

極端降雨事件下崩塌潛勢衝擊評估分析

施虹如 吳亭燁 蘇元風 *李欣芳 李欣輯 陳永明

行政法人國家災害防救科技中心

*國立台北教育大學社會與區域發展學系

摘 要

近年來由於全球氣候異常，極端降雨現象更趨明顯，其所誘發的災害事件更是引發國際間高度的關注，像是 2009 年莫拉克颱風於台灣併發多起複合性災害、2011 年韓國的豪雨事件造成牛眠山泥石流災害、以及 2012 年日本颱風 12 號在紀伊半島引發的土砂災害等，皆造成嚴重坡地災害。而另一方面，根據研究顯示極端降雨的頻率和強度在世紀末的情境下將較現在更為嚴重，因此極端氣候條件對於坡地災害的影響，便成為必須關注且相當重要的議題。本研究從集水區尺度來探討氣候變遷極端事件情境下，崩塌災害範圍及可能影響程度，並以莫拉克颱風作為驗證案例。首先，選取曾文水庫上游集水區作為研究區域，應用美國地質調查所(USGS)所發展的 TRIGRS(Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model)淺層崩塌物理模式來進行崩塌災害分析；極端降雨事件的設定則是採用臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(TCCIP)所提供之動力降尺度資料經過偏差校正後基期(1979-2003 年)及世紀末(2075-2099 年)於曾文水庫上游集水區，分別以累積降雨量最大的一場極端降雨事件來模擬所造成崩塌潛勢分布情形。另外，本研究分別比較以全區分布最廣的長枝坑層作為單一參數分區代表，以及全區 12 類流域地質種類做為多地質參數分區之依據來進行崩塌潛勢模擬。結果顯示，相較於單一地質分區所模擬出來的崩塌潛勢，經歷年崩塌圖層進行套疊後發現，有明顯高估且不易區分崩塌區位的狀態，認為以單一地質分區並不足以表現出整體水文地質特性；而由多地質分區所模擬出來的崩塌潛勢則較能詮釋整體水文地質特性，將其模擬結果與歷年崩塌圖層進行套疊後，模式正確率之評估皆有不錯的成果，可作為後續極端降雨事件之模擬依據。而利用多地質分區所校驗完的參數去代入莫拉克颱風降雨事件模擬結果顯示，模式推估進入水庫土砂量約 1 億 3 千萬立方公尺，而滯留於坡面土砂量約 1 億立方公尺，與莫拉克颱風後崩塌所產生進入水庫之土砂量相近。比較基期 TOP1 降雨事件及世紀末 TOP1 降雨事件所造成的崩塌潛勢及推估可能造成的崩塌量，結果顯示世紀末 TOP1 降雨事件所誘發的崩塌區位及崩塌量，相較於基期 TOP1 降雨事件有增強之趨勢。

關鍵字：淺層崩塌、TRIGRS、動力降尺度、崩塌區位、崩塌潛勢分析

一、前言

近年來由於全球氣候異常，極端降雨現象更趨明顯，其所誘發的災害事件更是引發國際間高度的關注，像是 2009 年莫拉克颱風於台灣併發多起複合性災害、2011 年韓國的豪雨事件造成牛眠山泥石流災害、以及 2012 年日本颱風 12 號在紀伊半島引發的土砂災害等，皆造成嚴重坡地災害。而另一方面，根據研究顯示極端降雨的頻率和強度在世紀末的情境下將較現在更為嚴重，因此極端氣候條件對於坡地災害的影響，便成

為必須關注且相當重要的議題。本研究從集水區尺度來探討氣候變遷極端事件情境下，崩塌災害範圍及可能影響程度，並以莫拉克颱風作為驗證案例。選取曾文水庫上游集水區作為研究區域，應用美國地質調查所(USGS)所發展的 TRIGRS(Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model)淺層崩塌物理模式來進行崩塌災害分析；極端降雨事件的設定則是採用臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(TCCIP)所提供之動力降尺度資料經過偏差校正後基期(1979-2003 年)及世紀末(2075-2099 年)於曾

