

# 崩塌地變遷與分析之研究

馮正一

國立中興大學  
水土保持學系助理教授

張育瑄 吳宗江 梁家齊 洪子恩

國立中興大學  
水土保持學系研究生

## 摘要

本研究介紹如何應用三維雷射掃瞄技術對邊坡進行掃瞄，以及利用所得的點雲資料進行邊坡穩定性分析與岩石位態判釋。藉由三維雷射掃瞄安全且快速的測量方式，可改善傳統測量上操作繁複且耗費人力的缺點。本研究撰寫「地形變遷分析模組」，能在 ArcGIS 系統下，劃分地形變化範圍以及土石方變化量。在邊坡穩定性分析方面，利用地理資訊系統 ArcGIS 結合 3D 邊坡穩定理論，撰寫「地層強度參數評估子模組」以及「三維邊坡穩定性計算子模組」，並將三維邊坡穩定分析結果進行比較與驗證。在岩石位態判釋上，本研究利用三維雷射掃瞄之雲點，藉由三維空間幾何關係，求算岩石邊坡與弱面之位態，並將結果展示於立體投影圖上，可供後續岩石邊坡穩定分析之用。

## 一、前言

崩塌地治理一向是水土保持的重要課題，如何有效且安全的進行調查是崩塌地治理的第一步。目前有各種地形變遷監測的方法，包括衛星、空載光達、地面光達以及航照判釋。本文主要應用地面光達進行地形變遷量測與判釋。地面光達可針對小範圍區位進行掃瞄，可快速地獲得三維地形資訊，其精確度也較其他監測方式高，因此能詳實的表現出現地地形。本研究將三維雷射掃瞄所得的結果進行分析，研究內容包括崩塌地地形變化分析、邊坡穩定分析以及岩石位態判釋。

在崩塌地地形變化分析方面，為了解崩塌地地形在不同時期之三維空間變化，本研究使用 Visual Basic 6.0 (2006)撰寫「地形變遷分析模組」，能在地理資訊系統(Geographic information system, GIS)架構下劃分出地形變化範圍以及土石方變化量。由於分析資料來源為高精度之點雲資料，因此能表現出地形細微變化之處，提高分析之精確度。

邊坡穩定分析方面，由於自然邊坡的崩塌形式均為三維，為了要更真實反應出崩塌的型態，掌握崩塌滑動面在三維尺度下的變化特性，本研究進行三維邊坡穩定分析。由於分析方法眾多，本研究考慮計算上的難易度，以及程式處理的速度，選擇較為簡便、快速的方法，將邊坡穩定性之分析方法撰寫成「三維邊坡穩定分析模組」外掛於 ArcGIS 中，目標為計算出邊坡之安全性以及滑動面位置，對邊坡進行初步的安全性判斷。

岩石位態判釋方面，本研究發展出一套處理 3D 掃瞄點雲判釋岩石邊坡位態(走向與傾角)資料的作業方法。文中介紹藉由點雲編輯、座標轉換以及空間內插建立三角網格，利用空間幾何關係，求算岩石邊坡的位態，並將位態資料展示於立體投影圖上，這些判釋結果可供後續岩石邊坡分析使用。

## 二、研究方法

### (一) 崩塌地地形變化分析

本研究自行撰寫「地形變遷分析模組」掛載於 GIS 中，此模組能在 GIS 架構下進行分析，劃分出地形變化範圍以及土石方變化量。其劃分原理是將兩次不同時期之 DEM，應用 ArcGIS 空間分析模組進行圖層相減，求得各網格的高度差值，若兩期 DEM 相減後網格高程為正值，表示該區域為堆積區，反之若為負值則為崩塌區。此外，將各網格之高度差值乘以網格大小後進行加總，可得土石方變化量。

在操作上，首先選取兩次不同時期之 DEM，作為欲分析之圖層匯入到模組中。選取的 DEM 必須有全部或部分的區域重疊，以及網格大小均同，以防止運算時因圖層條件不同而產生誤差。最後經由運算即可得到兩個時期地形變化範圍，以及因地形變化所產生的崩塌量或堆積量。整個操作過程均在 GIS 中完成，使用者無須再進行其他轉換或計算，操作上相當簡單方便，應用在其它工程設計分析上也相當適合。

