

空載光達高精度掃描技術評估 石門水庫集水區整治成效

林伯勳* 蕭震洋** 許振崑*** 冀樹勇****

摘 要

由於石門水庫淤積日趨嚴重，各級權責單位依據「石門水庫及其集水區整治特別條例」，積極辦理上游集水區保育治理工作，為確保石門水庫營運功能、上游集水區水域環境之保育及有效提升其供水能力，其中整治計畫係以防砂量及整治率作為績效目標。依此，本文透過空載光達高精度掃描技術，針對第一階段整治工程之重點治理區域，進行全面性且重複性施測，建置多期數值高程模型，藉由工程完工前後比較分析計算單一集水區土砂產量及囚砂量，據以具體量化集水區土砂攔阻率，逐年評析並檢視是否有達其整治預期目標的，以突顯集水區保育治理之實值效益。

關鍵字：石門水庫、防砂量、整治率、土砂攔阻

一、前 言

依據民國 95 年「石門水庫及其集水區整治特別條例」，於石門水庫及其集水區進行整治復育計畫，相關單位經評估後提出多目標之治理方案，整治規劃重點主要針對災害治理、水土保持監測與管理、山坡地與生態環境資源保育為策略，並以降低原水濁度、水庫延壽及提高整治率為目標。整治計畫共分成兩階段進行，第一階段施行期間為民國 95 年至 98 年（原為民國 95 年至 97 年，於民國 97 年 8 月通過第一階段修訂，將第一階段展延並修正為民國 95 年至 98 年），其工程執行上主要以崩塌裸露地治理及設置防砂設施為主，第二階段施行期間為民國 98 年至 100 年，工程執行上主要以植生復育為主，其中描述整治計畫中兩大績效目標分別為（1）總體目

標：防砂量；（2）個體目標：整治率。各階段需達至績效目標整理如表 1 所示。

表 1 石門水庫整治計畫績效目標

目標別	第一階段 (95 年至 98 年)	第二階段 (98 年至 100 年)
防砂量	1,050 萬方	828 萬方
整治率	54%	62%

為達前述目標前，須於整治工程進駐前、中、後，辦理各式土砂監測工作，俾利有效掌握集水區地形貌變化及災害歷程、土砂產砂區、土砂堆積及沖蝕區、河道囚砂量及土砂遞移率，以上皆屬時效性之土砂分析重要資訊，應按時程逐步完成蒐整，得以有效反應相關措施對於集水區土砂安定之貢獻程度。因此，若能分期、分年、分區及分級逐步達成全面集水區長期監測計畫標

* 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長

** 中興工程顧問社防災科技研究中心助理研究員

*** 中興工程顧問社防災科技研究中心助理工程師

**** 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心經理

的，以有效估算土砂產量，研擬土砂抑制條件策略，進而合理並實質量化集水區整治成效。水利署近期更提出以「五水」構置「石門永續經營藍圖」，如圖 1 所示。圖中顯示五大目標包含（1）利水：供水穩定；（2）治水：水庫安全；（3）活水：庫容維持；（4）保水：生態保育；（5）親水：水源維護。此藍圖譜繪出石門水庫永續發展重要方針、經營理念以及未來發展方向。

爰此，本文首先說明集水區土砂產量評估方式、土砂攔阻及遞移相關概念以及集水區評估指標；再者，利用多時期空載光達高精度數值高程模型，因其解析度、精確度以及濾除遮蔽影響較為優越，故配合同步施測航照清楚判釋野溪支流及蝕溝等細緻地形，利於推估土砂產量；最後，透過前後期地形高程比較相減，逐次分析各期階段之集水區土砂攔阻率，用以評析保育治理工程對於集水區整治效益。

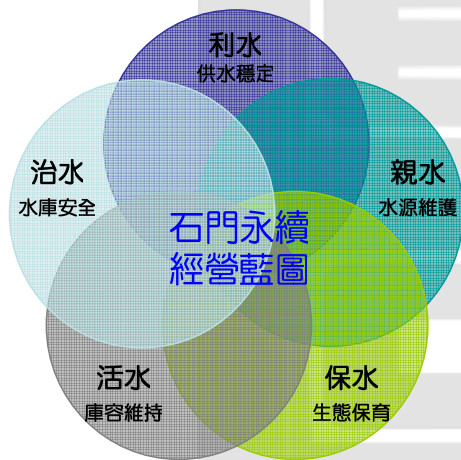


圖 1 石門水庫集水區永續經營藍圖暫定架構

二、文獻回顧

欲有效降低水庫高濁度現象及消弭供水危機，提升水庫水源涵養能力及減少庫淤，則需明確掌握集水區土砂供應來源及其量體，才得以解決集水區土砂災害演變次生問題，俾利妥善分配保育治理經費及進行優先整治方案擬定。一般而言，集水區內土砂生產來源係指坡面及河道土砂

經各種外力作用而搬離原有位置之總量，包括坡面沖蝕（坡面土壤流失量）、崩塌（包含臨溪或離溪崩塌）及河道輸砂量（含土石流）；其中汛期常以崩塌產量為主要供砂來源。實務上，為整合集水區土砂生產、土砂遞移以及土砂堆積等可透過土砂收支模式（Sediment Budget）概念，分析並檢討集水區土砂來源、輸送與河道沖淤行為。

（一）土砂產量評估

集水區土砂生產來源主要由兩種構成，一種為伴隨降雨隨機產出之土壤沖蝕量，另一種為因降雨或地震等擾動產生之坡面崩塌量。土壤沖蝕量或坡面崩塌量因豪雨誘發及地表逕流帶入河道，或經其他介質流入下游或進入水庫內，造成水庫濁度及淤積量升高，影響水庫供水能力及水庫容量（王晉倫，2010）。

