

邊坡變遷三維測量與穩定性分析

馮正一^[1]

梁家齊^[2]

吳宗江^[3]

Three-dimensional Laser Scanning and Stability Analysis of Slopes

Zheng-yi Feng^[1]

Jia-Chi Liang^[2]

Tzong-Jiang Wu^[3]

[1] 國立中興大學水土保持學系助理教授（通訊作者）

Assistant Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

(Corresponding Author) Email: tonyfeng@dragon.nchu.edu.tw

[2] 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

Graduate student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

[3] 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

Graduate student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

摘要 本研究介紹應用三維雷射掃描技術對邊坡進行地形掃描及變遷監測，藉由三維雷射地形掃描安全且快速的測量方式，改善傳統測量上操作繁複且耗費人力的缺點。此外，三維雷射地形掃描的結果為高精度的「點雲」資料，能有效掌握原始的邊坡坡型，藉由多次掃描的結果能在地理資訊系統中建立地形變遷資料庫。在分析上本研究將地理資訊系統結合了邊坡穩定程式，並根據地形與水文原理劃分出「邊坡單元」，在系統中能對單一邊坡單元切取二維地形剖面進行極限平衡穩定性分析。藉由對現地進行實測結果驗證，本研究所介紹的三維雷射地形掃描技術可改善作業時間與簡化作業流程，適合邊坡崩塌災前與災後快速取得地形資料，對邊坡進行初步的穩定性評估。

關鍵詞：三維雷射掃描、地理資訊系統、邊坡穩定、邊坡單元。

Abstract

This study introduces the application of 3D laser scanning on landform measurement and monitoring of slopes. The operation of the 3D laser scanning is quick and safe; therefore, it is better than traditional surveying. Beside, the high accuracy “point cloud” data can capture slope landform effectively. With multiple scanning results, we can establish a slope morphological database in GIS system. This study also combines GIS and slope stability program for two-dimensional limit equilibrium stability analysis for “slope unit”. The “slope unit” is defined according to the principle of topography and hydrology. From the field 3D scanning implementations and data analysis, the processes of slope measure and stability analysis is proved to be time saving and simplified. The method is suitable for rapid obtaining slope landform before and after landslide, and for initial stability evaluation.

Key words: 3D laser scanning, geographical information system, slope stability, slope unit.

一、前言

一般邊坡變遷分析，其地形條件大多是以某一剖面視為整個邊坡，而詳實的現地剖面資料又難以取得，尤其是崩塌後之邊坡其地形險峻，以傳統的測量方法量測是較危險且不易有效掌握地形的變化關係。目前對於崩場地之勘查與量測，較為安全且可行之作法之一是進行三維雷射地形掃描（3-D Laser Scanner），並應用在變遷監測上。三維雷射地形掃描具有高精度、掃描速度快、操作簡便等特性，因此相當適合作為地形掃描及變遷監測使用，通常有效掃描距離可達 1,000 公尺左右或以上，精度可達公分級之程度，依照儀器類型的不同會有所差異。三維雷射掃描所得的結果為一群密佈「點雲」的三維座標資料，可進行被測物之三維模型重建，而一般地形掃描及變遷監測無需以高密度的掃描方式，所以不會產生無意義的資料，且易與相關工程軟體交互應用。

地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）可進行空間分析，包括數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）的建立、圖層套疊運算及圖層管理系統，可做為決策輔助工具。目前 GIS 分析功能應用到崩場地方面，大都以權重疊加計算方法，得到山崩潛感圖，或是應用無限邊坡分析模式來計算邊坡穩定性，但以此方法所假設地形與真實崩塌地形狀況差異甚大。本研究選擇 ArcGIS9.0（2005）做為展示與分析的工具，由於 ArcGIS9.0 具有較佳的擴充性，能自行撰寫程式（Visual Basic for Applications, VBA）外掛於其中，使得 GIS 除了既有的功能外，能依照使用者的需求開發其他功能。利用此一特點，本研究在 GIS 中結合邊坡穩定程式進行邊坡穩定性分析，目前邊坡穩定分析程式種類繁多，其中以美國普渡大學所開發之 PC-STABL5M(Achilleos,1988)較廣為大家所接受，其使用方法簡單且採用的分析方法較無限邊坡分析嚴謹，在不需要高精度計算的情況下，應用在災後初步邊坡穩定性評估上應已足夠。

本研究考量測量時的安全性、邊坡穩定性分析時資料的精確度，應用三維雷射地形掃描對崩塌前或崩塌後之邊坡進行掃描，能在現地勘察後快速地將地形資料建構在 GIS 中，相關既有的資料可建立資料庫，相當適合災後初步邊坡穩定性評估以及後續治理參考使用。文中首先介紹三維雷射地形掃描技術建立崩塌區三維數值地形，將不同時期獲得的掃描資料，建立地形變遷的資料庫，藉由 GIS 空間分析功能將資料轉成數值高程模型，展示崩塌地變遷的三維雷射掃描結果。除了地形條件外，對於地質條件，作者自行撰寫程式，建立土壤與岩石的地層強度參數模組，讓使用者可根據現地狀況，選擇適合的地層強度參數，應用在穩定性分析。最後介紹如何在 GIS 中自動劃分「邊坡單元」與繪製地形剖面的方法，並針對單一邊坡單元切取二維地形剖面進行極限平衡穩定性分析。

二、文獻回顧

曾義星、史天元（2002）探討三維雷射掃描技術應用在工程測量上的方法，以及掃描資料後續處理的問題及方法。該研究發現三維雷射掃描能有效獲得詳實且精度高之顯性三維空間資訊，且操作方便的特性與快速的測量方式能有效提昇工作效率。此技術除了應用在工程測量上，對於山坡地開發、防災與災害調查、土木工程測量、土方計算等也有相當大的潛力。

蕭國鑫等（2005）利用三維雷射掃描技術，分別以航空與地面測量方式，對集集大地震後九份二山崩場地進行地形測量。藉由地震前的 40 公尺網格 DEM 資料與地震後航空與地面三維雷射掃描資料，

