

曾文溪上游土石流積淹型態之特性分析與堆積量推估

吳亭燁 施虹如 蘇元風 李欣輯 陳永明 張志新
行政法人國家災害防救科技中心

摘要

透過二維洪水與土石流數值模擬套裝軟體 Flo2D、以及台灣氣候變遷推估與資訊平台計畫 (TCCIP) 所產製之動力降尺度資料，經過偏差校正後所繁衍的世紀末最劣情境 TOP1 之降雨資料，進行曾文溪上游之土石流潛勢溪流之土石流境況模擬，並進一步推估該情境下土石流可能產生之堆積土方量。由於部分土壤參數較為缺乏，本研究透過相關文獻蒐集、操作手冊等之建議，進行模擬參數之建置，並以水文分析和合理化公式進行土石流流量之推估。模擬結果以定性和定量方式進行分析，由定性描述來看，曾文溪上游土石流之積淹型態和其他流域極為不同，由於地形之因素，土石流不易形成沖積扇而易直接影響主流；大量產生之土方量是造成曾文水庫上游地形變化的主要因素。另一方面，由定量分析來看，土石流所產生且進入曾文水庫之土方量，在世紀末 TOP1 情境下約為總崩塌所產生土方量的十分之一。由此分析可知，土石流在曾文溪上游主要影響在於主河道之地形變化影響，而非直接針對水庫。本研究成果可作為氣候變遷下，考量曾文溪流域調適方案之參考。

關鍵字：土石流境況模擬、Flo-2D、土方量推估、土石流潛勢溪流、地形變化

一、前言

極端降雨事件所帶來的高強度或長延時降雨，常造成集水區整體之各種不同類型的災害案例。以 2009 年莫拉克颱風為例，經由災後調查，長延時以及高強度降雨在流域之上中下游地區造成大面積坡面崩塌、土石流、堰塞湖、河道淤積、水庫庫容減少、道路橋樑損毀、都市淹水、以及堤防破損等災害 (國家災害防救科技中心, 2009)。從這些災害之災因探討，除了因降雨為主要原因之外，土砂的產生、移動、堆積、或侵蝕等狀況，除了造成集水區地形改變之外，大量未經淘選的土砂帶到下游，亦在短時間造成廣泛的影響。因此極端情境的降雨狀況下，有關土砂的運移及管理是必須要考量的。

另一方面，IPCC (政府間氣候變化專門委員會) 分別在 1990、1995、2001、2007、以及 2014 針對未來情境之氣候變化提出報告。對應 IPCC 的報告，TCCIP (台灣氣候變遷推估與資訊平台) 也針對台灣在未來情境之氣候變化提出分析和推估，並藉此提出相應的調適對策。在對未來情境的推估下，未來至世紀末的極端降雨情境下，颱風所造成的總累積降雨量將會增加，且颱風規模超越較莫拉克颱風之數量也將較目

前增加，顯示面對未來極端情境之對策和趨勢不可免。

因此本研究將就氣候變遷情境為背景，進行災害衝擊之推估，並與莫拉克颱風之災害狀況進行比較。選定土石流之災害類型進行境況模擬，期望在最極端之氣象條件下所可能產製土砂量來進行探討與分析。一方面透過土砂運移模式的分析，進行較為合理之土石流流量及運移至下游之土方量推估；另一方面希望透過土石流模擬之結果，了解影響土石流堆積和運移下游之地形特性。

二、研究方法與研究區域

(一) 研究區域

研究選定曾文溪流域進行探討，研究假設土砂由崩塌和土石流產生後，將經由主流運移至曾文水庫。曾文水庫因土砂量而庫容量將會減少，進而影響水庫之出流流量。為簡化計算，本研究僅針對曾文水庫之上游集水區，共 17 條潛勢溪流進行土石流模擬作業。

曾文溪主流發源於嘉義縣阿里山鄉的東水山，主要河川長度約為 56.2 公里，流經嘉義縣與台南縣交界後進入曾文水庫，其水庫上游之曾文水庫集水區，重要支流約有 31 條，而水土保持局在該區域共劃定 17 條土石流潛勢溪流 (水土保持局, 2014) (圖 1)。

