airiti

中華水土保持學報, 54(4):250-263(2023)
Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 54 (4)*: 250-263* (2023)
DOI: 10.29417/JCSWC.202312_54(4).0002

臺東縣延平鄉紅葉村崩塌地特性及變遷研究

王姵兮[1] 吳嘉俊[2] 武德玲[3] 張清晏[3] 林國財[3] 柯燦堂[3]

摘　　要　本研究以臺東縣延平鄉紅葉村崩塌潛勢區為研究場址，藉由 2017 ~ 2020 年現地調查、微地形變異及崩塌地監測與分析，確立潛在滑動體運移機制及活動性。研究成果顯示，潛在不安定土砂量約 91.9 萬 m^3，延平鄉-T001 塊體 T001-C 的源頭活動性高，滑動層分別位於地下 15 ~ 22 m 及 45 ~ 49 m 處。本研究根據潛勢區內降雨量、地下水位、地中傾斜量測、地表變位量量測，提出崩塌塊體移動觀念模式，獲得變位量與累積雨量最具相關性。

關鍵詞：紅葉村崩塌地、崩塌特性分析、大規模崩塌監測、崩塌觀念模式

Landslide Characteristics and Evolution of a Large-Scale Landslide in Hong-Yeh Village

Pei-Hsi Wang[1]　Chia-Chun Wu[2]　De-Ling Wu[3]　Kuo-Tsai Lin[3] Chang-Ching Yen[3] Tsan-Tang Ko[3]

ABSTRACT　In this study, field geological surveys, high-resolution digital terrain investigations of microrelief variations, and onsite monitoring were conducted from 2017 to 2020 to investigate the mechanics and mobility of a large-scale landslide located at Hong-Yeh Village in Taitung County. The results indicated that 91.9 million cubic meters of unstable mass predominantly remained on the slope. Borehole inclination measurements conducted at the high-mobility sliding block T001-C revealed two sliding planes located at 15-22 and 45-49 m, respectively, below the ground. A conceptual model was therefore proposed on the basis of the landslide mechanics and detailed analyses of on-site monitoring results, including rainfall, groundwater stage, borehole inclination, and surface displacement measurement. The preliminary results indicated that amount of ground displacement was strongly correlated with accumulated rainfall.

Key Words: Hong-Yeh landslide, landslide characteristic analysis, large-scale landslide monitoring, landslide conceptual model

一、前　　言

近年來全球氣候變遷加劇，在極端氣候影響下，颱風豪雨所誘發大規模崩塌或土石流災害常威脅下游保全對象生命財產安全。臺灣因地形與地質條件特殊，加上降雨豐沛且集中以及地震作用，致使山崩、地滑及土石流等坡地災害常有所聞。2016 年 9 月莫蘭蒂颱風為臺東縣延平鄉紅葉村帶來 652 mm 的三日累積雨量，48 小時連續降雨達 633 mm。短延時、強降雨，導致 9 月 15 日清晨誘發部落後方邊坡岩屑層的大面積崩塌，土砂下移暴發土石流，造成紅葉村 1 鄰及 2 鄰民宅約 30 戶、紅葉國小、派出所及社區道路等設施遭淤埋。

大型土體移動 (Mass Movement) 往往造成坡地重大土砂災害，Varnes (1978) 將大型土體移動依據運動型態與材料特性進行分類，解決了各家不同名詞用語的混淆。Hutchinson (1987) 認為平面型岩體滑動的破壞機制主要有三種，包括挫屈 (buckling)、楔型擠壓 (wedging) 及剪斷 (faulting)，層間剪裂帶的存在與否，對於平面型滑動的機制有很大的影響。近年來國內對降雨引發坡地災害之關注日增，廖志中等 (2011) 利用鑽探、孔內造影以及震波試驗，探討梨山崩塌區大規模崩積地層的形成機制。研究結果顯示，梨山地區的板岩劈理位態與邊坡方位不一致，崩積層不應為沿劈理大規模順向滑動堆積所形成。李錫堤 (2012) 指出，順向坡常見的三種破壞型式，包括坡腳移除型、坡腳剪壞型、坡腳鼓脹型等。林錫宏等 (2014) 以嘉義太和地區為例，進行順向坡地區的山崩機制調查與活動性探討。研究結果認為，油車寮地

〔1〕立邦工程技術顧問有限公司
Lipang Engineering Consultant Co. LTD.
〔2〕國立屏東科技大學水土保持系
National Pingtung University of Science and Technology, Dept. Soil and Water Conservation.
〔3〕農業部農村發展及水土保持署臺東分署
Taitung Branch, Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA
* Corresponding Author. E-mail: li.pang66@msa.hinet.net

airiti

等。林錫宏等 (2014) 以嘉義太和地區為例，進行順向坡地區的山崩機制調查與活動性探討。研究結果認為，油車寮地滑為大規模平面型岩體滑動，滑動面可能為既存的層間剪裂帶。從平面型岩體滑動的邊坡穩定分析及參數敏感性研究發現，滑動面的摩擦角對於邊坡穩定的安全係數具有最大影響，其次是張力裂縫及滑動面的蓄水比。數值模擬中發現，即使在順向坡尚未砍腳的狀態，層間剪裂帶的弱化及其上覆岩體的風化，對平面型岩體滑動的發展亦具有不利的關鍵影響。李璟芳等 (2015) 以光達掃瞄產製之高精度數值地形進行崩塌地微地形判釋，採用 Voellmy-Salm 為理論基礎之土砂運移數值模擬程式 (RAMMS, WSL 2017)，對圈繪後之潛在重力變形區進行崩塌模擬，並進一步考慮集水區水文歷線特性，探討邊坡崩積土體轉化為土石流之動態特徵，最後導入危險矩陣 (hazard matrix) 概念進行危險度分級，以預測邊坡潛在土砂災害之影響範圍。鍾明劍等 (2016) 彙整適用於大規模崩塌地的調查與評估方法，目的在於瞭解潛在滑動塊體現況之穩定性、受地震或豪雨等外在誘因導致崩塌之關聯性、崩塌土體運移行為及其影響範圍。

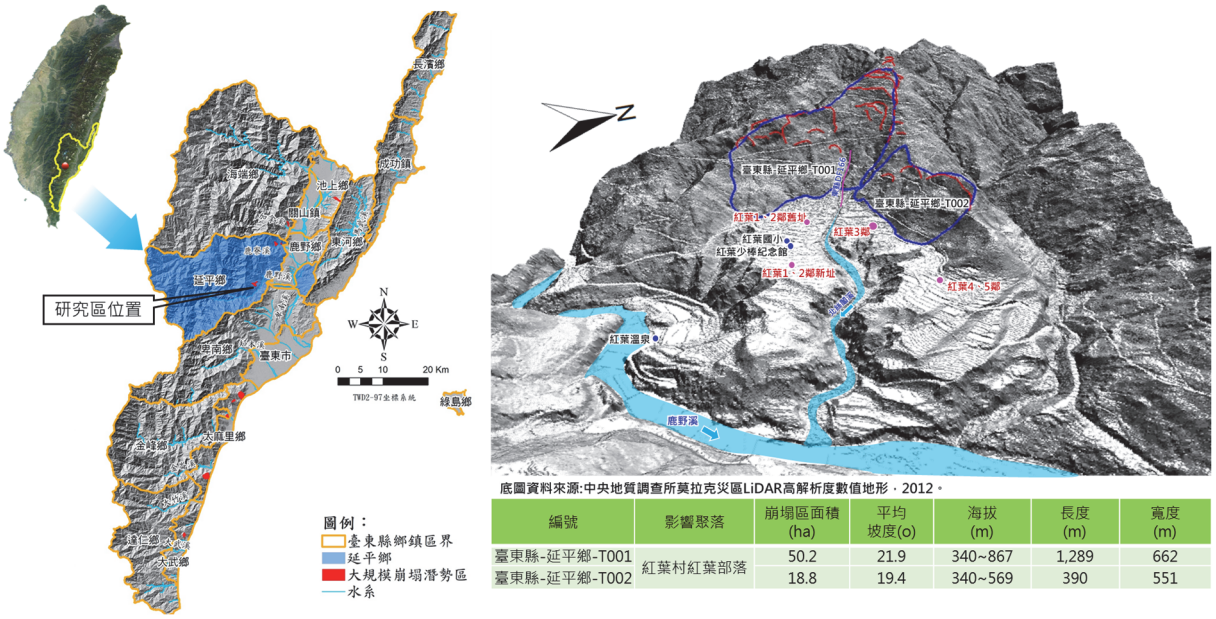
由於紅葉村崩塌區域的疏鬆滑動體仍停留在坡面上，且坡面及鄰近坡地均屬順向坡，事發後的現場調查也觀察到岩屑崩滑、道路下陷等現象，推測該地區仍具有崩塌潛勢。因此本研究除進行詳細地質調查外，並藉由辦理「臺東縣延平鄉紅葉村崩塌地災後治理調查規劃 (SWCB-106-157) (行政院農業委員會水土保持局臺東分局，2017)」、「107 年臺東縣延平鄉紅葉村等地區大規模崩塌調查監測計畫 (SWCB-107-155) (行政院農業委員會水土保持局臺東分局，2018)」、「108 年臺東縣潛在大規模崩塌地區監測維運計畫 (SWCB-108-124) (行政院農業委員會水土保持局臺東分局，2019)」及「109 年臺東大規模崩塌潛勢地區監測維運計畫 (SWCB-109-080) (行政院農業委員會水土保持局臺東分局，2020)」等連續四年的委辦計畫監測成果，進行統整分析，以瞭解崩塌區域的環境特性、滑動塊體分布、推估量體規模，同時藉由災後地質鑽井岩心判釋、崩塌邊坡調查監測等結果，研判當時崩塌災害事件觸發之機制與滑動塊體潛在活動性，輔以數值模式推估對保全對象之影響範圍，再藉由監測成果 (王姵兮等，2020)，探討邊坡變位與降雨、地下水之關聯性，以掌握研究區災害潛勢。

二、研究區概述、調查與研究方法

1. 研究區概述

本研究之研究區包含臺東縣延平鄉 2 處大規模崩塌潛勢區，分別為編號延平鄉-T001 (紅葉 1) 及延平鄉-T002 (紅葉 2) (圖 1)，屬於公告 48 處優先辦理區。大規模崩塌潛勢區位於北絲鬮溪集水區內，區內有編號東縣 DF166 之土石流潛勢溪流，下游堆積扇分布範圍涵蓋原紅葉聚落 1 至 3 鄰 (災後已遷建，臺東縣政府，2016；臺東縣政府，2017) 及東 36 鄉道，坡地水系大抵依地勢向東南分別匯流入鹿野溪，鹿野溪於此溪段之兩岸呈現河階地形。

