

曾文及南化水庫集水區土砂防治量比較研究

賴承農^[1*] 許振崑^[1] 林伯勳^[2] 簡以達^[3] 蔡明發^[3]

摘要 本研究針對莫拉克颱風後曾文及南化水庫集水區治山防災工程，透過標準化作業程序，將工程構造物區分為河道橫向構造物(防砂設施、固床工)、河道側向構造物(護岸)。根據現場調查成果，以現地實測法及與理論模式法比較年平均防砂量結果，顯示曾文水庫集水區現地實測法之防砂量為 104.36 萬 m³/年，理論模式法為 294.3 萬 m³/年；南化水庫集水區現地實測法為 23.37 萬 m³/年，理論模式法為 44.55 萬 m³/年，皆以理論模式法之推估結果大於現地實測法，且約為 1.91 至 2.82 倍。兩者估算土砂防治量結果之差異，主要在於河道兩側坡面潛在土砂抑制量計算方式不同所導致。採用現地實測法僅可估算河道側向構造物後方背填土砂量，尚無法量化高於河道側向構造物上方兩側坡面之潛在土砂抑制量；理論模式法則可經由數學理論推導出兩側坡面之潛在土砂抑制量，但相關參數需先率定及掌握明確。本研究建議可結合兩種估算方法之優勢，整合計算集水區土砂防治量，供以作為其他水庫土砂防治量計算之參考。

關鍵詞：莫拉克颱風，曾文水庫，南化水庫，土砂防治量。

Comparative Study on Estimation of Sediment Control Volume in Tsengwen and Nanhua Reservoir Watersheds

Cheng-Nung Lai^[1*], Cheng-Kun Hsu^[1], Bor-Shiun Lin^[2], Yi-Da Chien^[3],
Ming-Fa Tsai^[3]

ABSTRACT This study utilized standard operating procedures to investigate disaster prevention engineering structures constructed after Typhoon Morakot in Tsengwen and Nanhua reservoir watershed. These structures can be divided into hydraulic transverse structures (sediment control facilities and ground sill works) and hydraulic lateral structures (revetments). According to the results, measurement in situ method (MSM) and theoretical model method (TMM) are both adopted to estimate annual average amount of sediment control volume. Results shows annual average amount of sediment control volume of Tsengwen reservoir watershed is 104.36 10⁴m³/year and 294.3 10⁴m³/year estimated respectively by MSM and TMM ; sediment control volume of Nanhua reservoir watershed is 23.37 10⁴m³/year and 44.55 10⁴m³/year estimated respectively by MSM and TMM. Therefore, TMM estimates is approximately 1.91 to 2.82 times MSM estimates. The difference of these two methods is owing to the different calculations of sediment control volume on slopes. MSM can only estimate sediment control volume of slopes backfilled behind revetments, but cannot estimate sediment control volume in the upslope of revetments. TMM can directly calculate both situations, but requires the preparation of parameters which are difficult to calibrate. Therefore, this study suggests a combination of both methods can be employed to integrate the amount of sediment control volume as a reference for sediment prevention of other reservoir watersheds.

Key Words: Typhoon morakot, Tsengwen reservoir, Nanhua reservoir, sediment control volume.

-
- [1] 中興工程顧問社防災科技研究中心副工程師 (* 通訊作者 E-mail: jackylai@sinotech.org.tw)
Associate Engineer, Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc. Taipei 114, Taiwan
- [2] 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長
Senior Researcher, Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc. Taipei 114, Taiwan
- [3] 行政院農業委員會水土保持局保育治理組
Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Nantou 540, Taiwan

