

## 累積雨量對土石流影響範圍評估之影響

劉格非<sup>[1]\*</sup> 魏士超<sup>[1]</sup> 鄺寶成<sup>[2]</sup>

**摘要** 土石流預警在台灣是以有效累積雨量為基準，但在不同累積雨量下的土石流災害範圍，卻少有學者討論。針對這個問題，本文以北市 DF024 為例，用其警戒雨量 500 毫米做為基準，再選 300 和 700 毫米的累積雨量做影響範圍的比較。透過物部公式 (Monobe formula) 將累積雨量轉換為降雨強度，並搭配合理化公式和流量歷線去估算集水區產生的總水量，再以土石流平衡濃度公式推估土石流體積量。並經過現場調查，將料源分佈於崩坍地與河床崩積層，最後採用 DEBRIS-2D 去模擬土石流影響範圍。在北市 DF024 的案例中發現，土石流影響範圍會隨著累積雨量的增加而擴大，但最大土石堆積深度皆在 3~3.5 公尺之間。透過此方法得到的土石流影響範圍不只可以連結與累積雨量的關係，並且可提供相關單位一個修正警戒雨量或疏散範圍決策的參考。

**關鍵詞：**累積雨量、DEBRIS-2D、土石流影響範圍。

## The Influence of Accumulated Precipitation on Debris Flow Hazard

Ko-Fei Liu<sup>[1]\*</sup> Shih-Chao Wei<sup>[1]</sup> Pao-Cheng Li<sup>[2]</sup>

**ABSTRACT** Debris flow warning system in Taiwan uses effective accumulated precipitation as the warning criteria. Little research has studied the affected area associated with different levels of accumulated precipitation. The Taipei DF024 potential debris flow torrent is used as an example to study the relation between an affected area and accumulated precipitation. Three different amount of accumulated precipitation 300, 500 (official warning criteria) and 700 mm in 24 hours are chosen for comparison. Average rainfall intensity per hour is calculated from accumulated rainfall through the Monobe formula. Total water flow rate is estimated using the Rational formula and a discharge hydrograph. Maximum debris flow volume is determined by the equilibrium concentration formula. All sources of debris are distributed on landslide areas and river bed from field investigation. DEBRIS-2D is used to simulate debris flows. The results show that the hazard area is proportional to precipitation, and the thickness of maximum debris flow accumulation is between 3 and 3.5 m for all three cases. The relation between accumulated precipitation and hazard area can provide officials with additional information related to resident evacuation.

**Key Words :** Accumulated precipitation、DEBRIS-2D、hazard area.

---

[1] 國立台灣大學土木工程學系  
Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taiwan.

[2] 亞柏技術顧問股份有限公司  
YABO Technical Consultants, Ltd.

\* Corresponding Author. E-mail : kfliu@ntu.edu.tw

## 一、前言

台灣位於環太平洋地震帶，受到菲律賓板塊與歐亞板塊的頻繁擠壓運動，因此地勢陡峭，地質脆弱，而季節性的梅雨或颱風更帶來豐沛的雨量。地質脆弱提供了豐富的土石材料，豐沛的雨量則帶來充足水源，因此在山坡地則易形成如土石流等的坡地災害。根據民國 101 年水保局公佈之資料，全台灣共有 1660 條土石流潛勢溪流，其中臺北市轄區內有 50 條。目前水保局對於土石流潛勢溪流所發佈的警報主要是依據中央氣象局之雨量資料，利用累積雨量訂定各地區之土石流警戒基準值。台灣各地區之土石流警戒基準值主要分為九個級距（由 200 至 600 毫米，每 50 毫米為一級距），而臺北市警戒雨量都落在 500 毫米至 600 毫米之間。水保局除了提供警戒雨量外，也對潛勢溪流劃定了土石流的影響範圍，提供保全對象做為疏散避難的參考。但是警戒雨量的訂定主要是針對不同區域以統計方式所做出的參考值（詹錢登、李明熹，2004），而土石流影響範圍的劃定則是利用經驗式（池谷浩，1995）去繪製，因此影響範圍和警戒雨量兩者並無法做連結。但是由物理觀念判斷，雨量越大，影響範圍就可能越大，這對於人口密度越高的地區就更重要，因為土石流影響範圍的改變，就可能造成受影響戶數的改變，在不同累積雨量的狀況下，政府該如何應變即變成重要的課題。因此本文利用數值模擬來找出隨雨量改變的土石流影響範圍變化。另一方面，也可藉由不同累積雨量的模擬，與工程界在使用的頻率年做一區隔，因民眾對防災警戒的了解與目前政府對外發佈的資訊皆以累積雨量值為主，所以知道多少累積雨量可造成影響範圍多大改變，然後又該如何決定要撤離居民的範圍，及管制範圍的大小，是目前站在第一線的縣市政府非常關心的問題。

針對此議題，本文選定編號北市 DF024 的土石流潛勢溪流做研究，參考過去颱風事件中的降雨資料，大台北地區的「連續 24 小時最大累積雨量」，曾在民國 87 年的瑞伯颱風達到 492 毫米、民國 89 年的象神颱風在火燒寮處達到 676 毫米、民國 90 年的納莉颱風在竹仔湖達到 765 毫米、民國 97 年的薔蜜颱風也在文山區累積至 392.5 毫米等，從這些颱風事件中的累積雨量資料，可發現其範圍介於 300 毫米至 700 毫米，又因為北市 DF024 的土石流警戒雨量為 24 小時 500 毫米的累積雨量，故本文選定 300、500 和 700 毫米的累積雨量去分析，並以數值模擬的方式去估計不同累

