

以定率法評估邊坡山崩臨界雨量—以南勢坑為例

鍾明劍^{[1]*} 譚志豪^[1] 陳勉銘^[2] 蘇泰維^[2]

摘 要 本文採用定率法評估邊坡之山崩臨界雨量。定率法具有明確的物理意義與力學機制，除能評估特定邊坡在不同降雨條件下之崩塌潛勢外，並可藉由邊坡安全係數臨界值觀念反推所對應的臨界雨量。本文所稱山崩臨界雨量定義為暴雨條件下使邊坡安全係數 FS 達 1.0 的累積總雨量。山崩臨界雨量研擬程序係先透過現場長期及多場颱風事件之監測資料進行模式回饋分析，以率定及驗證各項水文地質特性參數，建立足以代表現地之水文地質概念模型。再利用此模型輸入不同降雨條件進行關聯性研究以獲得山崩臨界雨量。文中以台南市 174 線公路 50k+650 處邊坡為例，透過可考量降雨入滲-滲流-穩定性之串聯式分析模式，獲得其山崩臨界雨量為 640 mm。研究成果可供後續防減災措施、保全策略擬訂及坡地預警技術研擬之參考。

關鍵詞：臨界雨量、山崩、定率法、南勢坑。

Deterministic Approach for Estimating the Critical Rainfall Threshold of the Rainfall-induced Nan-Shi-Keng Landslide

Ming-Chien Chung^{[1]*} Chih-Hao Tan^[1] Mien-Min Chen^[2] Tai-Wei Su^[2]

ABSTRACT In this paper, a deterministic approach is adopted to estimate the critical rainfall threshold of a rainfall-induced landslide. The critical rainfall threshold is defined as the accumulated rainfall when the safety factor of the slope is equal to 1.0. The process of deterministic approach first establishes the hydrogeological conceptual model of the slope based on a series of in-situ investigations and laboratory experimental results. Second, the hydraulic and mechanical parameters of the model are calibrated with the long-term monitoring data. Furthermore, the critical rainfall threshold of the slope can be estimated from the relational analysis between the accumulated rainfall and the slope stability. Finally, the critical rainfall threshold of the slope can be obtained through the integrated analysis of rainfall, infiltration, seepage, and slope stability. Taking the slope located at 50k+650 on Tainan County Road 174 as an example, the results show that the critical rainfall threshold of the study case is around 640 mm. Our preliminary results appear to be useful for rainfall-induced landslide hazard assessments. The findings can also serve as a good reference for establishing an early warning system for landslides.

Key Words : Critical rainfall, landslide, deterministic approach, Nan-Shi-Keng.

[1] 中興工程顧問社大地工程研究中心

Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan, R.O.C.

[2] 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組

Envir. and Eng. Geology Division, Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : mcchung@sinotech.org.tw

一、前言

近年來全球氣候異常，水文極端現象明顯，再加上台灣先天上具有地形陡峻、地質複雜且豪雨集中等特性，故每逢暴雨常釀成規模不等的坡地災害，嚴重危害民眾生命與財產安全。以 2009 年 8 月的莫拉克颱風為例（經濟部中央地質調查所，2009），除在南台灣造成嚴重水患災情外，連日豪雨更誘發 2 萬餘個大小不等的新增山崩與土石流災害，造成重大傷亡及經濟損失。因此，如何有效地預估地質災害發生潛勢及山崩預警系統，以擬訂相關的防治與保全對策，實為相關權責單位刻不容緩的重要課題。然而，山崩預警系統的參考指標有很多，諸如：降雨強度、累積雨量、地下水位抬升量、地表變形量、地中變形速率等（譚志豪等人，2009）。為能早一步發揮示警功效，普遍採用降雨指標作為預警系統之參考依據。為達預警目的，首先須先推估邊坡開始產生崩塌狀態之臨界降雨條件，以作為後續訂定警戒值或行動值之訂定基準。

早期研究雖已透過各式數值分析方法進行邊坡災害評估或預測，惟多數研究通常係不考慮降雨入滲與地下水滲流狀況，僅逕行於模式中輸入地下水位線，再採極限平衡法進行分析。若欲考量降雨入滲影響時，則多以經驗公式或逕行假設方式，輸入該場降雨事件後之地下水位線進行分析，惟上述分析程序均無法完整模擬降雨期間地下水位之暫態反應對邊坡失穩機制之影響。有鑑於此，本文採用的定率法，係鍾明劍等人（2010）所建立可結合降雨入滲-地下水滲流-邊坡穩定性之串聯式分析模式，模式中所需之參數均透過現地試驗或調查而得，分析模式的可靠性與準確性則透過現地監測資料進行率定與驗證。

整體而言，本研究採用定率法進行深層崩塌（或稱岩體滑動型山崩）之臨界雨量評估。分析程序先探討降雨特性，乃至求解未飽和入滲問題，再進一步透過極限平衡法評估暫態地下水變化對邊坡穩定性之影響，最終透過輸入不同重現期累積雨量進行降雨誘發崩塌潛勢評估，藉以評估特定邊坡山崩臨界雨量。本研究除建立一套可評估特定邊坡山崩臨界雨量之分析模式外，另探討特定邊坡在不同的暴雨條件下坡地之可能崩塌位置、規模及崩塌潛勢，可提供後續相關的預警準則及保全對策擬訂時之參考。

二、山崩臨界雨量研究現況

1. 臨界雨量

臨界雨量 (Critical Rainfall) 定義為誘發山崩之最小累積降雨量，即在降雨事件期間，自降雨強度開始明顯增加，至邊坡開始發生崩塌為止之累積降雨量。Guzzetti 等人 (2007) 依據研究尺度之不同而分為：全域性 (Global)、區域性 (Regional) 及局部性 (Local) 三類臨界雨量。其中，全域性臨界雨量係採用跨地區之降雨促崩資料評估山崩臨界雨量，因此其結果不受地區差異影響而一體適用，惟其成果可能是極保守之下限值。至於區域性臨界雨量則需考量各區域氣象、地質及地文等特性對坡地穩定性之影響，故評估所得之臨界雨量將受上述條件所影響而有區域性之差異。至於局部性臨界雨量則多以局部單一邊坡案例作為研究對象，探討累積雨量達某局部性臨界雨量後則邊坡會開始產生破壞。本研究屬局部性臨界雨量研究，研究對象以特定邊坡為主，並推估此局部單一邊坡之山崩臨界雨量。

除了上述定性說明臨界雨量之基本定義及其適用範圍之外，為求得山崩臨界雨量門檻值 (Rainfall Threshold)，則需透過定量方式予以評估。傳統上，山崩臨界雨量之評估可透過統計法 (Statistical Approach) 或定率法 (Deterministic Approach) 進行，兩者概念不同，茲將其差異說明於后。

