

流域水文地質特性調查及降雨誘發山崩模式分析

譚志豪¹、鍾明劍¹、冀樹勇¹、蘇泰維²、陳勉銘²、費立沅²

1財團法人中興顧問社

2經濟部中央地質調查所

摘要

本計畫針對台灣各主要流域之中、上游集水區進行一系列水文地質調查試驗。整合各項調查成果並應用定率式分析模式，評估流域內各邊坡單元於特定降雨條件下坡地穩定性隨時間之變化關係。另針對其中降雨促崩較高潛勢地區擇具保全對象之特定重點坡地進行更進詳盡之現地調查與模式分析，除探究各項水文地質因子對降雨促崩行為之影響外，另藉由模式分析評估降雨誘發山崩之臨界雨量門檻值。研究成果為後續山崩預警準則建立及保全對策研擬奠定良好的基礎。

關鍵詞：山崩、水文地質、臨界雨量、即時監測

Abstract

The objective of the project is on the investigation of the hydrogeology affecting slope stability in the midstream and upstream areas of the watersheds. An effective assessment of regional rainfall-induced landslides using GIS-based deterministic model was presented to investigate the shallow landslides. For the high-potential landslide areas, a series of hydrogeologic investigation and a site-specific deterministic model was also applied to investigate the relationship between rainfall and slope stability. Furthermore, the rainfall thresholds for landslides can be also estimated by the deterministic model. Our preliminary results appear to be useful for rainfall-induced landslide hazard assessments in the study area. The results can be as a good reference for the authority to scheme out an early warning system in the future.

Keywords : Landslide, Hydrogeology, Critical Rainfall, Real-time Monitoring

一、前言

根據歷年地質災害調查成果顯示，山崩與土石流的發生易受地質、地形與水文等因素影響，具有地域性及重複性。集集大地震後10年，接連的颱風豪雨事件在台灣山區引發數以萬計的山崩與土石流，並對中下游地區帶來極嚴重的災害。根據相關研究顯示，坡地水文地質特性為降雨誘發山崩之關鍵因素，實有必要進行詳細的調查評估。過去國內在流域中、上游山區所進行之水文地質調查與評估

工作甚少。本計畫自民國96年起，逐年針對各流域集水區中、上游地區進行一系列水文地質對坡地穩定性影響之調查及評估工作，所獲經驗與成果可提供相關單位研擬減災、治災對策之參考，並可做為國土復育與管理之依據。

二、計畫範圍及工作內容

中興工程顧問社承接中央地質調查所委辦之「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫」，自民國96年6月至今，按年度分流域（詳圖1），陸續已針對大漢溪、大甲溪、濁水溪、虎尾溪與朴子溪等流域（第1期96年度）；鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪與烏溪等流域（第2期97年度）；高屏溪、東港溪與知本溪等流域（第2期98年度）；淡水河、蘭陽溪與南崁溪等流域（第2期99年度），進行廣泛且全面水文地質特性對坡地穩定性影響之相關調查、試驗、分析與評估工作。

綜觀各年度已執行之工作內容，工作團隊已針對上述16個主要流域區域進行大尺度流域水文地質調查與山崩關聯性分析，並於其中挑選共計15處重點崩塌地（圖1星號標示處），進行小尺度重點崩塌地水文地質監測與模式分析工作，相關成果極為豐碩。因受限於篇幅，本文將著重於調查成果及其應用層面介紹，茲將數項重要工作成果摘述於後，其餘細節可參考本計畫成果報告及相關文獻。

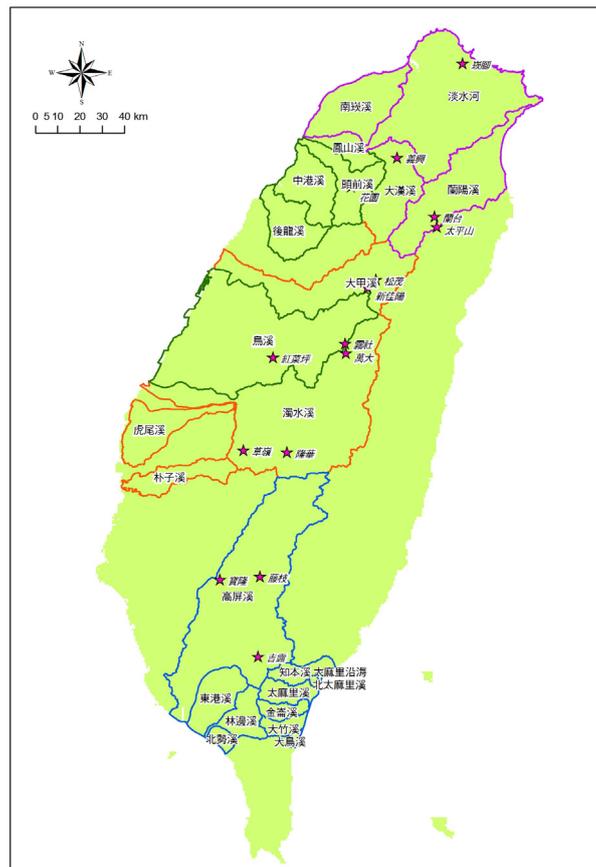


圖 1 本計畫各年度流域範圍與重點崩塌地位置

三、大尺度流域水文地質調查成果

(一) 流域水文地質調查

1. 山區地下水位觀測成果

本計畫於各流域中、上游山區陸續設置計有 60 孔水位觀測井，各觀測井隨季節之豐、枯變化及短期暴雨影響，地下水位均有所起伏。經初步經迴歸分析後，可獲得井內地下水位高程 z_w 與井口高程 z 之關係，呈現良好的線性關係 (如圖 2 所示)，即：

$$z_w = 0.986z - 6.82 \quad (r^2 = 0.98) \quad (\text{單位:公尺}) \quad (1)$$

圖中數據點以誤差棒 (error bar) 方式呈現。除顯示常時水位外，另顯示量測期間之最高與最低水位值。惟本文未再針對豐、枯期季節差異、側向補注量及颱風事件對地下水位之影響進行進一步處理。初步統計成果提供作為山區淺層地下水位分布之初步參考。對於後續計畫若需於山區布設地下水位觀測井、或是建置水文地質概念模型給定初始地下水位，均提供初步的研判資訊。

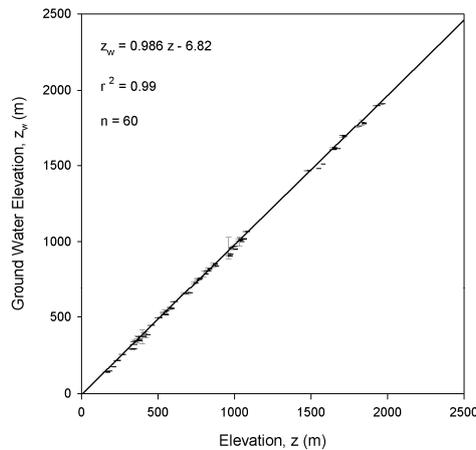


圖 2 台灣山區地下水位與井口高程之迴歸關係

2. 土壤厚度調查

本計畫於 96~99 年度已累積執行 668 處調查點位，點位分布於各流域中、上游山區。由過去相關研究得知，影響自然邊坡土壤厚度之因素主要有坡度、岩性、坡向等。調查成果經初步的相關係數與變異係數分析後得知，坡向、地層對土壤厚度之關聯性屬輕度關聯，而土壤厚度與坡度具有較強烈的關聯性。

