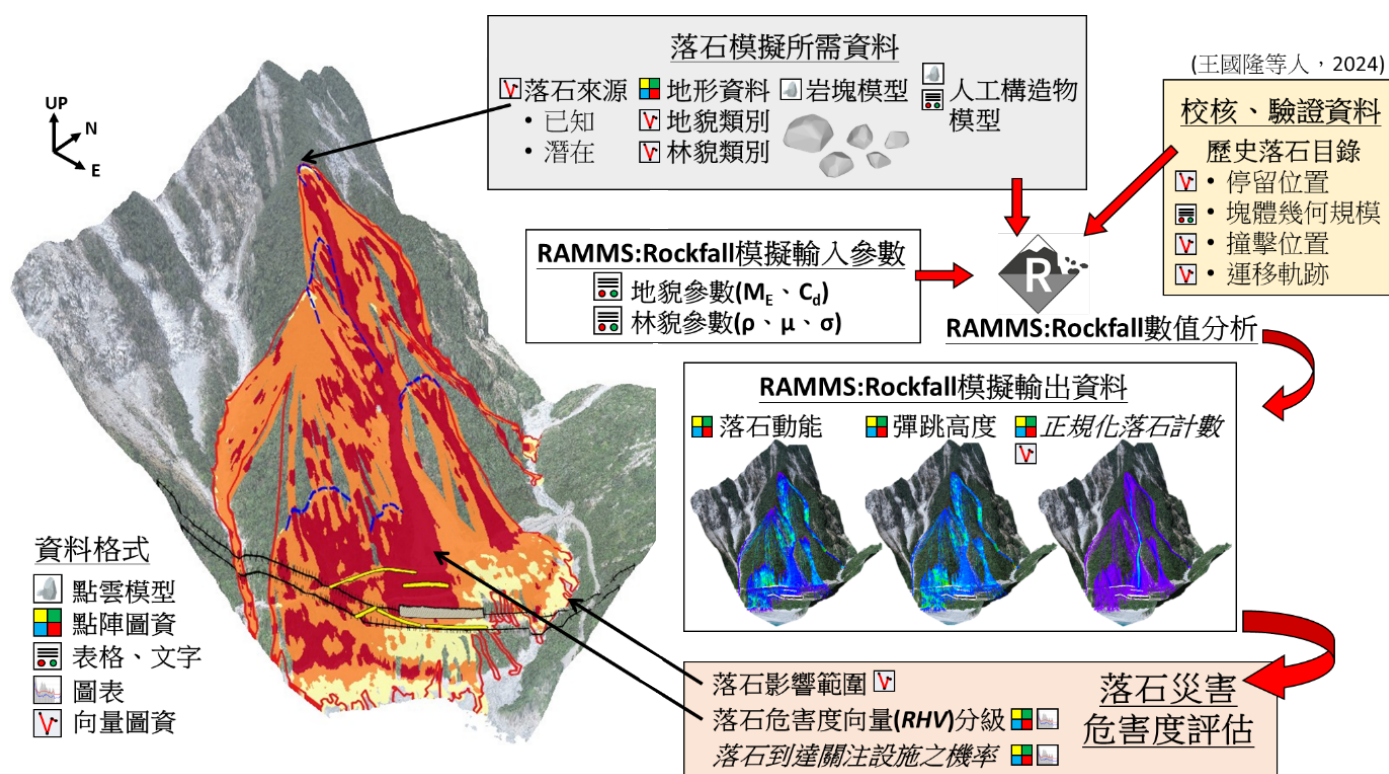


圖 15 本團隊落石災害危害度評估之研究架構(改繪自林承翰等人, 2025)

二、防護工程初步探討

針對北迴線 K51 路段之中期防護對策，本團隊初步建議於鐵路雙線均設置明隧道（圖 16-A），應用 RAMMS:Rockfall 相關模擬成果來評估於落石規模為 $V = 14$ 立方公尺情境下的落石災害風險，並檢核既有明隧道的防落石性能（消能能量 4,000 千焦耳；高度 8 公尺）是否足夠，如圖 16-B。

結果顯示，西正線關注路段（K51+180 ~ K51+430）共有 3 處位置的落石危害度將暴露在高風險等級，其中包括擬新設西正線明隧道位置（里程 K51+230 ~ K51+300）。檢核該里程段的落石能量與最大彈跳高度之模擬成果，顯示以既有明隧道的設計性能，足夠承受此中期落石災害風險情境的落石衝擊；惟既有明隧道路段的彈跳高度與落石衝擊能量卻可能超過原設計。

另東正線關注路段（K51+200 ~ K51+500），扣除大清水橋梁段長約 250 公尺，未來擬設置明隧道覆蓋，依據落石危害度評估成

果（如圖 16-C）顯示，落石彈跳高度 8 公尺及消能能量 4,000 千焦耳的明隧道設計性能可防止大多數落石災害；惟於大清水隧道洞口處，落石能量或彈跳高度均有可能超出設計值。

此外，本軟體基於瑞士落石規範所計算的落石對東、西正線明隧道頂板緩衝材之衝擊力結果（ASTRA, 2008; Labiouse et al., 1994）詳列如下：

1. 西正線明隧道頂板：撞擊角度（ $20.6 \sim 66.7^\circ$ ）、衝擊力大小（約 120 ~ 780 公噸力）
2. 東正線明隧道頂板：撞擊角度（ $16.3 \sim 66.6^\circ$ ）、衝擊力大小（約 138 ~ 805 公噸力）

上述模擬結果皆可作為防護工程依據，後續再檢討明隧道頂板角度、緩衝材性質與消能效果及隧道頂板與梁柱之受力行為等，最終擬定有效的防護策略。

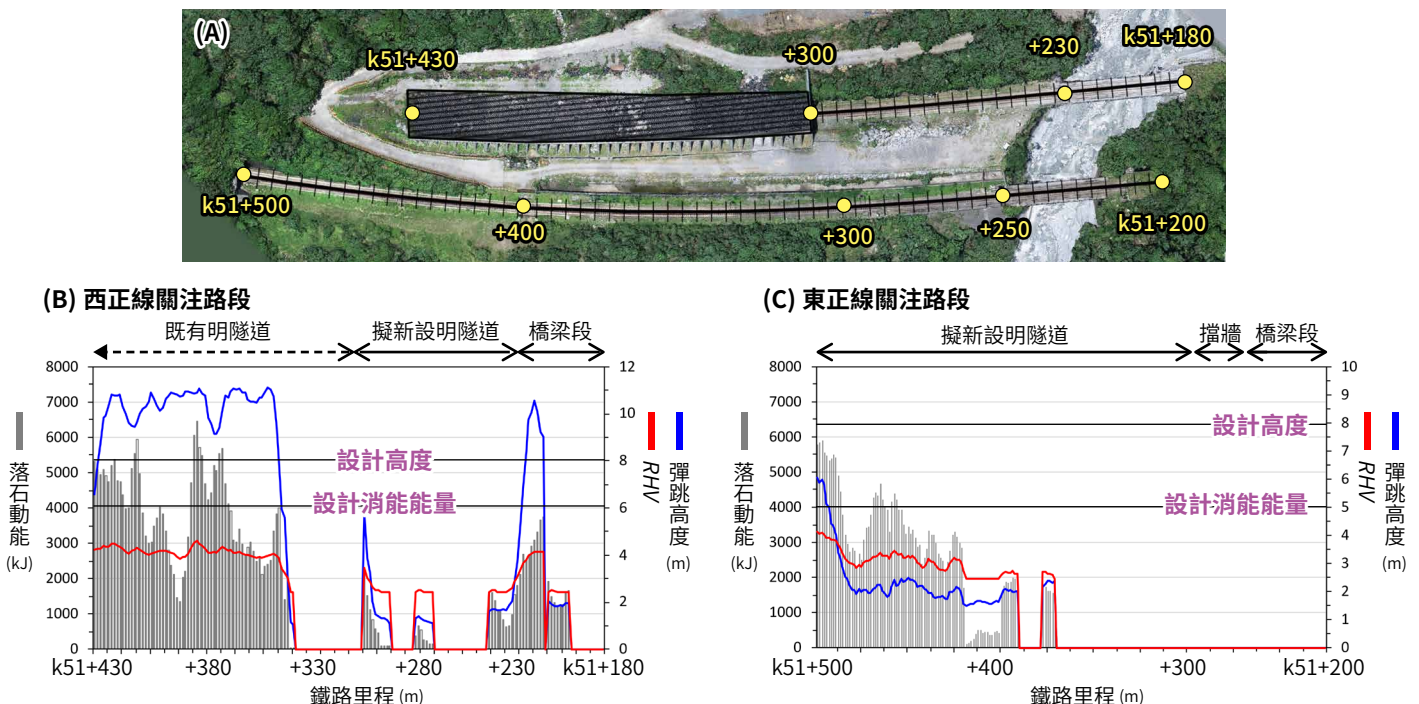


圖 16 北迴線 K51 路段採雙線明隧道防護之設計性能評估（改繪自林承翰等人，2025）

伍、結語

本次 0403 花蓮地震及其後續所引發之複合型災害，對臺鐵北迴線和平至崇德間造成嚴重衝擊，顯示震後地質環境劇烈變遷與極端氣候條件交織下，可能帶來高潛勢之災害風險。特別是在里程 K48、K51、K53 及 K56 等重點路段，皆因地震改變地質條件與邊坡穩定性，後續鋒面與颱風等降雨事件則加劇災害誘發，使地質災害迅速發生並擴大影響範圍。經現地災後調查及衛星影像比對分析，觀察到多處地貌出現劇烈變異，如新生崩塌再運動、堆積土砂下移與河道重塑等現象，顯示該區域仍處於高度不穩定狀態，造成未來災害潛勢。

透過臺鐵北迴線和平至崇德區間系列災損案例分析，可進一步認知極端氣候下災害應變之困境與挑戰；未來應強化常態性災害監測與應變體系建立，整合中央與地方相關單位行政資源，藉由跨部會間之協作平台，從流域整體治理的觀點與原則出發，完善上、中、下游防災機制，共同建構宜蘭至花蓮間具備韌性與永續性的交通運輸路廊。

參考文獻

1. 林承翰、郭觀豪、林于超、周昕成、陳俊樺、翁孟嘉，「臺鐵北迴線和仁隧道至清水隧道段遭遇 0403 花蓮地震之落石調查與模擬」，2024 大地工程學術研討會論文集，臺南（2024）。
2. 林承翰、郭觀豪、林于超、周昕成、陳俊樺、翁孟嘉，「0403 花蓮地震後落石災害危害度評估－以臺鐵北迴線 K51 路段為例」，地工技術，第 184 期，93-92 頁（2025）。
3. 邱雅筑、王泰典、劉曉樺、陳玟伶、潘紹勇、陳俊堯、嚴文彬，「因應氣候變遷道路防災管理創新落石風險圖」，地工技術，第 181 期，65-74 頁（2024）。
4. 王國隆、柯明淳、林聖琪、柯永彥、林承翰、周昕成、郭觀豪、林于超、陳俊樺、楊哲銘、吳重君、詹家賓、林俊廷，「2024 年 0403 花蓮地震地工災害初步調查報告」，地工技術，第 180 期，91-102 頁（2024）。
5. ASTRA S. "Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien" Guidel Swiss Fed Roads Off Swiss Fed Railw, 21 (2008) .
6. Labiouse, V., Descoedres, F., Montani, S., & Schmidhalter, C. A., "Étude expérimentale de la chute de blocs rocheux sur une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissants," Revue française de Géotechnique, (69) ,41-62 (1994) .
7. Tanyaş, H., Kirschbaum, D., Görüm, T., van Westen, C. J., Tang, C., and Lombardo, L., "A closer look at factors governing landslide recovery time in post-seismic periods," Geomorphology, Vol. 391, 107912 (2021) .
8. 翁孟嘉，「落石災害風險影響及整治對策研擬－以北迴線 K51 路段為例」，台灣世曦工程顧問股份有限公司研發計畫，No.13939，臺北（2024）。

風災豪雨



因應極端氣候變遷之復建工程 調適策略

關鍵詞 Keywords

- # 台 20 線 Taiwan Provincial Highway No.20
- # 明霸克露橋 Minbaklu Bridge
- # 中期道路復建 Mid-term Road Rehabilitation
- # 莫拉克颱風 Typhoon Morakot
- # 水文地質 Hydrogeology

交通部公路局
南區養護工程分局

副分局長

王慶雄

甲仙工務段段長

鄭敏華

分局長

陳貴芳

台灣世曦工程顧問股份有限公司
大地工程部

正工程師

徐士捷

副理

張嘉興

協理

陳聰海



台 20 線明霸克露橋為復興、梅山地區對外聯繫之重要橋梁，惟其位處水文地質極不穩定區域。自 1999 年 921 集集大地震以來，經歷多起規模大小不一之地震、颱風暴雨等侵襲，導致本區域地形地貌大幅改變。

尤其 2009 年莫拉克颱風挾帶大豪雨，造成道路沿線各支流之崩坍土石流入荖濃溪流域，形成土石流沖積扇，河床淤積升高外，亦形成類似堰塞湖現象。洪水與土石亦陸續侵蝕台 20 線既有路廊導致嚴重損毀，復建極為困難，故採中期道路橋梁方案進行修復，並於 2017 年 4 月勤和至復興路段中期道路全線完工通車。

惟因 2021 年 8 月 7 日盧碧颱風帶來豐沛雨量，導致玉穗溪上游邊坡崩坍並引發土石流，造成玉穗溪口之橋梁遭沖毀，又 2024 年 7 月 26 日凱米颱風來襲，再次將既有明霸克露橋全面損毀，至此重建工程必須滾動檢討，而在極端氣候與水文地質不穩定衝擊下，對復建工程設計及施工確實更為艱難。

本文將針對目前設計與施工所面對之挑戰進行說明，供各界借鏡參考。



壹、前言

台 20 線 92k ~ 99k 勤和至復興段，不僅為高雄市桃源區勤和里、復興里、拉芙蘭里與梅山里地區對外聯繫道路，台 20 線南橫公路更是連接高雄與台東之間的重要交通動脈，沿線擁有豐富的自然景觀與觀光資源，一旦道路中斷，將影響地方產業的發展、通行，也大大影響當地居民之生活起居、就業機會、經濟收入、醫療資源與文化交流等生活機能。

此路段位於環境地質敏感地區，山區地形陡峻，加上 921 集集大地震、颱風暴雨等侵襲影響，致本區域地形地貌大幅改變，尤其莫拉克颱風挾帶大豪雨，造成荖濃溪及各支流邊坡嚴重崩坍，河床淤積升高，形成類似堰塞湖，並掩埋本路段橋梁及明隧道，使復建工程極為困難。

於 2017 年前，本路段原採河床便道通行。為避免一再陷入搶修、施工與損毀之短期輪迴，加上原鄉部落通行安全強烈需求，公路局在 2014 年爭取近 10 億元災害復建經費，全長 5.05km，共分為優先標、A、B1、B2 及 C 標等 5 個施工標，以大幅提升該路段抗洪能力。

其中，明霸克露橋於 2017 年 4 月完工，歷經 2017 ~ 2021 年颱風災害造成玉穗溪大量土砂下移，導致玉穗溪口明霸克露橋下土砂淤積嚴重，淤積高程多次接近橋梁梁底，形成威脅，故災後均進行橋下河道土砂疏浚，以維橋梁淨空。惟至 2021 年 8 月 7 日，因盧碧颱風外圍環流帶來豐沛雨量，玉穗溪上游邊坡再次崩坍並引發土石流，導致本段明霸克露橋之 A1 橋台 ~ P2 橋墩遭沖毀、P3 ~ P5 橋墩被掩埋。

2024 年 7 月 24 ~ 26 日，凱米颱風再次帶來豐沛雨量，引發玉穗溪、布唐布那斯溪及荖濃溪大量土石流動，使布唐布那斯溪口形成大規模土石流沖積扇，導致荖濃溪河道束縮，河床高程急遽抬升，荖濃溪左岸明霸克露橋 P9 橋墩 ~ AA2 橋台（東端）間之鋼 I 梁橋面全面沖毀、東端引道路基陷落及擋土牆背填淘刷破壞。

此外，鄰玉穗溪兩側，新建中之中期橋梁修復工程 P1 橋墩及 P2 橋墩外側高培厚填土，亦遭荖濃溪主流深槽區河水沖刷損壞。同時，玉穗溪土石流將臨時通行鋼便橋沖毀，僅能以河床便道通行。

因此重新研議便道抬升災害修復工程策略，預計 2025 年底完工。2017 年明霸克露橋啟用後之修復歷程詳圖 1。



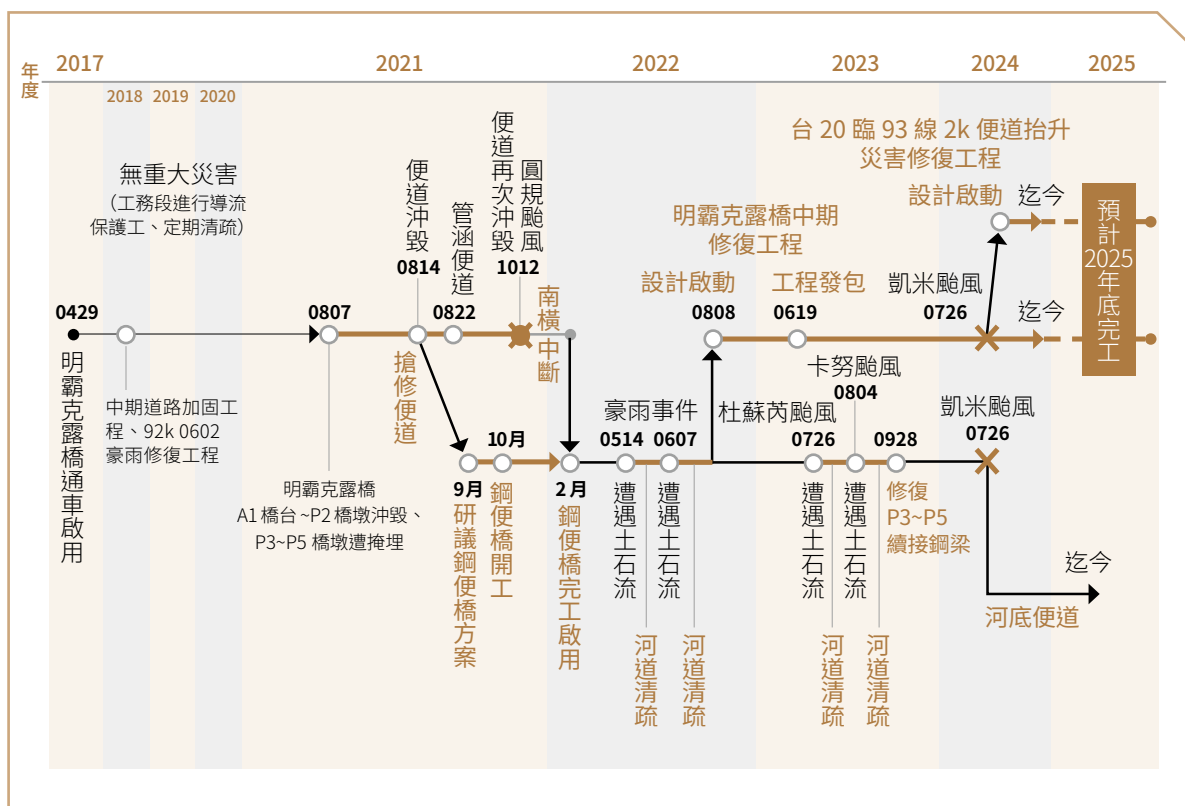


圖 1 2017 年迄今台 20 線明霸克露橋修復歷程

貳、工址概述及災害歷史

南橫公路台 20 線前身為日治時期的理蕃警備道「關山越嶺道」，起點臺南玉井、終點臺東海端，為南部橫貫中央山脈重要公路；自 1968 年開始修築，初始規劃是軍事用途，1972 年開通為碎石路面，直到 1994 年才全線加封瀝青混凝土。

一、地形、地質特性

台 20 線沿線地勢高低起伏崎嶇，海拔高度在 500 ~ 1,000m 之間，地形分區上屬屏東山地中山帶（陳培源，2006，臺灣地質）。本路段高程介於海拔 560 ~ 720m，

主要水系皆為東北—西南走向，支流多為西北—東南走向，而荖濃溪屬於寬谷地形，河流攻擊側之邊坡較為高聳且陡峭，堆積坡側則易產生地勢較為平緩的河階或沖積扇。根據數值地形模型之分析詳圖 2，本路段附近兩岸集水區邊坡平均坡向為東南及西北向為主，坡度約 34 度。

本路段鄰近土壟灣斷層（潮州斷層北段延伸），屬界線斷層，以西屬於西部麓山帶地質區之砂岩與頁岩，以東為脊樑山脈地質區廬山板岩帶之板岩夾變質砂岩。此外，附近一系列向東傾之逆斷層及褶皺，使地層頗為破碎，區域地質詳圖 3。

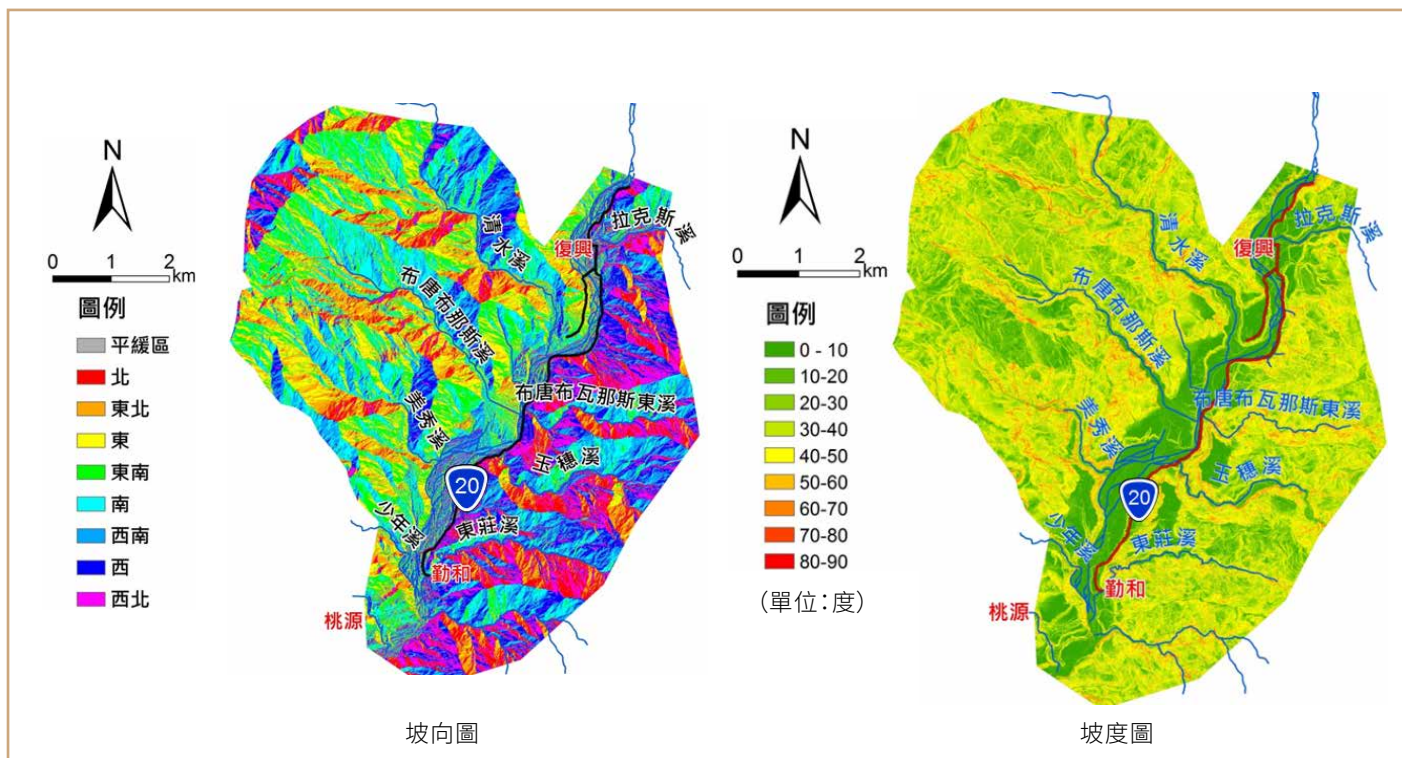


圖 2 台 20 線勤和至復興路段區域地形分析圖

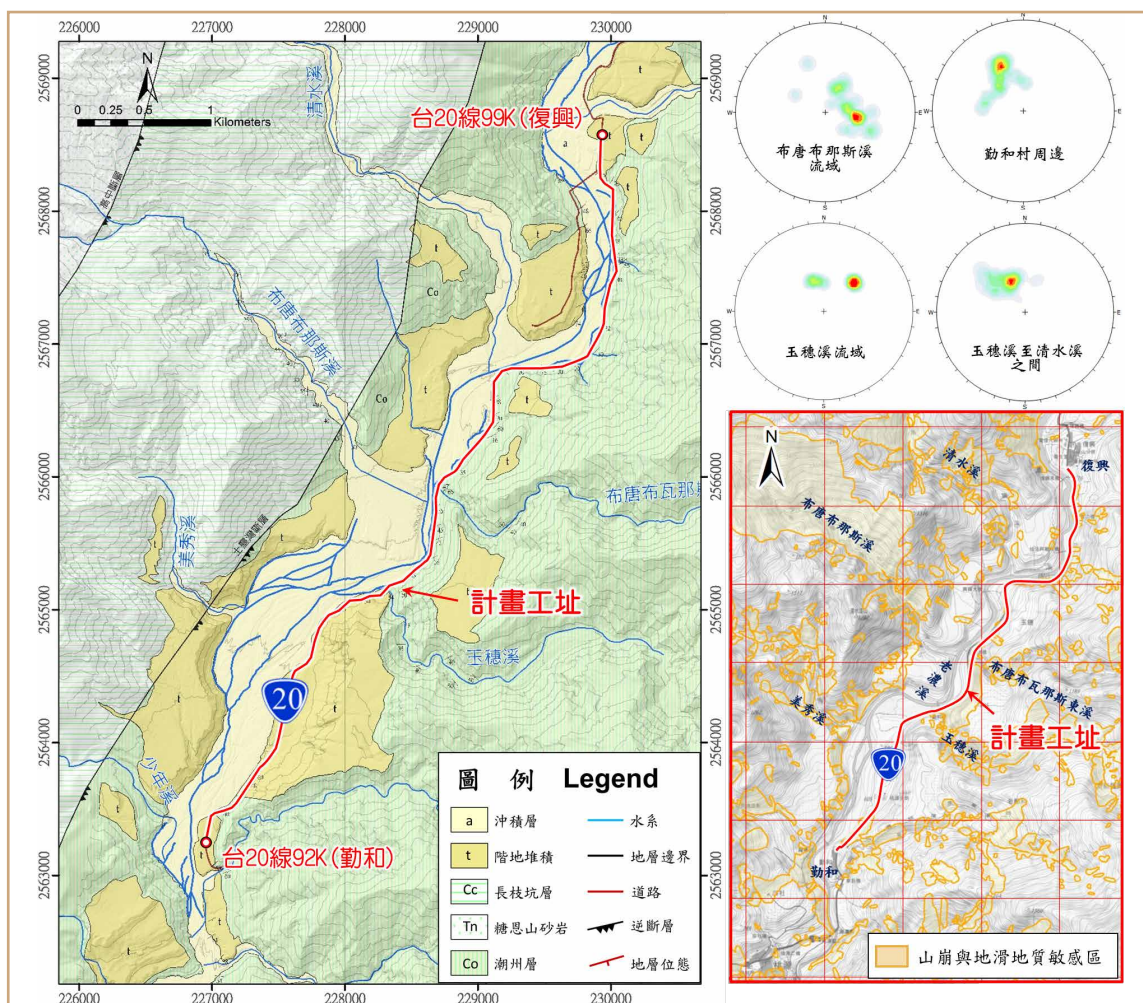


圖 3 台 20 線勤和至復興路段區域地質圖

二、水文及氣象

本路段位於荖濃溪溪谷，荖濃溪源於玉山東北坡，沿玉山山脈與中央山脈之間往南流，與旗山溪於屏東里港滙流，稱之高屏溪。荖濃溪在布農族語中意為「兇猛不定的河水」，附近存在多條活躍的土石流運動，包括農村水保署公告之5條土石流潛勢溪流，及地礦中心將沿線兩岸之清水溪、美秀溪、玉穗溪及東莊溪，均劃設為土石流溪流詳圖4。

