

探討降雨強度趨勢與重現週期對未飽和 邊坡穩定之影響

Effect of Variations in Rainfall Intensity and Different Return Period Rainfall Events on Unsaturated Slope Stability

國立成功大學
資源工程學系
碩士班研究生

蔡易縉

Yi-Jin Tsai

國立成功大學
資源工程學系
助理教授

葉信富*

Hsin-Fu Yeh

摘 要

降雨型態做為邊坡安全的考量因素受到氣候變遷之影響而發生改變，本研究藉由趨勢分析以及頻率分析等水文統計方法，探討曾文水庫集水區的降雨強度變動以及不同重現週期之降雨量變化，藉此瞭解未來邊坡可能面臨之降雨情境。另外，研究中以水文分析之結果設計降雨案例，並使用水力耦合模式進行邊坡穩定性分析，討論降雨型態變遷對邊坡之影響。趨勢檢定結果顯示，曾文水庫集水區之降雨強度呈現增加之趨勢，且最大一日降雨強度變化最為明顯，每年約增加 0.08 毫米/小時。邊坡穩定分析結果則顯示，在 2016 年、2050 年及 2100 年降雨案例中，斜坡深度 2.5 公尺處土壤安全係數分別下降了 4.8%、8.1%及 12.2%，代表未來邊坡深處土壤穩定性將各易受降雨影響而降低。透過頻率分析及邊坡穩定性分析，可知重現期越長之降雨，其降雨強度較高，因此降雨入滲行為快速。研究中由斜坡處 3.0 公尺深之土壤安全係數變動，可見在 3 日降雨期間，土壤安全係數並未受 2 年重現期降雨所影響，而 10 年及 100 年重現期之降雨則使土壤安全係數分別在 48 小時與 32 小時發生明顯下降現象。而根據 2016 年臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫之調查報告，可知未來發生極端強降雨機率提高，因此未來若能取得邊坡現地資料進行此類降雨情境分析，將能提前預防邊坡災害發生或減小其危害。

關鍵詞：降雨型態，趨勢分析，頻率分析，水力耦合模式，邊坡穩定。

*通訊作者，國立成功大學資源工程學系助理教授，70101 台南市東區大學路 1 號，hfych@mail.ncku.edu.tw

ABSTRACT

Rainfall patterns considered a factor in slope stability, are affected by climate change. This study conducts a trend analysis and a rainfall frequency analysis to examine rainfall intensity variations and rainfall amount for various return periods in order to understand the rainfall pattern changes in the Zengwen reservoir catchment area in the future. Then, a coupled hydromechanical framework is used to analyze the effect of rainfall pattern changes on slope stability. The results of the trend analysis reveal an increasing trend from 1990 to 2016. The trend (slope) of the one-day rainfall events is the largest, with an average slope of 0.08 mm/h per year. The slope stability analysis results reveal that if the rainfall intensity continues to rise in the future, precipitation will more easily infiltrate the soil, decreasing stability. For rainfall in 2016, 2050, and 2100, the LFS (Local Factor of Safety) of soil at a slope depth of 2.5 m decreased by 4.8%, 8.1%, and 12.2%, respectively. Moreover, the results of the frequency analysis show that rainfall intensity, and thus the infiltration rate, increased with increasing return period. For rainfall events for a 2-year return period, the LFS of soil at a slope depth of 3.0 m did not show an obvious drop. However, for 10- and 100-year return periods, the stability of soil started to decrease at 48 h and 32 h, respectively. According to a Taiwan Climate Change Projection and Information Platform report (2016), there is an increase in the probability of extreme rainfall events in the future. The slope data (e.g., slope topography, slope structure, and soil mechanical and hydraulic parameters) obtained from the field in this study can be used to prevent or reduce the hazards of slope disasters.

Keywords: Rainfall pattern, Trend analysis, Frequency analysis, Coupled hydromechanical framework, Slope stability.

一、前言

邊坡災害的觸發因子主要為降雨、地震以及人為影響等因素(Rahimi *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2017)。而因降雨因素而引發的邊坡崩塌事件在世界各地更是屢見不鮮。根據美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出的全球降雨崩塌潛勢,在中亞、東南亞、美洲西部沿岸、歐洲地中海沿岸以及非洲東南部高原地帶受此類災害影響最為嚴重(NASA, 2018)。另外,聯合國之附屬組織政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在2013年第5次評估報告中,透過氣候監測與分析,指出在全球暖化的情境下,全球水循環之變遷並不

一致,各地之間的降雨情境存在著較過去更大的空間差異,且乾濕季節或乾溼區域更加分明,極端降雨或乾旱事件發生頻率增加且強度增強(IPCC, 2013),代表濕季或潮濕地區未來坡地可能面臨更嚴重的威脅。

臺灣在夏秋兩季屬於潮濕季節,降雨來源主要為梅雨鋒面、颱風以及午後因強烈對流而引發之強降雨。根據氣候變遷之調查,雖然總雨量之百年變化趨勢並不明顯,但年度總降雨日數則有明顯下降之趨勢,且極端降雨呈現強度增加趨勢,其中以中、南部之極端降雨線性上升趨勢最為明顯(Tung *et al.*, 2016)。另外,陳正達等人(2017)透過耦合模式比對計畫氣候模式(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)推估未來臺灣氣候受全球暖化之影響,在降雨方

面，由現今至 21 世紀末之年雨量雖無顯著變化，但乾濕季降雨差異加劇，呈現乾季越乾，濕季越濕之趨勢，且預估臺灣地區之颱風降雨強度將會增加 20%~40%。綜上所述，可知臺灣地區之邊坡所面臨之降雨情境將越加嚴峻，須審慎評估未來降雨型態的變動對邊坡之影響。

氣候變遷對坡地安全之影響莫過於降雨型態之改變，不同的降雨模式影響了雨水入滲行為，導致邊坡含水狀態變化情形也有明顯之差異。因此，了解降雨型態在未來可能的變動，有助於進行邊坡安全性之分析，以預防邊坡災害危及人民之生命與財產安全。例如，Strauch *et al.* (2015) 透過探討夏威夷地區氣候變化，瞭解到氣候變遷造成夏威夷地區發生降雨強度上升，而降雨頻率下降的現象，代表該地區的降雨型態趨於極端，可能未來邊坡會面臨更嚴重的降雨威脅。Kristo *et al.* (2017) 則透過統計方法分析降雨強度趨勢，發現新加坡地區之降雨強度呈現上升趨勢，因此未來須謹慎提防降雨帶來的洪水或邊坡破壞等災害。

若要探討降雨型態對坡地安全之影響，首先須瞭解降雨引致邊坡崩坍之機制。邊坡發生破壞或變形可歸因於土壤中應力的變化。降雨入滲除了造成土體所承受的剪應力提高外，由於含水量增加，土壤孔隙水壓(pore-water pressure)亦隨之上升，使其有效應力發生下降的現象，導致土壤之剪力強度折減，邊坡的穩定性因此發生下降之行為(Chen *et al.*, 2004; Iryo and Rowe, 2005; Matsuura *et al.*, 2008; Kim and Borden, 2013; Lee *et al.*, 2014; Qi and Vanapalli, 2015; Yang *et al.*, 2017)。而降雨的滲流行為雨水的入滲行為主要受到土壤水力特性與降雨型態所影響。其中，土壤水力傳導係數(hydraulic conductivity)控制了土壤中滲流之速度，且飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity, k_s)限制了降雨入滲速率，在降雨強度高於 k_s 時，未能入滲邊坡之降雨通常以地表逕流之方式流失；降雨型態則包含降雨強度分布及降雨延時之因素，提供了能入滲於邊坡土壤之降雨量，因此降雨型態不同，亦會影響地下水文狀態之改變，從而影響邊坡穩定性的變

化情形(Rahimi *et al.*, 2011; Jemec and Komac, 2013; Li *et al.*, 2013; Kristo *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018)。

綜上所述，可知現今世界各地降雨情境受到全球暖化影響而乾濕季節之乾旱或豪雨強度可能增加，且存在地區性的明顯差異，因此了解臺灣各地區降雨型態未來之變化，有助於分析其對邊坡安全性之影響，有效預防邊坡災害之發生。因此，本研究選擇曾文水庫集水區為研究區域，透過雨量站之紀錄資料分析降雨強度變動趨勢以及降雨重現之頻率，並透過水力耦合模式瞭解未來降雨型態之改變及其對坡地安全之影響。此外，在水力耦合模式中引入局部安全係數(Local Factor of Safety, LFS)理論，進行邊坡穩定性分析，相較於傳統的破壞面安全係數分析模式，更能確切掌握邊坡各處土壤之安全係數變動行為(Lu *et al.*, 2012)。

