

降雨誘發崩塌地滑動之 監測回饋分析與預警應用探討

王金山* 鍾明劍* 冀樹勇**

摘要

本文針對松茂崩塌地進行一系列之水文地質特性調查、長期監測與模式分析工作，並建立從降雨入滲引致地下水滲流及水位變動，進而導致邊坡位移或滑動的分析模式。分析模式之特色除包含傳統穩定分析無法考量降雨入滲-地下水滲流-邊坡穩定性之耦合分析外，同時也可考量未飽和土壤基質吸力變化對邊坡穩定性所造成之影響。本文透過現場長期及多場颱風事件之監測資料進行模式回饋分析，以率定及驗證各項水文地質特性參數，建立足以代表現地之水文地質概念模型。文末利用此模型進行特定降雨條件下崩場地穩定性之關聯性研究，用以評估崩場地之再崩潛勢及可能發生時間，探討後續預警應用之可能性，所得成果可供後續防減災措施、保全策略擬訂及坡地預警技術研擬之參考。

關鍵字：降雨、崩塌地、滑動、監測回饋分析、預警應用

一、前言

隨著人口不斷增加、人類活動空間與範圍逐漸擴展和工程規模提升等因素影響，使坡地開發需求日益漸增，但近年來全球氣候異常，水文極端現象明顯，坡地災害發生的頻率逐漸提高，舉凡有人類居住或工程活動之山岳地區，幾乎都有坡地災害之發生。諸多案例均顯示降雨引致之坡地災害不只為人類生命安全帶來威脅，並對財產、環境、資源等具有破壞性，已成為僅次於地震的第二大地質災害。以地質災害角度而言，坡地災害造成人類的損

失僅次於地震，但坡地災害發生的頻率卻遠遠高於地震，因此降雨引致坡地災害議題在國際上始終備受重視(Caine, 1980; Sugiyama *et al.*, 1995; Bozzano *et al.*, 2002; Blata *et al.*, 2004; Cascini *et al.*, 2006; Guzzetti, 2008)。

台灣因地形陡峭、山高谷深，每年侵襲颱風平均約 3.5 次，豪大雨數十次，雨量豐沛且降雨強度集中，經常釀成災害。以民國 93 年為例，全年颱風侵襲次數高達 9 次，僅 72 水災事件淹水面積即達 659 平方公里；而民國 94 年的 612 豪雨事件亦造成南部地區多處淹水，淹水面積超過 500 平方公

* 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

里。此外，在 921 集集地震後的數次颱風事件，經常導致山區發生大規模的山崩與土石流，造成道路中斷與房舍被掩埋等災害，各地受災範圍與程度均遠較過去為烈。民國 98 年 8 月份之莫拉克颱風事件不僅在台灣南部地區造成嚴重水患，連日豪大雨更誘發許多大型山崩與土石流災害，造成重大傷亡及經濟損失，上述事件均顯示高崩塌潛勢地區之調查、監測與安全評估工作刻不容緩。因此，近年來台灣對降雨引致坡地災害之關注與日俱增，許多學者及政府機關均投入許多資源進行相關研究(謝平城與王瀚衛，2004；葉信富等人，2005；林德貴等人，2008；經濟部中央地質調查所，2008a、2008b、2009；鍾明劍等人，2009)。

本文考量山崩受水文因素的影響相當顯著，且降雨入滲係引致地下水文改變的主因，故採用降雨入滲-地下水滲流-邊坡穩定性(Infiltration-Seepage-Slope Stability)之耦合分析(Coupled Analysis)，用以模擬降雨入滲引致地下水滲流及水位變動，進而導致邊坡位移或滑動之行為。文末則透過輸入不同設計雨型及各重現期累積雨量進行邊坡穩定分析，藉以評估降雨特性與崩塌地穩定性之關聯性研究，以此探討後續預警應用之可能性，所得成果可供防減災措施、保全策略擬訂及坡地預警技術研擬之參考。

二、文獻回顧

(一) 國內外相關研究

Misfeldt *et al.* (1991)研究加拿大 Hepburn 更新世之河岸邊坡滑動，針對該連續性不穩定邊坡進行反算分析，分析採用有限元素滲流分析及邊坡穩定分析軟體，利用滲流分析得到之孔隙水壓值導入邊坡穩定分析程式，藉由邊坡穩定安全係數設定為 1.0 之臨界狀態反算出地層水力及強度參數。James *et al.* (2004)透過現地調查、監測、室內試驗資料及數值模擬的方式，針對加拿大 Virden 鎮東北方一處公路邊坡之淺層滑動進行水

質地質參數率定及邊坡穩定分析，且就不同邊界條件與力學參數進行模式之敏感度分析。

鄧鳳儀(2006)以湖口崩場地水文地質數值模型作回饋分析研究，其研究中亦利用有限元素滲流分析進行降雨入滲與地下水滲流之數值模擬，根據模擬結果所得之孔隙水壓值帶入邊坡穩定之極限平衡程式，進行歷次崩場地反算分析，以進一步驗證湖口臺地之地層滑動與水文地質條件之關聯性及水文特性。許正輝(2005)、林德貴等人(2005，2008)分別進行梨山及林肯大郡案例研究，亦將數值分析模擬方法藉由現地調查、試驗及監測資料進行降雨入滲與地下水滲流穩定分析，並以每一時階分析所得之地下水位計算邊坡穩定之安全係數，探討其對邊坡穩定性之影響。

由於傳統邊坡穩定分析鮮少考量未飽和土壤的入滲、滲流與力學特性，除因未飽和土壤領域發展較晚(Van Genuchten, 1980; Fredlund *et al.*, 1994)，其機制未若飽和土壤理論成熟外，亦因以飽和分析法較能簡化邊坡穩定分析，故多數研究或於實務應用時多忽略邊坡降雨入滲分析，僅以地下水位變動作為輸入參數，即視為已考量降雨入滲因素，致使淺層地下水文與崩塌地之關聯研究相對缺乏。有鑑於此，財團法人中興工程顧問社執行經濟部中央地質調查所委託之集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(財團法人中興工程顧問社，2008a; 2008b; 2009)時，即研擬降雨入滲-地下水滲流-邊坡穩定性-邊坡變形性耦合分析進行相關研究，全台已累積 12 處崩場地案例研究成果。

