

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(陳樹群和吳俊銘，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: hsiehy@moecgs.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 地面基地站的設置規範上，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。

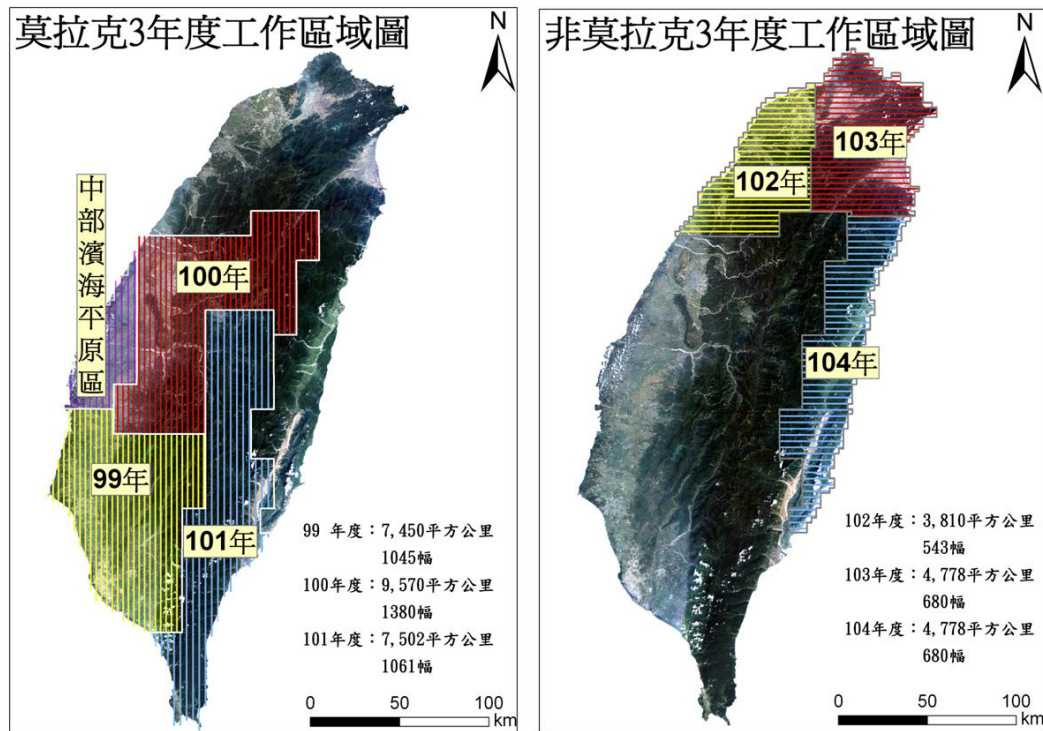


圖 1 經濟部中央地質調查所 6 年來執行 LiDAR 掃瞄之區域圖

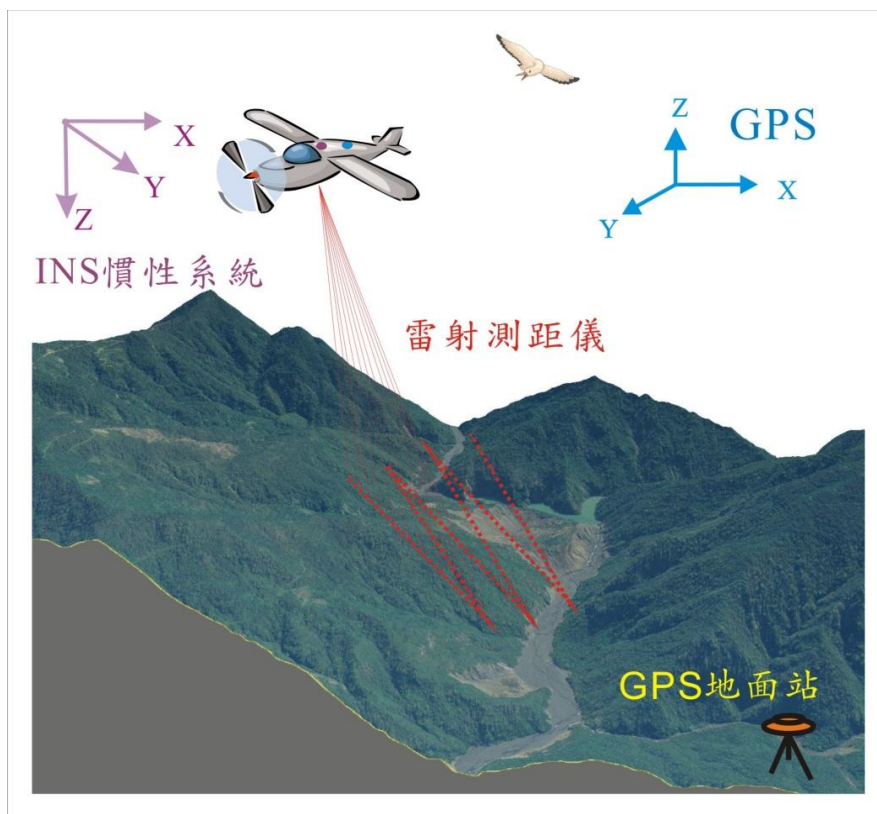


圖 2 空載光達掃瞄示意圖(謝有忠等, 2012)

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。

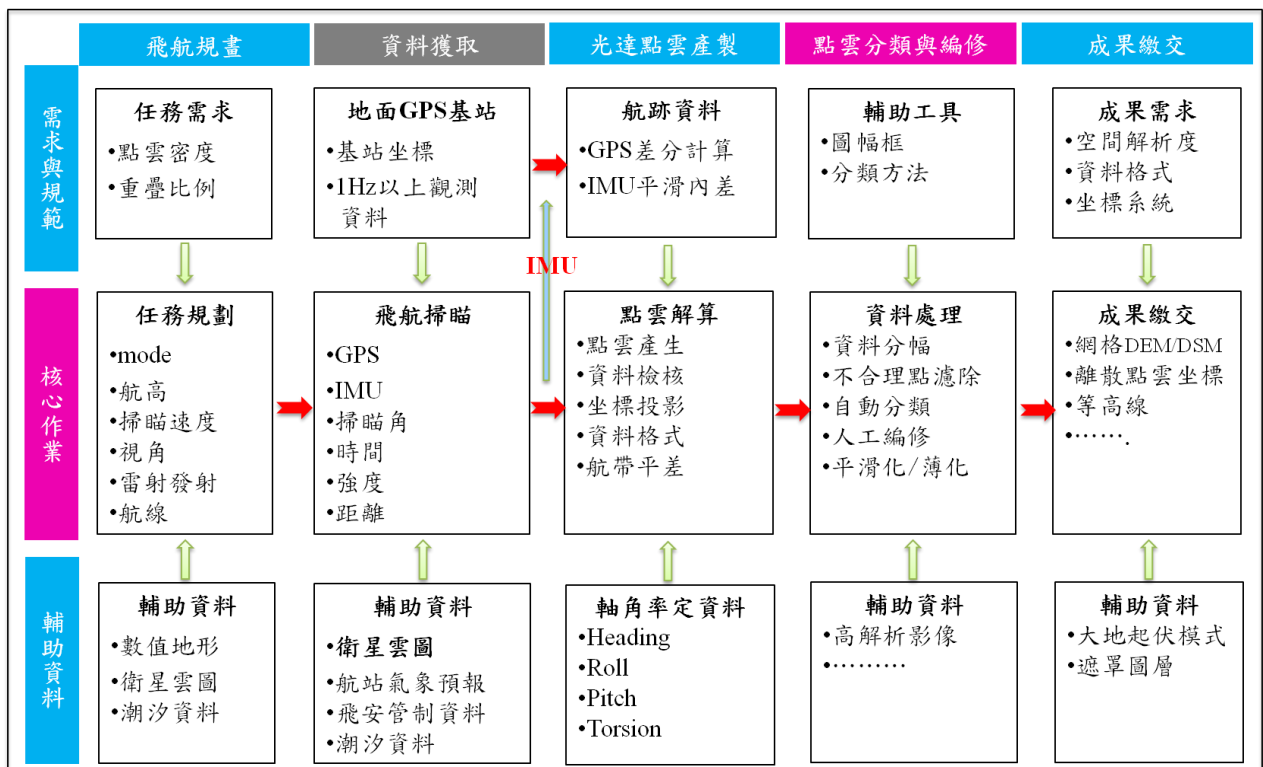


圖 3 空載光達作業流程圖

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 米高精密數值地形模型資料，設定上述嚴謹的光達點雲掃描密度。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，應於掃描區域內 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、地質災害潛勢分析及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、河流域、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、河流域、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、橋樑及道路等)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 年來之統計，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(獨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。