積雨量條件下的最大土石流影響範圍。透過本文的案例希望可提供一種分析方式，可應用於分析人口密集的潛勢溪流，並提供相關單位擬定防救災程序的參考，以期讓保全對象有更充分的反應時間進行疏散避難。

## 二、數值方法

在土石流數值模擬的部分，目前台灣有部份單位利用 FLO-2D 來模擬土石流，但是經評估，FLO-2D 並不適用於台灣這種小集水區與礫石比例大的土石流（Wu et al., 2013），因此本文利用 DEBRIS-2D（Liu et al., 2009）做為分析的工具。此模式可預測土石流最大流速、流動的時間以及影響範圍，也可評估不同整治工程的規劃。以下就將 DEBRIS-2D 做一簡短介紹。

### 1. 模式介紹

DEBRIS-2D 模式的控制方程式是由質量守衡與動量守衡方程式，配合二維長波理論的假設所組成。應變率與剪力的本構關係式則是採用 Julien & Lan (1991) 提出的土石流關係式，此關係式是修正泥流的賓漢模型（Bingham model），再以應變率的二次項來考慮碰撞的效應，因此可以用來表現泥流與石流混合狀態下的流動行為，其剪力張量與流速的關係式如下：

$$\tau_{ij} = \left( \frac{\tau_0}{\varepsilon_{ij}} + \mu_d + \mu_c \varepsilon_{ij} \right) \varepsilon_{ij}, \text{ 當 } \tau_{ij} \geq \tau_0 \text{ (強剪層)} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0, \text{ 當 } \tau_{ij} < \tau_0 \text{ (弱剪層)} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \varepsilon_{ij} = \left( \frac{1}{2} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} \right)^{1/2}, \tau_{ij} = \left( \frac{1}{2} \tau_{ij} \tau_{ij} \right)^{1/2}$$

其中， $\varepsilon_{ij}$  是應變率張量， $\tau_0$  是降伏應力， $\mu_d$  和  $\mu_c$  分別為動力黏滯係數與紊亂離散參數。因為接近表面空氣不受力，式 (2) 的弱剪層應該為接近自由水面的部份，該區剪力小於降伏應力，其範圍為  $B(x, y, t) + \delta(x, y, t) \leq z \leq h(x, y, t)$ ， $B(x, y, t)$  為底床地形高層， $\delta(x, y, t)$  為強剪層厚，而  $h(x, y, t)$  則為自由表面高層。式 (1) 為剪力大於降伏應力的情況，就應該是靠近底床的部份，所以強剪層範圍為  $B(x, y, t) \leq z \leq B(x, y, t) + \delta(x, y, t)$ 。Liu & Huang (2006) 的研究中發現強剪層的厚度小於全部厚度的 10%，因此從底床  $z = B(x, y, t)$  到自由表面  $z = h(x, y, t)$  對  $z$  積分，並忽略強剪層厚度後，可得到一組深度平均的質量與動量守恆方程式如式 (3)、(4) 和 (5) 所示：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(uvH)}{\partial y} = gH \sin \theta - gH \cos \theta \frac{\partial(B+H)}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\tau_0 u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(vH)}{\partial t} + \frac{\partial(uvH)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2H)}{\partial y} = -gH \cos \theta \frac{\partial(B+H)}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\tau_0 v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5)$$

其中  $\theta$  為地形的平均坡度,  $\rho$  為土石流的密度,  $g$  為重力加速度,  $H$  為流深,  $B$  為底床地形的高程,  $u$  和  $v$  分別為  $x$  和  $y$  方向的流速。式 (3) 為質量守恆方程式。式 (4) 和式 (5) 分別為  $x$  和  $y$  方向的動量守恆方程式, 式子的左邊由時間項和對流項組成; 式子的右邊則由重力項、壓力項與剪力項所組成。

由於有降伏應力的關係, 因此土體給與底床剪力若小於降伏應力, 土體將不會有任何運動 ( $u=v=0$ ), 因此利用式 (4) 與 (5) 的平方和, 可推導出如下土石流啟動條件, 來判斷土石料源是否會開始流動

$$\left( \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} - \tan \theta \right)^2 + \left( \frac{\partial B}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 > \left( \frac{\tau_0}{\rho g \cos \theta H} \right)^2 \quad (6)$$

式 (6) 中的  $B$  和  $H$  的一階微分為壓力的效應,  $\tan \theta$  則是重力的效應。只要壓力與重力的效應大於降伏應力, 則該處的土石料源就會開始流動。

數值方法上, DEBRIS-2D 用有限差分法來離散控制方程式, 為了計算的效率, 採用顯式的計算 (explicit scheme), 所以時間上是以 Adams-Bashforth 的三階法處理; 空間上, 採用二階的中央差分法, 但為了處理震波與乾床問題, 在動量方程式中的對流項, 則在速度大時改用一階上風法。

運用此模式可以得到土石流流深在時間與空間上的變化, 因此流經的範圍, 任何有土石流流過的位置的流深與流速, 以及該處土石流所造成的衝擊力, 都可算得, 底床沖刷和邊坡沖刷所增加的料源, 因為可以預先由現勘估出, 所以可以如下節說明沿溪分佈。

