

不同降雨型態對異向性水力傳導之 淺層邊坡信賴度評估

Reliability Analysis of Anisotropic Hydraulic Conductivity of Shallow Landslides Under Different Rainfall Pattern

國立成功大學資源工程學系
博士後研究員

葉 信 富

Hsin-Fu Yeh

國立成功大學資源工程學系
碩士班研究生

沈 岡 陵

Kang-Ling Shen

國立成功大學資源工程學系
教授

李 振 誥*

Cheng-Haw Lee

摘 要

降雨入滲至邊坡土體時，淺層土壤內的基質吸力隨降雨入滲而改變，導致許多推估邊坡穩定性的參數不確定性增加。本研究利用信賴度分析，以機率分佈輸入土壤力學參數，其不同於傳統方法僅考量單一定值，進而評估淺層邊坡信賴指標 (reliability index)。本研究主要考量三種不同的降雨型態，分別為前峰雨型、中峰雨型和後峰雨型，分別以砂土、粉土及黏土三種類型土壤邊坡進行降雨入滲模擬，本研究設定土壤水平水力傳導係數(k_x)和垂直水力傳導係數(k_y)比值(k_x / k_y)分別為 2、10 及 20 三種異向性比值。本研究應用數值分析軟體 Geo-Studio 模擬降雨入滲至未飽和土壤邊坡內部，首先進行邊坡暫態滲流分析，將所評估之孔隙水壓空間分布進行邊坡穩定分析，計算出各時間點的邊坡信賴指標，進而探討降雨型態對於不同土壤水力傳導異向性邊坡穩定性的影響。

本研究結果顯示，砂土邊坡在三種降雨型態中，異向性高的土壤邊坡(k_x / k_y 比值越大)其信賴指標發生明顯下降的時間皆較異向性低的土壤邊坡延後，且於模擬時間內，異向性最高的土壤邊坡($k_x / k_y = 20$)其信賴指標值達到最小。另外，對粉土邊坡而言，異向性對於信賴指標發生明顯下降的延遲時間與砂土相似，異向性高的土壤邊坡信賴指標發生明顯下降的時間較異向性低的土壤邊坡晚，於模擬時間內，邊坡的信賴指標變化的趨勢皆為持續下降，以異向性低的土壤邊坡下降幅度最大。最後，黏土邊坡模擬結果顯示，於案例中的信賴指標皆沒有明顯的變化，可推知黏土水力傳導的異向性對於邊坡穩定性的影響並不大，本研究之分析結果可以提供坡地防災之參考。

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

關鍵詞：水力傳導異向性，未飽和邊坡，信賴指標，降雨型態。

ABSTRACT

Stability of the slope decreases due to the suction decreases with the rainfall infiltration. As the result, many parameters used in analysis their uncertainty will increase. In this study, reliability analysis is used for the unsaturated soil slopes. The numerical software Geo-Studio is used to simulate rainfall infiltrated inside the unsaturated soil. The analysis was performed on three typical rainfall patterns, including the advanced, normal, and delayed, with considering three different soil types (sand, silt, and clay). Anisotropic studies are defined the vertical anisotropic ratio as the ratio of vertical (k_y) to horizontal (k_x) hydraulic conductivity ($k_x / k_y = 2, 10, 20$). The finite element method and limit equilibrium method are used to calculate the reliability index with time. The process of infiltration into a slope due to rainfall patterns and its effect on soil slope stability is examined using numerical simulation.

The reliability index of the sand unsaturated slope is 7.7 before the start of the rainfall patterns. The time for reliability index reduction becomes noticeable is early for low anisotropic ratio ($k_x / k_y = 2$) but during the simulate time the high anisotropic ratio ($k_x / k_y = 20$) has the largest reduction in the reliability index. For the silt unsaturated slope, the reliability index exist obvious reduction in the reliability index when the anisotropic ratio is low ($k_x / k_y = 2$). During the simulate time all the silt slope cases are sustained decreased in reliability index. Finally, effect of anisotropic conductivity for the clay slope and the reliability index, the result indicated that there is not evident different between these three anisotropic ratio.

Keywords: anisotropic conductivity, unsaturated slope, reliability index, rainfall pattern.

一、前言

影響坡地坍塌之因素甚多，一般可歸納為外在因素與內在因素兩大類。其中，外在因素包括降雨量、溫度、颱風、地震及人為因素等；而內在因素包括地下水狀況、邊坡類型、地形及地質結構與條件之影響。綜觀以上各項影響因素，坡型、地形及地質均為潛勢因子，若無誘因影響，不易造成邊坡災害，而地下水的動態變化即為坡地崩坍主要誘因，且與外在因素降雨量及颱風息息相關，故邊坡的穩定性與降雨之關係密不可分(葉信富等，2005)。當邊坡上降雨發生時，除了一部份形成地表逕流而流失之外，另一部份則會入滲至邊坡土壤中。入滲至邊坡內部之雨水將造

成地表下土壤之含水量及飽和度改變，使得土壤或岩石界面抗剪強度折減，導致邊坡易發生破壞(如圖 1 所示)。

淺層邊坡在颱風或豪雨時期時發生不穩定的現象，早期在國外已有許多案例探討(Lumb 1975; Fukuoka 1980; Brand 1984; Kim *et al.* 1991)。而這些破壞一般均是淺層破壞且破壞面通常平行坡面，因此用一簡單的無限邊坡(infinite slope)分析方法可以用來推估坡地之安全係數。一般來說降雨會導致地下水位抬升和孔隙水壓升高，是導致坡地發生破壞之主因，然而在許多現地中並無足夠證據顯示坡地之破壞是直接由地下水位抬升所影響的。反而，主要是由於未飽和層中潤濕帶(wetting band)隨降雨入滲所增加至

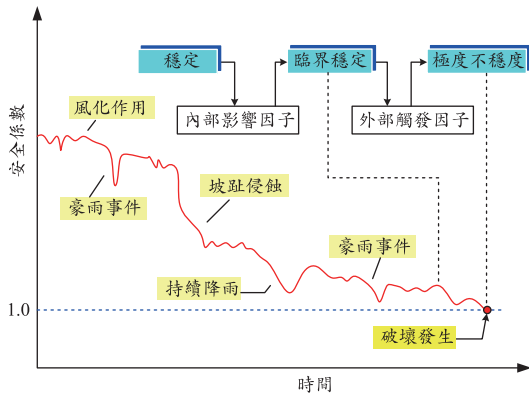


圖 1 安全係數隨時間變化示意圖(Popescu 2005)