上述研究多利用現地調查、試驗及監測資料進行崩場地穩定性分析，惟其模式中之水文地質參數卻鮮見完整而長期的率定與驗證程序，導致模式無法充分模擬現場之狀況，後續之分析亦存有相當不確定性因素。因此本文參考前述學者之研究方法並針對崩場地進行長期之監測回饋分析工作，藉以建立足以代表現地之水文地質概念模

型後，方進行後續之關聯性研究。

(二) 分析模式與程式

本文採用二維有限元素法(Finite Element Method)商用套裝軟體 GeoStudio 2007 進行分析，此版本包含八個不同功能的模組(AIR/W、SIGMA/W、SLOPE/W、TEMP/W、CTRAN/W、QUAKE/W、SEEP/W、VADOSE/W)，本文採用 SEEP/W 及 SLOPE/W 模組以模擬邊坡降雨入滲後之滲流與穩定行為。

SEEP/W 模組用於模擬降雨入滲及滲流行為，可計算各時階之地下水水位與崩塌地內流動狀

態，選擇未飽和模式則可求得未飽和層中土壤含水量與孔隙水壓之變化。SLOPE/W 模組採用擬靜態分析法(Pseudo-Static Method)之極限平衡分析，主要將通過土體之滑動面分成許多垂直片段，利用力與力矩之平衡求得臨界安全係數，滑動面可為圓弧形、複合型或由使用者指定一系列直線段所組成之滑動面。

利用 SLOPE/W 與 SEEP/W 模組之耦合分析，即可模擬崩塌地不同降雨滲流情況下可能產生之整體滑動機制。

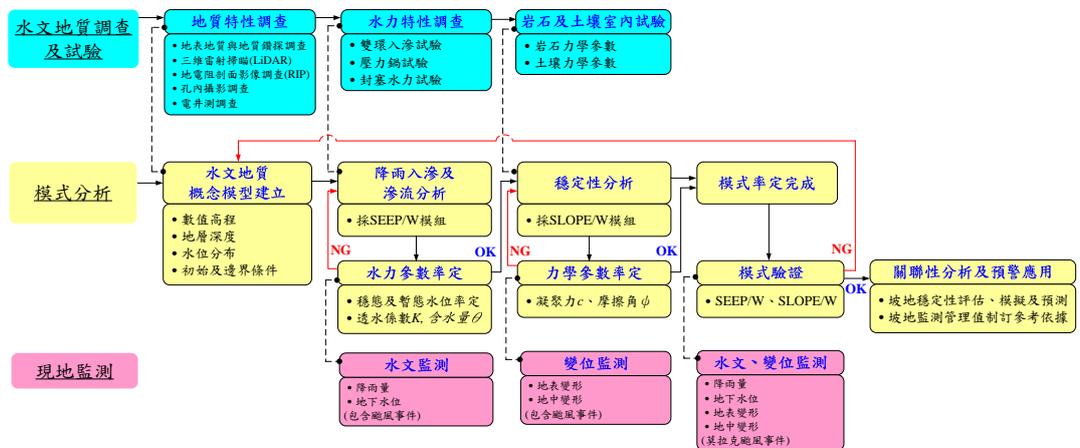


圖 1 研究流程圖

三、研究方法

本文之研究流程如圖 1 所示，包含(1)水文地質調查及試驗；(2)現地監測；(3)模式分析等程序，茲分述如后。

(一) 水文地質調查及試驗

為了解研究區域之地層屬性、地質構造及水文特性，本研究進行一系列現地水文地質調查與試驗項目，包含有(1)鑽孔調查；(2)地表地質調查；(3)雙環入滲試驗；(4)地表地球物理調查；(5)岩體裂隙位態調查；(6)裂隙岩體水力試驗；室內

試驗則包括有(1)室內土壤與岩石力學試驗(基本物理性質、滲透性質及強度性質試驗)及(2)未飽和層土壤含水量曲線調查(壓力平板試驗)。各項調查工作之目的與用途如表 1 所示。

(二) 現地監測

為了解研究區域降雨、地下水水位變化及地層滑動之關係，故於崩塌地內裝設自記式雨量計及地表固定規標點(配合全測站施測)，進行降雨量及地表變形之觀測，並於地質鑽孔中設置傾斜觀測管及水位觀測井，以進行崩塌地潛在滑動面深度、位移及地下水水位變化觀測，現場監測工作項

目配置如圖 2 所示。

(三) 模式分析

進行降雨誘發崩塌地滑動分析前，需先透過現地調查及試驗方法建立足以代表現地之水文地質概念模型 (Hydro-Geological Conceptual Model)，再進行後續之分析工作。但往往受限於執行經費與規模不夠充足及研究區域地質材料之

異質性、異向性難以充分掌握，導致模式分析結果可能存在眾多之不確定性。因此本文透過現地長期監測資料進行參數率定，再透過颱風事件進行模式驗證，以確保模式分析之正確性及準確度。最後利用完成率定與驗證之水文地質概念模型及水文地質參數進行關聯性研究，評估於特定降雨條件下崩塌地之穩定性與崩塌潛勢。

表 1 調查及試驗工作之目的與用途(鍾明劍等人, 2009)

