

# 未飽和土壤單峰與雙峰水力特性 對邊坡穩定性影響之研究

EFFECT OF UNIMODAL AND BIMODAL SOIL HYDRAULIC PROPERTIES ON SLOPE STABILITY ANALYSIS

國立成功大學  
資源工程學系  
碩士班研究生

**黃獻廷**  
Tsien-Ting Huang

國立成功大學  
資源工程學系  
副教授

**葉信富\***  
Hsin-Fu Yeh

中興工程顧問社  
大地工程研究中心  
組長兼資深研究員

**柯建仲**  
Chien-Chung Ke

## 摘要

降雨入滲是主要造成邊坡不穩定的因素，降雨入滲的過程導致邊坡土壤的含水量與內部應力改變，進而影響邊坡的穩定性。土壤持水曲線(SWRC)用來描述土壤含水量與基質吸力之間的關係與土壤的保水特性，此特性在估算未飽和土壤特性相當重要，例如未飽和水力傳導函數和抗剪強度，因此土壤持水曲線被視為描述未飽和土壤特性的重要資訊。土壤持水曲線主要受到土壤孔徑分布所影響，而具有單峰與雙峰特徵，其中雙峰土壤持水曲線適用於結構性或是具有雙孔隙介質的土壤，此方法能夠描述土體中微孔與大孔的結構，了解不同孔隙尺度中的水力行為，故該模式較為符合現地土壤特性。鮮少有研究探討土壤單峰與雙峰模式對未飽和邊坡影響之差異性，本研究考量單峰與雙峰土壤持水曲線在實際降雨狀況下進行未飽和邊坡穩定性影響評估。本研究依據現地資料建置邊坡概念模型以模擬邊坡水力行為的變化，滲流分析結果顯示雙峰模式具有較好的保水能力，故其儲水性能較佳。在相同的飽和水力傳導特性下，雙峰模式中的濕潤帶前緣向下移動速度較快，導致壓力水頭與含水量以及土壤內部應力之改變。由於保水能力的不同，結果顯示雙峰模式的含水量及吸應力變化均高於單峰模式，本研究考量不同模式之滲流分析進而評估邊坡穩定程度，其結果指出雙峰模式的潛在破壞深度高於單峰模式。

**關鍵詞：**土壤水力特性、土壤持水曲線、邊坡穩定性。

\* 通訊作者，國立成功大學資源工程學系副教授

701 台南市大學路 1 號 · hfieh@mail.ncku.edu.tw

## EFFECT OF UNIMODAL AND BIMODAL SOIL HYDRAULIC PROPERTIES ON SLOPE STABILITY ANALYSIS

**Tsien-Ting Huang**

Department of Resources  
Engineering,  
National Cheng Kung University

**Hsin-Fu Yeh\***

Department of Resources  
Engineering,  
National Cheng Kung University

**Chien-Chung Ke**

Geotechnical Engineering  
Research Center, Sinotech  
Engineering Consultants, Inc.

### ABSTRACT

Rainfall infiltration is the main triggering factor which causes slope instability. The process of rainfall infiltration leads to changes in the water content and internal stress of the slope soil, which will affect the stability of the slope. The soil water retention curve (SWRC) is used to describe the relationship between soil water content and matric suction and the water retention characteristics of the soil. This characteristic is very essential to estimate the properties of unsaturated soils (*e.g.* unsaturated hydraulic conductivity function and shear strength). Thus, the SWRC is regarded as important information to depict the properties of unsaturated soil. The SWRC is mainly affected by the soil pore size distribution (PSD), and has the features of unimodal and bimodal. The bimodal SWRC is suitable for soils with structural or dual-porous media. This model can describe the structure of micropores and macropores in the soil and understand the hydraulic behavior in different pore scales. Therefore, this model is more consistent with the properties of the on-site soil. Few studies have explored the difference in the impact of unimodal and bimodal models on unsaturated slopes. This study aims to consider the unimodal and bimodal SWRC to evaluate the impact of unsaturated slope stability in actual rainfall conditions. A conceptual model of the slope is built based on the field data to simulate changes in the hydraulic behavior of the slope. The results of seepage analysis show that the bimodal model has better water retention capacity, so its water storage performance is better. Under the same saturated hydraulic conductivity function, the wetting front of the bimodal model moves down faster. It results in changes in the pressure head, water content, and the internal stress of the soil. Due to the difference in water retention capacity, the results show that the water content and suction stress changes of the bimodal model are higher than those of the unimodal model. Based on the results of seepage analysis to calculate the stability of the slope, the results indicate that the potential failure depth of the bimodal model is deeper than that of the unimodal model.

**Keywords:** Soil hydraulic properties, Soil water retention curve, Slope stability.

Huang, T.T., Yen, H.Y., & Ke, C.C. (2021). "Effect of Unimodal and Bimodal Soil Hydraulic Properties on Slope Stability Analysis." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 67(3), 51-63.

[https://doi.org/10.29974/JTAE.202109\\_67\(3\).0005](https://doi.org/10.29974/JTAE.202109_67(3).0005)

## 一、前言

近年來，許多研究針對未飽和邊坡受到降雨入滲所引致的邊坡破壞與不穩定進行分析與探討，使得未飽和土壤領域的研究變得相當重要(Mukhlisin *et al.* 2011; Arnone *et al.* 2016; Antinoro *et al.* 2017)。其中，許多研究專門針對土壤持水曲線(Soil Water Retention Curve, SWRC)的水力行為進行探討，因為土壤持水曲線包含了基本的未飽和土壤特性，能夠了解土壤含水量與基質吸力之間的關係。土壤持水曲線的形狀主要受到不同土壤與其孔徑分布(Pore Size Distribution, PSD)而有所差異，主要分為單峰(unimodal)與雙峰(bimodal)特徵。對分級良好的土壤而言，通常具有單峰孔隙分佈，且其土壤持水曲線顯示單峰特徵，即代表土壤孔徑為單個連續的孔隙域。然而，殘餘土或崩積土通常具有雙孔隙結構，可分為聚集體內的微孔與聚集體間的大孔。其土壤持水曲線通常具有雙峰特徵且與毛細管理論相關(Burger and Shackelford 2001; Rahardjo *et al.* 2004)。此外，相關研究指出土壤孔徑分布對於不同孔隙在未飽和條件下的保水行為有重大的影響(Berkowitz and Ewing 1998)。因此，為了預測未飽和土壤的水力特徵，學者們提出經驗式和具物理意義的方程式來描述土壤持水曲線(Gardner 1958; Brooks and Corey 1964; van Genuchten 1980; Ross and Smettem 1993; Fredlund and Xing 1994; Kutilek 2004)。另外，為了探討現地土壤中雙孔隙介質的水力特性，一些學者提出方法來量化土壤中孔隙的分布與雙孔隙結構(大孔和微孔)之間的相互作用以及優先流現象(Rahardjo *et al.* 2004; Dexter *et al.* 2008; Satyanaga *et al.* 2013; Zhai and Rahardjo 2015)。雙峰土壤持水曲線是由兩條單峰曲線所疊加，子曲線與土壤的大孔(inter-aggregate pore)和微孔(intra-aggregate pore)有關，而許多研究已證實採用孔徑分布函數概念的土壤持水曲線可以推算出土壤的水力傳導函數(Hydraulic Conductivity Function, HCF)(Othmer *et al.* 1991; Ross and Smettem 1993; Durner 1994; Priesack and Durner 2006)。