圖 3 為本計畫各年度執行之土壤厚度調查與其調查點位所對應坡度之迴歸關係曲線。顯示土壤厚度與坡度可透過自然對數建立較佳的關係，而坡度越小土壤厚度越大。惟各年度所執行之調查成果迴歸曲線仍

存在著差異，顯示各流域自然邊坡之土壤仍受其他次要因素影響而具略有差異，此部分仍將持續加以研究探討。

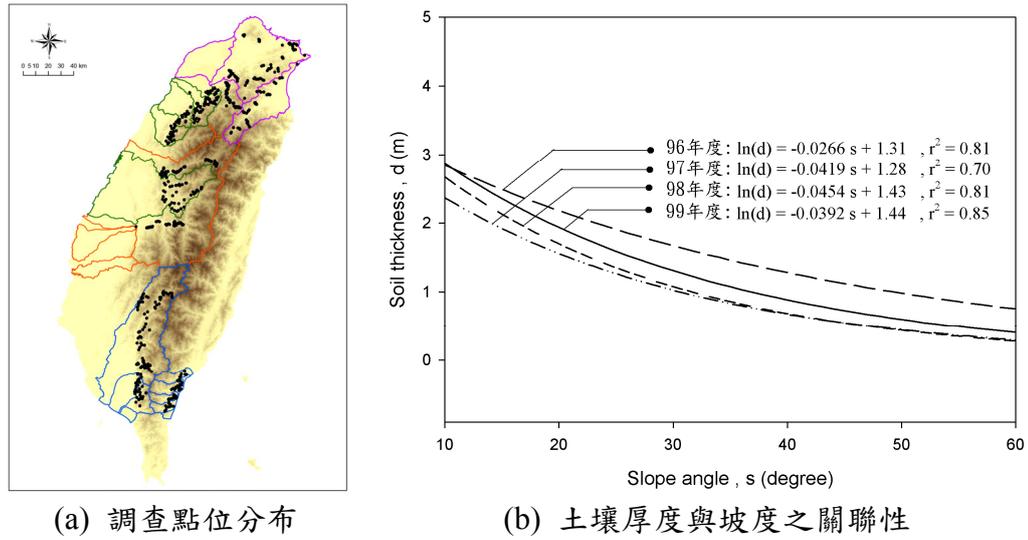


圖 3 台灣山區土壤厚度調查成果

(二) 流域降雨促崩潛勢評估及關聯性探討

本文針對各流域進行降雨引發岩屑崩滑型山崩 (費立沅, 2009) 之潛勢分析。模式分析採用美國地質調查所 (USGS) 所開發之廣域降雨入滲邊坡穩定分析模式 TRIGRS (Baum et al., 2002)。該模式乃基於 Iverson (2000) 之研究成果，先將分析區域離散成眾多網格單元，而各網格單元之初始地下水位、幾何特性 (如：坡度、土層厚度)、水文地質與力學特性 (如：地表入滲率、透水係數、擴散係數及剪力強度參數等) 及降雨強度延時等參數值均可隨空間或時間設定成不同分布型態，再透過求解未飽和流動方程式 (Richards equation) 評估降雨入滲對坡地淺層孔隙水壓之影響，即：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\phi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\phi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\phi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\phi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (2)$$

式中， ϕ 為地下水壓力水頭； θ 為含水量； t 為時間； α 為坡角； K_x 、 K_y 、 K_z 分別為 x 、 y 、 z 三方向之透水係數。

待求得暫態地下水位分布後，再透過極限平衡法之無限邊坡穩定性分析理論，代入坡角 α 、土與水之單位重 γ_s 、 γ_w 、暫態地下水壓力水頭 $\phi(Z,t)$ 及風化土壤剪力強度參數 c 與 ϕ 後，解得各網格單元之崩塌安全係數為：

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c - \phi(Z,t) \gamma_w \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (3)$$

透過式(2)至式(3)即可獲得降雨入滲期間各邊坡單元網格之穩定性變化。

本計畫自96年起，分年度針對各流域進行流域降雨促崩潛勢評估，初步已針對14個主要流域上游集水區進行模式評估，並透過多次的颱風降雨促崩事件予以率定與驗證。該成果可進一步探討各項因子對山崩發生之影響。惟因各流域水文地質條件不同，降雨分布特性亦不盡相同，故各流域邊坡可能發生岩屑崩滑之潛在可能性亦不相同。為進一步釐清，以下則舉各流域200年重現期1日累積降雨條件下，透過TRIGRS模式分析獲得之降雨促崩潛勢評估成果為例(如圖4所示)，針對流域分布、坡度及地層岩性等差異進行探討。

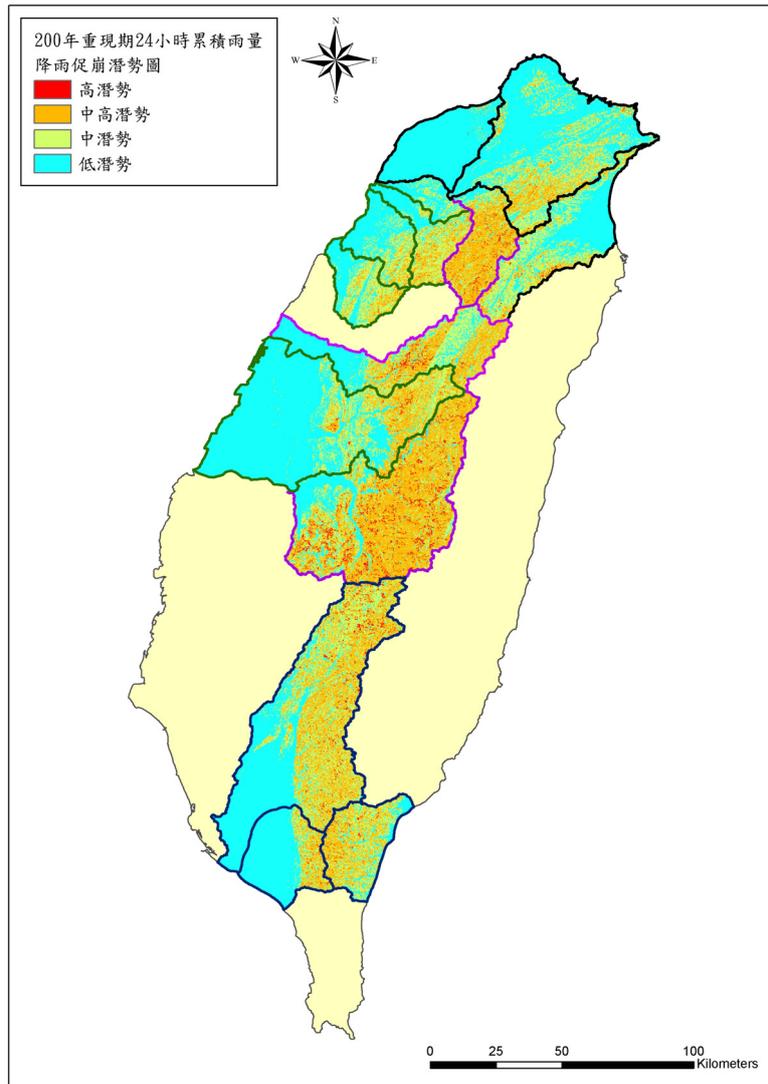


圖 4 研究範圍之降雨促崩潛勢分布 (200 年重現期 1 日累積雨量)