### (二) 邊坡穩定分析

本研究在 GIS 架構下開發「三維邊坡穩定分析模組」，包括 5 個子模組：(a) 設定工具箱；(b) 橢圓端點座標產生子模組；(c) 崩塌滑動面產生子模組；(d) 地層強度參數評估子模組；(e) 三維邊坡穩定性計算子模組。此模組能在 ArcGIS 介面下自動化進行分析，求得邊坡可能之三維臨界破壞面與最小安全係數。

#### 1. 崩塌滑動面產生方法

對大多數圓弧滑動崩塌來說，其破壞滑動面可以視為橢圓體的下半部，尤其當地質為均質等向性且無弱面(不連續面)之地區，越符合此項特性。故本研究假設崩塌滑動面為橢圓體之下半部分，藉由調整橢圓體之參數來改變其「姿態」，參數包括了橢圓體之幾何參數( $a, b, c$ )、水平旋轉角度( $\delta$ )以及水平旋轉角度( $\theta$ )。其產生原理是將三維橢圓體的下半部表面網格化，計算出崩塌滑動面各網格交點的座標( $x, y, z$ )，之後透過 ArcGIS 空間分析的功能，以距離反比權重法進行內插，重建崩塌滑動面。

#### 2. 評估地層強度參數

為了要得到地層的強度參數，本研究收集整理地層強度參數的相關研究結果，建立「地層強度參數評估子模組」(如圖 1 所示)來評估地層強度參數。目標

為在不要求高精度的情況下，使用者可於現地概估地層類型與種類，對現地土壤強度進行概估。本研究將邊坡地層類型分為土壤與岩石兩種，在岩石方面，地層強度參數是根據 Generalized Hoek-Brown criterion (Hoek *et al.*, 2002) 岩石破壞經驗準則進行分類，輸入變數為  $\sigma_{ci}$  (sigci)、GSI、 $m_i$  與 D 四項，如圖 1 左圖所示。若使用時不清楚這四種變數的定義方式，可於程式中選取說明釋疑，使用上相當方便。在土壤方面，由於土壤強度影響因子多、變異性大，相關研究相對較少，因此本研究僅根據 Rodriguez Ortiz *et al.* (1986) 建立之土壤強度分類方式，將土壤整理分為 13 類。使用者根據現地選擇適合的土壤種類後，即可獲得相對應之土壤強度參數供參考(如圖 1 右圖所示)。

### 3. 三維邊坡穩定分析方法

本研究採用 Xie *et al.* (2003) 提出之改良 Hovland (1977) 分析法，建置「三維邊坡穩定性計算子模組」。在操作上首先要從「崩塌滑動面產生子模組」建立一個初始滑動面，其目的是做為搜尋各滑動面之原始位置，之後設定滑動面的搜尋範圍。本研究將以初始滑動面為基準，調整變動參數來改變滑動面的位置，變動參數分別為：圓心上下左右移動  $\pm 1$  與  $\pm 2$  公尺，長軸 a 變化  $\pm 5$  公尺，深度 d 變化  $\pm 1$  公尺， $\theta$  變化  $\pm 5^\circ$ ，總共分析 675 組破壞滑動面。最後依序在「三維邊坡穩定性計算子模組」中輸入 c、 $\phi$ 、GridSize、 $\gamma$ 、 $\gamma_{sat}$  等五個參數，以及 DEM、地下水位、初始滑動面、 $\theta_{xz}$ 、 $\theta_{yz}$  等五個圖層(如圖 2 所示)，即可由「三維邊坡穩定性計算子模組」計算，求得最小安全係數以及三維臨界破壞面(馮正一、梁家齊，2007)。

