不同尺度分析模式於崩塌潛勢評估 之整合應用-以莫拉克颱風事件為例

鍾明劍* 譚志豪** 冀樹勇***

摘要

本文提出一套整合不同尺度分析模式之崩塌潛勢評估流程,先透過大尺度降雨促崩模式快速篩 選出集水區內高崩塌潛勢區域,再以小尺度降雨模式詳細評估特定高潛勢邊坡之穩定性。本文所採 用之大尺度模式係採美國地質調查所發展之 TRIGRS 程式,旨在快速求得集水區內各邊坡單元之降 雨促崩潛勢,進而篩選出關鍵的危險區域;小尺度模式則係採 GEO-SLOPE 公司發展之 GeoStudio 程式進行分析,旨在針對特定關鍵的危險區域進一步模擬邊坡因降雨入滲引致地下水位變動進而導 致邊坡失穩之行為。文末則以莫拉克颱風事件為例,先以大尺度分析初步評估高屏溪流域整體之降 雨促崩潛勢,再針對集水區內特定關鍵區域(舊藤枝部落、吉露部落及寶隆場址)進行降雨誘發崩 塌之潛勢評估,除探討不同尺度分析模式整合應用之適用性外,亦藉由實際現勘及監測資料予以驗 證。相關成果可供後續防、減災措施以及保全策略擬訂之參考。

關鍵字:潛勢評估、崩塌、莫拉克颱風、降雨誘發、高屏溪流域

一、前言

近年來由於全球氣候異常,頻繁的颱風豪雨 使得台灣山區受損範圍與程度均遠較過去為烈, 以致山崩及土石流等自然災害頻傳。特別是 921 集集地震後,每當重大颱風襲台,山區即常發生 大規模的山崩與土石流,除造成道路中斷與房舍 掩埋等災害外,集水區下游易淹水地區亦產生水 患問題,嚴重地危害到民眾生命與財產的安全。 以 2004 年為例,全年颱風侵襲次數高達 9 次, 僅 72 水災事件淹水面積即達 659 平方公里;而 2005 年的 612 豪雨事件亦造成南部地區多處淹 水,淹水面積超過 500 平方公里。2009 年 8 月的 莫拉克颱風不僅在南台灣造成嚴重水患,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以提供相關單位防 災、減災措施之參考,實為一項重要的課題。 I.

程

技

衏

當今面對極端氣候侵襲下,山區連日豪雨動 輒誘發數以千計的山崩,傳統單一邊坡穩定分析 模式實無法針對集水區內所有邊坡進行詳細的穩 定分析及預測,實有必要針對此困境進行突破。

^{*} 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

^{**} 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質模擬組組長

^{***} 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

鑒此,本文嘗試突破上述困境,透過整合不 同尺度分析模式以快速評估降雨期間大範圍崩塌 潛勢及小區域坡地穩定性之變化。首先採用美國 地質調查所 (USGS)發展之暫態降雨入滲邊坡網 格穩定分析模式 (Transient <u>R</u>ainfall <u>Infiltration and</u> <u>Grid-based <u>Regional</u> <u>Slope-Stability Model</u>,簡稱 TRIGRS)進行以集水區為目標之降雨促崩潛勢分 析,旨在求得該集水區在不同降雨條件下崩塌潛 勢之時空分布,成果可應用於初步挑選具崩塌潛 勢之交通要衝或危險緊落。</u>

待縮小可能範圍及聚焦重點位置後,則另採 GEO-SLOPE 公司發展之 GeoStudio 程式進行以 單一邊坡為目標之小尺度模式分析,以進一步模 擬關鍵區域所處邊坡因降雨入滲引致地下水位變 動進而導致邊坡失穩之行為。評估成果可提供該 區域後續防災、減災措施及保全策略擬訂之參 考。

二、文獻回顧

近年來國際間對降雨引致坡地災害之關注與 日俱增,政府相關單位亦積極投入進行許多研 究,發展出一些用以評估崩塌潛勢之方法。本文 按評估方法的分析尺度將其區分為:(1)以集水 區為目標的大尺度降雨促崩潛勢分析模式;(2) 以單一邊坡為目標的小尺度降雨誘發崩塌分析模 式等兩類,茲分述兩類崩塌潛勢評估方法之發展 近況如后。

(一) 大尺度降雨促崩潛勢分析模式

一般而言,大尺度降雨促崩潛勢分析模式多 以集水區為目標,分析單位可為網格狀單元或不 規則狀坡地單元。各單元之穩定性常以崩塌潛勢 (Landslide Susceptibility)加以表示。又根據崩塌 潛勢之評估方法不同,可概分為專家評分法、統 計法與定率法等三大類。(財團法人中興工程顧問 社,2008~2009)。

