

降雨入滲對崩塌地邊坡穩定之耦合分析

羅鴻傑¹ 許世孟² 鄭道隆¹ 柯建仲¹ 蘇泰維³ 李錦發⁴

1. 中興工程顧問社大地工程研究中心 研究員
2. 中興工程顧問社大地工程研究中心 組長
3. 中央地質調查所 科員
4. 中央地質調查所 科長

摘 要

台灣本島係由歐亞板塊和菲律賓板塊相互擠壓形成，造就出陡峭的地形及脆弱多變的地質環境，山區地層更在歷經集集地震後造成嚴重擾動而非常破碎，在頻繁的颱風豪雨事件下往往發生大規模的山崩與土石流災害，因此探討山區崩塌地受降雨入滲而導致邊坡失穩之行為，已成為一重要課題。由於傳統邊坡穩定分析鮮少考量降雨入滲機制，僅能以地下水的變動作為模擬之水文條件，以致難以對降雨與邊坡穩定性間之關聯性多作探討，而 GeoStudio 可整合降雨入滲-滲流-穩定性進行耦合分析，因此，本文嘗試以 GeoStudio 為分析工具，並以義興崩塌地為例，將一系列現地與室內調查試驗成果整合建立一水文地質概念模式，利用數值模擬方式瞭解崩塌地在降雨入滲條件下整體地下水滲流行為，以及邊坡滑動潛勢。為使模擬成果更具代表性，模式中之參數及邊界條件均透過監測資料成果率定，並以辛樂克及蕃蜜颱風事件輔以驗證。此外，本研究將頻率分析所預測之重現期雨量帶入模式中，以進而探討崩塌地不同降雨條件下的穩定性。分析結果顯示因本崩塌地風化岩層過於破碎，水力傳導係數高，故雨水入滲後蓄積不易，以致水位抬升規模不大，而在相同條件下，滑動面之安全係數亦不會呈現明顯的下降趨勢，說明了義興崩塌地處於穩定狀態。

關鍵字：耦合分析、水文地質概念模式、數值模擬、降雨入滲、邊坡滑動潛勢。

Coupled Stability Analyses of Rainfall Induced Landslide

ABSTRACT

Taiwan is an island located at an active collision zone between the Eurasian Plate and the Pacific Plate. In recent years, due to the abnormal climate change, typhoon events with high rainfall intensity frequently occurred during the summer and early fall period and usually triggered severe damages such as landslides in Taiwan's piedmont areas. To better understand such problems, numerical models of rainfall induced landslide have become a critical issue. However, there are rarely any models taking into account the rainfall infiltration mechanism which may lead to impractical results. In this study, a 2D time-dependent infiltration-seepage-stability coupled hydrogeologic model was established to simulate the seepage and slope stability of an active landslide site in northern Taiwan. Realization of the conceptual model and corresponding hydraulic and mechanical parameters applied in the model were based on a series of in-situ investigations and laboratory experimental results. A transient seepage analysis was conducted of which the result was calibrated in order to minimize the difference between the computed pore pressures and the observed piezometric levels. Once the calibration was achieved, a transient stability analysis considering the precipitation brought by two typhoon events was conducted to compute the factor of safety for each typhoon event. According to the results, the slip potential of the landslide site was identified which brought up a good indication for the risk management during the typhoon event.

Key Words: Coupled Analyses, Hydrogeological Conceptual Model, Numerical Modeling, Rainfall Infiltration, Slip Potential.

一、前言

台灣係由歐亞板塊和菲律賓板塊相互擠壓形成，造就出陡峭的地形及脆弱多變的地質環境，山區地層更在歷經集集地震後造成嚴重擾動而使岩體破碎程度增加、強度減弱，近年來在全球氣候異常變化下，頻繁的颱風豪雨往往使山區發生大規模的山崩與土石流，造成道路中斷與房舍掩埋等災害，嚴重地危害到民眾生命財產安全，而 97 年 9 月蕃蜜颱風所引發之貓纜墩柱坍塌事件又再次突顯了此一問題之嚴重性。因此探討山區坡地受降雨入滲而導致邊坡失穩之潛勢，提供災害評估及預警之參考，已成為今日防災工作之重要課題。

