

山崩影響範圍與危害度分級劃設之研究

林建杰^[1] 鍾言鑫^[1] 羅佳明^[1*] 馮正一^[2] 張光宗^[2]

摘要 本文以歷年地形分析與遙測判釋，分析上安村研究區歷史與潛在山崩分布範圍，以瞭解區域內山崩發展特性。再以分離元素法建置研究區山崩運移數值模型，探討其山崩運移過程並劃設堆積影響範圍。另將山崩堆積影響範圍進行危害度分級，據以繪製山崩危害度圖，作為未來國土開發與防災避難規劃之參考。結果顯示，研究區計有 13 處潛在山崩塊體，屬不穩定邊坡與具山崩活動性者佔 92%，其應為後續持續關注之邊坡治理重點。此外，上游源頭崩滑體周緣約 50m 與溪床周緣約 30m 範圍，均應注意崩落土石之直接衝擊；中、下游範圍內，須注意溪床兩岸約 30m 與低階地位置，降低土石流衝擊之影響，下游聚落與低灘地範圍則須注意土石流溢流或淹埋之影響。

關鍵字：地形分析、遙測判釋、分離元素法、山崩危害度圖

Delimitation of the landslide zonation and hazard assessment

Jian-Jie Lin^[1] Yan-Xin Zhong^[1] Chia-Ming Lo^[1*] Zheng-Yi Feng^[2]
Kuang-Tsung Chang^[2]

ABSTRACT This study conducted terrain analysis and remote sensing interpretation to determine the distributions of historical and potential landslides in Shang-an Village and elucidate the characteristics of landslide development within the area. Using the discrete element method, we constructed a digital model of the study area in order to explore the landslide movement processes and determine the scope of influence with regard to deposition. The scope of influence was then used to perform hazard zoning in the creation of a landslide hazard map for use as a reference in future land planning and disaster prevention. Our results revealed 13 potential landslide masses in the study area, 92% of which are on unstable slopes with limited landslide activity. These areas should be the focus of future monitoring and remediation projects. Direct impact from falling rock is the main concern in the area roughly 50 m around the sliding masses in the source areas of the study region and approximately 30 m around the creek beds upstream. In contrast, being buried by debris flow is the concern in the lowland areas roughly 30 m from creek channels in the middle and lower reaches.

Key word: terrain analysis, remote sensing interpretation, discrete element method, landslide hazard map.

[1] 建國科技大學土木工程系暨土木與防災研究 (* 通訊作者 E-mail: cmlc@ctu.edu.tw)

Department of Civil Engineering, Chienkuo Technology University, Changhua 500, TAIWAN, R.O.C

[2] 中興大學水土保持學系 (* 通訊作者 E-mail: tonyfeng88@gmail.com)

Department of Soil and Water Conservation, Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C

一、前言

近年極端豪雨重創臺灣，造成相當嚴重之大規模山崩災害事件，而歷經多次慘痛之教訓後，國內外相關防災單位已把山崩災害敏感區、崩壞機制及危害範圍劃設等，列為當前的重要課題。Latetin et al (2005) 與 Jaboyedoff et al (2005)曾利用瑞士危害度分級圖進行各類型山崩影響範圍分級，繪製出各類型山崩影響範圍危害度圖，並落實於邊坡工程規劃層面。Jaboyedoff et al (2005)建立之危害度分級圖以落石為主，主要由 return period 與 kinetic energy 構成，並依此分為高、中、低等危害度分級。其概念在於當山崩災害回歸期較短時(如較小規模之山崩)，只需較低之山崩動能即可構成高危害度等級；而當山崩災害回歸期較長時(如較大規模之山崩)，則需較高之山崩動能方可構成高危害度等級。然而，其應用之數值模擬僅能評估少量落石之運動路徑與堆積範圍，對於大規模山崩複雜之塊體運動行為等，則無法呈現。此外，大規模山崩由於瞬間崩滑量體甚大，導致運動堆積距離不易估算，其大量塊體運動過程中往往因岩塊群碰撞交互作用而形成遠距離之堆積影響範圍 (Okura et al, 2000)。尤其劇烈變化之地形，易影響其山崩運動型態，導致山崩塊體由滑動轉為極快速之崩滑，甚至崩入河道轉變為流動，形成複合型之山崩型態 (complex landslide)。況且，以大規模山崩而言，運動速度是決定山崩破壞潛能之重要參數，往往幾秒就可能造成相當大規模之災害 (Hung, 2007)。然而，關於大規模山崩之運動過程轉變與影響範圍描述甚少文獻提及，對於崩滑過程之塊體分離、碰撞交互作用、運動型態之轉變等討論，更是相當缺乏。隨著電腦運算與數值模擬科技之進步，近年來諸多研究已開始採用分離元素法 (Discrete element method)模擬山崩運移及堆積問題 (KOC et al., 2008；Lo et al., 2012 & 2015)，其模擬優勢在於可深入探討分離塊體之複雜運動過程，除塊體滑動行為外，可掌握山崩塊體變形至破碎、碰撞交互作用、能量傳遞與消耗等特性，為近年山崩運動至堆積模擬之突破關鍵。有鑒於此，本研究選取陳友蘭溪上安村研究區 (圖 1)進行潛在山崩判釋分析與數值模型建置，並參考瑞士頒布之危害度分級圖，藉此評估其崩壞運移過程與堆積影響範圍。本文主要探討重點如下：