專家評分法係依據專家經驗,就現場調查成

果,擬定數項崩塌關聯因子,並賦予每個案例不 同的因子評分值,經加權後得到各案例之評分 值,並藉以分級決定崩塌潛勢。此法執行較為容 易,但各項因子之決定及權重與評分均較主觀, 且針對不同的案例多未有一致的評分項目與評分 標準。

統計法 (如多變量分析法、類神經網路法) 則需藉由分析已發生崩塌區域之各項影響因子組 合,再針對未發生崩塌但具有相同組合特性之區 域進行量化的潛勢預測。惟統計法需建立大量的 影響因子組合及累積大量的崩塌事件以訂定各項 因子之權重值方可達成,較適用於監測資料較完 整之都市周緣地區,而較不適用於缺乏雨量測站 資料及即時山崩報導之偏遠山區。

至於定率法則基於物理與力學概念模型,透 過極限平衡法求解不同降雨條件下各邊坡單元之 穩定性,透過現地調查及試驗以建立各地質分區 之代表性力學與水文地質參數,並輔以參數反算 分析,藉以獲得集水區之代表性參數。定率法較 適用於缺乏山崩與降雨統計資料之偏遠山區。

本文建議之分析方法係屬定率法,該法為近 年來國際間進行大尺度降雨促崩潛勢分析之重要 研究主題。Iverson (2000)透過解析解方式求解 Richards 未飽和流動方程式,藉以連結降雨入滲 地表後導致地下水壓上升之關係,以進一步評估 無限邊坡之穩定性隨降雨歷時之變化。美國地質 調查所 (USGS)進一步將 Iverson 建議之方法適 度修改後,撰寫成數值程式 TRIGRS,透過自動 化分析方式求解大尺度範圍內所有邊坡單元於降 雨入滲條件下之崩塌潛能 (Baum et al., 2002)。 Godt (2004)、Chen et al. (2005)、Salciarini et al. (2006)及譚志豪等 (2008, 2009)亦針對如何有效 結合物理機制及力學理論於廣域崩塌潛勢分析提 出相關之案例驗證與應用建議。

本文所採用之大尺度分析模式係基於 TRIGRS 程式,並結合地質特性、地下水文、水 文地質特性、降雨強度與延時等輸入資料之區域 分布差異,再藉由空間與時間之離散作業將此時 空差異一併納入考量,所獲得各邊坡單元之穩定 性評估結果則更具代表性與正確性。該模式之分 析程序係由降雨強度及延時開始探討,並求解土 壤層之未飽和入滲問題,藉以進一步估算暫態地 下水位上升幅度,最終透過極限平衡法評估此一 地下水位變動對各邊坡單元穩定性之影響。該模 式除將上述山崩關聯性較高之因子納入外,亦著 重於數個模式所需之關聯因子之探討,包括降雨 強度、地下水位、土壤凝聚力與摩擦角以及地表 入滲率等,藉此充分反應集水區內各邊坡受降雨 入滲引致地下水位上升所造成之失穩問題。

為納入上述各項關鍵因素,本文採用定率式 模式,並同步採用 USGS 發展之 TRIGRS 程式對 實際案例進行大尺度降雨促崩潛勢分析。

(二) 小尺度降雨誘發崩塌分析模式

傳統上,小尺度降雨誘發崩塌分析模式係以 單一邊坡為目標,透過邊坡穩定分析程序進行安 全係數之計算,以評估其穩定性。典型的邊坡穩 定分析方法首推極限平衡法,如解析圓弧型滑動 的 Fellenius 法、Bishop 法或 Spencer 法;解析複 合型滑動的 Janbu 法或 Morgensten-Price 法。然 而隨著數值分析方法的顯著進步,國內外已有許 多數值分析方法諸如:有限元素法 (FEM)、有限 差分法 (FDM)、邊界元素法 (BEM)、分離元素 法 (DEM) 與不連續變形分析法 (DDA)等被廣 泛地應用於邊坡穩定分析問題。

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。傳統方 法分析時若欲考量降雨入滲影響,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。因此,近年來國際間小尺度降雨誘發崩 場分析之重要研究主題,多朝向探討如何整合降 雨入滲、地下水滲流及邊坡穩定等程序進行耦合 分析 (Coupled Analysis) (Bozzano et al., 2002; Blatz et al., 2004; Cascini et al., 2006; Guzzetti, 2008; 鄧鳳儀, 2008;林德貴等, 2008; 鍾明劍 等, 2009; 王金山等, 2009)。

除上述研究外,中興工程顧問社於執行經濟 部中央地質調查所委託之集水區水文地質對坡地 穩定性影響之調查評估計畫期間,採用 GeoStudio 程式並結合各坡地獨特之水文、地質 與水文地質特性,成功建立多個邊坡從降雨、入 滲引致地下水位變化,進而導致邊坡失穩之潛勢 評估模式 (財團法人中興工程顧問社, 2008~2009)。整體而言,該研究建立之潛勢評估 模式可進行降雨入滲、地下水滲流及邊坡穩定性 (Infiltration-Seepage-Slope Stability) 之耦合分 析,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。截至目前為止,中興社團 隊已於全台山區累積 12 處崩塌地之小尺度降雨 誘發崩塌分析案例研究,成果經驗證後已確立本 研究模式之可行性。