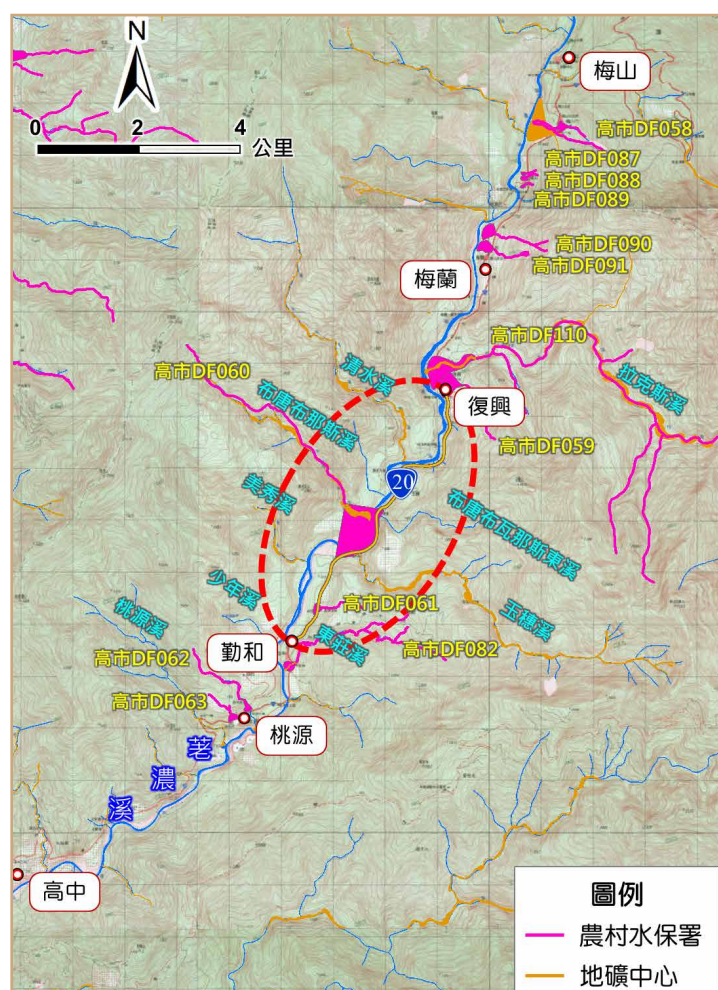


圖4 台20線勤和至復興路段周邊水系及土石流分佈圖

本路段位屬熱帶季風氣候，雨量隨地勢增高之趨勢。綜整鄰近氣象及雨量站共5站，分別為南天池站、小關山站、梅山站、高中站及復興站，及參考中央氣象署觀測資料查詢系統與水利署水文年報，統計近5年（2019～2024年）數據顯示，年雨量約2,570～3,810mm，豐水期皆在5～9月間，其雨量約占全年之72～91%。分析各觀測站之月雨量分布詳圖5，可知降雨來源為5～6月梅雨季、夏季颱風及初冬滯留鋒。因邊坡崩坍與雨量具高相關性，綜合以上降雨特性，於5～9月發生邊坡崩坍風險高。

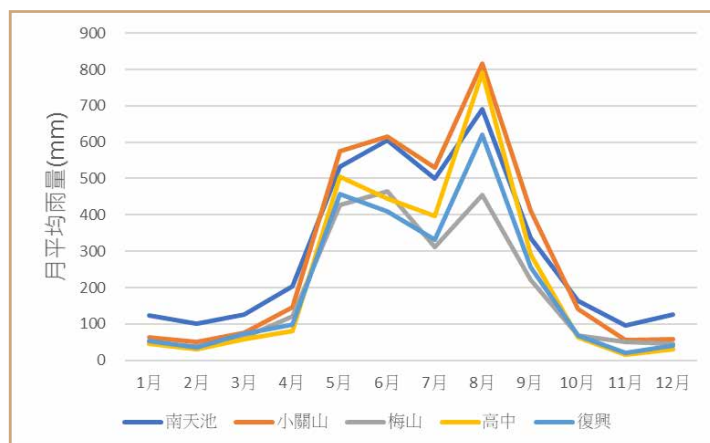


圖5 台20線勤和至復興路段鄰近雨量站年雨量分布圖

三、災害歷史

2009年莫拉克颱風迄今，本路段（92k～99k）道路受災歷史、歷年相關作為及修復歷程等災害大事紀詳圖6，災害位置及工程詳圖7，歷史災害回顧及搶修對策如表1。

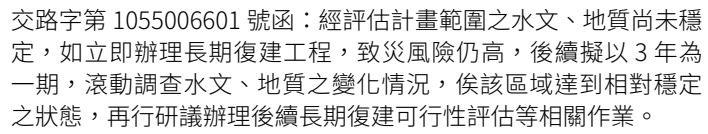


圖 6 台 20 線勤和至復興路段災害紀事

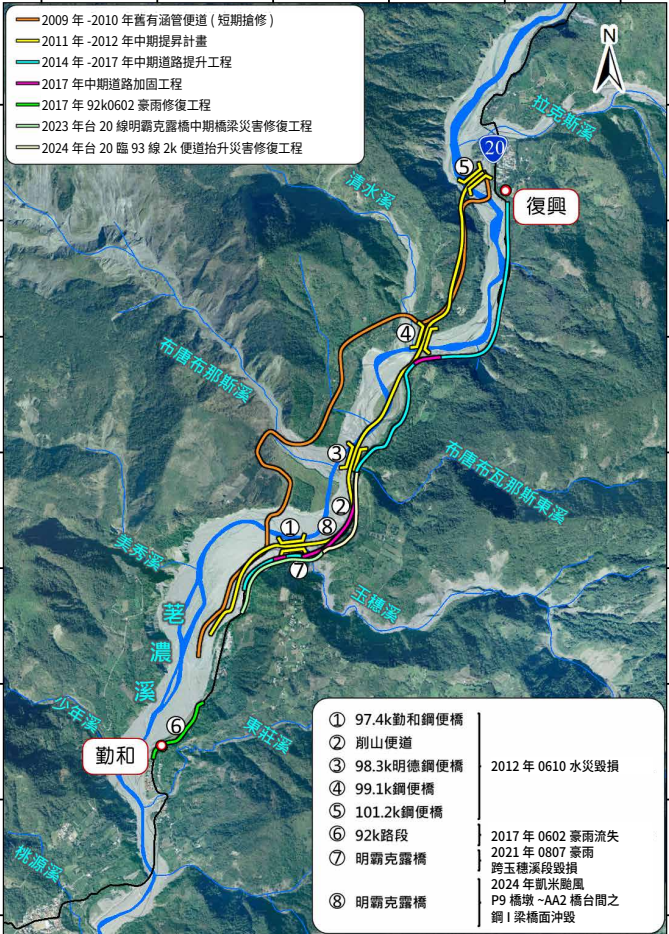


圖 7 台 20 線勤和至復興路段災害位置

表 1 歷史災害回顧及搶修對策

01 | 2009 年 莫拉克颱風

說明及對策>

A. 短期搶修 2009~2010 年

- 2009 年 8 月 7~10 日間莫拉克颱風造成嚴重水災，荖濃溪河床淤高約 30~40m，92k~99k 路段之撒拉阿塢橋、勤和橋、明德橋及勤和明隧道完全覆滅於河床下。
- 2009 年 12 月河床便道搶通，採即壞即修方式維護。由於荖濃溪支流仍存大量崩坍土砂，自 2009 年底至 2010 年汛期結束前，每逢下雨即因土石流沖毀便道，導致台 20 線交通中斷達 134 天。



1994 年莫拉克颱風前



2010 年莫拉克颱風後

02 | 2012 年 0610 水災

說明及對策>

A. 中期提昇計畫（脫困計畫）2011~2012 年

- 為提昇抗災能力，部分路段重新選線或改道，採架設鋼便橋及開闢削山便道，提高道路路基高度，左岸山壁之便道施作於 2011 年 5 月完工。

B. 中期道路提升工程 2014~2017 年

- 為避免一再陷入搶修、施工、損毀之短期輪迴，以中期道路提升工程方案進行改善，期可大幅提昇抗洪能力。
- 改善範圍全長約 5.05km，計 5 個施工標。其中跨越玉穗溪明霸克露橋，長度 695m，18 跨距，淨寬 9m，為雙向單車道之 I 型梁鋼構橋。班順努安橋跨布瓦那斯東溪與荖濃溪交會口，長度 70m，2 跨距，為雙向雙車道之 I 型梁鋼構橋。



2011 年 0610 水災前



2012 年 0610 水災後



中期道路提升工程



2017 年新建完工之明霸克露橋

03 | 2017年 | 2021年 0602 水災 | 0807 豪雨

說明及對策>

A. 啟用期間 2017 年

- 2017年0602及2018年0823豪雨造成橋墩防撞鋼板受損，為避免遭受土石流衝擊新設導流牆保護橋墩。

B. 通車期間 2019～2021 年

- 2019～2021年歷年颱風導致玉穗溪口土砂淤積，多次接近梁底，採河道土砂疏浚，以維持橋梁淨空。

C. 通車期間 2021～2023 年

- 2021年0807豪雨造成玉穗溪大量土砂下移，形成土石流橋梁遭掩埋。
- 暫採鋼便橋方案增加通洪斷面，提升通行安全。



0807豪雨明霸克露橋玉穗溪口遭土石沖毀覆蓋



2022年2月完成鋼便橋工程

04 | 2024年 凱米颱風

說明及對策>

A. 2024年明霸克露橋及鋼便橋損毀

- 2024年7月24～26日凱米颱風帶來豐沛雨量，導致布唐布那斯溪產生大規模沖積扇，使河道束縮，河道高程急遽抬升，造成明霸克露橋全面沖毀。

B. 復舊評估

- 布唐布那斯溪沖積扇及荖濃溪主流深槽區，皆緊鄰原橋明霸克露橋址，於原荖濃溪河岸已無原址修復之可能性，因此重新評估各路線方案之可行性。



凱米颱風造成明霸克露橋橋面沖毀



凱米颱風使新建中之中期橋梁，橋墩外側高培厚填土遭荖濃溪主流深槽區河水冲刷破壞

參、致災原因及評估

一、破壞情形及河床土砂評估

凱米颱風造成布唐布那斯溪土石流暴發，並導致明霸克露橋全面沖毀，雖未造成施工中之中期橋梁主體工程損壞，惟橋墩因緊鄰玉穗溪口與荖濃溪主流匯流處，遭受荖濃溪主流深槽區河水沖刷，產生淘刷破壞，且使玉穗溪口兩岸之高培厚回填土下刷約 20m。此外，原明霸克露橋東端橋台後引道路面亦遭受洪水沖擊損壞。

經比對災害前後 LiDAR 地形測繪成果顯示，沿明霸克露橋橋址處抬升之淤積高約 16 ~ 19m，鄰玉穗溪河口處沖刷深約 16 ~ 23m，主流深槽區易受布唐布那斯溪及玉穗溪等二支流土石流堆積影響，使河

道左右擺盪，因河水沖刷或淤積行為導致大小不一之災損。

近年來由測繪河道斷面圖，可觀察到荖濃溪主流深槽區左右擺盪現象詳圖 8 ~ 9，由圖可知荖濃溪左岸緊鄰明霸克露橋址最高抬升約 17 ~ 19m 不等，玉穗溪口沖刷最深達 20 ~ 23m，凱米颱風造成布唐布那斯溪輸土方量初步概估約達 400 萬方。

另於明霸克露橋東端橋台引道前後，經比對現場破壞痕跡，顯示凱米颱風最高洪水水位約高於橋面 3m；且布唐布那斯溪土石流所形成沖積扇亦緊鄰深槽區，僅能藉工程手段快速疏濬，惟再次發生豪雨，恐將造成更大損壞，且原址重建困難度高，因此選擇改線避開之方案。

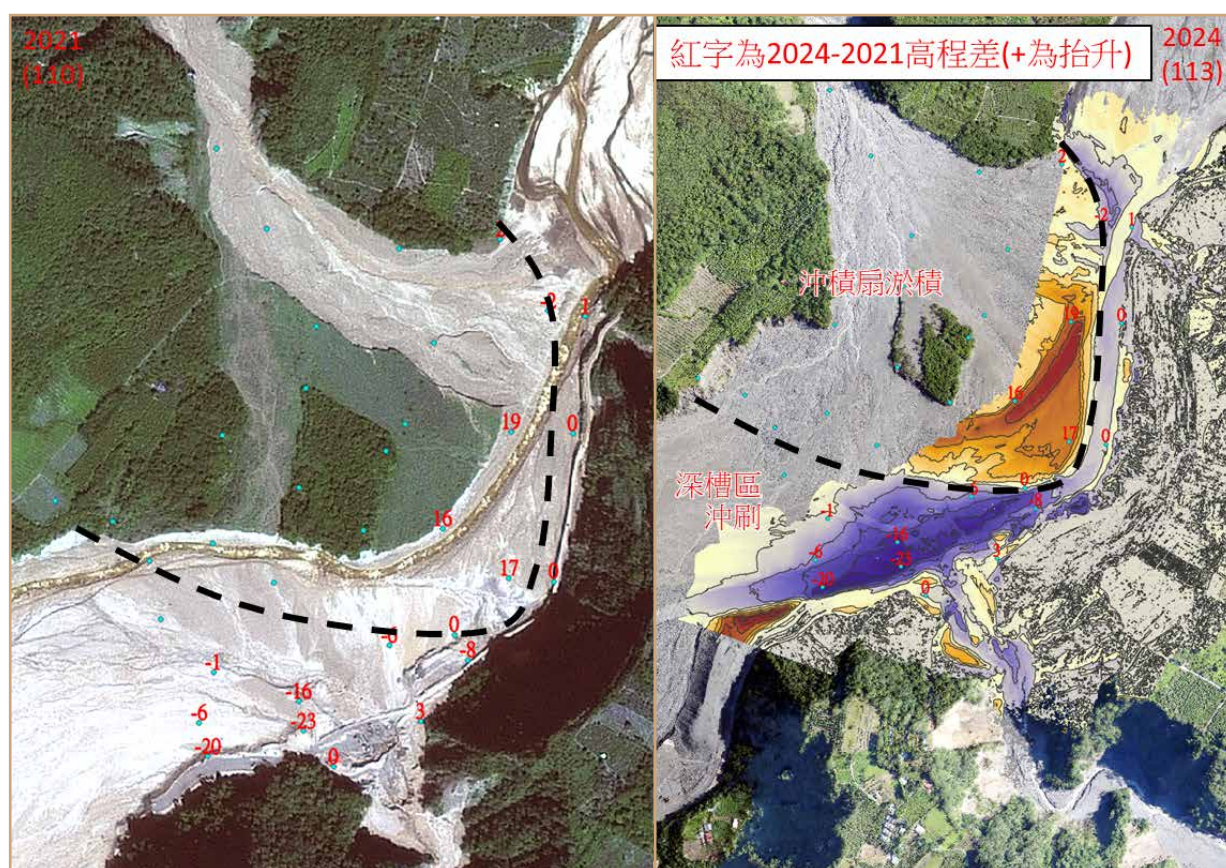


圖 8 交匯口受沖刷與淤積之破壞行為

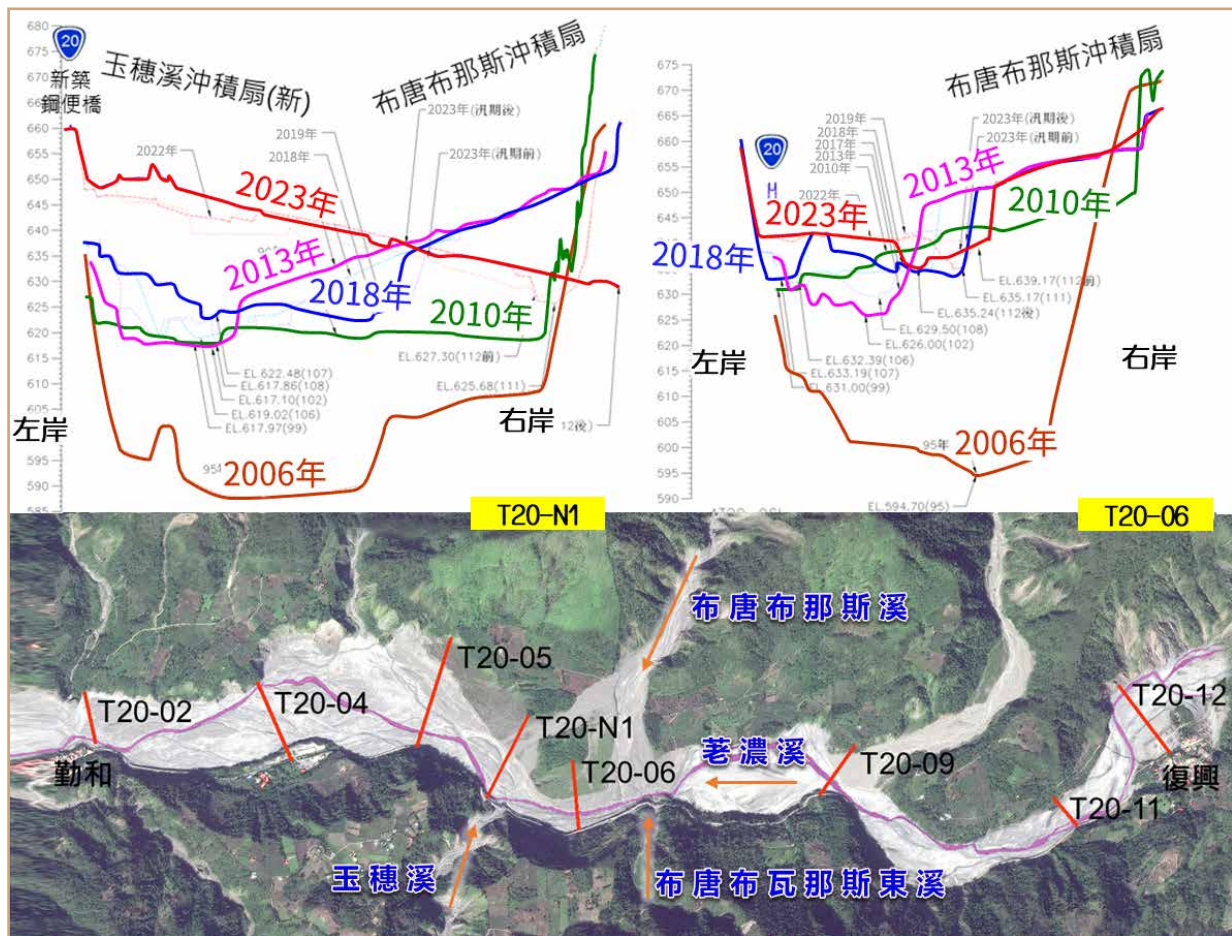


圖 9 支流附近近年河道斷面測繪成果顯現深槽區左右擺盪

二、沖積扇量體評估與淤高預測

為瞭解玉穗溪沖積扇量體，對跨玉穗溪口橋梁之影響，透過沖積扇量體模擬進行分析，以供橋梁高度的規劃設計參考。

(一) 沖積扇序率模型率定結果與體積風險評估

傳統上，計算沖積扇量體是將沖積扇切成許多小塊，以積分求解體積。本分析使用 Chen and Capart (2022) 研發的可視多邊形方法預測沖積扇的體積範圍。以蒙地卡羅進行 10,000 次模擬，選取 30 次結果詳圖 10 (左)。

由模擬結果可看出純跳躍過程特性，黑線會穩定一段時間後發生突然體積值的改變，反應了沖積扇體積在一段時間內會達到沖淤平衡，又會因為土石流或河流侵蝕在短時間內發生淤積或侵蝕。

使用 10,000 次的蒙地卡羅結果，分別計算 2、5、10、20 和 50 年內的體積破壞機率，詳圖 10 (右)，橫軸為破壞機率，縱軸為累積體積。以 10,000 次的蒙地卡羅結果，有 500 次的模擬在兩年內體積會超過 $582 \times 10^4 [m^3]$ ，即代表在兩年內的破壞機率為 0.05 的沖積扇量體為 $582 \times 10^4 [m^3]$ ；亦可解釋為兩年內有 0.05 的機率沖積扇

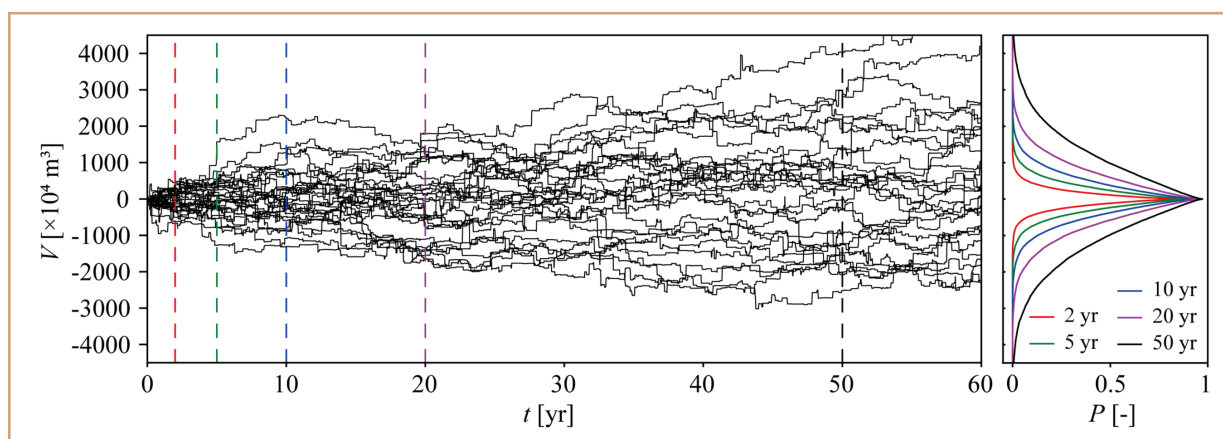


圖 10 沖積扇體積序率分析結果

累積體積會超過 $582 \times 10^4 [\text{m}^3]$ ，詳圖 10 (右)。

(二) 河床與多沖積扇淤高風險評估

本路段位處荖濃溪、玉穗溪和布唐布那斯溪交匯處，地形地貌變動複雜，災害不僅來自單一土砂，也有來自多個土砂來源。

為了同時考慮布唐布那斯溪土石流、玉穗溪土石流和荖濃溪主流土石流淤高風險，需先率定的沖積扇體積隨機過程，和 Chen, et al. (2022) 中率定的河床高度隨機過程，以作為沖積扇體積和主流河床高程隨時間變化的歷線，始供模擬沖積扇量體堆積的範圍和厚度；為了計算風險，使用蒙地卡羅法進行多次模擬，以獲得在特定時間尺度下 2、5、10、20、50 年之風險機率，每次模擬三個土砂來源所造成的最大淤高，並計算最大淤高的累積分布，即可求得每個位置的破壞機率。

1. 河床及多沖積扇風險

為使模擬結果能夠與規劃道路高程比較，由不同淤高超越機率風險面的縱剖面，與相同超越風險但不同時間尺度的風險面可

繪製在同一圖上，超越風險為 0.5、0.2 和 0.05 (詳圖 11 ~ 13)。

由模擬結果發現，考慮河床及布唐布那斯溪淤高的風險，在考慮風險量體較小的情況下，並不會對跨玉穗溪口之中期橋梁有所影響，然下游引道及上游接續明霸克露橋段在相同的風險下，受土砂淤高災害的風險則相對增加。

2. 將洪水影響納入風險評估

明霸克露橋於 2021 年盧碧颱風事件後，橋面受 2024 年凱米颱風洪水沖毀，顯示颱風事件除沖積扇序率模型率定，更需將洪水影響納入風險評估，以更全面評估潛在的危害。

依現場荖濃溪左岸之水痕、架設之攝影機高程及荖濃溪右岸坡折等狀況納入模擬分析，2024 年凱米颱風洪水模擬分析結果詳圖 14。由評估成果及荖濃溪深槽區緊鄰山側邊坡及與原橋橋址極為接近，後續重複致災風險高，原址新建橋梁方案可行性低，因此採遠離山側便道提升方案策略辦理復建。

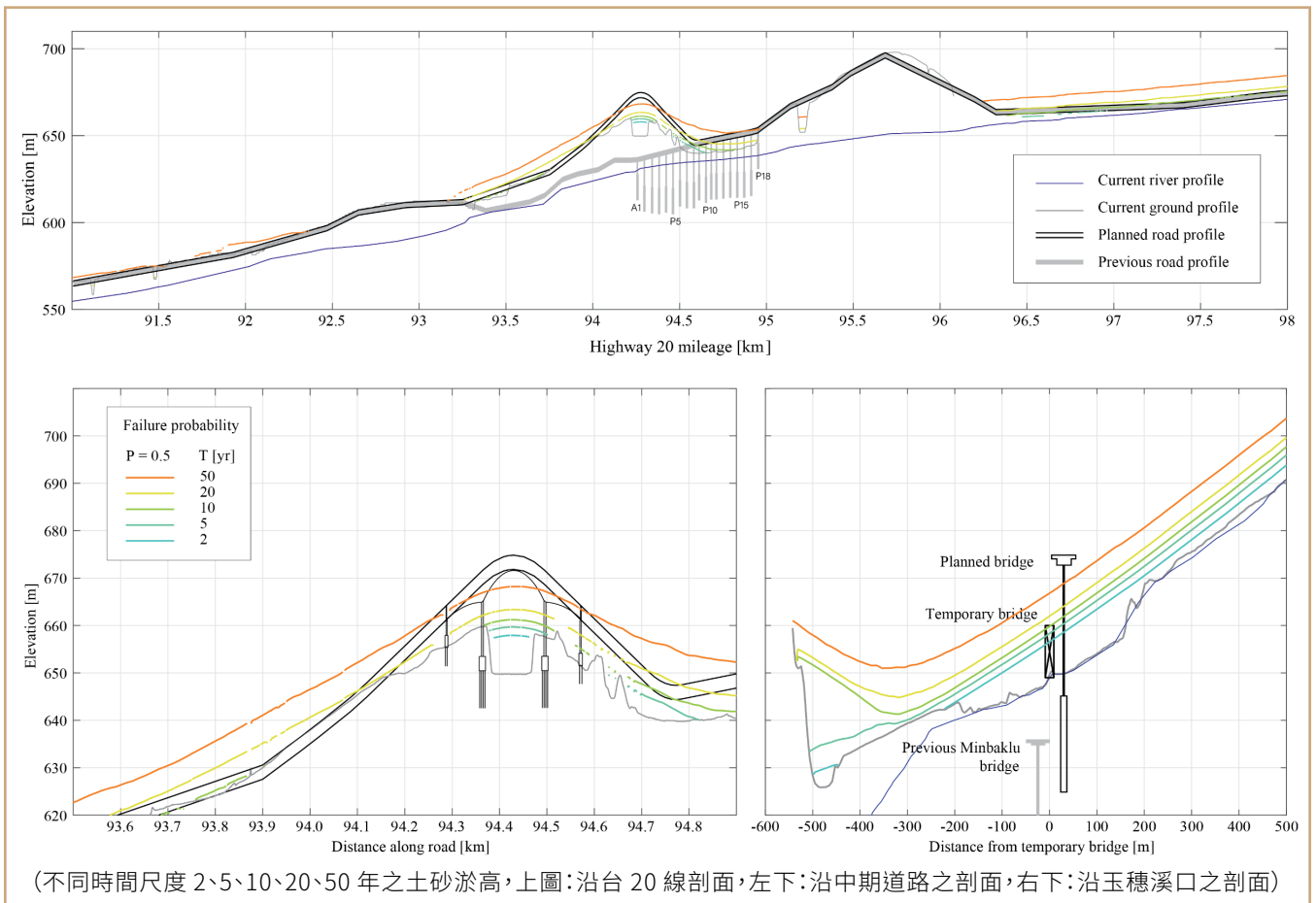


圖 11 河床及多沖積扇風險分析剖面圖(破壞機率 0.5)

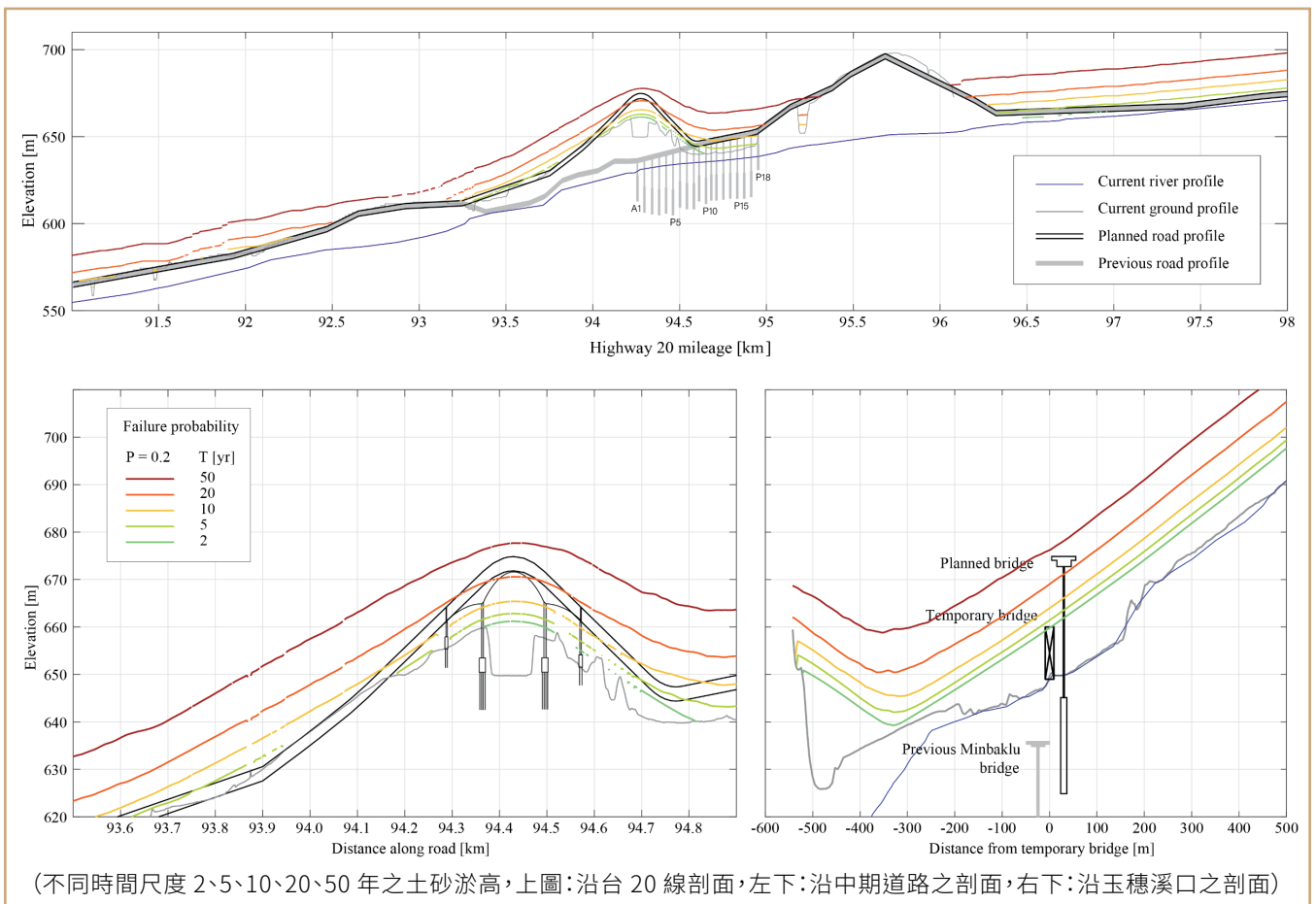


圖 12 河床及多沖積扇風險分析剖面圖(破壞機率 0.2)

