中華水土保持學報, 51(1):34-41(2020)
Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 51 (1)*: 34-41* (2020)
DOI: 10.29417/JCSWC.202003_51(1).0004

必坦溪集水區工程治理效益研究

賴原崇[1]　劉益誠[4]*　邵龍雨[2]　葉昭憲[3]　唐偉倫[4]　白絜成[4]

摘　　要　大甲溪之支流必坦溪集水區，2004 年受到敏督利颱風侵襲，連日大雨滂沱，水庫周邊邊坡崩塌，形成土石流，引發洪水氾濫（七二水災），大量土砂堆積溪床及德基水庫排洪隧道口，使德基水庫排洪隧道受損，並造成台八線交通中斷。歷經多年投入治理工程，實有必要探討此集水區進行整體性之治理成效分析。本研究利用二維水理輸砂演算（CCHE2D）模式模擬重現期 50 年降雨情境必坦溪四期治理工程河段，分析治理前後水理輸砂狀況，整治後下游河段最快流速由 6.5 m/s 降低為 1.0 m/s，蓄水深度由 1.7 m 增加至 3.5 m，增加蓄水量約 1,650 公噸，能將上游來砂量透過沉砂池消能沉澱，沉砂區庫容量達 4,000 立方公尺，而沉靜後之水則可由防砂壩兩側堆砌礫石之格框流出進入德基水庫，做到泥砂分離降低入庫泥砂量，減少排洪隧道前土砂堆積，保護排洪設施正常運作。

關鍵詞：CCHE2D、必坦溪、治理效益。

Assessing the Effectiveness of River Regulation Project in Bi-Tan Creek Watershed in Central Taiwan

Yuan-Chung Lai[1]　Yi-Cheng Liu[4]*　Long-You Shao[2]　Chao-Hsien Yeh[3]　Wei-Lun Tang[4]
Chieh-Cheng Pai[4]

ABSTRACT　A Dajia River tributary, Bi-Tan Creek, was hit by Typhoon Mindulle in 2004. A hydrological sand transport calculus model (CCHE2D) was used to simulate a 50-year-return-period rainfall scenario in the fourth phase of Bi-Tan Creek. The hydraulic sand transport before and after treatment was analyzed. Governance at the highest flow velocity in the lower reaches is reduced from 6.5 to 1.0 m/s, water storage depth increases from 1.7 to 3.5 m, and the water storage capacity increases by approximately 1,650 t. Energy dissipates sedimentation, and the storage capacity of the sedimentary area reaches 4,000 m^3. The accumulation of soil and sand in front of the drainage tunnel decreases, protecting normal operation of the drainage facilities.

Key Words: CCHE2D, Bi-Tan Creek, assessing effectiveness

一、前　　言

必坦溪位於德基水庫大壩及排洪隧道旁匯入德基水庫，經調查工區溪段流心擺盪，溪床坡度陡，土石容易下移庫區，溪床下切及溪岸侵蝕持續發展，威脅上游台 8 線路基安全及臨庫大型崩塌地之穩定，危及以往治理成效。因此歷次治理主要目的旨在穩固溪床保護溪岸，抑制土砂入庫及延長水庫壽命，達到導正流心、降低流速、調節水質及攔阻土砂等多元價值，確保以往治理成果及保全對象安全。

歷經東勢林區管理處分期執行必坦溪治理及崩塌地復育工程，一共進行 4 期整治工程，包含「必坦溪下游整治工程」、「必坦溪下游整治二期工程」、「必坦溪下游整治三期工程」及「必坦溪下游治理工程」，工程連接台 8 線下既有箱涵，施設護岸、連續固床工及截水牆等結構物，有效攔截上游土砂，達到減災與保障德基水庫排洪口暢通之功效。本研究蒐集各災害事件雨量分析頻率年，模擬演算必坦溪治理前後河床流速及水深變化。

治理工程效益分析需全面檢討與量化分析，為政府部門執行集水區治理工程之首，治理工程效益評估，過去採用簡單或簡化之傳統分析，如整治率 (Remediation rate)、成本效益分析，無法呈現直觀性評估反應於治理工程之妥適性。因此，建立一套可靠分析方法，精準評估集水區投入治理工程後所帶來之實

〔1〕國立中興大學水土保持學系
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.
〔2〕林務局東勢林區管理處
Dongshih Forest District Office No. 2, Hangchou S. Rd., Sec. 1, Taipei City 10050, Taiwan R.O.C.
〔3〕逢甲大學水土保持學水利工程與資源保育學系
Professor, Dept. of Water Resources Engineering and Conservation, Feng Chia Universtiy, Taichung, Taiwan, R.O.C.
〔4〕逢甲大學營建及防災研究中心
Assistant Researcher. of Construction and Disasters Prevention Research Center, Feng Chia Universtiy, Taichung, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail: kenji700808@gmail.com.tw

