



# 以數值地形及三維地質資料評析 石門水庫 匹亞崩塌地

## Assessment and Analysis the Pi-Ya Landslide in Shihmen Watershed by Using DEM and 3-D Geological Data

蕭震洋 Cheng-Yang Hsiao / 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 研究員

李易叡 Yi-Rui Lee / 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 研究員

周立生 Li-Sheng Chou / 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 研究員

近年在全球氣候變遷影響下，造成極端天氣越趨顯著，使得臺灣山坡地之崩塌災害現象頻生。本文以石門水庫集水區匹亞崩塌地為例，使用高精度 DEM 判識崩塌地地表特徵；接著，使用 PIV 方法分析坡地潛在滑動量；再者，以不同期數值地形分析不穩定土砂所在區域及量體；最後，參考地質資料建立三維地質模型，分析崩塌之機制及可能成因。研究成果可提供政府相關單位後續治理或監測規劃之參考。

### ABSTRACT

In recent years, under the influence of global climate change, extreme weather has become more and more obvious, resulting in the frequent landslides of hill slopes in Taiwan. This paper took the Pi-Ya landslide in Shihmen Reservoir watershed as an example, using high resolution DEM to identify landslide surface features. And the PIV method was used to analyze the potential slips on the hill slope. In addition, also compared the DEM in different periods to analyze the unstable sediment area and volume. Finally, this paper used geological data to establish a 3D geological model, analyzing the mechanism and potential causes of landslide. The research results can provide reference for government agencies as follow-up governance or monitoring plans.

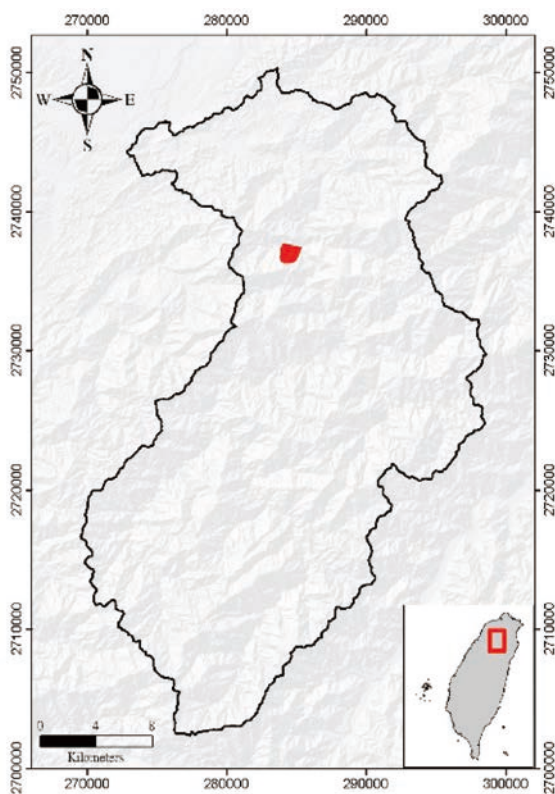
### 前言

山坡地約佔台灣全島面積 73%，且人口密度高，使平地土地不敷使用，山坡地開發成為常態，但山坡地常有潛變、滑動、崩塌等問題，同時，受氣候變遷影響，極端天氣出現頻率加劇，致使山坡地經常發生崩塌。以往採用等高線、分層設色、彩繪明暗圖或正射影像判釋崩塌地表特徵時，常受陰影影響，而導致判釋或分析成果有所遺漏。

山區之地質狀況往往比平地或是丘陵區複雜，因造山帶除了地層會受到擠壓產生大規模之變形及構造，地層之岩性也會受到不同程度的變質作用，而山區的侵蝕作用較高，形成複雜的地形，也增加了整合現地地質資料之難度。山區地質資料的取得一般透過現地之露頭調查、鑽井或是槽溝開挖，間接的地下地質則透過地物探勘（震測、地電阻剖面）方式推估，呈現上通常是將分散之調查點位整合，依開發之需要繪製不同比例尺之區域平面地質圖，並搭配線狀分布之地質剖面或立體地層柵狀圖。這些地質資訊除了不易與不同工程界面人員溝通之外，也不易分析坡地之崩塌機制及坡地之地下各地層細部位態及滲水等狀況。

近年來，空載光達已普遍使用於地形測繪，其具有高精度及高密度特性，故能不受陰影影響，提供具有地表細節之數值地形（Digital Elevation Model, DEM），同時，視覺化展示工具 MVS（Mining Visualization System）能以鑽井岩芯及露頭位態資料建構真實三維之地下地質模型。鑑此，本文應用空載光達掃瞄點雲及同步航拍所產製 95 年 6 月、97 年 11 月、98 年 10 月、99 年 11 月、

101年10月及104年7月等共計6期之DEM及正射影像，另，地質岩性及位態資料則參考地調所五萬分之一地質圖，進行後續崩場地相關分析。首先，以DEM分別計算地形開闊度及坡度後，產製各期紅色立體地圖，再進行崩塌表面特徵判釋，接著，透過質點影像測速法（Particle Image Velocimetry, PIV）計算前、後兩期紅色立體地圖間之水平位移場，進而評估崩塌位移量，再者，分析前、後兩期數值高程模型間之地形差異量，藉以評估不穩定土方區位及量體，最後，以MVS配合地質資料建構三維地質模型，進而分析崩塌可能成因，並嘗試套疊含地表高程之紅色立體地圖及正射影像，後續可供相關治理機關訂定工程治理及監測等策略之參考。



(a) 匹亞崩塌地與石門水庫集水區



(b) 匹亞崩塌地與鄰接道路

圖 1 研究區域位置圖

## 研究區域概述

本文以鄰接台7線之匹亞崩塌地為研究區域（如圖1），其位於石門水庫榮華壩下游之匹亞溪集水區，96年至97年間接連數起颱風造成坡面左右兩側之蝕溝寬度擴大，並皆持續向源侵蝕，至101年蝕溝兩側邊坡失穩，致使崩塌持續擴大（如圖2），已影響有多戶居民之內奎輝原住民部落惟一聯外產業道路及石門水庫重要道路台7線之用路人安全，且大量泥砂移運至下游，亦影響石門水庫營運。

## 崩塌地表特徵判釋

崩塌地表特徵可從現地調查或遙測資料判釋得知<sup>[1,2]</sup>。然而，現地調查雖正確性高，但常有見樹不見林之憾，而早期解析度較差的遙測資料，隨著科技日漸提升，目前已可應用空載光達取得高密度及高精度的地形三維點雲資料及同步航拍影像，足以應用於地形及地貌判釋。

崩塌發展的過程中，會在地表留下地形徵兆，故可使用適當的工具或方法判釋具有崩塌潛勢的地點，本文以千葉達朗及鈴木雄介<sup>[3]</sup>提出建議方式，以DEM製作紅色立體地圖，並判釋崩崖、裂隙及蝕溝等崩塌地形特徵，藉以圈繪潛在崩塌區。紅色立體地圖其結合陰影及分層設色圖的優點，不受模擬光照方向及陰影影響，能正確呈現地形凹凸之特徵，已廣泛應用於地形學及地質學等領域。橫山隆三等人<sup>[4]</sup>先以DEM依序分別計算各位置之突出地面及深入地底的程度，並加以結合（如圖3），能以立體感顯示地形平緩或傾斜等特徵，亦稱為地形開闊度圖（Opennesses）。千葉達朗及鈴木雄介<sup>[3]</sup>則進一步整合地形坡度（Slope）產製紅色立體地圖（如圖4），更便於以肉眼輕易地判釋出地表特徵。爾後，許多研究人員<sup>[5-10]</sup>在紅色立體地圖的技術概念下，嘗試用解析度更好的地形資料、各式的坡度計算方法、地形開闊度的轉換函數、顯示色彩及值域，都是為能提高地形特徵細節，藉以增加地形特徵判釋或分類的豐富度及正確性。

