野溪防砂工程功能量化：西南台灣集水區案例分析

蔡易達[1]　連惠邦[1, 2]　李仲強[1]　吳俊鋐[2] *

摘　要　本研究以歷年崩塌分布比對、該集水區降雨逕流演算及以多期數值高程模型資料進行地形變遷分析，以量化數據說明該防砂工程對於野溪河道所能提供的防砂功能，包含直接的野溪河道土砂運移減緩及間接的河川底床及兩岸的植生復育效果，以茄苳寮溪集水區、大湖底溪集水區及南沙魯集水區等三個集水區為研究對象，量化說明野溪防砂工程的防砂功能，根據本研究分析結果，各集水區在防砂工程施設後之河岸崩塌縮減率分別為茄苳寮溪集水區之 33.3%/年、大湖底溪集水區之 11.2%/年及南沙魯集水區之 12.1%/年，年計防砂量也分別為茄苳寮溪集水區之 1.6 萬 m^3/年、大湖底溪集水區之 8.1 萬 m^3/年及南沙魯集水區之 1.17 萬 m^3/年。

關鍵字：防砂工程、防砂功能量化、年計防砂量

Sediment Trap Quantization Efficiency for Sabo Dams in the Torrents– The Case Studies in Southwest Taiwan

I-Ta Tsai [1]　Hui-Bang Lien [1,2]　Zhong-Qiang Lee [1]　Chun-Hung Wu [2] *

ABSTRACT　This study estimates the sediment trap quantization efficiency in the Qietongliao watershed, the Dahudi watershed and the Nansaru watershed. The results of the study show that, the decrease in the landslide ratio after the establishment of sabo dams in the three watersheds is 33.2%/year in the Qietongliao watershed, 11.2%/year in the Dahudi watershed and 12.1%/year in the Nansaru watershed. The annual sediment trap volume is also estimated to be 1.6×10^4 m^3 in the Qietongliao watershed, 8.1×10^4 m^3 in the Dahudi watershed and 1.17×10^4 m3 in the Nansaru watershed.

Key Words: Sabo dams, sediment trap quantization efficiency, annual sediment trap volume

一、前　　言

防砂壩體是多數國家用於控制野溪土砂運移的主要工程方法，例如具有山坡地坡度陡峭特性的日本與台灣，防砂壩體的使用相當頻繁。以負責北台灣供水的重要水庫：石門水庫集水區為例，為了降低土砂形成水庫淤積影響未來供水，防砂壩體的應用在集水區內就是重要的工程手段，以集水區內壩體歷年總數而言，在 1992 年間由林務局調查的防砂壩體總數約為 82 個，至 2005 已達 123 座 (朱達仁等，2005)，而至 2012 年調查結果則已達 236 座 (許振崑等，2012)，雖然在各次調查中被隸屬於防砂壩體的種類可能不一致 (例如在 2012 年調查乃將防砂壩、非透過式潛壩、堆石壩、透過式梳子壩都列為防砂壩)，但防砂壩體的總數逐漸增加且在 1999 年集集地震後更是大幅增加的趨勢是可發現的。防砂壩體的頻繁使用在半乾旱地區(semi-arid) 的國家也時常見到，主因來自於地表植生覆蓋減少及豪雨事件增加所造成的土砂產量增加及土砂運移現象的頻繁 (Romero-Díaz et al., 2012)，單以西班牙的塞古拉河集水區 (Segura river basin) 而言，集水區面積約為 19,525 km^2，但卻有超過 2000 個防砂壩體存在 (Romero-Díaz et al., 2008)。

根據水土保持手冊 (中華水土保持學會，2005) 記載：防砂壩體具有以下數種功能：攔阻或調節河床砂石、減緩河床坡度，防止縱橫向沖蝕、控制流心，抑止亂流，防止橫向沖蝕、固定兩岸山腳，防止崩塌、砂石堆積或沖蝕地區配合整流，防止砂石二次流失。若在土砂運移量大且坡度更為陡峭的野溪中，通常會施作連續防砂壩體以達野溪河道土砂穩定。而近年在防砂壩體設計技術的演進與人類希望達到對野溪土砂運移的更主動控制管理前提下，而衍生出多種不同型態的防砂壩體，例如全封閉式防砂壩、可攔阻特定粒徑以上的梳子壩體或鋼管壩體或近年發展可拆卸式孔隙型防砂壩體 (陳樹群等，2007) 或可拆卸式鋼管壩體 (陳樹群等，2016)。

長久以來各國官方單位一直想把每一項防砂工程所產生的各種效益進行估算，提供未來工程規劃設計及評估之用。以台灣而言，在欠缺長期地形地貌監測資料及集水區特性各異的情況下，在建立各種防砂效益推算模式時，常有難以驗證或更精進之問題存在。防砂壩體防砂效益的估算方式一直是難以解決的問題，國際研究偏向以水庫為研究標的，因此所使用的是

〔1〕逢甲大學營建及防災中心
Construction and Disaster Prevention Research Center, Feng Chia University, Taichng, Taiwan, R.O.C.
〔2〕逢甲大學水利工程及資源保育學系
Department of Water Resources and Conservation Engineering, Feng Chia University, Taichng, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail: chhuwu@fcu.edu.tw

囚砂效益 (trap efficiency)，代表土砂運移經過該水庫後，能有多少量體的土砂被停留在水庫中 (Brune，1953)，且囚砂效益跟河川入流量與蓄水量比、水庫種類及操作方法有關，爾後也有研究認為囚砂效益也跟水在壩體內的滯留時間有關 (Verstraeten and Poesen, 2000; 2001)。台灣過往也有相關研究探討防砂壩體的囚砂效益，並以壩體上游面淤積長度、寬度、高度及方式估算淤砂量及上游淤砂所達成的坡降減緩比來估算壩體防砂效益或壩體是否已淤滿 (朱達仁等，2005；許振崑等，2012)。

但為將水土保持手冊記載之防砂壩體功能綜合量化呈現，近年對於壩體的穩定土砂功效不再只侷限於壩體可提供的淤積空間，而更擴展到「一個壩體對於該壩體上下游河道所產生的土砂停留、土砂穩定的功能」，連惠邦及蔡易達 (2013) 將野溪工程需分為橫向跨越河川的防砂壩體跟沿河川流向興建的護岸擋土牆工程，並將此類工程所能提供的防砂量區分為貯砂量 (sediment storage volume)、土砂流出調節量 (sediment control volume)、土砂生產抑制量 (sediment yield reduction volume) 等三個來源，其中土砂生產抑制量包含溪床土砂生產抑制量跟兩岸坡面土砂生產抑制量，此方式需以現場調查得到估算過程所需的特性參數。賴承農等人 (2014) 也將則以水土保持局 (2012) 所提出的防砂壩體及護岸工程土砂防治量公式，而得集水區總防砂量數值，並再以該土砂運移控制量所產生的直接與間接效益評估防砂效益。

防砂量或效益過往難以推求的主因之一，在於對於變動的野溪河道，難以在各場降雨事件後獲得高精準度的地形資料，也難以判斷底床質 (bed load) 是否在某場降雨事件中曾經啟動或仍停止於原地。但在近年無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle，後簡寫 UAV) 的發展，在特定降雨事件後立即以無人飛行載具 (UAV) 進行空拍及相關測量校正作業而獲得即時地形高程資料，在普遍為裸露區域的野溪河道上，水平與垂直精度已可達公分等級，也代表防砂工程在單場降雨事件下的防砂功能已可進展到量化估算。

本研究主要目的在於探討特定野溪河道在防砂工程的施作前後，以歷年崩塌分布比對、該集水區降雨逕流演算及以多期數值高程模型 (Digital Elevation Model，後簡寫 DEM) 資料進行地形變遷分析，以量化數據說明該防砂工程對於野溪河道所能提供的防砂功能，包含直接的野溪河道土砂運移減緩及間接的河川底床及兩岸的植生復育效果。本研究以三個集水區為例，包含茄苳寮溪集水區、大湖底溪集水區及南沙魯集水區，三個集水區的歷年崩塌分布及野溪整治工程施設時間都不盡相同，本研究以此三個不同案例來論述野溪防砂工程對於野溪土砂穩定效果的功能。

二、研究區域

本研究以探討野溪集水區或河段因為防砂工程興建所產生的防砂功能量化值，挑選集水區的方式為：選取近年有較多治理工程的集水區，並以集水區面積較小且土砂來源單純為主。經挑選後，以選定台中市新社區茄苳寮溪集水區、嘉義縣中埔鄉大湖底溪及高雄市那瑪夏區南沙魯集水區為研究區域，以下針對這三個研究區域說明與土砂運移相關的基本資料。

1. 台中市新社區茄苳寮溪集水區

茄苳寮溪集水區 (如圖 1) 位於台中市新社區，屬於烏溪支流之一，主流長度約為 3.3 公里，集水區面積約為 3.67 km^2，集水區高程介於 314 m 至 821 m，集水區平均高程約為 511 m，集水區平均坡度約為 28.6 度。集水區地質以更新世頭科山層火炎山段 (岩性為礫岩夾厚層至薄層砂岩，佔集水區面積之 41.4%) 及中新世桂竹林層 (岩性為塊狀砂岩、粉砂岩、砂岩夾頁岩及砂頁岩互層，佔集水區面積之 58.6%)。集水區土地利用則以森林用地 (佔集水區面積之 82.9%)、農業用地 (佔集水區面積之 8.1%) 及水利用地 (佔集水區面積之 5.1%) 為主，其餘土地利用種類總面積佔集水區面積都不到 2.0%。

