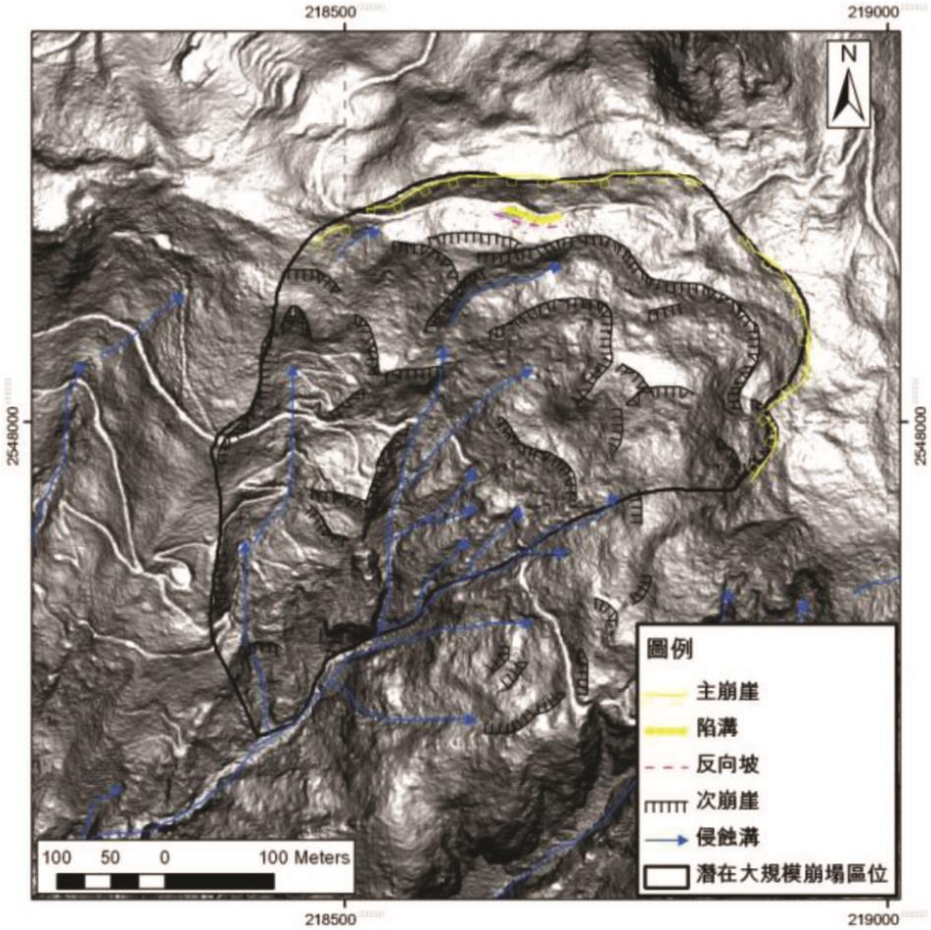
第 十 八 卷 第 二 期
中華民國一〇三年五月

ISSN 1021-8661

航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版

空載光達於地質災害防治之應用特刊



Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Volume 18 No.2 May 2014

Published by Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

航 測 及 遙 測 學 刊

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

發行人：陳良健

出版者：中華民國航空測量及遙感探測學會

地址：台北市文山區羅斯福路五段 113 號三樓
信箱：台北市郵政 93-158 號信箱
電話：886-2-8663-3468　　886-2-8663-3469
傳真：886-2-2931-7225
電子信件：csprsmail@csprs.org.tw
網址：http://www.csprs.org.tw

PUBLISHER: L. C. Chen

PUBLISHED BY: Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing
Address: 3F, No.113, Sec.5, Roosevelt Road, Taipei, Taiwan
Mail Address: P. O. Box. 93-158, Taipei, Taiwan
Tel: 886-2-8663-3468　　886-2-8663-3469
Fax: 886-2-2931-7225
E-mail：csprsmail@csprs.org.tw
Web Site：http://www.csprs.org.tw

總編輯

曾義星
國立成功大學測量及空間資訊學系
電　　話：886-6-275-7575 分機 63835
傳　　真：886-6-237-5764
電子信件：jprssubmit@gmail.com

EDITOR-IN-CHIEF

Yi-Hsing Tseng
Department of Geomatics, National Cheng Kung University
Tel: 886-6-275-7575 ext. 63835
Fax: 886-6-237-5764
E-Mail: jprssubmit@gmail.com

編輯委員

- **農林**
  鄭祈全 (文化大學)
  申雍 (中興大學)
- **海洋與大氣**
  劉振榮 (中央大學)
  何宗儒 (台灣海洋大學)
- **防災**
  劉進金 (達雲科技有限公司)
  徐百輝 (台灣大學)
- **土地利用與覆蓋**
  陳永寬 (銘傳大學)
  詹進發 (政治大學)
- **地理資訊系統**
  何維信 (中華科技大學)
  蔡榮得 (中興大學)
- **遙感探測**
  陳良健 (中央大學)
  陳錕山 (中央大學)
- **攝影測量與光達**
  廖揚清 (成功大學)
  史天元 (交通大學)
  趙鍵哲 (台灣大學)

EDITORIAL BOARD

- **Agriculture and Forestry**
  C. C. Cheng (Chinese Culture University)
  Y. Shen (National Chung Hsing University)
- **Oceanography and Atmospheric Science**
  G. R. Liu (National Central University)
  C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)
- **Disaster Management**
  J. K. Liu (LIDAR Technology Co., Ltd)
  P. H. Hsu (National Taiwan University)
- **Land Cover and Land Use**
  Y. K. Chen (Ming Chuan University)
  J. F. Jan (National ChengChi University)
- **Geographical Information System**
  W. H. Ho (China University of Science and Technology)
  J. D. Tsai (National Chung Hsing University)
- **Remote Sensing**
  L. C. Chen (National Central University)
  K. S. Chen (National Central University)
- **Photogrammetry and LiDAR**
  Y. C. Liao (National Cheng Kung University)
  T. Y. Shih (National Chiao Tung University)
  J. J. Jaw (National Taiwan University)

封面圖片說明 About the Cover

本圖之潛在大規模崩塌位於高雄市六龜區新發村花果山一帶，屬高屏溪荖濃溪集水區水系。潛在崩塌面積為 17.24 公頃，平均坡度約為 31 度，地質分區屬板岩帶。由 1 米高精度數值地形產製的坡度圖(淺色代表緩坡；深色代表陡坡)，明顯發現崩塌區位內呈現典型圓弧形大規模崩塌的地形特徵，如坡面地形呈現多階平臺如同波浪狀、圓弧形崩崖與多重山脊地形。

(封面圖片出處：應用數值地形及光學影像於潛在大規模崩塌地形特徵判釋，第十八卷第二期第 109-127 頁)

特刊引言

空載光達於地質災害防治之應用

林慶偉 教授
國立成功大學地球科學系

台灣位處環太平洋地震帶，板塊運動活躍且地勢陡峭，地質構造複雜破碎提供了豐富的土石材料。同時因季節性颱風豪雨常帶來豐沛的雨量，導致台灣地區崩塌和土石流災害頻傳，居民的生命財產頻受威脅。應用航測及遙測的技術有助於我們分析瞭解容易發生災害之區域，以及在某種氣候條件之下可能受災之區域，有助於我們提早進行災害防治，亦能提早疏散可能受災之居民。

因應2009年莫拉克風災所帶來的嚴重地質災害，並造成許多地區地形地貌的變動，經濟部中央地質調查所自2010年起，以3年時間利用空載光達進行地形掃瞄，產製1米高解析度數值地形及航照正射影像，藉以建立災後高精度的數值地形資料庫，並用來分析因莫拉克颱風所造成之地表地形與環境地質的變化，探討原因及評估安全性，以供相關重建單位或是各級政府對於國土保育政策推動時使用。此資料已提供相關單位及學界應用於地形與水系分析、地質敏感區調查與地質災害潛勢評估等，其中對於潛在大規模崩塌的判釋與調查結果顯示，臺灣中部、南部與東部地區可找出超過數百處可能屬於大規模崩塌的潛勢區域，未來可再針對高活動區域逐步進行細部觀測。為報導高精度空載光達的技術在判釋地形地貌上的研究分析成果，並基於推廣航測及遙測技術應用於地質調查及土石災害防治及分析之研究，乃規劃出版「空載光達於地質災害防治之應用」專刊，本刊所刊載之論文計五篇，其篇名依序為：

- 高解析度空載光達資料結合地形開闊度分析於構造地形特徵之應用
- 南部板岩地質區地震及豪雨誘發山崩之地形特徵-以隘寮溪流域為例
- 空載光達數值地形產製與地質災害的應用
- 應用數值地形及光學影像於潛在大規模崩塌地形特徵判釋
- 應用光達地形資料於莫拉克災後陳有蘭溪流域崩塌與土石流地質敏感地區判釋與分析

這五篇論文所探討之課題包含空載光達數值地形的產製、地形開闊度分析、潛在大規模崩塌地形特徵之判釋、地震及豪雨誘發山崩之地形特徵、以及崩塌與土石流地質敏感地區判釋與分析等，反映出高精度空載光達的技術在判釋地形地貌上的效能，以及在地質災害防治的分析成果。期望此特刊能呈現高精度高解析度空載光達資料在地質災害防治上的效用，以提供重建單位或是各級政府推動國土保育政策。

航測及遙測學刊　第十八卷　第2期　第67-78頁　民國103年05月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume18, No2, May 2014, pp. 67-78

高解析度空載光達資料結合地形開闊度分析於構造地形特徵之應用

陳奕中[1]　侯進雄[2*]　謝有忠[3]　陳柔妃[4]　吳若穎[5]

摘　要

地形開闊度分析之地形計測方法能突顯地形角度變化強烈處，是分析地形資訊的利器。本研究利用1米空載光達測製數值高程模型，藉由地形開闊度計算得到正與負值兩種結果，其正值能反映山脊線、崩崖、階地，負值則為河谷、水系與蝕溝分布等構造地形，並進一步由紅色立體投影圖同時展現正負兩地形開闊度之凸凹特性，以判釋出草嶺地區之微地形特徵。最後，由負地形開闊度(灰階)搭配坡度分析(紅階)細部判釋草嶺山崩之崩塌面蝕溝於不同岩層分布，並估算出1999-2011年期間卓蘭層及錦水頁岩基岩下切侵蝕速率分別為平均每年下切31-39公分、54- 89公分，顯示錦水頁岩抗蝕力較弱。

關鍵詞：開闊度分析、空載光達、數值高程模型、地形特徵、草嶺山崩

1. 前言

近幾十年來，數值地形模型之應用與日俱增，且對於水文、地形及生態學等領域已成為不可或缺的重要資料，過去數值地形模型主要利用地形圖資料、野外實測、航空攝影測量、衛星遙測影像等方式測製。臺灣過去完整數值地形資料主要有 1986 年林務局農林航空測量所與 2005 年內政部同以航空攝影測量測製解析度 40 米及 5 米解析度之規則網格資料，然現今於地質、坡地防災、林業資源等調查分析工作，對於數值地形之精度與解析度甚達公分級之要求，過去測製成果漸無法應付所需，為了克服精度不足的問題，因而開始有光達技術之應用。2009 年莫拉克風災導致臺灣南部、中部與東部地區嚴重之山崩、土石流與淹水災害，為提供災區精確地形資訊以進行地質因子判釋及特性分析，因此經濟部中央地質調查所後續執行「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」運用空載光達技術測製出全臺範圍最廣且資料品質最佳之 1 米解析度之數值高程模型。

利用地形計測學(Geomorphometry)以計量指標描述地表形貌，並結合數學統計與影像分析技術已被廣泛應用於各領域，然光達數值高程模型提供了高精度之正高資訊，該資訊能反應細部地形之高程變化，因此過去數值高程模型常進一步藉由坡向(aspect)、等高線(contour)、曲率(curvature) 、日照陰影(hillshade)、坡度(slope)等方法計算展示不同之地形資訊，該技術方法在山崩、構造地形、海岸變遷、火山等地質地形學研究上已有諸多成果(Kondo *et al*., 2008; Kasai *et al*., 2009; Oskin *et al*., 2012; 陳映璇等，2009; 劉治中等，2010; 林慶偉，2012; 詹瑜璋，2012; 謝有忠，2012)。

地形開闊度分析計測之使用，導因於近年來數值高程模型的廣泛應用，利用單位規則網格值之重新計算出各網格於八個方位坡度資訊，量化出新的地形參數(Yokoyama *et al*., 2002)，該參數能嶄露地形上的凸凹特徵，並能萃取其構造線形，過去有潘彥男(2005)利用臺灣暨有 40 米數值地形模型運用地形開闊度分析輔以電腦自動化萃取出臺灣本島山脊線之線形。另外亦有火山研究之案例，如 Prima

[1] 經濟部中央地質調查所 助理
[2] 經濟部中央地質調查所 科長
[3] 經濟部中央地質調查所 技士
[4] 中國文化大學地質學系 助理教授
[5] 中央研究院應用科學中心 研究助理
*通訊作者，電話: 02-29462793 ext 261, E-mail: hcs@moeacgs.gov.tw

收到日期:民國 102 年 08 月 09 日
修改日期:民國 102 年 11 月 02 日
接受日期:民國 102 年 11 月 14 日

and Yoshida, (2010)利用地形開闊度呈現出火山錐口之形貌，並清楚呈現過去火山岩屑流及熔岩流之遺跡。此外，Chiba *et al*. (2008)利用地形開闊度分析呈現地形凸凹特性及坡度分析之陡峭程度，提出紅色立體投影圖的地形表現方法，強化了開闊度分析於不同尺度地形特徵之應用，而 Lin *et al*. (2013)分別利用不同解析度之航測及空載光達數值地形，比較各種影像呈現方法之優劣，指出紅色立體投影圖技術利用於空載光達資料，能精確且快速判釋出斷層、侵蝕溝等微地形構造，並強調該方法未來對地質調查研究扮演相當重要關鍵的角色。

本研究利用高解析度 1 米空載光達數值高程模型，運用開闊度分析之計測方法結合坡度分析產製紅色立體投影圖，針對草嶺地區進行地形特徵判釋。過去已有研究利用空載光達資料針對蝕溝進行區域判釋、剖面資訊萃取、量體變化等研究(James *et al*., 2006; Perroy *et al*., 2010)，草嶺山崩之崩塌面於不同時期航照發現有逐年侵蝕下切出多處蝕溝的痕跡，因此後續將判釋位處該區崩塌面主蝕溝，並根據判釋成果做進一步探討。

2. 研究區域

2.1 地理位置與地質背景

草嶺舊名番坪坑，位於雲林縣境內古坑鄉東南方，亦處雲林、嘉義、南投三縣交界(圖 1)。該區有清水溪東西橫切，以致地形坡度陡峭，海拔高約 400-1400 米，草嶺山崩位於濁水溪支流清水溪之中上游，北起草嶺山(亦稱窟沓山，海拔 1234 米)東西向稜線，南至兩公里清水溪河床，崩坍影響範圍達 7 平方公里，該區有春秋斷崖、斷魂谷特殊之地形景觀。

草嶺山崩為一典型順向坡地形，其地質構造分布如圖 2，岩層受構造作用產生摺皺，其東西翼分別有草嶺背斜與九芎坪向斜之地質構造，該區及其附近出露之地層分布由老至新分別為上新世的大窩砂岩段(厚層及巨層泥質砂岩、間夾薄層頁岩或泥岩)、錦水頁岩(巨層頁岩或泥岩，偶夾薄層砂岩)，及上新世至更新世的卓蘭層(厚層泥質砂岩，間夾頁岩或泥岩)，其中卓蘭層與錦水頁岩為草嶺山崩主要地層，且卓蘭層為過去歷次山崩之崩塌土石來源(劉桓吉等, 2004)。

2.2 草嶺山崩事件概述

草嶺地區經歷多次大規模山崩，誘發之因素包括地震、颱風和豪雨等，主要發生年代分別為西元 1862、1941、1942、1979、1999 年，其中 1999 年的九二一集集大地震使草嶺地區再度發生大規模岩層滑動與土石崩落，使得該崩塌面形成一大範圍的裸露面(圖 3a)。此外，自 2001 年起，因地層累積地下水湧出與地表逕流於該崩塌面不斷沖刷，其崩塌面開始因河流侵蝕作用下切出蝕溝的痕跡(圖 3b)，至 2011 年其岩盤侵蝕下切之蝕溝發育更為顯著，顯示蝕溝有逐年下切較深之現象(圖 3c)，因此本研究在進行蝕溝分析時，依據 2001 和 2011 年航照正射影像，判釋出主要位於滑動面的蝕溝，藉此了解自 1999 年山崩事件後，本研究區域的地表侵蝕作用及河流下切速率。

3. 研究方法

3.1 空載光達與數值地形資料簡介

光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)是一種利用雷射光束主動式發射與接收過程進行掃瞄式測距，以快速且精確獲取高程資料的一種光學遙測技術。近幾年有利用飛行載具搭載雷射掃描儀，並結合全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)與慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)技術，加上慣性量測單元(Inertial Measurement Unit, IMU)記錄飛航時的俯仰角(pitch)、滾轉角(roll)、偏流角(yaw)三項飛機姿態方位參數，此即為空載光達(Airborne LiDAR)，根據雷射掃描接收回來的點雲資料經飛行載具上 GPS、IMU 與地面 GPS 基站資料解算後，最後便可獲取高解析度、高精度、高密度的地面三維坐標

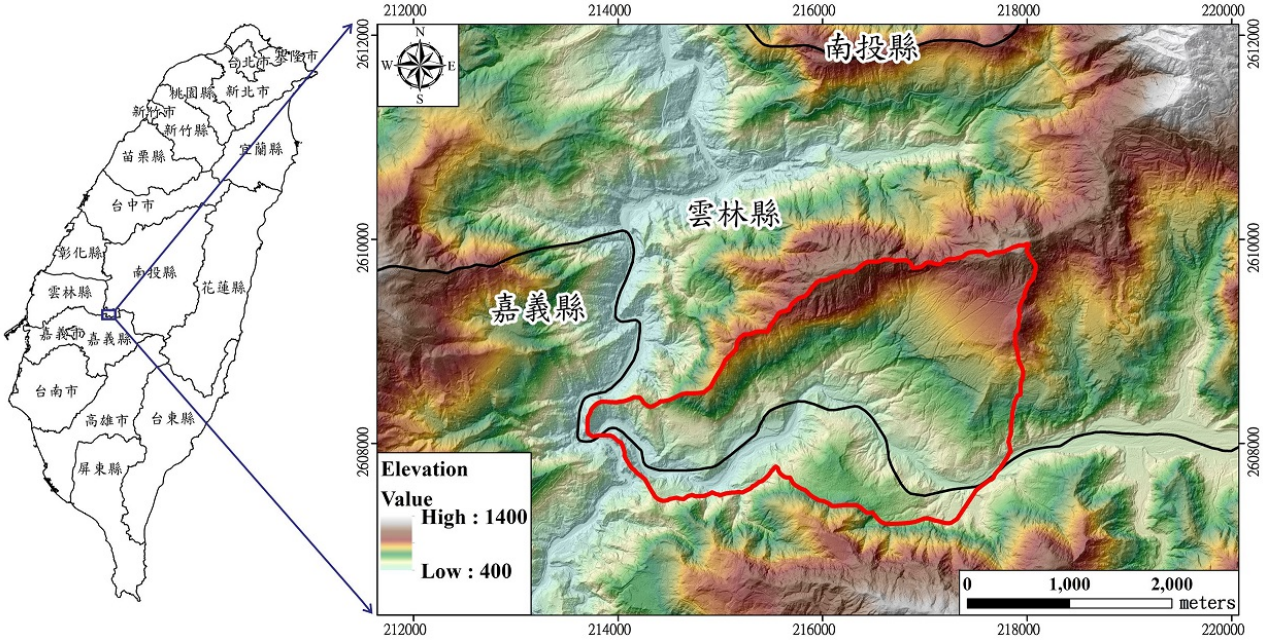


圖 1 研究區域地理位置圖。(紅色範圍為草嶺山崩區)

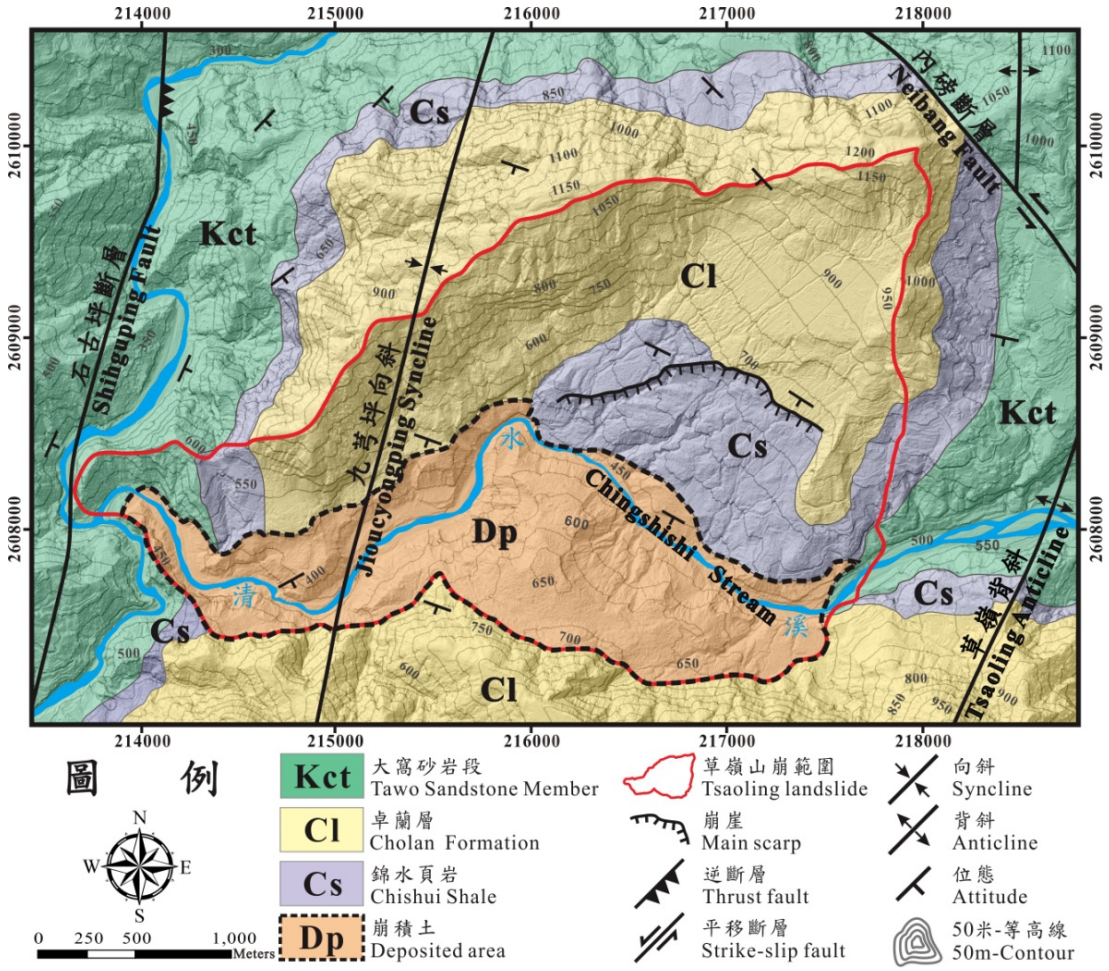
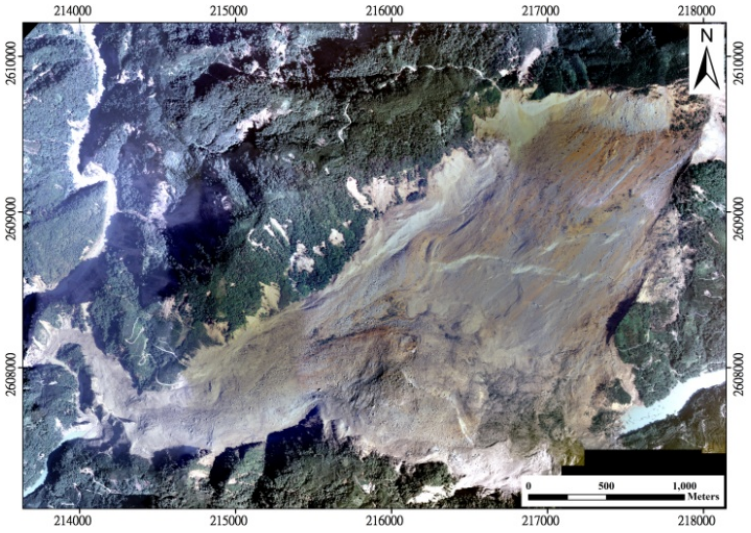
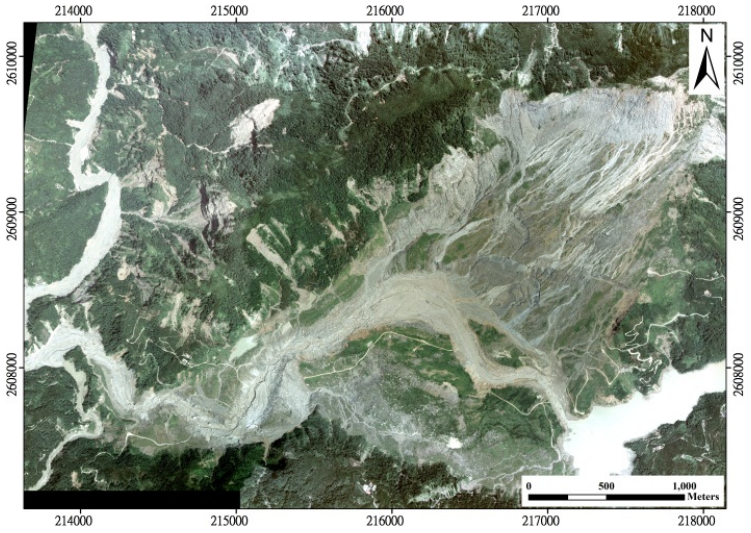


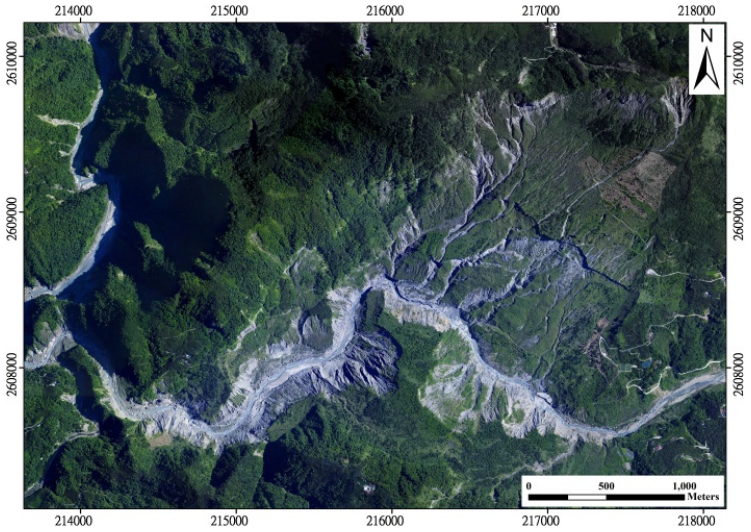
圖 2 草嶺地區地質圖(修改自劉桓吉等，2004)



(a)1999 年



(b) 2001 年



(c)2011 年

圖 3 草嶺山崩不同時期正射影像圖(圖 a 至圖 c)

空載光達所獲取經解算資料進一步經由內差計算成網格式數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)及去除植被及建物後的數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，本研究採用資料來源為經濟部中央地質調查所執行之施政計畫「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」於 2011 年 7-9 月期間以空載光達技術測製草嶺地區的數值地形資料，其該區作業範圍掃瞄參數如表 1。

表 1 草嶺地區作業範圍掃瞄參數表

儀器型號	ALTM 3070
飛行載具	直升機
航高(m)	1600
航速(KTS)	70
掃瞄角度(deg.)	±20
雷射脈衝率(KHz)	70
重疊帶寬(%)	60
點雲密度(點/平方米)以上	3.2

3.2 地形開闊度分析

地形開闊度(Topographic openness)為地形上的凸(convexity)與凹(concavity)兩特性於地表形貌的表現概念(Yokoyama *et al.*, 2002)，其分析方法主要是利用地表水平距離與高程關係角度進行計算，目的在呈現不規則地形面上各位置之坡度資訊，以描述區域內之地形特徵。其原理主要是根據地形上之直視性(line-of-sight)，計算各位置於八方位等距離的天頂角與天底角之角度和平均值。如圖 4a 所示，以所求 A 點為圓心，L 距離為半徑沿各方位角 D(D=0、45、90、135、180、225、270、315)找出最大值與最小值，並計算出各方位角坡度 ${}_D\beta_L$ 及 ${}_D\delta_L$ ，並由式(1)、(2)推算天頂角(${}_D\Phi_L$)與天底角(${}_D\Psi_L$)。

$$ {}_D\Phi_L = 90° - {}_D\beta_L \tag{1}$$

$$ {}_D\Psi_L = 90° - {}_D\delta_L \tag{2}$$

最後將各方向角度作平均，如式(3)、(4)，得到正(positive, Φ_L)與負(negative, Ψ_L)開闊度兩種結果，此即分別代表地形的凸與凹特性，以圖 4b 為例，紅圓點為圓心向周圍進行計算，其半徑長範圍內各方位相對於地勢較高或較低處與紅圓點垂直方向之角度即為該方位之地形開闊度，最後計算出之 Φ_L 值若越高， Ψ_L 值越低，反之 Ψ_L 值越高。

$$ \Phi_L = ({}_0\Phi_L + {}_{45}\Phi_L + \ldots + {}_{315}\Phi_L)/8 \tag{3}$$

$$ \Psi_L = ({}_0\Psi_L + {}_{45}\Psi_L + \ldots + {}_{315}\Psi_L)/8 \tag{4}$$

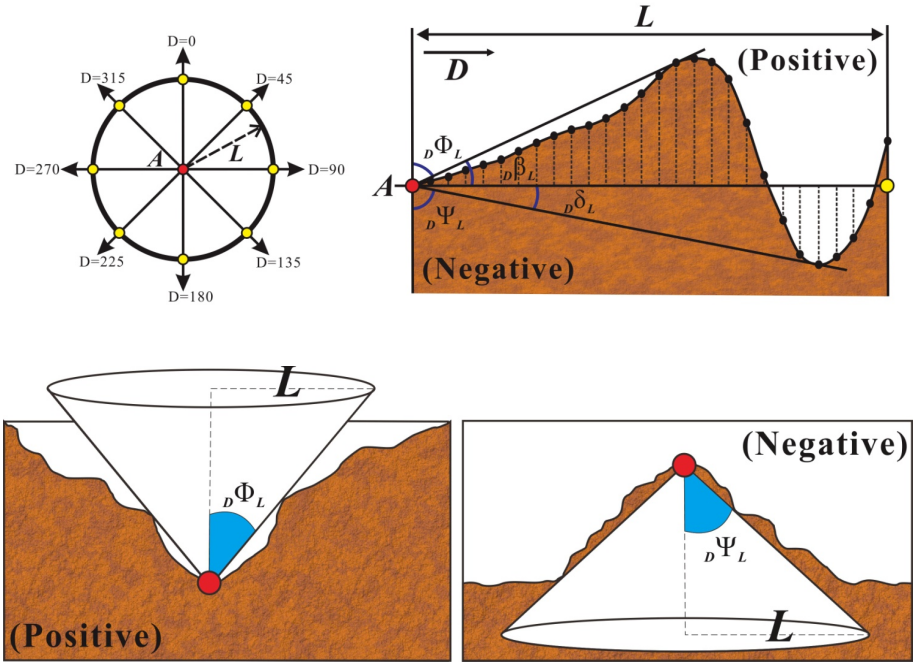


圖 4 (a)開闊度分析原理示意圖。(b)開闊度分析概念模型

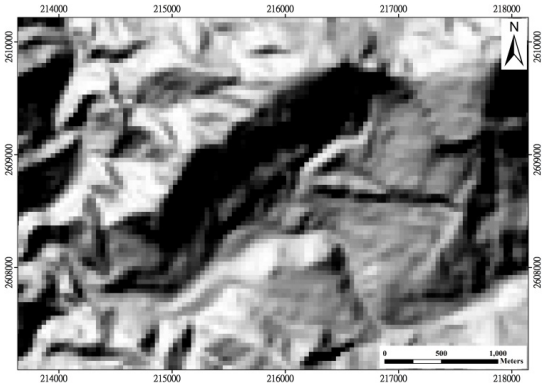
此外，將正與負之結果進行相減後除以二的計算，將得到同時擁有該兩開闊度特性的地形參數 I，如(5)式所示，並利用地理資訊系統(GIS)中 3D Analyst 的坡度分析(紅階表示)結果套疊於地形參數 I(灰階表示)，此即為紅色立體投影圖(Red Relief Image Map, RRIM)視覺化呈現技術(Chiba *et al.*, 2008)。由於人眼對於紅色之辨識較具敏感度，該方法呈現之地圖即以紅色描述坡度，並同時展現地形開闊度凸凹特性，使地形視覺化呈現上產生三維立體化的效果，此多項特性之紅色立體投影圖相對於單一開闊度分析之應用上，強化了不同尺度地形特徵的判釋效果。

$$I = (\Phi_L - \Psi_L)/2 \tag{5}$$

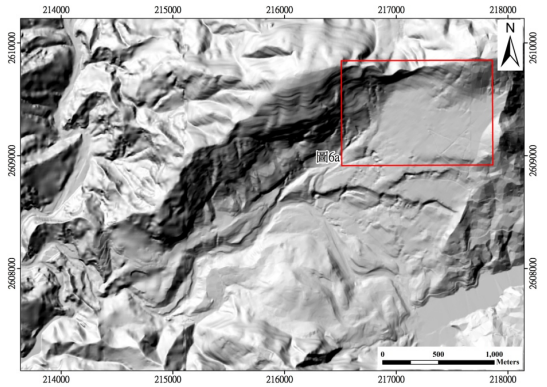
4. 結果與討論

4.1 不同時期草嶺數值地形之比較

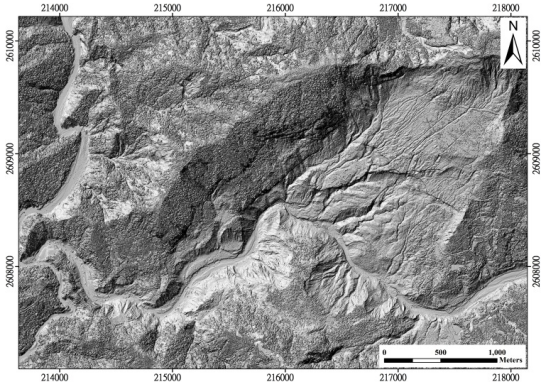
圖 5a、5b 分別為林務局農林航空測量所與內政部測製之 40 米及 5 米解析度草嶺地區數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)以日照陰影圖(光源方位角 315 度，地面水平仰角 45 度)呈現之成果，40 米數值地形模型的呈現，其解析度品質較差，對於該區較細微之地形特徵應用無顯著的幫助，而 5 米的數值地形模型則局部地反應草嶺山崩的地形，該成果為近幾年來國內應用最廣泛之數值地形資料，圖 5c、5d 分別為本研究利用經濟部中央地質調查所於 2011 年以空載光達測製解析度 1 米之數值地表模型與數值高程模型，其中由地面點分類產生之數值高程模型，進一步與 5 米數值地形模型比較草嶺山崩崩塌面範圍區域(圖 6a、6b)，可發現本研究資料對於細部之地形特徵呈現效果相當清楚，其中尤以蝕溝特徵更為顯著，而 5 米地形資料則否，顯示本成果有去除植被後直接反應地面高程的特性及高精度的正高資訊，該資料亦是目前國內精度與解析度最佳之數值地形模型。



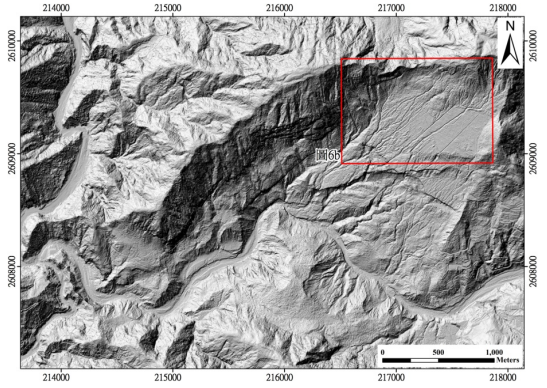
(a)農航所航測 40 米 DTM



(b)內政部航測 5 米 DTM

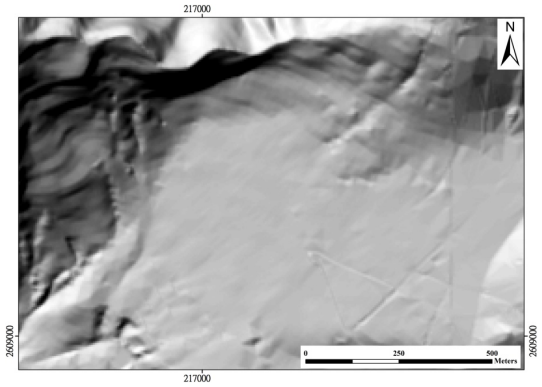


(c)地調所空載光達 1 米 DSM

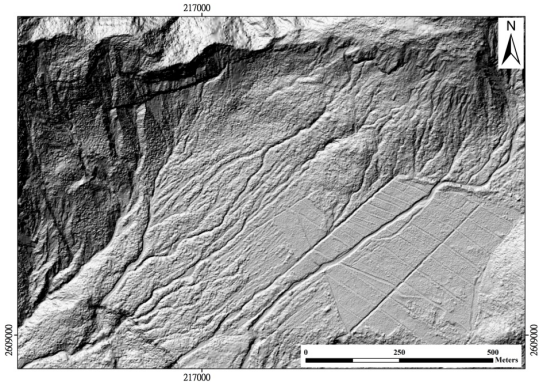


(d)地調所空載光達 1 米 DEM

圖 5 不同時期之草嶺地區數值地形模型(圖 a 至圖 d)



(a)內政部航測 5 米 DTM



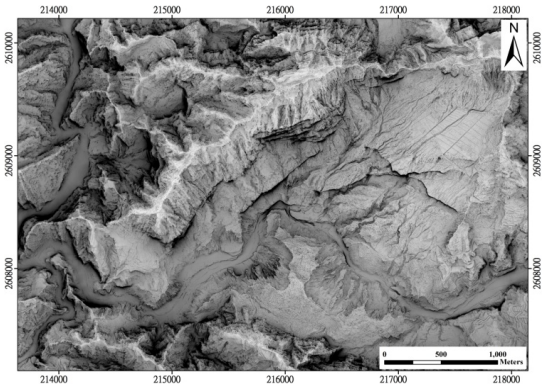
(b)地調所空載光達 1 米 DEM

圖 6 不同解析度數值地形於草嶺山崩崩塌面之比較(圖 a 至圖 b)

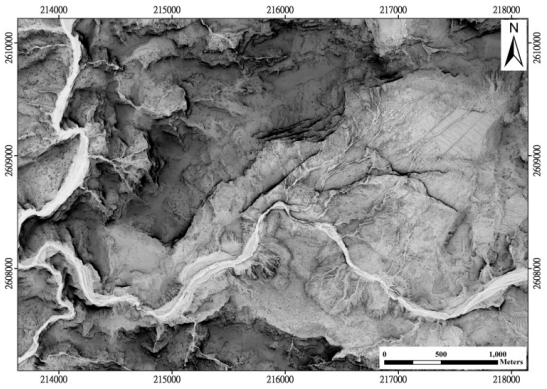
4.2 地形開闊度分析之應用

本研究利用 1 米數值高程模型進行地形開闊度分析之運算，運算過程主要設定各資料網格於各方向之指定計算半徑長為 1000 米，以移動網格方式計算出各位置正與負的地形開度度值，該成果特別強調地表凸凹形狀，以突顯出地形上的線形特徵，此種藉由角度關係表示區域性構造地形之方法將有助於地質地形學研究。圖 7a 為地形開闊度分析正值之結果，在空間分布中表示往地形表面高程相對較高之開闊度，視覺化地圖呈現上其灰階梯度中越趨近明亮色階正值越高，並能萃取出山脊線、崩崖、階地等地形特徵，負值(圖 7b)相對於正值之開闊度則反之，該參數以呈現峽谷、河谷、裂隙、蝕溝與水系分布等地形上凹陷部分。

