

土石流流動模擬技術於災害風險區劃定及 災損評估應用之研究

林德貴⁽¹⁾ 徐森彥⁽²⁾ 趙啟宏⁽³⁾ 溫惠鈺⁽³⁾ 許世孟⁽³⁾ 顧承宇⁽⁴⁾ 冀樹勇⁽⁵⁾

摘要 本研究採用二維有限差分法數值分析程式，針對花蓮地區之土石流潛勢溪流，進行災害風險區劃定及災損評估。首先，藉由參數敏感度分析，來探討各數值運算參數及材料特性參數之輸入值，對數值計算結果之影響。隨之，經由特定土石流事件之土石災害影響範圍之計算值與其觀測值之比對，即可決定一組適用於現地土石流流動模擬之參數組合並建立一套標準化之土石流流動數值模擬程序。採用上述數值模擬程序，可針對花蓮地區之土石流潛勢溪流，在不同災害規模設定條件下，模擬土石流流動之可能影響範圍及其流動深度分布。依據影響範圍及其流動深度之計算結果，即可進行土石流潛勢溪流影響範圍之劃定及災害風險之等級評估。透過定義土石流影響範圍內之災損元素，及二維有限差分法數值分析程式之災損計算模組之演算，即可獲得土石流影響範圍內之災損價值。本研究之分析成果，除了可提供土石流防災單位，在執行土石流相關政策及資源運用時之參考依據外，對於土石流潛勢溪流之災損評估方面亦提出一個較科學的量化計算方法，以供後續防災、救災與減災作業之參考。

關鍵詞：土石流潛勢溪流、影響範圍之劃定、災害風險、災損評估。

Applications of Simulation Technique on Hazard Zone Delineation and Damage Assessment of Debris Flow

Der-Guey Lin ^[1] Sen-Yen Hsu ^[2] Chi-Hung Chao ^[3] Hui-Yu Wen ^[3]
Shih-Meng Hsu ^[3] Cheng-Yu Ku ^[4] Shu-Yeong Chi ^[5]

ABSTRACT This study performed a series of hazard zone delineations of debris flow potential creek and damage assessment in Hua-Lien district using two-dimensional (2-D) finite difference numerical tool. The input values of various numerical parameters and their influence on numerical calculation were investigated by sensitivity analyses. Subsequently, a set of parameters which are appropriate for the simulation of debris flow motion can be determined by comparing the computed influence zone with that from observations. Using the aforementioned numerical simulation procedures, the influence zone and the distribution of flow depth of debris flow motion in debris flow potential creek can be simulated under various debris flow intensities. According to the calculation results of influence zone and flow depth of debris flow, the delineation of influence zone and hazard assessment can be achieved. Through the definition of damage element within the influence zone and the flood damage estimation module in 2-D finite difference numerical tool, the damage value within the influence zone of debris flow can be calculated. In addition to providing the public agent or private sector the necessary information for executing the relevant policies and resource allocation on debris flow prevention, this study proposed a scientific and quantitative method enables a systematic analyses on the damage assessment in potential debris flow torrent.

Key Words: debris flow potential creek, delineation of influence zone, disaster risk, damage assessment.

[1] 國立中興大學水土保持系副教授（通訊作者）

Associate professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan. (Corresponding Author)
E-mail: dglin@nchu.dragon.edu.tw

[2] 國立中興大學水土保持系博士研究生

Doctoral student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan.

[3] 中興工程顧問社大地工程研究中心 研究員

Research Engineer, Geotechnical Engineering Research Center, Sino-tech Engineering Consultants, Inc.

[4] 國立台灣海洋大學河海工程學系 助理教授

Assistant professor, Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, Taiwan.

[5] 中興工程顧問社大地工程研究中心 經理

Manager, Geotechnical Engineering Research Center, Sino-tech Engineering Consultants, Inc.