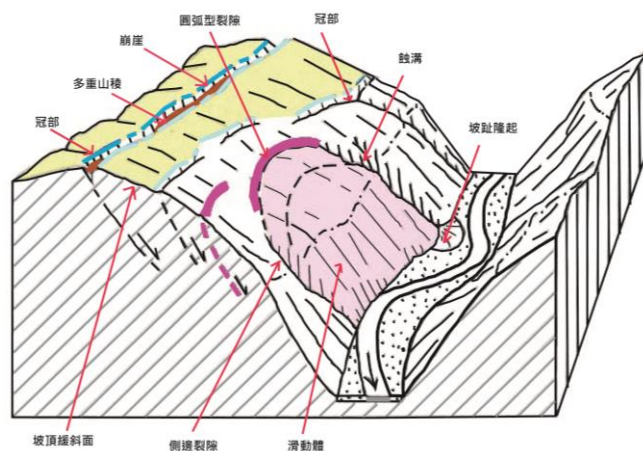


圖 4 大規模崩塌細微地形特徵示意圖(修改自鈴木隆介, 2000)

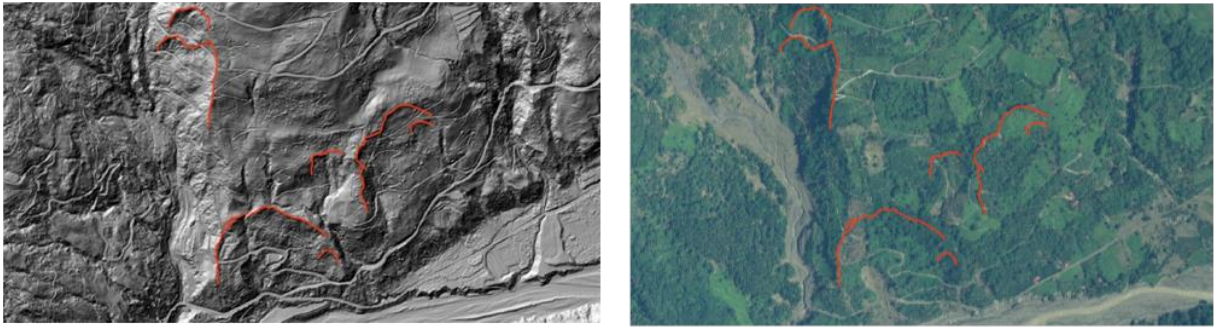


圖 5 左圖為利用空載光達產製之 1 米解析度之日照陰影圖，右圖為航照正射影像。大規模崩塌的的細微地形特徵可以由左圖圈繪出可能潛在的崩塌區域，再套繪於右圖航照正射影像上，再次的驗證，由此不難判釋出其潛勢區域，這是先前單從高植被覆蓋密林區的航照正射影像上做判釋很難辦到的

