

玉峰溪集水區崩塌特性與崩塌體積之探討

陳樹群 翁愷翎 吳俊鉉*

摘要 本研究主要探討玉峰溪集水區崩塌地貌特性、誘發特性及崩塌量之估算，根據本研究以 2006 年正射影像圖所萃取出之 601 處崩塌地案例進行分析，總崩塌面積 164.3 公頃，崩塌率約 1.9%。玉峰溪集水區之崩塌具有幾個地貌特性：58.2%之崩塌地面積大於 0.5 ha，82.4%崩塌地屬於狹長型崩塌地（長寬比大於 1），78.4%崩塌地位於易崩之澳底層，89.4%之崩塌地坡度介於 30°至 50°，玉峰溪集水區崩塌分佈以下邊坡或山腰地區為主，崩塌前後之崩塌坡面型態由直坡轉為直坡及凹坡為主。而在道路開發、河川分佈及降雨等三項誘發因素探討上，分析結果顯示僅有 35.4%之崩塌地位於道路上；50.6%之崩塌地位於河川兩岸，且位於河川兩岸的崩塌案例，其平均崩塌面積較非未於河川兩岸之崩塌案例平均面積約大兩倍；78.5%崩塌案例位於颱風事件中累積降雨量超過 1000mm 區域。本研究認為玉峰溪集水區主要崩塌誘發因素以豪雨及洪水淘刷坡腳為主。在崩塌體積估算上，本研究推導崩塌面積 A_L (m^2) 及崩塌體積關係式 $V(m^3)$: $V=0.015A_L^{1.606}$ ，相關係數達 0.83，可供未來估算土砂產量之使用。
關鍵詞：崩塌深度、崩塌量估算、石門水庫集水區、玉峰溪。

The characteristics of landslides and landslide size in Yu-Fong river watershed

Su-Chin Chen Kai-Ling Weng Chun-Hung Wu*

ABSTRACT The study discusses the geomorphological and inducing characteristics of the landslides as well as the estimation of landslide volume in the Yu-Fong creek watershed. The 601 landslide cases with a total area of 164.3 ha and a landslide ratio of 1.9% were extracted from aerial photographs in 2006 and used for analysis in this study. The geomorphological characteristics of landslides in the Yu-Fong watershed are explained in the following. Landslides with an area of > 0.5ha with a long and narrow shape make up 58.2% and 82.4 % of all landslide cases, respectively. The landslides located in the Aoti formation, the landslide-prone formation, and in the hillslope with a slope of 30°-50°, make up 78.4% and 89.4 % of all landslide cases, respectively. The landslides mainly occurred in the middle or lower hillslope. The major morphology of the slope in the landslide cases were plain types prior to the landslide, and plain and concave types following the landslide. The inducing characteristics of landslides in the Yu-Fong watershed are explained as follows. About 35.4 % and 50.6% of landslides occurred along roads and rivers, respectively. The area of the landslides located along the rivers was about twice as large as those not along the rivers. About 78.5 % of landslides occurred in heavy rainfall areas, i.e. an accumulated rainfall of > 1,000 mm during the typhoon events.

This study suggests the dominant factors in Yu-Fong watershed are heavy rainfall and river-scouring. This study also derives the estimation formula for the landslide area $AL(m^2)$ and landslide volume $V(m^3)$: $V = 0.015 AL^{1.606}$ with an R^2 of 0.83. The formula can be used for estimating sediment yield in the watershed.

Key Words: landslide depth, landslide volume, Shihmen reservoir watershed, Yu-Fong watershed.

一、前言

1999年集集地震使台灣山區地層受到擾動，並造成多處山坡地崩塌與裸露。1999年集集地震後至今，台灣每隔數年便出現因颱風或豪雨引發嚴重土砂災害，根據內政部消防署（2009）所彙整台灣地區天然災害損失統計表，若以死亡或失蹤人數累計超過15人稱嚴重災害，則1999年集集地震後所發生嚴重災害包含2000年象神颱風、2001年桃芝颱風及納莉颱風、2004年敏督利颱風及艾利颱風、2005年海棠颱風、2008年卡枚基颱風及辛樂克颱風、2009莫拉克颱風等，一連串曾引發嚴重災害的颱風記錄也正記載台灣在集集地震後的嚴重災害易發性。

根據中央氣象局（2010）所發佈之集集地震地震報告及等震度圖，石門水庫集水區於集集地震之震度約為4至5級，雖受強震影響不若中台灣地區嚴重，但也導致石門水庫在近10年內發生嚴重土砂災害。土砂災害起源來自於崩塌及土石流等兩種，一般針對集水區之災害調查皆以崩塌及土石流調查為主。石門水庫集水區之崩塌調查歷史可回溯至1962年，石門水庫地方建設委員會（1962）曾針對石門水庫集水區進行土地利用調查，當時便曾調查崩塌地及土壤沖蝕地，但並未留下完整記錄。爾後為因應1964年葛樂禮颱風襲台，石門水庫管理局（1968）進行再次調查，該次調查便提出350處崩塌地，且記錄崩塌地地貌特性（如崩塌縱長、橫寬、面積、體積、坡度）及誘發因素（如溪流沖刷、逕流集中、底土滲流、地質、開路關係），為石門水庫集水區崩塌詳盡調查的第一筆記錄。於1970至1971年間，台灣省林務局農林航空測量隊（1972）與台灣省農林航空測量隊開啓用航空攝影技術調查石門水庫集水區崩塌地，該次調查共提出888處崩塌地，調查內容除包含原有之地貌因子及誘發原因外，也加入崩塌位置（如山嶺、山腹、山腳、溪邊）、崩塌程度（如較安定、不安定、極不安定）、崩塌種類（如新崩、舊崩擴大、舊崩縮小）、崩塌型態（如崩失或堆積）等調查。爾後1976年及

1998年都曾再次進行崩塌地詳盡調查，調查項目也以上述地貌因子、誘發原因、崩塌位置、崩塌程度、崩塌種類、崩塌型態等為主，三次調查各提出736處（台灣省林務局農林航空測量所，1976）及553處（台灣省北區水資源局，1998）。1999年集集地震後，崩塌地調查開始以衛星影像初步判釋及航空照片比對，並以ArcView圖層方式展現（工業技術研究院能源與資源研究所，2000），根據該版圖層資料顯示：石門水庫集水區在集集地震後共有784處崩塌地。以衛星影像進行判釋並以ArcView圖層匯出是2000年後的崩塌調查資料展現主要方式，除集集地震之崩塌地調查外，2001年桃芝颱風後（工業技術研究院能源與資源研究所，2002）及2004年艾利颱風後（工業技術研究院能源與資源研究所，2004）也都曾出版過全省崩塌地調查圖層，而根據兩版圖層顯示，石門水庫集水區在桃芝颱風後及艾利颱風後之崩塌地各為252處（總崩塌面積約2.0 km²）及920處（總崩塌面積約5.95 km²）。屢次土砂災害事件中，以2004年艾利颱風所引發之土砂災害對石門水庫造成最嚴重影響，該次颱風引發大量土砂入庫造成石門水庫原水濁度超過一萬NTU（neoh-elometric turbidity unit，簡寫NTU，標準濁度單位），使桃園地區面臨長達十七天無法正常供水的窘境。

