

中文摘要

本研究接續前兩年的研究成果，持續的收集火炎山地區的氣候資料，並的針對年度中發生的降雨事件進行地形監測。此外，本年度的利用 2008 年的航空照片完成製作數值地形資料，來比較火炎山地區在沖積扇的地形變化。

分析火炎山隧道興建後降雨量與災害發生的資料，當降雨強度達每小時 28.4 公釐或是 12 小時內超過 100 公釐降雨時，就會在隧道口處發生災害。今年度重要的降雨事件為 8 月份的莫拉克颱風，在 8 月 6 日至 10 日降下超過 400 公釐的雨量，降雨強度為每小時 48.8 公釐，並出現 12 小時內 100 公釐的警戒降雨量，根據現場人員記錄，大約在 8 月 7 日晚上在火炎山隧道西口發生輕微的土石流，本計畫也在 8 月 7 成功發出警示的簡訊。

在影像的監測上，藉由攝影機的畫面觀察，火炎山隧道東口經過去年的整理，今年呈現穩定的情況，植生生長相當茂密，莫拉克颱風並未對東口造成影響。在西口的影像上，沒有捕捉到土石流發生的影像，主要是因為發生時間在晚上，同時因解像力有限，對於小規模的土石流現象並不容易觀察。

數值地形模型的比較上，藉由比較 2006 年與 2008 年的資料，發現 2008 呈現出大幅侵蝕的情況，推測應該是人為移除土石所造成。

現場觀察部分，莫拉克颱風前因人為開挖，在隧道上方向下挖深約兩公尺的土石，在颱風過後，土石又堆積到原始的高度。隧道在興建時可承受的 7 公尺的土石壓力，建議在不影響隧道安全的情況下，應不去干擾礫石的堆積與侵蝕現象。

Abstract

This research is a continuum of the past two year's research on the Hoyensan area, Taiwan. Data on various weather activities was collected for this area in order to monitor the geomorphological changes during and after rainfall episodes. A comparison of digital terrain models (DTM) show that a substantial rate of erosion from 2006 - 2008. There is a high possibility that this erosion is due to the human related activities within the area.

Upon analysis of data obtained from three separate typhoon events, it was concluded that there is a high possibility of a hazard occurring when the rainfall intensity is greater than 28mm/h or when rainfall is 100mm or more within a 12 hour period. Since January 2009, the most influential weather event is typhoon Morakot. During this event (from August 6th to 10th) it rained up to 400 mm within a four day period and numerous high-intensity rainfall events occurred ($\leq 28\text{mm/h}$ or $\leq 100\text{mm}$ within 12 hours). As a result of this high rainfall intensity a light debris flow occurred on the west side of the Hoyensan tunnel, on the 7th of August 2009. The warning system (cameras and sensors) was successful and automatically transmitted data.

In the aftermath of the typhoon the camera monitoring the east side of Hoyensan tunnel produced images which indicate stability in this area. The images show that there is extensive plant growth in this area which was not affected by typhoon Morakot. On the west side, a light debris flow occurred, but the camera did not record this event. The event occurred at night, and the resolution of the camera is not high enough to record the movement of small debris flows in such conditions.

On site observations revealed that prior to the typhoon two meters of sediment was removed from above the tunnel in order to prevent the tunnel from being buried. This two meters of sediment was subsequently replenished during the typhoon.

This paper concludes that it is more beneficial to reduce human activity in this area, particularly the removal of sediment. If the sediment is allowed build up and cover the tunnel it will lead to greater stability of the alluvial fan. It is only necessary to remove sediment when the structural integrity of the tunnel is jeopardized.

目 錄

一、前言.....	9
二、研究背景	10
(一) 地形地質概況.....	11
(二) 氣候資料.....	12
(三) 火炎山隧道.....	13
三、研究目的.....	18
四、過去研究成果	19
(一) 地形變遷.....	19
(三) 氣象資料與土石流災害分析.....	24
(四) 降雨警戒發報系統.....	26
(五) 颱風即時影像監測.....	27
(五) 颱風降雨資料分析.....	32
(六) 現場調查.....	35
(七) 航照判釋.....	38
五、研究成果	40
(一) 氣象觀測.....	40
(二) 影像監測.....	48
(三) 數值地形分析.....	53
(四) 降雨資料整理與分析.....	58

(五) 現場會勘.....	63
(六) 莫拉克颱風後現場調查.....	68
(七) 宣傳海報設計.....	80
六、結語及建議	90
參考文獻.....	93

圖目錄

圖 1	火炎山自然保留區範圍.....	11
圖 2	火炎山地區地質圖.....	12
圖 3	火炎山隧道與保留區之位置分佈圖.....	14
圖 4	隧道設施分佈位置.....	15
圖 5	火炎山隧道興建工程圖（資料來源：元裕工程技術顧問有限公司）.....	15
圖 6	火炎山隧道興建工程圖（資料來源：元裕工程技術顧問有限公司）.....	16
圖 7	施工中的火炎山隧道口（拍攝日期：2005/4/5）.....	17
圖 8	完工後的火炎山隧道口（拍攝日期：2006/2/28）.....	17
圖 9	火炎山隧道東口監視器架設位置（2007/9/12）.....	23
圖 10	西口影像監視器新架設位置（2008/10/15）.....	23
圖 11	卡玫基颱風前後隧道東、西口處影像監測.....	28
圖 12	2008 年 9 月 14 日 16 時辛樂克颱風前影像.....	30
圖 13	2008 年 9 月 14 日 19 時辛樂克颱風影像.....	30
圖 14	2008 年 9 月 14 日 19 時 30 分辛樂克颱風時影像.....	30
圖 15	2008 年 9 月 15 日 0 時辛樂克颱風時影像.....	31
圖 16	2008 年 9 月 15 日 5 時辛樂克颱風時影像.....	31
圖 17	2008 年 9 月 16 日 14 時辛樂克颱風後影像.....	31
圖 18	卡玫基颱風降雨量統計圖.....	32
圖 19	辛樂克颱風降雨量統計圖.....	33
圖 20	2007 年隧道東口處照片（2007.9.19）.....	37
圖 21	2008 年辛樂克颱風後隧道東口處照片（2008.10.09）.....	37
圖 22	隧道東口航照影像對照圖.....	39
圖 23	2009 年火炎山月降雨量圖.....	40
圖 24	2009 年 3 月火炎山上測站氣候資料統計圖.....	41
圖 25	2009 年 4 月火炎山上測站氣候資料統計圖.....	42
圖 26	2009 年 5 月火炎山上測站氣候資料統計圖.....	43
圖 27	2009 年 6 月火炎山上測站氣候資料統計圖.....	44
圖 28	2009 年 7 月火炎山上測站氣候資料統計圖.....	45
圖 29	2009 年 8 月火炎山上測站氣候資料統計圖.....	46
圖 30	2009 年 9 月火炎山上測站氣候資料統計圖.....	47
圖 31	1~7 月火炎山隧道西口影像監測圖.....	49
圖 32	1~7 月火炎山隧道東口影像監測圖.....	50
圖 33	8 月 6 日~9 日莫拉克颱風期間火炎山隧道西口影像監測圖.....	51
圖 34	8 月 6 日~10 日莫拉克颱風期間火炎山隧道東口影像監測圖.....	52
圖 35	2005 年至 2006 年火炎山沖積扇面高程變動.....	53
圖 36	2006 年至 2008 年火炎山沖積扇面高程變動.....	54

圖 37	2005 年至 2008 年火炎山沖積扇面高程變動.....	55
圖 38	火炎山隧道在 3D 立體影像上的位置.....	56
圖 39	火炎山一號集水區剖面圖（橘線與藍線所夾處為隧道位置）.....	56
圖 40	火炎山二號集水區剖面圖（橘線與藍線所夾處為隧道位置）.....	57
圖 41	火炎山三號集水區剖面圖（橘線與藍線所夾處為隧道位置）.....	57
圖 42	2006、2007 與 2008 年三次降雨事件累積降雨比較.....	62
圖 43	莫拉克颱風期間（8/6~8/10）累積降雨量比較.....	62
圖 44	隧道西口土堤內側土石堆積情況.....	64
圖 45	從土堤往下看，土泥內側有一小土堤.....	65
圖 46	本計畫在隧道西口設立的影像監視器.....	65
圖 47	沖積扇出口處的土石，已被向下挖深約 2 公尺.....	65
圖 48	從 5 號至 3 號集水區，沖積扇約被挖深 2 公尺.....	66
圖 49	下雨時細粒的泥沙被帶出，堆積在隧道上方.....	66
圖 50	沖積扇的邊緣形成土堤，豪雨來時會加速土石的崩落.....	67
圖 51	檢視土石採取的範圍規劃圖.....	67
圖 52	莫拉克颱風後火炎山隧道東口情況 1.....	69
圖 53	莫拉克颱風後火炎山隧道東口情況 2.....	69
圖 54	莫拉克颱風後火炎山隧道東口旁土石流痕跡.....	70
圖 55	莫拉克颱風後火炎山一號集水區情況.....	71
圖 56	莫拉克颱風後火炎山二號集水區情況.....	71
圖 57	莫拉克颱風後火炎山三號集水區情況.....	72
圖 58	三號集水區扇面的堆積 1.....	73
圖 59	三號集水區扇面的堆積 2.....	73
圖 60	三號集水區扇面上的刷深情況.....	74
圖 61	三號集水區從隧道上方往大安溪的土石堆積情形.....	75
圖 62	四號集水區與五號集水區的下游景象.....	76
圖 63	莫拉克颱風後的四號集水區.....	76
圖 64	清理後的隧道西口上方景象.....	77
圖 65	莫拉克颱風後的五號集水區.....	78
圖 66	五號集水區側邊的堆積情況，下方接近隧道西口.....	78
圖 67	隧道西口旁的滯洪池.....	79
圖 68	火炎山 1991 年正射影像圖海報.....	81
圖 69	火炎山 1999 年正射影像圖海報.....	82
圖 70	火炎山 2002 年正射影像圖海報.....	83
圖 71	火炎山 2005 年正射影像圖海報.....	84
圖 72	火炎山 2008 年正射影像圖海報.....	85
圖 73	火炎山自然保留區全圖海報.....	86
圖 74	火炎山礫岩特性海報.....	88

圖 75 火炎山監測說明海報.....	89
---------------------	----

表目錄

表 1 大坪頂雨量測站 1990-2003 歷年月份別雨量統計表.....	10
表 2 火炎山隧道 2007 年 3 次泥流災害降雨比較表.....	21
表 3 颱風降雨量比較表	34
表 4 火炎山豪雨事件日降雨及降雨強度比較表.....	53

一、前言

火災山自然保留區為現有的 19 個自然保留區之一，其特徵為蝕溝發達、地表沖刷作用強烈，邊坡垂直聳立礫石惡地地形，加上一系列的聯合沖積扇，遠觀具有地景的形色之美。依據前人調查，造成惡地地形的原因，地質地形條件以及豪大雨事件，都會影響到地形發育的狀況。

由於火災山自然保留區的礫石惡地地形變動非常大，當降雨量達到一定程度以上，就會產生邊坡沖蝕的現象，蝕溝發育，進而有許多礫石與細粒物質進入河道，並向下邊坡移動，在進入大安溪河岸前形成大規模的沖積扇。火災山地區由於受到地表侵蝕作用，往往在颱風豪雨後，會在沖積扇外緣的道路淤積大量土石，因此公路單位於 2005 年在沖積扇下方興建一隧道。由於這個隧道正位於火災山的坡腳下，將來礫石在堆積時，除了從隧道上方通過外，是否會側向延伸至隧道口？這個隧道將來保留區所沖刷下來的泥沙堆積的模式，是否造成隧道口的封閉及不可預期的生命財產損失，值得進行觀察監測。

本計畫運用航空測量的方法，以農林航空測量所提供的航空照片，經過正射化產生立體相對後，計算地形的變化量與下游沖積扇堆積的情況，並利用所收集的氣象資料，分析地形變遷與降雨之間的關係，以此來推測礫石堆積對下方公路與隧道工程的影響，希望由監測所得資料，以窺探保留區內土石流之變化，並藉由所得資料，擬訂適當防災機制，以提高苗 140 線公路上之人車安全。同時本計畫所收集的相關資料，將來也可做環境教育的參考資料。

過去本研究在隧道東、西口設置即時觀測攝影系統，並於 2007 年 10 月 7 日觀察到土石流事件，並記錄下從事件發生至土石清淤完畢的經過。本年度計畫除了持續收集氣象資料與即時影像側錄之外，將設置具有訊號回傳功能的氣象觀測站，藉由降雨量的值達一定量時發送訊號至研究室，告知可能發生土石流事件。此外，苗栗縣政府於 2007 年年底開始於保留區外的沖積扇面進行土石開挖，本研究亦將針對土石開挖是否影響保留區內的地形變化作評估。

二、研究背景

本區研究屬於苗栗丘陵的最南側，隔著大安溪與后里臺地相望，東側為東勢丘陵的前緣，西側為大安溪的沖積區。交通位置上，火炎山自然保留區的左側有國道一號與 13 號省道經過，下方有苗 140 (原 130 甲) 線可通往國道三號的通霄/苑裡交流道。由於主要岩層均為礫石層，邊坡易崩落形成草木不生的惡地景觀，已於 1986 年公告劃定成為台灣十九個自然保留區之一。劃定的範圍除了陡崖區、部分丘陵區，及由蝕溝堆積出來的大型沖積扇。依新竹林管處所訂定之保留區範圍，疊合於第三版二萬五千分之一地形圖上，其範圍與位置如圖 1 所示。

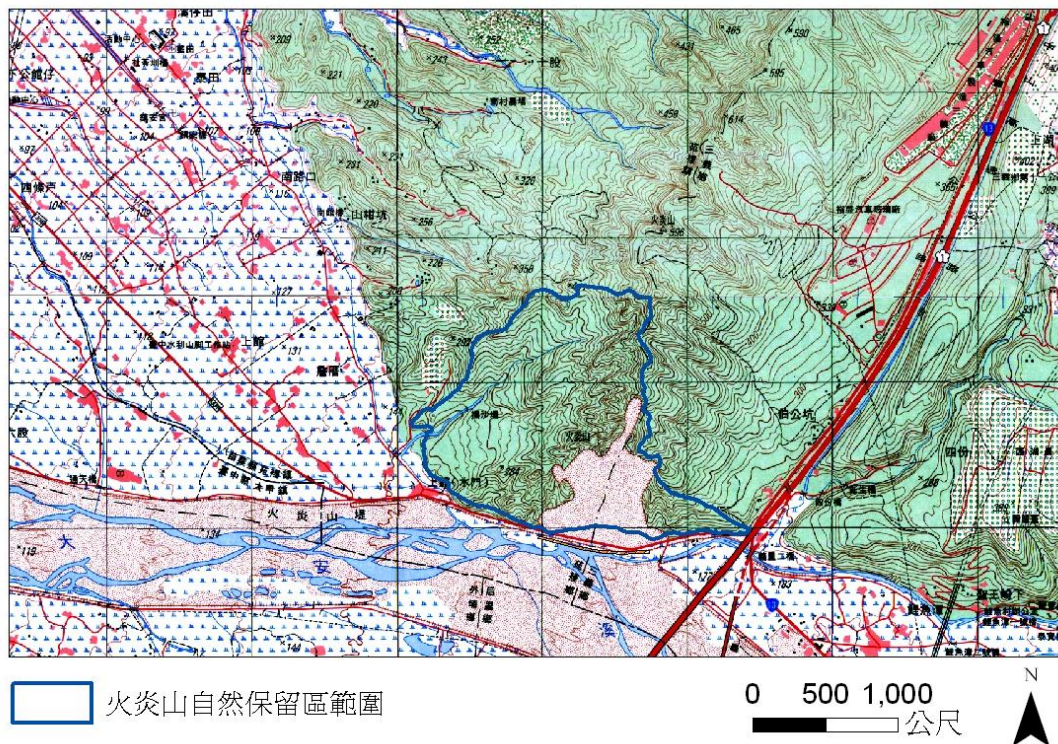


圖 1 火炎山自然保留區範圍

(一) 地形地質概況

火炎山屬苗栗丘陵南部，大安溪的北側，地勢北高南低，東高西低；最高點為火炎山頂的 596 公尺。旁邊分別為鐵砧山臺地、后里臺地。就地層而言，幾乎都屬沈積岩體系（砂岩、頁岩、礫岩、紅土臺地堆積層與現代沖積層），沈積的年代從中新世到全新世之間。

火炎山附近有三條構造線，分別為鐵砧山背斜、三義斷層與關刀山斷層。此三條構造線中，關刀山斷層對於本區的影響並不大。影響較大者為三義斷層與鐵砧山背斜，其中由於背斜通過火炎山西邊附近地區造成隆起，使火炎山的地層呈東北西南走向，並往東南東方向傾斜，傾角為 $8^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 不等（圖 2）。

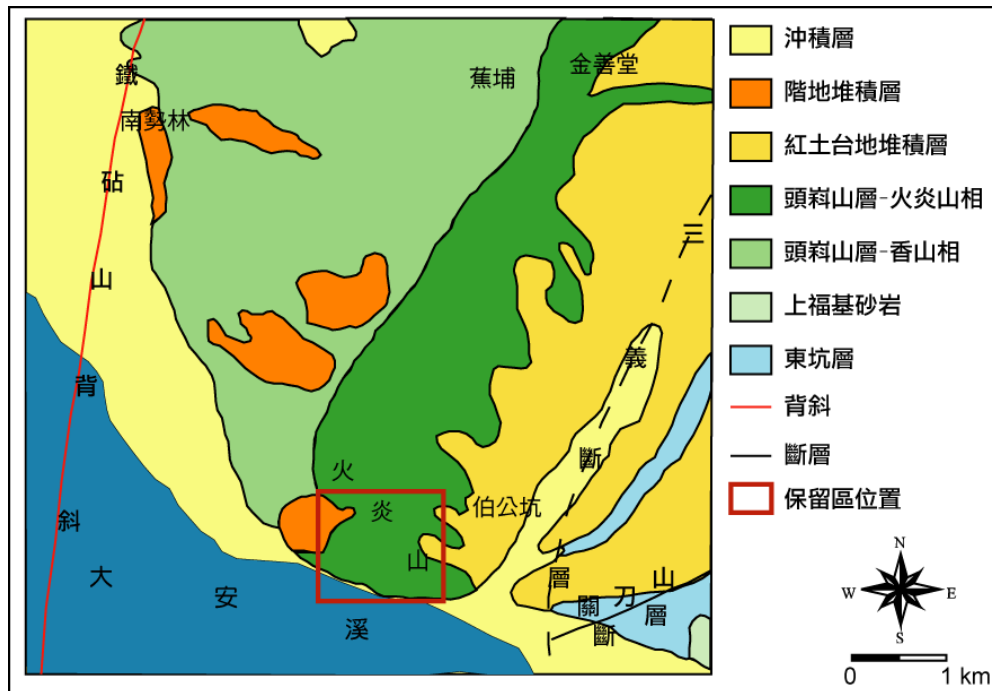


圖 2 火炎山地區地質圖

(二) 氣候資料

由於三義是台灣北部地區與中部地區的氣候分界，火炎山位於臺地南端，在氣候上比較接近台灣中部地區的氣候型態。依火炎山主峰北方約 2 公里的大坪頂雨量測站，收集與分析長期的降雨資料。火炎山地區的年平均降雨約 1600 公釐，且有著很強的季節分佈情況，乾濕季分明。主要降雨集中於 5~8 月，以季節表示，則為從梅雨季開始到 8 月颱風季節結束，會降下超過全年 60% 以上的雨量。依據過去的研究資料，火炎山地形容易發生變化的時期，也多集中在 6~9 月，與降雨量的分佈情況相吻合（表 1）。

表 1 大坪頂雨量測站 1990-2003 歷年月份別雨量統計表（單位：mm）

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	總計
歷年 平均	42.8	104.2	128.4	153.0	249.1	314.4	183.9	243.7	126.7	20.3	20.1	28.6	1615.2
百 分 比 %	2.65	6.45	7.95	9.47	15.42	19.46	11.38	15.09	7.85	1.26	1.24	1.77	100

