

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

鄭清江 譚志豪 鍾明劍 李錦發 費立沅
華梵大學環境與防災設計學系 財團法人中興工程顧問社 經濟部中央地質調查所

摘 要

本文除對這次莫拉克颱風引發之高屏地區邊坡崩塌勘查資料作彙整報導外，並透過這次颱風期間之降雨入滲、雨水滲流、地下水變動、地層孔隙水壓變化及地層位移之模擬成果，探討完整之水文地質穩定分析案例。勘查路線包括高雄縣旗山溪與荖濃河流域，主要道路則有台20、台27、台27甲線、高128及高130縣道。災害類型主要包括：道路與河岸邊坡崩坍，另有多處大型土石崩落與土石流災害。案例分析部分係以經濟部中央地質調查所委託中興工程顧問社於寶隆崩場地（高128縣道）案例為例作說明，此案例透過詳實之現地鑽探、調查與試驗成果建置水文地質概念模型，再以GeoStudio™進行模擬分析，模式分析之正確性係透過現場監測值進行驗證。驗證成果顯示此模式已可擬合颱風前之常時水位且掌握莫拉克颱風期間水位抬升之型態，進而可評估其穩定性及變形性。

關鍵字：莫拉克颱風、降雨引致災害、邊坡崩塌勘查、邊坡穩定數值分析。

Field Exploration and Numerical Analysis for the Case of Rainfall Induced Landslide in Cau-Pin Area by Typhoon Morakot

Ching-Jiang Jeng

Department of Environmental & Hazards-Resistant Design, Huafan University

Chih-Hao Tan Ming-Chien Chung

Sinotech Engineering Consultants, Inc.

Jiin-Fa Lee Li-Yuan Fei

Central Geological Survey, MOEA

Abstract

This paper present the field exploration of the hazards of rainfall induced landslides by the Typhoon Morakot in Kao-Pin area, and the hydro-geological numerical simulation analysis for an integrity monitoring case study on the infiltration, seepage, groundwater variation, pore water pressure change and displacement of the slope land. The exploration routes are along the Chishan river and Laonong river watershed in Kaohsiung County. The main routes included are Route 20, Route 27, Route 27 A and county road No. 128 and No. 130. Type of disasters include: the landslides along road and river banks, and several large-scale rock falls and debris flows. The case study presented refers to the project on the landslide site of Baolong near to the local road No. 128, which was conducted by Sinotech Engineering Consultants Inc. and commissioned by Central Geological Survey, MOEA. For the numerical analysis, the program GeoStudio™ was used, and SEEP / W, SLOPE / W and SIGMA / W modules are applied. An integrated field investigation and test results, as well as on-site monitoring value are used and comparisons are made. The results show that the model of analysis fits the lifting state of water level in the period of typhoon Morakot. Furthermore, it may also appraise the performance of slope stability and deformation.

Key Words : Typhoon Morakot 、 Rainfall Induced Disaster 、 Landslide
Exploration 、 Numerical Analysis of Slope Stability

一、前言

綜觀這次 88 水災所造成南部地區之許多邊坡坍塌災害情況，不乏淺層覆土受豪大降雨所造成之大量土石崩坍案例。由於多數坡地表層普遍覆蓋有崩積土層或風化表土，在豪雨下入滲影響淺層土壤基值吸力變化，以及地下水位上升，進而改變地層之剪力強度，引發坡地位移或滑動。此一連串之變化機制，牽涉到入滲、滲流、吸水軟化、基值吸力改變、水位變動、不飽和土層與飽和土層之穩定性分析等複雜過程，且其數值均在動態時間序列上呈現改變。然以往一般對於降雨對邊坡穩定性影響之探討，大多係在給定之靜態地下水位下之孔隙水壓，作用於分析斷面狀態進行分析，且分析中祇變化地下水位之高程，而未將整個降雨事件由地表入滲影響納入考量。因而分析結果常無法適時與每一次颱風前預估之雨量事先作邊坡之安全穩定性評估，甚而無法真正模擬邊坡可能坍塌機制，以供因應對策之參考依據。

本文除對這次莫拉克颱風引發之高屏地區邊坡崩塌勘查資料作彙整報導外，並透過這次颱風期間之降雨入滲、雨水滲流、地下水變動、地層孔隙水壓變化及地層位移之模擬成果，探討完整之水文地質穩定分析案例，即由降雨-滲流-位移-穩定性串聯式分析模式，並將分析結果與監測數據進行比對以驗證數值之可靠性，期能進一步作為往後坡地在預測雨量下穩定性評估之參考。

二、文獻回顧

2.1 國內外現有相關研究

非飽和土壤力學的試驗與分析在國內仍是偏屬於較新穎的一門研究，近年來雖國內外針對不飽和土壤的理論研究正逐漸發展成熟，然而將理論應用於實例的經驗仍少有完整的現地觀測資料以供印證 (Fredlund, 2006; Fredlund and Rahardjo, 1993; Ng *et al.*, 2003)。華梵大學校園坡地試區在長年觀測下已累積了完整的邊坡變位量測資料，近年亦在國科會補助下完成為期多年的不飽和崩積土層水份張力與土壤水分特性曲線研究 (鄭清江, 2005; Jeng *et al.*, 2007)。

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，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。經濟部中央地質調查所曾利用 GeoStudio™ 進行集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫 (中興工程顧問社, 2008a; 2008b; 2009)。