而在石門水庫集水區崩塌特性分析上，康恬慎（2001）曾利用石門水庫集水區多期崩塌調查資料進行分析，並提出下述論點：以坡向分佈而言，石門水庫集水區崩塌集中在北、東北、東、東南及南等方位，其中又以東、東南及南方為最多，該文並認為崩塌案例位於此五坡向可能跟日照、季風、土地利用、颱風及地層走向有關。在不同時期崩塌地安定度比對上，該文提出三個標準：較安定（崩塌地或其下部堆積物已穩定，其岩層完整，節理較規則，且少有分崩離析之現象者）、不安定（尚未安定之崩塌地，其母岩節理發達，層面不穩定或土石流有欲崩之跡象，若承受外力之侵蝕，即有崩塌之可能者）及極不安定（崩塌地之母岩脆弱，節理甚發達，土層擾亂或崩離，岩層

極不穩定，顯然正在崩塌中，或有大量土石呈極易崩塌之狀態者)。由 1968 年至 1998 年間，除 1998 年極不安定之比率遠高過其他年分外，其餘年份都有出現不安定比例逐漸攀高現象；該研究認為 1998 年數據異於其他年份乃在於判釋定義與其他年份不一所導致。在崩塌活動性比較上，經該研究分析可得：除 1968 年外，爾後屢次崩塌判釋所得之新崩場地個數約佔總個數之 52.1% 至 76.7%。該研究亦曾以 1998 年判釋之崩場地分佈針對玉峰溪集水區進行部分研究，並認為玉峰溪集水區在 1998 年判釋之崩場地分佈中，具有最大崩塌面積及最多崩塌個數，崩塌率達 4.8%，本區崩塌誘因主要為地形及地質條件、逕流沖蝕與河岸侵蝕，且崩塌發生處原植生以針葉林地為主。

玉峰溪集水區位於石門水庫集水區內，也正位於桃園縣復興鄉與新竹縣尖石鄉交界處，吳俊銘 (2005) 曾提出：石門水庫集水區於新竹縣尖石鄉境內區域 (包含玉峰村及秀巒村)，在艾利颱風前後崩塌案例由 181 處增加至 624 處，除艾利颱風降雨集中在新竹縣尖石鄉區域外，另一原因則為在艾利颱風引發嚴重崩塌的澳底層地層也為新竹縣尖石鄉主要地層區域，此也正顯示玉峰村乃石門水庫集水區內崩塌易發區域；本研究以玉峰溪集水區為研究區域，主要探討該集水區崩塌與地貌因子及誘發因子之關係，並以 5m 網格數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 推估崩塌深度及崩塌量估算等，以完整說明玉峰溪集水區崩塌案例之特性。

二、研究區域概述

玉峰溪集水區位於石門水庫集水區，其行政區域跨越桃園縣復興鄉與新竹縣尖石鄉。根據本研究採用內政部所發行之 5m 網格 DEM 進行地形特徵萃取，玉峰溪集水區面積為 84.67 km²，集水區海拔約在 527 至 2283m 之間，平均高程約 1196 m，集水區內高程介於 800 至 1400m 之間總面積約佔集水區面積之 71.8%；平均坡度約為 35.2°，25° 至 50° 之間總面積約佔集水區面積之 77.7%。玉峰溪為玉峰溪集水區之主流，流向為由西南往東北，流長約 22 公里，下游於巴陵與三光溪匯流為大漢溪，整體水系分佈成格柵狀。

在地質分佈上 (圖 1)，玉峰溪集水區出露地層主要為乾溝層、大桶山層、澳底層三種地層，分別佔集水區總面積之 12.4%、24.4%、63.3%，三個地層之年代皆為漸新世至中新世，其中以乾溝層年代最老且澳底層年代最年輕。而在各岩層之岩性說明，乾溝層岩性為硬頁岩、板岩、千枚岩，大桶山層岩性為硬頁岩、砂岩、砂頁岩，澳底層岩性為砂岩、頁岩、煤質頁岩 (何春蓀, 1986)。在土壤分佈上，玉峰溪集水區內土壤主要以砂頁岩石質土及砂頁岩暗色崩積土為主，砂頁岩石質土約佔總面積之 90.8%，土壤特性為排水多屬良好或尚良好及土壤呈強至極強酸性；砂頁岩暗色崩積土僅佔總面積之 9.2%，土壤特性為土壤結構多鬆脆及土壤多呈中至強酸性反應 (謝兆申及王明果, 1989)。玉峰溪集水區內植生以闊葉林為主。

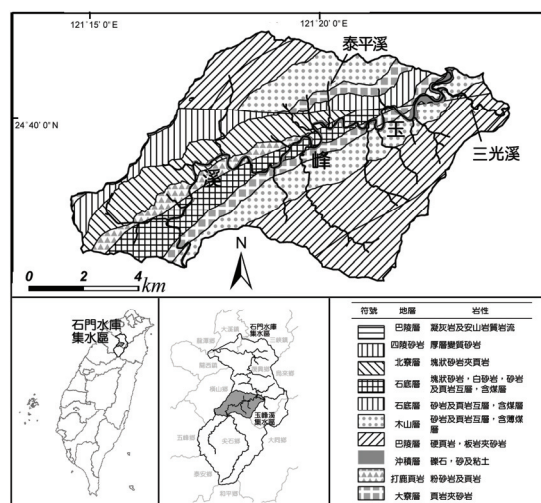


圖 1 玉峰溪集水區地質分佈圖

Fig.1 The geology distribution in Yu-Fong watershed

玉峰溪集水區屬於亞熱帶海洋季風氣候，全年氣溫約介於 11°C 至 24°C 間，以 1 月平均 11.5°C 為最低溫，7 月平均 23.2°C 為最高溫，年平均溫度約為 18°C；在雨量分佈上，本研究採用玉峰降雨站由 1960 至 2009 年之月降雨資料進行比較，1960 至 1969 年年平均降雨量約為 2089.2 mm，2000 至 2009 年年平均降雨量則為 2669.3 mm，年降雨量約較過往增加 27.7%；在月降雨量分佈上，本研究以 1960 至 2009 年雨量進行比較，5 月至 10 月皆為玉峰溪集水區主要降雨季節，此段時間總降雨量約佔年降雨量之 76.6% 至 77.9%；但若以 1960 至 1969 年與 2000 至 2009 年月雨量進行比較，雨量主要增加在 7 月至 10 月，尤其 2000 至 2009 年 8 月月平均雨量比 1960 至 1969 年 8 月月平均雨量增加 105.7%。

三、研究流程與成果

本研究主要分為三個方向進行探討，包含崩塌地地貌因子、崩塌誘發因子及崩塌深度等探討，本研究流程圖如圖 2 所示，除崩塌深度列於分析與討論說明外，崩塌地貌及崩塌誘發之探討如下分述。

