

降雨滲流對邊坡穩定的影響

謝平城^{(1)*} 王瀚衛⁽²⁾

摘 要

在許多邊坡穩定的問題中，水是最重要的因子，降雨入滲不但會增加土坡的下滑力，且減弱材料特性，所以在邊坡穩定問題中對於地下水流情況的了解是不可或缺的。本研究即以有限元素法模擬邊坡在降雨入滲情況下，土坡內孔隙水壓力的分佈，再應用延伸的摩爾-庫倫破壞準則，考慮基質吸力對於土坡抗剪強度的改變，以探討降雨入滲對邊坡穩定的影響。研究結果顯示，降雨強度會對邊坡的穩定性造成影響，但其影響存在一個極限值，而這極限值是由土體的飽和滲透性所決定的。而降雨雨型對邊坡安全係數的影響，依安全係數開始明顯下降的時間來看，降雨強度尖峰值越先到達者，安全係數越早下降，而降雨強度尖峰值後到來者，雖然安全係數較晚下降但其下降的幅度會較大。

(關鍵詞：邊坡穩定、降雨入滲、降雨雨型、基質吸力)

Effects of Rainfall Infiltration on Slope Stability

Ping-Cheng Hsieh

Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung, 402 Taiwan, R.O.C

Han-Wei Wang

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung, 402 Taiwan, R.O.C

ABSTRACT

Water is the most important factor in many slope stability problems. Rainfall infiltration results in an increase in unit weight and a decrease in strength of soil. Knowledge of groundwater flow conditions is essential for the analysis of slopes. The process of infiltration into a slope due to rainfall and the distribution of pore water pressure were examined by finite element method. An extended Mohr-Coulomb failure criterion was used to allow for shear strength variations as a result of changes in matric suction. The results indicated that slope stability is influenced by rainfall

(1) 國立中興大學水土保持學系副教授 *通訊作者

(2) 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

intensities. However, there exists a limit for the influence of rainfall intensity on slope stability and the limit is dominated by the permeability of saturated soil. The results of influence of slope stability by rainfall pattern indicated that the earlier peak of rainfall intensity has earlier change in safety factors, but the later peak of rainfall intensity causes greater change in safety factors.

(**Keywords** : slope stability, rain infiltration, rainfall pattern, matric suction)

前言

邊坡破壞是山坡地常見的災害，而在許多的研究中更指出降雨和邊坡的破壞往往脫不了關係(陳本康, 1992; Gasmol 等, 2000; Cho & Lee, 2001)，再加上台灣的地形陡峭，地質脆弱，河川源短流急，地震頻繁又常有濫墾、濫伐等不當的坡地利用，而颱風、梅雨所帶來的季節性雨量又集中，所以每逢暴雨就常引起沖蝕、崩塌、地滑、洪患及土石流等自然災害，而一般邊坡穩定的問題大都將土體視為完全乾燥或完全飽和來研究，然而邊坡的崩塌及其穩定與土壤中水分的流動關係密切，但現有的邊坡穩定分析方法大多不考慮含水量的變化對土體抗剪強度和邊坡穩定性的影響，此不能完全符合實際的情況，所以探討未飽和邊坡的水分入滲與穩定問題的關係，將對邊坡破壞行為的了解有相當的裨益。

基本理論介紹

一、地下水控制方程式

根據能量守衡的原理可以建立流速和水頭損失的關係，也就是達西定律 $\bar{v} = -K \text{ grad } h$ ，其中 $\bar{v}$ 為流速、 K 為滲透係數、 h 為水頭。水在未飽和土中的流動也滿足達西定律，但是與飽和土中滲流的相異處是未飽和滲流中滲透係數是土壤水分含量的函數，而土壤水分含量又是孔隙水壓力的函數，所以未飽和滲流中滲透係數是孔隙

