

以地形特徵值分析高屏河流域崩塌地特性

蔡喬文^{[1]*} 陳樹群^[1]

摘 要 崩塌現象通常跟邊坡原始地形條件及氣候降雨或地震事件相關，然而崩塌地的原始地形條件非常複雜以致於難以了解崩塌地特性。因此本研究提出一套簡化原始地形條件的崩塌地地形特徵值 (TCVL)，並提出崩塌特性分布圖(TCFL)以取得崩塌地力學平衡及規模特性，由崩塌特性統計圖(TCSL)得到崩塌地統計資訊。本研究以 TCFL 和 TCSL 探討高屏溪 2008 年與 2009 年崩塌案例，結果顯示，碎屑岩區平均坡度比其他分區低了 10%，大型崩塌($c/d > 0.8$)數量高於其他分區約 25%，且兩期崩塌地總數量皆以碎屑岩區為最多，因此可推論大多數土砂來源以碎屑岩區為主。本研究建議由於 TCVL、TCFL 和 TCSL 除了對該崩塌災害提供快速且全面性的通盤瞭解外，並提供防災策略擬定與工程治理之有用且關鍵的資訊。

關鍵詞：崩塌地特徵值、崩塌地、崩塌地特徵。

Terrain Characteristic Value Analyze Landslide Characteristics in Chishan Watershed

Chiao-Wen Tsai^{[1]*} Su-Chin Chen^[2]

ABSTRACT The occurrences of landslide are always related to the geomorphological settings, rainfall or earthquake events, and the factors of geomorphological settings are particularly complex for understand occurrence of landslide. Therefore, in this study terrain characteristic value of landslides (TCVL) is used by facilitate the factors of geomorphological settings; terrain characteristic figure of Landslide (TCFL) is used by obtain the mechanical balance and the scale characteristic of landslides; and terrain characteristic Statistics chart of Landslide (TCSL) is used by obtain the statistics of landslides. In this study TCFL and TCSL were used to investigate landslide cases of 2008 and 2009 in Kaoping river watershed. The results show that in clastic rock zone average slope of landslides is lower than other zone of 10% and quantity of deep Landslides ($c/d > 0.8$) is higher than other zone of 25%, most sediment produces from clastic rock zone was inferred. As a result, TCVL, TCFL, and TCSL were recommending be used comprehensive understanding of widespread landslide disaster and useful and key information for the following strategy of disaster prevention and project management.

Key Words : Terrain characteristic value, landslide, landslide characteristics.

一、前 言

崩塌現象通常與邊坡原生地貌條件及氣候降雨或地震條件相關。崩塌特徵資訊除了對該崩塌災害提供快速且全面性的通盤瞭解外，也是後續防災策略擬定之有用且關鍵的資訊。最常用崩塌地的分類系統是由 Varne (1978) 所提出，主要根據崩塌地運動種類與材料(如岩石和土體)可將崩塌地分類為墜

[1] 國立中興大學水土保持學系

Dept. of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : d099042001@mail.nchu.edu.tw

落、傾倒、滑落、利差和流體。此外，根據崩塌地長期啟動機制 (Agliardi, 2001) 或以崩塌地的長度、寬度、深度或體積等分為淺層和深層崩塌兩種。

上述方法這需要專業人員至現場判讀才能獲得，因此無法快速獲得全面性資訊。為解決這問題，因此許多學者開始採用現代航拍或 SPOT 衛星影像快速解讀崩塌地的資訊。在現代航拍或 SPOT 衛星影像及測量科技發展下，已可在崩塌事件發生後，快速地根據航拍圖跟 DEM 而萃取出崩塌分佈位置圖層，並獲得崩塌相關尺寸特性值。從崩塌地的物理尺寸與特殊特徵值可以得到重要崩塌地資訊，例如：使用山頂至崩塌地頂部、崩塌地頂部至趾部、與崩塌地趾部至最近河道等三個參數，得知崩塌地誘發因子為上或下邊坡(Meunier et al., 2008)或豪雨事件洪水(Wu et al., 2011)所造成。通過使用崩塌地數量與崩塌地面積分布可分析世界上不同崩塌事件的自組織臨界性 (SOC) 分析(Van Den Eeckaut et al., 2007; Wu et al., 2011)。但這些研究者都只是解讀崩塌地的物理特徵，並未進一步對崩塌地特徵資訊進行研究。

崩塌地的物理特徵與崩塌地之誘發因子有關，例如重力導致深層崩塌或洪水導致流動型崩塌案例，往往具有長運行距離，而河槽淘刷崩塌往往在下邊坡造成大寬度。大部分地震誘發崩塌的位置趨近於山脊或上邊坡處，而大部分降雨誘發崩塌的位置鄰近河道或下邊坡處(Meunier et al., 2008; Wu et al., 2011)。

防災策略需要更多崩塌地特徵資訊，例如多少及何處發生深層崩塌案例，因為深層崩塌往往導致如堰塞湖等更嚴重災害。同時災害防災策略問題是如何應用現今科技進行更快速且有效獲得崩塌地特徵資訊。本研究以崩塌地物理尺寸包含：崩塌地規模(c/d)及崩塌地平均坡度兩項，並依據崩塌地發生區位之地質條件，提出一套獲取崩塌地特徵資訊之方法。且本研究以 2008 年卡玫基颱風、辛樂克颱風與蕃密颱風後，以及 2009 年莫拉克颱風(Wu et al., 2011)等兩場水文事件所引發高屏流域上游崩塌災害案例來分析本研究獲得崩塌地特徵資訊方法的可行性。並希望能提供有效且快速獲得崩塌地特徵資訊，做為提供決策者制定防災策略以及工程治理或環境保育之參考。

二、研究方法

1. 崩塌地特徵值(Terrain characteristic value of landslide, TCVL)

Meunier et al.(2008)針對崩塌地在邊坡上的位置提出量化分析方式是以崩塌地上緣距離山脊的長度(a)與全邊坡長度(d)之比率(a/d)及崩塌地下緣距離坡腳的長度(b)與全邊坡長度(d)之比率(b/d)，並以崩塌地面積為圖上圓形大小，繪製崩塌地地形位置影響圖(圖 1)，並認為：地震誘發崩塌案例集中在邊坡靠山脊處，在崩塌地地形位置影響圖上會偏左上半部(a/d \leq 0.5 及 b/d \geq 0.5)；且降雨引發崩塌案例則會明顯發現受河岸淘刷所引發之崩塌明顯增多，且在崩塌地地形位置影響圖上會偏右下半部(b/d \leq 0.5 及 a/d \geq 0.5)。此分析方法是第一個針對崩塌案例在邊坡上的分佈位置特性所提出的量化分析方式，爾後多篇研究(Wu et al., 2011; 陳樹群等, 2012a, b, c & 2013)陸續採用此方式針對崩塌案例提出分佈位置特性及誘發原因之推論。