資料來源：經濟部水利署水文資料網路查詢系統

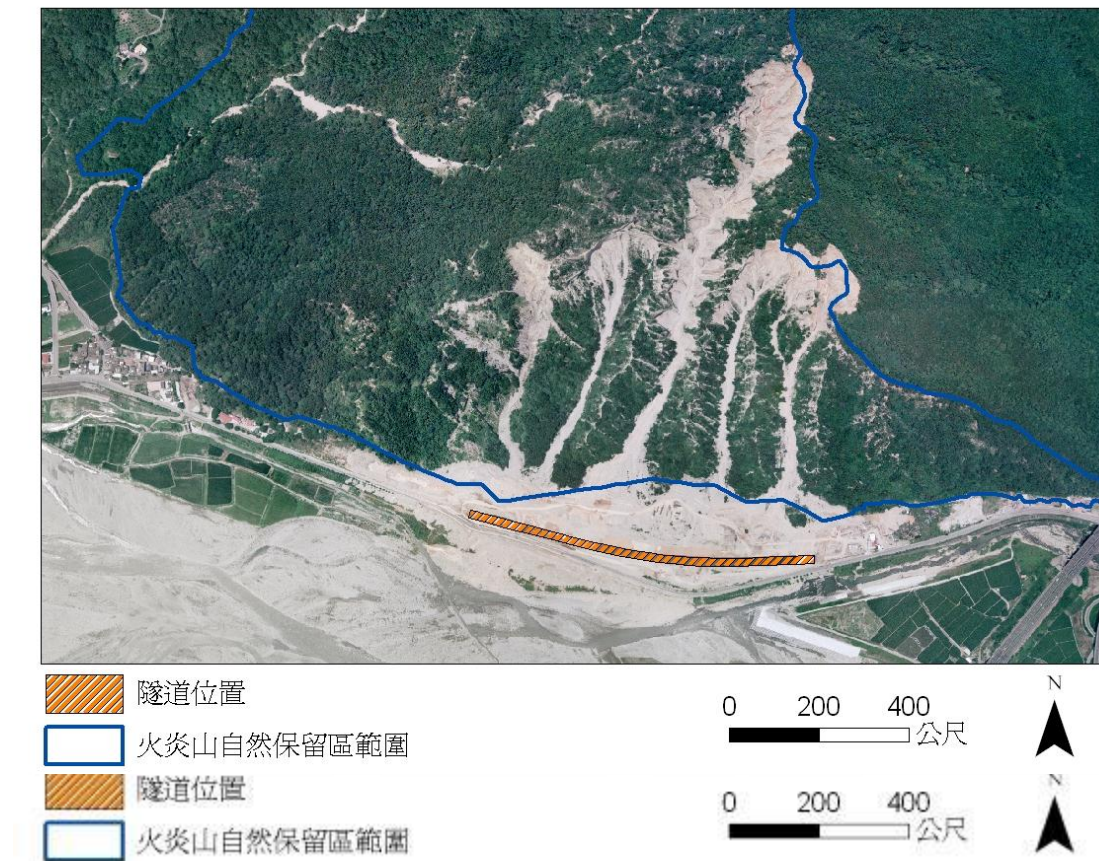
(三) 火炎山隧道

過去每當颱風豪雨發生，火炎山沖積扇總是會發生土石流，滾滾泥漿與巨礫漫過其下的苗 140 線道，造成交通中斷與人員的傷亡。在公路局、新竹林區管理處與苗栗縣政府三方討論之下，決定興建公路隧道，避開上方火炎山沖積扇土石流的侵擾。

工程由執掌中部地區省道養護的公路總局第二區養護工程處，進行發包施工，從 2004 年年中起開始，迄 2005 年年底完工，工期約一年半，其間並發生土石流掩蓋隧道口的意外。目前已於 2005 年底驗收完成，2006 年元旦正式對外開放通車。

火炎山隧道興建工程經費 3 億 5000 餘萬元，全長 780 公尺之單孔箱涵隧道（非屬長隧道），平面引道長 380 公尺，規劃為雙向四車道加兩側路肩，淨寬為 15 公尺。隧道覆土以坡度修坡方式以利土石流洩流，隧道上方設置四道南北向土石堤形成護堤，疏導土石流自隧道上方洩流至大安溪，並於隧道二側洞口北側設置石籠護堤保護洞口安全（圖 3～圖 8）。

在原始設計中，火炎山隧道頂可以承受高達 7 公尺的土石堆積量，並且可以通行重機具，方便工程單位進行土石清除工作。而隧道下方即為大安溪河床，土石在越過隧道後會掉入河床中堆積，落差約有 10 公尺，依據目前的養護狀況，



不大可能發生隧道上方土石淤滿，阻擋後方土石前進的情況。

圖 3 火炎山隧道與保留區之位置分佈圖

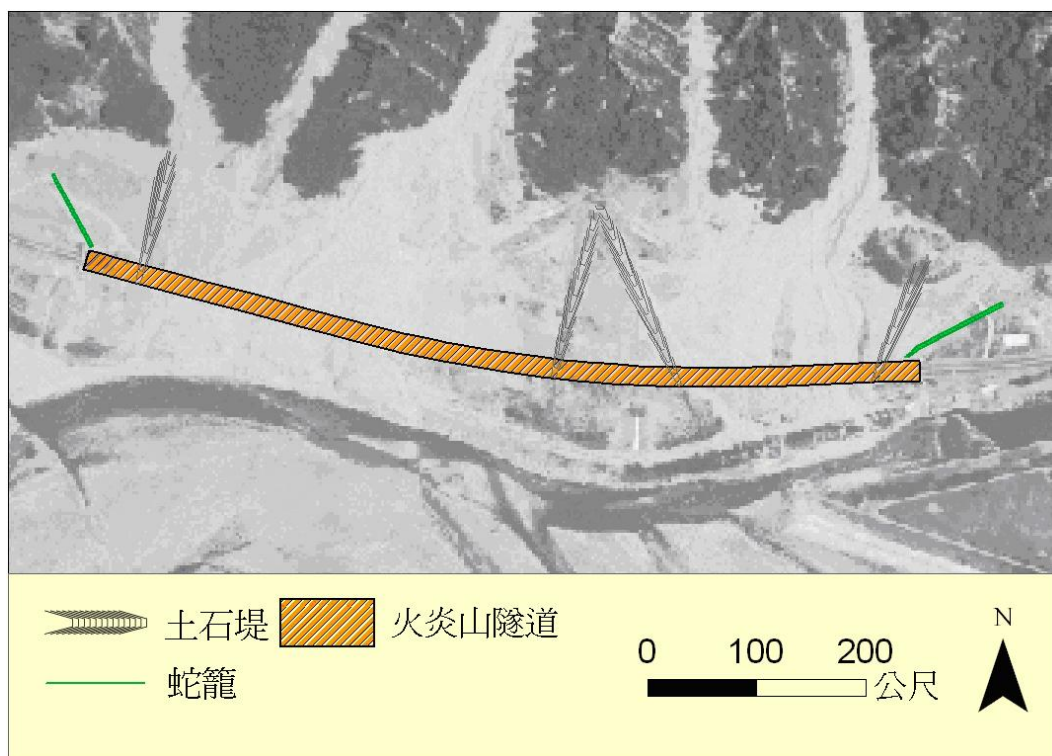


圖 4 隧道設施分佈位置

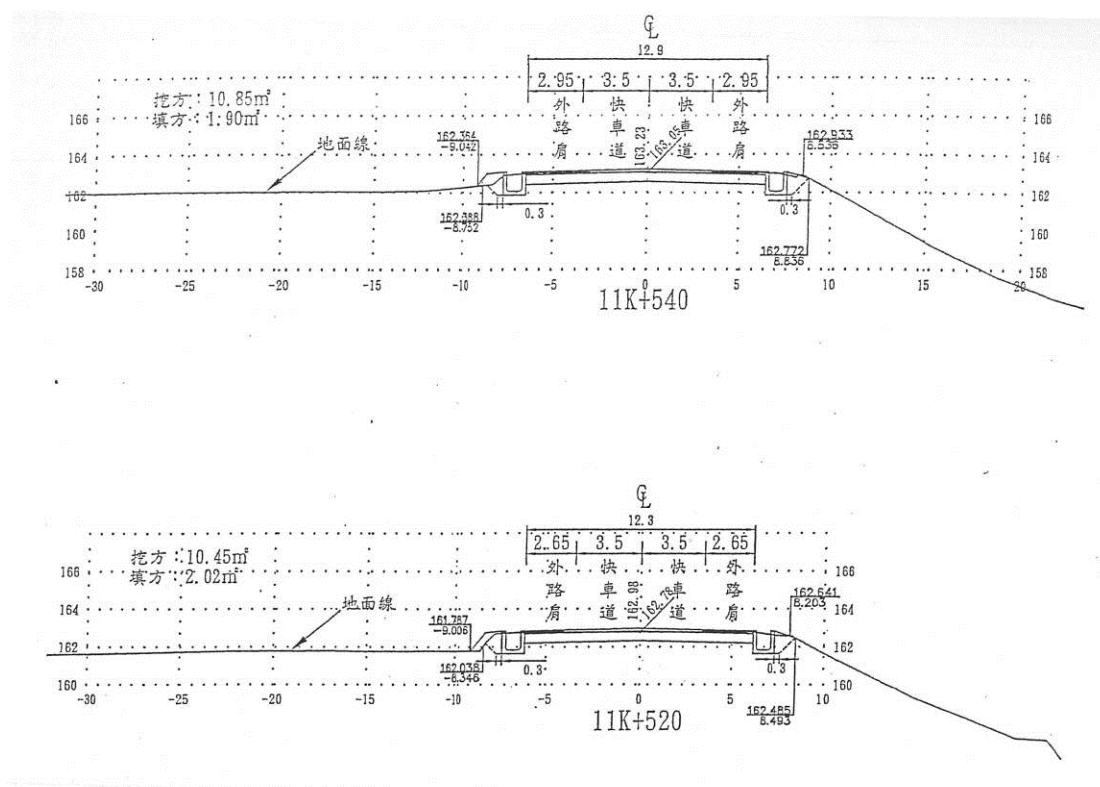


圖 5 火炎山隧道興建工程圖 (資料來源：元裕工程技術顧問有限公司)

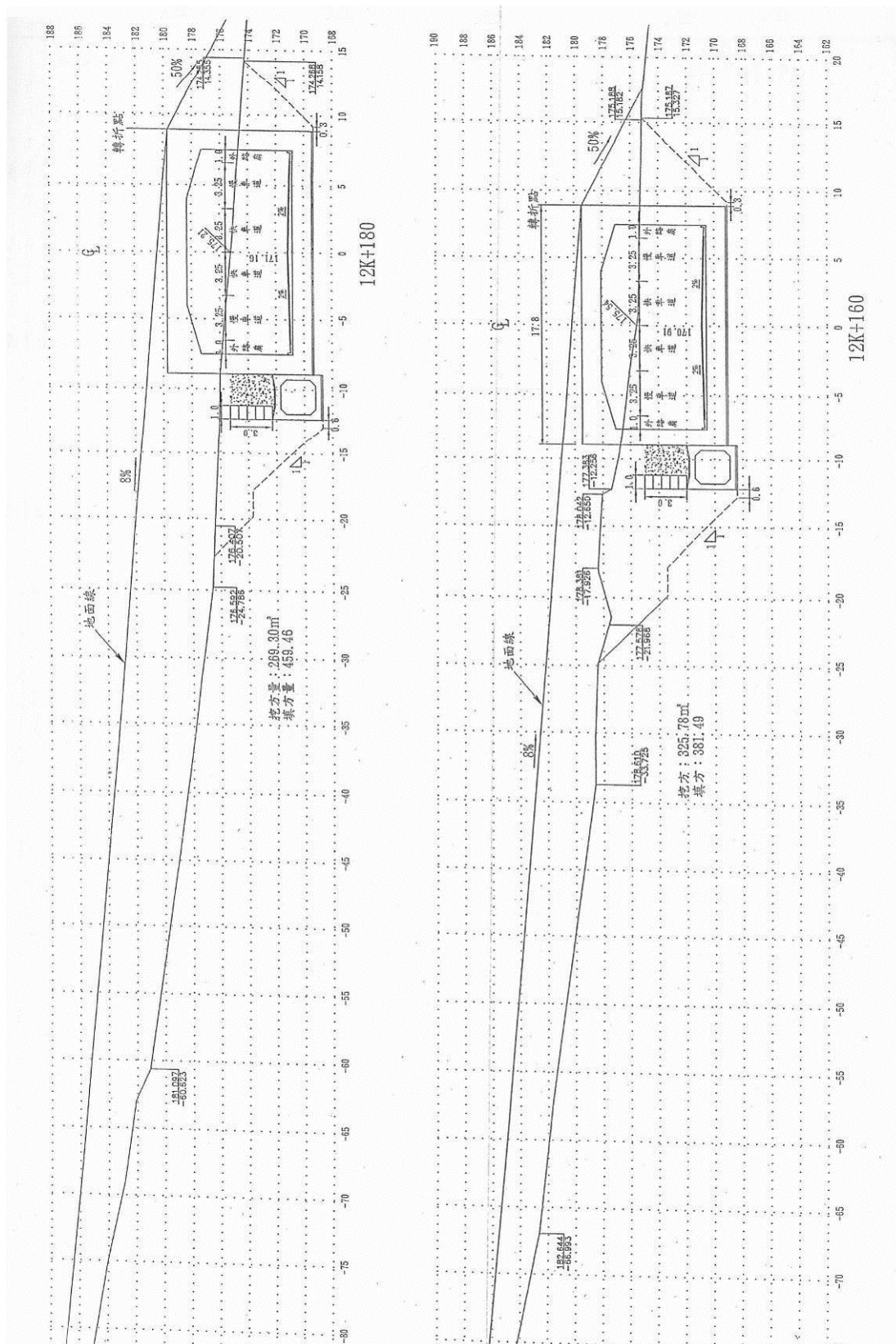


圖 6 火炎山隧道興建工程圖（資料來源：元裕工程技術顧問有限公司）



圖 7 施工中的火炎山隧道口 (拍攝日期：2005/4/5)



圖 8 完工後的火炎山隧道口 (拍攝日期：2006/2/28)

三、研究目的

利用航照資料及現場調查資料來進行研判，觀察礫石堆積的模式是否發生改變，並同時監測颱風豪雨對自然保留區的影響。

因此預計要完成的項目有：

本年度計畫執行項目

- (一) 利用航空照片並進行觀察土石堆積的情形
- (二) 觀測沖積扇面挖掘工程對保留區地形變化的影響
- (三) 設置雨量警告簡訊發報系統，並討論降雨閾值與土石流發生的關係
- (四) 持續收集氣象與即時影像監測資料

四、過去研究成果

2005 年年底隧道興建完成後，為了瞭解隧道對火炎山自然保留區的影響，林俊全（2006）利用航空攝影測量的方法，進行數值地形資料的生產，同時在隧道東側出口處架設影像監視系統，觀察監測礫石堆積及侵蝕的變化；並進行氣候資料的監測與蒐集，並將過去所累積的資料進行彙整，探討氣候變化對興建隧道後的火炎山自然保留區變動情形。

（一）地形變遷

農委會林務局新竹林區管理處 2003 年至 2005 年委託林俊全教授進行「火炎山自然保留區地形變遷監測」三年的研究計畫，以農航所航空照片來建立數值地形模型（DTM），產出網格精度為 5 公尺的 DTM，作為地形變遷之分析。從研究中發現，在地形的變遷中，火炎山自然保留區常常因為颱風造成地形大規模發生改變。研究結果顯示，火炎山邊坡後退的形式有兩種，一種為平行後退，多出現在搬運能力強的地方；另一種為減坡後退，多發生在順向坡的邊坡。1991 年～2002 年的資料顯示，10 年間平均的後退速率分別為平行後退邊坡每年 2.5 公尺（以 3 號集水區的邊坡計算）、減坡後退邊坡每年 1.5 公尺（以 4 號集水區的邊坡計算）。

在集水區源頭，侵蝕地貌的範圍不斷擴大，裸露地的後退速率以 3 號集水區最快，達每年 3 公尺，此結果比兩種邊坡後退的速率稍快。由剖面顯示河道高程變動中，河道的堆積及侵蝕都發生在接近源頭的區域，河道中段的高度沒有發生

太多變動。顯示在降雨事件發生時，堆積在源頭的土石會被沖出河谷進入沖積扇。各集水區沖積扇中，以 3 號集水區的沖積扇變動最為頻繁，堆積量與影響面積也最大，有時甚至會影響到隔壁沖積扇的發育。其原因可能是上游土方量供應最多，集水區面積也最大，上游河道較不易堆積土石，使河道可以完全把源頭侵蝕的土石全部帶出谷口，在谷口後方造成堆積，成為新的沖積扇。1986 年～2002 年間，以 2002 年的變遷幅度最大，主要的原因是受到 2001 年的桃芝颱風及納莉颱風影響。

在沖積扇地貌變遷，每個集水區下游沖積扇在不同的情況發生時，發生的反應不盡相同。倘若降雨事件的規模不大，通常只有 3 號集水區會發生反應。如果暴雨規模極大（如 2001 年納莉颱風），則所有的集水區都會有反應發生。以下為歷年數值地形資料分析的結果：

1. 1991 年: 3 號集水區左側沖積扇經計算結果，約比 1986 年高了 10 公尺以上，平均一年堆高達到 2 公尺。
2. 1992～1993 年，在 3 號～5 號集水區沖積扇的最外側，沖積扇的高度減少了 5 公尺以上。另外在 1 號集水區沖積扇的右側，新產生人為堆積的砂石堆。除此之外，其他區域幾乎沒有發生堆積或侵蝕的情況。
3. 1999 年: 3 號集水區出沖積扇往左側改道，在下游堆出新的沖積扇。這次的變化情況較小，主流河道移動的距離不若前幾次這麼大，也沒有造成其

他的新河道。5 號集水區沖積扇發生的情況也很類似，影響範圍小、沒有大型氾濫的痕跡。

4. 2002 年：由於納莉颱風帶來的充沛雨量 (880 公釐) 1、2 號集水區堆高了約 5 公尺，3 號集水區沖積扇的新扇面除了沖出馬路進入大安溪床的區域外，新扇面也是沿著舊扇面堆積，4 號沖積扇的大變動，除了將 5 號集水區的主流擠回左邊，甚至將原本堆積在出口達十年以上 (1986 年時開始堆積) 的穩定土石堆沖破。

本研究所取得的 2005 年的航照影像，為隧道正在施工時所拍攝，而 2006 年的航照影像為隧道已經施工完成並通車後近八個月後所拍攝，利用此二幅航空照片進行地形變遷的高程與面積變化分析。

由立體影像觀察火炎山地貌變化特徵，發現沖積扇變動程度為區域內最大，特別是三號沖積扇面逕流流路與沈積物搬運路徑變動劇烈。此外區域內植被生長速度快，近一年時間便能新生出大面積的植被。

建議管理單位對於隧道體上方扇面之堆積土石定期進行清淤工程，以維護隧道主體結構，保障隧道口免受土石流之威脅，及行經此路段之人車安全。隧道口長度必須延伸。西口部分至少應延伸 350 公尺，東口則應延伸 200 公尺。如此才能避開未來土石掩埋困擾。

(二) 影像監測

本計畫第一年度的研究成果，在火炎山隧道東、西口處各架設一台影像監視器，來監測隧道上方土石堆積的情形。過去曾經嘗試在隧道東口架設監視攝影機，但資料僅能記錄在遠端電腦上，無法達到即時監測的功能，因此 2008 年在東口處申請專線，以撥接的方式進行連線，東口正式開始紀錄影像時間為 2007 年 8 月，西口正式紀錄時間為 2007 年 9 月。

已經完成之隧道東口遠端監視系統的建置 (圖 9)，可透過一般電腦進行遠端的監視，本區由於地點較偏僻，目前採用 256K/64K 的寬頻連線，因此在連線時速度較慢，連線方式只要在電腦網址輸入連線的 IP 位址 (目前暫時設定 IP 位址為 <http://219.87.249.240/>)，即可進行遠端監測。

隧道西口處監視系統設備已初步架設完成 (圖 10)，影像已在錄製當中。在遠端連線方面，本計畫採用 3.5G 的傳輸方式進行監測，以 2100 的 3G 寬頻路由器，配合 4140 去傳送一攝影機訊號，此監視器曾於 2007 年 10 月 7 日觀察到土石流事件。

