地工技術，第 110 期（民國 95 年 12 月）第 97-108 頁
Sino-Geotechnics, No.110 (Dec., 2006) PP.97-108

土石流災害整治工程設計探討
－以溪頭自然教育園區為例

陳福勝　吳文隆　楊智堯
財團法人中華顧問工程司

摘　　要

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，地質活動頻繁，地層年代輕且破碎，地質構造複雜，加上地震以及豪大雨，所引發之山崩、地滑及土石流實乃為台灣之天然災害。惟近年來，隨著經濟快速發展以及生活空間的需求，人類之活動範圍已由平原逐漸擴大到山區，尤其常見以河谷及沖積扇為聚落群聚之處，因此土石流對其造成危害甚巨。本文以土石流災害之特性來作為防治與整治工法之設計探討，並以溪頭自教育園區之災害整治案例，進行土石流災害整治工程流程之完整說明與介紹，提供國內進行土石流災害整治工程之參考。

關鍵字：溪頭、土石流、集集地震、桃芝颱風、整治工程。

CASE STUDY ON REMEDIATION CONSTRUCTION DESIGN OF DEBRIS FLOW IN SITOU NATURE EDUCATION AREA

CHEN FU-SHEN　WU WEN-LONG　YANG CHIH-YAO

CHINA ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

ABSTRACT

The geological structures of Taiwan are complex, weak and young. The rock slopes of many river valleys were damaged by earthquakes and landslides, which caused a great deal of cracks and unstable rock blocks. The torrential rain brought by typhoons usually induced serious debris flow. In the recent years, with the increasing of population density and the development of economy, the scope of human activity has been expanded to the mountain district. For the reason, debris flow disaster has been the nightmare of us. This paper presents the case of remediation construction in Sitou. And with the presentation, it is advantage to the engineers to take the lessons as a reference in their plan, design, and construction works to against the disasters.

KEYWORDS: Sitou, debris flow, Chi-Chi earthquake, Toraji typhoon, remediation construction.

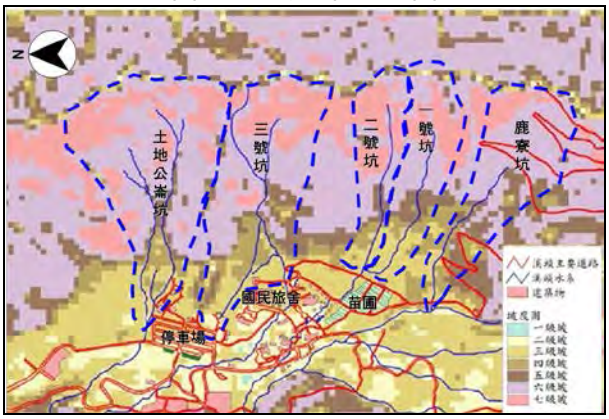
一、前言

台大溪頭自然教育園區位於南投縣鹿谷鄉境內，為台灣最著名之觀光景點之一，由往年之觀光客人數統計資料顯示，每年皆有約100萬人次以上前往遊憩渡假，具有相當重要之教育、觀光產業價值。但由於近10年來天災不斷，在歷經民國85年賀伯颱風、民國88年921大地震以及民國90年之桃芝颱風影響，園區內陸陸續續發生山崩、土石流等災害，並影響園區內之既有設施以及相關人員之安全。其中以桃芝颱風所造成之土石流災害最為嚴重，其所產生之土石流危險溪流包括之鹿寮坑、一號坑、二號坑、三號坑、土地公崙坑、米堤坑、桃芝坑、巨石坑、大學坑、流

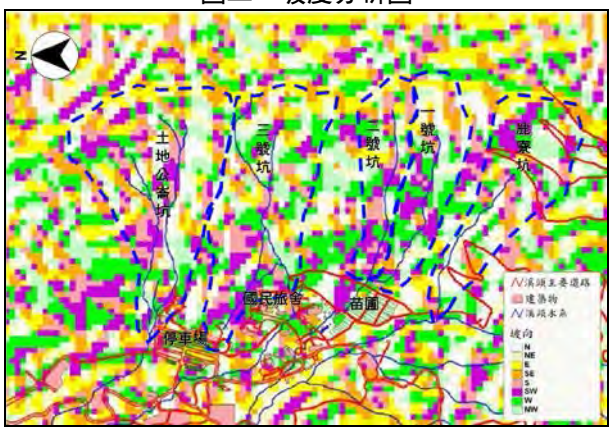
地工技術

籠坑、神木坑等，道路方面包括鳳凰林道及神木林道有十餘處受損、佈滿土石。此外，步道系統、吊橋等亦遭土石流沖失斷裂，而區內電力、通訊、供水系統悉數遭毀；備用發電機組、電腦設備、房舍內部裝潢、設施、家電用具等均遭淤泥土石流毀損，損失不貲。而上述災害整治工程，自民國92完工後歷經各次颱風豪雨及地震考驗並無後續災害發生，而達預期整治功效。筆者有幸參與其中鹿寮坑、一號坑、二號坑、三號坑及土地公崙坑之整治工程，茲整理上述土石流坑溝之整治工程經驗提供探討與參考。

圖一　溪頭地區空照圖



圖二　坡度分析圖



圖三　坡向分析圖

二、工程概述

2.1 地形分析

溪頭因位於北勢溪的源頭而得名，山巒起伏，地勢陡峻，高度介於海拔500~2,000公尺間。地形上為三面環山之大型谷地，東面為鳳凰山脈，南面為嶺頭山脈，西南面為內樹皮山脈，地勢由南向北傾斜，地形變化相當劇烈，主要溪流為濁水溪流域的支流北勢溪，接近溪谷處之沖積扇皆相當平坦，而接近鳳凰山稜線處坡度甚至超過45°。區內主體建物大都位於北勢溪右岸，背倚南北走向之鳳凰山脈山麓，如圖一所示。為了解本工址之地形分布及特性，乃利用數值地形模型(DTM)，進行區內集水區之坡度及坡向分析，如圖二~圖三。由於本案例工址位於鳳凰山脈山稜線西側，故其坡向主要以西北、西南與西為主，而工址內各集水區之坡度分布，以水土保持技術規範之坡級予以歸納，得知區內地形陡峭，以六級坡(55%~100%)之分布最廣，平均佔全區面積約36%，其次為七級坡(>100%)約為22.9%，詳表一~表二。

表一 各集水區坡度分級面積一覽表

坑溝名稱 / 分級	鹿寮坑	一號坑	二號坑	三號坑	土地公崙坑	總計
一級坡(　　≦5%	25	775	1,300	4,175	675	6,950
二級坡(5~15%)	2,100	29,925	23,950	129,800	63,800	249,575
三級坡(15~30%)	17,500	72,175	39,350	156,200	149,275	434,500
四級坡(30~40%)	29,425	36,475	16,225	65,275	63,025	210,425
五級坡(40~55%)	50,000	34,000	15,975	84,600	68,500	253,075
六級坡(55~100%)	157,225	99,700	58,425	415,400	282,950	1,013,700
七級坡(＞100%)	33,175	98,200	67,550	164,625	280,400	643,950
總計	289,450	371,250	222,775	855,450	908,625	2,647,550

單位：m^2

地工技術

表二　各集水區坡度分級百分比一覽表

單位：%

坑溝名稱 / 分級	鹿寮坑	一號坑	二號坑	三號坑	土地公崙坑	總計
一級坡(　　≦	0.01	0.21	0.58	0.49	0.07	0.26
二級坡(5~15%)	0.73	8.06	10.75	15.17	7.02	9.43
三級坡(15~30%)	6.05	19.44	17.66	18.26	16.43	16.41
四級坡(30~40%)	10.17	9.82	7.28	7.63	6.94	7.95
五級坡(40~55%)	17.27	9.16	7.17	9.89	7.54	9.56
六級坡(55~100%)	54.32	26.86	26.23	40.72	31.14	36.05
七級坡(＞100%)	11.46	26.45	30.32	16.14	30.86	22.9
總計	100	100	100	100	100	100

2.2 氣象水文

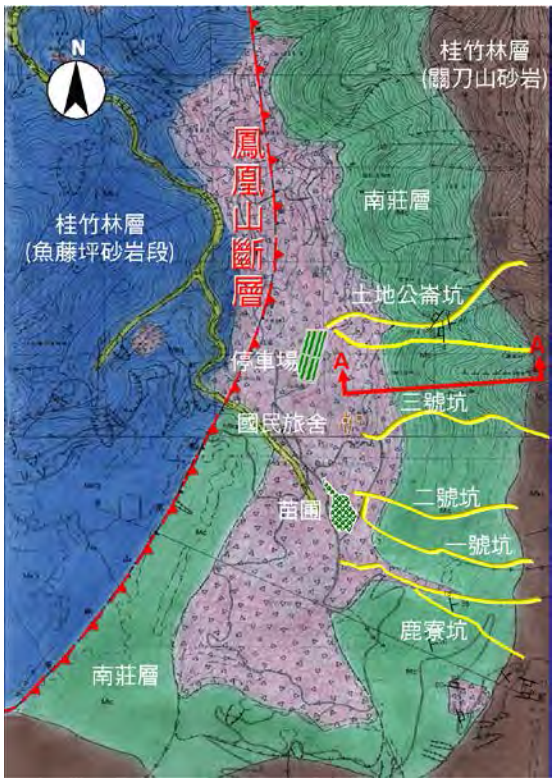
依據溪頭氣象站近年來之統計資料顯示，年平均雨量約2,213.5公厘，每年受梅雨及颱風季節影響，降雨量集中於五月、六月、七月及八月，月平均雨量均在300公厘以上。全年平均降雨日數約154天左右，月平均降雨日數分佈類似降雨量分佈，以五月~八月份較多。本地區屬於副熱帶氣候，因位處於山區，全年平均氣溫約16.6℃，月平均氣溫變化約在10℃~20℃之間，各月平均氣溫以七月之20.4℃較高，一月之11.4℃較低。

2.3 區域地質

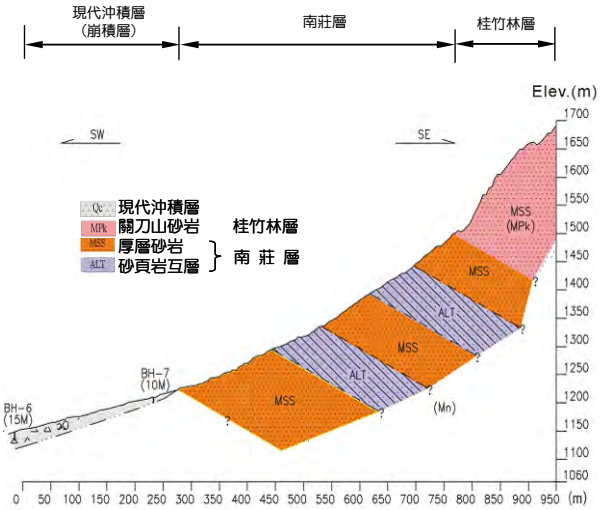
溪頭地區地質主要為第三紀中新世至上新世地層所組成，地表覆蓋崩積層厚約3~7m以上。出露之地層包括第三紀中新世上部之南莊層、中新世上部至上新世之桂竹林層，以及現代沖積層(如表三)。其中南莊層係由細粒砂岩及頁岩互層為主，主要分布於鳳凰山西側之山腹地帶。桂竹林層則以厚層塊狀砂岩為主，於本區域主要為下部關刀山砂岩段及上部魚藤坪砂岩段出露，其中關刀山砂岩段主要分布於鳳凰山稜線附近，且因夾有頁岩及薄煤線，砂岩多帶有鈣質膠結及常呈厚層塊狀而形成陡壁，加以差異侵蝕因素影響，於頁岩及塊狀砂岩界面易形成弱面，造成大規模崩坍，成為本區各坑溝源頭主要土石來源。本區主要地質構造為鳳凰山斷層，又稱有水坑斷層，其走向約為 N25°E，係一高角度逆斷層，斷層東南側為升側，主要分布為中新世南莊層，上覆桂竹林層關刀山砂岩段，西北側則為桂竹林層魚藤坪砂岩段分布。於本計畫區現地量得之層面位態約為 N15°~30°W/28°~35°E。區域地質及地質剖面如圖四~五所示。

表三　溪頭地區地層岩性與分佈位置表

特性 / 年代	地層	岩性	位置
第四紀	現代沖積層	塊石、砂土、黏土	平坦沖積扇
第三紀中新世	關刀山砂岩層	厚層塊狀砂岩	鳳凰山之稜線至山腹地帶
	南莊層	細粒砂岩、砂頁岩互層	山腹地帶



圖四　溪頭區域地質圖

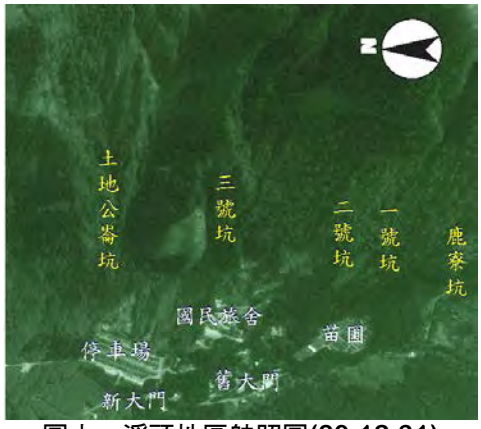


圖五　A-A 地層剖面圖

地工技術

2.4 災害歷史

本文收集不同時間之航照圖加以比對，民國80年12月31日之航照圖顯示區內林相茂盛，並無重大崩塌情形，如圖六。民國88年九二一大地震造成溪頭地區發生多處大規模土石崩塌，成為日後引發土石流之主要材料，如圖七。民國90年7月31日桃芝颱風來襲，由於上游發源區土石鬆散，經豪雨作用而產生土石流情形，如圖八~九所示。



圖六　溪頭地區航照圖(80.12.31)

圖七 溪頭九二一地震各溪谷上游坍塌情形(88.9.27)

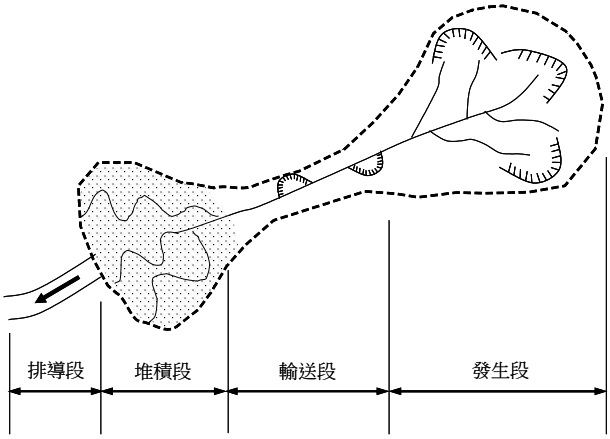
圖八　桃芝颱風後溪谷上游崩坍情形(90.11.27)

圖九　桃芝風災後工址土石坑溝分布圖

三、整治工程調查、設計

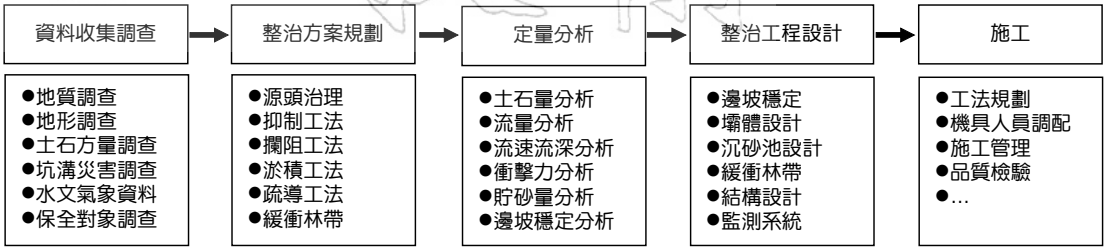
土石流係指泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物以重力作用為主，水流作用為輔之流動體。土石流溪流依照土石流形成、運動及堆積等特性，一般可分成發生段、輸送段、淤積段及排導段等四個區段，如圖十所示。不同區段因水源、土砂料源、流動、匯流、輸送及勢能等條件有所差異，使工程治理措施必須按其屬性作適當之規劃。依據過去研究及經驗得知，土石流溪流的四種區段可依其坡度和土砂供給型態進行規劃，並據以研擬治理工程對策，詳如表四所示。

本文將針對土石流災害整治之規劃設計流程進行探討，並依各土石流坑溝之特性研選適當之工法。土石流災害整治工程流程大致上可分為調查、規劃、分析、設計及施工等階段，如圖十一所示。



圖十　土石流溪流特徵圖

地工技術



圖十一 土石流災害整治工程流程

表四 土石流溪流各區段地形特徵及其整治工程措施

區域	地形特徵	整治工程措施
發生段	溪流上游區段呈漏斗狀 溪床坡度約在15度以上 岸坡陡峻，具V字形橫斷面， 土石裸露，岩石破碎，崩塌、 地滑發達	固定床面工程 護坡工程 導排水工程 蝕溝控制、打樁編柵
輸送段	溪流中上游多為峽谷地形 坡度約介於10 ~15度間 土層厚度可高達數十公尺 溪床土砂沖淤顯著 呈複式斷面，溪幅較大	各式壩工(透過性及 非透過性壩) 護岸工程
淤積段	溪流下游段，多呈扇形 溪床坡度在10度以下 大小石塊堆積無明顯篩分 易漫流改道，流路不穩定	沉砂池、大型防砂壩 緩衝林帶 導流堤
排導段	淤積段下游常與主流連接 溪床坡度較淤積段為緩和	導流渠道 導流堤

3.1 資料收集及調查作業

資料收集調查階段主要工作係收集土石流坑溝之相關資料，並以現地調查或遙測等方式了解現地之災害情況及崩塌、土石堆積情形。一般而言，土石流災害發生後將有一段時間形成交通中斷而有現地勘察不易的情況，因此遙測技術乃為土石流整治調查不可或缺之有效工具。尤其以土石流坑溝及源頭崩塌地，常常因為地形、交通等因素而無法深入詳細調查。若適度利用遙測影像可以先行對於目標集水區進行整體初步之瞭解。待災區已初步整理後，再以現地調查補充了解及驗證，一來可以大幅節省調查時間及增進工作效率，二來可避免見樹不見林之情況發生。

目前可供利用之遙測影像包括衛星影像、航空照片及無人載具直升機拍照等。其中以航空照片的精度最高，除可進行崩塌地判釋外，甚至可利用航照立體相對先行製作數值地形模型(DTM)，以了解工址之地形分布，並作為規劃與初步設計之底圖，惟其所需經費較高，並且需要配合天氣情況才可拍攝得較佳之成果。而無人載具直升機拍照則機動性較高，且費用較為經濟，所拍攝之成果比例較大，可清楚觀察崩塌地之分布與土石流坑溝之狀況，惟其缺點為並非正射影像，故無法求得較精確之量化與地形資料。

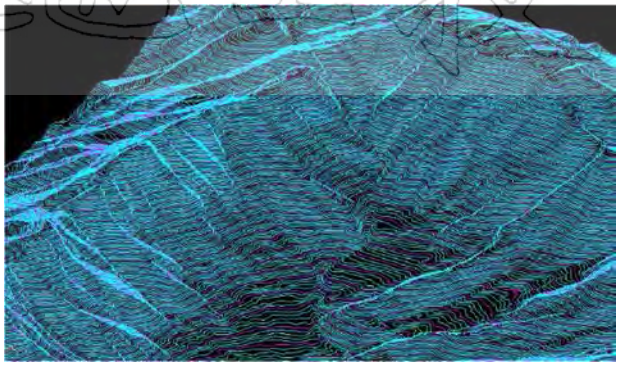
本案例於規劃之初即收集歷年之航空照片，以瞭解崩塌歷史及分布範圍，並利用其製作數值地形模型與工址地形等高線(如圖十二~十三)，進行土石方量估算及整治工程之初步規劃。除此之外，利用無人直升機空中拍攝以進一步了解源頭崩塌地及土石流坑溝災害情況。在室內作業對於災區進行完整之了解後，再進行現地補充勘測作業，以對工址進行較完整之分析設計。

3.2 崩塌地及源頭治理

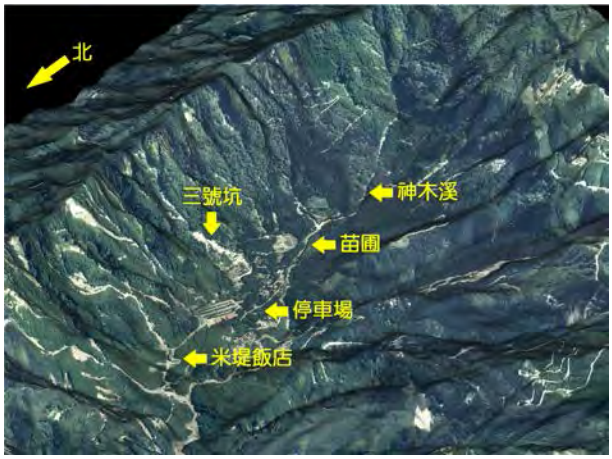
經調查了解本工程因921地震與颱風豪雨之影響，各坑溝上游均有已裸露之崩塌地。根據航照圖(包括正射航照與直昇機空拍照片)、地形圖與現地勘查之成果，依各集水區上游之崩塌現況進行判釋，各坑溝上游較具規模之現有崩塌地共計38處，分別為土地公崙坑13處、三號坑10處、二號坑4處、一號坑3處與鹿寮坑8處，區內崩塌地崩塌面積總計約為86,896m²，其中3,000m²以上之崩塌面積共計約54,418m²，約佔總面積63%，崩塌面積1,000m²~3,000m²共計約24,247m²，約佔總面積28%。

本工程之崩塌坡地及源頭治理，採因地制宜原則，分別採用減除誘因、增加阻抗力且具時效性之方法進行：例如危木伐除、危石移除、源頭導排水、臨時排水、坡面植生、坡趾加載及注意警示之設置。依據「土石流及崩塌地整體治理工作手冊」(行政院農委會，2001)，土石流及崩塌

地工技術



圖十二　溪頭自然教育園區航測 DTM 等高線圖



圖十三　溪頭自然教育園區航空立體影像

圖十四 源頭治理打樁編柵施工照片

地治本工作要項包括源頭處理、裸坡面植生、堆積區處理等三大類。源頭處理包括高莖危木處理及裂縫填補兩大項，前者係將崩塌區內及周圍之高莖危木截短或鋸除，以避免風吹搖動附近土壤，造成地層鬆動而增加崩塌之危害；後者係指將崩塌區冠部附近之張力裂縫使用具黏性之原地土壤加以填補，並加以植生覆蓋，以避免水分入滲造成額外壓力，造成崩塌情況更加明顯。

裸坡面處理則包括地表截排水設施及植生設施，前者係將坡頂水導入天然坑溝，避免進入崩塌區內加劇沖蝕；後者則依據裸坡面狀況選擇適當植生加以覆蓋，減少坡面沖蝕，增加坡面穩定。本工程衡諸現地狀況，擇定以打樁編柵配合截排水工法進行源頭治理，施工情況如圖十四。

3.3 土石方量估算及定量分析

土石流流出土方量是土石流規模之重要指標與制訂防治策略之依據。依據前人研究發現，土石流流出土方量V(m^3)與集水區面積A(Km^2)有非常密切之關係。本文採用日本建設省(1989)之經驗估算公式，平均土石流出土方量V_{50}(m^3)與集水面積A(Km^2)之關係為$V_{50}=13,600A^{0.61}$，機率90%流出土方量$V_{90}=70,992A^{0.61}$，最高土石流流出土方量(不被超過機率99%計算)為$V_{99}=274,720A^{0.61}$，以坡度15度以上之有效集水面積，代入計算各坑溝之土石流出土方量，並配合實地調查推估值，比較如表五所示。實地調查推估值係依據工址遙測影像配合現地勘查與地質鑽探結果而得，約介於V_{50}及V_{90}之間。惟土石流出量推估於實務上存有必然之誤差，其不確定因素包括源頭治理成效、潛在崩塌地、雨量門檻值及氣象之變異性等等，工程師應考量現地實際勘察情況與各項因素之掌握度，推估適當之土石流規模以作為設計之依據。本文考量上述情況，依安全性及經濟性之需求，以實地調查推估之土方量，作為本工程土石流的土石量體設計規模。

表五 各坑溝土石流出土方量計算及實地調查推估值

坑溝名稱	公式計算值				實地調查推估值 (m^3)
	15度以上有效集水面積 (ha)	V_{50} (m^3)	V_{90} (m^3)	V_{99} (m^3)	
鹿寮坑	24.71	5,797	30,260	48,578	8,141
一號坑	14.68	4,219	22,025	35,358	3,702
二號坑	14.46	4,181	21,823	35,034	3,388
三號坑	25.79	5,950	31,060	49,862	28,429
三號坑支流	5.85	2,407	12,565	20,172	4,158
土地公崙坑	42.75	8,099	42,275	67,866	18,900
總計	-	-	-	-	66,718

地工技術

表六 土石流定量分析結果一覽表

坑溪名稱	控制點位置	清水流量Q_w (CMS)	溪床坡度θ (度)	溪床斜率 S	通水斷面寬 B(m)	土石流泥砂體積濃度 C_D	土石堆積體積濃度 C*	土石流流量Q_D (CMS)	曼寧係數 n	土石流流深 h_d(m)	土石流流速U_d (m/s)
鹿寮坑	鹿寮坑至神木坑溪交匯處	12.11	14.04	0.2500	10.00	0.39	0.62	32.80	0.10	0.78	4.22
一號坑二號坑	一號坑至苗圃	7.34	14.04	0.2500	10.00	0.39	0.62	19.89	0.10	0.58	3.46
	二號坑至苗圃	6.93	14.04	0.2500	10.00	0.39	0.62	18.79	0.10	0.56	3.38
	一號坑、二號坑、神木坑溪匯流處	23.18	7.50	0.1316	10.00	0.30	0.62	44.92	0.10	1.14	3.95
三號坑	三號坑主坑至沉砂池	12.09	11.31	0.2000	25.00	0.30	0.62	23.42	0.10	0.39	2.39
	三號坑支坑至停車場	5.30	10.13	0.1786	8.00	0.30	0.62	10.28	0.10	0.49	2.62
	三號坑主坑至新大門	22.14	5.71	0.1000	6.00	0.30	0.62	42.89	0.10	1.63	4.38
	三號坑至神木坑溪	31.12	12.27	0.2174	10.00	0.31	0.62	63.15	0.10	1.20	5.26
土地公崙坑	土地公崙坑至停車場	20.05	9.46	0.1667	10.00	0.30	0.62	38.84	0.10	0.97	4.00
	土地公崙坑至神木坑溪	33.74	15.53	0.2778	10.00	0.47	0.62	136.93	0.10	1.77	7.72

土石流定量分析項目是以硬體防治對策之相關參數為主，有關計算公式及分析方法乃依據水土保持技術規範、水土保持手冊之相關規定，並參考相關研究報告及技術論文等，各相關參數之研定、參考公式及分析結果如下所示。

曼寧粗糙係數(n)依據土石流防治工法之研究評估(連惠邦，2001)。在自然溪床上，土石流先端部n =0.1，後續流n=0.06，具襯砌三面流路工之河道n=0.03。

土石流體積濃度(C_D)合理值應介於0.3~0.9C_*之間(C_*＝溪床上土石流堆積物之體積濃度)，依據水保規範規定以下式表示：

$$C_D = \frac{\rho \tan\theta}{(\sigma-\rho)(\tan\phi - \tan\theta)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

式中 σ =土石密度(kg/m^3)

ρ =水之密度(kg/m^3)

θ =溪谷之坡度(°)

ϕ =土石之內摩擦角(°)

土石流流量(Q_D)依水保規範，可由清水流量(Qw)推求之 $Q_D = \frac{C_*}{C_* - C_D} Q_w$ 。

土石流流深(h_d)及流速(U_d)分析以假設溪流為近似矩形之寬廣斷面，則由連續性方程式得知，土石流流量可表為：

$$Q_D = U_d \cdot h_d \cdot B \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

又根據曼寧公式，上式可解得土石流流深為

$$h_d = \left(\frac{nQ_D}{B \cdot S_0^{1/2}}\right)^{3/5} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

即可得土石流之流速(U_d)。惟獲得之土石流流深，尚應比較土石流之設計粒徑(D_e)，並取較大值作為土石流流深。

四、坑溝治理工程方案說明

4.1 鹿寮坑整治工程

本坑曾於民國78年發生小規模土石流，於民國79年時水保局曾在此施作16座小型連續壩以攔蓄河道砂石、減緩溪床坡度並抑制土石流。此集水區於桃芝風災後所引發之土石流除南側主坑外，尚有北側一支坑，南側之主坑於0k+125至0k+175間穿越鳳凰林道，並造成道路損毀，而北側支坑於0k+550處匯入主坑後流入神木坑溪。災後有大量土石(約5000m^3)堆積於下游連續潛壩至神木坑溪之間，並將坑溝出口處之念馨橋沖毀，造成交通中斷。

本坑依據實測地形圖，主坑長度約為950m，坑谷坡度在上游發生區皆大於30°，接近鳳凰山稜線處為陡峭裸露之岩壁；中游流動段之坡度則介於15°至30°間，沿途有巨石分佈；下游堆積區之坡度則小於15°，自0k+657處開始設有既有潛壩16座，經桃芝颱風土石流災害後，有多處潛壩已遭毀損並淤滿土石。

考量現有經費限制及用地限制，整治目標係以避免日後災害擴大，減輕土石流所造成之災害，故主要於中下游施作潛壩及梳子壩以減緩坑溝縱坡與攔阻土石，並修復既有系列潛壩以維持其功能；另於有限經費內以最經濟可行方式，將已遭沖毀之林道與念馨橋進行修復，以維持交通。

因本坑既有16座潛壩已有部份遭土石衝毀，故將損毀較嚴重之潛壩予以敲除重建，而輕微損壞者則以修復除石，恢復其既有之功能，以利緩坡固床，減少岸壁淘刷降低下沖土石量。

為降低土石流發生時所造成之破壞力，本坑於0k+620處將新設梳子壩一座以攔阻上游之土石，經壩體與水理計算後，此梳子壩可有效攔阻約1683m^{3}之土石量。

另本坑於0k+750處因其左側護岸較低，且此處為河道轉彎處，故於土石流發生時因其直進性而沖毀左側砌石護岸，致使土石由此溢流衝至林道路面，造成道路損壞，交通中斷，故於0k+720至0k+750左側進行整地與新設蛇籠，並於0k+750~0k+770緊臨鳳凰林道處新設重力式擋土牆，以避免土石衝至路面，而影響交通與危及財產生命安全，另為保護坑溝岸壁之穩定，於0k+650至念馨橋之間之坑溝兩側將設置砌石護岸，以避免側壁遭土石沖刷而崩落。念馨橋之改建亦考量土石流之最大粒徑與流量，採用大跨度之結構配置，以利日後土石之下沖停淤，並避免損壞橋樑造成交通中斷。

4.2 一號坑整治工程

本坑於桃芝風災後引發土石流，大致沿原山溝向下沖，至0k+700附近因左側砌石護岸遭沖毀而自此處溢流直進，幸被苗圃上方杉木林阻擋部分，但仍有約1000m^{3}土石堆積停淤於苗圃部分區域，造成作物損失。本坑依據實測地形圖，長度約為820m，坡度於上游發生區(0k+000~0k+300)皆大於30°，接近鳳凰山稜線處為陡峭裸露岩壁；中游流動區(0k+300 -0k+550)坡度則介於15°至30°間，部分有巨石分佈，現場推測係古老土石崩坍時所堆積；下游堆積區(0k+550~0k+820)坡度則小於15°。自0k+635處

圖十五 鹿寮坑、一號坑及二號坑整治工程平面配置

圖十六 大跨度念馨橋以避開土石流災害

開始既有潛壩11座，情況大致良好，但多已淤滿土石。

本工程整治目標係以避免大量土石下沖，並保全苗圃及下方別墅區，故主要於中游施作潛壩及梳子壩攔阻土石，並修復既有系列潛壩以維持其功能，對於下沖土石以苗圃上方道路上方杉木林作為緩衝林帶。本坑既有11座潛壩以修復除石方式維護其既有功能，但於0k+635之既有潛壩因其後方為一較平坦且低窪地區，估算庫容量約達2268 m^3，乃敲除改建為4m高梳子壩以增加其攔阻土石功能，並自苗圃上方道路開闢一便道以利後續除石維持庫容量。此外，於0k+480、0k+540新建5m高潛壩，以利緩坡固床，並減少岸壁淘刷降低下沖土石量。本坑於0k+685之既有潛壩因其左側護岸較低，且此處為河道轉彎處，故於土石流發生時因其直進性而沖毀左側砌石護岸，致使土石大部分由此溢流下沖苗圃，故加高RC護岸

地工技術

3m(左側0k+685~0k+705，右側0k+675~0k+705)，總長度約50m；此外，為維持梳子壩庫容量，將0k+590~0k+610右側RC護岸修復。另考量本坑於前述整治設施配置下仍有土石下沖危及下游保全對象，並考量地形及土石流直進性於0k+750~0k+800左側設置面積約為50m x30m緩衝林帶，以利下沖土石散開停淤，預計可停淤土石量約1500 m^3。

4.3 二號坑整治工程

本坑於桃芝風災後引發土石流，大致沿原山溝向下沖，至0k+750附近因右側砌石護岸遭沖毀而自此處部分溢流，大部分仍沿山溝範圍下沖，但仍有約1200 m^3土石堆積停淤於下游排水路及部分苗圃區域，並造成蓄水池損壞及作物損失。本坑依據實測地形圖，長度約為830m，北側有支坑長約300m，坡度於上游發生區(0k+000~0k+450)皆大於30°，接近鳳凰山稜線處為陡峭裸露岩壁；中游流動區(0k+450~0k+700)坡度則介於15°至30°間，部分有巨石分佈，現場推測係古老土石崩坍時所堆積；下游堆積區(0k+700~0k+830)坡度則小於15°。自0k+570處開始設有既有鋼管分篩壩5座，鋼管多已損壞，自0k+650處開始既有潛壩9座，情況大致良好，但多已淤滿土石。為保全苗圃及下方別墅區，本工程主要於中游修復鋼管分篩壩及潛壩以維持其功能，以利於攔阻土石，對於下沖土石則以別墅區上方杉木林作為緩衝林帶。此外，本工程於0k+503、0k+530新建5m高潛壩，以緩坡固床，並減少岸壁淘刷降低下沖土石量。本坑之既有5座鋼管分篩壩雖已損壞，但其壩座大致仍可修復，其容量估算約達1000 m^3，故乃以直徑20cm鋼管修復以維持攔阻土石功能。本坑於0k+750之既有潛壩因其右側護岸較低，且此處為河道轉彎處，故於土石流發生時因其直進性而沖毀右側護岸，致使土石部分由此溢流下沖，本工程以加高RC護岸2m(右側0k+735~0k+790)，總長度約55m；此外，為防止岸壁淘刷將下游加設砌石護岸(右側0k+800~0k+830，左側0k+750~0k+830)，總長度約110m。考量整治工程並無法確保土石流不再下衝，而有危及下游保全對象之可能性，於是本工程考量地形及土石流直進性於二號坑下游設置面積約為50mx50m緩衝林帶，以利下沖土石散開停淤，預計可停淤土石量約2500m^3。

圖十七　一號坑堆積區緩衝林帶完工照片

圖十八 二號坑整治前蓄滿土石鋼管分篩壩破壞情形

圖十九 二號坑整治後連續鋼管分篩壩

地工技術

4.4 三號坑整治工程

本坑於85年賀伯颱風後曾發生土石流，當時即建造包括約11座的連續潛壩群及0k+700附近長約50m之蛇籠分流工；桃芝風災後再度引發土石流，大致沿原山溝向下沖，至0k+690附近部分循既有北側支坑溢流，大部分仍沿主坑範圍下沖，約有15,000m^{3}土石堆積停淤於國民旅社上方竹類標本園南側，以及鳳凰賓館南側區域，另有約3,000 m^{3}土石沿支坑下沖至新大門，並造成下游處保全對象二人死亡。

本坑依據實測地形圖，主坑長度約為950m，自主坑0k+450處北側有上支坑長約500m匯入，自主坑0k+690處北側有下支坑長約500m流出，坡度於上游發生區(0k+000~0k+400)皆大於30°，接近鳳凰山稜線處為陡峭裸露岩壁；中游流動區(0k+400~0k+800)坡度則介於15°至30°間，部分有粒徑大於2m塊石分佈；下游堆積區(0k+800~0k+950)坡度則小於15°。自0k+760處開始既有潛壩11座，多已被土石流損壞。

本整治工程拆除主坑既有11座損壞潛壩，新建2座梳子壩(0k+772及0k+810) 預計可攔阻約3888m^{3}土石、2座5m高潛壩(0k+590、0k+620)，於支坑新設3座3m高潛壩(0k+058、0k+110、0k+130)，2座木樁壩(0k+180、0k+200)，1座竹樁壩(0k+240)，以利緩坡固床，減少岸壁淘刷及降低下沖土石量。另為保全下游眾多保全對象，除多道橫向構造以緩坡固床、防治縱橫向沖刷及攔阻土石外，更設置2座大型沉砂池以蓄積下沖土石，包括主坑之＃1沉砂池及下支坑之＃2沉砂池，前者可容納土石量約為12000 m^3，後者約為6000m^3，池岸壁配合現地景觀，以方籠、砌石堤作為岸壁之擋土，或利用現地塊石材料裝飾相關擋土結構，以符合景觀之美化。本工程於下支坑下游＃2沉砂池處亦設置面積約為130m x 70m緩衝林帶，以利下沖土石散開停淤。

另為確保土石主要沿主坑下流，必要時始由下支坑溢流，故於下支坑0k+020處施作橫向方籠長度約20m；另為保護主坑0k+690處流下之下支坑岸壁避免沖刷，且為導引土石並避免下沖至主支坑間保全對象上方區域，故於此處施作方籠護岸長度約322m(右岸：0k+042-0k+052，左岸：0k+033-0k+345)；另外，為確保梳子壩、＃1沉砂池庫容及防止岸壁沖刷，於主坑左岸施作方籠護岸長度約222m(0k+720-0k+942)。

圖二十 三號坑整治設施平面配置

圖二十一 三號坑支流木樁壩

圖二十二 三號坑支流竹樁壩及植生近照

本坑雖已考量保全對象設置多道整治設施，但顧及設計條件之限制，乃裝設自動監測系統一套，包括於上游及中游等三處位置，裝設包括雨量計與鋼索檢知器(0k+450)、鋼索檢知器與CCD攝影機(0k+610)及雨量計與鋼索檢知器(0k+730)等三處，各處監測站設有監測箱或監測小屋，除蓄電池外並利用太陽能方式發電，並將利用無線傳送訊號及數據至控制中心，以利緊急應變及避難時間之爭取。

4.5 土地公崙坑整治工程

本坑於桃芝風災後引發土石流，大致沿原山溝向下沖，可分為北支坑和南支坑，北支坑至0k+950附近因地勢較為平緩造成土石流展開。展開區域主要為林木及竹林，約1800 m^3土石堆積停淤於林木及竹林間，造成林木及竹林損失。南支坑既有7座梳子壩、11座潛壩，經現場逐一檢視功效良好，唯部份壩體損壞部份須補強，壩體淤積部份土石需清理。

本坑依據實測地形圖，長度約為1140m(至立德橋)，坡度於上游發生區(0k+000~0k+400)皆大於30°，接近鳳凰山稜線處為陡峭裸露岩壁；中游流動區(0k+400~0k+800)坡度則介於15°至30°間，部分有巨石分佈，現場推測係古老土石崩坍時所堆積；下游堆積區(0k+800~1k+140)坡度則小於15°。

整治工程主要保全對象為停車場至米堤飯店間道路，故於北支坑中下游施作梳子壩攔阻土石；南支坑因既有梳子壩及潛壩僅部區域損毀，故修復既有系列梳子壩及潛壩並清理壩與壩間已蓄積之土石以維持其功能。部份潛壩基礎淘空處將回填並設置蛇籠保護基腳。而梳子壩則以修復除石維護其既有功能。

北支坑由於無任何既有設施，故本工程於0k+795處選擇一較平坦地區新建第1座梳子壩，其庫容量估算約達1800m^3。第2座梳子壩施作於0k+945處，其庫容量估算約達2066 m^3。

考量本坑於前述整治設施配置下仍有土石下沖危及下游停車場至米堤飯店間道路安全，以地形條件及土石流直進之特性於0k+970~1k+030間設置面積約為100mx50m緩衝林帶，以利下沖土石散開停淤，預計可停淤土石量約5000m^3。並於道路邊設置土石防護網長度60m高度3.0m，以確保道路安全。

圖二十三 土地公崙坑整治工程設施平面配置

圖二十四 整治後土地公崙坑下游現況

4.6 土石流流出土石方量控制檢討

本工址各坑溝土石流流出土方量約為66,718m^3，本工程以車輛機具較容易到達之中下游段區進行坑溝土石清運工作，計約清運土石44,565m^3，另於坑溝設置整治工程設施，預估可攔阻或淤積工法控制量約32,415m^3，以最臨界危險情況，土石流一次全部下來之情形檢討，各坑溝均有足夠容量吸納或攔阻土石流流出土石量，如表七所示。

其中整治工程控制量之計算考公式如下：

$$V = E_s \times \frac{\overline{B}H_0^2}{2(S_0 - S_e)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

式中 S_0=現地溪床坡度(°)

Se=設施上游淤砂坡度(°)

$\overline{B}$=溪床平均寬度(m)

H_0=壩體有效高度(m)

E_s=貯砂率

地工技術

表七 各坑溝土石流流出土方量及處理對策

坑溝名稱	流出土方量(m^3)	整治工程控制量					
		里程	工法	控制量(m^3)	小計m^3)	清運土方量(m^3)	合計(m^3)
鹿寮坑	8,141	0k+620	梳子壩	1,683	2,355	6,786	9,141
		0k+657	5m潛壩	672			
一號坑	3,702	0k+635	梳子壩	2,268	2,268	6,173	8,441
二號坑	3,388	0k+503	5m潛壩	548	2,038	1,453	3,491
		0k+530	5m潛壩	490			
		0k+570	鋼管分篩壩	1,000			
三號坑(主坑)	28,429	0k+590	5m潛壩	600	16,488	12,094	28,582
		0k+772	梳子壩	1,840			
		0k+810	梳子壩	2,048			
		0k+875	1號沉砂池	12,000			
三號坑(支流)	4,158	0k+400	2號沉砂池	6,000	6,000	2,532	8,532
土地公崙坑	18,900	0k+795	梳子壩	1,800	3,866	15,527	19,393
		0k+945	梳子壩	2,066			
總計	66,718				32,415	44,565	76,980

* 土石流流出土方量係根據實地調查推估值

五、結語

土石流整治工程必須經詳細資料收集及現地調查，了解崩塌地情形以及利用可靠之經驗公式推估土石流出量，據以規劃及設計整治設施與配置，配合自動監測預警系統，以達到兼顧生態及安全之目的。而土石流整治設施於完工後，應予以定期維護與清淤，以發揮整治設施之防災功能。本文以溪頭自然教育園區為例，介紹土石流整治工程之工法及設計流程，以供後續相關類似工程之參考，並期望藉由工程技術之研討，增進工程界對於土石流災害之瞭解，以尊重大自然之心態，考量環境容受力，在工程與生態間取得適度之平衡，以求永續發展。

致謝

本文撰寫期間承蒙台大實驗林管理處提供諸多寶貴工程及影像資料，中華顧問工程司同仁於本工程規劃、設計、施工監造等各方面給予指導與指教，使本文得以順利完成，於此一併致謝。

參考文獻

行政院農業委員會（2004），”水土保持技術規範”。

行政院農業委員會水土保持局(2006)，”水土保持手冊”

池谷浩(1980)，”土石流災害調查法”，山海堂。

林銘郎、李順敏(2002)，”土石流災後快速復建作業及範例期末報告”，財團法人中華顧問工程司。

連惠邦（2001），”土石流防治工法之研究評估”，行政院農業委員會水土保持局。

許文祥、張嘉興、王文通、陳福勝(2003)，”隧道洞口遇土石流危險坑溝之處理對策”，中華技術60期。

詹錢登（2000），”土石流概論”，科技圖書股份有限公司。

鄭富書、陳福勝、吳文隆、周坤賢(2003)，”溪頭森林遊樂區三號坑土石流災害整治案例探討”，第十屆大地工程學術研究討論會，三峽。

鄭富書、陳福勝、吳文隆(2003)，”溪頭森林遊樂區鹿寮坑土石流災害案例分析”，中華技術57期。

潘國樑（1999），”山坡地永續利用”，詹氏圖書公司。

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期末報告”，台大實驗林管理處。