過去研究指出降雨是邊坡破壞的主要觸發因素，降雨入滲到未飽和土壤中會增加飽和度，從而影響抗剪強度特性與土壤內部應力以及邊坡穩定性(Zhang *et al.* 2004; Rahardjo *et al.* 2007; Arnone *et al.* 2011; Mukhlisin *et al.* 2011; Sheng *et al.* 2011)。相關文獻指出，受限於現地土壤樣本與測量誤差的情況下，土壤水力參數的準確性對於水力耦合模型進行邊坡穩定性的評估相當重要。現地測量能夠反映出邊坡的實際狀

況，其所推估的水力參數能有效校正預測模型(Phoon and Kulhawy 1999; Li *et al.* 2016; Vardon *et al.* 2016; Luo *et al.* 2017)。因此，土壤持水曲線擬合的精準度對於水力耦合模型的模擬預測會有所影響。若在實驗數據和最佳擬合曲線(單峰模式)之間觀察到差異，可能是由於土壤持水曲線具有雙峰特徵。此時，雙峰土壤持水曲線能夠擬合出較精準的曲線，並且可用於準確推估未飽和土壤的水力傳導函數和抗剪強度(Satyanaga 2015; Zhai *et al.* 2017)。

許多研究透過實驗來測量土壤持水曲線以獲得未飽和土壤的水力特性，並用於推估未飽和土壤的剪切強度和滲透率，藉此來解決降雨引致邊坡不穩定性評估所需的土壤水力特性(Miao *et al.* 2002; Rahardjo *et al.* 2013; Rahardjo *et al.* 2016; Satyanaga and Rahardjo 2019)。Lu *et al.*(2010)提出吸應力與有效飽和度之間的關係，並使用土壤持水曲線描述基質吸力對於評估未飽和土壤剪切強度的貢獻。透過吸應力特徵曲線來表示未飽和土壤的應力狀態，並將吸應力視為單位土體中儲存的能量(Lu and Likos 2004; Lu and Likos 2006)。當降雨入滲時，容易引致邊坡內部水力行為的變化，此為造成淺層邊坡不穩定的關鍵。然而，鮮少有研究考量邊坡土壤中雙孔隙介質受降雨入滲對未飽和邊坡內部應力之影響，並以雙峰土壤持水曲線與土壤吸應力特徵曲線預測含水量與土壤應力之間變化估算邊坡的穩定性。

傳統的邊坡穩定性分析研究多採用極限平衡法(Limit Equilibrium Method, LEM)，因為它們具有公認的有效性和可靠性(Fellenius 1936; Bishop 1955; Price and Morgenstern 1965; Janbu 1973; Michalowski 2002; Duncan and Wright 2005)。此方法會預先設定邊坡的潛在破壞面，將潛在滑動土體離散成較小的垂直切片，並基於力平衡與力矩平衡原理，以安全係數(Factor of Safety, FS)作為邊坡穩定程度之指標。但是此方法僅尋求邊坡整體單一穩定性指標，無法了解降雨入滲導致孔隙水壓與有效應力之變化，而引起之邊坡穩定性隨時空之變化情形以及初始破壞的位置點。局部安全係數(Local Factor of Safety, LFS)理論為基於莫爾庫倫破壞準則以評估邊坡中每個位置點的穩定程度(Lu *et al.* 2012)。此方法是將 Iverson and Reid (1992) 所描述的方法擴展到了有黏性的、可變飽和的多孔材料，並提供具有物理意義的量值來評估部分飽和的邊坡穩定性。另外，可依據考量邊坡土壤中雙孔隙介質受降雨入滲所計算獲得之土壤吸應力分布，作為邊坡中每個位置點的局部安全係數及穩定程度。因此，局部安全係數能夠有效分析不同深度之邊坡穩定性與評估可能

發生破壞的位置點，並有效解決傳統邊坡穩定性分析遇到的挑戰。

本研究旨在探討考量邊坡土壤中雙孔隙介質對降雨引致未飽和邊坡穩定性之影響。首先，依據現地土壤數據針對單峰與雙峰土壤持水曲線參數進行擬合，並推估其水力傳導函數。依據崩塌地的現地資料建置邊坡概念模型，選用實際降雨事件與現地含水量的測量值進行率定，以校正模型的準確度，以單峰與雙峰土壤持水曲線參數進行邊坡滲流分析，比較兩種模式之間的差異。最後，依照滲流分析的結果進一步分析邊坡穩定性，以量化兩種模式對穩定程度的變化情況。

## 二、邊坡概念模型

本研究為探討未飽和土壤單峰與雙峰模式對降雨引致邊坡滲流與穩定性之影響，依據臺灣嘉義縣中埔鄉東興村八寶寮崩塌地的現地水文地質資料(行政院農委會水土保持局 2018)，建置本研究邊坡剖面概念模型，如圖 1 所示。邊坡概念模型中包含上部風化岩層及下部岩盤，另外有一層薄層的表層土壤覆蓋於上部風化岩層。邊坡表面為降雨入滲邊界，左右兩側分別為定水頭邊界，其餘為零流量邊界，網格劃分共 17,261 個節點(nodes)，33,913 個元素(elements)。其中，邊坡中設有兩口觀測井(BH-05CI 和 BH-02)以及觀測剖面，並分析觀測剖面以及剖面深度為 0.85 公尺處，受降雨入滲時，土壤滲流情形與內部應力及穩定性之影響。本研究依據八寶寮雨量站觀測資料(2019/06/01 ~ 2019/08/01)，顯示在 2019/06/13 至 2019/06/14 間有高強度的降雨事件，因此本研究選用該降雨事件 48 小時降雨數據作為模型之降雨輸入值。

本研究的邊坡土壤材料與土壤採樣點壓力鍋測試數據皆參考行政院農委會水土保持局(2018)研究報告，三種土壤的力學參數依據現地土壤試驗結果所整

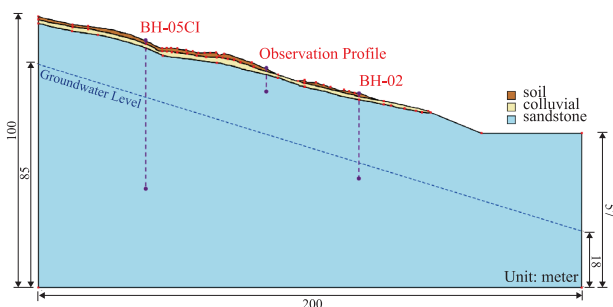


圖 1 邊坡概念模型圖

表 1 土壤力學參數

	Gs[-]	c[kPa]	φ[degree]	poisson ratio[-]	E <sub>x</sub> [kPa]	E <sub>y</sub> [kPa]
soil	2.72	68.64	23	0.33	20000	20000
colluvial	2.61	83.34	21	0.33	20000	20000
sandstone	2.64	176.51	34	0.33	40000	40000

理，如表 1 所示。由現場調查顯示此地區以泥質砂岩為主，而鄰近場址受到土壤潛變(creep)影響產生許多張力裂縫及陷落等特徵，而這些裂縫可能在降雨時成為降雨入滲到土體內部的通道，並造成邊坡內部壓力水頭與含水量分布的不連續性，進而導致邊坡土壤異質特性和內部水力行為的變化與不穩定發展。因此，本研究選用考量土壤雙孔隙介質的雙峰土壤持水曲線模型進行後續的分析與探討。

