

台 2 線 68K 八斗子落石災害致災成因初探

黃韋凱^{[1]*} 魏倫瑋^[1] 李璟芳^[1] 紀宗吉^[2] 林錫宏^[2] 陳宏宇^[3] 林銘郎^[4]

摘要 基隆市北寧路於 2013 年 8 月 31 日下午發生高強度降雨事件 (最高達 94.5 mm/hr), 並導致台 2 線 68K+000 處於當日 16 時 19 分左右發生落石擊毀小客車之意外。本次落石災害之發生區屬於大寮層中段塊狀砂岩, 且為逆向坡之型態, 現地調查結果顯示本區域具有兩組傾角近乎垂直之節理面, 一組走向約略平行於海岸線, 另一組走向則約略垂直於海岸線。致災成因可能與長期雨水入滲及風化作用有關, 節理裂隙除因風化作用逐漸加大外, 節理面上之含鐵質結核亦可能於風化後體積增加, 進而加速節理開裂速度。本次落石災害之運動歷程大致可分為傾倒、滾動、墜落、彈跳、滾動等數段歷程, 落石運動過程耗時約 23 秒, 移動路徑上之植被與風化土壤層可能為遲滯落石運動之主因。本文將說明此次災害之地質調查成果, 並探討可能之破壞機制, 以供未來類似災害之防治對策參考。

關鍵詞：落石、地質調查、破壞機制。

The Study of Rockfall Mechanism at 68K on Provincial Highway No. 2

Wei-Kai Huang^{[1]*} Lun-Wei Wei^[1] Ching-Fang Lee^[1] Chung-Chi Chi^[2]
Hsi-Hung Lin^[2] Horng-Yue Chen^[3] Ming-Lang Lin^[4]

ABSTRACT Several rockfalls caused damages on Highway No.2 during an intensive rainfall on August 31, 2013, in Keelung. One of the rockfalls hit a car and the event was captured by a camera. This study analyzes the mechanism of the rockfall based on the video and field investigation. Two major joints which led to the hazard, one was parallel to the coast and the other was perpendicular to the coast. Both of them were almost vertical and cut the rock into several blocks. Weathering processes may have lead to the extension of joints during the heavy rainfall; the infiltration and the surface runoff took the weathered material away, making the rock unable and ultimately leading to the rockfall. The process of this hazard can be divided into topple, roll, fall, bounce and roll. The rockfall took about 23 seconds in total. This paper focuses on the results of field investigation and the mechanism of the rockfall is also discussed.

Key Words : Rockfall, geological investigation, failure mechanism.

一、前言

臺灣位於菲律賓海板塊及歐亞大陸板塊之碰撞帶, 在構造上為一造山運動頻繁之活動帶, 屬板塊碰撞下產生之板塊邊緣島嶼。臺灣本島歷經劇烈之造山運動, 造成山坡地面積佔全臺四分之三以上, 坡體地質狀況脆弱破碎且陡峻, 易於地震、豪雨等外在因素擾動下發生落石災害。臺灣緊鄰高陡岩坡之聯絡道路, 如橫貫公路 (北橫、中橫、新中橫、南橫) 及濱海公路 (北部、蘇花) 落石阻斷道路事件, 常於颱風豪雨過後造成人

員傷亡災情 (王豐仁, 1994; 吳曉明, 1996; 紀宗吉與陳宏宇, 1997; 陳志豪, 2002; 陳柏村和江婉綺, 2010)。

本研究區域位於台 2 線北部濱海公路上, 依據交通部公路總局近三年 (2010~2013) 交通流量統計, 台 2 線北部濱海公路車流量高 (平均值為 166,841 車次/日) 且落石坍方災害頻繁, 自民國 68 年通車後其落石坍方造成人員傷亡災情不斷, 如民國 78 年北口標誌區至鼻頭附近落石造成三人死亡、民國 85 年水滴洞山崩活埋兩車六人 (陳榮河等, 1997)。另根據交通部公路防救災資訊系統 (<http://www.bobe168.tw/>) 統計近年

[1] 財團法人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.
[2] 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組
Environmental & Engineering Geology Division, Central Geological Survey, MOEA, New Taipei, Taiwan.
[3] 國立臺灣大學地質科學系
Dept. of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.
[4] 國立臺灣大學土木工程學系
Dept. of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.
* Corresponding Author. E-mail : wuangwk@sinotech.org.tw

(民國 83 至 102 年) 災害次數與分布 (圖 1)，配合中央氣象局相關雨量資料比對，顯示於豪雨 (交通部中央氣象局 93.11.25 修訂之「豪雨」定義係指 24 小時累積雨量達 130mm 以上) 之狀況下，台 2 線沿線道路邊坡易發生落石與岩屑崩滑之災害 (表 1)。

2013 年 8 月 31 日康芮颱風 (英文名稱 KONG-REY) 離臺之際為臺灣北部帶來極大雨勢，於當日 16 時 19 分左右在基隆市北寧路 (台 2 線 68K+000 處) 發生巨大落石衝擊小客車之意外 (圖 2)，坡頂殘留之岩塊與危石更是震驚社會。因此，本文將概述此次災害初步調查成果，提供落石初步發生機制及成因分析之參考。

表 1 台 2 線北部濱海近年歷史公路災害及降雨相關統計 (data from Taiwan Central Weather Bureau)

Table 1 The recently historical hazards and meteorological data on Provincial Highway No. 2 Northern Coast Highway

