

土石流風險分析之建構與應用

曹鼎志* 許文科** 賴承農* 鄭錦桐*** 張玉堦**** 陳振宇***** 羅文俊*****

摘 要

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，地處造山運動之板塊邊緣，進而造成台灣地區多數山坡地具有坡度陡峭、地質脆弱和水流湍急等條件。1999 年 921 集集大地震以及近年來全球氣候變遷所導致之極端降雨事件，致使山崩與土石流之災害發生頻率更勝以往，對於土石流等坡地災害，應建立有效率的災害管理決策機制，以合理的經費運用進行坡地災害的風險管理（Risk Management）。

土石流災害可藉由效率化的規劃與管理來降低其對於社會與經濟所造成的損失，而土石流災害風險分析步驟包括：風險鑑別（Risk Identification）、頻率分析（Frequency Analysis）、後果分析（Consequence Analysis），及風險估算（Risk Estimation）等。本研究探討將國外行之有年之坡地災害等自然災害之定量風險評鑑（Risk Assessment）架構引入台灣之可行性，並嘗試對土石流之風險管理提出適用於本土之管理架構及分析方式，以作為土石流災害疏散避難規劃及工程整治效益評估之參考。

關鍵字：土石流、風險管理、風險評鑑、風險分析、F-N 圖

一、前 言

台灣地區自 1996 年賀伯颱風後，大眾輿論方對土石流有較初步之認識及重視，而隨著歷年來土石流潛勢溪流之調查規劃與整治，以及對於各溪流之基本資料建置與歷年災情蒐集已有一定之基礎，可藉由效率化的規劃與管理來降低土石流災害對於社會與經濟所造成的衝擊，其方法包括：（1）限制山坡地開發；（2）分級管理、植生與技術規範訂定；（3）以工程措施降低災害發生機率；及（4）發展預警系統。

前述方法隨土石流之分析、預測與預警技術

之進步及改善措施之執行，已可降低大部分災害發生，而行政院農業委員會水土保持局（以下簡稱水保局）自 2000 年起主管土石流防災業務以來，即積極推動國內之土石流災害管理，逐年建立各項完整的土石流防災及應變體系，並於颱風豪雨期間協助地方政府執行疏散避難工作，有效地降低土石流所帶來的危害，

但包括台灣在內，因為全球氣候變遷已導致極端豪雨型態發生頻率大增，各國發生土石流案例頻仍，災害規模增加。據此，對於土石流等坡地災害，導入風險管理的架構，將可協助建立有效率的土石流災害管理決策機制，得以合理的運

* 中興工程顧問社大地工程研究中心工程師
** 中央大學災害防治研究中心研究員
*** 中興工程顧問社大地工程研究中心防災科技組組長
**** 中興工程顧問社大地工程研究中心地工技術組組長
***** 行政院農業委員會水土保持局土石流防災中心主任
***** 交通大學土木工程研究所博士候選人

用經費進行坡地災害的風險管理。近年來國內對於天災害管理多依據美國聯邦緊急救援事務署（FEMA）所提之「減災-整備-應變-復原（Mitigation-Preparedness-Response-Recovery）」災害管理循環四階段為主流，惟對於土石流潛勢溪流之分級與管理尚未完全引進風險管理之理念。

有鑑於此，水保局於 2008 年引進國際上坡地災害管理常用之風險管理架構（AGS, 2000; 2007），嘗試訂定土石流災害之風險分析與管理流程，本研究將探討土石流風險分析之建構及其應用，並以土石流災害案例進行實際操作。

二、土石流風險管理機制

風險管理於 1970 年代開始正式應用，初期主要以定性方法於都市規劃及公路邊坡管理之危害區域劃定為主；1980 年代與 1990 年代則擴充至定量方法，且應用於單一邊坡、海床邊坡與區域邊坡之風險管理。澳大利亞與紐西蘭於 1999 年提出風險管理之國家標準（AS/NZS 4360）以作為風險管理之基礎準則，依此，澳大利亞大地力學學會於 2000 年擬訂了相關的技術指導綱要（AGS, 2000），並於 2007 年再依此綱要提出考量用地規劃的坡地災害穩定分析、災害範圍與風險指導綱要（AGS, 2007），為近年來國際上坡地災害風險管理較有系統之整理與應用，並為歐美國家所參考引用，亞洲方面，香港土力工程處（GEO）亦自 1998 年起引進定量風險評估架構管理轄區之人造及天然邊坡（Chan and Lau, 2008）。

國內近年來亦嘗試將風險之概念導入災害或安全管理範疇中，陳振宇（2007）曾提出應用風險管理於土石流減災工程效益評估之具體且明確之作法，並提出於土石流疏散避難決策之應用，陳樹群、王价巨等人（2006）亦提出以土石流危

害度評估、易致災性分析及承受度評估等三部分作為土石流風險評估，以作為風險管理決策之參考，冀樹勇等人（2008）亦將風險管理之理念導入天然災害之管理上，陳天健等人（2009）亦嘗試將風險管理與風險分析之方法應用於坡地災害管理上。

風險管理概念及架構

圖 1 為一般風險管理的示意架構，風險管理系統（Risk Management System）的組成，包含風險鑑別（Risk Identification）、風險估計（Risk Estimation）、風險評估（Risk Evaluation）、風險處理（Risk Treatment）等程序及後續包含計劃、執行、考核及改善等風險控管措施。本研究則採用如圖 2 之土石流災害風險管理架構，並進行進一步之分析。

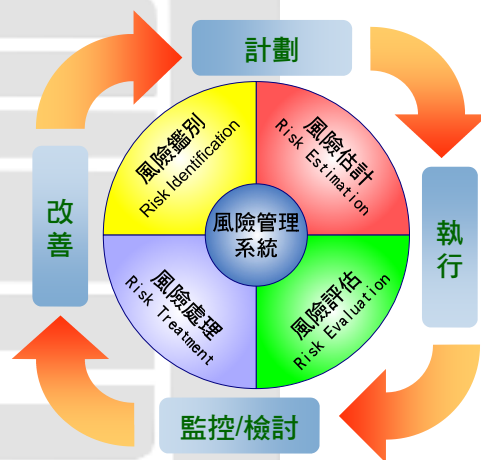


圖 1 一般風險管理架構

在我國國家標準 CNS 14889-Z4066「風險管理－詞彙－標準使用指導綱要」中，風險分析（Risk Analysis）係包含風險鑑別與風險估計二個過程，茲將風險之各詞彙定義如下。

