

多元多期遙測影像分析玉穗溪大規模崩塌地坡體變形與滑動歷程

柳鈞元^{[1]*} 李璟芳^[1] 陳振宇^[2] 陳國威^[2]

摘要 2021年盧碧颱風降雨誘發玉穗溪源頭發生大規模崩塌，大量土砂阻塞河道形成堰塞湖，4小時後堰塞湖潰決致使台20線明霸克露橋遭土石流沖毀。本文蒐集多元多時期光學影像與歷史降雨資料，分析玉穗溪源頭斯拉巴庫山南麓邊坡2000~2021年的變遷歷程，並篩選特徵點來定量評估邊坡各塊體的活動性，評估坡體各區域的滑動趨勢與應變-應變率的變化，另輔以多時期高精度數值地形來判釋山崩微地形特徵的發展變化，並估算不同時期的崩積量體。

本研究發現，多次極端降雨事件促使斯拉巴庫山南麓邊坡坡體加速滑動，局部崩塌與土石流頻率逐步增加，顯示邊坡穩定性持續惡化。而觀測邊坡主崩崖的應變-應變率趨勢可作為邊坡防災應變與警戒值的參考，建議未來可透過多元遙測技術（如無人機、InSAR、或高重返光學衛星等）輔助監測廣域邊坡，集中並提升大規模崩塌潛勢區的防災量能，希冀提早防災應變以降低災害風險。

關鍵詞：玉穗溪、大規模崩塌、降雨誘發山崩、不安定土砂、應變-應變率

Multitemporal Image Analysis of Large-Scale Landslide Evolution in Yusui Stream

Chun-Yuan Liu^{[1]*} Ching-Fang Lee^[1] Chen-Yu Chen^[2] Kuo-Wei Chen^[2]

ABSTRACT On August 7, 2021, a devastating debris flow hit the Yusui stream in Taiwan, damaging the Minbaklu Bridge on the southern cross-island highway. The enormous volume of the debris flow was caused by a catastrophic rainfall-induced landslide at Mt. Silabaku, the source of the Yusui stream.

Historical aerial photos indicated that the main scarp of the Silabaku landslide was present for over 20 years before the incident. The slope remained stable until Typhoon Morakot in 2009. Over the following decade, several rainfall events further deteriorated the slope, which partially collapsed due to headward erosion along gullies. Concurrently, the main scarp began to spread, and the residual slope slipped downward.

This study integrated multitemporal optical images to investigate the evolution of the Silabaku landslide and estimate the slope's strain/strain rate trend, enabling evaluation of the urgency of failure.

Landslide topographic features and volume were interpreted on the basis of high-resolution digital terrain model data. Finally, the relationship between intense rainfall events and the rainfall threshold for landslides was explored.

Key Words: Yusui stream, large-scale landslide, rainfall-induced landslide, unstable sediment, strain/strain rate

一、前言

回顧玉穗溪近年的土砂災害紀錄，自2009年莫拉克颱風重創高屏山區後，每逢豪大雨玉穗溪就有大量土砂流出，多次沖毀玉穗溪口河床便道（表1）（王慶雄，2018），2017年台20線明霸克露橋完工通車後，同年的0602豪雨、2019年利奇馬颱風...等降雨事件均有土石流發生，每次均有大量土砂淤積於玉穗溪與荖濃溪匯流口，持續墊高玉穗溪河床高程，經工程單位多次疏濬後才勉強維持橋下通洪空間。

2021年8月初盧碧颱風挾帶西南氣流襲台，荖濃溪流

域7日內累積降水逾1000毫米，大量降雨促使玉穗溪源頭的斯拉巴庫山南麓邊坡於8月7日發生大規模崩塌，從鄰近的地震站震動紀錄得知大規模崩塌發生於早上9點17分，崩塌歷時約86秒，大量崩積土砂阻塞上游河道形成堰塞湖，大約4小時後堰塞湖潰決土石流爆發（Shiu et al., 2023），目擊民眾記錄下台20線明霸克露橋遭土石流沖毀的畫面，造成南橫公路中斷，復興至梅山部落對外交通受阻。

極端降雨事件促使斯拉巴庫山南麓邊坡持續滑動，本研究透過多元多時期光學影像、歷史降雨資料與高解析度數值地形模型，探討本處邊坡過去20年間的變異趨勢，估算不

[1] 創聚環境管理顧問股份有限公司
InnoFusion Environmental Management Co., Ltd.
[2] 農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation
* Corresponding Author. E-mail: cylu@ifem.com.tw

同時期的崩積量體，並評估坡體各區域的滑動趨勢與應變-應變率的變化，以及比對歷史雨量資料來釐清降雨促崩門檻

與邊坡穩定性的關聯。

表 1 玉穗溪歷年土石流災情

Table 1 Debris flow events in Yusui stream over years

| 年份 | 事件 | 單日最大降雨 | | 災損及影響 |
|------|-----------|--------|----------|------------------------------------|
| | | 日期 | 降雨量 (mm) | |
| 2009 | 莫拉克颱風 | 8/8 | 1,173 | 荖濃溪流域邊坡及支流普遍發生崩塌與土石流，河床大量淤埋。 |
| 2012 | 0610豪雨 | 6/10 | 664 | 台20線削山便道路基流失。 |
| 2015 | 杜鵑颱風 | 9/27 | 176 | 荖濃溪暴漲、玉穗溪土石流、河床淤高。 |
| 2016 | 0611豪雨 | 6/11 | 526 | 台20線勤和至復興河床便道路基流失，玉穗農路中斷。 |
| | 梅姬颱風 | 9/26 | 364 | 玉穗溪土石流、河床便道淤高中斷。 |
| 2019 | 0517豪雨 | 5/18 | 434.5 | 玉穗溪土石流 |
| 2021 | 盧碧及0806豪雨 | 8/7 | 423 | 玉穗溪暴發土石流沖出大面積土石流扇，沖毀2017年通車之明霸克露橋。 |
| 2023 | 卡努颱風 | 8/4 | 304 | 颱風外圍環流導致玉穗溪土石流，沖毀明霸克露橋鋼便橋橋墩。 |
| | 0822豪雨 | 8/22 | 339 | 玉穗溪爆發土石流，台20鋼便橋與溪床便道受阻。 |
| | 凱米颱風 | 7/26 | 943 | 荖濃溪暴漲沖毀明霸克露橋。 |
| 2024 | 山陀兒颱風 | 10/2 | 60 | 荖濃溪暴漲沖毀台20溪床便道。 |
| | 康芮颱風 | 10/31 | 420 | 玉穗溪土石流沖毀鋼便橋、荖濃溪暴漲沖毀溪床便道。 |

註1 資料來源：王慶雄(2018)、林司秦等(2023)、新聞報導

註2 小關山雨量站紀錄

二、研究區概述與遙測影像蒐集分析

1. 研究區概述

玉穗溪位於高雄市桃源區勤和里，為荖濃溪中游支流，集水區面積約 1231 公頃，主流長達 8 公里，源頭為海拔 2754 公尺的斯拉巴庫山，匯入荖濃溪的高程約海拔 615 公尺，出流點為台 20 線明霸克露橋，為南橫公路西段的重要聯外橋梁，中上游屬於國有林事業區林班地，溪床坡度約 13~18 度，下游則屬於原住民保留地，溪床坡度約 6~9 度，2017 年曾於下游段陸續施作五座防砂壩 (圖 1a)，但前 4 座防砂壩皆於 2021 年土石流事件中埋沒，第 5 座防砂壩也嚴重磨損與底座淘空，庫容區已淤滿喪失防砂功能 (圖 1b、1c)。

地質條件方面，玉穗溪集水區深入中央山脈山區，此區域不易人員深入調查，所屬區域的 5 萬分之一地質圖-卑南主山圖幅至今尚未出版，而流域地質圖 (經濟部地質調查及礦業管理中心，2013) 將玉穗溪中上游地層劃分為畢祿山層，岩性以板岩、變質砂岩與變質火成岩為主，變質岩體強度極高，因此上游地形多為高陡岩壁或溪谷瀑布；中下游地層屬