坡度分析能展現地形的陡峭程度，是過去用於判釋地表所有地形特徵相當好的工具，如斷層、崩崖或谷地等，由於凸凹形狀是象徵地表不規則地貌重要的指標，因此重新計算正負地形開闊度的地形參數 *I* 與坡度分析之結合，能相互強化對方的優點，並分別利用灰階與紅階色調結合之紅色立體投影圖，展現出有別於以往地形計測方法的三維立體地貌，其紅階梯度越趨紅色表示坡度越陡，反之越緩，灰階梯度越趨亮白色代表地形開闊度值越正，越趨於暗黑色則越負，該成果亦克服以往常用之地形日照陰影分析因光源方向不同造成陰影覆蓋之缺點(如圖 5)，有效突顯地形角度變化強烈處，如稜、谷部分。圖 8 為本研究草嶺地區紅色立體投影圖，其相對於正與負地形開闊度不僅強化了地形視覺化呈現效果，在構造地形判釋上亦結合該兩參數之特點。此外，本成果中展現出細部的地形資訊，對於地表侵蝕作用、大規模山崩發生機制與河道變遷等地形演育之釐清上更是提供相當好的參考，後續工作將應用該方法判釋草嶺山崩崩塌面蝕溝於卓蘭層與錦水頁岩兩岩層之位置，進而探討基岩下切侵蝕速率。



(a)正地形開闊度



(b)負地形開闊度

圖 7 草嶺地區地形開闊度分析之結果

4.3 基岩下切侵蝕速率結果

先前結果顯示應用 1 米空載光達數值高程模型搭配紅色立體投影圖技術，成功地將過去地形視覺表現方法不易辨識的地形特徵有效呈現，因此本節利用負地形開闊度成果判釋草嶺山崩崩塌面之蝕溝特徵，並同以紅色階之坡度分析成果套疊，加強負向開闊度視覺化呈現形貌。從圖 9 可清楚辨識出崩塌面上白色凸起部分，此即為受河流侵蝕下切之蝕溝分布，本研究進一步根據該崩塌面上不同之岩性(岩性交界如圖 9 黃色虛線部分)，判釋出 5 條位於卓蘭層主蝕溝(A-E)，其中 A、B、C 蝕溝向下游持續侵蝕錦水頁岩至清水溪河道，D、E 蝕溝最後共同匯流於 C 蝕溝上。本研究根據判釋出之蝕溝，後續每 50 米之區間切一橫剖面，各蝕溝剖面於地表上相對最高與最低點之差值即為下切深度，河道口兩側最遠距離則為河道寬度。

表 2 為本研究根據 2011 年空載光達資料計算出之成果，E 蝕溝於本研究因未完全坐落於該崩塌面上，因此暫不探討。坡面上卓蘭層之蝕溝(A-D)平均下切深度介於 3.67-4.68 米，河道寬為 16.36-18.97 米，下游錦水頁岩上之蝕溝(A-C)平均下切深度介於 6.43-10.73 米，河道寬為 19.75-31.59 米，最後根據基岩下切深度，假設 1999 年山崩事件後之坡面為侵蝕基準面，可進一步推算出 1999-2011 年期間基岩下切侵蝕速率分別為卓蘭層每年 31-39 公分，錦水頁岩則為 54-89 公分。

高解析度空載光達資料於基岩地表侵蝕作用可得到較精確的實測結果，不同岩性基岩下切侵蝕之深度與河道寬度，在本研究間接反映了岩體強度。Sklar and Dietrich, (2001)將基岩上不同岩體樣本進行高抗壓強度(Tensile Strength)實驗，由分析之岩體力學參數指出岩體強度控制基岩下切侵蝕程度，強度越強抗蝕力強，反之則抗蝕弱，經濟部中央地質調查所(2004)過去曾針對草嶺地區現地進行岩體強度試驗，其中卓蘭層之岩性組合主要以細粒至粉砂質層狀砂岩為主，錦水頁岩則多岩質較弱的深色頁岩，整體岩石單壓強度卓蘭層(約 400 kg/cm^2)明顯大於錦水頁岩(約 50~100 kg/cm^2)，本研究兩地層整體下切深度與河道寬度比較，錦水頁岩皆比卓蘭層深且寬，顯示錦水頁岩之抗蝕力確實較弱。此外，A-D 蝕溝於卓蘭層與錦水頁岩交界處其坡度介於 32.45-56.12 度之間，錦水頁岩出露之頭部顯得相當陡峭，研判該區過去可能長期受河流下切造成侵蝕基準面逐年降低，以致該區蝕溝河道頭部漸受向源侵蝕影響，加上錦水頁岩本身抗蝕力較差，側蝕作用旺盛，使其河道深度及寬度明顯大於卓蘭層。

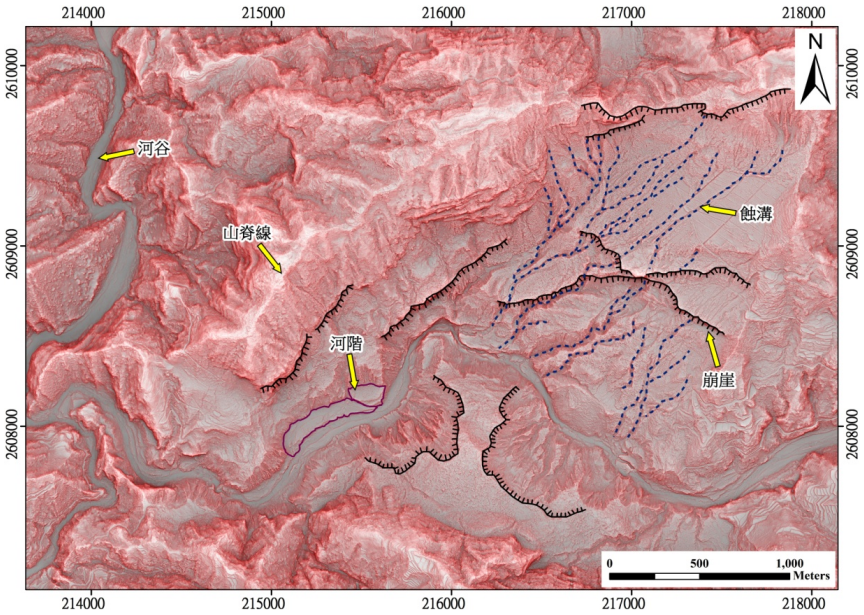


圖 8 草嶺地區紅色立體投影圖

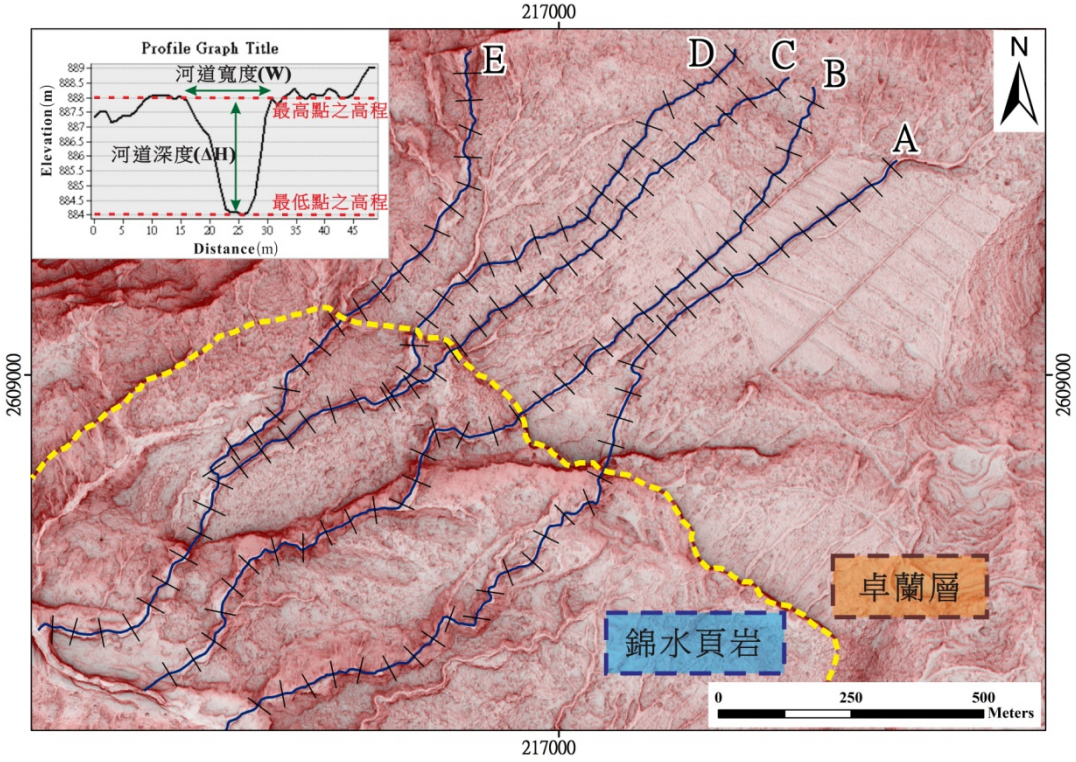


圖 9 不同岩性蝕溝之判釋暨剖面取樣分布圖。(左上角為蝕溝剖面寬度及深度示意圖)

表 2 蝕溝於不同岩性基岩下切侵蝕成果

點號			A	B	C	D	E
卓蘭層	剖面取樣數		16	16	16	16	11
	最大值	ΔH	7.99	5.94	7.52	8.05	9.84
		W	25.88	29.87	28.89	25.85	33.63
	最小值	ΔH	2.72	1.77	1.88	2.25	2.46
		W	13.12	9.60	10.91	8.46	16.87
	平均值	ΔH	4.62	3.67	4.45	4.68	6.36
		W	18.97	17.12	17.39	16.36	21.90
	1999-2011 平均下切速率		0.39	0.31	0.37	0.39	0.53
錦水頁岩	剖面取樣數		17	18	19	3	8
	最大值	ΔH	10.13	18.69	14.92	12.90	7.62
		W	31.83	37.52	36.68	27.53	32.91
	最小值	ΔH	3.54	5.01	1.71	5.49	2.69
		W	10.93	22.71	12.08	22.72	11.77
	平均值	ΔH	6.43	10.73	7.38	9.15	5.74
		W	19.75	31.59	22.02	25.75	20.15
	1999-2011 平均下切速率		0.54	0.89	0.62	0.76	0.48
ΔH:基岩下切深度(米) W:河道寬度(米) 平均下切速率:米/年							

5. 結論與建議

空載光達的發展於目前所有遙測技術中，提供了廣域區域測製速度最快、精度與解析度最佳的資料，本研究利用測製出的 1 米解析度空載光達數值高程模型，獲取其高精度的正高資訊，進一步精確地呈現了草嶺山崩崩塌面上的蝕溝特徵，以及提供該區基岩下切速率實測值之參考。

地形開闊度分析能有效突顯出不規則地形上角度變化強烈處，正值之特性能明顯將山脊線、崩崖、階地等地形特徵表現出來，負向值則為谷地形、水系與蝕溝分布。此外，紅色立體投影兼備正負地形開闊度與坡度之優點，強化不同尺度下地形地貌特徵之判釋，其中對於細微構造地形更提供極佳之應用。

負地形開闊度搭配紅色階坡度之視覺化呈現方法，可客觀快速的判釋出崩塌面於不同岩性分布之蝕溝正確位置，基岩下切侵蝕之計算得，崩塌面卓蘭層下切深度介於 3.67-4.68 米，河道寬為 16.36-18.97 米，錦水頁岩則介於 6.43-10.73 米，河道寬為 19.75-31.59 米，根據該成果最後推算出 1999-2011 這 12 年間基岩下切侵蝕速率為分別為卓蘭層每年下切 31-39 公分，錦水頁岩 54-89 公分，根據該結果間接反應錦水頁岩之抗蝕力較卓蘭層弱。

本研究利用空載光達資料進行微地形之探討得到相當顯著之成果，然研究過程主要透過該資料進行人為計測，建議後續研究加入野外地質調查暨測量工作進行比對及驗證，該技術未來之利用將會是國內各領域應用的利器。

誌謝

本研究承經濟部中央地質調查所提供 2011 年測製之草嶺地區空載光達資料(計畫編號：100-5826901000-7-D3-01)與軟硬體設備，及該單位環工組光達科全體同仁於工作上的支持，本研究得以順利完成，深表感謝。

參考文獻

林慶偉，2012，空載光達數值地形找尋潛在大規模崩塌的利器，地質，31(2): 44-48。

陳映璇、沈淑敏、詹瑜璋、謝有忠，2009，光達資料在臺灣海岸地形變遷上的應用，航測及遙測學刊，14(2): 157-170。

經濟部中央地質調查所，2004。坡地岩體工程特性調查研究(3/5)-南部地區，經濟部中央地質調查所。

詹瑜璋，2012，空載光達精準判釋海岸山脈中段構造地形，地質，31(2): 42-43。

劉治中、蕭國鑫、饒見有、劉進金、吳榮哲、黃群修，2010，結合空載 LiDAR 與彩色航照應用於崩塌地研判，航測及遙測學刊，15(1): 111-122。

劉桓吉、李錦發、紀宗吉，2004，五萬分之一臺灣地質圖幅說明書—雲林圖幅(第二版)，經濟部中央地質調查所。

潘彥男，2005，利用電腦自動化對數值高程模型作線形偵測，國立中央大學太空科學研究所碩士論文，桃園縣。

謝有忠，2012，空載光達看臺灣北部火山島嶼，地質，31(2): 36-41。

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, 47: 1071-1076.

James, L,A., Watson, D,G. and Hansen, W.F., 2006. Using LiDAR data to map gullies and headwater stream under forest canopy: South Carolina, Catena, 71: 132-144.

Kasai, M., Ikeda, M., Ashina, T. and Fujisawa, K., 2009. LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a seep and rocky region of Japan, Geomorphology, 113: 57-69.

Kondo, H., Toda, S., Okamura, K., Takada, K. and Chiba, T., 2008. A fault scarp in an urban area identified by LiDAR survey: A case study on the Itoigawa–Shizuoka Tectonic Line, central Japan, Geomorphology, 101: 731-739.

Lin, Z., Kaneda, H., Mukoyama, S., Asada, N. and

Chiba, T., 2013. Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey, Geomorphology, 182: 104-115.

Oskin, M.E., Arrowsmith, J.R., Corona, A.H., Elliott, A.J., Fletcher, J.M., Fielding, E.J., Gold, P.O., Gonzalez-Garcia, J.J., Hudnut, K.W., Liu-Zeng, J, Teran, O.J., 2012. Near-field deformation from the E1 Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential LiDAR, Science, 335: 702-705.

Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P. and Chadwick, O.A., 2010. Comparison of gully erosion estimates using airbone and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island,California, Geomorphology, 119: 288-300.

Prima, O. D. A. and Yoshida, T., 2010. Characterization of volcanic geomorphology and geology by slope and topographic openness, Geomorphology, 118: 22-32.

Sklar, L.S. and Dietrich, W.E., 2001. Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock, Geology, 29: 1087-1090.

Yokoyama, R., Shirasawa, M. and Pike, R.J. 2002. Visualizing topography by Openness: A new application of image processing to digital elevation models. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68: 257-265.

Application of high-resolution LiDAR DEM for extracting terrain openness: A case study in the Tsaoling landslide area

Yi-Zhong Chen [1] Chin-Shyong Hou [2*] Yu-Chung Hsieh [3] Rou-Fei Chen [4] Ruo-Ying Wu [5]

ABSTRACT

Openness methods can visualize the topographic character of angular measure between surface relief and horizontal distance; it is a useful tool for determining geomorphic fractures. We adopted the high-resolution Airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) DEM to obtain the positive and negative values. Positive shows reflect ridge, scarp and terrace, whereas negative describe valley, river and gully. Red Relief Image Map (RRIM) can identify fine-scale geomorphic change when it is combines the positive and negative values. Many of the characteristics that obtained from the negative calculation (marked in gray-scale) and an analysis of stacked slope (marked in red-scale), to interpret the position of eroded gullies in the Tsaoling sliding area. In this study, we investigated the distribution of erosion gullies and calculated the bedrock incision rate for the Cholan Formation and Chishui Shale for 1999 and 2011, which were 31 to 39 cm/year and 54 to 89 cm/year on average, respectively. These results indicated that the Cholan Formation has a higher resistance to erosion than the Chishui Shale, where the erosion was more serious.

Keywords: Openness, Airborne LiDAR, Digital Elevation Model, Geomorphic fractures. Tsaoling landslide

[1] Assistant, Central Geological Survey, MOEA
[2] Chief of Plannung Section, Central Geological Survey, MOEA
[3] Geologist, Central Geological Survey, MOEA
[4] Assistant Professor, Department of Geology, Chinese Culture University
[5] Research Assistant, Research Center for Applied Sciences, Academia Sinica
[*] Corresponding Author, Phone: 886-2-29462793 ext 261, E-mail: hcs@moeacgs.gov.tw

Received Date: Aug. 09, 2013
Revised Date: Nov. 02, 2013
Accepted Date: Nov. 14, 2013

航測及遙測學刊　第十八卷　第2期　第79-92頁　民國103年05月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume18, No2, May 2014, pp. 79-92

南部板岩地質區地震及豪雨誘發山崩之地形特徵-以隘寮溪流域為例

陳天健[1*]　李明熹[2]　曾勛苑[3]　顏宏諭[4]　李宗聯[5]　林意修[6]

摘　要

本文以台灣南部高屏溪支流之隘寮溪流域為研究區，應用 GIS 結合航照、災前後 DEM 或光達數值地型，就集集地震與莫拉克颱風事件之二千多筆崩塌地，進行地震及豪雨誘發山崩地形特性研究。成果顯示地震之崩塌坡度主要分佈於 30 - 50 度，75%位於山脊或山腹，90%崩塌之面積小於 10 公頃；而颱風之崩塌坡度則主要分佈於 20 - 40 度，81%位於山腹或坡趾，且中大型崩塌面積明顯增多，52%崩塌之面積大於 10 公頃；颱風引致大型崩塌之數量較地震事件顯著。就地形分析方面，斜交坡地形之崩塌趨勢為最；大型崩塌地之曲率達 1×10^{-4} 時，崩塌顯著增加。大型崩塌地滑動前，坡體均已具某種程度之撓曲變形，顯示大型崩塌呈漸進式變形，其地形曲率隨時間逐漸增大，最終乃至坡體快速滑動。

關鍵詞：山崩、地震、颱風、板岩、地形

1. 前言

台灣位於板塊活動劇烈之環西太平洋地震帶上，頻繁之造山運動促使地形陡峭、岩體破碎，加上極端氣象條件下，容易觸發崩塌的發生。集集地震後，山坡地發生崩塌比例明顯增加，其遭遇較大降雨時所造成之土砂災害有日益嚴重的情形。於前人研究及文獻回顧中，大多認為不同觸發因子之崩塌於區位分布上有其差異性；如由地震所引發之崩塌，多位於凸坡之坡頂，其規模較小；而降雨引發之崩塌則多發生於山腹及邊坡坡趾，其規模通常較地震引發之崩塌來得大(洪如江等，2000；Pierson，1977；Fuchu，1999)。

本研究以隘寮溪為研究區域，選定莫拉克風災後 2327 筆崩塌(圖 1)，應用地理資訊系統分析所有崩塌地之風災前 DEM，進行各崩塌地平面曲率與剖面曲率分析，以探究其與崩塌類型間的相互關係。同時進一步分析崩塌區之崩塌深度與地形型態、區位之影響，以了解相互關係。

1.1 地理位置

本研究區域為隘寮溪流域如圖 1 所示，流經屏東縣三地門鄉、霧台鄉、瑪家鄉、泰武鄉四個鄉鎮，面積約 34,025 ha，約 80%為山坡地。東隔中央山脈與台東縣相鄰，北以茂林鄉與高雄縣分治。

1.2 隘寮溪水系及地形

隘寮溪河系為台灣山系南部西坡面之一順向河，發源於知本主山（2368.8 公尺）附近的巴尤泡池（Bayu）。隘寮溪於離溪口 4 公里處分為南北兩溪；以北溪為本溪之主流。全流域嵌入曲流顯著，下切比側切強，全長 90 公里中，約有 50 公里的峽谷地形。全流域主要為順向谷地形，河流坡度較大，且受潮州斷層的最近隆起及屏東平原下陷的作用，下切營力強。隘寮溪的源流區位於屏東縣霧台鄉，是台灣南部的多雨中心，年平均雨量高達

[1] 國立屏東科技大學水土保持系　副教授
[2] 國立屏東科技大學水土保持系　助理教授
[3] 高雄市政府水利處水土保持科　工程員
[45] 國立屏東科技大學水土保持系　碩士生
[6] 國立屏東科技大學水土保持系　大學部
*通訊作者，電話: 08-7703202 ext 7169, E-mail: cchen@mail.npust.edu.tw

收到日期:民國 102 年 08 月 23 日
修改日期:民國 102 年 11 月 11 日
接受日期:民國 102 年 11 月 29 日

4500mm 以上。本溪由三地門附近流出進入屏東平原形成沖積扇。

1.3 隘寮溪地區地質與地層概況

本流域主要岩層為廬山層，其次為西村層、大南澳片岩、臺地堆積、沖積層，地層分佈如圖 2 所示。廬山層屬於第三紀亞變質岩，中新世地層，大部分由黑色到深灰色的硬頁岩、板岩及千枚岩和深灰色的硬砂岩互層組成，含有零星散佈的泥灰岩團塊，厚度估計至少在一千公尺以上。西村層是由劈理發達的深灰色板岩和千枚岩所構成，夾有暗灰色、粗粒、堅硬的石英砂岩層。大南澳片岩屬於先第三紀，為古生代晚期到中生代地層，片岩於本流域地區所佔面積很小，主要分布於大浦山、拉戛以西附近，地處高海拔，地形險惡，由黑色片岩、綠色片岩、砂質片岩的互層組成。

2. 地震及豪雨誘發山崩地形特徵之相關研究

地震及豪雨之崩塌地其觸發機制不同，顯現於其區位與地形型態上亦有所差異。本文分就坡度、坡向、區位、面積與地形型態等因子，綜整地震及豪雨所引發之崩塌特性如下。

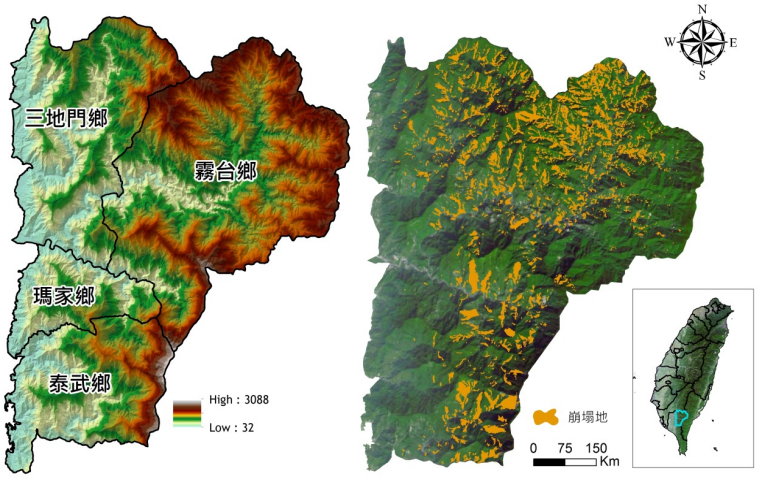


圖 1 研究區域地形與莫拉克颱風崩塌分布圖

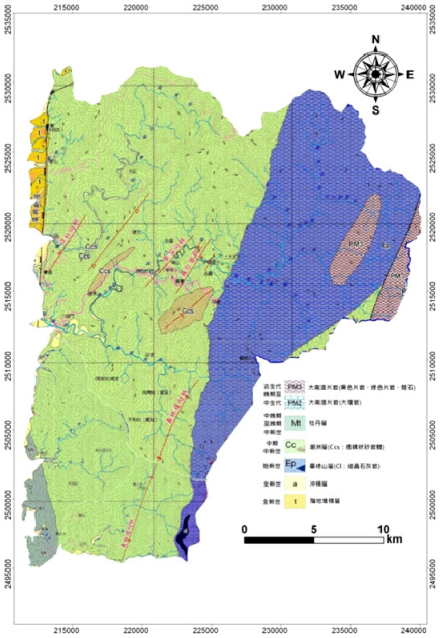


圖 2 研究區域地質圖（1/50000）

- 崩塌地坡度

Keefer(2000)及 Parise and Jibson (2000)針對 1989 美國加州地震引致的崩塌變異點，統計結果顯示坡度 30-40 度附近者數量最多；但就發生密度而言，則有坡度愈陡者，崩塌密度愈高之趨勢。國內學者（洪如江等人，2000；林慶偉等（2002）；許煜煌，2002；楊凌翔，2005）觀察集集地震之崩塌，指出93%坡地破壞發生於坡度大於 45 之坡面，坡度愈陡崩塌潛勢愈高。鍾育櫻（2005）研究陳有蘭溪集集地震後之崩塌，指出桃芝颱風崩塌地多位於坡度 50 度以上與 20 度以下之坡面。

而豪雨致生崩塌方面，Fuchu *et al.*(1999)以香港大嶼山為例，指出對於降雨引致之滑坡，以坡度 30-40 度地區最易破壞，40 度以上反而較少。綜合言之，地震型崩塌發生之坡度較陡，地震後初期崩塌會先往陡坡發育，而後再逐漸回復至降雨型崩塌之較緩坡處。

- 崩塌地坡向

林慶偉等（2002）分析集集震後發育崩塌事件，以南至西方坡向較易發生崩塌。許煜煌（2002）與楊凌翔（2005）觀察集集地震崩塌之所在坡向，發現南、西南與西北等方為有較大之崩塌趨勢。而邊坡坡面與斷層走向垂直者，有明顯較高的崩塌趨勢。就豪雨觸發之崩塌方面，陳天健等人（2009）進行莫拉克颱風荖濃溪風災調查，指出崩塌地多分布於集水區之迎風面，此一崩塌趨勢肇因於迎風面亦是降雨集中之區位；於莫拉克颱風崩塌較集中於南、西南及東南等方向。

- 崩塌面積

王文能等（2000）分析集集地震所引致之崩塌，其發現地震崩塌主要為表層之小規模崩塌。廖啟岳（2008）分析 1996-2001 年多次颱風事件之崩塌資料進行地震影響研究，指出桃芝颱風之新生崩塌，數量多但規模較小，地震崩塌復發者其數量較少但規模較大。陳天健等（2010）比較莫拉克颱風與集集地震於隘寮溪流域崩塌地之面積指出豪雨觸發之崩塌其面積相對於地震崩塌者為大。

- 崩塌區位

王文能等（2000）與鍾育櫻(2005)分析集集地震所引致之崩塌，其發現地震崩塌多數位於坡頂及陡崖邊緣，崩塌冠部至稜線相對較近。Meunier *et al.*（2008）歸納台灣、美、紐、歐等地之地震崩塌事件，探討崩塌距離坡頂、河道之長度與全坡長之分佈關係，其表示方法如圖 3 所示，其指出集集地震引致崩塌之區位較為靠近坡頂。惟震後降雨事件亦先造成崩塌位置往上移。

陳天健等（2010）研究指出集集地震所引發之崩塌區位多位於山脊和山腹等較高區位，而 2009 年莫拉克颱風引發之崩塌分布，則多發生於山腹及邊坡坡趾部位等中至低區位。Chang *et al.* (2007)研究和社溪崩塌地之變遷，亦指出颱風引致之崩塌接近溪谷；集集地震後新生之崩塌則接近山脊，而後之崩塌位置再逐年下降。

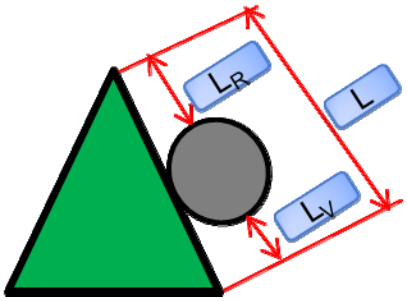


圖 3 崩塌距離坡頂、河道與全坡長關係之表示方法（摘自 Meunier *et al.*，2008）

- 崩塌山坡地形型態（topography）

一般山坡坡形可分為直線形、凸形、凹型和台階形斜坡四種基本類型（湯國安等，2005），直線形斜坡為從分水嶺到斜坡底部地面坡度基本上不變。凸形斜坡為地面坡度隨著距分水嶺距離增加而增加，鄰近分水嶺附近的地表先較為平緩，以後隨坡長的增

加，坡度亦增加。凹型斜坡為斜坡上半部坡度較陡，下半部坡度較緩，此種坡形常以沉積為主，較多分佈在山區與階地平原接壤處或河谷兩岸。最後，台階形斜坡為斜坡與階地相間所組成，可以看作是凸形坡與凹形坡的組合。若進一步考慮三維形狀，依山坡坡面水平與垂直（縱向）之凸直凹三種形狀，組合為 9 種坡形（Ruhe，1975），其坡形示於圖 4。

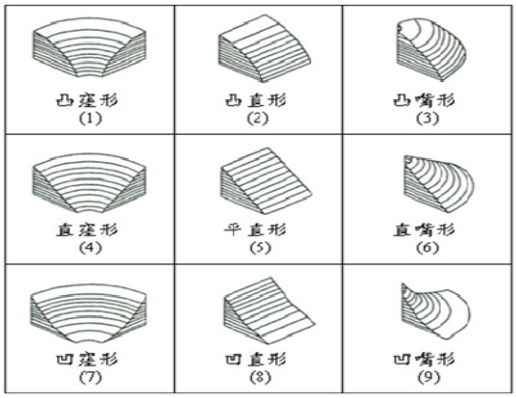


圖 4 山坡類型分類圖（轉繪 Ruhe，1975）

就地震觸發之崩塌，崩塌地多發生在凸直型、直平、或凸嘴型等凸型與直線型形狀為主（王瑞斌，2001；呂政諭，2001）。徐美玲（1995）考慮地下水之作用後，認為凹型坡地形集水面積比直坡與凸坡大，因此較易受降雨事件影響，而鍾育櫻(2005)亦有相同之結論。沖村孝等(1999)調查日本兵庫縣地震後，降雨引致崩塌地多位於凹坡或直坡之坡谷附近。此與降雨引致崩塌係發生於凹形多於凸形之結果成相反之結果。

李德河等(2004)為了瞭解颱風降雨對公路邊坡之破壞特性，並探討集集地震造成公路邊坡土石鬆動之影響，發現集集地震時與地震後一年內的邊坡崩壞均以凸嘴邊坡所佔的比例最高，其次為平直形與凸直形，但桃芝颱風則以凹窪形及平直形、凸直形為最多。許琦等（2000）針對在 921 集集大地震崩塌地崩塌前之地形特徵研究發現，崩塌前地形之縱剖面以直線形最多。

綜合以上，地震引致山崩的地型特徵有：多為表層、小規模、為於陡坡較高區位處。由於直坡與凸坡之坡頂，受地震增幅效應，易使得不穩定岩塊掉落，故崩塌地多位於此區。相對地，降雨型崩塌面積較大，其多位於坡度較緩處，較顯著分佈於山腹及坡腳之凹坡或直坡。

3. 研究區地震及豪雨誘發山崩之地形特徵

本文取用研究區災前 DEM（5×5m）與災後 Lidar DEM 進行各項地形因子加值與比對，進一步探討研究區崩塌地之坡度、坡向、規模、區位、邊坡類型等各項特性。分析比對結果分別說明如下。

3.1 崩塌地坡度

研究區地震與豪雨崩塌地之坡度分佈狀況如圖 5 及圖 6 所示，其中垂直軸為崩塌地平均坡度各區間數量百分比，而各坡度長條圖上者為其崩塌個數。就數量之分佈比率顯示，地震與豪雨崩塌地兩者之平均坡度於 30 至 40 度均有顯著的高峰值，但地震崩塌地平均坡度主要分佈於 30 至 50 度之間，兩者所佔達 71.4%；而莫拉克颱風崩塌地則主要分佈於 20 至 40 度之間，兩者所佔達 79%。整體而言，颱風豪雨崩塌地之坡度較緩於地震崩塌地。

將兩類崩塌地加值成崩壞比值，結果示於圖 7 與圖 8，其中「崩壞比」定義為各坡度之崩塌面積除以該坡度於集水區內總面積。圖中垂直軸為各坡度崩塌地之崩壞比值所佔百分比，而各長條圖上者為其崩壞比值。若考慮自然邊坡之崩塌趨勢，不計位於河道與蝕溝之 20 度下崩塌地，則地震崩塌地之崩壞比隨著坡度增加而增加，主要之崩塌坡度分佈 40 度以上(佔 70%)；而莫拉克颱風崩塌地則有著不同分佈特性，其中 10 至 40 度間區域崩壞比顯著增加，崩壞比分佈於較緩坡處比例大幅提高，且緩坡之崩壞比略與陡坡度處相當。本地質區因劈理、節理與裂隙弱面發達，地震時陡坡之岩塊易於崩裂分離；而豪雨時則地下水位豐沛，隨雨量增大時，山腹及坡腳區位常見地下滲流匯集而致生崩塌。結果顯示地震與颱風觸發崩塌之主控機制不同，進而顯現於崩塌坡度之差異。

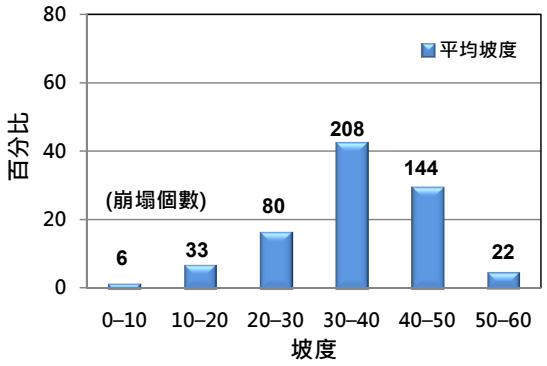


圖 5 隘寮溪流域集集地震崩塌地之平均坡度分佈

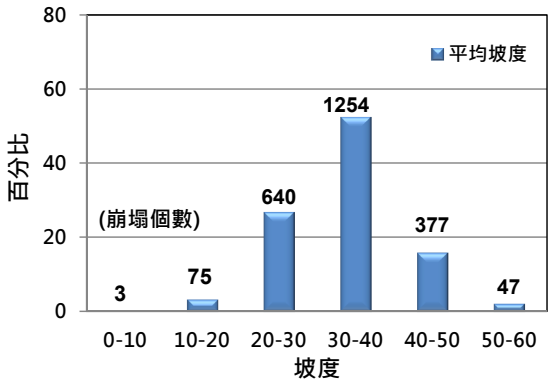


圖 6 隘寮溪流域莫拉克颱風崩塌地之平均坡度分佈

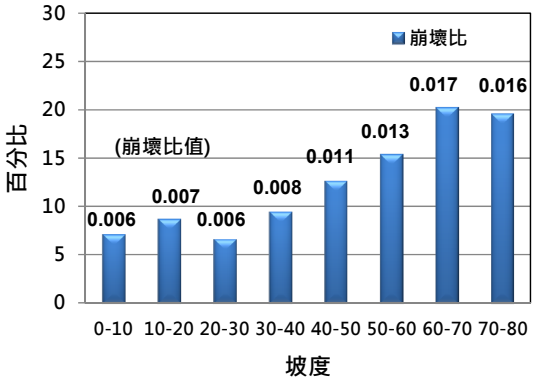


圖 7 隘寮溪流域集集地震崩塌地各坡度之崩壞比分佈

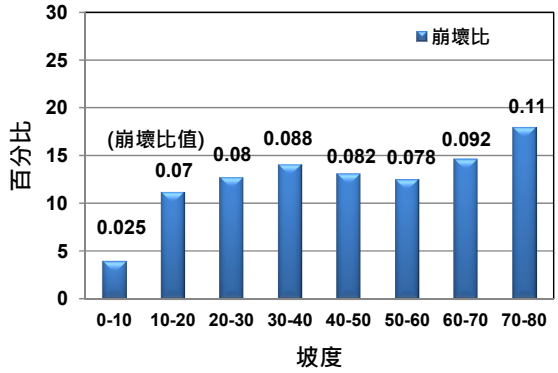


圖 8 隘寮溪流域莫拉克颱風崩塌地各坡度之崩壞比分佈

3. 2 崩塌地坡向

肇因於地形特性，崩塌地主要坡向集中面東至南向之間，請參考圖 1 所示之崩塌分布，研究區崩塌地之坡向分析統計如圖 9 與圖 10。就數量之分佈而言，不管集集地震或莫拉克颱風之崩塌均主要朝向東至南方向，此方向者佔全崩塌地之 80%以上。為排除樣本數目多寡之影響，另本文進行崩壞比分析，圖 11 與圖 12 顯示地震與颱風崩塌地之坡向分佈狀況與數量所顯示的特性相似，即集中於面東與南兩方向之間，顯示研究區在冬至南方向支崩壞比確實較高，此一現象與地形上邊坡多面向東至南等方向一致（圖 1 右）。惟於二圖中西北方向亦出現一小峰值，顯示出在地形之反向坡，亦有高的崩塌趨勢。

