

東澳嶺崩塌地之地形演育分析

李璟芳^{[1]*} 周憲德^[2] 魏倫璋^[1] 黃韋凱^[1] 冀樹勇^[1] 陳樹群^[3] 黃文昭^[2]

摘要 梅姬颱風 (2010) 與東北季風之共伴效應於台灣宜蘭縣蘇澳地區帶來了豐沛降雨，高累積雨量造成了台 9 線蘇花公路群集性土砂災害，尤其在 115.9K 上邊坡更誘發了約 210 萬 m³ 之大規模崩塌土砂災害。本文從現地地質調查、致災機制、水文分析及遙測影像判釋等面向進行討論。由降雨-延時-頻率分析得知近年來誘發重大崩塌事件的雨量皆高於 200 年回歸週期，並獲致良好判別致災雨場之 I-R 圖降雨臨界線關係 ($R_e + 53.5I_{ave} = 1,146$)。多時期遙測影像判釋指出東澳嶺坡頂之弧型張力裂隙仍有持續溯源發展之趨勢。裸露崩塌地不連續面方位密度分布圖之裂隙位態大致與區域地質構造位態 (N70°W) 相近，顯示本區域崩塌主要仍受地質條件主控。此外，蝕溝溯源侵蝕、剪裂帶分布及凹窪坡型亦為影響研究區崩塌地地貌變遷之重要因子，而前期地震或長延時高強度降雨則為外在促崩因子。

關鍵詞：東澳嶺、大規模崩塌、土石流、遙測判釋、剪裂帶。

Geomorphic Evolution of The Dong-Ao Peak Landslide, North Eastern Taiwan

Ching-Fang Lee^{[1]*} Hsien-Ter Chou^[2] Lung-Wei Wei^[1] Wei-Kai Huang^[1]
Shu-Yeong Chi^[1] Su-Chin Chen^[3] Wen-Chao Huang^[2]

ABSTRACT Typhoon Megi coupled with the northeastern monsoon induced an extreme rainfall of 939 mm on the Suao area, Yilan County, in eastern Taiwan on October 21st, 2010, causing the Dong-Ao Peak landslide of 2.1 million m³ along the coastal Su-Hua Section of Highway Route 9. This study adopts a geological survey, rainfall data, satellite images, orthophotos, and high-resolution DEM based on airborne laser scanner surveys to quantify the morphological changes before and after landslide events following major rainfall events since 2010. Rainfall frequency analysis indicates the cumulative precipitation triggering landslide events is greater than the 200-year return period. In addition, both the entrainment effect of debris flow and toe erosion on the down-slope is shown to induce regressive sliding failure at the adjacent roadbed. The results suggest that geological factors such as head-cutting erosion and the concave landform shape the landform evolution of the catchment. The occurrence of landslides also depends on antecedent earthquake events and extreme intense rainfalls.

Key Words : Dong-Ao Peak^[1], large-scale landslide, debris flow, remote sensing interpretation, shear zone.

一、前言

近年來在極端氣候變遷影響下，臺灣常因颱風挾帶超大豪雨造成山區公路邊坡災害，如坡面沖蝕、大規模邊坡滑動、大量岩屑崩滑、落石、土石流溢淹及路基坍塌。高強度降雨或長延時暴雨所引致之山崩與土石流等災害，不僅影響山區公路之坡面穩定性，對於行經該路線之對象（如行人車輛）或公共設施（如道路橋涵）亦產生重要之危害。台 9 線（又稱蘇花公路）為台灣北部聯繫東部地區之唯一道路，其沿線地形陡峻，且多

緊臨海岸構築，在蘇花公路改善工程尚未竣工之前，仍為本區域最重要之交通要道。近年，發生於台 9 線來之重大災害始於 2009 年芭颱風、2010 年梅姬颱風、2011 年奈格颱風外圍環流與東北季風共伴豪雨、2012 年蘇拉颱風與 2013 年 1111 豪雨事件，這些颱風及豪雨事件挾帶豐沛雨量於蘇花公路蘇澳 (104.7K)-東澳段 (120.0K) 區域，除引起道路沿線群集性邊坡土砂災害與雙向路線阻斷外（公路總局防救災資訊系統網頁；<http://bobe168.tw/>），其中梅姬颱風更造成 26 人失蹤或死亡（中央地質調查所，2010；李光敦，2010）。

[1] 中興工程顧問社防災科技研究中心

Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan, R.O.C.

[2] 國立中央大學土木工程學系

Department of Civil Engineering, National Central University, Jhongli, Taiwan, R.O.C.

[3] 國立中興大學水土保持學系

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

* Corresponding Author. E-mail : cflee@sinotech.org.tw

山區道路常見之主要地質災害包括落石 (rock fall)、岩屑崩滑 (debris sliding)、深層滑動 (deep-seated landslide)、土石流 (debris flow)、削坡破壞 (slope cutting)、坡趾沖蝕 (toe erosion) 及邊坡填土 (slope filling) 災害等 (Hearn, 2011)。公路總局第四區養護工程處曾針對梅姬颱風於蘇澳地區及蘇花公路災害進行沿線調查, 調查顯示此颱風所誘發之地質災害多以岩屑崩滑為主, 僅一處為岩體滑動 (116K+100), 其中又以大坑橋 115.9K 上邊坡 (東澳嶺) 崩滑面積最大, 約 89,000 m² (李光敦, 2010)。針對梅姬颱風於台 9 線 115.9K-116.4K 所誘發之崩塌-土石流及其所衍生之海岸沖積扇演育過程也被提出探討, 其研究指出此區域上邊坡崩塌災害, 除於降雨逕流浸潤下轉化為溪溝型土石流外, 同時亦於太平洋形成 Gilbert type 沖積扇 (Chou et al., 2012)。羅佳明等 (2013) 亦以蘇花公路 115.9K 崩塌案例作為對象, 分別以 Midas GTS 與離散元素法 (PFC) 進行邊坡崩壞數值模擬, 同時藉由模擬結果探討岩屑崩滑之運動歷程與堆積特徵。林銘郎等 (2013) 針對蘇花公路近年來 115.7K-116.1K 路基坍塌之破壞機制與搶災歷程加以分析, 同時也對大坑溪集水區內的出露剪裂帶 (shear zone) 及未來潛在發展進行評估。李璟芳等 (2013) 以地質災害潛勢圖與現地岩體評分系統 (Rock Mass Rating System), 進行台 9 線蘇澳至南澳段道路災害潛勢等級評估, 並依山區斜坡單元對道路沿線進行劃分, 其中高災害潛勢路段佔全道路長度之 44.0%。

根據台 9 線蘇澳至東澳段 2007 年至 2012 年之災害分類與發生次數統計, 落石或岩屑崩滑之發生頻率以九宮里及東澳嶺路段較高 (公路總局防救災資訊系統網頁; <http://bobel68.tw/>)。本研究為了釐清東澳嶺上邊坡 (115.8-116.4K) 災後地形演育, 首先以歷史致災雨量進行臨界降雨分析, 為了進一步獲取陡峭與溪谷地形遮蔽效應下之局部地形變化, 並補足該處陡峭地形之細微特徵, 輔以全波形空載光達 (型號: Riegl LMS-Q680i, 2011 年 7 月施測) 及地面光達 (型號: Riegl VZ1000, 2013 年 7 月施測) 掃瞄產製 2 公尺高精度數值高程模型, 結合多期遙測影像 (multi-temporal remote sensing image), 進行現地地質調查, 探討地形演育、崩塌轉化為土石流之演化機歷程, 最後配合災後現地調查驗證, 探討大坑溪土石流沖淤特性, 以提供後續監測處置依據與減 (離) 災措施規劃參考。

