

# 以三維數值模型探討滲透異向性對邊坡地下水的影響

陸弘哲<sup>(1)</sup> 張光宗<sup>(2)</sup>

## 摘 要

地下水壓影響邊坡的穩定，而地下水壓分佈又受地質材料的性質、土壤和風化層的厚度、岩層滲透異向性等的影響。本研究探討地下水滲透的異向性，對地下水分佈的影響。考慮層面或劈理面產生的滲透異向性，比較斜交坡、順向坡、逆向坡在相同降雨狀況下，地下水位與地下水壓分佈的不同。選擇廬山滑動邊坡建立水文地質模型，蒐集莫拉克颱風之雨量、地下水位隨時間變化的資料，用 FEMWATER 模式分析其三維狀況下地下水位因為降雨造成的變動，結果顯示逆向坡水位上升最多，其次是斜交坡，而順向坡最少。

(**關鍵詞**：FEMWATER、滲透異向性、地下水)

## Three-dimensional numerical analysis for the effects of permeability anisotropy on the groundwater of slopes

*Hung-Che Lu*<sup>(1)</sup> *Kuang-Tsung Chang*<sup>(2)</sup>

Graduate student<sup>(1)</sup>, Professor<sup>(2)</sup> Department of Soil and Water Conservation National Chung Hsing University, Taichung, 402 Taiwan

## ABSTRACT

Slope stability is affected by groundwater pressure, of which the distribution is associated with the properties of geomaterials, the thickness of the weathered layer, permeability anisotropy. This study aims at the effects of permeability anisotropy on the distribution of groundwater. With the permeability anisotropy of cleavage, the groundwater levels of oblique, dip, and anaclinal slopes are compared under the same rainfall amount. The software FEMWATER was used to establish the hydro-geological model of an unstable slope at Lushan. Under the rainfall of typhoon Morakot, the rises of groundwater from the highest to lowest appear in the anaclinal, oblique, and dip slopes.

(**Keywords** : FEMWATER、permeability anisotropy、groundwater )

---

(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副教授(通訊作者 e-mail : changkt@nchu.edu.tw)

## 前言

對於大降雨導致崩塌或滑動者，如小林村和廬山邊坡，地下水的大量上升有重要的影響。地表的地形、地下地質狀況、破碎程度、或地下水流動的異向性都可能影響地下水的分佈。曾建豪(2004)提出調整層面傾斜角度，會影響滲透異向性及孔隙水壓，對於邊坡穩定有一定程度影響。Dong et al. (2012)考慮滲透與強度異向性，進行二維的穩定分析，討論不同地層位態下邊坡的安全係數。

## 研究方法

### 1. 區域概述

廬山滑動邊坡位在台灣中部廬山溫泉區、塔羅灣溪北側邊坡，地滑區頭部靠近母安山三角點，趾部在河谷附近，滑動面積約 30 公頃(圖 1)。



圖 1 廬山滑動邊坡(林俊良, 2013)

Fig 1 the unstable slope at Lushan

### 2. FEMWATER 模式介紹

本研究所採用之 GMS (Groundwater

Modeling System)介面系統是由美國楊百翰大學(Brigham Young University)與美國陸軍水道工程試驗站(U.S. Army Engineer Water Experiment Station)共同合作發展。GMS 軟體提供 FEMWATER 模式一個圖形使用者介面並便利參數的設定。從各種來源中(例如 GIS、CAD)收集背景資料，及從眾多的數據庫中獲得地圖、影像和高程資訊等線上資料，使用者能夠有效率且快速地使用與操作地下水數值模式。GMS 系統藉由 3D Mesh Model 得到各水頭斷面圖，提供更明確之地層結構以建立地下水概念模式，提昇數值模擬之準確性。

Yeh and Huff(1983)根據流體的連續性(Continuity of Fluid)、固體的連續性(Continuity of Solid)、達西定律 (Darcy's Law)、介質壓密 (Consolidation of Media)以及水的壓縮性 (Compressibility of Water)，進而推導出三維流體積分方程式。賓州大學葉高次博士(Yeh,1987)使用有限元素法來求解地下水水流控制方程式，並發展出 FEMWATER 地下水水流數值模式。

### 3. 輸入參數

本研究係在廬山邊坡上模擬降雨，設定邊界條件、材料特性等，並計算水頭發生的變化。模型邊界的水頭設定成周圍各點高程減 50m，而底部條件設定為不透水層，水無法透過底面。