在 2007 年 10 月 7 日土石流事件發生後，苗栗縣政府在隧道西口處興建堤防，原本西口監視器的觀察沖積扇堆積的狀況，已被土堤遮擋住，因此必須移動監視器架設的位置，以持續觀察沖積扇的堆積狀況。目前已將監視器的位置改架設在隧道西口的上方，架設時間為 2008 年 10 月 15 日，持續監測西口處土石堆積的狀況。



圖 9 火炎山隧道東口監視器架設位置 (2007/9/12)



圖 10 西口影像監視器新架設位置 (2008/10/15)

(三) 氣象資料與土石流災害分析

火炎山集水區內的侵蝕與堆積物搬運移動，主要皆透過大量的降水以及所形成的逕流作用，在平時無降雨狀態，區域內呈現安定無變動的情形。林俊全(2004)分析經濟部水資源局所提供之資料，統計自民國1986年至2002年之豪大雨事件，並配合航照觀察，以有航照的年度作劃分，歸納出火炎山地區的降雨特性。依過去觀察經驗，當累積降雨量超過100公釐時，區域內之堆積物便會發生搬運作用，因此將超過100公釐的事件定義為本區的豪大雨。

從2007年6月及8月所發生的土石流災害事件來看，發生的情況相當類似，都是經過兩次降雨事件，且第一次降雨事件中最大日雨量均超過100mm，在間隔10天內後第二次的降雨事件才發生災害，泥流產生時的降雨量並不是很多。10月7日所發生的災害事件，則與前兩次不同，本次降雨在兩天內累積降雨量就將近300mm，使得土石流宣洩不及，越過隧道旁的蛇籠，造成西側隧道口土石淤積的現象。目前就這3次泥沙發生事件與氣候資料比較如表2，並將觀察說明如下：

1. 本次單場降雨量超過100公釐，造成土石流動，與過去四年的觀測結論仍然吻合。然而此次的土石流動受到降雨強度以及降雨延時的影響，應該值得繼續觀察。
2. 本次的泥沙沖刷，主要在第三個子集水區（由高速公路往西算去），河道沖刷約1-2公尺深。以及第五子集水區，沖刷河道約六公尺，刷深約3-5公尺。沖刷至隧道西口的泥沙顆粒以泥沙為主，影響公路長度約70-100

公尺。第五子集水區的泥沙在將來有可能繼續沖刷，也勢必繼續造成隧道口的威脅。建議隧道口向西擴建延伸 350 公尺。同樣的，隧道東口也應該向東延伸 200 公尺，以預為防範。

3. 第三子集水區的泥沙可以越過隧道上方，並沒有造成災害。
4. 在可見的未來，建議除了繼續土石流動觀測外，如果隧道沒有能立即延伸，應在保留區範圍外，也就是隧道口附近增設蛇籠，導引礫石往西流動，避免對隧道口立刻造成淹沒的威脅，以避免不必要的行車危害。

表 2 火炎山隧道 2007 年 3 次泥流災害降雨比較表

災害發生時間	2007 年 6 月 10 日 6 時	2007 年 8 月 19 日 5 時	2007 年 10 月 7 日 5 時
最大日降雨時間	6 月 8 日	8 月 12 日	10 月 6 日
最大日降雨量	114.6mm	107.6mm	166.8
最大降雨強度	28.4mm	56mm	32mm
災害發生前累積 雨量	417.2 mm	274.6mm	192mm
災害發生前 10 小時內 最大時雨量	24mm	9.2mm	23mm

(四) 降雨警戒發報系統

土石流發生的原因主要有三種，降雨多、土石堆積多及陡坡多，其中任一項一旦達到條件，土石流即可能形成。因此，可藉由上述條件的成立與否來判斷土石流事件是否會發生。以水土保持局目前在進行土石流觀測系統為例，主要可分為非接觸性及接觸性兩種觀測方式，非接觸型監測系統是以與土石流可能發生有密切相關之因子，做為預警指標，即時將相關資料回傳土石流防災應變中心進行研判，一般均採用降雨量及降雨強度做為警戒指標。

接觸型監測系統是以土石流發生後之各種徵兆及其流動時產生的特性進行觀測與比較，常用者如利用鋼索檢知器架設於防砂壩溢洪口或橫跨河道兩岸，當

土石流流過時會扯斷鋼索因而發出警訊。

本研究為了瞭解即時降雨的狀況，當達到降雨臨界值時能夠及時發佈災害的警訊，將本計畫測站的降雨資料透過程式的撰寫，設計當 12 小時內累積雨量達到 100 公釐時，立即發佈簡訊通知相關人員，目前已經完成簡訊設定，將發佈給本計畫主持人及大湖工作站相關人員，在卡玫基與辛樂克颱風分別成功收到簡訊，達到即時通報的效果。

(五) 颱風即時影像監測

即時影像監視的目的，是希望瞭解在颱風侵襲的期間，可能產生災害發生的時間點，以及災害的變化的情形。本年度從監視影像中記錄卡玫基颱風與辛樂克颱風兩次颱風對本區造成的影響，說明如下：

1. 卡玫基颱風

卡玫基颱風在 2008 年 7 月 17 日晚上 6 點風雨並不明顯（圖 11），18 日早上 9 點風雨較大，但在西口隧道仍然可以看到許多車輛經過，在這之前本區並未產生任何土石災害；在 18 日 6 時颱風過後，在地面上並未有土石堆積與泥流出現，顯示本次颱風並未在此造成災害。

雖然本次颱風並沒有對隧道交通造成影響，但現場觀察土石堆積的情形，在颱風過後仍有相當多的土石被帶到隧道上方堆積，估計堆積淤 3 公尺高度，顯示火炎山依舊與過去一樣，每次颱風過後都會有大量土石被沖出，在小規模的土石流事件中，隧道降低了土石流對道路安全的影響。

	
西口監視器 2008.07.17 晚上 6 點	東口監視器 2008.07.17 晚上 6 點
	
西口監視器 2008.07.18 早上 9 點	東口監視器 2008.07.18 早上 9 點
	
西口監視器 2008.07.18 晚上 6 點	東口監視器 2008.07.18 晚上 6 點

圖 11 0020 卡玫基颱風前後隧道東、西口處影像監測 (2008.7.17-18)

2. 辛樂克颱風

辛樂克颱風侵襲時間為 9 月 14-16 日，14 日 16 時隧道東口邊坡還是植生茂密的情況（圖 12），14 日 19 時由於是晚上的影像（圖 13），因此無法明確觀察是否有土石沖出，但在 19 時 30 分，從隧道的燈光亮度，感覺似乎有部分被遮蔽（圖 14），之後燈光逐漸變小，至 15 日 0 時隧道口僅可看到微弱的燈光（圖 15），推測可能是土石堆積所造成。至 15 日 5 時白天的影像，則可以清楚看到隧道出口處上邊坡已被土石被掩蓋（圖 16），原本監視器的影像可以看到一半隧道口的位置，目前僅可以看到隧道口的上緣；至 9 月 16 日可清楚看到挖土機在清運土石（圖 17）。

由於發生土石堆積的時間在晚上，從影像上無法實際看到土石沖出的狀況以及發生的時間，因此假設造成隧道燈光逐漸被遮蔽的結果是因為土石堆積所造成，則可以推估土石開始沖出的時間大約在 9 月 14 日晚上 7：00 至 7：30 分這段期間，至 15 日 0 時堆積逐漸趨緩，到 5 點以後已看不到土石沖出的現象。



圖 12 2008 年 9 月 14 日 16 時辛樂克颱風前影像



圖 13 2008 年 9 月 14 日 19 時辛樂克颱風影像



圖 14 2008 年 9 月 14 日 19 時 30 分辛樂克颱風時影像



圖 15 2008 年 9 月 15 日 0 時辛樂克颱風時影像



圖 16 2008 年 9 月 15 日 5 時辛樂克颱風時影像



圖 17 2008 年 9 月 16 日 14 時辛樂克颱風後影像

(五) 颱風降雨資料分析

1. 卡玫基颱風

本計畫統計颱風其間時雨量及累積雨量，觀察其降雨的特性。此颱風最大時雨量為 51.4 公釐，發生時間在在 7 月 18 日 9 時，最大日降雨量為 7 月 18 日達 215.2 公釐（圖 18）。本次降雨累積雨量為 223.8 公釐，但從監視影像及現場調查的結果，並沒有發現明顯的災害產生。由於本次累積降雨量已達本計畫監測的閾值（12 小時累積雨量達 100 公釐），但實際上並沒有對道路造成危險災害，初步推測可能因為西口堤防的興建以及在苗栗縣政府在隧道上方進行土石的採取，使得土石堆積在堤防內，並沒有發生溢出現象，顯示堤防已發揮其阻擋土石的功用。

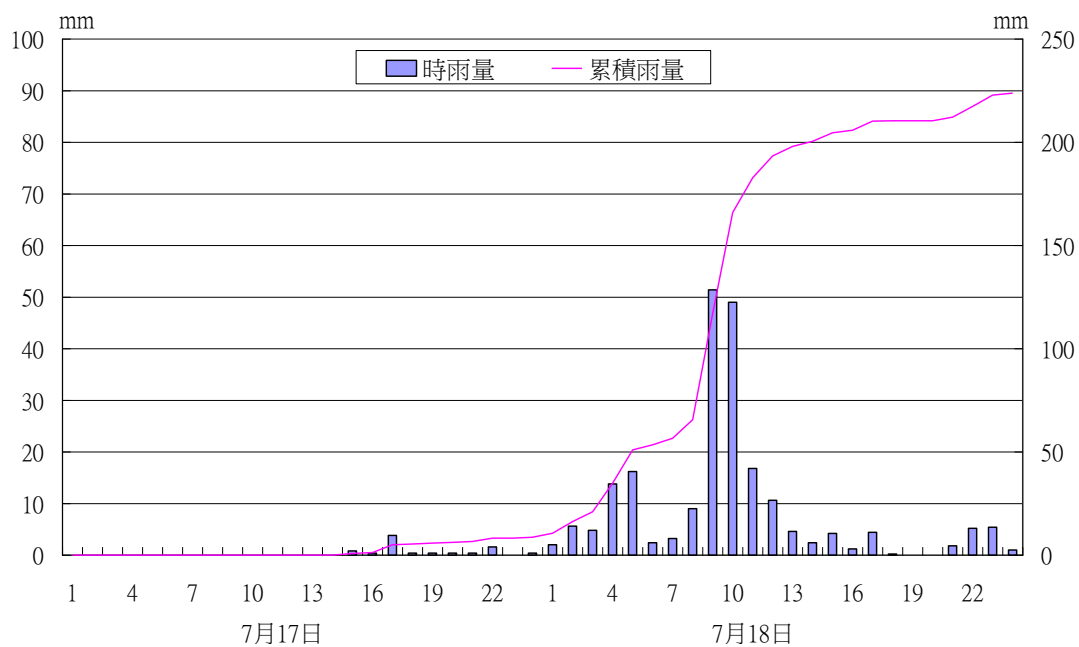


圖 18 卡玫基颱風降雨量統計圖

2. 辛樂克颱風

本次颱風最大時雨量為 30.8 公釐，發生在 9 月 14 日 20 時，日降雨量 9 月 13 日為 150.2 公釐，14 日為 255.6 公釐，15 日為 52.4 公釐，三天累積降雨量為 458.2 公釐（圖 19）。由於本次颱風在隧道東口處造成嚴重的土石流及崩塌，這也是隧道興建以來首次在東口處產生的災害。

從監視影像的紀錄來推估土石流發生的時間大約在 14 日晚上 19 時，災害發生前的累積降雨量達 318.8 公釐，14 日日降雨量為 255.6 公釐，此降雨量為在隧道興建後為最大的日降雨量，大量的降雨是造成本次災害的重要原因。

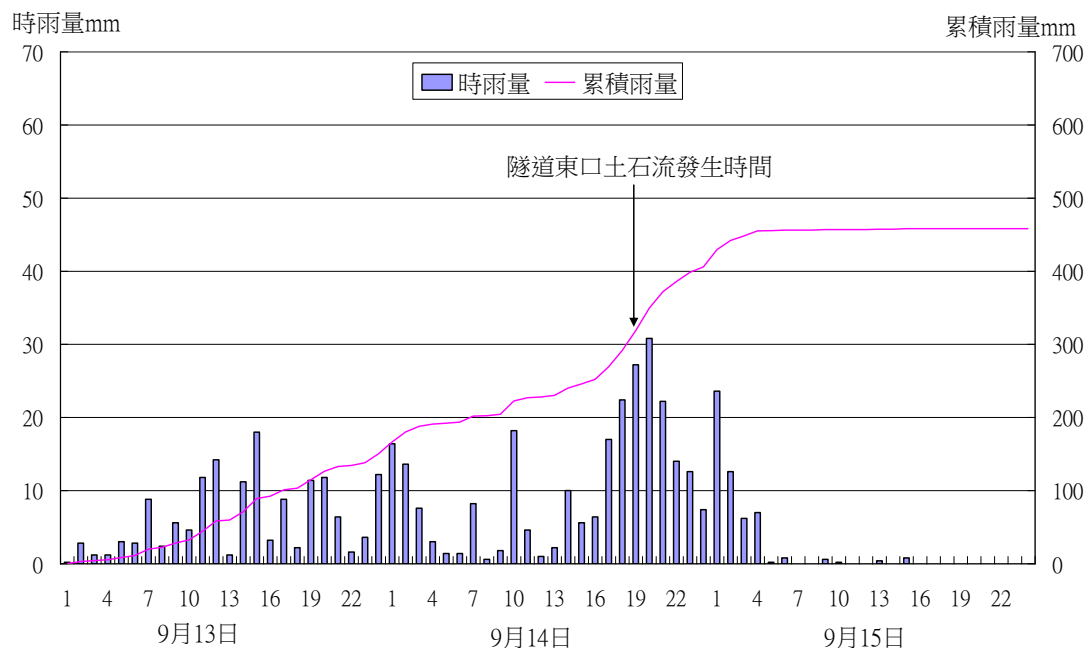


圖 19 辛樂克颱風降雨量統計圖

比較兩次颱風災害的降雨情況（表 3），辛樂克颱風最大時雨量降雨並沒有比卡玫基來得大，而最大日降雨量 255.6 公釐比卡玫基颱風多 40.4 公釐，且為隧道興建後日降雨量最高值，其中差異最大的為累積降雨量相差 234.4 公釐，因此在隧道東口發生土石流的原因，推測主要是持續性的降雨，累積降雨達 318.8 公釐，極有可能造成災害。

表 3 颱風降雨量比較表

	卡玫基颱風	辛樂克颱風
最大日降雨時間	2008 年 7 月 18 日	2008 年 9 月 14 日
最大日雨量 (公釐)	215.2	255.6
最大降雨強度	51.4	30.8
累積雨量 (公釐)	223.8	458.2
災害發生時累積降雨量 (公釐)	無明顯災害	318.8

本計畫在火炎山上及下方各架設一氣象站，將所收集的資料，分別比較降雨量的差異性，以瞭解區域降雨的差異，7月18日卡玫基颱風時兩測站所測得的降雨資料，原始資料為每半小時計算一筆，比較火炎山上及下方的降雨量，在此次颱風所得的資料差異不大，最大差異為半小時3公釐，日降雨量上方及下方分別為215.2公釐及216.8公釐，僅差1.6公釐。

9月14日辛樂克颱風降雨比較，最大差異為半小時3.6公釐，日降雨量上方及下方分別為298.6公釐及255.6公釐，相差43公釐，表示辛樂克颱風在火炎山集水區上方所帶來的降雨量較下方來得多。

從兩個氣象測站降雨量比較結果，在兩測站相距並不很遠的情況下，仍可以看到些許的差異，因此越接近火炎山地區的測站也更能反映當時的氣候狀況。

(六) 現場調查

苗栗縣政府於火炎山地區進行土石挖掘工程，在隧道西側出口建造便道以方便砂石車進出，主要的挖掘工程在第三子集水區的沖積扇扇面進行。土石挖掘工程的進行，能夠藉由清除隧道上方土石而減少隧道體承受的壓力，達到保護隧道的作用。但沖積扇扇面上的土石被移除之後，有類似於河川地形學中的侵蝕基準面下降的概念，會加強上游區域的侵蝕作用，造成邊坡的快速後退與大量土石搬運。唯挖掘工程始於2008年1月至今，在此段期間內火炎山區無充足的降雨進行地表侵蝕，同時由於時距不長，難以觀察出上游區域的變化，但此為值得後

續觀察的重點。

雖然沖積扇面的土石清淤能夠減少隧道體承受的壓力，且隧道西側出口附近的砂石車便道比原來蛇籠設施的位置更往西側延伸，有保護西側道路受土石流影響的作用，但隧道西側出口仍存有潛在的土石災害危機。原因在於五號子集水區的河道流路，便道所在的土石堤範圍並未涵蓋到整個沖積扇面最西側的範圍，同時照片左方的堆積土石限制住五號子集水區的沈積物流動，當沈積物被搬運時只能往辦公所的位置移動。加上人造工程的影響，大量的土石堆積於五號扇面上，使得未來從上游搬運而下的土石僅有少部分的空間可堆積，因此會更快溢流往下方道路方向移動，容易造成土石流災害的發生。此區域的災害潛在危機需要多加關注。

由於辛樂克颱風在隧道東口處造成嚴重的土石堆積情形，從現場隧道口處觀察土石堆積的痕跡，估計在隧道口處土石堆積約 1 公尺左右。比對東口處邊坡災害發生前後土石堆積的情形，在沒發生土石災害前可看到東口處植生相當茂密，在辛樂克颱風後，原本植生的區域大部分被土石所掩蓋，範圍已達東側的機房處，表示此次颱風將大量土石帶出，這些土石主要來自一號集水區的上游。



圖 20 2007 年隧道東口處照片 (2007.9.19)



圖 21 2008 年辛樂克颱風後隧道東口處照片 (2008.10.09)

(七) 航照判釋

本計畫於 2008 年度收集火炎山自然保留區兩個時間的航空照片，拍攝日期分別為 2008 年 6 月 10 日(資料來源：農林航空測量所)及 2008 年 9 月 11 日(資料來源：陶林數值測量有限公司)，這兩個影像拍攝期間主要有卡玫基颱風侵襲，可從航照來判釋颱風對本區造成的影響。

本計畫將影像分成隧道東口處及西口處來觀察地形的變化，在西口處兩個時期的變化並不大，在五號集水區的下游處，有部分植生被土石掩蓋，但僅可以看到微小的變化；另外在四號集水區並沒有看到明顯的土石被帶到沖積扇中，這表示卡玫基颱風並沒有在隧道西口處造成影響。

本年度將生產 2008 年 9 月 11 日的數值地形資料，後續資料分析將可以說明地形變化的結果。



航拍日期：2008.6.10



航拍日期：2008.9.11

圖 22 隧道東口航照影像對照圖

五、研究成果

(一) 氣象觀測

本研究持續收集火炎山自計式氣象測站 (位於火炎山隧道東口的機房樓頂) 資料，目前資料累積 2009 年 3 月到 9 月，如以下各圖所示。這幾個月的雨量分布上，主要受到颱風侵襲與否的影響最大，8 月份的降雨量達 569 公釐，就是受到莫拉克颱風侵襲，短時間內降下暴雨所造成。而在其他的月份中，由於沒有颱風的干擾，降雨事件相當零星，單次降雨事件的雨量也不多，因此有較多陣雨發生的六月 (午後陣雨) 才有稍多的雨量 (236.4 公釐)。