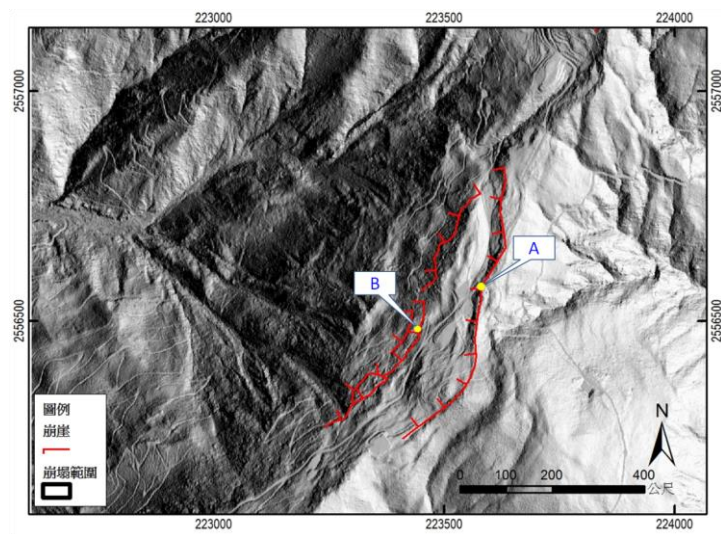


圖 6 高雄市寶來區竹林聚落由空載光達產製之 1 米解析度數值地形陰影圖判釋出可能潛在大規模崩塌的地形特徵



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。

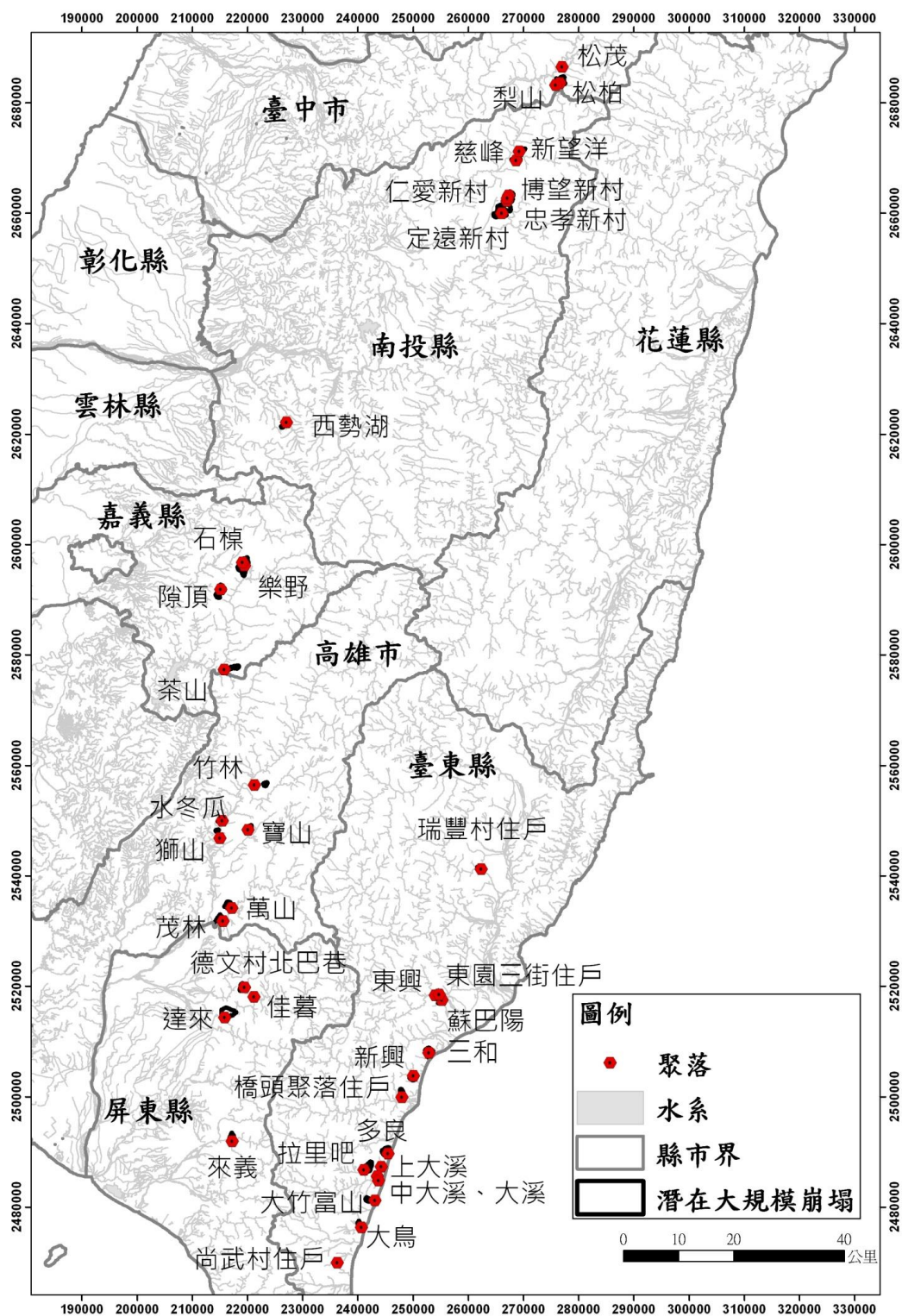


圖 9 台灣莫拉克受災地區潛在在大規模崩塌影響之聚落分布圖



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場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場地-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)。