自95年起即可以紅色立體地圖（如圖5）判釋出匹亞崩塌地之崩崖、裂隙及蝕溝等崩塌地表特徵，97年11月時，兩條蝕溝已有向源侵蝕及向下刷深現象，



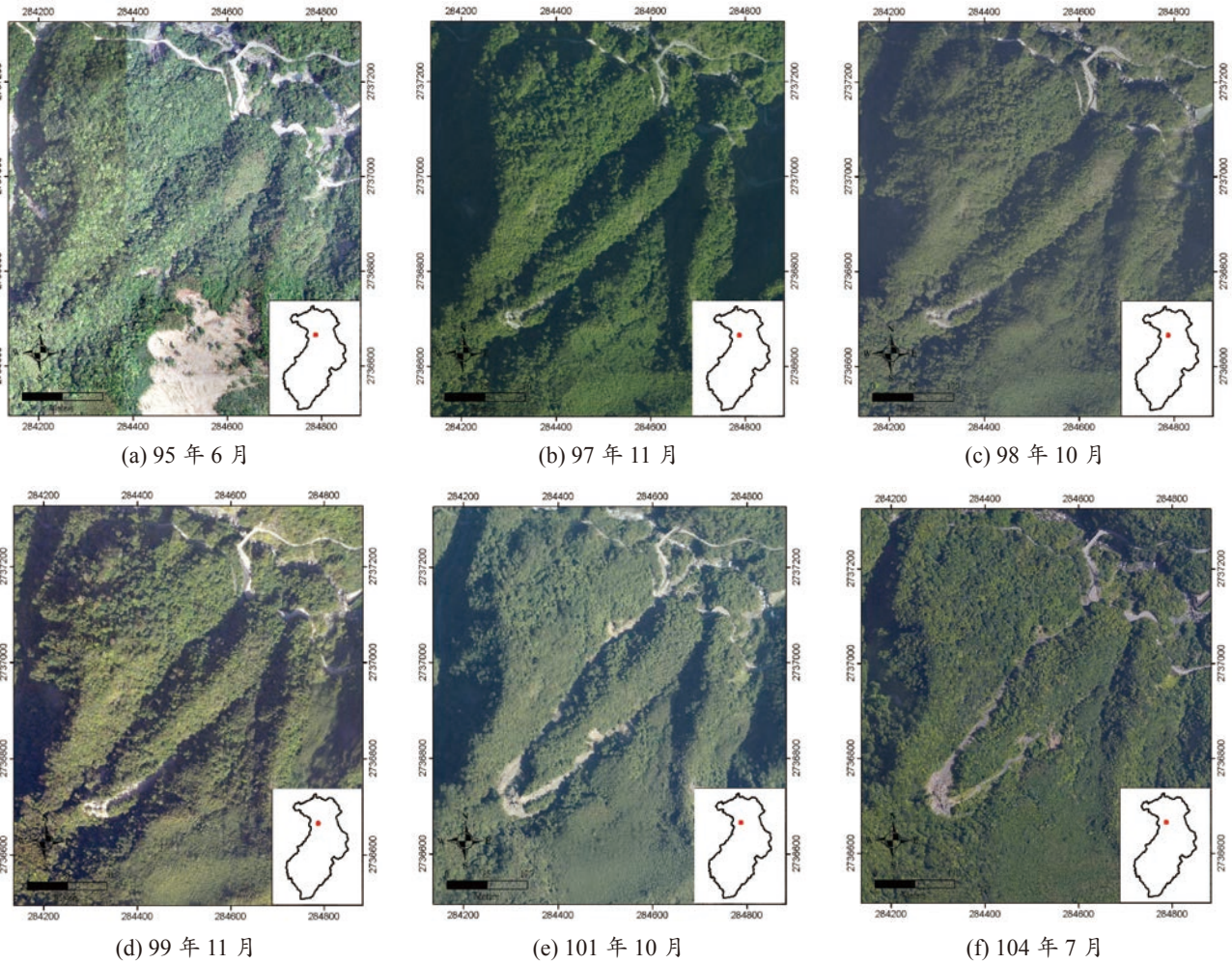


圖 2 研究區域歷年正射影像圖

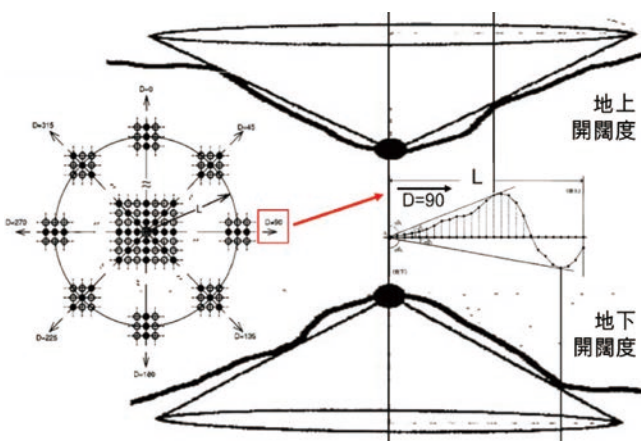


圖 3 地形開闊度計算概念圖 (改繪自橫山隆三等人<sup>[4]</sup>)

101年10月地表裂隙特徵已明顯增多且蝕溝有明顯擴寬現象(如圖6),顯示紅色立體地圖較正射影像更適合做為崩塌發展過程之地表特徵判釋資料來源。

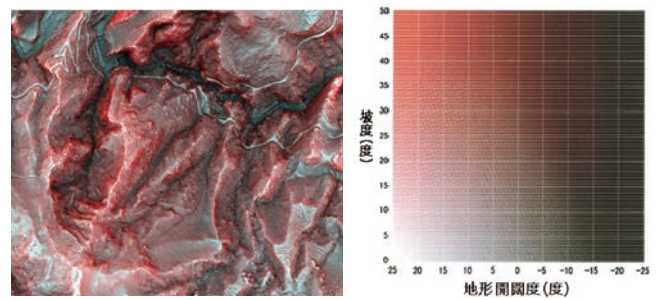


圖 4 紅色立體地圖示意圖 (右圖為配色原則建議,摘自千葉達朗等人<sup>[11]</sup>;左圖紅色立體地圖係本文產製,以匹亞崩塌地為例)

### 崩塌滑動位移量評估

崩塌滑動位移量可透過現地佈設地表伸縮儀、傾斜儀及傾斜管等儀器,即時監測地表及地中之滑動時間及移動距離,或透過雷達、光達或影像等遙測資料,比對前、後兩期地表特定點的移動距離,若坡面