文水庫上游集水區，分別以累積降雨量最大的一場極端降雨事件來模擬所造成崩塌潛勢分布情形。另外，本研究分別比較以全區分布最廣的長枝坑層作為單一參數分區代表，以及全區 12 類流域地質種類做為多地質參數分區之依據來進行崩塌潛勢模擬及推估可能的崩塌量。

二、研究方法

(一)模式簡介

本研究乃應用美國地質調查所(USGS)所發展的 TRIGRS(Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model)淺層崩塌物理模式，其以網格為單位，並考慮暫態降雨所造成水分入滲於淺層表土影響邊坡穩定性之分析。其降雨入滲機制來自於 Iverson(2000)所提出的理查方程式之線性解來進行延伸，並結合無限邊坡理論(Infinite slope stability analysis)去計算該邊坡的穩定性(如式 1)，其可根據不同研究區域的土壤及水文特性，給予各種地質水文參數的輸入，模擬逐時降雨入滲及孔隙水壓上升的變化(Baum et al., 2008)。而透過 TRIGRS 模擬降雨前後，研究該地區坡面的安全係數變化情況，可透過安全係數值門檻設定來找到可能誘發崩塌發生之區位及推估可能造成的崩塌量。本研究在此以安全係數值小於 1.0 做為邊坡發生崩塌的門檻值，由於崩塌土砂從坡面上並非全數運移至主河道內，為簡化計算過程，因此根據文獻訂立研究試區之泥沙遞移率，作為推估進入主河道的崩塌量之依據。

FS

$$= \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + \frac{C' - \psi \gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s d_{lb} \cos \alpha \sin \alpha} \quad \text{式(1)}$$

其中， ϕ' 為土壤摩擦角； C' 為有效凝聚力； γ_w 、 γ_s 為水及土壤的單位重； ψ 則代表不同時間 t 在 Z 深度下的孔隙水壓狀態。而根據鐘欣翰(2008)及尹立中(2013)於研究中指出 TRIGRS 模式限制有：(1) 假設土壤處於飽和或近飽和狀態，且屬同質等向性土壤，對於非同質、異向性或乾枯的土壤都可能導致最後的解析有誤；(2) 模式對於參數的起始條件非常敏感；(3) 若降雨強度大於土壤的水力傳導係數，無法入滲至土壤的雨量，則會沿著邊坡表面逕流而下，雖然 TRIGRS

利用簡單的方法去尋找地表逕流路徑及流量，但並未考慮逕流的蒸發量；(4) 模式允許網格之間有不同的水力擴散速率及水力傳導係數，故網格與網格之間可能會因為相異的水文特性，導致在鄰近邊界的位置引起不均衡的側向力及非平面的破壞；(5) 由於 TRIGRS 模式是架構在無限邊坡穩定分析之下，因此，該模式假設邊坡發生滑動時是以平移型滑動為主。倘若現地發生非平移型滑動時，TRIGRS 模式所計算出來的邊坡安全係數將小於其他的穩定分析模式。

(二)研究區域概述

本研究試區範圍為曾文水庫上游集水區(圖 1)，主流發源於嘉義縣阿里山鄉的東水山，主要河川長度約為 56.2 公里，流經嘉義縣與台南縣交界間後進入曾文水庫，主流總長度約 213 公里。該區主要災害類型包括崩塌以及土石流災害，歷年災害事件包括 2006 年 0609 豪雨事件，造成坡面崩塌，崩塌土石阻絕交通要道以及橋樑、以及 2009 莫拉克颱風，造成舊有崩塌面積跨大、以及大量土石流出進入主河道，並流入曾文水庫內。

而根據地質調查所提供流域地質分布(圖 2)，於曾文水庫上游集水區包括了三民頁岩、北寮頁岩、南莊層、沖積層、竹頭崎層、糖恩山砂岩、紅花子層、茅埔頁岩、長枝坑層、階地堆積層、隘寮腳層及鹽水坑頁岩，其中又以長枝坑層分布最廣。