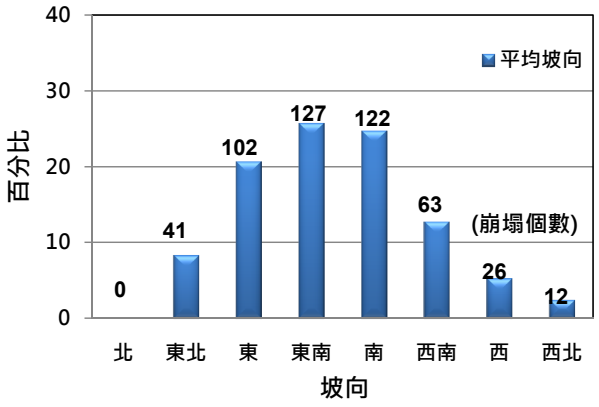


圖 9 隘寮溪流域集集地震崩塌地之平均坡向分佈

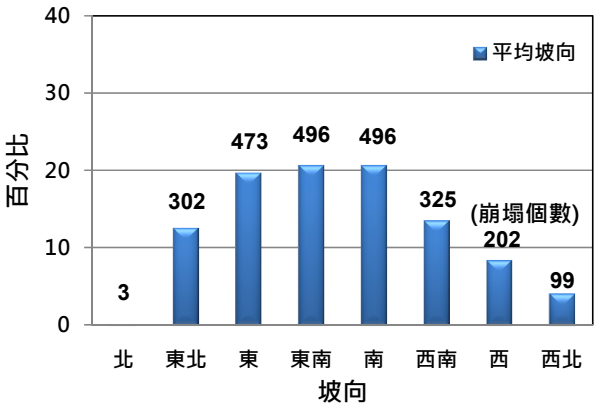


圖 10 隘寮溪流域莫拉克颱風崩塌地之平均坡向分佈

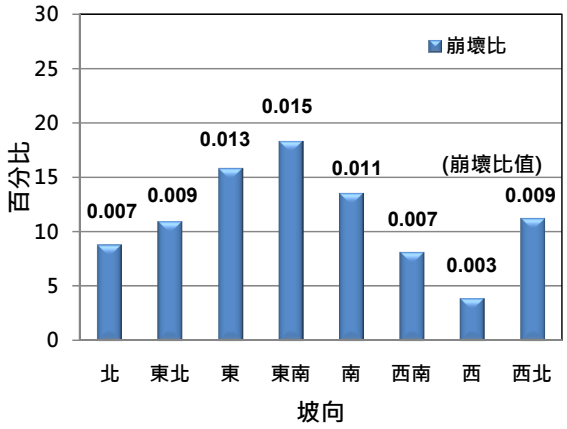


圖 11 隘寮溪流域集集地震崩塌地各坡向之崩壞比分佈

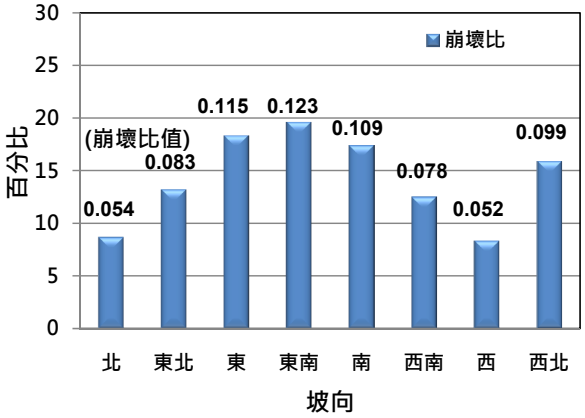


圖 12 隘寮溪流域莫拉克颱風崩塌地各坡向之崩壞比分佈

3.3 崩塌規模與邊坡類型

就崩塌面積而言，表 1 綜整集集地震及莫拉克颱風後隘寮溪流域內崩塌數量與規模，集集地震後崩塌地總筆數為 335 筆，莫拉克颱風崩塌地總筆數則為 2327 筆。本文將崩塌面積分為大於 30ha、介於 30~10ha、10ha~1ha、小於 1ha 以下四類。於崩塌地數量方面，表中顯示莫拉克颱風崩塌地數量遠多於集集地震崩塌。集集地震時隘寮溪流域之 PGA 較小（瑪家鄉北葉村為 45.4 gal），因此並無大於 30ha 之崩塌，而 30~10ha 之則為 3 處，兩者所佔之比例低於 1%；相較之下，莫拉克颱風之豪雨則為超過 200 年降雨迴歸週期之降雨規模，大於 30ha 大型崩塌計 24 處，而 30~10ha 之數量則達 92 處，合計崩塌面積大於 10ha 以上之崩塌地，共計 116 處，佔所有崩塌之 5%。惟其面積卻佔流域內全崩塌面積之 52%，顯示颱風引致大規模崩塌之趨勢較顯著。

就表 1 崩塌面積之數量分佈比例而言，地震或颱風崩塌兩者之分布比例無明顯差異。面積小於 1ha 以下之崩塌地，集集地震佔 67.8%；莫拉克颱風則佔 64.9%；1-10 ha 情況地震與颱風兩者分別為 31.1% 及 31.1%，顯示出其主要中至小崩塌面積兩者並無明顯差異。惟另從面積比來看，地震引致之崩塌主要以 10 公頃以下的中小型崩塌為主，比例合計達 90%；相反地颱風豪雨者則崩塌面積則中大型崩塌明顯增多，10 公頃以上者達 52%。

為進一步瞭解邊坡類型與崩塌之關係，本文將崩塌地所在邊坡依其與岩層位態之相對關係，分為「順向坡」、「逆向坡」、「斜交坡」等類型。本文採用中央地質調查所國土保育之敏感地質區調查分析計畫（林慶偉，2010）調查成果，研究區內順向坡分佈如圖 13 所示。其中，斜交坡再依其與岩層傾向關係分析，劃分為位於岩層傾向側之斜交坡（簡稱順斜坡）與位於岩層逆向側之斜交坡（簡稱逆斜坡）。

表 1 集集地震及莫拉克颱風後隘寮溪流域內崩塌數量與規模統計

事件	集集地震			莫拉克颱風		
崩塌點	數量	百分比%	面積比%	數量	百分比%	面積比%
>30ha	0	0.0	0.0	24	1.0	24.6
30 -10ha	3	0.9	9.9	92	4.0	27.4
10 - 1ha	103	30.7	60.6	701	30.2	37.5
< 1ha	229	68.4	29.5	1505	64.8	10.5
總計	335	100.0	100.0	2322	100.0	100.0

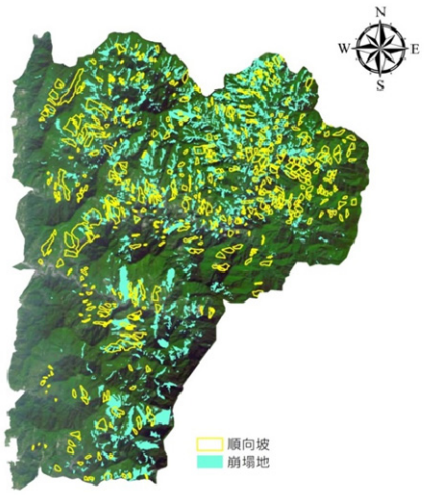


圖 13 研究區內順向坡與崩塌地分佈圖，其中順向坡圖資為摘自中央地質調查所國土保育之敏感地質區調查分析計畫（2010）調查成果

研究區之崩塌地，地震與颱風崩塌地分為 335 處與 2322 處(已剔除階地 5 筆)，共計 2657 處。其分佈位置之數量與其百分比如表 2 所示。表 2 顯示崩塌地之分佈多位於斜交坡上，合計順斜及逆斜坡者於集集地震為 45.1%，於莫拉克颱風則更高達 68.3%。另就整體分佈來看，集集地震所觸發之崩塌點，四邊坡類型之崩塌地分佈較平均，位於逆向坡者比例約佔 28%，其次為順向坡，而順斜交坡最少；另莫拉克颱風觸發之崩塌，則以逆斜交坡者居多，其比例達 51%以上，其次為順向坡，而逆向坡最少。此一結果顯示地震引致的崩塌較無區分性，主要受坡度影響；但豪雨作用時，隘寮溪流域板岩層具有發達之劈理與節理等弱面，除降低岩體強度外亦與構成密集之地下水系統，豪雨時較易形成斜交坡表層或崖錐崩積材料之崩塌。

本文續細分各類型邊坡其崩塌規模如圖 14 所示，上圖中地震崩塌之小崩塌面積，其崩塌較不分邊坡類型，然為順向坡之崩塌規模面積通常較大順向構造地形常出現較大面積崩塌之狀況，亦出現於颱風崩塌地。顯示就大規模崩塌而言，順向構造為重要崩塌影響因素。再者，因隘寮溪河流下切劇烈，區域山坡常有解壓解理，斜交坡面上通常具有較密集之弱面或厚層崖錐堆積，所以較易發育中小規模崩塌(<10 公頃) 。

表 2 集集地震及莫拉克颱風崩塌之邊坡類型分布

	集集地震				莫拉克颱風			
邊坡型態	順向	逆向	順斜	逆斜	順向	逆向	順斜	逆斜
數量	88	96	69	82	486	251	414	1171
百分比%	26.3	28.6	24.5	20.6	20.9	10.8	17.1	51.2
崩壞比%	33.5	24.0	18.7	23.8	40.4	7.4	10.6	41.6

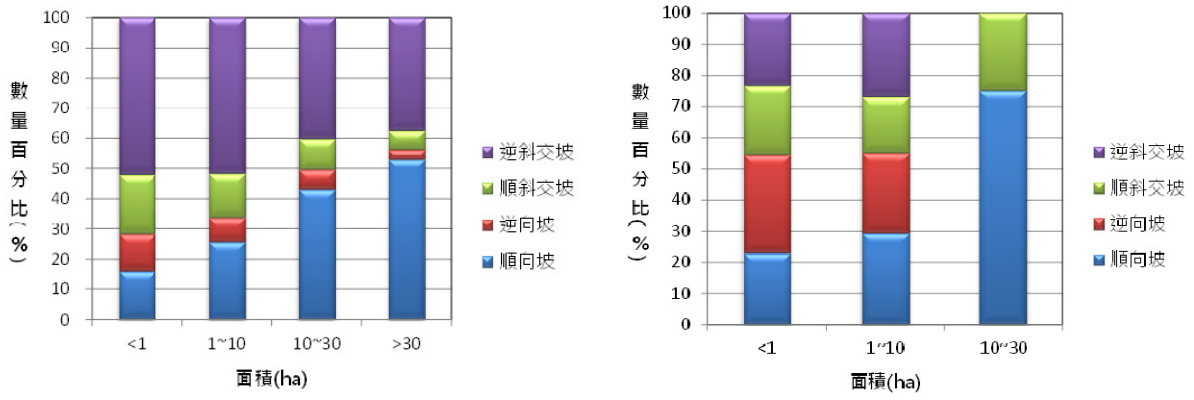


圖 14 集集地震後(左)與莫拉克颱風(右)崩塌類型與崩塌面積關係圖

3.4 崩塌規模與區位

本文分別針對集集地震及莫拉克颱風後隘寮溪流域內崩塌之分布區位進行統計；依其崩塌與山脊或河岸之距離比，繪製成圖 15 之分布圖。集集地震在山脊處之崩塌為 124 筆、山腹 128 筆、全坡長 3 筆、坡址 80 筆，崩塌區位數量分布最多的是山腹佔(38.21%)，其次為山脊(37.0%)、坡址(23.9%)、全坡長(0.9%)，如圖 16 所示；莫拉克颱風在山脊處之崩塌為 359 筆、山腹 784 筆、全坡長 83 筆、坡址 1101 筆，崩塌區位數量分布最多的是坡趾佔(47.31%)，其次為山腹(33.7%)、山脊(14.5%)、全坡長(3.6%)。惟比較地震與颱風崩塌地位置，為山腹區位之崩塌比例相當約於 33-38%左右。最後，綜合比較兩圖點位分布之狀況，顯示集集地震崩塌點較密集於坡頂及山腹之區位，而莫拉克颱風之崩塌則較分佈於山腹至坡腳等較低之區位。

本文進一步探討大崩塌與小崩塌分布區位之特性，區分大於與小於 1ha 崩塌在山脊、山腹、坡趾等區位之數量如圖 17 與圖 18。比較圖 17 兩事件之崩塌分佈，崩塌面積大於 1ha 者在山脊區位者，地震事件（37.89%）較多於颱風事件（12.61%），顯示地震大崩塌面積發生位置較密集分布於山脊；坡趾區位則是颱風(54.71%)多於地震(21.15%)，且全邊坡崩塌亦達 8.57%。地震引發之大面積崩塌主要分布於嶺線，其受地震時山脊稜線加速度增幅作用與地形坡度所影響。而位處於坡趾的崩塌，根據調查結果發現，位於坡趾的崩塌主要多發生於坡趾之崩積層。而莫拉克颱風之大崩塌面積者(>30ha 及 10~30ha)，崩塌發生起始位置從坡趾擴大至山腹，形成崩塌範圍佔據全邊坡的情況。崩塌趨近於山腹是因為高強度及長延時之降雨所造成的深層滑動，而坡趾處則多因溪水暴漲沖刷邊坡坡腳造成崩塌。

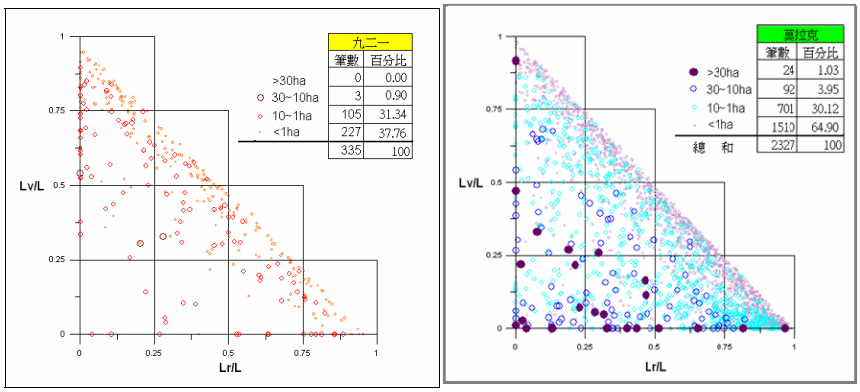


圖 15 集集地震後(左)與莫拉克颱風(右)崩塌面積與分布區位圖

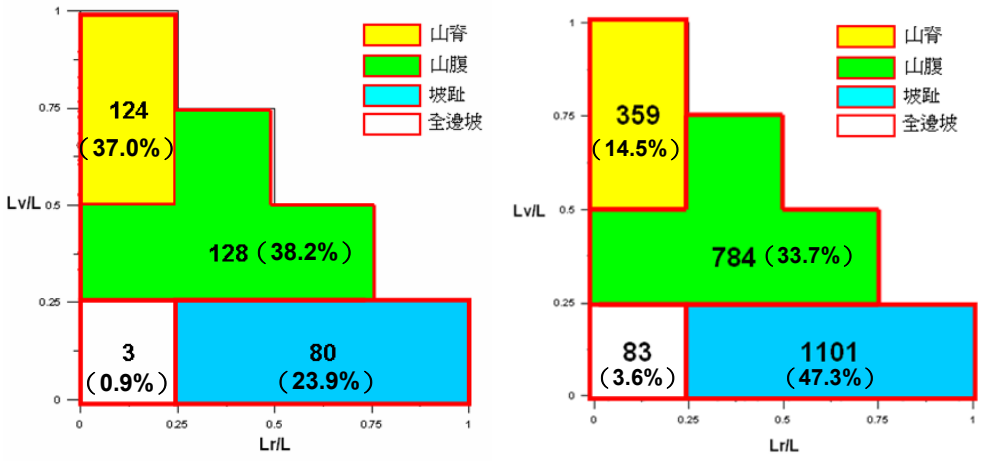


圖 16 集集地震後(左)與莫拉克颱風(右)崩塌於山脊、山腹、坡趾崩塌數量比較

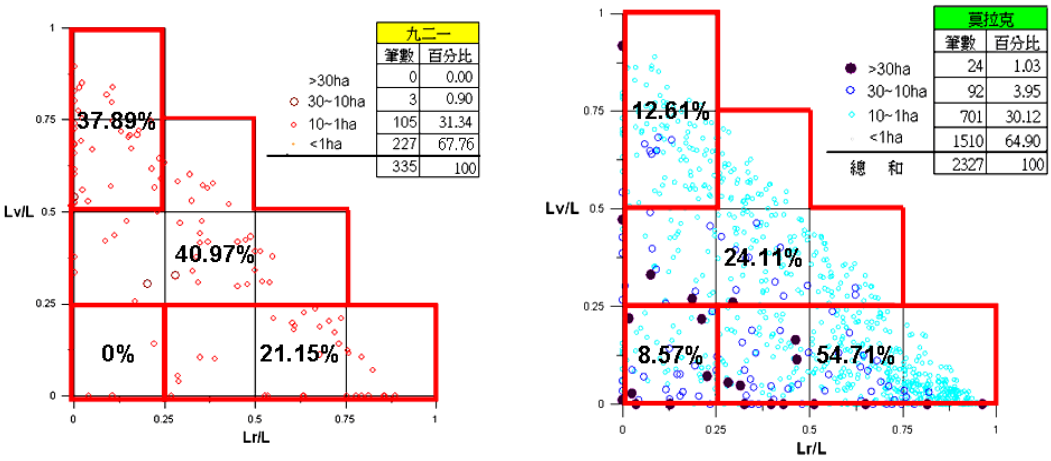


圖 17 集集地震後(左)與莫拉克颱風(右)>1ha 崩塌於山脊、山腹、坡趾數量分布

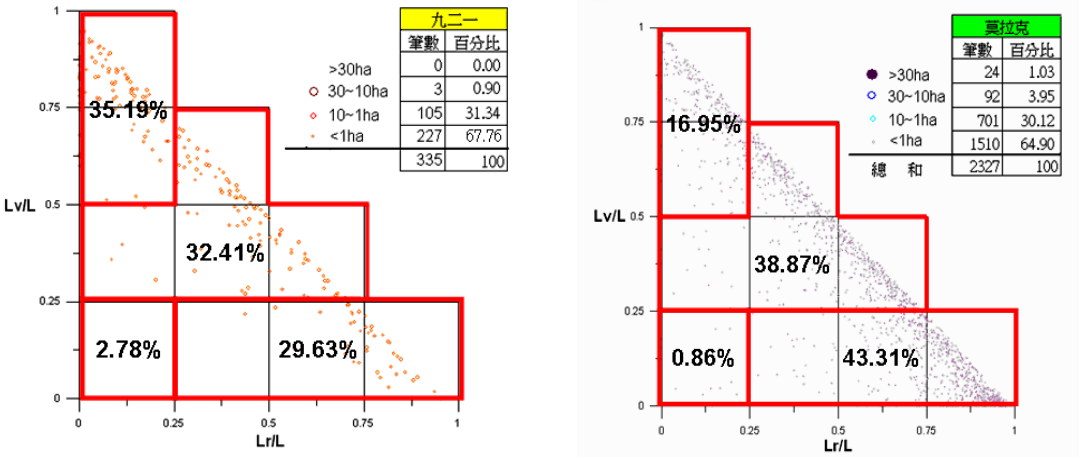


圖 18 集集地震後(左)與莫拉克颱風(右)<1ha 之崩塌於山脊、山腹、坡趾數量分布

小面積之崩塌地其分布狀況如圖 18 所示，圖中呈現與大面積崩塌相似的特性。地震型之崩塌趨近於山脊；豪雨型則是趨近於坡趾且越靠近坡趾的崩塌地面積亦較大，數量亦越多。

3.5 邊坡類型與崩塌區位

本文綜整崩塌邊坡類型與區位(山脊、坡腹、坡趾)分布狀況，統計成果如表 3 所示。表中分示集集地震與莫拉克颱風引致之崩塌。地震後崩塌之區位方面，地震山崩整體趨勢較為集中於山脊與山腹；不過順向、順斜與逆斜坡三者之崩塌，為呈現較均勻分布在山脊、山腹與坡趾。逆向坡崩塌稍有不同，較顯著集中於山脊及山腹處（約 88%）。而莫拉克颱風所觸發之崩塌，整體趨勢較為集中於坡趾與山腹。四類型邊坡崩塌之分布趨勢相似，均以坡趾為最高約由 43%至 57%間，次為山腹約佔 1/3 數量，而山脊崩塌約僅在 12%至 18%間。

綜合比較集集地震與莫拉克颱風兩事件，兩個事件崩塌地在山脊、山腹、坡趾的分布狀況呈現明顯差異，顯示地震與豪雨所引發崩塌之控制因素有所不同。但細觀各邊坡類型分別於兩事件崩塌區位之數量比例，除逆向坡之地震事件外，大部分邊坡類型之崩塌區位之分布比例較無顯著差異，此顯示崩塌區位之數量分佈比例受地震或颱風因素影響，但較不受邊坡類型影響。惟仍應注意的，崩塌地面積則受邊坡類型顯著之影響。

4. 崩塌地形狀

崩塌地形狀為山坡塊體運動行為之展現，亦與地形之侵蝕程度相關。本文針對大型崩塌地計算其坡形曲率，取崩塌地之平面、剖面曲率值分為橫軸與垂直軸如圖 19 所示，由於地震引致之大型規模

崩塌數量甚少，因此本文以莫拉克颱風事件作為分析主體。其次崩塌面積及區位之關係，則示於圖 20。圖中由平面、剖面曲率界分為 9 類形狀，圖上之編號分為對應圖 4 上之 9 種坡形編號。另分別細分以崩塌地之山脊、山腹、及坡腳區位，以及 5-10 公頃、10-30 公頃、及 30 公頃以上等三類崩塌面積，進而探討崩塌之坡形特性。

綜合圖 19 及圖 20 顯示，大面積崩塌地主要位於山腹及坡腳，其中又以坡腳處之崩塌點最多。就其分佈坡型來看，小於 30 公頃之山腹及坡腳崩塌多分佈於凸形及凹形剖面，而大於 30 公頃之崩塌地則以凸形剖面居多，其位置亦多位於坡腳區位，此亦與向源侵蝕動力增加或河谷解壓有明顯相關，此亦符合前節隘寮溪高侵蝕作用之推論。

大型崩塌常為深層岩體滑動，因此原邊坡之地質動力與構造為主要控制因素，由圖 20 中可見大型崩塌地其崩塌前，均具有某種程度之撓曲變形。圖中平直形者（如型態 4、5、6）崩塌點甚少，而就坡型來說，大型崩塌（10 公頃以上）多分佈於 1 凸窪、2 凸直、3 凸嘴、7 凹窪及 9 凹嘴等 5 型態。愈大面積崩塌其災前即存在愈大的凸或凹地形，由圖 20 中顯示大部分崩塌點其坡面若非明顯凸起、即有明顯凹入，顯示大規模崩塌岩體多呈漸進式的變形，於坡形上逐漸凸脊或凹谷地形，而後乃至破壞。

另統計崩塌區剖面之曲率分佈如圖 21 所示，圖中顯現出崩塌邊坡之地形曲率達 1×10^{-4} (1/m)即開始有崩塌曲線上昇趨勢，其中尤以較高區位之山脊上崩塌地，其崩塌趨勢相當顯著。而山腹及坡腳區位之崩塌地則較具耐山體變形能力，約半數之崩塌地達曲率 1×10^{-3} (1/m)時，崩塌曲線方明顯上昇。

表 3 集集地震及莫拉克颱風崩塌之邊坡類型與區位分布

邊坡類型		集集地震 山脊	山腹	坡趾	全坡面	莫拉克颱風 山脊	山腹	坡趾	全坡面
順向坡	數量	29	32	27	-	57	144	261	24
	%	33.0	36.3	30.7	-	11.7	29.6	53.7	5.0
逆向坡	數量	43	42	11	-	45	93	107	6
	%	44.8	43.8	11.4	-	17.9	37.1	42.6	2.4
順斜坡	數量	30	21	17	1	75	144	182	13
	%	43.5	30.4	24.6	1.5	18.1	34.8	44.0	3.1
逆斜坡	數量	22	32	26	2	182	403	546	40
	%	26.8	39.0	31.7	2.5	15.6	34.4	46.6	3.4

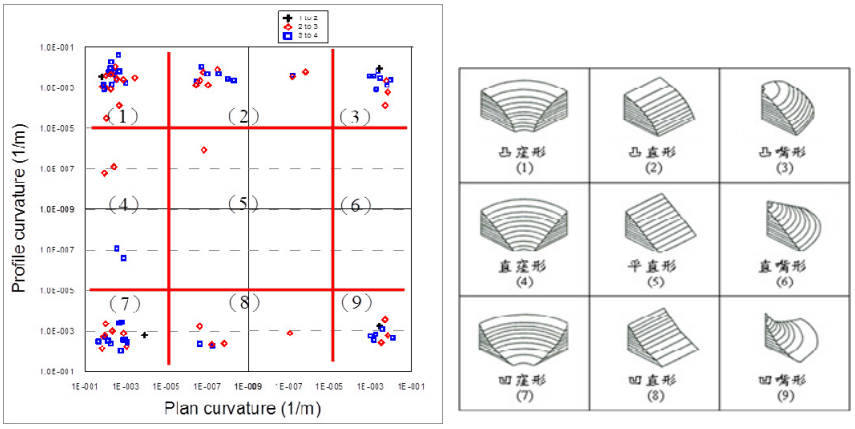


圖 19 區位-曲率分佈圖(1-山脊，2-山腹，3-坡腳)

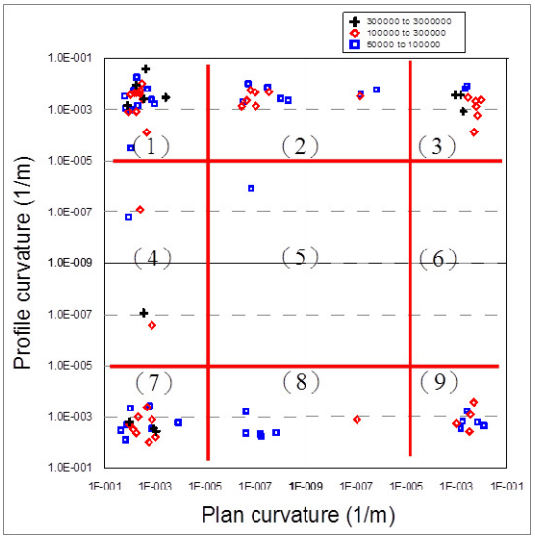


圖 20 崩塌面積(m^2)-曲率分佈圖

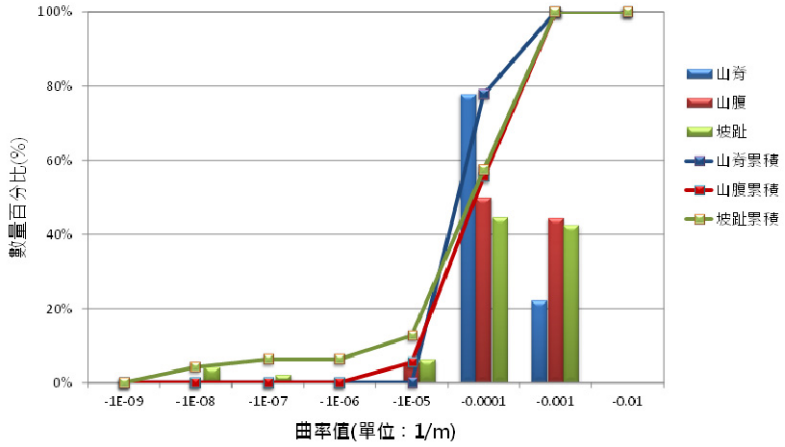


圖 21 大面積剖面凹形曲率-區位數量統計

5. 結論

本文針對隘寮溪流域集集地震後及莫拉克颱風兩事件之崩塌地進行分析統計後，獲致數點結論如下：

1. 就崩塌地坡度而言，集集地震崩塌地平均坡度主要分佈於 30 至 50 度之間，而莫拉克颱風崩塌地則主要分佈於 20 至 40 度之間；兩者之平均坡度均集中於 30 至 40 度之間，但颱風豪雨崩塌地之坡度較緩於地震崩塌地。
2. 崩塌地之坡向方面，集集地震或莫拉克颱風之崩塌均主要朝向東至南方向，此方向者佔全崩塌地之 80%以上。
3. 集集地震崩塌規模多較小，約 90%崩塌地面積小於 10 公頃；莫拉克颱風之崩塌規模則較大，10 公頃以上者達總崩塌面積之 52%。惟地震或颱風崩塌面積之數量比例並無明顯差異。再者，颱風引致大型崩塌之趨勢較地震事件顯著，其佔約崩塌數量之 5%，且面積卻幾佔全崩塌面積之 50%。
4. 於崩塌地區位上，集集地震崩塌較多位於山脊及山腹處，莫拉克颱風崩塌則較集中於山腹及坡腳處。莫拉克颱風崩塌區位集中於邊坡山腹及坡腳處，其與河岸被淘刷甚為相關。
5. 集集地震所觸發的崩塌點在各邊坡類型之分布較為平均，受坡度影響較大；而莫拉克颱風觸發之崩塌點，則主要位於逆斜坡居多。此一結果與隘寮溪流域崩塌地，劈理節理、弱面密集與地下水系統發達有關。

6. 坡形分析顯示大型崩塌地其崩塌前均已具有某種程度之撓曲變形。曲率值越大，則越容易造成大規模崩塌。多數大型崩塌點地形若非明顯凸起、即有明顯凹入，此大規模崩塌坡體多呈漸進式的變形，其地形曲率隨時間逐漸增大乃至破壞。
7. 大型崩塌地之地形曲率達 1×10^{-4} (1/m)即出現崩塌曲線上昇趨勢，其中尤以山脊附近崩塌地崩塌趨勢明顯。而山腹及坡腳區位之崩塌地則較具耐山體變形能力，約半數之崩塌地達曲率 1×10^{-3} (1/m)時，崩塌曲線方明顯上昇。
8. 本文採集集地震及莫拉克颱風兩事件為分析之案例，其中莫拉克颱風為極端降雨事件造成研究區嚴重崩塌，而集集地震則對研究區之影響較小。因此本文主要為討論地震與豪雨引致崩塌之特性，而非比較兩者之災害規模。

致謝

作者們感謝兩位審查委員提供非常精緻與寶貴之建議，其對本論文品質之提昇有相當重要之幫助。

參考文獻

王文能、尹承遠、陳志清、李木青，2000，九二一地震崩塌地的分佈與特性，第二屆海峽兩岸山地災害與環境保育學術研討會論文集，中華水土保持學會編印，台中，台灣，p.223-233。

王瑞斌，2001，南投九九峰卵礫石之排列及其形狀對坡度的影響，國立台灣大學地質科學系研究所碩士論文。

呂政諭，2001，地震與颱風作用下阿里山地區公路邊坡崩壞特性之研究，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。

沖村孝、鳥居宣之、永井久德，1999，地震後崩壞降雨による山腹崩壞，地震による林地の安定性と山地災害に關する總合的研究（基盤研究（A）（1））研究報告，p.63-76。

李德河, 方世杰, 林宏明, 2004, "颱風引致公路邊坡之破壞特性探討-以阿里山公路為例",防災與國土永續發展研討會論文集, 台北, p. 115～136.

林慶偉，2010，國土保育之敏感地質區調查分析計畫，莫拉克颱風受災區域之地質敏感特性分析(1/3)，中央地質調查所研究報告。

林慶偉、謝正倫、王文能，2002，集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響，集集地震對中部災區崩坍與土石流之影響，台灣之活動斷層與地震災害研討會，p.124~134。

徐美玲，1995，預測潛在岩屑滑崩的網格數值地形模式，地理學報，第 19 期，p.1-15。

洪如江、林美聆、陳天健、王國隆，2000，921 集集大地震相關的坡地災害、坡地破壞特性、與案例分析，地工技術，第 81 期，p.17-32。

陳天健、吳嘉俊、翁孟嘉、謝坤宏、王建智，2009，莫拉克颱風荖濃溪坡地災害調查，*地工技術*，第 122 期，p.13-20。

陳天健、曾勛苑、楊雅惠、吳雅平，2010，地震與豪雨作用觸發崩塌區位特性：以隘寮溪流域為例，2010 海峽兩岸地質災害防治學術，福州，中國福建，p.129-130。

許琦、蕭達鴻、徐豐裕、歐泰林、葉雅芸，2000，921 集集大地震崩塌地崩塌前之地形特徵，921 集集大地震週年學術研討會論文集，高雄應用科技大學土木工程系。

許煜煌，2002，以不安定指數法進行地震引致坡地破壞模式分析，台灣大學土木工程學研究所碩士論文。

湯國安、劉學軍、閻國年，2005，數字高程模型及地學分析的原理與方法，第八章，坡面形狀因子提取，p.217-218。

楊凌翔，2005，地震引致之山崩條件式機率預測模式-以集集地震為例，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。

廖啟岳，2008，大漢溪流域崩塌地發生特性分析，國立成功大學地球科學研究所碩士論

文。

鍾育櫻，2005，921 集集大地震前後降雨型崩塌地特徵之比較，臺灣大學地理環境資源學研究所碩士論文。

Chang, K.T., Chiang, S.H., and Hsu, M.L., 2007, Modeling typhoon-and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression, Geomorphology, vol. 89, p. 335-347.

Fuchu, D., Lee, C.F., and Sijing, W. (1999), Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, Engineering Geology， 51:279-290.

Keefer, D.K., (2000), Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution - the 1989 Loma Prieta, California event, Engineering Geology, v. 58, p. 231-249.

Muenier, P., Hovius, N., Haines, J., 2008,Topographic side effects and the location of earthquake induced landslides, Earth and Planetary Science Letters v. 275, p. 221-232.

Parise, M., and Jibson, R.W., 2000, A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the January 17, 1994, Northridge, California, earthquake, Engineering Geology, v. 58, p. 251-270.

Pierson, T.C. (1977), Factor controlling debris-flow initiation on forested hillslopes in the Oregon coast range, Ph.D. dissertation, University of Washington, Seattle.

Ruhe, R. V., 1975, Geomorphology: geomorphic processes and surficial geology, Boston, Massa chusetts: Houghton Mifflin.

Topographic Characteristic of the Landslide induced by earthquake and Rainfall in Slate Stratum in South Taiwan – Case of Ai-Liao Catchment

Tien-Chien Chen [1*] Ming-Hsi Lee [2] Xun-Yuan Zeng [3] Hong-Yu Yen [4] Zong-Lian Li [5] Yi-Siou Lin [6]

ABSTRACT

The paper draws the topographic characteristics of the landslide induced by Chi-Chi Earthquake and Typhoon Morakot in Ai-Liao catchment, in slate stratum. The result from topographic analysis on the DEM shows 90% landslides induced by earthquake are small than 10 ha, the average slope is 30-50^{o}, and 75% of landslide locates at the ridge or the mountainside of the slope. Oppositely, the 52% landslides induced by typhoon are large than 10 ha, the average slope of landslide is gentle to the one of earthquake landslides and 81% of landslides locates at the mountainside or the toe of slope. The analysis result also demonstrated that a certain degree of deflection usually occurs before a sliding initiation that suggests the deformation (and the subsequent damage) of the massive landslide is progressive. Moreover, the profile curvatures of landslide cases are close to the curvature 1×10^{-4} (1/m), the landslide possibility rises up at where curvature beyond the value.

Keywords: Earthquake, rainfall, landslide, slate, topography

[1] Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology
[2] Assistant Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology
[3] Engineer, Section of Soil and Water Conservation, Bureau of Hydraulic Engineering, Kaohsiung City
[45] Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology
[6] Senior, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology
[*] Corresponding Author, Phone: 886-8-7703202 ext 7169, E-mail: tcchen@mail.npust.edu.tw

Received Date: Aug. 23, 2013
Revised Date: Nov. 11, 2013
Accepted Date: Nov. 29, 2013

航測及遙測學刊　第十八卷　第2期　第93-108頁　民國103年05月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume18, No2, May 2014, pp. 93-108

空載光達數值地形產製與地質災害的應用

侯進雄[1]　費立沅[2]　邱禎龍[3]　陳宏仁[4]　謝有忠[5*]　胡植慶[6]　林慶偉[7]

摘　要

因2009年莫拉克風災造成臺灣中南部地區嚴重的生命財產損失，其中以小林村重大的崩塌事件引起注意，故經濟部中央地質調查所自2010年起，以3年時間利用空載光達進行地形掃瞄，產製1米高解析度數值地形及航照正射影像，藉以建立災後高精度的數值地形資料庫，並應用於地形與水系分析、地質敏感區調查與地質災害潛勢評估等；其中對於潛在大規模崩塌的判釋與調查結果顯示，臺灣中部、南部與東部地區可找出超過數百處可能屬於大規模崩塌的潛勢區域，且對於有聚落保全對象的崩塌潛勢區域設置簡易監測儀器，藉以觀察各崩塌地之滑動趨勢，未來可再針對高活動區域逐步進行細部觀測；目前在尚未得知潛在大規模崩塌區的滑動面位置及深度前，藉由野外調查潛在崩塌區的範圍、地形、裂隙、塌陷等地表的特徵來估算滑動面的位置，以數值模擬推估崩塌的可能影響範圍，可作為後續搬遷、撤離等防災減災之參考資訊。

關鍵詞：空載光達、數值地形模型、大規模崩塌、自然災害、全球衛星定位系統

1. 前言

2009 年 8 月莫拉克颱風重創臺灣，造成臺灣南、中及東部地區持續出現複合型土砂災害，整個國土之地形地貌發生劇烈變遷，更在臺灣中南部地區造成嚴重傷亡及財物損失，依據內政部消防署(2009)之統計資料：莫拉克颱風共造成 675 人死亡、24 人失蹤及 34 人受傷，在臺灣天然災害史上死亡及失蹤人數總和排名僅次於 1999 年之集集大地震(陳樹群和吳俊鋐，2009)，尤其以小林村崩塌之埋村災變為最。小林村遭受之災害包含大規模崩塌、土石流、堰塞湖及洪水等四種不同災害類型影響，此一重大坡地災害引起國際關注類似小林村深層岩體滑動所引致的大規模崩塌災害議題，也在國內開啟大規模崩塌災害相關防治工作研究。

由於莫拉克風災在災區產生許多新的崩塌地，地形地貌亦有大幅度改變，舊有地質災害資料已不適用，須即刻進行該地區之地質災害調查及地質敏感區圈繪，以提供當地住民安全資訊及政府各項重建重要數據，中央地質調查所從 2010 年起，以 3 年時間執行「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」；另從 2013 年起，以 3 年時間執行其他非莫拉克地區，俾使全臺灣有一致精度的數值地形(圖 1)。以空載光達(Airborne LiDAR)測製數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的技術，可以濾除地表建物與植被的影響，且將地形原始真實地面之高程清楚呈現，使地質與地形特性的研究更容易進行；並利用同步獲致之航照影像，可應用於地質敏感區調查分析、地形及水系特性分析、與地質災害潛勢評估等，提供國土保育以及坡地土地利用與管理之基本資料。

利用空載光達數值地形資料進行敏感區調查

[1] 經濟部中央地質調查所 科長
[2] 經濟部中央地質調查所 組長
[3] 經濟部中央地質調查所 技正
[4] 經濟部中央地質調查所 技士
[5] 經濟部中央地質調查所 技士、國立台灣大學地質科學系 博士生
[6] 國立台灣大學地質科學系 教授
[7] 國立成功大學地球科學系 教授
*通訊作者, 電話: 02-29462793 ext 903, E-mail: hsiehyc@moeacgs.gov.tw

收到日期:民國 102 年 08 月 09 日
修改日期:民國 102 年 11 月 26 日
接受日期:民國 102 年 12 月 18 日

分析時，發現此資料提供之崩塌地形資訊，比傳統技術方法更為細緻且在判釋上直接有利，因此開啟了利用高解析度數值地形資料來對潛在大規模崩塌的調查工作。透過地形資料的判釋與現地調查，初步認定可能屬於大規模崩塌滑動的潛勢區域數量甚多，受限於技術及經費，設置簡易型觀測設備是目前較適合針對大規模崩塌進行觀測之可行方式，並可為日後大規模崩塌觀測技術研發跨出重要的一步；此外，細部調查及可能影響範圍等亦為未來之重要工作，方能進行後續的治理與管理工作的推動，以達國土災害預警之目標，降低大規模崩塌可能造成之生命財產損失。

本文就上述從地質災害調查所需而採取的數值地形製作、資料檢核、地質敏感特性分析、潛在大規模崩塌判釋與調查、以及後續之簡易監測與細部調查做更進一步的描述。

2. 空載光達數值地形

2.1 空載光達介紹

光達(Light Detection And Ranging, LiDAR) 是一種利用雷射光束進行掃瞄式測距的一種技術，能於短時間內快速且精確的得到高解析度、高精度、高密度的高程資料，由於儀器是採用自體光源進行施測，無需於測區擺設任何接收儀器，故為主動式的測距技術。空載光達(圖 2)是結合雷射掃瞄儀、全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)與慣性導航儀 (Inertial Navigation System, INS) 等技術，另外加上慣性量測單元 (Inertial Measurement Unit, IMU)可以記錄飛航時的三項姿態角 (Roll、Pitch、Yaw)，將雷射掃瞄所產生的點雲資料與 GPS 和 IMU 資料解算後，能獲得地面點位的三維坐標 (經度、緯度、高程)，其特點包括：

(1) 高精度，在平坦地區測高精度可達 15 公分。
(2) 高密度，目前雷射脈衝率最高可達 500 KHz。
(3) 氣候狀況影響較低，可於夜間作業。
(4) 雷射光束能穿透植被到達地面，可精確的測得植被覆蓋區的地表高程。
(5) 對於大範圍的測區能快速的完成掃瞄，成本較傳統測量方式低。

2.2 空載光達數值地形測製

本工作主要目標為利用空載光達技術取得高解析度數值地形，並且拍攝航照影像，施測範圍依據莫拉克颱風受災情況，分為南部、中部及東部 3 個地區(圖 1)，且分 3 年度執行，施測重點以包含山區的聚落與具有保全對象之範圍者為優先。

