

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

坡地災害之發生機制：以溪頭集水區為例—總計畫
暨子計畫：坡地土石流發生機制研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 90-2625-Z-002-017

執行期間： 90年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

計畫主持人：黃宏斌

計畫參與人員：胡聖賢 李偉哲 黃彥文 蘇立明

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

執行單位：國立台灣大學水工試驗所

中華民國 91 年 8 月 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

國科會專題研究計畫成果報告

NSC Project Reports

計畫編號：NSC90-2625-Z-002-017

執行期限：90年08月01日至91年07月31日

主持人：黃宏斌 國立台灣大學水工試驗所

計畫參與人員：胡聖賢 李偉哲 黃彥文 蘇立明 國立台灣大學水工試驗所

一、中文摘要

民國 88 年之九二一地震發生後，不僅產生 12,479.72 公頃之新崩塌地，也使得原本就脆弱之坡地地質更易崩解或分解，龐大之土石方移往下游或堆積在河谷上，可能在短期內或長期以後對下游之居民皆會產生相當程度之災害。為了減輕災害規模和威脅，本研究蒐集了國內外土石流之相關文獻外，並分析溪頭在桃芝颱風後之肇災原因。此外，也規劃了本研究明年之實施內容和步驟。

關鍵詞：土石流、溪頭、發生機制

Abstract:

After the occurrence of Chichi earthquake in 1999, not only the 12,479.72 hectares of new landslide happened, but also the fragile geological hillside is easier to collapse or separate than before. These huge sediment deposits located on the upstream creek valley or transporting to downstream area would largely threaten people who live in downstream area. In order to mitigate the scale and threatening of debris-flow disaster, this project collected related literature about debris flow and analyzed the disaster sources of Typhoon Toraji at Hsitou. Moreover, the experimental content and its procedure are also planned here.

Keywords: Debris flow, Hsitou, Mechanism of occurrence

第一章、前言

台灣本島乃歐亞板塊和菲律賓板塊相互擠壓成形，地處造山運動之板塊邊緣，造就出地形陡峻、地質脆弱、河川湍急之自然環境特性；再加上位處西太平洋之颱風形成地區，颱風豪雨頻繁。近年來人口、產業漸漸由不敷使用之平地地區移往山坡地，使得原本就有崩塌、地滑、土石流發生之山坡地，因為人口之進駐，而有人命或財產損失之災害發生。

民國 88 年之九二一地震發生後，不僅產生 12,479.72 公頃之新崩塌地，也使得原本就脆弱之坡地地質更易崩解或分解，龐大之土石方移往下游或堆積在河谷上，可能在短期內或長期以後對下游之居民皆會產生相當程度之災害。

本計畫之研究區域台大實驗林溪頭營林區在歷經賀伯颱風及九二一地震兩次重大災害，受到相當大之危害與衝擊，但因台大實驗林在溪頭之造林地維護與管理尚相當完整，故此二次之災害之受害皆已減至最輕，因此溪頭地區不同之森林群落、植被覆蓋情形對於坡地災害發生之抑制作用及其機制值得做深入之探討，且由於溪頭已經建立了水文氣象觀測系統，已有長期觀測資料，故以溪頭之集水區內不同林型作為研究對象，將可對坡地發生災害之機制有所了解，更可進一步防止災害發生時受到重大之破壞。

本研究針對溪頭地區水文、地質、地形、森林分布和土地利用型態對土石流發生或邊坡穩定之影響做評估；並將在中部地區再選擇一處作為研究對象，以充實本整合計畫之研究結果，因此，本研究擬蒐集近年來國內外相關之土石流發生模式，在從事相關之水槽試驗後，加以分析探討，找出適用性最高之模式，或是修正其中之模式，以作為土石流防治工程之規劃參考。

第二章、文獻回顧

2.1 土石流簡介

2.1.1 土石流之定義

目前，土石流之定義尚未獲得共識，水土保持技術規範 168 條定義土石流是指泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物受重力作用後所產生之流動體。Varnes (1958) 亦提出，土石流是含高比例之粗質碎屑 (fragments)，然而發生於異常降雨或突然解凍之土壤，常於逕流造成之急流沖刷地表土壤時發生，尤其是在具有深層堆積物土壤之山坡地及植生被移除時更容易發生。Robert & Raymond (1978) 認為一般所稱土石流係指材料含有高含量之粗碎屑；泥流則為堆積材料中至少含 50% 之砂、沉泥及粘土之顆粒，含水量極高，能造成極快速之流動。何春蓀(1981)指出土石流是因地表面岩屑經飽和含水後，岩石、岩塊和土壤與水混和在一起，形成可塑性之物體沿斜坡向下流動。周必凡等人 (1991) 則定義泥石流 (或稱土石流) 為鬆散土體和水之混和體在重力作用下，沿自然坡面或沿壓力坡流動之現象。日本防砂學會指出土石流中土石含量多於水量，水流不是土石流