里程樁號	災害時間	颱風豪雨名稱	累積災害次數	事件累積雨量	事件最大降雨強度
114K+500	2010/10/21	梅姬颱風	1	274.8	20
82K+900	2012/01/08	20120108 豪雨	1	163.8	9
68K+000	2013/08/31	20130831 豪雨	1	277.5	94.5
75K+000			2		

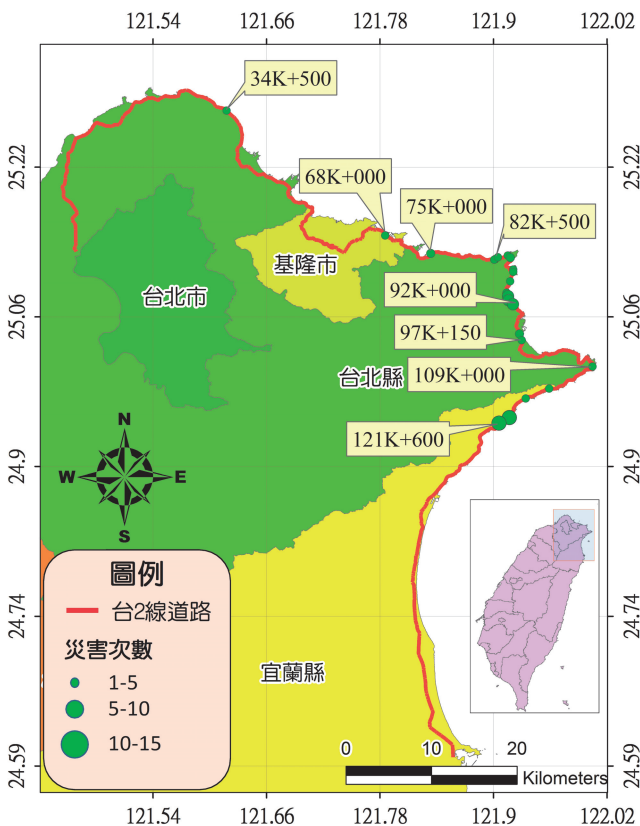


圖 1 台 2 線民國 83 至 102 年落石及坍方災情統計分布圖 (from Highway Disaster Information System : <http://www.bobe168.tw/>)

Fig.1 The hazard inventory map of rockfall and shallow landslide on Highway No.2 from 1994 to 2013

二、研究區域概述

1. 地形與地質特性

本研究區域位於基隆市，受基隆火山群及五指山山脈環繞，地形以丘陵地居多。自基隆至頭城，大多為地形降陡、高差甚大之岩石陡坡，易於降雨集中之條件下，形成強烈水流侵蝕作用，引致崖線退縮崩落，形成坡趾明顯之崖錐堆積及豐厚風化土層。本次落石災害位置高程約為 114 公尺，與災害位置形貌相似之周緣崖頂地貌及高程地形如圖 3 所示。本次災害位置屬大寮層之中段砂岩 (圖 4)，為厚層塊狀砂岩，此處地貌常見數公尺到數十公尺厚的山脊或岩壁 (何春蓀，1986)，岩層位態約為北偏東 80 度、向南傾斜 8 度，為一逆向坡型態之邊坡，而造成本次災害之落石即為該段砂岩被節理切割後之岩塊。

2. 水文條件

基隆市因東、西、南向三面環山，冬季受到東北季風之影響，降雨日期長，雨量豐沛。根據 2005 至 2013 年統計資料 (表 2)，基隆之年平均降雨量約為 3,785 mm。冬春之際，常有綿綿細雨致使港區壟罩大霧，夏秋兩季，則因地形迎風效應與颱



圖 2 基隆八斗子落石災害實景 (from udn.com)

Fig.2 The photo of rockfall at 68k on Provincial Highway No. 2

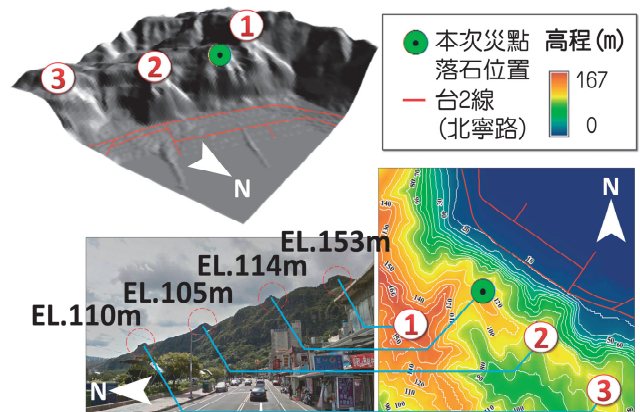


圖 3 研究區域崖線崖頂現況及高程地形展示圖

Fig.3 The cliff and the 3D digital elevation model of the study area

風侵襲影響，每月降雨日約略接近 20 日，使基隆素有「雨港」之稱。本區之水系主要分為基隆港與基隆河水系，兩水系流域以獅球嶺為分水嶺，本文所探討之落石災害區坐落於基隆港水系區域內。