水土保持技術規範（2003）第二章第五節「泥砂生產調查」之第 38 條規定：「崩塌量調查方法，應由實測或部分配合推估實施之。新增崩塌地得利用實際勘查或利用航照圖判斷，亦得利用衛星影像分析，以進行崩塌量之調查」。依據上述而言，目前估算崩塌量模式可分為小尺度地區邊坡及大尺度集水區邊坡崩塌量估算等兩種模式。於小尺度地區邊坡，崩塌量估算可利用傳統地形測量至現地量測堆積面積及高程，以估算現場之崩塌地堆積體積，但傳統地形測量過於耗費人力且耗時，無法提供即時數據；另大尺度集水區方面，陳信雄（1995）則建議大尺度集水區崩塌地土石崩塌量之推估，可利用航照與衛星遙測技術判釋崩塌地變遷（如新增崩塌地、復育地，參見圖 2），故集水區之邊坡崩塌量估算可藉由不同時間歷史衛星影像判釋之崩塌地、再透過高精度雷射掃描儀產製數值地形或現地勘查等，將所獲得總崩塌面積乘上平均崩塌土壤厚度或利用數學積分計算，即可獲得單場或特定時期之崩塌量。

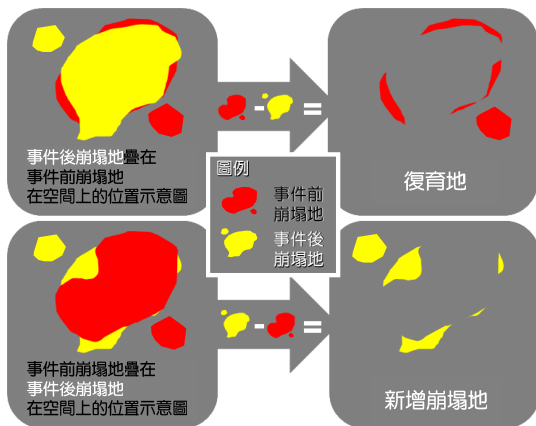


圖 2 新增崩塌地與崩塌復育地示意圖

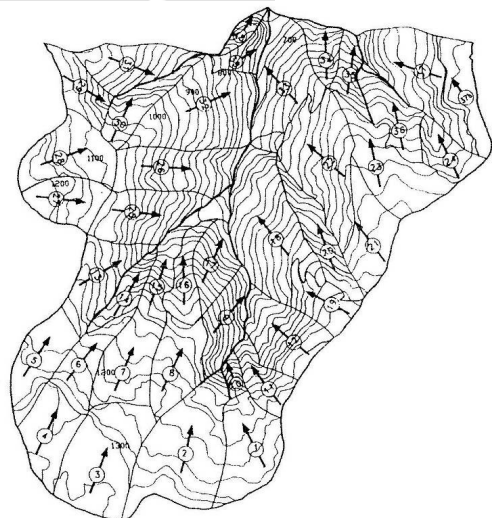
另土壤沖蝕量則常以經驗法進行估算，以美國農業部（United State Department of Agriculture, USDA）之發展最為多元化，如 USLE、EPIC、WEPP、MUSLE、RUSLE、SWRRBWQ、CREAMS、AGNPS；國內學者陳樹群等人（1998）發展土壤沖蝕指標 SEIM（Soil Erosion Index Model）模式，將 USLE 影響參數轉換成指數方式，並以指數總值配合迴歸公式求取土壤沖蝕量。近期林俐玲（2008）將土壤沖蝕特性結合土壤理化性質，透過土壤結構與滲透性參數，修正 USLE 公式，並製作相關簡表，以方便計算。陳樹群等人（2009）選定較適合台灣地區使用之因子，以發展台灣通用土壤流失公式 TUSLE，以估算台灣地區土壤沖蝕量；有關化學元素法方面，Yang *et al.*（1998）及李建堂（1999）利用銻 137 元素之空間分布，建立土壤歷年沖蝕率曲線，據以估算土壤沖蝕量；謝正倫（2008）利用鐳元素追蹤石門水庫上游可能造成濁水之懸浮土砂移動過程，以了解進入庫區之土砂量多寡及其發生位置之空間分布（許振崑等人，2009；梁惠儀等人，2010；林伯勳等人，2010）。

（二）土砂遞移

一般而言，集水區之泥砂來源，主要為崩塌與坡地沖蝕兩類為產砂主因，且透過沖蝕量及崩塌量之估算，配合土砂遞移率（Sediment Delivery

Ratio, SDR）進行修正與調整，即可確切推求集水區之泥砂產量。土砂遞移過程中，若於河道存有防砂設施則大顆粒材料將被攔阻，剩餘部分則被水流挾帶並遞移至下游，再合流至主河道。根據上述土砂生產過程，上游土砂總產量與下游堆積量之相對關係，即稱為土砂遞移率。

集水區土砂遞移率在過去研究中，並無細分並釐清崩塌或沖蝕率所佔比例，亦即無法探討河道及坡面上因不同運動機制，所引致之土砂遞移變化差異。分析手法常以某一集水點或將原集水區劃分成數個子集水區（如圖 3），形成涵蓋坡面及溪流之網狀系統（Hillslope-Stream Network System），分別計算土砂流出量，並與上游土砂生產量相互比較，用以估算整體集水區土砂遞移率。土砂遞移率因土壤類型及粒徑大小、排水狀況、河道形態、植生覆蓋程度、暴雨類型及堆積泥砂再遞移等種種因素，以及時間因素造成地形貌變化，而土砂遞移率亦隨之不同。此外，不同土砂運動區位，亦具不同遞移效果。Lin *et al.*（2008）曾針對台灣陳有蘭流域之各子集水區進行土砂遞移率分析，研究發現若就坡面及河道兩個土砂遞移區位，其集水區面積對於河道遞移率影響較大，而坡面遞移率影響相對較小。