為瞭解茄苳寮溪集水區歷年土砂產量的變化，本研究收集 6 個年度的崩塌圖層說明，6 場颱風事件或日期包含 2004 年敏督力颱風 (Typhoon Mindulle)、2009 年莫拉克颱風 (Typhoon Morakot)、2013 年 11 月 17 日、2014 年 11 月 24 日、2015 年 10 月 14 日、2016 年 10 月 4 日等，如表 1 所示。茄苳寮溪集水區崩塌率 (崩塌面積除以集水區總面積，並以百分比表示) 最高僅在 2013 年曾達到 0.85%以外，其餘年度崩塌率都在 0.50%左右或以下。集水區土砂來源為上游近河岸崩塌地及裸露坑溝，近年公務單位投入 10 件工程。茄苳寮溪集水區在 2008 年卡玫基颱風野溪嚴重淤積，公務單位在此投入多期治理 (如圖 2)，至 2015 年衛星影像顯示崩塌地面積約 1.0 公頃。

表 1 本研究三個集水區歷年崩塌與河岸崩塌率表

Table 1 The landslide ratio and riverside-landslide ratio from 2004 to 2016 in the three watersheds

年份	2004	2009	2013	2014	2015	2016
台中市新社區茄苳寮溪集水區 (面積：3.67 km^2)						
崩塌率 (%)	0.3	0.0	0.9	0.4	0.3	0.1
河岸崩塌率 (%)	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
嘉義縣中埔鄉大湖底溪集水區 (面積：2.75 km^2)						
崩塌率 (%)	0.2	10.4	2.3	2.3	1.9	2.0
河岸崩塌率 (%)	0.2	3.1	1.4	1.2	1.1	1.0
高雄市那瑪夏區南沙魯集水區 (面積：3.57 km^2)						
崩塌率 (%)	0.0	14.7	5.3	4.7	3.3	2.8
河岸崩塌率 (%)	0.0	6.9	2.5	2.4	1.8	1.5

備註：經查詢氣象局地震資料，本表列舉年份內，三個研究區域都未曾有地震規模超過5.0以上之地震紀錄，因此可將本表列舉年份之崩塌誘發主因歸咎為降雨導致。

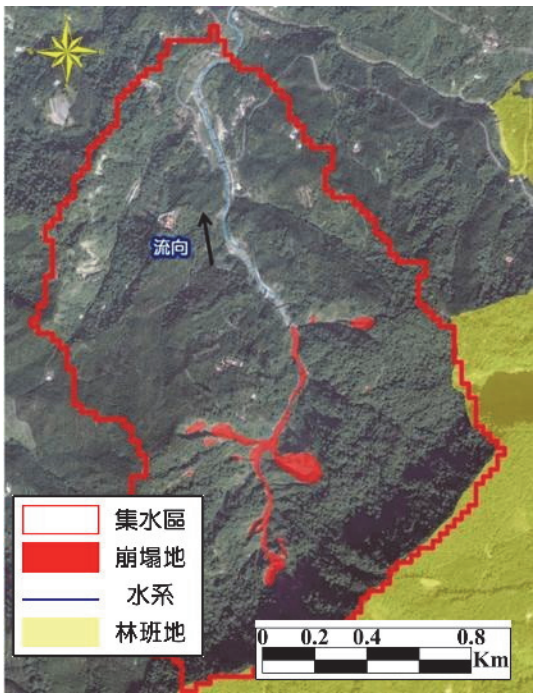
2. 嘉義縣中埔鄉大湖底溪集水區

大湖底溪集水區 (如圖 1) 位於嘉義縣中埔鄉，屬於八掌溪上游支流之一，主流長度約為 2.6 公里，集水區面積約為 2.75 km^2，集水區高程介於 319 m 至 1059 m，集水區平均高程約為 624 m，集水區平均坡度約為 30.5 度。集水區地質以中新世至上新世糖恩山砂岩 (岩性為厚層塊狀砂岩和泥質砂岩，佔集水區面積之 50.5%)、中新世至上新世中崙層 (岩性為頁岩，砂質頁岩及泥岩，佔集水區面積之 21.8%) 及中新世長枝坑層 (岩性為砂岩及砂頁岩互層，佔集水區面積之 12.7%) 三種地層為

主。集水區土地利用則以農業用地 (佔集水區面積之 40.9%)、森林用地 (佔集水區面積之 32.6%) 為主。

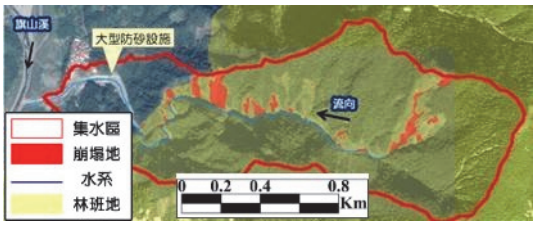
(a) 茄苳寮溪溪集水區位置圖

(b) 茄苳寮溪集水區現況圖



(c) 大湖底溪集水區位置圖

(d) 大湖底溪集水區現況圖



(e) 南沙魯集水區位置圖

(f) 南沙魯集水區現況圖

圖 1 本研究三個集水區位置與現況圖

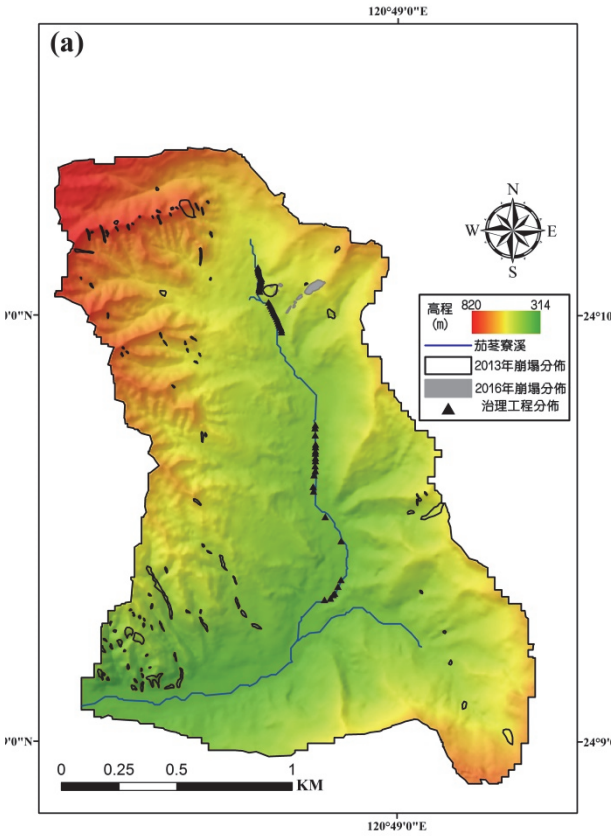
Fig.1 The location and current pictures of three watersheds in this research

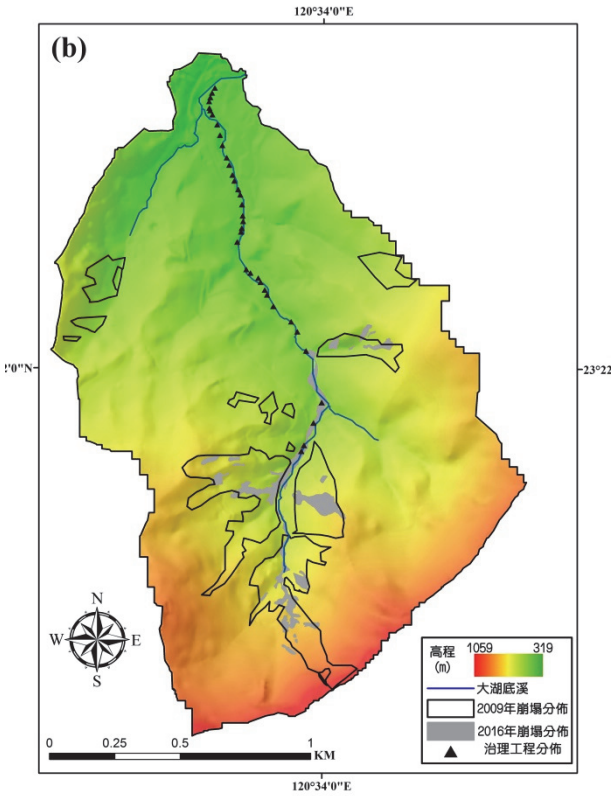
為瞭解大湖底溪集水區歷年土砂產量的變化，本研究也如同茄苳寮溪集水區分析方式，取九個颱風或年份方式說明。大湖底溪集水區崩塌率最高僅在 2009 年莫拉克颱風後達到 10.4%，其餘後續各年崩塌地多數都是由 2009 年莫拉克颱風後崩塌位置逐漸復育，少數則為新增崩塌地。由 2009 年莫拉克颱風後每一年之河岸崩塌率都超過 1.0%。大湖底溪集水區上游土砂下移造成大湖底溪嚴重淤積，其後進行多期防砂治理 (如圖 2)，野溪上游布設多座防砂設施，下游設置潛壩與固床工穩定河道。

3. 高雄市那瑪夏區南沙魯集水區

南沙魯集水區 (如圖 1) 位於高雄市那瑪夏區，屬於高屏溪上游支流之一，主流長度約為 4.2 公里，集水區面積約為 3.57 km^2，集水區高程介於 510 m 至 1903 m，集水區平均高程約為 1159 m，集水區平均坡度約為 33.6 度。集水區地質以中新世長枝坑層 (岩性為砂岩及砂頁岩互層，佔集水區面積之 62.1%)、中新世紅花子層 (岩性為厚層粉砂岩，及粉砂岩和砂岩厚互層，佔集水區面積之 27.3%) 及中新世三民頁岩 (岩性為頁岩間夾