鄭清江 (2005) 以華梵大學的崩積土坡為試驗坡地，探討在不同時期的降雨模式下，不飽和土壤之負孔隙水壓力 (基質吸力) 形成與消散的過程，及其對崩積土壤強度的影響性。研究內容包含現地監測崩積土坡與相關土體之室內試驗，並求得土壤水分特性曲線，透過分析比較，為崩積土坡非飽和滑動機制提供了參考依據。鄧鳳儀在 2006 年以湖口崩塌地水文地質數值模型作回饋分析研究，其研究中亦利用 GEO-SLOPE Office 軟體之 SEEP/W 有限元素程式進行降雨地下水滲流數值模擬，並建立地質剖面上共計三次崩塌之水文地質模型，根據模擬結果所得之孔隙水壓，利用同套軟體中之 SLOPE/W 極限平衡分程式，進行歷次崩塌地逆分析與正分析，以進一步驗證湖口臺地之地層滑動與水文地質條件之關連性及水文特性 (鄧鳳儀, 2006)。林德貴等人 (2005, 2008) 分別以林肯大郡及梨山為案例，利用數值分析模擬方法藉由現地降雨歷時、配合現地地層各層次之水力傳導係數在逕流入滲、地下水滲流及地下水位變動下計算依時邊坡穩定安全係數，以及即時呈現梨山地滑區趨近實際之滲流行為及其對邊坡穩定性之影響。

2.2 分析模式與程式

GEO-SLOPE Office (2004 年後之版本改名為 GeoStudio™) 為二維有限元素法 (finite element method) 商用套裝軟體，2007 年改版後包含八個不同功能的模組 (AIR/W、CTAN/W、QUAKE/W、SEEP/W、SIGMA/W、SLOPE/W、TEMP/W、VADOSE/W)，利用這些模組可模擬邊坡降雨入滲後之滲流與滑動變形行為。本文採用 SEEP/W、SIGMA/W 以及 SLOPE/W 三個模組進行參數的校核並對坡地影響進行分析。

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，可由所設定的坡地參數計算出相對應的滲流情形，得出地下水位與土體內流網狀態。

使用 SEEP/W 模組得出滲流情形之後，接著使用 SLOPE/W 模組開始進行穩定分析。SLOPE/W 模組採用極限平衡法分析邊坡穩定，主要將土體滑動面分為若干垂直切片，對每一片土體之抵抗力與滑動力採力平衡方式求解安全係數。另外，SIGMA/W 模組採有限元素法分析，利用小位移、應變及增量載重公式對於二維平面

應變或軸對稱問題進行分析，程式透過網格節點之計算，可探討每一載重時階（load step）下之應力應變特性。

利用 SIGMA/W 與 SLOPE/W 模組進行耦合分析（coupled analysis），即可模擬試驗坡體在不同降雨滲流情況下可能產生之位移與整體滑動機制。

三、高屏地區邊坡淺層崩塌災害 勘查資料

3.1 勘查路線說明

本次災區勘查路線包括高雄縣旗山溪與荖濃溪流域。主要道路則有台 20、台 27、台 27 甲線及高 128 及高 130 縣道。由於受莫拉克颱風巨大風雨影響，導致流域兩岸道路多處因土石崩落或路基流失而中斷。

3.2 邊坡崩塌災害情況

本次莫拉克颱風造成荖濃溪流域沿線主要道路及坡地多處災害，沿線主要災情有(1) 新發村新開部落遭土石掩埋，約有 30 罹難，往六龜鄉及荖濃村主要橋樑巴斯蘭橋、新發橋均已遭沖

斷；(2) 六龜鄉新發村 13~15 多戶民宅遭土石掩埋，並有 6 罹難；(3) 新開部落的彩虹山宗教園區，遭土石掩埋，但無人傷亡；(4) 台 27 六津橋及橋旁兩戶民宅均遭掩埋，但無人傷亡；(5) 台 27 草蘭村有 10 民宅遭掩埋，但無人傷亡；(6) 桃源鄉寶來溫泉 10 掩埋，荖濃溪沿線多處崩塌並形成堰塞湖，建山村、勤和村多處橋梁沖毀；(7) 桃源鄉桃源村鄉公所遭掩埋。其餘高屏地區崩塌地災害勘查概況見表 1，勘查點位分部則見圖 1，部分勘查點之照片詳如照片 1（編號 1~16）所列（照片 1 所列勘查點編號可對照表 1）。

3.3 災害類型彙整與原因初判

各調查點災害類型詳如表 1 所示，主要包括：道路與河岸邊坡崩坍，另有編號 5 到 14 多處大型土石崩落與土石流災害。初步災害成因都與暴雨入滲、滲流、水位變動、軟化土層造成淺層土石崩落，並帶下大量岩體碎屑，致使下方民房、道路遭掩埋有關。