三、致災成因分析

1. 致災降雨分析

台 2 線 68K 處落石災害事件發生於 2013/8/31 16:19，在致災降雨分析上，本文採用中央氣象局基隆氣象站之降雨組體圖 (圖 5)，並採用 4 mm - 6 hr - 4 mm 劃分準則進行雨場切割。由於康芮輕度颱風 (Kong-Rey；編號 1315) 影響台灣時間為 2013/8/27-8/29，其於基隆地區所降下之累積降雨量僅有 50 mm (至 2013/8/27 18:00)，8/29 18:00 至 8/31 13:00 該區域皆無任何降雨，研判康芮颱風與本次落石災害可能較無直接關聯。根據基隆雨量站觀測紀錄，2013/8/31 降雨事件於降雨初期四小時內已降下 177 mm 雨量 (13:00-17:00)，屬前峰型降雨，並導致台 2 線 68K 上邊坡落石於 16:19 落下，災害發生時之降雨強度為 48 mm/hr，雨場最大降雨強度為 94.5mm/hr。圖 6 為 08/31 降雨事件雨場之等雨量線圖 (8/31 10:00-9/1 20:00)，分析顯示本次降雨事件之空間雨量分布型態為西南向東北遞增，其中沿北海岸構築之台 2 線恰好落於雨量 350 mm 以上之區域，此一集中降雨誘發沿線多處落石與岩屑崩滑災害 (如：68K, 82K)。為了進一步研析 08/31 降雨事件之降雨強度-延時-頻率關係 (Rainfall Intensity-Duration-Frequency, IDF)，本文採用國內常用之三參數 Horner 降雨強度公式進行評估

$$i = \frac{a}{(t + b)^c} \quad (1)$$

式中，i 為降雨強度 (mm/hr)；t 為時間 (min)；a, b, c 為無因次係數，係數值依不同集水區降雨特性而異。由於降雨頻率分

表 2 基隆市 2005 至 2013 年降雨統計 (data from Taiwan Central Weather Bureau)

Table 2 The monthly and yearly meteorological data in Keelung from 2005 to 2013

年 月	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	平均雨量
1月	407	393	429	474	446	323	432	533	522	440
2月	605	307	111	466	239	369	267	546	338	361
3月	351	272	356	151	297	112	243	248	113	238
4月	56	342	204	215	151	222	70	390	300	217
5月	596	494	109	341	75	180	406	352	425	331
6月	209	318	662	146	403	322	149	391	129	303
7月	256	88	15	182	65	5	120	62	76	97
8月	392	224	296	27	212	243	94	365	488	260
9月	475	493	386	853	472	520	53	73	287	401
10月	476	75	378	327	611	506	473	139	99	343
11月	139	237	946	363	480	304	896	308	368	449
12月	280	482	173	130	203	199	523	503	625	346
合計	4241	3724	4064	3674	3655	3304	3727	3909	3768	3785

析需要較長年限之雨量紀錄 (至少 20 年)，故挑選氣象局基隆雨量站作為分析對象 (1960 年至今)，其不同頻率年之 a, b, c 係數值如表 3 (盧瑞興等，2003)。分析結果表 4 所示，顯示本次降雨事件在短延時 (5-120 min) 的降雨強度皆接近 100 年一次頻率暴雨之降雨強度 (圖 7)，而長延時 (如 24hr) 則僅達到 10 年一次頻率暴雨之降雨強度，說明了短暫且集中的暴雨型態為造成本次落石災害之重要誘發因子。

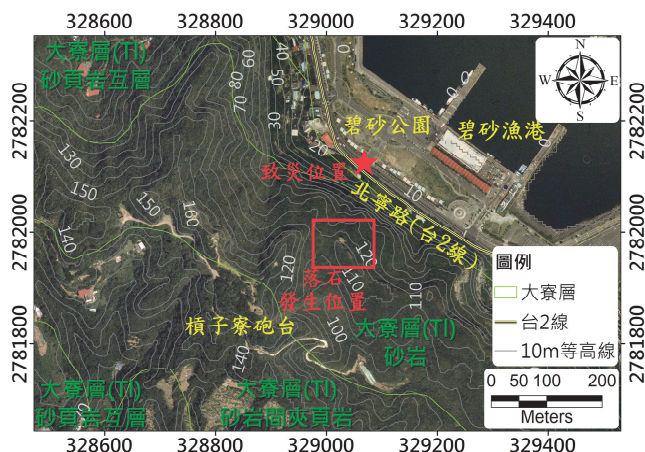


圖 4 災害位置地質圖 (modified from MOEA, 1988, Geological map of Taiwan scale 1:50,000)

Fig.4 The geological map of the study area

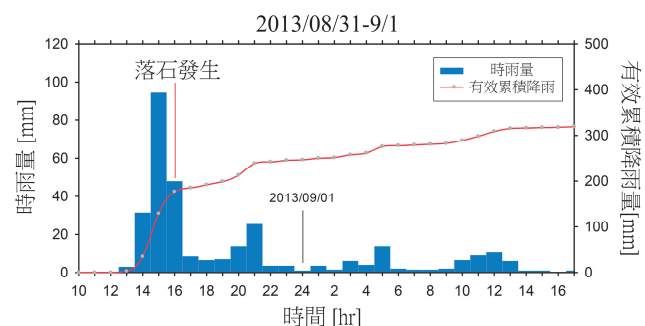


圖 5 基隆氣象站 2013/08/31-9/1 降雨組體圖 (data from Taiwan Central Weather Bureau)

Fig.5 The rainfall histogram during 8/31-9/1, 2013 of Keelung meteorological station