水壓力的函數。從達西定律來看，一個方程式有兩個未知數，故仍需另一個方程式來求解，也就是連續方程式。連續分程式可依質量守衡的原理來推導建立，達西定律和連續分程式的結合便可推導出基本的地下水流控制方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中， H 為總水頭； K_x 和 K_y 分別為水平方向和垂直方向的滲透係數； Q 為邊界條件，等於邊界的流量； Θ 是體積含水量； t 為時間。(1)式即為地下水流的控制方程式，又稱為 Richard 方程式(苑蓮菊等, 2001)，顯示了在單位時間單位體積內流進和流出的量會等於體積含水量的改變量，而體積含水量的改變量和土壤內應力的狀態有關。

未飽和滲流問題的邊界條件有許多種形式，第一類邊界條件(Dirichlet 條件)，又稱水頭已知邊界，而第二類邊界條件(Neumann 條件)，又稱流量已知邊界。而在本研究中，對於降雨入滲的過程中，當降雨小於土壤之飽和滲透係數時，降雨完全入滲，此時邊界條件為第二類邊界條件，而當降雨大於飽和滲透係數時，邊界條件轉為第一類邊界條件。

二、不飽和土壤的剪力強度理論

當飽和土壤孔隙中的水分減少時，

將會在土壤顆粒間形成負的孔隙水壓力。而更多的水分減少，基質吸力便會增加使得土壤顆粒間的空氣和水份界面產生一張力進而增加土壤的剪應力。而當滲透發生，基質吸力減少，土壤的剪力強度也會跟著減小，因此滲透在土壤剪力強度上會形成負面的作用。

Fredlund & Morgenstern(1977、1978) 提出了以淨正向應力 ($\sigma - u_a$) 和基質吸力 ($u_a - u_w$) 兩狀態變數來表示土壤飽和和不飽和的剪力強度公式

$$s = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

式中， s 為剪力強度； c' 和 ϕ' 分別為有效凝聚力和有效摩擦角； σ 為總應力； u_a 和 u_w 分別為孔隙氣壓力和孔隙水壓力； ϕ^b 是由於基質吸力 ($u_a - u_w$) 所造成抗剪強度增加的曲線的傾角。

數值模擬

本研究採用數值方法分析邊坡的穩定性，首先藉由 SEEP/W 程式來模擬邊坡內之滲流行為，並求得邊坡內之水頭分佈，再將所得水頭分佈配合土壤之強度特性以 SLOPE/W 來進行穩定分析。

一、SEEP/W 簡介

SEEP/W 係由加拿大 Calgary 大學所發展的套裝軟體，主要功能為分析飽和與不飽和土層之滲流問題。SEEP/W 之分析原理係使用有限元素法，藉由分析多孔材料(如土壤、岩石)中孔隙水壓的變化，以求得相應之水流路徑、流速大小及地下水位面。

SEEP/W 可分析之滲流問題很廣泛，其問題型態主要有非拘限水層 (Unconfined Flow)、水池或湖泊滲透(Pond Infiltration)、超

額孔隙水壓(Excess Pore-Water Pressure)、暫態滲流 (Transient Seepage) 和降雨入滲 (Precipitation Infiltration)等問題。SEEP/W 的邊界條件，須設定在有滲流行為發生之土層，且須設於有限元素網格之格點上，方為有效。SEEP/W 程式可選擇之邊界條件類型有：(1)上、下游總水頭高度、(2)滲流量、(3)滲流速率等。

二、SLOPE/W 簡介

SLOPE/W 程式亦為加拿大 Calgary 大學所發展的套裝軟體，其主要功能為邊坡穩定分析，可分析簡單或複雜的邊坡穩定問題，其分析原理係採二維極限平衡理論，主要以切片法進行邊坡分析與安全因子計算。SLOPE/W 為一功能強大之邊坡穩定分析軟體，除一般常用之圓弧形破壞面之外，亦可進行岩盤上的非均質邊坡分析(Heterogeneous Slope Overlying Bedrock)、塊狀破壞分析(Block Failure Analysis)、外部荷重及加勁材(External Loads and Reinforcements)以及複雜孔隙水壓條件下之分析。