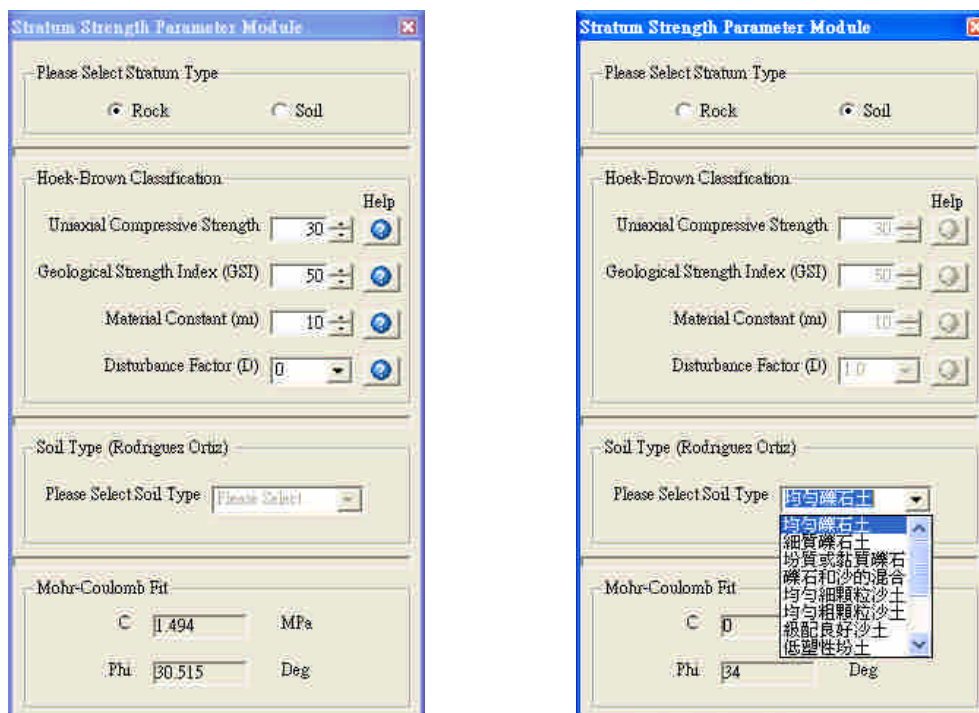


圖 1 地層強度參數評估子模組執行介面

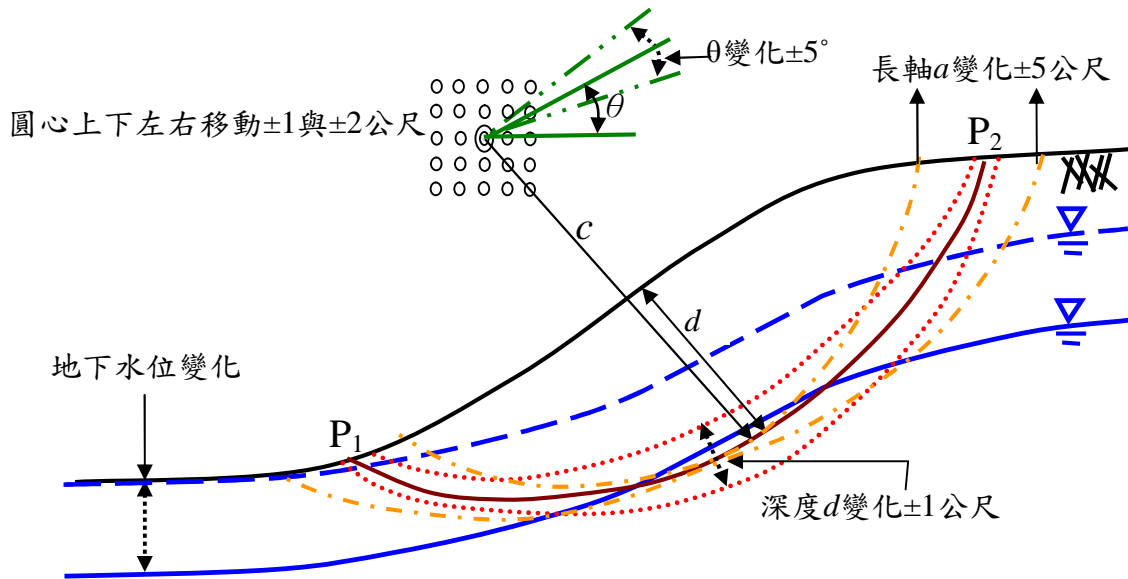


圖 2 三維穩定分析示意圖

### (三) 岩石邊坡位態

本研究利用三維雷射掃瞄點雲，以 FastRBF Toolbox 工具模組(2004)、Matlab(2006)來進行分析，再搭配 Dip 5.0(2006)可以畫出所需之立體投影圖，找出岩石邊坡之位態(走向與傾角)，以供工程設計時使用，分析流程如下：