2. 統計法

統計法常應用於全域性或區域性之山崩臨界雨量推估，此法係利用過去山崩歷史資料與當時降雨特性資料，包括降雨強度、降雨延時、累積雨量或前期雨量等特性參數，透過統計分析方法推估發生山崩時之臨界降雨特性。以統計法評估臨界雨量之研究最早可溯自 Caine (1980)，該研究蒐集 73 個世界各地山崩土石流案例之降雨強度與降雨延時資料，並根據資料下限值統計迴歸出一條線性關係曲線，視為臨界線 (Critical Line)，並將其應用在評估土石流之發生門檻值。後來陸續有許多研究基於此觀念推廣應用在判定山崩及土石流發生條件判定及訂定相關警戒準則之用。

統計法依據選定之特性參數不同，其推估臨界雨量模式可再區分為：(1) 降雨強度-累積雨量、(2) 降雨強度-降雨延時、(3) 累積雨量-降雨延時及 (4) 降雨強度-前期雨量等四種配對方式作為臨界雨量之判定指標 (Keefer et al., 1987; Terlien, 1998; Jakob & Weatherly, 2003)。針對上述指標之配對組合，將各降雨事件特性

資料繪製於圖上（例如降雨強度-累積雨量圖），其中降雨誘發山崩之降雨事件與未誘發山崩之降雨事件以不同的符號表示。再透過統計方法將兩類事件以迴歸線區隔開，視該迴歸線為降雨臨界曲線。當未來某場預測降雨事件之降雨特性達到降雨臨界曲線以上時，則推定該場預測降雨引致山崩之發生機率相當高；反之，則發生山崩之機率明顯較低（譚志豪等人，2009）。

3. 定率法

定率法係以物理模型結合力學理論推估山崩時之降雨特性，可應用於各種研究尺度之山崩臨界雨量推估。一般自降雨落於坡面後，雨水經由入滲作用進入地中，造成坡地內部力學性質的改變（例如單位重增加、孔隙水壓上升、剪力強度降低等），進而影響邊坡穩定性。當邊坡穩定性達到臨界破壞時，往往開始造成岩體滑動或崩落進而形成山崩災害。因此降雨誘發山崩之機制應與邊坡之岩土成分、組構、含水量及入滲等特性有著密切的關係，上述因素將影響山崩發生的時間與規模（Iverson, 2000; Godt, 2004; Savage et al., 2004）。

此法首先需整合坡地水文及地質特性資料以建立物理模型。隨後再輸入降雨歷程，並透過未飽和傳輸理論評估降雨入滲對地下水壓之影響程度。再採用極限平衡法求得邊坡單元之穩定性隨水壓之變化。最終輸入不同大小的降雨量，計算出邊坡穩定性達極限狀態時所對應之累積雨量，該雨量即視為該特定邊坡之山崩臨界雨量（譚志豪等人，2009）。

由於台灣地區山崩與其相連結之降雨資料相當缺乏且不易取得，故利用統計方法推估特定邊坡崩塌發生之臨界雨量，其精度恐嫌不足。本研究在山崩臨界雨量推估上主要採用定率式方法，利用局部性降雨誘發崩塌潛勢分析模式評估特定邊坡於臨界滑動狀態下之臨界雨量門檻值。

三、定率式臨界雨量分析理論

1. 局部性山崩臨界雨量定義

本文提及之局部性山崩臨界雨量係針對特定邊坡進行山崩臨界雨量評估。由於邊坡會受到不同降雨特性之影響而使發生臨界滑動狀態之累積雨量不盡然相同。因此，先定義本文所採用之降雨特性參數及安全係數臨界值，茲分述如后。

(1) 降雨特性參數

降雨資料為定率式臨界雨量分析的主要輸入條件之一，常用於探討邊坡滑動的降雨特性參數包括降雨強度、降雨延時、累積雨量、前期雨量、及降雨型態等。謝正倫與陳俞旭（2010）研究指出在高強度但累積降雨量較小的情況下，容易誘發坡地岩屑崩滑、土石流與淹水等災害；而累積降雨量較大但降雨強度較小的情況下，則可能誘發岩體滑動或天然壩堰塞湖等災害。由於本研究係針對深層崩塌之特定邊坡為對象，對照上述研究即屬岩體滑動災害，因此參考財團法人中興工程顧問社（2010）建議採 72 小時降雨延時評估特定邊坡深層滑動之臨界雨量。累積雨量及降雨型態部分，則均參照水利署規定辦理。如累積雨量係參照「水利署水文分析報告作業須知」之規定，利用年最大值選用法（Annual Maximum Series）採年最大降雨序列進行不同延時頻率分析，以常態、二參數對數常態、三參數對數常態、皮爾森 III 型、對數皮爾森 III 型及極端值 I 型等六種機率分布進行降雨頻率分析，獲得不同重現期之 72 小時延時降雨量。

降雨型態則係採用水利署（2003）目前使用之序位法兩型設計計算方式，其分析步驟為：(a) 選擇數個颱風事件作為所欲分析集水區之兩型代表事件；(b) 應用徐昇多邊形法推求各場颱風事件之逐時平均降雨量；(c) 計算各場颱風事件每小時之降雨百分比，由大至小排列，並予以排序；(d) 將同一排序之降雨百分比相加後除以颱風事件場數，以計算各排序降雨百分比之平均值；(e) 將步驟 (d) 所求得之降雨百分比置於總延時之中間，而後將其它降雨百分比由大至小交替置於最大增量之兩側，即可形成所欲推求之延時的設計兩型百分比分配。本研究係透過上述程序計算降雨延時 72 小時之設計兩型，套入前述不同重現期降雨量即可獲得 72 小時延時下之降雨強度。

(2) 邊坡安全係數臨界值

根據極限平衡法理論可知，邊坡穩定性在安全係數等於 1.0 時達即將破壞之極限平衡狀態，此時可能滑動破壞面上抗剪強度與作用於滑動面上平均剪應力相同，邊坡會因再增加些微剪應力而失穩造成崩滑。因此，不論全域性或區域性山崩臨界雨量相關研究，大多將臨界雨量定義為

邊坡安全係數 F.S. 達 1.0 時所對應之累積雨量 (Montgomery and Dietrich, 1994; Wilson and Wieczorek, 1995; Crosta, 1998; Terlien, 1998)。本研究雖屬局部性山崩臨界雨量研擬, 但仍遵循上述定義, 將邊坡山崩臨界雨量定義為暴雨條件下使邊坡安全係數達 1.0 的累積總雨量。

2. 局部性降雨誘發崩塌潛勢分析模式建立

本研究採 GEO-SLOPE 公司發展之 GeoStudio 程式進行降雨誘發崩塌潛勢評估。GeoStudio 程式為二維有限元素之商用套裝軟體, 內建多種分析模組, 可視問題需求選用。本研究採 SEEP/W 及 SLOPE/W 兩模組進行串聯式分析, 其中, 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, 可由所設定的邊坡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。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。茲摘錄相關理論背景如后。