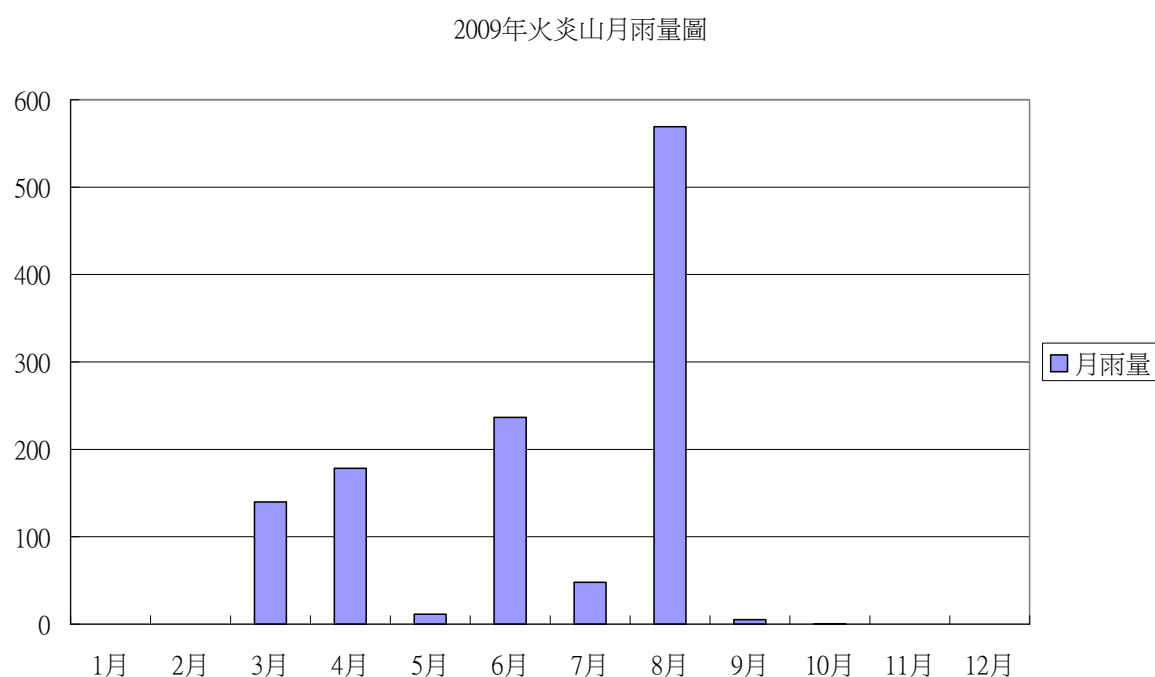


圖 23 2009 年火炎山月降雨量圖

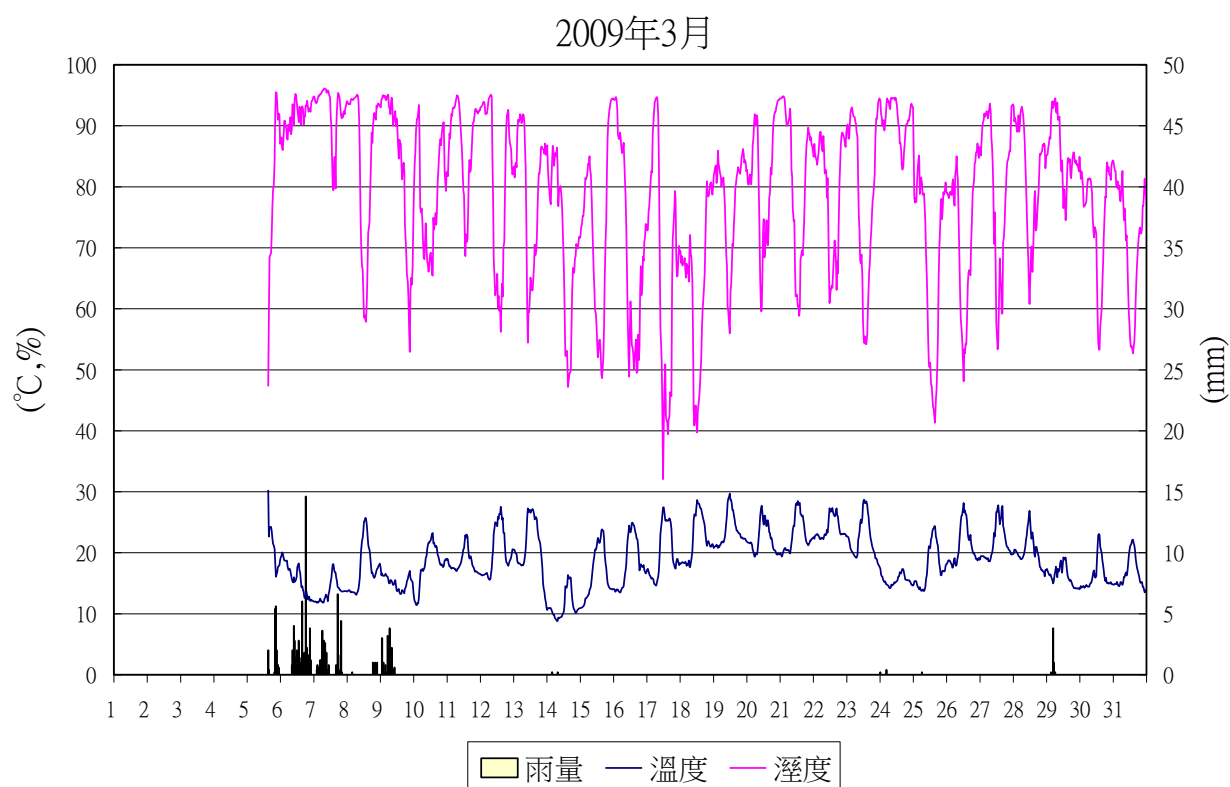


圖 24 2009 年 3 月火炎山上方測站氣候資料統計圖

在各月的氣象資料分析上，3 月份除了 6 日至 8 日有些許降雨外，其他時間幾乎沒有降雨。白天的濕度普遍偏高，但夜間的濕度迅速降低到 70% 以下，為乾爽舒適的情況，僅有降雨日附近的夜間濕度有偏高。白天的溫度接近 30 度，晚上則為 15 度，平均氣溫約 20 度。

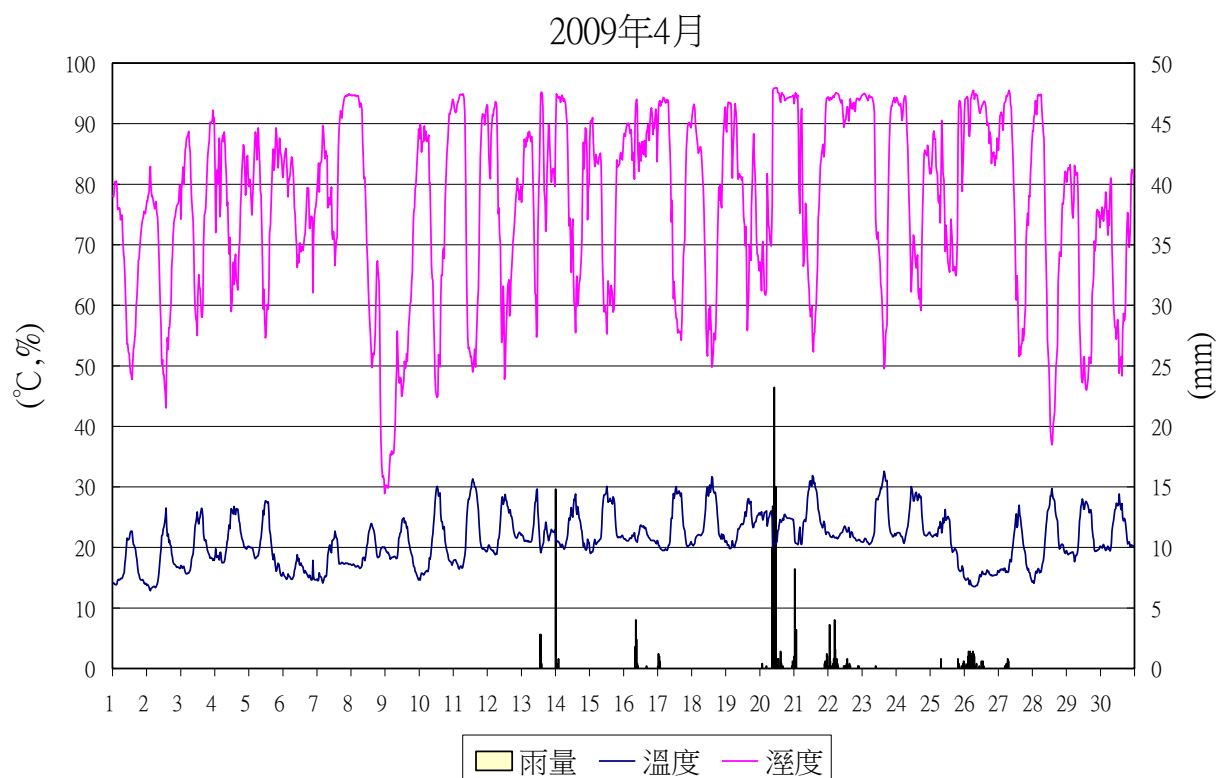


圖 25 2009 年 4 月火炎山上方測站氣候資料統計圖

4 月份有較多的降雨天數，4 月 20 日最大時雨量為 36.8 公釐，12 小時最大累積降雨量為 88.4 公釐，並沒有超過警戒值，從實際現場來看，並沒有發生土石沖到道路的現象。濕度上與三月份相較變化不大，氣溫較 3 月來得高，白天的均溫約在 25~30 度，夜間則上升到 20 度左右，平均氣溫約 22 度左右。

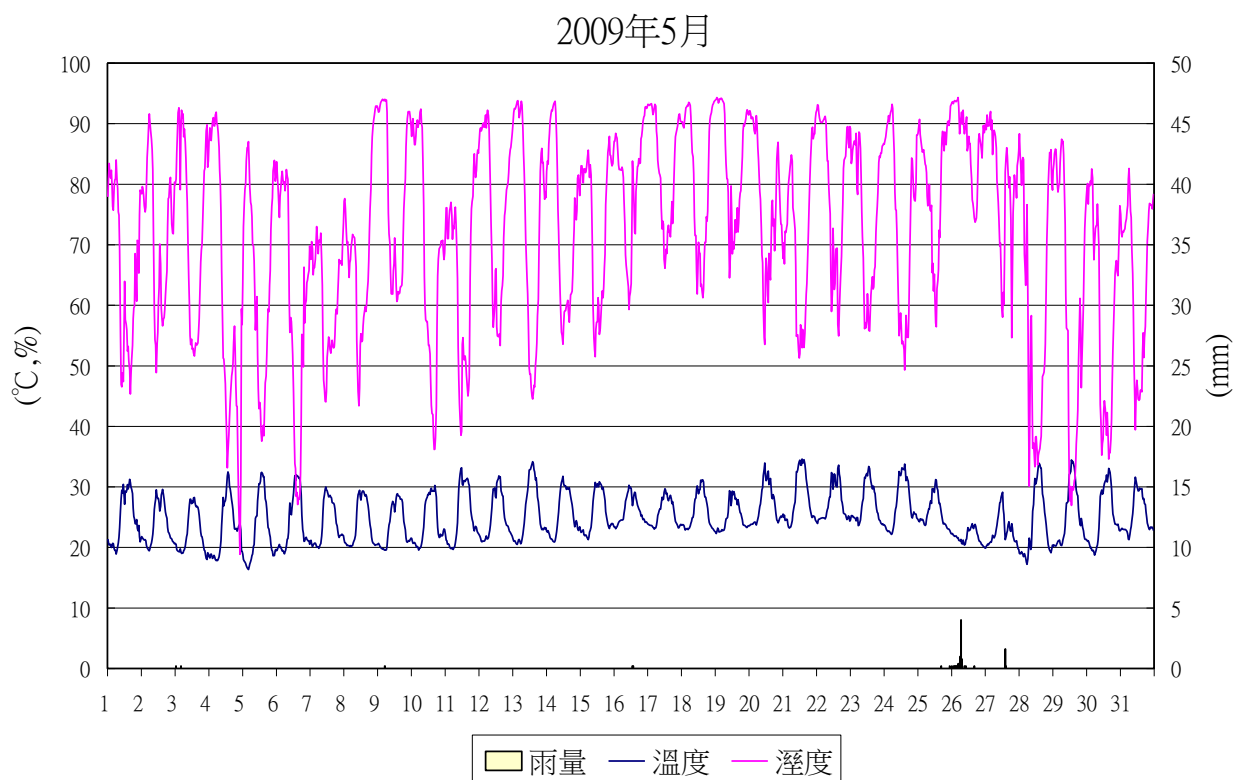


圖 26 2009 年 5 月火炎山上方測站氣候資料統計圖

5 月份從資料來看幾乎沒有發生明顯的降雨事件，只有 26 日有零星的降雨，月降雨量更只有 11 公釐，相當稀少。濕度分佈與三、四月的情況相同，白天高夜間低。溫度上則比四月份更高，白天的高溫來到 30 度以上，夜間也在 20 度以上，平均氣溫為 25 度左右。

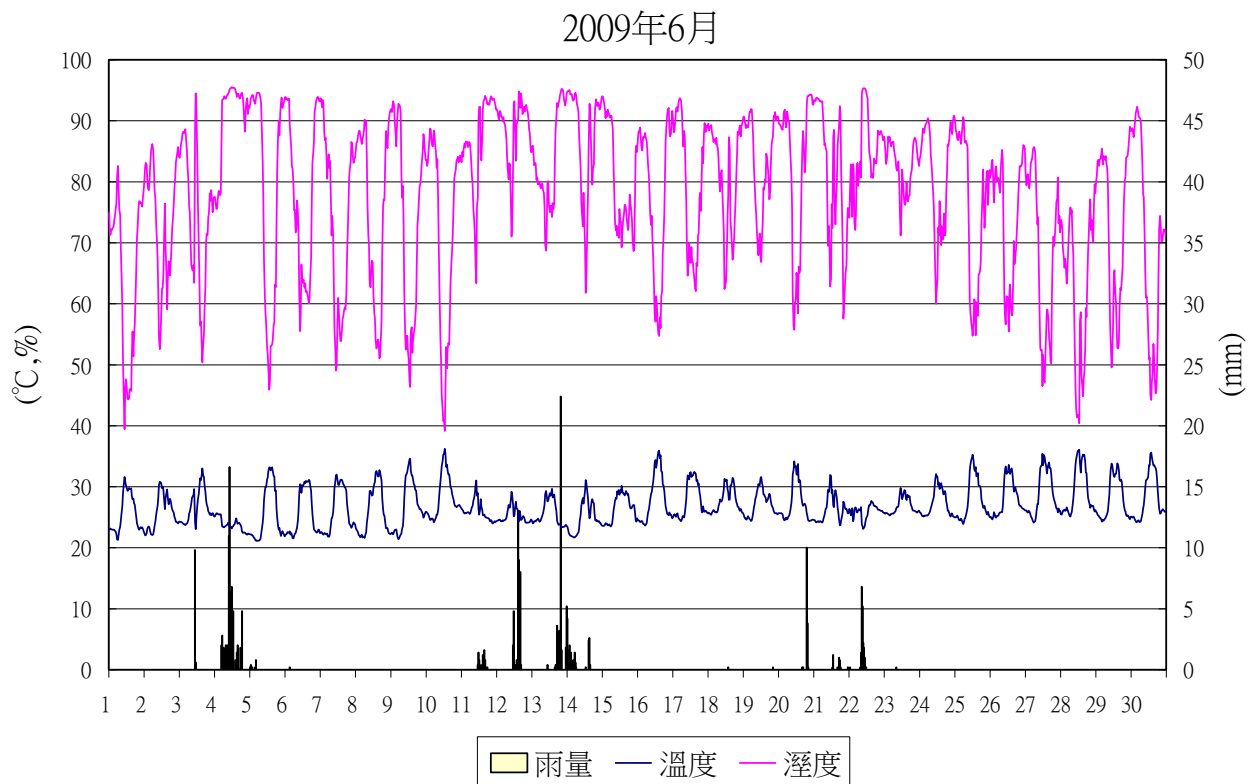


圖 27 2009 年 6 月火炎山上方測站氣候資料統計圖

6 月份為上半年度累積降雨最多的月份，主要有兩場較大的降雨事件，一次在 6 月 4 日，最大時雨量為 18 公釐，12 小時最大累積降雨為 67.6 公釐，未達到警戒值的 100 公釐；第二次為 6 月 13-14 日，最大時雨量為 25.6 公釐，12 小時最大累積降雨為 55.6 公釐，也沒有達到警戒值。濕度上較五月份來的稍高，白天的濕度大致相同，夜間的濕度略有上升的跡象。溫度的分佈上與五月相當類似，平均溫度落在 26 度。

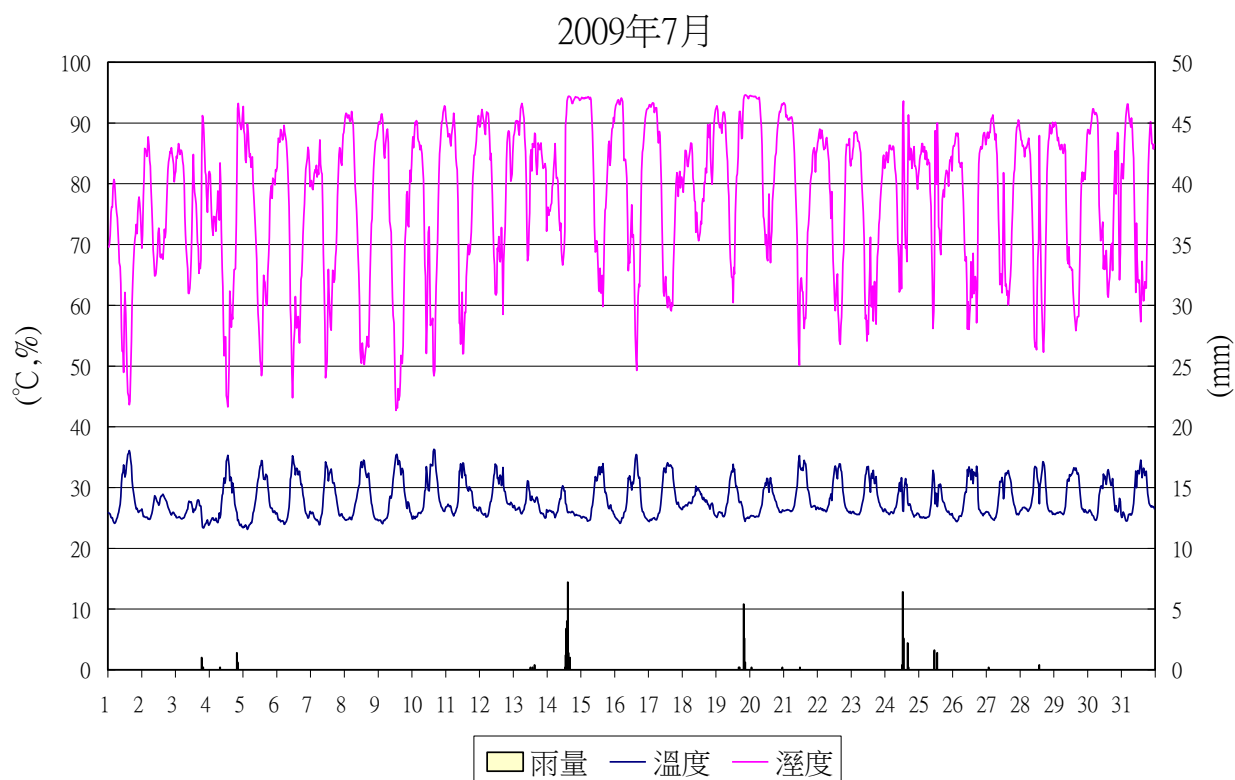


圖 28 2009 年 7 月火炎山上方測站氣候資料統計圖

進入下半年的 7 月，由於沒有颱風的水汽補給，也極少有午後雷陣雨，本月份的雨量相當稀少，雨日僅有五天，但強度都很小，時雨量低。濕度上與前兩個月相較，白天的濕度稍低，夜間的濕度則大致相同。溫度上則相當穩定，白天均溫約 33 度，夜間的溫度大約 25 度。