二、研究區域概述

曾文水庫之壩址坐落於位於臺灣臺南市楠西區與嘉義縣大埔鄉交界之柳藤潭谷地，集水區主要涵蓋嘉義縣阿里山鄉、大埔鄉以及嘉義縣番路鄉與高雄市那瑪夏區之部分區域，其集水區面積為 481 km²、蓄水範圍面積為 17.1 km²，為臺灣蓄水量最大之水庫，如圖 1 所示。研究區域標高介於 2,600 m 至 100 m 之間，地勢由東北向西南遞減，區內全屬山嶺區而地形陡峻。坡度方面，研究區域坡度分布主要以六級坡為主，共佔約 44.4%之範圍；坡向方面則以西向及西南向為主，西北向、南向與東南向次之(水土保持局，2011)。

曾文水庫集水區位於西部麓山帶地質區，區域內地層以中新世與上新世地層為主，包含有三峽群及其相當地層、錦水頁岩及其相當地層、瑞芳群及其相當地層、臺地堆積以及小部分卓蘭層及其相當地層。而集水區內地層之岩性以灰色細粒泥質砂岩與泥質頁岩為主，由於其含泥量較高，且地質年代較為年輕而固結性較差，易受風化作用影響，因此於溪流兩岸河階地形十分發達，且崩塌地甚多。

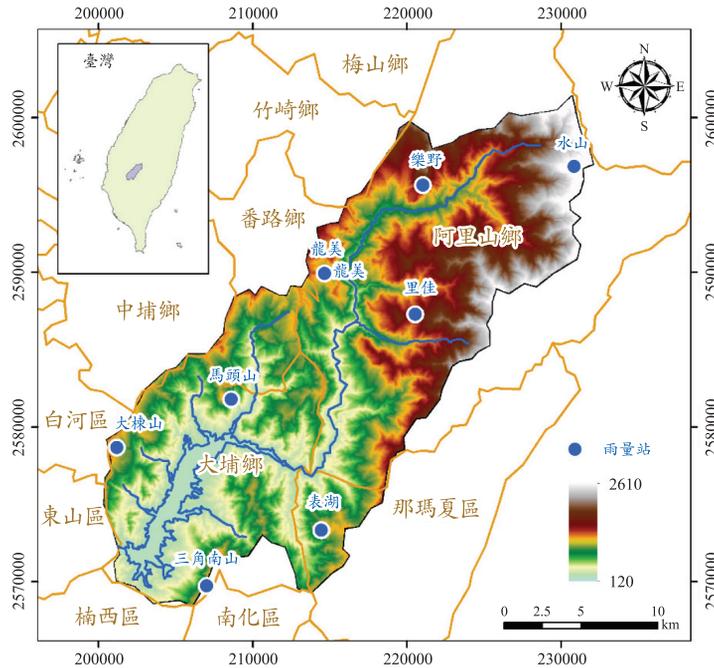


圖 1 研究區域地理位置示意圖

三、研究方法

3.1 趨勢分析

本研究透過 Mann-Kendall test (Mann, 1945 ; Kendall, 1975)及 Theil-Sen estimator (Sen, 1968)評估研究區域之降雨強度趨勢變動。Mann-Kendall test 為一種無母數趨勢檢定方法，透過比較連續資料間的大小關係來檢定資料序列之趨勢變化，而能處理離群值以及遺失紀錄之資料序列為此檢定方法之優點，因此時常應用於水文資料之統計分析(Dindang *et al.*, 2013; Longobardi and Villani, 2010; Yeh *et al.*, 2015)。其方法介紹如下。

假設資料序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 對應時間序列 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ，則 Mann-Kendall test 之顯著指標 Z 可由下列方法推求。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j),$$

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & x_i - x_j > 0 \dots\dots\dots(1) \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \dots\dots\dots(2)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \dots\dots\dots(3) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases}$$

在 Mann-Kendall test 檢定法中會建立虛無假設 H_0 與對立假設 H_1 ，分別假設時間序列資料無顯著趨勢以及具備顯著趨勢，並透過 Z 值判斷是否拒絕 H_0 而接受 H_1 。當 $|Z| > Z_{(\alpha/2)}$ 時，代表時間序列資料有顯著趨勢。其中， S 值為正表示資料呈現上升趨勢，反之則代表資料呈現下降趨勢。 α 為顯著水準(significance level)，與 $Z_{(\alpha/2)}$ 相互對應。本研究選定 0.05 作為趨勢檢定之顯著水準，使 $Z_{(\alpha/2)} = 1.96$ 。因此，當 $|Z| > 1.96$ 代表時間序列資料具有顯著之上升或下降趨勢。

Theil-Sen estimator 為一種計算時間序列資料趨勢之真實斜率的方法，其研究表示當一時間

序列資料具有線性趨勢時，可透過計算各資料點間之斜率，並取其中位數作為趨勢之斜率，如式(4)所示(Sen, 1968)。

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right), \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, j-1$$

式中 β 為時間序列上 x_j 與 x_k 兩點之斜率，並對應時間點 j 與 k ($j > k$)。研究中經由 Theil-Sen estimator 求得降雨強度趨勢斜率後，可藉其推估未來降雨強度之變化。

3.2 降雨頻率分析

降雨頻率分析之主要目的為探討具有某降雨量 X 之降雨事件之重現週期(return period, T)長短，兩者間關係主要與頻率因子(frequency factor, K_T)有關，如下所示：

$$X_T = M + K_T S \quad \dots\dots\dots(5)$$

其中， X_T 為重現週期 T 之降雨量，頻率因子 K_T 為與重現週期 T 及機率分布相關之函數， M 及 S 分別為降雨量的平均值及標準差。

由於降雨資料之機率分布通常並非以常態分佈呈現，因此本研究選擇頻率分析中常使用的機率分布型式進行計算，包含有對數常態(Log-Normal distribution, LN)、極端值第一型(Extreme Value Distribution, EV1)、皮爾遜第三型(Person Type III Distribution, PT3) 以及對數皮爾遜第三型(Log-Person Type III Distribution, LPT3)等型式，並透過適合度檢定(卡方適合度檢定及平方差和)挑選最適切的分布進行分析。

最後，本研究在水文頻率點繪方法中選取合適之點繪方式，包含有 California 法、Hazen 法、Weibull 法、Chegodayev 法、Blom 法、Tukey 法及 Gringorten 法，並將頻率分析結果繪於甘保氏機率紙，其縱軸為算術座標(水文量)，橫軸可為機率(%)、重現週期(T)或改化變量(reduced variate, y)，而機率與重現週期互為倒數，機率與改化變量之關係則如式(6)所示。

$$P(X_T) = e^{-e^{-y}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

其中， $P(x_T)$ 代表重現降雨量為 X_T 之事件發生的機率。

3.3 邊坡穩定分析

本研究使用 HYDRUS 2D (Šimůnek *et al.*, 2008)數值分析軟體進行二維土壤邊坡之暫態滲流分析，以探討降雨入滲對邊坡未飽和層含水狀態之影響。分析中使用之二維暫態滲流控制方程式為 Šimunek *et al.* (2008)引用 Richards 方程式發展出暫態未飽和層之滲流解析解：

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \nabla \cdot K(h) \nabla H + W \quad \dots\dots\dots(7)$$

其中， θ 為體積含水量[-]； t 為時間[T]； h 孔隙水壓或水頭[L]； H 為總水頭[L]； W 代表抽水或入滲行為所造成的滲流[L³T⁻¹]。 $K(h)$ 為隨孔隙水壓變化的水力傳導係數項(Hydraulic Conductivity Function, HCF)[LT⁻¹]； $\theta(h)$ 則是土壤持水曲線(Soil-Water Retention Curve, SWRC)中隨孔隙水壓變化的體積含水量[-]。

研究中以 van Genuchten (1980)提出之土壤持水曲線(SWRC)及水力傳導係數函數(HCF)理論推估土壤的體積含水量及滲透能力隨著基質吸力(matric suction)改變的變化，如式(7)及式(8)所示。

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{-1/n}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$K = K_s \cdot (S_e)^l \left\{ 1 - \left[1 - (S_e)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

其中， θ_s 為土壤飽和含水量[-]， θ_r 為土壤殘餘含水量[-]， h 為基質吸力[ML⁻¹T⁻²]， α 與空氣進氣之壓力值(air-entry value)的倒數相關[M⁻¹LT²]， n 與 SWRC 斜率相關[-]， K_s 為飽和土壤狀態下的水力傳導係數[LT⁻¹]， $m = 1 - 1/n$ ， l 為土壤孔隙相關係數[-]； S_e 為有效飽和度(equivalent degree of saturation) [-]。