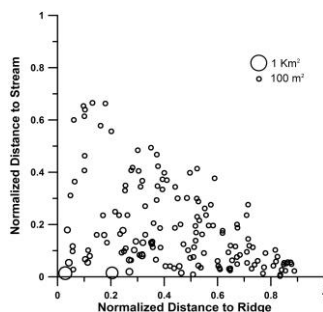


圖 1 崩塌地地形位置影響圖(陳樹群等, 2012c)

Fig.1 Landslide Topography influence diagrams

Meunier et al.(2008)所提出之方法是以邊坡長度 d 及崩塌地上下邊坡距 a 及 b ，計算 a/d 及 b/d 值，作為地形特徵值判別方式，但邊坡邊坡距(a 、 b 、 c 、 d)等資訊萃取，在 GIS 程式上難度較高，且對 GIS 程式技術需求較高，因此本研究提出修正方法，如圖 2 所示，以三角形三邊定理而言， $a/d = H_A/H_D$ ， $b/d = H_B/H_D$ ，但高程距(H_A 、 H_B 、 H_C 、 H_D)資訊萃取方式較容易，GIS 程式之操作更簡單，更可節省分析時間，且本研究所提出修正方法可應用於過往崩塌案例，配合崩塌地發生前，即為 2002 年以前 20 公尺寬數值高程模式(20m DEM)資料，即可快速且簡易分析崩塌地地形特徵值，本研究即以此方法分析高屏河流域 2008 年及 2009 年兩場水文事件所引發上游崩塌災害案例。

2. 崩塌特性分布圖(Terrain characteristic figure of Landslide, TCFL)

崩塌地之地形特性主要包含崩塌地發生區位及崩塌地物理尺寸兩種，前者由 Meunier et al.(2008)所提出崩塌地地形位置影響圖即可清楚分析崩塌地之發生區位特性，而後者本研究提出以崩塌地平均坡度作為縱軸，由於邊坡穩定與邊坡坡度為正相關，因此採用崩塌地發生前邊坡平均坡度，做為比較各崩塌地力學平衡之因子。再者以崩塌地規模做為橫軸，並由崩塌地面積做為圖上圓形大小，如圖 3 所示，但由於崩塌地規模係指崩塌地之總長度，其分部可由 $10^1\text{m}\sim 10^5\text{m}$ ，分布零散且無法有效了解其崩塌地規模特性，而由圖 2 可清楚了解 c 值可代表為崩塌地長度規模，因此 c/d 為『崩塌地長度』除以『邊坡總長度』，可視為無因次化後崩塌地規模特徵值，當 $c/d = 1.0$ 時代表全坡面崩塌情形，因此本研究提出橫軸崩塌地規模係採用 c/d 值。而配合特定分析區域進行繪製崩塌地規模特徵圖，即可清楚了解特定分析區域之崩塌規模特徵，本研究即以崩塌地規模特徵圖分析高屏河流域不同岩石種類之崩塌規模特徵。

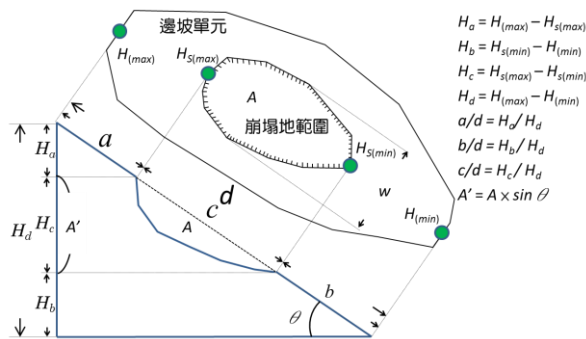


圖 2 崩塌地地形特徵值示意圖

Fig.2 Conceptual diagram of terrain characteristic value of landslide

3. 崩塌特性統計圖(Terrain characteristic Statistics chart of Landslide, TCSSL)

本研究將圖 3 將縱軸依坡度 10° 區分為 9 個區間，橫軸則依 c/d 值 0.1 區分為 10 個區間，形成總計 90 個分析區域後，如圖 4 所示，圖中每格分析區域中上面數字代表『崩塌數量百分比』，指該年度發生在該分析區域內崩塌地之數量除以該年度總崩塌地數量之百分比(單位為：%)，下面數字代表『崩塌面積百分比』，指該年度發生在該分析區域內崩塌地面積和除以該年度總崩塌地總面積(單位為：%)，而由下面『崩塌面積百分比』除以上面『崩塌數量百分比』，可得到該分析區內每一處崩塌地所造成『平均崩壞面積率』，當『平均崩壞面積率』越高，代表該區崩塌地所提供地表裸露率越高，由於地表裸露往往造成大量土砂量流失，因此『平均崩壞面積率』亦與『土砂輸出權重比』呈現正相關，因此當『平均崩壞面積率』越大，代表該分析區域內崩塌地造成土砂輸出量越大趨勢。

本研究計算高屏河流域不同岩石種類下，各分析區域之數量與面積分布情形，以了解高屏河流域不同岩石種類之崩塌地特性，再者將面積比例除上數量比例，以了解不同岩石之崩塌到在不同區域所供應之『土砂輸出權重比』，再者將權重比區分為 >10 (紅)、 $10\sim 5$ (橙)、 $5\sim 2$ (淡紅)、 $2\sim 0.8$ (淡綠)、 $0.8\sim 0.4$ (黃綠)及 <0.4 (綠)等六個顏色區間，其中，土砂輸出權重比越大，顯示該區域之崩塌地所造成崩塌面積比

例較大，亦即代表該區域崩塌地所可能提供土砂量越大，如圖 4 中，提供土砂量最大者主要位於坡度 30~40 崩塌規模 0.4~0.5，以及坡度 40~50 崩塌規模 0.9~1.0 等兩個區域。再者，由最上及右邊數量與面積條狀圖，可清楚分析不同岩石種類之崩塌地分布特性，本研究以此作為分析重點。