三、數值幾何模型及材料參數

1、幾何模型

為了研究降雨對於邊坡穩定的影響，採用一個理想化的二維有坡趾的邊坡進行參數研究 (見圖 1)，假定斜坡坡度為 30° ，邊坡左側高 12 公尺，右側高 32 公尺，坡趾長 20 公尺，坡頂長 45 公尺，模擬範圍為橫向 100 公尺，並假設存在一地下水位，於邊坡左側水位高為 6 公尺，於邊坡右側水位高為 12 公尺。並將此邊坡分割為 1065 個節點與 992 個有限元素網格來進行分析。

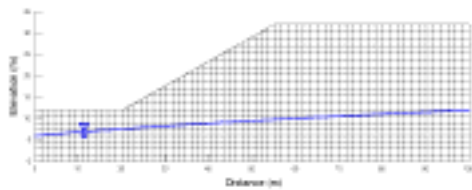


圖 1. 幾何模型之有限元素網格

Figure 1. Finite element mesh for geometric model.

2、材料參數

邊坡穩定分析所用之土壤強度參數如表 1 所示，而滲流分析所用的土壤水分特性曲線如圖 2 所示，滲透係數與孔隙水壓力之關係將以飽和滲透係數為基礎再以 Van Genuchten (1980)法來推估，為了解降雨對於邊坡穩定的影響，本研究將以兩個計算例來進行探討。

表 1. 邊坡分析選用材料參數

Table 1. Selected parameters for slope analysis.

現地 密度 ρ_t	比重 G_s	有效 凝聚力 c'	有效 摩擦角 ϕ'	吸力內 摩擦角 ϕ^b
20.09	2.7	9.6	30.2	14.68
kN/m^3		kpa	°	°

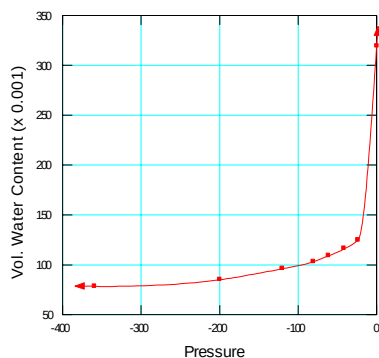


圖 2. 土壤水分特性曲線

Figure 2. Soil-water characteristic curve.

(1)降雨強度與滲透係數

第一例將針對降雨強度和滲透係數來進行邊坡穩定的探討，本例將模擬三種不同飽和滲透係數與三種不同降雨強度對邊坡穩定的影響，相關之參數如表 2 所示。

(2)降雨雨型

第二例則是對於降雨的雨型進行研究，本研究模擬的雨型是採用石棟鑫(1989)所提出的六種假想雨型分佈(如圖 3)進行邊坡穩定分析，即降雨強度由大排到小的前峰式雨型(peak at the first section)、降雨強度最大值在 1/4 延時處的擬前峰雨型(peak at first quarter section)、降雨強度最大值在 1/2 延時處的中央集中式雨型(peak at center)、降雨強度最大值在 3/4 延時處的擬後峰雨型(peak at the third section)、降雨強度由小排到大的後峰式雨型(peak at the last section)以及降雨強度最大值在 1/4 及 3/4 延時處的雙峰雨型(double peak)；其中降雨強度最大值為 48mm/hr，總降雨量為 1200mm。

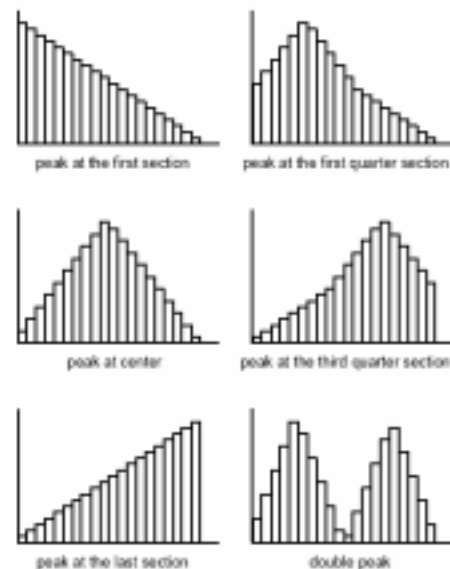


圖 3. 六種雨型分佈

Figure 3. The distribution of six rainfall patterns.