調查項目	目的	用途
鑽探調查	調查崩塌地內地層與地質構造之空間分布及其力學特性	1. 提供崩塌地水文地質及穩定分析所需之基本參數； 2. 了解崩塌地地層之破碎程度； 3. 提供崩塌地可能滑動面深度及可能滑動位置。
地表地質調查	調查崩塌地範圍內之地形表徵與地質露頭	1. 調查崩塌地地形表徵，掌握坡面變動狀況； 2. 掌握崩塌地露頭分佈及位態，推估崩塌地內之地質構造。
雙環入滲試驗	調查崩塌地表層土壤之入滲率	1. 提供崩塌地水文地質及穩定分析所需之入滲參數。
地表地球物理調查	調查崩塌地內之地層構造特性與地下水位資訊	1. 調查崩塌地內潛在滑動面位置與滑動區塊； 2. 調查崩塌地內岩盤分布及深度； 3. 調查阻水層位置、含水層深度與厚度。
岩體裂隙調查分析	調查岩層破碎程度、主要含水層可能之位置	1. 評估裂隙岩體水力試驗之深度位置； 2. 掌握鑽孔岩心之精確位置，檢核鑽探品質； 3. 釐清可能潛在滑動面之範圍。
裂隙岩體水力試驗	調查鑽孔內地層之裂隙岩體透水係數	1. 評估崩塌地水文地質特性； 2. 評估崩塌地內含水層位置與型態； 3. 提供崩塌地水文地質及穩定分析所需之透水係數。
未飽和層土壤含水特性試驗	利用壓力平板與現地張力設備調查未飽和層土壤含水特性	1. 評估不飽和土壤滲透特性，求取體積含水量隨基質吸力之變化； 2. 提供崩塌地水文地質及未飽和層穩定分析所需之基本參數。
土壤與岩石力學試驗	利用現地鑽探與調查取得的岩心試體或土壤試樣進行各項相關之室內試驗	1. 提供崩塌地水文地質及穩定分析所需之基本參數。

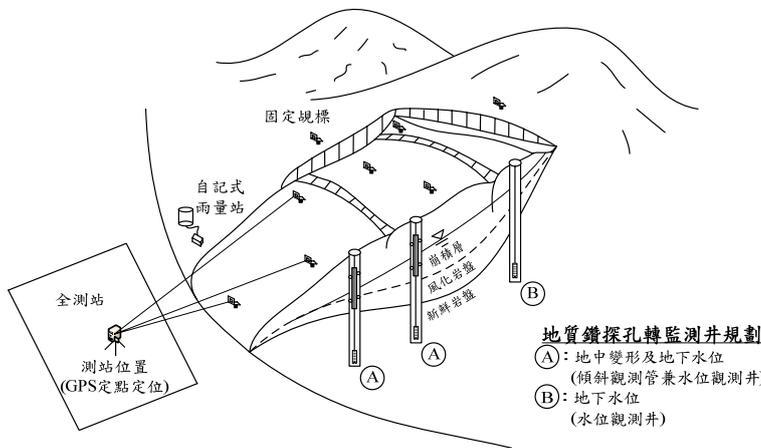


圖 2 現地監測工作項目配置示意圖

四、研究案例

(一) 研究區域位置

松茂崩塌地位於台 7 甲線 69.5 公里處下方，行政區域隸屬台中縣和平鄉梨山村，地理位置如圖 3 所示。其高程介於 1,460 公尺至 1,765 公尺，面積約 3.5 公頃，坡長約 450 公尺，地勢由東南向西北遞降，平均坡度約為 21 度，如圖 4 所示。當地居民主要以松茂部落居民為主。自 921 集集地震後，中橫公路(台 8 線)自青山至德基段崩塌，至今仍未修復通車，因此與台中縣隔絕之梨山地區，對外只能依賴往合歡山之台 14 甲線及往宜蘭之台 7 甲線，故此崩塌區不只對部落居民安全產生威脅，亦對梨山當地居民之民生計有重大影響。



圖 3 松茂崩塌地地理位置圖



圖 4 松茂崩塌地遙測影像與地滑區域圈繪

(二) 地形、地質、氣象與水文資料

本研究區域位於大甲溪上游河岸，大甲溪為中台灣主要河流，河谷走向約自東北向西而行，沿岸常見曲流、沖積扇與河階等地形。東側為合歡溪，北流至環山南側後匯入南湖溪，南湖溪再向西南流至松茂北側匯入大甲溪。受此河流系統作用形成一山脊稜線，山脊稜線又被南湖溪分為南、北兩段，北段為平岩山—環山稜線，環山部落即位於其上；南段則為太保久稜線，而松茂、梨山及福壽山即位於太保久稜線上。太保久稜線頂部海拔約 1,500~2,000 公尺，為典型之角階地形(Ecktreppe)(林朝棨，1957)。

松茂地區位於中央山脈西翼之脊樑山脈帶地質分區之西緣，出露之地層為第三紀中新世之廬山層。該地層主要由黑色至深灰色板岩、千枚岩、硬頁岩與深灰色砂岩互層所組成，偶有零星散布之泥灰岩團塊，劈理構造發達(何春蓀，1986)。研究區域內覆蓋於新鮮岩盤上之滑動地層主要由風化板岩塊、板岩屑、黏土質土壤組成，組織鬆散而不均勻。岩盤風化深度與氣候、地形、地層岩性、地質構造、河谷解壓及環境等因素有關，依大甲溪河谷切割侵蝕型態研判，本區域進大甲溪處應屬壯年期地形。河谷兩岸偶有岩盤裸露且坡度較陡，約 30~50 度，河谷上部接近山脊處，偶露老年期地形特徵，留有侵蝕或沉積遺跡，河谷腰部則分布著大小丘陵地，易形成地滑條件。至於河岸攻擊坡趾易受河流冲刷而肇生邊坡破壞。

於地質構造方面，研究區域附近最主要的地質構造為梨山斷層，斷層由研究區域西側通過。梨山斷層位於中新世廬山層與漸新世佳陽層間，梨山斷層之位置與型態雖有許多不同基調之論述，但各種論述及證據都能支持研究區域附近確實曾經歷劇烈地殼變動而導致地層破碎及變質，進而形成現在的地形與地質狀態(如圖 5 所示)。

