

# 颱風引致山崩之調查、監測與模式分析

鍾明劍<sup>1</sup>、王金山<sup>1</sup>、林金成<sup>1</sup>、冀樹勇<sup>1</sup>、蘇泰維<sup>2</sup>、李錦發<sup>2</sup>、費立沅<sup>2</sup>

1財團法人中興顧問社

2經濟部中央地質調查所

## 摘要

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，因此高崩塌潛勢地區之調查、監測與穩定性分析工作刻不容緩。本文除說明既有水文地質特性調查、監測與模式分析架構外，並彙整莫拉克颱風對寶隆、藤枝與吉露等崩塌地之災害勘查成果，再進一步採用降雨入滲-滲流-穩定性-變形性之串聯式分析模式，模擬莫拉克颱風期間藤枝與吉露崩塌地之降雨入滲、地下水滲流、穩定性變化及地層位移行為。透過現地監測數據及現勘成果比對，可證實本文所提分析模式具有良好的模擬能力與正確性，研究成果可供往後崩塌地在預測雨量下穩定性評估之參考。

關鍵詞：山崩、水文地質、模式分析、莫拉克颱風。

## Abstract

In recent years, the increase in the frequency and intensity of extreme rainfall events accompanied with typhoons has brought significant landslide and debris flow disasters in Taiwan. In particular, the tremendous rainfall brought forth by Typhoon Morakot not only flooded villages and towns in lowland area but also incurred many large-scale landslide and debris flow hazards in mountain areas of southern Taiwan. The study of this project is aimed to better understand the mechanisms triggering landslide hazards so that property damages and casualties can be hopefully reduced in the events of future natural disasters through ultimately some appropriate warning system. For the active landslide analysis, a two-dimensional numerical program, Geostudio, and a three-dimensional numerical program, FLAC3D, were employed and modeling practice was performed. The reliability of the resulting numerical results were validated by two case studies at Teng-Zhi and Ji-Lou landslide sites. It is expected that the landslide initiation, enlargement and reactivation can be more confidently predicted through the use of aforementioned physics-based models.

Keywords : Landslide, Hydro-geologic, Numerical analysis, Typhoon Morakot

## 一、前言

近年來颱風豪雨事件所引致之山崩與土石流災害頻繁，根據歷年山崩與土石流現地調查工作成果顯示，山崩與土石流的發生受地質、地形與水文環境之影響而具有地域性及重複性，其中尤以水文地質因素係引發山崩與土石流發生之主控因素，因此高崩塌潛勢地區之調查、監測與穩定性分析工作刻不容緩。經濟部中央地質調查所即委託財團法人中興工程顧問社辦理「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，針對各流域中上游地區進行水文地質對坡地穩定之調查、試驗、分析與評估工作，第1期95與96年度、第2期97與98年度之計畫範圍與所挑選之重點崩塌地如圖1所示。

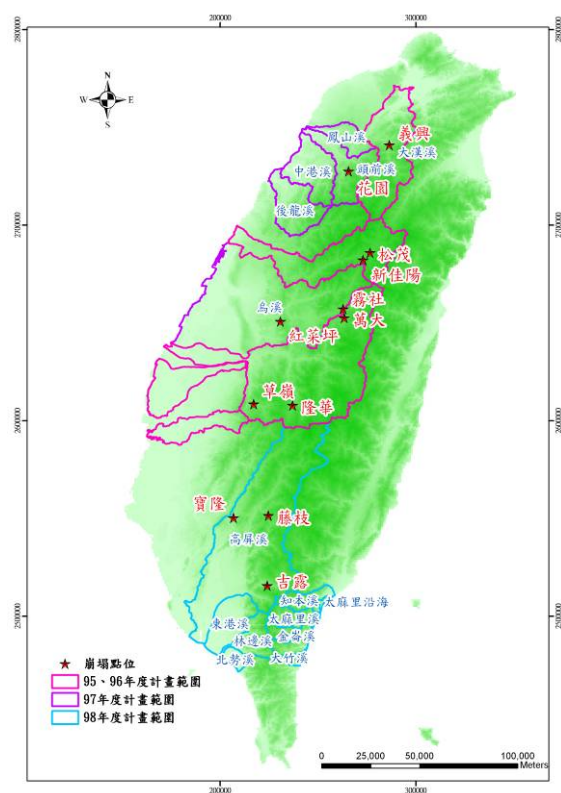


圖 1 各年度計畫之流域範圍及所挑選之重點崩塌地

本研究為前述計畫成果之一，文中旨在介紹颱風引致山崩之調查、監測與模式分析方法，以瞭解崩塌地受降雨入滲引致水文地質條件改變，進而導致邊坡發生不穩定之機制。因今年度適逢莫拉克颱風侵台造成台灣南部地區嚴重受創，其影響範圍正涵蓋今年度之計畫範圍，故本文除說明水文地質特性調查、監測與模式分析方法與架構外，並彙整莫拉克颱風對寶隆、藤枝與吉露等崩塌地之勘災成果，再進一步採用降雨入滲-滲流-穩定性-變形性之串聯式分析模式，模擬藤枝與吉露崩塌地於莫拉克颱風期間之降雨入滲、地下水滲流、安全係數變化及地層位移行為。本文所提分析模式之適用性，將透過現地監測數據及現勘成果進行比對與驗證，相關研究成果可作為往後坡地在預測雨量下穩定性評估之參考。

## 二、水文地質特性調查、監測及模式分析方法

### (一) 水文地質特性調查方法

為掌握崩塌地之地層分布、地質構造、水文特性、可能崩滑範圍及滑動機制，本研究擬定一系列的調查工作，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；(7)電井測調查；(8)地下水流速調查；(9)未飽和層土壤含水特性試驗；(10)土壤與岩石力學試驗等。各項調查工作之目的與用途如表1所示(經濟部中央地質調查所，2008；鍾明劍等人，2008)。其中，表1中岩體裂隙位態調查、裂隙岩體水力試驗、電井測調查、地下水流速調查等均屬於孔內探測調查方法。上述成果除可掌握崩塌地內各地層之水文地質參數、架構水文地質概念模型外，亦可協助釐清可能之潛在滑動面範圍及含水層位置與型態，提供監測儀器布置規劃之參考。

表 1 崩塌地水文地質調查工作之目的與用途說明

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. 瞭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面訊息。	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。
岩體裂隙位態調查	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。
電井測調查	調查地層孔隙及其強度、界定地層岩性及裂縫位置。	1. 評估崩塌地地層細部構造； 2. 提供建置崩塌地水文地質概念模型之參考。
地下水流速調查	調查鑽孔內地層之滲透或含水層位置。	1. 評估崩塌地內含水層位置； 2. 提供建置崩塌地水文地質概念模型之參考。
未飽和層土壤含水特性試驗	利用壓力鍋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。

### (二) 監測配置規劃

本研究針對各崩塌地監測工作所採用的方式如圖2所示，主要係於崩塌地內之地質鑽孔中，設置水位觀測井與傾斜觀測管，透過電子水壓計及測傾儀進

行地下水位變化及潛在滑動面位移之觀測。同時於崩塌地內之適當地點設置雨量站、地表伸縮計、固定規標點及張力計，進行降雨量、地表變形及不飽和土壤張力之觀測。綜上所述，本研究於各重點崩塌地均同步進行降雨量、地下水位、地中變形、地表變形等監測工作，並定期派員前往回收監測資料，再於室內統一進行相關資料分析。

此外，本研究於藤枝崩塌地採用全自動監測系統，透過GPRS進行遠端無線傳輸，並於監控中心的遠端伺服器即時接收監測資訊，配合遠端伺服器內的資料庫與即時監測資訊展示網頁(如圖3所示)，可供使用者進行即時監控及資料備份與查詢。

