



第五章 遙測影像多元尺度監測及分析

本計畫於曾文水庫集水區內進行遙測影像多元尺度監測及分析，並完成(1)重大土砂災害後之衛星影像變異點研究、(2)製作高精度數值高程、(3)蒐集政府機關曾辦理本區域歷史高精度數值高程模型、(4)高精度數值高程模型比較以及(5)無人載具拍攝等工作項目。前述工作項目分別於以下各小節中說明。

5-1 重大土砂災害後之衛星影像變異點研究

5-1-1 重大土砂災害事件衛星影像建置

衛星影像可建置多時期資訊，屬全區域分析，對於釐清曾文集水區之崩塌特性，以及評估治理成效及後續治理建議上將有所助益。本計畫衛星影像選購原則採雲量較少或無雲量遮蔽之影像為優先，並以其彩色融合影像進行崩塌地自動化判釋作業，分析災前與災後之崩塌地變化情形，供以探討土砂災害之空間與時間分布。表5-1.1為近10年內曾文水庫集水區歷史重大土砂災害事件相關資訊彙整表，由表可知，水保局(2010^a)已針對桃芝颱風、杜鵑颱風、海棠颱風、六九豪雨、莫拉克颱風等5場災害事件完成事件後崩塌地圖資蒐集，故本計畫購置餘4場災害事件衛星影像，分別為93年敏督利颱風、民國96年聖帕颱風、民國97年卡玫基颱風、民國99凡那比颱風等，以達通盤瞭解曾文水庫集水區災害之時序性演變。前述4場事件前後適用於進行崩塌地變異點研究之衛星影像圖資及相關資訊如圖5-1.1及表5-1.2所示。故此，本計畫總計分析10場歷史災害事件崩塌地圖資，以完整並通盤瞭解曾文水庫集水區土砂災害演變歷程，助於有效掌握崩塌災害特性及輔助說明保育治理成效。

本計畫分別於100年8月月15日期中報告簡報會議以及100年10月5日第一次工作會報簡報會議，業經審查委員同意後，購置100年度2期即時衛星影像，並完成崩塌地變異點研究；2期影像時程分別為100年3月20日以及100年9月27日(詳見表5-1.2及圖5-1.2)，可用以評估與分析100年0719豪雨



(本計畫定義事件日期為7月17日至21日)與南瑪都颱風事件造成之崩塌地變異情況。詳細分析成果參見6-3節。

表 5-1.1 歷史災害事件衛星影像與崩塌地圖資出處表

項次	事件名稱	事件日期	崩塌地圖資出處
1	桃芝颱風	2001/07/28-2001/07/31	水保局(2010 ^a)
2	杜鵑颱風	2003/08/31-2003/09/02	水保局(2010 ^a)
3	敏督利颱風	2004/06/28-2004/07/03	已購置
4	海棠颱風	2005/07/16-2005/07/20	水保局(2010 ^a)
5	六九豪雨	2006/06/07-2006/06/11	水保局(2010 ^a)
6	聖帕颱風	2007/08/16-2007/08/19	已購置
7	卡玫基颱風	2008/07/16-2008/07/18	已購置
8	莫拉克颱風	2009/08/05-2009/08/10	水保局(2010 ^a)
9	凡那比颱風	2010/09/17-2010/09/20	已自費購置

表 5-1.2 本計畫購置歷史重大災害事件對應拍攝日期與衛星影像編號

項次	災害事件 (災害期間)	相關事件與拍攝日期	衛星影像編號	載具 種類	地面解 像力
1	敏督利颱風 2004/06/28~07/03	敏督利颱風前拍攝 (2004/03/22)	SP5_G2J_20040322_299303	SP5	2.5m x 2.5m
		敏督利颱風後拍攝 (2004/11/11)	SP5_G2J_20041111_299303	SP5	2.5m x 2.5m
2	聖帕颱風 2007/08/16~08/19	聖帕颱風前拍攝 (2007/03/30)	SP5_G1J_20070330_299303	SP5	2.5m x 2.5m
		聖帕颱風後拍攝 (2008/01/05)	SP5_G2J_20080105_299303	SP5	2.5m x 2.5m
3	卡玫基颱風 2008/07/16~07/18	卡玫基颱風前拍攝 (2008/01/05)	SP5_G2J_20080105_299303	SP5	2.5m x 2.5m
		卡玫基颱風後拍攝 (2008/08/26)	SP5_G2J_20080826_299303	SP5	2.5m x 2.5m
4	凡那比颱風 2010/09/17~09/20	凡那比颱風前拍攝 (2010/03/21)	SP5_G2J_20100321_299304	SP5	2.5m x 2.5m
		凡那比颱風後拍攝 (2010/11/27)	SP5_G2J_20101227_299304	SP5	2.5m x 2.5m
5	南瑪都颱風 2011/08/27~08/31	南瑪都颱風前拍攝 (100/03/20)	SP5_G2J_20110320_299303	SP5	2.5m x 2.5m
		南瑪都颱風後拍攝 (100/09/03、09/14、09/27)	FS2_R1M_20110927_583338	FS2	2.0m x 2.0m

註1：SP5為法國之SPOT衛星影像。

註2：衛星影像編號摘自中央大學太空及遙測中心網站公布資訊。

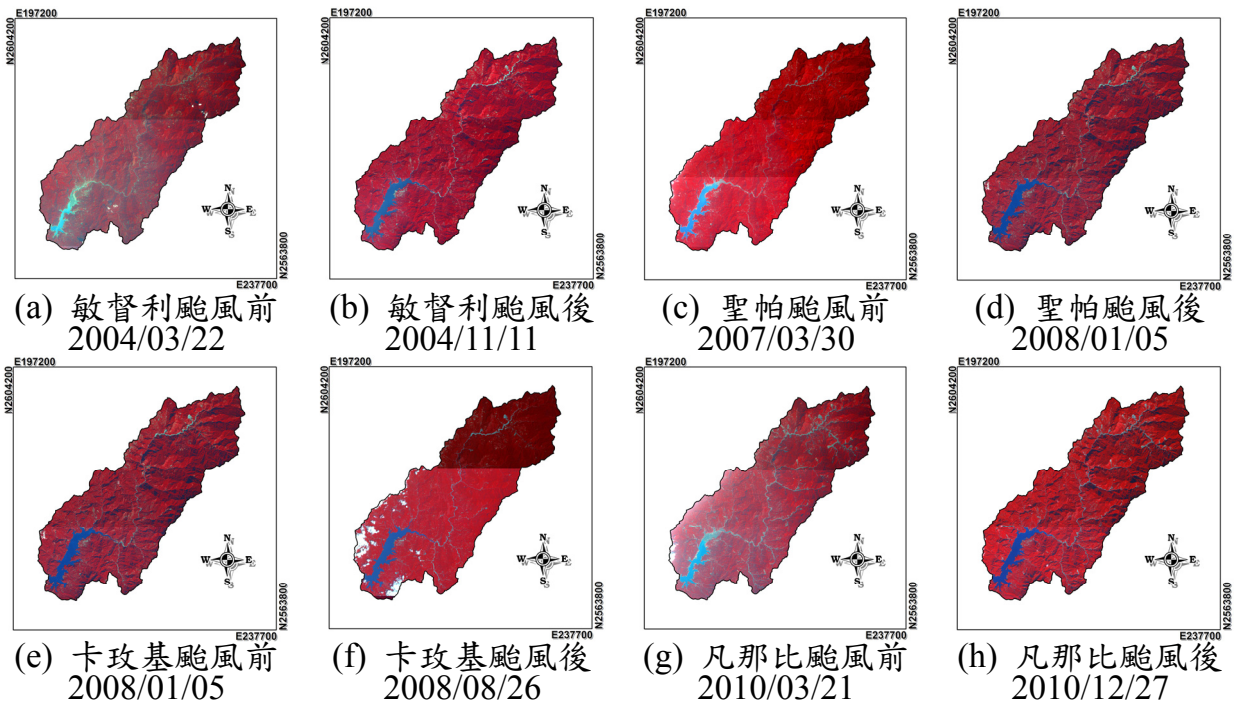


圖 5-1.1 本計畫購置歷史災害事件衛星影像

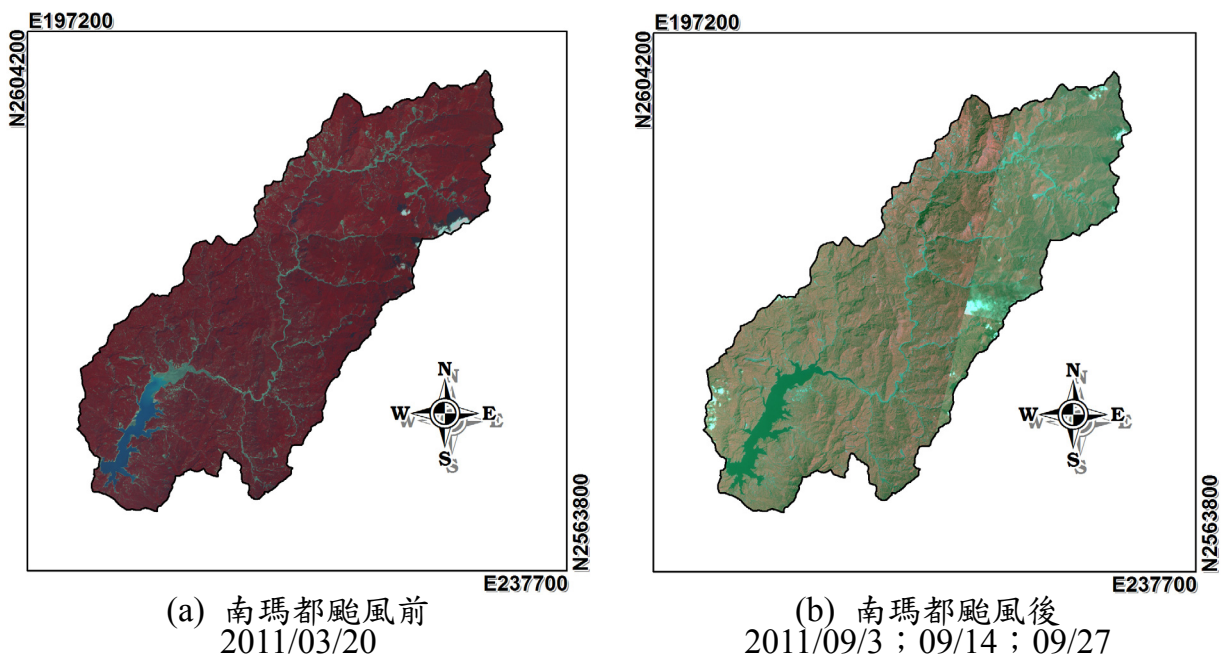


圖 5-1.2 本計畫購置即時衛星影像

5-1-2 物件導向自動化判釋與品管流程

本計畫崩塌地判釋方式係採用物件導向自動化判釋技術來劃設崩塌空間位置，接著運用人工判釋完成品管作業，提高判釋成果之可靠度。自動化判釋技術之優點主要為突破野外踏勘所不能通達之特性，並可減少大量時間於野外瞭解崩塌範圍及數量，對於廣域之崩塌地調查可達事半功倍



之效(蕭震洋等人, 2009^a; 黃韋凱等人, 2010; Arroyo *et al.*, 2010)。有關自動化判釋流程(如圖5-1.3)說明如下：

1. 載入衛星影像與參考圖層：在判釋整幅衛星影像以前，須先訂定崩塌地區域於衛星影像中之特性，並可加入坡度為產生判釋物件之參考依據。
2. 選擇適當崩塌地之分類條件設定：調整衛星影像崩塌地分類設定，包含 NDVI、坡度、色階平均數之綠色圖層(layer G)等，進而將影像區分為崩塌地以及非崩塌地等兩種多邊形圖層。
3. 品管物件大小之適宜性：透過原衛星影像檢視產製之多邊形物件大小是否適當(須可區隔不同色調之邊界)。
4. 崩塌地區域範圍之多邊形物件輸出：將判釋為崩塌地區域範圍之GIS圖層輸出，以利後續檢核及應用。

依上述流程完成崩塌地判釋後，接以運用初步品管、二次品管及專家品管等三階段品管方式(如圖5-1.4)，確保電腦自動判釋區域之可靠度，並提升分析資料之品質。

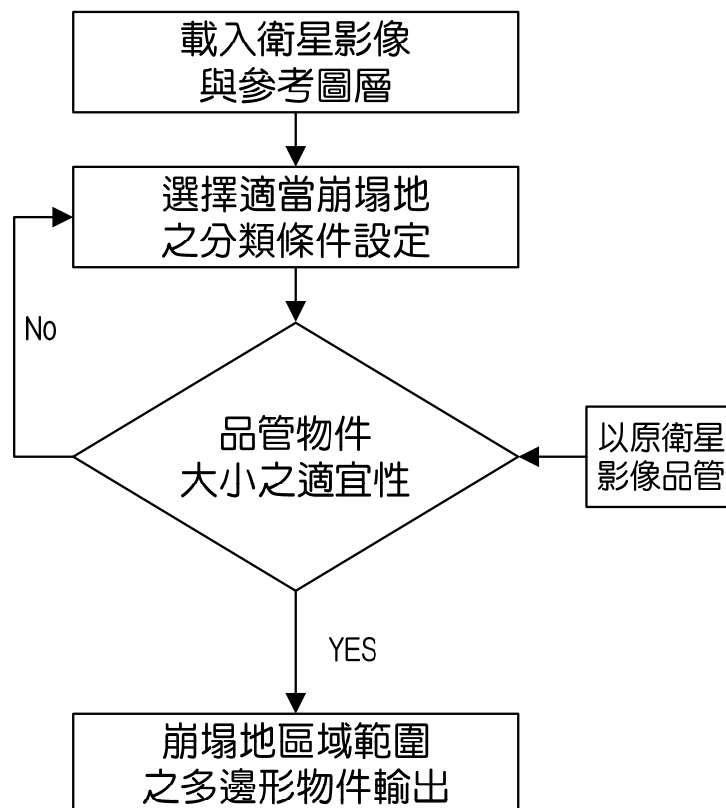


圖 5-1.3 自動化判釋流程

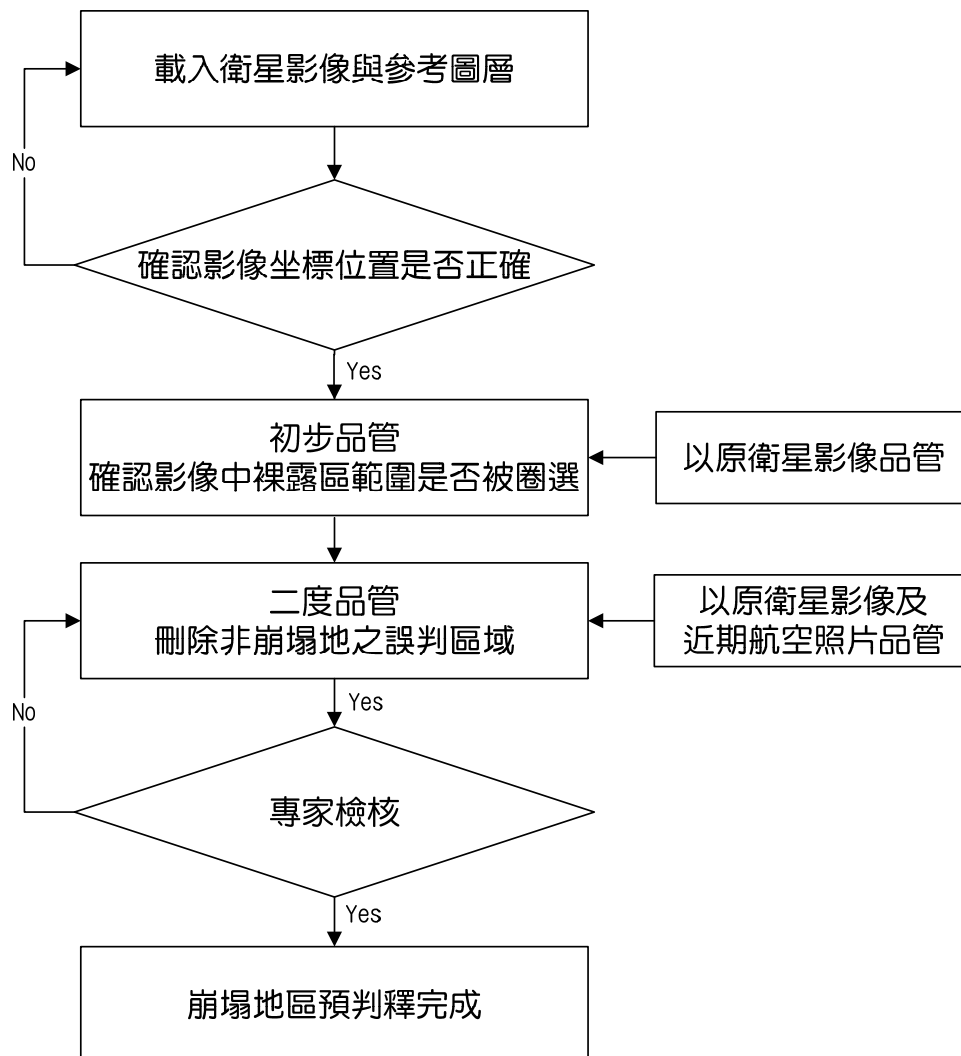
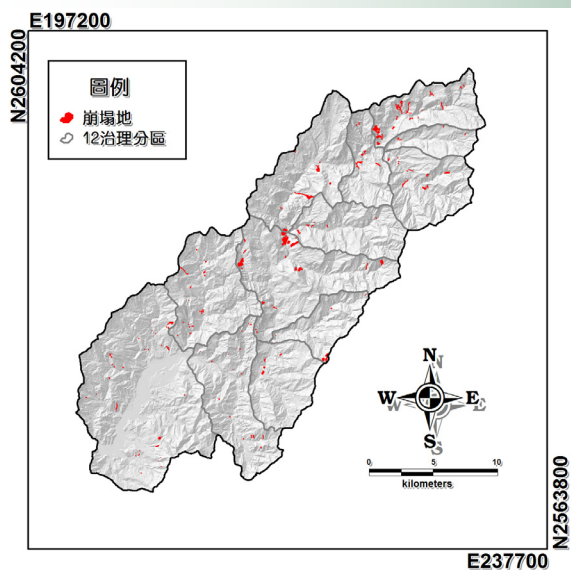


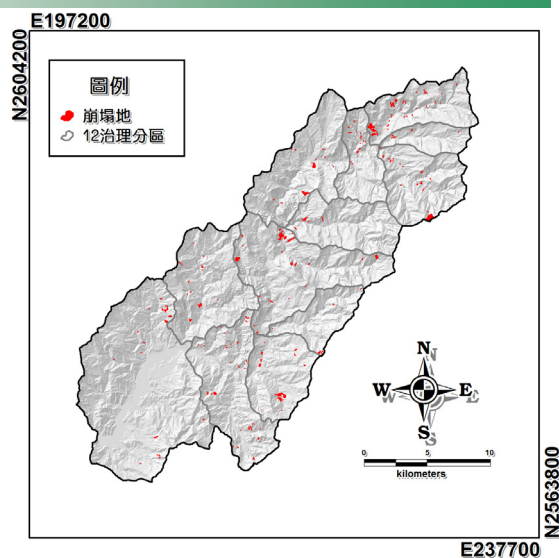
圖 5-1.4 判釋成果品管流程圖

5-1-3 歷史災害衛星影像崩塌地判釋成果

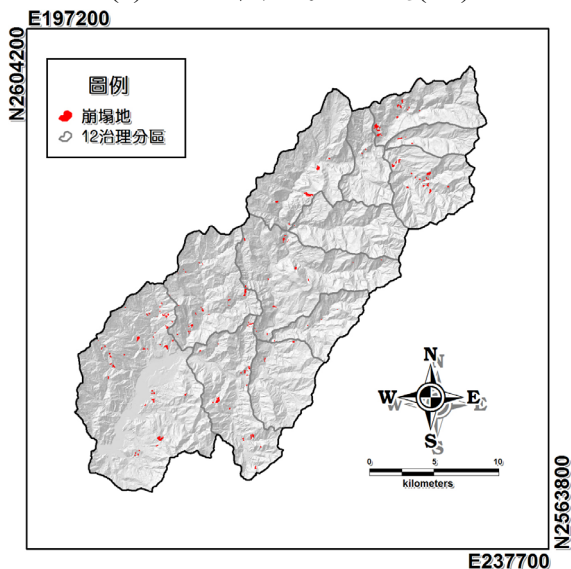
依據前節所述判釋與品管流程，本計畫已完成5場(共9期)災害事件衛星影像崩塌地變異點判釋，展繪判釋成果，如圖5-1.5所示。此外，本計畫另蒐集水保局(2010^a)相關崩塌地圖資，共5期(如表5-1.1)，並再運用本計畫蒐集之「92年」以及「98年莫拉克後」等兩期航照，針對蒐集之崩塌地圖層進行再次品管工作，藉以刪除房建物、道路等誤判區域，以提高後續崩塌地變遷及致災關聯性分析之準確性；經品管後之各期崩塌地空間分布，如圖5-1.5所示。



