

行政院農業委員會林務局保育研究計畫系列 96-08

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 96-02-8-01

火炎山自然保留區土石流演變監測



委託機關：行政院農業委員會林務局新竹林區管理處

執行機關：中國地理學會

中華民國 96 年 12 月

火炎山自然保留區土石流演變監測

委託機關：行政院農業委員會林務局新竹林區管理處

執行機關：中國地理學會

中華民國 96 年 12 月

目錄

一、 前言	5
二、 研究背景	6
(一) 地形地質概況.....	7
(二) 氣候資料.....	8
(三) 火炎山隧道.....	8
三、 研究目的	13
四、 土石流監測	14
五、 研究成果	27
(一) 遠端監視系統之建置	27
(二) 氣候觀測.....	32
(三) 氣象資料與土石流災害分析	36
(四) 土石流影像監測.....	47
(五) 現場調查.....	51
六、 討論及建議	59
七、 結論	62
參考文獻	64
附錄 1 航照正射化影像.....	68

圖目錄

圖 2.1 火炎山自然保留區範圍.....	6
圖 2.2 火炎山地區地質圖.....	7
圖 2.3 火炎山隧道與保留區之位置分佈圖.....	9
圖 2.4 隧道設施分佈位置.....	10
圖 2.5 火炎山隧道興建工程圖.....	10
圖 2.6 火炎山隧道興建工程圖.....	11
圖 2.7 施工中的火炎山隧道口.....	12
圖 2.8 完工的火炎山隧道.....	12
圖 4.1 民國 75~80 年沖積扇地貌變遷圖.....	17
圖 4.2 民國 80~82 年沖積扇地貌變遷圖.....	18
圖 4.3 民國 82~87 年沖積扇地貌變遷圖.....	19
圖 4.4 民國 87~88 年沖積扇地貌變遷圖.....	20
圖 4.5 民國 88~89 年沖積扇地貌變遷圖.....	21
圖 4.6 民國 89~90 年沖積扇地貌變遷圖.....	22
圖 4.7 民國 90~91 年沖積扇地貌變遷圖.....	23
圖 4.8 民國 91~94 年沖積扇地貌變遷圖.....	24
圖 4.9 民國 94-95 年沖積扇面高程變動與隧道設施位置圖.....	26
圖 5.1 火炎山隧道東口監視器架設位置.....	28
圖 5.2 火炎山隧道西口監視器架設位置.....	28
圖 5.3 火炎山隧道東口監視系統介面.....	29
圖 5.4 PDR228 D/N 監視攝影機.....	29
圖 5.5 影像伺服器 BlueEyes BE-4110.....	30
圖 5.6 寬頻路由器 AES-M2100R 3G Router	31
圖 5.7 影像傳輸架構圖.....	31
圖 5.8 火炎山上方測站民國 96 年 6 月溫溼度及降雨統計圖.....	33
圖 5.9 火炎山上方測站民國 96 年 7 月溫溼度及降雨統計圖.....	33
圖 5.10 火炎山上方測站民國 96 年 8 月溫溼度及降雨統計圖.....	34
圖 5.11 火炎山上方測站民國 96 年 9 月溫溼度及降雨統計圖.....	34

圖 5.12	火炎山上方測站民國 96 年 10 月溫溼度及降雨統計圖.....	35
圖 5.13	火炎山上方自計式氣象站 2007 年 6 月份日降雨量圖.....	42
圖 5.14	火炎山上方自計式氣象站 2007 年 7 月份日降雨量圖.....	42
圖 5.15	火炎山上方自計式氣象站 2007 年 8 月份日降雨量圖.....	43
圖 5.16	火炎山上方自計式氣象站 2007 年 9 月份日降雨量圖.....	44
圖 5.17	火炎山上方自計式氣象站 2007 年 10 月份日降雨量圖.....	44
圖 5.18	研究區範圍及測站位置圖.....	45
圖 5.19	隧道西口前風雨交加.....	47
圖 5.20	隧道前方開始有泥流產生.....	47
圖 5.21	泥流溢流至路面.....	48
圖 5.22	風雨逐漸減緩.....	48
圖 5.23	泥沙堆積在隧道口，汽車無法通行.....	48
圖 5.24	警車到隧道前方觀察狀況.....	49
圖 5.25	風雨逐漸變小，可清楚看到隧道口堆積沙石.....	49
圖 5.26	挖土機正在清理堆積的沙石.....	49
圖 5.27	卡車正在搬運隧道口堆積的沙石.....	50
圖 5.28	挖土機持續在進行清理泥沙.....	50
圖 5.29	持續清理，已開放一線道通行.....	50
圖 5.30	施工中的隧道頂部.....	51
圖 5.31	施工中的火炎山隧道頂部.....	51
圖 5.32	火炎山隧道旁邊的蛇籠.....	52
圖 5.33	清理後的火炎山沖積扇.....	52
圖 5.34	清理後的火炎山沖積扇.....	53
圖 5.35	沖積扇工程.....	53
圖 5.36	火炎山隧道西側出口上方扇.....	54
圖 5.37	完工的火炎山隧道與側邊蛇籠.....	54
圖 5.38	隧道西側出口.....	55
圖 5.39	隧道下方處形成之小沖積扇.....	55
圖 5.40	隧道下方處的土石堆積.....	56
圖 5.41	隧道主體與下方的土石堆積.....	56

圖 5.42	隧道西側出口.....	57
圖 5.43	隧道西側出口上邊坡.....	57
圖 5.44	隧道東側出口.....	58
圖 5.45	隧道西口處淤積情況.....	58
圖 7.1	火炎山自然保留區外側建議採石區及清淤區規劃範圍圖.....	61

表目錄

表 2.1	大坪頂雨量測站民國 79-92 歷年月份別雨量統計表.....	8
表 5.1	1986-2002 年火炎山豪大雨事件	37
表 5.2	2006 年自計式氣象站月累積降雨統計	39
表 5.3	2007 年自計式氣象站月累積降雨統計	40
表 5.4	火炎山隧道 3 次泥流災害降雨比較表.....	46

一、前言

火炎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。

由於火炎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。火炎山地區由於受到地表侵蝕作用，表面的礫石以落石的方式後退，形成非常高角度的裸露邊坡。這些邊坡由於經常發生邊坡後退作用，因此植物無法生長，長年保持光禿狀態。這種邊坡演育的方式，是上方邊坡以高角度的方式後退，在下方產生由崩落物質堆積的崖錐。

火炎山自然保留區往往在颱風豪雨後，會在沖積扇外緣的道路淤積大量土石，因此公路單位於民國 94 年在沖積扇下方興建一隧道。由於這個隧道正位於火炎山的坡脚下，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，觀察下游沖積扇堆積的情況，並利用本研究過去架設的自計式氣象站的氣象資料，分析土石流發生事件與降雨之間的關係，以此來推測礫石堆積對下方公路與隧道工程的影響。另外，本年度預計在隧道東、西口部分架設影像監視系統，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。

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，已於民國 75 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 2.1 所示。

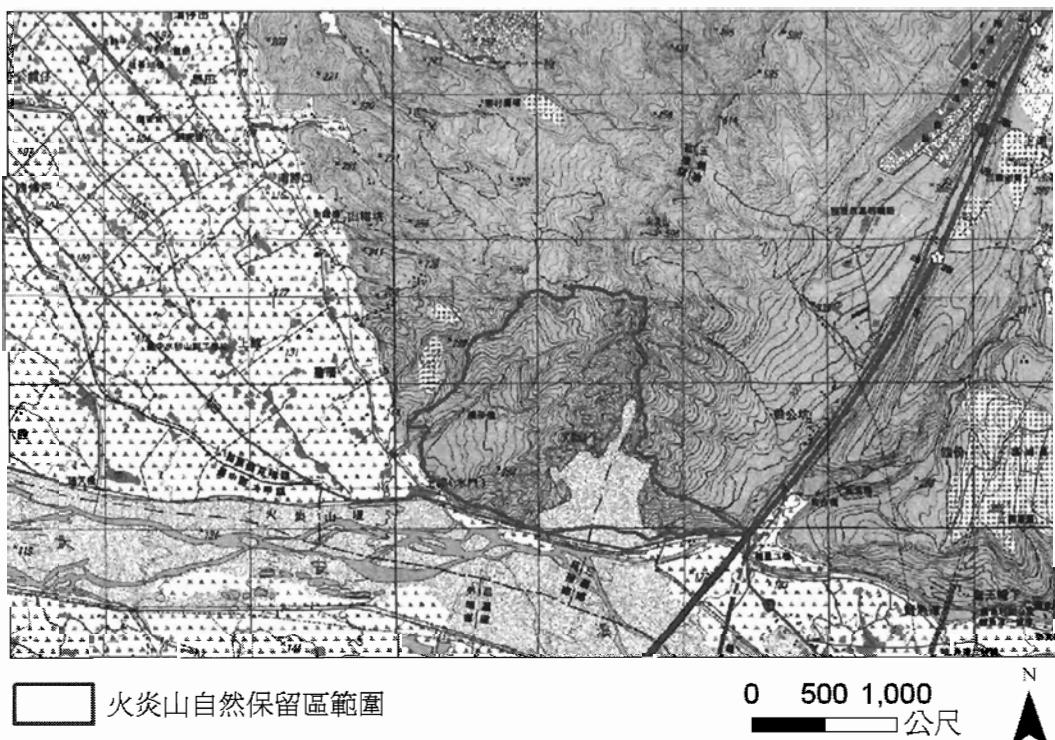


圖 2.1 火炎山自然保留區範圍

(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）。

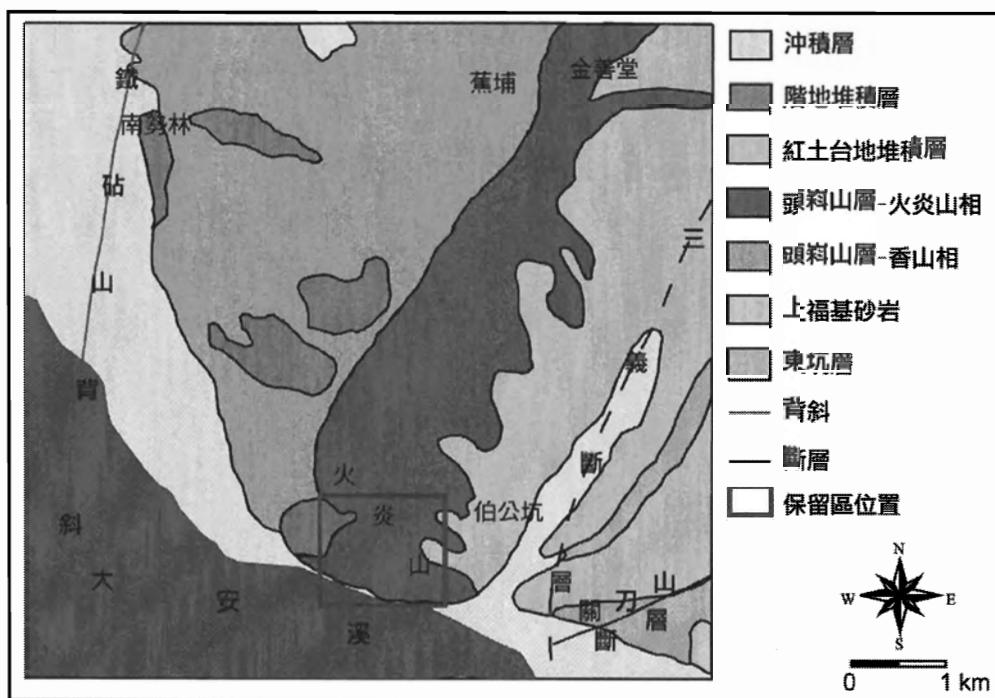


圖 2.2 火炎山地區地質圖

(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 2.1）。

表 2.1 大坪頂雨量測站民國 79-92 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。在當地仕紳民代的反映與相關單位的研議下，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 93 年年中起開始，迄 94 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。工程已於 94 年底驗收完成，95 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 2.3～圖 2.8）。

