

蒙地卡羅方法應用於廬山邊坡破壞機率之評估

楊子賢⁽¹⁾ 張光宗⁽²⁾ 葉柏村^{(3)*}

摘要

一般以數值方法探討邊坡安全穩定性通常考慮整體邊坡材料參數的平均值，並透過強度折減法來計算安全係數 (FS)。然而現地邊坡材料的狀況具有不確定性，所以很難就材料參數的一種組合去評斷邊坡是否安全穩定，故常需進一步針對邊坡材料的不確定性來探討邊坡的破壞機率。本研究將利用有限元素分析軟體 PLAXIS 建立廬山地滑區之邊坡模型，考慮莫拉克豪雨事件，地下水位抬升造成的邊坡位移對邊坡材料參數進行反算，包含滑動面上之強度折減因子 (R_{inter}) 以及摩擦角 (φ)、凝聚力 (c) 等強度參數。值得一提的是本研究加以考慮三個參數之間的相關性，再利用參數之機率密度函數 (Probability Density Function, PDF) 來進行蒙地卡羅抽樣 (Monte Carlo Simulation, MCS)，最後根據參數抽樣的結果，並設定兩種不同情況的地下水位 (分別為高於莫拉克豪雨事件之水位、貼近坡面之水位)，以強度折減法 (ϕ - c reduction) 來計算安全係數並探討廬山邊坡的破壞機率，本研究結果顯示邊坡安全係數的平均值由小至大依序為：貼近坡面之水位、高於莫拉克豪雨事件之水位。邊坡破壞機率由大至小依序為：貼近坡面之水位、高於莫拉克豪雨事件之水位。不過我們發現在參數相依的狀況下所計算出來的破壞機率微小，且破壞機率會隨著參數負相關性越大而變得極小。另外，由於莫拉克事件造成的廬山邊坡位移量比以往豪雨事件來得小，所以造成反算出的強度參數偏大，因此可能會低估邊坡的破壞機率。

(**關鍵詞**：廬山、不確定性分析、有限元素法、蒙地卡羅方法、破壞機率)

Evaluation of the failure probability of Lushan slope Using Monte Carlo Simulation

Tzu-Hsien Yang⁽¹⁾ Kuang-Tsung Chang⁽²⁾ Po-Tsun Yeh^{(3)*}

Graduate student⁽¹⁾, Professor⁽²⁾, Postdoctoral researcher⁽³⁾ in Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系 碩士生

⁽²⁾ 國立中興大學水土保持學系 教授

⁽³⁾ 國立中興大學水土保持學系 博士後研究員(通訊作者 e-mail: ohyeah147@nchu.edu.tw)

Generally, numerical methods are used for the stability of slopes by calculating the safety factor (FS); however, it is difficult to evaluate whether the slope is safe or not via one set of material parameters. The condition of the on-site slope material actually has uncertainty; therefore, it is necessary to further evaluate the failure probability of slope according to the uncertainty of slope material. The study used the finite element analysis software PLAXIS to establish the slope model of the Lushan Landslide area. The slope displacement caused by the rise of groundwater level due to Morakot torrential rain event were considered. We inversely calculated the material parameters of the slope, including the strength reduction factor on the sliding surface (R_{int}), the friction angle (φ), the cohesion (c). It is worth mentioning that this study considered the correlation among the three parameters, and then used the Probability Density Function (PDF) of parameter to carry out Monte Carlo Sampling (Monte Carlo Simulation, MCS). Besides, we set the groundwater level into two different conditions (the water level is higher than that caused by the Morakot torrential rain event and the water level is close to the slope surface) in PLAXIS. The safety factors in the condition of different material parameters and water levels were calculated by the strength reduction method (ϕ - c reduction). Then we can discuss the Lushan slope failure probability through safety factors calculated. The results showed that the slope had smaller mean safety factor and larger failure probability when water level is close to the slope surface. However, we found that the failure probability of slope was little due to the parameter dependence considered, and then became more little with the larger negative correlation coefficient of parameter. Moreover, it was found that the displacements of Lushan slope caused by the Morakot event was smaller than that caused by previous events; as a result, it may overestimate the strength parameters of back-calculating and underestimate the failure probability of slope.

