

# 松茂崩場地降雨促崩潛勢評估與監測驗證

鍾明劍 譚志豪 冀樹勇 蘇泰維 李錦發 費立沅

財團法人中興工程顧問社

經濟部中央地質調查所

## 摘要

本研究針對松茂崩場地之崩塌機制及崩塌潛勢進行綜合調查與研究，調查成果顯示於台7甲省道上邊坡仍處不穩定。本研究進而以二維及三維程式進行模擬分析，其中，二維分析以考量可整合降雨、入滲、滲流、邊坡穩定、與變形分析之GeoStudio程式進行分析，以深入研究降雨入滲作用引致崩場地失穩現象；另考量重點崩場地之三維地形效應，本研究另以FLAC<sup>3D</sup>模擬三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估，上述兩種分析模式均由崩場地現地監測成果進行比對驗證及參數反算分析。綜合研究成果顯示其破壞機制為以圓弧型滑動為主之複合型破壞，且地下水位與地中變形於颱風豪雨事件期間隨降雨量之變化甚為顯著，顯示降雨可能再次誘發松茂崩場地產生滑動。

## MODELING AND MONITORING OF RAINFALL-INDUCED LANDSLIDE RESPONSE TO CLIMATE CHANGES – A CASE STUDY OF SONG-MAO LANDSLIDE

M. C. CHUNG, C. H. TAN, S. Y. CHI

T. W. SU, J. F. LEE, L. Y. FEI

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

CENTRAL GEOLOGICAL SURVEY, MOEA

## ABSTRACT

In recent years, the increase in the frequency and intensity of extreme rainfall due to typhoon events brings significant landslide hazards in Taiwan. Accordingly, the study uses field investigation, monitoring and numerical analysis for landslides to improve the quality of life of local residents. For the study of active landslide analysis, two-dimensional and three-dimensional analyses were carried out. To improve understanding of active landslide triggering mechanisms especially focused on the rainfall induced landslide, modeling and analysis using two dimensional unsaturated numerical programs, Geostudio, and three dimensional numerical program, FLAC<sup>3D</sup>, were made. It is expected that the landslide initiation, enlargement, or reactivation can be predicted through the physically based models.

## 一、前言

松茂崩場地位於台中縣和平鄉，自921集集地震後，又逢敏督利、海棠、瑪莎、珊瑚等颱風及梅雨季豪雨影響，引發後續大範圍地層滑動現象，致使宜蘭通往梨山之省道台7甲線69k附近路基下陷達10公尺，導致當地住戶房舍龜裂受損，而靠近稜線附近亦產生山崩現象。鄰近最主要的地質構造為梨山斷層，由松茂崩場地西側通過(約位於中新世廬山層與漸新世佳陽層間)，對於梨山斷層之位置與型態雖有許多不同基調之論述，但均能佐證此區曾經歷劇烈地殼變動導致地層破碎及變質，進而形成現在的地形與地質狀態。由於松茂地區鄰近德基水庫，若此大範圍地滑區域再次產生大規模地層滑動，勢必將對水庫營運及當地居民安全造成極大的威脅，而根據本研究現地實際調查結果研判，大甲溪曲流河岸攻擊坡上方邊坡仍具有再次滑動的潛勢(詳見圖1與圖2)，故有必要針對該地區之地滑機制及地滑潛勢持續進行調查與研究。



圖1 大甲溪河岸攻擊坡持續受側蝕導致崩塌

圖2 坡面果園棚架因持續地滑產生嚴重變形

## 二、水文地質特性調查

台灣地區因活躍的造山運動造成岩層之破碎度高且節理發達，伴隨充沛之雨量，以致岩盤中之地下水儲存量豐富。近年來，集集大地震後接續之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之工作成果顯示，山崩與土石流的發生受地質、地形與水文環境的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。有鑑於此，實有必要對崩場地進行水文地質特性調查。

