

# 土石流數值模擬技術於集水區工程整治成效評估之研究-以 花蓮地區為例

趙啟宏<sup>1</sup> 林德貴<sup>2</sup> 許世孟<sup>1</sup> 溫惠鈺<sup>1</sup> 游宗耀<sup>3</sup> 徐森彥<sup>4</sup>

- 1.財團法人中興工程社大地工程研究中心研究員
- 2.國立中興大學水土保持系副教授
- 3.行政院農業委員會水土保持局花蓮分局工程員
- 4.行政院農林委員會水土保持局花蓮分局局長

## 摘 要

本研究利用二維有限差分數值分析程式 FLO-2D，以花蓮地區為例，針對具有災害歷史並有整治需求之土石流潛勢溪流，以土石流流動模擬的方式，進行工程整治設施配置建議及成效評估之研究。首先，藉由現地調查資料及參數敏感度分析，搭配特定土石流事件中，實際災害影響範圍與模擬影響範圍之比對，決定適合於現地土石流流動模擬使用之參數組合；並依此建立一套標準化之土石流流動模擬程序及模式，即可模擬土石流流動時之最大流動深度及最大流動速度分布。透過不同災害規模的設定之下，可根據模擬之深度及速度結果，進一步進行分析，提出適合於當地之土石流整治工法；更可利用工程整治設施加入前後之模擬結果，進行工程整治設施成效之評估。本研究之分析流程及結果，除可提供土石流防災單位在執行土石流相關整治之參考依據外，對於整治設施施作的成效，更可利用較科學的計算方式，具體地提出其適宜性，以供後續整治對策研擬之參考。

關鍵字：土石流潛勢溪流、數值模擬、FLO-2D、工程整治。

## Applications of Simulation Technique on Evaluation of Regulation Engineering Effects in Hua-Lien District

Chi-Hung Chao<sup>1</sup> Der-Guey Lin<sup>2</sup> Shih-Meng Hsu<sup>1</sup> Hui-Yu Wen<sup>1</sup>  
Tsung-Yao You<sup>3</sup> Sen-Yen Hsu<sup>4</sup>

## ABSTRACT

This study performed suggestions of engineering construction and evaluation of regulation engineering effects to potential debris flow torrents in Hua-Lien district using two-dimensional finite difference numerical tool named FLO-2D. The input values of various numerical parameters and their influence on numerical calculation were investigated by sensitivity analyses. Subsequently, significant parameters used in the model for the simulation of debris flow motion can be calibrated by comparing the computed influence zone with that from observations. With the aforementioned numerical simulation procedures, distributions of flow depth and flow velocity in a potential debris flow creek can be simulated under various debris flow intensities. By simulating debris-flow inundation areas with and without locating the engineering constructions, results pointed out that the evaluation of regulation engineering effects could be achieved. This study not only provided the public agent or private sector the necessary information for executing the relevant policies and resource allocation on debris flow prevention but also proposed a scientific and quantitative method to perform systematic analyses on evaluation of regulation engineering effects in potential debris flow torrents.

*Key Words:* potential debris flow torrent, numerical simulation, FLO-2D, regulation engineering.

## 一、前言

充沛的降雨、適當的地形坡度及充足的土石材料，為土石流發生之三大要素，而台灣特有之地質、地形及氣候條件正好滿足此要素，造成土石災害頻傳。近年來又因都市開發頻繁，使得住宅區臨近山坡地，以致於土石流發生時易造成生命財產之大量損失，且善後之整治及後續處理問題亦造成政府單位與社會相當之負擔。以花蓮縣為例，民國 79 年 6 月歐菲莉颱風期間秀林鄉銅門村爆發之土石流，造成房舍全毀 24 間，半毀 11 間，29 人死亡、6 人失蹤之慘劇及重大經濟損失，開啟大眾對於土石流災害之重視；民國 90 年 7 月桃芝颱風更於光復鄉大興村、萬榮鄉見晴村及鳳林鎮鳳義里等處造成重大土石流災情。

歐、美等先進國家在很早即針對土砂之影響範圍進行劃分，並施行土地管制措施，以確保位居於山坡地與山麓谷口扇狀堆積地區居民之生命財產安全。在國內，國家災害防救科技中心亦針對地勢低窪之洪水平原區與海岸地區，進行洪水氾濫區之劃分及預估可能發生之淹水潛勢情形；近年來，隨著數值模擬技術的進步及電腦效能的提升，國內、外學者乃致力利用數值模擬之運算方式於土石流之流動與堆積特性之描述，其中又以 O' Brien 等人於 1993 年發展出名為 FLO-2D 之土石流數值模擬模式較為成熟並最為廣泛使用。而國內學者及政府機關亦多利用此模式進行土石流模擬之相關研究，例如林美聆等(1999, 2000, 2001 及 2003)使用 FLO-2D 進行土石流潛勢的模擬；吳政貞(2003)、邱禎龍(2003)、蘇立明(2003)則利用 FLO-2D 來建立一套完整的土石流模擬模式；趙啟宏(2004)則針對土石流之流變參數及輸入模式進行探討。但上述研究多僅限於土石流可能堆積之影響範圍劃設，或引入風險及機率的概念來定義土石流影響範圍內之受災害風險高低，較少利用數值模擬之方式提出適合於不同溪流特性之整治工法。因此，本研究將採用數值分析模式，利用 FLO-2D 程式作為分析工具，以花蓮地區具有歷史災害之土石流潛勢溪流為示範區，進行土石流流動模擬，並提出適合該溪流特性之整治工法建議，且針對已提出之工法進行整治效益評估。