(1) 降雨入滲及地下水滲流分析

本研究所採 SEEP/W 模組係透過式 (1) 之控制方程式求解二維非均向地下水滲流問題。

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

式 (1) 中 H 為總水頭、 k_x 與 k_y 分別為 x 與 y 方向之水力傳導係數、 Q 為邊界流量、 θ 為體積含水量、 t 為時間。式 (1) 說明水流在土體元素中某一點, 某一時間下流進與流出之差異等於土體中體積含水量之變化量。而體積含水量為土體應力狀態與土壤性質之函數, 其中土體應力狀態可由 $(\sigma - u_a)$ 及 $(u_a - u_w)$ 兩個獨立應力狀態變數來定義, 此處 σ 為總應力 (Total Stress); u_a 為孔隙氣壓力 (Pore-Air Pressure); u_w 為孔隙水壓力 (Pore-Water Pressure)。SEEP/W 模組於暫態分析中假設 u_a 在大氣壓力下為常數, 不會影響體積含水量之變化, 因此式 (1) 可改寫為式 (2)。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w r_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

式 (2) 中 m_w 為土壤水分特性曲線之斜率 $(\partial \theta / \partial u_w)$ 、 r_w 為水的單位重。此外, 為模擬

飽和-不飽和土壤間的入滲行為, 則需於程式中建立水力傳導函數 (Hydraulic Conductivity Function), 此函數除可直接由試驗求得外, 程式亦內建 Green and Corey、van Genuchten 及 Fredlund and Xing 等模式供選擇, 本研究係採 Fredlund and Xing 模式求取此函數。若需分析暫態 (Transient) 滲流條件時, 則需建立體積含水量函數 (Volumetric Water Content Function), 除現地或室內試驗外, 程式亦內建 van Genuchten、Arya and Paris、Fredlund and Xing 及 Modified Kovacs 等模式供選擇, 本研究係至現地取土樣後透過壓力鍋試驗及套用 Fredlund and Xing 公式求取此函數。透過 SEEP/W 模組即可建立降雨入滲引致地下水位變化的分析模式。

(2) 邊坡穩定分析

本研究所採 SLOPE/W 模組係採極限平衡法進行邊坡穩定評估, 其原理係以切片法進行邊坡分析及安全係數計算。切片法原理係將通過土體之滑動面分成許多垂直片段, 利用力與力矩之平衡求得臨界安全係數, 滑動面可為圓弧型、複合型或由使用者指定一系列直線段所組成之滑動面。極限平衡分析具有下列假設條件: (1) 強度參數中之凝聚力分量及摩擦角分量所採用之安全係數皆相等; (2) 所有切片之安全係數皆相同。對有效應力分析而言, 剪力強度定義如式 (3)。

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (3)$$

式 (3) 中 τ 為剪力強度、 c' 為有效凝聚力、 ϕ' 為有效內摩擦角、 σ_n 為正向總應力、 u 為孔隙水壓力。若欲考量不飽和土壤之基質吸力影響, 土壤之剪力強度可視為凝聚力、內摩擦角及基質吸力所提供之強度三個分量所組成, 式 (3) 可改寫為式 (4)。

$$\tau = c' + (\sigma_n - \sigma_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4)$$

式 (4) 中 u_a 為孔隙氣壓力、 u_w 為孔隙水壓力、 ϕ^b 為基質吸力所貢獻之摩擦角。邊坡穩定分析採降雨入滲及滲流分析所得的地下水位資料作為輸入資料, 再計算其安全係數。由於降雨入滲時的地下水位會隨降雨歷線與延時而改

變，故將上述分析所得每個時間間隔的地下水位轉至 SLOPE/W 模組分析時，邊坡穩定之安全係數即隨地下水位而變化，呈現安全係數隨時間的關係曲線。透過上述分析流程，即可建立邊坡從降雨入滲、地下水位變化乃至邊坡穩定性變化之分析模式。

3. 模式率定與驗證

進行特定邊坡降雨誘發崩塌潛勢分析時，由於現地調查、試驗及監測之數量往往受限於執行經費與規模而未臻充足，使得模式分析結果可能存在著模型概念化、水文地質參數給定及統計資料運用等階段所產生之不確定性。因此有必要針對模式進行參數率定，以確保模式分析之正確性及準確度。所謂模式率定係透過反算分析方法找出模式內各水文地質單元最適當的物理、力學及水文地質參數。模式率定程序係結合最佳化概念反覆修正各參數至誤差縮小至工程可接受之精度為止。誤差估算方式係透過比對模式分析及現

地監測所得之地下水位高程，並透過式 (5) 之相對平均誤差指標 (財團法人中興工程顧問社, 2010) 量化模式分析之正確率，式中 x_m 與 x_s 分別為監測值和模擬值。

$$\delta_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(x_m - x_s)_i|}{(x_s)_i} \times 100\% \quad (5)$$

待水文地質概念模型建置完成且相關水文地質及力學參數通過率定後，仍須透過模式驗證以確保模式之正確性及適用性，方可用來預測未來於特定降雨條件下特定邊坡之穩定性與崩塌潛勢。本研究分析模式之率定與驗證程序係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；再以降雨期間之變動水位進行暫態滲流分析，驗證各項水力參數之適用性。圖 1 為本研究進行邊坡山崩臨界雨量評估之流程圖，旨在呈現各項水文地質特性調查、試驗、監測與分析程序間的整合應用關係，以及前述模式率定與驗證流程。