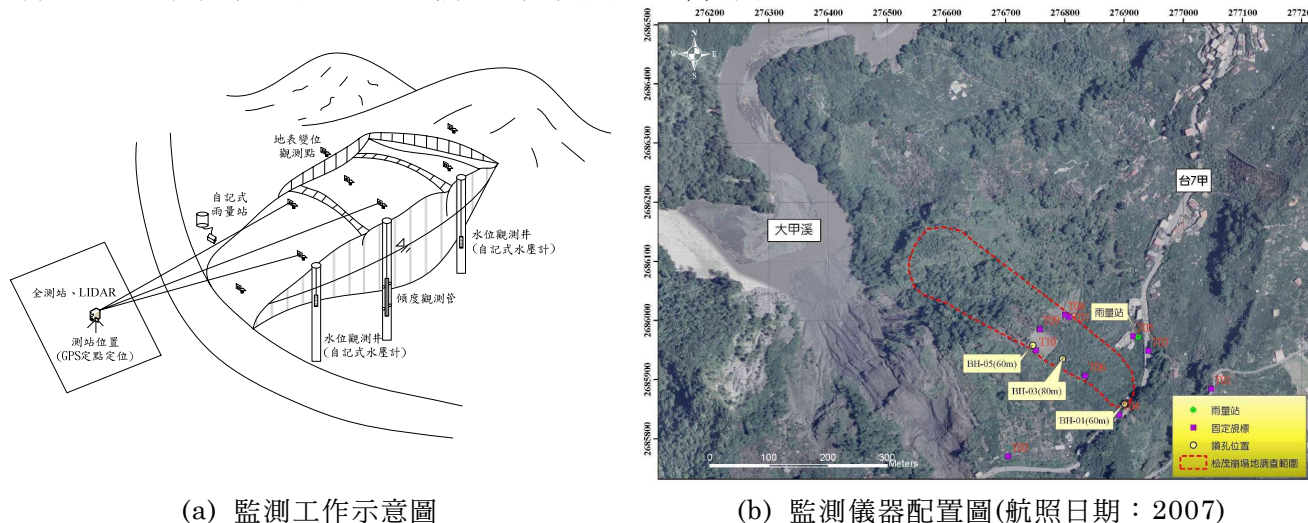
為瞭解松茂崩場地之可能崩滑範圍、地質構造及滑動機制，本研究採用之調查手段有地質鑽探調查、地表地質調查、雙環入滲試驗、地表地球物理調查、孔內探測調查(包含岩體裂隙調查分析與裂隙岩體水力試驗)、未飽和層土壤含水特性試驗、以及土壤與岩石力學試驗等，各項調查工作之目的與用途詳列如表1所示(經濟部中央地質調查所，2008；鍾明劍等人，2008)。表1各工項之功能除掌握崩場地內各地層之水文地質參數、架構水文地質概念模型外，亦可協助釐清可能之潛在滑動面範圍及含水層位置與型態，提供監測儀器佈置規劃之參考。

表1 崩場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	調查崩場地內地層與地質構造之空間分布及其力學特性。	1. 提供崩場地水文地質及穩定分析所需之基本參數； 2. 瞭解崩場地地層之破碎程度； 3. 提供崩場地可能滑動面深度及可能滑動位置。
地表地質調查	調查崩場地範圍內之地形表徵與地質露頭。	1. 調查崩場地地形表徵，掌握坡面變動狀況； 2. 掌握崩場地露頭分佈及位態，推估崩場地內之地質構造。
雙環入滲試驗	調查崩場地表層土壤之入滲率。	1. 提供崩場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	調查崩場地內之地層構造特性與地下水位面訊息。	1. 調查崩場地內潛在滑動面位置與滑動區塊； 2. 調查崩場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. 評估崩場地水文地質特性； 2. 評估崩場地內含水層位置與型態； 3. 提供崩場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	利用壓力鍋與現地張力設備調查未飽和層土壤含水特性。	1. 評估未飽和土壤滲透特性，求取體積含水量隨基質吸力之變化； 2. 提供崩場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. 提供崩場地水文地質及穩定分析所需之基本參數。