一、前言

曾文水庫及南化水庫集水區於莫拉克颱風後，集水區土砂災害嚴重及水庫壽命劇減，為延續水庫使用壽命及維護民生供水，政府遂緊急於 2010 年公布「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水特別條例」，並由經濟部研擬「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫」，其保育治理層面之計畫目標為「抑制土砂生產，減少泥砂入庫」、「加速植生復育，防止崩塌擴大」。颱風豪雨造成大量崩塌土砂，沿陡坡隨水流下移，沖刷能量在輸送過程產生溪床縱橫向沖刷現象，使溪床向下切割及兩側邊坡崩塌，因此採以防砂工程作為山坡地土砂生產控制的主要手段之一，其工程構造物可形成攔蓄土砂，調節流出土砂、抑制溪床及兩岸土砂生產，達到穩坡固床之效果，因而衍生出推估其工程防砂量之關鍵課題(水保局，2011^a)。為釐清保育治理工程之土砂抑制生產及有效評估水庫集水區內保育治理成效，依河道沖刷區位分為橫向及側向，河道橫向構造物包括防砂壩以及固床工，河道側向構造物為護岸。防砂壩防砂機理主要在於抬高溪床沖刷基準面，使在壩頂以下之上游溪床及兩岸土砂，免於沖刷以維持安定；此外，因抬高溪床沖刷基準面，於上游側溪流內取得某特定容積，以蓄積及調節自壩體上游之來砂量。因此，防砂壩應具有貯砂量、調節量及溪床生產抑制量等防砂機能(水保局，2012^b)，一般可利用土砂防治量計算予以表示或量化其防砂機能。本文首先說明土砂防治量計算方法，再根據曾文水庫及南化水庫集水區現場調查成果，以現地實測法與理論模式法比較年平均防砂量結果及獲得相對倍率，可供為其他水庫集水區土砂防治量設計之參考。

二、土砂防治量計算方法

探討防砂工程在水土保持與水庫集水區保育治理工作上，針對防砂量自竣工後所發揮可防止影響範圍內土砂流失之體積量；除結構安定及生態保育問題外，防砂量是目前唯一可以具體量化表徵其治理成效之重要參數(水保局，2011^{a, d}；水保局，2008)。**水保局(2014)**針對河道橫向構造物防砂設施之貯砂量、調節量及土砂生產抑制量，與河道側向構造物護岸之貯砂量及土砂生產抑制量分別說明。

1. 現地實測法：

(1) 防砂壩：防砂壩土砂防治量，含貯砂量及調節量；貯砂量計算方法，採用縱斷面法並配合地形量測，估算而得(林務局，1991、1992；松村和樹，1988；水利署，2002a；朱達仁等，2005；水保局，2011^c)。除原河床坡度及壩高可由工程管考系統提供外，其他資訊可經現地地形量測或計算公式推求獲得，相關調查資訊資料來源對照表整理如表 1 所示。以下說明連續壩以及單一壩之計算。連續壩單位壩寬度之貯砂量(V_x ，如圖 1 之斜線面積)之計算式：

$$V_x = L \times H_e / 2 \quad (\text{式 1})$$

單獨一座防砂壩貯砂量，令 $H_e + H_x = \tan \alpha \times L$ ； $H_x = \tan \beta \times L$ ，則貯砂量公式之淤砂長度 L 之計算式以及推求單一設施之貯砂量 V_m 之計算式：

$$L = H_e / (\tan \alpha - \tan \beta) \quad (\text{式 2})$$

$$V_m = V_x \times B_w = \frac{1}{2} \frac{H_e^2}{(\tan \alpha - \tan \beta)} B_w \quad (\text{式 3})$$

調節量為大洪水事件後短暫停留於貯砂空間上方的土砂量，可藉由事件後之實測淤砂坡度，配合原始溪床坡度評估計算，或可透過具代表性水力模式進行演算，進一步做為防砂效益評估應用。**水保局(2014)**彙整有關水力模式與溪床土砂調節量之研究計畫，包括曾文水庫、南化水庫以及眉溪集水區案例演算(如 CCHE1D、SEC-HY21 等模式)，據以建立調砂比(=貯砂量/調節量)，可藉由貯砂量推求調節量，一般而言調砂比可設定為 9%。