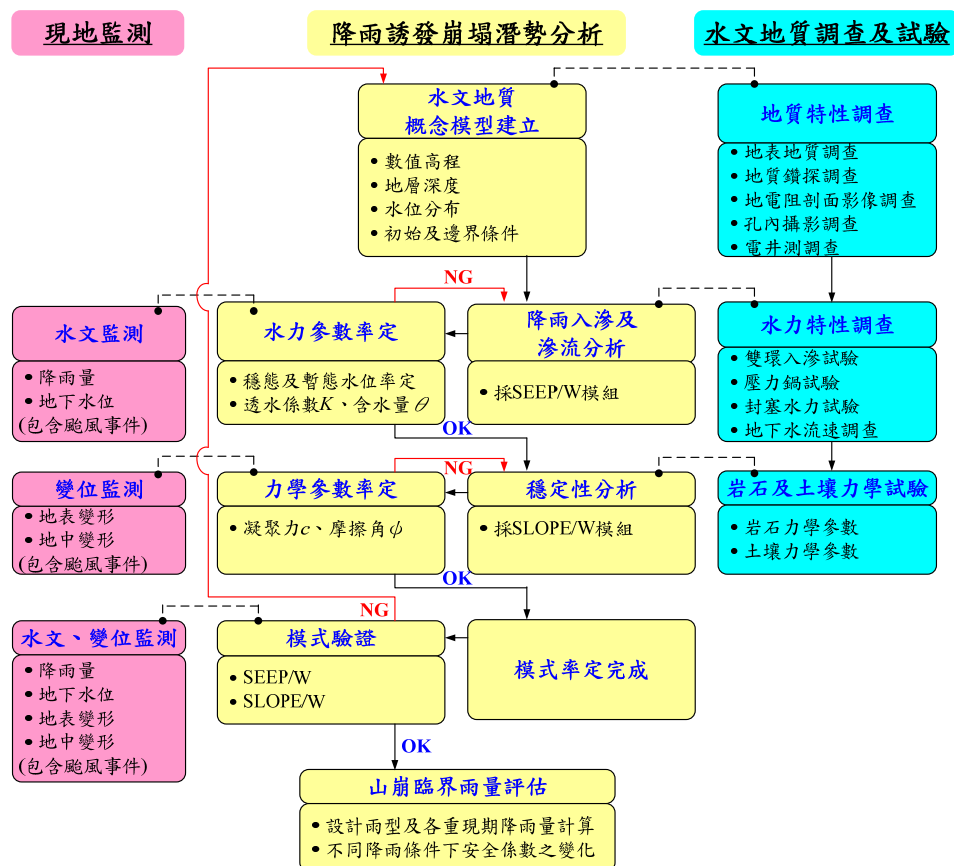


圖 1 邊坡山崩臨界雨量評估流程圖

Fig.1 Flow chart of rainfall-induced landslides hazard assessment

四、研究案例

1. 研究區域概述

(1) 地理位置及災損記錄

本文舉台南市 174 線公路 50k+650 處邊坡為例，該處行政上隸屬於台南市六甲區大丘村，邊坡影響範圍涵蓋縣道 174 線公路路面、公路上邊坡以及公路下邊坡等區域。經調查，本研究圈繪出主要調查範圍面積達 33.6 公頃 (560 m×600 m，見圖 2)，以下統稱為「南勢坑調查範圍」。

蘇冠憲 (2007) 指出縣道 174 線公路自 1980 年開闢後，歷年來每逢颱風豪雨，常有路面嚴重下陷及上下邊坡滑動之情形。自 1986 年起，50k+650 處路段即開始產生明顯路基下陷滑動現象，至今經粗略統計災害修復達 10 次以上，投入之人力及經費難以估算。主要災情包含：(1) 民國 80 年豪雨後該路段路面發生外側嚴重下陷，採將路線改線往內側移方式改善，完成後仍持續有邊坡滑動跡象，均以填補路基路面方式辦理修復；(2) 民國 87 年 8 月豪雨後該路段路面造成落

差約 1.5 m 而阻斷交通，管理單位遂辦理現地調查及鑽探再依資料成果，規劃設計施作較大規模之各項邊坡穩定防護措施，民國 89 年完工後歷經桃芝、納莉風災豪雨，路基尚無明顯之滑動跡象，有趨穩定之情形；(3) 民國 92 年 8 月至民國 95 年 8 月間因受連續豪雨及颱風影響，再度造成該處下邊坡擋土牆產生裂縫、傾斜及下陷，上下邊坡明顯滑動現象，並導致路基損壞，嚴重影響行車安全。綜合上述災損記錄可知，多年來縣道 174 線公路 50k+650 處邊坡雖陸續透過路基回填、邊溝修復、蛇籠擋土牆、路線變更，甚至是民國 89 年進行擋土牆、場鑄基樁、預力岩錨、水平排水管及集水井等大規模整治工法保護路基，均未能達到穩定路基成效，至今仍持續產生地層滑動現象。

(2) 地形、地質與水文

南勢坑調查範圍位於西烏山嶺山列的西側山腳，西側為南勢坑溪上游河谷，地勢東南高西北低，坡面傾向西北方，平均坡度約 20°，海拔高度範圍自 140 m 至 330 m，縣道 174 線公路之

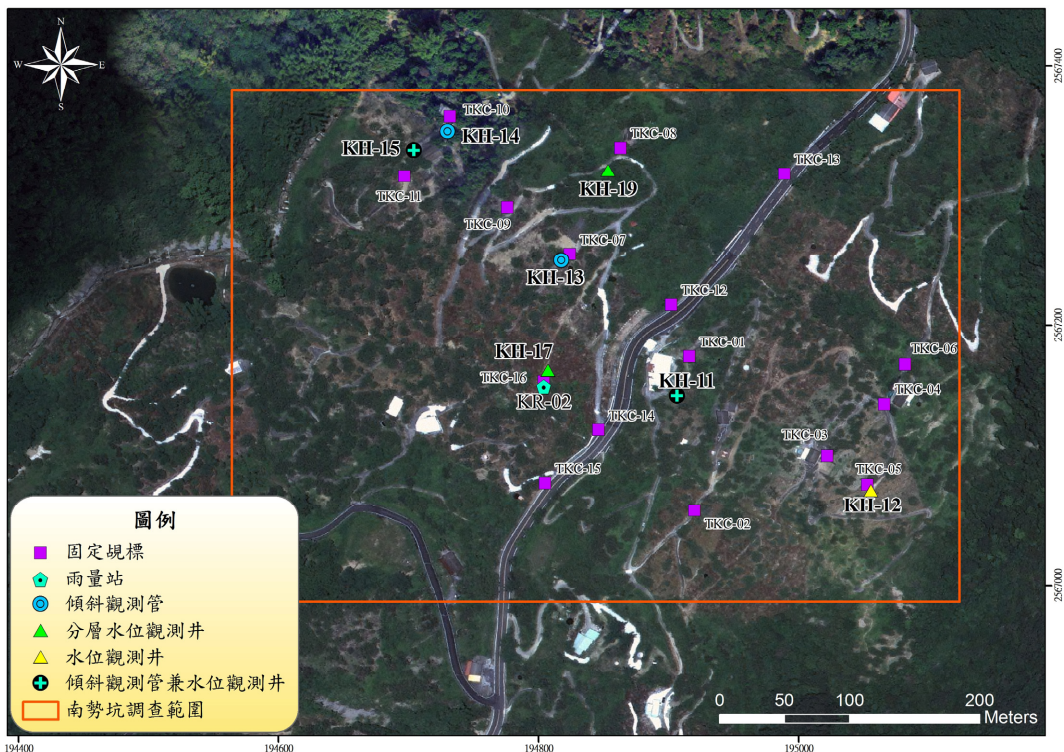


圖 2 南勢坑調查範圍航空影像及監測儀器配置圖 (影像年份：2010 年)

Fig.2 Aerial imagery and monitoring layout of Nan-Shi-Keng landslide

路面高程約 230~235 m。此區域出露地層屬於第三紀上新世晚期到第四紀更新世早期的六重溪層，其沉積環境為海相，主要岩性為砂質泥岩或頁岩與泥質砂岩，間夾頁岩及砂岩。經調查，地層主要層面位態約為 N15°E/40°E，與坡面面向 (N40°W/N) 大體呈逆向坡。由區域地質圖 (見圖 3) 可知調查範圍東側以烏山頭斷層為不整合面與中新世晚期之糖恩山砂岩相鄰，西側則為中坑斷層，兩者均為逆斷層且呈東北—西南走向。

