

施設背拉式排樁未飽和邊坡之降雨滲流穩定性分析

林德貴^[1] 王勝賢^[1] 鄒瑞卿^[2] 許聖富^{[3]*}

摘要 臺灣地區在梅雨及颱風季節所帶來之集中性豪雨，常引發大規模之落石、土石流或地滑等邊坡崩坍災害。針對已發生滑動或有滑動潛勢之邊坡，目前國內已發展出許多邊坡整治工法，其中背拉式擋土排樁為邊坡整治常採用之工法。以往邊坡於降雨情況下之穩定分析研究，大多將邊坡視為完全乾燥或完全飽和狀態進行分析，並未模擬降雨入滲行為對邊坡穩定性之影響。本研究首先利用已完成之室內大型人工邊坡降雨入滲試驗資料，以 PLAXIS 3D 三維有限元素程式進行數值模擬，並建立數值模擬程序及驗證其有效性。最後，針對未飽和均質邊坡，在不同降雨雨型與地下水水位深度條件下，探討降雨入滲行為及背拉式排樁對邊坡穩定性之影響。

關鍵詞：降雨入滲、背拉式排樁、邊坡穩定、PLAXIS 3D。

Rainfall Seepage-induced Stability Analyses of Unsaturated Slopes with Tie-back Retaining Piles

Der-Guey Lin ^[1] Sheng-Hsien Wang^[2] Jui-Ching Chou ^[3] Sheng-Fu Sheu ^{[4]*}

ABSTRACT During the raining season in Taiwan, heavy rainfall often causes landslides, debris flows and collapses on slopes. The tie-back retaining pile method is one of the most popular methods used for slope rehabilitation. In the past, the infiltration and seepage behaviors of slopes during rain fall have usually been ignored in the stability analyses. In this study, a large scale test on the infiltration and seepage behaviors of a slope is modeled using the three-dimensional finite element program, PLAXIS 3D, to validate and calibrate the numerical model. Then, a model of an unsaturated slope consisting of a homogeneous layer of the colluvium was established for a series of slope stability analyses. Meanwhile, the effects of infiltration and seepage behavior and the tie-back retaining pile system on the slope stability under different water table levels and rainfall patterns were investigated.

Key Words: Rainfall infiltration, tie-back retaining pile, slope stability, PLAXIS 3D.

一、前言

臺灣地區因地殼板塊擠壓運動，造成地層年代輕、地形高低懸殊，河流既短且陡急，加上降雨時空分配不均，在梅雨及颱風季節所帶來之集中性豪雨情形，常引發大規模之落石、土石流或地滑等邊坡崩坍災害。目前國內針對崩塌地處理已發展出許多邊坡整治工法，其中背拉式擋土排樁為常採用之工法，其抗滑機制來自於土體與排樁力學互制行為所提供之抵抗能力。過往諸多邊坡於降雨情況下之穩定分析研究，大多將邊坡視為完全乾燥或完全飽和狀態進行分析。然而，現地邊坡土壤大多為未飽和狀態，因此當降雨入滲行為發生後，邊坡內之負值孔隙水壓降低，導致邊坡之基質吸力 (matric suction) 減少，進而影響邊坡穩定性。因此本研究將針對未飽和邊坡，在不同

降雨雨型與地下水水位條件下，降雨入滲行為及背拉式排樁對於邊坡穩定性之影響進行探討。

二、文獻回顧

2.1 未飽和土壤之水力傳導函數及剪力強度

由於孔隙吸力與孔隙密度變化之機制相當複雜，Mualem (1978) 藉由土壤水分特徵曲線，同時考慮土壤水分勢能與水分含量對於水力傳導度之影響，進而推導出土壤相對水力傳導函數。van Genuchten (1980) 以 Mualem (1978) 模式為基礎推導出之方程式，係以實驗參數代入 Mualem 之積分式，而求得之另一水力傳導函數 (即 van Genuchten model-vG 模式)。此舉讓原本使用不易之積分函數式更易於應用。當飽和土壤之含水量減少時，土壤顆粒間會形成負孔隙水壓力，使得土壤顆粒間

[1] 國立中興大學水土保持學系
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C.

[2] 中興工程顧問股份有限公司
Sinotech Engineering Consultants, Ltd., Taipei, Taiwan, R.O.C.

[3] 華勝工程顧問有限公司
Hwa-Sheng Eng. Consultants Co., Ltd., Miaoli, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: sanford877@yahoo.com.tw

的界面產生張力，進而增加土壤的剪力強度。Fredlund, et al. (1978) 提出以淨正向應力與基質吸力，來表示未飽和土壤之剪力強度。

2.2 土壤水分特性曲線

土壤水分特性曲線是土壤體積含水量與土壤孔隙張力的關係曲線，利用此關係曲線可以換算土壤孔隙內水張力與體積含水量，並且間接地反應土壤孔隙大小的分佈，藉以分析異質性土壤的保水性、土壤有效孔隙與土壤水分的有效性等 (Gotardi and Venutelli, 1993)。van Genuchten and Nielsen (1985) 探討 vG 模式在接近飽和進氣潛能 (air-entry suction) 時，曲線變化對土壤之適用性。Tyler and Wheatcraft (1989) 以碎形幾何觀念(fractal geometry)為基礎，假定土壤結構依碎形幾何排列，推導一套適用於特定土壤之孔徑分佈土壤-水分特性曲線模式。陳進發 (2002) 則進一步整理出土壤-水分特性曲線模式之發展歷程，並設定各種模式的參數彙整出土壤之水分特性曲線。

李振誥等 (2001) 進行八種水分特性曲線對不同土壤的適用性評估，並探討各模式擬合情形。分析結果指出 Kosugi model 與 van Genuchten model 適用範圍最廣，Brooks and Corey model 較適用於砂質土壤。然而，相較於 Brooks and Corey (1964) 公式，van Genuchten (1980) 的曲線在轉折處有較佳的表現，特別是接近飽和時 (van Genuchten and Nielsen, 1985)。因此，目前數值分析描述土壤體積含水量與土壤孔隙張力的關係曲線，以 van Genuchten (1980) 所建議之水分特性曲線公式較常使用，該模式由飽和含水量 (θ_s)、殘餘含水量 (θ_r)、兩者之中間值 (θ_p) 以及 θ_p 對應之基質吸力 (ψ_p)，計算一斜率值 (S_p)，再由 S_p 求得水分特徵曲線之形狀參數 α 、 n 、 m 。曾仁郁 (2013) 利用 PLAXIS 有限元素數值分析，進行 vG 模式中擬合參數 (α 、 n 、 m) 之變化，對於邊坡土壤水分特性曲線及安全係數影響之研究，其研究結果顯示在 α 、 n 、 m 三個擬合參數中， α 值與土壤吸氣值、土壤孔隙率及保水性皆有關， n 值與排水速率有關， m 值和土壤殘餘含水量有直接對應之關係。其中，又以 α 值對於降雨入滲之邊坡安全係數計算影響最大。

2.3 降雨入滲行為之研究

Mein and Larson (1973) 藉由土壤之入滲容量 f_p 、降雨強度 I 、及土壤飽和滲透係數 k_s 等參數，描述複雜的降雨入滲行為。當 $k_s > I$ 時，降雨完全滲入土層中，但僅造成土層中土壤含水量之改變，不會產生地表浸潤帶；當 $f_p > I > k_s$ 時，降雨完全滲入土層中，靠近地面之土層含水量逐漸增加，浸潤帶亦漸次產生；當 $I > f_p > k_s$ 時，除產生浸潤帶外，因降雨強度大於土壤入滲容量，雨水滲入量受到限制，部分地區因入滲率小於降雨強度，而產生積水及地表逕流，且入滲率逐漸降低。Rahardjo et al. (2001) 長期觀測降雨對邊坡之影響，發現降雨入滲率隨著時間漸增，但達到一定入滲率後即不再有顯著的增加。同時，隨著時間增加，浸潤帶深度會逐漸增加，進而了解降雨造成之邊坡破壞通常發生在含有較深地下水面之殘餘土陡坡。另外，Lumb (1975) 提供降雨入滲深度 (浸潤帶) 之計算式，將土層分為浸潤帶與非浸潤帶兩區域，藉以估算浸潤帶的最大深度。范嘉程與馮道偉 (2003) 之研究指出，地表逕流滲入邊坡土層

時，會使邊坡地表面下約 1~4 m 之淺層形成浸潤帶，進行邊坡穩定分析時，應將受到浸潤後之土壤強度進行折減後輸入分析程式，以求得降雨滲流時之邊坡穩定安全係數。浸潤帶之土壤強度折減方式及折減之比例，可依范嘉程與馮道偉 (2003) 之建議，浸潤帶之土壤摩擦角維持不變，凝聚力折減至原凝聚力之 20%~30%。

呂明杰 (2004) 以數值模擬方式，進行均勻細砂、砂質壤土、粉土質粘土及龍潭紅土等四種未飽和土壤邊坡之降雨入滲分析，探討不同性質土壤於未飽和狀態下之入滲行為，結果顯示當土壤未飽和部份之水力傳導函數較高時，入滲速度較快，入滲影響區域較大。同時，容易造成坡頂向下滲入水流受到推擠而改變流動方向，形成部份水流往遠離坡面之方向流動。