二、研究區域概述

1. 地理與地質概述

研究區域為大坑溪集水區內之東澳嶺崩塌地, 位於宜蘭縣蘇澳鎮境內東側 (圖 1 中之紅色方框處), 西與中央山脈接壤, 東瀕臨太平洋。台 9 線位處山勢陡峭的海岸山麓側, 路線多隨地形變化而蜿蜒, 道路線平均高程介於海拔 220-280 m, 本區地形主要為西高東低, 愈往南其地勢愈高。本研究範圍介於台 9 線 115.8-116.4K 之間。東澳嶺最高點標高為 800 m, 與太平洋距離僅有 1.2 km, 屬於陡降地形 (坡度多大於 30 度)。根據中央地質調查所五萬分之一臺灣區域地質圖-蘇澳及南澳圖幅資料顯示 (林啟文等, 2009), 本崩塌地屬於東澳片岩中的角

閃岩出露區域, 其位態約為北偏西 45 度、南傾 65 度, 其坡向大致向西南。雖該處角閃岩強度甚高 (單壓強度約 700 kg/cm²), RMR 分級為 III 級 (坡地環境地質資料庫查詢系統資訊網, 中央地質調查所), 但因其風化程度較高, 屬極破碎之地質材料。地質圖中顯示東澳斷層 (存疑) 通過 116.7K 及大坑溪下邊坡溪谷, 本研究區位於中央地質調查所公告環境地質圖中岩屑崩滑與落石中潛勢區 (坡地環境地質資料庫查詢系統資訊網, 中央地質調查所), 其中大坑溪上游流動段屬於東澳片岩中的石墨雲母片岩區 (圖 1)。下游河床兩側於 2012 年 12 月 24 日下邊坡崩塌後出露數條剪裂帶 (圖 1)。

2. 水文氣象條件

本研究區位處東亞熱帶季風氣候迎風帶, 雨量充沛, 根據中央氣象局蘇澳站 (站號: 46706) 資料分析 (1971-2009 年, 表 1), 年平均雨量達 4,480 mm 以上, 平均降雨日數為 210 天, 降雨以 10-12 月最多, 每年以 7 月氣溫最高 (攝氏 32.0 度), 1

表 1 蘇澳與東澳嶺氣象站年平均雨量統計表 (data from Taiwan Central Weather Bureau)

Table 1 Averaged monthly rainfall in Suao and Dong-Ao Peak meteorological stations

月份	1	2	3	4	5	6
月平均雨量 (mm)	蘇澳 364.9	339.7	211.2	192.8	267.4	248.8
	東澳嶺 687.8	659.3	328.0	215.0	797.0	363.5
月份	7	8	9	10	11	12
月平均雨量 (mm)	蘇澳 178.7	280.7	536.9	719.6	696.6	422.7
	東澳嶺 207.2	462.7	328.0	962.5	951.0	1019.2

註: 蘇澳站: 1971/1 至 2009/12 年資料; 東澳嶺站: 2011/7 年至 2013/12 年資料。

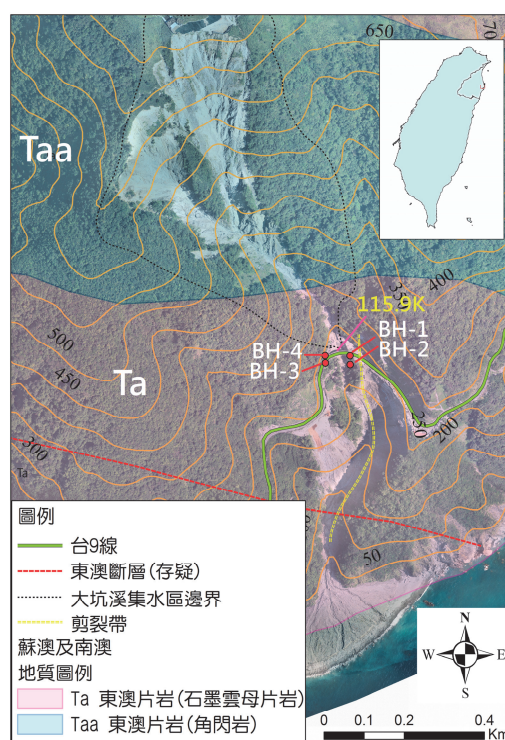


圖 1 東澳嶺崩塌地地理位置 (台 9 線 115.9K) 之地質圖

Fig.1 The location (115.9K of Route 9) and geological settings in the Don-Ao peak landslide area

月份氣溫最低為攝氏 12.9 度。氣象局於 2011 年 7 月後於東澳嶺新設雨量站 (站號：C1U84)，根據 2011-2013 年之總雨量統計顯示，此區年平均雨量高達 6,558 mm (表 1)，其值約為蘇澳站之 1.5 倍。整體而言，東北季風期 (10 月至隔年 1 月)、梅雨季 (5-6 月) 及颱風季 (8-10 月) 最常為本區帶來豐沛降水。

三、致災降雨事件及水文分析

1. 遙測影像地貌判釋

本研究蒐集 2003-2013 年共八期遙測衛星影像與正射航照圖 (圖 2)，期間共涵蓋了影響研究區域內之四場颱風事件與

兩場降雨事件。遙測影像判釋顯示研究區域於 2003-2009 年屬植生良好之林班地 (圖 2(a))，直至 2009 年芭瑪颱風侵襲後，研究區中游始出現新生崩塌地 (圖 2(b)A 處)，116.4K 上、下邊坡則有裸露崩塌地形成。2010 年梅姬颱風發生前，大坑溪中游崩塌地鄰近蝕溝已呈現顯著沖蝕裸露情形 (圖 2(c)A 處)，上游左翼支流亦有蝕溝溯源發展之跡象 (圖 2(c)B 處)，另於 116.1K 與 116.8K 下邊坡處蝕溝侵蝕正逐漸發展至道路面，為後續本區 115.8K-115.9K 重大路基坍塌阻斷雙向交通災害 (2011 年 10 月 27 日, 2012 年 10 月 24 日) 啟動破壞徵兆。梅姬颱風 (2010) 侵襲台灣東部地區後，其崩塌地與蝕溝樣貌已清楚呈現，位於 115.9K 之大坑橋下邊坡兩側溝床也受到了