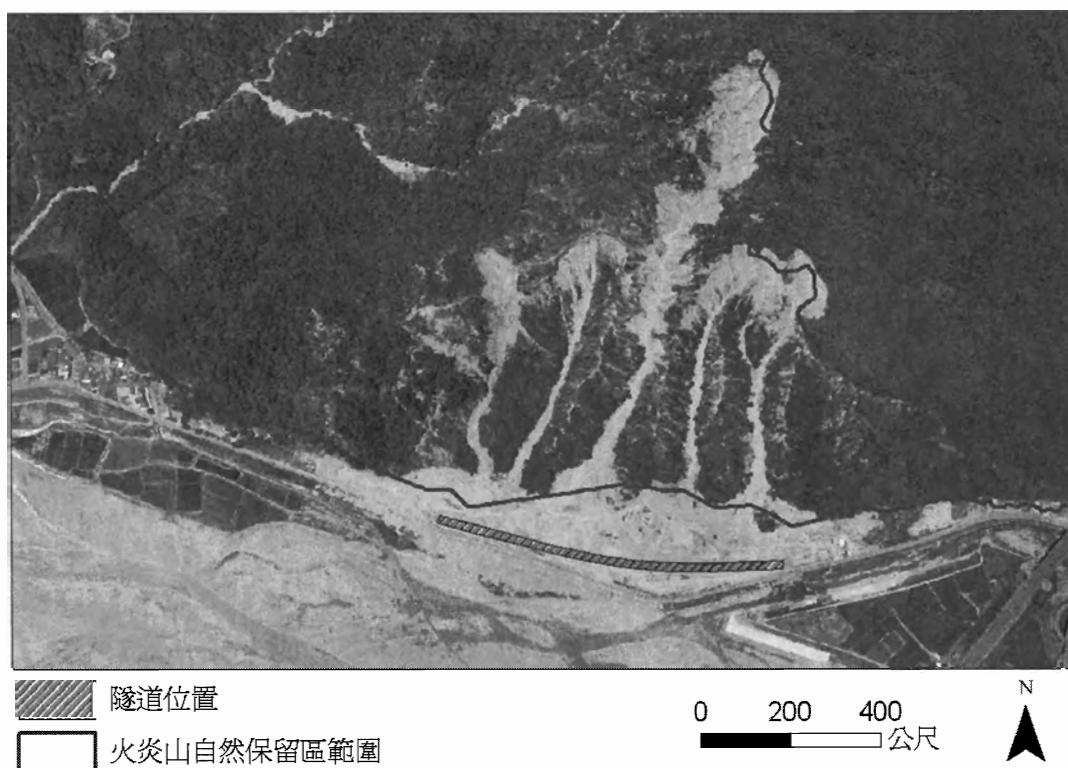


圖 2.3 火炎山隧道與保留區之位置分佈圖

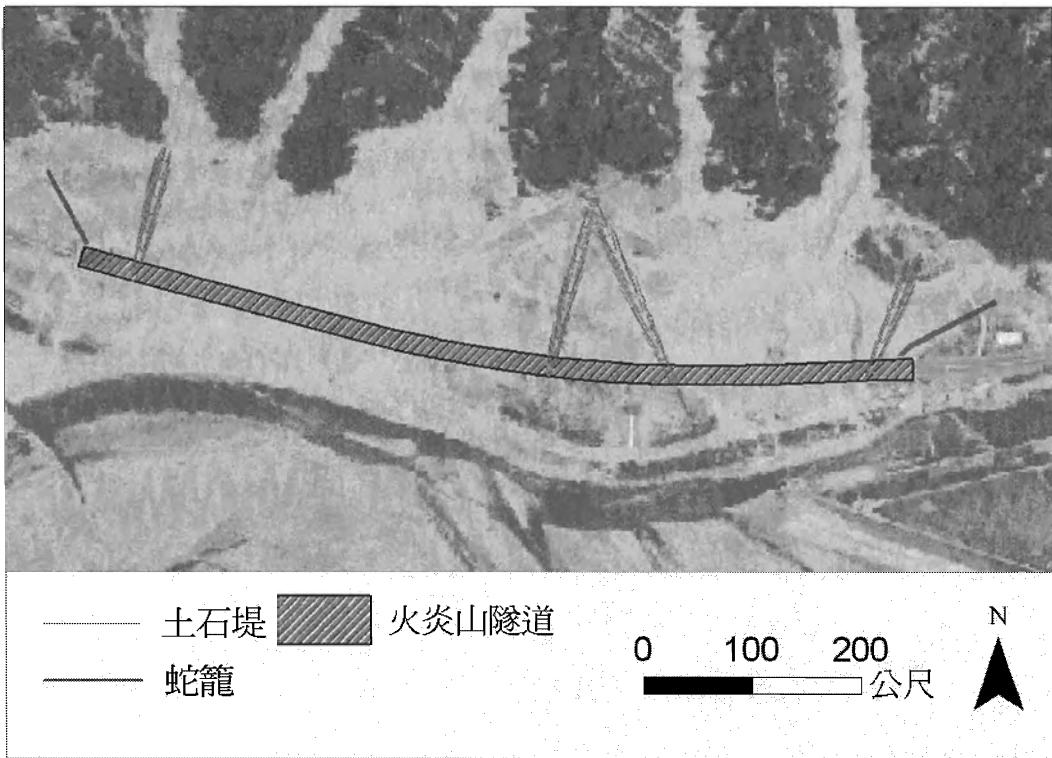


圖 2.4 隧道設施分佈位置

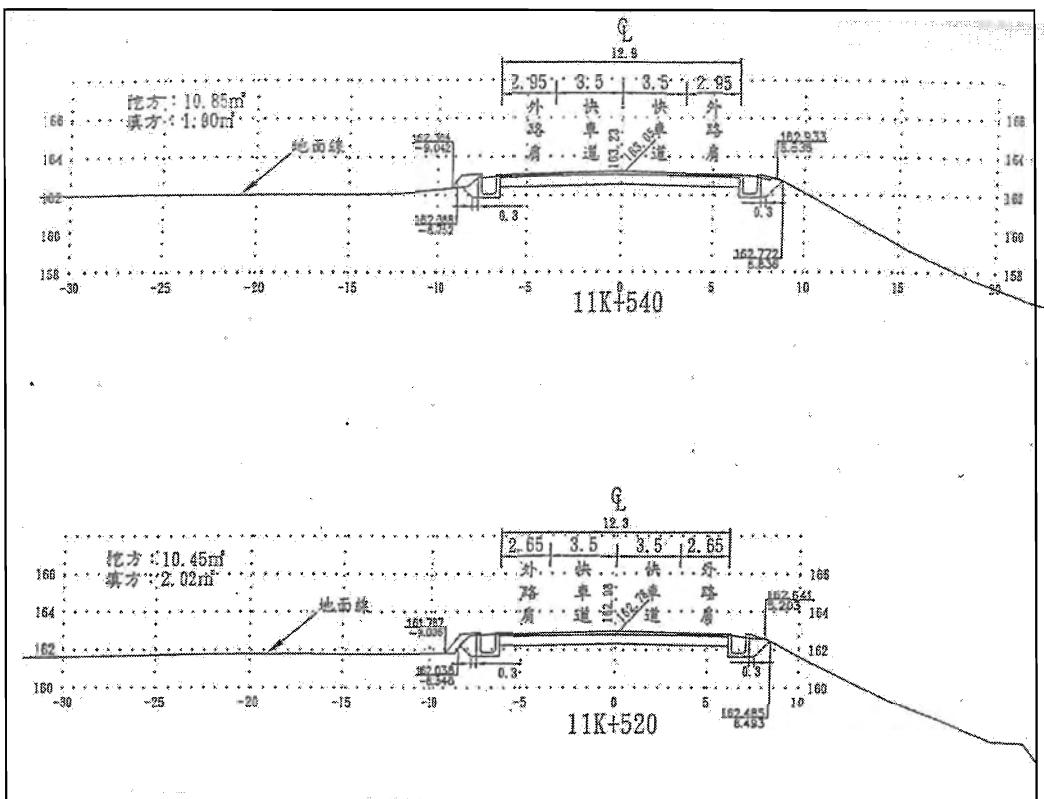


圖 2.5 火炎山隧道興建工程圖（資料來源：元裕工程技術顧問有限公司）

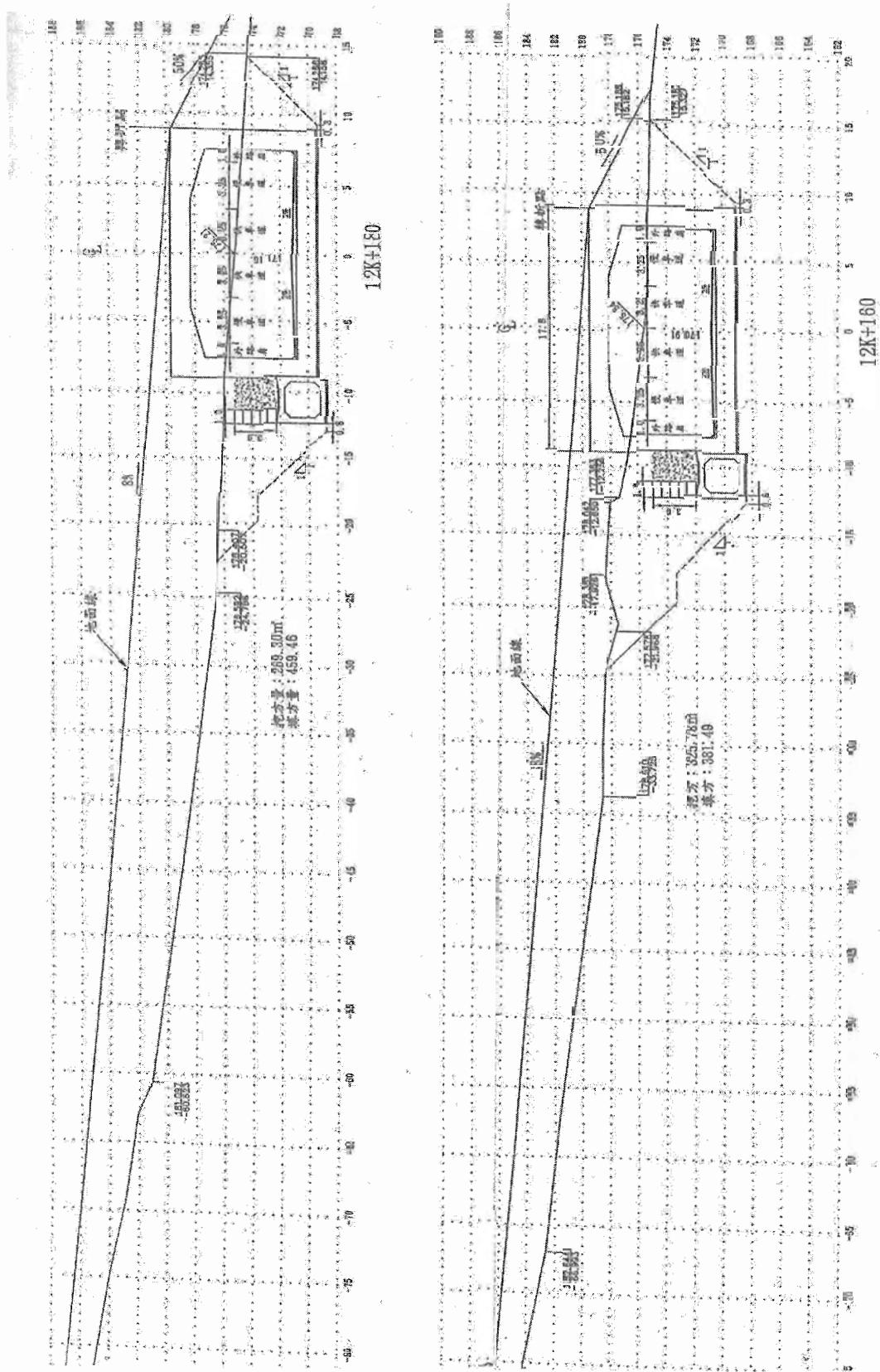


圖 2.6 火炎山隧道興建工程圖（資料來源：元裕工程技術顧問有限公司）

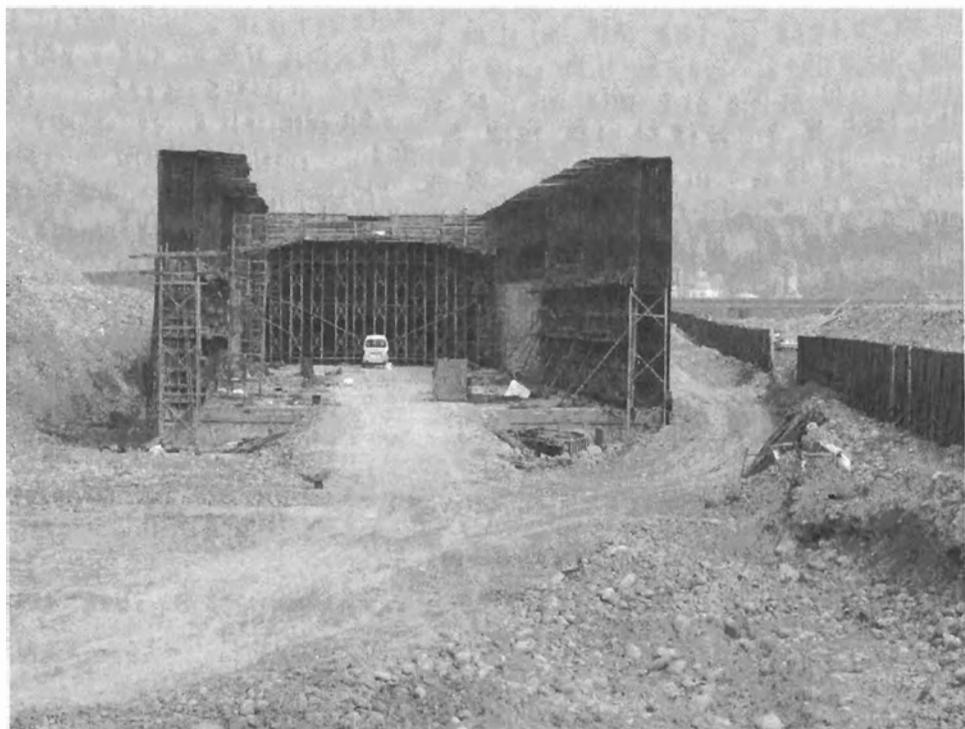


圖 2.7 施工中的火炎山隧道口（拍攝日期：94/4/5）



圖 2.8 完工的火炎山隧道（拍攝日期：95/2/28）

三、研究目的

火炎山自然保留區往往在颱風豪雨後，會在沖積扇外緣的道路淤積大量土石，因此公路單位於民國 94 年在沖積扇下方興建一隧道。由於這個隧道正位於火炎山的坡脚下，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？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。

因此本計畫將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，並同時架設影像監視系統，來監測颱風豪雨對自然保留區的影響。

因此本年度要完成的項目有：

- (一) 觀測沖積扇的發育
- (二) 觀測公路工程對沖積扇的影響
- (三) 觀測豪雨颱風後保留區下方泥沙沖刷的問題
- (四) 完成隧道兩側影像監測系統建置
- (五) 探討火炎山自然保留區的泥沙侵蝕與堆積問題

四、土石流監測

當降雨多、土石堆積多及陡坡多等「三多」條件一旦成立，土石流即可能形成，土石流發生前也會有許多徵兆，可由這些徵兆研判土石流即將來臨，並預先做好相關的因應措施。為加強各項事前防災措施已成為土石流防災之重點工作，尤其是土石流監測工作，期能藉由瞭解土石流發生前之各種徵兆，掌握土石流發生時間與運動現象，提供各級防災單位早期的警戒資訊，期以事前防範措施達到減災、消災及避災之具體目標，以減少土石流發生時人民生命財產之損失。

一般土石流發生時，有溪水混濁、流量變大或變小、水流聲變得尖銳及上游處有火花發生…等多項徵兆產生。吾人可利用土石流發生前或發生時的現象，以各種先進之儀器進行土石流發生時，各項資訊的蒐集與現象之觀測，期能避免土石流發生時造成人民生命財產損失。水土保持局目前在進行土石流觀測系統主要可分為非接觸性及接觸性兩種觀測方式，分述如下：

(一) 非接觸型監測系統

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，此方式亦可稱為事前型之監測方式，其所能提供之應變時間較長，惟準確性較不高。中央氣象局目前已於全省架設 343 座雨量站，而局部地區再增設 37 座雨量站，該項資料已可透過專線將 10 分鐘雨量資料即時傳輸至水土保持局。

(二) 接觸型監測系統

即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，此外，由於土石流發生時會有巨礫撞擊河床而傳出聲響，並且河道兩側附近之地表亦會產生震動，吾人即可利用次聲探測器量得土石流發生時空氣中的聲音，而以地聲檢知器量測土石流地聲訊號。目前水土保持局

監測方式為在觀測站均架設雨量計、鋼索檢知器、地聲檢知器、紅外線攝影機 (CCD) 等 4 種儀器，以進行土石流潛勢溪流現場動態的即時觀測，確實掌握土石流發生之現象與時間，做為土石流警戒基準值調整之參考依據，然而要架設整套儀器，經費較為昂貴。同時由於土石流觀測地點大部分位於偏僻山區，水土保持局採用衛星傳輸架構將資料即時傳送回去，所需成本也不便宜。

水土保持局所架設的土石流監測設備及維護經費費用較為昂貴，因此農委會林務局新竹林區管理處在有限的經費下，委託臺灣大學地理系林俊全教授於 92 年至 94 年進行「火炎山自然保留區地形變遷監測」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，進行地形變遷之分析，瞭解過去土石沖蝕及堆積現象的模式。

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。民國 80 年～91 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。民國 75 年～91 年間，以民國 91 年的變遷幅度最大，主要的原因是受到民國 90 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（如民國 90 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. 民國 80 年：3 號集水區左側沖積扇經計算結果，約比民國 75 年高了 10 公尺以上，平均一年堆高達到 2 公尺。
2. 民國 81~82 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. 民國 88 年：3 號集水區出沖積扇往左側改道，在下游推出新的沖積扇。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. 民國 91 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（75 年時開始堆積）的穩定土石堆沖破。

圖 4.1 民國 75~80 年沖積扇地貌變遷圖 (1986/05/04~1991/10/07)

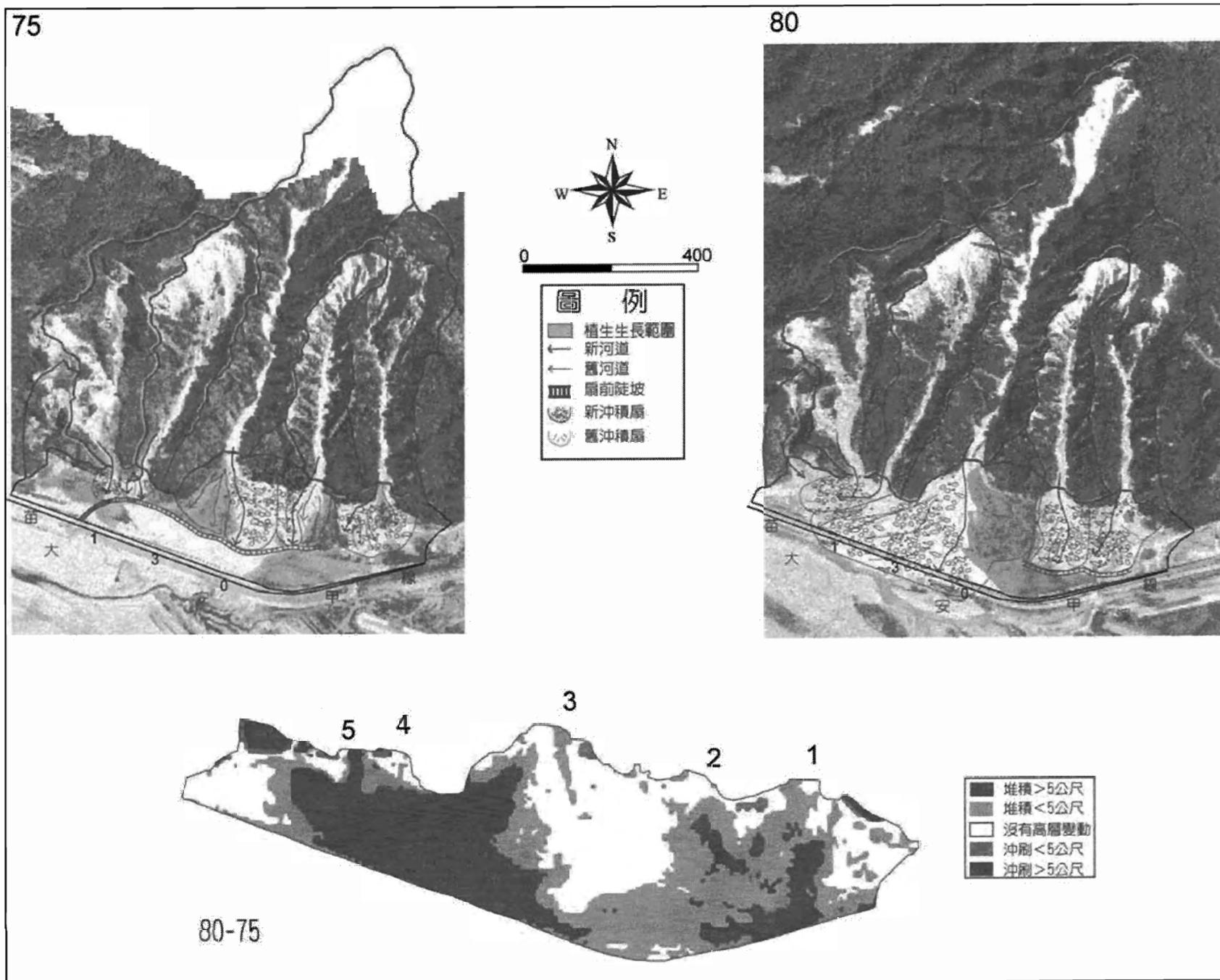


圖 4.4 民國 87~88 年沖積扇地貌變遷圖（1998/03/09~1999/06/23）
 （經歷奧托、瑞伯颱風）

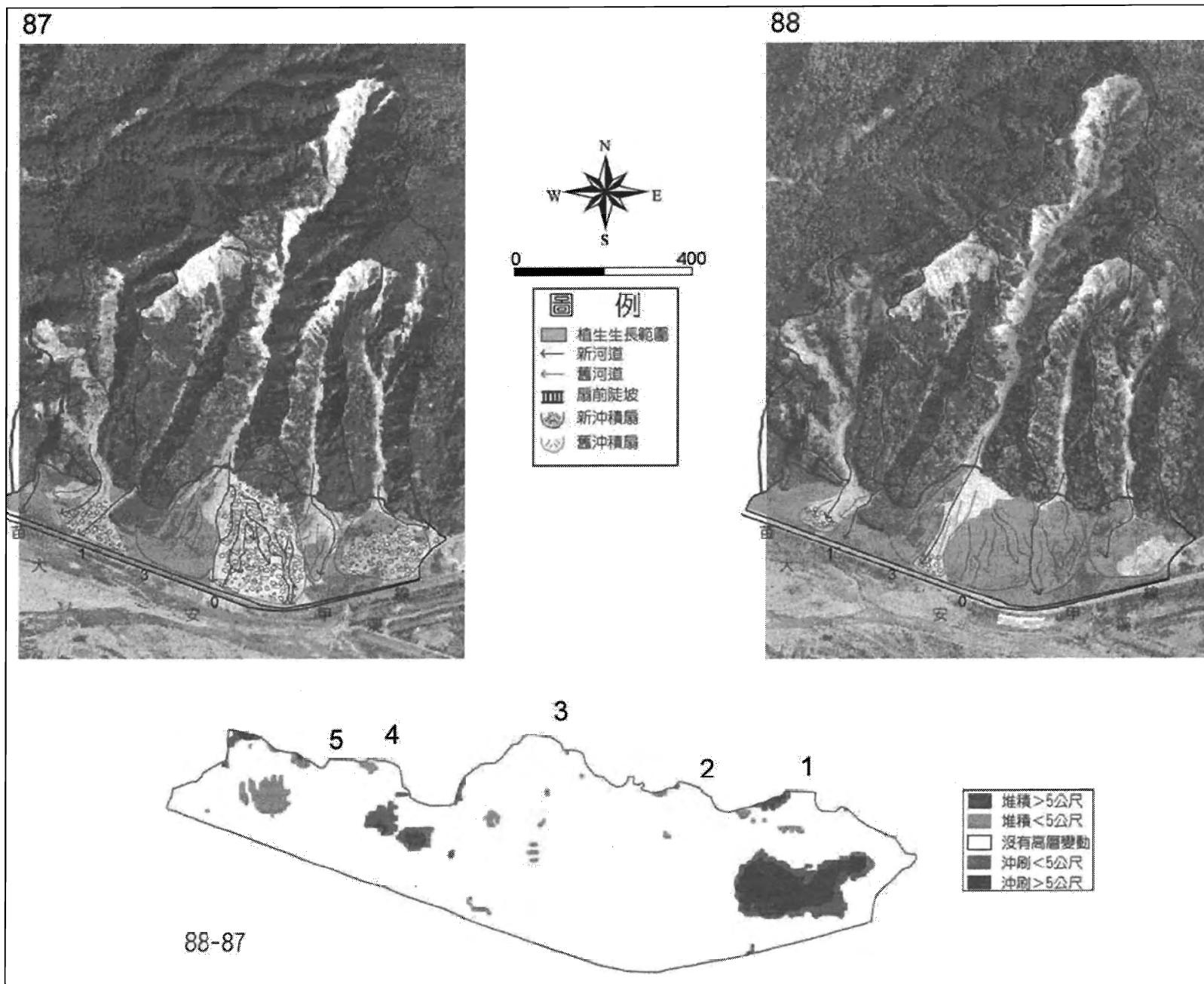


圖 4.2 民國 80~82 年沖積扇地貌變遷圖 (1991/10/07~1993/08/03)