一定的臨界深度，導致未飽和層中原有的基質吸力減低而進一步使得剪力強度下降，導致坡地發生滑動破壞(Fredlund and Rahardjo 1993)。其中，Van Asch *et al.* (1999)曾提出降雨造成邊坡破壞發生的形式包含有土石流(debris flow)、淺層滑動(shallow landslide) (深度 1-2 公尺)和深層滑動(deeper landslide) (深度 5-20 公尺)，邊坡滑動之深度不超過 2 公尺之淺層滑動是最容易發生邊坡破壞之形式，而且淺層滑動之研究最為困難，因需要更詳細之氣象水文資訊。圖 2 為降雨事件誘

發邊坡淺層崩塌及深層崩塌因子示意圖。

許多研究指出引起邊坡破壞的因素有很多，其中包含氣候條件、地質特性、地形特性及植生狀況等(Ost *et al.* 2003; Basile *et al.* 2003)，而這些影響因子則會隨著地理位置而變化。在熱帶或亞熱帶其地下水位通常很深，其未飽和殘積土(residual soil)時常因豪雨而產生淺層之破壞(Lim *et al.* 1996; Toll *et al.* 1999)。雨水入滲至未飽和殘積土，會改變土壤含水量亦使土壤基質吸力發生變化因而減低坡地之穩定性。在乾季時，未飽和殘積土存在很高的基質吸力(負孔隙水壓)且剪力強度亦很高。然而，在長期雨季下時，當雨水入滲之邊坡使得土壤含水量增加而基質吸力減少剪力強度亦減少，則易引發淺層地滑(Fredlund and Rahardjo 1993; Rahardjo *et al.* 1995; Ng and Shi 1998; Fourie *et al.* 1999; Tsaparas *et al.* 2002; Collins and Znidarcic 2004; Rahardjo *et al.* 2007; Huang *et al.* 2009)。

未飽和土壤邊坡滲流機制於國內外已有多位學者將其應用至現地研究中，然而多數的研究對於土壤水力傳導係數的大多考慮為均向性(isotropy)，對於異向性(anisotropy)的研究文獻相

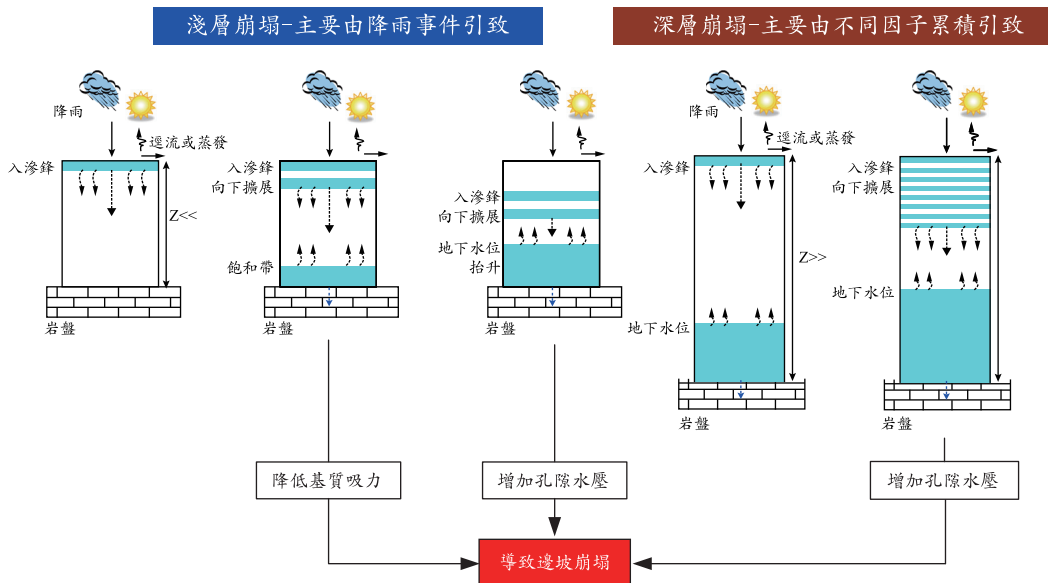


圖 2 誘發邊坡淺層崩塌及深層崩塌因子示意圖(Beek 2002)

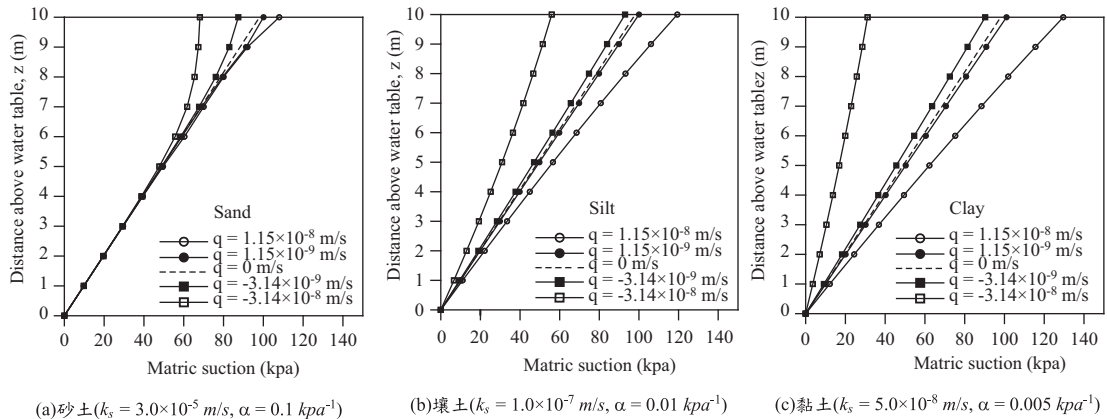


圖 3 考量蒸發與入滲行為之不同流量在三種土壤條件下之基質吸力垂直剖面

對較少。另外，過去研究在探討土壤邊坡的穩定度，通常採用安全係數(factor of safety)進行評估，所以本研究為了能更準確的描述土壤邊坡發生破壞的機制，主要探討水力傳導係數異向性(anisotropic hydraulic conductivity)並考量三種不同的降雨型態(rainfall pattern)，分別為前峰雨型、中峰雨型和後峰雨型，以三種類型土壤邊坡(砂土、粉土及黏土)進行降雨入滲模擬。於評估邊坡穩定的方法，本研究使用機率式(probability)邊坡穩定分析方法，以機率分佈概念探討土壤力學參數，進而利用信賴指標(reliability index)來描述邊坡穩定性。

二、未飽和層剖面概念

2.1 基質吸力垂直剖面分佈

未飽和層中基質吸力之垂直剖面分佈受到下列幾個因素影響，首先是孔隙介質中之土壤水力參數，其可由土壤水分特徵曲線(*Soil Water Characteristic Curve*, SWCC)和土壤水力傳導函數(*Hydraulic Conductivity Function*, HCF)來推得(Yeh *et al.* 2008)；另外則為環境因數，其中包含了降雨所產生之入滲或蒸發行為之流量控制以及邊界條件(如：地下水位之深度)等影響因數，導致基質吸力在未飽和層中有著不同型態之表現。基質吸力之垂直剖面如何受到入滲與蒸發影響之研究，是一重要的議題亦已有許多學者做過相關研究(Yeh 1989; Wilson 1997)。然而基質