松茂崩塌地年平均氣溫為攝氏 15.2 度，月

刪除: 佈

均溫以 6 月份為最高(22℃)、1 月份為最低(9.4℃)。年平均雨量約 2,150mm。年平均降雨日數為 146 日，降雨多集中在 5~9 月，占全年雨量 64%，其中 5~6 月平均降雨量可達 300mm 以上；11 月至隔年 2 月為乾季，雨量僅為年雨量 18%。降雨量主要受梅雨季、地形及颱風所影響，春、夏兩季雨量豐沛，秋、冬兩季雨量甚少，6~9 月降雨額外受颱風影響而明顯增加。

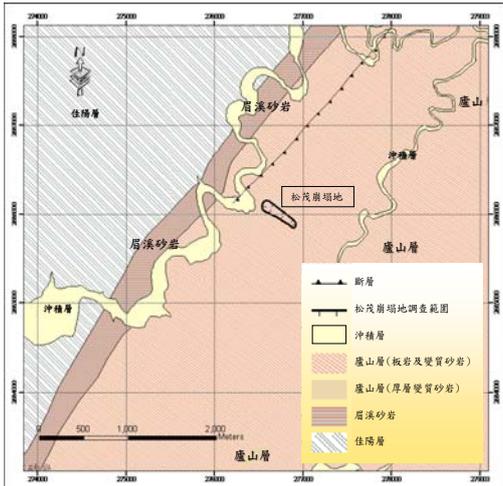


圖 5 松茂崩塌地區地質圖

松茂地區位於凹谷地形，降雨及地表逕流易匯集並沿著地表風化表土或裂隙滲入地下，更易沿滑動區頂部張裂縫發達之區域滲入地下。若原滑動界面存在較不透水之阻水層面，則易蓄積成為暫棲地下水，逢大雨時此棲止地下水位易迅速累積並抬升，將降低邊坡的穩定性。

(三) 水文地質調查及試驗成果

綜合地質鑽探資料可知本研究區域地質由上而下可簡化為三層，各地層材料之基本物理、滲透及力學性質，如表 2 所示。

第一層為崩積層(山坡表土堆積層)，主要是由棕灰色破碎板岩塊夾黃褐色砂土及泥所構成。厚度自十幾公尺至二十幾公尺不等，碎屑岩塊大小不一，小者數公分，大者數十公分，此層岩屑

膠結鬆散，易受地表逕流冲刷掏蝕。體積含水量函數(Volumetric Water Content Function)曲線如圖 6 所示，水力傳導函數則由室內透水試驗及 Fredlund and Xing(1994)公式推算而得(見圖 7)。

第二層為風化岩層(中度風化及破碎之板岩層所組成)，此區弱面多夾泥且局部銹染，板岩之劈理發達，且坡面淺層解壓作用顯著，故淺層之板岩易受風化擾動，形成一鬆動帶。受重力下滑影響，擾動帶內之板岩劈理位態呈不規則之變化。岩體內解壓節裡發達，部份節理成開口狀，或已形成裂縫，部份開口者具有黏土填充物，節理或劈理面常有鐵質銹染，透水性大。破碎帶厚度約十幾公尺，其風化與破碎程度隨地表之深度而遞減。第三層為基盤岩層(新鮮安定之灰黑色新鮮板岩層)，板狀板岩之岩質堅實緻密，岩層中偶夾石英脈。

表 2 地質材料參數(初始分析參數)

地層	崩積層	風化岩層	基盤岩層
飽和透水係數 K_s (m/sec)	$10^{-4} \sim 10^{-6}$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	$10^{-6} \sim 10^{-8}$
單位重 γ_t (kN/m ³)	16.5 ~ 17.5	24.3	26.6 ~ 27.4
凝聚力 C (kPa)	0	20*	699 ~ 844
摩擦角 ϕ (deg)	25.5 ~ 28.1	20*	46.6

註：*表引用自林德貴等人(2008)

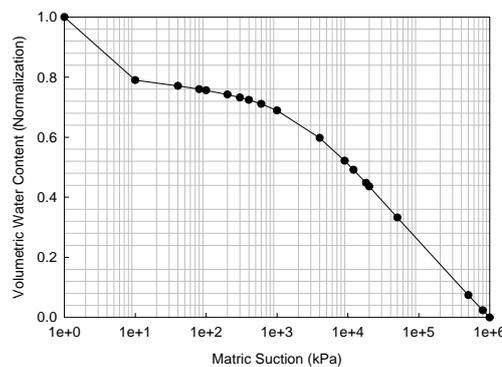


圖 6 崩積層之完整土壤水分特性曲線

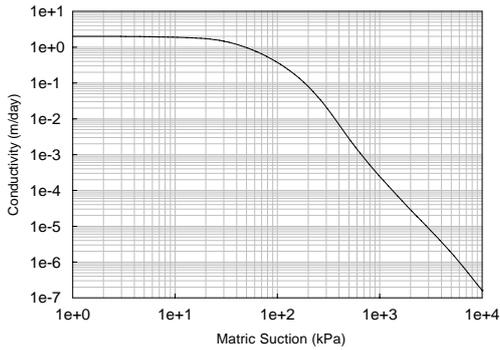


圖 7 崩積層水力傳導函數曲線

(四) 現地監測成果

由民國 96 年 11 月現地開始監測至今，崩塌地內設置之雨量計所記錄的日降雨量(圖 8)可看出降雨量主要受梅雨季、地形及颱風所影響，多集中在 3~10 月，11 月至隔年 2 月為乾季，此外 7~9 月降雨額外受颱風影響而明顯增加，其中四場颱風事件(卡玫基、鳳凰、辛樂克及薔蜜)即占 2008 年全年總降雨量之 53.4%，茲將研究期間歷經之颱風紀錄及其降雨量整理如表 3 所示。另外，由地下水監測資料可發現研究區域內 BH-01 鑽孔地下水位受季節影響頗大(約 4 至 5 公尺幅度之變化)，並隨降雨事件而抬升，惟抬升之幅度不甚顯著；而 BH-05 鑽孔地下水位受降雨影響並不顯著，如圖 9 所示。由此可知此崩塌地之地下水文呈現複雜且多變之型態。