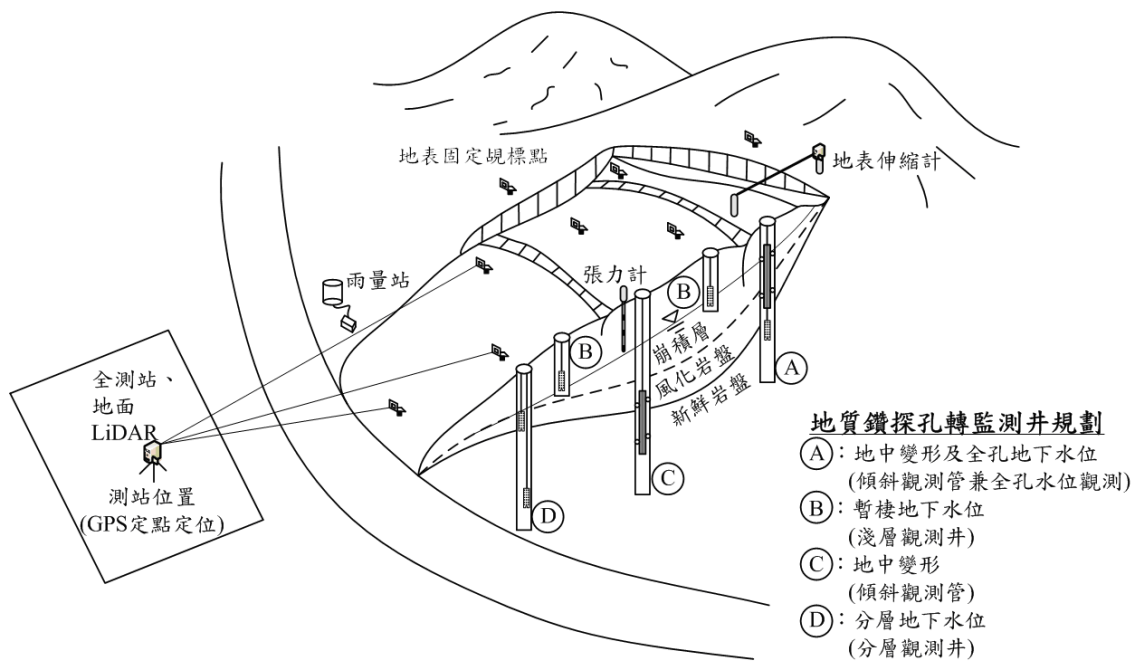


圖2 監測配置規劃示意圖

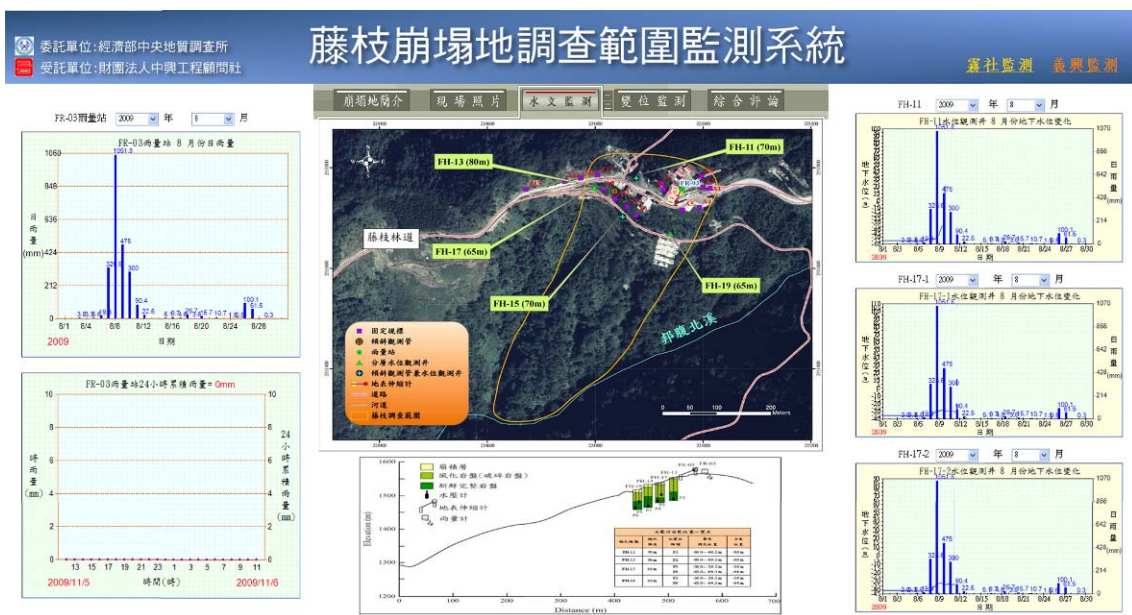


圖3 即時監測資訊展示網頁

### (三) 模式分析程序

本研究整合研究場址的水文與地質特性，建立從降雨入滲引致地下水位變化，進而導致邊坡崩塌的分析模式，以探討颱風豪雨事件引致山崩之機制，及評估崩塌地於莫拉克颱風期間之水位變化及安全係數改變。分析程序包含二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析(以下簡稱二維分析)及三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估(以下簡稱三維分析)，茲摘錄分析程序如后。

#### 1. 二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析

本研究採用 GeoStudio 程式進行二維分析，研究流程如圖 4 所示。首先須先界定邊坡分析範圍，並以表 1 所述之地質鑽探、地球物理調查、孔內攝影調查，以及三維雷射掃成果瞄建立坡地數值地形與幾何網格。隨後輸入調查與試驗所得之水文地質參數，再設定初始及邊界條件即完成水文地質概念模型建置。

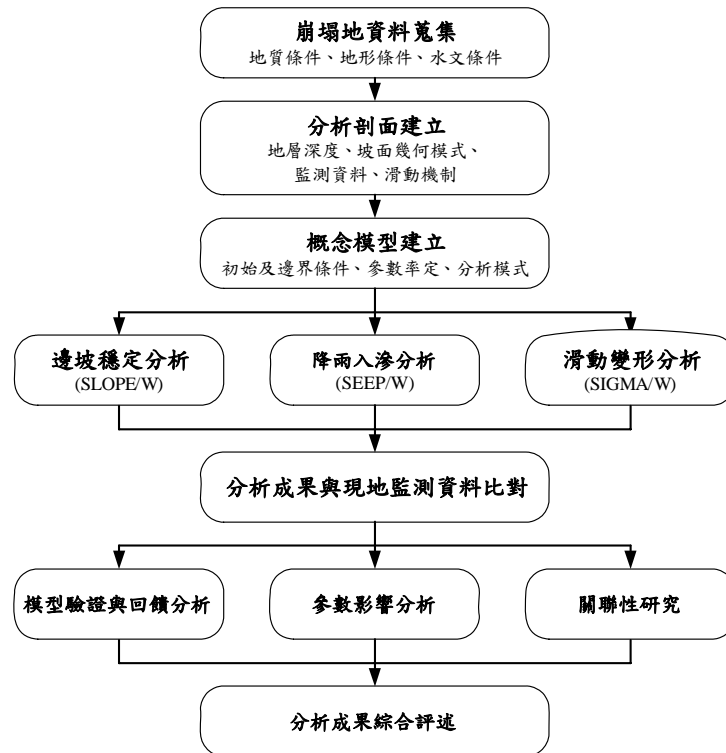


圖4 二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析流程圖

分析過程中，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。

## 2. 三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估

考量崩塌地之三維地形效應，本研究另以 FLAC<sup>3D</sup> 進行三維分析，分析流程如圖 5 所示。本研究採用衛星影像、航空照片或三維雷射掃描所取得之數值地形資料來建立三維分析網格，並藉由地質鑽探及地球物理調查成果輔助建立三維地層分析剖面。將複雜的物理環境簡化為由若干個水文地層單元組成之分析模型後，再輸入調查與試驗所得之水文地質參數，並設定初始與邊界條件即完成三維水文地質概念模型建置。

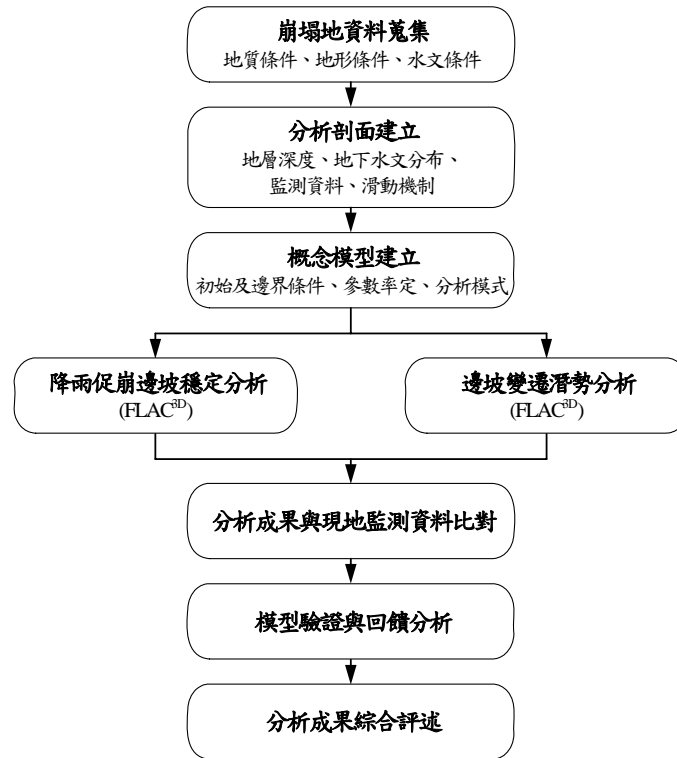


圖6 三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估流程圖

FLAC<sup>3D</sup> 程式運用更符合材料特性之組合律來分析應力與應變狀況，並透過剪力強度折減(Shear Strength Reduction, SSR)評估安全係數與滑動破壞面位置，而 SSR 所得之安全係數為土壤之實際剪力強度與折減至破壞發生時剪力強度之比值。本研究藉由 SSR 進行穩定分析，經由不平衡力比(unbalanced force ratio)的收斂與否及改變不同之剪力強度參數，得到整體邊坡之安全係數及對應之剪應變速率與位移向量場，並藉以判定邊坡具崩塌最大潛勢區域。

此外，邊坡崩塌時可視為其破壞面之剪應力超過抗剪強度，而在降低剪力強度之因素中，地下水的作用為重要因素之一。FLAC<sup>3D</sup> 程式雖可進行土壤與水之耦合效應，惟並未內建友善的暫態地下水輸入界面，故本研究先以前述 GeoStudio 程式進行崩塌地地下水位的暫態分析，以模擬降雨入滲後之地下水位變動，再將此模擬之暫態水位及飽和-不飽和土壤分布情形予以評估。三維分析成果透過現地監測成果(如固定規標、地表伸縮計監測成果)進行參數率定與驗證分析，以獲得最終的數值分析結果。

### 三、重點崩塌地災害勘查成果

莫拉克颱風不僅在南台灣造成嚴重水患，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。根據莫拉克颱風災害應變處置報告統計(中央災害應變中心，第74報)，已造成超過600人罹難、254處道路災害及超過164億元的農林漁牧產物及民間設施災情損失。莫拉克颱風災情影響範圍涵蓋今年度之計畫範圍，災後各重點崩塌地之通達道路均中斷，計畫團隊於道路搶通後隨即進行現勘工作，茲摘錄寶隆、藤枝與吉露等崩塌地之勘災成果如后。