在滲流分析過後，研究將分析結果引入 HYDRUS 2D 下的子模式 Slope Cube (Lu *et al.*, 2016) 以評估邊坡的應力狀態及穩定性受降雨的影響。

首先，使用 FEM 2D 有限元素法(Reddy, 1993)及動量平衡理論(momentum balance)，推求土壤應力場變化，如式(9)。

$$\nabla \cdot (\sigma) + \gamma(\theta)b = 0 \dots\dots\dots(9)$$

其中 σ 代表土壤二維方向之應力張量， $\gamma(\theta)$ 為受含水量影響之土壤單位重， b 則為重力單位向量。

研究中藉由局部安全係數(LFS)分析方法評估土壤之穩定性受含水量變化之影響，如式(10)所示。其中，引入了 Lu and Likos (2004)發展的有效應力理論，此理論統整了所有可能發生在土壤顆粒間的物理與化學機制並以吸應力(suction stress)的概念進行概括。

$$LFS = \frac{\tau^*}{\tau} = \frac{\cos \phi}{\sigma_1 - \sigma_3} (2c + (\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_s) \tan \phi) \dots\dots\dots(10)$$

式中， τ^* 代表庫倫應力潛勢值[ML⁻¹T⁻²]， τ 則為當前庫倫應力[ML⁻¹T⁻²]， c 為土壤凝聚力[ML⁻¹T⁻²]， ϕ 為土壤摩擦角[-]， σ_1 與 σ_3 分別代表最大及最小主應力， σ_s 為吸應力[ML⁻¹T⁻²]， $(\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_s)$ 則為有效應力項。吸應力受土壤含水狀態之變動則可由下式進行推估。

$$\sigma_s = -\frac{S_e}{\alpha} \left(S_e^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots(11)$$

其中， S_e 為有效飽和度(equivalent degree of saturation)[-]， α 與 n 皆為擬合參數[-]，定義與 van Genuchten (1980)的土壤持水曲線理論相同。

四、結果與討論

4.1 降雨趨勢對邊坡穩定性之影響

本研究蒐集經濟部水利署之日雨量資料(如表 1)，應用 Mann-Kendall test 以及 Theil-Sen estimator 方法推估曾文水庫集水區之降雨強度變動趨勢。在研究中使用降雨延時之長短進行降雨事件分類(1、2、3、5 及 7 日)，並挑選出每年各降雨事件之最大降雨量作為該年分該降雨事件之代表，並換算為降雨強度，以進行趨勢分析，

表 1 曾文水庫集水區各雨量站紀錄資料

雨量測站	紀錄年份	紀錄年數
大棟山	1990-2016	27
馬頭山	1990-2016	27
三角南山	1990-2016	27
表湖	1990-2016	27
里佳	1978-2016	39
龍美	1990-2016	27
樂野	1978-2016	39
水山	1970-2016	47

藉此比較不同時間尺度之降雨延時對降雨強度趨勢的影響。

藉由趨勢檢定之方法，曾文水庫集水區各雨量站之降雨強度變動趨勢分析結果如表 2 所示。透過 Mann-Kendall test 所得之 Z 值，顯示位於集水區內的 8 個雨量站所記錄之降雨資料大多呈現上升之趨勢，以 1、2 及 3 日之降雨事件其降雨強度上升趨勢最為明顯。鍾侑達(2009)等人研究指出曾文溪流域在 1966-2007 年期間年總雨量呈現下降趨勢，而降雨型態則呈現降雨延時縮短且降雨強度增加的現象，本研究結果亦顯示研究區域之極端降雨事件及其強度有增加之趨勢。而透過 Theil-Sen estimator 方法計算降雨趨勢之斜率值，發現降雨強度趨勢之斜率與趨勢檢定結果相同，亦呈現上升之情形，且各雨量站大多以 1 日降雨事件之趨勢斜率最大，平均斜率為 0.08。

本研究為了探討降雨趨勢對邊坡穩定性之影響，選擇以上升趨勢最為明顯的 1 日降雨事件之線性趨勢以及推估未來 2050 年與 2100 年之一日降雨事件平均最大降雨強度，並且與 2016 年之一日平均最大降雨強度分別設計三日之降雨事件。本研究參考 Rahimi *et al.* (2011)之常態型降雨(normal rainfall pattern)進行案例設計，其透過降雨強度百分比分布，即可在已知累積降雨量或平均降雨強度時，設計簡易降雨案例，如圖 2 所示。另外，研究中所使用之平均最大降雨強度為透過徐昇氏多邊形法(Thiessen Polygons Method)推求而得，如表 3 所示，且其降雨強度等同於各降雨案例中第二日之平均降雨強度值。

表 2(a) 曾文水庫各雨量站降雨強度趨勢及斜率檢定結果

降雨日數	三角南山 (1990-2016)		大棟山 (1990-2016)		馬頭山 (1990-2016)		表湖 (1990-2016)	
	Mann-Kendall	趨勢斜率	Mann-Kendall	趨勢斜率	Mann-Kendall	趨勢斜率	Mann-Kendall	趨勢斜率
1	1.10	0.08	0.79	0.13	0.48	0.09	0.69	0.08
2	1.31	0.09	0.63	0.07	0.42	0.04	1.15	0.10
3	1.29	0.08	0.67	0.04	0.10	0.00	1.15	0.09
5	0.71	0.03	0.25	0.02	-0.17	-0.01	0.81	0.05
7	0.40	0.01	0.25	0.01	-1.23	-0.05	0.65	0.03
平均	-	0.06	-	0.05	-	0.02	-	0.07

表 2(b) 曾文水庫各雨量站降雨強度趨勢及斜率檢定結果

降雨日數	里佳 (1978-2016)		龍美 (1978-2016)		樂野 (1978-2016)		表湖 (1990-2016)	
	Mann-Kendall	趨勢斜率	Mann-Kendall	趨勢斜率	Mann-Kendall	趨勢斜率	Mann-Kendall	趨勢斜率
1	0.07	0.01	0.88	0.18	0.19	0.03	1.37	0.06
2	0.00	0.00	1.00	0.13	-0.17	-0.02	1.69	0.06
3	0.12	0.01	0.42	0.02	0.23	0.02	1.33	0.04
5	0.04	0.00	0.25	0.01	0.00	0.00	1.06	0.02
7	-0.04	0.00	-0.02	0.00	0.39	0.01	0.44	0.01
平均	-	0.00	-	0.07	-	0.01	-	0.04

表 3 探討 2016 年、2050 年及 2100 年一日最大降雨強度情境推估

雨量站	$I_t = \beta \times t + b$		徐昇氏權重(%)	2016 年 (mm/hr)	2050 年 (mm/hr)	2100 年 (mm/hr)
	β	b				
大棟山	0.13	-237.5	7.9	14.5	18.8	25.0
馬頭山	0.09	-176.0	17.9	13.0	16.2	20.8
三角南山	0.08	-141.4	8.5	11.4	13.9	17.7
表湖	0.08	-156.9	13.4	11.1	14.0	18.1
里佳	0.01	-3.5	18.4	10.2	15.1	15.6
龍美	0.18	-339.5	10.1	10.6	23.5	32.4
樂野	0.03	-48.8	12.9	9.8	16.9	18.5
水山	0.06	-117.3	10.9	9.0	13.7	16.9
平均	-	-	-	13.7	16.3	20.0

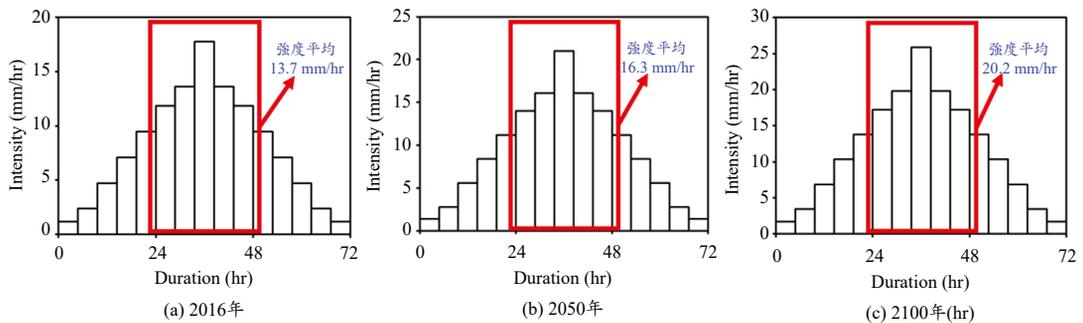


圖 2 考量 2016 年、2050 年及 2100 年降雨強度變動趨勢之案例設計

表 4 土壤水力特性參數

θ_s (-)	α (kPa ⁻¹)	n (-)	K_s (m/s)
0.43	0.36	1.56	1.0×10^{-5}

表 5 土壤力學特性參數

G_s (-)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	ν (-)
2.65	22	30	15000	0.3