吸力剖面的分佈會因其季節性的不穩定變化，使得其變成許多研究淺層邊坡穩定的重要因數(Fredlund *et al.* 2001)。

欲正確地預測未飽和層中基質吸力剖面變化，可以透過水流控制方程式與適當的邊界條件來推估；對於一穩態(steady state)剖面而言，未飽和層水流可使用達西定律(Darcy's law)來描述：

$$q = -k \left(\frac{d(u_a - u_w)}{\gamma_w dz} + 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

其中， k 為未飽和水力傳導係數[L/T]， γ_w 為水的單位重[F/L³]。

另外，為描述未飽和層的水力傳導特徵，可引用 Gardner (1958)所提出單一參數之指數模式，因其被廣泛應用於未飽和和水分問題之解析，故結合 Gardner 的未飽和水力傳導模式 $k = k_s e^{-\alpha(u_a - u_w)}$ ，其中參數 α 為所能承受之進氣潛能值，在考量邊界條件為地下水位 $z = 0$ ，和一穩態入滲率 q ，可以得到一基質吸力之解析解(Lu and Griffiths 2004)：

$$(u_a - u_w) = \frac{-1}{\alpha} \ln \left[(1 + q/k_s) e^{-\alpha \gamma_w z} - q/k_s \right] \dots \dots (2)$$

圖 3 為考量蒸發與入滲之不同流量在三種土壤條件下之基質吸力垂直剖面。圖 3(a)以砂土層為例，顯示僅在地下水位面上 6 公尺其基質吸力才有顯著的變化，直至地下水位面上 10 公尺，

考量入滲($-3.14 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)與蒸發($1.15 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)行為變化範圍大約在 40 kpa ，在地下水位處於平衡狀態為靜水壓情況下($q = 0$)，基質吸力分佈與高程呈現一線性直線。另外，以圖 3(b)粉土層條件下，其不同流通量情況對於土壤基質吸力剖面分佈影響較砂土層大，當考量最大入滲行為($-3.14 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)，基質吸力變化可以直接影響到達地下水位面。以圖 3(c)黏土層條件下，土壤基質吸力剖面分佈變化最大，考量入滲與蒸發行爲其變化範圍可以高達 100 kpa 。

2.2 未飽和層含水量剖面分佈

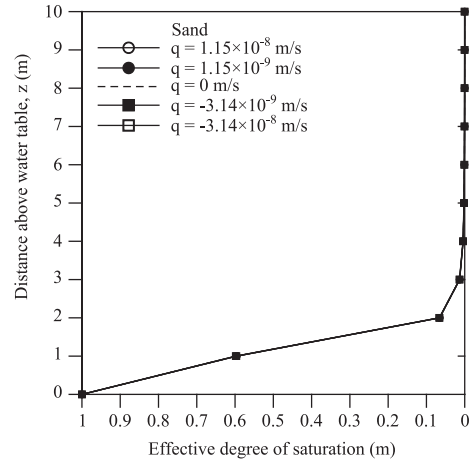
未飽和層含水量之分佈可以利用土壤水分特徵曲線(SWCC)來推估，以 van Genuchten (1980) 模式為例，土壤基質吸力與有效含水量的關係式可以表示如下：

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad \dots\dots\dots (3)$$

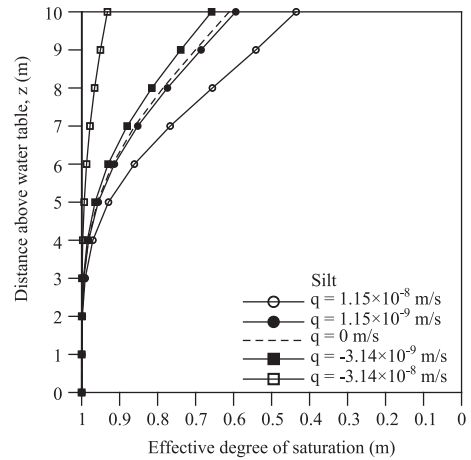
其中，參數 α 是代表吸力值相對於土壤水分特徵曲線上的反曲點(inflexion point)，其物理意義為所能承受的空氣進入值，單位為土壤吸力；參數 n 為土壤水分特徵曲線上之未飽和漸變帶改變率，其與土壤粒徑分布有關。上式結合式(2)可以探討不同流通量在未飽和層中有效含水量垂直剖面圖(Lu and Griffiths 2004)：

$$\frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left(\frac{1}{1 + \left\{ -\ln \left[\left(1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\gamma_w \alpha z} - \frac{q}{k_s} \right] \right\}^n} \right)^{1-1/n} \quad \dots\dots\dots (4)$$

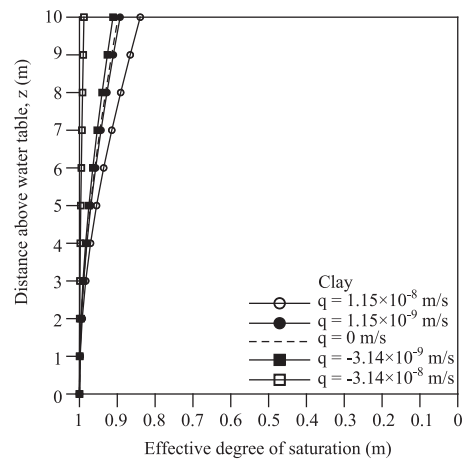
圖 4 亦為考量蒸發與入滲之不同流通量在三種土壤條件下之有效飽和度垂直剖面。圖 4(a)以砂土層為例，對於各種流通量情況下，其變動皆是相當不敏感的，圖中顯示飽和度在地下水位面上 4 公尺處迅速降至含水量為零。根據毛細管理論，砂土之毛細管在靜水壓之情況下因自身顆粒



(a)砂土 ($k_s = 3.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $\alpha = 0.1 \text{ kpa}^{-1}$, $n = 5.0$)



(b)粉土 ($k_s = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, $\alpha = 0.01 \text{ kpa}^{-1}$, $n = 4.0$)



(c)黏土 ($k_s = 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $\alpha = 0.005 \text{ kpa}^{-1}$, $n = 2.0$)