評估九份二山崩場地的地形變化，經比較航空與地面測量結果後發現，航空三維雷射資料不適用於監測此地形變化。

Dai and Lee (2001) 依香港臨近島嶼大嶼山之邊坡，利用 GIS 結合 Multiple Correspondence Analysis (MCA) 統計分析方法，以實際崩塌案例所得的地形變化數據進行分析，經由回歸模式以及 GIS 所建立模式求得崩塌敏感性因子。結果發現崩塌敏感性與地形、地質有關，如岩性、邊坡坡度、坡面傾角、坡高等，也證實所建立的 GIS 模式是有用的，且適用於該研究所採用的崩塌規模。

朱聖心 (2001) 探討降雨與地震誘發的崩塌，以力學的觀點出發，應用 Newmark' 位移法以及無限邊坡極限平衡方法，對 1997 年安珀颱風與集集大地震後天祥地區及中橫公路東段進行分析，並於地理資訊系統中分別繪製降雨與地震崩塌風險圖。結果顯示該模式具有不錯的效果且能有效預測崩壞區域。但該方法僅適用於淺層滑動，對於非淺層滑動之崩塌型態，於該研究中並未分析。

鄭傑銘 (2001) 結合了地理資訊系統與遙感探測，以無限邊坡與 Newmark 位移法的概念，進行山崩潛感性分析，探討各參數 (工程性質參數、邊坡幾何參數、誘發因子參數) 對分析結果 (安全係數、永久位移量) 之影響，並嘗試提出豪雨及地震之反算分析模式，以反算方式求得豪雨與地震分析所需之工程性質參數。該研究只針對大範圍崩塌進行分析，並以網格做為分析單元，但網格分析與實際邊坡崩塌情況會有所差異。

Xie, *et al.* (2003) 利用 Visual Basic 6.0 與 MapObjects，開發三維邊坡穩定 GIS 分析系統，並根據地形與水文原理自動劃分出「邊坡單元」，所劃分出的邊坡單元與崩塌地區位有著密切的關係。以該系統進行之邊坡穩定性分析，根據輸入地形參數 (高程、傾度和坡度等)、崩塌地空間分佈 (推測關鍵的滑動面與邊界)、邊坡單元之材料參數和地下水條件等，應用 Monte-Carlo 隨機模擬方法獲得隨機選取之滑動面與 C、 ψ 值，在系統中所建立三維網格柱再依 Hovland 模式求得最小三維安全係數和崩塌風險圖。

Xie, *et al.* (2004) 假設崩塌滑動面為橢圓體之下半部份，以 Monte-Carlo 隨機模擬方法鑑別出三維崩塌滑動面，並根據三維邊坡穩定分析模式，開發出 GIS 架構下之三維定率模式，能計算出邊坡最小安全係數。此方法能考量到斷層弱面以及地下水位對邊坡穩定的影響，但須假設之參數過多且複雜，如橢圓體之幾何參數 (a,b,c)、橢圓體傾角 θ ，因此分析上較為困難。

三、研究方法

根據前述之研究理念，本研究方法劃分為現地三維雷射地形掃描展示與地形變遷資料庫建立、地層強度參數模組建立、邊坡單元的劃分方法與崩塌地變遷分析等項目，研究流程如圖 1 所示。

1. 現地三維雷射地形掃描展示與地形變遷資料庫建立

在進行三維雷射地形掃描時，首先需要現地打設「掃描參考點」，一般至少需設置 4 個，其中一個備用。設置掃描參考點的作用說明如下：3D 雷射掃描所得之資料是以測站位置、測站高程與起始掃描方向，所測得的 3D(x, y, z) 資料。每次架站掃描均需對「掃描參考點」進行量測。如果一個測站無法量測到整個坡面，則需要進行第二次或甚至第三次以上的架站量測，此時即需以「掃描參考點」來轉換各次量

測的資料，將資料轉換到一個統一的局部（local）座標系統。由於地形變遷需要進行多次量測，每次測站所架設的位置也會不同，若無建立掃描參考點，則日後無法根據所建立之三維數值模型分析地形變化。

三維雷射地形掃描所測得的原始點雲資料須經過資料處理後才可使用，其原因是由於三維雷射地形掃描會將不屬於邊坡的部份一起記錄進去，例如邊坡旁的電線杆、樹木等構造物，即所謂的「雜點」，如不剔除，會造成掃描結果與原始地形有所差異。藉由 Realwork (Trimble, 2005) 軟體處理後可得到圖 2 所示的結果，其中黑色區域代表所謂的「雜點」，藍色區域即處理後所需的形狀。另外，由於三維雷射地形掃描所得的結果為高精度的三維座標資訊，本研究採用之雷射掃描儀(Mensi GS100 Laser Scanner)其角度解析度可達 0.0018° (6.6 arc second)，因此所得掃描的點紀錄高達十幾萬筆點雲，若將資料全數輸入到 GIS 中會造成電腦處理工作過量，且太密集的點資料會使 GIS 中所產生之數值等高線產生不規則的現象，所以必須要進行除點雲的工作，本研究針對此狀況撰寫程式，可將各點雲之 x 或 y 資料由小到大進行排序，再設定每間隔幾個點雲筆數，刪除一個點雲，進行點雲減除工作，如圖 3a 所示。如此可減少資料的處理量，且不會對 3D 地形造成太大的差異。在經過除點處理後即可將點雲資料匯入 GIS 中轉成數值地形模型，本研究應用 ArcGIS 9.0 之“Spatial Analyst”模組，將點雲資料轉成數值高程模型，所得成果包括不規則網格 (TIN)、規則網格 (GRID) 以及數值等高線。為了要探求地形變遷，本研究將不同時期掃描結果整理後建立地形變遷資料庫，作為後續研究崩場地變遷分析使用。