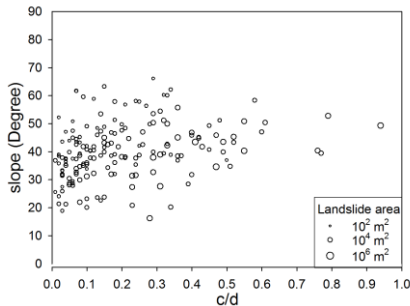


圖 3 崩塌地規模特徵圖示意圖

Fig.3 Conceptual diagram of terrain characteristic figure of Landslide

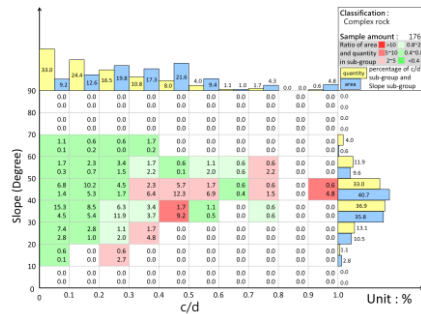


圖 4 崩塌地特性統計圖示意圖

Fig.3 Conceptual diagram of Terrain characteristic Statistics chart of Landslide

三、研究試區

本研究採用高屏河流域 2008 年卡玫基颱風、鳳凰颱風、辛樂克颱風與蕃密颱風後，以及 2009 年莫拉克颱風(Wu et al., 2011)等兩年度颱風事件所引發上游崩塌災害案例進行分析。高屏河流域位於台灣南部玉山南坡，主流全長約 171 公里，流域總面積約 332,010 公頃，為全台第二長之河川，高屏溪集水區跨越高雄市及屏東縣，區域內包含旗山溪、荖濃溪、濁口溪以及隘寮溪四條溪流，其中以荖濃溪與旗山溪為高屏溪上游之兩大主要支流；高屏河流域崩塌災害主要發生在旗山溪上游和荖濃溪上游至與隘寮溪匯流口等區域，進入平原之後坡面土砂災害便相對減少，所以本研究採用高屏河流域上游旗山溪和荖濃溪作為研究區域。

由流域地質圖顯示高屏溪集水區主要地層為潮州層、畢祿山層、長枝坑層與廬山層等，如表 1 所示，其中地質年代為新生代為主，而中央山脈西側以古生代晚期至中生代為主，年代分布包含：古生代晚期至中生代、始新世、漸新世、中新世、上新世、更新世、全新世等 7 種年代，總計區分 11 個時期，如圖 5 所示。再者，依據都城秋穗(1975 年)岩石種類分類，包括：火成岩(火山岩、淺成岩、深成岩)、沉積岩(碎屑岩、火山碎屑岩、生物岩、化學岩)、變質岩(接觸變質岩、區域變質岩、動力變質岩)等，總計 3 種第一層分類及 10 種第二層分類，本研究將流域地質圖中高屏河流域內 27 種地層種類，依據其岩石分布特性，歸納為火成岩之火山岩、沉積岩之碎屑岩、變質岩之接觸變質岩、變質岩之區域變質岩、以及區域變質岩與碎屑岩混成區域，最後為沉積層及接地堆積層所組成之非岩石區域等 6 種情形，如圖 6 所示。

四、結果與討論

本研究依據圖 6 岩石種類套疊 2008 年與 2009 年崩塌地層圖後，得到表 2，表中高屏河流域內主崩塌區域位於火成岩(Igneous rocks)之火山岩 (Volcanic rock)、沉積岩(Sedimentary rocks)之碎屑岩 (Clastic rock)、變質岩(Metamorphic rocks)之區域變質岩 (Regional metamorphic rock)、區域變質岩與碎屑岩混成區等四種岩石分類，其中區域變質岩與碎屑岩混成區主要指崩塌地位於廬山層範圍內。表中『總面積』代表岩石分區之總面積，『個數』代表該年度發生在該岩石分區之崩塌地數量，『個數百分比』代表該年度發生在該岩石分區之崩塌地數量除以該年度崩塌地總數，『面積』代表該年度發生在該岩石分區之崩塌地面積，單位採公頃(ha)計算，『面積百分比』代表該年度發生在該岩石分區之崩塌地面積除以該年度崩塌地總面積，『崩壞比』代表該年度發生在該岩石分區之崩塌地面積除以該岩石分區總面積。

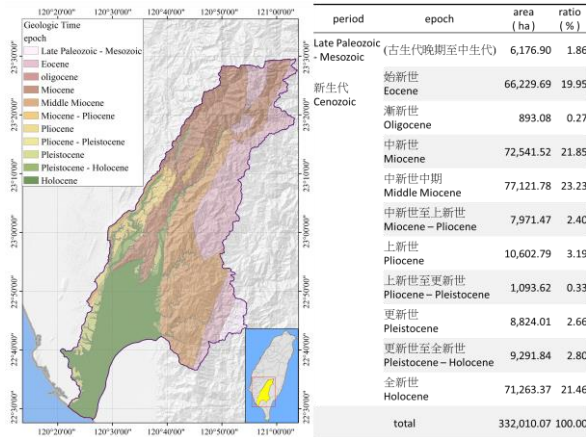


圖 5 高屏溪流域地質年代分布圖

Fig.5 Geological age distribution of Kaoping River watershed

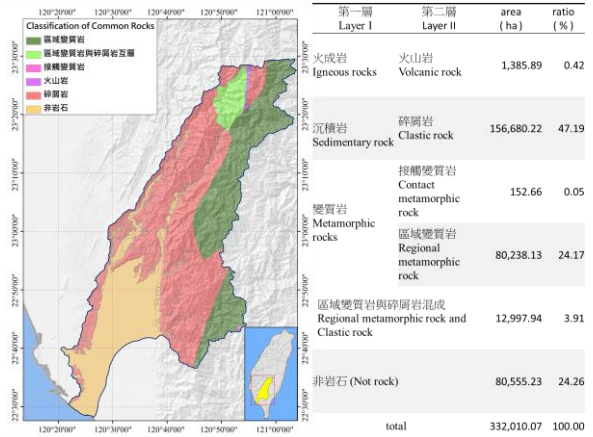


圖 6 高屏溪流域岩石種類分布圖

Fig.5 Rock types distribution of Kaoping River watershed

1. 2008 年崩塌特性分布圖

本研究分析 2008 年颱風事件所造成 2,938 處崩塌地之崩塌地特徵值包括： a/d 、 b/d 、 c/d 等，並以 GIS 分析 2,938 處崩塌地之平均坡度($^\circ$)資訊，再者以 c/d 為橫軸與平均坡度($^\circ$)為縱軸，繪製圖 7。由圖 7 可知崩塌特性分布圖可知，2008 年颱風事件所造成崩塌地大多發生在碎屑岩與區域變質岩兩區，坡度介 $25^\circ \sim 55^\circ$ 間，崩塌地規模(c/d)中，碎屑岩介 $0.0 \sim 0.7$ 間，區域變質岩則介 $0.0 \sim 0.5$ 間，顯示在 2008 年颱風事件所造成崩塌地中，在碎屑岩區域內所產生崩塌規模明顯大於區域變質岩區。