(**Keywords** : Lushan slope, uncertainty analysis, Finite element method, Monte-Carlo simulation, failure probability)

前言

台灣位於板塊交界帶，板塊擠壓運動造成地質構造豐富，擁有多變的斷層及節理構造，地震等自然災害也伴隨而來，氣候方面因位處太平洋熱帶地區，易遭受颱風豪雨侵襲，導致山區邊坡滑動、山崩等事件層出不窮，且地狹人稠，導致在山區居民及下方保全對象無法完全避開危險區域，將危害其生命及財產安全，因此邊坡穩定性的評估是相當重要的課題。

廬山位處南投深山，地層滑動明顯且坡地高差大及地質破碎，每逢雨季及颱風都會造成周遭設施損壞，危及保全對象安全，是非常嚴重的災害潛勢區，本研究針對廬山地區進行研究，期望能了解廬山邊坡的破壞機率，以利後續安全預防及相關學術研究之遂行。

目前主要的邊坡穩定分析(Slope stability analysis)主要分析方法可分為極限平衡法及有限元素分析法，邊坡穩定分析通常主要以安全係數(Factor of Safety, FS)作為評斷邊坡

安全的量化數據，PLAXIS 中主要以強度折減法進行安全係數的計算，將逐步降低土壤中的凝聚力 c 與摩擦角 $\tan \varphi$ 值，直到結構發生破壞，得出的強度折減係數即是安全係數，根據 PLAXIS Tutorial Manual(2016)，強度折減係數表示為：

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = Msf$$

其中 Msf =安全係數 FS

一般安全穩定分析都會將相關地質條件及參數設定為確定單一數據，但由於變數量測含有不確定因素。鄭佳邦(2018)以國道三號大埔順向坡邊坡失穩案例為對象，在考慮岩層特性和預應力變化的情況下，分析邊坡的穩定性，透過敏感度和參數不確定性分析邊坡的破壞機率；RK Sharma (2016)以新罕布什爾州一處破壞邊坡進行研究，利用有限元素分析程式(PLAXIS)及蒙地卡羅模擬法對單位重(unit weight)、摩擦角(friction angle)以及凝聚力(cohesion)等參數取機率密度函數進行分析，評估邊坡安全之可靠度指標。

研究方法

1. 研究區域

基地位置為位在台灣中部南投縣仁愛鄉廬山溫泉及塔羅灣溪北側邊坡，其滑動體區域頭部靠近母安山三角點，海拔約為1499公尺，趾部位於河谷附近，滑動體上下高程差約為400公尺，面積約30公頃，區域範圍長約為 820 公尺，寬約為 480 公尺，最大滑動深度可能達100公尺左右，為一大型滑動體，如圖1。



圖 1 研究區域3D 模型示意圖(修改自 Chang, K.T., 2015)

Figure 1 Schematic diagram of the 3D model of the study area(Chang, K.T., 2015)

2. 地質狀況

廬山層為中央山脈中主要的板岩地層，根據水土保持局(2006)及水保局之鑽探資料顯示，此處地層主要由黑色至深灰色的硬頁岩、板岩和深灰色的硬砂岩互層組成，中間夾雜泥灰岩團塊，岩層厚且多受變形與變質作用影響，故劈理面發達。廬山邊坡之劈理面位態大致呈北偏東30度，南偏東約57度，邊坡滑動範圍之西側受劈理控制，東側裂隙則受傾向節理控制，滑動體中央之板岩層受到高度風化，在地層較為軟弱破碎。

3. 數值模型建立

研究之模型部分主要參考 Chang, K.T. (2015)對廬山邊坡的模型設計，並針對滑動面做部分修改，其長跟高分別是946×500m，模型主要包含廬山邊坡中的滑動體(Sliding body)與周圍塊體(Surrounding part)兩個部分(圖2)。研究之滑動面是依據中央地質調查所對

廬山邊坡滑動面的調查，利用測傾管所量測出的錯動深度繪出滑動面深度。

根據中央地質調查所調查結果，滑動面上方之滑動體為較破碎與軟弱之塊體，為主要滑動體，且滑動面尚未貫穿坡趾，其餘部分則為周遭較完整區域。故本研究將模型之塊體分成滑動面上方之破碎滑動區域(圖2藍色區域)與周圍較完整之區域(圖2綠色區域)兩塊，其強度為綠色區域>藍色區域。而滑動面強度由其上方破碎區域(藍色區域)之折減倍率進行後續分析探討。