（摘自 Ferro and Minacapilli, 1995）

圖 3 單元化網狀集水區土砂遞移分析概念圖

目前國內外學者研究土砂遞移率，主要是探討集水區地文、水文因子，並據以建立相關經驗式，其中又以集水區面積最為常見（Walling, 1983；林昭遠等人，2006）。根據美國諸多水庫淤砂分析資料顯示，其產砂量與流域面積之 0.8 次方成正比。早期，美國農業水土保持局（USDA）由德州及奧克拉荷馬州、密蘇里流域黃土區、密西西比和東南部等區域之資料分析求得土砂遞移率隨集水區面積增加而遞減之關係圖，且依因集水區特性及其地域性，所呈現土砂遞移曲線類型亦隨之改變，如圖 4 所示。

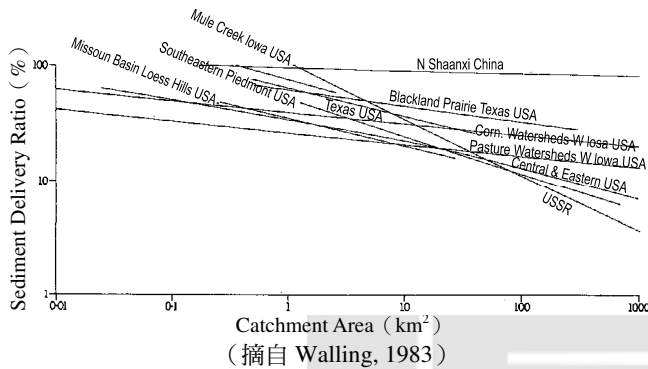


圖 4 集水區面積與土砂遞移率之關係圖

（三）土砂攔阻

對於集水區河道中防砂設施攔砂能力，可以因砂量相較於土砂生產量比例或經過防砂設施前後之泥砂濃度值變化，用以評估集水區內整治工程攔阻效果。鄭為仁等人（2008）曾參考日本學者渡邊正幸等人（1980）於集水區土砂災害整治經驗，所提出攔阻效率指標評估，分述如下：

1. 無因次土砂流出率 E_p

$$E_p = \frac{V_{sb}}{V_{sa}} \quad (1)$$

式中， V_{sa} 為通過壩體之前土石流總土砂量； V_{sb} 為通過壩體之後土石流總量。

2. 泥砂體積濃度比 E_R

$$E_R = \frac{C_{DB}}{C_D} \quad (2)$$

式中， C_D 為通過壩體之前土石流泥砂體積濃度； C_{DB} 為通過壩體之後土石流泥砂體積濃度。

3. 土砂攔阻率 STR

$$STR = \frac{V_{sa} - V_{sb}}{V_m} \quad (3)$$

式中， $V_{sa} - V_{sb}$ 為進入及流出壩體土砂量之差，或蓄積於壩體上游之土砂量； V_m 為壩體上游最大土砂產量。

4. 下游淤積長度縮減率 RE

$$RE = \frac{L_{Ti} - L_{Tic}}{L_{Ti}} = 1 - E_p^{0.42} \quad (4)$$

$$\log L_{Ti} = 0.421 \log(V_{sbi} \tan \theta_d) + 0.935 \quad (5)$$

$$\log L_{Tic} = 0.421 \log(V_{sbic} \tan \theta_d) + 0.935 \quad (6)$$

式中 L_{Ti} 、 L_{Tic} 為下游淤積長度（m）； $\tan \theta_d$ 為下游扇狀地坡度； V_{sbi} 為治理前通過壩體後流出之土砂量（ m^3 ）； V_{sbic} 亦為 V_{sb} （ $= E_p V_{sa}$ ）即治理後通過壩體後流出之土砂量（ m^3 ）。

上述以土砂攔阻率定義最為簡易明確，相較其他公式所需參數過於複雜且求取不易，故常用於實務設計及評估工程整治後效益。

（四）整治率評估指標

整治率（Completeness Ratio, CR），依據日本建設省（1958）即為『現階段已完成之工作規模與為達到集水區治理計畫目標所需投入總治理工作規模之比值』。日本為最早提出整治概念的國家，主要應用於河川流域泥砂整治方面，目的為有效進行整體集水區治理規劃。國內張三郎（1996）參考日本概念，定義整治率公式如下：

$$CR = \frac{B}{A - E} \times 100\% \quad (7)$$

式中 B 為防砂量（ m^3 ）； A 為泥砂生產量（ m^3 ）； E 為容許流砂量（ m^3 ）。

游繁結等人（1999）曾採用張三郎（1996）

所提出之整治率公式（如式 7），同時假設容許流砂量為零，保守估計集水區整治效果。隨後，陳樹群和賴益成（2004）亦針對水庫集水區進行整治率之研究，將整治率定義如下式所示：

$$CR = \frac{Q_{SO} - Q_S}{Q_{SO} - Q_{SP}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 Q_{SO} 為治理前集水區之泥砂生產量； Q_{SP} 為規畫時所設定之合理泥砂排放量； Q_S 為治理後之泥砂生產量。

水土保持局（2008）建議分別考量土砂生產、洪峰流量及環境保育等整治課題，以分年規劃目標整治率；彙整國內外整治率研究及經驗公式，列於表 2。

表 2 集水區整治率公式表

整治率	研究者
$CR = \frac{B(1-\alpha) + D}{B'(1-\alpha) - E} \times 100\%$	日本建設省（1958）
$CR = \frac{B}{A - E} \times 100\%$	張三郎（1996） 游繁結等人（1999）
$CR = \frac{Q_{SO} - Q_S}{Q_{SO} - Q_{SP}} \times 100\%$	陳樹群和賴益成（2004）
$CR = \frac{X - Y}{X - Z} \times 100\%$	水土保持局（2008）