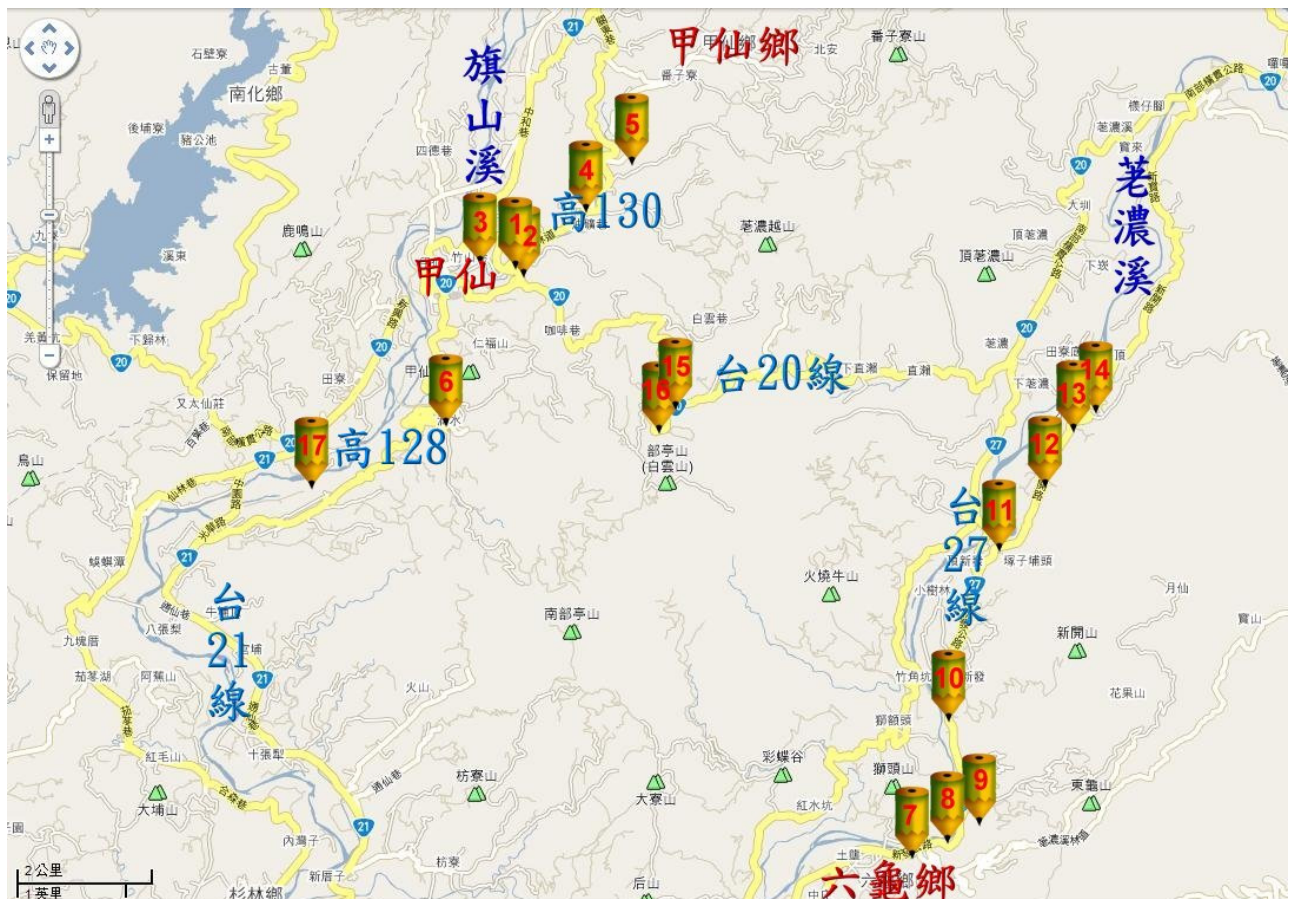


圖 1 崩塌地勘查地點分布圖



編號 1 擋土牆損毀



編號 2 牆體側移



編號 3 河岸崩塌淤積



編號 4 河岸崩塌淤積



編號 5 山崩引發土石流



編號 6 山崩引發土石流



編號 7 河岸侵蝕崩塌



編號 8 道路邊坡崩塌



編號 9 佛寺後邊坡崩塌



編號 10 河岸滑坡路斷



編號 11 土石流引發斷橋



編號 12 邊坡坍方堆積



編號 13 佛寺後邊坡崩塌



編號 14 河岸滑坡路斷



編號 15 土石流引發斷橋



編號 16 邊坡坍方堆積

照片 1 高屏地區崩塌地災害勘查照片

表 1 高屏地區崩塌地災害勘查概況一覽表

編號	流域與道路區位	座標 E	座標 N	災害類型	編號	流域與道路區位	座標 E	座標 N	災害類型
1	旗山溪，甲仙高 130，龍鳳寺下方	209070	2553609	道路下邊坡擋土牆損毀	9	荖濃溪，台 27 線，妙崇寺	215917	2545504	佛寺後方邊坡崩塌
2	旗山溪，甲仙高 130，龍鳳寺上方	209143	2553535	土石崩落牆體側移	10	荖濃溪，台 27 線，新發道路	215509	2547000	土石流河岸路滑坡
3	旗山溪，油礮溪，慈恩橋	208611	2553769	河岸崩塌河床淤積	11	荖濃溪，台 27 線，新寶橋	216180	2549411	土石流引發斷橋
4	旗山溪，油礮溪，3 號橋	210035	2554425	河岸崩塌河床淤積	12	荖濃溪，高 113，彩虹山佛教園區	216336	2550459	邊坡坍方土石堆積
5	旗山溪，油礮溪與崩坪坑交會處	210735	2555086	山崩引發土石流	13	荖濃溪，台 27 線，新發村 23 鄰	217202	2551044	土石流沖毀房屋
6	旗山溪，滴水橋，高 128	208047	2551122	山崩引發土石流	14	荖濃溪，台 27 線，不老溪新開橋	217574	2551478	土石流引發滑坡及房屋崩落
7	荖濃溪，六龜台 27 線，邦腹溪橋	214856	2545023	土石流河岸侵蝕	15	荖濃溪，台 20 線	211456	2551644	道路邊坡崩滑
8	荖濃溪，台 27 線，台電取水口	215408	2545216	河岸道路邊坡崩塌	16	荖濃溪，台 20 線，內寮橋	211235	2551329	道路邊坡崩塌斷橋

四、降雨引致邊坡穩定性數值分析案例

4.1 分析案例基地位置

本次風災災區內，寶隆崩塌地為不飽和土坡相關案例中具較完整監測與分析之案例，寶隆村位於高雄縣甲仙鎮西南方約 3km(詳如圖 1 中編號 17)，二度分帶座標為 (205985, 2550480)。其詳細航照圖參見圖 2，崩塌地位於高雄縣甲仙鄉孢子寮南緣之邊坡，主要通達道路為縣道高 128 線。選定之調查範圍內主要為果園，並有兩間農舍。該區域於民國 94 年 6 月 12 日受到強烈西南氣流滯留梅雨鋒面侵襲，在 6 月 14 日至 15 日期間陸續發生多次崩塌，崩塌後整片山坡衝洩而下，路面不規則隆起，甚至斷裂毀損無法通行。



圖 2 寶隆調查範圍航照圖 (航照日期：2006)