1. 風險鑑別：為一尋找、列出及表明風險要項的過程，風險要項可包括風險的源由（Source）或危害事件發生的機制、可能後果（Consequence）及發生可能性。亦即瞭解自

已或周遭環境可能的潛在危險之來源，及危險可能造成的衝擊或影響。

2. 風險估計：為利用風險鑑別的結果，進行後果分析（Consequence Analysis）及頻率分析（Frequency Analysis），估計可能的損失大小及發生機率，進而估算得風險評估所適用之成本、效益或其它風險相關者所關切的變數（例如年平均損失、年傷亡率或最大可能損失等）。
3. 風險評估：為將預估的風險和已知的風險準則（Risk Criteria）進行比較的程序，以決定風險的顯著性，用來協助決定是否接受風險或進一步處理風險。風險準則可包括相關的成本與利益、法令與規章要求、社會經濟與環境層面問題以及風險相關者之關切點。

4. 風險評鑑（Risk Assessment）：為風險管理之核心，係整合風險分析與風險評估結果，作出建議以降低風險至可容忍程度的程序。
5. 風險處理（Risk Treatment）：為選擇與執行減少風險的措施的過程，可採用的方法分為風險控制（Risk Control）與風險融資（Risk Financing）二大類。其中風險控制又可分為風險規避（Risk Avoidance）及風險降低（Risk Reduction）二類，風險融資可分為風險移轉（Risk Transfer）及風險留置（Risk Retention）二類。

而風險（Risk）為危險事件發生的機率與其後果的組合，在定量風險分析上有多種不同之組合方式，本研究採用 Crichton（1999）提出，廣為天然災害研究所採用之風險三要素（Risk Triangle）（Peduzzi *et al.*, 2002 and Garnger, 2003）理念進行分析，即為計算：

$$\text{Risk (風險)} = \text{Hazard (危害度)} \times \text{Vulnerability (易損性)} \times \text{Exposure (暴露量)} \quad (1)$$

以土石流災害為例，式 1 之危害度即為討論土石流之災害規模與頻率，暴露量即為討論風險元素（或稱保全對象）之種類與數量，易損性即為討論不同風險元素於不同規模與強度之土石流災害下之破壞機率。

三、土石流風險分析流程

土石流風險分析是一結構化程序，利用所蒐集之資訊幫助辨識土石流潛勢溪流或整治設施破壞造成之災害後果與發生之可能性。土石流風險分析可分為定性風險分析（Qualitative Risk Analysis）及定量風險分析（Quantitative Risk Analysis）兩類，前者以文字型態描述或以數值分級方式描述危害發生之後果規模與其可能性；後者則以數值型態描述危害發生機率與災害損

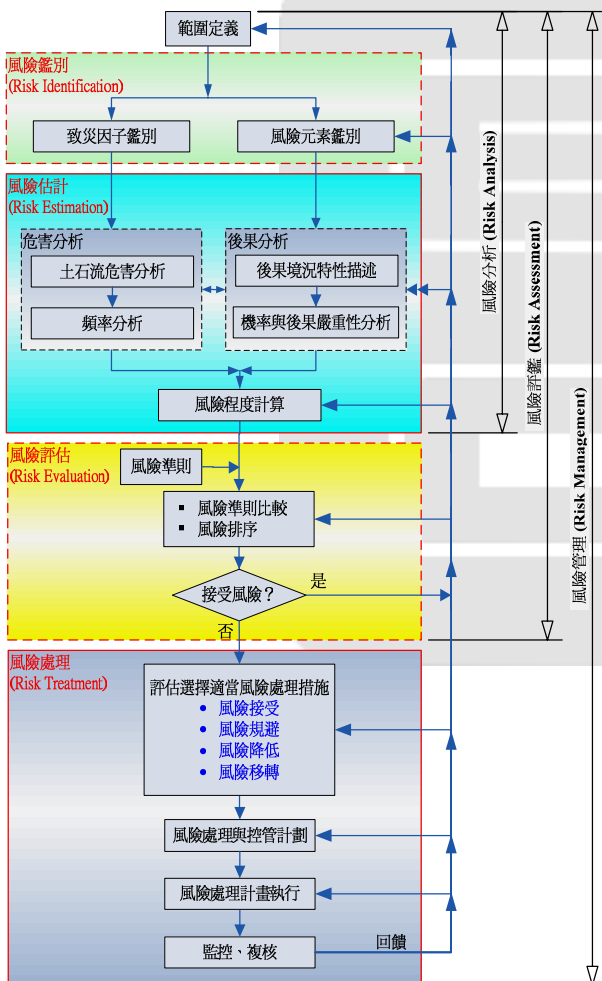


圖 2 本研究採用之土石流災害風險管理流程

失，以產生風險數值。其中定性風險分析方法較定量風險分析簡單，但定性風險分析結果多僅能作為風險排序之用；而定量風險分析所得結果，除可作為風險排序外，亦可作後續更精確的成本效益評估或風險計價之用。本研究提風險分析方法將以定量風險分析為主。

土石流風險分析步驟包括：風險鑑別（Risk Identification）、危害分析（Hazard Analysis）、後果分析（Consequence Analysis）及風險計算（Risk Calculation）等，而其分析流程則可細分如圖3之10個步驟，簡要說明如下：

（一）確認分析區域

在進行土石流潛勢溪流風險分析第一個步驟為確認分析區域，收集欲分析區域的基本資訊，包含收集行政區、地理位置、邊界及所在溪流等基本資訊，如可能收集到航照圖將更有助後續風險元素的調查。