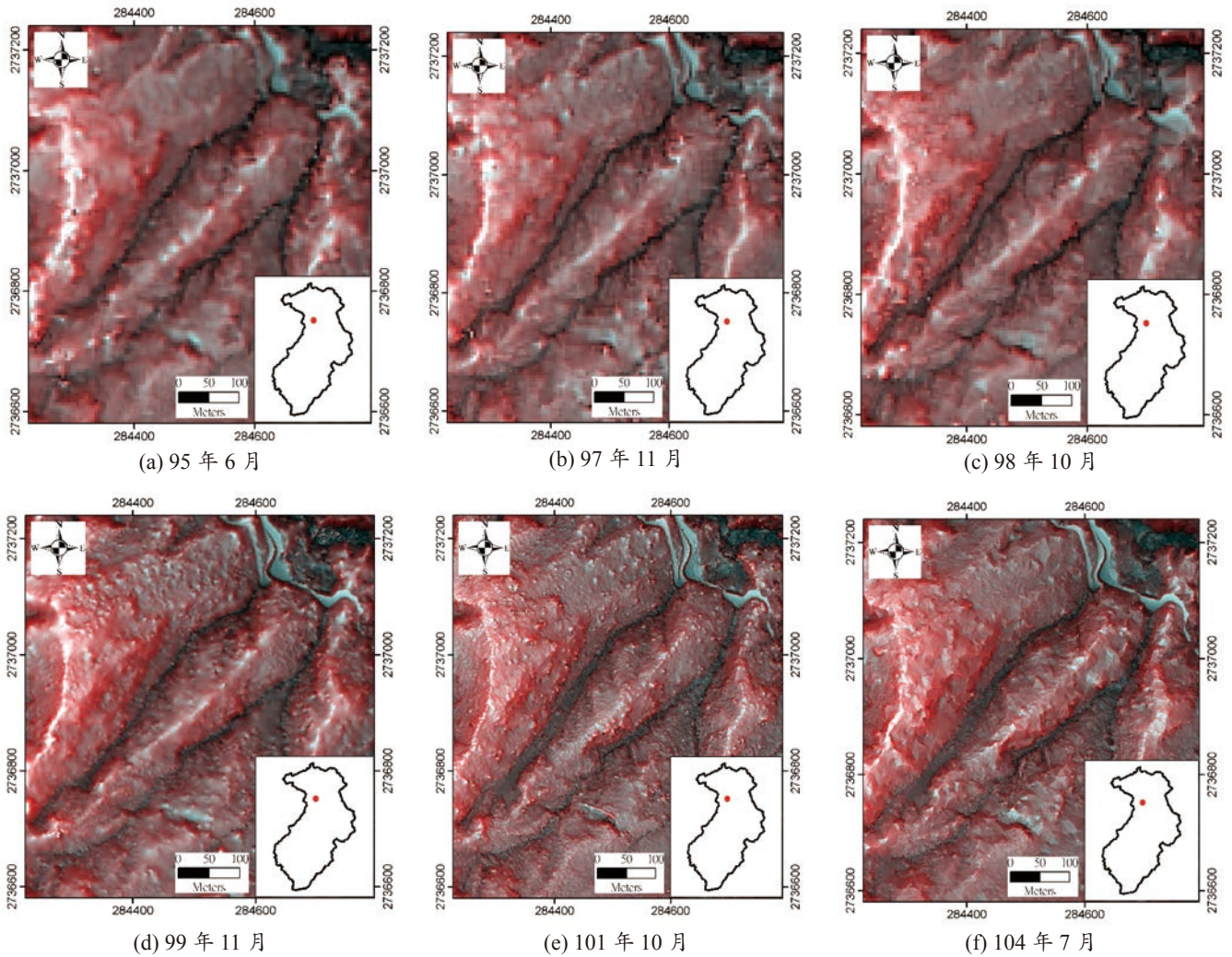


圖 5 研究區域歷年紅色立體地圖

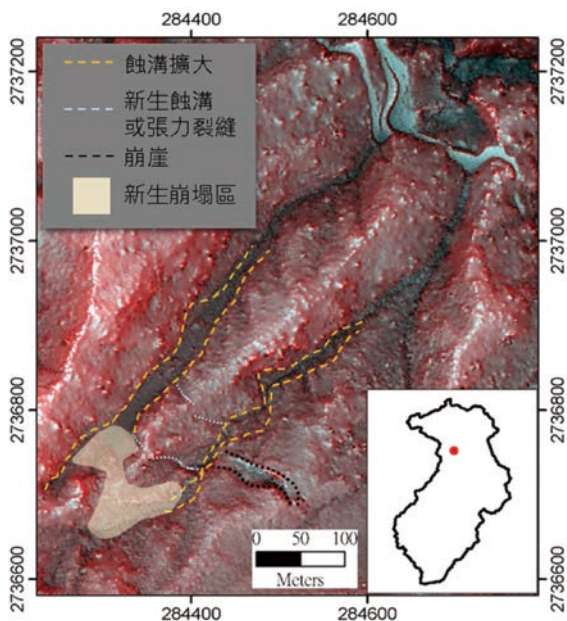


圖 6 以 101 年 10 月紅色立體地圖進行地表特徵判釋成果圖

恰好有適當樹種，亦可採用樹年輪判斷可能滑動時間 [12-14,1]。但儀器架設後始有監測資料紀錄，且不易有立即成效，坡面上又並非一定有適當樹種，而遙測技術中，以能穿透植被之光達較能取得地表資訊進行崩塌滑動位移量評估。

本文採用 PIV 分別運算並疊加各期紅色立體地圖或正射影像之各像元相關係數，可獲得機率密度向量場分佈，故能有效降低地表上植被等雜訊影響，並以機率密度場最高點為像元位移方向及距離，推算各像元運動方向及距離（如圖 7），故可分析崩塌地之變動方向及距離。

比較紅色立體地圖（99 年至 104 年等三期）及正射影像（95 年至 104 年等六期）分別之 PIV 分析成果（如圖 8 及圖 9），正射影像可能由於拍攝使用相機、



時間、航線、日照皆有所不同，且並非屬於使用同期地形資料進行微分糾正 (Differential Rectification) 之真實正射影像 (True Ortho)，導致各期正射影像有些微變形、陰影及色差，使 PIV 誤判地貌有所變化，故產生許多雜訊向量、或獲得受到照片立體扭曲所致反映影像變形之向量場 (如圖 8)；反觀使用同樣坐標系統之各期 DEM 製作紅色立體地圖，因不受模擬光照方

向及陰影影響，能在相同位置上顯示地形特徵，故 PIV 雜訊較低、向量場一致性較高，且能夠反映地形特徵之變位量，利於進行崩塌滑動位移量評估，但仍受到 DEM 製作品質、樹高扣除差異所影響。

本文根據原始影像解析度，與實際空間長寬比決定合適分析網格大小、向量機率密度場大小、濾除原則等，決定航照 PIV 分析採用參數 (如表 1)。

由圖 8 觀察可發現 97 年 11 月至 104 年 7 月共五期航照之前後期航照間差異非實際地形變化導致，為航照拍攝航高、角度、日照、陰影、鏡頭參數等造成影像拍攝不均勻扭曲，因此 PIV 判釋結果向量場雖一致但非正確向量場。由圖 9 觀察可發現 99 年 11 月、101 年 10 月、104 年 7 月三期 DEM 品質均略有差異，但整體而言構造明顯、判讀容易，經過 PIV 分析比對構造特徵移動狀況顯示之向量場，相對合理且方向一

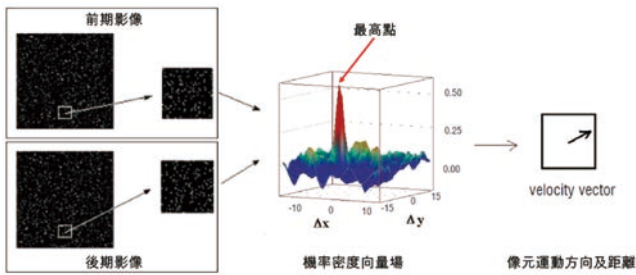


圖 7 PIV 原理說明圖 (改繪自 C. Brossard *et al.* [15])