4.2 基本地形水文與地質資料

寶隆調查範圍地形以山間丘陵地為主，主要地勢西北高東南低，坡面傾向東南方，坡度約 20°，高程介於 300~450 m 之間。本區水系屬旗山溪，為高屏流域中最大的支流，寶隆調查範圍位於旗山溪支流之源頭。根據中央地質調查所 1/50,000 甲仙圖幅(宋國城等人, 2000)(圖 3)，寶隆調查範圍出露之岩層為隘寮腳層，臨近出露地層之層位為 N40°E 21°N，岩質主要由薄層的頁岩和粉砂岩所組成的帶狀互層，以頁岩中偶夾不規則葉狀粉砂岩體之紋層構造為其特徵。砂岩含碳質物碎片，偶有波痕、水流波痕交錯層理、水道等沉積構造。隘寮腳層底部以厚層帶狀砂岩為其與鹽水坑頁岩之分界。據地質圖所示，寶隆調查範圍有十張犁向斜軸面通過，其向斜軸之走向約呈北 30° 東，為一向南傾沒且東翼陡西翼緩之不對稱向斜。在寶隆調查範圍一帶，向斜東翼地層之傾角約為 50° 左右，西翼地層之傾角則在 15°~35° 間，十張犁向斜向北延伸為滴水斷層所

錯移，可能與滴水斷層另一側之小林向斜屬同一向斜構造。滴水斷層之走向呈西北北，斷層面向西南傾斜約 60°，為一具有明顯左移特性之走向斜移斷層。

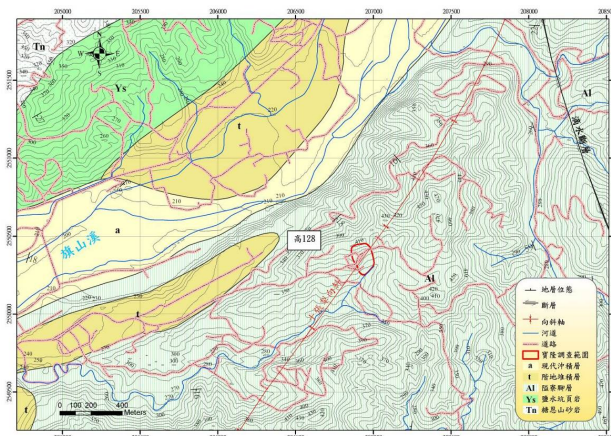


圖 3 寶隆調查範圍區域地質圖 (改繪自中央地質調查所 1/50,000 甲仙地質圖幅)

寶隆調查範圍因四面環山，林木蒼鬱，雨量充沛，故冬暖夏涼、四季如春、氣候宜人，雨量於初夏至初秋較多，年平均氣溫為 24.7°C，月平均最高氣溫為 7 月份約 28.9°C，最低氣溫則為 1 月份 18.8°C，平均濕度則為 77.7%。根據鄰近調查範圍之中央氣象局甲仙雨量站 (C0V250) 觀測資料顯示，本區全年平均降雨量為 2,574.91 mm，其中以 7 月 622.8 mm 為最高，12 月 15.0mm 最低；整年雨水主要集中在 5~9 月間，其平均月降雨量為 457.5mm，總累積雨量佔全年雨量 88.8%；冬季雨量與夏季差異甚大，12~2 月的平均月降雨量僅約 18.8mm。此類短暫且集中之降雨型態較易產生坡地的災害，其中又以尖峰雨量較常發生之 7~8 月期間最為明顯，如民國 95 年 7 月凱米颱風及 97 年 7 月卡玫基颱風期間，均在當地造成了暴雨促崩之災害案例。

4.3 基地監測資料

A. 監測儀器配置規劃

寶隆調查範圍內共設置 1 組雨量站 (FR-01)、1 組地表伸縮計 (FE-01)、2 口全孔水位觀測井 (TFB-01~TFB-15)、2 口分層水位觀測井 (FH-07、FH-09)、15 處地表固定規標點 (F01~F15)、3 口傾斜觀測管 (FH-01、FH-03 及 FH-05)、及 2 處土壤張力計 (FF-01、FF-02，共計 6 支張力計)。本研究於寶隆調查範圍內同步進行降雨量、地下水位、地中水平變形、地表變形及淺層不飽和土壤張力等監測工作，儀器布置圖如圖 4 所示。



圖 4 寶隆調查範圍監測儀器布置圖（航照日期：2006）

B. 監測儀器安裝成果

寶隆調查範圍之監測儀器安裝相關資料如圖 5 所示。其中，分層觀測井 (FH-07 及 FH-09) 係依鑽探岩心與孔內水文地質探測成果綜合研判其分層深度，並配合全孔水位觀測井 (FH-01 及 FH-05) 位置搭配，以釐清各含水層型態（淺層自由含水層、暫棲水層及受壓含水層）內水位（水壓）之變化。

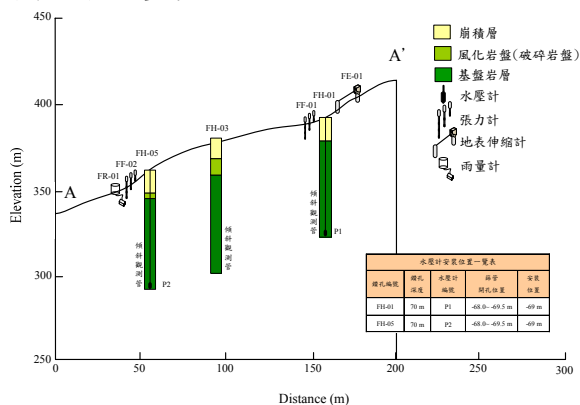


圖 5 寶隆調查範圍沿 AA'分析剖面之監測儀器布置圖

C. 監測成果

(A) 降雨量監測

寶隆調查範圍監測所得降雨量資料，於有效監測期間內（民國 98 年 7 月 20 日至 98 年 10 月 12 日）之累積雨量約為 2,329mm，並監測得莫拉克颱風之降雨紀錄。莫拉克颱風時雨量紀