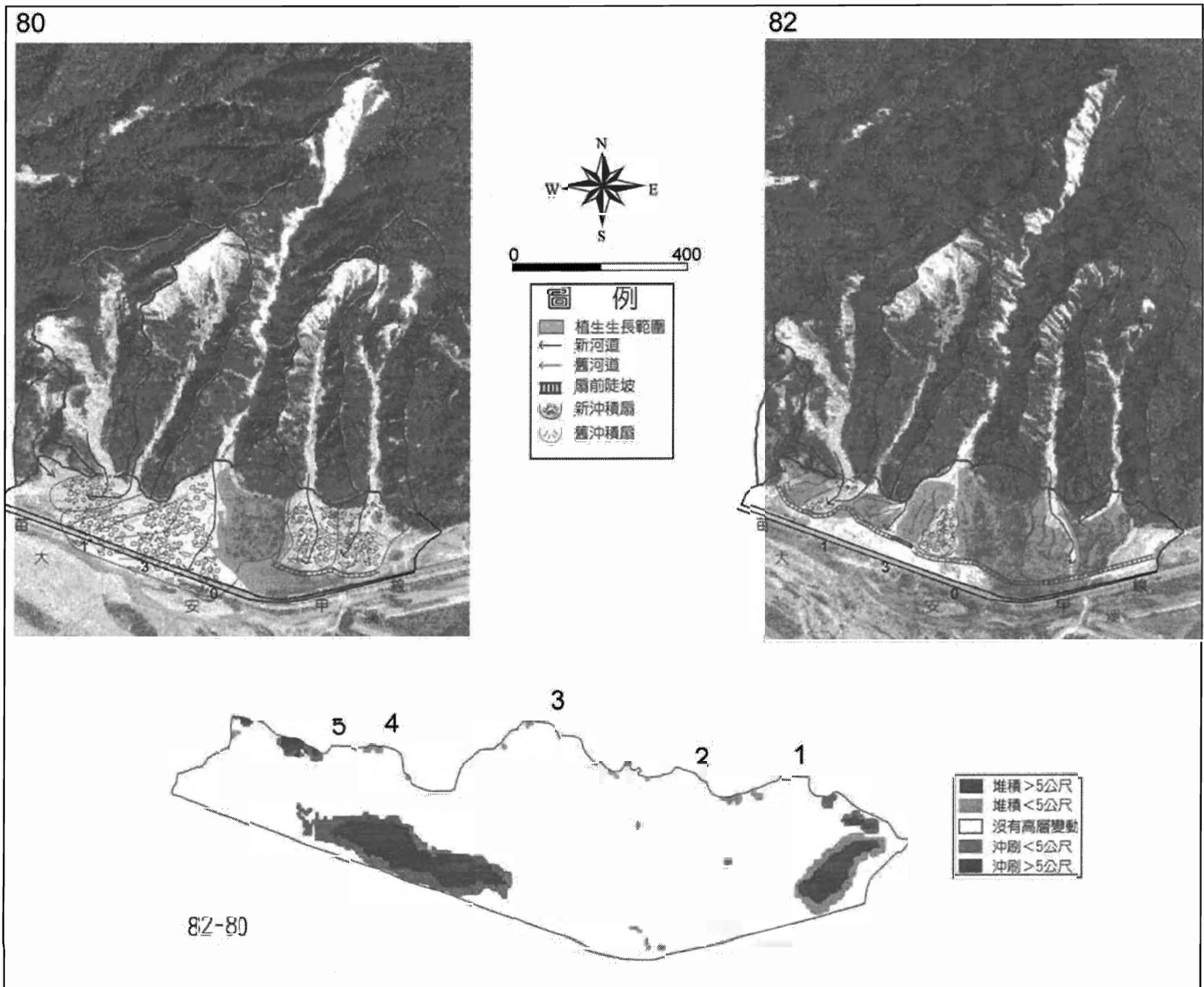
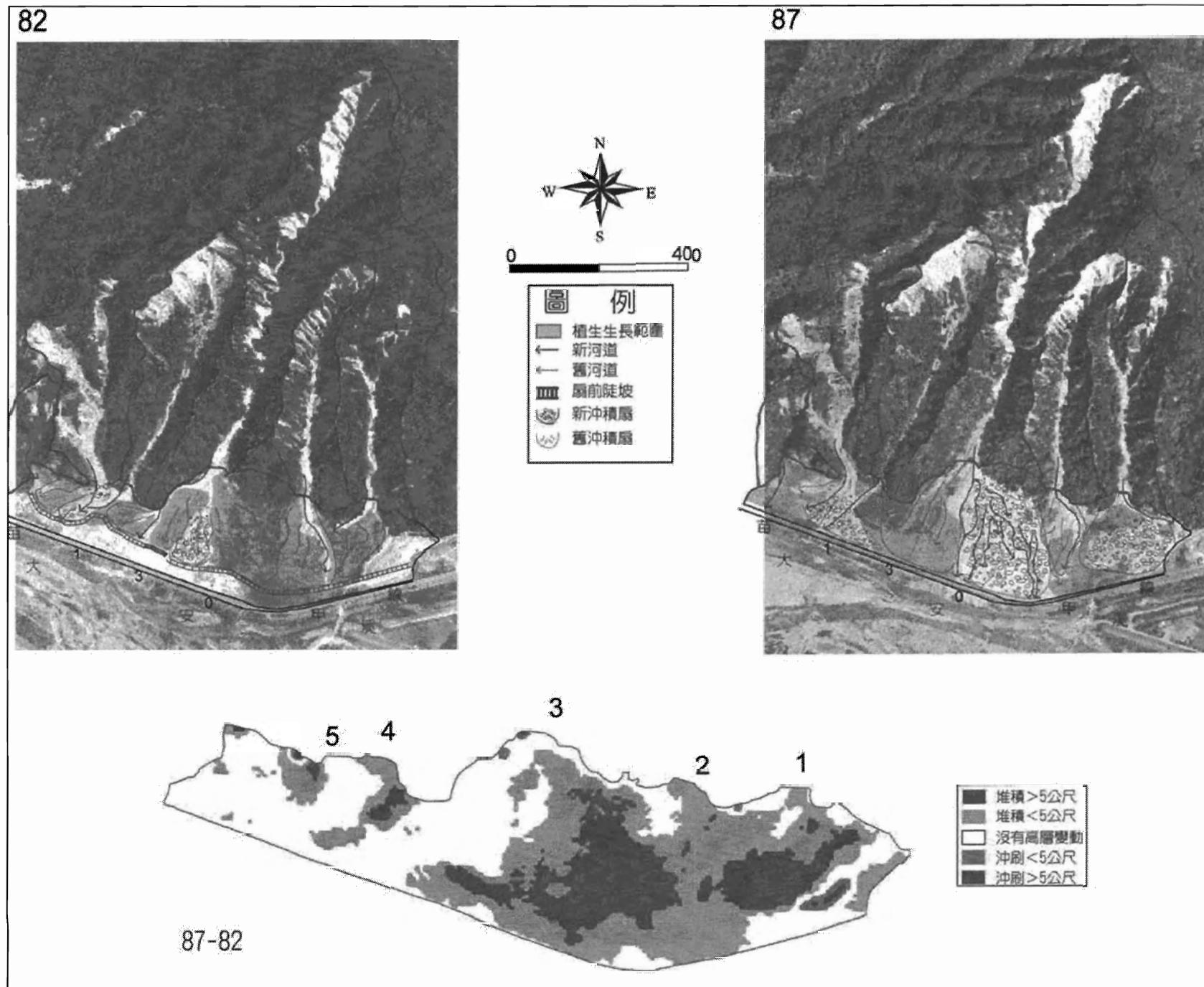


圖 4.3 民國 82~87 年沖積扇地貌變遷圖（1993/08/03~1998/03/09）



(經歷啟德、巴比斯、碧利斯颱風)

圖 4.5 民國 88~89 年沖積扇地貌變遷圖 (1999/06/23~2000/10/07)

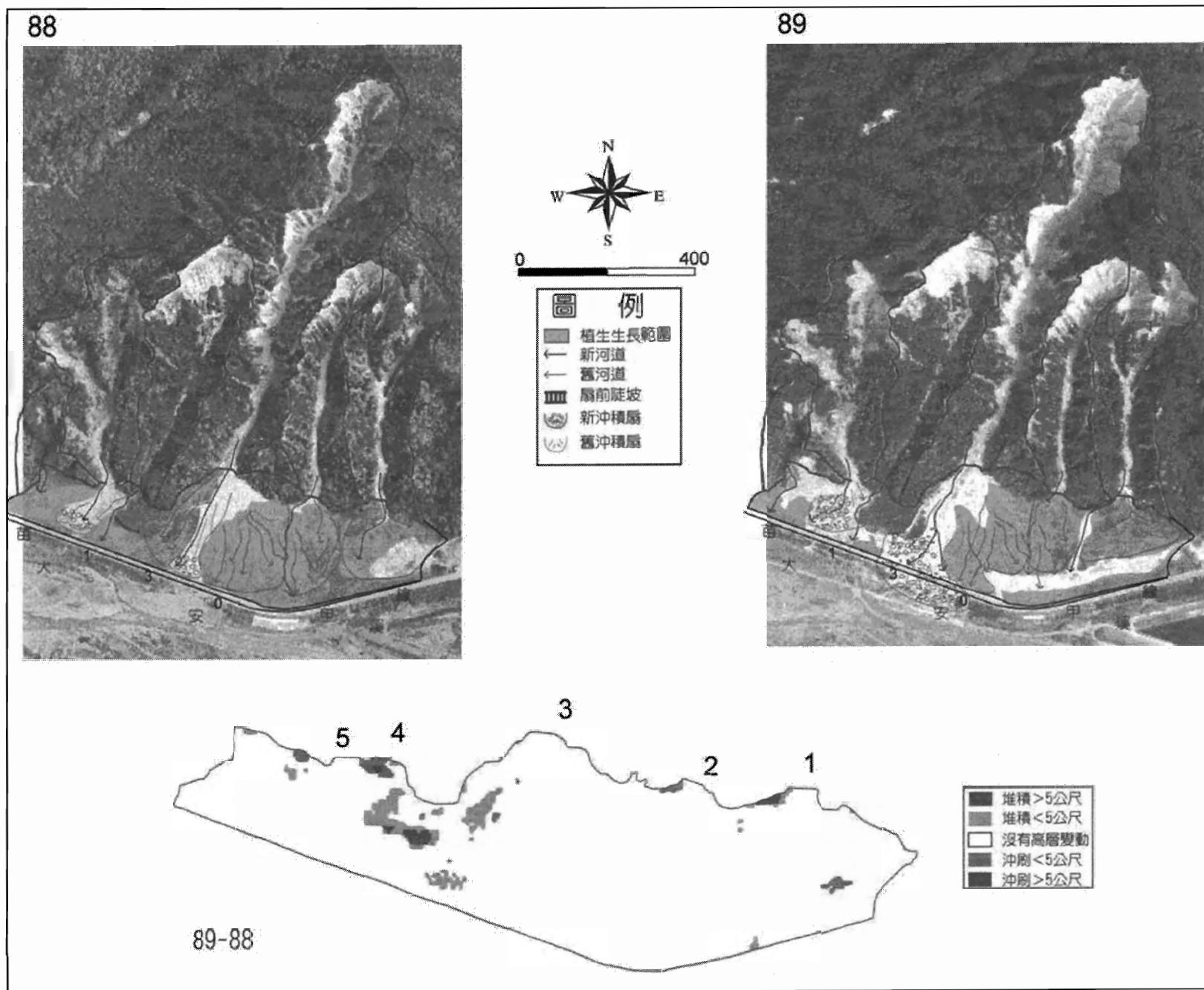
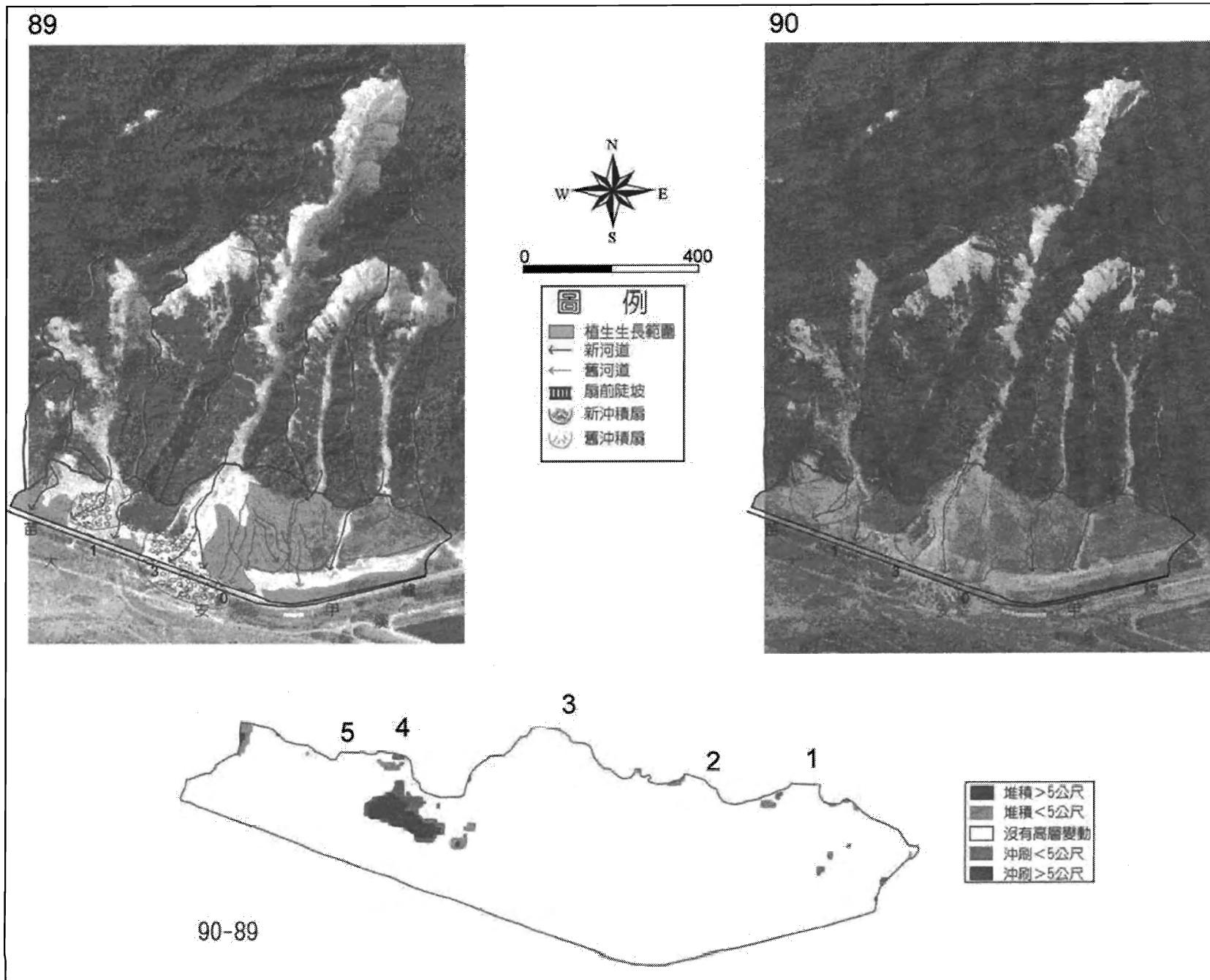


圖 4.6 民國 89~90 年沖積扇地貌變遷圖 (2000/10/07~2001/03/05)