### 三、監測系統建置與成果

本研究針對松茂崩場地監測工作所採用的方式如圖3(a)所示，主要係於重點崩場地內之地質鑽孔中，設置水位觀測井與傾斜觀測管，透過自記式水壓計及測傾儀進行各崩場地之地下水位變化及潛在滑動面位移之觀測。同時，於各選定崩場地內之適當地點設置自記式雨量站與打設固定規標點，進行降雨量與地表變形之觀測，監測儀器配置狀況如圖3(b)所示。

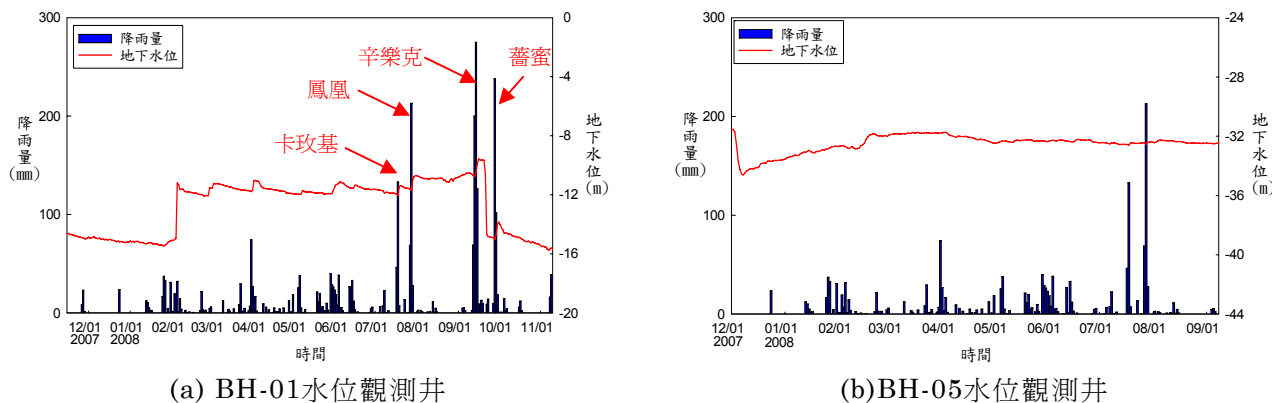


(a) 監測工作示意圖

(b) 監測儀器配置圖(航照日期：2007)

圖 3 松茂崩場地監測系統佈置規劃

松茂崩場地監測所得BH-01與BH-05水位觀測井地下水位與降雨量之關聯性資料如圖4所示，其中BH-05觀測井於薔蜜颱風過後，因井管變形過大導致其內之水壓計無法取出。由地下水監測資料可知地下水位從冬季進入春季後，坡頂(BH-01)之地下水位明顯由地表下15m抬升至12m；坡趾(BH-05)之地下水位亦由地表下34.0m逐漸抬升至32.5m，初步研判松茂崩場地之地下水位會受乾、溼季節影響，且可發現持續性之降雨事件會促使BH-01地下水位有所抬升，且有稽延的現象，而BH-05則較不顯著。



(a) BH-01水位觀測井

(b)BH-05水位觀測井

圖 4 松茂崩場地地下水位與降雨量關係

松茂崩場地監測所得地中變形資料如圖5(a)所示，可發現松茂崩場地存在二處顯著之滑動面，分別位於地表下約18~20m(崩積層與風化層交界面)及58~60m(風化層與新鮮岩盤交界面)處。由圖5(b)及圖5(c)可知，深度18~20m之淺層滑動面，監測迄今之累積滑動量約為10.91mm，平均滑動速率為1.71mm/月；卡玫基及鳳凰颱風期間之累積滑動量約為34.57mm，平均滑動速率高達10.28mm/月。惟於2008年8月27日吊放測傾儀時發現於地表下18.5m處產生嚴重變形，研判地表下18~20m之崩積層與風化層交界面已產生嚴重滑動現象。根據日本地滑對策技術協會(1978)建議基準值研判，松茂崩場地於常時即處於「準確定變動狀態」，屬於緩慢運動中的崩場地，而此兩場颱風事件引致之變形更處於「確定變動狀態」，屬於活潑運動中的崩場地，顯示松茂崩場地未來受豪雨誘發崩滑的可能性相當高。