## 2. DEBRIS-2D 模式的參數設定

DEBRIS-2D 為物理模擬程式, 不用統計或回歸的參數, 因此土石流模擬當中首先必須瞭解現場土石料

源體積量的分佈狀況以及土石料源組成的性質, 並透過料源的組成性質去推估土石流的降伏應力。透過現地勘察的結果可以得到現場土石料源的分佈及其體積量, 這些材料在流動中會因為強烈混合, 濃度達到平衡濃度 (Takahashi, 1981)

$$C_{dso} = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} C_{dso} \leq 0.603 \quad (7)$$

其中  $C_{dso}$  為土石流中固體顆粒的體積濃度, 稱之為平衡濃度;  $\rho$  為水的密度  $1.00 \text{ g/cm}^3$ ;  $\sigma$  為砂礫的密度約取  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ;  $\phi$  為砂礫的內摩擦角約為  $37$  度;  $\theta$  為溪床的平均坡度, 當此濃度大於  $0.603$  時則取  $0.603$ 。

得到平衡濃度  $C_{dso}$  後, 土石流的模擬可分為兩種; 第一種是集水區的水量足夠帶動所有料源, 所以可用現地所調查的乾土石料源量, 估計土石流的體積量為

$$V_1 = \frac{V_{debris}}{C_{dso}} \quad (8)$$

其中  $V_{debris}$  為乾土石料源量,  $V_1$  為料源控制的土石流總體積量。第二種則是在集水區水量不足以帶動所有料源, 則利用累積雨量去估計集水區的總水量, 並利用此總水量去算可產生的土石流體積量如下

$$V_2 = \frac{V_{water}}{1 - C_{dso}} \quad (9)$$

其中  $V_{water}$  為累積雨量所估計的集水區總水量 (通常以合理化公式得到的流量乘上集流時間來計算),  $V_2$  為累積雨量所控制的土石流總體積量。一般的做法會取  $V_1$  和  $V_2$  中較小的值代表現場可能產生的土石流總體積量, 再按照現地土石崩坍點輸入模式中進行模擬。針對此兩種假設情況, 本文將於三.3 與三.4 節中分別做模擬的探討。

在 DEBRIS-2D 所需要輸入的資料中, 除了代表現地狀況的土石流體積與分佈外, 另一個必須輸入的參數則是代表土石流物質組成的降伏應力。降伏應力是黏塑性流體 (Viscoplastic Fluid) 很重要的一個流變參數, 代表著流體開始運動的瞬間所需施予的外力, 若沒有超過此降伏應力則流體將不會有運動發生。而降伏應力也可視為材料組成的函數, 理論上降伏應力在土石流內會隨著時間、位置而變化, 然而配合前述平衡濃度的假設, DEBRIS-2D 假設土石流的降伏應力為一個常數值。降伏應力的量測方式有很多, 實驗室內常用流變儀 (O'Brien & Julien, 1988), 但現場估算往往是用傾斜木板的簡易測量法 (Liu & Huang, 2006;

Coussot & Boyer, 1995)。本研究針對現地材料，使用傾斜平板法，以現場飽和土樣做量測，3 個樣本的平均降伏應力為 750 帕 (Pa)，最大誤差為 100 帕 (Pa)。Liu et al. (2007) 針對降伏應力與土石料源體積量進行敏感度分析，發現即使降伏應力輸入值誤差為 $\pm 50\%$ ，模擬出來的影響範圍僅相差了 $\pm 10\%$ ，而總體積量差了 $\pm 50\%$ ，則影響範圍會差到 $\pm 300\%$ 。這表示體積量的估算比降伏應力敏感。在 DF024 的現地試驗中，最大降伏應力誤差為 13%，因此可以大略推算，最後影響範圍只會有 2% 左右的影響。

### 3. DEBRIS-2D 模式的驗證

DEBRIS-2D 經過多次的理論與實驗室內的試驗驗證 (Liu & Huang, 2006)，都非常準確，但是要能應用於現場，重要的是與現場的真實災害比較。

DEBRIS-2D 程式有經過多次的現場驗證案例。1996 賀伯颱風的神木村土石流案例中，Liu & Huang (2006) 模擬的最後影響範圍與實際土石堆積範圍最大誤差為 20 公尺 (全長約 2.5 公里，0.1% 誤差)，而模擬的最大厚度與實際土石堆積厚度誤差來自現場的大石頭，為 1 公尺 (最大厚度約 10 公尺，誤差 10%)。Liu & Wu (2010) 則在韓國麟蹄郡 (Inje, Korea) 的土石流模擬中發現，其最後土石流堆積位置有 95% 的精確度。Wu et al. (2013) 應用 DEBRIS-2D 模擬在莫拉克颱風期間，新發村發生的崩塌型土石流，模擬的最後土石流堆積厚度與水保局現場量測的誤差在 8% 以內，影響範圍的平均誤差為 4%，在當時救難人員有測量的兩個點，其最後堆積厚度深度誤差僅 20cm (3%)。

Tsai et al. (2011) 在 2008 預測大鳥村的土石流範圍，其結果與 2010 年的災害比對，土石流影響範圍只有 2.76% 的誤差。

因此 DEBRIS-2D 已經證明可以模擬出真實的災害情形，尤其是礫石型土石流，模擬的效果最好。

## 三、研究區域的調查與分析

### 1. 北市 DF024 的基本資料

北市 DF024 土石流潛勢溪流位於臺北市士林區溪山里境內，為外雙溪上游的野溪，在北市 DF024 中游以上的部分共有三條主要的支流，流向皆由北向南，根據台北市大地工程處的報告 (2011)，這三條溪流的平均長度約 950 公尺，溪流的平均坡度約為 36%，總

