# 以定率法評估特定邊坡山崩臨界雨量

鍾明劍[1\*] 譚志豪[2] 陳勉銘[3] 蘇泰維[4]

摘 要 本文採用定率法評估特定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係參考香港土木工程拓展署建議,定義為暴雨條件下使邊坡安全係數FS達1.1的三日累積總雨量。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-穩定性耦合模式分析,獲得其山崩臨界雨量為545mm。所獲之山崩臨界雨量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。

# Deterministic Approach for Estimating Critical Rainfall Threshold of Rainfall-induced Landslide

Ming-Chien Chung<sup>[1\*]</sup> Chih-Hao Tan<sup>[2]</sup> Mien-Min Chen<sup>[3]</sup> Tai-Wei Su<sup>[4]</sup>

**ABSTRACT** In this paper, a deterministic approach is adopted to estimate the critical rainfall threshold of the rainfall-induced landslide. The critical rainfall threshold is defined as the accumulated rainfall while the safety factor of the slope is equal to 1.1, suggested by Hong Kong Civil Engineering and Development Department. The process of deterministic approach is firstly to establish 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 stability. Taking the slope located at 50k+650 on Tainan county road No 174 as an example, the results show that the critical rainfall threshold of the study case is around 545 mm. Our preliminary results appear to be useful for rainfall-induced landslide hazard assessments. The findings can also be a good reference to establish an early warning system of landslides.

Key Words: critical rainfall, landslide, deterministic approach.

<sup>〔1〕</sup> 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心研究員(\* 通訊作者 E-mail: mcchung@sinotech.org.tw)

Researcher, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan [2] 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心組長

Division Head, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan [3] 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組科長

Section Chief, Envir. and Eng. Geology Division, Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan [4] 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組科員

Associate Tech. Specialist, Envir. and Eng. Geology Division, Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan

# 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(地質期刊,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)。爲能早一步發揮示警功效,普遍採用降雨指標作爲預警系統之參考 依據。爲達預警目的,首先須先推估邊坡開始產生崩塌狀態之臨界降雨條件,以作爲後續訂定警戒値 或行動値之訂定基準。

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,本研究採用 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。本文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,至邊坡開始發生崩場為止之累積降雨量。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 線爲降雨臨界曲線。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交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。本文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,先定義本研究所採用之降雨特性 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。謝正倫與陳奇旭(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。由於本文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目前使用之序位法區域雨型設計計算方式,獲 得降雨延時 72 小時之設計雨型, 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,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)。惟邊坡於暴雨狀態時,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,故香港土木工程拓展署(GCO, 1984)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。因 此,本研究將特定邊坡之山崩臨界雨量定義為暴雨條件下使邊坡安全係數達1.1的三日總雨量。

#### 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 兩模組進行耦合分析(Coupled Analysis),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,對每一片土體之阻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及非均質地下水滲流問題。

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

式(5)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為邊界流通量、 $\theta$ 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,而土體應力狀態可由 $(\sigma - u_a)$ 及  $(u_a - u_w)$ 兩個獨立應力狀態變數來定義,此處 $\sigma$ 為總應力(Total Stress); $u_a$ 為孔隙氣壓力(Pore-Air Pressure);  $u_a$  為孔隙水壓力(Pore-Water Pressure)。SEEP/W 模組係採總應力分析法,並於暫態 分析中假設u<sub>a</sub>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)。

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

式(2)中m。為土壤水分特性曲線之斜率、r。為水的單位重。此外,為模擬飽和-不飽和土壤間的滲 流行為,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 et al.等模式供選擇。 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。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)。

 $\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'$ (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<sub>n</sub> 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)。

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

式(4)中u<sub>a</sub>為孔隙氣壓力、u<sub>w</sub>為孔隙水壓力、φ<sup>b</sup>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<sub>x</sub>與<sub>x</sub>分別為監測値和模擬值。

$$\delta_{\rm r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{|(x_m - x_s)_i|}{(x_s)_i} \times 100\%$$

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。

......(5)

## 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 1),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 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,路基尙無明顯之滑動跡象,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塡、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。



圖 1 南勢坑調查範圍航照影像及監測儀器配置圖(影像年份:2010年)

Fig.1 Aerial imagery and monitoring layout of Nan-Shi-Keng study area

#### (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140m至330m,縣道174線公路之路面高程 約230~235m。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2)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 北一西南走向。 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%。



#### 圖 2 南勢坑調查範圍區域地質圖

Fig.2 Regional geological map of Nan-Shi-Keng study area

#### 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6孔,鑽探總進尺達370m)、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,相關成果用 於建置水文地質概念模型及數值模擬。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1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5m、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138mm), 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 5 mx5 m 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 等鑽孔至南勢坑溪支流溪谷為止。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 3(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。

圖 3(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。



#### 圖 3 南勢坑調查範圍水文地質概念模型及邊界條件



#### 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5(a) 所示,監測期間涵蓋南瑪都颱風事件。圖5(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5(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4(b)分析成果顯示模擬水位 與監測水位相當一致,而圖4(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 文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(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 4(d)可知南勢坑調查範圍於 颱風前之常時安全係數為 1.39,其最小安全係數之滑動塊體位於 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 5(a)所示,其深度與各傾斜觀測管量測成 果相吻合。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。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,抬升幅度對滑動弧造成 一定影響,使其安全係數略降至 1.35,如圖 5(b)所示。