錄，此場颱風事件之累積雨量約 1,828mm，最大日雨量發生於民國 98 年 8 月 8 日，所量得之日雨量達 947mm，屬於超大豪雨事件。

(B) 地下水位監測

寶隆調查範圍地下水位監測資料，由各孔水位觀測成果可知地下水位隨降雨量之增加而有所抬升，尤其以颱風豪雨事件之影響為鉅；而分層水位觀測井的觀測結果顯示寶隆調查範圍下有一明顯之受壓含水層，其常時及颱風豪雨時之地下水位皆高於淺層地下水位。

(C) 地表及地中位移監測

寶隆調查範圍地表及地中位移監測系統包含地表固定規標點位建置、地表伸縮計與傾斜觀測管之安裝及量測作業，茲分述如后。

地表固定規標布置位置如圖 4 所示，莫拉克颱風事件前後各完成一次量測工作，點位變化成果彙整如圖 6 所示。由圖 6 可知寶隆調查範圍歷經莫拉克颱風侵襲後，各地表固定規標均無產生明顯變位，其變位量在 0.22~1.34cm 不等，顯示寶隆調查範圍僅局部區域略有潛移跡象，尚未見大規模深層滑動跡象。

地表伸縮計布置規劃如圖 4 所示，監測期間歷經莫拉克颱風事件，由監測成果可知設置於坡頂之地表伸縮計於歷經此颱風事件後產生約 2.2cm 之變形。

寶隆調查範圍已執行 4 次地中水平變形資料量測，由監測成果可知寶隆調查範圍於監測期間

歷經莫拉克颱風事件後，地中變形並無產生顯著變位，也無發現明顯滑動面的存在，整體而言，寶隆調查範圍尚未有大規模深層滑動跡象。

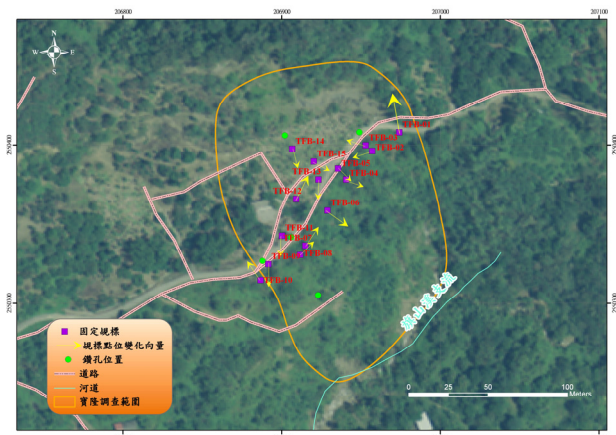


圖 6 寶隆調查範圍固定規標點位移向量圖（航照日期：2008）

(D) 淺層不飽和土壤基質吸力監測

淺層不飽和土壤基質吸力監測布置規劃如圖 4 所示，由監測成果可知：(1) 監測期間之基質吸力有隨降雨事件而下降之現象；(2) 基質吸力隨降雨事件結束後有緩慢增加的趨勢；(3) 基質吸力受降雨入滲使含水量提高之影響而明顯下降，且係由最深層（3.0m 處）先有反應，淺層（2.0m 及 1.0m 處）深度之基質吸力隨之反應，此與一般常見降雨入滲反應相反，推測應為寶隆調查範圍表土透水性較小，雨水入滲速率較慢，而地下水位接近地表且隨降雨事件之抬升顯著之故。

4.4 分析模式與輸入參數

本研究結合寶隆調查範圍的水文與地質特性，建立從降雨入滲引致地下水位變化，進而導致崩塌的分析模式，探討山崩與水文地質的關聯性。本研究採 GeoStudio™ 進行降雨入滲條件下之邊坡穩定分析，其特色為可進行降雨入滲、滲流、穩定性及變形等模式之耦合分析。上述分析模式均由崩塌地現地監測成果進行參數反算分析及比對驗證，茲分述如后。

A. 分析流程

寶隆調查範圍的分析程序，先由現地鑽探、調查與試驗成果建置水文地質概念模型，再分別以 GeoStudio™ 中 SEEP/W、SLOPE/W 及 SIGMA/W 分析模組進行模擬。SEEP/W 分析模組係模擬降雨入滲及滲流行為，包含有穩態滲流分析（steady-state seepage analysis）及暫態滲流分析（transient seepage analysis），其中穩態滲流分析旨在模擬穩態滲流場及常時地下

水位；暫態滲流分析則以降雨歷線作為降雨入滲邊界，以模擬每一時階（time step）之地下水位變化。SLOPE/W 及 SIGMA/W 分析模組係分別模擬崩塌地之穩定及變形行為，各時階之滲流場及地下水位均由 SEEP/W 模擬成果提供，以探求崩塌地在每一降雨歷線時階下因水位變化所引致之位移量及可能滑動面之安全係數變化。上述模擬成果均與現場監測值進行比對，其成果可回饋於參數反算及率定，並可驗證分析模式之適用性。

B. 水文地質概念模型

寶隆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 FH-01、FH-03、FH-05 等鑽孔至底部溪溝為止。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。本場址的水文地質單元可分為崩積層、風化岩層以及基盤岩層等層。

水文地質概念模型的水力及位移邊界條件（詳如圖 7），降雨入滲及滲流分析時，將左側邊界設定為定水頭邊界（constant head boundary），其值等於坡趾處溪溝的水位高程；右側邊界因已達稜線，故設定為無流量邊界（no flux boundary）；模型底部設定為無流量邊界；坡面則設定為降雨入滲邊界（rainfall-infiltration boundary）。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監測所得之降雨量。變形性分析時，左、右兩側水平方向設為零位移邊界，模型底部之水平及垂直方向均設為零位移邊界。