物質之搬運介質，而是含水之粥狀泥沙在其自重作用下產生運動之現象。

2.1.2 土石流之特性

早期土石流屬於傳統溪流型零星分佈於偏遠山谷人煙稀少區域，隨著社會變遷人口成長快速，許多聚落往山區移動，使得山區開發過度坡地負荷增大，導致每遇到雨量特大且集中之氣候環境，就造成大量土石災害；而 921 大地震後，傳統溪流型仍存在卻增加許多崩塌型土石流，甚至許多表面覆蓋良好之山地，也因地震導致土石鬆軟，加上豪雨順著道路或蝕溝、坡面流下而形成土石流。本研究針對水土保持手冊(1992)、張立憲(1985)、游繁結和陳重光(1987)、林炳森等人(1993)、詹錢登(1997)、何敏龍(1997)、小橋澄治 (1979)、土屋昭彥(1980)、奧田(1985)、Varnes (1958)、Takahashi (1978)、Johnson & Rodine (1984)、Vandine (1985)等專家學者對土石流之特性描述做比較，並將其共通點整理歸納如下：

- (1) 土石流為濕流(wet flow)之一種，其搬運屬高濃度之集合搬運形態，與一般河床沖刷及表土沖蝕之個別搬運不同。
- (2) 土石流表面之流速明顯高於其平均流速，由此可知土石流具有表面快而底面慢之流速分佈特性，如圖 2.1 所示。
- (3) 因土石流具有高含水量，又常發生於陡坡上，造成其流動速度快(3m/sec~20m/sec)，故常沿溪谷沖下並留下鋸齒狀或 V 型之沖刷痕跡。
- (4) 土石流之組成材料中顆粒粒徑受地質及風化程度不同之影響，分佈十分廣泛，粒徑大小自數公尺至 0.01 公厘以下皆有。
- (5) 土石流之材料中含高含量之粗碎屑，但至於其固體顆粒濃度需在那一百分比範圍內才可稱為土石流，各學者均有不同之看法，茲將其整理於表 2.1。
- (6) 在豪雨或解凍時之土壤，經常因逕流之沖擊而發生土石流，尤其在山坡地之植生被除去時更易發生。
- (7) 土石流破壞力極強，所能夾帶之砂礫粒徑分佈相當廣，有時甚至連直徑大至數公尺之礫石也隨之移動，因此土石流流動時大多呈不穩定狀態，有陣流現象；意即當前端部分受阻而停止時，其後續部分因慣性而壅高，隨著壓力加大迫使前端再次流動，因此常呈間歇性流動狀態，並於前端形成顯著波段，土石流流態及各波段粒群分佈情形如圖 2.2 所示。
- (8) 土石流大多由岩塊、礫石、流木與泥砂等混合而成，其前端部分常有巨大礫石集中現象，呈旋轉且隆昇狀之流動；觀察流動時之橫斷面形狀，前端部分呈中央隆起，在後續部分則呈中央凹下之形狀，如圖 2.3。
- (9) 當溪床之坡度變緩且土石之含水量逐漸減少時，則可能會停止流動開始堆積，圖 2.4 土石流堆積部之粒徑分佈情形，由圖中可看出堆積部前端之粒徑較粗大，而中央及尾部之粒徑較小。此外土石流堆積物前端部份之礫石呈規則性之排列，從縱斷面上來看，其粗礫石長軸方向與流下方向約呈 45 度角，從平面上來看，則前端部份皆為粗礫塊石所組成，夾雜少量顆粒較細之砂礫，如圖 2.5 示。

- (10) 一般土石流發生階段大致可分為三部份，包括發生段、流動段與堆積段；發生段通常位於溪谷上游坡度較陡處，其溪床坡度大約在 15 ~30 之間，常藉水流對溪床堆積物及側岸之沖蝕所造成之土石崩塌，以獲得足夠土石材料；第二階段屬流動段，其坡度約在 6 ~15 之間，因土石流以達一相當濃度，並具有一定之流速，對於溪床已有極大之沖蝕破壞力；當土石流到達下游溪床較寬或坡度較緩處，坡度在 3 ~6 間，因流速減慢，土砂礫石逐漸沉積，並在谷口或溪流出口形成扇狀堆積地。
- (11) 土石流之特徵為先端部含有巨大之礫石群，具有強大衝擊力與破壞力，流動時有明顯之直進性，通過溪谷彎道或遇到障礙物時不易繞流或轉向，因而產生強大之衝擊作用或爬高現象。

2.1.3 土石流之類型

土石流類型很多，以發生之類型居多，也有學者是按組成材料粒徑分類或流體性質分類。依發生機制分類者有中筋氏(1977)、武居有恆(1980)、菟田和男與高橋保(1983)、張石角(1983)、高橋、水山(1984)、山口伊佐夫(1985)、高橋(1991)、謝正倫(1993)和陳榮河(1999)等；依組成材料分類者有周必凡等人(1991)和謝正倫(1991)；依流體性質分類者有周必凡(1991)和崔之久(1996)。