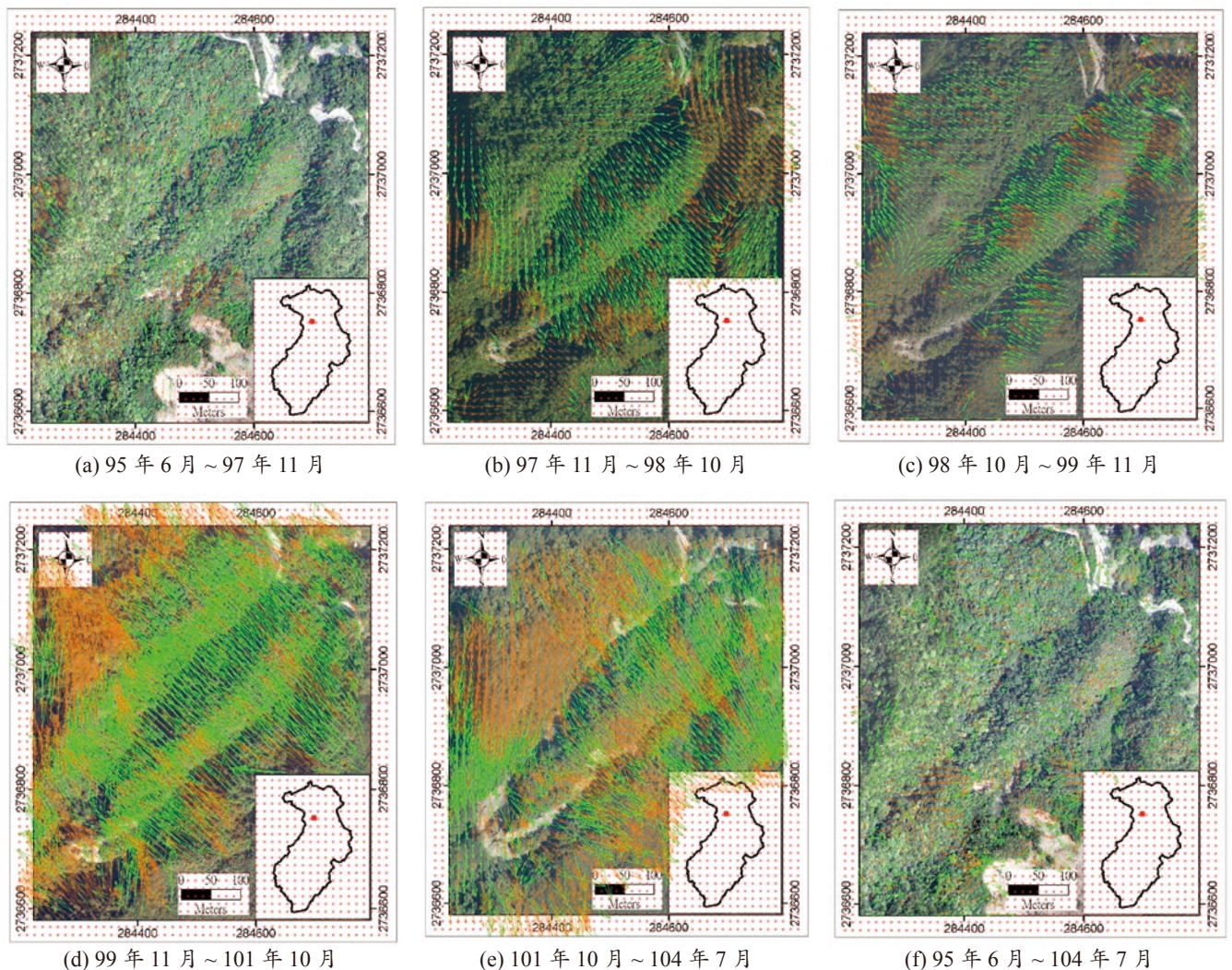
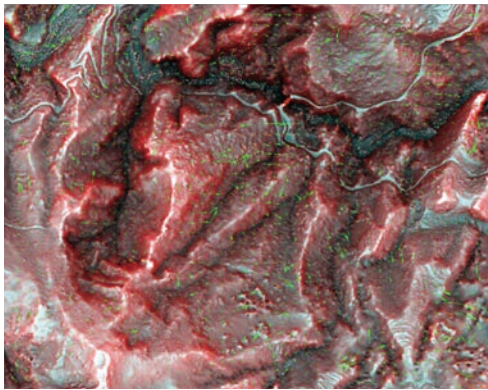


圖 8 研究區域前後期正射影像 PIV 分析成果 (以前期航照為底圖)

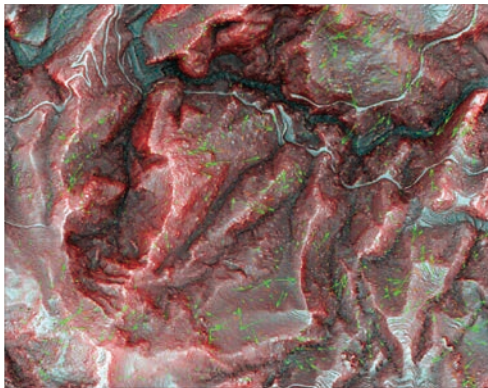


表 1 本文質點影像測速法 (PIV) 分析使用參數表

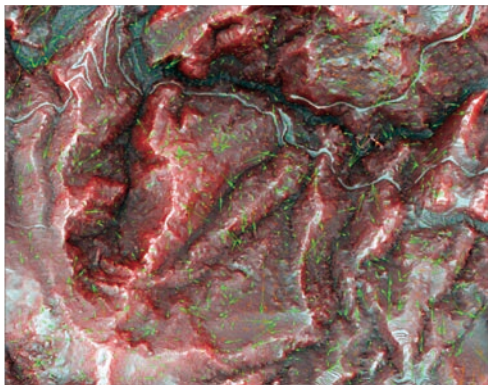
參數項目	航照圖採用數值	紅色立體地圖採用數值
向量場分析網格距	64 pixels	128 pixels
機率密度場搜尋範圍	128 × 128 pixels	64 × 64 pixels
影像長寬	1620 × 1824 pixels	1468 × 1253 pixels
實際長寬	570 × 660 公尺	1468 × 1253 公尺
像素與長寬比	3 pixels / m	1 pixel / m
向量濾除原則 (Filter)	航照圖濾除原則	紅色立體地圖濾除原則
方向	不濾除	不濾除
向量大小標準差 (STD)	2 倍標準差以上	2 倍標準差以上
中值濾波 (Local Median Filter)	門檻 (Threshold) : 3	門檻 (Threshold) : 1



(a) 99 年 11 月至 101 年 10 月分析結果 (99 年 11 月 DEM 為底圖)



(b) 101 年 10 月至 104 年 7 月分析結果 (101 年 10 月 DEM 為底圖)



(c) 99 年 11 月至 104 年 7 月分析結果 (104 年 7 月 DEM 為底圖)

圖 9 研究區域前後期紅色立體地圖 PIV 分析成果

致，崩塌區域以外分析判釋之移動向量甚微，主要向量雜訊來自於 DEM 品質差異，如空載光達掃瞄點不足造成椎狀平滑化影響兩期間 PIV 分析結果、樹高扣除方式不理想造成雜訊，或河道、道路因空載光達點雲分布差異造成邊界線性略有偏移等。以三期 PIV 分析判釋結果比較，99 年 11 月與 101 年 10 月等兩期 DEM 品質較為一致，崩塌周圍向量方向均朝向蝕溝發育，冠部崩崖區域之向量主要與坡向及蝕溝發育方向相符合，經濾除 2 倍標準差雜訊後，向量大小多集中於 0 ~ 3 公尺，尚屬合理；而 104 年 7 月 DEM 則因植被下品質不一，故 101 年 10 月與 104 年 7 月、99 年 11 月與 104 年 7 月之 PIV 分析結果，向量雜訊相對較多，但趨勢仍大致類似，惟 101 年 10 月至 104 年 7 月間之地表變異不大，故向量並不顯著。

### 不穩定土方區位及量體分析

為判斷不穩定鬆散土方之區域及其量體，可比對崩塌裸露地範圍內的地形高程差異量，一般採前、後期數值地形相減方式 (如圖 10)。但各期數值地形之間可能存有系統性的誤差，在做差異比對前，應於相同基準下比較同性質資料才具意義，此時應利用同樣條件，消除共同誤差，亦稱之為差分 (Differential)，例如比較穿著不同鞋子的兩個人之身高差異，需要知道兩個人穿鞋時的高度 (或高度差) 及兩雙鞋的高度差等兩個條件，即可計算兩個人正確的身高差異，鞋的高度差就是系統性的差量 (如圖 11)。也就是說可以在沒有高程變動的地點先計算出前、後兩期數值地形的高程系統性差量，就能在增加或扣除系統差量後，計算出前、後兩期間變動區域的正確高程差異量。