1. 流域差異探討

另比較各流域山崩高潛勢區域占該流域總面積之比例關係(如圖5所示)。截至目前研究範圍之成果顯示，台灣山區山崩高潛勢區域以濁水溪、大漢溪及大甲溪等流域所占比例較高。此外，知本溪、高屏溪流域之高潛勢區域所占比率亦相對較大，此結果在莫拉克颱風事件亦獲得驗證。此結果未對各流域之坡地面積作正規化權重調整，此種呈現方式較能凸顯各流域發生土砂災害時對該流域整體所造成影響的嚴重程度。

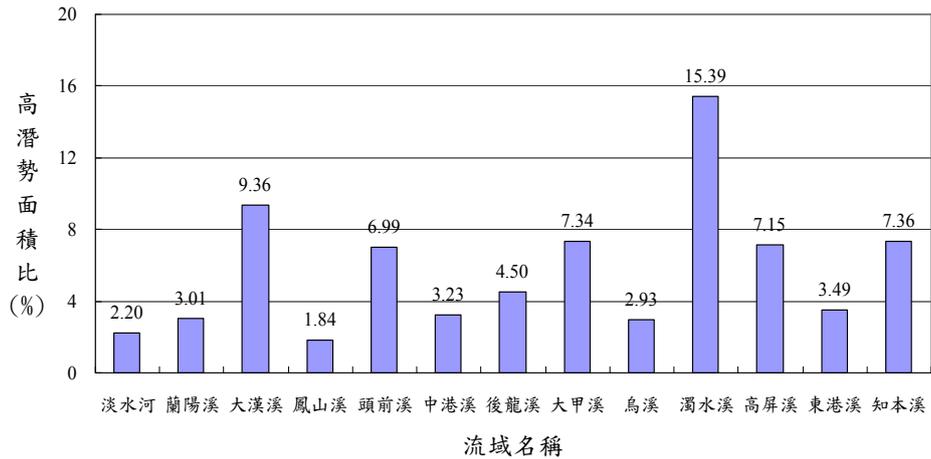


圖 5 各流域山崩高潛勢區域所占面積比率之比較

2. 地質分區差異探討

由於台灣地質條件相當複雜多變，各流域往往涵蓋數十個地層單元。為方便呈現崩塌與地層特性之趨勢關係，本文採何春蓀 (1986) 建議之七個地質分區版本進行統計，以呈現高山崩潛勢區域於不同地質分區之分布差異。

圖 6 為各流域範圍內各地質分區之高潛勢面積占流域內所有高潛勢面積之比例。初步獲知中央山脈西側之北部流域上游，以西部麓山帶地質區之高潛勢面積比最高；中部流域則以雪山山脈地質區高潛勢面積比較高；中南部流域則以脊梁山脈地質區較高。其中，又以濁水溪流域橫跨西部麓山帶、雪山山脈帶及脊梁山脈帶三個地質區，其高潛勢區域分布較為平均。

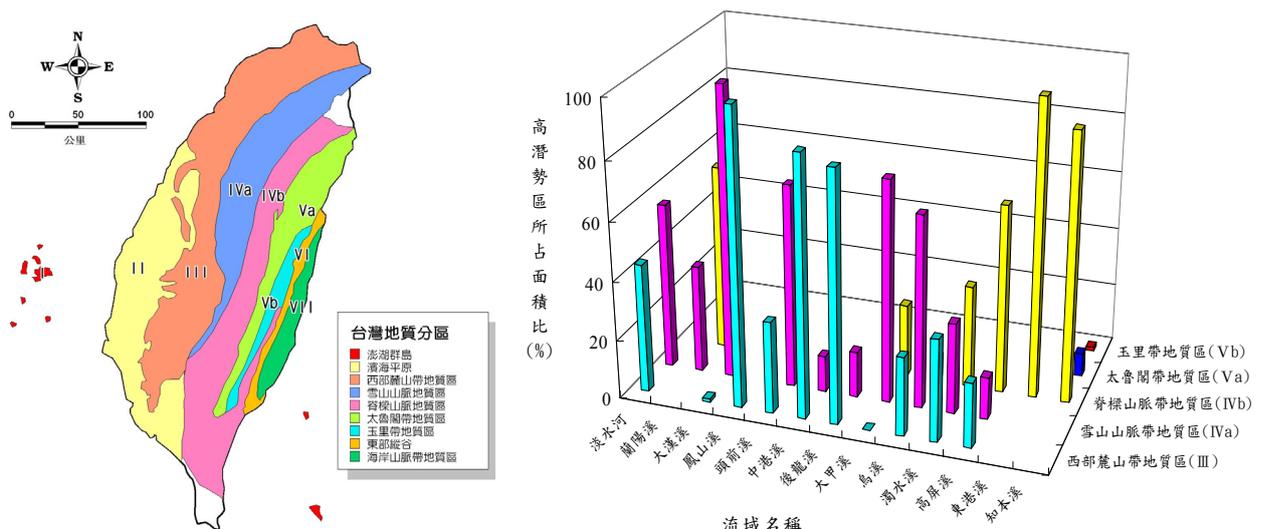


圖 6 不同地質分區之山崩高潛勢區域所占面積比率之比較

3. 坡度差異探討

進一步針對各流域之地形坡度進行分析，各流域內高潛勢區域之坡度分布如圖 7 所示。結果顯示最易發生岩屑崩滑型山崩多集中在 29~45 度邊坡（六級坡），其次為 22~29 度邊坡（五級坡）。

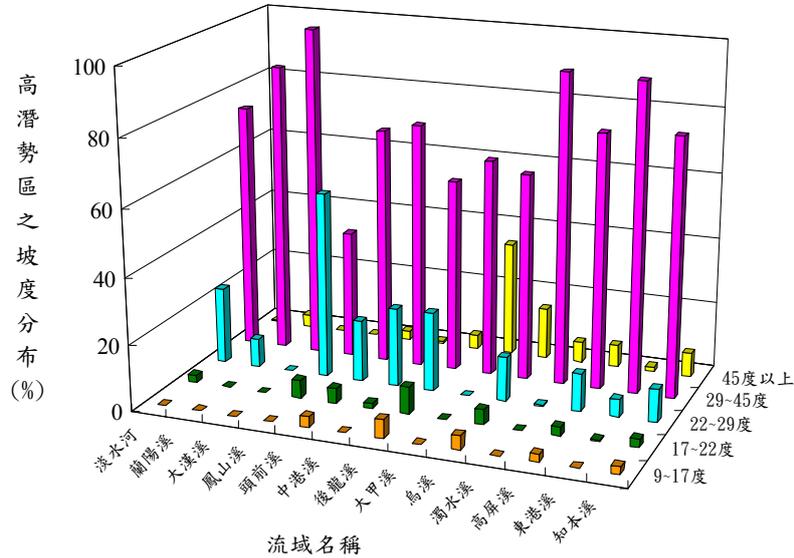


圖 7 各流域山崩高潛勢區域之坡度分布

4. 地層差異探討

進一步針對各流域之地層特性進行分析，各流域高潛勢區域之主要分布地層整理如表 1 所示。表中，地層占流域面積比係指該地層在流域內之分布面積占流域總面積之比例；至於高潛勢相對面積比則指該地層之高潛勢區域面積占該流域內所有高潛勢區域總面積之比例。