2.4 降雨導致邊坡破壞之相關研究

張萬芳 (1982) 探討不同邊坡坡度與岩層傾角下，降雨對邊坡破壞型式之影響，顯示平緩坡度 ($20^\circ \sim 35^\circ$) 邊坡為流動型式之破壞型式；中等坡度 ($35^\circ \sim 50^\circ$) 及較陡坡度 ($50^\circ \sim 60^\circ$) 邊坡為流動及滑動複合之破壞型式；陡峭坡度 ($>60^\circ$) 邊坡則為整體崩滑之破壞型式。此外，坡角固定時，岩層傾角愈大對地下水水位影響愈大，且邊坡之穩定安全係數愈小。姜禮應 (1981) 以三種不同粒徑土壤，在玻璃模型箱進行不同坡度、不同填土條件下之破壞試驗。結果顯示，當坡度小於安息角時，邊坡之破壞多為滲流作用造成；當坡度接近或略大於安息角時，邊坡之破壞多因孔隙水壓力之上升，導致土體不穩定所造成；當坡度遠大於安息角時，因土體已呈不穩定狀態，故少量地下水進入土體時，邊坡即發生破壞。此外，不同表土厚度下，地下水對邊坡之破壞方式約略相同；但表土層較薄者，邊坡發生潰流破壞比例較高。Fredlund and Rahardjo (1993) 提出，當未飽和土壤因雨水入滲而飽和時，因基質吸力銳減，導致凝聚力大幅折減，容易造成邊坡淺層破壞。陳肇成 (2002) 利用有限元素法，考慮水壓力與滲流力之影響，並配合臨界滑動面之特殊搜尋方式，進行工程案例之土壤邊坡及土石壩有效應力穩定分析，探討相關之力學行為。Moriwaki et al. (2004) 以全尺寸物理模型，進行降雨引致邊坡破壞之力學行為研究，顯示邊坡破壞初期，下邊坡表面土體移動速度較上邊坡快；邊坡大規模滑動破壞時，則反之。疏鬆砂土層於破壞過程中，因其土體結構趨於緊密而體積趨於收縮，並造成孔隙水壓上升。砂土層之高摩擦阻抗與高滲透性，可有效降低邊坡的滑動潛勢。

2.5 室內邊坡降雨入滲之砂箱試驗

蔡和倫 (2010) 以大型砂箱來進行人工降雨下模型邊坡之崩塌破壞模式研究 (以下簡稱砂箱試驗)。試驗中探討邊坡之降雨入滲與土體位移、飽和度及孔隙水壓值的關係。試驗以高屏河流域之河砂為研究材料，採用 4 號~50 號篩的配比砂、50 號~200 號篩的配比砂，以及坩土等三種材料來調配出不同配比之砂土，並製作長 1.98 m、寬 1.40 m 及高 1.0 m 之模型邊坡，邊坡坡面角為 45° 、 44° 、 32° 。選用莫拉克風災之高屏流域的最大降雨強度 (100 mm/h)，作為試驗之降雨強度，並對具有高、中、低滲透性係數之配比土體進行砂箱試驗，來研究土壤滲透性係數對邊坡降雨入滲行為之影響。另外，設計

三組降雨強度 (164 mm/h、114 mm/h 及 64 mm/h)，對具有中等滲透性係數之土體進行砂箱試驗，研究不同降雨強度邊坡降雨入滲行為之影響。本研究採用以上大型砂箱試驗結果，進行數值模擬模型之建立與模式之校正。

和倫 (2010) 模型邊坡降雨入滲砂箱試驗中，具有相同降雨強度、不同滲透性係數、以及不同降雨強度相同滲透性係數土壤之試驗結果，進行三維數值模擬比對。其次，針對未施設及施設背拉式排樁之均質崩積層邊坡，在不同初始地下水水位 (h_{wo})、降雨雨型、以及水力傳導係數函數情況下，分析降雨入滲行為對於邊坡飽和度 (S)、孔隙水壓 (P_{water}) 變化、以及穩定性之影響。本研究之分析流程，如圖 1 所示。分析模式主要為未飽和土體之降雨入滲暫態分析。

三、研究方法與數值模型驗證

3.1 研究流程

本研究以 PLAXIS 3D (2013) 程式進行三維有限元素之數值模擬。首先，為建立數值模擬程序並驗證其有效性，選用蔡

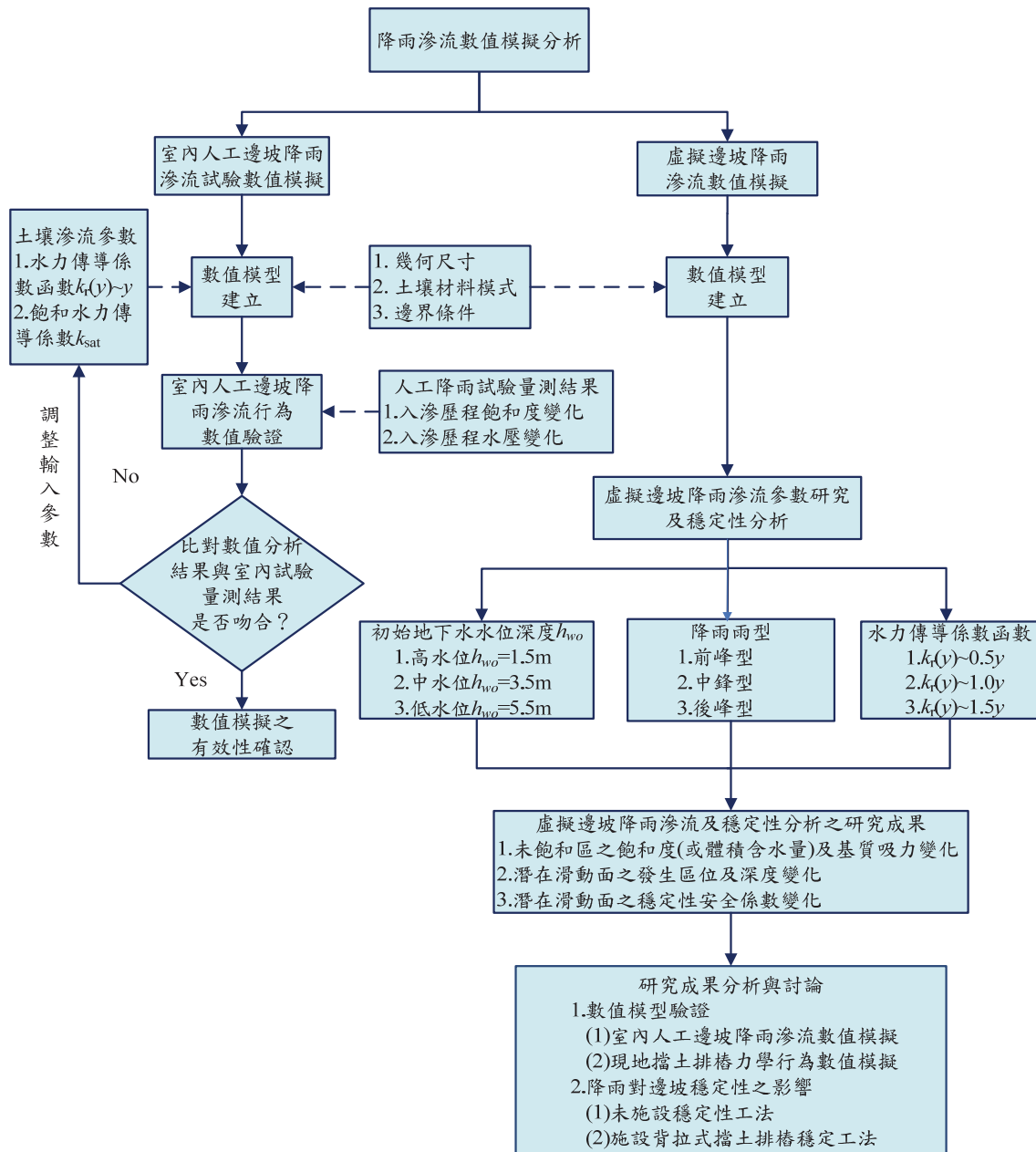


圖 1 研究分析流程圖

Fig.1 Flow chart of the study

3.2 數值模型驗證

砂箱試驗之數值模擬乃針對具有不同滲透性係數之土壤，在不同降雨強度條件下，進行模型邊坡降雨入滲分析，並比對

土體飽和度與孔隙水壓變化之模擬值與量測值之吻合度，以驗證數值程序及各項輸入材料參數之有效性。數值幾何模型，乃依照砂箱試驗之實際尺寸 (長×寬×高=1.98 m×1.40 m×1.0 m)

來建立。而模型邊坡採用具有不同配比之砂土 (編號 A、B、C, 其配比與相關參數如表 1) 來設置, 邊坡坡角分別為 45°、44°及 32° (如圖 2)。數值模型之變形分析之邊界條件為: 四周側面邊界設定為水平位移束制邊界(滾輪邊界), 底面邊界則設定為位移完全束制邊界(銜接邊界)。降雨入滲分析之邊界條件為: 將上邊界 ($Z > 0$) 設定為入流量 $Q = \Sigma q(t)$ 之降雨入滲邊界, $q(t)$ 為降雨歷時, 右邊界 ($X > 0$) 設定為有流量流出之開放邊界 ($Q \neq 0$), 其餘邊界皆設定為無流量進出之封閉邊界 ($Q = 0$), 降雨強度採用四組不同降雨強度 164 mm/h、114 mm/h、97 mm/h、以及莫拉克風災之高屏溪流域的最大降雨強度 100 mm/h。

土壤材料模式採用莫爾-庫倫 (Mohr-Coulomb) 模式, 所需材料模式參數包括: 土壤未飽和單位重 (γ_{unsat})、飽和單位重 (γ_{sat})、凝聚力 (c')、摩擦角 (ϕ')、楊氏模數 (E') 以及柏松比 (ν'),