該集水區之主要坡地災害類型為崩塌以及土石流，歷年較嚴重之災害事件包括 2006 年 0609 豪雨，造成坡面崩塌，崩塌土石阻絕交通要道以及橋樑等；2009 年的莫拉克颱風，由於高強度長延時降雨集中在集水區上游，造成舊有崩塌面積擴大，以及大量土石流入主河道，最後進入曾文水庫內，據調查約有九千萬立方公尺土砂進入水庫。本研究套疊林務局所判釋、從 1994-2013 年之崩塌地圖層資料，以及 NCDR 蒐整之歷年坡地災害點位後發現（圖 2），崩塌發生之位置集中在集水區上游的樂野、達邦等區域，以及靠近水庫的茶山、大浦等區域。另外，根據水土保持局的重大土石災情報告顯示，土石流災害較為嚴重的是 2009 年莫拉克颱風在樂野，以及茶山村之災害，總共造成數棟房舍損毀（水土保持局，2009）。



圖 1、研究區域及潛勢溪流分布

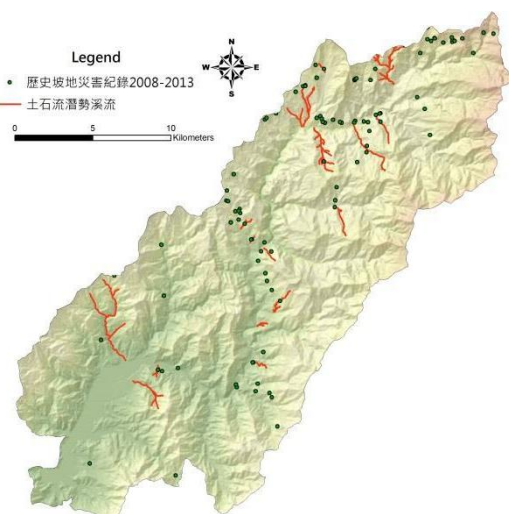


圖 2、研究區域近五年來坡地災害頻率

(二)研究方法

土石流模擬以 Flo-2D 數值程式進行境況模擬作業。Flo-2D 提供使用者進行土石流模擬時，能依據現地狀況進行許多參數的設定，以呈現潛勢溪流的环境特性和條件，例如土石流體積濃度、顆粒比重、地表曼寧因子、層流阻滯係數、賓漢降伏應力、以及賓漢黏滯係數等。除了參數設定之外，還必須經由地文條件的設定和調整，和水文分析所推估之土石流流量資料等，以完整呈現土石流模擬時的狀況，並且經由模擬來得到設定規模下土石流的淹沒範圍、深度、以及最大流動深度等資料。因此在模式操作上，主要分為三個部分，包括地形資料設定、參數設定、以及流量推估等。

首先，地形資料設定以地理資訊數值圖層的處理為主，目的在於透過影像判釋地表地物，以判斷潛勢溪流位置、土石流集水區域、並透過設定編輯高程資料，來使模擬的地形與實際狀況穩合。使用的資料主要是全球數值地形模型（Global Digital Elevation Model），是由美日合作之 ASTER 衛星拍攝之資料經分析後公開所取得，資料解析度為 30 公尺。另外，為判斷潛勢溪流所在區域、以及選取境況模擬之合適範圍，本研究另參照水土保持局所劃分之子集水區、農林航測所產製的航照圖等資料，進行地表判斷及模擬區域劃定。

模擬之土石參數設定以參照現有文獻之資料來進行。透過相關模擬實驗的期刊文獻，以及曾文溪上游之現地調查報告，找出較為合理的參數設定；設定尺度以水土保持局劃分之子集水區為單位。因此，位於同一個子集水區的潛勢溪流之土石參數將相同。另一方面，潛勢溪流的流量資料推估與計算，必須仰賴雨量資料、地文因子、歷史雨量資料等資料進行演算。為表現曾文溪上游集水區之流量特性，設定以累積 72 小時之極端降雨事件，從歷史降雨資料推估每個雨量站的資料分佈特性。最後以合理化公式（ $Q=CIA$ ），推估降雨事件造成的雨量強度、並換算成每一條潛勢溪流的清水流流量。土石流流量的推估則是

