

高屏溪流域崩塌地之地形特徵分析

吳俊毅 蔡喬文 陳樹群*

摘要 本研究考量崩塌地規模、平均坡度、發生區位及地質條件等因子，提出一套分析崩塌地地形特徵之方法，藉此建立崩塌規模與坡度統計圖，並以高屏溪流域 2008 年及 2009 年之颱風事件所引發上游崩塌災害案例進行分析。板岩區在 2008 年與 2009 年之崩塌比分別為 1.36% 及 7.92%，提高程度最高，顯示莫拉克颱風強降雨誘發下板岩區崩塌機率明顯增加。由崩塌地之地形特徵分析成果顯示：堅硬砂岩與頁岩區之崩塌地平均坡度最低，2008 年與 2009 年分別為 39.8° 及 34.8°，最容易出現全坡面崩塌情形；大南澳片岩區之崩塌地平均坡度最高，2008 年與 2009 年分別為 46.8° 及 41.2°；石英砂岩區、大南澳片岩區 2008 年與 2009 年皆未產生全坡面崩塌情形。

關鍵詞：崩塌地地形特徵、崩塌比、高屏溪流域。

Topographic Characteristic Analysis of Landslides in Kaoping River Watershed

Chun-Yi Wu Chiao-Wen Tsai Su-Chin Chen*

ABSTRACT An analysis method for landslide topographic characteristic, considering the factors such as landslide size, average slope, location and geologic condition, was used to draw landslide scale and slope statistical chart. The landslides caused by the typhoons in 2008 and 2009 in Kaoping River Watershed were investigated and then analyzed. The landslide ratios were 1.36% and 7.92% in slate area in 2008 and 2009, respectively. The highest degree of increase in landslide ratio showed the landslide probability in slate area rose obviously because of the heavy rainfall during Typhoon Morakot. The analysis results of landslide topographic characteristic showed landslide average slopes were lowest, 39.8° and 34.8° in 2008 and 2009, and the probability of the whole slope landslides was highest in hard sandstone and shale area. Additionally, the landslide average slopes were highest, 46.8° and 41.2° in 2008 and 2009 in Tananao schis area, and there was no whole slope landslide in 2008 and 2009 in quartzose sandstone area and Tananao schis area.

KeyWords : topographic characteristic of landslides, landslide ratio, Kaoping River Watershed.

一、前言

崩塌行為與邊坡地質地貌條件及誘發的降雨或地震相關，但誘發條件為動態變化因子，因此掌握崩塌地地形特徵資訊，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關鍵資訊。Varnes (1978) 所提出的崩塌地分類系統主要根據崩塌地運動種類與材料（如岩石和土體），將崩塌地分類為墜落、傾倒、滑動、側滑和流動。此外，Agliardi et al. (2001) 則根據崩塌地長期啟動機制分為淺層和深層崩塌兩類。現今台灣與日本則採用崩塌地的長度、寬度、深度或面積等物理尺寸區分為淺層和大規模崩塌（含地滑及深層崩塌）等。上述分類方法需要專業人員至現場判讀，因此無法快速獲得全面性資訊。為解決這問題，許多研究開始採用航拍、SPOT 衛星影像及高精度空載雷射掃瞄（又稱空載光達 LiDAR, Light Detection And Ranging）等工具來分析崩塌地的特徵。藉

由航拍圖、影像及數值高程模型（DEM, Digital Elevation Model）快速地萃取出崩塌分佈位置，以進行後續分析，如林美玲與陳彥澄 (2014) 透過航空照片、衛星影像及空載光達之日照陰影圖，判釋研究區域內崩塌及土石流等地質敏感區域；林慶偉等 (2010) 利用高精度的 DEM，配合高解析度航空照片及福衛二號影像，進行崩塌與土石流等坡地環境地質因子分析與活動地形構造判釋。

Meunier et al. (2008) 針對崩塌地在邊坡的位置提出量化分析方式，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，繪製崩塌面積與坡面區位特性分布圖（如圖 1）。Meunier et al. (2008) 認為地震誘發崩塌案例集中在邊坡靠山脊處，在崩塌面積與分布區位圖上會偏左上半部 ($a/d \leq 0.5$ 且 $b/d \geq 0.5$)；降

雨誘發崩塌案例因受河岸淘刷所誘發之崩塌明顯增多,在崩塌面積與分布區位圖上會偏右下半部 ($b/d \leq 0.5$ 且 $a/d \geq 0.5$)。爾後多篇研究 (Wu et al., 2011; 陳樹群等, 2012a; 陳樹群等, 2012b; 陳樹群等, 2013; 陳天健等, 2014) 陸續採用此方式針對崩塌案例分析分布位置之特性並推論誘發原因。此外,相關學者研究崩塌地的物理特徵大多以崩塌地長度、寬度、面積等項目為主 (陳樹群與吳俊銓, 2009; 陳樹群等, 2010), 而崩塌地的物理特徵與崩塌地之誘發因子有關,例如地震導致深層崩塌或降雨導致流動型崩塌,往往具有長運行距離;而河岸淘刷往往在下邊坡造成寬度大之崩塌型態。目前在航拍、SPOT 衛星影像及空載光達等測量科技發展下,已可在崩塌事件發生後迅速獲得崩塌地之物理尺寸,以判斷該事件是否為全坡面崩塌或小規模表層崩塌,並可建立崩塌地數量與崩塌地面積分布情形,以分析不同崩塌事件的自組織臨界性 (Self-organized Criticality, SOC) (Van Den Eckaut et al., 2007; Wu et al., 2011)。