## 二、研究區域概況

本研究以花蓮地區作為案例之示範區域，花蓮地區土地狹長且多山地，自然環境變化很大，發展條件與西部縣市不同，地勢西高東低，境內高度在海拔一百公尺以下者，僅占全縣面積的 9%，而坡度在 5% 以下者，亦僅占全部面積之 12.7%。研究中選用之案例區域，位於花蓮中段之花東縱谷與中央山脈交界處，其地理位置如圖 1 所示。



圖 1 案例區域位置

依據經濟部中央地質調查所之地質圖可知，本研究區域所在地質區之地層多為大南澳片岩，大南澳片岩之主要組成黑色、綠色、矽質片岩、變質石灰岩及片麻岩，具有發育良好的葉理面，其地質較脆弱，故容易產生崩塌地，提供土石流發生時之料源。

## 三、數值模式簡介與研究流程

本研究選擇以 FLO-2D 來作為土石流流動模擬之分析程式，其模擬之控制方程式、模式參數分類與選用，及分析步驟茲說明如下。

### 3.1 土石流運動之控制方程式

採用 FLO-2D 進行土石流運動及堆積模擬時，主要在求解土石流  $x$ -軸方向之水深平均速度  $u$  及  $y$ -軸方向水深平均速度  $v$ ，以及土石流流深或堆積深度  $h$ 。其中，其採用之控制方程式包含：

一、連續方程式：

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

其中， $i$ =降雨強度； $t$ =時間。

二、運動方程式：

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

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

其中， $S_{fx}$ ,  $S_{fy}$ =摩擦坡降(friction slope)； $S_{bx}$ ,  $S_{by}$ =底床坡降(bed slope)； $g$ =重力加速度。

### 三、材料組成率：

$$S_f = S_y + S_v + S_{id} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta w}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 w^2}{h^{4/3}} \quad (4)$$

其中， $S_v$ =黏滯坡降； $S_{id}$ =紊流-擴散坡降； $\tau_y$ =降伏應力； $\eta$ =賓漢黏滯係數； $\gamma_m$ =土石流體之單位重； $K$ =層流阻滯係數； $n$ =等效曼寧係數； $w$ =合向量之平均流速。

### 3.2 參數分類與給定方式

根據上述控制方程式，可將本研究中土石流數值模擬所需之參數歸納為：地形條件參數、流量條件參數、材料參數及數值差分運算之穩定性參數等四大類。其內容及本研究所採用之參數依據分述如下：

#### 一、地形條件參數

1. 數值地形模型：本研究蒐集案例區域附近之高解析度 DEM(Digital Elevation Model)，並視需求調整其精度進行數值土石流流動模擬。

2. 等效曼寧係數(n)：參考美國陸軍工兵團之 HEC-1 手冊(1990)與工程設計指引(1997)之建議及設定方式。

3. 入滲條件：針對不同土地利用及土壤條件來決定降雨損失(Abstraction)及水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)係數。

4. 邊界條件：進行土石流模式分析時，在河道上游邊界需設定流入分析區域之流入點條件(source condition)。而於河道下游邊界則需設定流出點條件(sink condition)。

#### 二、流量條件參數

1. 洪水演算：本研究蒐集花蓮地區之案例區域周圍雨量站資料，進行降雨頻率分析，並以不同重現期距雨量作為災害規模之設定，再透過降雨-逕流模式，進行示範區域集水區之洪水演算，提供後續土石流演算時流量輸入之使用。而降雨-逕流模式則根據「花蓮集水區土砂影響範圍及災損評估分析」報告所述，使用具有較佳驗證成果之 BASINS 取代 FLO-2D 進行降雨-逕流模式之演算。

2. 土石流演算：採用流入點之洪水流流量歷線乘以放大因子 BF (bulking factor)獲得土石流流量歷線後，進行土石流流量計算。BF 值由土石流體積濃度計算如下：

$$BF = \frac{1}{1 - C_v} \quad (5)$$

3. 土石流體積濃度  $C_v$ ：參考 Takahashi(1991)對於平衡濃度  $C_D$  的定義，並考量現地條件及土石流數值模擬之經驗，決定土石流數值模擬時之體積濃度及其應有範圍。一般可取  $C_v = 0.3 \sim 0.7$ ，而  $C_v = (C_D / C^*)$ 。平衡濃度  $C_D$  值可表為：

$$C_D = \frac{\rho_w \tan \theta}{(\rho_s - \rho_w)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (6)$$

其中， $\rho_w$ =清水密度； $\rho_s$ =土石顆粒密度； $\phi$ =土石材料內摩擦角； $\theta$ =溪床坡度； $C^*$ =溪床面堆積土體之體積濃度。