表 1 各流域山崩高潛勢區域之主要分布地層及相對面積比

流域名稱	地層名稱	地層占流域面積比(%)	高潛勢相對面積比(%)
淡水河	乾溝層	6.29	27.03
蘭陽溪	廬山層清水湖段	24.77	50.32
大漢溪	巴陵層	36.77	51.25
鳳山溪	大茅埔礫岩	18.39	39.05
頭前溪	巴陵層	29.23	40.76
中港溪	石底層	7.28	23.20
後龍溪	南莊層	19.16	18.51
大甲溪	白冷層中段	18.15	37.07
烏溪	白冷層	8.68	28.46
濁水溪	大禹嶺層	10.56	16.47
高屏溪	潮州層	22.71	33.60
東港溪	潮州層	28.13	90.25
知本溪	潮州層	79.16	82.65

(三) 流域降雨促崩成果之預警應用

應用上述流域降雨促崩模式分析程序，可評估各流域集水區在不同降雨條件下之崩塌潛勢及其空間分布。若進一步套繪交通路線或重要聚落位置圖層，即可快速研判交通要衝或重要聚落之岩屑崩滑型山崩潛勢等級，並協助篩選出具高崩塌潛勢之危險聚落進行細部評估，提早因應以達防災、減災之效。

由於本年度計畫範圍截至目前為止並未有實際破壞案例，故以下列舉98年度研究範圍之藤枝崩塌地為例，說明前述流域降雨促崩成果之應用情形。

舊藤枝部落位於高雄縣桃源鄉寶山村（藤枝林道20km處），鄰近藤枝國家森林遊樂區。此區地質屬樟山層下段，岩層以深灰色硬頁岩與板岩為主，間夾透鏡狀變質砂岩或輕微變質之薄砂頁岩互層。圖8為高屏河流域降雨促崩潛勢評估結果，並聚焦放大至藤枝地區（取裁自圖4）。舊藤枝部落內邊坡單元多位於高潛勢或中高潛勢範圍。莫拉克颱風後，藤枝林道沿線多處崩塌，道路沿線商家均往下邊坡滑動，下滑深度約一層樓高，隨處可見顯著張裂縫（見圖9）。舊藤枝部落之降雨促崩潛勢分析成果在莫拉克颱風事件中可獲初步驗證。

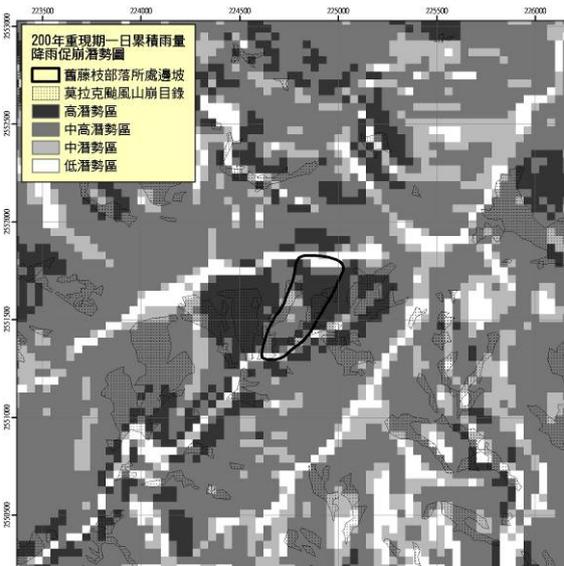


圖 8 藤枝地區降雨促崩潛勢分布圖



圖 9 莫拉克颱風藤枝地區崩滑破壞情形

四、小尺度降雨誘發崩塌潛勢評估

經由上述大尺度降雨促崩潛勢評估成果（如圖4所示）套疊重要公共設施、交通要衝或山區聚落等保全對象之地理位置後，可快速篩選出具較高崩塌潛勢之危險區域（如圖8所示）。針對該特定區域可再進行進一步水文地質細部調查，並建立更精細的數值模型以進行小尺度模式分析，藉以細部評估邊坡因降雨入滲引致地下水水位變動，進而導致邊坡變形或產生滑動之行為。以下則舉本年度進行調查與監測之蘭台調查範圍為例，說明小尺度降雨誘發山崩模式分析之應用情形。

(一) 背景概述

蘭台調查範圍位於宜專一線(太平山公路) 10K處，行政上隸屬宜蘭縣大同鄉，範圍涵蓋羅東林管處太平山事業區98林班內之蘭台苗圃。在過去歷年災害紀錄中，2005年7月海棠颱風後，蘭台苗圃附近宜專一線9.9K柏油路面有開裂與沉陷之現象，2006年1月雖經羅東林管處整修後路面恢復平坦完整，然2008年1月發現路面下擋土牆出現裂縫，接著，於同年7月鳳凰颱風後，出現路面扭曲與下陷之情形，而在同年10月薔蜜颱風後，10.1K路面彎曲隆起，10.8K路面沉陷。在2009年12月芭瑪颱風後，受破壞較嚴重區域為12.8K附近，9.9K為較輕微的破壞，而羅東林管處已於芭瑪颱風後在9.9K新鋪AC路面。

苗圃內建築物主要為管理室與工寮各一，工寮的四面牆壁均有裂縫，東面窗戶邊框歪斜，東側屋外樓梯有開裂與沉陷之現象。調查範圍的植被狀況，在宜專一線沿線路邊上坡面有樹幹向下傾倒、樹根裸露之現象，顯示坡面持續向下滑動，而苗圃東側的山坡直到田古爾溪谷均有類似的樹幹傾斜情形，初步推測此區域具有圓弧形滑動潛勢。根據羅東林管處以及中興社前期調查，推估可能之崩塌方向為朝東南向滑動(詳見圖10)。

(二) 地形、地質與水文概述

蘭台調查範圍位於中央山脈北段見晴山支稜北方坡面上，研究區域大致為宜專一線與田古爾溪上游南北二支流所圍起來之範圍，調查面積約5.7公頃。此區地形為西北高東南低，坡面傾向東南方，坡度約15度，海拔高度約1,000公尺。所屬地層為廬山層仁澤段，岩性以厚層硬頁岩為主，地層位態大致為N80°E/35°S，主要節理位態為N30°W/80°N。

研究區域鄰近雨量站有水利署的太平山(1)站(海拔1,960m)、台電公司的太平山站(海拔1,930 m)及土場(1)站(海拔400m)。各站之年平均降雨量分別為：太平山(1)站為3861.9 mm(統計年數：20年)、太平山站為3448.6 mm(統計年數：29年)及土場(1)站為2635.3 mm(統計年數：59年)，顯示該區域海拔越高則平均年降雨量越大。降雨主要集中在每年的5~10月間，約佔全年總降雨量75~80%，11月~隔年4月之降雨量則佔全年20~25%。整體而言，由於太平山區的豐沛雨量，加上地層屬較軟弱之硬頁岩/板岩帶，因此流域之溪谷皆發育出強力之向源侵蝕，造成許多崩塌面。