本工作數值地形測製相關規範原則以內政部「LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序(草案)」為依據，惟為後續數值地形的應用與防災使用，本案在測製規範上採用更加嚴謹的尺度做規劃；於 GPS 地面基站的設置規範上，規定空載光達資料獲取同時，應於掃瞄區域內 20 公里範圍內，選取 2 點以上之透空度佳(仰角 10 度以上無遮蔽)的地面 GPS 基地站；為利航帶平差之成果進行精度分析及資料之整合，本案規定進行航帶平差時，每航帶間應有頭、中及尾共 3 個控制點加入航帶間的平差計算使用，惟山區道路崎嶇難行或無法抵達之處，容許使用航測空中三角方法，而在航帶重疊率則規定需在 40%以上；本計畫為獲取 1 米高精密度數值高程模型(DEM)資料，故設定嚴謹的光達點雲掃瞄密度及重疊航帶後的點雲密度，並以 100 米x100 米為單位，於低海拔及河川洪泛溢淹地區(高程 800 米以下)平均密度需大於 2.02 點/平方米，中高海拔地區(高程 800 米以上)平均密度需大於 1.5 點/平方米，密度不足比例需小於測區面積之 10%；低密度(平均密度小於 1.0 點/平方米)之比例需小於測區面積之 5%；在點雲分類方面，本案採用地面點(Ground)、非地面點(Nonground)、水域點(Water)、雜點(Noise)等共四種類別作為分類標準。另飛航掃瞄應同時進行航照影像的拍攝，單幅影像之含雲量應低於 5%之影像。

空載光達數值地形製作之主要工作內容包含下列六大項：

(1) 空載雷射掃瞄飛航計畫規劃與申請。
(2) 地面 GPS 基地站控制測量。

(3) 空載雷射掃瞄施測資料獲取。

(4) 雷射掃瞄點雲資料處理。

(5) 數值高程模型(DEM)與數值地表模型(DSM)製作、正高改算、人工檢核與編修及圖幅鑲嵌處理等。

(6)正射影像製作。

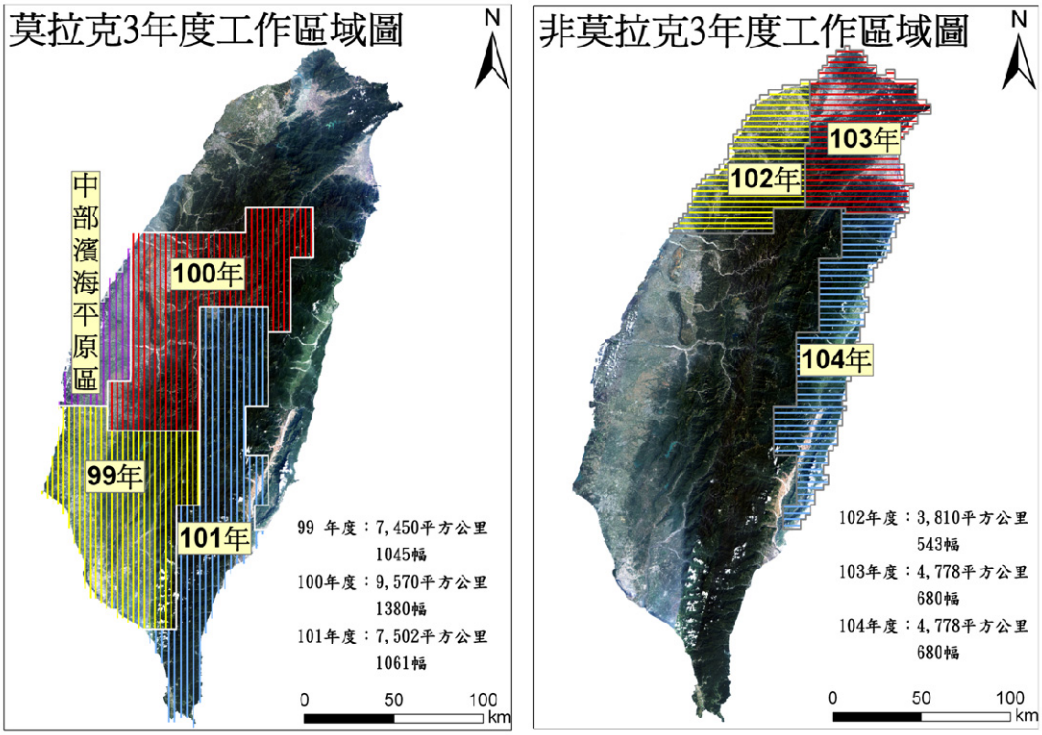


圖 1 經濟部中央地質調查所 6 年來執行 LiDAR 掃瞄之區域圖

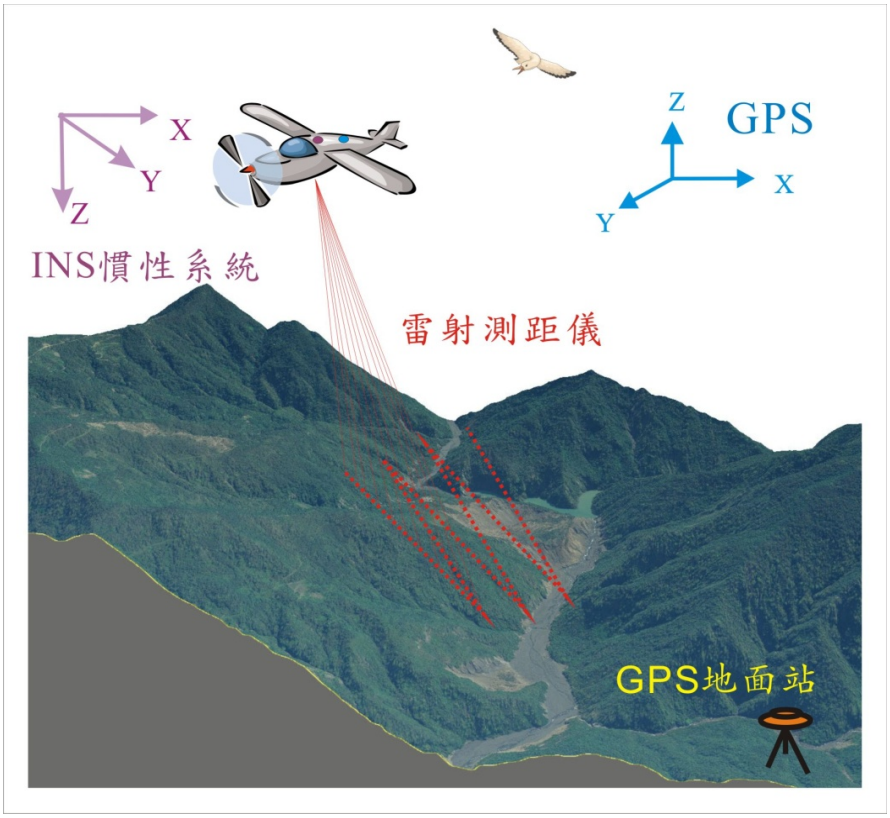


圖 2 空載光達掃瞄示意圖(謝有忠等，2012)

再根據標準作業流程(圖 3)分成飛航掃瞄規劃、資料獲取、原始點雲解算、點雲分類與編修及成果產出等 5 個階段，最終產製 1 米x1 米的 DEM/DSM 及解析度 50 公分的正射影像，供後續地質敏感特性分析使用，並建置高解析度數值地形資料庫。

3. 空載光達數值資料處理檢核與精度控制

光達產製資料品質好壞與未來是否能實際應用於分析或災區整治用途，皆與 LiDAR 資料掃瞄測製、數值地形製作成果之品質有相當大之關聯性，且 LiDAR 資料處理完成之時程與整體計畫之執行是否順利息息相關。因此必須有一獨立廠商對於資料建置廠商整個作業流程與資料品質做最好的監督與把關的工作，以保障其正確性並供後續應用，以期計畫能如期如質完成。

3.1 資料處理檢核

本項檢核工作除了就建置廠商的作業計畫、進度管控與成果的繳交等期程的控管之外，對於工作的實質內容亦有嚴密的檢核機制；因此除了飛航計畫書、光達系統率定(含率定場)、控制點(含點位指示圖)、航帶平差、潮汐資料、各架次成果飛航掃瞄、點雲記錄格式、測區覆蓋完整度及相鄰航帶重疊率等書面或程式檢核外，對於點雲密度、不合理點雲、測區水體點雲、航帶平差控制點、點雲過濾、原始與正射影像、圖幅無縫接邊處理等作書面檢核或實地的外業測量查核，俾使資料品質更臻完善、正確。

在點雲過濾檢查項目方面，依建置廠商初期的繳交成果，針對點雲過濾有疑義(常見錯誤)之項目歸納出如表 1 共 11 項基本準則，並依此準則進行檢查，檢查發現列表中任一錯誤，視為 1 個錯誤區，單幅累積滿 3 個錯誤即判定不合格。

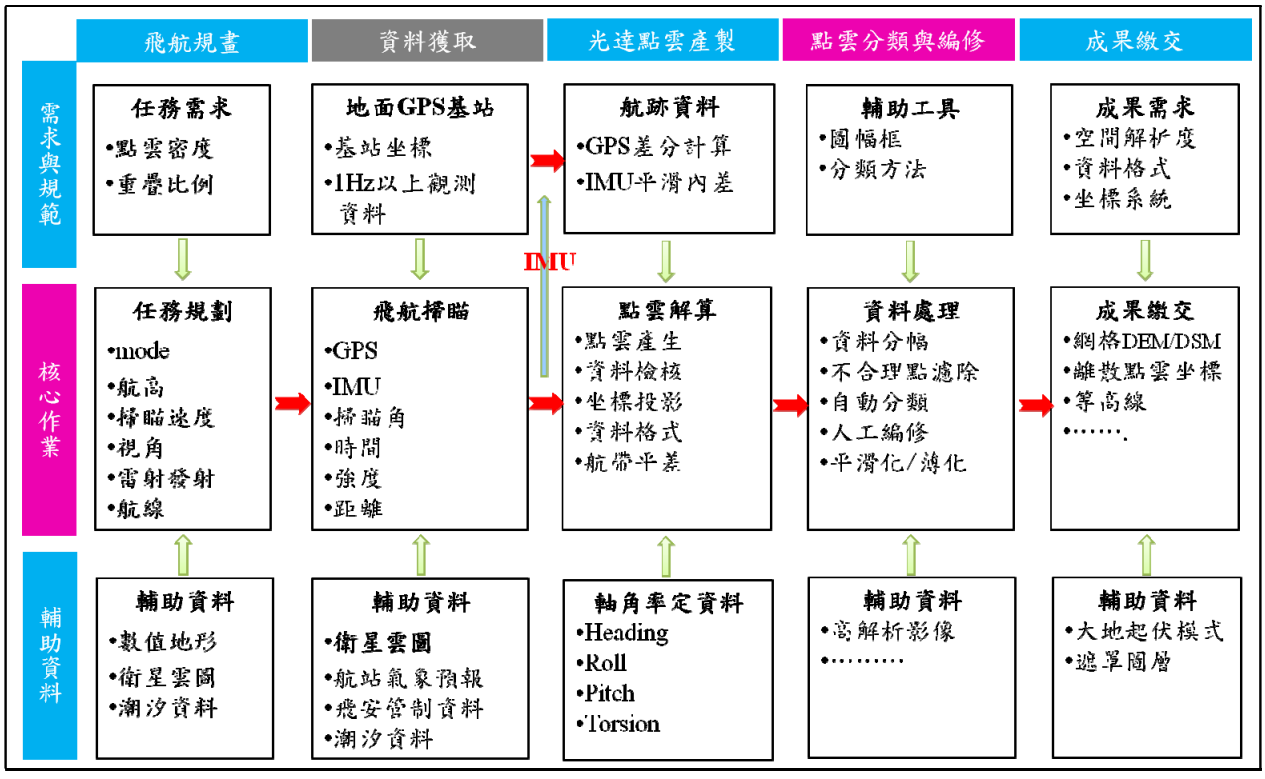


圖 3 空載光達作業流程圖

表 1 本計畫檢核廠商歸納出點雲過濾時常見的明顯錯誤

點雲過濾明顯錯誤(常見錯誤)列表			
1	建物未濾除	7	非永久性土堆未濾除
2	堤防或實心道路被濾除(含土堤、田埂等)	8	地面點不足(地面點過少，明顯不足以表現地形變化）
3	橋樑(含高架道路)、涵洞未濾除	9	圖幅或圖幅內接邊問題(圖幅間高程不一致)
4	不合理點雲(高點或低點)未濾除	10	航帶間有明顯偏差(平差問題)
5	地面點過度濾除(地形反曲位置，如：山脊線因地面點不足被削平)	11	水域內點雲未濾除(本項納入水域範圍線檢查不視為編輯錯誤，但後續作業中，需確實將水域內點雲濾除)
6	植被未濾除(矮植被則考量其影響面積與高度進行判定)		

3.2 成果精度控制

本計畫為獲取 1 米高精密度數值地形模型資料，設定上述嚴謹的光達點雲掃瞄密度。在 DEM 品質方面，依據內政部「LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序(草案)」，本案之 DEM 成果產製的精度採用內政部 Level 2B 等級標準，高程精度以 $\sigma = a + b + c \cdot t$ 公式計算(參數說明請參照前述草案)，由基本精度標準，再依據不同地形類別及地表植被覆蓋情形作為檢核依據，平面精度需符合 50 公分以下的檢核基準。另於正射影像需符合 50 公分地面解析度的彩色影像，檢核工作項目包含格式及品質檢查、地物連續及合理性檢查、地物平面位置精度檢查，其中對於色調與色彩平衡、構造物、交通系統與其他建物之完整性及是否扭曲變形、及圖幅接邊的連續性，以達無縫接邊的完美狀況；惟因不同年度由於天然災害(山崩或土石流)造成前後期地形地物的改變，本案採取分別維持前後期的成果，不需更動，但須於地形地物有差異之處，說明其原因，供後續使用者參考。

在成果精度的檢核方面，監審廠商須就航帶平差控制點與不同地類的地形高程做實際的外業測量檢核工作，其測量與建置廠商的比較結果，依內政部「基本測量實施規則」所規定之加密控制測量精度規範，採單次抽樣，抽樣比例為10%以上，每個送驗批至少抽4個點，允收品質水準(AQL)為0，亦即所有抽樣皆須通過檢查標準；在航帶平差高程控制點方面，水平(E或N坐標分量)分量差值之絕對值應小於30mm+ppm；垂直(h坐標分量)分量差值之絕對值應小於75mm+15ppm；航帶平差平面控制點(特徵角點)方面，以水平分量差值之絕對值應小於100mm+6ppm；垂直分量差值之絕對值應小於150mm+15ppm，否則以不合格計。全部抽驗之點位需符合規定才算合格。任何點位不符合規範，視同地面控制測量成果驗收不通過。由於本案空載光達資料獲取同時，應於掃瞄區域內20公里範圍內，選取2點以上之透空度佳的地面GPS基地站，故航帶平差控制點距上述GPS基站之最長距離應為20公里之半，故本案驗收之基線統一以10公里檢核計算之依據；故平面標準為90mm(30mm+6ppm)，高程標準為225mm(75mm+15ppm)。

在 DEM 成果產製的外業實際檢核方面，依上述不同地類依規範標準，分別於實地上適當透空處，以動態方式觀測，並使用內政部國土測繪中心 e-GPS 系統為參考框架，實測得各地類點三維坐

標，再與產製的 DEM 成果依地類點平面坐標內插而得的高程做比較，必須符合 $\sigma = a + b + c \cdot t$ 公式 Level 2B 的標準。

4. 地質災害敏感特性分析

本項工作主要利用空載光達所測製之數值地形模型與航照影像，以分年分區完成莫拉克受災區域內之地質構造與地形分析、可能的地質敏感地區範圍圈繪、地質災害潛勢分析與地質災害可能影響區域分布等工作，以精確完整的評估災區之地質敏感地區、地質災害潛勢區域及地質災害可能影響區域分布，並適切討論相關地質災害之成因、影響範圍、影響程度與未來可能之發展等，以供後續國土規劃、國土分級管理、國土保育等目的使用。主要工作項目如下：

(1) **判釋地質構造、河流水系、緩坡地與階地地形；進行莫拉克風災前後地形地貌比對**

判釋之內容包括工作範圍內之斷層、褶皺及其他類型不連續面的線形構造、河流水系、緩坡地(面積大於 10 公頃以上)與階地等。

(2) **判釋可能致災之環境地質因子，並圈繪地質敏感地區**

運用現有之調查、影像及數值地形資料，進行工作範圍內之環境地質因子圈繪與屬性資料建置，環境因子圈繪包括山崩(落石、岩屑崩滑及岩體滑動等 3 種類型)、順向坡、土石流、河岸侵蝕及向源侵蝕等資料；各類屬性資料的建置，根據地調所前期環境地質資料庫標準格式建置。完成環境地質因子建置後，配合地調所前期建置之資料，就山崩、土石流及其它可能存在之地質敏感地區，配合地形現況，進行地質敏感地區的範圍圈繪。

(3) **進行山崩地質災害潛勢分析及其可能影響區域之圈繪**

結合前兩項工作項目之分析成果，比對曾經發生地質災害的案例、歷年衛星影像或航照分析成果，確認重大山崩可能發生的區位，並加以分級分類，進行山崩之災害特性、發生原因、未來可能之災害潛勢分析及估計其可能影響的範圍。

(4) **受災地區重點區域的地質敏感特性評估**

對於調查區域內具有保全對象之重點地區，配合 LiDAR 數值地形資料，進行細部之判釋與野外地質查核工作。調查內容以高山聚落為主，但其它具有保全對象之所在及重要設施(如水庫、電廠、橋梁及道路等)也需加以評估，其優先調查次序以聚落為第一優先、水庫電廠及重要公共建築為第二優先，再者為重要聯結橋樑與道路等。現地細部調查以 1/5,000 數值地形圖為工作底圖，調查內容應涵蓋重點區域及鄰近區域內各類不利地質安全之環境地質因子或人為之行為進行調查與評估(表 2)。

5. 大規模崩塌調查

5.1 大規模崩塌定義

國際間針對山崩或坡地土砂災害等現象之分類方法眾多，多以移動材料、移動方式、移動速度、發生規模等因子進行分類；歐美地區的研究多以 Large landslides ; Deep-seated Landslides ; Catastrophic rockslide-avalanches ; Catastrophic landslide ; Large-scale rock avalanches；Sturzstrom 等名詞來表示涉及岩體滑動或崩解的大規模破壞(Geertsema *et al*., 2006; Jarman, 2006)。美國地質調查所(USGS)彙整了近百年全球出現的大規模崩塌事件，這些列入全球性事件的多有下列 3 項特點之一或以上，(1)至少造成百人死亡以上，(2)巨額財產損失，(3)造成自然環境重大影響等，以對社會、經濟或自然環境有重大衝擊的山崩，包括人員和財務的重大損失，稱為 Large landslide(USGS, 2010)。

加拿大則以近 30 年來的統計，即以 50 萬立方米或範圍超過 1 公里等條件，來定義大規模崩塌或災害性崩塌(Geertsema *et al*., 2006)；另有以剪切面超過 3 米深度或平均影響面積超過 4.2 公頃者(Van Den Eeckhaut *et al*., 2005)、岩坡破壞至少 0.01 平方公里為最低門檻標準者(Jarman, 2006)等有關大規

模崩塌的描述與定義。而在日本相關研究中，也將災害規模依滑動深度區分為深層崩壞及表層崩壞，以一般表層土與岩石基盤分界大約在 0.5-2 米深度為分類依據，而深層崩壞為在斜坡上發生較大規模，滑動深度較深，且包含表土層及地盤基岩等土石岩塊的崩壞現象，並具高速移動的土砂運動，且土砂運移範圍多超過原土石崩壞範圍，坡面崩壞土塊會在崩解同時開始移動，或是維持原形態崩解下滑等幾個特徵((社)砂防学会, 2004)，且深層崩壞土砂體積量多為 10^5 立方米以上，容易引起土石流、堰塞湖等而造成甚大的災害(独立行政法人土木研究所, 2008)，因此由災害規模可與表層崩壞區分出。日本地滑學會也提出以發生區規模為 30 米以及移動速度以 5 米/天 為界，可以按田字型分成四類，包含大規模高速(如深層崩壞)、大規模低速(如地滑)、小規模高速(如落石)、小規模低速(如表層潛移)等，發生區域之規模可以直接在地形圖上量測，可為方便現地調查的操作定義((社)日本地すべり学会, 2004)。

表 2 莫拉克颱風受災區之地質敏感特性分析計畫各年重要成果

No.	年度生產重要圖資成果		年度		
			99 年 (南部)	100 年 (中部)	101 年 (東部)
1	地質敏感區圈繪完成幅數		42幅 (1/25,000)	1100幅 (1/5,000)	773幅 (1/5,000)
2	山崩	落石	1,053	1,873	387
		岩屑崩滑	54,889	39,359	22,312
		岩體崩滑	387	321	358
		總計	56,329	41,553	23,057
3	土石流		1,700	1,100	663
4	順向坡		4,398	3,646	1,168
5	河岸侵蝕		1,586	566	288
6	向源侵蝕		3,579	299	175
7	重大山崩		491	321	358
8	潛在大規模崩塌		52	178	188
9	聚落安全評估	不安全	50	56	70
		有條件安全	46	57	46
		安全	14	15	37
		總計	110	128	153
1:25,000 成果圖					
10	地質構造、地形與特徵分析成果圖		32	44	38
11	地質敏感地區分布圖		42	44	38
12	地質災害潛勢分析及山崩地質災害可能影響區域分布圖		42	44	38
13	1:5,000 之重點區域地質敏感特性評估分析圖		101	100	100

目前常見的分類方法為 Varnes 之分類方法(Varnes, 1978)，以移動物質的材料及移動方式來分類，中央地質調查所先前即參考此山崩分類方法並加入順向坡地形、風化侵蝕、礦坑、棄填土等而成環境地質基本因子，此方式可以利用目前常見的地形或影像資料，而進行有效且方便的判釋。雖目前的分類中並未加入土砂規模或移動速度的考量，而以岩體滑動的定義會產生大規模土砂事件，故本文所討論的大規模崩塌即以岩體滑動類型為主。日本京都大學千木良雅弘(2011)在其「大規模崩塌潛感區」一書中，即以崩塌土方量達十萬(10^5)立方米以上，亦即長、寬、深分別為 100 米×100 米×10 米以上作為「大規模崩塌」之定義，此定義方式可以在圖面上清楚劃分崩塌的規模，對室內判釋或野外調查作業都能方便操作，故本研究也以此規模大小做為大規模崩塌之定義(謝有忠等，2013)。

5.2 大規模崩塌地表特性

大規模崩塌的發生雖是一種瞬間高速的滑動行為，然於未發生滑動前會有一段很長的孕育發展過程，在這些發展的過程當中，地表上將會顯現出一些細微的地形特徵；這些重力變形現象包括山頂緩斜面、崩崖、反斜崖、裂縫、二重或多重山稜線、線狀凹地、圓弧形滑動體、坡趾隆起、坡面及側邊蝕溝、岩盤潛變現象、其它老崩塌地地形，部分特徵位置分布如圖 4，上述地形特徵多為利用地形圖或地形資料可判釋出，這些地表上顯現出一些細微的地形特徵，將是我們尋找潛在大規模崩塌的重要判釋依據。

6. 以空載光達數值地形判釋大規模崩塌

就崩塌判釋研究而言，過去坡地地質災害的研究，包含淺層崩塌、岩體滑動、土石流等，主要多利用衛星影像、航空照片、現地調查及數值高程模型等基本資料來進行分析研究(經濟部中央地質調查所，2008)，從衛星影像、航照上植生色調變化，或是坡面上地貌特徵，或由水系密度、排列狀況，或地形坡面平整程度等來進行判釋，在臺灣地區多數發生不久的或植生不易的崩塌地比較容易被判釋出；植生復原的崩塌地或舊崩塌地，由於山坡地植生茂密，衛星影像或航空照片則易受植生遮蔽影響，而影響判釋結果。而地形資料方面，過去數值地形資料的產製，大多來自航空攝影立體測圖產製的數值地形，然而航空攝影受到地面上植被的覆蓋，在植被茂密的高山密林區，受到製圖者經驗且主觀的因素影響甚鉅，無法呈現真實的地表地形。因此在大規模崩塌呈現的小崖、崩崖等地形特徵，並不易被判釋出來(圖 5)。

近年來空載光達技術快速發展，由於它能穿透地表植被的覆蓋，能夠獲取真實地表的數值高程模型，且因具有足夠可靠的解析度、精度、便利等特性，在地質與地形學的領域可以提供極佳的應用，更重要的是此項技術可以濾除建物與樹木遮蔽，還原原始地面形貌，能確實符合地質與地形之分析研究。本研究利用空載光達技術所測製之高解析度數值地形資料、航照影像，輔以既有地質圖之地層與構造資料，合併地形坡向資料，以地形計測方法分析處理，針對細微地形特徵之分析，進行潛在大規模崩塌之判釋；透過光達數值地形資料之判釋與現地調查(圖 6~圖 8)，可找出可能屬於大規模崩塌滑動的潛在區域，探討潛在大規模崩塌滑動體可能的活動性，崩塌後可能的堆積形貌、塊體運動路徑與速度及整體影響範圍與未來可能之發展等。

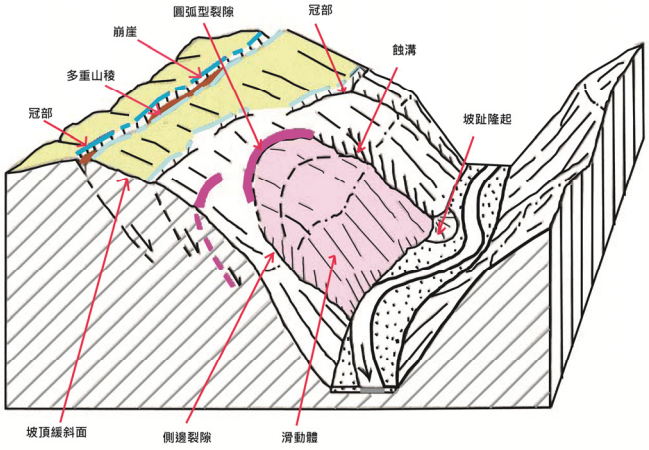


圖 4 大規模崩塌細微地形特徵示意圖(修改自鈴木隆介, 2000)

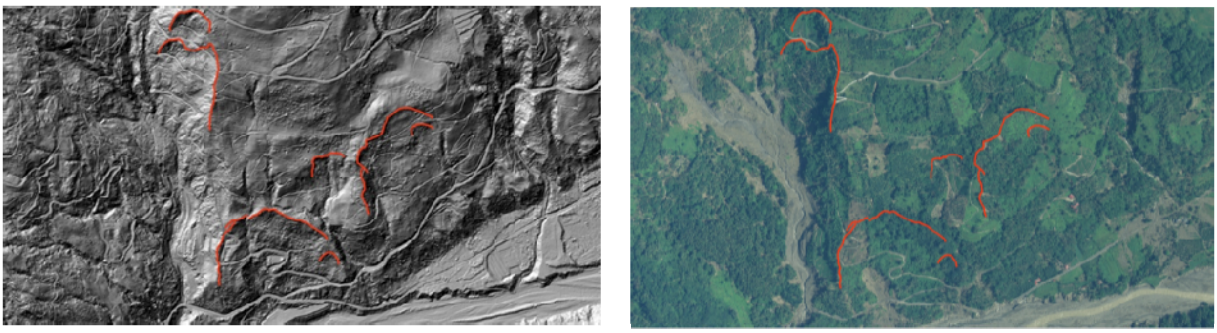


圖 5 左圖為利用空載光達產製之 1 米解析度之日照陰影圖，右圖為航照正射影像。大規模崩塌的的細微地形特徵可以由左圖圈繪出可能潛在的崩塌區域，再套繪於右圖航照正射影像上，再次的驗證，由此不難判釋出其潛勢區域，這是先前單從高植被覆蓋密林區的航照正射影像上做判釋很難辦到的

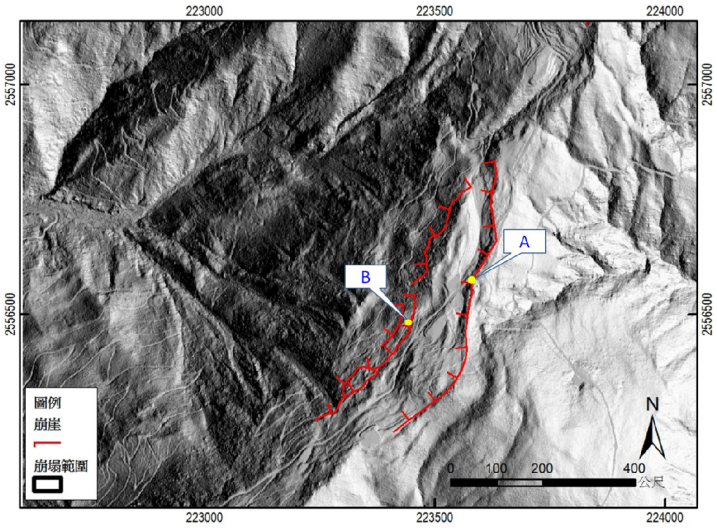


圖 6 高雄市寶來區竹林聚落由空載光達產製之 1 米解析度數值地形陰影圖判釋出可能潛在大規模崩塌的地形特徵



圖 7 根據室內判釋結果，實際赴現場找尋可能的地形特徵證據，此為圖 6(A)處於現地上出現崩崖切過路面，呈現明顯的落差與擋土牆破壞的情況



圖 8 此為圖 6(B)處於現地上呈現梅樹園坡面有一明顯高差，顯示崩崖於梅樹園發育的情形

7. 大規模崩塌之初步調查成果

地調所自 2011 年起依據高解析度數值地形資料，分年分區針對莫拉克災區進行潛在大規模崩塌區域性之調查圈繪(圖 9)；初步以面積大於 10 公頃、崩塌體積超過 10 萬立方米、深度在 10 米以上者進行篩選。結果顯示在南部地區共有 52 處符合潛在大規模崩塌區位之條件，其中對聚落有影響者共計 13 處；中部地區共有 225 處符合潛在大規模崩塌區位之條件，其中對聚落有影響者共計 27 處；東部地區共有 192 處符合潛在大規模崩塌區位之條件，其中對聚落有影響者共計 13 處。依崩塌潛勢將聚落分為高、中、低等 3 等級，其中列為中、高潛勢之聚落，建議在汛期前，儘速針對影響範圍內之住戶建立相關名冊、擬定安全避難住所；於颱風豪大雨時建議配合現有土石流避難疏散與預警機制，撤離影響範圍內之居民。此外，應儘速進行現地細部調查工作，包括地表地質、地表及地下水文、地電探勘、現地鑽探以及邊坡穩定分析等工作。配合現調資料確認滑動範圍、發生滑動潛勢，進而評估工程治理、監測預警、土地管理與居民遷移等相關作為。而在相關工作完成前，建議儘速進行簡易監測工作(雨量、GPS 連續監測與全測站定期監測)。列為低潛勢之聚落則建議進行持續監測之工作。

目前國內外對於潛在大規模崩塌的研究技術仍持續發展中，因此本項成果僅屬初步分析之資料，僅提供相關重建單位及各級政府參考，建議針對前述具潛在災害地區的聚落，構思必要的防災因應對策。

8. 潛在大規模崩塌活動性監測

為了聚落民眾的安全考量，對於潛在大規模崩塌地區必須進行長期之調查與觀測(圖 10)，包括地表地質、地表及地下水文、地電探勘、現地鑽探以及邊坡穩定分析等工作；地質調查所利用空載光達產製的 DEM 成果，於莫拉克災區初步判釋出數百處具有潛在大規模崩塌區域，如要進行崩塌地細部調查、觀測與維護，勢必花費相當龐大的金錢；因此在經費與效益的考量下，無法對疑似潛在崩塌區域進行全面性的細部觀測。但為後續撤離、避難、逃生、安置等重要的參考數據，迫切之際，地質調查所首先就南部地區有聚落保全對象的崩塌潛勢區域，選擇 7 處設置單頻的 GPS 接收儀、經緯儀測距儀器及雨量計等簡易監測儀器(圖 10)。由於主要誘發大規模崩塌地移動的外力因子為地震或降雨，地震因發生頻率較低且在中央氣象局已布

建有完善的監測網，一旦地震發生可藉由中央氣象局觀測資訊進行崩塌外力的分析；至於降雨量部分，因台灣地區的地形及氣候特性，降雨隨空間的變異性相當高，為瞭解大規模崩塌較精確的降雨資訊，在大規模崩塌坡面適當地點設置雨量觀測站，配合前述兩項移動監測資料進行分析，以觀察各崩塌地的地表滑動趨勢與活動性，未來再針對高活動區域逐步進行地質鑽探、測傾管、孔內伸縮計、地表伸張計、地層變位計等細部監測儀器的設置。

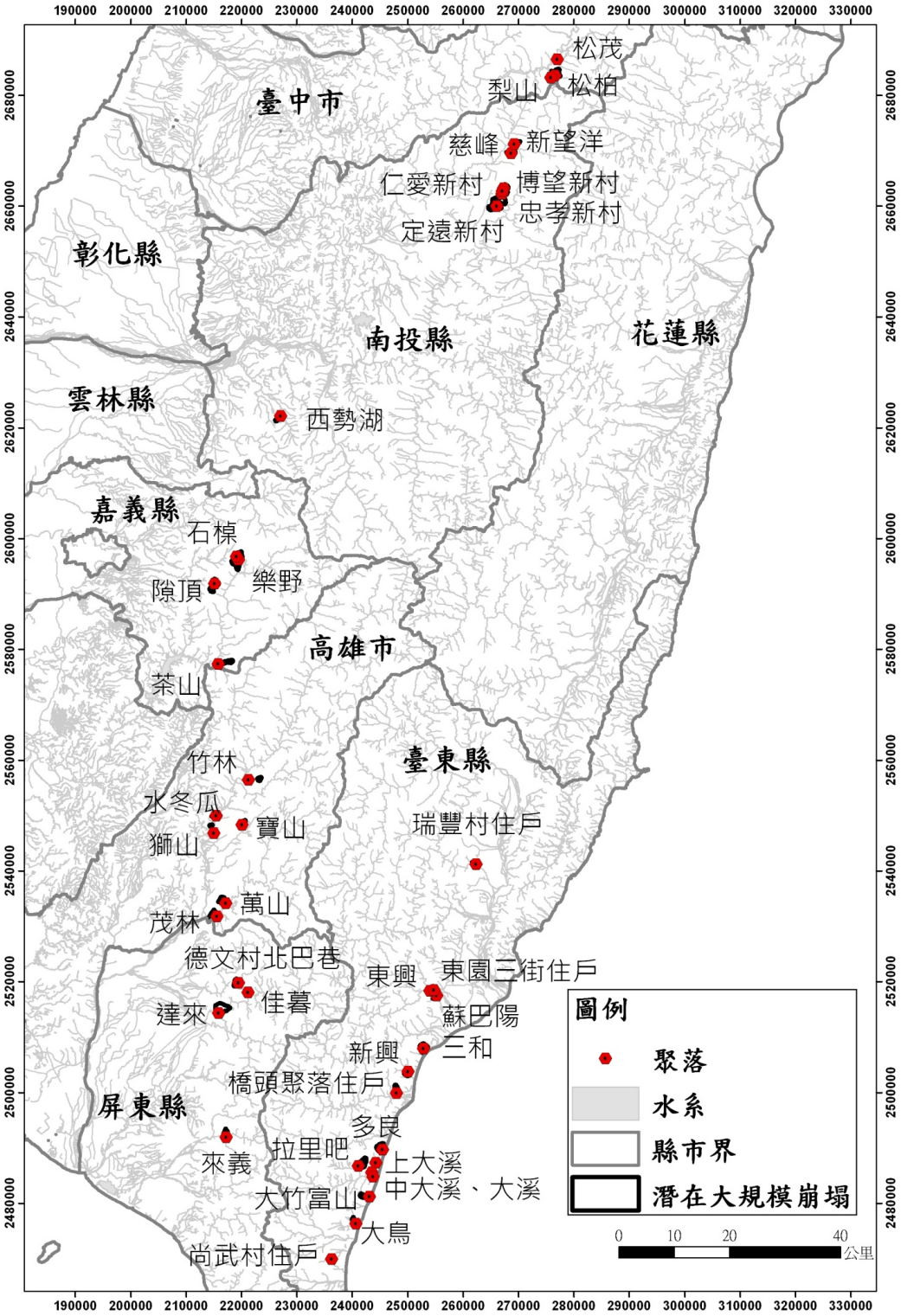


圖 9 台灣莫拉克受災地區潛在大規模崩塌影響之聚落分布圖



圖 10 經濟部中央地質調查所監測大規模崩塌之簡易監測儀器

9. 大規模崩塌影響範圍之數值模擬

判釋潛在大規模崩塌之後，後續則需探討其發生崩塌的機制與發生崩塌後的影響範圍。由於大規模崩塌的研究上屬於起步階段，發生崩塌的雨量警戒值仍需多方的研究與驗證；而就滑動深度而言，更需實際的鑽探調查與更細部的觀測才能得知最主要的滑動面深度；但就防救災的角度來看，發生崩塌後的影響範圍更是後續撤離、避難、逃生、安置等重要的參考依據，因此可嘗試以數值模擬方法來探討各崩塌地發生崩塌後之影響範圍。

利用離散元素法(Discrete Element Method, DEM)於山崩敏感區域，境況模擬發生山崩後之堆積範圍及可能危害之保全對象。以離散元素法為基礎的模型是由多個分離的個體所組成，利用這些分離的個體，經過參數的校正後，再組成物質；顆粒與顆粒之間有互相鍵結作用。離散元素法的基礎理論是牛頓運動定律(Force-Displacement Law)，也就是說以精確時間作為基礎，計算很短時間內所有的顆粒的位移變化，顆粒與顆粒之間力的傳遞。因此離散元素法不止得到的是模擬結果，還可將過程記錄下來，如力、速度、位移在整個模擬過程中的歷時變化等(唐昭榮等，2013；Tang *et al.*,2009)。

使用以離散元素法為基礎所開發的三維顆粒流軟體 PFC3D(Particle Flow Code 3D)，以荖濃溪與曾文溪上游各一處潛在大規模崩塌地-竹林、茶山為例，運用已知的地質、野外調查資料以及遙測影像，判斷出潛在滑動面的範圍及深度。從模擬結果中可知，竹林地區山崩的整體影響範圍(包含崩塌範圍與堆積影響區)將高達 933,500 平方米，並有可能產生一堰塞湖(圖 11、12)當地居民有潛在的危險性存在。茶山的模擬中顯示也有可能產生一堰塞湖，而由於塊體會先衝撞對側山坡，所以滑動距離較短，整體影響範圍較竹林地區山崩小，約為 492,600 平方米，對於茶山地區居民威脅可能較低。如此配合三維數值模擬的方式，可以了解在潛

在性山崩區域，若發生山崩，其運動型態、速度、堆積形貌以及造成之堰塞湖影響範圍。

利用模擬軟體進行潛在大規模崩塌地時，由於大規模崩塌地之影響範圍相對複雜，滑移距離和崩塌體積有關，體積越大滑動的距離越大。數值模擬可大幅降低地形對影響範圍決定之不確定性，但在參數設定部分為關鍵課題，本文所述二個潛在崩塌地目前並無鑽井和其他探勘資料，無法得知滑動面的位置與深度，因此藉由野外調查潛在崩塌區的範圍、地形、裂隙、塌陷等地表的特徵來估算滑動面的位置，難免會有誤差產生；而且不同材料在不同速度及位移條件下之摩擦特性研究仍需多方參考再進行設定。未來須在潛勢崩塌的地區安裝傾斜管等監測儀器，並增加鑽孔取樣，以獲得岩層位態、岩石試驗等的地質資料，才能做更有效的評估(唐昭榮，2013)。