### 三、材料強度參數

1. 流變參數：分為賓漢降伏應力(Bagnold yield stress)  $\tau_y$  及賓漢黏滯係數(Bagnold viscosity coefficient)  $\eta$ 。一般室內試驗所得之  $\tau_y$  及  $\eta$  值，由於所採用之試驗土石材料粒徑尺寸受到限制的關係，所得之結果遠低於現地之實際值。因此，為求取適用於現地土石流數值模擬之流變參數，本研究選定花蓮地區有歷史災害事件之示範區，並參考相關文獻之估計方法，進行流變參數之率定。最後，依各土石流潛勢溪流之特性進行參數分組，建立適用於花蓮地區土石流潛勢溪流之流變參數組合。

2. 土石流流體單位重：根據現地堆積材料種類給定土石流流體中之土石材料比重  $G_s$ ，且由於比重值於 FLO-2D 模式之運算中，屬於參數敏感度較低之參數。因此，在本研究中採用定值之比重  $G_s = 2.65$ 。

3. 層流阻滯係數：根據現地調查結果後，並參考 Woolhiser (1975)之建議來設定。

### 四、數值差分運算之穩定性參數

依據 FLO-2D 模式中不同使用者對分析精度之要求，選擇合適參數之範圍值後，數值差分運算時需滿足下列條件式：

$$\Delta t < \zeta S_0 \Delta x^2 / q_0 \quad (7)$$

其中， $\Delta t$ =計算時階； $\zeta$ =動力波穩定係數； $\Delta x$ =網格尺寸； $S_0$ =底床坡度； $q_0$ =單位流量。

### 3.3 本研究分析步驟與流程

進行土石流運動及堆積模擬，需針對模式的適用性及限制進行合理的假設，並制定一套完整之分析模式，本研究使用之分析步驟如下：

一、以溢流點以下之區域進行堆積區的設定，此堆積區即為本模式之模擬範圍，並粹取此範圍內之數值高程資料，並以上述參數給定方式設定等效曼寧係數  $n$  值。

二、以上述溢流點為土石流之流入點，給定該點之洪水流流量歷線(由 BASINS 中之降雨-逕流模式執行產生)，再乘以放大因子 BF (bulking factor)，決定土石流之流量歷線。

三、輸入土石流流變參數及其他材料參數。

四、進行土石流之運動及堆積模擬(由 FLO-2D 中之土石流模式執行)，並假設土石流發生於雨量最大時且歷時 1 小時(池谷浩，1980；謝正倫，1993)，亦即在洪水流流量歷線之尖峰值發生時間點往後延 1 小時之期間內，採用放大因子 BF 來決土石流流量歷線。最後，可計算求得土石流之最大流動深度及最大流速分布，作為後續應用之參考依據。

五、進行工程整治設施成效評估時，可加入工程設施元素，並重複上述步驟一至四得到工程整治設施

對於流動範圍及流速改變之貢獻。

綜上所述，本研究擬訂之土石流流動模擬技術流程如圖 2 所示。

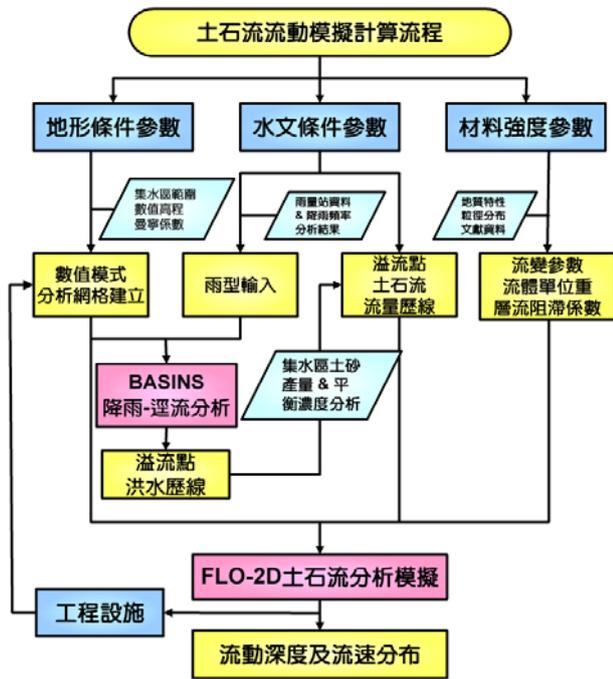


圖 2 土石流流動模擬計算流程圖

#### 四、利用案例分析進行流變參數率定

由前文所述可知，進行現地土石流數值模擬計算時所使用之流變參數，較不適合使用室內試驗所得，趙啟宏(2004)亦針對土石流數值模擬時使用的各參數進行參數敏感分析，指出流變參數中之降伏應力屬於敏感度較高之參數，並提出其合理範圍。有鑒於此，本研究以民國 90 年桃芝颱風時發生重大土石流災害之花蓮大興、見晴及鳳義地區作為示範區域進行模擬，並藉由比對模擬得之堆積範圍與利用災後航照判釋之土石流堆積範圍，來率定並求取合適之降伏應力。