滲透係數是根據 Lin et al.(1997)，利用下式：

$$[K]_{x'y'z'} = [Q][K]_{xyz}[Q]^T \quad (1)$$

可整理成 (5)

$$[K]_{xyz} = [Q]^{-1}[K]_{x'y'z'}[Q^T]^{-1} \quad (2)$$

其中 x' 方向垂直劈理面，y'- z' 平面平行劈理面；[Q] 與劈理面位態有關。根據水土保持局 (2008)，地層平均滲透係數為  $2.046 \times 10^{-4}$  (cm/s)；假設 y'- z' 平面的滲透係數  $2.046 \times 10^{-4}$  (cm/s)，x' 方向滲透係數  $1.023 \times 10^{-4}$  (cm/s)，即垂直劈理面方向的滲透係數為平行劈理面滲透係數之一半，可得：

$$[K]_{x'y'z'} = \begin{bmatrix} 1.023 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 2.046 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 2.046 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

除了廬山邊坡原本的地層位態，另外假設兩個不同的地層位態，分別代表斜交坡、順向坡及逆向坡，[Q] 為 x'、y'、z' 的方向餘弦，可參考 Goodman (1989) 得到：

(1) 廬山原地層位態：(斜交坡，劈理面位態 N30°E/57°SE)

$$[Q] = \begin{bmatrix} 0.726 & -0.419 & 0.545 \\ -0.472 & 0.272 & 0.838 \\ 0.4998 & 0.866 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.51 \times 10^{-4} & 3.1 \times 10^{-5} & -4.1 \times 10^{-5} \\ 3.1 \times 10^{-5} & 1.87 \times 10^{-4} & 2.4 \times 10^{-5} \\ -4.1 \times 10^{-5} & 2.4 \times 10^{-5} & 1.75 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

(2) 順向坡：(劈理面位態 N68°E/28°S)

$$[Q] = \begin{bmatrix} 0.176 & -0.435 & 0.883 \\ -0.331 & 0.819 & 0.469 \\ -0.927 & -0.375 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.02 \times 10^{-4} & 8 \times 10^{-6} & -1.6 \times 10^{-5} \\ 8 \times 10^{-6} & 1.85 \times 10^{-4} & 3.9 \times 10^{-5} \\ -1.6 \times 10^{-5} & 3.9 \times 10^{-5} & 1.25 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 逆向坡：(劈理面位態 N68°E/60°N)

$$[Q] = \begin{bmatrix} -0.324 & 0.803 & 0.5 \\ -0.187 & 0.464 & -0.867 \\ -0.927 & -0.374 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.94 \times 10^{-4} & 2.7 \times 10^{-5} & 1.6 \times 10^{-5} \\ 2.7 \times 10^{-5} & 1.39 \times 10^{-4} & -4.1 \times 10^{-5} \\ 1.6 \times 10^{-5} & -4.1 \times 10^{-5} & 1.79 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (9)$$

地下水位資料係根據中央地質調查所 (2010)，包括莫拉克颱風侵臺前後地下水位資料，共 11 個點，如圖 2。

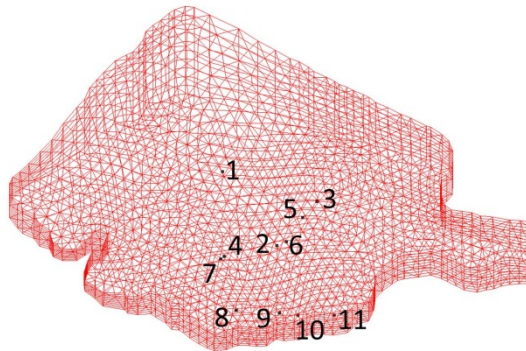


圖 2 11 個觀測水井  
Fig 2 11 observation wells

降雨資料(圖 3)則是根據廬山雨量站在莫拉克颱風侵台期間的雨量資料，然而降雨不連續的緣故，故雨場分割採用李明熹(2006)提出之方法，時雨量大於 4mm 降雨開始，連續 6 小時之時雨量均小於 4mm 降雨結束，共 88 小時。另外，孔隙率根據水土保持局(2008)取崩積層及岩層的平均值為 0.28。