#### (一) 寶隆崩塌地

寶隆崩塌地位於高雄縣甲仙鄉寶隆村匏子寮南緣，主要通達道路為縣道高128線，地理位置詳見圖7。此區地層屬隘寮腳層，岩性以粉砂岩和頁岩互層為主，十張犁向斜軸約略由西南往東北經過此崩塌地。此區曾於2005/6/12受到強烈西南氣流滯留梅雨鋒面侵襲，在2005/6/14~6/15期間陸續發生多次崩塌，崩塌後整片山坡衝洩而下，路面呈不規則隆起，甚至斷裂毀損而無法通行。勘查結果顯示其主崩崖高差約40m，崩崖西側較高、東側較低，崩崖走向約略成東西向，初步研判屬於圓弧型岩體滑動機制。莫拉克颱風後，寶隆崩塌地西側產生兩處小規模之岩屑崩滑(照片1(a)與1(b))，坡趾處則因溪溝侵蝕而產生崩滑(照片1(c))，對岸產業道路更因路基塌陷而成階梯狀破壞(照片1(d))，災害勘查成果彙整如圖8所示。整體而言，寶隆崩塌地於莫拉克颱風期間除坡趾處產生小規模崩塌外，其餘仍相當穩定，且本研究設置之監測系統均無受損。

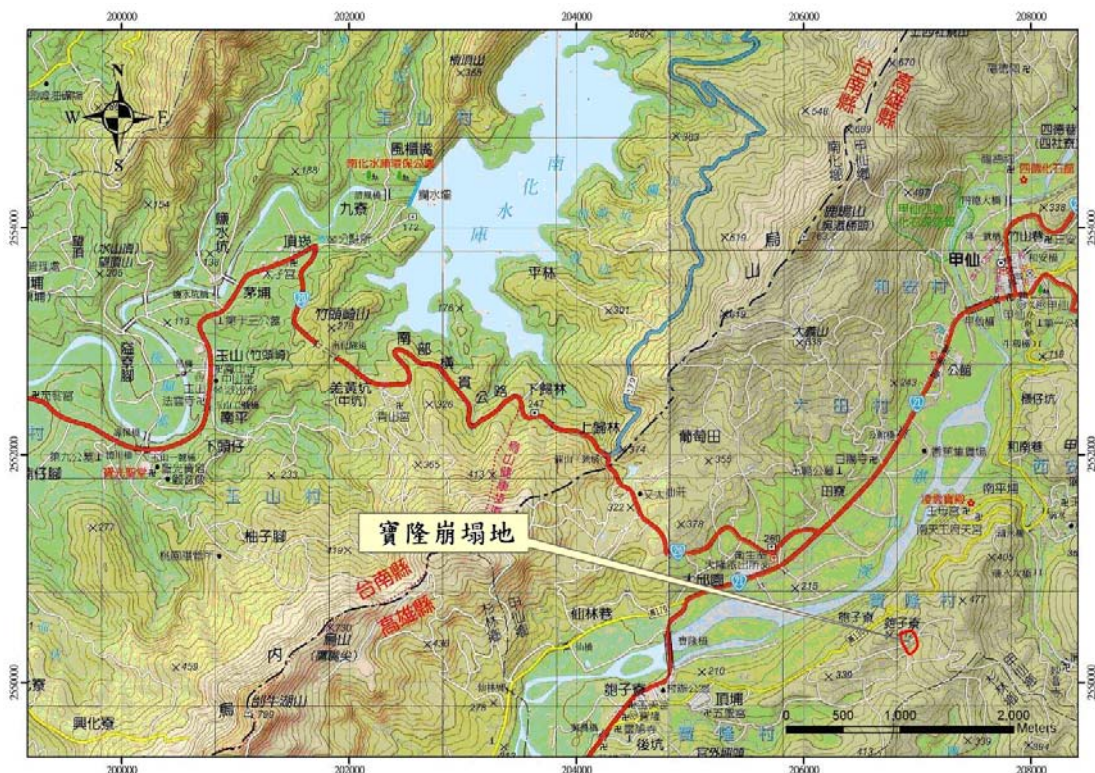


圖7 寶隆崩塌地地理位置圖



(a) 西側之產業道路下邊坡產生崩滑  
(206788, 2550213)



(b) 西側之產業道路產生崩滑  
(206824, 2550204)



(c) 坡趾受溪溝侵蝕而崩滑  
(206961, 2550258)



(d) 對岸道路因路基塌陷成階梯狀破壞  
(206907, 2550285)

照片1 莫拉克颱風後寶隆崩塌地災害勘查照片

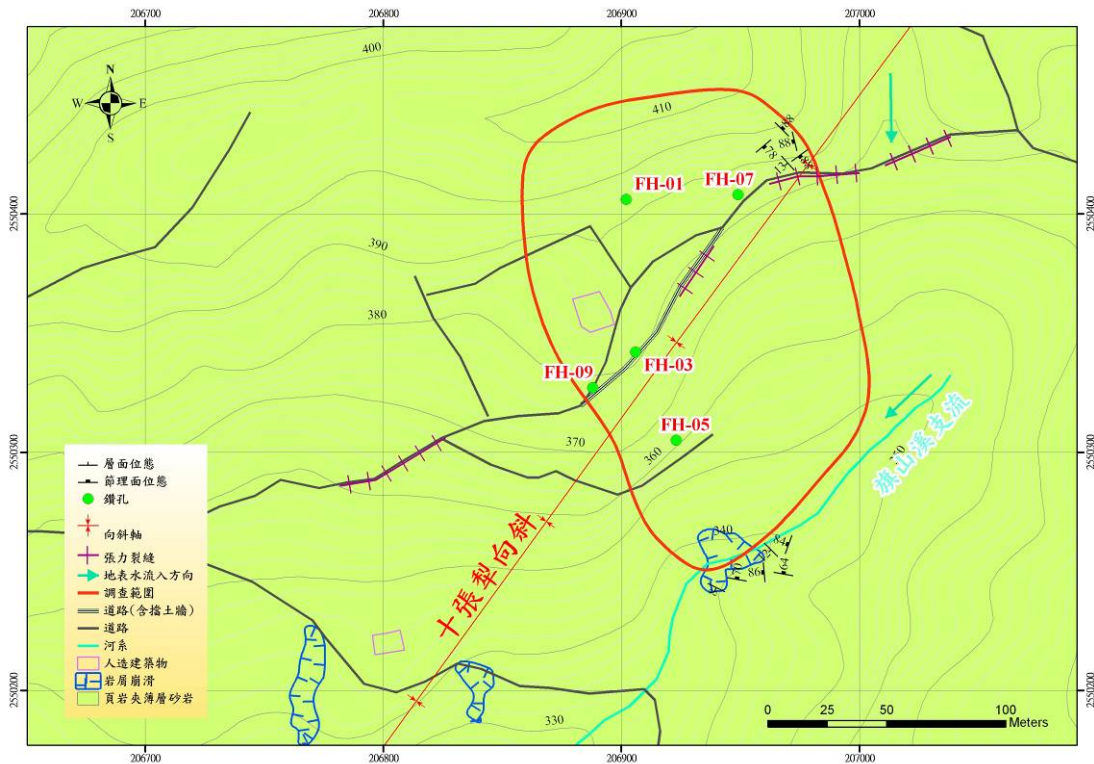


圖8 莫拉克颱風後寶隆崩塌地災害勘查成果圖



## (二) 藤枝崩塌地

藤枝崩塌地位於高雄縣桃源鄉寶山村(藤枝林道20km處)，地理位置詳見圖9。此區位於樟山層下段，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。本區保全對象集中於上邊坡之藤枝部落，惟2004年敏督利颱風及2005年海棠颱風均導致明顯之邊坡下滑、道路下陷、張力裂縫及結構物變形等災情。莫拉克颱風後，藤枝林道沿線多處崩塌，藤枝崩塌地除原先張裂縫再度張裂外，道路沿線商家均往下邊坡滑動(照片2(a)與2(b))，下滑深度約一層樓高，且隨處可見顯著張裂縫(照片2(c)、2(d)與2(e))，FH-11觀測管管口於災後已高出地表約40cm(照片2(f))，災害勘查成果彙整如圖10。整體而言，藤枝地區受莫拉克颱風影響產生多處岩屑崩滑，本研究之監測系統於颱風期間雖陸續受損，所幸受損前之監測資料均有回傳及紀錄。

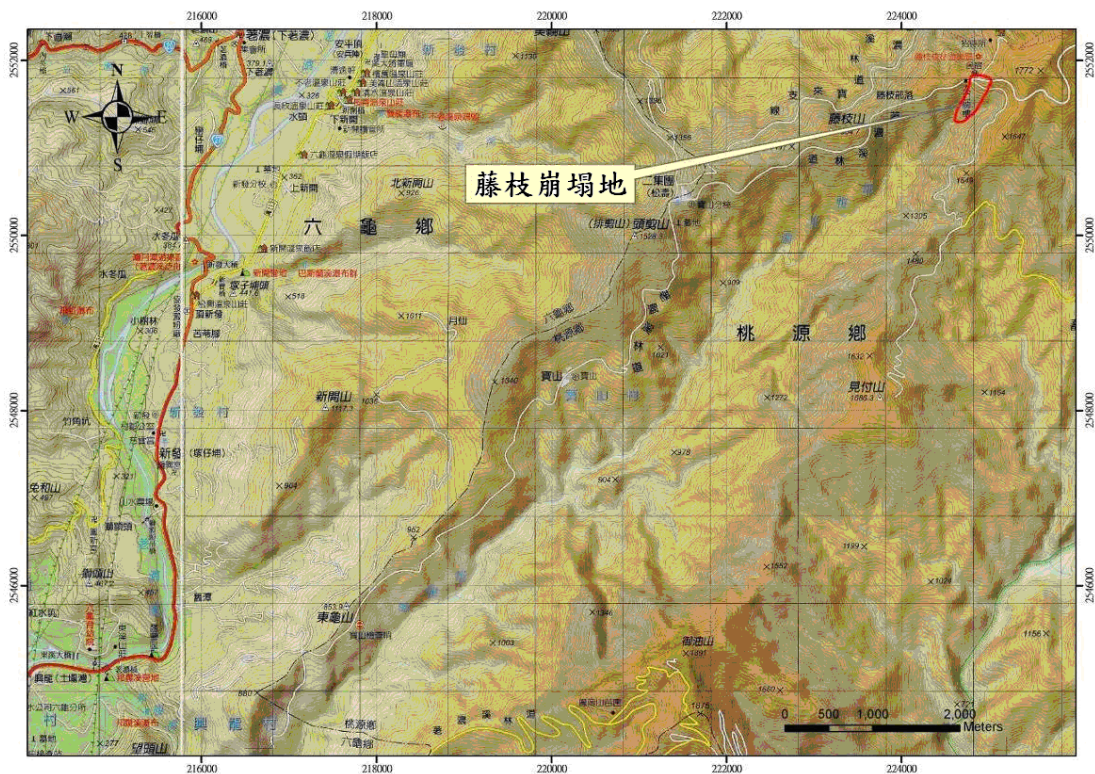


圖9 藤枝崩塌地地理位置圖



(a)西側房屋傾倒狀況，塌陷約一層樓高  
(224918, 2551739)