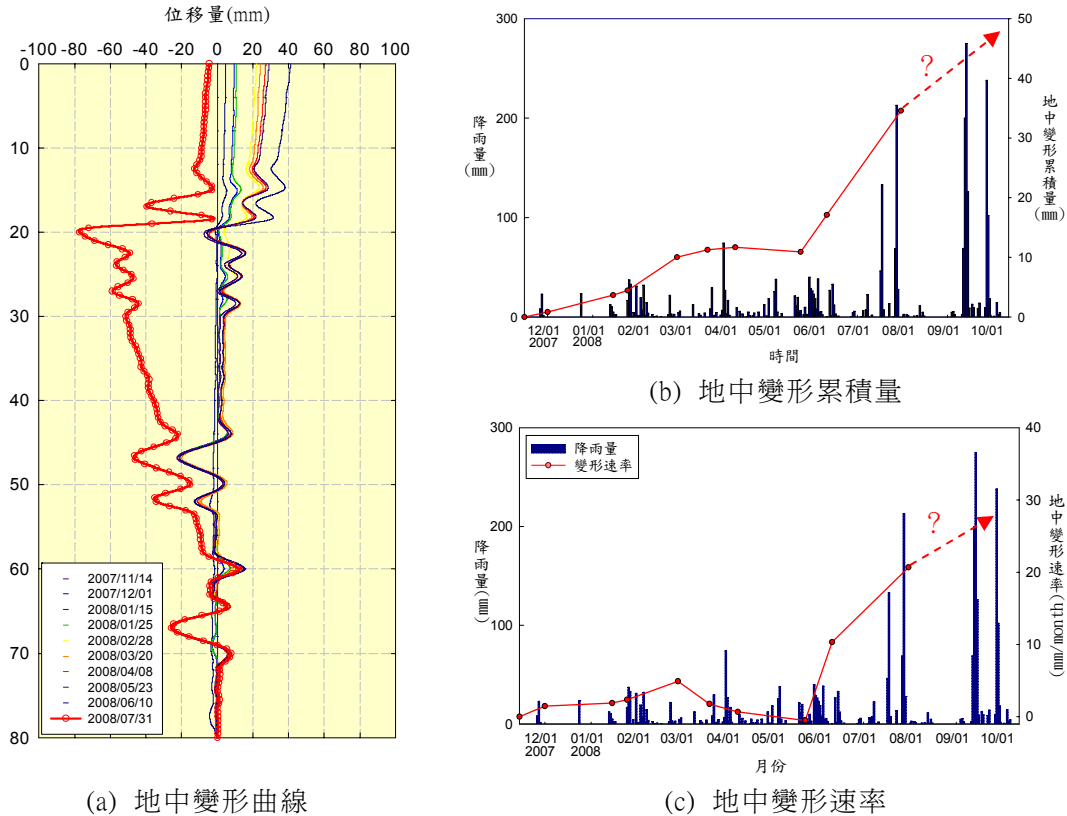


圖 5 松茂崩場地 BH-03 地中變形監測記錄

## 四、降雨促崩潛勢評估與監測驗證

### 4.1 降雨促崩潛勢評估模式

#### 4.1.1 二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析

本研究於二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析時所採之研究流程包含崩場地資料蒐集、分析剖面建立、概念模型建立、降雨入滲未飽和邊坡穩定分析(含邊坡穩定分析、降雨入滲分析、滑動變形分析)、分析成果與現地監測資料比對、模型驗證與回饋分析、參數影響分析、關聯性研究、以及分析成果綜合評述等工作。使用GeoStudio軟體於建立水文地質概念模型時，須先界定邊坡分析範圍，並以表1所述之地質鑽探、三維雷射掃描、地球物理調查與孔內攝影調查成果建立坡地數值地形與幾何網格。隨後輸入所需之水文地質參數(從既有資料或本研究相關試驗所獲得)，再設定初始條件及邊界條件即完成二維水文地質概念模型。松茂崩場地所建立之二維分析概念模型如圖6(a)所示。