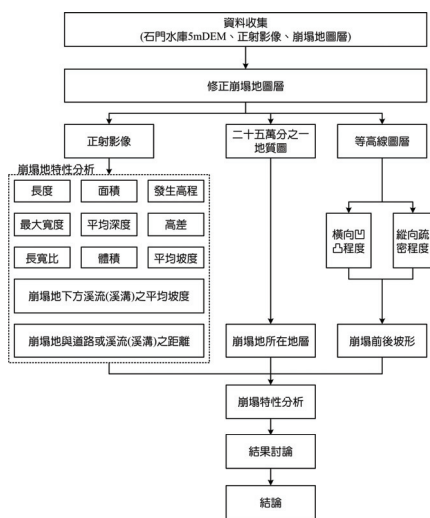


圖 2 本研究流程圖

Fig.2 The flow chart of this study

1. 崩塌地貌特性探討

為進行崩塌特性之分析，本研究乃收集玉峰溪集水區內 2006 年拍攝之航空照片製成之正射影像圖、精度 5 m × 5 m 之 DEM、二十五萬分之一地質圖及崩塌地圖層等資料，並萃取各崩塌地之面積、長度（由

崩塌開始處至崩塌下方堆積處前端之距離）、最大寬度（崩塌地由左翼至右翼之最大距離）、發生高程、平均坡度、所在地層及崩塌坡型等資料，進行比較及並瞭解玉峰溪集水區崩塌之地貌特性。

經判釋結果顯示：玉峰溪集水區內共有 601 處崩塌地，總崩塌面積為 164.5 公頃，集水區崩塌率約為 1.9%，崩塌分佈如圖 3 所示。崩塌地大多分佈於溪流兩側，並以砂崙仔、泰平、下文光、石磊一帶較多。崩塌地面積、長度及最大寬度之統計如表 1 所示。以崩塌地面積而言，601 處崩塌地之面積約介於 0.003 至 8.631 ha。崩塌面積大於 0.5 ha 之個數僅有 64 個，但其所佔總崩塌地面積卻高達 58.21%，顯示玉峰溪集水區雖然多為小面積崩塌，但面積大於 0.5 ha 之崩塌地仍是土砂災害的主要來源。以崩塌地長度而言，崩塌地長度分佈範圍為 5.7 m 至 723.1 m，且崩塌地長度小於 100 m 者佔總崩塌地個數之 74.7%。以崩塌地最大寬度而言，崩塌地最大寬度介於 4 m 至 216 m，平均崩塌地最大寬度為 36.2 m，且最大寬度小於 60 m 以下約佔總個數之 86.4%。以崩塌長寬比而言，長寬比介於 1 至 4 之間的崩塌個數佔總個數之 68.9%，且僅有 17.6% 之崩塌地長寬比小於 1，可知玉峰溪集水區之崩塌地形狀以狹長型（長寬比大於 1）為主。

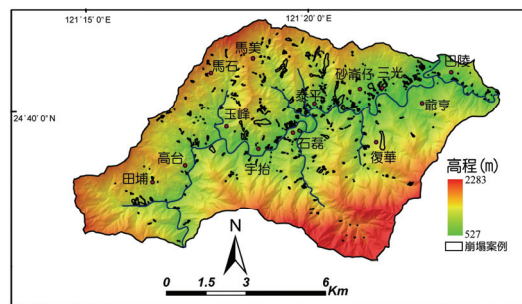


圖 3 玉峰溪集水區 2006 年崩塌地分佈圖

Fig.3 The landslide distribution in Yu-Fong watershed in 2006

在崩塌地所在地層探討上（如表 2），601 個崩塌地中約有 471 個位於澳底層上，約佔總個數之 78.4%，為崩塌個數最多之地層，澳底層之崩塌率也高達 2.5%，大桶山層及乾溝層也分別有約 16.5% 及 3.7% 之崩塌地個數分佈。若將崩塌率超過 1% 視為易崩地層，顯見玉峰溪集水區之澳底層及大桶山層都屬於易崩地層。

崩塌地坡度、發生高程及崩塌高差之統計如表 3 所示。在崩塌坡度探討上，玉峰溪集水區崩塌地坡度介於 20° 至 64° ，平均值為 40° ，且 30° 至 50° 之間之崩塌地總個數約佔 89.4%，顯見此區間為玉峰溪集水區崩塌地主要發生坡度。在崩塌地發生高程探討上，玉峰溪集水區崩塌地發生高程介於 559 m 至 1,965 m，且集水區內 91.4 % 崩塌地發生高程小於

1400m，比對前述集水區高程分佈資料可發現：玉峰溪集水區崩塌分佈並非位於山脊或上邊坡，而以下邊坡或山腰地區為主。在崩塌高程比較上，玉峰溪集水區崩塌高程差介於 3 m 至 428 m，平均值為 65.4 m，且崩塌高程差小於 120m 之崩塌地約佔總數之 85.9%，且崩塌高程差越大則崩塌地個數越少。

表 1 崩塌地面積、長度、最大寬度及長寬比統計表

Table 1 The statistical analysis of the landslide area, landslide length, maximum landslide width, and the length-width ratio in Yu-Fong watershed

| 面積(ha) | N*(%) | TA*(%) | 長度(m) | N*(%) | 最大寬度(m) | N* (%) | 長寬比 | N*(%) |
|--------------------|-------|--------|--------------------|-------|-------------------|--------|------------------|-------|
| $A < 0.1$ | 50.4 | 8.7 | $L < 50$ | 49.1 | $W < 20$ | 29.8 | $L/W < 1$ | 17.6 |
| $0.1 \leq A < 0.5$ | 38.9 | 33.1 | $50 \leq L < 100$ | 25.6 | $20 \leq W < 40$ | 39.3 | $1 \leq L/W < 2$ | 34.0 |
| $0.5 \leq A < 1$ | 6.0 | 14.7 | $100 \leq L < 200$ | 18.3 | $40 \leq W < 60$ | 17.3 | $2 \leq L/W < 3$ | 19.3 |
| $A \geq 1$ | 4.7 | 43.5 | $L \geq 200$ | 7.0 | $60 \leq W < 80$ | 7.0 | $3 \leq L/W < 4$ | 15.6 |
| | | | | | $80 \leq W < 100$ | 2.8 | $4 \leq L/W < 5$ | 5.3 |
| | | | | | $W \geq 100$ | 3.8 | $5 \leq L/W < 6$ | 2.8 |
| | | | | | | | $6 \leq L/W < 7$ | 2.3 |
| | | | | | | | $L/W \geq 7$ | 3.0 |

備註：N 代表該間距內之總個數佔全集水區崩塌地總個數之百分比，TA 代表該間距內總面積佔全集水區總面積之百分比。

表 2 崩塌地分佈之地層統計資料

Table 2 The geology statistical analysis of the landslide cases in Yu-Fong watershed

| 地層 | 個數 | 百分比(%) | 崩塌面積(ha) | 崩塌率*(%) |
|--------------|-----|--------|----------|---------|
| 澳底層 | 471 | 78.4 | 135.8 | 2.5 |
| 大桶山層 | 99 | 16.5 | 24.7 | 1.2 |
| 乾溝層 | 22 | 3.7 | 1.8 | 0.2 |
| 部分澳底層及部分大桶山層 | 9 | 1.5 | 2.0 | --- |