一般而言，降雨入滲除使坡地飽和層中地下水位抬升外，亦增加了非飽和層土壤之單位重及含水量，造成土壤抗剪強度降低而驅使坡體產生滑動。由於傳統邊坡穩定分析鮮少考量不飽和土壤的降雨入滲機制，僅能以輸入地下水位的變動作為模擬之水文條件，因此往往造成模擬代表性的不足，而 GeoStudio 程式可整合降雨入滲、滲流及邊坡穩定進行暫態耦合分析(transient coupled analysis)，可計算崩塌地在不同降雨條件下之水位分布及安全係數，相當適用於此一現象之探討。近年來諸多學者均藉此為分析工具來模擬降雨對邊坡穩定的影響(謝平城, 2004; 呂明杰, 2004; 黃瑞昌, 2003; Hoydal and Heyerdahl, 2006)，然此類研究係以室內模型或虛擬邊坡為模擬對象，導致模擬結果與真實現況產生落差；此外，亦有學者利用 GeoStudio 程式來模擬實際的邊坡行為(Gasmo et al., 2000; Blatz et al., 2004; Casagli, 2006; 許正輝, 2005; 陳筑佑, 2005; 鄧鳳儀, 2008)，然受限於資料的不足，其模式之參數及邊界條件仍僅以鑽探或試驗結果來給定，且多無透過現地長期的監測結果進行參數的校正與驗證，導致模擬結果之代表性仍顯不足。

本研究亦嘗試以 GeoStudio 為分析工具探討降雨對坡地穩定性之影響，模式的建立係透過一系列現地與室內調查試驗成果整合而成，而為使模擬結果合乎現地情況，模式中的參數藉由長期水位監測成果進行率定，並以辛樂克及蕃蜜兩場颱風事件監測資料作驗證。此外，本研究亦將頻率分析所預測之重現期距雨量之二日暴雨設計雨型代入模式，計算崩塌地在不同累積雨量下之地下水位及安全係數，以進而探討崩塌地在不同降雨條件下的穩定性。

二、GeoStudio 程式介紹

GeoStudio 為加拿大 Calgary 大學發展之二維地工數值軟體，內含多種不同分析功能的模組，因應研究目的，本研究僅使用其中之 SEEP/W 及 SLOPE/W 模組，茲對此二模組分別說明如后。

2.1 SEEP/W

SEEP/W 模組為一有限元素(finite element method)滲流分析程式，依據達西定律並藉由網格節點的計算，模擬流體通過飽和-非飽和土體中之行

為，此模組可輸入暫態雨量資料，適於探討地下水受降雨、蒸發或地面水補注等條件下之滲流行為，其計算滲流之控制方程式如式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中 H 為總水頭， K_x 及 K_y 分別為 X 向及 Y 向之水力傳導係數， Q 為邊界補注量， θ 為體積含水量， t 則為時間，式(1)表示水流在某空間 X 向及 Y 向流動的變化量加上外在之補注量等於該空間中土體單位時間內體積含水量之變化。而當土壤為不飽和狀態時，其體積含水量將隨著土壤的基質吸力(孔隙氣壓與孔隙水壓的差值， $U_a - U_w$)而有所改變，考量不飽和機制之影響，在模式分析時需建立體積含水量函數(volumetric water content function)，即是須了解不飽和土體中孔隙水壓與體積含水量之關係，此函數除可透過室內試驗求得外，SEEP/W 更提供了 Fredlund and Xing(1994)、Van Genuchten(1980)及 Modified Kovacs(2003)發展之理論公式供使用。此外，土壤在不飽和層的水力傳導係數並非為一定值，往往隨著土體的飽和度及孔隙水壓的變化而改變，故模式亦需輸入水力傳導係數函數(hydraulic conductivity function)，即是建立水力傳導係數與孔隙水壓之關係，此函數亦可選用 SEEP/W 中提供之理論模式包括 Fredlund and Xing (1994)、Van Genuchten(1980)及 Green and Corey(1971)等。

2.2 SLOPE/W

SLOPE/W 模組採極限平衡法(limit equilibrium method)進行邊坡穩定分析，其方法包含 Morgenstern-Price、Bishop、Janbu、Ordinary、Spencer 及 GLE 等，可對不同土體類型、複雜地層和滑動面形狀邊坡作分析，主要是將通過土體的滑動面以滿足力平衡或力矩平衡的方式求解安全係數。而因應不飽和土壤之地下水問題，SLOPE/W 提供了與 SEEP/W 的耦合分析功能，可在分析中進而探討邊坡在不飽和條件下或是不同孔隙水壓分布下之穩定性。考量土壤在負孔隙水壓條件下剪力強度變化與正孔隙水壓狀態下有所不同，SLOPE/W 於計算不飽和土壤剪力強度時係利用 Fredlund 等(1978)提出之 Mohr-Coulomb 修正式，如式(2)所示。

$$\tau = C' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

式中 τ 為剪力強度， C' 為有效凝聚力， σ_n 為切片底面之平均正向應力， ϕ' 為有效摩擦角， ϕ^b 則是土壤抵抗力因基質吸力增加而提升之摩擦角，由此修正式可知不飽和層土壤的剪力強度與 C' 、 ϕ' 及 ϕ^b 有著密不可分的關係。