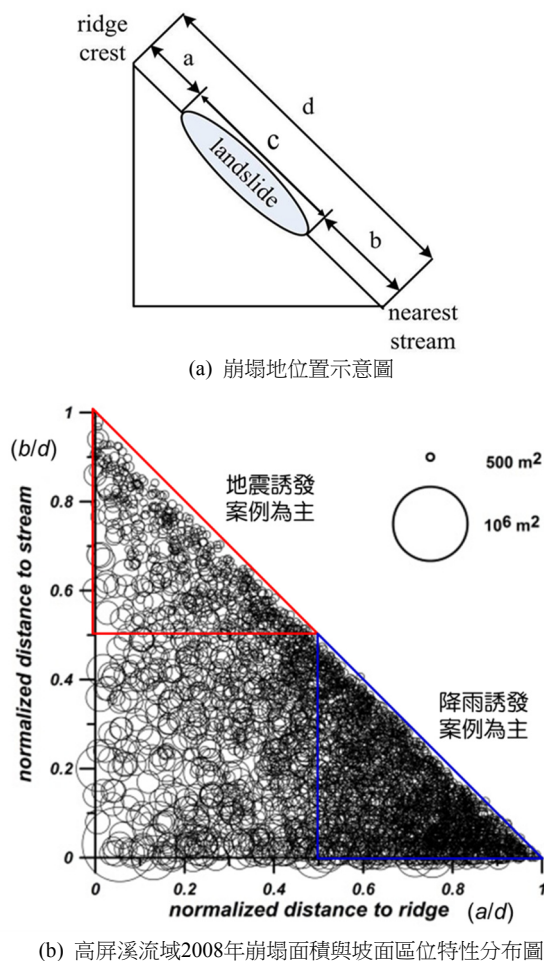


圖 1 崩塌面積與坡面區位特性分布圖 (陳樹群等, 2013)

Fig.1 The areas and locations on slope of landslides

這些研究僅分析崩塌地的物理特徵,若能進一步結合崩塌地之相關地形特徵即可探討不同崩塌事件之特性。如陳天健等 (2014) 應用 GIS 結合航拍、災害前後 DEM 或光達數值地形分析崩塌地坡度與坡向特性,並由崩塌面積與曲率分佈圖及大面積剖面凹形曲率與區位數量統計圖探討地震與豪雨引發崩塌之特性。林慶偉等 (2010) 則分析崩塌地在不同地質分區之特性,其中地質分區以 50 萬分之一地質圖進行劃分,分為沖

積層 (含沖積層與階地堆積)、鬆散砂岩與頁岩 (含頭嵙山層及其相當地層與卓蘭層、錦水頁岩及其相當地層)、堅硬砂岩與頁岩 (含桂竹林層及其相當地層、南莊層及其相當地層與南港層、石底層及其相當地層)、板岩 (含廬山層及其相當地層、畢祿山層與西村層、佳陽層)、大南澳片岩 (含大南澳片岩 (黑色片岩、綠色片岩、燧石)) 與泥岩 (含古亭坑層) 等六種分區;分析結果顯示崩塌地個數、面積在板岩區皆為最高。此外,何春蓀 (1986) 依據台灣地理與地質條件,將台灣分為七個地質分區,包含 I 澎湖群島 (洪流玄武岩,即火成岩)、II 濱海平原 (沖積層)、III 西部麓山地質區 (以新第三紀碎屑岩為主,即沉積岩為主)、IV 中央山脈西翼地質區 (中新世至古第三紀硬頁岩及板岩系)、V 中央山脈東翼地質區 (先第三紀變質雜岩)、VI 東部縱谷 (板塊縫合帶)、VII 海岸山脈地質區 (新第三紀火山質及濁流式碎屑岩覆蓋的火山弧) 等。何春蓀之分類法乃依台灣地理、地質條件為主,林慶偉等之分類法則以地層岩性為主。

本研究為探討崩塌地之地形特徵與地質條件是否具相關性,因此以崩塌地規模等物理尺寸為基礎,並依據崩塌地平均坡度、發生區位及地質條件,提出一套分析崩塌事件特性之方法;並針對 2008 年卡玫基颱風、辛樂克颱風與薔蜜颱風後,與 2009 年莫拉克颱風後高屏溪流域上游崩塌案例進行分析。期提供有效且快速獲得崩塌地特徵資訊之方法,藉此探討不同岩性分區之崩塌地規模,以瞭解崩塌地之地形特徵。

二、研究試區與研究方法

1. 研究試區與崩塌地

高屏溪流域位於台灣南部,主流全長約 171 公里,流域總面積約 3,305 平方公里,為全台第二長之河川。高屏溪流域跨越高雄市及屏東縣,包含旗山溪、荖濃溪、濁口溪及隘寮溪四條支流,其中荖濃溪與旗山溪為兩大主要支流。本研究為探討崩塌地之地形特徵與地質條件是否具相關性,因此以林慶偉等 (2010) 分類法為基礎,並採用中央地質調查所 2000 年出版 50 萬分之一地質圖之地質種類進行分類,將高屏溪流域分為 7 種岩性分區:大南澳片岩、板岩、石英砂岩、堅硬砂岩與頁岩、鬆散砂岩與頁岩、泥岩及沖積層。岩性分區與地層種類如表 1、圖 2a 所示,流域上游主要岩性分區為板岩區 (50.34%)、堅硬砂岩與頁岩 (21.64%),流域下游則以沖積層 (23.99%) 為主。岩性分區大致以荖濃溪為界,荖濃溪左岸以板岩為主,荖濃溪右岸與旗山溪集水區以堅硬砂岩與頁岩為主,此外,隘寮溪上游集水區部分屬大南澳片岩 (如圖 2a)。

本研究利用 GIS 程式與 2002 年之數值高程模式 (DEM, 20 m),配合高屏溪流域 2008 年卡玫基颱風 (2008 年 7 月 18 日)、辛樂克颱風 (2008 年 9 月 12 日) 與薔蜜颱風 (2008 年 9 月 27 日) 後,及 2009 年 8 月 6 日莫拉克颱風後所引發上游崩塌災害案例,以分析 2008 年及 2009 年不同岩性分區中之崩塌地地形特徵,其中崩塌地資料來源為水土保持局提供,並經本研究配合本區影像資料加以修正。高屏溪流域之崩塌災害主要發生在旗山溪上游和荖濃溪上游與隘寮溪匯流口等區域

(如圖 2b、圖 2c)，下游區域崩塌災害相對較少。2008、2009 年不同地層種類之崩塌地統計如表 1，其中，「總面積」代表該地層種類之總面積，各年度發生在該地層種類之崩塌地面積則統計為「面積」，單位為平方公里 (km²)，「崩塌比」代表該年度發生在該地層種類之崩塌地面積除以該地層種類之總面積。