另由 $c/d > 0.6$ 之區域而言，碎屑岩區崩塌地數量明顯大於區域變質岩區，且當 $c/d > 0.8$ 後，區域變質岩區數量僅剩 6 處，碎屑岩區仍有 37 處，顯示大規模崩塌地主要位於碎屑岩區。再者由於 c/d 僅代表崩塌地佔全坡面之比例，無法顯示坡面原始大小，因此配合崩塌地面積可知，當 c/d 大且崩塌面積大，顯示該處應屬大規模崩塌，而當 c/d 大且崩塌面積仍較小，顯示該處應屬小型邊坡之全坡面崩塌情形。

由圖 7 各資料點圓圈大小，即為崩塌地面積大小而言，碎屑岩區之崩塌面積隨 c/d 增大，面積隨之增大，而區域變質岩區面積差異較小，不隨 c/d 增大而明顯增加，顯示碎屑岩區可能有較大規模崩塌地發生，而區域變質岩區雖有部分案例產生全坡面崩塌情形，但可能是發生在小規模邊坡所造成。

2. 崩塌特性統計圖

本研究將 2008 年 2,938 處崩塌地與 2009 年 11,705 處崩塌地，依坡度 10° 區分為 9 個區間，橫軸則依 c/d 值 0.1 區分為 10 個區間，形成總計 90 個分析區域後，計算每個分析區域崩塌地數量及面積百分比，如圖 8 及圖 9 所示，本研究由圖中上面『崩塌數量百分比』，與下面『崩塌面積百分比』，以及由下面『崩塌數量百分比』除以上面『崩塌面積百分比』，得到『土砂輸出權重比』，而由『土砂輸出權重比』 >10 (紅)、 $10 \sim 5$ (橙)、 $5 \sim 2$ (淡紅)、 $2 \sim 0.8$ (淡綠)、 $0.8 \sim 0.4$ (黃綠)及 <0.4 (綠)等六個區間進行區分，並以 2008 年四場颱風事件與 2009 年莫拉克颱風事件進行分析，並以千木良雅宏 (1998) 之災害地質觀點進行探討。結果顯示：火山岩部分(圖 8(a)及圖 9(a))總計 2008 年 25 處及 2009 年 67 處崩塌地， c/d 在 2008 年主要分布為 $0.0 \sim 0.4$ ，2009 年主要分布為 $0.0 \sim 0.5$ ，2008 年崩塌地坡度介於 $30^\circ \sim 60^\circ$ ，2009 年崩塌地坡度介於 $20^\circ \sim 50^\circ$ ，平均坡度由 44.8° 變為 39.0° ，顯示莫拉克颱風的極端降雨造成火山岩區崩塌數量增加，且造成崩塌條件降低，且規模有略為變大趨勢，而比較特殊點在於 2008 年時，坡度 $60^\circ \sim 70^\circ$ 及 $50^\circ \sim 60^\circ$ 發生 2 處 $c/d > 0.5$ 之崩塌地，2009 年莫拉克颱風卻無 $c/d > 0.5$ 之崩塌案例，造成此種結果之原因，除了火山岩之案例數較少而未發現外，另可顯示高屏溪流域上游火山岩之岩體受風化程度較小，較少發生大規模崩塌情形。

表 1 高屏河流域地質種類統計表

Table 1 Geological Statistics table of Kaoping River watershed

		岩石種類		地質年代	縮寫	面積(ha)	百分比(%)		
第一層	第二層	第三層	岩石組成						
火成岩 (Igneous rocks)	火山岩(Volcanic rock)	十八重溪層	綠色變質火成岩	始新世	gr	1,362.86	0.41		
		火成岩	安山岩質或玄武岩質火成岩	中新世	tu	23.03	0.01		
	淺成岩(Hypabyssal rock)		—						
	深成岩(Plutonic rock)			—					
沉積岩 (Sedimentary rocks)	碎屑岩 (Clastic rock)	三民頁岩	頁岩間夾薄層粉砂岩	中新世	Si	1,879.22	0.57		
		六龜層	礫岩、砂岩、砂質頁岩和泥岩	更新世	Le	1,629.03	0.49		
		南勢崙砂岩	厚層砂岩、泥質砂岩間夾有厚層的薄砂、頁岩互層，及厚層炭質頁岩夾砂岩層	上新世	Nl	392.57	0.12		
		南莊層	砂岩及頁岩互層	中新世	Nc	2,936.12	0.88		
		古亭坑層	青灰色泥岩偶夾薄砂岩層	上新世—更新世	Gt	1,093.62	0.33		
		大社層	厚層泥岩間夾砂岩與礫岩	更新世	Ts	1,450.78	0.44		
		嶺口礫岩	厚層礫岩與泥岩互層，偶夾席狀或透鏡狀砂岩	更新世	Lo	5,744.20	1.73		
		潮州層	硬頁岩或板岩間夾透鏡狀砂岩體	中新世中期	Co	77,135.15	23.23		
		烏山層	厚層砂岩、泥質砂岩間夾有厚層的薄砂、頁岩互層，及厚層炭質頁岩夾砂岩層	中新世—上新世	Wa	434.55	0.13		
		玉山主山層	石英岩質砂岩、硬頁岩及其互層	始新世—漸新世	Ya	2,404.54	0.72		
		糖恩山砂岩	砂岩夾頁岩	中新世	Tn	10,987.19	3.31		
		紅花子層	厚層細砂岩或粉砂岩、細砂岩及粉砂岩厚互層	中新世	Hh	2,331.30	0.70		
		蓋仔寮頁岩	厚層砂岩、泥質砂岩間夾有厚層的薄砂、頁岩互層，及厚層炭質頁岩夾砂岩層	中新世—上新世	Kz	495.46	0.15		
		達見砂岩	厚層變質砂岩間夾板岩	始新世	Tc	2,774.70	0.84		
		長枝坑層	砂岩及頁岩互層	中新世	Cc	34,781.58	10.48		
		隘寮腳層	粉砂岩和頁岩薄互層	上新世	Al	6,181.67	1.86		
		鹽水坑頁岩	塊狀頁岩	上新世	Ys	4,028.55	1.21		
			火山碎屑岩(Pyroclastic rock)			—			
			生物岩(Biolite)			—			
	化學岩(Chemical sedimentary rock)			—					
變質岩 (Metamorphic rocks)	接觸變質岩(Contact metamorphic rock)	大南澳片岩(大理岩)	大理岩	古生代晚期—中生代	PM2	152.66	0.05		
		佳陽層	厚層板岩偶夾變質砂岩	漸新世	Cy	893.08	0.27		
	區域變質岩 (Regional metamorphic rock)	大南澳片岩(黑色片岩、綠色片岩、燧石)	黑色片岩、綠色片岩、燧石	古生代晚期—中生代	PM3	6,024.23	1.81		
		大禹嶺層	板岩、千枚岩及變質砂岩	中新世	Ti	13,633.23	4.11		
		畢祿山層	板岩為主間夾變質砂岩，夾有變質火成岩透鏡體	始新世	Ep	59,687.59	17.98		
		動力變質岩 (Dynamic metamorphic rock)			—				
其他	區域變質岩)與碎屑岩混成區	廬山層	板岩及變質砂岩與板岩薄互層	中新世	Ls	12,997.94	3.91		
	非岩石	沖積層	礫石、砂及粘土	全新世	a	71,263.36	21.46		
		階地堆積層	泥、砂及礫石	更新世—全新世	t	9,291.83	2.80		
合計(total)						332,010.07	100.00		

