

集水區土砂災害研究

許世孟* 溫惠鈺** 趙啟宏*** 陳耐錦** 冀樹勇****

一、前言

土砂災害是一種常見的山地自然災害，廣泛的分布世界各地，除了南極洲外，其他地區皆發生不同程度的土砂災害，較常出現的地區是在北迴歸線至北緯 50 度之間，如阿爾卑斯山、喜馬拉雅山系、環太平洋山系、歐亞大陸內部一些山系等（費與舒，2004）。台灣則位處菲律賓海洋板塊和歐亞大陸板塊碰撞之交界處，山地形勢陡峭、岩質脆弱、地震頻繁，加以颱風、梅雨等季節所帶來之集中性豪雨，也常引發山區大規模之山坡地土砂災害，尤其九二一大地震後，因地震造成山坡地大量崩塌及岩層鬆動，每年之颱風豪雨侵襲，更加劇土砂災害的發生，而對生命財產及國家經濟損失構成莫大傷害。

本研究為能瞭解土砂災害發生機制、過程與產砂結果，以提升土砂防災能力，故分別發展土石流災害模擬技術及集水區產砂分析技術，架構與流程，如圖 1 所示。其中，土石流災害模擬技術係利用 FLO-2D 程式並配合學者所提之經驗公式，進行參數討論及模式驗證，最後針對土石流潛勢溪流集水區土石流災害建立一套合理且完整之評估模式；集水區產砂分析技術則應用 FLO-2D 及 WINHSPF 程式，建立一套從降雨逕流、土砂生產及河道輸送等三種機制的土砂產量推估模式，模式同時考慮地表沖蝕與坡面崩塌兩種類型土砂生產來源，並提出未發生土石流及發生土石

流之土砂產量推估方式。本研究除上述技術之建立外，更提出其應用於實際案例之方向，如風險等級評估模式、土砂災損評估模式、工程整治成效評估及集水區土砂產量評估等，對於解決近年土砂災害頻傳之問題實有裨益，以期對防災計畫的擬訂及工程應用方面有所幫助。

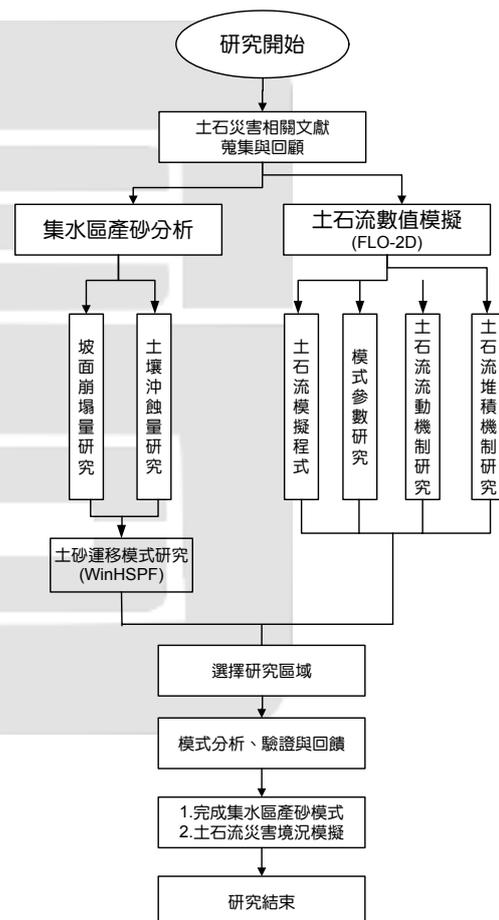


圖 1 研究架構與流程圖

* 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質調查組組長
** 中興工程顧問社大地工程研究中心副研究員
*** 中興工程顧問社大地工程研究中心前研究員
**** 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心經理