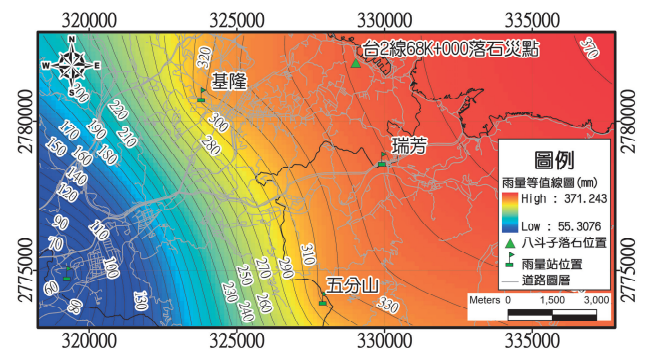


圖 6 基隆 08/31 降雨事件等雨量線圖 (8/31 10:00-9/1 20:00)

Fig.6 The mean precipitation contour during 8/31-9/1, 2013 of Keelung meteorological station

2. 現場調查與機制研判

災害發生後，坡頂上仍殘留一塊巨石與其他零星殘石 (圖 8a、圖 8b)，由槓子寮砲台亦可眺望該巨石所在位置 (圖 8c)。經現地調查後發現，災害位置具兩組主要節理 (圖 9)，其中 J1 約略平行海岸線，J2 則約略垂直於海岸線，此兩組節理與岩層層面共同切割岩塊，為此次造成落石災害之主要不連續面。

於巨石所在位置面向海岸方向概略為北方，經由施密特錘 (schmidt hammer) 試驗得知，該巨石之強度約為 220~420 kg/cm²，平均值約為 310 kg/cm²，顯示其已有相當程度之風化 (圖 10a)，巨石西側之岩壁已有三條 J1 節理面形成之裂隙 (圖 10b)，其中編號③之裂隙張裂約 20 cm，且裂隙內已被風化材料所填充 (圖 10c)，而編號①之裂隙則張裂約 10 cm，且裂隙內之風化材料已被地表逕流冲刷殆盡 (圖 10d)。由巨石崩落後之崩壁可進一步測量各組節理位態 (圖 10e)，其中 J1 約為 N72°W/88N(略平行海岸線)，J2 則約為 N16°E/88S(略垂直於海岸線)，兩組節理接近正交，且 J1 與坡面幾乎平行 (圖 10f)。

現場調查時另於巨石東側發現一殘石，除藉由此殘石頂部植生之生長位置及狀況，遂推論該殘石於災前、後應無太大之轉動及位移，且該殘石之破裂面存有疑似災前岩體撞擊而發育之羽毛狀構造。比對該殘石羽毛狀構造發育之弱面方位，概略與垂直海岸線之節理 (J2) 相同，裂隙之弧型曲線同心圓圓心方向處於塊體底側 (圖 10g)，於破裂面上存有不同風化程度之狀況 (圖 10h)。Van der and Marshak, S. (2004) 以岩體裂面上同心圓狀 (concentric) 之羽毛狀構造 (plumose structure)，說明破裂面上同心圓狀之圓心係為岩體受撞擊後破裂之起始位置 (圖 11)。經由上述之現地證據，推論出過去可能之岩體運動歷程 (圖 12)：該岩體於災前曾受 J1、J2 節理發育切割使之破裂墜落 (圖 12-1,2)，巨石底部遭受撞擊造成 J2 方向之羽毛狀破裂面構造，由底部往殘石頂部發展 (圖 12-3)，長期風化作用遂使此節理裂隙於巨石岩體內加深、青苔生長，使殘石破裂面產生風化狀況 (圖 10h)。

而此次落石事件 (2013/08/31) 之災害歷程，始於豪雨引致地表水匯集於災源西北側低窪處，淘刷巨石底部岩土基質，使之巨石懸空失穩往西北側翻落，東側殘石此時則沿著既有 J2 羽毛狀構造產生之節理面開裂，由表面往岩體底側發展出一新鮮裂面 (圖 10h)，終使岩塊斷裂、分離而墜落。

此外，於岩壁上亦可看見大量砂岩岩層內所夾雜之結核塊體，其主要由碳酸鈣、黃鐵礦與褐鐵礦等構成，所含之鐵質於氧化後可能進一步造成體積膨脹，進而加速裂隙張裂及風化作用 (圖 13)。

災後坡頂除該巨石外，災害發生後仍有高度約 8m 之殘石停留於風化材料之上 (圖 14)，且巨石底部已有受地表逕流淘刷，形成懸空之現象，若遇地震或豪雨將有立即危害，惟業管單位已於災後將巨石進行崩解處理並移除現地危石。現場調查時亦發現落石墜落之路徑至少有二個方向 (圖 15)，路徑①約為西北方，此即為本次造成災害之落石路徑；路徑②則約為北偏東 10~15 度，該路徑雖未直接造成災害，但已於其路徑底部堆積大量岩塊，高度可達 2m 以上，後續仍有致災之可能。

表 3 氣象局基隆雨量站不同重現期之 Horner 公式係數 (Lu, R.H.et al., 2003)

Table 3 The coefficient of Horner's Equation for Rainfall Intensity-Duration-Frequency of Keelung meteorological station

重現期 係數	10年	25年	50年	100年	200年
a	1032.55	1010.61	973.98	925.63	868.20
b	17.91	15.55	13.99	12.39	10.53
c	0.60	0.56	0.54	0.51	0.49

表 4 基隆雨量站不同重現期之最大降雨強度 (單位: mm/hr)

Table 4 The maximum rainfall Intensity of different rainfall frequencies of Keelung meteorological station

重現期 降雨延時	10年	25年	50年	100年	200年
30 min	103.0	117.6	127.1	135.9	144.1
60 min	77.1	88.4	96.1	103.2	110.1
120 min	54.9	63.6	69.9	75.8	81.7