2. 地層強度參數模組建立

由於邊坡崩塌後其地層是裸露在外，因此可於現地概估其地層種類，不同的地層種類其地層強度參數會有所差異，在不要求高精度的情況下，可建立「地層強度參數模組」來查詢地層強度參數。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, Carranza-Torres & Corkum, 2002) 岩石破壞經驗準則進行分類，其公式如下：

$$c = \frac{\sigma_{ci} \left[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}' \right] (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left[6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1} \right]}} \sqrt{[(1+a)(2+a)]}$$

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}} \right]$$

上述公式中各參數之計算方式如下：

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

其中： σ_1' 和 σ_3' 為破壞時最大與最小有效主應力。

σ_{ci} 為岩石材料之單壓強度。

m_i 為完整岩石之材料常數。

m_b 為根據岩塊材料所得之 m_i 折減值。

s 為根據岩石特性變化之常數。

GSI為地質強度指數。

D為干擾因子。

σ_{3n}' 在一般情況下可設為 $\sigma_{ci}/4$ 。

根據上述計算公式，將輸入變數分為 σ_{ci} (sigci)、GSI、 m_i 與D四種，若使用時不清楚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。在選定符合現地狀況的數值後，即可得到相對應之強度參數，如圖3b所示。要注意的是各變數有其限制範圍， σ_{ci} 必須大於零、GSI要介於1~100之間、 m_i 要介於1~50之間、D要介於0~1之間，否則會產生錯誤。

在土壤方面，本研究根據Rodriguez Ortiz *et al.* (1986)以及NAVFAC Design Manual 7.02 (U.S. NAVY, 1982)建立之土壤強度分類方式，將土壤整理分為15類，如表1所示。根據現地選擇適合的土壤種類後，即可獲得相對應之地層強度參數，由於本研究所定義之 c 值是以土壤飽和時的狀況下保守估計，實際狀況會比所定義值來的大，因此使用時可以將數值向上調整。

3. 邊坡單元的劃分方法

一般邊坡崩塌都有其特殊的外型與輪廓，由於所建立之數值高程模型為網格單元，無法表現出實際的崩塌狀況，因此本研究參考Xie *et al.* (2004)所介紹的方法，在GIS中建立「邊坡單元」。所謂的「邊坡單元」可視為邊坡的一部分或是集水區左半部或是右半部，因此可藉由集水區的脊線與谷線鑑別出來，透過ArcHydro Tools (Maidment, 2002)可將所建立之數值高程模型自動化產生邊坡單元。首先，ArcHydro Tools可將DEM依據地理與水文原則產生集水區邊界與河流流線，其中集水區邊界為所謂的脊線而河流流線則為谷線，如圖4之Part 1。之後將原本的DEM高度反轉，依照同樣的方法劃分出集水區邊界與河流流線，如圖4之Part 2與Part 3，即原本的谷線變成脊線而脊線變成谷線。最後將所得之兩個集水區邊界Polygon進行套疊融合，如此一來，原本的集水區可分成兩個部份，此即為兩個邊坡單元。在這裡要說明的是，劃分出來的邊坡單元大小與數量，會隨著集水區自動劃分時所設定的“Flow Accumulation Grid”門檻值改變，當門檻值較小時，所劃分的邊坡單元面積會較小、數量會較多，反之當門檻值較大時，邊坡單元面積會較大、數量會較少。

4. 邊坡穩定性分析

在建立地形變遷資料庫、地層強度參數模組與劃分邊坡單元後，接下來針對所建立之數值地形模型進行穩定性分析。本研究採用PcStable5M做為分析程式，作者利用Visual Basic.NET (2005)撰寫參數輸入界面，如圖5所示，包括地形剖面(Profile)、土壤參數(Soil)、地下水位(Water)、限制位置(Limit)、分析方式(Analysis)等五項，選擇其中分析方式包含了Bishop簡化法(Circle2)、Janbu簡化法(Circle)以及Random，而土壤參數整合先前介紹之地層強度參數模組。本研究目前只考慮地形與地質對邊坡穩定性的關係，在未來若能取得其他相關圖層，如地下水位、限制位置等，也可以依序加入界面之中進行分析。

此界面可外掛於 GIS 系統中，分析時首先根據先前劃分的邊坡單元，選擇其中一個“Polygon”做為分析之區位，為了要取得計算時所需的地形剖面資料，本研究利用 Huang(2004)所撰寫之“Easy Profiler”程式，此程式能根據需求在 GIS 圖層上任意繪製剖面，讀取並儲存剖面上各點位的水平距離與高程。對於不同類型的圖層有不同的繪製方法，例如當圖層為數值等高線時，可根據剖面線與等高線之交點來繪製，而當圖層為 TIN 或 GRID 時，可選擇剖面線上欲產生的點數，選擇點數越多代表產生的剖面圖越精細，越符合地形，如圖 6 所示。

本研究之穩定性分析配合 PcStable5M，將邊坡調整為左低右高的坡型，即高程隨著水平 X 軸距離增加。所以繪製剖面時，起點由坡趾的地方開始繪製。取得地形剖面後，資料可匯入到前述之參數輸入界面中（圖 5），此輸入的地形數值也可以在該界面中進行修改，使用上相當流暢與方便。土壤參數則根據前介紹之地層強度參數模組（圖 3），點選適合之地層條件後自動產生起始數值，如有需要可自行修改，在輸入各參數後即可進行運算得，到該邊坡之安全係數。

四、三維測量與穩定性分析結果

本研究現地掃描之地點選在九份二山堰塞湖溢洪道旁之一處邊坡，研究區位如圖 7 內之星號所示，該邊坡高寬分別約 20 公尺與 30 公尺，旁邊設有一座柱狀固床工，有鑑於柱狀固床工結構強不易產生變形，因此選定該處做為三維雷射地形掃描的「掃描參考點」。由於溢洪道屬於崩積土，土質鬆軟且坡陡，因此沖蝕相當嚴重，河道嚴重下切，原本設置之柱狀固床工已多處發生背填土砂流失、基礎掏空的現象，底部基樁嚴重裸露。在經過相關單位整治後，此一情況已改善。本研究現地掃描邊坡即位於溢洪道改道後之凸岸處，現地狀況如圖 8 所示。