薄層粉砂岩，佔集水區面積之 9.9%) 為主。集水區土地利用則以森林用地 (佔集水區面積之 95.4%) 為主，其餘各類用地佔集水區面積都不到 3.0%。





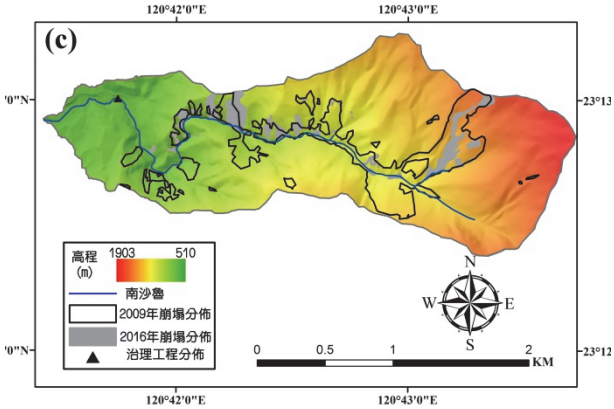


圖 2 本研究三個集水區最高崩塌率 (黑色) 與 2016 年崩塌 (灰色) 分布圖。(a)、(b) 及 (c) 圖分別為茄苳寮溪、大湖底溪及南沙魯集水區。

Fig.2 The distribution of landslide in the year with the highest landslide ratio (marked in black) and in 2016 (marked in gray) in the Qietongliao watershed (Fig. a), Dahudi watershed (Fig. b), and Nansaru watershed (Fig. c)

為瞭解南沙魯集水區歷年土砂產量的變化，本研究也如同茄苳寮溪集水區分析方式，取九個颱風或年份方式說明。南沙魯集水區崩塌率最高僅在 2009 年莫拉克颱風後達到 10.4%，其餘後續各年崩塌地多數都是由 2009 年莫拉克颱風後崩塌位置逐漸復育，少數則為新增崩塌地。由 2009 年莫拉克颱風後每一年之河岸崩塌率都超過 1.0%。集水區土砂來源為上游林班地內崩塌地，近年公務單位投入 5 件工程 (總經費約為 6547.4 萬元)。南沙魯集水區也為土石流潛勢溪流 (編號：高市 DF007)，2009 年莫拉克颱風上游林班地發生多處崩塌，土砂生產量高，也造成南沙魯集水區河段嚴重淤積。公務單位在 2009 年莫拉克颱風後，於南沙魯集水區下游接近出口處興建一座壩體 (如圖 2)，以減緩上游土砂往下游運移速度。

三、研究理論及材料

為瞭解防砂壩體對於野溪河段的土砂運移減緩功能，本研究的分析分為歷年崩塌率分析、降雨誘發崩塌原因分析、降雨逕流分析、地形變遷量分析及防砂功能量化分析等，各段分析原理如下分述：

(1) 歷年崩塌率分析主要比對由過往至 2016 年為止該野溪集水區的崩塌率及河岸崩塌率 (集水區內位於河川兩岸 100 公尺內之崩塌面積除以集水區總面積，以百分比表示)，藉此瞭解該集水區的崩塌演變及河岸崩塌演變，河岸崩塌率的降低可視為來自野溪防砂工程導致河岸崩塌不易發生的結果，但崩塌率的降低則不一定可歸咎於野溪防砂工程所產生的效果，例如崩塌坡面坡頂的植生復育應當被認定為野溪河段防砂工程的施設成效。本研究以崩塌率及河岸崩塌率兩個數據來探討野溪河段防砂工程的功能。

(2) 降雨誘發崩塌原因分析主要比對該野溪集水區在發生最高崩塌率年份的前後各五年之降雨紀錄，瞭解誘發該集水

區高崩塌率的降雨特性分析，本研究從該野溪集水區鄰近雨量站採徐昇多邊形法 (Thiessen's Polygon Method) 求得該集水區代表雨量，本研究求出該集水區在該場降雨事件中之最大 1、3、6、24 小時降雨紀錄及總雨量，以該紀錄搜尋事件發生前五年紀錄目的在於判斷該集水區崩塌率最高的誘發主因，以該紀錄搜尋事件發生後五年紀錄的目的在於瞭解野溪河段防砂工程對於該集水區的土砂穩定是否達到成效。藉此判定現況防砂工程的防砂功能。

(3) 降雨逕流誘發土砂運移分析上，本研究從 2016 年 6 月起在三個集水區設置降雨及河川水位監測儀器，但因為監測時間仍短，且 2016 年下半年在此三個集水區曾發生的颱風降雨事件以梅姬 (Typhoon Megi，侵襲時間：2016/9/25 至 28) 為主，本研究有完整收集到該颱風事件在三個集水區的降雨與河川水位資料。本研究先以各集水區之地文與水文特性求出單位歷線後，配合本研究所蒐集該集水區降雨紀錄，以適用於小集水區的三角形單位歷線法，將降雨量轉為河川流量。

(4) 數位地形高程模型 (DEM) 是目前大範圍區域對於地形變遷偵測主要使用工具，同一地區採用多期 DEM 進行比對即可獲得不同時期內的地形變遷資料。惟本方式需仰賴於高精度的 DEM，若網格尺度太大 (例如 40 m DEM) 可能不適合用於評估地形變遷較不明顯的地區。本研究所採用之 DEM 包含由內政部發行之以航測方式產製 5 m DEM 及以光達 (Light Detection And Ranging，簡稱 LiDAR) 技術產製 1 m DEM，與本研究以 UAV 並搭配 Pix4D mapper 軟體所產製 DEM。在各 DEM 誤差比較上，航測方式產製 5 m DEM 誤差在平地及丘陵地為 0.5 m，在山地及陡峭地為 0.8 m；光達技術產製 1 m DEM 誤差在 0.45 m 以下 (黃俊翔，2013)，本研究以 UAV 產製 DEM，誤差約在 0.2 m 以下。

本研究在三個集水區的 DEM 資料收集及產製如下分述：茄苳寮溪集水區採用光達技術產製 2011 年 1 m DEM、2016 年 7 月及 10 月之 UAV 產製 DEM，共有三次 DEM 可供地形變遷比對。大湖底溪集水區收集航拍產製 2008 年 5 m DEM、光達技術產製 2011 年 1 m DEM 資料、2016 年 7 月及 11 月之 UAV 產製 DEM，共有四次 DEM 可供地形變遷比對。南沙魯集水區收集光達技術產製 2011 年 1 m DEM 資料、2016 年 6 月及 10 月之 UAV 產製 DEM，共有三次 DEM 可供地形變遷比對。

(5) 本研究採用 UAV 所產製 DSM(Digital Surface Model，數值表面模型)，因拍攝區域在野溪河道，河道上並無其他遮蔽物，因此可直接將 DSM 視為 DEM。產製過程如圖 3，說明如下：

a.各研究區域規劃的航線跟起飛點：台中市新社區茄苳寮溪集水區規劃 32 條航帶及 4 個起飛點，嘉義縣中埔鄉大湖底溪集水區規劃 11 條航帶及 1 個起飛點，高雄市那瑪夏區南沙魯集水區規劃 4 條航帶及 1 個起飛點。三個區域平均飛行高度約為 300 公尺。

b.航空標佈設：三個研究區域都設置 4 處固定航空標，佈設位置都在具有明確測量資訊之集水區道路或防砂壩體上。

c.產製正射影像：UAV 行駛在設定航線時，便可直接垂直向下拍攝，當任務完成後可利用照片處理技術將軌跡上的照片進行接合，即可產製正射影像。UAV 航拍拍攝前後影像重疊比例超過 80%以上，左右影像重疊比例超過 50%以上。

d.產製 DSM：在上述正射影像產製後，本研究人員以地面控制點測量資料進行空間轉換，將取得資料匯入 Pix4D mapper 航測影像處理軟體，生成點雲資料，最後產製 DSM。台中市新社區茄苳寮溪集水區拍攝時間為 2016/7/3 及 2016/10/4，拍攝面積約為 1.63 km^2，空間解析度約為 11.6 cm 至 11.8 cm。嘉義縣中埔鄉大湖底溪集水區拍攝時間為 2016/7/5 及 2016/11/3，拍攝面積約為 2.22 km^2，空間解析度約為 14.4 cm 至 18.7 cm。高雄市那瑪夏區南沙魯集水區拍攝時間為 2016/6/22 及 2016/10/21，拍攝面積約為 0.87 km^2，空間解析度約為 9.9 cm 至 11.4 cm。

e.產製 DSM 誤差說明：經本研究人員比對地面控制點測量資料與上述利用 Pix4D mapper 軟體產製 DSM 所得位置資料，三個集水區在水平空間誤差約在 0.1 m 以下，垂直空間誤差約在 0.2 m 以下。本研究在大湖底溪集水區拍攝後之比對，曾出現過垂直空間誤差達 2.5 m，但經詳查原因：該點位位於拍攝圖幅邊緣，經本研究判定應是航拍相片重疊率不足導致，也因該點並非未於本研究所討論的野溪河道上，因此在實際過程並不採用。

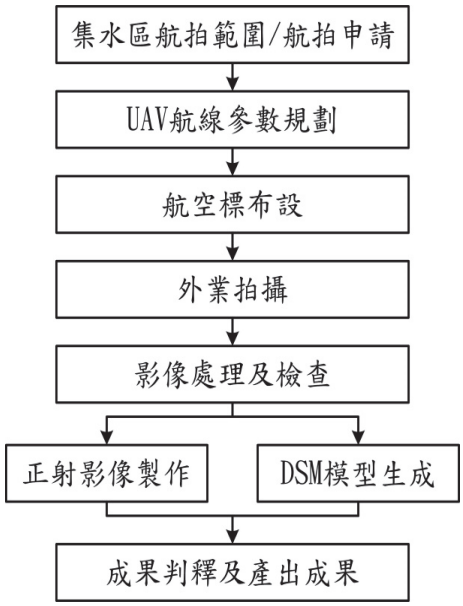


圖 3 本研究以 UAV 產製正射影像及 DSM 流程圖

Fig.3 The flow chart of producing the orthophoto images and DSM by using UAV in the study

(6) 防砂壩體防砂量估算：為瞭解施設防砂工程後對野溪土砂運移速度減緩的效果，本研究建議以年計防砂量估算，年計防砂量的定義可為「防砂設施於生命週期中，相較於未實施防砂設施時之總防砂量的年均值」。對於防砂壩體的