三、研究區域概述

本研究調查區域位於桃園縣復興鄉義興電廠上方，距大漢溪中游及榮華壩下游約 5 公里處之崩塌地。近年來此崩塌地雖持續進行邊坡穩定及排水改善等工程，然每逢颱風豪雨仍使部分邊坡產生崩塌，而

根據水利署評估報告(2006)及實地地勘的種種跡象研判,本崩塌地仍有持續坍塌之現象。由於崩塌地下方即為義興電廠,若此區域產生大規模滑動,勢必將對電廠營運及當地居民安全造成威脅,有鑒於此,本研究以義興崩塌地為研究對象模擬該區域受降雨入滲後之滑動潛勢,研究區域位置如圖 1 所示。



圖 1 義興崩塌地研究區域遙測影像

四、模式建立與分析

本研究於調查區域布設 4 孔共 200m 之地質鑽探調查,並施作一系列之現地水文地質試驗包括地表地電阻剖面影像調查、雙環入滲試驗、孔內攝影調查及封塞水力試驗,主要係以獲得崩塌地之地層分布、滑動模式及水力參數等資訊來協助崩塌地水文地質概念模式之建立。崩塌地之基本物理參數及力學參數可透過多項室內試驗的施作來獲得,包括物理性質試驗、壓力鍋試驗、三軸壓縮試驗及直剪試驗等。此外,本研究亦於調查範圍裝設雨量計及水壓計,並以長期監測方式獲取資料來提供模式初始水文條件以及參數校正、驗證之依據。整合上述調查與試驗至模式後即可開始分析,其流程如圖 2 所示,依序包含概念模型建立、降雨入滲分析、模式參數校正、模式驗證、邊坡穩定分析及關聯性研究。茲針對分析流程說明如后。

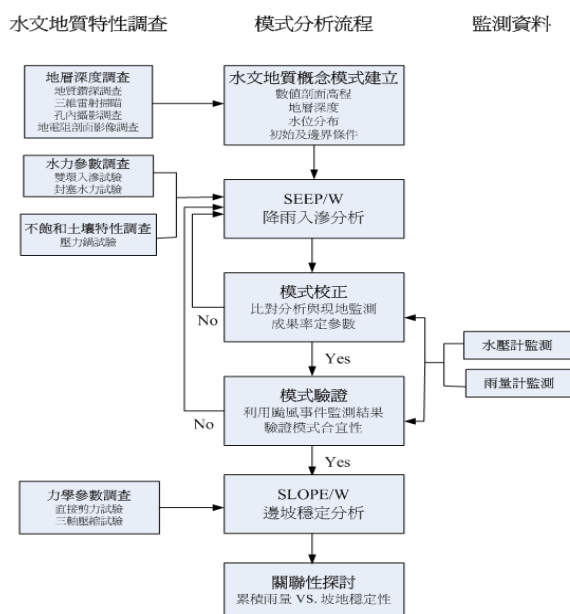


圖 2 模式分析流程圖

4.1 模式建立及降雨入滲分析

模式中崩塌地之剖面高程採三維雷射掃描 LIDAR(light detecting and ranging)數值地形成果,並參照鑽孔岩心資料、孔內攝影圖像及地表地電阻剖面影像決定地層深度及地下水高程,待剖面確立後將高程輸入 GeoStudio 中繪製有限元素網格。本研究將崩塌地地層由淺至深分為崩積土層,風化破碎岩層以及新鮮岩盤。在進行 SEEP/W 降雨入滲分析時,本研究將地下水位的左右邊界水頭皆設為定值,下方則設為零流通量(noflux),並將監測所得雨量給定於崩塌地上方,如圖 3 所示。

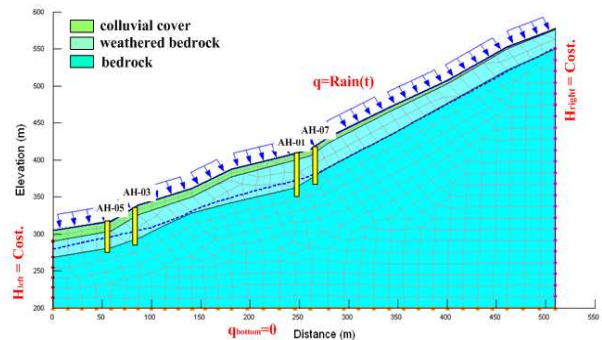


圖 3 義興崩塌地模式建立及邊界條件指定

另在 SEEP/W 分析不飽和土壤滲流時,需建立體積含水量函數以及水力傳導係數函數,本研究除崩積土體積含水量函數採壓力鍋試驗量測結果外(見圖 4),其餘地層均以程式提供 Fredlund and Xing(1994)之經驗公式求得,此外,本研究所採用之水力傳導係數均參照現地試驗成果,崩積土引用雙環入滲試驗計算之最小入滲率,風化及新鮮岩層則依雙封塞水力試驗之成果給定,並透過 Fredlund and Xing(1994)之經驗公式計算水力傳導係數函數;而為確切掌握模擬結果,在進行暫態分析時,本研究採日作為每一時階(time step)之分析單位。將相關參數代入程式後即可計算崩塌地每一時階之地下水流場變化、壓力水頭分布及含水量分布等,如圖 5 及圖 6 所示。