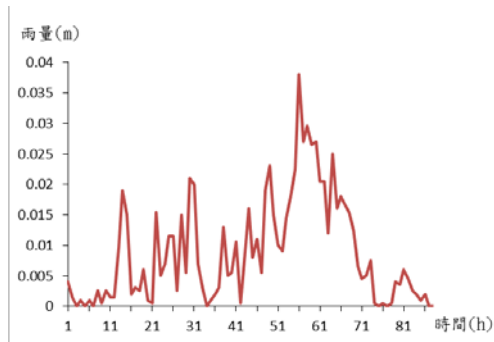


圖 3 降雨資料  
Fig 3 rainfall data

## 結果與討論

### 1. 地下水分佈比較

FEMWATER 模式模擬出的結果，分別於 3 個剖面(圖 4)比對原本廬山地層、順向坡以及逆向坡，在莫拉克颱風後壓力頭和總水頭的分佈情形。邊坡不同的地層傾向或是滲透的異向性，會影響水流的方向以及地下水的分佈。同剖面下，在大雨過後，降雨結束後的水位皆有明顯上升。結果顯示降雨過後，逆向坡的地下水位最高，廬山原本地層次之，而順向坡則最低(圖 5 至圖 7)。以不同的方式表示(圖 8)，在 B-B' 和 C-C' 剖面下 50 公尺及 80 公尺觀察其壓力頭變化，更能看出以上結果。

降雨結束後的總水頭(圖 9 至圖 11)顯示，地下水也是照著 Dong(2006)分析結果的方向流動，像是順向坡的水會沿著坡面往低處流，以及逆向坡的水會因為劈理面的異向性，而沿著劈理面往上流。

結果顯示考慮地層材料的滲流異向性，在同樣的降雨狀況下，逆向坡的地下水位最高，其次為斜交坡，順向坡地下水位最低；可知若只考慮地下水狀況，逆向坡最不利邊坡穩定。但地層強度的異向性使逆向坡較不易產生深層崩塌，所以斜交坡與順向坡可能較易形成深層崩塌。事實上台灣的已知大規模(深層)崩塌或滑動案例，除了草嶺的順向坡曾經因為豪雨造成崩塌外，其它因為豪雨造成滑動的案例，如小林村、廬山和霧社水庫邊坡案例都是斜交坡。目前大規模崩塌潛勢的評估，可能低估了斜交坡在豪雨下的崩塌潛勢；另外哪些地層有明顯的滲流異向性也應該加以探討