圖 4 考量蒸發與入滲行為之不同流通量在三種土壤條件下之有效飽和度垂直剖面

孔隙較大，所以上升高度本來就相對較低。另外，以圖 4(b)壤土層與圖 4(c)黏土層條件下考量不同流量情況，對土壤有效飽和度與地下水位高程之剖面分佈均不顯著，其中黏土層在地下水位面上 10 公尺處，其變動範圍僅 20%以內。所以，三種土壤層對有效飽和度與地下水位高程剖面分佈之影響，應該是本身顆粒孔隙大小所能持結的水分有關。

三、研究方法

本研究使用由加拿大 Calgary 大學於 1998 年發展出來的套裝軟體 Geo-Studio 數值軟體，其中 SEEP/W 功能為分析飽和與未飽和土層滲流問題，可應用在穩態(steady state)或暫態(transient state)情況下。分析原理為使用有限元素法，藉由分析多孔材料中孔隙水壓變化來得到相對應的水流路徑、流速大小及地下水位面。另外，SLOPE-W 功能為邊坡穩定分析，可分析簡單與複雜的邊坡穩定問題，分析原理為二維極限平衡理論，以切片法(slices method)進行邊坡分析與安全係數計算。本研究探討水力傳導係數異向性並考量三種不同的降雨型態，分別為前峰雨型、中峰雨型和後峰雨型，以三種類型土壤邊坡(砂土、粉土及黏土)進行降雨入滲模擬。於評估邊坡穩定的方法，本研究使用機率式(probability)邊坡穩定分析方法，以機率分佈概念探討土壤力學參數，進而利用信賴指標(reliability index)來描述邊坡穩定性。

3.1 滲流分析

本研究以暫態滲流分析來進行研究討論，使用之二維有限元素暫態模型偏微分方程式表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + q = m_w \rho_w g \frac{\partial H}{\partial t} \dots (5)$$

其中： H 為總水頭； k_x 、 k_y 為 x 、 y 方向水力傳導係數； q 為邊界流量； ρ_w 為水密度； m_w 為比水容積。 m_w 定義為：

$$m_w = -\frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)} \dots (6)$$

其中： m_w 為體積含水量； u_a 為孔隙空氣壓力； u_w 為孔隙水壓力； $(u_a - u_w)$ 為基質吸力。由式(6)可知在飽和含水層時，因為體積含水量為一定值，所以 $m_w = 0$ ，而在未飽和含水量，未飽和水力傳導係數和 m_w 受基質吸力的影響而有不同變化值。

另外，暫態滲流分析中需輸入其土壤未飽和參數來進行模擬分析，本研究主要利用 van Genuchten (1980)經驗式來建立各種土壤之完整土壤水份特徵曲線(SWCC)進行分析，方程式如式(3)所示。

3.2 未飽和土壤剪力強度

未飽和土壤力學原理牽涉到土粒、孔隙水及孔隙氣體等三項材料之互制行為，Fredlund et al. (1978)提出廣義莫爾-庫倫破壞準則，其以多相連體力學之觀點，提出部分飽和土壤可用三個應力狀態參數總應力(σ_n)孔隙氣壓力(u_a)及孔隙水壓力(u_w)中之任兩個組合來定義其應力狀態，並建議採用($\sigma_n - u_a$)及($u_a - u_w$)兩個獨立應力狀態變數，不僅經實驗證明可成功地解釋未飽和土體之應力平衡狀態，且已相當廣泛地應用在與土壓力、剪力強度及體積變化相關的地工問題上。

基質吸力可直接解釋為代表孔隙水壓力(u_w)與孔隙氣壓力(u_a)兩者之壓力差。基質吸力代表的物理現象，即傳統飽和土壤力學所稱之負孔隙水壓力(negative pore water pressure)。因為一般位於地下水位上方的未飽和層，孔隙氣壓力係與大氣壓力相通，此時之孔隙氣壓力等於大氣壓力(表示壓力為零)；未飽和層的孔隙水壓力將小於大氣壓力(表示壓力為負值)。因此兩者的差值為正值，為未飽和土壤理論所稱之基質吸力。因此，未飽和土壤的基質吸力愈大，代表負孔隙水壓力越大。

Fredlund et al. (1978)所提出之未飽和土壤抗剪強度如下：

$$\tau_f(\sigma_n, u_a, u_w) = c' + (\sigma_n - u_a)_f \tan \phi'_f + (u_a - u_w)_f \tan \phi'_b \dots (7)$$

其中： τ_f 為破壞時破壞面上的剪應力； c' 為土壤之有效凝聚力； $(\sigma_n - u_a)_f$ 為破壞面上的正相應力狀態； ϕ' 為受淨正向應力狀態 $(\sigma_n - u_a)_f$ 影響之內摩擦角； $(u_a - u_w)_f$ 為破壞面上的土壤基質吸力狀態； ϕ_b 為受土壤基質吸力狀態 $(u_a - u_w)_f$ 增加而對應之摩擦角度。將飽和土壤之莫爾-庫倫破壞準則擴展到未飽和之範圍，以剪應力 τ 為垂直軸， $(\sigma_n - u_a)$ 與 $(u_a - u_w)_f$ 分別為水準軸，可構成三維土壤抗剪破壞包絡面，如圖 5 所示。

未飽和層滲流分析中，水力傳導係數是土壤水份含量的函數，而土壤水份含量又是孔隙水壓力的函數，所以分析未飽和滲流中滲透係數是孔隙水壓力的函數。當飽和土壤孔隙中的水分減少時，土壤顆粒間會形成負的孔隙水壓，由於造成更多的水分減少，基質吸力便會增加使得土壤顆粒間的空隙和水份界面產生一張力進而增加土壤的剪應力。相反的當降雨入滲事件發生，土壤基質吸力減少，土壤的剪力強度也會跟著減小，因此降雨入滲行為在土壤剪力強度上會形成負面的作用。

3.3 邊坡穩定分析

邊坡穩定分析一般是採用極限平衡法來計算其安全係數，其認為邊坡破壞是沿著某個破壞滑動面，滑動力主要是由於載重與外力而來，且剪力強度由莫爾庫倫破壞準則提供。極限平衡法為計算邊坡此一滑動面之力平衡以求得其安全係數。在本研究中，未飽和土壤邊坡安全係數是

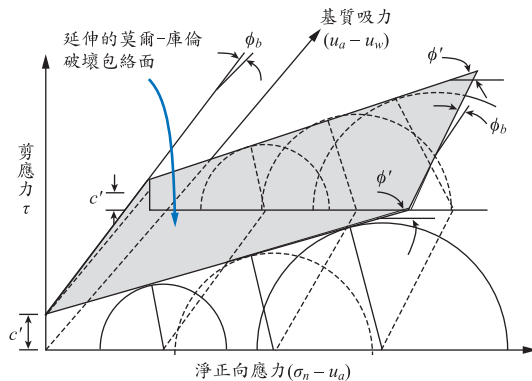


圖 5 未飽和土壤廣義莫爾-庫倫破壞包絡面

由 Bishop 簡化法來推求，此法是用於圓弧面的破壞面，特點乃在於假設切片間之作用力為沿水平方向，亦不考慮片間之垂直剪力，且此法被認為所需運算時間較少可得準確性較高。切片底部之正向力可由垂直向量力之平衡而得。由破壞準則之假設，正向力 N 以下式表示：

$$N = \frac{\left(W - \frac{c' l \sin \beta}{F} + \frac{ul \tan \phi' \sin \beta}{F} \right)}{m_a} \dots\dots\dots (8)$$