## 三、研究方法

### 3.1 未飽和土壤滲流模型

本研究採用 HYDRUS 2D 軟體(Šimůnek *et al.* 2008)針對未飽和土壤中的滲流過程進行評估分析，此軟體可用於分析未飽和土壤邊坡，並基於 Richards 方程式發展暫態與二維滲流控制方程式，以分析未飽和層與土壤水力特性。其滲流控制方程式如下：

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \nabla \cdot K(h) \nabla H + W \dots\dots\dots(1)$$

其中， $H$  代表總水頭高[L]。 $t$  為時間[T]， $h$  為壓力水頭[L]， $W$  為源匯項(source or sink)，表示因抽水或入滲補注所造成之滲流[T<sup>-1</sup>]。 $\theta(h)$  為土壤持水曲線隨孔隙水壓變化之體積含水量[-]， $K(h)$  為隨孔隙水壓變化之水力傳導函數[LT<sup>-1</sup>]。本研究採用之土壤持水曲線為 van Genuchten (1980)所提出之模型，用以描述土壤含水量與基質吸力之間的關係，此方法在擬合土壤持水曲線參數與實驗結果有很好的的一致性(Phoon *et al.* 2008)。另外，水力傳導函數由 Mualem (1976)基於土壤持水曲線所提出，兩者之方程式分別可描述成下式：

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha |h|^n]^m} \dots\dots\dots(2)$$

$$K = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \dots\dots\dots(3)$$

其中， $\theta_s$  代表土壤飽和含水量[-]， $\theta_r$  代表土壤殘餘含水量[-]， $h$  代表基質吸力[L]， $\alpha$  代表空氣進氣值 (air-entry-value) 的倒數[L<sup>-1</sup>]， $n$  代表為孔徑分布指數[-]、 $l$  代表為孔隙連通參數[-]，一般表示為 0.5， $m = 1 - 1/n$ ， $S_e$  表示為有效飽和度[-]。 $K_s$  為飽和水力傳導函數[LT<sup>-1</sup>]，而  $\alpha$ 、 $n$  和  $l$  為定義水力傳導函數的經驗參數。

### 3.2 雙峰土壤持水曲線

一些土壤存在有大孔與微孔結構，在土壤持水曲線中會表現出雙峰的特徵，且具有雙峰孔徑分布。而具有雙峰孔徑分布的土壤無法使用單峰土壤持水曲線完整的描述雙峰特性。因此，許多研究提出雙峰土壤持水曲線的方程式 (Othmer *et al.* 1991; Ross and Smettem 1993; Durner 1994; Mallants *et al.* 1997) 用以描

述結構性土壤中微孔與大孔的水力特性。本研究採用 Durner (1994) 提出的雙峰土壤持水曲線模型針對現地土壤進行擬合，此方法為了正確描述具有非均質孔隙結構的土壤的保水特性，引入多峰持水函數，該函數由 van Genuchten 模型中的子曲線所疊加而成，如下：

$$S_e = \sum_{i=1}^2 w_i \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_i |h|)^{n_i}} \right]^{m_i} \dots\dots\dots (4)$$

其中， $S_e$  代表有效飽和度[-]， $\alpha_i$ [L<sup>-1</sup>]、 $n_i$ [-]、 $m_i$ [-]、 $m = 1 - 1/n$ ，代表兩個孔隙域的經驗參數。 $w_i$  代表單一孔隙域的權重因子 ( $w_1 = 1 - w_2$ )。

雙峰模式的未飽和水力傳導函數  $K(S_e)$  結合 Mualem (1976) 和 van Genuchten (1980) 模型以及雙峰土壤持水曲線以描述成下式 (Priesack and Durner 2006)：

$$K(S_e) = K(h_i) \left( \sum_{i=1}^k w_i S_{e_i} \right)^{0.5} \left( \frac{\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i \left\{ 1 - (\alpha_i h)^{n_i-1} \left[ 1 + (\alpha_i h)^{n_i} \right]^{-m_i} \right\}}{\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

其中， $k$  表示模型的模態 ( $k=2$ ，即為雙峰)， $w_i$  為每個孔隙域的權重因子。 $K(h_i)$  為對應於通過穩態流通方法在  $I = -1hPa$  的壓力水頭所定義的未飽和水力傳導函數。

### 3.3 未飽和土壤力學模型

本研究以有限元素分析模式 HYDRUS 2D 結合 The Slope Cube Module 計算單向耦合變飽和流動與應力問題，基於前一小節的滲流分析，以 The Slope Cube Module 分析土壤承受應力變化，可描述未飽和層受到降雨入滲後土壤水力行為之變化。The Slope Cube Module 採用有限元素法 FEM2D (Reddy 1993) 基於動量平衡 (momentum balance) 求解邊坡內部各點之應力分布，該方法基於平面應力線性彈性 (plane stress linear elasticity) 模擬因瞬態單位重改變造成之應力變化。線性彈性材料總應力控制方程式可描述成下式：

$$\nabla \cdot (\sigma) + \gamma b = 0 \dots\dots\dots (6)$$

其中， $\sigma$  代表二維空間內獨立的應力變量， $\gamma$  為邊坡土壤材料的單位重， $b$  為體積力 (body force) 的單位

向量。

本研究採用的有效應力原理與 Terzaghi 的有效應力相一致，透過修改飽和度對有效應力的貢獻，將有效應力作為 Bishop 的擴展和對所有飽和度的 Terzaghi 的擴展，其有效應力可被表示為 (Lu and Likos 2006)：

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - [-S_e (u_a - u_w)] = (\sigma - u_a) - \sigma^s \dots\dots\dots (7)$$

其中， $\sigma'$  代表有效應力 [ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]， $\sigma$  為總應力 [ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]， $u_a$  為孔隙空氣壓力 [ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]， $S_e$  為有效飽和度 [-]， $\sigma^s$  為吸應力 [ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]，表示所有可能發生在土壤顆粒間之物理與化學機制，可描述如下：

$$\sigma^s = -\sigma_{cap} - \sigma_{pc} - S(u_a - u_w) = -\sigma_c \dots\dots\dots (8)$$

由於土壤每個應力分量可描述為基質吸力、飽和度與含水量的函數，因而土壤吸應力主要受到含水量所控制。Lu *et al.* (2010) 基於熱力學理論，將吸應力是為單位土體中儲存之能量，並透過 van Genuchten (1980) 土壤持水曲線模型推算出吸應力特徵曲線，推導過程如下式：

$$\sigma^s = -S_e(u_a - u_w) = -\left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} (u_a - u_w) \dots\dots\dots(9)$$

$$\sigma^s = \frac{(u_a - u_w)}{\{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n\}^{(n-1)/n}} \dots\dots\dots(10)$$

### 3.4 局部安全係數理論

本研究使用的局部安全係數理論為 Lu *et al.* (2012)所提出，此方法基於莫爾庫倫破壞準則及受到降雨導致應力狀態朝向破壞方向轉變之過程，用以評估邊坡內部每個位置點的當下應力與穩定狀態。此方法與傳統的極限平衡法不同，極限平衡法是針對邊坡中每一切面去給定一安全係數量值，作為有可能的潛在破壞面。但局部安全係數可以計算出每個位置點的安全係數，以此找出潛在的破壞位置，而非侷限於單一切面。土壤當前應力狀態的強度可透過莫爾圓與莫爾庫倫破壞包絡線焦點的截距估算，以定義邊坡內個位置點的局部安全係數，由潛在的應力與當前應力之比值所表示：

$$LFS = \frac{\tau^*}{\tau} = \frac{\cos \phi'}{\sigma_1 - \sigma_3} [2c' + (\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma^s) \tan \phi'] \dots\dots(11)$$