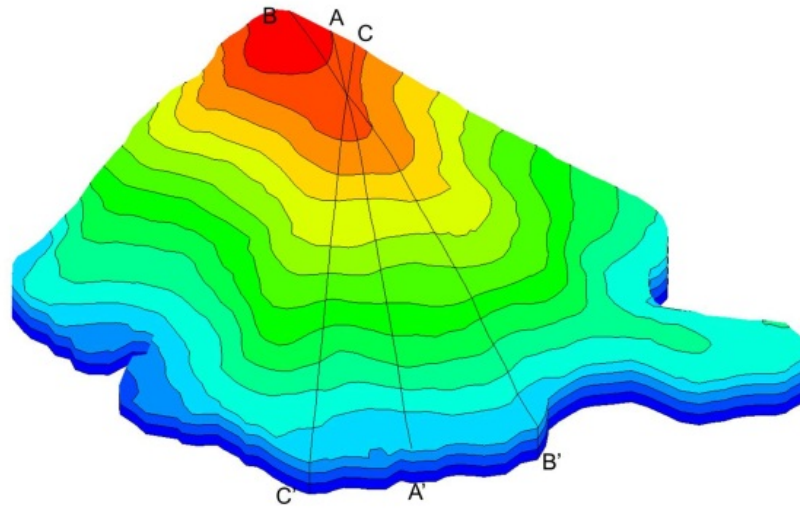


圖 4 剖面位置圖

Fig 4 Locations of the sections

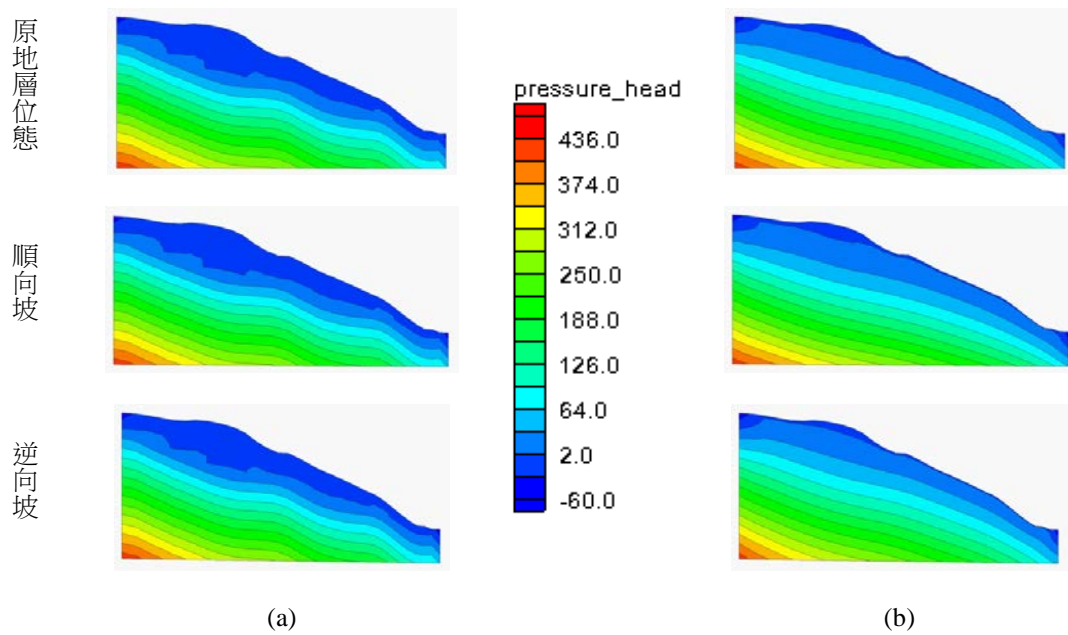


圖 5 A-A'剖面壓力頭 (a)降雨前 (b)降雨後

Fig 5 pore pressure head along section A-A' (a) before rainfall (b) after rainfall

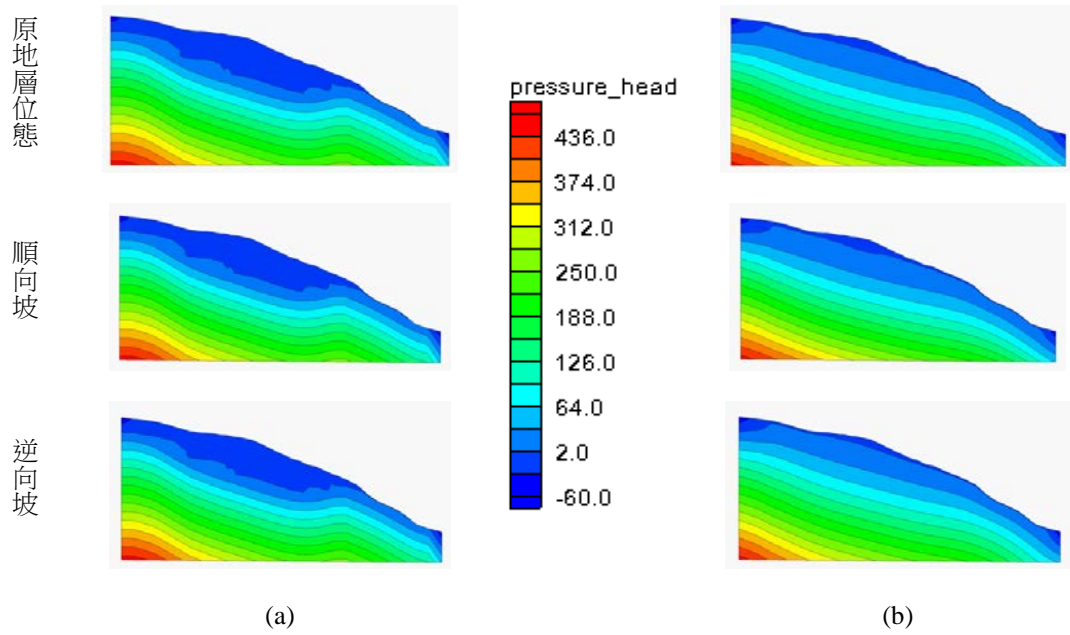


圖 6 B-B'剖面壓力頭 (a)降雨前 (b)降雨後

Fig 6 pore pressure head along section B-B' (a) before rainfall (b) after rainfall