際效益，利用圖像化之呈現讓民眾可讀性增加為本研究主要之目的。

蒐集國內外文獻以 CCHE1D、CCHE2D 模式進行研究之案例，均獲得良好成果，如交通部運輸研究所 (2011) 選用 CCHE1D 模式建構一維動床動床橋梁數值，以 2005 年的颱風事件紀錄石岡壩放水量進行驗證，模擬成果與實際狀況相當吻合，Yan Ding、Sam S.Y. Wang(2012) 以 CCHE1D 建構一維河道模型，研究河道中各種形狀之堆積物特性，模式所建置之模型對模擬河道的洪水輸砂及最佳治理方法都有不錯的成效，NCCHE 所發表之 Wu (2001)、Jia (2001a)、Jia (2008) 等相關報告，利用 CCHE2D 模式提出之輸砂模式理論，計算之床形變化與實測值趨勢相同。故本研究使用其兩套模式進行量化評估實質之成效。

二、必坦溪集水區概況

必坦溪位於臺中市和平區梨山里，德基水庫下游出水口支流，如圖 1 所示，德基水庫集水區內僅有台電宿舍人員，人口數約 60 人，其對外聯絡道主要為台 8 線 (中部橫貫公路)，集水區內共有 3 條土石流潛勢溪流，分別為必坦溪 (中市 DF101)、中市 DF099 及中市 DF0100 匯流至德基水庫，往西流至主流域大甲溪下游，如圖 2 所示，總面積 874.9 公頃。在地質分區上屬於佳陽層所佔比例最大，佳陽層的底部為黑色板岩和變質砂岩的互層，如圖 3 所示。

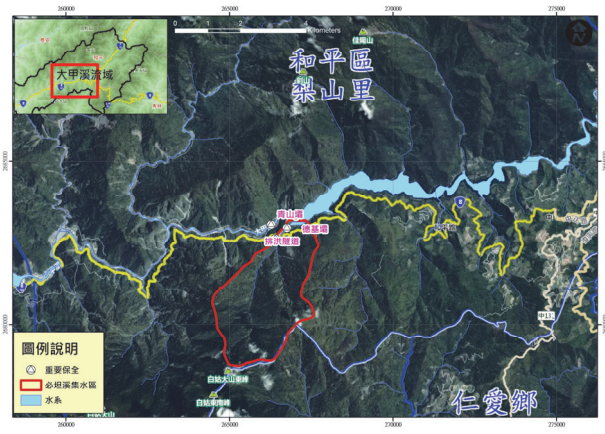

圖 1 地理位置

Fig.1 Geographical location

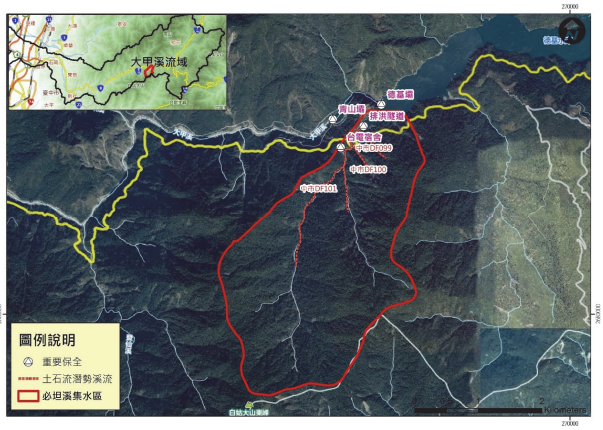

圖 2 必坦溪集水區水系分布圖

Fig.2 Water system

圖 3 必坦溪集水區地質圖

Fig.3 Geological map

三、治理工程成效評估方法

為瞭解整體治理成效建立一套分析流程，首先分析集水區歷年水文狀況，包含暴雨頻率分析、雨型分析與各重現期洪峰流量，並以近年颱風豪雨事件建立集水區土砂收支模式，據以推求集水區降雨量與土砂生產量之關係，最後利用二維水理輸砂模式 (CCHE2D) 模擬重現期 50 年情境，評估必坦溪治理前後之水位、流速、土砂運移與沉砂設施之成效，整體架構流程如圖 4 所示。

1. 水文分析

本研究針對計畫範圍進行暴雨頻率分析、雨型分布與各重現期距洪峰流量推估，作為後續土砂收支與成效評估之基礎資料。

(1) 暴雨頻率分析

必坦溪集水區境內無設立水文測站，故搜尋鄰近雨量站，其篩選雨量站原則已超過 50 年紀路年份為主，故以翠巒雨量站 (1950~2018，共 69 年) 且有小時雨量資料為主要分析測站，如圖 5 所示，統計歷年最大 24 小時暴雨量進行暴雨頻率分析，以二參數對數常態分佈 (LN2)、三參數對數常態分佈 (LN3)、皮爾生三型分佈 (PT3)、對數皮爾生三型分佈 (LPT3) 與極端值 (甘保) 一型分佈(EV1)等方法進行分析。以標準誤差 (SE) 檢定各頻率分析方法之適用性，選定結果為皮爾生三型分佈之成果，如表 1 所示。