其中： W 為切片總重； c' 為土壤有效凝聚力； ϕ' 為土壤有效內摩擦角； l 為切片底部長度； β 為切底部中心點之傾角； u 為孔隙水壓力； F 為安全係數；且 $m_a = \cos \beta + (\sin \beta \tan \phi') / F$ ，安全係數則由對某一點之力矩平衡而得。

3.4 信賴指標

由於邊坡分析所使用的土壤力學參數(例如：凝聚力及摩擦角)常具有某種程度的不確定性，傳統的邊坡穩定分析在處理這些參數的不確定性大多採用平均值或是過去經驗值輸入極限平衡法來求取安全係數，再以容許安全係數(一般均大於 1.0)來概括參數的不確定性，即當安全係數大於容許值時才認定其為安全(Duncan 2000)。機率式邊坡穩定分析方法，考慮參數的變異，將所有可能發生的參數值帶入極限平衡模式中。

邊坡破壞機率一般被認為較容許安全係數更能客觀地處理不確定性。信賴指標(reliability index)為一個常見的邊坡破壞機率表示方法(Bergado and Anderson 1985; Li and Lumb 1987; Gui et al. 2000; Babu and Murthy 2005)，評估方法為 $RI = \frac{(\mu - 1.0)}{\sigma}$ ，其中 μ 為安全係數的平均值， σ 為標準偏差。Wolff (1996)曾提出邊坡信賴指標為 3.0 到 4.0 之間是可以被接受的工程安全建議。美國工兵團(U.S. Army Corps of Engineers) (1999)亦建議邊坡工程之基本的安全信賴度可區分成七個層級，其中 3.0 到 4.0 為一平均值。

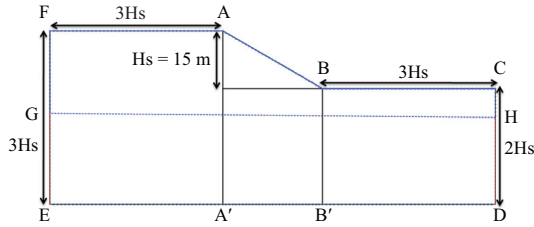


圖 6 邊坡幾何模型示意圖

3.5 幾何模型建置

本研究探討不同降雨型態對於邊坡安全係數的影響，首先設定一邊坡幾何模型，如圖 6 所示。本研究設定邊坡坡度約為 30 度，左側高 45 公尺，右側高 30 公尺，坡頂長 45 公尺，坡址長 45 公尺，模擬橫向總長為 116 公尺，並設定一地下水位面，於邊坡左側水位高 23.5 公尺，邊坡右側水位高 22.5 公尺，並將此邊坡模型分割為 4666 個節點與 4515 個有限元素網格。模型邊界條件設定上邊界 FA, AB 及 BC 為降雨入滲邊界(定流量邊界)；左右邊界 FE 與 CD 及下邊界 DE 定為零流量邊界；GE 與 HD 設定為隨著深度改變之定水頭邊界。

3.6 土壤材料參數

本研究利用有限元素程式 SEEP/W 進行二維暫態滲流分析，其所需輸入之參數為土壤水分特徵曲線(SWCC)參數與飽和水力傳導係數。本研究採用 van Genuchten (1980)土壤水分特徵曲線推估，並分成三種不同滲透性土壤材料由高至低分別為砂土、粉土及黏土進行模擬，其中土壤水

表 1 滲流分析土壤參數設定表

土壤材料	SWCC 參數設定			飽和水力傳導參數設定
	α	n	θ_s	k_s (m/s)
砂土	3.3	6.0	0.3	2.15×10^{-5}
粉土	18.18	3.0	0.35	1.0×10^{-6}
黏土	181.82	1.8	0.44	7.0×10^{-7}

表 2 邊坡穩定分析土壤力學參數設定表

土壤材料	飽和單位重 γ_{sat} (kN/m ³)	凝聚力 c (kN/m ²)	摩擦角 ϕ (degree)
砂土	18	0	35
粉土	19	5	30
黏土	17	8	25

力參數及飽和水力傳導係數設定，如表 1 所示。其中，異向性的比值(k_x / k_y)設定為 2、10 及 20。邊坡安全係數分析所用之土壤強度參數如表 2 所示。探討信賴指數的相關係數(Coefficient of variation)本研究主要參考 Duncan (2000)彙整之相關係數值作為本研究之模式設定，並以常態機率分佈代入模式中。

3.7 研究案例

本研究訂定三種降雨型態案例進行邊坡穩定模擬分析，分別為降雨強度尖峰最先到達的前峰雨型、降雨強度尖峰值位於中間的中峰雨型和降雨強度尖峰位於後段的後峰雨型，如圖 7 所示。其中，降雨強度最大值為 8.4 mm/hr，總降雨量為 440 mm。本研究所模擬降雨入滲時間為 120 小時。