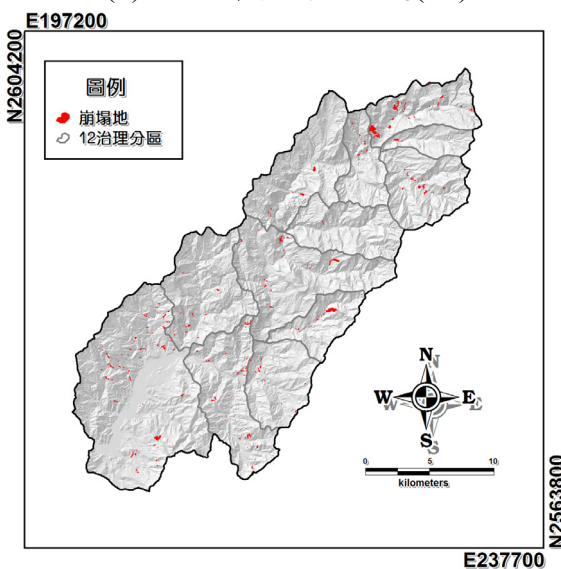
(a) 2001 年桃芝颱風後(S1)



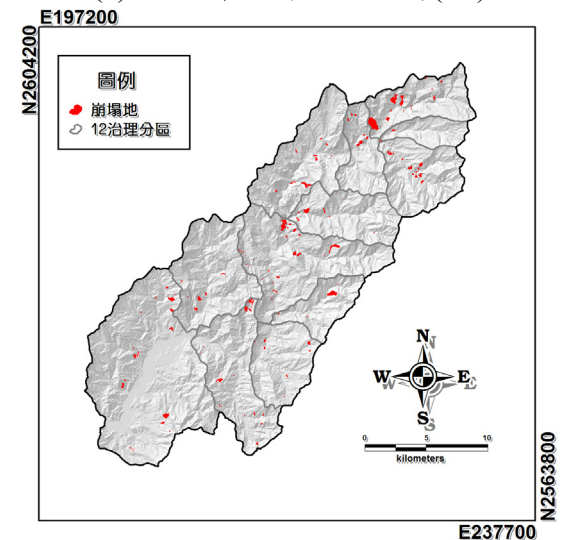
(b) 2003 年杜鵑颱風後(S2)



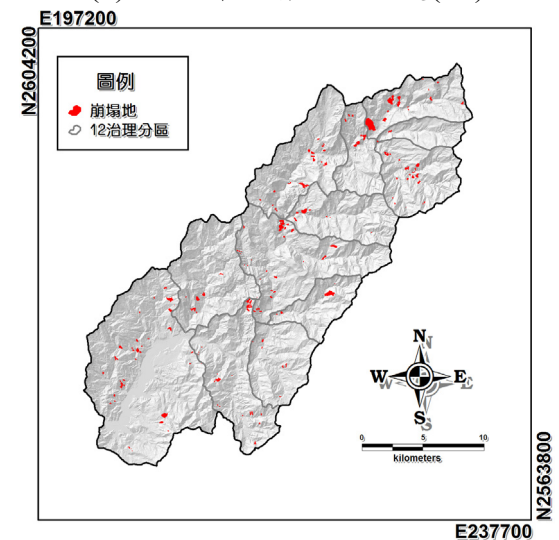
(c) 2004 年敏督利颱風前(S3)



(d) 2004 年敏督利颱風後(S4)

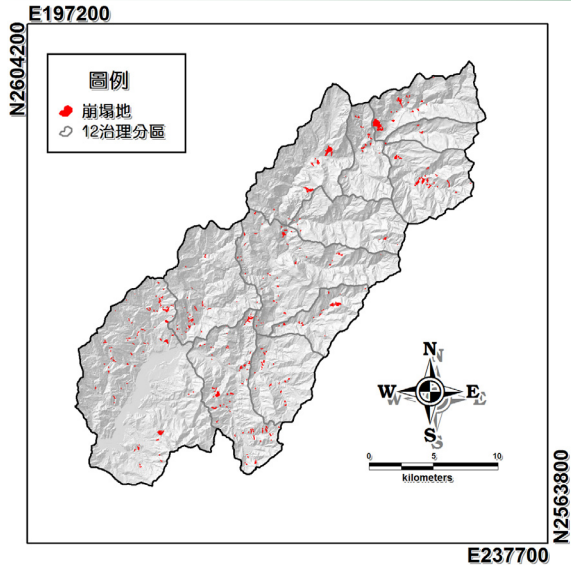


(e) 2005 年海棠颱風後(S5)

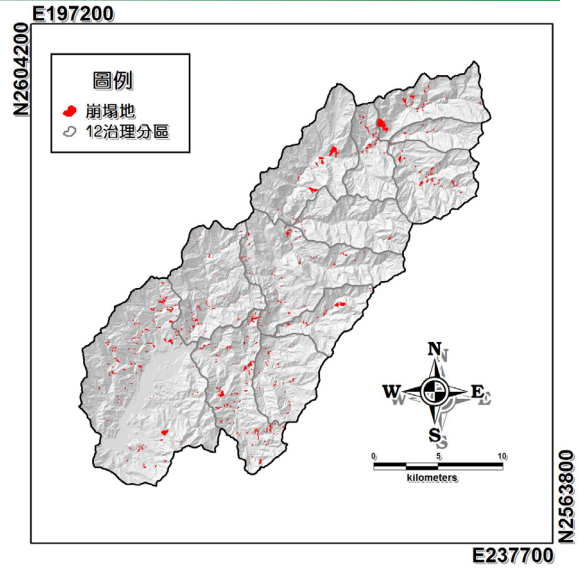


(f) 2006 年六九豪雨後(S6)

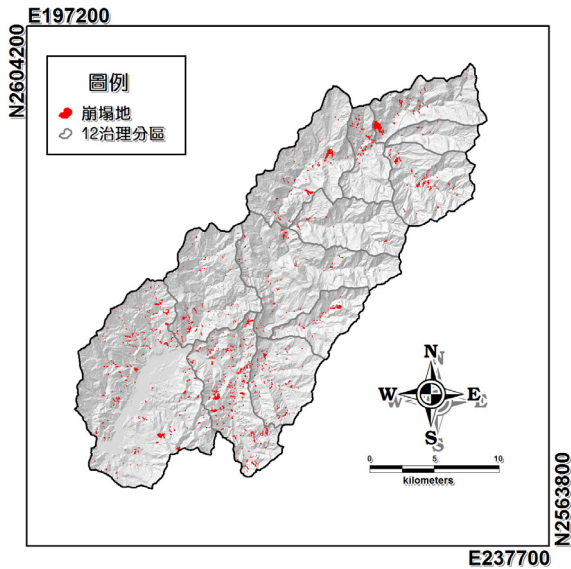
圖 5-1.5 本計畫衛星影像崩塌地判釋與蒐集崩塌地品管成果



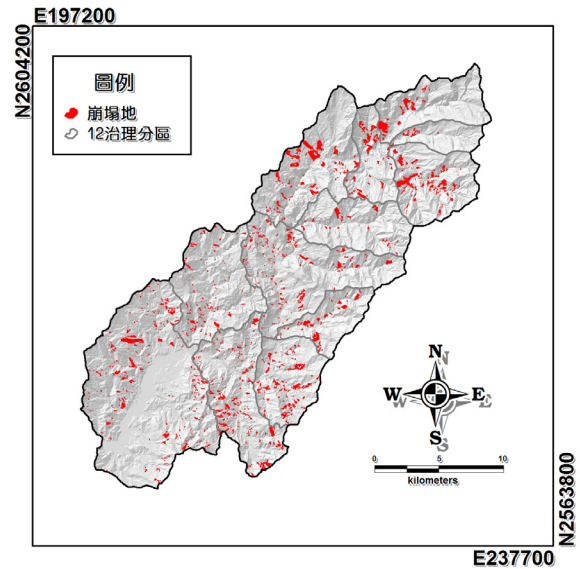
(g) 2007年聖帕颱風前(S7)



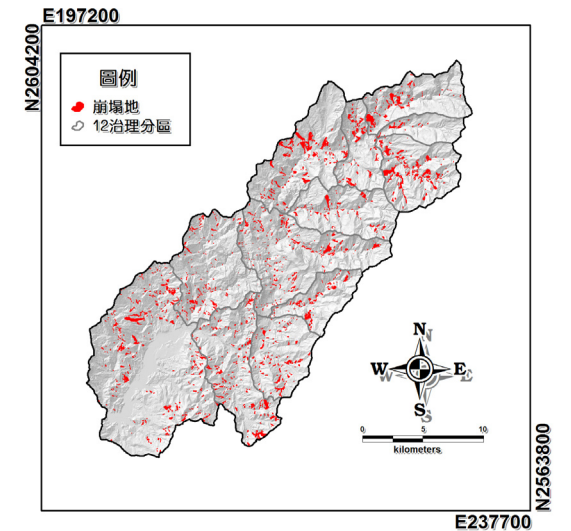
(h) 2008年聖帕颱風後(S8, 卡玫基颱風前)



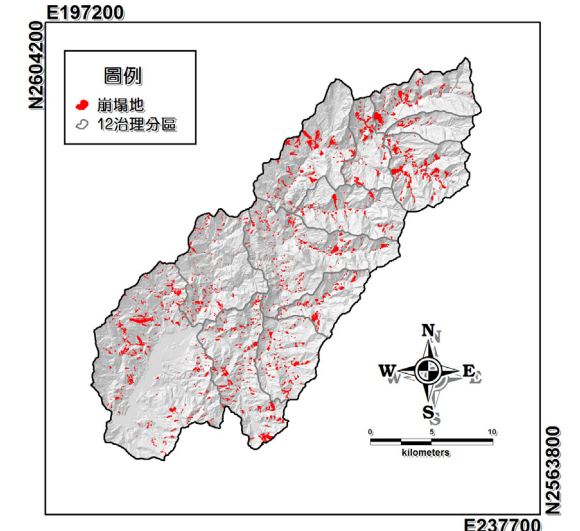
(i) 2008年卡玫基颱風後(S9)



(j) 2009年莫拉克颱風後(S10)

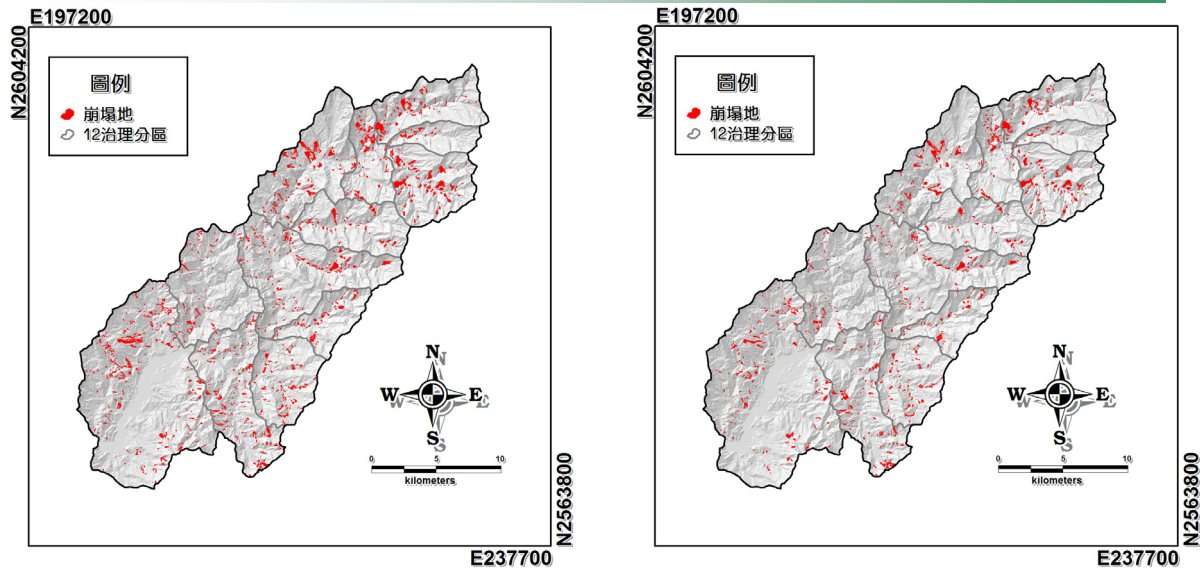


(k) 2010年凡那比颱風前(S11)



(l) 2010年凡那比颱風後(S12)

圖 5-1.5(續) 本計畫衛星影像崩塌地判釋與蒐集崩塌地品管成果



(m) 2011年南瑪都颱風前(S13)

(n) 2011年南瑪都颱風後(S14)

圖 5-1.5(續) 本計畫衛星影像崩塌地判釋與蒐集崩塌地品管成果

5-1-4 崩塌地歷程分析步驟

為探討曾文水庫集水區內重點治理區域之崩塌地變化情形，以瞭解土石災害之降雨量(或降雨強度)、空間與時間分布等相關性，除本計畫購置之4場衛星影像判釋成果外，另併同蒐集曾文水庫集水區相關計畫產製之災害事件崩塌地判釋成果，以通盤探討曾文水庫集水區崩塌地變遷。首先，以各期判釋崩塌地區域及其屬性資料建置成GIS圖層，接著，探討包括崩塌地面積、新增崩塌地面積、復育地面積及其相對應之集水區崩壞比、新增崩壞比、崩塌復育比等演變歷程與趨勢，說明計畫區域各期事件之崩塌區域分布及增減趨勢等相關資訊，以瞭解崩塌地是否有復育亦或擴大跡象，並且探討新增崩塌與降雨量之關聯。最後，統計各期崩塌致災因子之變化歷程，預計分析致災因子包括高程、坡度、地質以及土地利用等，瞭解曾文水庫集水區泥岩地層崩塌特性與致災關聯性、人為治理與自然復育差異程度，供作後續保育治理措施規劃等。詳細分析步驟、處理流程及成果，參見6-3小節。



5-2 高精度數值高程製作

空載 LiDAR 優勢除不受限於地面交通影響，可於廣域範圍進行高效率施測且能同時獲得地物及地表三維空間資料，適用於本計畫執行期間瞭解莫拉克風災迄今地形貌變化情形，以及評估建置後續保育治理工程成效評估之基準地形，故此本計畫以空載 LiDAR 建置數值高程模型。以下茲就空載 LiDAR 施測範圍、施測時程、施測流程及分析成果，依序說明如后。

一、施測範圍

本計畫主要針對曾文水庫內整治重點區域內之子集水區進行規劃施測及其選取原則參見第肆章，約計施測面積達至 80km²，符合招標文件之施測面積需求(達 75 km²)；有關空載 LiDAR 施測各子集水區面積、空間分布及航線規劃，如表 5-2.1 及圖 5-2.1 所示。

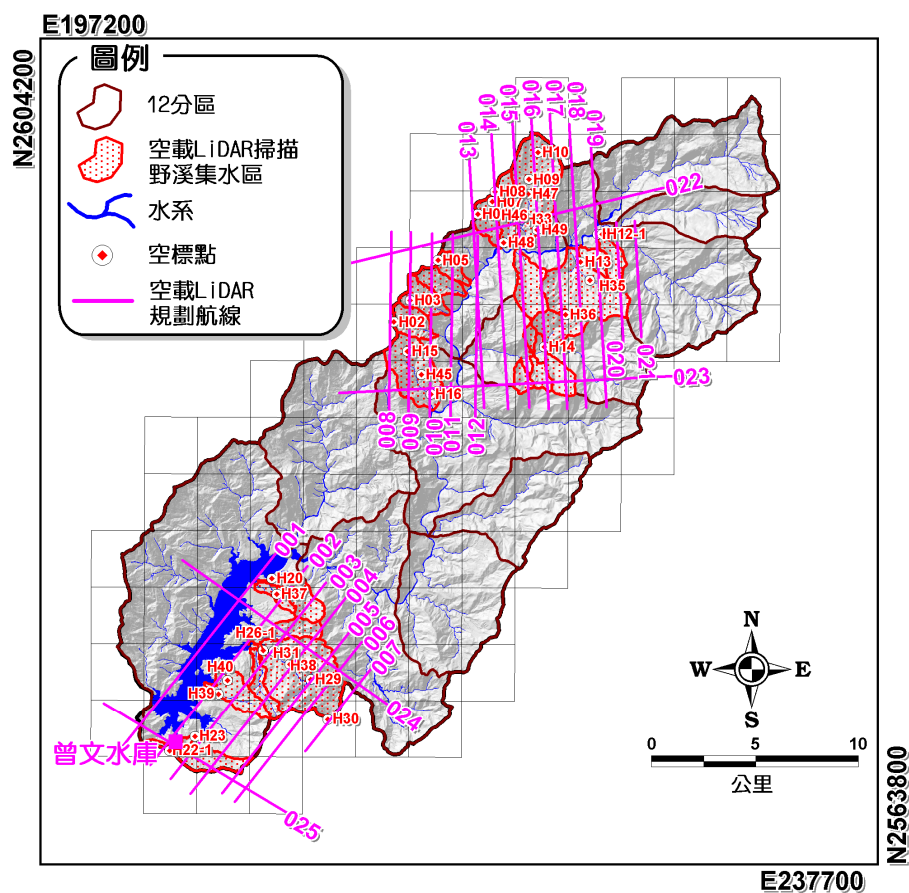


圖 5-2.1 空載 LiDAR 航線規劃圖



表 5-2.1 空載 LiDAR 施測野溪子集水區及其面積一覽表

治理分區名稱	子集水區名稱	面積(km ²)
大埔	龍蛟溪	2.80
	大埔 6 號野溪	1.19
	大埔 9 號野溪	2.51
	東西坑溪	12.40
	大埔 10 號野溪	1.94
	大埔 12 號野溪	3.43
	摸乳巷坑溪	3.52
新美	新美 2 號野溪	6.49
樂野	樂野 2 號野溪	8.92
	行電橋野溪	3.30
	樂野 3 號野溪	2.00
	樂野 5 號野溪	1.37
	樂野 6 號野溪	1.95
	樂野 7 號野溪	2.53
	樂野 8 號野溪	2.44
	樂野 11 號野溪	3.66
里佳	里佳 2 號野溪	3.24
	里佳 3 號野溪	0.58
	達有野溪	1.96
	里佳 7 號野溪	1.13
	里佳 8 號野溪	0.98
達邦	櫻花溪	1.73
	達邦 4 號野溪	1.20
	達德安溪	9.17
總計		80.44

備註：施測範圍並未含蓋完整各治理分區

二、施測時程

本計畫業經 100 年 5 月 13 日函請水保局同意施測規劃(詳見附錄十)，始於進行後續相關作業；遂分別於 100 年 6 月 9、10、15 日等三天，進行飛航並完成預定範圍掃瞄任務(如圖 5-2.2 及圖 5-2.3；詳見附錄六)。此外，於計畫執行期間，水利署南水局(2011^a)另有委辦計畫「曾文水庫



集水區土地變異及土砂災害監測」預計 100 年 11 月後針對曾文水庫集水區進行空載光達施測；故建議未來計畫可將兩者相互比對，俾利瞭解 100 年汛期前後地形高程變化之差異。