本研究於 2005 年在泰利颱風侵台(8 月 31 日)前進行第一次三維雷射地形掃描(8 月 30 日)，泰利颱風侵台後進行第二次三維雷射地形掃描(9 月 6 日)，於 10 月 14 日進行第三次三維雷射地形掃描。除了第一次掃描需埋設參考點要花費較多的時間外，其餘作業時間從架設儀器到掃描完畢僅約 1 小時左右即可完成，整個過程相當快速，且架設好三維雷射掃描器後只需由電腦操作儀器，不需要再接觸被測物，作業效率高、工作簡單。

三維雷射掃描的成果在資料處理後，匯入 GIS 中進行分析，三次數值掃描所建立之不規則網格數值高程模型與規則網格數值高程模型如圖 9 與圖 10 所示。本研究所測量而得各點資料是以儀器位置為原點(0,0,0)所測得的相對位置，所以在圖 9 與圖 10 中高程為負值，也因此尚無法與其它二度分帶座標或經緯度座標之圖層套疊，此問題可利用 GPS 測得測站座標後，藉由座標轉換的方式是可以解決的，不會影響研究結果。

本研究選擇第二次的掃描結果進行邊坡穩定性分析，在 GIS 中由“Spatial Analyst”模組所得規則網格數值高程模型之網格大小為 $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ ，總網格數約 34000 個，總面積約 500m^2 。由於本研究掃描的區位面積很小，因此所選取的“Flow Accumulation Grid”(Maidment, 2002)門檻值相對很大，否則劃分出的邊坡單元範圍會顯的過小，以 ArcHydro Tools 所得之邊坡單元如圖 11 所示，一共分為二個 Polygon。在每個邊坡單元內繪製剖面線，設定產生的點數為 20 點，即可得到任一剖面的剖面資料，本研究掃描所得

的剖面資料只僅包含坡面，所以坡頂與坡趾的區域必須參考現地地形假設之，這樣可能會對結果造成影響，對此問題建議藉由擴大掃描區位以獲得完整的邊坡坡型來解決。

在強度參數方面，本研究區位地層屬於九份二山崩塌後之崩積土，經現場初步判視為粉質砂土-黏質砂土，由「地層強度參數模組」得到之土壤強度參數為 C 、 ϕ 分別為 14KPa 與 33° ，但此數值為土壤飽和時的狀況，而在測量當天並無下雨且天氣晴朗，因此本研究將 C 值提高至 20KPa 來估計土壤強度。此外，從現場觀察坡面狀況相當乾燥，無坡面滲水的情況發生，而坡趾正好為河道，因此假設地下水位從坡趾開始計算。將所有參數套入 PcStable5M 中，分析方式選擇“Random”進行運算，所得之安全係數分別如下：Polygon 1(slope unit 1)為 1.15、Polygon 2(slope unit 2)為 1.12（如圖 12 所示），均屬如於安全情況。這些安全細數僅是對邊坡安全性的初步評估，如有對邊坡進行細部評估的需求，則需進一步執行地質調查與試驗，以取得更確實的土壤強度參數來計算安全性。

五、結論

1. 本研究計畫應用三維雷射地形掃描結合 GIS 對崩場地進行變遷監測與穩定性分析，藉由三維雷射地形掃描高品質的測量成果，可改善傳統邊坡穩定分析輸入邊坡剖面與現地狀況過大差異的缺點。此外應用 GIS 強大的處理分析能力，能將資料整理並建立地形變遷資料庫，對於結合邊坡穩定分析程式也有不錯的分析結果。
2. 本研究選定九份二山堰塞湖溢洪道旁之一處邊坡做為分析區位，經由三次現地測量，驗證三維雷射地形掃描的確可改善作業時間與簡化工作流程。將掃描後點資料進行處理後轉成數值高程模型，可真實的反應出現地地形狀況。
3. 在 GIS 系統中可自動化產生邊坡單元，藉由地形與水文原理所得之邊坡單元與崩塌區位有固定的關係，因此進行變遷分析時可明確選出所要分析的邊坡。
4. 三維雷射地形掃描亦可以結合 GPS 進行定位，建議可以較高精度的 GPS 設備，進行空間座標的定位，由於三維雷射地形掃描是以測站位置作為原點 (0,0,0)，而 GPS 之定位座標系統為 WGS84，藉由座標轉換的方式將每次 3D 雷射掃描測站之座標系統轉成同一座標系統(Global coordinates)，如 TWD67 座標系統或是 TWD97 座標系統，才可在 GIS 系統內與其他既有圖層進行套疊分析。由於本研究著重於「地形條件」與「地質條件」，尚未將地下水位考慮進去，但地下水位為影響邊坡穩定重要因子之一，因此在未來可進行相關研究，將地下水位的影響加入於穩定性分析之中，可以增進結果準確性。此外，若所監測之邊坡在崩塌發生後，可計算崩塌面積、崩塌量，進一步瞭解崩場地擴大變遷之行爲方。