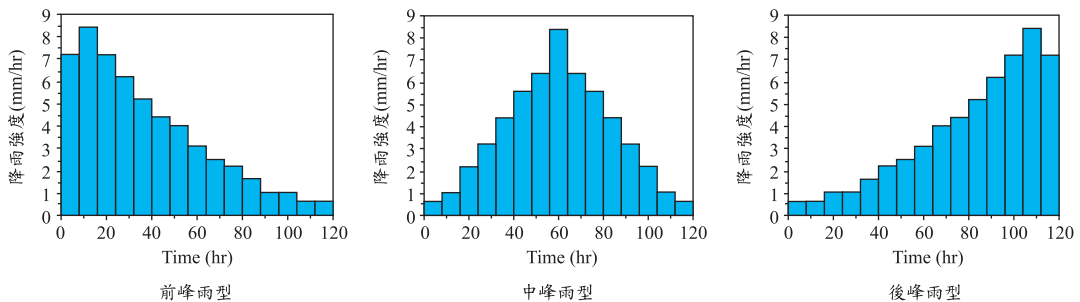


圖 7 本研究假設之三種降雨型態分佈圖

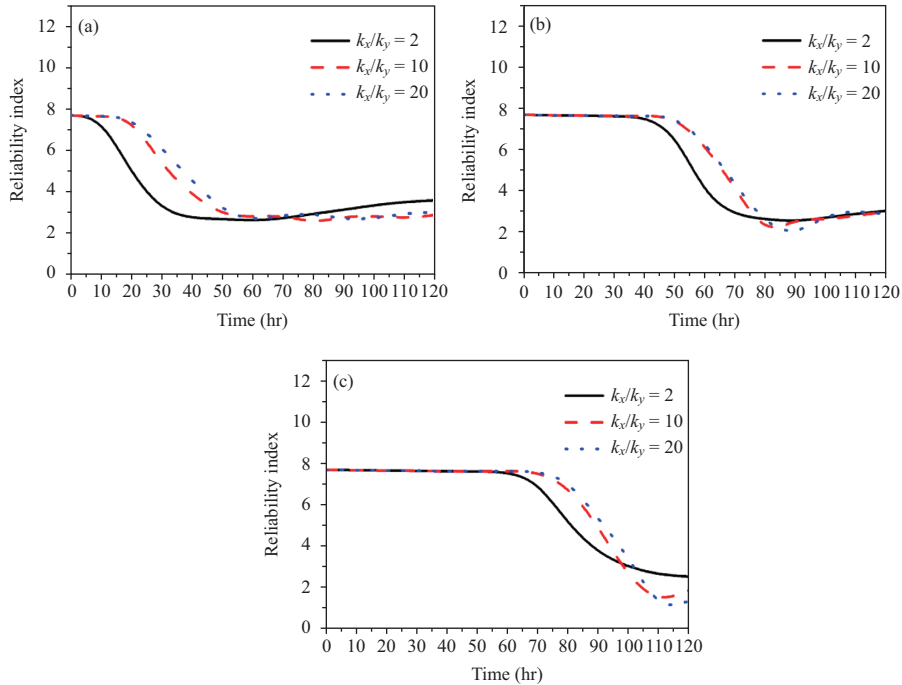


圖 8 砂土邊坡於三種降雨事件下不同異向性比值之信賴指數隨時間的變化，(a)前峰降雨；(b)中峰降雨；(c)後峰降雨

四、結果與討論

4.1 砂土邊坡

本研究首先考量砂土邊坡，以三種不同的降雨型態，探討水力傳導係數異向性之影響。本研究結果顯示，在降雨事件發生前，砂土邊坡之初始信賴指標為 7.7。比較三種降雨型態之下，砂土邊坡信賴指標向下遞減的發生時間與降雨尖峰到達的時間呈有相同趨勢，如圖 8 所示。其中，水力傳導係數異向性低($k_x / k_y = 2$)的土壤邊坡，其信賴指標於降雨事件發生後 6 小時發生顯著的下陷，相對於異向性高($k_x / k_y = 10$ 及 20)的土壤邊坡下降時間較早約 15 個小時。此乃異向性高的土壤邊坡，降雨造成的暫態飽和區因土壤垂直方向的水力傳導係數和水平方向傳導係數相差越多，暫態飽和區越不易向下入滲，而是往水平方向移動。

上述現象可由圖 9 孔隙水壓的剖面變化圖顯示其差異，異向性低($k_x / k_y = 2$)的土壤邊坡暫態

飽和區入滲速率約為異向性高($k_x / k_y = 10$ 及 20)土壤邊坡的 2 倍。在降雨事件中，信賴指標以異向性最高的土壤邊坡下降幅度最大，而又以後峰降雨事件下降最多。後峰降雨事件為例，異向性比值 $k_x / k_y = 20$ 的土壤於降雨事件發生後 115 小時信賴指標達到最小，較初始信賴指標下降 89%，而比值 $k_x / k_y = 10$ 和 2 信賴指標分別下降 84%和 67%。

4.2 粉土邊坡

本研究考量不同降雨類型入滲至粉土邊坡的模擬結果顯示，在降雨事件發生前，初始信賴指標為 12.8，其值比前述砂土邊坡高。本案例之信賴指標依三種不同的降雨事件相互比較，可清楚瞭解到不同的降雨類型是影響信賴指標發生顯著下降時間的因素之一，以異向性比值 $k_x / k_y = 2$ 為例，前峰、中峰、後峰雨型分別約於 28、45 及 60 小時開始明顯下降，此結果與砂土邊坡類似(如圖 10 所示)。依不同水力傳導異向性比較，

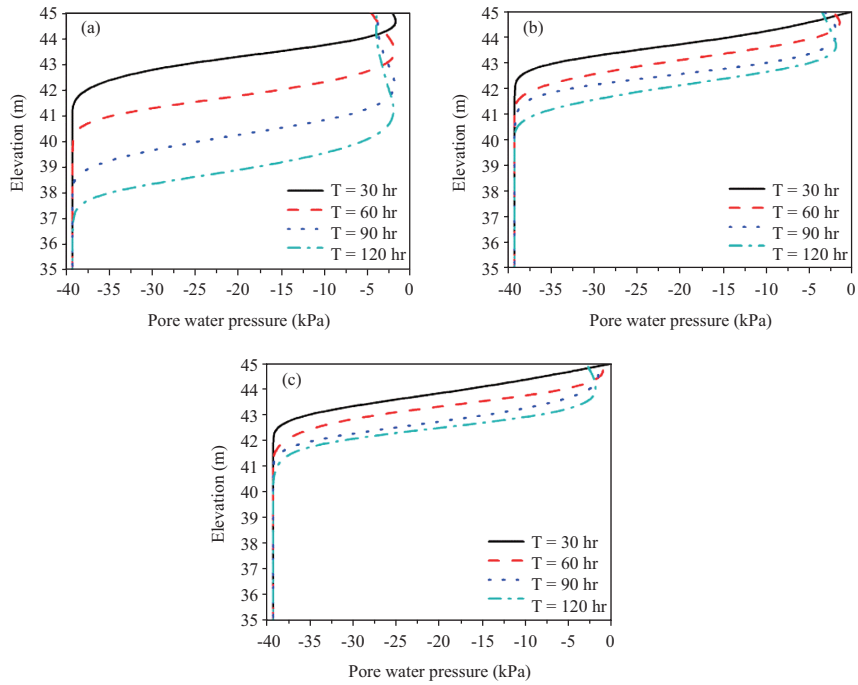


圖 9 砂土邊坡於前峰降雨事件下不同異向性比值之孔隙水壓剖面變化圖，(a)比值 $k_x/k_y = 2$ ；(b)比值 $k_x/k_y = 10$ ；(c)比值 $k_x/k_y = 20$