一、前言

台灣特有之地質、地形及氣候條件，符合土石流發生之三要素：極端事件的降雨、適當的地形坡度及足夠的土石材料，使得台灣地區之土石流或邊坡崩塌等土石災害頻傳。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 月歐非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，此亦為上世紀末台灣重大土石流災情之一。

歐、美等先進國家在很早即針對土石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；而近年來隨著數值模擬技術的進步，已有部分國內學者使用數值模擬方式來模擬解析土石流相關問題，但多僅限於土石流可能堆積之影響範圍劃設，較少數有進一步的引入風險等級的概念來定義土石流影響範圍內之受災害風險高低，同時進行土石流影響範圍內之災損價值評估。因此，本研究將採用數值分析模式，並以花蓮地區之土石流潛勢溪流為示範區，進行土石流流動模擬極其影響範圍劃定後，再進行土石流影響範圍內之災害風險區劃定及災損評估。

二、本研究數值模式簡介與建立

有別於傳統經驗公式，近年來隨著數值模擬技術的進步，國內、外學者乃利用此技術致力於模擬解析土石流之相關問題。自從 O'Brien 等人(1993, 2006)發展出 FLO-2D 土石流數值模擬模式後，國、內外已有多位學者利用此一程式進行土石流之模擬研究。近年來，國內 FLO-2D 之使用也越來越為廣泛，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；趙啓宏(2004)則針對土石流之流變參數及輸入模式進行探討。因此，本研究選擇以 FLO-2D 來建立土石流流動模擬，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。

2.1 FLO-2D 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，數值模式所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：

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

其中， S_v =黏滯坡降； S_a =紊流-擴散坡降； τ_y =降伏應力； η =賓漢黏滯係數； γ_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。

2.2 參數分類與選用

根據上述控制方程式，可將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輸入方法分述如下：

一、地形條件參數

1. 數值地形模型：本研究使用高精度 $5m \times 5m$ DEM (Digital Elevation Model)。
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：根據 FLO-2D 模式中，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：本研究以蒐集之花蓮地區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。

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， ρ_w =清水密度； ρ_s =土石顆粒密度； ϕ =土石材料內摩擦角； θ =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) τ_y 及賓漢黏滯係數(Bagnold viscosity coefficient) η 。一般室內試驗所得之 τ_y 及 η 值，由於所採用之試驗土石材料粒徑尺寸受到限制的關係，其室內試驗值均遠低於現地之實際值。因此，本研究選定花蓮地區有歷史災害事件之示範區，並參考前人研究之估計方法，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，建立適用於示範區域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， Δt =計算時階； ζ =動力波穩定係數； Δx =網格式尺寸； S_0 =底床坡度； q_0 =單位流量。

2.3 分析步驟

土石流運動及堆積模擬之分析步驟如下：

- 一、以溢流點以下之區域進行堆積區的設定，並由設定之堆積區範圍粹取其數值高程資料以便設定等效曼寧係數 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 FLO-2D 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(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，可計算求得堆積區土石流之最大流動深度及最大流速分布，並作為後續土石流影響範圍劃定、風險分析及災損評估之參考依據。

綜上所述，本研究所擬訂之土石流流動模擬技術流程如圖 1 所示。

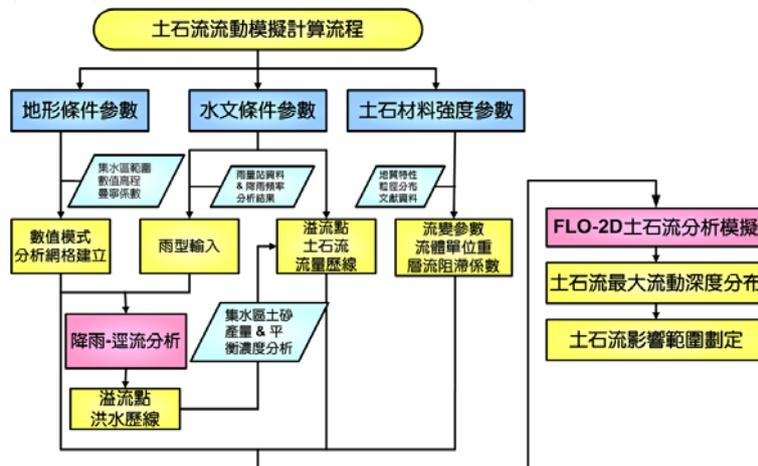


圖 1 本研究土石流流動模擬技術流程圖

Fig. 1 Flowchart for simulation of debris flow using FLO-2D

三、案例分析及參數率定

本研究採用民國 90 年桃芝颱風時發生重大土石流災情之大興、見晴及鳳義地區等三個土石流災區，作為本研究數值模式之參數率定。其中，流變參數中之降伏應力在土石流模式中，屬於敏感度較高之參數；故本研究針對上述三個地區之土石流災害進行模擬，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，來率定求取合適之降伏應力。

3.1 FLO-2D 土石流模式分析案例

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分布輸入 FLO-2D 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。藉由調整降伏應力比對模擬結果與災後航照判釋結果，以求得流變參數中之降伏應力。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 土石流潛勢溪流土石流運動模擬各類參數輸入值