如表 2 所示。土壤水分特性參數, 則採用 van Genuchten 水力傳導係數模式 (vG 模式), 進行降雨入滲數值分析。vG 模式中藉由輸入殘餘飽和度 S_{res} 、飽和度 S_{sat} 及擬合參數 α 、 n 、 m , 來決定土壤水分特性曲線, 並用以模擬未飽和土壤之相對水力傳導度 k_r 與基質吸力 ψ 之關係。另依據飽和砂土之室內滲透試驗結果, 可獲得砂箱試驗所使用砂土之 vG 模式擬合參數與殘餘飽和度 S_{res} 之組合, 及相關參數如表 2 所示。

行降雨入滲數值分析時, 程式中將地下水水位以上之土層, 設定為未飽和土層, 而地下水水位面則設定為零孔隙水壓 ($P_{water} = 0$)。在降雨前, 地下水水位線以上之未飽和區土層將產生基質吸力 (張力), 使得其孔隙水壓為正值 ($P_{water} > 0$), 且土層處於未飽和狀態 ($S < 100\%$)。反之, 在地下水水位面以下之飽和區土層, 其孔隙水壓為負值 ($P_{water} < 0$), 土層處於飽和狀態 ($S = 100\%$)。

表 1 降雨入滲砂箱試驗之砂試體配比與材料參數

Table 1 Proportion and material parameters of sand samples used for rainfall infiltration tests of sand box

編號	用砂	4-50 號篩 (粗砂)	50-200 號篩 (細砂)	200 號篩以下 (粉土)	平均 乾土重 (kN/m ³)	土壤 滲透係數 ($\times 10^{-5}$ m/sec)	滲透 速率	土壤 種類	凝聚力(kN/m ²)	摩擦角 (°)
A		62 %	33 %	5 %	16.02	5.1	極快	細砂	21.8	45.52
B		21 %	64 %	15 %	16.147	2.7	快	細砂	23.4	44.20
C		0 %	80 %	20 %	13.763	1.5	中等	細砂	28.5	32.35

(修改自:蔡和倫(2010))

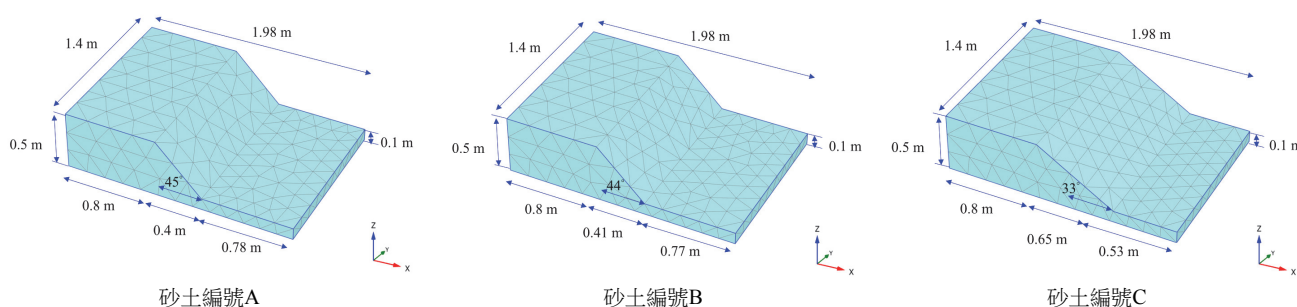


圖 2 降雨入滲砂箱試驗 3-D 數值模型

Fig.2 3-D Numerical models of rainfall infiltration tests of sand box

表 2 數值模擬土壤材料模式參數

Table 2 Material model parameters of soil for numerical simulation

編號	用砂	$\gamma_{unsat}(\gamma_{sat})$ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ' (°)	E' (kPa)	ν'	S_{res}	S_{sat}	α (1/m)	n	m ($=1-(1/n)$)	k_x, k_y, k_z ($\times 10^{-5}$ m/s)
A		16(19)	21.8	45.52	0	2×10^4	0.33	0.150	1	13.2	2.40	0.58	5.1
B		16(19)	23.4	44.20	0	2×10^4	0.33	0.180	1	9.8	2.04	0.51	2.7
C		14(17)	28.5	32.35	0	2×10^4	0.33	0.188	1	7.7	1.90	0.47	1.5

其中: 土壤未飽和單位重 (γ_{unsat})、飽和單位重 (γ_{sat})、凝聚力 (c')、摩擦角 (ϕ')、剪脹角 (ψ')、楊氏模數 (E')、柏松比 (ν')、殘餘飽和度 (S_{res})、飽和度 (S_{sat})、擬合參數 (α 、 n 、 m)及滲流係數 (k_x 、 k_y 、 k_z)。

首先, 在固定降雨強度 $I = 100$ mm/h (2.8×10^{-5} m/s) 條件下, 採用表 2 三組不同編號之砂土試體, 進行降雨入滲分析, 以探討降雨在不同滲透性土壤之滲流行為。邊坡中央剖面於降雨入滲期間 (10、30 與 60 mins) 之土壤飽和度變化, 如圖 3 所示。坡頂下 0.4 m 深度處水壓力之量測值與模擬值之比較, 如圖 4 所示。由圖 3 之模擬結果顯示, 當土壤滲透係數 ($k = 5.1 \times 10^{-5}$ m/s)

大於降雨強度時, 由於入滲水可由土體內部快速排出, 因此, 邊坡在整個降雨過程中不易達到飽和狀態 (圖 3(a))。再者, 當土壤滲透係數 ($k = 2.7 \times 10^{-5}$ m/s) 近似於降雨強度時, 則入滲水由表層土滲流至土體內部呈現中等速率, 土壤飽和度與孔隙水壓增加速率相對較快 (圖 3(b))。最後, 當土壤滲透係數 ($k = 1.5 \times 10^{-5}$ m/s) 小於降雨強度時, 由於入滲水由表層土滲流

至土體內部及排出之速率皆緩慢，因此，邊坡坡頂區域較易達飽和狀態 (圖 3(c))。

隨之，採用砂土編號 B 之模型 (滲透係數 $k=2.7 \times 10^{-5}$ m/s= 97.2 mm/h)，並輸入降雨強度 164 mm/h、114 mm/h 與 64 mm/h，進行不同降雨強度之降雨入滲分析，以探討不同降雨強度對土壤滲流行為之影響。邊坡中央剖面於降雨入滲期間 (10、30 與 60 mins) 之土壤飽和度變化，如圖 5 所示。坡頂下 0.4 m 深度處水壓力之量測值與模擬值之比較，如圖 6 所示。分析結果顯示：當降雨強度 ($I=164$ mm/h) 大於土壤滲透性時，

表層土迅速飽和。同時，由於雨水滲入量受到較低土壤滲透性之限制，將會造成表層土表面積水，且入滲水由表層土滲流至土體內部之速度較慢，使得深層土之飽和度與孔隙水壓增加緩慢。再者，當降雨強度 ($I=114$ mm/h) 近似於土壤滲透係數時，則入滲水由表層土滲流至土體內部呈現中等速率，土壤飽和度與孔隙水壓增加速率較快。最後，當降雨強度 ($I=64$ mm/h) 小於土壤滲透係數時，由於土壤滲透係數較高，入滲水滲流快速造成試體含水不易，因此飽和度與孔隙水壓增加速率較慢。

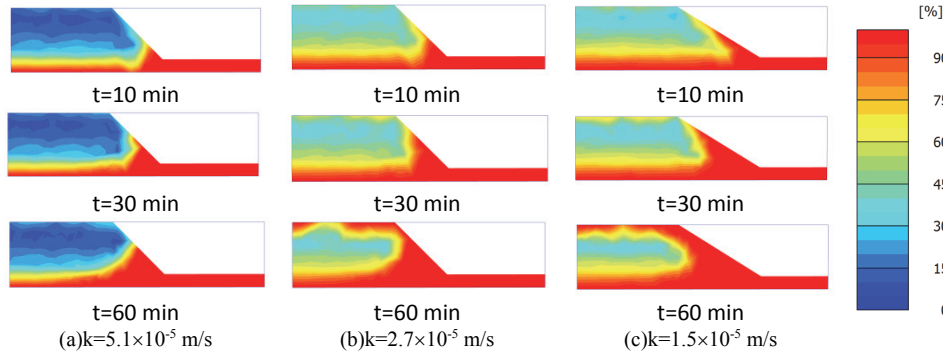


圖 3 不同滲透性土壤在特定降雨強度下之數值模擬飽和度歷程圖 ($I=100$ mm/h)

Fig.3 Simulated degree of saturation for soils with different permeability under specific rainfall condition ($I=100$ mm/h)

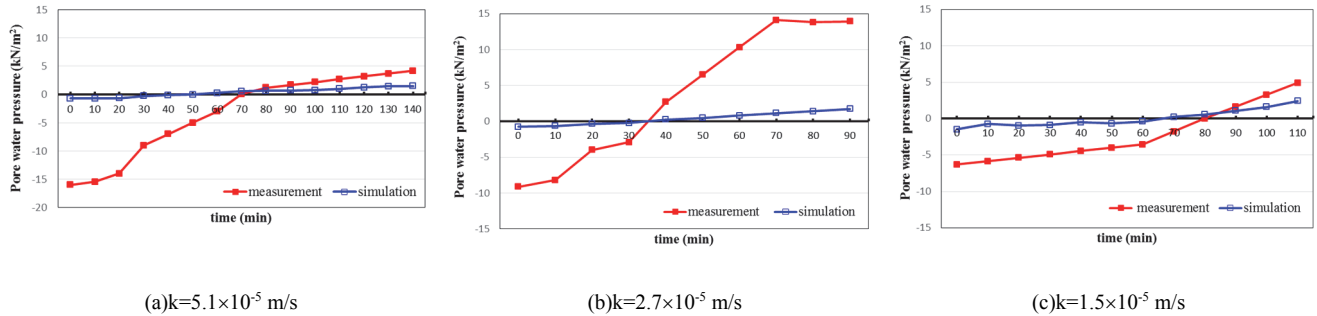


圖 4 不同滲透性土壤在特定降雨強度下 ($I=100$ mm/h) 坡頂下方 0.4 m 處之孔隙水壓變化量測值與模擬值比對

Fig.4 Comparisons between measurement and simulation of pore water pressure variation of soils beneath slope top of 0.40 m with different permeability ($I=100$ mm/h)