二、土石流數值模擬技術

本研究使用由 O'Brien 及 Julien 所開發之 FLO-2D 程式 (v.2006) 進行土石流之流動及堆積模擬，FLO-2D 程式可進行二維土石流模擬，以求解土石流平均速度及堆積深度。以下針對 FLO-2D 理論、分析模組以及土石流流動模擬計算流程等相關技術進行介紹及說明。

(一) FLO-2D 理論

在 FLO-2D 的運算之中，座標系統定義如圖 2 所示，其控制方程式與運動方程式如下述：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = i \quad (1)$$

$$S_{fx} = S_{bx} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial u}{g \partial y} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{by} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y} \quad (3)$$

上式中 h 為土石流深度；u 為 x 軸方向上平均流速；v 為 y 軸方向上平均流速；i 為降雨強度；t 為時間；S_{fx}、S_{fy} 為摩擦坡降 (Friction Slope)；S_{bx}、S_{by} 為底床坡降 (Bed Slope)；g 為重力加速度。

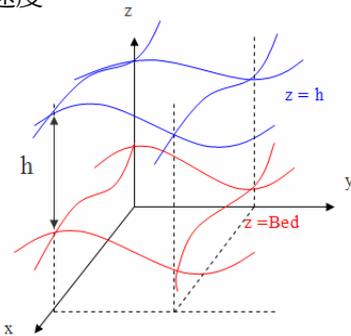


圖 2 FLO-2D 座標系統定義

(二) FLO-2D 模組

本研究使用之 FLO-2D (2006) 中，主要分析模組包含 (1) 降雨-逕流模組：利用降雨歷線的輸入得到欲分析區域內之洪水歷線；(2) 土石流分析模組：模擬土石流發生過程之流動深度

及流速；(3) 風險圖製作模組：計算土石流影響範圍內各區域風險危害度；(4) 災損評估模組：計算各種土石流災害規模下，土石流影響範圍災害損失情況，可作為決策單位工程防治參考依據。

(三) 土石流模擬分析步驟

本研究所擬訂之土石流流動模擬技術流程如圖 3 所示。

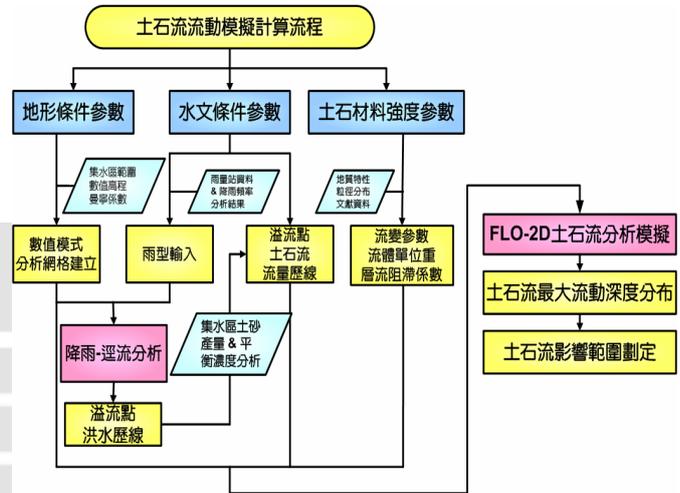


圖 3 土石流流動模擬計算流程圖

1. 降雨-逕流模式

- (1) 首先利用數值地形資料，決定研究區域之集水區範圍及其數值高程，並給定各格點之漫地流曼寧係數 n 值及入滲條件之各參數值。
- (2) 以現地調查並參考現行水保局所公布之各土石流溢流點位置，並假設此點以下只有土石停淤而沒有溪床刷深的現象。
- (3) 由雨量站降雨頻率分析所得結果，以不同重現期雨量做為災害規模設定，並以 24 小時為模擬時間配合設計雨型得到該流域的降雨歷線。
- (4) 最後利用 FLO-2D 的降雨-逕流模式進行洪水演算，以上述之溢流點為洪水流量出流的記錄點，得到該點之洪水流量歷線。