(三) 現地調查及監測成果

本研究於蘭台調查範圍執行一系列之現地調查與監測工作，調查工作包含有地表地質調查、地質鑽探(計5孔，鑽探總進尺達350m)、雙環入滲試驗、地電阻影像探測、孔內水文地質調查(含孔內攝影、水力試驗、電井測、地下水流速等)、室內土壤與岩石力學試驗等，相關成果用於建置水文地質概念模型及數值模擬；此外，同步於此地區進行降雨量、地下水位、地中水平變形、地表變形及土壤張力等監測工作，相關配置如圖11所示。

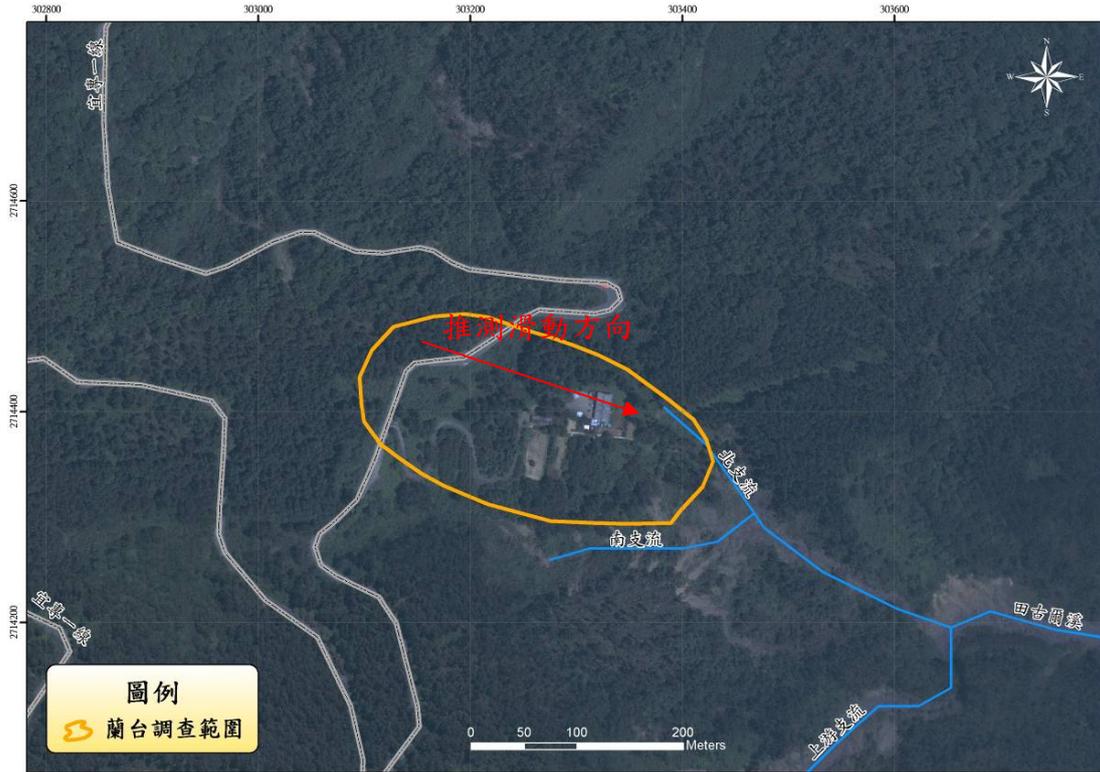


圖 10 蘭台調查範圍航照影像及鑽孔配置圖 (影像年份：2009)

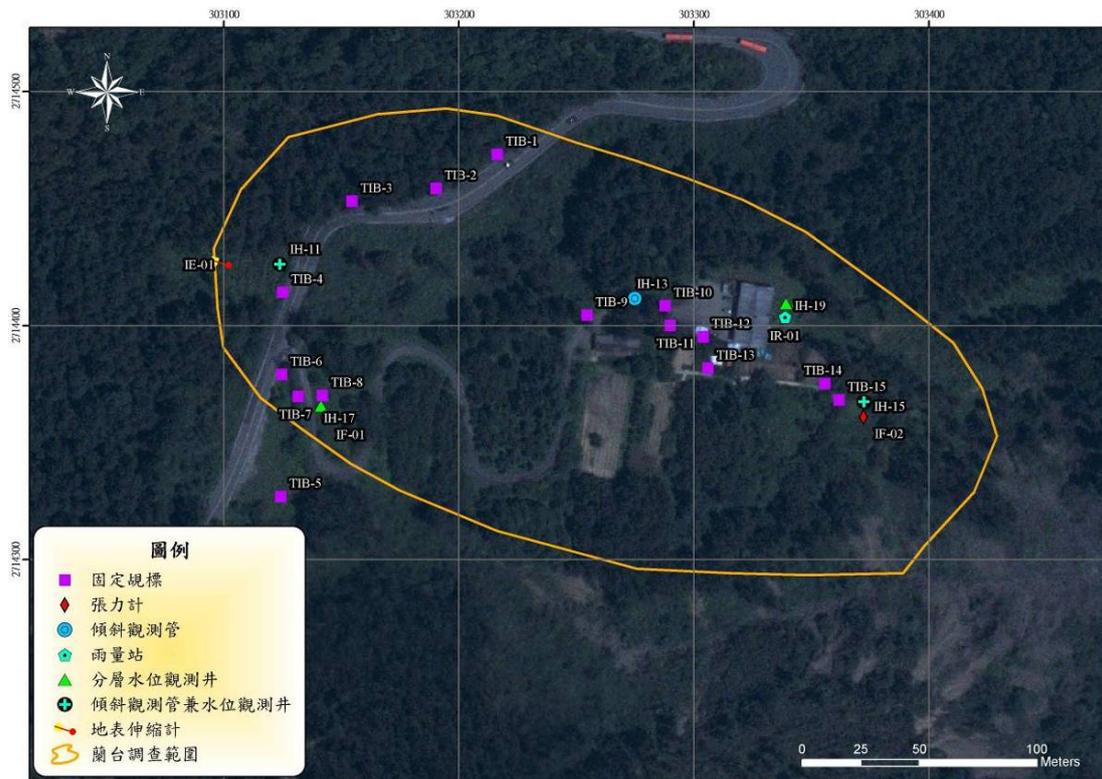


圖 11 蘭台調查範圍監測儀器布置圖 (影像年份：2009)

監測期間 (2010/7/20至2010/9/26) 單日最大降雨發生於凡那比颱風期間 (9月19日單日降雨量為282.6 mm)，導致IH-11水位井水位抬升約5.4 m，IH-15水位井水位抬升約2.5 m，顯示上邊坡的水位抬升幅度較大。另由圖12的地中變形量測成果可發現IH-11及IH-13傾斜觀測管分別於地表下約6.5 m及17~18 m處具有較明顯的滑動面，IH-15傾斜觀測管則尚無發現較明確之滑動面，有待後續持續觀測。