註: 08/31 降雨事件 30、60、120 min 降雨強度為 113.4、94.5、71.5mm/hr

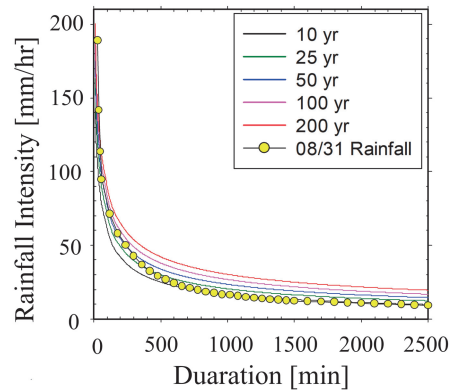


圖 7 基隆站 08/31 降雨事件之降雨頻率-延時-頻率關係
Fig.7 The rainfall intensity-duration-frequency diagram on August 31, 2013 of Keelung meteorological station



圖 8 八斗子落石災害坡頂殘留巨石
Fig.8 The residual stone on cliff

綜合調查成果初步研判,本次災害因大寮層中段塊狀砂岩內之節理發達,岩體切割成塊,且此巨石災前曾發生墜落撞擊,裂隙已於當時發育;而節理因長期雨水入滲,復以節理面內之結核塊體氧化造成體積膨脹,配合既有裂隙向重力側延伸,而加速風化作用之進行,遂於本次豪雨地表逕流淘刷下,巨石底部風化材料流失造成失穩翻覆,岩體終至斷裂墜落,擊中行經坡底之車輛。

3. 落石運動特徵與軌跡

台 2 線 68K 處落石災害發生時,恰巧有一汽車駕駛以行車紀錄器紀錄全程崩落經過 (引用自 YouTube),使本研究得



圖 9 俯瞰巨石及其節理分布概況

Fig.9 The overview and the distribution of joints

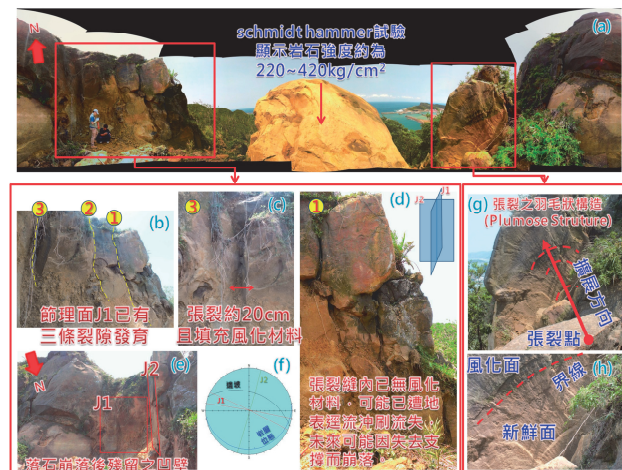


圖 10 巨石崩落節理之破裂特徵

Fig.10 The failure feature of joints on the rock

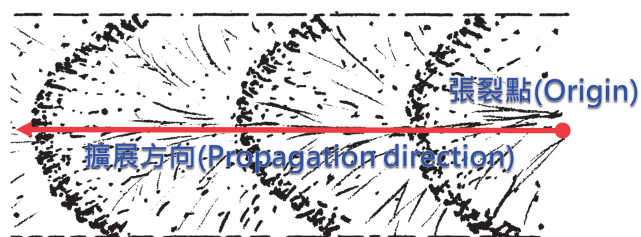


圖 11 羽狀構造示意圖 (modified from Van der Pluijm and Marshak, S., 2004)

Fig.11 The feature of plumose structure

以深入探討落石崩落之動態歷程 (圖 16)。根據紀錄影片得知坡頂突出之巨石於 16:19:43(t=3 s) 時開始傾倒,隨後於接近台 2 線 68K 處,北上車道上邊坡突有大量岩屑伴隨地表逕流噴濺至路面 (16:20:01, t=21 s),落石於 16:20:06(t=26 s) 彈跳滾動至台 2 線,並於 16:20:10(t=30 s) 達到靜止狀態。本研究以手持式雷射測距儀對落石運動路徑進行量測,結果顯示坡面高差約為 114 m,水平距離為 158 m,平均坡度約 51.4 度。配合影片記錄時間推估,落石從發生至墜落台 2 線路面共計耗時 23 秒,落石平均崩落速度為 8.8 m/s(見表 5)。另由災後現地調查得知致災落石尺寸為 4.5 m(長)×3.5 m(寬)×3.5 m(高),重量約 150 噸。

落石崩落型態受重力影響,依其運動特徵可分為滾動(rolling)、墜落(fall)及彈跳(bouncing)等三類,滾動為落石沿坡面路徑之運動型式,而墜落運動為最快之運動型式,落於接觸點後常伴隨著彈跳行為。落石的運動行為除了與坡度、地形特徵有關外,亦與落石材料組成、形狀係數有關。一般而言,愈接近圓球之落石較易形成滾動。本次造成災害之落石外型上偏向橢圓球,由災後無人載具航拍影像、現地勘查與測量分析