(2) 固床工：固床工防砂量受限於構造物高度僅略高或與溪床齊平，雖影響範圍有限，但仍可抑制河

道上游土砂生產量及防止運往下游土砂量。單座固床工之貯砂量(V_D ，如圖 2 之斜線面積)之計算式(水保局，2012^a)如下：

$$V_D = H \times L_S \times \bar{B} \quad (\text{式 4})$$

式中， H ：固床工上游土砂堆積平均高度。

L_S ：固床工與上游橫向構造物之間距。

\bar{B} ：固床工上游溪流平均寬度。

- (3) 河道側向構造物：側向構造物護岸係指為保護河岸免於遭受水流淘刷而將構造物直接構築於岸坡，其主要功能在於保護河岸及穩定坡腳，可抑制溪流兩岸坡面之土砂生產，示意圖詳圖 3 所示。護岸貯砂量(V_R)之計算式(水保局，2012^a)如下：

$$V_{Ri} = (A_{iL} + A_{iR}) \times L_{i,ave} \quad (\text{式 5})$$

$$A_{iL} = X_{iL} \times Y_{iL} \quad (\text{式 6})$$

$$A_{iR} = X_{iR} \times Y_{iR} \quad (\text{式 7})$$

式中， A_{iL} 、 A_{iR} ：第 i 段河道左右側土砂防治平均面積。

$L_{i,ave}$ ：第 i 段河道左右側護岸平均長度。

X_{iR} 、 X_{iL} ：第 i 段河道左右側土砂防治平均寬度。

Y_{iR} 、 Y_{iL} ：第 i 段河道左右側護岸平均高度。

2. 理論模式法：假設一座構造物於設計使用年限、高強度降雨事件中不致發生邊坡破壞以及在溪床高程變化相當有限等限制條件下，尚能維持河床穩定之功能，並確保河道兩岸坡面土砂處於安定等(水保局，2011^a)。該研究過程以曾文水庫集水區之埔頭溪、韭菜湖及阿里山溪等 3 處子集水區共計 9 處工程資料及現地調查資料為樣本，建立簡易工程構造物之土砂抑制模式以及防砂量推估公式。

- (1) 防砂壩：考量防砂設施防砂量與其「有效壩高」及「壩長」之關聯度較高。其建立迴歸公式供以計算貯砂量，如下：

$$S'_{CT} = 559.77 \cdot h_s^{2.79} \cdot B^{0.34} \quad (\text{式 8})$$

式中 S'_{CT} ：防砂壩生命週期內總防砂量(m^3)； h_s ：有效壩高(m)； B ：壩長(m)。

- (2) 固床工：考量固床工防砂量與其施設之「溪流平均寬度」、「縱向影響範圍」及「渠道底質 50% 過篩之粒徑」之關聯度較高。建立迴歸公式供以計算貯砂量，如下：

