



第七章 結論與建議

7-1 結論

本計畫運用多元尺度環境監測及調查，建置曾文水庫集水區監測資料及整治前、後之地形高程，進而合理並實質量化重要治理區域集水區整治成效，以及推估未來土砂演變趨勢，供以做為工程規劃滾動式檢討方針、土砂抑制條件策略及治理對策評估依據。茲就工作成果所獲得重要觀察與具體結論，整理如次。

1. 集水區基本資料

藉由曾文水庫集水區基本資料，除可瞭解歷年災害潛勢及分布資訊，另可作為後續監測點位規劃及選定、崩塌誘發關連因子探討、以及評估保育治理成效等；茲將分析結果條列如下：

1. 曾文水庫集水區內年平均降雨量高達 2,350mm，且近 10 年之年平均降雨量約為過去之 1.11 倍；此外，曾文水庫年平均降雨量更明顯大於台灣年平均降雨量；且平均降雨量大於世界平均降雨量值(約 973mm)，高達 3 倍之多。
2. 由集水區水文分析發現，最大 1 日暴雨其降雨主要集中於集水區中游之里佳、新美、樂野、達邦等治理分區，以及下游大埔治理分區偏西北方；而最大 2 日暴雨其降雨則集中於里佳、新美、樂野、達邦等治理分區。
3. 本計畫蒐集 49 件歷史災害案例中，大多以道路崩塌為主，計有 28 件；其次屬土石流，計有 9 件；其他大多以一般崩塌，計有 7 件；護岸淘刷，計有 3 件；邊坡落石與水庫淤積，各為 1 件。其災情多集中於上游樂野與達邦治理分區。

2. 水庫集水分區重點治理區域坡面及溪流資料現地調查

本計畫完成集水區環境監測工作項目，共包含土壤厚度調查、地表沖蝕量調查、溪床斷面量測及溪床粒徑調查等四項，用以監控土砂生產運移環境以及探討保育治理成效。茲將環境監測重要觀察成果，歸納說明如次：



1. 經由現場環境觀察得知，曾文水庫集水區境內砂源主要源於逕流沖蝕坡面、崩塌與土石流、主河道長期堆積之沈積物、不穩定之邊坡堆積等四種；目前以鄰近水庫入流區域之曾文溪主河道上，堆積材料多以細顆粒土砂為主，恐於汛期隨暴漲溪水運往下游庫區，造成水庫淤積。
2. 本計畫完成 30 處土壤厚度調查並結合水保局(2011^b)於茶山治理分區之調查成果，發現隨著邊坡坡度愈陡，所得土壤厚度值愈小。其中，以樂野治理分區之崩塌厚度最大，可達 165cm，對應坡度為 21 度；大埔治理分區崩塌厚度最小，約為 17cm，對應坡度為 54 度。另曾文溪主流坡面土壤平均厚度約為 60cm，支流坡面土壤平均厚度約為 74cm。
3. 本計畫完成 20 處沖蝕針鋪設及 5 次監測工作(含 0719 豪雨及南瑪都颱風事件)，並結合水保局(2011^b)於茶山治理分區之調查成果，可以得知以茶山治理分區中頓阿巴娜溪集水區土壤沖蝕厚度最高，為 2.23 cm；以達邦治理分區之達德安溪集水區最小，其沖蝕厚度為 1.22cm。
4. 本計畫於「曾文溪主流上山美橋至大埔橋區間」，進行兩次溪床斷面測量作業並建置河道斷面基礎資料，藉以監測曾文水庫集水區河道變遷及中游河段土砂運移行為。發現兩次溪床斷面調查期間，溪床水流流路多有變動情況，且溪床堆積材沖淤互現。由曾文溪由大埔橋至山美橋區間內河道(中游運移段)，總沖刷土方為 106,360 m³，總淤積土方為 143,046 m³，淨淤積土方量約為 36,686 m³。
5. 本計畫配合溪床斷面測量完成辦理 20 處溪床樣坑及 40 處表面粒徑採樣調查，以監測溪床溪床粒徑組成與顆粒大小變化情形，用以瞭解莫拉克颱風於曾文溪主流造成之沖淤影響，以及計畫期間 0719 豪雨與南瑪都颱風等兩場降雨事件造成之推移質運移情況。綜合二次調查成果顯示，於茶山治理分區以上河道區段，溪床堆積材料 D₅₀ 均有細化現象，顯示南瑪都颱風與 0719 豪雨等事件降雨期間，溪床中運移之推移質粒徑尺寸有變小趨勢。

3. 遙測影像多元尺度監測及分析



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分析並完成歷史及本計畫空載 LiDAR 施測產製高精度數值高程模型比較分析工作。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歷史 9 場災害事件崩塌地判釋成果，以及 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. 經比較歷史及本期(100 年 6 月)空載 LiDAR 資料分析成果顯示，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，後續應持續注意該區域土砂生產量變化，以降低水庫淤積潛勢風險。
3. 由於本計畫尚缺 98 年莫拉克後達邦、里佳、樂野及新美等四個治理分區之數值地形資料，故僅能分析「97 年至 100 年 6 月」乙期土砂運移變化；經分析顯示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；依此，建議未來需蒐集並補足莫拉克颱風後乙期數值地形資料，以利進行較完整之治理前後比較及成效追蹤。
4. 本計畫利用無人載具(UAV)完成樂野治理分區內樂野大崩塌中低空照片拍攝後工作，其保育治理現況說明如下：