表 2. 邊坡穩定分析中數值變數之選用方案

Table 2. Selection of numerical variables for slope stability analysis.

方案編號	滲透係數 (cm/sec)	降雨強度 (mm/hr)	降雨型態	降雨延時 (hr)
1	1×10^{-1}	20	均勻	72
2	1×10^{-1}	40	均勻	72
3	1×10^{-1}	60	均勻	72
4	1×10^{-3}	20	均勻	72
5	1×10^{-3}	40	均勻	72
6	1×10^{-3}	60	均勻	72
7	1×10^{-5}	20	均勻	72
8	1×10^{-5}	40	均勻	72
9	1×10^{-5}	60	均勻	72
10	1.5×10^{-3}	48	前峰	48
11	1.5×10^{-3}	48	擬前	48
12	1.5×10^{-3}	48	中央	48
13	1.5×10^{-3}	48	擬後	48
14	1.5×10^{-3}	48	後峰	48
15	1.5×10^{-3}	48	雙峰	48

結果與討論

一、降雨強度與滲透性對邊坡穩定的影響

爲了研究降雨與滲透性對於邊坡穩定的影響，考慮土壤三種不同的滲透性係數，探討降雨強度對其邊坡穩定性之影響，其結果分別如圖 4 至圖 6 所示。

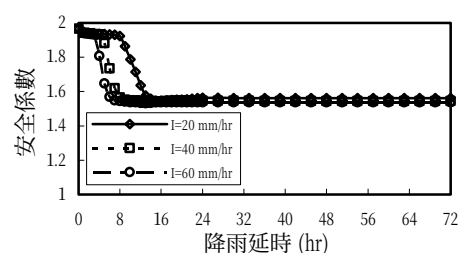


圖 4. 在高滲透係數($K=0.1$ cm/sec)下降雨強度對安全係數的影響

Figure 4. Effects of rainfall intensities on safety factors under high permeability.

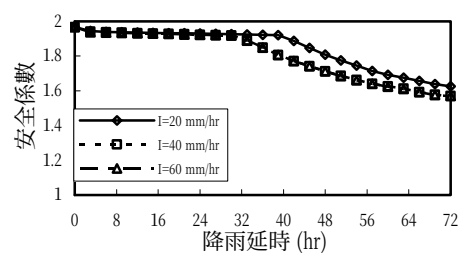


圖 5. 在中滲透係數($K=0.001$ cm/sec)下降雨強度對安全係數的影響

Figure 5. Effects of rainfall intensities on safety factors under medium permeability.

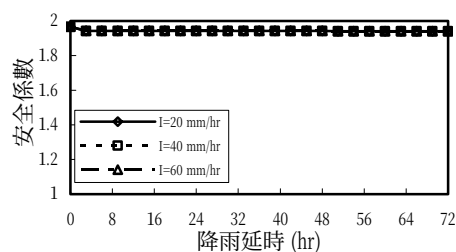


圖 6. 在中滲透係數($K=0.00001$)下降雨強度對安全係數的影響

Figure 6. Effects of rainfall intensities on safety factors under low permeability.

圖 4 係分析三種不同的降雨強度在高滲透係數 $k = 0.1\text{cm/sec}$ 之情況下對安全係數的影響，從圖中可以看出，在降雨強度為 $I=40\text{mm/hr}$ 與 $I=60\text{mm/hr}$ 的情況下，安全係數在降雨延時達到 3 小時後，隨即大幅下降，且較高的降雨強度其所下降的趨勢要比低降雨強度來得劇烈，而在降雨強度 $I=20\text{mm/hr}$ 的情況下，在降雨延時達到 8 小時後安全係數才明顯地下降。且當降雨到 15 小時後，三種不同降雨強度所對應之安全係數均趨近相同，這是因為當降雨達到一定時間後，土坡已完全被雨水所浸潤，其基質吸力消散，土壤之強度已降至最低值，所以再持續的降雨也不會對邊坡的穩定造成影響。