(b)東側房屋傾倒狀況，塌陷約一層樓高  
(224805, 2551751)



(c)建築物旁擋土牆破壞且道路塌陷  
(224961, 2551727)



(d)西側道路塌陷產生顯著張裂縫  
(224759, 2551756)



(e)東邊界崩塌情形  
(225007, 2551736)



(f)地層下陷使FH-11測傾管高出地表  
(224879, 2551781)

照片2 莫拉克颱風後藤枝崩塌地災害勘查照片

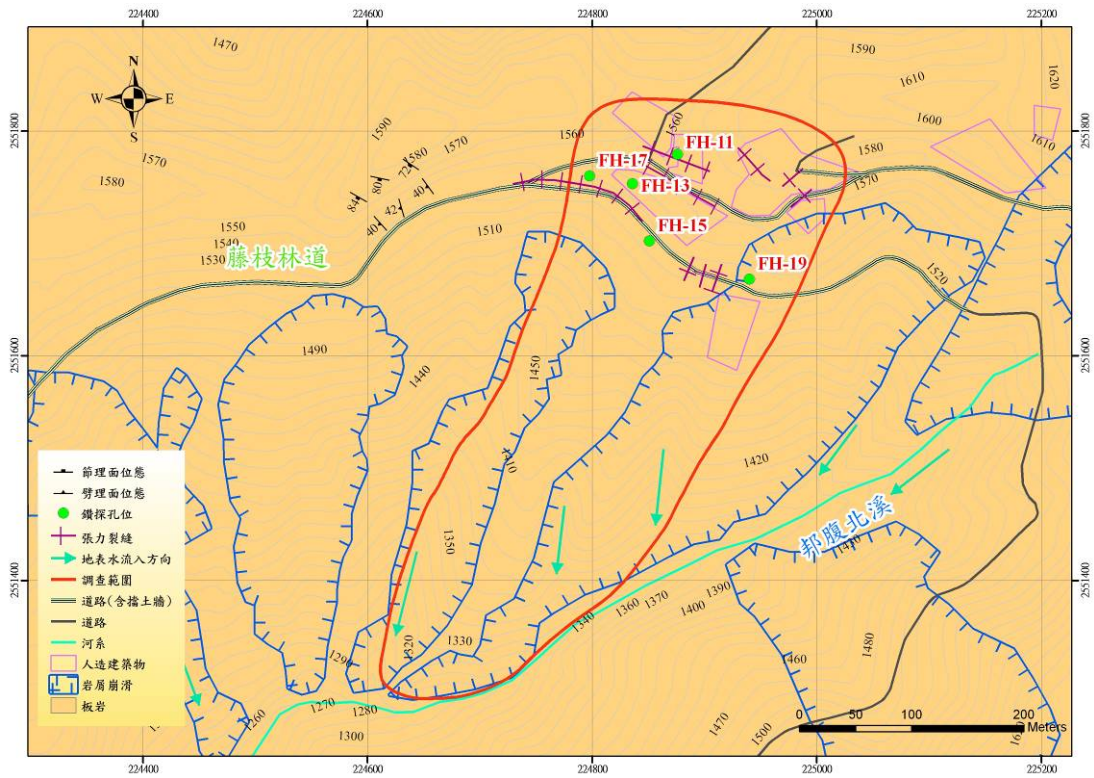


圖10 莫拉克颱風後藤枝崩塌地災害勘查成果圖

### (三) 吉露崩塌地

吉露崩塌地位於屏東縣霧台鄉吉露村(台24線46km處)，地理位置詳見圖11。此區地層屬於潮州層，岩層以板岩為主且局部夾雜變質砂岩。2006年612水災、2007年9月連日豪雨及2008年9月卡玫基與鳳凰颱風均造成通達道路中斷、坡面產生張力裂縫及擋土牆裂隙。莫拉克颱風過後，崩塌地西側及南側皆有大型岩屑崩滑(照片3(a)與3(b))，使台24線完全中斷，吉露村形同孤島。照片3(c)為上邊坡之張裂縫，照片3(d)與3(e)為坡面之張裂縫(落差達1m)，下邊坡則因溪溝坡趾侵蝕而有大规模崩滑(照片3(f))，災害勘查成果彙整如圖12。整體而言，吉露地區受莫拉克颱風影響產生多處岩屑崩滑，應嚴加注意上邊坡區域仍有滑移趨勢，本研究之監測系統雖於颱風期間陸續受損，所幸受損前之相關資料均有紀錄，惟FH-25監測點則因下邊坡大规模崩滑而全數損毀。



圖11 吉露崩塌地地理位置圖



(a)西側坡面產生近乎垂直之岩屑崩滑  
(223936, 2515687)



(b)南側侵蝕溝於崩後可見光滑岩盤面  
(224162, 2515500)



(c)上邊坡道路之張力裂縫  
(224086, 2515684)



(d)籃球場旁道路張力裂縫再次張裂  
(224209, 2515800)



(e)坡面道路下陷，垂直落差約1 m  
(224167, 2515754)



(f)下邊坡崩滑已危及村民住宅及道路  
(224263, 2515676)

照片3 莫拉克颱風後吉露崩塌地災害勘查照片

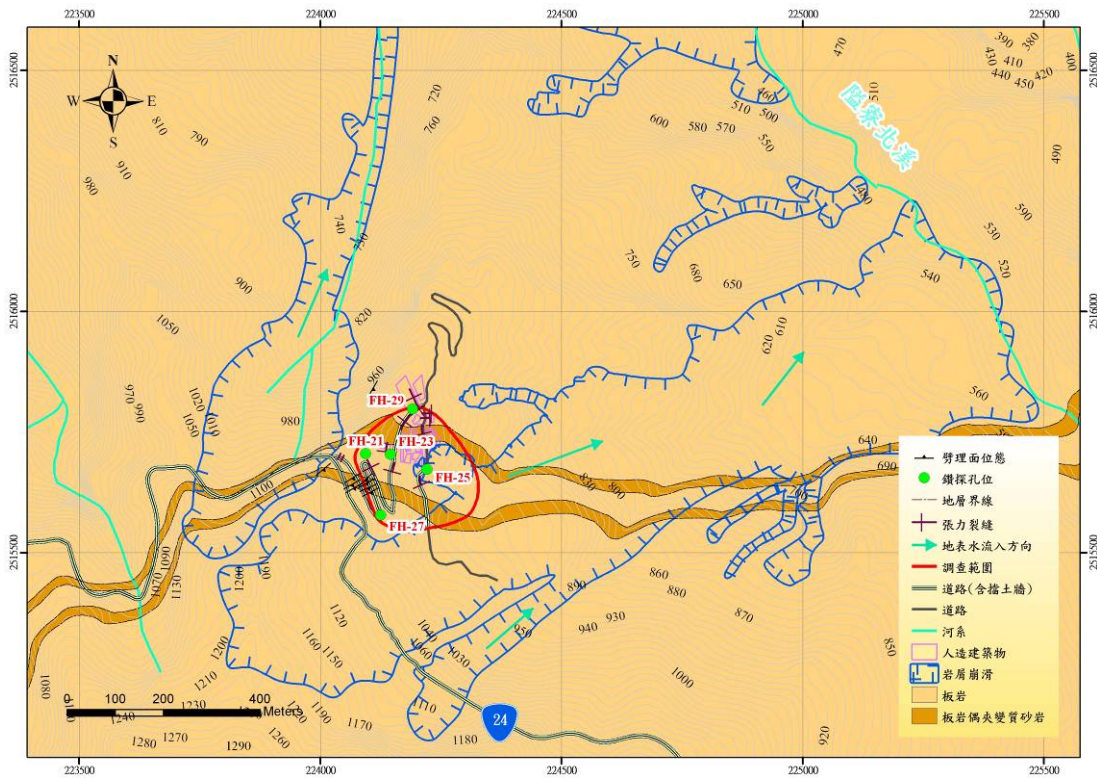


圖12 莫拉克颱風後吉露崩塌地災害勘查成果圖

## 四、案例研究

綜觀本次莫拉克颱風事件，藤枝與吉露崩塌地均於下邊坡處產生崩滑現象，為模擬莫拉克颱風期間藤枝與吉露崩塌地之降雨入滲、地下水滲流、穩定性變化及地層位移行為，本研究於二維分析模式採用可模擬降雨入滲-滲流-穩定性-變形性之串聯式分析模式，且以三維分析方法評估其崩塌潛勢。本文所提分析模式之適用性則透過現地監測數據及現勘成果進行比對與驗證，茲分述如后。