2. 土石流模式

- (1) 以溢流點以下劃設堆積區，並由設定的堆積區提取其數值高程以及給定曼寧係數 n 值。
- (2) 以上述溢流點為土石流的流入點，給定該點之洪水流量歷線，並乘以放大因子 BF (Bulking Factor)，決定土石流流量歷線。
- (3) 輸入流變參數及其他材料參數。
- (4) 進行土石流模式的模擬，並假設土石流發生於雨量最大時刻且歷時為 1 小時。最後可得最大流動深度及最大流速分布，據此提供後續土石流影響範圍的劃定、風險圖製作及災損分析評估參考。

三、集水區產砂分析技術

影響河流傳輸能力主要為降雨量所造成之地表逕流大小，而由山坡上傳輸至河道內之土砂量體來源主要來自兩方面，一是降雨產生地表逕流造成坡地土壤沖蝕，另一方面是因降雨或其他外在擾動因素所引起之坡地崩塌；故本研究認為，可完整考量集水區內土砂產量推估模式之概念應包含：(1) 具有時序性之降雨、(2) 非點狀土砂來源之坡面土壤沖蝕量、(3) 點狀土砂來源之坡地崩塌量，以及(4) 河道輸送機制。

為了能達成上述目的完整地進行集水區內之土砂產量推估，本研究利用由美國環保署 (USEPA) 與 Hydrocomp Inc. 所共同發展之 HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran) 模式進行集水區內之土砂產量推估。集水區的土砂來源主要來自兩方面，一是降雨地表逕流造成坡地土壤沖蝕，另一方面是因降雨或其他外在擾動因素所引起之坡地崩塌；而後坡地土壤沖蝕及坡面崩塌透過土砂輸送機制，最後成為集水區之土砂產量。圖 4 為本研究依據前述理論彙整擬訂

之集水區土砂產量推估模式概念圖，即為以降雨-逕流、土砂生產及土砂輸送等三種機制所擬訂之集水區土砂產量推估流程。

土砂生產來源主要坡地土壤沖蝕及坡地崩塌，經由崩塌土砂遞移率計算，則可推估土砂總產量，分別說明如下。

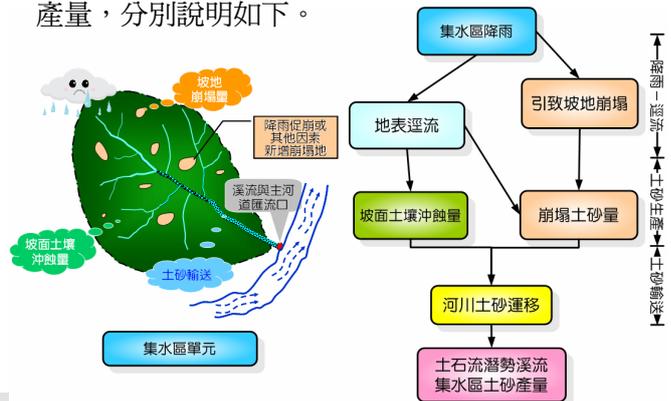


圖 4 本研究擬定之集水區土砂產量推估模式概念及流程圖

(一) 坡地土壤沖蝕量估算

在坡地土壤沖蝕量估算上，本研究擬利用由美國環保署所開發之集水區地理資訊系統管理 BASINS 模式進行集水區內之土壤沖蝕產量模擬。

(二) 崩塌地土砂產量推估模式

由文獻可知，一般常使用打荻氏集水區崩塌土砂量推估公式進行坡地崩塌土砂量之推估，其公式內之參數 K 與 R 參數需要多期航照或衛星影像資料相互比對，而因考量研究區內之前期航照或衛星影像資料稍嫌不足，故本研究將採用以現期之遙測資料進行崩塌地土砂量推估。