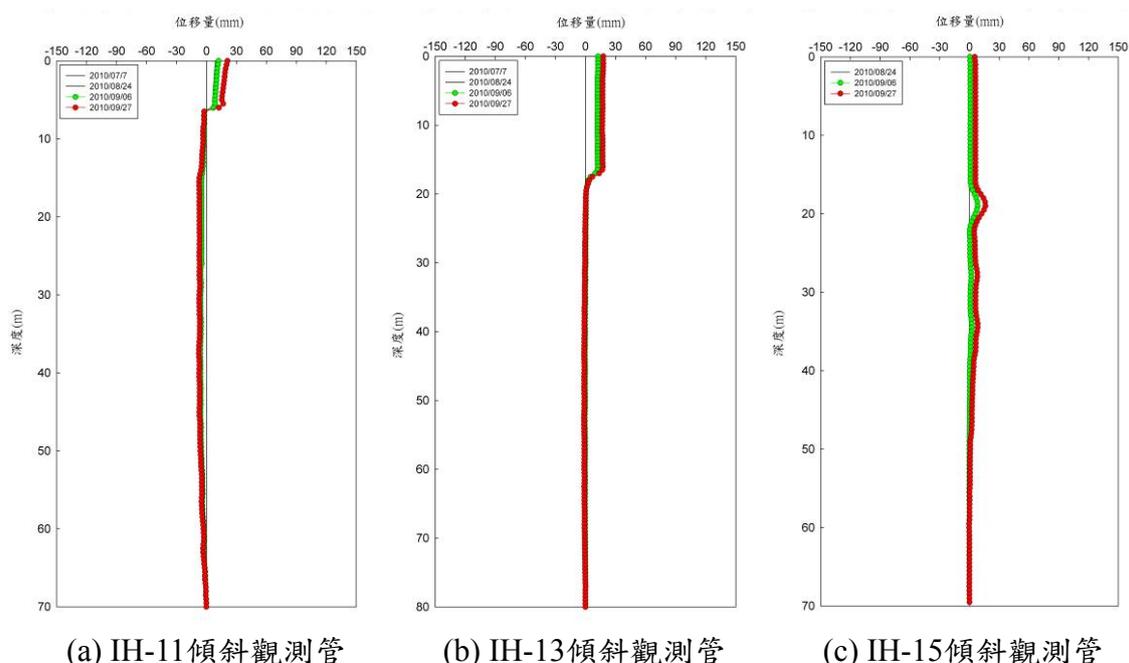


圖 12 蘭台調查範圍地中變形量測成果

(四) 水文地質概念模型建立

蘭台調查範圍的數值地形係採5m×5m DEM數值資料建置而成，此分析剖面始自頂部稜線經IH-11、IH-13、IH-15等鑽孔至田古爾溪北支流溪谷為止。透過Surfer或ArcGIS程式可建立分析剖面的高程，再依照鑽孔岩心及現地調查成果決定各水文地質單元之地層深度及地下水位。

另根據現地鑽探資料、地電阻探測資料及孔內探測資料，研判研究區域之水文地質單元可分為(1)表土或崩積層、(2)風化或破碎之板岩或硬頁岩及(3)完整之板岩或硬頁岩等三層，其水文地質概念模型剖面如圖13所示。

進行降雨入滲及滲流分析時，將左側邊界 (SA) 則設定為定水頭邊界，其值參考IH-11觀測井水位紀錄；右側邊界 (RB) 設定為定水頭邊界，其值等於坡趾處田古爾溪北支流的水位高程；模型底部 (AB) 設定為無流量邊界；坡面 (SR) 則設定為降雨入滲邊界。穩態滲流分析時係參考年平均雨量作設定，暫態滲流分析時則設定為假設降雨條件或監測所得之降雨量。

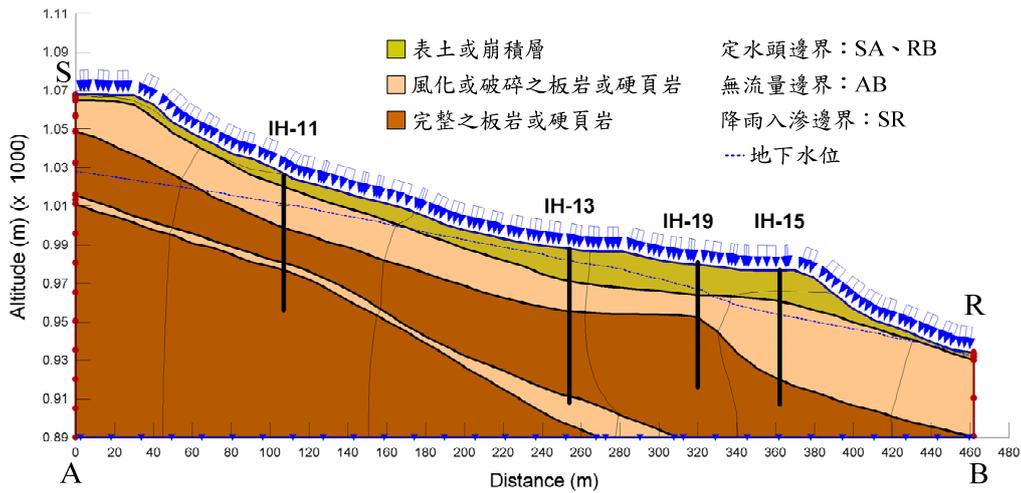


圖 13 蘭台調查範圍水文地質概念模型剖面圖

(五) 降雨誘發崩塌潛勢評估

本研究採用GeoStudio程式並結合坡地水文地質調查與試驗結果，將前述所建立之水文地質概念模型數值化，並給定相關邊界條件與初始條件後，透過模式分析進行降雨入滲、地下水滲流及邊坡穩定性 (Infiltration-Seepage-Slope Stability) 之耦合分析。模式中所需之參數均透過現地試驗或調查而得，分析模式的可靠性與準確性則透過現地監測資料進行率定與驗證。

GeoStudio為二維有限元素之商用套裝軟體，內建多組分析套件，可視問題需求選用。其中，SEEP/W模組為專用於降雨入滲及滲流分析的模組，依據已有之降雨資料，可由所設定的邊坡參數計算出相對應的滲流情形，得出未飽和層及飽和層內地下水流網狀態。而SLOPE/W模組採用極限平衡法分析邊坡穩定，主要將土體滑動區域切分為若干切片，對每一片土體之抵抗力與滑動力採力平衡方式進而求解安全係數。

為驗證本研究所採分析模式之程序及適用性，本研究採2010/7/20至2010/9/26間之現地監測資料進行分析與驗證 (涵蓋凡那比颱風事件)，降雨資料如圖14(a)所示。圖14(b)則為IH-11觀測井水位紀錄，監測資料顯示水位觀測井建置後水位約於地表下12 m，凡那比颱風前則下降至地表下17~18m (設定為常時水位)；圖14(c)為IH-15觀測井水位紀錄，監測資料顯示凡那比颱風前之地下水位相當穩定，約於地表下22 m (設定為常時水位)。圖14(b)及圖14(c)的分析成果顯示模擬水位與監測水位相當一致，驗證本模式可掌握凡那比颱風期間之水位變化。