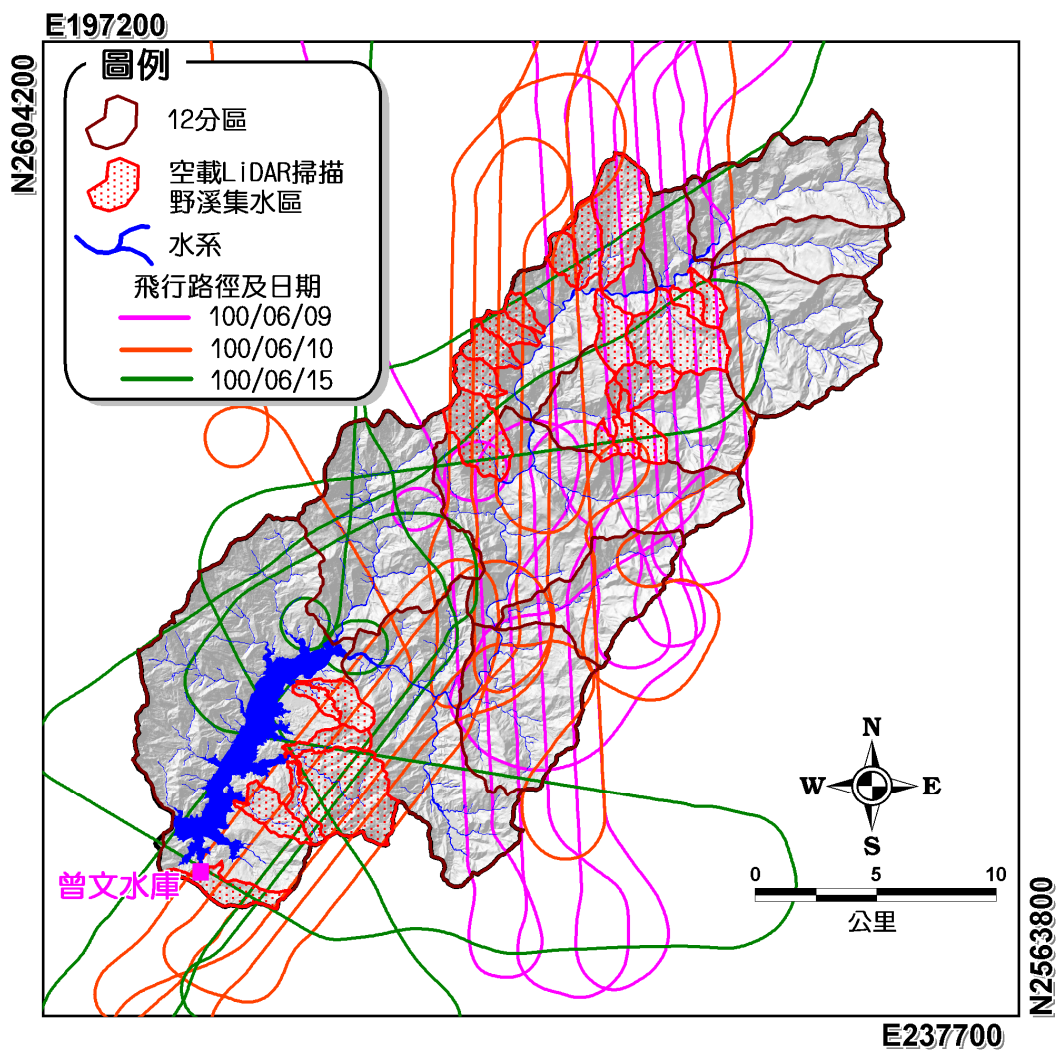


圖 5-2.2 空載 LiDAR 飛行路徑

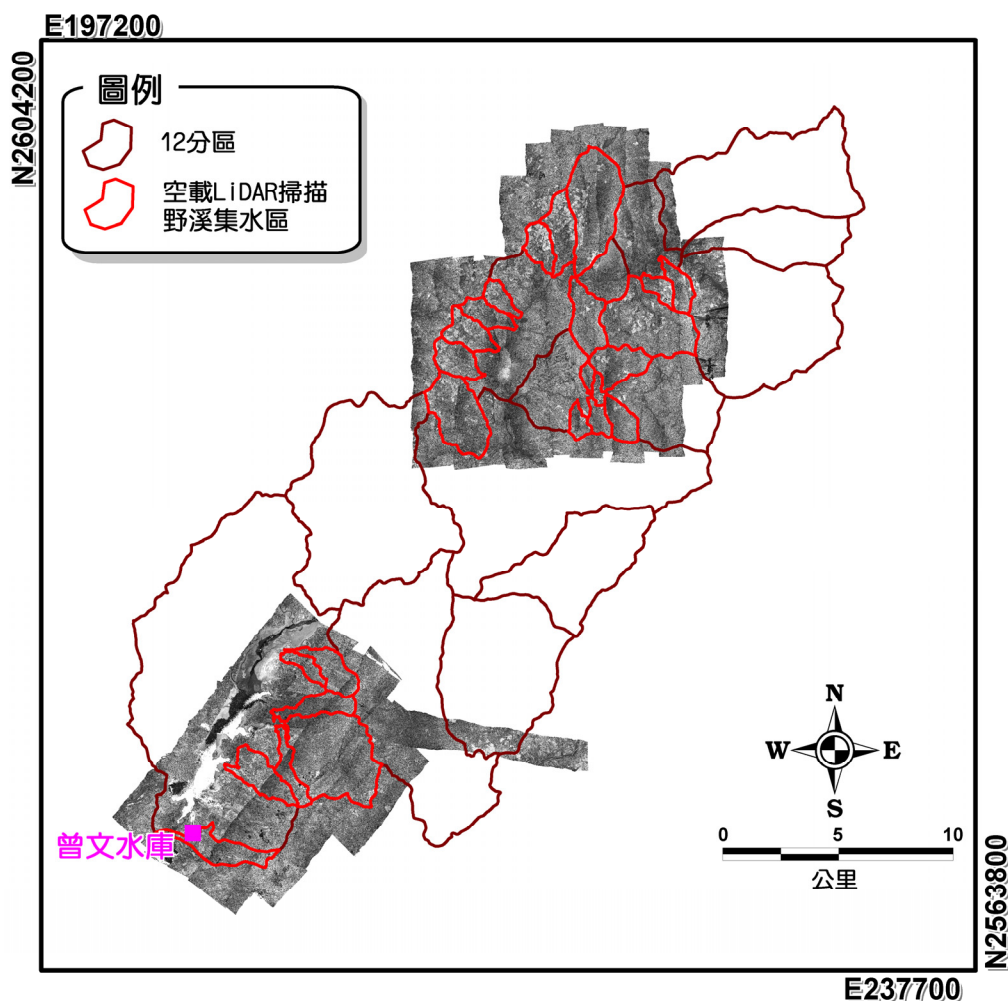


圖 5-2.3 空載 LiDAR 點雲涵蓋範圍示意圖

三、施測流程

空載 LiDAR 施測至 DEM 產出之整體詳細作業與品質管流程，其主要工作項目包括：前置作業、施測以及資料處理與檢核等三個階段，其標準作業程序詳見附錄五。同時，為確保調查資料之品質，故執行空載 LiDAR 施測及資料產製品質管控，品質管制措施參考國外如 FEMA、NDEP 等之相關作業程序文件訂定品質計畫，主要內容為進度控制及標準查核，於作業前、作業中及作業完成階段對各工作項目進行查核。

本計畫採用德國 LEICA 公司生產最新型之空載雷射掃描系統 ALS60，其儀器規格如表 5-2.2；於進行空載 LiDAR 飛航掃描工作，並採用美國 Trimble 公司所生產的 Aerial Camera P65+(儀器規格如表 5-2.3) 進行同步空拍作業，圖 5-2.4 為本次空載 LiDAR 施測完整設備示意圖。



圖 5-2.5 為本計畫空載 LiDAR 施測流程、品管及對策，主要工作項目包括：前置作業、施測、資料處理與檢核等三個階段，依序簡述工作方法及原則如后。

1. 前置作業

前置作業為作業規劃階段，共有系統率定、控制點設置及航線規劃等三項工作，分述如后。

(1) 系統率定

本步驟共分為「原廠系統率定」以及裝機後「視準率定」等兩項工作。空載 LiDAR 系統在出廠前已進行掃瞄儀之校正(詳見附錄七)，但安裝於飛機後之視準率定，則須配合率定場之地面控制資料定期加以率定。視準率定(Boresight Calibration)是以不同航向、角度與高度之空載 LiDAR 掃瞄資料，利用共軛 intensity image、laser point 與率定場之真實座標進行計算，以求取 IMU 偏移值之系統誤差值，實施之時機通常為掃瞄儀拆裝及週期之率定。本計畫使用台中港港務大樓附近重劃區設立之中部率定場，以 GPS RTK 測量 254 點，每一點間距約 10 公尺，率定時分別以 3 種高度各 4 個方向進行飛航(如圖 5-2.6 所示)；儀器最近期率定時間為 99 年 9 月 29 日，飛航軌跡圖如圖 5-2.7 所示。經 Leica Attune 率定軟體計算後其率定後高程之均方根誤差及標準差均為 0.04 公尺，符合率定場之 10 公分精度要求，任意選取 2 條檢核航線剖面進行檢核，其點雲成果均一致，如圖 5-2.8 所示。

(2) 控制點設置

依據本計畫之分析需求與精度考量，配合施測航線範圍小於 30 公里內需有地面控制點之要件。地面 GPS 控制點於空載 LiDAR 掃瞄時，同時設置於地面接收 GPS 訊號，作為飛航軌跡定位之解算使用，由於空載 LiDAR 數據精度受 GPS 解算成果影響甚大，因此地面 GPS 控制點選用特別重要，故將選擇具有良好透空度及較穩定接收訊號品質之地點。

由於政府機關設置之連續追蹤站，通常有較穩定之訊號品質與位置，



因此本計畫選擇 3 個 GPS 基站，分別為：信義(SINY)、竹崎(JHCI)、桃源(TAYN)，飛航時根據實際航線選擇較近之測站進行後續解算。此 3 個 GPS 基站皆為國土測繪中心之 eGPS 基準站(如圖 5-2.9 所示)，在飛機掃瞄作業時，可使最遠距離符合規範之 30 公里以內要求。各站基本資料如表 5-2.4 所示；其空間分布如圖 5-2.10 所示。

(3) 航線規劃

參照使用空載 LiDAR 儀器規範，用以設定包括測區地形高程、載具高度、雷射掃儀掃瞄角度及每一航線涵蓋寬度、航線間重疊率、交叉航線、點雲分布密度及軍方訓練等資訊，使用 Leica 之 FPES 軟體進行規劃，並展繪詳細的飛航規劃圖等參數，進而取得本計畫航線規劃圖及對應規劃表(如表 5-2.5)。

2. 施測

進行飛航掃瞄時，主要需先掌握施測區之天氣狀況後，再依據飛航規劃之各項參數及品質管制程序，於掃瞄前、掃瞄中進行必要之硬體檢查、參數確認及完整工作紀錄。

3. 資料處理與檢核

資料處理與檢核分為資料前處理、初步檢視資料及資料後處理與檢核等三項工作，分述如后。

(1) 資料前處理

依據飛航規劃各項參數及品質管制程序比對飛行任務紀錄，並於掃瞄後進行必要之硬體檢查、參數確認、完整工作紀錄確認及施測資料主要檔案完整性檢查。

(2) 初步檢視資料

首先需要將飛航航跡以及原始點雲資料進行解算，且應有同步拍攝對應航照作為比對；其次，以正反算差值比對資料拼接間隙情形，若間隙過大，應重新處理；接著，檢核施測資料覆蓋之完整性，需與相鄰航帶覆蓋且不可被雲遮蔽(如圖 5-2.11)，如量測數據產生缺漏，需另行補



測；最後，將相鄰航帶重疊區域進行內部精度檢核，如有超過標準，應重新處理資料。

(3) 資料後處理與檢核

初步檢視資料後，首先應先檢核點雲密度，根據 LAS 檔案格式定義，其檔案之檔頭格式可供使用者自行調整(本計畫使用 TerraScan 軟體進行處理)。因此，檔頭均為 229 位元組(byte)，每個點則為 28 位元組，以 1 點/m² 之密度計算，每 1km×1km 單元圖幅之檔案容量至少為 28,000,229 位元組(相當於 26.7MB)；其次，為全區航帶平差，雖然資料後處理及成果產出 LiDAR 原始點雲資料，其產出時已引入系統誤差校正，但一般根據前述重疊區資料精度分析，資料仍可能殘餘著一些系統誤差，主要包括 Heading, Pitch, Roll, Dz 等項目(分別是飛機的航向、縱搖角、橫搖角以及測量對地高差)，若有前述誤差存在時，將利用 TerraMatch 軟體之 Find Match 功能進行全區航帶平差，使全區資料達到一致性；最後，本計畫完成航帶平差後，將全區之航帶之點雲予以合併，再分割為 1km×1km 之小區域，並以 TerraScan 及 TerraModeler 軟體進行地面點過濾，包括自動分類與人工編修，並將點雲成果儲存為 ASPRS 之 LAS 格式。本計畫施測點雲資料平均密度設定為 1 點/m²，故可產製表現地形貌細節且符合本計畫要求 5m×5m 網格高精度 DEM。

此外，當資料處理及檢核後，再將過濾後之點雲成果再以 SCOP++ 軟體內插為 5m×5m 網格 DEM，而完成 DEM 需將全區域進行鑲嵌，並以等高線及坡度方式檢核其合理性(如圖 5-2.12)，接著，以內政部(2002)之大地起伏模式換算為正高，最後將高精度 DEM 輸出為 ERDAS 之 img 格式成果。



表 5-2.2 Leica ALS60 規格表

項目	規格
Max. Pulse Rate	200 kHz (with MPiA, Multi Pulse in Air)
Max .Scan Rate	100 Hz
Returns/intensities	4/3 (with FWD, Full Waveform Digitizer)
Operating altitude(AGL)	200~5000m
Max FOV	75 degree
Scanner	0.37m(W)*0.68m(L)*0.27m(H) , 43 kg
Equipment Rack	0.45m(W)*0.47m(L)*0.36m(H) , 45 kg
Power	910W @ 22~30VDC
Adaptive roll compensation	Yes
Digital Camera	Trimble Aerial Camera P65+ (8984*6732 pixel)
POS	Leica Geosystems IPAS20 (GNSS + Honeywell microIRS IMU)

表 5-2.3 Trimble Aerial Camera P65+

類型	規格	
感光元件	型號	P65+
	CCD	53,9 mm*40.4 mm
	像素	8924*6732 像素(6000 萬像素)
	像素尺寸	6 μm
	色彩濃度 color depth	16 bit
	光學感應當量/ISO 值	ISO 50~800
搭配鏡頭	Schneider Apo-Digitar 50mm f/4.0	
其他	工作溫度	攝氏-10°C~攝氏 50°C
	相機率定	各別鏡頭可自動化率定
	快門型式	電子式葉片快門
	快門速度	1~1/1000 秒、B 快門
	動力供應	18-30 伏直流電；最小:250 毫安培；最大:2 安培(1 毫秒)

表 5-2.4 GPS 基站基本資料

點號	站名	TWD97_X	TWD97_Y	建置機關
SINY	信義	235030	2621419	國土測繪中心
JHCI	竹崎	203782	2601244	國土測繪中心
TAYN	桃源	225855	2561947	國土測繪中心



表 5-2.5 航線規劃表

Name	Alt MSL [m]	Min ref Height [m]	Max ref Height[m]	FOV[deg]	Used Scan Rate [Hz]	Used Laser Pulse Rate [Hz]	Min Swath Width [m]	Max Swath Width [m]	Mean Sidlap [%]	average point density[pt/m ²]
1	2235	213	472	65	27	103200	2246	2576	20.3	1
2	2709	232	640	41.3	20.8	47700	1559	1867	23.9	1
3	2927	255	762	36.7	20.7	45200	1436	1772	21.2	1
4	2363	306	983	53.9	21.1	53400	1403	2091	22.9	1
5	3335	509	1022	30.8	28.8	44900	724	885	20.1	1
6	3231	430	1004	30.6	21.9	44300	1218	1532	22.1	1
7	2798	420	756	43.9	20.9	49200	1646	1917	N/A	1
8	2674	635	1287	50	21	52000	1293	1902	24.4	1
9	2674	547	1300	50	21	52000	1281	1984	20.1	1
10	2674	503	1300	50	21	52000	1281	2025	23.8	1
11	2674	501	1264	50	21	52000	1315	2027	20.8	1
12	2674	547	1186	50	21	52000	1388	1984	N/A	1
13	2795	622	1330	50	21	52000	1366	2027	20.6	1
14	2986	769	1572	48.6	21	51200	1277	2002	20.8	1
15	3240	787	1764	41.9	20.8	48000	1130	1879	20.6	1
16	3254	816	1814	42.3	20.9	48400	1114	1886	20.2	1
17	3262	843	1829	42.8	20.9	48400	1123	1896	22.7	1
18	3292	888	1840	43.2	20.8	48800	1150	1904	23	1
19	3355	909	1886	42.1	20.8	48000	1130	1882	20	1
20	3490	949	2006	39.7	20.8	46900	1072	1835	21.4	1
21	3414	1028	1992	43.7	20.9	49200	1140	1913	N/A	1
22	3240	1028	1999	50	21	52000	1114	1989	24.4	1
23	2927	305	987	50	21.8	52000	1299	1906	24.8	1
24	2896	635	1287	50	21	51400	1332	2035	23.8	1
25	3335	1100	1876	50	22	52000	1293	1901	24.4	1



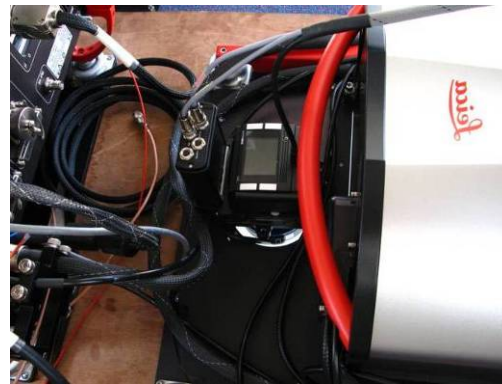
(a)Leica ALS60 掃瞄儀及配件



(b)Trimble Aerial Camera P65+



(c) Leica ALS60 裝機圖



(d) ALS60 及 Trimble P65+裝機圖



(e) Trimble Aerial Camera P65+裝機圖

圖 5-2.4 空載 LiDAR 高精度施測完整設備示意圖

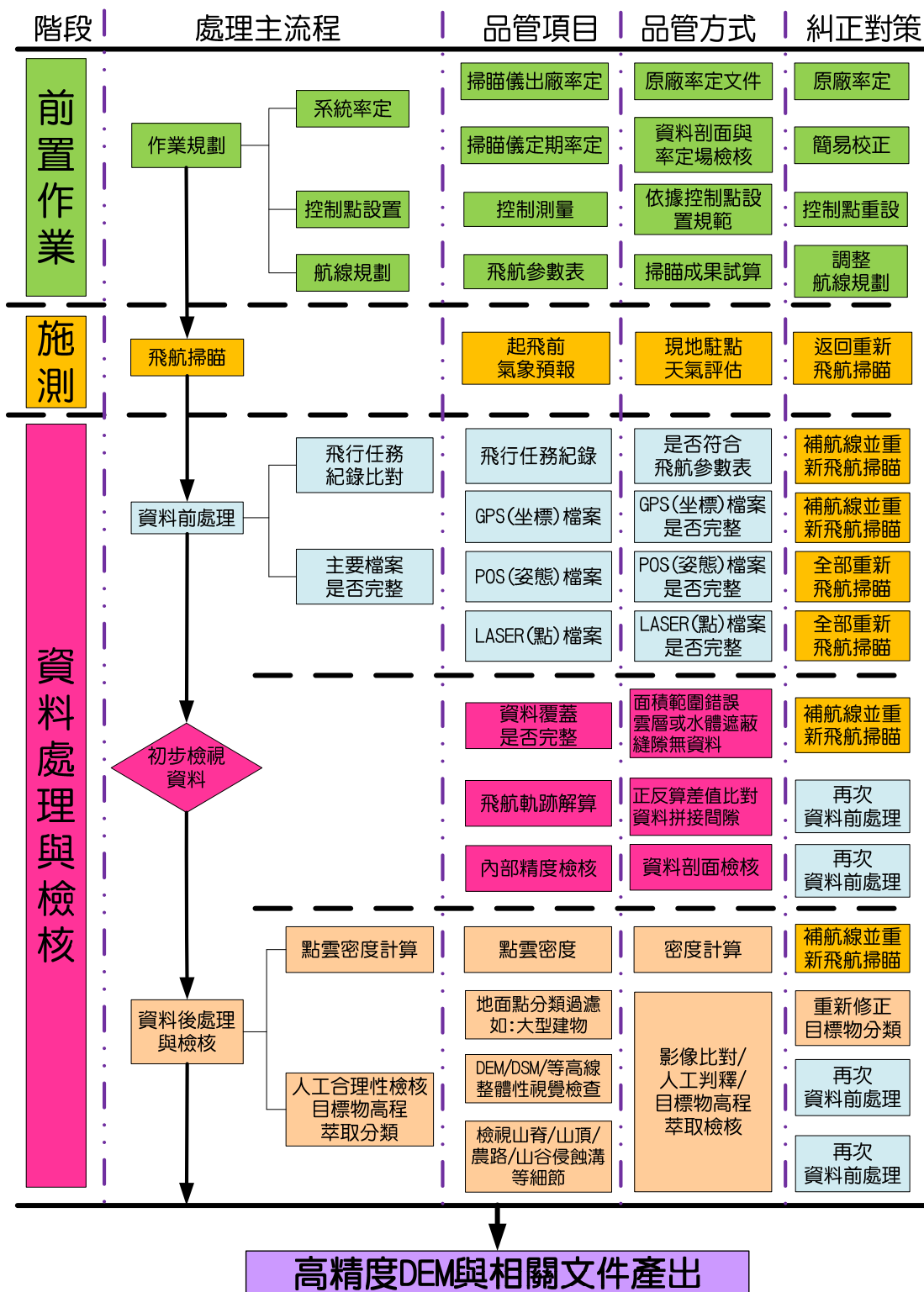


圖 5-2.5 空載 LiDAR 施測標準作業程序流程圖

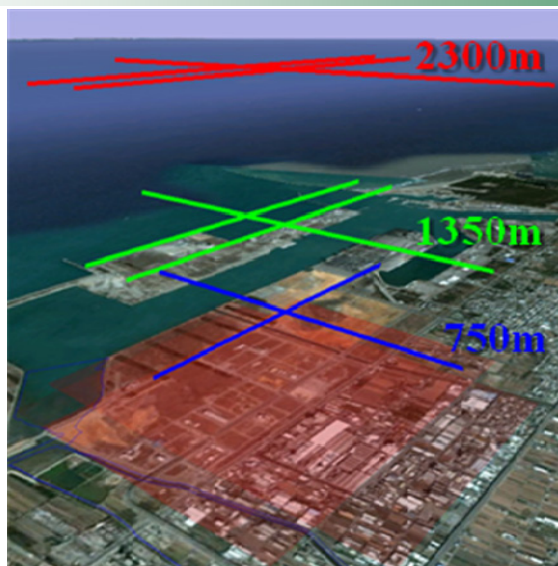
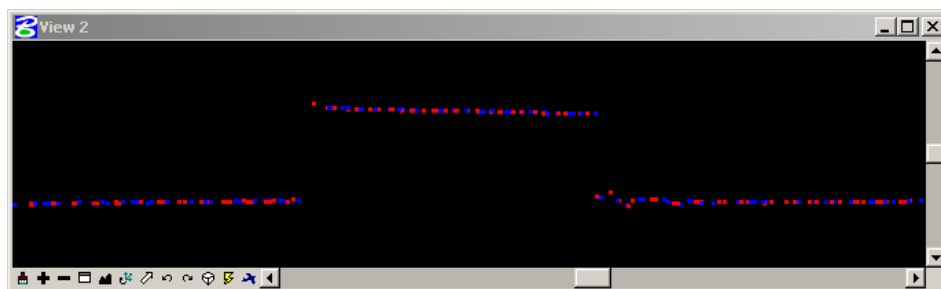