基於上述實際案例成功之應用經驗,本文將 介紹可考量降雨入滲、地下水滲流及邊坡穩定性 之耦合分析模式,採用 GeoStudio 程式對實際案 例進行小尺度降雨誘發崩塌分析。

三、研究方法之理論背景

(一) 大尺度降雨促崩潛勢分析模式

本文所採用之 TRIGRS 程式為 USGS 發展之 暫態降雨入滲邊坡網格穩定分析模式。TRIGRS 模式乃基於 Iverson (2000)研究成果發展而來, 旨在求解區域內各無限邊坡網格在降雨入滲條件 下邊坡單元之安全係數隨孔隙水壓之變化情形。

模式首先將集水區離散成眾多邊坡單元之組

工程技術

合,而各邊坡單元之初始地下水位、幾何特性 (如坡度、風化土層厚度)、水力特性 (如地表入 滲率、透水係數、擴散係數)、力學參數 (如剪力 強度參數等) 及降雨強度等參數值均可隨空間或 時間設定為不同之分布型態,再透過求解未飽和 流動方程式 (Richards Equation) 評估降雨入滲期 間坡地內孔隙水壓 (或含水量) 之變化,即:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\varphi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right]$$
(1)

式(1)中, φ 為地下水壓力水頭, θ 為含水 量,t為時間, $x \land y \land z$ 分別為三個直角座標 方向, α 為坡角, $K_x \land K_y \land K_z$ 分別為 $x \land$ $y \land z$ 三方向之透水係數。

待求得暫態地下水位分布後,結合極限平衡 理論即可求得各邊坡網格於此降雨入滲期間安全 係數之變化。TRIGRS 模式求解暫態地下水水頭 變化可由下列公式表示 (Baum et al., 2002),即:

 $\varphi(Z,t) = \left[Z - d_Z\right]\beta$



式(2)中, φ 為地下水壓力水頭,Z軸垂直向 下為正,t為時間,等式右邊第一項[$Z - d_z$] β 為 穩態時之地下水壓力水頭分布,其餘項為暫態地 下水壓力水頭分布。 $Z = z/\cos\alpha$,z為垂直坡面 方向、 α 為坡角, d_z 為穩態地下水位之深度, d_{LZ} 為不透水邊界沿Z軸方向之深度, $\beta = \lambda \cos \alpha$, $\lambda = \cos \alpha - (I_z/K_z)_{LT}$:沿Z軸方 向之長期穩態地表流通量, K_z 為沿Z軸方向之 飽和水力傳導度, I_z 為沿Z軸方向之穩態入滲 率, I_{nz} 為降雨期間各延時區間之降雨強度, $D_1 = D_0 \cos^2 \alpha$, D_0 為飽和水力擴散係數, N為 總區間數目, H(x)為 Heavyside 步階函數, *ierfc*(η)為互補誤差函數。m < 1表示均質無限 邊坡、 $m \ge 1$ 表示有限深度內存在相對不透水基 岩。

再透過極限平衡法之無限邊坡穩定性分析理 論,代入坡角α、土與水之單位重γ_s,γ_w、暫態 地下水壓力水頭φ(Z,t)及風化土壤剪力強度參數 c與φ後,解得各網格單元之崩塌安全係數為:

$$F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} + \frac{c - \varphi(Z, t)\gamma_w \tan\phi}{\gamma_s Z \sin\alpha \cos\alpha} \dots (3)$$

此外,TRIGRS 模式又針對 Iverson (2000) 之研究成果增加了下列條件限制,以確保入滲期 間地下水位不致高出地表,即:

 $\varphi(Z,t) \le Z\beta \tag{4}$

透過式(2)至式(4)即可獲得降雨入滲期間各 邊坡單元網格之暫態地下水位變動。待求得暫態 地下水位分布後,再結合極限平衡法之無限邊坡 理論,計算邊坡單元之安全係數即可求得各邊坡 單元網格於此降雨入滲期間穩定性之變化,其原 理如圖1所示。



圖 1 TRIGRS 分析原理示意圖 (Iverson, 2000)

(二) 小尺度降雨誘發崩塌分析模式

本文所採 GeoStudio 為二維有限元素之商用 套裝軟體,內建多個套件,可視問題需求選用。 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

本文所採 SEEP/W 模組係透過式(5)之控制方 程式求解二維非均向及非均質地下水滲流問題。

 $\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial H}{\partial y}\right) + Q = \frac{\partial\theta}{\partial t}$(5)