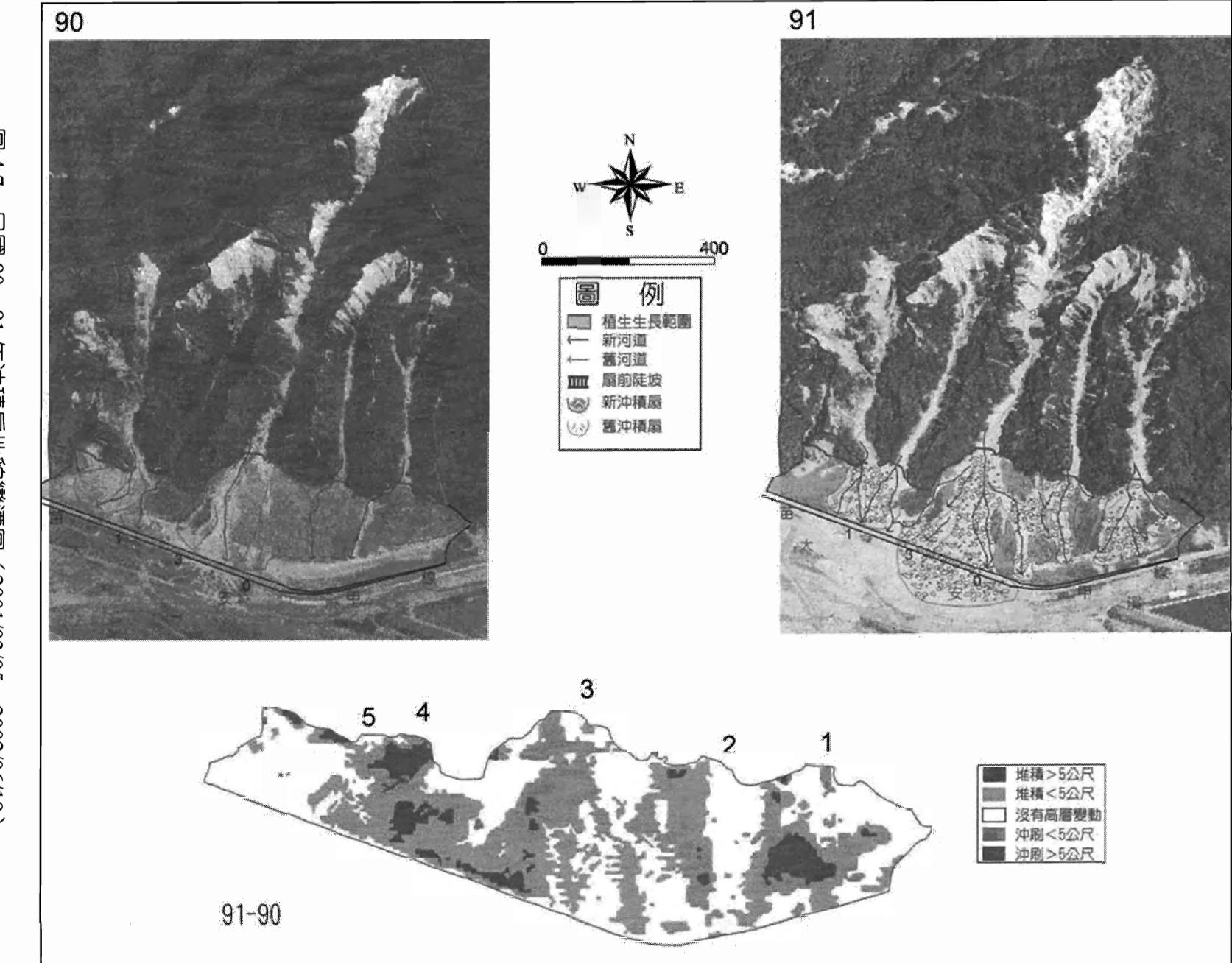
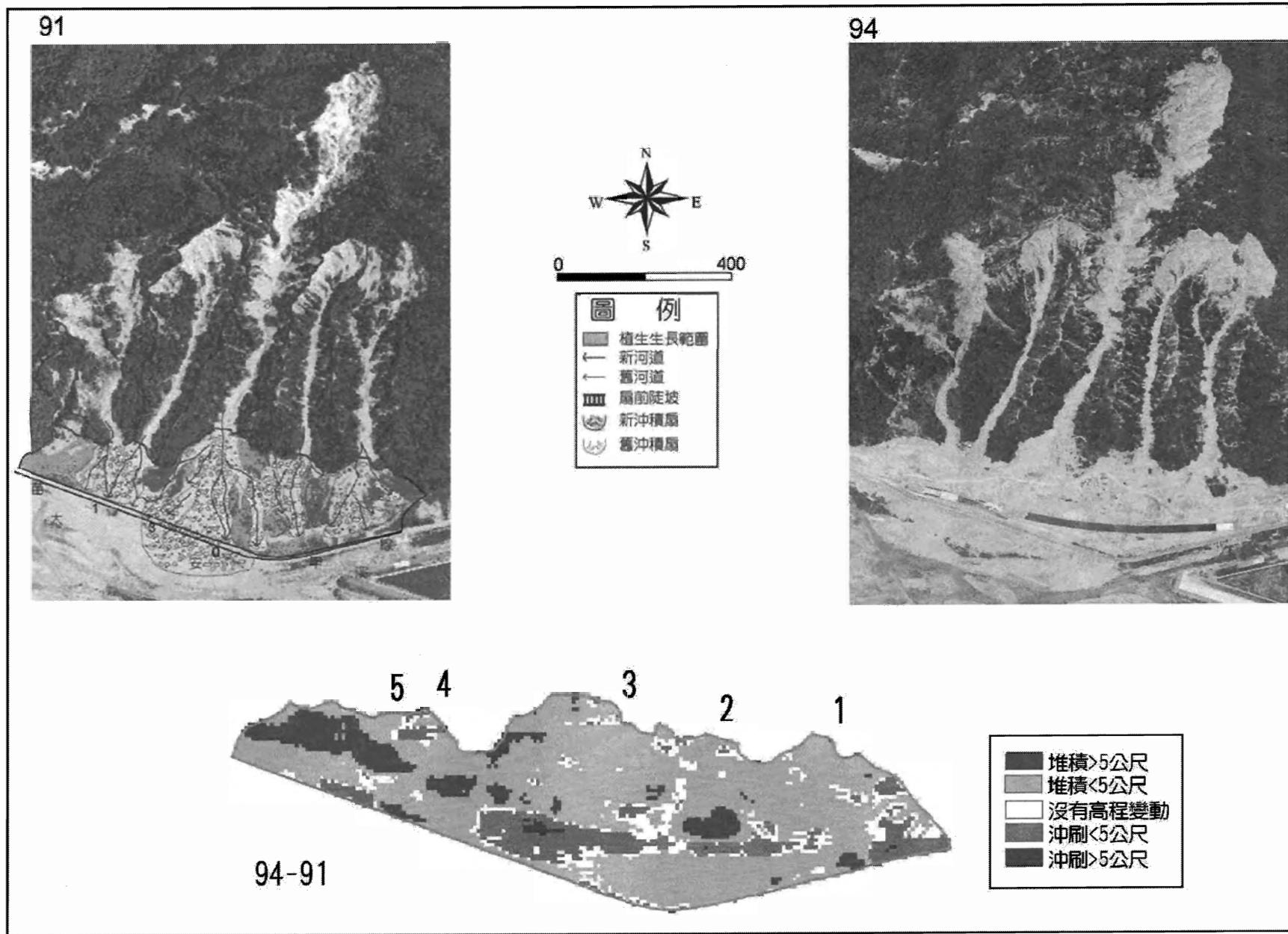


圖 4.7 民國 90~91 年沖積扇地貌變遷圖 (2001/03/05~2002/06/19)

(經歷納莉颱風)

圖 4.8 民國 91~94 年沖積扇地貌變遷圖



91 至 94 年的沖積扇變化之間有颱風杜鵑、敏督利等強颱侵襲，理論上沖積扇應有明顯的侵淤變化，但因火炎山隧道於 93 年開始施工，於 1-5 號集水區沖積扇扇面上進行整地工程之因素，故自然條件所造成的原始地形已遭破壞，扇面之高程變化及沖積扇範圍並不能代表實際變動之情形。特別是在隧道主體施工之處，因為進行下挖工程所以沖積扇高度是下降，但在沖積扇扇頂及五號集水區沖積扇之西側部分，受到工程施工影響較小，故其變動可視為受自然營力產生，而觀察其高程變動主要以堆積作用為主，特別是 4、5 號集水區之沖積扇有大規模超過 5 公尺的堆積。就整體沖積扇變動而言，除隧道施工鄰近善面因工程施工受擾動不以討論外，其餘扇面主要還是以持續的堆積作用為主要變動特徵。

研究民國 94-95 年沖積扇的侵淤情形，在這其間並無颱風事件侵襲，但因整體火炎山集水區的侵蝕基準面已向上提高至隧道頂，侵蝕基準面的變動以及隧道建築體的穿越，沖積扇面以及上游之沖蝕溝產生侵蝕與堆積營力消長的變化反應。由侵淤圖及剖面觀察發現，沖積扇主要之堆積區域，皆集中在隧道上方處，侵蝕現象僅產生在少部分扇面上。但民國 94 年航照為隧道正在施工時所拍攝，隧道主體上方尚未完全回填土體，而 95 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，因此堆積作用有多少是自然營力所產生，須待後續觀察研究。

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。若將來規劃延伸隧道長度，依現地地形（集水區和沖積扇界線發育之考量），建議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。

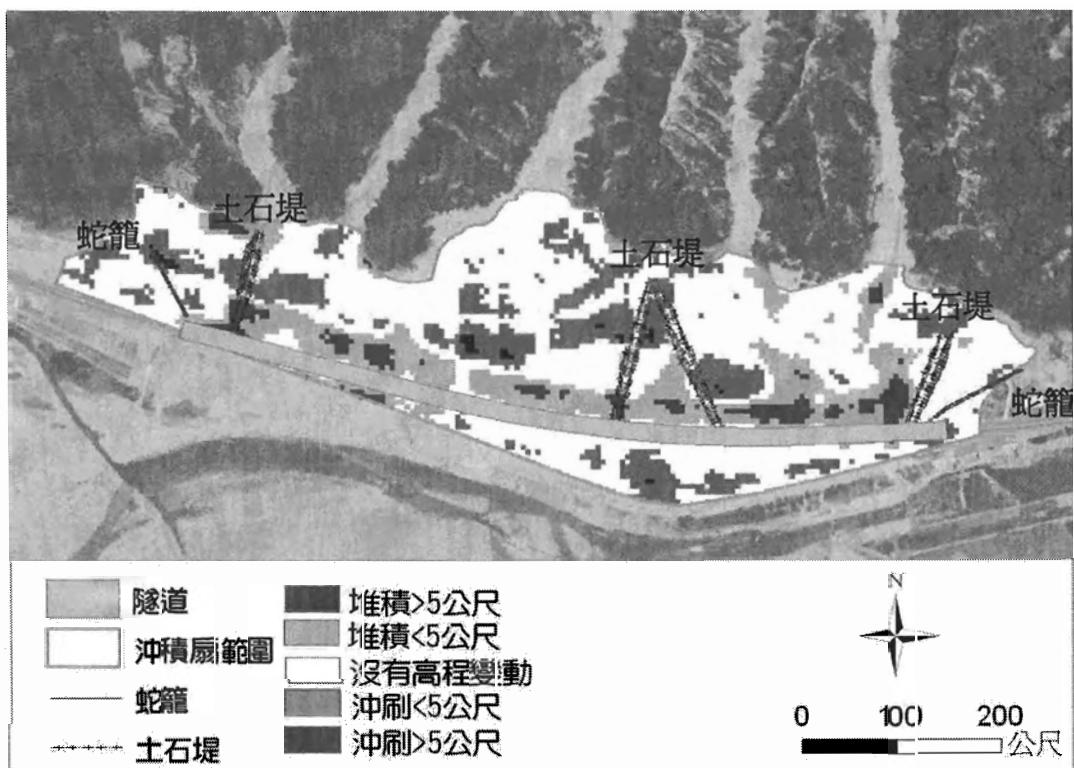


圖 4.9 民國 94-95 年沖積扇面高程變動與隧道設施位置圖

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。

綜合以上的結果，可以發現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（如民國 90 年納莉颱風），則所有的集水區都會有反應發生。而其中 3 號集水區可能因為集水區面積大、土方供應量較足，河道主流與下方沖積扇發生的變化次數最多。1、2 號沖積扇在前期比較活躍而容易發生變化，但在後期變化的次數就減少了。反觀 4、5 號兩個集水區則與 1、2 號相反，前期多屬於流路的改變，後續需持續作密切的觀察，特別是當豪大雨事件侵襲時，始能得知隧道興建對保留區地形變動影響有明確的答案。

五、研究成果

(一) 遠端監視系統之建置

本計畫在火炎山隧道東、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，因此本年度在東口處申請專線，以撥接的方式進行連線，東口正式開始紀錄影像時間為 96 年 8 月，西口正式紀錄時間為 96 年 9 月。

本研究目前已經完成隧道東口遠端監視系統的建置（圖 5.1），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，介面如圖 5.3。

隧道西口處監視系統設備已初步架設完成（圖 5.2），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，但目前測試的結果，由於當地的訊號較差，影像資料傳輸較慢，並沒有達到預期的結果。



圖 5.1 火炎山隧道東口監視器架設位置（2007/9/12）

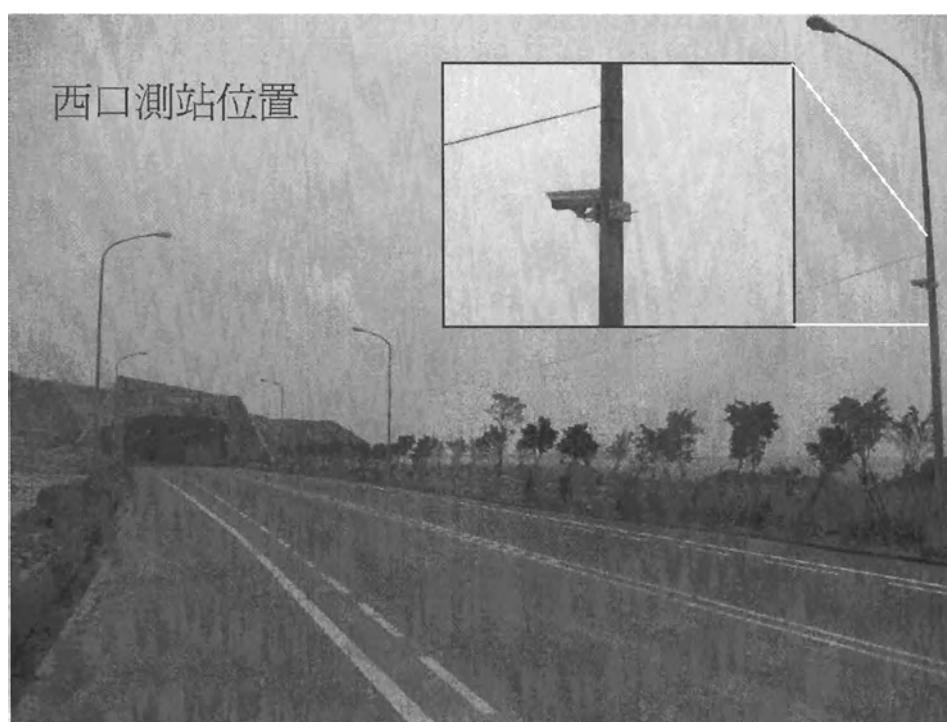


圖 5.2 火炎山隧道西口監視器架設位置（2007/9/12）



圖 5.3 火炎山隧道東口監視系統介面 (2007/9/12)

以下將本計畫所採用的監視設備說明如下：

1. 監視攝影機

本計畫採用 SUPER SENTRY SPECIALLY CAMERA SERIES 監視攝影機，水平解析度達 27 萬點 430 條 TV Lines，影像總畫素 NTSC: 510(H) × 492(V), PAL: 500(H) × 582(V)，最低照度 0.01 Lux/F1.2, 0.1 Lux/F2.0, 0 LUX When IR ON。



圖 5.4 PDR228 D/N 監視攝影機

2. 影像伺服器

影像伺服器為將監視攝影機所記錄的影像進行存取，並可透過內建網頁系統，將影響資料傳輸出去，本計畫採用 BlueEyes BE-4110 Network Video Server，最大解析度 704x480 像素(單一畫面)；352x240 像素(四分割畫面)，可儲存每秒 30 張畫面。



圖 5.5 影像伺服器 BlueEyes BE-4110

3. 寬頻路由器

本計畫採用 AES-M2100R 寬頻路由器（圖 5.6），此設備符合 3GPP 與 3GPP2 標準的多媒體技術，可將影響透過無限網路、GPRS、2.5G 或 3G 的方式將資料傳輸，並透過網路進行影像的監視（圖 5.7）。

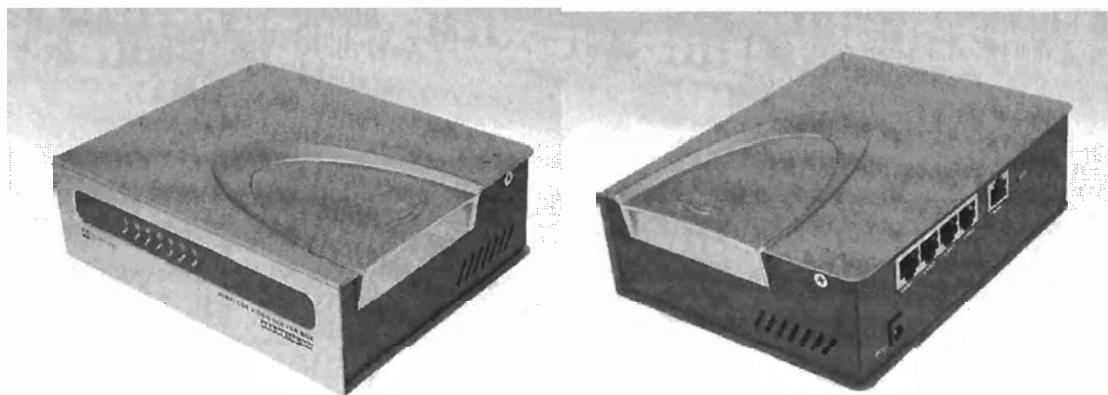


圖 5.6 寬頻路由器 AES-M2100R 3G Router

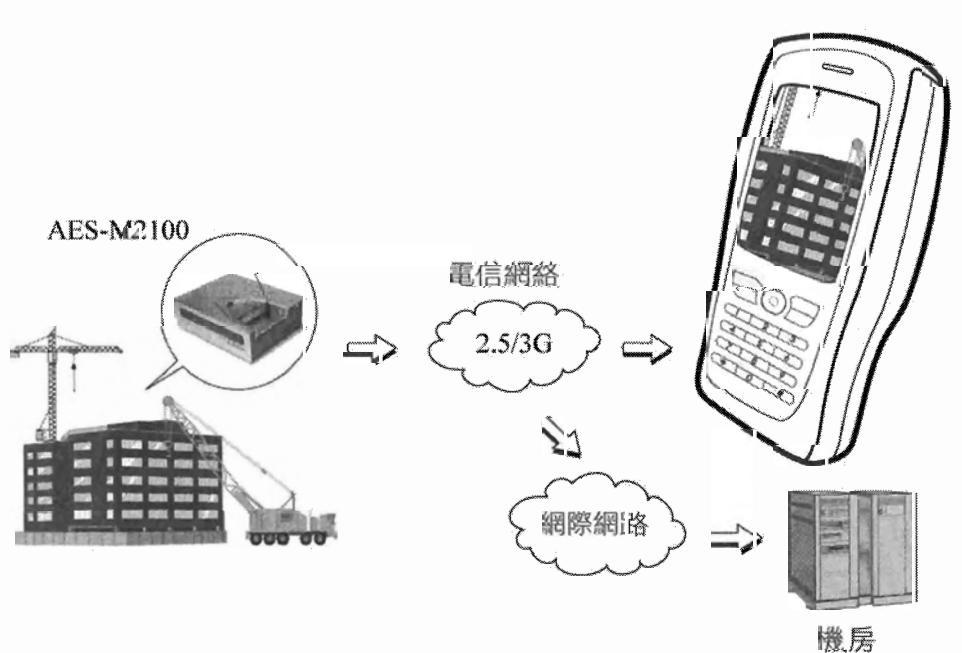


圖 5.7 影像傳輸架構圖

(二) 氣候觀測

本研究持續收集火炎山上方自計式氣象站資料，目前資料累積 96 年 6 月到 11 月底，每半小時統計一筆資料，如圖 5.8~5.13。其中 10 月中至 11 月中的資料由於電池損壞，造成資料記錄中斷。從溫度來看，6 月 26 日至 7 月 26 日前間，溫度變化不大，大約維持 30 度左右氣溫，自 8 月份至 10 月間，日夜溫差明顯較大，約 23 度至 35 度左右。