年計防砂量估算，本研究沿用松村和樹等 (1988) 所提出的估算方式，連惠邦及蔡易達 (2013) 也曾以台灣野溪防砂工程驗證過證明適用於台灣野溪。該估算方式建議以壩體高度、寬度及河床坡度量測值，即可判斷防砂壩體的總防砂量，而總防砂量包含貯砂量 S_1、土砂流出調節量 S_2 及土砂生產抑制量 S_3 等三項，如下述公式及圖 4 所示：

$$S_1 = \frac{1}{2} \times \frac{m \times n}{m-n} \times B \times H^2 \quad (1)$$

$$S_1 = 10BH^2 \quad (2)$$

$$S_2 = 18.7H^{2.79}B^{0.34} - \frac{S_1}{30} \quad (3)$$

$$S_3 = 0.17bL_S B_S \sin(\emptyset - m) \quad (4)$$

$$L_S = H \times \frac{m \times n}{m-n} \quad (5)$$

$$b = H\frac{\sin(90-n)}{\sin(90-\emptyset)} \quad (6)$$

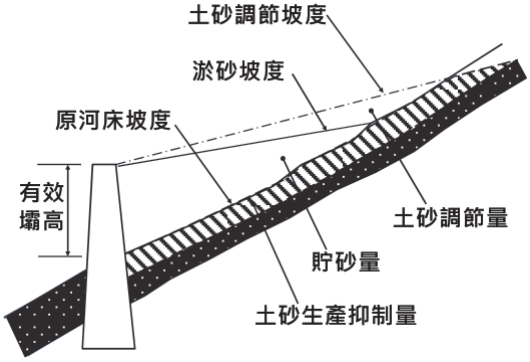


圖 4 野溪防砂工程貯砂量、調節量及抑制量示意圖 (Kasuki et al., 1988)

Fig.4 The definitions of sediment-storage, sediment-adjustment, and sediment-decrease volume of sabo dams. (Kasuki et al., 1988)

於上述公式中，B 為平均淤砂寬度 (單位：公尺)，H 為防砂壩體有效高度 (單位：公尺)，n 及 m 為原河床坡度及設計淤砂坡度 (也可採用原河床坡度之 1/2 至 2/3)。L_S 為淤砂長度 (單位：公尺)，φ 為調砂坡度 (也可採用原河床坡度之 3/4)，B_S 為平均河道寬度 (單位：公尺)。貯砂量 S_1 所代表的是該防砂壩體設計所能貯砂之土砂量體，土砂流出調節量 S_2 則代表因為防砂壩體設置，促使壩體上游面河床坡度減緩，此減緩的河床坡度線與原本壩體設計淤砂坡度線之間的淤積量，土砂生產抑制量 S_3 則為原本野溪河段在沒興建壩體前，可能產生的土砂量，但卻因為興建防砂壩體後，在壩上游段淤砂範圍內即可達到防止沖刷之土砂生產抑制量。

(7) 各集水區防砂功能量化評估及說明：防砂工程的興建能夠對野溪不穩定土砂逐漸達到穩定效果，一旦野溪河道趨於穩定，位於野溪兩岸的邊坡不易發生崩塌，進而擴展到防砂工程上游的野溪河段土砂穩定性，此即為本研究認為防砂功能對於野溪土砂之穩定方式，但此土砂穩定效果有限，並非位於防砂工程上游的全集水區內邊坡穩定都跟防砂工程相關。本研究以各集水區近年崩塌率及河岸崩塌率釐清隸屬於防砂工程達到土砂穩定的效果，並篩選在該集水區防砂工程興建完畢後至現在曾發生過的最大降雨事件及 2016 年梅姬颱風降雨事件，分析此兩場降雨事件及野溪流量推估數據 (僅 2016 年梅姬颱風)，並以多期 DEM 分析該集水區在防砂工程興建後至今的地形變遷量，而提出防砂壩體防砂量化數據，並將此數據區分為來自於防砂工程所達成野溪河道穩定的效果及陡峭邊坡因植生復育所產生的穩定效果。綜合以上分析方式，本研究流程如圖 5 所示。

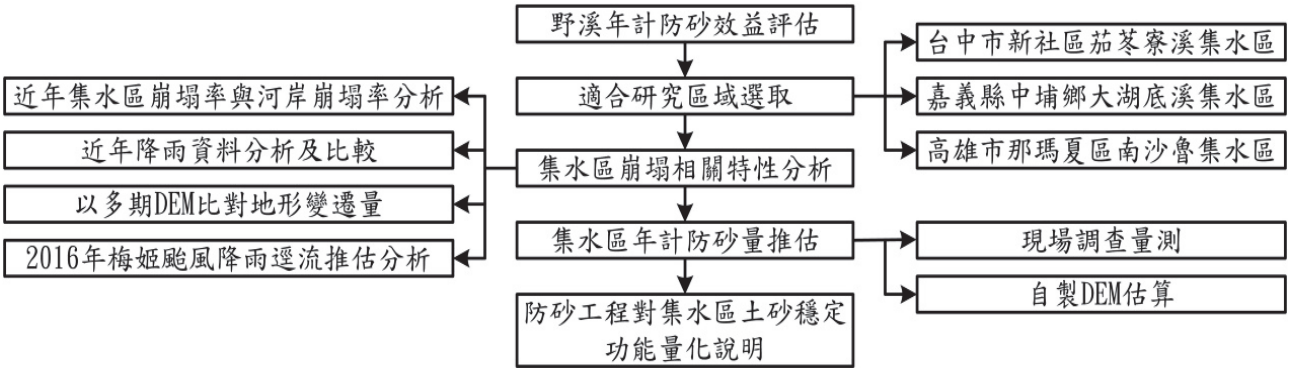


圖 5 本研究流程圖

Fig.5 The flowchart of this research

四、結果與討論

針對本研究所選集水區，各集水區土砂災害跟後續工程施設時間都不同，因此每一個集水區的野溪防砂工程所發揮的效能也不相同，本研究以分節方式一一論述野溪防砂工程在各集水區所發揮的效果。

1. 台中市新社區茄苳寮溪集水區近年野溪防砂功能量化說明

茄苳寮溪集水區近年土砂災害高峰期在 2013 年蘇力颱風 (Typhoon Soulik，侵襲時間：2013/7/11 至 13，崩塌率為近年最高)，但在 2008 年卡玫基颱風也曾誘發大量土砂往下游河段運移並造成野溪河段土砂嚴重淤積。該集水區在 2010 年至

2015 年間陸續施作野溪防砂工程，包括 47 座防砂壩體 (如圖 2)。以歷年崩塌分布分析而言，該集水區在 2013 年豪雨期間引發 3.3 公頃崩塌地 (包含 0.4 公頃位於距離河川 100 公尺內)，但爾後各年各年份崩塌範圍逐漸縮減，至 2016 年時崩塌面積僅剩下 0.4 公頃 (包含 0 公頃位於距離河川 100 公尺內)，代表由 2013 年至 2016 年的 3 年間，縮減的崩塌面積約佔 2013 年崩塌面積之 87.8%，約為平均每年崩塌縮減面積 29.2%。河岸崩塌也呈現類似趨勢，在 3 年內河岸崩塌面積縮減了 100.0 %，約為平均每年河岸崩塌縮減面積 33.3 %。由此點可發現屬於野溪防砂工程直接影響的河岸崩塌縮減率明顯大於坡面上的崩塌縮減率。

在集水區降雨資料分析上，茄苳寮溪集水區與龍安雨量站 (台中市新社區) 距離僅為兩公里，因此不論以幾個雨量站套用徐昇式法，在估算茄苳寮溪集水區平均雨量之各雨量權重上，龍安雨量站一直都是 100%，因此本研究對於茄苳寮溪集水區之雨量推估會直接以龍安雨量站降雨紀錄顯示。表 2 為茄苳寮溪集水區發生崩塌率最高的降雨事件分析數據，若以 2013 年蘇力颱風降雨事件最大 1、3、6、24 小時降雨紀錄搜尋 2008 年至 2012 年降雨紀錄，僅在最大 1 小時降雨紀錄上，曾有一次紀錄比該場事件還大 (2008/7/18 早上 6 點的 94.5 mm/hr)，但並未出現比該場事件最大 3、6、24 小時降雨還大的紀錄，因此可認定茄苳寮溪集水區在 2013 年的降雨崩塌主因是 239.0 mm/3-hrs、404.0 mm/6-hrs、563.5 mm mm/24-hrs。再以該場事件最大 1、3、6、24 小時降雨紀錄搜尋 2014 年至 2016 年降雨紀錄，並未有降雨紀錄比該場事件降雨累積值更大。

本研究在茄苳寮溪集水區下游安全橋處設置降雨及河川水位觀測站，雨量計採傾斗式雨量站，最短量測時間為每 10 分鐘一筆。水位記則採超音波水位計。圖 6 為茄苳寮溪集水區在 2016 年梅姬颱風期間 (2016/9/25 0 點至 2016/9/29 23 點) 之降雨、河川水位及流量分布圖。2016 年梅姬颱風所帶來的豪雨主要集中在西南台灣，在茄苳寮溪集水區所帶來的總雨量為 52 mm，最大 10 分鐘降雨強度為 3 mm/10 mins，在茄苳寮溪集水區之安全橋下最高水位高度約為 104 mm，經本研究換算為流量約為 1.2 cms。以圖 6 之比對而言，茄苳寮溪之降雨高峰值與河川水位流量高峰值都有對上。