圖 5 是分析三種不同的降雨強度在中滲透係數 $K = 0.001\text{ cm/sec}$ 情況下之情形，從圖中可看出，邊坡的穩定性隨著降雨時間的增加而有降低的趨勢，而其中，在降雨強度 $I = 40\text{mm/hr}$ 與 $I = 60\text{mm/hr}$ 的安全係數變化曲線，皆在降雨延時達到 30 小時後，安全係數才有明顯的變化，且變化的趨勢相當一致，這是因為其降雨強度皆已大於飽和時的滲透性，所以其滲透入邊坡的水量，由邊坡飽和時的滲透係數決定之，而因為都是在相同滲透係數的情況下模擬，所以兩者的安全係數曲線變化才會一致。而在降雨強度 $I = 20\text{mm/hr}$ 的情形下，當降雨延時達到 39 小時後，安全係數才有明顯地下降趨勢。

圖 6 是分析了三種不同的降雨強度在低滲透係數 $K = 0.00001\text{cm/sec}$ 時之情形，可發現不管是在哪一種降雨強度下，安全係數幾乎沒有變化，這是因為在此種土壤條件下，土壤幾乎接近於不透水，水分滲入土壤之速率極為緩慢，自然也就對邊坡穩定不易發生影響。

綜合以上的分析結果顯示，降雨入滲會

造成安全係數之下降，對邊坡穩定有明顯的影響。一般而言，在相同的時間內，降雨強度越高，邊坡就越不穩定，但對於低滲透性的邊坡，雨水入滲量極微，影響不顯著。當降雨強度大於入滲率，則大部分的雨水將形成地表逕流帶走，只有少部分的雨水入滲對邊坡的穩定造成影響。

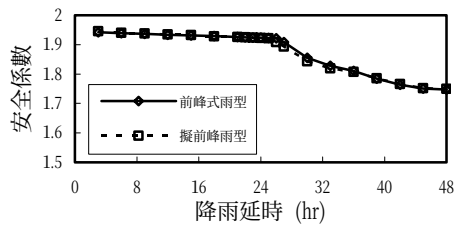
降雨強度對於邊坡穩定性的影響存在一個極限，而造成此效應的就是土壤的滲透性，因此可以根據土壤的滲透性來推估造成邊坡不穩定的臨界降雨強度。

降雨入滲對於邊坡的破壞大都為淺層的破壞，雨水入滲後先在邊坡表面形成一浸潤層，使得其基質吸力降低，當完全飽和時，基質吸力完全喪失，這對邊坡的穩定是極不利的，不過當表層完全飽和後，之後的降雨便對邊坡的穩定性影響不大。

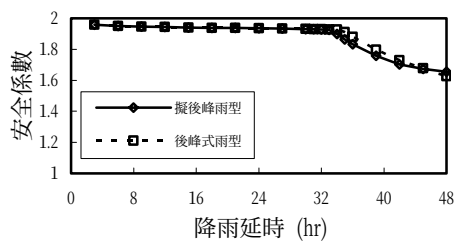
二、降雨雨型的影響

圖 7 是在各種降雨雨型及飽和滲透係數 $k = 0.0015\text{cm/sec}$ 下之分析結果。在擬前峰雨型情況下，邊坡之安全係數首先於降雨延時在第 25 小時即發生明顯下降之趨勢，隨後於降雨延時在第 26 小時，前峰式雨型的安全係數也發生了下降的趨勢，中央集中式雨型則於降雨延時在第 27 小時，安全係數開始大幅下降；而雙峰雨型則是在降雨延時在第 32 小時處安全係數才有明顯下降的趨勢，擬後峰雨型和後峰式雨型則分別於降雨延時在第 33 小時和第 34 小時，安全係數才開始有明顯的下降。