本文採用水保局<sup>[16]</sup>及 Hsiao *et al.*<sup>[17]</sup>所提出不同期產製數值地形比對前之差分校準法 (Procedure of calibrating multi-temporal DEMs)，先將數值地形校準後，才進行前、後期地形差異分析，即可正確判斷崩塌料源及堆積等不穩定鬆散土方之區域及其量體。

各期間地形高程差異分析結果如圖 12 及表 2。95 年 6 月至 104 年 7 月間，一開始僅坡頂有些微崩塌並運移至鄰近下方區域堆積後，蝕溝逐漸往上游襲奪，兩側蝕溝有部分土砂向下游運移，至 99 年 11 月至 101 年 10 月間，主要崩塌區域位於兩側蝕溝上游匯集源



頭處，且蝕溝兩側坡面有多處崩塌產生，下刷最深達 15 m，且外移土砂量達 24,909.1 m<sup>3</sup>，為 95 年至 104 年評估期間最大的土砂運移事件，外移土砂約占評估期間總量的 68%，經查詢中央氣象局各颱風事件累積降雨量，可能是 101 年蘇拉颱風於 8 月 1 日至 3 日間，由於每日於該崩塌地皆有降下超過 200 mm 以上的累積雨量所造成，101 年 10 月至 104 年 7 月間，前期滯

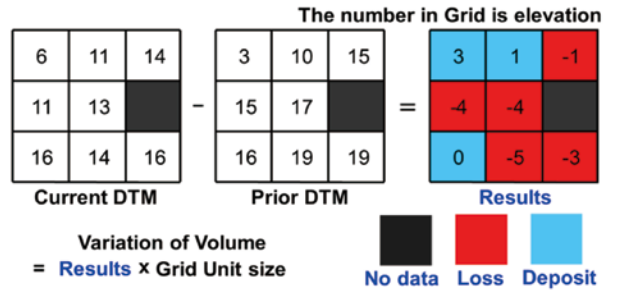


圖 10 前後期 DTM 比對方式示意圖 (摘自 Hsiao et al. [17])

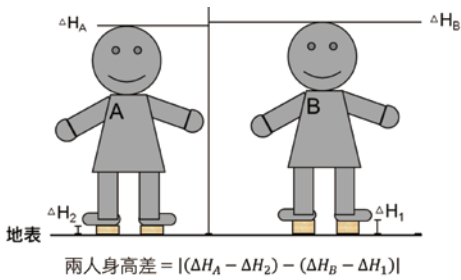


圖 11 比較兩人身高差前須先各別扣除各自的鞋子高

表 2 研究區域前後期地形高程差異量分析成果

期間	堆積區		下刷區		移出量 (m <sup>3</sup> )
	堆積最深 (m)	堆積量 (m <sup>3</sup> )	下刷最深 (m)	下刷量 (m <sup>3</sup> )	
95 年 6 月 ~ 97 年 11 月	4.2	1,686.2	-10.6	-4,543.4	-2,857.2
97 年 11 月 ~ 98 年 10 月	1.7	124.6	-8.7	-5,247.6	-5,123.0
98 年 10 月 ~ 99 年 11 月	4.5	591.5	-4.6	-1,442.3	-850.8
99 年 11 月 ~ 101 年 10 月	10.7	17,970.2	-15.0	-42,879.3	-24,909.1
101 年 10 月 ~ 104 年 7 月	2.9	1,115.0	-6.6	-4,216.3	-3,101.3
95 年 6 月 ~ 104 年 7 月	10.1	17,401.6	-16.9	-54,243.1	-36,841.5

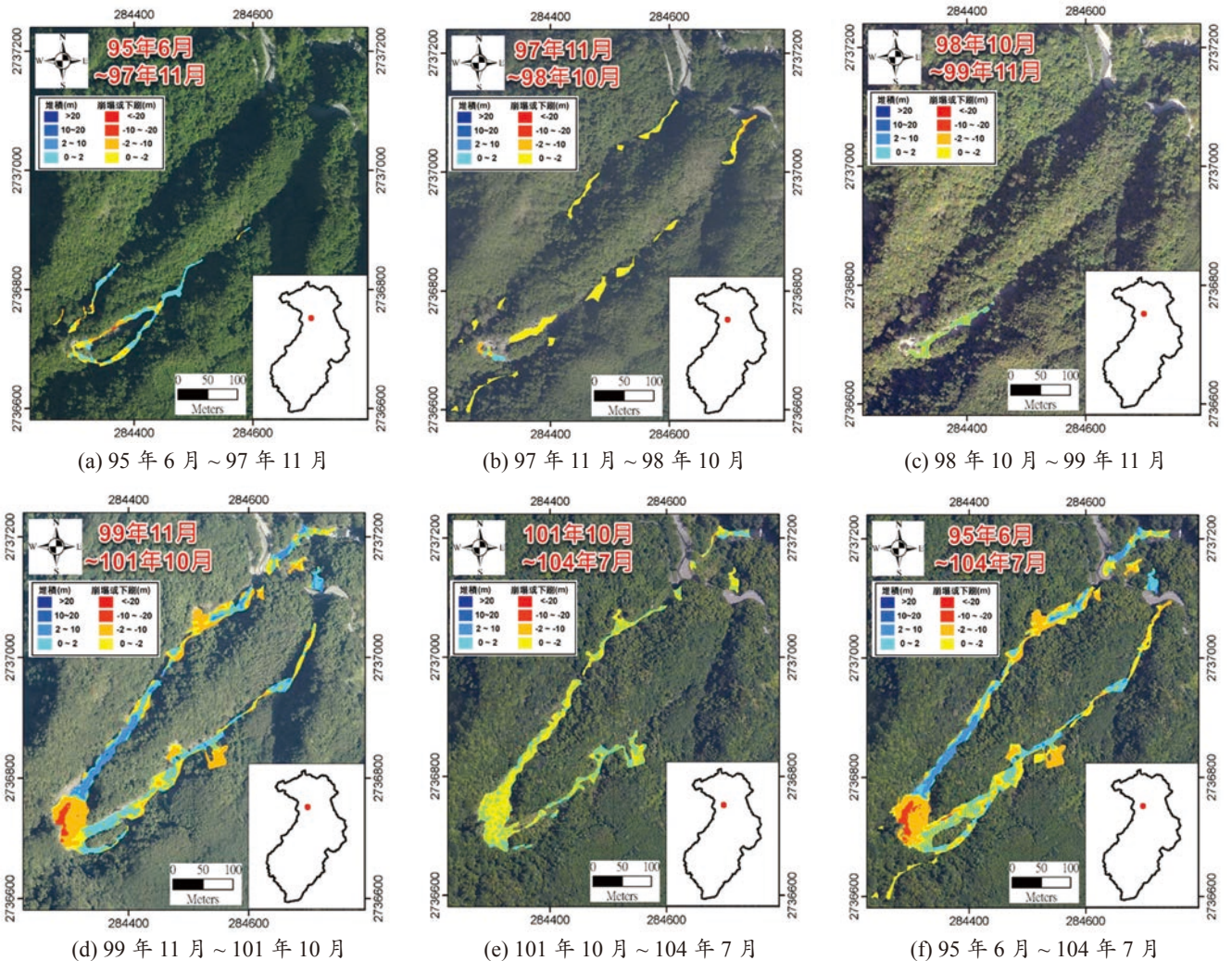


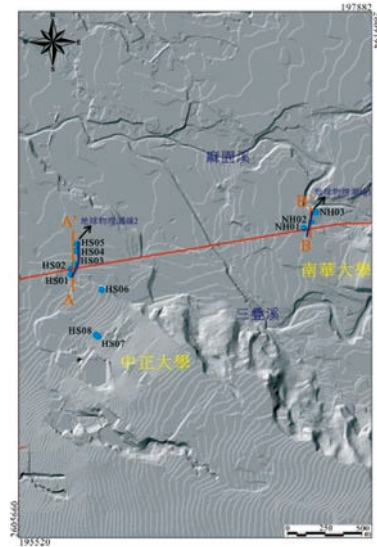
圖 12 研究區域前後期地形高程差異分布圖

留於蝕溝內的不穩定土方仍持續向下運移。104年7月後，仍有多數不穩定土方仍滯留於蝕溝上游側，堆積長度達200m，且平均高度高於2m，未來若遭受豪雨侵襲，易造成蝕溝下刷導致土砂往下游移動，及引致蝕溝兩側外擴，應特別關注。後續將可透過三維地質模型，探討崩塌可能成因，可做為相關單位防減災參考之用。

