

降雨誘發坡地土砂災害之危險度評估模式

林德貴 林永欣 吳正義 游繁結*

摘 要 本研究依據現有之數值工具、分析技術及案例驗證建置一套可行之坡地土砂災害(或坡地型土石流)數值模擬程序以評估此類型土砂災害之危險度。該數值模擬程序包含:坡地之降雨-滲流-安全係數數值模式(R-S-F 模式)及土砂之降雨-流動-堆積數值模式(即 R-F-D 模式)。其中 R-S-F 模式用以計算不同地形、地質及降雨量條件下之坡面崩塌規模,而此崩塌規模再轉換為 R-F-D 模式所需之輸入土砂量體,來進行土砂流動影響範圍計算,並據以評估降雨所引發土砂災害之可能危險度。本研究亦整合上述兩個模式參數研究之計算成果,用以製作簡化型應用圖表,透過簡單現場調查及簡化型應用圖表查用,吾人即可針對土砂災害潛勢區進行土砂災害危險度安全係數計算及危險度評估,並可作為颱風降雨期間警戒及疏散預測之參考。

關鍵詞: 坡地土砂災害、坡地型土石流、數值模式、R-S-F 模式、R-F-D 模式、危險度安全係數。

An Evaluation Model of Hazard Potential for Rainfall Induced Sediment-Related Slope Disaster

Der-Guey Lin Yung-Hsin Lin Cheng-Yi Wu Fan-Chieh Yu*

ABSTRACT To make an immediate evaluation for the hazard potential of sediment-related slope disaster (or slope-type debris flow) caused by torrential rainfalls, this study aimed to establish a feasible procedure including the currently available numerical tools and analytical techniques using historical cases. In which, the numerical models included: (1) Rainfall-Seepage-Factor Safety Model or R-S-F Model and (2) Rainfall-Flow-Deposition Model or R-F-D Model. The R-S-F Model is used to calculate the collapse scale of a failure slope characterized by different slope angles, slope lengths, colluvium thicknesses, geological materials, and rainfall intensities. Subsequently, the collapse scale from the R-S-F Model was further converted into the quantity of sediment required for the R-F-D Model to simulate the influence zone of the flowing sediment. Finally, integrating the calculated results of parametric study using the R-S-F Model and R-F-D Model, a series of simplified application charts could be generated. Accompanying simple field investigations, the application charts can be implemented at the potential area to evaluate the hazard potential of sediment-related slope disaster. They can be used as a reference for disaster prevention, warning systems, and evacuation aspects during torrential rainfall in typhoon season.

Key Words : Sediment-related disaster of slope, slope-type debris flow, numerical model, R-S-F model, R-F-D model, factor safety of hazard potential.

一、前言

台灣由於地形陡峭，地質脆弱及豪雨集中等因素，致使坡地土砂災害發生頻繁。目前在坡地土砂災害方面，對於坡面土體因降雨入滲、吸水變形位移、穩定性喪失崩塌破壞，終至轉變為土砂流動，並堆積於坡地之下邊坡之土砂運動機制及危險度評估模式之研究並不多見。本文針對特定降雨條件下之坡地崩塌提出：坡地之降雨-滲流-安全係數數值模式 (rain-fall-seepage-factor safety model, 簡稱 *R-S-F* 模式)，以計算不同地形、地質及降雨量條件下之坡面崩塌規模。另外，再提出：土砂之降雨-流動-堆積數值模式 (rainfall-flow-deposition model, 簡稱 *R-F-D* 模式)，並運用 *R-S-F* 模式所推估之崩塌規模來進行土砂流動影響範圍計算。上述兩個數值模式，除了可應用於 Takahishi (1991) 所提之坡地型土石流 (slope-type debris flow) 中，坡地在降雨入滲情況下發生崩塌，並啟動土砂流動及堆積之系列串聯式分析外，同時亦可針對土砂災害影響範圍作完整的闡述及預測。由於本文所提之概念性數值模式尚處測試階段，分析上仍含有一部分簡化及假設之作法。因此，在未來有必要再針對兩個模式之實用性，進行實務驗證及檢核。

二、文獻回顧

1. 降雨誘發坡地崩塌機制

過去許多研究對降雨誘發坡地崩塌之力學機制皆有精細的描述。其中，降雨為觸發坡地崩塌最主要的外在環境擾動因子。降雨期間雨水經由地表入滲，並在坡地之未飽和及飽和地層滲流，而持續性降雨將降低地層材料之凝聚力與摩擦力。隨之，材料內部之孔隙水壓上升而坡地之穩定性呈現下降直至發生位移破壞 (Morgenstern and de Matos, 1975; Fukuoka, 1980; Brand, 1984; 渡正亮, 1987; Vargas et al., 1986; 申潤植, 1989; Kim et al., 1991)。Ocakoglu (2002) 依現場調查結果指出，降雨將使坡地之飽和度升高並導致崩塌。同時，在降雨事件中大量地表水滲入坡地，地下水位升高後，將產生極大之動態滲流水壓及靜態上浮力並引發坡地崩塌。林德貴 (2005, 2008) 進行坡地破壞及地滑地案例數值分析研究發現，未飽和土層在降雨期間其材質狀態將由乾硬轉為濕軟，其基質吸力 (matrix suction) 所能提供之額外當量抗剪強度，終將

隨著雨水入滲而幾近於喪失，並使坡地之穩定性在瞬間大幅下降。另外，在崩塌預測之研究方面，陳時祖 (1994) 依現地觀測資料說明，在降雨期間當累積雨量達到某門檻值時，一場強度不高之降雨即可誘發坡地崩塌，且降雨量愈大則發生崩塌之機率也愈高。一般而言，可彙整坡地區域之降雨特性與坡地崩塌之關係，並以降雨期間所引起之土體位移量，來預測坡地之崩塌潛勢。

2. 崩塌土砂流動機制

持續性的降雨將使崩塌土體形成可運移之土砂流體，同時在重力作用下開始向低處流動。土砂流體為多相混合非均質流體材料，在流動時因土砂顆粒材料之尺寸及孔隙大小不一，以及顆粒間之相互碰撞、滾動及流路底床之摩擦阻抗等影響因素，造成土砂流體各區位之材料密度及運動速度皆不相同。因此，多數研究在透過系統簡化及適宜流變模式 (rheological model) 之選用後，大多將土砂流體視為遵守質量及動量守恒之運動流體並提出運動控制方程 (Vicente et al., 2008; Chen and Lee, 1999; Jan, 1997; Shieh et al., 1996; O'Brien et al., 1993 and Savage and Hutter, 1989)。另外，過去研究指出，土砂流體運動時由於具有薄剪層及長波特性，可將其視為層流運動，因此採用深度平均變數求解運動方程時，所獲得之解答亦具有相當精度 (Hunt, 1994; Savage and Hutter, 1989)。Bagnold (1954) 以碰撞力為土砂流體流動之主要作用力，並分別提出礫石流之分散模式 (dispersive model) 及泥流之賓漢模式 (bingham model)。O'Brien and Julien (1997) 考量摩擦力、黏滯力及碰撞力為主要作用力，並提出廣泛被運用之黏-塑性-碰撞模式 (viscous-plastic-collision model)。Jan (1997) 則將現有的土石流流變模式大致分為六大類，包括：摩擦模式 (friction model)、碰撞模式 (collision model)、摩擦-碰撞模式 (friction-collision model)、高黏性模式 (macro-viscous model)、黏-塑性模式 (visco-plastic model) 以及黏-塑性-碰撞模式 (visco-plastic-collision model)。在土砂流體流動及淤積行為之研究方面，一般著重於模擬或預測土砂流體進入堆積區之淤積行為 (流出距離及堆積厚度) 及評估其對堆積區周圍環境所造成之衝擊 (危害及災損)。Cannon (1993) 依現地案例統計資料，提出土砂流出距離之迴歸公式。Takahashi 及 Yoshida (1979) 依動量守恒原理，推導出土砂流出距離之計算式。另外，室內水槽模型試驗亦被採用來

探討土石流之淤積形態 (Takahashi, 1991; 蔡元芳, 1999)。目前由於數值模擬技巧及電腦科技的快速進步, 部分研究者已採用各種數值方法來進行土砂流動之模擬分析。O'Brien 等人 (1993), 即發展出 FLO-2D 有限差分法土石流數值模擬程式, 並獲各界廣泛運用。謝正倫及蔡元芳 (1998) 亦採用有限差分法, 進行南投地區土石流之數值模擬及堆積扇狀地之研究。

3. 土砂災害危害度及預警評估

土砂災害危害度可藉由發生區之地形特徵、地質條件及保全對象調查等數項指標, 依權重或土砂流動模擬方式, 來訂定危險區位。Takahashi (1997) 以土石流潛勢區之溪床坡度、集水面積、堆積層厚度、地質條件及湧水情形等因子, 來建立日本地區之土石流危險度等級。吳雲瑞 (1999) 則以有效集水面積、溪床平均坡度、集水區形狀係數、崩塌地面積比值、斷層長度比值、水土保持狀況及保全對象等 7 項因子, 來評估土石流潛勢溪流之危險度。Fiebigler (1999) 採用集水區基本資料、水文分析、推估可沖蝕土量、估算土石沖淤量、現地複勘、繪製危險區地圖及科學審查等 7 個步驟, 來劃定奧地利地區之土石流危險區域。謝正倫 (2000) 則選用有效集水面積、集水區內之岩性、集水區斷層之長度、上游崩塌面積及保全對象等 5 項因子, 來賦予土石流之危害度。林德貴等人 (2009) 採用 FLO-2D 程式針對花蓮地區之土石流潛勢溪流, 進行災害風險區劃定及災損評估。此外, 依據經驗公式及數值模擬成果, 亦可來推估土石流流動之運動行為影響指數, 如土砂之最大流出體積、流量、流速、流出距離及堆積厚度等, 並藉以評估土石流災害之潛勢 (Liu and Zhang, 2004; Oramas et al., 2006)。

4. 坡地型土石流

由降雨觸發坡地崩塌並轉化為土石流體, 隨之在重力作用下土石流體沿坡面或天然溝渠運移至下邊坡的自然現象, 稱為坡地型土石流 (張石角, 1983; Van Steijn et al.; 游繁結, 1990; Bathurst, 1997)。一般而言, 坡地型土石流大多發育於陡峭邊坡, 土砂堆積規模較小, 但衝擊力大, 且無明顯之溪溝地形, 因此不利於事前調查。對邊坡道路、農田、房舍等保全對象具有較大之危害性 (Lewkoicz, 1998; 王隆昌, 2005)。坡地型土石流由坡地崩塌直至轉化成土砂流體之大地力學機制, 可以 3 階段進行說明: 即 (1) 坡地大量吸水 (含水量大於其液性限度) 直至飽和或呈液化狀態 (2) 孔