延平鄉-T001 (紅葉 1) 崩塌潛勢區的中心坐標為 TWD97 (E255784, N2532500)，潛在崩塌面積 50.2 ha，山崩與地滑地質敏感區面積 0.3 ha，平均坡度 21.9°，潛在崩塌區位形狀近似菱形，最高點海拔約 867 m，最低點海拔約 340 m，最大坡面長度約 1,288.8 m，最大寬度約 662.4 m，坡向朝東。延平鄉-T002 (紅葉 2) 崩塌潛勢區的中心坐標 TWD97 (E256220 , N2532962)，潛在崩塌面積 18.8 ha，平均坡度 19.4°，崩塌潛勢區形狀近似長方形，最高點海拔約 569 m，最低點海拔約 340 m，最大坡面長度約 389.7 m，最大寬度約 550.6 m，坡向朝東南。



編號	影響聚落	崩塌區面積 (ha)	平均坡度(o)	海拔 (m)	長度 (m)	寬度 (m)
臺東縣-延平鄉-T001	紅葉村紅葉部落	50.2	21.9	340~867	1,289	662
臺東縣-延平鄉-T002		18.8	19.4	340~569	390	551

圖 1 崩塌潛勢區位置及範圍

Fig.1 Location and scope of the potential landslide area

airiti

2. 地質特性、露頭調查、地球物理探測

為研判崩滑致因，本研究總計調查 38 處岩盤露頭，調查位置除了延平鄉-T001、T002 大規模崩塌潛勢區之外，亦包括鹿野溪及崩塌區周邊露頭。為判釋潛在崩塌深度、範圍及分析致災成因，本研究乃進行崩塌潛勢區的地球物理探測。自 2017 年至 2020 年間共計進行 4 次、6 條地球物理探測地電阻測線佈設，測線佈線位置如圖 2 所示。本研究採二維地電阻影像剖面探測法 (2D Resistivity Image Profiling, 2D RIP)，進行地層分布調查，以瞭解岩盤與崩塌地分布深度及地層剖面。

為掌握潛在滑動體深度及運移變位速率，本研究自 2017 年至 2020 年間針對可能發生滑動之弱面進行地質鑽探調查共計 11 孔，並進行現地透水試驗。鑽探期間取具代表性的岩心樣本進行室內土岩試驗，試驗項目包含：土壤及岩石一般物理試驗、岩石單軸壓縮強度、岩石直接剪力強度及岩石弱面直接剪力強度等。除獲得力學參數及工程地質特性之外，並利用鑽孔進行地中傾斜位移量與地下水位自動監測。

3. 崩塌潛勢區活動性監測

本研究同時進行崩塌潛勢區之降雨量、地下水位、地表變位、地中變位等監測系統佈設 (圖 2)，以獲得邊坡地表及地中變位歷程、降雨及地下水位變化。降雨量監測地點位於紅葉少棒紀念館頂樓，採傾斜式雨量計，雨量筒口徑為 200 mm，量測雨量精度 0.5 mm。地表活動性自動化監測包含：於滑動塊體上佈設 1 處地表雙軸傾斜計、源頭崩崖處佈設 8 處地表裂縫伸縮計。地中活動性監測則利用地質鑽孔進行地中傾斜觀測管手動量測，量測頻率為每月進行一次，凡地震震度超過 5 或遇颱風豪雨事件，則增加一次量測。

地下水位採壓力式水位計以自記式觀測，同時於延平鄉-T001 源頭之 YP-B703 觀測孔配設時域反射儀 (Time Domain Reflectometry, TDR)。TDR 時域反射儀係將電磁波打入預埋在地層下的同軸纜線，當邊坡滑動造成監測纜線剪動時，電磁波會在監測纜線發生變形處產生反射突波 (reflection spike)，藉由反射訊號的位置來判斷滑動深度，用以監測滑動邊坡的長時間變形行為，藉以確定邊坡滑動面的深度位置與規模。

降雨量、地下水位、地表位移變位、地表雙軸向之傾斜量，採每 10 分鐘記錄及自動傳送；孔內 TDR 反射時域的監測資料，則採每 1 小時一次的頻率進行記錄及傳送。

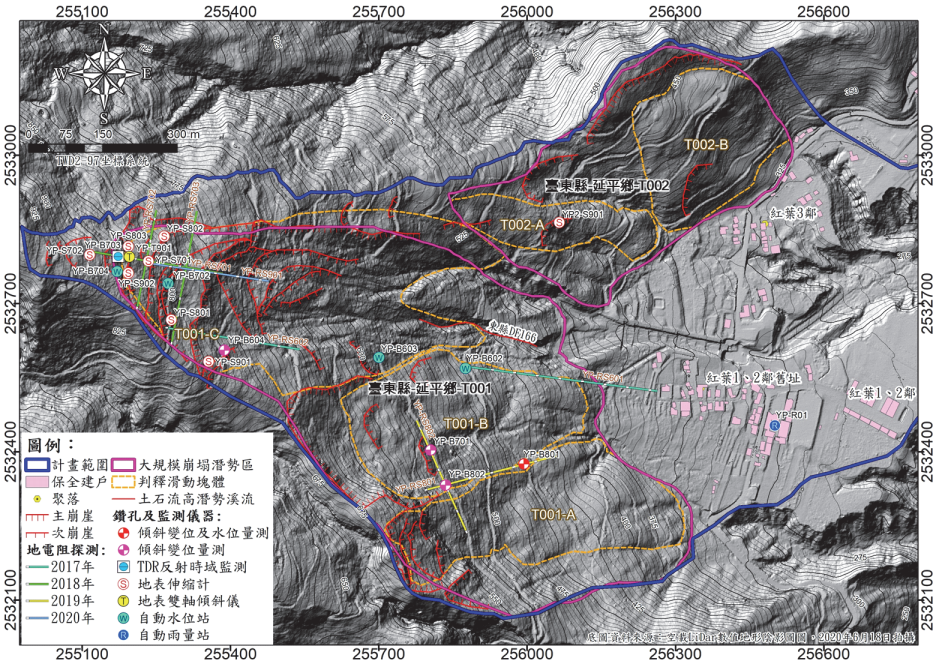


圖 2 地電阻測線、鑽探點與監測系統配置

Fig.2 Locations of RIP sections, boreholes, and monitoring system

三、結果與討論

1. 地質調查結果與土砂產量估算

延平鄉-T001、T002 大規模崩塌潛勢區所在坡面之平均坡度為 28.2°(53.7%)，多為岩屑 (崩積) 層覆蓋。為釐清潛勢區弱面位態與坡面空間分布關係，本研究利用地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 數化不同坡向區塊，進行坡向分析，再依據水土保持技術規範 (2023) 第 31 條，檢核各區塊之層面及劈理面位態量測成果，並繪製次斜坡單元邊坡類型 (順向坡、逆向坡及斜交坡) 分布圖 (圖 3)，分析成果發現，崩塌潛勢區多為順向坡。

由露頭調與大圓分析 (Great Circle Analysis) 結果顯示，代表性層面位態 N24E/34S，劈理面位態 N6E/27S(圖 4A)，邊坡向東傾斜，而層面及劈理位態亦均向東傾，層面走向與邊

airiti

坡向夾角大約 20°，劈理走向與邊坡向夾角大約 6°。代表性節理面 J1 位態為 N51W/83S，節理面 J2 位態為 N38E/88N(圖 4B)，此 2 組節理面為共軛節理；其中，節理面 J1 研判為切割順向坡兩側之節理面，節理面 J2 則可能形成順向坡滑動頂部之裂縫。因此，整體研判崩塌潛勢區之邊坡屬於劈理面及層面之順向坡，滑動機制屬平面型滑動與岩屑層的弧形滑動。

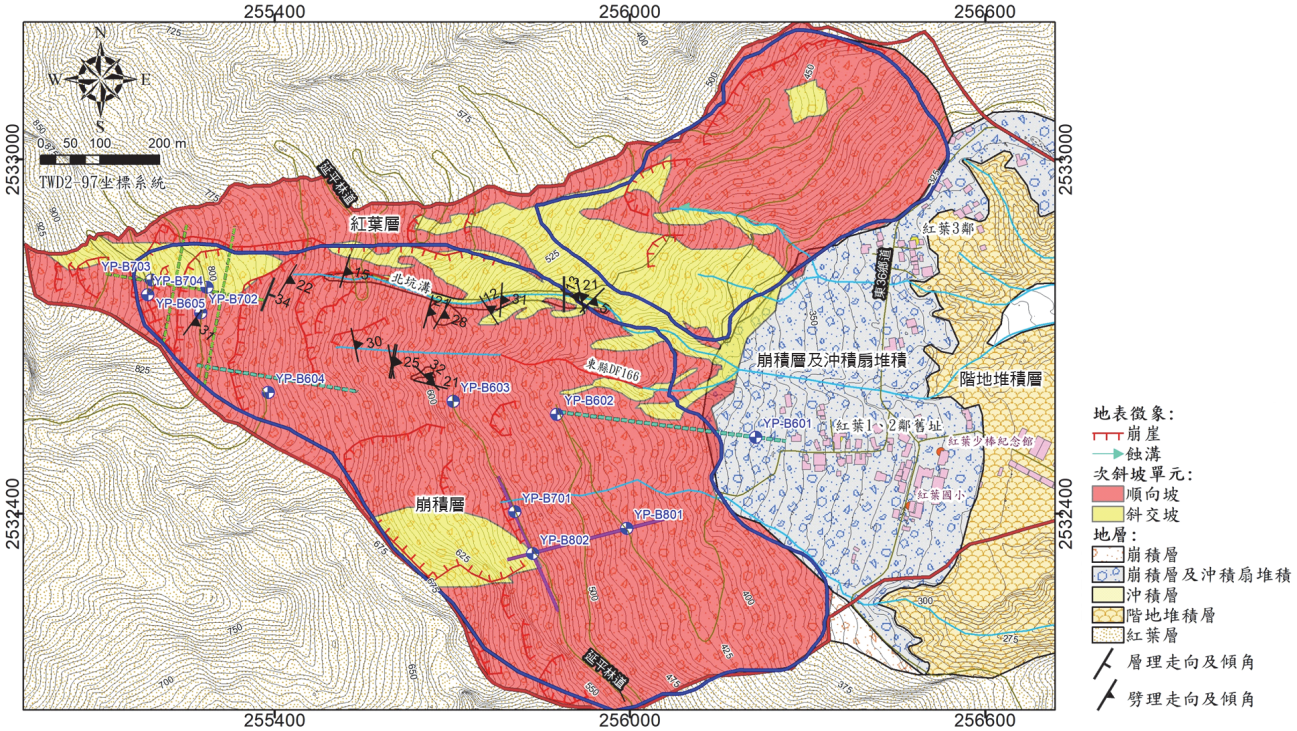
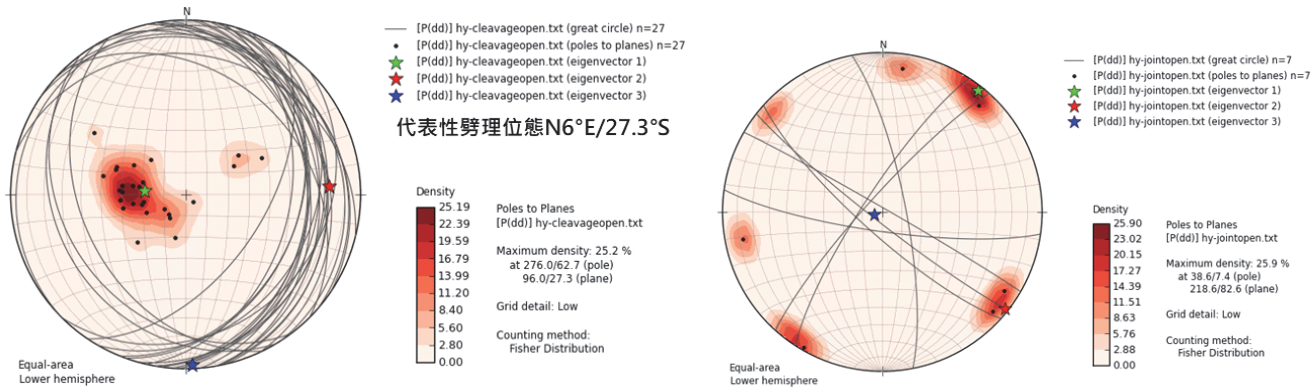