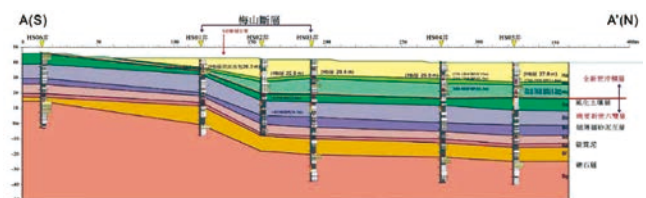
### 三維地質模型

傳統地質圖資的展示方式主要是以平面圖為主，包括等高線圖、等物理量分布圖或是地層等深線圖，要了解現地的地下地質構造則是以剖面圖資作為展示之手法，例如地形剖面圖、構造平衡剖面、震測剖面、地電阻分布圖以及鑽井之地層柵狀對比圖等等，隨著地理資訊系統(GIS)的發展與三維資料軟硬體處理技術的進步，已可將複雜的平面地質圖資或大量的地質調查資料以三維立體化、視覺化、數量化等方式呈現，經由GIS系統將其數化並整合之後，藉由三維視覺化軟體的展示及建模便可以呈現出現地之三維地下構造。三維地質模型的建置不僅可提供專業地質工程人員以數值化的地質資訊與不同工程界面人員溝通；對於重要工程建設所面臨的地質問題，透過三維視覺化的處理，可將複雜的地質議題能簡易的讓社會大眾了解，增加政府與民眾的溝通效率，亦能滿足人民知的權利。三維地質模型具有易於觀察地層、岩性、地下水或構造於面狀分佈合理性，並可依據缺疑部分規劃新增孔位及深度。

以往鑽井規畫是以線性分布為主，建立地質鑽井剖面圖(如圖13)，或結合數條線狀剖面建立立體地層柵狀圖(如圖14)，但若是規畫面域不夠廣泛，便不易與三維的地形資料結合，也不易計算量體。現藉由MVS，即可將面狀分布之鑽井地下資料建立成三維地質模型(如圖15)，因此在鑽井位置之選取上，無需受限於條帶或是線狀分布，反而可以針對調查區域進行廣域、平均分布的鑽井選址。此外，透過結合地形及三維地質模型，更可達到分析崩塌成因、崩塌材料、崩塌可能深度及潛在量體估算之目的。鑑此，本文使用美國C-Tech公司所發展的MVS軟體作為三維地質模型的建置與展示工具，是一套真實三維(true 3D)



(a) 鑽井位置分布圖



(b) A-A' 鑽井岩心柵狀剖面圖

圖 13 鑽井位置及剖面示意圖 [18]

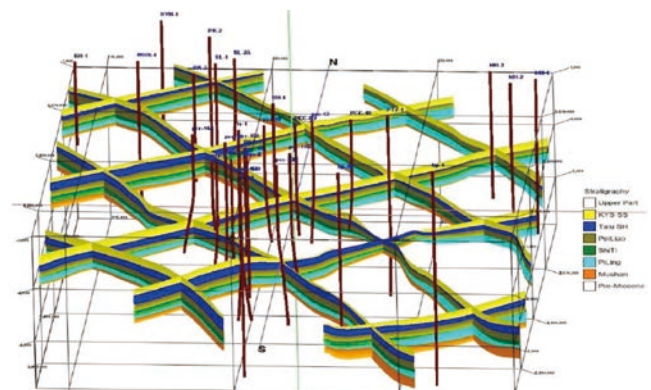


圖 14 斜交狀之立體地層柵狀圖及井程分佈圖 [19]

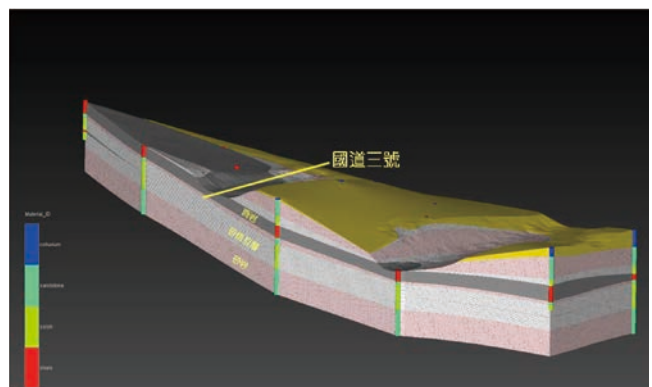


圖 15 利用國道三號鑽井資料建立之三維地質模型  
(摘自財團法人中興工程顧問社防災中心網頁 [20])



視覺化分析展示工具，由於 MVS 能與 GIS 系統（如 ArcGIS）進行無縫整合，使得建置在空間資料庫中的地質資料，能直接作為建立三維地質模型及分析資料來源，並可達到 (1) 真三維 (True 3D) 視覺化分析及顯示；(2) 三維斷層圖塊產生；(3) 三維地質資料空間克利金 (Kriging) 統計分析。

三維地質模型雖可結合高精度 DEM，直觀的呈現現地之地層於地表之分布情形，也可從地質模型剖面中判斷其滑動機制。然而，本研究區域因受限於鑽孔範圍之數量及深度不足（如圖 16），且鑽孔點位並未涵蓋三維地質模型範圍，故先參考地調所五萬分之一地質圖中地質剖面圖，因本研究區及鄰近範圍位於插天山背斜之軸部及西翼（圖 17），依此初步建立三維地質模型，藉以確定區域之地層位態分布情形，接著，因本區地層為漸新世乾溝層，岩性為硬頁岩夾薄至厚層砂岩，同時，位於本區鄰近之鑽井岩心，主要為厚層頁岩偶夾薄層粉砂岩，據此粗估頁岩及粉砂岩之厚度比例，建立三維地質模型，如圖 18 所示。同時，地質模型可結合 DEM、正射影像（圖 19）或是紅色立體地圖（圖 20）進行地表之地形判釋及呈現，也可呈現地層岩性於地表面之分布情形（圖 21）。在模型中也可切割剖面觀察坡面與地層之關係，判斷其滑動機制，如圖 22 所示。

若鑽孔點位能平均分布於調查區中，便可降低推估之不確定性，在三維地質模型中進一步建立地表崩

積層及土壤層之厚度，進而可配合各期歷史 DEM，計算前後期間之崩塌主要岩層及量體，甚至可能可做為歷史崩塌模擬的材料參數來源之一。但一般山坡地之調查受限於經費，僅有少量鑽孔數量，且深度常未達百公尺，故不易建立完整三維地質模型。若要建立深部地層分布之三維地質模型，則需間接透過地質剖面圖、岩層位態分布或是面狀分布之地球物理測線調查成果，此外，更可依此三維地質模型作為後續安排鑽孔增加調查數量、分布及深度之參考。