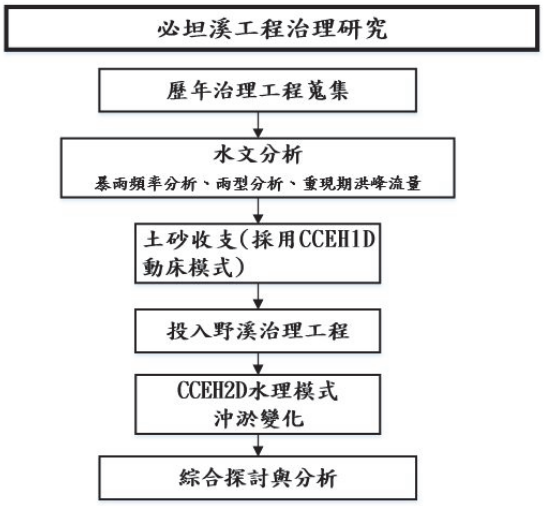

圖 4 治理成效評估方法

Fig.4 Effectiveness evaluation methods.

表 1 集水區各重現期距暴雨量分析成果表

Table 1 Rainfall analysis results for each recurrence interval

機率分佈 \ 重現期 (year)	重現期距暴雨量 (mm)							標準誤差 (SE)
	2	5	10	25	50	100	200	
二參數對數常態分佈 (LN2)	189.9	293.3	368.2	469.2	548.7	631.6	718.5	27.1
三參數對數常態分佈LN3	192.0	296.9	370.6	467.6	542.5	619.5	699.1	28.4
皮爾生三型分佈(PT3)	187.3	297.2	374.8	474.8	549.7	624.4	699.1	27.0
對數皮爾生三型分佈 (LPT3)	194.9	296.6	364.7	450.2	513.2	575.3	636.9	32.2
極端值一型分佈(EV1)	198.0	312.8	388.8	484.8	556.1	626.8	697.3	31.8

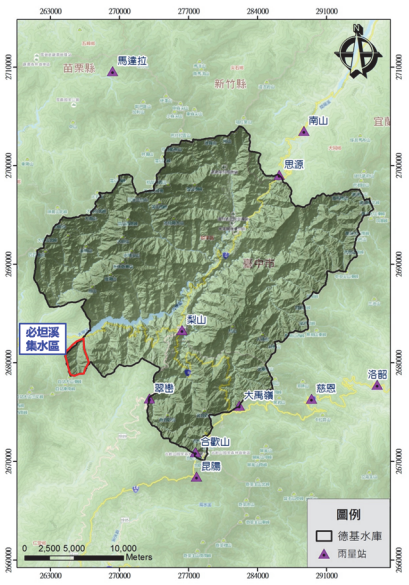

圖 5 雨量站分布

Fig.5 Rainfall Station Distribution

(2) 雨型分析

設計雨型部分則參考經濟部水利署 2003 年「台灣地區雨量測站降雨強度-延時 Horner 公式分析」以鄰近雨量站之 Horner 參數進行設計雨型分析，集水區重現期 50 年之設計雨型如圖 6 所示。

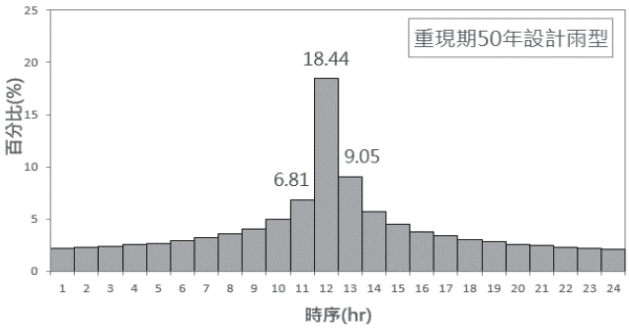

圖 6 設計雨型分析

Fig.6 Design Rain Analysis

(3) 各重現期洪峰流量

山坡地集水區常採用三角形單位歷線法模擬分析降雨逕流關係。本研究採用皮爾生三型分佈之成果配合 Horner 設計雨型，以三角形單位歷線法推估各重現期洪峰流量，計算成果如表 2 所示。其重現期 50 年暴雨量為 549.7 毫米；洪峰流量為每秒 164.1 立方公尺，重現期 50 年之 24 小時洪水歷線，如圖 7 所示。

表 2 各重現期洪峰流量

Table 2 Peak flow

控制點	重現期距洪峰流量（cms）						
	2	5	10	25	50	100	200
必坦溪	40.0	63.4	88.9	129.4	164.1	200.9	240.8