##### 4.1 土石流模式分析案例與參數

民國 90 年 7 月桃芝颱風期間，於花蓮地區傳出多處重大土石流災情，其中又以光復鄉大興村之花蓮 061 土石流潛勢溪流、萬榮鄉見晴村之花蓮 069 土石流潛勢溪流以及鳳林鎮鳳義里之花蓮 A112 土石流潛勢溪流最為嚴重，大量土砂掩埋房舍、道路及農田，並造成多人傷亡。本研究首先採用災後之正射航照及相關整治報告資料，劃定出桃芝風災後之土石流災害區域，而後依據前述各類參數之決定方式與設定條件，同時以桃芝颱風發生時之雨量輸入本模式中，進行三個區域之土石流流動模擬，得到土石流流動及堆積範圍。並藉由調整降伏應力比對模擬結果與災後航照判釋結果，以求得合適之降伏應力。表 1 為率定後之成果及三條土石流潛勢溪流數值模擬所需之各項輸入參數。

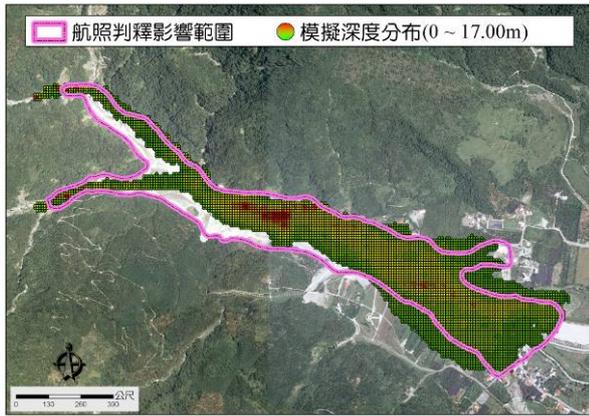
表 1 災害案例模擬各類參數輸入值

溪流編號	大興 花蓮 061	見晴 花蓮 069	鳳義 花蓮 A112
地形條件	69 年內政部數值地形 原始精度：40m*40m 模式內插：10m*10m		
參考雨量站	太安	鳳林	鳳林
桃芝颱風累 積雨量	368 mm	570 mm	570 mm
曼寧係數 (河道區/集水 區/堆積區)	0.05/0.3/0. 15	0.05/0.3/0. 15	0.05/0.3/0. 15
土石顆粒 比重	2.65	2.65	2.65
層流阻滯 係數	2285	2285	2285
體積濃度	0.62	0.88	0.35
賓漢降伏 應力	1200 Pa	2500 Pa	800 Pa
賓漢黏滯 係數	6 Pa-s	15 Pa-s	12 Pa-s

圖 3 則為模擬所得土石流堆積範圍與航照判釋之堆積範圍進行套疊比對之成果，可見最終參數調整過後之模擬成果與實際災害之堆積範圍相近。此外，並將數值模擬成果與實際淹沒範圍面積進行量化比較，如表 2 所示，其中影響面積差異百分比為模擬所得範圍與航照判釋範圍面積之差異，重疊面積差異百分比為落於航照判釋範圍內之模擬面積與航照判釋面積差異的百分比。

表 2 航照判釋成果與數值模擬結果之影響面積比較

溪流編號	大興 花蓮 061	見晴 花蓮 069	鳳義 花蓮 A112
航照判釋影響 面積(m <sup>2</sup> )	476,292	72,446	127,303
數值模擬影響 面積(m <sup>2</sup> )	489,600	75,200	137,100
影響面積差異 百分比(%)	2.8	3.8	7.7
重疊面積差異 百分比(%)	19.0	23.9	19.7



(a) 大興(花蓮 061)



(b) 見晴(花蓮 069)



(c) 鳳義(花蓮 A112)

圖 3 航照判釋成果與數值模擬結果之影響範圍比較

#### 4.2 降伏應力之決定

利用上述模擬分析案例，對於花蓮 061、花蓮 069 及花蓮 A112 此三條土石流潛勢溪流降伏應力率定成果，進行降伏應力之分類，結果如表 3 所示。由於平衡體積濃度將影響賓漢降伏應力，而溪床坡度又為改變平衡體積濃度之顯著因子，因此可知本土石流數值模擬模式中降伏應力與其相應之土石流潛勢溪流溪

床坡度具正相關性，如表 3 所示。另依此結果可建立不同潛勢溪流溪床平均坡度與降伏應力間之關係，並進行分組如表 4 所示。依此分組結果，於後續進行土石流潛勢溪流之數值模擬時，即可提供降伏應力之建議輸入值。

表 3 災害案例特性與合適之降伏應力

溪流編號	主流域	地質	集水面積 (ha)	溪床坡度 (度)	合適之降伏應力 (Pa)
花蓮 061	花蓮溪流域	廣域變質岩	1429	15.6	1000~1200
花蓮 069			59	18.8	2000~2500
花蓮 A112			746	10.8	600~800

表 4 數值模擬中降伏應力與溪床平均坡度之關係

溪床平均坡度(度)	建議降伏應力 (Pa)
>16	2500
12~16	1200
<12	800

### 五、模式適用性及災害案例驗證

根據本研究之分析流程及參數決定方式，並利用民國 97 年鳳凰颱風於花蓮地區境內發生之土石流災害進行案例驗證討論，並使用鳳凰颱風前之 5m\*5m 高精度數值地形作為驗證案例之地形條件。經由此驗證過程，加強本研究所開發模式之適用性後，未來可針對任一特定土石流潛勢溪流進行土石流運動及堆積模擬分析，並將分析結果作為防救災政策擬定或是工程整治之參考依據。