隙水壓或坡地材料自重劇增, 造成坡地位移率快速上升 (3) 坡地材料達完全飽和狀態致使其無法再吸水而發生表面逕流, 逕流再混合土砂而使坡地處於極不穩定狀態, 並形成土砂流體 (Hunger, 1995; Iverson et al., 1997; Ancey, 2002; Malet et al., 2005)。另外, 游繁結 (1990) 依室內水槽試驗結果指出, 坡地型土石流發生之臨界坡度可能大於 25° 。Davidson (2002) 則根據蘇格蘭地區之坡地型土石流調查成果說明其主要發生於坡度 $32^\circ \sim 42^\circ$ 之開放性坡面。姚善文 (2002) 經由理論公式推導得知, 坡地型土石流之降雨條件主要受總降雨量所控制, 而臨界總降雨量之大小與坡地土壤特性、地表逕流條件及降雨延時有關。

三、研究方法

以大地力學觀點視之, 坡地發生崩塌或滑動主要肇因於坡地材料剪力強度的降低, 而降雨期間雨水滲入坡地材料中, 造成飽和度增加 (或由未飽和轉為飽

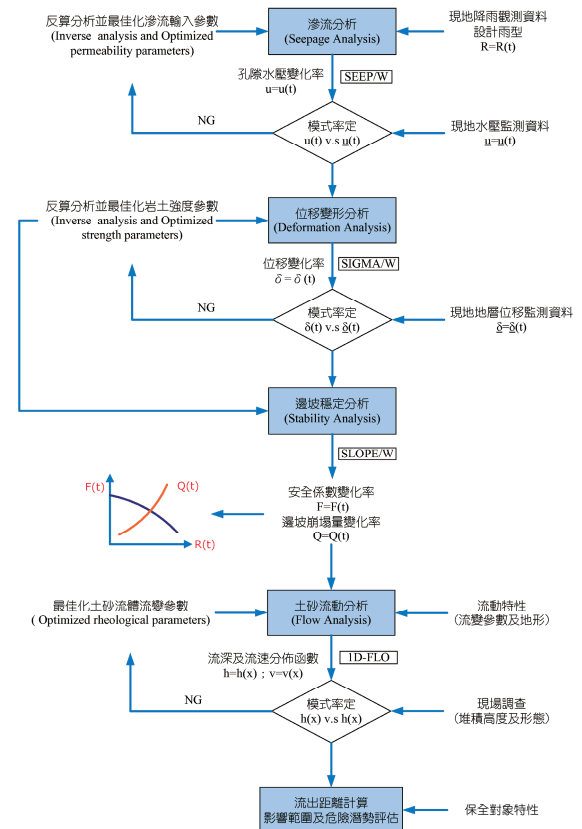


圖 1 數值分析之架構及工作流程

Fig.1 The framework and working procedures of numerical analyses

和) 及孔隙水壓變化 (或由負值轉為正值)，則為剪力強度降低之主要原因。因此，適當地評估坡地材料飽和度及孔隙水壓變化與降雨之關係，對於坡地位移變化之預測有決定性的影響。本文採用有限元程式 SEEP/W 及 SIGMA/W 求解降雨滲流狀態下，未飽和地層材料由於飽和度 (或孔隙水壓) 變化所產生之吸水膨脹位移增量。同時，藉由地下水水位及坡地位移變化率之模擬值與監測值之比對，即可檢核坡地降雨入滲以及吸水膨脹位移數值分析程序之有效性。另外，採用有限元程式 SEEP/W 及極限平衡程式 SLOPE/W，可進一步求解降雨滲流狀態下，坡地由於飽和度 (或孔隙水壓) 變化而瀕臨破壞時之崩塌形式及規模 (潛在崩塌土砂量)。隨之，將此崩塌土砂量饋入以有限差分法並配合摩擦-碰撞質流模式 (friction-collision rheological model) 所建立之流體運移及堆積數值模式 (1D-flow model, 1D-FLO)，計算土砂流體之暫態流深及流速變化後，同時求得土砂流體於堆積區之流出距離及堆積厚度，以建置土砂流體影響範圍之危險潛勢評估模式。本文所提串聯式數值分析程序 (SEEP/W→SIGMA/W→SLOPE/W→1D-FLO) 之整體分析架構及工作流程，如圖 1 所示。

四、降雨期間坡地土砂災害啟動之數值分析

1. 坡地之降雨-滲流-安全係數數值模式 (R-S-F 模式)

坡地之降雨-滲流-安全係數數值模式 (rain-fall-seepage-factor safety model, 簡稱 R-S-F 模式) 涉及之幾何模型 (如地形、地層及地質構造)、材料模式 (如材料之楊氏模數及強度參數)、初始條件 (如降雨暫態分析前之地下水水位分布) 及邊界條件 (如地表邊界之降雨條件、左右邊界之水文及變形束制條件)，對於數值模式之模擬計算結果皆有不同程度之影響。本模式之率定及驗證程序可分為三個部份：

- (1) 以特定颱風之降雨歷線作為地表邊界之入流條件，並採用有限元程式 SEEP/W 進行坡地降雨滲流分析，以計算在降雨歷時 t 所引發之地下水水位變化 $h(t)$ (或孔隙水壓 $u(t)$ 變化)，並與現地監測值比對，進行坡地材料滲流參數最適輸入值之反算及率定。
- (2) 採用有限元程式 SIGMA/W 計算地下水水位變化

$h(t)$ (或孔隙水壓 $u(t)$ 變化) 所產生之坡地體積變化 (volume change) 或地層位移率變化 $v(t)$ ，並與現地監測值比對，進行坡地材料楊氏模數及強度參數最適輸入值之反算及率定。

- (3) 最後，採用第 (1) 項所得之暫態滲流分析孔隙水壓 $u(t)$ 及第 (2) 項所得之坡地材料強度參數最適輸入值，饋入極限平衡程式 SLOPE/W 中較為嚴謹之 Morgenstern-Price 分析法，計算降雨歷時 t 之安全係數變化 $F(t)$ ，並檢核其與地層位移率變化 $v(t)$ 間之關係 ($F(t) \sim v(t)$ 關係曲線)。

本文採用廬山地滑地案例於馬莎颱風 (2005) 期間之現地監測資料，進行第 (1)~(3) 項之數值模式率定及驗證。

2. R-S-F 模式之率定-以廬山地滑地為案例

(1) 廬山地滑地概述

廬山地滑區位於南投縣仁愛鄉東側之精英村境內，全區標高在 1,085 m 至 1,495 m 之間，坡長約 820 m、寬約 480 m，面積約 30 ha，如圖 2 所示。地滑區形狀略呈倒三角形，地勢由西北

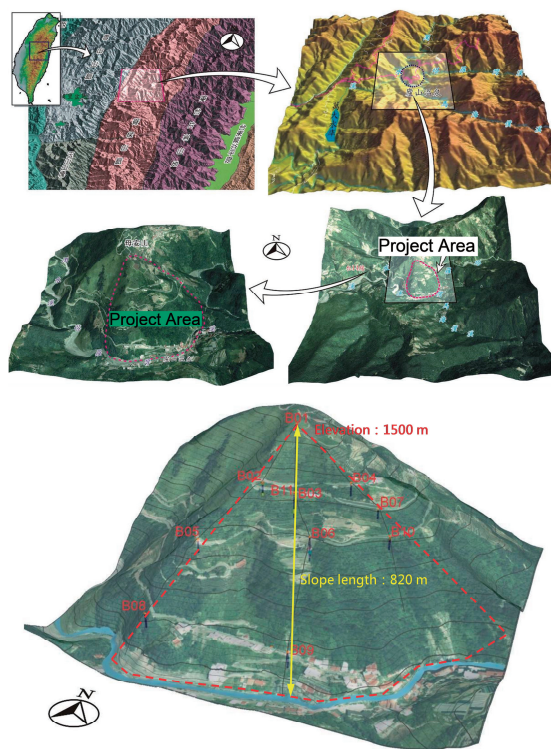


圖 2 廬山地滑地之地理位置及其影響區範圍

Fig.2 Geographical map for the administrative district and the influence zone of Lu-Shan landslide

向東南遞降，其平均坡度約為 22° ，位處中央山脈西翼，岩層分布主要屬廬山層春陽段，岩性則以劈理面發達之暗灰色板岩為主，並可概分為板岩 (SL) 及砂質板岩 (SSL) 兩大類。圖 3(a) 及 (b) 為廬山地滑區主要分析剖面之位置及其地質構造示意圖 (行政院農業委員會水土保持局台中分局, 2007)。另外，降雨歷線則採用廬山雨量站於 2005/7/27~2005/9/6 期間之降雨量紀錄，如圖 4 所示，其中在 2005/8/3 ~2005/8/7 為馬莎颱風侵台期間並帶來豪雨。

(2) 目標函數反算分析及參數最佳化

本文採用最小平方差法，利用降雨誘發土砂災害數值模式各時間階段求得之計算值 (或數值解) $y'(b_i)$ (=地下水水位變化 $h(t)$ 及地層位移率變化 $v(t)$) 與現地觀測值 $y(t)$ (= $h(t)$ 及 $v(t)$) 來計算各類數值參數 (numerical parameters) b_i 之最佳化目標函數 $S(b_i)$ ，以決定其最佳化輸入值。其中，數值參數 b_i 之最佳化目標函數 $S(b_i)$ 可表示為：

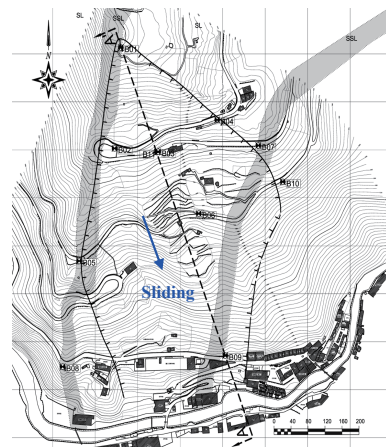
$$s(b_i) = [y(t) - y'(b_i)]^T \times \omega \times [y(t) - y'(b_i)] = e^T \times \omega \times e \quad (1)$$

b_i = 需要進行最佳化之數值參數向量矩陣 ($i=1\sim7$ ，本文有 7 個數值參數)。其中，崩積土材料之有效應力數值參數有： c =凝聚力， ϕ =摩擦角， E =彈性模數， ν =柏松比， γ =單位體積重。以及崩積土材料之滲流數值參數有： k_{sat} =飽和水力傳導係數， Θ_{sat} =飽和體積含水量。式中， $y(t)$ =反算分析中，作為比對用之現地觀測值向量矩陣。 $y'(b_i)$ =數值模式之計算值向量矩陣。 ω =權重矩陣，每一種觀測值之權重，取為其誤差變異數 (s^2) 之倒數。而 $s^2 = [S(b_i) / ND]$ ， ND =觀測值之數目。(本文假設每一種觀測值之權重相等，即採用 ω =單位矩陣)。 e =誤差殘值。在滲流分析及變位分析中以飽和水力傳導係數 k_{sat} 及楊氏模數 E 對分析結果影響較大，如圖 5(a) 及圖 5(b) 所示。圖 5(a) 為飽和水力傳導係數 k_{sat} 之敏感圖，由圖中可知 $k_{sat} > 0.25$ m/day 時，目標函數變化較大。反之， $k_{sat}=0.01\sim0.25$ m/day 時，目標函數變化並不明顯，此說明 k_{sat} 之最佳輸入值乃座落於此範圍內。同理，由圖 5(b) 可知，楊氏模數 E 之最佳輸入值則可能在 $8\times10^5 \sim 2\times10^6$ kPa 之範圍內。