其中 CR 為整治率； B 為防砂工程設計抑制之土砂量； α 為土砂殘留率； $(1-\alpha)$ 為土砂流出率； B' 為生產土砂量； D 為流出調節土砂量； E 為容許泥砂流出量； Q_{SO} 為治理前集水區之泥砂生產量； Q_{SP} 為規畫時所設定之合理泥砂排放量； Q_S 為治理後之泥砂生產量； X 為治理前預估之可能變化量； Z 為規劃時所設定之合理值； Y 為現況值。

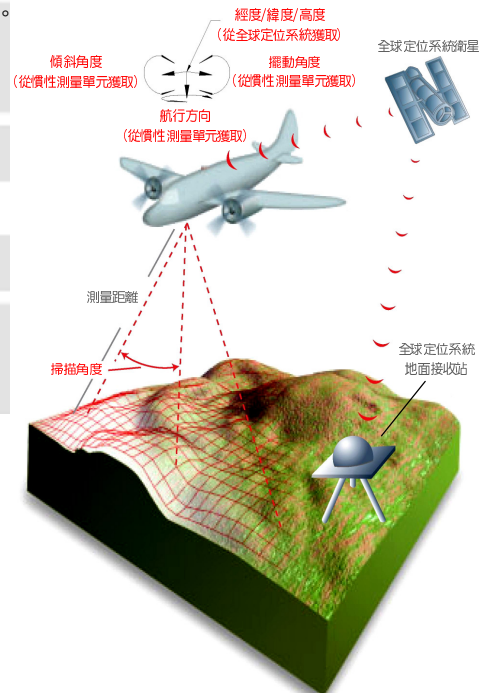
三、空載光達高精度掃描技術

空載光達為目前新興遙測技術，已廣泛應用於集水區土砂監測及地形貌變遷等議題，係以雷射光對目標物進行高密度的掃描，獲取目標物三維形貌的遙測技術。因光達訊號具備多重回波特特性，即發射單一脈衝波，卻能接收最多四個反射回波訊號，並能透過施測資料後處理，將樹木資料點及房舍等建築物全部移除，用以獲取實際地

面之高精度數值地形。以下針對空載光達高精度掃描技術之施測流程、資料後處理與品管作業，以及分析優勢與應用層面，預作說明如后。

（一）高精度掃描作業原理

空載光達主要包含定位定向系統（Position and Orientation System, POS）雷射掃描儀（Laser Scanner）及控制器（System Controller）三個部分，其中的定位定向系統是以直接幾何對位（Direct Georeferencing）技術，整合動態 GPS 定位技術求得三維座標，與精密慣性姿態儀（Inertial Measurement Unit, IMU）測得之三軸偏轉角及加速度等資訊，直接提供在飛航過程 200Hz 頻率的精密航跡定位；而雷射掃描儀則是以每秒高達 60,000~150,000 Hz 的頻率，記錄脈衝雷射波之發射角度及接收之時間差與回波，並轉換為量測之距離與反射之強度；控制器除具備人機介面之特點外，並且可記錄上述二項設備時間標記（Time Stamp），以精確連結定位定向與雷射量測資訊。空載光達的作業原理示意圖，如圖 3。



（修改自 <http://gis.leica-geosystems.com/>）

圖 3 空載光達作業示意圖

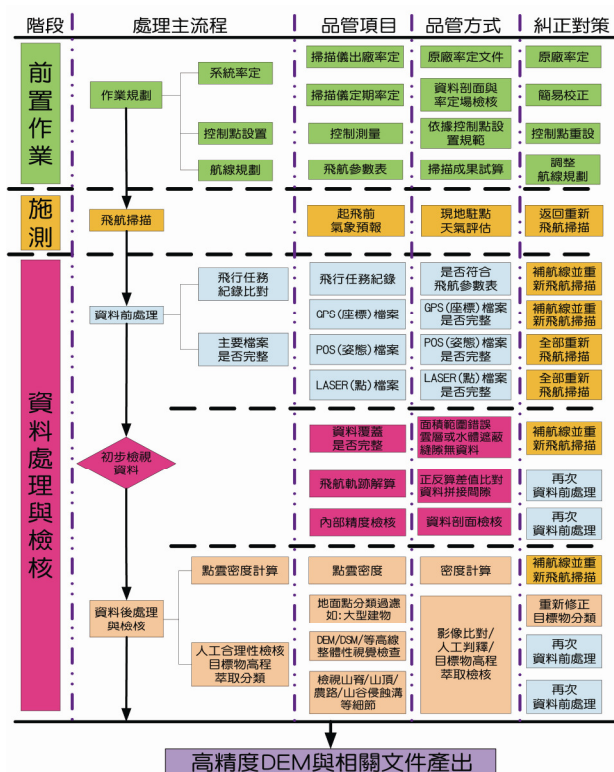
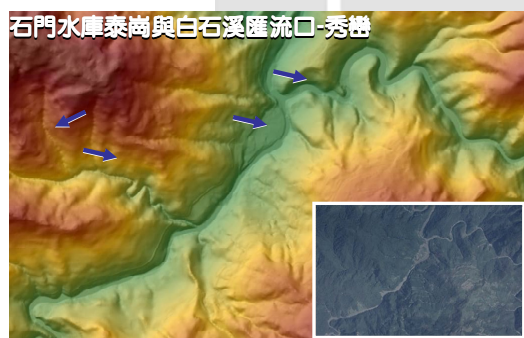


圖 4 空載光達施測標準作業程序流程圖



(a) 利用航照攝影測量產製數值高程
(箭頭標示處為溪流及蝕溝)



(b) 利用空載光達產製數值高程
(箭頭標示處為溪流及蝕溝)