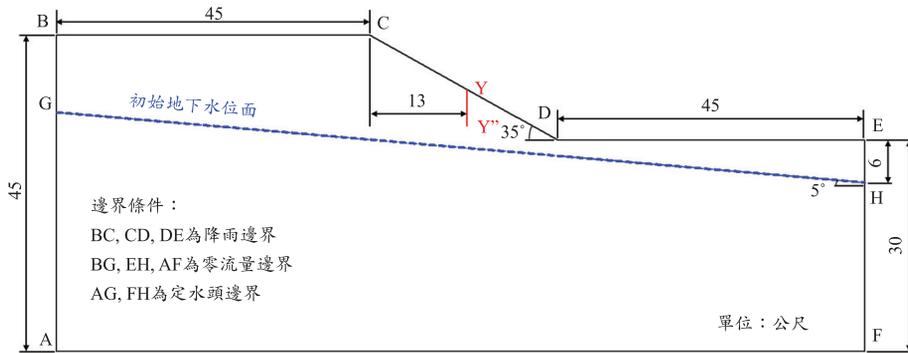


圖 3 邊坡概念模型

研究中為著重探討降雨型態改變對邊坡穩定性之影響，因此設計一簡單邊坡概念模型 (Rahimi *et al.*, 2011; Rahardjo *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018) 進行討論，其幾何形狀與邊界條件設置如圖 3 所示，為坡高 15 公尺，坡角為 35° (曾文水庫集水區邊坡多屬六級坡，介於 28.8°~45.0°) 之邊坡。而土壤水力特性參數及力學特性參數則參考施虹如等人 (2015) 研究中所使用之曾文水庫集水區水文地質參數資料進行設定，如表 4 及表 5 所示。邊界條件方面，GH 為初始地下水位面，為一傾斜 5° 之平面；BC、CD 及 DE 為大氣邊界 (atmospheric boundary) 而研究中於此邊界設定降雨條件，因此亦稱之為降雨入滲邊界；AG 及 FH 為定水頭邊界，水頭高度與初始地下水位面 (GH) 相等；AF、BG 及 EH 處則為零流量邊界。

為評估土壤安全係數受降雨之影響，研究中以安全係數下降率 (LFS_d) 討論其分析結果，其計算方法如式 (12) 所示：

$$LFS_d = \frac{LFS_i - LFS'}{LFS_i} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$

其中， LFS_i 為土壤初始安全係數， LFS' 則為降雨

結束時土壤安全係數分析結果。

透過滲流分析及邊坡穩定分析可瞭解在 2016 年、2050 年及 2100 年降雨強度變化對邊坡穩定之影響。在此以先前透過降雨強度趨勢分析所建立之降雨案例分別進行模擬，並以降雨結束 (3 日) 時，邊坡斜坡 Y-Y' 剖面處之土壤含水量、吸應力及安全係數隨深度之變化情形進行討論，如圖 4 所示。研究結果顯示，在 2016 年的降雨案例中，隨著 3 日降雨持續下滲，使土壤邊坡表面逐漸形成深度 3.0 公尺之濕潤帶，而造成此深度之間的土壤發生安全係數下降之現象。若以 2016 年的降雨入滲深度為基準，則能發現在 2050 年與 2100 年的降雨模擬之中，其入滲深度分別增加了 16.7% 及 30.0%，並且深度 2.5 公尺處之土壤之有效應力狀態因受到含水量增加之影響，土壤安全係數較 2016 年之分析結果 ($LFS_d = 4.8\%$) 下降幅度較大，分別下降了 8.1% 及 12.2%。由此可知，若降雨入滲行為未受土壤飽和水力傳導係數所限制，未來曾文水庫集水區逐漸上升之降雨強度會明顯增加邊坡內水流入滲深度，而導致邊坡各深度之土壤穩定性下降的時間點呈現提前之趨勢。

表 6 曾文水庫集水區 1 日最大降雨量頻率分析結果

雨量站	1 日最大降雨事件		重現週期(年)		
	頻率分析法	點繪法	2	10	100
三角南山	Log Pearson Type III*	Hazen	237	402	663
大棟山	Log Pearson Type III*	Hazen	262	484	802
馬頭山	Log-Normal*	Hazen	303	576	973
表湖	Log Pearson Type III*	Gringorten	244	492	917
里佳	Log-Normal*	California	340	668	1158
龍美	Person Type III	Gringorten	348	590	820
樂野	Log Pearson Type III*	Hazen	342	669	1125
水山	Person Type III*	Gringorten	247	428	623
徐昇氏平均			296	539	926

* 表通過 $\alpha = 0.05$ 卡方適合度檢定

單位：毫米

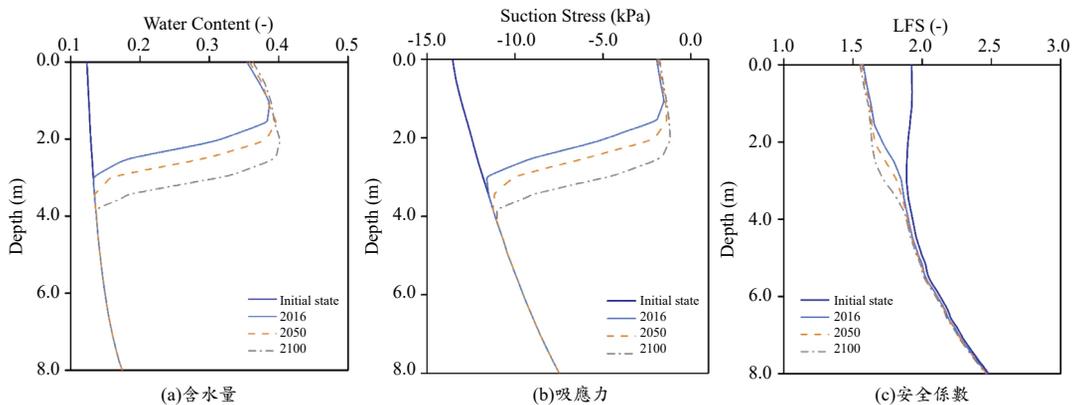


圖 4 以 Y-Y'剖面，降雨延時 72 小時為例，2016 年、2050 年及 2100 年降雨情境對土壤含水量、吸應力及安全係數之影響

4.2 累積雨量對邊坡穩定性之影響

本研究進而採用頻率分析之方法，探討曾文水庫集水區之各重現期降雨量對邊坡穩定性之間的關聯性。首先以年最大值法(annual maximum series)選取各雨量站每年最大之一日降雨量以建立年最大降雨序列，而後以對數常態(Log-Normal distribution, LN)、極端值第一型(Extreme Value Distribution, EV1)、皮爾遜第三型(Person Type III Distribution, PT3) 以及對數皮爾遜第三型(Log-Person Type III Distribution, LPT3)等機率分布進行降雨頻率分析，並透過卡方適合度檢定與平方差和選擇最佳之機率分布形式。而分析資料則在

California 法、Hazen 法、Weibull 法、Chegodayev 法、Blom 法、Tukey 法及 Gringorten 法等水文頻率分析中常用之水文頻率點繪方法中，挑選合適之方法進行繪製，其結果如表 6 及所示。

藉由徐昇氏多邊形法，可推求曾文水庫集水區之 1 日各重現週期的平均最大降雨量。研究中同樣以常態雨型進行重現週期 2 年、10 年及 100 年而降雨延時 3 日案例設計，如圖 5 所示，其中第二日的累積降雨量與各重現週期之 1 日平均最大降雨量相等，而總降雨量分別為 511 毫米、960 毫米及 1,596 毫米。