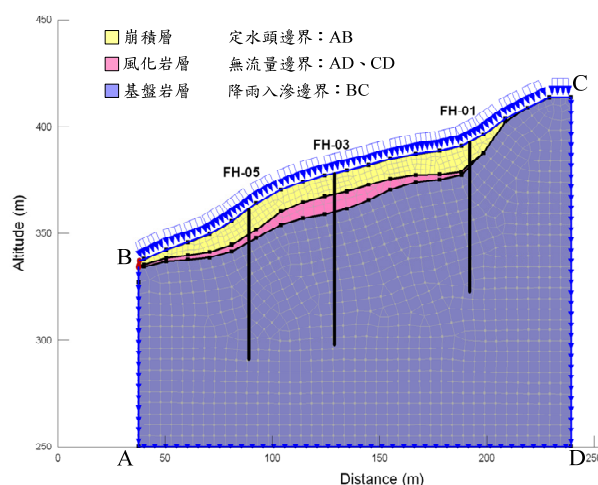


圖 7 寶隆調查範圍水文地質模型與邊界條件

根據民國 98 年 7 月 20 日至 9 月 18 日間之現地監測資料，已初步完成各水文地質單元參數率定工作，如表 2 所列。

表 2 各水文地質單元參數率定成果

水文地質單元 參數名稱	崩積層	風化 岩層	基盤 岩層
飽和透水係數 $K_s \times 10^{-6}$ (m/sec)	50	1.9	0.01
飽和體積含水量 ω (%)	0.35	0.11	0.10
單位重 γ_t (kN/m ³)	20.0	25.3	25.7
摩擦角 ϕ (deg)	27	32	40
凝聚力 c (kPa)	25	100	500
彈性模數 $E \times 10^5$ (kPa)	35	3.0	0.35
柏松比 μ	0.33	0.32	0.22

4.5 分析結果與討論

A. 降雨入滲及滲流分析成果

各水文地質單元水力參數之參考值係透過現地雙環入滲試驗、壓力鍋試驗、封塞水力試驗及室內透水等求得，再藉由民國 98 年 7 月 20 日至 9 月 18 日間之現地水文監測資料進行模式率定與驗證工作。本研究先以非降雨期間之常時水位資料進行穩態滲流分析，以率定各項水力參數；再以降雨期間（包含莫拉克颱風事件）之變動水位進行暫態滲流分析，以驗證各項水力參數之適用性。透過上述程序可掌握此場址各水文地質單元之水力參數及地下水位變動特性，並提供後續穩定性及變形性分析使用，茲分述穩態及暫態率定成果如后。

穩態滲流分析旨在擬合分析剖面上 FH-01 及 FH-05 水位觀測井之常時水位，由監測資料可知，莫拉克颱風前 FH-01 與 FH-05 常時水位分別約於地表下 21~23m 及 14~15m 間。由穩態滲流分析所得地下水位分布可知，坡頂至 FH-01 觀測井間基岩出露處之常時水位存在於基盤岩層內，FH-01 觀測井至坡趾間之常時水位則存在於風化岩層下部，另由滲流向量可知其地下水沿崩積層與風化岩層交界處之流動速度較快。

暫態滲流分析係以上述穩態滲流邊界及常時地下水位作為初始條件，並設定坡面為降雨入滲邊界，以模擬降雨條件下垂直入滲及地下水滲流引致水位變化之情形。降雨入滲邊界採民國 98 年 7 月 20 日至 9 月 18 日之降雨量，期間歷經莫拉克颱風事件，雨量組體圖如圖 8(a)所示。

圖 8(b)中紅色圓點為 FH-01 觀測井水位監測紀錄，監測資料顯示莫拉克颱風前地下水位約於地表下 21~23m（設定為常時水位），颱風後地下水位大幅下降至地表下 40~42m，颱風期間水位變化幅度可從地表下 4m 降至 42m，降幅達

38m。分析成果（綠色實線）顯示此模型可模擬出莫拉克颱風期間水位抬升變化趨勢，惟颱風後水位大幅下降至地表下 42m 的水位消散行為尚未能有良好模擬。圖 8(c)中紅色圓點為 FH-05 觀測井水位監測紀錄，監測資料顯示莫拉克颱風前、後地下水位均約於地表下 14~15m（設定為常時水位），颱風期間最高水位可達地表下 1.2m。分析成果（綠色實線）顯示此模型可模擬出莫拉克颱風期間水位抬升變化趨勢及颱風後水位洩降幅度，惟颱風後水位迅速消散的行為尚未能有良好模擬。綜合 FH-01 及 FH-05 觀測井水位分析成果可知，本研究建置之分析模型已可擬合颱風前之常時水位並掌握颱風期間水位抬升的型態，惟颱風後水位消散行為則待後續監測資料進行回饋修正。