依據清水流和和土石流的放大因子，以倍數進行換算，但若是沒有放大因子的資料，則以土石體積濃度進行計算。

表 1 潛勢溪流設定參數表

參數		數值
土石流體積濃度		0.50
土石顆粒比重		2.65
層流阻滯係數		1000
賓漢降伏應力	常數	8.123
	次方	0.868
賓漢黏滯係數	常數	1.303
	次方	0.048

由於每個潛勢溪流所接近的雨量站不同，雖然是同一個事件，重現期不同，分析之流量差異也相當大（表 2）。其中以嘉義 DF076 之潛勢溪流所參考的雨量站之重現期最大，約為 169 年，其餘皆在 100 年左右，顯示在世紀末最極端事件的情境下，於曾文溪上游集水區的事件規模須以 169 年為最大以進行考量；另一方面，集水區之形狀大小，是來估算該潛勢溪流的集流時間。目前以土石流發生一小時為假設，當集流時間小於一小時的情況，則流量歷線將呈現三角形的兩型；但若是大於一小時，則將以該延時所達到的時間和流量最大值進行設定。

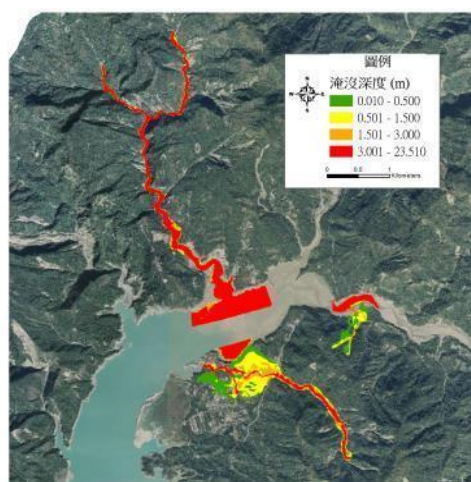
表 2 曾文水庫上游 17 條潛勢溪流土石流模擬情境資料設定

潛勢溪流編號	事件重現(年)	集流時間(hr)	土石流流量(cms)
嘉義 DF038	84.746	1.129	4,188.58
嘉義 DF044	63.291	1.008	1,239.55
嘉義 DF045	45.662	0.564	715.71
嘉義 DF046	65.789	0.846	648.81
嘉義 DF054	84.746	0.644	1,051.96
嘉義 DF056	63.291	0.842	646.84
嘉義 DF057	129.870	0.503	208.56
嘉義 DF058	45.662	0.768	3,704.29
嘉義 DF062	93.458	1.414	503.90
嘉義 DF071	120.482	0.362	226.64
嘉義 DF074	83.330	0.511	164.64
嘉義 DF075	63.291	0.645	1,323.16
嘉義 DF076	169.492	0.516	361.89
嘉義 DF077	129.870	0.375	208.52
嘉義 DF078	129.870	0.610	600.93

嘉義 DF079	93.458	0.531	262.98
嘉義 DF080	66.225	0.445	1,249.22

三、結果與討論

圖 3 為曾文溪上游 17 條潛勢溪流的模擬結果，圖中所顯示的是土石流堆積範圍中，每個網格之堆積深度。以顏色進行區分深度，以了解土石流的堆積狀況，區分為 0-0.5m、0.5m-1.5m、1.5m-3.0m、以及 3.0m 以上等四個等級。依據土石流的堆積型態進行分類，可歸類為兩種型態：第一種之潛勢溪流的堆積深度從上游至與主流交匯處均在三公尺以上，顯示該潛勢溪流發生土石流之後，產生的土砂多堆積在河道、或進入主流。並且較無扇狀地於潛勢溪流和主流交匯處間形成。因此，所造成的影響將集中在河道地形及匯入主流之土砂量這兩種。第二種之潛勢溪流在主要河道之堆積深度小於 3 公尺，其堆積之範圍影響到河道兩側約 50 公尺範圍內，或是在與主流交匯處形成扇狀堆積。顯示該潛勢溪流所產生之土砂對於河道的影響相對來說較小，但因形成扇狀堆積，對於聚落、道路或橋梁常分布在河岸邊或河流交匯處者，將可能造成損壞。這種堆積型態主要造成的影響包括河道兩側和下游扇狀地，以及若是扇狀地位於主河道的河岸，則大部分堆積土砂可能進入主河道，對主河道之運移及沖刷，可能造成河道地形改變的影響。