其中， $\tau^*$ 為剪力強度，代表庫倫應力潛勢值 (potential Coulomb stress)。 $\tau$ 為剪應力，代表當前庫倫應力 (current Coulomb stress)。 $\phi'$ 為有效摩擦角， $c'$ 為有效凝聚力， $\sigma_1$ 為最大主應力， $\sigma_3$ 為最小主應力， $\sigma^s$ 為吸應力，如圖 2 所示。當局部安全係數小於 1.0 表示該位置點可能發生破壞，而局部安全係數大於 1.0 時，

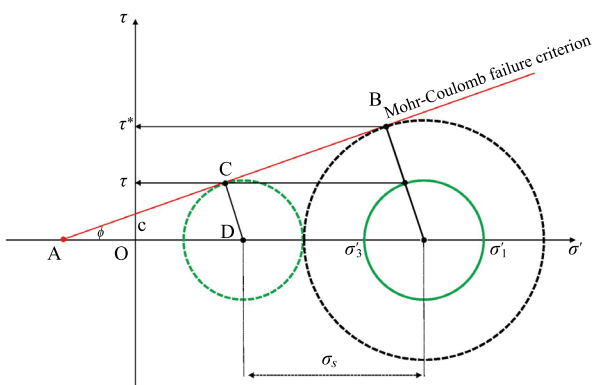


圖 2 局部安全係數理論概念圖

則代表該點相對穩定，以此說明潛在破壞區域與相對穩定區域的位置。此方法能夠有效克服傳統邊坡穩定性分析的挑戰，用以分析邊坡各位置點受降雨入滲後穩定性改變之影響。

## 四、結果與討論

### 4.1 土壤水力參數擬合與現地率定結果

本研究利用八寶寮崩塌地所量測到的三種土壤數據，分別為土壤、風化岩屑和砂岩，依據其含水量和基質吸力針對單峰與雙峰模式的土壤持水曲線進行擬合，並比較兩者之差異。透過單峰模式方程式(2)與雙峰模式方程式(4)獲得土壤持水曲線參數，如表 2 所示。三種土壤的擬合結果顯示雙峰模式的土壤持水曲線有較高的擬合程度，且土壤持水曲線能完整擬合現地測量數據及呈現出雙峰形狀，如圖 3 所示。本研究給予兩種模式相同的飽和水力傳導度，透過擬合之土壤持水曲線參數代入方程式(3)和(5)推估三種土壤在單峰模式與雙峰模式的未飽和水力傳導度，如圖 4 所示。由於，雙峰模式會受到不同孔徑分布的影響，在大孔與微孔區域的滲透率會有所不同，而導致水力傳導度會與單峰模式有所差異，雙峰模式的未飽和土壤具有較高的水力傳導特性。而此結果會影響到後續滲流分析與穩定性分析的部分。

另外，本研究採用現地數據所擬合之土壤持水曲線參數進行現地邊坡模型的模擬，在模擬之前，本研究先針對現地測量之土壤含水量數值進行率定，以證明此模型的合理性。依據八寶寮雨量站觀測資料(2019/06/01-2019/08/01)，顯示在 2019/06/13 至 2019/06/14 間有高强度的降雨。因而，以此降雨事件進行土壤含水量的率定。本研究依據現場觀測之含水量與模擬之含水量進行率定，其中採用深度為 0.3 公尺處的含水量觀測值作為率定依據。透由單峰與雙峰模式的土壤持水曲線參數模擬之結果顯示含水量的變化與現地觀測值趨勢

表 2 土壤持水曲線參數

bimodal	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha_1$	$n_1$	w	$\alpha_2$	$n_2$	$K_s$
	[-]	[-]	[1/m]	[-]	[-]	[1/m]	[-]	[m/hr]
soil	$3 \times 10^{-6}$	0.325	1.6	1.8	0.21	0.065	1.2	$3.24 \times 10^{-3}$
colluvial	$3 \times 10^{-2}$	0.508	2	1.6	0.25	0.06	1.22	$3.24 \times 10^{-4}$
sandstone	$3 \times 10^{-4}$	0.463	2.09	1.45	0.436	0.0056	1.75	$5.9 \times 10^{-6}$
unimodal	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$				$K_s$
	[-]	[-]	[1/m]	[-]				[m/hr]
soil	$2 \times 10^{-6}$	0.322	0.6	1.14				$3.24 \times 10^{-3}$
colluvial	$7 \times 10^{-5}$	0.488	0.61	1.13				$3.24 \times 10^{-4}$
sandstone	$3 \times 10^{-2}$	0.467	3.71	1.12				$5.9 \times 10^{-6}$