#### 5.1 災害案例驗證-光復鄉大馬村花蓮 A124

花蓮 A124 於鳳凰颱風後於下游谷口處形成明顯之土石流沖積扇，其災後之現地照片與災前狀況比較如圖 4 所示。經過現地調查後，可得知其堆積範圍以檢視本研究中土石流影響範圍劃定模式之適用性，如圖 5 所示。由圖中及現地調查成果可知由鳳凰颱風造成土石流影響範圍，往溪流右岸約至無門牌保全住戶之倉庫，往溪流左岸則至大馬 22 鄰 302 號旁之農舍（並無直接影響到 302 號住戶），往前則到產業道路旁之排水溝；而以鳳凰颱風當時太安雨量站之實際觀測雨量輸入本研究土石流流動模擬模式中進行模擬，影響範圍則如圖中所示，可知本研究模式對於左右岸保全住戶是否遭受此次災害威脅之模擬成果有不錯的成效。若以影響面積之差異來看，本模式模擬之影響面積與現地調查影響面積之差異約為 9.09%，而模擬結果落於現地調查影響面積內之重疊面積差異則為 13.4%，相對於現有公告之土石流影響範圍，有著更為合理精確的成果。差異主要來源研判為非使用鳳凰颱風前之數值地形所致，因目前所用之數值地形為桃芝颱風過後的地形，至今年鳳凰颱風發生前已有些許差異；另一原因為現地調查時無法完全得到災害當時

之影響範圍(如災害發生時僅淹水而無土砂堆積之區域)。



圖 4 鳳凰颱風前後花蓮 A124 之現地狀況比較



圖 5 鳳凰颱風後花蓮 A124 土石流影響範圍之比較

## 5.2 災害案例驗證-壽豐鄉樹湖村花蓮 072

花蓮 072 由多個支流組成，鳳凰颱風時，位於樹湖二號橋上的支流發生大規模之土石流，沖毀溪旁護岸及右岸之道路等設施，並留下大量大顆粒之土石材料堆積於河床上，其災後之現地照片與災前狀況比較如圖 6 所示。將災後空照圖定位進行土石流影響範圍之判釋，並與本研究以鳳凰颱風當時西林雨量站之實際觀測雨量輸入本研究土石流影響範圍劃定模式中進行模擬並進行比對，如圖 7 所示。可知本模式模擬之影響面積與空照判釋影響面積之差異約為 9.12%，而模擬結果落於空照判釋影響面積內之重疊面積差異則為 28.27%，相對於現有公告之土石流影響範圍，有著更為合理精確的成果。差異主要來源除了模擬所用之數值地形與鳳凰颱風發生前之實際數值地形有些許差異外，河道兩側淘刷部份則因本模式未含側向淘刷機制而無法正確反應。

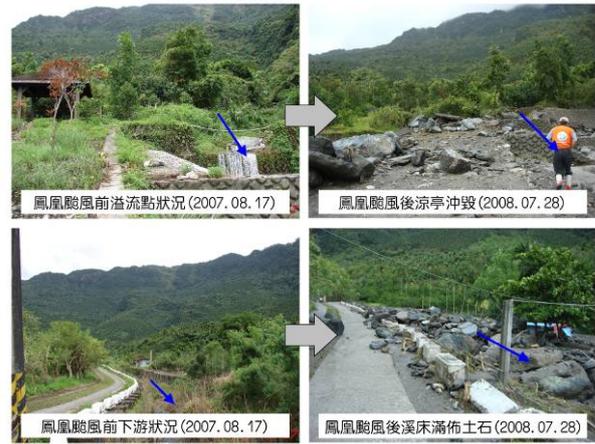


圖 6 鳳凰颱風前後花蓮 072 之現地狀況比較



圖 7 鳳凰颱風後花蓮 072 土石流影響範圍之比較

由以上各災害案例比較結果，可知本研究使用之土石流分析模擬模式將可提供土石流流動模擬一合理且完整之評估模式，其成果則可作為後續整治或是防救災政策擬定之參考。

## 六、工程整治設施配置建議及成效評估

根據上述鳳凰颱風於花蓮 A124 及花蓮 072 土石流潛勢溪流造成之災情，本研究亦針對溪流及災害特性，提出適合之整治對策及工法配置概念，並利用本研究發展之土石流流動模擬模式進行建議工程整治設施設置後之成效評估。此成果及流程可提供相關單位於處理土石流災害問題時之依據及參考。

### 6.1 溪流災害特性及整治配置建議

#### 一、光復鄉大馬村花蓮 A124

花蓮 A124 下游地形開闊平坦，災害發生時大量土石材料淤滿河道，排洪斷面大幅縮小並於谷口處發生溢流形成典型之土石流扇狀地，而鳳凰颱風過後既有之工程整治設施已被淤埋而無法於下次土砂災害發生時立即發揮其應有功能。為保護位於溪流出口處附近之住戶及土地，根據以下原則進行建議工法的配置：