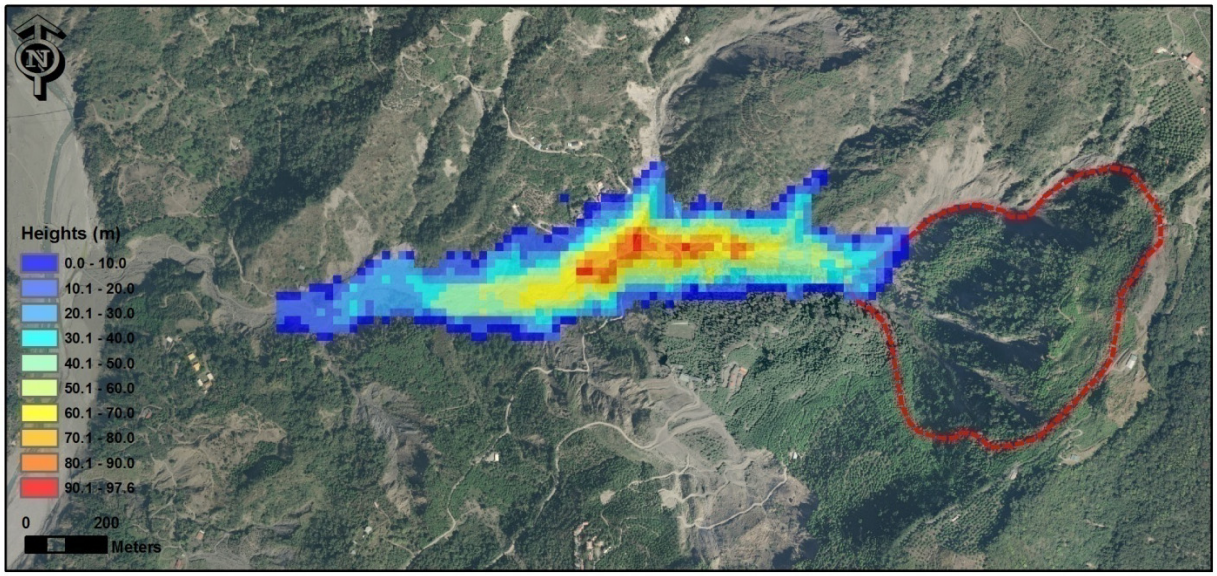


圖 11 竹林地區潛在性山崩區域三維模擬結果。圖中顯示山崩發生後 120 秒的顆粒堆積情形，最高堆積高度可達 97.6 米

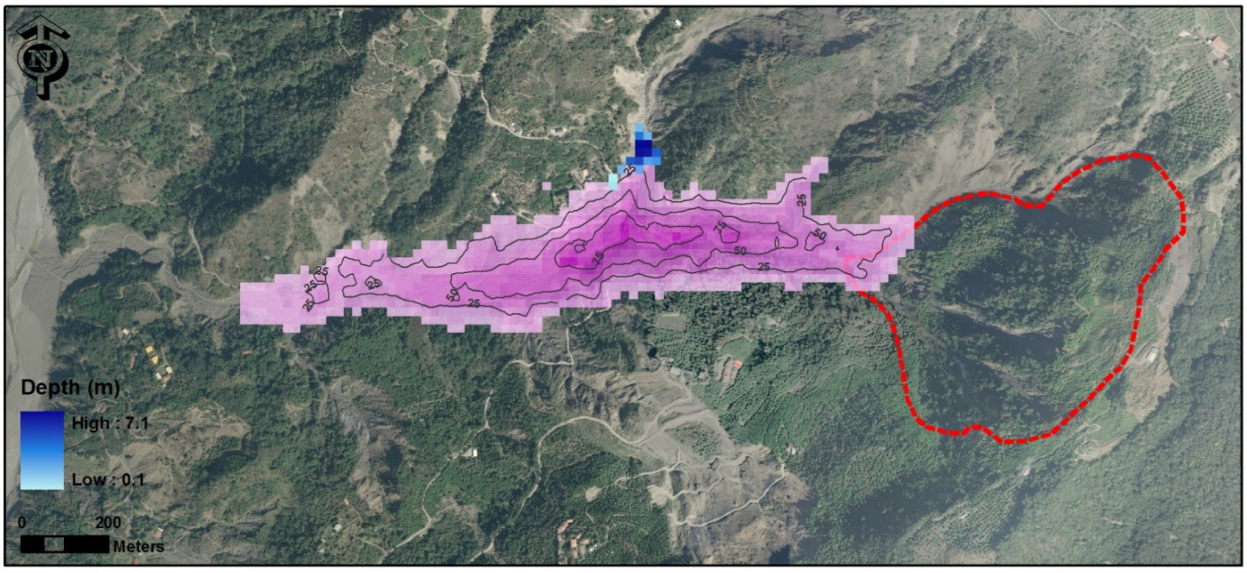


圖 12 竹林地區崩塌後可能造成之堰塞湖影響範圍(藍色部分)，堰塞湖深度可達 7 米

10. 討論與結論

10.1 討論

(1) 進行判釋時需以不同日照角度的陰影圖來做判釋，判釋成果需說明使用的日照角度。

(2) 對於大規模崩塌的判釋，除了提供地質構造資訊之外，應搭配地(層)、地質分布，針對地(岩)層的影響可加以討論。同時進行岩性與山崩分析正規化、崩塌地判釋基準(包含 DEM 判釋方法)，將判釋的崩塌區依規模加以統計區分。

(3) 可嘗試以 LiDAR 成果對大規模崩塌地涉及部落安全的區域繪製地貌表徵圖(同時產製 2 米或 5 米 Contour)，分別對於 Scarp <5 米，Scarp >5 米用不同符號表示，在廣大範圍之大規模崩塌地中找出不同滑動區塊之最活躍區塊，並嘗試從中央位置切出剖面，方能瞭解其現況。

(4) 導致大規模崩塌的誘因除了地震、短時間的降雨之外，其他如長時間的降雨、地下水流動、邊坡長期的重力變形等都是重要因素。因此有關大規模崩塌的影響範圍及警戒雨量，需要依賴更多的調查研究資料來訂定。

(5) 強降雨(或長時間降雨)只是造成潛在大規模崩塌的主要因子之一，地質構造是另一非常重要的因素，因此需要完成基本的地質調查、建置基本的監測網，才能依據雨量數據、地下水位變動量、位移的變形量等，做為發布緊急措施之依據。

(6) 數值模擬離散元素法(PFC 3D)可模擬大變形大位移之塊體變形，適合大規模崩塌運移及堆積範圍影響之行為模擬，參數部分應由實驗率定，輔以大量的現場調查來訂定設定標準；在尚未得知潛在大規模崩塌區的滑動面位置及深度前，藉由野外調查潛在崩塌區的範圍、地形、裂隙、塌陷等地表的特徵來估算滑動面的位置，以模擬崩塌的影響範圍，作為後續搬遷、撤離等防災減災之參考資訊。

10.2 結論

(1) 以空載光達建置高精度高解析度之數值高程模型(DEM)及數值地表模型(DSM)、正射影像圖，其相關圖資除了可提高國土開發利用之精確度，更可在地質科學上應用於岩性變化之研究、地質構造與地形特徵之辨識、分析地質特性。其分析結果可協助進行山崩發生潛在危險之區域進行判釋，利用 1 米解析度之數值高程模型(DEM)重新進行構造判釋，同時利於各項作業分析結果之精度提升。

(2) 利用高精度數值地形模型進行潛在大規模崩塌區位初步判釋與篩選，需進行後續之細部調查作業，以確認大規模崩塌之規模、土砂量體與影響範圍。

(3) 空載光達可在短時間內獲取資料並建置高精度及高解析度數值地形模型，對相關防災單位、各縣市政府於日後推動國土保育、環境規劃、區域發展、工務建設等業務應用，提升災害預防、災害緊急應變與救援能力有重大效益。

(4) 目前利用 LiDAR 資料判釋的潛在大規模崩塌區，僅為初步成果，在尚未得知崩塌區的活動性、影響範圍與導致崩塌的可能機制之前，僅能提供各縣市政府在颱風豪雨來臨時，作為防災減災的參考，後續應先進行簡易觀測，長期則應詳細調查分析研究，才能做為日後疏散撤離作業的依據。

誌謝

本計畫由國內中興測量公司、詮華國土測繪有限公司、群立科技股份有限公司、自強工程顧問有限公司等四家廠商共同參與數值地形製作建置，國立成功大學測量與空間資訊學系及財團法人成大研究發展基金會負責建置廠商資料品質的監督與成果的審核，國立成功大學地球科學系工作團隊參與地質敏感特性分析與調查工作，以及本所

LiDAR 工作團隊的一起努力，使得本計畫得以在高規格品質的要求下順利完成，本文利用此機會在此一併誌謝。

參考文獻

千木良雅弘，2011。大規模崩塌潛感區，科技圖書股份有限公司，臺北市 。

內政部消防署，2012。「中華民國 100 年消防統計年報」，內政部消防署，臺北市 。http://www.nfa.gov.tw/

唐昭榮、呂喬茵、胡植慶，2013。大規模崩塌的影響範圍模擬研究-以廬山溫泉北坡為例，地質，32(1) : 87-89。

唐昭榮，2013。集水區河道及特定崩塌地之崩塌運動模式模擬試驗，經濟部中央地質調查所報告，共 48 頁。

陳樹群、吳俊鋐，2009。莫拉克颱風引致小林村堰塞湖之形成與潰決歷程，中華水土保持學報，40(4) : 377-392。

經濟部中央地質調查所，2008。都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖集說明書，經濟部中央地質調查所，新北市。

謝有忠、陳宏仁、邱禎龍、侯進雄，2012。高解析度數值地形在坡地地質災害之研究，經濟部中央地質調查所，新北市。

謝有忠、陳宏仁、邱禎龍、侯進雄，2013。地形計測方法應用於潛在大規模崩塌調查之可行性研究，經濟部中央地質調查所，新北市。

(社)日本地すべり学会，2004。地すべり(Landslides)地形地質的認識と用語，社団法人日本地すべり学会，東京。

(社)砂防学会，2004。改訂砂防用語集，社団法人砂防学会，東京。

独立行政法人土木研究所，2008。深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル(案)，土木研究所資料，4155 : 1-20。

鈴木隆介，2000。建設技術者のための地形図読図入門 第 3 巻 段丘・丘陵・山地，古今書院，東京。

Geertsema, M., Clague, J.J., Schwab, J.W. and Evans, S.G., 2006. An overview of recent large catastrophic landslides, in: northern British Columbia, Engineering Geology, 83: 120-143.

Jarman, D., 2006. Large rock slope failures in the Highlands of Scotland: Characterisation, causes and spatial distribution, Engineering Geology, 83: 161-182.

Tang, C. L., Hu, J. C., Lin, M. L., J. Angelier, Lu, C. Y., Chan, Y. C. and Chu, H. T., 2009. The Tsaoling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: Insights from a discrete element simulation, Engineering Geology, 106(1-2) :1-19.

USGS, 2010. Worldwide Overview of Large Landslides of the 20th and 21st Centuries, http://landslides.usgs.gov/learning/majorls.php.

Van Den Eeckhaut, M., J. Poesen, G. Verstraeten, V. Vanacker, J. Moeyersons, J. Nyssen. and L. P. H. van Beek., 2005. The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides, Geomorphology, 67(3-4) : 351-363.

Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes, Transportation Research Board Special Report, 176: 11-33.

Airborne LiDAR DEM and Geohazards Applications

Chin-Shyong Hou [1] Li-Yuan Fei [2] Cheng-Lung Chiu [3] Hung-Jen Chen [4] Yu-Chung Hsieh [5]
Jyr-Ching Hu [6] Ching-Wei Lin [7]

ABSTRACT

The heavy rainfall of Typhoon Morakot caused severe damage to infrastructures, property and human lives in southern Taiwan in 2009. The most atrocious incident was the Hsiaolin landslide which buried more than 400 victims. Consequently the airborne LiDAR survey was carried out from 2010 to 2012 by Central Geological Survey, MOEA in Taiwan to produce 1m x 1m high resolution DEM and aerial ortho-photo images in order to build up post-disaster high resolution DEM database and apply to such as investigate and analysis for geologically sensitive areas, Geological and Topography characteristics, Potential geological disaster, River system analysis. the key projects is to investigate and analysis large-scale landslides, the result shows that there are hundreds of large-scale landslides area in central, southern and eastern Taiwan. For those potential landslides site near villages, monitoring instruments such as single-frequency GPS, rainfall recorder and electro-optical theodolite have been set up to detect the surface displacement. More monitoring instruments such as tiltmeter, inclinometer, rain gauge, extensometer and Time Domain Reflecometry (TDR) will be deployed in high susceptibility landslide area in the near future.

Keywords: Airborne LiDAR, DEM, Catastrophic Landslides, Natural Hazard, GPS

[1] Section Chief, Central Geological Survey, MOEA
[2] Division Chief, Central Geological Survey, MOEA
[3] Technical Specialist, Central Geological Survey, MOEA
[4] Associate Technical Specialist, Central Geological Survey, MOEA
[5] Associate Technical Specialist, Central Geological Survey, MOEA、
PhD.Student, Department. of Geosciences, National Taiwan University
[6] Professor, Department. of Geosciences, National Taiwan University
[7] Professor, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University
[*] Corresponding Author, Phone: 886-2-29462793 ext.309, E-mail: hsiehyc@moeacgs.gov.tw

Received Date: Aug. 09, 2013
Revised Date: Nov. 26, 2013
Accepted Date: Dec. 18, 2013

航測及遙測學刊　第十八卷　第2期　第109-127頁　民國103年05月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume18, No2, May 2014, pp. 109-127

應用數值地形及光學影像於潛在大規模崩塌地形特徵判釋

何岱杰[1]　張維恕[2]　林慶偉[3]　劉守恆[4]

摘　要

民國98年8月莫拉克颱風重創臺灣南部地區，造成許多大規模崩塌，尤以高雄市小林里(原小林村)發生最嚴重災情。為避免類似重大災害出現，判釋潛在大規模崩塌區位是一重要工作，其提供未來防災及減災工作之重要資訊。在大規模崩塌發育過程中，地形上常有一些特徵出現，如主崩崖、次崩崖、反向坡等。本文分別使用40米、5米及1米不同解析度之數值地形資料，以其坡度圖進行判釋，並佐以8米、2米及0.25米不同解析度影像輔助判釋，結果顯示解析度1米之空載光達高精度數值地形提供更多細微地形特徵資料，並搭配解析度0.25米之航空照片以協助判釋，大大提高判釋潛在大規模崩塌特徵的能力，且再透過野外查核，以確定崩塌特徵正確判釋。

關鍵詞：潛在大規模崩塌、空載光達、航空照片

1. 前言與研究目的

由於臺灣本島地形陡峭、地質脆弱，加上颱風、極端變異降雨以及地震等不利因素，山區易發生山崩、大規模崩塌及土石流等情形。民國98年8月莫拉克颱風重創臺灣南部地區，創下3,000毫米的降雨紀錄，造成高雄市(原高雄縣)獻肚山發生大規模崩塌災害，小林里(原小林村)被淹沒，450名里民喪生的重大災情。此外，99年4月25日國道3號3.1K附近的順向坡滑動亦為大規模崩塌案例。大規模崩塌滑動的深度可達數十公尺以上，面積也可達百公頃以上，由於崩塌土石滑動極為快速，瞬間即造成重大災難。因此，若能在大規模崩塌發生前，藉由判釋出其相關之地形特徵，及早找出大規模崩塌潛勢位置，便可提供相關權責單位進一步進行防災及減災工作。

自93年內政部推動空載光達先導計畫以後，國內相關應用多著重於地質斷層構造研究(Chan *et al*., 2007)、地形變化(Chen *et al*., 2006; 蕭國鑫等，2006)及三維建物建模等(張智安和陳良健，2006; 賴彥中等，2005)，然而在山崩災害上較少涉略(劉治中等，2010)。98年起由經濟部中央地質調查所推動之空載光達應用在國土保育之地質敏感區調查，為臺灣地區建立了完整高精度數值地形資料，對於大規模崩塌判釋提供更好材料，也為國土變異分析提供了重要資料，在國土保育工作上是一重要且關鍵的資料。為此，本文使用不同精度之數值地形資料判釋崩塌特徵，並進行野外查核，以驗證高精度數值地形對判釋潛在大規模崩塌能力的提升。

1.1 大規模崩塌定義

日本將滑動深度大於 3 公尺深入岩盤的岩體崩塌，稱之為「深層崩壞」。在歐洲地區稱此類型崩塌為 DSGSD(Deep-Seated Gravitational Slope Deformation) (Agliardi *et al*., 2001)，指的是因重力造成大面積，破壞面深入岩盤，並緩慢運動的崩塌。國內過去對於大型崩塌並無明確定義及命名，

[1][2] 國立成功大學防災研究中心 研究助理
[3] 國立成功大學地球科學系 教授
[4] 國立成功大學地球科學系 博士後研究員
*通訊作者, 電話: 06-2757575 ext 65427, E-mail: chingwee@mail.ncku.edu.tw

收到日期:民國 102 年 08 月 09 日
修改日期:民國 102 年 11 月 18 日
接受日期:民國 102 年 12 月 27 日

在臺灣常用的山崩分類法中，這類型崩塌指的是在一般情況下是緩慢運動的地滑型崩塌，如 Varnes (1978)山崩分類法中的「滑動」和「側滑」(表 1)；經濟部中央地質調查所是以「岩體滑動」一詞代表規模較大、滑動面深度較深的山崩，其滑動面常深入岩層內(表 2)；水土保持手冊中「地滑」定義係指移動土體或岩體之規模較大，通常在較緩坡度之斜面發生，其運動之典型特徵在於移動速度緩慢，而移動時可能呈斷斷續續或持續緩慢運動，往往移動土體上方之構造物尚可保持原狀(表 3)。目前行政院對於莫拉克颱風時在小林村所發生之嚴重土石災害是以「大規模崩塌」稱之，國家災害防救科技中心則初步以崩塌面積大於 10 公頃或滑動深度超過 10 米者為大規模崩塌。

由於以崩塌深度作為判釋依據難以藉由圖面判釋崩塌地。為方便大範圍、快速地圖面判釋此類大面積且緩慢運動的崩塌區位，本研究引用的大規模崩塌定義為：崩塌土方大於 10 萬立方的崩塌，也就是崩塌面積大於 10 公頃，崩塌深度 10 公尺的大型崩塌(千木良雅弘，2011)。一般來說，崩塌面積越大，崩塌深度亦越深，崩塌土方也就越多，因此在判釋時，定義具有崩塌地形特徵的潛在崩塌，其面積大於 10 公頃者，稱為「潛在大規模崩塌」。

表 1 Varnes 山崩分類法

運動類型		**材料分類**		
		岩石	工程土壤	
			岩屑	土
墜落		岩石墜落	岩屑墜落	土墜落
傾覆		岩石	傾覆岩屑	土傾覆
滑動	**圓弧形**	**岩石滑動**	**岩屑滑動**	**土滑動**
	平面型			
側滑		岩石側滑	岩屑側滑	土側滑
流動		岩石流動	岩屑流動	土流動
複合型運動		綜合兩種或兩種以上之運動方式		

表 2 中央地質調查所山崩分類法

運動類型		**材料分類**		
		岩石	工程土壤	
			岩屑	土
墜落		落石		**岩屑崩滑**
傾覆				
滑動	**圓弧形**	**岩體滑動**		
	平面型			
流動		土石流		

表 3 水土保持局山崩分類法

運動類型		**材料分類**		
		岩石	工程土壤	
			岩屑	土
墜落		落石	山崩	
傾覆				
滑動	**圓弧形**	**地滑**		
	平面型			
流動		土石流		

1.2 大規模崩塌地表特徵

在大規模崩塌的發育過程中，地形上常存在一些地形特徵。大規模崩塌大致可以分為冠部、陷落區和隆起區，其主要特徵有主崩崖、次崩崖、冠部崩崖、冠部裂隙，反向坡與陷溝等線性構造如圖 1 所示(Agliardi *et al*., 2001; Chigira, 2009; Chigira and Kiho, 1994; Crosta *et al*., 2013; Pedrazzini *et al*., 2013; Varnes, 1978; 日本土木研究所，2008)。

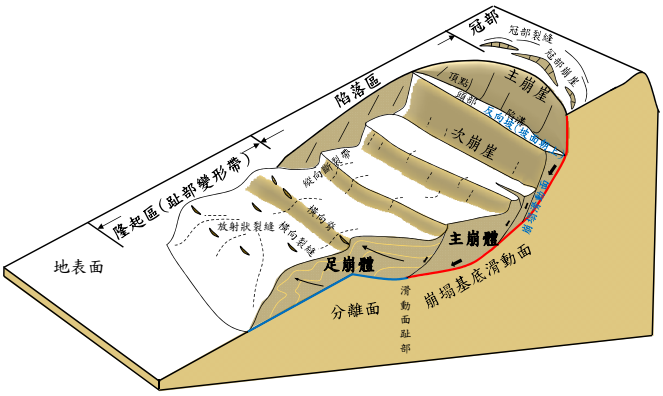


圖 1 大規模崩塌特徵示意圖(修改自 Varnes, 1978)

1. 冠部是大規模崩塌發育的頭部，此區為張裂環境。坡面因拉張而發育較大落差者稱為冠部崩崖，較小者為冠部裂隙。
2. 陷落區是大規模崩塌主要材料來源，一般地貌會發育為似碗狀的凹谷地形。內部主要崩塌構造是主崩崖、次崩崖，若滑動體因圓弧滑動，可能造成坡面反轉(坡面朝山脊，形成反向坡地形。
3. 主崩崖為大規模崩塌主要判釋特徵，為崩塌最主要的滑動面，是高精度數值地形判釋中最重要之線性。
4. 次崩崖是大規模崩塌滑動體內部之崩崖，主要為舊崩崖。若崩塌區內存在許多次崩崖，會使坡面如階梯狀，也就是坡面內部存在許多舊崩塌。
5. 多重山脊地形是指滑動體因旋轉運動，導致坡面反轉使坡向朝山脊，而與正常坡面(朝河谷)之間形成一凹谷。此朝山脊之坡面稱為反向坡(counterslope)，而凹谷稱之為陷溝(trench)。
6. 隆起區為大規模崩塌趾部變形帶或崩崖堆積區。趾部變形帶的主要應力狀態是壓應力，並呈現隆起狀。崩塌體內可見岩盤破碎變形。

1.3 潛在大規模崩塌判釋方法

大規模崩塌的判釋主要根據潛移的相關地形特徵，傳統判釋崩塌方法為使用航空照片之立體像對進行判釋(Chigira and Kiho, 1994)，而現今多以光學影像(衛星影像、航空照片)結合數值地形資料(40 米、5 米)進行判釋(魏倫瑋等，2012)；李錦發等人(2004)利用數值航測立體判釋描繪地滑分佈範圍，但受到植被遮蔽影響滑動塊體的邊界無法清楚界定，受到臺灣地區植被茂盛的環境條件限制，直接從光學影像上觀察到細微地形特徵並不容易。然而，自空載光達(LiDAR)技術發展後，其所產製之高精度數值地形資料可達到 1 米解析度，不同於以往利用航空照片製作的數值地形模型，空載光達同時剝除了植被影響(劉進金和史天元，2009)，對於判釋崩塌更是有利(Chigira *et al*., 2004; Glenn *et al*., 2006; Tarolli *et al*., 2012)，也更有機會觀察出潛在大規模崩塌之地形特徵。

在國內外已有許多案例利用高精度數值判釋潛在大規模崩塌區位(Agliardi *et al*., 2013; Crosta *et al*., 2013)。潛在大規模崩塌發生機制有河道下切(Agliardi *et al*., 2013; 千木良雅弘，2011)、岩層挫屈或傾覆(Chigira, 1992)、地質構造通過(Li *et al*., 2012)、岩層黏土化形成滑動面(千木良雅弘，2011)等。

2. 研究方法及成果

大規模崩塌研究目前有幾個重要的課題：(1) 大規模崩塌區位；(2) 崩塌發生時機；(3) 崩塌深度與影響範圍。不論科學研究或防救災目的，第一步也是最重要的一步是找出大規模崩塌區位。選擇適合的遙測數據可有效判釋大規模崩塌，本文對適合的定義為：可表現崩塌地形特徵且精度夠高。大規模崩塌與淺層崩塌不同之處在於：淺層崩塌的滑動面可在遙測影像上直接觀察出來，而大規模崩塌的滑動面大多不易直接從光學影像上觀察，除非已發生滑動。

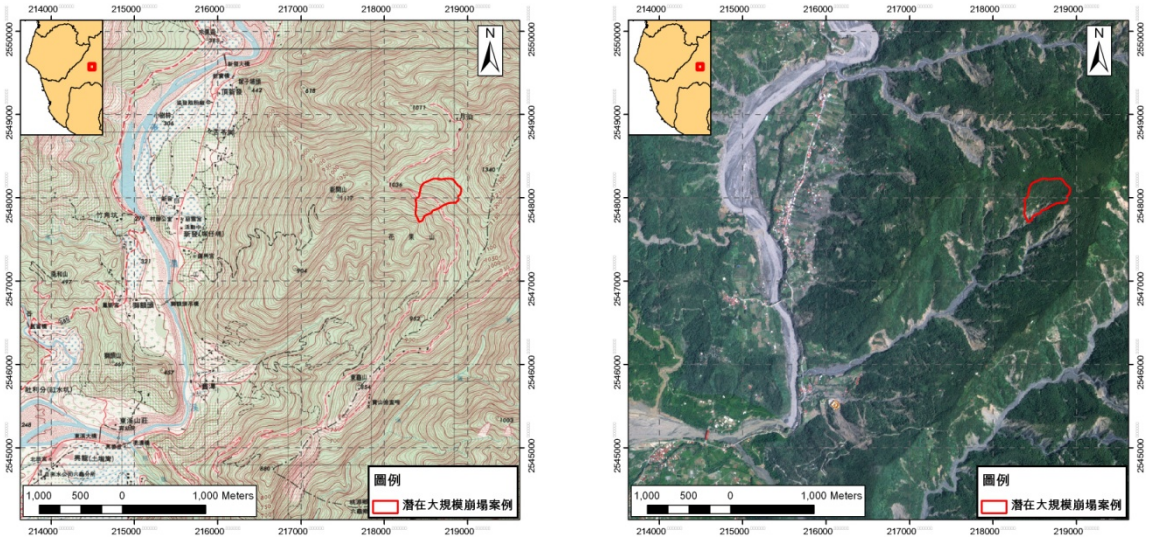
本文使用不同精度之數值地形資料(40 米、5 米、1 米)，以其坡度圖進行判釋，並佐以不同解析度影像輔助判釋(8 米、2 米、0.25 米)，再以野外查核資料確認判釋準確度，以找出最適合應用於判釋潛在大規模崩塌之資料。

2.1 研究區域

本研究區域為高雄市六龜區新發村花果山一帶，此區水系屬高屏溪流域荖濃溪集水區，荖濃溪由北往南流經新發村，海拔高度由 300 公尺(荖濃溪)到 1340 公尺(花果山)(圖 2)。研究區域內主要岩層有二:荖濃溪以東為潮州層，其岩性為硬頁岩或板岩；荖濃溪以西為長枝坑層，其岩性為砂頁互層(圖 3)。

潛在崩塌位置位於新開山東側 800 公尺，崩塌中心坐標為 TWD97 (218625，2548020)。交通方面，由省道 27 號接藤枝林道，藤枝林道 6.1K 往花

果山支線即可抵達。潛在崩塌面積為 17.24 公頃，坡向朝西南方，平均坡度約為 31 度。崩塌所在地質分區為板岩帶，岩層劈理位態為(N35W，54W)，與坡面關係為順向坡。在地質構造方面，崩塌周圍無構造線通過。



研究區域地形圖　　研究區域福衛二號 2 米融合影像
(拍攝日期: 98 年 8 月 17 日)

圖 2 研究區域位置圖

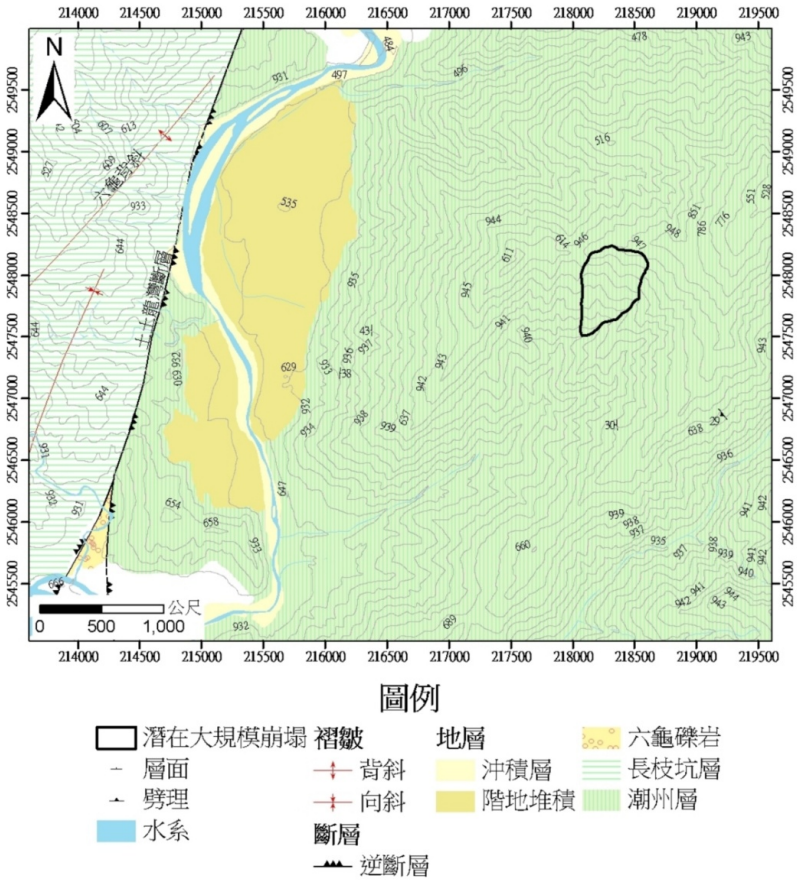


圖 3 高雄市六龜區新發村花果山地表地質圖

2.2 潛在大規模崩塌判釋

本文以不同精度之光學影像及數值地形資料進行判釋比較，以建立潛在大規模崩塌判釋流程及所使用之材料。以下將分別針對數值地形資料及光學影像判釋成果進行說明。

2.2.1 數值地形資料判釋成果

在數值地形資料製作成坡度圖之判釋成果方面，所選用之資料解析度分別為 40 米、5 米及 1 米，其中 1 米解析度數值地形資料為空載光達資料產製而成。

1. 40 米數值地形坡度圖判釋結果，除坡頂有一落差可能為主崩崖外，其餘崩塌特徵無法判釋，無法判釋出潛在大規模崩塌區位(圖 4)。
2. 5 米數值地形坡度圖判釋結果顯示坡面為上緩下陡之地貌，坡頂發育主崩崖，崩塌內部特徵有數處崩崖和侵蝕溝，其潛在大規模崩塌面積為 22.93 公頃，崩塌最大高差 365 公尺，最大長度 750 公尺，最大寬度 490 公尺。其餘內部特徵無法判釋，難以判釋出潛在大規模崩塌區位(圖 5)。
3. 1 米數值地形坡度圖明顯顯示出坡面線性特徵。潛在大規模崩塌區位劃定方面，此區集水區為凹谷地形，幾何外觀似碗狀，考量主崩崖和坡向，崩塌西翼以崩崖為界，東翼以侵蝕溝為界，整體坡面主要為西南向，其潛在大規模崩塌面積為 17.24 公頃，崩塌最大高差 333 公尺，最大長度 654 公尺，最大寬度 470 公尺。崩塌判釋特徵結果方面，潛在大規模崩塌坡頂發育一圓弧狀主崩崖和陷溝等崩塌特徵，內部特徵有多處月牙狀崩崖，利用航空照片可區分現生崩崖和次崩崖。侵蝕溝發育至主崩崖，形成典型大規模崩塌雙溝同源之地形(圖 6)。

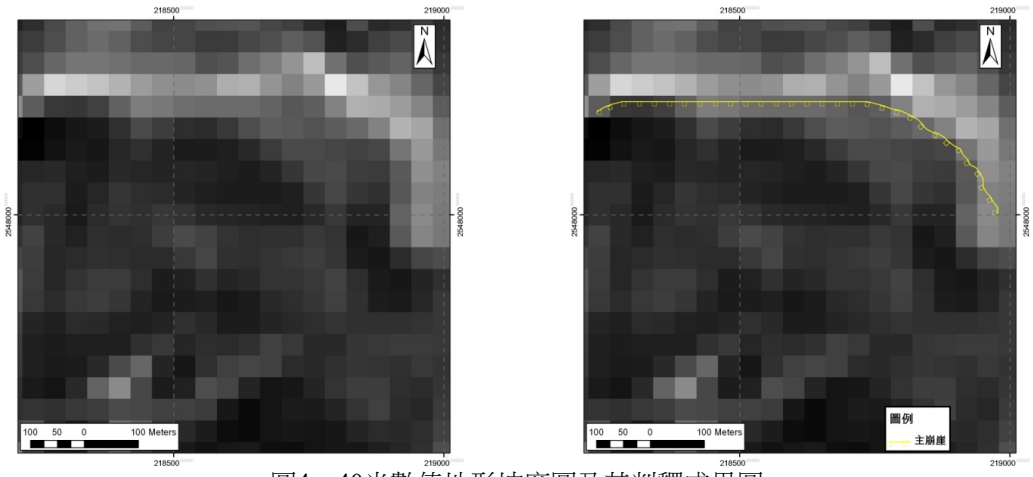


圖4　40米數值地形坡度圖及其判釋成果圖

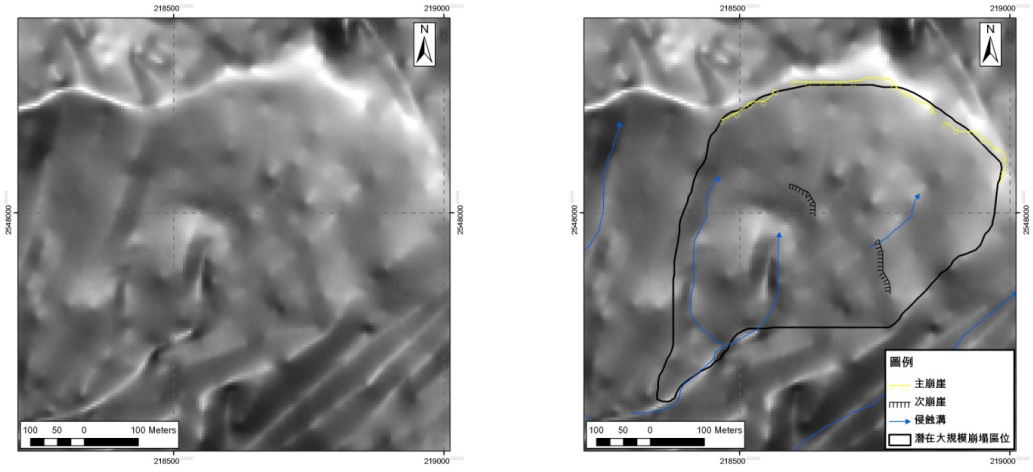


圖5　5米數值地形坡度圖及其判釋成果圖

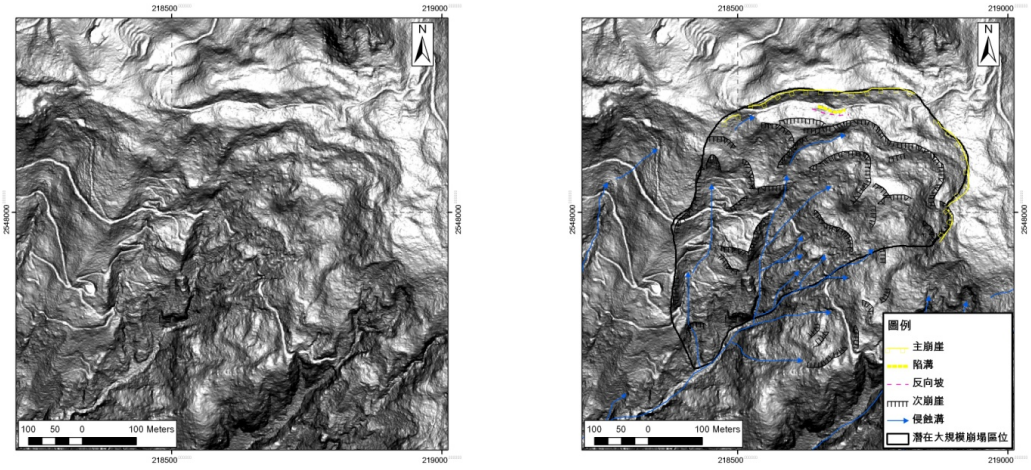


圖6 1米數值地形坡度圖及其判釋成果圖

2.2.2 光學影像判釋成果

在光學影像判釋成果方面，分別判釋福衛二號 8 米彩色影像(拍攝日期: 98 年 8 月 17 日)、福衛二號 2 米融合影像(拍攝日期: 98 年 8 月 17 日)、0.25 米航空照片 (拍攝日期: 98 年 8 月 28 日)，以下針對各種影像判釋成果進行說明。

1. 福衛二號 8 米彩色影像判釋結果顯示潛在大規模崩塌面積為 16.73 公頃，崩塌最大高差 409 公尺，最大長度 880 公尺，最大寬度 305 公尺，在坡趾處有現生崩塌發育。在崩塌特徵判釋方面，在坡頂和坡腹處有一不顯著的圓弧線性，其性質不明，其內部崩塌特徵和植生因解析度不足，難以判釋(圖 7)。
2. 福衛二號 2 米融合影像判釋結果顯示潛在大規模崩塌面積為 15.53 公頃，崩塌最大高差 338 公尺，最大長度 666 公尺，最大寬度 385 公尺。在坡趾處有明顯現生崩塌發育，並發育侵蝕溝。在坡頂處存在一圓弧線性，其線性根據色澤、植生差異程度可分為東西兩側。西側線性較平直，附近有 Z 字形平坦且植生稀疏的區域，推測應為道路；東側崩崖近月牙狀，植生有些微落差，中間存在一陰影，推測可能為主崩崖。在崩塌內部特徵方面，植生變化較福衛二號 8 米影像有明顯差異，可判釋出現生崩崖和少數侵蝕溝與(次)舊崩崖(舊崩塌地)(圖 8)。
3. 0.25 米航空照片判釋結果與福衛二號 2 米融合影像判釋結果大致相似，潛在大規模崩塌面積為 15.4 公頃，崩塌最大高差 312 公尺，最大長度 580 公尺，最大寬度 420 公尺。在坡趾處有明顯現生崩塌發育，並發育侵蝕溝。在坡頂處存在一圓弧線性，其線性根據色澤、植生差異程度可分為東西兩側。西側線性為平直形，植生稀疏或裸露地的區域，推測應為道路；東側崩崖近月牙狀，植生有明顯落差，中間存在一陰影，推測可能為主崩崖。在崩塌內部特徵方面，植生差異變化和地形特徵最為明顯，較易判釋出侵蝕溝和(次)舊崩塌地(圖 9)。

2.2.3 潛在大規模崩塌判釋流程及成果

根據上述判釋成果比較結果，本文建議首先以 LiDAR 1 米數值地形資料產製之坡度圖進行細微崩塌特徵判釋，包含潛在大規模崩塌範圍、主崩崖位置、次崩崖位置、侵蝕溝分布、陷溝、反向坡特徵等。再透過可反映植生狀況與地表使用情形之 0.25 米航空照片進行判釋分辨崩塌活動性與人為開發情形，其中植生的影像色調較淺者為近期活動之現生崩塌地，反之色調較深者為活動性較低之舊崩塌地。