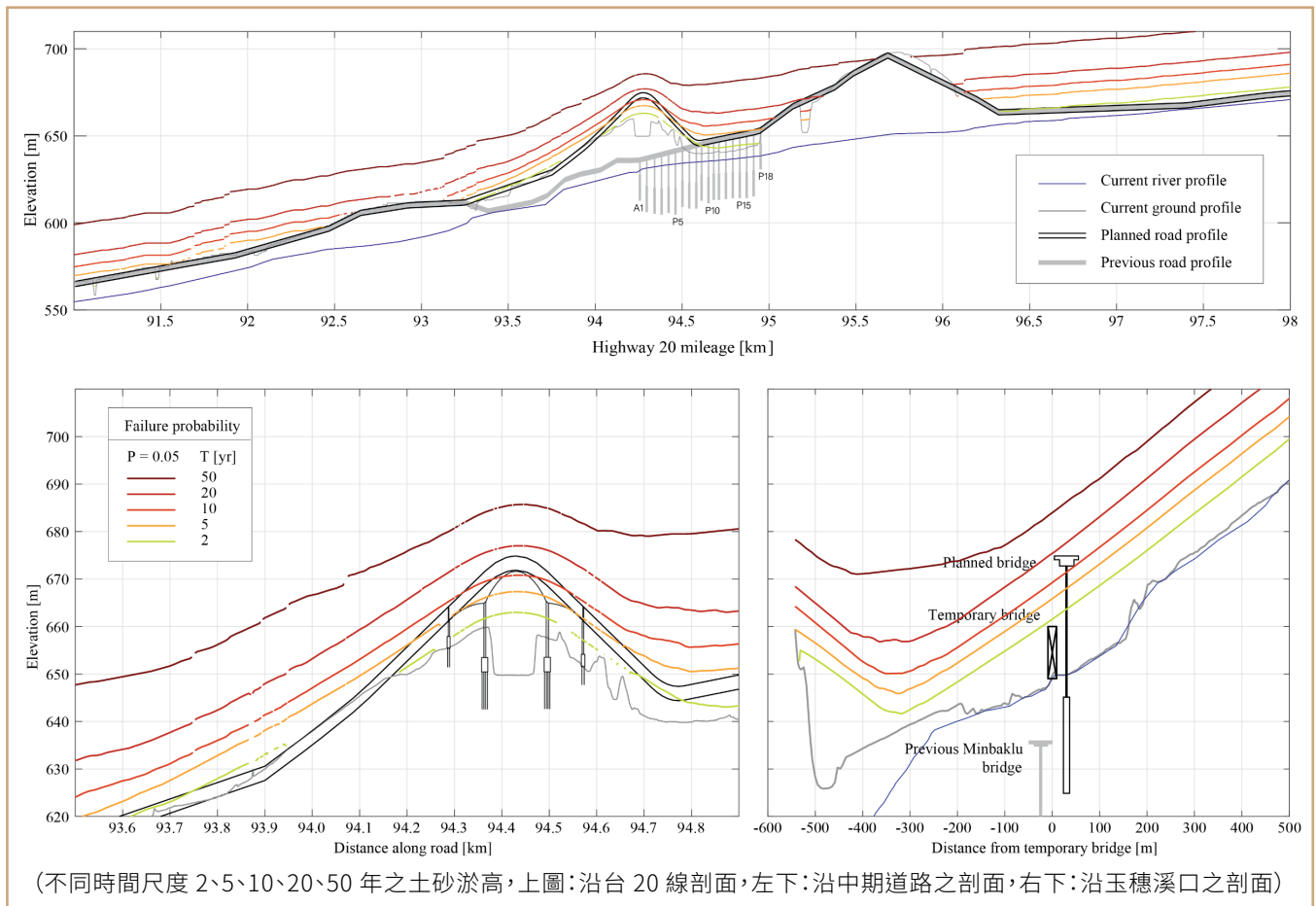


圖 13 河床及多沖積扇風險分析剖面圖(破壞機率 0.05)

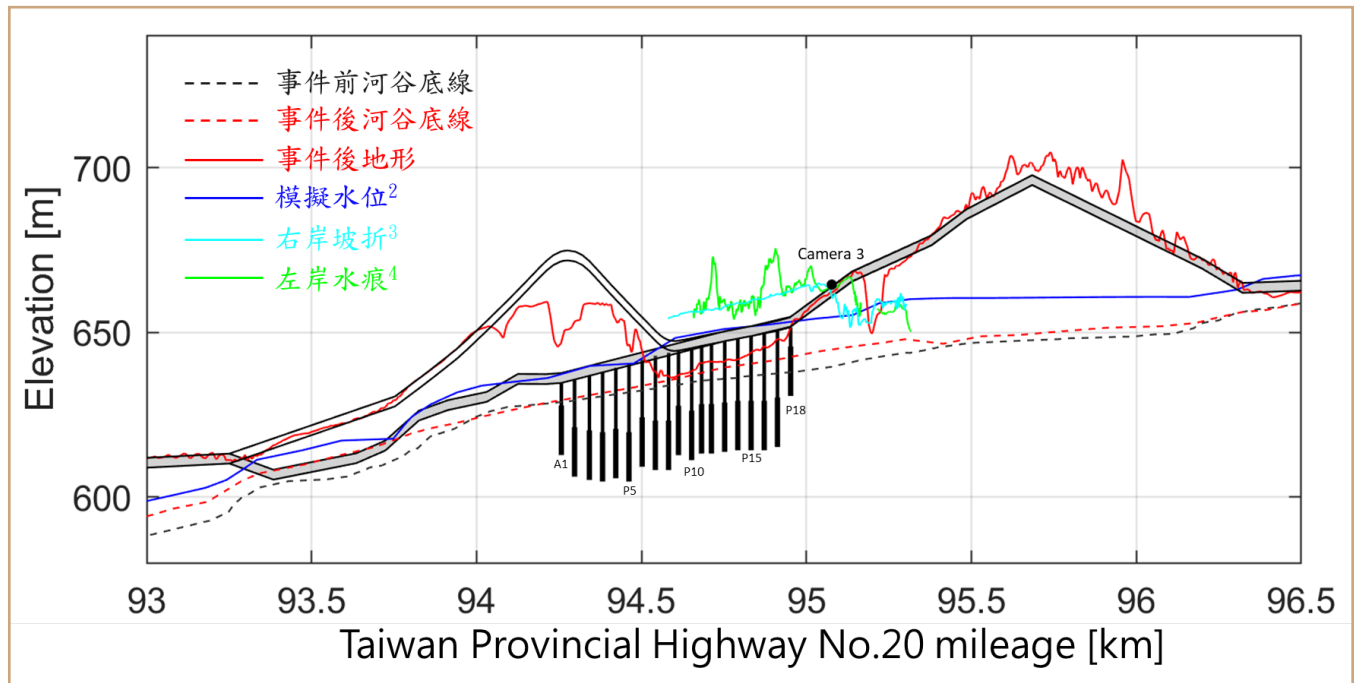


圖 14 2024 年凱米颱風洪水水位模擬分析剖面圖

肆、防災規劃策略與工法規劃

一、施工中遭遇重大災害

凱米颱風來襲新建中之中期明霸克露橋，已完成主體工程之 A1、A2 橋台及 P1、P2 橋墩，P1、P2 柱頭節塊亦已完成，且工作車已分別架設於 P1、P2 橋墩上，其中 P1 側已分別往 A1 及 P2 方向各進行第 1 節塊之鋼筋綁紮作業，P2 側已分別往 P1 及 A2 方向各推進 1 節塊。

玉穗溪之土石流並未造成兩岸之 P1 及 P2 橋墩主體工程受損，顯示跨越玉穗溪之中期明霸克露橋設計高程符合原設計需求，故風災後緊急啟動設計變更，以不調整 P1 及 P2 橋墩主體設計高程為考量，針對已施工完成現況提出路線之復舊改善。

玉穗溪口歷年災修工程縱面圖詳圖 15。

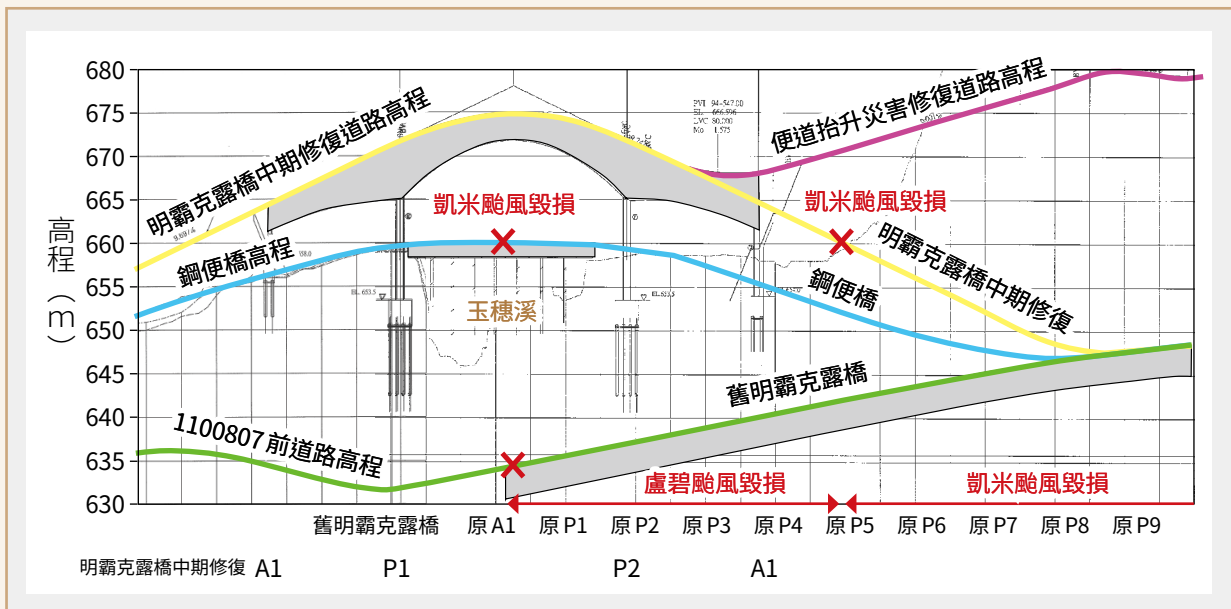


圖 15 玉穗溪口歷年災修工程縱面圖

二、路線調整方案及設計構想

本路段區域環境之水文地質仍非常不穩定，工程方案順應自然，設計準則與傳統考量標準不同，需多元考量各樣複合式災害潛勢及其影響，另水文地質穩定性及穩定廊帶安全需作滾動調查、評估及災害敏感區辨識，始得研擇修復工程選線及影響

減輕方案評估。針對歷年之環境衝擊與破壞，說明如下。

(一) 風險辨識及復舊改建策略

原有明霸克露橋再次遭土石流全面沖毀，土石流最高達橋面 3m 以上，且橋址位處荖濃溪深槽區，近年顯示深槽區屬易擺盪

動床，重複致災機率高，道路線形避開影響區域始為上策。

復建道路係採抬升便道避開荖濃溪深槽區，沿荖濃溪左岸邊坡挖築路堤與建構擋土牆順接原路。西端起點里程 94k+570，路線採平曲線經新設便道而上，並沿荖濃溪左岸邊坡爬高，已完成之 A2 橋台往山側擴建，便道最大高程約 EL.694m，再銜接至班順努安橋前，保留線形延伸跨布唐布瓦那斯東溪機制，並考量車道寬度及車行視距需求、邊坡保護等措施。

(二) 減輕衝擊設計重點

依據水文滾動調查成果，本路段仍屬水文極不穩定區域，復建工法因地制宜滾動檢討。主要設計構想為：

1. 考量抬高便道高程，避開荖濃溪土石流及深槽區攻擊。

2. 於最短距離內銜接回既有道路。

將原 A2 橋台保留並擴建，以擋土牆銜接新設便道，岩坡開挖將道路路線爬升至高程約 EL.694m 後，往下銜接回班順努安橋台前接回台 20 線，平面配置詳圖 16。

邊坡開挖土方量，可供作 A1 引道河側培厚及路基回填，降低 A1 引道設計縱坡，另剩餘量體可作為荖濃溪凹岸施作培厚回填護岸工，達挖填平衡方式。

抬升便道岩坡降挖後，仍需受後續汛期考驗，待便道路線邊坡穩定後，需視狀況再進行邊坡保護作業，確保改線後路廊整體安全。

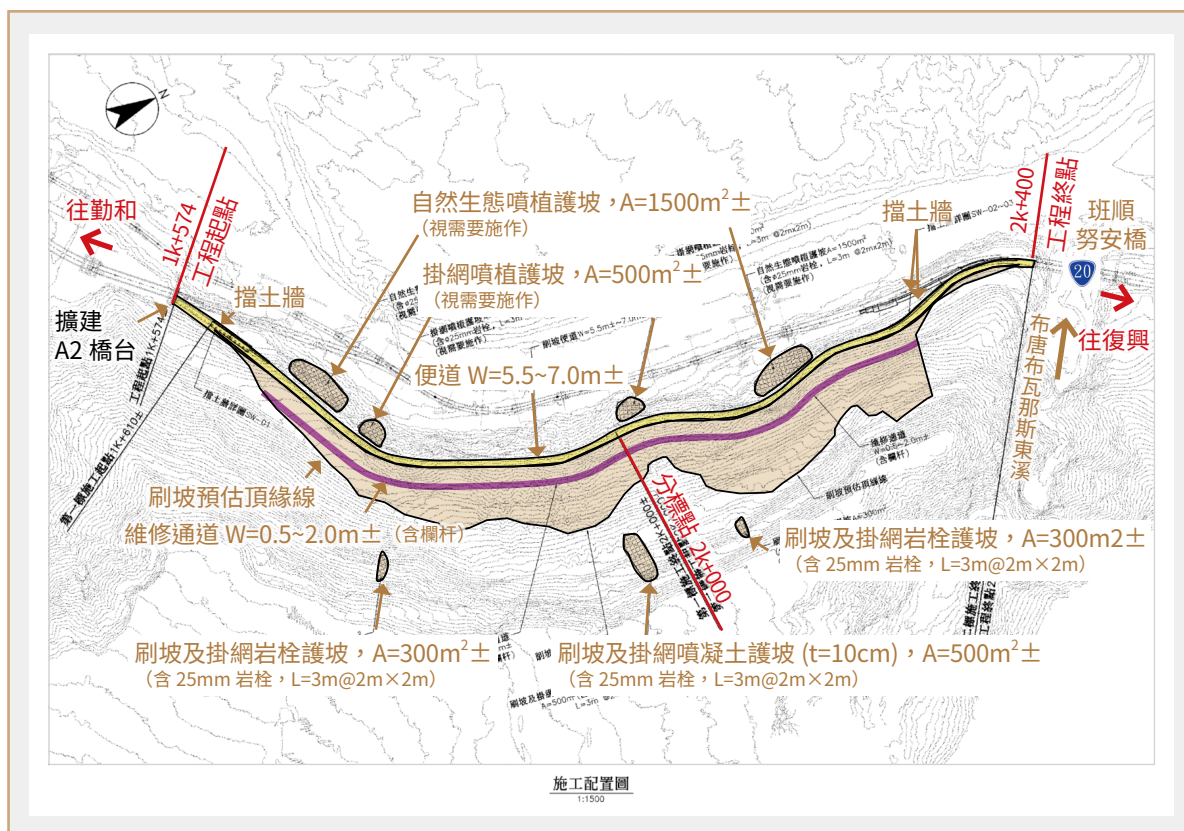


圖 16 工程配置平面圖

（三）維修通道韌性設計

近年來，無論是玉穗溪或布唐布那斯溪所造成土石流災害，有經常性造成道路阻斷現象，間接造成居民進出困難，農產品運送不便，甚而有孤島效應，嚴重影響當地居民生活，故於便道邊坡台階平台前後連貫之位置，增加設置維修通道，平時供養護單位巡查養護使用，當發生邊坡坍塌或落石等災害造成便道阻斷時，亦可供居民緊急進出使用。

「台 20 線明霸克露橋中期橋梁災害修復工程」在工程團隊通力合作下，積極排除

困難、研析解決方案，雖在惡劣環境中施工，整體進度管控良好，至 2025 年 5 月，最艱難的上部橋面結構已閉合完成，「台 20 臨 93 線 2k 便道抬升災害修復工程」則為最後一塊拼圖，讓勤和至復興路段道路安全提升及復通，得以保障用路人交通安全。

伍、結語

莫拉克風災距今已 16 年，台 20 線南橫公路全線通車仍剩最後一哩路，本文僅提供



勤和至復興路段案例及其整治工法、路線方案經驗。由經驗顯示，河川管理策略及水文地質穩定廊帶，對於山區道路之選線尤為重要，宜審慎檢討，以避免每年汛期都要面對道路中斷無法進出之窘境。

感謝交通部公路局陳局長文瑞、陳總工程司進發、前鄧總工程司文廣、交通部公路局長官、專家之指導與協助，於歷年氣候衝擊下，均積極扮演本路段各權責機關之溝通、復舊構想之先鋒，適時對外界說明，讓民眾清楚了解，面對天災時，積極透過跨部會合作將災害衝擊降至最低，及

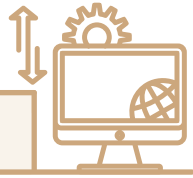
快速搶通等相關作為，以期本路段能儘速浴火重生，提供一條讓民眾放心、不中斷的安全道路。

參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「高屏溪治理規劃檢討」（2008）。
2. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「臺灣地質圖 - 甲仙圖幅」（2000）。
3. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置」（2000）。
4. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「高雄市 - 山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書」（2014）。
5. 林清洲、卡艾瑋、姜繁洲、張嘉興、許文祥、莊心凱，「荖濃溪勤和至復興段河道變遷及沖淤評估」，中華技術第 109 期，第 106 ~ 113 頁（2016）。
6. 林清洲、王慶雄、陳正偉、吳文隆、蕭秋安、張嘉興、王景平，「台 20 線南橫公路勤和至復興路段複合災害之工程處理對策」，中華技術第 119 期，第 180 ~ 195 頁（2018）。
7. 經濟部地質調查及礦業管理中心，「山崩與地滑地質敏感區（L0006 高雄市）」（2022）。
8. T.-Y. K. Chen, C.-Y. Hung, Y.-C. Chiang, M.-L. Hsieh, and H. Capart, "A stochastic model of geomorphic risk due to episodic river aggradation and degradation," Engineering Geology, vol. 309 Art no. 106845 (2022) .



科技應用



空間資訊應用於臺鐵邊坡調查

關鍵詞 Keywords

- # 邊坡科技巡檢 Intelligent Slope Movement Monitoring System
- # 地理資訊系統 GIS
- # 無人機 UAV
- # 合成孔徑雷達干涉技術 InSAR
- # 光達 LiDAR

國營臺灣鐵路股份有限公司
設施群

副總經理
陳宗宏

臺北工務段

段長
王立德

台灣世曦工程顧問股份有限公司
地理空間資訊部

副理
黃子珉

正工程師
印漢軒

正工程師
張凱硯



臺鐵公司自 1887 年陸續建設，路線多鄰接自然邊坡，惟因坡頂不易通行且植被遮蔽，傳統巡查多受限於軌道鄰近區域，難以掌握邊坡整體穩定狀況。歷經多起災損事件後，逐步導入衛星、飛機、無人機（UAV）與地面載具等多元平台，搭配光學影像、LiDAR、InSAR、GNSS 等技術，進行多尺度測繪與監測，補強人工巡查與地工儀器的限制，強化預警效率。

為統整監測資料並輔助風險判釋，建置邊坡科技巡檢 GIS 平台，整合臺鐵邊坡資料、維護履歷與外部開放圖資，提供圖層套疊、異常查詢與三維分析等功能，作為科學化巡檢與輔助決策的核心工具，提升邊坡管理與災害應變之韌性。



壹、前言

自 1887 年起，國營臺灣鐵路股份有限公司（以下簡稱臺鐵公司）逐步建置鐵道系統。早期多沿溪谷間以小曲線半徑鋪設路線，搭配橋梁與短隧道通行，部分以貨運為主之路線更與自然邊坡共存。隨著時代演進，臺鐵已成為國內主要運輸旅客的交通工具。然而，受限於無替代路線與難以停駛之特性，面對日益嚴峻的極端氣候挑戰，沿線邊坡愈發脆弱，導致事故風險升高。

為提升行車安全，臺鐵公司自 2016 年起推動「鐵路行車安全改善六年計畫」下的

「邊坡全生命週期維護管理計畫」。惟目前相關調適措施仍難以有效因應極端氣候帶來之頻繁豪雨衝擊，近年多起災損事件亦與邊坡事故有關。

臺鐵公司於 2019 年研擬《鐵路邊坡養護手冊》草案內容，完成主線及支線邊坡與擋土設施之安全評估與初步分級，作為建立分級維護制度的重要基礎。2020 年，該手冊正式發布，進一步明訂巡檢頻率、執行項目與作業程序，建構系統化的邊坡分級維護機制（表 1 至表 2、圖 1）。

表 1 臺鐵邊坡等級標準與養護頻率（國營臺灣鐵路股份有限公司）

邊坡分級	等級標準	經常巡查	定期巡查頻率			邊坡 監測頻率	地錨 定期檢測
			災害潛感因子				
			低	中	高		
A 級	明顯不穩定	2 週	1 季	1 季	1 月	1 週	1 年
B 級	疑似不穩定	1 月	2 季	1 季	1 季	1 月	2 年
C 級	無明顯不穩定	1 季	2 年	1 年	1 年	1 季，穩定 3 年後每半（1）年	4 年
D 級	穩定	1 季	4 年			無；重要保全對象依 C 級執行	4 年

表 2 災害潛感因子評估（國營臺灣鐵路股份有限公司）

評估項目 / 標準	低	中	高
地質敏感區	(1) 地質遺跡 (2) 地下水補注	活動斷層	山崩與地滑
土石流潛勢區	無	低、中潛勢溪流經過	高潛勢溪流經過
災害潛勢	無	落石、岩屑崩滑、岩體滑動、 惡地、棄填土區	歷史坡地災害

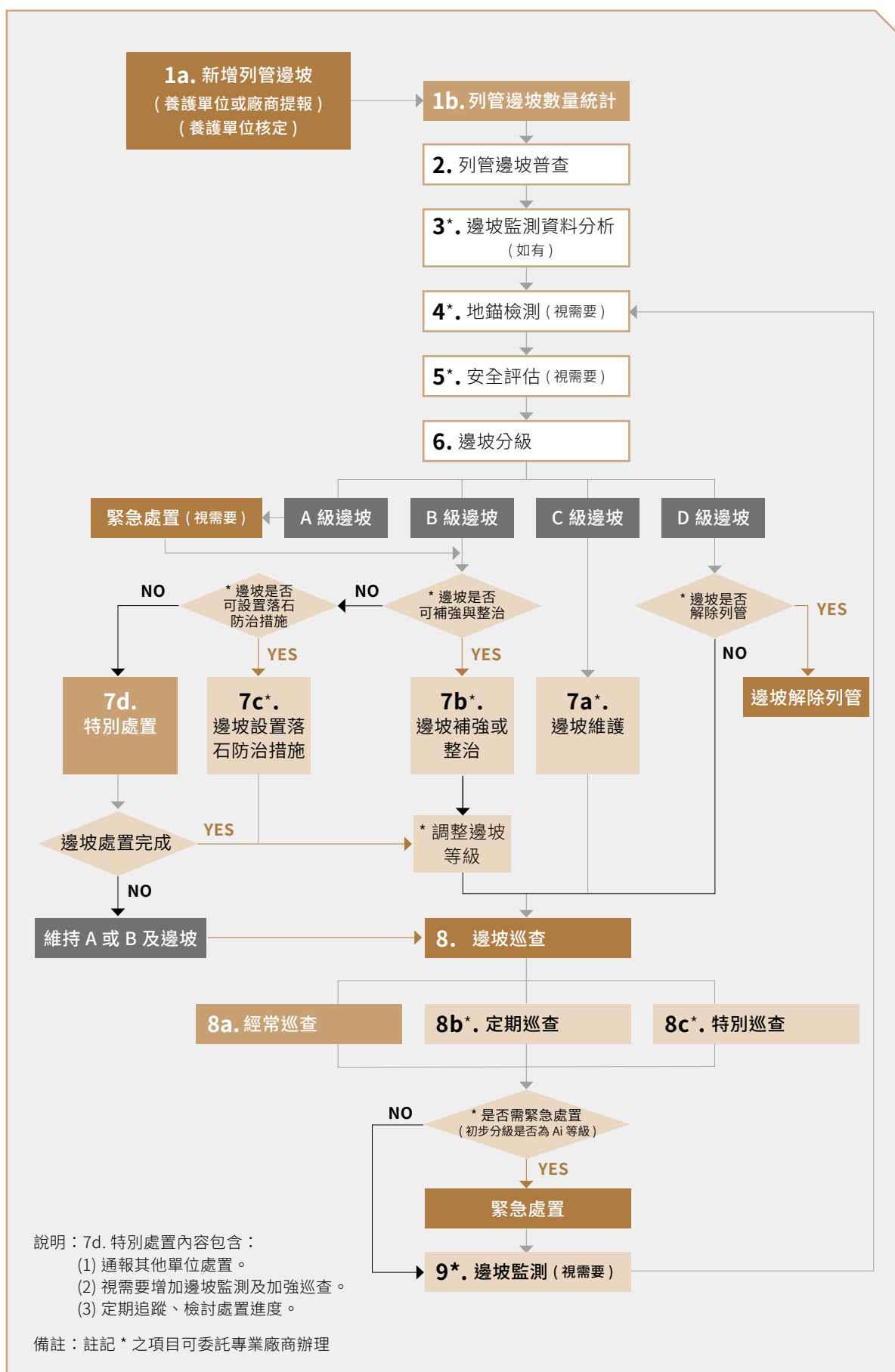


圖 1 臺鐵公司近年邊坡養護管理重要歷程（國營臺灣鐵路股份有限公司）

此外，自 2021 年起，臺鐵公司陸續建置 26 處「落石告警系統」，其主要功能為偵測異物入侵軌道並即時警示駕駛，惟屬被動式設施，未具備針對邊坡長期穩定性之監測功能。隔年，各工務段開始執行「邊坡及擋土設施巡檢及安全評估分析」，由技術顧問（技師）進行現場檢查與檢測；同時亦啟動「鐵路邊坡全生命週期維護管理系統」之建置。

為進一步強化邊坡管理的數位轉型與風險掌控能力，2023 年起推動「邊坡巡檢精進系統建置」，導入空間資訊收集與處理流程，並建構地理資訊系統（GIS）平台以整合歷次巡檢與監測成果。該平台可收納無人機（UAV）、高解析光學影像、光達（LiDAR）、合成孔徑雷達干涉技術（InSAR）、全球導航衛星系統（GNSS）等多源測量資料，透過立體影像交會（stereo photogrammetry）與點雲比對等空間分析技術，精準產製具時序性之邊坡變化圖資與三維邊坡模型，用以顯示坡面微地形變化、變形區位、崩塌體積與構造物位移等資訊，並支援歷史資料比對與分析。

2024 年起，整體系統更進一步彙整各邊坡之養護、巡檢、監視、監測、預警及地質水文等空間與屬性資料，同時結合機器學習演算法與地工、地質專業分析，判釋潛在風險邊坡（如邊坡精進分級與山區活動性評估），作為後續精密評估與工程決策之依據。

貳、邊坡科技巡檢系統目標與流程

臺鐵公司因發展歷程年代較早，不同於近年興建之高速公路（共計 2,570 處）或高鐵（共計 389 處）人工邊坡，多具備鑽探資料

及依相關規範設計之護坡設施，可透過檢查、檢測與監測進行完整評估，並進行力學分析與查核作為邊坡分級依據。相較之下，臺鐵自 1887 年起陸續建置，受限於歷史資料整備不全，迄今仍難釐清多數邊坡所採用穩定處置工程設施的設計依據、功能與構造特性，亦缺乏足夠之鑽探與地表下地層、地質及水文資料，致使無法有效建構工程地質模型，進而限制穩定性分析與評估作業的執行。

2019 年辦理的邊坡分級，係依 2020 年頒佈之「鐵路邊坡養護手冊」作業要求，對自然植生邊坡進行目視巡查，主要檢視以下項目：

1. 邊坡坡頂裂縫或陷落。
2. 坡趾龜裂或局部陷落、隆起。
3. 坡面鼓出、滑移、坍塌或崩落。
4. 坡面侵蝕、沖刷、回填材料流失。
5. 落石。
6. 坡面異常滲水（泥水或高壓水）。
7. 超載堆積物（含垃圾）。
8. 樹木傾倒、植生枯損、雜草異常茂盛。
9. 路權內耕作或佔有。
10. 路權外土地利用改變或加載。
11. 河（海）岸侵蝕。

