

應用三維數值方法預測降雨後邊坡地下水位變化

趙軒磊⁽¹⁾ 張光宗⁽²⁾

摘 要

台灣地區地形陡峻且降雨劇烈，強降雨事件常導致坡地地下水位劇烈變化，進而誘發崩塌與滑動等地質災害。為有效模擬坡地雨水入滲與地下水位變化行為，本研究以 PLAXIS 3D 為數值模擬平台，建構三維飽和－非飽和連續體模型，結合廬山地區四孔地下水觀測井與兩場颱風事件（2009 年莫拉克、2013 年蘇力）之實測資料，進行 Van Genuchten 模型參數之反算與靈敏度分析。模型設定考量岩體異質性，採用雙材料分層設計，針對空氣進入值 g_a 與水分從土壤中抽離的速率 g_n 設計多組參數組合進行模擬，並以地下水位時序資料作為比對依據，選取最佳組合並進行跨事件驗證。模擬結果顯示，空氣進入值 g_a 為主導參數，對地下水位上升反應具高度敏感性；水分從土壤中抽離的速率 g_n 則扮演調節作用，影響入滲速率與濕潤鋒推進。模擬成果與實測資料吻合良好，四孔觀測井之 R^2 值最高可達 0.78，MAE 多數低於 1.2 公尺，顯示所建立之模型具備穩定性與準確性。本研究成功驗證 Van Genuchten 模型參數在坡地降雨後地下水反應模擬的適用性與代表性，未來可應用於坡地穩定分析、災害預警系統與參數推估等相關領域，提供實務應用與後續研究之參考依據。

（關鍵詞：地下水位預測、Van Genuchten 模型、反算模擬、降雨）

Three-Dimensional Numerical Simulation of Groundwater Level Changes in a Slope Induced by Rainfall

Hsuan-Lei Chao⁽¹⁾ Kuang-Tsung Chang⁽²⁾

Graduate student⁽¹⁾, Professor⁽²⁾ in Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

Taiwan's mountainous terrain and intense rainfall make it highly susceptible to rainfall-induced landslides and slope failures, primarily driven by rapid groundwater level fluctuations. To effectively simulate the dynamics of rainfall infiltration and groundwater response in fractured rock slopes, this study employs PLAXIS 3D to develop a three-dimensional saturated-unsaturated continuum seepage model. The model integrates field data from four groundwater observation wells in the Lushan area of

(1) 國立中興大學水土保持學系研究生

(2) 國立中興大學水土保持學系教授（通訊作者 email：changkt@nchu.edu.tw）

central Taiwan, along with hourly rainfall records from two major typhoon events—Typhoon Morakot (2009) and Typhoon Soulik (2013). The model incorporates dual-material zoning to represent heterogeneity between fractured and intact slate layers. A systematic inverse modeling approach was applied to identify optimal combinations of Van Genuchten parameters, particularly focusing on air-entry value g_a and pore distribution index g_n . Sensitivity analysis and time-series comparison against observed groundwater levels were conducted to evaluate parameter influence and model performance. Results indicate that g_a plays a dominant role in controlling water level rise, with smaller values promoting faster infiltration and wetting front advancement. The g_n parameter, while less dominant, influences the rate and magnitude of groundwater response. The model demonstrates strong agreement with observed data, with determination coefficients R^2 up to 0.78 and mean absolute errors (MAE) mostly below 1.2 meters. This study confirms the applicability and reliability of the Van Genuchten model in simulating unsaturated flow behavior within fractured slope environments. The proposed optimal parameter combinations offer practical value for future applications in slope stability analysis, early-warning systems, and regional parameter estimation in geotechnical and hydrological studies.

(Keywords：Groundwater level prediction, Van Genuchten model, Inverse modeling, Rainfall)

前言

台灣地區年降雨量豐沛，然而受限於地形陡峻與季風氣候特性，降雨在時間與空間分布上極不均勻，常集中於夏季颱風或豪雨事件，易引發各類地質災害。尤其在高山地區，隨著道路開發與觀光建設等人為活動持續深入，地質環境脆弱性逐漸升高。當極端降雨來襲時，天然與人為因子疊加效應顯著，常導致坡地崩塌、邊坡滑動及道路中斷等災害，對交通安全與地方發展造成重大衝擊。因此，建立具備即時性與理論基礎之災害預測與防治系統，對提升山區防災應變能力與降低災損具有重要實務與學術價值。

本研究聚焦在廬山地區，位於台灣南投縣仁愛鄉，地質材料以板岩為主，岩層破碎且劈理發育明顯，具高透水性。當強降雨發生時，雨水極易迅速入滲至坡體內部，導致

地下水位短時間內劇烈上升，進而引起孔隙水壓增加與安全係數下降，顯著提升大規模崩塌風險。若能準確掌握地下水位變化機制，並進一步發展有效的預測模型，將有助於提升坡地災害預警系統的敏感度與準確性，不僅可作為工程設計、防災規劃的重要參考，也有助於強化坡體穩定性分析，對整體監測與預警效能之提升亦具實質助益。

目前用於預測坡地災害相關地下水位變化的方法，大致可區分為統計模型與物理模型兩類。統計方法如 ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) 模型具有建模快速、計算效率高等優點，能有效從歷史數據中擷取地下水位與降雨變化間的時間相關性與趨勢 (鄭開元,2015;何學承,2019)。然而，此類方法多為單變量或低維度分析，難以考慮地層異質性、水文地質特性及降雨入滲與坡體力學間之耦合行為。因此，若研究目的為模擬地下水動態以進行邊坡穩定性評估，統