綜合 LiDAR 1 米數值地形與 0.25 米航空照片判釋結果，最終成果如圖 10 所示，由 AA’ 地形剖面可顯示清楚看出坡頂雙重山脊及崩崖特徵(圖 11)。

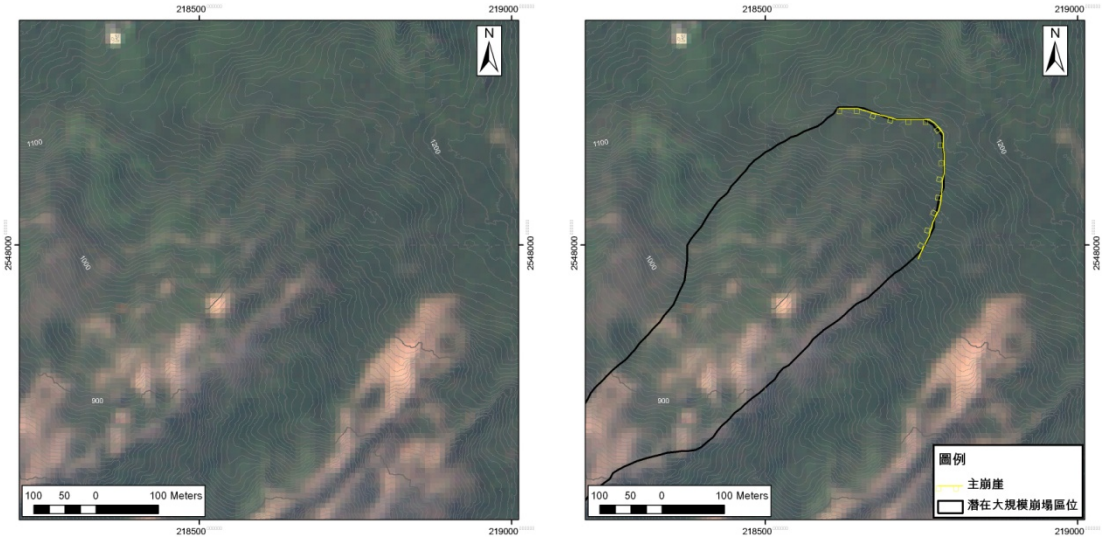


圖7 福衛二號8米彩色影像及其判釋成果(拍攝日期: 98年8月17日)

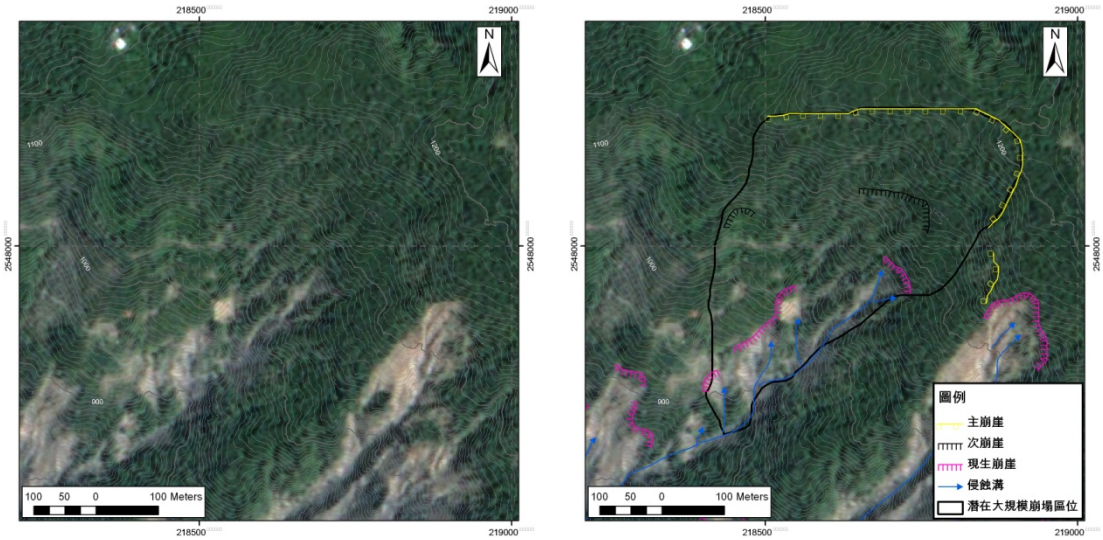


圖8 福衛二號2米融合影像及其判釋成果圖(拍攝日期: 98年8月17日)

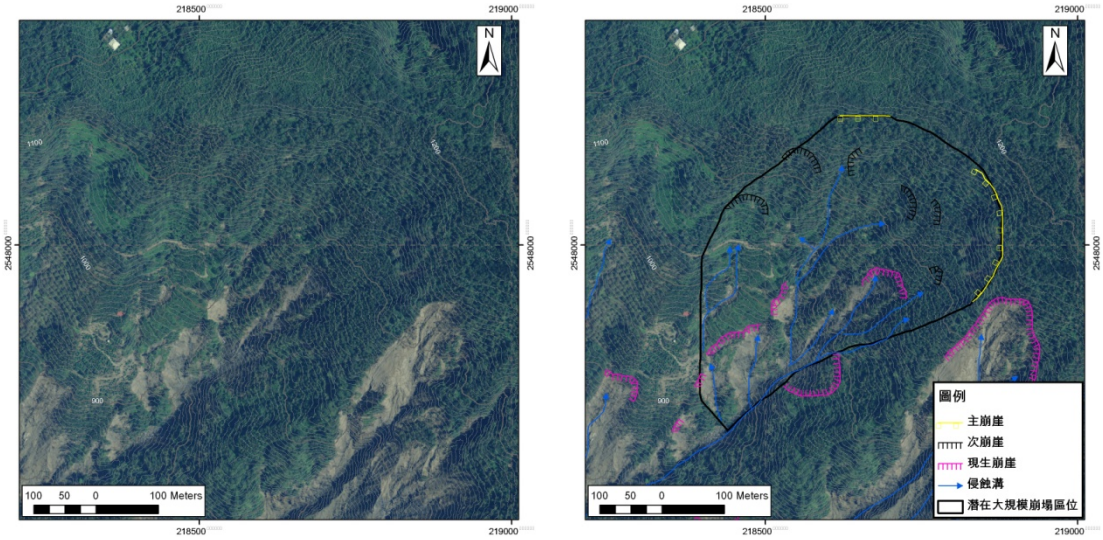


圖9 航空照片0.25米影像及其判釋成果圖(拍攝日期: 98年8月28日)

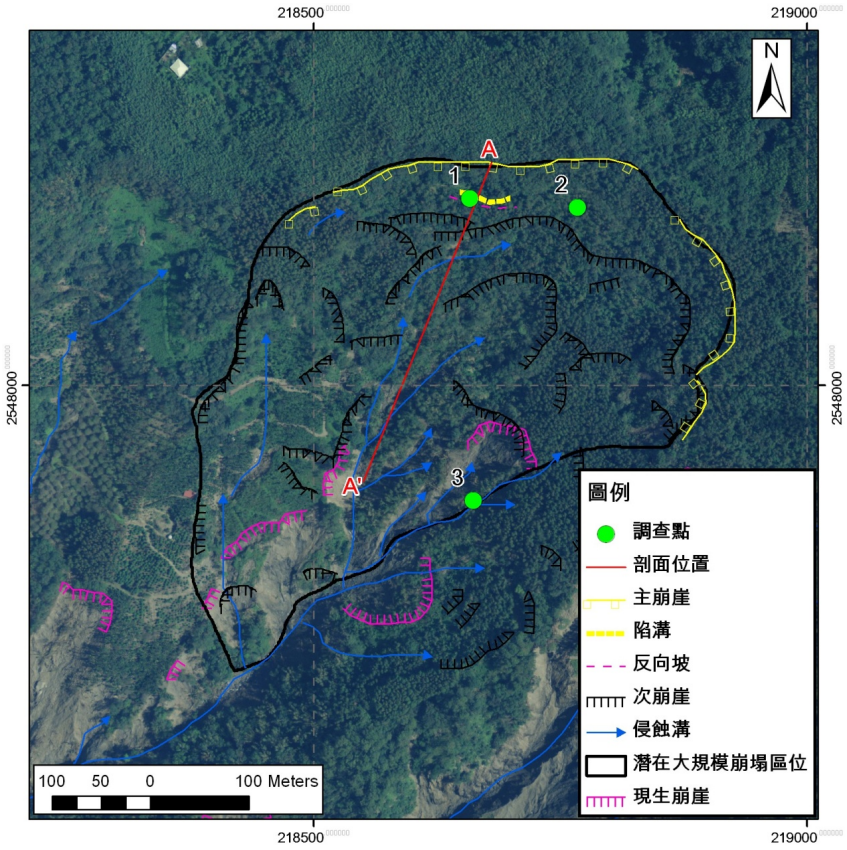


圖 10 潛在大規模崩塌特徵圖、剖面位置及野外調查點分布圖

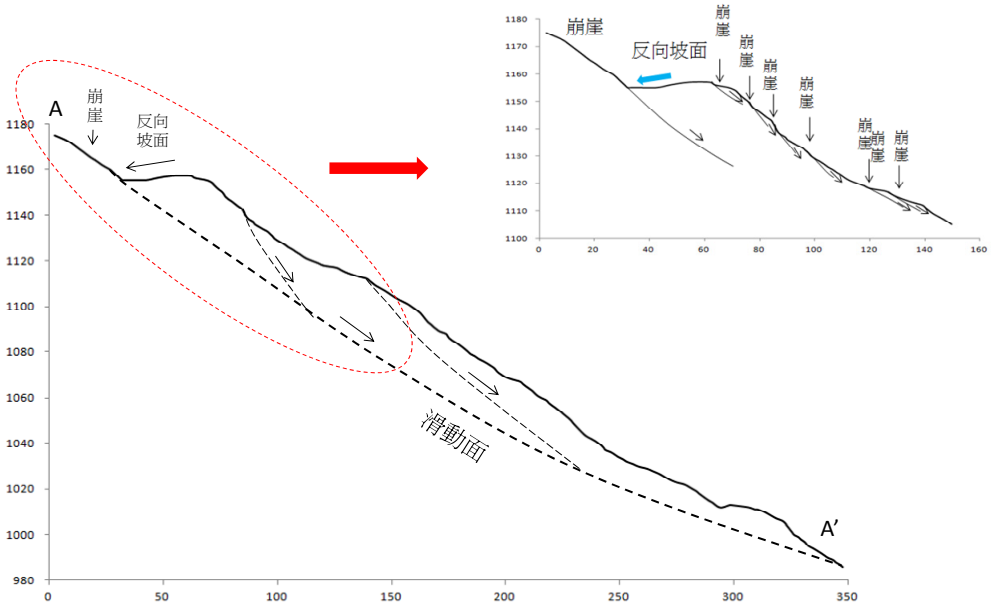


圖 11 AA'剖面示意圖

2.3 野外查核

透過室內判釋分析後，針對判釋出之大規模崩塌特徵位置進行野外查核工作，調查點位置如圖 10 所示。現調結果顯示，滑動體主要是板岩底部風化岩盤和頂部風化，在頂部崩崖可見因大規模崩塌滑動造成雙重山脊(圖 12)和裂縫，裂縫發育高差 30 公分，寬度 20 公分(圖 13)。坡腹處可見板岩因潛變而彎曲的現象(圖 14)。



圖 12 調查點 1，坡頂因大規模崩塌滑動造成雙重山脊



圖 13 調查點 2，坡頂發育裂縫，高差約 30 公分、寬度約 20 公分



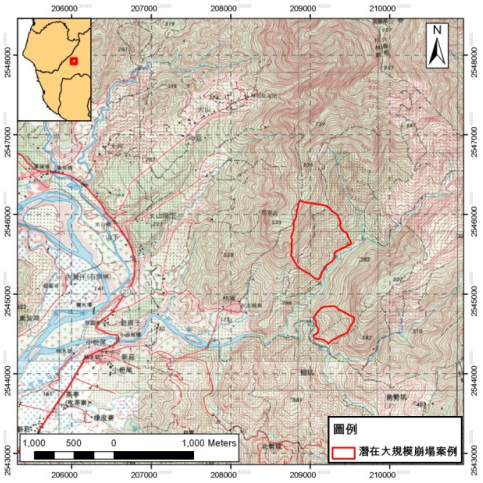
圖 14 調查點 3，板岩出露，並因潛變而呈現波浪狀

3. 潛在大規模崩塌案例

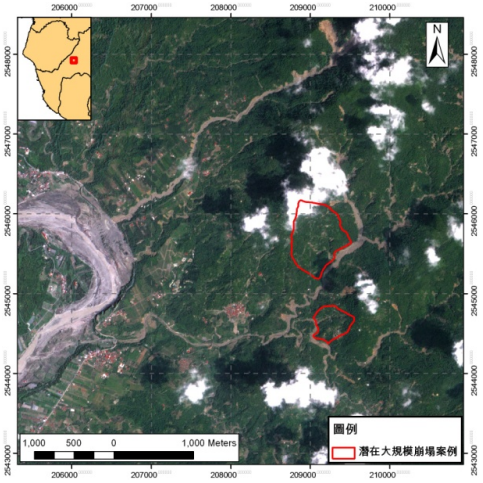
由上述研究結果得知，藉由 LiDAR 高精度數值地形製作之坡度圖搭配航空照片判釋潛在大規模崩塌是一快速有效之判釋方法，故以下利用此方法判釋兩個潛在大規模案例，並搭配野外查核確定其準確度。

兩案例皆位於旗山溪集水區內(圖 15)。案例一位於(高雄)旗山溪集水區內枋寮溪上游支流大茖藤溪右岸，崩塌地下方 1.7 公里有枋寮聚落，其下游 3.5 公里為枋寮溪與旗山溪匯流口與小份尾聚落。案例二位於(高雄)枋寮溪上游支流粗坑溪右岸。

以下為兩處案例基本資料與判釋結果說明：



(a) 潛在大規模崩塌案例地形圖



(b)潛在大規模案例福衛二號 2 米融合影像(拍攝日期: 98 年 9 月 3 日)

圖 15 潛在大規模崩塌案例位置(a、b)圖

3.1 案例一

(1)地質條件

在地質方面，潛在崩塌區位出露的地層為長枝坑層。長枝坑層在此處岩性為厚層頁岩夾極薄層至薄層砂岩(砂岩厚度約 2 到 5 公分)，地層位態為(N88E，29S)，地層傾向與坡向為斜交坡地形。由影像判釋與現場調查結果，推測崩塌區位的地表地質圖如圖 16。

崩塌區位在此區的岩性以頁岩為主，故岩性強度以頁岩代表，表示此區崩塌材料較為均質。地形表現因受岩性控制，崩崖發育以圓弧形為主，因此推測此區底部滑動面可能為圓弧形。因現地欠缺鑽探資料，故由地表地質與地形條件合理推測可能的圓弧形底部滑動面，如圖 17。

(2)高精度數值地形判釋結果

潛在大規模崩塌案例一崩塌中心之 TWD97 坐標為(209077，2545705)，崩塌面積約為 47.5 公頃、形狀近 5 邊形，平均坡度在 25.2 度，潛在崩塌區位最高點標高 535 公尺，最低點標高 280 公尺，最大寬度 660 公尺，主要坡向傾東。

高精度數值地形之坡度圖明顯顯示出主崩崖，其形狀似く字形。在地形特徵方面，崩塌整體範圍為一凹谷狀地形，且內部存在多處次崩崖。主崩體內部被侵蝕溝切過，大致可區分為東西兩側。東側主崩體其主要崩塌特徵是坡腹處具月牙狀次崩崖，且崩崖發育具多層次如波浪般，崩崖線性明顯、密度高、連續性佳，表示崩塌活動性高。西側主崩體崩崖線性明顯，但密度較東側主崩體低。其坡頂處發育 2 處多重山脊地形。

在水系特徵方面，在東側主崩體的坡面侵蝕溝大多發育至坡頂主崩崖處；在西側主崩體內和邊界，侵蝕溝發育至坡腹，雙溝同源地形目前未發育完全(圖 18、19)。

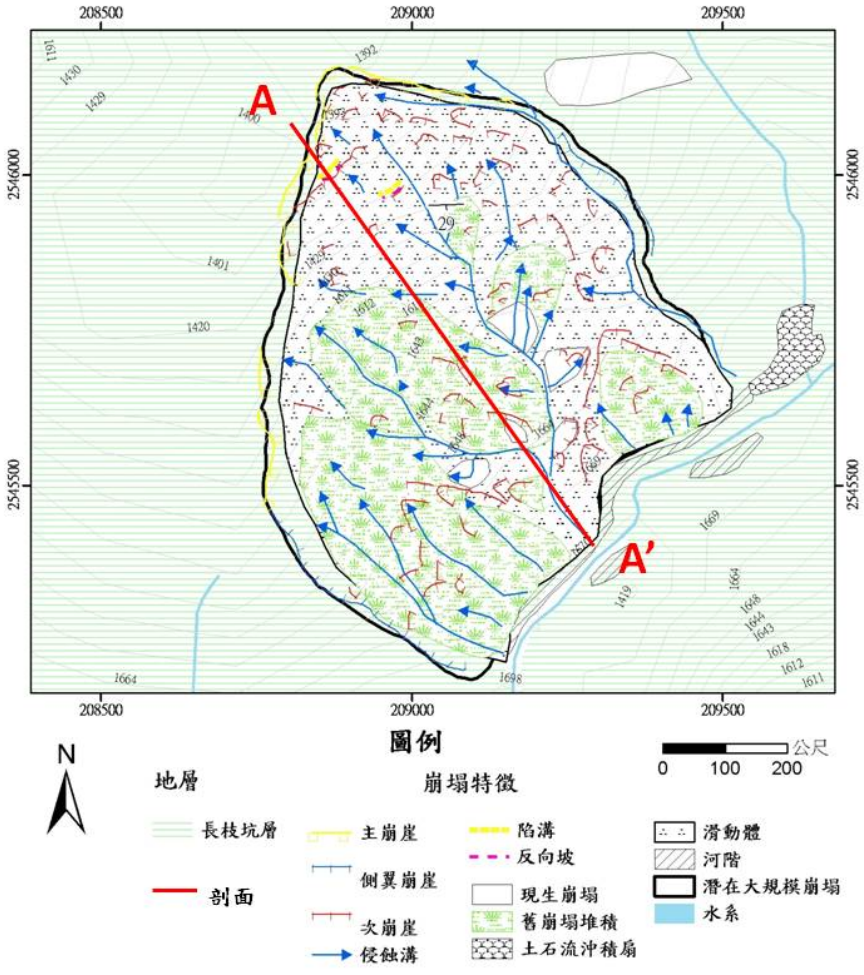


圖 16 潛在大規模崩塌案例一地表地質圖

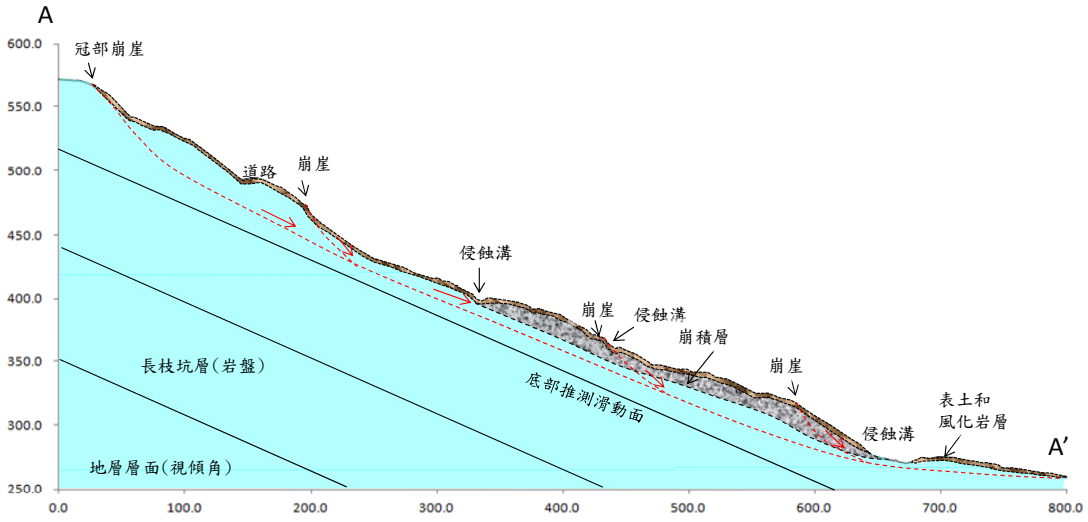


圖 17 潛在大規模崩塌案例一 AA'剖面圖(岩層為視傾角)

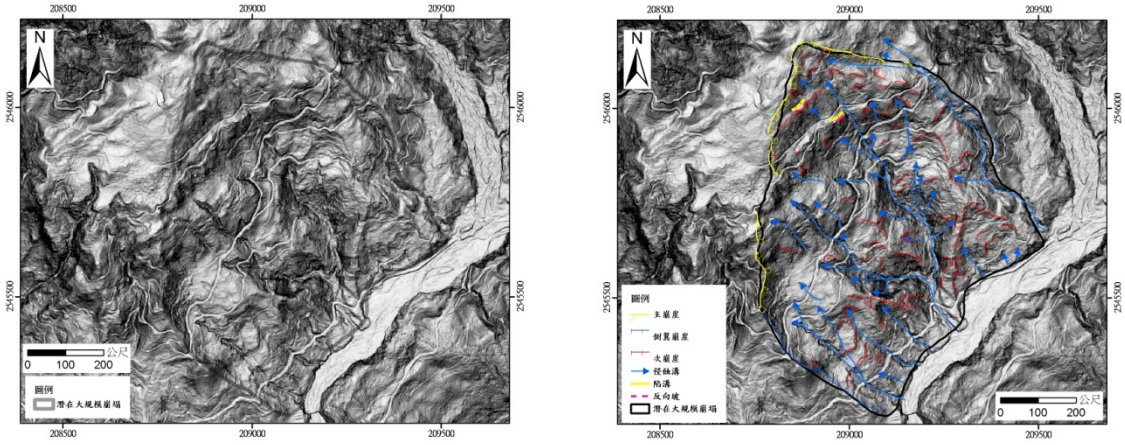


圖 18 潛在大規模崩塌案例一高精度數值地形之坡度圖判釋特徵圖

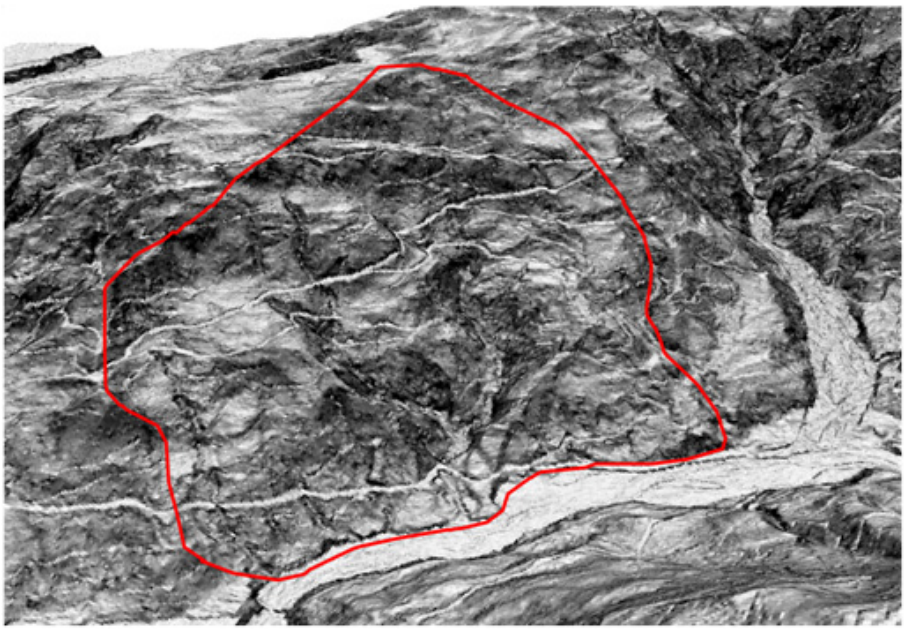


圖 19 潛在大規模崩塌案例一立體圖，紅線範圍為潛在大規模崩塌範圍

(3)野外查核

現場調查目的是針對判釋結果進行驗證。查核分為兩部分，一是針對圖面線性；二是圖面上「面特徵」的分布。線性主要查核重點在於主崩崖和冠部裂縫(或崩崖)，其次為內部裂縫和次崩崖。面特徵的主要查核重點在於趾部岩盤是否變形與崩積層堆積等。

案例一現場查核方面(調查點如圖 20)，調查點 CSC06-2 為發育於冠部之裂隙，高差約 5 到 10 公分圖 21-a)。CSC06-5 為主崩崖(圖 21-b)。東側區位內地形特徵明顯，調查點 CSC06-4、CSC06-6、CSC06-7 皆位於東側主崩體坡腹。調查點 CSC06-4 為坡腹裂縫造成道路拉張破壞之現象(圖 21-c)。調查點 CSC06-6 以及 CSC06-7 為位於坡腹之崩崖及裂縫，落差高度皆約 0.5 公尺(圖 21-d、圖 21-e)。調查點 CSC06-8 為西翼邊界崩崖，現場地形有明顯陡坡，內部並存在小崩崖(圖 21-f)；在主崩崖和坡腹，各發育 1 處多重山脊地形。調查點 CSC06-10 為位於主崩崖之反向坡構造(圖 21-g)，反向坡高差約 1 公尺；調查點 CSC06-3 為舊道路，因邊坡下滑，地形略有反向坡地形，並有發育一高差約 40 公分裂縫(圖 21-h)。

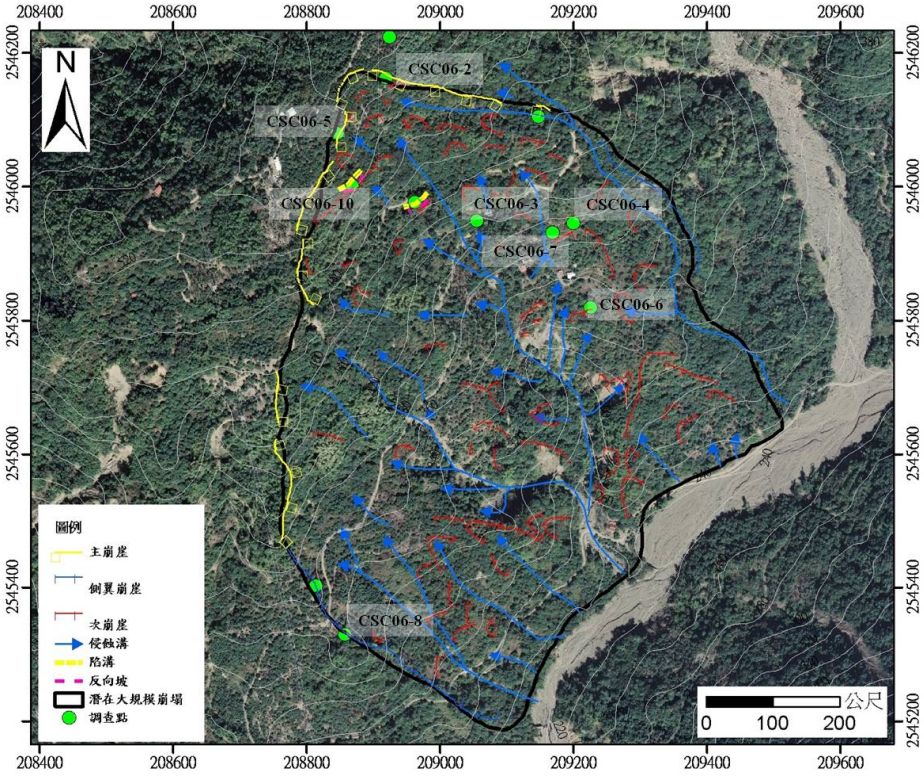


圖 20 潛在大規模崩塌案例一航照和調查點位



圖 21-a:調查點 CSC06-2 冠部之裂隙



圖 21-b:調查點 CSC06-5 主崩崖



圖 21-c:調查點 CSC06-4 坡腹裂縫造成道路破壞，高差約 30 公分



圖 21-d:調查點 CSC06-6 坡腹裂縫，落差高度約 0.5 公尺



圖 21-e:調查點 CSC06-7 坡腹裂縫，落差高度約 0.5 公尺



圖 21-f:調查點 CSC06-8 西翼邊界崩崖



圖 21-g:調查點 CSC06-10 位於主崩崖之反向坡構造，高差約 1 公尺。



圖 21-h:調查點 CSC06-3 發育一高差約 40 公分的裂隙。

3.2 案例二

(1)地質條件

在地質方面，潛在崩塌位置出露地層為長枝坑層。長枝坑層在此處岩性為厚層頁岩間夾薄層砂岩(砂岩厚度約 5 公分)，頁岩和砂岩比例約 4:1。崩塌地對岸岩盤地層位態(N40W，80W)，地層傾向與坡面傾向相近，近順向坡地形。坡趾地層走向為南北向，地層高角度傾東，並發育 2 公尺寬的破碎帶，頁岩產狀呈菱形狀。由影像判釋與現場調查結果，推測崩塌區位地表地質圖如圖 22。

崩塌區位在此區的岩性以頁岩為主，代表崩塌材料較為均質。地形表現因受岩性控制，崩崖發育以圓弧形為主，故推測底部滑動面為圓弧形。因現地欠缺鑽探資料，故由地表地質與地形條件合理推測可能的潛在底部滑動面，如圖 23。

(2)高精度數值地形判釋結果

潛在大規模崩塌案例二崩塌中心之 TWD97 坐標為(209272，2544630)。潛在崩塌面積約為 15.8 公頃、平均坡度 22.1 度，潛在崩塌區位最高點 420 公尺，最低點標高 220 公尺，最大寬度 450 公尺，主要坡向為西南向。

高精度數值地形明顯顯示出主崩崖，其形狀似く字形。在地形特徵方面，崩塌主要地形為兩個凹谷狀地形，且內部存在多處次崩崖。主崩體依中間山脊大致可區分為南北兩側。東側主崩體其主要崩塌特徵是坡頂為主崩崖呈陡坡地形，坡腹處為一緩坡地，其東側為侵蝕溝，無明顯側邊崩崖，故崩塌左翼(南側)以侵蝕溝為邊界。北側主崩體形狀為凹谷形，內部月牙狀崩崖線性明顯，水系發育較南側發達(圖 24、25)。

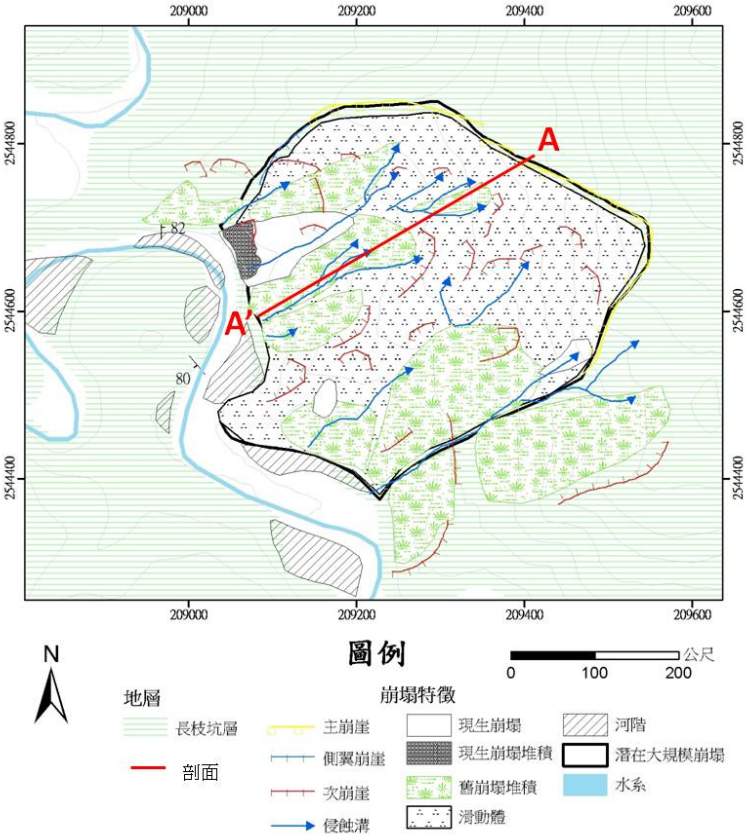


圖 22 潛在大規模崩塌案例二地表地質圖

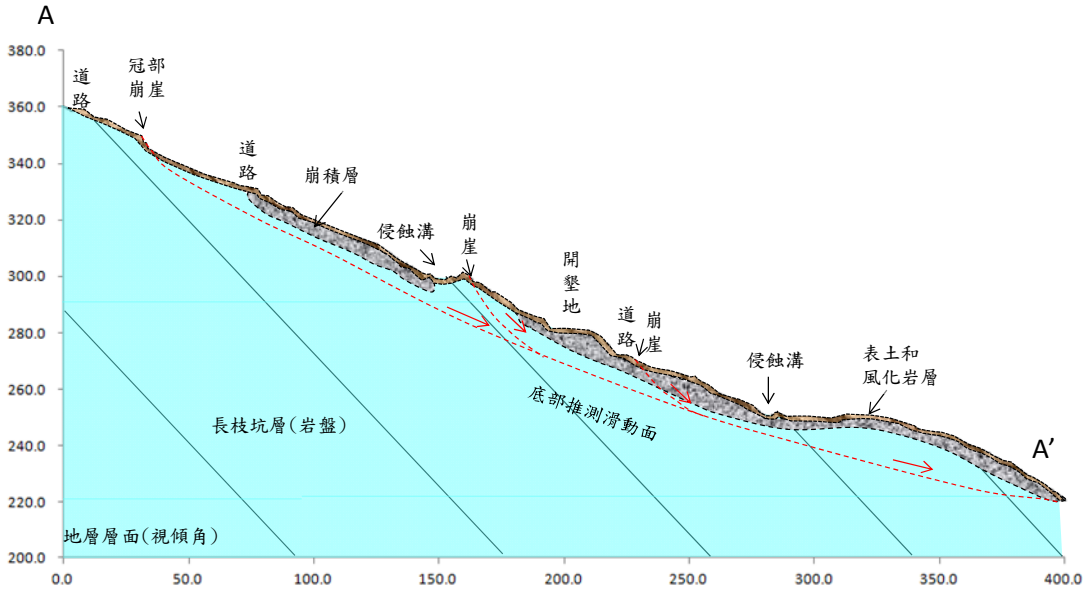


圖 23 潛在大規模崩塌案例二 AA'剖面圖(岩層為視傾角)

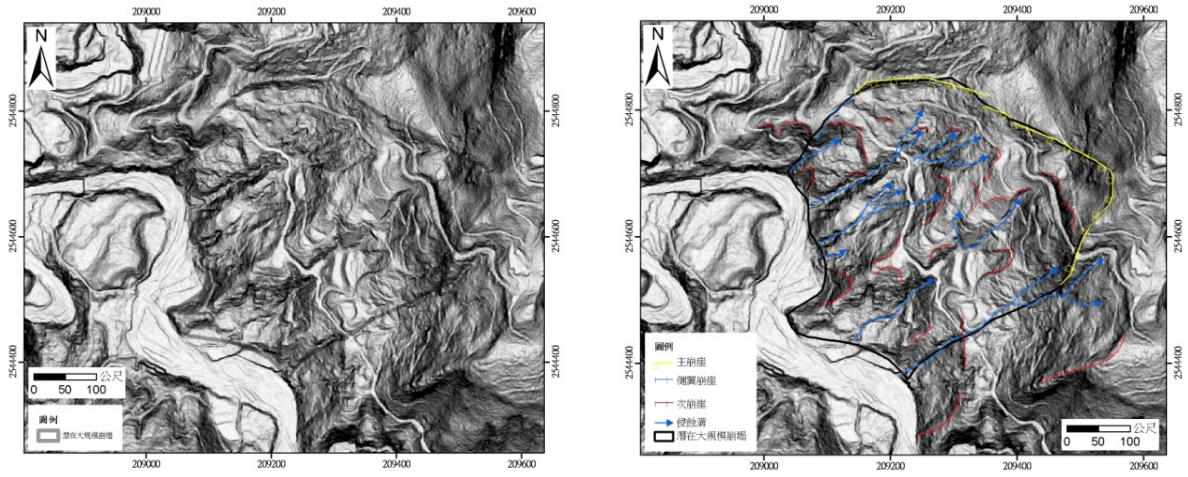


圖 24 潛在大規模崩塌案例二高精度數值地形之坡度圖判釋特徵圖

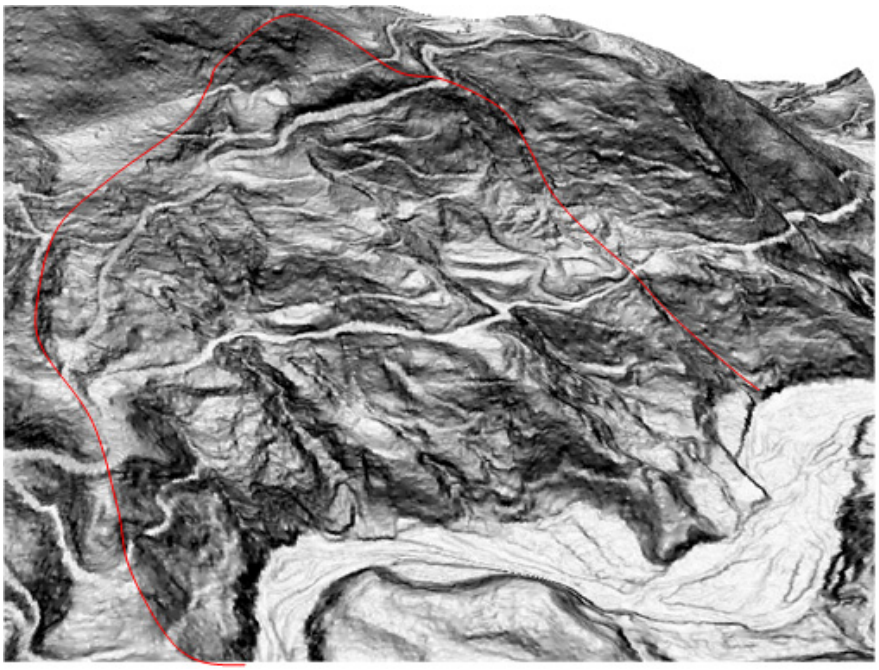


圖 25 潛在大規模崩塌案例二立體圖，紅線範圍為潛在大規模崩塌範圍

(3)野外查核

案例二野外查核方面(圖 26)，調查點 CSC10-1、CSC10-2 以及 CSC10-8 為崩塌之北側主崩崖和冠部，航空照片植生茂密，現地查核發現多處主崩崖有現生崩塌活動，顯示冠部位置活動性高。其中調查點 CSC10-8 因主崩崖活動造成農路的破壞(圖 27-a)，發育約 60 公分高的小崩崖；調查點 CSC10-1 位於崩塌冠部，因拉張作用而發育冠部裂縫，高差約 80 公分(圖 27-b)；調查點 CSC10-2 道路破壞，道路破裂方向與主崩崖方向相近(圖 27-c)。

調查點 CSC10-3、CSC10-9 以及 CSC10-5、CSC10-6 皆位於坡腹之位置，道路存在破壞以及裂縫。調查點 CSC10-3 有道路破壞現象，新舊道路高差近 2 公尺，坡腹活動性活躍 (圖 27-d)。調查點 CSC10-9 因邊坡滑移，造成道路破壞，有 20 公分落差(圖 27-e)。因趾部次崩崖通過調查點 CSC10-5 和 CSC10-6，調查點 CSC10-5 之擋土牆出現多處嚴重的變形破壞以及道路下陷(圖 27-f)；調查點 CSC10-6 因裂縫發育導致舊農舍地基掏空，其裂縫高差約 20 公分(圖 27-g)。

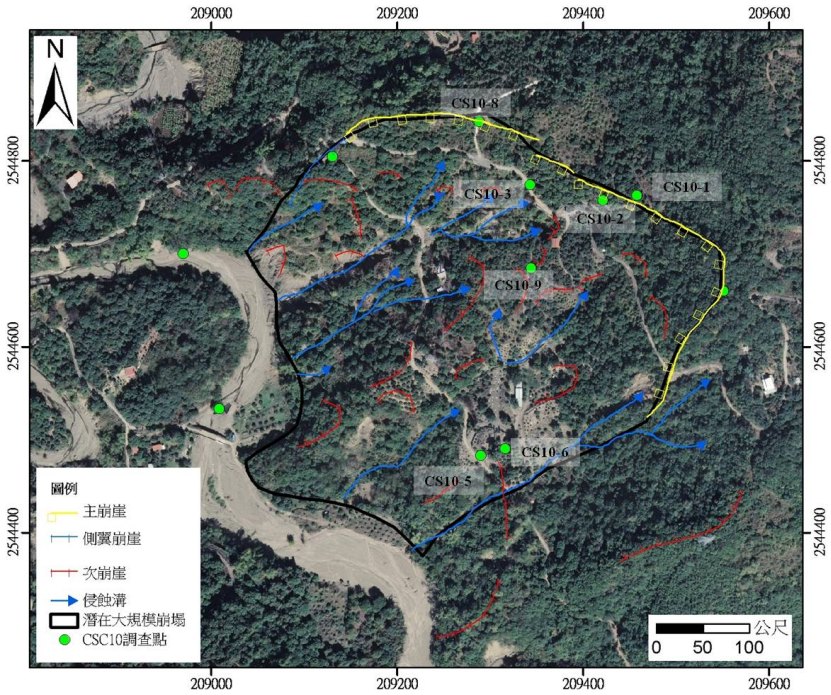


圖 26 潛在大規模崩塌案例二航照和調查點位



圖 27-a:調查點 CSC10-8 主崩崖發育並切過農路，造成約 60 公分高的小崩崖。



圖 27-b:調查點 CSC10-1 冠部裂縫，高差約 80 公分。



圖 27-c:調查點 CSC10-2 位於主崩崖，崩崖與路面破壞方向相近。



圖 27-d:調查點 CSC10-3 位於坡腹之道路與擋土牆破壞情形，舊有道路路面與現今路面落差約 2 公尺。



圖 27-e:調查點 CSC10-9 位於坡腹道路，因邊坡滑移導致路面有 20 到 40 公分的落差



圖 27-f:調查點 CSC10-5 位於坡腹因趾部崩崖通過，導致道路和擋土牆損壞



圖 27-g:調查點 CSC10-6 位於坡腹發育裂縫，裂縫高差約 20 公分

4. 結論

LiDAR 高精度數值地形資料，提供了許多細微地形特徵資訊，大大提高判釋潛在大規模崩塌特徵的能力，藉由 LiDAR 高精度數值地形製作之坡度圖搭配航空照片，更易判釋出崩崖、反向坡、陷溝、侵蝕溝等特徵，並找出潛在大規模崩塌區位，再結合野外查核工作，便能確認是否為大規模崩塌特徵，以免發生誤判情形。潛在大規模崩塌區位資訊可供後續防災或減災規劃使用，以避免因大規模崩塌造成之重大災害，是坡地災害防制之重要課題。過去判釋大規模崩塌是藉由光學影像(衛星影像、航空照片)結合數值地形資料(40 米、5 米)進行判釋，但這些方法和資料受限於植生和解析度，難以有效準確判釋出潛在大規模崩塌區位，特別是崩塌特徵的細部判釋。高精度數值地形明確反應地表特徵，藉由電腦數化與影像處理，在室內可輕易有效判釋出大規模崩塌地形特徵，以便進行現地查核。兩處案例的判釋與現場調查結果驗證了以高精度數值地形判釋大規模崩塌特徵之優點，因此本研究認為高精度數值地形為目前判釋潛在大規模崩塌區位最有利的工具。

參考文獻

千木良雅弘，2011。大規模崩塌潛感區，科技圖書股份有限公司。

日本土木研究所，2008。深層崩塌潛勢溪流檢出方

法說明書，日本。

張智安和陳良健，2006。利用光達資料模塑建物之研究，航測及遙測學刊，第十一卷，第 175-189 頁。

李錦發、魏正岳、林明旻與黃健政，2004。數值航測應用於山崩調查- 以紅菜坪地滑為例，經濟部地質調查所。

劉進金、史天元，2009。以空載光達技術進行三維空間資訊之收集及應用。土木水利，第三十六卷，第五期，第 52-63 頁。

劉治中和蕭國鑫、饒見有、劉進金、吳哲榮、黃群修，2010。結合空載 LiDAR 與彩色航照應用於崩塌地研判，航測及遙測學刊，第十五卷，第 111-122 頁。

蕭國鑫、劉進金、游明芳、陳大科、徐偉城、王晉倫，2006。結合空載 LiDAR 與航測高程資料應用於地形變化偵測，航測及遙測學刊，第十一卷，第 283-295 頁。

賴彥中、陳良健、饒見有，2005。整合光達點雲與空照影像重建三維建物模型，航測及遙測學刊，第十卷，第 27-46 頁。

魏倫瑋、羅佳明、鄭添耀、鄭錦桐、冀樹勇，2012。深層崩塌之地貌特徵-以台灣南部地區為例，中興工程，第 115 期，第 35-43 頁。

Agliardi, F., Crosta, G., and Zanchi, A., 2001, Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics: Engineering Geology, v. 59, p. 83-102.