#### 1. 資料內差與網格化：

利用 FastRBF Toolbox 工具模組，將編修後之點雲資料進行資料內插並網格化。其主要方程式為 RBF(Radial Basis Function)，能將一組二維或三維點資料以一組數學方程式作描述，針對因視角而無法掃瞄到之岩石邊坡或刪除因植生覆蓋而產生之不均勻散佈點雲，進行內插及坡面重建。

#### 2. 位態計算：

點雲資料經由內插及網格化後，會產生出一組新的點雲資料及一組網格資料，其中網格資料為一組  $3 \times n$  之矩陣，規範三角網格中之各個三角形頂點(vertex)資訊，使得整個點雲資料構成  $n$  個三角形 TIN 網格。利用三個點構成一平面之特性計算每一三角網格之平面方程式如下式所示，其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  及  $D$  分別代表  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  之係數及常數項：

$$AX+BY+CZ+D=0$$

#### a. 計算傾角：

在傾角方面，傾角為岩石層面或解理面與水平面之交角(如圖 3 所示)，角度範圍介於  $0 \sim 90^\circ$ ，故取三角網格平面方程式之法向量( $A, B, C$ )與  $xy$  平面之法向量( $0,0,1$ )之交角。

b. 計算走向：

岩層之走向是岩石層面或解理面與水平面所構成交線之方向角角度範圍介於  $0\sim 360^\circ$  (如圖 3 所示)，由於利用平面方程式直接求算岩層之走向計算較為繁瑣，故改採計算傾角方向(Dip Direction)作為岩層位態值。傾角方向為岩石面之方向角，恰等於岩石之走向加  $90^\circ$ ，利用計算三角網格之法向量投影之  $xy$  平面之向量  $(A, B, 0)$  和  $y$  軸向量  $(0, 1, 0)$  之夾角  $\cos^{-1}(\kappa)$  加上判別式來求算岩層真正之傾角方向。

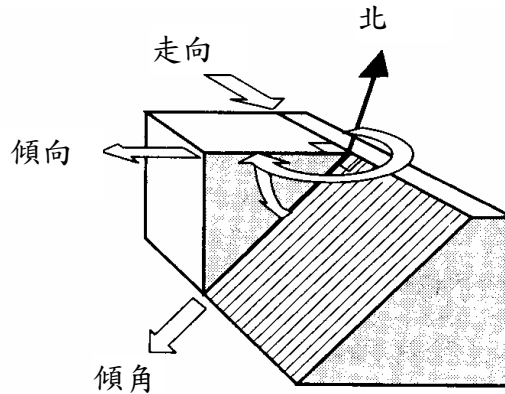


圖 3 岩層位態示意圖 (修改自 Turner *et al.*, 1996)

### 三、結果與討論

#### (一) 三維雷射掃瞄結果

本研究的三維雷射掃瞄共分為兩方面進行，目的為取得邊坡穩定分析以及岩石位態判釋所需的資料。

1. 在邊坡穩定分析方面，研究區位選定於九份二山崩塌堆積區，一共進行四次三維雷射掃瞄。掃瞄作業時間從架設儀器到掃瞄完畢僅約 2 小時左右即可完成，整個過程相當快速，且架設好儀器後只需由電腦操作，不需要再接觸被測邊坡，因此大幅提昇作業效率，投入之人力也相對地減少。將處理後的點雲資料匯入 ArcGIS 中，進行空間內插建立 DEM，其中第四次掃瞄所建立之 DEM 總面積約  $66,000\text{m}^2$ ，如圖 4 所示。

2. 在岩石位態判釋方面，試驗樣區位於南投縣仁愛鄉蕙蓀林場實驗林園區內道路旁之岩石邊坡，現地照片如圖 5(a) 所示。岩層屬達見砂岩，為中至粗粒厚層塊狀之石英變質砂岩夾雜少許礫岩、板岩與綠色岩所構成，表面因岩體中之鐵氧化產生紅褐色斑狀特徵。掃瞄點雲資料如圖 5(b) 所示，由於現地掃瞄時會有因視角而無法掃瞄到之岩石邊坡或因刪除植生覆蓋的點位，本研究利用 FastRBF Toolbox 工具模組，將不均勻散佈點雲作內插及坡面重建，經編修後之點雲資料內插並網格化後，如圖 5(c) 所示。為了要量測岩層的位態，本研究將選取五個岩坡面進行分析，其標示位置如圖 5(d) 所示。