高屏溪流域上游之碎屑岩(圖 8(b)及圖 9(b))包括：砂岩、頁岩及泥岩為主，其中泥岩主要位於高屏溪流域西側丘陵區，為台灣著名西南部泥岩惡地區之東麓。區內總計 2008 年 1,396 處及 2009 年 6,781 處崩塌地， c/d 在兩年度全部皆有案例分布，兩年度崩塌地坡度明顯集中於 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，平均坡度分別為 37.7° 及 34.5° ，顯示莫拉克颱風的極端降雨造成碎屑岩區崩塌數量增加，且造成崩塌之坡度條件降低。

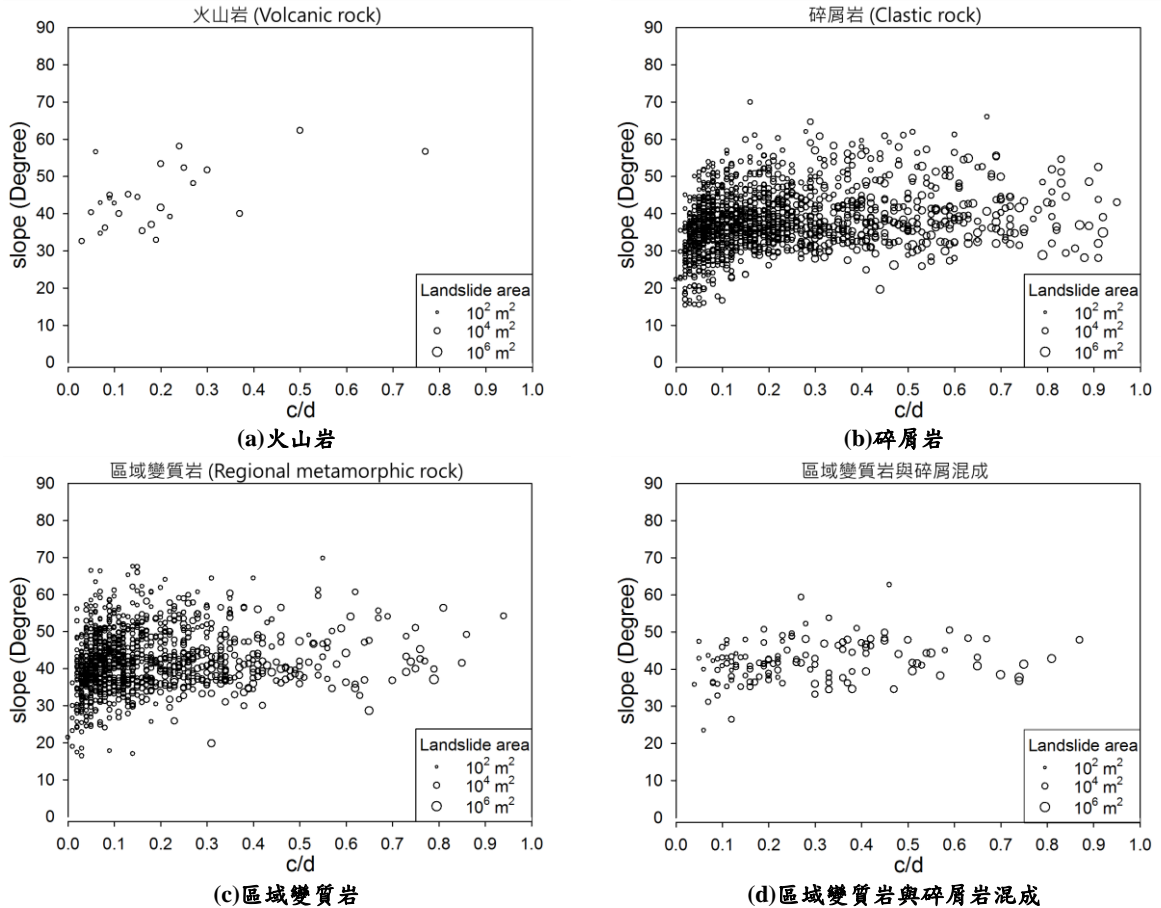


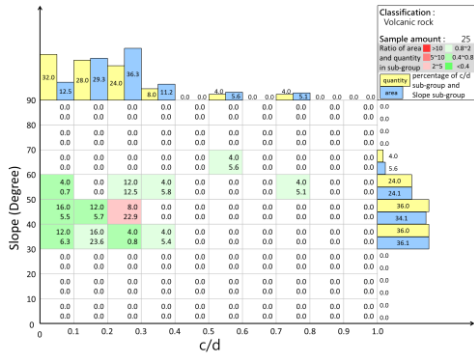
圖 7 高屏溪流域蓄密颱風崩塌特性分布圖

Fig.7 Terrain characteristic figure of Landslide in Kaoping River watershed during