表 3 監測期間颱風事件之降雨紀錄

日期	颱風名稱	累積降雨量(mm)
民國97年7月16~18日	卡玫基	179.30
民國97年7月26~29日	鳳凰	310.10
民國97年9月11~13日	辛樂克	681.50
民國97年9月27~28日	薔蜜	349.50
民國98年8月 5~10日	莫拉克	635.50

此外，監測期間發現松茂崩塌地具有一處明顯滑動面的存在，位於地表下約 18~20m(崩積層與風化岩層交界面)。首先於民國 97 年 08 月(鳳

凰颱風過後)發現 BH-03 傾斜觀測管地表下 19.0m 處產生嚴重變形，研判崩積層與風化岩層交界面已產生滑動；BH-05 水位觀測井也因變形過大而喪失功能性。民國 98 年初於 BH-03 及 BH-05 旁新增 2 孔傾斜觀測管兼水位觀測井(BH-03A 及 BH-05A)以延續現場監測工作，監測成果如圖 10。

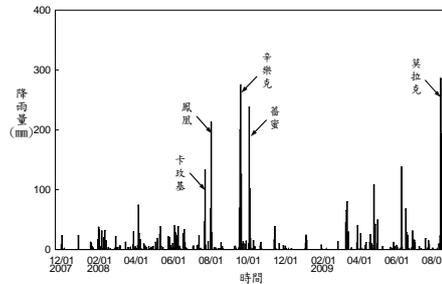


圖 8 松茂崩塌地日雨量紀錄

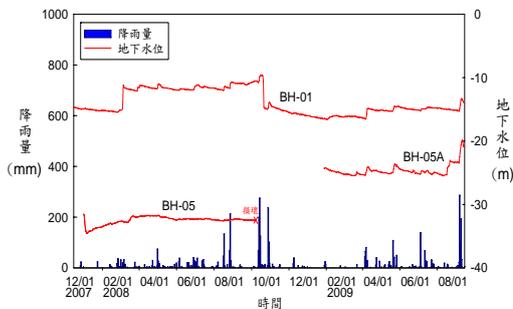


圖 9 松茂崩塌地地下水位紀錄

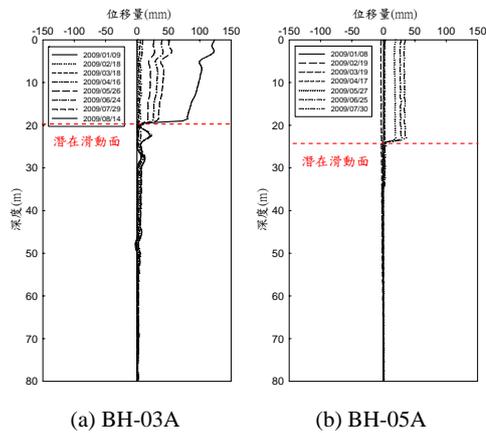


圖 10 松茂崩塌地地中水平變位紀錄

由圖 10 可知，民國 98 年 8 月之莫拉克颱風再次造成 BH-03A 及 BH-05A 傾斜觀測管損壞(深度：19.0m 及 22.5m)，而由圖 10 可清楚得知松茂崩場地潛在滑動面之位置為崩積層及風化岩層之交界面。

(五) 模式分析成果

本文透過上述各項水文地質特性調查及室內試驗結果，結合現地勘察及監測資料所顯示之邊坡行為，建立松茂崩場地之水文地質概念模型，如圖 11 所示。模型中將地層簡化為三層，分別為崩積層及其下之風化岩層(風化破碎之板岩層)與基盤岩層(新鮮安定之板岩層)，並假設所有材料性質皆為均質(Homogenous)且等向(Isotropic)，相關之參數及條件如下：

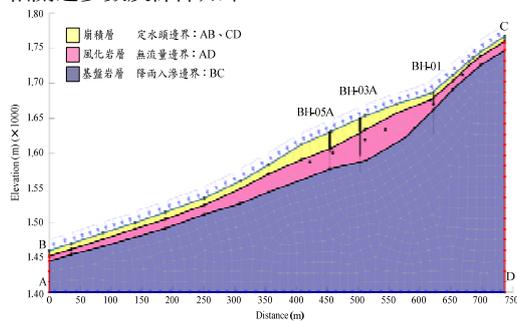


圖 11 松茂崩場地水文地質概念模型

1. 水文地質及力學參數

本文首先就前述各項現地調查及室內試驗結果作為模式分析之初始參數，如表 2 所示。由現地監測資料可知，現地常時地下水位皆位於新鮮岩盤之上，因此將其材料性質設為飽和狀態，其上之地層則設為飽和/不飽和狀態進行分析。崩積層之土水特性曲線及水力傳導函數曲線則如圖 6 及圖 7 所示。

2. 穩態及暫態分析水力邊界條件

為簡化滲流分析條件，穩態分析之邊界條件設定如下：模型中之左邊及右邊邊界參考現地水位井觀測資料，將其設為定水頭邊界，總水頭值分別為 1758m 與 1445m；底部邊界則考量下方新

鮮板岩之水力傳導性甚小，故將其視為無滲流行為，設為一單位滲流為零之不透水邊界。於暫態分析中，除前述之穩態分析水力邊界條件外，本研究設定崩場地崩積層之坡面為降雨入滲邊界，採用實際之降雨資料(單位流量)作為其邊界條件，降雨資料由現地裝設之雨量計獲得。

3. 初始條件

地下水滲流暫態分析時之初始條件乃採用穩態分析率定後之地下水位。邊坡穩定性分析中所需之地下水位及孔隙水壓值乃利用 SEEP/W 降雨入滲-地下水滲流分析中每一時階計算所得之結果做為其初始條件；滑動面起始及結束之位置限制在模型右邊之稜線及左邊之河谷之間。

4. 模式率定與驗證

本文利用民國 98 年 1 月至 7 月之監測資料率定模式及分析所需參數後，再將 8 月份莫拉克颱風之降雨歷時資料輸入進行降雨誘發滑動模式分析，最終將模式分析結果與該事件實際造成之崩塌位置比對，以驗證本模式分析於預測重大降雨事件崩塌位置與規模之正確性與準確度。