計模型在空間解析與地質特性的詮釋上具有明顯侷限。

為克服此侷限，本研究採用具物理基礎之三維飽和—非飽和連續體模型，以模擬破碎岩層中非飽和區域的水分傳輸行為。考量裂隙—基質系統在多尺度與多維度下的水力特性，本文用等效連續體模型（Equivalent Continuum Model）作為模擬架構，將破碎岩層簡化為等效多孔介質。此方法因操作簡便與計算效率高，已廣泛應用於場址尺度之地下水模擬研究（Peters and Klavetter, 1988；Finstlerle, 2000；Chen et al., 2016）。然而，模型表現高度依賴於非飽和水力參數（如水力特徵曲線與相對滲透率）的準確性，惟實地量測此類參數常受限於裂隙幾何複雜性與變異性（National Research Council, 1996；Wu et al., 2006）。在實務上多借用源自土壤力學領域之經典模型（如 van Genuchten, 1980；Mualem, 1976），並結合現地地下水位資料進行參數反算（Kool and Parker, 1988；Bandurraga and Bodvarsson, 1999），以提升模擬之場址適用性。

近年亦有學者應用 PLAXIS 3D 進行邊坡滲流與穩定性模擬，例如 Yeh et al. (2020) 針對岩坡建立三維模型，模擬水位上升與孔隙水壓發展，並評估其對邊坡穩定之影響。研究結果突顯三維模擬在複雜地質條件下掌握地下水位變化與潛在滑動風險，亦驗證 PLAXIS 3D 在降雨誘發滲流行為分析上的應用潛力，為本研究方法設計提供參考依據。

基於此，本研究以 PLAXIS 3D 為模擬平台，整合廬山邊坡四孔地下水觀測井與降

雨實測資料，進行 Van Genuchten 模型中關鍵參數（空氣進入值 g_a 與水分從土壤中抽離的速率 g_n ）之系統化反算與靈敏度分析，探討其對地下水位反應的影響機制與空間差異表現，並驗證所建模擬流程在多場事件下之穩定性與應用潛力，期能為坡地災害預測、穩定性分析與參數決定提供有效依據。

研究區域

本研究選定樣區如圖 1 所示，位於南投縣仁愛鄉廬山地區，地處中央山脈西側，海拔約 1100 至 1500 公尺，地形陡峻，鄰近濁水溪上游塔羅灣溪，年平均降雨量超過 2000 mm。受颱風與鋒面影響，降雨常在短時間內集中，易引發強降雨入滲與地下水位劇烈變化。本區屬廬山層，地表出露岩層以板岩為主；岩層受輕度變質作用影響，劈理發育明顯，層理與劈理位態大致一致。由於岩體結構破碎、裂隙發達，導致高透水性，形成降雨入滲迅速、地下水反應靈敏的坡地環境，具典型非飽和一飽和轉換特性。

本研究採用之地下水位資料來自設置於坡腹與坡趾多孔監測井，四個孔位分布如圖 2 中的 A17，A21，A24 和 A25。資料涵蓋 2009 年莫拉克颱風與 2013 年蘇力颱風兩場事件。各觀測井觀測頻率為每 5 分鐘一筆，具高時間解析度。降雨資料則取自中央氣象署設於廬山之自動雨量站，提供逐時雨量紀錄。上述兩場颱風事件均為強降雨特性明顯、引發地下水顯著變化之代表性案例，觀測資料完整且連續，適合作為模型模擬與參數反算之基礎。透過此二事件分析，除可涵蓋不

同雨型與降雨強度條件，亦可驗證所建模擬方法在多種環境下之適用性與穩健性。



圖 1 研究區域空拍影像

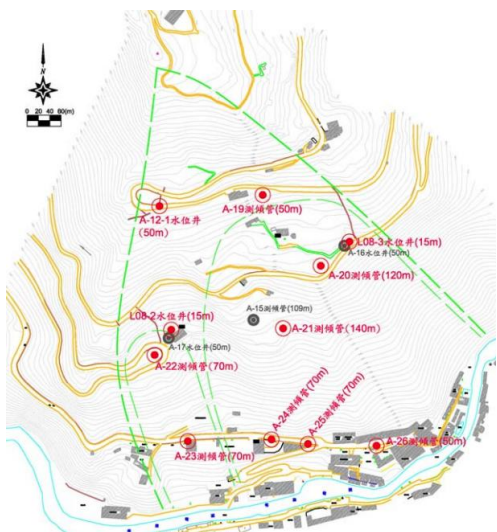


圖 2 廬山邊坡地下水位觀測井位置分布(經濟部中央地質調查所，2009)

研究方法

1. 方法概述

本研究採用連續體方法將破碎岩體視為等效連續介質，並以三維數值模擬軟體 PLAXIS 3D 建立研究區域模型，整合降雨入滲、地下水位變化與現地觀測資料，以探討廬山地區坡地在降雨條件下之地下水動態行

為。整體模擬流程分為以下三個階段：

(1) 地層建模與初始條件設定：根據實際水位觀測資料與地形資料建構模型，並設定初始水頭與邊界條件，建立穩定狀態下之地下水分布，作為後續動態模擬之基礎。

(2) 參數範圍反算與校正：針對 Van Genuchten 模型中之關鍵參數 g_a 、 g_n 設計多組組合，並將模擬結果與實測地下水位變化進行比對，以篩選能合理重現現地觀測之代表性參數組。

(3) 降雨模擬與結果驗證：輸入逐時實測降雨資料進行瞬態 (Transient) 滲流分析，模擬各颱風事件期間之地下水位上升歷程，並與觀測井資料進行驗證，以評估模型精度與應用穩健性。