圖 5 不同方法產製數值高程之地形貌比較圖

(二) 施測流程及資料後處理品管作業

空載光達完整施測流程及品管對策圖如圖 5 所示，主要工作項目包括：前置作業、施測與資料獲取、資料處理與檢核等三個階段，相關工作內容簡述如次：

1. 前置作業

在地面控制測量方面，以透空度佳為光達施測作業之控制點選點原則，且能同時有二個以上之 GPS 控制點。其他考慮因素包括地形高程、載具高度、雷射掃儀掃描角度及每航線涵蓋寬度、航線間重疊率、交叉航線、點雲分布密度及軍方訓練等資訊，利於展繪詳盡飛航規劃圖。

2. 施測與資料獲取

欲進行飛航掃描時，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，於掃描前、掃描中進行必要硬體檢查、參數確認及完整工作紀錄。

3. 資料處理與檢核

依據飛航規劃之各項參數及品質管制程序比對飛行任務紀錄，並於掃描後進行必要之硬體檢查、參數確認及完整之工作紀錄確認與航線初步檢查。關於飛行掃描成果之查核方式，需與相鄰航帶覆蓋且不可被雲遮蔽，而資料密度須優於 1 平方公尺內 1 點，如數據產生缺漏，需另行補測。此外，仍須修正系統誤差，再藉由大地起伏模式換算為正高，最後輸出成果。

(三) 分析優勢及應用層面

空載光達技術藉由飛機搭載雷射光束掃描儀器於高空進行掃描，產製數值地形，不論於解析度、精確度、方便性以及濾除地上建物與樹木遮蔽影響等方面都較為優越（陳樹群，2006）。圖 5 為利用航照攝影測量及空載光達掃描技術針對石門水庫泰崗與白石溪匯流口建立數值高程模型；由圖可知，透過空載光達產製數值高程模型，可清楚判釋溪流及蝕溝等細緻地形。另關於

空載光達精度，Schenk (2001) 由理論推導以及實測資料皆證實高程精度優於平面定位精度；而其他應用空載光達進行地表資訊擷取研究亦陸續發展中，如林分高度量測、森林地表模型製作、土砂產量評估，及不同時期之地形變遷及建物萃取等課題，相關經驗案例文獻可參見 Bitelli *et al.* (2004)、Avian *et al.* (2009)。

四、石門水庫集水區整治成效評估

石門水庫及其集水區第一階段整治計畫，其施行期間為 95 年至 98 年間，各項工程已陸續完成。為了解第一階段所實施整治工程對於集水區土砂安定效益是否有達預期之整治標的，以及歷經多場颱風侵襲後防砂設施是否有發揮其功效。本節主要針對四個重要監測治理區域，分別為砂崙仔溪、泰平溪、下文光溪、蘇樂溪等（其地理位置，如圖 6 所示）；透過光達高精度掃描技術建置多期數值高程模型（詳細空載光達施測報告詳見水土保持局，2010），藉由前後期比較分析計算個別集水區土砂產量及囚砂量，據以具體量化集水區土砂攔阻率，逐年評析並檢視是否有達其整治預期標的。



圖 6 重要監測治理區域地理位置圖

（一）重點治理區域環境簡述

根據水土保持局（2009、2010）研究報告指出第一階段整治工程數量，集中於庫區及玉峰等兩大集水區，整治重點在於崩場地整治及處理工程、土石流災害復育工程及坡地保育工程，並於艾利颱風後，積極投入工程整治；前述重要監測治理區域位於石門水庫集水區中部，詳見圖 6；並以蘇樂集水區面積最大，再者為泰平溪，其次為砂崙仔溪以及下文光溪。有關集水區基本資料表，列於表 3。以下針對各重點監測區域環境、保全對象以及歷史災害進行簡述：

1. 蘇樂溪集水區面積約為 5.96km^2 ，保全對象為省道台七線以及高義蘭部落。本溪流於艾利颱風侵襲後，引致中游山坡地大量崩塌，造成河道中土砂淤積與溪床沖淤情形嚴重，下移之土石多次沖毀蘇樂橋及周遭農舍，影響道路通行。
2. 砂崙仔溪集水區面積約為 1.76km^2 ，保全對象為三光、泰平聚落以及桃 113 線、林道武道能敢道路以及砂崙仔聚落。本溪流於艾利颱風侵襲時，造成桃 113 線多處嚴重崩塌，並隨著雨水挾帶大量土砂石向下游移運至下游，造成桃 113 線道路以及周遭農舍損毀。
3. 泰平溪集水區面積約為 3.28km^2 ，保全對象為竹 60 線道路。本溪流於艾利颱風侵襲時，造成中游土石崩塌災害，並造成溪流河道嚴重淤積以及鄰近道路與河道嚴重淘刷兩岸，阻礙聯外交通。
4. 下文光溪集水區面積約為 1.26km^2 ，保全對象為下文光聚落、縣道竹 60-1 線道路以及馬美道路支線。本溪流於艾利颱風侵襲時，引致溪流源頭以及中游右岸土石崩塌災害，造成鄰近道路路面破損以及河道嚴重淘刷，危及竹 60-1 線及馬美道路支線之用路人安全，及危及鄰近聚落居民安全。

表 3 集水區基本資料表

集水區名稱	集水區面積 (km ²)	溪流長 (km)	溪流平均坡度 (°)	主要地層
蘇樂溪	5.96	3.15	13.49	巴陵層
砂崙仔溪	1.76	1.05	19.56	木山層
泰平溪	3.28	2.77	13.30	木山層
下文光溪	1.26	0.99	17.15	北寮層