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、 θ 為體 積含水量、*t*為時間。式(5)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 σ 為總應力(Total Stress); u_a 為孔 隊氣壓力(Pore-Air Pressure); u_a 為孔際水壓 力(Pore-Water Pressure); u_a 為孔際水壓 方(Pore-Water Pressure); u_a 為孔際水壓 方(方可改寫為式(6)。

式(6)中 m_w 為土壤水分特性曲線之斜率、 r_w 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

本文所採 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(7)。

 $\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'$ (7)

式(7)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 隊水壓力。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(7)可 改寫為式(8)。

 $\tau = c' + (\sigma_n - \sigma_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \dots (8)$

式(8)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。

四、案例研究

2009 年 8 月份的莫拉克颱風事件不僅在南 台灣造成嚴重水患,連日豪大雨更誘發許多大型 山崩與土石流災害,造成重大傷亡及經濟損失。 根據行政院災害防救委員會中央災害應變中心於 2009 年 9 月 8 日發布「莫拉克颱風災害應變處置 報告第 74 報」之統計資料顯示,已造成超過 600 人罹難、254 處道路災害及超過 164 億元的農林 漁牧產物及民間設施災情損失。其中,最受矚目 之山崩災情莫過於高雄縣甲仙鄉小林村災變,幾 近滅村的慘劇令國人震驚。

然而小林村並非莫拉克颱風唯一引致的崩塌 案例,根據統計資料(地質,2009)顯示:莫拉 克災前山崩數量約23,700個,山崩面積約19,446 公頃;風災後山崩數量增加到約45,100個,數量 接近風災前的2倍,山崩面積也達56,353公頃, 幾乎是災前崩塌面積的3倍。

因莫拉克事件新增山崩中斷許多主要聯外道 路及危及眾多聚落安全,災後許多相關單位召集 國內學者開始針對山區原住民居住地進行災後安 評工作。其中,陳宏宇和林銘郎(2009)統計 64 個村落中,即有 33 個村落屬於「不安全」的狀 況、10 個村落屬於「條件性」的安全、21 個村 落屬於「安全」的狀況。調查成果凸顯出偏遠山 區聚落安危及防救災機制受降雨促崩事件影響之 嚴重性,針對國土進行全面性的降雨誘發山崩之 潛勢評估工作實在刻不容緩。

有鑑於此,本文以莫拉克颱風事件受創極為 嚴重的高屏溪流域為例,進行大尺度降雨促崩潛 勢評估,先求得集水區內所有邊坡單元之降雨促 崩潛勢分布後,再舉集水區內三處特定地點之邊 坡(舊藤枝部落、吉露部落及寶隆場址)進行降 雨誘發崩塌潛勢評估,並與三處之現勘、試驗與 監測成果進行比對,以驗證不同尺度分析模式整 合後之適用性及準確性。 (一) 高屏溪流域大尺度降雨促崩潛勢評估

1. 流域地質與水文概述

高屏溪流域之地層與區域性地質構造大致呈 北北東一南南西走向延伸,地形概況詳參圖 2。 由經濟部中央地質調查所之活動斷層分布圖顯 示,高屏溪流域內之主要斷層中,六龜斷層被歸 類為第二類活動斷層,旗山斷層、內英斷層、潮 州斷層、土壟灣斷層與鳳山斷層則均歸類為存疑 性活動斷層。藉由沙里仙溪斷層、眉溪斷層、土 壟灣斷層以及潮州斷層,將流域分為三個地質區 塊。位於流域北段,眉溪斷層與沙里仙溪斷層之 間所出露的地層屬於雪山山脈地質區之變質岩 層;潮州斷層與土壟灣斷層以東屬中央山脈地質 區;潮州斷層與土壟灣斷層以再屬於西部麓山帶 地質區,詳圖 3 (參考經濟部中央地質調查所 1/50,000 地質圖)。





圖 3 高屏溪流域地質圖 (改繪自中央地質調查所 1/50,000 地質圖)

由歷年雨量資料顯示高屏溪流域內各測站年 平降雨量介於 1,980 至 4,350mm 之間,年平均降 雨量分布趨勢,靠近中央山脈地區較大,平地及 沿海地區則較小。此外,該流域降雨量的時間分 布多集中在 5 至 9 月之豐水期,約佔全年雨量的 90%,主要原因為颱風及後續所帶來西南氣流的 豪雨所造成,而 8 月為單月降雨最多的月份。因 降雨之時空分布極不平均,造成流量枯豐明顯。 2. 分析參數率定及圖層建立

高屏溪流域地層分區係按經濟部中央地質調 查所之 1/50,000 地質圖 (詳圖 3),分為二十餘個 地層分區,包括潮州層、畢祿山層、長枝坑層、 南港層、廬山層...等。因現地調查、試驗及監測 之數量有限,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,本文係透過分析參數率定 手段,以確保模式分析之正確性及準確度。 參數率定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 方式係透過模式分析所得崩塌網格位置與暴雨事 件誘發崩塌之山崩目錄進行比對,並透過誤差矩 陣法量化模式分析之正確性。本文根據過去研究 區域內各岩層之既有參數資料庫,並透過多次降 雨促崩事件之山崩目錄率定後,可獲得相關參數 代表值,茲摘錄各地質分區風化土層之相關參數 如表1所示(財團法人中興工程顧問社,2009)。