### (一) 藤枝崩塌地案例

#### 1. 水文地質概念模型

藤枝崩塌地的數值地形係採 5m×5m DEM 數值資料建置而成，如圖 13 所示。圖中 AA' 線即為二維分析時所選用之剖面線，此分析剖面始自頂部稜線經 FH-11、FH-13、FH-15 等鑽孔至底部邦腹北溪為止。透過 Surfer 或 ArcGIS 程式可建立 AA' 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、風化岩層與基盤岩層等層。

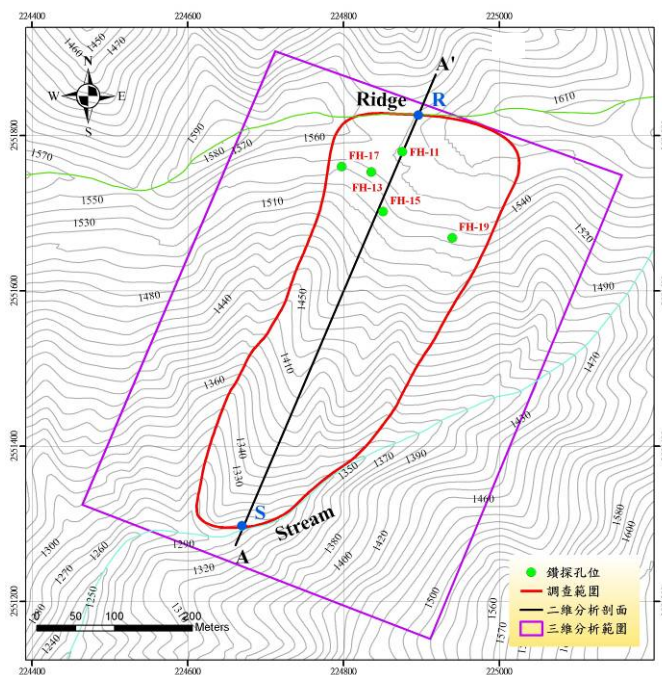
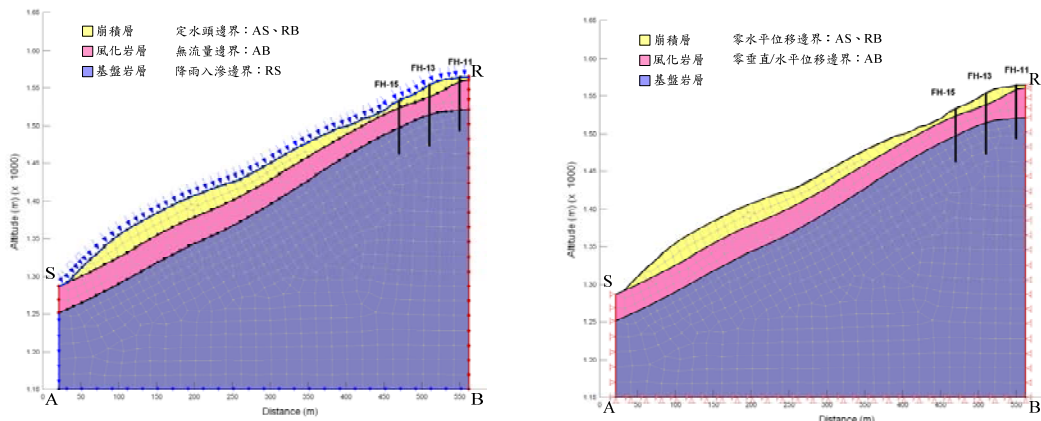


圖 13 藤枝崩塌地數值地形、鑽孔配置及模式分析範圍

圖 14 為水文地質概念模型的水力及位移邊界條件，降雨入滲及滲流分析時，將左側邊界(AS)設定為定水頭邊界，其值等於坡趾處邦腹北溪的水位高程；右側邊界(RB)設定為定水頭邊界，其值參考 FH-11 觀測井水位紀錄；模型底部(AB)設定為無流量邊界；坡面(RS)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監測所得之降雨量。變形性分析時，左、右兩側(AS、RB)水平方向設為零位移邊界，模型底部(AB)之水平及垂直方向均設為零位移邊界。



(a)水力邊界設定

(b)位移邊界設定

圖14 藤枝崩塌地水文地質模型與邊界條件

## 2. 二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析

本研究採 2009/7/20 至 2009/8/24 間之現地水文監測資料進行模擬，期間歷經莫拉克颱風事件，降雨資料如圖 15(a)所示。圖 15(b)為 FH-11 觀測井水位紀錄，監測資料顯示莫拉克颱風前之地下水位約於地表下 54~55m(設定為常時水位)，2009/8/9 後之監測資料則因該區地層滑動而有漏失，惟分析成果顯示此模擬分析結果與監測資料相當一致，驗證本模式可大致掌握莫拉克颱風前半段期間水位抬升行為。

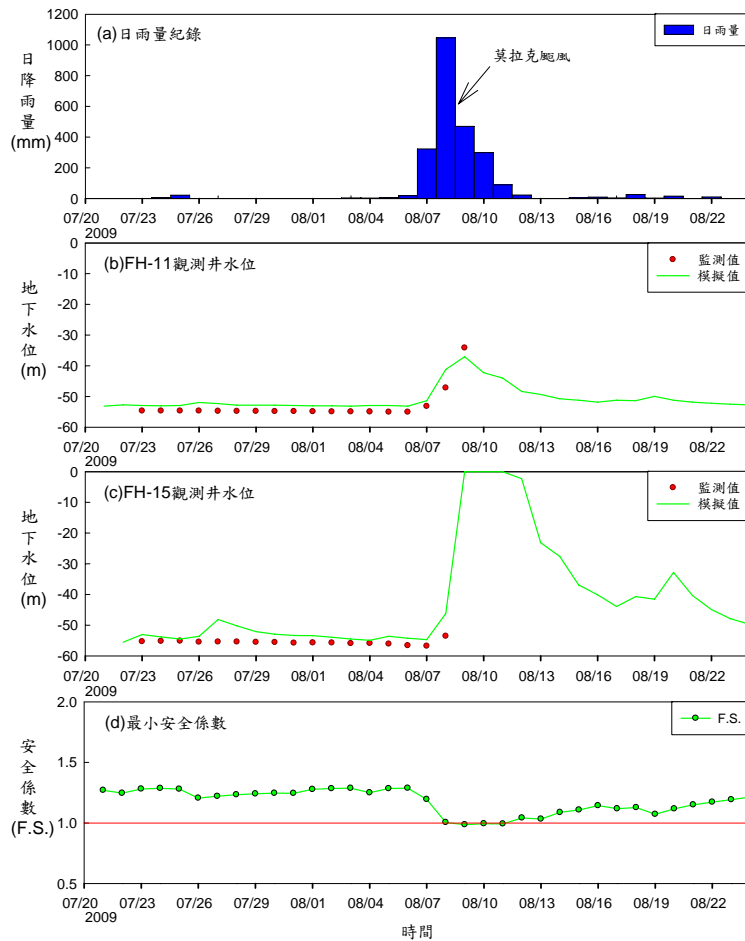


圖15 藤枝崩塌地二維降雨入滲邊坡穩定分析成果

圖 15(c)為 FH-15 觀測井水位紀錄，監測資料顯示莫拉克颱風前之地下水水位約於地表下 55~56m(設定為常時水位)，而其監測紀錄僅至 2009/8/8 為止，分析成果與監測資料相當一致，驗證本模式可大致掌握莫拉克颱風前半段期間水位抬升行為。由 FH-11 及 FH-15 觀測井水位分析成果可知，本研究所建置之分析模型已可初步擬合颱風前之常時水位並掌握颱風前半段期間水位之抬升行為，並可提供模擬莫拉克颱風後半段期間觀測井水位所模擬之消散行為。

圖 16(a)為藤枝崩塌地於颱風前常時安全係數評估成果，最小安全係數之滑動塊體位於下邊坡處且滑動弧約切過崩積層與基盤岩層交界面，其安全係數為 1.388，研判藤枝崩塌地常時處於穩定狀態。莫拉克颱風期間，藤枝崩塌地之安全係數變化可見圖 15(d)。結果顯示在莫拉克颱風期間，藤枝崩塌地安全係數於 2009/8/6 自 1.388 開始降低，2009/8/9 之安全係數降至 0.993 時達到破壞條件。圖 16(b)為莫拉克颱風期間穩定性分析成果，分析所得滑動塊體為下邊坡至坡趾處(涵蓋 FH-25 孔位)，滑動深度最深可達崩積層與基盤岩層交界面，此結果與莫拉克颱風後現勘成果(見圖 10)相符，顯示此模型具有良好的模擬能力與正確性。

圖 17 為藤枝崩塌地於莫拉克颱風期間之變形性評估成果，成果顯示最具滑動潛勢位置為下邊坡至坡趾間之崩積層，其範圍與穩定性分析定義之滑動塊體(圖 16(b))具一致性。