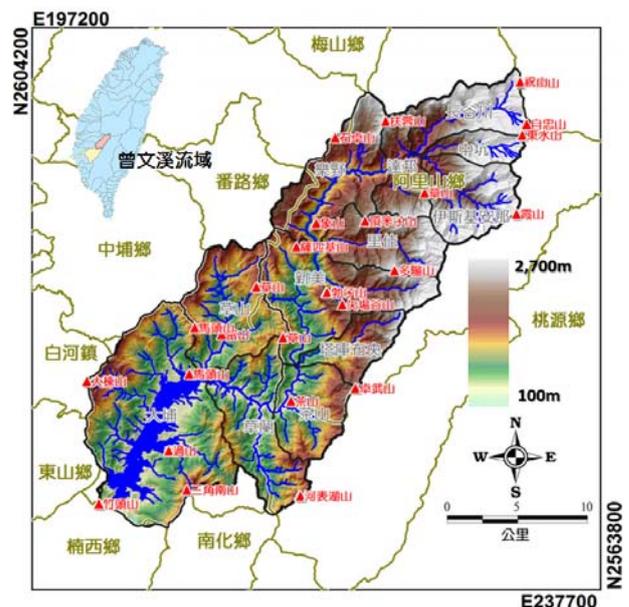


圖 1、曾文水庫上游集水區地理位置

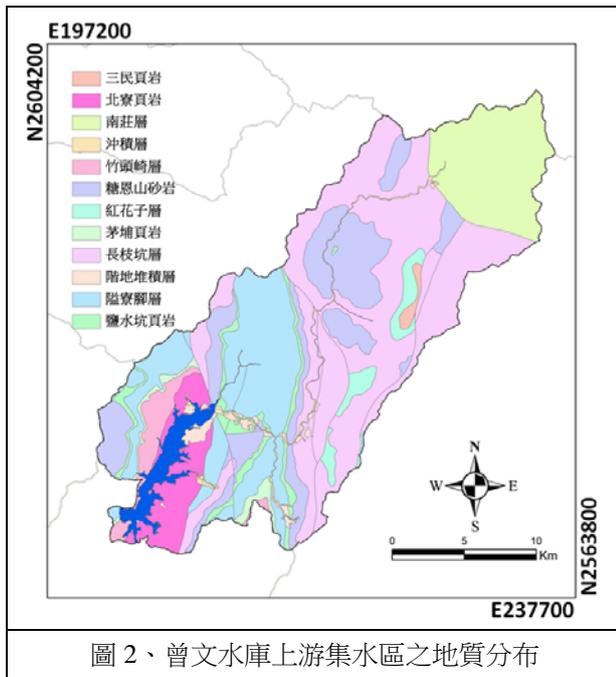


圖 2、曾文水庫上游集水區之地質分布

(三) 模式正確率評估方法

為了評估模式於參數率定及驗證後之準確性，本研究採用誤差矩陣法(error matrix method)及修正後成功率(modified success rate, MSR)作為模式校驗之工具(如表 1)，並不同於以往採用網格數量方式，而是以子集水區作為評估單位予以計算，套疊子集水區分布、該場歷史崩塌圖層與該場降雨事件所模擬出的結果來進行模式正確率評估計算(圖 3)，訂定 MSR 值達到 70% 為模式修正後成功率之判斷準則，若 MSR 達 70% 以上則進入模式驗證程序(陳則佑, 2011)，反之則重新調整水文地質參數，以得到最佳模式參數之率定結果。本研究根據坡地災害資料庫中挑選了四場颱風事件於曾文水庫上游集水區造成許多坡地災害影響的來進行率定及驗證作業，分別為 2005 年海棠颱風、2007 年柯羅莎颱風及 2008 年辛樂克颱風的降雨資料，並配合模式參數的初始設定，進行曾文水庫上游集水區之參數率定，反算出合理的水文地質參數。