2. 崩塌規模與坡度特性圖 (Landslide scale and slope figure, LSSF)

崩塌地之特性主要包含崩塌地發生區位及崩塌地地形特徵兩種，前者由 Meunier et al. (2008) 所提出崩塌面積與坡面

區位特性分布圖即可分析崩塌地之發生區位特性。由於邊坡穩定與邊坡坡度有高度相關，因此本研究採用崩塌地發生前邊坡之平均坡度來反應崩塌地坡度特徵。

即以崩塌地平均坡度為縱軸，崩塌地規模為橫軸，圓形符號的大小代表崩塌地面積，如圖所示。由於崩塌地長度分布極廣，可介於 10 m~10⁵ m，因此以圖 1 中崩塌地長度 (c) 除以邊坡總長度 (d)，來作為無因次化之崩塌地規模特徵值 (c/d)，藉此判斷崩塌地在整個坡面之破壞規模，當 c/d=1.0 時即為全部坡面崩塌情形。針對不同岩性分區繪製崩塌規模與坡度特性圖，即可清楚了解不同坡度之崩塌地地形特徵。

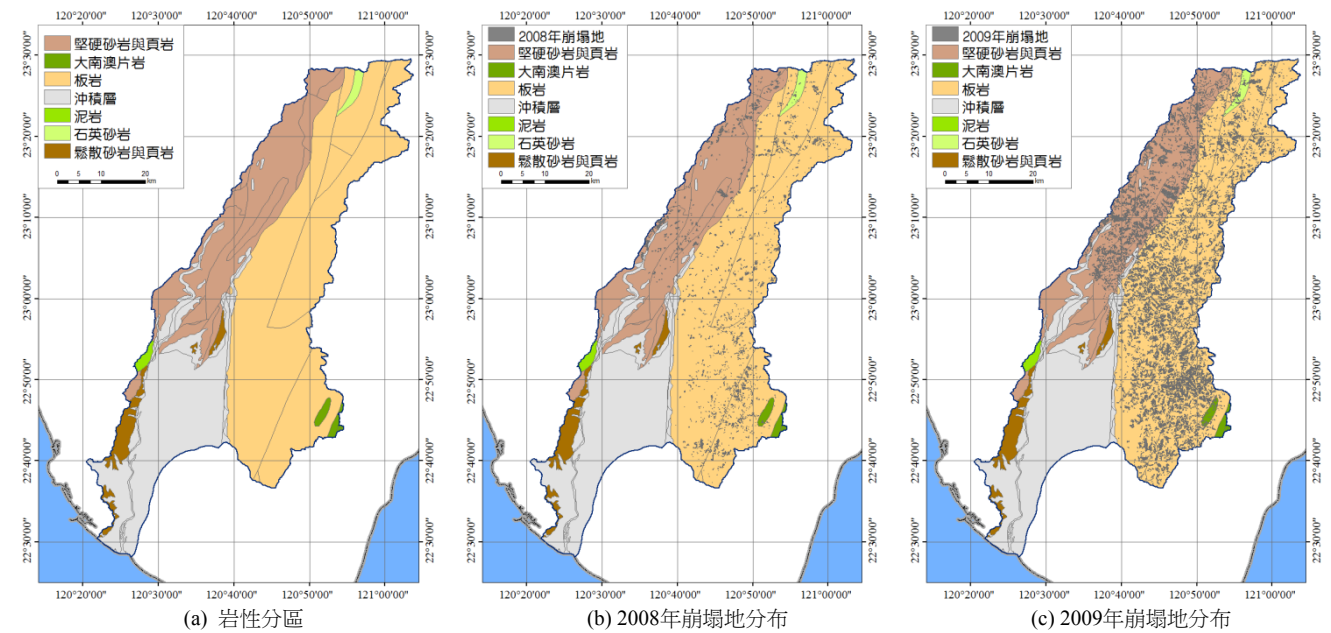


圖 2 高屏溪流域岩性分區與崩塌地分布

Fig.2 Lithology zonation and landslides of Kaoping River watershed

表 1 高屏溪流域岩性分區及崩塌地統計表

Table 1 Lithology zonation and landslide statistics of Kaoping River watershed

岩性分區	地層種類	總面積 (km ²)	比率 (%)	2008年崩塌地		2009年崩塌地	
				面積 (km ²)	崩塌比 (%)	面積 (km ²)	崩塌比 (%)
大南澳片岩	大南澳片岩 (黑色片岩、綠色片岩、燧石)	20.99	0.64	0.11	0.52	0.52	2.47
	大南澳片岩 (大理岩)	1.11	0.03	-	-	-	-
	小計	22.10	0.67	0.11	0.50	0.52	2.35
板岩	畢祿山層	686.00	20.76	10.68	1.56	53.17	7.75
	十八重溪層	18.74	0.57	0.16	0.86	0.56	3.01
	西村層、佳陽層	118.60	3.59	1.94	1.63	8.22	6.93
	廬山層及其相當地層	840.48	25.43	9.82	1.17	69.75	8.30
	小計	1663.82	50.34	22.60	1.36	131.70	7.92
石英砂岩	達見砂岩	18.64	0.56	0.17	0.92	0.64	3.46
	南港層、石底層及其相當地層	68.12	2.06	2.22	3.26	4.14	6.07
堅硬砂岩與頁岩	南莊層及其相當地層	395.81	11.98	3.89	0.98	27.59	6.97
	桂竹林層及其相當地層	251.09	7.60	4.53	1.81	15.73	6.27
	小計	715.02	21.64	10.64	1.49	47.46	6.64
泥岩	古亭坑層	12.61	0.38	-	-	-	-
	卓蘭層、錦水頁岩及其相當地層	0.02	0.00	-	-	-	-
鬆散砂岩與頁岩	頭嵙山層及其相當地層	79.99	2.42	-	-	-	-
	小計	80.01	2.42	-	-	-	-
沖積層	階地堆積	99.67	3.02	-	-	-	-
	沖積層	693.03	20.97	-	-	-	-
	小計	792.70	23.99	-	-	-	-
合	計	3304.90	100.00	33.52	1.02	180.32	5.47