1. 清除河床面上堆積土砂及塊石，增加排洪斷面，以利宣洩爾後土石流。
  2. 恢復修補遭淹埋之既有配置工程構造物。
  3. 於特定河段施作導流堤或護岸，儘量疏導控制下次土石流之流路，使其沖擊潛勢降至最低，並防止土砂影響位於谷口沖積扇。
- 配置建議之分布如圖 8 所示。



圖 8 花蓮 A124 整治建議配置圖

## 二、壽豐鄉樹湖村花蓮 072

花蓮 072 下游並無明顯之開闊地，中游至下游坡度陡變，使災害發生時位於中上游河道上之大顆粒土石沿陡峭區段高速往下輸送，強大的撞擊力直接衝擊下游工程設施，造成河床上潛壩及固床工的損壞淤埋，更沖毀渠道護岸溢出影響河道右岸之道路及保全住戶之安全。為減緩中上游土石材料向下之衝擊力，並保護位於溪流下游右岸之住戶及道路安全，根據以下原則進行建議工法的配置：

1. 下游堆積區之土石流防治工程構造物，如渠道護岸、固床工及潛壩大抵皆已發揮應有功能，惟受土砂掩埋。基於此情況，現階段之渠道整治應以清淤及工程構造物修復或補強為主。
  2. 河道左岸增設砌石護岸，並於平坦處增加河道斷面寬度成為土砂蓄積區。
  3. 溢流點上游之陡峭區段，可考慮新增防砂壩數座，其目的在降低土砂移動速度，以減緩下次來襲土砂對下游堆積區工程構造物之衝擊。
- 配置建議之分布如圖 9 所示。



圖 9 花蓮 072 整治建議配置圖

## 6.2 數值模擬方式進行工程整治成效評估

根據以上工程整治配置建議，將工程元素加入本研究之土石流流動模擬模式中，而災害規模的設定則使用 50 年重現期距之一日暴雨強度進行降雨頻率分析。分析方式則依據「水利署水文分析報告作業須知」之規定，需選用兩種以上之機率分布。本研究利用年最大值選用法(annual maximum series)採年最大降雨序列進行不同延時頻率分析，以常態、二參數對數常態、三參數對數常態、皮爾森 III 型、對數皮爾森 III 型及極端值 I 型等六種機率分布進行降雨頻率分析並選擇最合適之分布法。此二案例之降雨頻率分析結果如表 5 所示。

表 5 案例之降雨頻率分析結果

溪流編號	參考雨量站	50 年重現期距一日雨量	最適機率分布
花蓮 A124	太安	815mm	皮爾森 III 型
花蓮 072	西林	481mm	二參數對數常態

兩案例依上述之整治配置建議，代入本研究之土石流流動模擬模式後，對於土石流發生時之減災成效分述如下：

### 一、光復鄉大馬村花蓮 A124

花蓮 A124 之整治目的主要為防止土石流流動影響下游之保全住戶，由圖 10 可知若僅進行河道清淤(濬深 2m)將不足以達到保護下游住戶之效果。

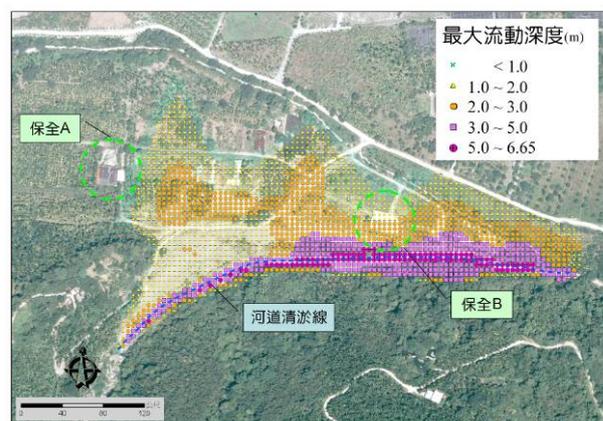
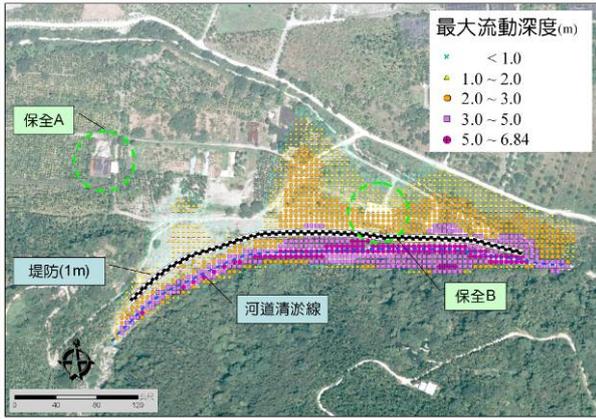
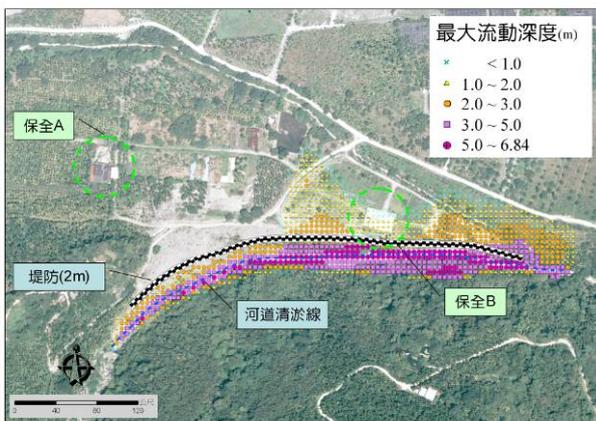