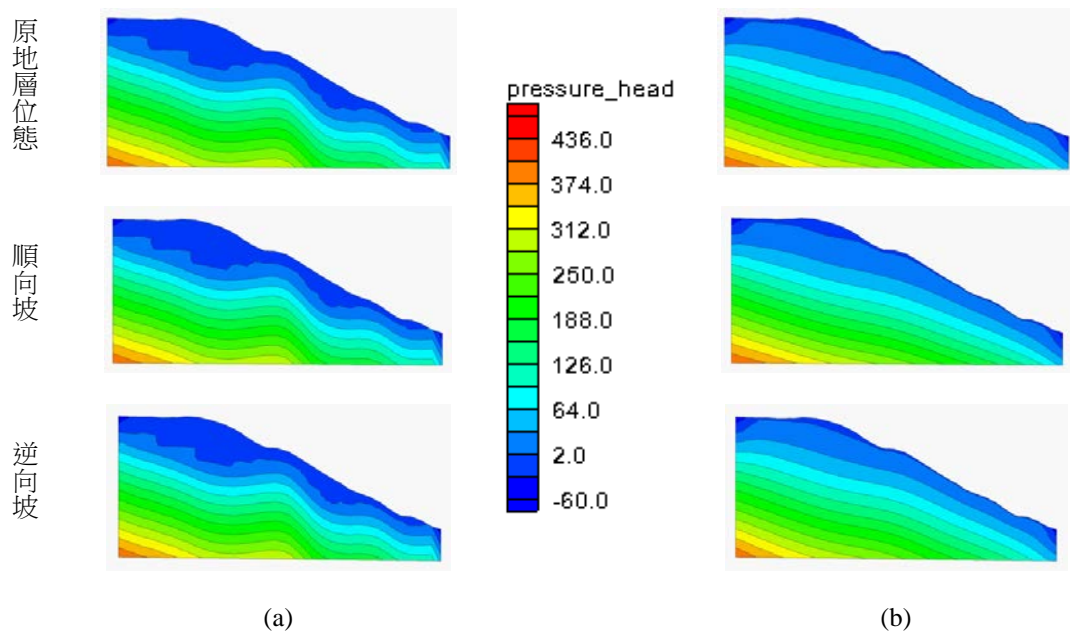


圖 7 C-C'剖面壓力頭 (a)降雨前 (b)降雨後

Fig 7 pore pressure head along section C-C' (a) before rainfall (b) after rainfall