$$S_S = 1.74 D_{50}^{-0.11} L_S \bar{B} \quad (\text{式 9})$$

式中 \bar{B} =溪流平均寬度； L_S ：縱向影響範圍； D_{50} =渠道底質 50%過篩粒徑(m)，詳見表 2 所示。

- (3) 河道側向構造物護岸：考量其防砂量與其「有效護岸高」之關聯度較高。其建立迴歸公式供以計算貯砂量，如下：

$$S'_R = 55.102 \cdot e^{0.5147h_R} \quad (\text{式 10})$$

$$S_R = L \cdot S'_R \quad (\text{式 11})$$

式中， S'_R ：單位長度護岸防砂量(m^3/m)； h_R ：有效護岸高(m)； S_R ：護岸總防砂量(m^3)；

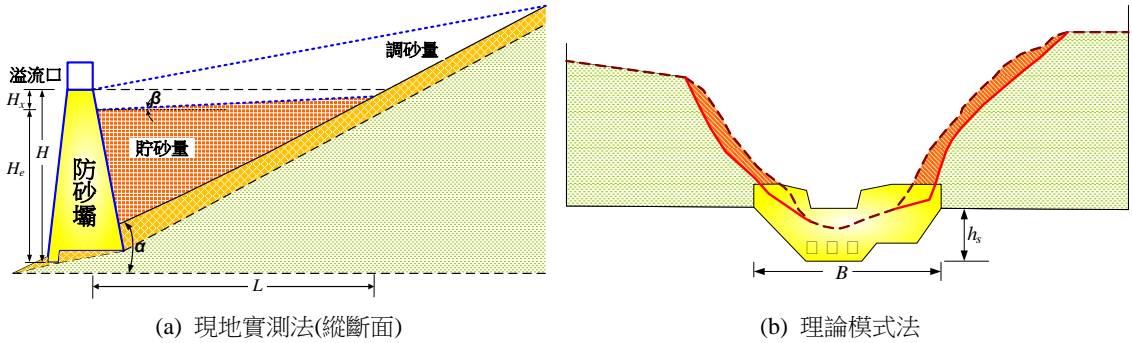
L ：護岸總長度(m)。護岸防砂量估算示意詳見圖 3 所示。

- (4) 設計使用年限：結構物經過長期使用，受到外在環境物理化學作用而造成使用性能降低，隨著時間之演進，最終將導致結構物性能消失，結構強度嚴重老化，必須加以拆除重建(水保局，2011^a)。

因此，參考行政院主計總處於民國 103 年 5 月訂頒之「財物標準分類」規定，有關水土保持防砂設施最低使用年限(T)，參見表 3；結構物自施建開始至功能完全喪失，進而推演防砂設施之總防砂量及年平均防砂量之估算式，如下式。

$$\overline{S_{CT}} = \frac{S_{CT}}{T} = \frac{S'_{CT} + S_S + S_R}{T} \quad (式 12)$$

式中， $\overline{S_{CT}}$ 、 S_{CT} ：防砂設施年平均防砂量、總防砂量(m³)；T：防砂設施最低使用年限(年)；
 S'_{CT} ：防砂壩總防砂量(m³)； S_S ：固床工總防砂量(m³)； S_R ：護岸總防砂量(m³)。



(a) 現地實測法(縱斷面)

(b) 理論模式法

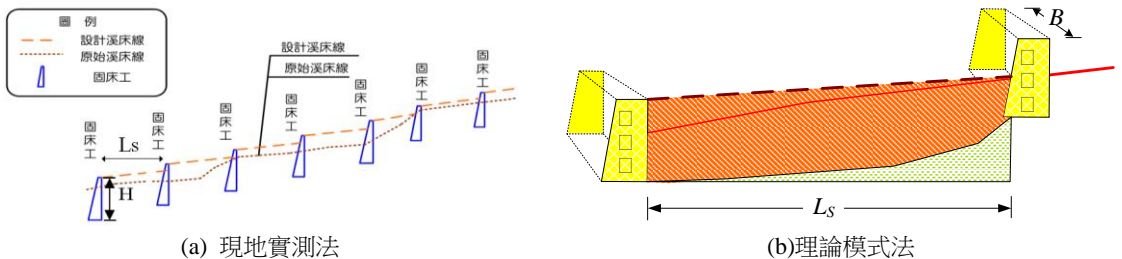
圖 1 防砂設施防砂量計算示意圖 (虛線代表為輔助線)

Fig 1 Schematic layout of sediment control volume for check dam

表 1 治山防災構造物調查資訊對照表

Table 1 Definition of disaster prevention engineering structures investigation

代號	名稱	定義	來源
H	壩高	壩底至溢流口間高差	工程設計圖
α	原河床坡度	原始河床坡度	
B_w	淤砂寬度	壩後淤積寬度	
L	壩體上游淤砂長度	兩防砂壩間距離或有效淤砂高度(He)除以原河床坡度之正切值	現地量測
He	有效淤砂高度	「壩高」扣除「溢流口至淤積底床」間距離	推估值
β	現況坡度	以有效淤砂高度求得	



(a) 現地實測法

(b) 理論模式法

圖 2 固床工防砂影響範圍計算示意圖 (虛線代表為輔助線)

Fig 2 Schematic layout of sediment control volume for ground sill works

表 2 水庫集水區河床底質 50%過篩粒徑(m)對照表

Table 2 List of river-bed material D_{50} data in Tsengwen and Nanhua reservoir watershed

項次	水庫集水區	溪流段	50%過篩粒徑(m)	備註
1	曾文水庫	上游	0.028-0.050	樂野、達邦、長谷川
		中游	0.0006-0.090	新美、茶山、草山
		下游	0.0037-0.090	大埔、草蘭
2	南化水庫	上游	0.041-0.049	木瓜坑、平坑仔
		中游	0.0070-0.011	竹子山
		下游	0.013-0.020	庫區