地質分區	γ_t	с	ϕ	K	D	Iz
	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	10 ⁻⁶ (m/sec)	10 ⁻⁴ (m ² /sec)	10 ⁻⁸ (m/sec)
沖積層	16.5~19.5	2.5~3.5	23.1~32	25~29	75~88	25~29
階地堆積層	19.5~23	2.3~3.5	23~28	0.63~0.74	1.8~2.2	0.63~0.74
六龜層	20.4~24	0.8~1.7	28~34	0.5~0.58	1.5~1.7	0.5~0.58
紅水坑礫岩	19.8~22	2~2.6	30~34	0.1~0.11	0.3~0.33	0.1~0.11
大社層	22.8~24	0.8~0.9	26~28	0.05	0.15	0.05
嶺口礫岩	21.2~25	2.1~2.8	33.1~39	0.18~0.21	0.54~0.63	0.18~0.21
古亭坑層	20.4~22.8	0.3~0.5	26~29	0.05	0.15~0.17	0.05
鹽水坑頁岩	22.1~26	3.3~5.1	21~25	0.07~0.08	0.21~0.24	0.07~0.08
隘寮腳層	22.1~26	0.4~0.6	30~35	0.2~0.23	0.6~0.7	0.2~0.23
南勢崙砂岩	22.6~26.6	0.3~0.4	28~33	0.50~0.58	1.5~1.7	0.5~0.8
烏山層	22.1~26.1	0.6~0.8	30~36	0.1~0.12	0.3~0.35	0.1~0.12
蓋仔寮頁岩	22.7~26.8	7.4~12.1	25~30	0.05~0.06	0.15~0.17	0.05~0.06

註1:分析參數是以地層分區之表層風化層為主。

註 2:僅摘錄部分地層,詳見中興工程顧問社(2009)成果。

3. 分析颱風事件

本文於莫拉克颱風期間,蒐集包括尾寮山、 小關山等 46 個雨量站之時雨量資料做為促崩因 子。舉研究區域內之尾寮山雨量站為例,莫拉克 颱風期間所量測到之時雨量雨柱圖如圖 4 所示, 總累積雨量達 2,701mm,為研究區域內最大降雨 量。至於流域內各站所測得之降雨強度則又隨降 雨延時而異,以莫拉克颱風降雨尖峰期間之雨量 空間分布為例,高屏溪流域於特定時間之雨量分 布如圖 5 所示 (本文採徐昇氏多邊形法表現各雨 量站測值之差異)。上述降雨時空分布差異均已納 入大尺度降雨促崩潛勢分析模式之考量與評估。

7



4. 模式率定與成效驗證

在建立降雨促崩潛勢分析模式時,主要透過 反算方式率定研究範圍各分區之力學參數及水文 地質參數。分析結果須與現地實際發生崩塌之區 域進行比對,以瞭解模式分析之準確度。本文採 桃芝颱風、敏督利颱風及海棠颱風等三場降雨促 崩事件之山崩目錄進行模式率定與驗證工作。

茲以桃芝颱風事件率定為例 (見圖 6),黑色

區塊為崩塌地範圍,約有 3,874 處。分析其崩塌 與非崩塌之網格數 (見表 2),透過誤差矩陣法 (定義詳見表 2)可量化其山崩正確率為 78.2%、 非山崩正確率 90.4%、總正確率 90.3%。同理, 可獲得敏督利颱風率定之山崩正確率為 76.2%、 非山崩正確率 90.2%、總正確率 89.9%;海棠颱 風驗證模式之山崩正確率為 66.1%、非山崩正確 率 87.6%、總正確率 87.4%。驗證本模式經率定 後之正確性及準確度均在工程可接受之範圍內。



圖 6 高屏溪流域模式率定結果與 桃芝颱風山崩目錄之套疊比對

總網格數		模式預測結果(網格數統計)				
2, 074, 053		(FS≦1)	(FS>1)			
實 際 狀 況	口話曲	21, 208	5, 916			
		(N1)	(N2)			
	1:54	195, 999	1, 850, 930			
	ヲF月月上羽	(N ₃)	(N4)			
山崩正確率為 78.2%、非山崩正確率為 90.4%						
總正確率為 90.3%						

註:山崩正確率定義為 Nı/(Nı+N₂) 非山崩正確率定義為 N₄/(N₃+N₄) 總正確率定義為(Nı+N₄)/(Nı+N₂+N₃+N₄)