由水力耦合模式分析之結果，可了解土壤含

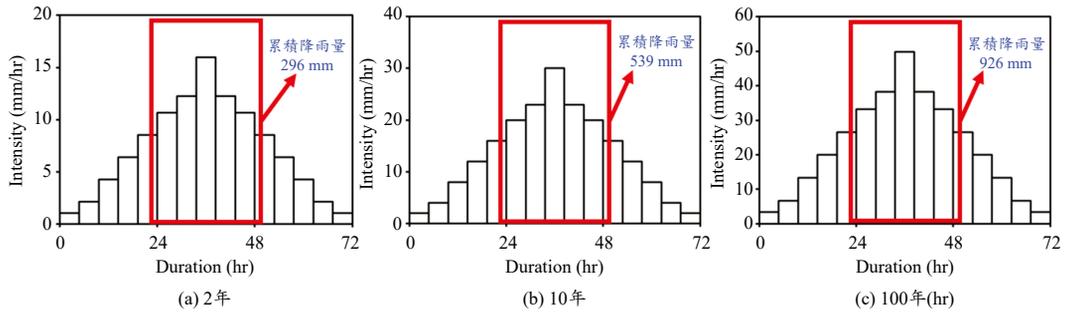


圖 5 考量重現週期 2 年、10 年及 100 年之降雨案例

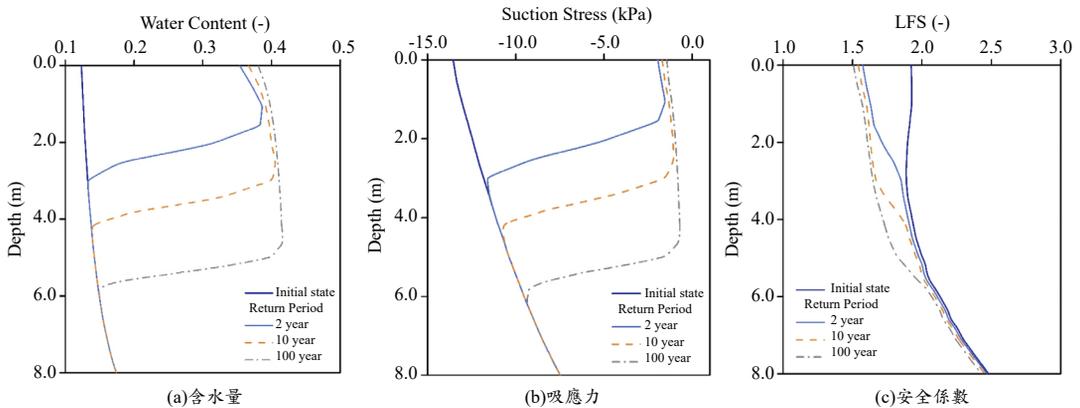


圖 6 以 Y-Y'剖面，降雨延時 72 小時為例，各重現週期降雨對土壤含水量、吸應力及安全係數之影響

水量、吸應力及安全係數受降雨之影響，而研究中選擇以邊坡斜坡 Y-Y'剖面於 3 日時之分析結果探討累積降雨量對邊坡穩定性之影響，其模擬結果如圖 6 所示。由邊坡土壤在降雨期間受降雨影響之深度變化，可瞭解降雨入滲深度隨著累積降雨量之增加而呈現明顯加深之趨勢。其中 2 年重現期之降雨入滲深度達 3.0 公尺，而 10 年與 100 年的案例中，受降雨影響之深度則分別增加了 40.0%與 98.0%。另外，根據斜坡處 Y-Y'剖面深度 3.0 公尺之土壤之安全係數變化，如圖 7 所示，可見 2 年重現週期之降雨因單位時間內累積降雨量較小(511 毫米/3 日)，因此此處土壤安全係數在 3 日間安全係數下降行為並不明顯。10 年重現週期之降雨因單位時間內累積降雨量較高(960 毫米/3 日)，導致安全係數在 48 小時後發生大幅下降之現象，而降雨事件結束時安全係數下

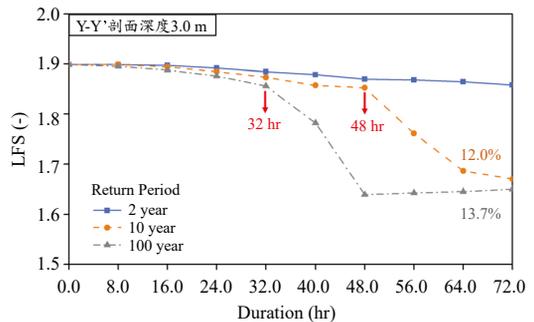


圖 7 以 Y-Y'剖面為例，深度 3.0 公尺之土壤安全係數隨時間變化分析結果

降率為 12.0%。由於 100 年重現週期之累積降雨量最大(1,596 毫米/3 日)，降雨强度高而入滲速度快，因此深度 3.0 公尺處土壤在 32 小時過後即受到降雨影響而穩定性發生明顯下降之行為，並於

表 7 曾文水庫集水區降雨強度頻率分析結果

t (分鐘)	降雨重現週期(年)				
	2	5	10	50	100
60	59.1	75.3	86.7	114.3	127.4
180	39.5	49.9	55.8	67.1	71.4
360	30.3	39.4	44.2	53.0	56.1
720	22.5	30.1	34.3	42.2	45.1
1440	12.2	18.5	22.9	33.3	37.9

單位：毫米/小時

48 小時達安全係數最低點，此時安全係數下降率為 13.7%。顯示重現週期越長之降雨其降雨入滲速度越快，而導致土壤吸應力提高而有效應力快速下降，致使土壤穩定性下降時間點提前，且安全係數下降速率呈現加快之趨勢。

4.3 降雨強度及延時對邊坡穩定性之影響

本研究另外使用不同延時之降雨量進行降雨頻率分析之結果，建立曾文水庫集水區之降雨強度-延時頻率曲線(Intensity-Duration-Frequency curve, IDF curve)，其用以描述研究區域降雨事件之延時與降雨強度之關聯性。本研究蒐集 2000 年至 2016 年曾文水庫集水區中雨量站所紀錄之時降雨資料，進行降雨頻率分析，分別建立 2 年、5 年、10 年、50 年及 100 年重現期之 IDF 曲線。

本研究以降雨頻率分析及徐昇式平均法評估曾文水庫集水區在各降雨重現期與各降雨延時之平均最大降雨強度，如表 7 所示。另外，藉由 Horner 方程式(式 13)擬合 2 年、5 年、10 年、50 年及 100 年重現期之 IDF 曲線，擬合結果如圖 8 所示。

$$I_t = \frac{a}{(t+b)^c} \dots\dots\dots(13)$$

其中， I_t 為降雨強度(mm/hr)； t 為降雨延時(min)； a 、 b 、 c 為擬合參數，因降雨強度須為正值，因此擬合參數須符合 $a > 0$ ， $t + b > 0$ ，且 $c > 0$ 之限制。

本研究以曾文水庫集水區之 IDF 分析結果，選擇 2 年、10 年及 100 年重現期之降雨強度以及

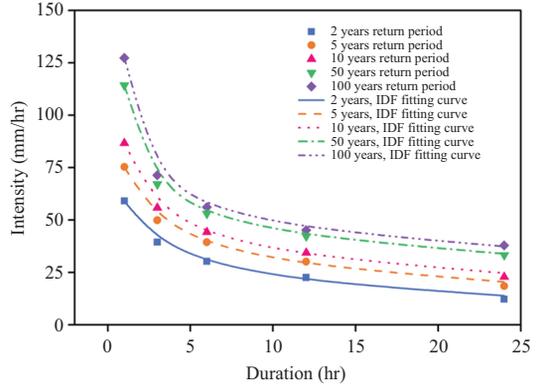


圖 8 曾文水庫集水區降雨強度-延時頻率(IDF)擬合結果

國家災防科技中心的短延時及長延時降雨定義(龔楚嫻等人, 2013)，分別設計六種降雨案例，探討降雨強度及短延時(6 小時)與長延時(24 小時)降雨對邊坡穩定性之影響，降雨案例如圖 9 所示。

首先，以 2 年重現期的短延時(6 小時)之降雨(案例 A)對邊坡模型進行水力耦合分析，其降雨強度為 29.7 mm/hr。由邊坡斜坡處 Y-Y'剖面之結果，顯示在短降雨 6 小時，邊坡表層土壤之含水量已接近飽和含水狀態，且降雨入滲深度達 1.6 公尺(圖 10)，因此造成土壤吸應力值在降雨初期有快速升高的現象，導致在此期間深度 0~0.5 公尺處土壤安全係數快速下降 8.1%~16.1%，如表 8 所示。

在 2 年重現期的長延時(24 小時)之降雨(案例 B)分析結果中，從降雨 6 小時的入滲模擬，可瞭解到此案例因降雨強度低而入滲速度緩慢，僅有約 1.0 公尺深之土壤受到降雨影響，其安全係數僅下降 0.5%~6.4%。然而，在 6 小時後，降雨仍持續入滲邊坡，因此土壤含水量逐漸增加，在降雨結束時約有 2.0 公尺深之土壤受到影響而局部安全係數下降，如圖 10 所示。另外，靠近地表深約 0.5 公尺處形成暫時飽和帶，使土壤之吸應力接近於零，而使其有效應力下降，因此安全係數下降明顯，下降幅度約 16.4%~18.9%，如表 8 所示。