參考資料：水利署(2007^b)「曾文水庫整體治理調查規劃」、水保局(2011^b)「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」、水保局(2011^f)「南化與烏山頭水庫坡地土砂生產調查分析」、水利署(2011^b)「曾文溪河道冲刷成因調查監測及防治策略研究(1/2)」。

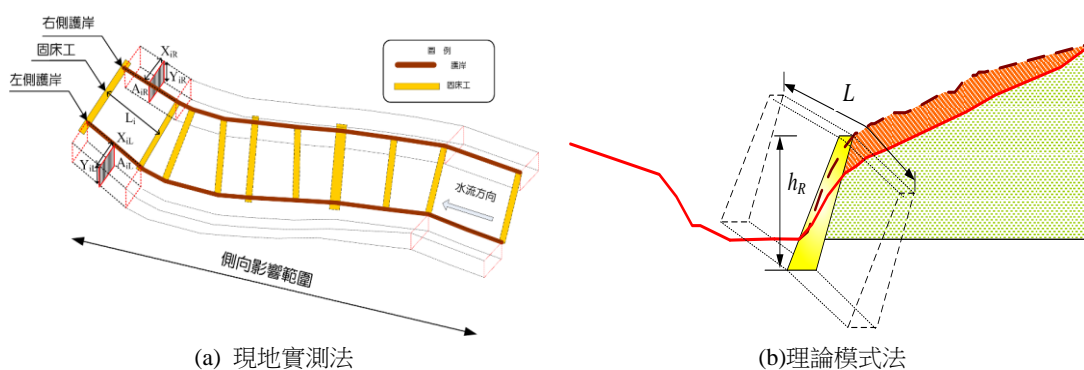


圖 3 護岸防砂影響範圍計算示意圖 (虛線代表為輔助線)

Fig 3 Schematic layout of sediment control volume for revetment

表 3 治理工程構造物不同材料性質之最低使用年限(主計總處, 2013)

Table 3 Minimum lifetime of different engineering structure types

項次	構造物類別及使用年限
1	堰壩、版橋、箱涵及水池，最低使用年限定為 40 年。
2	明渠、排水溝、護坡，另於研究範圍之消能池、靜水池亦屬於排水溝、明渠之構成元件，最低使用年限均定為 30 年。
3	護岸、順壩、排樁透水設施及最低使用年限定為 20 年，另於研究區域之固床工屬整流設施，其使用年限亦歸類為此一等級。
4	採預鑄、可調整或現地組立之格柵型式，由於大多數鋼骨建構成防砂壩，設計之鋼骨厚度較厚，預估最低使用年限為 30 年。
5	護岸、護坡、丁壩及順壩等，最低使用年限 10 年。

三、研究區域概述及研究流程

3.1 研究區域概述

涵蓋曾文水庫、南化水庫集水區，行政區域跨越嘉義縣大埔鄉、高雄市甲仙區、臺南市官田區以及南化區，其地理位置詳見圖 4。在水庫集水區水系方面，曾文水庫集水區面積約為 481 km²，集水區內共分為樂野、里佳、新美、草山、大埔、草蘭、長谷川、中坑、伊斯基安那、茶山、塔庫布央及達邦等十二治理分區，水系發源於阿里山脈水山(標高 2,609m)，主流曾文溪為長谷川溪與伊斯基安那溪匯流成，曾文溪上游均屬山谷河川，流路受制蜿蜒曲折，下游段為平原區，河床質係由泥砂土組成，易形成淤積(水保局, 2010^b)。南化水庫集水區面積約為 108.3 km²，集水區內共分為木瓜坑、平坑仔、