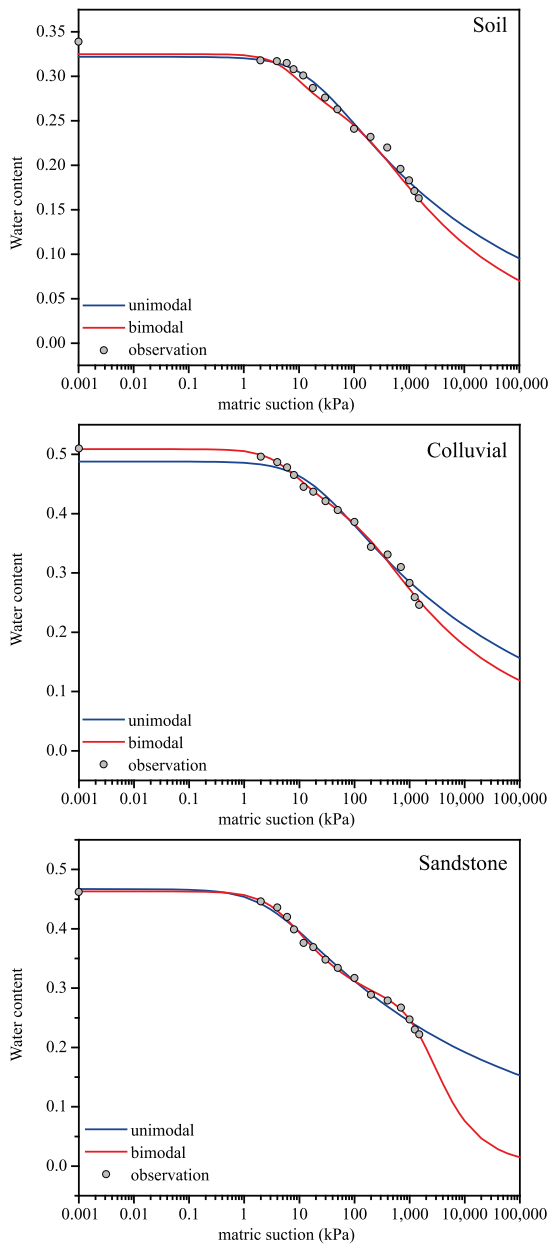


圖 3 土壤、崩積土與砂岩的單峰與雙峰最佳土壤持水曲線擬合

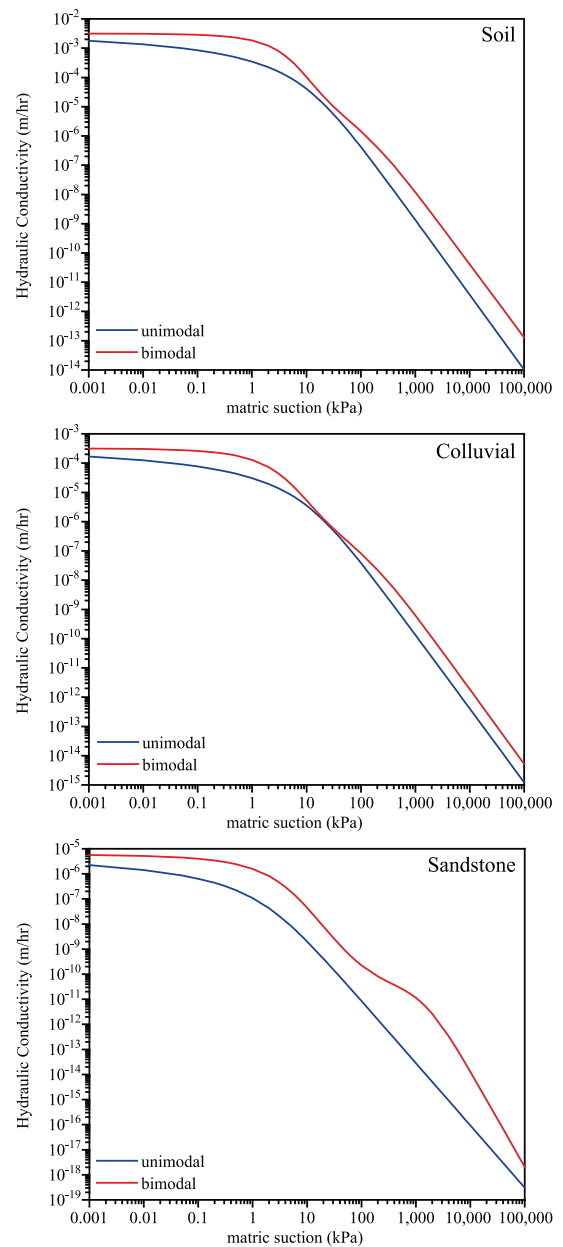


圖 4 土壤、崩積土與砂岩的單峰和雙峰土壤水力傳導函數推估

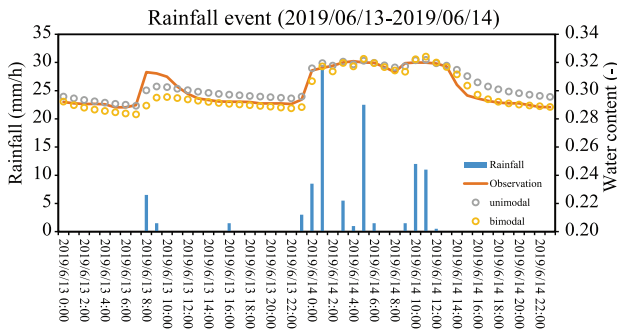


圖 5 降雨事件與現地土壤含水量率定結果

相似，如圖 5 所示。經過統計方法計算後結果顯示單峰與雙峰模式對於現地土壤含水量皆有相符合的狀態，其均方根誤差 RMSE 分別為 0.00568 和 0.0057，而共變異數為 0.000121 和 0.00015，顯示本研究模式之合理性。下一小節將針對擬合之土壤持水曲線參數進行邊坡滲流分析，並且量化與定性兩種土壤持水曲線模式之間的差異。

#### 4.2 比較單峰與雙峰模式對滲流分析之影響

本章節探討單峰與雙峰土壤持水曲線對於未飽和土壤受降雨入滲後之影響，分析兩種模式在降雨入滲量的多寡以及壓力水頭的變化程度。本研究利用兩種模式的土壤持水曲線參數進行滲流分析，並建立邊坡中降雨入滲量與壓力水頭的變化情形，其模擬時間為 48 小時。首先，本研究針對大氣邊界(地表)受降雨入滲之情形進行探討，圖 6 為降雨入滲量隨時間的變化與降雨累積入滲量。從圖 6 中可觀察到在相同的降雨條件下，兩種模式的降雨入滲量有所差異，雙峰模式的降雨入滲量較大，此現象主要受到未飽和水力傳導度所影響。雙峰模式的未飽和水力傳導度較大，因此造成降雨入滲後，水體流動速度較快而土壤的保水能力較佳，此結果會影響到後續的滲流與穩定性分析。另外，本研究探討邊坡中壓力水頭的變化情況，在初始狀態下( $t=0$ )，壓力水頭隨著邊坡深度呈線性分布。依據降雨事件將模擬結果分成 6 小時、12 小時、24 小時、36 小時和 48 小時，觀察單峰和雙峰土壤持水曲線參數對觀測剖面的壓力水頭變化，如圖 7 所示。圖 7(a)和(b)分別為單峰與雙峰模式的壓力水頭變化圖，由於本研究選用的降雨事件在第 23 小時至第 36 小時間有強降雨發生，因此壓力水頭主要從第 24 小時後有明顯的變化差異發生。邊坡受降雨入滲，使得濕潤帶前緣向下推移，導致壓力水頭下降。

在相同降雨條件下，結果顯示單峰與雙峰模式的

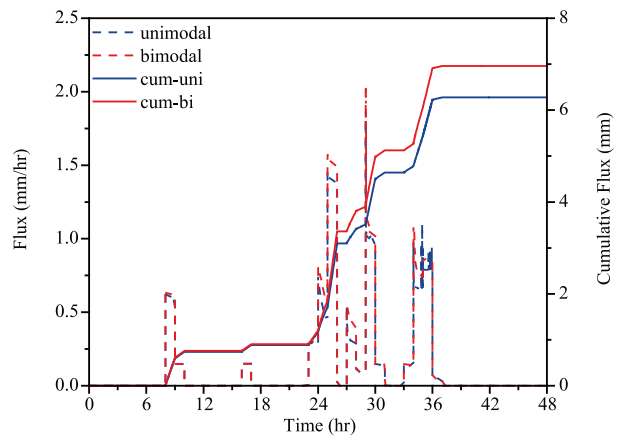


圖 6 單峰與雙峰模式的地表降雨入滲量與累積入滲量

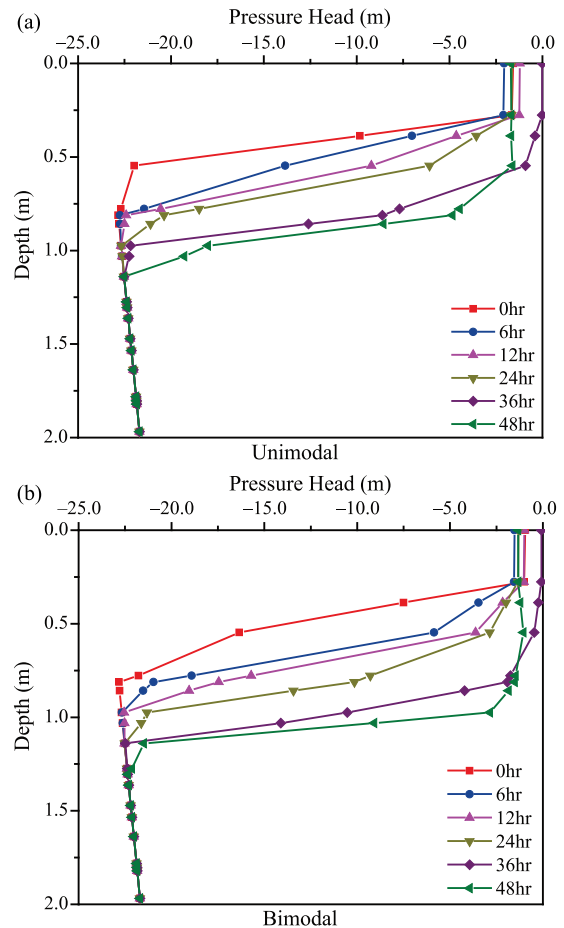


圖 7 (a)單峰與(b)雙峰模式觀測剖面在不同時間的壓力水頭變化

壓力水頭下降主要發生在淺層區域，歸因於土壤的滲透性較差，而在深層部分的土壤並沒有受到影響。從圖 7(a)中可觀察到在 24 小時降雨後，單峰模式的濕潤帶前緣往下移動至深度約為 1 公尺處。圖 7(b)中顯示，雙峰模式的濕潤帶前緣則往下移動至深度約為 1.2 公尺處，而推移深度到約 1.2 公尺處便不再影響更深層