表 1、誤差矩陣法及修正後成功率

| (單位：子集水區數量) | | 模式預測結果 | |
|-------------|-----|----------------|----------------|
| | | FS<1.0 | FS≥1.0 |
| 實際狀況 | 已崩塌 | N ₁ | N ₂ |
| | 未崩塌 | N ₃ | N ₄ |

| |
|--|
| 山崩正確率(SRn,%) = $N_1 / (N_1 + N_2)$ |
| 非山崩正確率(SRc,%) = $N_4 / (N_3 + N_4)$ |
| 總正確率 = $(N_1 + N_4) / (N_1 + N_2 + N_3 + N_4)$ |
| 修正後成功率指標 (MSR,%) = $(0.5 \times SRn) + (0.5 \times SRc)$ |



圖 3、模式結果校驗流程圖

(四) 參數給定

由於現地水文地質參數取得不易，本研究參考易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置計畫針對曾文河流域所建立水文地質參數資料庫，作為研究參數反算校驗之依據。模式所考慮參數包括了凝聚力、內摩擦角、土壤單位重、水力傳導係數、水力擴散係數、初始地下水位及初始入滲率外，本研究採用 40 公尺×40 公尺的數值高程模型來建立坡度、流向及土壤深度等網格資料。而作為校驗之歷年崩塌圖層乃採用林務局所提供 2004 至 2013 逐年崩塌資料為依據；土壤深度部分則參考 NCDR(2012)坡度-深度關係式經換算後可得到每個網格的深度(表 2)；地下水位深度則假設與土壤深度相同(吳佳郡, 2006、陳則佑, 2011、NCDR, 2012)。圖 3 為本研究於 TRIGRS 模式執行流程圖。

表 2、坡度與土壤深度換算表(NCDR, 2012)

| 坡度(度) | 土壤深度(公尺) |
|---------|----------|
| <20° | 1.5 |
| 20°~30° | 3.5 |
| 30°~40° | 4.5 |
| 40°~50° | 2.5 |
| >50° | 1.0 |