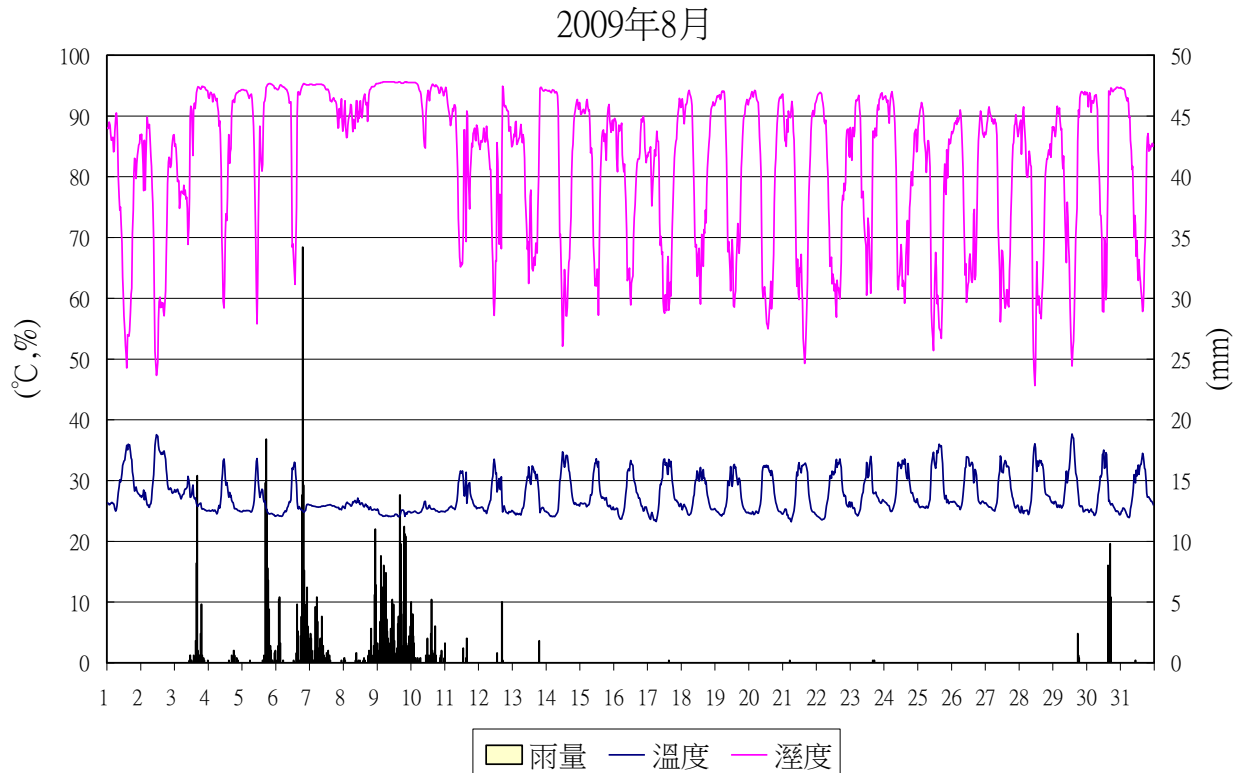


圖 29 2009 年 8 月火炎山上方測站氣候資料統計圖

8 月份的雨量是今年到目前為止，降雨量最多的月份。主要的降雨事件共有四次，分別是 8 月 3 日、8 月 6~7 日、8 月 9~10 日以及 8 月 30 日。與颱風侵襲時間比較，莫拉克颱風警報時間為 8 月 7~10 日，對照火炎山地區的降雨時間，應為 8 月 6~7 日、8 月 9~10 日兩場降雨。從 8 月 6 日~8 月 11 日的雨量記錄中，總降雨量為 414 公釐。而在 8 月 7 日時，因為 12 小時累積雨量超過 100 公釐，系統發出警告簡訊。其他場次的降雨，則均未達到 100 公釐。濕度分佈上，除了 8 月 6 日~10 日之間，因為大雨而使濕度持續偏高外，其他時間的濕度分佈都與 5~7 月相同。氣溫的分佈也是如此，除了颱風期間溫度低於 30 度之外，日間溫度都來到 30 度以上，夜晚則為 25 度左右。

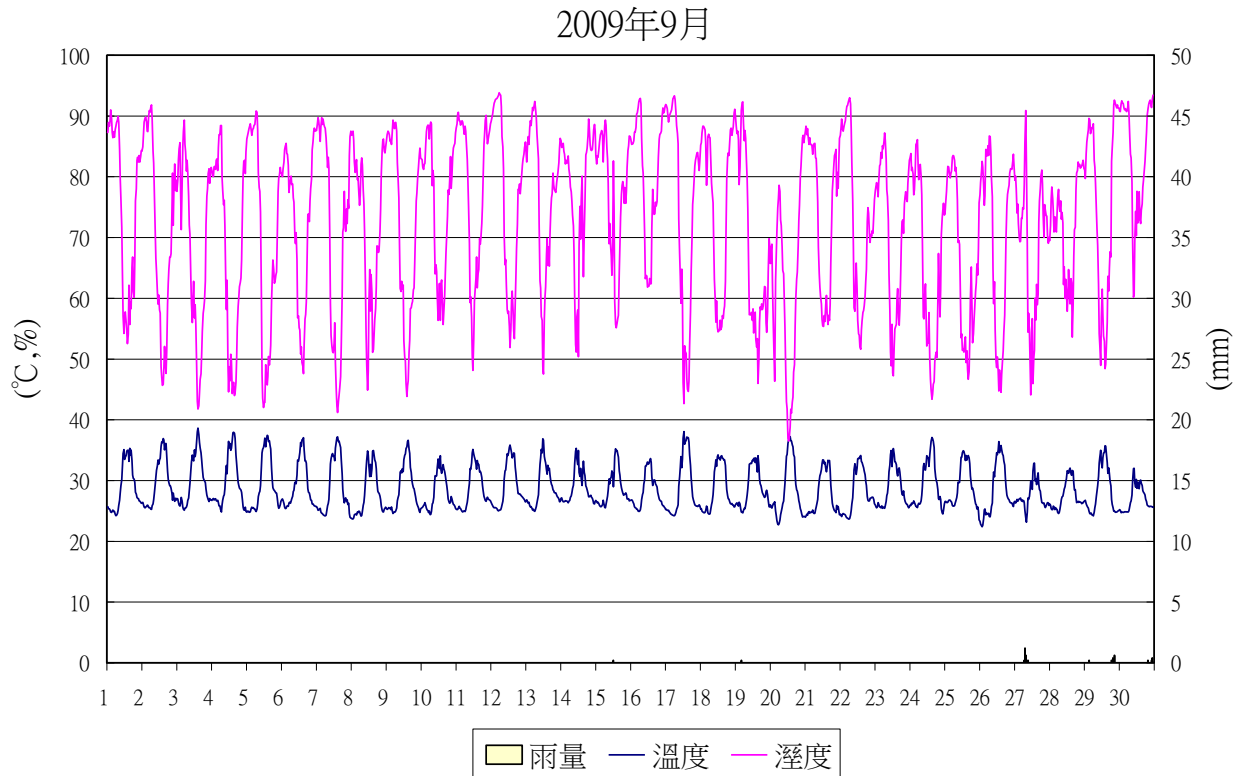


圖 30 2009 年 9 月火炎山上方測站氣候資料統計圖

九月份的降雨，因為沒颱風侵襲，又回到跟 7 月相同的情況。全月份只有兩個雨日，而且降雨量極少。濕度的分佈情況與前幾個月略有不同，濕度超過 90% 的天數減少，夜間的濕度也降低到在 40~50% 之間，比前幾個月感覺乾爽。溫度的分佈上則感覺不到差異，穩定的維持白天 35 度、夜間 25 度的夏季情況。不過隨著日期愈晚，日間最高溫將會慢慢的下降。

(二) 影像監測

本年度計畫持續進行監測影像儀器的維護及監測東側、西側隧道口鄰近的土石堆積情形，從上半年的影像來看，土石堆積的情況並不明顯，主要是今年至 7 月底為止，沒有颱風或豪雨等降雨量較多的情形。過去在研究本區土石流發生的情形，推估當累積降雨量超過 100 公釐時，會有土石沖出，本年度至 7 月底單場的降雨並未超過警戒值。

而在 8 月份的莫拉克颱風，帶來了今年為止研究區內最大的降雨事件。颱風降雨的強度在 8 月 7 日到達 12 小時內降下 100 公釐的警戒條件，並且降下了 400 多公釐的總雨量。依據報載，8 月 7 日至 8 日間，隧道西口有發生土石輕微溢流的情況，然而就攝影機擷取到的畫面中，並沒有觀察到土石流的情況。而就 8 月 13 日的現場勘查，道路上有土砂掩埋過的痕跡，但攝影機所在位置與隧道頂端的蛇籠卻狀況良好，因此推斷應該不是由隧道頂部直接溢出，而是從西側土提後方繞過去，所以才沒有被捕捉到影像。

在東口的部分，就全年度的影像來看，由於沒有土石沖出的情況，東口的土石情況相當穩定，邊坡上的植生逐漸長高，顯示今年的幾場降雨事件對於隧道東口的部分沒有造成任何影響。

目前隧道東西兩側的影像系統經過廠商檢修，錄影系統持續正常運作。

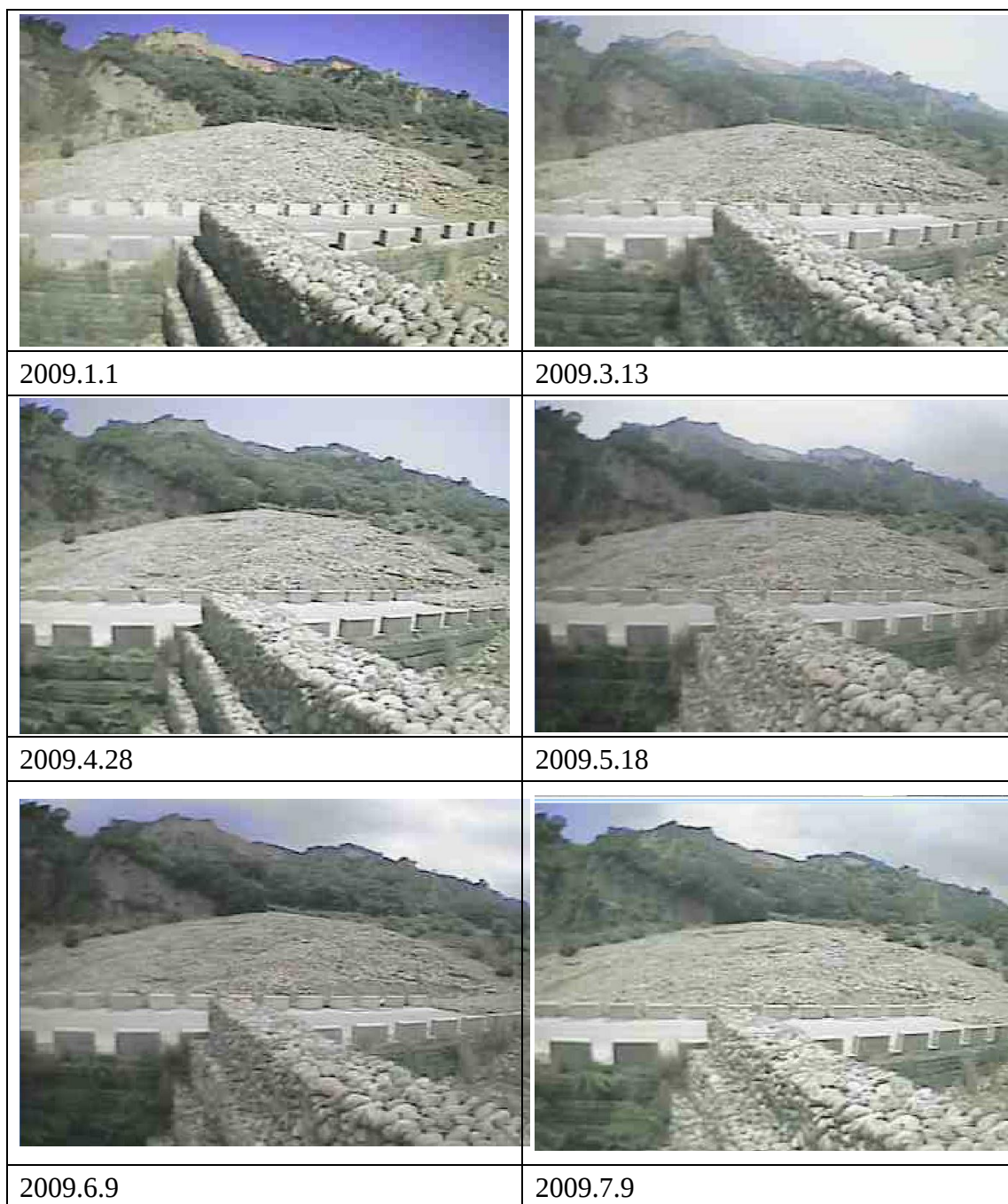


圖 31 1~7 月火炎山隧道西口影像監測圖

	
2009.2.14	2009.3.13
	
2009.4.24	2009.5.16
	
2009.6.13	2009.7.9

圖 32 1～7 月火炎山隧道東口影像監測圖



圖 33 8 月 6 日 ~ 9 日莫拉克颱風其間火炎山隧道西口影像監測圖

	
2009.8.6 08:00	2009.8.7 08:00
	
2009.8.8 08:00	2009.8.9 08:00
	
2009.8.10 08:00	

圖 34 8 月 6 日 ~ 10 日莫拉克颱風期間火炎山隧道東口影像監測圖

(三) 數值地形分析

本計畫利用 2006 年與 2008 年航空照片的影像，生產 5 公尺網格的 DTM 資料，分析 2005 年、2006 年及 2008 年三個年代地形變遷的情況。目前初步分析沖積扇地形的變化，結果如圖 35 ~ 37。

2005 年為隧道正在施工的期間，2006 年為隧道通車後 8 個月，從兩年的數值地形資料來比較，在隧道上方呈現明顯的堆積，主要原因可能為施工期間挖填所造成的高程變化差異，而自然地形的變化，因為受到人為工程的影響，因此無法明確說明因降雨所造成的地形變化。