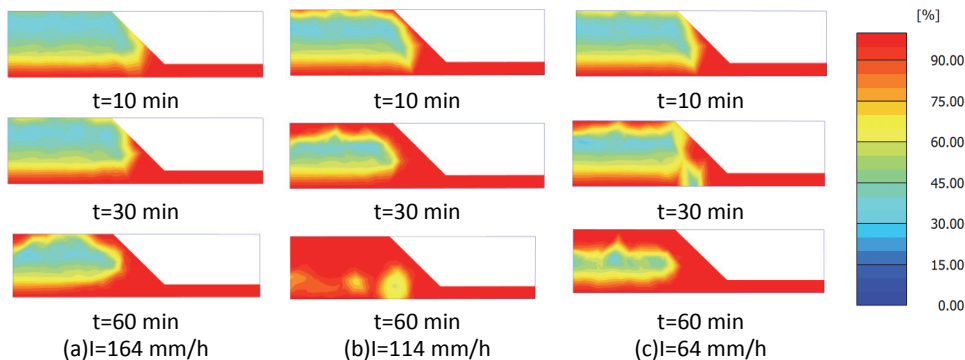


圖 5 特定滲透性土壤 ($k=2.7 \times 10^{-5}$ m/s) 在不同降雨強度下之數值模擬飽和度歷程圖

Fig.5 Simulated degree of saturation under different rainfall intensity for soils with specific permeability ($k=2.7 \times 10^{-5}$ m/s)

如圖 4 及 6 所示，比較砂箱試驗之量測值與模擬值可知，降雨入滲期間之飽和度與孔隙水壓變化趨勢吻合，尤其在孔隙水壓由負值轉為正值之降雨延時吻合度極佳，但孔隙水壓之數

值差異較大，原因說明如下：(1) PLAXIS 3D 程式中，孔隙水壓使用自由水位線 (phreatic line) 方式計算，即自由水位線 (即地下水水位線) 以上點位，其水壓力 (P_{water}) 為水的單位重

(γ_w) 乘以高程 (h), 並呈線性分佈。本研究將砂箱模型邊坡之初始地下水位線設定於邊坡底部基準面(配合試驗開始前, 土壤處於低含水量較乾燥之狀態)。此時, 在坡頂位置由上往下之初始孔隙水壓計算值為 $-5 \sim 0 \text{ kN/m}^2$, 亦即在坡頂下 0.4 m 深度處之初始孔隙水壓計算值為 $-1 \text{ kN/m}^2 (= -0.1 \times 10 \text{ kN/m}^2)$ 。而由圖 4 及 6 可知, 在坡頂下 0.4 m 深度處之初始孔隙水壓量測值 ($-7 \sim -15 \text{ kN/m}^2$) 皆大於計算值。因此, 初始孔隙水壓計算值無法與量測值吻合, 為爾後降雨模擬發生偏差的主要原因。

(2) PLAXIS 3D 採用之水力傳導係數模式 (vG model) 無法完全模擬下邊坡土層厚度較薄區域之實際之滲流行為。雖然上述兩點原因, 導致數值分析結果與試驗量測成果有較大差異, 但計算求得之孔隙水壓歷程曲線變化趨勢與室內砂箱試驗量測者仍有相當之吻合度。

綜整以上砂箱試驗數值模擬與實際量測之比較, 在此確認 3-D 降雨入滲數值模擬技術, 可進一步配合應用於背拉式排樁穩定邊坡穩定性分析。

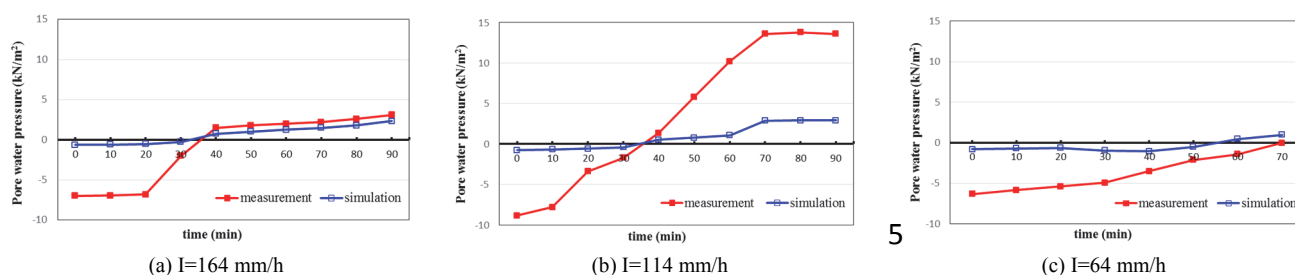


圖 6 特定滲透性土壤 ($k=2.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) 在不同降雨強度下坡頂下方 0.4 m 處孔隙水壓變化量測值與數模擬值比對

Fig.6 Comparisons between measurement and simulation of pore water pressure of soils with specific permeability ($k=2.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ beneath slope toe of 0.4 m under different rainfall intensity

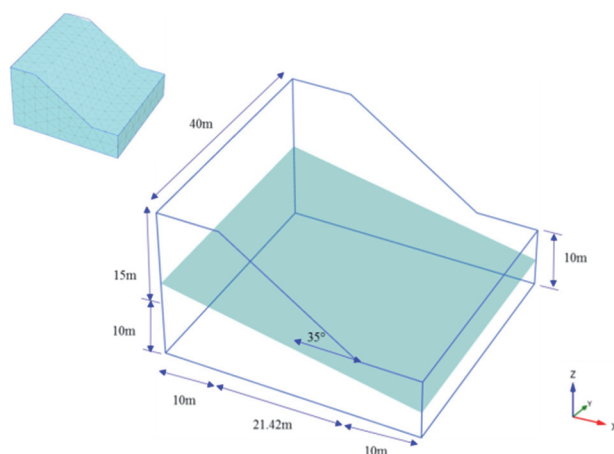


圖 7 邊坡未施設穩定工法且初始地下水水位在坡趾下方 h_{wo} 深度之 3-D 數值模型

Fig.7 3-D numerical model of slope without tie-back retaining piles and groundwater level beneath slope toe of h_{wo}

四、背拉式排樁穩定工法對降雨時邊坡之穩定性影響

4.1 未施設穩定工法降雨時邊坡之穩定性分析

邊坡數值模型採用邊坡坡角 $\beta=35^\circ$, 及三組初始地下水水位 $h_{wo}=1.5$ (高水位)、 3.5 (中水位) 及 5.5 m (低水位)。其中, 初始地下水水位設定為 $1:5(V:H)$ 之斜度分佈 (如圖 7), h_{wo} 為地下水水位在坡趾下方之深度。土壤材料模式參數, 如表 3 所示。其中, 降雨入滲時浸潤帶之土壤凝聚力, 則採用范嘉程與馮道偉 (2003) 之建議, 將凝聚力折減至原凝聚力 (c') 之 $20\% \sim 30\%$ 。尖峰降雨強度採用莫拉克颱風時之統計平均降雨強度 86.4 mm/h (林煥軒, 2011), 同時採用 (a) 前峰型 (b) 中鋒型及 (c) 後峰型 (石棟鑫, 2001), 三種日雨量設計雨型進行降雨入滲分析, 如圖 8 所示。探討不同設計雨型對邊坡穩定性之影響。其中, 前峰型降雨是指尖峰降雨發生在降雨延時 $1/4$

處, 因其初始雨量很大, 故在降雨之初期, 大量雨水會對淺層土壤產生沖刷作用, 必須注意土體淺層的破壞。中峰型降雨是指尖峰降雨發生在降雨延時 $1/2$ 處。後峰型降雨是指尖峰降雨發生在降雨延時 $3/4$ 處。中鋒及後鋒型降雨容易造成土體內之地下水蓄積, 若在排水不易之地區, 豐富的地下水再加上愈益強大的雨勢, 會使得土層受地下水的潤滑而產生深層的崩壞。

目前 PLAXIS 3D 程式內建 van Genuchten 水力傳導模式 (vG 模式) 之擬合參數, 並無法正確的模擬崩積層之滲流行為。因此, 本研究另參考莊欣蓉 (2014) 針對廬山地滑區崩積層分析所得之未飽和水力傳導係數函數 $k_r(\psi) \sim (\psi)$, ψ 為基質吸力 (水頭), 加以修正, 以求得 vG 模式之擬合參數 (α 、 n 、 m), 如表 3 所示, 繪製之 $k_r(\psi) \sim (\psi)$, 如圖 9。此外, 藉由改變 ψ 之範圍值, 各調整為 0.5ψ 及 1.5ψ , 進行降雨滲流行為分析, 探討未飽和水力傳導係數函數 $k_r(\psi) \sim (\psi)$, 對邊坡飽和度及孔隙水壓分佈之影響。

表 3 未施設穩定工法邊坡土層材料模式參數 (邱倍堅, 2012)

Table 3 Material model parameters of soil strata for the slope without tie-back retaining piles

$\gamma_{unsat}(\gamma_{sat})$ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ' (°)	E' (kPa)	ν'	Sres	Ssat	α (1/m)	n	m (=1-(1/n))	k_x, k_y, k_z (m/s)	Rinter
19(21)	1	25	0	3.56×104	0.3	0.75	1	0.65	2	0.50	4.05×10-6	0.75