水文地質概念模型於水力參數率定階段，須分別考量穩態及暫態分析成果比對。穩態地下水位分析係將數值分析所得到之壓力水頭值與現場水位觀測井之水位資料進行率定，率定方式係藉由反覆調整概念模型內各地層水力參數值，使模擬成果與實際監測之地下水位相符。暫態地下水位分析係利用穩態分析所得之地下水位作為初始條件，以監測之日降雨量資料作為降雨入滲邊界條件，率定方式同穩態分析步驟。松茂崩場地率定成果如圖 12 及表 4 所示。

為確保前述水文地質概念模型之可靠度，本文透過莫拉克颱風事件進行驗證，驗證方式係將颱風事件之降雨資料輸入前述已率定之模型中，比對模式分析成果與現場水位觀測井之地下水位資料。驗證結果顯示長期地下水位變動趨勢及莫拉克颱風期間水位抬升模擬值均與實際量測值具

一致之趨勢，由此可知，本文所建立的水文地質概念模型及參數具有相當之代表性。

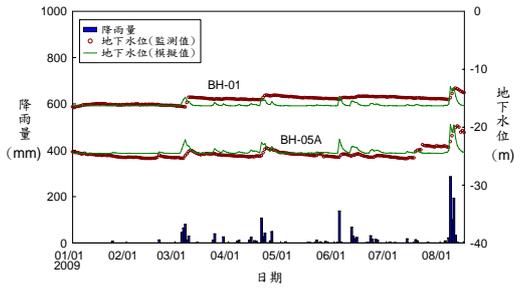


圖 12 地下水位率定及驗證成果

表 4 率定完成後之地質材料參數

地層	崩積層	風化岩層	基盤岩層
飽和透水係數 K_s (m/sec)	4.6×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.9×10^{-6}
單位重 γ_t (kN/m ³)	22.9	24.3	27.2
凝聚力 C (kPa)	0	20	500
摩擦角 ϕ (deg)	20	32	46

力學參數率定工作係以民國 98 年 8 月莫拉克颱風事件造成松茂崩場地滑移現象作為臨界狀態，比對模式分析成果與傾斜觀測管地中水平變位資料，反覆調整各地層之力學參數值，以符合此時之安全係數 F.S 等於 1.0 之臨界狀態，率定成果及各地層之力學參數如圖 13 及表 4 所示。

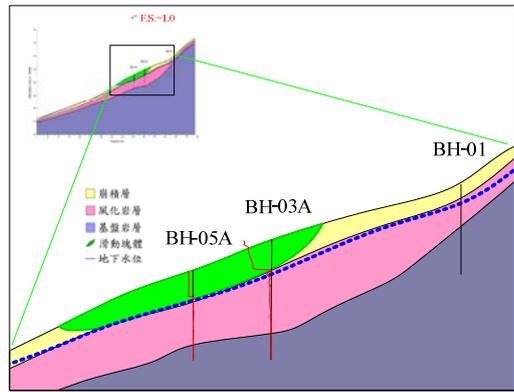


圖 13 邊坡穩定分析成果與現場監測資料比對

(六) 關聯性研究及預警應用

由於影響坡地穩定性之降雨因素甚多，諸如降雨強度、降雨延時、降雨型態與前期降雨等，本文考量中央氣象局於颱風來襲前可發布登陸時間、滯留時間(降雨延時)及預估累積降雨量等資料，故以降雨強度、降雨延時、降雨型態等三因子作為探討重點，期能透過不同累積雨量及降雨延時資訊推估坡地穩定與否及發生災害的時間，供未來坡地預警架構研擬參考之用。

本文以 72 小時降雨延時為例，探討不同設計雨型(如圖 14 所示)及重現期累積雨量對崩場地穩定性之影響。圖 15 為 72 小時降雨延時下不同雨型之正規化累積降雨量曲線，雨量資料乃採中興工程顧問社(2008a)估算松茂崩場地 5、10、50 及 100 重現期雨量進行探討(見表 5)。當降雨延時、累積降雨量及雨型選定後，即可反算降雨歷時中每小時之降雨量，再以此降雨歷時資料輸入先前建立之數值模型內進行分析。

表 5 松茂崩場地不同重現期之累積降雨量

重現期距(年)	降雨延時(小時)	累積降雨量(mm)
5	72	356.0
10	72	427.5
50	72	589.8
100	72	661.1

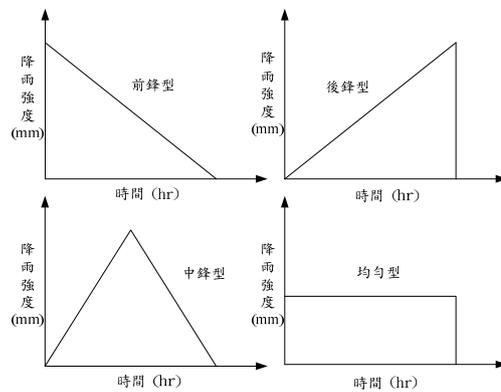


圖 14 設計雨型種類

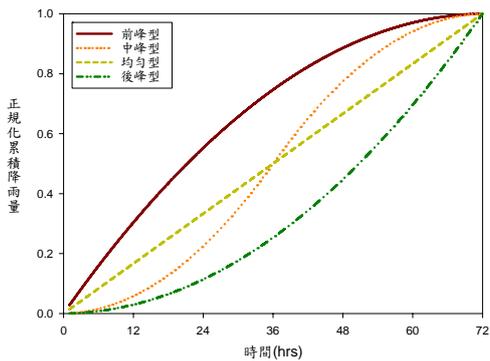


圖 15 72 小時降雨延時下不同雨型之正規化累積降雨量曲線

1. 關聯性研究

圖 16 為各重現期累積雨量時松茂崩場地安全係數隨降雨歷時之變化，由圖 16 可知：(1)累積雨量越大所分配至各時階之降雨量越大，致使入滲後水位抬升結果較顯著，安全係數較快降低；(2)前峰型的降雨型態對松茂崩場地穩定性之影響速率較為顯著，約在降雨 9 小時後，其安全係數下降到 1.0；(3)後峰型的降雨型態對松茂崩場地穩定性之影響速率雖較為緩慢，但其安全係數下降之幅度最多。