的土壤。兩種模式在濕潤過程中的濕潤帶前緣推移速度與深度有所不同，意味著降雨行為對於邊坡滲流分析應與土壤持水曲線以及水力傳導度有關。圖 8 結果中可以明顯觀察到雙峰模式的壓力水頭在深度較深的區域發生變化，雖然兩種模式的飽和水力傳導度相同，但由方程式(3)和(5)計算出的未飽和水力傳導度有所差異，進而導致此情況的發生。因此，在具有相同降雨強度與延時和飽和水力傳導度的條件下，雙峰模式的濕潤帶前緣向下推移較快，且土壤中壓力水頭消散的也較快。由此可見，雙峰模型所考量的土壤異質性會影響邊坡中滲流的變化。

### 4.3 降雨條件下對單峰與雙峰模式之影響

不同模式的土壤持水曲線參數在 48 小時相同降雨條件下，顯示不同模式的濕潤帶前緣推移速度及深度會有所影響，如圖 8 所示，為單峰與雙峰模式的邊坡觀測剖面在第 48 小時之壓力水頭曲線。雙峰模式的土壤保水能力較大，濕潤帶前緣向下推移較快速，約比單峰模式的濕潤帶前緣深 0.2 公尺，使得壓力水頭較容易散失。意味著，不同模式對於邊坡滲流行為的差異會控制著後續邊坡的穩定性。

本研究探討觀測剖面中單一深度下的壓力水頭隨時間之變化情況，如圖 9 所示。圖 9 為單峰與雙峰模式的邊坡觀測剖面中，深度為 0.85 公尺處之壓力水頭曲線，此壓力水頭量值隨著降雨時間的增加而下降。壓力水頭曲線指出，單峰模式的壓力水頭隨時間從 -22.8 m 下降到 -8.56 m，總共下降 14.24 m，其變化率為 62.4%。雙峰模式的壓力水頭隨時間從 -22.8 m 下降到 -1.85 m，總共下降 20.95 m，其變化率為 91.8%。

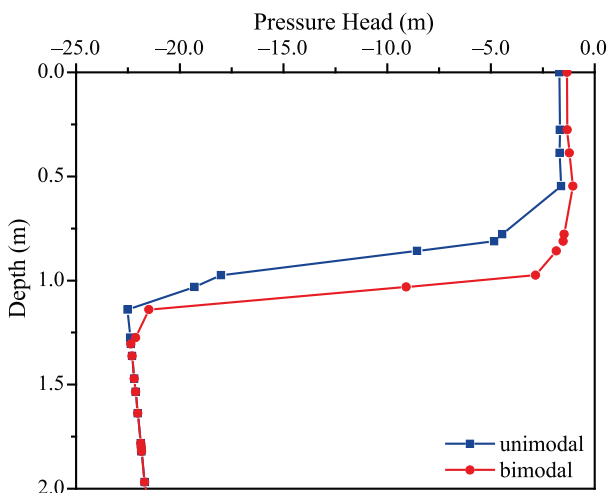


圖 8 單峰與雙峰模式觀測剖面的壓力水頭變化(第 48 小時)

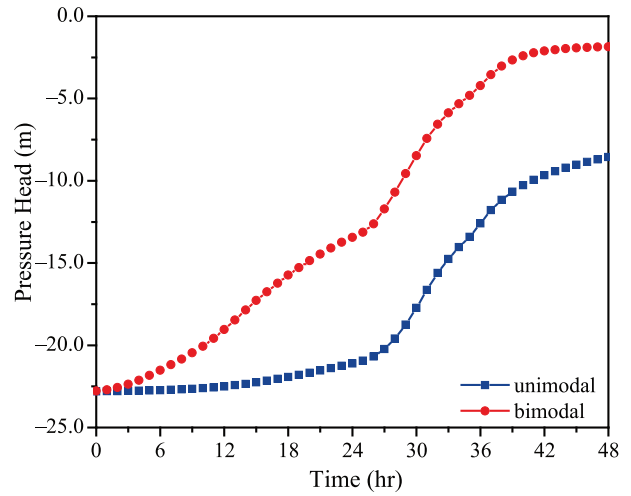


圖 9 深度為 0.85 公尺處，單峰與雙峰模式的壓力水頭隨時間之變化

從上述結果可看出，採用雙峰模式所模擬出的壓力水頭，其變化程度比採用單峰模式的模擬結果還要大。圖 9 中可清楚觀察到單峰與雙峰模式的壓力水頭下降幅度，隨著降雨時間的推移，兩者的下降幅度有所差距。上述結果主要受到土壤水力特性的影響，由雙峰土壤持水曲線參數推估的未飽和水力傳導度具有較高的數值，使得雨水在土壤中流動速度較快，導致壓力水頭下降的較多。因此，在未飽和狀態下的水力傳導度對於邊坡的滲流分析有很大的影響，若能準確獲得與現地相符的水力傳導度，就能提升模擬真實情況的準確度。

### 4.4 比較單峰與雙峰模式對邊坡穩定性之影響

本章節採用前兩節滲流分析獲得之壓力水頭與土壤含水量分布量值，針對邊坡穩定性進行計算與探討。本研究選用局部安全係數以計算不同位置點當時的應力狀態與穩定程度，能夠有效克服傳統邊坡穩定性分析所遇到的挑戰。邊坡穩定性主要受到降雨入滲後，雨水入滲土壤內部而導致壓力水頭的改變和含水量的增加。土壤內部的水體多寡與分布會影響應力的變化，並導致邊坡的穩定性發生改變與下降。因此，本章節主要探討土壤含水量、吸應力與局部安全係數之間的關係，分析上述三種因子在單峰與雙峰模式隨著降雨時間的變化情形。

首先，從圖 10(a)中可觀察到單峰與雙峰模式的土壤含水量隨時間之變化，單峰模式的含水量從 0.257 上升到 0.293，其變化率為 14%，而雙峰模式的含水量從

0.258 上升到 0.325，其變化率為 25.9%。結果顯示雙峰模式的含水量增加的幅度比單峰模式還大。此結果會影響土壤內部應力的變化，如圖 10(b)所示，代表單峰與雙峰模式的土壤吸應力隨降雨時間之變化量。結果顯示，單峰模式的吸應力從 -155.2 kPa 下降到 -64.7 kPa，其變化率為 58.3%，而雙峰模式的吸應力從 -151.7 kPa 下降到 -15.5 kPa，其變化率為 89.7%。由於雙峰模式的土壤具有較好的儲水能力，能夠儲存的雨量較多，使得邊坡含水量上升，並導致土壤吸應力下降的程度較大。