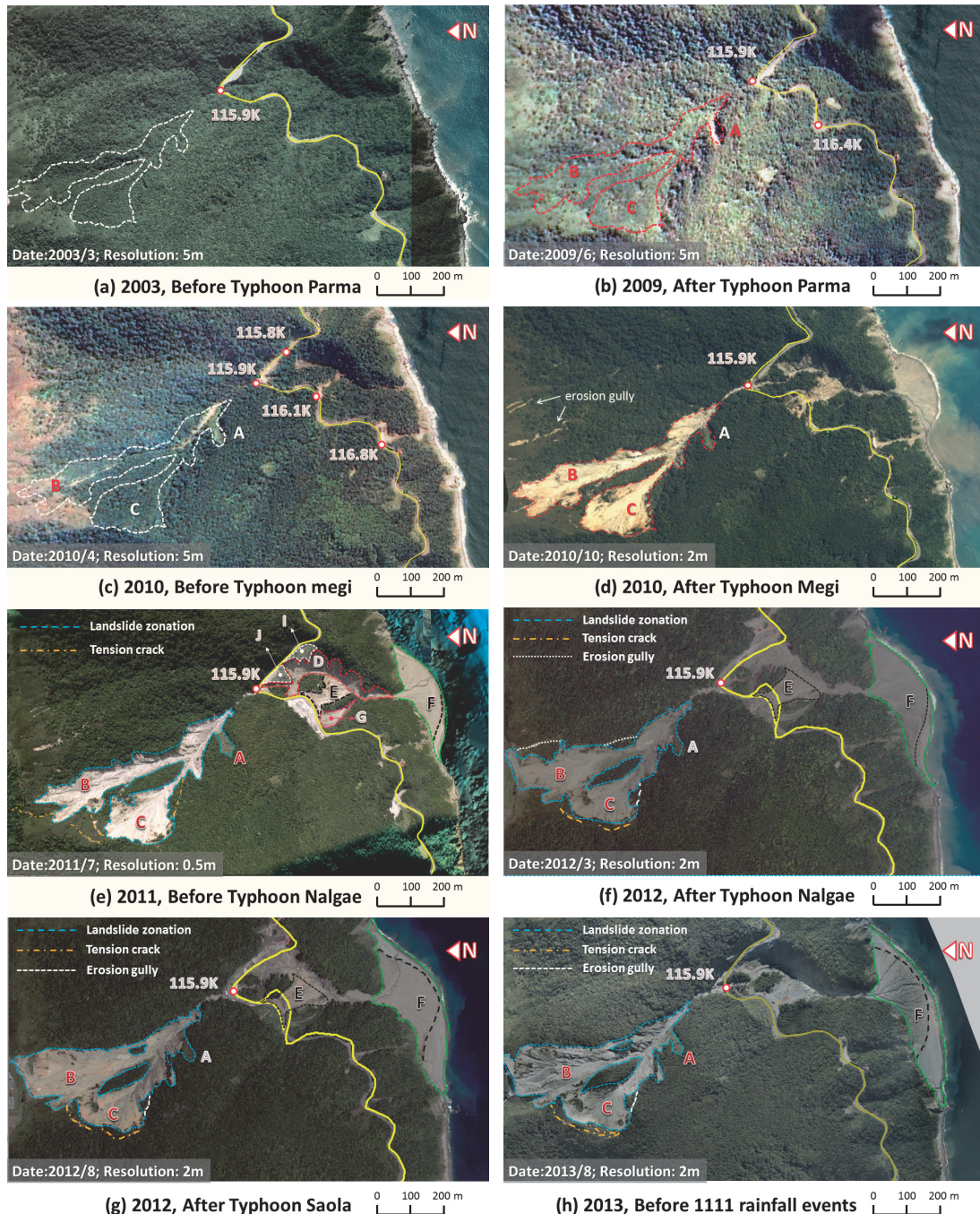


圖 2 東澳嶺崩塌地歷年遙測影像比對 (FS-2, SPOT 5)

Fig.2 Comparison of remote sensing interpretation at the Don-Ao Peak landslide area between 2004- 2013(FS-2, SPOT 5)

嚴重之側蝕與淘刷，並誘發 116.1K 下邊坡路基坍塌與道路中斷 (圖 2(d))，於東側太平洋上形成對稱之土石流沖積扇。至 2011 年 7 月時，東澳嶺下方兩葉狀崩崖上緣數條顯著張力裂隙持續發展 (圖 2(d), (e), (f)B 及 C 處西北側)，其延伸長度約有數十米至一百米不等；且受到巨量土石流冲刷所致，115.9K 下邊坡之溪溝側岸崩塌愈形嚴重 (圖 2(e)D, E, I 與 J 處)，另東北側自然野溪集水區上游也始見清晰的蝕溝發育特徵。2011 年奈格颱風與外圍環流挾帶豪雨侵襲本研究區後，東澳嶺下緣的葉狀崩塌地持續沿張力裂隙溯源發展 (圖 2(f)B 與 C 處北側)，並沿擴大之崩塌地產生新的張力裂隙與側邊蝕溝。2012 年歷經 512 豪雨及蘇拉颱風後，大坑溪上游左翼崩塌地再次溯源擴大 (圖 2(g)B 處東北側)，兩葉狀崩塌地匯流處之蝕溝下切作用亦導致河道左岸局部崩滑。受 2012 年 12 月中旬連日豪雨影響，115.8K 下邊坡鄰近大坑溪處發生路基坍塌 (2012 年 10 月 24 日)，導致交通阻斷長達一個月之久。由於 2013 年本研究區並無重大颱風降雨事件，故對崩塌地地形變遷影響較輕微，僅 11 月 11 日上游右翼崩塌地裸露蝕溝持續溯源侵蝕造成局部崩塌與土石流 (圖 2(h))。受到台 9 線 116.4K 及 116.8K 兩處蝕溝之土砂運移沉積，115.9K 大坑溪出口之沖積扇範圍，近年來有逐漸向西擴大之跡象 (圖 2(h) F 處)。研究區上邊坡及沖積扇於各颱風降雨事件後之崩塌與堆積正射投影面積則繪如表 2 所示。從遙測影像判釋得知，東澳嶺下方兩葉狀崩塌料源區 (lobe-shaped source area) 歷年災害最大崩塌深度接近 30 m，主崩崖 (main scarp) 仍持續向上游溯源擴張，為供應本區土砂的主要來源。

2. 致災降雨事件及崩塌時間推估

根據歷史災害紀錄得知東澳嶺上邊坡之主要崩塌土砂災害始於 2009 年芭瑪颱風，崩塌時間點為透過現地訪查與文獻資料蒐集而得 (中央地質調查所，2010；李光敦，2010；林銘郎等，2013；羅佳明等，2013)，本研究彙整了自 2009-2013 年造成該區域邊坡崩塌之重要降雨事件。如表 3 所示，包含四場颱風事件與兩場降雨事件，各事件之降雨組體圖與有效累積雨量如圖 3 所示。有效累積降雨係指

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \quad (1)$$

式中 $\alpha = 0.7$ ， R_0 為該時刻之前 0-24 hr 之累積雨量， R_i 為該時刻之前 25-48 hr 之累積雨量。雨場切割則以 6h 內總雨量 < 4 mm 為雨場結束點。在各致災之颱風事件中，2012 年蘇拉颱風為直接登陸 (花蓮縣秀林鄉) 所挾帶豪大雨災害引起之災害。由中央氣象局東澳站雨量資料顯示 2010 年 10 月 19 日至 10 月 21 日東澳總累積雨量達 939 mm，其 121.0 mm/hr (10 月 21 日 13:00-14:00) 之高降雨強度也改寫了蘇東澳歷史雨量紀錄。經現地訪查得知，東澳嶺之崩塌始於 12:30-13:30(2010/10/21)。隔年奈格颱風 (2011 年 10 月 2 日) 雖未登陸台灣本島，但外圍環流及東北季風共伴引發之豪雨，累積雨量達 645.5 mm，最大降雨強度達 78.5 mm/hr。2012 年 5 月 12 日因梅雨季受到午後對流雲系影響，超大豪雨侵襲南澳地區，其致災時東澳嶺所測得之雨量為 428.5 mm，降雨強度為 32.5 mm/hr。同年蘇

拉颱風 (2012 年 8 月 2 日) 因於花蓮登陸後呈現原地打轉之現象，其停滯期間所挾帶豐沛雨量對蘇花公路沿線造成區域性土砂災害與重大災損，東澳嶺崩塌地再次發生岩屑崩滑與土石流災害，災害發生之累積雨量達 786 mm 及降雨強度為 80.0 mm/hr。隔年東北季風 (2013 年 11 月 11 日) 之致災降雨強度雖僅有 10 mm/hr，但其高累積雨量 (315.0 mm) 於東澳嶺右翼崩塌地誘發了岩屑崩滑與土石流 (發生時間為 11:00；現地訪視調查)。

3. 降雨水文分析

為了進一步闡述四場較高雨量之颱風降雨強度 (intensity)、延時 (duration) 與頻率 (frequency) 三者間關係，本研究採用三參數 Horner 公式 ($I=A/(t+B)^n$)； A, B, n 皆為常數) 推估降雨-延時-頻率曲線 (I-D-F curve) 對 2009-2013 年颱風事件進行探討，因 Horner 公式可應用於合理化公式推估小面積流域洪峰流量，且可依氣象、排水或防洪目的，針對不同降雨延時進行分析，故於台灣為最常被應用之降雨強度公式。經分析研究區域內三座雨量站，僅蘇澳站 (站號：467060；1981~迄今) 可提供較長時間 (20 年) 記錄資料，因此選用蘇澳站雨量紀錄繪製 I-D-F 曲線 (盧瑞興等，2003；李光敦，2010)。如圖 4 所示，若將研究區四次颱風降雨紀錄與蘇澳雨量站之 I-D-F 曲線比較，結果顯示僅 2011 年奈格與 2012 年蘇拉颱風之短延時降雨強度 (60 min) 略低於 200 年重現期距之降雨強度，但其長延時降雨強度皆明顯高於 200 年頻率。突顯近年來頻繁且豐沛的高強度降雨特性，為誘發研究區土砂災害之顯著驅動因子。