Table 1 Various input parameters for simulation of flow motion of debris flow at debris flow potential creek

項目	大興(花蓮 061)	見晴(花蓮 069)	鳳義(花蓮 A112)
地形條件	10 m×10 m DEM	10 m×10 m DEM	10 m×10 m DEM
降雨歷線	368 mm ; 48 hrs	570 mm ; 48 hrs	570 mm ; 48 hrs
洪水歷線	FLO-2D 降雨-逕流模式		
曼寧係數	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 2 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。此外，三個災區之數值與實際淹沒範圍面積比較，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 土石流影響面積之航照判釋成果與 FLO-2D 模擬結果比較

Table 2 Comparisons of influence zone of debris flow determined by aerial photos interpretation and FLO-2D simulation

溪流編號	航照判釋 影響面積 (m ²)	FLO-2D 模擬 影響面積 (m ²)	影響面積 差異百分比(%)	重疊面積 差異百分比(%)
花蓮 061 (大興)	476,292	489,600	2.8	19.0
花蓮 069 (見晴)	72,446	75,200	3.8	23.9
花蓮 A112 (鳳義)	127,303	137,100	7.7	19.7

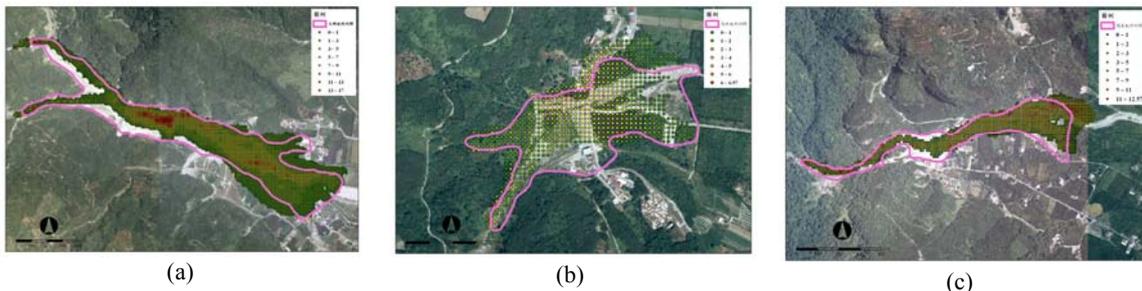


圖 2 土石流航照判釋影響範圍與 FLO-2D 模擬影響範圍之比對

(a)大興(花蓮 061) (b)見晴(花蓮 069)及(c)鳳義(花蓮 A112) 土石流潛勢溪流溪

Fig. 2 Comparisons of influence zone of debris flow determined by aerial photos interpretation and FLO-2D simulation at (a) Da-Sing (Hua-Lien 061) (b) Jian-Cing (Hua-Lien 069) and (c) Fong-Yi (Hua-Lien A112) debris flow potential creek

3.2 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、花蓮 A112 等三條及後續增加之花蓮 A110 共四條土

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。表 3 顯示之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。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，未來於土石流潛勢溪流之數值模擬時，即可提供降伏應力建議輸入值。

表 3 利用土石流模擬案例分析分類之降伏應力

Table 3 Yield stress determined by back analyses of debris flow simulation

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
花蓮 A110			136	9.6	600~800

表 4 土石流降伏應力與溪床平均坡度之關係

Table 4 Relations of yield stress and volumetric concentration with average slope of channel bed

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

四、鳳凰颱風災害案例驗證及土石流流動模擬成果展示

本研究根據上述 FLO-2D 程式之分析流程及參數決定方式，首先以今年（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，並以花蓮縣見晴地區為例，進行土石流流動模擬結果之展示。經由災害案例驗證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，並將分析結果作為土石流潛勢溪流影響範圍劃定、風險圖製作及災損分析評估之參考依據。

4.1 鳳凰颱風災害案例驗證

民國 97 年 7 月 28 日鳳凰颱風侵台，在花蓮地區帶來豪雨及災情，並於壽豐鄉樹湖村花蓮 072 土石流潛勢溪流引發土石流災害。以本研究所建置之土石流流動模擬分析模式，並輸入鳳凰颱風期間西林雨量站之實際觀測雨量資料進行模擬，將此土石流災害影響範圍模擬成果與現地災害範圍進行比對驗證。花蓮 072 土石流潛勢溪流由多條支流所組成，鳳凰颱風時，位於樹湖二號橋上方之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，並留下大量粗大顆粒之土石材料堆積於河床上。