圖14(d)為將前述不同時階下水位變動所得的邊坡穩定分析成果，由圖14(d)可知蘭台調查範圍於颱風前之常時安全係數為1.35，其最小安全係數之滑動塊體位於上邊坡處 (涵蓋IH-11鑽孔) 且滑動弧最深約切過表土或崩積層底部 (詳見圖15)，其深度與IH-11傾斜觀測管所量地表下6.5 m處滑動面相吻合。綜合研判蘭台調查範圍常時處於相對穩定狀態，惟仍低於常時安全係數高於1.5

之要求，需持續密切注意。凡那比颱風雖造成蘭台調查範圍地下水抬升，惟其抬升幅度對滑動弧穩定性影響尚不顯著，其安全係數略降至1.33，如圖16所示。

(六) 關聯性研究

完成分析模式的初步率定與驗證後，本研究進而探討不同降雨條件對崩塌地安全性之關聯性分析，其成果可應用於當預估特定降雨事件（如颱風或豪雨）之總降雨量後，可快速地由關聯圖表估算降雨事件期間之安全係數變化。分析採用之設計雨型係蒐集太平山雨量站（編號：41U420）自1980年至2000年及2008至2009年之雨量資料，採用位序法計算其設計雨型，並透過降雨頻率分析所得各重現期降雨量（詳見表2），本研究以72小時降雨延時為例進行說明。