竹子山及庫區等四治理分區，南化水庫集水區主流後堀溪屬於曾文溪支流，水系發源於三角南山(標高 1,186m)，後堀溪左右兩岸支流甚多，分別呈非字型流入後堀溪本流(水保局，2010)。研究區域總共分成 16 個治理分區，各水系及地形地勢空間分布如圖 4(a)、圖 4(c)。在水庫集水區治山防災工程方面，水保局於民國 98 年莫拉克颱風後至 103 年 9 月底，於曾文水庫及南化水庫集水區已辦理且已完竣河道工程計有 229 件；其中曾文水庫集水區共計完成 194 件工程，南化水庫集水區共計完成 35 件工程，保育治理工程分布圖如圖 4(b)、圖 4(d)。本研究區域涵蓋 98 年莫拉克颱風後至 103 年 9 月底止，水保局已完竣河道工程共計 229 件。所獲得調查資料均建置為 GIS 數位檔，分成「資料統計」、「調查彙整」、「分析評估」等三大部份(如圖 5)；在資料統計方面，針對已完竣治山防災工程之河道橫向構造物，進行構造物分類統計；於現地覆核構造物分布、評估構造物功能以及量測構造物後方淤砂高度及範圍。最後，評估水庫集水區實際(或潛在)防砂總量，以有效追蹤後續所發揮土砂防治成效。

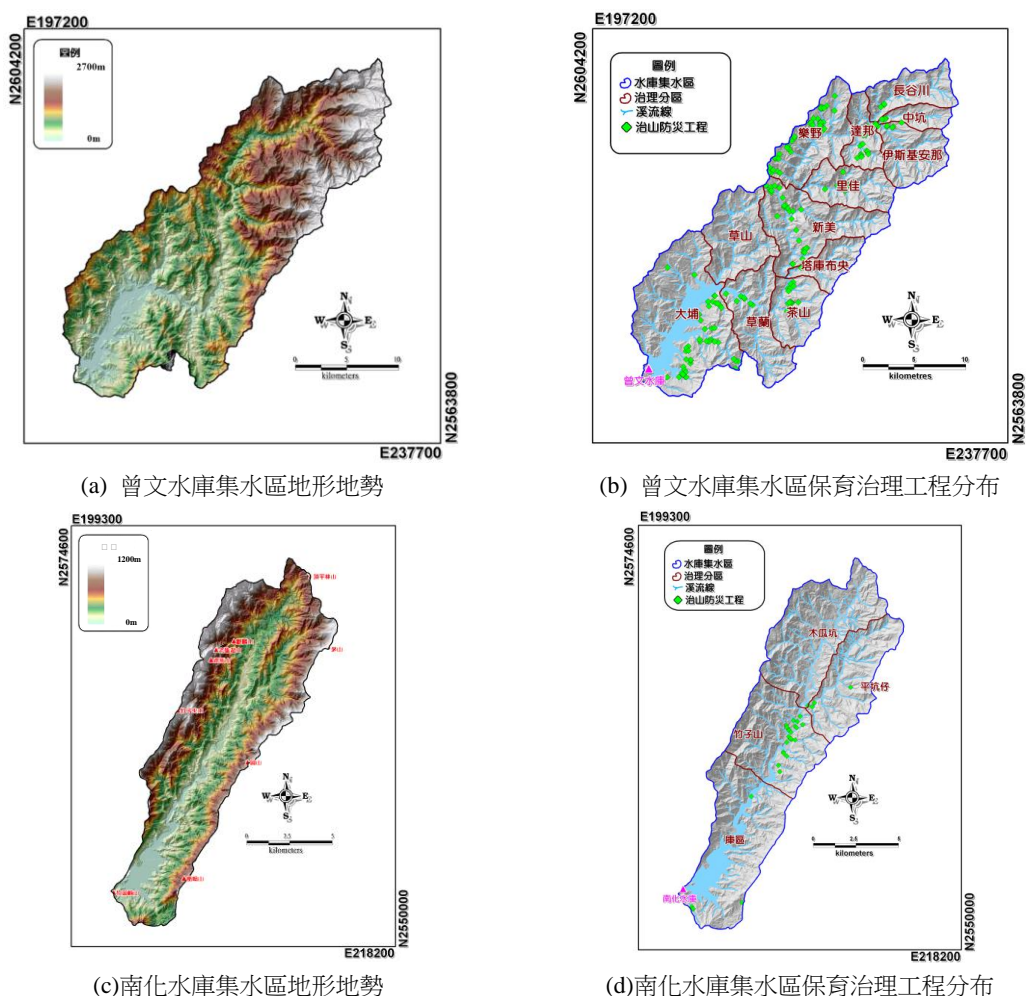


圖 4 地形地勢及治理工程分布圖 (摘自 水土保持局，2013)