將災後航照判釋之土石流堆積範圍與數值模擬之土石流影響範圍進行比對，如圖 3 所示。由比對結果可知，本研究可模擬得災害區域與實際災害範圍大致符合，土石流模擬之影響面積與航照判釋之影響面積，其間之差異約為 9.12%，而模擬結果落於航照判釋影響面積內之重疊面積差異，則約為 28.27%；而於河道兩岸有部分堆積範圍之些微差異，主要係為 FLO-2D 程式無法反應渠道兩側之側向淘刷機制，但相對於現有水保局公告之土石流影響範圍(即圖中黃線標示者)，本研究所得之模擬影響範圍，更為合理且精確。

4.2 流動模擬成果

本研究已由 4.1 節之實際災害案例驗證土石流流動模擬模式之適用性，故本研究所建立之模式可進行土石流淹沒範圍最大流動深度及流動速度分布模擬展示並應用於土石流潛勢溪流之影響範圍劃定。於土石流流動模擬時，可以實際降雨事件作為每條欲分析土石流之災害規模設定，或是視需求而自行設定降雨條件輸入。本研究以見晴地區之花蓮 069 為例，在 100 年重現期距之一日降雨強度下，其最大流動深度及流動速度分布，如圖 4(a)及(b)所示，由圖中可知，危險區域分布于見晴橋之兩側，與 90 年桃芝風災時之受災區域相同。此數值模擬結果，亦可提供後續風險圖製作及災損評估分析使用。

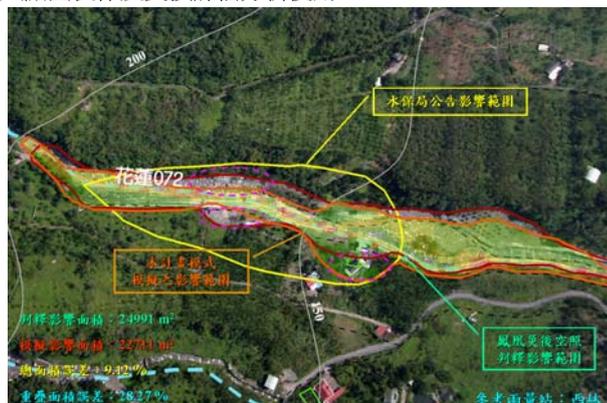


圖 3 鳳凰颱風後花蓮 072 土石流潛勢溪流土石流影響範圍之比較

Fig. 3 Comparison of debris flow influence zone at Hua-Lien 072 debris flow potential creek

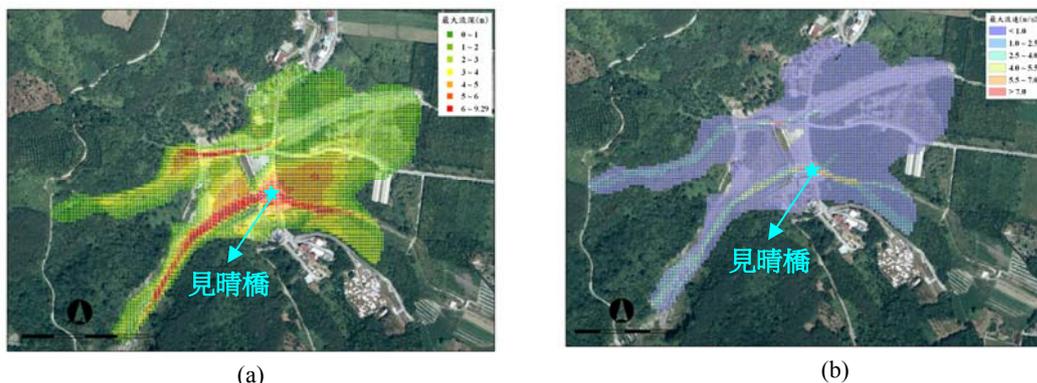


圖 4 土石流潛勢溪流(花蓮 069)土石流運動模擬(a)最大流動深度分布(b)最大流速分布
(100 年重現期距一日降雨強度)

Fig. 3 Debris flow simulation of Hua-Lien 069 debris flow potential creek (a) distribution of maximum flow depth (b) distribution of maximum flow velocity (100-year return period with one day rainfall duration)

五、土石流影響範圍風險分析及風險圖製作

本研究利用上述不同災害規模設定條件下之土石流模擬結果，進行土石流影響範圍之劃定，同時引入風險等級之概念，即可製作土石流潛勢溪流影響範圍之災害風險圖，並提供作為防救災計畫擬定及後續災損分析評估之參考。