圖 3 基地地質與次斜坡單元分布

Fig.3 Distribution of geology and subslope units



A. 劈理位態大圓分析　　B. 節理位態大圓分析

圖 4 劈理與節理位態大圓分析

Fig.4 Great circle analysis of cleavage and joint attitudes

圖 5 為 YP-B605 觀測孔於 2017 年間所量得之 A、B 向地中傾斜位移量、孔口位移量、合變位量及地質鑽探岩心樣本，經由監測結果得知，滑移面坐落於地表下 20 ~ 22 m。

本研究利用二維地電阻影像剖面探測法，進行地層分布調查，以瞭解岩盤與崩塌分布深度及地層剖面。二維地電阻影像剖面探測成果呈現於 Google Earth 底圖上，如圖 6 所示。二維地電阻地層電阻率分布狀態顯示，調查區域測線所經之地層皆為岩屑層、破碎岩層及板岩，YP-RS602 測線最深達 17 m、YP-RS701 (YP-RS901) 測線最深達 40 m、YP-RS702 測線最深達 30 m、YP-RS703 測線最深達 36 m。YPRS901 測線在岩屑層底部有大範圍含水量較高區域，並且沿著岩層分界分布，推測為潛在滑動面並且含水量大，推測之流動方向為沿岩層分界順坡面向下流動。

本研究於延平鄉-T001 源頭之 YP-B703 觀測孔分別以人

工進行地中傾斜變位觀測與自動化時域反射 (TDR) 監測，以瞭解滑動邊坡的長時間變形行為。自 2018 年 6 月開始至 2020 年 7 月 27 日為止，本研究監測的時域反射之反射係數差值變化曲線如圖 7 所示。由圖中的反射係數訊號研判，(1) 於淺層深度 15 m ~ 16 m 及 (2) 深層 46 m ~ 49 m 處可見較強的反射訊號，顯示地層剪動變位。淺層深度變位訊號增強的時間約發生在 2019 年 10 月雨季後期，深層 46 m ~ 49 m 處變位訊號增強的時間較早，約發生在 2018 年 9 月雨季後期。

根據與 TDR 反射時域系統共孔之傾斜觀測井 YP-B703 地中傾斜變位速率監測結果，自 2018 年 6 月起至 2020 年 7 月止之平均變位量約 4.1 mm/月，管體在管深 2.5 m 處之最大合位移量為 105.8 mm，發生位移現象的深度有二處，分別為：(1) 深度 14 ~ 20 m 之岩屑層與破碎板岩層交界區段，為變位滑動面，(2) 深度 46 ~ 49 m 破碎板岩層區段，與 TDR 反射時域監測剪動深度相當吻合，如圖 8 所示。

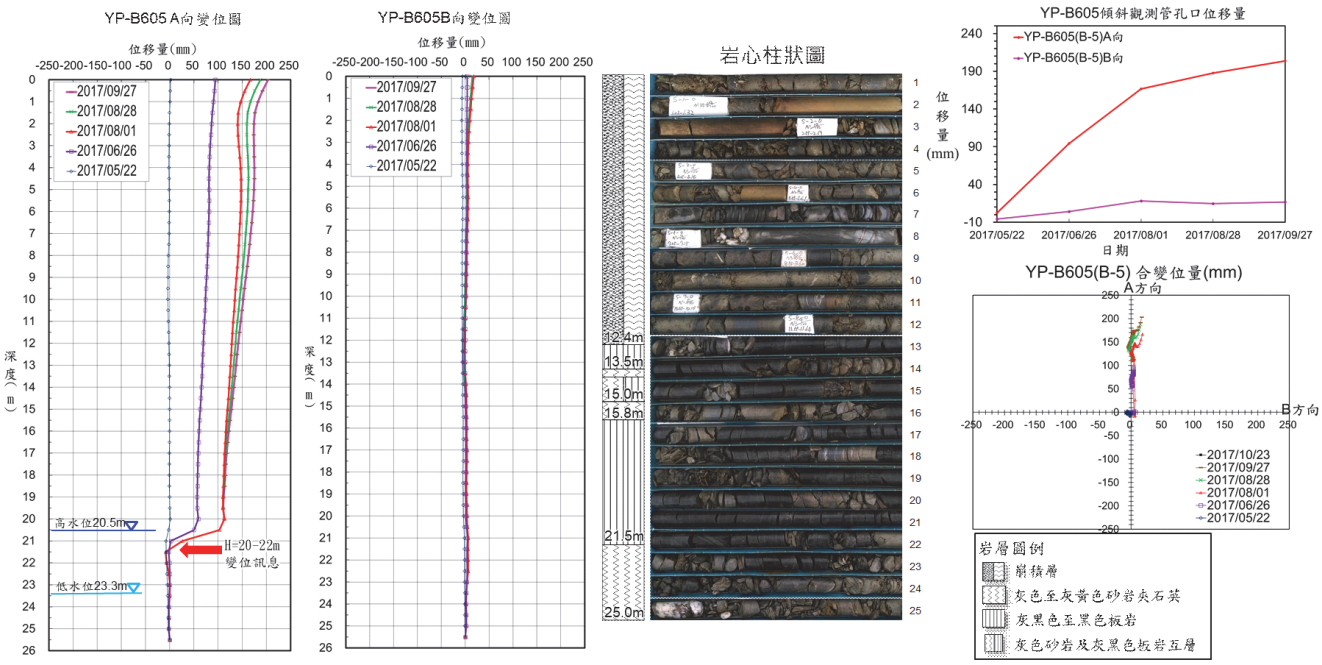


圖 5 觀測孔 YP-B605 之地中傾斜位移量與岩心樣本

Fig.5 Borehole inclination displacements and core samples from YP-B605

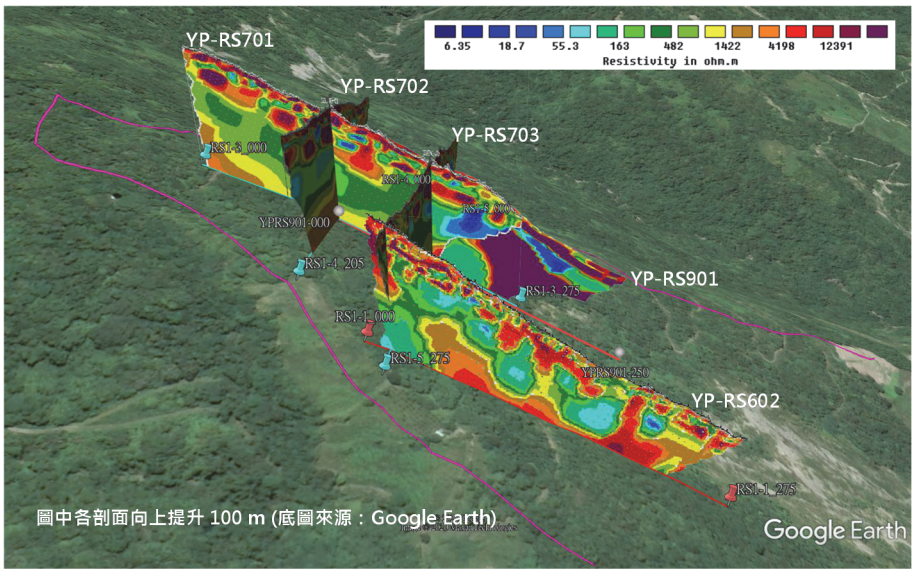


圖 6 地電阻探測結果 3D 視圖

Fig.6 3D view of the RIP test results

airiti

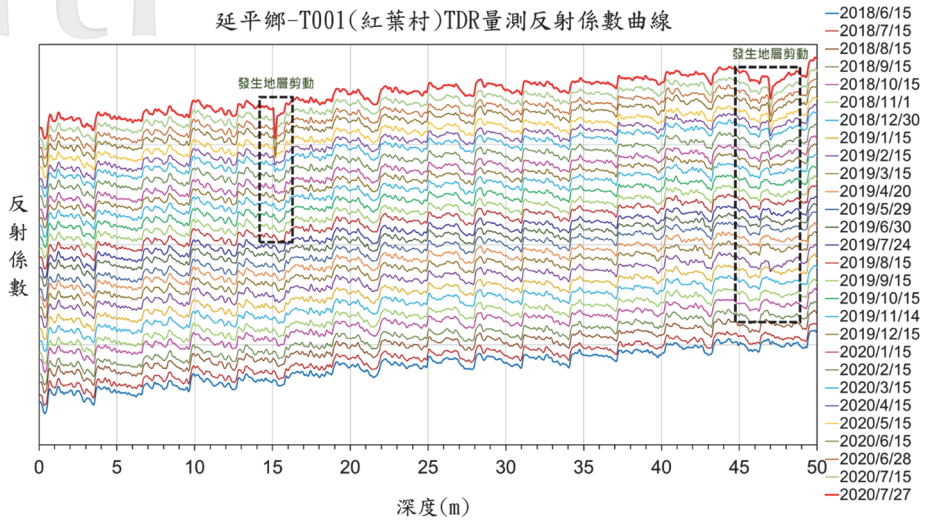


圖 7 延平鄉-T001 YP-B703 之 TDR 監測反射係數曲線 (2018 年至 2020 年)

Fig.7 TDR reflection coefficient curves at YP-B703 in Yanping Township-T001 (2018 to 2020)