在本研究將以中等網格密度進行分析，並增強網格的細化，設定尺度因子(Global scale factor)及最小網格元素因子(Minimum element size factor)進行運算，本模型共分割為5905個元素及12802個節點數，其產生網格之結果如圖3。

地質參數的部分為參考 Chang, K.T. (2015)與林唯庭(2019)對廬山邊坡之參數設定，主要參數項目為揚氏模數(E)、柏松比(ν)、凝聚力(c)、摩擦角(ϕ)、膨脹角(ψ) 以及飽和傳導係數(k)，輸入之參數值如表1所示。

本研究設定的水力邊界如圖4所示，利用莫拉克豪雨事件前後地下水位抬升造成的邊坡位移量來反算強度參數，再利用高於莫拉克事件之水位與接近地表之水位來計算安全係數，探討邊坡的破壞機率。

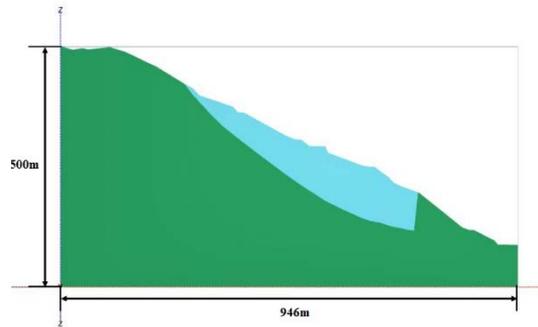


圖 2 廬山邊坡模型示意圖

Figure 2 Schematic diagram of Lushan slope model

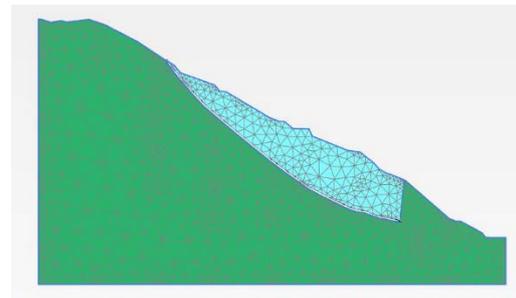


圖 3 廬山邊坡網格示意圖

Figure 3 Schematic diagram of Lushan slope grid

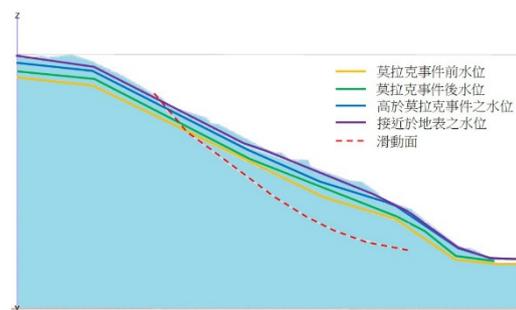


圖4 地下水位於模型上之位置

Figure 4 The position of the groundwater level on the model

表 1輸入 PLAXIS 地質參數表

Table 1 Enter the PLAXIS geological parameter table

	滑動體	周圍區域
濕單位重(kN/m ³)	26.2	26.2
飽和單位重(kN/m ³)	27	27
楊氏模數 E(kPa)	2.01E5	1.996E6
柏松比 ν	0.3	0.3
凝聚力 c(kPa)	40~300 (反算)	303
摩擦角 $\phi(^{\circ})$	22~37 (反算)	39.3
膨脹角 $\psi(^{\circ})$	0	0
飽和傳導係數 k(m/hr)	0.056	0.056
滑動面上之強度因子 (R_{inter})	0.9~1 (反算)	--

4. 計算程序設定

在進行 PLAXIS 模型分析前，需先設置計算程序(Phase)和所要執行的運算內容，在 PLAXIS 中主要運算可選擇種類分為三種，為塑性計算(Plastic)、壓密計算(Consolidation)及穩定分析計算(Safety)，塑性計算主要提供彈塑性排水或不排水分析，穩定性分析的部分為透過強度折減法計算整體安全係數，本研究在計算程序(Phase)的選定上主要以塑性運算及穩定分析計算為主要應用項目。