潮州層，主要岩性為硬頁岩與板岩，常見岩層塑性變形之崩移構造 (Slump)(圖 1d)，此區節理發達岩體較為破碎，因此中下游兩岸常年有規模不等的崩塌發生。

空載光達可穿透植生遮蔽，所產製之高精度數值地形模型可揭露清晰的地表地形 (圖 2a)，從地形圖中可見上、下游岩性差異對地形的影響，可概略劃分出畢祿山層與潮州層的界線。此外，地形圖也顯示中下游右岸已有數個已發育明顯崩崖的崩塌地，現況為坡面持續沖刷並有蝕溝發育 (圖 2b)，潛在崩塌地的活動將為玉穗溪持續帶來大量的不安定土砂，值得持續關注。

水文條件是探討邊坡長期穩定的重要因子，本文蒐集玉穗溪集水區南側，距離斯拉巴庫山約 4.2 公里的中央氣象署小關山自動觀測站 (C1V220) 從 2000 年至 2022 年的日雨量資料，期間最大年降雨量為 2009 年達 4951 毫米，最低年降雨量為 2002 年 1496 毫米，平均年降雨量為 3460 毫米，顯示玉穗溪集水區屬於高降雨量地區，本文藉由將歷史降雨資料搭配多元多期遙測影像，掌握玉穗溪源頭大規模崩塌地各年度的變化情形。



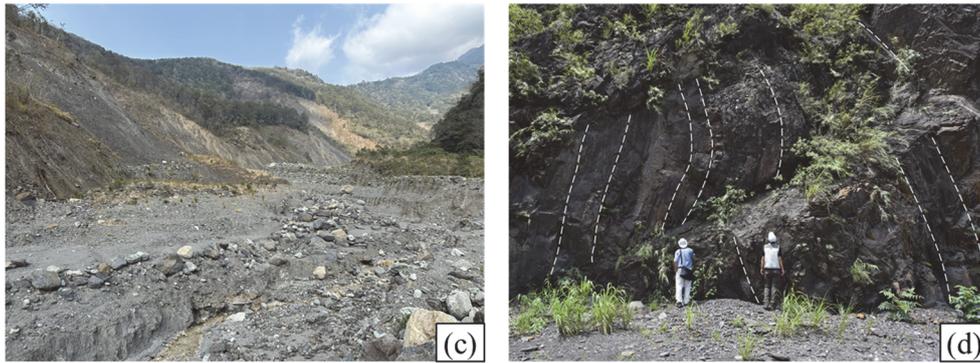


圖 1 玉穗溪河床今昔 (a) 第一座防砂壩 (2018 年 7 月攝), 現已埋沒; (b) 第五座防砂壩嚴重磨損、淘空 (2023 年 3 月攝); (c) 中下游河床與右岸潛在崩場地現況 (2023 年 3 月攝); (d) 板岩夾硬頁岩崩移構造 (2018 年 7 月攝)

Fig.1 Field survey of the Yusui stream watershed. (a) The 1st check dam had been buried. (b) The 5th check dam had been scratched by debris flow. (c) The potential landslide in the downstream right bank. (d) The slump structure in slate slope

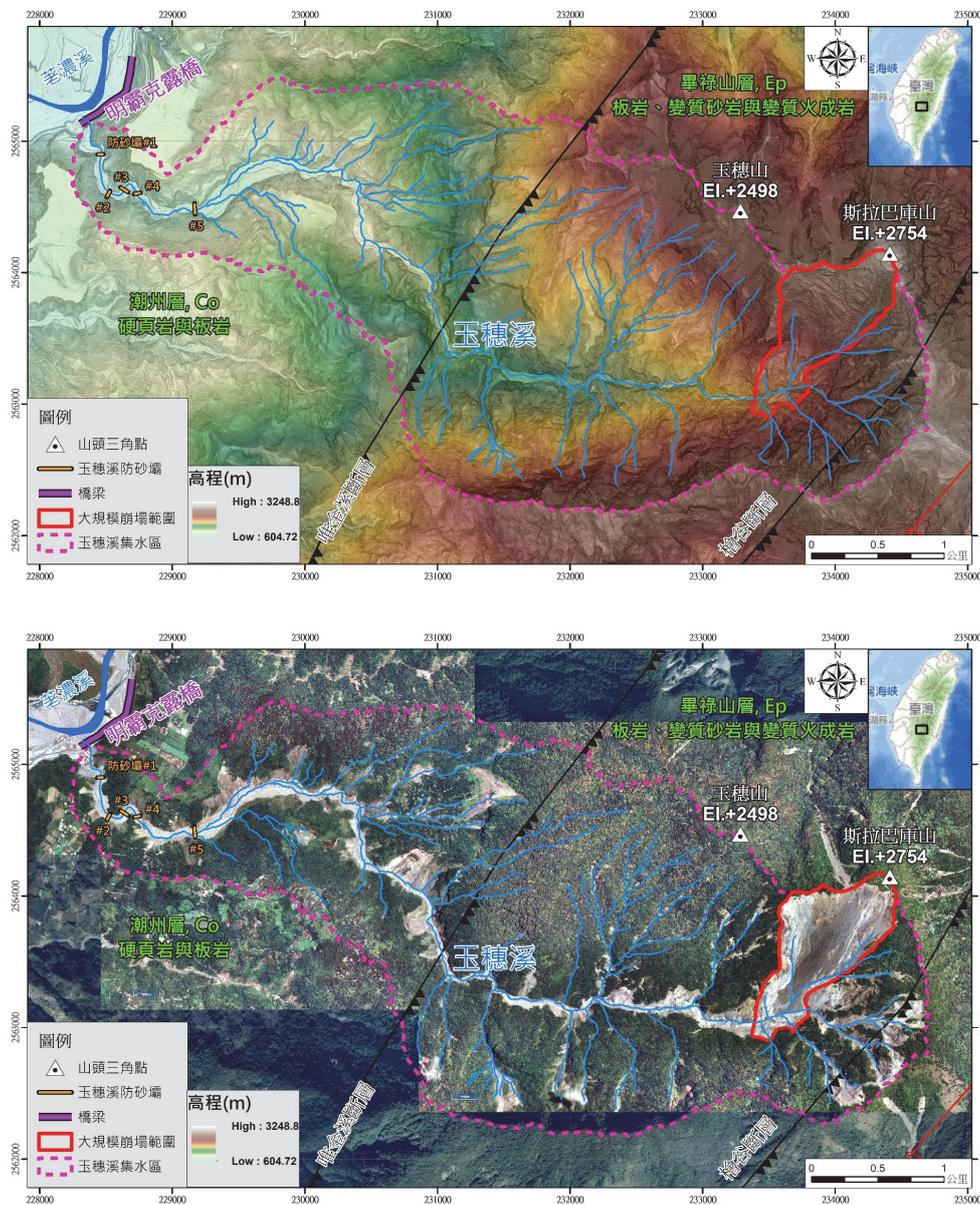


圖 2 玉穗溪集水區 2018 年空載光達地形渲染圖與 2022 年正射影像套疊水系與流域地質圖

Fig.2 Hydrologic, geologic and topographic condition overview of the Yusui stream watershed

2. 多期多元遙測影像

為了瞭解玉穗溪源頭大規模崩塌地變遷歷程，本文綜合多種航、遙測圖資來觀察玉穗溪大規模崩塌地近年的地貌變化與滑動趨勢。首先透過中央大學太空及遙測研究中心提供之 SPOT 衛星無雲影像 wmts 服務，蒐集與瞭解玉穗溪大規模崩塌地近 20 年來坡面變化與蝕溝發展情形，評估各年度中極端降雨事件對坡面穩定性的影響。

圖 3 為玉穗溪源頭大規模崩塌之歷史影像，配合本文蒐集之歷史雨量資料，在 2008 年的 SPOT-5 衛星影像中便可清晰見到斯拉巴庫山 (白色三角圖例) 下方 150 公尺處已有明顯的 M 字形主崩崖發育，坡面植生大致完整，隱約可見東西兩條蝕溝向源發育造成局部裸露，2009 年莫拉克期間小關山雨 量站累積雨量達 2764 毫米，災後影像中主崩崖明顯往西延伸逾 300 公尺，坡面兩蝕溝處向源侵蝕造成大面積