5.1 風險圖製作概念

災害風險圖之風險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)；其中，發生機率為重現期距頻率雨量之超越機率，而災害強度則取決於土石流淹沒深度(可由土石流最大流動深度決定)及土石流衝擊程度(可由土石流最大流速決定)。因此，要製作土石流之風險圖，則需要進行不同重現期距雨量規模下之土石流影響範圍模擬，並擷取影響範圍最大流動深度及最大流速分布之模擬結果。

本研究採用 FLO-2D 之風險等級評估方法，進行風險圖製作。該法係由 Garcia 等人(2003, 2005)所提出。其中，採用不同重現期距下發生的災害強度，再配合災害發生的機率，即可求得高、中、低(High, Medium and Low)不同程度之風險等級。較長的災害重現期距可能發生較高的災害強度，但其發生機率也較小。反之，較短的災害重現期距可能發生較低之災害強度，但其發生機率也較大，其概念示意，如圖 5 所示。

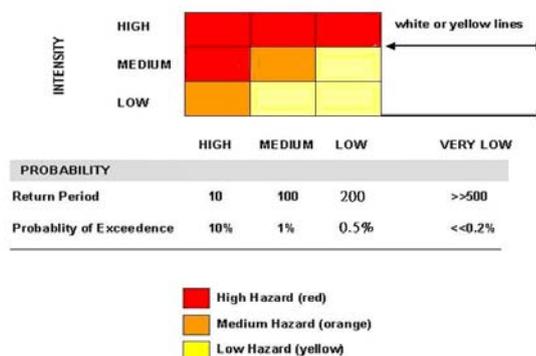


圖 5 風險等級概念(Garcia, 2003, 2005)

Fig. 5 Illustrative concept for various hazard levels (Garcia, 2003 & 2005)

5.2 風險圖製作與成果

利用上述方法並選用(10 年, 100 年, 200 年)重現期距之一日降雨強度，作為災害規模設定值。在完成 FLO-2D 土石流數值模擬後，利用計算所得之影響範圍內之最大流動深度 h 及最大流速 v 模擬分布結果，即可將影響範圍內之不同區域之災害強度訂定為：(1)高、(2)中及(3)低三個等級。(1)高災害強度區域於圖上將顯示為紅色，在此區域內將可能發生結構物損壞，且人員不論於室內、外均有生命威脅。(2)中災害強度區域於圖上將顯示為橘色，在此區域內結構物依不同種類而有不同損壞，而人員於室外有生命威脅。(3)低災害強度區域於圖上將顯示為黃色，在此區域內不論人員及結構物均無重大威脅，但仍有輕微影響。各等級災害強度之相當最大流動深度及最大流速，如表 5 所示。最後，結合地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)技術，即可製作土石流潛勢溪流土石流影響範圍內之風險強度圖。

本研究採用 FLO-2D 之風險評估模組及上述風險圖之製作方法，即可製作土石流潛勢溪流之災害風險

圖，以見晴地區(花蓮 069)為例，如圖 6 所示。圖中顯示在見晴土石流潛勢溪流中，以往受災嚴重位於溪流與見晴橋交會處右岸之住戶目前已無人居住，現場房舍內仍留有災害發生時之土石材料。另外，於溪流左岸一帶之住戶則位於中風險區，於豪大雨來臨時將有發生淹水之可能性。因此，對於位在風險區內之住戶，有必要對其進行防救災及避難疏散計畫之擬定與演練。

表 5 災害強度及定義

Table 5 Disaster intensity definition

災害強度	風險圖例	h =最大流動深度 (m) v =流動速度 (m ² /sec)
高	紅色	$h > 2.5 \text{ m}$ or $hxv > 2.5 \text{ m}^2/\text{sec}$
中	橘色	$1.0 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$ or $1.0 \text{ m}^2/\text{s} < hxv < 2.5 \text{ m}^2/\text{sec}$
低	黃色	$h < 1.0 \text{ m}$ or $hxv < 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$