（二）決定欲分析的土石流損失種類

一般災害的損失分為直接損失（Direct Loss）、間接損失（Indirect Loss），其中直接損失與間接損失係分別指因災害造成的直接實質損失，及間接因實質運作連結中斷致服務無法持續的損失或災害緊急處理的成本。而依災害損失以市場價值來度量的難易與否，又可分為有形損失（Tangible Loss）與無形損失，例如建築物、公共設施及農作物的損失或商業營運中斷，多可以市場價值估算，其為有形損失；而如人命傷亡、健康及生態影響等較難以市場價格度量者，是為無形損失。在進行土石流風險分析前，應先依分析的目的、損失的重要性及資訊的可取得與否，決定欲分析的損失種類。決定損失的種類之後，方能據以進行風險元素的調查。本文主要以探討直接損失為主。

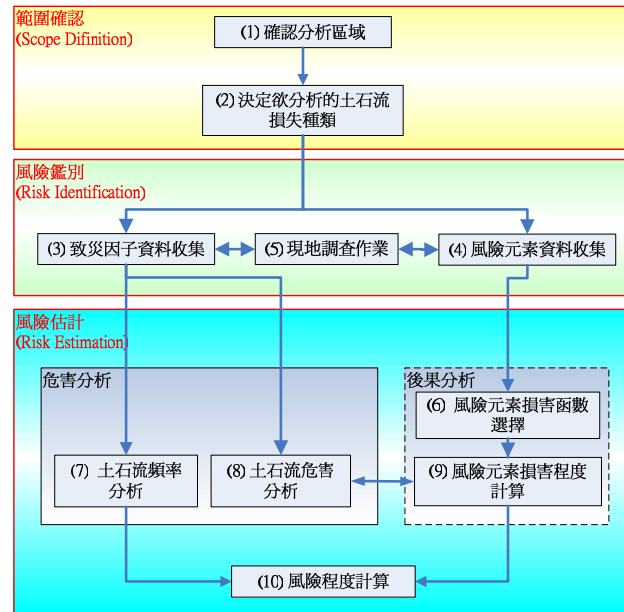


圖3 土石流災害風險分析流程圖

（三）致災因子資料收集

土石流潛勢溪流的致災因子調查與資料收集，為後續土石流頻率分析、數值模擬及危害分析的依據，應收集的資料包括集水區面積、溪流長度、集水區內地層名稱及岩性、土石流災害紀錄及相關文獻、集水區內崩塌區位及崩塌規模、土石流流動段堆積材料破碎情形、土石流災害類型、土石流潛勢溪流現有防治設施、數值地形資料收集、降雨資料收集等。

（四）風險元素資料收集

本文對於土石流可能影響範圍內的風險元素（人、事、物）進行調查，種類包括建築物、公共設施（道路、橋梁）、農作物以及人員分布狀況，調查的內容則包括各風險元素之類別、名稱、面積、尺寸等，另外亦需蒐集各風險元素之經濟價值，以供後續計算土石流災害造成之經濟損失之用，如建築物造價可由建築師公會或各縣市政府取得，建築物內裝（傢俱及家電）價值可由行政院主計處調查資料估得，道路與橋梁等設施造價可由工程單位詢得，農作物產值與價格可

由農糧署之年報查得。各風險元素及其經濟價值可數化為 GIS 圖層以供後續風險分析及套疊運算之用。

(五) 現地調查作業

在瞭解欲探討的損失類型後，需透過現地調查的方式蒐集致災因子與風險元素以供後續之分析，現地調查需完成之工作包括：

1. 風險元素現況調查：針對鄰近溪流之建築物、道路、橋梁、用地狀況進行記錄。
2. 易致災因子現況檢核：記錄可能致災之因子及其特性。
3. GPS 定位影像記錄：風險元素、易致災因子之影像記錄及定位。
4. 溢流點與影響範圍現地檢核：檢視既有土石流溢流點與影響範圍之合理性。
5. 風險元素數化圖層現地確認：現地比對室內先行數化之各風險元素圖層狀況。
6. 歷史災害訪談及範圍、強度劃定：透過現地訪談、歷史災害文獻及影像現地比對，劃定歷史災害之範圍及強度，以供土石流歷史災害重現數值模擬之參數率定使用。

而現地調查所蒐集之影像與圖層在經過品管後即可匯入調查資料庫內，以供後續分析之用，以北縣 DF174 為例，所蒐集的各風險元素分布如圖 4 所示。

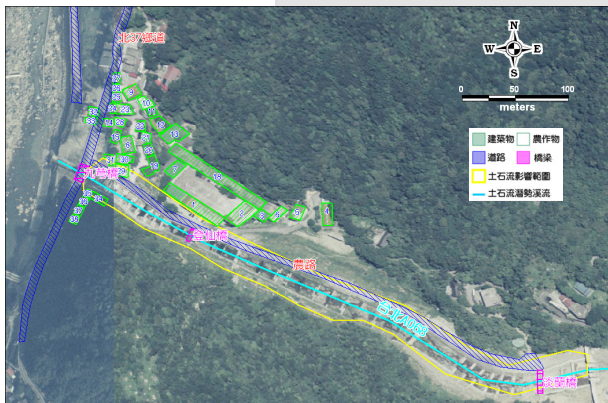


圖 4 北縣 DF174 風險元素分布圖

(六) 選擇風險元素之易損性函數

為具體計算土石流災損，一般以風險元素 (Element at Risk) 之易損性 (Vulnerability) 表示，其中風險元素以直接災損而言即為保全對象，包括人員、建築物、工程構造物、道路、橋梁與地表之經濟作物等；易損性則為風險元素於危害發生後之損失程度，其值介於 0 (無損失) 與 1 (完全損失) 之間。土石流易損性函數，定義為不同土石流災害強度 (Intensity) 作用在風險元素上，其可能造成風險元素損害程度大小之關係。