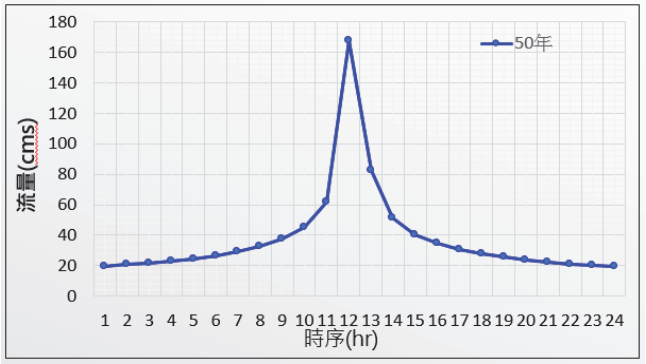

圖 7 50 年重現期距之 24 小時洪水歷線

Fig.7 24-hour flood calendar with 50-year recurrence interval

2. 集水區土砂收支

集水區土砂收支包含土砂生產（含坡面上表土沖蝕及崩塌量，以及河床土砂沖刷量）、流出（即從集水區下游出口的土砂流出量）及殘留堆積（位於在坡面和河床上的部分土砂量）等物理過程所組成。整個土砂運移過程受到集水區自然地形、環境、河道特性及人為介入等因素的綜合作用而顯得特別地複雜多變。本研究集水區土砂收支模型整體運算流程，如圖 8 所示。由集水區坡面降雨逕流模式獲得輸入之流量歷線，結合坡面土壤流失量，以及河道一維動床數值模式演算結果，可分別獲得集水區土砂生產量，河床堆積量及下游出口土砂流出量等。

(1) 土砂收支模式建立

本研究已蒐集歷年重大颱風豪雨事件及三期 DTM 資料分別為 2008 年 10 月、2012 年 11 月及 2014 年 10 月，根據歷年降雨事件紀錄，自民國 98 年起至 2014 年，挑選計畫區較具規模之 8 場降雨事件進行分析，以 2009 年莫拉克、2010 年凡那比、2012 年蘇拉與天坪颱風等颱風事件進行模式檢定；另以 2013 年蘇力、潭美、天兔颱風與 2014 年麥德姆等颱洪事件模式驗證，如圖 9 所示，集水區重大颱洪事件水文土砂分析，如表 3 所示。

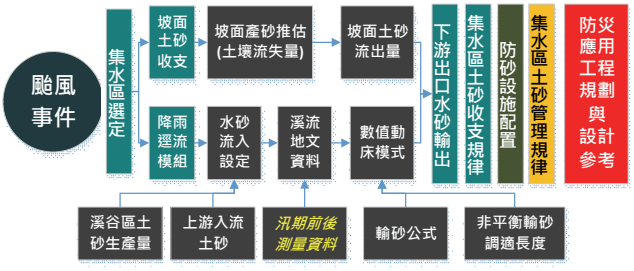

圖 8 集水區數值土砂收支模式流程圖

Fig.8 The process Sediment budget in watersheds by numerical model

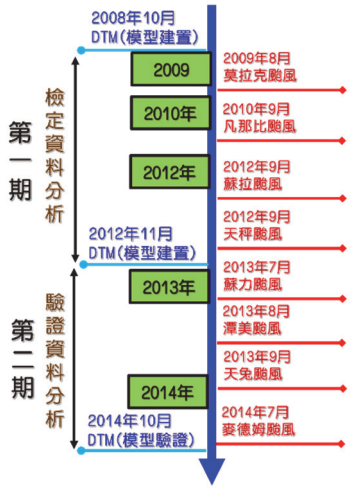

圖 9 歷年重大颱風豪雨事件及 DTM 資料

Fig.9 Major typhoon and DTM data

表 3 集水區水文土砂分析成果表

Table3 Hydrology and soil analysis

類別	颱風事件	總降雨量 (mm)	洪峰流量 (cms)	崩塌量 (萬 m^3)	近岸崩塌量 (萬 m^3)	土壤沖蝕量 (萬 m^3)
第一期	98年莫拉克	788	38.08	58.52	18.51	1.00
	99年凡那比	197.5	36.08	46.46	14.69	0.49
	101年蘇拉	509.5	31.61	31.24	9.88	0.74
	101年天坪	107.5	12.985	39.94	12.63	0.37
第二期	102年蘇力	307	56.94	16.35	5.17	0.76
	102年潭美	191	33.1	10.17	3.22	0.47
	102年天兔	296	37.57	15.76	4.99	0.6
	103年麥德姆	334.5	48.745	25.18	7.97	0.72