集水區面積約為 31 公頃，年平均降雨量為 3163 毫米。水保局將此溪流的紅色警戒雨量訂定為 24 小時 500 毫米的累積雨量。此集水區的地形高度分佈於海拔 360 公尺至 680 公尺之間。地質分佈圖見圖 1，該溪流上游地層屬性為安山岩，且地形較陡，而中下游地層屬性為石底層，以砂頁岩為主，且地形較為平緩。

### 2. 現地勘查

根據台北市大地工程處 (2011) 的調查報告，北市 DF024 土石流潛勢溪流共有五戶保全對象，總共 23 人，並居住於此溪流中游 (圖 1)，且水保局也將民宅的位址劃進土石流的影響範圍內，故在此節針對保全戶上游的部分做說明。在圖 1 的民宅上游有三條支流，本文分別由西而東定義為支流 1、2、3。

沿支流 1 往上游的勘察過程中發現，溪床上皆有植生被覆，一直到最上游的地方都沒有明顯的水路，且越往上游植生越茂密，因此研判此支流地區的水是以地下伏流方式傳遞，再加上沿溪床往上游調查的過程中，都可見居民開墾的果園，以及整治截水的水保工法，且現場居民也表示，即使暴雨或颱風來臨時，該區也從未有大量表面水出現，因此研判此支流的狀態較為穩定，故不將支流 1 的上游崩坍納入為土石流的料源考慮。

在支流 2 往上游勘查的過程，可陸續見到一些小型崩坍，雖然每一塊面積都不大，但可估計成沿溪連續分佈到上游。比較大的崩坍地有兩處，在圖 1 的點位 2，可看到沿下游方向右岸有一塊樹木較少以灌木為主的老崩坍地，根據現場的估計，此崩坍地長為 22.5 公尺、寬為 12 公尺。續往上游走，由於左岸皆為峭壁，水源應是來自右岸灌木區 (如圖 1 點位 1)，且該區有許多倒塌的枯木，所以也推測此灌木區可能為發生土石流的崩坍料源，經現場估計此灌木區長為 45 公尺、寬為 15 公尺，而此兩個點位的面積皆不大，研判應為淺層崩塌，現場估計其平均深度最大為 2 公尺。

支流 3 的部分則與支流 1 狀況類似，溪床兩側植生茂盛，即使調查過程中下著大雨 (調查之前兩天也都持續在下雨) 也皆無水流跡象，因此推估此支流區也是以地下快速導水層將水往下游運送。但是在現勘過程，在支流 3 最下游河岸邊有大片的人工果園如圖 1 的點位 3 (長寬分別為 41、25 公尺)，由於果園位於支流 2 與支流 3 下游交會處，假設支流 2 發生土石流，則此片果園非常有可能被帶動成大塊崩坍，故也將此塊果園面積納入土石流模擬的料源之一。

在民宅下游的溪流中，雖然表面堆積許多直徑大於 50 公分的塊石，但河道狀況良好，並無任何崩坍的痕跡，且下游的情況對中游處的居民較無直接的致災危險，故在此不多加贅述，而其它現場勘查的詳細內容則可參考台北市大地工程處「100 年土石流潛勢溪流致災分析及現況調查」的報告。

### 3. 土石流模擬

經由上述現地勘查，本文僅針對支流 2 做土石流事件的模擬。在所模擬的支流 2 溪床，其平均坡度為 21.8 度，由式 (7) 可得平衡濃度為 0.685，因為大於 0.603，所以取 0.603 為土石流的平衡濃度。由土石流的平衡濃度和現場調查所估計的土石料源量，可使用式 (8) 計算出現場可產生的土石流體積量 (如下表 1)。

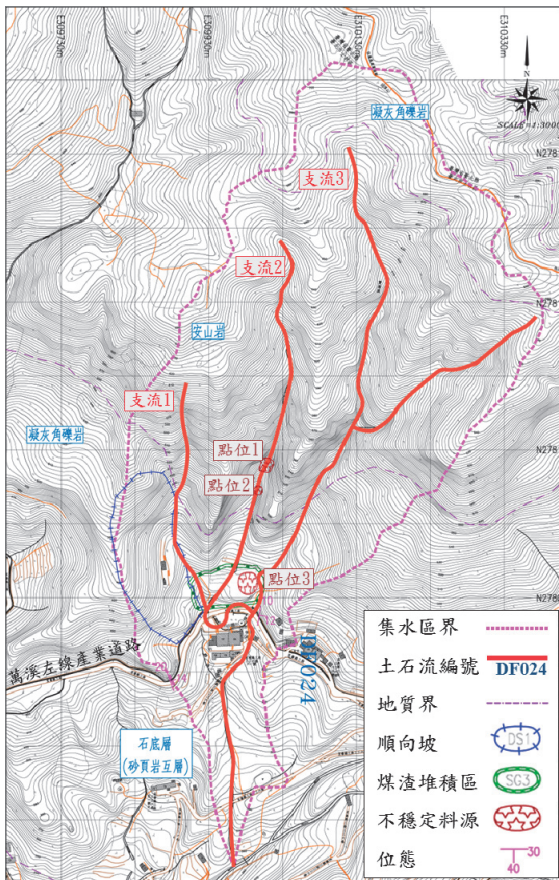


圖 1 北市 DF024 環境地質圖 (摘自台北市大地工程處, 2011)