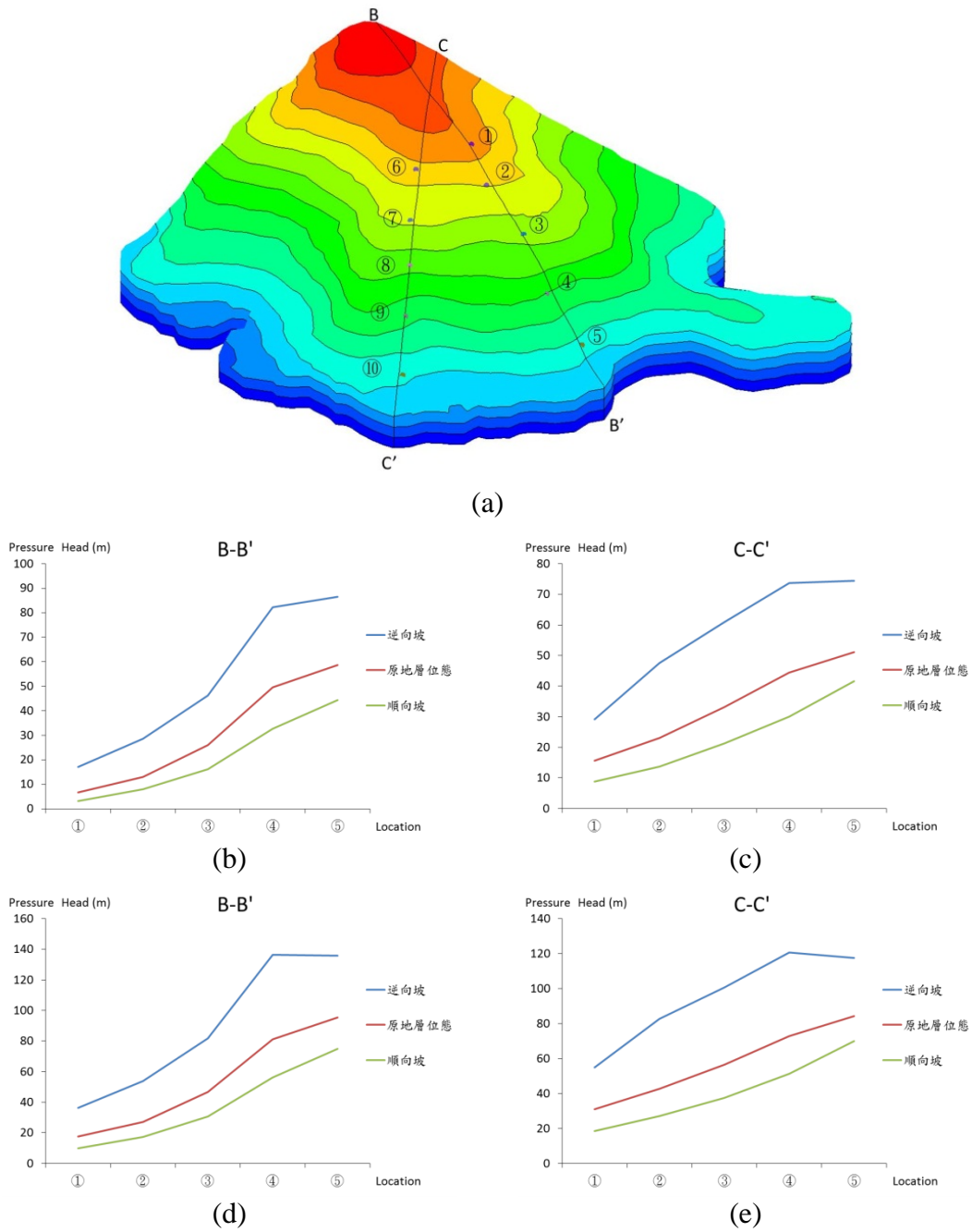


圖 8 (a)剖面位置(b)B-B'剖面地下 50 公尺壓力頭(c)C-C'剖面地下 50 公尺壓力頭(d)B-B'剖面地下 80 公尺壓力頭(e)C-C' 剖面地下 80 公尺壓力頭

Fig 8 (a) Locations of the sections (b) pore pressures 50 meters underground along section B-B' (c) pore pressures 50 meters underground along section C-C' (d) pore pressures 80 meters underground along section B-B' (e) pore pressures 80 meters underground along section C-C'