首先設定初始計算程序(Initial Phase)，在初始應力生成的部分主要分為 K0 procedure、Field stress 與 Gravity loading 等三種型式，其中 K0 procedure 及 Field stress 主要為直接生成初始有效應力的型態，Gravity loading 為經有限元素計算生成初始應力的型態，且應用於具斜率之斜坡，固本研究採用 Gravity

loading 作為 Initial Phase 的生成方式，此外在孔隙水壓選用類型上選擇穩態地下水流量(Steady state groundwater flow)進行運算，完成第一階段程序的設定。

設定完 Initial Phase 後，首先要進行邊坡位移之反算來得到不同的強度參數組合，本研究考慮滑動面上之強度折減因子(R_{inter})以及摩擦

角(ϕ)、凝聚力(c)等強度參數，在 Phase 1 的部分水利條件輸入莫拉克事件前水位，並將運算類型設定為 Plastic 進行運算，結束後接 Phase 2 輸入莫拉克事件後水位，一樣將運算類型設定為 Plastic 進行運算，藉此反算莫拉克事件前後之位移變化量，如表2a 所示。

經由 Phase 1 及 Phase 2 的運算成果即可推算出模型於莫拉克事件前後之位移變化量，完成計算後可與現場監測資料比對，查看是否與現場監測資料相符。

後續將接著進行安全係數之運算，Initial Phase 的部分一樣選擇穩態地下水流量(Steady state groundwater flow)進行運算，接著設定 Phase 1，此階段將輸入高於莫拉克事件之水位資料，並將運算類型設定為 Plastic 進行運算，結束後接 Phase 2 進行 Safety 計算，接著將位移數據重設歸零後進行 Phase 3 的運算，在 Phase 3 的部分則輸入接近地表之水位資料，結束後接 Phase 4 進行 Safety 計算，完成整個程序設置過程，計算程序如表2b 所示。

Phase 2 及 Phase 4 輸出結果則應用於後續研究破壞機率計算使用，利用蒙地卡羅方法進行抽樣，將多組凝聚力、摩擦角及弱面強度折減因子匯入程序進行安全係數的計算。

表2 研究模型設定程序表 a. 強度參數的反算 b. 安全係數的計算

Table 2 Research model setting procedure table a. Inverse analysis of strength parameters b. Calculation of safety factors

(a)

計算階段	前一階段	計算型式	水力條件
Initial Phase	-	Gravity loading	
Phase 1	Initial Phase	Plastic	莫拉克事件前水位
Phase 2	Phase 1	Plastic	莫拉克事件後水位

(b)

計算階段	前一階段	計算型式	水力條件
Initial Phase	-	Gravity loading	
Phase 1	Initial Phase	Plastic	高於莫拉克事件之水位
Phase 2	Phase 1	Safety	
Phase 3	Initial Phase	Plastic	接近地表之水位
Phase 4	Phase 3	Safety	

5. 位移反算強度參數

在廬山邊坡模型的部分將以莫拉克事件前後測傾管位移量作為驗證的參考，對模型進行強度參數的模擬反算，以滑動體設定之強度參數($c=120\text{kpa}$ 、 $\varphi=33^\circ$ 、 $R=0.9$)為例子，圖5顯示莫拉克事件造成的位移變化量，各監測點位的結果如表3所示，大致上數值模擬位移的變化資料與現場位移觀測資料相符合，誤差值皆在1公分之內，由此可得到反算出的強度參數。

$c=120\text{kpa}$ 、 $\varphi=33^\circ$ 、 $R=0.9$ 為例)

Figure 5

Simulated surface displacement after the Morakot event (take the sliding body $c=120\text{kpa}$, $\varphi=33^\circ$, $R=0.9$ as an example)

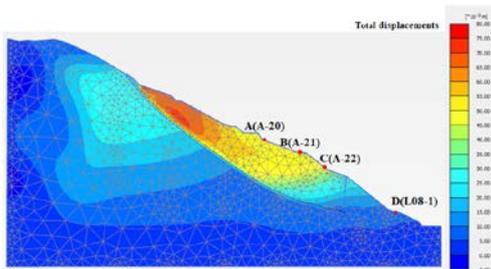


圖 5 莫拉克事件後模擬地表位移(以滑動體

表 3 莫拉克事件前後位移變化量對照表 (以滑動體 $c=120\text{kpa}$ 、 $\varphi=33^\circ$ 、 $R=0.9$ 為例)