1. 建築物土石流易損性函數

由於國內目前尚未建立本土化的土石流易損性函數，本研究參考奧地利學者 Fuchs (Fuchs *et al.*, 2007) 所提出之建築物土石流易損性關係為評估依據，修正 Fuchs 等人所提之公式，使其公式計算所得之值皆落於 0~1 之間，而得式 2 之鋼筋混凝土造、加強磚造、磚造建築之土石流易損性函數。 $f_{bldg}(h)$ 為建築物的損壞程度， h 為土石流深度 (m)。

$$f_{bldg}(h) = \begin{cases} 0, & \text{if } h < 0.34m \\ 0.12h^2 - 0.04h, & \text{if } 0.34m \leq h \leq 3.05m \\ 1, & \text{if } h > 3.05m \end{cases} \quad (2)$$

另針對台灣地區山區常見之鐵皮造、木造建築，由於其耐土石流衝擊能力遠低於鋼筋混凝土造、加強磚造、磚造建築，假設堆積深度 0.2 公尺以下損失為 0，堆積深度大於 1.5 公尺時為全損-損失為 100%，得其易損性函數如下。

$$f_{bldg}(h) = \begin{cases} 0, & \text{if } h < 0.2m \\ 0.48 \cdot h^2 - 0.06 \cdot h, & \text{if } 0.2m \leq h \leq 1.5m \\ 1, & \text{if } h > 1.5m \end{cases} \quad (3)$$

式 2 與式 3 之易損性函數曲線如圖 5 所示。

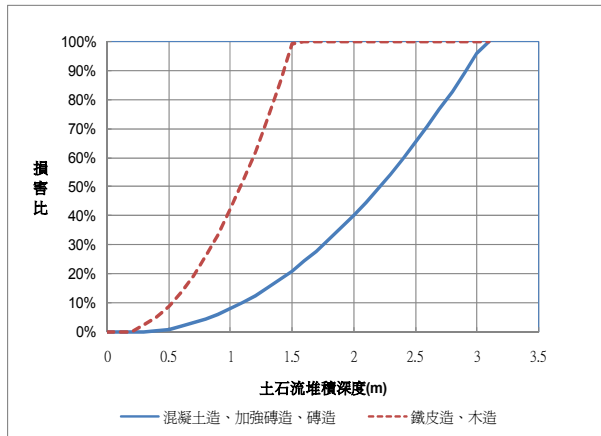


圖 5 建築物土石流易損性曲線

2. 建築物內裝易損性函數

在內容物損失部分，其土石流易損性函數的建立，因建築物內容物實際之損失資料較少，參考國內一般家庭內裝擺設之狀況，假設堆積深度在 20 公分以下時，僅需清理，財物損失為 0；50 公分時（約電視櫃或茶几的高度）時，損失為 20%；100 公分時（電視等主要設備均淹沒）時，損失為 70%；深度大於 150 公分時，衣櫥、冰箱等較高之內容物多被淹沒，則假設內容物全損，損失 100%。經過上述條件之迴歸可得式 4 之建築物內裝易損性曲線。 $f_{content}(h)$ 為建築物內裝的損壞程度， h 為土石流深度 (m)。

$$f_{content}(h) = \begin{cases} 0, & \text{if } h < 0.2m \\ -0.8117 \cdot h^3 - 2.2132 \cdot h^2 - 0.8994 \cdot h + 0.0978 & \text{if } 0.2m \leq h \leq 1.5m \\ 1, & \text{if } h > 1.5m \end{cases} \quad (4)$$

式 4 之易損性函數曲線如圖 6 所示。

3. 橋梁土石流易損性函數

本研究假設土石流堆積深度大於橋梁淨高時才造成損失，當堆積深度等於橋梁淨高時，土石會撞擊梁或橋版，而造成梁或橋版之局部損壞，需表面的清理修復，其損失比假設為 10%，即 $f_{brdg}(H_B) = 0.1$ ；而當土石流堆積深

度大於橋梁底淨高 0.5 公尺時（超過一般橋面版高度），造成最大的側向推力及衝擊力，此時假設橋面版將全部遭土石流沖走，橋梁為全毀，損失比為 100%，即 $f_{brdg}(H_B + 0.5) = 1$ ；當堆積深度在橋底淨高與橋底淨高+0.5 公尺之間時，以線性內插推估其可能損失，即 $f_{brdg}(h) = 1.8(h - H_B) + 0.1$ ，式 5 中 $f_{brdg}(h)$ 為橋梁的損壞程度， h 為土石流堆積深度 (m)， H_B 為橋孔淨高。

$$f_{brdg}(h) = \begin{cases} 0, & \text{if } h \leq H_B \\ 1.8(h - H_B) + 0.1, & \text{if } H_B \leq h \leq H_B + 0.5 \\ 1, & \text{if } h > H_B + 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

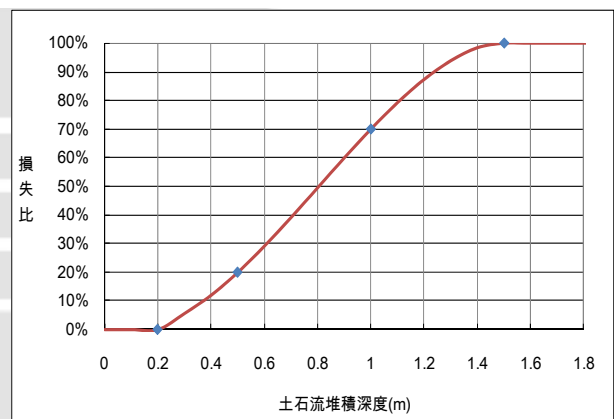


圖 6 建築物內裝土石流易損性曲線

4. 道路土石流易損性函數

在道路的部分，土石流可能造成路基淘空、路面流失、鋪面毀壞等損失，即使路面無損壞，亦有堆積土砂清運之成本。本研究假設土石流造成道路之損失與堆積之土砂體積成正比，每堆積一立方公尺之損失為新台幣 100 元。

5. 人員土石流易損性函數

土石流造成人員之傷亡，主要為土石掩埋致死或土石撞擊造成之傷亡。英國 Ramsbottom, Wallingford 等人 (2003) 依據 Abt, RESCDAM 等 (1989) 所作之人員受水流作用之穩定性實