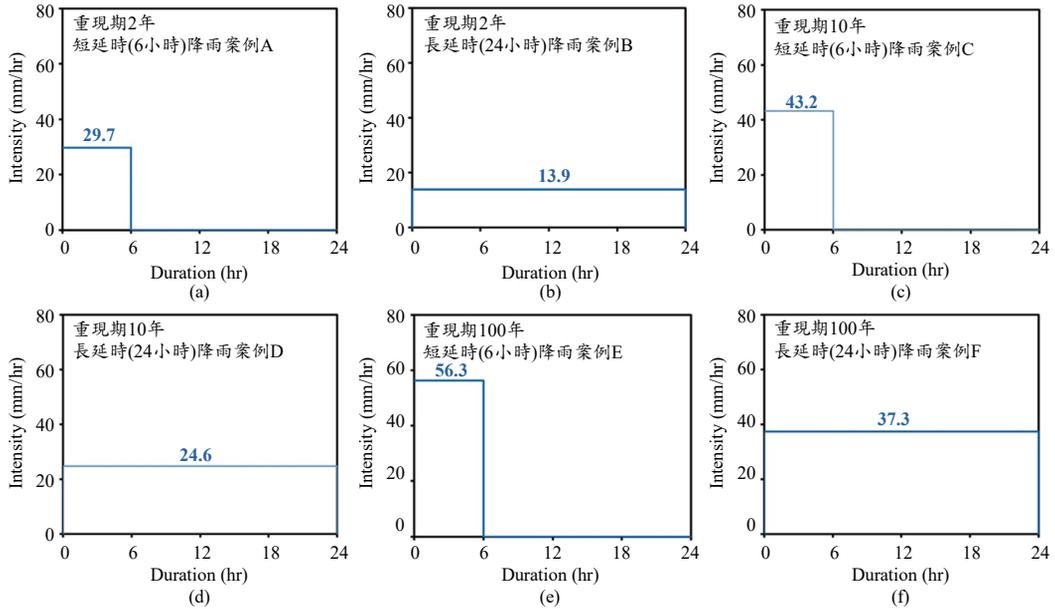


圖 9 考量 2 年、10 年及 100 年重現期之短延時(6 小時)與長延時(24 小時)降雨案例設計

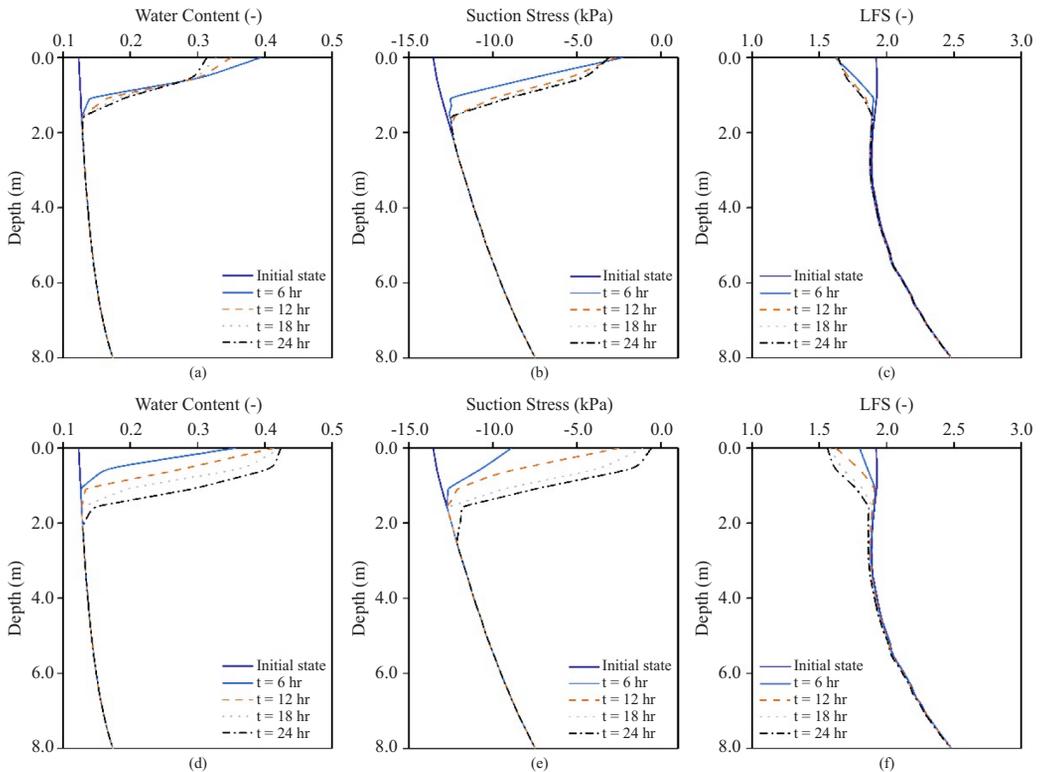


圖 10 考量 2 年重現期之短延時降雨(案例 A)及長延時降雨(案例 B)對土壤含水量、吸應力及安全係數之影響(Y-Y'剖面)。(a)、(b)及(c)分別為短延時土壤之含水量、吸應力及安全係數隨時間之改變；(d)、(e)及(f)分別為長延時土壤之含水量、吸應力及安全係數隨時間之改變

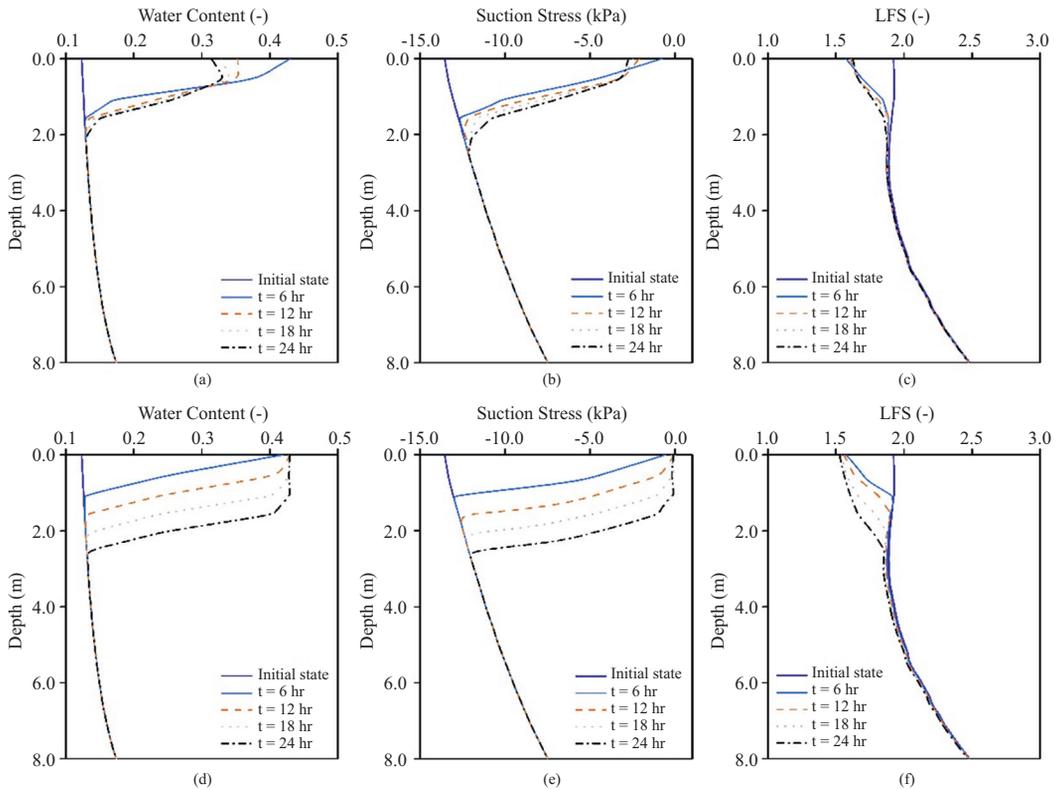


圖 11 考量 10 年重現期之短延時降雨(案例 A)及長延時降雨(案例 B)對土壤含水量、吸應力及安全係數之影響(Y-Y'剖面)。(a)、(b)及(c)分別為短延時土壤之含水量、吸應力及安全係數隨時間之改變；(d)、(e)及(f)分別為長延時土壤之含水量、吸應力及安全係數隨時間之改變

表 8 考量 2 年重現期短延時(案例 A)及長延時(案例 B)降雨情境下，不同深度土壤之安全係數下降率(%) (Y-Y'剖面)

時間(小時)	6		24	
深度(公尺)	A	B	A	B
0.0	16.1	6.4	14.7	18.9
0.5	8.1	3.6	11.9	16.4
1.0	1.1	0.5	5.2	8.0
1.5	0.8	0.2	1.1	2.7
2.0	0.7	0.2	0.6	1.7