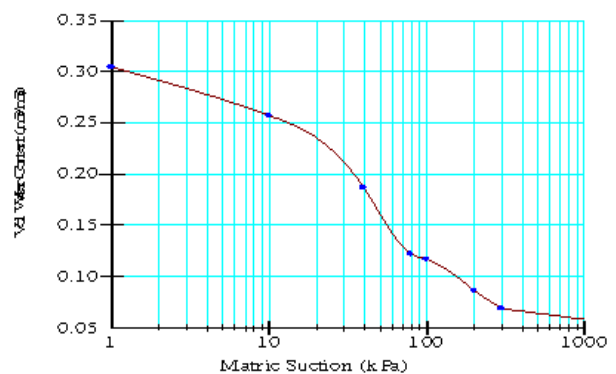


圖 4 崩積土體積含水量函數

4.2 模式參數校正

由於本研究所建立之模式係以概念化的角度為出發點,即是將現地複雜多變的環境條件簡化成一單純之水文地質概念模式,而為使模式中每一地層單元之水力參數與現場條件相當,本研究採崩塌地

AH-03、AH-05 及 AH-07 鑽孔所埋設之水壓計監測資料，並以 96 年 12 月 1 日至 97 年 7 月 29 日之水位觀測結果進行模式參數的校正，藉由反覆計算來減少模擬水位與監測水位間之誤差，此除可驗證現場參數求取之合宜性外，亦能使模式的計算結果更具代表性，其最終的校正結果如圖 7 所示。

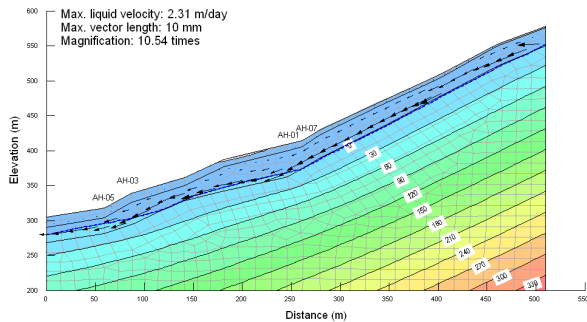


圖 5 SEEP/W 滲流向量及壓力水頭分布計算結果

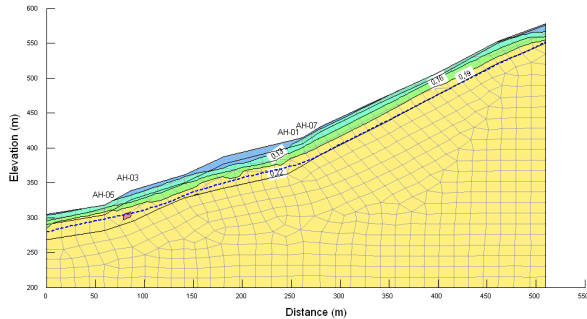


圖 6 SEEP/W 含水量分布計算結果

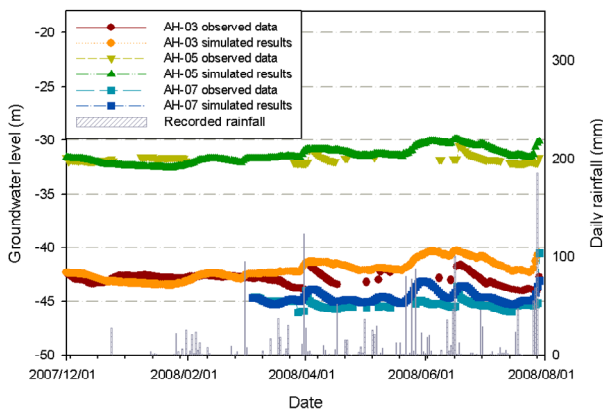


圖 7 參數校正後模擬水位與監測水位比對

圖 7 顯示模式計算結果與水位觀測趨勢相當，其中又以 AH-03 及 AH-07 鑽孔最為一致；在 96 年 12 月至 97 年 3 月期間因無明顯降雨，故兩者水位均未產生顯著的變化，而 97 年 3 月後降雨趨於頻繁，水位則開始隨雨量呈現明顯的改變，惟其水位均處於地層較為破碎且透水係數較高之風化岩層，故整體受降雨抬升的幅度並不大。此外，圖中亦顯示校正過後之模擬水位仍略高於實際觀測結果，說明了數值模擬在本研究中仍存有些許差異，同時亦證明了崩塌地水文地質條件的複雜性。模式參數最終校正成果彙整如