(2) 土砂收支模式檢定

檢定成果以 2009 年莫拉克颱風、2010 年凡那比颱風與 2012 年蘇拉颱風與天秤颱風進行 CCHE1D 模式檢定，經坡面土砂流失量及下游控制斷面河床沖淤高程變動作為模式參數檢定適合性之比對基準，模擬結果可符合實際的河床土砂淤積趨勢（圖 10），故選擇 SEDTRA

module 作為輸砂公式，輸砂參數方面，推移值之非平衡調適長度選擇 1,500(1/1,500=0.00067)，懸浮值之非平衡調適長度之 α 值為 0.5，沖瀉質之非平衡調適長度為 0，其誤差值相對較低，較適用於集水區。

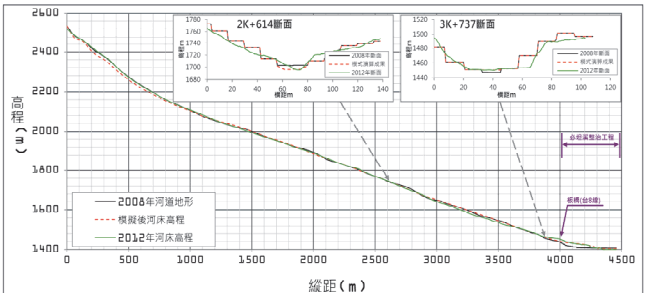

圖 10　控制斷面縱橫斷面沖淤變化模擬成果（模式檢定）

Fig.10　The Analysis on Riverbed Evolution (Calibration)

(3) 土砂收支模式驗證

根據上述數值模式檢定所確定下來的輸砂公式與輸砂參數，進行颱風降雨事件之模式驗證，採用民國 2013 年蘇力颱風、潭美及天兔颱風與 2014 年麥德姆颱風等降雨事件進行模式驗證，使用同一組輸砂公式與參數模擬下，坡面土砂流失量及下游控制斷面河床沖淤高程變動之模擬結果可符合實際的河床土砂淤積趨勢 (圖 11)，顯示使用之輸砂公式與輸砂參數尚在合理範圍。

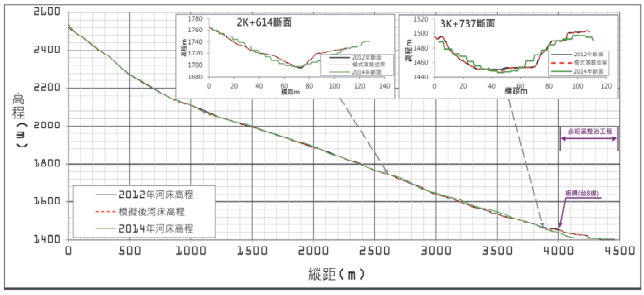

圖 11　控制斷面縱橫斷面沖淤變化模擬成果（模式驗證）

Fig.11　The Analysis on Riverbed Evolution (Validation)

3. 水理演算 (CCHE2D)

本研究運用 CCHE2D 水理模式，檢核必坦溪計畫河段，量化評估河道流速及水深變化的趨勢，本研究使用之 CCHE2D 水理輸砂參數如表 4 及表 5 所示，現場調查土砂平均粒徑 22.1~39.5 mm，模擬重現期 50 年成果，分析範圍為必坦溪第一~四期治理工程河段範圍如圖 12 所示，治理工程包含連接台 8 線下既有箱涵，施作項目包含護岸、連續性固床工、防砂壩及截水牆等構造物，達到有效攔截上游土砂，維持排洪口通暢及水庫蓄水之目的。