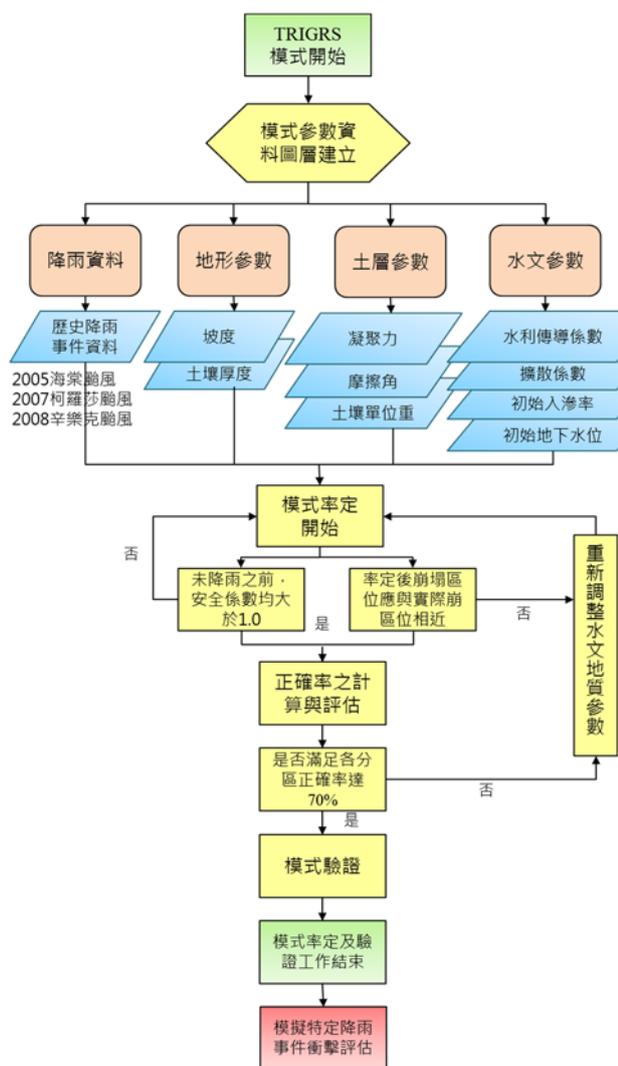


圖 4、TRIGRS 模式執行流程圖

三、結果與討論

本研究分別比較以全區分布最廣的長枝坑層作為單一參數分區代表(表 3)，以及全區 12 類流域地質種類做為多地質參數分區之依據(表 5)來進行崩塌潛勢模擬。結果顯示，相較於單一地質分區所模擬出來的崩塌潛勢，經歷年崩塌圖層進行套疊後發現，有明顯高估且不易區分崩塌區位的狀態，認為以單一地質分區並不足以表現出整體水文地質特性；而由多地質分區所模擬出來的崩塌潛勢則較能詮釋整體水文地質特性，將其模擬結果與歷年崩塌圖層進行套疊後，模式正確率之評估皆有不錯的成果(如表 4)，可作為後續極端降雨事件之模擬依據，圖 5、圖 6 為代入莫拉克颱風降雨事件所模擬推估可能的崩塌潛勢分布情形。

另外，再根據多地質分區所校驗完的參數去代入莫拉克颱風降雨事件模擬結果顯示，模式推估進入水庫土砂量約 1 億 3 千萬立方公尺，而滯留於坡面土砂量約 1 億立方公尺，與莫拉克颱風後崩塌所產生進入水庫之土砂量相近。

而從圖 7、圖 8 模擬結果可以比較基期 TOP1 降雨事件及世紀末 TOP1 降雨事件所造成的崩塌潛勢及推估可能造成的崩塌量，結果顯示世紀末 TOP1 降雨事件所誘發的崩塌區位及崩塌量，相較於基期 TOP1 降雨事件有增強之趨勢。

表 3、經率定後單一地質分區參數表(以長枝坑層為代表)

| 地層 | 土壤凝聚力 (C, N/m ²) | 土壤內摩擦角 (ϕ , degree) | 土壤單位重 (γ_s , N/m ³) | 水力擴散係數 (D ₀ , m ² /s) | 水力傳導係數 (K _s , m/s) |
|------|---------------------------------|------------------------------|--|--|----------------------------------|
| 長枝坑層 | 20000 | 28 | 24500 | 4.8e-03 | 1.6e-05 |

表 4、多地質分區下的模式正確率評估結果

| 降雨事件 | 驗證方法 | 誤差矩陣法 | | | 修正後成功率 MSR(%) |
|------|------------|-----------|----------|---------|------------------|
| | | 非山崩正確率(%) | 山崩正確率(%) | 總正確率(%) | |
| 率定組 | 2005 海棠颱風 | 68.96% | 75.00% | 70.27% | 71.98% |
| | 2007 柯羅莎颱風 | 62.96% | 80.00% | 67.56% | 71.48% |
| | 2008 辛樂克颱風 | 87.50% | 75.00% | 86.11% | 81.25% |
| 驗證組 | 2009 莫拉克颱風 | 97.05% | 66.66% | 94.59% | 81.86% |