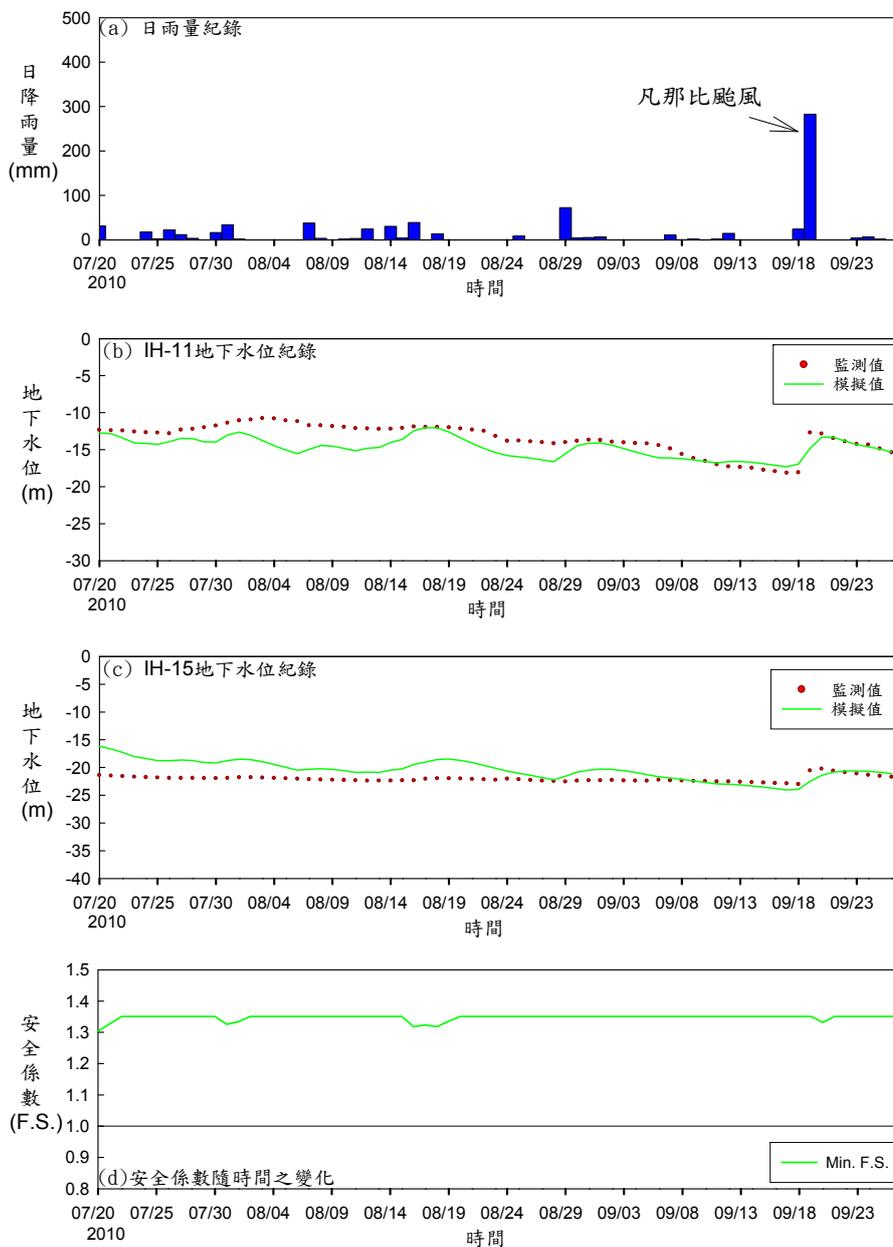


圖14 蘭台調查範圍降雨誘發崩塌潛勢評估成果

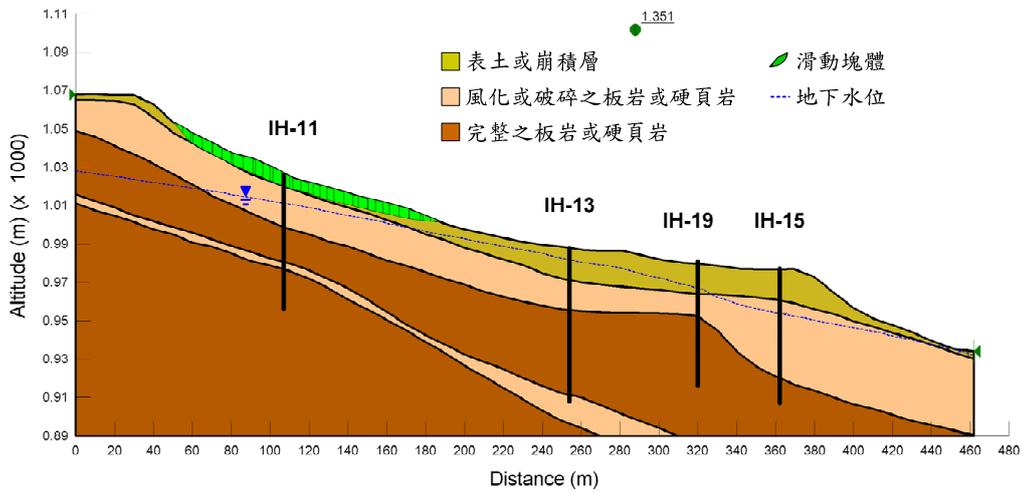


圖15 蘭台調查範圍於常時水位之穩定性評估

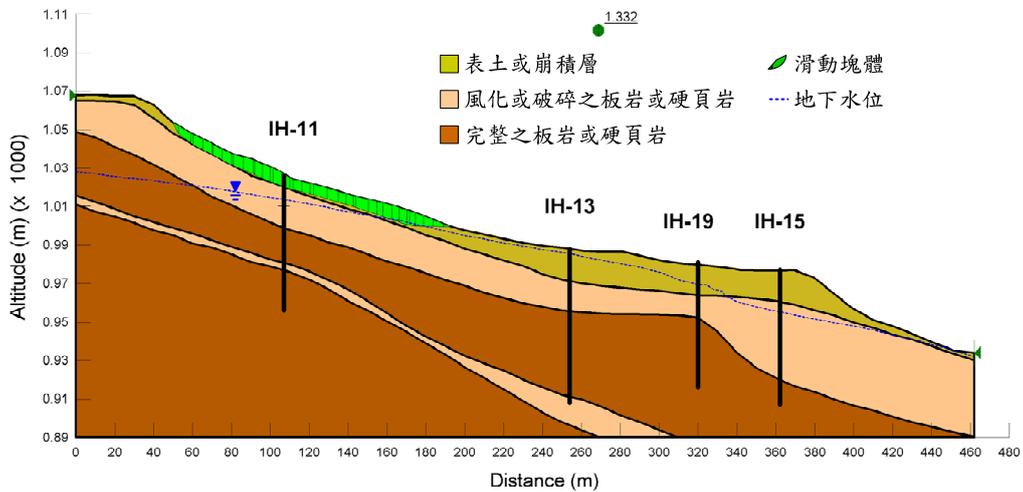


圖16 蘭台調查範圍於凡那比颱風期間之穩定性評估

表2 太平山雨量站各重現期降雨量分析結果 (單位: mm)

重現期 降雨延時	2年	5年	10年	20年	25年	50年	100年
72小時	767	1063	1204	1314	1345	1430	1503

套用表2中各重現期之降雨條件進行邊坡穩定分析，即可找出蘭台調查範圍於不同降雨事件預估總雨量時之安全係數變化，如圖17所示。由圖17可知當72小時降雨延時且總雨量高於980 mm後，其安全係數將降低至1.1以下，即已低於暴雨時一般邊坡安全係數高於1.1的標準，研判蘭台調查範圍於此降雨門檻條件以下將呈現不穩定狀態，易引致邊坡產生變形或不穩定之現象。

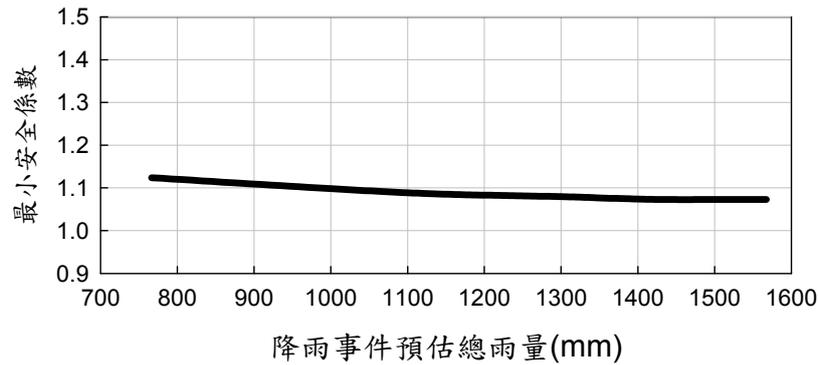


圖 17 蘭台調查範圍安全係數與降雨量關聯性分析成果

五、結論與建議

根據前述研究成果可歸納以下結論與建議：

1. 本研究分年度針對不同流域山區進行一系列水文地質對坡地穩定性影響之調查評估工作，成果豐碩，可提供各界參考運用。
2. 本研究整合不同尺度降雨促崩分析模式，除可獲得大尺度流域降雨促崩潛勢之時空分布外，另針對特定重要區域進行細部水文地質調查及小尺度降雨引發崩塌之穩定性評估，以獲得更精準的評估結果。
3. 本文採TRIGRS程式進行大尺度降雨促崩潛勢評估，透過多場降雨促崩事件進行模式率定與驗證，其山崩及非山崩之平均正確率普遍可達70%以上。另舉舊藤枝部落實際崩塌案例驗證，顯示模式具良好成效。
4. 本文採GeoStudio程式進行小尺度降雨誘發崩塌潛勢評估，透過蘭台調查及監測案例驗證此模式能有效評估邊坡內地下水位及安全係數隨降雨歷時之變化狀況，並針對該區域進行降雨與崩塌潛勢之關聯性評估。
5. 本研究成果可結合即時預報雨量，可應用於快速篩選出特定降雨條件下具高崩塌潛勢之交通要衝及危險聚落，並可進一步模擬該區域邊坡因降雨入滲引致地下水位變動進而導致邊坡位移或滑動之行為。模式分析所獲得之臨界雨量及變形量值亦可提供相關單位於後續擬定相關準則或整治設計時之參考。
6. 本文所建議之定率式模式，目前針對河岸沖刷引致上方邊坡崩塌此類複合型山崩尚無法有效模擬，仍有待後續進一步檢討改善。

誌謝

感謝經濟部中央地質調查所提供計畫經費及技術協助得使本文順利完成，特此誌謝。對於工作期間提供協助的相關單位及中興工程顧問社工作同仁，亦一併感謝諸位之付出與努力。

參考文獻

1. 財團法人中興工程顧問社 (2007), 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第1期96年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫, 計畫成果報告, 經濟部中央地質調查所研究報告。
2. 財團法人中興工程顧問社 (2008), 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第2期97年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(1/3), 計畫成果報告, 經濟部中央地質調查所研究報告。
3. 財團法人中興工程顧問社 (2009), 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第2期98年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2/3), 計畫成果報告, 經濟部中央地質調查所研究報告。
4. 財團法人中興工程顧問社 (2010), 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第2期99年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(3/3), 計畫成果報告, 經濟部中央地質調查所研究報告。
5. 譚志豪、陳憶璇、冀樹勇 (2009), 「以定率法評估集水區山崩臨界雨量」, 中興工程季刊, 第105期, 第5-16頁。
6. 譚志豪、陳憶璇、顧承宇、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、費立沅 (2008), 「降雨誘發山崩災害之預警系統初步研究」, 2008流域地質與坡地災害研討會。
7. 鍾明劍、王金山、林金成、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、費立沅 (2009), 「颱風引致山崩之調查、監測與模式分析」, 2009流域地質與坡地災害研討會, 台北。
8. 王金山、鍾明劍、譚志豪、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、費立沅 (2009), 「颱風事件引致崩塌地滑動之研究-以萬大崩塌地為例」, 第13屆大地工程研討會, 宜蘭。
9. 費立沅 (2009), 「台灣坡地災害與地質敏感區的關係」, 地質, 第二十八卷, 第一期, 第16~22頁。
10. Baum, R. L., Savage, W. Z., and Godt J. W. (2002), "TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability Analysis", U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424.
11. Iverson, R. M. (2000), "Landslide Triggering by Rain Infiltration", Water Resour. Res., 36(7), pp. 1897-1910.
12. GEO-SLOPE International Ltd. (2007), Seepage Modeling with SEEP/W 2007: An Engineering Methodology, User's Guide.
13. GEO-SLOPE International Ltd. (2007), Stability Modeling with SLOPE/W 2007: An Engineering Methodology, User's Guide.
14. Salciarini, D., Godt, J. W., Savage, W. Z., Conversini, P., Baum, R. L., and Michael, J. A. (2006), "Modeling Regional Initiation of Rainfall-induced Shallow Landslides in the Eastern Umbria Region of Central Italy", Landslides, 3, pp. 181-194.