驗資料，建立一個人員洪水傷亡評估模型（如圖 7 所示）。本研究參考前述實驗結果，考量人員在土石流作用下，因土石流衝擊而造成人員傾倒進而遭土石掩埋致死之可能性。本研究參考一般土石流之比重為 1.7~1.8，將原門檻值除以土石流比重，並取 0.25 之倍數值，可得 0.5、0.75、1.25 等應用於土石流人命風險評估之門檻值。定義 d 為土石流堆積深度， v 為土石流流速，當 $d(v+0.5)$ 小於 0.5 時，死亡之比率為 0；等於 0.75 時，死亡之比率為 50%；大於等於 1.25 時，死亡之比率為 100%。本研究以上述三個數據點，以二次多項式迴歸分析，得其人員傷亡易損性如式 6 所示，而其曲線則如圖 8 所示。

$$f_{\text{people}}(d, v) = \begin{cases} 0, & \text{if } d(v+0.5) \leq 0.5 \\ -\frac{4}{3}[d(v+0.5)]^2 + \frac{11}{3}d(v+0.5) - 1.5, & \text{if } 0.5 < d(v+0.5) < 1.25 \\ 1, & \text{if } d(v+0.5) \geq 1.25 \end{cases} \quad (6)$$

式中， d 為土石流堆積深度（m）， v 為土石流流速（m/s）， $f_{\text{people}}(d, v)$ 則為人員傷亡率。

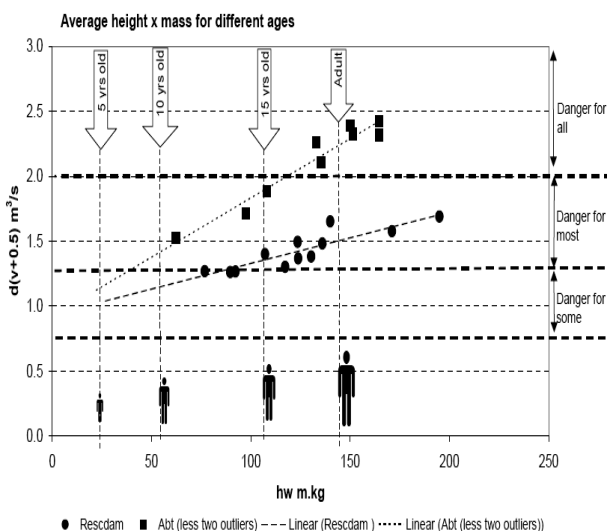


圖 7 洪水人命風險實驗資料與風險門檻

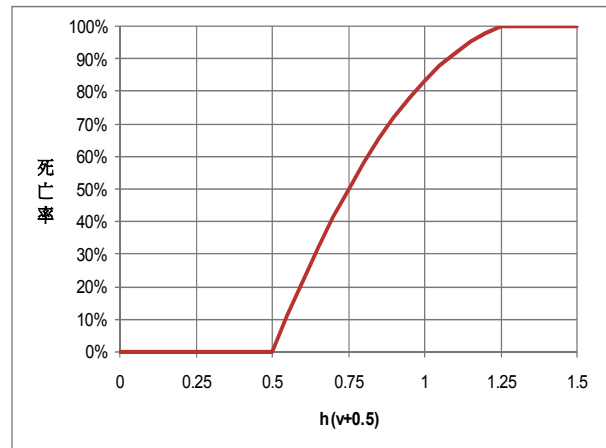


圖 8 土石流人命傷亡易損性曲線

（七）土石流頻率分析

頻率分析即保全對象暴露可能性（機率）分析，為土石流災害風險分析中較為關鍵與困難的一項工作，主要原因有二：其一為台灣地區水文事件紀錄約四、五十年，以此有限降雨紀錄資料，推估將近 200 年重現期距之水文事件，其統計數據無法具有足夠的可信度；其二乃若干土石流村里歷來發生土石流次數較少，無法周延考慮土石流發生之臨界條件（如雨量）；以下列舉數種現行常用於推估土石流發生之方法：

1. 依據歷史災害或土石流目錄分析所獲得之特定區域土石流年發生頻率（統計法）。
2. 由土石流潛勢溪流之土石流發生機制，所推估啟動土石流之雨量頻率（定率法）或降雨強度之發生機率（機率法）。

（八）土石流危害分析

土石流危害分析內容為在設定條件下，土石流發生後的危害範圍及強度，即推估土石流堆積範圍、堆積深度及速度。本研究以 FLO-2D 程式為土石流危害分析工具，該程式為二維災害洪水模擬程式，並經過美國聯邦緊急救援事務署認可，可模擬泥流（Mud Flow）及土石流（Debris Flow）等危害。以 FLO-2D 進行土石流模擬之分

析流程如圖 9 所示。本研究以台北縣瑞芳鎮弓橋里之北縣 DF174 土石流潛勢溪流作為示範，計算不同重現期距雨量（5、10、25、50、100、200 年）所可能造成的土石流堆積範圍，以作為後續計算分析之用。

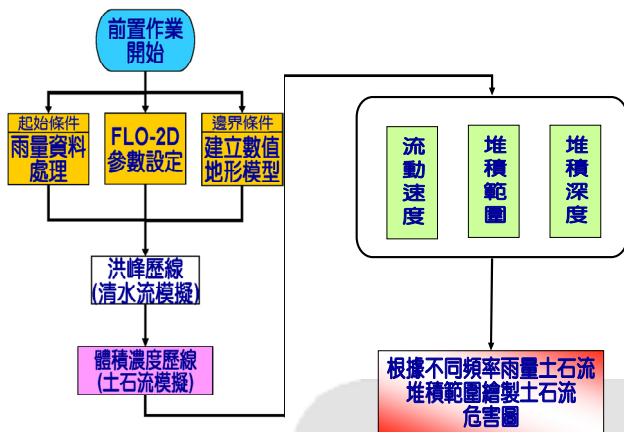


圖 9 FLO-2D 土石流模擬分析流程圖

而為便於後續利用地理資訊系統工具進行風險分析，可將 FLO-2D 模擬結果轉化為地理資訊（GIS）圖層資料，並與風險元素（建築物及道路）進行套疊，不同之堆積深度以不同漸層之顏色表示，本研究以台北縣瑞芳鎮弓橋里之北縣 DF174 土石流潛勢溪流為案例，套疊 200 年雨量重現期距結果如圖 10 所示，圖 10 中以紫色表示者為模擬結果可能受土石流危害的 5 棟建築物。