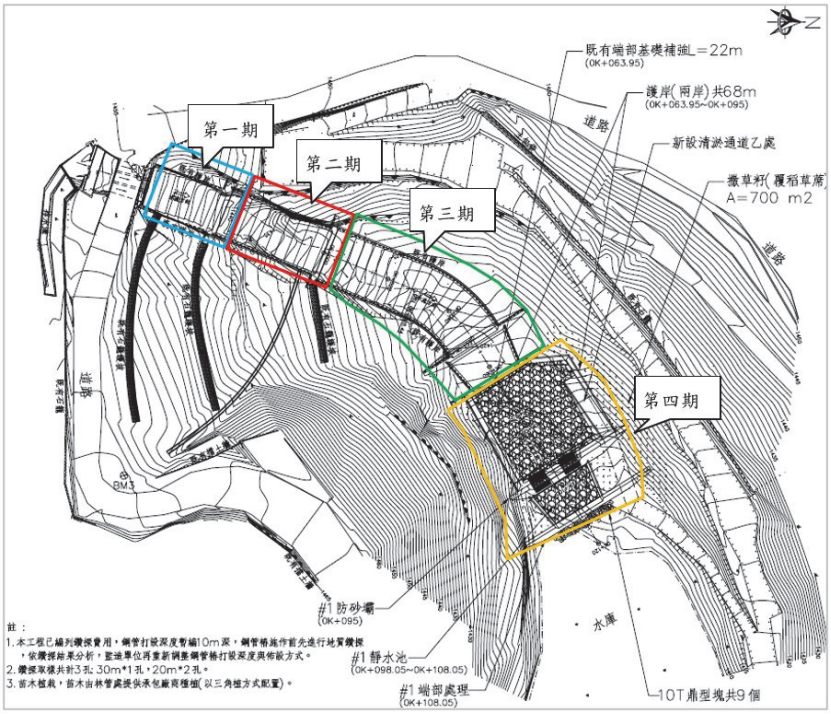

圖 12　數值模擬河段範圍

Fig.12　Numerical Model of river reach

表 4　水理相關參數設定

Table 4　Hydrological and hydraulic set

項目	設定值	說明
糙度係數	0.04	依據Lane公式計算(n=0.015n = 0.015$d_{75}^{1/6}$)
紊流模式	Mixing Length Model	紊流模式
考量乾點的水深 (Depth to consider dry(m))	0.09	乾點與濕點的水深分界。

表 5 輸砂相關參數一覽表

Table 5 The parameters of sediment discharge

項目	設定值	備註
輸砂模式 (Transport Model)	Total load as Bed load Model	以推移質輸砂模式為主。
推移質輸砂公式	Wu et al	建議公式。
輸砂模擬模式 (Sediment Simulation Model)	Fast bed change with unsteady flow	變量流情況下的動床計算
推移質調適長度 Adaptation Length for Bedload (L_b值)	200	建議值。
混合層厚度(δ_m值)	0.1	2倍D50或是水深倍數。
可沖刷性(Erodibility)	YES	可模擬河床沖淤變化

四、成果分析

本研究主題可區分三項主題，(1) 集水區產砂量分析；(2) 歷年降雨事件下土砂生產量指數迴歸分析；(3) 二維模擬重現期 50 年必坦溪治理工程成效分析，各分析成果分述如下：

1. 集水區產砂量分析

本研究以民國 97 年汛期前之數值高程地形建置模型，將民國 97 年~101 年之降雨事件作為第一期，以民國 101 年~103 年作為第二期，以利比對前後期之變化，土砂收支經模式分析結果，如表 6 所示。

第一期 (97 年至 101 年) 期間颱洪事件，集水區下游出口土砂生產量 (含沖瀉質) 為 62.12 萬立方公尺，河道呈現沖刷趨勢，平均沖刷約 1.28 公尺。第二期 (101 年至 103 年) 期間颱洪事件集水區下游出口土砂生產量 (含沖瀉質) 為 29.24 萬立方公尺，河道呈現沖刷趨勢，平均沖深約 1.80 公尺。

2. 土砂生產量指數迴歸分析

採用 CCHE1D 動床模式模擬分析土砂生產情況，計畫區土砂流失與生產皆以颱風豪雨為主，屬於事件型土砂運移，故採用歷年颱風豪雨事件作為土砂收支分析之基礎，並進行降雨-逕流演算，推導出降雨量與土砂生產量關係式如圖 13 所示，建立它們之間的關係，即

$$y = 5.7996e^{0.002x} \quad (1)$$

式中，y =土砂生產量 (m^3)；x=1 日暴雨降雨量 (mm)，推估之成果相關性 0.6605。

透過回歸成果可針對後續降雨量進行土砂生產量推估，藉以該公式推動必坦溪下游沉砂池辦理清疏工作啟動時機。

表 6 必坦溪集水區產砂分析成果表

Table 6 The result of the analysis of sediment budget

No.	產砂分析項目	第一期	第二期	單位	備註
(1)	坡面土砂流失量 (土壤沖蝕量)	2.60	2.55	萬m^3	MUSLE公式
(2)	坡面土砂流失量 (崩塌量)	55.72	21.34	萬m^3	歷年崩塌資料估算
(3)	溪床沖刷量	15.73	6.29	萬m^3	數值模式結果
(4)	土砂流失總量	74.05	30.18	萬m^3	(1)+(2)+(3)
(5)	自坡面流入河道之土砂量 (含沖瀉質)	58.32	23.89	萬m^3	(1)+(2)
(6)	溪床淤積量	11.93	0.94	萬m^3	數值模式結果
(7)	溪床沖淤量	-3.80	-5.35	萬m^3	(6)-(3)
(8)	集水區上游入流泥砂量	0.00	0.00	萬m^3	自集水區源頭建模 (無上游來砂量)
(9)	集水區下游出口土砂生產量 (含沖瀉質)	62.12	29.24	萬m^3	(5)+(8)-(7)
(10)	河床平均沖淤深度	-1.28	-1.80	m	溪床沖淤量/模擬範圍