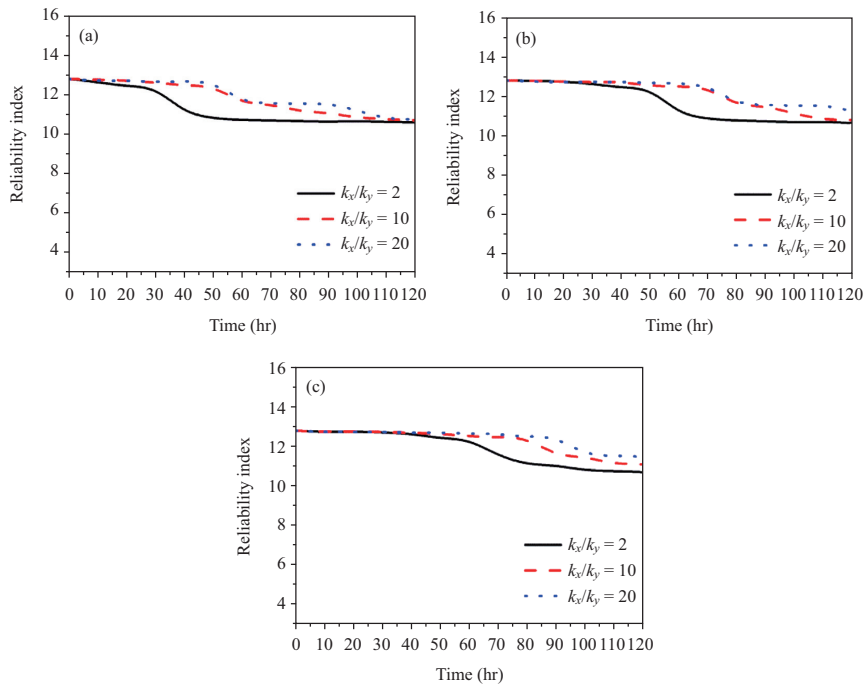


圖 10 粉土邊坡於三種降雨事件下不同異向性比值之信賴指數隨時間的變化，(a)前峰降雨；(b)中峰降雨；(c)後峰降雨

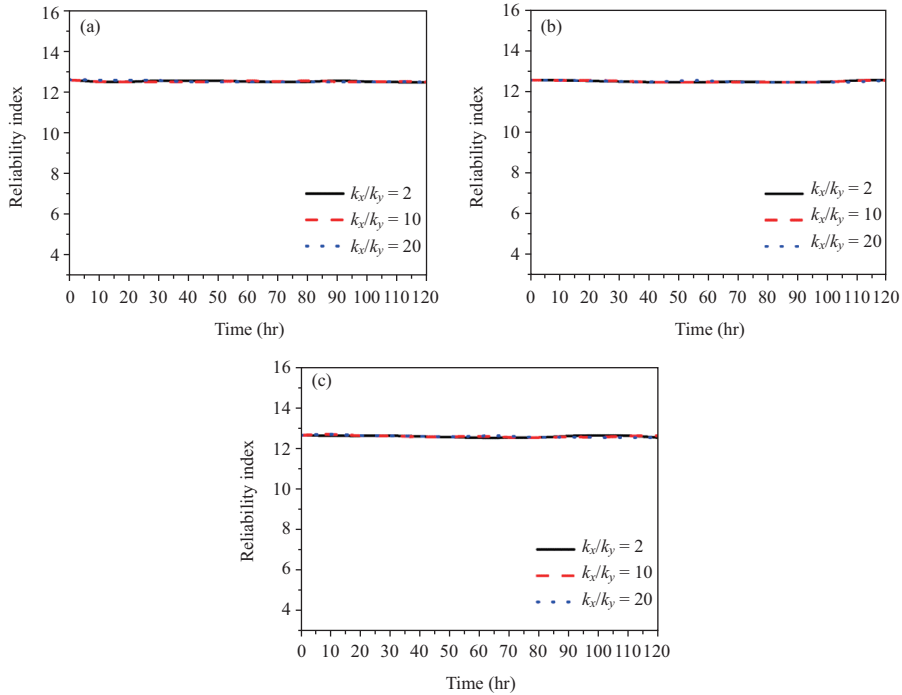


圖 11 黏土邊坡於三種降雨事件下不同異向性比值之信賴指數隨時間的變化，(a)前峰降雨，(b)中峰降雨，(c)後峰降雨

可知異向性高($k_x / k_y = 10$ 及 20)的土壤邊坡較異向性低($k_x / k_y = 2$)的邊坡可維持一段較長的時間才開始發生信賴指標下降，意即土壤邊坡的不穩定之發生，此一現象的結果與因素也和砂土邊坡相同。

4.3 黏土邊坡

最後本研究針對黏土邊坡之不同降雨型態之模擬，由圖 11 結果顯示，考量不同的降雨型態以及不同的異向性高低，所評估之信賴指標在降雨事件的過程中，其變化量與初始信賴指標之比較，均為不到 1.0%之變化。由本研究評估結果，黏土邊坡因黏土之水力傳導係數很低，使得雨水不易入滲進入土壤內部，對於水力傳導係數不管是橫向或是縱向皆遠小於降雨強度，故異向性高低對黏土邊坡的衝擊影響較不顯著。

五、結 論

本研究利用信賴度分析，以機率分佈輸入土

壤力學參數來評估淺層邊坡信賴指標。本研究考量前峰雨型、中峰雨型和後峰雨型，分別以砂土、粉土及黏土三種類型土壤邊坡進行降雨入滲模擬。本研究設定三種異向性比值，應用數值分析軟體 Geo-Studio 模擬降雨入滲至未飽和土壤邊坡內部，計算出各時間點的邊坡信賴指標，進而探討降雨型態對於不同土壤水力傳導異向性邊坡穩定性的影響。本研究針對各未飽和土壤邊坡探討土壤水平方向(k_x)與垂直方向(k_y)的水力傳導係數不同時，進行降雨事件入滲至邊坡，邊坡穩定性的評估。研究結果指出，當降雨事件發生，降雨入滲至土壤邊坡時，邊坡穩定性會下降，而信賴指標在降雨事件中發生明顯下降的時間與各降雨事件中降雨尖峰到達的時刻呈現相同的趨勢。

另外，研究異向性高低造成邊坡安全的穩定性評估中，結果指出，當異向性較高的土壤邊坡，其信賴指標相較於異向性低的土壤邊坡發生下降時間延遲，此因異向性高的土壤邊坡，降雨

入滲後於土體中形成的暫態飽和區垂向入滲速率較慢，故信賴指標發生下降時間也會較晚發生。對於黏土邊坡而言，不同的降雨事件以及異向性的高低，沒有顯著的差異，此因黏土本身的水力傳導係數較小，降雨不易入滲至土體邊坡內部。