根據鄰近之中央氣象局楠西雨量站觀測資料顯示，本區域平均全年降雨量為 2449 mm，其中以 8 月平均雨量 629 mm 為最高，11 月平均雨量 13 mm 最低；整年雨水主要集中在夏季 6 月至 9 月間，總累積雨量佔全年雨量 80.4%。

2. 水文地質特性調查與現地監測

本研究於南勢坑調查範圍進行一系列之水文地質特性調查與現地監測工作，調查工作包含有地表地質調查、地質鑽探 (計 7 孔，鑽探總進尺達 370 m)、雙環入滲試驗、地電阻影像探測、孔內水文地質調查 (含孔內攝影、水力試驗、電井測、地下水流速等)、室內土壤與岩石力學試驗等。此外，本研究透過壓力鍋試驗求取土壤水分特性曲線 (如圖 4 所示)，並套用 Fredlund and Xing (1994) 公式，建立其完整之土壤水份特性曲線，如式 6 所示。上述成果用於建置水文地質概念模型及數值模擬。式 (6) 中 θ 為體積含水比； θ_s 為飽和時體積含水比； ψ 為土壤之基質吸力值； ψ_r 為殘餘體積含水比所對應之土壤基質吸力值。

$$\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1000000}{\psi_r} \right)} \right] \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{19.5} \right)^{2.758} \right]} \right]^{0.118} \quad (6)$$

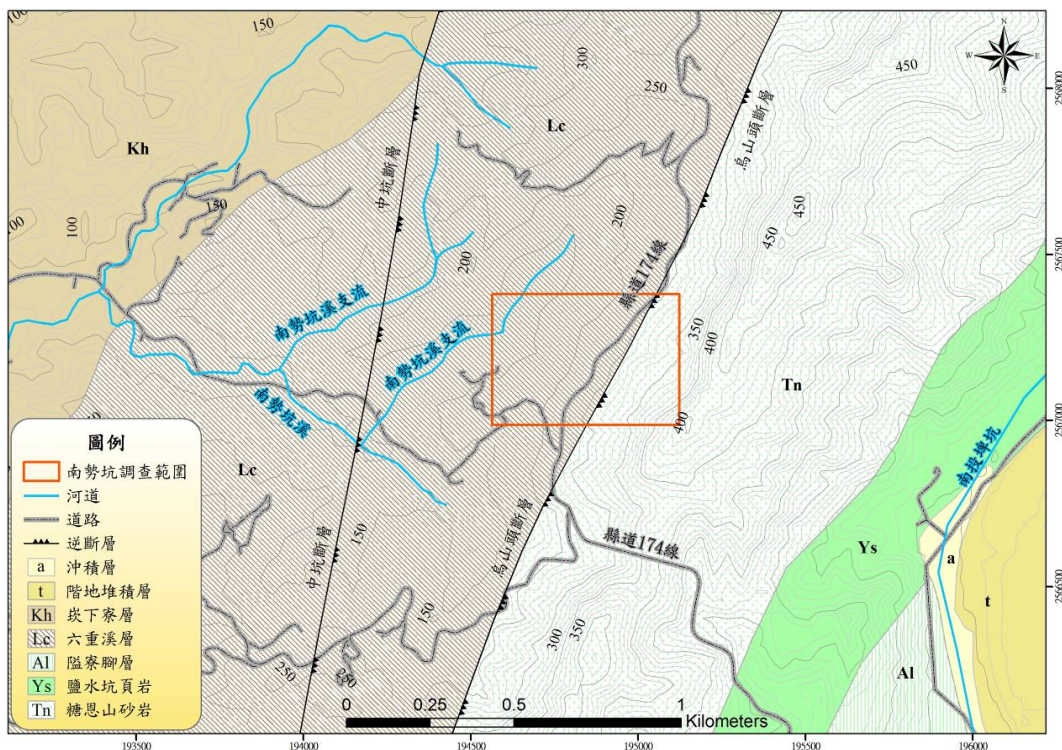


圖 3 南勢坑調查範圍區域地質圖

Fig.3 Regional geological map of Nan-Shi-Keng landslide

此外,本研究同步進行降雨量、地下水位、地中變形及地表變形等現地監測工作,相關配置如圖 2 所示。監測期間 (2011/7/1 至 2011/10/11) 因 7 月中、下旬累積超過 300 mm 的連綿雨勢,透過地表變形量測可知此雨勢導致公路下邊坡區域產生 2 至 30 cm 不等之滑移量,公路上邊坡區域則普遍少於 1.5 cm;南瑪都颱風則造成公路下邊坡區域產生 3 至 16 cm 不等之滑移量,公路上邊坡區域則普遍少於 2 cm。7 月中、下旬雨勢導致 KH-15 傾斜觀測管於地表下 5~6 m 處遭地層錯移而剪斷,無法持續量測地中變形。為獲取邊坡滑動面深度及滑移量,本研究於同年 9 月 6 日完成新增鑽孔 KH-14 持續監測,透過地中變形量測可知 KH-11、KH-13 及 KH-14 傾斜觀測管分別於地表下約 5 m、26 m 及 9.5 m 處具有較明顯的滑動面。水文觀測部分,已完整記錄南瑪都颱風降雨歷線,單日最大降雨發生於 8 月 30 日 (約 138 mm),導致 KH-11 及 KH-15 觀測井水位分別抬升 0.8 m 及 6.5 m,顯示公路下邊坡水位抬升幅度遠較公路上邊坡來得顯著。

3. 水文地質概念模式建置

南勢坑調查範圍的數值地形係採 5m × 5m DEM 數值資料建置而成,此分析剖面始自烏山頭斷層線經 KH-12、KH-11、KH-13、KH-15 等鑽孔至南勢坑溪流溪谷為止。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。本研究根據水文地質特性調查成果,將南勢坑調查範圍的水文地質單元分為:(1) 崩積層、(2) 破碎岩層 (泥岩) 及 (3) 基

盤岩層 (泥岩) 等三層,其水文地質概念模型剖面如圖 5(a) 所示。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試驗等求得,再藉由 2011/7/1 至 2011/10/11 間之現地水文監測資料進行模式率定與驗證工作。各水文地質單元經率定後之參數如表 1 所列。圖 5(b) 為水文地質概念模型的邊界條件,降雨入滲及滲流分析時,將左側邊界 (SB) 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 (RA) 設定為定水頭邊界,其值參考 KH-12 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。

4. 模式率定與驗證

本研究採 2011/7/1 至 2011/10/11 間之現地監測資料進行模式分析與驗證,降雨資料如圖 6(a) 所示,監測期間涵蓋南瑪都颱風事件。圖 6(b) 為 KH-15 觀測井水位紀錄,監測資料顯示水位觀測井建置後水位約於地表下 11~12 m 間 (設定為常時水位);圖 6(c) 為 KH-19 觀測井水位紀錄,監測資料顯示南瑪都颱風前之地下水位約於地表下 12~14 m (設定為常時水位)。圖 6(b) 分析成果顯示模擬水位與監測水位相當一致,而圖 6(c) 分析成果顯示模擬水位變化幅度小於監測水位。經計算, KH-15 及 KH-19 水位觀測井之相對平均誤差分別為 13.9% 及 12.1%,顯示模式擬合成果良好。整體而言,本研究所採分析模式已可擬合常時水位並掌握南瑪都颱風期間水位抬升及消散的型態。