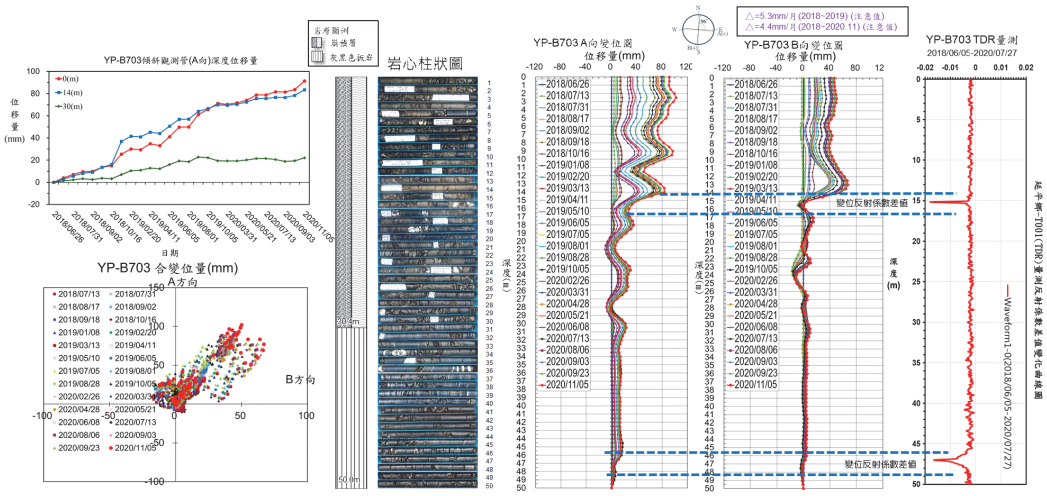


圖 8 延平鄉-T001 YP-B703 地中變位及 TDR 量測成果

Fig.8 In-place borehole displacement and TDR measurements at YP-B703 in Yanping Township-T001

2. 邊坡活動性與崩塌潛勢分析

本研究透過空載光達 (LiDAR) 及無人載具 (UAV) 完成研究區的數值地形建立，並進行紅葉村崩塌地災害前後土砂沖淤變異分析。藉由 2012 年及 2017 年二時期數值地形於 GIS 地理資訊系統套疊計算網格土砂沖淤變異深度，並依網格面積進行土砂沖刷與堆積變化量計算，成果如圖 9 所示，圖中洋紅色範圍圈繪出崩塌地範圍。分析結果顯示，土砂沖淤變異深度約介於 -12.7 m 至 +19.3 m 之間，區塊顏色越偏藍綠表示該區塊沖刷深度越深；區塊顏色越偏紅色則表示該區塊堆積深度越深。

經 2016 年 9 月莫蘭蒂颱風新生的崩塌及同年 10 月艾利颱風及豪雨所產生的沖刷，崩塌面積合計 9.6 ha，整體坡面土砂沖刷量估計約 23.2 萬 m^3、分布網格面積 6.4 ha、沖刷平均深度 3.6 m，坡面不安定土砂堆積量估計約 9.8 萬 m^3、分布網格面積 3.1 ha、堆積平均深度 3.1 m，淨土砂生產量為 13.3 萬 m^3。

本研究依據 2018 年至 2020 年現場調查與監測結果判釋，獲知延平鄉-T001、T002 大規模崩塌潛勢區存在 5 處滑動塊體，分別為：延平鄉-T001 的 (1) T001-A、(2) T001-B、(3) T001-C 潛在滑動塊體、延平鄉-T002 的 (4) T002-A 及 (5) T002-B，如圖 10 所示。

研究區因受 2017 年卡努颱風外圍環流共伴效應連日豪大雨影響；其中 1011 豪雨 48 小時降雨量達 807.0 mm、累積總降雨量達 924.5 mm，為本研究自監測以來所測得之最大降雨事件。強降雨沖刷崩塌地鬆軟邊坡，造成蝕溝深化和溝岸崩塌，引發土石下移，幸好剛完成的土砂防治復建工程適時發揮疏導功效。源自於 2016 年 10 月艾利颱風所造成的 T001-C 滑動塊體，於 2017 年颱風豪雨事件後再次發生滑移，根據 GIS 套疊、配合現場勘查複核顯示，該塊體朝東稍偏南方向滑移約 6.5 m，屬於風化岩屑層的後退式崩塌 (headward retreat slump)。

2019 年 8 月白鹿颱風後之現地調查發現，紅葉源頭出

現崩滑、地表層陷落及大量樹木傾伏的現象。據此，本研究根據 2017 年至 2020 年現場調查，綜合地表徵象及邊坡變位量監測成果，將崩塌活動性分為極高、高、中及低等四級，滑動塊體之崩塌活動性分級成果及徵象，如表 1 所示；其中，T001-C 崩塌活動性歸類為高－極高等級、T001-B 歸類為中活動性等級、T001-A 則歸類為低活動性等級。整體觀之，本研究認為，T001-C 源頭 S1、S2 主崩崖下方崩滑塊體及冠部崩崖區處於地表變位活躍狀態。

根據表 1 的分級結果，本研究繪製紅葉邊坡活動性分級之平面及縱剖面圖，如圖 11 及圖 12 所示。依據現地調查、整體坡面地形地貌及微地形變異分析，崩塌潛勢區源頭可描繪出多條崩崖線型分布。再藉由地球物理探測、地質鑽探判釋剖面及監測所得滑動面深度資訊，經由 GIS 數值地形分層推估，本研究認為，延平鄉-T001 源頭具淺層崩塌土體層 (如圖 11 所示之第 ① 層) 至不安定土 (岩) 層 (如圖 11 所示之第 ④ 層)，潛在不安定土砂量體合計約 91.9 萬 m^3。

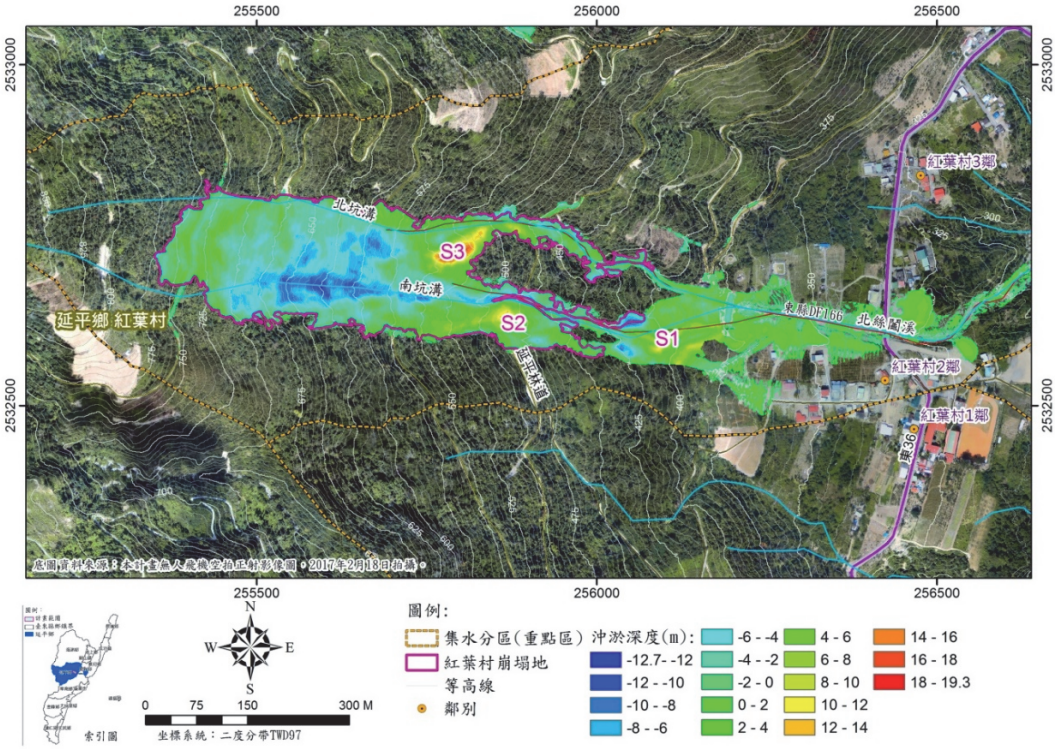


圖 9　紅葉村崩塌地災害前後土砂沖淤比較 (2012 年至 2017 年)

Fig.9　Comparison of sediment deposition and erosion at Hong-Yeh Large-scale landslide (2012 to 2017)

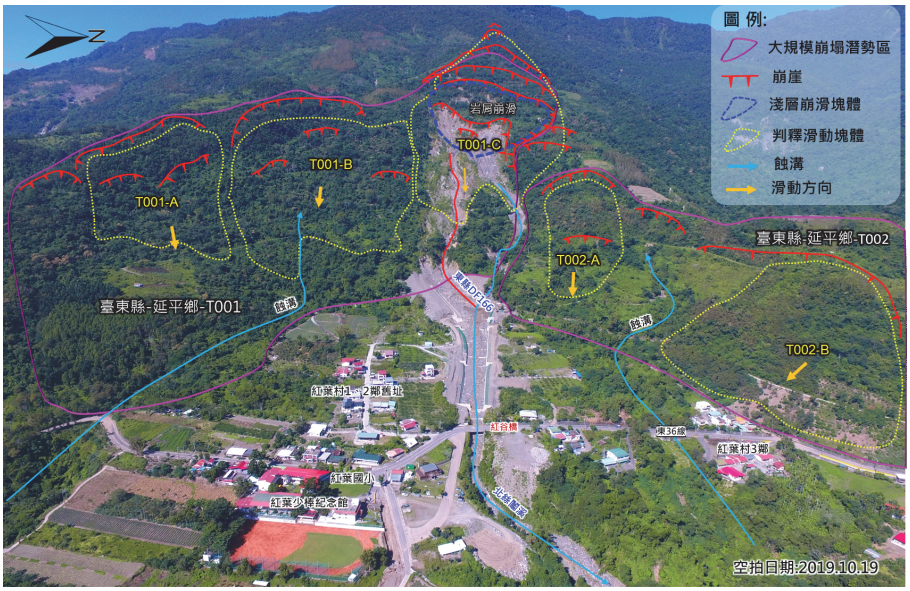


圖 10　延平鄉紅葉村之判釋滑動塊體分布

Fig.10　Distribution of sliding blocks in Hong-Yeh, Yanping Township

airiti

表 1 紅葉研究區邊坡崩塌活動性分級

Table 1 Ranking of landslide activity in Hong-Yeh study site

判釋滑動塊體	崩塌活動性分級	滑動塊體徵象說明
T001-A	低	具地質與地形不利因素→順向坡 具滑動徵兆→崩崖、裂隙
T001-B	中	具滑動徵兆→崩崖、裂隙、蝕溝、坡趾隆起 具地質與地形不利因素→順向坡 地中傾斜深層滑動量達 1 ~ 2 mm / 月，具一定方向變動趨勢
T001-C	高－極高	具地質與地形不利因素→順向坡 具崩塌滑動之地形特徵→崩滑、張力裂縫、沉陷、森林雜亂生長，有明顯崩滑裸露坡面 具確定滑動面極滑動深度 地表位移監測累積位移量大於 2 ~ 5 m，且持續變位 地中傾斜變位深層滑動量達 2 mm / 月(高)；0.5 mm / 日(極高)，具一定方向變動趨勢
T002-A	低	具地質與地形不利因素→順向坡 具滑動徵兆→崩崖、裂隙
T002-B	低	具地質與地形不利因素→順向坡 具滑動徵兆→崩崖