3. 崩塌規模與坡度統計圖 (Landslide scale and slope statistical chart, LSSC)

本研究進一步將圖之縱軸依坡度 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 90 個分析區格，如圖 4 為高屏溪流域 2008 年崩塌規模與坡度統計圖。每分析區格上方數字代表「崩塌筆數百分比」，指該年度發生在該分析區格內崩塌地之數量除以該年度總崩塌地數量；下方數字代表「崩塌面積百分比」，指該年發生在該分析區格內崩塌地之面積除以該年總崩塌地面積；而由下方「崩塌面積百分比」除以上方「崩塌筆數百分比」，可得到該分析區格內之「崩塌規模比」。「崩塌規模比」越高，代表該分析區格內單一崩塌地所造成崩塌面積越大，相應會有越大的崩塌量。

此外，本研究分析高屏溪流域不同岩性分區之崩塌地數量與面積分布情形，以了解高屏溪流域不同岩性分區之崩塌地物理尺寸特性。再者將面積百分比除以筆數百分比，以了解不同區格之崩塌所對應之「崩塌規模比」，並將規模比區分為 <0.1 (綠)、 $0.1\sim0.5$ (橙)、 $0.5\sim1$ (淡紅)、 $1\sim2$ (紅)、 $2\sim10$ (淡紫) 及 >10 (紫) 等六個區間。此外，藉由崩塌地所在坡度之數量與面積分布圖 (右方) 與所在 c/d 值之數量與面積分布圖 (上方)，進而分析不同岩性分區之崩塌地地形特徵分布特性。

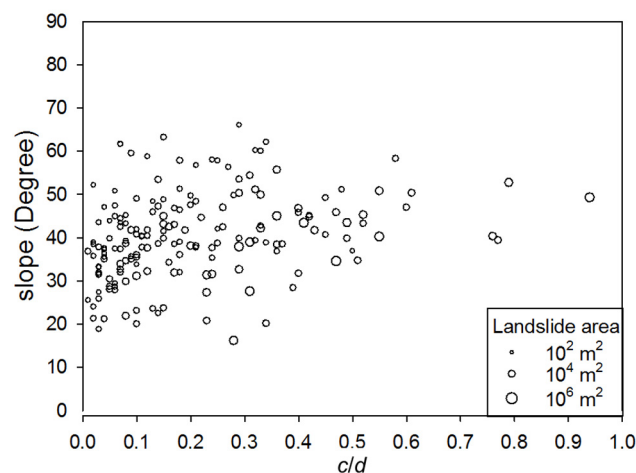


圖 3 崩塌規模與坡度特性圖示意圖 (LSSF)

Fig.3 Schematic diagram of landslide scale and slope figure (LSSF)

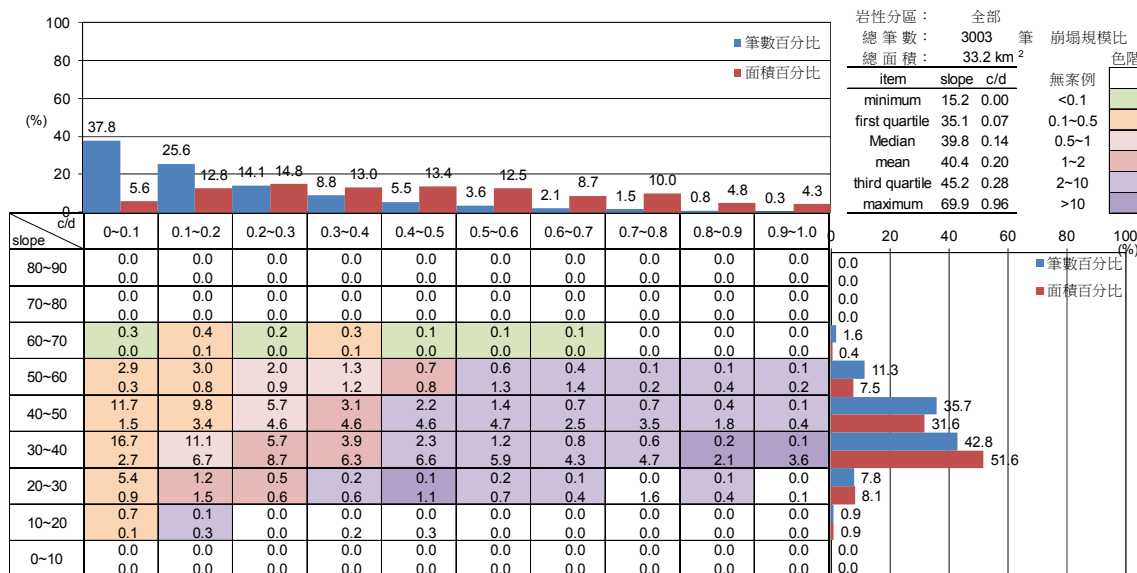


圖 4 高屏溪流域 2008 年崩塌規模與坡度統計圖 (LSSC)

Fig.4 Landslide scale and slope statistical chart (LSSC) of Kaoping River watershed in 2008

三、結果與討論

1. 不同年度崩塌地之崩塌比

由表 1 不同岩性分區之崩塌面積，可知 2008 年與 2009 年崩塌地皆以板岩區佔 2/3 以上為最大，分別為 67.4% 及 73.0%，

其次為堅硬砂岩與頁岩區，分別佔 31.7% 及 26.3%，石英砂岩區分別佔 0.5% 及 0.4%，大南澳片岩區分別佔 0.3% 及 0.3%。

而由不同岩性分區的崩塌比可分析該年度易發生崩塌之區域，其中 2008 年與 2009 年在板岩區崩塌比分別為 1.36% 及 7.92%，堅硬砂岩與頁岩區分別為 1.49% 及 6.64%，石英砂岩

區分別為 0.92% 及 3.46%，大南澳片岩區分別為 0.52% 及 2.47%。所有岩性分區的崩塌比在 2009 年莫拉克颱風強降雨影響下，均較 2008 年明顯提高，其中板岩區崩塌比提高 482%，堅硬砂岩與頁岩區崩塌比提高 346%，石英砂岩區崩塌比提高 274%，大南澳片岩區崩塌比提高 370%。分析結果顯示降雨增加提高崩塌機率，以板岩區崩塌機率提高程度最為顯著。