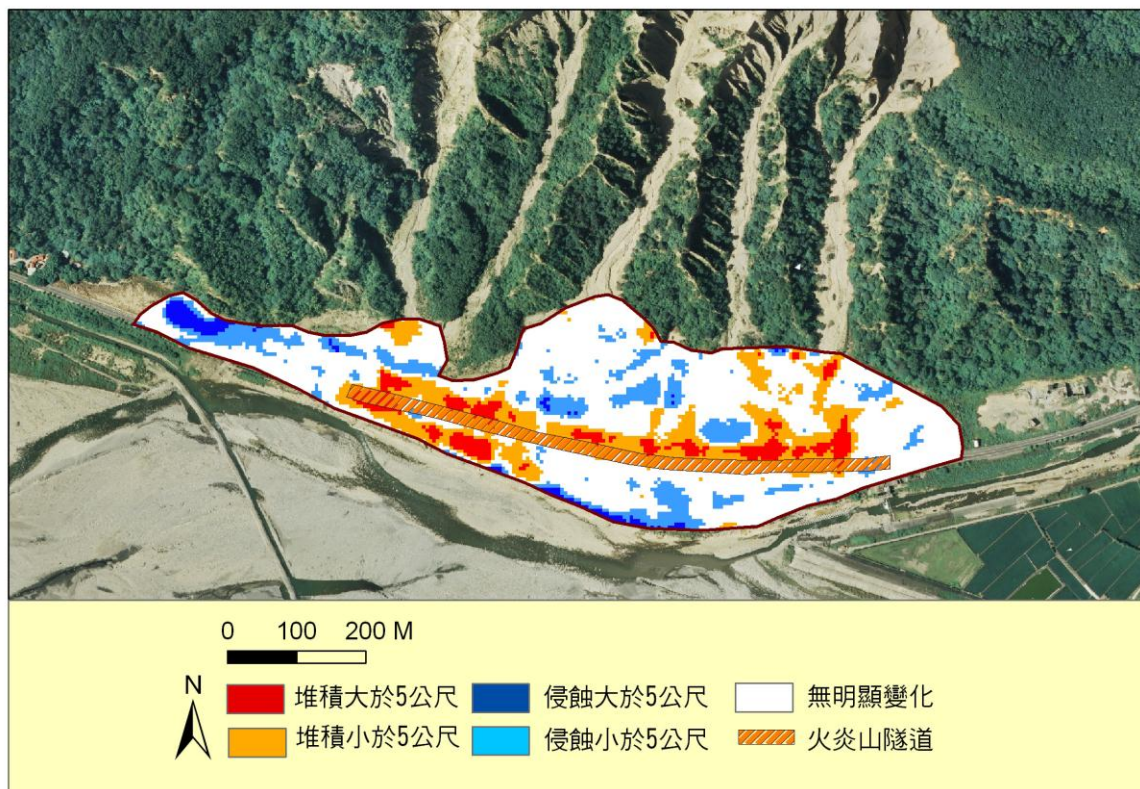


圖 35 2005 年至 2006 年火炎山沖積扇面高程變動

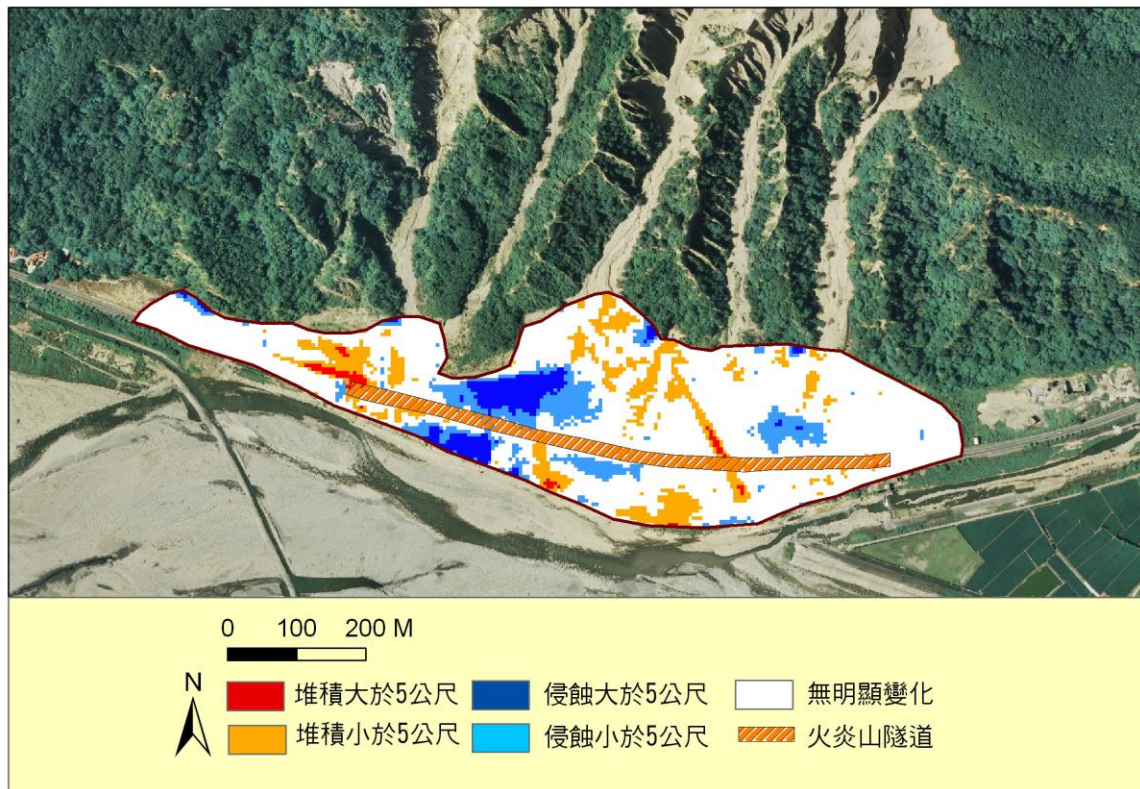


圖 36 2006 年至 2008 年火炎山沖積扇面高程變動

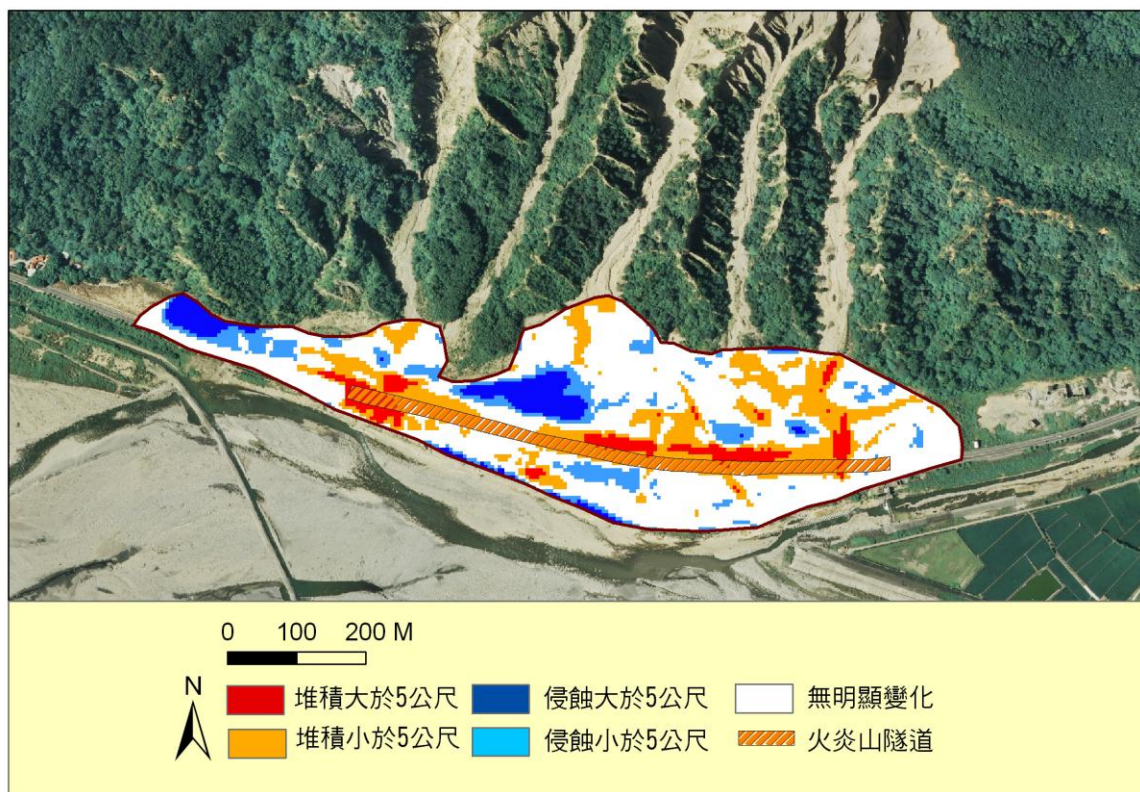


圖 37 2005 年至 2008 年火炎山沖積扇面高程變動

2007 年隧道西口因颱風及豪雨造成 3 次泥流及土石堆積在隧道口的狀況，因此在 2008 年在隧道西口處興建一土堤，從 2006 年至 2008 年的數值地形資料可以看到隧道西口處有一堆積，這就是土堤的位置。2006 年至 2008 年航照拍攝的期間，發生了幾場較大的降雨事件，如 2007 年 6 月 10 日、2007 年 8 月 19 日、2007 年 10 月 7 日及 2008 年 7 月 17 日的卡玫基颱風，比較這段期間數值地形資料分析的結果，除了在 4 號、5 號集水區（靠近隧道西口）有些許的堆積，3 號集水區沖積扇的部分呈現是大量侵蝕的現象。過去利用歷年航照及數值地形資料研究火炎山地形變遷的結果，沖積扇發生侵蝕的現象主要是人為土石的清淤及砂石的採取所造成的，由於本區已經開放苗栗縣政府進行土石的採取，從數值地形資料看，推估 2008 年 9 月時土石的採石量已經大於隧道完成後土石的堆積量，造成沖積扇地形呈現大量侵蝕的現象。

而就隧道上方的土石量而言，火炎山隧道原始設計可以承受隧道上方 7 公尺的土石堆積量，若是超過 7 公尺則需要進行清除土石的動作。本研究找出 2006 年隧道完工後，隧道上方的土石堆積高度。隧道頂部的高度在完工的當時(2005) 為 180 公尺，而在 2006 年的 DTM 上顯示，隧道上方的土石在當年度的高度並沒有累積超過 7 公尺，還可以繼續的承受土石堆積。而未來是否需要進行土石的清除動作？就目前的觀察，隧道前方還有很大的空間可以累積土石，當土石流發生時，土石流應僅通過隧道上方，而並非停在隧道上方增加土石高度。就此點推

斷，隧道上方的土石高度，在短期間內應該不至於累積超過 7 公尺的高度。



圖 38 火炎山隧道在 3D 立體影像上的位置

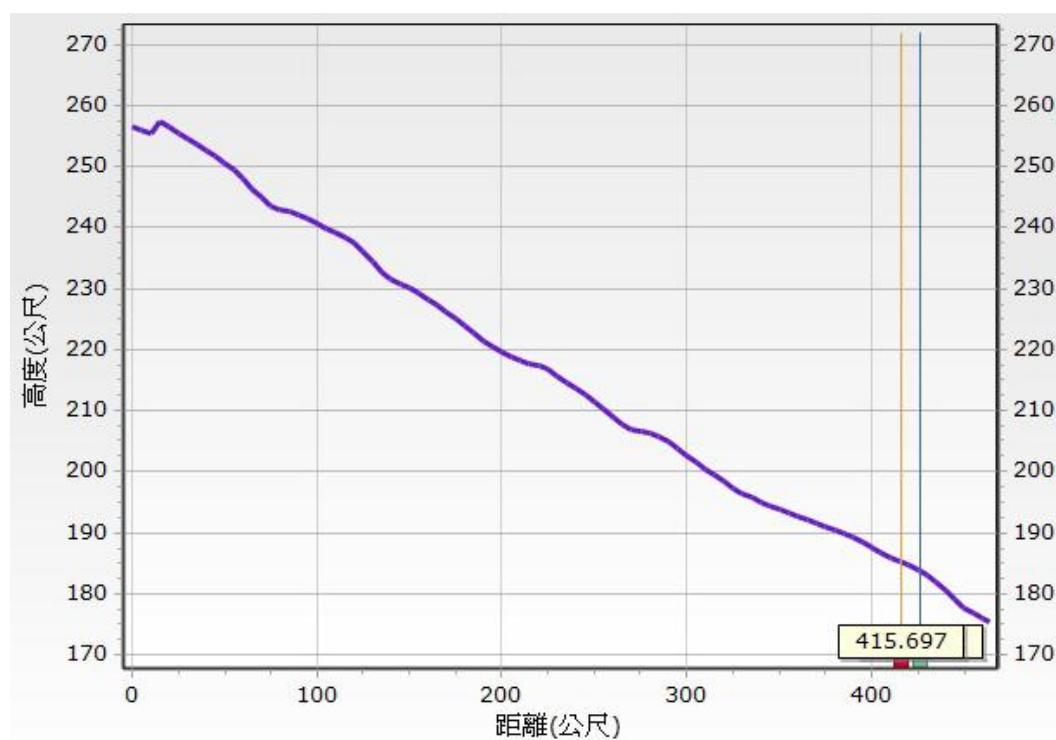


圖 39 火炎山一號集水區剖面圖 (橘線與藍線所夾處為隧道位置)

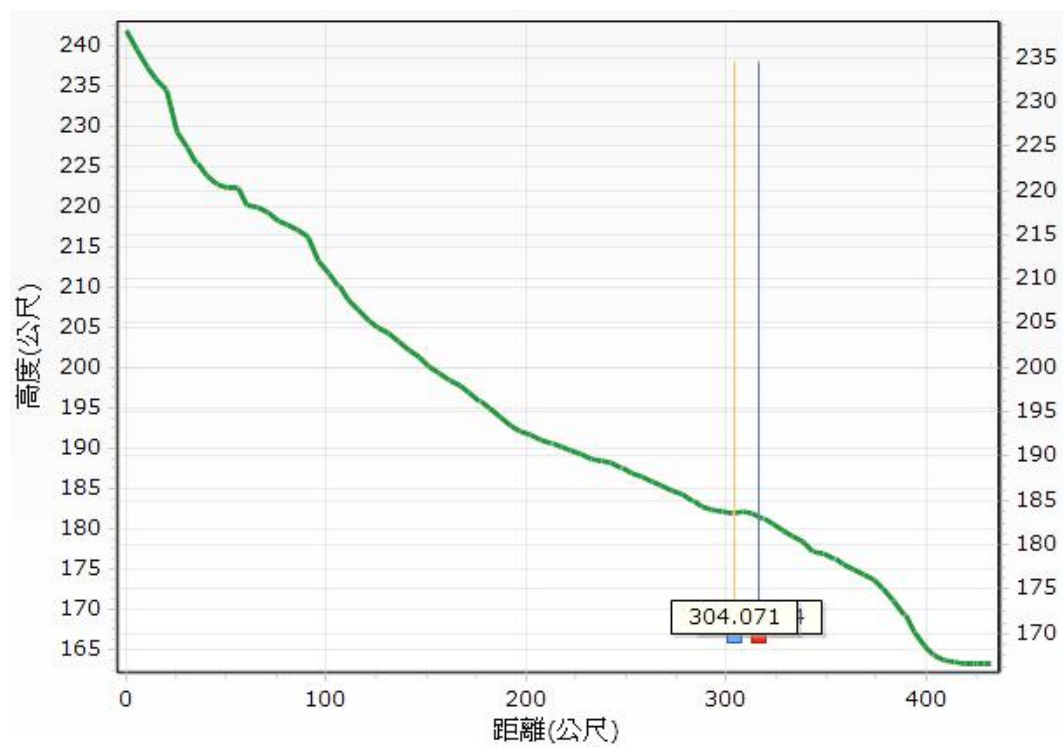


圖 40 火炎山二號集水區剖面圖 (橘線與藍線所夾處為隧道位置)

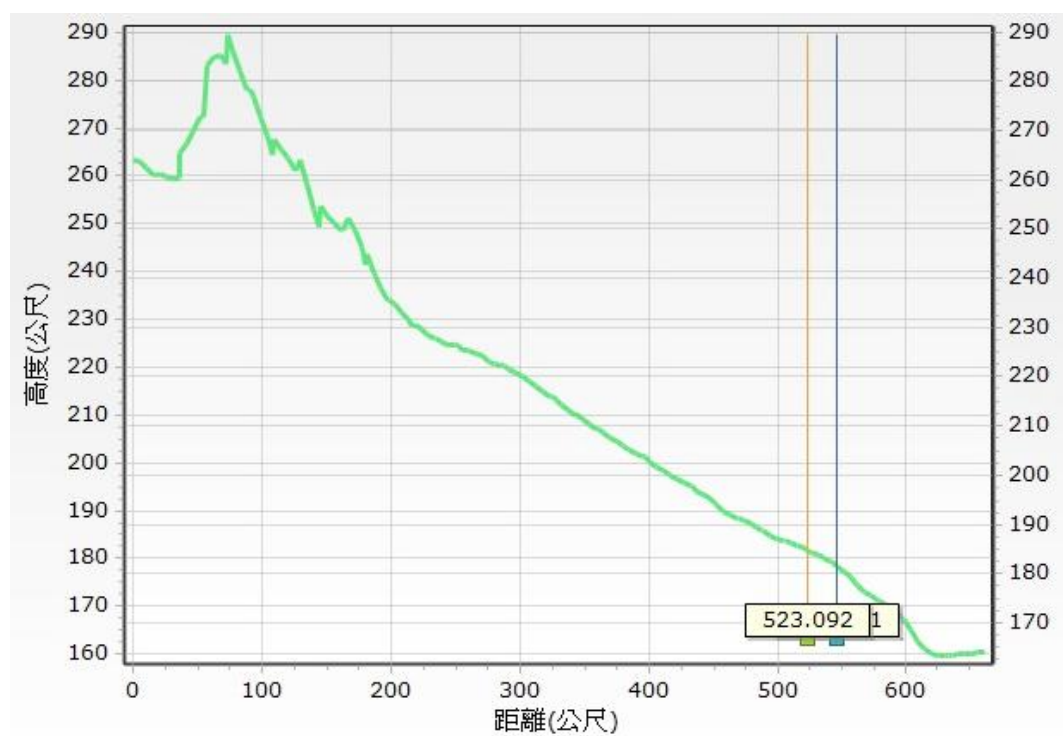


圖 41 火炎山三號集水區剖面圖 (橘線與藍線所夾處為隧道位置)

(四) 降雨資料整理與分析

1. 降雨強度分析

過去在研究土石流事件中，降雨強度是引發土石流事件的重要指標，本研究為了瞭解近年來引發土石流與降雨之間的關係，統計 2006 年至 2009 年之間日降雨量超過 100 公釐的降雨事件，觀察降雨對火炎山地形的影響。

2005 年底火炎山隧道已經完工，2006 年至 2009 年的降雨主要是討論隧道興建後降雨對火炎山自然保留區地形的影響。隧道興建完成後至 2007 年間，發生了多起泥流的災害，都發生在隧道的西口處，因此苗栗縣政府在於 2008 年在西口處興建一土堤，以預防泥流再次發生。不過在今年的莫拉克颱風事件中，還是有少量的泥流漫過土堤，輕微的影響道路的通暢。

從表 4 來看，降雨強度在 28.4 公釐即可能發生泥流的災害，但在西側土堤興建完成後，2008 年 7 月的卡玫基颱風降雨強度達 51.4 公釐卻沒有發生明顯災害，表示西側土堤有預防災害發生的功用。在今年 8 月的莫拉克颱風中，最大降雨強度為 48.8 公釐，造成土壤中的含水量接近飽和，進而發生土石流的情況。不過由於土堤發揮作用，溢出的土石流規模並不大，工程單位也在發生的當天立即排除。

因此，就目前的經驗來看，降雨強度指標通常能夠反應出土壤水分是否有快速增加的情況，尤其是在火炎山地區，礫石的特性會加速水分的下滲，容易形成半固體的土石流往下滑動。不過，由於高降雨強度的時間與土石流發生的時間仍

有差距，因此還是需要加入總雨量的指標來幫助研判是否會發生土石流。

表 4 火炎山豪雨事件 24 小時降雨及降雨強度比較表

時間	24 小時雨量 (公釐/hr)	降雨強度 (公釐/hr)	說明
2005/12			火炎山隧道完工
2006/7/9	112.4	44.8	隧道東口泥流
2006/7/18	185.4	32.4	無明顯災害
2007/6/8	114.6	28.4	隧道西口泥流
2007/8/12	107.6	56	隧道西口泥流
2007/10/6	166.8	32	隧道西口泥流
2008/1			隧道西口土堤興建完成
2008/7/18	215.2	51.4	卡玫基颱風，無明顯災害
2008/9/14	255.6	30.8	辛樂克颱風，隧道東口土石流

2009/8/6	414	48.8	莫拉克颱風，7 日晚間隧道西口輕微土石流
----------	-----	------	----------------------

2. 累積降雨分析

降雨對於礫石的影響除了降雨強度外，持續性的降雨也影響礫石層搬運的作用。本研究比較幾場豪雨的事件，比較累積降雨的差異性，希望能更瞭解降雨的特性對於火炎山自然保留區土石搬運的影響。

本研究選定 4 個發生災害的降雨事件來觀察之間降雨的差異，時間分別為 2006 年 7 月 9 日-10 日、2007 年 6 月 8 日-9 日、2008 年 7 月 18-19 日以及今年莫拉克颱風侵台期間 (8 月 6 日-8 月 10 日)，這 4 場降雨 12 小時累積降雨量均超過 100 公釐，觀察及降雨特性分別說明。

2006 年 7 月 9 日累積降雨量 4 個小時即達到 100 公釐以上，與本研究設定的災害發生臨界值高許多，因此可見快速集中的降雨是一般造成土石流最主要的致災原因。

2007 年 6 月 8 日 0 時至 9 日 10 時，累積降量才達到 100 公釐的臨界值，本次災害主要是造成隧道西口處泥流的溢流及小規模的崩塌，因此持續性的降雨也會造成本區的災害產生。目前已於隧道西口處興建土堤，目前暫時可解決泥流的問題，但後續在更多的降雨時是否可避免災害的發生，還要持續進行觀察。

2008 年 7 月 18 日的降雨事件，為前兩次災害的綜合結果，不但在短時間

累積很多的降雨量，同時降雨時間也相當長，累積降雨量已經達到 200 公釐以上，這種降雨通常會在颱風時才會產生。

在今年的莫拉克颱風期間，最大的降雨強度出現在 6 日晚間，而在隔日（7 日）也發生了土石流的現象。由圖 43 可以看出，這次颱風降雨的另一特色為降雨時間長，兩個降雨的高峰從 8 月 6 日開始，7 日中午起雨勢稍歇，8 日晚間又開始新的降雨高峰。沖積扇上的土石從 7 日起已經富含水份，在沒有足夠時間排除水份下，當 8 日降開始時，發生土石流的機率就偏高。而警報系統在 8 月 7 日雨量超過 100 公釐時就已經先發出簡訊，7 日晚間至 8 日該地凌晨傳出小規模土石流的災情，證明警報系統有達到預先警告的設立目標。

從累積降雨來看，過去研究顯示大部分 12 小時的降雨超過 100 公釐，本區會有災害發生而這些大部分是屬於降雨強度較高的型態。除此之外在降雨強度不高但是持續性的降雨也是會造成災害的產生。

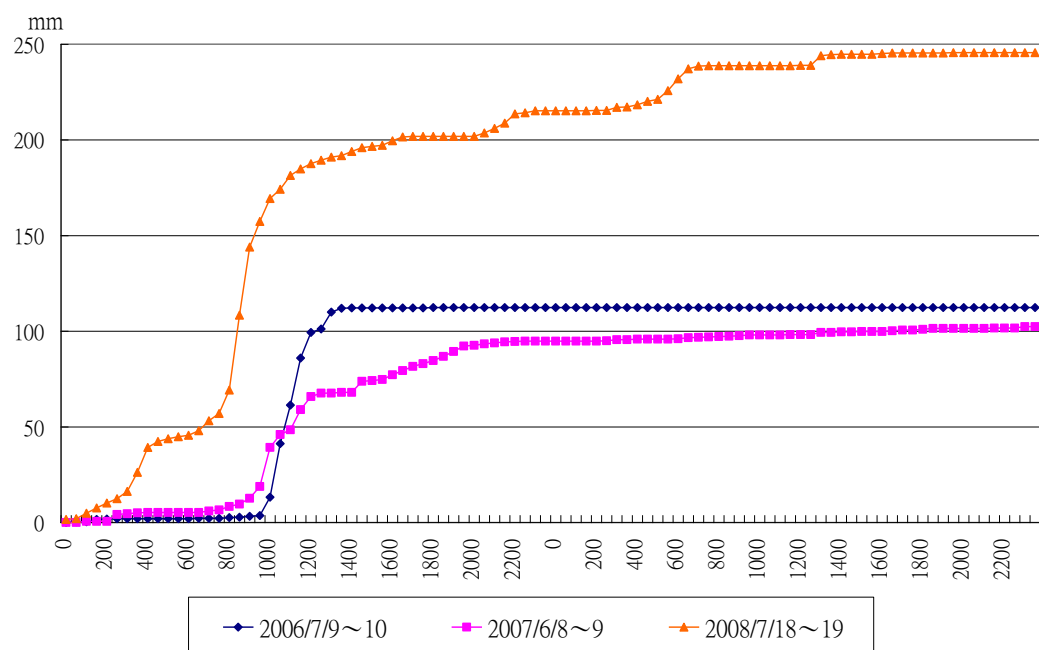


圖 42 2006、2007 與 2008 年三次降雨事件累積降雨比較

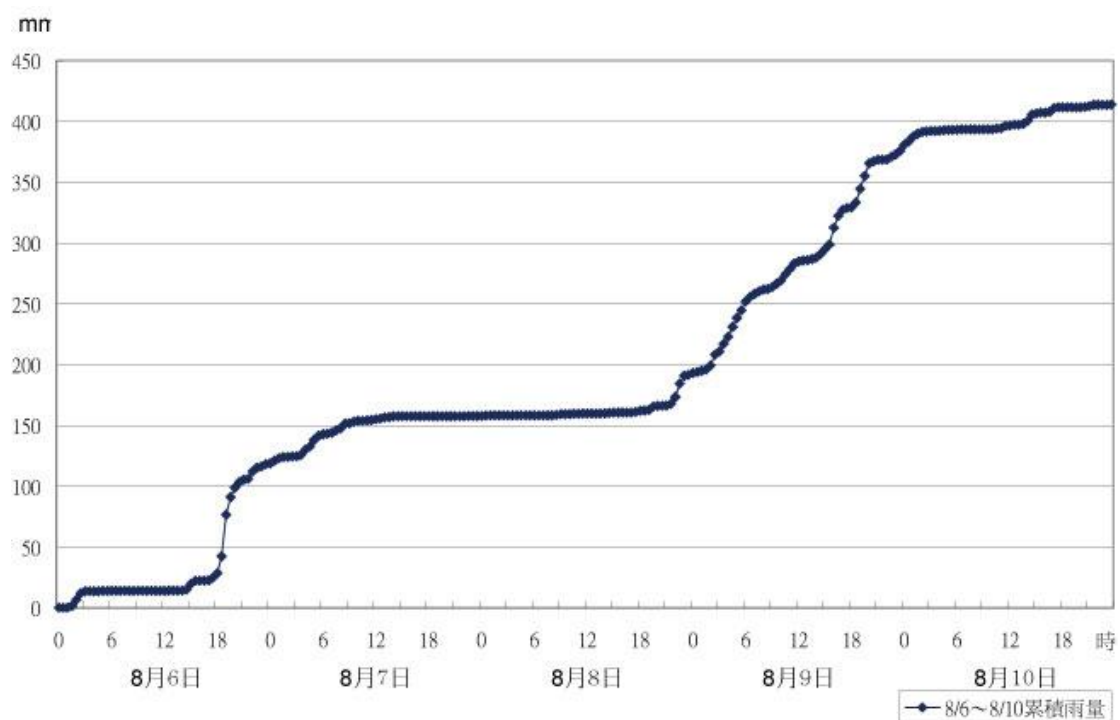


圖 43 莫拉克颱風期間 (8/6 ~ 8/10) 累積降雨量比較

(五) 現場會勘

本年度 6 月 2 日進行現場會勘，觀察目前土石堆積的狀況及當地土石採取對地形變化的影響。

從隧道西口的土堤往隧道上方，土堤內側堆積許多土石，土石的堆積面已經接近土堤的高度，在土堤內側的溝道上中段再設置一小土堤，以減緩土石向下衝擊的力量(圖 45)，本研究已經於 2008 年將西口的監視影像改設立於隧道上方，監測 4 號及 5 號集水區沖積扇土石崩落的情形(圖 46)。