受限於自然邊坡的植被遮蔽與地形陡峭，實務巡查作業大多僅能在距離軌道約 20 公尺範圍內進行，經常無法通行至坡頂，致使難以全面掌握邊坡整體穩定狀況。以 2020 年

《鐵路邊坡養護手冊》所訂分級方法為例，受地形限制無法有效觀測之情形，曾發生於 2020 年 12 月 4 日臺鐵宜蘭線瑞芳－猴硐間 12K+233 處邊坡事故。該處原評為 C 級邊坡，後因岩體滑動導致災損，事後調整為 A 級（不穩定），顯示現行分級與管理方式仍有可精進之處，亟需檢討更符合實務需求之邊坡評估與風險管控機制。

因應瑞芳－猴硐與集集隧道邊坡事故，臺鐵公司 2021 年辦理「邊坡精進分級」，運用國土測繪中心之全臺灣 1m 解析度 LiDAR/DEM 及影像空間資訊，評估上界至山稜線之邊坡危害度潛勢，以坡向變化、崩塌地形特徵、集水區、地質條件差異（如位態變化）為原則劃分邊坡單位。

此外，亦檢視地質調查及礦業管理中心區域地質圖及流域地質圖，參酌岩性、位態及構造等地質條件之岩屑崩滑、落石、岩體滑動、順向坡、河岸侵蝕、山崩地滑地質敏感

區、潛在崩塌、歷史崩塌紀錄等資訊，並納入農村發展及水土保持署公告之土石流潛勢溪流等環境因子，以精進分級並評估優先與持續關注之邊坡區段。

然其所研析圖資通常為數年前資訊，雖亦提供重要參考依循，但常因邊坡位處臺鐵路權外或植被茂密，尚難持續觀測工址現況，得知邊坡滑移活動性狀況，進而研析應監測項目與位置，及設施改善處理之對策與範圍。

為提升邊坡巡檢作業的預警效率與應變能量，臺鐵公司自 2023 年起導入科技巡檢手段，由遠方運用衛星與飛機等廣域遙測技術蒐集高空圖資，快速篩選潛在致災熱區。其後再以無人機與地面近域遙測方式進行補測，逐步提升重點區域的測繪解析度（圖 2），涵蓋多源資料如光學影像、光達、合成孔徑雷達干涉技術及全球導航衛星系統等空間資訊，獲得多時期高解析度之三維地形變化與邊坡形變監測成果。

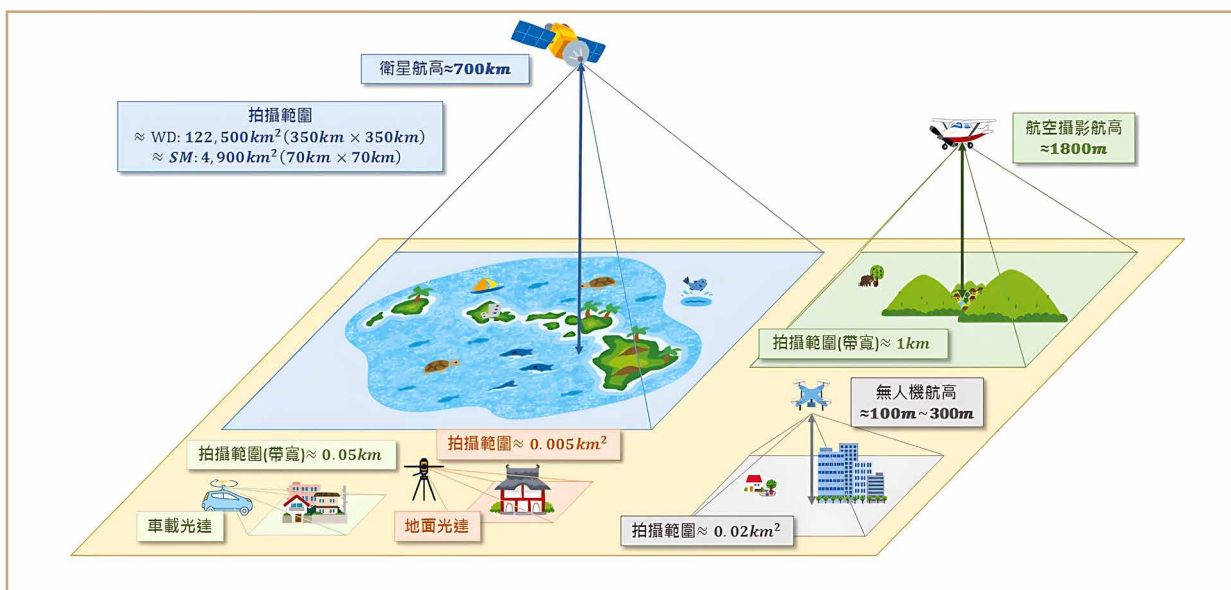


圖 2 由遠而近之各種遙測載具拍攝調查

進一步，這些異質性的空間資料將與檢查、檢測、地工儀器監測、設施改善等傳統養護作業流程整合（圖 3），形成邊坡科技巡檢系統。所有數據皆匯入統一建置之 GIS 平台，進行空間資料的分級管理、時序分析

與風險評估，使維護人員能即時掌握邊坡狀況，優先整備高風險區段，精準投入有限資源，並強化邊坡之災害抑制能力與整體韌性，以提升面對極端氣候事件之調適與應變效能。

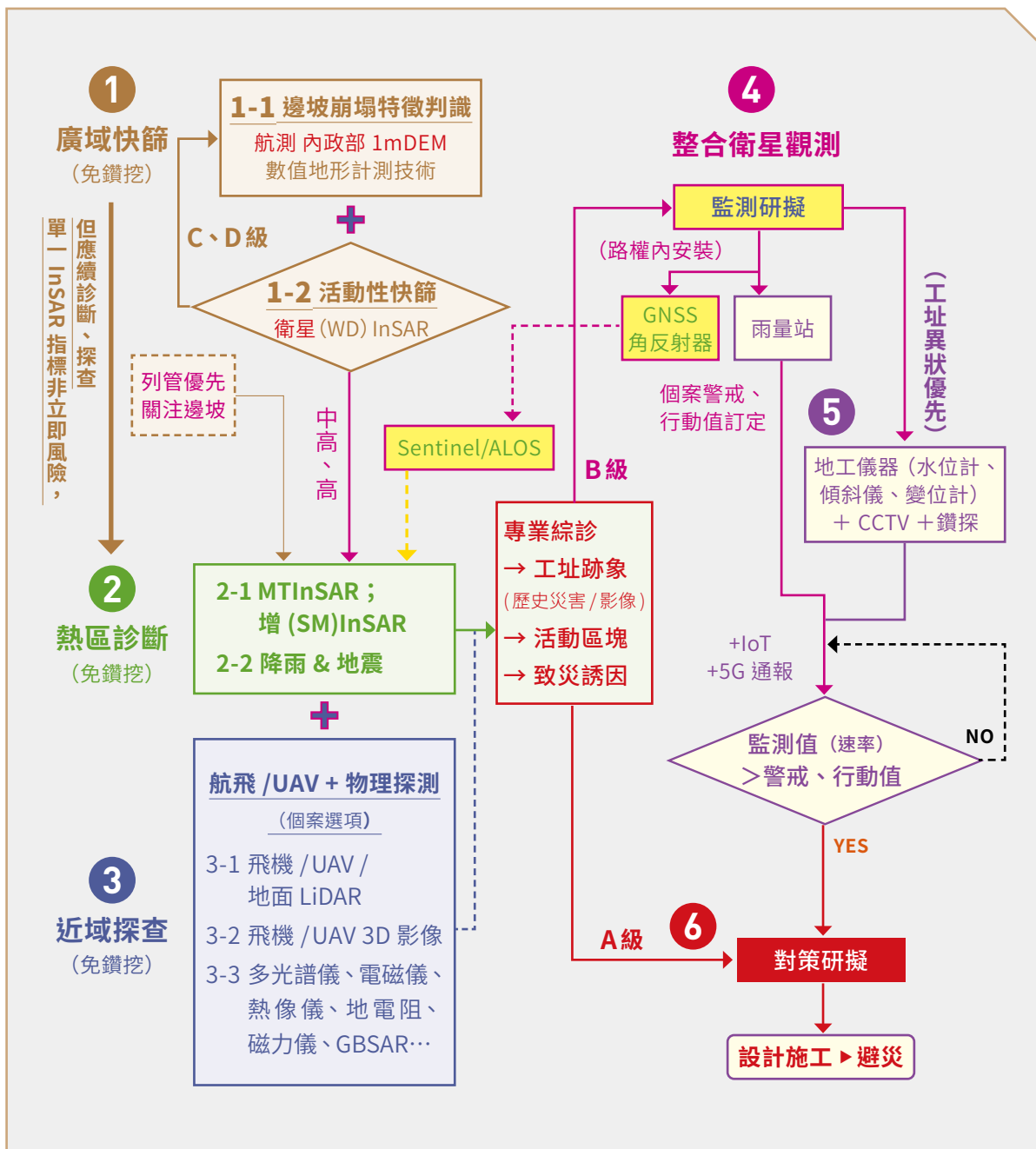


圖 3 整合邊坡科技與傳統巡檢作業流程

參、空間資訊應用於科技巡檢之成果

一、透過飛機／UAV 提升測繪解析度

地礦中心、農村水保署與林業保育署等機關，多聚焦於面積超過 10 公頃之大規模崩塌地，惟對於實際影響交通路線運轉安全的重大邊坡災害，其規模往往僅約 1 公頃。例如 2020 年 12 月 4 日臺鐵宜蘭線瑞芳～猴硐段邊坡岩體滑動、2021 年 8 月 7 日高鐵苗栗 126K 邊坡岩屑崩滑、2021 年 8 月 14 日臺鐵集集支線隧道受邊坡滑動壓迫致損，及 2022 年 11 月 1 日國道一號汐止交流道邊坡岩體滑動等事件，皆突顯「中小尺度但高風險」邊坡災害的治理需求。

目前國土測繪中心所提供空載 LiDAR 資料（約 1 點雲 /m²）產製的 1m 解析度地形模型（DEM），雖可應用於集水區與主要水系圈繪，但對於交通路線沿線隧道口、擋土牆等邊坡保護設施之判識精度有限。為提升科技巡檢的精度與應用性，臺鐵公司進一步採加密 1.8 倍航線策略（或搭配提升掃描儀性能），將 DEM 解析度提高至 0.3m（約 10 點雲 /m²）（圖 4），同時於飛行中搭配測繪級相機拍攝，建構具有真實紋理之三維影像模型（圖 5），以輔助人工保護設施判釋與地貌比對。

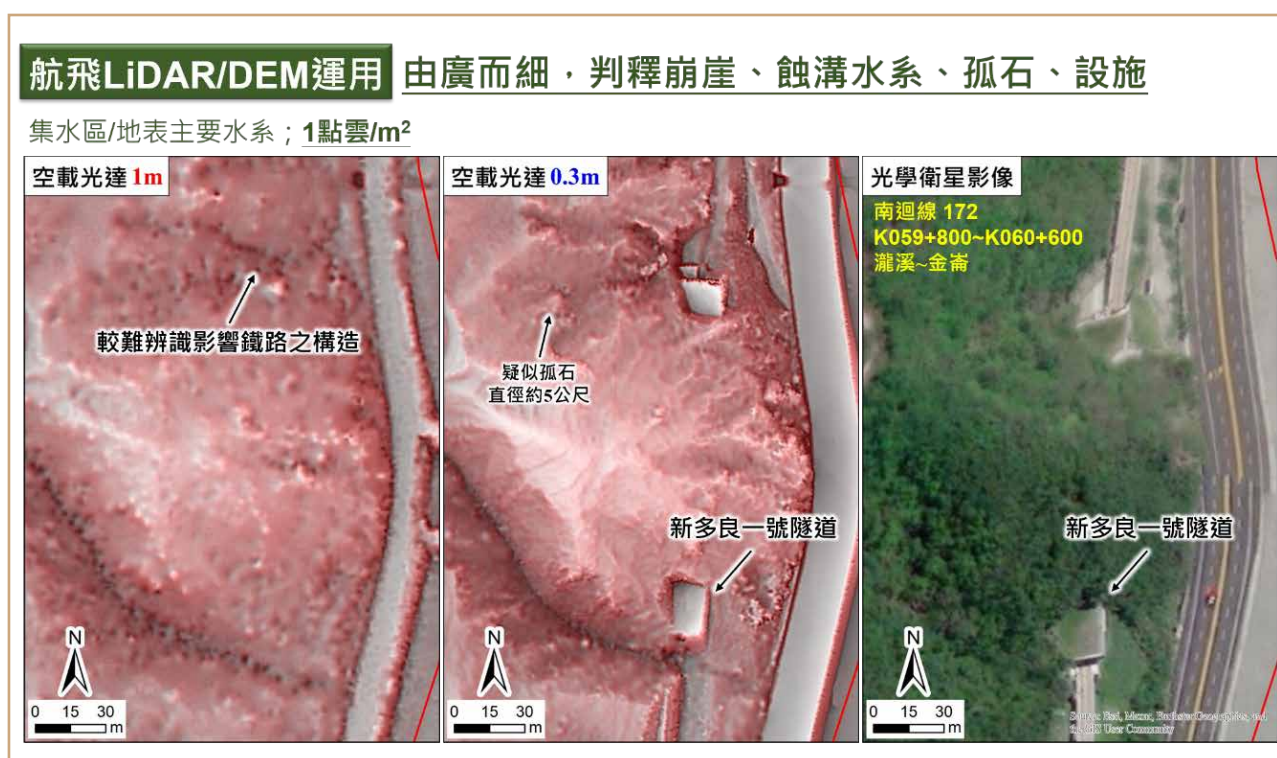


圖 4 飛機 LiDAR / DEM 測繪解析度與運用(南迴線)

航飛LiDAR與3D影像模型運用

蝕溝上構造物或孤石難辨識→續人工巡檢或UAV LiDAR測繪

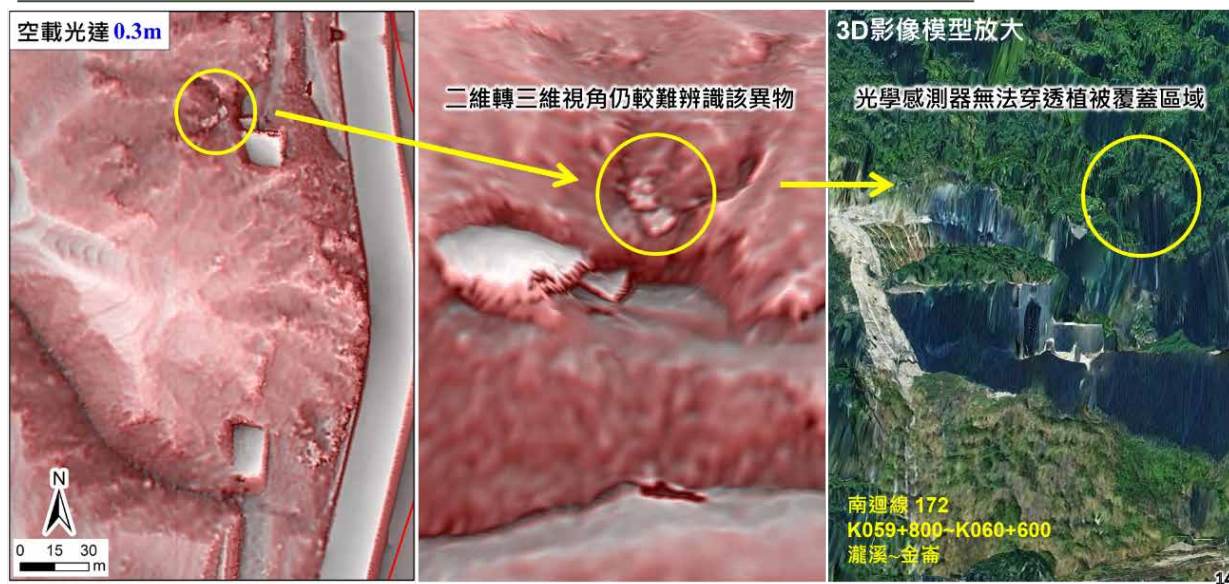


圖 5 飛機 LiDAR DEM 與 3D 影像模型運用

當蝕溝、異物或上構造物難以透過光學影像辨識時，則需補以地面巡檢。若需更細緻掌握邊坡支溝分布、崩塌輪廓、孤石位置與主要構造物特徵，則進一步以 UAV 搭載高解析度 LiDAR 進行掃描，產製 0.1m

(100 點雲 /m²) 或更高密度之 DEM (如第三代 UAV LiDAR 儀器可達 400 點雲 /m²)，以提供具穿透植被能力的高精度裸地模型 (圖 6)。

UAV LiDAR運用(機動性高) 細部辨識蝕溝發育與孤石

集水區/地表主要水系；

1點雲/m²

蝕溝/崩塌特徵/塊體/主構造物；

100點雲/m²

支溝發育/崩崖/孤石/構造物；

400點雲/m²

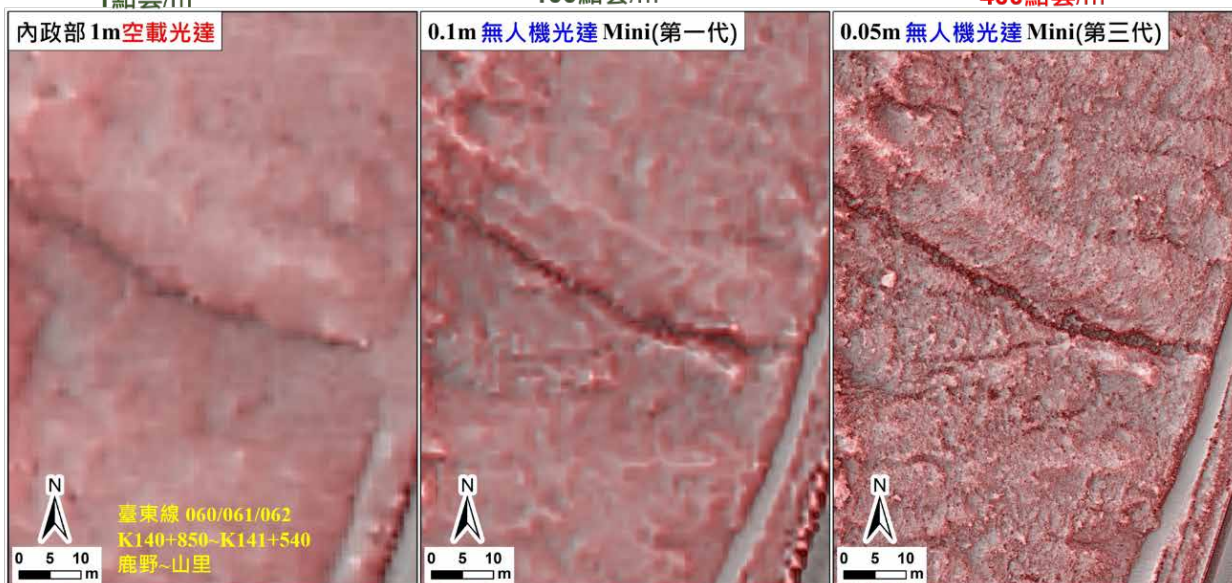


圖 6 UAV LiDAR 細部辨識支溝發育與孤石

最終，所有航測與地面巡檢所得之空間資料，包括光達點雲、DEM、三維影像模型、巡查異常紀錄與工程設施位置等，皆匯入統一建置之 GIS 平台（圖 7）。

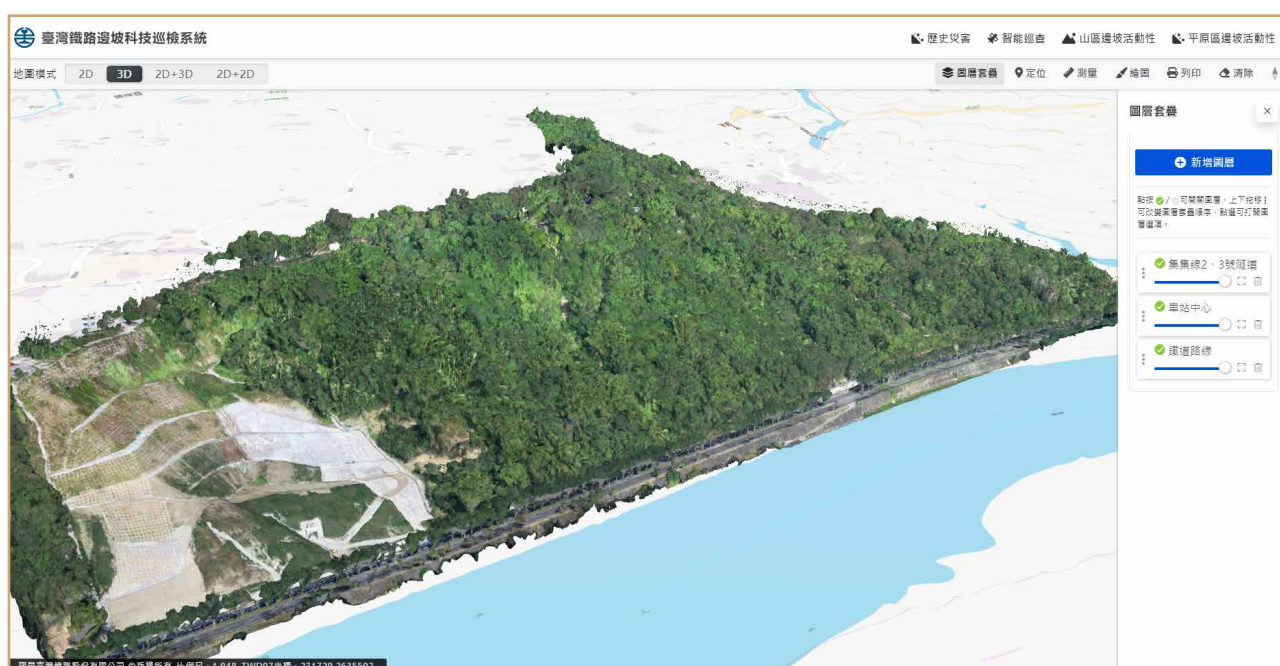


圖 7 圖台展示三維邊坡模型成果截圖

二、提升 InSAR 之測繪解析度

在邊坡監測作業中，InSAR 可長期、廣域且非接觸式地提供地表微小形變之觀測資料，已成為科技巡檢中不可或缺的手段。臺鐵作業上，初期採用較長波長、穿透植被能力較強之 ALOS-2 WD1 觀測模式衛星影像（每幅寬約 350 公里），進行邊坡活動性的廣域快篩。該模式解析度為 $100\text{m} \times 100\text{m}$ ，即每個網格代表約 1 公頃面積，適合初步判別山區地形之下陷或隆起區域。

針對篩選後之潛在熱區，則進一步套用 ALOS-2 SM3 觀測模式影像，其幅寬縮小為 70 公里，但解析度大幅提升至 $10\text{m} \times 10\text{m}$ ，網格單元涵蓋面積縮小為 0.01 公頃，使局部邊坡地表變形特徵更為清晰。於此解析度下，可明確辨識坡頂、坡腹與坡趾位置的差異性形變區（圖 8），並透過冷暖色調分布有效圈繪潛在變形帶，有助於後續判識應加強監測或補強改善的部位。

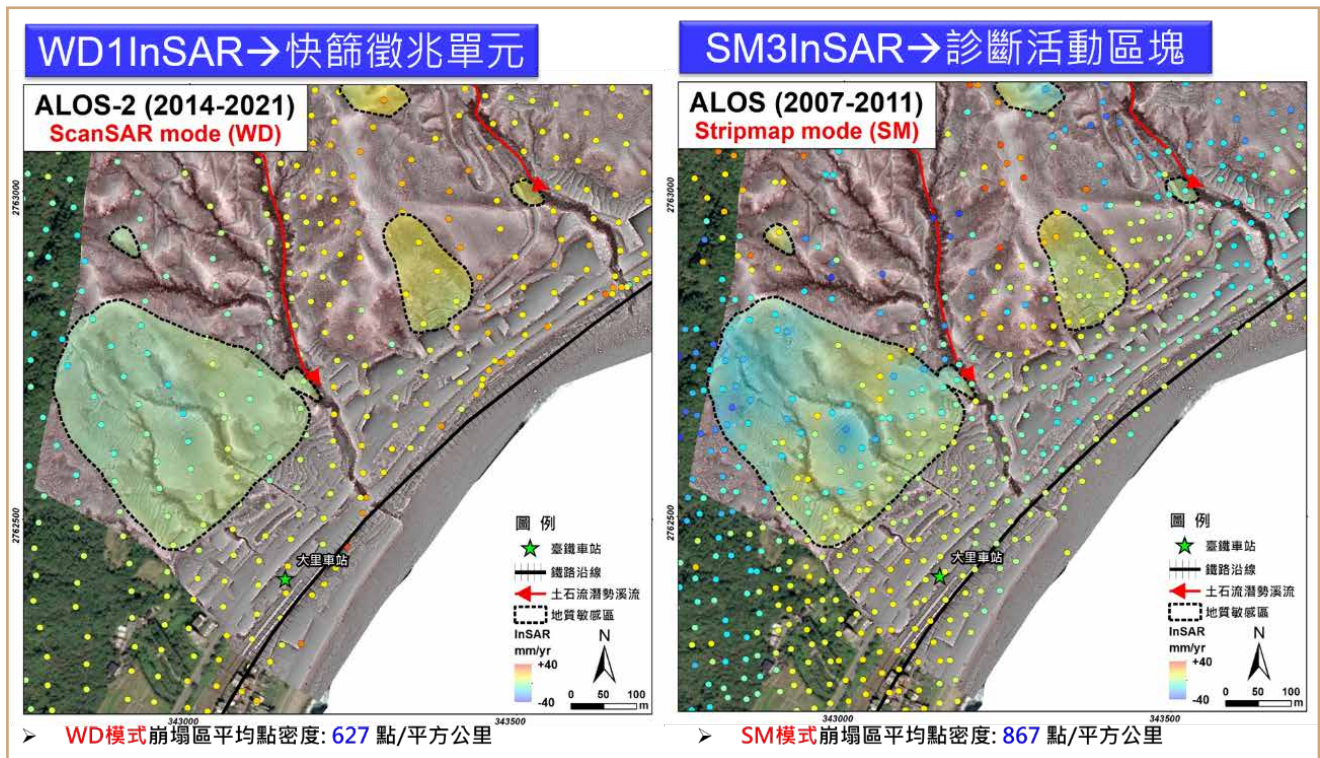


圖 8 ALOS WD 及 SM InSAR 地表形變比較

然而，InSAR 仍受限於雷達衛星的拍攝軌道與地形遮蔽問題。例如 ALOS-2 下降軌從東北向西南移動，對於坡面朝西南的邊坡易產生遮蔽，導致該處回波訊號微弱，進而影響干涉解算品質。因此，在重點邊坡區亦需輔以設置角反射器及 GNSS 點位，以提高 InSAR 監測成果的時空精度與地面驗證能力。

邊坡穩定性受豪雨與地震等自然因子高度影響，特別是颱風豪雨分布具空間與時間之不確定性，地震亦可能於兩次監測週期間造成快速變化，導致傳統如國土測繪中心六年期空載 LiDAR 更新頻率不足以即時掌握異變現象。因此，SAR 衛星具備短天期或每季拍攝一次的能力，為彌補常規地

形資料更新之時效性落差，提供一項具時效性的監測工具。

但須注意的是，單一時點 InSAR 形變熱區的判釋結果，尚不足以直接研判其危險程度。仍應整合多源資料，如高解析度航測影像、UAV 光達成果、地表水系變化（圖 9）、極端氣象與地震事件紀錄、工址現地異狀觀察等資訊，進行比對與交叉診斷，方能提升判釋精度與預警準確性。

整體而言，InSAR 技術特別適合應用於監測變形速率緩慢之岩體滑動、岩屑堆積滑移等類型，較不適合即時預警落石、土石流等快速崩塌事件。為提升整體監測與風險評估效率，臺鐵公司已將 InSAR 快篩成