崩滑，2012 年東、西兩蝕溝持續發育擴大，主崩崖延伸至西端支稜，崩崖拉伸的寬度也越來越明顯，至 2017 年間經歷蘇迪勒、尼伯特、梅姬颱風...等豪雨事件，SPOT-6/7 衛星影像中坡面無明顯變化，2018 年坡體明顯下滑，且坡面中發育出兩道次崩崖，顯示坡體已分成三區塊滑動。

經過 2019 年 5 月中旬的豪雨事件使坡體大幅度下滑，上方塊體①與中央塊體②已明顯脫離，坡面中央發育出新的向源侵蝕使下方塊體③完全流失。殘破的坡體經不住 2021 年 8 月初的盧碧颱風帶來的強降雨，坡體全面破壞，坡腹量體的流失也造成斯拉巴庫山頂旁的張力裂隙明顯加劇，災後光學影像中可見張力裂隙拉伸達 5~10 公尺，裂隙包絡出的殘坡塊體面積達 47,800 平方公尺，此殘坡塊體在 2024 年 7 月的凱米颱風期間崩塌，而坡腹與坡趾上至今仍殘留有大量鬆散、易受侵蝕的不安定土砂料源，未來仍有土石流災害風險。

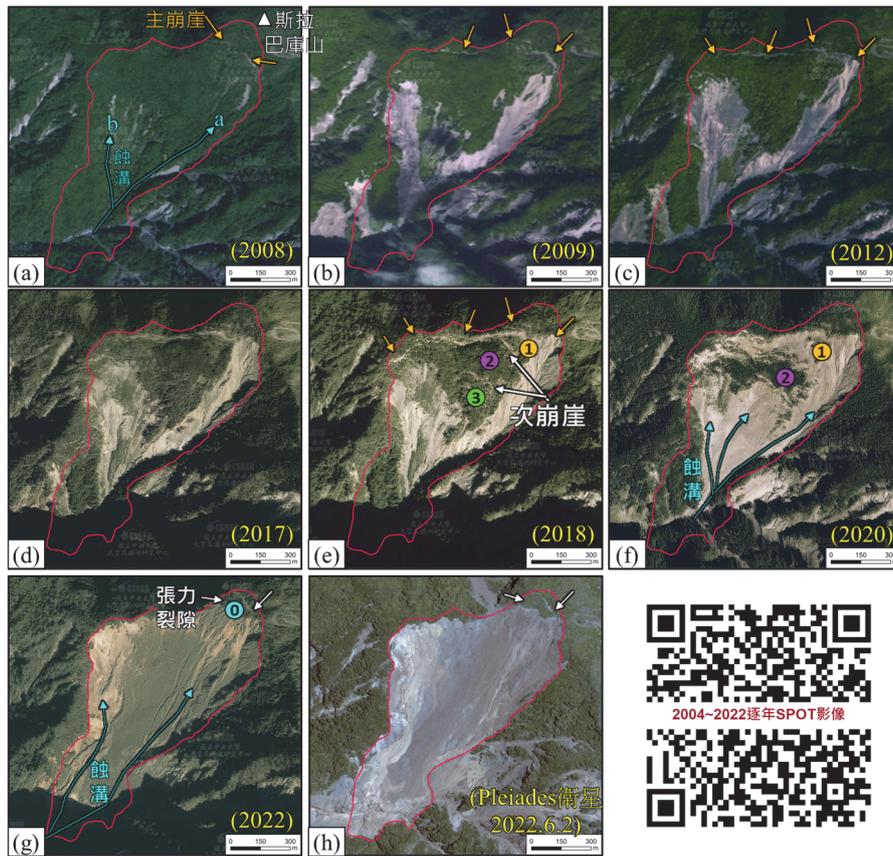


圖 3 玉穗溪源頭大規模崩塌地變遷歷程，取自中大太遙中心 SPOT 衛星影像與 Pleiades 高解析衛星影像

Fig.3 The evolution of the large-scale landslide in the Yusui stream from 2008 to 2022

3. 研究方法

多時期的光學影像可快速回顧崩塌地的變遷過程，而諸多文獻也利用多時期光學影像兩兩相匹配 (matching) 與互相關 (cross-correlation) 來估算邊坡滑動速率 (如 Ding et al., 2021, Teo et al., 2023 與農村水保署, 2024)，但茂密的植被也遮蔽了地表崩塌地形特徵，無法進一步探究大規模崩塌的樣貌，然而空載光達可穿透植被，獲取精確的地表高程與細緻的地形特徵，是山崩調查的重要圖資，本文亦利用多時期光達數值地形，(1)：藉由 GIS 軟體產製地形坡度圖 (Slope

Map) 來揚顯細微地形特徵，並參考 Varnes (1978)、Chigira(1992) 與 Agliardi et al.(2001) 常見大規模崩塌地形特徵判釋原則，進行兩期山崩微地形特徵判釋作業，數化崩崖 (Scarp)、反向崖 (Conuterscarp)、張力裂隙 (Tension crack)、直線型 (Lineation) 等山崩微地形；(2)：計算兩期數值地形間的垂直高程變化量，概估崩塌範圍內侵蝕 (高程下降) 與堆積 (高程抬升) 的土砂量體，量化分析期間內玉穗溪源頭不安定土砂的流出量體，若兩期數值地形解析度不同則降解析度處理；(3)：挑選地形圖上特徵點，紀錄各特徵點的

歷年坐標, 可與光學影像中的特徵點互相比對分析, 瞭解邊坡各塊體的滑動趨勢。

圖 4 為 2012 年與 2018 年兩期空載光達數值地形產製之坡度圖與山崩微地形判釋成果, 2012 年地形圖 (圖 4a) 中可清楚辨識主崩崖與數道次崩崖, 斯拉巴庫山頂旁有一道約 200 公尺的張力裂隙, 西側山脊處隱約有道東西向帶狀陷落, 坡面上則可見多條直線型特徵, 兩兩成銳角相交, 研判可能為岩體之共軛節理組, 另有數條平行坡面的反向崖發育, 使局部出現階梯狀地形特徵; 隨著空載光達技術更加成熟,

2018 年的數值地形揭示出更細節的地表特徵, 圖 4b 可見主崩崖向西延伸至支稜, 次崩崖持續發育, 直線型與反向崖的地形特徵更加顯著, 坡頂的張力裂隙則無明顯變化, 概觀上坡體下滑了數十公尺, 東側與西南側蝕溝持續發育。

團隊也蒐集農村發展及水土保持署之巨量空間資訊系統 Big GIS 平台之航照影像、Pleiades 衛星影像與無人機航拍成果 (表 2), 利用高解析度光學圖資挑選坡面適當特徵點 (如, 樹冠、裸露岩塊), 紀錄各特徵點的歷年坐標, 瞭解邊坡各塊體的位移趨勢。

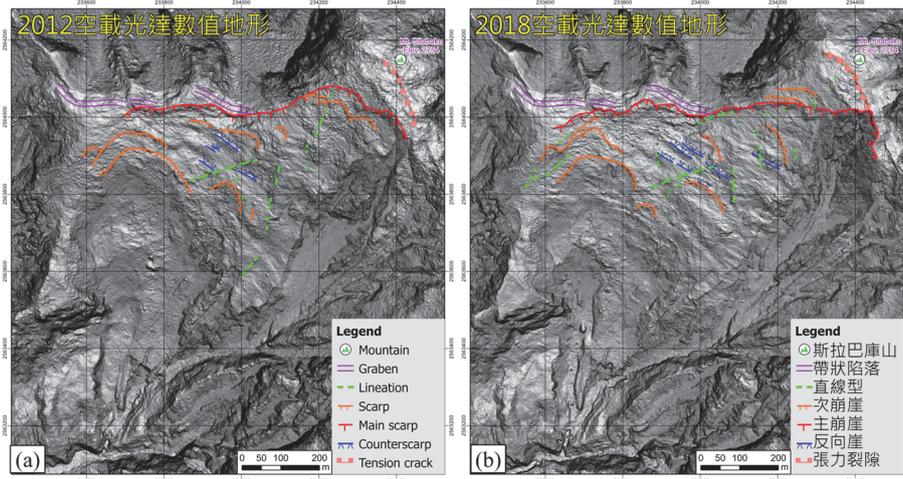


圖 4 玉穗溪源頭大規模崩塌地空載光達數值地形圖與山崩微地形判釋

Fig.4 The interpretation of the landslide topographic features in the Yusui stream landslide