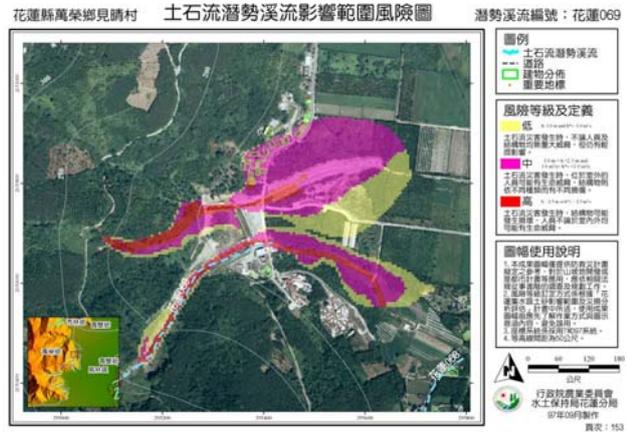


圖 6 見晴土石流潛勢溪流(花蓮 069)災害風險圖

Fig. 5 Hazard risk map of Jian-Cing debris flow potential creek (Hua-Lien 069)

六、土石流潛勢溪流土砂災損評估分析

土石流所致之災損可分為直接損失(direct damage)和間接損失(indirect damage)兩種(李欣輯, 2006)。直接損失是指災害第一時間所造成的損失，如人命傷亡、房屋損毀、道路中斷以及公設損壞等；間接損失泛指直接損失之外的所有損失，如房屋若遭損毀，居民因無處可住，而需額外付出的安置費用，此即為間接損失。土石流災害中直接損失的大小是第一時間內反應災害規模大小的重要參考指標，對於災時的緊急搶救來說，直接損失的估算對於災時的緊急應變更顯重要；故本研究僅針對土石流災害之直些災害損失進行研擬。

6.1 土石流災損分類及計算方式

本研究在進行土石流土砂災損分析時，乃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。土地損失係指土地經過土石流侵害後，造成土地無法恢復原有用途，其原因包括土地遭土石流沖蝕流失之損失，以及土地遭土石堆積後恢復成本過高而放棄利用之損失。地上物損失主要可分為兩大類：一類為建築構造物，其損失計算依土石流之淹埋深度而有不同程度之損失；另一類為非建築構造物之地上物，如稻田、果園、茶園及竹林等，此類地上物在經過土石流侵襲或淹埋後即視為全毀，因此，此類地上物僅需計算其經濟價值即可求得損失。

各個災損因子之計價標準說明如下：

一、土地損失

$$LL = \sum_{i=1}^N LV_i \times LLA_i \quad (8)$$

其中， LL =土地損失(單位：元)、 LV_i =土地價值(單位：元/ m^2)、 LLA_i =土地損失面積(單位： m^2)、 i =不同土地利用分類下之土地編號。各年度各區段之土地公告地價 LV_i ，可由各縣政府地政局之「土地公告現值查詢」得之。

二、建築物損失

$$BL = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M BC_{ij} \times BA_{ij} \quad (9)$$

其中， BL =建物損失(單位：元)、 BC_{ij} =不同建物每層每 m^2 之造價(單位：元/ m^2)、 BA_{ij} =不同建物每層面積(單位： m^2)、 j =建物樓層、 i =不同種類建物之類型編號。建物每單位面積之造價 BC_{ij} ，可參考各縣政府所公佈之「房屋用途分類表」及「房屋標準單價表」進行計算。

三、非建築構造物之地上物損失

此類損失為農耕地、林業用地及交通水利用地之地上物損失，其計價方式均為地上物之單價(元/每計價單位)乘以損失數量(每計價單位)，而各地上物之單價均可透過相關政府部門之公告價格計算。

另於 FLO-2D 所使用之災損計算公式如下：

$$COST_B = \left(\frac{\sum A_i (Cost_i)}{A_b} \right) \quad (10)$$

式中， $COST_B$ 為欲計算災損物 B 之價值， A_i 為 B 災損物所在之元素 i 上被淹沒面積； $Cost_i$ 為元素 i 上之災損

價值； A_B 為 B 災損物之面積。

本研究依據過去所累積之現地調查記錄與歷史災害資訊，再與歷年來南投縣、新竹縣、台中縣等曾發生土石流重大災害之事件比對，即可擬訂財產損失程度之判定準則，如表 6 所示。圖 7 則為本研究所採用之土石流災損評估流程。