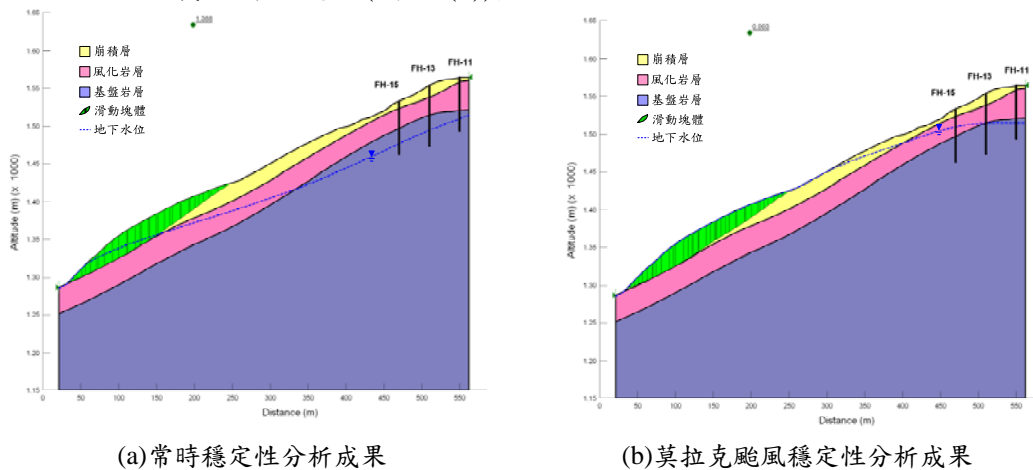


圖 16 藤枝崩塌地常時及莫拉克颱風期間穩定性評估

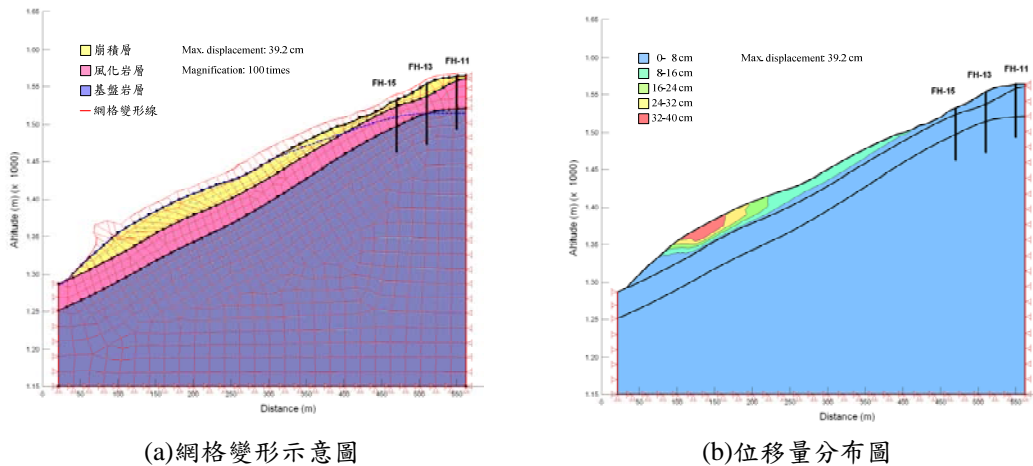
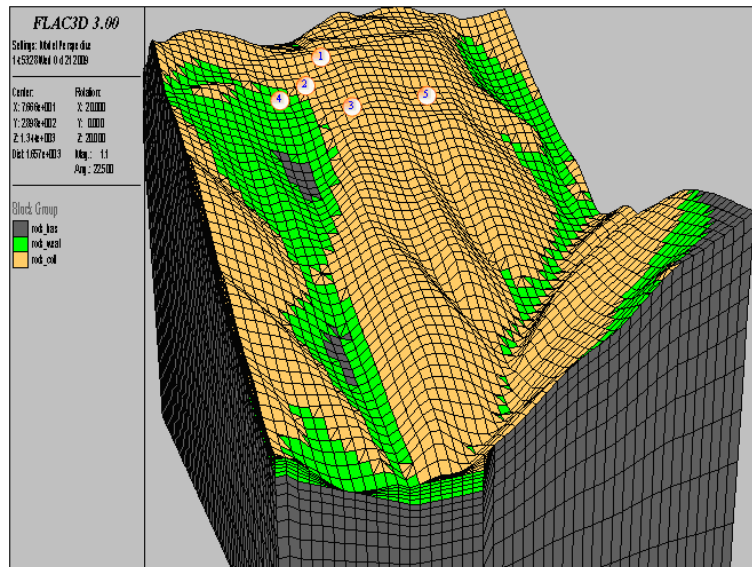


圖 17 莫拉克颱風期間藤枝崩塌地變形性評估

3. 三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估

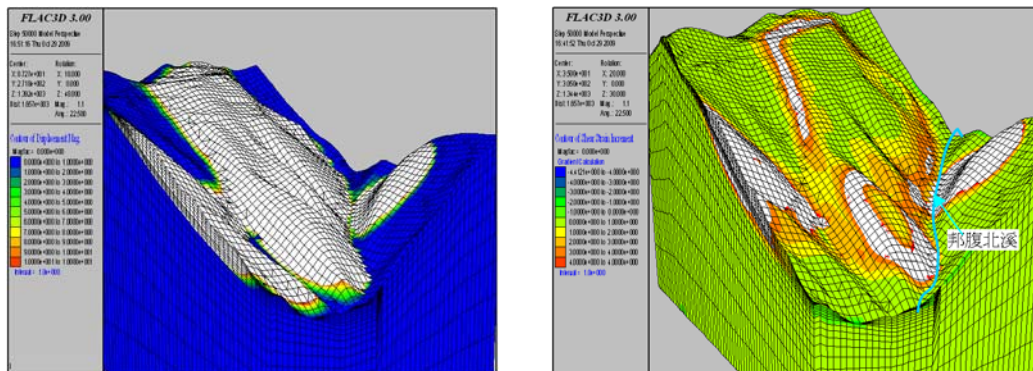
圖 18 為藤枝崩塌地之三維水文地質概念模型，依常時地下水位進行三維分析，可得其整體之安全係數為 1.18，顯示藤枝崩塌地常時仍處於相對穩定狀態。為了解莫拉克颱風對藤枝崩塌地之影響，本研究依據雨量及地下水位監測資料，經由前述二維分析所得之地下水位抬升與地層飽和度結果，配合邦腹北溪河床高程，以 Kriging 模式推估莫拉克颱風期間之地下水位分布，並進一步進行三維分析。分析所得之邊坡整體滑動位移分布、邊坡剖面滑動位移與剪應變深度分布如圖 19 所示。

由圖 19 可知分析區域內之邊坡已產生滑動破壞，而邦腹北溪南側之邊坡亦產生破壞，顯示莫拉克颱風之豪雨導致地下水位抬升而使藤枝崩塌地處於不穩定狀態。由剪應變分布顯示鄰近藤枝部落下緣之邊坡具剪應變速率集中現象，具備較高之崩塌潛勢，主要滑動破壞面為沿崩積層之淺層滑移；惟剪應變深度分布圖顯示應變增量有向崩積層下方之風化岩層侵入現象，顯示下邊坡之風化岩層亦具甚高之崩塌潛勢。



\*\*鑽孔位置①: FH-11、②: FH-13、③: FH-15、④: FH-17、⑤: FH-19

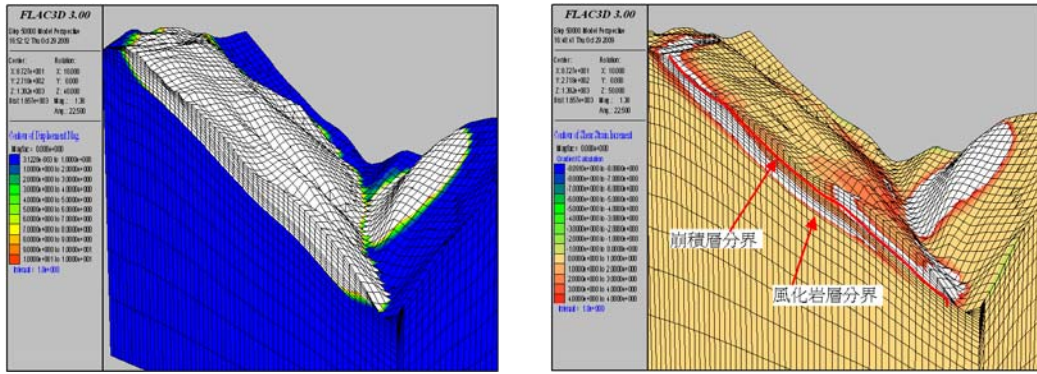
圖 18 藤枝崩塌地三維分析網格地層分布示意圖



(a) 邊坡整體變位分布

(b) 邊坡整體剪應變分布





(c)AA'剖面變位深度分布

(d)AA'剖面剪應變深度分布

圖19 藤枝崩塌地於颱風事件後之邊坡位移與剪應變分布圖

## (二) 吉露崩塌地案例

### 1. 水文地質概念模型

吉露崩塌地的數值地形係採 5m×5m DEM 數值資料建置而成，如圖 20 所示。圖中 AA' 線即為二維分析時所選用之剖面線，此分析剖面始自頂部稜線經 FH-21、FH-23、FH-25 等鑽孔至底部溪溝為止。透過 Surfer 或 ArcGIS 程式可建立 AA' 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與基盤岩層兩層。

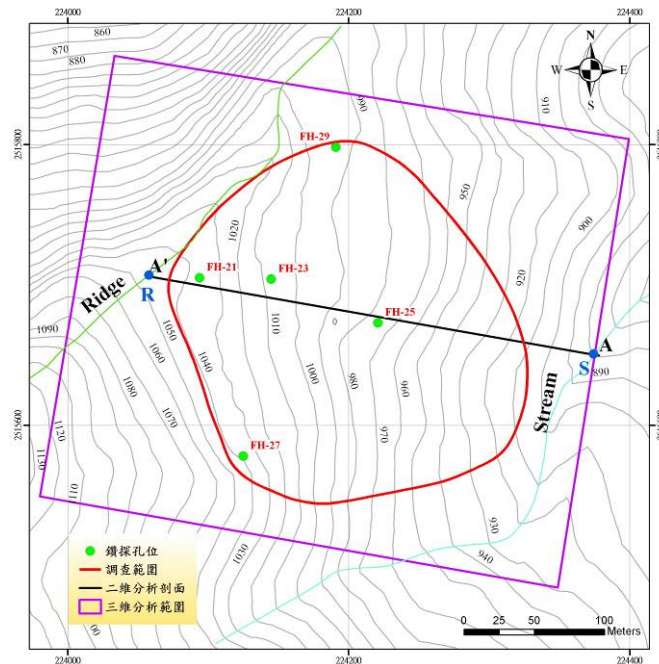


圖20 吉露崩塌地數值地形、鑽孔配置及模式分析範圍

圖 21 為水文地質概念模型的水力及位移邊界條件，降雨入滲及滲流分析時，將左側邊界(AS)設定為定水頭邊界，其值等於坡趾處溪溝的水位高程；右側邊界(RB)設定為定水頭邊界，其值參考 FH-21 觀測井水位紀錄；模型底部(AB)設定為無流量邊界；坡面(RS)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