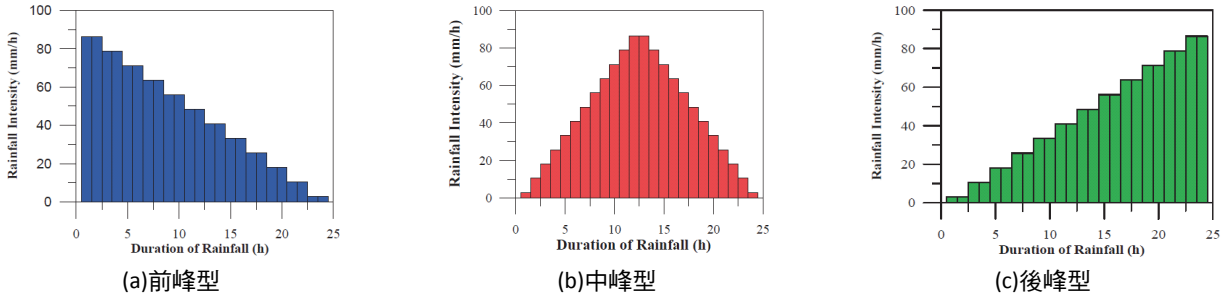


圖 8 降雨雨型示意圖

Fig.8 Design rainfall of different patterns used for rainfall-induced seepage analyses

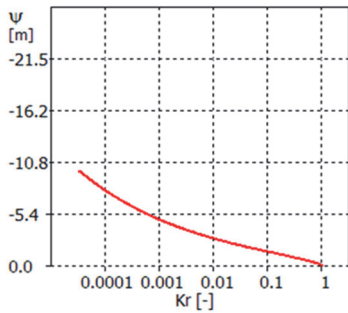


圖 9 未飽和水力傳導係數函數 $k_r(\psi) \sim (\psi)$

Fig.9 Unsaturated hydraulic conductivity function

表 4 未施設穩定工法邊坡之降雨入滲數值分析案例

Table 4 Analysis cases for numerical simulation of rainfall-induced seepage of slope without tie-back retaining piles

案例	地下水水位 h_{wo} (m)	水力傳導係數函數 $k_r(\psi) \sim (\psi)$	雨型
1	1.5	$k_r(\psi)$	中鋒型
2	3.5	$k_r(\psi)$	中鋒型
3	5.5	$k_r(\psi)$	中鋒型
4	3.5	$k_r(\psi)$	前峰型
5	3.5	$k_r(\psi)$	後峰型
6	3.5	$k_r(0.5\psi)$	中鋒型
7	3.5	$k_r(1.5\psi)$	中鋒型

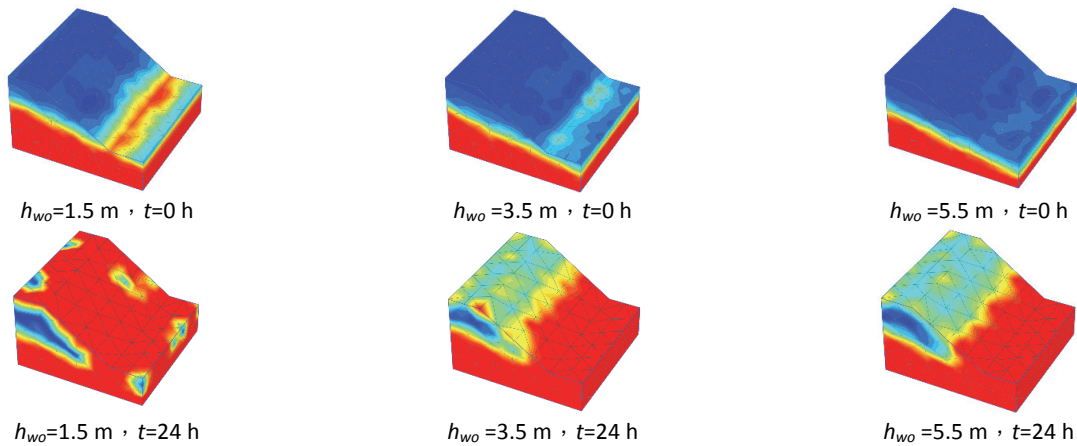


圖 10 不同初始地下水水位未施設穩定工法邊坡飽和度模擬等值圖 (紅色表示飽和度較高, 藍色表示飽和度較低)

Fig.10 Simulated contour of saturation degree (S value) for slopes without tie-back retaining piles for different initial groundwater level (red color: higher S value, blue: lower S value)

未施設穩定工法邊坡之數值模擬分析條件, 如表 4 所列。分析時採用每 6 小時為一個時間間隔, 並以 $c-\phi$ 強度折減穩定性分析法計算其邊坡之穩定性安全係數, 由分析結果可歸納出降雨入滲對未施設穩定工法之崩積層-均質邊坡所產生之影響。

首先, 探討不同初始地下水水位對邊坡穩定性之影響 (表 4 分析案例 1、2、3), 模擬結果顯示: 隨著降雨延時增長, 具

有高初始地下水水位之邊坡 ($h_{wo}=1.5$ m), 其飽和區域之分布範圍較大, 如圖 10 所示。具有不同初始地下水水位之邊坡, 其穩定性安全係數 FS 皆隨著降雨延時之增長而呈現下降之趨勢, 如圖 11 所示。同時, 在同一降雨延時下, 初始地下水水位較高之邊坡, 其 FS 值相對較低。降雨延時 $t=24$ 小時, 高、中、低水位之穩定性安全係數分別為: $FS=0.993$ 、 $FS=0.999$ 與 $FS=1.089$ 。

隨之, 探討不同設計雨型對邊坡穩定性之影響 (表 4 分析案例 2、4、5), 模擬結果顯示: 隨著降雨延時增長, 前鋒型降雨之邊坡土壤飽和區域分布範圍較大, 如圖 12 所示。不同設計雨型條件下之邊坡穩定性安全係數 FS 值, 皆隨著降雨延時之增長而呈現下降之趨勢, 如圖 13 所示。在同一降雨延時下, 前鋒型降雨之 FS 值相對較低, 降雨延時 $t=24$ h 時前鋒型、中鋒型與後鋒型降雨條件下之穩定性安全係數分別為: $FS=1.049$ 、 $FS=1.089$ 與 $FS=1.091$ 。

最後, 探討不同基質吸力 (ψ) 對邊坡穩定性之影響 (表 4 分析案例 2、6、7), 模擬結果顯示: 隨著降雨延時增長, 因基質吸力 1.5ψ (基質吸力大) 之土壤具有較佳的保水性, 邊坡土壤飽和區域分布範圍較大, 如圖 14 所示。不同基質吸力之邊坡穩定性安全係數 FS 值, 皆隨著降雨延時之增長而呈現下降之趨勢 (基質吸力隨降雨逐漸消失), 如圖 15 所示。另外, 在同一降雨延時下, 基質吸力大之邊坡 FS 值相對較低, 降雨延時 $t=24$ h 時基質吸力為 0.5ψ 、 1.0 、 1.5ψ 之穩定性安全係數分別為: $FS=1.109$ 、 $FS=1.089$ 與 $FS=1.075$ 。

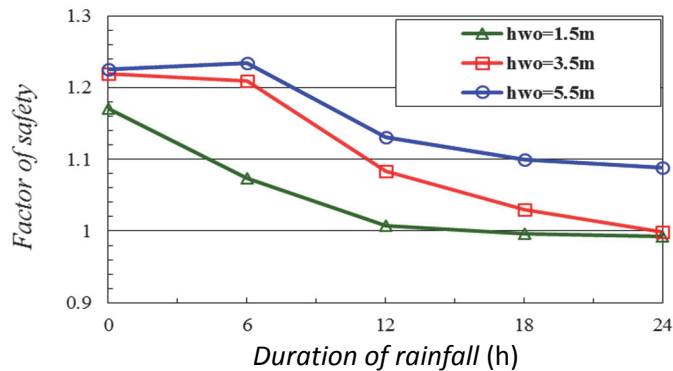


圖 11 不同初始地下水水位案例邊坡穩定安全係數

Fig.11 Factor safety of slopes without tie-back retaining piles for different initial groundwater level

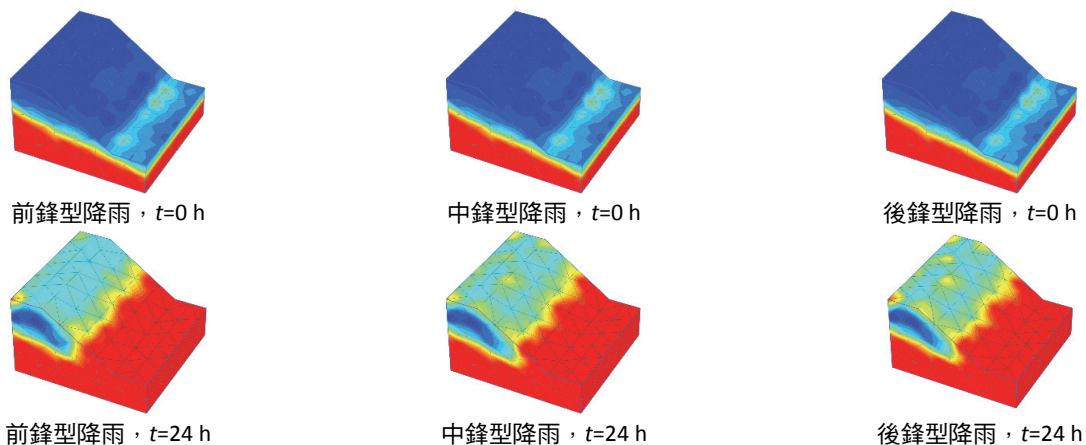


圖 12 不同設計雨型未施設穩定工法邊坡飽和度模擬等值圖 (紅色表示飽和度較高, 藍色表示飽和度較低)