表 2 玉穗溪大規模崩塌活動性分析使用影像清單

Table 2 Remote sensing images used for the activity analysis of the large-scale landslide

| 影像類別 | 地面採樣距離 (GSD)* | 影像測繪日期 (年/月/日) | 影像類別 | 地面採樣距離 (GSD)* | 影像測繪日期 (年/月/日) |
|------|---------------|----------------|------------|---------------|----------------|
| 航照正射 | 約50 cm | 1980/6/18 | Pleiades衛星 | 約50 cm | 2018/10/28 |
| 航照正射 | 約50 cm | 1988/11/19 | 航照正射 | 約15 cm | 2019/1/25 |
| 航照正射 | 約50 cm | 1990/1/11 | Pleiades衛星 | 約50 cm | 2020/9/19 |
| 航照正射 | 約25 cm | 2001/11/23 | Pleiades衛星 | 約50 cm | 2021/3/11 |
| 航照正射 | 約25 cm | 2007/1/14 | 無人機正射影像 | 50 cm | 2022/4/14 |
| 航照正射 | 約25 cm | 2008/8/27 | Pleiades衛星 | 約50 cm | 2022/6/22 |
| 航照正射 | 約25 cm | 2008/10/10 | Pleiades衛星 | 約50 cm | 2025/2/20 |
| 航照正射 | 約25 cm | 2009/11/21 | 航照數值地形 | 5 m | 2006 |
| 航照正射 | 約25 cm | 2012/6/26 | 光達數值地形 | 1 m | 2012/1/1 |
| 航照正射 | 約25 cm | 2013/3/16 | 光達數值地形 | 1 m | 2018/7/15 |
| 航照正射 | 約15 cm | 2017/4/3 | 無人機DSM | 50 cm | 2022/4/14 |

*地面採樣距離 (Ground Sample Distance, 簡稱GSD)

資料來源: 農村發展及水土保持署

三、結果與討論

1. 潛在大規模崩塌地形演變

空載光達數值地形除了可揭露清晰的地表地形特徵之外, 更可進一步利用多時期的數值地形圖資分析大規模崩塌區的高程變化量, 瞭解崩崖陷落區、堆積區與活動範圍, 並可估算各時期內不安定土砂的供給量。在 2006 至 2012 年間 (圖 5a), 主要侵蝕區發生在東側蝕溝, 侵蝕深度逾 20 公尺,

坡面上呈現坡頂高程下降而坡腹高程增加, 代表坡體已有緩慢向下滑動的趨勢, 計算崩塌範圍內地形變異量可知侵蝕約 2.47 百萬立方公尺, 堆積約 1.13 百萬立方公尺, 代表有 1.34 百萬立方公尺的崩積材料成為玉穗溪的土砂料源, 若與圖 3a-c 交互比較則可知莫拉克風災為主要肇因。

2012 年至 2018 年間 (圖 5b) 東側蝕溝持續侵蝕, 侵蝕深度逾 50 公尺, 西側蝕溝開始向源侵蝕, 坡面則持續滑動, 主崩崖位置與高程減少的邊界一致, 可知此時期張力裂隙尚

屬穩定，滑動範圍並無擴大 (圖 3c-e)，但仍有 1.83 百萬立方公尺之土砂輸出至玉穗溪中下游，造成多次土石流災害事件 (表 1)。

2018 年至 2022 年間 (圖 5c)，利用農村水保署提供之無人機拍攝產製之災後數值地表模型(DSM)進行地形變異分析，可知此次玉穗溪大規模崩塌最大滑動深度逾 70 公尺，土砂輸出量約 3 百萬立方公尺，且仍有逾 6 百萬立方公尺之崩積土砂堆積於坡趾，極有可能成為未來玉穗溪不安定土砂之主要料源。

邊坡滑動的趨勢亦可從多時期地形 AA'剖面 (圖 5d)(改繪自 Yang et al., 2022) 中看到，2006 年至 2018 年間坡腹逐年緩慢下滑，2019 年後滑動情形加劇，大規模崩塌災後坡腹坡度仍有 33 度，坡址堆積區厚度逾 80 公尺，坡度約 24 度，堆積區崩積材料所形成的自然坡度即安息角 (Angle of repose)，可視為崩積材料的視摩擦角 (apparent friction angle) (Al-Hashemi & Al-Amoudi, 2018)，24 度的摩擦角反映崩積材料極為鬆散，極有可能受降雨逕流冲刷成土石流，溪谷中則留有明顯的深槽區，研判為潰壩時所造成的沖蝕溝。

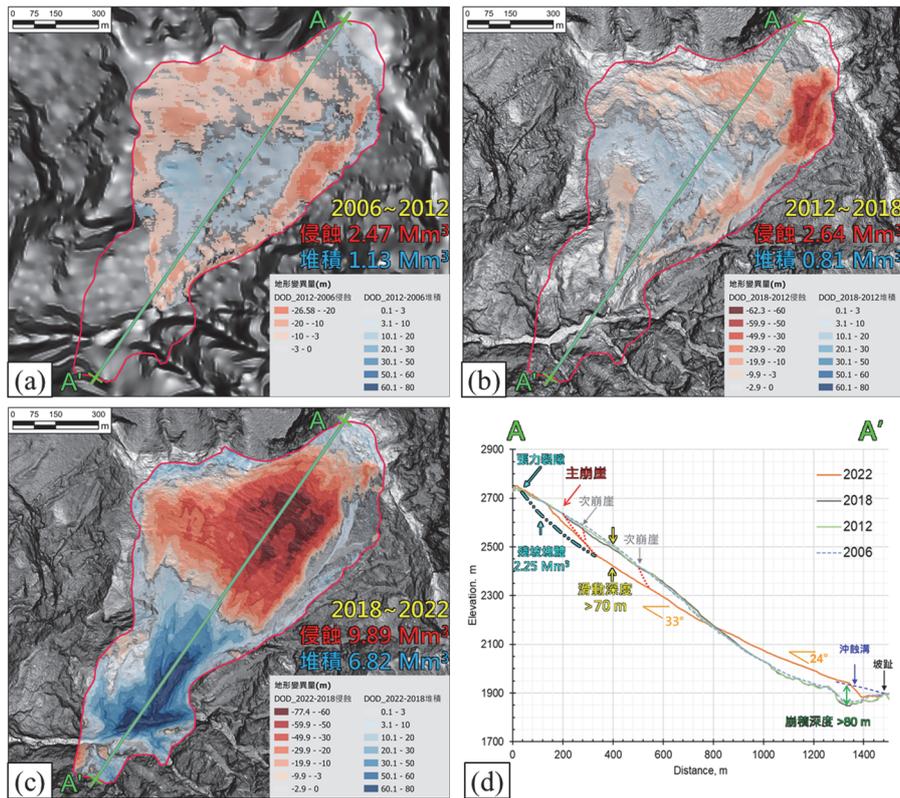


圖 5 各時期地形變異分析。(a)2006 年至 2012 年間；(b) 2012 年至 2018 年間；(c) 2018 年至 2022 年間；(d) 中央地形剖面 (改繪自 Yang et al., 2022)。

Fig.5 The difference of DEM for each period. (a) from 2006 to 2012 ; (b) from 2012 to 2018 ; (c) from 2018 to 2022 ; (d) the topography profile of the landslide (modified from Yang et al., 2022)

2. 潛在大規模崩塌歷史位移分析

為了量化評估玉穗溪大規模崩塌地的歷史位移速率，本文挑選多期航照與兩期光達數值地形圖中的特徵點，追蹤各期影像中的特徵點位置來計算各特徵點的位移速率 (圖 6 與表 3)，然而航拍影像之地貌特徵點 (如：樹冠、裸岩岩塊) 會因不同航次、拍攝角度與日照陰影之影響有坐標跳動飄移現象，但玉穗溪大規模崩塌地的位移量逾數十公尺，大於潛在光學影像偏差，因此地貌特徵點的位移量仍具有代表性；相較之下光達數值地形圖之地表特徵點(如：岩塊、地形線形等幾何特徵)有較佳的定位精度，且公尺級解析度亦小於邊坡位移量，相較於光學影像在計算位移量上更加精確；另依據 2019 年 1 月航拍影像可大致邊坡劃分為數個區塊，包含兩道次崩崖發育所切割出的三大塊體，以及西側蝕溝向源侵蝕