(二) 土砂產量及攔阻率評估方式

水土保持局(2009、2010)曾針對此四個集水區，進行四次空載 LiDAR 全面性施測，同時並產製高精度數值高程，詳見施測日期，參照表 4。若依前後期之比較，共可拆分成三期；第一期為「民國 95 年 6 月至 97 年 8 月」，其歷經聖帕、韋帕、柯羅莎、鳳凰等四場颱風；第二期為「民國 97 年 8 月至 97 年 11 月」，其歷經如麗、辛樂克、薔蜜等三場颱風；第三期為「民國 97 年 11 月至 98 年 10 月」，歷經莫拉克、芭瑪等兩場颱風事件，共計 9 場，尤以辛樂克颱風所狹帶累積雨量最大，高達 914.6mm。依此，為探討各施測期間之集水區防砂設施對於颱風事件引致土砂產量之攔阻效益，可藉由地形高程差異量分析，亦即將「後期高精度數值地形」減去「前期高精度數值地形」，所得數值網格內高程負值代表「崩塌或沖蝕」，而高程正值即為「堆積」，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，而土砂生產量為子集水區內之坡面崩塌及河道沖蝕等地形變化量之體積總和，且經由河道連續防砂工程結構物前之土方堆積體積，進而推估土砂攔阻量，其模擬分析示意圖如圖 7 所示。

表 4 各期空載光達施測期間歷經颱風統計表

期數	施測時程	歷經颱風事件
1	民國 95 年 6 月至 97 年 8 月	聖帕、韋帕、柯羅莎、鳳凰
2	民國 97 年 8 月至 97 年 11 月	如麗、辛樂克、薔蜜
3	民國 97 年 11 月至 98 年 10 月	莫拉克、芭瑪

註 1：第一次施測日期為民國 95 年 6 月；第二次施測日期為民國 97 年 8 月；第三次施測日期為民國 97 年 11 月；第四次施測日期為民國 98 年 10 月。

註 2：表中粗體字為施測期間最大累積降雨量之颱風事件。

基於上述，為簡化及保守估算整治成效，暫時忽略容許流砂量之影響性，用以評估集水區整體整治率。另將張三郎所提整治率(如式 7)與土砂攔阻率(如式 3)相互比較，其兩式意義相符且估算結果相同，故可將攔阻率視為並代表集水區現況整治率。

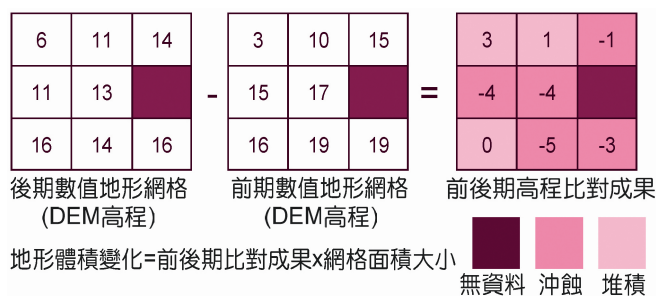


圖 7 前後期數值地形相減分析示意圖

(三) 集水區整治成效評估

1. 各期崩塌地變遷

藉由各期空載光達同步拍攝航照，判釋各子集水區之新增崩塌地空間分布、數目以及數化防砂工程地理區位；統計第一期至第三期評估期間新增崩塌地數量，列於表 5，並繪製成如圖 8 所示。由圖可知，第三期新增崩塌地數量，總計 62 筆；相較於第一期新增崩塌地數量達 138 筆以及第二期新增崩塌地數量 128 筆，顯示集水區歷次崩塌現象漸有趨緩，且崩塌地規模亦相對縮減，間接證實集水區保育整治確有效益且崩塌坡面正持續復育中。

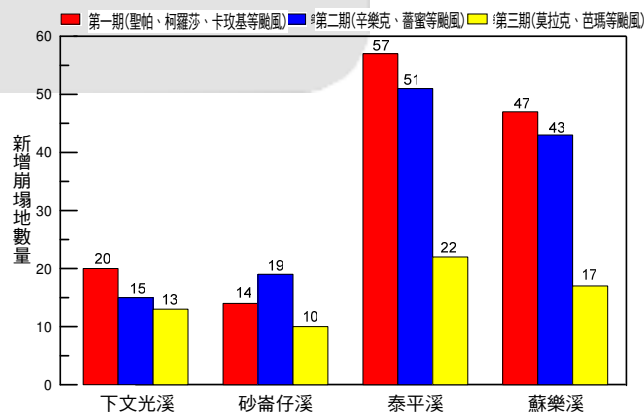


圖 8 各期新增崩塌地數量比較圖

另透過第三期施測新增崩塌地圖層並同步施測航照進行套疊，如圖 9 至圖 12；由圖可知，泰平溪、下文光溪與砂崙仔溪等三子集水區，大多數崩塌均集中於溪流源頭處且有明顯下切，顯見向源侵蝕較為嚴重；蘇樂溪集水區之崩塌地主要分布於中下游之臨岸，易受強降雨入滲或河流淘刷坡趾造成崩塌破壞，故以上皆為主要土砂供應來源。