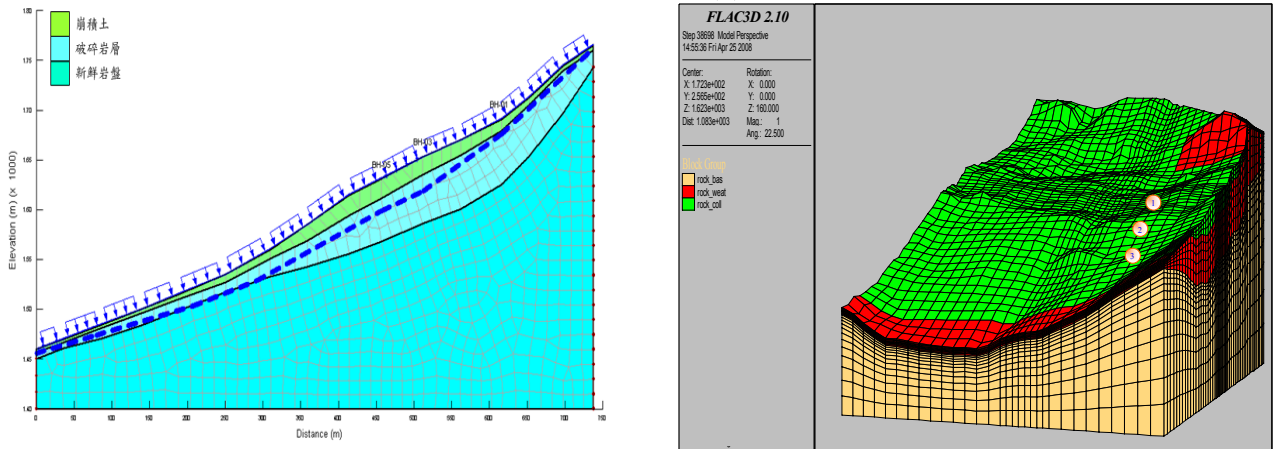
#### 4.1.2 三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估

本研究考量崩場地三維地形效應，以FLAC<sup>3D</sup>進行三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估，分析流程包含崩場地資料蒐集、分析剖面建立、概念模型建立、降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估、分析成果與現地監測資料比對、模型驗證與回饋分析、以及分析成果綜合評述等工作。採FLAC<sup>3D</sup>程式建立數值模型時須先界定邊坡分析範圍，本研究採用衛星影像或三維雷射掃描所取得之數值地形資料來建立重點崩場地之三維分析網格。並藉由既有之鑽探資料、本研究之地質鑽探以及地球物理調查成果輔助以建立三維地層之分析剖面。以表1所得成果簡化為由若干個水文地層單元組成之分析模型，並建立分析網格，再輸入所需之水文地質參數(從既有資料或本研究相關試驗所獲得)，並設定初始條件與邊界條件，即完成三維水文地質概念模型。松茂崩場地所建立之三維分析概念模型如圖6(b)所示。