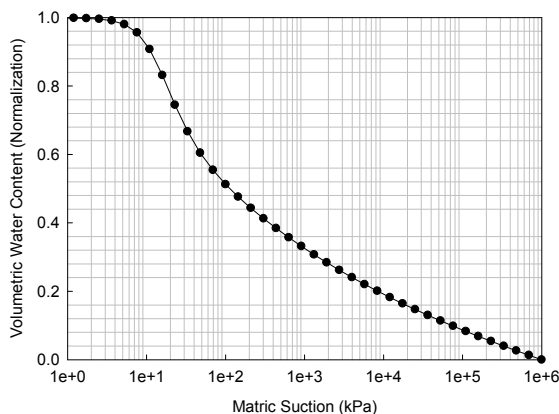


圖 4 南勢坑調查範圍土壤水分特性曲線

Fig.4 Soil-water characteristic curve of Nan-Shi-Keng landslide

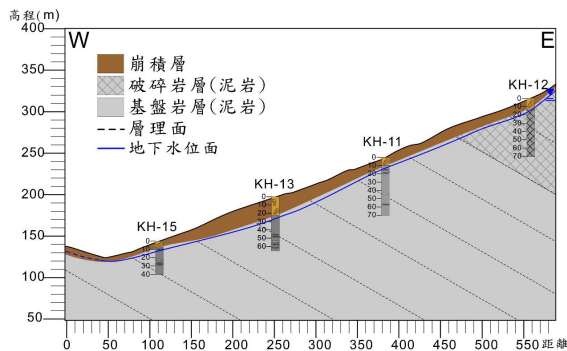
表 1 南勢坑調查範圍各水文地質單元參數率定成果

Table 1 Hydrogeological parameters of Nan-Shi-Keng landslide

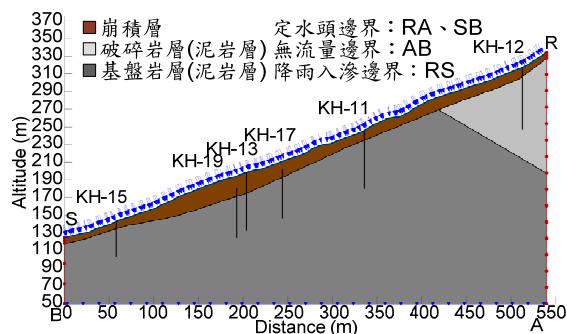
水文地質單元 參數名稱	崩積層	破碎岩層 (泥岩)	基盤岩層 (泥岩)
飽和透水係數 (m/sec)	5.78×10^{-4}	6.20×10^{-8}	2.00×10^{-8}
飽和體積含水量 (%)	0.466	0.23	0.18
單位重 (kN/m ³)	17.7	23.2	24.1
凝聚力 (kPa)	15	23.6	170
摩擦角 (deg)	23.3	25	34
彈性模數 (kPa)	1.2×10^4	3.3×10^4	1.08×10^5
柏松比	0.35	0.42	0.39

圖 6(d) 為將前述不同時階下水位變動所得的邊坡穩定分析成果，由圖 6(d) 可知南勢坑調查範圍於颱風前之常時安全係數為 1.39，此時之地下水位及可能滑動塊體如圖 7(a) 所示。綜合研判南勢坑調查範圍常時處於相對穩定狀態，惟仍低於常時安全係數高於 1.5 之

要求，需持續密切注意。此外，南瑪都颱風所帶雨勢確實造成南勢坑調查範圍地下水抬升，抬升幅度對滑動塊體造成一定影響，使其安全係數略降至 1.35，分析所得之地下水位及可能滑動塊體如圖 7(b) 所示。



(a) 水文地質概念模型



(b) 邊界條件

圖 5 南勢坑調查範圍水文地質概念模型及邊界條件

Fig.5 Hydrogeologic conceptual model and boundary conditions of Nan-Shi-Keng landslide

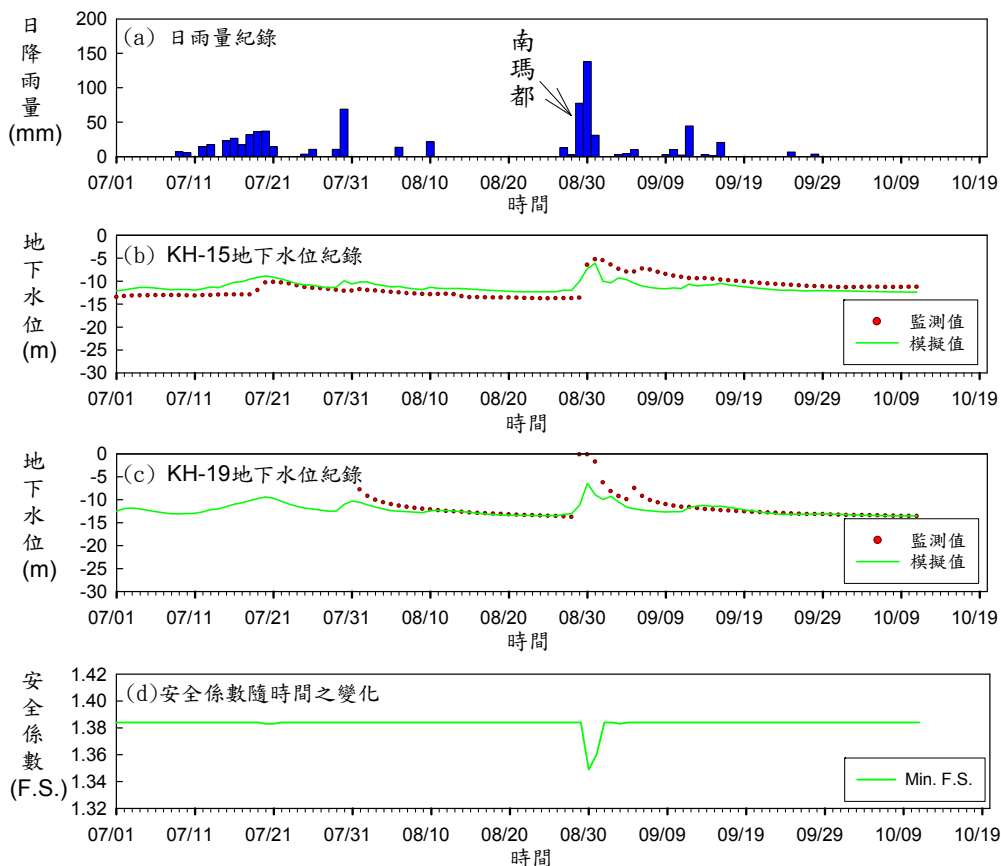


圖 6 南勢坑調查範圍降雨誘發邊坡山崩潛勢評估分析成果

Fig.6 Analysis results of rainfall-induced Nan-Shi-Keng landslide hazard assessment