Table 3 Comparison table of displacement changes before and after the Morakot event

(Take the sliding body $c=120\text{kpa}$, $\varphi=33^\circ$, $R=0.9$ as an example)

測傾管編號	模型中編號	現場位移 (cm)	模擬位移 (cm)
A-20	A	5.7	5.1
A-21	B	5.2	5.3
A-22	C	4.5	5.5

測傾管編號	模型中編號	現場位移 (cm)	模擬位移 (cm)
L08-1	D	1.2	0.7

6. 不確定性參數

在 PLAXIS 有限元素分析程式中有提供弱面界面設定的功能，在模型中將需要弱化的部分設定 Interface，利用滑動體弱面強度折減因子(R_{inter})達到所需弱化折減的程度，藉此模擬滑動體因錯動而產生滑動的情形。

在本研究分析的模型中，為了使反算出來的 c 及 φ 參數之平均值接近 Chang, K.T. (2015)之設定值($c=84\text{kpa}$ 、 $\varphi=28.9^\circ$)，因此本研究的 R_{inter} 設定為介於1至0.9之間而無法再降低，因為更小的 R_{inter} 將使得 c 及 φ 之平均值偏大。本研究共反算出5組 R_{inter} 值，每組 R_{inter} 值反算10組 c 及 φ 值，因此可以得到50組 c 及 φ 值，在反算的部分將各孔位位移變化量控制在誤差值1公分以內，以求得最接近實際監測之數據。

不確定參數的部分將針對滑動體弱面強度折減因子(R_{inter})、 c 及 φ 值做關聯性探討，國外 Greco(2016)與國內紀雲曜&李雅芬(2012)都指出 c 及 φ 兩參數之間呈現負相關性，實驗在反算 c 及 φ 值的過程中也發現 c 與 φ 具有負相關的線性關係，如圖6。

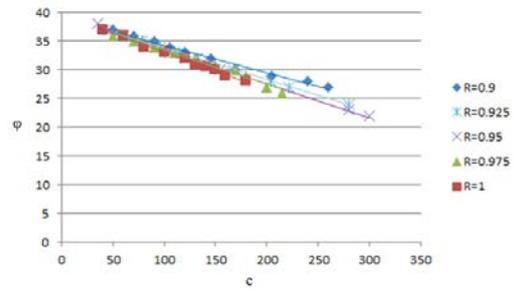


圖 6 $R_{inter}=1\sim 0.9$ 的狀況下， c 與 φ 之線性關係

Figure 6
When $R_{inter}=1\sim 0.9$, the linear relationship between c and φ

在 c 及 φ 關係方程式中能發現兩參數組合的斜率部分與 R_{inter} 值呈現負相關線性關係，為了解個參數彼此間關係，將利用 Excel 對其做圖表顯示，如圖7所示，得出當 R_{inter} 值越大則 c 及 φ 關係方程式的斜率越小，其關係式為 $y=-0.1512x+0.0864$ ， x 值為 R_{inter} ， y 值的部分為 c 及 φ 關係方程式之斜率，後續將輸入 R_{inter} 得出多組 c 及 φ 關係方程式之斜率，再代入抽樣分布後之得出之 c 值求出其對應的 φ 值，完成不確定參數之設定。

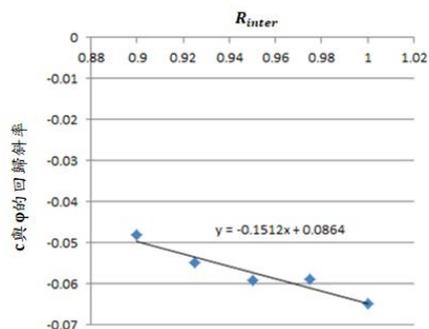


圖 7 R_{inter} 與 c 、 φ 斜率之線性關係

Figure 7. The linear relationship between R_{inter} and c , φ slope

7. 蒙地卡羅模擬

在本研究中將利用 Palisade 公司研發 @RISK 風險分析軟體進行蒙地卡羅模擬的分析，在 R_{inter} 的部分將假定其為連續型均勻分布(Uniform Distribution)，為了放大反算出的參數，利用 @Risk 程式運行蒙地卡羅模擬將反算得出的5組 R_{inter} 值進行10次抽樣而得到10組 R_{inter} 值，如圖8所示。