Fig.12 Simulated contour of saturation degree for slopes without tie-back retaining piles for different design rainfalls (red color: higher S value, blue: lower S value)

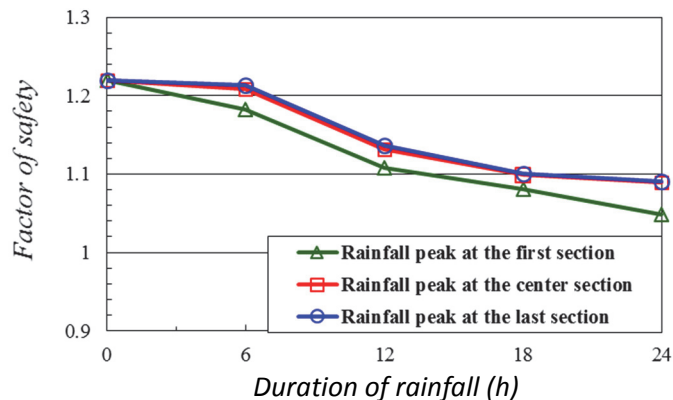


圖 13 不同設計雨型案例邊坡穩定安全係數

Fig.13 Factor safety of slopes without tie-back retaining piles for different design rainfalls

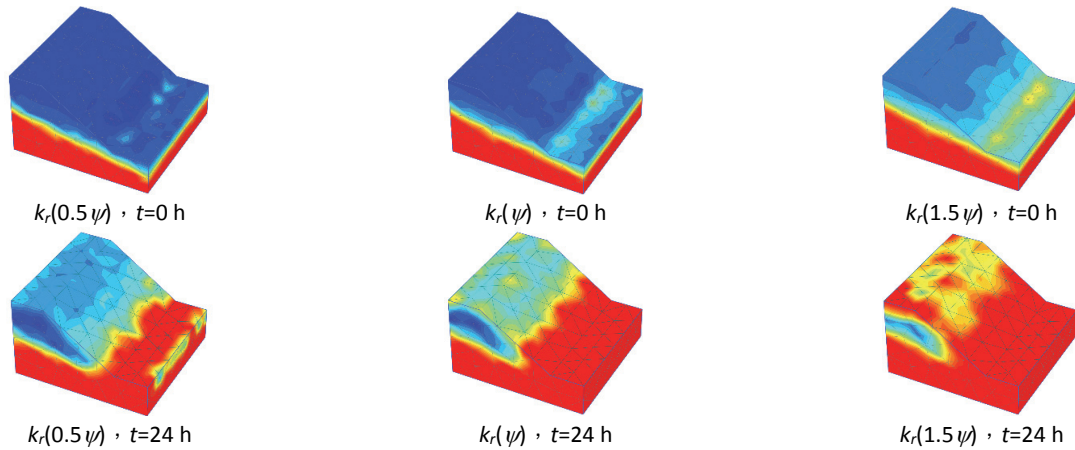


圖 14 不同基質吸力未施設穩定工法邊坡飽和度模擬等值圖 (紅色表示飽和度較高，藍色表示飽和度較低)

Fig.14 Simulated contour of saturation degree for slopes without tie-back retaining piles for different initial matrix suctions (red color: higher S value, blue: lower S value)

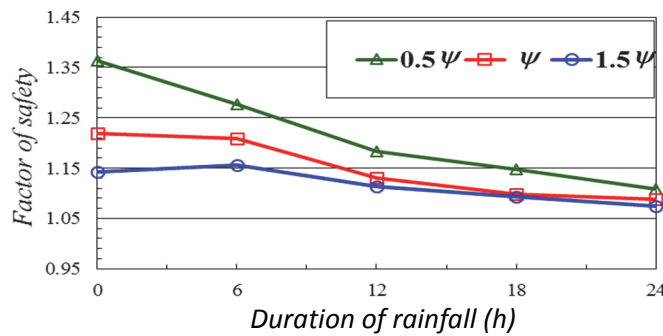


圖 15 不同基質吸力案例邊坡穩定安全係數

Fig.15 Factor safety of slopes without tie-back retaining piles for different initial matrix suctions

4.2 施設穩定工法降雨時邊坡之穩定性分析

施設背拉式排樁 (以下簡稱穩定工法) 邊坡之降雨入滲模擬, 所使用之幾何形狀及參數設定, 與未施設穩定工法邊坡者相同。Lee et al.(2010) 研究成果顯示採用埋置樁 (embedded pile) 元素, 可有效模擬樁-土間之互制作用。因此, 本研究之排樁採用埋置樁元素進行模擬, 並將排樁材料設為線彈性材料模式 (linear elastic material model, LE model), 所需材料參數, 如表 5 所示。此外, 根據邱倍堅 (2012) 所歸納出之結論, 將排樁設置於邊坡坡長中間之位置, 邊坡可獲得最大穩定性安全係數。分析中, 排樁打設長度 $L_p=9$ m、樁徑 $D=1$ m、間距比 $S/D=6$ 。此外, 採用排樁帽樑 (capping beam) 連結各排樁, 排

樁帽樑採用樑元素 (beam) 進行模擬, 並將排樁帽樑材料設為線彈性材料, 所需材料參數, 如表 5 所示。背拉地錨分為自由段 L_f (free length) 及錨碇段或灌漿段 L_g (grout body) 兩部分。自由段與錨碇段分別採用錨元素 (anchor) 及埋置樁 (embedded pile) 元素進行模擬。分析中, 採用錨碇段長度 $L_g=7$ m、自由段長度 $L_f=13$ m、地錨傾角 $\theta=30^\circ$ 及地錨極限拉力 $T_a=490.5$ kN 進行模擬。施設背拉式排樁邊坡之幾何模型, 如圖 16 所示。背拉式排樁穩定邊坡之數值模擬, 分別對降雨期間在不同初始地下水水位及不同設計雨型案例 (表 4 案例 1-5), 計算其邊坡穩定性安全係數, 並歸納降雨入滲對施設背拉式排樁崩積層-均質邊坡所產生之影響。

表 5 背拉式排樁結構元素之材料模式參數 (林韋君, 2013)

Table 5 Material model parameters for structural element of tie-back retaining piles

結構單元	結構元素類型	E (kPa)	γ (kN/m ³)	D (m)	A (m ²)	I_3 (m ⁴)	I_2 (m ⁴)	T_{max} (kN/m)	F_{max} (kN)
排樁	Embedded pile element	2.36×10^7	23.52	1	0.785	0.04909	0.04909	235	700
帽樑	Beam element	3.00×10^7	23.52	---	1.300	0.1083	0.1831	---	---

其中: E =楊氏模數; γ =單位體積重; D =樁徑; A =樁總斷面積; I_3 =樁 3-軸 (Y-軸) 慣性矩; I_2 =樁 2-軸 (X-軸) 慣性矩; I_1 =樁 1-軸 (Z-軸) 慣性矩; F_{max} =排樁之最大端點阻力: 依據 Das(2007) 之建議來決定; T_{max} =排樁之最大樁身摩擦力: 參考 Das (2007) 之建議; $T_{max}=\sum p \times f = \sum p \times K_o \times \sigma'_v \times \tan \delta = (1 \times 3.14) \times [1 - \sin(35^\circ)] \times [(25 \times 15) \times \tan(0.8 \times 35^\circ)] = 235$ (kN/m), 其中: p =樁斷面之周長; f =任意深度 z 處之樁身單位摩擦力; $K_o=1 - \sin \phi$ =靜止土壓力係數; σ'_v =臨界垂直有效應力 $=\gamma \times (15 - 20D)$; δ =土-樁介面摩擦角 $=0.5 - 0.8 \phi$ 。

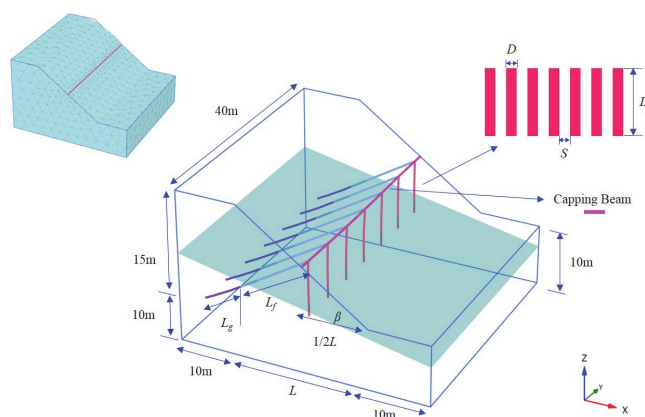


圖 16 背拉式排樁邊坡 3-D 數值模型

Fig.16 3-D Numerical model of slope with tie-back retaining piles

不同初始地下水水位對邊坡穩定性之影響 (表 4 分析案例 1、2、3)，邊坡穩定性安全係數 FS 皆隨著降雨延時增長呈現下降之趨勢，如圖 17 所示。而同一降雨延時下，初始地下水水位較高之邊坡 FS 值相對較低， $t=24$ h 時高水位、中水位與低水位之安全係數分別為 $FS=1.002$ 、 $FS=1.217$ 與 $FS=1.266$ 。另外，不同設計雨型對邊坡穩定性之影響 (表 4 分析案例 2、4、5)，邊坡穩定性安全係數 FS 亦隨著降雨延時增長呈現下降之趨勢，如圖 17 所示。而同一降雨延時下，前鋒型降雨之邊坡 FS 值相對較低， $t=24$ h 時前鋒型降雨、中鋒型降雨與後鋒型降雨之安全係數分別為 $FS=1.062$ 、 $FS=1.217$ 與 $FS=1.221$ 。