果、雷達衛星影像分析、GNSS 觀測數據與地工異常紀錄等多源資料整合入 GIS 平台。該平台可視化形變分布圖、熱區演變歷程，並疊合交通設施、地形、地質等基

礎圖層，支援巡檢計畫、資源調度與工程處置決策，進一步強化邊坡災害的預警機制與韌性治理能力。

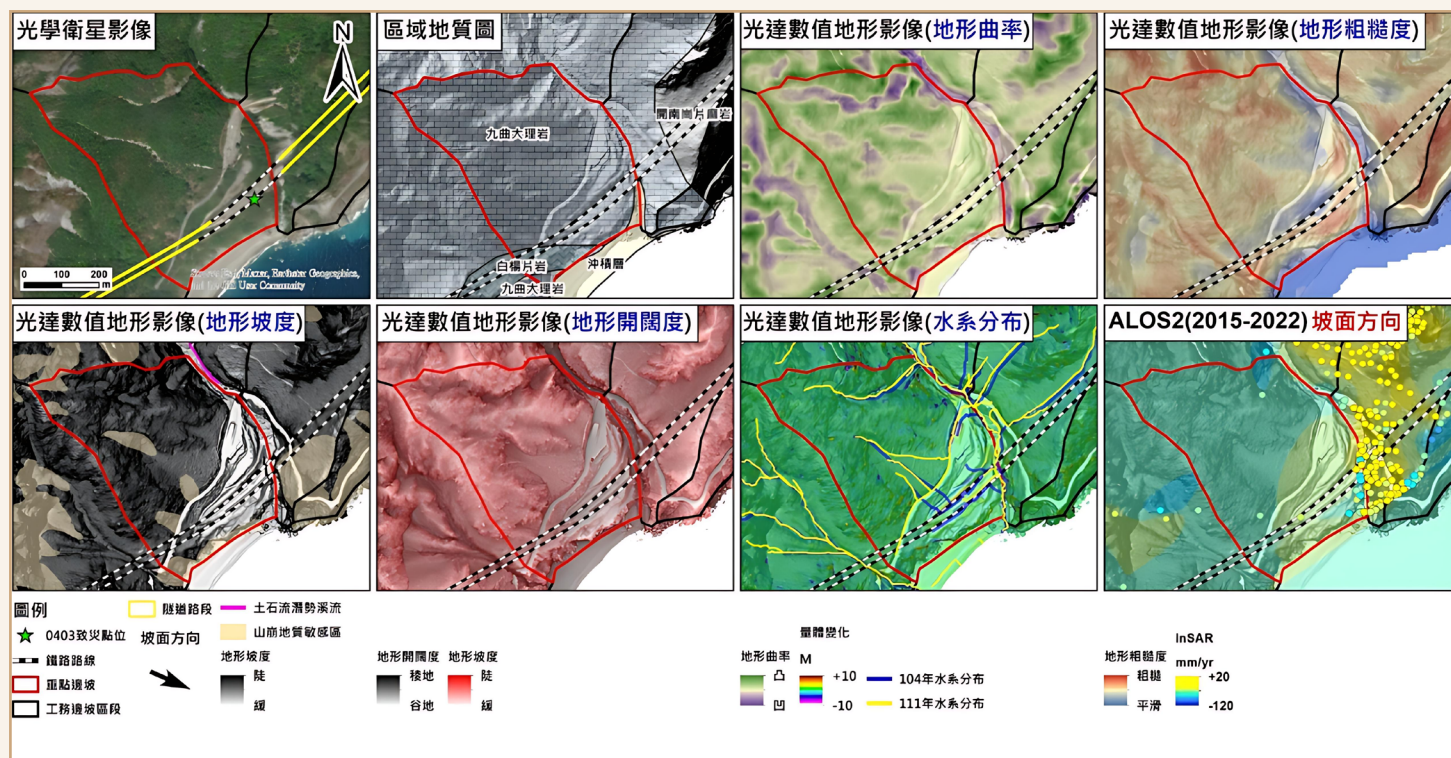


圖 9 工務邊坡地形資訊及地表變形例

三、邊坡科技巡檢 GIS 平台彙整

邊坡科技巡檢 GIS 平台旨在強化臺鐵邊坡維護管理與災害風險掌握能力，作為整合監測資料與空間分析的核心工具。平台整合與國家地震工程研究中心、臺北科技大學等單位合作取得之測繪與監測資料，並彙整臺鐵既有邊坡資料與維護履歷，藉由 GIS 套疊分析方式，介接「鐵路邊坡

安全生命週期維護系統」。此外，亦結合地質雲、中央氣象署、全國地理資訊入口網 (TGOS) 及國土測繪中心等開放資料來源，形成涵蓋地形、氣象、地質與導航圖資的多元資料架構 (圖 10)，提供工程技術分析與災害熱區判釋依據，奠定後續自動化預警與崩塌監測之發展基礎。

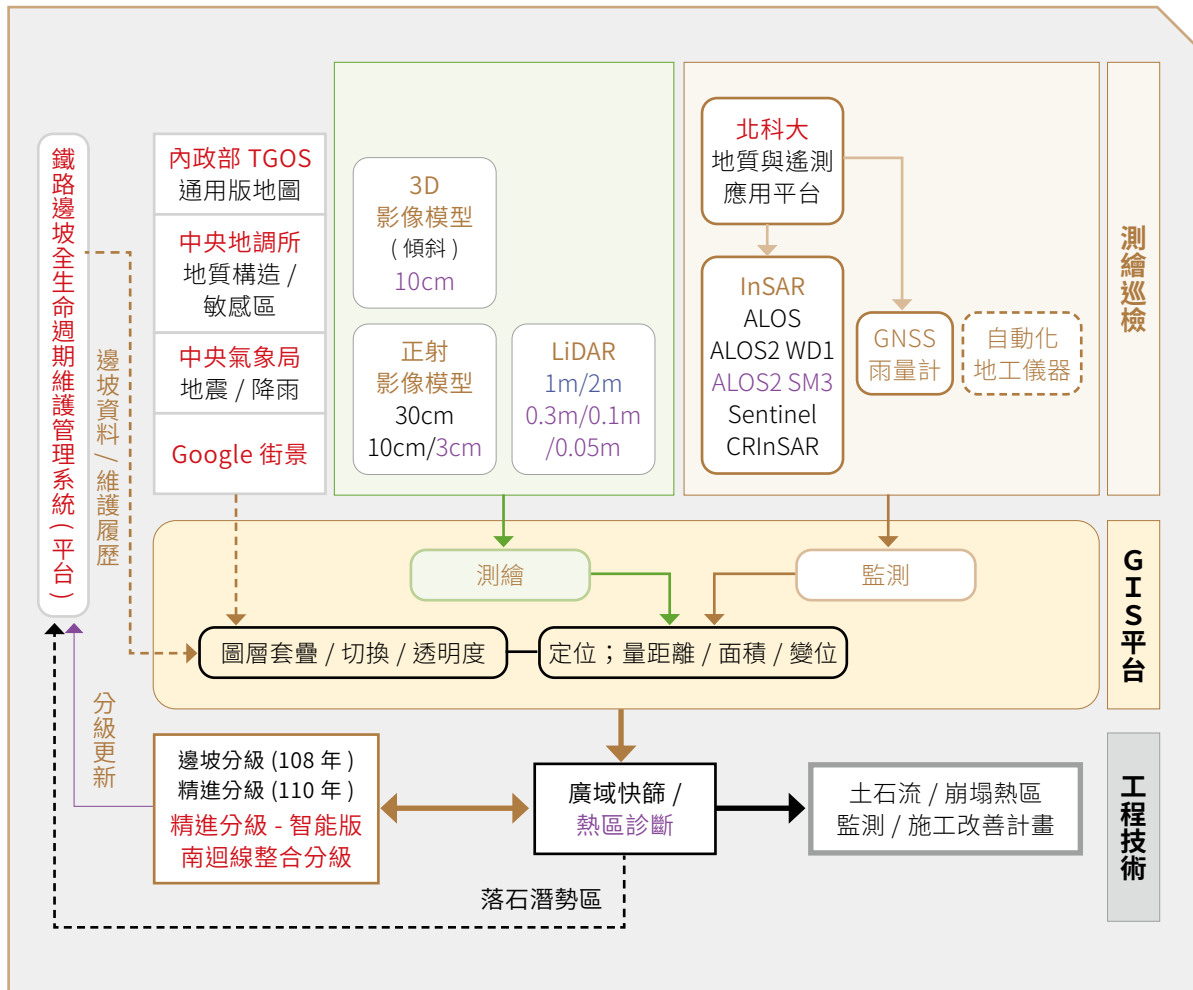


圖 10 邊坡科技巡檢 GIS 平台架構

整體平台系統涵蓋前端介面、應用程式介面（API）、資料庫、雲端環境與圖資應用等五大模組。前端介面採用響應式網頁設計（RWD），支援桌機與行動裝置瀏覽，提供 2D、3D 與 2D / 3D 整合圖台（圖 11），搭配量測、標註、套疊與圖層控制等功能，提升圖資操作的彈性與便利性。平台後端則運用 .NET Core Web API 架構，結合 Geometry Web API 與客製化查詢服務，資料庫涵蓋臺鐵車站、路線、里程點等多項設施資料與工務段災害記錄（圖 12、圖 13），並以 GIS 圖資形式發布供查

詢使用。整體系統建置於亞馬遜雲端運算服務（AWS）環境中，強化運算效能與跨機構資料整合能力。

系統亦依循交通部鐵道局智慧鐵道 ICT 技術規範，具備與鐵道雲平台互通與系統移轉的技術能力。並整合既有維運系統、地礦中心山崩雲（圖 14）、內政部 1mDEM 加值產品、InSAR、GNSS 等監測成果外，未來亦將導入臺鐵公司內部 MIS 系統介接機制，實現工務類系統資訊融合。操作介面採模組化設計，圖台分為地圖顯示區、

查詢模組與邊坡分析（圖 15）及監測資料檢索模組三大區塊，使用者可於單一介面中完成表單查詢、地圖互動與資料顯示等操作，達到無縫整合的系統體驗。

為提升資料篩選與即時反應能力，可透過圖資套疊模組，比對不同年份正射影像、

三維邊坡模型、InSAR 成果與傾斜攝影建模圖資，搭配標註與量測工具，協助使用者掌握邊坡變異趨勢與潛勢區分布。整體系統以智慧邊坡管理為核心，提供工程單位高效、即時與整合性的支援平台，朝向智慧鐵道全生命週期維運管理之願景邁進。

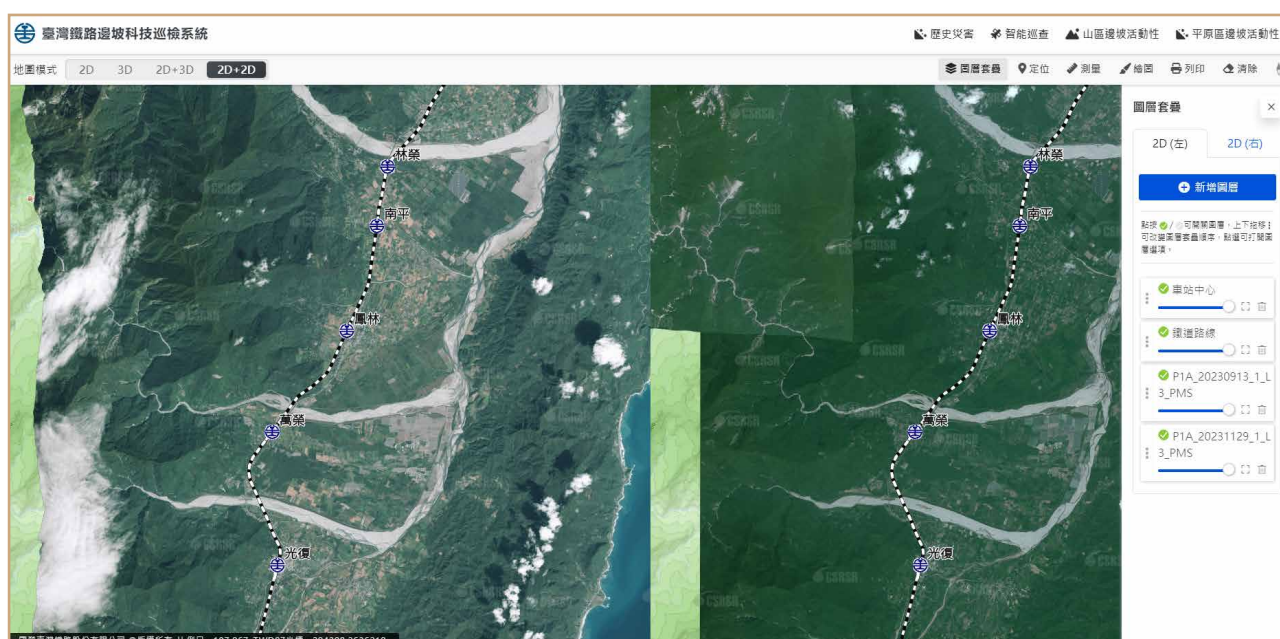


圖 11 20240403 花蓮地震前(左)、後(右)衛星影像

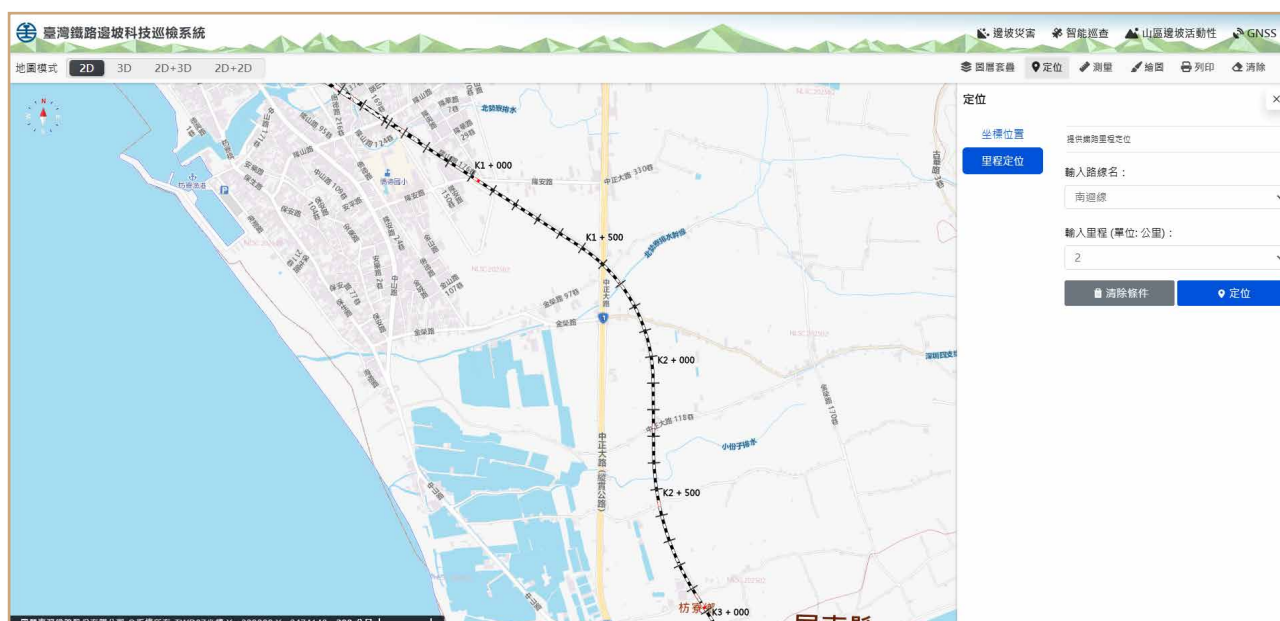


圖 12 鐵路里程定位

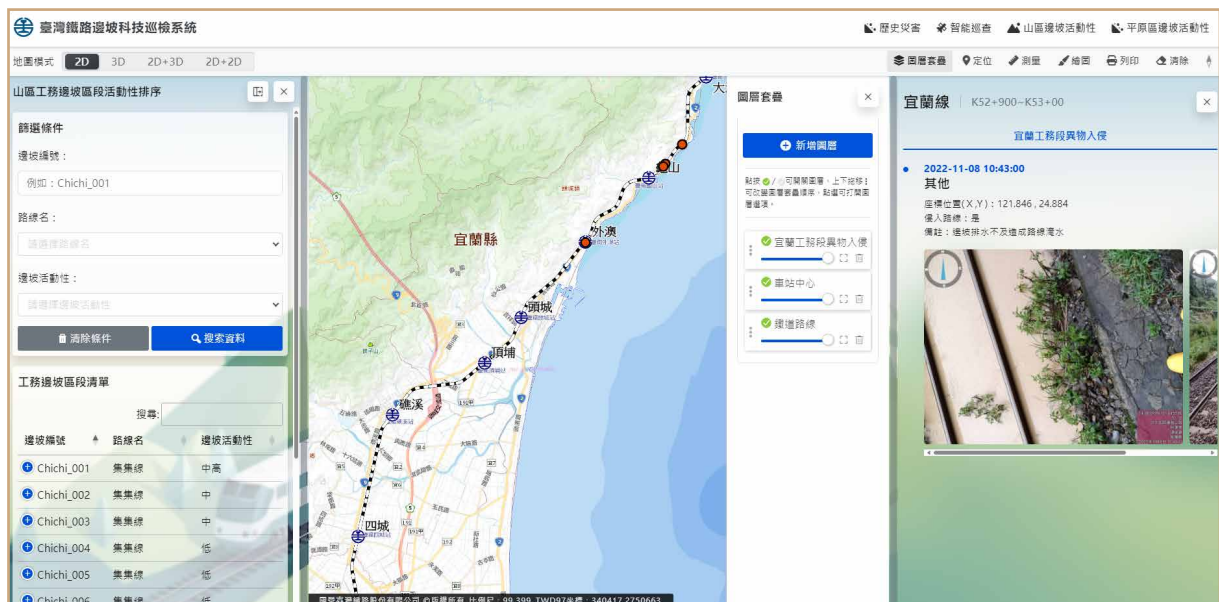


圖 13 宜蘭工務段異物入侵資訊欄

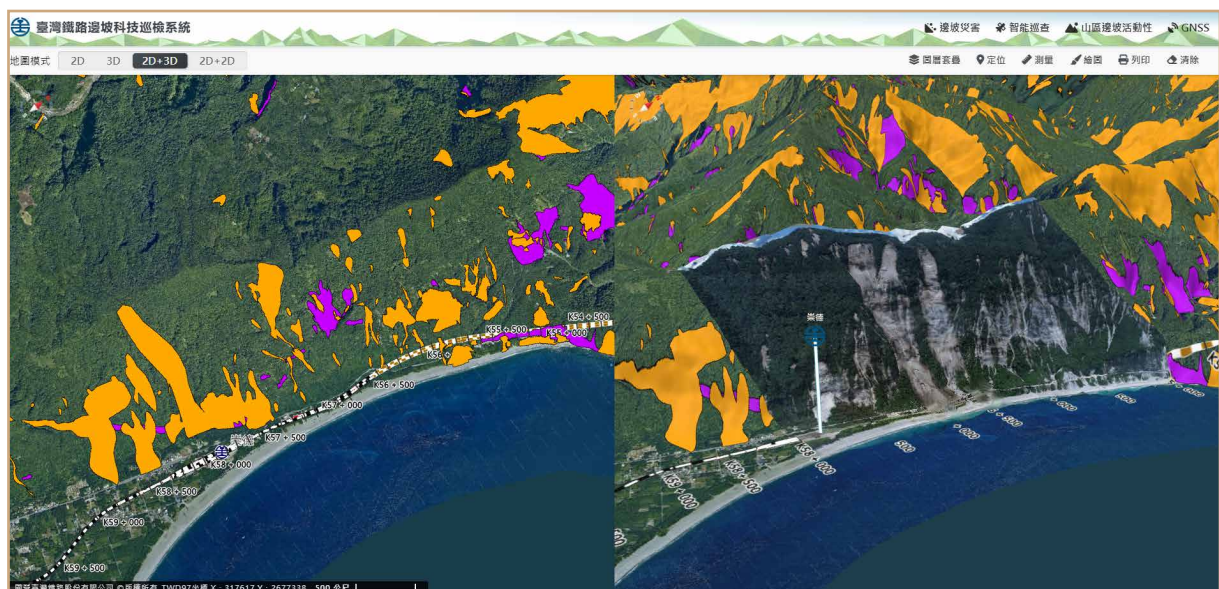


圖 14 邊坡科技巡檢系統 K56 邊坡災後圖資整合展示圖

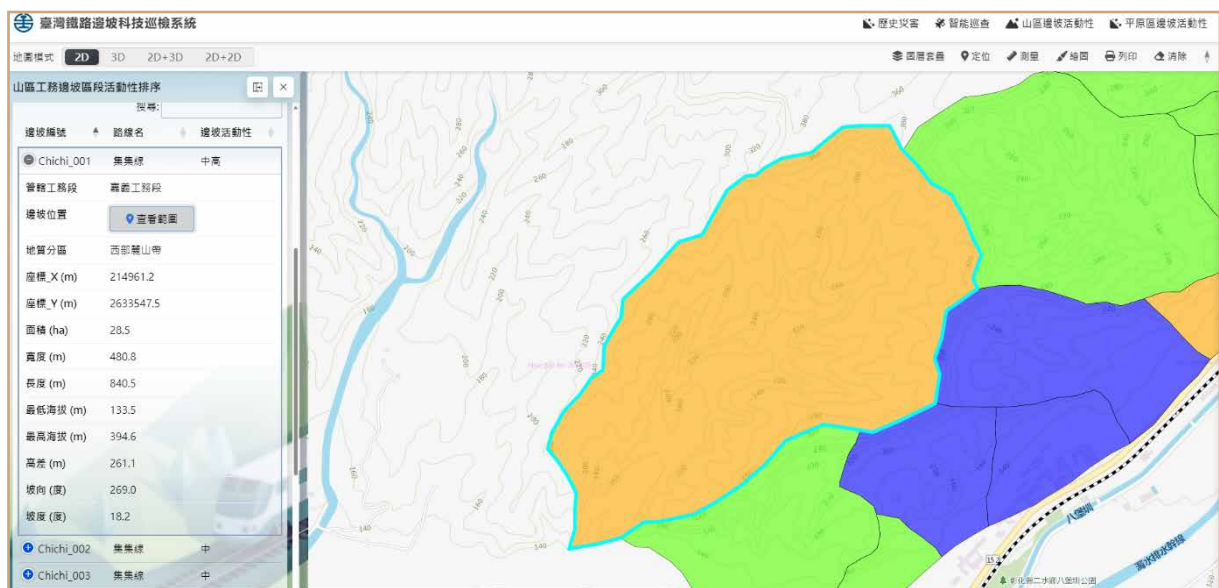


圖 15 智能邊坡檢索模組

肆、結論與建議

豪雨與地震為影響邊坡穩定性之兩大主因，前者具降雨區域不確定性，後者則可能瞬間改變坡體內部應力狀態。尤其颱風所夾帶之強降雨，其登陸路徑與降雨熱區分布變化極大，造成在兩次監測頻率之間（如光達每六年、InSAR 每月或每兩週）所發生之坡體突變，難以及時掌握，形成潛藏風險。臺鐵路網涵蓋眾多自然邊坡與高陡人工邊坡，加以多為單一路線、缺乏替代路徑，於惡劣天候下難以全面封閉停駛，故防災應變需求更為迫切。

為強化邊坡風險掌控，應藉由科技巡檢與監測技術進行輔助，研析近年災損事件與現場經驗可發現，邊坡災害往往具備前期徵兆，顯示科技與人工觀察可互為補充。現階段可整合下列監測與分析手段：

一、傳統儀器與人工巡檢

具高精度優勢，但受限於布設密度與維護條件。

二、雷達衛星

提供廣域、高頻率之資料更新，突破人力巡查限制。

三、InSAR 干涉雷達技術

可長期監測地表微幅形變，提前捕捉異常移動趨勢。

四、LiDAR 光達測繪技術

可建立高解析 DEM，解析崩塌特徵與潛在鬆動區塊，具穿透植被能力。

未來，上述多源監測資料將整合至臺鐵 GIS

平台中，建立具時序性的三維空間資料庫。該平台具備下列應用功能：

一、三維邊坡視覺化與 InSAR 診斷檢視

即時線上檢視山坡現況與風險變化。

二、資料檢索、比對功能

整合 InSAR 形變速率、LiDAR 地形異變、集水區分布與歷史災點，進行多因子風險研判。

三、風險分級與應處建議

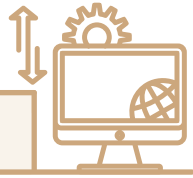
協助工程單位掌握邊坡分級、優先整備位置與調度資源依據。

總結而言，透過建置結合監測、分析與決策支援之智慧化 GIS 平台，不僅可提前辨識異常，降低致災風險，更能在氣候變遷日趨嚴峻之情境下，強化臺鐵邊坡管理系統的預警能力與韌性治理成效。此舉有助於集中有限資源，精準防災整備，實踐智慧巡檢與主動調適的目標。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「臺灣鐵路邊坡巡檢精進系統建置」計畫期中報告書（2024）。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「0403 花蓮地震特別巡檢報告書（震後百日）」（2024）。
3. 國營臺灣鐵路股份有限公司，「鐵路邊坡養護手冊」（2020.3）。

科技應用



三維地質模型與 AI 監督式學習應用於軟弱地層之探討

關鍵詞 Keywords

- # 土壤液化 Soil Liquefaction
- # 監督式機器學習 Supervised Learning
- # 道路坍塌 Road Collapse
- # 三維地質網格 3D Geological Grids

台灣世曦工程顧問股份有限公司
大地工程部

工程師

許哲瑋

計畫經理

莊心凱

副理

楊智堯

協理

陳聰海

新北市政府

工務局

科長

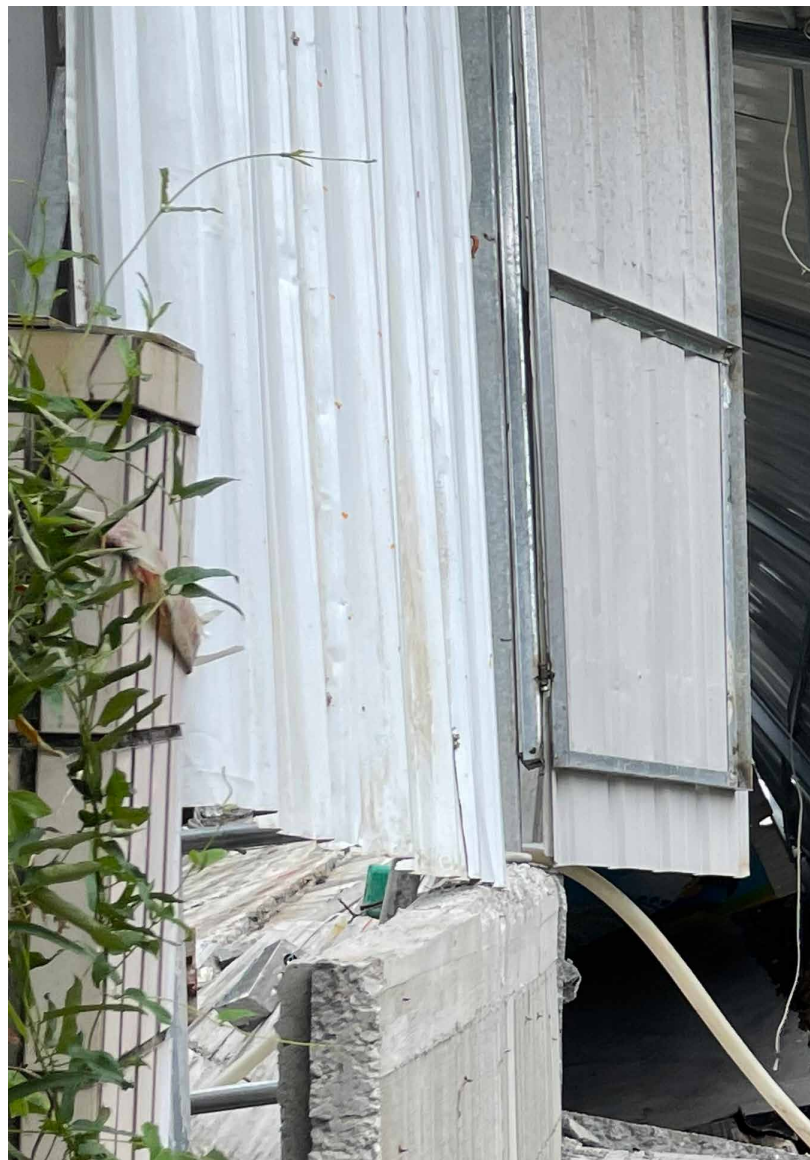
鄔豪中

股長

林育群

工程司

高啟堯



都會區多位於沖積層，地質結構較為軟弱，且人口密度高，常面臨諸多人為事故或天然災害的威脅，如 2016 年美濃地震重創南臺灣，造成多處房屋倒塌傾斜、維生管線嚴重損壞，導致民眾生命、財產蒙受巨大損失，而大部分震損災情與強震引致之土壤液化相關。此外，近年隨著都市建設密集發展，道路塌陷事件亦日益頻繁，特別於深開挖工程時，更易誘發此類災情。上述災害雖成因不同，但皆與都會區地質有顯著關係。

由此可見，建構一套高解析度的三維地質資料，對於都市災害潛勢分析及防災規劃具有重大意義，故本文蒐集新北市境內共 756 筆鑽探資料，以及新北市政府提供近五年之 138 筆道路坍塌資料，包含「路基掏刷」和「污水管線滲漏掏刷」案例，建置涵蓋高解析度之三維地質模型，並進一步應用於土壤液化與道路塌陷潛勢評估，提供科學且具體之災害潛勢圖資，有利於未來工程設計與都市規劃決策。



壹、前言

新北市轄區內人口密集區域多位於現代沖積層，地質條件相對鬆軟，全盤掌握土壤液化潛勢分布之需求顯得尤為必要且迫切；此外，市區工程建案眾多，且類型繁雜，亦伴隨潛在之道路坍陷風險。故本文選定新北市人口密度高、發展成熟且地勢相對平坦之區域作為研究區，並配合 756 筆鑽探資料建置之高精度三維地質網格模型，進行土壤液化與道路坍陷潛勢之空間分析與探討。

新北市地形複雜多變，以火山、山地地形為大宗，西有林口台地、觀音山火山，中為臺北盆地，北有大屯火山群，東南側則緊接西部麓山帶，整體可細分為火山區、山地區、台地區、盆地區及平原區。本文分析範圍含括新北市內六個行政區：五股、蘆洲、三重、新莊、板橋和泰山，其中五股、泰山位

於林口台地邊緣，多為緩傾坡地與沖積扇地形；蘆洲、三重、新莊及板橋則位處臺北盆地西緣，多為河流沖積形成之平原地形。

地形方面，本文分析範圍淺層覆蓋多屬全新世之沉積物，地質上多屬松山層。松山層為臺北盆地常見的更新統沖積層，主要由砂、黏土與礫石互層構成，形成於晚更新世至全新世期間，屬於河流與沖積環境沉積物。因其土層鬆軟、壓縮性高，具高液化潛勢，為都會地區地工設計與防災評估的重要對象(如圖 1)。