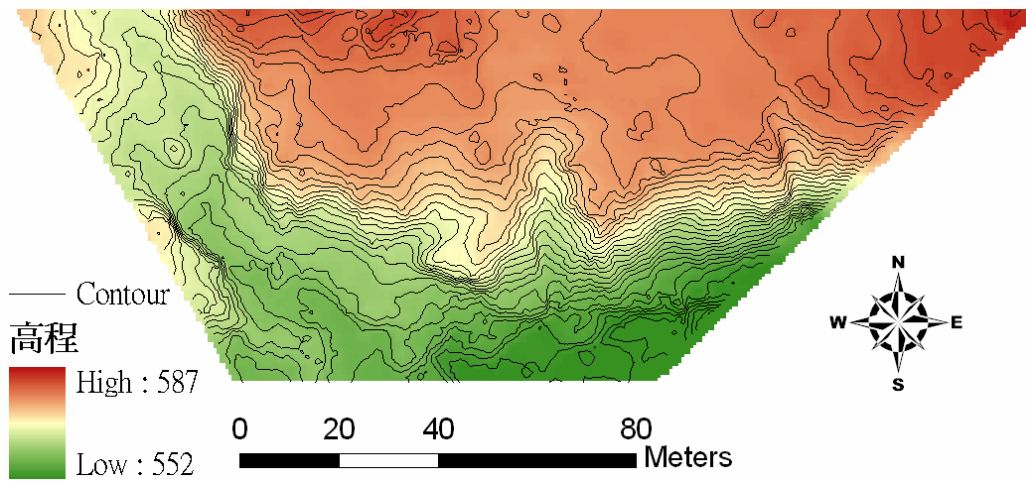


圖 4 分析範圍內之 DEM 與等高線-資料處理後



圖 5 (a) 惠蓀林場試驗地現地照片

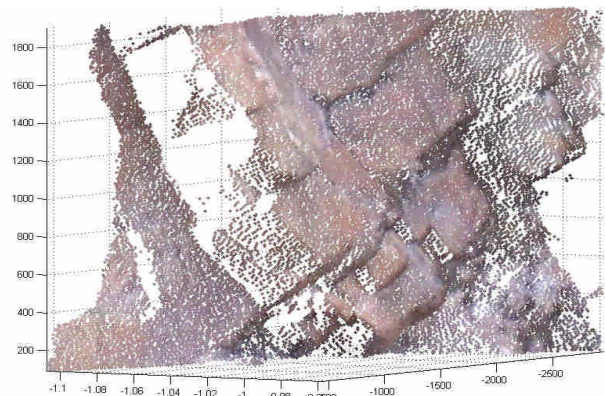


圖 5 (b) 現地掃描點雲

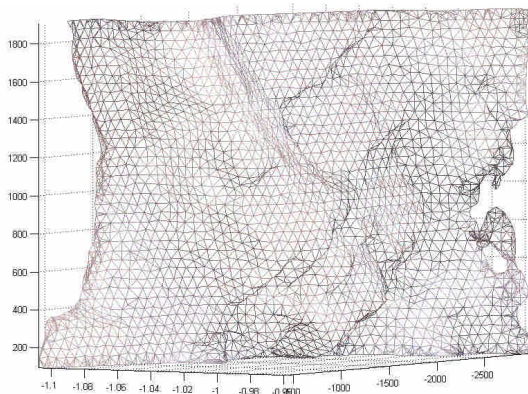


圖 5 (c) 不規則三角網格

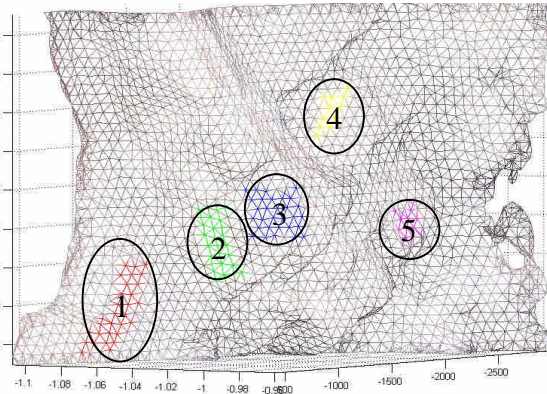


圖 5 (d) 現地位態比較區位

## (二) 崩塌地地形變化分析

本研究選擇其中二次掃描結果進行地形變化分析，圖 6 為分析後的地形變化圖，圖中顯示出整個坡面是呈現崩塌的現象，即第二次 DEM 高程小於第一次

DEM 高程，絕大部份均為崩塌區位(藍色部份)，而堆積區則為零星分布(黃色部份)，主要發生在坡趾與坡腹處。

將前後兩期 DEM 相減得到高程差分布如圖 7 所示，高程負值的區位代表崩塌區，正值的區位則為堆積區。分析結果顯示掃瞄的區位在颱風期間所造成的地形變化並非崩塌，應為視為沖蝕。從計算結果得知堆積土石方量為 1.8 立方公尺、沖蝕量為 31.8 立方公尺，兩者差距高達 30 立方公尺，造成差距的原因是由於坡趾處緊鄰溢洪道，在颱風期間大量土砂隨著逕流被帶入河道中，藉由水流順流而下堆積在下游地區，因此大部分土石方無法測得而造成短少的現象。

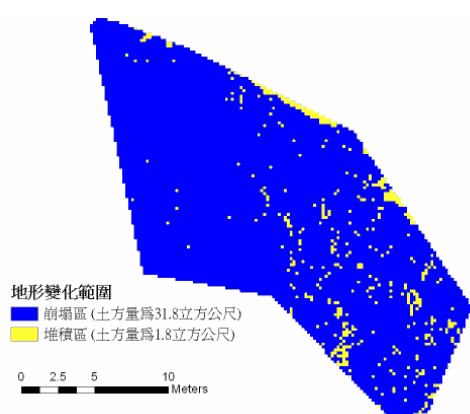


圖 6 現地地形變化圖