表 5、經率定後多地質分區參數表

| 地層 | 土壤凝聚力 (C, N/m ²) | 土壤內摩擦角 (ϕ , degree) | 土壤單位重 (γ_s , N/m ³) | 水力擴散係數 (D_0 , m ² /s) | 水力傳導係數 (K_s , m/s) |
|-------|---------------------------------|------------------------------|--|--|--------------------------|
| 沖積層 | 30050 | 28.5 | 24400 | 5.00e-01 | 2.50e-03 |
| 三民頁岩 | 23000 | 27.5 | 24750 | 1.95e-02 | 6.50e-05 |
| 北寮頁岩 | 26050 | 28.5 | 24400 | 5.00e-01 | 2.50e-03 |
| 南莊層 | 18050 | 29.0 | 23500 | 3.20e-02 | 1.60e-04 |
| 竹頭崎層 | 22000 | 28.5 | 27000 | 2.14e-02 | 1.07e-04 |
| 糖恩山砂岩 | 22500 | 27.0 | 23600 | 4.85e-02 | 1.60e-04 |
| 紅花子層 | 20000 | 33.5 | 24100 | 3.25e-03 | 1.50e-05 |
| 茅埔頁岩 | 20645 | 31.5 | 23400 | 1.51e-01 | 7.57e-04 |
| 長枝坑層 | 22500 | 27.0 | 24500 | 4.85e-02 | 1.60e-04 |
| 階地堆積層 | 20000 | 27.5 | 21250 | 2.00e-02 | 6.85e-05 |
| 隘寮腳層 | 18000 | 29.5 | 24050 | 6.50e-02 | 2.15e-04 |
| 鹽水坑頁岩 | 20000 | 30.5 | 24050 | 2.25e-03 | 7.50e-04 |

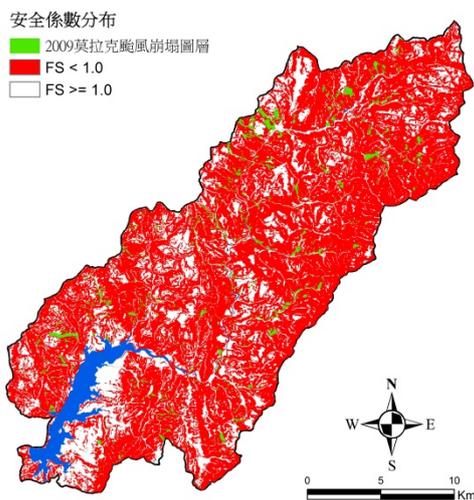


圖 5、單一地質分區模擬崩塌潛勢結果(莫拉克颱風)

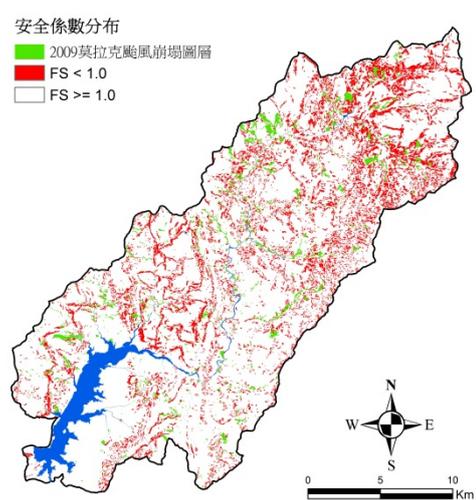


圖 6、多地質分區模擬崩塌潛勢結果(莫拉克颱風)