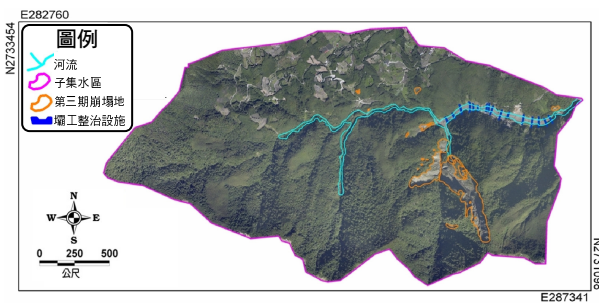


圖 9 蘇樂溪集水區新增崩塌地分布圖

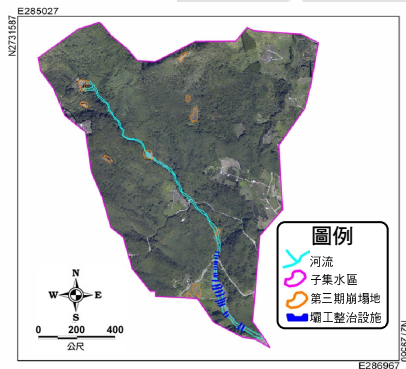


圖 10 砂崙仔溪集水區新增崩塌地分布圖

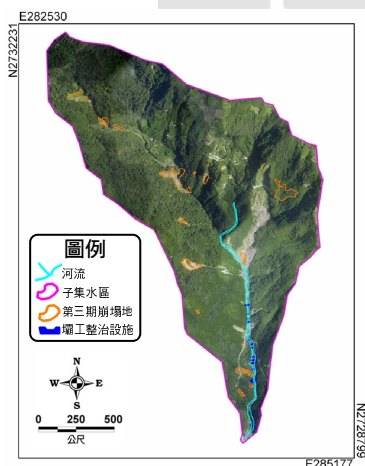


圖 11 泰平溪集水區新增崩塌地分布圖

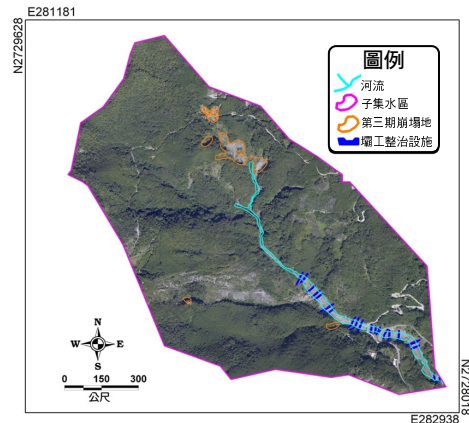


圖 12 下文光溪集水區新增崩塌地分布圖

2. 土砂產量及攔阻率評估

依前述評估分析流程，計算各期土砂生產與攔阻量，結果列於表 5；由表可知，第三期土砂產量多寡，依次為蘇樂溪、泰平溪、砂崙仔溪及下文光溪；由於，下文光溪及砂崙仔溪子集水區於 97 年至 98 年間因坡面植生復育完整，上游崩塌土砂產量較少；其他區域第一期及第二期集水區土砂產量順序與上述觀察一致。另就各期土砂攔阻量而言，以蘇樂溪最大，再者為泰平溪，其次為砂崙仔溪，最後為下文光溪，其趨勢與集水區土砂產量多寡順序雷同，亦與防砂設施數量及規模有關。

表 5 各期重要治理區土砂生產與攔阻率計算表

重要治理區		新增崩塌地 面積 (m ²)	土砂生產 量 (m ³)	土砂攔 阻量 (m ³)	土砂攔 阻率 (%)
下文光溪	第一期	51,647.90	24,786.60	15,977.00	64.46
	第二期	23,322.40	4,098.70	2,752.90	67.16
	第三期	16,868.46	2,229.50	1,528.25	68.55
砂崙仔溪	第一期	10,022.80	6,681.50	4,491.30	67.22
	第二期	5,584.60	3,634.40	2,597.20	71.46
	第三期	15,489.82	2,487.25	1,718.50	69.09
泰平溪	第一期	30,304.20	19,160.20	12,027.80	62.77
	第二期	28,396.00	3,459.80	2,585.00	74.71
	第三期	47,406.64	3,184.75	2,026.75	63.64
蘇樂溪	第一期	177,836.50	122,646.00	77,271.00	63.00
	第二期	162,089.20	8,426.50	6,285.00	74.59
	第三期	157,692.07	8,968.50	5,946.63	66.31

若比較各期土砂攔阻率，若由高至低排列，依次為砂崙仔溪、下文光溪、蘇樂溪與泰平溪，較前兩期土砂攔阻稍有下降，但維持於 63% 以上。此外，就三期之平均土砂攔阻率而言，以砂崙仔溪最大（其平均值約為 69.25%），對土砂下移之情形發揮良好之攔阻功用，故工程整治效益較為顯著；下文光溪集水區則因防砂設施規模相對較小，故平均攔阻土砂量 66.72%，餘 33.28% 土砂量則流入主河道中。整體而言，以上重點治理區土砂攔阻效率均大於第一階段（民國 95 年至 98 年）整治工程規劃預期標準 54%，確實有達計畫績效目標，表示上游土砂量流入主河道之總量已有效控制，且容許部分土砂補注河道穩定河床平衡，適度減少土砂生產量對水庫淤積量貢獻及降低淤積潛勢風險，消弭供水危機。

3. 整治效益及植生復育個案說明

為說明集水區整治效益及坡面植生復育效果，以第三期蘇樂溪集水區為例說明（如圖 13），於民國 97 年 8 月至 98 年 10 月施測期間，曾遭受莫拉克及芭瑪等兩場颱風事件，透過前後期數值地形資料相減比較，得知土砂產量約計 0.89 萬方，並於治理區內囚禁約 0.59 萬方土砂，如表 5；直接效益為土砂攔阻率達 66%，間接效益為增進水源涵養、保護道路安全及降低用路人行車風險。另由比較不同期航照可知，原蘇樂便橋上游壩體之左翼崩塌地，因進行坡面植生，崩塌裸露狀況已趨緩且逐漸復育中，顯見整治確有成效，詳見圖 14。

五、結論與建議

本文藉由空載光達高精度掃描技術，能廣域且迅速建置多期數值高程模型，並藉由前後期比較分析計算，確實能有效評估並彰顯第一階段石門水庫集水區整治成效。有鑑於此，上游集水區保育治理實為水庫減淤措施，並可延長水庫壽命，進而朝向水庫永續經營發展，持續進行集水