2. 崩塌規模與坡度統計圖

本研究將 2008 年 3,003 處崩塌地與 2009 年 11,645 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 個分析區格後，計算每個分析區格崩塌地筆數及面積百分比，如圖 4 及圖 6 所示，以探討不同年度各種岩性分區崩塌地之地形特徵。

圖 5 (a) 及圖 6(a) 之大南澳片岩區域部分，總計 2008 年 27 處及 2009 年 78 處崩塌地， c/d 在 2008 年主要分布為 0.0~0.5，最大組別為 0.6~0.7；2009 年主要分布為 0.0~0.6，最大組別為 0.7~0.8。2008 年崩塌地坡度介於 20°~60°，平均坡度為 46.8°；2009 年崩塌地坡度介於 10°~60°，平均坡度為 41.2°。另由崩塌地所在坡度之數量與面積分布圖 (右方) 可知 2008 年、2009 年之崩塌筆數、面積分別集中在 40°~60° 及 30°~50°。顯示莫拉克颱風強降雨造成大南澳片岩區崩塌數量增加，崩塌地發生坡度降低，且規模有略為變大的趨勢。值得注意的是在 2009 年時，發生 5 處 $c/d > 0.5$ 之崩塌地，相較 2008 年的 2 處，說明 2009 年莫拉克颱風除了增加崩塌數量外，也同時增加更大規模之崩塌事件。

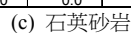
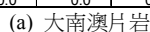
圖 5 (b) 及圖 6(b) 之板岩區域部分，總計 2008 年 2,601 處及 2009 年 8,659 處崩塌地， c/d 在 2008 年主要分布為 0.0~0.6，最大組別為 0.9~1.0；2009 年主要分布為 0.0~0.7，最大組別為 0.9~1.0。2008 年崩塌地坡度介於 10°~70°，平均坡度為 40.4°；2009 年崩塌地坡度介於 10°~70°，平均坡度為 37.9°。另由崩塌地所在坡度之數量與面積分布圖 (右方) 可知 2008 年、2009 年之崩塌筆數、面積均集中在 30°~50°，且 2009 年 20°~40° 之比例較 2008 年顯著增加。顯示莫拉克颱風強降雨造成板岩區崩塌數量增加，崩塌地發生坡度降低，且規模有略為變大趨勢。另由崩塌地所在 c/d 值之數量與面積分布圖 (上方) 可知 $c/d > 0.6$ 之「崩塌面積百分比」由 20.1% 增加為 40.4%，說明 2009 年莫拉克颱風增加本區更大規模崩塌之比例。

圖 5 (c) 及圖 6(c) 之石英砂岩區域部分，總計 2008 年 16 處及 2009 年 81 處崩塌地， c/d 在 2008 年主要分布為 0.0~0.4，最大組別為 0.5~0.6；2009 年主要分布為 0.0~0.6，最大組別為 0.6~0.7。2008 年崩塌地坡度介於 30°~60°，平均坡度為 44.6°；2009 年崩塌地坡度介於 20°~70°，平均坡度為 41.3°。另由崩塌地所在坡度之數量與面積分布圖 (右方) 可知 2008 年、2009 年之崩塌筆數、面積分別集中在 40°~60° 及 30°~50°。顯示莫拉克颱風強降雨造成石英砂岩區崩塌數量增加，崩塌地發生坡度降低，且規模有略為變大趨勢。值得注意的是在 2009 年時，發生 3 處 $c/d > 0.5$ 之崩塌地，相較 2008 年的 1 處，說明 2009 年莫拉克颱風增加更大規模之崩塌案例。

圖 5 (d) 及圖 6(d) 之堅硬砂岩與頁岩區域部分，總計 2008 年 359 處及 2009 年 2,827 處崩塌地， c/d 在 2008 年主要分布為 0.0~0.7，最大組別為 0.9~1.0；2009 年主要分布為 0.0~0.5，最大組別為 0.9~1.0。2008 年崩塌地坡度介於 10°~70°，平均坡度為 39.8°；2009 年崩塌地坡度介於 10°~70°，平均坡度為 34.8°。另由崩塌地所在坡度之數量與面積分布圖 (右方) 可知 2008 年、2009 年之崩塌筆數、面積分別集中在 30°~50° 及 20°~40°，且 2009 年 20°~40° 之比例較 2008 年顯著增加。顯示莫拉克颱風強降雨造成堅硬砂岩與頁岩區崩塌數量增加，崩塌地發生坡度降低。另由崩塌地所在 c/d 值之數量與面積分布圖 (上方) 可知 $c/d > 0.5$ 之「崩塌面積百分比」由 55.9% 略增為 56.6%，顯示 2009 年莫拉克颱風未明顯增加本區更大規模崩塌之比例。值得注意的是崩塌筆數百分比隨 c/d 變大而明顯減小，但崩塌面積百分比則無明顯增減，由此可知崩塌地之面積隨 c/d 呈現等倍數成長情形。

整體而言，由圖 5 及圖 6 中不同岩性分區之崩塌地地形特徵可知：高屏溪流域裡四種岩性分區以堅硬砂岩與頁岩區在此兩次降雨事件中，最容易產生大規模之全坡面崩塌情形，其次為板岩區，而大南澳片岩區及石英砂岩區則未發現大規模之全坡面崩塌案例。在小規模崩塌地 ($c/d < 0.2$) 方面，大南澳片岩區在 2008 年以 50°~60° 約佔 33% 以上為最多，在 2009 年以 40°~50° 約佔 27% 以上為最多；板岩區在 2008 年以 30°~40° 約佔 30% 以上為最多，在 2009 年以 30°~40° 約佔 33% 以上為最多；石英砂岩區在 2008 年以 40°~50° 約佔 31% 以上為最多，在 2009 年以 40°~50° 約佔 36% 以上為最多；堅硬砂岩與頁岩區在 2008 年以 30°~40° 約佔 15% 以上為最多，在 2009 年以 30°~40° 約佔 31% 以上為最多。此外，由各區格之「崩塌規模比」可知，大南澳片岩區在 2008 年以 $c/d = 0.6 \sim 0.7$ 及坡度 40°~50° 較高，在 2009 年以 $c/d = 0.7 \sim 0.8$ 及坡度 40°~50° 較高；板岩區以 $c/d = 0.7 \sim 1.0$ 及坡度 30°~40° 較高；石英砂岩區在 2008 年以 $c/d = 0.5 \sim 0.6$ 及坡度 50°~60° 較高，在 2009 年以 $c/d = 0.6 \sim 0.7$ 及坡度 30°~40° 較高；堅硬砂岩與頁岩區以 $c/d = 0.8 \sim 1.0$ 及坡度 20°~40° 較高。