從降雨量來看，6 月 3 日至 6 月 11 日期間受到鋒面的影響，有比較密集的降雨，最大時雨量發生在 6 月 8 日早上 10 時，降雨強度 28.4mm，另外 6 月 28 日下午也發生一場豪雨，最大時雨量發生 15 時，降雨強度 56mm。8 月 11 日至 14 日則受到聖帕颱風的影響，降雨較多，最大時雨量發生在 8 月 13 日晚上 23 時，降雨強度 43.2mm。9 月 17 日至 19 日受到颱風外圍環流的影響，在本區造成降雨，最大時雨量發生在 9 月 19 日 15 時，降雨強度 12mm，由於產生的降雨量較少，對本區影響不大。10 月 10 日至 11 月底，並沒有較大的降雨事件產生。

本年度降雨時數最長發生在 2007 年 10 月 6 日至 7 日，連續兩天的降雨，最大時雨量發生在 10 月 6 日下午 4 時，降雨強度 32mm。這兩天的降雨將近降雨量將近 300mm，造成本區隧道西口處發生土石崩落堆積的災害，災害發生的原因將於下一節作討論。

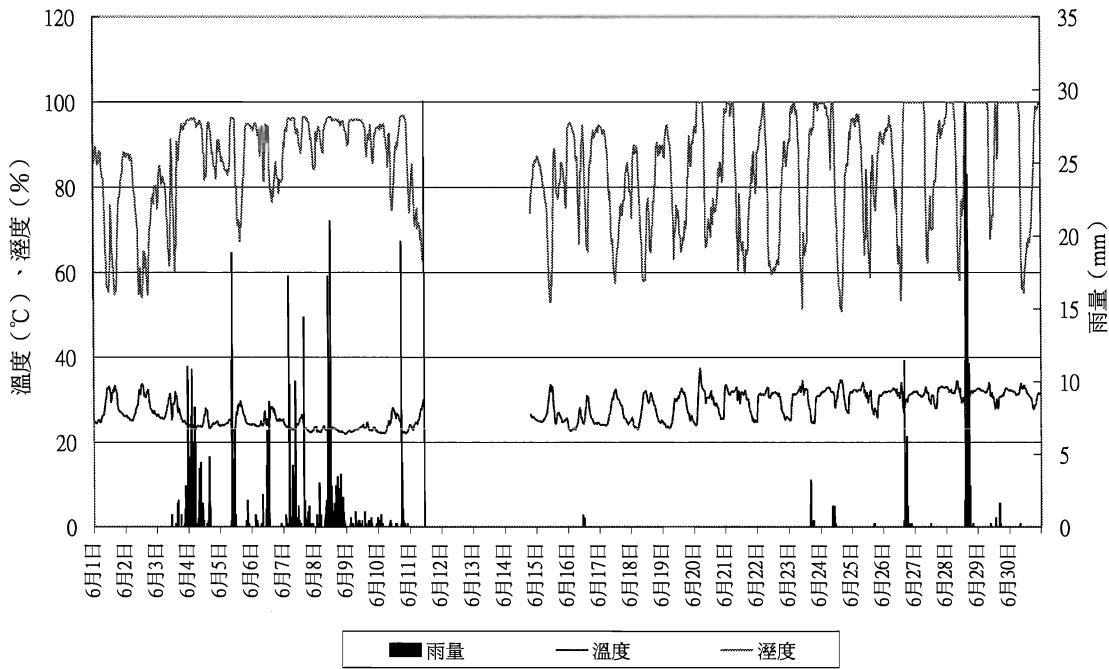


圖 5.8 火炎山上方測站民國 96 年 6 月溫溼度及降雨統計圖

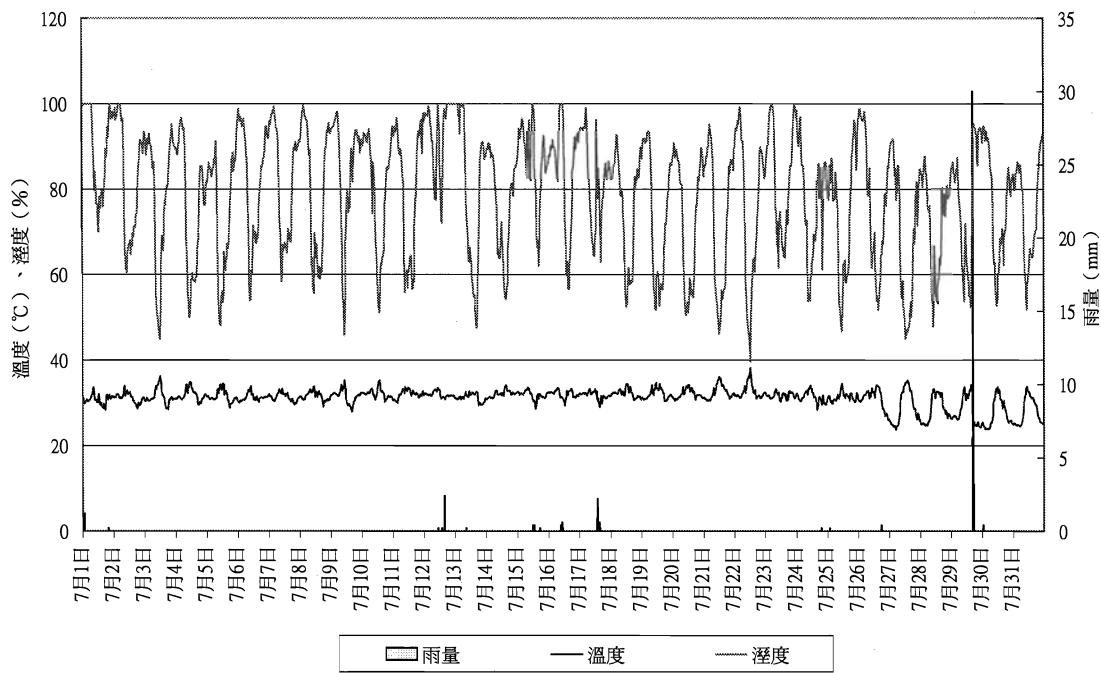


圖 5.9 火炎山上方測站民國 96 年 7 月溫溼度及降雨統計圖

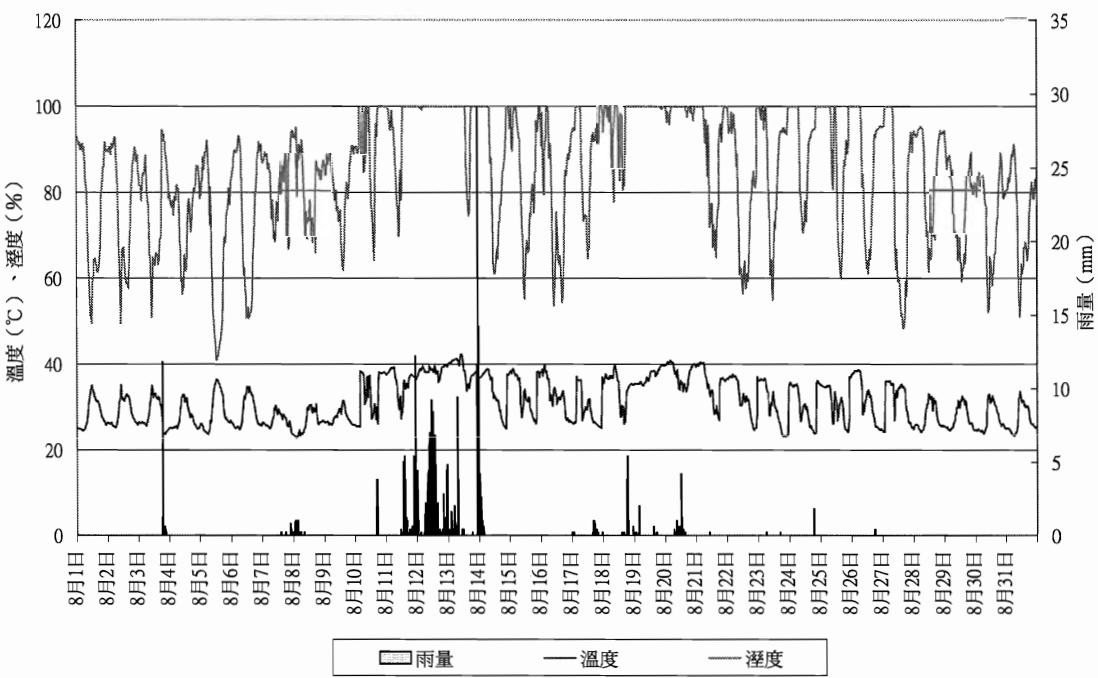


圖 5.10 火炎山上方測站民國 96 年 8 月溫溼度及降雨統計圖

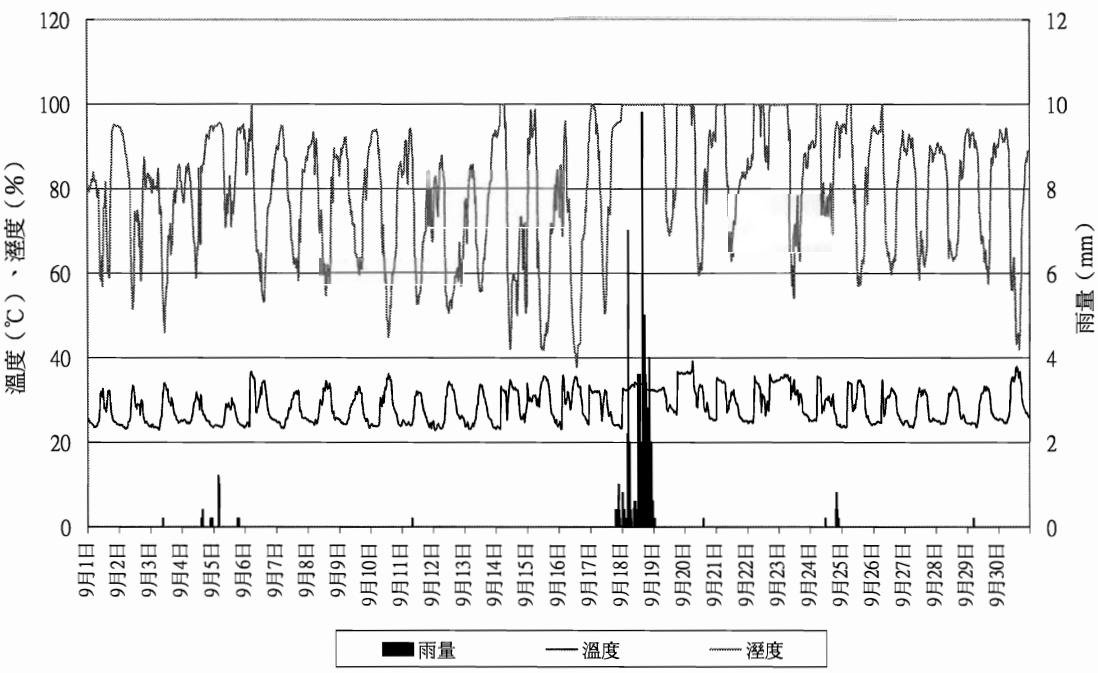


圖 5.11 火炎山上方測站民國 96 年 9 月溫溼度及降雨統計圖

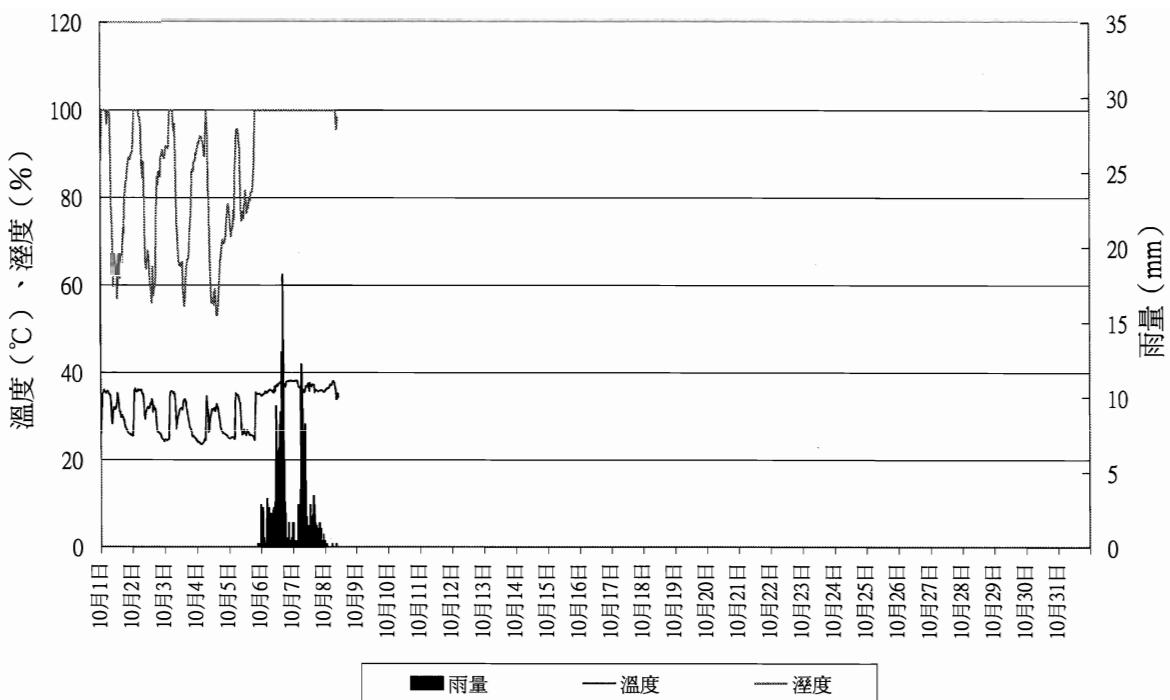


圖 5.12 火炎山上方測站民國 96 年 10 月溫溼度及降雨統計圖

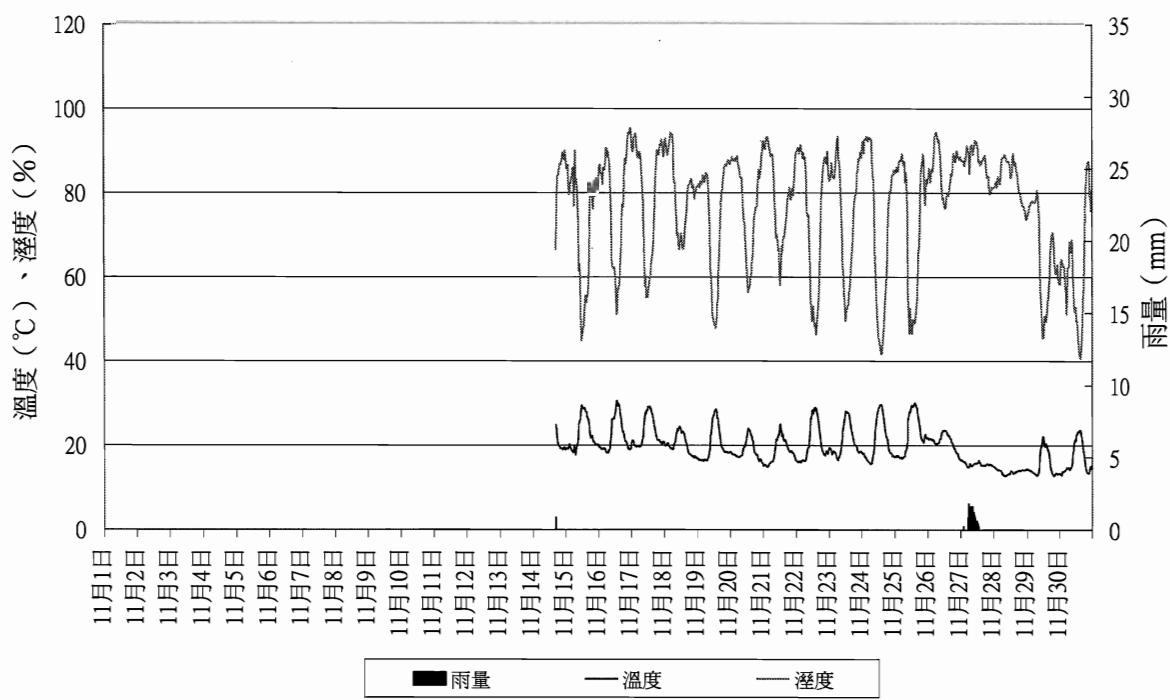


圖 5.13 火炎山上方測站民國 96 年 11 月溫溼度及降雨統計圖

(三) 氣象資料與土石流災害分析

1. 1986-2002 年降雨分析

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 公釐的事件定義為豪大雨。

由表 5.1 所示，自民國 1986 年至 2002 年間，每年會產生 1 至 6 場豪大雨不等，每年發生豪大雨事件的平均值約在 3 場左右。其中民國 1986 年至 1991 年間，除 1991 年之外，每年皆有三場以上的豪大雨，此段時間內豪大雨事件的總降雨量 3475.8 公釐。共 19 場的豪大雨事件中，包含五次颱風事件，颱風事件所產生之雨量平均比一般豪大雨事件為高，平均降雨量為 275.4 公釐，比一般豪大雨事件之平均值 149.9 公釐多出 125.5 公釐。