表 2 東澳嶺崩塌地與沖積扇面積變化

Table 2 The area variation of landslide and alluvial fan at Don-Ao Peak

事件名稱	芭瑪颱風後 (2009)	梅姬颱風後 (2010)	奈格颱風後 (2011)
崩塌地面積 (m ²)	5,638	89,574 ^[4]	119,449
沖積扇面積 (m ²)	-	49,040 ^[4]	63,370
事件名稱	512豪雨後 (2012)	蘇拉颱風後 (2012)	1111豪雨前 (2013)
崩塌地面積 (m ²)	123,387	136,405	136,530
沖積扇面積 (m ²)	65,920	77,828	73,103

[4]註：引用自參考文獻[4]

表 3 2009-2012 年東澳嶺崩塌地降雨事件

Table 3 Typhoon scenarios for landslide events at Dong-Ao Peak from 2009-2012

事件名稱	芭瑪 (Parma)	梅姬 (Megi)	奈格 (Nalgae)	0512豪雨	蘇拉 (Saola)	1111豪雨
致災時間	2009/10/5	2010/10/21	2011/10/02	2012/05/12	2012/08/02	2013/11/11
颱風路徑*	特殊	9	-	-	2	-
共伴效應	-	東北季風	東北季風	-	-	東北季風
致災降雨強度 (mm/hr)	110.0	121.0	78.5	32.5	80.0	10.0
致災有效降雨 (mm)	527.5	704.7	645.5	428.5	786.0	315.0

*註：颱風路徑係參考中央氣象局所發布之分類資訊

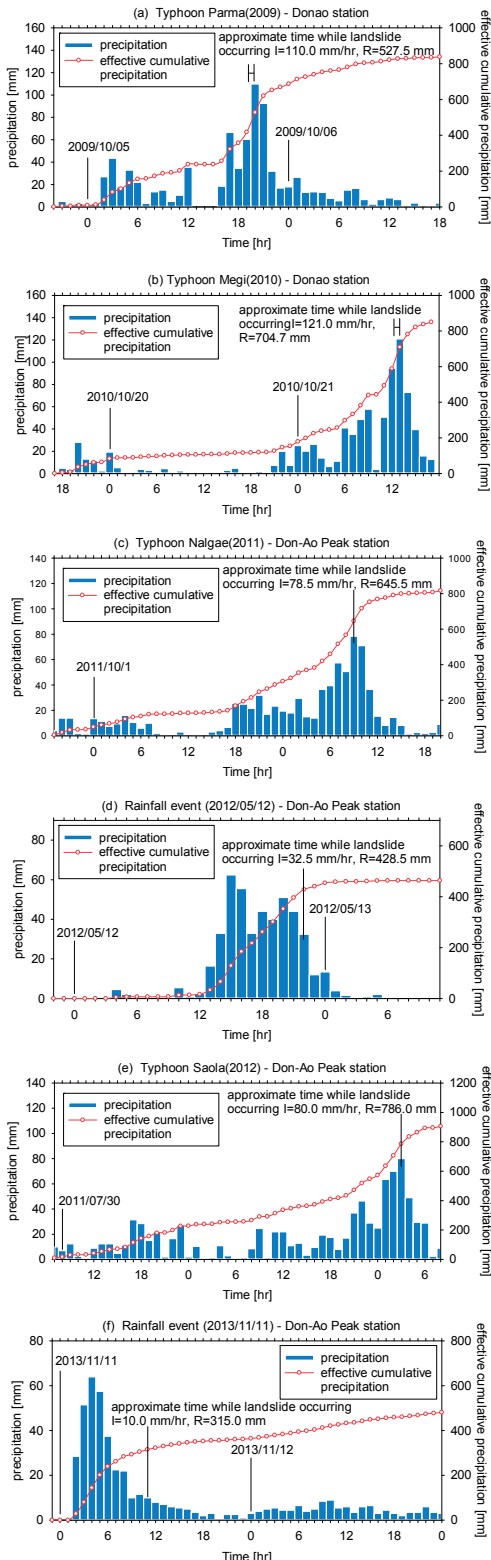


圖 3 2009-2013 年致災事件降雨組圖；(a) 芭瑪颱風 (2009)；(b) 梅姬颱風 (2010)；(c) 奈格颱風 (2011)；(d) 0512 豪雨 (2012)；(e) 蘇拉颱風 (2012)；(f) 1111 豪雨 (2013) (data from Taiwan Central Weather Bureau)

Fig.3 Hourly intensity and effective cumulative precipitation for (a) typhoon Parma (2009), (b) typhoon Megi (2010), (c) typhoon Nalgae (2011), (d) 0512 rainfall event (2012), (e) typhoon Saola (2012), and (f) 1111 rainfall event (2013)

本研究另根據 2004-2013 年歷史山崩災害紀錄 (公路總局防災救災資訊系統網頁；<http://bobe168.tw/>) 與鄰近氣象局雨量站資料建構致災降雨臨界線，有效累積雨量採氣象局雨量站各降雨事件之有效累積雨量，平均降雨強度則採用山崩事件雨場之平均時雨量強度。如圖 5，有效累積雨量與臨界雨量強度兩參數構成臨界雨量線可判定誘發坡面岩屑崩滑之觸發雨型。從研究區近十年致災事件雨場得知，其 $I-R$ 圖上之降雨臨界線可定義為 (圖 5(a))

$$R_e + 53.5 I_{ave} = 1,146 \quad (2)$$

式 (2) 中，降雨臨界線可區分致災雨場 (線上方) 與非致災雨場 (線下方) 之門檻值； R_e 為有效累積雨量； I_{ave} 為平均降雨強度。由歷次六場致災降雨事件資料歸納，其災前有效累積雨量皆大於 300 mm。若與農委會水土保持局公告之蘇澳鎮土石流警戒雨量 (500 mm) 相較 (土石流防災資訊網；<http://246.swcb.gov.tw/>)，則 512 豪雨與 1111 豪雨災害致災總雨量略低於 500 mm。另本研究區 $I-D$ 圖之降雨臨界線 (圖 5(b)) 也呈現了致災與非致災雨場間的差異性，當降雨時距愈長，所需之致災降雨強度也相對較低。其致災降雨強度與延時之臨界條件可以幕次回歸關係式加以描述

$$I_{ave} = 98.8 D^{-0.54} \quad (3)$$

式 (3) 中， D 為降雨延時。圖 5(b) 中之虛線 (THB) 為公路總局於該路段所發布之封路累積降雨基準值 290 mm (公路總局防災特報；<http://www.thb.gov.tw/TF1/Def01.aspx>)，由上式所獲得之致災降雨臨界線，僅 2007 年聖帕颱風案例較接近臨界線外 (未致災)，大致上可作為本區域判別土石災害發生之降雨臨界關係。

四、災害調查分析

1. 災後崩塌區地文特性

本研究於 2010 年梅姬颱風、2011 年奈格颱風、2012 年蘇拉颱風及 2013 年 1111 豪雨後後至現地進行數次調查，除蒐集 115.9K 鄰近區域土石災害發生後現況，並探討大坑溪河道內