在集水區的地形變遷分析上，茄苳寮溪集水區是屬於已經完成多期整治的集水區，在安全橋以上有多座歷年施作防砂設施，因此可用於檢視多重防砂工程對於野溪土砂運移的防砂效果。茄苳寮溪集水區歷年地貌變遷分析如圖 7 所示，本研究以 2011 年、2016 年 6 月及 2016 年 10 月 DEM 進行地形變遷比對，以 2011 年及 2016 年 6 月 DEM 比對主因在於瞭解 2013 年蘇力颱風引發該集水區最高崩塌率，野溪河段土砂在多重防砂工程下的運移情況，比對 2016 年 6 月及 2016 年 10 月 DEM 則在於瞭解 2016 年梅姬颱風在該集水區所引發的地形變遷量。由圖 7 可發現 2013 年蘇力颱風造成的土砂崩落情況，多數都在連續防砂工程間停淤，經兩期 DEM 比對結果顯示土砂淤積量約為 2.9 萬 m^3。而 2016 年梅姬颱風在本河段僅產生小規模地形變遷，河段總淤積量約為 0.05 萬 m^3，沖刷量約為 0.2 萬 m^3。

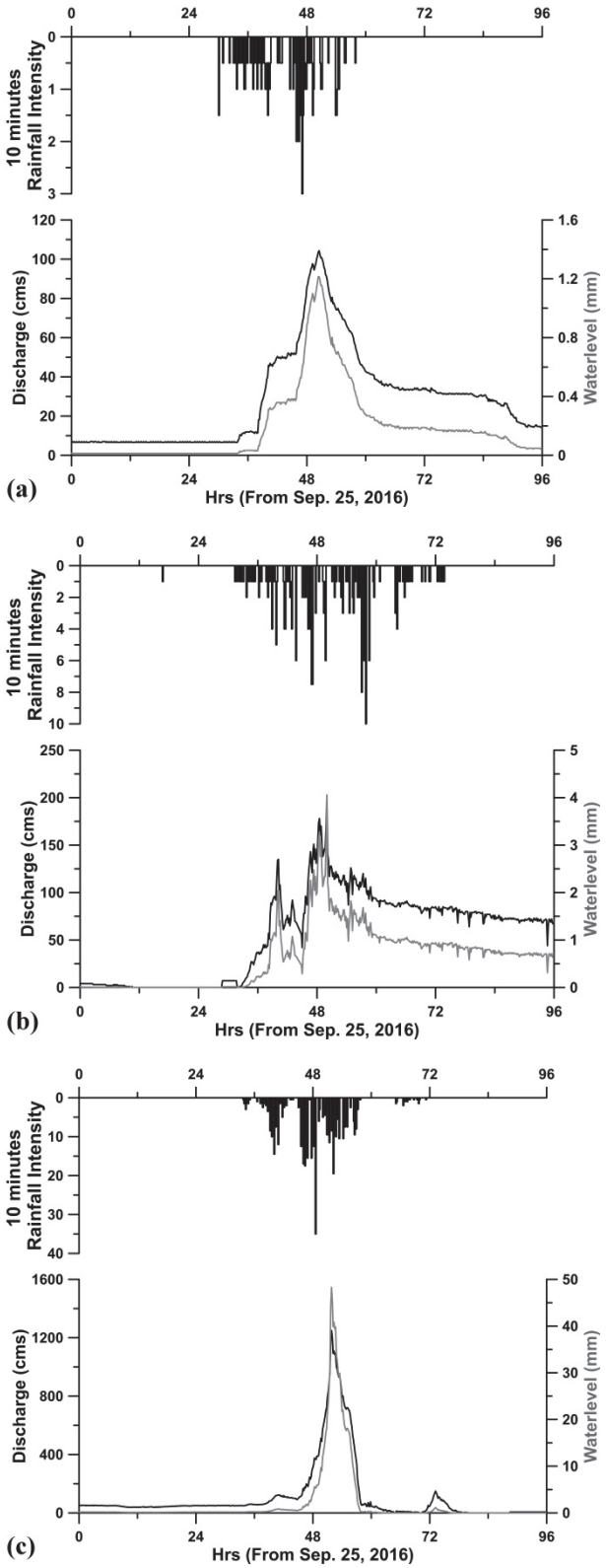


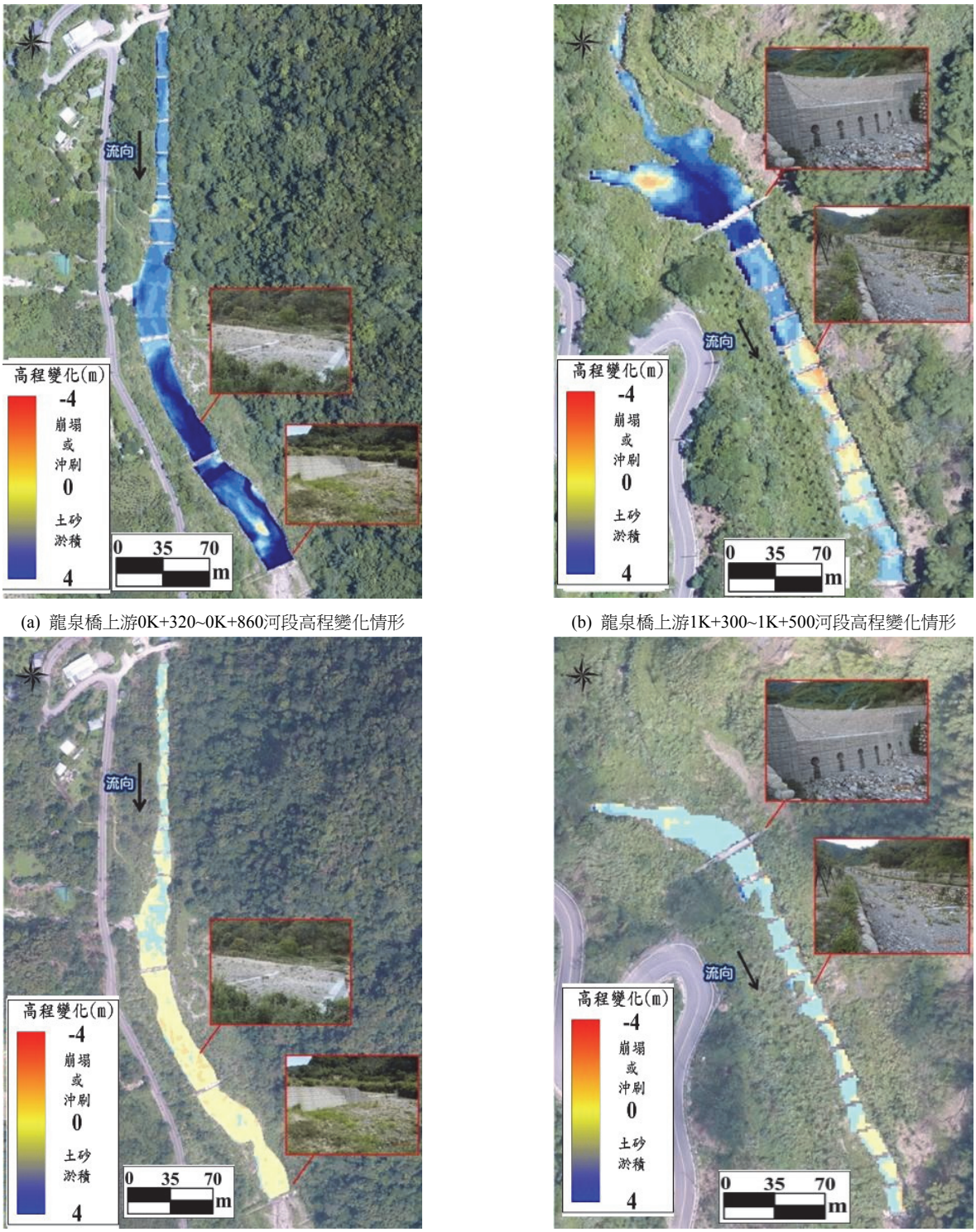
圖 6 本研究三個集水區在 2016 年梅姬颱風降雨強度、河川水位及流量分布圖。(a) 圖為茄苳寮溪溪集水區，(b) 圖為大湖底溪集水區，(c) 圖為南沙魯溪集水區

Fig.6 The distribution of rainfall intensity, water level, and discharge in the Qietongliao watershed (Fig. a), Dahudi watershed (Fig. b), and Nansaru watershed

表 2 本研究三個集水區誘發最高崩塌率之降雨事件分析

Table 2 The characteristic of rainfall events with the highest landslide ratio in the three watersheds

集水區	降雨日期	最大1小時	最大3小時	最大6小時	最大24小時	總降雨
茄苳寮溪	2013/7/12-13	88.5 mm	239.0 mm	404.0 mm	563.5 mm	563.5 mm
大湖底溪	2009/8/5-10	88.0 mm	244.0 mm	440.0 mm	1330.0 mm	2485 mm
南沙魯	2009/8/5-10	76 mm	218.8 mm	332.0 mm	946.8 mm	1627.5 mm



(a) 龍泉橋上游0K+320~0K+860河段高程變化情形

(b) 龍泉橋上游1K+300~1K+500河段高程變化情形

(c) 龍泉橋上游0K+320~0K+860河段高程變化情形

(d) 龍泉橋上游1K+300~1K+500河段高程變化情形

圖 7 茄苳寮溪溪集水區歷年地形變遷分布圖，圖 a 及 b 為 2011 年與 2016 年 6 月 DEM 比對圖，圖 c 及 d 則為 2016 年 6 月與 10 月 DEM 比對圖

Fig.7 The terrain change by comparing the DEMs between 2011 and Jun. 2016 (Figs. a and b) and Jun. 2016 to Oct. 2016 (Figs. c and d) in the Qietongliao watershed

表 3 三個集水區之年防砂量估算表

Table 3 The annual sediment trap volume in the three watersheds

集水區		茄苳寮溪	大湖底溪	南沙魯
防砂數值區間	個數	47	36	1
	H	0.3～4.0 m	0.3～7.0 m	5.5 m
	S_1	0.001~0.3556萬	0.001~0.0376萬m^3/年	1.2萬
	S_2	---	0.001~1.2002萬m^3/年	0.72萬m^3/年
	S_3	0.0002～0.1199萬m^3/年	0.0007～0.3794萬m^3/年	0.41萬m^3/年
總年計防砂量		1.6萬m^3/年	8.1萬m^3/年	1.17萬m^3/年