時則設定為監測所得之降雨量。變形性分析時，左、右兩側(AS、RB)水平方向設為零位移邊界，模型底部(AB)之水平及垂直方向均設為零位移邊界。

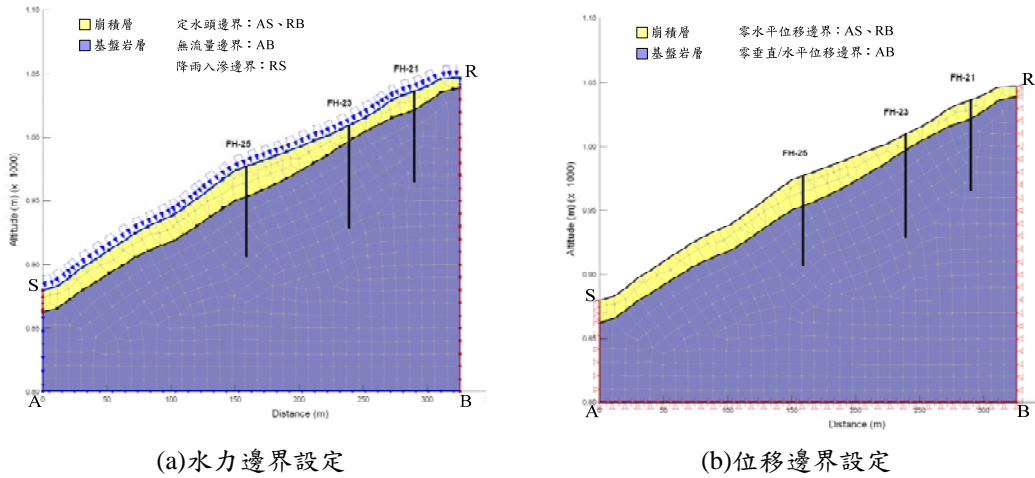


圖 21 吉露崩塌地水文地質模型與邊界條件

## 2. 二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析

本研究採 2009/7/16 至 2009/8/24 間之現地水文監測資料進行模擬，期間歷經莫拉克颱風事件，降雨資料如圖 22(a)所示。圖 22(b)為 FH-21 觀測井水位紀錄，監測資料顯示莫拉克颱風前之地下水位約於地表下 41~45m(設定為常時水位)，颱風期間水位變化幅度可抬升至地表下 18.8m，抬升約 22m。分析成果顯示此模擬分析結果與監測資料相當一致，驗證本模式可大致掌握莫拉克颱風期間水位抬升及消散行為。圖 22(c)為 FH-25 觀測井水位紀錄，7/16~7/23 之地下水位約於地表下 34~36m，7/24 後之監測資料受莫拉克颱風影響而有漏失，此模擬結果僅提供莫拉克颱風期間 FH-25 觀測井水位抬升及消散行為之研判參考，模擬結果顯示颱風期間水位變化幅度可抬升至地表下 1.6m，約抬升 34m。由 FH-21 觀測井水位分析成果可知，本研究所建置之分析模型已可初步擬合颱風前之常時水位並掌握颱風期間水位之抬升及消散行為，另可提供模擬莫拉克颱風期間 FH-25 觀測井水位之變動行為。

圖 23(a)為吉露崩塌地於颱風前常時安全係數評估成果，最小安全係數之滑動塊體位於下邊坡處且滑動弧約切過崩積層與基盤岩層界面，其安全係數為 1.567，研判吉露崩塌地常時處於穩定狀態。莫拉克颱風期間，吉露崩塌地之安全係數變化可見圖 22(d)。結果顯示在莫拉克颱風期間，吉露崩塌地安全係數於 2009/8/7 自 1.567 開始降低，2009/8/9 之安全係數降至 0.966 時達到破壞條件。圖 23(b)為莫拉克颱風期間穩定性分析成果，分析所得滑動塊體介於坡中至坡趾處(涵蓋 FH-25 孔位)，滑動深度最深可達崩積層與基盤岩層界面，此結果與莫拉克颱風後現勘成果(見圖 12)相符，顯示此模型具有良好的模擬能力與正確性。

圖 24 為崩塌地於莫拉克颱風期間之變形性評估成果，成果顯示最具滑動潛勢位置為介於坡中至坡趾間之崩積層(涵蓋 FH-25 孔位)，其範圍與穩定性分析定義之滑動塊體(見圖 23)具一致性。

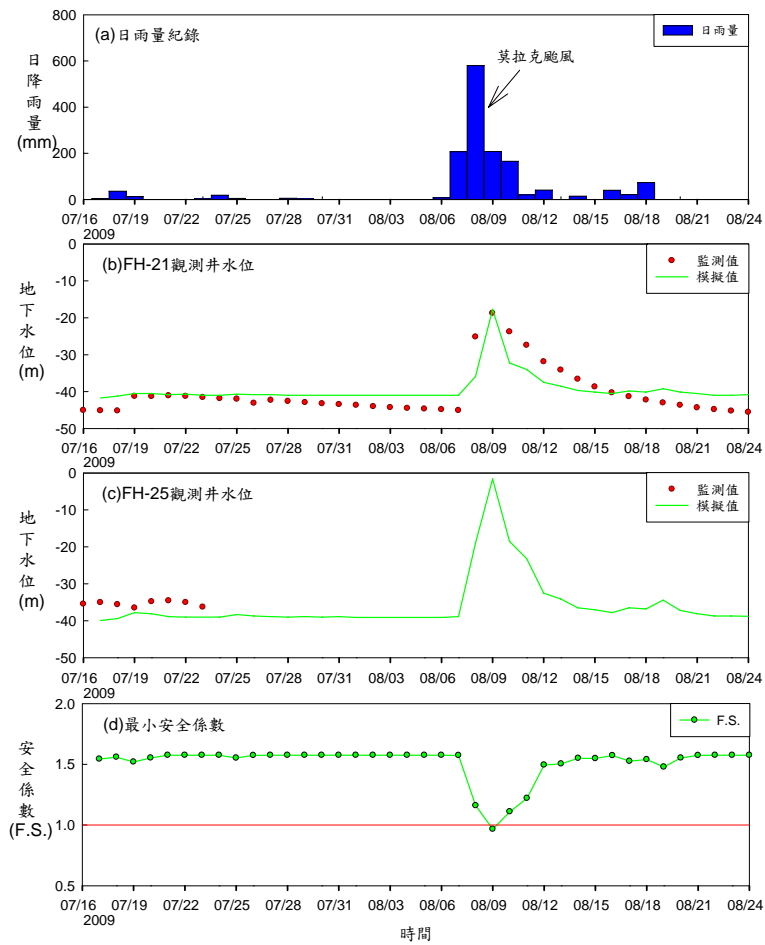
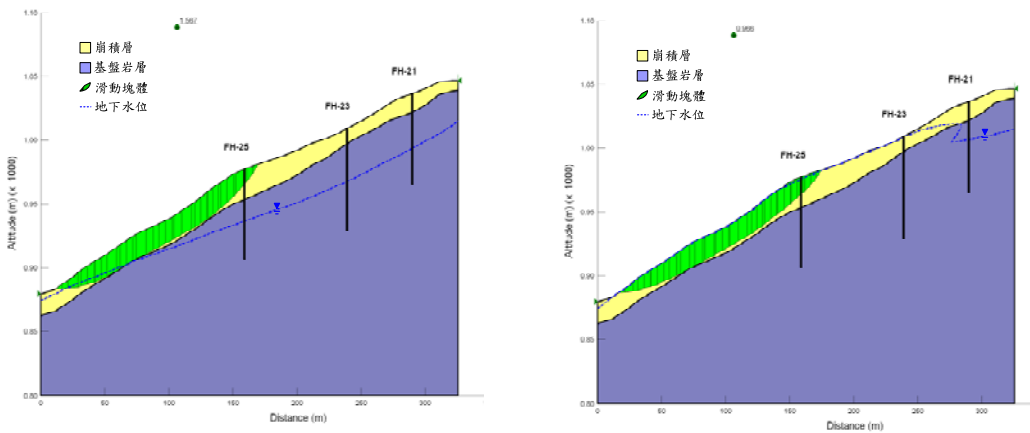
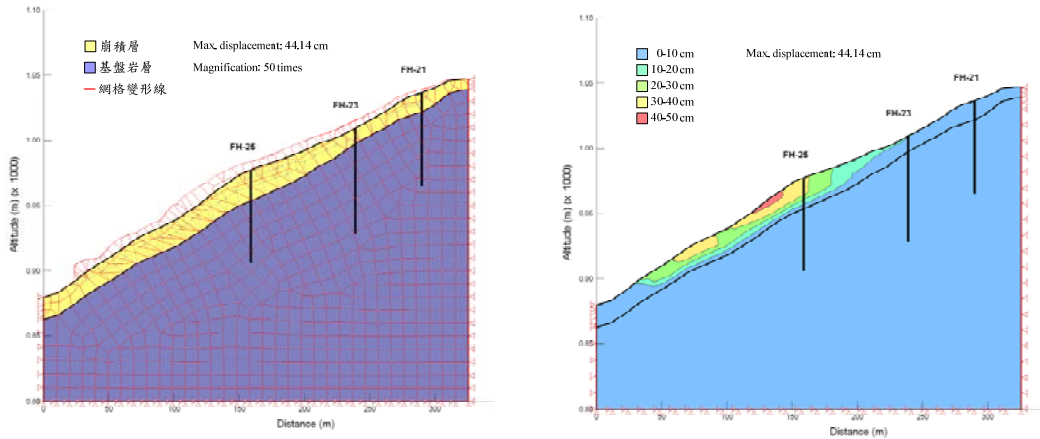