民國 1992 年及 1993 年，雖僅有二次颱風事件，且降雨量並不突出，但豪大雨事件比起往年為多，因此將這二年單獨分析。1992 年共有六場豪大雨事件，包含二次颱風，總降雨量達 712 公釐，平均每場豪大雨降下 188.7 公釐；1993 年則有四場豪大雨，總降雨量達 868 公釐，平均每場豪大雨降下 217 公釐。此二年之單場豪大雨降雨平均值皆大於 1986 至 1991 年中降雨量最多的 1990 年，1990 年平均單場降雨事件為 179 公釐。民國 83 至 87 年度中，1997 及 1998 年分別有 5 場及 6 場降雨超過 100 公釐的豪大雨事件，但單場降雨值不高，均在 100-160 之間。而 1996 年的賀伯颱風所產生的降雨量就達 610 公釐，甚至高過 86 年所有豪大雨事件的總降雨量。1999 年至 2002 年的豪大事件，以 2001 年的二個颱風為主，桃芝及娜莉 2 次颱風事件分別降下 330 及 880 公釐的雨量，娜莉的總降雨量更超過賀伯所創下的單場事件最多總降雨之紀錄，而二次颱風為 2001 年帶來

1210 公釐的降雨，比過去記錄中每一年皆高出許多。

回顧 1986 至 2002 年來火炎山地區的降雨事件，豪大雨之降雨平均值約在 100 多公釐，而颱風事件是降雨尖峰值產生主要的原因，最明顯的例子如賀伯及 娜莉二次颱風事件。且分析降雨延時長短，除颱風事件之降雨時間會達 4 天之外，其餘之豪大雨事件在 2 至 3 日內即結束。

表 5.1 1986-2002 年火炎山豪大雨事件

颱風名稱	日期	總降雨量*(mm)	颱風及豪大雨之總降雨量 (mm)	固定時間內之總降雨量 (mm)
H ***	20-21 May 1986	174.5		
H	6-7 Jun. 1986	134.5		
Wayen	21-25 Aug. 1986	213		
H	18-19 Sep. 1986	139.5		
Abby	16-20 Sep. 1986	120		
H	23-25 Mar. 1987	111.7		
H	24-25 Jun. 1987	187.6		
H	20-27 Jul. 1987	109		
H	20 Apr. 1988	137.1		
H	3-5 Apr. 1989	150.6	3475.8	8209 (1 May 1986 ~ 30 Sep. 1991)
H	25-27 July 1989	258		
H	22-24 Aug. 1989	131.3		
Sarah	10-13 Sep. 1989	305		
H	19 Apr. 1990	102		
H	21-22 Apr. 1990	168		
H	9-10 Jun. 1990	162		
Ofelia	22-24 Jun. 1990	133		
H	3-4 Aug. 1990	133		
Yancy	16-20 Aug. 1990	376		
H	22-24 Jun. 1991	230		
H	9-11 Apr. 1992	142	1580	2978 (1 Oct. 1991 ~ 31 Jul. 1993)
H	20-21 May 1992	105		
H	7-8 Jun. 1992	134		
H	7-8 Jul. 1992	100		
Polly	26-31 Aug. 1992	128		
Ted	21-23 Sep. 1992	103		
H	26-27 May 1993	154		
H	1-2 Jun. 1993	476		
H	5 Jun. 1993	120		

H	7-8 Jun. 1993	118		
H	2-4 May 1994	365		
Doug	6-8 Aug. 1994	146		
H	16-18 May 1995	135		
Deanna	5-9 Jun. 1995	173		
H	4-7 May 1996	219		
Herb	29-31 Jul. 1996	651		
H	21-22 May 1997	129		
H	17 Jul. 1997	106		7459 (1 Aug. 1993 ~ 31 May 1998)
H	14-15 Aug. 1997	149	3010	
Winnie	16-18 Aug. 1997	100		
Amber	27-29 Aug. 1997	126		
H	14-15 Jan. 1998	131		
H	18-20 Feb. 1998	131		
H	3-5 Jun. 1998	162		
H	7-9 Jun. 1998	121		
H	25 Jun. 1998	166		
Zeb	14-16 Oct. 1998	123		969 (1 June 1998 ~ 31 May 1999)
H	27-May-1999	142	265	
H	12-13 Jun. 2000	143		2189 (1 June 1999 ~ 31 Oct. 2000)
Prapiroon	27-30 Aug. 2000	130	273	
H	20-21 Apr. 2001	110		2776 (1 Nor. 2000 ~ 31 Mar. 2002)
Toraji	28-31 Jul. 2001	330	1320	
Nari	16-19 Sep. 2001	880		
H	6 Jul. 2002	100	678	2718 (1 Apr. 2002 ~ 31 Dec. 2004)

*資料來源：經濟部水資源局 (<http://gweb.wra.gov.tw/wrweb>)

**H：豪大雨事件（降雨量超過 100 公釐）

2. 2006 年降雨分析

在火炎山自然保留區的設置之自計式測站與過去降雨統計比較（林俊全，2006），2006 年火炎山地區降雨變化，在於 7、8 月份的降雨量明顯減少，特別是 8 月份只降下 10 公釐。表 5.2 的數據告知 7、8 月的雨量約佔全年的 26%，此外，由表 5.1 的統計得知 7、8 月份的颱風及其所帶來的豪大雨每每為火炎山地區帶來上百公釐的雨量，同時伴隨產生的大量逕流也是研究區內產生侵蝕與堆積的主要營力。但此年度之中 7、8 月份的降雨總和只有 198 公釐，與過去相較

要少許多。而 4 月份的 219.6 公釐與 79-92 年的平均值 153 多出 66 公釐。

配合過去氣候統計資料，也發現火炎山地區的降雨雖然主要集中於夏季，但其降雨變率亦有很大的變動性，特別是月份別的降雨變率，在特殊情況下過去也曾發生夏季乾旱的情形。

表 5.2 2006 年自計式氣象站月累積降雨統計

時間	月總降雨(公釐)
2006/1	*
2006/2	*
2006/3	101.8
2006/4	219.6
2006/5	*
2006/6	*
2006/7	188
2006/8	10
2006/9	83.4
2006/10	0
2006/11	0
2006/12	0

* 表示測站資料損毀

3. 2007 年降雨分析

本年度單月降雨量最多發生在 6 月、8 月及 10 月，與過去 1986 至 2002 年大坪頂雨量站累積降雨量較高的月份大致相同，但降雨量較過去平均降雨量來得高，主要降雨量分佈主要還是受到颱風的來臨的季節有關，當有 1~2 次颱風，就會造成當月降雨量增加的現象。

表 5.3 2007 年自計式氣象站月累積降雨統計

時間	月總降雨(公釐)
2007/1	0
2007/2	28.2
2007/3	121.6
2007/4	*
2007/5	*
2007/6	587.8
2007/7	53
2007/8	311.4
2007/9	94.6
2007/10	*
2007/11	*

* 表示測站資料損毀或不完整

4. 土石流災害分析

2007 年 6 月 3 日 至 10 日之間，受到鋒面影響，連續性的降下大雨，於 10 日傍晚 6 點多，中苗六線火炎山隧道口發生土石坍方，長約 70 公尺的路段被土石淹沒，土石泥流覆蓋在隧道口馬路上，造成雙向交通中斷。

由 2007 年 6 月 3 日至 10 日之間降雨量初步分析，四號集水區的降雨量較東側出口測站略高，顯示火炎山地區降雨量在空間分布的不均勻，而集水區內的降雨略高於平地之降雨。

在 6 月 10 日的一場降雨事件（日降雨量 29.2mm、時降雨強度 19.6mm），造成火炎山土石滑落，此降雨雖然為驅動此次災害的事件，然而必須考慮此事件之前的前期降雨與土壤含水量。在 6 月 3 日至 10 日的累積雨量為 417.2 mm，其中 6 月 8 日雨量最大，日降雨量達 114.6 mm，最大時雨量達 28.4 mm，但是仍然沒有造成集水區下游造成立即的災害，但此時可能已造成造成礫石之間的縫隙含水量達到飽和，而在 6 月 10 日的一場降雨事件，雖沒有 6 月 8 日降雨事件大，卻造成災害的發生。由此事件顯示，災害發生前累積降雨所造成礫石之間的縫隙含水量達到飽和，火炎山地區累積降雨量達 114.6 mm 以上之後，再經過一次較強的降雨事件，極可能造成火炎山地區之災害。

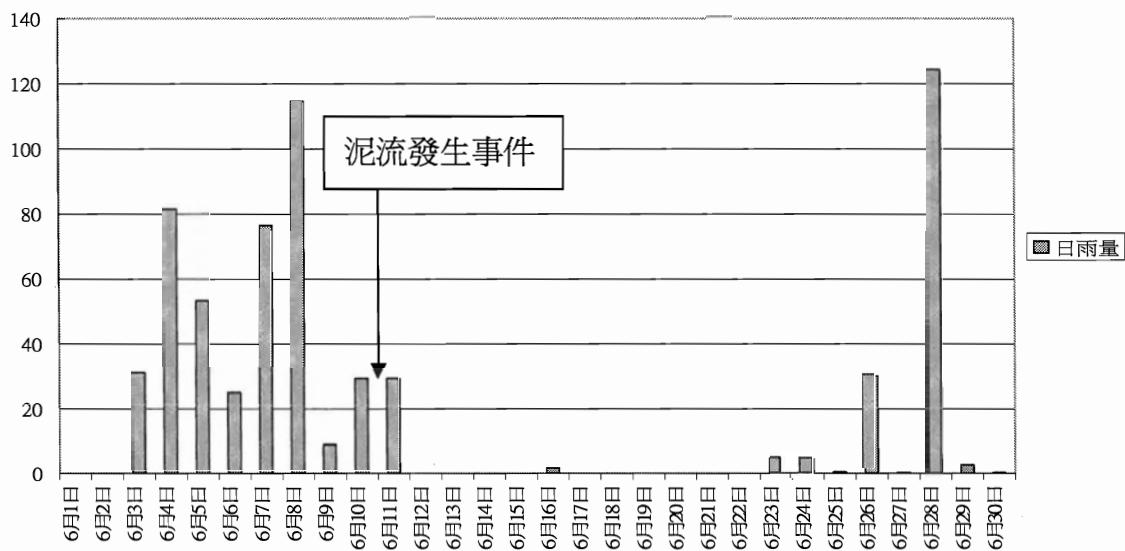


圖 5.13 火炎山上方自計式氣象站 2007 年 6 月份日降雨量圖

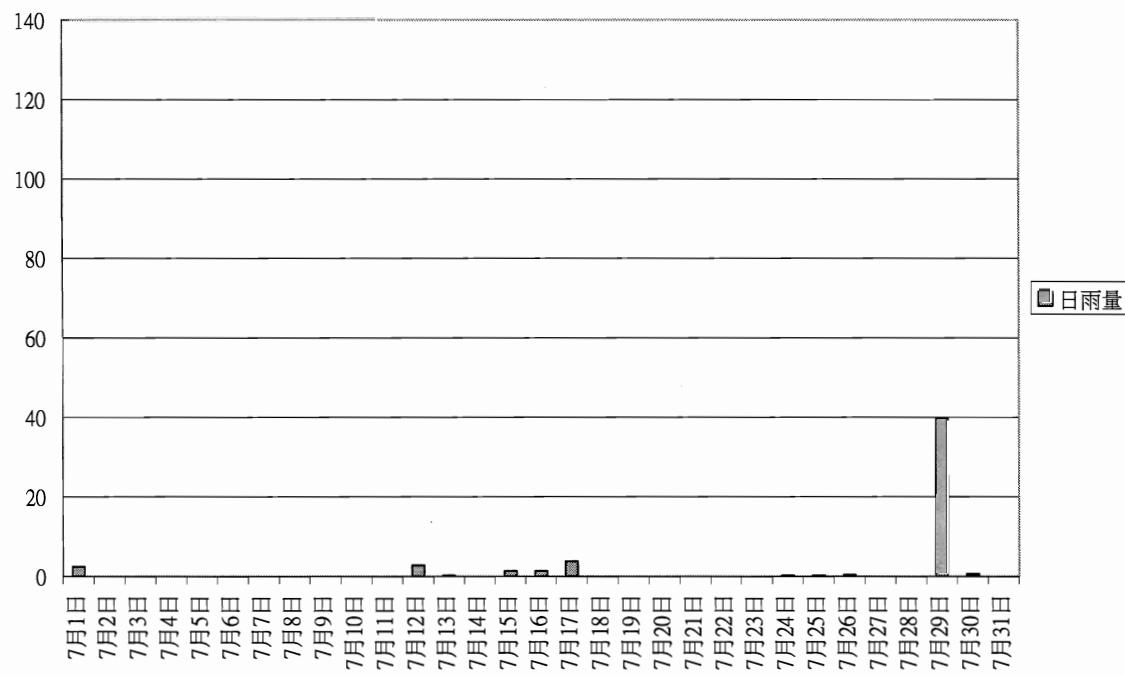


圖 5.14 火炎山上方自計式氣象站 2007 年 7 月份日降雨量圖

苗栗縣於 2007 年 8 月 18 日晚上大雨不斷，通往台中的苗 140 線火炎山明隧道 19 日清晨 5 時許因土石泥流滾滾而下，封阻隧道，公路總局緊急派員搶修，5 小時後排除，但隧道口的泥漿很滑，車輛都減速慢行。

從雨量記錄來看，18 日當天日降雨量僅 11.6mm，計算 17 日 0 時開始降雨至 19 日 5 時泥流發生前的累積降雨量為 19mm，最大時雨量在 18 日 18 時，降雨強度 9.2mm。此次的降雨事件雨量並不多，但卻造成泥流的災害，本研究認為主要原因為前幾天 8 月 10 日至 14 日的降雨，5 天內共累積 255.6mm 的雨量，最大日雨量為 12 日達 107.6mm，超過 100mm 的假設閥值，當時並沒有明顯災害產生，但那幾天的降雨使得礫石層間的含水量達到飽和。因此 18 日與 19 日的短暫的降雨，就造成泥流溢流的現象產生。