Fig 4 Geographic map of terrain and conservation engineering practices

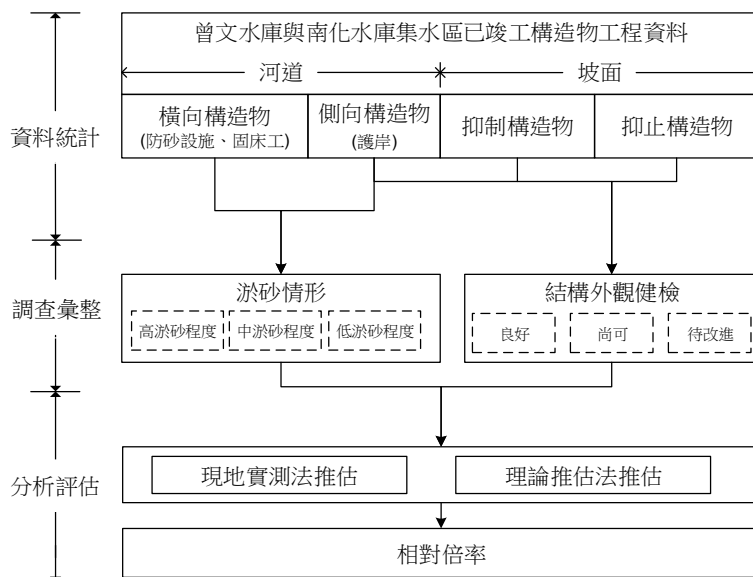


圖 5 治山防災構造物調查評估流程圖

Fig 5 Procedure of investigation and evaluation for disaster prevention engineering structures

四、水庫集水區治山防災工程統計與防砂量推估

本研究於曾文水庫及南化水庫治山防災構造物現地調查成果，以現地實測結果推估發揮水庫集水區防砂量；然後，再以理論模式法推估河道防砂量，比較兩者差異性。

一、治山防災工程統計

為瞭解自 98 年莫拉克後迄 103 年 9 月底曾文水庫及南化水庫集水區山坡地治山防災構造物分布區域，進行水庫集水區範圍野溪及工程案件分布統計，統計結果說明如下：

1. 曾文水庫集水區：山坡地治山防災工程分布於 49 處野溪，以大埔治理分區 15 處野溪及 49 件工程為最多，其次為樂野治理分區計有 7 處野溪及 43 件工程，以塔庫布央治理分區最少計有 1 處野溪及 1 件工程，總計完成調查 194 件治山防災工程。
2. 南化水庫集水區：以竹子山治理分區計有 22 件為最多，其次為庫區治理分區計有 9 件，以平坑仔治理分區最少計有 4 件，總計 35 件。

表 4 水庫集水區治理分區野溪及河道工程件數統計表

Table 4 Statistics of torrents and engineering works in conservation engineering divisions

水庫集水區	治理分區	野溪(處)	工程(件)	水庫集水區	治理分區	野溪(處)	工程(件)
南化水庫	庫區	3	9	曾文水庫	樂野	7	43
	平坑仔	1	4		達邦	3	16
	竹子山	8	22		伊斯基安那	1	12
	小計	12	35		長谷川	1	3
曾文水庫	草蘭	5	7		里佳	1	17
	大埔	15	49		塔庫布央	1	1
	茶山	5	14		小計	49	194
	新美	10	32		總計	61	229