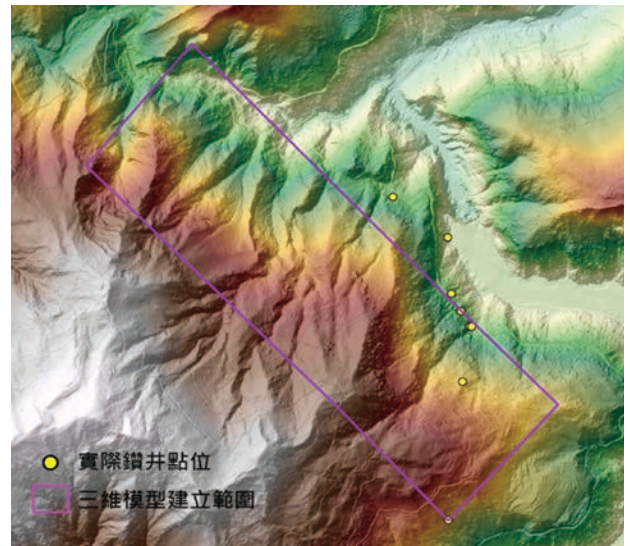


圖 16 鑽井點位與模型範圍分布圖

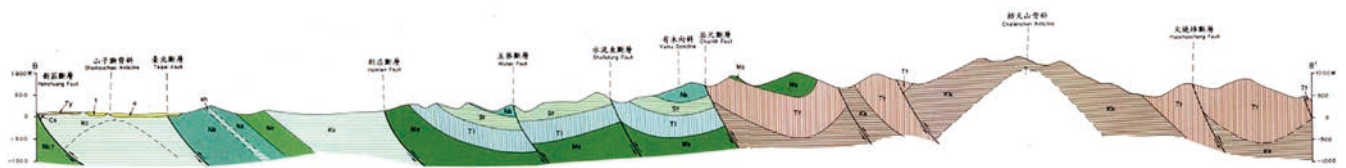


圖 17 研究區地質剖面圖（摘自地調所五萬分之一地質圖桃園圖幅<sup>[21]</sup>）

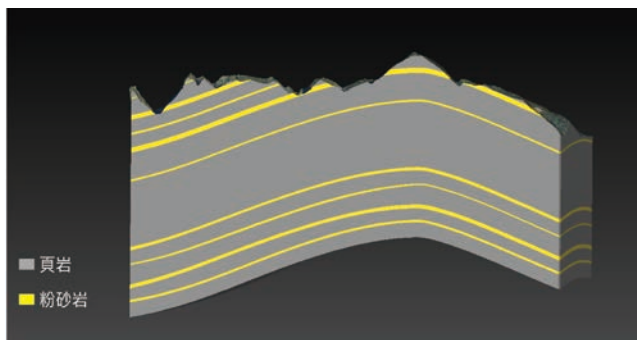


圖 18 參考地質剖面圖建立插天山背斜形貌之地質模型

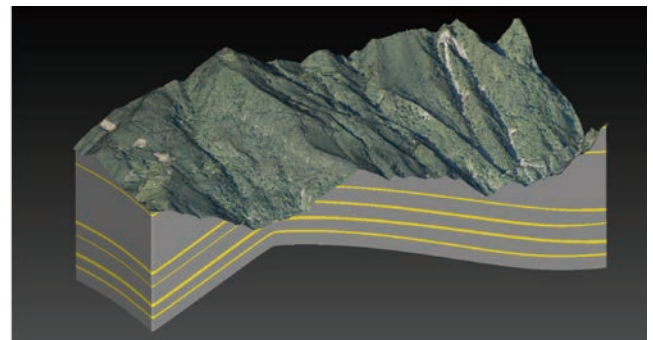


圖 19 三維地質模型套疊 DEM 及航空照片



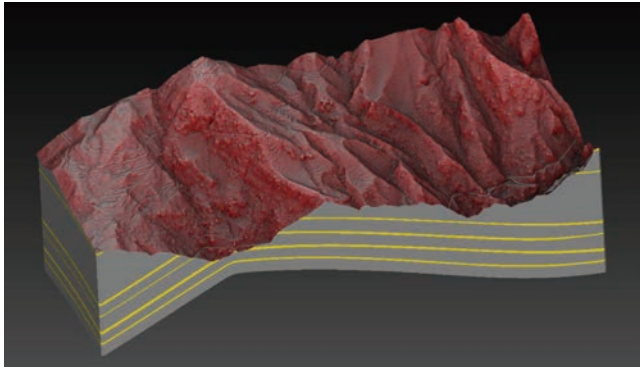


圖 20 三維地質模型套疊 DEM 及紅色立體地圖

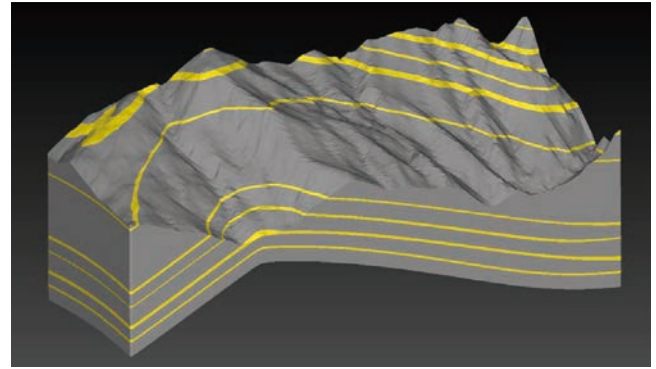


圖 21 三維地質模型地層分布

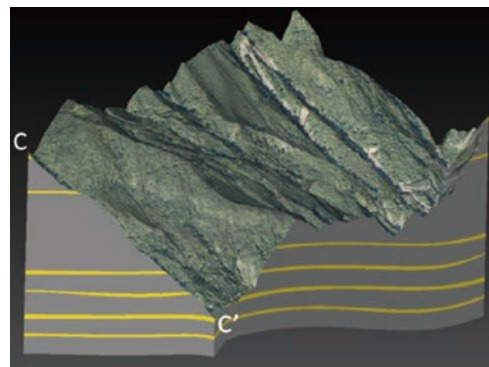
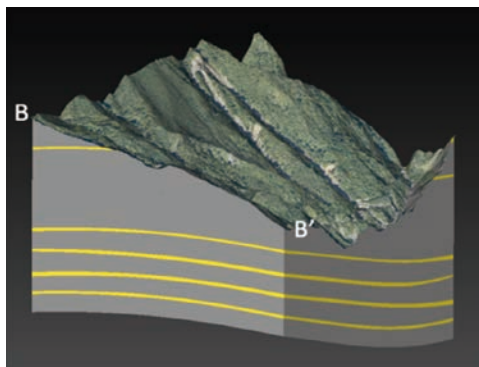
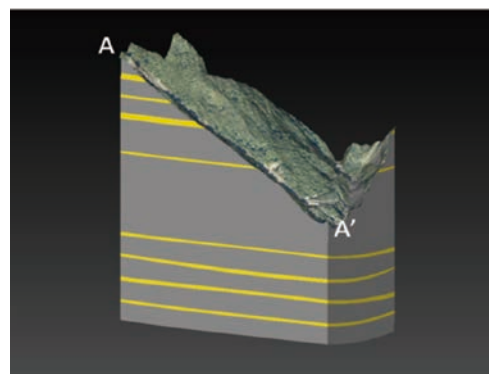
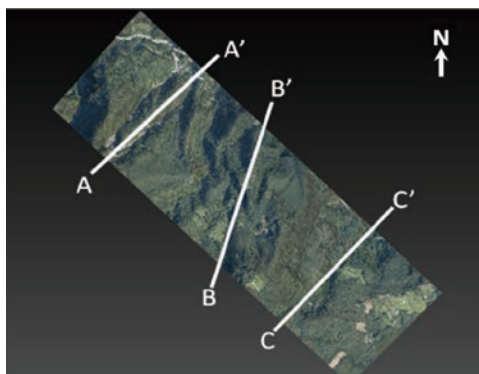