由於 2008 年苗栗縣政府已經開放在隧道上方自然保留區範圍外進行土石的採取，實際上範圍雖然在保留區外，但已經相當靠近保留區的範圍。從現場觀察，原本為土石堆積的沖積扇，已被向下挖深，使得原本沖積扇的上緣形成土堤，而沿著沖蝕溝所攜帶的土石，則在土堤下方形成新的沖積扇(圖 47)。

從 5 號集水區至 3 號集水區原沖積扇的位置，由於大部分的土石已被向下挖深約 2 公尺，靠近保留區的邊界上形成一高低落差的土堤(圖 48)；由於這樣挖深的結果，使得原本地形上所形成的侵蝕基準面發生改變；另外沖積扇上方的土石都是膠結不良的礫石，當豪雨來臨時這些土石會直接向下堆積，除了沖蝕溝中的土石會因為沖積扇被挖深而加速向下侵蝕的作用力，沖積扇上方的土堤因失去原本沖積扇的支撐，更容易加速侵蝕作用的產生。

當降雨量較少時，礫石並不會產生明顯的搬運，主要是礫石間的細粒物質沿著空隙被雨水沖刷出來，形成泥流。由於火炎山上方沖積扇的土石已移走，下

方因隧道的阻隔所以無法繼續向下流動，因此當降雨發生時，泥流會先被帶出堆積在隧道上方。



圖 44 隧道西口土堤內側土石堆積情況



圖 45 從土堤往下看，土泥內側有一小土堤



圖 46 本計畫在隧道西口設立的影像監視器



圖 47 沖積扇出口處的土石，已被向下挖深約 2 公尺



圖 48 從 5 號至 3 號集水區，沖積扇約被挖深 2 公尺



圖 49 下雨時細粒的泥沙被帶出，堆積在隧道上方



圖 50 沖積扇的邊緣形成土堤，豪雨來時會加速土石崩落



圖 51 檢視土石採取的範圍規劃圖

(六) 莫拉克颱風後現場調查

莫拉克颱風為今年度火炎山地區最大降雨事件之一，為了瞭解此次颱風侵襲對於隧道上方集水區的影響，特地前往現場觀察。由於颱風造成輸水管路破裂，工程單位在搶修時就先將隧道上方的土石進行清理，使得照片中堆積在隧道上方的土石會少於颱風過後的堆積情況。

就隧道東口以及第一、二號集水區觀察，這三個地點在這次颱風中並沒有發生災害，而在沖積扇兩旁的土堤上，也已經佈滿草叢，環境相當穩定。一二號集水區下方的沖積扇，工程單位也已經加以清理，目前相當空曠。而往集水區上游觀察，目前河道中已經有大量的土石堆積，但坡度與沖積扇上未被清理的部分相當，顯示沖積扇上的堆積已經向上累積到了河道中，達成某種程度的平衡。河道中也有看到重新刷深的現象，代表這次颱風也有造成土石搬運，但規模不至於造成土石災害。



圖 52 莫拉克颱風後火炎山隧道東口情況 1



圖 53 莫拉克颱風後火炎山隧道東口情況 2



圖 54 莫拉克颱風後火炎山隧道東口旁土石流痕跡



圖 55 莫拉克颱風後火炎山一號集水區情況



圖 56 莫拉克颱風後火炎山二號集水區情況

三號集水區為火炎山最大也最活躍的集水區。由現場觀察，三號集水區在這次颱風中也有發生土石搬運的情況，但因沖積扇面積廣大，這次的土石流並沒有改變整個沖積扇面的情況，而只有刷深部分水流經過的河道。工程單位這次也有清除堆積在隧道上方的土石，也給了觀察土石堆積的良好基準。目前三號集水區沖積扇在隧道上的堆積高度約有 1.5 公尺，往扇頂也相當厚。扇面上的河道中有新的刷深痕跡，刷深的程度依據目測，應達 2 公尺以上。

由於三號集水區土石搬運能力強，除了造成大量的堆積外，扇面上也有很多

不同時期的河道痕跡。目前工程單位在三號集水區的左右兩側都有堆起至少兩米的土堤，在避免三號集水區大改道上有發揮成效，避免三號集水區大量的土石在改道後阻礙其他集水區的流路。



圖 57 莫拉克颱風後火炎山三號集水區情況，遠處可見河道的刷深高度



圖 58 三號集水區扇面的堆積 1



圖 59 三號集水區扇面的堆積 2



圖 60 三號集水區扇面上的刷深情況



圖 61 三號集水區從隧道上方往大安溪的土石堆積情形

四號與五號集水區的面積比三號集水區小，但因其會影響到隧道西口的交通情況，使得這兩個集水區的情況相對變的重要。由於工程單位會視情況清理這兩個集水區的沖積扇，使得扇面的堆積高度沒有三號集水區來的高。以四號集水區來看，照片內河道中的樹林生長情況良好，表示這幾次颱風對於四號集水區的影響很小，沒有對河道造成大擾動。但從谷口觀察，谷口後方河道的堆積高度相當驚人，甚至比原來兩側的自然堤還要高，河道中應該累積了相當多的土石。

五號集水區經過颱風之後，目前處於相對穩定的情況。從扇面到河道的角度相當一致，但也代表五號集水區的搬運能量強大，已經將之前扇面土堤旁的低平處填滿，未來新搬運出的土石可能會在扇面上任意流動。目前工程單位在隧道西口旁清出一滯洪池，希望達到留置土石的效果，但對比於五號集水區的土石搬運量，滯洪池的效果可能相當有限。



圖 62 四號集水區與五號集水區的下游景象



圖 63 莫拉克颱風後的四號集水區



圖 64 清理後的隧道西口上方景象



圖 65 莫拉克颱風後的五號集水區



圖 66 五號集水區側邊的堆積情況，下方接近隧道西口



圖 67 隧道西口旁的滯洪池

(七) 宣傳海報設計

本年度設計及編輯 10 張海報，提供管理處進行教育宣導，十張主題分別為：

- 1.歷年航空照片影像共 6 張；
- 2.火炎山礫石的介紹；
- 3.火炎山的地形變遷；
- 4.火炎山的氣象及影像監測；
- 5.火炎山主題圖。

相關成果見圖 68～75。

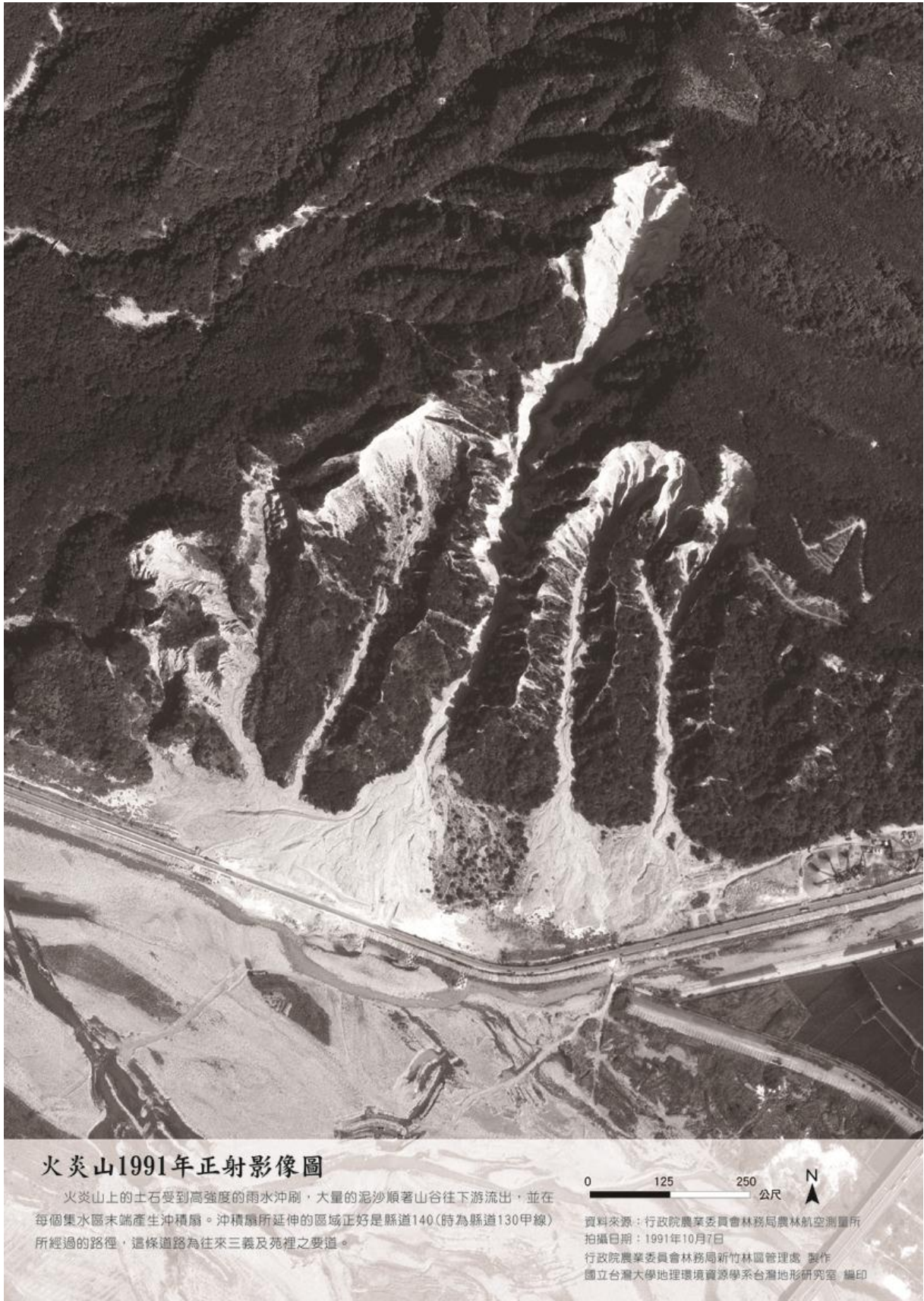


圖 68 火炎山 1991 年正射影像圖海報

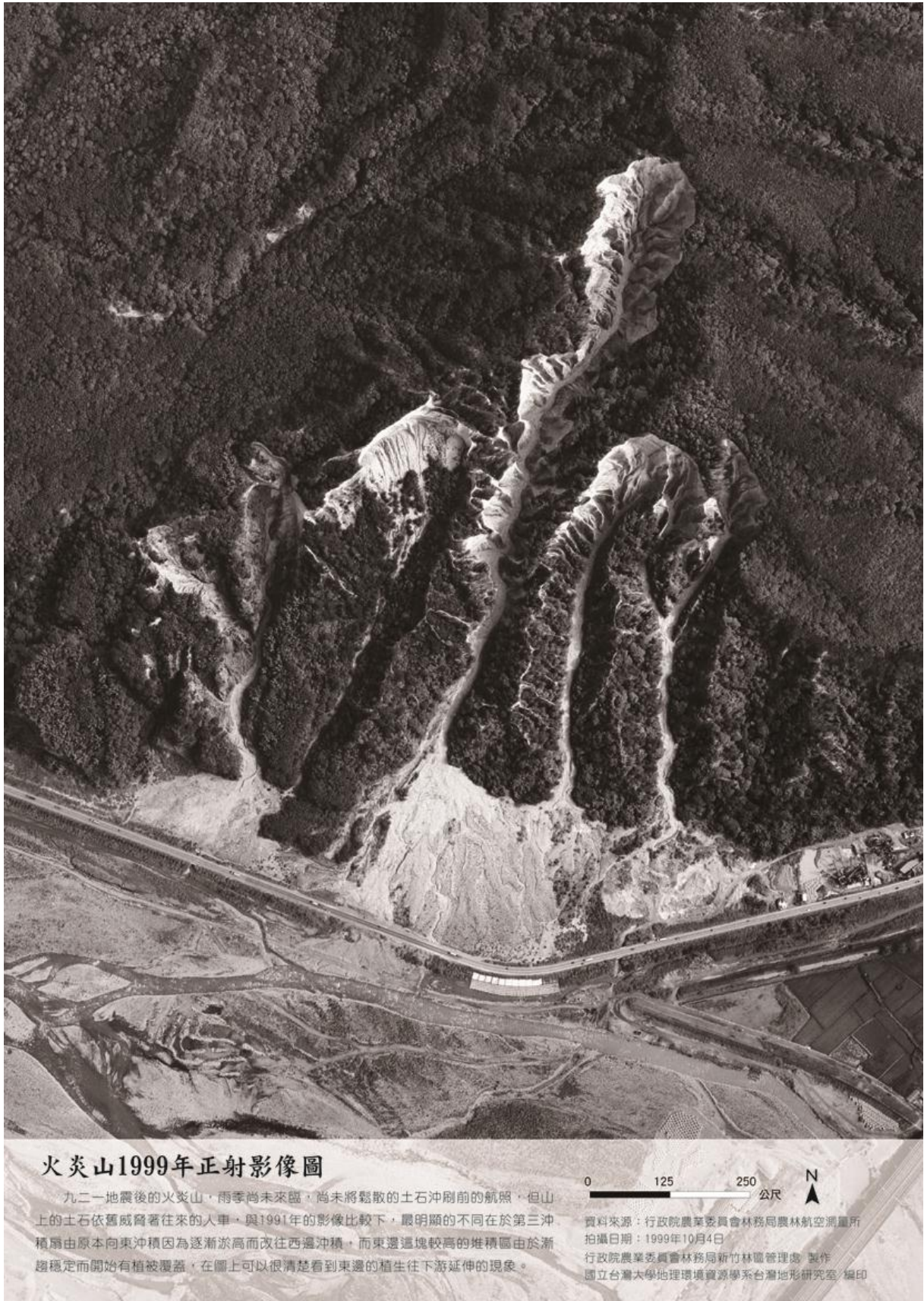


圖 69 火炎山 1999 年正射影像圖海報



火炎山2002年正射影像圖

九二一地震後至2002年間台灣遭受了許多強降雨的颱風，如2000年象神颱風、2001年的桃芝及納莉颱風，這些颱風對於台灣地區帶來大量的雨量，也造成了許多災情。火炎山在這樣的衝擊之下，在影像上可以清楚的看見每個沖蝕溝都有向源侵蝕的現象，裸露的河道也有加寬，甚至更北面的坡地上也出現了明顯的土石沖刷痕跡。

0 125 250 公尺



資料來源：行政院農委會林務局農林航空測量所
拍攝日期：2002年6月12日
行政院農委會林務局新竹林區管理處 製作
國立台灣大學地理環境資源學系台灣地形研究室 編印

圖 70 火炎山 2002 年正射影像圖海報



圖 71 火炎山 2005 年正射影像圖海報



圖 72 火炎山 2008 年正射影像圖海報

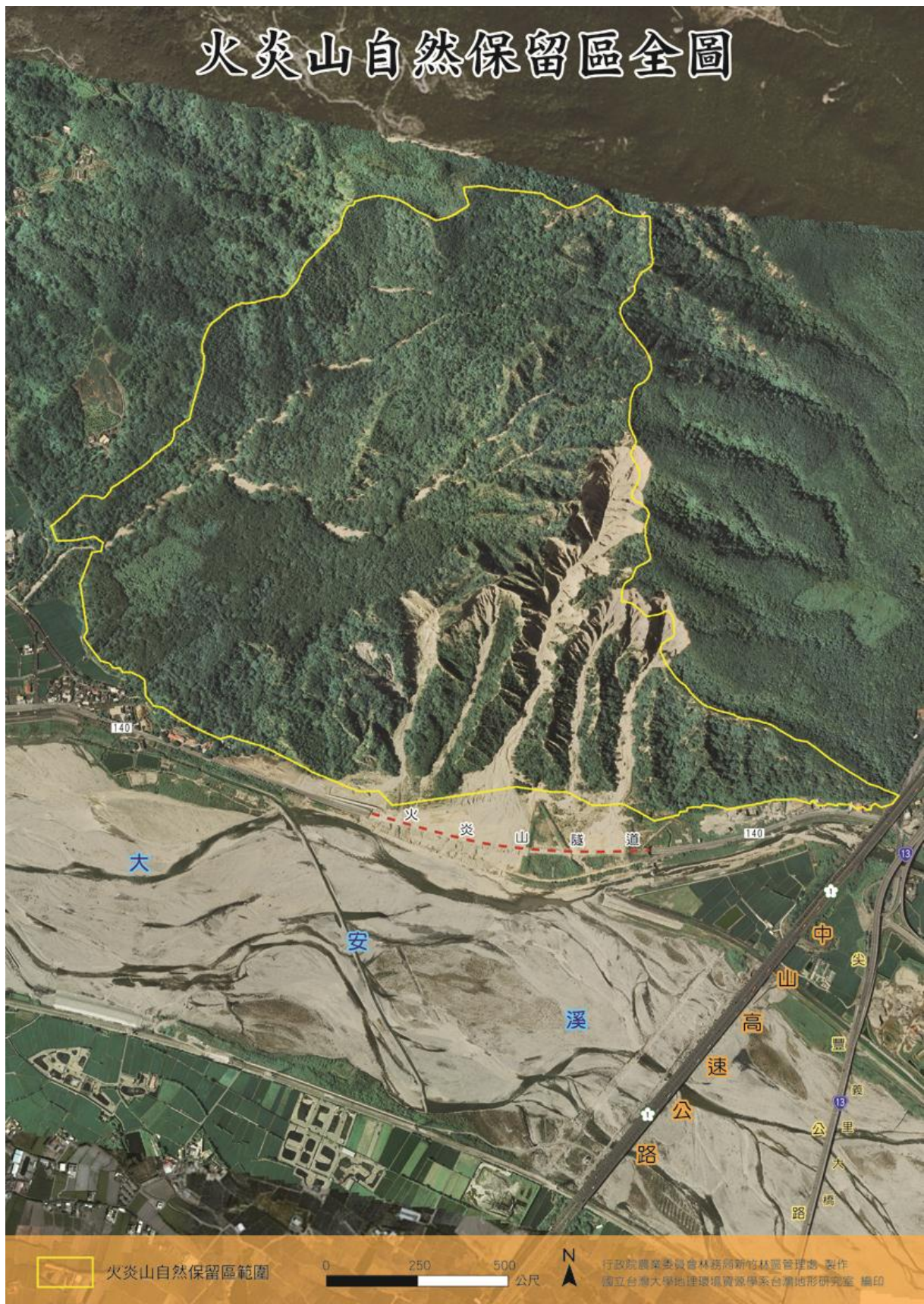
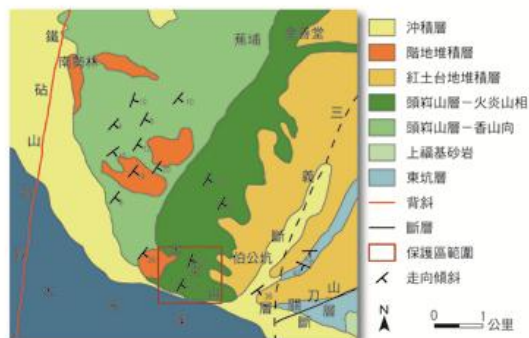