二、水庫集水區現地實測總量與理論推估總量比較

根據前述曾文水庫與南化水庫治山防災構造物現場調查結果，以現地實測法及理論模式法分別計算年土砂防治量，觀察比較現地實測總量與理論推估總量如表 5 所示。

1. 現地實測法推估：以現地實測法推估曾文水庫及南化水庫集水區河道總防砂量，其中顯示曾文水庫集水區年平均河道防砂量最大，計為 104.36 萬 m³/年；其次為南化水庫集水區年平均河道防砂量，計為 23.37 萬 m³/年。
2. 理論模式法推估：以理論模式法推估曾文水庫及南化水庫集水區河道總防砂量，其中顯示曾文水庫集水區年平均河道防砂量最大，計為 294.30 萬 m³/年；其次為南化水庫集水區年平均河道防砂量，計為 44.55 萬 m³/年。
3. 比較不同水庫集水區防砂量估算結果顯示，相對倍率係指理論模式法與現地實測法估計防砂量之比值，用以瞭解防砂設施之實測防砂量與模式推估總防砂量之差異。
4. 經比較曾文水庫及南化水庫集水區不同防砂量估算結果，皆以理論模式法推估結果大於現地實測法，且約為 1.91 至 2.82 倍，平均約為 2.37 倍，顯示理論模式法估計之防砂量相較於現地實測法估計值偏大。

表 5 現地實測法與理論歸法估算結果比較表

Table 5 Comparative results list of measurement in situ method (MSM) and theoretical model method (TMM)

水庫集水區	現地實測法 (萬 m ³ /年)	理論模式法 (萬 m ³ /年)	相對倍率
	A	B	C=B/A
曾文水庫	104.36	294.30	2.82
南化水庫	23.37	44.55	1.91

五、結 論

本研究於曾文水庫及南化水庫集水區估算土砂防治量，藉此現地實測法、理論模式法分析結果，探討二種方法之參數選擇、適用性以及計算公式等不同層面差異。在參數選擇方面，現地實測法採用竣工前後資料，包括：構造物尺寸、河道淤砂現況、原始溪床與淤砂寬度等參數，而理論模式法則採用構造物尺寸及堆積材料粒徑資料，無法得知防砂設施是否淤滿以及其剩餘容量；在適用性方面，現地實測法可估算直接落入河道之儲砂量，意即直接防治量，量值估計較準確，可應用於參數未率定野溪集水區，理論模式法可估算直接落入河道之儲砂量及河道生產抑制量，潛在總防砂量值較高估。整體上，現地實測法可估算單一洪水事件或時期；而理論模式法則不考慮淤砂現況，整個構造物生命週期之防砂量為單一值。在計算公式方面，現地實測法採用體積法為計算基礎，雖防砂總量較為保守而偏少；理論模式法採統計迴歸法，理論防砂總量可達實測值 2 倍以上，惟分析結果尚需進行統計檢定。此項分析經驗亦可供工程師，針對未來欲治理集水區，能有效掌握工程設計實際或潛在可發揮之土砂防砂量。

參考文獻

1. 主計總處(2013), 「財物標準分類規定」。
2. 水利署(2002), 「石門水庫集水區攔砂壩生態體檢調查計畫」。
3. 水利署(2007^b), 「曾文水庫整體治理調查規劃」。
4. 水利署(2010), 「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水特別條例」。
5. 水利署(2011^a), 「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水實施計畫」。
6. 水利署(2011^b), 「曾文溪河道沖刷成因調查監測及防治策略研究(1/2)」。
7. 水保局(2008), 「防砂設施保育處理技術之研發與應用」。
8. 水保局(2010^a), 「曾文水庫(阿里山鄉以外)南化及烏山頭水庫集水區保育治理分析與對策」。
9. 水保局(2010^b), 「南部地區多時期遙測影像建置成果報告書」。
10. 水保局(2011^a), 「曾文水庫達邦壩上游集水區防砂目標下之保育治理措施及土砂變遷監測計畫」。
11. 水保局(2011^b), 「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」。
12. 水保局(2011^c), 「南化與烏山頭水庫坡地土砂生產調查分析」。
13. 水保局(2011^d), 「水土保持防砂工程防砂整備之推估與應用」。
14. 水保局(2012^a), 「曾文南化烏山頭水庫集水區環境變異監測及治理成效評估」。
15. 水保局(2012^b), 「曾文、南化及烏山頭水庫集水區生態檢核效益追蹤及土砂運移機制分析」。
16. 水保局(2014), 「水庫集水區環境資料及土砂災害風險評估(2/3)」。
17. 林務局(1991), 「台灣省早期防砂壩現況調查報告」。
18. 林務局(1992), 「台灣省近期防砂壩現況調查報告」。
19. 松村和樹、中筋章人、井上公夫(1988), 「土砂災害調查」。
20. 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, 第31期, 第3卷, 第49~57頁。