備註：崩塌率(%)=地層崩塌面積/地層面積

表 3 崩塌地坡度、高程及崩塌高差統計表

Table 3 The statistical analysis of the slope, elevation, and relief of the landslide cases in Yu-Fong watershed

| 坡度($^{\circ}$) | N*(%) | 發生高程(m) | N*(%) | 崩塌高差(m) | N*(%) |
|------------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| $20 \leq S < 30$ | 4.5 | 500 至 800 | 29.6 | 小於 40 | 43.9 |
| $30 \leq S < 40$ | 39.1 | 800 至 1100 | 33.8 | 40 至 80 | 27.8 |
| $40 \leq S < 50$ | 50.3 | 1100 至 1400 | 28.0 | 80 至 120 | 14.2 |
| $50 \leq S < 60$ | 5.5 | 1400 至 1700 | 7.3 | 120 至 160 | 6.5 |
| $60 \leq S < 70$ | 0.7 | 1700 至 2000 | 1.3 | 160 至 200 | 4.2 |
| | | | | 200 至 240 | 1.3 |
| | | | | 240 至 280 | 0.5 |
| | | | | 大於 280 | 1.7 |

備註：N 代表該間距內之總個數佔全集水區崩塌地總個數之百分比。










在崩塌坡型探討上，本研究引用 Ruhe (1975) 所提出之 9 種坡型 (如表 4) 進行分類；而玉峰溪集水區內之崩塌地崩塌前後坡型萃取上，崩塌前後分別採用 40 m 網格 DTM 及 5m 網格 DEM (陶林數值測量工程有限公司, 2008)，而繪製崩塌前後崩塌地之等高線分佈，並利用等高線分佈情況判別該崩塌地之坡面型態，如等高線分佈間距若由密至疏，則本研究判別為凹型坡；等高線分佈間距相近或由疏至密，則分別判別為直型坡及凸型坡，以此方式判斷縱向及橫向坡面型態，便可比對 Ruhe (1975) 所提出之九種坡型分類。表 4 為崩塌前後坡面型態演變統計表，在崩塌地坡面型態探討上，在 601 個崩塌坡面中，崩塌前之坡面橫向及縱向型態皆以直坡居多，分佔總崩塌個數之 72.7% 及 60.1%，而坡面橫向及縱向型態則分別以凸坡及凹坡為最少，分佔總崩塌個數之 4.0% 及 8.2%。崩塌後坡面橫向型態以直坡 (佔 36.4%) 及凹坡 (佔 35.8%) 居多，而以凸坡為最少 (佔 2.3%)；

坡面縱向型態則以直坡居多 (佔 50.3%)，而以凸坡 (4.8%) 為最少。若以 Ruhe (1975) 所提出之分類進行探討，則崩塌前以平行直坡及複合坡居多，崩塌後則仍以平行直坡及複合坡居多，但平行直坡所佔比例降低約 23.8%，此降低而呈現在複合坡、內聚直坡及內聚凹坡等三種坡面型態增加上。

在崩塌坡面型態於崩塌前後演變上，根據本研究之分析，坡面橫向及縱向型態呈凸坡者，較少發生崩塌；呈直坡者，則較易發生崩塌；發生崩塌後之坡面橫向及縱向型態易呈現為直坡，不易為凸坡。崩塌後之坡面型態以複合坡、平行直坡、內聚直坡及內聚凹坡等四種為主，本研究對此之解釋為：崩塌後可能因崩塌深度分佈不一，因此崩塌後形成複合坡為最；崩塌後形成平行直坡者，即橫向型態及縱向型態皆呈現直坡情況，可能為順向坡崩塌導致；崩塌後形成內聚直坡及內聚凹坡兩者，則屬於常見之弧形崩塌。

表 4 崩塌前後坡面型態演變

Table 4 The slope morphology before and after landsliding

| 坡面型態 | 判斷方式 | 崩前 N*(%) | 崩後 N*(%) | 坡面型態 | 判斷方式 | 崩前 N*(%) | 崩後 N*(%) |
|---|------|----------|----------|---|-------|----------|----------|
|  | 橫向直坡 | 47.4 | 23.6 |  | 橫向直坡 | 11.0 | 2.2 |
| | 縱向直坡 | | | | 縱向凸坡 | | |
|  | 橫向直坡 | 4.7 | 6.0 |  | 橫向凸坡 | 2.3 | 1.5 |
| | 縱向凹坡 | | | | 縱向直坡 | | |
|  | 橫向凸坡 | 1.3 | 0.5 |  | 橫向凸坡 | 0.2 | 0.2 |
| | 縱向凸坡 | | | | 縱向凹坡 | | |
|  | 橫向凹坡 | 6.5 | 15.0 |  | 橫向凹坡 | 1.0 | 0.8 |
| | 縱向直坡 | | | | 縱向凸坡 | | |
|  | 橫向凹坡 | 2.0 | 14.0 | 複合坡 | 橫向複合坡 | 23.6 | 36.3 |
| | 縱向凹坡 | | | | 縱向複合坡 | | |

備註：N 代表該間距內之總個數佔全集水區崩塌地總個數之百分比，複合坡則為無法單一歸類至凹、直或凸形之坡面。

2. 崩塌誘發特性探討

為瞭解玉峰溪集水區崩塌受其他因子誘發特性，本研究將道路開發、河川分佈及降雨量等因子納入探討，分別估算各崩塌與鄰近道路及河川分佈之距離，並以 2004 至 2005 年降雨分佈進行套疊，分析哪一個誘發因子對玉峰溪集水區之崩塌產生具有較大影響。

在道路開發對崩塌形成分析上，表 5 為研究區域內所有道路（包含縣道、鄉道及農路等）及鄰近崩塌地個數統計表，以桃 113 縣道每單位公里發生之崩塌個數最多，其次則為台 7 線及竹 60-1，且除桃 116 及竹 60 縣道之每單位公里發生之崩塌個數較少外，其餘省道及縣道之每單位公里發生之崩塌個數都大約在農路或便道等之兩倍以上。本研究分析其原因可歸納為兩點：一則省道或縣道之道路開發不論在寬度或規模都較農路或便道來得大，因此對邊坡之擾動也較大，若在道路開發後未能施作完善之坡面穩定設施，相對引發邊坡滑動的機會必較農路或便道為大；二則如前所述，玉峰溪集水區崩塌地約 78.4% 崩塌地位於易崩之澳底層，地層易崩加上道路開發，更增加形成崩塌之機會。表 6 則為崩塌分佈與道路之距離，本研究以崩塌距離道路進行分類，與道路距離為 0m 代表該崩塌緊鄰道路上邊坡、下邊坡、兩道路間或跨越道路，其次則以距離 200m 為分界進行分類。由表中分析可知：以緊鄰道路的四項分類而言，除跨越道路之崩塌類型所引發之平均崩塌面積較大外，崩塌發生於道路上或下邊坡和崩塌位於兩道路間等項目，所引發崩塌數佔總崩塌比例約在 13.0% 以下，平均崩塌面積

介於 0.10 至 0.17 公頃，可見因道路開發造成之緊鄰道路崩塌並無太大差異。本研究認為玉峰溪集水區道路旁之崩塌皆以小面積崩塌居多，顯見道路開發易引發小型崩塌，但在跨越道路之崩塌類型，可能已與道路開發切坡腳之效應無關，而是深層滑動導致，因此崩塌面積也較大。距離道路 200 m 內與 200 m 外之崩塌平均崩塌面積則分別為 0.16 ha 及 0.25 ha，但此部分仍需分析其他因素方可判斷誘發原因。