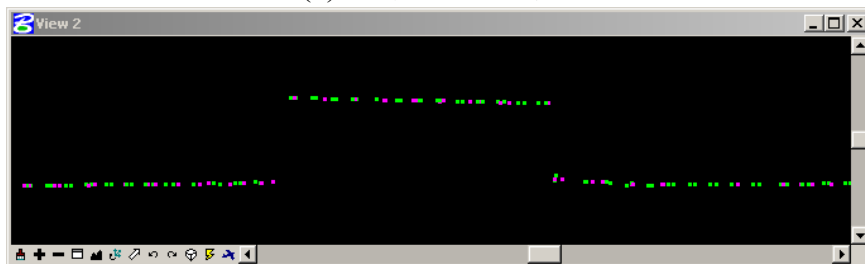
圖 5-2.6 台中港工業區率定作業示意圖



圖 5-2.7 率定飛航軌跡圖 (99年9月29日)



(a)相鄰航線比對圖



(b)相鄰航線比對圖 2

圖 5-2.8 率定成果之檢核航線剖面圖



圖 5-2.9 e-GPS 基準站現況圖 (以信義站 SINY 為例)

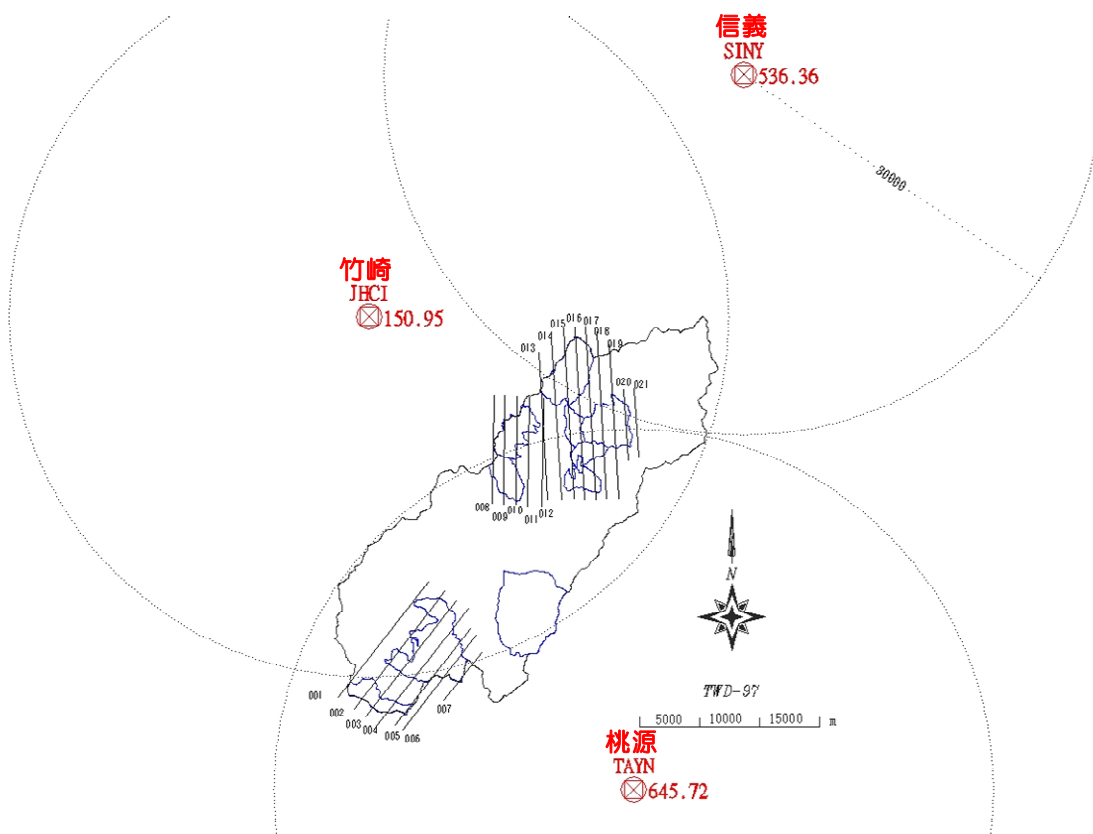
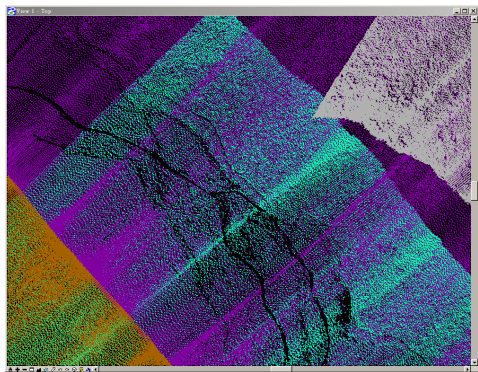
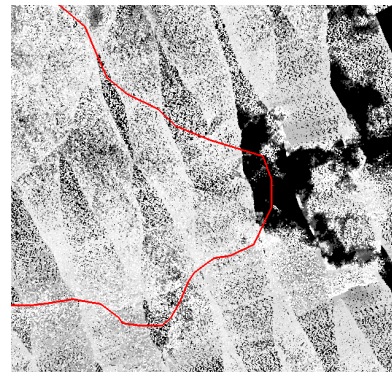


圖 5-2.10 地面 GPS 控制點分布示意圖 (涵蓋半徑為 30 公里)

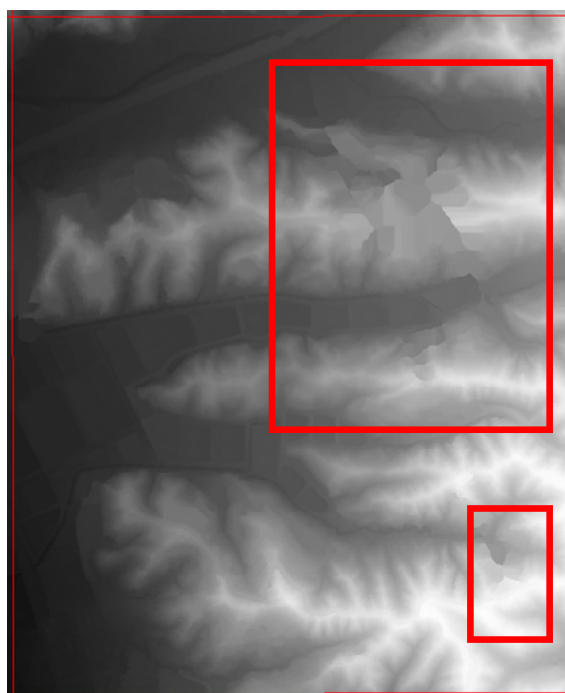


(a) 相鄰航帶覆蓋完整
(不同顏色表示不同航帶)

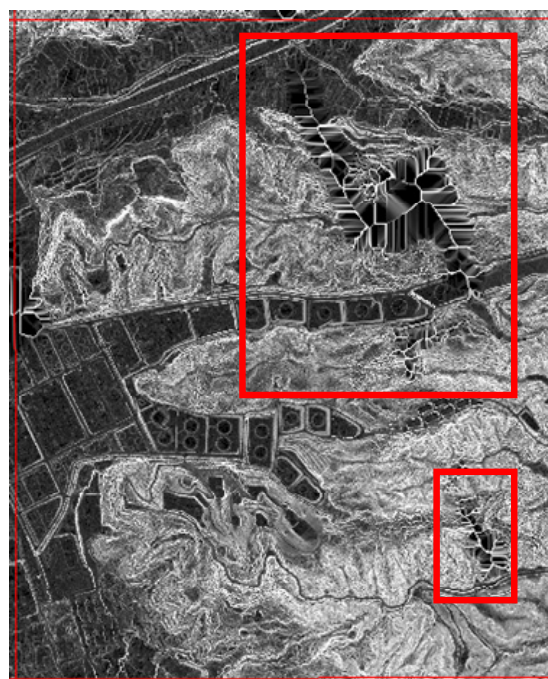


(b) 測區內雲層遮蔽
(紅色範圍內黑色區)

圖 5-2.11 飛行掃瞄成果查核示意圖



(a) 高程影像



(b) 坡度影像

圖 5-2.12 等高線及坡度方式檢核成果示意圖 (紅色矩形為雲洞區)



四、施測成果

圖 5-2.13 及圖 5-2.14 分別為施測同步正射影像及施測成果產製 5m×5m 高精度數值高程模型 (DEM, Digital Elevation Model)，後續將與歷史高精度數值高程模型進行比較分析工作。有關本計畫空載 LiDAR 施測儀器、執行流程，以及其完整施測文件及相關參數記錄詳見附錄六。

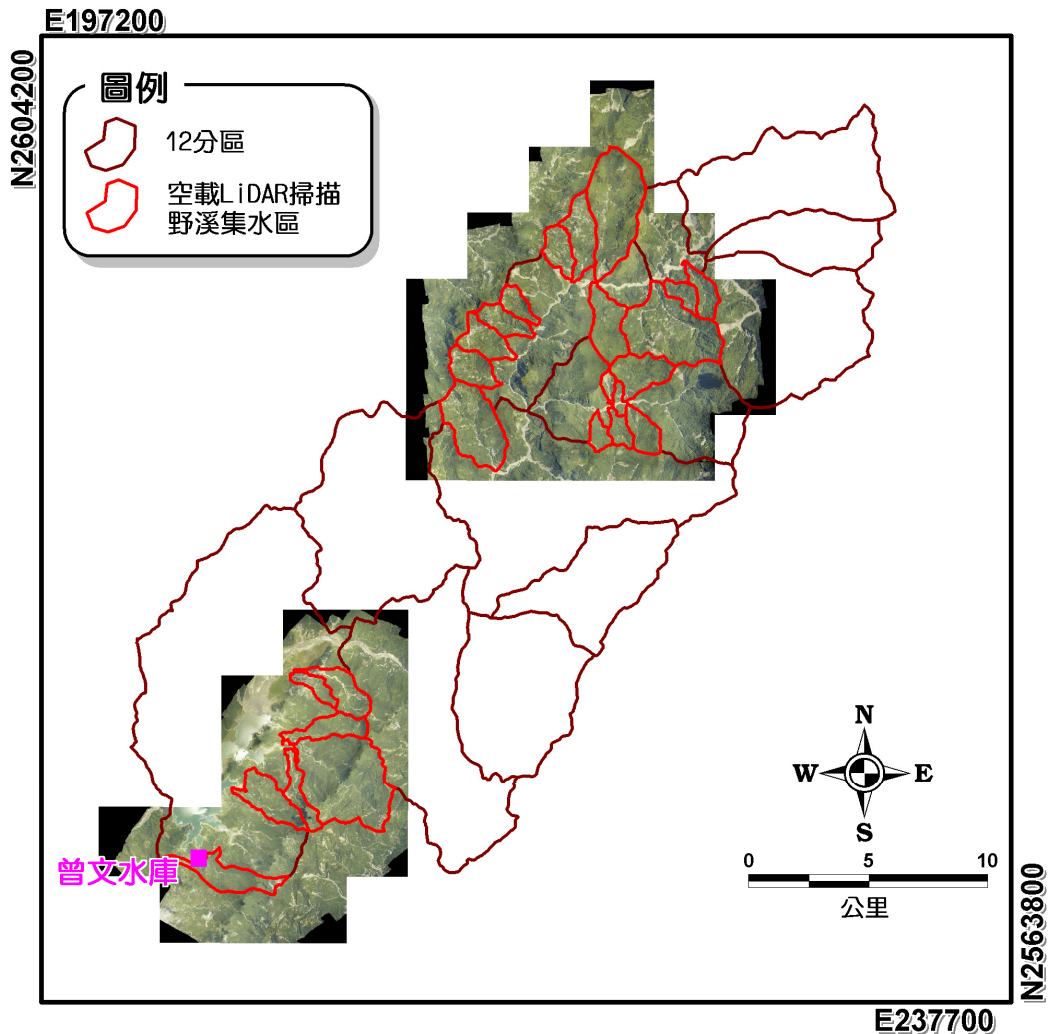
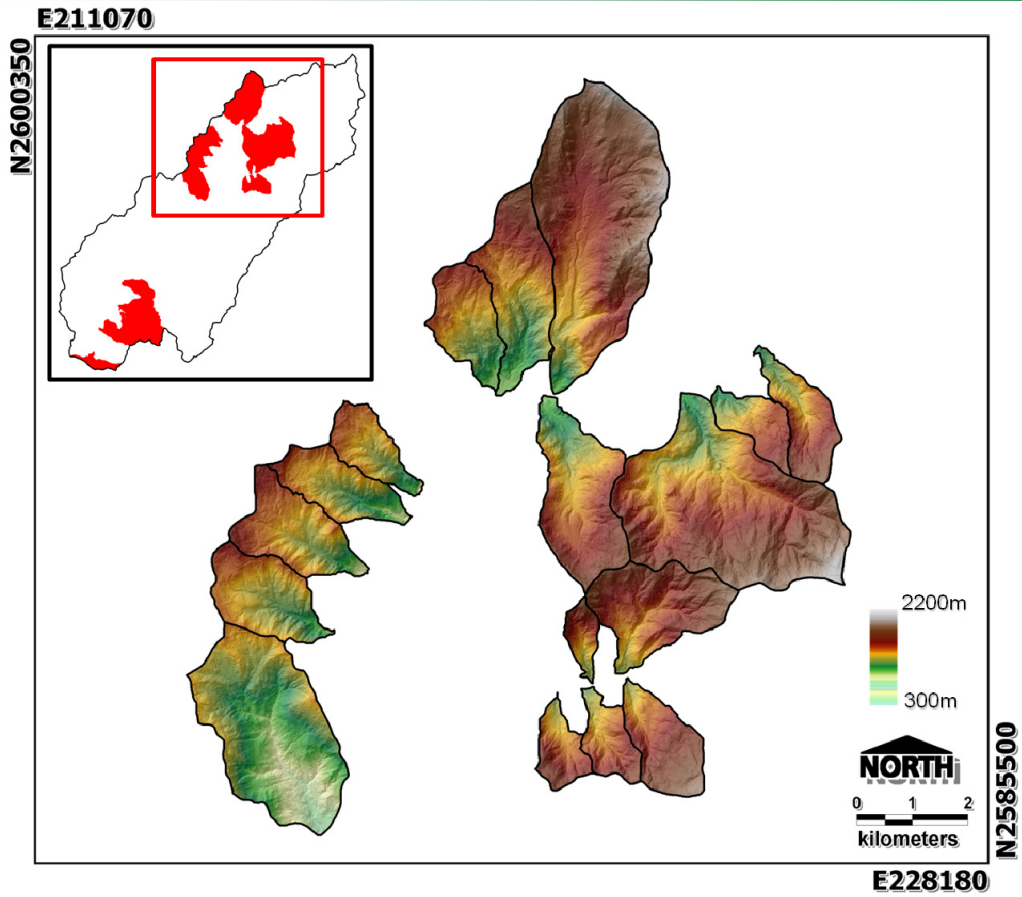
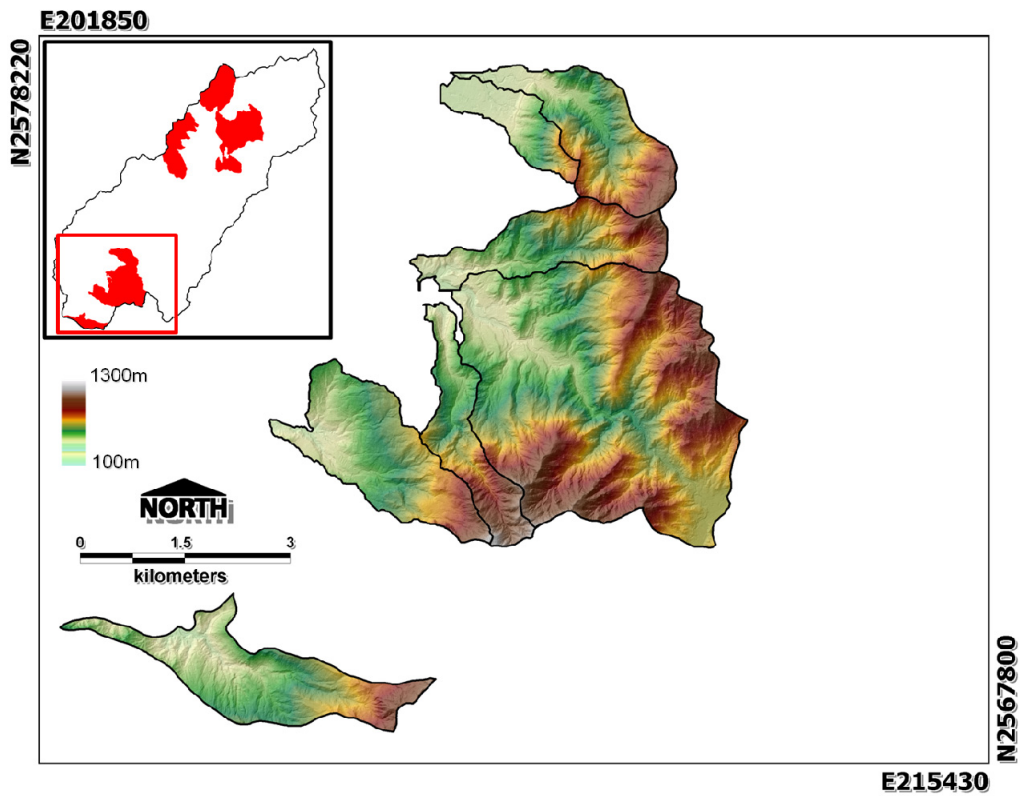


圖 5-2.13 本計畫空載 LiDAR 施測同步正射航照



(a) 曾文水庫集水區上游範圍



(b) 曾文水庫集水區下游範圍

圖 5-2.14 本計畫空載 LiDAR 施測 DEM 成果示意圖



5-3 歷史高精度數值高程模型蒐集

本節利用本次空載 LiDAR 施測成果製作高精度數值高程模型，與歷年重疊區域之高精度數值高程進行前後比較及高程差異分析探討；故於工作執行期間，本計畫共蒐集水保局於 97 年以及地調所於 099 年 10 月至 12 月產製高精度數值高程模型，共計兩期，其產製時程、產製單位以及資料屬性、解析度，詳見表 5-3.1；其中地調所(2011^a)「莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作(1/3)99 年度 1-3 分區」產製成果，目標為突破地表植被覆蓋影響且獲取地表細微特徵的數值高程模型，故施測時程長達三個月且多次對同地點進行施測，以利提高密林區地面點雲密度；同時，地調所因考量數值高程模型及同步航拍屬於機密性資料，故僅同意本計畫於 100 年 8 月 25 日赴地調所內部進行分析並攜回統計數據及成果圖檔，其來往公文詳見附錄十；圖 5-3.1 為地調所(2011^a)計畫施測範圍，目前僅完成曾文水庫集水區全區境內新美治理分區以下區域，再與本計畫施測範圍相互比較，僅有大埔治理分區重疊，故該分區共計有三期數值地形資料，可分別進行治理前及後之地形高程變化差異評估；其餘達邦、里佳、樂野及新美治理分區，計有兩期數值高程資料，故僅能探討「97 年至 100 年 6 月」地形高程變化量。此外，在不同時期進行數值高程獲取皆有相對系統差量外，使用不同工具及方式獲得數值高程也存在相對精度之差異，倘若進行兩個不同資料之比較，恐造成誤差傳遞的問題發生，相關精度估算及比較亦納入後續探討，利於進行前後期資料比較分析之誤差參考。

以下茲就各期數值高程比較分析之主要探討目的、不同數值高程資料參考精度及比較精度估算方式，依序說明如次。

一、各期數值高程比較分析目的

本計畫藉由蒐集 98 年莫拉克颱風前、後之歷史數值高程模型，分析與探討莫拉克及凡那比颱風對於曾文水庫集水區內地形高程變化影響程度。並可藉由本計畫 100 年度空載 LiDAR 掃瞄產製成果，建置工程治

理區位集水區之基準地形貌，藉以提供集水區保育治理成效之評估使用。茲將兩期探討目的條列如下：

1. 97 年至 99 年 12 月(或 97 年至 100 年 6 月)：曾文水庫集水區於本期間，主要受莫拉克颱風影響，其次為凡那比颱風(參見 6-3-1 節)，故可供分析莫拉克及凡那比颱風引致地形高程變化量。
2. 99 年 12 月至 100 年 6 月：98 年 8 月莫拉克風災後，集水區保育治理工程陸續進駐並進行整治中，故可分析本期間之地形高程變化量外，尚用以評估已完成治理工程子集水區保育治理初期成效。