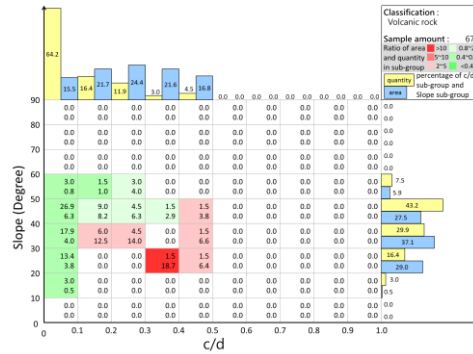
表 2 2008 年及 2009 年崩塌地案例之地質種類統計表

Table 1 Geological Statistics table of Landslide cases in 2008 and 2009

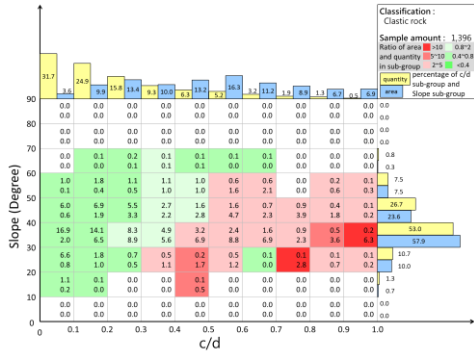
第一層	第二層	總面積 (ha)	2008 年水文事件造成崩塌地					2009 年水文事件造成崩塌地				
			個數	個數百分比(%)	面積(ha)	面積百分比(%)	崩壞比(%)	個數	個數百分比(%)	面積(ha)	面積百分比(%)	崩壞比(%)
火成岩	火山岩	1,385.89	38	1.29	19.98	0.66	1.44	89	0.76	59.44	0.33	4.29
沉積岩	碎屑岩	156,680.22	1,494	50.85	1,971.17	64.66	1.26	6,844	58.47	11,757.21	65.98	7.50
變質岩	接觸變質岩	152.66	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	區域變質岩	80,238.13	1,205	41.01	751.09	24.64	0.94	4,017	34.32	5,291.68	29.69	6.59
其他	區域變質岩與碎屑岩混成區	12,997.94	157	5.34	291.01	9.55	2.24	666	5.69	641.92	3.60	4.94
	非岩石	80,555.23	44	1.51	15.14	0.49	0.02	89	0.76	69.95	0.40	0.09
合計(total)		332,010.07	2,938	100.00	3,048.39	100.00	0.92	11,705	100.00	17,820.20	100.00	5.37



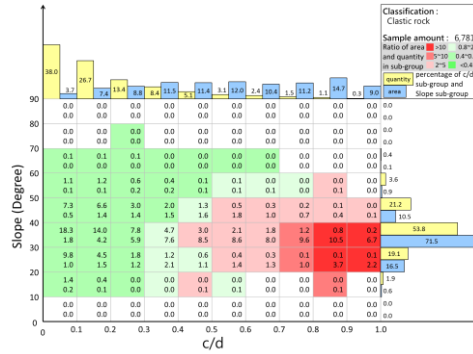
(a)火山岩



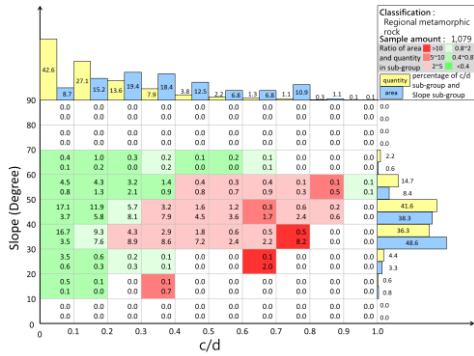
(a)火山岩



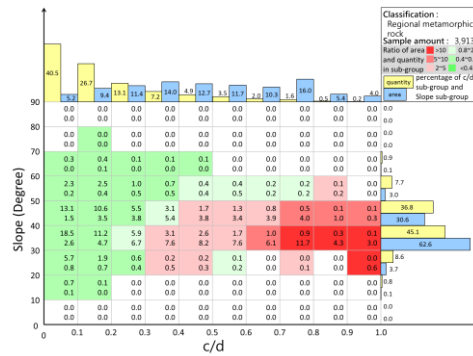
(b)碎屑岩



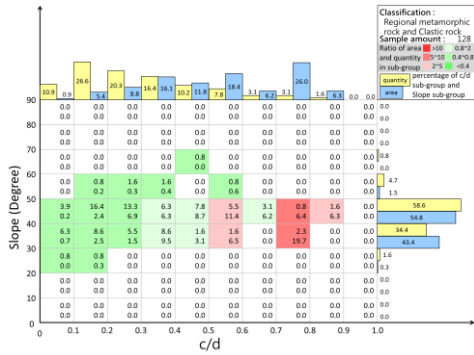
(b)碎屑岩



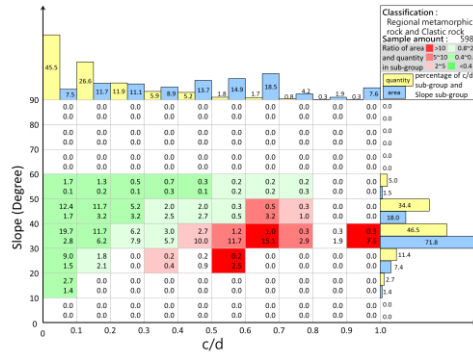
(c)區域變質岩



(c)區域變質岩



(d)區域變質岩與碎屑岩混成



(d)區域變質岩與碎屑岩混成

圖 8 高屏溪流域 2008 年崩塌特性統計圖

Fig.8 Terrain characteristic Statistics chart of Landslide in 2008

圖 9 高屏溪流域 2009 年崩塌特性統計圖

Fig.9 Terrain characteristic Statistics chart of Landslide in 2009

碎屑岩區內崩塌規模在 2008 年與 2009 年之數量比例相似， $c/d > 0.8$ 之數量分別佔 1.70% 與 1.45% 相似，而崩塌面積明顯以 2009 年大幅增加， $c/d > 0.8$ 之『崩塌面積百分比』由 13.7% 增加為 23.8%，顯示 2009 年莫拉克颱風造成更大規模全坡面深層崩塌案例，而本區比較特殊點在於崩塌地集中發生在 $30^\circ \sim 40^\circ$ ，且有 75% 以上案例數量集中於 $c/d = 0.0 \sim 0.3$ 之間，顯示本區內大多數仍屬於小規模崩塌為主，數量明顯隨 c/d 變大而變小，然而崩塌面積比率分布，卻隨 c/d 變大而無明顯增減，由此顯示，崩塌面積隨 c/d 呈現等倍數成長情形。再者，2008 年與 2009 年崩塌地案例之崩塌特性區別在於 2008 年度崩塌地面積比率集中於 $c/d = 0.5 \sim 0.6$ ，而 2009 年度崩塌地面積比率集中於 $c/d = 0.8 \sim 0.9$ ，皆約佔 15%，其餘各段大約 10%，崩塌地平均坡度 $30^\circ \sim 40^\circ$ 則以 2008 年佔 57.9% 增加為 2009 年佔 71.5%。造成此種結果之原因在於高屏溪流域之碎屑岩區屬風化程度高之岩體，區內邊坡穩定性較差，尤其 $30^\circ \sim 40^\circ$ 邊坡最容易產生破壞行為。