六、誌謝

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

參考文獻

1. ArcGIS 9.0 (2005) ESRI Ltd., Homepage. <http://www.esri.com/>, Accessed Nov 4, 2005.
2. Dai, F.C. and Lee, C.F. (2001) "Terrain-Based Mapping of Landslide Susceptibility Using a Geographical Information System: A Case Study", *Can. Geotech. J.*, 38, pp. 911–923.
3. Maidment, D.R. (2002) "Arc Hydro: GIS for water resources", ESRI Press, Redlands, Calif.
4. Huang, M.L. (2004) "Easy Profiler V9.0 User Guide", Homepage. <http://arcscripits.esri.com/details.asp?dbid=13688>, Accessed Nov 4, 2005.
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. 267-271.
6. U.S. NAVY (1982) "Foundations and earth structures" *NAVFAC Design Manual 7.02 Naval Facilities Engineering Command*, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C., 60 °
7. 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.
8. Achilleos, E. (1988). User Guide for PCSTABL5M, Joint Highway Research Report JHRP-8819, Purdue University, West Lafayette, IN.
9. Trimble (2005) Trimble Navigation Ltd., Homepage. <http://www.trimble.com>, Accessed Nov 4, 2005.
10. Visual Basic.NET (2005) Microsoft Corporation., Homepage. <http://msdn.microsoft.com/>, Accessed Nov 4, 2005.
11. Xie, M., Esaki, T., Zhou, G., and Mitani, Y., (2003) "G.I.S.-Based Three-Dimensional Slope Stability Analysis and Landslide Hazard Assessment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Vol. 129, No. 12, pp. 1109-1118.
12. Xie, M., Esaki, T., Cai, M., (2004) "A GIS-based Method for Locating the Critical 3D Slip Surface in a Slope", *Computers and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 267–277.
13. 朱聖心 (2001), 「應用地理資訊系統製作地震及降雨所引致之山崩危險圖」, 國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
14. 曾義星、史天元 (2002), 「三維雷射掃描技術及其在工程測量上之應用」, 土木水利。
15. 鄭傑銘 (2001), 「應用 GIS 進行豪雨及地震引致山崩之潛感性分析」, 國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
16. 蕭國鑫、劉進金、游明芳、曾義星 (2005), 「航測與三維雷射掃描資料應用於九份二山地形變化分析」, 航測及遙測學刊, 第十卷, 第二期 第 191-202 頁。

表 1. 本研究建立之土壤種類對應地層強度參數表		
Table.1 Strength parameters of soil strata		
土壤種類	C (KPa)	ψ (Degrees)
級配良好礫石土 Gravel : well-graded (GW)	0	38
級配不良礫石土 Gravel : poor-graded (GP)	0	37
粉質礫石土 Gravel : with silty (GM)	1	34
黏質礫石土 Gravel : with clayey (GC)	1	31
級配良好砂土 Sand : well-graded (SW)	0	38
級配不良砂土 Sand : poor-graded (SP)	0	37
粉質砂土 Sand : with silty (SM)	20	34
粉質砂土-黏質砂土 Sand : sand-silt clayey (SM-SC)	14	33
黏質砂土 Sand : with clayey (SC)	11	31
低塑性粉土 Silt : low plasticity (ML)	9	32
高塑性粉土 Silt : high plasticity (MH)	20	25
低塑性黏土 Clay : low plasticity (CL)	13	28
高塑性黏土 Clay : high plasticity (CH)	22	19
含有機質粉粘土 Clay : mixture of organic silt or clay (OL)	15	23
含無機質粉粘土 Clay : mixture of inorganic silt or clay (ML-CL)	22	32

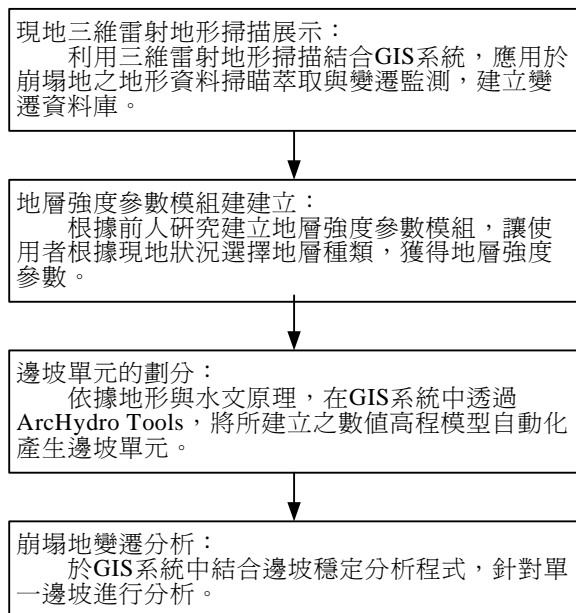


圖 1. 研究流程圖

Fig.1 Flow chart of this study for 3D laser scanning and stability analysis of slopes