綜上，可獲得高屏溪流域內四種岩性分區之崩塌地地形特徵，堅硬砂岩與頁岩區之崩塌地平均坡度最低，最容易產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌 ($c/d < 0.2$) 百分比最低，「崩塌規模比」最大值最接近崩塌規模與坡度統計圖之右下角，即越容易在低坡度區位發生較大規模崩塌。板岩區之崩塌地平均坡度次低，次容易產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌百分比最高，「崩塌規模比」最大值次接近崩塌規模與坡度統計圖之右下角，即次容易在低坡度區位發生較大規模崩塌。石英砂岩區之崩塌地平均坡度次高，未產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌百分比次高，「崩塌規模比」最大值最接近崩塌規模與坡度統計圖之左上角，即最不容易在低坡度區位發生較大規模崩塌。大南澳片岩區之崩塌地平均坡度最高，未產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌百分比次低，「崩塌規模比」最大值次接近崩塌規模與坡度統計圖之左上角，即次不容易在低坡度區位發生較大規模崩塌。



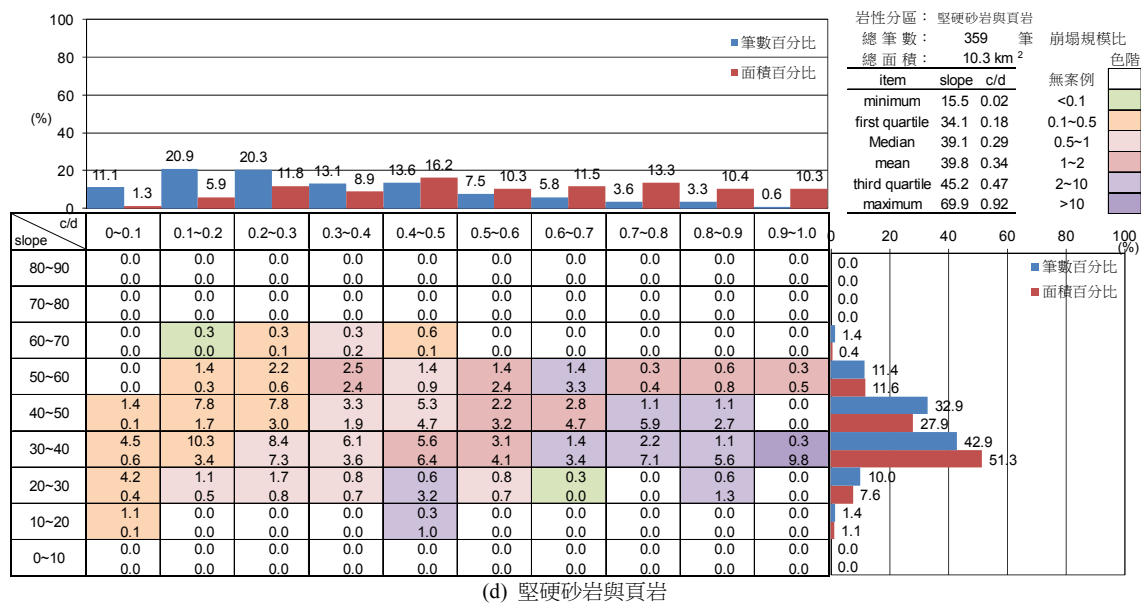
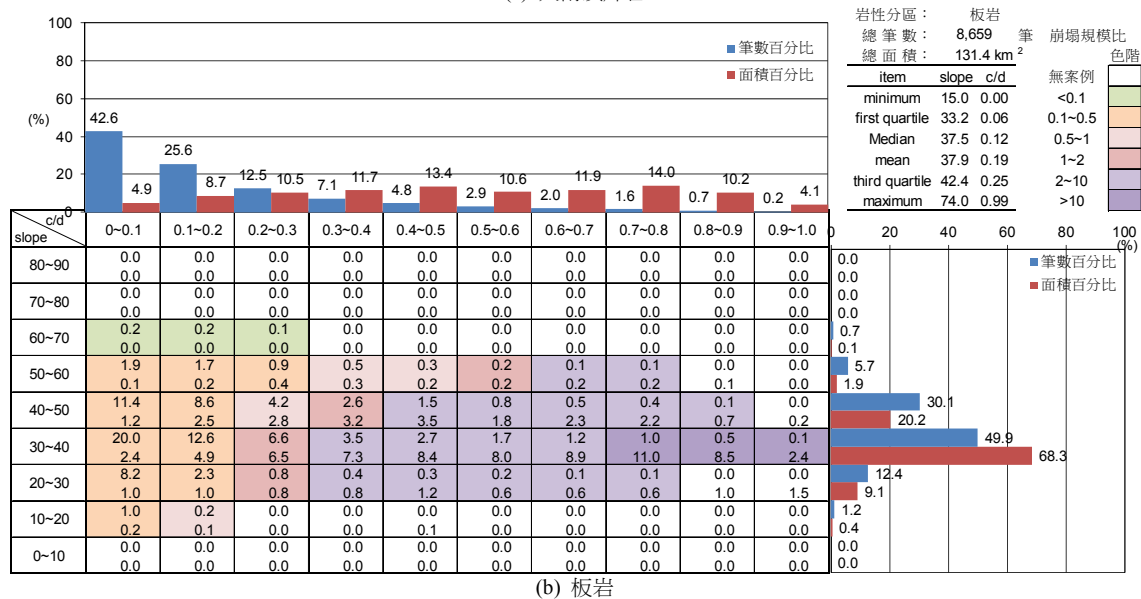
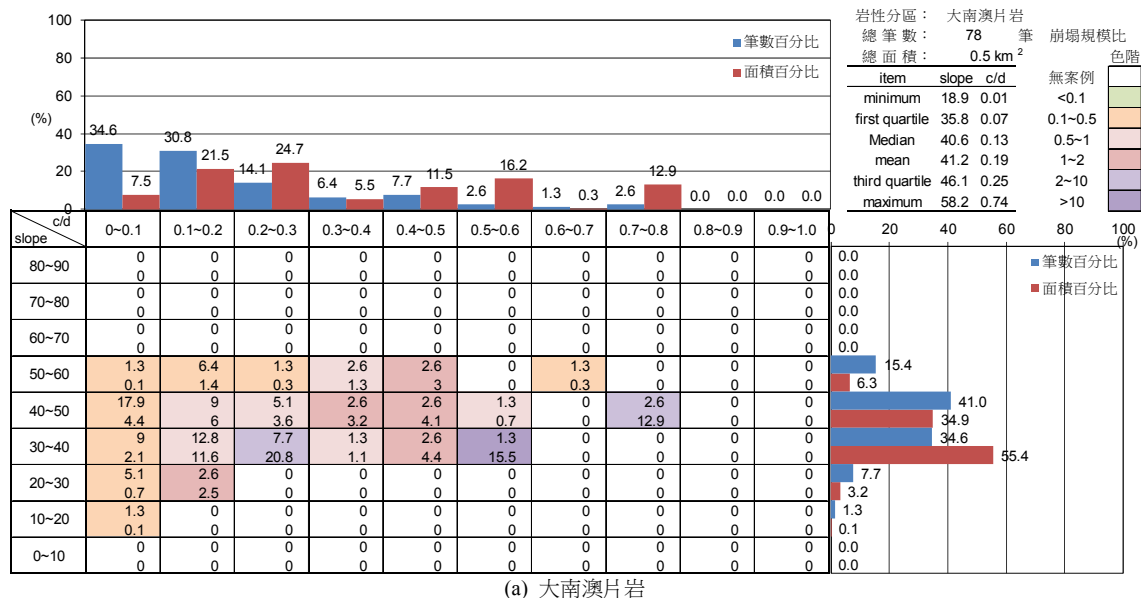