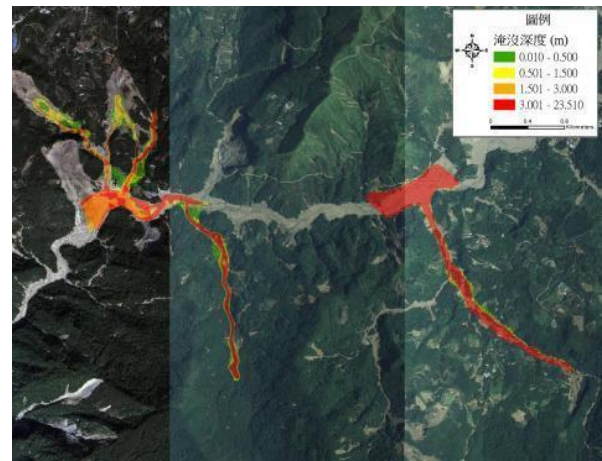
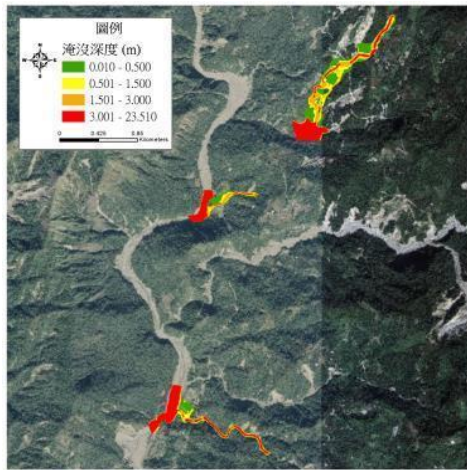
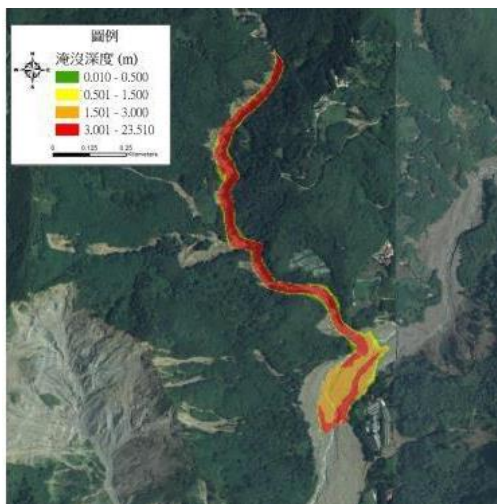
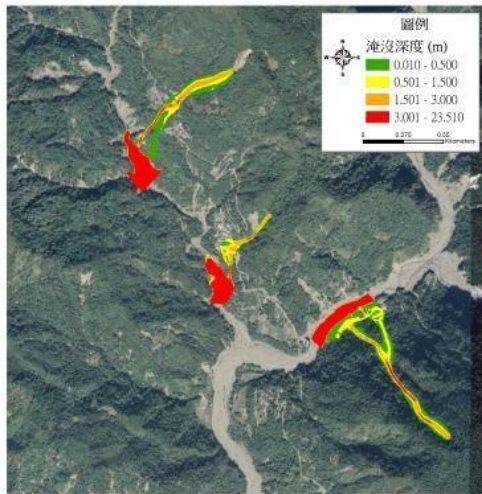


圖 3 曾文溪上游 17 條土石流潛勢溪流境況模擬結果



近年許多災害案例顯示在單次大雨後，若在短期間內再次降雨，則土砂災害發生的可能性將提高許多；或是連續數次降雨也可能提高土砂災害的潛勢。因此，在大雨或地震後，相關主管機關會對具坡地災害潛勢之地區進行警戒值調降作業、並且發布訊息以喚起注意。這些作為顯示土石流的災害除了環境因素之外，降雨的型態是主要影響災害是否發生的要素。本次研究雖沒有針對二次或多次降雨進行土石流的模擬作業，但從本次的模擬結果的堆積狀況可進行初步判斷。