區水土保持工作，可穩定集水區土砂產量及減少砂源入庫，防止崩塌擴大並避免泥砂直接流入；此外，為因應近期極端水文活動及氣候變遷，建議有關單位應透過可行性防災監測或多元尺度遙測技術，進行集水區全面性健檢及基礎資料建置，供以充分了解集水區水域產砂環境及運移過程，尋找並擬訂土砂抑制條件及面對氣候變遷下調適策略，得以有效解決水庫淤積問題。

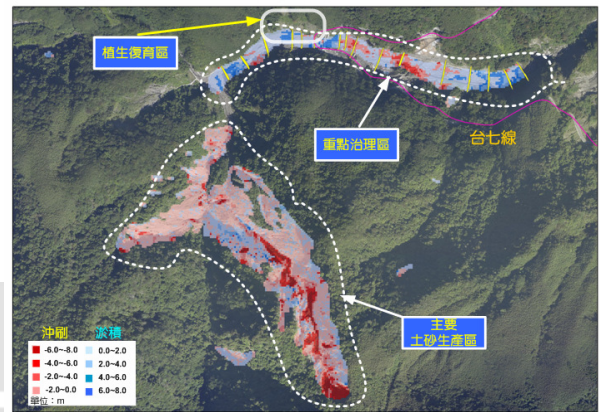


圖 13 第三期間蘇樂集水區地形高程變化圖



圖 14 蘇樂溪集水區植生復育狀況航照比較圖

誌 謝

感謝行政院農業委員會水土保持局，提供計畫（編號 SWCB 99-005）經費補助，作者深表謝忱。

參考文獻

- 王晉倫（2010）泰平溪集水區臨溪崩塌空間分布及土砂量之研究，國立中興大學水土保持學系研究所，博士論文
- 水土保持局（2003）水土保持技術規範
- 陳信雄（1995）崩落地調查與分析
- 陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明（1998）本土化土壤沖蝕指標模式之建立，中華水土保持學報，第 29 卷，第 3 期，第 233-247 頁
- 林俐玲（2008）土壤沖蝕指數估算公式之研究，中華水土保持學報，第 39 卷，第 4 期，第 355-366 頁
- 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、王士豪（2009）GIS 圖層及修正因子建置台灣通用土壤流失公式（TUSLE）-以石門水庫集水區為例，中華水土保持學報，第 40 卷，第 2 期，第 185-197 頁
- Yang, H., Chang, Q., Du, M., Minami, K., and Hatta, Y. (1998) Quantitative Model of Soil Erosion Rates Using Cs137 for Uncultivated Soil, Soil Science, 163 (3), pp. 248-257
- 李建堂（1999）鉅 137 技術應用於土壤沖蝕研究之回顧與展望，台灣大學地理學系地理學報，第 26 期，第 25-44 頁
- 謝正倫（2008）水庫濁水現象之研究-子計劃一水庫集水區細微土砂來源之空間分布特性之分析，國科會研究成果報告，計畫編號 NSC 95-2625-Z-006-003
- 許振崑、林伯勳、鄭錦桐、高丞瑋、冀樹勇、黃文洲、尹孝元（2009）結合 3S 技術於石門水庫集水區不同植生坡面沖蝕量調查，水土保持技術，第 4 卷，第 3 期，第 191-203 頁
- 梁惠儀、許振崑、林伯勳、鄭錦桐、冀樹勇（2010）極端暴雨事件於石門水庫集水區土壤沖蝕量估算及探討，中興工程，第 106 期，第 5-15 頁
- 林伯勳、何幸娟、陳建宏、冀樹勇、施美琴、尹孝元（2010）神木集水區降雨引致土壤沖蝕量調查與監測，第十九屆水利工程研討會，國立雲林科技大學，台北，第 M9-M15 頁
- Lin, G. W., Chen, H., Hovius, N., Horng M. J., Dadson S., Meunier P. and Lines M. (2008) Effects of Earthquake and Cyclone Sequencing on Landsliding and Fluvial Sediment Transfer in a Mountain Catchment, Earth Surface and Process Landforms, 33, pp. 1354-1373
- Ferro, V., and Minacapilli, M. (1995) Sediment Delivery Processes at Basin Scale, Journal of Hydrological Processes, 12 (5), pp. 703-717
- Walling, D. E. (1983) The Sediment Delivery Problem, Journal of Hydrology, 65, pp. 479-493
- 林昭遠、陳昱豪、林家榮（2006）集水區泥砂產量推估之研究，水土保持學報，第 38 卷，第 2 期，第 207-218 頁
- 鄭為仁、范雯雯、連惠邦（2008）土石流壩工治理評估模式之建置，第六屆海峽山地災害與環境保育學術研討會，台中，第 A-12 頁
- 渡邊正幸、水山高久、上原信司（1980）土石流對策砂防設施に關する検討，新砂防第 115 號，第 40-45 頁
- 日本建設省（1958）河川砂防技術基準
- 張三郎（1996）治山防洪計畫之展望，坡地防災研討會論文集
- 游繁結、周天穎、葉昭憲、賴如慧（1999）集水區整治率評估模式之探討，中華水土保持學報，第 30 卷，第 2 期，第 137-147 頁
- 陳樹群、賴益成（2004）水庫集水區土砂評量與整治率評估模式，中華水土保持學報，第 35 卷，第 1 期，第 53-67 頁
- 水土保持局（2008）水土保持保育治理成效之定量評估及觀測計畫
- URL: <http://gis.leica-geosystems.com/>
- Schenk, T. (2001) Modeling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners, Technical Report in Photogrammetry 19, Ohio Sate University
- Bitelli G., Dubbini M., and Zanutta A. (2004) Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitor Landslide Bodies, Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, Commission
- Avian M., Kellerer-Pirklbauer A., and Bauer A. (2009) LiDAR for Monitoring Mass Movements in Permafrost Environments at the Cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, pp. 1087-1094
- 水土保持局（2009）石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究
- 水土保持局（2010）石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討