在野溪防砂工程之年計防砂量估算，本研究以自製高精度 DEM 及現場調查，估算河段內各防砂設施之有效高度 H，並進而推算攔砂量 S_1、土砂流失抑制量 S_2 及調砂量 S_3 等三數據，使用前述年計防砂量推估公式嘗試估算三個集水區之年計防砂量值。茄苳寮溪集水區年計防砂量估算過程如表 3 所示。茄苳寮溪集水區的野溪防砂治理工程由 2011 年陸續整治，現況除了龍泉橋上游新設的格柵式防砂壩尚未淤滿，其他過去於治理河段施設的防砂設施、固床工均已淤滿。經防砂壩年計防砂量估算，在累計 47 個防砂工程所展現出的一次性攔砂量量體 S_1 約為 1.2 萬 m^3，且年計調砂量 S_3 約為 0.4 萬 m^3，5 年內的調砂量總和為 2.0 萬 m^3，兩者累計約為 3.2 萬 m^3，約比前述土砂淤積量約為 2.9 萬 m^3 多出 10.3%，估算結果尚可接受。

2. 嘉義縣中埔鄉大湖底溪集水區

在歷年崩塌分析上，大湖底溪集水區在 2004 年敏督力颱風後後僅有 0.55 公頃 (都位於距離河川 100 公尺內)，集水區內崩塌地在 2009 年莫拉克颱風期間達到高峰，2009 年莫拉克颱風後該集水區總崩塌面積約為 28.6 公頃 (包含 8.5 公頃位於距離河川 100 公尺內)，但爾後各年份崩塌範圍逐漸縮減 (2016 年總崩塌面積比 2015 年總崩塌面積略增)，至 2016 年崩塌面積已縮小至 5.5 公頃 (包含位於 2.8 公頃位於距離河川 100 公尺內)，代表由 2009 年至 2015 年的 6 年間，縮減的崩塌面積約佔 2009 年莫拉克後崩塌面積之 80.8%，約為平均每年崩塌縮減面積 13.5%；而河岸崩塌也呈現類似趨勢，在六年內河岸崩塌面積縮減了 67.1%，約為平均每年河岸崩塌縮減面積 11.2%。

在降雨資料分析上，大湖底溪集水區與小公田雨量站 (嘉義縣番路鄉) 距離僅有 1.6 公里，因此本研究對於大湖底溪集水區之雨量推估會直接以小公田雨量站降雨紀錄顯示。以如同茄苳寮溪集水區檢視方式檢視大湖底溪集水區，大湖底溪集水區在 2009 年莫拉克颱風之最大 1、3、6、24 小時降雨紀錄如表 2 所示，以該紀錄搜尋事件發生前五年內降雨紀錄，大湖底溪集水區不乏有最大 1 小時降雨紀錄超過該次事件，但並未有最大 3、6、24 小時降雨紀錄超過該場降雨事件之紀錄，也可認定大湖底溪集水區最高崩塌率誘發原因是因為 2009 年莫拉克颱風所帶來的最大 3 小時累積降雨超過 244 mm 以上的降雨量。以前述紀錄搜尋事件發生後五年內降雨紀錄，大湖底溪集水區尚未出現過比該場降雨事件更大的紀錄。

在降雨逕流分析上，本研究也在大湖底溪集水區中崙四號橋上設置降雨 (傾斜式雨量站) 及河川水位 (超音波水位計) 觀測站，圖 6 為大湖底溪集水區在 2016 年梅姬颱風期間 (2016/9/25 0 點至 2016/9/29 23 點) 之降雨、河川水位及流量分布圖。梅姬颱風在大湖底溪集水區所帶來的總雨量為 185 mm，最大 10 分鐘降雨強度為 10 mm/10 mins 在大湖底溪集水區之中崙四號橋下最高水位高度約為 202 mm，經本研究換算為流量約為 4.1 cms。

在地形變遷分析上，大湖底溪集水最高崩塌率發生在 2009 年莫拉克颱風後，因此本研究採用 2008 年、2011 年、2016 年 6 月及 2016 年 10 月四期 DEMs 比對，主要瞭解 2009 年莫拉克颱風及 2016 年梅姬颱風在大湖底溪集水區內的地形變遷情況，比對結果如圖 8 所示。以 2008 年與 2011 年比對過程可發現大湖底溪集水區土砂流失現象主要來自於河岸左右兩側及最上游的崩塌，且崩落土砂立即在下邊坡處的河道鄰近淤積，經估算土砂流失量約為 151.2 萬 m^3，土砂殘留約為 29.6 萬 m^3，則大湖底溪在 2009 年莫拉克颱風前後的土砂生產量約為 121.6 萬 m^3。以同樣方式檢視 2016 年 7 月至 10 月 DEM 比對結果，可從圖中清楚發現在 2009 年發生的河川左右兩側及最上游的源頭崩塌面積都縮小，崩塌幅度也降低，但崩塌下邊坡鄰近河道處土砂逐漸往下游運移。經估算地形變遷量，2016 年梅姬颱風在大湖底溪引發的土砂流失量約為 13.5 萬 m^3，土砂殘留量約為 2.6 萬 m^3，土砂生產量約為 10.9 萬 m^3。

在年計防砂量推求上，大湖底溪集水區的野溪防砂治理工程由 2009 年莫拉克颱風誘發大量土砂後開始施設，經本研究估算，野溪河段上共 36 個防砂工程所累計之年計防砂量約為 8.1 萬 m^3，若以 2009 年莫拉克颱風後起算至 2016 年為止，大湖底溪河段上之防砂量可達 56.7 萬 m^3。比對前述 2009 年莫拉克颱風土砂生產量與 2016 年梅姬颱風土砂生產量兩者差值約為 110.7 萬 m^3，此差值除由野溪防砂工程所達成的 56.7 萬 m^3 外，剩餘的 54.0 萬 m^3 則來自於崩塌地植生復育所產生的穩定效果。

3. 高雄市那瑪夏區南沙魯集水區

在歷年崩塌分佈上，本研究比對南沙魯集水區多期衛星影像，在 2009 年莫拉克颱風前僅有 0.6 公頃 (包含 0.1 公頃位於距離河川 100 公尺內)，集水區內崩塌地在 2009 年莫拉克颱風期間達到高峰，2009 年莫拉克颱風後該集水區總崩塌面積約為 51.3 公頃 (包含 24.6 公頃位於距離河川 100 公尺內)，包含 1 處面積超過 10 公頃以上的大規模崩塌地 (large landslides)，但爾後各年份崩塌範圍逐漸縮減，至 2015 年崩塌面積已縮小至 11.8 公頃 (包含 6.7 公頃位於距離河川 100 公尺內)，代表

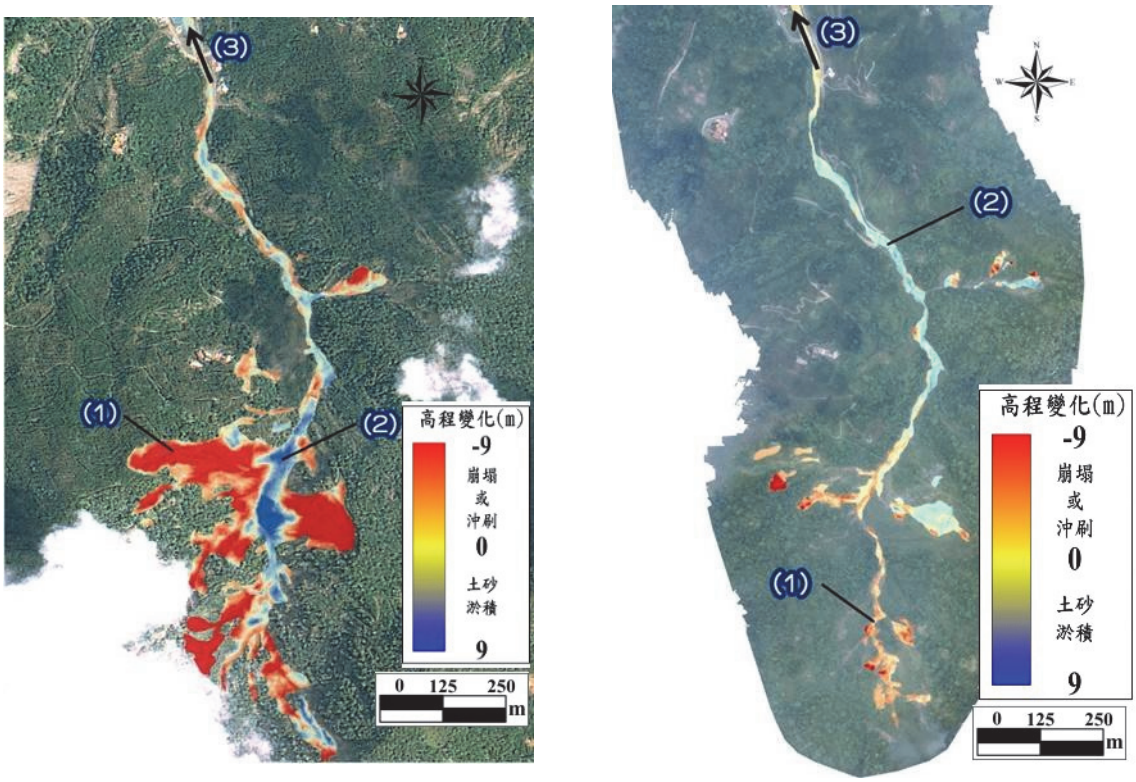
由 2009 年至 2015 年的 6 年間，縮減的崩塌面積約佔 2009 年莫拉克後崩塌面積之 77.0%，約為平均每年崩塌縮減面積 12.8%；而河岸崩塌也呈現類似趨勢，在六年內河岸崩塌面積縮減 72.7%，約為平均每年河岸崩塌縮減面積 12.1%。