(3) 降雨滲流分析

降雨滲流分析包含：穩態 (steady state) 及暫態 (transient) 分析。圖 6 為滲流分析之數值模式。首先，穩態分析乃於分析剖面數值模型之左、右邊界設置定水頭型之邊界條件後開始進行，並使數值計算之地下水水位能擬合常時之地下水水位。隨之，暫態分析再採用穩態分析所得地下水水位及孔隙水壓最終計算結果作為初始條件，並計算降雨歷時中地層之地下水水位變化量 $h(t)$ 、孔隙水壓變化量 $u(t)$ 、滲流量及滲流速度場分布等。另外，在降雨滲流分析求得地下水水位變化量之數值解 $h(t)$ 後，再經由數值參數最佳化程序後，即可決定一組數值參數最適輸入值，如表 1 所示。由輸入此組最適數值參數所計

(a)



(b)

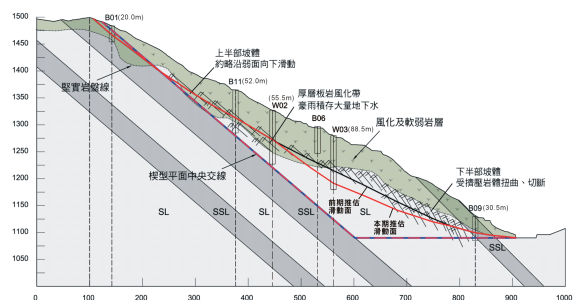


圖 3 廬山地滑區分析剖面 (A-A 剖面) 之 (a) 位置圖 (b) 地質構造圖 (Executive Yuan, Council of Agricultural, Soil and Water Conservation Bureau, Taichung Branch Office)

Fig.3 (a) the location of sliding block (b) the geological structure and soil strata of the A-A profile at Lu-Shan landslide

算 B06 觀測井之 $h(t)$ 與其現地監測值 $\hat{h}(t)$ 進行比對，其擬合情況良好，如圖 7 所示。由圖中可知，B06 監測站於降雨入滲期間，地下水水位上升之遲滯現象亦可由模擬程序中獲得呈現。

(4) 位移分析

降雨期間邊坡地材料在吸水膨脹後，將導致體積發生變化；意即坡地材料之飽和度（由未飽和轉為飽和）與孔隙水壓 $u(t)$ （由負值轉為正值）變化與位移增量息息相關。利用表 1 廬山地滑區之滲流數值參數最適輸入值，即可進行滲流及位移耦合分析，並求解降雨歷時下坡地位移變化量 $\Delta\delta(t)$ 。另外，由兩個相鄰時間 t_i 及 t_{i+1} 之位移量 $\delta(t_i)$ 及 $\delta(t_{i+1})$ ，可定義該時階 $(t_{i+1}-t_i)=(t-t')$ 之平均位移率（average displacement rate）如下：

$$v(t \sim t') = \left(\frac{\delta(t_{i+1}) - \delta(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \right) \quad (2)$$

同理，經過數值參數最佳化程序後，可決定一組位移分析數值參數最適輸入值，如表 2 所示。再者，圖 8 及 9 分別顯示地層位移量 $\delta(t)$ 及降雨歷時之平均位移率 $v(t \sim t')$ 之數值解與現地傾斜管監測值之變化趨勢有相當之吻合度。其中，圖 9 之平均位移率 $v(t \sim t')$ (mm/day) 乃依據圖 8 之 B09 傾斜管在特定監測期間（2005/7/27~

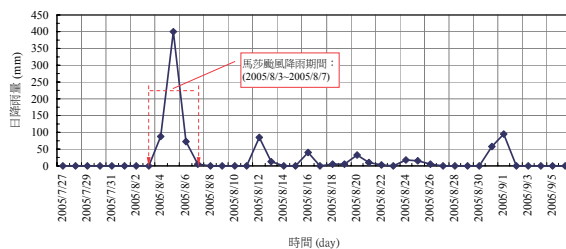
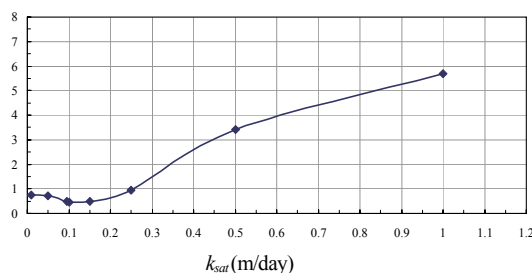
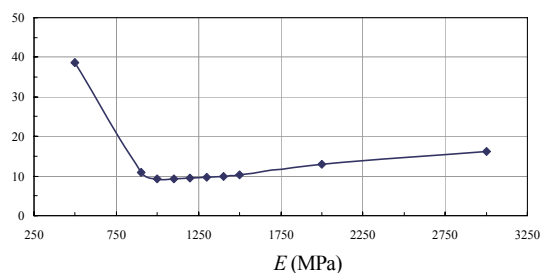


圖 4 廬山雨量站降雨紀錄 (2005/7/27~2005/9/6)

Fig.4 Rainfall records of Lu-Shan rainfall observation station (2005/7/27~2005/9/6)



(a)



(b)

圖 5 廬山地滑區崩積土層之 (a) 飽和水力傳導係數之 (b) 楊氏模數之目標函數

Fig.5 The objective functions of (a) the saturated hydraulic conductivity and (b) the elastic modulus of the colluvium of Lu-Shan landslide

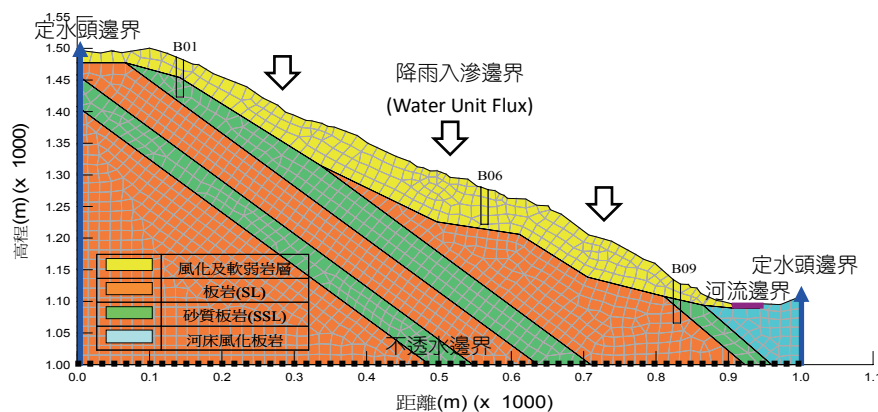


圖 6 廬山地滑區分析剖面之數值模式

Fig.6 Numerical model and boundary conditions of the A-A profile of Lu-Shan landslide for various types of analyses

2005/8/9), 在不同深度 (-0.5 m, -14 m, -25 m, -40 m) 之位移監測值及模擬值, 代入方程式 (2) 求得。另外, 藉由位移剖面之模擬結果, 亦可推估實際滑動面可能座落之深度範圍。

(5) 穩定性分析

本文採用極限平衡法 (Das, 2010) 及摩爾庫倫材料模式, 針對廬山地滑地之特定已知滑動面求解安全係數。坡地材料之強度參數則引用位移分析最佳化程序後所決定之凝聚力 c 與摩擦角 ϕ (如表二), 作為輸入值。在求解過程中, 同時饋入由滲流分析數值參數最佳化程序後, 所計算之滲流孔隙水壓 $u(t)$, 以求解降雨歷時滑動面之穩定安全係數變化 $F(t)$ 。如圖 10 所示, 依據廬山已知滑動面穩定性分析結果可知, $F(t)$ 在 2005/8/3~2005/8/7 馬莎颱風期間地下水水位大幅上升時 (如圖 7 所示) 之下降率 (或 $F(t) \sim t$ 之斜率 $\Delta F/\Delta t$) 亦會隨之驟增, 此現象說明降雨期間, 滑動面上之孔隙水壓 $u(t)$ 亦將因地水水位上升而增加, 並引起 $F(t)$ 值之驟降。

由兩個相鄰時間 t_i 及 t_{i+1} 之安全係數 $F(t_i)$ 及 $F(t_{i+1})$, 可定義該時階 $(t_{i+1}-t_i)=(t-t')$ 之安全係數變化率 $F(t_{i+1}-t_i)=F(t-t')$ (Variation rate of factor safety)如下:

$$F(t \sim t') = \left(\frac{F(t_{i+1}) - F(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \right) \quad (3)$$

採用降雨歷時 2005/7/27~2005/9/5 (馬莎颱風期間:2005/8/3~2005/8/7) 之 $v(t-t')$ 與 $F(t-t')$ 之模擬值, 吾人即可建立廬山地滑地之 $v(t-t') \sim F(t-t')$ 關係曲線, 如圖 11 所示。運用 $v(t) \sim F(\Delta t)$ 之迴歸方程式, 在颱風豪雨期間廬山地滑地可依據現地之位移率 $v(t-t')$ 來推估相當之穩定性安全係數變化率 $F(t-t')$, 以供作預警或警戒作為之參考。由圖中可知, 當 $F(t-t')$ 為負值時表示安全係數開始下降。同時, 當 $F(t-t') < -0.005$ 時, 廬山地滑地之地層位移率將有迅速增加之趨勢。此表示邊坡在此一時階, 將有較高之位移潛勢。

表 1 廬山地滑地之滲流分析數值參數最佳化輸入值

Table 1 Optimized input values of numerical parameters for rainfall induced seepage analyses of Lu-Shan landslide

土層類型	飽和體積含水量 Θ_{sat} (m^3/m^3)	飽和水力傳導係數 $ksat$ (m/day)	材料模式
崩積層 (風化及軟弱岩層)	0.40	1.00×10^{-1}	未飽和模式
板岩 (SL)	0.20	1.00×10^{-4}	未飽和模式
砂質板岩 (SSL)	0.20	1.00×10^{-5}	未飽和模式

註: 1. 崩積層之 Θ_{sat} 及 $ksat$ 乃根據目標函數反算求得。

2. 板岩及砂質板岩之 $\Theta_{sat} = S \times n = 1.0 \times n$, S =飽和度, n =孔隙率。

3. 板岩及砂質板岩之 $ksat$ =採用現地透水試驗結果之平均值進行調整。

表 2 位移及穩定性分析數值參數最佳化輸入值

Table 2 Optimized input values of numerical parameters for rainfall induced displacement and slope stability analyses of Lu-Shan landslide

土層類型	楊氏模數 E (kN/m^2)	柏松比 ν	單位重 γ (kN/m^3)	凝聚力 c (kPa)	摩擦角 ϕ (deg.)	材料模式
崩積層 (風化及軟弱岩層)	1.0×10^6	0.30	20.00	10	30	彈性-塑性 (摩爾-庫倫)
板岩 (SL)	9.0×10^7	0.28	24.00	10	34	彈性-塑性 (摩爾-庫倫)
砂質板岩 (SSL)	1.0×10^8	0.25	27.50	10	35	彈性-塑性 (摩爾-庫倫)