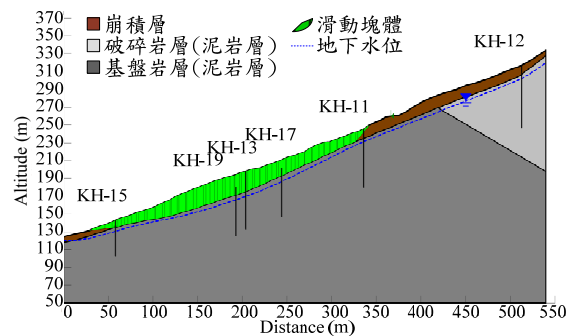
5. 山崩臨界雨量評估

完成上述分析模式之率定與驗證後,即可採用水利署建議方法進行兩型設計及不同重現期降雨量計算。山崩臨界雨量評估採用之設計兩型係蒐集中央氣象局楠西雨量站(編號:C10920)自1989年至2010年之雨量資料,採用水利署建議之序位法兩型設計計算方式,獲得降雨延時72小時之設計兩型,如圖8所示。同時,本研究參照「水利署水文分析報告作業須知」規定採年最大降雨序列進行降雨頻率分析,獲得各重現期降雨延時72小時之降雨量,如表2所示。將表2各重現期之降雨量按照圖7設計兩型之比例分配至72小時延時,即可得到各重現期之降雨歷線,結合邊坡穩定分析,即可計算南勢坑調查範圍於不同降雨條件下安全係數之變化,如圖9所示。

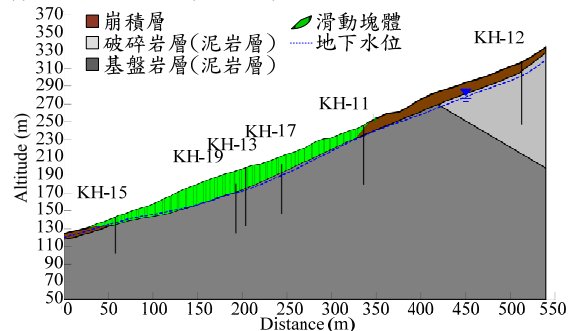
表2 南勢坑調查範圍各重現期降雨量(單位:mm)

Table 2 Precipitation of different return periods in the Nan-Shi-Keng landslide

降雨延時	重現期							
	1.01年	2年	5年	10年	20年	50年	100年	200年
72小時	205	409	631	824	1050	1413	1750	2151



(a) 常時穩定性評估 (F.S.=1.39)



(b) 南瑪都颱風期間穩定性評估 (F.S.=1.35)

圖7 南勢坑調查範圍穩定評估分析成果

Fig.7 Slope stability analysis of Nan-Shi-Keng landslide

由圖9可知,安全係數會隨累積總雨量增加而大幅降低,顯示南勢坑調查範圍容易受降雨導致邊坡趨於不穩定狀態。惟需注意的是,安全係數低於1.0代表邊坡已超過極限臨界狀態,喪失穩定性後將產生大變形或塊體崩滑現象,至於安全係數低於1.0後之變化則不具任何意義。最後,根據本研究對特定邊坡山崩臨

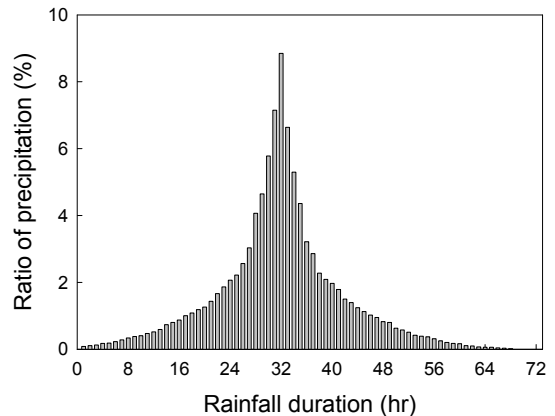


圖8 南勢坑調查範圍72小時延時之設計兩型

Fig.8 Design hyetograph of 72-hour duration in the Nan-Shi-Keng landslide

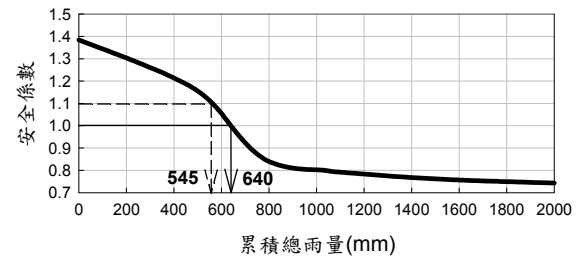


圖9 南勢坑調查範圍安全係數隨累積總雨量之變化

Fig.9 Relationship between F.S. and accumulated rainfall in the Nan-Shi-Keng landslide

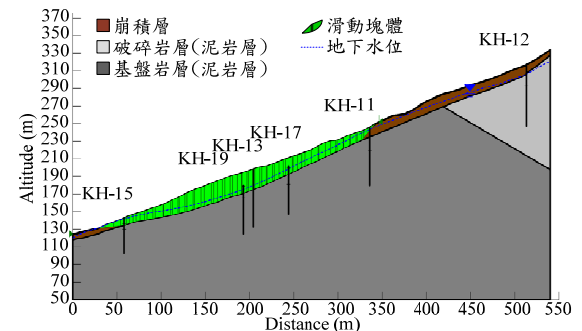


圖10 臨界雨量狀態下南勢坑調查範圍之可能滑動塊體

Fig.10 Potential sliding mass of Nan-Shi-Keng landslide at the critical rainfall condition

界雨量之定義，可從圖 9 中研判南勢坑調查範圍的山崩臨界雨量為 640 mm，可能滑動塊體位於 174 線公路及其下邊坡區域（涵蓋 KH-13 及 KH-15 鑽孔）且滑動弧大體沿著崩積層底部（如圖 10 所示），其深度與各傾斜觀測管量測成果（財團法人中興工程顧問社，2010）相吻合。

6. 防災應用

一般監測系統管理值分為注意值、警戒值與行動值，其中行動值係定義為已處於緊急之狀態，須立即採取各項緊急應變措施，然本文定義之山崩臨界雨量係指邊坡處於臨界滑動狀態（F.S.=1.0），雖極具物理意義，但於防災實務執行時等同無保留緊急應變時間而難於直接應用。香港土木工程拓展署（GCO, 1984）考量邊坡於暴雨狀態時，受到土壤材料可能泡水軟化、地下水入滲及滲流改變等諸多因素影響而存在不確定性，故建議人命風險高的邊坡在最差地下水文條件下，其安全係數仍應高於 1.1；國內建築技術規則建築構造篇基礎構造設計規範（內政部營建署，2011）、水土保持手冊（行政院農委會水土保持局，2005）等規範亦有相同規定。