表 1 所示。

表 1 模式校正後之水力參數與邊坡穩定使用之力學參數

地層 參數	崩積土	風化岩層	新鮮岩盤
水力傳導係數, K (m/sec)	1.63×10^{-5}	7.94×10^{-5}	7.75×10^{-8}
體積含水量, ω (%)	23	22	20
水力傳導係數異向比 K_r	1	0.5	1
單位重, γ_t (kN/m ³)	16	22	26
凝聚力, C (kPa)	10	80	500
摩擦角, ϕ (deg)	29	32	42

4.3 模式驗證

由於崩塌地於 97 年 9 月 11 日及 9 月 26 日分別遭受辛樂克及薔蜜颱風侵襲，故本研究亦將兩場颱風事件之降雨歷程代入模式進行分析，計算崩塌地在颱風期間整體水位變化，並透過水壓計監測結果的比對來驗證模式的代表性；其成果如圖 8 及圖 9 所示。

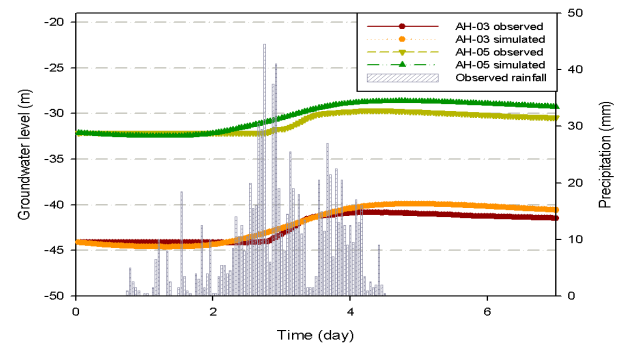


圖 8 辛樂克颱風模式水位驗證成果

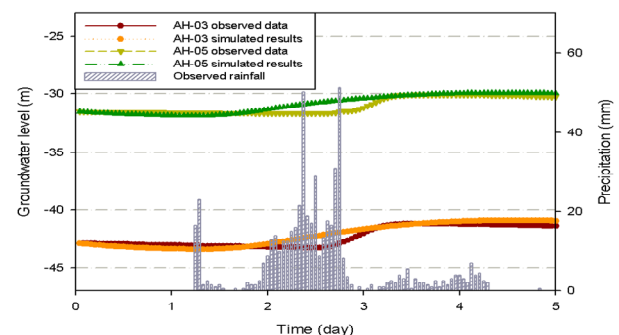


圖 9 薔蜜颱風模式水位驗證成果

圖中顯示模擬水位受降雨入滲抬升的反應較快，而監測資料卻略有延遲的情況產生；此外，辛樂克颱風事件的模擬水位亦小幅高於實際監測反應，然

就整體而言模式計算結果與水位觀測仍呈現一致的趨勢，驗證了模式於本崩塌地模擬之代表性。

4.4 邊坡穩定分析

模式完成校正與驗證後即可進行 SLOPE/W 邊坡穩定分析，分析時係依現勘、鑽探及試驗調查成果確立可能滑動面位置，並將其指定於剖面中，本研究綜觀調查結果研判滑動面較有可能沿風化岩層及新鮮岩盤的界面產生，故依位置不同區分為下風化層/新鮮岩盤界面滑動面(slip surface-1)、上風化層/新鮮岩盤界面滑動面(slip surface-2)及通過監測移動位置滑動面(slip surface-3)，如圖 7 所示，邊坡穩定所給定之力學參數如表 1 所示。