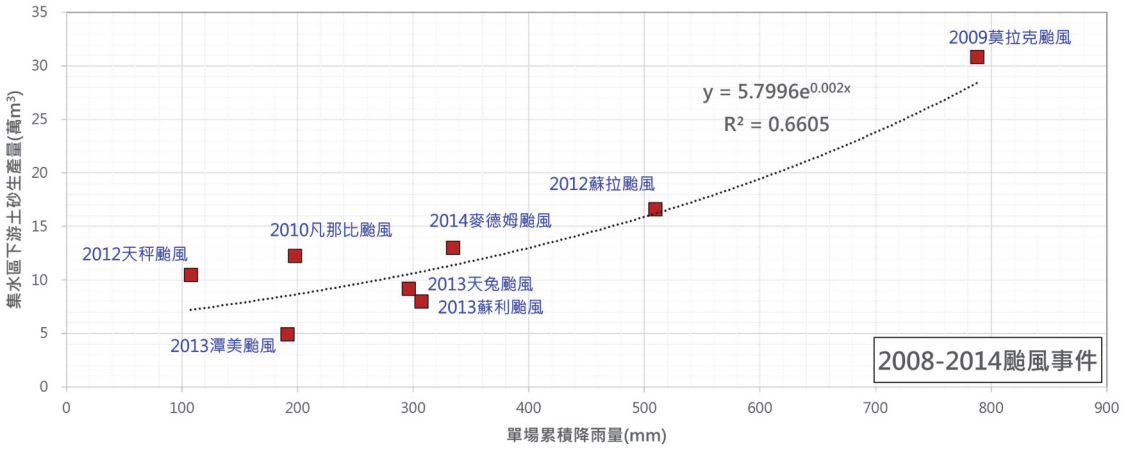

圖 13 事件土砂量推估

Fig.13 Estimation of event sand

3. 治理工程成效分析

本研究使用治理前數值地形為 2008 年 DTM 資料及治理後數值地形資料為 UAV 空拍成果（2019/2/11），以動床模式檢核重現期 50 年降雨情境，本河段工程治理前後各控制斷面之通洪能力與土砂運移狀況，各項說明如下：

(1) 經數值模擬後，流速變化如圖 14 所示，必坦溪第一期至第三期治理工程河段，治理前溪床流速於洪鋒時刻約每秒 3~11 公尺；治理後溪床流速每秒 4~10 公尺。第四期治理工程河段（沉砂設施）治理前溪床流速約每秒 0.5~6.5 公尺；治理後溪床流速每秒 0.3~1.0 公尺。

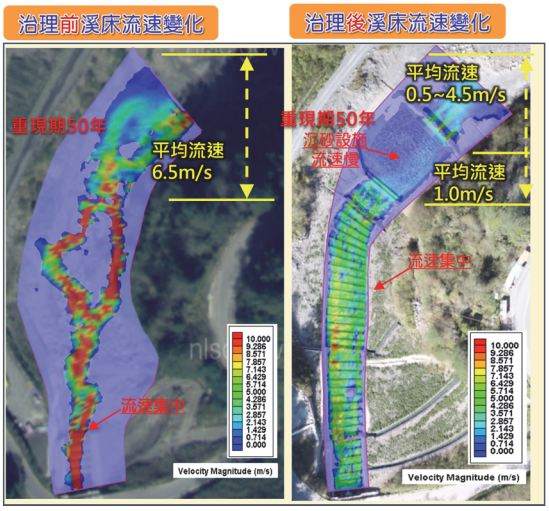

圖 14　治理河段治理前後流速變化圖

Fig.14　Change flow velocity before and after.

(2) 必坦溪治理前後溪床水深變化，如圖 15 所示。治理前溪床流路較紊亂，經必坦溪第一~三期治理工程後流路與水量集中至第四期沉砂池消能並排入德基水庫。治理前溪床水深變化約 0.2~2.3 公尺間；治理後溪床水深變化為 0.1~4.3 公尺間。檢核各斷面河道通洪能力，其水深皆未超過設計護岸高程之現象，均可滿足計畫洪水量。

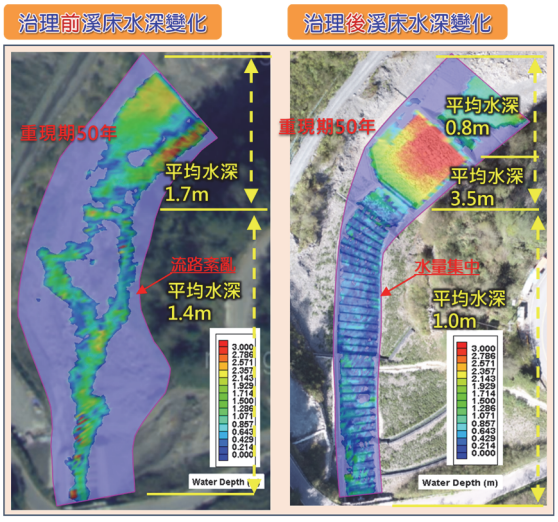

圖 15　治理河段治理前後水深變化圖

Fig.15　Change water depth before and after.