貳、三維地質模型與土壤液化潛勢分析

一、三維地質模型之建置

為充分了解研究區地質分布變化，並為後續分析提供所需地質參數資料，本文同步

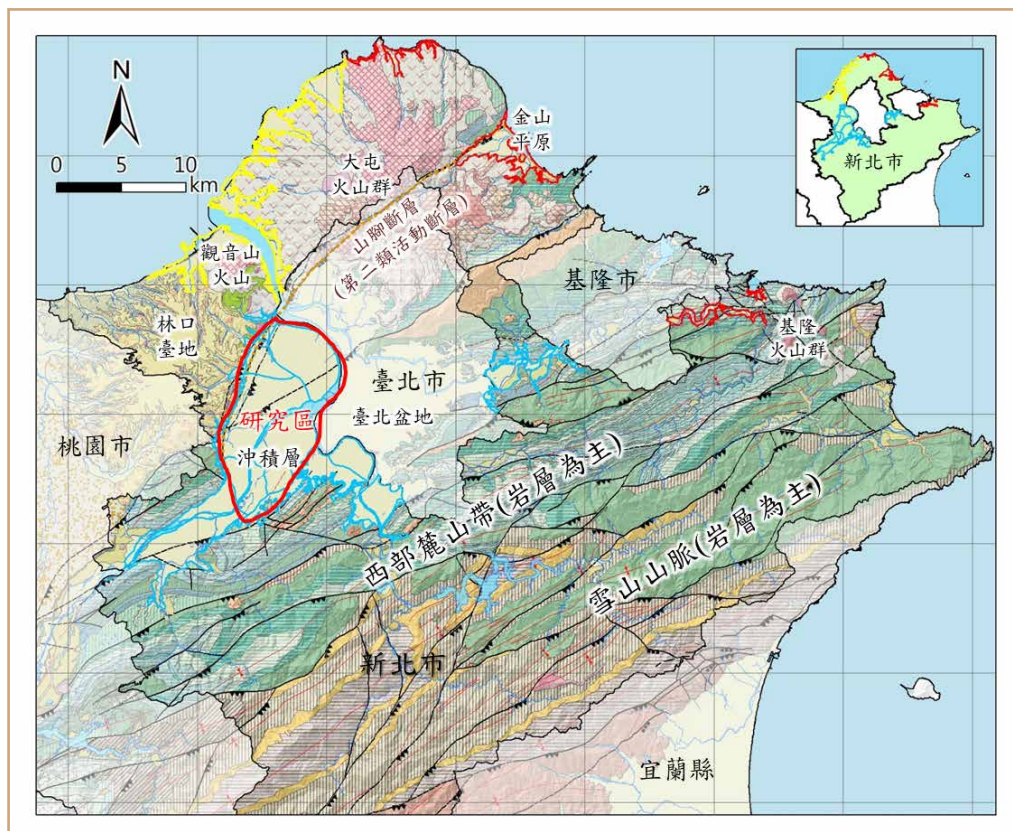


圖 1 本文研究區範圍及新北市區域地質圖

進行補充鑽探並蒐集過去工程資料鑽孔，總鑽孔數共計 756 孔，藉由利用大量分布均勻之鑽探資料進行空間內插，將各項地質參數有效分配至具等尺寸的水平與垂直三維網格中，進而建立具有一致解析度之地質模型。

三維地質模型建構，首先須對各鑽孔資料中之地質參數，如標準貫入試驗 N 值、細料含量 FC、塑性指數 PI 與單位重 γ_t ，依據特定原則進行初步篩選與補值處理，並將篩選後之資料以 1m 為間距，自地表向下至 30m 深度進行正規化分層分配。隨後，以每層 1m 厚度為單位進行水平內插，推估各地質參數於整個平面上之空間分布，並將所得結果依序寫入 25m×25m 之水平網格中，如此逐層處理所有參數，最終完成全區地層參數記錄與模型建構，其作業流程與原理如圖 2。

為確保模型在空間上具良好精度與代表性，內插方法與參數設定至關重要，又考量地質參數具有高度空間變異性，故採用具統計理論基礎之 Kriging 內插法進行預測。透過對鑽孔資料進行半變異分析，得以掌握其空間關聯性，進一步選定適當之內插參數與擬合函數，有效提升內插準確性。

然而，單一內插分析範圍若涵蓋地質異質性高之區域，可能導致推估失真，故本文進一步依據地質調查資料，將整體研究區劃分為若干地質微分區，並分別於各區內進行分區內插，以強化同區域內資料之空間關聯性與內插成果可信度（如圖 3）。分區內插後，再進行區間結果之整併與鑲嵌，完成連續且一致性良好的三維地質模型。

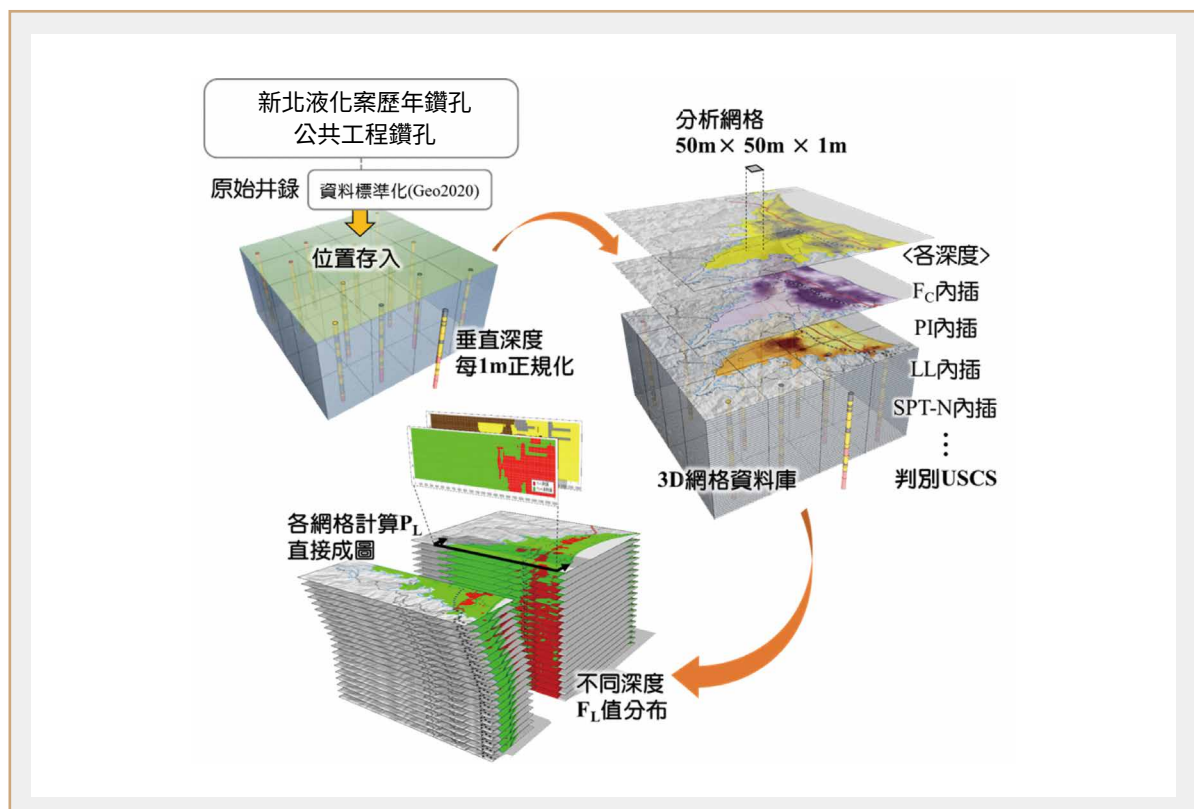
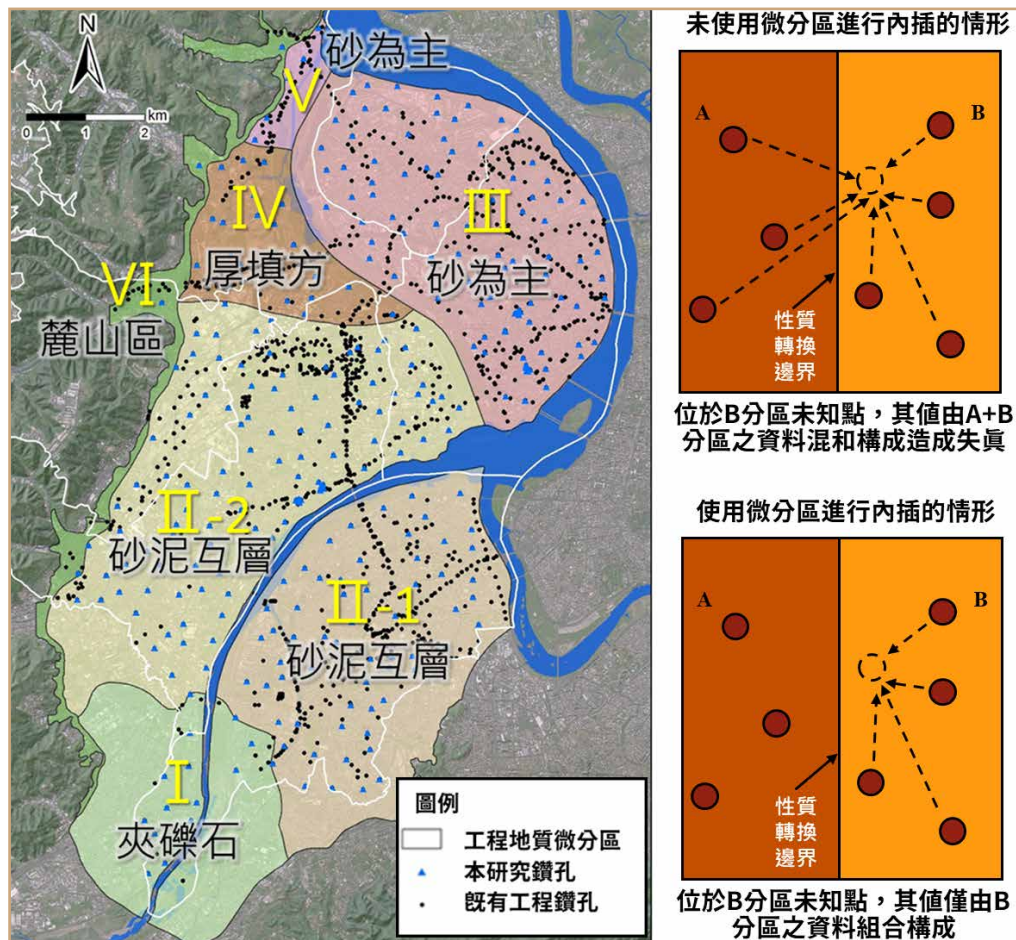


圖 2 三維網格模型建置示意圖



二、土壤液化潛勢分析

土壤液化 (Soil Liquefaction) 係指疏鬆之飽和砂質土層於地震之連續性反覆應力作用下，產生孔隙水壓上升，導致有效應力趨近於零，使剪力強度急遽下降，進而造成土層承载力降低、地層流動、地面隆起或沉陷等現象。影響土壤液化潛能之因素甚多，主要包括：地震規模、地震延時、地表加速度、土壤顆粒特性、相對密度、飽和度、應力歷史、側向壓力等。

目前國內外學者已提出多種土壤液化評估方法，其中基於 SPT-N 值之評估法包含：臺灣之 HBF 法、日本之 AIJ 和 JRA 法，以及美國之 NCEER 法。本文採用 HBF 法進行分

析（如圖 4），此分析法係根據 Seed 等人提出之方法，並因應臺灣當地情形進行改良，已被國內學者廣泛使用，其以液化抵抗率 F_L 值評估土壤液化與否， F_L 值小於 1.0 時，即判定該土層可能液化；若土層為黏土層，或是位於地下水位以上，或是 $(N_1)_{60,CS}$ 大於 39，則判斷為不液化， F_L 值之相關計算公式如下：

$$F_L = \frac{CRR}{CSR}$$

其中 CRR 為土壤抗液化剪力強度比，CSR 為地震引致之平均反覆剪應力比。當 F_L 小於 1 時，即判定有液化發生之風險。此外，本文亦導入 Iwasaki 等人所提出之液化潛能指數 (Liquefaction Potential Index, P_L)，

此法整合地層深度、液化風險與重要性權重進行綜合判斷：

$$P_L = \int_0^{20} F(z) W(z) dz$$

其中 $F(z) = 1 - F_L(z)$ (若 $F_L \geq 1$ ，則 $F(z) = 0$)， $W(z)$ 為深度加權係數，定義為

$W(z) = 10 - 0.5z$ 。根據 P_L 值可劃分為高 ($P_L \geq 15$)、中 ($5 \leq P_L < 15$) 與低 ($P_L < 5$) 三級液化潛勢。後續可將分析結果繪製成液化潛勢分布圖，呈現液化風險之空間分布，作為未來地震防災規劃與基礎設施耐震評估依據。

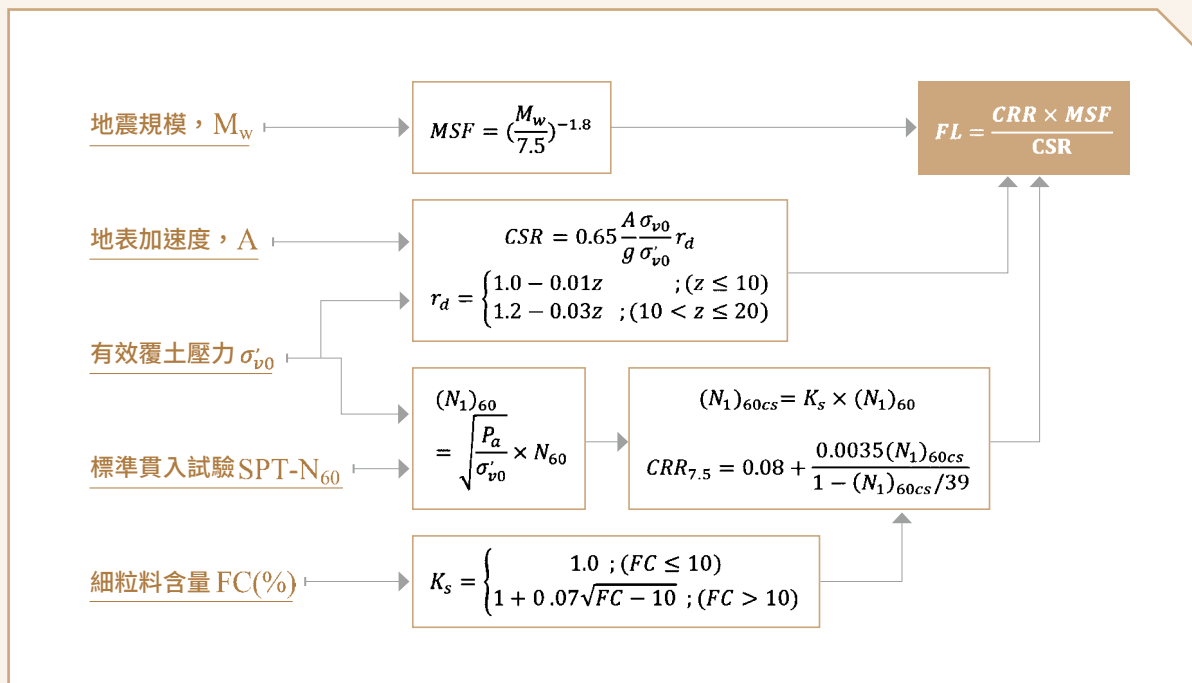


圖 4 雙曲線函數 (HBF) 液化評估法之計算流程

參、道路坍塌風險評估

近年來，人工智慧技術迅速發展，廣泛應用於各類空間資料分析與風險預測領域。針對新北市都會區之潛在道路坍塌問題，本文嘗試運用已發展成熟之監督式學習模型 (Supervised Learning)，結合地質與管線資料進行風險評估。監督式學習是一種常用的機器學習 (Machine Learning, ML) 方法，透過輸入資料及其對應的標

籤 (Label) 進行模型訓練，使模型學會從特徵中預測結果。訓練過程中，模型會不斷調整參數，以最小化預測結果與實際標籤之誤差。當模型學習完成後，即可應用於未知資料進行預測。此方法適用於分類 (如判斷有無風險) 或迴歸 (如預測數值) 問題。

一、物件分割與尺度因子

本文欲使用機器學習模型進行分類，輸入資料型式可分為以「像素」或「物件」兩種（如圖 5）。像素分類雖具細緻度，但易受雜訊干擾，且不易表現空間結構特徵；反之，物件分類可整合形狀、紋理與統計

特性，適合應用於空間具連續性且需表現區塊特徵之場合；鑒於辨識道路坍陷潛勢區，風險常受局部地質區塊控制，故採物件作為分類單位較為合適。

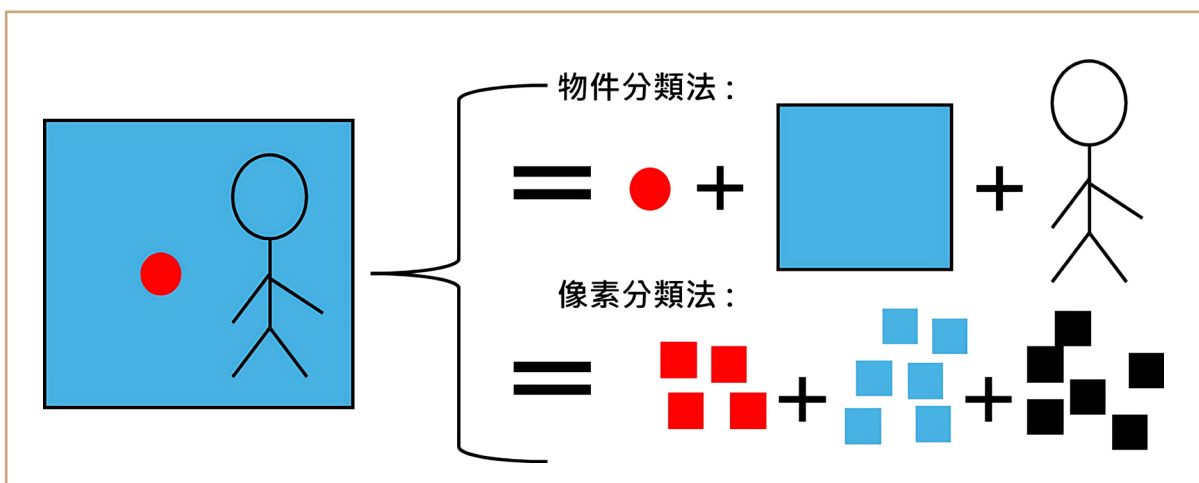


圖 5 物件式及像素式分類法對影像的觀點差異（改繪自 Definiens AG, 2007）

為將三維地質模型轉為不同大小之物件，需先對三維地質模型進行區塊分割。本文使用 Trimble 公司開發的 eCognition 軟體進行分析，其具備完整之物件分析能力與多重尺度分割技術，並可整合監督式、非監督式、知識導向、電腦視覺與深度學習等分類法，恰契合本文所需。

藉由 eCognition 之多重尺度分割法，可將 25m×25m 之地質網格視為類似多光譜格柵影像（Raster），並將各地質參數如 SPT-N、PI、FC 等視為不同圖層，藉由分割群聚同質性高的像素，形成具代表性的地質多邊形區塊（Polygon）。其分割演算法以異質性指標為依據，綜合地質數值差

異與區塊形狀差異進行區塊合併，直到異質性超過門檻為止，此門檻值即稱為「尺寸參數」。

最終所得物件，不僅可代表空間上的連續地質單元，也可計算統計參數、形狀特徵等，有助於模型學習潛在風險區的共同特性。

多重尺度分割需設定尺寸、形狀、緊緻及圖層權重等參數，分割效果將直接影響後續分類準確度，而尺寸參數缺乏通用標準，故多以試誤法調整，使分割區塊趨近分析對象。

本文分析目標為潛在道路坍陷風險區域，其空間分布與同質地質條件相關，考量盆地地層沉積特性與道路坍陷常發生於地表下 10m 內，因此選定分割深度為 1 ~ 10m，以 1m 為分層單位，輸入 PI、FC、SPT-N 值及 γ_t 等參數進行分割。

由於統一土壤分類無法內插，故以像素回推分類分布與分割後區塊分類分布之吻合度為依據，調整參數選出最適組合，使結果接近原始土壤分布（如圖 6）。

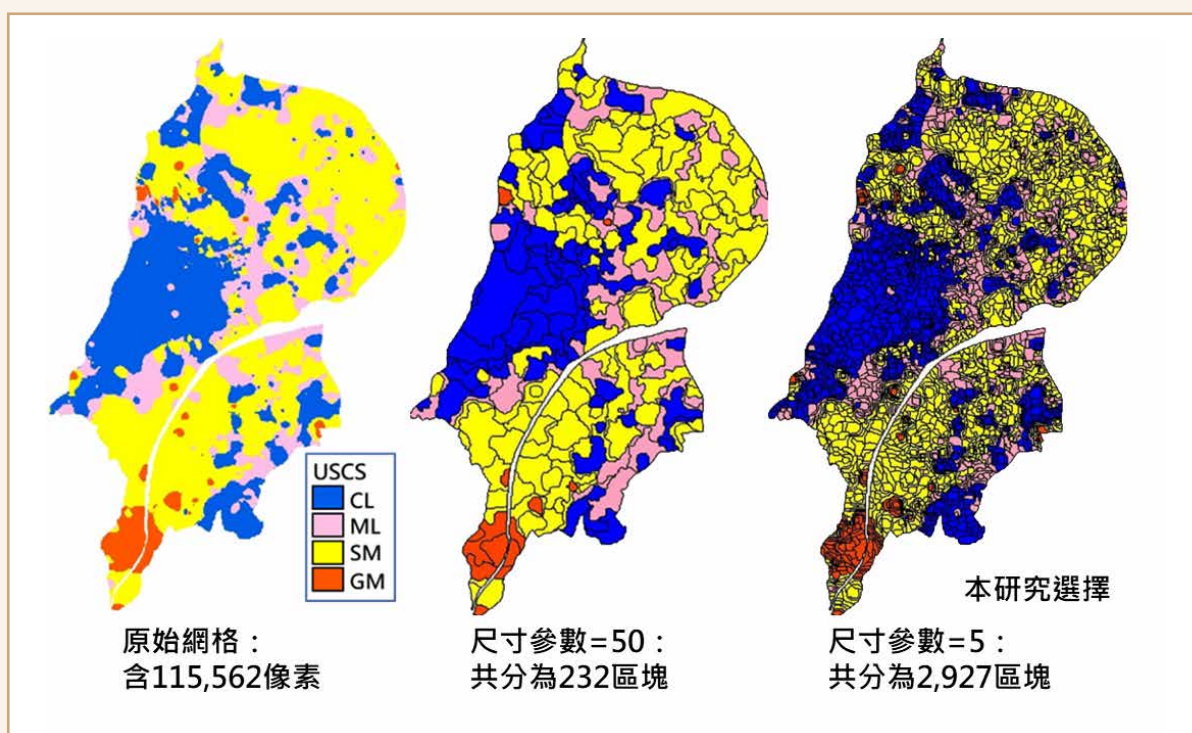


圖 6 以統一土壤分類態樣比較尺寸參數（以 5m 深度層為例）

二、標籤化與資料萃取

在進行監督式分類前，需先完成訓練資料的標籤化作業，即建立具代表性樣本。本文採用新北市政府近五年提供之道路坍陷通報資料，包含道路養護機關記錄的「路基掏刷」及污水管養單位提供的「污水管線滲漏掏刷」案例，合計 138 筆，經重新定位與數化後，作為「會發生」道路坍陷的正

樣本。至於「不會發生」之反樣本，則由 10m 以內主要為黏性土的地區選取，點位間距設為 200m，並排除鄰近 100m 內已有掏刷紀錄的區域，最後以亂數方式挑選，使正反樣本數量相近，以降低樣本不平衡對模型學習之影響。

本文研究區之地質資料，以三維地質模型為基礎，涵蓋地下 30m 範圍之 FC、PI、

SPT-N 值、 γ_t 、USCS 等龐大資料，但並非所有資料皆與道路坍塌相關，為避免不敏感之地質參數影響模型表現與訓練效率，遂須將資料萃取與簡化處理，對連續性資料取平均，非連續性取眾數，再以物件為單位進行分析與特徵挑選。

此外，考量土壤單位重變異小，對模型貢獻有限，故予以剔除；而土壤分類為非連續性資料，數化後恐影響距離計算準確性，且同類分類間特性差異大，不利訓練，宜剔除後再與模型預測結果進行統計分析。根據過往案例，道路坍塌多源於路基掏空與淺層土壤流失，深層地層較易導致大範圍沉陷，與道路坍塌關聯性低。綜合上述因素，本計畫最終僅選取地表下 10m 內之 FC、PI 與 SPT-N 值作為模型訓練特徵，以提升預測效益與準確性。

三、監督式機器學習模型研選

eCognition 支援多種監督式學習模型，挑選其中最常見的五種分別為：簡單貝氏模型 (Naïve Bayes, NB)、K 近鄰演算 (K-Nearest Neighbors, KNN)、支持向量機 (Support Vector Machine, SVM)、決策樹 (Decision Tree, DT) 和隨機森林 (Random Forest, RF)，其演算機制各不相同，且適用之資料型態也不同，為避免選用不適用模型所產生的時間成本，本文在調參前，先以全數資料訓練五種模型並強迫過擬合，透過混淆矩陣評估擬合能力，確認本文資料型態與各模型適配性，篩選表現良好者進行後續調參。

由過擬和之結果顯示，SVM 預測效果最佳，能高度擬合資料並具優異分群能力；

KNN 在參數 k 為 1 或 2 時準確度較高， k 值上升後準確度明顯下降，主要因樣本數不平衡，導致多數類別主導分類結果。DT 經調整後準確度略升，但資料特徵較少，使得調整幅度有限；RF 雖為 DT 之集成模型，受樣本不均影響，整體表現仍不佳。由混淆矩陣更可得知 DT 與 RF 在預測「會發生」樣本時表現不足，由於 RF 為 DT 之集成學習法，DT 本身即表現不佳，導致 RF 產生反向集成效果，使準確率更低。

綜上所述，本文資料不適合樹類演算法，模型差異主要源自資料與演算法邏輯之適配性。SVM 與 KNN 皆屬資料空間導向方法，適用於本計畫低維度、二分類資料特性；其中 SVM 具較佳集中性與調參彈性，亦較適應未來特徵維度增加的情況，故本計畫最終選用 SVM 為主要學習模型，進行後續訓練與預測。

四、模型調參與結果

本文將地下 10m 每 1m 深度之土層參數分別訓練，且為避免模型僅對該深度訓練資料過擬合，先將標籤資料以隨機抽樣拆分為 70% 之訓練集和 30% 之驗證集，僅利用訓練集資料以 SVM 模型學習之，經調整超參數 (Hyperparameter) 應用於各深度土層資料，並逐層以驗證集資料確認皆有不錯的效果確定參數。

由於地下 10m 內任一處發生坍塌皆會導致上方坍塌，故最終繪製道路坍塌高風險區時，取地下 10m 內各層模型預測結果之聯集 (如圖 7)，由預測結果顯示，「會發生」樣本之精確度達 100%，顯示模型於不發生樣本點之邊界相當明顯。

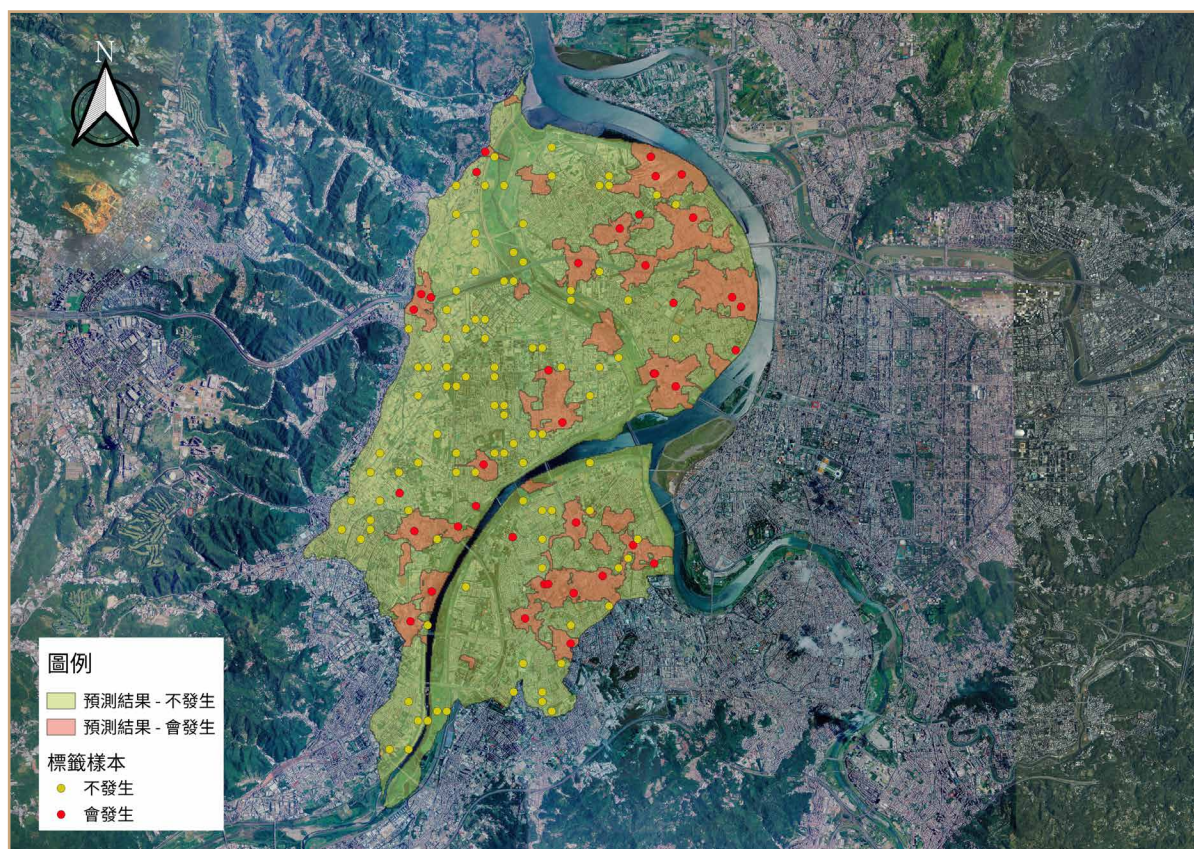


圖 7 本文研究區地下 10m 內道路坍陷預測成果

為探討道路坍陷之成因特性，本計畫累積統計地下 1～10m 內預測為道路坍陷區域之 FC 值，並與研究區全區資料進行比對，結果繪製於圖 8。圖中顯示，道路坍陷地區之 FC 值大多集中於 10～30% 之間。進一步將深度區分為淺層（1～5m）與深層（6～10m）進行分析後發現，此集中分布主要源自較深層土層。