1. 以分離元素探討研究區山崩運移過程與堆積影響範圍。
2. 藉由數值模擬與山崩危害度分級規則評估研究區潛在山崩危害度分級。

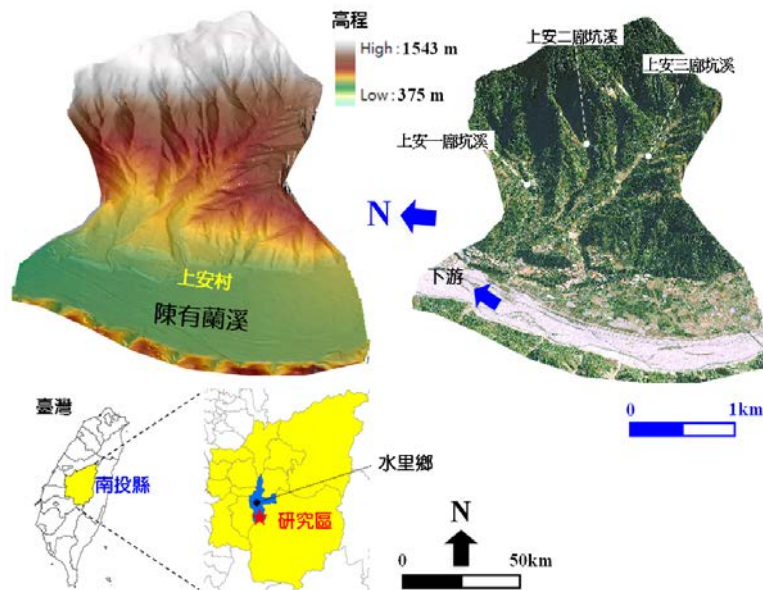


圖 1 研究區地理位置與地形圖

Fig.1 Geographic position and topographic map of the study area

二、研究方法

2.1 山崩地形分析與地貌判釋

潛在山崩區位之檢出，需有賴於歷年地形資料及遙測影像蒐集、長年調查經驗與正確之山崩特徵判釋，方能合理找出潛在山崩範圍。為瞭解山崩歷史地形變遷與空間分佈範圍，須利用不同時期地形圖等高線、水系分佈之變化，做為觀察山崩變化趨勢之重要資訊。且藉由等高線隆起之地形變化特徵，可辨識出古山崩之地貌特徵。本文即應用等高線地形變化特性，掃描各期地形圖成數位化，並觀察 1924-2004 年研究區近百年地形變異特徵，進一步檢出潛在山崩區位。Soeters 與 Van Western (1996)曾以遙測影像觀察不同類型山崩特徵提出各山崩類型判釋之準則，其方法乃根據影像內山崩地呈現之地貌特徵(morphology)、植生(vegetation)及排水狀況(drainage)等作為遙測影像判釋基準 (Soeters and Van Western, 1996)，以區分不同山崩類型之特徵。因此，本文將針對遙測影像之潛在山崩區位之地貌、地形及地質特性等，利用遙測影像與數值高程模型進行潛在山崩區位判釋，並經由現場檢核後，建置潛在山崩數值模型。此外，本文於潛在山崩區位之穩定性評估做法上，首先比對其歷史與其地形演育，經由現場查核後，參考 Crozer 於 1984 年提出之邊坡穩定程度分類方法 (表 1)進行潛在山崩塊體穩定性分類。

表 1 邊坡活躍程度分類方法 (改自 Crozier, 1984)
Tab.1 Stability classification of slopes (modified from Crozier 1984)

分級描述	
I 不穩定邊坡	
I _a	活動性極高之崩塌邊坡，其崩塌材料目前仍在滑動中，且其滑動特徵相當顯著且能清楚界定。
I _b	再次發生崩塌之邊坡，崩塌材料目前仍在滑動中，且具有再次滑動之特徵，部份區域滑動特徵相當新鮮且能清楚界定，其他區域則可能保留舊有崩塌特徵。
I _c	近年曾發生崩塌之邊坡，其上具有近年曾發生崩塌之證據，崩塌特徵相當顯著且能清楚界定。
II 山崩活動性較低之邊坡	
II _a	目前活動性較低之歷史紀錄山崩，邊坡上具有近10年內曾發生崩塌之證據。
II _b	目前活動性較低之青年期山崩，邊坡上具有近10至50年間曾發生崩塌之證據。
II _c	目前活動性較低之成熟期山崩，邊坡上具有近50至100年間曾發生崩塌之證據。
II _d	目前活動性較低之老年期崩塌，邊坡上具有超過100年以上曾發生崩塌之證據。
III 潛在不穩定之邊坡	
III	邊坡目前無明顯證據指出過去曾發生崩塌活動，但未來可能逐漸發展出崩塌破壞條件，其潛在崩塌可能性可藉由與其他邊坡比較分析而得知。

2.2 分離元素原理

PFC 係由 Itasca 公司於 1999 年發展出之分離元素分析程式 (Itasca, 2002)，主要利用外顯有限差分法計算每一時階之系統變化。每個運算時階，均先計算顆粒位置及重疊量，依其力一位移定律計算接觸力後，根據牛頓第二運動定律，可得到新的顆粒速度與位置。PFC 藉由每一接觸點之接觸組成模式模擬材料之基本力學行為，提供三種接觸組成模式包含接觸勁度模式、滑動模式及鍵結模式等。另外，滑動模式係採用摩擦係數的設定，當元素接觸介面間滑動力大於摩擦阻力時，元素便會產生滑動。而鍵結模式則於顆粒元素間加入鍵結，以結合元素群構成另一種形狀，當所施加元素之外力大於鍵結力時，其鍵結便會斷裂。