表 5-3.1 本計畫蒐集及產製數值高程資料相關資訊

產製資料時間	產製資料單位	資料屬性	計畫名稱	資料解析度
97 年間	農委會水土保持局	航照	-	5m×5m
99 年 10 月至 12 月間	經濟部地質調查所	空載 LiDAR	莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作(1/3)99 年度 1-3 分區)	1m×1m
100 年 6 月	本計畫	空載 LiDAR	本計畫	5m×5m

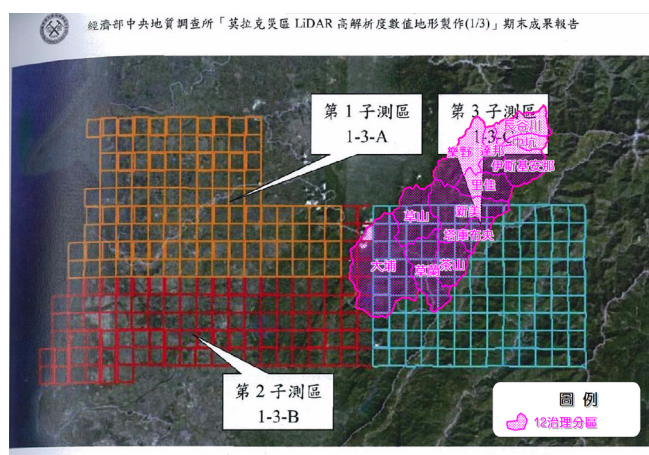
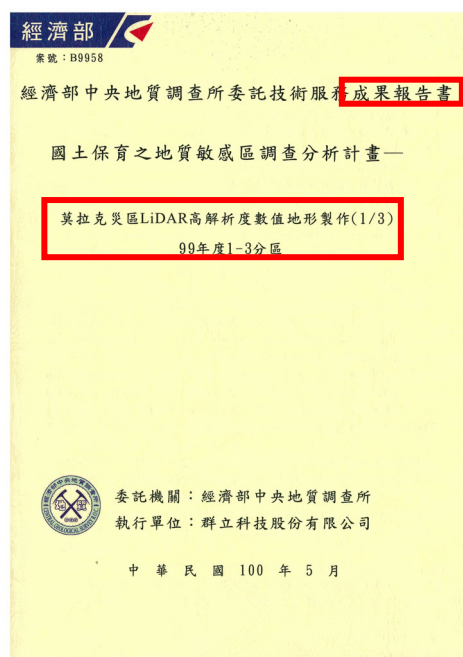


圖 5-3.1 地調所(2011^a)「莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作(1/3)99 年度 1-3 分區」產製成果範圍 (改繪自 地調所，2011^a)



二、資料參考精度及比較精度估算方式

本計畫蒐集及產製各期歷史數值高程資料，含空載 LiDAR、航照等來源，然各數值高程精度並非一致，且各項計畫施測工具不同之驗收精度標準，亦有提出適當誤差評估之參考精度計算方式，進而估算各期數值高程資料比較精度，以下整理各期數值高程資料參考精度及比較精度之計算基礎及範例，利於各期資料比較分析之誤差參考及後續應用，詳見如次。

1. 數值高程資料參考精度

- (1) 空載 LiDAR：本計畫施測成果高程精度優於 0.5 公尺(精度檢核詳見附錄六)，且水保局曾於 95 年至 99 年間至石門水庫集水區以空載 LiDAR 施測產製數值高程，其高程精度報告亦顯示為 0.5 公尺，故本計畫以 0.5 公尺為空載 LiDAR 製作數值高程之參考精度。
- (2) 航照產製 5 公尺數值高程：以航照製作數值高程，於不同地形坡度及植被情況(如平地、陡坡以及短草、密林)，皆有不同數值高程精度驗收標準。因林班地地形大多屬於山地至陡坡山地間，且分析地表型態多為裸露至半裸露的崩塌地，故參考施測圍範內中地形及地表型態，取其兩者平均，再經內政部「高精度及高解析度數值地形模型測製規範(草案)」中所提數值高程模型(DEM)之高程品質標準作為計算基礎，該案中之高程誤差之最大允許值，均以 σ 為計算標準，如式 5-3.1：

$$\sigma = a + b + c \times t \quad (5-3.1)$$

式中 a ：常數，規範中設定航測使用值為 0.5。

b ：地形類別而不同，參考表 5-3.2；

c ：依植被覆蓋類別而不同，參考表 5-3.3)；

t ：植被平均高度。

依上述公式定義，因比較範圍皆為裸露區域，故不考量植被平均高度，計算近期航照製作數值高程參考高程精度為 1.95 公尺，如下式：



$$\sigma = a + b + c \times t = 0.5 + (0.9 + 2) / 2 + 0 = 1.95 \quad (5-3.2)$$

2. 數值高程資料比較精度

本計畫比較前後期數值高程計算土砂運移量，需考量誤差傳遞來顯示資料可信度區間，故以前述各別參考精度進行計算，並於每次比較結果中標示其比較精度。舉例來說，97 年以航照產製數值高程模型參考精度為 1.95 公尺，100 年 6 月以空載 LiDAR 施測成果產製數值高程模型參考精度為 0.5 公尺，則透過誤差傳播理論計算後，為±2.01 公尺。計算結果如下式：

$$\pm \sqrt{1.95^2 + 0.5^2} = \pm 2.01 \quad (5-3.3)$$

表 5-3.2 地形類別參數值(m)

地形類別	<i>b</i>
平地	0
丘陵	0.2
山地	0.9
陡峭山地	2.0 (不含峽谷及峭壁斷崖)

表 5-3.3 植被覆蓋類別參數值(無單位)

植被覆蓋類別	<i>c</i>
裸露地	0
半裸露地	0.15
林地	0.1
密林地	0.07

5-4 高精度數值高程模型比較

數值高程模型亦稱為數值地形，本計畫使用航拍或空載 LiDAR 施測成果產製高精度數值高程模型進行前後期高程比較分析，但前述兩者施測工具及產製資料精度，並不適用於進行「土壤沖蝕」這類僅於厘米等級變化之量體分析，故本計畫僅比較分析集水區內之地形變化劇烈區(係指坡面崩塌及河道下刷區域)。比對前後兩期數值地形可評估集水區內「地形變化劇烈區」之高程變化量，並確定土砂材料供應來源與堆積殘

留土砂區域，藉以探討野溪集水區之土砂收支，計算土砂攔阻率及土砂遞移率，進而評估治理成效。蕭震洋等人(2009^b)曾於石門水庫應用空載 LiDAR 施測進行兩期間之地形變化量分析，並與精度較佳之地面 LiDAR 進行不動點資料比對，結果顯示空載 LiDAR 儀器精度應用範圍可足以評估崩塌地等土砂災害及治理工程之成效，故本計畫應用空載 LiDAR 施測成果進行後續地形貌變化研究探討。

以下就前後期數值地形比對方法、土砂收支及攔阻率計算方式依序進行說明。

一、前後期數值地形比對

圖 5-4.1 為前後期數值地形變化比對方式示意圖。經後期高精度數值地形減去前期高精度數值地形，若所得網格內數值為負值即為崩塌或下刷之「土砂生產」，反之，正值即為堆積之「土砂殘留」，再乘上高精度數值地形網格面積大小，即為單一網格之地形變化量。

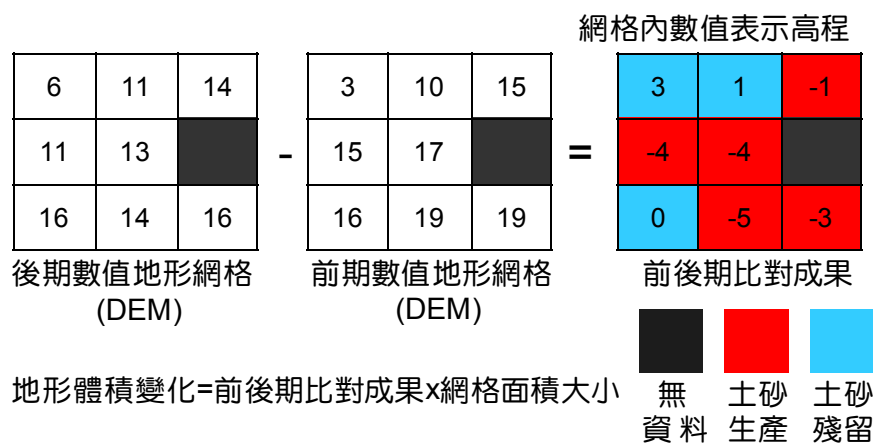


圖 5-4.1 前後期數值地形比對方式示意圖 (修改自 蕭震洋等人，2009^b)

二、土砂收支及攔阻率計算方式

本計畫參考「集水區整體調查規劃報告撰寫參考手冊」中第 4-3 節集水區土砂收支分析中名詞定義，並以集水分區水系出口為下方界點，並以其做為分析之系統及計算單元，從中分為「坡面」及「溪床」等兩大土砂生產及殘留區域，接著，計算各集水區之坡面崩塌及溪床下刷、側淘之沖



刷所形成「土砂生產量」；坡面、溪床及其結構物所堆積或殘留造成「土砂殘留量」；另將土砂流失量減去土砂殘流量後，即可獲得該集水區之「土砂流出量」；進而可推求不同時期各集水區之「土砂攔阻率」與「土砂遞移率」，圖 5-4.2 為集水區土砂運移分區示意圖。前述相關名詞定義及計算方式說明如后。

a. 土砂生產量(V_{WSY} , m^3 , Sediment Yield)，亦為集水區土砂收入：

$$V_{WSY} = \text{坡面土砂崩塌生產量}(V_{LS}, m^3) + \text{溪床下刷側淘生產量}(V_{TS}, m^3) \quad (5-4.1)$$

b. 土砂殘留量(V_{WSD} , m^3 , Sediment Deposition)：

$$V_{WSD} = \text{坡面土砂殘留量}(V_{LSD}, m^3) + \text{溪床土砂殘留量}(V_{TD}, m^3) \quad (5-4.2)$$

c. 土砂流出量(V_{WSF} , m^3 , Sediment Flow-out)，亦為集水區土砂支出：

$$V_{WSF} = V_{WSY} - V_{WSD} \quad (5-4.3)$$

d. 土砂攔阻率(STR , %, Sediment Trapping Ratio)：

$$STR = (V_{WSD}/V_{WSY}) \times 100(\%) = 1 - SDR \quad (5-4.4)$$

e. 土砂遞移率(SDR , %, Sediment Delivery Ratio)：

$$SDR = (V_{WSF}/V_{WSY}) \times 100(\%) \quad (5-4.5)$$

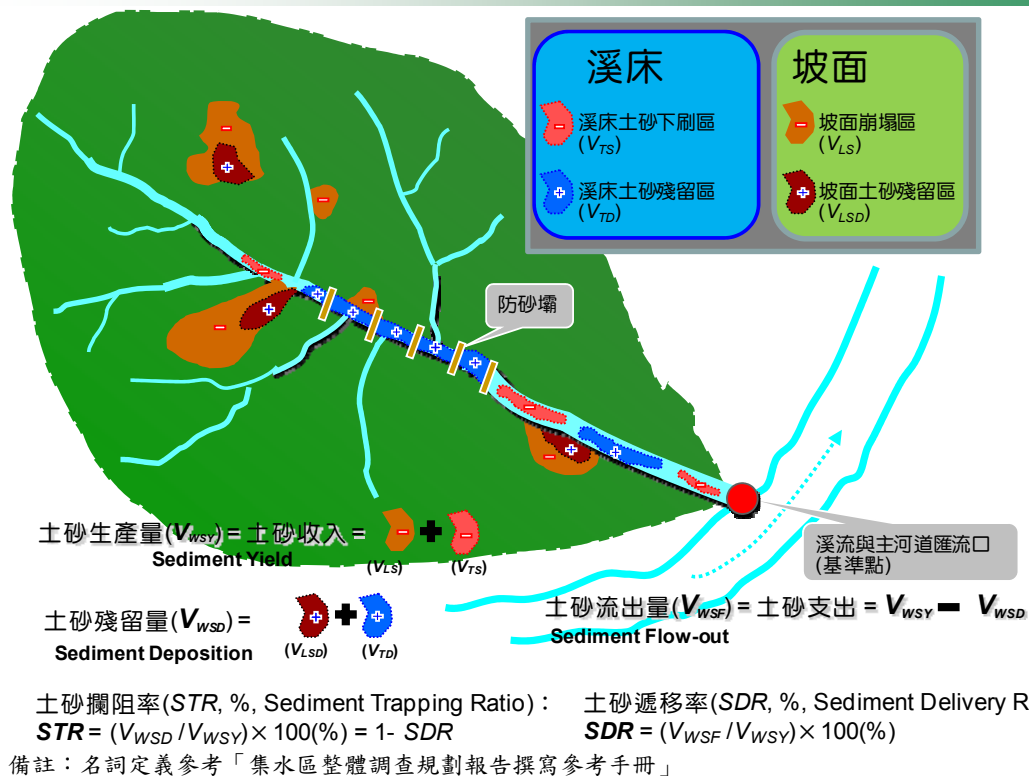


圖 5-4.2 集水區土砂運移分區及土砂收支計算示意圖

(圖中地形變化劇烈區域未涵蓋土壤沖蝕)

三、土砂收支及攔阻率分析成果

根據本計畫蒐集數值高程資料相關資訊，並由各期施測範圍與本年度空載光達施測範圍進行相互比對，可以發現地調所(2011^a)資料與本計畫施測範圍僅與新美治理分區以下之大埔治理分區重疊；依此，本計畫以曾文水庫集水區之新美治理分區為界，計有以上及以下等兩大區塊(如圖 5-4.3)。此外，本計畫旨在分析「減少土砂供應」及「抑制土砂」直接進入主河道等影響效應，用以評估治理前後之土砂生產量及攔阻率，故藉由前述分析流程進行兩大區塊數值地形比對工作，茲將重點觀察及分析結果，說明如后。

1. 曾文水庫集水區新美治理分區以下

經資料比較顯示數值地形重疊範圍為大埔治理分區，其境內本期施測之子集水區共有龍蛟溪、大埔 6 號野溪、大埔 9 號野溪、東西坑溪、大埔 10 號野溪、大埔 12 號野溪、摸乳巷坑溪等七條(地理位置分布如圖 2-4.4 與表 2-4.2)，共可分析「97 年至 99 年 12 月」及「99 年 12 月至 100 年 6



月」等兩期土砂運移變化，據以分析說明莫拉克及凡那比颱風引致地形高程變化量，用以評以評估保育治理工程成效。

圖 5-4.4 為大埔治理分區之土砂生產量及土砂攔阻率成果圖。因近期並無災害事件發生且部分子集水區治理工程已進駐且陸續完竣中，故境內子集水區之土砂生產量皆已下降，降低為治理前土砂總產量之 5%至 97%，相關數據整理如表 5-4.1 所示；另就土砂攔阻率而言，集水區治理後大致優於治理前，且現階段土砂攔阻率介於 4.9%~37.8%(相關數據詳見表 5-4.1)，平均可達 19.5%；惟摸乳坑溪於莫拉克颱風後仍堆積大量砂於溪床出口處，故僅治理後攔阻率高於治理前，又該土砂堆積區緊鄰曾文水庫庫區(如圖 5-4.5)，故治理較屬困難，後續需注意該區域土砂生產量變化，以適時進行土砂防治工作。

綜以上述，本計畫建議後續仍應持續追蹤監測、蒐集現況保育治理情資及規劃後續健檢治理工程，以利進行治理成效追蹤、經常性野溪清疏及工程修繕等災害防治及降低致災風險之工作規劃參考。

2. 曾文水庫集水區新美治理分區以上

經資料比較數值地形重疊範圍為達邦、里佳、樂野及新美等四個治理分區，其境內本期施測子集水區共有等櫻花溪、達邦 4 號野溪、達德安溪、里佳 2 號野溪、里佳 3 號野溪、達有野溪、里佳 7 號野溪、里佳 8 號野溪、樂野 2 號野溪、行電橋野溪、樂野 3 號野溪、樂野 5 號野溪、樂野 6 號野溪、樂野 7 號野溪、樂野 8 號野溪、樂野 11 號野溪、新美 2 號野溪等 17 條，可供分析「97 年至 100 年 6 月」乙期土砂運移變化，藉以說明莫拉克及凡那比颱風引致地形高程變化量。

圖 5-4.6 至圖 5-4.9 為達邦、里佳、樂野及新美等四個治理分區之土砂生產量及土砂攔阻率成果圖。本期間土砂生產量及土砂流出量前三名為達邦治理分區中達德安溪、樂野治理分區中樂野 3 號野溪及里佳治理分區中里佳 3 號野溪，其土砂生產量皆超過 100 萬 m^3 ，至少有 85.2%土砂量流出，如表 5-4.1 所示；若再細究山坡地範圍內的坡面土砂生產量，則以樂野治

理分區的樂野3號野溪、新美治理分區的新美2號野溪及樂野治理分區的行電橋野溪為前三名，亦分別有超過60萬 m^3 的土砂生產量，如表5-4.1；其中，樂野治理分區佔其大部份土砂料源，係因莫拉克颱風造成樂野大崩塌座落在樂野治理分區的樂野3號野溪及行電橋野溪中所引致，詳見6-1-3節。

綜以上述，因本計畫目前僅完成蒐集及產製數值地形，共計兩期，故無法進行治理前後之比較，建議未來蒐集其他公部門莫拉克颱風後之地形資料，以利進行較完整之治理前後比較及成效追蹤。

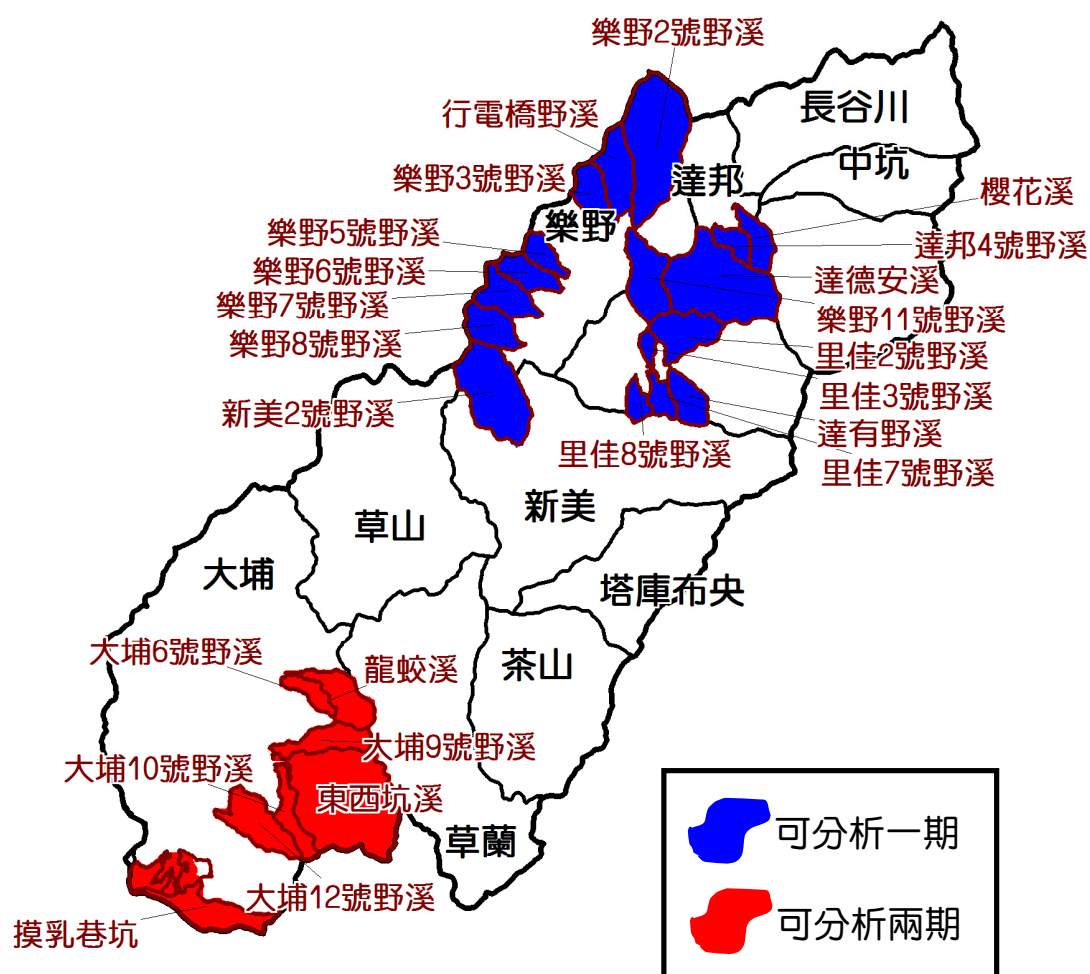


圖 5-4.3 土砂收支及攔阻率可分析期數及地理位置圖

3. 重要治理區域案例探討

為有效完整呈現重要治理區域成效及集水區土砂生產環境評估，本計畫分別針對曾文水庫集水區上游及下游治理分區挑選「行電橋野溪」及「龍蛟溪」進行案例說明，相關成果詳見第6-6節。