(三) 崩塌土砂遞移率

WINHSPF 程式除了可進行非點源污染 (坡面土壤沖蝕量) 之傳輸計算外，也可加入點源污染 (坡地崩塌量) 進行估算，因此本研究利用 WINHSPF 下之點源傳輸計算模式，將崩塌地體積量分別輸入各條集水區中，建立崩塌地位置與各集水區中之空間關係後，即可進行崩塌土砂運移量推估。

(四) 土砂總產量推估模式

集水區土砂產量推估最後一個步驟是坡面上所有點源及非點源泥砂進入河道後之輸送模擬，其輸送行為會因土石流發生與否，而呈現不同的泥砂輸送機制，因此需要針對不同的狀況，利用適合的模式進行河道輸送演算。針對非土石流發生情況時，本研究採用 WINHSPF 程式進行土砂運移計算；而針對土石流發生時，則利用 FLO-2D 程式進行土石流輸送行為模擬之運算。

本研究所分析出之土砂產量，是考慮集水區內現有崩場地、集水區地形分布、河道坡度、降雨規模等因素，較前人研究更能反映現地狀況。

四、實際應用案例

(一) 土石流流動模擬之應用

1. 影響範圍劃定及風險等級評估

本研究使用不同重現期雨量作為土石流影響範圍劃定之災害規模條件，以 FLO-2D 進行模擬運算，其模擬結果將可劃定不同重現期雨量下之土石流影響範圍，以 200 年重現期雨量為例，劃定最大可能之土石流影響範圍，如圖 5 所示。

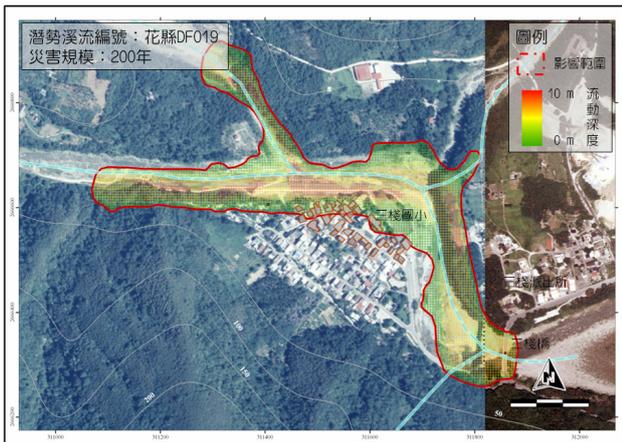


圖 5 花縣 DF019 土石流潛勢溪流影響範圍

本研究參考聯合國國際減災策略委員會 (ISDR) 提出所謂天然災害風險 (Risk) 之概念，訂定土石流潛勢溪流之災害風險 R (Risk)

為災害危害度 H (Harzard) 及易致災性 V (Vulnerability) 之乘積，通式如下：

$$\text{Risk (災害風險)} = \text{Hazard (災害危害度)} \times \text{Vulnerability (易致災性)} \quad (4)$$

其中災害危害度可定義為某特定規模下，災害發生機率及災害影響程度 (或災害強度, Intensity) 之函數；本研究參考 Garcia *et al.* (2003, 2005) 所提出之概念，以不同重現期下發生的災害強度，配合災害發生的機率，以得到不同程度之危害度 (High, Medium and Low)。而易致災性可以定義為災害對於人類所造成之傷害和財產被破壞的程度，本研究參考 Saldivar-Sali and Einstein (2007) 所使用之方法，將易致災性分為土地利用類別與居住人口兩部分，根據其易致災性高低分別給予災害危害度不同程度之折減，最終相乘結果即為風險等級之評分。

$$\text{RR} = \text{HR} * \text{LUM} * \text{PM} \quad (5)$$

式中 RR 為風險等級；HR 為災害危害度；LUM 為土地利用類別評分；PM 為居住人口評分。

依上述之災害強度準則與土石流流動模擬步驟，可得土石流潛勢溪流之災害危害度分布；再配合易致災元素類別，最終可得該土石流潛勢溪流之風險圖。圖 6 是以花縣 DF019 為例，可知三棧社區緊鄰河岸之住戶具有較高之風險，附近之其他住戶則具低風險等級。