本研究針對邊坡穩定性進行局部安全係數的計算與分析，圖 11 顯示降雨事件第 48 小時單峰與雙峰模式的局部安全係數隨深度之變化。從結果可觀察出單峰與雙峰模式的邊坡在淺層均有不穩定的情況發生(局部安全係數小於 1)，意味著可能會發生破壞。單峰與雙峰模式的邊坡潛在破壞深度分別約為 0.6 公尺與 0.8 公尺。除此之外，本研究針對單一深度的穩定程度進行分析，如圖 12 所示。圖 12 顯示深度為 0.85 公尺

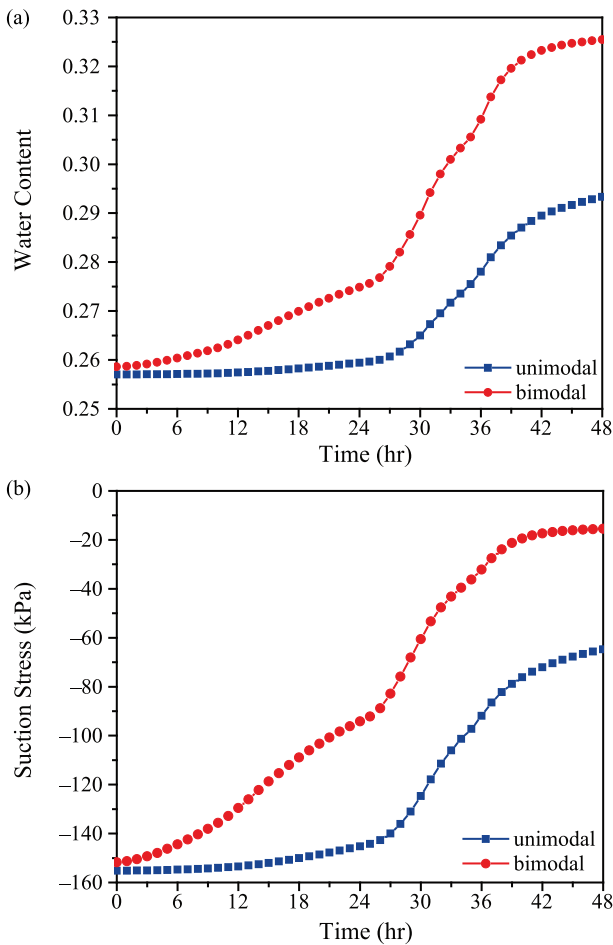


圖 10 在深度為 0.85 公尺處，單峰與雙峰模式的(a)土壤含水量與(b)土壤吸應力變化

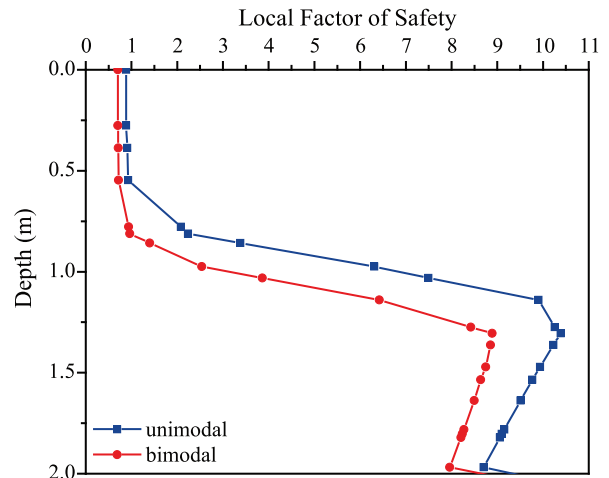


圖 11 單峰與雙峰模式的局部安全係數隨深度之變化(第 48 小時)

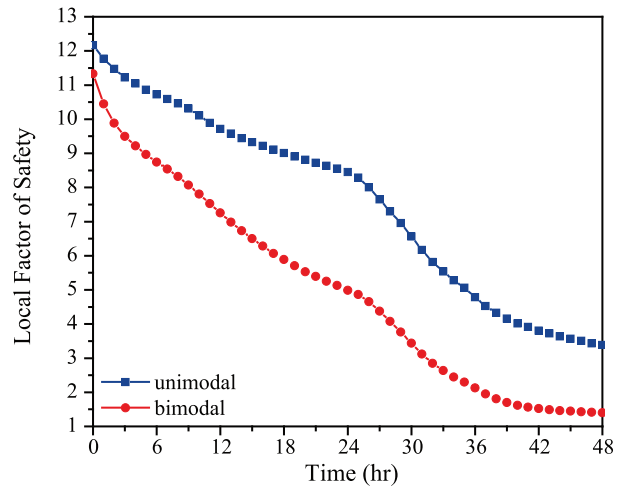


圖 12 在 0.85 公尺處，單峰與雙峰模式的局部安全係數隨時間之變化

之局部安全係數隨降雨時間之變化量，單峰模式的局部安全係數從 12.16 下降到 3.38，其變化率為 72.1%，而雙峰模式的局部安全係數從 11.32 下降到 1.40，其變化率為 87.6%。邊坡受到降雨入滲後，土壤含水量增加，濕潤帶前緣向下移動導致壓力水頭與吸應力下降，造成局部安全係數降低，而雙峰模式的局部安全係數下降程度較大。其結果顯示，在相同的降雨條件下，考量了雙峰模式的邊坡受到降雨引致不穩定性的變化程度較大，而考量單峰模式的邊坡其影響範圍與變化程度較小。

上述結果與預期相符，雙峰模式的未飽和土壤水力傳導度較大，會導致降雨入滲速度較快，進而影響濕潤帶前緣向下移動的速度。從入滲量來看，考量雙

峰模式的地表入滲量比單峰模式的還多，也就造成土壤含水量增加較多，而引致不穩定的狀況。因此，考量土壤持水曲線雙峰模式確實會影響到邊坡的穩定性。

## 五、結論

本研究考量單峰與雙峰模式的土壤持水曲線進行比較及量化降雨引致邊坡穩定性影響的程度，本文的結論可歸納為以下幾點：

1. 考量土壤雙峰模式(雙孔隙介質)的情況下，對於現地土壤的擬合土壤持水曲線參數有著較佳的結果。此結果能夠描述降雨所引致土壤雙孔隙介質水力行為的變化，並量化與預測未飽和邊坡的滲流過程與穩定性狀態。
2. 相同的降雨條件下，雙峰模式表層土壤的入滲量比單峰模式大，意味著雙峰模式土壤的保水程度較為優異。此結果與未飽和土壤的水力傳導度有關，雙峰模式的未飽和水力傳導度比單峰模式高，代表水流在雙峰模式的土壤中流動的較快。
3. 雙峰模型受降雨入滲後，因濕潤帶前緣向下移動速度較快，會影響較深的土壤層。降雨入滲使得土壤含水量增加，導致邊坡內部應力和穩定程度發生改變。
4. 由本研究的結果中，可發現若現地土壤具有結構性或是優先流的特性，可利用雙峰模式進行分析，此模式能夠考量土壤雙孔隙介質，其結果也能符合實際情況。因此，日後的工程評估可依照現地土壤的特性以選用此模式進行分析。