在 10 年重現期的短延時(6 小時)之降雨案例(案例 C)中，雖然降雨強度較高(42.3 mm/hr)，但土壤飽和水力傳導係數(36 mm/hr)限制了降雨入滲之速度，所以其土壤含水量、吸應力及安全係

數之變化與 2 年重現期之短延時降雨(案例 A)的分析結果十分相似。在降雨期間(6 小時)，於邊坡斜坡(Y-Y'剖面)形成深度約 1.6 公尺之濕潤帶，使此處土壤吸應力提高而有效應力下降，導致安全係數發生下降之現象，如圖 11 所示。

降雨案例 D 為 10 年重現期長降雨延時(24 小時)之案例，研究結果顯示，由於降雨強度 24.6 mm/hr 約為 B 案例(13.9 mm/hr)之兩倍，因此雨水入滲較為快速，且與 B 案例相比，可發現降雨結束時(24 小時)的 Y-Y'剖面的濕潤帶深度增加 25.0%，如圖 11 所示。同時亦可觀察到距地表深度 1.3 公尺以內之土壤皆呈現飽和含水狀態，土壤有效應力因吸應力提高而下降，因此其安全係數大幅下降 14.7~20.6%，如表 9 所示。

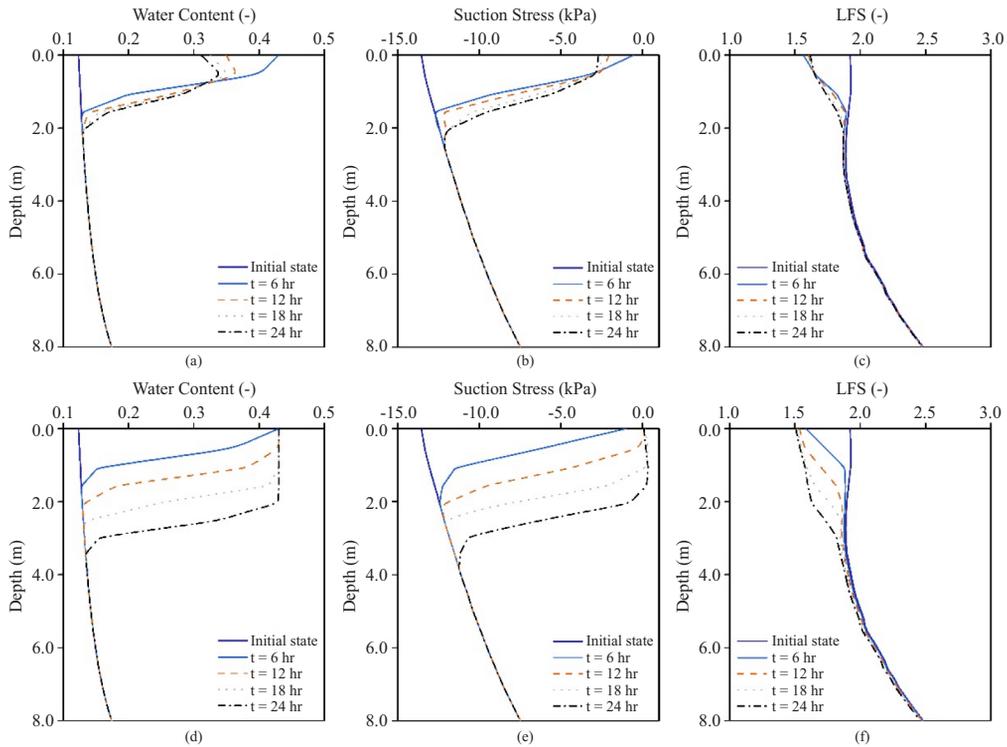


圖 12 考量 100 年重現期之短延時降雨(案例 A)及長延時降雨(案例 B)對土壤含水量、吸應力及安全係數之影響(Y-Y'剖面)。(a)、(b)及(c)分別為短延時土壤之含水量、吸應力及安全係數隨時間之改變；(d)、(e)及(f)分別為長延時土壤之含水量、吸應力及安全係數隨時間之改變

表 9 考量 10 年重現期短延時(案例 C)及長延時(案例 D)降雨情境下，不同深度土壤之安全係數下降率(%) (Y-Y'剖面)

時間(hr)	6		24	
	C	D	C	D
0.0	18.2	18.0	15.6	20.6
0.5	12.1	11.8	13.9	19.1
1.0	4.2	0.5	8.0	16.7
1.5	1.5	0.5	3.3	13.3
2.0	0.8	0.6	1.2	6.3

表 10 考量 100 年重現期短延時(案例 E)及長延時(案例 F)降雨情境下，不同深度土壤之安全係數下降率(%) (Y-Y'剖面)

時間 (hr)	6		24	
	E	F	E	F
0.0	18.7	17.7	15.9	21.7
0.5	14.1	10.0	14.5	20.2
1.0	5.5	2.4	9.8	18.1
1.5	1.2	1.3	4.9	16.5
2.0	1.0	0.7	1.4	14.1

在 100 年重現期的短延時之降雨案例(案例 E)中，雖然降雨強度高達 56.3 mm/hr，降雨入滲速度仍受到土壤飽和水力傳導係數(36 mm/hr)所限制，因此模式分析之結果與其餘短延時降雨案例近乎相同，如圖 12 所示。於降雨 6 小時期間，

邊坡斜坡處約 1.6 公尺深之土壤受到降雨影響(Y-Y'剖面)，而土壤安全係數發生下降之行為，其中距地表深 0.5 公尺以內之土壤安全係數下降幅度較大，下降約 14.1~18.7%，如表 10 所示。

對於 100 年重現期的長延時之降雨情境(案

例 F)而言，由於降雨強度高(37.3 mm/hr)且接近於邊坡土壤之飽和水力傳導係數，雨水入滲較其餘長延時降雨案例更加顯著，因此土壤含水量分布在 6 小時、12 小時、18 小時及 24 小時的變化非常明顯，如圖 12 所示。以邊坡斜坡 Y-Y'剖面分析結果為例，在 24 小時降雨期間內，邊坡表層形成厚度約 3.4 公尺之濕潤帶，較 B 案例增加了 70.0%。此外，近地表約 2.1 公尺深之土壤皆呈現飽和含水狀態而吸應力為零，導致土壤的安全係數大幅下降約 14.1~21.7%，如表 10 所示。

近年來，有相關研究蒐集臺灣的降雨型崩塌案例，分析降雨強度及延時與邊坡發生破壞之間的關聯性，並以分析結果建立臺灣地區降雨強度-延時引致邊坡崩塌之門檻(rainfall intensity-duration threshold)。其研究同時也指出臺灣地區短延時之降雨雖然較少造成邊坡滑動，但由於降雨强度高，邊坡表面之土石材料容易遭到沖刷而形成土石流之災害，而長延時之降雨雖然降雨強度較低，不過在降雨持續入滲下，土石流及邊坡滑動、崩坍等災害皆有發生的可能性(Chen *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017)。在本研究中透過降雨案例之模擬，同樣可瞭解到短延時之降雨容易使地表處土壤在短時間內安全係數發生大幅下降，但降雨所影響的深度皆小於同重現期之長延時降雨案例。而在長延時降雨案例中，則能發現隨著降雨持續入滲，邊坡深處土壤較易受到雨水下滲影響而含水量上升、吸應力趨近於零，導致安全係數下降，可能引發土石流或淺層邊坡滑動等災害。

五、結 論

研究中選擇曾文水庫集水區之雨量資料，探討集水區降雨特性對邊坡安全之影響。首先，趨勢分析結果顯示，研究區域於近 30~40 年間降雨強度呈現上升之趨勢，其中以 1、2 及 3 日降雨事件之上升趨勢較為明顯，且以 1 日最大降雨強度的上升幅度最大，每年平均上升 0.08 毫米/小時。而由邊坡穩定性分析，則能發現 2100 年之降雨案例對邊坡造成之影響深度相較於 2016 年案例，增加了 30.0%，顯示在降雨強度在未受土壤飽和及水力傳導係數所限制時，未來降雨強度增加，降

雨入滲所影響之深度範圍越大，土壤安全係數下降而更易發生淺層邊坡崩塌或滑動之破壞。

藉由降雨頻率分析之結果，可討論各重現週期之降雨與邊坡穩定之關聯性。研究中以斜坡處 3.0 m 深之土壤安全係數變化結果進行討論，發現在 2 年重現期降雨案例中，土壤安全係數並無明顯變化，而重現期為 10 年及 100 年之案例則分別在 48 小時及 32 小時後安全係數發生明顯之下降行為，且降雨結束時之安全係數下降率分別為 12.0%及 13.7%。因此可之降雨入滲未受到飽和及水力傳導係數限制下，重現週期越長之降雨，其入滲行為越加快速，造成邊坡深處之土壤受降雨影響之時間點提前，且安全係數下降幅度較大。