## 圖 4 南勢坑調查範圍降雨誘發崩塌潛勢評估分析成果

Fig.4 Analysis results of rainfall-induced Nan-Shi-Keng study area hazard assessment



圖 5 南勢坑調查範圍穩定評估

Fig.5 Slope stability analysis of Nan-Shi-Keng study area

## 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雨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雨型係蒐集中央氣象局楠西雨量站(編號: C1O920)自 1989 年 至 2010 年之雨量資料,採用水利署建議之序位法區域雨型設計計算方式,獲得降雨延時 72 小時之 設計雨型,如圖 6 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 1 所示。將表 1 各重現期之降雨 量按照圖 6 設計雨型之比例分配至 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 7 所示。

表1 南勢坑調查範圍各重現期降雨量(單位:mm)

| Table 1 | Precipitation | of different | return | periods in | the | Nan-Shi-Keng | study | area |
|---------|---------------|--------------|--------|------------|-----|--------------|-------|------|
|---------|---------------|--------------|--------|------------|-----|--------------|-------|------|

| 隆雨延時  | 重現期   |     |     |      |      |      |      |      |  |
|-------|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|--|
| 阳阳汉正时 | 1.01年 | 2年  | 5年  | 10年  | 20年  | 50年  | 100年 | 200年 |  |
| 72 小時 | 409   | 631 | 824 | 1050 | 1131 | 1413 | 1750 | 2151 |  |



## 圖 6 南勢坑調查範圍 72 小時延時之設計雨型

#### Fig.6 Design hyetograph of 72-hour duration in the Nan-Shi-Keng study area



#### 圖 7 南勢坑調查範圍安全係數隨三日累積雨量之變化

#### Fig.7 Relationship between F.S. and 3-days precipitation in the Nan-Shi-Keng study area

由圖 7 可知,安全係數會隨三日累積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,根據本交 對特定邊坡山崩臨界雨量之定義,可從圖 7 中研判南勢坑調查範圍的山崩臨界雨量為 545 mm。

## 五、結論與建議

綜合本研究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 545 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,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。
- 3. 一般監測系統管理値分為注意値、警戒値與行動值,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。而本文山崩臨界雨量係配合國內外相關規範(暴雨條件下 F.S.=1.1)予以定義,而非邊坡臨界滑動狀態(F.S.=1.0),在實務執行時相當於保留緊急應變 時間,因此本研究所研擬之分析程序將可作為往後行動值之訂定基準。
- 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,方使本研究順利完成,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工作同仁,亦一併感謝諸位對此研究之付出與努力。

## 參考文獻

- 1. 地質專題(2009),「災情紀錄」,地質,第28卷,第4期,第55頁。
- 2. 譚志豪、陳嬑璇、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。
- 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。
- Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi, and C.P. Stark (2007), "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe," *Meteorology and atmospheric physics*, 98(1-2):239-267.
- Caine N. (1980), "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows," *Geografiska Annaler*, 62A(1-2):23-27.
- Keefer, D.K., R.C. Wilson, R.K. Mark, E.E. Brabb, W.M. Brown, S.D. Ellen, E.L. Harp, G.F. Wieczorek, C.S. Alger, and R.S. Zatkin (1987), "Real-time warning during heavy rainfall," *Science*, 238:921-925.
- Terlien M.T.J. (1998), "The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds," *Environmental Geology*, 35(2-3):125-130.
- Jakob M., H. Weatherly (2003), "A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia," *Geomorphology*, 54:137-156.
- 9. Iverson, R.M. (2000), "Landslide triggering by rain infiltration," *Water Resource Research*, 36(7):1897-1910.
- 10. Godt, J.W. (2004), "Observed and modeled conditions for shallow landsliding in the

Seattle, Washington area", Ph.D. dissertation, University of Colorado.

- Savage, W.Z., J.W. Godt, and R.L. Baum (2004), "Modeling time-dependent slope stability", *Proceedings of 9th international symposium on landslide*, 28 June-2 July, Rio de Janeiro, Brazil, 23-28.
- 12. 謝正倫、陳俞旭(2010),「應用集水區侵蝕與堆積調查評估成果於莫拉克災區重建空間與時間 尺度之訂定」,2010流域地質與坡地災害研討會,台灣台北。
- 13. 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。
- 14. Montgomery D.R., and W.E. Dietrich (1994), "A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding," *Water Resources Research*, 30:1153-1171.
- 15. Wilson, R.C., and G.F. Wieczorek (1995), "Rainfall thresholds for the initiation of debris flow at La Honda, California," *Environmental and Engineering Geoscience*, 1(1):11-27.
- 16. Crosta G. (1998), "Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation", *Environmental Geology*, 35(2-3):131-145.
- 17. GCO (1984), "Geotechnical Manual for Slopes (Second edition)," Geotechnical Control Office, Hong Kong.
- 18. 內政部營建署(2011),「建築技術規則」。
- 19. 行政院農業委員會水土保持局(2005),「水土保持手冊」。
- 20. 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。