在 c 的部分也將進行取樣分析，Terlie(1996)和陳盈良(2003)皆假定凝聚力為常態分布(Normal Distribution)，本研究也將假定 c 的部分為常態分布進行取樣，將輸入5組不同 R_{inter} 值所反算出的50組 c 數據，利用 @Risk 程式運行蒙地卡羅模擬取樣100次，如圖9所示，由於 φ 的部分後續將代入 c 及 φ 的關係式求得，因此沒有機率密度函數圖表示。

利用蒙地卡羅模擬取樣得出之 R_{inter} 值將與 c 及 φ 關係方程式的斜率關係式 $y = -0.1512x + 0.0864$ 進行連動，輸入取樣得出之10組 R_{inter} 值得出10組 c 及 φ 之斜率，再利用這10組斜率組成10組 c 及 φ 關係方程式，其截距的部分取線性關係式後發現數值差異微小，故最後決定取用平均值進行運算，所採用的截距平均值數據為39.362，最後得出的10組關係方程式及其相關係數 $\rho(c, \varphi)$ 如表4所示。

取樣所得出之100組 c 將代入表4之關係式中，得出100組 φ 值，最後輸出對應之100組 c 與 φ 值與取樣得出之10組 R_{inter} 值做為不確定參數組合，共可對應輸出1000組不確定參數之組合於 PLAXIS 中進行後續的邊坡穩定分析運算。

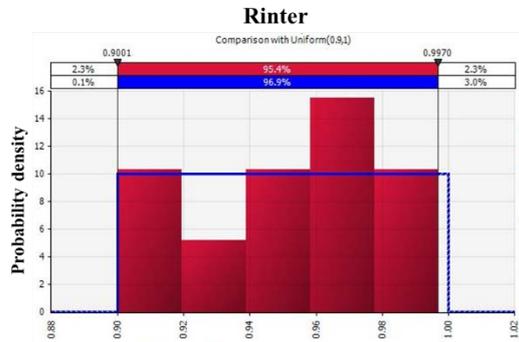


圖8 R_{inter} 均勻分布圖

Figure 8 Uniform distribution of R_{inter}

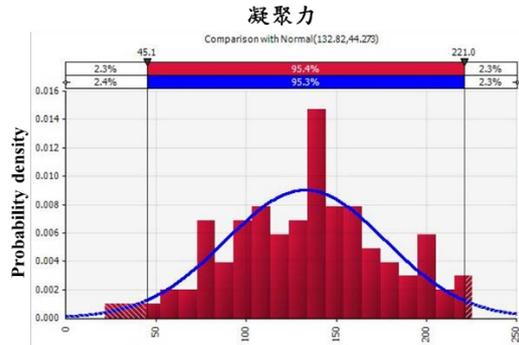


圖9 凝聚力常態分布圖

Figure 9 Normal distribution of cohesion

表4 輸入 R_{inter} 得出 c 及 φ 之斜率與關係方程式

Table 4 Input R_{inter} to get the slope and relation equation of c and φ

編號	R_{inter}	c 及 φ 關係方程式	$\rho(c, \varphi)$ 相關係數
1	0.930	$\varphi = -0.0542c + 39.362$	-0.99990
2	0.960	$\varphi = -0.0587c + 39.362$	-0.98905
3	0.997	$\varphi = -0.0643c + 39.362$	-0.95595
4	0.900	$\varphi = -0.0497c + 39.362$	-0.98433
5	0.958	$\varphi = -0.0585c + 39.362$	-0.99003

編號	R_{inter}	c 及 φ 關係方程式	$\rho(c, \varphi)$ 相關係數
6	0.944	$\varphi = -0.0563c + 39.362$	-0.99749
7	0.984	$\varphi = -0.0624c + 39.362$	-0.96851
8	0.966	$\varphi = -0.0597c + 39.362$	-0.98428
9	0.946	$\varphi = -0.0567c + 39.362$	-0.99642
10	0.910	$\varphi = -0.0512c + 39.362$	-0.99331