資料來源：日本地滑對策技術協會 (1978) 邊坡活動性分級建議表、108 年臺東縣潛在大規模崩塌地區 (延平鄉-T001 及 T002、太麻里鄉-D003 及 D029、大武鄉-D021 及 D022、池上鄉-T001) 監測維運計畫成果報告書 (2019) 及本研究分析彙整，2021。

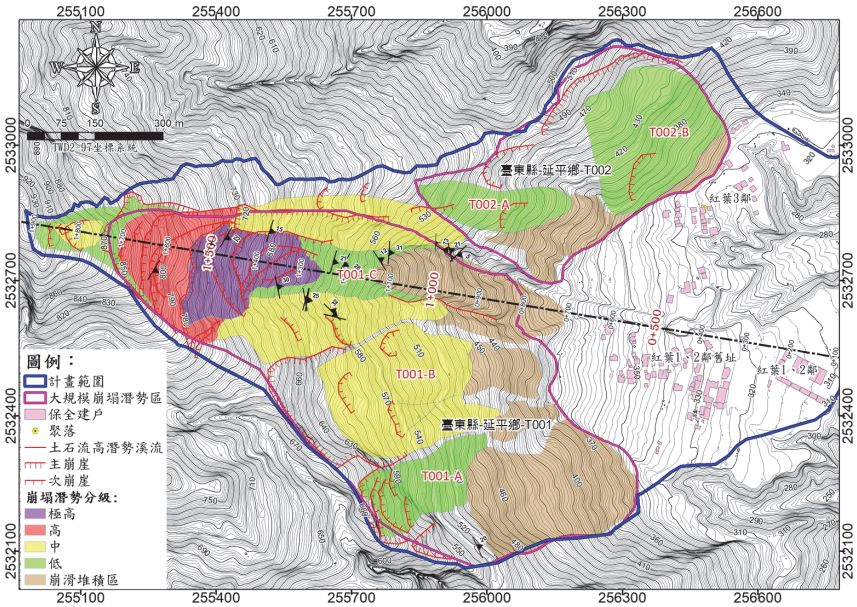


圖 11 延平鄉-T001、T002 邊坡崩塌活動性分級平面圖 (圖中長虛線為 A-A’ 剖面所在位置)

Fig.11 Plan view of landslide activity ranking at Yanping-T001 and T002 (Long dash line denotes the location of A-A’ cross section)

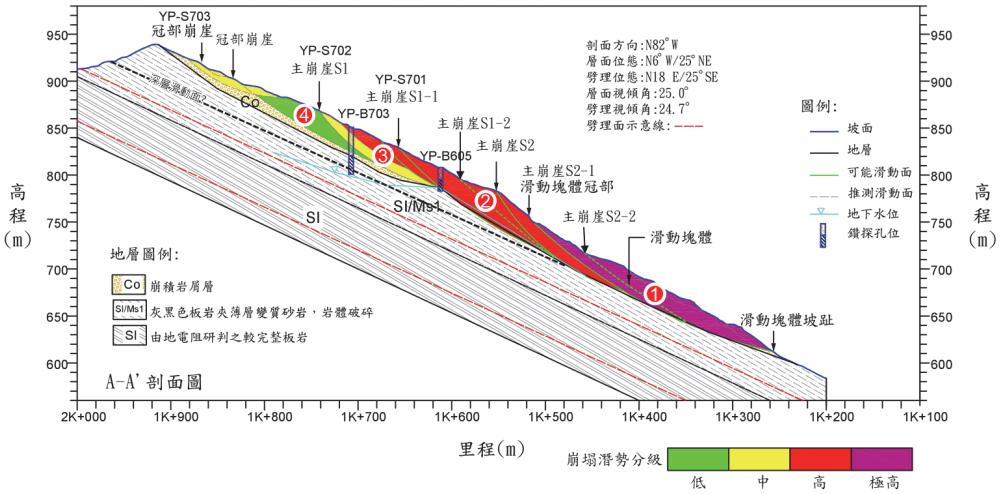


圖 12 延平鄉-T001 A-A’ 剖面之崩塌塊體與地層岩性分布

Fig.12 Sliding blocks and lithology distributions along A-A’ cross section at Yanping-T001

airiti

3. 延平鄉-T001 不安定塊體之崩塌運移影響因子分析

現場監測成果顯示，測區各水位觀測井之平時地下水位接近觀測井底，甚至呈現無水狀態，岩心鑽探結果顯示，崩塌區所在地之岩屑層呈現高度破碎狀態，降雨期間地表水容易下滲，促使降雨期間水位迅速抬升，降雨後地下水位則快速洩降，表 2 為研究區內 6 個地下水位觀測井自 2017 年至 2020 年於颱風豪大雨事件的地下水位紀錄摘要。

為檢核延平鄉-T001 崩塌潛勢區之源頭崩塌活動性，本研究乃對測區內另外兩處觀測孔 YP-605 及 YP-703 之地中傾斜合位移及孔口合位移與降雨歷程繪圖，如圖 13 所示。位於滑動塊體 T001-C 源頭 S1-1 次崩崖的 YP-B605 觀測孔曾經受 2017 年 0603 豪雨、尼莎及海棠颱風侵襲影響，導致地中傾斜變位及孔內水位均達警戒值，於 2017 年 1011 豪雨後斷孔無法繼續監測。本研究發現，2017 年梅雨期間，YP-B605 及位於主崩崖 S1 滑動塊體內之 YP-B703 的孔口合位移量呈現加速情形，直到 10 月後雨季結束方漸趨緩，YP-B703 的孔口合位移量斜率較該孔內所量得深度 -15 m 處的合位移量變化斜率為陡。除此之外，YP-B605 之孔內地下水位變動與該孔所在邊坡之位移及降雨具高相關性。研究區域於 2019 年 1 月與同年 4 月曾經歷兩次地震，震度 4 對 YP-B703 觀測孔之地中變位量並未見到明顯影響。

圖 14 乃是將研究區內兩處地表伸縮計 (YP-S701、YP-S702) 的觀測結果與 YP-B703 孔口合位移量進行比較，圖中紅色折線代表地表伸縮計所測得之累積位移量、綠色折線則代表 YP-B703 的孔口合位移量。本研究自 2018 年 10 月底開始接手地中傾斜變位量的量測工作，並汰舊換新設備，使得圖中的累積位移量無法接續。YP-S701 地表伸縮計設置於 S1-1 崩崖之滑動塊體表面，設置點坐落於 YP-B703 觀測井所在區位的下邊坡；YP-S702 地表伸縮計則設置在主崩崖 S1 之滑動塊體上，設置點坐落於 YP-B703 觀測井所在區位的上邊坡。由圖中可以看出，YP-S701 地表伸縮計所測得之地表變位量較 YP-B703 所測得的孔口合位移量變化量劇烈，兩儀器設置位置之間存在小崩落崖，而 YP-S702 地表伸縮計所測得的地表位移量與其下方 YP-B703 所測得之孔口合位移量較為近似。

表 2 延平鄉-T001 監測區颱風豪大雨事件之地下水位觀測紀錄摘要

Table 2 Observation summary of groundwater levels during rainfall events at Yanping Township - T001

年	颱風 豪大雨事件	事件期間	最大降雨 (mm)				地下水位抬升高度 (m)					
			1 h	24 h	48 h	累積雨量	Sta. YP -B601	Sta. YP -B602	Sta. YP -B603	Sta. YP -B702	Sta. YP -B704	Sta. YP -B801
2017	0603豪雨	0602-0604	30.0	134.5	148.0	149.5	0.3	16.5	2.5	-	-	-
2017	0704豪雨	0703-0704	71.2	105.4	126.6	126.6	0.1	1.6	3.3	-	-	-
2017	尼莎及海棠颱風	0729-0731	25.8	226.8	245.4	247.2	0.2	3.9	3.6	-	-	-
2017	1011豪雨	1012-1016	51.8	495.8	807.0	924.6	0.9	20.0	8.6	-	-	-
2018	0614豪雨	0614-0617	15.2	141.2	149.6	171.4	0.1	0.5	5.0	0.0	0.2	-
2018	0714豪雨	0712-0720	23.8	75.4	80.4	308.2	0.2	9.0	3.2	0.2	3.2	-
2018	0823豪雨	0823-0830	19.8	147.8	201.4	395.8	0.7	1.5	4.5	0.2	0.1	-
2018	0910豪雨	0910-0917	54.8	242.8	332.8	451.0	0.8	1.2	3.4	0.3	4.1	-
2019	8月白鹿颱風	0823-0825	76.5	513.0	568.5	568.5	0.6	1.2	5.4	△	1.3	22.3
2020	0521大雨	0521-0524	10.5	77.5	98.5	110.5	△	0.0	3.9	△	0.0	0.1
2020	0727大雨	0727-0802	51.0	110.5	117.0	171.0	△	0.0	3.0	△	0.0	0.1

資料來源：本研究彙整成果，2021。*:YP-B702、YP-B704 白鹿颱風紀錄不完整、△儀器卡管停止觀測。

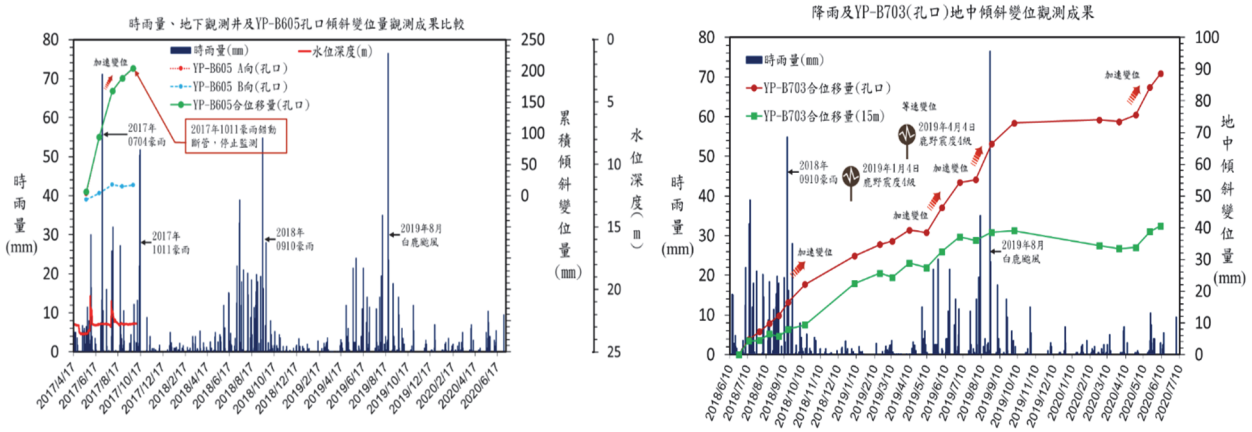


圖 13 延平鄉-T001 崩塌地觀測孔之孔口及地中合位移量與降雨歷程紀錄

Fig.13 Records of rainfall and displacements at ground surface and boreholes at Yanping Township-T001