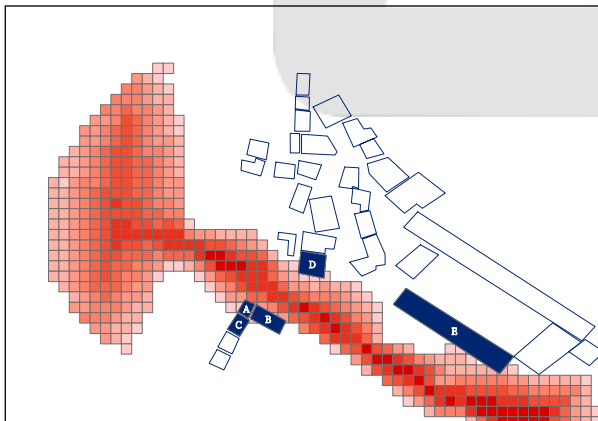


圖 10 可能受土石流影響之建築物分布圖

（九）風險元素損害程度計算

風險元素損害程度計算為利用危害分析結果所得之土石流堆積範圍、深度及速度分布資料，及依分析風險元素種類對應之易損性函數，計算其損害程度及其經濟損失。而各風險元素所在位置之土石流危害強度，可利用 GIS 工具的空間分析能力，將風險元素圖層與土石流危害圖層套疊，求得各風險元素所在位置之土石流危害度（堆積深度、速度）。以建築物之損害程度計算為例，可將前述套疊結果依式 2 或式 3 之建築物易損性函數進行損害程度計算，並考慮各類型、類別建築物之造價進行損失金額之評估。但如考慮有時只有一小部分受到土石流影響，採用最大值會有高估損失的情形，亦可以網格面積加權平均方式計算風險元素損害程度。以建築物為例，以土石流影響面積加權平均方式計算風險元素損害程度之式如式 7 所示，式中， A_i 為建築物與不同土石流網格套疊出之多邊形面積； n 為影響風險元素的土石流危害網格數（即有發生土石流堆積之網格）； h_i 為土石流危害網格 i 之堆積深度； $f_{bldg}(h)$ 為風險元素（建築物）之易損性函數。

$$Damage = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times f_{bldg}(h_i)}{\sum_{i=0}^n A_i} \quad (7)$$

利用網格面積方式與上述各步驟可計算出建築物受土石流災害之可能損害程度或損失金額，而其它種類之風險元素（如道路、橋梁、農作物）亦可採類似方法計算得之。

（十）風險值計算

風險為危險事件發生的機率與其後果的組合。風險計算，則為結合利用後果分析（Consequence Analysis）及頻率分析（Frequency Analysis）所得的可能損失大小及發生機率，進而估算得風險評估所適用之成本、效益或其它風

險分析者所關切的變數，作為風險管理決策參考之用。

1. 財產損失

事件損失為後續其它風險值計算之基礎，其為依第 9 步驟之方法及觀念計算指定土石流頻率事件發生之損失，如計算 5 年、10 年、25 年、50 年、100 年及 200 年重現期距等降雨條件下，引發土石流所可能造成損失，如表 1 為以北縣 DF174 為範例，不同重現期距下土石流事件所可能造成該地區之建築物、橋梁、道路、農作物之總損失等損失。而其計算式可以式 8 表示之。

$$L_{prop|H} = \sum_j P_{S|H,j} \times P_{T|S,j} \times V_{prop|S,j} \times E_{p,j} \quad (8)$$

式 8 中 $L_{prop|H}$ 為指定規模土石流 (H) 發生所會造成的總損失，即為各風險元素 j 損失之總和。

$P_{S|H}$ 為空間衝擊機率 (Probability of Spatial Impact)，即風險元素 (如建築物) 在給定的土石流事件下 (如雨量及土砂量)，風險元素會受到土石流影響的機率，其值為 0~1 間。如土石流危害度分析係以明確模式 (Deterministic) 下進行，例如以 FLO-2D 進行土石流危害分析，其分析之輸入參數均為明確指定，不考慮參數之不確定性 (本研究採用之方式)，則其值為 0 或 1，即風險元素如位於土石流堆積範圍內，則 $P_{S|H}=1.0$ ，否則 $P_{S|H}=0$ 。而未來如能考慮參數之不確定性，則其值可能為 0~1 間的任何值，而非僅 0 或 1 而已。

$P_{T|S}$ 為時間衝擊機率 (Probability of Temporal Impact)，即風險元素受土石流影響的時間比率，例如建築物或道路、橋梁等公共設施會一直座落在原處，故其 $P_{T|S}=1.0$ ；人員則依其可

能在建築物內的時間而定，如住宅則可假設其 $P_{T|S}=0.75$ (一天 18 小時)；公司行號則依其工作時間而定，其 $P_{T|S} \approx 0.4$ (9~10 小時)；學校如不考慮假期，則一天約為 9 小時，其 $P_{T|S} \approx 0.375$ 。

$V_{prop|S}$ 為財產類的風險元素之易損性函數，其值在 0~1 之間，代表損害比率，其值與風險元素所在之土石流強度 (堆積深度、速度) 有正關係，即土石流災害強度愈高，損害愈大，其值愈高。而其型式則與風險元素的特性有關。

E_{prop} 為財產類風險元素之重置成本。

由重現期距的倒數可簡化計算得土石流災害事件的年超越機率 (Annual Exceeding Probabilities)，進而可得如表 1 所示之土石流損失之超越機率，並可繪製成如圖 11 所示之土石流損失超越機率曲線，此曲線可協助瞭解不同損失程度發生的可能性。