本文採用 PFC 3D 軟體建構山崩運移與堆積之數值模型，其優勢在於可模擬物件鍵結與分離、延弱面破裂及碰撞交互作用後之大位移行為。PFC 3D 程式主要需輸入之材料強度參數包含正向與切向之接觸勁度、元素間連結之鍵結勁度與強度等，其主要反映岩坡之強度與變形特性，然其輸入值屬於微觀參數(指各顆粒元素之輸入參數值)，甚少可利用力學試驗方法直接求得。因此，本文參考 Potyondy (2004)建議之材料參數設定方法，以相關計畫報告現場鑽探取樣之單壓試驗結果做為比對依據。另以 PFC 模擬其力學實驗過

程與結果，初步進行巨觀與微觀參數之轉換，以實際單壓實驗及模擬實驗比對，進行巨觀與微觀參數轉換公式修正，進而得到模擬材料之微觀參數。關於模擬材料碰撞消能方面，主要參考 Giani 於 2004 年現場試驗之回彈係數進行阻尼參數轉換，以設定較符合現場狀況之阻尼參數。

2.3 數值模型建置

數值模型主要分為山崩量體、不規則地形與結構物等，其中山崩深度由於甚難精準預估，故本研究以最新一期地形 (5m×5m 精度 DEM)資料分析崩滑體量體損失區與未崩滑邊界之相對高程 (即未崩滑邊界之高程扣除崩滑體量體損失區之高程)，並統計已發生滑動之山崩面積與其崩滑深度之關係 (圖 2)，藉此評估研究區潛在山崩之可能崩壞深度，作為運移數值模型建置之參考。

數值模型之不規則地形主要由 5m×5m DEM 轉為 Wall 元素建構而成，設定 228,957 wall 建構地形，整個數值模型總長為 5,215m，寬為 2,580m。而崩滑體係以 11,087 顆 ball 建構而成，其主要將崩滑前地形以 wall 建構後，再將 ball 填入崩滑範圍。待球元素群穩定後，再於 ball 之間接觸位置給予鍵結強度，使其有如崩滑前固結之岩體，相關模擬參數如表 2。

結構物模型主要於現地詳細調查各建物之高度、主結構材料與其分布區位，並以 ArcGIS 程式建構各結構物圖層資訊，經由 PFC3D 轉換後以 28,569 ball 建構結構物，再建置 3D 山崩體、地形與結構物整合之數值模型 (圖 3)。目前國內外甚少山崩結合 3D 結構物之相關模擬研究成果，其數值模型將可進一步提升山崩運移模擬之合理性，強化評估潛在山崩範圍內房建物衝擊之分析，提升防災決策與災前整備研擬之參考。

表 2 本研究 PFC 模型脂數值模擬參數

Tab.2 The numerical parameters of the PFC modeling in this study

參數項目	單壓實驗模擬參數	全尺度模型參數
球元素單位重(kg/m ³)	2,350	2,350
球元素半徑分布範圍(m)	0.0025-0.003	2.5-5
正向勁度(kN/m)	4.8e7-5.8e7	5e8
切向勁度(kN/m)	2.4e7-2.9e7	5e8
球元素摩擦係數	0.6	0.05-0.6
牆元素摩擦係數	0.6	0.6
平行鍵結正向勁度(kN/m ³)	8e11-8.5e11	4e8-4.3e8
平行鍵結切向勁度(kN/m ³)	4e11-4.2e11	2e8-2.1e8
平行鍵結正向強度(Mpa)	15-17	15-17
平行鍵結切向強度(MPa)	7-8	7-8
正向阻尼係數	0.32-0.4	0.32-0.4
切向阻尼係數	0.05-0.2	0.05-0.2