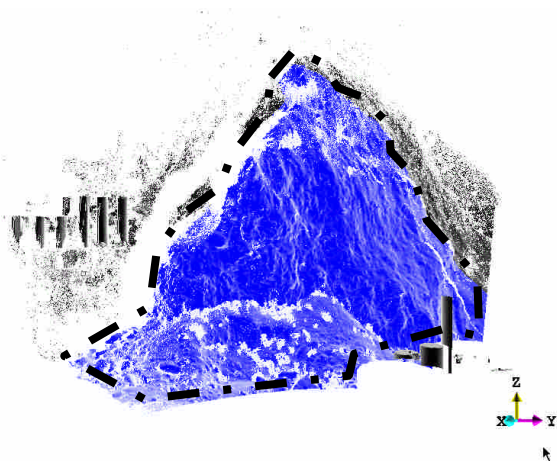


圖 2. 資料處理前與資料處理後之三維立體圖

Fig.2 3D plots before and after data processing

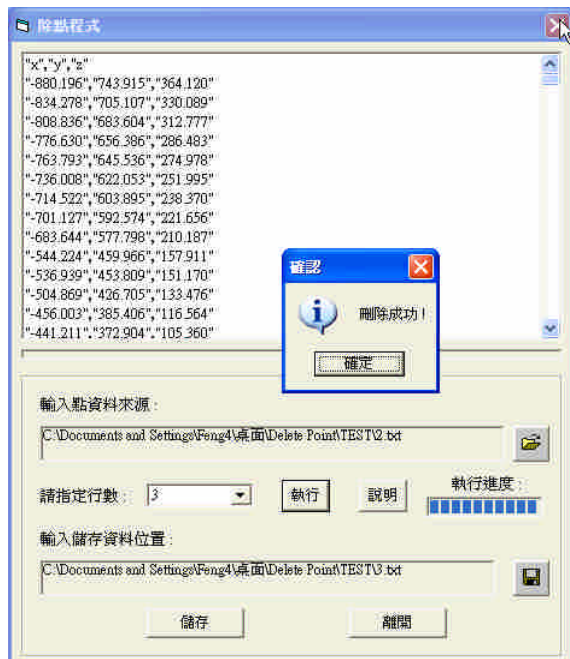


圖 3a. 資料除點程式執行界面

Fig.3a Data deletion interface

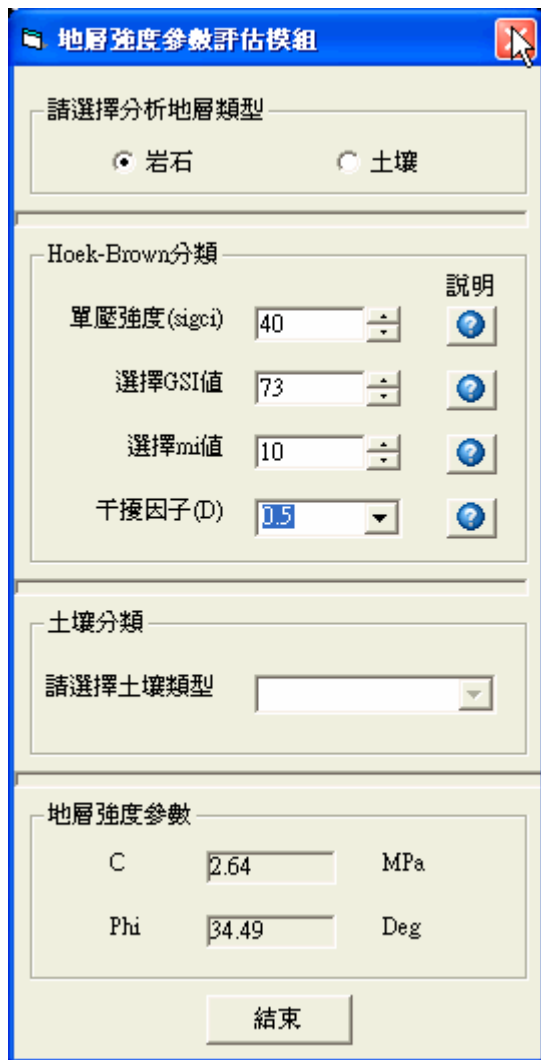


圖 3b. 地層強度參數模組執行界面

Fig.3b Strength parameter module interface

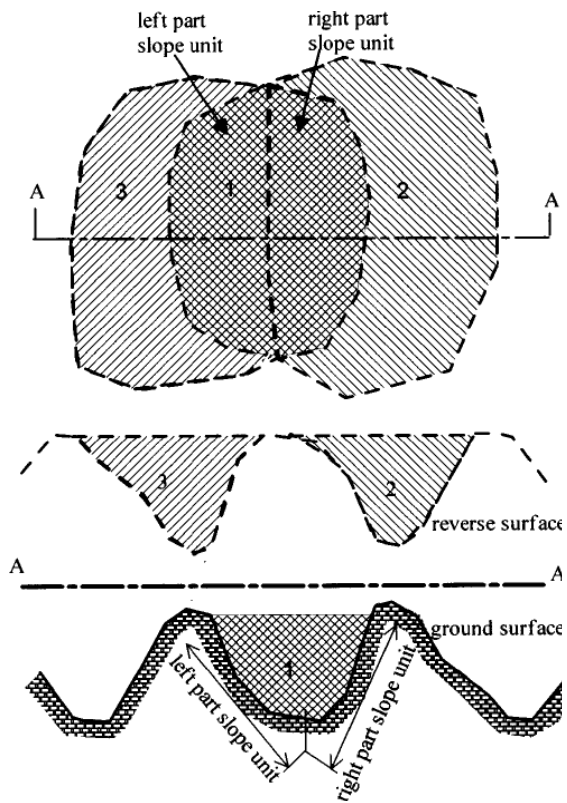


圖 4. 由集水區 DEM 與反轉集水區 DEM 劃分邊坡單元 (Xie, *et al.* 2003)

Fig.4 Slope unit derived from DEM and reverse DEM (Xie, *et al.* 2003)