2. Van Genuchten 土壤水分特徵曲線

為描述非飽和地質材料的保水能力與滲流行為，本研究採用 Van Genuchten (1980) 所提出之土壤水分特徵曲線 (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) 描述基質吸力 ψ 與飽和度 $S(\psi)$ 間的關係。該模型數學式如下：

$$S(\psi) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})[1 + (g_a|\psi|^{g_n})]^{-g_c} \quad (1)$$

$$g_c = \frac{1-g_n}{g_n} \quad (2)$$

其中：

$S(\psi)$ ：當吸力為 ψ 時之飽和度

S_{sat} ：飽和條件下的飽和度，PLAXIS 中預設為 1

S_{res} ：殘留飽和度，即使在高吸力情況下，仍留存在孔隙中的水分

$|\psi|$ ：基質吸力

g_a ：與空氣進入值（air entry value）相關，需針對特定材料量測（單位 m^{-1} ）

g_n ：描述超過進氣值後，水分從土壤中抽離的速率，與孔徑分佈有關，需針對特定材料量測

g_c ：由 g_n 導出之擬合參數，用以調整 SWCC 曲線

配合 SWCC 模型，PLAXIS 亦內建由 Burdine（1953）與 Mualem（1976）發展的模型，用以估算非飽和區域相對滲透率 k_{rel} ，該模型數學式如下：

$$k_{rel} = \max \left\{ S_{eff}^{g_l} \left[1 - \left(1 - S_{eff}^{g_n} \right)^{g_n^{-1}} \right]^2, 10^{-4} \right\} \quad (3)$$

$$S_{eff} = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}} \quad (4)$$

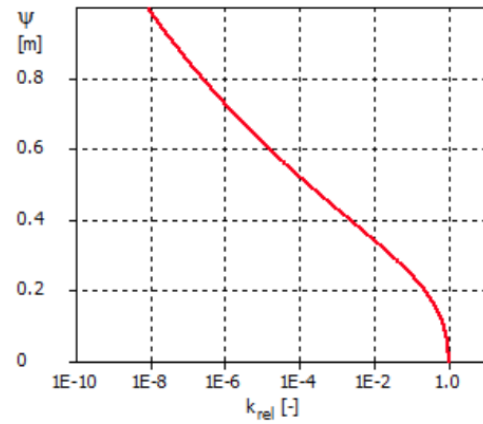
其中：

k_{rel} ：相對滲透率，反映非飽和狀態下滲透能力相對於飽和狀態之比例

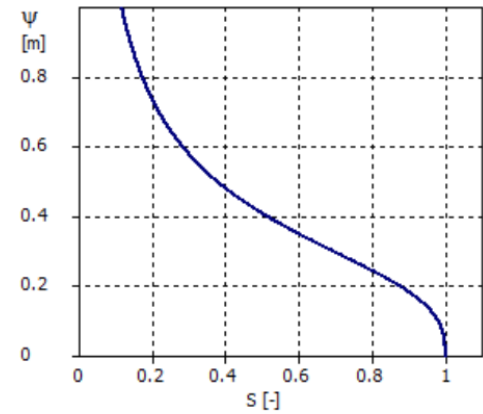
S_{eff} ：有效飽和度

g_l ：擬合參數，需針對特定材料進行測量。常設為 0.5，亦可視材料特性調整

圖 3(a) 與圖 3(b) 分別顯示 Van Genuchten 模型下，基質吸力 ψ 與相對滲透率 k_{rel} ，以及飽和度 S 間之關係曲線。由圖可見當吸力逐漸增加，非飽和區域之滲透能力將迅速下降，顯示水分在土壤遷移時在高吸力條件下受到抑制。



(a)



(b)

圖 3 (a) 基質吸力 ψ 與相對滲透率 k_{rel} 關係
(b) 基質吸力與飽和度 S 的關係（SWCC）

3. 模型幾何與邊界條件設定

為模擬降雨期間廬山坡體之地下水位變化與非飽和入滲行為，本研究於 PLAXIS 3D 建立三維連續體滲流模型，如圖 4(a) 所示。模型幾何尺寸 1000 m（長）× 1000 m（寬）× 530 m（高）之三維數值模型，並依據現地地質特性設定兩個部份，分別代表地層破碎、高透水性的板岩區與相對完整板岩區。兩者於滲流分析中分別給定不同之非飽和參數組

(空氣進入值 g_a 、水分從土壤中抽離的速率 g_n)，以模擬材料異質性對水分移動的影響。

邊界條件設定如下：

(1) 地表邊界：地表設定為可透水表面，採用 Surface Groundwater Flow 邊界條件。降雨資料以 Discharge Table 格式輸入逐時雨量（單位 m^3/h ），PLAXIS 依模型地表面積自動轉換為水力通量，模擬降雨入滲歷程。

(2) 側邊邊界條件：模型四側邊界設為開放水流邊界（Open-Flow Boundary），允許坡體中水流由側邊流出，模擬現地坡體中側向滲流現象。

(3) 底部邊界條件：底部設為不透水邊界（Close-Flow Boundary），水無法向下流出。

(4) 坡頂邊界條件：於坡頂高處設置固定水頭邊界（Head BC）如圖 4(c) 所示，水頭高約為 450 m，模擬常時存在之地下水補注來源，促使坡體內部形成穩定之自上而下滲流。

(5) 坡趾邊界條件：坡趾臨近塔羅灣溪如圖

4(d) 所示，設置固定水頭條件 70 m 作為坡趾水位代表。

(6) 坡體內水頭條件：坡體內設置 9 孔觀測井如圖 4(e) 所示，各井位置與初始水頭依現地監測與佈設資料設置，並施加固定水頭作為初始條件，作為降雨模擬前之初始水位分布。

(7) 初始條件設定：模擬初始狀態為降雨前地下水條件。透過長時間（2000 小時）之 Transient 模擬建立穩定水位分布，並校準使模擬初始水位與觀測井實測水位一致，確保初始條件準確性。

(8) 模擬階段劃分：模擬流程共分為兩階段，第一階段為降雨前初始水位建立，以 Transient 模擬；第二階段為降雨期間之 Transient 模擬，輸入莫拉克與蘇力颱風事件之逐時雨量資料，模擬水位變化過程。