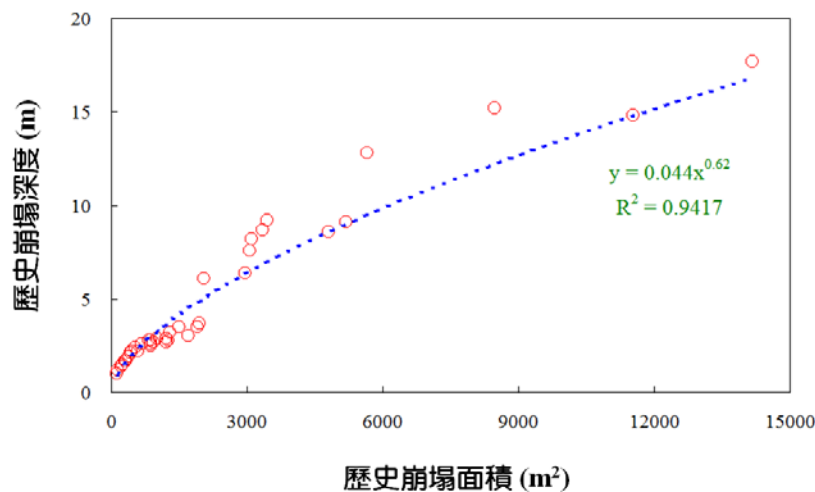


圖 2 研究區山崩面積與崩滑深度關係圖

Fig.2 Relationship between landslide area and depth in the study area

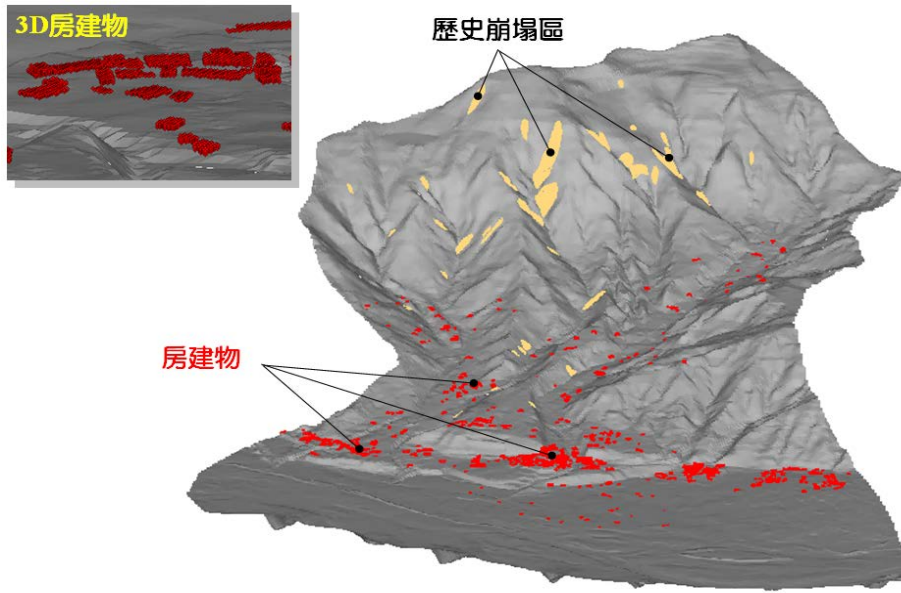


圖 3 研究區 PFC3D 數值模型

Fig.3 PFC3D model of the study area

三、物理試驗與數值模擬結果

3.1 山崩地形分析與地貌判釋

- (a) 圖 4 分析結果顯示，研究區於 1924 可判釋出 7 處圓丘狀地形，當豪雨或地震等外力作用時，將可能加速圓丘狀地形崩壞。20 年後 (1944)，上安三廊溪中游右岸可發現新增一處圓丘狀地形，上游 7 處圓丘狀地形均有往上游擴展之跡象。1985 地形得知，區域內源頭已逐步往東側崩退，中上游附近仍可判釋出 9 處面積較大之圓丘狀地形，而 1992 增加至 12 處，其多新增於上安二廊溪源頭，1999 則無較顯著之數量變化或擴大發展。顯見中、上游邊坡變形發展跡象較為顯著，未來豪雨或地震事件均可能導致圓丘狀地形破壞而轉變為大規模山崩，進而增加下游上安村受到土石衝擊之風險。
- (b) 2005-2013 遙測判釋結果顯示 (圖 5)，2005 山崩主要位於上安二廊溪源頭 (發生 6 處山崩)，其餘支流均為 2 處山崩，2006-2008 山崩發展則轉往三廊溪源頭，2009-2012 區域內則無山崩分布，顯見區域內稍有植生復育之跡象。而 2013 判釋顯示，上安三廊溪源頭發生多處山崩，導致河床堆積大量山崩土石，二廊溪源頭支流則僅兩處山崩發生，相對較為穩定。比較研究區三條支流發現，以上安三廊溪山崩發生頻率最高，相較於一廊溪與二廊溪侵蝕發展最為劇烈。此外，綜合地形分析結果得知，區域內圓丘狀地形分布以上安三廊溪源頭最多且面積最大 (佔有 6 處)，其次為二廊溪 (佔有 5 處)，顯見山崩發展多位於邊坡變形範圍，當岩坡內弱面因重力變形而逐漸開裂與擴大，並構成較深層且規模較大之裂隙發展範圍，其將促成地表水與地下水滲入裂隙內流動，大幅弱化圓丘狀地形之材料強度，而坡趾則可能產生隆起或剪力破壞，增加大規模崩壞之可能。
- (c) 潛在山崩判釋與穩定程度分類結果顯示 (圖 6)，整個研究區計有 13 處潛在山崩，最小面積約 $8.7 \times 10^3 \text{m}^2$ ，最大面積可達 $1.5 \times 10^5 \text{m}^2$ 。比較三條溪流發現，潛在山崩區多位於上安三廊溪源頭 (佔有 9 處)，其次為二廊溪源頭 (四處)，顯見區域內溪流侵蝕發展與崩壞特性之差異。參考 Crozer (1984) 提出之邊坡穩定程度分類得知，屬不穩定邊坡與山崩活動性較低之分類者達 12 處 (屬 Ia 者計有 2 處、Ib 者計有 6 處、Ic 者計有 2 處、IIa 者計有 2 處)，僅一處歸類於潛在不穩定之邊坡 (屬 III 者，邊坡目前無明顯證據指出過去曾發生山崩活動，但未來可能逐漸發展出山崩破壞條件)，故後續進行潛在山崩影