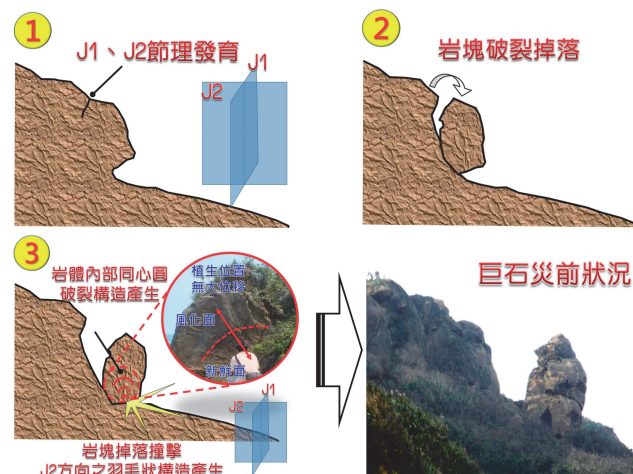


圖 12 巨石災前演變歷程

Fig.12 The Pre-disaster feature and movement of rock



圖 13 崩壁之上之結核塊體

Fig.13 The concretion on failure surface



圖 14 停留於坡頂上之殘石與海刷懸空現象

Fig.14 The unstable broken rock on the slope

(圖 17)，正射影像清楚地呈現該落石軌跡並非全為直線運動，在落石傾倒後初始的滾動階段主要沿著路徑①(圖 15)，直至落石滾動於坡度劇變之位置，此時塊體轉採墜落運動之方式(圖 17①)，拋射至下方緩坡(H=30m)於坡面上形成了一約 6.0 m(長)×5.0 m(寬)×1.0 m(深)之撞擊坑(圖 17②)。落石碰撞消能後之彈跳與滾動順勢摧毀位於移動路徑上之鐵皮屋，最後越過路面邊坡之擋土牆落至台 2 線路面。綜合現場勘查與無人載具航拍圖研判，本次落石災害路徑剖面線之運動型態與路徑如圖 18 所示。崩落速度最大處應為墜落運動撞擊坡面階段，其噴濺至路面之岩屑泥水混合物亦為此階段所造成。

表 5 台 2 線 68K 落石運動特徵參數

Table 5 Parameters of rockfall hazard at 68K, Provincial Highway No.2

參數	估算值	資料來源
崩落高程 (m)	114.0	
崩落水平距離 (m)	158.0	現地測量
路徑平均坡度 (deg.)	51.4	
崩落時間 (s)	23	行車紀錄器影片
崩落平均速度 (m/s)	8.8	以斜面路徑計算
落石尺寸 (m)	4.5(L)×3.5(W)×3.5(H)	
落石重量 (ton)	~150	現地測量
坡面撞擊坑尺寸 (m)	6.0(L)×5.0(W)×1.0(H)	



圖 15 落石崩落路徑
Fig.15 The rockfall paths

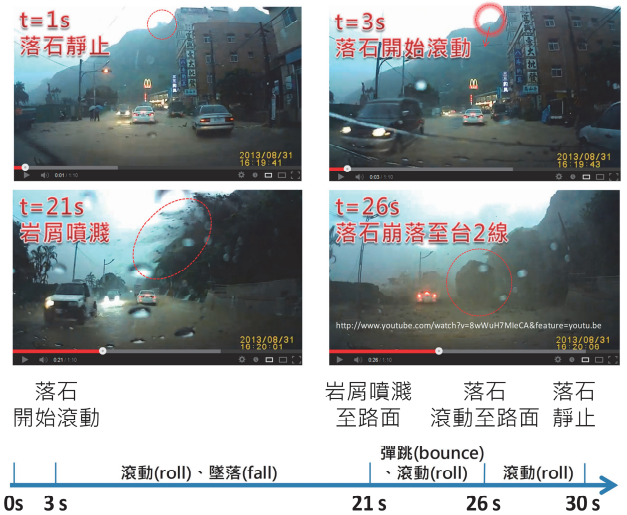


圖 16 台 2 線 68K 落石影片分析 (from YouTube)
Fig.16 The video analysis of rockfall hazard at 68K, Provincial Highway No.2

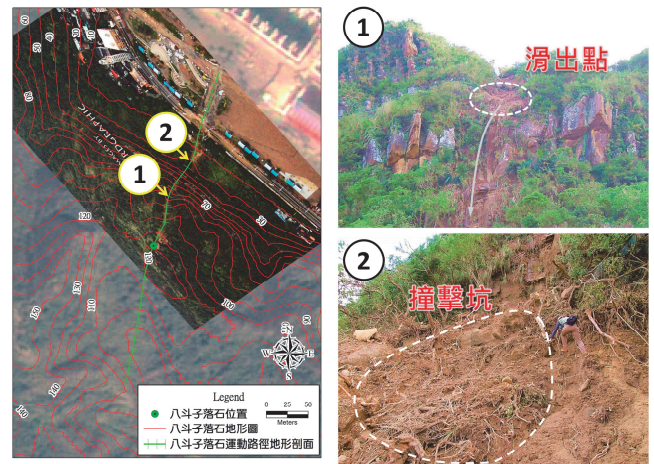


圖 17 台 2 線 68K 落石崩落路徑、滑出點及撞擊坑 (base map provided by GIS.FCU)
Fig.17 The rolling, falling and bouncing path of rockfall at 68K, Provincial Highway No.2

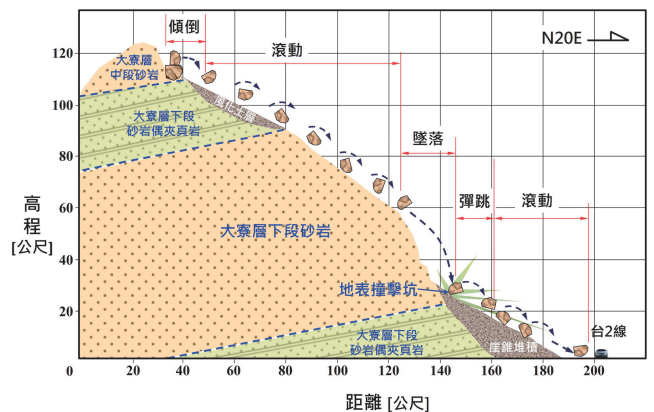


圖 18 台 2 線 68K 落石路徑剖面線與運動特徵
Fig.18 The cross-section of rockfall path and motion characteristics at 68K, Provincial Highway No.2