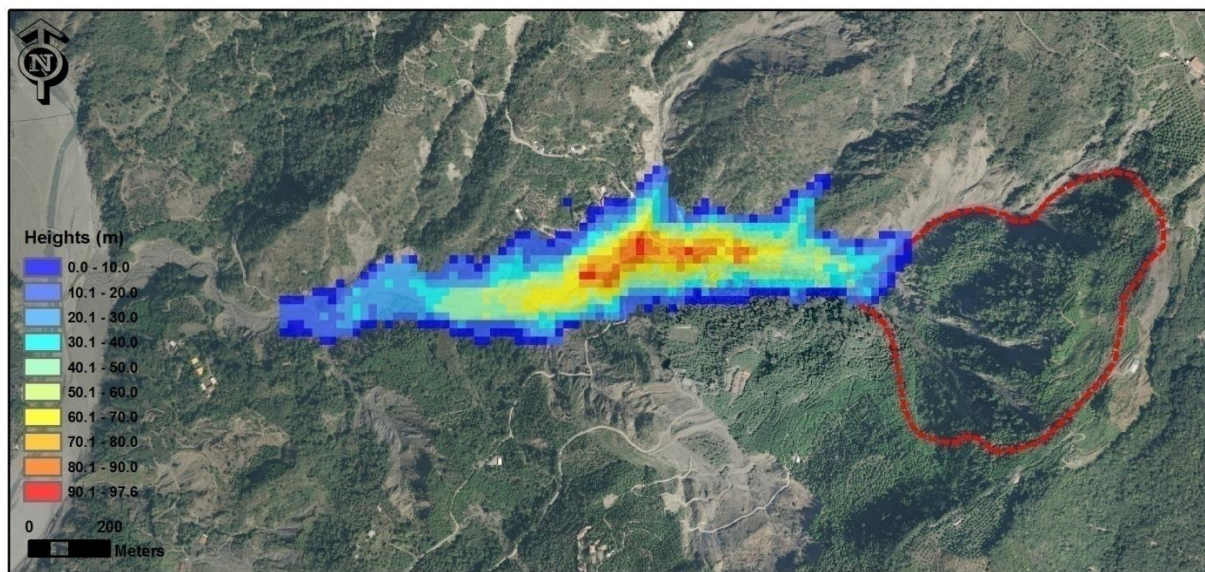


圖 11 竹林地區潛在性山崩區域三維模擬結果。圖中顯示山崩發生後 120 秒的顆粒堆積情形，最高堆積高度可達 97.6 米

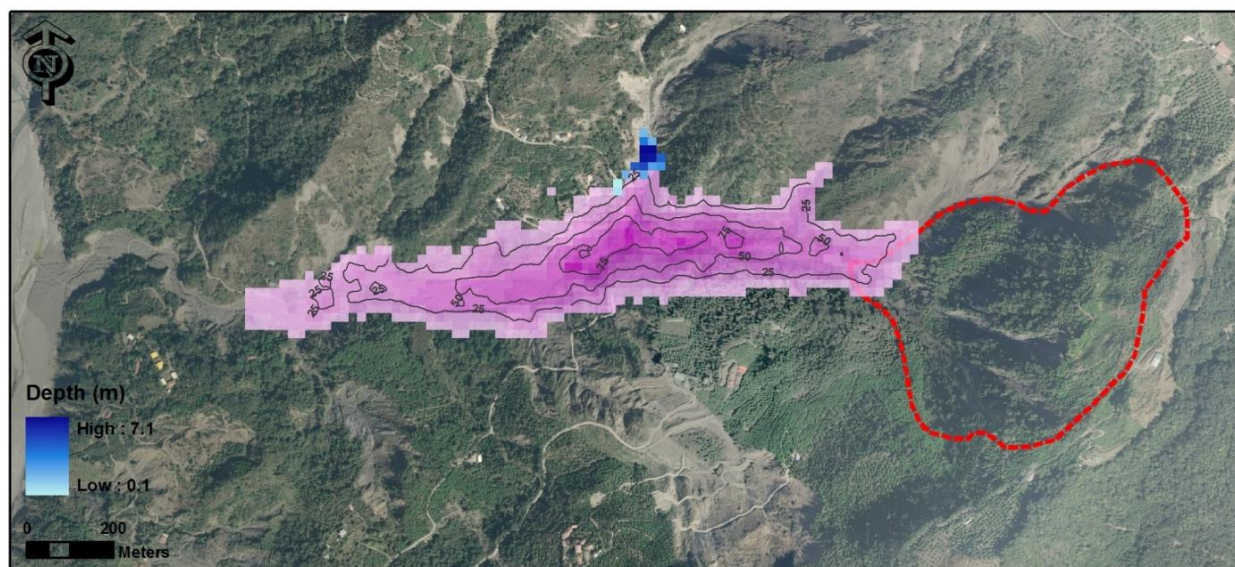


圖 12 竹林地區崩塌後可能造成之堰塞湖影響範圍(藍色部分)，堰塞湖深度可達 7 米

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、吳俊鉉，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，社團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，社團法人砂防学会，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溪流抽出マニュアル(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 卷 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 Hou¹ Li-Yuan Fei² Cheng-Lung Chiu³ Hung-Jen Chen⁴ Yu-Chung Hsieh⁵
Jyr-Ching Hu⁶ Ching-Wei Lin⁷

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 Reflectometry (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: hsiehy@moecgs.gov.tw

Received Date: Aug. 09, 2013

Revised Date: Nov. 26, 2013

Accepted Date: Dec. 18, 2013