Agliardi, F., Crosta, G.B., Frattini, P., and Malusà, M.G., 2013, Giant non-catastrophic landslides and the long-term exhumation of the European Alps: Earth and Planetary Science Letters, v. 365, p. 263-274.

Chan, Y.-C., Chen, Y.-G., Shih, T.-Y., and Huang, C., 2007, Characterizing the Hsincheng active fault in northern Taiwan using airborne LiDAR data: Detailed geomorphic features and their structural implications: Journal of Asian Earth Sciences, v. 31, p. 303-316.

Chen, R.-F., Chang, K.-J., Angelier, J., Chan, Y.-C., Deffontaines, B., Lee, C.-T., and Lin, M.-L., 2006, Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: The 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi–Chi earthquake: Engineering Geology, v. 88, p. 160-172.

Chigira, M., 1992, Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep: Engineering Geology, v. 32, p. 157-184.

Chigira, M, 2009, September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan: Engineering Geology, v. 108, p. 1-15.

Chigira, M., Duan, F., Yagi, H., and Furuya, T., 2004, Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics: Landslides, v. 1, p. 203-209.

Chigira, M., and Kiho, K., 1994, Deep-seated rockslide-avalanches preceded by mass rock creep of sedimentary rocks in the Akaishi Mountains, central Japan: Engineering Geology, v. 38, p. 221-230.

Crosta, G.B., Frattini, P., and Agliardi, F., 2013, Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps: Tectonophysics, http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.028.

Glenn, N.F., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G.D., and Dorsch, S.J., 2006, Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity: Geomorphology, v. 73, p. 131-148.

Li, Y.-Y., Yi, D.-C., and Lin, C.-W., 2012, The geologic environment and triggering mechanism of the catastrophic landslide at Hsiaolin Village, Kaohsiung: Western Pacific Earth Sciences, v. 12, p. 1-20.

Pedrazzini, A., Jaboyedoff, M., Loye, A., and Derron, M.-H., 2013, From deep seated slope deformation to rock avalanche: Destabilization and transportation models of the Sierre landslide (Switzerland): Tectonophysics, http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.016.

Tarolli, P., Sofia, G., and Dalla Fontana, G., 2012, Geomorphic features extraction from high-resolution topography: landslide crowns and bank erosion: Natural Hazards, v. 61, p. 65-83.

Varnes, D.J., 1978, SLOPE MOVEMENT TYPES AND PROCESSES: Washington, Transportation Research Board.

Topographic Characteristics Interpretation of Potential Deep-Seated Landslides from Digital Elevation and Remote Sensing Images

Dia-Jie Ho [1] Wei-Shu Chang [2] Ching-Weei Lin [3] Shou-Heng Liu [4]

ABSTRACT

The typhoon Morakot in 2009 August caused lots of deep-seated landslides in southern Taiwan, especially the most serious ones in Hsiaolin village. In order to prevent this kind of serious disaster, interpretation of potential deep-seated landslides is an important work that leads to disaster prevention and mitigation of future important information. During the develop of deep-seated landslides movement process, some characteristics often can be found from terrain data. We use different resolutions of the digital terrain data and images to interpret the sites of potential deep-seated landslides, the results show that high precision digital terrain data from airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) can provide more subtle topographic characteristics, greatly improving the capability to interpret the potential deep-seated landslides, with aerial photos during the interpretation. Results of the interpretation are validated through field work to ensure the accuracy.

Keywords: potential deep-seated landslides, airborne LiDAR, aerial photos

[12] Research Assistant, Disaster Prevention Research Center, National Cheng Kung University
[3] Professor, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University
[4] Postdoctoral Fellow, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University
[*] Corresponding Author, Phone: 886-6-2757575 ext.65427, E-mail: chingwee@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Aug. 09, 2013
Revised Date: Nov. 18, 2013
Accepted Date: Dec. 27, 2013

航測及遙測學刊　第十八卷　第2期　第129-144頁　民國103年05月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume18, No2, May 2014, pp. 129-144

應用光達地形資料於莫拉克災後陳有蘭溪流域崩塌與土石流地質敏感地區判釋與分析

林美聆[1]　陳彥澄[2]

摘　要

台灣位處環太平洋地震帶，板塊運動活躍、地勢陡峭，地質構造複雜破碎提供了豐富的土石材料。季節性颱風豪雨帶來了豐沛的雨量，導致台灣地區崩塌和土石流災害頻傳。崩塌和土石流地質敏感區域常以航空照片或衛星影像進行判釋，但往往因為地形地貌、日照方向、雲覆或植被之影響導致判釋上的困難。目前高精度光達探測技術日益發展，本研究透過航空照片以及衛星影像及光達日照陰影圖，判釋研究區域崩塌及土石流等地質敏感區域。將光達資料所判釋的成果與航照及衛星影像之圈繪成果比對，並討論光達地形資料在崩塌和土石流之判釋適用性。

利用光達數值地形判釋時可以排除航照及衛星影像的不利因素，可以更精確的判釋大規模崩塌及土石流。光達數值地形所判釋的崩塌規模較大並可看出整體性，而且判釋不受植被影響。利用光達數值地形判釋土石流時，能得到河道的正確位置，土石流沖積扇也能輕易的判釋，但對於小規模及淺層崩塌則難以判釋。

關鍵詞：崩塌及土石流地質敏感地區、光達地形資料、航空照片、陳有蘭溪流域、莫拉克颱風

1. 前言

台灣位於環太平洋地震帶，板塊運動活躍使得地形陡峭，加上颱風及季節性之豪大雨所帶來的豐沛雨量常常導致坡地災害，造成生命財產的損失。加以全球氣候變遷之影響，對於坡地崩塌和土石流等地質敏感地區的資料實有必要建立及更新，以提供國土規劃及防災應用所需之資料。

近年來高精度空載光達的技術發展快速，對於應用在判釋地形地貌上有良好成效。本研究利用高精度光達數值地形判釋坡地崩塌及土石流地質敏感地區，配合莫拉克災後航照以及衛星影像判釋對於研究區域內的圈繪結果進行比對，並討論高精度光達數值地形在判釋崩塌及土石流地質敏感地區的適用性。

2. 光達地形資料於坡地崩塌與土石流判釋方法

光達數值地形運用於崩塌與土石流地質敏感區域的判釋，國內外已有相關的研究，有別於以往用航照及衛星影像的判釋工作，利用高精度光達數值地形更能看出細緻地形變化，有利於相關地質敏感區域的判釋。

2.1 文獻探討

Schulz (2004)針對美國西雅圖的 Puget Sound 地區進行研究，利用光達資料西雅圖 Duwamish Head 地區 2m 光達數值地形產生坡度及不同角度之陰影圖，求取較佳之判釋陰影圖。由研究區內地

[1] 國立台灣大學土木工程學系 教授
[2] 國立台灣大學土木工程學系 研究助理

收到日期:民國 102 年 06 月 03 日
修改日期:民國 102 年 11 月 18 日
接受日期:民國 102 年 12 月 27 日

*通訊作者, 電話: 02-23656444, E-mail: nonametochoice@gmail.com

形分析，發現光達數值地形對於大型複合型態之崩塌判釋有良好之成效，且可判釋出具有崩塌潛勢之崩塌地區。

Schulz(2005)利用美國西雅圖地區之光達數值地形和可能崩塌冠部及可能崩塌地點，利用影像疊合處理航拍影像及光達數值地形圖，判釋可能發生崩塌之冠部地區。光達資料特性可移除樹高呈現真實地表情形，故可進行微地形分析，有助於判釋可能發生崩塌之位置。

Miner *et al.*,(2010)在澳洲維多利亞 Otway Ranges山脈靠近Johanna地區進行植被所呈現之地表高程和光達數值地形所顯示真實地表高程之差異研究和由航照正射影像及1m解析度之光達數值地形比對，發現光達數值地形可明顯看出地表起伏，但在航空照片中卻難以看出地表變化。國外如M. *et al.,* (2007)也利用光達數值地形進行舊崩塌地之研究，國內則吸收國外經驗，也利用光達數值進行分析，如水利規劃試驗所(2014)，「水庫蓄水區邊坡深層滑動潛勢評估分析」，利用光達數值地形，對士文水庫及南化水庫上游第二水庫集水區內邊坡進行深層滑動潛勢評估分析。劉進金(2011)等人，「空載光達技術於大區域坡地災害調查與分析之應用」，利用空載光達對於大屯火山群進行分析，透過光達地形資料可看出火山錐體以及近代發生的斷層，並觀察山腳斷層的位置及錯移量，與現場調查的位置比對。

2.2 判釋方法

本研究主要針對研究區坡地破壞類型之崩塌及土石流進行判釋分析，另外將針對研究區以航照進行相關土砂災害判釋圈繪及比對。

航照判釋主要利用數值地形配合莫拉克災後航照以及衛星影像，依地質敏感區所在之坡度及特性，進行判釋與圈繪。判釋所使用影像的為研究區域內1/5000的航照，解析度為25公分，拍攝時間在莫拉克風災過後。衛星影像為福衛二號的原生影像，解析度為8公尺。

利用研究區域內的高精度光達數值資料模型在地理資訊系統空間分析功能中可建立八方位日照陰影圖。可由不同方向日照陰影圖中看出地形的細微變化如線性構造及裂縫等以利在圈繪上得到更好的判釋效果，日照陰影的八方位圖如圖1所示。

2.2.1 崩塌判釋方法

航照判釋之崩塌型態包含落石以及岩屑崩滑，以下說明其發生要件及判釋要點。

a. 落石發生要件及判釋要點：

坡地具陡峭地形、堅硬岩層、富含節理等不連續面發達之地層條件下，在航照上崖面色調呈光亮，反映其為裸露或植被稀疏之坡面，或在陡崖下方可見坡度變緩且呈錐形堆積地形面，其平均坡度在55°以上的範圍地區，或具有曾經發生落石歷史紀錄的地區(經濟部中央地質調查所，2006)。落石之發生示意圖，如圖2所示。

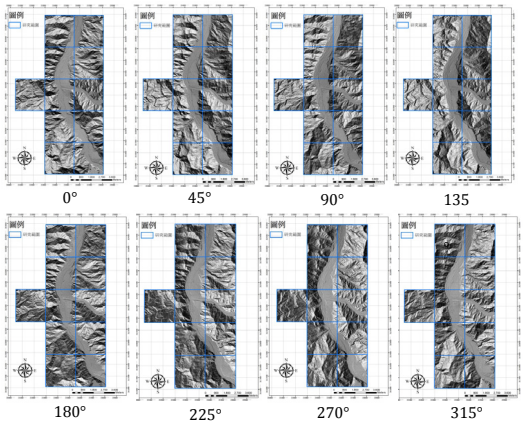


圖1 研究區域內之八方位日照陰影圖

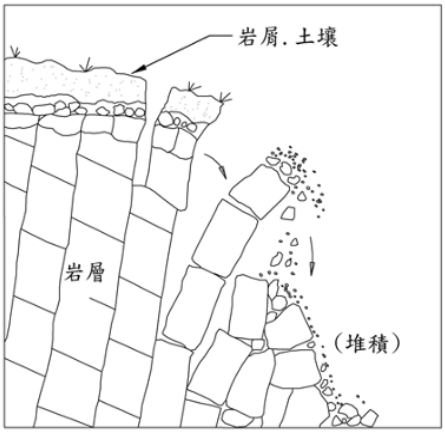


圖2 落石發生示意圖(修改自經濟部中央地質調查所，2012)

b. 岩屑崩滑發生要件及判釋要點：

岩屑崩滑係坡地破壞之移動物質為岩屑及土壤，其移動方式在陡坡地為崩落，緩坡為滑動，如圖 3 所示。陡坡岩屑崩滑後坡面常呈細長條狀之裸露狀態，土石堆積於坡趾處。若崩塌作用未完全停止或崖坡面缺乏植生保護時，常易受沖蝕而持續發生擴大現象。在航照判釋上色調呈光亮之長條型裸露地，坡面呈現淺凹槽狀，植生色調與周圍區域不協調，下方之坡度變平緩處具有崩塌堆積特徵，判釋與崩塌地形特徵有關。

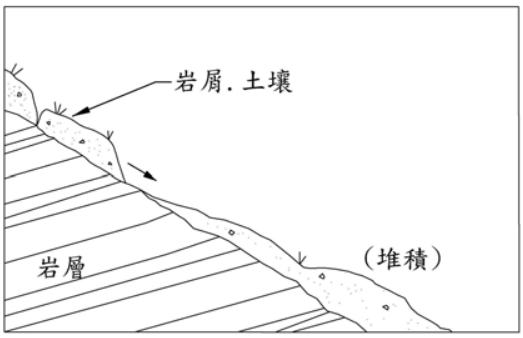


圖 3 岩屑崩滑示意圖(修改自經濟部中央地質調查所，2012)

由光達地形資料判釋崩塌時，無法像航照或是衛星影像直接從圖面上看出植被變化或是地層顏色等特徵，而是利用光達地形資料建立之日照陰影圖對於研究區域的地形變化進行判釋。針對崩塌地形特徵如圖 4 所示，從日照陰影圖中判釋出崩崖、側邊裂隙、橫向裂縫、線性構造及坡趾隆起等滑動徵兆，將此滑動徵兆連接起來可圈繪出崩塌範圍。如果為圓弧形或潛變形破壞之地形特徵主要於冠部呈現崩崖地形，崩崖下方可能有窪地或濕地。在順向坡地區，地表有平面滑動遺跡，坡頂具殘留岩塊，坡側具陡崖地形，坡趾具有堆積大量土石或隆起現象或河道異常彎曲，可研判為岩體曾經發生滑動的地區。

2.2.2 土石流判釋方法

土石流常發生於 1、2 級溪流，其流動材料通常來自溪谷兩側之坡地崩塌。土石流發生後河道常呈 U 字型，在河道匯流處或谷口則形成扇形堆積。土石流動坡度剖面如圖 5 所示，判釋方法說明如下。

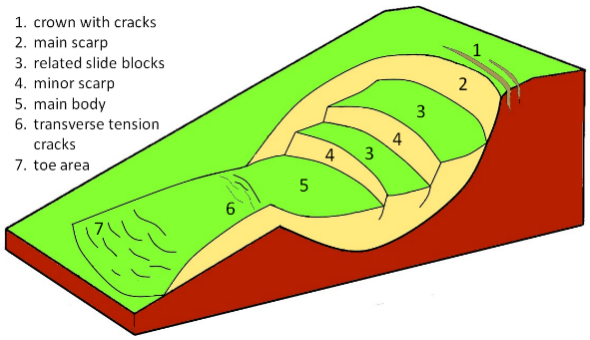


圖 4 大規模崩塌微地形特徵特徵示意圖(M. *et al*,2014)

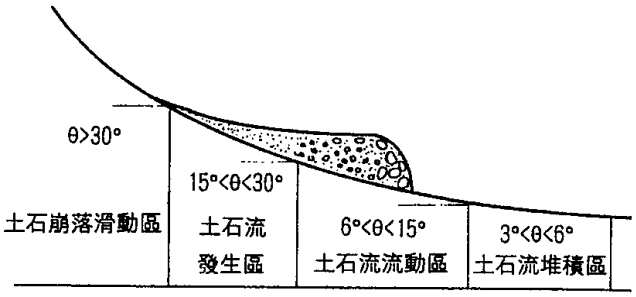


圖 5 土石流動坡度剖面示意圖(改繪自詹錢登，1998)

a. 土石流航照判釋要點：

航照上顯示集水區溪床有明顯土石且邊坡可能具崩塌分布，往下游的溪溝顯現出光亮，谷口有呈現扇形堆積等近期土石流發生的地貌特徵。土石流之水系及集水區範圍內，地形圖上研判山溝或溪谷之谷口地區是否有扇狀地形表徵及具有發生土石流歷史紀錄的坑溝，均為判釋之依據。

b. 土石流圈繪及數化原則：

圈繪符合航照判釋具有土石流地貌特徵或有發生土石流歷史紀錄的坑溝，圈繪範圍依坑溝中發生土石流之河道及土石流堆積區圈繪。土石流河道的圈繪方式依土石流影像與地形資料判釋方法判釋範圍。土石流堆積區為土石流注入主河道或流出谷口處之堆積區域。堆積區可能呈扇狀，包含早期土石流堆積造成，因地盤隆起及河道侵蝕作用，而破壞原有地貌，但仍可能保留扇狀地形的特徵，應圈繪其最大地形面範圍。

利用光達地形資料判釋土石流方法與航照及

衛星影像相同，建立研究區域內的日照陰影圖進行土石流判釋工作，由於少了植被、日照陰影或是雲覆的外在影響，加上高精度影像更清楚研判河道狀況以及下游堆積。

3. 研究區域

本研究針對陳有蘭溪流域中有保全對象的圖幅進行判釋工作。利用中央地質調查所所提供在陳有蘭溪流域中有保全對象的五千分之一圖幅共 11 幅高精度光達地形日照陰影資料圖幅進行判釋。

3.1 研究區地理位置

陳有蘭溪流域主流長約 42 公里，流域面積約為 449 平方公里，為南北縱向流路的溪流，也是濁水溪之重要支流之一。主流發源於玉山北麓，匯集該坡面及西方阿里山山脈東坡與郡大山脈之水流，向北於水里鄉注入濁水溪主流，陳有蘭溪全流域如圖 6。

本次的研究範圍位於陳有蘭溪的中下游段，包含有 11 個圖幅，分別為竹子腳、新山、安村、三十甲(三)、三十甲(四)、田底、郡坑口、信義、九層坑、風櫃斗和豐丘，研究範圍如圖 7 所示。行政區域包含南投縣鹿谷鄉鳳凰村；水里鄉新山村、興隆村、郡坑村和上安村；信義鄉明德村、愛國村、自強村、豐丘村、新鄉村以及羅娜村，等 11 村，行政區域分布如圖 8 所示。



圖 6 陳有蘭溪流域

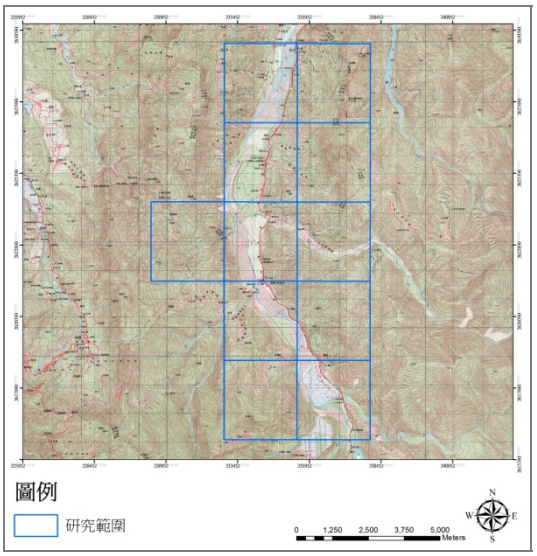


圖 7 研究範圍之地形圖

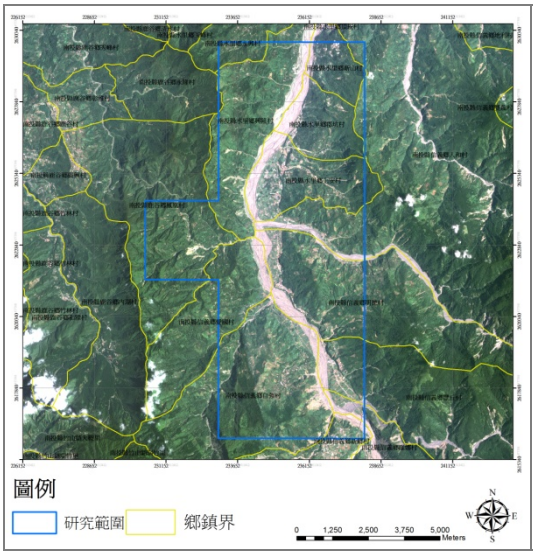


圖 8 研究範圍之行政區域

自民國 85 年賀伯颱風、民國 88 年 921 集集大地震、民國 90 年桃芝颱風以及民國 98 年莫拉克颱風等，皆在研究區內造成多次崩塌及土石流等災情，亦對生命財產形成嚴重衝擊。在莫拉克颱風時所帶來之豪大雨再陳有蘭溪流域內的水里鄉發生嚴重崩塌，導致土石流之發生，位於水里鄉的投縣 DF216 土石流溪流源頭之崩塌，直延伸至坡頂，有向源侵蝕之現象，如圖 9。在投縣 DF216 土石流溪流中下游處，大小不一之崩塌量體堆積於河道中央，土石粒徑約為 2 公尺以上，土石材料豐富，如圖 10。所幸此土石流未造成人命傷亡。



圖 9 投縣 DF216 土石流溪流源頭崩塌源頭區(拍照時間：2009/10/23，地點：南投縣水里鄉)



圖 10 投縣 DF216 土石流溪流堆積區(拍照時間：2009/10/23，地點：南投縣水里鄉)

3. 2 區域地質

研究區流域地層多為沉積岩層之砂岩及頁岩，並有陳有蘭溪斷層以及摺皺通過，研究區域內多為破碎材料，研究區域之地層與地質構造分布如圖 11 (經濟部中央地質調查所，2007)。

研究區域內的地層包含了始新世的白冷層，此地層岩性以灰白色厚層中粒至粗粒石英砂岩為主，間夾深灰色炭質頁岩、灰色緻密粉砂岩、薄至厚層的細粒至中粒砂岩與頁岩之互層，薄至厚層礫石層及薄煤層。中新世的和社層、樟湖坑頁岩以及深坑砂岩，其中和社層以塊狀或厚層砂岩與薄層頁岩之互層所成。砂岩呈灰色或淡青色，細粒或中粒，部分含石灰質，常造成懸崖或峭壁；樟湖坑頁岩特色為深灰色頁岩，無清晰層面，富含有孔蟲化石；深坑砂岩主要是由厚層塊狀砂岩及暗灰色頁岩組成。砂岩通常為灰至淡灰色，細粒泥質或粉砂質，常連續出現而構成巨大厚累層。上新世的桂竹林層，此地層主要由塊狀厚層灰色至棕色泥質砂岩為主要岩性，間夾灰色泥岩或頁岩。更新世的階地堆積層地層中大多包含礫石及砂。全新世的沖積層，沖積層中多礫石、砂以及黏土。研究區域內的地質大都為砂岩及頁岩，此岩性在大量降雨的影響下容易產生崩塌以及土石流等災害。

研究區域內地質構造有三處斷層以及一處摺皺。斷層包含了有水里坑斷層、陳有蘭溪斷層以及苦苓腳斷層。摺皺則是集集大山向斜摺皺。研究區域內因為有斷層以及褶皺影響，岩石材料易產生破裂而產生許多的強度較弱的材料，如果加上大量降雨或地震等外來因素之影響下，容易造成嚴重災情。

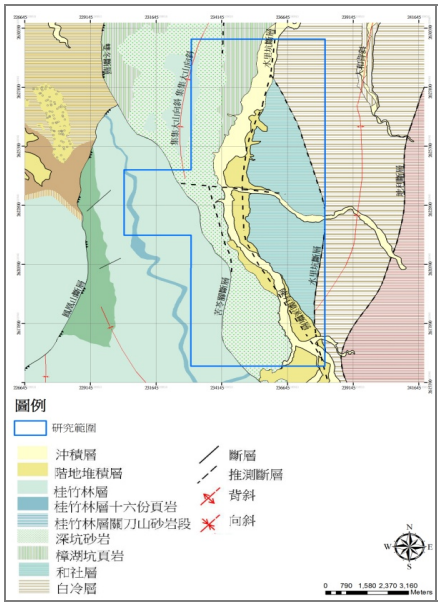


圖 11 研究區域之地質圖(經濟部中央地質調查所，2007)

4. 研究區崩塌判釋

分別利用航空照片以及衛星影像圈繪和高精度光達數值地形判釋研究區域內之崩塌，再將兩者成果比較並討論。

4. 1 航空照片判釋

利用莫拉克颱風災後之航空照片以及衛星影像進行研究區域內之崩塌判釋，崩塌圈繪成果範例如圖 12 所示，此處為牛稠坑溪出口西北方約 550 公尺處之岩屑崩滑。

在研究區域內經由航空照片及衛星影像判釋後，所圈繪出的崩塌總共有 220 處，總面積為 182.43 公頃。崩塌形態多為岩屑崩滑，地質材料為砂岩或頁岩。多發生於土石流溪流中上游邊坡以及陳有蘭溪沿岸。

圖 13 為研究區域北方之四幅圖幅。分別為竹子腳、新山、安村以及三十甲(四)之崩塌判釋成果，合計有 59 處崩塌，總計面積為 46.6 公頃。圖 14 為研究區域中部三幅圖幅分別為田底、郡坑口以及三十甲(三)之崩塌判釋成果，合計有 67 處崩塌，總計面積有 50.6 公頃。圖 15 為研究區域南方四幅圖幅分別為信義、九層坑、風櫃斗和豐丘之崩塌判釋成果，合計有 94 處崩塌，總計面積為 85.2 公頃。

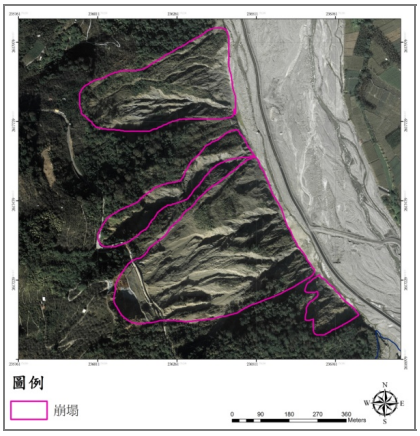


圖 12 牛稠坑溪出口西北方約 550 公尺處之崩塌圈繪成果圖

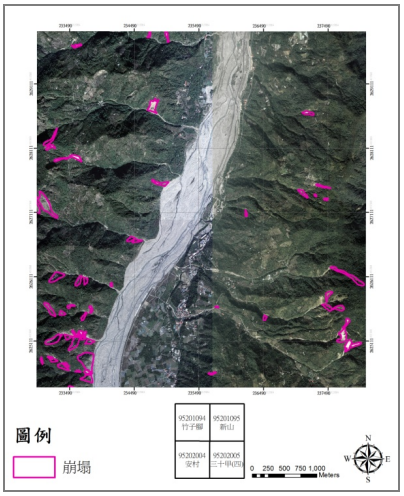


圖 13 研究區域北方四幅航照崩塌之圈繪成果(圖幅為: 竹子腳、新山、安村和三十甲(四))

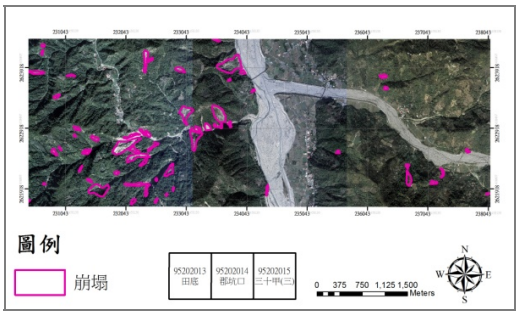


圖 14 研究區域中部三幅航照之崩塌圈繪成果(圖幅為: 田底、郡坑口和三十甲(三))

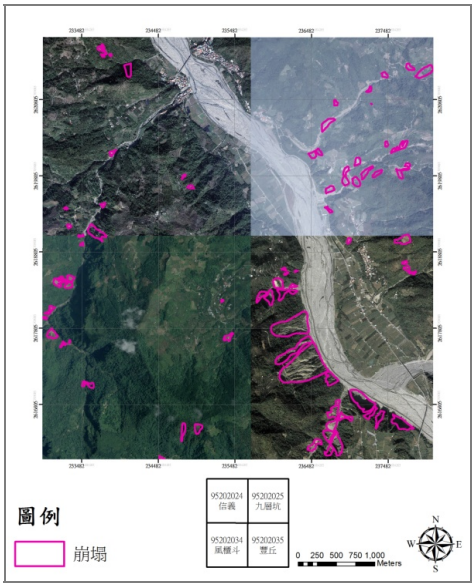


圖 15 研究區域南方四幅航照之崩塌圈繪成果(圖幅為: 信義、九層坑、風櫃斗和豐丘)

4.2 研究區光達資料崩塌判釋

研究區域內利用光達日照陰影圖判釋崩塌的結果崩塌總共有 43 處，總面積為 555 公頃。判釋結果大都為較大規模的崩塌，面積超過 10 公頃的有 17 處。

圖 16 為研究區域北方四幅圖幅分別為竹子腳、新山、安村以及三十甲(四)之崩塌判釋成果，合計有 16 處崩塌，總計面積為 141.3 公頃。圖 17 為研究區域中部三幅圖幅為田底、郡坑口以及三十甲(三)之崩塌判釋成果，合計有 12 處崩塌，總計面積有 282.6 公頃。圖 18 為研究區域南方四幅圖幅為信義、九層坑、風櫃斗和豐丘之崩塌判釋成果，合計有 15 處崩塌，總計面積為 131.1 公頃。

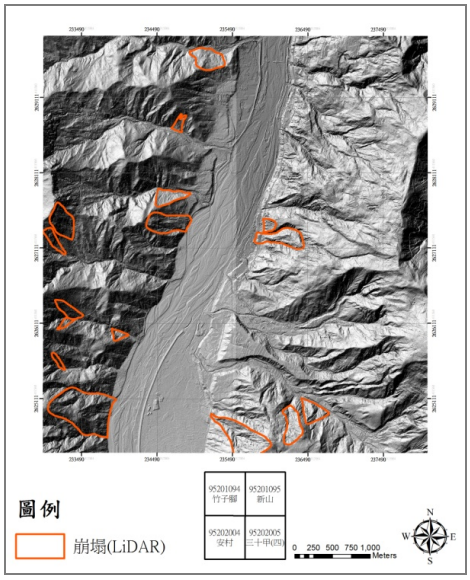


圖 16 研究區域北方四幅光達數值地形之崩塌圈繪成果(圖幅為: 竹子腳、新山、安村和三十甲(四))

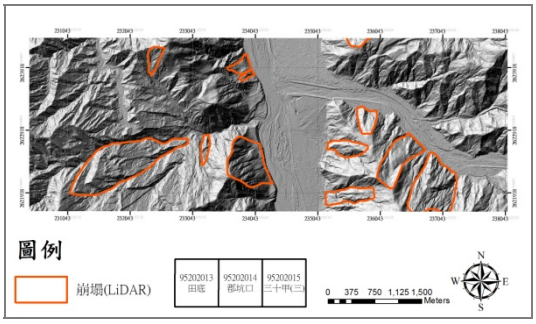


圖 17 研究區域中部三幅光達數值地形之崩塌圈繪成果(圖幅為: 田底、郡坑口和三十甲(三))

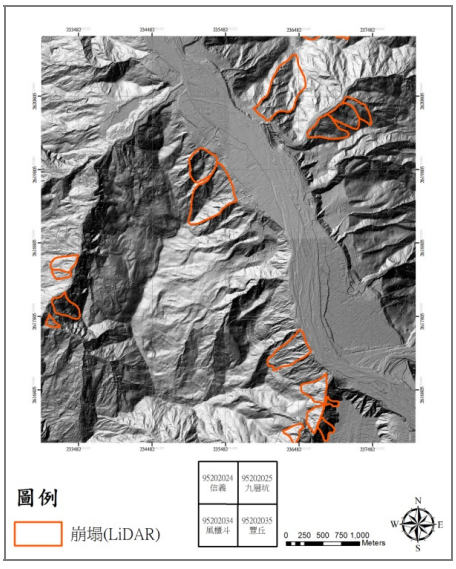


圖 18 研究區域南方四幅光達數值地形之崩塌圈繪成果(圖幅為: 信義、九層坑、風櫃斗和豐丘)

4. 3 崩塌判釋成果比對

圖 19 為航照所圈繪的崩塌為發生於烏松崙聚落西方 800 公尺的岩屑崩滑。由航空照片中可清楚的判釋出崩塌的位置以及形態，但該地區光達數值地形所建立的日照陰影圖如圖 20，圖中無法清楚判讀，評估原因為此處崩塌為較淺層的滑動，地形變化量不大，導致光達資料無法清楚呈現崩塌形態。

圖 21 中所圈繪之崩塌發生於陳有蘭溪沿岸，牛稠坑溪出口西北方約 550 公尺處之岩屑崩滑。由航空照片中可研判出崩塌的大致位置，但由於坡地上的材料並未完全的崩落，所以在圈繪上有些困難。利用光達日照陰影圖則可清楚的看出崩塌的形狀以及堆積的位置，可圈繪出完整的崩塌形狀，如圖 22 所示。

圖 23 之航照崩塌圈繪成果位置在苦嶺腳山下，面對田仔底聚落。航空照片研判包含的陳有蘭溪沿岸之 18 處崩塌以及 2 條土石流。套疊日照陰影圖後，可看出沿著南北兩側的土石流溪溝發展出長 810 公尺，寬 550 公尺的一個大規模崩塌，如圖 24 所示。因此在判釋植被茂盛或是滑動區未明顯裸露的崩塌時，由光達數值地形所建立的日照陰影圖較容易看出地形變動而判釋出大規模崩塌的位置及範圍。

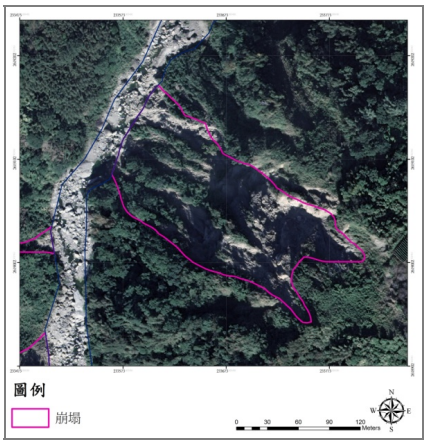


圖 19 航照所判釋之崩塌成果(烏松崙聚落西方 800 公尺的岩屑崩滑)

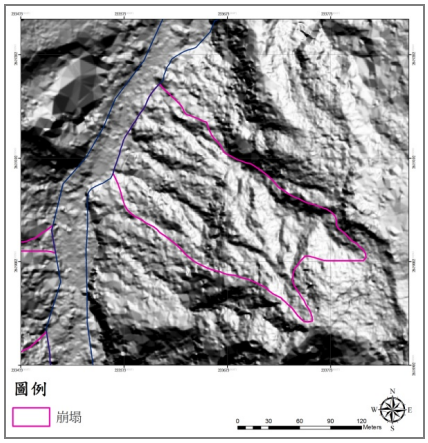


圖 20 光達數值地形所建立陰影圖比對航照判釋成果(烏松崙聚落西方 800 公尺的岩屑崩滑)