表 6 財產損失程度判定準則

Table 6 Criterion for the definition of various levels of property loss

土石淹埋深度	地上物	
	建物	非建物 (以農作為主)
2.5 m 以上	全毀	全毀
1 m ~ 2.5 m	半毀	全毀
1m 以下	輕微損失	全毀

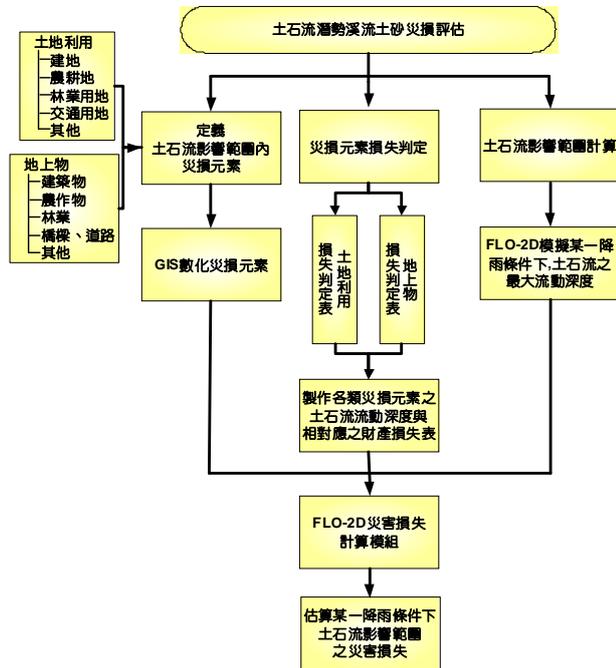


圖 7 土石流災損評估流程圖

Fig. 6 Flow chart of debris flow damage assessment

6.2 災損分析成果

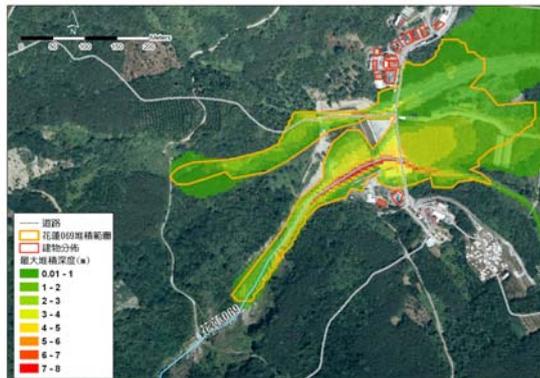
以見晴地區土石流潛勢溪流(花蓮 069)為例，依據上述之土石流土砂影響範圍之劃定分析流程，可得到此潛勢溪流在不同重現期距下(10 年，100 年，200 年)之土石流最大流動深度分布圖。隨之，於圖上套疊各災損因子(如道路、建物)之分布，如圖 8(a)~(c)所示。最後，利用 FLO-2D 災損評估模式進行災損計算，即可求得三個不同重現期距降雨強度下之土石流災損金額。

見晴地區土石流潛勢溪流(花蓮 069)可能之災損金額，評估如表 7 所示。由表中可知，100 年重現期距降雨強度下之損失金額較 10 年重現期距降雨強度下之損失者提高約 2 倍以上。此乃由於土石流河道左岸之房舍於 100 年重現期距降雨強度下，受到掩埋所致。

表 7 花蓮 069 土石流潛勢溪流示範案例之總損失金額

Table 7 Illustrative example of total monetary loss for Hua-Lien 069 debris flow potential creek

溪流編號	降雨強度	土地損失(元)	建物損失(元)	道路損失(元)	林地損失(元)	總損失(元)
花蓮 069	10 年	0	0	2,815,650	60,483	2,876,133
	100 年	240,000	1,677,357	4,235,940	75,538	6,228,835
	200 年	315,000	2,574,608	4,235,940	102,479	7,228,027