圖 5. 邊坡穩定分析參數輸入界面

Fig.5 Data input interface for slopes stability analysis

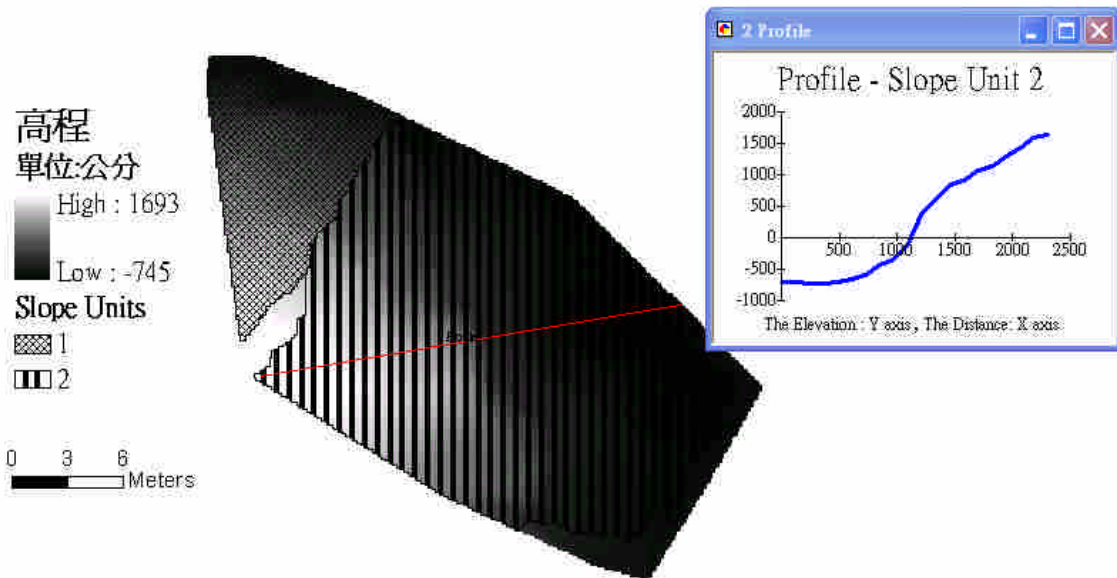


圖 6. 經由繪製剖面線產生地形剖面圖

Fig.6 Terrain profile form generation

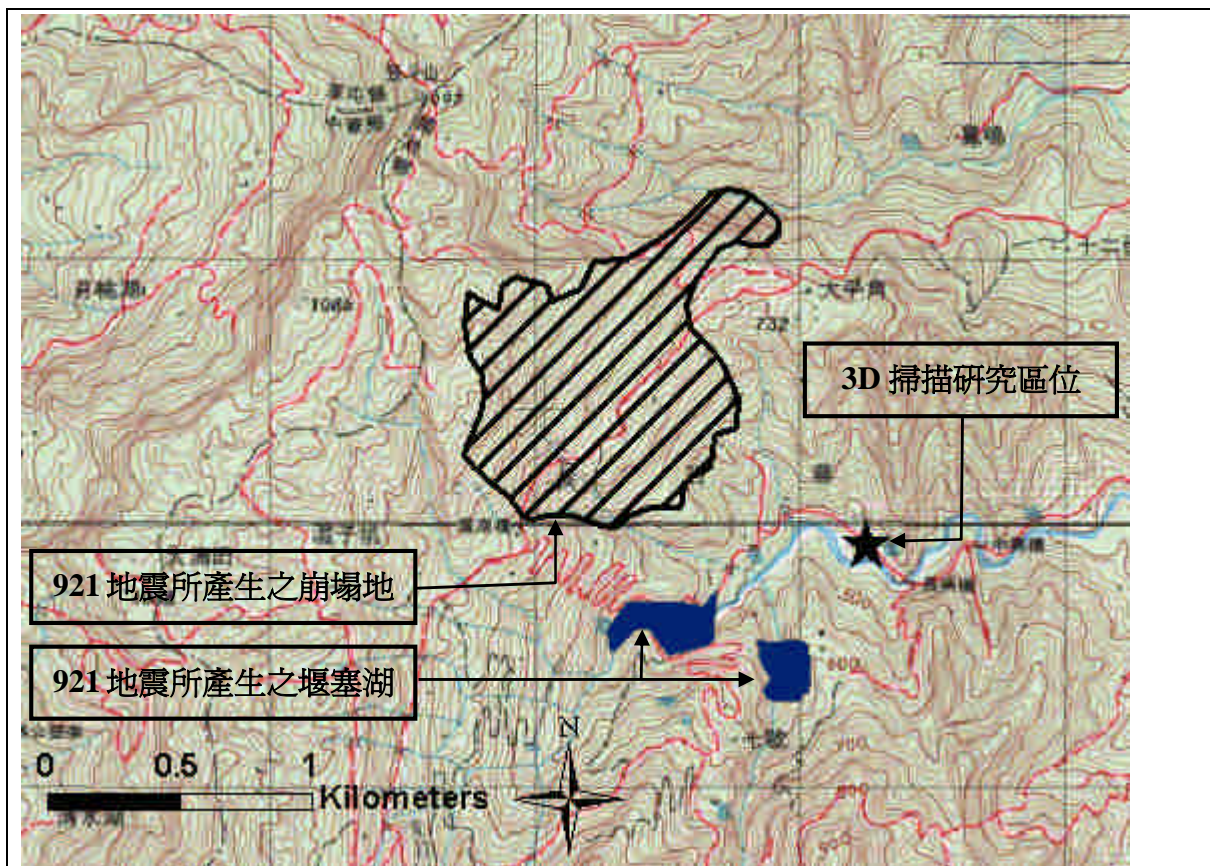


圖 7. 研究區位圖

Fig.7 Location of the research area

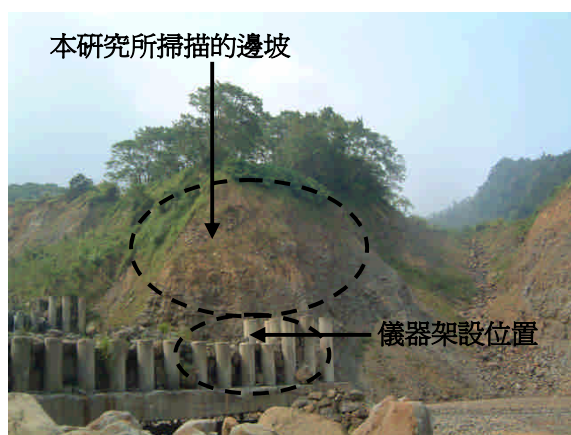


圖 8. 研究區位現地狀況

Fig.8 Location of 3D laser scanning

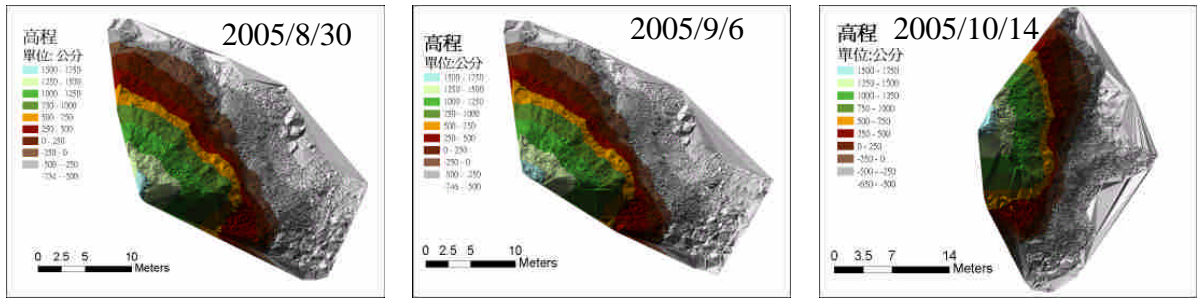


圖 9. 三次數值掃描所建立之不規則網格數值高程模型