Fig.1 Geology graph for DF024, Taipei (from Geotechnical Engineering Office, Public Works Department of Taipei City Government, 2011)

### 4. 雨量控制的土石流模擬

土石流的發生，除了需要足夠的土石料源外，還需要有足夠的水量，因此要以累積雨量 300、500 與 700 毫米時所集流的總流量，去估計此集水區可能產生的總水量，並用此水量去估計可能發生的最大土石流體積量，最後用此土石流體積量做現場土石流的模擬。

以支流 2 最下游與產業道路交界處作基準，往上游劃定集水區 (資料如表 2)

我們選用 Wooding (1965) 年所提出之運動波公式去計算集水區的集流時間如下

$$t_c = \left( \frac{n_o L_o}{\sqrt{S_o} i_e^{0.67}} \right)^{0.6} + \frac{B}{2i_e L_c} \left( \frac{2i_e n_c L_o L_c}{\sqrt{S_c} B} \right)^{0.6} \quad (10)$$

其中  $n_o$  與  $n_c$  分別為漫地流糙度與渠流糙度，參考李光敦 (2003) 針對台灣上游集水區所檢定之數值， $n_o$  與  $n_c$  分別為 1 和 0.6； $L_o$  與  $L_c$  分別為漫地流長度與渠流長度； $S_o$  與  $S_c$  分別為漫地流坡度與渠流坡度； $B$  為渠流河寬； $i_e$  為超量降雨強度，在小集水區中也等於逕流係數  $C$  與平均降雨強度  $I$  的乘積，由於此區域的坡度較為陡峭，故根據水土保持技術規範第 18 條，選定  $C$  為 0.75。每小時平均降雨強度，在此引用物部公式 (monobe formula) 如下

$$I = \frac{R_{24}}{24} \left( \frac{24}{t_c} \right)^{2/3} \quad (11)$$

表 1 現勘崩坍點土石流體積量換算

Table 1 Conversion of volume from dry debris to debris flow

	現地乾土石料源體積量 (m <sup>3</sup> )	平衡濃度下土石流體積量 (m <sup>3</sup> )
點位1	864	1432.84
點位2	345.60	573.13
點位3	2050	3399.67
總量	3259.60	5405.64

表 2 支流 2 集水區資料表

Table 2 Information of catchment on tributary 2

集水區面積 $A$ (公頃)	5.94
漫地流長度 $L_o$ (公尺)	65.08
溪流的長度 $L_c$ (公尺)	586.67
溪流的河寬 $B$ (公尺)	2
漫地流平均坡度 $S_o$	0.5
渠流平均坡度 $S_c$	0.39

其中  $I$  為平均  $t_c$  小時之降雨強度 (單位為 mm/hr)， $R_{24}$  為 24 小時內的累積雨量 (單位為 mm)。用式 (10) 與 (11) 以遞迴方式算出超降雨強度如表 3。

由於此集水區小於 1000 公頃，故依照水土保持技術規範第 17 條，使用合理化公式 (rational formula) 去計算洪峰流量

$$Q_p = \frac{1}{360} CIA \quad (12)$$

其中  $Q_p$  為洪峰流量 (單位為  $m^3/s$ )， $C$  為逕流係數 (無單位)， $I$  為降雨強度 (單位為 mm/hr)， $A$  為集水區面積 (單位為公頃)。利用上式接續去計算此集水區的洪峰流量，如表 3 第 (5) 欄，並利用洪峰流量與集流時間去繪製三角流量歷線如圖 2。

為了推估不同累積雨量下的土石流體積量，在此利用圖 2 中達到洪峰流量前(或集流時間前)的三角歷線底下面積，先計算出集水區的總水量，再代入式 (9) 分別計算不同累積雨量的土石流體積量，如表 3 第 (6) 欄。

以累積雨量 300 毫米所計算的土石流體積量 ( $V_2$ ) 因為小於現場料源所計算的土石流體積量 ( $V_1$ ，5405.64 立方公尺)，表示現場土石不會全部都轉為土石流，因此採用較小的雨量算出的體積量。因為點位 1、2 由崩塌產生的料源是較易發生土石流的，因此全部列入模擬，而點位 3 的果園則只有部份體積轉為土石流，其量是以表 3 第 (6) 欄的值減去點位 1、2 的土石流體積量來估計，初始料源分佈見圖 3(a)。

而在累積雨量 500 和 700 毫米所推估的土石流體積量 ( $V_2$ ) 因為都大於現場所有料源所得的土石流體積量，因此還有多餘水量，可從溪旁的不穩定崩積層沖刷出新料源。考量現場調查資料，溪旁崩積層裸露的樹根最深約 1 公尺，故以 1 公尺做為最大沖刷深度。利用表 3 第 (6) 欄減去現場料源估計的總土石流體積量，再除以 1 公尺的估計深度得到沿溪崩積層料源的面積，如表 3 第 (7) 欄，其料源分佈可見圖 3(a)。

## 5. 土石流模擬結果

因為計算出來的土石流體積總量，從小到大分別為累積雨量 300mm (全部崩塌變成土石流)，累積雨量 500mm 和累積雨量 700mm，因此本節將這四種情況的模擬並列以供比較，結果見圖 3。圖 3 由左至右分別為累積雨量 300 毫米 (全部崩塌變成土石流) 累積雨量 500 和 700 毫米條件下的模擬結果，而水保局所劃定的影響範圍也以紅色虛線標於圖 3 中。圖 3(a) 為土石流起始分佈圖，因雨量增加，所以沖刷區域漸漸朝下游分佈。