(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

樂野大崩塌左岸處崩塌右側已治理完竣；崩塌坡址左側坡面正以鋪



網、噴植草種與縱、橫向截排水工法進行坡面整治中。整體上，現況植生復育速度良好，惟建議觀察源頭處坡面後續是否持續擴大跡象。

5. 透過本計畫樂野大崩塌之三維視覺模擬成果，可以發現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；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。

4. 集水區土砂生產環境演變及評估保育治理工程成效

本計畫根據蒐曾文水庫集水區多元尺度環境調查監測資料與各項分析成果，探討集水區土砂生產環境以具體評估曾文水庫集水區整體保育治理成效，有效回饋至土地利用管理策略研提及集水區整體治理規劃。以下茲就「坡面」、「河道」及「整體集水區」等不同空間尺度土砂生產區域，分述如下：

一、坡面區域

1. 透過本計畫建立「不同坡度」土壤厚度經驗式，若於某一災害事件發生，針對災害區域內輸入任一淺層崩塌坡面之坡度值，用以快速估算崩塌高程值，再乘上對應之崩塌面積，並評估潛在土方量或可能落入河道供砂量，將有助於相關單位進行災後復建工程規劃及保育成效評估之參考。
2. 依據現地沖蝕針監測成果以及蒐集同步監測資料，分別建立「整治邊坡」及「裸露邊坡」等兩類型之新增土壤沖蝕厚度與累積雨量關係式；藉由沖蝕針監測成果推估得知，現階段曾文水庫集水區內人為整治後邊坡至少降低 33.64% 之土壤流失，最大可達 84.15%，其整體平均值為 57.18%，顯示現階段各治理分區保育治理工程漸有成效。



4. 若欲強化 MUSLE 估算土壤沖蝕量對土砂產量之貢獻程度及所佔比例大小精確度，除需掌握降雨量資訊外，仍需注意不同植生或地質岩性所代表地表滲透率，建議可透過試驗方式如現地雙環試驗、定水頭及變水頭試驗等，獲得土壤材料參數並瞭解雨水入滲地表狀況及特性，配合率定公式計算不同區域土壤沖蝕性指數(K_m)，再與現地沖蝕針試驗相互驗證，以求確實掌握集水區土壤沖蝕量多寡及細粒料來源分布。

二、河道區域

1. 透過兩次溪床斷面測量成果可以發現，現階段於草蘭治理分區內曾文溪主河道上，原莫拉克颱風引致之大量堆積物係為直接造成曾文水庫庫容縮減主要砂源之一。而茶山與新美等 2 治理分區內河段主河道上則呈現土砂停淤情況。另大埔治理分區內兩支流溪床高程則無顯著變動，暫無土砂產量直接入庫之虞。
2. 綜合二次溪床粒徑調查成果顯示，於茶山治理分區以上河道區段，溪床堆積材料 D_{50} 均有細化現象，顯示南瑪都颱風與 0719 豪雨等事件降雨期間，溪床中運移推移質粒徑尺寸有變小趨勢。
3. 透過蒐集之泥砂濃度資料顯示，整體而言以曾文溪下游之懸浮質輸砂量較少，顯示上游輸砂能力大於下游河段，與本計畫溪床斷面以及溪床粒徑調查(茶山與新美治理分區沿線河段)分析結果相符。
4. 綜觀本計畫執行期間河道區域調查資料顯示，除溪床上原有莫拉克颱風引致堆積材料係為庫容主要淤砂來源之外，新美治理分區內之達娜伊谷溪以及茶山治理分區內之頓阿巴娜溪集水區亦可能係潛在砂源之一，建議後續需持續監測溪床高程變動情況，以確實釐清造成水庫淤積主要砂源供應區域；此外，亦建議相關單位應適時辦理河道清淤工作，以確保河道暢通及流心穩定，或於沿線道路易清淤處設置臨時沉砂池，進而減少土砂入庫量。