8

5. 高屏溪流域大尺度降雨促崩潛勢評估成果

透過前述完成率定及驗證之模式,可進一步 求得高屏溪流域在特定降雨條件下之降雨促崩潛 勢分布如圖 7 所示 (本文以 200 年重現期一日累 積雨量為例)。參考內政部 (2001) 頒布之建築物 基礎構造設計規範針對路堤邊坡之安全係數分 界,將分析結果劃分出高潛勢、中高潛勢、中潛 勢及低潛勢四級等區域。其中,安全係數小於 1.0 之範圍定義為高潛勢區;安全係數介於 1.0~1.2 定義為中高潛勢區;安全係數介於 1.2~1.5 定義為中潛勢區;安全係數大於 1.5 之範 圍定義為低潛勢區。



圖 / 局併溪流域 200 中里現期一日素慎雨重 之降雨促崩潛勢分布圖

應用上述程序可求得各集水區內不同降雨條 件下之崩塌潛勢分布圖,若套繪交通路線或重要 聚落所在地圖層,即可快速研判交通要衝或重要 聚落之崩塌潛勢等級,找出具高崩塌潛勢之危險 聚落進行細部評估,提早因應以達防災、減災之 效。 (二) 高屏溪流域小尺度降雨誘發崩塌潛勢評估

由大尺度降雨促崩潛勢評估成果(如圖 7 所 示)找出具崩塌潛勢之危險聚落後,可更細緻地 模擬單一邊坡因降雨入滲引致地下水滲流及水位 變動,進而導致邊坡位移或滑動之行為。茲舉本 研究曾進行調查與監測且落於初步評估為高潛勢 等級之舊藤枝部落為例說明如后。

1. 背景概述

舊藤枝部落位於高雄縣桃源鄉寶山村(藤枝 林道 20km 處),鄰近藤枝國家森林遊樂區。此區 地質屬樟山層下段,岩層以深灰色硬頁岩與板岩 為主,間夾透鏡狀變質砂岩或輕微變質之薄砂頁 岩互層。

圖 8 為藤枝地區之大尺度降雨促崩潛勢評估 成果 (摘錄自圖 7),舊藤枝部落內邊坡單元多位 於高潛勢或中高潛勢範圍。現勘成果顯示莫拉克 颱風後,藤枝林道沿線多處崩塌,舊藤枝部落所 在地除原先張裂縫再度張裂外,道路沿線商家均 往下邊坡滑動,下滑深度約一層樓高,且隨處可 見顯著張裂縫 (見圖 9)。舊藤枝部落之降雨促崩 潛勢分析成果在莫拉克颱風事件中可獲初步驗 證。



圖 8 藤枝地區降雨促崩潛勢分布圖



圖 9 莫拉克颱風災後舊藤枝部落商店街下陷

2. 地形、地質與水文概述

舊藤枝部落所在地主要地勢屬東北高西南 低,坡面朝西南,坡度約 35°,屬邦腹北溪流 域,最高海拔約 1,565m。此區所屬地層為中新世 樟山層下段,以深灰色硬頁岩與板岩為主,間夾 透鏡狀變質砂岩,或輕微變質之薄砂頁岩互層。 由鑽探岩心可判釋其岩性以黑灰色板岩為主,局 部沿節理或劈理面有石英脈或石英基質充填。

根據中央氣象局所設阿禮雨量站之統計結果 顯示,1979~2008 間之年雨量約 3,277mm,雨量 主要集中於 5~9 月間,合佔年降雨量的 84.3%; 11 月至翌年 3 月為乾季,降雨量僅佔全年 7.3%。當地雨季之降雨主要集中在颱風帶來之豪 雨佔多數,此種短期集中降雨型態最易產生坡地 災害。

3. 前期調查及監測成果

中興工程顧問社 (2009) 於舊藤枝部落執行 一系列之調查與監測工作,調查工作包含有地質 鑽探 (計 5 孔,鑽探總進尺達 350m)、莫拉克颱 風前後之地表地質調查、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,同步於此地區進行降雨 量、地下水位、地中水平變形及地表變形等監測 工作,相關配置如圖 10 所示。



工.

程

技

術

圖 10 舊藤枝部落前期調查及監測配置圖 (中興工程顧問社, 2009)

4. 水文地質概念模型

舊藤枝地區的數值地形係採 5m×5m DEM 數值資料建置而成,分析時所選用之剖面線即為 圖 10 中之 AA'線,此分析剖面始自頂部稜線經 FH-11、FH-13、FH-15 等鑽孔至底部邦腹北溪為 止。透過 Surfer 或 ArcGIS 程式可建立 AA'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。研究 區域之水文地質單元可分為崩積層、風化岩層及 基盤岩層等三層,其水文地質概念模型剖面如圖