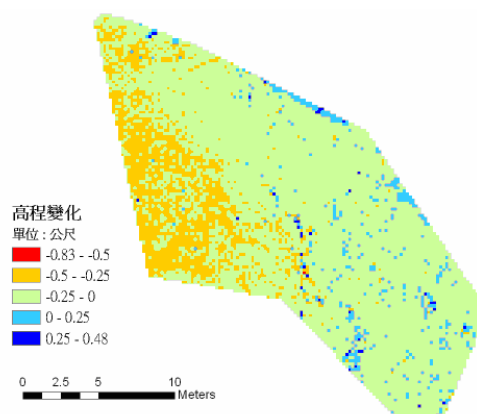


圖 7 現地高程變化圖

### (三) 邊坡穩定分析

本研究區位地層以砂頁岩崩積土為主，因此本研究將現地地層類比為破碎之岩石，岩塊間填充土壤，應用「地層強度參數評估子模組」來決定地層強度參數。經調整各變數後，得到地層強度參數  $c$ 、 $\phi$  分別為 20KPa 與  $28^\circ$ 。另外，土壤單位重( $\gamma$ )與飽和土壤單位重( $\gamma_{sat}$ )，本研究將分別假設為  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ ； $\gamma_{sat}=22 \text{ kN/m}^3$ 。在取得各項分析參數後，以「三維邊坡穩定性計算子模組」進行計算，計算結果如下：降雨前最小安全係數為 1.336，降雨後則降至為 1.292，搜尋之滑動面位置如圖 8~圖 9 所示。

另外，本研究將三維分析結果與二維分析結果進行比較，結果整理成表 1。其中 2D Bishop 為二維分析所得之二維安全係數；3D Hovland 為三維分析所得之三維安全係數；3D Check 為切取出三維崩塌滑動面之二維剖面，分析所得之二維安全係數(二維計算)。表 1 亦可得知 3D Check 均比 2D Bishop 來的大，表示三維分析所搜尋的滑動面在二維分析中，其安全係數並非最小的一組，原因是由於在三維分析中，橢圓參數變動量設定數量不夠多，所搜尋到的安全係數僅是相對最小的一組。