在崩塌分佈與河川之距離探討上，表 7 為崩塌與河川分佈統計表。玉峰溪集水區 601 個崩塌地中有 445 個崩塌地位於溪流周遭 200 m 以內之地區，其中更有 304 個崩塌地之下緣緊鄰溪流，此類溪流包含玉峰溪、太平溪、三光溪、抬耀溪、石磊溪、百歡溪及其餘野溪等。由表 7 可發現玉峰溪集水區內受河川淘刷造成之崩塌佔總崩塌個數之 50.6%，且平均崩塌面積也為其他非位於河川旁的大兩倍，此數據明確表現：玉峰溪崩塌受河川淘刷坡腳形成崩塌之現象為多。而本研究將崩塌地下緣緊鄰溪流之 304 個崩塌進行分析（如表 8），此類崩塌類型皆以河川淘刷（側向侵蝕）引發崩塌居多，總崩塌面積約佔全集水區崩塌面積之 66.7%。在所有溪流統計中，平均每單位流長之崩塌個數較多的為太平溪、三光溪及玉峰溪等，尤其太平溪溪流長度約僅 1.8 km，卻有 24 個崩塌地分佈，顯見太平溪集水區土砂環境不穩定，未來仍有可能爆發大量土砂；再者其餘野溪也有 140 個崩塌案例分佈，顯見玉峰溪集水區除前述幾條較大溪流外，野溪鄰近亦開始有大量土砂產生，未來也有可能爆發大量土砂。

表 5 玉峰溪集水區道路鄰近崩塌地個數統計表

Table 5 The statistical result of the landslide numbers near the roads in Yu-Fong watershed

| 道路名稱 | 崩塌個數 | 個數/道路長 (個/km) | 道路名稱 | 崩塌個數 | 個數/道路長 (個/km) |
|--------|------|------------------|--------|------|------------------|
| 台 7 線 | 15 | 3.5 | 石磊道路 | 23 | 1.5 |
| 桃 113 | 37 | 5.4 | 復華道路 | 10 | 1.7 |
| 竹 60 | 12 | 1.1 | 武道能敢道路 | 5 | 1.7 |
| 竹 60-1 | 44 | 3.1 | 桃 116 | 2 | 0.6 |
| 馬美道路 | 30 | 2.2 | 無名道路 | 35 | |

表 6 崩塌與道路分佈統計表

Table 6 The statistical result of the distance from landslide to roads in Yu-Fong watershed

| 崩塌與道路距離 (m) | 個數 N*(%) | 平均崩塌 面積(ha) |
|----------------|-------------|----------------|
| 距離 0 | 道路上邊坡 | 13.0 |
| | 道路下邊坡 | 11.3 |
| | 兩道路間 | 1.3 |
| | 跨越道路 | 9.8 |
| 0 至 200 | 25.6 | 0.16 |
| 大於 200 | 38.9 | 0.25 |

備註：N 代表該間距內之總個數佔全集水區崩塌地總個數之百分比。

表 7 崩塌與河川分佈統計表

Table 7 The statistical result of the distance from landslide to rivers in Yu-Fong watershed

| 崩塌與河川距離 (m) | 個數 N*(%) | 平均崩塌面積 (ha) |
|----------------|-------------|----------------|
| 距離 0 | 50.6 | 0.36 |
| 0 至 200 | 23.6 | 0.18 |
| 大於 200 | 25.8 | 0.19 |

備註：N 代表該間距內之總個數佔全集水區崩塌地總個數之百分比。

表 8 各河川鄰近崩塌個數統計表

Table 8 The statistical result of the landslide number near each river in Yu-Fong watershed

| 鄰近溪流 | 個數 | 個數/流長 (個/km) |
|------|-----|--------------|
| 玉峰溪 | 94 | 4.1 |
| 泰平溪 | 24 | 13.7 |
| 三光溪 | 16 | 4.2 |
| 抬耀溪 | 15 | 3.6 |
| 石磊溪 | 8 | 1.5 |
| 百歡溪 | 7 | 2.1 |
| 其餘野溪 | 140 | 1.8 |

在降雨量分佈與崩塌地分佈之比對上，根據吳俊鉉（2005）統計資料顯示：石門水庫集水區於 2004 年艾利颱風前僅有 252 處崩塌地，而艾利颱風後卻引發 908 處崩塌地，崩塌案例增加約 2.6 倍，因此可認為石門水庫集水區內崩塌地主要由艾利颱風及其後之颱風所引發。而若以玉峰溪集水區進行分析，艾利颱風

風後玉峰溪集水區共有 329 處崩塌，總崩塌面積約為 150.8 公頃，玉峰溪集水區崩塌率約為 1.8%；本研究根據 2006 年正射影像圖所判釋之崩塌圖層，估算玉峰溪於 2006 年後共有 601 處崩塌，總崩塌面積約為 164.5 公頃，玉峰溪集水區崩塌率約為 1.9%。在艾利颱風後與 2006 年後之崩塌分佈比較上，艾利颱風後之崩塌面積約有 46.5% 重複出現在 2006 年後之崩塌面積，代表舊崩塌未復原或續崩；艾利颱風後之崩塌面積約 53.5% 則未出現在 2006 年後之崩塌面積，代表崩塌復原或邊坡達到穩定；2006 年後崩塌面積則約 57.4% 屬於新崩塌，此類新崩塌包含由舊崩塌擴張或崩塌發生在過往未曾發生位置上。本研究將玉峰溪集水區於艾利颱風後與 2006 年後之崩塌分佈繪製如圖 4(a) 所示。

本研究篩選由 2004 年 8 月艾利颱風後至 2006 年年底颱風資料，發現 2004 年 8 月 23 至 26 日中度颱風艾利及 2005 年 8 月 3 至 6 日中度颱風馬莎乃為降雨量豐沛的兩場颱風，本研究於圖 4(b) 繪製艾利颱風之降雨分佈與颱風後之崩塌分佈，於圖 4(c) 則為 2005 年馬莎颱風之降雨分佈與 2006 年正射影像數化之崩塌分佈。本研究共使用十處雨量站（包含太閣南、梅花、鞍部、玉峰、三光、巴陵、高義、嘎拉賀、鎮西堡及梵梵等）於兩場颱風之累積降雨值，並以 Kriging 方式模擬玉峰溪集水區於兩場颱風事件中之降雨分佈值。於 2004 年艾利颱風降雨事件中，玉峰溪集水區平均降雨量約 1250.0 mm，以降雨分佈及崩塌地分佈而言，全集水區崩塌案例約有 78.5% 位於累積降雨量超過 1200.0 mm 以上區域，累積降雨量在 1200mm 以下區域崩塌率最大僅為 1.0%，累積降雨量在 1200mm 以上區域之崩塌率卻高達 1.98% 以上，且 83.9% 崩塌面積位於累積降雨量 1200mm 以上。而在 2005 年馬莎颱風降雨事件中，玉峰溪集水區平均降雨量約 1074.0 mm，以降雨分佈及崩塌地分佈而言，全集水區崩塌案例約有 84.0% 位於累積降雨量超過 1000 mm 以上區域，累積降雨量大於 1000.0 mm 之崩塌率約為 1.7 至 2.7%，但累積降雨量在 1000mm 以下區域崩塌率最大僅為 1.1%；在累積降雨量超過 1000mm 以上區域之崩塌率則大於 1.72% 以上；全研究區則有 84.0% 崩塌地位於累積降雨量 1000mm 以上，且去除與艾利颱風後崩塌判釋重複處，則在 2006 年後新增的崩塌地也有 77.3% 位於累積降雨量 1000mm 以上；以上所述可知玉峰溪集水區崩塌分佈在降雨集中區為主。