圖 11 舊藤枝部落水文地質概念模型剖面圖

進行降雨入滲及滲流分析時,將左側邊界 (SS')設定為定水頭邊界,其值等於坡趾處邦腹 北溪的水位高程;右側邊界(RR')則設定為定水 頭邊界,其值參考 FH-11 觀測井水位紀錄;模型 底部 (S'R') 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假設 降雨條件或監測所得之降雨量。

5. 降雨誘發崩塌潛勢評估及驗證

為說明及驗證本文所採分析模式之程序及適 用性,本文採 2009/7/20 至 2009/8/24 間之現地監 測資料進行分析與驗證 (涵蓋莫拉克颱風事件), 降雨資料如圖 12(a)所示。



圖 12 舊藤枝部落降雨誘發崩塌潛勢評估成果

圖 12(b)為 FH-11 觀測井水位紀錄,監測資 料顯示莫拉克颱風前之地下水位約於地表下 54~55m (設定為常時水位),2009/8/9 後之監測資 料則因該區地層滑動而有漏失,惟分析成果顯示 此模擬分析結果與監測資料相當一致,驗證本模 式可大致掌握莫拉克颱風前半段期間水位抬升行 為。

圖 12(c)為 FH-15 觀測井水位紀錄,監測資 料顯示莫拉克颱風前之地下水位約於地表下 55~56m (設定為常時水位),而其監測紀錄僅至 2009/8/9 為止,分析成果與監測資料相當一致,驗證本模式可大致掌握莫拉克颱風前半段期間水 位抬升行為。

將前述不同時階下水位變動成果套入邊坡穩 定分析,可得舊藤枝部落於颱風前之常時安全係 數為 1.388,其最小安全係數之滑動塊體位於下 邊坡處且滑動弧約切過崩積層與基盤岩層交界 面,研判舊藤枝部落常時處於穩定狀態。而莫拉 克颱風期間,舊藤枝部落之安全係數變化可見圖 12(d)。結果顯示舊藤枝部落在莫拉克颱風期間之 安全係數於 2009/8/6 自 1.388 開始降低,2009/8/9 之安全係數降至 0.993 時達到破壞條件。圖 13 為 舊藤枝部落達破壞條件時之穩定性分析成果,分 析所得滑動塊體為下邊坡至坡趾處,滑動深度最 深可達崩積層與風化岩層交界面。



圖13 售滕枝部落於臭拉克颱風期間之 穩定性評估

(三) 不同崩塌潛勢等級之案例驗證

除前述研判屬高崩塌潛勢之舊藤枝部落外, 本文另舉中高崩塌潛勢之吉露部落及低崩塌潛勢 之寶隆場址為例,透過實際崩塌狀況進行模式驗 證及比對,茲分述如后。

1. 中高崩塌潛勢案例: 吉露部落

吉露部落位於台 24 線 46km 處下方,行政 上隸屬於屏東縣霧台鄉吉露村,部落居民以魯凱 族為主。圖 14 為吉露地區之大尺度降雨促崩潛 勢圖 (摘錄自圖 7),顯示部落下邊坡位於中高潛 勢範圍,上邊坡則位於中至低潛勢範圍。

莫拉克災後現勘成果顯示,部落西側及南側 皆有大型岩屑崩滑,造成聯外道路(台 24 線)完 全中斷。部落內自上邊坡至下邊坡皆有張力裂縫 產生,下邊坡則因溪溝坡趾侵蝕,直接崩滑(見 圖 15)。顯示吉露部落之大尺度降雨促崩潛勢評 估成果在莫拉克颱風事件中獲得初步驗證。



圖 14 吉露地區降雨促崩潛勢分布圖



圖 15 莫拉克颱風災後吉露地區空拍影像 (李彥良拍攝,2009.08)

2. 低崩塌潛勢案例:寶隆場址

寶隆場址位於高雄縣甲仙鄉寶隆村匏子寮南 緣,主要通達道路為縣道高 128 線。圖 16 為寶 隆地區之大尺度降雨促崩潛勢圖(摘錄自圖 7), 顯示寶隆場址內多數邊坡單元位於低潛勢範圍, 少數位於中潛勢範圍。

莫拉克災後現勘成果顯示,寶隆場址西側產 生兩處小規模之岩屑崩滑,坡趾處則因溪溝侵蝕 而產生崩滑(見圖 17),對岸產業道路更因路基 塌陷而成階梯狀破壞。寶隆場址之大尺度降雨促 崩潛勢分析成果在莫拉克颱風事件中可獲得初步 驗證。



圖 16 寶隆地區降雨促崩潛勢分布圖



圖 17 莫拉克颱風後寶隆場址坡趾處局部崩滑

五、結論與建議

根據前述研究成果可歸納以下結論與建議:

本文嘗試整合不同尺度分析模式於崩塌潛勢評 估之應用,可獲得集水區整體降雨促崩潛勢之 時空分布及特定邊坡受降雨誘發崩塌之穩定性 評估成果,可供相關單位訂定後續防、減災措 施以及研擬保全策略之參考。