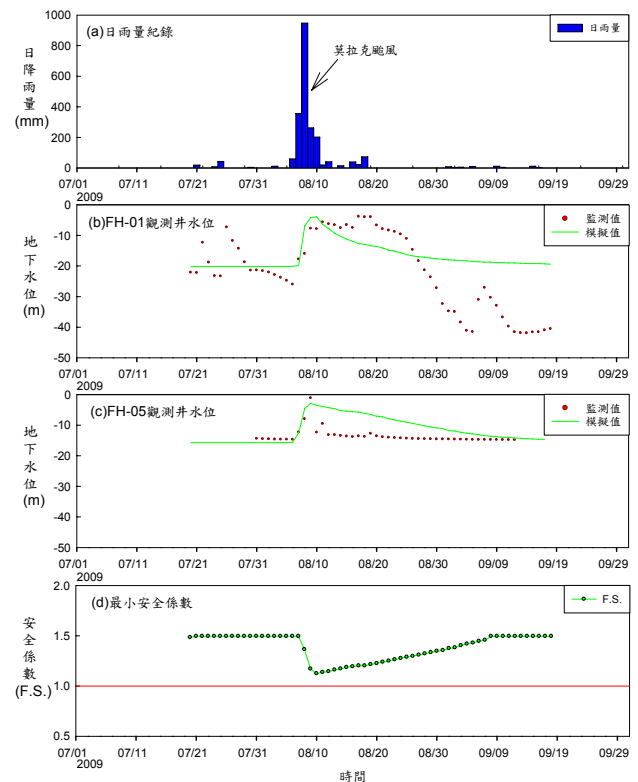


圖 8 寶隆調查範圍二維降雨入滲邊坡穩定分析成果

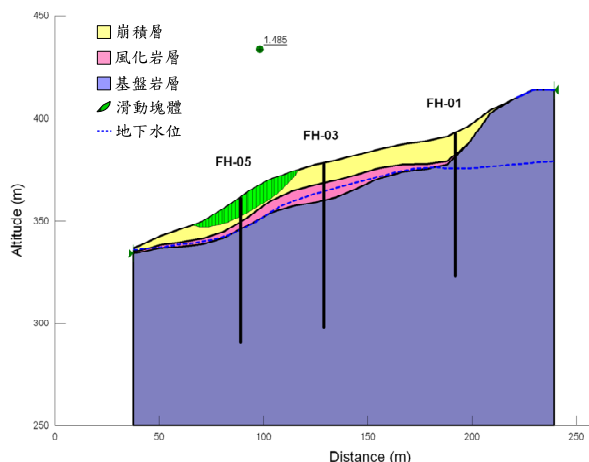
B. 穩定性分析成果

各水文地質單元力學參數之參考值係透過室內試驗求得，若現場調查成果可掌握明確之滑動面時，可採人為設定（fully specified）方式指定滑動面，或可採用自動搜尋（auto locate）方式找出最小安全係數之滑動面。本研究於寶隆調查範圍係採自動搜尋方式，並於輸入力學參數後將 SEEP/W 分析之水位代入進行耦合分析，透過極限平衡法（採 Morgenstern-Price 法）進行安全係數估算。圖 9(a)為寶隆調查範圍於莫拉克

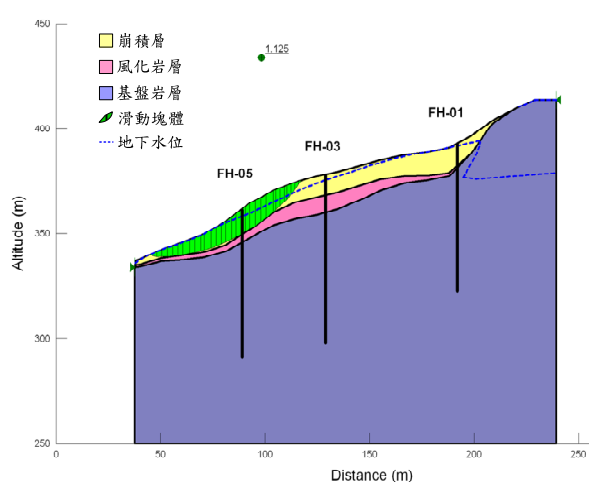
颱風前常時安全係數評估成果，顯示最小安全係數之滑動塊體位於下邊坡處且滑動弧面約切過崩積層與風化岩層交界面，其安全係數為 1.485，研判寶隆調查範圍常時尚處於穩定狀態。

莫拉克颱風期間安全係數變化可見圖 8(d)，結果顯示颱風期間因降雨引致地下水位抬升，進而導致安全係數下降；地下水位隨著降雨減緩而逐漸下降，同時安全係數則隨之提高。在莫拉克颱風期間，寶隆調查範圍安全係數於 8 月 8 日開

始降低，8 月 10 日之安全係數降至 1.125 達最低，研判該日在局部區域可能發生零星或小規模的崩塌事件，其可能發生區域介於下邊坡至坡趾處，滑動深度最深可達崩積層與風化岩層交界面，如圖 9(b)所示。此結果與莫拉克颱風後現勘成果相符，現勘成果發現寶隆調查範圍於坡趾處具小規模崩塌。而由 4.3 節基地監測資料中，C 小節監測成果內容，(c) 地表及地中位移監測之說明亦可驗證此一結果。



(a) 常時穩定性分析成果
(F.S.=1.485)



(b) 莫拉克颱風穩定性分析成果
(F.S.=1.125)

圖 9 寶隆調查範圍常時及莫拉克颱風期間穩定性評估

C. 變形性分析成果

各水文地質單元材料參數之參考值係透過室內試驗求得，力學與材料參數輸入後將 SEEP/W 分析之水位代入進行耦合分析，透過分析可計算出崩場地之位移分布，且可以網格變形方式顯示，以利判斷崩場地最具變形或滑動潛勢位置。

圖 10 為寶隆調查範圍於莫拉克颱風期間之變形性評估成果，顯示最具滑動潛勢位置為介於下邊坡 FH-05 孔位至近坡趾間之崩積層，其範圍與穩定性分析定義之滑動塊體（圖 9(b)）具一致性；崩崖下方 FH-01 孔位鄰近崩積層在降雨期間略有吸水回漲現象。整體而言，寶隆調查範圍於莫拉克颱風期間並無顯著之變形行為，其最大變形量約為 6.3cm。

本研究以傾斜觀測管監測之地中變形檢核變形性分析成果，顯示寶隆調查範圍於莫拉克颱風期間雖略有滑動，惟 FH-01、FH-03 及 FH-05 觀測管孔口位移量均不甚顯著（介於 3~8mm 間）。由變形性分析所模擬各傾斜觀測管之變形行為，成果顯示各傾斜觀測管之孔口位移量介於 8~32mm 間，其中以 FH-03 觀測管模擬之趨勢最為良好，FH-01 及 FH-05 觀測管於崩積層之