### 4.2 分析成果與監測驗證

#### 4.2.1 二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析成果

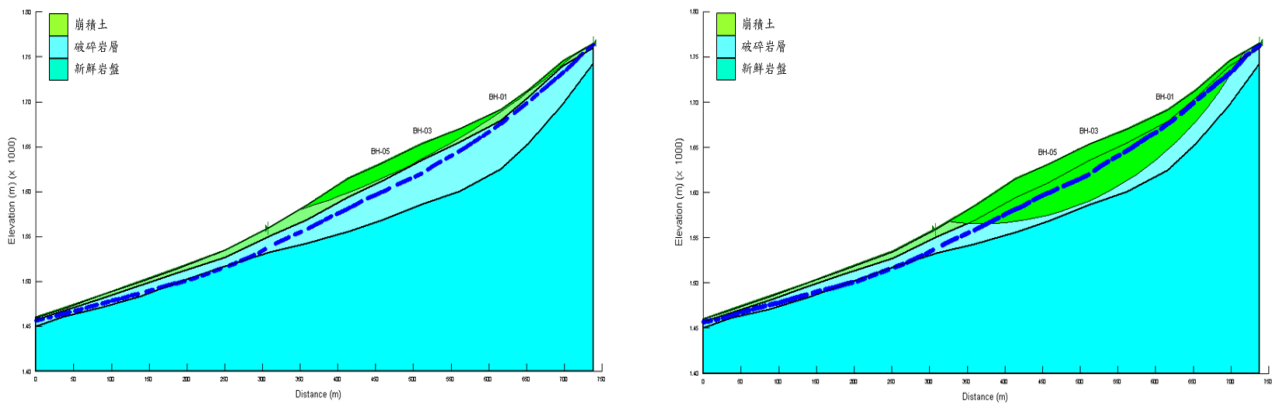
穩定分析成果顯示崩場地之最小滑動面位於坡頂風化岩層與新鮮岩盤的界面處，安全係數為1.31，說明此處有較大的滑動勢能，如圖7(a)所示；其次為深層剪裂帶滑動面，安全係數為1.40，其它滑動面之安全係數則相對較高，介於1.57~1.59間，如圖7(b)所示。



(a) 二維分析概念模型建立

(b) 三維分析概念模型建立

圖 6 松茂崩場地二維及三圍分析概念模型



(a) 崩積層/風化層界面滑動面

(b) 深層剪裂帶滑動面

圖 7 二維降雨入滲未飽和邊坡穩定分析成果

若考量於不同降雨強度作用下整體邊坡之安全性，累積降雨量與滑動面安全係數關係如表2所示，其中以崩積層及風化層界面滑動面的下降趨勢最為顯著，當累積降雨量達210mm時，安全係數由1.57降至0.85，說明此處有非常劇烈的滑動潛能；而累積降雨量達310mm時，淺層剪裂帶滑動面的安全係數由1.59下降至0.97，亦證明了此處在暴雨發生時所隱藏之滑動潛能。在累積降雨量達380mm時，多數滑動面之安全係數均會降低至1以下，代表此崩場地在暴雨發生時呈現了極度不穩定狀態。以上分析與卡玫基颱風(累積降雨量達133mm)與鳳凰颱風(累積降雨量達213mm)期間監測所得現象一致(見圖5)，顯示二維分析成果能有效地評估不同降雨強度作用下之變形行為。