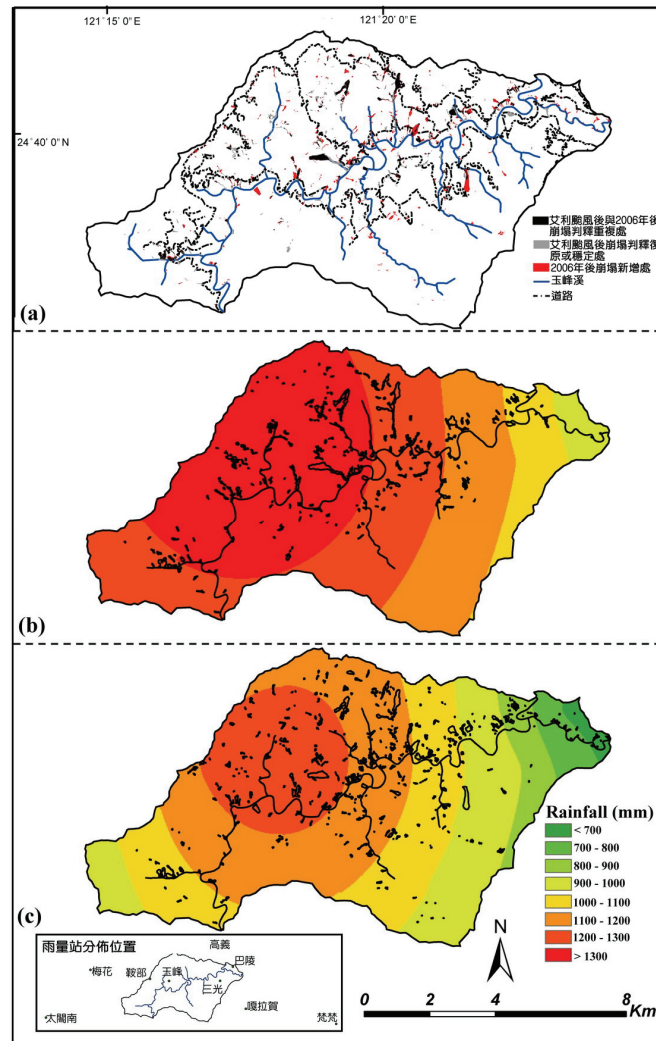


圖 4 玉峰溪集水區於 2004 年艾利颱風降雨分佈 (圖 b)、2005 年馬莎颱風 (圖 c) 及兩場颱風後之崩塌分佈 (圖 a)

Fig. 4 The rainfall distribution during Typhoon Aere in 2004 (Fig. b), Typhoon Masa in 2005 (Fig. c) and the landslide inventory after the two typhoon events (Fig. a)

以上述三個崩塌誘發因子進行比較，則降雨量分佈與崩塌案例分佈之關係最為明確；而利用平均流長或道路長之崩塌案例個數值進行比較，在道路崩塌分佈上，道路旁崩塌地個數佔全集水區崩塌案例之 35.4%，平均道路長之崩塌案例個數比值超過 3.0 個/km 僅有台 7 線、桃 113 及竹 60-1，此三條道路旁之總崩塌案例個數約為 96 個 (佔全集水區崩塌案例之 16.0%)，緊鄰道路的平均崩塌面積 (不包含跨越道路的崩塌案例，因前述認為非因道路開發所導致) 約為 0.10 至 0.17 公頃；但在河川與崩塌分佈上，河川旁崩塌地個數佔全集水區崩塌案例之 50.6%，平均流

長之崩塌案例個比值超過 3.0 個/km 則有泰平溪、玉峰溪、三光溪及抬耀溪等河川，此四條河川旁之總崩塌案例個數約為 149 個 (佔全集水區崩塌案例之 24.8%)，緊鄰河川之平均崩塌面積約為 0.36 公頃。且考量位於河川旁之崩塌大部分崩塌原因以豪雨引發河川水位暴漲，河水淘刷坡腳造成邊坡不穩定而引發崩塌居多，因此可推論：玉峰溪集水區之崩塌案例分佈以豪雨及豪雨引發之洪水造成坡腳淘刷之崩塌為主，雖也有位於道路兩旁之崩塌案例，但以總個數及崩塌率而言，仍以豪雨及洪水淘刷坡腳兩因素為主要崩塌原因。

四、分析與討論

本研究以 5 m 網格 DEM 進行崩塌深度量測，量測方法為針對每一處崩塌地沿地表等高線而繪製數條橫剖面，每一條橫剖面之間距為 10m，並利用 ArcView 程式 (Surface tool) 找出每一條剖面線高程最高點與最低點，並以該橫剖面高程最高點與最低點之差則為該橫剖面之崩塌深度，將每一橫剖面之崩塌深度平均則得本研究定義之平均崩塌深度。而崩塌量之估算則為崩塌面積與平均崩塌深度之乘積。

以崩塌深度與崩塌體積之分析而言，本研究雖使用 601 處崩塌案例，但部分崩塌案例卻有崩塌深度數值不合理的情況，如崩塌面積大但崩塌深度卻小或等於 0.1 m，此類案例起因可能來自於 DEM 之誤差或應歸屬於土壤沖蝕情況，或如崩塌面積非常小但崩塌深度卻超過 20 m 等案例，此類案例起因可能來自於 DEM 之誤差。經刪除此類不合理之 41 處崩塌案例後，本研究僅就其他 560 個崩塌地進行分析。此 560 個崩塌案例之崩塌深度介於 0.1 m 至 19.6 m，平均崩塌深度約為 2.1 m，崩塌深度分佈圖如圖 5 所示。

平均深度小於 3 m 之案例總數約佔全集水區 68.0%，平均深度大於 10 m 以上者卻僅佔全區之 2.68%，顯示玉峰溪集水區中大多為平均深度小於 3 m 之崩塌，平均深度 10 m 以上崩塌地較少。本研究並將陳樹群等 (2010) 蒐集石門水庫集水區 (1/5000 圖幅圖號為 96222014、96222024 及 96222034，約為寶裡苦溪往南至部分玉峰溪集水區) 及大甲溪集水區 (約由松鶴二溪至天輪壩) 之崩塌深度案例納入比較。由比較結果顯示：崩塌面積漸增會促使崩塌深度漸增的趨勢在三個案例中都可發現；以三條最佳曲線分佈而言，若以三條最佳曲線之交點 (約為崩塌面積介於 9000 – 11000 m²) 而言，崩塌面積小於 11000 m² 之崩塌案例，大甲溪集水區之崩塌案例易引發較大崩塌深度，但崩塌面積大於 11000 m² 之崩塌案例，則為石門水庫集水區之崩塌案例易引發較大崩塌深度。但因石門水庫集水區之崩塌案例僅約 2% 崩塌案例之面積大於 11000 m²，較不具代表性，因此以一般崩塌案例分佈而言，以大甲溪集水區之崩塌案例及石門水庫集水區所引發之崩塌案例而言，同樣崩塌面積情況下，大甲溪之崩塌案例易有較深之崩塌深度。