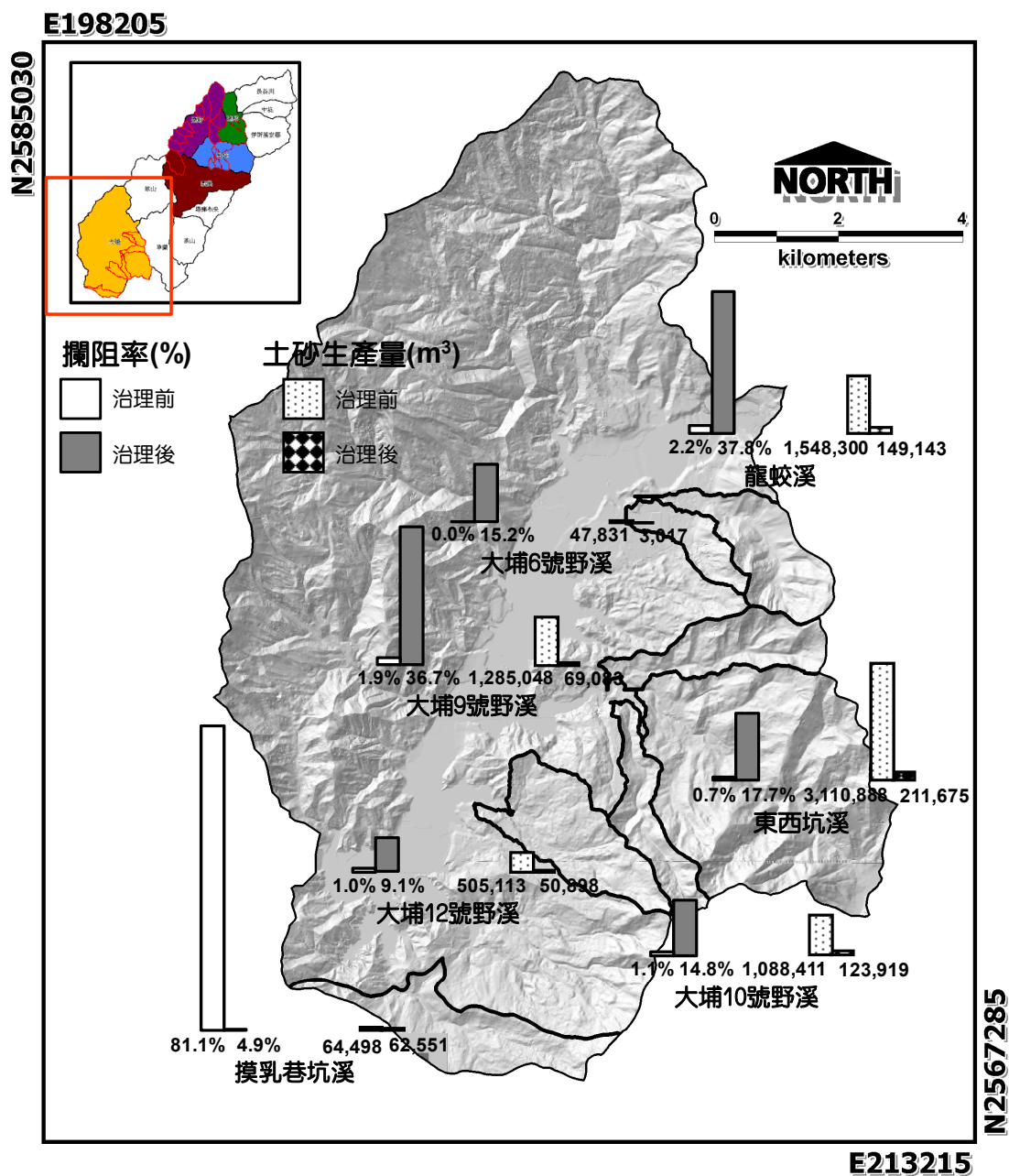
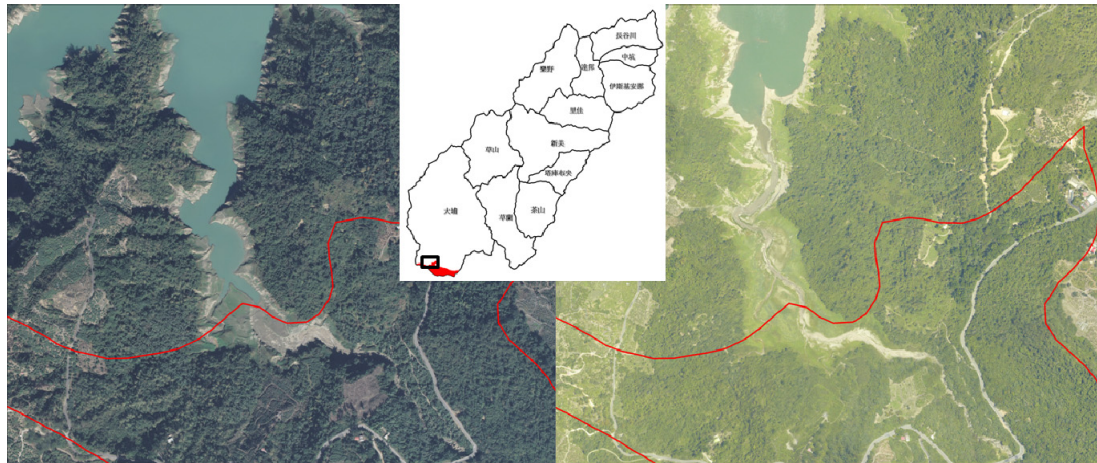
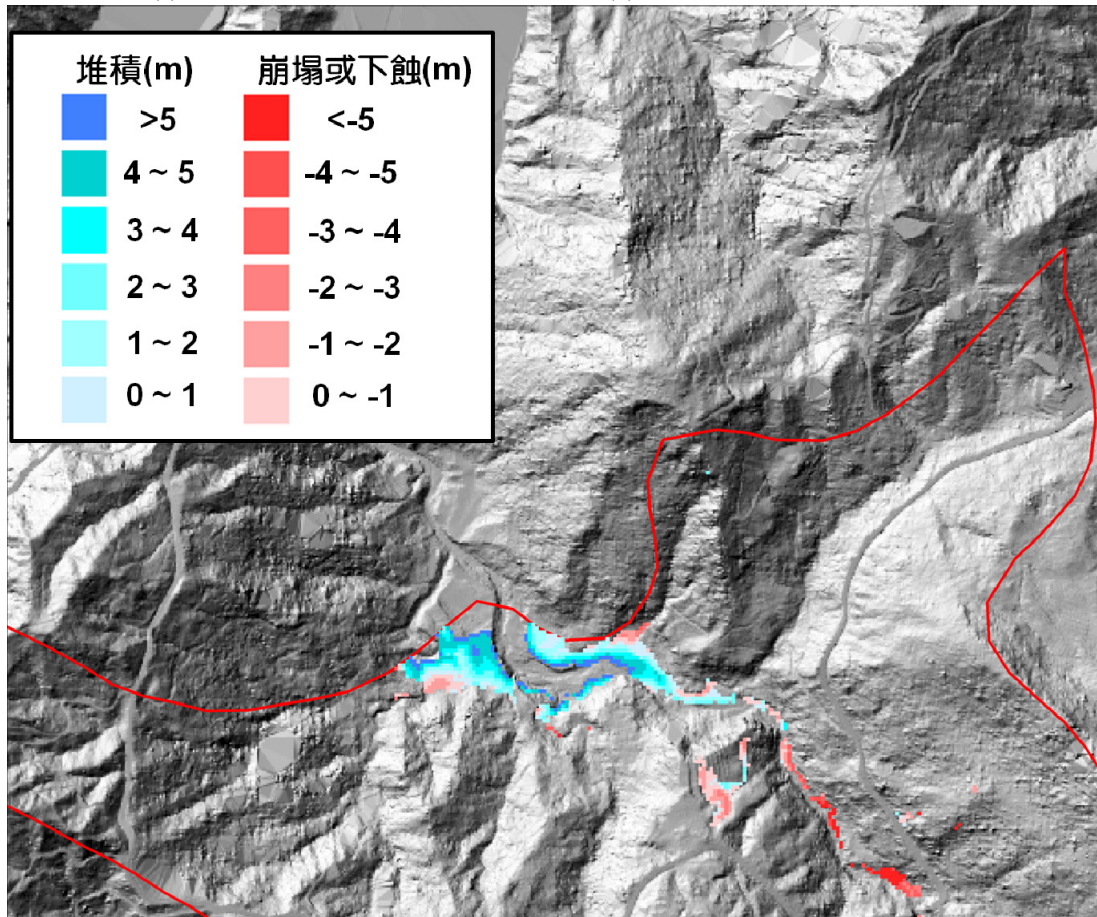