在降雨資料分析上，本研究以以徐昇式法估算南沙魯集水區之降雨量，採用雨量站及權重分別為高中雨量站 (高雄市桃源區) 的 1.0%、民生雨量站 (高雄市那瑪夏區) 的 16.5%及表湖雨量站 (高雄市那瑪夏區) 的 82.5%，以上述各雨量站降雨資料及權重結合後之南沙魯集水區雨量如表 2 所示。南沙魯集水區最高崩塌率發生在 2009 年莫拉克颱風後，本研究以 2009 年莫拉克颱風事件中之最大 1、3、6、24 小時降雨紀錄搜尋事件發生前五年內及事件發生後五年內降雨紀錄。搜尋結果如大湖底溪集水區搜尋結果，不乏有最大 1 小時降雨紀錄超過 2009 年莫拉克颱風之最大 1 小時降雨紀錄，但並未有最大 3、6、24 小時降雨紀錄超過 2009 年莫拉克颱風之紀錄，可認定南沙魯集水區的最高崩塌率誘發原因是因為 2009 年莫拉克颱風所帶來最大 3 小時累積雨量超過 218.8 mm 導致。以前述紀錄搜尋事件發生後五年內降雨紀錄，南沙魯集水區尚未出現過比該場降雨事件更大的紀錄。

在降雨逕流分析上，本研究也在南沙魯集水區南沙魯橋上設置降雨 (傾斗式雨量站) 及河川水位 (超音波水位計) 觀測站，圖 6 為南沙魯集水區在 2016 年梅姬颱風期間 (2016/9/25 0 點至 2016/9/29 23 點) 之降雨、河川水位及流量分布圖。2016 年梅姬颱風在南沙魯集水區所帶來的總雨量為 395 mm，最大 10 分鐘降雨強度為 35 mm/10 mins，在南沙魯集水區之南沙魯橋下最高水位高度約為 1249 mm，經本研究換算為流量約為 48.3 cms。

在地形變遷分析上，南沙魯集水最高崩塌率發生在 2009 年莫拉克颱風後，因此本研究採用南沙魯集水區興建防砂工程後的 2010 年、2016 年 6 月及 2016 年 10 月三期 DEMs 比對，主要瞭解在 2010 年興建防砂工程後的防砂量及在 2016 年梅姬颱風下的地形變遷量，比對結果如圖 9 所示。由圖 9 可發現，在興建防砂壩體後，由壩體往上游 220 公尺河段產生明顯土砂淤積，這一段河段的土砂淤積量估算約為 2.9 萬 m^3，此也代表興建防砂壩體所產生的減緩土砂運移速度功能。而 2016 年梅姬颱風前後地形變遷圖可發現：壩體上游呈現沖刷趨勢，惟靠近防砂壩上游處土砂淤積，淤積量約 0.3 萬 m^3。

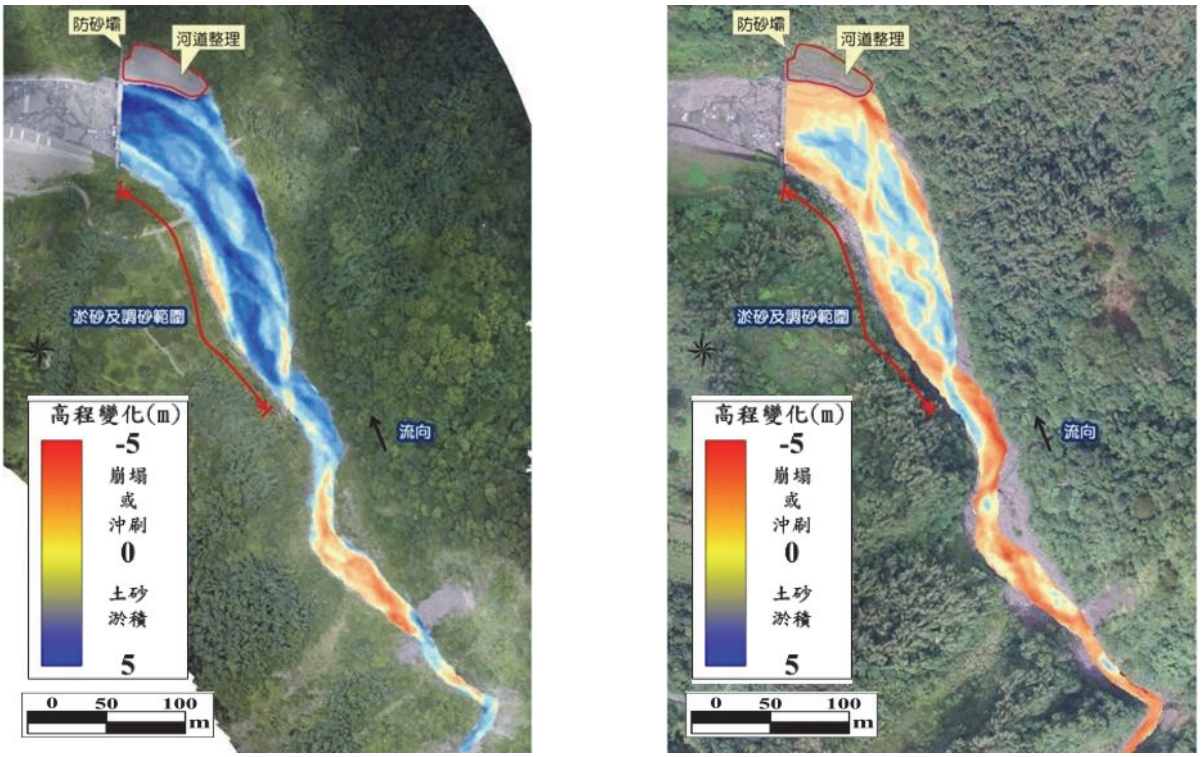
在年計防砂量推求上，南沙魯集水區僅在下游施設一座防砂壩體，有別於上述兩個集水區為多座連續壩體所產生的綜合防砂效果。根據表 3 調查資料，考慮該集水區防砂工程由 2011 年施設至今約為 5 年，則將防砂壩體一次性攔砂量 1.2 萬 m^3 (採有效高度以公式 (1) 推求) 與年計調砂量 S_3 乘上 5 年並累計，估算所得之總量約為 3.25 萬 m^3，約比前述推算壩體上游 220 公尺內之土砂淤積量 2.9 萬 m^3 多出 12.1%，估算結果尚可接受。



(a) 2008 年至 2011 年地形變化：莫拉克颱風前後　　(b) 2016 年 7 月至 10 月地形變化：梅姬颱風前後

圖 8 大湖底溪集水區歷年地形變遷分布圖

Fig.8 The terrain change by comparing the DEMs between 2008 to 2011 (Fig. a) and Jun. 2016 to Oct. 2016 (Fig. b) in the Dahudi watershed



(a) 2010年至2016年6月地形變化　　(b) 2016年6月至10月地形變化：梅姬颱風前後

圖 9 南沙魯集水區歷年地形變遷分布圖

Fig.9 The terrain change by comparing the DEMs between 2010 to Jun. 2016 (Fig. a) and Jun. 2016 to Oct. 2016 (Fig. b) in the Nansaru watershed

五、討　　論

以上述三個具有不同崩塌率及不同壩體數的集水區綜合比較分析中，本研究可提出幾點進行討論：

1. 防砂壩體的功能除了原設計壩體之貯砂量外，更應包含防砂壩體施作促使野溪河道土砂趨於穩定，進而產生的河岸崩塌率的復育。以茄苳寮溪集水區而言，近年的兩場崩塌率較高事件分別為 2008 年卡玫基颱風及 2013 年蘇力颱風，若以最大 1、3 及 6 小時累積降雨資料而言，茄苳寮溪集水區與大湖底溪集水區及南沙魯集水區的差異不遠，甚至在最大 1 小時降雨上還是三個集水區最大者，發生年份也最接近 2016 年，但茄苳寮溪集水區卻是三個集水區在 2016 年檢視崩塌分佈下，崩塌率及河岸崩塌率復育最高的集水區。從崩塌分佈圖也可發現：茄苳寮溪集水區的崩塌發生處較遠離野溪，崩落土砂進入野溪河道仍須時間，且在該集水區野溪上施作連續防砂工程，的確在該集水區收到土砂穩定的成效。

   大湖底溪及南沙魯集水區的河岸崩塌率復育都介於 11.2%至 12.1%/年，且從崩塌分佈圖可發現兩個集水區的崩塌都以位於野溪河道兩旁居多，但在野溪防砂工程施作後，都可以產生河道土砂穩定及抵抗洪水啟動土砂的功能，雖然前述分析提及這三個集水區都尚未再次遇到引發最高崩塌率的降雨事件同等規模之降雨事件，但野溪河道土砂經過多年穩定而逐漸形成穩定基質，增加河川底床抵抗洪水沖刷及土砂啟動的能力，這部分的量化數據需要更多監測及地形變遷資料比對才能說明，但此功能卻是防砂壩體除了壩體貯砂量外，對野溪河道所提供的最重要關鍵。

2. 因為野溪防砂工程存在而促使河段土砂逐漸穩定且植生復育，是難以量化但卻存在間接性防砂功能。本研究列舉高雄市茂林區萬山溪野溪治理工程、台東縣大武鄉大鳥部落崩塌及野溪治理工程及台東縣達仁鄉土阪二號橋野溪整治工程為例，並配合本研究以無人飛行載具 (UAV) 拍攝影像比對過往與現況差異。