## 參考文獻

1. Antinoro, C., E. Arnone and L. V. Noto (2017). "The use of soil water retention curve models in analyzing slope stability in differently structured soils." *Catena* 150: 133-145.
2. Arnone, E., D. Caracciolo, L. Noto, F. Preti and R. Bras (2016). "Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides." *Water Resources Research* 52(11): 8590-8612.
3. Arnone, E., L. Noto, C. Lepore and R. Bras (2011). "Physically-based and distributed approach to analyze rainfall-triggered landslides at watershed scale." *Geomorphology* 133(3-4): 121-131.
4. Berkowitz, B. and R. P. Ewing (1998). "Percolation theory and network modeling applications in soil physics." *Surveys in Geophysics* 19(1): 23-72.
5. Bishop, A. W. (1955). "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes." *Geotechnique* 5(1): 7-17.
6. Brooks, R. and A. Corey (1964). "Hydraulic properties of porous medium. Hydrology paper no. 3 pp." *Civil Engineering Department, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado*.
7. Burger, C. A. and C. D. Shackelford (2001). "Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions." *Canadian Geotechnical Journal* 38(1): 53-66.
8. Dexter, A., E. Czyż, G. Richard and A. Reszkowska (2008). "A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil." *Geoderma* 143(3-4): 243-253.
9. Duncan, J. M. and S. G. Wright (2005). "Soil Strength and Slope Stability."
10. Durner, W. (1994). "Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure." *Water resources research* 30(2): 211-223.
11. Fellenius, W. (1936). *Calculation of stability of earth dam*. Transactions. 2nd Congress Large Dams, Washington, DC, 1936.
12. Fredlund, D. G. and A. Xing (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal* 31(no. 4): 521-532.
13. Gardner, W. (1958). "Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table." *Soil Science* 85(no. 4): 228-232.
14. Iverson, R. M. and M. E. Reid (1992). "Gravity-driven groundwater flow and slope failure potential: 1. Elastic Effective-Stress Model." *Water Resources Research* 28(3): 925-938.
15. JANBU, N. (1973). "Slope stability computations. The Embankment Dam Engineering." *Casagrande Volume, Editors Hirschfeld and Poulos*: 47-86.
16. Kutilek, M. (2004). "Soil hydraulic properties as related to soil structure." *Soil and Tillage Research* 79(2): 175-184.
17. Li, D.-Q., T. Xiao, Z.-J. Cao, C.-B. Zhou and L.-M. Zhang (2016). "Enhancement of random finite element

- method in reliability analysis and risk assessment of soil slopes using Subset Simulation.” *Landslides* 13(no. 2): 293-303.
18. Lu, N., J. W. Godt and D. T. Wu (2010). “A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil.” *Water Resources Research* 46(5).
19. Lu, N. and W. J. Likos (2004). *Unsaturated soil mechanics*, Wiley.
20. Lu, N. and W. J. Likos (2006). “Suction stress characteristic curve for unsaturated soil.” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 132(2): 131-142.
21. Lu, N., B. Şener-Kaya, A. Wayllace and J. W. Godt (2012). “Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety.” *Water Resources Research* 48(no. 9).
22. Luo, X., W. Liu, M. Fu and J. Huang (2017). “Probabilistic analysis of soil-water characteristic curve with Bayesian approach and its application on slope stability under rainfall via a difference equations approach.” *Journal of Difference Equations and Applications* 23(no. 1-2): 322-333.
23. Mallants, D., P.-H. Tseng, N. Toride, A. Tinunerman and J. Feyen (1997). “Evaluation of multimodal hydraulic functions in characterizing a heterogeneous field soil.” *Journal of hydrology* 195(1-4): 172-199.
24. Miao, L., S. Liu and Y. Lai (2002). “Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil.” *Engineering Geology* 65(4): 261-267.
25. Michalowski, R. L. (2002). “Stability charts for uniform slopes.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128(no. 4): 351-355.
26. Mukhlisin, M., M. R. Baidillah, M. R. Taha and A. El-Shafie (2011). “Effect of soil water retention model on slope stability analysis.” *International Journal of Physical Sciences* 6(19): 4629-4635.
27. Othmer, H., B. Diekkrüger and M. Kutilek (1991). “Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity.” *Soil Science* 152(3): 139-150.
28. Phoon, K.-K. and F. H. Kulhawy (1999). “Characterization of geotechnical variability.” *Canadian Geotechnical Journal* 36(no. 4): 612-624.
29. Phoon, K.-K., A. Santoso and Y. Cheng (2008). Probabilistic analysis of soil water characteristic curves from sandy clay loam. *GeoCongress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems*: 917-925.
30. Price, V. and N. Morgenstern (1965). “The analysis of the stability of general slip surfaces.”
31. Priesack, E. and W. Durner (2006). “Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function.” *Vadose Zone Journal* 5(1): 121-124.
32. Rahardjo, H., K. Aung, E. C. Leong and R. Rezaur (2004). “Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering.” *Engineering Geology* 73(1-2): 157-169.
33. Rahardjo, H., K. Chatterjea, E.-C. Leong and J.-Y. Wang (2016). “Effect of hydraulic anisotropy on soil-water characteristic curve.” *Soils and Foundations* 56(2): 228-239.
34. Rahardjo, H., T. Ong, R. Rezaur and E. C. Leong (2007). “Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(no. 12): 1532-1543.
35. Rahardjo, H., A. Satyanaga and E.-C. Leong (2013). “Effects of flux boundary conditions on pore-water pressure distribution in slope.” *Engineering geology* 165: 133-142.
36. Reddy, J. N. (1993). “An introduction to the finite element method.”
37. Ross, P. J. and K. R. Smettem (1993). “Describing soil hydraulic properties with sums of simple functions.” *Soil Science Society of America Journal* 57(1): 26-29.
38. Satyanaga, A. (2015). Soil water characteristic curve and shear strength of soil with bimodal characteristic, PhD Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
39. Satyanaga, A. and H. Rahardjo (2019). “Unsaturated shear strength of soil with bimodal soil-water characteristic curve.” *Géotechnique* 69(9): 828-832.
40. Satyanaga, A., H. Rahardjo, E.-C. Leong and J.-Y. Wang (2013). “Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution.” *Computers and Geotechnics* 48: 51-61.
41. Sheng, D., A. Zhou and D. G. Fredlund (2011). “Shear strength criteria for unsaturated soils.” *Geotechnical and Geological Engineering* 29(2): 145-159.
42. Šimůnek, J., M. T. van Genuchten and M. Šejna (2008). “Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes.”

*Vadose Zone Journal* 7(no. 2): 587-600.

43. van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1." *Soil Science Society of America Journal* 44(no. 5): 892-898.
44. Vardon, P., K. Liu and M. Hicks (2016). "Reduction of slope stability uncertainty based on hydraulic measurement via inverse analysis." *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 10(no. 3): 223-240.
45. Zhai, Q. and H. Rahardjo (2015). "Estimation of permeability function from the soil-water characteristic curve." *Engineering Geology* 199: 148-156.
46. Zhai, Q., H. Rahardjo and A. Satyanaga (2017). "Effect of bimodal soil-water characteristic curve on the estimation of permeability function." *Engineering Geology* 230: 142-151.
47. Zhang, L., L. Zhang and W. Tang (2004). "Rainfall-induced slope failure considering variability of soil properties."
48. 行政院農業委員會水土保持局南投分局(2018).「八寶寮地區大規模崩塌調查監測計畫-崩塌地多尺度滑動徵兆關鍵因子評析與關聯性建立成果報告書」。

收稿日期：民國 110 年 04 月 12 日

修改日期：民國 110 年 05 月 18 日

接受日期：民國 110 年 06 月 30 日