airiti

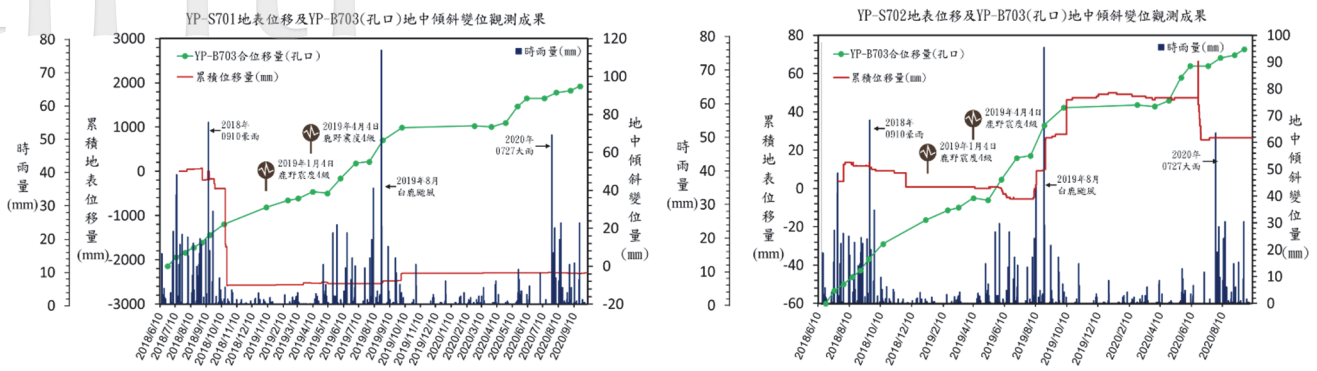


圖 14　延平鄉-T001 地表位移、地中變位與時雨量比較圖

Fig.14　Comparison of surface displacement and borehole displacement at Yanping Township-T001

彙整現場監測區颱風豪大雨事件期間的地下水位、地中傾斜變位、地表伸縮計及地表雙軸傾斜監測結果，本研究認為，延平鄉-T001 (紅葉 1) 源頭具極活潑特性，當累積雨量達 150 mm 以上時，容易觸發邊坡不穩定；當累積雨量達 300 mm，即達警戒狀態。本研究推測，局部暫棲水層與地下水於岩土交界面的流動為影響邊坡穩定的主因之一。

為了進一步瞭解延平鄉-T001 極活潑塊體發生位移的可能觸發因子，本研究利用 2018 年及 2019 年孔內傾斜量測結果，輔以兩年現地觀察之所見，提出以下的觀念模式：

$$U = f(ATP，I_{max}，GL_{max}，GwRR，GwDR，resistant\ forces)$$

式中，U 代表孔口雙軸向合位移之變位速率，等號右邊則為影響日平均合位移量的觸發因子，包含：發生位移量之前期累積雨量 (ATP; mm)、最大時雨量 (I_{max}; mm/h)、最高地下水位 (GL_{max}; m)、地下水位上升速率 (GwRR; m/day)、地下水位下降速率 (GwDR; m/day)，以及阻滑力 (resistant forces)。

坡面滑移的預測或預警模式，可分為黑盒子模式 (black-box model)、白盒子模式 (white-box model)、灰盒子模式 (gray-box model)。黑盒子模式是因為完全或無法用現有對該物理現象發生原因的理解給予可信的掌握情況下，改採統計方式所產生的推估模式。白盒子模式則恰好相反，乃是將所理解的力學或影響物理現象的機制，以數學的方式進行詮釋，再求取解析解或是近似解。至於灰盒子模式，則介於上述兩者之間。

觀念模式中的阻滑力包含：「滑動塊體中的裂隙或破碎網絡 (fracture network)」及「地質特性」所具備阻止塊體下滑的阻力，主要來自於裂隙與裂隙之間的摩擦阻力及岩體本身的降伏應力 (yield stress) 或極限應力 (ultimate stress)。雖然從監測樣區地質鑽探岩心取樣分析結果可以掌握錯動或破碎層所在的位置，但當岩心樣本離開所處的環境之後，是否可以確實反映其所在環境的外力逆境則屬未知，尤其是包含了破碎層的岩心樣本，因此，本研究將觀念模式中的阻滑力 (resistant forces) 視為「黑盒子」。

本研究認為，上揭的觀念模式具因地制宜特性，無法以相同模式的產出結果套用到每一個監測地區，但觀念不變。以下分別對於觀念模式中各相關觸發因子進行說明：

U：孔口雙軸向合位移之變位速率，以下稱為孔口雙軸向日平均合位移量 (mm/day)，乃是將兩次合位移量的差除以兩次量測期間的間隔天數。本研究曾嘗試利用孔內傾斜儀人工量測的孔內位移量進行分析，但經孔內傾斜儀量測資料研析，近孔口處的位移量較孔內位移量明顯，最後決定選用孔內傾斜儀所測得之孔口 A+ 向與 B+ 向的合位移量取代。

ATPj：為連續兩次現場孔內傾斜量測發現孔口合位移量發生明顯變化的前 j 日累積雨量。例如：ATP_1 代表發生明顯位移量之前一日 (24 小時) 實測累積降雨量、ATP_2 則代表發生明顯位移量之前二日 (48 小時) 的實測累積降雨量。依此類推，前 j 日的時間起算點採現場完成孔內傾斜量測時的整點時間往回推算 j 日。例如，某一監測孔完成孔內傾斜量測的日期為 08/27 11:05，則前一日的雨量累積則自 08/27 11:00 開始往前累積降雨量至 08/26 11:00 為止。

I_{max}：最大小時降雨強度，為兩次孔內位移量量測期間內所發生的最大小時降雨強度，最大小時降雨強度的計算示意圖，如圖 15 所示。

GL_{max}：為連續兩次孔內位移量量測期間內所發生自孔底起算的最高地下水位，本研究將連續兩次觀測期間孔內最高水位納入觀念模式的理由，是為了瞭解孔內最高水位對於位移量的影響。本研究認為，如果孔內破碎層長時間浸泡在地下水層中，破碎層結構之間的靜摩擦力會因此受到影響，地下水形同潤滑劑，降低了滑動塊體的阻滑力，有可能會讓監測孔出現較為明顯的位移。孔內最高地下水位的選取，如圖 16 所示。

GwRR–地下水位上升速率，以 m/day 表示。本研究認為，若只考慮連續兩次觀測期間之孔內最高水位，仍不足夠。如果連續兩次觀測期間孔內水位發生快速上升，有可能快速觸發滑動層間摩擦阻力的降低、改變滑動層所承受的上浮力、甚至改變滑動介面的破裂結構方向性 (fracture structure orientation)，進而改變靜摩擦係數，GwDR–地下水位下降速率，以 m/day 表示，亦然。孔內地下水位上升速率 (GwRR) 與地下水位下降速率 (GwDR) 的選取，如圖 16 所示。

本研究對於不穩定塊體發生位移之臨前降雨的累積計

算並未考慮臨前各日降雨量的加權，亦即假設臨前 j 日的累積雨量與臨前 (j+1) 日具有觸發滑動塊體產生位移相同的權重，此種做法有別於目前國內以指數遞減加權方式用於土石流預警的做法，主要是因為雨水入滲至可能崩滑界面後對於界面以上的崩滑塊體之驅動效果持續累積。

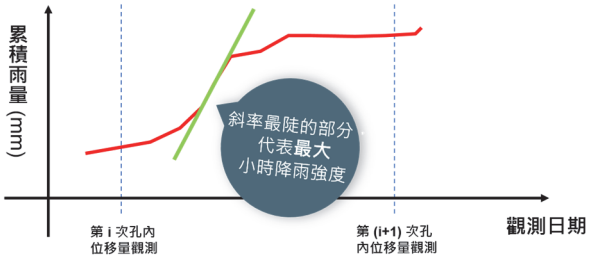


圖 15　最大小時降雨強度計算示意圖

Fig.15　Schematic diagram of the calculation of maximum hourly rainfall intensity

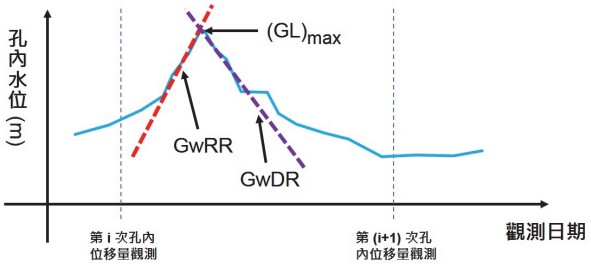


圖 16　孔內最高水位、地下水位上升及下降速率示意圖

Fig.16　Schematic diagram of the highest water level, the rising and falling rates of the groundwater level in the borehole

本研究採用延平鄉-T001 2018 至 2019 年的降雨紀錄，搭配源頭 YP-B605、YP-B703 觀測井之孔內位移量量測結果，以孔口合位移日變化量 (以下簡稱合位移速率；DR) 於塊體發生滑移之臨前 1、7、14、28、36 及 72 日累積雨量 (以下簡稱臨前累積雨量) 進行迴歸分析。迴歸分析的過程中，選取判定係數 (coefficient of determination, R^2) 最高的迴歸形式，分析結果多以線性關係的判定係數最高，成果如圖 17 及圖 18 所示。

延平鄉 T-001 源頭 YP-B703 監測所得之合位移速率與臨前累積雨量 ATP_j 具有線性相關 (圖 17)，但相關性並不高；其中，前一日累積雨量 (ATP_1) 與孔口合位移速率之間的相關性最差，僅能夠解釋 1.67% 的資料變異。隨著臨前累積雨量的增加，直到使用前 36 日的臨前累積雨量 (ATP_{36}) 時，R^2 提升到 0.2653，表示有 26.53% 的資料變異可以獲得解釋。當臨前累積日數來到 72 日時，R^2 又開始下降。以本研究連續兩年現場的量測操作而言，各監測孔之孔內傾斜量測間隔天數儘可能安排在 30 天到 45 天之間，因此，臨前 72 日累積雨量 (ATP_{72}) 基本上一定會跨到前二次及前三次孔內傾斜量的量測區間，此時不排除於前二次與前三次孔內傾斜量量測期間發生滑動塊體位移的可能。因此，若以跨前二次與前三次量測之孔口合位移速率來對臨前 72 日累積雨量進行分析時，可能是造成臨前 72 日累積雨量與合位移速率線性迴歸判定係數下降的原因之一。由圖 17 的線性迴歸分析結果，本研究認為，最好能夠注意滑動塊體發生位移前的 36 日累積雨量 (ATP_{36})。