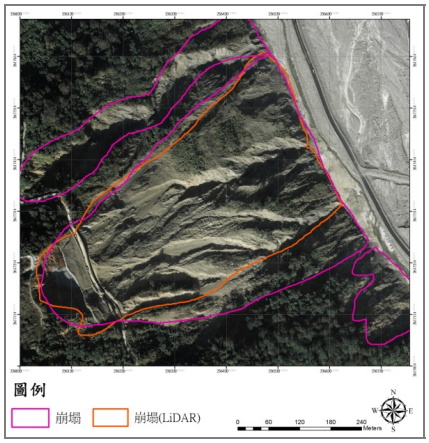


圖 21 航照與光達數值地形所判釋之崩塌成果由航照輸出(牛稠坑溪出口西北方約 550 公尺處之岩屑崩滑)

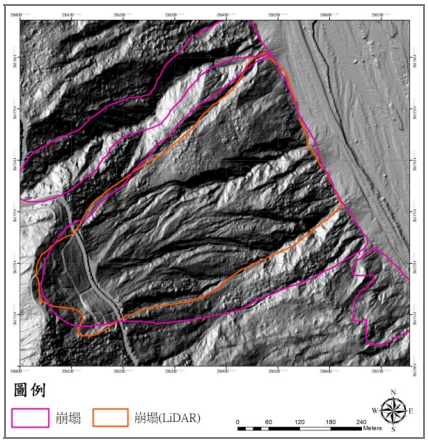


圖 22 航照與光達數值地形所判釋之崩塌成果由日照陰影圖輸出溪出口西北方約 550 公尺處之岩屑崩滑)

圖 23 之航照崩塌圈繪成果位置在苦嶺腳山下，面對田仔底聚落。航空照片研判包含的陳有蘭溪沿岸之 18 處崩塌以及 2 條土石流。套疊日照陰影圖後，可看出沿著南北兩側的土石流溪溝發展出長 810 公尺，寬 550 公尺的一個大規模崩塌，如圖 24 所示。因此在判釋植被茂盛或是滑動區未明顯裸露的崩塌時，由光達數值地形所建立的日照陰影圖較容易看出地形變動而判釋出大規模崩塌的位置及範圍。

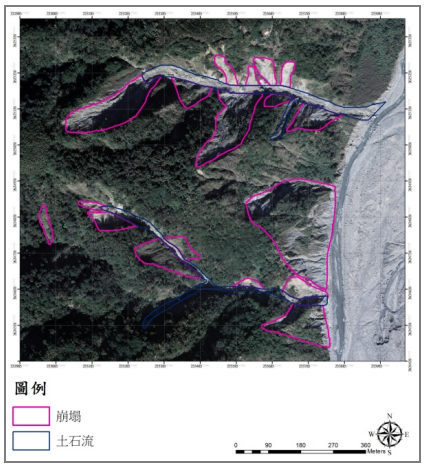


圖 23 航照判釋之崩塌及土石流位於苦嶺腳山下，面對田仔底聚落之岩屑崩滑

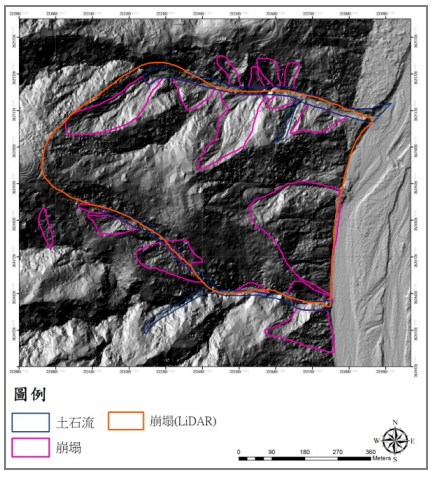


圖 24 光達數值地形判釋之崩塌，苦嶺腳山下，面對田仔底聚落之岩屑崩滑及大規模崩塌

4.4 航空照片與光達地形資料之崩塌判釋結果討論

光達探測具有可透過植被表現出原本的地形

地貌的特性，因此對於植被較茂密的區域有利於判釋出明顯地形變動的位置及範圍，又因為解析度甚高可看出地表的細微起伏，光達數值地形所建立的八方位日照陰影圖可由不同角度觀察地形地貌，在判釋崩塌上有很明顯的幫助。

然對於在崩塌深度較表淺、規模小或地形的變動較小時，在日照陰影圖上則較難辨識。因此採用航空照片或衛星影像配合光達八方位日照陰影圖使圈繪可互相比對驗證，崩塌位置以及範圍更精確。

將光達資料判釋的崩塌以及由航照及衛星影像圈繪的結果整理於表 1、表 2 及表 3。由表 1 可看出北方 4 幅由航照判釋的崩塌數量雖然多，但整體崩塌率只有 1.65%，而光達數值地形判釋的崩塌雖然只有 16 處，但所判釋出的崩塌面積都較大，因此判釋出的整體崩塌率有 5%，唯有新山圖幅的崩塌率較低，推測此處的地形較平緩。

中部 3 幅圖幅所判釋的狀況與北方 4 幅類似，由航照判釋的崩塌個數多，但面積較小，僅有田底圖幅的崩塌率偏高。由光達數值地形判釋的崩塌個數只有航照判釋的 1/5，但面積卻將近 5 倍，而且崩塌率都大於 10%。

南方 4 幅由航照判釋的崩塌個數約為光達數值地形所判釋的 5 倍，而崩塌面積僅有 0.5 倍。而豐丘圖幅由航照判釋出的崩塌率為 8.95%，為 13 幅圖幅中由航照判釋的崩塌率最高，推估為在莫拉克颱風時，大量的降雨進入陳有蘭溪流域，使得此處的邊坡受到強烈的河岸侵蝕，造成許多在溪流沿岸規模較大的崩塌，因此有較高的崩塌率。

整個研究區域的崩塌，由航照判釋的崩塌總共有 209 處，總面積為 185.9 公頃，崩塌率約為 2.4%；由光達數值地形所判釋的崩塌總共有 44 處，總面積為 578.3 公頃，崩塌率為 7.5%。可看出航照判釋的崩塌數量雖多，但崩塌的面積小，崩塌率較低；而光達數值地形所判釋崩塌數量較少，但崩塌面積大，崩塌率偏高。

表 1 研究區域北方四幅崩塌統計表

圖幅名稱	航照判釋			光達數值地形判釋		
	個數	面積(公頃)	崩塌率(%)	個數	面積(公頃)	崩塌率(%)
竹子腳	13	13.8	2.04	6	43.7	6.47
新山	5	2.0	0.30	2	13.1	1.94
安村	29	21.6	3.20	5	46.0	6.81
三十甲（四）	12	9.2	1.36	3	38.5	5.70
合計	59	46.6	1.65	16	141.3	5.00

表 2 研究區域中部三幅崩塌統計表

圖幅名稱	航照判釋			光達數值地形判釋		
	個數	面積(公頃)	崩塌率(%)	個數	面積(公頃)	崩塌率(%)
田底	40	27.0	4.00	2	89.7	13.3
郡坑口	18	20.1	3.00	7	101.6	15.4
三十甲(三)	9	3.5	0.52	3	91.3	13.5
合計	67	50.6	1.79	12	282.6	10.0

表 3 研究區域南方四幅崩塌統計表

圖幅名稱	航照判釋			光達數值地形判釋		
	個數	面積(公頃)	崩塌率(%)	個數	面積(公頃)	崩塌率(%)
信義	14	5.4	0.8	2	42.7	6.33
九層坑	26	15.5	2.30	4	56.5	8.37
風櫃斗	15	7.4	1.10	4	17.7	2.62
豐丘	28	60.4	8.95	6	37.5	5.56
合計	83	88.7	3.14	16	154.4	5.15

5. 土石流判釋成果

土石流判釋分別利用航空照片以及衛星影像圈繪和高精度光達地形資料判釋研究區域內之土石流溪流，再將兩者成果比較並討論。

5.1 航空照片土石流判釋成果

利用研究區域的航空照片以及衛星影像所圈繪出之土石流溪流總共 38 條，大都為陳有蘭溪之支流，僅有兩條發展於田底圖幅之山區。流經的地層大都為砂岩和頁岩，其中包含水保局已公開之土石流潛勢溪流共有 25 條。圖 25 為土石流潛勢溪流投縣 DF148 及投縣 DF214 土石流判釋圈繪成果圖。

圖 26 為研究區域北方四幅圖幅，分別為竹子腳、新山、安村以及三十甲(四)之土石流判釋成果，共計有 18 條土石流。圖 27 為研究區域中部三幅圖幅分別為，田底、郡坑口以及三十甲(三)之土石流判釋成果，共計有 9 條土石流。圖 28 為研究區域南方四幅圖幅，分別為信義、九層坑、風櫃斗和豐丘之土石流判釋成果，共計有 11 條土石流。

5.2 光達資料土石流判釋成果

由光達數值地形建立的日照陰影圖所判釋的土石流大致上跟航照判釋的結果相同，判釋出的土石流溪流為 38 條，但在圈繪上更能準確判釋出河道的位置，使圈繪成果更精確。

圖 29 為研究區域北方四幅圖幅，分別為竹子腳、新山、安村以及三十甲(四)之土石流判釋成果，共計有 18 條土石流。圖 30 為研究區域中部三幅圖幅分別為，田底、郡坑口以及三十甲(三)之土石流判釋成果，共計有 9 條土石流。圖 31 為研究區域南方四幅圖幅，分別為信義、九層坑、風櫃斗和豐丘之土石流判釋成果，共計有 11 條土石流。



圖 25 土石流潛勢溪流投縣 DF148 及投縣 DF214 土石流圈繪成果圖

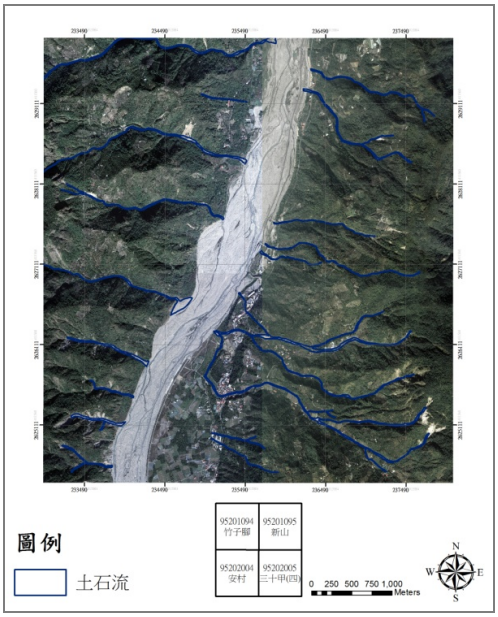


圖 26 研究區域北方四幅航照土石流圈繪成果(圖幅為: 竹子腳、新山、安村和三十甲(四))

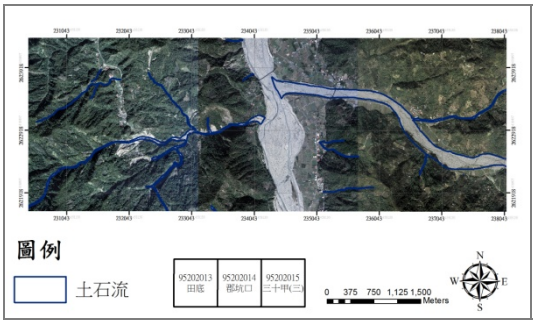


圖 27 研究區域中部三幅航照土石流圈繪成果(圖幅為: 田底、郡坑口和三十甲(三))

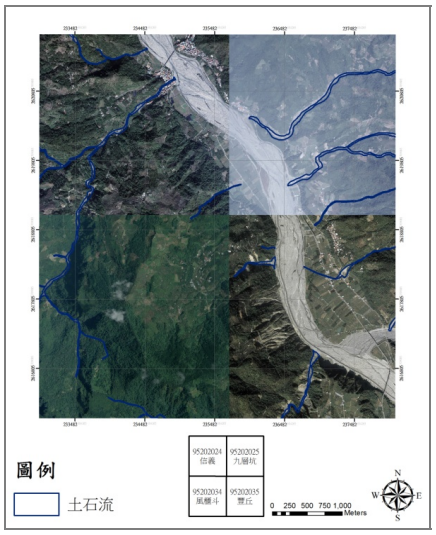


圖 28 研究區域南方四幅航照土石流圈繪成果(圖幅為: 信義、九層坑、風櫃斗和豐丘)

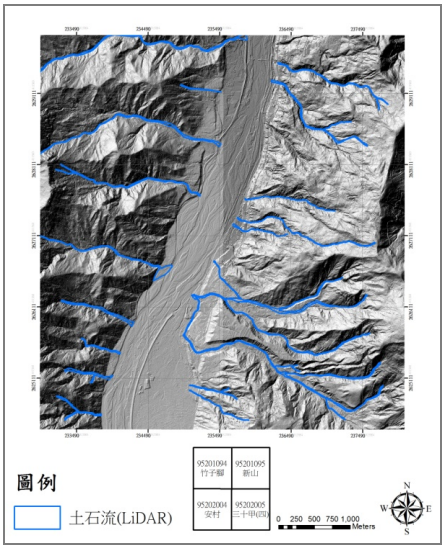


圖 29 研究區域北方四幅光達數值地形土石流之圈繪成果(圖幅為: 竹子腳、新山、安村和三十甲(四))

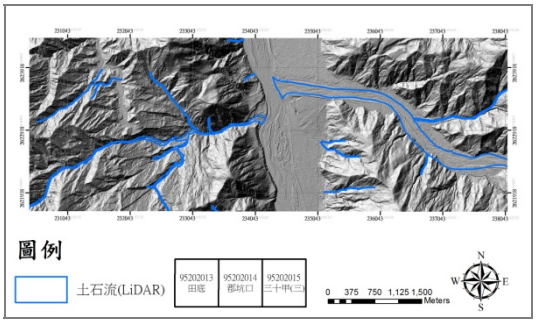


圖 30 研究區域中部三幅光達數值地形土石流之圈繪成果(圖幅為: 田底、郡坑口和三十甲(三))

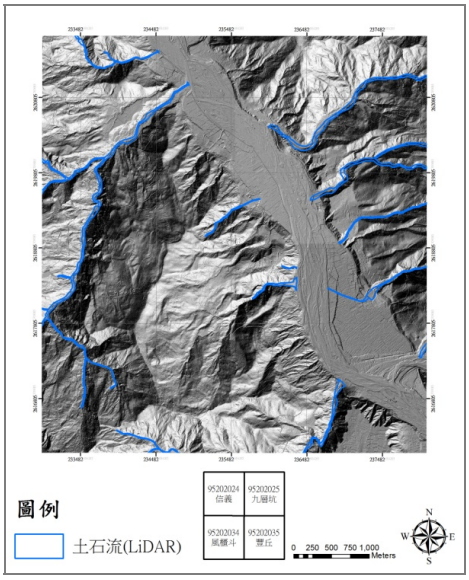


圖 31 研究區域南方四幅光達數值地形土石流之圈繪成果(圖幅為: 信義、九層坑、風櫃斗和豐丘)

5.3 航空照片與光達地形資料土石流判釋成果比對

在圖 32 中兩條土石流為水保局公開之土石流潛勢溪流投縣 DF148 及投縣 DF214，位於田底聚落北側。用航空照片判釋此兩溪流時，因河道被植被覆蓋且受陰影影響，在圈繪工作上較為困難，必須利用等高線圖協助圈繪。但利用光達日照陰影圖則可以穿透植被清楚判釋河道位置，在圈繪上較為明確，圖 33 為光達數值地形所圈繪之土石流成果。

圖 34 中所圈繪的土石流位於郡坑聚落對岸。雖不明顯但下游出口處可判釋出沖積扇。而圖 35 為同區域的光達地形日照陰影圖，在判釋土石流沖積扇上也有良好的表現，但沖積扇較不明顯，因陳有蘭溪的沖刷頻繁，許多沖積扇的土石已被帶走，以致於圖面上並不明顯，因此不論航空照片或光達拍攝，其拍攝時間點宜選取於地形變動後盡快進行。



圖 32 由航空照片所圈繪之土石流潛勢溪流投縣 DF148 及投縣 DF214

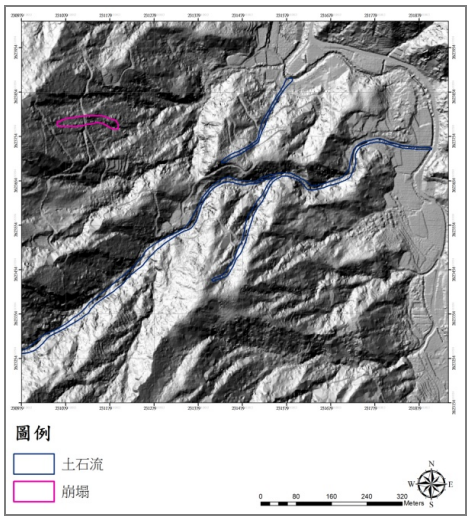


圖 33 由光達數值地形圖所圈繪之土石流潛勢溪流投縣 DF148 及投縣 DF214



圖 34 由航空照片圈繪出之郡坑聚落對岸土石流沖積扇

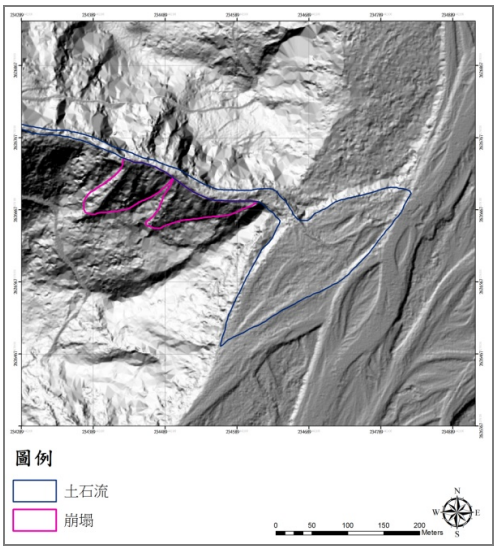


圖 35 由光達地形資料圈繪出之郡坑聚落對岸土石流沖積扇

5.4 航空照片與光達數值地形之土石流判釋成果討論

在圈繪土石流時，常會遇到河道遭到植被覆蓋或日照角度問題，導致河道位置不清楚。但光達可以穿透地表植被，取得地形的變化。因此可排除這些外在因素的影響，得到河道的正確位置。

高精度光達資料的解析度非常細緻，在航空照片或衛星影像中較無法辨識的土石流沖積扇及河道變遷也能輕易的判釋，對於沖積扇的範圍可得到更精確的數值。

沖積扇之堆積範圍常受主河道沖刷影響，故無論航照或光達拍攝，宜於地形明顯變動後盡快進行。

6. 航照及光達判釋成果差異分析

光達數值地形對於崩塌與土石流地質敏感區域判釋結果與航照或衛星影像所圈繪出的結果可由上述兩節中看出有所差異。

在判釋土石流時，光達數值地形的成果幾乎與航照及衛星影像圈繪成果相同，如航照及衛星影像所圈繪的圖 26、圖 27、和圖 28 以及由光達數值地形所判釋的圖 29、圖 30 和圖 31 中可看出兩者結

果相當一致。但由於航照及衛星影像容易因為植被、日照陰影或是雲覆等外在因素影響，對於河道的位置以及溪流的長度較不易判釋，而光達地形資料並不會受到這些因素影響，因此在判釋土石流溪流時能更精確的圈繪出溪流的位置及長度。因此由光達地形資料所判釋出的土石流溪流與航照及衛星影像所圈繪的土石流溪流成果相當一致，只是由光達地形資料在河道判釋的成果較為精確。

由光達地形資料和航照及衛星影像所判釋的崩塌面積整理如表 4。由百分比中可看出，由光達地形資料所判釋的崩塌面積在 5 至 10 公頃及大於 10 公頃部分遠較航照判釋成果高，並且面積沒有小於 1 公頃的崩塌，平均面積約為 13 公頃。而由航照及衛星影像所圈繪的崩塌面積小於 5 公頃的佔所有圈繪崩塌的 95.3%，並且面積不到 1 公頃的崩塌有 164 個佔所有圈繪崩塌的 77%，平均面積約為 0.97 公頃。可看出由光達地形資料所判釋崩塌面積規模偏大，甚至有大於 20 公頃以上之崩塌；而航照及衛星影像所判釋的崩塌面積則偏小，大部分的崩塌皆小於 1 公頃。

在判釋崩塌時，除了有面積大小上的不同，兩者判釋結果彼此間仍存在著關聯性，此關聯性可分成三種類型。第一種類型為相關，如圖 21 所示，光達地形資料所判釋的成果與航照圈繪出的成果非常相似，圈繪出的面積重疊處比例大於 80%，此類形崩塌總共有 9 處。此類型崩塌規模大，並且崩塌處植被稀少甚至裸露，能在航照及衛星影像中可清楚看出的崩塌。

表 4 崩塌判釋數量比較表

判釋準則 / 崩塌面積	光達地形資料		航照及衛星影像	
	個數	百分比	個數	百分比
<5 公頃	13	29.6%	199	95.3%
5~10 公頃	13	29.6%	6	2.8%
>10 公頃	18	40.9%	4	1.9%

第二種類型為部分相關，如圖 22 和圖 24 所示。部分相關的崩塌在同一區域中，由航照及衛星影像判釋的崩塌及土石流成果合併起來觀察後，可看出此地區其實為一處規模較大的崩塌，但是由航照及衛星影像較難直接判釋；而從光達地形資料中則可以很清楚的由地形地貌的變化將其崩塌圈繪出來。由光達數值地形所判釋出此類型的崩塌有 10 處，其中包含了由航照及衛星影像所圈繪的崩塌共 33 處。光達地形資料所判釋的結果可能包含數個航照所圈繪出的結果所合併而成，或是數個崩塌加上土石流所組成的崩塌，此一現象與現地觀察大規模崩塌常包含數個較小崩塌之情形一致。因此由航照及衛星影像所圈繪出的崩塌數量較光達地形資料所判釋的量多，但規模相對小，對於包含數個崩塌之大規模崩塌整體性判釋成果較不理想。

最後一種類型則為二者無相關，此類型的崩塌為光達數值地形所判釋出的結果與航照或衛星影像所圈繪出的結果無關聯性，面積上不相重疊。此類型的崩塌由光達數值地形所判釋有 25 處，而由航照及衛星影像所圈繪的有 169 處。無相關的崩塌類型，由光達地形資料判釋出的崩塌大都規模較大並且崩塌塊體布滿著植生，由航照或衛星影像不易辨別，此類型崩塌可能為潛在崩塌或是植生復育舊崩塌；還有許多由航照或衛星影像所圈繪出的崩塌未被光達地形所判釋出來，這些崩塌為規模較小並且破壞較為表淺之崩塌，在航照或衛星影像能清楚看出崩塌位置，但是由光達地形不易判釋。尤其在莫拉克颱風後，造成研究區域內多處的淺層崩塌，而這些淺層崩塌在光達地形資料中不易判釋，因此造成崩塌圈繪的數量上差異。以上數據整理於表 5。

由上述討論，光達數值地形所判釋的崩塌大都為規模較大並可看出整體性，而且判釋不受植被影響。而由航照或衛星影像圈繪的崩塌結果，規模小的數量較多，並且需要有較明顯的破壞及裸露較易圈繪。

表 5 崩塌判釋成果差異統計表

崩塌類型 \ 判釋準則		光達數值地形	航照及衛星影像
相關	<5 公頃	5	
	5~10 公頃	2	
	>10 公頃	2	
部分相關	<5 公頃	3	30
	5~10 公頃	2	3
	>10 公頃	5	0
無相關	<5 公頃	5	164
	5~10 公頃	9	1
	>10 公頃	11	2

7. 結論

高精度光達數值地形因不受日照角度、植生和雲覆的影響，在判釋上較不會被外來的因素所遮蓋及干擾，再加上其解析度非常高，國內目前使用的光達資料已可達 1 公尺 x1 公尺，因此在使用上更為便利。光達技術中的「多重反射」訊號，可以穿透地表上的植生，取得地表的訊號。即可得到更完整及實際的地貌資料，可看出一些在航空照片中無法直接或甚至無法辨識的崩崖。因此在圈繪崩塌時可以判釋出更精確的範圍，甚至是潛在的崩塌；圈繪土石流時，易於找出河道的位置，並判釋沖積扇大小。

在判釋崩塌時，由光達數值地形和航照及衛星影像所判釋出兩者形狀面積彼此相關性時，皆為規模較大並在航照上能清楚看出的現生崩塌；由光達地形資料所判釋的崩塌，由航照及衛星影像無法直接判釋，但其圈繪出的土石流及山崩則可以看出崩塌的趨勢，列為部分相關；而兩者圈繪成果彼此無相關時，由光達數值地形所判釋的崩塌規模大並且植被茂盛，大部分為舊崩塌地或是有潛勢的崩塌。由航照及衛星影像圈繪的崩塌大都規模較小，並為較表淺的滑動，對於較淺層的崩塌光達地形資料相較於航空照片或衛星影像難以判釋，因此日照陰影圖並不利於使用在判釋淺層滑動的崩塌上，由統計結果亦可看出此現象。

利用航照及衛星影像圈繪土石流時，常會遇到河道遭到植被覆蓋，或日照角度問題，導致河道位置不清楚。但光達可以穿透地表上的植被，取得地表的變化。因此可排除這些外在因素的影響，得到河道的正確位置。再加上光達資料的解析度非常細緻，因此在航空照片或衛星影像中較無法辨識的土石流沖積扇也能輕易的判釋，對於沖積扇的範圍可得到更精確的數值。

在崩塌判釋上光達地形資料能有效的判釋出規模較大且地形特徵明顯的崩塌，但對於只有淺層滑動的崩塌則因地表變動幅度小不易判釋；判釋土石流時，因為能排除外在因素，因此能更精確判釋河道位置和長度，加上高解析度的日照陰影圖，也能清楚圈繪出土石流沖積扇的位置，但對於河道兩側或是上游是否有崩塌或是河岸侵蝕較不易判釋，則不易了解土石材料來源在何處。因此在判釋崩塌或土石流時，光達地形資料的確能提昇判釋的準確性，彌補航照及衛星影像在判釋上缺點，將光達地形資料配合航照及衛星影像進行崩塌及土石流的判釋，對於含括淺層崩塌及大規模崩塌之整體判釋，可望能達到極高的效益，對於未來的防治工程及疏散工作上都有非常大的幫助。

致謝

本研究部分為經濟部中央地質調查所計畫「國土保育之地質敏感區調查計畫－莫拉克颱風受災區域之地質敏感特性分析(3/3)」，計畫編號：101-5826901000-7-D3-01。

參考文獻

經濟部中央地質調查所(2006)，「都會區及周緣坡地整合性環境地質資料庫建置」

水利規劃試驗所(2014)，「水庫蓄水區邊坡深層滑動潛勢評估分析」。

經濟部中央地質調查所(2007)，「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫」

經濟部中央地質調查所(2012)，「國土保育之地質敏感區調查計畫－莫拉克颱風受災區域之地

質敏感特性分析(3/3)」

詹錢登(1998)，「土石流的發生與運動」，土木技術第一卷第一期，第 132-144 頁。

劉進金(2011)，「空載光達技術於大區域坡地災害與分析之應用」地工技術，第 129 期，第 35-44 頁

M. Ling Lin, Te-Wei Chen, Ching-Weei Lin,Dia-Jie Ho, Keng-Ping Cheng, Hsiao-Yuan Yin,and Mei-Chen Chen, 2014, "DetectingLarge-Scale Landslides Using Lidar Data and Aerial Photos in the Namasha-Liuoguey Area,Taiwan. " Remote Sens. 2014, 6, P.42-P.63.

M. Van Den Eeckhaut, J. Poesen, G. Verstraeten, V. Vanacker, J. Nyssen, J. Moeyersons, L. P. H. van Beek and L. Vandekerckhove, 2007, "Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest" Earth Surface Processes and Landforms, Earth Surf. Process. Landforms 32, 754–769.

Miner, A.S., Flentje, P., Mazengarb ,C. and Windle, D.J. 2010. "Landslide Recognition using LiDAR derived Digital Elevation Models-Lessons learnt from selected Australian examples." Geologically Active, Proceedings of the 11th IAEG Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment, Auckland, New Zealand, 2010.

Schulz, W.H., 2004, "Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington", U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1396.

Schulz, W.H., 2005, "Landslide Susceptibility Estimated From Mapping Using Light Detection and Ranging (LIDAR) Imagery and Historical Landslide Records, Seattle, Washington", U.S. Geological Survey Open-File Report 2005–1405.

Application of LiDAR Data on Identifications of Landslides and Debris Flow Geologically Sensitive Area of the Chen-Yo-Lan River Basin Post Typhoon Morakot

Meei-Ling Lin [1] Yen-Chen Chen [2]

ABSTRACT

Taiwan is located on the circum-Pacific seismic zone, the active tectonic actions, steep terrain, and geological structures provide abundant debris material. The seasonal typhoons with heavy rainfall often cause landslides and debris flow .The aerial photos or satellite images are often used for interpretation of landslides, debris flow, and other geohazards, but the results are affected by topography, shades, cloud cover, and vegetation. With the development of high resolution LiDAR technique, this study uses aerial photos and satellite images as well as LiDAR shading map for identification of landslides and debris flow. Comparisons of the results from LiDAR shading maps and aerial photos are made, and differences of the interpretation results are discussed.

Using LiDAR for interpretation of landslides and debris flow provides accurately large-scale landslides identifications of and can exclude unfavorable factors in using aerial photos or satellite images. The landslides interpreted by LiDAR are mostly large-scale landslides. By LiDAR also provides good results of debris flows interpretation along with river channels, and alluvial fan. However, the small-scale landslides are difficult to identify using LiDAR shading map.

Keywords: Landslide and debris flow geological sensitive aera, LiDAR, aerial photos, Chen-Yo-Lan river basin, typhoon Morakot

[1] Professor, Dept. of Civil Engrg., National Taiwan Univ
[2] Research Assistant, Dept. of Civil Engrg., National Taiwan Univ

[*] Corresponding Author, Phone: 886-2-233664361, E-mail: linml@ntu.edu.tw

Received Date: Jun. 03, 2013
Revised Date: Nov. 18, 2013
Accepted Date: Dec. 27, 2013

中文稿件投稿注意事項（英文稿件請參閱下頁 Author Guidelines）

本學刊定期出版攝影測量及遙感探測領域之學術論著、技術短文及應用性報導。所收錄之稿件皆須通過本編輯委員會安排之專家學者審查程序，並由通訊作者簽署著作權讓渡書。作者可自行聲明文稿屬學術論著、技術短文或應用性報導之類別，但本編輯委員會將依據審查委員意見決定收錄文稿之類別。本學刊不接受已經刊載過之文稿，於研討會發表過之論文，經適當增補其內容者為例外。

投稿之電子郵件信箱地址為 jprssubmit@gmail.com，請以電子郵件附件方式寄送稿件之 WORD 檔及 PDF 檔各一份。為便利編審作業，請於稿件 PDF 檔中移除作者之相關資料（如姓名、服務機關、電話、及電子郵件信箱等）。稿件撰寫要點如下：

1. 頁面：採用 A4 規格頁面。
2. 字體：(1) 中文均以**新細明體**橫式打字；(2) 英文均以 **Times New Roman 字體**橫式打字。
3. 單位：內文、圖表及符號中之度量單位皆採用 SI 公制單位。
4. 首頁：首頁應含內容依次為「題目、作者姓名、摘要、關鍵詞、及作者服務機關及職稱（置於頁尾）」，接續文稿內文。
5. 末頁：末頁應含內容與首頁相同，但皆以英文書寫。
6. 題目：論文題目宜簡明，字體大小為 20，英文題目每字第一位字母以大寫字體打印。
7. 作者：作者姓名列於題目之下方，字體大小為 14，其服務機關及職稱以 $^{1, 2,\cdots}$ 上標編號註記於頁尾，字體大小為 12。
8. 摘要：摘要字數以 250 字為限，字體大小為 12。
9. 關鍵詞：列出三至五個關鍵詞，字體大小為 12。
10. 章節及標題：(1)章節標題置中，編號一律為阿拉伯數字，如 1，2，...，標題字體大小為 18；(2)小節標題靠左，編號一律為 1.1，1.2，1.1.1，1.1.2……，字體大小為 14。
11. 內文：內文之長度(含圖表)以不超過 25 頁為原則，各段落第一行應縮排，字體大小為 12。
12. 數學式：所有數學式均須標式號於圓括弧內，數學式內所有符號須於符號第一次出現時，應於數學式下方逐一加以定義。
13. 圖及影像：(1)圖及影像均須數位化置於文稿中適當位置；(2)所有圖及影像下方須附圖流水編號及說明；(3)本刊接受彩色圖及影像，但紙版印刷一律採灰階印刷。
14. 表格：(1)表格均須數位化置於文稿中適當位置；(2)所有表格上方須附表流水編號及說明；(3)本刊接受彩色表格，但紙版印刷一律採灰階印刷。
15. 參考文獻：(1)參考文獻應列於文末，文稿中未直接引用者不得列入；(2)先排列中文參考文獻，再排列英文參考文獻，其他文字參考文獻列於英文參考文獻之後；(3)中文參考文獻以第一作者姓名筆劃順序排列，英文參考文獻以第一作者之姓依英文字母順序排列。當作者相同時，依發表年代排列，作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 順序。第一作者姓名相同時，先排列單一作者之參考文獻，其次為多作者文獻；(4)參考文獻之格式如下列：
    - 期刊論文：作者姓名，年代。文章標題，期刊名稱，卷數(期數)：起始頁數—結束頁數。
    - 書籍：作者姓名，年代。書名，出版者，出版地。
    - 論文集：作者姓名，年代。篇名，論文集名稱，發表地點，卷(期)：起始頁數—結束頁數。
16. 參考文獻引用：(1)作者為一人時，以作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如李良輝(1991)或(李良輝，1991)、Jones (1979)或(Jones, 1979)；(2)作者為二人時，以二作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如施學延及陳良健(2011) 或(施學延及陳良健，2011)、Jones & Smith (1979)或(Jones & Smith, 1979)；(3)作者為多人時，以第一作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)，之後加「等」(中文文獻)或「et al.」(英文文獻)及發表年代，如(郭寶章等，1976)或郭寶章等(1976)、Jones et al. (1979)或(Jones et al., 1979)；(4)作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 引用，如 Jones & Smith (1979a)、Jones & Smith (1979b)。

Author Guidelines

The Journal of Photogrammetry and Remote Sensing periodically publishes academic articles, technical short papers and application reports addressing topics in photogrammetry and remote sensing. Acceptance of submitted manuscripts for publication is based on a peer-reviewing process arranged by the editorial board. A manuscript will not be formally accepted until a copyright agreement is received. Although authors can indicate their submitted manuscripts belonging to one of the categories of academic articles, technical short papers or application reports, the editorial board will make the final decision based on the suggestions of reviewers. This journal does not accept any paper has ever been published, but a paper only published in conference proceedings and revised appropriately is an exception.

The E-mail address for manuscript submission is jprssubmit@gmail.com. Please send your manuscript in both WORD and PDF formats via e-mail attachments. In the WORD file, please provide author information. However, for blind reviewing, please eliminate author information in the PDF file. Instructions for authors to prepare a manuscript are as follows:

1. Typing format: Manuscripts should be typed single-column and double-space on A4 page size using font-type of 12pt **Times New Roman**. The pages should be numbered.
2. Units: Manuscripts must use SI (Metric) units in text, figures, or tables.
3. Cover page: The cover page should contain manuscript title, author names, abstract, key words, and author affiliations.
4. End page: The end page contains the same information as the cover page, but in Chinese.
5. Title: The title of the manuscripts should be concise and informative. Please use font size of 20pt and capitalize the initial letter of each word in the title.
6. Authors: Authors names (using font size of 14pt) are listed below the title, affiliations (using font size of 12pt) are listed at the end of the first page marked with [1, 2,...].
7. Abstract: The abstract should be shorter than 250 words and typed using font size of 12pt..
8. Keywords: Keywords (no more than 5 words) should be given and placed below the abstract.
9. Sections and Sub-sections: Section heading (using font size of 18pt) should be centered and numbered in 1, 2… etc. Sub-sections (using font size of 14pt) are justified to the left in 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2…etc.
10. Paper length: Published papers are limited to 25 pages.
11. Equations: Type formulae and equations clearly in black and numbered in curved brackets. All symbols in equations should be clearly defined when they firstly appear in the manuscripts.
12. Figures and Tables: Figures and tables are numbered and described in short. When papers are accepted, original figures, tables, and photographs are expected for reproduction. Color figures and tables are acceptable in digital version, but they will be printed in gray levels in hard copies.
13. References: Only works cited in the text will be included. References should be cited in the text by giving the last name of the author(s) and the year of publication of the reference, such as Lee and Huang (1979) or (Lee and Huang, 1979). With three or more names use the form “Huang *et al*. (1995) or (Huang *et al*., 1995)” in the text. When two or more references have the same text identification, please distinguish them by appending “a”, “b”, etc., to the year of publication. References should include the complete title(s), the number of the volume and the page(s) of the information cited. References should be listed in alphabetical order, according to the last name of the first author, at the end of the paper.

Volume 18 No. 2
M a y 2 0 1 4

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (Special Issue on Applications of Airborne LiDAR on Geological Disasters)

CONTENTS

Introduction to the Special at Issue

Applications of Airborne LiDAR on Geological Disasters
(Ching-Weei Lin)

Regular Issue Papers

Application of high-resolution LiDAR DEM for extracting terrain openness: A case study in the Tsaoling landslide area

(Yi-Zhong Chen, Chin-Shyong Hou, Yu-Chung Hsieh, Rou-Fei Chen, Ruo-Ying Wu) ……**67**

Topographic Characteristic of the Landslide induced by earthquake and Rainfall in Slate Stratum in South Taiwan – Case of Ai-Liao Catchment

(Tien-Chien Chen, Ming-Hsi Lee, Xun-Yuan Zeng, Hong-Yu Yen, Zong-Lian Li, Yi-Siou Lin) ……**79**

Airborne LiDAR DEM and Geohazards Applications

(Chin-Shyong Hou, Li-Yuan Fei, Cheng-Lung Chiu, Hung-Jen Chen, Yu-Chung Hsieh, Jyr-Ching Hu, Ching-Wei Lin) ……**93**

Topographic Characteristics Interpretation of Potential Deep-Seated Landslides from Digital Elevation and Remote Sensing Images

(Dia-Jie Ho,Wei-Shu Chang,Ching-Weei Lin,Shou-Heng Liu) ……**109**

Application of LiDAR Data on Identifications of Landslides and Debris Flow Geologically Sensitive Area of the Chen-Yo-Lan River Basin Post Typhoon Morakot

(Meei-Ling Lin, Yen-Chen Chen)……**129**

第 十八 卷 第 二 期
中華民國一 ○ 三年五月

航測及遙測學刊

(空載光達於地質災害防治之應用特刊)

目錄

特刊引言

空載光達於地質災害防治之應用
(林慶偉)

學術論著

高解析度空載光達資料結合地形開闊度分析於構造地形特徵之應用
(陳奕中、侯進雄、謝有忠、陳柔妃、吳若穎).....**67**

南部板岩地質區地震及豪雨誘發山崩之地形特徵-以隘寮溪流域為例
(陳天健、李明熹、曾勛苑、顏宏諭、李宗聯、林意修).....**79**

空載光達數值地形產製與地質災害的應用
(侯進雄、費立沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉).....**93**

應用數值地形及光學影像於潛在大規模崩塌地形特徵判釋
(何岱杰、張維恕、林慶偉、劉守恆).....**109**

應用光達地形資料於莫拉克災後陳有蘭溪流域崩塌與土石流地質敏感地區判釋與分析
(林美聆、陳彥澄).....**129**