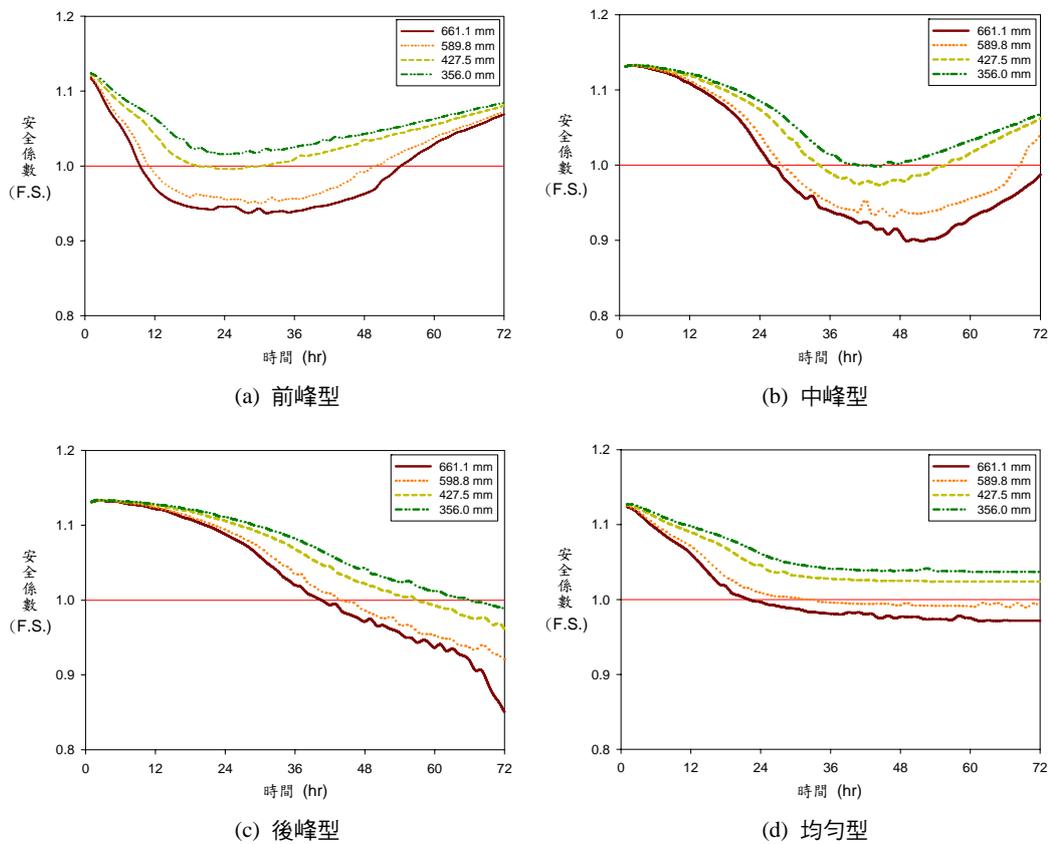


圖 16 不同累積雨量松茂崩場地安全係數隨降雨歷時之變化

2. 預警應用

由關聯性研究成果進一步作為坡地預警應用

時，本文擬由重現期累積雨量及降雨延時推估崩場地之穩定與否及發生崩壞時間。圖 17 為不同

降雨型態時松茂崩場地安全係數隨降雨歷時之變化，以預估累積降雨量為 733.7mm(200 年重現期累積雨量)，降雨延時為 72 小時為例，經查詢圖 17(a)，可瞭解當降雨型態為前峰型時，松茂崩場地可能於第 9 小時其安全係數達臨界狀態，若為

後峰型則需至 38 小時其安全係數方達臨界狀態。由前述各雨型分析所得之破壞時間，對應圖 15 之正規化累積降雨曲線，透過換算即可估算崩場地發生滑動時之臨界降雨量，供災害預警之參考。