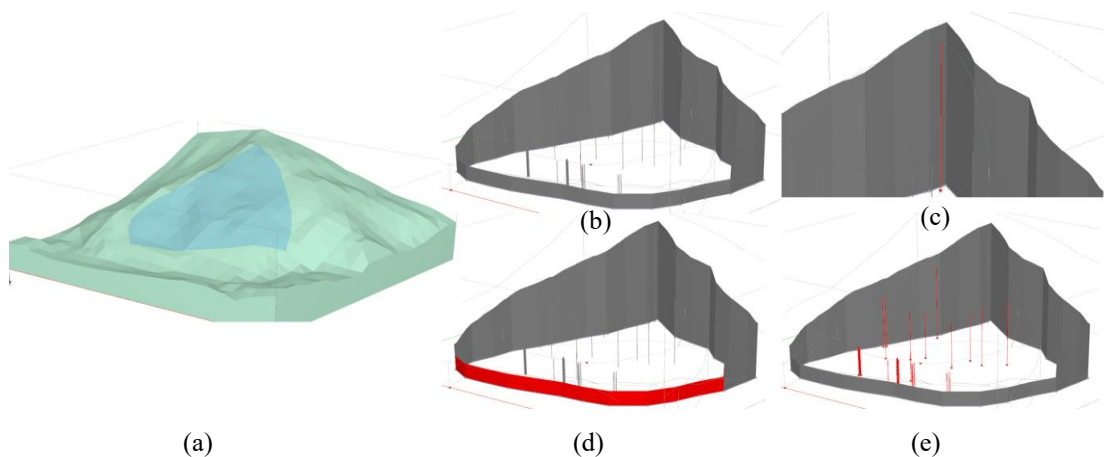


圖 4 (a) 三維連續體滲流模型，淺藍色部分為破碎岩層，淺綠色部分相對完整岩層

(b) 邊界條件一覽 (c) 坡頂邊界條件 (d) 坡趾邊界條件 (e) 坡體內水頭條件

4. Van Genuchten 參數反算流程設計

為有效評估不同 Van Genuchten 模型參數對地下水模擬結果之影響，本研究採用階段式參數篩選策略，逐步縮小參數組合空間，提升篩選效率與合理性。整體流程說明如下：

- (1) 固定上層參數，測試下層組合：首先設定一組代表性上層參數 ($g_n = 1.7$, $g_a = 0.054$, $g_l = 0.5$)，針對多組下層參數進行模擬。模擬期間採用莫拉克颱風逐時降雨作為入滲條件，比對模擬水位與實測結果，以篩選初步合理之下層參數組。
- (2) 固定下層參數，測試上層組合：接續設定一組下層參數 ($g_n = 2$, $g_a = 4$, $g_l = 1$)，以相同方式模擬多組上層參數，觀察其模擬地下水位與觀測結果之相符程度。
- (3) 單材料參數組合驗證：將步驟 1 與 2 中表現較佳之參數組合，分別套用至蘇力颱風事件進行模擬驗證，確認其穩定性與適用性。
- (4) 雙材料參數配對試算：進一步將上、下層經初步驗證的參數組合進行交叉配對，重新以莫拉克事件作為模擬條件，分析不同組合間的交互作用對地下水位模擬結果之影響。
- (5) 雙材料參數組合驗證：將表現良好的配對組合應用於蘇力颱風，驗證其在不同降雨條件下之適用性。
- (6) 逐時比對與評分排序：針對最終入選之配對組合，進行莫拉克與蘇力全事件逐

時模擬，輸出各觀測井之水位時序曲線，並與實測資料進行比對與視覺化呈現。

- (7) 誤差指標評估與最終篩選：以 RMSE (Root Mean Squared Error)、MAE (Mean Absolute Error) 等統計指標，評估模擬水位與觀測資料間之誤差，綜合準確性與穩定性，篩選出最終推薦之最佳參數組合。

結果與討論

1. 參數反算結果與靈敏度分析

本研究針對 Van Genuchten 模型之不飽和水力參數 g_a 、 g_n 進行反算與靈敏度分析，探討其對地下水位模擬結果之影響。模擬莫拉克颱風期間，四孔觀測井 (A24、A25、A17、A21) 之水位變化，結果以熱力圖方式呈現如圖 5 所示。從圖中可清楚觀察各參數組合對地下水位反應程度。

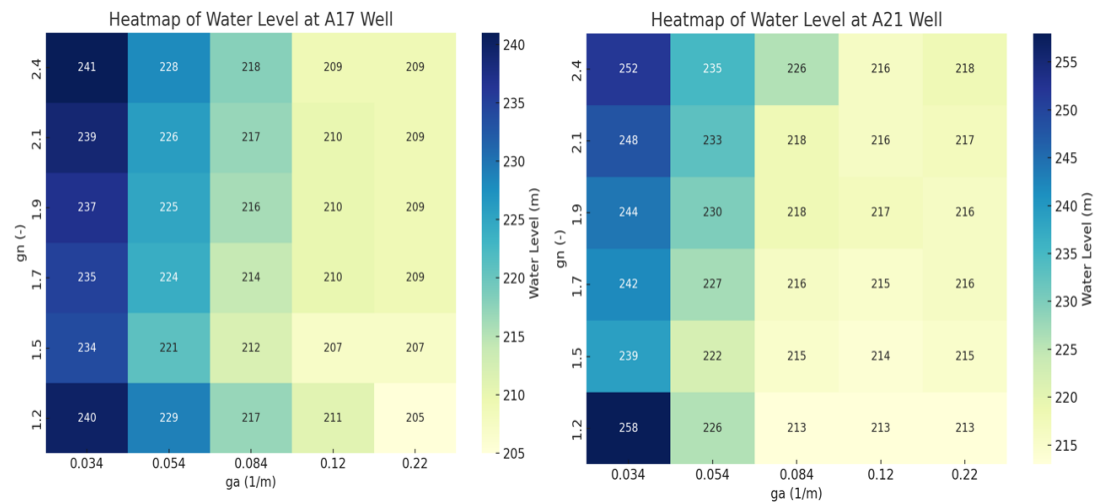
模擬結果顯示，控制地下水位反應最敏感的參數是空氣進入值 g_a ，該參數控制空氣進入孔隙的起始吸力，直接影響雨水能否有效入滲與濕潤鋒能否順利傳導至深層，是本研究中最主導的控制因子。