圖 3(b) 標示為土石流剛流至民房旁的情況，除了案例 1 的時間 30 秒較慢，其它情況皆在 20 秒即流到民房旁邊。剛撞擊到民房時，民房旁的土石流前鋒最大高度會隨著雨量漸增而從 2.04 公尺漸漸減少到 1.81 公尺，也就是雨量越大，流深越淺，但流速卻隨著雨量的增加，從 1.97 m/s、2.65 m/s、2.78 m/s 增加到 2.95 m/s。一般經驗公式都顯示撞擊力隨流速平方增加，因此表示撞擊力會因此隨雨量增加而增加，若依照劉與李 (1997) 的土石流撞擊力公式去計算，民房上每公尺寬牆壁所受的撞擊力可分別算出為 8.23 kN、12.73 kN、21.90 kN 與 27.45 kN。而此刻所有情況的最大流深都發生於圖 3 中最上游標示點上，流深約 3.11~3.63

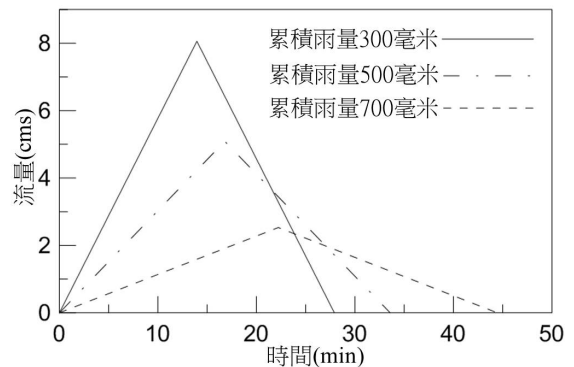


圖 2 支流 2 三角流量歷線

Fig.2 Triangular hydrograph for trinary 2

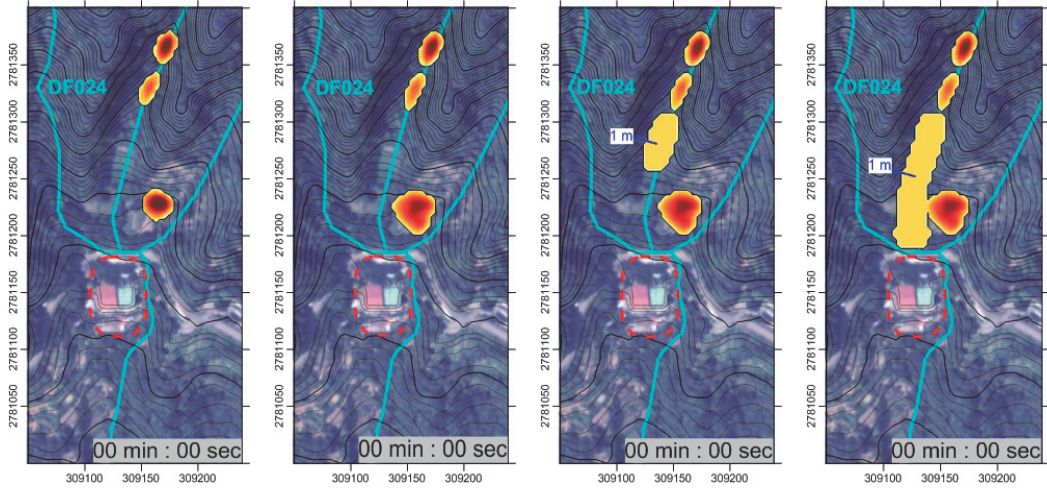
表 3 土石流總體積量估算

Table 3 Estimating for total volume of debris flow

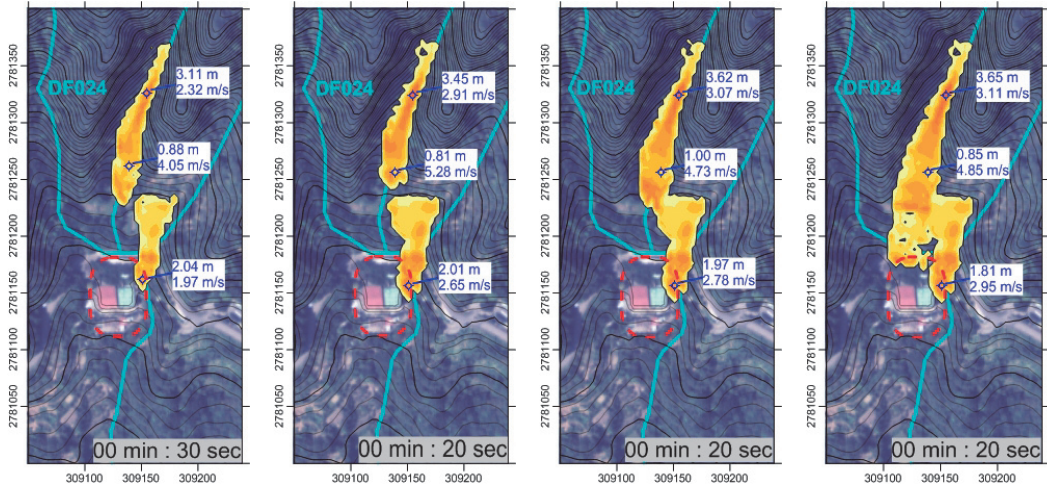
(1) 累積雨量 (mm)	(2) 總集流時間 (min)	(3) 平均降雨強度 (mm/hr)	(4) 超量降雨強度 (mm/hr)	(5) 洪峰流量 (cms)	(6) 雨量推估的土石流體積量 ( $m^3$ )	(7) 沿溪崩積層料源面積推估 ( $m^2$ )
300	22.22	204.48	153.36	2.53	4249.47	NA
500	16.79	411.27	308.45	5.09	6456.28	1050.64
700	13.96	651.63	488.73	8.06	8504.22	3098.58