響範圍推估上，將採用 12 處屬 I-II 之類型，做為山崩影響範圍模擬之參考崩滑體。

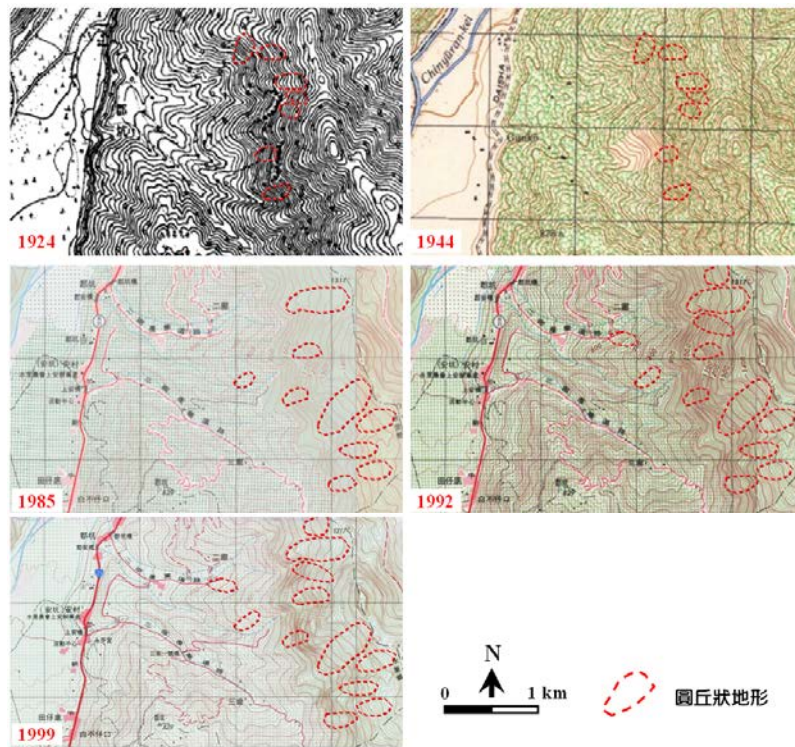


圖 4 研究區歷史地形分析結果

Fig.4 Results of historical terrain analysis in the study area

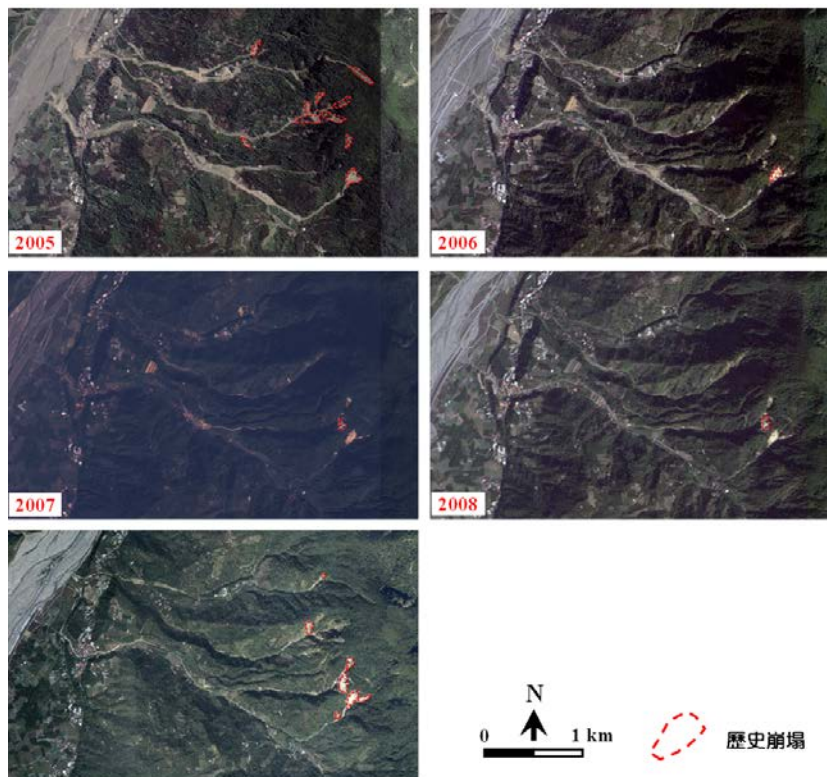


圖 5 研究區歷史崩場判釋結果

Fig.5 Results of landslide interpretation in the study area

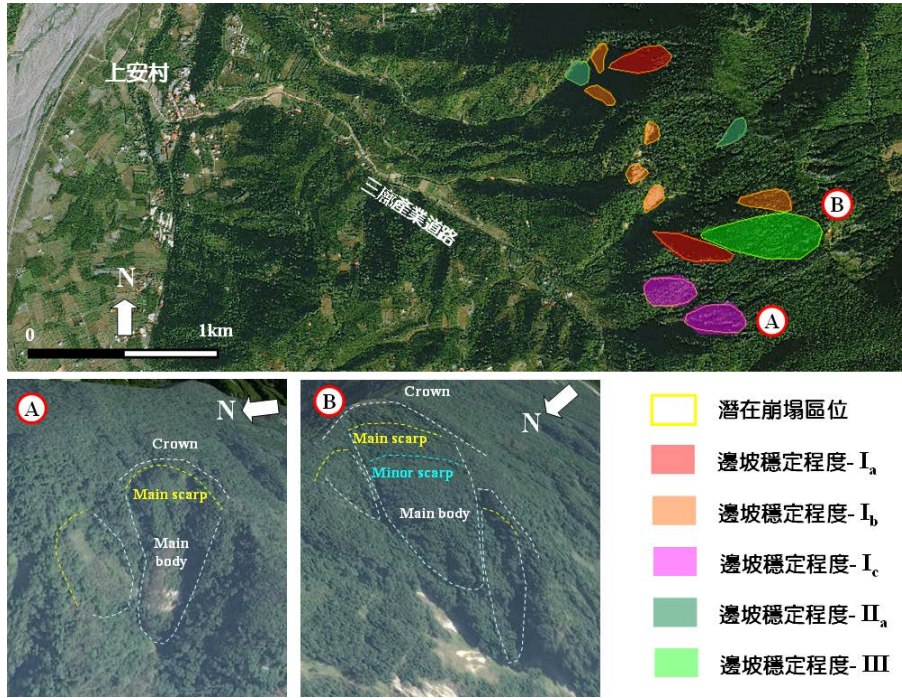


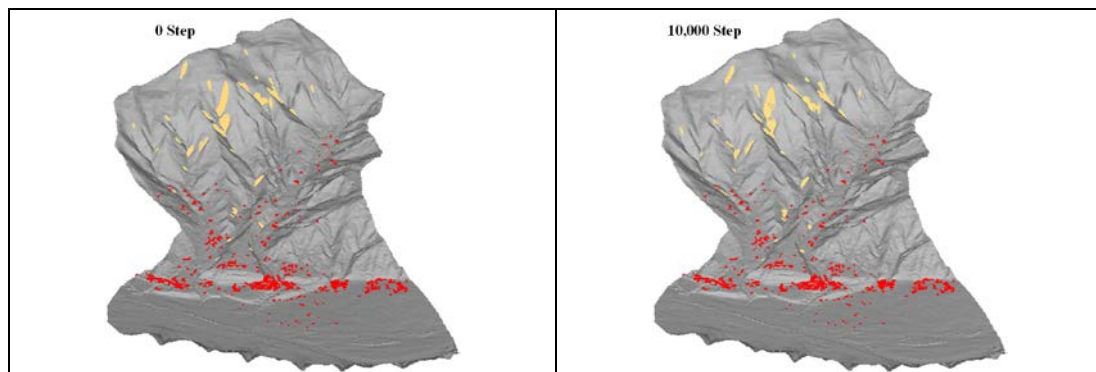
圖 6 研究區潛在崩塌微地形判釋與穩定程度分類結果

Fig.6 Micro-topographical interpretation results of potential landslides and classification of slope stability