當 g_a 為較小值 (如小於 0.35 1/m) 時，各觀測井皆呈現明顯的水位上升；而隨著 g_a 增大 (尤其當 $g_a > 0.85$ 1/m 時)，水位反應明顯趨緩。從土壤水分特徵曲線 (SWCC) 的角度來看如圖 6 顯示 g_a 值越小如 $g_a = 0.054$ 時，SWCC 曲線會向右平移，代表在更大的基質吸力條件下仍可維持較高的飽

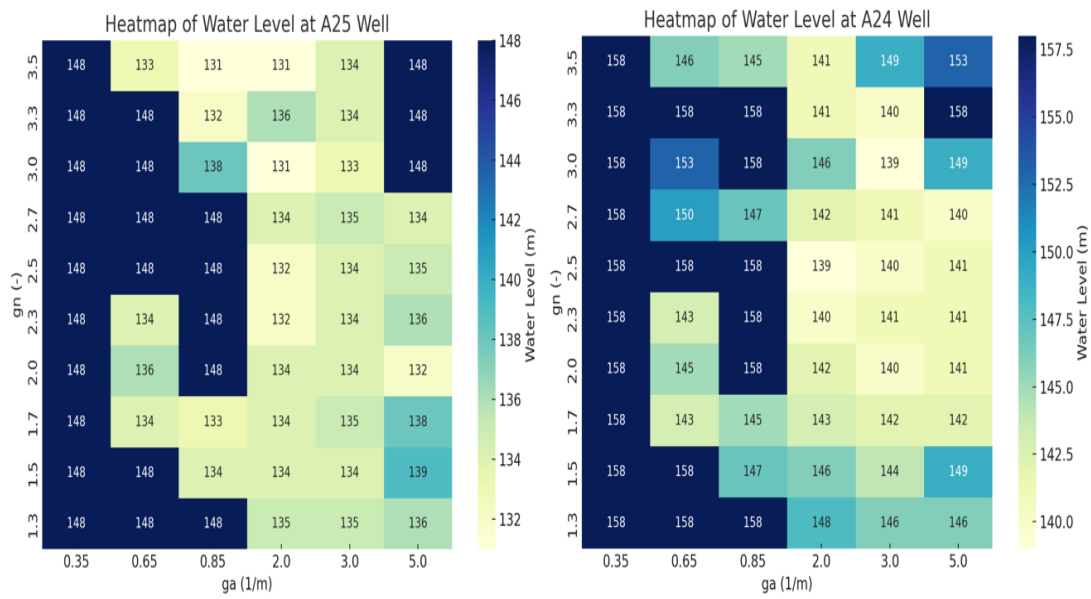
和度，這樣的條件有利於降雨期間快速形成濕潤區，水分也較容易從淺層下傳至深部，引發地下水位明顯上升，如表 1 所示。相對地，當 g_a 較大時如 $g_a=5$ 時，SWCC 曲線轉折較早，飽和度上升受限，即便降雨持續，仍難以快速補注至地下水層，導致模擬水位反應緩慢。整體來說，小 g_a 代表地質材料在更大吸力下仍維持高飽和度，降雨時更容易達到濕潤、入滲並提升地下水位；而大 g_a 組合的模擬結果常出現水位變化小。

水分從土壤中抽離的速率參數 g_n 則決定 SWCC 曲線的斜率，控制由部分飽和轉為完全飽和的速率。模擬結果如圖 5(a)所示顯示，在固定 g_a 下，若 g_n 增加（如 1.2 至 2.4），地下水位上升幅度略有提升，漲幅多

介於 1–5 公尺之間，影響雖不劇烈，但在 A21 與 A17 井中表現相對明顯。如圖 6 所示，當 g_n 較小（如 1.2–1.5）時，SWCC 曲線較平緩，孔隙分布細小、毛細現象強，能維持高吸力，延緩飽和進程。反之，當 g_n 達 2.3–3.5 時，曲線陡峭，含水量對吸力變化更敏感，易促成水分快速傳導與水位迅速上升。整體來說， g_n 值主要決定入滲過程的速度與水位漲幅的穩定性，其影響雖不如 g_a 劇烈，但仍對地下水位模擬結果具有調節作用。擬合的參數選擇過程中， g_n 可作為次要優化調整的參數。



(a)



(b)

圖 5 (a) A17 與 A21 觀測井於莫拉克事件第 100 小時的模擬水位熱力圖與(b) A25 與 A24 觀測井於莫拉克事件第 100 小時的模擬水位熱力圖