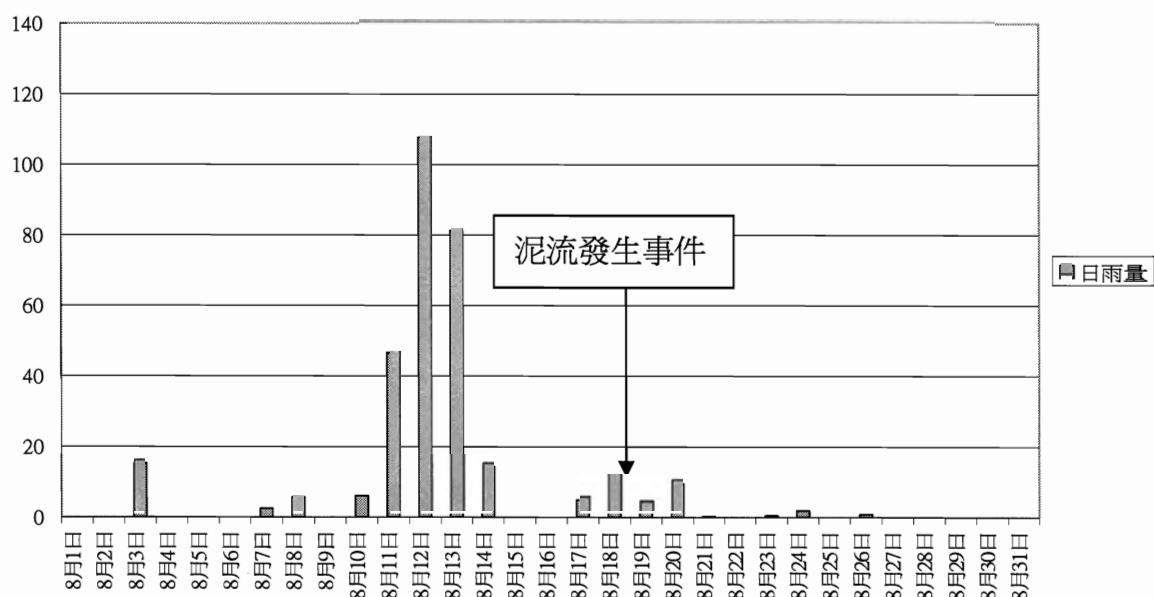


圖 5.15 火炎山上方自計式氣象站 2007 年 8 月份日降雨量圖

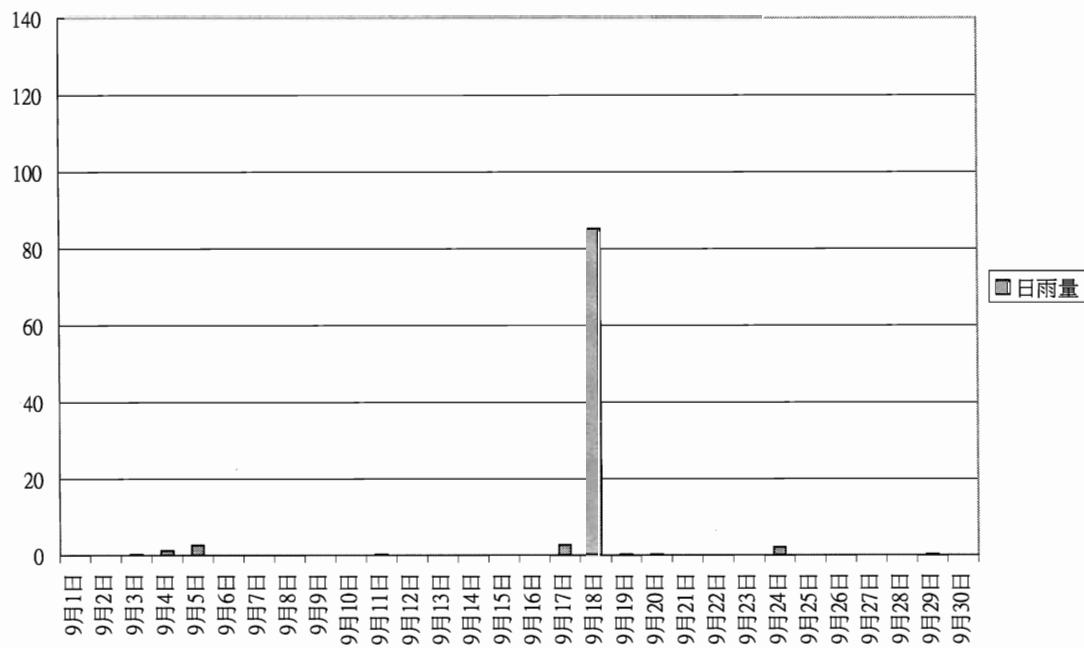


圖 5.16 火炎山上方自計式氣象站 2007 年 9 月份日降雨量圖

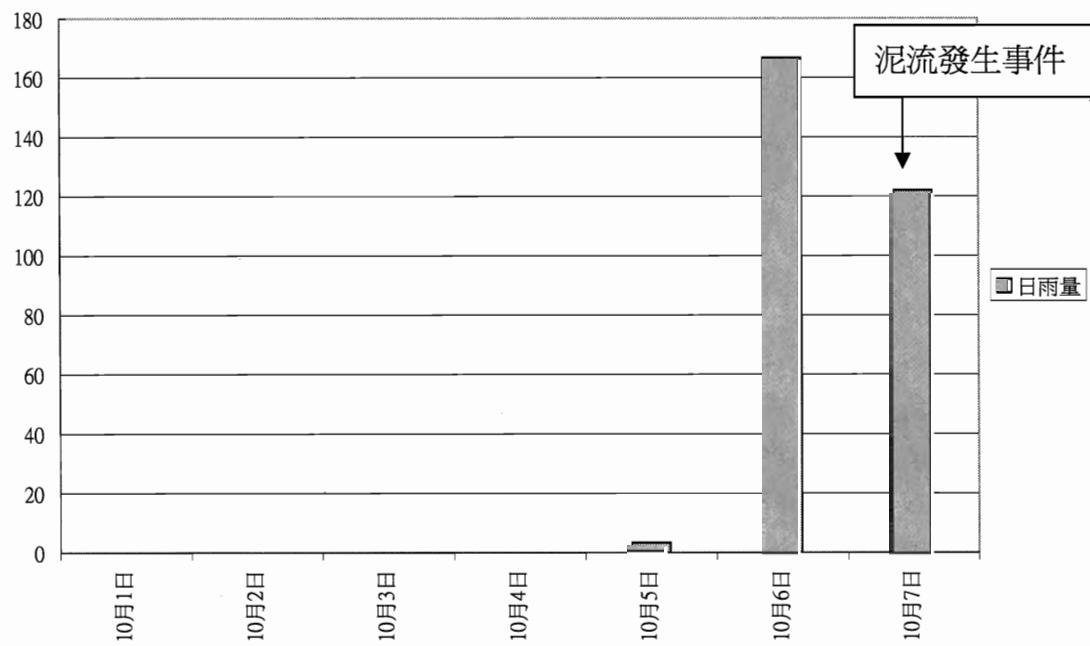


圖 5.17 火炎山上方自計式氣象站 2007 年 10 月份日降雨量圖

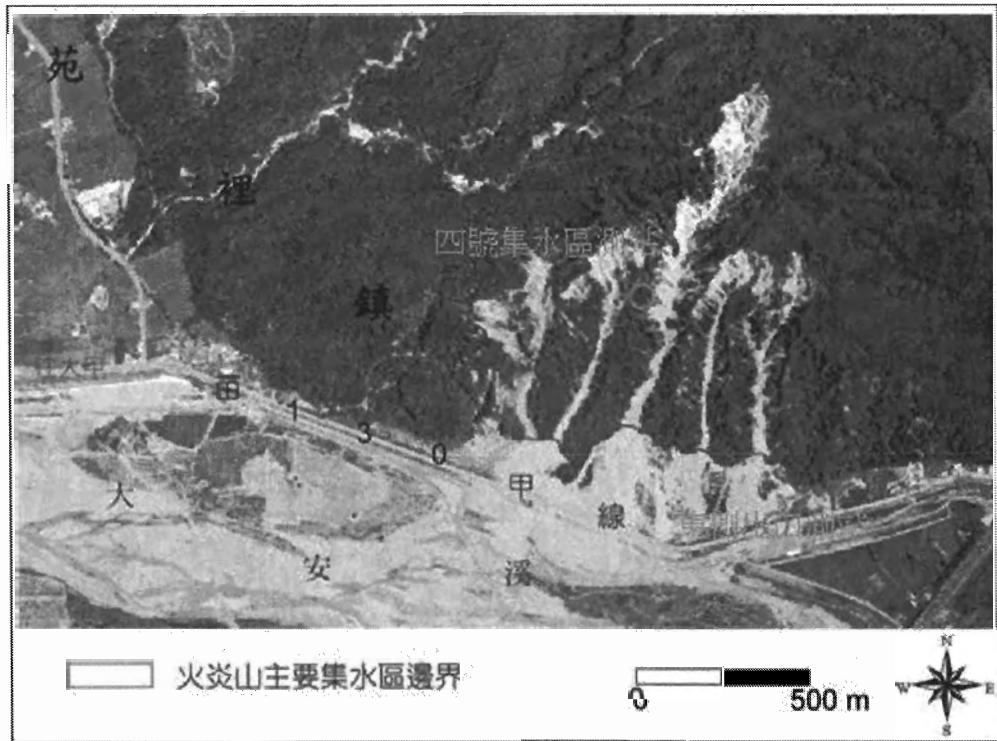


圖 5.18 研究區範圍及測站位置圖（資料來源：林務局農林航空測量所）

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 5.4，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。
5. 蛇籠的設置，應避免景觀的破壞。
6. 目前苗 140 線全線道路養護工作已經宜交由苗栗縣政府負責，相關土石流災害防治工作，由苗栗縣政府編列預算施設石籠，主要進行土石的清淤及疏導，以減少災害發生的可能。

表 5.4 火炎山隧道 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) 土石流影像監測

在影像監測方面，過去在隧道興建完成時，曾經在西口處因為泥流造成車禍，因此本研究將著重於隧道西口的土石流影像監測，來觀測造成泥流發生的原因。本年度在 10 月 7 日，記錄了 10 月 7 日颱風發生的土石流事件，以下將本次發生的過程說明如下：



圖 5.19 隧道西口前風雨交加（5：37 分）



圖 5.20 隧道前方開始有泥流產生（5：39 分）



圖 5.21 泥流溢流至路面（5：40 分）



圖 5.22 風雨逐漸減緩（6：00 分）



圖 5.23 泥沙堆積在隧道口，汽車無法通行（6:10 分）



圖 5.24 警車到隧道前方觀察狀況（6:50 分）



圖 5.25 風雨逐漸變小，可清楚看到隧道口堆積沙石（8：00 分）



圖 5.26 挖土機正在清理堆積的沙石（9：50 分）



圖 5.27 卡車正在搬運隧道口堆積的沙石（10：56 分）



圖 5.28 挖土機持續在進行清理泥沙（11:34 分）



圖 5.29 持續清理，已開放一線道通行（16：49 分）

(五) 現場調查

除了影像監測外，配合事件後現場調查可以比較清楚瞭解在颱風發生後，對火炎山地形造成的變化，因此本研究在不同時間在現場進行拍照記錄，進行觀察比對沖積扇地形的變化。



圖 5.30 施工中的隧道頂部（拍攝日期：94/4/5）



圖 5.31 施工中的火炎山隧道頂部（拍攝日期：94/4/5）



圖 5.32 火炎山隧道旁邊的蛇籠（拍攝日期：95/6/20）



圖 5.33 清理後的火炎山沖積扇（拍攝日期：95/2/28）



圖 5.34 清理後的火炎山沖積扇（拍攝日期：95/2/28）

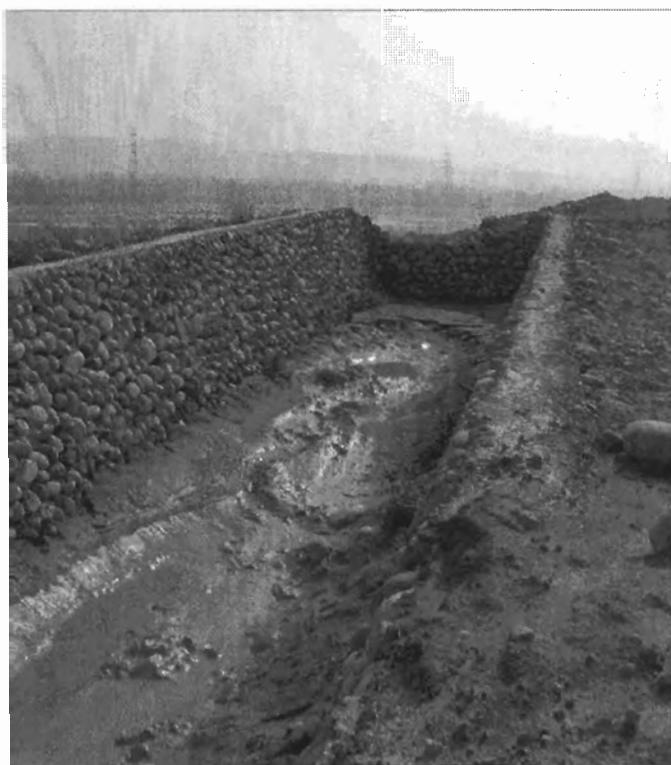


圖 5.35 沖積扇工程（拍攝日期：95/2/28）



圖 5.36 火炎山隧道西側出口上方（拍攝日期：95/7/24）



圖 5.37 完工的火炎山隧道與側邊蛇籠（拍攝日期：95/9/6）



圖 5.38 隧道西側出口（拍攝日期：95/9/6）



圖 5.39 隧道下方處形成之小沖積扇（拍攝日期：95/9/6）



圖 5.40 隧道下方處的土石堆積（拍攝日期：95/9/6）



圖 5.41 隧道主體與下方的土石堆積（拍攝日期：95/9/6）

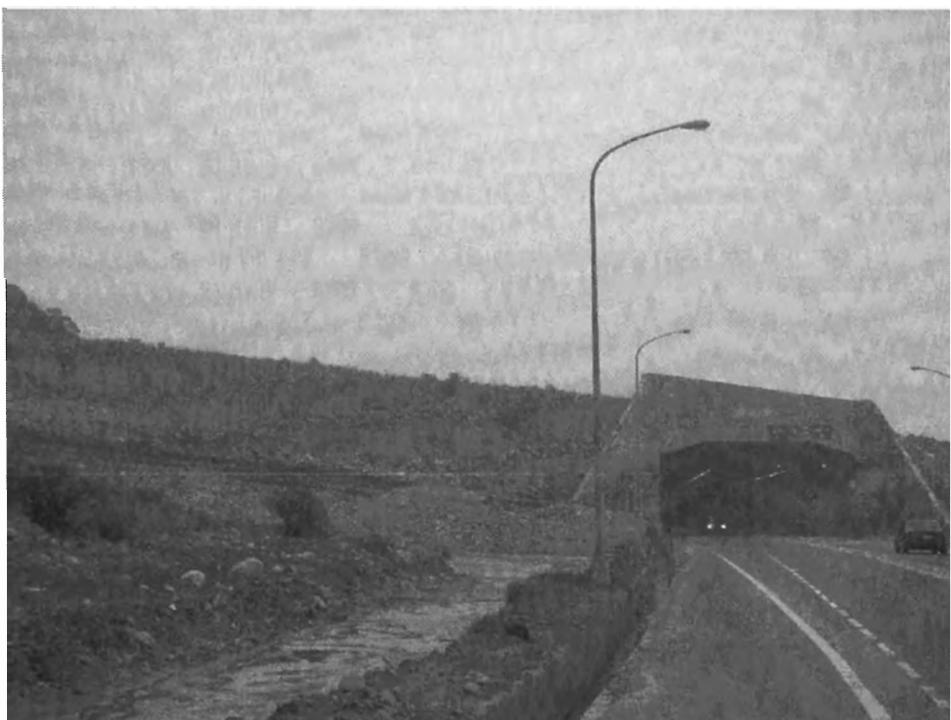


圖 5.42 隧道西側出口（拍攝日期：96/9/19）



圖 5.43 隧道西側出口上邊坡（拍攝日期：96/9/19）

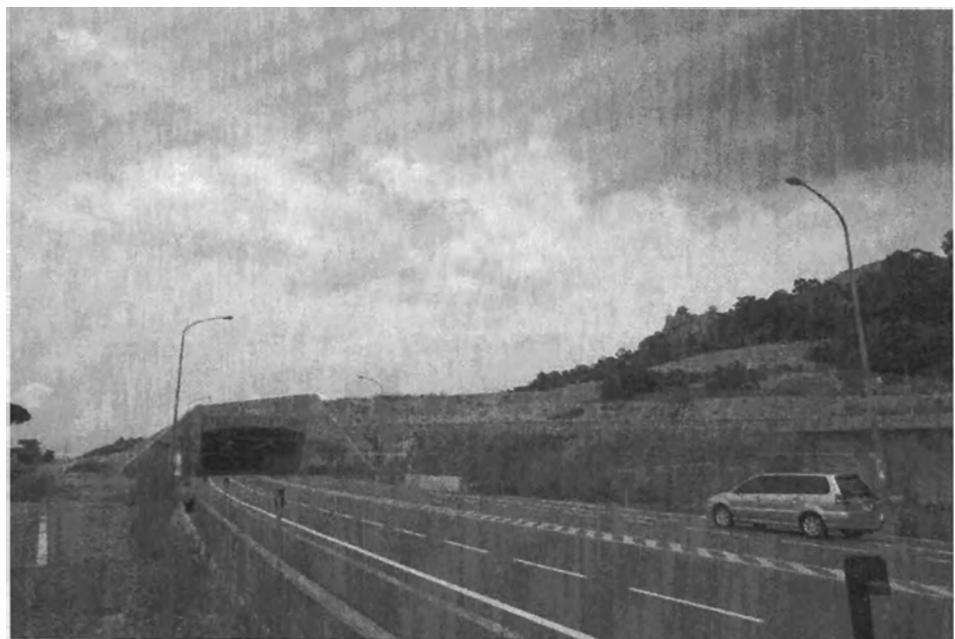


圖 5.44 隧道東側出口（拍攝日期：96/9/19）



圖 5.45 隧道西口處淤積情況（拍攝日期：96/11/14）

六、討論及建議

土石流發生必要條件包含三要素：(1)不穩定且量足夠的溪床堆積物。(2)充足的降雨量當潤滑劑。(3)陡峻可讓土石重力加速之斜坡。一般在土石流的防制上可分成下列幾項方式處理：

- (一) 土石流抑制工法：在坡度較陡的溪谷或山溝上游區，防止溪床下蝕及河岸側蝕，減少造成土石流的材料，此類工法可包括河床固床、河岸護坡等。
- (二) 土石流攔阻工法：當溪谷或山溝內的土石流材料已累積至近乎飽和，只要有大雨就有可能造成災害時，防治應以直接攔阻為佳。
- (三) 土石流淤積工法：局部擴大溪谷或山溝，適用於土石流頻繁的溪溝中游。中游的寬度，或減少河床坡度，例如建造階梯狀，使土石流材料在事先規劃的沉沙池內沉積。
- (四) 土石流疏導工法：應用於溪谷或山溝中下游或谷口扇狀地上，以渠道或疏導堤誘使土石流沿規劃的安全路線流動。
- (五) 土石流緩衝林帶：應用於土石流末端的扇狀地上，以種植樹林為阻擋或緩衝區，減少土石流的衝擊力或直接侵襲。

由於火炎山集水區中上游屬自然保留區的範圍，根據文化資產保存法規定：「自然保留區禁止改變或破壞其原有自然狀態」，因此在土沙移動上需在保留區外疏導、清淤土石或避開危險區域為處理方式。目前苗 140 線全線道路養護工作已經交由苗栗縣政府負責，相關土石流災害防治工作，由苗栗縣政府編列預算施設石籠，在不影響隧道安全及自然保留區的範圍外，進行土石的清淤及疏導。但為維護保留區土石邊坡的穩定性，有以下的建議：

- (一) 建議在保留區外、隧道南側與緊鄰大安溪河床岸規劃為清淤區，如圖 7.1 所示。自然保留區界至隧道之間規劃為緩衝區，不要進行清淤，以使火炎山礫石河道穩定下來。
- (二) 於隧道東西口處、保留區外土堤與蛇籠間設清淤區，以做為沈沙池之用。然而在土石清淤之後，雖然可減緩土石堆積向隧道兩側擴張的狀況，但沖積扇是否會因土石被移除，坡度變陡，造成堆積型態發生改變或不穩定，值得持續觀察。
- (三) 建議未來採挖地區如圖 7.1 所示。
- (四) 現在隧道頂部的土石堆積將導致沖積扇地形基準面的提高，以及是否增加隧道上方的負載壓力，未來仍須觀測並加以探討。