區域和主崩崖至張力裂縫之間殘坡塊體。

經計算兩期空載光達數值地形期間 (2012~2018)，崩塌範圍外的特徵點位移速率多小於 1(m/yr)，代表空載光達數值地形的精度控制良好，而崩塌範圍內的地表特徵點位移速率普遍介於 2.7 至 6.8(m/yr)(圖 7)，兩者位移量有顯著差異，代表選取特徵點來概估位移速率的方法可行。進一步統計各塊體的活動趨勢，其中塊體①的平均位移量約 23.4±1.3 公尺，位移方向 228 度 (正北為 0 度)；塊體②的平均位移量約 22.2±2.4 公尺，位移方向 212 度；塊體③的平均位移量約 31.7±4.8 公尺，位移方向 209 度，塊體①跟②有相近的位移速率但滑動方向稍有不同，而塊體③位移速率明顯大於前二者，顯示在坡體全面破壞前，塊體③次崩崖就已開始發育使得塊體滑動。

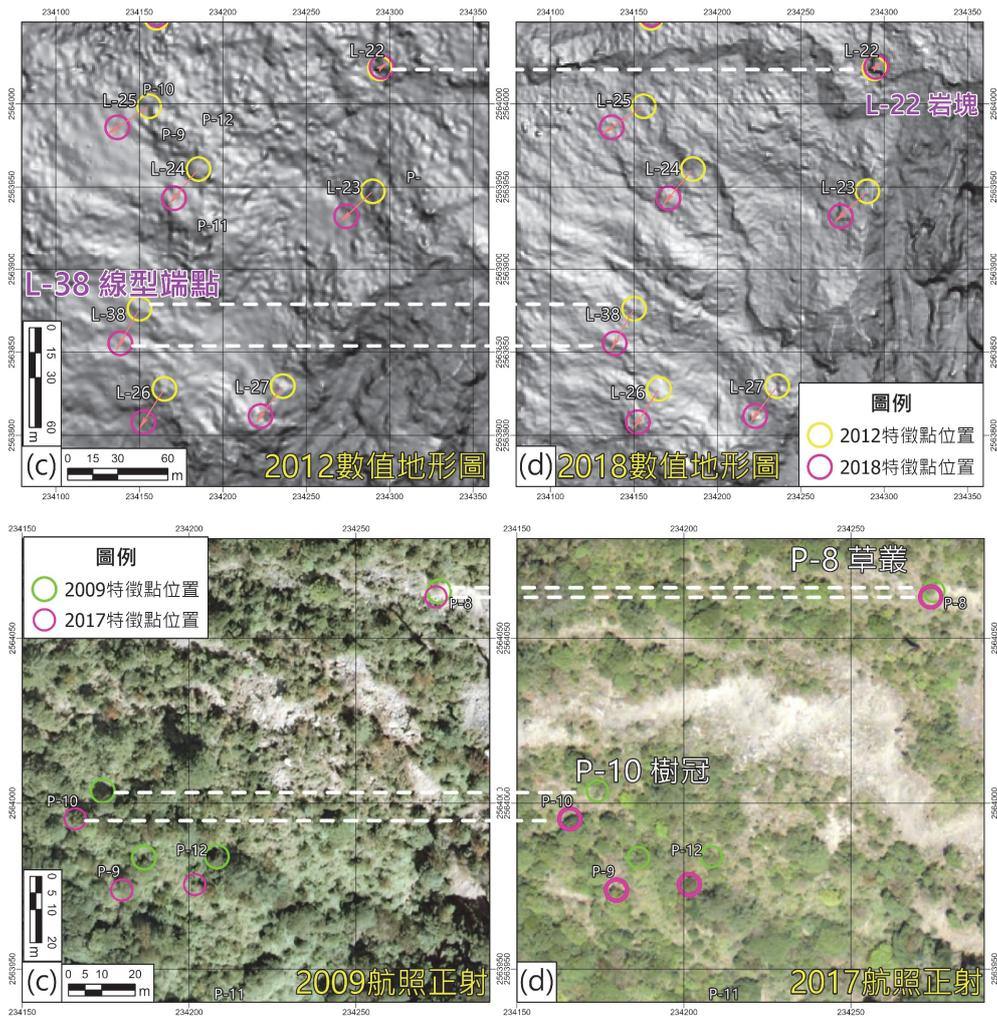


圖 6 數值地形特徵點與光學影像地貌特徵點變遷比對圖。(a) 與 (b) 兩期數值地形的地形特徵點位置變化；(c) 與 (d) 兩期光學影像的地貌特徵點位置變化

Fig.6 Schematic diagram for the displacement of the feature points in slope map and aerial photo. (a) and (b) before and after in slope maps. (c) and (d) before and after in aerial photos

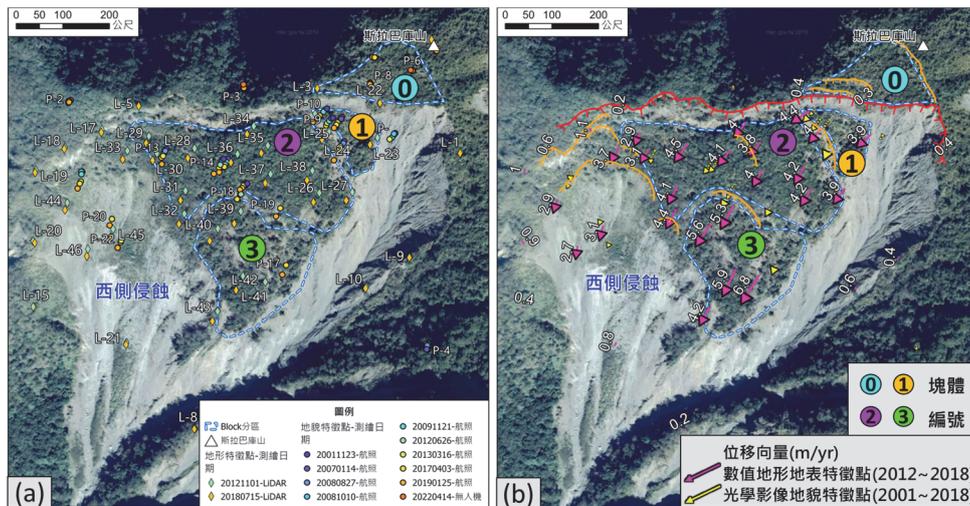


圖 7 藉由光學影像的地貌特徵點與數值地形的地形特徵點重建 2001~2018 年間的位移歷程。(a) 特徵點分布；(b) 特徵點位移速率

Fig.7 The displacement pattern of the large-scale landslide, derived from the feature points in remote sensing data. (a) the distribution of the feature points. (b) the slip rate of the feature points

表 3 特徵點性質與累積位移量

Table 3 The characteristic and accumulative displacement of the feature points.