高屏溪流域上游之區域變質岩區(圖 8(c)及圖 9(c))位於高屏溪流域東側，即為中央山脈西麓部分，總計 2008 年 1,079 處及 2009 年 3,913 處崩塌地， c/d 在 2008 年度分布為 $c/d = 0.0 \sim 0.9$ ，2009 年全部皆有案例分布，兩年度崩塌地坡度明顯集中於 $30^\circ \sim 50^\circ$ ，約佔總案例數量之 80%，平均坡度分別為 40.7° 及 38.7° ，顯示莫拉克颱風的極端降雨亦造成區域變質岩區崩塌數量增加，且造成崩塌之坡度條件降低。本區內有 80% 以上案例數量集中於 $c/d = 0.0 \sim 0.3$ 之間，顯示區域變質岩區絕大多數為小規模崩塌地，而 2008 年 $c/d > 0.8$ 僅有 6 件案例，約佔 0.5%，2009 年 $c/d > 0.8$ 增加為 27 件案例，約佔 0.67%，而崩塌面積明顯於 2009 年大幅增加， $c/d > 0.8$ 之『崩塌面積百分比』由 1.2% 增加為 9.4%，顯示 2009 年莫拉克颱風造成區域變質岩區出現大規模全坡面深層崩塌案例。而 2008 年與 2009 年崩塌地案例之崩塌特性區別在於雖兩年度崩塌地集中皆發生在 $30^\circ \sim 50^\circ$ ，其中崩塌地數量在 2008 年坡度以 $40^\circ \sim 50^\circ$ 佔 41.6% 為最多，而 2009 年坡度以 $30^\circ \sim 40^\circ$ 佔 45.1% 為最多，顯示強降雨事件造成區域變質岩區崩塌地坡度降低趨勢，再者，於 2008 年度崩塌地面積比率集中於 $c/d = 0.2 \sim 0.3$ ，佔 19.4%， $c/d = 0.3 \sim 0.4$ ，亦佔 18.4%，主要分布介於 $c/d = 0.0 \sim 0.5$ ，而 2009 年度崩塌地面積比率集中於 $c/d = 0.7 \sim 0.8$ ，佔 16%，且其餘各段大約 10%，崩塌地規模明顯增大。

最後，高屏溪流域上游之區域變質岩與碎屑岩混成區(圖 8(d)及圖 9(d))位於高屏溪流域北側，即為玉山山脈南麓部分，總計 2008 年 128 處及 2009 年 598 處崩塌地，本區崩塌地特性同時具備區域變質岩區與碎屑岩區之特性， c/d 在 2008 年度分布為 $c/d = 0.0 \sim 0.9$ ，2009 年全部皆有案例分布，兩年度崩塌地坡度明顯集中於 $30^\circ \sim 50^\circ$ ，約佔總案例數量之 80%，平均坡度分別為 41.5° 及 36.5° ，顯示莫拉克颱風的極端降雨亦造成區域變質岩區崩塌數量增加，且造成崩塌之坡度條件降低。本區內 2008 年度有 63.3% 案例數量集中於 $c/d = 0.1 \sim 0.4$ 之間，2009 年則有 84.0% 案例數量集中於 $c/d = 0.0 \sim 0.3$ 之間，此亦顯示本區絕大多數以小規模崩塌地為主，而 2008 年 $c/d > 0.8$ 僅有 2 件案例，約佔 1.6%，2009 年 $c/d > 0.8$ 增加為 5 件案例，約佔 0.7%，數量雖然增加，『崩塌數量百分比』反而出現減少趨勢，而崩塌面積 2009 年， $c/d > 0.8$ 之『崩塌面積百分比』由 6.3% 增加為 9.5%，並無明顯增大趨勢，顯示 2009 年莫拉克颱風未造成本區大規模全坡面深層崩塌案例增加趨勢。而 2008 年與 2009 年崩塌地案例之崩塌特性區別在於雖兩年度崩塌地集中皆發生在 $30^\circ \sim 50^\circ$ ，其中崩塌地數量在 2008 年坡度以 $40^\circ \sim 50^\circ$ 佔 58.6% 為最多，而 2009 年坡度以 $30^\circ \sim 40^\circ$ 佔 46.5% 為最多，與區域變質岩區結果相似，顯示強降雨事件造成本區崩塌地坡度降低趨勢，再者，於 2008 年度崩塌地面積比率集中於 $c/d = 0.7 \sim 0.8$ ，佔 26.0%，主要分布介於 $c/d = 0.3 \sim 0.6$ ，而 2009 年度崩塌地面積比率集中於 $c/d = 0.6 \sim 0.7$ ，佔 18.5%，其次以 $c/d = 0.5 \sim 0.6$ ，佔 14.9%， $c/d = 0.2 \sim 0.5$ 各段為 10% 以上，顯示崩塌地規模並無明顯變化。

就整體趨勢而言，由圖 8 及圖 9 不同岩石分區之崩塌地特性分不可知：高屏溪流域裡四種岩石分區以碎屑岩區最容易產生大規模之全坡面崩塌情形，其次為區域變質岩區，區域變質岩與碎屑岩混成區中，於 2009 年發生 2 處，而火山岩區則未發現大規模之全坡面崩塌案例。再者依『土砂輸出權重比』可知，碎屑岩區土砂供應以 $c/d = 0.8 \sim 1.0$ 及坡度 $20^\circ \sim 40^\circ$ 佔多數，區域變質岩區以 $c/d = 0.7 \sim 1.0$ 及坡度 $30^\circ \sim 50^\circ$ 佔多數，區域變質岩與碎屑岩混成區則以 $c/d = 0.7 \sim 0.9$ 及坡度 $30^\circ \sim 50^\circ$ 佔多數，火山岩區因 c/d

>0.5 案例較少，因此以 $c/d = 0.2\sim 0.5$ 及坡度 $20^\circ\sim 50^\circ$ 佔多數。最後在小規模崩塌地($c/d < 0.2$)方面，碎屑岩區以 $30^\circ\sim 40^\circ$ 約佔 30% 以上為最多，其次為 $40^\circ\sim 50^\circ$ 約佔 12% 以上；而區域變質岩區是 $30^\circ\sim 40^\circ$ 約佔 25% 以上最多，其次 $40^\circ\sim 50^\circ$ 約佔 24% 以上，兩者相當；火山岩區則 $40^\circ\sim 50^\circ$ 約佔 35% 以上為最多，其次 $30^\circ\sim 40^\circ$ 約佔 24% 以上；區域變質岩與碎屑岩混成區，則是 2008 年以 $40^\circ\sim 50^\circ$ 佔 20.3% 最多， $30^\circ\sim 40^\circ$ 佔 14.9%，2009 年以 $30^\circ\sim 40^\circ$ 佔 31.4% 最多， $40^\circ\sim 50^\circ$ 佔 24.1%，由此可獲得高屏流域內四種岩石分類區崩塌地特性，其中以兩期平均坡度之均值進行比較，碎屑岩區崩塌地平均坡度低於其他分區約 10%，碎屑岩區大型崩塌($c/d > 0.8$)發生率高於其他分區約 25%，且兩期崩塌地總數量皆以碎屑岩區為最多，由此可推論高屏流域之土砂主要來源以碎屑岩區為主，另小規模崩塌($c/d < 0.2$)比率以區域變質岩區佔 80% 為最高。