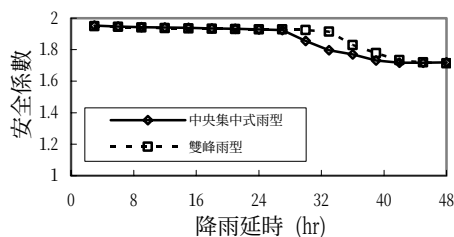
綜合上述各種不同降雨雨型所造成邊坡安全係數下降的趨勢，可以發現，降雨強度尖峰值最先到達的前峰式雨型與擬前峰雨型安全係數最先下降，直到模擬時間結束後安全係數約下降了 10%，為下降幅度最小的；



(a)



(b)



(c)

圖 7. 各種降雨雨型之安全係數歷時變化
Figure 7. Variations of safety factor with elapsed time for various rainfall patterns.

降雨強度尖峰值位於中間的中央集中式雨型和有著兩個尖峰值的雙峰雨型其安全係數開始下降的時間位在於中間，且下降的幅度也是在中間，約為 12%；而降雨強度尖峰值最後到達的後峰式雨型與擬後峰雨型安全係數最後下降，且下降的幅度最大，約為 16%。

結論與建議

- 一、在低滲透性土坡，由於土壤的滲透性很低($K = 0.00001\text{cm/sec}$)，雨水滲入邊坡極為緩慢，因此降雨對於邊坡穩定的影響不大，安全係數幾乎沒有變化。
- 二、在中滲透性土坡($K = 0.001\text{cm/sec}$)，由於降雨大於滲透性，在土壤表層形成一浸潤層，而使安全係數大幅降低，且在模擬時間結束後仍沒有緩和的趨勢了。
- 三、在高滲透性土坡($K = 0.1\text{cm/sec}$)，安全係數隨著降雨的發生而下降，但再經過某一時間後，安全係數便沒有再發生下降的趨勢。
- 四、在總降雨量相同的情況下，降雨強度尖峰值越快到達者會使得邊坡安全係數越快下降，但降雨強度尖峰值越慢到達者，雖然能使邊坡安全係數較晚發生下降的情形，卻會造成較大幅度的安全係數下降值。
- 五、依照不飽和土壤之剪力強度理論，邊坡因降雨入滲而破壞分為兩個階段：第一個階段是雨水入滲使土壤含水量增加，進而達到飽和狀態，而造成因基質吸力所產生之抗剪強度喪失；第二階段為再持續的降雨，使得飽和土壤之孔隙水壓力上升，有效應力減小，進而發生破壞。然而本研究因模擬時間較短，水份尚未完全入滲到地下水含水層，所以只探討到第一部份，故對於整個降雨入滲破壞機制之探討仍有研究之發展空間。

參考文獻

1. 石棟鑫 (1989)「台灣地區颱風降雨型態之分析研究」，中央大學土木工程研究

- 所碩士論文。
2. 苑蓮菊、李振栓等 (2001)「工程滲流力學及應用」。
 3. 陳本康、吳仁明 (1992)「地下水文及降雨與邊坡穩定的關係」, 第六屆水利工程研討會論文集, pp. 517-524。
 4. Cho, S.E and Lee, S.R. (2001) "Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration," Computers and Geotechnics, Volume: 28, Issue: 3, April, 2001, pp. 185-208.
 5. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. (1978) "The Shear Strength of Unsaturated Soil," Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, No.3 pp313-321.
 6. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977) "Stress State Variables for Unsaturated Soils," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 103, pp. 441-446.
 7. Gasmo, J.M., Rahardjo, H. and Leong, E.C. (2000) "Infiltration effects on stability of a residual soil slope," Computers and Geotechnics, Volume: 26, Issue: 2, March, 2000, pp. 145-165.
 8. User's guide for SLOPE/W, version 4. Canada Geo-slope international Ltd. (1998).
 9. User's guide for SEEP/W, version 4. Canada Geo-slope international Ltd. (1998).
 10. van Genuchten, M.T. (1980) "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils," Soil Science Society of America Journal Vol.44, pp. 892-898.

93 年 05 月 04 日 收稿

93 年 05 月 14 日 修改

93 年 05 月 29 日 接受