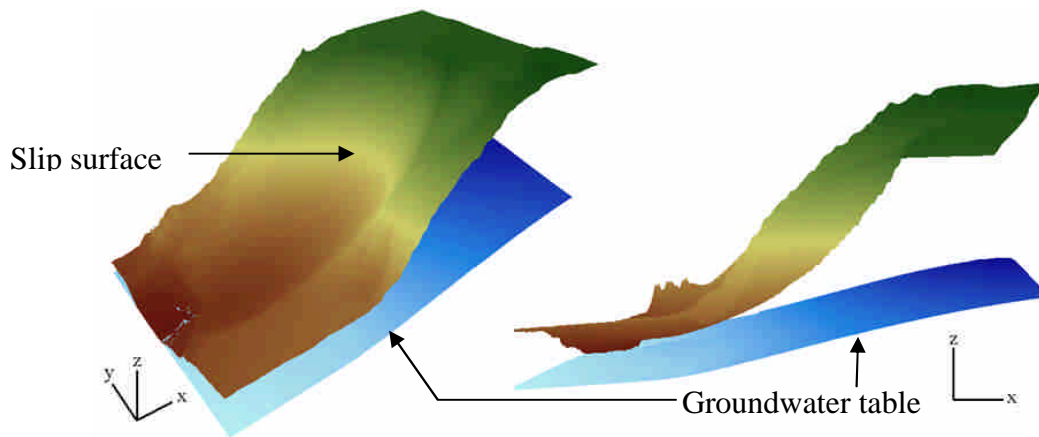


圖 8 3D 滑動面示意圖-降雨前

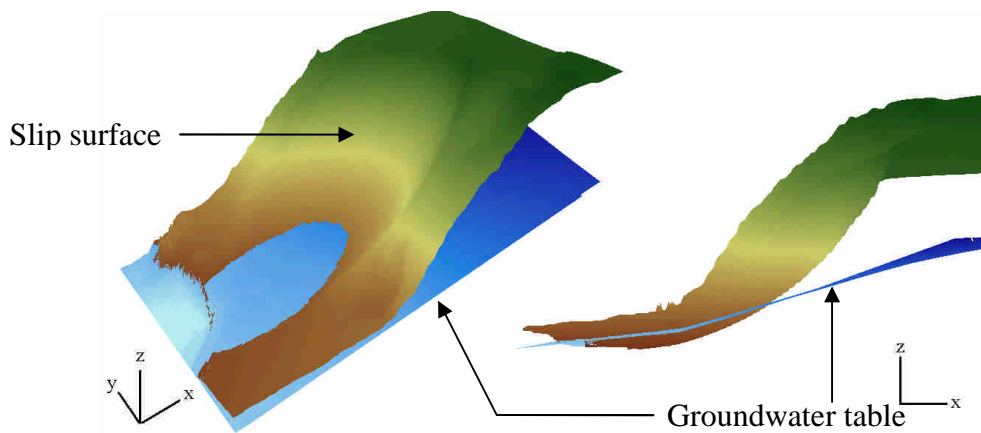


圖 9 3D 滑動面示意圖-降雨後

表 1 二維與三維安全係數分析表(馮正一、梁家齊，2007)

方法	FS (降雨前)	FS (降雨後)
2D Bishop	1.134	1.101
3D Hovland	1.336	1.292
3D Check	1.212	1.115

#### (四) 岩石位態

將切取後之網格資料進行位態分析，於 Matlab 中計算每一網格之平面方程式，再藉由上述判別式來計算岩面之位態，並統計範圍內網格之位態資料，選取出現頻率最高的位態值和現地量測位態值，最後將位態資料分別繪製於 3D 立體投影圖作比較如圖 10~圖 11 所示，其位態比對資料如表 2 所示。經由比對計算位態資料和現地量測位態資料發現，計算傾角值與量測傾角值約有 0~10°之誤差；計算傾角走向值與量測傾角走向值約有 0~5°之誤差，但從 3D 立體投影圖中發現，整體位態趨勢和現地量測位態趨勢大致相符，其誤差來源和岩層表面之粗糙度及水平程度有關，其中岩層傾角值受此因素之影響程度較大。本分析程序可在調查人員遙不可及與具相當危險性的岩石邊坡應用，求出岩石邊坡的走向與傾