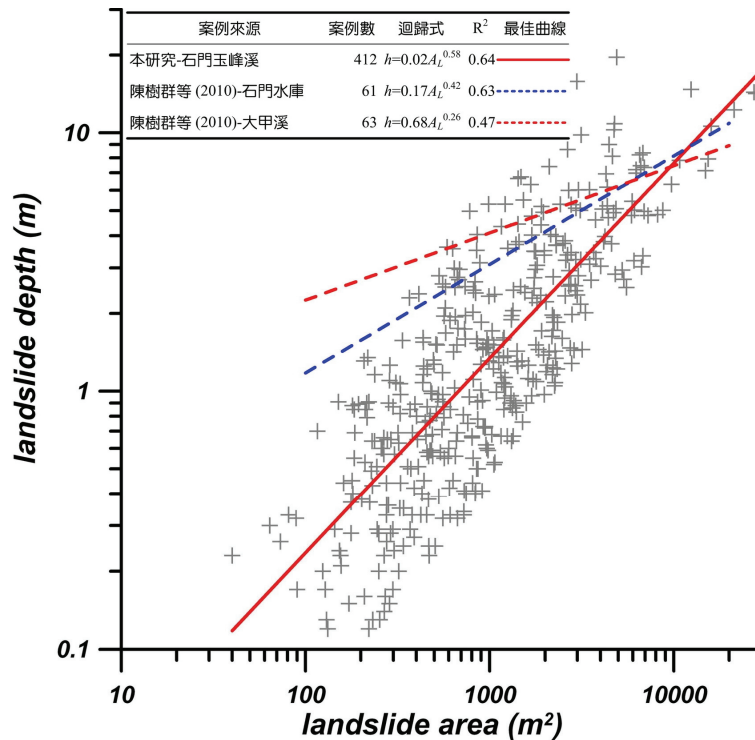


圖 5 玉峰溪集水區之崩塌面積對深度關係分佈圖

Fig.5 The relationship of landslide area and landslide depth in Yu-Fong watershed

表 9 則為依據崩塌地不同坡度而引發之崩塌深度彙整表, 由比較結果顯示: 不論在石門水庫集水區或大甲溪集水區, 崩塌深度最深處發生在坡度 30° 至 50° 間為主, 且不論在坡度小於 30° 或大於 50° 之邊坡反而崩塌深度會降低, 此現象亦同陳樹群等 (2010) 提出論述: 坡度緩之邊坡覆土深度雖較深但下滑力卻減少, 坡度陡峭之邊坡覆土深度雖較淺但下滑力卻增加, 且因原地形條件陡峭而使該邊坡可崩塌土層亦不多, 因此坡度介於 30° 至 50° 間位於兩區間之間, 具有一定覆土深度及下滑力, 因此在統計數據分析上顯現最大崩塌深度。

在崩塌體積估算上, 本研究以崩塌面積與平均崩塌深度之乘積為崩塌體積估算值, 於本研究採用的 560 個崩塌案例中, 崩塌體積估算值介於 9 至 9.4×10⁶

m³; 崩塌體積小於 10,000 m³ 之崩塌個數約佔總個數之 80%。本研究以崩塌面積與崩塌體積推算最佳曲線, 如圖 6 所示。本研究採用石門水庫玉峰溪集水區之崩塌案例, 推導崩塌面積 A_L(m²)與崩塌量 V(m³)推算式如(1)式所示; 本研究一併將相關文獻之崩塌量估算公式納入探討 (如圖 6), 可發現除 Korup (2005) 之推算公式適用崩塌面積範圍較大且與其他估算式不接近, 其餘六條估算式都有近似趨勢, 尤其在崩塌面積介於 10² 至 10⁵ m² 之間, 本研究以各估算式進行推算, 當崩塌面積為 10² m² 時, 估算崩塌體積約介於 23 至 304 m³ 之間, 當崩塌面積為 10⁵ m² 時, 估算崩塌體積約介於 3.17×10⁵ 至 1.58×10⁶ m³ 之間。

$$V=0.015A_L^{1.606}, R^2=0.83 \tag{1}$$

表 9 玉峰溪集水區各坡度級距所對應之深度表

Table 9 The relationship of slope and landslide depth in Yu-Fong watershed.

| 坡 度(°) | <20 | 20~30 | 30~40 | 40~50 | >50 |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|------|
| 石門水庫集水區崩塌深度(m) (陳樹群等, 2010) | 1.41 | 3.13 | 3.51 | 2.17 | 1.82 |
| 大甲溪集水區崩塌深度(m) (陳樹群等, 2010) | 3.04 | 4.19 | 5.33 | 3.49 | 1.33 |
| 玉峰溪集水區崩塌深度(m) (本研究) | 1.01 | 1.95 | 2.04 | 2.37 | 2.05 |
| 平 均 | 1.82 | 3.09 | 3.63 | 2.68 | 1.73 |

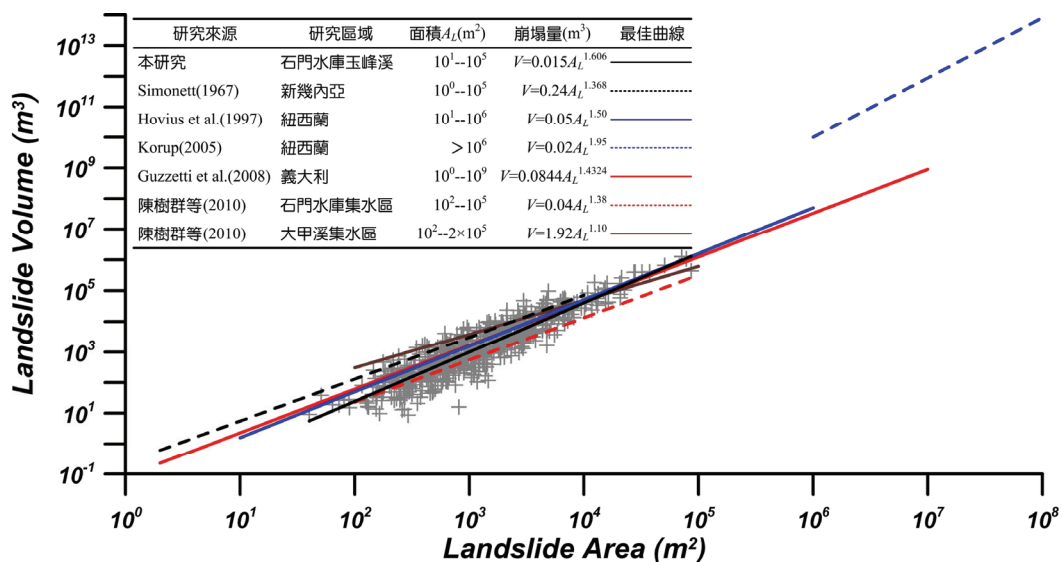


圖 6 本研究與相關文獻之崩塌面積與崩塌體積關係圖

Fig.6 The relationship of landslide area and landslide volume from the study and other references