4. 落石運動模擬與驗證

本研究為還原及驗證災害發生時落石之運動狀況,除彙整了落石崩落之攝影紀錄,以及現地勘查之落石路徑和撞擊痕跡之資料外,亦以圖 17 之落石崩落路徑進行落石數值模擬,分析落石之運動型式,提供未來周遭危石之運動影響路徑及防治工作之參考。

模擬落石運動軌跡之方式是以 Rocscience 所發展之 Rocfall 軟體來進行,該軟體之估算模式是將落石視為一個質點 (Piteau & Clayton,1977),以其墜落之初始速度、坡面之折減係數等參數來進行。模擬參數部分本研究將依據實地量測之邊坡型態,以及其材料特性將邊坡分為四段進行設定。其落石模擬路徑成果及參數表如圖 19 所示,本研究以巨石運動數值模擬結果,其角速度、速度與其橫軸 (x 方向) 距離關係 (圖 20),進行落石運動型式之探討。由模擬結果發現於水平相對位置 79 公尺時,角速度陡升,推論塊體此時以滾動方式於坡面上運動,而因坡度由緩轉陡 (圖 19①),角速度因而上升。塊體水平相對位置 124 公尺處,移動速率急遽上升,而

19②位置),塊體無接觸坡面改以墜落方式運動。塊體之水平相對位置 144 公尺處,角速度及移動速率大幅下降,塊體應於角速度未產生變動;推論應為坡度驟然陡升 (塊體約略於圖此時撞擊至崖錐堆積面 (約略於圖 19③位置);而墜落撞擊坡面前,塊體之移動速率已達 30 公尺/秒 (約為 108 公里/小時),撞擊瞬間之總動能更高達 70,000 千焦,但隨後即因撞擊坡面造成撞擊坑而消散部分能量,使移動速率迅速降至 7 公尺/秒 (約為 25.2 公里/小時),總動能也降至 5,500 千焦,影像內出現之碎屑與雨水之噴濺現象,亦為此階段所造成。塊體於撞擊崖錐堆積面後,轉變為彈跳行為,而後於圖 19④的位置,即水平相對位置 146 公尺處,改以滾動方式沿著坡面運動至台 2 線公路,滾落路面時落石之移動速率僅約 4 公尺/秒 (約為 14.4 公里/小時),最後大約在水平相對位置 190 公尺處,即台 2 線東行車道上靜止。上述運動歷程皆與落石運動記錄影片、現地調查及影像判釋結果相近,顯示本研究模擬所使用之地形模型與各項參數已可反映現地概況。

五、結 論

本次落石災害之高差約為 114 公尺,地質屬大寮層之中段塊狀砂岩,且為逆向坡型態,現地調查顯示具有兩組傾角近乎垂直之節理面,一組走向約略平行海岸線,另一組走向則約略垂直海岸線,長期雨水入滲下加速風化作用之進行。降雨分析顯示本次災害之累積雨量約為 177 mm,災害發生時之降雨強度為 48 mm/hr,災害前一小時之降雨強度更高達 94.5 mm/hr,已接近 100 年一次頻率暴雨之降雨強度,研判為本次災害主要誘發因子,風化後之基質材料受豪雨期間地表逕流冲刷而流失,使砂岩塊體逐漸失去支撐,進而造成災害。由落石運動路徑之剖面圖分析可知,本次落石災害之運動型式大致可分為傾倒、滾動、墜落、彈跳及滾動等五階段,整體運動過程耗時約 23 秒,移動路徑上之植生與風化土壤層為遲滯落石運動之主因。

本研究為驗證落石運動型式,亦進行落石數值模擬。模擬成果與記錄影片中之落石行為相符,且與現地調查及遙測影像判釋狀況相似,顯示模擬所採用之參數已可反映現地概況,模擬之成果可提供後續防護工程之施作參考,未來可進一步使用考慮落石幾何形狀之模擬軟體,並計算落石運動時間以提供更多參考數據。

災後坡頂仍停留許多殘石,若遇地震或豪雨時即可能再次崩落,且本路段沿線仍有許多倒懸之砂岩岩塊,未來仍有持續致災之可能性,建議針對坡頂可能致災之岩塊加強防災工作,並於災害潛勢較高之路段以明隧道或其他工法進行減災防治,以確保用路人之生命財產安全。

六、誌 謝

在此特別感謝經濟部中央地質調查所於地質特性分析上提供之寶貴意見,以及逢甲大學地理資訊系統研究中心 (GIS.FCU) 提供本區災後之無人載具空拍影像供本研究分析。

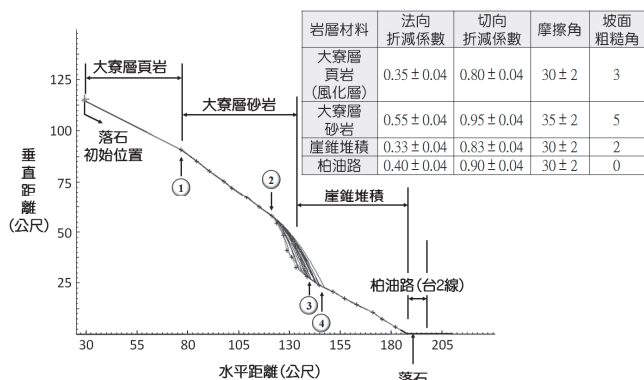


圖 19 落石路徑模擬結果與材料參數一覽
Fig.19 The simulation result and parameter of rockfall simulation