註: 1. 崩積層之 E 、 ν 、 γ 、 c 、 ϕ 乃根據目標函數來反算決定。

2. 板岩及砂質板岩之 E =採用廬山層板岩之典型值 ($2.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$ kPa) 進行調整。(參考張吉佐等人, 2002)

3. 板岩及砂質板岩之 ν 。(參考 Joseph E. Bowles, 1996)

4. 板岩及砂質板岩之 γ =現地取樣決定。

5. 板岩及砂質板岩之 c 、 ϕ =直接剪力試驗結果。

6. c 、 ϕ 為 SLOPE/W 之坡地材料參數輸入值。

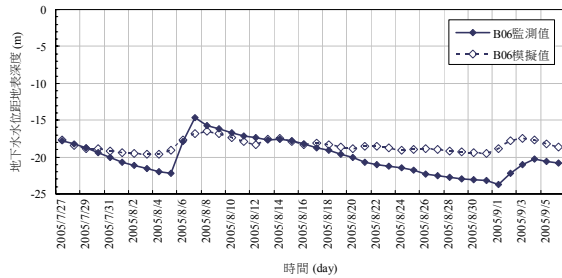


圖 7 B06 監測站地下水水位模擬值與監測值比對

Fig.7 Comparison of groundwater variation between simulation and measurement of borehole B06

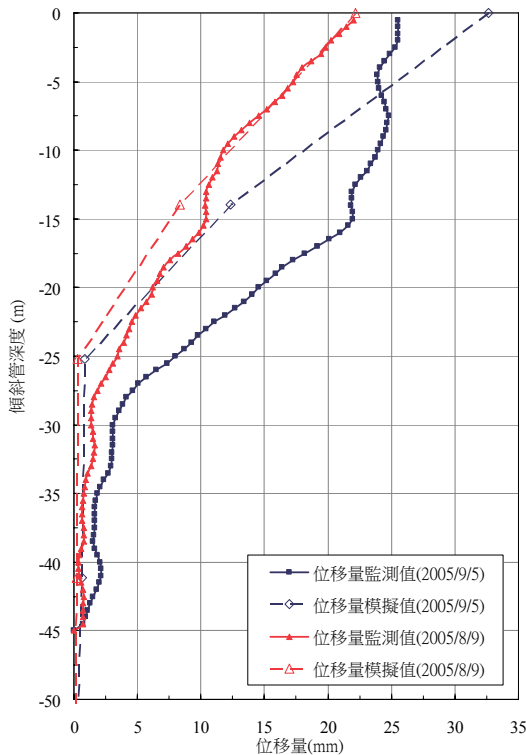


圖 8 B09 監測站坡地地層側向位移剖面之模擬值與傾斜管監測值比對 (三角形點代表監測期間為 2005/7/27~2005/8/9; 方形點代表監測期間為 2005/8/9~2005/9/5)

Fig.8 Comparison of lateral movement between simulation and measurement of inclinometer B09 (monitoring duration: triangular points for 2005/7/27~2005/8/9, square points for 2005/8/9~2005/9/5)

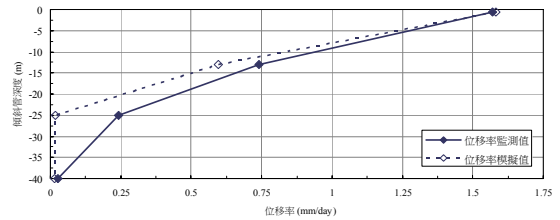


圖 9 坡地地層側向平均位移率之模擬值與監測值比對 (B09 監測站) (依據圖 8 中之三角形點監測期間 2005/7/27~2005/8/9 之模擬值與監測值來計算平均位移率)

Fig.9 Comparison of ground movement between measurement and simulation of inclinometer B09 (Based on the triangular points for the monitoring duration: 2005/7/27~2005/8/9 in Fig.8)

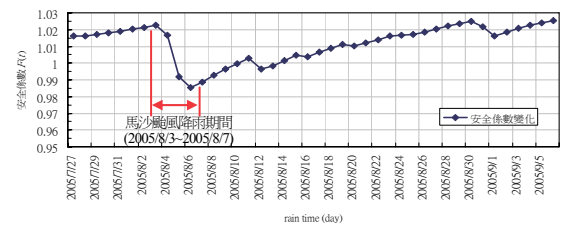


圖 10 降雨期間臨山地渾地 A-A 剖面已知滑動面之穩定性安全係數變化

Fig.10 Variation of factor safety of the potential sliding surface of A-A profile during rainfall

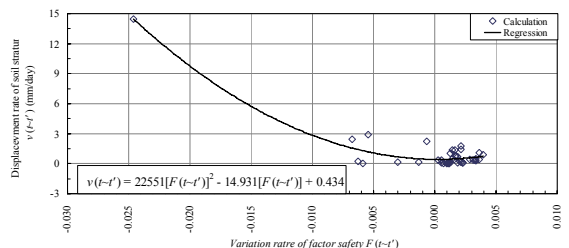


圖 11 B09 傾斜管之位移率 $v(t)$ 與安全係數變化率 $F(t-t')$ 之迴歸分析結果

Fig.11 Regression analysis of displacement rate $v(t)$ and factor of safety rate $F(t-t')$ of inclinometer B09

五、降雨期間土砂流動堆積之數值分析

1. 土砂之降雨-流動-堆積數值模式 (R-F-D 模式)

本文所提之土砂之降雨-流動-堆積數值模式 (rainfall-flow-deposition Model, 即 R-F-D 模式) (Lin et al., 2009), 可運用 R-S-F 模式所推估之崩塌土砂量體, 來進行土砂流動影響範圍計算。

(1) 土砂流體之運動控制方程式

實際上, 土砂流體屬於非線性、黏/彈-塑性可壓縮介質 (nonlinear visco-elastoplastic compressible medium), 因此在求解土砂流體之控制方程式時, 有必要藉由合適之物理假設以便求取近似解。圖 12 為本模式使用之座標系統及內部應力張量示意圖。其中, 假設土砂流體為均質、連續且不可壓縮之層流流體, 並依萊布尼茲積分法則 (Leibnitz's integration rule) 及移動柱體元素 (moving column element) 之內部應力張量進行分析 (Chen and Lee, 1999)。依質量及動量守恆方程可推導出暫態二維 (或擬三維) 之土砂流體平均流速控制方程式如下:

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \hat{h}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \hat{h}}{\partial y} = -\frac{\partial b}{\partial t} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u} \hat{h}}{\partial t} + \beta_x \frac{\partial \bar{u}^2 \hat{h}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{v} \hat{h}}{\partial y} \\ = g \hat{h} \sin \theta - k_x g \hat{h} \cos \theta \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} \rho_m \left[\bar{v} \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + \bar{u} \bar{v} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} + \beta_y \bar{v}^2 \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \right] \\ = -k_y \rho_m g \hat{h} \cos \theta \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} - \tau_{by} \end{aligned} \quad (3c)$$

其中, $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ =柱元素 x 方向及 y 方向之平均流速, ($\int_b^h u dz = \bar{u}$, $\int_b^h v dz = \bar{v}$); β_x =x-方向流速之動量修正數; β_y =y-方向流速之動量修正數, 其中 ($\int_b^h u^2 dz = \beta_x \bar{u}^2 \hat{h}$, $\int_b^h v^2 dz = \beta_y \bar{v}^2 \hat{h}$); g =重力加速度; θ =河床或溪床坡度; τ_{bx} 、 τ_{by} =河床或溪床之剪應力 τ_b 在 x-及 y-方向之分量; k_x =x-向之側向土壓力係數; k_y =y-向之側向土壓力係數。

Hungr (1995) 指出 k_x 及 k_y 約介於 0.2~5.0 之

間。Savage and Hutter (1989) 則將 k_x 及 k_y 分別視為主動土壓力係數及被動土壓力係數, 並將其表為:

$$\left. \begin{matrix} k_x \\ k_y \end{matrix} \right\} = 2 \frac{1 \mp \sqrt{1 - (1 + \tan^2 \delta) \cos^2 \phi}}{\cos^2 \phi} - 1 \quad (4)$$

本模式建構之土砂流體運動方程式為非線性偏微分方程組, 由於不易求得解析解, 因此採用交錯式網格及馬克麥克兩階段顯式差分法 (MacCormack, 1978) 來離散控制方程組, 以便求解主要變數: 即平均流速、流深及溪床剪應力。

(2) 礫石型土石流之流變模式 (應力與應變或與應變率之關係)

礫石型土石流之運動行為主要受顆粒間之摩擦與碰撞作用所支配, 此類土石流亦為台灣地區常發生之土砂災害類型。因此, 本文採用摩擦-碰撞流變模式 (friction-collision rheological model) 以反應礫石型土石流之內應力與應變或應變率之關係。摩擦-碰撞流變模式之溪床剪應力與流速、流深變化之關係式可表示如下 (Bagnold, 1954):

$$\tau_{bx} = \tau_y + \frac{9}{4} \frac{\alpha}{\hat{h}} \frac{\bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{\left(1 - 2H/5\hat{h}\right)^2} \quad (5a)$$

$$\tau_{by} = \tau_y + \frac{9}{4} \frac{\alpha}{\hat{h}} \frac{\bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{\left(1 - 2H/5\hat{h}\right)^2} \quad (5b)$$

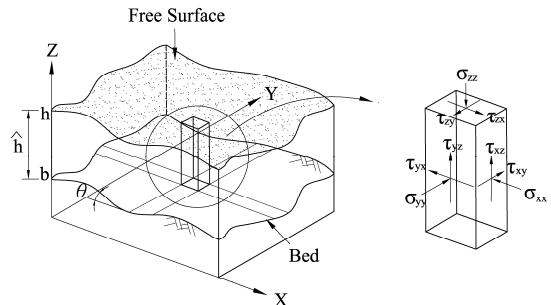


圖 12 土砂流動數值模式之座標系統及內部應力張量示意圖

Fig.12 The coordinate system and stress tensors of the discretized column element of debris flows (σ_{ii} =normal stress tensor, τ_{ij} =shear stress tensor)

式中， τ_{bx} 、 τ_{by} =溪床剪應力 τ_b 在 x -及 y -方向之分量； τ_y =河床或溪床材料之降伏應力。其中， α =(經驗)摩擦係數，為土石流濃度及粒徑之函數，並可以下式表示 (Jan,1997)：

$$\alpha = 0.042 \times \sin \delta \times D_s^2 \times \left\{ 1 / \left[(C_{max}/C_d)^{1/3} - 1 \right] \right\}^2 \quad (6)$$

C_{max} =靜止時土石流最大體積濃度 (maximum concentration of sediment)； C_d =運動中土石流濃度 (current concentration of sediment)； D_s =土石流沉積物之平均粒徑 ($=d_{50}$)； δ =碰撞角($=[\phi - (3^\circ \sim 4^\circ)]$) (Richard et al, 1997)； H =當溪床上沉積物內之剪應力等於降服應力時之土石流深度 (發生於土石流啟動時刻)。