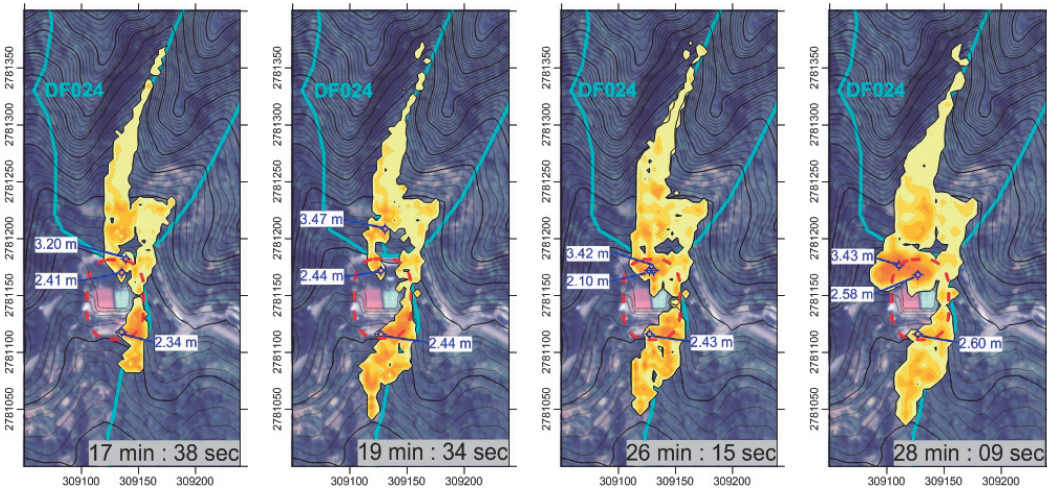
(a) 初始分佈 (由左至右為累積雨量300毫米、全部崩塌變成土石流、累積雨量500和700毫米條件下的案例)



(b) 流至民房旁



(c) 停止堆積分佈



水保局劃定範圍: - - - 流深: 0.1 1 2 3 4 5 6 7 (m)

圖 3 不同時間下的土石流流深分佈

Fig.3 Distribution of Debris flow depth at different time

公尺，而最大流速都發生在中游，流速約為 4.05~5.28m/s，表示此時集水區中的土石流還在發展中，上游尚有未流下的土方。

一直到 17 分鐘以後，土石流才停止流動，且雨量越大，流動時間越長。停止時的堆積厚度畫在圖 3(c) 中。不同累積雨量，最大厚度都在民房上游的產業道路上，厚度在 3.20~3.47 公尺之間，其原因應該是因為此處為附近唯一的平坦地形，類似一個小滯洪池。但隨著雨量增加，民房上方的土石流堆積範圍會變大，民房本身遭受的衝擊範圍也變大，只要累積雨量到達 500mm 以上，土石流就會直接衝入民房區域。又因為此區民房都是一層樓高，本模擬假設民房結構不受損，因此土石流會把民房部份掩埋掉。而自民房向下游堆積的部分，除了累積雨量 300mm 的情況較小外，其他情況會隨土石流總體積增加而稍為增加，只是差別不大，朝下游增加的距離都只差約 5 公尺。

不管那種情況，只要此處發生土石流，民房上游的產業道路必定會因此受到阻斷，而在土石流漸漸停止後，隨之產生的脫水現象也會使泥水從石塊間的縫隙滲出，並往下游繼續流動，故可預見，即使累積雨量 300mm 情形，土石流雖不會直接衝入民房區域，但產業道路上的土石堆積必定也會滲出泥水往住宅方向蔓延，造成居民的不便。同時因為產業道路受阻，本區疏散避難，若不能提早進行，疏散路線就必須避開產業道路，以免反而造成危險。

## 四、結 論

本研究係針對累積雨量與土石流影響範圍間的關係做分析研究，並以北市 DF024 為案例。將累積雨量透過物部公式 (Monobe formula) 轉換為集流時間內每小時的平均降雨強度，再使用合理化公式和三角流量歷線去估計集水區的總水量，最後利用集水區總水量去推估土石流體積。有了總量與現地調查的料源分佈後，利用 DEBRIS-2D 去模擬不同累積雨量下可能產生的最大土石流影響範圍。最重要的假設為降不同雨量，就會有不同的崩坍量與沖刷量，因此若有土石流發生，其規模也就會有所不同。

結果顯示在北市 DF024 的案例中，累積雨量越大，土石流影響範圍則越大，保全對象受到的損害也就越大，水保局設定的警戒雨量值，就是土石流會直接衝入保全對象民房的門檻值。但是不管雨量多少，土石流停止的最大堆積高度都超過 3 公尺，且一定會