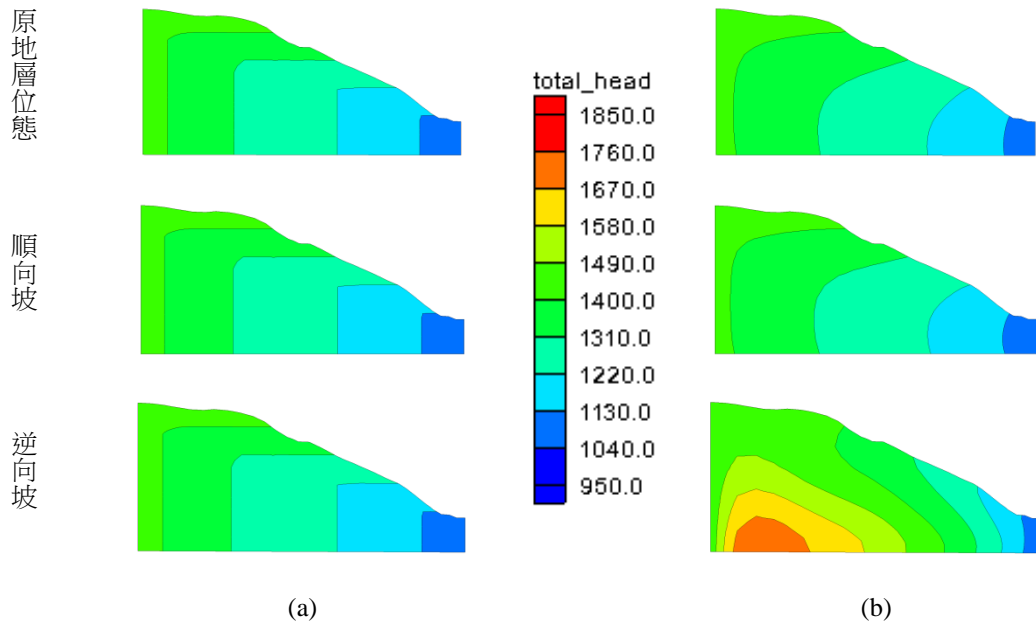


圖 9 A-A'剖面總水頭 (a)降雨前 (b)降雨後

Fig 9 Total head along section A-A' (a) before rainfall (b) after rainfall

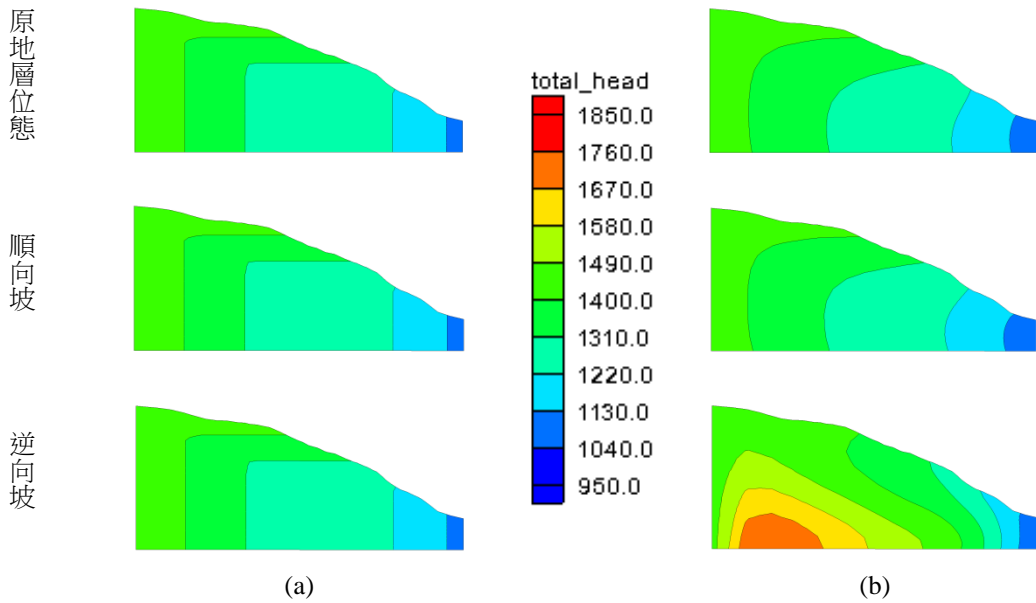


圖 10 B-B'剖面總水頭 (a)降雨前 (b)降雨後

Fig 10 Total head along section B-B' (a) before rainfall (b) after rainfall



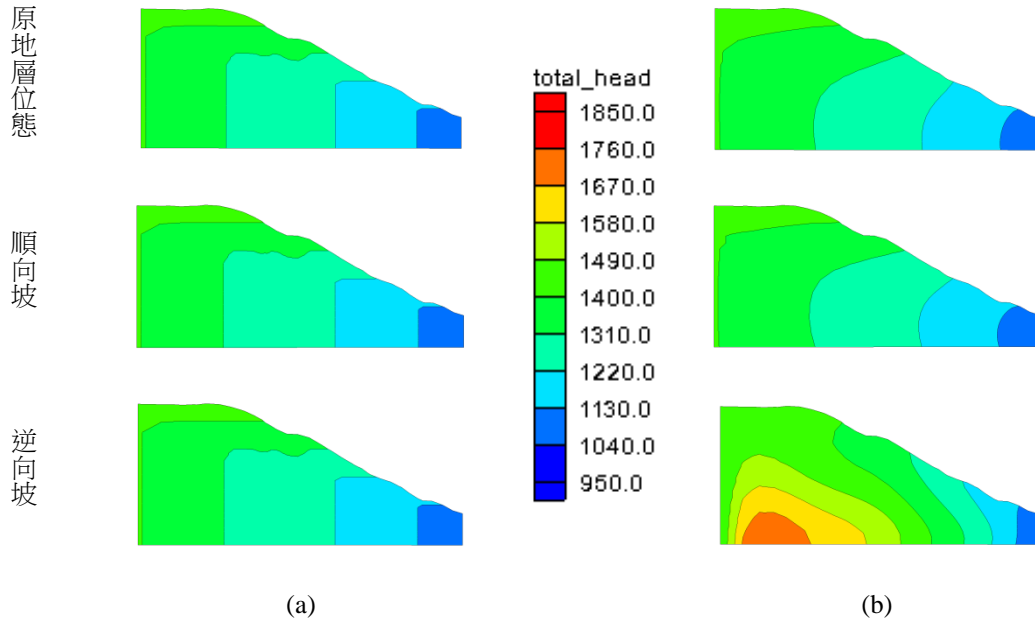


圖 11 C-C'剖面總水頭 (a)降雨前 (b)降雨後

Fig 11 Total head along section C-C' (a) before rainfall (b) after rainfall

## 2 地下水水位比較

表 1 為模擬結果與鑽孔監測水位的比較，降雨前的水位比較顯示一開始的初始設定良好，而降雨後顯示，雖然模擬值與觀測值有些許差異，但差別不大，結果尚可接受。

表 1 各鑽孔於降雨前後的地下水位 (單位：m)

Table 1 Groundwater levels in boreholes before and after rainfall (unit : m)

well	降雨前		降雨後	
	觀測	模擬	觀測	模擬
1	-45	-45	-32	-42
2	-60	-63	-33.5	-26
3	-26.5	-26	-20	-16
4	-39	-37	-27.5	-11
5	-43	-43	-35	-28

6	-50.5	-44	-31.5	-18
7	-35.5	-37	-10.5	-11
8	-38.5	-39	-21.5	-14
9	-32	-33	-24.5	-20
10	-28	-28	-22	-11
11	-29	-28	-22	-20

## 結論

1. 莫拉克颱風降雨過後的地下水位，逆向坡最高，斜交坡次之，順向坡最低；顯示地層滲透異向性是影響水位高低的因素。
2. 模擬結果與鑽孔監測水位比較，初始值大致相同，顯示初始設定良好，而最終值比較起來也差別不大。整體而言，模

擬結果與觀測水位相差不遠，表示此模式率定良好。

3. 如果邊坡地層有滲透異向性，就應該考慮其對地下水壓分佈的影響。本模式率定後可進一步探討滲透異向性對邊坡穩定性的影響。

### 參考文獻

1. 曾建豪(2004)，異向性軟岩邊坡地下水滲流對孔隙水壓分佈影響之探討，國立中央大學應用地質研究所，碩士論文。
2. 李明熹(2006)，土石流發生降雨警戒分析及其應用，國立成功大學水利及海洋工程 0 研究所，博士論文。
3. 水土保持局(2008)，廬山地滑監測及後續治理規劃。