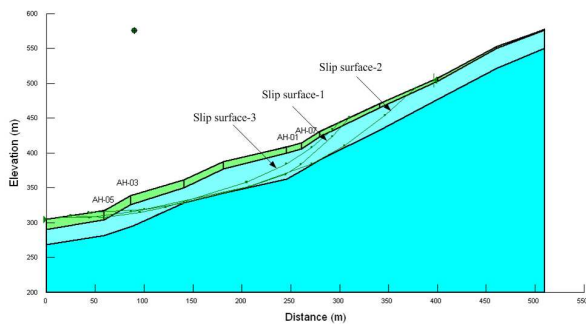


圖 7 SLOPE/W 滑動面指定

完成滑動面指定後將室內試驗所得之力學參數代入程式中即可利用極限平衡切片法計算各滑動面之安全係數(見圖 8)，結果顯示三個滑動面安全係數分別為 1.77、1.62 及 1.79。此外，若將 SEEP/W 模擬之暫態水位代入 SLOPE/W 中進行耦合分析，可進而求取滑動面在每一時階下的安全係數(見圖 9)，其結果顯示三個滑動面之安全係數反應趨勢相當，在無明顯降雨期間均無顯著的變化，而一旦進入降雨頻繁時期，安全係數則開始隨雨量而下降，惟由 SEEP/W 分析結果顯示地下水受雨量抬升之規模並非顯著，以致安全係數未呈現大規模的變化，說明了本崩塌地處於穩定的狀態。本研究亦分析兩場颱風事件下之邊坡穩定性，結果如圖 10 及圖 11 所示，其趨勢均顯示安全係數受颱風的侵襲而下降，其中因辛樂克颱風降雨延時較長，安全係數下降規模亦較大，介於 7.2~10.1% 間，相形之下薔蜜颱風的影響較小，其安全係數下降規模則在 3.2~3.9% 間，然其整體最終安全係數均高於規範常態安全係數 1.5 之規定，說明了崩塌地在兩場颱風的降雨條件下仍呈一穩定狀態。

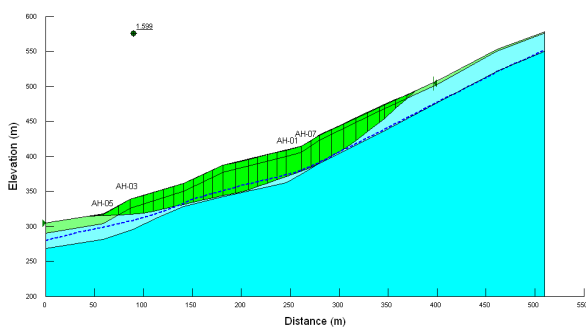


圖 8 SLOPE/W 滑動面安全係數計算結果

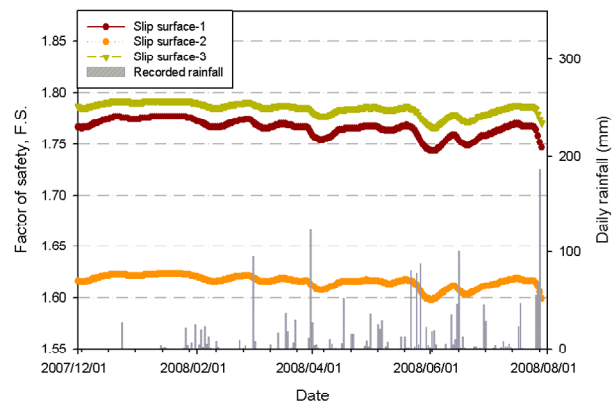


圖 9 滑動面暫態安全係數計算結果

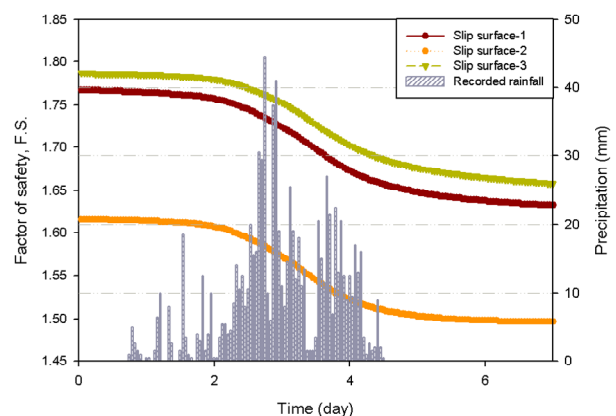


圖 10 辛樂克颱風滑動面安全係數計算結果

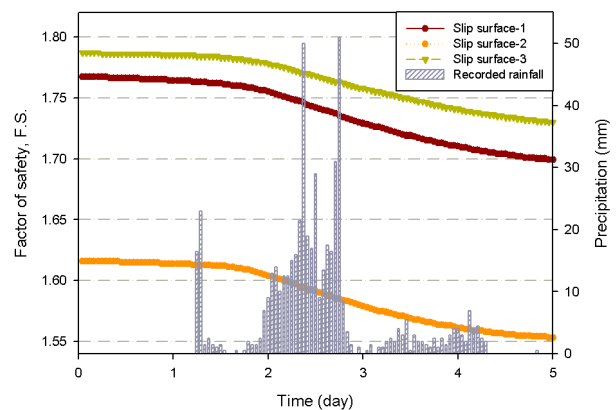


圖 11 薔蜜颱風滑動面安全係數計算結果

五、累積雨量與邊坡穩定之關聯性探討

本研究進而探討崩塌地累積雨量與整體邊坡穩定性間之關聯性，其方法係採用崩塌地鄰近之霞雲雨量觀測站資料，透過頻率分析方式將預測之 2 日重現期距雨型代入模式，以每小時做為時階單位進行 48 小時的暫態分析，計算地下水在不同重現期距累積雨量下之水位抬升以及滑動面安全係數變化；探討之雨型資料如表 2 及圖 12 所示。