結果與討論

1. 邊坡安全穩定分析

研究將利用不確定參數之 c 、 φ 及 R_{inter} 值輸入 PLAXIS 模型中進行邊坡安全穩定分析 (Safety)，並利用兩種不同地下水位條件進行分析，得出各1000組不同之安全係數結果，圖10及圖11中以滑動體($c=146.7\text{kpa}$ 、 $\varphi=30.75^\circ$ 、 $R=0.96$)為例子針對兩水位對模型進行安全穩定分析，分析結果發現在高於莫拉克豪雨事件之地下水位面安全係數(FS)平均值為1.2，接近於地表之地下水位面安全係數(FS)平均值為1.1。

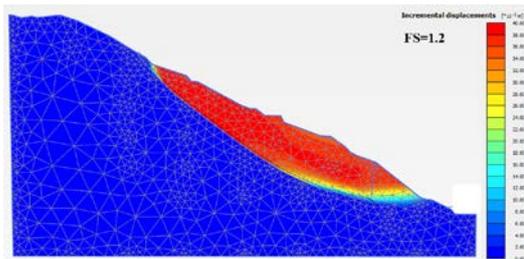


圖10 高於莫拉克事件水位時的安全係數(以滑動體 $c=146.7\text{kpa}$ 、 $\varphi=30.75^\circ$ 、 $R=0.96$ 為例)

Figure 10 Safety factor in the condition of the water level was higher than that of the Morakot event (take the sliding body $c=146.7\text{kpa}$, $\varphi=30.75^\circ$, $R=0.96$ as an example)

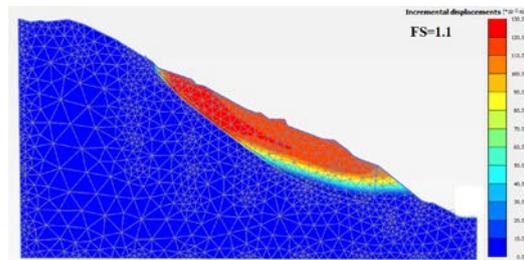


圖11 接近於地表水位時的安全係數(以滑動體 $c=146.7\text{kpa}$ 、 $\varphi=30.75^\circ$ 、 $R=0.96$ 為例)

Figure 11 Safety factor in the condition of the water level was close to the slope surface (take the sliding body $c=146.7\text{kpa}$, $\varphi=30.75^\circ$, $R=0.96$ as an example)

2. 邊坡破壞機率評估

為求得邊坡破壞機率，將研究程序計算出各水位面之各1000筆數據取出 FS 的機率密度分布如圖12~13所示，假設分布為常態計算累積分布函數來求取 $FS \leq 1$ 的累積機率(Pf)，即為邊坡的破壞機率，結果表明在貼近地表之地下水位面的情況下，與水位高於莫拉克豪雨事件之地下水位面的情況下，雖然可以發現前者的破壞機率大於後者，但整體而言均微小，前者為 $1.6 \times 10^{-9}\%$ ，後者為 $7.3 \times 10^{-23}\%$ 。

破壞機率微小的結果可能是因為在反算地質強度參數的過程中，是利用莫拉克事件去做反算推導，但是在莫拉克事件時廬山的位移量不大，導致反算出來的強度參數偏大，造成安全係數的高估，所以導致了破壞機率的低估。此外 Guo et al. (2019) 在探討參數 c 、 φ 負相關的過程中，也發現破壞機率會隨著參數負相關性越大而變得極為微小，由於本實驗的 $\rho(c, \varphi)$ 屬於高度負相關性(表4)，故數值試驗結果在強度參數高度相依的狀況下出現了破壞機率極小的狀況，然而，雖然破壞機率雖極其微小，但仍存在相對高低關係，破壞機率為接近於地

表之水位>高於莫拉克事件之水位。

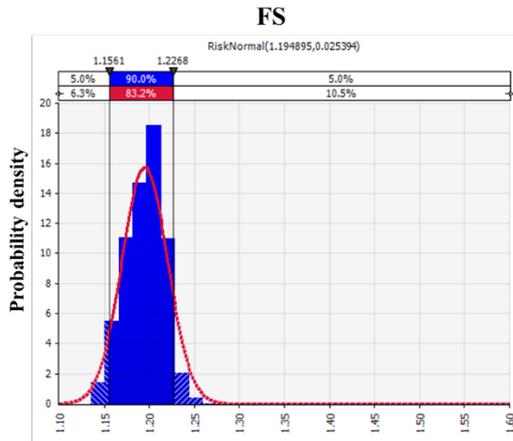


圖12 高於莫拉克事件之水位時的安全係數機率密度分布

Figure 12 Probability density distribution in the condition of the water level was higher than that of the Morakot event