另外，透過曾文水庫集水區之時降雨資料，可建立降雨強度-延時頻率曲線(IDF)，藉此分析降雨強度與延時對邊坡之影響。本研究中透過降雨案例之模擬，可瞭解到雖然短延時降雨由於强度高，但入滲行為容易受到降雨延時及土壤滲透能力所限制。在研究案例中，僅使地表處(<0.5 m)土壤在短時間內安全係數發生大幅下降(8.1%~18.7%)。而長延時降雨入滲速度雖然緩慢，但因延時長而受降雨影響之土壤深度較深(1.6 m~3.4 m)，且暫時飽和帶土壤之安全性下降率較高(14.1%~21.7%)，因此長延時之降雨更可能導致邊坡發生崩塌或滑移等災害。

而根據科技部之臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(2016)中極端降雨指標之研究成果，臺灣之降雨氣候在未來可能呈現降雨量增加而降雨日數減少之情況，代表未來容易發生極端強降雨事件。而本研究則透過趨勢檢定方法探討曾文水庫集水區之降雨強度變動情形，其結果亦呈現極端降雨事件之強度逐漸增加之趨勢，顯示研究區域之邊坡未來所面臨之境況越加嚴峻。未來若能取得邊坡現地資料進行此類降雨情境分析，則能預先瞭解邊坡破壞之可能以提前預防，避免崩塌或滑移等災害造成鄰近居民之財產及社會經濟之損失。

然而，研究中使用均質邊坡材料進行模擬分析，使研究結果應用於真實案例時有所限制。實

際上，降雨入滲邊坡之行為會受到邊坡複雜的地質構造與土壤的空間變異性所影響，因此在未來研究可考慮使用概率分析方法，以模擬土壤性質在空間中的不確定性及變異性，而地質構造則須仰賴現地調查之結果提供。在降雨分析方面，為更加精準預測其型態變遷，未來可考慮蒐集更齊全之降雨資料進行降雨型態及雨型分析，並考量暖化現象與聖嬰現象等氣候變遷因素之影響。

誌 謝

本研究成果承蒙科技部 MOST 106-2625-M-006-014 計畫補助，謹致謝忱。

參考文獻

1. Chen, H., Lee, C. F., and Law, K. T., "Causative Mechanisms of Rainfall-Induced Fill Slope Failures," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(6), 593-602, 2004.
2. Chen, C. W., Oguchi, T., Hayakawa, Y. S., Saito, H., and Chen, H., "Relationship between landslide size and rainfall conditions in Taiwan," *Landslides*, 14(3), 1235-1240, 2017.
3. Chen, C.W. Saito, H. and Oguchi, T. "Rainfall intensity-duration conditions for mass movements in Taiwan." *Progress in Earth and Planetary Science*, 2(1), 14, 2015.
4. Dindang, A., Taat, A., Beng, P. E., Alwi, A. M., Mandai, A., Adam, S. M., Othman, F., Bima, D. A., and Lah, D., "Statistical and trend analysis of rainfall data in Kuching, Sarawak from 1968-2010," *JMM Research Publication* (6), 17, 2013.
5. IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
6. Iryo, T., and Rowe, R. K., "Infiltration into an embankment reinforced by nonwoven geotextiles," *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), 1145-1159, 2005.
7. Jemec, M., and Komac, M., "Rainfall patterns for shallow landsliding in perialpine Slovenia," *Natural Hazards*, 67(3), 1011-1023, 2013.
8. Kendall, M.G., Rank Correlation Methods, 4th Edition, Charles Griffin, London, 1975.
9. Kim, J., Lee, K., Jeong, S., and Kim, G., "GIS-based prediction method of landslide susceptibility using a rainfall infiltration-groundwater flow model," *Engineering Geology*, 182, 63-78, 2014.
10. Kim, W. S., and Borden, R. H., "Numerical Simulation of MSE Wall Behavior Induced by Surface Water Infiltration," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), 2110-2124, 2013.
11. Kristo, C., Rahardjo, H., and Satyanaga, A., "Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore," *International Soil and Water Conservation Research*, 5(4), 258-264, 2017.
12. Lee, M. L., Ng, K. Y., Huang, Y. F., and Li, W. C., "Rainfall-induced landslides in Hulu Kelang area, Malaysia," *Natural Hazards*, 70(1), 353-375, 2014.
13. Li, W. C., Lee, L. M., Cai, H., Li, H. J., Dai, F. C., and Wang, M. L., "Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope," *Engineering Geology*, 153, 105-113, 2013.
14. Longobardi, A., and Villani, P., "Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area," *International Journal of Climatology*, 30(10), 1538-1546, 2010.
15. Lu, N., and W. J. Likos, Unsaturated Soil Mechanics, 584 pp., John Wiley, New York, 2004.
16. Lu, N., Şener-Kaya, B., Wayllace, A., and Godt, J. W., "Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety," *Water Resources Research*, 48(9), 2012.
17. Lu, N., Wayllace, A., and Formetta, G., "The Slope Cube Module," 2016.
18. Mann, H. B., "Nonparametric tests against trend," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259, 1945.

19. Matsuura, S., Asano, S., and Okamoto, T., "Relationship between rain and/or meltwater, pore-water pressure and displacement of a reactivated landslide," *Engineering Geology*, 101(1), 49-59, 2008.
20. NASA, *New NASA model finds landslide threats in near real-time during heavy rains*. Retrieved March 22, 2018, from <https://svs.gsfc.nasa.gov/12897>, 2018.
21. Qi, S., and Vanapalli, S. K., "Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes," *Computers and Geotechnics*, 70, 68-82, 2015.
22. Rahimi, A., Rahardjo, H., and Leong, E. C., "Effect of Antecedent Rainfall Patterns on Rainfall-Induced Slope Failure," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(5), 483-491, 2011.
23. Sen, P. K., "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau," *Journal of the American statistical Association*, 63(324), 1379-1389, 1968.
24. Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., and Šejna, M., "Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes," *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587-600, 2008.
25. Strauch, A. M., MacKenzie, R. A., Giardina, C. P., and Bruland, G. L., "Climate driven changes to rainfall and streamflow patterns in a model tropical island hydrological system." *Journal of Hydrology*, 523, 160-169, 2015.
26. Sun, G., Yang, Y., Jiang, W., and Zheng, H., "Effects of an increase in reservoir drawdown rate on bank slope stability: A case study at the Three Gorges Reservoir, China," *Engineering Geology*, 221, 61-69, 2017.
27. Tung, Y. S., Chen, C. T., Min, S. K., and Lin, L. Y., "Evaluating Extreme Rainfall Changes over Taiwan Using a Standardized Index," *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 27(5), 2016.
28. Van Genuchten, M.T., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," *Soil science society of America Journal* 44(5): 892-898, 1980.
29. Yang, K. H., Uzuoka, R., Thuo, J. N., Lin, G. L., and Nakai, Y., "Coupled hydro-mechanical analysis of two unstable unsaturated slopes subject to rainfall infiltration." *Engineering Geology*, 216, 13-30, 2017.
30. Yeh, C.F., Wang, J., Yeh, H.F., and Lee, C.H., "Spatial and temporal streamflow trends in northern Taiwan," *Water*, 7(2), 634-651, 2015.
31. Zhang, J., Li, J., and Lin, H., "Models and influencing factors of the delay phenomenon for rainfall on slope stability," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(1), 122-136, 2018.
32. 陳正達、鄭兆尊、林傳堯、林修立、朱容練、童裕翔、莊穎叡、錢伊筠、陳淡容、林宜穎，「臺灣未來氣候變遷推估」，臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制·443-508·2017。
33. 鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲，「台灣區域降雨趨勢分析」，農業工程學報，第 55 卷，第 4 期，1-18，2009。
34. 行政院農業委員會水土保持局，「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」，財團法人中興工程顧問社，2011。
35. 施虹如、吳亭燁、蘇元風、劉哲欣、李欣輯、陳永明、張志新，「極端降雨事件下淺層崩塌潛勢衝擊評估分析」，工程環境會刊，第 34 期，77-95，2015。
36. 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫，「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置」，科技部，2016。
37. 龔楚嫻、顏葆琳、李宗融、吳宜昭、于宜強，「台灣極端降雨事件：1992-2013 年重要事件彙整專書導讀」，國家防災科技中心，2013。

收稿日期：民國 107 年 4 月 27 日
 修正日期：民國 107 年 7 月 18 日
 接受日期：民國 107 年 11 月 22 日