位於滑動塊體 T001-C 源頭 S1-1 次崩崖下方崩滑塊體的 YP-B605 (B-5) 地中傾斜管，因 2017 年 1011 豪雨，造成觀測井錯動損壞而被迫停止觀測。該井於 2017 年 5~9 月間之觀測變位速率約 39.2 mm/月，傾斜管管體在管深 21 m ~ 21.5 m 處顯示為潛在滑動面，活動性屬於活潑趨勢。由於觀測井錯動損壞，無法繼續量測，因此只能採用觀測井 2017 年 1011 豪雨錯動損壞前的資料進行迴歸分析，迴歸分析成果如圖 18 所示。與圖 17 YP-B703 的分析結果相似，臨前累積雨量與孔口合位移速率之間的相關性隨著臨前累積雨量的增加而漸佳。圖 18 中臨前一日 (ATP_1) 因為只有一次孔內傾斜量的量測，量測時出現些微降雨，其他量測場次之前一日均無降雨，雖然 R^2 高達 0.7283，但不足採信。

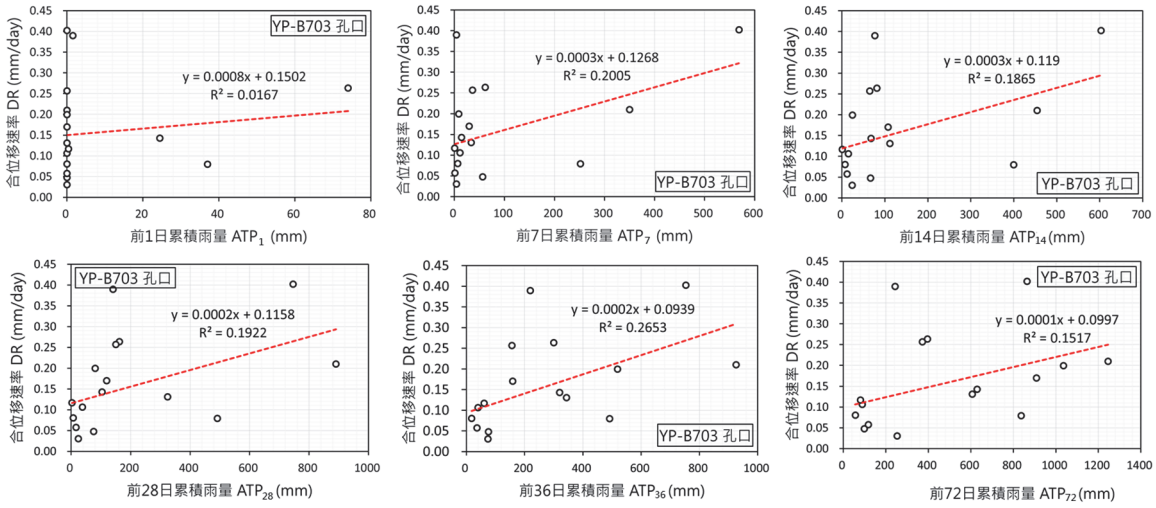


圖 17　延平鄉-T001 發生滑移之臨前累積雨量與 YP-B703 合位移速率之相關性

Fig.17　Correlations between antecedent total rainfall and surface resultant displacement velocity at Borehole YP-B703 in Yanping Township-T001

airiti

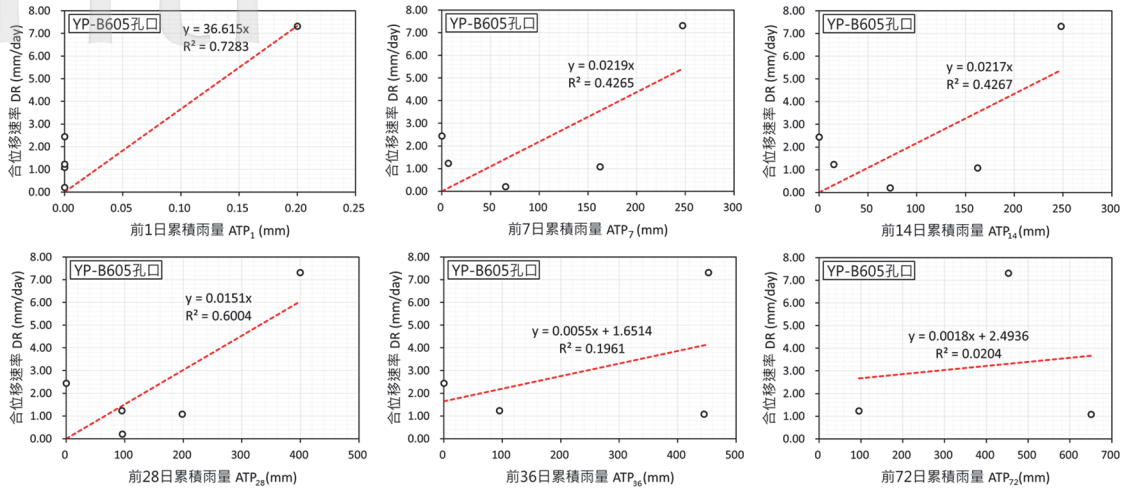


圖 18　延平鄉-T001 發生滑移之臨前累積雨量與 YP-B605 合位移速率之相關性

Fig.18　Correlations between antecedent total rainfall and surface resultant displacement velocity at Borehole YP-B605 in Yanping Township-T001

依據兩年來現場監測的結果，本研究認為，臨前累積雨量 ATP_j 如同目前國內對於土石流警戒的觀念類似；亦即，當降雨發生時，開始對當地雨量進行累積計算，當累積雨量達到一臨界值時，當地不穩定塊體有可能會發生滑移。只不過，本研究是利用現場合位移量的監測結果，將時間軸倒轉去看發生位移前的累積雨量需要多少，為了方便討論，乃使用「臨前 j 日」累積雨量的名詞，但重點仍在於累積雨量。因此，若採用臨前 28 日累積雨量 (ATP_{28}) 的迴歸成果，當累積雨量到達 400 mm 時，YP-B605 的日孔口合位移速率預計將達到 6.04 mm/day。據此，參考日本地滑對策技術協會 (1978) 所提出的「位移速率與邊坡穩定性判斷建議表」，當日變位量達到 0.1 mm/day 以上或月變位量達到 2.0 mm/day 以上時，則可歸屬於該協會判定的「準確定變動」等級；當日變位量達到 1.0 mm/day 以上或月變位量達到 10.0 mm/day 以上時，則可歸屬於該協會判定的「確定變動」等級。

接著本研究採用延平鄉-T001(紅葉 1) 2018 ~ 2019 年的降雨紀錄，搭配位於源頭 YP-B605、YP-B703 兩口觀測井位移量之量測結果，進行相鄰兩次量測期間所發生之最大小時降雨強度與合位移速率的迴歸分析，成果如圖 19 所示。

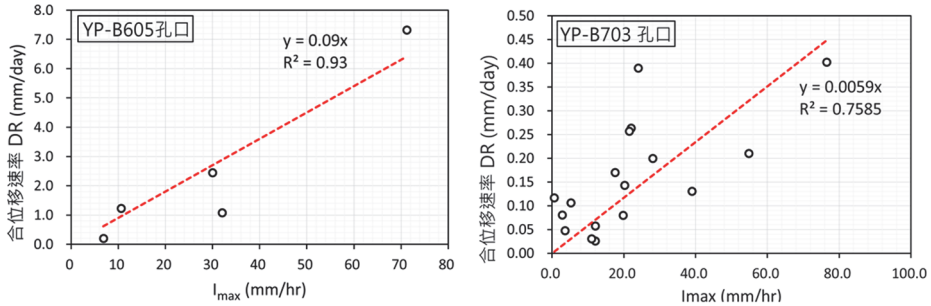


圖 19　延平鄉-T001 YP-B605 及 YP-B703 最大小時降雨強度與合位移速率之相關性

Fig.19　Correlations between maximum hourly rainfall intensity and surface resultant displacement velocity at Boreholes YP-B605 and YP-B703 in Yanping Township-T001

由圖 19 發現，位於源頭的 YP-B703 觀測井合位移速率與最大小時降雨強度間之判定係數達 0.76，YP-B605 之判定係數達 0.93，但資料點數最少。由圖中資料點的離散程度，似乎說明，既使造成滑動的驅動力可以相對較容易掌握，但滑動塊體之阻滑參數的抗滑影響仍具不確定性。

若單看 YP-B703 臨前 36 日累積雨量 (ATP_{36}) (圖 17) 與最大小時降雨強度 (I_{max}) (圖 19) 的迴歸分析結果，兩者與該觀測井合位移速率之間的判定係數分別為 0.2653 及 0.7585，表示就 YP-B703 孔口的合位移速率而言，最大小時降雨強度較臨前 36 日累積雨量稍優。倘若接受 YP-B605 觀測井數據極為有限的事實，該觀測井臨前 28 日累積雨量 (ATP_{28}) (圖 18) 與最大小時降雨強度 (I_{max}) (圖 19) 迴歸分析結果，兩者與該觀測井合位移速率之間的判定係數分別為 0.6004 及 0.93。然而，從有限的資料點萃取相鄰兩次孔內位移量觀測期間內所發生的最大小時降雨強度，其可信度難以掌握，因此，就延平鄉-T001 源頭崩塌塊體的位移預警而言，本研究建議仍採用臨前 28 日累積雨量 (ATP_{28})。

由於地下水為驅動塊體移動的驅動力之一，因此本研究採用延平鄉-T001 2018 至 2019 年觀測井內的地下水位紀錄，搭配位於源頭 YP-B605 觀測井之地中變位量測資料，進行相鄰兩次觀測期間所發生之最高水位 (GL_{max})、地下水位上升速率 (GwRR) 與地下水位下降速率 (GwDR) 的迴歸分析，成果如圖 20 所示。

airiti

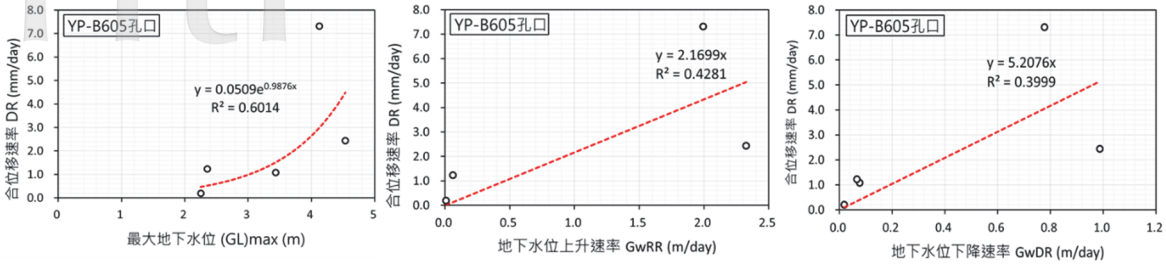


圖 20 延平鄉-T001 YP-B605 地下水位、水位上升及下降速率與合位移速率之相關性

Fig.20 Correlations between groundwater level, rise as well as drop rates and surface resultant displacement velocity at Borehole YP-B605 in Yanping Township-T001