2. R-F-D 模式之率定-以銅門土石流災害為案例

(1) 銅門土石流災害區概述

1990 年 6 月 23 日歐菲力颱風 (Ophelia) 過境台灣，為花東地區帶來豪雨，並在花蓮縣秀林鄉銅門地區引發土石流，導致 39 人死亡、68 人受傷及多棟房舍損壞。銅門集水區高程約介於 130 至 570 m 之間，寬度約 250 m，溪床坡度約介於 20° 至 55° 之間，溪谷全長約 2,000 m，平均傾斜角 20° 。Tsao (1993) 在銅門土石流發生後進行現場調查後指出，銅門土石流堆積區之沖積扇，長約 400 m，寬約 130 m，厚約 6 m，土石流災害後溝谷被刷深約 2 m，由溝谷流出堆積之土石量約 $5.6 \times 10^4 \text{ m}^3 (=Q_T)$ ，其平均乾單位體積重 $2,650 \text{ kg/m}^3 (= \rho_m)$ ，內摩擦角為 $33^\circ (= \phi)$ ，土砂平均粒徑為 5 mm ($=d_{50}$)，圖 13 為銅門地區土石流發生後之現場調查地形圖。

(2) R-F-D 模式輸入參數之訂定

① 初始體積濃度 (Initial sediment volumetric concentration)

運動中之土砂流體濃度 (C_d) 為流動時間與空間之變數，目前並無合理之量化表示式。Chen et al. (2001) 在現場案例調查後，指出土石流濃度 C_d 範圍約為 0.20~0.80。本文假定模擬土石流運動過程中，其濃度在時間及空間之變異為定值且等於平衡體積濃度 C_* 。由 Takahashi (1991) 所推導之平衡體積濃度可表為：

$$C_* = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (7)$$

θ =溪床坡度； ϕ =土石流沉積物之內摩擦角； σ =土石流沉積物之密度； ρ =清水之密度。

② 土石流在上游之初始流深 (Initial flow depth at upstream)

Yu and Chen (1990) 提出土石流在上游之初始流深與平均流速間之關係式如下：

$$\bar{u} = \frac{\rho \sin \theta}{C_d (\sigma - \rho)} U^* \left(\ln \frac{h_i}{d} + 2.4 \right) \quad (8)$$

$\bar{u}$ =平均速度 (m/sec)； d =土石流沉積物之平均粒徑 ($=d_{50}$)； h_i =上游初始流深； U^* =摩擦速度= $(g \times h_i \times \sin \theta)^{0.5}$ ； g =重力加速度。因此，土石流上游之初始流深 h_i 可將 (9) 式代入下式進行估計：

$$h_i = \frac{Q_T}{B \times \bar{u}} \quad (9)$$

Q_T =土石流總入流量 (cms)； B =河谷寬度 (m)。

③ 降伏應力 (Yield Stress)

謝正倫 (1998) 指出土砂流體之降伏應力為體積濃度之函數，並隨體積濃度之增加而提高。同時，土砂流體之內應力必須先克服其材料之降伏應力後土砂運動方能啟動，

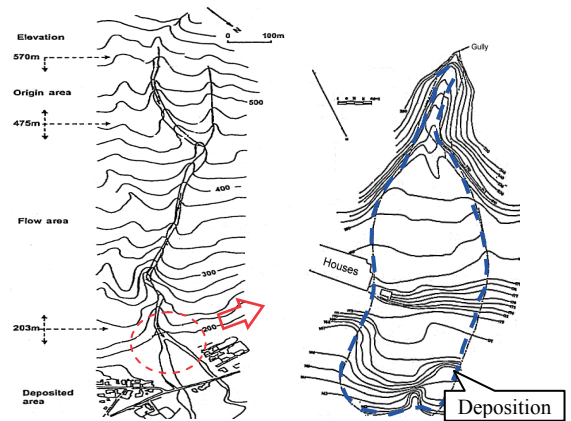


圖 13 銅門地區土砂流動災害谷口下游土砂堆積地形圖 (after Chen et al., 2001)

Fig.13 Topography of the Tung-Men debris flow and the deposition zone out of the gully outlet

且降伏應力越大土砂之流動距離越短。Jan (1997) 依據數個土石流現場調查研究指出，土砂流體之降伏應力約在 1,300~5,000 Pa 範圍內。Honda 及 Egashira (1997) 更進一步將土石流降伏應力 τ_y 表為：

$$\tau_y = \frac{1}{1+\alpha} \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) C_d g h_o \cos \theta \tan \phi \quad (10a)$$

Johnson 及 Jackson (1987) 提出土砂流動體之降伏應力 τ_y ，可簡化如下式：

$$\tau_y = \rho_f g h_o \sin \theta \quad (10b)$$

$\alpha=0.25$ ； σ =土石流沉積物之密度； ρ =清水之密度； h_o =土石流啟動時之流深； C_d =土石流體積濃度； ϕ =內摩擦角； θ =溪床坡度角； ρ_f =土石流流體之密度。

彙整本模式應用於銅門土石流事件之現場模擬時，所需之輸入參數整理如表 3 所示：

表 3 銅門土石流數值模擬輸入參數

Table 3 Input parameters for numerical simulation of Tung-Men debris flow

參數	輸入值
土砂乾單位體積重	ρ_d (kg/m ³) 2,650
土砂內摩擦角	ϕ (deg.) 33°
土砂堆積料平均粒徑	d_{50} (m) 0.005
土石流降伏應力	τ_y (N/m ²) 2,000~5,000
土石流流出總體積	V_t (m ³) 5.6×10^4
土石流體積濃度	C_d 0.770
土石流最大體積濃度	C_{max} 0.947
x-方向之側向土壓力係數	k_x 0.5
土石流初始流深	h_i (m) 5.668
土石流集流時間	t_c (sec) 988
土石流總入流量	$Q_T (=V/t_c)$ (cms) 56.68

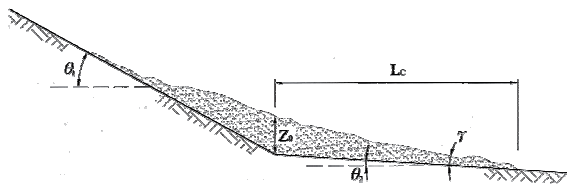


圖 14 土石流堆積扇最大堆積長度 L_c 及厚度 (after Takahashi, 1991)

Fig.14 Maximum deposition length L_c and deposition thickness Z_o of alluvial fan

(3) R-F-D 模式之驗證

① 土石流最大堆積長度 L_c 與厚度 Z_o

如圖 14 所示，Takahashi (1991) 依據土石流之質量及動量守恆方程式推導土石流在堆積段之最大堆積長度 L_c 與最大堆積厚度 Z_o ，如下列表式：

$$L_c = \frac{K^2}{G} \quad (11a)$$

式中， K 與 G 可分別表為：

$$K = \bar{u} \cos(\theta_1 - \theta_2) \left\{ 1 + \frac{[(\sigma - \rho)C_d K_a + \rho] \cos \theta_1 gh}{2[(\sigma - \rho)C_d + \rho] \bar{u}^2} \right\} \quad (11b)$$

$$G = \frac{(\sigma - \rho)g C_d \cos \theta_2 \tan \delta}{(\sigma - \rho)C_d + \rho} - g \sin \theta_2 \quad (11c)$$

$\bar{u}$ =土石流平均速度 (m/sec)； θ_1 及 θ_2 =分別為土石流流動區及堆積區之溪床坡度； K_a =主動土壓力係數； C_d =土石流體積濃度； σ =土石流沉積之物密度； ρ =清水流之密度。此外，最大堆積厚度 Z_o 亦可採用下列近似式進行估計：

$$Z_o \approx \tan(\gamma - \theta_2) \times L_c \quad (12a)$$

其中， γ 為土石流堆積扇平均坡度，可以下式求得：

$$\tan \gamma = \frac{C_B (\sigma - \rho) \tan \phi}{C_B (\sigma - \rho) + \rho (1 + \frac{H_o}{d})} \quad (12b)$$

C_B = 沖積扇沉積物之體積濃度 ($=C_{max}$)； H_o =沖積扇沉積物上方之流深； d =沖積扇沉積物之平均粒徑 ($=d_{50}$)。

② 銅門土石流災害案例模擬結果

應用本文所提土砂流動模式於銅門土石流現場數值模擬之分析成果，如圖 15 所示。其中，將土砂運動停止時之最終流深剖面與 Tsao (1993) 於現場調查後所繪製之流深剖面進行比對。由比對可知，數值模式在溪谷出口 (gully outlet) 處所求得之堆積厚度較現地調查實測者為小，而流動停止後之最終堆積

剖面則與實測值則相當接近。數值解與實測值發生差異可能導因於實際三維問題簡化一維之幾何效應，以及與溪床為定床、流體為長波、質流模式（流體材料為均質不可壓縮連體）之假設有關係。此外，本模式在輸入不同之降伏應力所求得之沖積扇最大堆積長度 L_c 及堆積厚度 Z_o 計算值與採用公式 (11a) 及 (12a) 計算所得結果以及與現場實測值進行比較，如表 4 所示。由比較可知，銅門土石流在降伏應力 $\tau_y=2,000$ Pa 時，可得較佳之數值模擬成果。同時，Takahashi (1991) 公式計算結果與實測值比較有較大差異，此差異可能由於其在推導公式中，未將流體質流模式及降伏應力納入考量所導致。

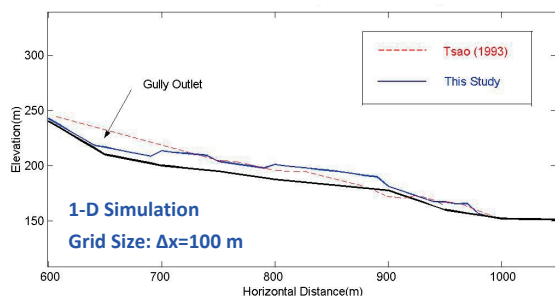


圖 15 銅門土石流現場數值模擬流動停止之最終流深剖面與實測值比較

Fig.15 Comparison of calculated final deposition profile with measurement (Tsao, 1993) of the Tung-Men debris flow (yield stress of debris flow $\tau_y=2000$ Pa)

表 4 沖積扇最大堆積長度 L_c 堆積厚度數值解與解析解以及現場實測值之比較

Table 4 Comparisons of numerical calculations, analytical calculations, and observations of maximum deposition length L_c and deposition thickness Z_o of the Tung-Men debris flow

τ_y (Pa) ($\Delta x=25$ m)	數值解		解析解		現場實測值	
	L_c (m)	Z_o (m)	$L_{c,anal}$ (m)	$Z_{o,anal}$ (m)	L_c (m)	Z_o (m)
2,000	337.5	6.8	173.4	9.6	300.0	6.0
3,000	262.5	10.1	$L_{c,anal}$ =Takahashi (1991), 公式 (11a) $Z_{o,anal}$ =Takahashi (1991), 公式 (12a) τ_y =土石流之降伏應力 L_c =沖積扇最大堆積長度 Z_o =沖積扇最大堆積厚度 Δx =有限差分網格在x-方向之尺寸大小=100 m			
4,000	137.5	13.3				
5,000	75.0	15.6				