若是在短期間發生二次以上之極端降雨，第一種堆積型態之潛勢溪流將較易發生二次或多次土石流災害，因其第一次土石流後殘留大量的堆積物於河道上，這些大量土石由於質地鬆散，很容易成為料源。並且由於第一種類型之土石流較難於匯流處形成沖積扇，土砂直接匯入主河道。判斷該類型之河道鄰近坡面坡度較陡，若鄰近坡面已有相當多風化後的碎屑，易成為供給土石流之材料來源，研究套疊坡度分布與潛勢溪流的圖層，可辨別出部分潛勢溪流所在之周圍坡度較陡（圖 4）。但仍需經由現地調查進行觀察，以了解坡面之裸露情況，才能夠判斷該處之坡面情形是否為易產生風化碎屑之區域。

圖 4 表現上游集水區之坡度分布狀況、以及第一、第二類型之潛勢溪流分布位置。第一類型潛勢溪流為黑色線條，主要分布位置在流域較上游區域，其中這一區的坡度較陡的位置皆在河岸兩側，或是沿

野溪處。第二類型潛勢溪流為桃紅色線條，主要位於上游集水區較為中下部分、靠近水庫之處。此區域坡度較陡部分離河岸仍有一段距離；沿河流有較平緩的區域分布，潛勢溪流多分布於該區域。因此第二類型之潛勢溪流雖然相對較不易有二次災害的潛勢，但由於其所在位置，分布於該處之道路及聚落等保全對象，其位於上游集水區較靠近水庫之處，若是更上游的土砂大量運移而下時，則易受到上游土砂的衝擊；而第一種類型之潛勢溪流，於匯流處有較高的可能性產生堰塞湖，或是堆積土砂較多時，易影響到匯流處對岸的保全對象。

將土石流堆積區域之土砂堆積深度以及堆積面積進行計算，以了解堆積區域的土方量以及進入主流的土方量。本研究以 DEM 資料為基礎，使用地理資訊系統的 Spatial Analysis 工具模組、配合航照圖進行曾文溪主流的圖層描繪與產製。假設位於河道周圍 10 公尺範圍內之土砂，將直接進入主流，以主流為中心，將河流向外延 10 公尺的範圍作為土砂直接進入主流的依據進行計算；而其餘分布在河岸 10 公尺外之土砂，將依據該區域的侵蝕或堆積傾向進行設定（中央地質調查所，2012）。考量潛勢溪流位置及其各個子集水區對於土砂生產是侵蝕或堆積的傾向（圖 5），作為判別計算土砂在主河道中運移時會造成侵蝕或堆積的依據。在侵蝕的條件下，土砂運移後量體將會增加；在堆積的條件下，土砂運移後量體會減少。另參考 2011 年豪雨事件之單位坡面的產砂量，分段計算每個子集水區出口的土砂量，經計算結果，土石流所產土砂流入水庫量約為 14,730,000m³。這個土砂量和莫拉克時上游集水區產生並流入曾文水庫的土砂量相比，約為十分之一，顯示曾文溪上游集水區之土石流對於水庫的影響，約佔 10%。

表 2 列出每一條潛勢溪流產生土砂、以及進入進入主流的土砂量，和其比例。從主流比來看，大部分潛勢溪流之比值皆超過 0.5，顯示超過一半以上的土砂量將進入主流；由於其中有兩條潛勢溪流所在位置較遠，其土砂進入主流之比值為 0。然而，大量土砂進入主流，且其堆積深度皆超過 3