圖 5 2008 年高屏溪流域不同岩性分區崩塌規模與坡度統計圖 (LSSC)

Fig.5 Landslide scale and slope statistical chart (LSSC) in each lithology zonation of Kaoping River watershed in 2008



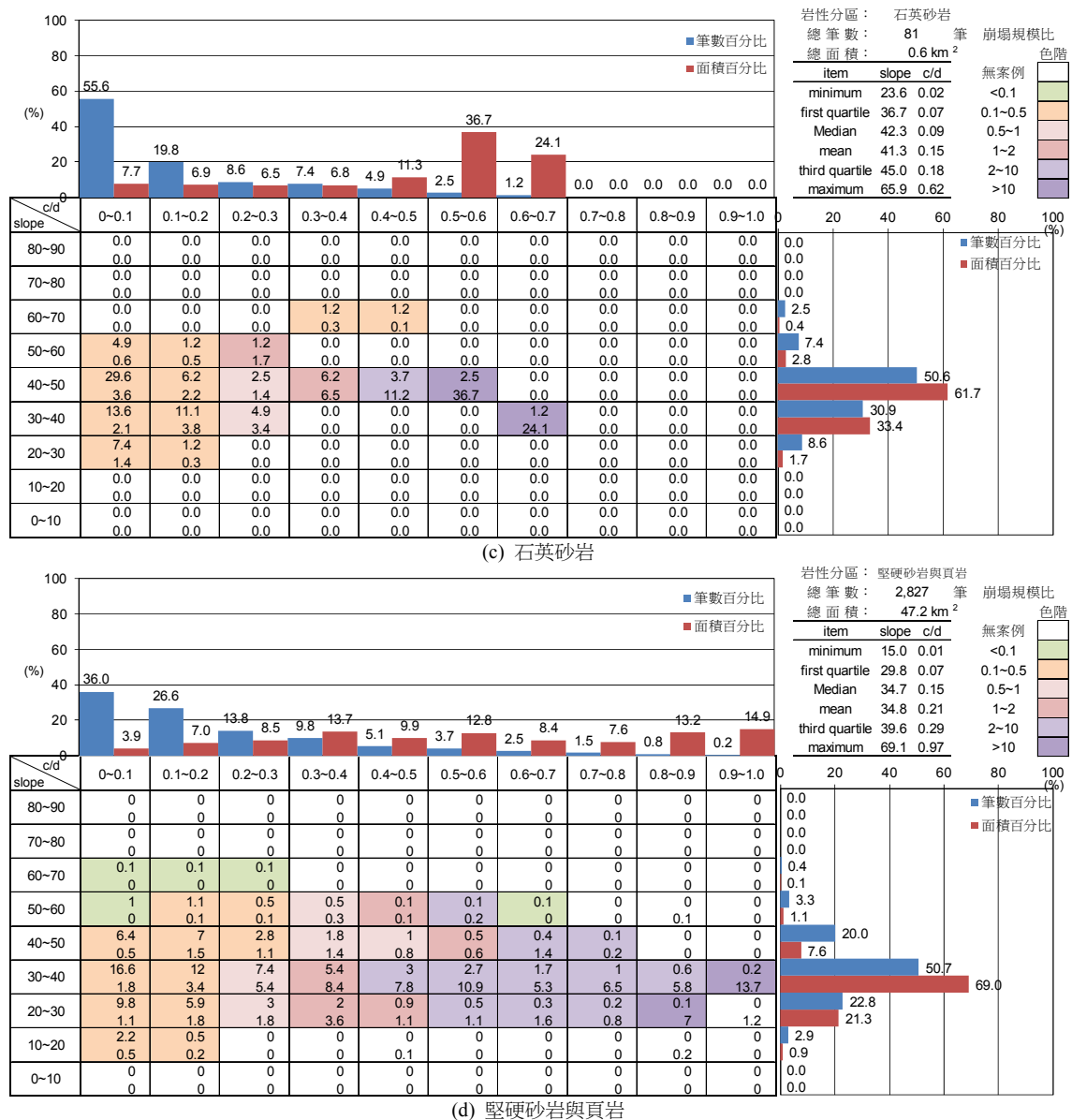


圖 6 2009 年高屏河流域不同岩性分區崩塌規模與坡度統計圖 (LSSC)