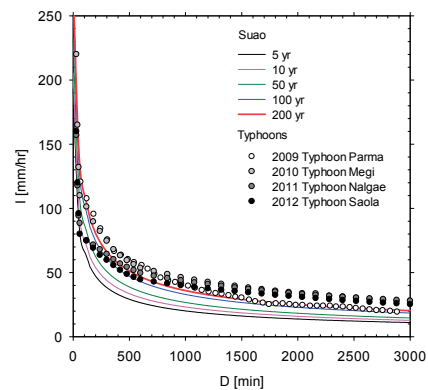


圖 4 蘇澳雨量站之降雨-延時-頻率 (I-D-F) 曲線與歷年颱風降雨紀錄比較

Fig.4 Comparison of I-D-F curve and historical rainfall record in Suao rainfall station

受降雨誘發之沖蝕與堆積特徵。由歷次災後現場調查得知 (圖 6), 崩塌土方受重力或降雨崩滑至大坑溪河道內時, 常因渠道斷面束縮造成壅塞。其流動段堵塞點有二, 一為中游舊防砂壩處 (圖 6(a), 位於岩性分布交界帶附近), 另一為台 9 線上大坑橋處 (既有涵洞通洪斷面不足)。當大坑橋處土石流通洪斷面受阻時, 部分巨礫或土砂遂溢淹至台 9 線路面, 進而阻斷道路交通 (圖 6(b))。於崩塌地現地調查中, 可發現上游兩葉狀崩塌地所夾植被良好之突出岩體, 為東澳片岩中的角閃岩出露區域 (圖 7), 雖岩體强度高, 惟因風化作用顯著, 使出露岩體多呈現三組劈理之破壞面 (圖 7(a)), 故可見東澳嶺崩崖處下方裸岩皆呈現極為破碎之塊狀材料 (圖 7 (b))。於 2010 年梅姬風災後, 大坑溪中游之岩性交界帶 (角閃岩/片岩) 附近存在一地下水滲出點 (exfiltration point, 圖 7 (c)), 為大坑溪內之地表逕流來源之一。該處位於芭瑪颱風災後最早引致崩塌處之上緣, 顯示地表下已形成地下水滲流通路, 地下水滲出所供應之持續

地表逕流, 對於降雨時大坑溪內崩積土流體化現象之啟動具有重要之影響。東澳嶺兩翼崩塌地匯流處之突出岩體 (圖 7 (d)), 因其岩體較為完整仍屬穩定狀態, 該區域崩塌行為主要以上游面之舊崩塌擴大為主。在坡型分類特徵上, 本研究區屬道路內彎線型, 且大坑溪集水區地貌具有凹澹坡型特徵, 溪谷有利於岩屑堆積與水流匯集, 地文條件上具備易致災地形特性。

2. 地質構造與破壞機制

葉恩肇 (1998) 由蘇澳-南澳地區的葉理面分布中指出, 北側岩層次生葉理多朝南傾斜; 反之, 南側岩層則相反, 呈扇狀構造 (fan structure), 並以角閃岩體為核心。地質分區上, 研究區隸屬中央山脈東翼地質區, 受到板塊碰撞帶之大地應力 (由南向北) 推擠所致, 使本區域常見板岩或片岩沿葉理面滑移之破壞型態。圖 8(a) 及 (b) 分別說明了大坑溪左岸災後於

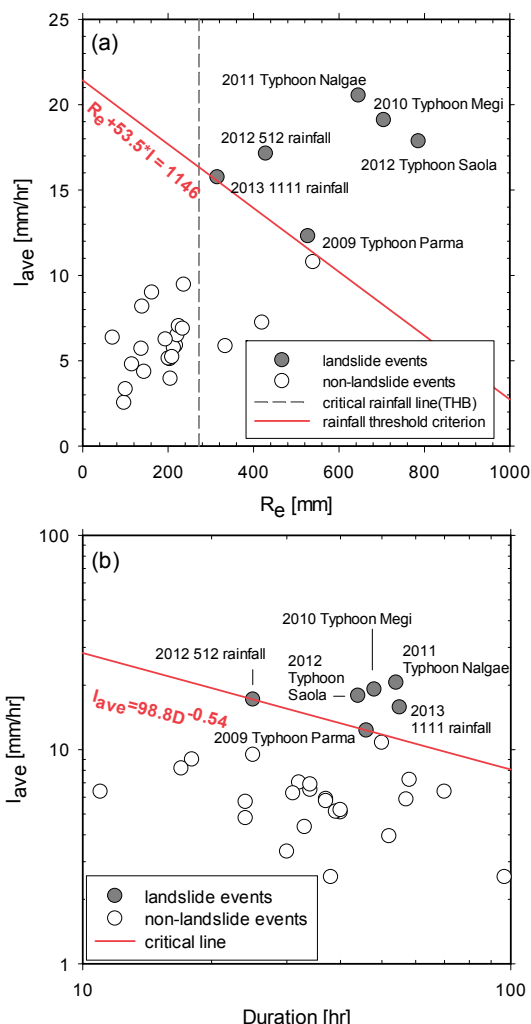


圖 5 大坑溪集水區土石災害發生之降雨臨界線 (a) 平均降雨強度與有效累積雨量 (I-R) 降雨臨界線圖; (b) 平均降雨強度與降雨延時 (I-D) 降雨臨界線圖

Fig.5 The critical rainfall line for landslide at Dakeng catchment watershed (a) the diagram of I-R critical rainfall line with mean rainfall intensity versus effective accumulative rainfall ; (b) the diagram of I-D critical rainfall line with mean rainfall intensity versus duration



圖 6 台 9 線 115.9K 大坑橋土石堵塞 (a) 梅姬颱風後; (b) 奈格颱風後 (photos : Directorate General of Highways, M.O.T.C.)

Fig.6 The Dakeng bridge at 115.9K of Route 9 was blocked up with debris flow after (a) typhoon Megi and (b) typhoon Nalgae

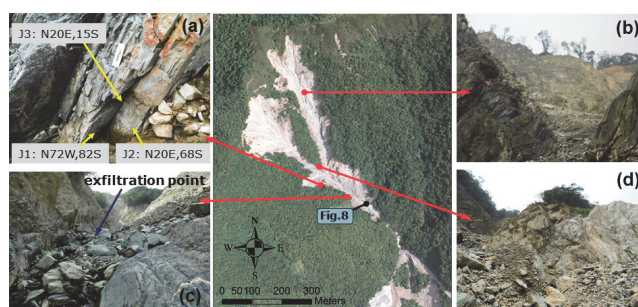


圖 7 東澳嶺崩地現地調查

Fig.7 Onsite survey in the Don-Ao Peak landslide

2011 年及 2012 年片岩受重力變形 (其位置標註於圖 7 中⑧)，沿葉理面滑移之漸變發展情形。一般而言，具葉理狀之風化岩體沿著葉理面朝重力方向呈彎曲傾覆破壞 (flexural toppling failure)，若同時存在一組交叉之節理組 (cross-joint set) 於上述岩體，當岩體無法承受伸張彎曲應力 (bending stress) 時，則坡體將產生塊狀傾覆破壞 (blocky toppling failure) 或彎曲塊狀傾覆破壞 (block-flexural toppling failure, Amini et al., 2012)。

建業工程 (2011) 之地質鑽探調查指出 (圖 1, BH-1, BH-2, BH-3, BH-4, 鑽探點高程介於 234-240 m, 鑽孔深度為 30-40 m)，位於大坑橋左側之地表崩積層分布甚廣，約為 0.7-1.7 m (BH-1, BH-2)，而右側之地表崩積層更深達 2.2-15.5 m (BH-3, BH-4)；由鑽探柱狀圖大致可將下邊坡地層特性歸納為三層：(1) 表層之崩積層 (結構鬆散具壓縮性)；(2) 片岩層 (黑色片岩為主、岩層破碎，裂面鏽染)；(3) 變質砂岩層 (偶夾片岩，約介於地表下 16-23m，為較完整之岩心)；地下水位觀測井量測資料則顯示本區平時地下水位約介於地表下 10-20 m，降雨時則升高至 3-10 m。透過地質鑽探與力學試驗分析得知，台 9 線 115.9K 下邊坡岩體屬於甚弱岩-弱岩 (ISRM 分類)，片岩層多呈破碎狀且工程性不佳 (建業工程，2011)；降雨時，雨水易沿著破裂的岩層入滲而增加坡體深部的地下水壓，進而降低抗剪應力，產生邊坡滑動破壞。梅姬颱風侵襲後，造成大量宣洩而下之土石流冲刷下邊坡坡趾，造成局部岩屑崩滑，台 9 線道路鋪面亦生成數道長約數 10 m 之垂直裂隙 (平行道路中心線)，此垂直裂隙同時反映了地表崩積層的破壞與深部岩體重力變形之結果，並為奈格颱風 (2011 年 10 月 11 日，圖 9) 及後續豪雨事件 (2012 年 12 月 14 日) 埋下 115.7-115.9K