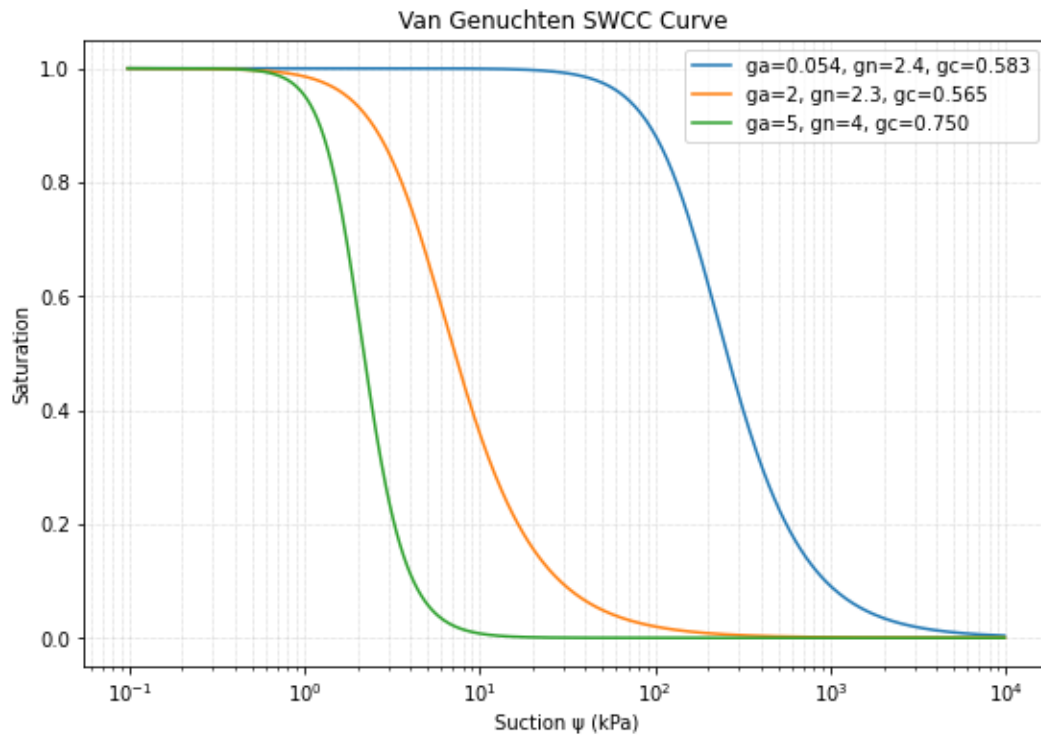


圖 6 不同 Van Genuchten 參數組合下之土壤水分特徵曲線 (SWCC)

表 1 g_a 大小對於水位反應影響

g_a (1/m)	SWCC 曲線特性	水位反應
0.054	曲線在右，基質吸力下降時，較早達到高飽和度	上升 12m
5	基質吸力下降時，曲線轉折晚，較晚達到高飽和度	無明顯上升

2. 各井模擬與實測水位趨勢

本節針對最終選定之 Van Genuchten 雙材料參數組合進行模型驗證。坡腹區設定是 $g_n=2.4$ 、 $g_a=0.054$ ，坡趾區為 $g_n=2.3$ 、 $g_a=2.0$ ，組合結果與過去針對破碎岩體等效連續體所提出之範圍相符 (Bandurraga and Bodvarsson, 1999；Chen, 2020)，具有物理合理性。

模擬分析以 2009 年莫拉克颱風與 2013 年蘇力颱風作為兩場代表性強降雨事件，並針對四孔觀測井 (A24、A25、A17、A21) 進行模擬水位與實測資料之比較。模擬期間涵蓋降雨開始至結束階段，重點關注水位上升趨勢與幅度之準確性。

根據表 2 統計，該參數組合於莫拉克事件中整體模擬吻合度高，四孔井的 R^2 值均在 0.65 – 0.79 之間，MAE 全數低於 2.9m。其中 A24 與 A25 表現最佳，RMSE 分別為 1.29 m 與 1.35 m，且 R^2 分別為 0.786 與 0.689，顯示模型能精確重現強降雨事件下的地下水位變化。

在蘇力事件中，模擬表現更加良好，見表 3。A21 與 A25 均呈現極高吻合度，A25 模擬誤差非常小 (RMSE = 0.378 m, R^2 = 0.816)，A21 亦達 R^2 = 0.774、MAE 僅 0.286m。A17 井在本次事件中模擬趨勢也與實測高度相符 (R^2 = 0.696, MAE = 0.857m)，顯示本模型在此地層分層條件與降雨事件下皆具良好適應性與穩健性。

透過模擬與實測比對，可以更直觀檢視本研究所反算參數組合的表現，圖 7 分別呈現莫拉克 (圖 7a) 與蘇力 (圖 7b) 兩事件中模擬與實測水位隨時間之變化。在莫拉克事件中累積雨量多，因此各觀測井皆呈現顯著的水位上升反應。其中，A24 與 A25 井模擬曲線與實測結果吻合度高，不僅水位起伏接近，模擬時上升速度也與實測相符。相較之下，蘇力事件累積降雨較小，水位抬升幅度明顯小於莫拉克，但模擬表現反而更加準確。尤其是 A21 與 A25 井，其模擬與實測水位幾乎完全重疊，誤差小，顯示模型在該區域的參數設定具高度掌控性。

進一步分析空間尺度下地下水位分布變化，圖 8 與圖 9 展示莫拉克事件期間模型

中穿越 A24、A25、A17 與 A21 井之剖面模擬結果。圖中色階代表孔隙水壓分佈，深藍色線條為水位線即孔隙水壓為 0 處，淺藍色線條為三維模型剖面後透視之地表線。圖 8 為降雨前穩定水位，圖 9 則顯示降雨後水位顯著上升，濕潤鋒由地表向深部推進，特別是在坡腹區，水位線上移幅度達數十公尺，

部分區域甚至接近地表。四孔觀測井所對應的剖面位置皆顯示明顯孔隙水壓上升增加，反映本模型參數設定能有效重現降雨事件引發的地下水快速補注行為。

表 2 莫拉克模擬與實測水位比對誤差指標

Well	Typhoon	RMSE	R^2	MAE
A17	莫拉克	3.028	0.683	2.833
A21	莫拉克	3.317	0.655	2.667
A25	莫拉克	1.354	0.689	1.167
A24	莫拉克	1.291	0.786	1

表 3 蘇力模擬與實測水位比對誤差指標

Well	Typhoon	RMSE	R^2	MAE
A17	蘇力	1.195	0.696	0.857
A21	蘇力	0.535	0.774	0.286
A25	蘇力	0.378	0.816	0.143
A24	蘇力	0.447	0.447	0.429