六、降雨期間土砂災害之影響範圍及危險度評估模式

1. 坡地型土石流（典型坡地）

回顧研究文獻（游繁結，1990；王隆昌，2005）可知，總降雨量、坡地坡度、坡地坡長、坡地崩積層厚度及崩積層材料特性等，為坡地型土石流發生之重要影響因子。因此，依上述影響因子，吾人可建立坡地型土石流（或典型坡地）之數值模型，如圖 16 (a) 所示。其中， AB 段：上坡面崩塌發生區； BC 段：中段坡面土石流流動區； CD 段：下坡面土石流堆積區； θ_1 ($^\circ$)：上坡面崩塌發生區坡度； L_1 (m)：上坡面崩塌發生區坡長； H (m)：上坡面崩塌區坡高； CD (m)：崩積層厚度； θ_2 ($^\circ$)：中段坡面流動區坡度； L_2 (m)：流動區水平距離； θ_3 ($^\circ$)：下坡面土石流堆積區坡度。隨之，以此簡化數值模型進行，涵蓋土砂災害啟動-流動-堆積之 R - S - F 模式及 R - F - D 模式分析及參數研究。最後，整合前述之計算成果，再製成簡化型應用圖表。透過簡單之現場調查及圖表查用，吾人即可針對土砂災害潛勢區進行土砂災害危險度之初步評估，並作為颱風降雨期間防災、警戒、及疏散預測之參考。圖 16 (b) 為 2009/8/7~2009/8/8 莫拉克颱風期間，南投縣國姓鄉長石巷之坡地型土石流，此類型土砂災害在颱風期間高累積降雨量條件下發生之情況相當普遍。

2. 典型坡地於特定降雨條件下之滲流及穩定性分析

本文設計多組典型坡地，並針對各影響因子：如坡度 θ ($^\circ$)、坡長 L_1 (m)、崩積層厚度 CD (m)、崩積層材料之單位體積重 γ (kN/m^3)、飽和水力傳導係數 k_{sat} 、凝聚力 c (kN/m^2)、及內摩擦角 ϕ ($^\circ$)，在降雨期間坡地瀕臨破壞時或穩定性安全係數 $F(t)$ 趨近 1.0 時，相應之崩塌規模 M (崩塌塊體剖面面積) 計算值進行參數研究。表 5 為坡地崩塌規模參數研究所採用之數值變數 (numerical variables) 範圍值。另外，依姚善文 (2001) 研究指出，台灣地區引發坡地型土石流之兩型中，有 74% 皆以中鋒型之降雨型態為主。依此本文採用不同累積日降雨量之三角中鋒型降雨型態，如圖 17 所示，來推估不同降雨強度下，在上坡面土石流發生區相應之崩塌規模。

圖 18 為不同坡地條件下，日累積降雨量 R (mm) 與崩塌規模 M (m^2) 之關係曲線。當日累積降雨量持續

增加至臨界日累積降雨量 (坡地瀕臨破壞時或穩定性安全係數 $F(t) \leq 1$ 時之日累積降雨量) 後, 縱使日累積降雨量續增, 坡地之崩塌規模卻未持續擴大, 而是趨近於某穩定值或是稍微縮小, 此現象在坡地之上坡面愈陡峭或坡長愈長時愈明顯。究其原因, 此乃由於在較大之降雨強度下, 坡頂區之崩積層因入滲集中, 孔水壓急遽上升, 剪力強度降低, 而發生局部破壞 (通常為接近坡頂之小規模坡面破壞) 所導致。因此, 本文為保守推估降雨誘發之崩塌規模, 在分析中若崩塌規模隨日累積降雨量之續增而縮減時, 則採用降雨期間之最大崩塌規模來進行土砂災害危險潛勢評估之計算。另外, 由於現地之崩積層厚度 CD 於評估初期較不易決定, 為說明評估程序, 乃選取崩積層厚度較大之情況 ($CD=0.2L_1$) 來作示範, 因為其崩塌塊體之滑動較不受崩積層厚度所影響 (亦即臨界滑動面較趨於自由產生且較不受下方岩層之影響), 而所計算之崩塌規模將作為危險潛勢評估依據。

3. 不同坡地條件之崩塌規模與土砂流動

坡地型土石流具有流動距離短 (< 300 m)、坡度陡峭 (大致介於 $10^\circ \sim 45^\circ$)、土砂堆積量小、流動深度淺等特性 (Lewkoicz, 1998)。另外, 統計坡地型土石流源頭崩塌區與坡趾之距離則大多落於 $100 \sim 300$ m 之範圍 (王隆昌, 2005)。因此, 如圖 19 所示, 本文針對坡地型土石流流動區不同坡度 ($\theta_2=10^\circ$ 、 12° 、 14° 及 16°) 及三種崩積層材料 (以顆粒之代表粒徑, 可區分為: 粗顆

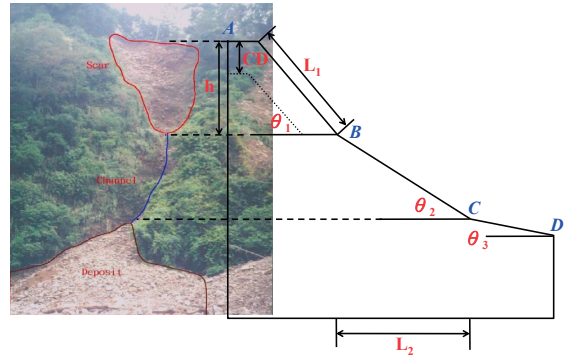


圖 16a 坡地型土石流 (典型坡地) 示意圖 (after K.K. Lee, 2002)

Fig.16a Typical slope-type debris flow



圖 16b 2009/8/7~2009/8/8 莫拉克颱風期間南投縣鹿谷鄉長石巷坡地型土石流

Fig.16b Slope-type debris flow event at Nan-Tou County during Morakot Typhoon (2009/8/7~2009/8/8)

表 5 坡地崩塌規模參數研究之數值變數範圍值

Table 5 The range value of numerical variables used for parametric study on the failure scale of slope

參數研究之數值變數	範圍值
坡地崩塌發生區之坡度 θ_1 ($^\circ$) (%)	28.81° 34.99° 40.36° 45° (55 %) (70 %) (85%) (100 %)
坡地崩塌發生區之坡長 L_1 (m)	50, 100, 150
崩積層厚度 CD (m)	$0.1 L_1$, $0.2 L_1$, $0.3 L_1$
崩積層材料單位體積重 γ (kN/m ³)	19.12
崩積層材料飽和力水傳導係數 k_{sat} (m/hr)	0.018 (5×10^{-4} cm/s)
崩積層材料之凝聚力 c (kPa)	0.0 (顆粒型材料)
崩積層材料之摩擦角 ϕ ($^\circ$)	26° 32° 36.5° 42°
三角形單峰降雨歷線之日累積雨量 R (mm)	50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000

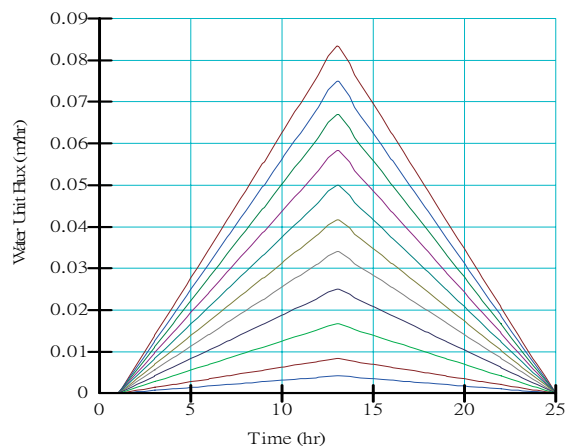


圖 17 三角形單峰降雨歷線

Fig.17 Triangular rainfall pattern with single peak

粒之卵礫石、中顆粒之粗砂、及細顆粒之粉砂)，並依特定降雨事件下 $R-S-F$ 模式分析所推估之崩塌規模 M ，來進行 $R-F-D$ 模式之參數研究及土砂流動影響範圍模擬。參數研究之幾何條件及材料參數輸入值，如表 6 所示。

最後，採用 $R-F-D$ 模式計算之土砂流出距離 (d) 以及既有保全對象 (住宅) 與坡地之距離 (D)，即可建置土砂災害危險度之評估模式。由 $R-S-F$ 模式分析所推估之上坡面崩塌規模 (M) 後，可依下式將崩塌規模轉化為土砂流動體在入流時間下之平均流量 (Q_d) 及起始流深 (h_i)。

$$M = A \times B = Q_d \times t = B \times h_i \times V \times t \quad (13)$$

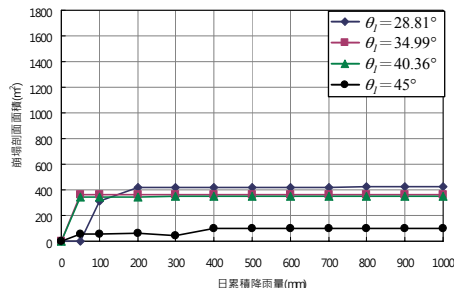
式中， M =崩塌規模 (m^3) (=單位寬度崩塌塊體之體積)， A =崩塌塊體剖面面積 (m^2) (=當上坡面在特定降雨條件下，穩定性安全係數 $F(t)$ 趨近 1.0 時，由 Slope/W 程式計算之崩塌塊體剖面面積)， B =崩塌塊體之單位寬度 (=垂直書面方向 1.0 m 寬度)， Q_d =崩塌土砂入流量 (m^3/sec)， t =入流時間 (sec)， h_i =土砂流動體之啟動流深 (m)， V 則為土砂流體流速 (m/sec)。

如圖 20 所示，由崩塌規模與流出距離及堆積厚度之參數研究結果可知，不同坡地幾何條件下，影響土砂災害流出距離 (d) 之主要幾何因子為流動區坡度 (θ_2)。反之，流動區坡度 (θ_2) 對土砂流體進入堆積區後之最終堆積厚度 (h) 則影響有限，而影響土砂災害最終堆積厚度 (h) 之主要幾何因子則為堆積區坡度 (θ_3)。

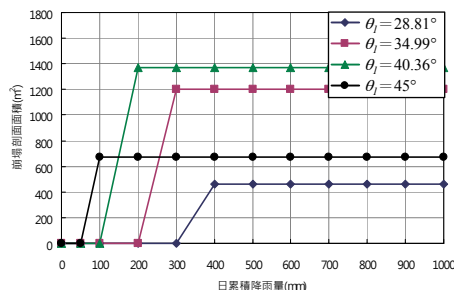
表 6 $R-S-F$ 模式參數研究之流動範疇模擬數值參數輸入範疇值

Table 6 The range value of numerical variables used for the parametric study of $R-S-F$ model and the simulation of flow motion