圖 22 三維地質模型可切任意方向之剖面，觀察坡面與地層面之關係

根據研究區域三維地質模型，研判坡面和地層對應關係後，匹亞崩場地應不屬於順向坡地形機制。

## 結論與建議

本文以空載光達之高精度及高密度施測成果產製 DEM 轉繪成不受模擬光照方向及陰影影響之紅色立體地圖，能有效呈現地形凹凸，便於判釋崩崖、裂隙及蝕溝等等崩場地地形特徵。因目前能取得皆非屬於真實正射影像 (True Ortho)，導致各期正射影像有些微變形、陰影及色差，使 PIV 產生許多雜訊向量，導致分析成果並不理想，但使用 PIV 分析前述紅色立體地

圖之向量場，均分布於 0~3 公尺，尚屬合理，顯示 PIV 若配合紅色立體地圖分析為可行之視覺化、特徵追蹤量化處理方法。匹亞崩場地地形差異分析 99 年 11 月至 101 年 10 月間之成果顯示，主要崩塌區域位於兩側蝕溝上游匯集源頭處，且蝕溝兩側坡面有多處崩塌產生，下刷最深達 15 m，且外移土砂量達 24,909.1 m<sup>2</sup>，約占 95 年至 104 間之外移土砂總量的 68%，為評估最大的土砂運移期間，經分析，應為日累積降雨量皆超過 200 mm 之 101 年蘇拉颱風所造成，目前仍有多數不穩定土方仍滯留於蝕溝上游側，應特別關注。本研究區域因受限於鑽孔範圍之數量及深度不足，且鑽孔點



位並未涵蓋三維地質模型範圍，故本文三維地質是依照地質圖資訊推估地層之位態，以及現有之鑽孔岩心記錄推估頁岩及粉砂岩比例所建成，並依此研判匹亞崩塌應不屬於順向坡地形機制。同時，參考崩塌位移量分析結果，匹亞崩塌較可能屬於蝕溝發育所造成崩塌。此外，以少量鑽孔、地質剖面圖、岩層位態分布或是面狀分布之地球物理測線調查成果所建立三維地質模型，可作為後續安排鑽孔增加調查數量、分布及深度之參考。

建議未來正射航照圖進行 PIV 分析前，仍需經過影像變形校正，以減少 PIV 分析得到影像變形向量場，而非地表地形變形向量場之可能性；但反向思考，PIV 分析方法可以量化影像之不均勻變形，若有參考點，亦可輔助校正影像間的變形誤差調整之參考。建議仍需針對 DEM 之平面、樹高扣除等問題進行校正，且產製品質應盡量一致，可有效減少地表地形不真實所造成之雜訊向量，方能獲得良好 PIV 分析成果。目前應用 UAV 拍攝高解析度影像已非常普遍，其可產製超高密度的點雲資料，及應用同期地形製作真實正射影像，建議後續可產製細節更高之紅色立體地圖及正射影像進行相關研究。後續更建議能增加不同區域的三維地質模型研究以提升適用性外，還可嘗試以較多的鑽孔資料建立精度較高之地下地質模型，推估不同岩性之歷史崩塌量，做為歷史崩塌事件模擬的材料參數，進而分析其可行性。

## 誌謝

本文過程承蒙農委會水土保持局及中興工程顧問社同仁提供相關參考資料及建議，僅此一併申謝。

## 參考文獻

1. Jeff Keck, Cheng-Yang Hsiao, Bor-Shiun Lin, Ming-Hsun Chan, William Wright (2014), Spatiotemporal Landslide Activity Derived from Tree-rings: The Tieliku Mingsui Landslide, Northern Taiwan (103 年中華水土保持學報, 45(1): 36-48).
2. 林伯勳、蕭震洋、柯傑夫、詹明勳、冀樹勇 (2014)，樹年輪地形學評估崩塌歷史活動度之應用案例探討。103 年中興工程季刊, 第 124 期, 第 71-84 頁。
3. 千葉達朗、鈴木雄介 (2004)，赤色立體地圖 — 新しい地形表現手法。用測量論文集, 第 15 期, 第 81-89 頁。
4. 橫山隆三、白沢道生、菊池祐 (1999)，開度による地形特 の表示，「真測量とリモートセンシング」Vol. 38, No.4, 26-34.
5. 張玲、楊曉平、魏占玉、黃偉亮 (2014)，三維數據的二維可視化方法綜述。地震地質, 第 36 卷, 第 1 期, 第 275-284 頁。
6. Chiba, T., Kaneta, S. I., and Suzuki, Y. (2008), Red relief image map: new visualization method for three dimensional data, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, pp. 1071-1076.
7. Lin, Z., Kaneda, H., Mukoyama, S., Asada, N., Chiba, T. (2013), Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey, Geomorphology, 182, pp. 104-115.
8. 陳奕中、侯進雄、謝有忠、陳柔妃、吳若穎 (2014)，高解析度空載光達資料結合地形開闊度分析於構造特徵之應用。航測及遙測學刊, 第 18 卷, 第 2 期, 第 67-78 頁。
9. Wang, K., Wang, C., Zhang, Q., Ding, K. (2015) Loess shoulder line extraction based on openness and threshold segmentation, Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 44, pp. 67-75.
10. 郭耀駿 (2016)，以自製紅色地圖輔助地形判釋。國立中興大學碩士論文。
11. 千葉達朗、鈴木雄介、平松孝晋 (2007)，地形表現手法の諸問題と赤色立体地圖。地圖, 第 45 卷, 第 1 期, 第 27-36 頁。
12. Paolini, L. and Villalba, R. (2010), Rainfall Up, Mountain Down?, Tree Rings and Natural Hazards, Springer, London, New York, pp. 121-125.
13. Carrara, P. E. and O'Neil, J. M. (2002), Tree-Ring Dated Landslide Movements and Their Relationship to Seismic Events in Southwestern Montana, Quaternary Research, Vol. 59, pp. 25-35.
14. Lopez, S. J, Corona C, Stoffel, M, Astrade L, Berger, F., and Malet J. P. (2012), Dendrogeomorphic Reconstruction of Past Landslide Reactivation with Seasonal Precision: the Bois Noir landslide, Southeast French Alps, Landslides, Vol. 9, No. 2, pp. 189-203.
15. Brossard, C., Monnier, J.C., Barricau, P., Vandermoot, F.X., Le Sant, Y., Champagnat, F., Le Besnerais, G. (2009), Principles and applications of particle image velocimetry. Optical Diagnostics of Flows, pp. 1-11.
16. 水保局 (2011a)「石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估」。
17. Hsiao, C. Y., Lin, B. S., Chen C. K., and Chang, D. W. (2014), Application of airborne LiDAR technology in analyzing sediment-related disasters and effectiveness of conservation management in Shihmen Watershed. Journal of GeoEngineering, Vol. 9, No. 2, August, pp. 55-73.
18. 陳文山、游能梯、楊小青 (2013)，重要活動斷層構造特性調查研究計畫斷層活動特性分析與評估 (3/4)。經濟部中央地質調查所報告第 102-9 號, 共 90 頁。
19. 羅仕榮、徐祥宏、沈顯全 (2007)，儲集層整合分析與研究。2007 台灣地球科學聯合學術研討會。
20. 胡剛與毛爾威 (1996)，桃園及圖幅說明書。五萬分之一台灣地質圖幅, 第 8 號。經濟部中央地質調查所, 共 39 頁。
21. 財團法人中興工程股同社防災中心網頁 (<http://dptrc.sinotech.org.tw/>)。
22. 邵國士、李易叡、洪世勳、林貴崑、鄭錦桐、俞旗文、焦中輝、黃連通 (2011)，地質空間資訊的三維展現與應用。中興工程季刊, 第 110 期, 第 73-81 頁。