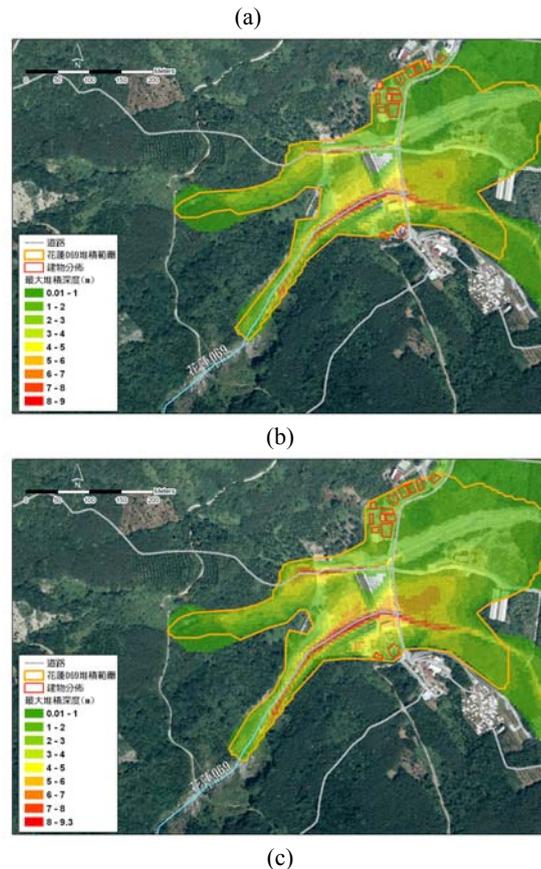


圖 8 見晴地區土石流潛勢溪流(花蓮 069)土石流於不同重現期距降雨強度下之最大流動深度與災損因子分布(a)50 年 (b)100 年(c)200 年

Fig. Distributions of maximum flow depth and damage element from various return period of rainfall intensity (a)50 year (b)100 year(c)200 year

七、結論與建議

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 FLO-2D 程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堆積範圍之方式，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 土石流模式之適用性及參數進行率定，利用大興（花蓮 061）、見晴（花蓮 069）、鳳義（花蓮 A112）及花蓮 A110 四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，依現地土石流模擬使用之降伏應力進行分組，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）鳳凰颱風造成之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所提土石流模擬演算模式之適用性。
- 四、本研究建立一套完整之土石流影響範圍計算及風險圖製作模式，同時，利用計算所得之土石流影響範圍即可而進行災損評估。評估結果除可提供土石流防災單位對於執行土石流相關政策及資源運用時之考量依據外，亦可提供後續防災、救災與減災之參考。
- 五、土石流流動模擬使用的 DEM 精度對於土石流影響範圍模擬及後續之災損評估分析之準確性具關鍵影響。未來若可提高 DEM 之精度，則 FLO-2D 程式之分析將更臻於準確。

八、參考文獻

- ①. 李欣輯 (2006)，「土石流防災方法成本效益評估方法之研究」，博士論文，國立台灣大學土木工程學研究所。
- ②. 吳政貞 (2003)，「土石流流況數值分析-以溪頭為例」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所。
- ③. 林美聆、莊睦雄等 (1999)，「陳有蘭溪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。
- ④. 林美聆、陳天健等 (2000)，「陳有蘭溪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

- 和社一號野溪」，防災國家型科技計畫八十九年度成果報告。
- ⑤. 林美聆、陳天健等(2001)，「陳有蘭溪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年度成果報告。
 - ⑥. 林美聆、王國隆、黃紀禎 (2001)，「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。
 - ⑦. 林美聆、王國隆、溫惠鈺 (2003)，「台灣藝術村土石流潛勢模擬」，中華民國大地工程學會。
 - ⑧. 邱禎龍 (2003)，「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。
 - ⑨. 趙啓宏(2004)，「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。
 - ⑩. 蘇立明 (2003)，「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。
 - ⑪. Garcia, R, J.L. López, M. Noya, M.E. Bello, M.T. Bello, N. González, G. Paredes, M.I. Vivas & J.S. O'Brien, 2003, "Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela," Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Davos, Switzerland. September 10-12.
 - ⑫. Garcia, R. & Lopez, J.L, 2005, "Debris Flows of December 1999 in Venezuela," Chapter 20th of Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Jakob, Matthias, Hungr, Oldrich Eds. Springer Verlag Praxis, Berlin.
 - ⑬. Grigg, Neil S. and Otto J. Helweg, 1975, "State-of-The Art of Estimating Flood Damage in Urban Areas" , Water Resources Bulletin, Vol. 11(2), pp. 379-390.
 - ⑭. O' Brien, J.S., Julien, P.J. and Fullerton, W.T. (1993), "Two-dimensional water flood and mudflow simulation," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.119, No.2, pp.244-261.
 - ⑮. O' Brien, J.S. (2006), FLO-2D user' s manual, version 2006.01, Flo engineering, Nutrioso.
 - ⑯. Takahashi, T., 1991, "Debris Flow" , Balkema, Rotterdam, pp.134-153.
 - ⑰. U.S. Army Corps of Engineers, 1990, "HEC-1, Flood Hydrograph Package," User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
 - ⑱. U.S. Army Corps of Engineers, 1997, "Flood-Runoff Analysis," Technical Engineering and Design Guides, No.19., ASCE Press, NY.
 - ⑲. Woolhiser, D.A., 1975, "Simulation of Unsteady Overland Flow," in Unsteady Flow in Open Channels, Mahmood, K. and Yevjevich, V. eds, Water Resources Publications, Fort Collins, CO.