使產業道路受到阻斷，因此疏散避難的流程，必須注意這點。

本文的分析方式，可將不同累積雨量與其對應的土石流影響範圍做連結。此分析方式也可提供未來土石流影響範圍劃定、工程設施評估或警戒雨量值的修正參考。

## 誌 謝

本研究承蒙台北市政府工務局大地工程處提供我們現地考察資料的協助，特此致謝。

## 參考文獻

- [1] 台北市政府工務局大地工程處 (2011)，「100 年土石流潛勢溪流致災分析及現況調查」(Geotechnical Engineering Office, Public Works Department of Taipei City Government. (2011) "2011 Assessment and field investigation of debris flow potential creek in Taipei city creeks." (in Chinese))
- [2] 行政院農業委員會水土保持局 (2003)，「水土保持技術規範」(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (2003) "Soil and water Conservation Act." (in Chinese))
- [3] 行政院農業委員會水土保持局 (2008)，「土石流潛勢易致災調查與整治對策研擬台北市成果報告附錄 A 台北市士林區村里報告」(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (2008) "Report on assessment and management of debris flow potential creeks in Taipei city." Appendix A. (in Chinese))
- [4] 行政院農業委員會水土保持局 (2010)，「99 年土石流潛勢地區易致災因子調查與危害頻率分析成果報告」(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (2010) "2010 Report on factor and frequency of disaster." (in Chinese))
- [5] 池谷浩 (1995)，「土石流災害調查法」，山海堂 (Hiroshi Ikeya (1995). "Investigation of disaster on debris flow." Sankai Tong. (in Japanese))
- [6] 李光敦 (2003)，「流域整體規劃河川集水區數值地形資訊系統建立(四)」(Lee, K.T. (2003). Development of the Watershed Digital Topography In-



- formation System for Integrated Basin Management (IV) (in Chinese))
- [7] 黃名村 (2003), 「土石流災害範圍之數值模擬及利用微波偵測土石流之研究」, 國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。(Huang, M.C. (2003). "The numerical simulation of the range of debris-flow hazards and detection of debris-flow by using microwave." Ph.D Dissertation, Department of Civil engineering, National Taiwan University. (in Chinese))
- [8] 詹錢登、李明熹 (2004), 「土石流發生降雨警戒模式」, 中華水土保持學報, 第 35 卷, 第 3 期, 第 273-283 頁。(Jan, C.D., and Lee, M.H. (2004). "A Debris-Flow Rainfall-Based Warning Model." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(3), 275-286. (in Chinese))
- [9] 劉格非、李峰昌 (1997), 「石流撞擊機制之試驗分析」, 中華民國力學學會期刊, 第 13 卷, 第 1 期, 第 87-100 頁。(Liu, K.F. and Lee, F.C. (1997). "Experimental analysis on impact mechanism of granular flows." *The Chinese Journal of Mechanics*, 13(1), 87-100. (in Chinese))
- [10] Coussot, P., and Boyer, S. (1995). "Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test." *Rheologica Acta*. 34(6), 534-543
- [11] Julien, P.Y. and Y. Lan (1991). "Rheology of Hyperconcentrations." *J. Hydr. Engrg*, 117(3):346-353.
- [12] Lee, K.T. and Chang, C.H. (2005). "Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling." *Journal of Hydrology*. 311, 91-105
- [13] Lee, M.H., Jan, C.D. and Kuo, F.H. (2006). "Rainfall threshold criteria for debris flow occurrence and its application in Taiwan." 2006 AJT International Symposium on Sediment-related Disaster Prevention, 15-1-15-7, Tainan.
- [14] Liu, K.F. and Huang, M.C. (2006). "Numerical simulation of debris flow with application on hazard area mapping." *Computational Geoscience*, 10(2), 221-240.
- [15] Liu, K.F., Hsu, Y.C. and Huang, M.C. (2007). "Study on the sensitivity of Parameters Relating to Debris Flow Spread." 2007 International Conference on Slope land Disaster Mitigation, Taipei, Oct. 29-30, 212-220
- [16] Liu, K.F., Li, H.C. and Hsu, Y.C. (2009). "Debris flow hazard assessment with numerical simulation." *Natural Hazards*. 49, 137-161.
- [17] Liu, K.F. and Wu, Y.H. (2010). "The Assessment of Debris Flow Hazard in Korea Using Debris 2D." *Interpraevent 2009*, 820-827.
- [18] O'Brien, J. and Julien, P. (1988). "Laboratory Analysis of Mudflow Properties." *J. Hydraul. Eng.*, 114(8), 877-887.
- [19] Takahashi, T. (1981). "Debris flow." *Annual Review Fluid Mechanics*, 13, 57-77.
- [20] Tsai, M.P., Hsu, Y.C., Li, H.C. and Liu, K.F. (2011). "Application of simulation technique on debris flow hazard zone delineation: a case study in the Daniao tribe, Eastern Taiwan." *Nat. Hazards Earth Syst.*, 11, 3053-3062
- [21] Wooding, R.A. (1965). "A hydraulic model for the catchment-stream problem. I. Kinematic-wave theory." *Journal of Hydrology*. 3(3), 254-267
- [22] Wu, Y.H., Liu, K.F. and Chen, Y.C. (2013). "Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study." *Journal of Mountain Science*. 10(2), 293-304.

---

2013 年 02 月 02 日 收稿

2013 年 02 月 27 日 修正

2013 年 06 月 24 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 3 月 31 日)