4. 中央地質調查所(2010)，南投縣廬山溫泉北坡監測及預警系統系統擴充及維護。
5. 林俊良(2013)，廬山地滑災害三維分析，國立中興大學水土保持研究所，碩士論文。
6. Lin, H.C.J., Richards, D.R., Yeh, G.T., Cheng, J. R., Cheng, H.P. (1997), "FEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media," Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Coastal Hydraulics Laboratory.
7. Dong, J. J., Tzeng J. H., Wu P. K., Lin M. L.(2006),"Effects of Anisotropic Permeability on Stabilization and Pore Water Pressure Distribution of Poorly-cemented Stratified Rock Slopes," Int. J. of Num. and Ana. Methods in Geomechanics, 30,1579-1600.
8. Dong, J. J., Tu, C. H., Lee, W. R. and Jheng, Y. J. (2012)," Effects of hydraulic conductivity/strength anisotropy on the stability of stratified, poorly cemented rock slopes," Computers and Geotechnics, 40, 147–159.
9. Yeh, G.T., D.D.Huff (1983), "FEMWATER: A Finite Element Model of Water Flow through Aquifers," ORNL-5976, OAK Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
10. Yeh, G.T. (1987), "FEMWATER: A Finite Element Model of Water Flow through Saturated-unsaturated Media," ORNL-6386, OAK Ridge National Laboratory, Oak Rid, Tenn.
11. Goodman, Richard E. (1989),"Introduction to Rock Mechanics," , John Wiley & Sons, Inc. , New York.

---

104 年 06 月 10 日收稿

104 年 06 月 17 日修改

104 年 06 月 29 日接受