3.2 山崩運移數值模擬

山崩數值模型之山崩區 ball 半徑約 0.5-1.0m (為畫面中黃色 ball)，而房屋建物顆粒元素半徑約 1.5m (28,569 ball) 建構而成(紅色部分)，數值模擬主要依各時期山崩事件依序模擬，並模擬所有事件山崩同時崩壞情形下之運動過程與堆積範圍，做為影響範圍劃設之參考。結果如下：

- 圖 7 主要模擬 2005-2013 崩滑體同時運移與堆積之模擬結果(假設山崩災害影響達最嚴重之狀況)，10,000 step 崩滑體已開始往溪谷滑移，20,000-32,000 steps 多數土石由源頭陡坡崩落構成落石(rockfall)運動特性，且快速崩滑至溪谷中，直至 60,000 step 各源頭之崩滑體均已滑落至上游溪谷並減速為流動型態，此階段下游尚未有任何建物受到土石影響。
- 60,000-128,500 steps 三廊溪上游已有局部土石衝擊至建物，其溪床左岸附近 3 處建物受到土石衝擊而受損，二廊溪中游則有少量土石流因溪谷轉彎處擁高而堆積至建物周圍。321,420 step 約 85% 以上土石已運移至中游範圍，此時中游已有 17 處建物受到衝擊而損毀或掩埋，尤以三廊溪中游最為嚴重。
- 884,217 step 約 32% 土石流動堆積至下游聚落位置，其餘土石則多停留至中游溪床，此階段區域內計有 42 處建物受到土石撞擊，約 9 處建物遭到掩埋，而郡坑國小與派出所等避難地點均未受到土石流堆積與衝擊影響，顯見目前避難處所選定之安全性與可靠度。