為釐清地質背景，另將預測為道路坍陷區域之地下 1～10m 土壤分類進行比對，如圖 9 所示。結果顯示，此深度範圍內之 USCS 分類以 SM、CL 與 ML 為主，其中 1～5m 區段砂土與粉土、黏土分布約為均等，而 6～10m 區段則有高達 80～90% 為砂土。

由此推測，在深層主要由砂土構成之區域，當 FC 低於 30% 時，土壤較易液化，進而引發土壤流失與地表沉陷，增加道路

坍陷風險，因此 FC 值集中於特定範圍的現象，在深層尤為明顯。

另一方面，圖 10 呈現道路坍陷區域中 N 值與 PI 值之統計分布。觀察 N 值時可發現，整體趨勢與研究區相似，但於 0～20 之間的比例略高，顯示軟弱土層較容易產生道路坍陷。然而，鑑於研究區地下 10m 內普遍 N 值偏低，導致此特徵在模型學習中可能被稀釋，其影響相對不若其他參數明顯。

至於 PI 值，則清楚展現出道路坍陷傾向集中於低塑性土壤，尤其 PI 值落在 0～1 之間者占比明顯偏高。此現象推測係因低塑性粉土與砂土皆缺乏凝聚力，較易受內部沖蝕而流失土壤，誘發道路坍陷。

綜合以上分析可推論，道路坍陷常見於低塑性之軟弱粉土層或細粒料含量小於 30% 之砂土層。

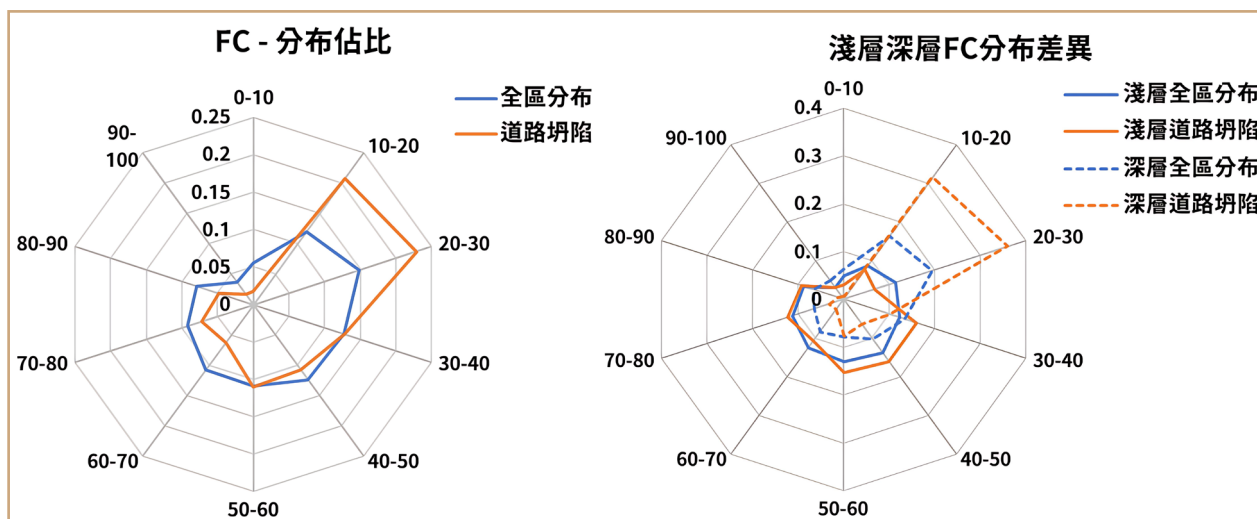


圖 8 地表下 10m 內 FC 統計分布

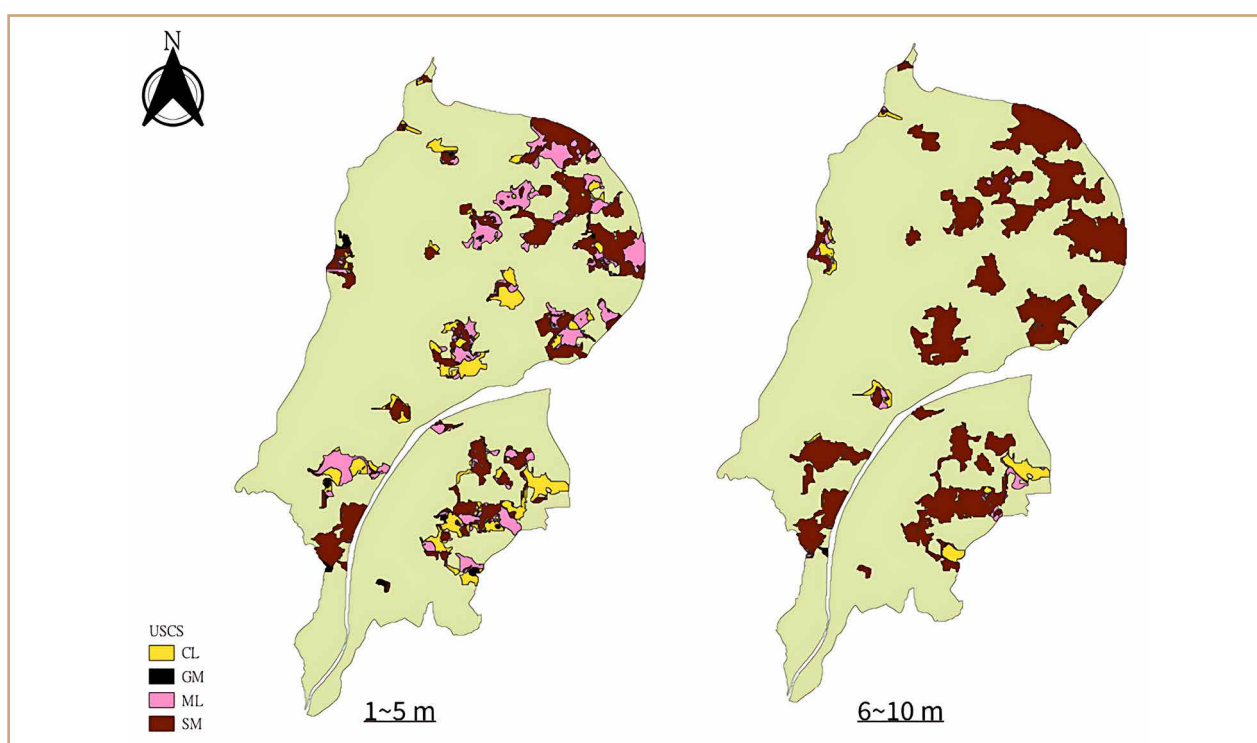


圖 9 預測道路坍陷區域淺層（1~5m）、深層（6~10m）土壤分類

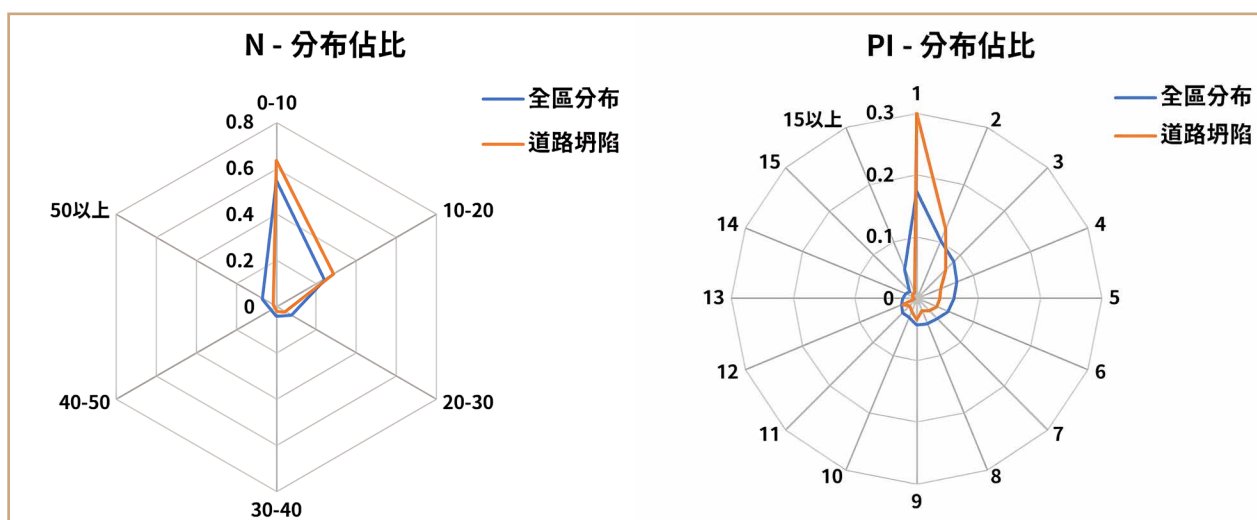


圖 10 地表下 10m 內 N 和 PI 值統計分布

肆、結論與建議

本文建置三維地質模型進行土壤液化評估和道路坍陷潛勢預測，前者採用地下 20m 內之資料進行 HBF 法分析，後者採用地下 10m 內之 FC、SPT-N 值與 PI 為特徵，並逐層訓練機器學習模型後統合結果；訓練樣本來自三維地質網格之多尺度分割，經試誤法確認尺寸參數 5 最能保留潛勢區特徵。

模型初步測試顯示 SVM 與 KNN 表現優異，而因本資料特徵少且為二元分類，較不適用樹狀演算法之 DT 與 RF，而採 SVM 分析

之結果顯示，道路坍陷區常分布於低塑性粉土或 $FC < 30\%$ 之砂土層。

一、道路坍陷與土壤液化潛勢之關係

因低塑性粉土或 $FC < 30\%$ 之砂土層同樣容易發生土壤液化，故將土壤液化潛勢圖與道路坍陷預測結果套疊（如圖 11），道路坍陷區中液化低、中、高潛勢占比分別為 8.38%、28.20% 和 63.42%，顯示兩者有所相關，即於近似本文研究區地質和液化潛勢的區域，液化潛勢或可成為道路坍陷與否之重要依據。

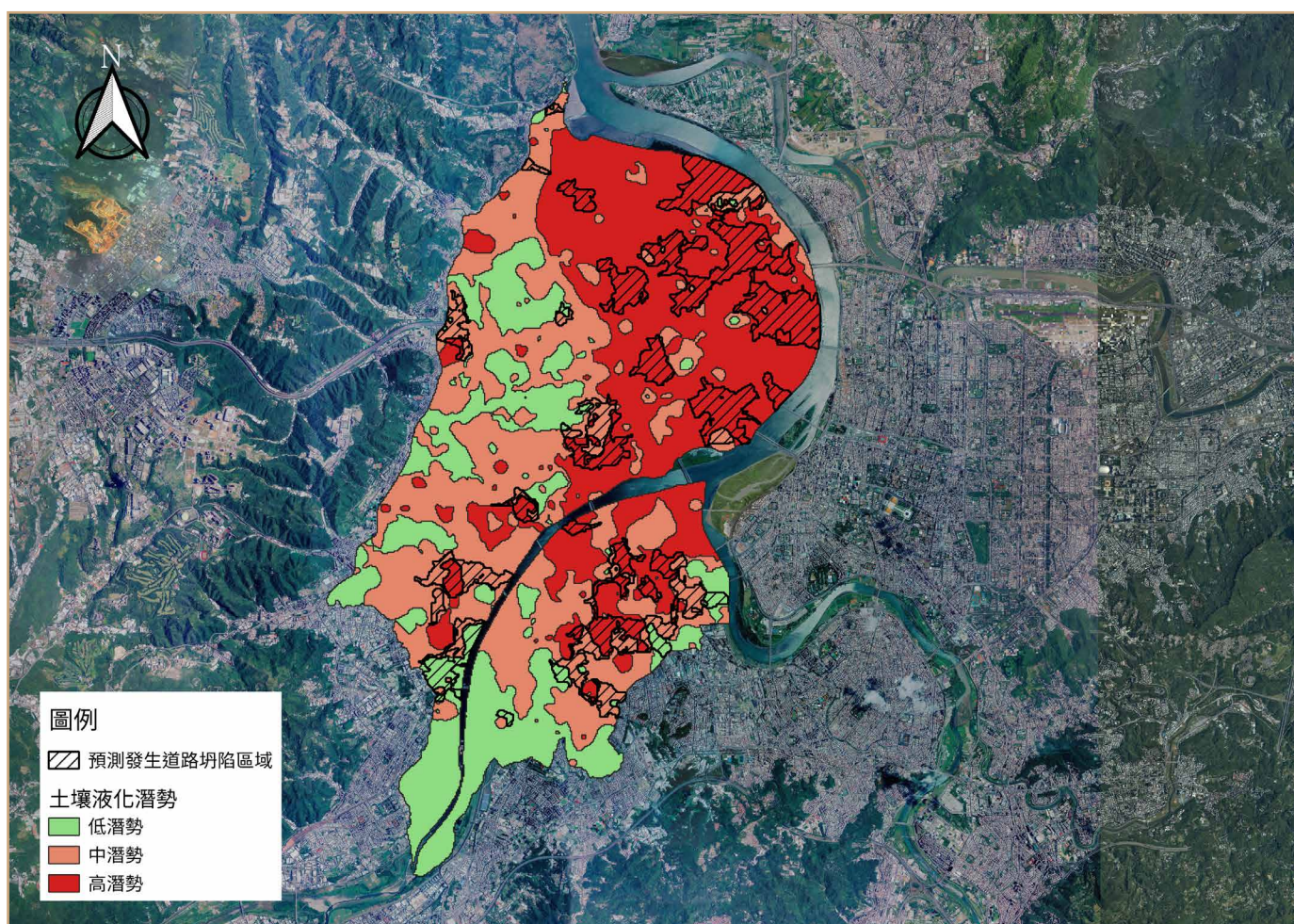


圖 11 預測道路坍陷區域與土壤液化潛勢之關聯比較

二、模型限制與未來展望

本文之訓練資料源自三維地質模型，旨在探討地質與道路坍陷間之關聯性，但道路坍陷雖與地質有關，實際上尚涉及管線老舊、地下構造體損壞等條件，且考量研究區之道路坍陷樣本多源自污水災損與路基掏刷，實與既有管線相關，故建議可於模型預測後，將潛勢區與管線空間資訊疊合，納入管種、材齡或尺寸等參數，綜合考量地質與管線之複合條件，以利後續量化各道路之坍陷風險。

此外，研究區地質多屬砂土、粉土與黏土，地層性質與強度分布均較單一，故模型訓練結果僅適用於與本區相似之地質條件，於如卵礫石為主之地區恐無預測意義。若欲提升模型泛用性，建議可納入不同地質條件之坍陷樣本，或擴大研究範圍以提升適用性。

另因本計畫預測之道路坍陷區與高液化潛勢區重疊性高，顯示後者於地質類似地區可作為坍陷風險之輔助指標；惟本文研究區多為高液化潛勢，建議未來可選擇潛勢分布較平均地區進行訓練與驗證，提升模型檢核有效度與應用價值。

參考文獻

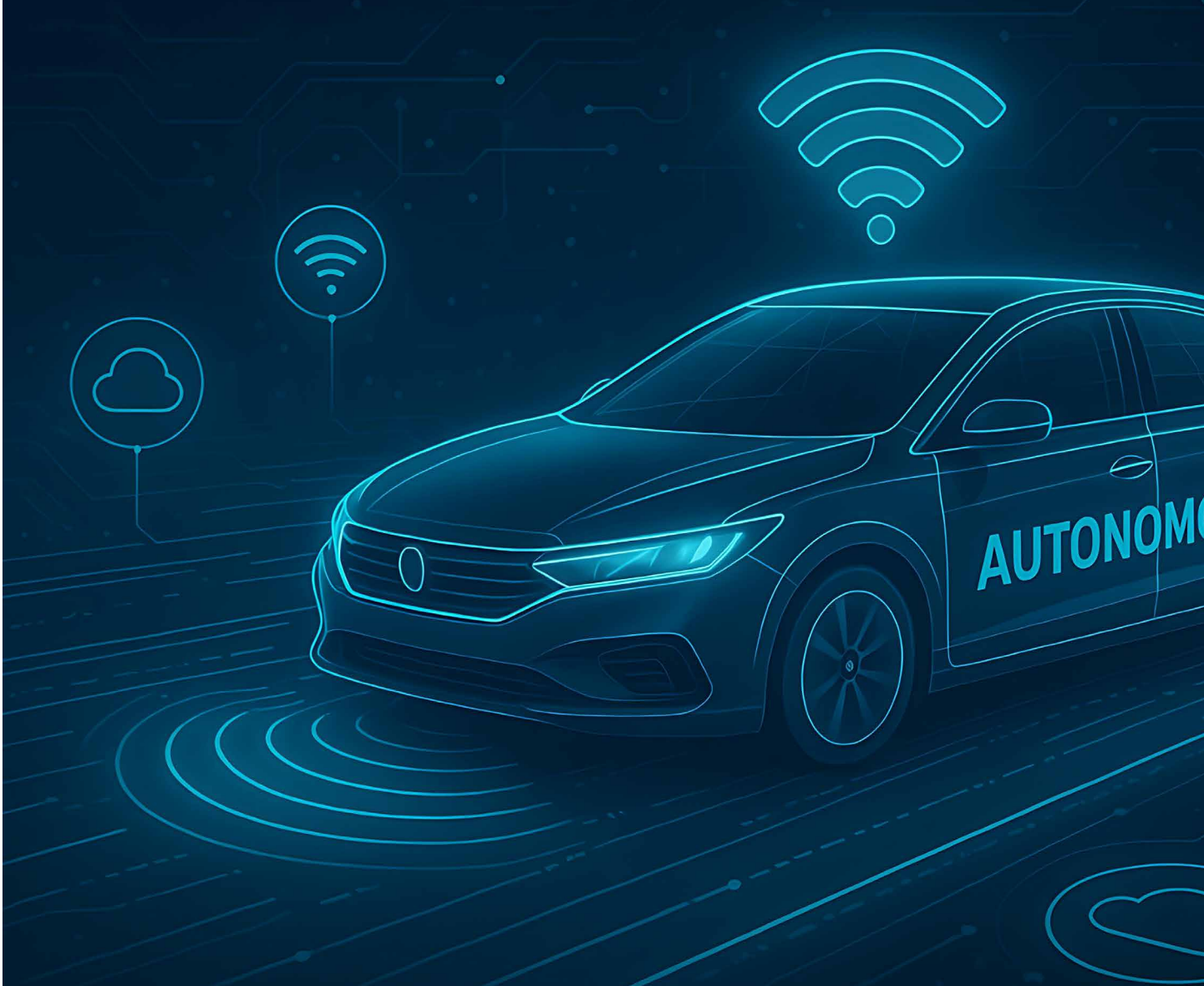
1. BAATZ, M., and SCHÄPE, A. "Multiresolution Segmentation : an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation". *Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung*, XII, pp. 12-23 (2000) .
2. Definiens, "Definiens Bridges the Gap between Remote Sensing and GIS". Press release, Munich, Germany/San Diego, CA, USA – June 18th (2007) .



3. Iwasaki, T., Arakawa, T. and Tokida, K. "Simplified Procedure for Assessing Soil Liquefaction During Earthquake". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 49-58 (1984) .
4. Trimble. "Documentation ECognition Suite" (2019) .
5. Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 107, No. SM9, pp. 1249-1274 (1971) .
6. 費立沅、紀宗吉、蘇品如、吳文隆、謝文誠、許智翔、楊智堯。「臺北盆地三維防災地質資料庫建置」。中華技術，第 101 期，第 148-159 頁 (2014)。
7. 吳秉儒、黃明偉、柯孝勳。「網格化土壤液化快速評估工具—高雄美濃地震實例分析」。土木水利，第 43 卷，第 3 期，第 34-38 頁 (2016)。
8. 彭振聲、曾俊傑、蕭秋安、廖繼仁、趙慶宇。「HBF、NJRA、SEED、T&Y 等四種土壤液化分析方法應用於臺北市之比較及探討」，土木水利，第 45 卷，第 4 期，第 52-58 頁 (2018)。
9. 行政院公共工程委員會。「道路塌陷及鄰房地基掏空之防範指引」(2023)。



日本自駕車發展案例回顧



本研究回顧了日本自駕車技術的發展，探討技術、政策與社會影響的成就與挑戰。自 2010 年代起，日本政府與產業界共同推進智慧交通系統（ITS）和「社會 5.0」策略，旨在以自駕車解決人口老化、交通安全、偏遠地區交通便利性和環境問題等社會挑戰。主要計畫包括東京臨海部實驗、柏葉地區車聯網示範實驗和氣仙沼市自動駕駛 BRT 計畫，各自展示了從技術測試到商業應用的進展與問題。實地實驗中，日本利用車聯網技術提升交通效率，並藉由區域性測試推進自駕車商業化。挑戰包括技術成熟度、基礎設施需求和法律規範。於臺灣自駕車發展，建議增強跨部會協調與政策支持，完善相關法規，以期從國際經驗中汲取教訓，穩健推進自駕車實用化。



關鍵詞 Keywords

智慧運輸系統 Intelligent Transportation System

自駕車 Autonomous Vehicle

多元交通行動服務 MaaS Mobility as a Service

中華顧問工程司 智慧運輸中心

工程師

張書豪

主任

王冠堯

交通部 交通科技及資訊司

科長

李易如

壹、前言

近年來，自駕車（Autonomous Vehicles, AV）技術的快速發展，已成為全球交通運輸領域的一大焦點。隨著人工智慧（Artificial Intelligence, AI）、感測器技術、高精度地圖以及 5G 網絡等技術的日益成熟，自駕車研發逐漸從實驗室走向實際道路測試。尤其在日本，自駕車不僅被視為技術創新象徵，更被寄予解決多項社會問題的期望，例如應對人口老齡化、提升交通安全、改善偏遠地區交通便利性以及降低環境負荷。

日本政府自 2010 年代起，便積極推動自駕車相關政策與實驗計畫。作為全球領先的汽車製造大國，日本政府與產業界聯手，透過「智慧交通系統（Intelligent Transport Systems, ITS）」及「社會 5.0（Society 5.0）」等宏觀策略，期望建立一個人類與科技深度融合的社會。其中，自駕車技術被定位為智慧交通系統的重要支柱，並廣泛應用於城市交通、物流運輸以及公共交通等多個場景。

日本經濟產業省（METI）與國土交通省（MLIT）共同制定中長期計畫，明確提出在 2030 年前實現特定場景下的完全自動駕駛的目標，同時鼓勵各地區進行實驗性應用。

此外，日本在自駕車技術測試與商業化方面的發展也具有鮮明特色。首先，日本充分利用其先進的基礎設施與高精度地圖技術，在多地進行實驗計畫，例如福岡、愛知和東京等地的自駕車實證測試；其次，日本強調與地方政府及企業的協同合作，針對高齡化社會需求，優先開發適用於偏遠地區的自駕接駁車服務；最後，日本在法規與標準制定上採取了穩健的態度，力求在技術發展與安全性之間取得平衡，為未來的技術商業化鋪平道路。

然而，自駕車推廣在日本仍面臨多重挑戰，包括技術成熟度、成本控制、道路基礎設施升級、社會接受度及法律和倫理問題等。例如，如何在複雜的城市環境中實現高效且安全的完全自動駕駛，仍然是一大技術難題；同時，針對自駕車事故的責任歸屬、數據隱私問題及與現有交通系統的整合，也需要進一步探索與討論。

本文旨在回顧日本自駕車相關計畫的發展歷程與現狀，分析其在技術、政策和社會影響層面的主要成就與挑戰，並探討未來發展的可能方向。以下將依序介紹東京臨海部實證實驗、柏葉地區車聯網自動駕駛計畫與氣仙沼市自動駕駛 BRT 計畫。

貳、東京臨海部實證實驗

一、實驗簡介

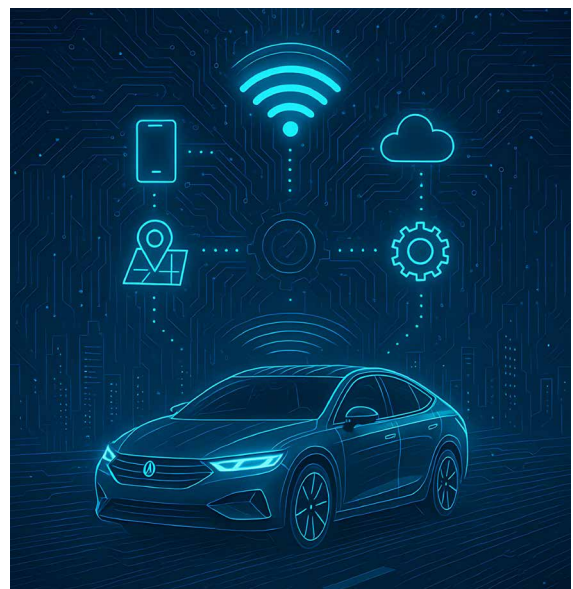
東京臨海部實證實驗主要透過 V2N (Vehicle to Network)，將即時交通資訊

傳送至實驗之自動駕駛車輛，並依據這些資訊進行路線決策，增進行車安全與減少旅行時間。此實驗期程為 2019 年 10 月至 2021 年 3 月底，參與者包括日本國內外多家汽車製造商與供應商、新創公司、大學等 22 個機構。

這些機構透過 V2N 技術，即時傳輸交通資訊給自動駕駛車輛以增進安全與效率，最後對這些技術進行有效性及課題探討。實驗分為三個主要區域進行，分別為：臨海副都心區域、首都高速公路及羽田空港區域。

二、實驗系統架構

實驗系統分為「數據收集」、「數據管理與傳輸」及「數據轉換與車輛控制」三部分，利用 LTE/4G 通訊技術同步即時交通資訊與高精度地圖，並透過 PUSH 及 PULL 兩種資料傳輸方式提供給自動駕駛車輛，車輛則根據這些資料進行自動駕駛決策。交通資訊共分為降雨資訊、按車道之道路資訊、模擬之緊急車輛資訊及號誌時制資訊。



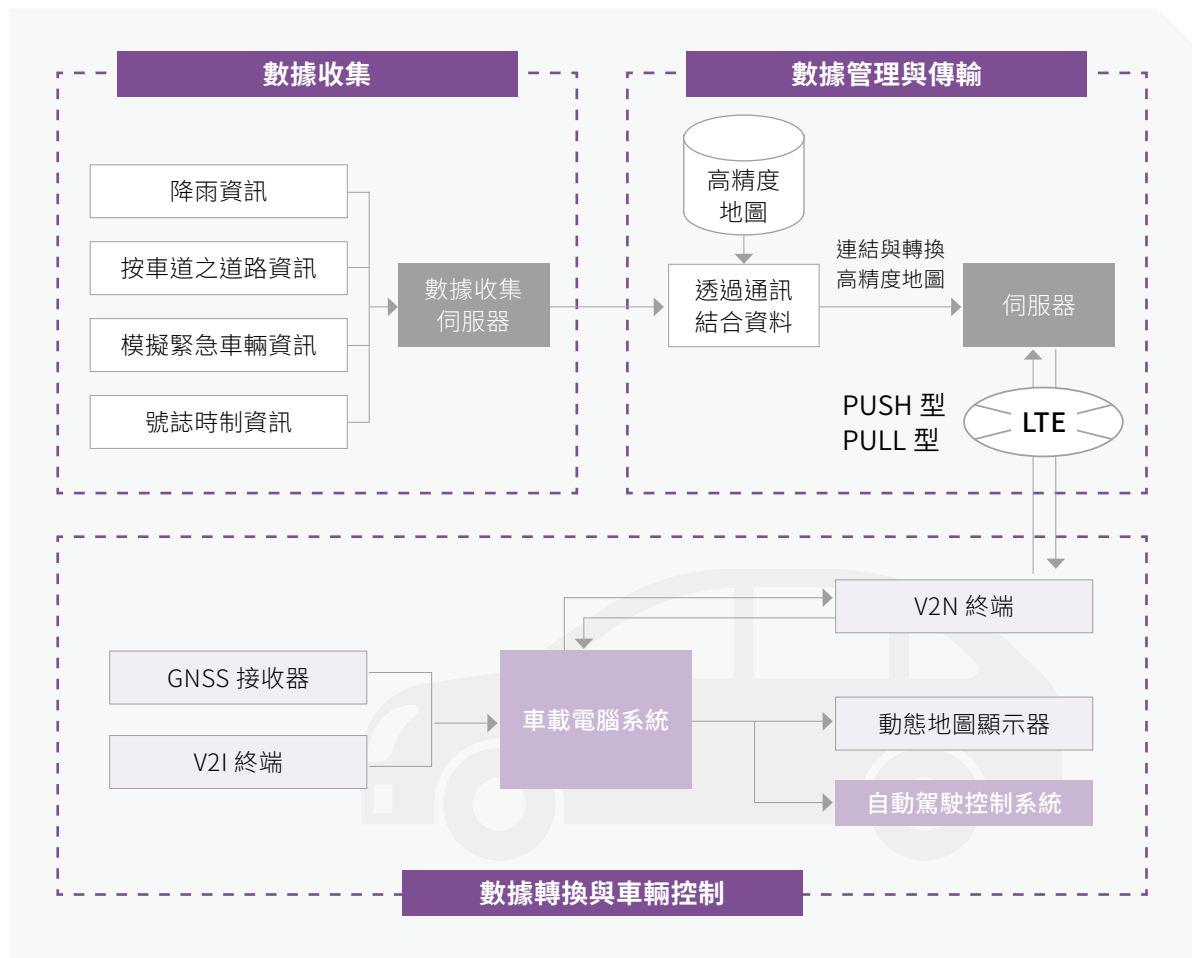


圖 1 東京臨海部實證實驗系統架構

三、實驗成果

(一) 降雨資訊

降雨資訊用途為：自動駕駛與手動駕駛切換提醒、旅行時間預測、車速調整及車間距離調整。另外，此系統縮短了獲取資料至傳輸完成之時間，並提高對極端氣候之應變力。未來，降雨資訊具體使用情景 (use cases) 將進一步探討，以期提高系統實用性。