年平均總損失 (Annual Total Risk) 計算結果可作為風險管理的優選排序參考，因各土石流事件之損失金額等化成同一基準 (年平均損失)，因此可作為風險處理成本效益評估及風險計價之依據。其計算方式為以分段積分方法計算損失超越機率曲線 (圖 11) 下方各區間之梯形面積，其各類型風險元素之年平均總損失試算結果如表 1 所示。

表 1 北縣 DF174 不同重現期距土石流事件之各種風險元素損失

重現期距 (年)	年超 越機率	建築物 損失(元)	橋梁損失 (元)	道路損失 (元)	農作物 損失(元)	總損失 (元)
-	100%	-	-	-	-	-
5	20%	14,222	-	196,742	-	210,964
10	10%	49,780	172,672	253,859	-	476,311
25	4%	88,993	585,245	292,136	-	966,374
50	2%	114,642	827,784	314,996	-	1,257,422
100	1%	145,941	1,101,047	337,750	-	1,584,738
200	0.5%	199,721	1,315,160	374,724	-	1,889,606
年平均損失		13,223	61,186	128,723	0	203,132

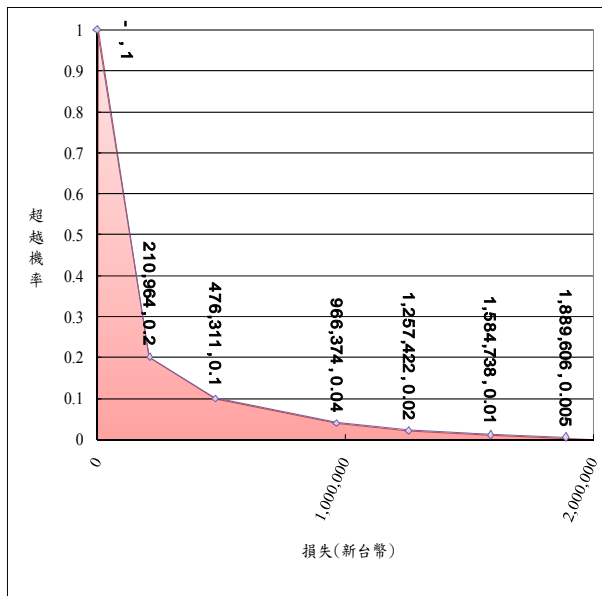


圖 11 北縣 DF174 土石流經濟損失超越
機率曲線

2. 人命損失

事件人員傷亡損失 (Event Losses) 為後續其它人員傷亡風險值計算之基礎，其計算方式與前述財產損失計算方式相同，惟其易損性曲線改為人員傷亡之易損性曲線 (式 6)，如表 2 為以北縣 DF174 為範例，不同重現期距土石流事件所可能造成該地區之人員傷亡數。

表 2 北縣 DF174 不同重現期距土石流事件之人員損失

重現期距 (年)	年超越機率	人員損失 (人)
-	100%	-
5	20%	-
10	10%	0.0009235
25	4%	0.0017498
50	2%	0.0021873
100	1%	0.0048098
200	0.5%	0.0229215
年平均損失		0.0002701

而其計算式可以式 9 表示之。式中， $L_{people|H}$ 為指定規模土石流 (H) 發生所會造成的平均人員傷亡數，即為各人員類風險元素 j 損失之總和， $V_{DI|S}$ 為人員類的風險元素之易損性函數 (式 6)，其值在 0~1 之間，代表死亡比率，其值與風險元素所在之土石流強度 (堆積深度、速度) 有正關係。 $E_{p,j}$ 為風險元素 j 之人員數。

$$L_{people|H} = \sum_j P_{S|H,j} \times P_{T|S,j} \times V_{DI|S,j} \times E_{p,j} \quad (9)$$

年平均總死亡人數 (Annual Total Risk) 可作為土石流整治的優選排序參考，亦可作為風險處理成本效益評估之依據。其計算式為針對各風險元素 (人員- $E_{p,j}$) 分別計算後加總，依此原則計算之北縣 DF174 人員損失計算如表 2 之年平均損失所示。

F-N 圖 (Frequency-Number of Fatalities Curve) 為社會風險準則應用在土石流風險管理之表示法，此種對天然或人為災害之分類管理方法亦為澳大利亞、英國、香港以及北美國家所採用 (BGC Engineering Inc., 2007)。F-N 圖上依風險之高低區分為不可接受 (Unacceptable)、實際且可接受 (As Low As Reasonably Practicable, ALARP)、可接受 (Broadly Acceptable) 等三區，經由風險計算可求得對應 N 人死亡的災害事件頻率 F ，將所得 F 、 N 值疊繪在 F-N 圖上，視其所座落的區域，即可判定其是否符合 F-N 圖所設定的風險準則，如不符合，主管機關便可依照各條溪流風險於 F-N 曲線之點位分布進行如降低發生頻率或降低暴露量等不同手段的管理，以將風險降到符合風險準則的程度。

在經由前述之計算得知人員損失後，可再由分析計算得土石流人員傷亡之 F-N 值，並套疊在 F-N 圖，以評估風險是否在可忍受的範圍

內，其可作為是否需進行整治以降低風險，或考慮遷村以規避風險。可利用表 3 不同重現期距土石流事件之人員傷亡評估結果，求得 F-N 值。表 3 中之人員損失值即可作為 N 值，年超越機率即為 F 值，惟一般 F-N 圖中之下限 N 值為 1，而如計算得到之人員傷亡 N 值小於 1 時，可將其正規化為 1，而同時將人員傷亡數乘上原來之年超越機率而得新的 F 值，而將表 3 計算而得之 F-N 值，繪於 F-N 圖上，可得圖 12。由圖中可知，北縣 DF174 土石流潛勢溪流 F-N 圖落於可接受區，但仍應以合理可行的工程或非工程方法降低其風險。而若將本研究所採用之土石流風險分析流程應用於多條土石流潛勢溪流上，則其分析結果可進行風險排序，可提供不同土石流潛勢溪流風險高低之客觀比較。