三、整體區域



1. 依據近 10 年內衛星影像崩塌地變遷歷程分析成果顯示，曾文水庫集水區境內，於莫拉克颱風前後，總崩塌地面積約增加 4 倍，高達 1,485.2ha。此後集水區內總崩塌地面積有隨保育治理工程陸續竣工持續縮小趨勢，並且總新增崩塌地面積亦有逐年減低趨勢，顯見保育治理成效。
2. 經由分析結果顯示曾文水庫集水區於莫拉克颱風以前，整體崩塌復育面積約為 220ha。莫拉克颱風後因治理工程進駐，每年曾文水庫集水區整體崩塌復育面積提高至 1,000ha，顯見人為介入確有加速崩塌植生復育成效。
3. 經崩塌地致災因子關聯性分析成果發現，山坡地範圍內以 500m 至 1,250m 高程間距、坡度六級坡以上、三峽群及其相當地層、以及土地利用圖中之天然林等地文因子，與各期崩塌相關性較高。此外，值得注意的是，若崩塌面坡向與地層位態趨於一致時，將大幅增加崩塌機率。
4. 由保全對象影響範圍內崩塌地潛在砂源評估可以發現，現階段於山坡地範圍內係以茶山與樂野治理分區境內保全對象受潛在土砂量影響較高，建議後續計畫可檢討此兩治理分區之保育治理工程是否符合土砂防治量需求，以達保土蓄水並防止土砂災害發生。
5. 依據曾文水庫集水區 12 治理分區之降雨與新增崩塌量關聯性分析結果，可供快速預測集水區單場暴雨引致崩塌產量並配合崩塌厚度之合理估算值，用以推估該場降雨之土砂產量且對於釐清集水區土砂貢獻量高低及崩塌來源多寡，進而評估防砂設施土砂控制量是否有達至設計目標，供以即時災後復建規劃。
6. 透過歷年衛星影像評析曾文水庫集水區山坡地範圍內植生覆蓋率結果，發現山坡地範圍植生覆蓋率於莫拉克颱風後由 92.23% 下降至 77.48%。於 99 年起整治工程進駐且陸續竣工至 100 年 9 月南瑪都颱風後，植生覆蓋率上昇至 90.05%，逐漸恢復接近整治前之植生覆蓋程度。
7. 透過本計畫治理分區內「行電橋野溪」及「龍蛟溪」等案例分，經分析



顯示各階段整治工程後，不僅有效控制坡面土壤沖蝕、且抑制坡面崩塌量及穩定溪床、更使植生復育提升；且經評估結果顯示，現階段集水區工程規模至少 200 年重現週期之單場暴雨引致之新增土砂量體，降低土砂災害發生，減少直接入庫泥砂量並延長水庫使用壽命。

8. 根據本計畫曾文水庫集水區土砂生產環境分析成果，據以評估保育治理計畫實施迄今(99 年至 100 年)，於曾文水庫集水區內山坡地範圍總土砂防治量約為 $5,941,890\text{m}^3$ ，總土壤沖蝕抑制量約為 $55,719\text{m}^3$ ；總溪床淤積量為 $286,092\text{m}^3$ ；總防砂量體 $6,283,701\text{m}^3$ ，累計達至執行計畫防砂目標之 45.53%。
9. 經本計畫評估土砂生產量、土砂防治量以及土砂入庫量可知，隨保育治理工程措施陸續竣工後，集水區內土砂入庫量已被逐年控制，於 99 年至 100 年等兩年期間，已減少 $9,491,848\text{m}^3$ 之土砂入庫量，若相較曾文水庫年平均淤積量 $7,104,000\text{m}^3$ ，約可使水庫壽命延長 1.3 年左右。



7-2 建議

本計畫藉由集水區基礎資料及配合本計畫建置重點區域多時期多元尺度之環境空間變遷實測資訊，已確切有效評估治理工程投入後曾文水庫集水區內保育治理及植生復育成效，供以後續保育治理措施規劃、設計及效益評估之參考及修正依據，並輔以進行集水區健康檢查與管理。最後，茲提出相關建議供作未來計畫執行及精進方向參考，條列如下：

1. 水庫集水區綜合性且標準化監測及調查

曾文南化烏山頭等水庫集水區將於 101 年將步入第三年期治理階段，惟目前僅完成曾文水庫集水區多元尺度調查監測及空載光達施測產製高精度數值地形等工作；未來建議應針對曾文南化烏山頭水庫等集水區辦理綜合性且標準化監測及調查，以使作業標準化、調查效率化以及資料同步化，利於進行監測資料彙整及比較，供以統一對外並呈現保育治理成效。

2. 集水區治山防災結構物整體性調查

辦理 99~101 年度曾文、南化、烏山頭水庫集水區內已竣工之防砂設施現況調查，建置基本資料、使用與受損情形，以及防砂設施之淤砂情形，藉以評估現階段儲砂量體、結構物安全性能以及檢核設計淤砂坡降，據此有效追蹤後續所發揮土砂防治成效。

3. 集水區產砂環境變遷研析及治理成效

延續辦理集水區各項監測工作並累積長期資料，定可深入研析集水區產砂環境，從坡面至河道，由區域至廣域，分就「崩塌面積復育量」、「土壤沖蝕抑制」、「河道輸砂變化」、以及「土砂防治量」等四大面相，逐步深究並具體量化反應集水區治理成效，以確保集水區土砂安定及維持環境生態穩定。另新美以上治理分區(如達邦、樂野)，因欲蒐集其他公部門產製數值地形仍未完成驗收階段，未能即時納入本計畫一併分析，續以分析並釐清莫拉克颱風後引致土砂變動量以及集水區治理後保育治理成效。