Fig.6 Landslide scale and slope statistical chart (LSSC) in each lithology zonation of Kaoping River watershed in 2009

五、結 論

本研究利用 GIS 程式，配合高屏河流域 2008 年及 2009 年之颱風事件所引發崩塌資料及 2002 年之數值高程模式 (DEM, 20 m)，建構崩塌規模與坡度之統計特性。首先計算崩塌面積與分布區位圖中所需之崩塌地長度、上邊坡坡長、下邊坡長及崩塌面積等資料，再以崩塌地規模 (c/d) 做為橫軸，崩塌地平均坡度作為縱軸，繪製崩塌規模與坡度特性圖。最後將橫軸依 c/d 值 0.1 區分為 10 個區間，縱軸則依坡度 10° 區分為 9 個區間，形成 90 個分析區格，以完成崩塌規模與坡度統計圖 (LSSC)，分析時並將高屏河流域依岩性分成大南澳片岩區、板岩區、石英砂岩區及堅硬砂岩與頁岩區等四區。

板岩區在 2008 年與 2009 年之崩塌比分別為 1.36% 及 7.92%，堅硬砂岩與頁岩區分別為 1.49% 及 6.64%，石英砂岩區分別為 0.92% 及 3.46%，大南澳片岩區分別為 0.52% 及 2.47%。

所有岩性分區的崩塌比在 2009 年莫拉克颱風強降雨影響下，均較 2008 年明顯提高，其中以板岩區崩塌比提高程度最高，顯示強降雨誘發下板岩區崩塌機率明顯增加。另外由 2008 年、2009 年之崩塌筆數、 c/d 主要分布範圍、崩塌地平均坡度及崩塌地所在坡度之數量與面積分布圖，可說明莫拉克颱風強降雨造成大南澳片岩區、板岩區、石英砂岩區及堅硬砂岩與頁岩區崩塌數量增加、崩塌地發生坡度降低，其中大南澳片岩區、板岩區及石英砂岩區並具有規模變大之趨勢。

本研究利用崩塌規模與坡度統計圖分析高屏河流域內四種岩性分區之崩塌地形特徵如下：堅硬砂岩與頁岩區之崩塌地平均坡度最低，最容易產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌 ($c/d < 0.2$) 百分比最低，越容易在低坡度區位發生較大規模崩塌；板岩區之崩塌地平均坡度次低，次容易產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌百分比最高，次容易在低坡度區位發生較大規模崩塌；石英砂岩區之崩塌地平均坡度次高，

未產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌百分比次高，最不容易在低坡度區位發生較大規模崩塌；大南澳片岩區之崩塌地平均坡度最高，未產生大規模之全坡面崩塌情形，小規模崩塌百分比次低，次不容易在低坡度區位發生較大規模崩塌。

本研究所建分析崩塌特性之方法，可探討崩塌地之地形特徵與地質條件之差異性，能有效且快速獲得崩塌地特徵資訊，藉此探討不同岩性分區之崩塌地規模，並瞭解崩塌地之地形特徵。

參考文獻

- [1] 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。(Ho, C.S. (1986). *The introduction of the geology in Taiwan*, Central Geological Survey, MOEA. (in Chinese))
- [2] 林美玲、陳彥澄 (2014)，「應用光達地形資料於莫拉克災後陳有蘭溪流域崩塌與土石流地質敏感地區判釋與分析」，航測及遙測學刊，18(2)，129-144。(Lin, M.L., and Chen, Y.C. (2014). "Application of LiDAR data on identifications of landslides and debris flow geologically sensitive area of the Chen-Yo-Lan River Basin post Typhoon Morakot." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 18(2), 129-144. (in Chinese))
- [3] 林慶偉、林美玲、張中白、吳銘志、王泰典、陳天健 (2010)，「莫拉克颱風受災區域之地質敏感特性分析 (1/3)」，經濟部中央地質調查所。(Lin, C.W., Lin, M.L., Chang, C.P., Wu, M.C., Wang T.T., and Chen, T.C. (2010). *Geohazards susceptibility analysis of the affected area during Typhoon Morakot*, Central Geological Survey, MOEA. (in Chinese))
- [4] 陳天健、李明熹、曾勛苑、顏宏諭、李宗聯、林意修 (2014)，「南部板岩地質區地震及豪雨誘發山崩之地形特徵-以隘寮溪流域為例」，航測及遙測學刊，18(2)，79-92。(Chen, T.C., Lee, M.H., Zeng, X.Y., Yen, H.Y., Li, Z.L., and Lin, Y.S. (2014). "Topographic characteristic of the landslide induced by earthquake and rainfall in Slate Stratum in south Taiwan – case of Ai-Liao Catchment." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 18(2), 79-92. (in Chinese))
- [5] 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」，中華水土保持學報，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))
- [6] 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))
- [7] 陳樹群、諸予涵、吳俊鉉 (2012a)，「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. (2012a). "The long term rainfall trend and landslide distribution in Chi-Shan river watershed." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43(4), 293-301. (in Chinese))
- [8] 陳樹群、陳少謙、吳俊鉉 (2012b)，「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. (2012b). "Characteristics of the landslides in Shenmu Watershed in Nantou County." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43(3), 214-226. (in Chinese))
- [9] 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. (2013). "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))
- [10] Agliardi, F., Crosta, G., and Zanchi, A. (2001). "Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics." *Engineering Geology*, 59(1), 83-102.
- [11] 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.
- [12] Van Den Eeckhout, 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.
- [13] Varnes, D.J. (1978). *Slope movement types and processes*, in: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. and Krizek, R. J.) Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- [14] 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.

2014 年 01 月 22 日 收稿

2014 年 06 月 03 日 修正

2016 年 08 月 22 日 接受

(本文開放討論至 2017 年 3 月 31 日)