| 區塊 | 數值地形地表特徵點 | | | | 光學影像地貌特徵點 | | | |
|--------------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|
| | 編號 | 標的物 | 影像期間 | 累積位移* | 編號 | 標的物 | 影像期間 | 累積位移* |
| 崩塌範圍外 參考點 | L-1 | 岩塊 | 2012~2018 | 2.2 | P-1 | 岩塊 | 2001~2022 | 5.7 |
| | L-3 | 線形端點 | 2012~2018 | 2.0 | P-2 | 樹冠 | 2001~2022 | 3.3 |
| | L-5 | 岩塊 | 2012~2018 | 0.9 | P-3 | 樹冠 | 2001~2022 | 8.3 |
| | L-6 | 瘦稜 | 2012~2018 | 1.0 | P-4 | 樹冠 | 2001~2022 | 13.6 |
| | L-8 | 瘦稜 | 2012~2018 | 1.3 | P-5 | 樹冠 | 2001~2022 | 6.7 |
| | L-9 | 瘦稜 | 2012~2018 | 2.5 | | | | |
| | L-10 | 瘦稜 | 2012~2018 | 3.2 | | | | |
| | L-15 | 岩塊 | 2012~2018 | 2.4 | | | | |
| | L-19 | 岩塊 | 2012~2018 | 5.6 | | | | |
| | L-20 | 岩塊 | 2012~2018 | 5.3 | | | | |
| | L-17 | 岩塊 | 2012~2018 | 6.3 | | | | |
| | L-18 | 岩塊 | 2012~2018 | 3.5 | | | | |
| | 殘坡塊體 | L-22 | 岩塊 | 2012~2018 | 1.5 | P-6 | 岩塊 | 2001~2022 |
| | | | | | P-7 | 枯幹 | 2001~2022 | 6.9 |
| | | | | | P-8 | 草叢 | 2001~2019 | 3.5 |
| 塊體1 | L-23 | 線形端點 | 2012~2018 | 22.0 | P-9 | 樹冠 | 2001~2019 | 37.4 |
| | L-24 | 岩塊 | 2012~2018 | 22.9 | P-10 | 樹冠 | 2001~2019 | 41.4 |
| | L-25 | 線形端點 | 2012~2018 | 25.3 | P-11 | 樹冠 | 2001~2019 | 47.2 |
| | | | | | P-12 | 樹冠 | 2001~2019 | 29.1 |
| 塊體2 | L-26 | 線形端點 | 2012~2018 | 23.7 | P-13 | 樹冠 | 2001~2019 | 34.0 |
| | L-27 | 岩塊 | 2012~2018 | 22.3 | P-14 | 樹冠 | 2001~2019 | 38.1 |
| | L-28 | 線形端點 | 2012~2018 | 25.6 | P-15 | 樹冠 | 2001~2019 | 34.9 |
| | L-29 | 線形端點 | 2012~2018 | 16.5 | P-16 | 樹冠 | 2001~2019 | 20.3 |
| | L-30 | 線形端點 | 2012~2018 | 17.9 | | | | |
| | L-31 | 岩塊 | 2012~2018 | 23.2 | | | | |
| | L-32 | 線形端點 | 2012~2018 | 24.9 | | | | |
| | L-33 | 線形端點 | 2012~2018 | 21.2 | | | | |
| | L-34 | 岩塊 | 2012~2018 | 22.6 | | | | |
| | L-35 | 線形端點 | 2012~2018 | 21.8 | | | | |
| 塊體3 | L-36 | 線形端點 | 2012~2018 | 23.2 | | | | |
| | L-37 | 岩塊 | 2012~2018 | 22.6 | | | | |
| | L-38 | 線形端點 | 2012~2018 | 23.8 | | | | |
| | L-39 | 線形端點 | 2012~2018 | 30.0 | P-17 | 樹冠 | 2017~2019 | 50.1 |
| | L-40 | 岩塊 | 2012~2018 | 32.0 | P-18 | 樹冠 | 2012~2019 | 50.1 |
| | L-41 | 線形端點 | 2012~2018 | 33.7 | P-19 | 樹冠 | 2017~2019 | 47.8 |
| 西側向源 侵蝕區 | L-42 | 線形端點 | 2012~2018 | 38.9 | | | | |
| | L-43 | 岩塊 | 2012~2018 | 24.1 | | | | |
| | L-21 | 岩塊 | 2012~2018 | 4.3 | P-20 | 草叢 | 2017~2019 | 28.8 |
| | L-44 | 岩塊 | 2012~2018 | 16.3 | P-21 | 草叢 | 2007~2019 | 38.3 |
| | L-45 | 岩塊 | 2012~2018 | 18.0 | P-22 | 岩塊 | 2013~2019 | 31.6 |
| | L-46 | 岩塊 | 2012~2018 | 15.7 | | | | |

*：僅列出影像期間累積位移量。

圖 8 彙整 2001~2023 年間的特徵點累積位移資訊，重建玉穗溪大規模崩塌的歷史位移速率，虛線段為多元多期光學影像中各滑動塊體內每個地貌特徵點的位移量，黃實線段為 AA 剖面 (圖 5d) 上主崩崖位移量，實線段則為兩期數值地形圖之地表特徵點平均位移量及標準差 (1σ)，並以 2013 年初各塊體地貌特徵點的累積位移量作為起點 (約 14 公尺)，建立兩類型特徵點間關聯性，再計算地形特徵點的累積位移

量。下方橫軸對照小關山雨量站之單日最大降雨量與單月累積雨量，圖中可見在 2009 年莫拉克風災前，因光學影像偏差使地貌位移量多在 5 公尺內跳動，此時可辨識主崩崖已明顯拉伸約有 5 公尺左右位移量。莫拉克風災中小關山雨量站測得單日雨量達 1173 毫米，災後航拍影像 (2009/11/21) 可見主崩崖位移達 23 公尺，邊坡特徵點累積位移量驟增至 10 公尺 (對應圖 3b)，而 2010 年後坡體開始緩慢下滑，各區塊

呈現一致滑動趨勢，滑動速率約 1.5 m/yr。2012 年 6 月梅雨單日降雨量達 664 毫米，使西側蝕溝明顯擴大 (圖 3c)，至

2017 年 4 月航照影像時各區塊累積位移量普遍增加到 15~30 公尺之間，主崩崖位移量也增加到約 34 公尺 (圖 3d)。

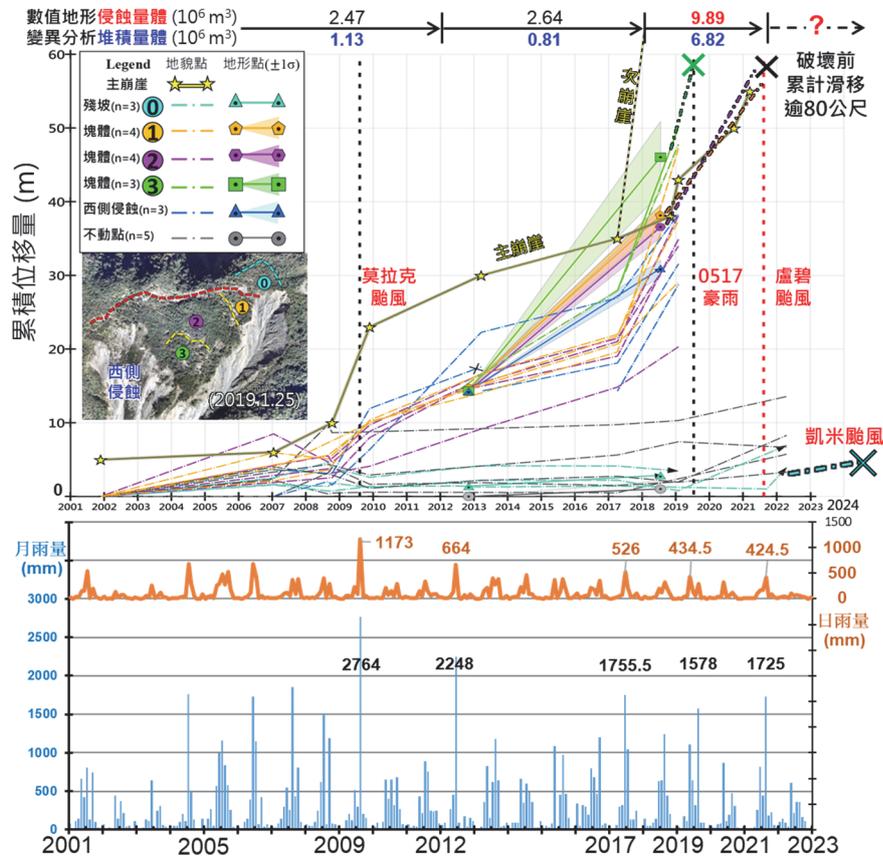


圖 8 藉由光學影像的地貌特徵點與光達影像的地形特徵點重建崩塌地的歷史位移資訊，雨量站為中央氣象署小關山測站 (C1V220)

Fig.8 The displacement history of the large-scale landslide, derived from the feature points in remote sensing data