(二) 按車道之道路資訊

按車道之道路資訊用途為：交通壅塞時，

判斷繼續跟隨或變換車道與否；提前知道道路事故或掉落物資訊；進行路線改道或切換手動駕駛提醒。這些用途不僅有助於自動駕駛車輛進行適當駕駛行為，也可在自動駕駛轉為手動駕駛的過程中提供輔助，確保乘客安全。

(三) 模擬緊急車輛資訊

模擬緊急車輛資訊用途為：提前偵測緊急車輛接近、確保有時間於緊急車輛接近時採取必要行動，例如：減速、停車、疏散至路邊、從自動駕駛切換至手動駕駛及警告駕駛等。

(四) 號誌時制資訊

號誌時制資訊用途為：減少停車次數與路口延滯、縮短旅行時間及減少碳排放量。此外，即使在號誌路口間隔較長之郊區與農村地區，此系統亦可用於定速駕駛，故預計擴大 V2N 號誌時制資訊適用區域，擴展號誌時制資訊服務範圍。

參、柏葉地區車聯網自動駕駛計畫

本示範實驗由東京大學、名古屋大學、產業技術綜合研究所、三菱綜合研究所、日本汽車研究所及先進移動力公司合作執行，為了加速實現自動駕駛等級 4 於實際道路上行駛，於千葉縣柏市柏葉地區進行示範實驗。

一、計畫目標

預計於 2025 年，在柏葉地區開放車聯網自動駕駛等級 4 之車輛行駛於實際道路，作為其他地區車聯網系統建置之參考示範。

二、計畫重點

(一) 梳理地區特性後，推動適合此地區之車聯網系統。

(二) 不僅需要克服自動駕駛等級 4 之技術，更應解決商業模式、駕駛調度及資料協作相關課題。

(三) 應推動標準化準備工作，加速 ITS 產業與國際接軌。

三、2023 年實地測試

(一) 測試時間：2024 年 1 月 15 日至 2024 年 2 月 22 日。

(二) 測試路線：

1. 東京大學柏葉校區內一柏葉六丁目公車站。

2. 柏葉六丁目公車站—三井花園酒店（柏葉公園館）。

3. 測試車輛：

(1) 自動駕駛等級 4 之改裝中型巴士。

(2) 以配有駕駛員形式行駛，故實際為自動駕駛等級 2。

四、系統架構

其系統運作模式分為三大運作系統，依序為路側設備、車載設備及資料共享伺服器，以下將依序介紹。

(一) 路側設備

透過閉路監視器、光達系統、號誌系統、無線 ITS 路側設備、WiFi 接收器及無線路由器獲得相關資料，並透過路側電腦系統處理資料。接著透過路側通訊系統將資料傳遞至車載通訊系統或資料共享伺服器，而車載通訊系統或資料共享伺服器亦可將資料回傳至車載設備，提供路側電腦系統更多資訊進行分析。

(二) 車載設備

透過影像攝影機、光達系統、GPS 天線、4G 天線及 WiFi 接收器獲得行車相關資料，並透過車載電腦系統處理資料。接著透過車載通訊系統將資料傳遞至路側通訊系統或資料共享伺服器，而路側通訊系統或資料共享伺服器亦可將資料回傳至路側設備，讓車載電腦系統更精進自動駕駛決策與控制。

(三) 資料共享伺服器

透過 4G 行動網路、760MHz 無線波段及 WiFi，獲得路側與車載設備相關資料，並處理資料。接著再將處理完成資訊回傳

給路側及車載通訊系統，提供路側及車載設備更多資訊，以更精進自動駕駛決策與控制。

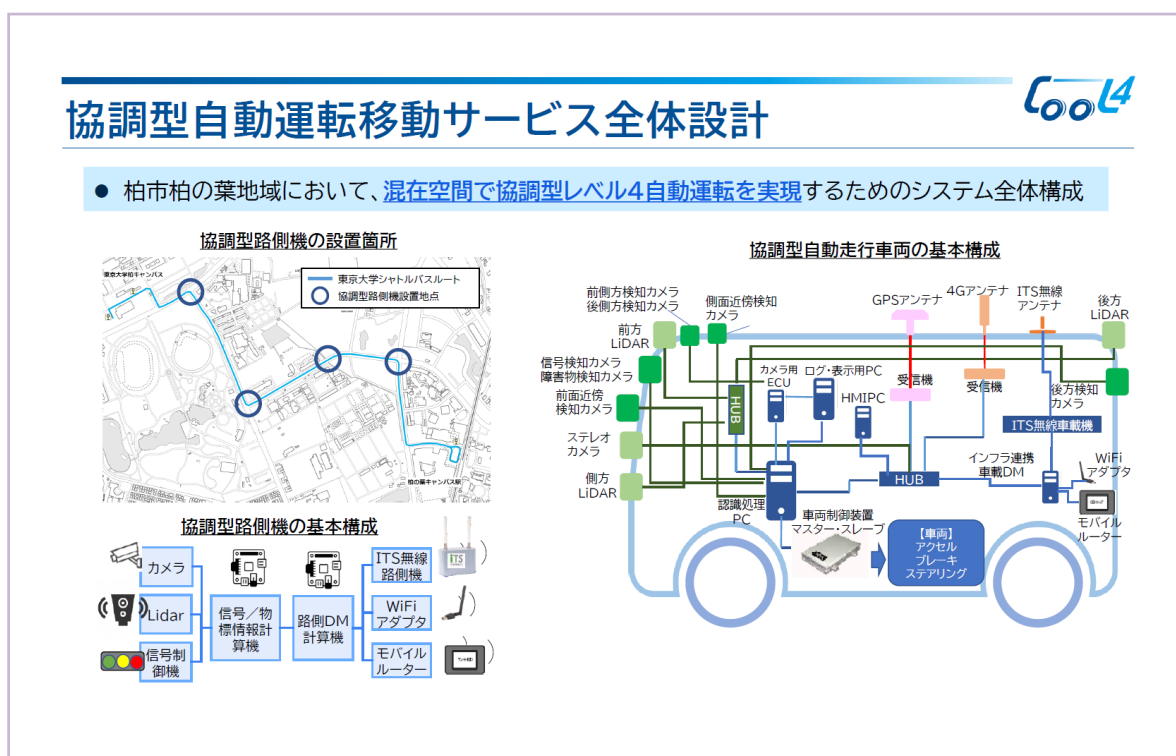


圖 2 柏葉地區車聯網自動駕駛相關設備

表 1 柏葉地區車聯網自動駕駛運作系統及要素列表

運作系統	系統要素	運作系統	系統要素
路側設備	閉路監視器	車載設備	影像攝影機
	光達系統		光達系統
	號誌系統		GPS 天線及接收器
	WiFi 接收器		4G 天線及接收器
	無線路由器		WiFi 接收器
	路側電腦系統		訊號處理器
	路側通訊系統		人機介面
			車載電腦系統
			車載通訊系統
		資料共享伺服器	資料共享電腦系統

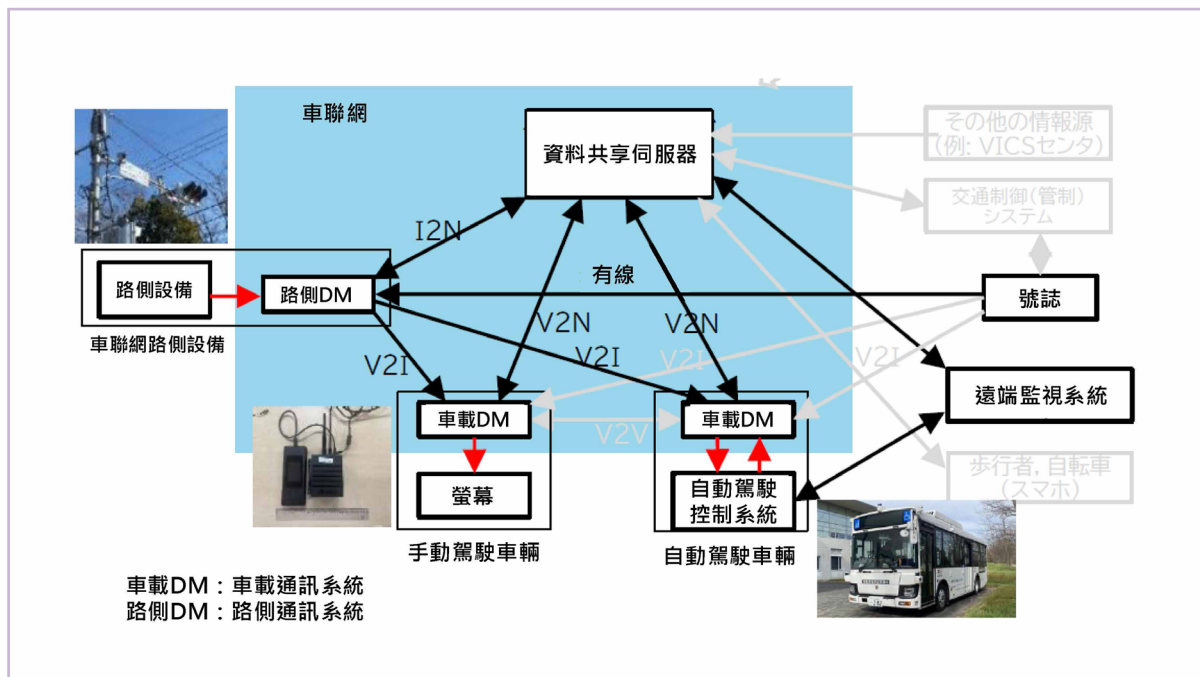


圖 3 柏葉地區車聯網自動駕駛系統設計

(四) 測試方式

1. 根據不同行駛環境來規劃行駛時間，進行技術驗證。
2. 僅允許相關人員乘坐，不予一般民眾試乘。

(五) 檢測項目

1. 車載與路側設備之路況辨識性能。
2. 通訊能力。
3. 於號誌化路口左右轉之安全性與平穩度。
4. 於無號誌化路口直行之安全性。
5. 其他基礎設施資訊使用率。

本示範實驗目前尚無成果報告，故仍無法得知此實驗各檢測項目成果狀況。但可確定的是，日本已如火如荼地展開各項自動駕駛示範實驗，以達成完全自動駕駛的最終目標。

肆、氣仙沼市自動駕駛 BRT 計畫

為了實現自動駕駛等級 4 之公車實際商業化，及振興 311 東日本大地震重災區之地方經濟，JR 東日本公司於宮城縣氣仙沼市執行自動駕駛等級 4 公車商業運轉計畫。

一、計畫目標

加速「Level 4」公車商業化速度，並提升東日本地區經濟。

二、2021 年實地測試

(一) 測試時間

2021 年 9 月 14 日至 2021 年 9 月 19 日。

(二) 測試路線

BRT 氣仙沼線柳津站至陸前橫山站，4.8 公里。

(三) 測試車輛

1. 自動駕駛等級 4 之改裝大型巴士。
2. 以配有駕駛員形式行駛，故實際為自動駕駛等級 2。

(四) 測試方式

1. 於 BRT 專用道內以 60 公里 / 小時速率行駛，情境包含隧道行駛、會車及障礙物迴避。
2. 開放報名試乘會之一般民眾試乘。

三、系統架構：

系統運作模式分為兩大運作單元，分別為路側設備及車載設備，以下將分別簡要介紹。

(一) 路側設備

由磁力路面標記、無線射頻識別辨識 (RFID) 路面標記及號誌控制系統組成，並分別與車載設備溝通。此計畫於試乘路段道路中線埋設磁力與 RFID 路面標記，可藉由磁力與無線電波被安裝於車輛底部之磁力感測器與 RFID 讀取器偵測到，以準確識別車輛位置。此計畫亦使用 LTE 串聯自動駕駛公車、其他自動駕駛公車及號誌控制系統，可根據自動駕駛公車及對向自動駕駛公車各自位置來調整號誌系統。

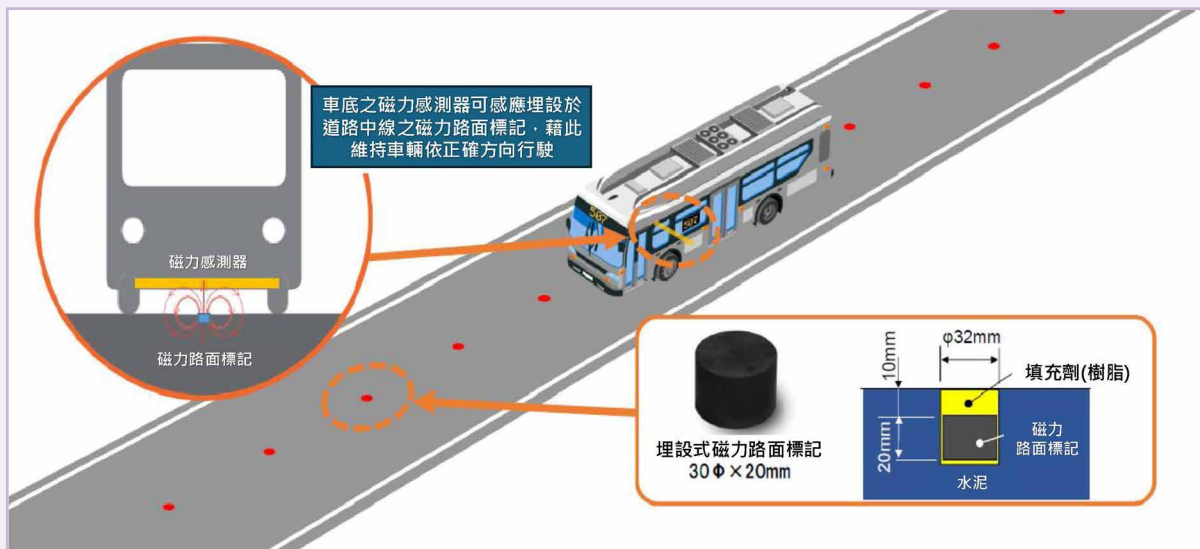


圖 4 氣仙沼市自動駕駛公車磁力路面標記運作原理

(二) 車載設備

由路況相關感測器、路側設備感測器及自動駕駛控制系統組成，其能分述如下。路況相關感測器包含影像攝影機、紅外線攝影機、立體攝影機、毫米波雷達及光達系

統，以上五種感測器會將路況相關資料傳輸予自動駕駛控制系統，讓自動駕駛系統依這些資料讓車輛更安全與精確地行駛。

路側設備感測器包含磁力感測器、RFID 讀取器及訊號收發器，以上三種感測器將分別接收磁力路面標記之磁力、RFID 路面標記資訊及號誌控制系統訊號。之後將這些資訊傳輸予自動駕駛控制系統，使自動駕駛系統進行更正確與精準之操作。

自動駕駛控制系統包含速度感測器、衛星導航系統（GNSS）、陀螺儀、自動駕駛軟體、遠端監控系統及人機介面，而自動駕駛系統擁有以下五種功能，分別為：控制行駛軌跡、進行車道維持、號誌續進控制、最小化風險操作（MRM）控制及自動 / 手動模式切換，藉此細膩地控制車輛行駛。

表 2 氣仙沼市自動駕駛公車運作系統及要素列表

運作系統		系統要素
路側設備		磁力路面標記
		無線射頻識別辨識（RFID）路面標記
		號誌控制系統
路況相關感測器		影像攝影機
		紅外線攝影機
		立體攝影機
		毫米波雷達
		光達系統
車載設備	路側設備感測器	磁力感測器
		RFID 讀取器
		訊號收發器
自動駕駛控制系統		速度感測器
		衛星導航系統（GNSS）
	自動駕駛控制系統	陀螺儀
		自動駕駛軟體
		遠端監控系統
		人機介面

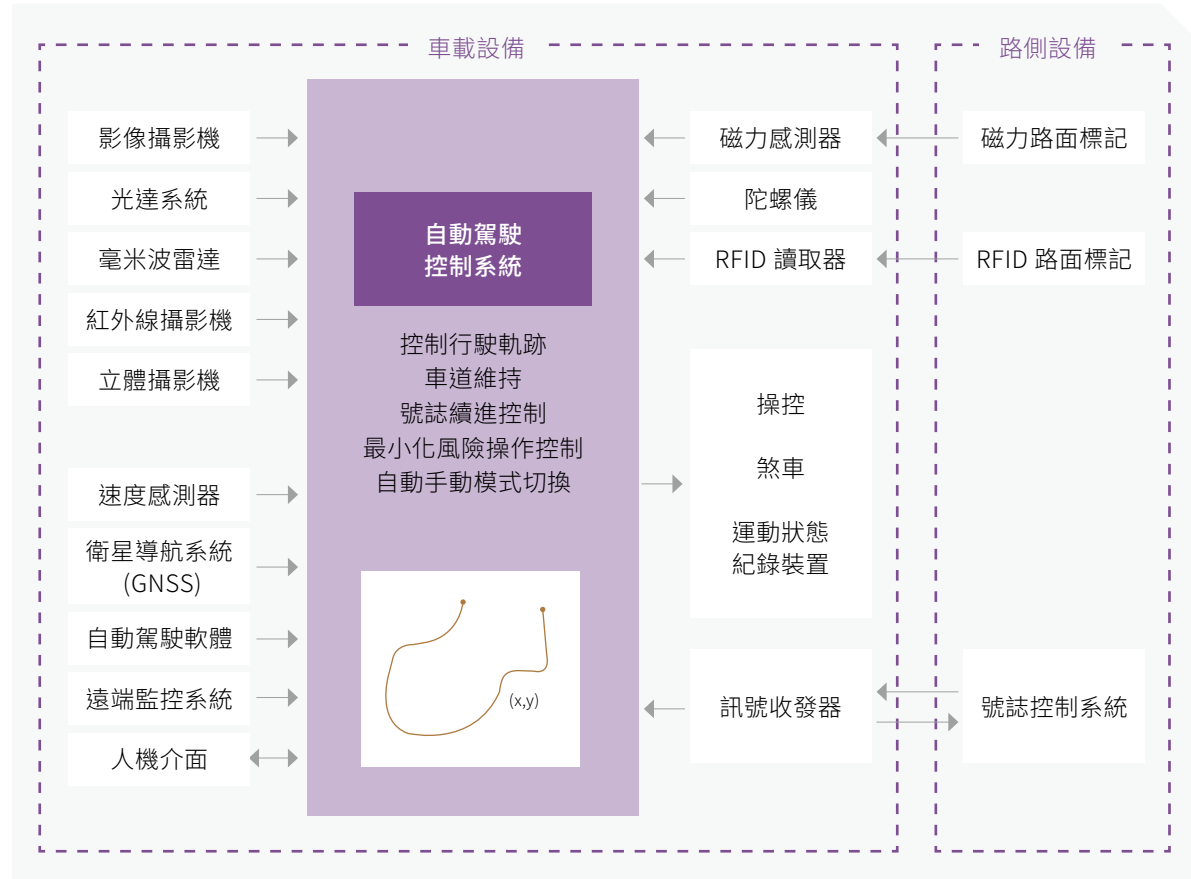


圖 5 氣仙沼市自動駕駛公車系統架構

四、正式營運

(一) 正式上路

JR 東日本公司於 2022 年 12 月 5 日正式營運 BRT 氣仙沼線柳津站至陸前橫山站之自動駕駛等級 4 公車，以自動駕駛等級 2，也就是配有駕駛員方式行駛。此系統於 2023 年 5 月 1 日起暫停營運，以歸納成果，並向日本政府申請認證。

(二) 自動駕駛等級 4 官方認證

JR 東日本公司宣布 BRT 氣仙沼線自動駕駛公車系統，於 2024 年 3 月 22 日獲得日本政府自動駕駛等級 4 營運許可，故開始更新自動駕駛公車車載設備及道路資通訊設備，並計畫於 2024 年重啟營運，將路線延長為柳津站至水尻川 AP 站，共 15.5 公里。



圖 6 氣仙沼市自動駕駛公車 2024 年營運計畫

伍、結論

結論將從技術、計畫與法規、商業應用三大觀點分別敘述，以求從不同角度切入內容核心。最後總結日本與國內自駕車計畫異同，萃取日本值得學習之處，以期繼續保持國內優點，並持續穩健地推動自駕車發展。

一、技術

自駕車相關技術包含：感測器、影像辨識演算法、高精度地圖、車聯網等，上述各項技術皆以落實自駕服務為最終目標，故各國皆於國內各地展開示範實驗，其成果重點如下。

(一) 大部分自駕車已有能力以 20 至 60KPH 速率行駛。

(二) 大多數示範實驗仍於封閉場域、專用道或大學校區內行駛，如：日本福岡機場自駕公車示範實驗、2020 年桃園市自駕巴士服務驗證計畫。少數實驗可於車流量較小與道路幾何較不複雜之實際道路行駛，例如：日本柏葉地區車聯網自動駕駛計畫。

(三) 多數示範實驗仍配置駕駛員以應對緊急狀況，如：日本氣仙沼市自動駕駛 BRT 計畫。

(四) 大多數實驗車輛屬於可載運 4 至 6 名乘客之小客車，例如：日本福井縣永平寺町計畫、臺灣智駕測試實驗室。少數示範實驗之實驗車輛為中大型公車，但此類實驗幾乎皆於封閉場域、公車專用道或大學校區內行駛，如：日本氣仙沼市自動駕駛 BRT 計畫、水湳智慧城自駕巴士虛實場域整合運行計畫。

由以上可知，當前兩國技術發展相差無幾，我國於部分技術甚至處於領先位置。目前各國的自駕車皆可行駛於簡單交通樣態之實際道路，但仍難以運行於全部實際道路上。明顯地，現有的影像識別演算法，難以辨別所有實際道路情境，以致於無法提供安全自駕服務。再者，高精度地圖資訊時常與實際路況相違，進而提高自駕之危險程度。最後，車聯網通訊協定尚待完備，通訊可靠度與資訊安全性仍須提升，如此才能完善自駕安全性。

至於自駕貨車方面，各國目前大部分皆以貨車列隊為中短期目標，透過車聯網通訊技術與自駕技術使貨車隊列化行駛，以提升安全、減少碳排與增加載貨效率。日本已於「RoAD to the L4」展開相關計畫，而我國自駕車計畫目前皆著重於客運方面，於此部分尚未有相關大型計畫。

同時，自駕車亦朝向電動化與共享服務發展，以達成淨零碳排目標。各國正積極汰換燃油車，改用電動或氫氣為動力之運具，逐步完成永續願景。共享服務可大幅提升自駕車使用效率，讓其不再是私有財產而產生大量閒置時間與停車成本，而是以共享方式，每分每秒皆投入於交通服務中，大幅減少自駕車總需求，減少能源消耗，並增進都市空間利用率。

二、計畫與法規

兩國於近年皆積極推動自駕車相關計畫，例如：日本「RoAD to the L4」、我國「新北市智動駕駛電動巴士系統測試運行計畫」。各主要國家皆十分重視自駕服務落地商轉，加速自駕服務實際上路。然而，兩國發展

自駕車之計畫經費、推動態度、發展時程相差甚大。

於計畫經費部分，日本自駕車計畫平均經費遠高於國內，從上述自駕車計畫便可知悉。在推動態度與發展時程部分，因多項自駕車技術仍屬新興技術，屬於初期發展階段，故需要長時間推動、大量資金與多次失敗經驗才能發展成熟。日本亦深知此理，對於自駕車計畫皆保持嘗試錯誤之心態實行，不斷從錯誤中學習以持續成長。

然而，相較於日本，國內自駕車計畫不僅資金少、期程短，且政府與社會普遍認為計畫已花費大量稅金執行，不應以失敗結案。以上現況讓許多國內自駕車計畫正要萌芽發展時，便被社會聲浪扼殺於紙上，實屬我國自駕車發展之一大困難。

三、商業應用

明顯地，目前自駕車商業應用進度仍受制於自駕技術。部分技術雖已具有於實際道路應用能力，但成本居高不下，故自駕服務仍難以實際商業化，例如：光達系統。另外，更多自駕技術尚未具有於所有實際道路行駛能力，無法保障自駕車行駛安全，故距離正式上路仍有一段時間，例如：影像辨識演算法與車聯網。

以上結果導致自駕車市場先盛後衰，近年來更是年年衰落，由全球自駕車發展趨勢中即可明顯得知。雖然各項自駕實驗已經過多年投資開發，卻始終難以走出實驗沙盒，進入實際營運階段，讓各家廠商與投資人對此技術未來價值預期大幅下降。

若以技術成熟度曲線體現自駕技術現況，則此技術約處於五大階段之低谷期，尚待關鍵技術成熟以降低成本，才得以使自駕服務實際上路。

陸、建議

近年交通部持續推動自駕車相關計畫，為國內自駕車技術奠定重要基礎。然而，比較日本與國內自駕車發展內容後，發現國內於自駕車技術方面表現卓越，但是於計畫執行、法規修訂、商業應用等方面尚有學習之處，故本案將針對數位技術以外之面向提出政策建議方向，以期我國可以持續推動自駕車發展，提供人民安全完善之交通環境。

一、強化宣導與溝通並凝聚全民共識

於結論中提及，國內自駕車計畫較缺乏從錯誤中學習之心態，且經費遠低於國外，計畫期程亦較短。故本案建議我國應建立溝通平台，或是利用大眾媒體與公開活動，凝聚政府與民眾對於自駕車發展共識。讓各界了解，國外自駕車計畫並不全然以成功收場，甚至其大部分計畫成果皆十分有限。另外，亦可讓各界理解國內自駕車計畫經費及期程與國外甚有落差，期望社會各界能以遠見卓識心態對待自駕車發展，給予自駕車技術足夠發展養分與時間，讓 ITS 於未來得以無所不在地提供人民完善之交通環境。

二、考量商業應用與永續經營並強化跨部會協調

我國自駕車技術發展卓越，一些領域甚至處於領先地位。然而，自駕車並非單純技術問題，而是跨領域問題。回顧我國推動自駕車經驗，相關計畫多以技術可行性為驗證目標，但若無法強化跨部門整合協調，豐碩成果恐僅能雪藏於報告書中，難以轉化為實際落地應用。以日本「RoAD to the L4」為例，其將自駕車商業應用視為計畫重點之一，由經濟產業省與國土交通省共同發布。回歸國內推動相關實證計畫經驗，最終目標皆是實際商業應用，故建議應於計畫發展時，考量商業應用與永續經營，並強化跨部會協調。

三、因應技術發展整備相關法令

隨著數位科技發展，智慧運輸應用可能帶來各種新型態經濟模式，對傳統產業與法律規範造成衝擊。以自駕車為例，日本正如火如荼地修訂自駕車相關法令，以期能盡早完善相關法律環境，加速自駕車正式上路。然而，國內此類法令仍尚待修訂完備，包含自駕服務許可審查標準、肇事責任歸屬劃分等面向皆亟需制定。最佳目標是讓法律走在技術之前，使自駕技術成熟時，即可立即投入實際應用，避免技術可商業化時，卻苦無相關法令支撐，讓技術價值無法馬上創造經濟效益並服務人民。

參考文獻

1. 交通部，「道安資訊查詢網」，<https://roadsafety.tw/>（2024）。

2. 総合科学技術・イノベーション会議，SIP 第 2 期 - 自動運転（システムとサービスの拡張） 最終成果報告書（2018 ～ 2022）。

3. 総合科学技術・イノベーション会議，「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期自動運転（システムとサービスの実用化）」のうち、2020 東京臨海部実証実験に向けた交通流への影響・効果についての調査事業 報告書概要版（2021）。

4. 経済産業省と国土交通省，令和 4 年度「無人自動運転等の CASE 対応に向けた実証・支援事業無人自動運転等の先進 MaaS 実装加速化のための総合的な調査検討・調整プロジェクト」成果報告書（2023）。

5. 経済産業省と国土交通省，【柏の葉（千葉県柏市）】混在空間でレベル 4 実現のためのインフラ協調や車車間・歩車間通信連携などの取り組み（2024）。

6. 東日本旅客鉄道株式会社，気仙沼線 BRT における自動運転バス試乗会のご案内について（2021）。





投稿本刊之稿約格式說明，請參考：

https://www.cec.com.tw/page/book/ceciet_submit_format.html

分毫不差

才足以教人驚豔

博得滿堂喝采的每一場演出，廣為客戶信賴的每一回肯定，
台灣世曦連番榮耀背後的，永遠都只是「專業」的累積，
以及「用心」的執著。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

CECI



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw