

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫：重建工程設計效益與影響之評估－抑制土石流災害 效益評估(I)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2625-Z-002-019-

執行期間：93 年 08 月 01 日至 94 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學水工試驗所

計畫主持人：黃宏斌

計畫參與人員：楊凱鈞、謝孟荃、曾耀生、賴紹文、楊勝崎、蔡奇璋、徐肇斌

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 3 月 14 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☒ 成果報告
☐ 期中進度報告

重建工程及其對環境長期影響之評估研究-子計畫：重建工程
設計效益與影響之評估—抑制土石流災害效益評估(I)

計畫類別：☐ 個別型計畫 ☒ 整合型計畫

計畫編號：NSC 93 - 2625 - Z - 002 - 019 -

執行期間： 93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

計畫主持人：黃宏斌教授

共同主持人：

計畫參與人員：楊凱鈞、謝孟荃、曾耀生、賴紹文、楊勝崎、蔡奇璋、
徐肇斌

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☐ 精簡報告 ☒ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年 ☐ 二年後可公開查詢

執行單位：國立臺灣大學水工試驗所

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

計畫中文摘要

政府在 921 地震發生後，迅速投入大筆經費進行重建區治山防災之工作，不過由於時間緊迫，部分防災工程未經審慎評估規劃即行施工，雖可在第一時間保護民眾避免再次受到災害，但長期看來，實有必要進行重建區治山防災工程之效益評估，檢討工程設計對抑制土石流災害之功能及其安全性。

為檢討重建工程抑制土石流災害之效益，本研究建立研究區域重建工程構造物資料庫，並蒐集 921 重建區中基本地文、水文資料，利用二維數值模式 FLO-2D，實際模擬土石流之流況，再根據模擬所得之結果，針對集水區整體治理工程對抑制土石流之效果、不同之土石流抑制工法對土石流抑制之效益、不同之抑制工法對當地生態之影響以及土石流抑制工法維護及管理問題等四個面向，進行分析與探討，最後提出一工程構造物抑制土石流災害之效益評估方法，除可檢討當地工程設計之功能及其安全性是否符合原先設計之要求外，並可作為日後土石流防治工程效益評估之參考。

關鍵詞：921 地震，二維數值模式，土石流

計畫英文摘要

After 921 Chi-chi Earthquake occurred, government spent a lot of money and resources for sediment disaster mitigation in the earthquake area. Because government wish protect the residents from suffering sediment disaster again in the shortest time, some hazard-mitigation structures was built without being assessed carefully. For the sake of long-term safety, they still ought to be evaluated on disaster mitigation effect of debris-flow.

In order to evaluate the structures on disaster mitigation effect of debris-flow, this study planned to build the database of the structures, and the geological and hydrological factors in the earthquake disaster area. Then, this study will use the two-dimensional numerical model FLO-2D to simulate the fluid behavior of debris-flow. Base on the results of the simulation, this study will discuss the following four problems: (1) the effect of the hazard-mitigation structures in the selected watershed, (2) the disaster mitigation effect of different kinds of structures, (3) the environmental impact of different kinds of structures, and (4) the management and maintenance problem of the hazard-mitigation structures. Finally, this study will

present a method to evaluate the structures on the debris-flow disaster mitigation effect of debris-flow in the earthquake disaster area, and be an example of evaluation disaster mitigation effect.

Key words: 921 Chi-chi Earthquake, Two-dimensional numerical model, FLO-2D, Debris-flow.

目錄

計畫中文摘要.....	I
計畫英文摘要.....	I
目錄.....	III
報告內容.....	1
壹 前言.....	1
貳 研究區域基本資料蒐集與調查.....	1
一、基本資料來源.....	1
二、行政區域.....	2
三、氣象與水文.....	5
四、地文環境資料蒐集與調查.....	10
五、歷史災害情形.....	15
參、工程構造物對土石流抑制效益之文獻回顧.....	17
一、梳子壩撞擊力.....	17
二、梳子壩貯砂效率.....	18
肆、二維土石流境況模擬模式(FLO-2D).....	20
一、FLO-2D 模式原理.....	21
二、FLO-2D 模式相關國內、外參考文獻.....	23
伍、現地踏勘與調查.....	25
一、現地測量.....	25
二、現地泥砂粒徑調查.....	26
三、水文參數.....	30
陸 結論與建議.....	31
參考文獻.....	32
計畫成果自評.....	33

報告內容

壹、前言

台灣位於歐亞板塊和菲律賓板塊交接處，地質構造原本即較為破碎及脆弱，在 921 地震後，更使原本就不甚穩定之坡地地質更容易崩解或分解，龐大之土石方量移往下游或堆積在河谷上，若再加上颱風豪雨，短期或長期上都會對下游之居民產生不定時之土石流災害。政府有鑑於此特地劃定重建區域，迅速投入大筆經費進行重建區治山防災之工作，不過宥於當時經費及工期的急迫性，重建區一般治山防災工程之規劃設計工作僅能針對保全重點，在局部區域進行穩定工法，較無法將地文因子之變化與工程構造物間之互制影響關係納入考量，使得地震後治山防災工程構造物抑制土石流之效益，無論在事前之規劃設計評估、或施工完成後工程效能之達成與否，均待有系統及多面向地進行綜合性評估。

921 地震發生至今已逾 4 年，重建區中大部分治山防災工程已經竣工，目前為各項工程資料最完整，也較為容易蒐集之時期，且重建區之地文環境已較地震剛發生時穩定（例如：地形變化已不像剛發生地震後那麼劇烈，溪床坡度亦已形成一較為穩定之狀態），故此時為進行重建工程抑制土石流之效益評估之一成熟時機，本計畫選定重建區中台大實驗林場溪頭營林區作為研究對象，建立研究區域重建工程構造物資料庫，並蒐集研究區域中基本地文、水文資料，利用二維數值模式 FLO-2D，實際模擬土石流之流況，最後再根據模擬之結果，探討重建工程抑制土石流發生之效益，提出一效益評估模式，用以作為日後土石流防治工程效益評估之參考。

貳、研究區域基本資料蒐集與調查

本研究第一年之工作主要是建立研究區域之基本資料庫，建立研究區域中之基本地文、水文、保全對象、歷史災害及重建工程等資料，並取得 FLO-2D 模式所需之地文、水文等參數。

一、基本資料來源

為建置研究區域內之基本資料庫，本研究主要蒐集台大實驗林場溪頭營林區

的三號坑溪水文、地文等自然環境資料、研究區域內之土石流歷史災害及其保全對象與重建工程，各基本資料來源如表 2-1。

表 2-1 基本資料來源表

資料名稱	資料格式	資料來源	出版或取得 年份(民國)	備註
經建版地形圖	紙圖	內政部	77	比例尺為 1/25,000
像片基本圖	紙圖	農委會林務局農林航測所	84	比例尺為 1/5,000
航照圖	紙圖	農委會林務局農林航測所	90	-
氣象	文字檔	交通部中央氣象局	90	-
水文	文字檔	交通部中央氣象局、 經濟部水資源局	90	-
地質圖	jpg 檔	工業技術研究院 能源與資源研究所	79	比例尺為 1/5,000
土地利用圖	電子檔	農委會水保局	84	比例尺為 1/5,000
數值地形模型 (DTM)	電子檔	國立中央大學太空遙測中心	69	精度為 40m×40m
溪頭森林遊樂區 九二一地震後續 災害復建工程	電子檔	財團法人中華顧問工程司	91	-

二、行政區域

台大實驗林場溪頭營林區三號坑溪行政區域隸屬南投縣鹿谷鄉內湖村，其水系屬北勢溪支流，北勢溪由許多野溪所匯流而成向北流去，最後匯入濁水溪。在地形上，東面為鳳凰山脈，地勢上東高西低，集水區內最高標高約為 1,760m，最低標高約有 1,080m，接近溪谷處之沖積扇皆相當平坦，而遍佈許多保全對象(如

漢光樓、鳳凰賓館、國旅社等)，在接近鳳凰山脈稜線坡度超過 45° ，地形變化相當劇烈。

台大實驗林場溪頭營林區三號坑溪相關地理位置如圖 2-1，三號坑溪集水區面積約為 44.86 公頃，如圖 2-2 所示，各子集水區基本資料如表 2-2。



圖 2-1 溪頭三號坑溪相關地理位置圖

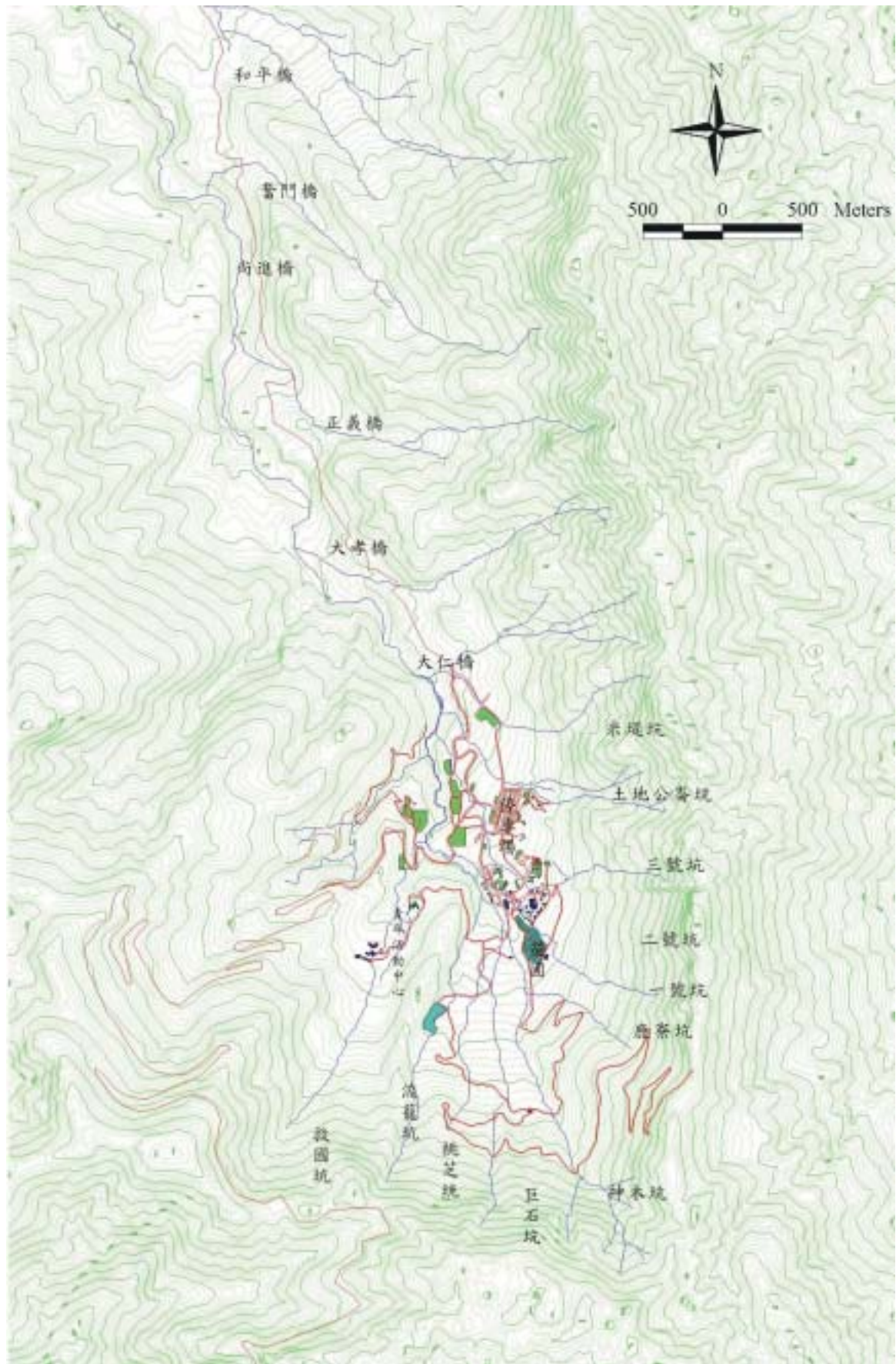


圖 2-2 三號坑溪集水區位置(台大實驗林提供)

表 2-2 三號坑溪集水區基本資料表

集水區名稱	南坑子集水區	北坑子集水區	三號坑溪集水區
集水區面積(ha) A	37.42	7.44	44.86
渠道流長(km) L_0	1.56	0.51	1.56
漫地流長(km) L'	0.1	0.09	0.1
溪流總長度(km) L	1.66	0.6	1.66
集水區周長(km) P	3.69	1.24	3.26
集水區最高點高程(m) H_1	1760	1745	1760
集水區最低點高程(m) H_2	1080	1312	1080
集水區最大高差之水平距離(m) D	1704	1683	1704
渠道最高點高程(m) h	1370	465	1370
集水區平均寬度(km) $W=A/L_0$	0.24	0.15	0.29
形狀係數 $F=W/L_0$	0.15	0.29	0.18
溪流平均坡度(%) $S=(H_1-H_2)/L$	40.96	72.17	40.96
渠道流平均坡度(%) $S_1=(h-H_2)/L_0$	40.00	72.75	40.00
漫地流平均坡度(%) $S_2=(H_1-h)/L'$	56.00	68.89	56.00
起伏量比 $Rr=(H_1-H_2)/D$	0.496	0.931	0.496

三、氣象與水文

為瞭解研究區域內之水文狀況，蒐集集水區附近氣象站或雨量站資料，如圖 2-3 所示，集水區附近氣象站或雨量站有溪頭雨量站、鳳凰氣象站、大鞍雨量站，由於溪頭雨量站位於研究區域集水區內，故以蒐集溪頭營林區鳳凰山瞭望臺旁之溪頭氣象站雨量資料為主，其基本資料如表 2-3。



圖 2-3 溪頭鄰近區域氣象站、雨量站分佈位置圖

表 2-3 溪頭鄰近氣象站和雨量站基本資料表(節錄自中央氣象局)

測站名稱	站號	經度	海拔高度 (m)	城市	地址	設站日期
		緯度				
溪頭 雨量站	C1H100	120° 47' 57" E	1,771	南投縣	鹿谷鄉內湖村森林巷溪頭林營區 (鳳凰山瞭望臺旁)	1992/07
		23° 39' 47" N				
鳳凰 氣象站	C0I090	120° 46' 45" E	878	南投縣	鹿谷鄉 鳳凰鳥園旁	1992/07
		23° 43' 47" N				
大鞍 雨量站	C1H120	120° 45' 05" E	1,453	南投縣	鹿谷鄉鳳凰村 仁義路 3 號旁	1992/07
		23° 40' 48" N				

由台大實驗林溪頭氣象站近十年來(1991~2000)之統計資料顯示，全年平均氣溫約 16.6℃，月平均氣溫變化約在 10℃~20℃ 之間，各月平均氣溫以一、二月最低，七、八月最高，如圖 2-4 所示，海拔一千公尺以下地區，甚少降至冰點以下。

另外，其年平均雨量約 2,213.7 mm，全年可依降雨之情形，劃分為乾季與雨季，自九月至翌年四月為乾季；其餘月份為雨季，降雨集中於夏季，月平均雨量均在 300 公厘以上，如圖 2-5 所示。本區氣候上屬於副熱帶氣候，亦即呈現夏季高溫多雨，冬季乾燥的氣候特徵。

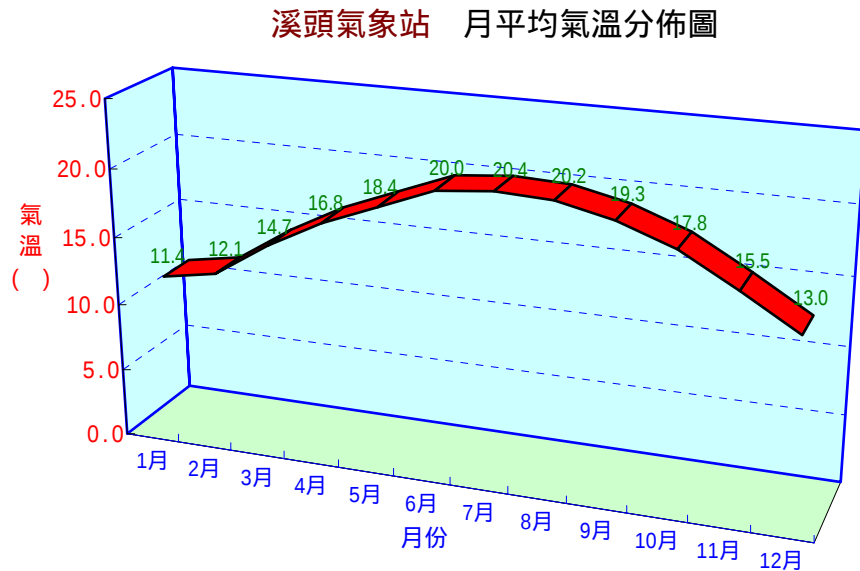


圖 2-4 溪頭氣象站月平均氣溫統計表(1991~2000)

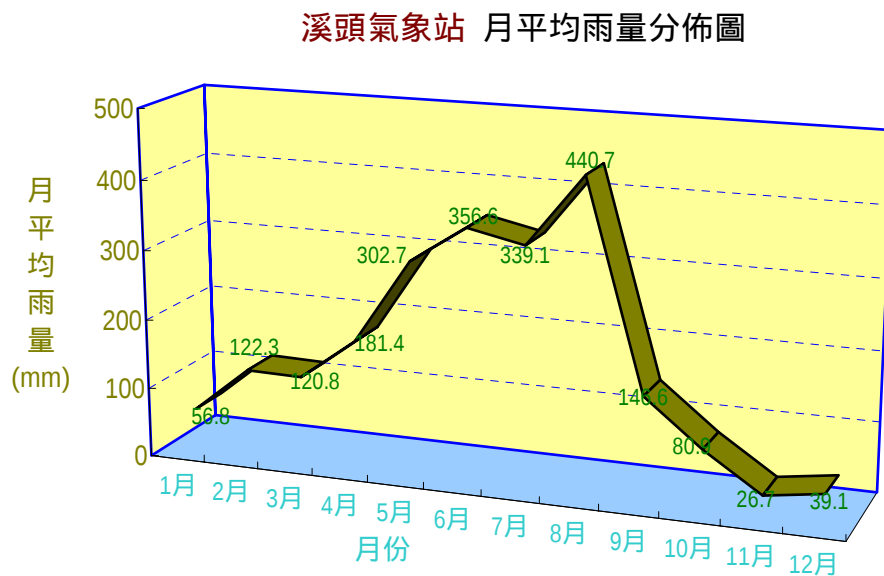


圖 2-5 溪頭氣象站月平均雨量統計表(1991~2000)

由歷史災害可知，民國 85 年賀伯颱風與民國 90 年桃芝颱風對溪頭三號坑造成

嚴重土石流災害，故本研究主要分析賀伯與桃芝颱風侵台期間，台大實驗林場溪頭營林區之降雨情形，以瞭解災害發生原因。

1、賀伯颱風(85/7/31~85/8/1)

民國 85 年之賀伯颱風為一強烈颱風，雖在基隆與蘇澳間登陸橫掃過北台灣，其挾帶的大量雨水，卻為台灣各地帶來很高的累積雨量，其中溪頭雨量站所測得之累積雨量高達 1,257.5 mm，如圖 2-6。

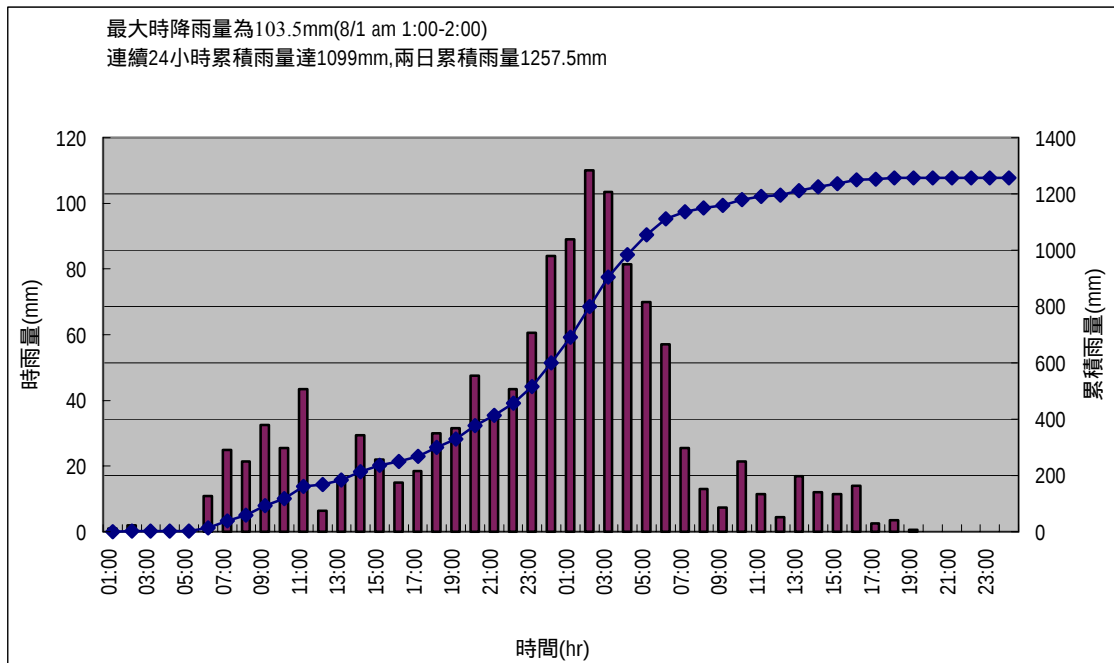


圖 2-6 賀伯颱風期間溪頭雨量站時雨量分佈

本次風災造成三號坑溪嚴重土石流災情，在潛壩上游彎處造成溢流情形，從逐時雨量資料，可知此次賀伯颱風侵台期間為溪頭地區帶來高達 103.5mm/hr 之降雨強度，且持續兩小時均超過 100mm/hr 以上，最大日降雨量更打破 200 年頻率年紀錄，如表 2-4 所示。

表 2-4 溪頭雨量站資料統計表

溪頭雨量站	賀伯颱風	桃芝颱風
累積雨量	1,257.5	614.7
最大小時雨量	103.5	107.4
最大 24 小時雨量	1,099.0	614.7
50 頻率年最大日雨量	653.0	653.0
100 頻率年最大日雨量	753.0	753.0

溪頭雨量站	賀伯颱風	桃芝颱風
200 頻率年最大日雨量	857.0	857.0

2、桃芝颱風(90/7/29~90/7/30)

根據中央氣象局所發布之民國 90 年桃芝颱風為一中度颱風，在花蓮秀姑巒溪口登陸，於新竹附近離開本島進入台灣海峽北部。中部地區雖有中央山脈阻擋卻也帶來豐沛雨量，其中溪頭雨量站累積雨量達 614.7 mm，如圖 2-7 所示。

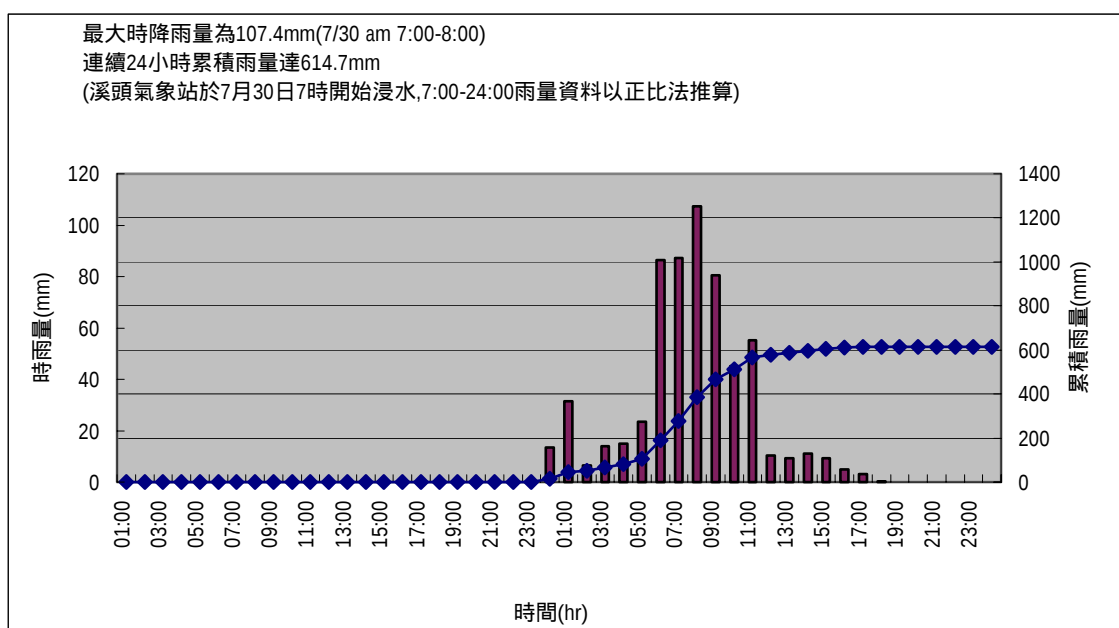


圖 2-7 桃芝颱風期間溪頭雨量站時雨量分佈

根據溪頭雨量站的資料顯示，此次桃芝所帶來的最大時雨量 107.4mm/hr 與賀伯颱風相近，但日降雨量(1,099mm)卻不及賀伯颱風，而溪頭三號坑溪卻在桃芝颱風造成比賀伯颱風更嚴重之土石流災情，河道中構造物皆遭損壞，甚至挾帶約三萬立方公尺土石量堆積於鳳凰賓館旁，上游彎道處雖在賀伯颱風後有使用蛇籠護岸加強，但在桃芝颱風期間亦抵抗不了土石流直進性，在冲破堤岸後挾帶大量土石往西北側放租林地溢流，沖至停車場東南側並掩覆下游住宅，造成 3 人死亡之災情。

探究其原因，可能是九二一(88/9/21)地震使得上游源頭土石鬆動，當桃芝颱風帶來高強度之降雨遂使鬆動之土石產生大崩塌，大量土石與雨水混合宣洩而下，造成桃芝颱風期間之土石流災情相較於賀伯颱風時更為嚴重。

四、地文環境資料蒐集與調查

1、地質

蒐集工業技術研究院能源與資源研究所於民國 79 年 6 月所繪製之南投縣溪頭(北、南)地區環境地質圖(比例尺為 1/5,000)，如圖 2-8、圖 2-9 所示。由圖中可知溪頭地區主要地質構造有鳳凰山斷層通過，斷層東側地層分類主要屬中新世南莊層，上覆桂竹林層，表層多覆蓋 2~4m 厚之崩積層。

三號坑溪集水區下游有大量崩積土層，山腹地帶為南莊層、山腹地帶至鳳凰山稜線為桂竹林層(關刀山砂岩段)，如圖 3-10，而地層岩性整理於表 2-5 中。

表 2-5 溪頭三號坑溪地層岩性與分佈位置表(修改自中華顧問工程司)

位置	地層	岩性
平坦沖積扇	崩積土層	塊石、砂、土
山腹地帶	南莊層	淡灰色細粒砂岩為主， 夾深灰色頁岩
山腹地帶至鳳凰山之稜線	桂竹林層(關刀山砂岩段)	青灰色中粒厚層 塊狀砂岩及泥質砂岩

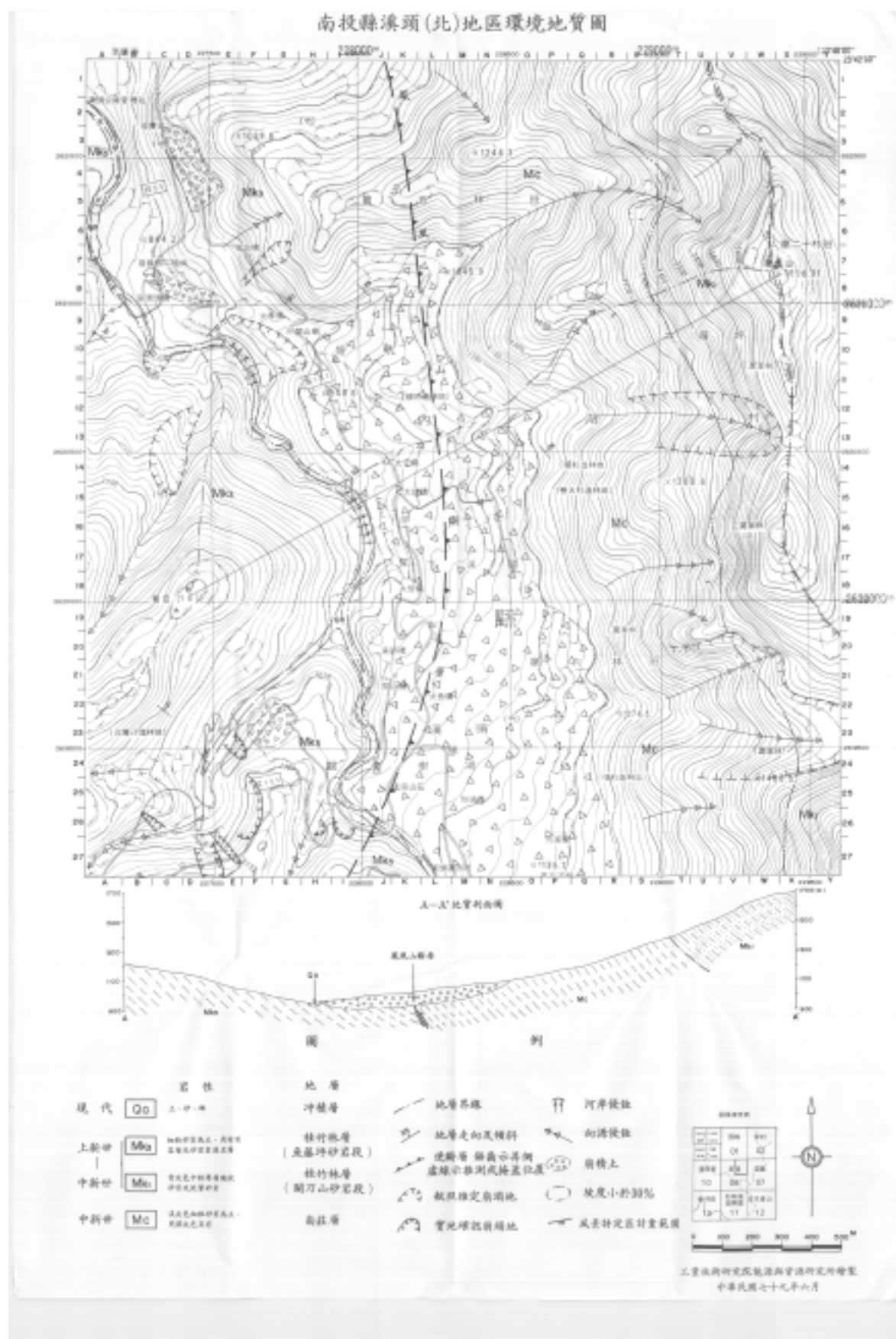


圖 2-8 溪頭(北)地區環境地質圖(能資所，1990)

南投縣溪頭(南)地區環境地質圖

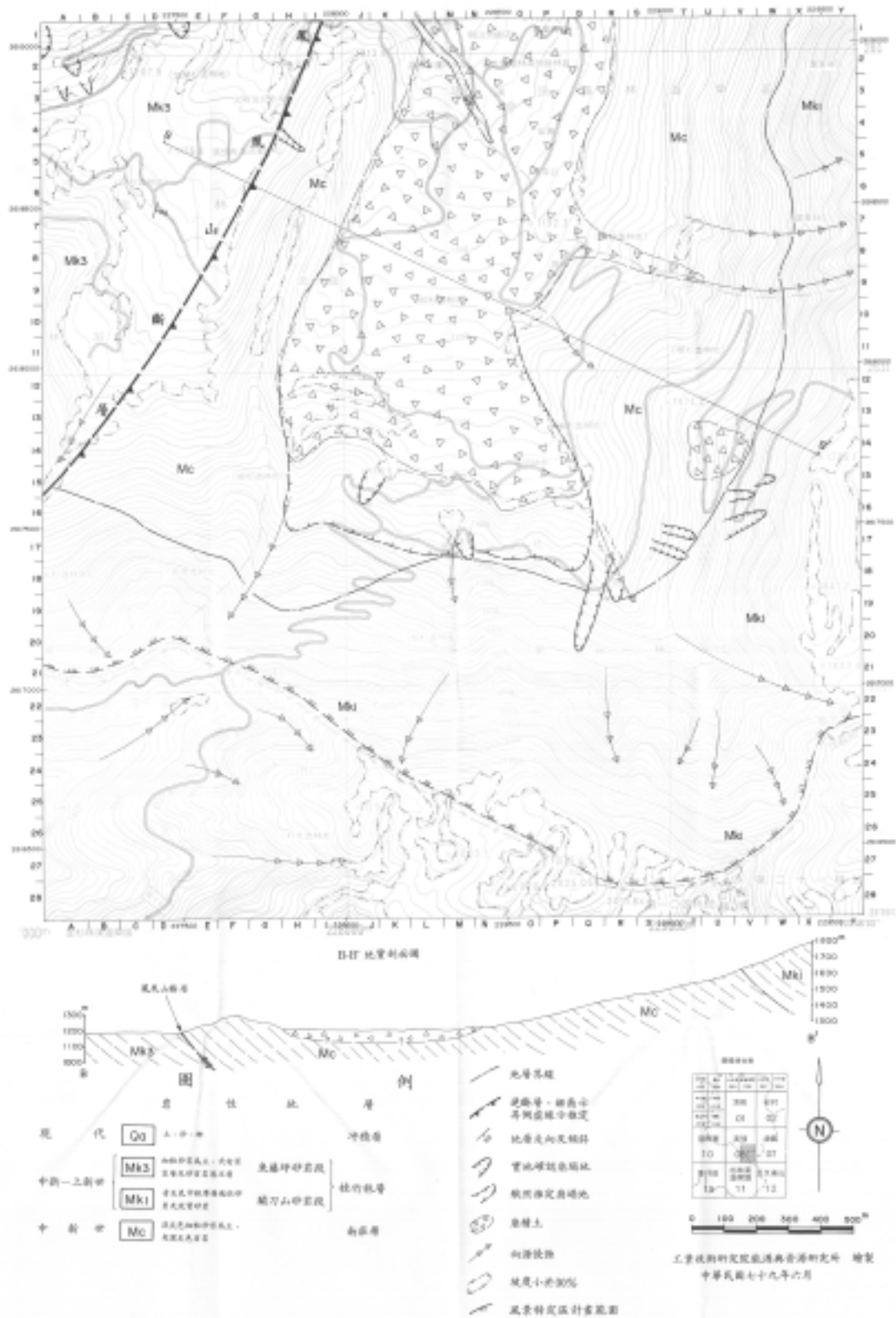


圖 2-9 溪頭(南)地區環境地質圖(能資所，1990)

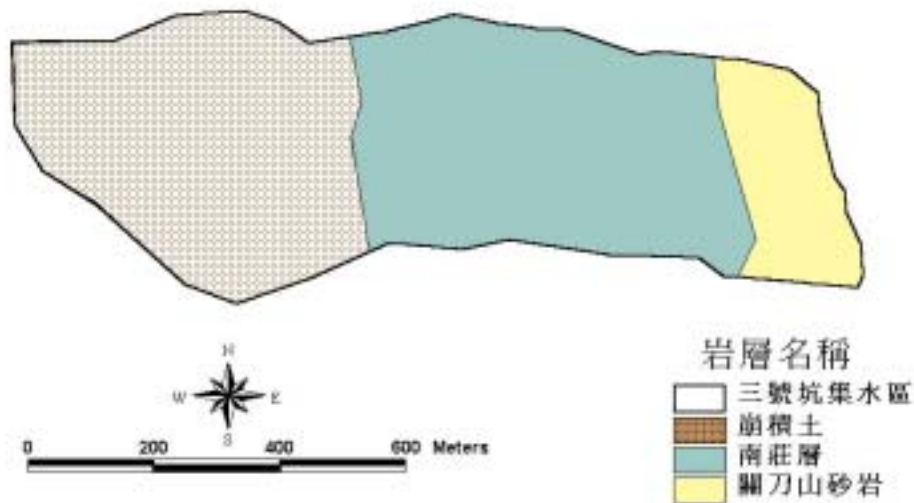


圖 2-10 溪頭三號坑溪地質分佈圖

2、土壤

在土壤特性方面，北勢溪沿岸多屬砂質壤土，在險峻地區，土壤深度較淺，緩斜地區則土層深厚，且存有腐植質。

三號坑溪北坑源頭處，大致為厚層變質砂岩夾薄層頁岩，其表面大致已被植生覆蓋，而南坑源頭處之裸露面大致亦為厚層變質砂岩，其表面大致已被植生覆蓋。

3、土地利用

三號坑溪為溪頭實驗林示範林區，在集水區中、上游多屬林業用地，區內包含針葉樹標本區、竹類標本園區。植被為山坡地之最佳保護層，其地表植生可覆蓋土壤表面，避免受雨滴等外力之直接衝擊，再者植物體本身之根系尚可吸收大量水分，以減低土壤之孔隙水壓，進而提高邊坡之穩定性。而下游地區則有部分住宅用地，如鳳凰賓館、國民旅社及小木屋別墅區等和少部份商業用地。其土地利用如圖 2-11 所示。

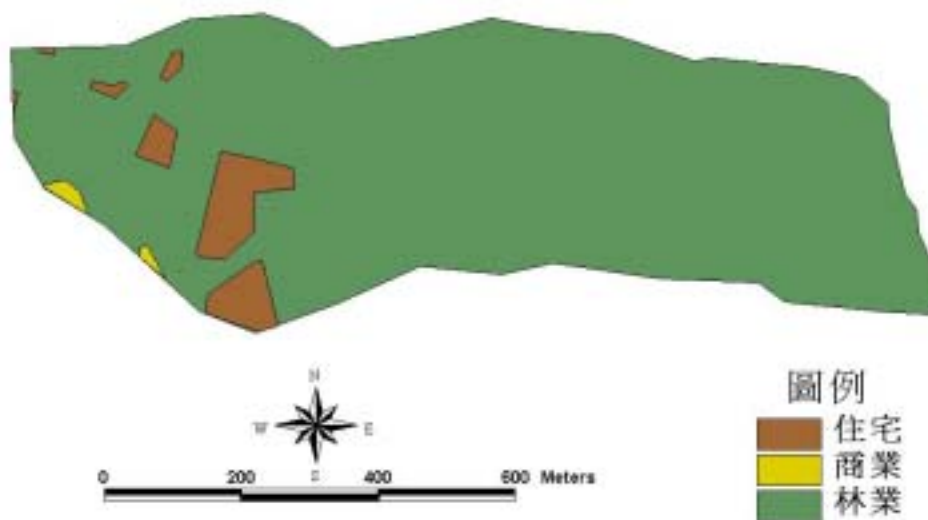


圖 2-11 三號坑溪土地利用圖

4、重建工程

民國 90 年桃芝颱風造成溪頭營林區發生嚴重土石流災害，台大實驗林管理處委託財團法人中華顧問工程司辦理「溪頭森林遊樂區九二一地震後續災害復建工程委託規劃設計監造技術服務工作」，復健工程設施配置如下圖 2-12 所示，主坑下游處設有堤岸高 6 m 之一號沉砂池；沉砂池內設有一複式流槽深 1.5 m，最大高差可達 7.5 m；另外，設有三座壩高 4 m 之梳子壩，其梳子壩間距從上游往下依序為 3 m、2 m、2 m；下游設有排水流路深 3.5 m；溢流支坑設有潛壩 6 座；漿砌石護岸及二號沉砂池高 4 m。



圖 2-12 三號坑工程設施配置圖(摘自吳政貞碩士論文)

五、歷史災害情形

民國 90 年 7 月 30 日之桃芝颱風對溪頭地區帶來極大之災情，使得竹類標本園附近路面、針葉樹標本園部分和國民旅社上方之鍋爐房，均遭土石溢流所掩埋，土石流更沖至下游水路溢流堆積於鳳凰賓館南側，並將通往新大門的排水路堵塞。

三號坑溪本是台大實驗林示範林區的範圍，植生良好，因 921 地震將上游源頭土石震鬆，使得上游產生大面積的崩塌，由 921 災後溪頭航照圖(如圖 2-13)判釋崩塌面積約 $15,147\text{m}^2$ ，大量土石混合高強度之降雨形成破壞力大之土石流宣洩而下，造成三號坑溪河床侵蝕與河岸淘刷特別嚴重，並於高程約 1,410 m 處衝破蛇籠護床工，形成了溢流，並造成潛壩群等構造物嚴重損壞，如圖 2-14。



圖 2-13 溪頭地區九二一災後航照圖(台大實驗林提供)

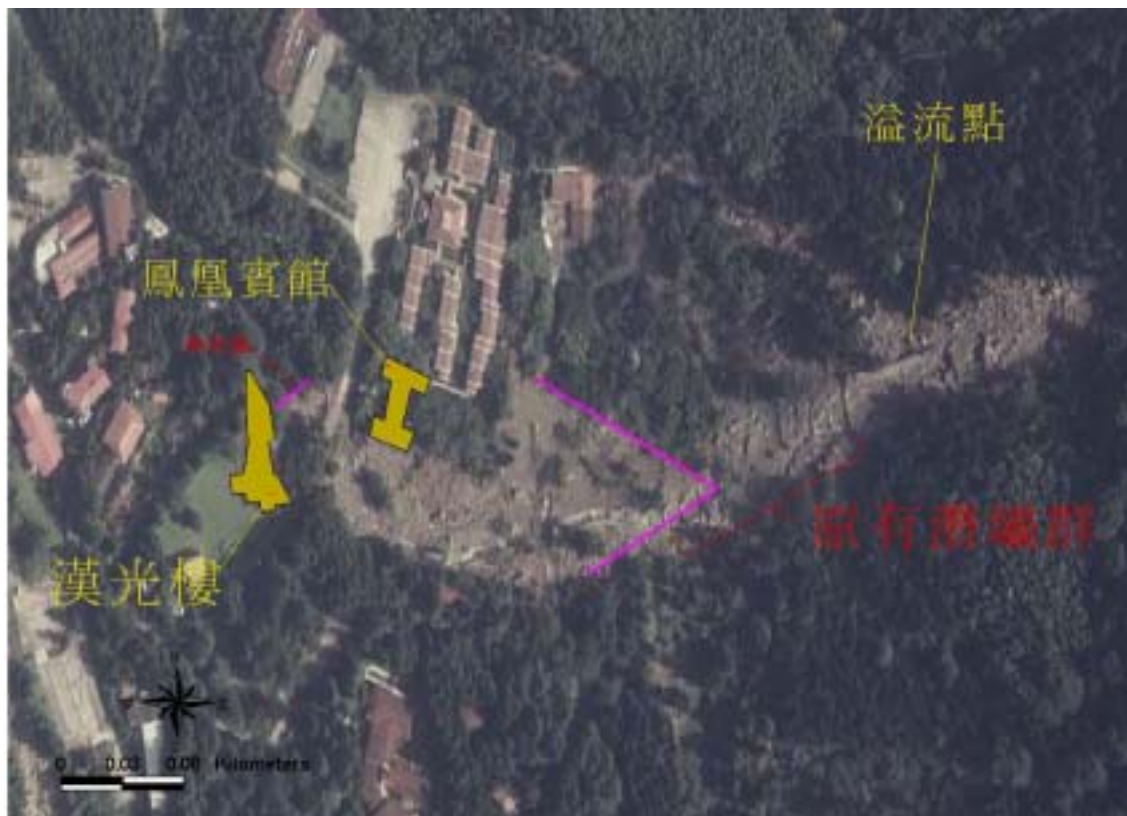


圖 2-14 桃芝颱風災後航照圖(台大實驗林提供)

參、工程構造物對土石流抑制效益之文獻回顧

在所蒐集到之重建工程設施中，可發現大都均採用較符合生態工法施作之工程構造物，將生態保育及生物多樣性納入考量，設計大量之潛壩、梳子壩及漿砌石護岸等。

重建工程設施建構一系列較低矮之潛壩取代原本防砂壩，採用較緩之坡度以暢通水域生態之通路及營造利於動植物生存及兩棲動物活動之空間；設置梳子壩可將流動或滑動材質粒徑較大者攔阻，細顆粒之泥砂得以流出，維持下游河道平衡，具調節輸砂之功能，平時可讓水生動物亦可通行其間，除了攔阻作用外，梳子壩亦可減緩河床坡度，減低土石流流速，降低沖刷力，保護坡腳等功能，且壩體上下游兩側若加以採用漿砌塊石護岸施做，則可增加表面粗糙度及有利於植物生長。

有鑑於重建工程構造物採用符合生態工法精神之梳子壩施作，實有必要針對梳子壩工程構造物對土石流抑制效益做一分析探討，因此，本計畫將目前國內、外各專家學者所做之梳子壩撞擊力及貯砂效率研究進行蒐集工作。

一、梳子壩撞擊力

有關土石流撞擊力係指壩體上游面遭土石流直接撞擊之力量，分為流體衝擊力和巨礫衝擊力，從過去至今日已有許多專家學者對於此兩種撞擊力進行一系列相關研究與討論，如：日置象一郎、大手桂二(1971)、水山高久(1979)、山口伊佐夫(1985)、仲野公章、右近則男(1986)、游繁結(1990)、宋義達(1990)、林弘群(1994)、連惠邦(2002)及賴紹文(2005)等學者。

其中，賴紹文(2005)依據彈性體碰撞理論為基礎，假設巨礫與梳子壩之衝擊屬於彈性體碰撞、梳子壩質量遠大於巨礫質量等條件下，推導出梳子壩受土石流衝擊力理論式，但理論衝擊力公式是根據彈性體碰撞理論而得，彈性體碰撞理論是在兩物體在空氣中進行碰撞且無能量損失下所成立，但實際土石流在流動時，石塊彼此會互相碰撞導致能量損失且土石流為泥、石塊與水之混合物，石頭碰撞時並非在空氣中，而是在水體中和水混合在一起撞向壩體，因此，再藉由渠槽試驗進行梳子壩撞擊力試驗，其將壓力計裝置於梳子壩模型表面，於上游混合土砂使之形成土石流體狀後衝向梳子壩模型，利用壓力計量測試驗過程中梳子壩實際

承受之土石流撞擊力，用以修正其所推導之衝擊力理論式，以求出更符合實際梳子壩受土石流巨礫撞擊力公式。賴紹文(2005)所修正之土石流巨礫撞擊力公式如下：

$$F = 30.8U^{1.2}R^2 \quad (3-1)$$

式中， P 為衝擊力(ton)

U 為巨礫對壩體之相對速度(m/s)

R 為巨礫之半徑(m)

二、梳子壩貯砂效率

渡邊正幸(1980)首先提出抑制土石流設施之優劣評估方式，可由以下四項基本功能決定之：

- a. 具有減少土石流之尖峰流量；
- b. 延遲土石流到達時間；
- c. 減少土石流之總流出量；
- d. 將大礫石與土石流分離。

其採用各種形式之透過性防砂壩進行試驗，試驗結果得到梳子壩開口寬度(b)會影響土石流之貯砂效率，當相對開口寬度 $b/D_{\max} < 2.0$ ($D_{\max}$ =最大泥砂顆粒粒徑)時，梳子壩可降低土石尖峰流出土砂量 50% 以上。

池谷 浩(1980)為探討洪水過程中梳子壩對土砂之調節效果，進行梳子壩渠槽試驗，得到梳子壩相對開口寬度 $b/D_{\max} = 1.5$ 時，壩體對上游來砂具有閉塞作用，可攔阻砂石自由穿過壩體，且開口密度 $\Sigma b/B = 0.2 \sim 0.6$ 時，則梳子壩對土砂調節能力較一般防砂壩約高 1.2 倍。

水山高久、小橋澄治、水野秀明(1995)認為透過性防砂壩對土石流及一般挾砂水流尖峰土砂量之調節效率，除了與相對寬度有關外，還受流體之泥砂體積濃度影響，故經由渠槽試驗建立尖峰土砂量減少率之表達式：

$$P_Q = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} = 1 - 0.11 \cdot \left(\frac{L_{\min}}{d_x} - 1 \right)^{0.36} \cdot C_{da}^{-0.93} \quad (3-2)$$

式中： Q_a 為過壩前土石流之尖峰土砂流量

Q_b 為過壩後之尖峰土砂流量

$L_{\min}$ 為格子壩最小間距

d_x 為代表粒徑(= D_{95})

C_{da} 為臨前土石流泥砂體積濃度

林裕益、江永哲(1988)透過渠槽之定性試驗，探討梳子壩對土石流之防制效果，並按照渡邊正幸所提出之四個基本機能進行分析，結果證實透過性防砂壩確有防治土石流之功能，並從梳子壩渠槽試驗結果提出一經驗公式，即：

$$\frac{Q_b}{Q_w} = 1.608 + 0.1713 \frac{b}{D_{\max}} \quad (3-3)$$

式中： Q_w 為上游供水流量

$b/D_{\max}$ 為相對開口寬度

Q_b 為土石流流出梳子壩之流量

連惠邦、柴鈺武、林忠義(1998)經由固液兩相質量守恒理論及渠槽試驗方式，建立了土砂流出率及泥砂體積濃度比作為梳子壩防治土石流之指標參數，以表徵土石流經過梳子壩後所攜帶或貯存土砂之關係：

$$P = 1 - 0.9 \frac{R(1 - C_{da})}{1 - R \cdot C_{da}} \quad (3-4)$$

式中： P 為貯砂率

R 為土石流流過壩前和後之泥砂體積濃度比

C_{da} 為過壩前流動中土石流之泥砂體積濃度

根據渠槽實驗，連惠邦等認為相對寬度為梳子壩各柱間之寬度(b)與土石流粒徑組成之特徵粒徑之比，而從其實驗結果發現若特徵粒徑以平均粒徑(D_m)做為代表更能反映出對於泥砂濃度比之關係。另外除了相對開度外，發現開度密度($\Sigma b/B$)亦屬梳子壩影響泥砂濃度比之重要因子，並推導出其關係式：

$$R = 0.144 \cdot \ln(b / D_m) + 1.06 \cdot \ln(\Sigma b / B) - 0.797 \quad (3-5)$$

式中： Σb 為梳子壩開口寬度之總和

B 為溪流寬度

柴鈺武(1999)由土石流質量守恆定理，建構出土石流臨前泥砂體積濃度、泥砂體積濃度比及土砂流出率之關係式。

$$G = \lambda \frac{R (1 - C_{da})}{1 - R \cdot C_{da}} \quad (3-6)$$

式中：G 為土砂流出率

R 為土石流流過壩前和後之泥砂體積濃度比

C_{da} 為過壩前流動中土石流之泥砂體積濃度

C_{db} 為過壩後水砂混合流體之泥砂體積濃度

λ 為水體流出比(0.95)

根據渠槽實驗可得：

$$R = 0.5 \cdot \ln(b / D_m) - 0.17 \cdot \ln(\sum b / B) - 0.26 \quad (3-7)$$

式中： $\sum b$ 為梳子壩開口寬度之總和

B 為溪流寬度

上述所論述之梳子壩貯砂模式雖然對於梳子壩貯砂效率上提供了一個設計方法，唯其探討之參數(相對開度、相對密度)僅與幾何因子相關，對於濃度、坡度或流量等亦會造成貯砂效率改變之因子並未加以討論，曾耀生(2005)加入濃度、坡度及流量等參數探討梳子壩貯砂效率之變化，藉由因次分析結果配合本身渠槽試驗與前人研究資料分析梳子壩之貯砂功能之成效，推導出一更適切之梳子壩貯砂率模式：

$$P = 2.23 \cdot S^{0.07} \cdot C_d^{0.09} \cdot (b / D_{50})^{-0.91} \cdot (\sum b / B)^{-0.45} \cdot \left(\frac{q}{\sqrt{g D_{50}^3}} \right)^{-0.23} \cdot \sigma^{0.25} \quad (3-8)$$

肆、二維土石流境況模擬模式(FLO-2D)

本研究選用二維數值模式 FLO-2D 模擬土石流之流況，檢討未興建防災工程及興建防災工程後之土石流淹沒範圍，找出興建防災工程後即不再被土石流所淹沒之保全對象，進而推求出防災工程之效益。

一、FLO-2D 模式原理

FLO-2D 為二維土石流境況模擬模式，此模式適用於都市淹水、洪水平原管理、工程風險設計、不規則形狀河道水理演算、橋樑涵洞水理演算，可以處理漫地流、都市水文，泥流及土石流。以 FLO-2D 模式模擬二維土石流，可求解土石流 x 軸方向之平均速度 u ，y 軸方向之平均速度 v ，和水深 h 等變數。上述 u 、 v 及 h 等三個變數需要三個控制方程式才能求解，分別為：

1、連續方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hV_x)}{\partial x} + \frac{\partial (hV_y)}{\partial y} = i \quad (4-1)$$

其中： i 為賸餘降雨強度(Excess rainfall intensity)

t 為時間

2、二維運動方程式(動力波方程式)

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right) - \frac{V_y}{g} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} \right) \quad (4-2)$$

$$S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right) - \frac{V_x}{g} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} \right) \quad (4-3)$$

其中： S_{0x} 、 S_{0y} 為床底坡降

S_{fx} ， S_{fy} 為摩擦坡降

g 為重力加速度

當省略掉壓力梯度項時，式(4-2)和式(4-3)就稱為動量方程式中之運動波方程式(Kinematic wave equation)。當右邊最後三項同時省略時，式(4-2)和式(4-3)就成為擴散波方程式(Diffusive wave equation)。O'Brien 等人(1998)提到 Henderson 在 1966 年曾藉著模擬陡急沖淤河道上發生陡升之水文歷線時，發現除緩坡外，在省略掉加速度項後，運動波方程式還可以滿足陡坡道之洪水波計算，根據美國陸軍兵工團研究指出(表 4-1)，沖積扇堆積區之模擬適合以擴散波方程式模擬。

表 4-1 演算方程式選擇表

物理過程	建議演算方程式
陡坡沖積扇、集水區或洪水平原	擴散波、運動波
緩坡之洪水平原、受到流量歷線影響之退水地區、溢頂水流	動力波、擴散波
底床坡度 $> 0.2\%$ 和 $TSv/d > 171$	動力波、擴散波、運動波
底床坡度 $0.04\% \sim 0.2\%$ 和 $TSv/d < 171$	動力波、擴散波
底床坡度 $< 0.04\%$ 和 $TS(g/d)0.5 > 30$	動力波、擴散波
底床坡度 $< 0.04\%$ 和 $TS(g/d)0.5 < 30$	動力波
T：流量歷線上升段時間；S：底床坡度；v：平均流速；d：平均水深；g：重力加速度	

3、流變方程式

O'Brien 在 1986 年同樣以賓漢模式設計了一維集水區渠道模式，於高含砂水流、泥流和土石流中，總應力共包含凝聚降伏應力 τ_c (Cohesive yield stress)、莫爾庫倫剪應力 τ_{mc} (Mohr-Coulomb shear stress)、粘滯剪應力 τ_v (Viscous shear stress)、紊流剪應力 τ_t (Turbulent shear stress) 和離散剪應力 τ_d (Dispersive shear stress) 等五項應力。

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (4-4)$$

1985 年，O'Brien 和 Julien 改寫式(4-4)為：

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{du}{dy} \right) + C \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (4-5)$$

其中，降伏剪應力， τ_y ，為

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \quad (4-6)$$

$$C = \rho_m \ell^2 + a_i \rho_m \left[\left(\frac{C^*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right] d_s^2 \quad (4-7)$$

式中： η 為動力粘滯係數(Dynamic viscosity)

ρ_m 為土石混合體之質量密度

ℓ 為 Prandtl 混合長度

a_i 為經驗係數(=0.01)

C_s 為最大靜體積濃度(Maximum static volume concentration)

C_v 為沉澱體積濃度

d_s 為沉澱粒徑

式(4-4)也可以改寫成坡度形式：

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (4-8)$$

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (4-9)$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (4-10)$$

其中： S_y 為降伏坡度

S_v 為黏滯坡度

S_{td} 為紊流離散坡度

γ_m 為砂比重

K 為層流阻力係數

η 為黏滯阻力係數

n 為曼寧粗糙係數

4、FLO-2D 之限制與假設

FLO-2D 之限制條件為：(1)穩定流、(2)靜水壓力分佈、(3)差分時間之間隔內為穩態流(steady flow)、(4)規則渠道斷面形狀及渠道糙度、(5)一個網格點只有一個高程及糙度及(6)定床模式(rigid bed model)，由於定床模式之限制，所以 FLO-2D 模式之假設前提為泥砂之沖刷及淤積動態平衡。

二、FLO-2D 模式相關國內、外參考文獻

近年來，FLO-2D 模式漸被應用在國、內外土石流境況模擬之工作上，此模式剛開始是由美國聯邦緊急事務管理總署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)所協助發展，目前 FEMA 仍沿用此模式進行洪水及土石流災害模

擬。

國外學者 O'Brien and Julien (1993)以 FLO-2D 模擬美國 1983 年發生之 Rudd Creek 土石流，其模擬方法假設下游土石方為洪峰時自上游挾帶而來，模擬結果與實際值對照，在扇形頂點處之模擬最大深度、淹沒範圍前緣之深度及流速都與實際狀況吻合。

另外，Hüble and Steinwendtner (2001)以 FLO-2D 模擬發生於阿爾卑斯山區 Moschergraben 與 Wartschenbach 兩地之土石流，經由實驗求取流變參數，再由現地測量之堆積土石方體積除以總清水流量以求得模擬體積濃度，發現此模式在地形資料及現地流變參數準確之情形下，將可獲得與實際情況相符之結果。

在國內方面，林美聆(2000)以民國 85 年 7 月 31 日賀伯颱風所引發土石流災害之和社一號野溪為主要研究對象，利用 FLO-2D 模式模擬一號野溪，並以風災後之航照圖進行模式之驗證，發現模擬結果與實際狀況大致符合。

蘇立明(2002)藉由不同坡度渠槽作 FLO-2D 模式之敏感度分析，針對模式中之土石流演算機制，選定渠槽坡度、體積濃度、降伏剪應力、黏滯阻力係數及泥砂比重等五項參數，分析結果發現坡度及體積濃度為 FLO-2D 土石流演算機制最重要之兩參數，並利用 FLO-2D 模式模擬民國 90 年 7 月 30 日桃芝颱風所造成之花蓮縣光復鄉大興村土石流災害，計算出大興集水區內各網格點之可能堆積深度及土石流流速分佈，將模擬結果整合地理資訊系統(GIS)軟體中，進行災害規模及災損之推估。

蔡誌崇(2004)利用 FLO-2D 模式模擬民國 85 年 7 月 31 日賀伯颱風雨量造成信義鄉豐丘村之土石流災害，並依照航空照片檢驗模擬結果，修正模式參數，使模擬結果更加符合實際情況，並藉由治理與管理措施之探討做為災前疏散避難規劃之參考依據。

伍、現地踏勘與調查

應用 FLO-2D 模式模擬土石流之流況，由於不同之參數值輸入模式中皆會產生不同之結果，故在執行模式之前，需要取得模式所需之各地文、水文參數值。

一、現地測量

在地文參數方面，FLO-2D 模式最基本之需要為數值地形模型(DTM)資料，本研究蒐集林務局農林航測所五千分之一像片基本圖(民國 84 年)和國立中央大學太空及遙測研究中心製作之 DTM(民國 69 年)等做為重建工程前之地形資料；並進行重建工程完工後之細部地形測量工作，以獲得更新之地形資料，如下圖 5-1、照片 5-1 所示，再建置為 DTM 資料輸入 FLO-2D 模式中，方可進行興建防災工程前後之土石流淹沒範圍之分析比較。

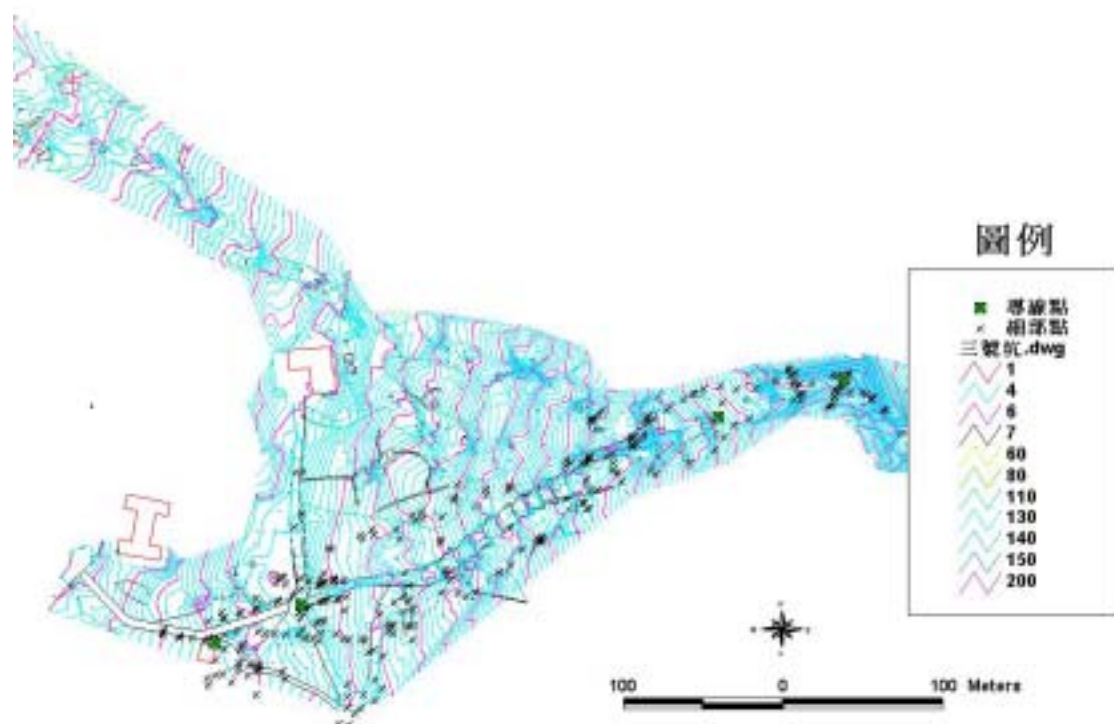


圖 5-1 三號坑溪現地測量點之分佈圖



照片 5-1 三號坑溪現地照片

二、現地泥砂粒徑調查

FLO-2D 模式所需之泥砂資料為：曼寧 n 值、土砂比重、土砂級別指數、 D_{50} 、漫地流層流指數、黏滯性阻力係數(η)、黏滯性降伏應力(τ_y)等。曼寧 n 值、土砂比重、土砂級別指數、 D_{50} 需由泥砂調查得知；漫地流層流指數則依照 FLO-2D 手冊之建議值；黏滯性阻力係數(η)、黏滯性降伏應力(τ_y)等流變參數在台灣較少有學者從事此方面研究，故採用詹錢登(1997)於南投縣出水溪採樣，進行室內流變試驗之數據。

為充分瞭解三號坑溪土石材料之特性，需於該研究區進行現地河床質粒徑調查分析，以求得土石材料之粒徑分佈曲線及物理特性，作為後續模擬之參考依據。因台大實驗林管理處委託財團法人中華顧問工程司辦理「溪頭森林遊樂區九二一地震後續災害復建工程委託規劃設計監造技術服務工作」計畫，曾對三號坑溪地區進行現地採樣孔粒徑調查分析、表面粒徑調查分析及現地密度試驗，故蒐集其相關試驗資料與報告，做為 FLO-2D 模擬之參考，三號坑溪現地採樣孔位置如圖 5-2，採樣孔粒徑分佈資料如表 5-1，採樣孔粒徑分佈如圖 5-3；三號坑溪現

地表面粒徑調查斷面位置如圖 5-4，表面粒徑調查結果如表 5-2，南北坑交會處表面粒徑分佈如圖 5-5，南坑上游崩場地附近表面粒徑分佈如圖 5-6，曼寧 n 值計算如表 5-3，現地密度試驗結果如表 5-4 所示。



圖 5-2 三號坑溪採樣孔位置圖

表 5-1 三號坑溪採樣孔粒徑分佈資料(整理自中華顧問工程司，2002)

採樣點	代表粒徑						最大粒徑	平均粒徑
	D ₂₀ (mm)	D ₃₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₅ (mm)	D ₇₅ (mm)	D ₉₀ (mm)	D _{max} (mm)	D _m (mm)
下游處	1.12	24.08	51.14	121.15	154.67	168.67	178	74.94

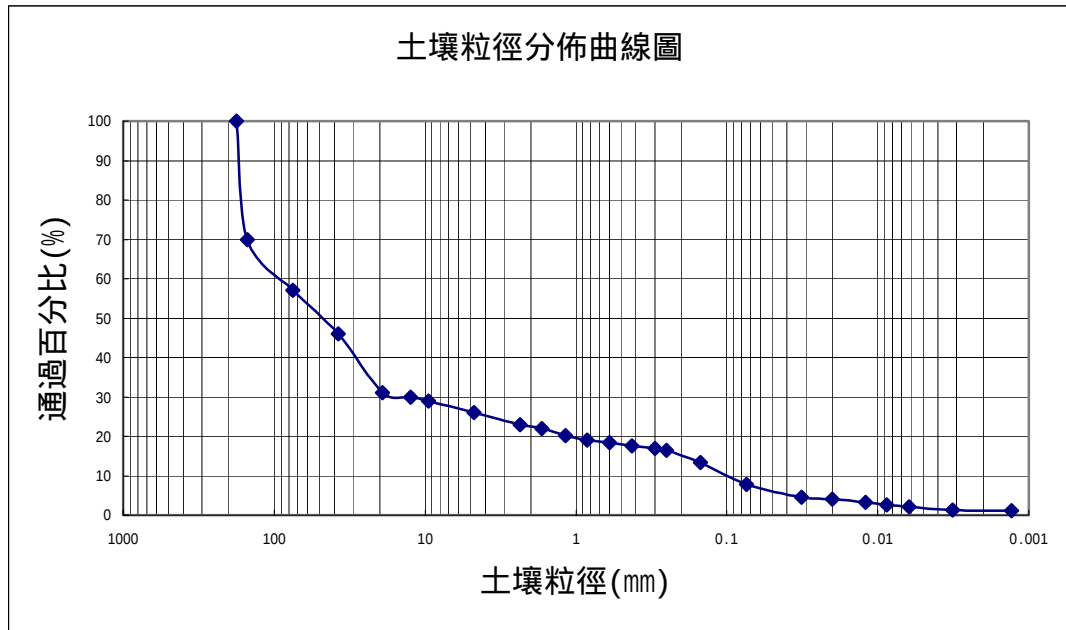


圖 5-3 三號坑溪採樣孔粒徑分佈曲線圖(中華顧問工程司，2002)

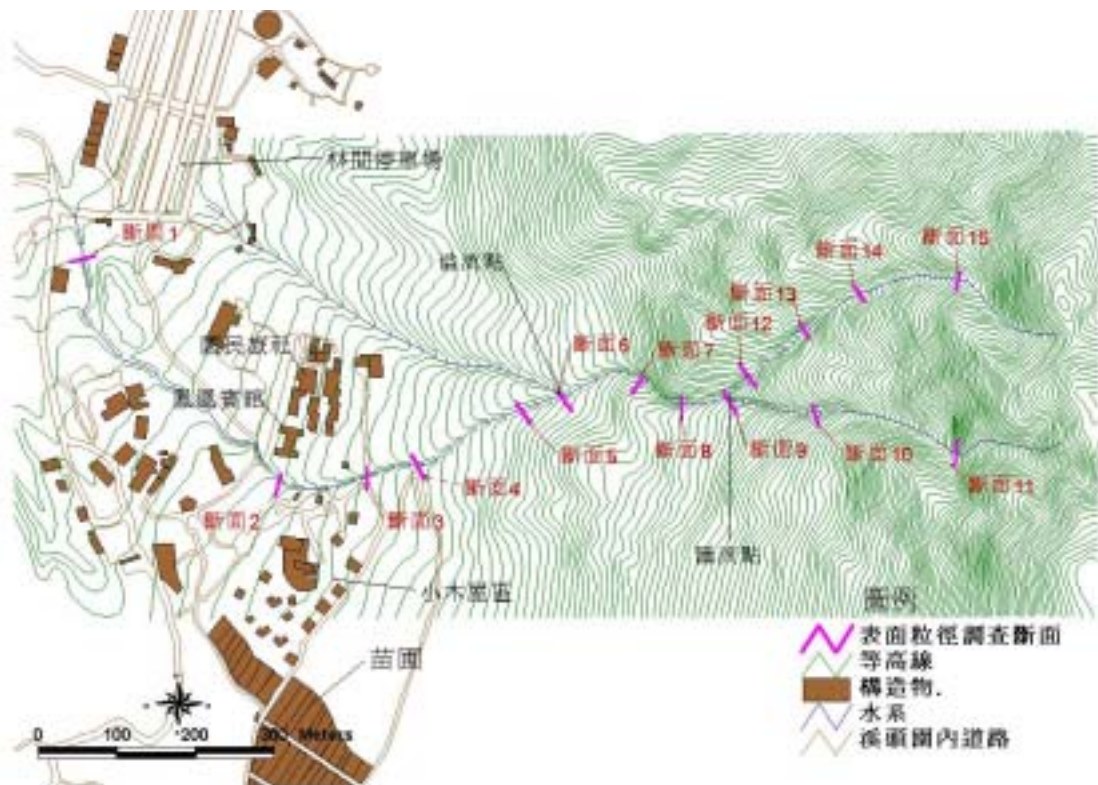
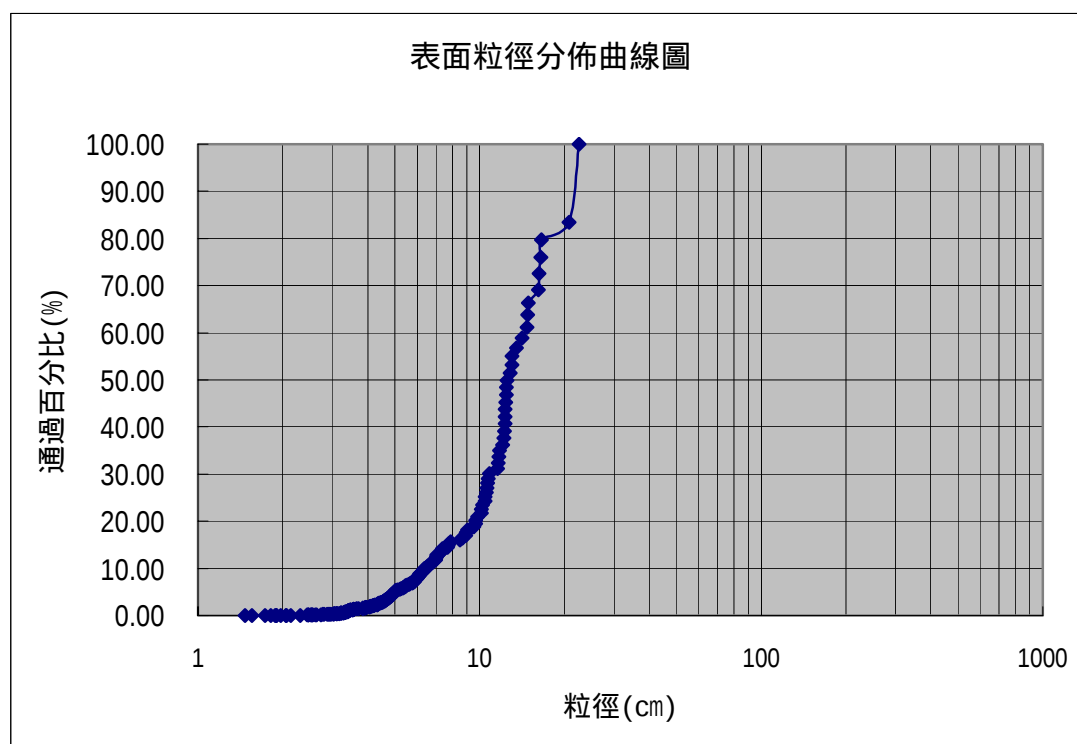


圖 5-4 三號坑溪表面粒徑調查断面位置圖

表 5-2 表面粒徑調查結果

採樣點位置	代表粒徑			最大粒徑	平均粒徑
	D ₆₅ (cm)	D ₇₅ (cm)	D ₉₀ (cm)	D _{max} (cm)	D _m (cm)
南北坑交會點	14.86	16.45	21.51	22.53	13.56
上游崩塌地	32.05	34.36	37.81	40.11	27.02



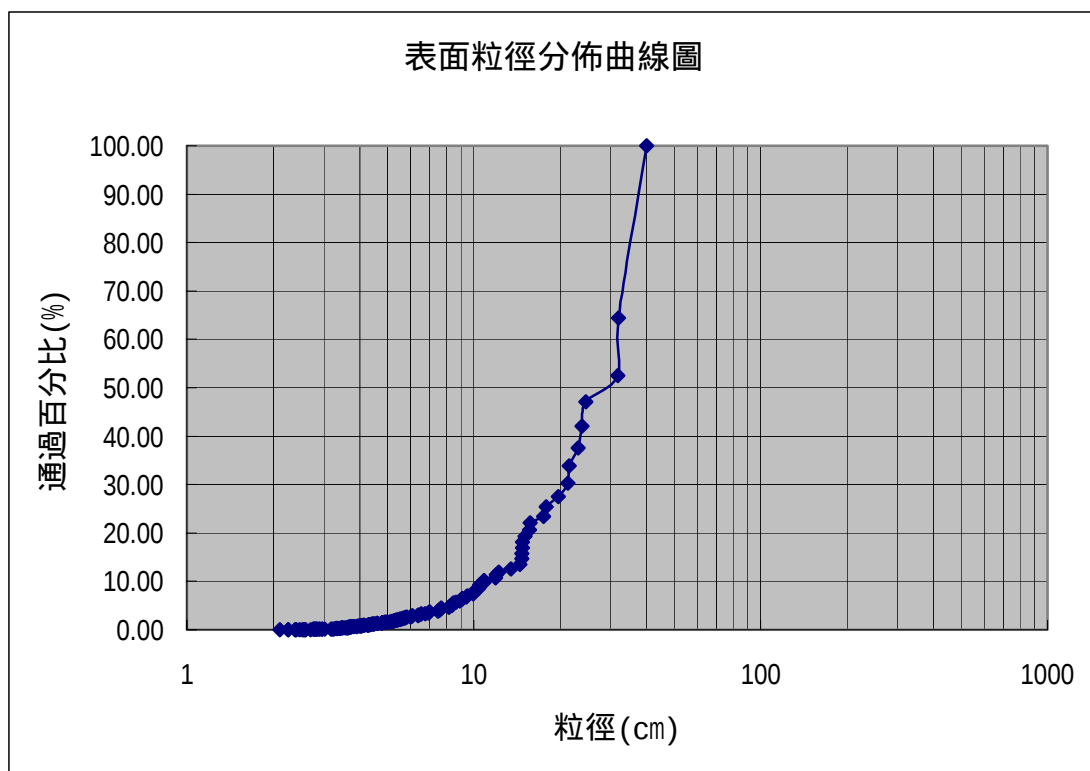


圖 5-6 南坑上游崩塌地附近表面粒徑分佈曲線圖

表 5-3 曼寧 n 值分析結果

專家學者	曼寧 n 值					平均值
	Einstein	Lane	Mayer&Peter	何黃氏	Strickler	
引用之公式	$0.0132D_{65}^{1/6}$	$0.015D_{75}^{1/6}$	$0.01216D_{90}^{1/6}$	$D_{90}^{1/6}/16$	$0.015D_m^{1/6}$	
南北坑交會處	0.0207	0.0239	0.0203	0.1042	0.0232	0.0385
上游崩塌地	0.0235	0.0270	0.0223	0.1145	0.0260	0.0427

表 5-4 三號坑溪現地密度分析結果(整理自中華顧問工程司，2002)

合計土樣總重(kg)	(A)	8,051.6
注水量(L)	(B)	6,250
現地密度(kg/L)	(A)÷(B)	1.2883

三、水文參數

FLO-2D 模式所需之水文參數為模擬颱風期間之雨量資料及流量歷線資料兩種，雨量資料則以蒐集溪頭營林區鳳凰山瞭望臺旁之溪頭氣象站雨量資料為主；另外，FLO-2D 模式需給定入流歷線，應用單位流量歷線乘以降雨組體圖之雨量即可求得流量歷線，本研究區域境內無水位流量站之設置，故蒐集同屬濁水溪流

域之下游龍神橋水位流量站之流量資料，龍神橋水位流量站之基本資料如表 5-5 所示，單位流量歷線資料，如圖 5-7。

表 5-5 龍神橋水位流量站資料表(中央氣象局)

測站名稱	站號	經度	海拔高度 (m)	城市	地址	設站日期
		緯度				
龍神橋水位流量站	C1H160	120°51' 49" E	296	南投縣	水里鄉崁頂村(臺 21 線龍神橋附近)	1993/05
		23°46' 53" N				

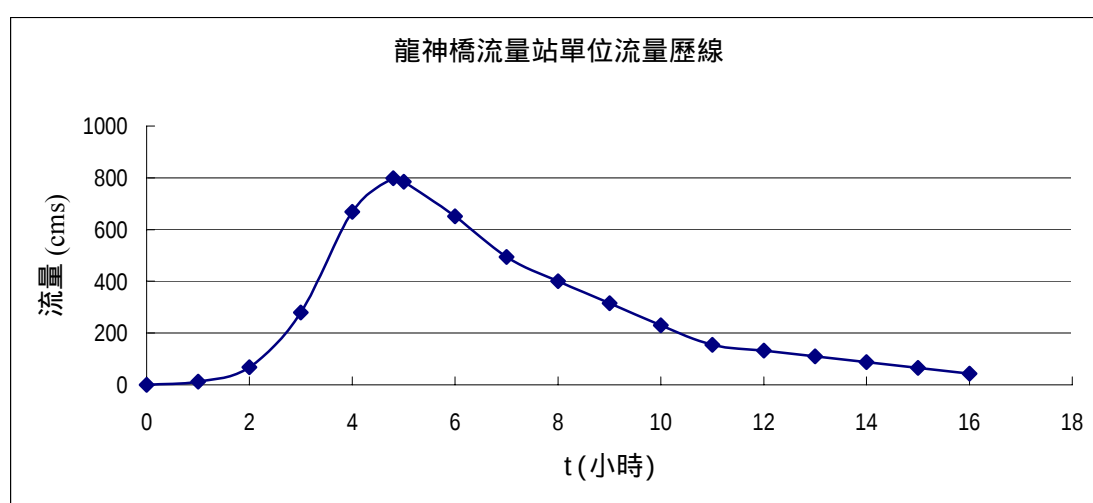


圖 5-7 龍神橋流量站單位流量歷線圖(中央氣象局)

陸、結論與建議

為探討重建工程抑制土石流災害之效益，本研究利用二維數值模式 FLO-2D 模擬土石流之流況，蒐集研究區域中各項 FLO-2D 所需之地文、水文資料，配合現地修正模式所需之參數，再模擬未興建防災工程及興建防災工程後之土石流淹沒範圍，比較其結果，找出興建防災工程後即不再被土石流所淹沒之保全對象，依照農委會「土石流災害救助種類及標準」，轉換政府實際補償之金額，此金額之總和即是防災工程之效益。

本研究研擬分析下列三種災損所產生之工程經濟效益：

1、農業災損

本研究初步將淹沒區域中之「水田」、「旱田」、「花圃」、「檳榔」、「香蕉園」、「茶園」、「鳳梨」及「果園」等各坡地農業土地利用之可能類別列為農業損失，依農委會「農田及魚塭受災流失、埋沒、海水倒灌救濟要點」規定：農田流失一公頃救濟新臺幣十萬元。

2、養殖漁業災損

本研究初步將淹沒區域中之「水池」列為養殖漁業損失，由於 1/5000 航照圖，將土地利用圖標示為「水池」處列為魚池，故此區域之「水池」應為魚塢，本研究依農委會「農田及魚塢受災流失、埋沒、海水倒灌救濟要點」規定：流失一公頃救濟新台幣十萬元。

3、住屋毀損安遷救助

本研究初步在住屋毀損補助方面，以 1/5000 航照圖配合現場判釋淹沒區域建物損毀之棟數，初步依農委會「土石流災害救助種類及標準」第六條所規定之「安遷救助」金額：「住屋毀損達不堪居住程度，依受災戶戶內人口數發放，一人以新台幣二萬元計算，最高以十萬元為限。」，依照內政部之規定以每戶四人作為安遷救助計算之標準，所以以每戶四人及新台幣八萬元估計之。

為求得上述三類災損之分佈位置，本研究欲建立研究區域之保全對象資料庫，除可供本身計畫所需之外，還可和其他子計畫建立之資料庫整合，以方便資料之流通與應用。

除了探討防災工程因減少土石流直接災損所得效益外，本研究未來將進行下列四個部分之研究：第一部份進行集水區整體治理工程對抑制土石流效益之評估，其研究尺度為一個完整之土石流發生集水區，探討興建在土石流野溪集水區之源頭處理、崩落地處理、梳子壩、護岸、階段性壩等工程，利用 FLO-2D 模擬土石流之流況，探討重建工程之工程配置、數量對抑制土石流之整體效益。第二部分主要探討不同之土石流抑制工法（如：梳子壩、階段性潛壩及源頭處理等工程）對土石流抑制之效益，其研究之尺度較小，探討單一構造物之設計型式對消滅土石流災害之功能。第三部分研究不同之抑制工法對當地生態之影響，探討工程施作後，會否幫助還是破壞當地生態之復育。第四部分則是研究不同土石流抑制工法維護及管理上之問題，比較各種不同構造物日後維護之成本。

最後，本研究期能提出一工程構造物抑制土石流災害之效益評估方法，檢討當地工程設計之功能及其安全性是否合乎其原先設計之要求，並根據評估結果，提出結論。

參考文獻

- 1.Hüble, J., and H. Steinwendtner. (2000) "Estimation of Rheological Properties of Viscous Debris Flow Using a Belt Conveyor" Phys. Chem. Earth (B), 25(9), 877-887.
- 2.Hüble, J., and H. Steinwendtner. (2001) "Two-Dimensional Simulation of Two Viscous debris Flows in Austria" Phys. Chem. Earth (C), 26(9), 639-644.

- 3.O'Brien, J. S., and P. Y. Julien. (1988) "Laboratory Analysis of Mudflow Properties." Journal of Hydraulic Engineering, 114(8), 877-887.
- 4.John Y. D. Liou. (2003) "Presentation of Special Natural Hazards and Mitigation Measures" 中美土石流防災政策體系與科技發展雙邊講習會。
- 5.吳政貞(2003),「土石流流況數值分析 - 以溪頭為例」, 國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 6.林美聆、陳天健(2000),「陳有蘭溪流域土石流溪流潛勢分析與境況模擬方法建立-出水溪、豐丘及和社一號野溪」, 防災國家行科技計畫辦公室。
- 7.胡聖賢(2003),「溪頭三號坑溪土石流堆積特性之調查與分析」, 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
- 8.財團法人中華顧問工程司(2002),「溪頭森林遊樂區九二一地震後續災害復建工程委託規劃設計監造技術服務工作」, 台大實驗林管理處。
- 9.國立台灣大學生物環境系統工程學系(2002),「土石流災害境況模擬、災害規模及災損之推估範例」, 行政院農業委員會水土保持局。
- 10.黃宏斌 (1997),「土石流流速之研究」, 第一屆土石流研討會論文集, pp. 171-178。
- 11.曾耀生(2005),「土石流通過梳子壩之水理特性研究」, 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
- 12.蔡誌崇(2004),「FLO-2D 模式應用於土石流災害管理之研究」, 國立中興大學水土保持學研究所碩士論文。
- 13.賴紹文(2005),「含砂水流之梳子壩撞擊力試驗分析」, 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
- 14.蘇立明(2003),「二維數值模式應用於土石流災害模擬之研究」, 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。

計畫成果自評

本計畫第一年主要工作為：(1)現地踏勘瞭解現況並取得模式所需之地文、水文參數。(2)建立研究區域之基本水文、水文、保全對象、歷史災害及重建工程等資料庫。(3)蒐集各工程構造物對土石流抑制效果之國內、外文獻。(4)蒐集

土石流境況模擬之國內、外文獻等。本研究進度與原計畫相符，並達成預期目標，完成上述各項工作，詳細之內容已於報告書中陳述。

第一年之工作主要是建立研究區域之基本資料庫，建立研究區域中之基本水文、水文、保全對象、歷史災害及重建工程等資料，還不足以發表在學術期刊中，未來若配合二維數值模式 FLO-2D 模擬土石流之流況，檢討未興建防災工程及興建防災工程後之土石流淹沒範圍，找出興建防災工程後即不再被土石流所淹沒之保全對象，進而推求出防災工程之效益，並整合提出一工程構造物抑制土石流災害之效益評估方法，此將會是一極有價值之研究。