角，並將位態資料展示於立體投影圖上，這些判釋結果可供後續岩石邊坡分析與設計使用。

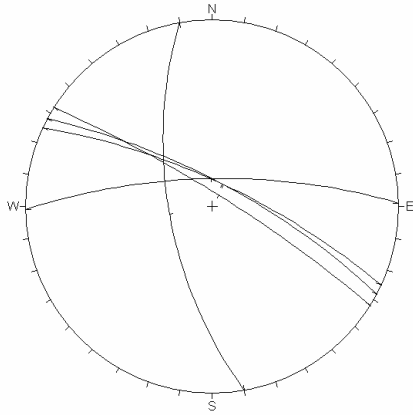


圖 10 計算位態之 3D 立體投影圖

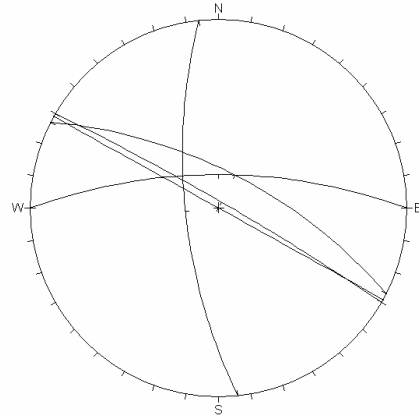


圖 11 現地量測位態之 3D 立體投影圖

表 2 惠蓀林場位態資料比較表

不連續面編號	計算 DD/Dip	現地量測 DD/Dip
1	25.4 / 75.83	27 / 68
2	260.31 / 64.958	264 / 70
3	32.28 / 82.26	29 / 90
4	28.77 / 75.83	30 / 86
5	359.47 / 72.99	0 / 70

#### 四、結論

1. 本研究所撰寫的「地形變遷分析子模組」可劃分出邊坡變遷區位以及計算出土石方變化量。
2. 本研究可讓使用者於現地勘查後，以「地層強度參數評估子模組」概估現地地層強度參數，然後在 GIS 架構下使用「三維邊坡穩定分析模組」，不僅可使用三維雷射掃瞄建立之 DEM 進行邊坡之 3D 穩定性分析，一般的 40x40m 既有 DEM 亦可直接套用進行計算。
3. 本研究建立之 3D 雷射掃瞄應用於岩層位態辨識的作業流程經驗證證明是可行的，此方法可由遠距之 3D 掃瞄結果，分析得到危險岩石邊坡之走向與傾角，可供後續岩石邊坡分析與設計使用。

## 誌謝

本文承國科會 NSC 94-2625-Z-005-008-與 NSC94-2622-E-005-022-CC3 計劃之支持，作者在此表達謝意。

## 參考文獻

1. 馮正一、梁家齊(2007)「應用三維雷射掃描與 GIS 於邊坡穩定分析之研究」，中華水土保持學報，第 38 卷，第 3 期，in press。
2. Achilleos, E., (1988), “*User Guide for PC- STABL5M,*” *Joint Highway Research Report JHRP-8819*, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
3. Dip 5.0, (2006), Rocscience Inc., Homepage. <http://www.rocscience.com>, Accessed Nov. 4, 2006.
4. FastRBF, (2004), “*Toolbox user manual,*” FarField Technology Ltd.
5. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., (2002), “Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition,” *5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC*, pp.267-273.
6. Hovland, H.J., (1977), “Three-dimensional slope stability analysis method,” *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.103, pp.971-986.
7. Matlab, (2006), MathWorks Inc., Homepage. <http://www.mathworks.com>, Accessed Nov. 4, 2006.
8. Rodriguez Ortiz, J. M., Serra Gesta, J. and Oteo Mazo, C., (1986), “*Curso Aplicado de Cimentaciones,*” 3rd Ed. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
9. Turner, A.K., and Schuster, R.L., editors, (1996), “*Landslides Investigation and Mitigation.*” Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C.
10. Visual Basic 6.0, (2006), Microsoft Corp., Homepage. <http://msdn.microsoft.com>, Accessed Nov. 4, 2006.
11. Xie, M., Esaki, T., Zhou, G., and Mitani, Y., (2003), “GIS-Based three-dimensional slope stability analysis and landslide hazard assessment,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Vol.129 (12), pp.1109-1118.