(3) 必坦溪治理前後溪床沖淤變化，如圖 16 所示。必坦溪第一期至第三期治理工程河段，因坡度陡故治理前溪床主要呈現沖刷趨勢，治理後經河道整治系列型固床工溪床因沉砂落淤呈現輕微淤積趨勢。第四期工程河段，治理前溪床主要呈現淤積趨勢，治理後沉砂設施土砂淤積約 0.7~1.0 公尺，滿足設計庫容可容納約 4,000 立方公尺之土砂量。

必坦溪系列性整治工程可攔蓄土砂量至沉砂設施，且其砂設施亦設立清疏便道，當沉砂設施發揮攔砂功能，汛期後可立即派員清除淤積土砂量，減緩土砂進入德基水庫，維持水庫穩定庫容。

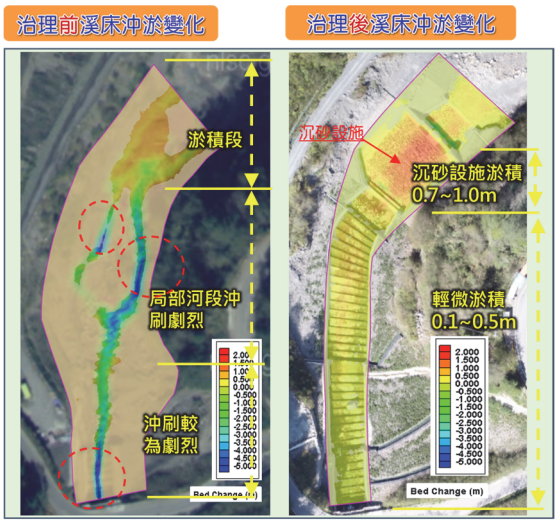

圖 16　治理河段治理前後沖淤變化圖

Fig.16　Change Scour and silting-up before and after

五、結論與建議

統整上述資料提出下列結論與建議：

(1) 整體分析成果，其治理前溪床水深變化約為 0.2~2.3 公尺間；治理後溪床水深變化為 0.1~4.3 公尺間，顯示治理區段能有效蓄水減緩水流沖刷。

(2) 溪床沖淤變化，治理前溪床主要呈現沖刷狀態，其沖淤變化約為-14.8~0.89 公尺；治理後溪床主要呈現淤積狀態，其沖淤變化約為-1.9~1.5 公尺沖刷量明顯減少，增加淤積量，建議當治理區段攔截土砂淤滿時，應立即派員清除淤積土砂量，減緩土砂進入德基水庫，維持水庫穩定庫容，以及促使防砂設施永續利用。

(3) 當無進行治理工程設置時溪床流入亂竄，易使河床面下切淘刷，治理後可導正流心降低流速，除穩定河床以外，更可有效保護德基水庫排洪隧道安定，不受土砂淤積影響減少排洪量。

(4) 歷經林務局東勢林區管理處多年投入治理工程，已對水庫發揮完整的防砂效益並營造出友善之生態環境。

(5) 本研究土砂生產量關係式 R^2 值僅 0.6605，相關性不高，而其原因歸咎可能如下：(1) 迴歸參數 1 日暴雨降雨量尚不足表示研究區域歷年降雨特性、(2) 有其他更具影響力之參數未納入考量，例如：流域坡度、土壤沖蝕指數、土壤

含水量及坡地土砂遞移率等，後續如能增加其資料之蒐集應該提高其相關性。

參考文獻

[1] 交通部運輸研究所 (2011)，河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究。(Institute of Transportation (2011), Prediction of Flood Stage and Scour Depth around Bridge Piers. (in Chinese))

[2] 陳樹群、賴益成 (1999)，「河川與集水區泥砂遞移率之推估研究」，中華水土保持學報，30(1)，47-57。(Chen, S.H., and Lai, I.C. (1999). "Estimating the Sediment Delivery Ratio in Rivers and Watersheds", *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 30(1), 47-57. (in Chinese))

[3] Wu, W.M. (2001). "CCHE2D sediment transport model." *Technical Report No. NCCHE-TR-2001-3*, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi.

[4] Jia, Y., and Wang, S. (2001a). "CCHE2D: two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel Flows over loose bed." *National Center for Computational Hydroscience and Engineering*, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1, February.

[5] Jia, Y., Zhang, Y., and Wang, S.S.Y. (2008). "Numerical modeling of bank erosion processes and its field application." *Proceedings of the International Conference of Hydroscience and Engineering*, Nagoya, Japan, September, 9-12.

[6] Ding, Y., and Wang, Sam S.Y. (2012). "Optimal control of flood water with sediment transport in alluvial channel", *Separation and Purification Technology*, 84, 85-94.

2019 年 12 月 09 日 收稿
2020 年 01 月 22 日 修正
2020 年 03 月 14 日 接受
(本文開放討論至 2020 年 06 月 30 日)