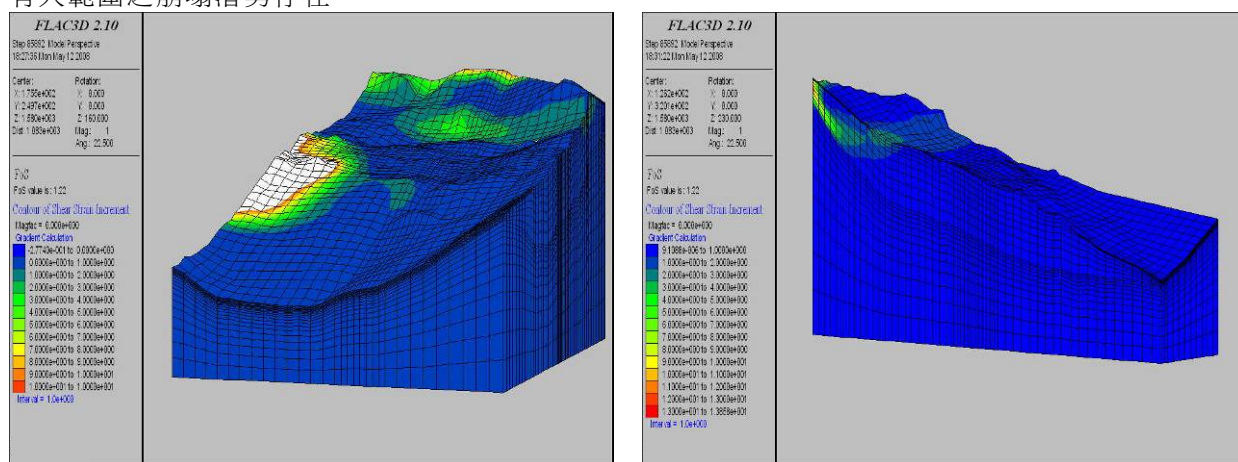
表2 松茂崩場地模式分析所得累積降雨量與安全係數關係

累積降雨量 (mm/day)	不同滑動面之安全係數			
	崩積層與風化層界面	上層剪裂帶	下層剪裂帶	風化層與新鮮岩盤界面
無降雨	1.57	1.59	1.40	1.57
210	0.85	1.41	1.26	1.44
310	0.33	0.97	1.10	1.19
380	0.23	0.79	0.89	1.07

#### 4.1.2 三維降雨促崩邊坡穩定分析與變遷潛勢評估成果

針對松茂重點崩場地進行現況常時地下水位之穩定分析，分析結果之安全係數與剪應變分布結果

如圖8所示。由分析結果顯示，整體之安全係數為1.22，雖小於規範於常態狀態之安全係數1.5要求，邊坡仍應處於穩定狀態，且由剪應變分布區域發現，剪應變最大集中於下邊坡坡度陡峭處之崩積層，由於地層探查資料有限，分析所採之地質模型中崩積層之分布與厚度與實際可能有所出入，由地形研判分析邊界上邊坡兩側之崩積層應不易堆積，因此分析範圍邊坡安全係數研判可能應較1.22為高，而於鑽孔位置剖面，雖仍有明顯之剪應變但已略低，因此於本研究鑽孔剖面區域之邊坡穩定度亦應高於1.22。另由暴雨暴雨導致水位上升狀況進行邊坡穩定分析結果顯示，台7甲省道上之邊坡則存有大範圍之崩塌潛勢存在。



(a) 分析域剪應變分布

(b) 鑽孔剖面剪應變深度分布

圖 8 松茂崩場地現況安全狀態與可能滑動之剪應變分布圖

## 五、結論

綜合松茂崩場地各項調查、試驗、與監測成果顯示，松茂崩場地可能破壞機制為以圓弧型滑動為主之複合型破壞，結合本計畫與前期相關研究成果顯示，松茂崩場地具極高之再次崩塌潛勢，尤其於台7甲省道上之邊坡處仍不穩定。鑽探岩心發現於地表下多處可發現明顯之剪裂泥，而監測得知可能滑動面位置分別位於淺層(地表下18~20公尺，崩積層與風化層交界面)及較深層(地表下58~60公尺，風化層與新鮮岩盤交界面)兩處，目前監測所得之地下水深度約為地表下38公尺至56公尺處。

降雨促崩綜合分析評估成果顯示，松茂崩場地於常時地下水位分析結果之安全係數為1.3，崩場地處於穩定狀態，惟松茂崩場地之上邊坡因暴雨促崩之潛勢相當高，現地勘察松茂地區於台7甲線省道上緣邊坡發現存在之地表張裂縫，顯示上邊坡相對處於較不穩定狀態。此外，二維降雨促崩分析結果於200年重現期距之暴雨規模下，水位上升約8公尺左右，其分析結果顯示於崩積層產生邊坡滑移破壞。而三維之分析之結果則可顯示台7甲省道上之邊坡則存有大範圍之崩滑潛勢存在。

## 誌謝

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中興社同仁，亦一併感謝諸位對此研究之付出與努力。

## 參考文獻

- 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與資料庫建置第一階段實施計畫-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估」，成果報告。
- 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。
- 日本地滑對策技術協會(1978)，*地滑對策技術設計實施要領*，一卷，第二期。