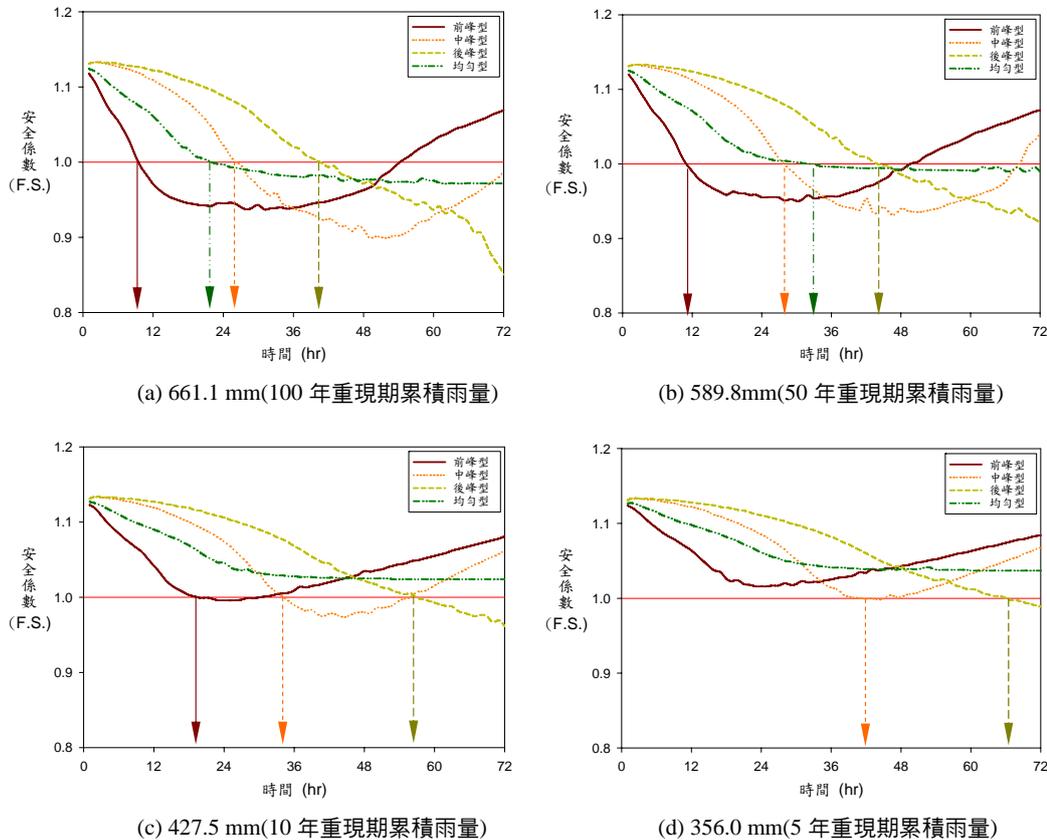


圖 17 不同降雨型態松茂崩場地安全係數隨降雨歷時之變化

五、結論

根據前述研究成果可歸納以下結論：

1. 本文經由一系列現地調查及室內試驗所得結果，建立松茂崩場地之水文地質概念模型，並利用長期監測資料及莫拉克颱風導致崩場地滑動事件之監測數據進行模型率定及驗證。結果顯示模式分析成果與現地監測資料相符，顯示本文建立之一系列現地水文地質調查、試驗、

監測及室內分析模式具有實務應用之價值與準確性。

2. 由長期監測成果可知，松茂崩場地自民國 97 年底監測至今，監測期間歷經多場颱風事件，且有持續滑移之跡象。由關聯性研究成果可知松茂崩場地受降雨誘發滑動之潛勢相當高。
3. 本文針對 72 小時延時之不同重現期累積雨量及 4 種不同之降雨型態作關聯性探討，結果顯示前峰型的降雨型態對松茂崩場地穩定性之影

響速率較為顯著，後峰型降雨型態之影響速率雖最為緩慢，但安全係數下降之幅度最多。

4. 關聯性研究成果可評估坡地發生滑動的時間，透過換算即可估算崩塌地發生滑動時之臨界降雨量，此研究架構及成果可供後續防減災措施、保全策略擬訂及坡地預警技術研擬之參考。

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。對於工作期間努力付出的財團法人中興工程顧問社同仁，亦一併感謝諸位對此研究之付出與努力。

參考文獻

何春燕 (1986) 臺灣地質概論，經濟部中央地質調查所
 林朝榮 (1957) 臺灣地形，臺灣省文獻委員會
 林德貴、張國欽、蘇苗彬 (2008) 颱風降雨期間梨山地滑區邊坡穩定性之數值評估，中華水土保持學報，39(1)，第 57-81 頁
 林德貴、黃伯舜、蘇苗彬 (2005) 以數值分析方法再論林肯大郡坡地破壞，中華水土保持學報，36(3)，第 215-232 頁
 財團法人中興工程顧問社 (2008a) 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
 財團法人中興工程顧問社 (2008b) 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，計畫成果報告，經濟部中央地質調查所
 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，計畫成果報告，經濟部中央地質調查所
 財團法人成大研究發展基金會 (2007) 松茂地區地滑地整體治理調查規劃，期中報告，行政院農業委員會水土保持局第二工程所
 許正輝 (2005) 降雨入滲對集水區邊坡穩定之影響探討，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程研究所
 葉信富、陳進發、李振誥 (2005) 降雨入滲對坡地穩定影響之研究，中華水土保持學報，36(2)，第 145-158 頁
 鄧鳳儀 (2008) 湖口崩塌地水文地質數值模型回饋分析研究，碩士論文，國立中央大學應用地質研究所

鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅 (2009) 莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值分析案例，地工技術，122，第 133-142 頁
 鍾明劍、譚志豪、冀樹勇、顧承宇、蘇泰維、李錦發、費立沅 (2009) 松茂崩塌地降雨促崩潛勢評估與監測驗證，2009 海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會，台中，台灣
 謝平成、王瀚衛 (2004) 降雨滲流現象對邊坡穩定之時變分析，水土保持學報，36(2)，第 135-142 頁
 Blatz, J.A., Ferreira, N.J., and Graham, J. (2004) Effects of Near-surface Environmental Conditions on Instability of an Unsaturated Soil Slope," Canadian Geotechnical Journal, 41, pp. 1111-1126
 Bozzano, F., Cherubini, C., Floris, M., Lupo, M., and Paccapelo, F. (2002) Landslide Phenomena In the Area of Pomarico (Basilicata-Italy): Methods for Modeling and Monitoring, Physics and Chemistry of the Earth, 27(36), pp. 1601-1607
 Caine, N. (1980) The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows, Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography, 62(1), pp. 23-27
 Cascini, L., Gulla, G., and Sorbino, G. (2006) Groundwater Modeling of a Weathered Gneissic Cover, Canadian Geotechnical Journal, 43, pp. 1153-1166
 Fredlund D.G., Xing Anqing, and Huang Shangyan (1994) Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 533-546
 GEO-SLOPE International Ltd. (2007) Seepage Modeling with SEEP/W 2007: An Engineering Methodology, User's Guide
 GEO-SLOPE International Ltd. (2007) Stability Modeling with SLOPE/W 2007: An Engineering Methodology, User's Guide
 Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2008) The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows: an update, Landslides, 5(1), pp. 3-17
 Misfeldt, G.A., Sauer, E.K., Christiansen, E.A. (1991) The Hepburnlandslide: an Interactive Slope-Stability and Seepage Analysis, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 347-356
 Van Genuchten, M. Th. (1980) A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, 44, pp. 892-898
 Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H., Noguchi, T., and Samizo, M. (1995) Statistical Rainfall Risk Estimating Method for a Deep Collapse of a Cut Slope, Soils and Foundations, 35(4), pp. 37-48