圖 5-4.4 大埔治理分區土砂生產量及攔阻率比較圖



(a)莫拉克颱風後航照

(b)100年6月空載LiDAR施測同步航拍



(c) 97年至99年12月土砂運移分析成果

圖 5-4.5 摸乳巷坑溪出口處

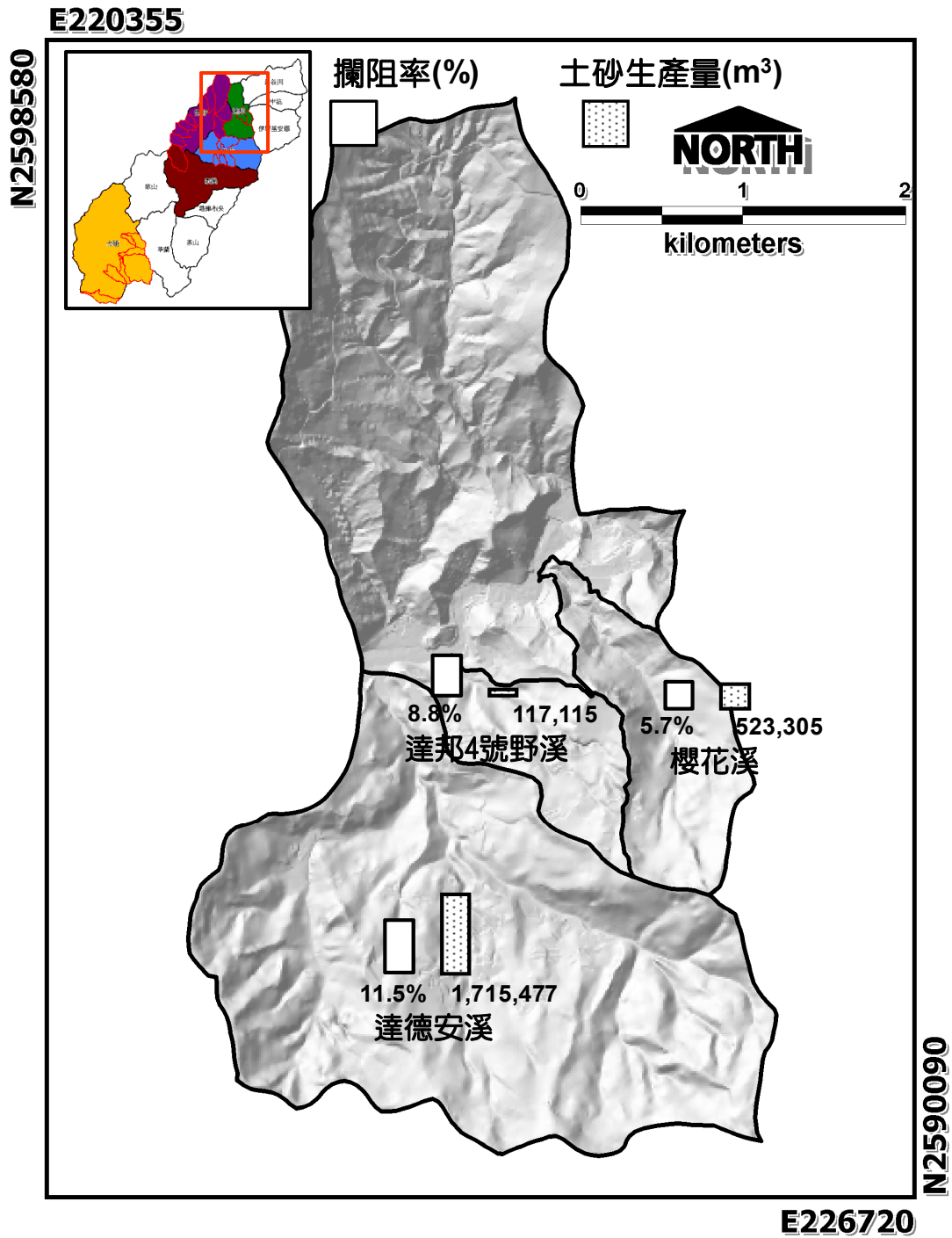


圖 5-4.6 達邦治理分區土砂生產量及攔阻率比較圖

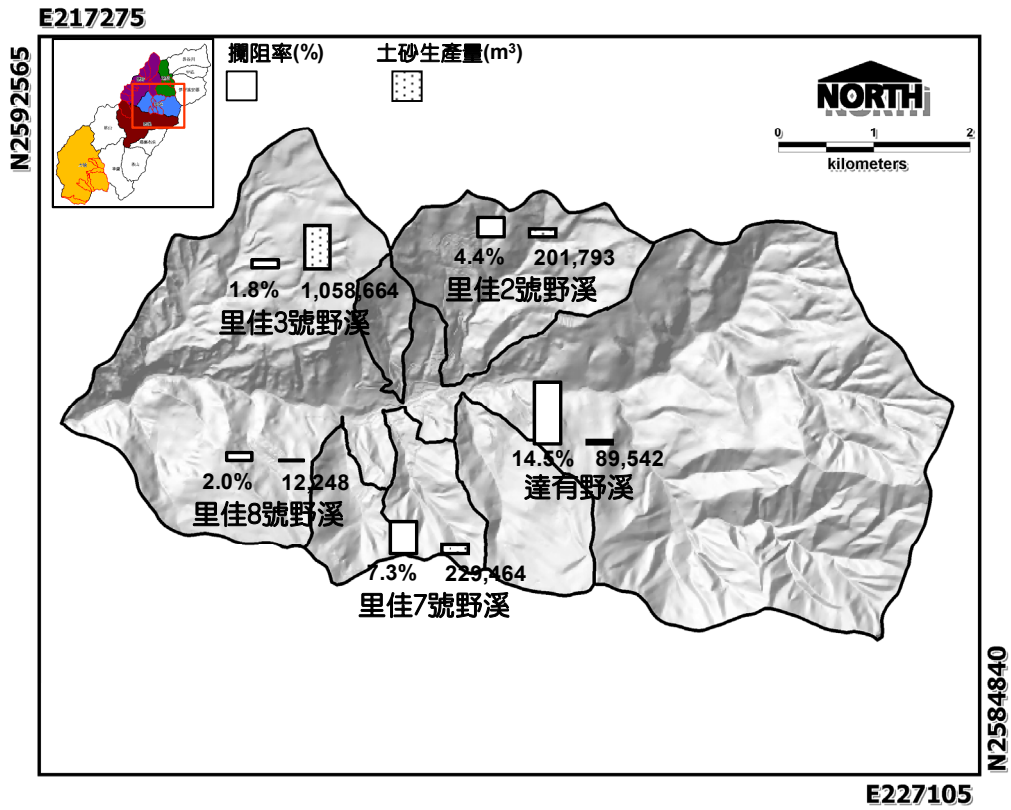


圖 5-4.7 里佳治理分區土砂生產量及攔阻率比較圖

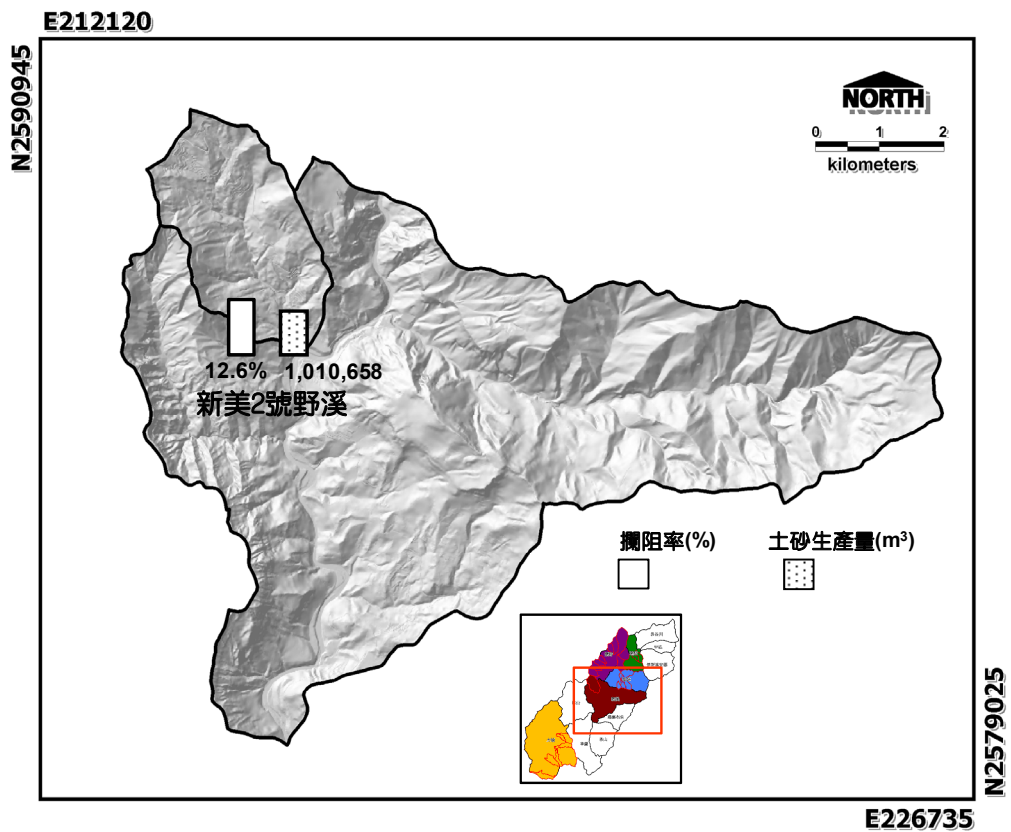


圖 5-4.8 新美治理分區土砂生產量及攔阻率比較圖

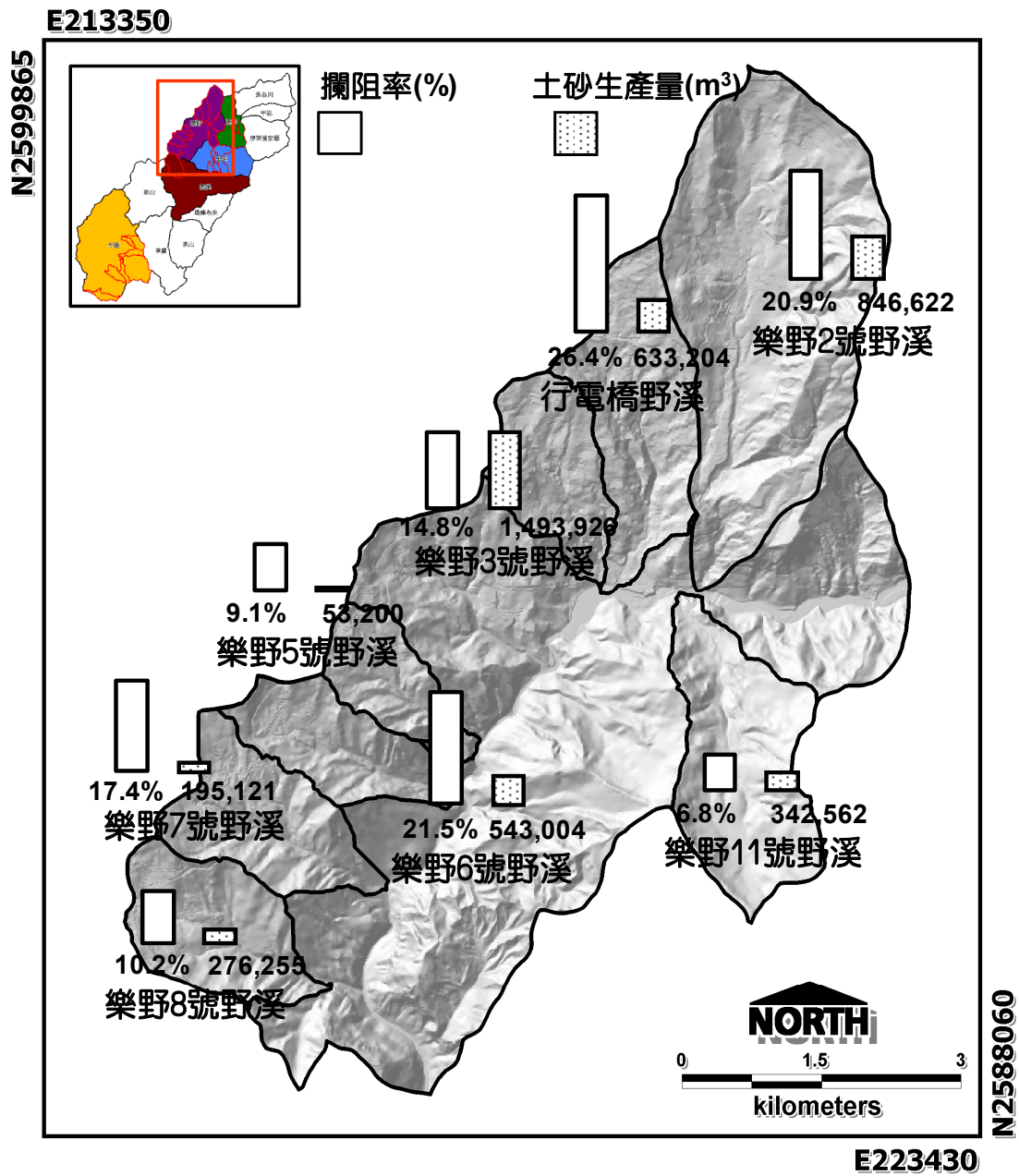


圖 5-4.9 樂野治理分區土砂生產量及攔阻率比較圖



表 5-4.1 空載 LiDAR 土砂運移分析成果表

治理分區	野溪集水區	類型	山坡地				非山坡地				土砂生產量(m ³) A	土砂殘留量(m ³) B	土砂流出量(m ³) A+B	土砂攔阻率(%) B/A
			溪床		坡面		溪床		坡面					
			生產	殘留	生產	殘留	生產	殘留	生產	殘留				
			(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)				
大埔	龍蛟溪	第一期	-253,662	8,187	-391,169	4,610	-181,571	21,703	-721,898	40	-1,548,300	34,540	-1,513,759	2.2
		第二期	-8,673	1,300	-52,004	36,074	-836	3	-87,630	18,996	-149,143	56,373	-92,770	37.8
		總計	-262,335	9,487	-443,173	40,684	-182,407	21,706	-809,528	19,036	-1,697,443	90,913	-1,606,529	5.6
	大埔 6 號野溪	第一期	0	0	-47,831	0	0	0	0	0	-47,831	0	-47,831	0.0
		第二期	0	0	-3,017	459	0	0	0	0	-3,017	459	-2,559	15.2
		總計	0	0	-50,848	459	0	0	0	0	-50,848	459	-50,390	0.9
	大埔 9 號野溪	第一期	-204,096	24	-169,192	0	-121,411	22,902	-790,350	1,579	-1,285,048	24,505	-1,260,543	1.9
		第二期	-9,549	2,016	-8,747	4,856	-18,741	1,546	-32,047	16,914	-69,083	25,332	-43,751	36.7
		總計	-213,645	2,040	-177,939	4,856	-140,152	24,448	-822,397	18,493	-1,354,131	49,837	-1,304,294	3.7
	東西坑溪	第一期	-399,881	6,526	-355,832	3,716	-307,417	1,483	-2,047,759	11,029	-3,110,888	22,754	-3,088,134	0.7
		第二期	-38,421	9,031	-11,736	2,782	-30,875	4,961	-130,643	20,778	-211,675	37,553	-174,123	17.7
		總計	-438,302	15,557	-367,568	6,498	-338,292	6,444	-2,178,402	31,807	-3,322,563	60,307	-3,262,257	1.8
	大埔 10 號野溪	第一期	-214,219	413	-159,706	9	-160,874	1,234	-553,613	9,886	-1,088,411	11,541	-1,076,870	1.1
		第二期	-21,527	4,513	-6,512	7,863	-22,989	1,082	-72,891	4,891	-123,919	18,350	-105,569	14.8
		總計	-235,746	4,926	-166,218	7,872	-183,863	2,316	-626,504	14,777	-1,212,330	29,891	-1,182,439	2.5

註 1：大埔治理分區第一期是 97 年至 99 年 12 月，第二期是 99 年 12 月至 100 年 6 月。總計為第一期與第二期相加值，代表間距為 97 年至 100 年 6 月。

註 2：表中負值表為沖刷。



表 5-4.1(續) 空載 LiDAR 土砂運移分析成果表

治理分區	野溪集水區	類型	山坡地				非山坡地				土砂生產量(m ³) A	土砂殘留量(m ³) B	土砂流出量(m ³) A+B	土砂攔阻率(%) B/A
			溪床		坡面		溪床		坡面					
			生產	殘留	生產	殘留	生產	殘留	生產	殘留				
			(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)				
大埔	大埔 12 號野溪	第一期	-154,655	0	-184,198	307	-2,918	4,558	-163,343	0	-505,113	4,865	-500,248	1.0
		第二期	-18,029	2,518	-13,732	1,118	-1,124	0	-18,013	996	-50,898	4,632	-46,266	9.1
		總計	-172,684	2,518	-197,930	1,425	-4,042	4,558	-181,356	996	-556,011	9,497	-546,514	1.7
	摸乳巷坑溪	第一期	-21,648	0	-12,293	1,340	-2,301	9,949	-28,256	41,030	-64,498	52,319	-12,179	81.1
		第二期	-1,097	1,195	-4,372	1,412	-22,417	343	-34,664	118	-62,551	3,068	-59,483	4.9
		總計	-22,745	1,195	-16,665	2,752	-24,718	10,292	-62,920	41,148	-127,049	55,387	-71,662	43.6

註 1：大埔治理分區第一期是 97 年至 99 年 12 月，第二期是 99 年 12 月至 100 年 6 月。總計為第一期與第二期相加值，代表間距為 97 年至 100 年 6 月。

註 2：表中負值表為沖刷。



表 5-4.1(續) 空載 LiDAR 土砂運移分析成果表

治理分區	野溪集水區	類型	山坡地				非山坡地				土砂生產量(m ³) A	土砂殘留量(m ³) B	土砂流出量(m ³) A+B	土砂攔阻率(%) B/A
			溪床		坡面		溪床		坡面					
		期數	生產	殘留	生產	殘留	生產	殘留	生產	殘留				
			(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)				
達邦	櫻花溪	第一期	-75,541	18,356	-447,764	11,476	0	0	0	0	-523,305	29,832	-493,473	5.7
	達邦 4 號野溪	第一期	-17,272	8,441	-99,843	1,861	0	0	0	0	-117,115	10,302	-106,813	8.8
	達德安溪	第一期	-222,780	84,038	-305,623	19,232	-62,126	31,292	-1,124,950	63,220	-1,715,477	197,781	-1,517,696	11.5
里佳	里佳 2 號野溪	第一期	-24,962	4,821	-130,780	3,295	-9,384	338	-36,667	362	-201,793	8,816	-192,977	4.4
	里佳 3 號野溪	第一期	-154,795	13,124	-322,883	2,940	-34,002	181	-546,984	2,463	-1,058,664	18,708	-1,039,956	1.8
	達有野溪	第一期	-52,574	3,399	-29,023	55	-1,722	7,878	-6,223	1,638	-89,542	12,971	-76,571	14.5
	里佳 7 號野溪	第一期	-33,916	9,876	-88,679	3,791	-898	0	-105,971	3,090	-229,464	16,757	-212,708	7.3
	里佳 8 號野溪	第一期	-974	80	-11,274	171	0	0	0	0	-12,248	250	-11,997	2.0
樂野	樂野 2 號野溪	第一期	-90,576	99,559	-102,871	36,778	-32,759	3,346	-620,417	36,932	-846,622	176,615	-670,007	20.9
	行電橋野溪	第一期	-24,662	83,545	-608,541	83,719	0	0	0	0	-633,204	167,263	-465,940	26.4
	樂野 3 號野溪	第一期	-105,565	46,857	-1,172,242	139,008	0	0	-216,119	35,507	-1,493,926	221,372	-1,272,554	14.8
	樂野 5 號野溪	第一期	0	0	-2,094	547	-16,885	3,272	-34,222	1,016	-53,200	4,835	-48,365	9.1
	樂野 6 號野溪	第一期	-10,852	8,781	-334,091	84,042	-69,838	3,585	-128,223	20,344	-543,004	116,752	-426,252	21.5
	樂野 7 號野溪	第一期	-296	836	-1,628	0	-26,379	13,640	-166,818	19,517	-195,121	33,993	-161,128	17.4
	樂野 8 號野溪	第一期	-3,178	2,636	-57,207	1,940	-38,513	16,299	-177,357	7,421	-276,255	28,296	-247,959	10.2
	樂野 11 號野溪	第一期	-57,677	22,390	-133,231	347	-1,011	0	-150,643	555	-342,562	23,292	-319,269	6.8
新美	新美 2 號野溪	第一期	-88,277	51,494	-725,472	37,893	-23,534	15,125	-173,375	22,846	-1,010,658	127,357	-883,301	12.6

註 1：除大埔治理分區外，其他治理分區的第一期為 97 年至 100 年 6 月。

註 2：表中負值表為沖刷。

5-5 無人載具拍攝

在進行現勘調查時，常因崩塌地或治理區域位於無道路可通達之處或地形因素，而無法取得較佳視角之拍攝照片以進行整體狀況評估。但藉由具有機動力強、時效性快、經費較廉、及較寬鬆天氣條件即可操作的優點等特性之無人載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)進行空中拍攝，可取得災害地區即時、清晰、全面之中低空照片，並作為後續災害分析與治理參考之用(Bendea *et al.*, 2008)。

鑑此，本計畫自費並參考簡榮興等人(2010)所提出之土砂災害調查與航拍作業流程(如圖 5-5.1)，於曾文水庫於莫拉克災後投入較多經費且已於近期完成治理工程之樂野大崩塌進行乙次 UAV 拍攝，其地理位置及莫拉克颱風後現況照片如圖 5-5.2 及圖 5-5.3。實施拍攝工作前，已預先蒐集地形高程、路網、航照影像與衛星影像等相關的基本資料，並將其整合於 GIS 軟體中，以提供 UAV 拍攝之航線規劃與拍攝重點參考，業於 100 年 6 月 14 日完成拍攝工作(如圖 5-5.4)。以下分述治理現地評析及三維視覺模擬，詳見後續各小節。

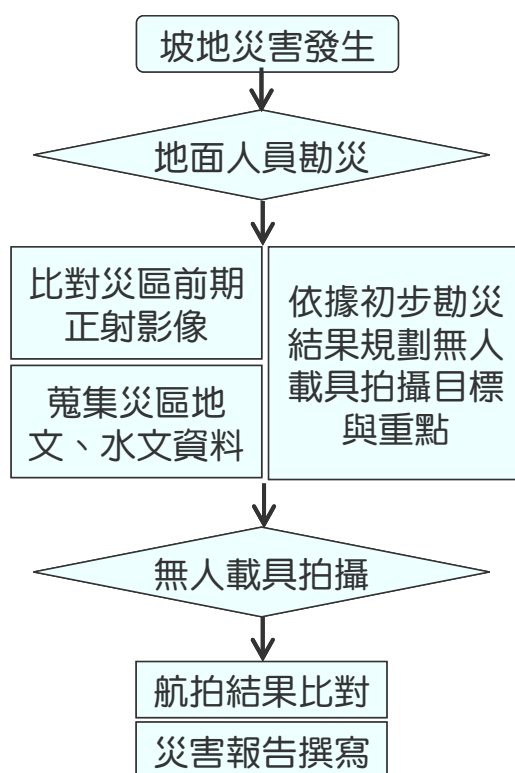


圖 5-5.1 土砂災害調查與航拍作業流程圖 (摘自 簡榮興等人，2010)

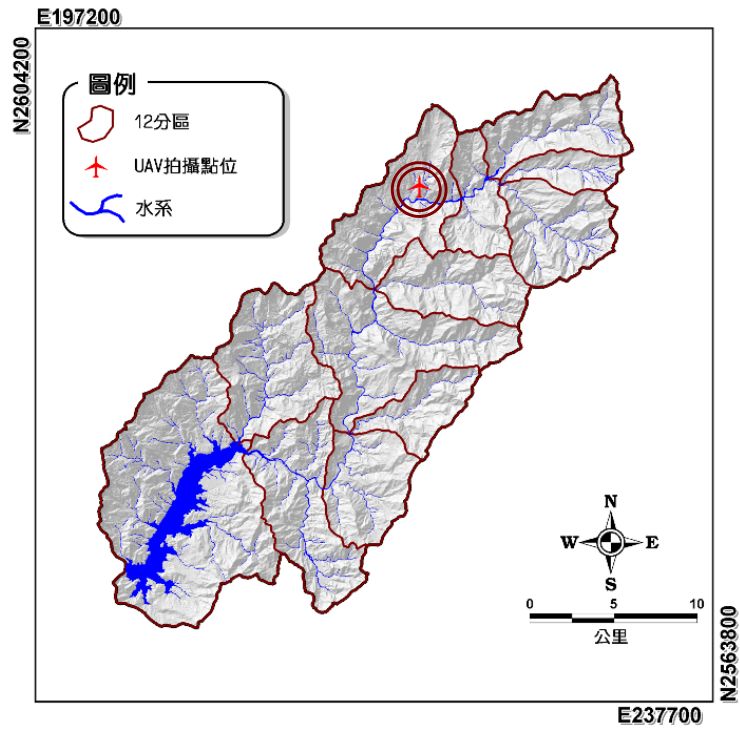


圖 5-5.2 本計畫無人載具拍攝地點地理位置



(a) 莫拉克災後空拍：崩塌面積大且道路遭受阻斷
(摘自 水保局，2010^a)



(b) 本計畫現勘照片

(治理工程接近完成；拍攝日期：100年3月28日)

圖 5-5.3 本計畫無人載具拍攝地點莫拉克後現況



(拍攝日期：100 年 6 月 14 日)

圖 5-5.4 本計畫無人載具拍攝成果示意圖

5-5-1 治理現況評析

本節根據樂野治理分區內樂野野溪周圍拍攝成果及現場治理現況，進行彙整說明並展繪拍攝點位空間分布圖，以瞭解河道防砂治理設施及坡面治理區域土砂控制及環境復育情形。有關樂野地區拍攝區域中低空拍攝照片及相對應位置圖如圖 5-5.5 及圖 5-5.6 所示。以下大致將拍攝成果拆成「河道治理狀況」、「坡面治理狀況」以及「鄰近保全對象」等三個部份分別說明，無人載具現場拍攝相關成果彙整詳見附錄六；茲整理現場重要觀察結果，說明如后。

一、河道治理狀況

拍攝區河道內計完成施作 15 座橫向防砂工程與砌石護岸，用以攔阻土砂及幫助溪水導流(如圖 5-5.6 照片 1)。本處河道治理設施主要集中於溪流中上游河段，藉由現場及中低空拍攝照片發現，各座壩體結構屬新建構造物，且此溪流於防砂設施結構體大致完成後並無較明顯土砂災害發生，壩體外觀堪稱完整，且無明顯毀壞情形，各防砂壩後方河床仍具餘裕囚砂



空間及調節溪床坡度與攔阻土砂之功能(如圖 5-5.6 照片 2)。此段河道源頭處存在乙處大型崩塌，仍有零星崩落土砂直接掉落於此河段，形成溪床堆積物，目前治理區域河道內土石材料多以細顆粒堆積，此處材料粒徑大小相對於河道其他區位，粒徑尺寸較小且較破碎。

綜以上述，除源頭處崩塌處河段流心變動會較大外，已治理區域河道流心堪稱穩定，而各座防砂壩因砂空間仍充足，可供土石停淤及調節溪床坡度。

二、坡面治理狀況

樂野野溪中、上游集水區於上游源頭處可見兩處大範圍崩塌裸露面(如圖 5-5.6 照片 3)，兩處坡面周圍植生係以竹林為主，目前崩塌處左側已由水保局完成三期崩塌地整治工程，包含鋪網、噴植草種與縱、橫向截排水工法進行坡面整治(如圖 5-5.6 照片 4 及 5)，整治完成之坡面業已完成邊坡植生復育，目前該處坡頂與坡腹植生復育狀況良好，原本裸露區域之土砂均逐漸獲得保護與控制；四至五期崩塌地整治工程施工中。而右側崩塌於莫拉克颱風後坡面存大量崩積土方及砂岩類之塊石，判斷蘊藏大量土砂(如圖 5-5.6 照片 6 及 7)。現階段已有兩期崩塌地整治工程進駐，整治內容包含固床工、防砂壩、掛網植生等，且第三期崩塌地治理工程亦已核定目前發包中。由於源頭處崩塌坡面較為陡峭，目前植生復育速度較為緩慢，建議持續觀察源頭處坡面後續發展。

三、鄰近保全對象

鄰近保全對象為兩崩塌地之間住戶、省道台 18 線以及嘉 169 線，另外，此兩道路為通往樂野聚落之主要幹道，影響居民出入通行甚鉅。上述保全對象均位於地勢較高處，其受災風險性相對較低(如圖 5-5.6 照片 8 及 9)。而崩塌下游處因坡面蘊含豐富土砂量，於災害發生時下游道路因易受土砂直接衝擊，其受災風險性相對較高。

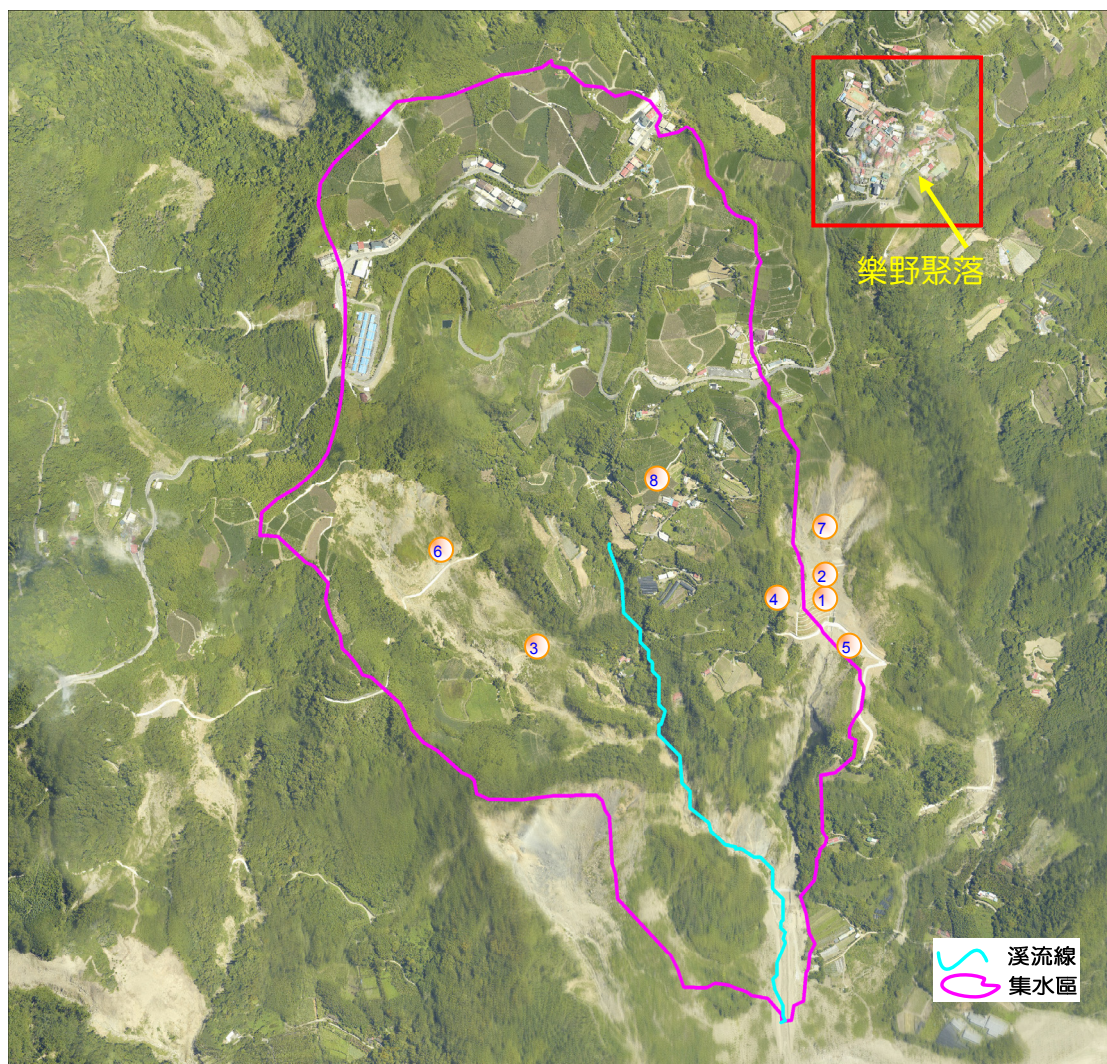


圖 5-5.5 中低空拍攝照片位置圖

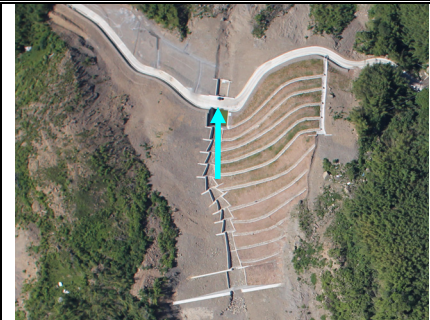
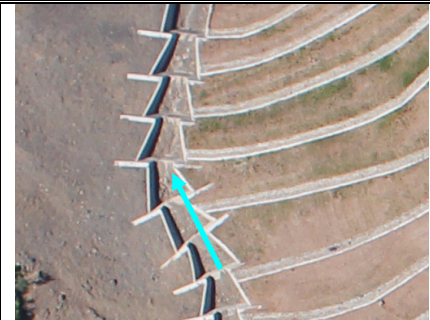