總而言之，由本研究採用 2008 年與 2009 年度颱風事件之前的 2002 年 20m DEM 資料，並以高屏流域四種岩石分類區繪製崩塌特性統計圖後，可清楚獲得四種岩石分類區之崩塌地特性。另若採用特定小集水區或地質區等分區方式，亦可快速且有效獲得各分區之崩塌地特徵資訊，對於集水區治理工作者制定防災策略、工程治理或環境保育工作，提供有效且全面性資訊，並提供決策者政策制定參考。

五、結 論

本研究首先修正 Meunier et al.(2008)所提出之以邊坡坡長計算崩塌地特徵值方法，改採用高程計算後，除資訊萃取方式較容易，GIS 程式操作更簡單，更可節省分析時間，並以此方法分析高屏流域 2008 年及 2009 年兩場水文事件所引發上游崩塌災害案例，採用 2002 年以前 20 公尺寬數值高程模式 (20m DEM) 資料進行分析崩塌地特徵值方法。再者本研究亦以崩塌地規模(c/d)做為橫軸，崩塌地平均坡度作為縱軸，繪製崩塌特性分布圖，由 2008 年案例資料顯示碎屑岩區之崩塌面積隨 c/d 增大，面積隨之增大，而區域變質岩區面積差異較小，不隨 c/d 增大而明顯增加，顯示碎屑岩區可能有較大規模崩塌地發生，而區域變質岩區雖有部分案例產生全坡面崩塌情形，但可能是發生在小規模邊坡所造成。

本研究另採用崩塌地數量百分比及面積百分比，依坡度及 c/d 值分為 90 個分析區域，繪製崩塌特性統計圖，並以高屏流域案例進行分析，結果顯示：高屏流域裡四種岩石分區以碎屑岩區最容易產生大規模之全坡面崩塌情形，其次為區域變質岩區，而火山岩區則未發現大規模之全坡面崩塌案例。再者依『土砂輸出權重比』可知，碎屑岩區土砂供應以 $c/d = 0.8\sim 1.0$ 及坡度 $20^\circ\sim 40^\circ$ 佔多數，區域變質岩區以 $c/d = 0.7\sim 1.0$ 及坡度 $30^\circ\sim 50^\circ$ 佔多數，區域變質岩與碎屑岩混成區則以 $c/d = 0.7\sim 0.9$ 及坡度 $30^\circ\sim 50^\circ$ 佔多數。最後在小規模崩塌地方面，碎屑岩區以 $30^\circ\sim 40^\circ$ 最多，區域變質岩區是 $30^\circ\sim 40^\circ$ 與 $40^\circ\sim 50^\circ$ 相當；火山岩區則以 $40^\circ\sim 50^\circ$ 最多，區域變質岩與碎屑岩混成區，則 2008 年以 $40^\circ\sim 50^\circ$ 最多，2009 年則以 $30^\circ\sim 40^\circ$ 最多，由此可獲得四種岩石分類區崩塌地特性。

最後本研究建議可採用特定小集水區或地質區等分區方式，亦可快速且有效獲得崩塌地特徵資訊，對於集水區治理工作者制定防災策略、工程治理或環境保育工作，提供有效且全面性資訊，並提供決策者政策制定參考。

參考文獻

- [1] 陳樹群、吳俊鉉 (2009)，「高雄縣小林村獻肚山巨型崩塌引致之地形變遷特性」，中華水土保持學，40(4)，359-376。(Chen, S.C., and Wu, C.H. (2009). "The geomorphological variation triggered by catastrophic landslide in Siaolin Village." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 40(4), 359-376. (in Chinese))
- [2] 陳樹群、翁愷翎、吳俊鉉 (2010)，「玉峰溪集水區崩塌特性與崩塌體積之探討」，中華水土保持學報，41(3)，217-229。(Chen, S.C., Weng, K.M., and Wu, C.H. (2010). "The characteristic of landslide distribution and landslide size in Yu-Fong river watershed." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation* 41(3), 217-229. (in Chinese))

- [3] 陳樹群、諸予涵、吳俊鉉 (2012), 「旗山溪集水區長期降雨特性改變與崩塌分佈關係」, 中華水土保持學報, 43(4): 293-301。 (Chen, S.C., Chu, Y.H., and Wu, C.H. (2011). "The long term rainfall trend and landslide distribution in Chi-Shan river watershed." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43 (4):293-301 (2012) (in Chinese))
- [4] 陳樹群、陳少謙、吳俊鉉 (2012), 「南投縣神木集水區崩塌特性分析」, 中華水土保持學報, 43(3): 214-226。 (Chen, S.C., Chen, S.C., and Wu, C.H. (2012). "Characteristics of the Landslides in Shenmu Watershed in Nantou County." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43 (3):214-226. (in Chinese))
- [5] 陳樹群、郭靜苓、吳俊鉉 (2013), 「西台灣強降雨誘發崩塌規模與區位之特性分析」, 中華水土保持學報, 44(1): 34-49。 (Chen, S.C., Kuo, C.L., and Wu, C.H. (2012). "Characteristic Analysis of Landslide Scale and Location Induced by Heavy Rainfall in Taiwan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44 (1):34-49. (in Chinese))
- [6] 千木良雅宏 (1998), 「災害地質學入門」, 近未來社。(Chigira M. (1998). "Disaster geology introduction." Kinmirai Inc. (in Japan))
- [7] 都城秋穗、久城育夫(1975), 「岩石學 II - 岩石の性質と分類」, 共立出版。
- [8] Agliardi, F., Crosta, G., & Zanchi, A. (2001). "Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics." *Engineering Geology*, 59(1), pp. 83-102.
- [9] Meunier, P., Hovius, N., and Haines, J.A. (2008). "Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides." *Earth and Planetary Science Letters*, 275, 221-232.
- [10] Van Den Eeckaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., and Demoulin, A. (2007). "Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region." *Earth and Planetary Science Letters* 256, 588-603.
- [11] Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. In: R.L. Schuster and R.J. Krizek (Editors), Special Report 176: *Landslides: Analysis and Control*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 11-33.
- [12] Wu, C.H., Chen, S.C., and Chou, H.T. (2011). "Geomorphologic characteristics of catastrophic landslides during typhoon Morakot in the Kaoping Watershed, Taiwan." *Engineering Geology*, 123, 13-21.