圖 8 具葉理狀岩體受重力漸變破壞示意圖 (date: 2012/5/24)
 Fig.8 An examples of rock mass creeping. The site is indicated in Fig.7



圖 9 台 9 線 115.8K 路徑垂直裂隙 (date: 2011/10/27)
 Fig.9 Vertical crack along the roadway at 115.8K of Route 9

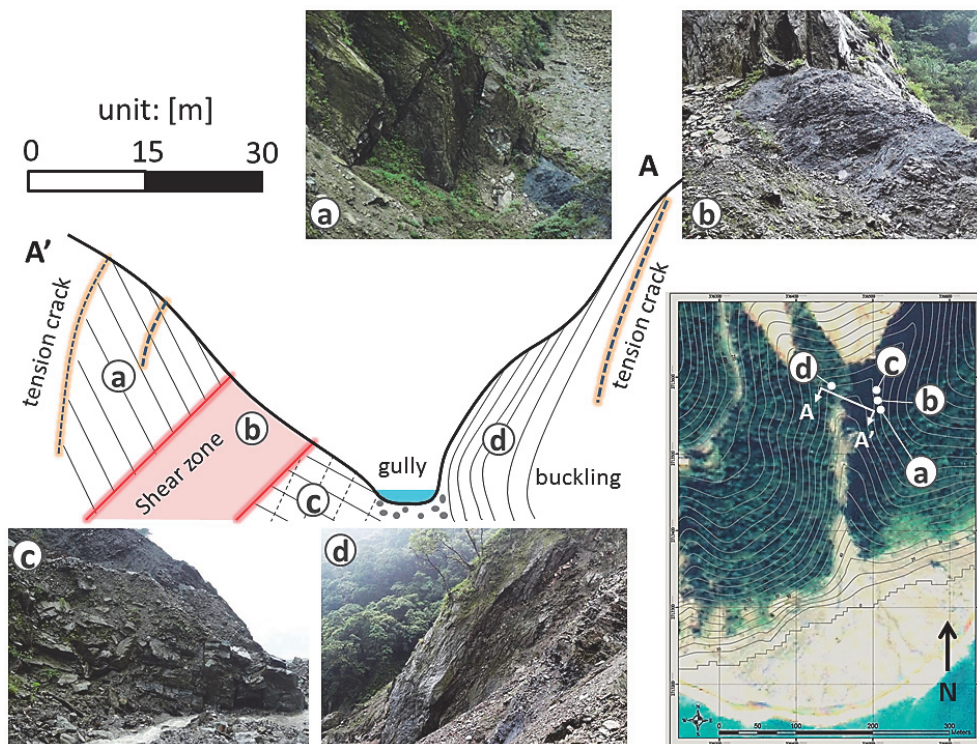


圖 10 東澳嶺崩場下邊坡地質構造斷面圖
 Fig.10 the schematic sketch of geological structure at the downstream of the Dong-Ao peak landslide

路基後退式坍塌破壞 (regressive failure) 前兆。由現地勘查發現 (圖 10, A-A'剖面), 除河岸左右兩側均有斷層剪裂帶出露外 (圖 10(b)) 相關特性於下節中說明, 左岸趾部與右岸坡體可見平行河道中心線的垂向張力裂隙 (圖 10(a)), 較不利於坡體穩定性; 鄰近河床處則常見沿葉理面崩解之趾部淘刷破壞 (圖 10(c))。此外在大坑溪與 116.1K 楔型破壞下邊坡鄰接處則可見黑色片岩劈理面受重力變形之彎曲現象 (buckling, 圖 10(d)), 河岸岩坡鄰近河道處則有劈理弱面發育崩解形成倒懸。

研究區域內現地調查所量測之不連續面 (含葉理及節理) 位態資料如圖 11(a) 及圖 11(b) 所示, 進一步利用不連續面方位分布次數所繪製之密度分布圖可知 (圖 11(c)), 研究區域內之不連續面方位以西北西-東南東走向及東北-西南走向為主, 而現地調查所得之主控崩塌發生不連續面方位大致以西北西-東南東走向為主, 顯示本區域颱風豪雨所引致之大規模崩塌主要受地質條件主控, 其中不連續面位態與邊坡之交互關係 (例如是否形成順向坡) 更是扮演重要角色, 而強降雨所引起地表逕流與地下水滲流作用則為促崩因子。另由歷史地震紀錄得知, 2010 年 10 月 15 日梅姬颱風前, 第 109 號地震 (2010 年 10 月 3 日) 曾於南澳測站觀測到五級震度 (資料來源: 中央氣象局), 其南-北向地表加速度 (195.6 gal) 接近直接驅動山崩之地震門檻值 (250 gal), 研判應為造成東澳嶺大規模崩塌之重要誘發因子。

3. 剪裂帶與斷層泥特性

根據中央地質調查所發行之 1/50,000 台灣地質圖 (蘇澳圖幅, 圖號 16, 中央地質調查所) 與 2012 年 12 月 24 日台 9 線 115.8K 路基坍塌後之勘查文獻指出 (林啟文等, 2009; 林銘郎等, 2013), 本研究區域內存在一條西北-東南走向的東澳斷層 (存疑) 線外, 該地質構造造就了台 9 線大坑橋北側 (N70°W/56°N) 與南側 (N50°W/40°S) 迥然相異之片理位態。透過現地勘查發現, 而大坑橋路面至下邊坡溪谷兩側, 另有一條接近南-北走向之剪裂帶斷層泥出露。林銘郎等 (2013) 研判大坑溪下游河谷即為一斷層谷, 其向上延伸至大坑橋左側上邊坡 (出露約 5 m 寬), 本研究經由現地調查也確認了大坑溪下游左右兩側河岸構造差異特性 (圖 12), 左岸以黑色片岩為主 (夾綠色片岩), 低傾角剪裂帶沿坡趾處呈帶狀往下游溪谷方向延伸。右岸岩體組成多為灰色砂質片岩與綠色片岩, 其剪裂帶分布呈現高角度向南傾斜之特性。蘇澳圖幅地質圖所標定之存疑東澳斷層位置與本研究現地調查結果大致相符, 其約略通過 116.4K 蝕溝下邊坡與大坑溪之交會點。圖 12(a) 中右岸斷層泥出露位置向 116.1K 上坡面延伸, 似與梅姬颱風後 116.1K 道路削坡工程後, 岩坡上所見之剪裂帶分布位置相近, 惟目前該邊坡已施作護坡工程, 較不易進行現地調查驗證。

葉恩肇 (1998) 曾於研究中指出東澳地區 115.7-115.9K 間存在一韌性剪切帶, 林銘郎等 (2013) 由現地調查推論於韌性剪切帶之另一側, 應有脆性斷層帶發育於其上, 該破碎帶可能存在於 115.9K 岩性交界帶介面上。為了進一步釐清出露斷層泥基本土壤特性, 本研究於 2013 年 5 月 8 日採集台 9 線 115.85K 上、下邊坡出露剪裂帶斷層泥 (圖 12(b) 及 (c)) 進行