圖 73 火炎山自然保留區全圖海報

火炎山的礫岩特性

火炎山位於苗栗丘陵南部，大安溪的北側，就地層而言，幾乎都屬沈積岩體系，沈積的年代從中新世到全新世之間。火炎山自然保留區的特色主要為厚層礫石層惡地的侵蝕地形。

受到地層傾斜的影響，火炎山最常見到的地層露頭為頭嵙山層火炎山相。火炎山相主要由礫石組成，其間亦夾雜厚度較薄之砂、頁岩互層。但其膠結物質多為粗沙或細礫，膠結程度較差，很容易被雨水或地表逕流冲刷而崩落，造成火炎山特殊的裸露礫石邊坡，以及在集水區下游地區形成大規模礫石沖積扇。由於這樣容易被侵蝕，不易開墾及種植的特性，在地形學上被稱為「惡地地形」。



◀ 受到雨水侵蝕的深切峽谷，深約十公尺。



▶ 頭嵙山層露頭及礫石沖積扇的一角。

地層	厚度	年代	主要組成岩性
現代堆積層		現代—萬年	礫石堆積：以石英砂岩、石英岩及石英礫岩為主。 泥沙堆積。
礫石台地堆積層	10m~20m	更新世末期	由圓礫、次圓礫及稜角礫之石英砂及沙土組成。
紅土地堆積層	10m~20m	更新世中期至末期	紅土。 礫石層：以石英砂岩、石英礫岩為主。由表層數十公分至兩公尺之紅棕土與數十公尺之礫石夾紅棕土組成。 層理不明顯。
頭嵙山層火炎山相	約320m	更新世早期至中期	礫石層以石英砂岩及粗礫石英砂岩為主。部分粗礫石英砂岩礫含較高之長石及黏土礦物，經風化後孔隙較大、強度降低，易以鐵錘擊破。 層理不明顯。
頭嵙山層香山相		上新世至更新世	以砂頁岩互層為主，間雜有礫石層、碳化木，並含有褐鐵礦之成分。 間夾之礫石層。 層理較明顯。



◀ 四號集水區源頭之崖壁，由礫石顆粒互相緊壓所支撐。

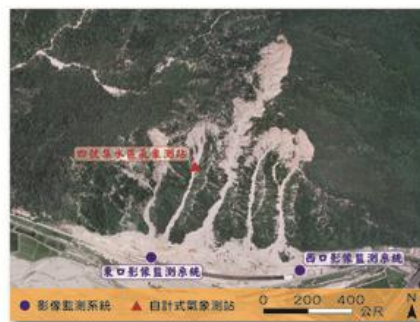
行政院農業委員會林務局新竹林區管理處 製作
國立台灣大學地理環境資源學系台灣地形研究室 編印

圖 74 火炎山礫岩特性海報

火炎山的監測

2005年年底隧道興建完成後，台大地理系台灣地形研究室在隧道東口架設影像監視系統，並進行氣候資料的監測與蒐集；2006年則完成隧道西口的影像監視系統的架設。

架設監視系統的目的在於監測地形變化之部分，是以火炎山變化量較大的區域為目標，在集水區源頭、中段河道、下方集水區出口各有不同的主題，源頭區市地貌變遷與邊坡後退的觀察；中段為河道的侵淤變遷；下游為沖積扇地形的變化。



監測設施位置示意圖

(一) 氣象監測

目前所採用的自計式氣象觀測站是由CAMPBELL公司所生產的資料收集處理器(Datalogger)與相關感測器(Sensor)。由感測器將氣象資料轉換成電子訊號，再由資料收集處理器負責量測、轉換訊號與記錄，最後以數位化的方式呈現。

火炎山四號集水區氣象測站以每10秒一次的頻率收集基本氣象資料，包含：雨量、風速、風向、溫度與相對濕度等五項。資料處理器會將每15分鐘內收集的氣象整理計算出一筆數值資料並儲存。當量測到每12小時超過100公厘的累積降雨量時，便會藉由GSM無線傳輸系統發送警告簡訊，來達到災害預警的效果。

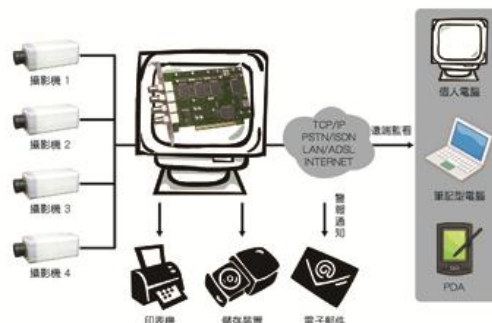
本測站除了採用鉛酸電池做為主要的電力供應來源，並且另外以太陽能板產生電能持續供電，因此可減少測站維護頻率及延長收集資料時效。

以往對環境監測只能以事後收集資料方式來進行，未來研究人員可藉著這套監測系統，隨時進入及時的監測資料，來觀察這一地區的狀況。

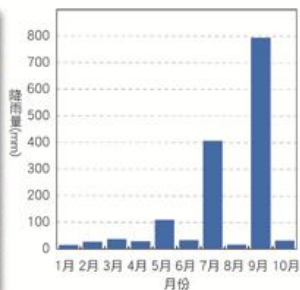
(二) 影像監測

本系統採用高剛股份有限公司所發展的影像監測系統，並在影像監控站中架設一電腦主機，將隧道兩側監視系統所取得的影像錄製下來。並且採用3.5G無線傳輸的方式運行遠端監控，再以3G寬頻路由器傳送攝影機訊號，使客戶端可以隨時利用網路取得監測系統之即時影像。

隧道西口影像監測設備曾於2007年10月7日觀察到土石流事件，同時配合自計式氣象站，可與氣象資料比對，找出災害發生與氣象條件間之關係。



四號集水區氣象測站



2008年1至10月累積雨量圖



隧道西口影像監視器



隧道東口監視系統介面

行政院農業委員會林務局新竹林區管理處 製作
國立台灣大學地理環境資源學系台灣地形研究室 編印

圖 75 火炎山監測說明海報

六、結語及建議

- (一) 本研究持續進行火災山上及下方自計式氣象站的維護及資料收集，以便進行本年度颱風豪雨降雨分析，瞭解氣候對火災山自然保留區土石流的影響。
- (二) 本年度因 8 月份莫拉克颱風來襲，在 8 月 6 日至 10 日降下 400 多公釐的雨量，為今年最多的單月雨量。其次則以 4 月及 6 月的降雨量較多。若以降雨強度觀察，今年度的降雨事件中，也只有莫拉克颱風期間有發生超過 100 公釐的高強度降雨事件，其他月份則無。
- (三) 本計畫架設在火災山隧道東口及西口的監視影像，影像從今年 1 月至 9 月，1 至 7 月由於沒有颱風或豪雨發生，監測影像沒有太大變化；8 月 7 日晚間至 8 日凌晨隧道西口曾經發生土石流，但發生地點超出攝影機的觀察範圍而沒有被捕捉。隧道東口處在去年辛樂克颱風進行土石流整治後，目前已趨於穩定，植生有長高的現象，在今年莫拉克颱風期間也沒有災害發生。
- (四) 本年度目前已經完成 2008 年 9 月 10 日的航空照片正射化及數值地形資料的生產，本研究將此數值地形資料與 2005 年及 2006 年的數值地形資料進行沖積扇的侵蝕與堆積的分析。從 2006 年及 2008 年數值地形比較，在沖積扇西側的堆積現象主要因為隧道西口的土堤興建所造成，整體而言隧道西口堆積現象並不明顯。

- (五) 在 3 號集水區沖積扇的位置，從 2006 年及 2008 年數值地形資料比較呈現大量侵蝕的狀態，推測侵蝕現象的造成主要是苗栗縣政府開放土石採取，將土石移除的所造成，而土石採取量已超越隧道當初完工後土石的堆積量。
- (六) 本研究整理自計式氣象站的降雨資料，分析降雨強度及累積降雨對火災山自然保留區的影響。分析降雨強度在西口土堤興建完成前，降雨強度 28.4 公釐即會產生泥流，在土堤完成後，2008 年的卡玫基降雨強度 51.4 公釐並沒有發生災害，表示土堤確實有發揮效果。而今年莫拉克颱風期間，最大的降雨強度為 48.8 公釐，發生了輕微土石流，證明降雨強度可以當作土石流是否發生的指標之一。
- (七) 從累積降雨來看，過去研究顯示大部分 12 小時的降雨超過 100 公釐，本區會有災害發生而這些大部分是屬於降雨強度較高的型態。除此之外，在降雨強度不高但是持續性的降雨也是會造成災害的產生。
- (八) 今年 8 月份侵台的莫拉克颱風，不論是降雨強度及總雨量都超過預警標準，預警系統也成功的發出預警簡訊。
- (九) 在莫拉克颱風前的現場觀察中，從 5 號集水區至 3 號集水區原沖積扇的位置，土石已被向下挖深約 2 公尺，靠近保留區的邊界上形成一高低落差的土堤。由於沖積扇上方的土石都是膠結不良的礫石，

當豪雨來臨時這些土石會直接向下堆積，除了沖蝕溝中的土石會因為沖積扇被挖深而加速向下侵蝕的作用力，沖積扇上方的土堤因失去原本沖積扇的支撐，更容易加速侵蝕作用的產生。而在莫拉克颱風來襲時，即為五號集水區的外側土石被侵蝕搬運而發生土石流現象。

- (十) 火炎山地區因為礫石間膠結軟弱，上方土石遇大雨極易發生崩塌，使土石的供應源源不絕。未來土石還是會繼續移動，不過養護單位只需在堆積達到 7 公尺，達到隧道設計的承載重量時再行清除即可，讓沖積扇可以保有較長時間的穩定，不會因為清理土石造成大規模的刷深情況。

參考文獻

1. 王鑫，1987，火炎山自然保留區生態之研究報告，行政院農業委員會 76 年生態研究第 003 號，69-117 頁。
2. 李錦南，1957，火炎山、大甲附近地質，國立台灣大學地質學系碩士論文。
3. 林朝棨，1957，台灣地形，269 頁，台灣省文獻委員會。
4. 林朝棨，1974，台灣地質，89 頁，台灣省文獻委員會。
5. 林俊全，1992a，台灣第四紀地形區邊坡沖蝕觀測，國家科學委員會專題研究計畫報告，9-12 頁。
6. 林俊全，1992b，台灣苗栗火炎山地區邊坡沖蝕之研究，國立台灣大學地理學報，第十五期，63-79 頁。
7. 林俊全，2003，火炎山地形變遷監測計畫(1)，行政院農委會林務局新竹林區管理處。
8. 林俊全，2004，火炎山地形變遷監測計畫(2)，行政院農委會林務局新竹林區管理處。
9. 林俊全，2005，火炎山地形變遷監測計畫(3)，行政院農委會林務局新竹林區管理處。
10. 林俊全，2006，公路工程對火炎山自然保留區的影響，行政院農委會林務局新竹林區管理處。
11. 林俊全，2007，火炎山自然保留區土石流演變監測(1)，行政院農委會林務局

新竹林區管理處。

12. 林俊錄，1990，航測遙測技術應用於生態資源保育之研究：火災山自然保留區植群變遷之研究，國立臺灣大學森林研究所碩士論文。
13. 許明仁，2003，台灣西部卵礫石地層之坡度影響因子及其地質材料特性，國立台灣大學地質學系研究所碩士論文。
14. 張憲卿，1994，五萬分之一台灣地質圖 (17)：大甲，經濟部中央地質調查所。
15. 黃朝恩，1990，台灣中部火災山沖積錐群的地形學研究，師範大學地理所研究報告，第十六期，139-166 頁。
16. 褚炳麟，1982，台灣地區麓山帶與台地礫石材料特質之初步研究，工程環境，第五十五卷第九期，21-39 頁。
17. 齊士崢，2002，台灣山地地區的主要沖積扇階地與地形災害，國立臺灣大學地理學報，32：75～87。
18. 詹錢登，2000，土石流概論—土木防災系列 1，台北：科技圖書股份有限公司。
19. 詹錢登、陳晉琪，2000，土石流發生臨界條件之理論分析，力學系列 B，16(2)：119～129。
20. 蔡光榮、陳旺志、林金炳，1986，中橫公路土石堆之穩定分析研究 (二)，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 74～57 號。

21. 鄭村益，1993，三義火災山自然保留區崩場地變遷之研究，國立中興大學水土保持學研究所碩士論文。
22. 謝豪榮、吳建興，1985，林口紅土台地邊坡穩定及其土壤特性之研究，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 74 ~ 28 號。
21. Armstrong, A. C. and Whalley, W. B., 1985, An introduction to data logging, British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin, No. 34.
22. Anderson, M. G. and Richards, K. S., 1987, Slope stability, John Wiley & Sons, 648p.
23. Blair, T.C., 1999. Alluvial fan and catchment initiation by rock avalanching, Owens Valley, California, *Geomorphology*, 28:201-221.
24. Bovis, M.J. and Jakob, M, 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(11):1039-1054.
25. De Ploey, J., Kirkby, M. and Ahnert, F., 1991, Hillslope erosion by rainstorm- A magnitude- frequency analysis, *Earth surface processes and landforms*, 16, 399-409.
26. Baily, B., Collier, P., Farres, P., Inkpen, R. and Pearson, A., 2003, Comparative assessment of analytical and digital photogrammetric methods in the construction of DEMs of geomorphological forms, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:307-320.
27. Field, J., 2001, Channel avulsion on alluvial fans in South Arizona, *Geomorphology*, 37:93-104.
28. Gomez-Villar, A. and Garcia-Ruiz, J.M., 2000, Surface sediment characteristics and present dynamics in alluvial fans of the central Spanish Pyrenees, *Geomorphology*, 34:127-144.
29. Harvey, A.M. , 2002, The role of base-level change in the dissection of alluvial fans: case studies from southeast Spain and Nevada, *Geomorphology*, 45:67-87.

30. Huang, C., Gascuel-Oudoux, C. and Cros-Cayot, S., 2001. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion, *Catena*, 46:177-188.
31. Martinez-Casasnovas, J.A., 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion, *Catena*, 50:293-308.
32. Selby, M. J., 1993, Hillslope materials and processes 2nd ed., 219-246.
33. Schumm, S. A. and Mosley, M. P., 1973, Slope Morphology, 238-327.
34. Young, A., 1972, Geomorphology Text 3 : Slope, 103-108.

期末報告審查意見回覆

說明	回覆
林俐玲 委員 一、 冲刷下來的土石，不挖除時，可能在下次土石流來臨時，庫容不足而造成溢堤。但挖除，又會造成向源侵蝕之現象，挖除與不挖除沖積扇上之土石，如何達到平衡點，乃為進一步之課題。 二、 在觀測期間，由於監測系統之故障，未能捕捉到土石流發生狀況，甚為可惜，如何減少系統之故障，乃當務之急。 三、 西口在過去之觀測中，有溢流之現象，目前雖設有導流堤，後續是否會有再溢流而阻塞西口之可能，應加以探討。 四、 隧道上方之承載量設計為何，能承載之土石量為何，當堆積太高時，是否阻擋土石通過，流入溪中？ 五、 中文摘要之降雨強度加入時間單位。	一、 謝謝指教。 二、 儀器已修復，目前持續監測。 三、 本研究將持續監測。 四、 如 P.10 說明 五、 已修正。
周憲德 委員 一、 報告成果豐富，值得肯定及繼續執行。 二、 我自己的實驗室於 5 號坑亦有架設攝影監測，而莫拉克颱風來時，5 號坑發生山崩致使監測器亦沒捕捉到土石流情況。 三、 建議統一臨界雨量，以「整場」降雨量或以「12 小	一、 謝謝指教。 二、 謝謝指教。 三、 本研究將統

時」累積雨量或以「24 小時」累積雨量達 100mm 作為發佈土石流警報的依據(請更正 p.57 公里為公厘) 是否可利用火災山的累積降雨量，以及高強度的降雨相連結作為土石流的警報依據。 四、 建議文中註明土石流發生日期及時間(小時)。 五、 建議後續研究分析短時間累積降雨與土石流發生規模的關係。表 4 中建議用「24 小時」而非「一日」。 六、 請註明雨量站是控制站或四號坑雨量站。	一以 12 小時累積雨量達 100 公釐為發佈警報的依據。 四、過去資料如 P.21 所示。今年莫拉克颱風造成的土石流發生在 8 月 7 日半夜，因此無法確定確切的發生時間。 五、遵照辦理。 六、遵照辦理。
黃麗萍 秘書 1998 與 2008 年火災山之資料比對，可否比較出 5 號坑增設的土堤，能利於上方植被的恢復。	就今年度的分析來看，無法直接確認兩者的關連性。
吳嘉俊 委員 一、 現地監測資料的呈現，建議增加累積雨量的部份，並可考慮於報告中探討累積雨量到達警戒閥值之關聯。關於現地監測站的溫度與濕度資料，可刪除；	一、 如 P.53~55。溫度及溼度資料將持

理由為溫濕度對於土石流的發生影響極微。	續監測，提供管理處參考。
二、 隧道之構築對於其上游土石流的發展或土石流堆積範圍與堆積縱坡的影響，宜在報告中多加著墨。	二、遵照辦理。
三、 海報的呈現，可在考量增加自然保留區內的生態物種圖片。倘若森林生態教育館內已有相關的圖資可共利用時，則可考量針對穿越隧道的設計理念加以解說。	三、將於明年計畫中加入。
四、 針對隧道上游幾個主要的土石流溪流，是否仍有再次發生的可能，建議於期末報告中多加著墨說明，以作為未來管理之參考。	四、如 P.81 說明。
五、 隧道已興建五年，是否有安息角的情況存在？隧道對於土石流是否存在有正面或負面的影響？例如，在 3 號坑刷深 5 公尺是因為疏濬或是與隧道有關？	五、由於養護單位定期清理隧道上方土石，沖積扇常受干擾使安息角難以觀察。隧道興建是為了避免土石流影響道路，若土石流不流出掩蓋隧道口，則土石流僅為自然現象而非

	災害。另 3 號集水區的刷深的確實是由於隧道上方清淤所造成。
吳志宏 課長 隧道西口容易發生土石流造成交通中斷，對當地交通而言，希望能獲改善。不必每遇豪雨，就發生土石流。乃在施做隧道後還有土石掩埋路面現象，貴處所做的研究請提供地方做改善道路參考，譬如東西口隧道的延長皆是很好建議，希望一勞永逸解決交通。	謝謝指教。
葉宗賦 課長 一、 P11、圖四，試問 2、3 號導流提的重要性。 二、 P64，3 號位置大量土石改道，請問在何種條件下會改道，是由於泥流關係嗎？現場的泥土變多。 三、 P56，開挖後又形成新的沖積扇，小的規模的是否亦可稱為沖積扇。 四、 複合沖積扇，左右是否會固定而不再改道，未來是否呈現安定？	一、謝謝指教。 二、因是大量降雨，造成土石流並移動而發生改道。 三、沖積扇在此僅為描述一個地形現象的名詞。 四、如 P.81 說明。
顏維祈 先生（火災山森林生態教育館）	

感謝老師針對保留區地形及土石流監測設計海報提供館內解說。	謝謝指教。
謝志富 技士(補充說明) 一、 當沖積扇角度漸為 105° 時，將趨於穩定，左右兩旁才會較安全。而土石流一開始形成時都會不穩，最後泥土漸漸覆蓋上去後才漸漸穩定，故不可採下方的土。 二、 土石壓在隧道上方，對於隧道本體屬於均壓，壓力均勻不易造成隧道的變形，但翻滾後的側推移才是主要影響隧道安全。故一般隧道都會設有側壓條，有側推移壓力至隧道便會鳴叫，並禁止車輛進入。	一、 感謝提供意見。 二、 感謝提供意見。