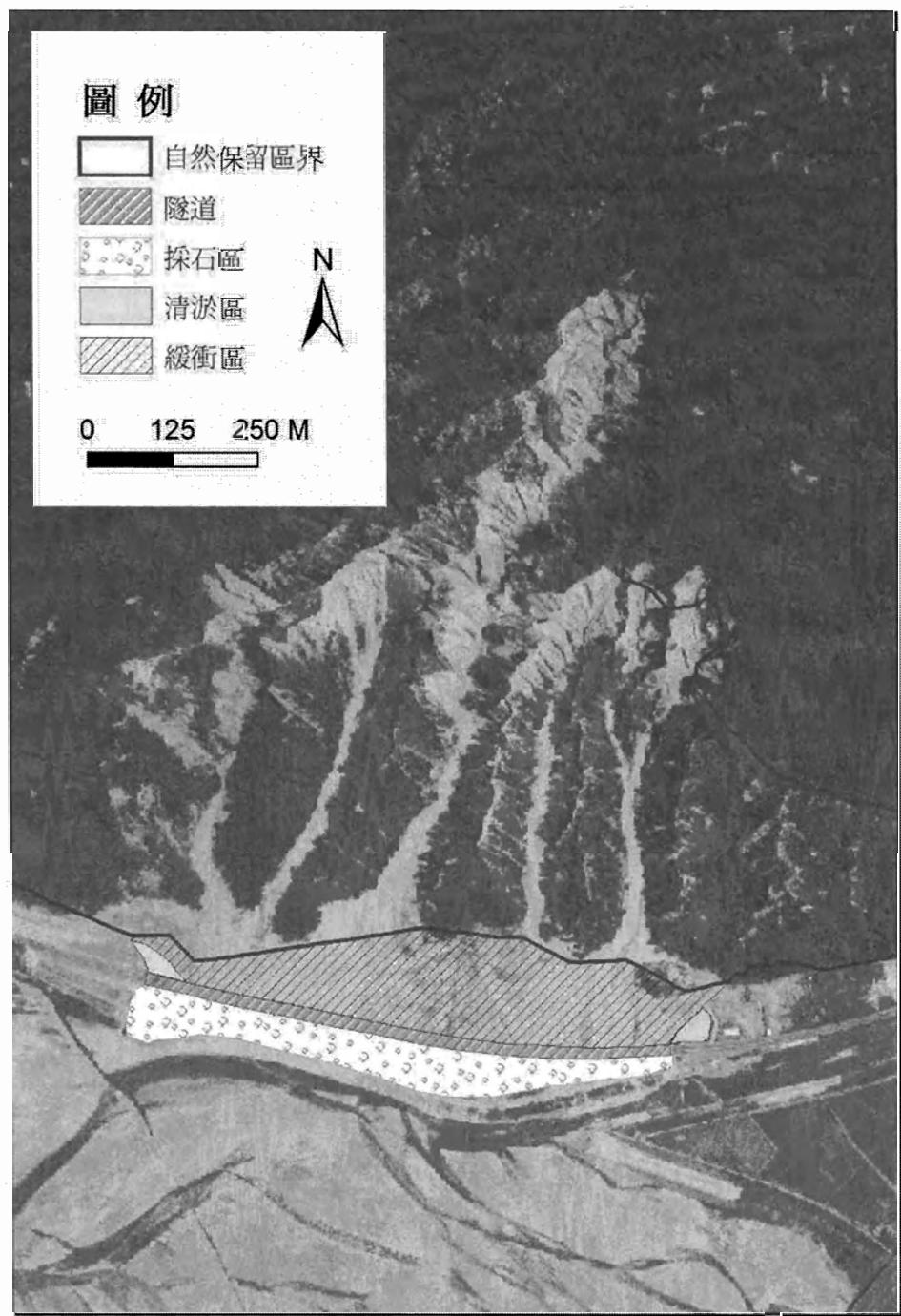


圖 7.1 火炎山自然保留區外側建議採石區及清淤區規劃範圍圖

七、結論

- (一) 火炎山自計式氣候站設置有兩處，一處位於火炎山四號集水區上游，一處位於隧道東口處，本年度持續進行火炎山氣象資料的收集，目前整理的資料為本年度 6 月至 10 月。
- (二) 由於自計式測站設置在野外中，儀器較易受損，因此本年度也持續進行儀器的維護。兩個測站中，在火炎山上游的測站，主要以氣候資料收集為主，隧道東口的測站，主要以監視隧道口狀況為主，本年度將再增加隧道西口處的監視系統。
- (三) 隧道東口的監視器除了每天進行監測隧道東口的狀況，同時影像資料也存在電腦當中，當有災害發生時，能清楚瞭解災害發生的原因。本年度計畫在東口的監視系統設置遠端連線的系統，以 ADSL 撥接的方式進行連線，目前可透過網頁的方式，即時觀察隧道東口的狀況。
- (四) 隧道西口處，本計畫採用 3.5G 的方式進行監測，但目前測試的結果，由於當地的訊號較差，影像資料傳輸較慢，並沒有達到預期的結果，後續將完成隧道西口的影像監視系統。
- (五) 從降雨資料來看，民國 96 年 6 月到 8 月間共發生三場較大的降雨事件，民國 96 年其中 6 月 10 日及 8 月 19 日的降雨造成泥流溢流的事件，使得隧道道路交通受阻。
- (六) 本研究分析這兩次所造成的災害事件，顯示這兩次泥流溢流發生的時間，並不是在日降雨量達 100mm 以上的時間產生，也不是降雨強度最大的時發生，而是在之後的降雨才產生。這可能與礫石層間在一定的累積降雨下，當地下含水量達到飽和的狀態，才產生泥流溢流的現象有關。
- (七) 10 月 7 日所造成隧道西口處土沙堆積的現象，主要是因為本次颱風帶來大量的降雨，單日最高降雨量達 166.8mm，而在發生土沙堆積時最大時雨

量達 23 公釐，因此在持續降雨量情況下，使得隧道上方的土石，隨著泥流崩落而下，造成本次嚴重的災害，所幸並沒有發生人員的傷亡。

(八) 除了遠端監視外，本計畫繼續配合野外觀察的方式，以照片記錄現場的狀況，觀察土石堆積的情形，並進行比對。將來可利用自計式氣象站及野外觀測的資料，來發展預警系統。

參考文獻

1. 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。
2. 林朝棨，1957，台灣地形，269 頁，台灣省文獻委員會。
3. 林朝棨，1974，台灣地質，89 頁，台灣省文獻委員會。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. 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。
10. 林俊錄，1990，航測遙測技術應用於生態資源保育之研究：火炎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。
11. 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。
12. 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。

13. 黃朝恩，1990，台灣中部火炎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。
14. 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。
15. 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。
16. 謂錢登，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。
17. 謂錢登、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。
18. 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。
19. 鄭村益，1993，三義火炎山自然保留區崩塌地變遷之研究，國立中興大學水土保持學研究所碩士論文。
20. 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. Amstrong, 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.

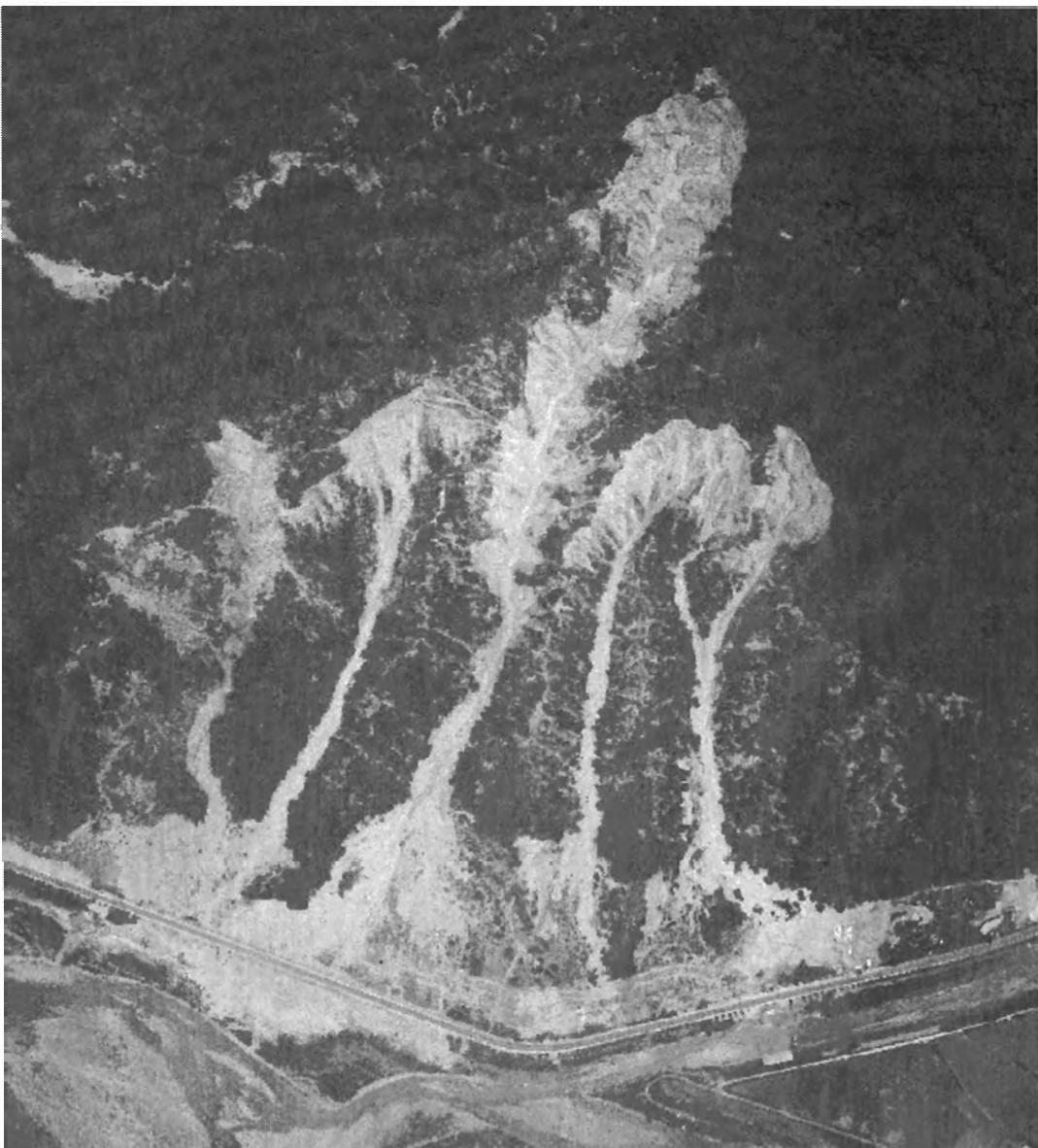
24. Bovis, M. J. and Jakob, M 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(11):1039-1054.
25. De Ploey, J., Kirkby, M. and Ahnert, F., 1991, Hillslope erosion by rainstorm- A magnitude- frequency analysis, *Earth surface processes 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 , *Erath 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-Odoux, 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 edit, 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.

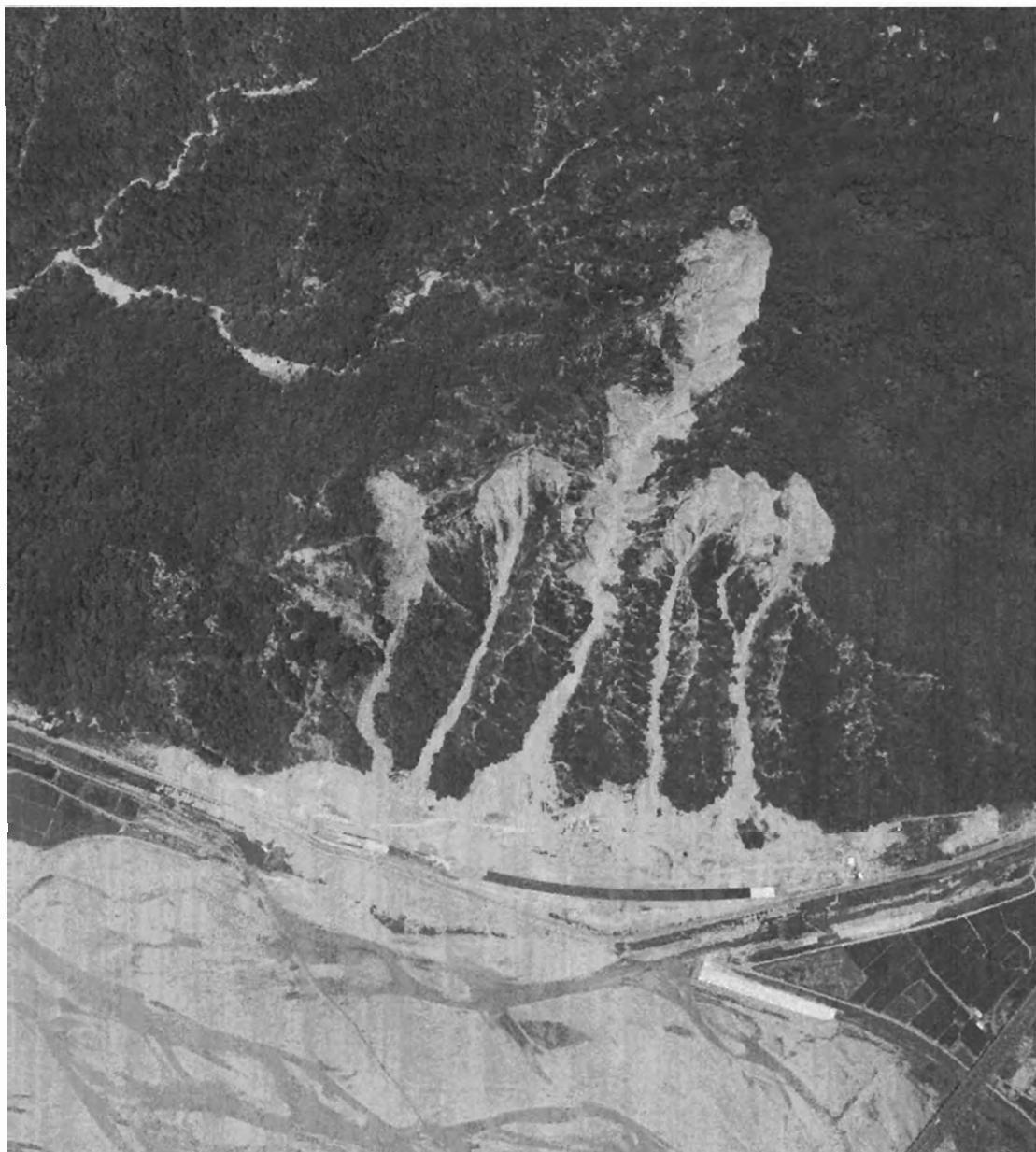
附錄 1 航照正射化影像



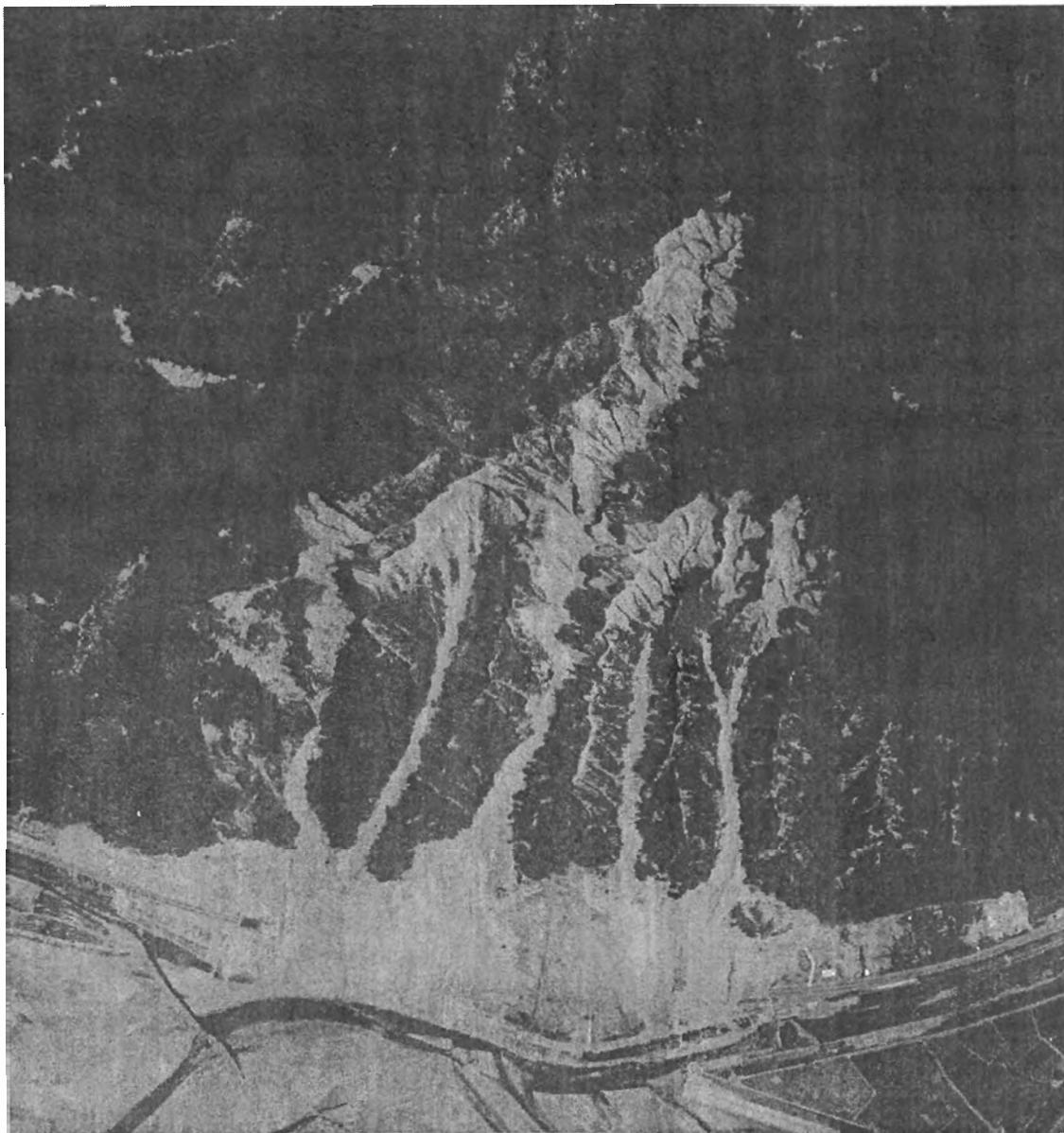
火炎山 2002 年正射化影像



火炎山 2004 年敏督利颱風後正射化影像



火炎山 2005 年正射化影像



火炎山 2006 年正射化影像