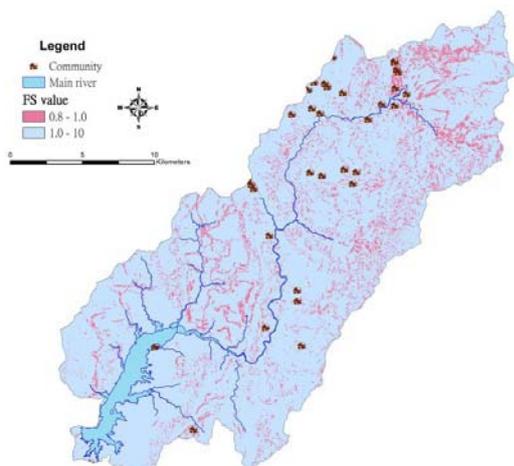


圖 7、基期 TOP1 降雨事件下模擬結果

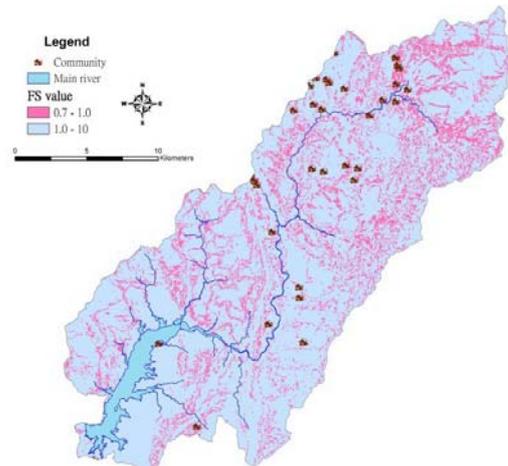


圖 8、世紀末 TOP1 降雨事件下模擬結果

四、結論

1. 透過本研究所建置的崩塌評估流程，可成功透過 TRIGRS 模式進行邊坡安全係數的計算，並且可訂定安全係數門檻值，來判定崩塌是否發生以及推估可能造成的崩塌量與崩塌區位。
2. 本研究分別比較以全區分布最廣的長枝坑層作為單一參數分區代表，以及全區 12 類流域地質種類做為多地質參數分區之依據來進行崩塌潛勢模擬。結果顯示，相較於單一地質分區所模擬出來的崩塌潛勢，經歷年崩塌圖層進行套疊後發現，有明顯高估且不易區分崩塌區位的狀態，認為以單一地質分區並不足以表現出整體水文地質特性；而由多地質分區所模擬出來的崩塌潛勢則較能詮釋整體水文地質特性，將其模擬結果與歷年崩塌圖層進行套疊後，模式正確率之評估皆有不錯的成果，可作為後續極端降雨事件之模擬依據。
3. 利用多地質分區所校驗完的參數去代入莫拉克颱風降雨事件模擬結果顯示，模式推估進入水庫土砂量約 1 億 3 千萬立方公尺，而滯留於坡面土砂量約 1 億立方公尺，與莫拉克颱風後崩塌所產生進入水庫之土砂量相近。未來可考慮由此方法進一步推估進入主河道的崩塌量，作為曾文水庫入庫土砂量之依據，評估現況及氣候變遷情境下，不同降雨型態所誘發的土砂量對於曾文水庫庫容之影響。
4. 比較基期 TOP1 降雨事件及世紀末 TOP1 降雨事件所造成的崩塌潛勢及推估可能造成的崩塌量，結果顯示世紀末 TOP1 降雨事件所誘發的崩塌區位及崩塌量，相較於基期 TOP1 降雨事件有增

強之趨勢。

參考文獻

1. Baum, R.L., Savage, W.Z., Godt, J. W. (2008), "TRIGRS – A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis Version 2.0," U.S., Geological Survey, Vol. 75 (Open-file Report 2008-1159).
2. Iverson, R.M. (2000), "Landslide triggering by rain infiltration," Water Resources Research, Vol. 36, No. 7, pp. 1897-1910.
3. 中央地質調查所，2012，易淹水地區上游集水區地質調查成果應用研究計畫（2/3）。
4. 尹立中、劉哲欣、吳亭燁，2013，降雨引致淺層崩塌物理模式分析尺度探討-以高屏溪美輪山子集水區為例，社團法人中華水土保持學會 102 年度年會。
5. 水土保持局，2006-2013，重大土石災情報告。
6. 國家災害防救科技中心（2012），「100 年坡地土砂災害衝擊評估」，國家災害防救科技中心技術報告。(NCDR 100-T36)。
7. 吳佳郡(2006)，「降雨誘發山崩之潛感分析初探」，國立暨南國際大學土木工程學系，碩士論文。
8. 陳則佑(2011)，「應用點估法與 TRIGRS 程式分析奧萬大道路邊坡之破壞機率」，國立中興大學水土保持學系，碩士論文。
9. 鍾欣翰(2008)，「考慮水文模式的地形穩定分析-以匹亞溪集水區為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。