   圖 10 為高雄市茂林區萬山溪野溪治理工程植生復育情況，包含在 2010 年 12 月完工後的現場照片及本研究逾 2016 年 6 月以 UAV 拍攝之空拍照片比對，可清楚發現在工程完工時，該地區主要裸露地區在於上游邊坡崩塌裸露面及整治河道兩旁河床土砂淤積，但在工程施設 5.5 年後，野溪河道上的植生復育明顯，僅剩為控制流心的主流路尚有少許裸露，而上游邊坡崩塌裸露坡面也有明顯植生復育，經本研究概估包含河道及上游原邊坡裸露面，植生復育速率約為 70%/4.5 年，平均約為 15.6%/年。

   圖 11 則為台東縣大武鄉大鳥部落崩塌及野溪整治工程植生復育情況，包含在 2011 年 3 月完工後的現場照片及本研究於 2016 年 9 月以 UAV 拍攝之空拍照片比對，在 2011 年完工後照片可發現當地裸露範圍包含上游崩塌區、土砂輸送段及下游土砂堆積區，而經本研究以 UAV 拍攝照片顯示多數地區都已出現明顯植生復育，若不計原下游土砂淤積區的裸露面積，僅估算上游崩塌坡面與土砂輸送段之裸露面積，則本研究概估此區域植生復育速率約為

90%/5.5 年，平均約為 16.4%/年。

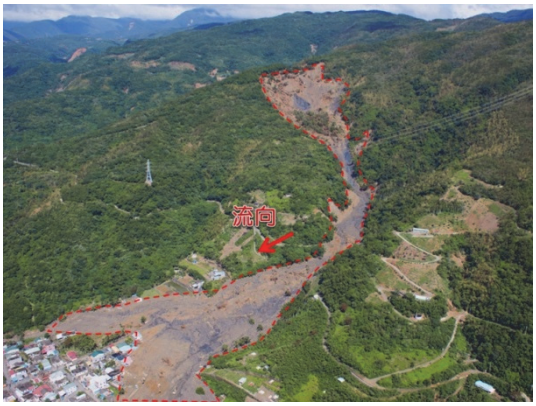
圖 12 則為台東縣達仁鄉土坂二號橋野溪整治工程植生復育情況，包含在 2012 年 9 月完工後的現場照片與本研究於 2016 年 9 月以 UAV 拍攝之空拍照片比對，該工程主要包含防砂壩 1 座、固床工 16 座、護岸 198 公尺等。由照片可發現過往災害沖毀當地橋樑，且在野溪上游坡面有兩處大面積裸露之崩塌土砂來源，但在研究以 UAV 拍攝照片顯示面向上游的左側坡面裸露已僅剩下匯流野溪處仍裸露外，其餘坡面都以植生復育，面向上游右側坡面則在坡頂處尚為裸露及下邊坡處部分裸露，其餘地區也都植生復育，野溪整治河道則尚未有植生復育，但裸露區域已經縮減，經本研究概估此區域植生復育速率約為 60%/4 年，平均約為 15.0%/年。

拍攝日期：2010年12月 (來源：土石流防災資訊網)

拍攝日期：2016年7月 (來源：本研究UAV)

圖 10 高雄市茂林區萬山溪上游野溪整治工程植生復育情況

Fig.10 The vegetation recovery in the sabo dams area in the upstream watershed of Wanshan river in Kaoshiung City

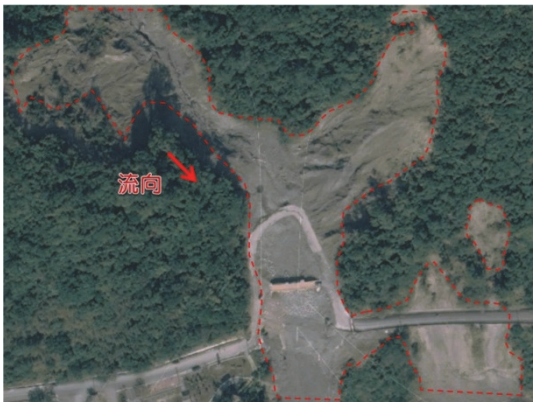


拍攝日期：2011年3月 (來源：土石流防災資訊網)

拍攝日期：2016年9月 (來源：本研究UAV)

圖 11 台東縣大武鄉大鳥部落上游崩塌地及野溪整治工程植生復育情況

Fig.11 The vegetation recovery in the sabo dams area in the upstream watershed of Daniaw village in Taitung City



拍攝日期：2011年3月 (來源：水保局GEE資料)

拍攝日期：2016年9月 (來源：本研究UAV)

圖 12 台東縣達仁鄉土阪二號橋野溪整治工程植生復育情況

Fig.12 The vegetation recovery in the sabo dams area in the Tubian No. 2 Bridge in Taitung County

六、結　　論

本研究主要說明野溪防砂工程之功能量化及分析方式，並挑選茄苳寮溪集水區、大湖底溪集水區及南沙魯集水區等三個集水區為研究對象，並以歷年崩塌分佈、降雨資料比對、降雨逕流分析、地形變遷分析及年計防砂量推求等方式，嘗試將防砂工程之功能全方位量化說明。以各集水區在近年發生最高崩塌率年份後，並施設野溪防砂工程後所得到的崩塌率縮減分別為茄苳寮溪集水區之 29.2%/年、大湖底溪集水區之 13.5%/年及南沙魯集水區之 12.8%/年，而若以與野溪防砂工程更相關的河岸崩塌率縮減率而言，則分別為茄苳寮溪集水區之 33.3%/年、大湖底溪集水區之 11.2%/年及南沙魯集水區之 12.1%/年。而若以本研究另外提出三個過往嚴重崩塌河段 (包括萬山溪、大鳥部落及土坂二號橋野溪) 在施作防砂工程後的崩塌率縮減情況，則其數據都介於每年縮減 15.0%至 16.4%之間。若以年計防砂量而言，則三個集水區數據分別為茄苳寮溪集水區之 1.6 萬 m^3/年、大湖底溪集水區之 8.1 萬 m^3/年及南沙魯集水區之 1.17 萬 m^3/年。

參考文獻

[1] 中華水土保持學會 (2005)，「水土保持手冊」，行政院農業委員會水土保持局。(Chinese Soil and Water Conservation Society. 2005. Soil and Water Conservation Manual. Soil and Water Conservation Bureau. (in Chinese))

[2] 朱達仁、李宗儒、施君翰 (2005)，「石門水庫上游集水區防砂壩現況與管理分析」，台灣林業，31(3)，49-57。(Chu, D.R., Lee, C.N., and Shi, J.H. (2005). “The management of sabo dams in the upstream watershed of Shihmen reservoir.” *Taiwan Forestry Journal*, 31(3), 49-57. (in Chinese))

[3] 連惠邦、蔡易達 (2013)，「水土保持防砂工程防砂量計量模式之建立與應用」，中華水土保持學報 44(4)，351-362。(Lien, H.P., and Tsai, I.T. (2013). “A computational model of sediment control for soil and water conservation engineering.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*，44 (4), 351-362. (in Chinese))

[4] 黃俊翔 (2013)，「空載光達於內插方法與不同地形類別精度分析」，成功大學地球科學系碩士論文。(Huang, C.H. (2013). *Accuracy analysis of Airborne LiDAR on different interpolation and terrain classification*. Master Thesis, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[5] 賴承農、許振崑、林伯勳、張玉蕣、冀樹勇、簡以達、蔡明發 (2014)，「曾文南化烏山頭水庫集水區河道土砂防治效益量化評估」，中興工程，122，35-44。(Lai, C.N., Hsu, C.K., Lin, B.S., Chang, Y.N., Chi, S.Y., Chie, I.D., and Tsai, M.F. (2014). “The assessment of sediment trap efficiency in the rivers of Tsengwen, Nanhua, and Wushantou reservoir watersheds. ” *Sinotech Journal*，122, 35-44. (in Chinese))

[6] 許振崑、林伯勳、洪世勳、冀樹勇、邱世宜、鐘啟榮 (2012)，「石門水庫集水區防砂設施囚砂量調查及淤砂坡降評估」，水保技術，7(3)，162-172.(Hsu, C.K., Lin, B.S., Hung, S.H., Chi, S.Y., Chiu, S.Y., and Chung, C.R. (2012). “The evaluation of trapped sediment and deposition gradients for the check dams in Shih-Men reservoir watershed.” *Journal of Soil and Water Technology*，7(3), 162-172. (in Chinese))

[7] 陳樹群、趙益群、安軒霈 (2007)，「孔隙型防砂壩對細顆粒泥砂囚砂效果之研究」，中華水土保持學，38(1)，55-63。(Chen, S.C., Chao, Y.C., and An, S.P. (2007). “Fine sediment trapping effect by porous check dam.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*，38(1), 55-63. (in Chinese))

[8] 松村和樹、中筋章人、井上公夫 (1988)，「土砂災害調査マニュアル」，鹿島出版社，日本，88-92。(Kazuki, M., Akito, N., and Kimio, I. (1988). *Sediment disaster Investigation manual*. Kajima Institute Publishing Co., Japan, 88-92. (in Japanese)

[9] Brune, G.M. (1953). “Trap efficiency of reservoirs.” *Transactions of the American Geophys-ical Union*. 34, 407-418.

[10] Romero Díaz, A. (2008). “Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión.” *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34, 83-99.

[11] Romero-Díaz, A., Marín-Sanleandro, P., and Ortiz-Silla, R. (2012). “Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. ” *Catena*, 99, 42-53.

[12] Verstraeten, G., and Poesen, J. (2000). “Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessement of sediment yield.” *Progress in Physical Geography*, 24 (2), 219-251.

[13] Verstraeten, G., and Poesen, J. (2001). “Modelling the long-term sediment trap efficiency of small ponds.” *Hydrological Processes*, 15, 2797-2819.

2017 年 01 月 20 日　收稿
2017 年 03 月 21 日　修正
2017 年 05 月 08 日　接受

(本文開放討論至 2017 年 12 月 31 日)