2018 年 8 月熱帶低壓造成西南部豪雨，促使邊坡再次下滑十餘公尺，並可見兩道次崩崖 (圖 3e)，在 2019 年 1 月航拍影像中可見主崩崖已達約 43 公尺，此時塊體③下滑程度加劇，累積位移量 47~50 公尺，而塊體①跟塊體②內地貌特徵點累積位移量約達 30~40 公尺，顯見塊體③明顯脫離塊體①跟②。且各塊體內的地貌累積位移量與數值地形圖所得之地表特徵點平均位移量皆有一致趨勢與量值，顯示兩類遙測影像所選取特徵點可互相對應，驗證光學影像追蹤邊坡特徵點位移量的可行性。

2019 年 0517 豪雨事件中單日雨量達 434 毫米，讓坡體穩定狀況更加惡化，主崩崖位移已達 50 公尺，塊體①些許下滑並有部分流失，塊體②亦下滑逾 80 公尺，且最大位移量超過 100 公尺，過大的位移量已追蹤特徵點位移量，塊體③則崩塌潰散且發育出新生蝕溝 (圖 3f)。2020 年無強降雨事件，殘破的坡體大致維持穩定無明顯位移。2021 年 8 月盧碧颱風帶來強降雨，單日雨量達 425 毫米，坡體發生大規模崩塌形成堰塞湖與土石流災情，亦使得山頂處張力裂隙進一步拉伸至 10 公尺，形成面積約 47,800 平方公尺的新生殘坡塊體 (圖 3g、h)，而該殘坡塊體在 2024 年凱米颱風期間崩塌 (圖 9)，崩塌面積約 42000 平方公尺，由於團隊尚未取得

最新的數值地形，暫以農村水保署建議之崩塌體積-面積關係式 (式 1) 估算，則此次殘坡塊體崩塌體積約 30 萬立方公尺，所引發的土石流造成玉穗溪鋼便橋受損。

$$V_L = 0.1025A_L^{1.401} \text{ (式 1) (農村水保署, 2023)}$$

3. 崩塌地防災急迫性評估

綜合歷史光學影像與圖 8 的歷史位移量趨勢及降雨量的關係大致可歸納出，在玉穗溪大規模崩塌地尚未完全破壞前，若單日降雨量超過 400 毫米，降雨沖刷裸露坡面加劇蝕溝向源侵蝕，2012 年 0610 豪雨單日降雨量達 664 毫米降雨量並未加速坡體滑動，然而 2017~2019 年間多場降雨事件強度不及 0610 豪雨，但卻造成坡體加速下滑、與局部崩塌，反映坡體穩定狀況已明顯惡化。

為了進一步評估潛在崩塌地的穩定狀態與瞭解防災急迫性，杉井良平等人 (2017) 蒐集日本 34 個案例，分析地表伸縮計 (Borehole Extensometer) 監測的主崩崖滑動紀錄，34 個案例中邊坡長度介於 30~400 公尺，觀測到的最大滑動量達 14 公尺。由於各案例的觀測時間間隔介於 1 小時至 1 日之間，該研究團隊假設在觀測間隔內邊坡穩定位移，並以邊坡坡長 (L) 與主崩崖位移量 (D) 計算邊坡應變量 (ε)，進

一步根據觀測時間間隔推算每小時平均應變速率 (ϵ)。透過數據分析，杉井等人歸納出邊坡滑動歷程中加速點 (Acceleration Point) 與臨界破壞點 (Failure Threshold) 對應的應變與應變速率門檻值 (圖 10)，其中加速點門檻值 ($\dot{\epsilon} = 0.3 \times 10^{-4}/hr$) 可做為崩塌地防災應變的警戒值，邊坡位移速率超過此警戒值門檻建議加強加密觀測並預作防災準備，臨界破壞點門檻值 ($\dot{\epsilon} = 1.3 \times 10^{-4}/hr$) 則可當成防災應變的行動值，邊坡位移速率若達臨界破壞門檻代表坡體極度不穩定，建議進行防災疏散作業。

根據圖 5d 的 AA' 地形剖面，玉穗溪大規模崩塌地從主崩崖到滑動面剪出位置長約 600 公尺 (L)，再根據各期航照計算 AA 剖面線上主崩崖的位移量 (D)(圖 8)(暫不考慮次崩崖因素) 來計算邊坡應變量，並仿效杉井良平等 (2017) 的假設直接將邊坡應變量除以影像觀測間隔，則可估算玉穗溪大規模崩塌地的應變-應變率並瞭解其時間變化趨勢，由於光學影像取像間隔較長，相較於現地儀器觀測數據，遙測

影像所獲得之應變率值勢必較低，也較為保守。

將計算所得之應變-應變率套繪杉井良平等 (2017) 之研究成果 (圖 11)，在 2008 年 10 月航拍影像中主崩崖位移量約 10 公尺，此時應變-應變率已達警戒值進入臨界破壞區域，2009 年莫拉克風災中崩崖位移量增加至約 23 公尺，但仍未破壞，接著數年內坡體穩定且緩慢下滑，因此應變率稍微下滑，2018 年 10 月應變率回升，2019 年的 0517 豪雨使應變率繼續上升，到了 2021 年 3 月的影像中，應變率已超出杉井良平等 (2017) 所蒐集的崩塌案例，最終在 2021 年 8 月盧碧颱風中發生大規模崩塌。

根據多期航照所重建之歷史位移資訊，玉穗溪大規模崩塌地之滑動歷程大致可劃分為緩慢滑動-加速滑動-穩定滑動-再加速滑動-大規模崩塌，共 5 階段，而單日累積雨量超過 400 毫米之強降雨事件 (如：莫拉克颱風、0517 豪雨、盧碧颱風) 為造成蝕溝向源侵蝕與坡體加速滑動的主要原因。

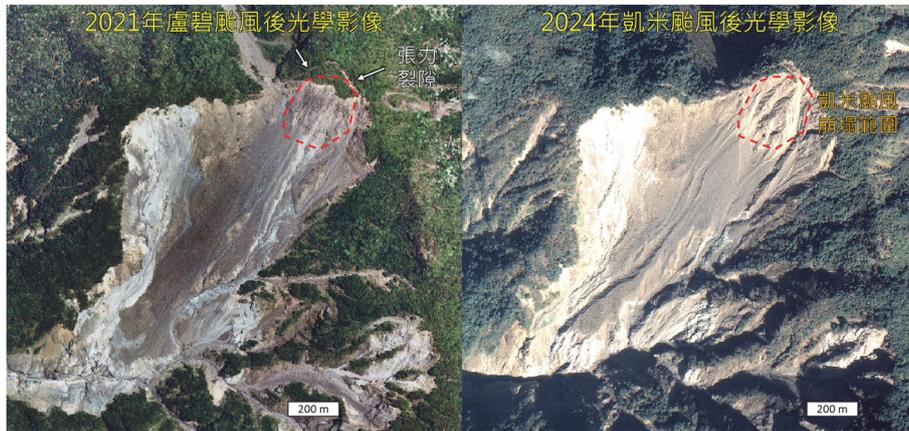


圖 9 斯拉巴庫山旁殘坡塊體已於 2024 年凱米颱風中崩塌
 Fig.9 The residual slope had collapsed during Gaemi Typhoon in July, 2024

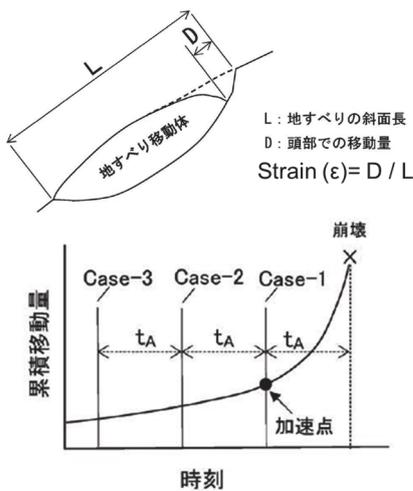


圖 10 邊坡應變量示意圖與位移加速點示意圖 (杉井良平等, 2017)