謝 誌

本研究承蒙國科會 NSC-100-2116-M006-004 計畫補助，謹致謝忱。

參考文獻

1. Babu, G. L. S., and Murthy, D. S. N., "Reliability Analysis of Unsaturated Soil Slopes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 11, pp. 1423-1428, 2005.
2. Basile, A., Mele, G., and Terribile, F., "Soil hydraulic behavior of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998," *Geoderma*, Vol. 117, No. 3-4, pp. 331-346, 2003.
3. Beek, L. P. H., "Assessment of influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment," *University of Utrecht, Utrecht, The Netherlands*, 363, 2002.
4. Bergado, D. T., and Anderson, L. R., "Stochastic Analysis of Pore Pressure Uncertainty for the Probabilistic Assessment of the Safety of Earth Slopes," *Soils Found.* Vol. 25, No. 2, pp. 87-105, 1985.
5. Bishop, A. W., and Morgenstern, N., "Stability Coefficients for Earth Slopes," *Geotechnique*, Vol. 10, No. 4, pp. 164-169, 1960.
6. Brand, E. W., Premchitt, J., and Phillipson, H. B., "Relationship between rainfall and landslide in Hong Kong," *Proc., 4th International Symposium on Landslide*, Toronto, Canada, 1, pp. 377-384, 1984.
7. Collins, B. D., and Znidarcic, D., "Stability analyses of rainfall induced landslides," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 4, pp. 362-372, 2004.
8. Duncan, J. M., "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 307-316, 2000.
9. Fourie, A. B., Rowe, D., and Blight, G. E., "The effect of infiltration on stability of the slopes of a dry ash dump," *Geotechnique*, Vol. 49, No. 1, pp. 1-13, 1999.
10. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley, New York, 1993.
11. Fredlund, D. G., Morgenstern N. R., and Widger R. A., "The Shear Strength of Unsaturated Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321, 1978.
12. Fredlund, D. G., Ng, C. W. W., Rahardjo, H., and Leong, E. C., "Unsaturated soil mechanics: Who needs it?" *Geotech. News*, December. *GeoSpec.*, Bi-Tech Publishing. Vancouver, B.C., Canada, pp. 43-45, 2001.
13. Fukuoka, M., "Landslides associated with rainfall," *Geotech. Eng., J. Southeast Asia Soc. Soil Eng.*, Vol. 11, pp. 1-29, 1980.
14. Gardner, W., "Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils," *Highway Research Board Special Report 40 International Symposium on Physic-Chemical Phenomenon in soils*. Washington D.C, pp. 78-87, 1956.
15. Geo-Slope International LTD. "SEEP/W for finite element seepage analysis", Vol. 4. User Manual. Calgary, Alberta, Canada, 2004.
16. Geo-Slope International LTD. "SLOPE/W for slope stability analysis", Vol. 4. User Manual. Calgary, Alberta, Canada, 2004.
17. Gui, S. X., Zhang, R. D., Turner, J. P., and Xue, X. Z., "Probabilistic Slope Stability Analysis with Stochastic Soil Hydraulic Conductivity," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

- Engineering, Vol. 126, No. 1, pp. 1-9, 2000.
18. Huang, C. C., Ju, Y. J., Hwu, L. K., and Lee, J. L., "Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures," *Journal of Hydrology*, Vol.307, pp. 39-51, 2009.
 19. Kim, S. K., Hong, W. P., and Kim, Y. M., "Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea," *Proc., 6th International Symposium on Landslides*, Christchurch, New Zealand, pp. 989-994, 1991.
 20. Li, K. S., and Lumb, P., "Probabilistic Design of Slopes," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 520-535, 1987.
 21. Lim, T. T., Rahardjo, H., Chang, M. F., and Fredlund, D. G., "Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 618-628, 1996.
 22. Lu, N., and Griffiths, D. V., "Profiles of Steady-State Suction Stress in Unsaturated Soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130 No. 10, pp. 1063-1076, 2004.
 23. Lumb, P., "Slope failures in Hong-Kong," *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, pp. 31-65, 1975.
 24. Ng, C. W. W., and Shi, Q., "A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage," *Computers and Geotechnics*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-28, 1998.
 25. Ost, L., Van-Den, E. M., Poesen, J., and Vanmaercke-Gottigny, M. C., "Characteristics and spatial distribution of large landslides in the Flemish Ardennes (Belgium)," *Zeitschrift fur Geomorphologie N. F.*, Vol. 47, No. 3, pp. 329-350, 2003.
 26. Popescu, M. E., "Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options," pp. 1-21, 2005.
 27. Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B., and Leong, E. C., "Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 12, pp. 1532-1543, 2007.
 28. Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., and Fredlund, D. G., "Shear-strength characteristics of a residual soil," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 1, pp. 60-77, 1995.
 29. Toll, D. C., Rahardjo, H., and Leong, E. C., "Landslides in Singapore," *Proc., 2th International Conference on Landslides, Slope Stability and the Safety of Infra-Structures*, Singapore, 27-28 July 1999, CI-Premier Conference Organization, Orchard Plaza, Singapore, pp. 269-276, 1999.
 30. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D. G., and Leong, E. C., "Controlling Parameters for Rainfall-Induced Landslides," *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-27, 2002.
 31. U.S. Army Corps of Engineers, "Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies, Engineering and Design," Rep. No. 20314-1000, Dept. of Army, Washington, D.C., 1999.
 32. Van Asch, T. W. J., Buma, J., and Van Beek, L. P. H., "A view on some hydrological triggering systems in landslides," *Geomorphology*, Vol. 30, No. 25-32, 1999.
 33. van Genuchten, M. T., "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils," *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.
 34. Wilson, G. W., "Surface flux boundary modeling for unsaturated soils," *Proc., Unsaturated Soil Engineering Practice*, Geotechnical Special Publication No. 68, ASCE, 1997.
 35. Wolf, T. F., "Probabilistic Slope Stability in

- Theory and Practice,” Proc., Conf. on Uncertainty in the Geologic Environment, Uncertainty 96, Part 1 (of 2), Madison, Wis., pp. 419-433, 1996.
36. Yeh H. F., Lee C. C., and Lee C. H., “A Rainfall-Infiltration Model for Unsaturated Soil Slope Stability,” Journal of Environmental Engineering and Management. Vol. 18, No. 4, pp. 271-278, 2008.
37. Yeh, T.-C. J., “One-dimensional steady state infiltration in heterogeneous soils,” Water Resources Research, Vol. 25, No. 10, pp. 2149-2158, 1989.
38. 葉信富、陳進發、李振誥，「降雨入滲對坡地穩定影響之研究」，中華水土保持學報，第 36 卷，第 2 期，第 145-159 頁，2005。

收稿日期：民國 101 年 12 月 7 日

修正日期：民國 102 年 7 月 12 日

接受日期：民國 102 年 7 月 19 日