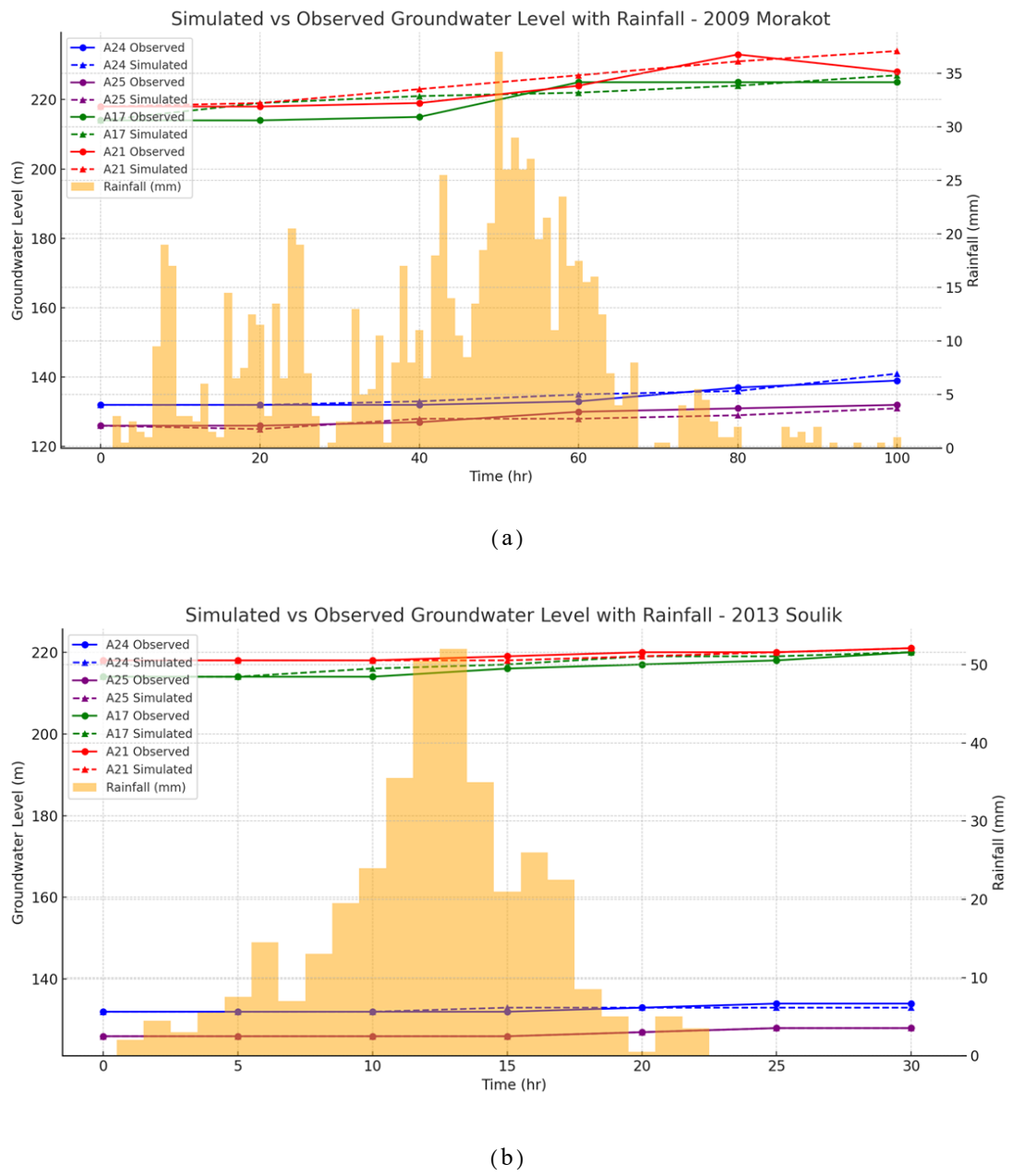


圖 7 (a) 2009 年莫拉克颱風與 (b) 2013 年蘇力颱風期間模擬與實測水位比較

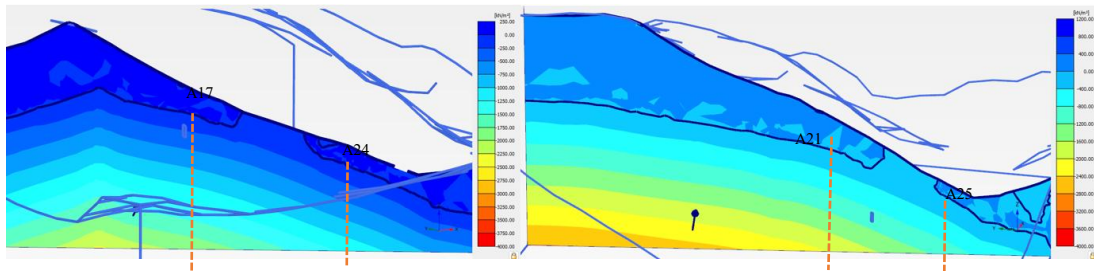


圖 8 降雨前穩定水位

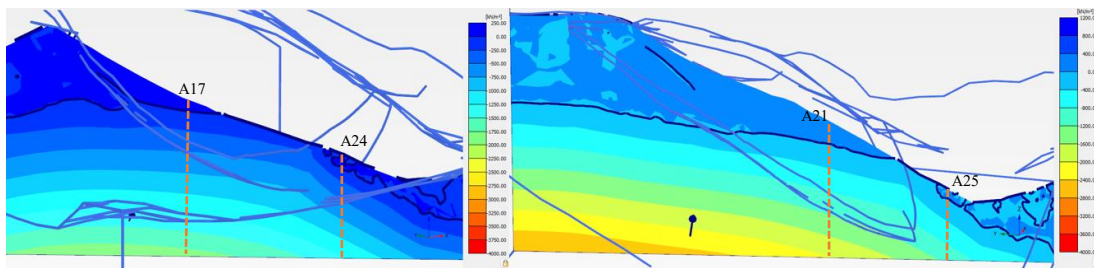


圖 9 莫拉克降雨後水位顯著上升

結論

本研究以 PLAXIS 3D 為數值模擬平台，建立三維飽和—非飽和滲流連續體模型，整合廬山邊坡四孔地下水觀測井與兩場颱風降雨現地資料，進行 Van Genuchten 不飽和參數之反算與靈敏度分析，評估其對地下水位變化模擬之準確性與場址適用性。綜合模擬結果與誤差分析，獲得以下主要結論：