圖22 吉露崩塌地二維降雨入滲邊坡穩定分析成果



(a)水力邊界設定 (b)位移邊界設定

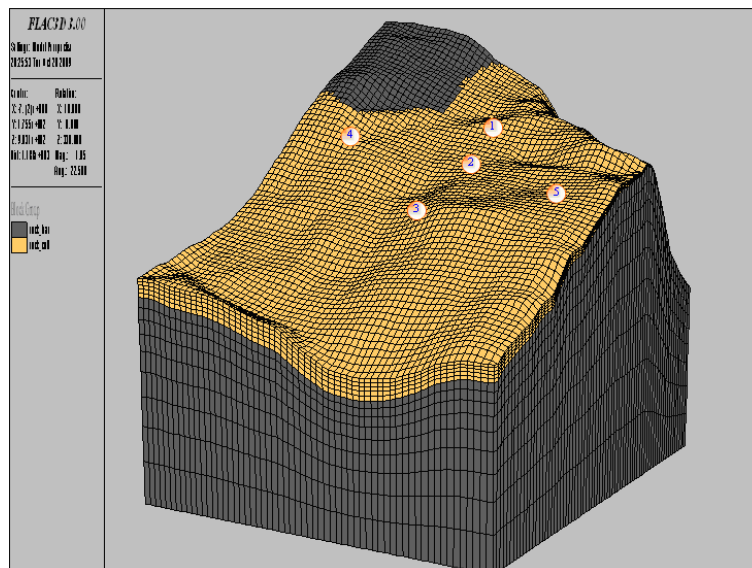
圖23 吉露崩塌地常時及莫拉克颱風期間穩定性評估



(a) 網格變形示意圖 (b) 位移量分布圖  
圖24 莫拉克颱風期間吉露崩塌地變形性評估

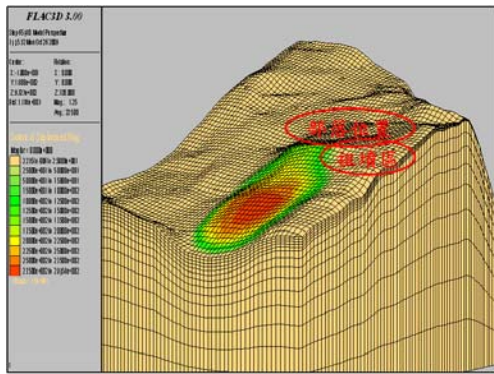
### 3. 三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估

圖 25 為吉露崩塌地之三維水文地質概念模型，依常時地下水位進行三維分析，可得其整體之安全係數為 1.41，顯示吉露崩塌地常時處於穩定狀態。為了解莫拉克颱風對吉露崩塌地之影響，本研究依據雨量及地下水位監測資料，經由前述二維分析所得之地下水位抬升與地層飽和度結果，配合溪溝河床高程，以 Kriging 模式推估莫拉克颱風期間之地下水位分布，並進一步進行三維分析。分析所得之邊坡整體滑動位移分布、邊坡剖面滑動位移與剪應變深度分布如圖 26 所示。由圖 26 可知分析區域內之邊坡已產生滑動破壞，顯示莫拉克颱風之豪雨導致地下水位抬升而使吉露崩塌地處於不穩定狀態。由剪應變分布顯示吉露村下緣之邊坡具剪應變速率集中現象，具備較高之崩塌潛勢，主要滑動破壞面為沿崩積層與岩盤介面滑移；惟剪應變深度分布圖顯示下邊坡之滑動區塊有往深層之基盤岩層侵入之潛勢，未來仍有可能因暴雨而導致坍塌擴大。

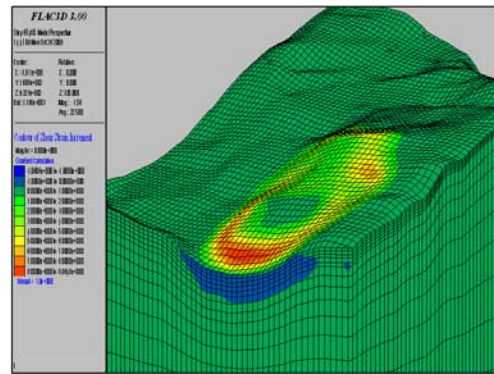


\*\*鑽孔位置①: FH-21、②: FH-23、③: FH-25、④: FH-27、⑤: FH-29

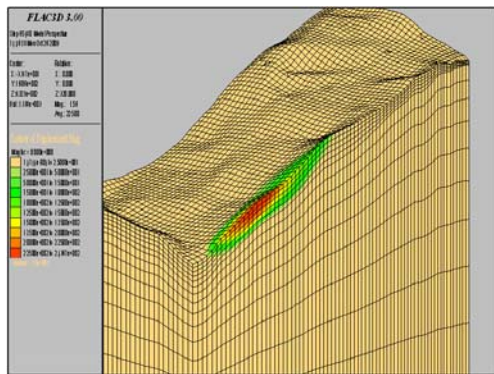
圖25 吉露崩塌地三維分析網格地層分布示意圖



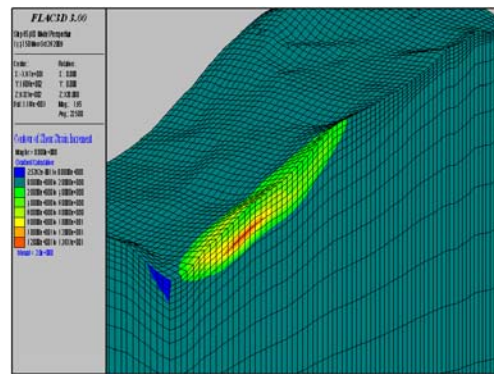
(a)邊坡整體變位分布



(b)邊坡整體剪應變分布



(c)AA'剖面變位深度分布



(d)AA'剖面剪應變深度分布

圖26 吉露崩塌地於颱風事件後之邊坡位移與剪應變分布圖

## 五、結論與建議

綜合本研究所得之各項調查與研究結果，茲摘要提出下列幾點結論與建議，以供各界參考運用。

### (一) 結論

1. 根據本研究現勘成果顯示，莫拉克颱風導致寶隆崩塌地西側產生兩處小規模之岩屑崩滑、坡趾處則因溪溝侵蝕產生崩滑，惟整體而言仍處於相對穩定狀態。藤枝與吉露崩塌地均於下邊坡產生較大規模之崩滑，尤其是吉露崩塌地因下邊坡坍滑形成坡趾見光，其上邊坡仍具較高之崩塌潛勢。
2. 本研究致力於探討崩塌地受降雨入滲引致水文地質條件改變，進而導致邊坡發生不穩定之機制，研究成果顯示本分析模式具有良好的模擬能力與正確性，可供往後崩塌地在預測雨量下穩定性評估之參考。
3. 二維分析成果指出，此模式已可初步擬合各研究場址於颱風前之常時水位，且大致掌握莫拉克颱風期間水位抬升的型態。其中吉露崩塌地更可擬合 FH-21 觀測井於颱風前後之常時水位，並掌握莫拉克颱風期間水位抬升及消散行為。此外，藤枝與吉露崩塌地之穩定性評估成果亦與現勘成果相符。
4. 三維分析成果指出：(a)藤枝崩塌地於藤枝部落下緣邊坡具備較高之崩塌潛勢，主要滑動破壞面為沿崩積層之淺層滑移，且下邊坡崩積層下方之風化岩層亦有相當高之崩塌潛勢。(b)吉露崩塌地於吉露村下緣之

邊坡具備較高之崩塌潛勢，主要滑動破壞面為沿崩積層之淺層滑移，且下邊坡崩積層下方之岩層亦有相當高之崩塌潛勢。

## (二) 建議

1. 本研究於藤枝崩塌地設置之自動化監測系統於莫拉克颱風期間均可正常回傳監測資料，雖受邊坡坍塌影響陸續受損而喪失監測功能，惟莫拉克颱風前期所紀錄之監測資料對後續模式分析驗證具有相當助益，建議後續類似研究可參考此監測架構。
2. 本研究所採用之 GeoStudio 程式為連體分析程式，僅適用於模擬破壞時間與可能滑動範圍，惟災後之幾何及水文地質條件均已改變，對於滑動塊體分離行為或後續引發次生崩塌之模擬則須採分離元素分析程式進行。

## 誌謝

本研究承蒙經濟部中央地質調查所提供相關研究經費，在此致上誠摯謝意，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

1. 經濟部中央地質調查所 (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 (1/3)」，成果報告，經濟部中央地質調查所，台灣，台北。
2. 鍾明劍、譚志豪、許世孟、顧承宇、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、費立沅 (2008)，「結合孔內探測與自動化監測技術之坡地監測系統研擬」，2008 流域地質與坡地災害研討會，台灣，台北。
3. 中央災害應變中心 (2009)，莫拉克颱風災害應變處置報告，第 74 報。