Fig.9 Irregular grid DEM from 3D laser scanning data

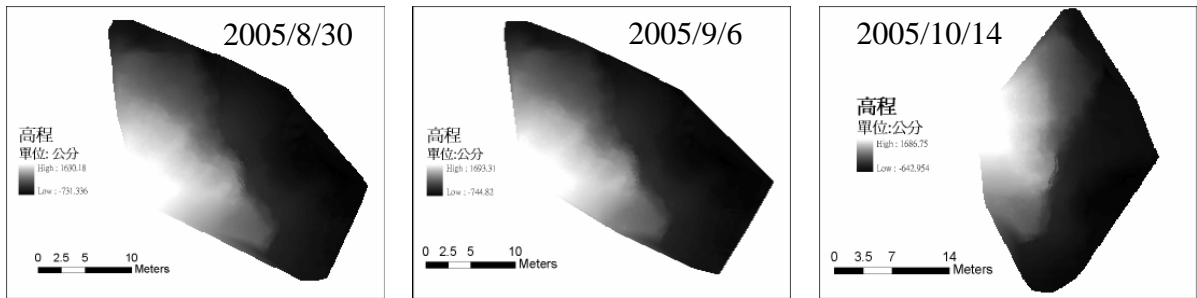


圖 10. 三次數值掃描所建立之規則網格數值高程模型

Fig.10 Regular grid DEM from 3D laser scanning data

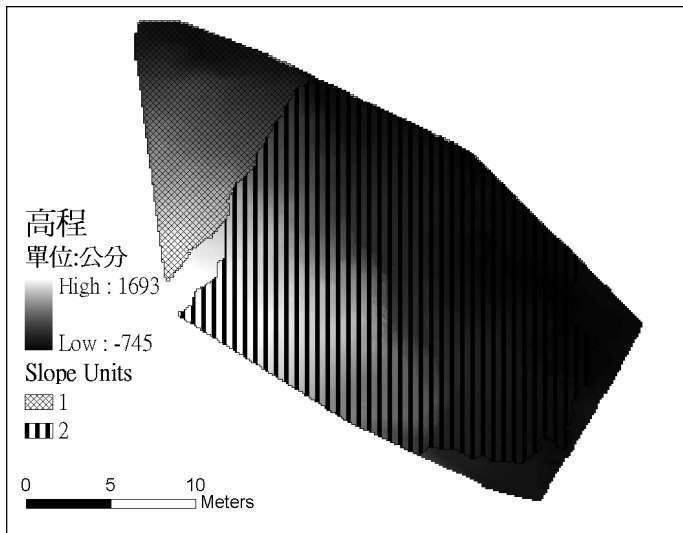


圖 11. 第二次數值掃描結果產生之邊坡單元

Fig.11 Slope units derived for the 2nd scan

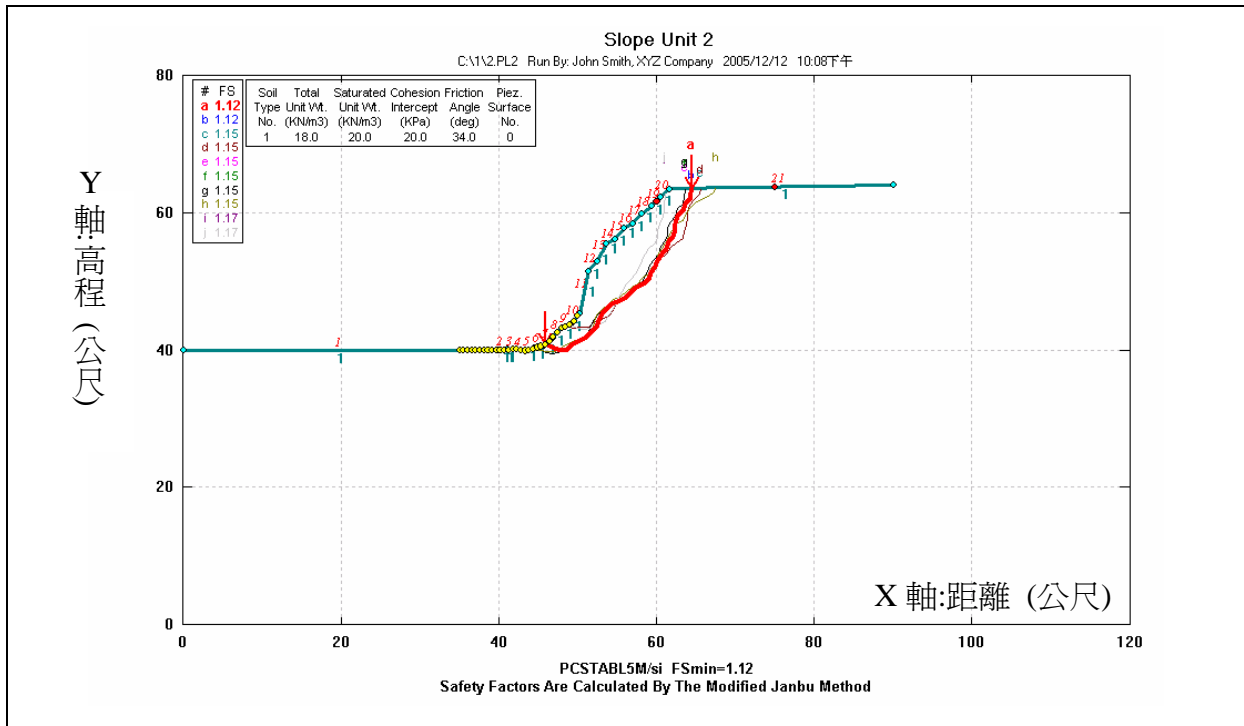


圖 12. Slope unit 2 之穩定性分析結果

Fig.12 Result of slope stability analysis for slope unit 2