1. 本研究結果顯示，空氣進入值 g_a 為主導控制坡地水位反應的關鍵參數，當 g_a 越小，土壤水分特徵曲線向右平移，有助於雨水快速入滲與濕潤鋒推進，導致地下水位顯著上升；反之， g_a 增大將抑制補注過程，使水位變化趨緩。相較之下，水分

從土壤中抽離的速率參數 g_n 對模擬水位具次要調節效果，其值愈大，SWCC 曲線陡峭，入滲速率與水位上升速度略有增加，尤以坡腹區觀測井反應較為明顯。

2. 採用雙材料設定以模擬坡體內部之異質性與其對水力反應的差異，模擬結果可合理重現四孔井於莫拉克、蘇力颱風事件中之水位變化行為。 R^2 值可達 0.78，MAE 多數低於 1.2m，RMSE 亦低於 1.4m，顯示本模型具備良好的模擬準確性與適用性。
3. 剖面圖結果顯示，強降雨期間水位線顯著上升，濕潤鋒向深部推進，說明本研究參數設定與邊界條件可成功捕捉邊坡地下水空間變化特性，模擬結果具備合理性。

4. 綜合模擬結果與參數反算評估，本研究提出之一組 Van Genuchten 最佳參數組合（坡腹區： $g_n = 2.4$ ， $g_a = 0.054$ ；坡趾區： $g_n = 2.3$ ， $g_a = 2$ ）展現良好模擬表現與跨事件穩定性，未來可應用於坡地模擬、災害預警分析等相關研究與工程設計基礎。

誌謝

非常感謝經濟部地質調查及礦業管理中心謝有忠科長提供現場地下水位監測資料，使本研究得以順利進行。

參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所(2009)，南投縣廬山溫泉北坡監測及預警系統建置期末監測成果報告書。
2. 鄭開元 (2015)，「利用 ARIMA 模式建立地滑地之降雨警戒基準值於大梨山地區」，國立中興大學土木工程學系碩士學位論文
3. 何學承 (2019)，「AIoT 技術及 ARIMA 模式於大規模崩塌決策系統之應用」，國立中興大學土木工程學系博士學位論文。
4. Peters, R.P., Klavetter, E.A., 1988. A continuum model for water movement in an unsaturated fractured rock mass. *Water Resour.Res.*24(3),416–430.
<https://doi.org/10.1029/WR024i003p00416>.
5. Van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc.Am.J.*44(5),892–898.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
6. Burdine,N.T., 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data.*Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*198,71–77.
<https://doi.org/10.2118/225-G>
7. Chen, Y. F., Yu, H., Ma, H. Z., Li, X., Hu, R., & Yang, Z. (2020). Inverse modeling of saturated-unsaturated flow in site-scale fractured rocks using the continuum approach: A case study at Baihetan dam site, Southwest China. *Journal of Hydrology*, 584, 124693.
8. Yeh, P. T., Lee, K. Z. Z., & Chang, K. T. (2020). 3D Effects of permeability and strength anisotropy on the stability of weakly cemented rock slopes subjected to rainfall infiltration. *Engineering Geology*, 266,105459.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105459>
9. Bandurraga, T., Bodvarsson, G., 1999. Calibrating hydrogeologic parameters for the 3-D site-scale unsaturated zone model of Yucca Mountain. Nevada. *J. Contam. Hydrol.*38,25–46.
[https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(99\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(99)00010-8)
10. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*12(3),513–522.
<https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513..>

11. Peters, R.P., Klavetter, E.A., 1988. A continuum model for water movement in an unsaturated fractured rock mass. *Water Resour. Res.* 24(3), 416–430.
<https://doi.org/10.1029/WR024i003p00416>.
12. Finsterle, S., 2000. Using the continuum approach to model unsaturated flow in fractured rock. *Water Resour. Res.* 36 (8), 2055–2066.
<https://doi.org/10.1029/2000WR900122>.
13. Chen, Y.F., Hong, J.M., Zheng, H.K., Li, Y., Hu, R., Zhou, C.B., 2016. Evaluation of groundwater leakage into a drainage tunnel in Jinping-I arch dam foundation in Southwestern China: A case study. *Rock Mech. Rock Eng.* 49 (3), 961–979.
<https://doi.org/10.1007/s00603-015-0786-y>
14. National Research Council, 1996. *Rock Fractures and Fluid Flow-Contemporary Understanding and Applications*. National Academy. Press, Washington D.C.
15. Wu, Y.S., Zhang, K., Liu, H.H., 2006. Estimating large-scale fracture permeability of unsaturated rock using barometric pressure data. *Vadose Zone J.* 5(4), 1129–1142.
<https://doi.org/10.2136/vzj2006.0015>.
16. Kool, J.B., Parker, J.C., 1988. Analysis of the inverse problem for transient unsaturated flow. *Water Resour. Res.* 24 (6), 817–830.
<https://doi.org/10.1029/WR024i006p00817>

114 年 05 月 22 日收稿

114 年 06 月 05 日修改

114 年 06 月 06 日接受

水土保持學報 55(1)：3457- 3472 (2025)

Journal of Soil and Water Conservation, 55(1)：3457- 3472 (2025)