如前所述，YP-B605 地中傾斜管因 2017 年 1011 豪雨，造成觀測井錯動損壞而被迫停止觀測，導致觀測資料有限，但就觀測井錯動損壞前的水位資料而言，YP-B605 的最大地下水位 (GL_{max}) 能夠呈現該觀測井合位移速率的趨勢。同樣的，倘若接受 YP-B605 觀測井數據極為有限的事實，由圖 20 分析的結果推估，當位於源頭的 YP-B605 觀測井內之日地下水位下降速率 (GwDR) 達到 2.0 m/day 時，該觀測井的孔口合位移速率估計將可達 10.42 mm/day。若以日地下水位上升速率 (GwRR) 估算，當地下水位上升速率達到 2.0 m/day 時，該觀測井的孔口合位移速率估計將可達 4.34 mm/day。該推估結果顯示，延平鄉-T001 源頭崩塌塊體的位移受到日地下水位下降速率的影響高於日地下水位上升速率。

由於影響滑動塊體位移的因子並不單純，極有可能各因子都會分別對觀測井的孔口合位移量提供貢獻，因此，本研究對觀念模式中各影響參數分別與觀測井 YP-B605、YP-B703 之日孔口合位移速率進行多元迴歸分析 (multiple regression analysis)。分析結果顯示，觀念模式中各影響參數之 P-值亦均大於 0.05，表示觀測井 YP-B703 之孔口合位移速率無法在 95% 信賴區間內被所有影響參數所詮釋。若逐一刪除 P-值大於 0.05 的參數，最後僅剩下臨前累積雨量 (ATP_j) 最具相關性，也最能夠呈現滑動塊體 T001-C 源頭之變位。因此，若採用臨前 28 日之累積雨量與日平均合位移速率之迴歸結果估算，當累積雨量達 400 mm 時，YP-B605 的日合位移速率預計將達 6.04 mm/day，屬於「確定變動」等級。若採用臨前 36 日的累積雨量，當累積雨量到達 400 mm 時，YP-B703 日的日平均合位移速率預計可達 0.174 mm/day，換算成月合位移速率則可達 5.30 mm/月，屬於「準確定變動」等級。對照表 2 之強降雨事件紀錄，2017 年 1011 豪雨受卡努颱風外圍環流共伴效應影響，48 小時降雨 807.0 mm，累積雨量達 924.6 mm，2018 年 0910 豪雨累積雨量達 451.0 mm 及 2019 年 8 月白鹿颱風 24 小時降雨 513.0 mm，48 小時累積降雨達 568.5 mm，均顯見測區地表及地中變位速率陡升。

四、結　　論

本研究經現地細部調查、鑽探及室內試驗分析結果，確立紅葉村崩塌地崩滑機制與邊坡滑動塊體潛在活動性，並得知延平鄉-T001、T002 大規模崩塌潛勢區存在 5 處滑動塊體，分別為：延平鄉-T001 的 (1) T001-A、(2) T001-B、(3) T001-C 潛在滑動塊體、延平鄉-T002 的 (4) T002-A 及 (5) T002-B；其中，T001-A 歸類為低活動性等級，T001-B 歸類為中活動性等級，T001-C 崩塌活動性歸類為高－極高等級，該塊體朝東稍偏南方向滑移，屬於風化岩屑層的後退式崩塌，T001-C 源頭 S1、S2 主崩崖下方崩滑塊體及冠部崩崖區處於地表變位活躍狀態。由長期監測成果可知，紅葉村崩塌地具有持續滑移跡象，監測資料顯示，紅葉村崩塌地源頭受降雨誘發滑動之潛勢相當高。

本研究提出一觀念模式，嘗試用於估算潛在滑動塊體之位移速率與邊坡穩定性判斷，觀念模式中考慮降雨特性、地下水位、地下水位之上升與下降速率等影響參數與監測孔之孔口合位移量的關聯性，獲得監測塊體發生滑移前的臨前 28 日累積雨量與臨前 36 日累積雨量的相關性較佳。當累積雨量達到 400 mm 時，延平鄉-T001(紅葉 1) 滑動塊體 C 之 S1-1 次崩崖塊體可達「確定變動」等級；當累積雨量達到 400 mm 時，主崩崖 S1 滑動塊體屬於「準確定變動」等級。由於影響坡面潛在滑動塊體位移的因子複雜，以現有有限的資料點應用於本研究所提出的觀念模式時尚有不足，仍需透過更長時間監測所得加以驗證，以輔助現地警戒管理值之擬訂。

誌　　謝

本研究承蒙農業部農村發展及水土保持署臺東分署「臺東縣延平鄉紅葉村崩塌地災後治理調查規劃 (SWCB-106-157)」、「107 年臺東縣延平鄉紅葉村等地區大規模崩塌調查監測計畫 (SWCB-107-155)」、「108 年臺東縣潛在大規模崩塌地區監測維運計畫 (SWCB-108-124)」及「109 年臺東大規模崩塌潛勢地區監測維運計畫 (SWCB-109-080)」之委辦補助，謹致謝忱。研究期間感謝王建涵、李承翰、倪湘志協助現場調查，王阿貴協助室內資料整理，特予致謝。

參考文獻

[1] 王姵兮、吳嘉俊、武德玲、柯燦堂 (2020)，「臺東縣延平鄉紅葉村大規模崩塌區規劃治理及坡地變遷監測研究」。(Wang, P.H., Wu, C.C., Wu, D.L., and Ko, T.T. (2020) "Planning and treatment on Hong-Yeh large-scale landslide and onsite monitoring to slope revolutions." *Proceedings of*

airiti

the conference on large-scale collapse prevention and mitigation results, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Taipei, Taiwan, 3-67~3-86. (in Chinese))

[2] 農業部農村發展及水土保持署 (2023)，「水土保持技術規範」。(Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA (2023). *"Technical Regulations for Soil and Water Conservation."* (in Chinese))

[3] 行政院農業委員會水土保持局臺東分局 (2017)，「臺東縣延平鄉紅葉村崩塌地災後治理調查規劃」。(Taichung Branch Soil and Water Conservation Bureau (2017). *"Landslide Disaster Aftermath Survey and Master Planning for Hung-Yeh Village, Yanping Township, Taitung County."* (in Chinese))

[4] 行政院農業委員會水土保持局臺東分局 (2018)，「107 年臺東縣延平鄉紅葉村等地區 (延平鄉-紅葉村、達仁鄉-D003、D004、大武鄉-D021、D022) 大規模崩塌調查監測計畫」。(Taichung Branch Soil and Water Conservation Bureau (2018). *"FY 108 field survey and monitoring for large-scale landslide in Taitung County (including: Yanping Township - T001 and T002, Taimali Township - D003 and D029, Dawu Township - D021 and D022, Chihshang Township - T001)."* (in Chinese))

[5] 行政院農業委員會水土保持局臺東分局 (2020)，「109 年臺東大規模崩塌潛勢地區監測維運計畫」。(Taichung Branch Soil and Water Conservation Bureau (2020). *"FY 109 field survey and monitoring for large-scale landslide in Taitung County*." (in Chinese))

[6] 行政院農業委員會水土保持局臺東分局 (2019)，「108 年臺東縣潛在大規模崩塌地區 (延平鄉-T001 及 T002、太麻里鄉-D003 及 D029、大武鄉-D021 及 D022、池上鄉-T001) 監測維運計畫」。(Taichung Branch Soil and Water Conservation Bureau (2019). *"FY 108 field survey and monitoring for large-scale landslide in Taitung County (including: Yanping Township - T001 and T002, Taimali Township - D003 and D029, Dawu Township - D021 and D022, Chihshang Township - T001)."* (in Chinese))

[7] 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉蕣、冀樹勇 (2015)，「微地形判釋應用於土石流災害之三維數值模擬」，中華水土保持學報，46(2)，96-105。(Lee, C.F., Huang, W.K., Tsao, T.C., Chang, Y.L., and Chi, S.Y. (2015). "A study of the numerical simulation of debris flow hazard combined with micro-photography interpretation." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 46(2), 96-105. (in Chinese))

[8] 李錫堤 (2012)，「台灣困難地質條件造成的工程挑戰與對策」，2012 年岩盤工程研討會。(Lee, C.T. (2012). "Engineering challenges and countermeasures of some difficult geological conditions in Taiwan." *2012 Taiwan Rock Engineering Symposium*, Taiwan. (in Chinese))

[9] 林錫宏、林銘郎、紀宗吉、費立沅 (2014)，「順向坡地區的山崩機制調查與活動性探討-以嘉義太和地區為例」，工程環境會刊，33，1-16。(Lin, H.H., Lin, M.L., Chi, C.C., and Fei, L. (2014). "The study of dip slope landslide mechanisms and activities in Tai-Ho village, Chia-Yi County." *Journal of Engineering Environment*, 33, 1-16. (in Chinese))

[10] 廖志中、潘以文、林志平、唐禎國、黃玉麟、羅文驤 (2011)，「梨山崩坍區大規模崩積地層之形成機制」，中華水土保持學報，42(4)，303-312。(Liao, J.J., Pan, Y.W., Lin, C.P., Tang, C.K., Huang, Y.L., and Lo, W.H. (2011). "The Origins of the Colluvial Deposits of the Li-Shan Landslides." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(4), 303-312. (in Chinese))

[11] 臺東縣政府 (2016)，「臺東縣延平鄉紅葉村 1-3 鄰遷村重建位址評估」。(Taitung County Government (2016). "Evaluation of the reconstruction site of Hong-Yeh 1-3 neighboring villages in Yanping Township, Taitung County." (in Chinese))

[12] 臺東縣政府 (2017)，「臺東縣延平鄉紅葉部落莫蘭蒂災後遷建計畫」。(Taitung County Government (2017). "Aftermath relocation plan for Hong-Yeh, Yanping township, Taitung County after Typhoon Meranti." (in Chinese))

[13] 鍾明劍、陳建新、李璟芳、黃韋凱、譚志豪 (2016)，「潛在大規模崩塌地對鄰近聚落衝擊之調查與評估方法」，中華水土保持學報，47(3)，122-134。(Chung, M.C., Chen, C.H., Lee, C.F., Huang, W.K., and Tan, C.H. (2016). "Investigation and Assessment Methods for the Impact of a Large-scale Landslide on a Neighboring Village." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 47(3), 122-134. (in Chinese))

[14] Sodnik, J., Podobnikar, T., and Mikoš, M. (2012) "Using LiDAR data for Debris Flow Modelling." 12th *Congress INTERPRAEVENT 2012*, Grenoble, France, 573-583.

[15] Varnes, D.J. (1978). "Slope movement types and processes." In *Special Report 176 Landslides: Analysis and control (Eds: Schuster, R.L and Krizek, R.J)*, Transportation and Road research board, National Academy of Science, Washington D.C. 11-33.

[16] WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF (2017). *"RAMMS User Manual v1.7.0.-DEBRIS FLOW"*, WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Zurich.

[17] 日本地滑對策技術協會，(1979)，「地滑對策技術設計實施要領」(Japan Landslide Countermeasures Technology Association (1979). "Technical Design and Implementation Essentials for Lansslide Countermeasures." (in Japanese))

2021 年 05 月 05 日 收稿
2021 年 06 月 29 日 修正
2023 年 08 月 04 日 接受