不同初始地下水水位以及不同設計雨型，對設施背拉式排樁邊坡之影響，與未設施背拉式排樁邊坡有相同之趨勢。

4.3 未施設及施設背拉式排樁邊坡受降雨影響之比較

表 6 與表 7 列出未施設及施設背拉式排樁邊坡，在不同地下水水位以及設計雨型條件下，不同降雨延時之邊坡穩定安全係數 FS 值，以及背拉式排樁對於邊坡 FS 值提升之百分比，圖 18 與 19 為未施設及施設背拉式排樁邊坡，經 $c-\phi$ 強度折減法穩定分析運算後，邊坡中央位置剖面圖之總位移增量等值圖。

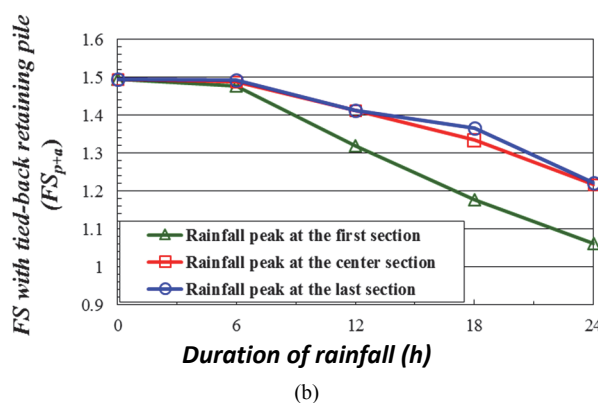
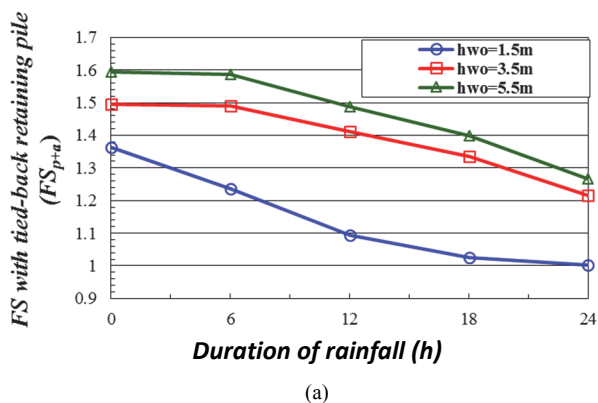


圖 17 施設背拉式擋土排樁邊坡 (a) 不同初始地下水水位 (b) 不同設計雨型之穩定安全係數變化 (h_{wo} =初始地下水水位在坡趾下方之深度)

Fig. 7 Factor safety of slopes with tie-back retaining piles for (a) different initial groundwater levels ($h_{wo}=1.5$ m=higher level; $h_{wo}=5.5$ m=lower level) (b) different design rainfalls

表 6 不同初始地下水水位對未施設及施設背拉式排樁邊坡穩定性影響比較

Table 6 Factor of safety of slopes with and without tie-back retaining piles for different initial groundwater levels

降雨延時 (h)	未施設穩定工法邊坡 FS (FS_0)			施設背拉式排樁邊坡 FS (FS_{D+R})			邊坡之安全係數提升百分比 (%) $[(FS_{D+R}-FS_0)/FS_0] \times 100 \%$		
	高水位	中水位	低水位	高水位	中水位	低水位	高水位	中水位	低水位
0	1.171	1.219	1.225	1.364	1.494	1.595	16.5%	22.6%	30.2%
6	1.074	1.209	1.234	1.235	1.489	1.586	15.0%	23.2%	28.5%
12	1.007	1.084	1.131	1.094	1.412	1.488	8.6%	30.2%	31.6%
18	0.997	1.030	1.099	1.025	1.335	1.399	2.8%	29.6%	27.3%
24	0.993	0.998	1.089	1.002	1.217	1.266	0.9%	21.9%	16.3%

表 7 不同設計雨型位對未施設及施設背拉式排樁邊坡穩定性影響比較

Table 7 Factor of safety of slopes with and without tie-back retaining piles for different design rainfalls

降雨延時 (h)	未施設穩定工法邊坡 FS_0			施設背拉式排樁邊坡 FS_{p+a}			邊坡之安全係數提升百分比(%) [[$FS_{p+a} - FS_0$]/ FS_0] $\times 100$ %)		
	前鋒型	中鋒型	後鋒型	前鋒型	中鋒型	後鋒型	前鋒型	中鋒型	後鋒型
0	1.219	1.219	1.219	1.494	1.494	1.494	22.6%	22.6%	22.6%
6	1.182	1.209	1.214	1.478	1.489	1.493	25.0%	23.2%	23.0%
12	1.108	1.131	1.136	1.32	1.412	1.413	19.1%	24.8%	24.4%
18	1.081	1.099	1.101	1.177	1.335	1.367	8.9%	21.4%	24.1%
24	1.049	1.089	1.091	1.062	1.217	1.221	1.2%	11.8%	11.9%

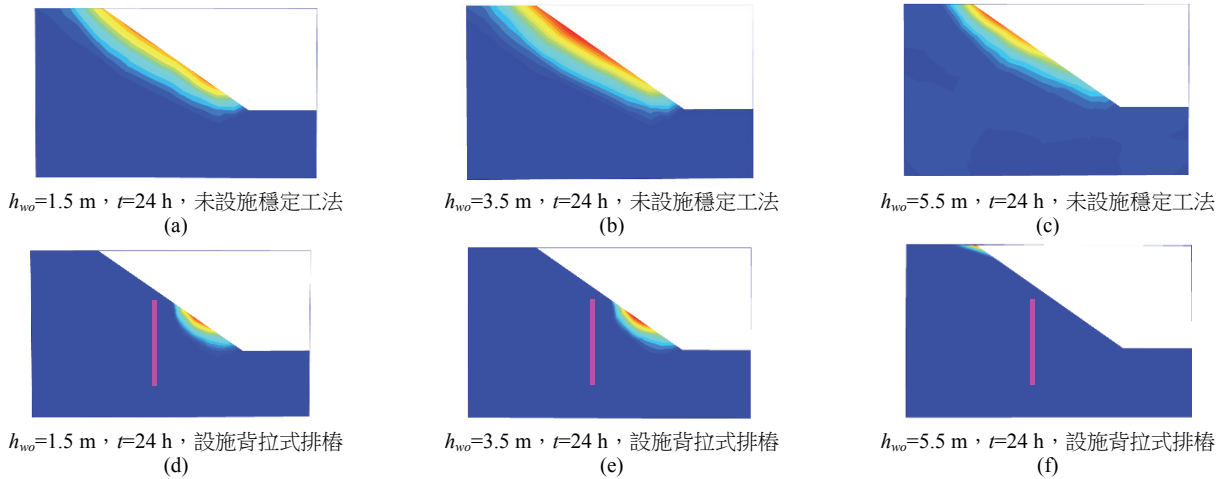


圖 18 不同初始地下水水位邊坡中央位置剖面之總位移增量等值圖 (紅色表示總位移增量較大為潛在滑動區)

Fig.18 Total displacement increment contour of the central cross section of slope for different initial groundwater levels (red color: larger displacement increment with potential sliding zone)

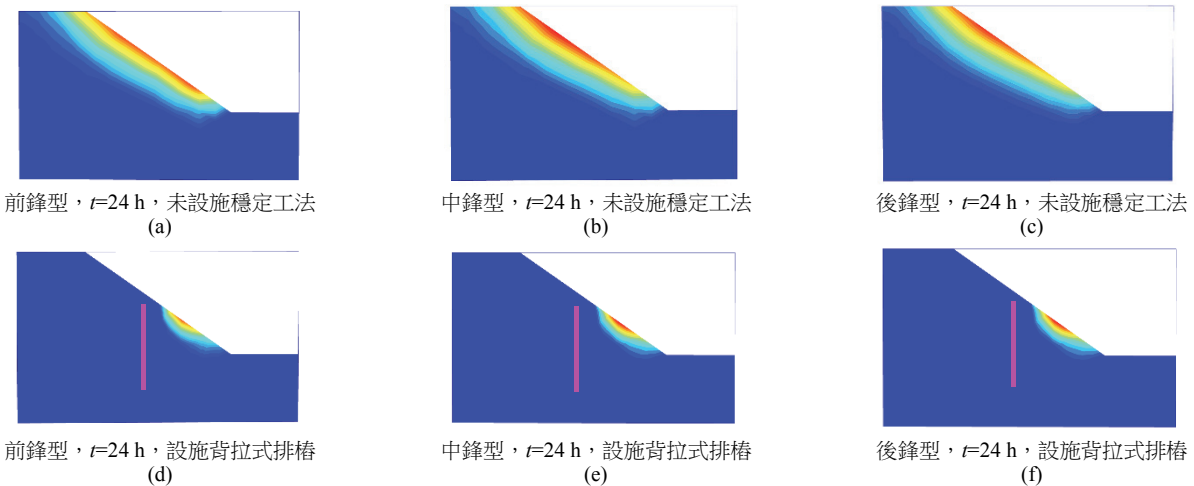


圖 19 不同設計雨型邊坡中央位置剖面之總位移增量等值圖 (紅色表示總位移增量較大為潛在滑動區)

Fig.19 Total displacement increment contour of the central cross section of slope for different design rainfalls (red color: larger displacement increment with potential sliding zone)

在相同初始地下水水位情況下，邊坡施設背拉式排樁之安全係數皆高於未施設者，且邊坡潛在滑動區域亦較小，除因穩定工法增加邊坡抵抗滑動之能力外，由於排樁施作後周圍表土區域之入滲面積比施作前較為縮小，雨水入滲量變少，排樁周圍區域土體之飽和速度減緩，因而間接降低邊坡下滑潛勢。雖然背拉式排樁在高初始水位條件下，對邊坡安全係數之提升百分比比較低，但由總位移增量圖 (圖 18) 中可知，其邊坡潛在滑