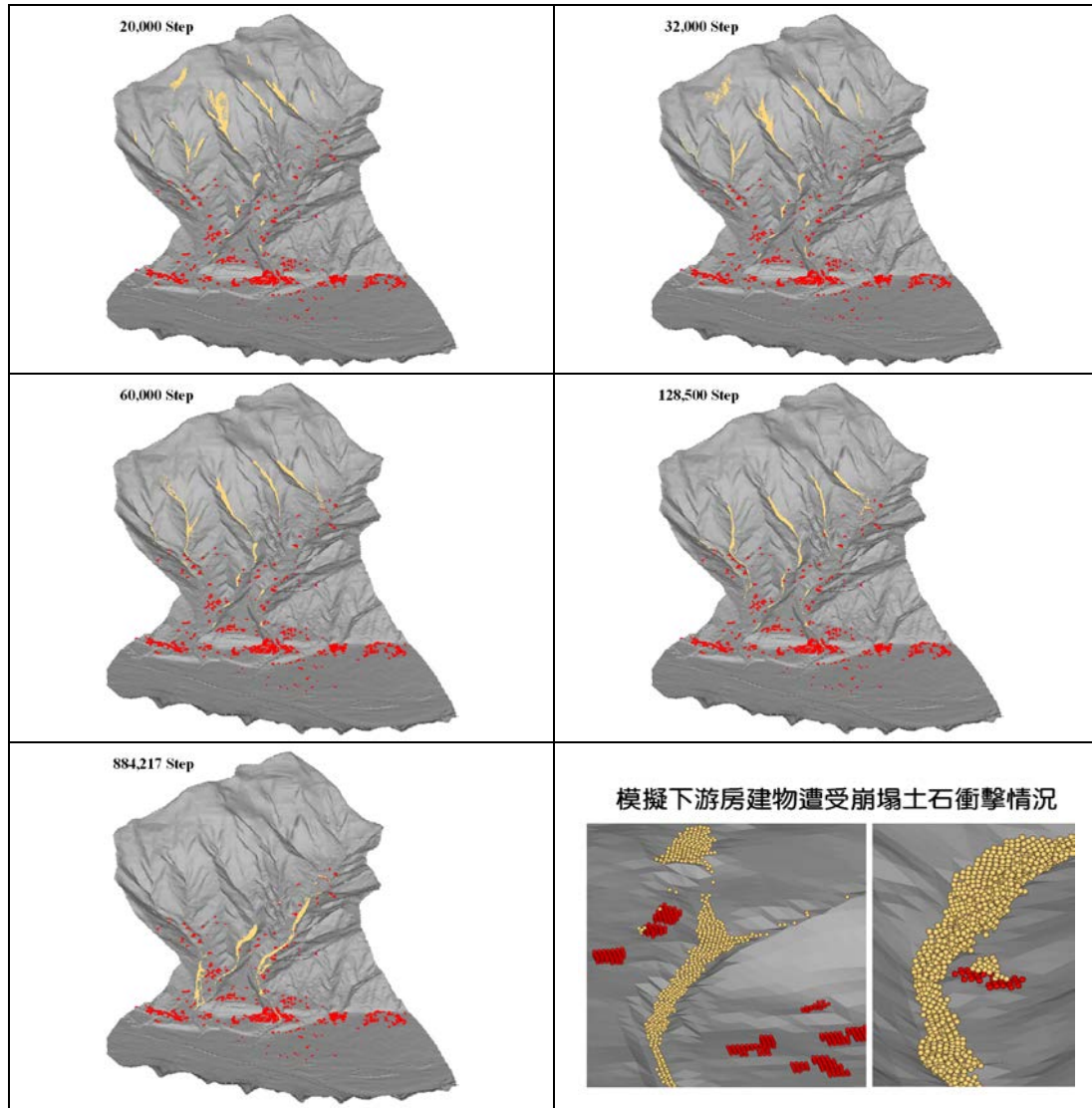


圖 7 研究區 2005-2013 歷史山崩同時運移模擬過程

Fig.7 Simulation of landslides in the study area between 2005 and 2013, with all events occurring at the same time

3.3 山崩影響範圍劃設與危害度分級

本研究主要參考瑞士危害度分級規則，並根據過去災害經驗修正為本研究區適用之危害度分級（表 3），於不同地形與山崩發生條件進行分類，另根據 PFC3D 模擬監測結果，搭配區域內山崩發生次數，綜合繪製山崩危害度圖，相關繪製流程與成果如下：

- (a) 山崩類型與強度 (intensity)：其主要依據地形與模擬崩滑體運動特性決定，當坡度超過 55 度且模擬崩滑體初始以自由落體、跳動或滾動等運動為主者，將其歸類為落石(達此條件時，將依據動能決定該區為之強度)。而當滑動塊體崩落至溪谷上且持續流動形成土石流運動特性時，則參考模擬之運動速度與土石堆積厚度決定該區為之強度。
- (b) 山崩模擬運移過程監測分析：主要於每個 ball 運動過程監測 x, y, z 方向之運動速度，再將各方向速度值換算成各球元素之速度與動能，依此評估其強度。而山崩實際堆積深度部分，則根據現場實際堆積狀況 (依據歷年 Lidar 或高精度 DEM 資料分析獲得)與模擬堆積分布結果，決定研究區土石流堆積深度之強度。
- (c) 山崩頻率分析：主要將研究區分成源頭、運動與堆積等區，分別評估其山崩發生次數與特性。源頭部分依據歷史圓丘狀地形與歷年實際山崩分布進行評估，當邊坡具有潛在山崩地形特性，但並未在圈繪

範圍內且無邊坡破壞之跡象，將歸納為 *very low probability*；當潛在山崩體 50 年未有山崩發生且圓丘狀地形未有擴大之證據，則將其歸納為 *low probability*；當潛在山崩體內曾發生過一次山崩或圓丘狀地形曾有擴大之跡象，則將其歸納為 *medium probability*；若潛在山崩塊體內曾發生過一次以上之山崩且圓丘狀地形曾多次擴大者，則歸納為 *high probability*。運動區與堆積區則以實際與模擬土石流堆積次數及分布變化進行評估，*very low probability* 屬該範圍於數值模擬曾有土石流或堆積，但實際上未有土石流堆積之證據者；*Low probability* 係指該區位過去 50 年內曾有一次土石流堆積分部且與數值模擬堆積狀況一致者；*Medium probability* 主要針對區域 10 年內曾有一次以上土石流堆積發生且與數值模擬堆積次數一致者；*High probability* 則於區域內 5-10 年內反覆發生土石流堆積證據且與數值模擬堆積次數一致者。此外，由於台灣山崩深度超過 10m 以上發生機率較低，故本研究初步將崩壞深度超過 10m 以上且 50 年內未曾發生大規模崩壞之案例對應至 *low probability*。而模擬案例 5-10m 崩壞深度且近 10 年曾發生山崩事件者，則設定為 *medium probability*，小於 5m 崩壞深度且近 5 年山崩次數重複者則設定為 *high probability*，藉此繪製研究區潛在山崩影響範圍與危害分布圖（圖 8）。

- (d) 未來研究區危害度圖應用層面而言，*High hazard* 範圍內應屬於禁止開發與遊憩活動區域，其保全對象無論在房建物或外部均可能受到危害，且建物有嚴重破壞的可能，故避難路線與避難處所不建議設置於此範圍內。*Medium hazard* 範圍內應屬主要為整治與監測觀察區域，其保全對象於房建物外極可能受到嚴重危害，且建物有中低程度破壞的可能，其避難路線與避難處所需設置於此範圍內時，應考量結構物型式與搭配上治理工程。*Low hazard* 範圍內應屬需提升防災避難意識區域，保全對象於房建物外可能受到較低程度之危害，避難路線與避難處所需設置於此範圍內時，需考量結構物型式與內部避難配置。*Very low hazard* 範圍應屬防災避難警戒區域，於山崩災害警戒時保全對象則應避免於此區範圍內活動。