表 2 頻率分析之二日暴雨重現期距雨量

重現期距 (year)	累積雨量 (mm)
5	425
10	517
25	622
50	693
100	760
200	823

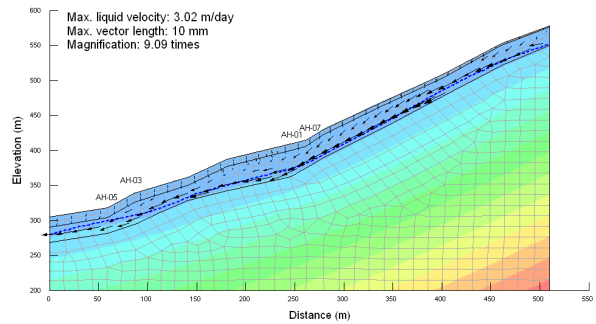


圖 14 模式分析重現期距雨量下滲流向量示意

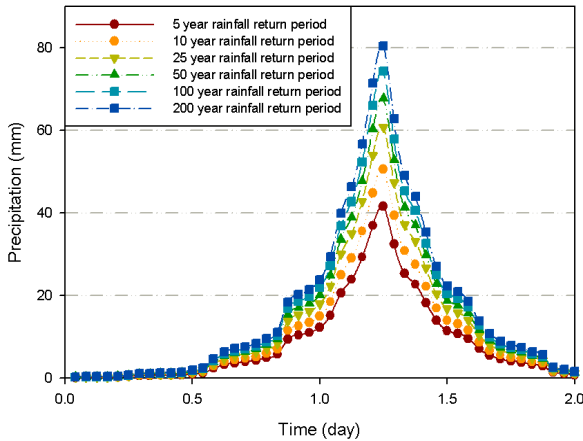


圖 12 義興崩塌地所預測之重現期距雨型分布

5.1 累積雨量與地下水位之關聯性

本研究分別針對三個鑽孔位置探討累積雨量與地下水位抬升關係，其模擬結果如圖 13 所示，由圖觀之崩塌地之地下水位均整體隨累積雨量的增加而呈一線性的抬升趨勢，抬升規模約在 2~6 m 間。由於本研究所給定之重現期距降雨強度約在 2.46×10^{-6} m/sec~ 9.53×10^{-6} m/sec 之間，已較崩積土水力傳導係數 (1.63×10^{-5} m/sec) 為低，故雨水皆可完全入滲，然風化岩層水力傳導係數為 7.94×10^{-5} m/sec，在大於降雨強度約一數量級 (order of magnitude) 的情況下，雨水蓄積不易，且多延此地層往下邊坡的方向流動 (見圖 14)，以致水位的抬升規模有限。

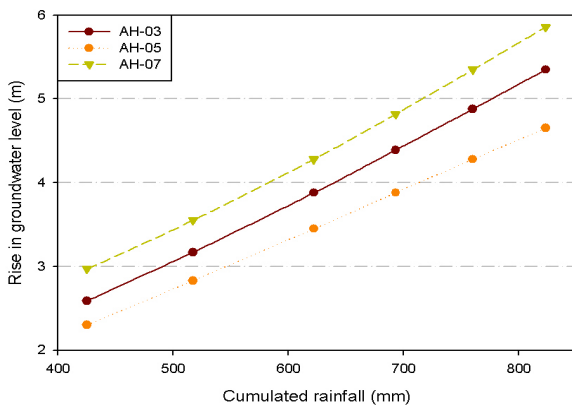


圖 13 模式分析所得累積雨量與地下水位關係

5.2 累積雨量與安全係數之關聯性

而在相同降雨條件的作用下，邊坡穩定分析結果顯示安全係數隨累積雨量呈一線性的緩降趨勢，如圖 15 所示，說明了崩塌地在降雨入滲情況下，土壤單位重增加，剪力強度降低，造成安全係數下降的結果；惟在水位抬升幅度不大的前提下，安全係數的下降規模亦非顯著，介於 2.9~4.0% 間，說明了崩塌地處於穩定狀態。