公尺，顯示進入主河道之土砂，將會對主流之地形變遷造成影響。

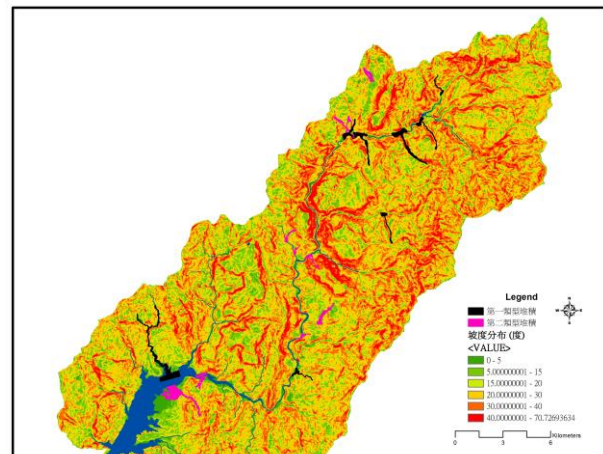


圖 4 曾文溪上游坡度圖

表 2 各潛勢溪流之流出土砂量分析

潛勢溪流編號	土砂堆積量 (m ³)	進入河道土砂量 (m ³)	土砂進入主河道比	堆積型態 (I, II)
DF038	8,372,377	5,928,106	0.708	I
DF044	560,781	254,716	0.454	I
DF045	2,844,760	843,599	0.297	I
DF046	1,860,479	1,342,198	0.721	I
DF054	422,420	190,753	0.452	II
DF056	2,395,043	1,942,093	0.811	II
DF057	642,860	257,782	0.401	II
DF058	7,197,462	821,853	0.114	I
DF062	754,674	411,048	0.545	I
DF071	751,413	675,402	0.899	II
DF074	581,278	0	0.000	II
DF075	855,437	286,169	0.335	I
DF076	1,037,969	331,689	0.320	II
DF077	576,935	311,349	0.540	II
DF078	1,736,240	0	0.000	II
DF079	508,815	336,188	0.661	II
DF080	444,600	104,471	0.235	I

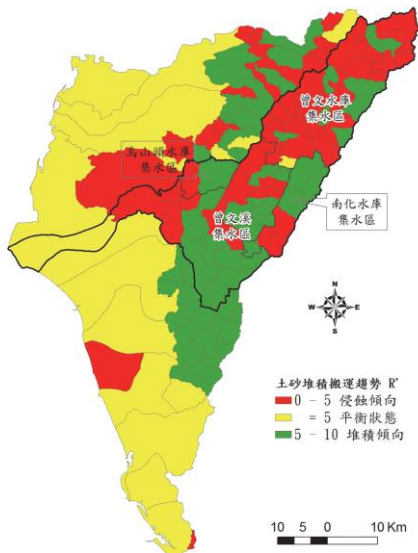


圖 5 土砂堆積搬運趨勢分級圖（引用自地調所）

五、結論

本研究以曾文溪上游集水區之 17 條潛勢溪流為研究對象，設定氣候變遷之世紀末最極端降雨事件為模擬情境，進行土石流境況模擬，本研究之重要結論與建議如下：

1. 氣候變遷情境下可產製颱風事件之降雨量資料，若是用於土石流模擬時，由於土石流流量難以從現地調查獲得，本研究建議將降雨量轉換為事件重現期後，配合地文因子進行土石流流量推估，並作為輸入因子。
2. 曾文溪上游集水區的土石流模擬結果顯示，受到地形因素的影響，土石流堆積呈現兩種堆積特徵：第一種潛勢溪流在堆積區域較不易形成堆積扇，土砂將直接進入主流，且堆積區域之深度皆在 3 公尺以上；第二種潛勢溪流之堆積分布於沖積扇及進入主流，堆積深度大多小於 3 公尺，但對於保全對象的影響較大。
3. 由各個潛勢溪流所產生土砂進入主河道比可發現，大多數潛勢溪流所產生的土砂接直接進入主流，對主流地形以及中下游造成影響。然其影響程度目前暫以各次集水區之崩塌或堆積傾向進行推估，推估量約有 14,000,000 立方公尺，與莫拉克

颱風後，進入曾文水庫之土砂量相比，其產量約為該土砂量之十分之一。

六、參考文獻

中央地質調查所，2012，易淹水地區上游集水區地質調查成果應用研究計畫（2/3）。

水土保持局，2006-2013，重大土石災情報告。

國家災害防救科技中心，2009，莫拉克颱風之災情勘查與分析。