模擬變形量大於監測資料，屬於偏保守側之分析結果。

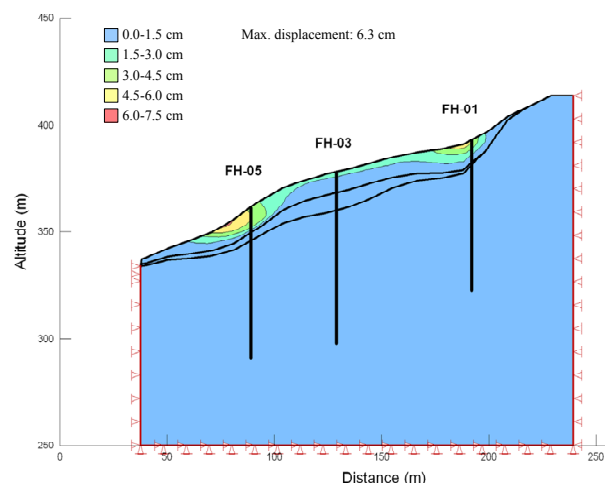


圖 10 寶隆調查範圍變形性評估結果

五、結論與建議

本次 88 水災南部災區由於受莫拉克颱風帶

來巨大豪雨所影響，導致許多流域兩岸道路多處因土石崩落或路基流失而中斷，人員死傷及財物損失都極為慘重。對此重大的天然災害，吾人除對不幸受災的住民表示深切的哀悼外，居於地工界的一份子，作者等亦期能從此災害中學習到些許經驗與教訓。故本文透過災後現地之災害勘查，與經濟部地質調查所委託中興工程顧問社於鄰地事先裝設完整監測儀器之坡地試區調查分析結果，探討降雨引致邊坡淺層崩坍之問題。勘查路線包括高雄縣旗山溪與荖濃河流域，主要道路含台 20 線、台 27 線、台 27 甲線及高 128 及高 130 縣道等。初步獲致結論如下：

1. 災害類型主要包括：道路與河岸邊坡崩坍，另有多處大型土石崩落與土石流災害。初步災害成因都與暴雨入滲、滲流、水位變動、軟化土層造成淺層土石崩落，並帶下大量岩體碎屑，致使下方民房、道路遭掩埋有關。
2. 寶隆調查範圍歷經莫拉克颱風侵襲後，崩塌地內地表固定規標均無產生明顯的變位，其變位量在 0.22~1.34cm 不等，顯示寶隆調查範圍僅局部區域略有潛移跡象，尚未見大規模深層滑動跡象。
3. 由穩態滲流分析結果，滲流向量可知其地下水沿崩積層與風化岩層交界處之流動速度較快。而由暫態滲流分析結果顯示分析模式可模擬出莫拉克颱風期間水位抬升變化趨勢。
4. 雖監測時間不足一個水文年，但驗證成果顯示模式分析已可擬合颱風前之常時水位且掌握莫拉克颱風期間水位抬升的型態，進而可評估其穩定性及變形性。惟颱風後水位消散行為則待後續監測資料進行回饋修正。
5. 由莫拉克颱風期間安全係數變化，結果顯示在莫拉克颱風期間，寶隆調查範圍安全係數於 8 月 8 日開始降低，8 月 10 日之安全係數降至 1.125 達最低，研判該日在局部區域可能發生零星或小規模的崩塌事件，其可能發生區域介於下邊坡至坡趾處，滑動深度最深可達崩積層與風化岩層交界面，此結果與莫拉克颱風後現勘成果相符。
6. 莫拉克颱風期間之變形性評估成果，顯示寶隆調查範圍最具滑動潛勢位置為介於下邊坡 FH-05 孔位至近坡趾間之崩積層。整體而言，寶隆調查範圍於莫拉克颱風期間並無顯著之變形行為，其最大變形量約為 6.3cm。

誌謝

本文得以順利完成，衷心感謝台科大國科會土木學門召集人計畫（案號：NSC 97-2217-E-

011-003-MY3）在災區現地勘查經費上之支助。另分析案例感謝經濟部中央地質調查所－「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）」在資料上的提供。同時亦感謝財團法人中興工程顧問社冀樹勇經理與台大土木系林銘郎教授在論文準備期間的建議、協助與鼓勵，在此均致上最誠摯的敬意與謝意。

參考文獻

- Fredlund, D.G. (2006), The 2005 Terzaghi lecture: "unsaturated soil mechanics in engineering practice", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(3):286-321.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soil*, John Wiley & Sons, New York, USA, p.517.
- Ng, C.W.W., Zhan, L.T., Bao, C.G., Fredlund, D.G., and Gong, B.W. (2003), "Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration", *Géotechnique*, 53(2): 143-157.
- 鄭清江（2005），「崩積土層滑動機制與坡地校園安全防災對策之研究」，行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告，NSC93-2745-E-211-002-URD。
- Jeng Chingjiang, Chu Bing-Lin, Tsao Shunping, Lin Taian (2007), Matrix Suction of Unsaturated Colluvium Slope Influenced by Rainfall and Plant Condition: A case of Taiwan Huafan University, Wuhan University, *Journal of Natural Sciences*, Vol.12, No.4, pp.689-694.
- 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與資料庫建置(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」，經濟部中央地質調查所研究報告，成果報告。
- 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與資料庫建置(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)」，經濟部中央地質調查所研究報告，成果報告。
- 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與資料庫建置(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)」，經濟部中央地質調查所研究報告，成果報告。
- 鄧鳳儀（2008），「湖口崩塌地水文地質數值模型回饋分析研究」，國立中央大學應用地質研究所論文。
- 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): 215-232。
- 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): 57-81。
- 宋國城、林慶偉、林偉雄、林文正（2000），「五萬分之一甲仙地質圖幅」，經濟部中央地質調查所，台北。