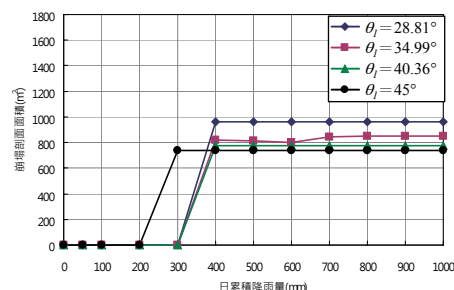
崩塌層材料類型	粗顆粒 (gravel)	中顆粒 (course sand)	細顆粒 (silty sand)
代表粒徑 (m)	0.1	0.01	0.001
飽和摩擦角 ($^\circ$)	30 $^\circ$	26 $^\circ$	22 $^\circ$
流動區坡度 θ_2 ($^\circ$)	10 $^\circ$ 、12 $^\circ$ 、14 $^\circ$ 及16 $^\circ$		
流動區坡長 L_2	50、100、150 m		
堆積區坡度 θ_3 ($^\circ$)	3 $^\circ$		
體積濃度 C_d	0.5~0.8 (中值為0.65)		
計算時間階 Δt	0.01 sec		



(a) 崩塌規模 $CD=0.2L_1$ 、發生區坡長 $L_1=50$ m



(b) 崩塌規模 $CD=0.2L_1$ 、發生區坡長 $L_1=100$ m



(c) 崩塌規模 $CD=0.2L_1$ 、發生區坡長 $L_1=150$ m

圖 18 不同坡地條件下日累積降雨量與崩塌規模之關係圖

Fig.18 The relationship between daily cumulative rainfall and failure scale under different topographic conditions of slope

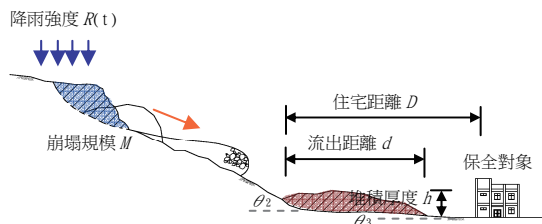


圖 19 豪雨期間坡地崩塌土砂流動並引發土砂災害危險度示意圖

Fig.19 Illustration of the hazard potential of sediment-related disaster initiated by slope failure and debris flow during torrential rainfall

4. 土砂災害危險度評估應用圖表製作

本文定義土砂災害危險度安全係數 FS (簡稱危險度安全係數) 為保全對象退縮距離 D (=保全對象與流動區下方坡趾間之距離) 與土砂流出距離 d 之比值 D/d , 並提出日累積降雨量→流動區坡度→崩積層材料→危險度安全係數 FS ($=D/d$) 之土砂災害危險度評估模式, 以便在特定降雨、地形、地質等條件下, 以及在特定危險度安全係數 $FS_{required}$ 之要求下, 初步評估保全對象與土砂流動影響範圍間之安全退縮距離 D_{safe} ($=FS_{required} \times d$)。如圖 21 所示, 為本評估模式應用於特定

坡地條件下, 日累積降雨量與危險度安全係數之關係圖表 (考量土砂災害對生命財產損害難以彌補之潛在威脅, 建議危險度安全係數 $FS \geq 5.0$ 為至少的要求。依此, 本文祇採用危險度安全係數 $FS \leq 5.0$ 之數據資料繪製圖表, 以呈現土砂災害之危險潛勢)。同時, 在圖表使用上僅需簡易之現場調查, 並獲得坡地上坡面之坡長及坡度 (L_1 、 θ_1), 下坡面之坡長及坡度 (L_2 、 θ_2), 以及現地保全對象 (住宅) 與下坡面坡趾間之距離 (D), 即可進行土砂災害危險度之初步評估。

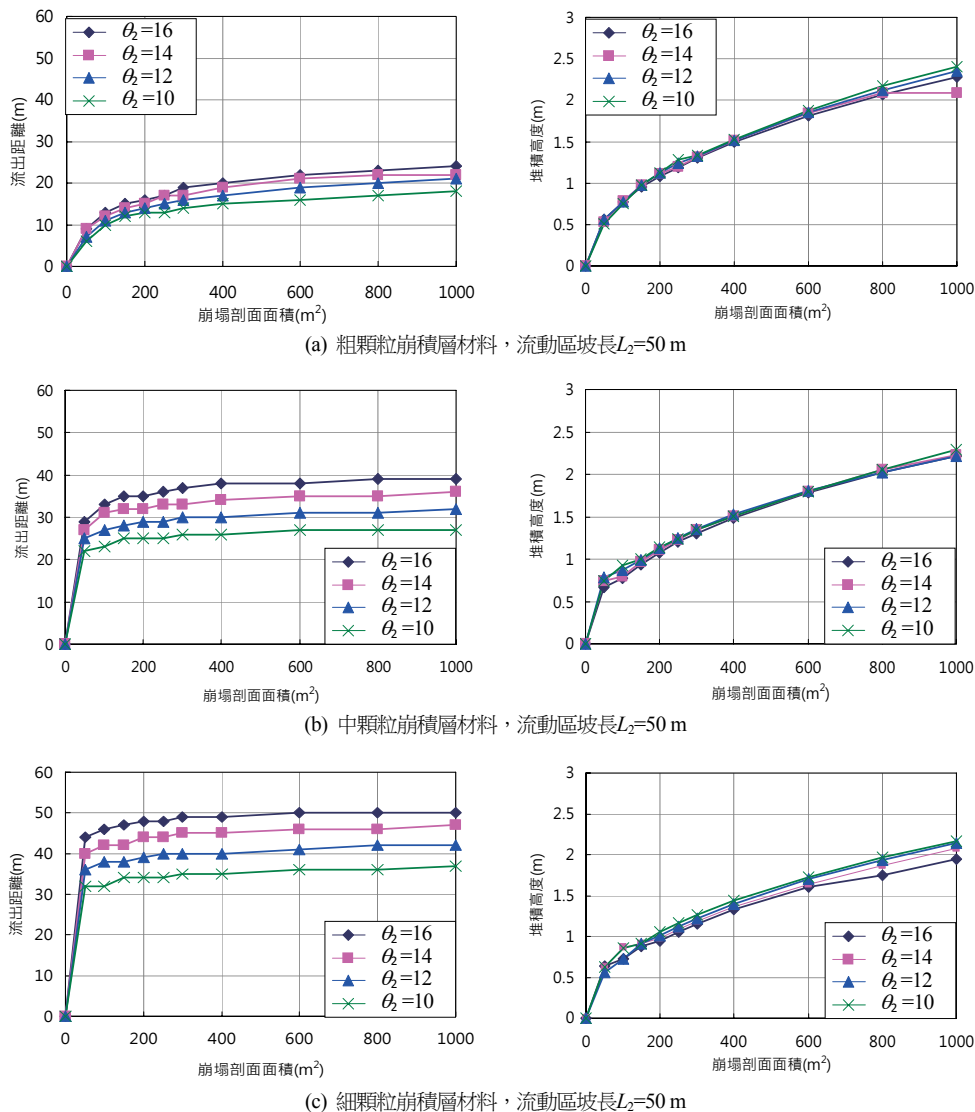


圖 20 各種崩積層材料之流動區坡度下不同崩塌規模造成之土砂流出距離與堆積厚度 ($L_2=50$ m)

Fig.20 Run-out distance and deposition thickness of sediment caused by different failure scale of slope under various colluvium materials and gradients of channel bed in transportation zone ($L_2=50$ m)

七、結 論

本文建立 $R-S-F$ 數值模式 (坡地之降雨-滲流-安全係數數值模式, $rainfall-seepage-factor\ safety\ numerical\ model$) 之整體操作及運算架構, 並藉由廬山地滑地地下水水位變動與地層位移率數值解與監測值之比對, 以及各項數值參數之目標函數最佳化反算程序, 來驗證 $R-S-F$ 模式中各階段數值程序之有效性及各項數值參數輸入值之適宜性。隨之, 本文依坡地型土石流之致災特性, 再建立 $R-F-D$ 數值模式 (土砂之降雨-流動-

堆積數值模式, $rainfall-flow-deposition\ numerical\ model$), 並藉由銅門土砂災害事件, 谷口下游土砂堆積區之土砂流出距離及堆積厚度之計算結果與現地調查成果之比對來驗證數值模式之有效性。最後, 整合 $R-S-F$ 模式與 $R-F-D$ 模式之計算成果, 再製成簡化型應用圖表。透過簡單之現場調查及圖表查用, 吾人即可針對土砂災害潛勢區進行土砂災害危險度之初步評估, 並作為颱風降雨期間警戒及疏散預測之參考。

本文所提之土砂災害危險度評估模式尚處概念性分析階段, 分析中仍存有一些簡化及假設。其中, 在滲流分析中, 未飽和土層之吸水及滲流問題並未納入考量, 因此, 此問題建議可在下一個研究階段進行。另外, 二維滲流分析中, 除了無法將三維地質構造對地下水滲流行為之影響納入考量外, 採用極限平衡法來推估崩塌土體體積之有效性仍有驗證之必要。因此, 在未來有必要將此評估模式運用於現地土砂災害區, 並進行實際比對及檢定以確認評估模式之合理性及有效性。但無論如何, 本文主要目的在依據現階段可資運用之數值分析工具, 儘可能地將各個不同功能之數值程式加以串接, 以進行有效率之數值演算, 並提供相關研究者一個可執行及可操作之工作程序。

參考文獻

- ANCEY, C. (2002). "Debris flows and related phenomena." In: Balmforth, N., Provenzale, A. (Eds.), *Geomorphological Fluid Mechanics, Lecture Notes in Physics*, Vol. 582, Springer-Verlag, Berlin, 528-547.
- Bagnold, R.A. (1954). "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a newtonian fluid under shear." *Proc. of the Royal Soc. of London*, 49-63.
- Bathurst, J.C., BURTON, A., and WARD, T.J. (1997). "Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 410-419.
- Braja, M. DAS. (2010). "Principle of Geotechnical Engineering, 7TH." Cengage Learning.
- Brand, E.W. (1984). "Landslide in Southeast Asia: a state-of-the-art report." In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslide*, Toronto, Canada, Vol. 1, 377-384.
- Cannon, S.H. (1993). "An empirical model for the volume change behavior of debris flow." *Proc. Conf. Hydraulic Eng.*, ASCE, San Francisco, 1768-1773.