- 本文採 TRIGRS 模式進行大尺度降雨促崩潛勢 評估,透過多場降雨促崩事件進行模式率定與 驗證,其山崩及非山崩之平均正確率普遍可達 75%以上。另透過舊藤枝部落、吉露部落及寶 隆場址等不同崩塌潛勢驗證實例,均獲良好的 驗證,顯示模式具良好成效,惟缺點為尚無法 考量混合型的漸進式破壞模式。
- 本文採 GeoStudio 進行小尺度降雨誘發崩塌潛 勢評估,透過舊藤枝部落案例探討證實此模式 可有效評估邊坡內地下水位及安全係數隨降雨 歷時之變化狀況。此模式可針對局部特定地區 進行細部之崩塌潛勢與變遷評估。
- 本文成果可應用於迅速研判特定降雨條件下具 高崩塌潛勢之交通要衝及危險聚落,並可進一 步模擬危險區域所處邊坡因降雨入滲引致地下 水滲流及水位變動,進而導致邊坡位移或滑動 之行為,相關變動量值可提供後續防災相關單 位於處置或整治設計時之參考。

誌 謝

感謝經濟部中央地質調查所提供計畫經費及 技術協助得使本文順利完成,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 顧問社的工作同仁,亦一併感謝諸位對此研究之 付出與努力。

參考文獻

- 財團法人中興工程顧問社 (2008~2009) 易淹水地區上游 集水區地質調查及資料庫建置-集水區水文地質對坡 地穩定性影響之調查評估計畫,計畫成果報告,經濟 部中央地質調查所研究報告
- Iverson, R. M. (2000) Landslide Triggering by Rain Infiltration, Water Resour Res., 36(7), pp. 1897-1910
- Baum, R. L., Savage, W. Z., and Godt J. W. (2002) TRIGRS -A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability Analysis, U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424
- Godt, J. W. (2004) Observed and Modeled Conditions for Shallow Landsliding in the Seattle, Washington Area,

Ph.D. Dissertation, University of Colorado

- Chen, C. Y., Chen, T. C., Yu, F. C., and Lin, S. C. (2005) Analysis of Time-varying Rainfall Infiltration Induced Landslide, Environmental Geology, 48, pp. 466-479
- Salciarini, D., Godt, J. W., Savage, W. Z., Conversini, P., Baum, R. L., and Michael, J. A. (2006) Modeling Regional Initiation of Rainfall-induced Shallow Landslides in the Eastern Umbria Region of Central Italy, Landslides, 3, pp. 181-194
- 譚志豪、陳嬑璇、顧承宇、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、 費立沅 (2008)降雨誘發山崩災害之預警系統初步研 究」,2008流域地質與坡地災害研討會,台北,台灣
- 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
- Bozzano, F., Cherubini, C., Floris, M., Lupo, M., and Paccapelo, F. (2002) Landslide Phenomena in the Area of Pomarico (Basilicata–Italy): Methods for Modeling and Monitoring, Physics and Chemistry of the Earth, 27(36), pp. 1601-1607
- Blatz, J. A., Ferreira, N. J., and Graham, J. (2004) Effects of Near-Surface Environmental Conditions on Instability of an Unsaturated Soil Slope, Canadian Geotechnical Journal, 41, pp. 1111-1126
- Cascini, L., Gulla, G., and Sorbino, G. (2006) Groundwater Modeling of a Weathered Gneissic Cover, Canadian Geotechnical Journal, 43, pp. 1153-1166
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2008) The Rainfall Intensity-duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows: An Update, Landslides, 5(1), pp. 3-17
- 鄧鳳儀 (2008) 湖口崩塌地水文地質數值模型回饋分析研究,國立中央大學應用地質研究所論文
- 林德貴、張國欽、蘇苗彬 (2008) 颱風降雨期間梨山地滑 區邊坡穩定性之數值評估,中華水土保持學報,第 39 卷,第1期,第 57-81頁
- 鍾明劍、王金山、林金成、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、 費立沅 (2009) 颱風引致山崩之調查、監測與模式分 析,2009 流域地質與坡地災害研討會,台北,台灣
- 王金山、鍾明劍、譚志豪、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、 費立沅 (2009) 颱風事件引致崩塌地滑動之研究-以萬 大崩塌地為例,第13 屆大地工程研討會,宜蘭,台灣
- 行政院災害防救委員會中央災害應變中心 (2009) 莫拉克 颱風災害應變處置報告,第74報
- 地質專題 (2009) 災情紀錄,地質,第 28 卷,第 4 期, 第 55 頁
- 陳宏宇、林銘郎(2009)山區原住民居住地在莫拉克風災後的初步安全評估工作,地質,第28卷,第4期,第 68-73頁
- 內政部營建署 (2001) 建築物基礎構造設計規範,內政部 營建署