同樣以崩塌面積進行迴歸，崩塌深度與崩塌面積所得之最佳曲線相關係數通常偏低，往往得適度刪減部分不太合理的崩塌案例方可得到相關係數超過 0.60 的最佳曲線。以本研究所分析之崩塌深度與崩塌面積關係式而言，601 個崩塌案例僅採用 412 個案例進行迴歸，方能得出相關係數為 0.64 的最佳曲線；同樣的情形也出現在陳樹群等（2010）對大甲溪及石門水庫庫區的迴歸關係式推求上。但以崩塌面積與崩塌深度之乘積視為崩塌體積，並分析崩塌面積與崩塌體積關係式時，卻並未出現最佳曲線相關係數偏低的情況。此問題之原因需回推崩塌深度之形成，邊坡發生崩塌後，所形成之最大或平均崩塌深度可能跟地層、坡度、崩塌誘發原因（降雨入滲或坡腳淘刷）及崩塌型態都相關，現階段採用單一因子推求崩塌深度關係式，會有相關係數過低或所得之關係式具地域性等問題，因此不易求得良好迴歸關係式。欲利用地貌因子或誘發因子推求崩塌深度，建議需增加評估因子（如以崩塌面積跟崩塌地層為推估崩塌深度之評估因子）、或以崩塌誘發原因區別崩塌型態（如因降雨入滲造成之崩塌分為一類，因河水暴漲造成坡腳淘刷之崩塌分為一類），可能可獲得相關係數較好之崩塌深度推估關係式。其次則為本研究推導崩塌面積與崩塌體積推估關係式時，可獲得良好相關係數之推估式，因此建議在土砂產量推估上，可直接採用崩塌面積與崩塌體積之推估方式。

五、結 論

本研究由 2006 年正射影像圖萃取玉峰溪集水區內 601 處崩塌地進行分析，總崩塌面積 164.3 公頃，崩塌率約 1.9%。經分析結果發現：玉峰溪集水區之崩塌地具有下述特性：58.2%之崩塌地面積大於 0.5 ha，74.7%之崩塌長度小於 100 m，86.4%之崩塌最大寬度小於 60m，82.4%崩塌地屬於狹長型崩塌地（長寬比大於 1），78.4%崩塌地位於易崩之澳底層（岩性為砂岩、頁岩及煤質頁岩），89.4%之崩塌地坡度介於 30°至 50°，玉峰溪集水區崩塌分佈以下邊坡或山腰地區為主，崩塌前後之崩塌坡面型態由直坡轉為直坡及凹坡為主。而在崩塌誘發因素探討上，經分析僅有 35.4%之崩塌地緊鄰道路；50.6%之崩塌地緊鄰溪流兩岸，平均崩塌面積也為其他非位於河川旁的兩倍；且以 2004 年艾利颱風及 2005 年馬莎颱風為例，78.5%崩塌案例位於颱風事件中累積降雨量超過 1000mm 區域。本研究認為玉峰溪集水區崩塌受豪雨

及洪水淘刷坡腳之影響最顯著。而在崩塌深度分析上，68.0%之崩塌案例崩塌深度小於 3 m，且崩塌案例在坡度介於 30°至 50°區間具有較大崩塌深度。本研究並推導崩塌面積與崩塌體積推估式，玉峰溪集水區之推估式與相關文獻所推估之關係式近似，相關係數亦高，除可為未來推估土砂產量應用外，本研究亦認為土砂產量推估上，採用崩塌面積與崩塌體積之推估方式會比推估崩塌深度獲得較良好之成果。

致 謝

本研究使用之玉峰溪集水區內 5 m DEM 乃由陶林數值測量工程有限公司所提供，謹此致謝。

參考文獻

- 工業技術研究院能源與資源研究所（2000），「九二一震災系列調查(一):崩塌地調查治理規劃」，行政院農委會水土保持局，南投，台灣。
- 工業技術研究院能源與資源研究所（2002），「崩塌地調查與後續演變趨勢觀測」，行政院農委會水土保持局，南投，台灣。
- 工業技術研究院能源與資源研究所（2004），「以 SPOT 影像進行崩塌地調查與變動分析」，行政院農業委員會水土保持局，南投，台灣。
- 中央氣象局（2010），「地震測報-地震活動彙整」，中央氣象局，台北，網址：<http://www.cwb.gov.tw>。
- 內政部消防署（2009），「台灣地區天然災害損失統計」，內政部消防署全球資訊網，台北，台灣，網址：<http://www.nfa.gov.tw>。
- 台灣省林務局農林航空測量隊（1972），「石門水庫集水區崩坍地航測調查報告」，台灣省石門水庫管理局，桃園，台灣。
- 台灣省林務局農林航空測量所（1976），「石門水庫集水區崩坍地航測調查報告」，台灣省石門水庫管理局，桃園，台灣。
- 台灣省北區水資源局（1998），「石門水庫集水區崩塌地及土地利用航測調查計畫整體報告書」，台灣省北區水資源局，桃園，台灣。
- 石門水庫地方建設委員會（1962），「石門水庫集水區土地利用調查報告」，石門水庫地方建設委員會，桃園，台灣。
- 石門水庫管理局（1968），「石門水庫集水區治理調查規劃報告」，石門水庫管理局，桃園，台灣。

- 何春蓀(1986),「台灣地質概論-台灣地質圖說明書」,經濟部中央地質調查所,台北,台灣。
- 吳俊鉉(2005),「降雨引發邊坡崩塌潛勢評估模式之建構」,國立中興大學水土保持學系博士論文,台中,台灣。
- 康恬慎(2001),「石門水庫集水區不同時期崩塌地調查成果分析」,國立臺灣大學森林學研究所碩士論文,台北,台灣。
- 陳樹群、吳俊鉉、王雁平(2010),「地震或降雨誘發崩塌之崩塌特性探討」,中華水土保持學報 41(2)。(已接受)
- 陶林數值測量工程有限公司(2008),「石門水庫集水區經營管理保育對策及建立集水區地理資訊系統資料庫建置」,經濟部水利署北區水資源局,桃園,台灣。
- 謝兆申、王明果(1989),「台灣土壤」,國立中興大學土壤調查試驗中心,台中,台灣。
- Guzzetti, F., F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli, P. Reichenbach, M. Rossi (2008), "Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, Central Italy," *Geomorphology*, 96: 105-122.
- Hovius, N., C.P. Stark, P.A. Allen (1997), "Sediment flux from a mountain belt derived by landslides mapping," *Geology*, 25(3): 231-234.
- Korup, O. (2005), "Distribution of landslides in southwest New Zealand," *Landslides*, 2: 43-51.
- Ruhe, R.V., (1975), "Geomorphology: Geomorphic Processes and Surficial Geology," Boston: Houghton Mifflin, pp.246.
- Simonett, D.S. (1967), "Landslide distribution and earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains," New Guinea. In: Jennings, J.N., Mabbutt, J.A. (Eds.), *Landform Studies from Australia and New Guinea*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 66-84.

2010年6月14日 收稿

2010年11月9日 修正

2010年10月15日 接受

(本文開放討論至2011年6月30日)