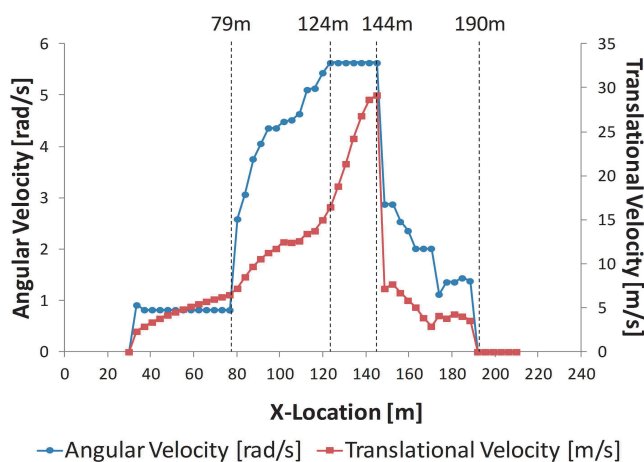


圖 20 落石模擬角速度及速度歷程
Fig.20 The angular velocity and translational velocity of rockfall simulation results

參考文獻

- [1] Piteau, D.R., and Clayton, R. (1977). "Discussion of Paper on Computerized Design of Rock Slope Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data by P. A. Cundall, M. D. Voegelé and C. Farihurst." *Proceedings of the 16th Symposium on Rock Mechanics*, Univ. of Minnesota, Minneapolis, 62-63.
- [2] Van der Pluijm, B., and Marshak, S. (2004) "Earth structure." *An introduction to structural geology and tectonics*. Norton and Co, New York, 141-143.
- [3] 王豐仁 (1994), 「玉山國家公園新中橫公路段之落石邊坡調查研究」, 國立成功大學地球科學系碩士論文。(Wang, F.R. (1994). *A case study on the rockfalls along the new mid-cross highway in the yushan national park*. Master Thesis, National Chen Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 何春蓀 (1986), 「臺灣地質概論 臺灣地質圖說明書」, 經濟部中央地質調查所 (Ho, C.S. (1986). "An introduction to the Geological map of Taiwan." (in Chinese))
- [5] 吳曉明 (1996), 「臺灣南部橫貫公路埡口至初來地區之岩石組織度及地質構造研究」, 國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。(Wu, X.M. (1996). *Textural grade and geologic structures in the Yako-Chulai area, southern cross highway, Taiwan*. Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [6] 紀宗吉、陳宏宇 (1997), 「落石運動軌跡之現地調查與模擬分析案例介紹」, 地工技術, 64, 59-68。(Chi, C.C., and Chen, H.Y. (1997). "Case for in-situ investigation and simulation of rockfall trajectories." *Journal of Sino-Geotechnics*, 64, 59-68. (in Chinese))
- [7] 陳榮河、林美聆、林銘郎 (1997), 「台灣區道路落石坍方之危險度分級準則及防治改善工法研究」, 交通部科技顧問室。(Chen, R.H., Lin, M.L., and Lin, M.L. (1997). "A study of mitigation measurements and criteria of hazardous degree of rockfall and landslide of roadways in Taiwan." *The Science and Technology Advisors office, MOTC*. (in Chinese))
- [8] 陳志豪 (2002), 「變質岩公路邊坡之破壞潛勢分析-以南橫公路啞口至新武段為例」, 國立成功大學資源工程學系碩士論文。(Chen, C.H. (2002) *Study of slope failure susceptibility along highway in the metamorphic rock region a case study of southern cross-island highway of Taiwan*. Master Thesis, National Chen Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [9] 陳柏村、江婉綺 (2010), 「南部橫貫公路東段於莫拉克颱風前後的地質面貌」, 地質, 29(1), 66-73。(Chen, P.T., and Chiang, W.C. (2010). "A study of geologic structures change after Morakot Typhoon—A case study at eastern South Cross-Island Highway." *Journal of Ti Chih*, 29(1), 66-73. (in Chinese))
- [10] 經濟部中央地質調查所 (1988), 「五萬分之一地質圖幅及說明書 雙溪圖幅」, 經濟部中央地質調查所。(Central Geological Survey, MOEA (1988) "Geological map of Taiwan scale 1:50,000- Shuanghsi." (in Chinese))
- [11] 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.H., Chang, Y.M., and Lin, H.C. (2003). "The study of horner's equation analysis for rainfall Intensity-Duration-Frequency of Taiwan meteorological station." *Water Resources Agencu, MOEA*. (in Chinese))
- [12] 交通部公路防救災資訊系統：<http://www.bobe168.tw/>
- [13] 交通部中央氣象局：<http://www.cwb.gov.tw/>
- [14] 落石影片：[http://www.youtube.com/watch?v=8wWuH7MIeCA&feature=youtu.be\(youtube video\)](http://www.youtube.com/watch?v=8wWuH7MIeCA&feature=youtu.be(youtube video))

2013 年 12 月 13 日 收稿

2014 年 03 月 11 日 修正

2014 年 06 月 03 日 接受

(本文開放討論至 2015 年 3 月 31 日)