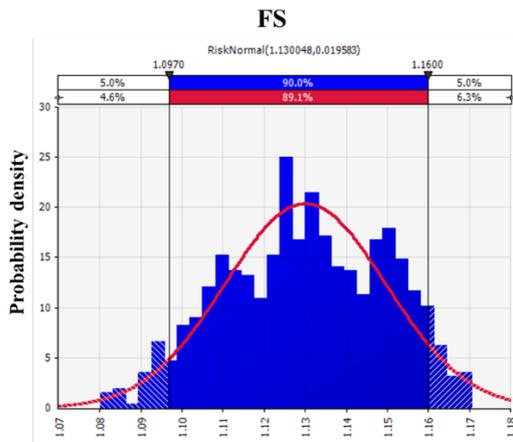


圖13 接近於地表之水位時的安全係數機率密度分布

Figure 13 Probability density distribution in the condition of the water level was close to the slope surface

結論

1. 本研究利用 PLAXIS 建立廬山邊坡之模

型，考量不同弱面強度折減因子(R_{inter})、摩擦角(ϕ)及凝聚力(c)三種不確定參數的情況下探討邊坡穩定性與破壞機率，設定兩種不同地下水水面條件進行分析，本研究結果顯示邊坡安全係數的平均值由小至大依序為：貼近坡面之水位、高於莫拉克暴雨事件之水位。邊坡破壞機率則為前者大於後者。

2. 本研究利用不確定參數對邊坡破壞機率進行探討，並研究弱面強度折減因子(R_{inter})、摩擦角(ϕ)及凝聚力(c)三種不確定參數彼此間的關係，研究發現三種強度參數彼此間具有相依性，且邊坡破壞機率會隨著參數負相關性越大而變得極為微小，本實驗的 $\rho(c, \phi)$ 計算出來的結果屬於高度負相關性，故數值試驗結果出現極小的破壞機率。
3. 由於莫拉克事件造成的廬山邊坡位移量比以往事件來得小，造成反算出的強度參數偏大，再加上本研究考慮材料強度參數為彼此相依，因此可能會低估邊坡的破壞機率，建議若考慮邊坡強度參數為相依的情況下，應考量不同暴雨事件來進行強度參數的反算。

參考文獻

1. 鄭佳邦(2018)，「邊坡穩定敏感度及不確定分析-以國道三號3.1公里崩塌事件為例」，國立台北科技大學土木工程與防災博士班博士學位論文
2. 張光宗、黃祥慶、林銘郎、張益通(2009)，「板岩地滑區的地質調查分析 - 以廬山溫泉滑動邊坡為例」，中華水土保持學報，40(4)：393-407(2009)

3. 陳盈良(2003),「考慮空間變異性之邊坡風險分析-以梨山地區為例」,中興土木工程學系碩士論文。
4. 李雅芬、李德河、紀雲曜(2009),「機率式邊坡穩定分析方法之研究」,中國土木水利工程學刊, 21(1): 91 - 103.
5. 林唯庭(2019),「廬山邊坡破壞機率之研究」,中興水土保持學系碩士論文。
6. RK Sharma. (2016), "Reliability Analysis of Slope Stability using Monte Carlo Simulation and Comparison with Deterministic Analysis".
7. Chang, K.T., and Huang, H.C. (2015). "Three-dimensional analysis of a deep-seated landslide in central Taiwan", *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 1379-13.
8. Terlien, M.T.J. (1996), "Modeling Spatial and Temporal Variations in Rainfall-Triggered Landslides", International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, The Netherlands. Publication No. 32.
9. Greco, V.R. (2016). "Variability and Correlation of Strength Parameters Inferred from Direct Shear Tests". *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(2), 585-60
10. Guo X.F., Daniel D., and Pan Q.J. (2019). "Probabilistic stability analysis of an embankment dam considering soil spatial variability", *Computers and Geotechnics*, 113, 103093

水土保持學報51 (2): 2759-2770 (2021)

Journal of Soil and Water Conservation, 51 (2): 2759-2770 (2021)

110年 6月 7日收稿

110年 6月 23日修改

110年 6月 23日接受