2. 土石流土砂災損評估分析

災前準確評估土石流災害可能造成之損失，可作為未來在執行土石流相關政策及資源運用時之考量依據；而災損評估結果更有可能影響政府相關單位進行防災、救災、減災之作為。本研究在進行土石流土砂災損之分析時著眼於土石流於第一時間所造成之直接財產損失，包括土地損失及地上物之損失。表 1 為花蓮縣 DF019 土砂災損計算分析成果。

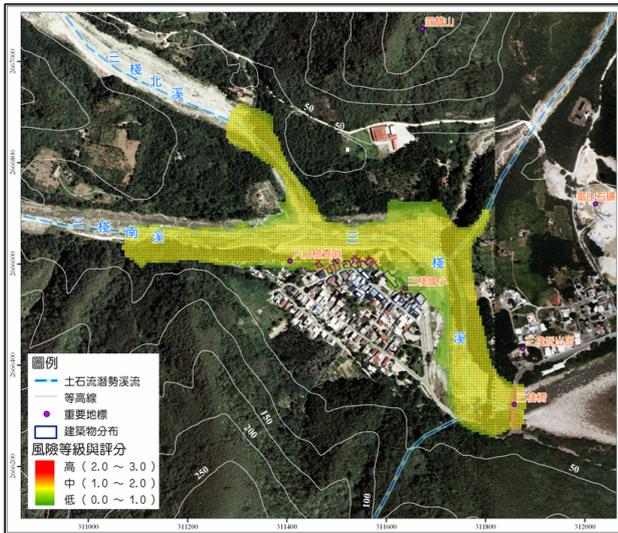


圖 6 花縣 DF019 土石流潛勢溪流風險圖

表 1 示範案例 DF019 之總損失金額示意表

單位：元

降雨重現期	土地損失	建物損失	道路損失	農業損失	林地損失	總損失
10 年	2,020,200	967,096	1,838,460	0	395,797	5,221,553
100 年	3,722,600	1,195,825	3,131,975	0	432,053	8,482,453
200 年	3,722,600	1,326,246	3,324,333	0	436,283	8,809,462

3. 工程整治成效模擬評估

本研究使用 FLO-2D 進行土石流流動模擬，此程式亦可以合理假設方式加入防砂壩、堤防等工程整治設施進行流動模擬，以評估此設施之整治成效。如圖 7 所示，以花蓮縣光復鄉大馬村花

縣 DF111 土石流潛勢溪流為例，根據現地條件進行工程設施配置，評估整治設施施作前後對於土石流潛勢溪流影響範圍控制之成效，可有效導流並保護下游保全住戶及農地之安全。

(二) 集水區產砂分析之應用

本研究已建立一套集水區土砂產量推估模式，能同時考量兩種土砂來源，即非點源類型之坡地土壤沖蝕量以及點源類型之坡地崩塌量，如此除能夠預測極端水文事件後集水區可能的土砂產出量，並探討坡地崩塌量之遷移率外，未來還可作為水庫清淤工程及集水區整治工程防砂效益之參考依據。

五、結 論

本研究建立完整土石流分析與模擬技術及集水區產砂分析技術，並列舉實際應用案例說明。本研究所建立之技術對於解決近年土砂災害頻傳之問題實有裨益，亦可提供防災計畫的擬訂及工程應用方面上之參考。而近年來極端氣候的出現導致土砂災害呈現的形式更多樣化，因此，瞭解現象發生與破壞的機制、規模及空間與時間分布相當重要。未來可以針對以上這些議題進行研究，以因應與解決日趨嚴重且複雜的土砂災害問題。



(a) 施作前



(b) 施作後

圖 7 整治設施施作前後模擬之影響範圍