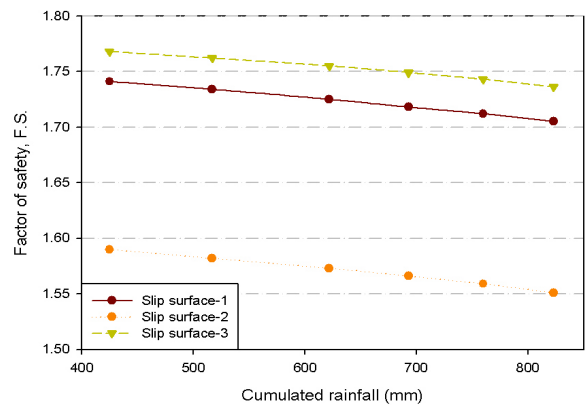


圖 15 模式分析所得累積雨量與安全係數關係

六、結論

由於 GeoStudio 可整合降雨入滲-滲流-穩定性進行暫態耦合分析，因此本研究以 GeoStudio 為分析工具並以義興崩塌地為模擬對象，將一系列調查與試驗成果整合建立一崩塌地之水文地質概念模式，探討崩塌地在不同降雨入滲條件下整體地下水之滲流行為，以及邊坡滑動潛勢。而為使模擬結果與現場條件一致，模式中所給定之參數均透過現地水壓計長期監測結果的回饋反覆校正而得，並藉由辛樂克及蕃蜜兩場颱風事件作驗證，其結果顯示模式計算結果與實際監測反應有良好的一致性，在兩場颱風的降雨條件下，崩塌地的穩定性下降規模約在 3~10 % 間。而完成模式的校正與驗證後，本研究進而將頻率分析所預測之各重現期距雨型帶入，以探討崩塌地在不同降雨條件下之穩定性，分析結果顯示崩塌地之風化岩層過於破碎，水力傳導係數高，故雨水入滲後蓄積不易，並多於此層向坡趾處流動，以致水位抬升規模有限，

而在此條件下，滑動面安全係數亦不會造成明顯的下降趨勢，約在 2.9~4.0 間；整體而言，義興崩塌地處於相對穩定狀態。

本文結合 GeoStudio 之未飽和滲流理論及極限平衡分析方法，主要係以探討坡地在不同水文條件下之穩定性，雖極限平衡法並非適切於分析所有邊坡的破壞屬性，且無法計算坡體移滑之變形量，然其所得之安全係數變化仍可做為研判邊坡穩定性之參考依據。受限於本案例地中變形監測資料之不足，本研究模式中力學參數的給定是以室內試驗為主，其校正與驗證仍待後續工作進行。

參考文獻

- [1]Green, R.E and Corey, J.C., "Calculating of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods." *Soil Sci Soc Am, Proc* 35, pp.3-8 (1971).
- [2]Fredlund, D., Morgenstern, N., and Widger, R., "The shear strength of unsaturated soil." *Canadian Geotechnical Journal*. Vol.15, No.3, pp.313-321 (1978).
- [3]Van Genuchten, M.T., "A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Sci Soc Am J44*, pp. 892-898 (1980).
- [4]Fredlund, D.G, Xing, A., and Huang, S. "Predicting the permeability functions for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Can Geotech, J.31*, pp. 533-546 (1994).
- [5]Gasmol, J.M, Rahardjo, H, and Leong, E.C., "Infiltration Effects on Stability of a Residual Soil Slope," *Computer and Geotechnics*, 26, pp. 145-165 (2000).
- [6]黃瑞昌,「土石流啟動機制之數值分析」, 碩士論文, 成功大學土木工程研究所, 台南 (2003)。
- [7]Blatz, J.A., Ferreira, N.J., and Graham, J., "Effects of near-surface environmental conditions on instability of an unsaturated soil slope." *Can. Geotech. J.* 41, pp. 1111-1126 (2004).
- [8]呂明杰,「土壤邊坡降雨入滲行為之探討」, 碩士論文, 中原大學土木工程研究所, 中壢 (2004)
- [9]謝平城、王瀚衛, 降雨滲流對邊坡穩定的影響, *水土保持學報*, 36(2), 第 135-142 頁 (2004)。
- [10]許正輝,「降雨入滲對集水區邊坡穩定之影響探討」, 碩士論文, 海洋大學河海工程研究所, 基隆 (2005)。
- [11]經濟部水利署北區水資源局,「榮華大壩(含義興電廠)第二次整體安全檢查與評估-監測成果分析總報告」(2006)。
- [12]Casagli, N., Dapporto, S., Lbsen, M.L., Tofani, V., and Vannocci, P., "Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20th-21th November 2000, in Northern Tuscany." *Landslides*. 3, pp. 13-21 (2006).
- [13]陳筑佑,「臺地邊緣復發式邊坡滑動之水文地質因素探討-以湖口臺地南緣地滑地為例」, 碩士論文, 中央大學應用地質研究所, 中壢 (2006)。
- [14]Høydal, Ø. A., and Heyerdahl, H., "Methodology for calculation of rain-induced slides," *Unsaturated Soils*, pp. 473-484 (2006).
- [15]GEO-SLOPE International Ltd. *Seepage modeling with SEEP/W, user's guide second edition*. GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alta (2007).
- [16]GEO-SLOPE International Ltd. *Stability modeling with SLOPE/W, user's guide second edition*. GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alta (2007).
- [17]經濟部地調所,「集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(期末分冊報告)」(2007)。
- [18]鄧鳳儀,「湖口崩塌地水文地質數值模型回饋分析研究」, 碩士論文, 中央大學應用地質研究所, 中壢 (2008)。