室內土壤基本特性分析, 經由阿太保限度試驗後, 其液性限度 (Liquid Limit, LL) 為 23.50, 塑性指數 (Plastic Index, PI) 為 11.90, 依統一土壤分類法 (USCS), 該處斷層泥屬於低塑性黏土 (low plasticity clay)(表 5), 為滲透性較差, 屬工程應用上欠佳之材料, 其阻水特性與新建壩體穩定性值得後續密切關注。

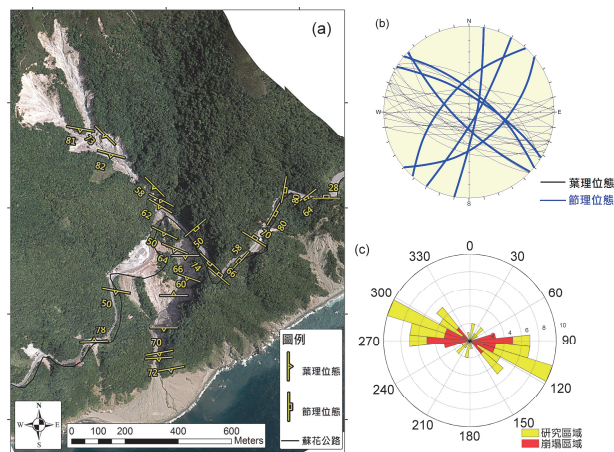


圖 11 (a) 不連續面位態量測資料、(b) 不連續面立體投影圖與 (c) 不連續面方位密度分布圖

Fig.11 (a) attitude of discontinuities; (b) stereographic projection of discontinuities; (c) discontinuities density in the study area

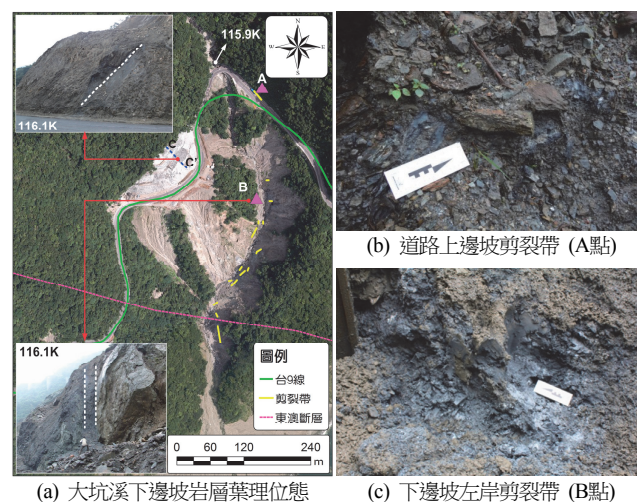


圖 12 大坑溪下游段剪裂帶空間分布圖 (date: 2013/05/08)

Fig.12 The spatial distribution map of shear zone at downstream of the Dong-Ao peak landslide

表 5 台 9 線 115.9K 剪裂帶斷層泥特性分析

Table 5 The characteristics of fault gouge on 115.9K of Route 9

試驗組別	1	2	3
水重 W_w (g)	0.66	0.60	0.71
乾土重 W_s (g)	5.43	4.97	6.71
含水量 (%)	12.15	12.07	10.58
液性限度 LL	23.50		
塑性指數 PI	11.90		
統一土壤分類	CL(低塑性黏土)		

4. 地形剖面變異

本研究以 2004 年、2011 年 (梅姬颱風後, 空載光達施測) 及 2013 年 (蘇拉颱風後, 地面光達施測) 三期數值高程地形進行比對 (圖 13), 剖面線位置如圖 13 插圖 (由東澳嶺右翼崩塌地沿大坑溪至河口沖積扇) 所示, 此三條剖面分別代表災前與近期兩次重要颱風事件後之地形變異。圖中說明梅姬颱風前後 (圖 13 黑色虛線與藍色實線) 主要崩塌與沖蝕區位發生於東澳嶺下緣 (崩滑深度最深約 30 m) 及兩葉狀崩塌地交會後之大坑溪中游段 (最大沖蝕深度約 15 m), 災後河谷底床處處可見岩層出露, 而大坑橋中游原存在兩座舊防砂壩於梅姬風災後淤滿且遭沖毀, 並於台 9 線大坑橋下方處形成堆積。而大坑溪下邊坡河道轉彎處 (圖 13 中 curved channel 處) 於梅姬風災後亦顯示有較深之底床冲刷 (約 25 m), 此一特性主要與彎道攻擊岸及土石流側岸侵蝕造成局部淘刷有關, 另於河口處, 則可顯見一呈現緩坡變化之沖積扇堆積地形 (坡度約 8.9°), 並以 Gilbert-type 三角洲型式 (Gilbert, 1890) 沒入太平洋中。Chou et al., (2012) 根據水下側掃聲納量測結果, 其沒入海床底部之沖積扇延伸段長達約 150 m。比較梅姬與蘇拉颱風前後期之地形剖面變化, 僅鄰近東澳嶺上游右翼崩塌裸露地, 沿舊張力裂隙形成崩崖後陷落之地表滑移, 另於大坑溪上邊坡中游段興建之新壩體因淤滿而呈現局部堆積狀態。下游河道剖面則因土石流流動而漸趨沖蝕下刷, 尤以大坑橋下方及彎道處為最, 沖積扇徑向長度仍維持既有堆積範圍但略有退縮 (約 7 m); 細顆粒堆積區漸趨沖積扇兩側擴張 (東-西向), 探究其原因與 115.9K 鄰近蝕溝 (116.8K, 117.0K) 之局部沖蝕作用有關。惟扇上河道主深槽隨歷次土石流規模與土砂壅塞條件略有改變, 其整體地形變異與現地勘查結果相符。

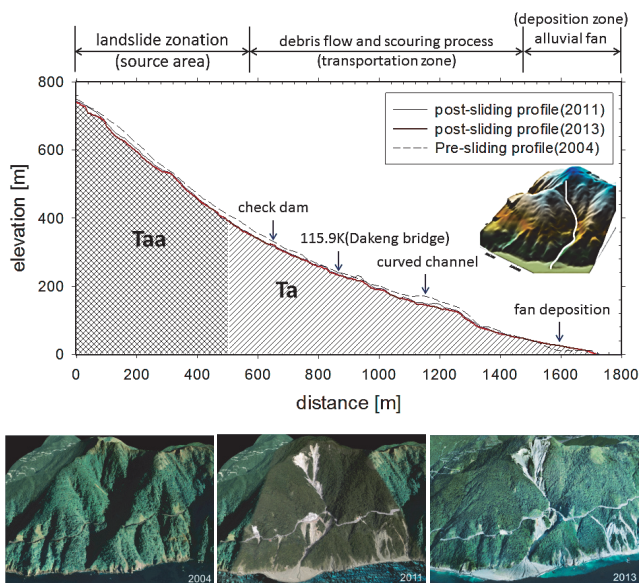


圖 13 東澳嶺崩塌地原形至沖積扇災前後地形剖面與三維地形
Fig.13 Surface profile of the main landslide and the corresponding three dimensional landform in 2004, 2011, and 2013; inset shows the travel path from the source area to the alluvial fan

五、結 論

本研究探討台 9 線蘇花公路 115.8-116.4K 於 2009 年至 2013 年間四場颱風事件與兩場降雨事件後之地形演育特性及崩塌地質構造, 以現地地質調查、遙測影像判釋、高精度數值地形及蒐集颱風、豪雨降雨資料進行研究分析。降雨強度-頻率-延時分析說明研究區域近年來誘發嚴重崩塌之事件雨量多高於 200 年回歸週期。本研究崩塌區內具葉理狀之風化岩體, 常沿著葉理面受重力呈彎曲產生塊狀傾覆破壞或彎曲-塊狀傾覆破壞。採用平均降雨強度 (I_{ave}) 與有效累積雨量 (R_e) 關係圖所獲致之降雨臨界線 ($R_e+53.5I_{ave}=1,146$) 可適切地描述降雨誘發山崩門檻值, 而平均降雨強度 (I_{ave}) 與降雨延時 (D) 臨界線關係圖 ($I_{ave}=98.8D^{-0.54}$) 則可用來評估颱風雨場是否達到致災之潛勢。