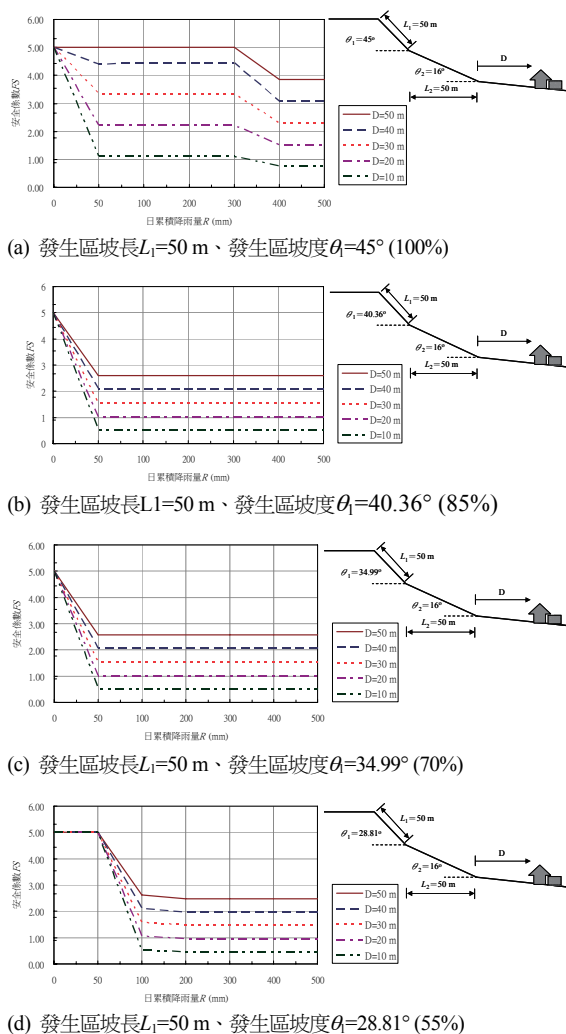


圖 21 特定坡地條件下日累積降雨量與土砂災害危險度安全係數之關係曲線

Fig.21 Relationship between the daily cumulative rainfall and the safety factor of the hazard potential of sediment-related disaster under specific conditions of the slope

7. Chang, C.T., HOU, P.C., and LI, M.C. (2002). "Establishment of Rock Mass Classification and Supporting Systems of Tunneling in Taiwan." Public Construction Commission, Executive Yan. (in Chinese)
8. Chang, S.C. (1983). "Debris Flow Disaster in Taiwan." *Proceedings of the Conference on the Disasters Flooding-Related and Sediment-Related Disasters*, 27-29.
9. Chen, H., and LEE, C.F. (1999). "Three-dimensional numerical modeling debris flows." *Proceeding of The International Symposium on Slope Stability Engineering. Slope Stability Engineering*, Vol. 2, 1397-1402.
10. Chen, H.Y., SU, D.I., and Chen, K.M. (2001), "Some case studies on the engineering geological characteristics of debris flows in Taiwan." *Western Pacific Earth Sciences*, 1(3), 265-296.
11. Chen, S.T. (1994). "A Study on the Relationship between the Slope Failure of Highway and the Precipitation in Alishan Mountain Area." *Research Report of Special Study of National Science Council, Executive Yan*. (in Chinese)
12. Coussot, P., LAIGLE, K., Arattano, M., Deganutti, A., and Marchi, L. (1998). "Direct determination of rheological characteristics of debris-flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(8), 865-868.
13. Davidson, D., and Grieve, A. (2002). "Spatial and temporal trends in upland erosion and sedimentation." *SNH Commissioned report F00AC 106*.
14. Fiebigler, Gernot. (1999). "The Estimation of the Hazard Potential Of Debris Flows and the Step to Step method." *Proceedings of Taiwan-Japan-Austria Conference on Sediment Disaster Prevention*.
15. Fukuoka, M. (1980). "Landslides associated with rainfall." *Geotechnical Engineering Journal, South-east Asia Society of Soil Engineering*, Vol.11, 1-29.
16. Honda, N., and Egashira, S. (1997). "Prediction of debris flow characteristics in mountain torrents." *Proceeding, First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, ASCE, New York, 707-716.
17. Hsieh, C.L. (2000). "Evaluation of Debris Flow Disaster-Method and Case History." *Proceedings of Conference on Geological Disasters*, 31-50, Tainan, Taiwan. (in Chinese)
18. Hungr, O. (1995). "A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches." *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 610-623.
19. Hunt, B. (1994). "Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 12, 1350-1363.
20. Iverson, R.M., Reid, M.E., and Lahusen, R.G. (1997). "Debris flow mobilization from landslides." *Annual Reviews: Earth and Planetary Sciences* 25, 85-138.
21. Jan, C.D. (1997). "A study on the numerical modeling of debris flows." *Proceeding, First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, ASCE, New York, 717-726.
22. Johnson, P.C., and Jackson, R. (1987). "Frictional-Collisional constitutive relations for granular materials with application to plane shearing." *Journal of fluid Mechanics*, Vol. 176, 67-93.
23. Joseph, E., Bowles, P.E., and S.E. (1996). *Foundation analysis and design (Fifth edition)*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
24. Kim, S.K., Hong, W.P., and Kim, Y.M. (1991), "Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea." *Proc, 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand*, 989-994.
25. Lewkoicz, A.G., and Hartshorn, J. (1998). "Terrestrial record of rapid mass movements in the Sawtooth Range, Ellesmere Island, Northwest Territories, Canada." *Canadian Journal of Earth Science*, Vol. 35, 55-64.
26. Lin, D.G., Hsu, S.Y., and Chang, K.T. (2009). "Numerical Simulations of Flow Motion and Deposition Characteristics of Granular Debris Flows." *Journal of Natural Hazards*, Volume 50, Number 3, 623~650.
27. Lin, D.G., Huang, B.S., and Su, M.B. (2005). "Recap of Slope Failure in Lincoln Residential Construction using Numerical Analysis Method." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, Vol. 36, No. 3, 215-232, Taiwan. (in Chinese)
28. Lin, D.G., Chang, K.C., and Su, M.B. (2008), "Numerical Assessment of Slope Stability at Li-San Landslide during Typhoon Rainfall." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, Vol. 39, No. 1, 57-79, Taiwan. (in Chinese)
29. Lin, D.G., Hsu, S.Y., Chao, C.H., Wen, H.Y., Hsu, S.M., Ku, C.Y., and Chi, S.Y. (2009), "Applications

- of Simulation Technique on Hazard Zone Delineation and Damage Assessment of Debris Flow.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, Vol. 39, No. 4, 391-402, Taiwan. (in Chinese)
30. Liu, X., and Zhang, D. (2004). “Comparison of Two Empirical Models for Gully-Specific Debris Flow hazard assessment in Xiaojiang valley of Southwestern China.” *Natural Hazards*, Volume 31, 157-175.
 31. Lu, K.K. (2002). “The Geomorphic Characteristics of Debris Flows in the Ninety-Nine Peaks Area Nantou.” Master Thesis, The Graduate Institute of Geography, National Taiwan University, Taipei, Taiwan. (in Chinese)
 32. Malet, J.P., Laigle, D., Remai, Tre, A., and Maquaire, O. (2005). “Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows.” *Geomorphology*, 66, 215-235.
 33. McCormack, R.W. (1978). “An efficient explicit-implicit characteristic method for solving the compressible Navier-Stokes equations.” *SIAM-AMS Proc*, 11, 130-155.
 34. Morgenstern, N. R., and De Matos, M.M. (1975). “Stability of slopes in residual soils.” *Proc., of 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Argentina, Vol. 3, 367-383.
 35. Morgenstern, N.R., and Price, V.E. (1965). “The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces.” *Geotechnique*, Vol. 15, 79-93.
 36. Ocakoglu, F., Gokceoglu, C., and Ercanoglu, M. (2002). “Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: a case study from NW Turkey.” *Geomorphology*, 15 January 2002, vol. 42, no. 3, 329-341
 37. O'Brien, J.S., Julien, P.Y., and Fullerton, W.T. (1993). “Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 119(2), 244-259.
 38. O'Brien, J. S., and Julien, P.Y. (1997). “On the Importance of Mudflow Routing.” *Proceeding of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, ASCE, New York, 677-686.
 39. Oramas, Dortal, D., Toyos, G., Oppenheimer, C., Pareschi, M.T., Sulpizio, R., and Zanchetta, G. (2006). “Empirical modeling of the May 998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ.” *Natural Hazards*, Volume 40, 381-396.
 40. Richard, F., Dominique, E., and Thomas, Z. (1997). “Numerical Modeling of Dam-Break Type Problems for Navier-Stokes and Granular Flows.” *Proceeding, First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, ASCE, New York, 568-595.
 41. Savage, S.B., and Hutter, K. (1989). “The motion of a finite mass of granular material down a rough incline.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 199, 177-215.
 42. Shieh, C.L., Jan, C.D., and Tsai, Y.F. (1996). “A numerical simulation of debris flow and its application.” *Natural Hazards*, 13, 39-54.
 43. Shin, Y.S. (1989). “Landslide Technology: Theory and Practice.” Sankaido, Japan (in Japanese)
 44. Soil and Water Conservation Bureau, Taichung Branch. (2007). “Site Investigation and Remediation of Landslides of Highway Tai-No. 14 from Mileage 88K to 91K.” Project Report prepared by Liming Engineering Consultants, Taichung, Taiwan. (in Chinese)
 45. Takahashi, T. (1991). “Debris flow.” *IAHR Monograph*, Balkema.
 46. Takahashi, T., and Yoshida, H. (1979). “Study on the deposition of debris flow (1): deposition due to abrupt change of bed slope.” *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No.22, B-2: 315-328.
 47. Takahashi, T., Satofuka, Y., and Chishiro, K. (1997). “Dynamics of Debris Flows in the Inertial Regime.” *Proceeding, First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, ASCE, New York, 239-248.
 48. Tsao, J.W. (1993). “Development and application of the erosion and deposition model of debris flow.” Master thesis, National Cheng Kung University, Tainan. (in Chinese)
 49. Tsai, Y.F. (1999). “A Study on the Features of the Deposition Fan of Debris Flow.” Doctoral Dissertation, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. (in Chinese)
 50. Van Steijn, H., De Ruig, J., and Hoozemans, F. (1988). “Morphological and mechanical aspects of debris flows in parts of the French Alps.” *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Vol.32, 143-161.
 51. Vargas, E. JR., Barbosa De Oliveira, A.R., Costa Filho, L.M., and Prado Campos, L.E. (1986). “A

- Study of the Relationship Between the Stability of the Slopes in Residual Soils and the Rain Intensity.” *Proceeding of International Symposium on Environmental Geotechnology, Envo., Bethlehem, Pa.*, 491-500.
52. Medina, V., Hürlimann, M., and Bateman, A. (2008). “Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula.” *Landslides* 5, 127-142.
 53. Wang, L.C. (2005). “The characteristics of topography and occurrence of hillslope debris flows in Shitou area.” Master thesis, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. (in Chinese)
 54. Watari, Masasuke., and Kobashi, Sumiji. (1987). “Predictions and Countermeasures of the Slope Failure.” Sankaido. (in Japanese)
 55. Wu, Y.J. (1999). “A Hazardous Potential Analysis of Debris Flow and It's Application in Tainan County.” Master thesis, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. (in Chinese)
 56. Yao, S.W. (2001). “Investigation on the Hydrological Characteristics for the Initiation of Debris Flow.” Master thesis, Department of Civil Engineering, National Central University, Zhongli. (in Chinese)
 57. Yu, F.C. (1990). “Study on the Mechanism of Collapse-Type of Debris Flow.” National Science Council Report on Disaster Prevention Technology Research, NSC-78-0404-P005-06B. (in Chinese)
-
- 2010 年 05 月 07 日 收稿
 2011 年 04 月 18 日 修正
 2011 年 07 月 06 日 接受
- (本文開放討論至 2012 年 12 月 31 日)