圖 10 未設置堤防前之模擬結果

若於河道左岸加入堤防的設置，疏導控制土石流流動時之方向，如圖 11 中當堤防高為 1m 及 2m 時，土石流之影響範圍隨著堤防的增高而逐漸被控制，但仍有局部溢堤的現象而危及下游保全住戶。



(a) 堤防高 1m



(b) 堤防高 2m

圖 11 逐漸加高堤防之模擬結果

當堤防高為 2.5m 時，在此災害規模設定下發生之土石流，將受此整治方案有效束制疏導，使下游保全住戶免於遭受土石流直接侵襲之虞。其整治過後模擬之流動深度分布如圖 12 所示。

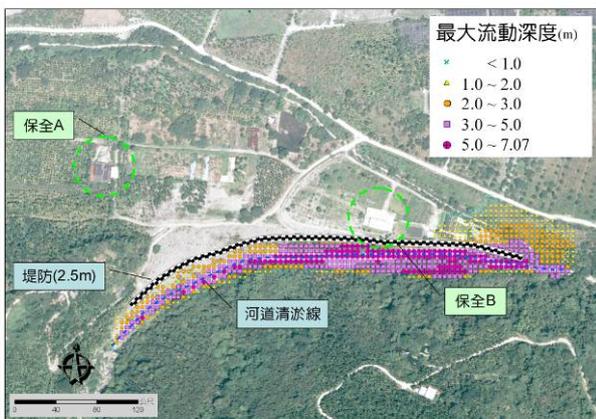


圖 12 堤防高 2.5m 之模擬結果

## 二、壽豐鄉樹湖村花蓮 072

花蓮 072 之整治目的主要為減緩土石流發生時之移動速度，避免土石直接撞擊導致強大的衝擊力摧毀河床之上之潛壩、固床工及渠道護岸，由圖 13 可知若在未加入任何工程整治設施時，於此災害規模設定之下，土石流最大流速為 16.65 m/s，在此流速之下土石流具有強大的衝擊力，恐有危及下游之既有工程設施及沿岸住戶與道路之虞。

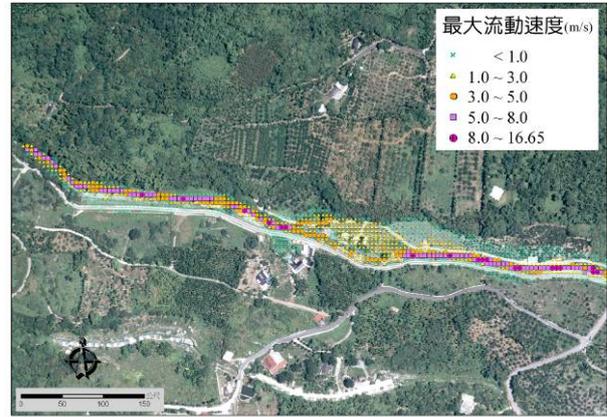


圖 13 防砂壩設置前之模擬結果

於花蓮 072 坡度陡變處之溢流點以上加設如上述建議之防砂壩後，由圖 14 可知，在同樣災害規模設定之下，土石流之最大流速將降低為 15.09 m/s，表示加入此設施將有利於降低土石流之衝擊力，減少對於下游河床上的固床工、潛壩及渠道護岸的直接損害，惟降低幅度並不大，可將整治著重於減少中上游土砂材料之供給。如上游產業道路上下邊坡崩塌區之堆積土砂，未來可能沿邊坡形成之蝕溝向下游渠道堆積區進行土砂輸送。因此，基於現地地質條件(風化破碎板岩及片岩)，現階段可考慮將坡面崩塌堆積土砂進行清運；而對於未來豪雨期間蝕溝內之輸送土砂，則可考慮沿蝕溝施作連續性節制壩予以攔截。

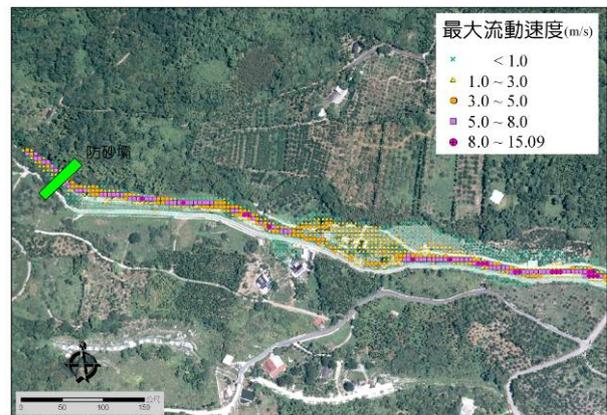


圖 14 防砂壩設置後之模擬結果

## 六、結論

依據本研究之各項分析成果可綜合下列幾點結論與建議：

一、採用數值模擬方式進行土石流流動及堆積範圍之模擬，相較於現行採用經驗公式並輔以現地調查來決定土石流可能影響範圍之方式，更加客觀準確。此點可由模擬堆積範圍與災害堆積範圍之比對來獲得驗證。