表 3 北縣 DF174 土石流 F-N 值之計算

重現期距 (年) (1)	年超越 機率 (2)	人員損失 (人) (3)	N 值	F 值= (2) * (3)
-	100%	-	-	-
5	20%	-	-	-
10	10%	0.0009235	1	0.0000924
25	4%	0.0017498	1	0.0000700
50	2%	0.0021873	1	0.0000437
100	1%	0.0048098	1	0.0000481
200	0.5%	0.0229215	1	0.0001146

四、結論與建議

1. 土石流災害之機制看似複雜，但經由分析危害度（Hazard）、易損性（Vulnerability）、暴露量（Exposure）後，仍可能以風險分析方式進行量化分析，並藉由各步驟之改進、改善提昇風險分析之可靠性。
2. 土石流風險之可靠性及完整性端賴基本資料蒐集之正確性，在沒有正確的基礎資料下，進一

步之風險分析將有其限制，目前各基礎資料雖有不足，但後續可依據風險三要素分別建構完整基礎資料，以使土石流風險分析架構更趨完整。

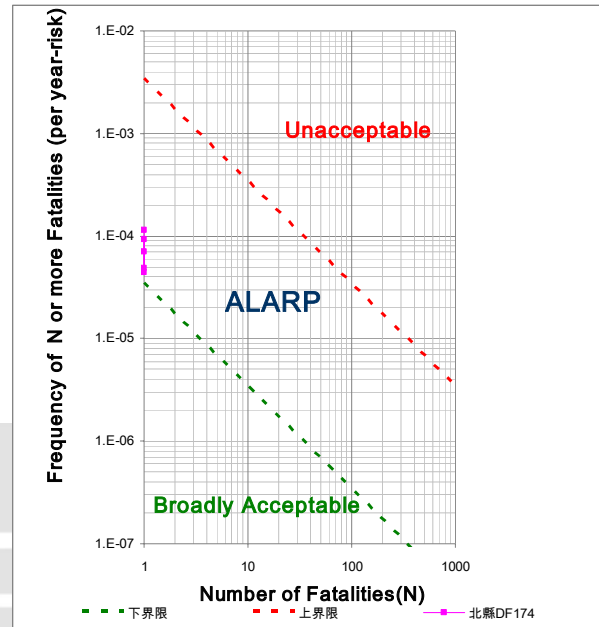


圖 12 北縣 DF174 土石流人員傷亡 F-N 圖之繪製

3. 土石流所帶來之損失除直接損失外，間接損失亦為重要之一環，建議未來可蒐集社會經濟資料，以提供建立間接損失模型所需資訊。
4. 台灣地區土石流發生雖仍頻繁，但對於土石流發生機制仍有待瞭解，其機制為土石流分析之重要環節，未來於土石流災害發生後仍應持續蒐集與發生機制有關之各類資訊，以便進行進一步之分析。
5. 風險分析成果可依據不同風險等級參考建議之管理對策，可供相關主管機關或地方政府於制定減災、防災策略時參考使用。
6. 台灣地區因天然環境因素獨特，使得土石流災害在未來仍有持續發生之可能性，如何透過土石流風險管理機制將有限的資源應用在最有效

的地方，並應用於土石流災害疏散避難規劃以及工程整治效益評估方面，為土石流風險管理、風險分析未來之方向。

參考文獻

- Abt, S.R., Whittler, R.J., Taylor, A. and Love, D.J. (1989) Human Stability in a High Flood Hazard Zone, Water Resources Bulletin, 25 (4), pp.881-890
- Australian Standard (1999) Risk Management, AS/NZS 4360
- Australian Geomechanics Society (2000) Landslide Risk Managemenet Concepts and Guidelines, Australian Geomechanics
- Australian Geomechanics Society (2007) Commentary on Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning, Australian Geomechanics Vol.42, pp.37-62
- BGC Engineering Inc. (2007) North Vancouver Debris Flow and Debris Flood Quantitative Risk Analysis, Final Report prepared by BGC Engineering Inc. for the District of North Vancouver, BC, Canada
- Chan, Lau (2008) Slope Safety System and Landslide Risk Management in Hong Kong, The First World Landslide Forum, United Nations University, Tokyo, Japan, pp.547-562
- European Commission (2004) Risk, Hazard and People's Vulnerability to Natural Hazards, EUR 21410 EN
- Huebl, J., Fuchs, S., Heiss, K. (2007) Towards an Empirical Vulnerability Function for Use in Debris Flow Risk Assessment, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, pp. 495-506
- Fuchs, S. (2008) Vulnerability to Torrent Processes, WIT Transactions on Information and Communication Technologies, Vol. 39, Risk Analysis VI, pp.289-298
- David Ramsbottom, Peter Floyd and Edmund Penning-Roswell (2003) Flood Risks to People Phase 1-R&D Technical Report FD2317, Defra / Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme
- 中國國家標準 CNS14889 (2005) 風險管理詞彙暨標準使用指導綱要，經濟部標準檢驗局
- 陳天健、洪鴻智 (2009) 坡地災害管理與風險分析方法，地工技術，第 119 期，第 29-40 頁
- 冀樹勇，鄭錦桐，林伯勳，沈哲緯，張州男 (2008) 淺談天然災害風險管理，土木水利季刊，第 35 卷，第 2 期，第 104-111 頁
- 陳樹群，馮智偉，吳俊毅，黃柏聰，王价巨 (2006) 土石流潛勢區域之風險評估及災害管理，地工技術，第 110 期，第 45-54 頁
- 陳振宇 (2007) 風險管理應用於土石流災害管理之探討，2007 年國際防災科技與防災教育學術研討會，雲林科技大學，雲林
- 行政院農業委員會水土保持局 (2008) 97 年土石流潛勢地區易致災因子調查與危害頻率分析，財團法人中興工程顧問社，南投