有鑑於此，本研究建議防災應用時可將行動值定義為暴雨條件下使邊坡安全係數達 1.1 的累積總雨量。由圖 9 可知在此定義下，南勢坑調查範圍防災行動值對應之降雨量為 545 mm。若以表 2 所列 10 年重現期降雨條件推算，南勢坑調查範圍自防災行動值對應之降雨量至臨界雨量間，約有 3.5 小時的緊急應變時間。

五、結論與建議

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

- 研究成果顯示南勢坑調查範圍的山崩臨界雨量為 640 mm，其可能滑動塊體位於 174 線公路及其下邊坡區域（涵蓋 KH-13 及 KH-15 鑽孔）且滑動弧大體沿著崩積層底部，此成果可提供權責單位後續於防減災策略及整治工程參考。
- 透過案例研究可清楚瞭解，本文所採降雨入滲-地下水滲流-邊坡穩定性之串聯式分析模式可擬合常時水位並掌握南瑪都颱風期間水位抬升及消散的型態，已有效解決早期分析程序無法完整模擬降雨期間地下水位之暫態反應對邊坡失穩機制之影響。
- 本研究參考國內外相關規範（暴雨條件下 F.S.=1.1）予以定義行動降雨量，經評估南勢坑調查範圍防災行動值對應之降雨量為 545 mm，推算在 10 年重現期降雨條件下，防災行動值對應之降雨量至臨界雨量間約有 3.5 小時的緊急應變時間，顯然本研究所研擬之分析程序足以作為往後行動值訂定之參考。
- 整體而言，定率式臨界雨量分析模式除極具物理意義外，亦可進一步獲得特定邊坡之山崩臨界雨量，後續可結合即時預報雨量作為已知危險聚落疏散避難及保全策略擬訂之參考。

誌 謝

感謝經濟部中央地質調查所提供計畫經費、交通部公路總局第五區養護工程處曾文工務段提供協助，方便本研究順利完成，特此誌謝。對於工作期間提供協助的相關單位及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

- 內政部營建署（2011），「建築技術規則」。(Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior (2011). *Building technical regulations*, Taiwan. (in Chinese))
- 行政院農業委員會水土保持局（2005），「水土保持手冊」。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan (2001). *Soil and water conservation handbook*, Taiwan. (in Chinese))
- 財團法人中興工程顧問社（2010），「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置（第 2 期 99 年度）—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫（3/3）」，經濟部中央地質調查所，成果報告，台灣台北。(Sinotech Engineering Consultants, Inc. (2010), *Geological investigation of upstream watersheds for flood-prone areas and database establishment (Second project phase)— Investigation and evaluation of the effect of hydrogeology on slope stability in the watershed area (3/3)*, Central Geological Survey, MOEA, Taiwan. (in Chinese))
- 經濟部中央地質調查所（2009），「災情記錄」，地質，第 28 卷，第 4 期，第 55 頁。(Central Geological Survey, MOEA (2009). "Disaster records." *Geology*, 28(4), 55. (in Chinese))

- [5] 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2003), 「台灣地區重要河川單位歷線模式應用研究-鹽水溪流域」, 經濟部水利署。(Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency, MOEA (2003). *Application study on unit hydrograph model for important rivers in Taiwan: Yanshuei-Chi basin*, Taiwan. (in Chinese))
- [6] 謝正倫、陳俞旭 (2010), 「二次災害傳遞過程與災區重建之新構想」, 中華防災學刊, 第 2 卷、第 2 期, 第 109-116 頁。(Shieh, C.L., and Chen, Y.S. (2010). "New idea for the transmission process of second disaster and disaster reconstruction." *Journal of the Taiwan Disaster Prevention Society*, 2(2), 109-116. (in Chinese))
- [7] 鍾明劍、譚志豪、王金山、冀樹勇、蘇泰維 (2010), 「莫拉克颱風引致吉露部落崩塌之案例研究」, 中華水土保持學報, 第 41 卷, 第 4 期, 第 333-342 頁。(Chung, M.C., Tan, C.H., Wang, G.S., Chi, S.Y., and Su, T.W. (2010). "Case study of Ji-Lou landslide triggered by Typhoon Morakot." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 41(4), 333-342. (in Chinese))
- [8] 譚志豪、陳億璇、冀樹勇 (2009), 「以定率法評估集水區山崩臨界雨量」, 中興工程季刊, 第 105 期, 第 5-16 頁。(Tan, C.H., Chen, Y.H., and Chi, S.Y. (2009). "A deterministic method for estimating critical rainfall thresholds of landslides in the watershed." *Sinotech Engineering*, 105, 5-16. (in Chinese))
- [9] 蘇冠憲 (2007), 「砂泥岩互層邊坡滑動機制及保護對策探討一以縣道 174 線公路 50k+650 為例」, 立德管理學院資源環境學系碩士論文。(Su, K.H. (2007). *Investigating the slope failure of inter-bedded sandstone and mudstone slope: case of highway R174 on 50k+650*, Master thesis, Leader University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [10] Caine, N. (1980). "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows," *Geografiska Annaler*, 62A(1-2), 23-27.
- [11] Crosta, G. (1998). "Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation", *Environmental Geology*, 35(2-3), 131-145.
- [12] Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, 521-532.
- [13] GCO (1984). *Geotechnical Manual for Slopes (Second edition)*, Geotechnical Control Office, Hong Kong.
- [14] Godt, J.W. (2004). "Observed and modeled conditions for shallow landsliding in the Seattle, Washington area", Ph.D. dissertation, University of Colorado.
- [15] Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2007). "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe," *Meteorology and atmospheric physics*, 98(1-2), 239-267.
- [16] Iverson, R.M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration," *Water Resource Research*, 36(7), 1897-1910.
- [17] Jakob M., and Weatherly, H. (2003). "A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia," *Geomorphology*, 54, 137-156.
- [18] Keefer, D.K., Wilson, R.C., Mark, R.K., Brabb, E.E., Brown, W.M., Ellen, S.D., Harp, E.L., Wiczorek, G.F., Alger, C.S., and Zatzkin, R.S. (1987). "Real-time warning during heavy rainfall," *Science*, 238, 921-925.
- [19] Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E. (1994). "A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding," *Water Resources Research*, 30, 1153-1171.
- [20] Savage, W.Z., Godt, J.W., and Baum, R.L. (2004). "Modeling time-dependent slope stability", *Proceedings of 9th international symposium on landslide*, 28 June-2 July, Rio de Janeiro, Brazil, 23-28.
- [21] Terlien, M.T.J. (1998). "The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds," *Environmental Geology*, 35(2-3), 125-130.
- [22] Wilson, R.C., and Wiczorek, G.F. (1995). "Rainfall thresholds for the initiation of debris flow at La Honda, California," *Environmental and Engineering Geoscience*, 1(1), 11-27.

2011 年 12 月 05 日 收稿

2012 年 04 月 26 日 修正

2012 年 10 月 15 日 接受

(本文開放討論至 2013 年 9 月 30 日)