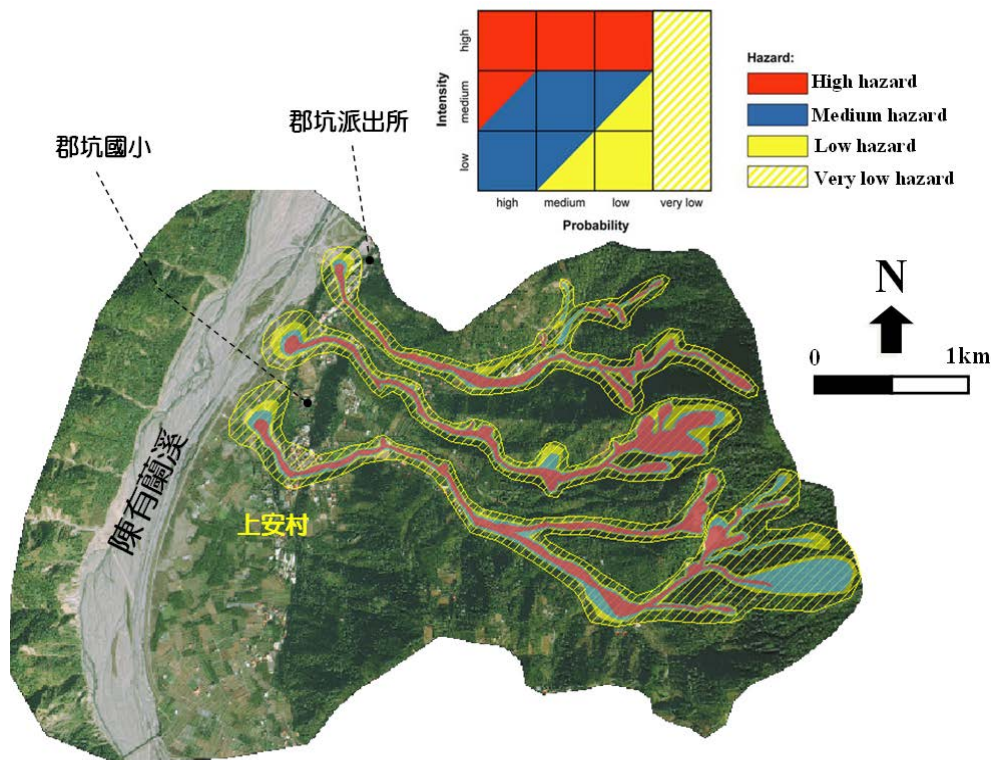


圖 8 研究區山崩影響範圍與危害度分布圖

Fig.8 Landslides hazard map of the study area

四、結論

本研究主要以上安村為研究區，進行地形分析、遙測判釋與數值模型建置，以模擬山崩運移與堆積影響範圍。另參考瑞士頒布之危害度分級規則，修改為研究區適用之分級方式，依此繪製山崩危害度圖，期能作為未來國土規劃與防災避難之參考。研究結果顯示，研究區上游1924即有hummocky surfaces特徵，且近後續仍有往源頭發展之趨勢。尤其近十年影像均可判釋出hummocky surfaces周緣之山崩發展，2005山崩多位於上安二廊溪源頭，2006-2008年山崩發展則轉移至三廊溪，尤以上安三廊溪山崩頻率最高，相較於其他支流侵蝕與山崩發展最為劇烈。而研究區計有13處潛在山崩塊體，面積約 $8.7 \times 103\text{m}^2$ - $1.5 \times 105\text{m}^2$ ，屬不穩定邊坡與山崩活動性較低之分類者達12處，其應為後續整個研究區監測與工程治理之重點。

影響範圍劃設與危害度分級結果顯示，研究區源頭崩滑體周緣約50m與上游溪床周緣約30m範圍，係為大規模落石或邊坡滑動災害潛勢範圍，均需注意崩落土石之直接衝擊，故多屬high hazard or medium hazard之範圍。研究區中、下游範圍內，由於崩落土石運移至河道內轉為土石流型態，故位於溪床周緣約30m與低階地位置均須注意土石流衝擊與淹埋。位於上安村聚落範圍內屬於土石流堆積區，容易受到較低速之土石流溢流或淹埋，尤其位於陳友蘭溪右岸低灘地之鄰近建物 (high hazard 或 medium hazard範圍內) 須特別注意土石流堆積之影響。

參考文獻

- 1 C. M. Lo, M. L. Lin, C. L. Tang, and J. C. Hu, 2011. A Kinematic Model of the Hsiaolin Landslide Calibrated to the Morphology of the Landslide Deposit, *Engineering Geology*, 123, 22-39.
- 2 C.M. Lo, H.H. Lee, C.C. Ke, 2015. Kinematic Model of a Translational Slide at the Cidu Section of Formosan Freeway, *Landslides*, DOI: 10.1007/s10346-015-0650-x.
- 3 Crozer, M. J., 1984. Field assessment of slope instability, In: *Slope Instability* / ed. by. Brunsen D., Prior D.B. (Editor), New York, John Wiley, Sons Ltd, 103-142.
- 4 Giani, G.P., Migliazza, M., and Segalini, A., 2004. Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37, 369-389.
- 5 Hungr, O., 2007. Dynamics of rapid landslides, *Progress in Landslide Science*, Chapter 4, 47-56.
- 6 KOC, O., 2008. Numerical analysis of rock mass falls using PFC3D. A comparison of two cases: Thurwieser rock avalanche and Frank slide. Master Thesis, Institute for Engineering Geology, Vienna University of Technology.
- 7 Lateltin, O., Haemmig, C., Raetzo, H., Bonnard, C., 2005. Landslide risk management in Switzerland, *Landslides*, 2, 313-320.
- 8 Itasca, 2002. Consulting Group Inc., PFC3D Particle Flow Code in 3 Dimensions. User's Guide. Minneapolis.
- 9 Jaboyedoff, M., Dudt, J. P., and Labiouse, V, 2005, An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 5, 621 - 632.
- 10 Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T. and Kawanami, A., 2000. The effect of Rockfall volume on runout distance. *Journal of Engineering Geology*, 58, 109-124.
- 11 Potyondy, D.O. and Cundall, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 1239-1364.
- 12 Soeters, R. and van Westen, C. J., 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: *Landslides, investigation and mitigation* / ed. by. A. K. Turner and R. L. (Editor), Schuster. Washington, D. C. National Academy Press, (Transportation Research Board, National Research Council, Special Report, 247), 129-177.