Fig.10 Strain of landslides and example of acceleration point

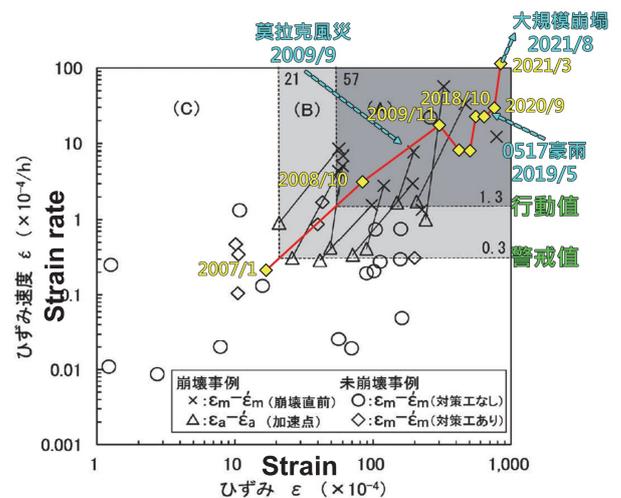


圖 11 玉穗溪大規模崩塌地應變-應變率歷程演變 (套繪杉井良平等, 2017)

Fig.11 The temporal variation of strain and strain rate of Yusui stream landslides

四、結 論

本文藉由多元光學影像分析玉穗溪大規模崩塌地之滑動歷程，並輔以多期數值地形驗證航照影像分析成果，顯示多期航照或高解析光學影像（如 Pleiades 衛星、無人機），可供作為人員不易觸及與儀器不易架設之潛在大規模崩塌地的替代監測方案，雖然遙測分析之取樣頻率遠不及現地定點儀器的高頻監測，但遙測影像為面狀資訊，空間解析度與訊息量遠勝於單點儀器監測，且具有低成本、可追溯、不需硬體維護等優點，非常適合用於定期性廣域評估各潛在崩塌地的穩定性與變異性，更適合緊急災後分析，使邊坡權責單位或影響範圍內的受災單位快速且全面地瞭解源頭區近即時災況，供機關擬定緊急災害防救措施之參考。

根據農村水保署 BigGIS 平台蒐集之早期航照影像，玉穗溪源頭處斯拉巴庫山南麓之大規模崩塌地最早可追溯到 1980 年航照影像，黑白影像中已可辨識出 M 字形主崩崖跡象，接著 30 年內主崩崖極緩慢發育，直到 2009 年莫拉克風災造成坡面蝕溝發育，主崩崖才明顯擴大，也讓邊坡進入接下來二十餘年的滑動歷程。地形變異分析成果估算，2005 年至 2021 年災後，單就玉穗溪源頭崩塌地的累積侵蝕量體超過 1400 萬立方公尺，扣除殘留在上游河道的崩積土砂，估計流出土砂量體約 600 萬立方公尺，造成玉穗溪河床大幅淤積，儘管河川管理單位與公路單位多次疏浚河床增加通洪斷面，但台 20 線南橫公路明霸克露橋仍不幸於盧碧颱風中遭堰塞湖潰壩產生之土石流沖毀。

經本文多元多期遙測影像分析與重建邊坡歷史位移量，近二十餘年來玉穗溪集水區經歷數場極端降雨事件，致使玉穗溪源頭崩塌地持續惡化，隨之而來的土石流災害紀錄也愈加頻繁，而崩塌地的應變-應變率逐時變化可做為防災行動值與警戒值之參考依據。除了布設現地監測儀器，人員無法到達處可藉由多元遙測方式（如無人機、InSAR 或高重返光學衛星）來縮短監測間隔，即時掌握邊坡是否進入加速滑動階段，也有助於篩選廣域邊坡之防災急迫性，集中監測量能並提早應變調度防災資源。

誌 謝

感謝農村發展及水土保持署提供各式遙測影像供本文分析與經費支持（計畫名稱：113 年集水區不穩定土砂運移模式建立與衝擊評估），以及國科會災害防救科技創新服務方案 GeoPORT 團隊（計畫編號：MOST-111-2124-M-027-001）與匿名審查委員提供諸多寶貴意見。

參考文獻

[1] 王慶雄 (2018), 「台 20 線南橫公路勘和-復興中期道路提升施工紀實」, 臺灣公路工程, 44(8), 2-27. (Wang, C.H. (2018). "Documentation of the midterm road improve-

ment from Qinhuei to Fuxing, southern cross-island highway." *Taiwan Highway Engineering*, 44(8), 2-27. (in Chinese))

- [2] 杉井良平、西井稜子、石井靖雄 (2017), 「地すべりのひずみ及びひずみ速度の経時変化による崩壊の切迫性評価」, 日本地すべり学会誌, 54(6), 259-268. (Ryohei, S., Ryoko, N., and Yasuo, I. (2017). "Evaluation of urgency for failures based on temporal variation in strain and strain rate of landslide." *Journal of the Japan Landslide Society*, 54(6), 259-268. (in Japanese))
- [3] 林司泰、沈淑敏、游牧笛 (2023), 「二萬五千分之一土砂災害地形特徵圖暨說明書-桃源區-荖濃溪-001」. (Lin, S.C., Shen, S.M., and Yu, M.T. (2023). *1:25,000 Scale Geomorphological Map and Explanation of Sediment-Related Disasters - Taoyuan District - Laonong River - 001*. (in Chinese))
- [4] 國家災害防救科技中心, 「全球災害事件簿 2019 年 0517-0520 豪雨」. (National Science and Technology Center for Disaster Reduction, *Global disaster events book, 0517-0520 heavy rainfall in 2019*. (in Chinese)) <https://den.ncdr.nat.gov.tw/1132/1188/1204/21958/21961/>
- [5] 經濟部地質調查及礦業管理中心 (2013), 「臺灣流域地質圖, 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置: 圖冊」. (Geological Survey and Mining Management Agency, MOEA. (2013). *Taiwan Watershed Geological Map. Geological Investigation & Database Construction for Upstreaming of Flood-Prone Area*. (in Chinese))
- [6] 農村發展及水土保持署 (2023), 「大規模崩塌潛勢區影響範圍劃設作業流程與方法」. (Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA. (2023). *The Process and Methods for Delineating the Impact Area of Potential Large-Scale Landslide Hazard Zones*. (in Chinese))
- [7] 農村發展及水土保持署 (2024), 「113 年集水區不穩定土砂運移模式建立與衝擊評估」. (Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA. (2023). *Development of The Unstable Sediment Transport Model for Watersheds and Impact Assessment in 2024*. (in Chinese))
- [8] Agliardi, F., Crosta, G., and Zanchi, A. (2001). "Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics." *Engineering Geology*, 59(1-2), 83-102.
- [9] Al-Hashemi, H.M.B., and Al-Amoudi, O.S. (2018). "A review on the angle of repose of granular materials." *Powder technology*, 330, 397-417.
- [10] Chigira, M. (1992). "Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep." *Engineering Geology*, 32(3), 157-184.
- [11] Ding, C., Feng, G., Liao, M., Tao, P., Zhang, L., and Xu, Q. (2021). "Displacement history and potential triggering factors of Baige landslides, China revealed by optical imagery time series." *Remote Sensing of Environment*, 254, 112253.

- [12] Ding, C., Feng, G., Liao, M., Tao, P., Zhang, L., and Xu, Q. (2021). "Displacement history and potential triggering factors of Baige landslides, China revealed by optical imagery time series." *Remote Sensing of Environment*, 254, 112253.
- [13] Shiu, W.J., Lee, C.F., Chiu, C.C., Weng, M.C., Yang, C.M., Chao, W.A., and GeoPORT Working Group. (2023). "Analyzing landslide-induced debris flow and flow-bridge interaction by using a hybrid model of depth-averaged model and discrete element method." *Landslides*, 20(2), 331-349.
- [14] Teo, T.A., Fu, Y.J., Li, K.W., Weng, M.C., and Yang, C.M. (2023). "Comparison between image-and surface-derived displacement fields for landslide monitoring using an unmanned aerial vehicle." *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 116, 103164.
- [15] Varnes, D.J. (1978). "Slope movement types and processes." *Special report*, 176, 11-33.
- [16] Yang, C.M., Chao, W.A., Weng, M.C., Fu, Y.Y., Chang, J.M., Huang, W.K., and GeoPORT Working Group. (2022). "Outburst debris flow of Yusui Stream caused by a largescale Silabaku landslide, Southern Taiwan." *Landslide*, 19, 1807-1811.

2024 年 08 月 27 日 收稿

2025 年 02 月 20 日 修正

2025 年 06 月 24 日 接受