二、針對 FLO-2D 土石流模式使用之參數，利用大興（花蓮 061）、見晴（花蓮 069）及鳳義（花蓮 A112）三條土石流潛勢溪流於桃芝颱風之土石流災後航照判釋範圍與模擬影響範圍進行比對及參數率定，其成果根據不同地文特性，將現地土石流模擬使用之降伏應力進行分組建議，可供作爾後土石流數值模擬之使用參考。

三、本研究利用今年（民國 97 年）鳳凰颱風造成大馬村（花蓮 A124）及樹湖溪土石流潛勢溪流（花蓮 072）之土石流災情進行土石流模擬案例驗證，其良好之吻合度可確認本研究提土石流模擬演算模式之適用性。

四、本研究利用具有整治需求之土石流潛勢溪流（花蓮 A124 及花蓮 072），針對其不同溪流特性，提出疏濬、導流堤及防砂壩等工程整治設施，並比較整治前後之土石流流動範圍及流動速度變化評估其整治成效，其中花蓮 A124 在此整治配置建議之下，可有效達到導流並保護下游保全住戶及土地之目標；而花蓮 072 除建議之整治配置外，尚需在中、上游輔以其他減少土石料源之整治對策方可使下游岸邊住戶及道路免於土石流災害之虞。而此流程可提供相關單位進行土石流整治或是防災政策擬定之參考。

五、土石流流動模擬使用的 DEM 精度及其製作年份與現地是否符合，對於土石流流動模擬及後續分析之準確性具關鍵影響。若可取得更高精度之 DEM 亦或提高其使用之正確性，則將使本研究提出之模式更臻於準確。

## 參考文獻

[1]謝正倫、江志浩、陳禮仁，「花東兩縣土石流現場調查與分析」，中華水土保持學報，第 23 卷，第 2 期，第 109-122 頁(1992)。  
[2]謝正倫，「土石流預警系統之研究」，國立成功大學台南水工試驗所報告，No.139(1993)。  
[3]林美聆、莊睦雄等，「陳有蘭河流域土石流溪流地理資訊系統建立與土石流溪流特性分析」，防災國家型科技計畫八十八年度成果報告(1999)。  
[4]林美聆、陳天健等，「陳有蘭河流域土石流溪流潛勢分析與境況模擬方法之建立-出水溪、豐丘及和一號野溪」，防災國家型科技計畫八十九年度成果報告(2000)。  
[5]林美聆、陳天健等，「陳有蘭河流域示範區土石流溪流潛勢分析與災害境況模擬」，防災國家型科技計畫九十年度成果報告(2001)。  
[6]林美聆、王國隆、黃紀禎，「豐山村集水區土石流整治規劃報告書」，元裕工程技術顧問有限公司(2001)。

[7]林美聆、王國隆、溫惠鈺，「台灣藝術村土石流潛勢模擬」，中華民國大地工程學會(2003)。  
[8]吳政貞，「土石流沉澱數值分析-以溪頭為例」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所(2003)。  
[9]邱禎龍，「台北縣三峽鎮白雞地區山崩引發土石流案例調查研究」，碩士論文，國立台灣大學地質科學研究所(2003)。  
[10]蘇立明，「二維數值模式應用於土石流災害模擬之研究」，碩士論文，國立台灣大學生物環境系統工程研究所(2003)。  
[11]趙啟宏，「土石流之數值模擬及流變參數特性之探討」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所(2004)。  
[12]財團法人中興工程顧問社，「土石流危險聚落易致災因子調查與整治對策」，成果報告，行政院農業委員會水土保持局(2007)。  
[13]財團法人中興工程顧問社，「花蓮集水區土砂影響範圍及災損評估分析」，成果報告，行政院農業委員會水土保持局花蓮分局(2008)。  
[14]池谷浩，「土石流災害調查法」，日本山海堂，第 39-45 頁(1980)。  
[15]O' Brien, J.S., Julien, P.J. and Fullerton, W.T., "Two-dimensional water flood and mudflow simulation," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.119, No.2, pp.244-261(1993).  
[16]O' Brien, J.S., FLO-2D user' s manual, version 2006.01, Flo engineering, Nutrioso(2006).  
[17]U.S. Army Corps of Engineers, "HEC-1, Flood Hydrograph Package," User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA(1990).  
[18]U.S. Army Corps of Engineers, "Flood-Runoff Analysis," Technical Engineering and Design Guides, No.19., ASCE Press, NY(1997).  
[19]Takahashi, T., "Debris Flow", Balkema, Rotterdam, pp.134-153(1991).  
[20]Woolhiser, D.A., "Simulation of Unsteady Overland Flow," in Unsteady Flow in Open Channels, Mahmood, K. and Yevjevich, V. eds, Water Resources Publications, Fort Collins, CO(1975).