動區域較未施設穩定工法時大幅縮減。另外，在相同設計雨型情況下，邊坡施設背拉式排樁之安全係數皆高於未施設者，且邊坡潛在滑動區域亦相對較小 (圖 19)。同時，在前鋒型降雨情況下，背拉式排樁對邊坡安全係數之提升百分比比較低，然而，其邊坡潛在滑動區域較未施設穩定工法時大幅縮減。

五、結 論

本研究使用 PLAXIS 3D 有限元素程式，分析降雨入滲對未飽和邊坡在未施設及施設背拉式擋土排樁二種情形下穩定性之影響，並獲得下列結論：

1. 比較砂箱試驗之量測值與模擬值可知，降雨入滲期間飽和度與孔隙水壓之歷程曲線變化趨勢吻合，但孔隙水壓之數值差異較大，可能原因為：(1) 程式中，初始孔隙水壓使用自由水位線 (phreatic line) 線性分佈方式計算。而量測用水壓計設置於坡頂下 0.4 m 深度處，造成孔隙水壓計算值在特定範圍內 ($P_{water} = -1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ kN/m}^2$)，無法符合試驗之實際水壓量測值。(2) 程式中，採用之水力傳導係數 vG 模式 (vG model)，由於砂箱下邊坡之土層厚度較薄，造成水力傳導係數模式無法完全模擬實際之滲流行為。雖然上述兩點原因，導致數值分析結果與試驗量測成果有較大差異，但計算之孔隙水壓歷程曲線變化趨勢與量測者仍有相當之吻合度。
2. 未施設背拉式排樁邊坡受降雨之影響：在同一降雨延時條件下，初始地下水水位較高時，邊坡之 FS 值也相對較低；另外，前鋒型降雨情況下，邊坡之 FS 值也相對較低；最後，基質吸力提高時 (ψ 至 1.5ψ)，土壤之保水性較佳，土壤飽和區域範圍較大，導致邊坡之抗滑能力較低，穩定性安全係數 FS 值亦會隨之降低。
3. 在相同初始地下水水位或相同設計雨型情況下，邊坡施設背拉式排樁之安全係數皆高於未施設者，且邊坡潛在滑動區域亦較小。雖然，背拉式排樁在高初始水位或前鋒型降雨條件下，對邊坡安全係數之提升百分比較低，但邊坡之潛在滑動區域則較未施設穩定工法者，可大幅縮減。

參考文獻

- [1] 石棟鑫 (2001), 「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。(Sh, D.X. (2001). "Analyses of Rainfall Patterns during Typhoon in Taiwan." Master Thesis, Department of Civil Engineering, National Central University. (in Chinese))
- [2] 林韋君 (2013), 「山區道路邊坡背拉式擋土排樁之穩定機制研究」, 國立中興大學水土保持學系, 碩士論文。(Lin, W.C. (2013). "A Study on the Stabilization Mechanism of Tie-Back Retaining Piles in the Slope of Mountain Road." Master Thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University. (in Chinese))
- [3] 林煥軒 (2011), 「高屏溪集水區土砂災害降雨特性之研究—以莫拉克颱風為例」, 國立屏東科技大學水土保持學系, 碩士論文。(Lin, H.H. (2011). "Rainfall Characteristics for Sediment-Related Disasters in Gao-Ping Watershed - A Case Study of Typhoon Morakot." Master Thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Ping-Tung University of Science and Technology. (in Chinese))
- [4] 呂明杰 (2004), 「土壤邊坡降雨入滲行為之探討」, 私立中原大學土木工程研究所, 碩士論文。(Lu, M.C. (2004). "An Investigation on the Rainfall-Induced Seepage Behaviors in Soil Slopes." Master Thesis, Department of Civil Engineering, Chung-Yuan Christian University. (in Chinese))
- [5] 李振誥、陳尉平、李如晃 (2001), 應用基流資料估計法推估台灣地下水補注量, 台灣水利, 50, 69-80。(Li, C.K., Chen, W.P., and Li, R.H. (2001). "Estimating the Groundwater Recharge in Taiwan using the Evaluation Method of Base Flow Data." *Journal of Taiwan Hydraulics*, 50, 69-80. (in Chinese))
- [6] 邱倍堅 (2012), 「擋土止滑排樁穩定邊坡之力學行為三維數值分析」, 國立中興大學水土保持學系, 碩士論文。(Chiu P. C. (2012). "Three-Dimension Numerical Analyses of the Mechanical Behaviors of the Slope Stabilized by Retaining Piles." Master Thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University. (in Chinese))
- [7] 范嘉程、馮道偉 (2003), 「以有限元素法探討暴雨時邊坡之穩定分析」, 土工技術, 95, 61-74。(Fan, C.C., and Ping, T.W. (2003). "Investigating the Slope Stability during Torrential Rainfall using Finite Element Method." *Journal of Sino-Geotechnics*, 95, 61-74. (in Chinese))
- [8] 姜禮應 (1981), 「地下水對斜面破壞之模型試驗」, 國立中興大學水土保持研究所, 碩士論文。(Chiang, L.Y. (1981). "Model Tests for the Slope Failure Induced by Groundwater." Master Thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University. (in Chinese))
- [9] 莊欣蓉 (2014), 「未飽和自然邊坡於降雨及地震情況下之滲流與穩定分析」, 國立中興大學水土保持學系, 碩士論文。(Chuang, H.J. (2014). "Stability and Seepage Analyses of Unsaturated Natural Slopes under Rainfall and Earthquake Conditions." Master Thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University. (in Chinese))
- [10] 陳肇成 (2002), 「土壤邊坡穩定數值分析方法之研究」, 國立中興大學土木工程研究所, 碩士論文。(Chen, C.C. (2002). "A Study on the Numerical Analyses of Slope Stability." Master Thesis, Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University. (in Chinese))
- [11] 曾仁郁 (2013), 「不飽和土壤水份特徵曲線特性及土壤初始水頭對邊坡穩定之影響」, 國立高雄第一科技大學營建工程研究所, 碩士論文。(Tseng, J.Y. (2013). "The Effects of Soil Water Characteristic Curves and Initial Pressure Head of Unsaturated Soil." Master Thesis, Department of Construction Engineering, National Kao-Hsiung First University of Science and Technology. (in Chinese))
- [12] 張萬芳 (1982), 「地下水水位與傾斜角對邊坡破壞之效應研究」, 國立中興大學水土保持研究所, 碩士論文。(Chang, W.F. (1982). "A Study of the Effects of Groundwater Level and Slope Inclination Angle on the Slope Failure." Master Thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University. (in Chinese))

- [13] 陳進發 (2002), 「未飽和層土壤水平衡模式解析及其應用之研究」, 國立成功大學資源工程學系, 博士論文。(Chen, C.F. (2002). "Analyses and Applications of Water Balance Model in Unsaturated Soil." Doctoral Dissertation, Department of Resources Engineering, National Cheng-Kung University. (in Chinese))
- [14] 蔡和倫 (2010), 「邊坡入滲與土體位移行為研究之大型試驗」, 國立屏東科技大學水土保持系, 碩士論文。(Tsai, H.L. (2010). "Large Scale Testing for the Infiltration and Displacement Behaviors of Slope." Master Thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Ping-Tung University of Science and Technology. (in Chinese))
- [15] Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). "Properties of porous media affecting fluid flow." *J. Irrig. Drain. Div. ASCE*, 92(IR2), 61-88.
- [16] Das, B.M. (2007). "Principles of Foundation Engineering, 6th ed." Thomson Canada, Ltd., 445p.
- [17] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. (1978). "The Shear Strength of Unsaturated Soil." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
- [18] Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*, New York, N.Y.: Wiley.
- [19] Gottardi, G., and Venutelli, M. (1993). "Richards: computer program for the numerical simulation of one-dimensional infiltration into unsaturated soil." *Computers and Geosciences*, 19, 1239-1266.
- [20] Kosugi, K.I. (1994). "Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention." *Water Resources Research*, 30(4), 891-901.
- [21] Lee, S.W., Cheang, W.W.L., Swolfs, W.M., and Brinkgreve, R.B.J. (2010). "Modelling of piled rafts with different pile models." *In Proceedings of the 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Trondheim, Norway*: CRC Press, 637-642.
- [22] Lumb, P. (1975). "Slope Failures in Hong Kong." *Quarterly Journal Engineering Geology*, 8, 31-65.
- [23] Mein, R.G., and Larson, C.L. (1973). "Modeling infiltration during a steady rain." *Water Resources Res.*, 9(2), 384-394.
- [24] Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., and Wang, G. (2004). "Failure Processes in a Full-Scale Landslide Experiment Using a Rainfall Simulator." *Landslides*, 1(4), 277-288.
- [25] Mualem, Y. (1978). "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated porous media." *Water Resource Res.*, 12(3), 513-522.
- [26] PLAXIS 3D (2010). Manual of finite element code for soil and rock analyses.
- [27] Rahardjo, H., Leong, E.C., and Rezaur, R.B. (2001). "Instrumented slopes for the study of rain-induced slope failures." *Proceedings Of the 14th Southeast Asian Geotechnical Conferences*, Hong Kong, 10-14 December, 3.
- [28] Tyler, S.W., and Wheatcraft, S.W. (1989). "Application of fractal mathematics to soil water retention estimation." *Soil Science Society of America Journal*, 59, 987-996.
- [29] Van Genuchten, M.T. (1980). "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- [30] Van Genuchten, M.T., and Nielsen, D.R. (1985). "On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils." *Ann. Geophysics*, 3, 615-628.

2016 年 08 月 24 日 收稿

2016 年 12 月 13 日 修正

2017 年 03 月 21 日 接受

(本文開放討論至 2017 年 9 月 30 日)