由多期遙測影像判釋結果, 可清楚地發現研究區內之崩塌最初由蝕溝溯源侵蝕所引致, 東澳嶺上邊坡崩塌地擴大範圍多沿 2010 年梅姬風災後坡頂之弧型張力裂隙發展, 而下邊坡路基之後退式崩滑災害則與土石流沖蝕坡只及剪裂帶生成有關。不連續面方位密度分布圖呈現裸露崩塌地之裂隙位態大致與區域地質構造位態 (N70°W) 相近, 說明本區大規模崩塌主要仍受地質條件主控。岩坡破壞點位多好發於岩性交界帶鄰近處, 強降雨所引起豐沛地表逕流與地下水滲流作用則為次要誘發因子。剪裂帶採樣之物理試驗分析結果表明此處斷層泥為工程性不佳之低塑性黏土, 其阻水特性對於後續地形演育發展值得密切關注, 未來應進一步監測邊坡體態應變率變化, 以掌握未來颱風降雨事件發生時潛在土砂動向。

六、誌 謝

本研究過程承蒙 交通部公路總局第四區養護工程處、台灣大學土木工程林銘郎教授於災害調查資料提供上之協助, 自強工程顧問公司提供數值地形及中山科學研究院第五所雷射物理組協助地面光達測量, 謹此一併致謝。

參考文獻

- [1] Agliardi, F. (2001). "Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics." *Engineering Geology*, 59, 83-102.
- [2] Amini, M., Majdi, A., and Veshadi, M.A. (2012). "Stability Analysis of Rock Slopes Against Block-Flexure Toppling Failure." *Rock Mech Rock Eng*, 45, 519-532.
- [3] Chigira, M. (2009). "September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan." *Engineering Geology*, 108, 1-15.
- [4] Chou, H.T., Lee, C.F., Lo, C.M., and Lin, C.P. (2012). "Landslide and alluvial fan caused by an extreme rainfall in Suao, Taiwan." *11th International Symposium on Landslides (ISL) and the 2nd North American Symposium on Landslides*, Banff, Alberta, Canada.

- [5] Gilbert, G.K. (1890). "Lake Bonneville" *U.S. Geol. Surv. Monogr.*, 1, 438.
- [6] Hearn, G.J. (2011). "Engineering Special Publication 24 - Slope Engineering for Mountain Roads." *Geological Society of London*. 5-20.
- [7] 李光敦 (2010), 「台 9 線 104k~120k (蘇花公路蘇澳~東澳) 路段梅姬颱風期間災害分析」, 交通部公路總局第四區養護工程處。(Lee, K.T. (2010). *Hazard Analysis at 104k~120k in Route.9 (Suhua Highway, Suao-Dongao) during Typhoon Megi*. Fourth Maintenance Office Directorate General of Highways, MTOC. (in Chinese))
- [8] 李璟芳、黃韋凱、張玉菡、龔樹勇、林文正、陳鶴仁、林振生、陳世昌、廖吳章、張運鴻 (2013), 「以災害潛勢與岩體評分建立山區道路致災指標-以台 9 線蘇澳至南澳段為例」, 兩岸四地公路交通發展論壇研討會, 台北, 台灣, 108-121。(Lee, C.F., Huang, W.K., Chang, Y.L, Chi, S.Y., Lin, W.C., Chen, H.R., Lin, C.S., Chen, S.C., Liao, W.C., and Chang, Y.H. (2013). "Establishing Landslide Hazard Index with Landslide Susceptibility and Rock Mass Rating System on Highway No.9 (Suao-Nanao)." *2nd Conference for highway transportation development*, Taipei, Taiwan. 108-121. (in Chinese))
- [9] 林啟文、高銘健 (2009), 五萬分之一台灣地質圖 (第二版), 圖幅第 16 號, 蘇澳, 經濟部中央地質調查所出版。(Lin, C.W., and Kao, M.C. (2009). *Explanatory Text of the Geological Map of Taiwan, scale 1:50000, Suao, No.16*, Central Geological Survey. (in Chinese))
- [10] 林銘郎、陳仁達、楊賢德、詹佩臻、劉桓吉、林偉雄、羅佳明、廖瑞堂、黃文正、王泰典 (2013), 「蘇花公路 115.7~116.1k 路段三處災害破壞機制之工程地質考量」, 大地技師, 第 6 期, 頁 16-33。(Lin, M.L, Chen, R.T., Yang, X.D., Zang, P.Z., Liu, H.C., Lin, W.K., Lo, C.M., Liao, R.T., Huang, W.C., and Wang, T.T. (2013). "Engineering Geological Assessment for Failure Mechanism at 115.7~116.1k on Suhua highway." *Geotechnical Engineer*, 6, 6-33. (in Chinese))
- [11] 侯進雄、費立沅 (2012), 「臺灣大規模崩塌調查的發展現況」, 地質, 32 卷, 第 1 期, 第 40-43 頁。(Ho, C.S., and Fei, L.Y. (2012). "Recent Development of Investigation for Large-scale Landslide in Taiwan." *Geology*, 32(1), 40-43. (in Chinese))
- [12] 建業工程顧問公司 (2011), 「台 9 線大坑橋改建工程地質鑽探報告」, 交通部公路總局第四區養護工程處。(Jianye Engineering Consultants, LTD. (2011). *Geo-technical Investigation at Dakeng Bridge in Route. 9*, Fourth Maintenance Office Directorate General of Highways, M.T.O.C. (in Chinese))
- [13] 葉恩肇 (1998), 「台灣東北部蘇澳至東澳地區蓬萊造山運動之韌性剪切變形及其構造演化」, 台灣大學地質學研究所碩士論文。(Yeh, E.C. (1998). *The ductile shear deformation and structural evolution of the Penglai Orogeny at Suao-Dongao area in northeastern Taiwan*. Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [14] 經濟部中央地質調查所 (2011), 「梅姬颱風蘇澳地區及蘇花公路災害調查報告」, 中央地質調查所。(Central Geological Survey (2011). *Disaster survey report for typhoon Megi in Suao area and Suhua highway*, Central Geological Survey. (in Chinese))
- [15] 經濟部中央地質調查所 (2012), 「國土保育之地質敏感區調查分析計畫, 中央地質調查所委託研究成果報告」。(Central Geological Survey (2012). *Investigation and analysis for geologically sensitive area in national preservation domain program*, Central Geological Survey. (in Chinese))
- [16] 盧瑞興、張炎銘、林秀娟 (2003), 「台灣地區雨量測站降雨強度-延時 Horner 公式分析」, 經濟部水利署。(Lu, R.X., Chang, Y.M., and Lin, X.J. (2003). *The rainfall intensity-duration equation analysis of rain gauge station in Taiwan*, Water Resources Agency, MOEA. (in Chinese))
- [17] 羅佳明、朱晃葵、李璟芳、周憲德、林銘郎 (2013), 「蘇花公路 115.9k 邊坡調查、穩定分析及運移模擬之研究」, 第十五屆大地工程學術研討會, 頁 214-225。(Lo, C.M., Chu, H.K., Lee, C.F., Chou, H.T., and Lin, M.L. (2013). "Field Investigation, Slope Stability Analysis, and Landslide Simulation of Kinematic Process in Su-Hua Highway 115.9k." *2013 Geotech conference*, 214-225. (in Chinese))

2014 年 04 月 07 日 收稿

2014 年 05 月 19 日 修正

2014 年 06 月 27 日 接受

(本文開放討論至 2015 年 3 月 31 日)