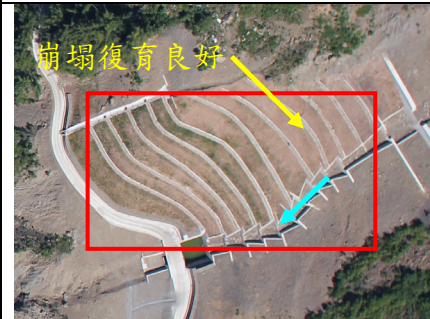

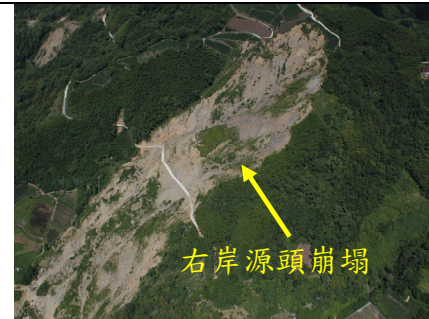
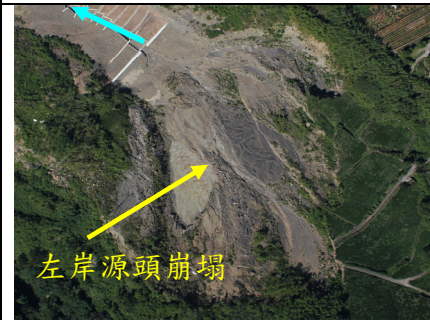

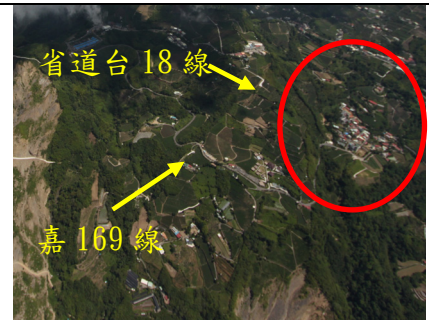
		
1.目前拍攝區河道內計完成15座橫向防砂工程與砌石護岸。(219441,2594983)	2.河道內15座防砂設施，其壩體後方均仍具餘裕囚砂空間。(219450,2594929)	3.樂野野溪溪流左右兩岸各可見乙處崩塌坡面，其崩塌面積廣大。(218996,2594996)
		
4.源頭處左岸崩塌坡面右趾部，可見防砂設施構築及坡面植生復育，以使邊坡穩定。(219374,2594965)	5.左岸崩塌左半側坡面坡面目前以鋪網植生復育積極整治中。(219513,2894875)	6.右岸崩塌面緊臨曾文溪，土石易直接進入河道內。(218518,2595064)
		
7.溪流左岸崩塌坡冠處因地勢陡峭且施工不易，裸露狀況明顯。(219450,2595235)	8.鄰近保全對象為兩崩塌地之間住戶。(219099,2595231)	9.鄰近道路為省道台18線以及嘉169線，其受災風險性較低。(218813,2596060)

圖 5-5.6 中低空拍攝照片 (坐標系統為 TWD97；藍色箭號代表溪流方向)



5-5-2 三維視覺模擬

本計畫除以能突破地形環境限制之 UAV 進行中低空航拍獲取豐富「二維」影像外，並嘗試應用非常規攝影量測建立所拍攝影像區域之「三維」視覺模擬資料。蕭震洋等人(2011)曾以國道 3 號基隆汐止段 3.1K 崩塌事件為例，使用非常規攝影量測方法製作崩塌土方清運前後兩期現地立體模型，並以 GPS 測量為地真資料(Ground True)進行高程檢核，其誤差介於 11 至 16 公分間，且推估崩塌清運土方量與交通部以實際工程車外運土方量統計公布數據誤差約計 2.5%，尚屬合理應用範圍內。

非常規攝影量測採用自標定技術(Self-Calibration)，首先，對目標物進行多角度拍攝，再以 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)進行特徵點提取及影像匹配；接著，重複以 SfM(Structure from motion)獲得相機參數，並應用多視幾何(Multiple View Geometry)方式獲取帶有 RGB 色碼之三維點雲資料，再藉由參考控制點將三維點雲資料由相對區域坐標轉換 TWD97 坐標及橢球高，其模擬處理流程如圖 5-5.7。

本計畫以 UAV 拍攝樂野崩塌地，三維視覺模擬範圍約 2.5 平方公里且測區高程約由 700 公尺到 1,300 公尺，共於地面布設 23 個參考控制點(如表 5-5.1、圖 5-5.8 及圖 5-5.9)。對於坐標轉換方面，汪磊(2002)曾使用非測量相機進行三維重建時，研究發現控制參考點數量需符合解算條件且最好能均布於整個測區，惟過多參考控制點對於提升精度有限；另於誤差比對上，Li(1991)曾提出比對點數量 n 與比較誤差 E_r 之關係式，如下：

$$E_r = \frac{1}{\sqrt{2(n-1)}} \times 100\% \quad (5-5.1)$$

透過上式，即可計算檢核之可信度 R ，如下式：

$$R = 1 - E_r \quad (5-5.2)$$

綜以上述，本計畫於使用高精度 GPS 進行共 23 地面控制點測量(如圖 5-5.9)，並使用其中 15 個點進行坐標轉換，餘 8 個點進行誤差比對，除可滿足本計畫使用 Bursa-Wolf 七參數坐標轉換方式最低 3 個參考點需求外，



可信度也超過 73.3%，其高程誤差從 0.14 公尺到 1.09 公尺，整理列於表 5-5.2 中。圖 5-5.10 為樂野崩塌地三維視覺模擬成果示意圖，共產製 3,965,453 個帶有坐標(TWD97_X、TWD97_Y、橢球高)及三原色碼(R、G、B)之點雲資料，平均點雲密度約為 1.6 點/m²。其三維視覺模擬成果應已足以用於估算坡面崩塌此類地形劇烈變化區域之土砂變化量；未來若發生大型土砂災害，在航拍、空載或地面 LiDAR 等標準測量儀器尚無法進行測量前，除可應用 UAV 蒐集二維照片圖資，進行受災區域及災情判讀外，另可同時產製三維地形資料，可初步概略估算坡面崩塌等土砂移動量體，應有助於及時防災決策。

表 5-5.1 高精度 GPS 坐標測量成果

編號	TWD97_X	TWD97_Y	橢球高(m)	GPS 測量誤差推估值(m)	用途
1	218408.0185	2595011.431	1161.2365	0.0219	坐標轉換
2	218573.2683	2595106.051	1157.3967	0.0259	
3	218978.2632	2595508.394	1160.8619	0.0354	
4	219420.2359	2595392.961	1122.8015	0.0493	
5	219180.2545	2595332.111	1117.2194	0.0324	
6	219191.1046	2595297.911	1107.9886	0.0513	
7	218907.6638	2595288.616	1078.0616	0.0415	
8	219000.6394	2595096.114	1055.0021	0.0372	
9	218785.91	2594902.943	1017.5962	0.0199	
10	219197.3497	2594874.207	964.7141	0.0241	
11	219434.4259	2594949.709	961.1752	0.0263	
12	219439.2467	2594924.471	953.6407	0.0193	
13	219813.7744	2594550.551	791.639	0.0269	
14	219458.092	2594606.382	895.1725	0.0326	
15	219507.3428	2594598.328	901.4244	0.0218	
16	219210.868	2595490.939	1151.6709	0.0373	誤差比對
17	219217.205	2595494.939	1151.3651	0.0296	
18	219279.7799	2595402.835	1137.0688	0.025	
19	219442.1301	2595357.573	1114.2937	0.0361	
20	218998.9907	2595089.823	1053.6099	0.0307	
21	218680.5839	2594817.429	1034.0262	0.0276	
22	219356.7763	2594906.539	961.5782	0.0268	
23	219823.1504	2594548.577	791.9362	0.0361	

表 5-5.2 高程誤差比對成果

編號	GPS 測量值			坐標轉換後值			高程差絕對值(m) a-b
	TWD97_X	TWD97_Y	a.橢球高(m)	TWD97_X	TWD97_Y	b.橢球高(m)	
16	219210.8680	2595490.939	1151.6709	219212.06	2595491.25	1151.81	0.1391
17	219217.2050	2595494.939	1151.3651	219216.67	2595493.79	1152.46	1.0949
18	219279.7799	2595402.835	1137.0688	219279.89	2595401.39	1137.69	0.6212
19	219442.1301	2595357.573	1114.2937	219440.03	2595355.94	1114.84	0.5463
20	218998.9907	2595089.823	1053.6099	219000.00	2595091.04	1053.96	0.3501
21	218680.5839	2594817.429	1034.0262	218681.09	2594816.93	1034.97	0.9438
22	219356.7763	2594906.539	961.5782	219358.21	2594907.48	960.73	0.8482
23	219823.1504	2594548.577	791.9362	219823.43	2594547.70	791.51	0.4262

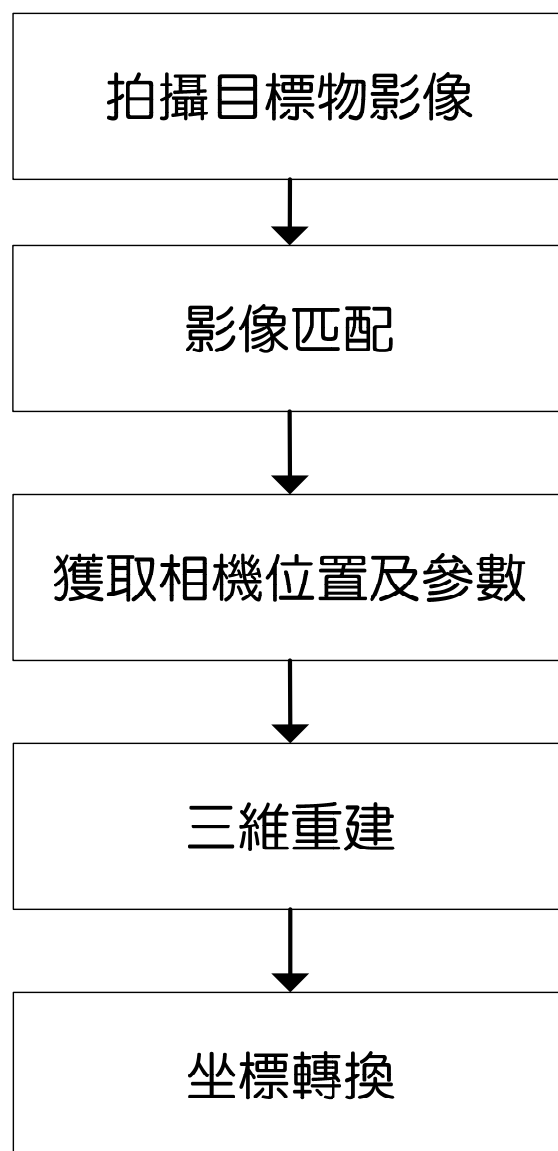


圖 5-5.7 三維視覺模擬處理流程圖

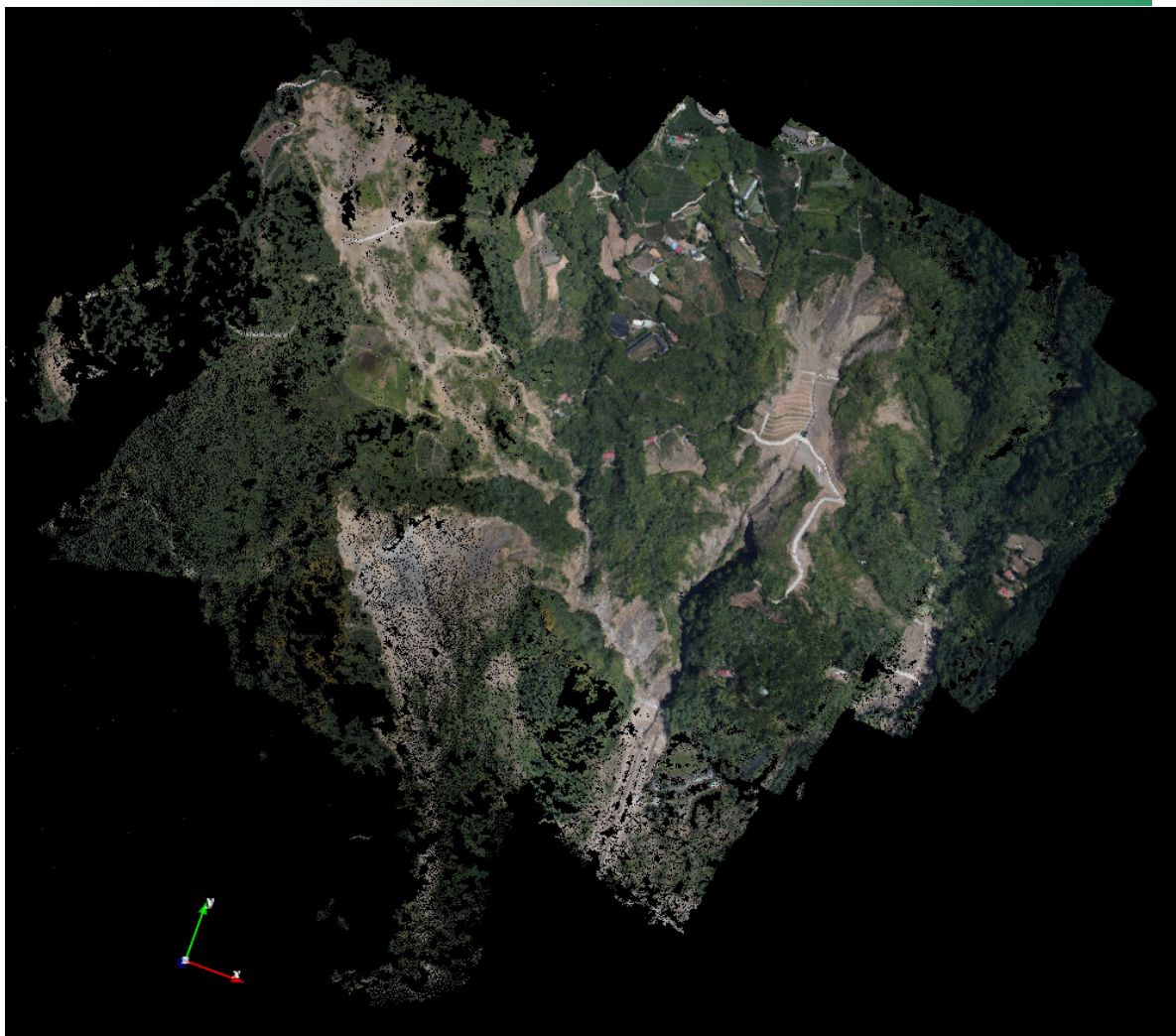


圖 5-5.8 三維視覺模擬參考控制點分布圖

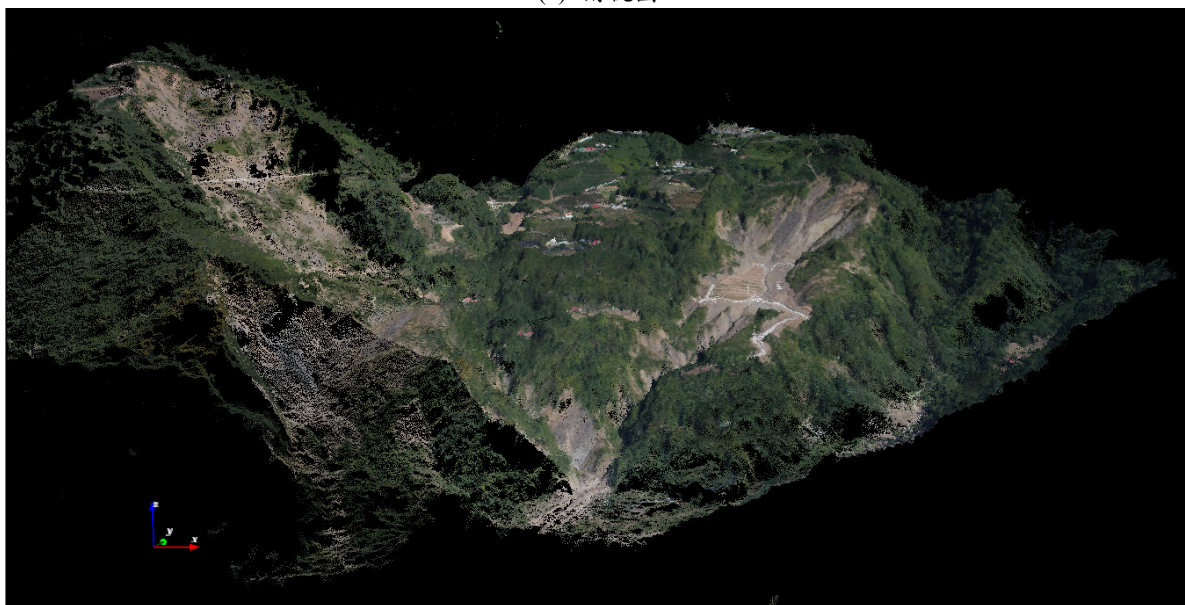
(底圖拍攝日期：98/8/15 及 98/8/28)



圖 5-5.9 參考控制點編號 12 之佈設位置示意圖



(a) 俯視圖



(b) 側視圖

圖 5-5.10 樂野大崩塌三維視覺模擬成果示意圖(黑色區域為無點雲地區)



5-6 本章小結

本計畫應用遙測影像多元尺度監測手段，分析重大土砂災害後之衛星影像崩塌地變異研究，接以透過空載 LiDAR 方式製作集水區之數值高程模型，並與蒐集之歷史高精度數值高程模型完成比較分析工作；最後，再以無人載具蒐集中低空照片，製作電腦三維視覺模擬影片。相關分析成果條列說明如後：

1. 本計畫完成建置曾文水庫集水區近 10 年內共計 9 場災害事件崩塌地判釋成果，並新增購置與判釋 100 年南瑪都颱風災害事件前、後之衛星影像崩塌地變異情況，供以進行集水區土砂崩塌變遷歷程。
2. 本計畫完成歷史及本期(100 年 6 月)空載 LiDAR 資料分析比對工作。經分析成果顯示，大埔治理分區於治理後，境內子集水區之土砂生產量皆已下降，降低為治理前土砂總產量之 5%至 97%。另就土砂攔阻率而言，集水區治理後大致優於治理前，現階段土砂攔阻率介於 4.9%至 37.8%，平均可達 19.5%；惟摸乳坑溪於莫拉克颱風後仍堆積大量砂於溪床出口處，故僅治理後攔阻率高於治理前，又該土砂堆積區緊鄰曾文水庫庫區，故治理較屬困難，後續需注意該區域土砂生產量變化，以適時進行土砂防治工作。
3. 另達邦、里佳、樂野及新美等四個治理分區，因現階段尚無 98 年莫拉克後之地形資料，故本計畫僅能分析「97 年至 100 年 6 月」乙期土砂運移變化。分析顯示，此四個治理分區中，土砂生產量及土砂流出量前三名為達邦治理分區中達德安溪、樂野治理分區中樂野 3 號野溪及里佳治理分區中里佳 3 號野溪，其土砂生產量皆超過 100 萬 m^3 ，至少有 85.2% 土砂量流出。囿於現階段資料不足，無法進行治理前後之比較，故本計畫建議未來需持續蒐集，以利進行較完整之治理前後比較及成效追蹤。
4. 本計畫針對樂野治理分區內，橫跨樂野 3 號野溪以及行電橋野溪等兩集水區之樂野大崩塌，進行乙期無人載具拍攝(UAV)，並製作三維視覺模擬，相關成果說明如下：

(1) 河道治理狀況



現階段樂野大崩塌右半部區域已有 15 座橫向防砂構造與砌石護岸等治理工程接近竣工，各防砂設施因砂空間仍充足，且明顯毀壞情形，可供土石停淤及調節溪床坡度。

(2) 坡面治理狀況

目前樂野大崩塌左岸處崩塌右半部已由水保局整治完成，坡面植生穩定復育中；而崩塌坡址左半側坡面目前正積極以鋪網、噴植草種與縱、橫向截排水工法進行坡面整治。另由於樂野大崩塌源頭處崩塌坡面較為陡峭，目前植生復育速度較為緩慢，建議持續觀察源頭處坡面後續發展。

(3) 鄰近保全對象

鄰近保全對象為兩崩塌地之間住戶、省道台 18 線以及嘉 169 線，另外，此兩道路為通往樂野聚落之主要幹道，影響居民出入通行甚高；距崩塌下游處因坡面蘊含豐富土砂量，於災害發生時下游道路因易受土砂直接衝擊，其受災風險性相對較高。

(4) 樂野大崩塌三維視覺模擬

本計畫完成樂野大崩塌之三維視覺模擬成果，未來若發生大型土砂災害，在航拍、空載或地面 LiDAR 等標準測量儀器尚無法進行測量前，除可應用 UAV 蒐集二維照片圖資，進行受災區域及災情判讀外，另可同時產製三維地形資料，迅速概略估算坡面崩塌等土砂移動量體，有助於及時防災決策。