2.1.4 影響土石流發生之因子

影響土石流發生之主要因子分為以下 4 個部份(1)豐富之土石材料(2)充足之水份供給(3)適當之溪谷坡度(4)植生狀況，來探討影響土石流發生之因素。另外，集水區環境、土石材料之粒徑分佈和人為破壞等因素也與土石流發生相關。

2.2 土石流研究回顧

土石流研究在國內外早已有十多幾年歷史，研究內容與範圍之廣泛可略知土石流在人類歷史扮演著不可或缺之角色，從眾多之土石流研究大致上可分為六個研究方向來分析探討：

1. 土石流之流動性質研究。
2. 土石流之發生機制研究。
3. 土石流之堆積機制研究。
4. 土石流之衝擊力力學特性及其防制對策研究。
5. 土石流之預測、預警系統或危險區域之劃定研究。
6. 土石流區之現場調查報告。

2.2.1 土石流之流動性質研究

陳重光、游繁結依紊流理論，並配合土石流之流動特性，推導出土石流之流動速度。謝正倫則認為土石流可視為一流體，經由流體力學之觀念，可得土石流之二維運動方程式。

2.2.2 土石流之發生機制研究

國內外學者對於預測土石流發生之理論公式非常重視，公式推導之觀點亦有所不同，有從傳統土壤力學無限邊坡之力平衡觀點出發者，有從流體力學或泥砂運動力學觀點，加以推導質量、動量及能量守恆程式而建立者，亦有將不同觀點應用於泥砂與水混合物之質流模式中而發展者；不同專家學者假設之條件及參數均有所不同，較常被引用者有高橋之理論公式、及由泥砂運動觀點推導之江頭和蘆田理論公式，以及何敏龍由質流模式建立之理論公式。

土石流臨界發生公式之推導極多，由於根據之定義及參數互異，所以國內外各學者推導之臨界公式不僅多而且複雜，然而大抵上皆採用無限邊坡分析，地下水位則可分為有地表逕流、與堆積面齊平及地下水位位於堆積面下三種情形。相關之文獻有，齊籐 (1965)、陳世芳 (1976)、Harris (1977)、Cernica (1982)；Takahashi (1977)；Sidle (1985)；江永哲 (1986)；游繁結 (1987)；林炳森 (1989)；黃宏斌 (1991)；陳榮河、蔡丁貴 (1993)；連惠邦、趙世照 (1996)。

2.2.3 土石流之堆積機制研究

土石流堆積量之研究有 Innes 和池谷浩以集水區面積、長度和平均沖刷深當參數所推導之相關式。另外，日本文部省也有公佈一簡化型之推導模式。在土石流泥砂體積濃度方面，高橋(1991)經由土石流固液兩相之動量守恆方程，推導出了由溪床堆積之土體經水流直接沖刷所形成之溪床沖刷型土石流平衡泥砂體積濃度公式。連惠邦、柴鈺武(1999)利用水流淨剪應力等於床面泥砂顆粒之啟動剪應力之力學平衡原理，亦建立了平衡泥砂體積濃度方程式。同時，Innes(1983)在調查蘇格蘭過去發生之土石流堆積量與堆積面積後，也推導出土石流流出谷口之土砂堆積量和堆積面積間之相關式。

日本文部省針對自然災害之調查結果，也推導出土石流淤積長度和土砂流出量、下游坡度間之關係式；以及土砂流出量和集水區面積間之關係式。

2.2.4 土石流之衝擊力力學特性及其防制對策研究

關於土石流衝擊力之估算，可依動量不減原理加以推導，游繁結曾發表具體之研究成果。

2.2.5 土石流之預測、預警系統或危險區域之劃定研究

臨界值之觀念常被用來預警土石流之發生。一般而言，首先由過去土石流發生之資料，以統計之方式建立一個地區土石流發生之臨界值，此臨界值可用降雨強度或降雨量表示之；再建立一個即時(real-time)雨量記錄及預報系統；暴雨來襲時，便可由雨量變化之監測來發佈土石流可能產生之預報。這方面研究之學者有 Caine (1980)、Camion & Ellen (1985)、Wieczorek (1987)、Keefer (1987)、潮尾克美、橫部幸裕(1978)、青木佑久(1980)、池谷浩(1973)、江永哲、林殷源

(1991)、謝正倫(1991)、謝正倫等(1992)和范正成等(1996)。

臨界降雨線之實地應用和檢討方面之文章很多，有：瀨尾克美，船崎昌繼(1973)分析日本七個縣市中之178場土石流災害，以平均發生土石流降雨量及平均年雨量作為分析基準，整理後得到之模式；瀨尾克美，橫部幸欲(1978)，分析日本六甲山系，大戶川流域、木津上游流域之土石流發生降雨強度及有效降雨量定義出土石流危險區和安全區域之分界線模式；吳積善等(1990)以中國大陸雲南蔣家溝為研究區域，建立雲南蔣家溝土石流之發生判別式；江永哲，林啟源(1991)提出芎林、林口、豐丘、二水、溪頭和銅門之土石流安全區域和危險區域之分離線模式；范正成、林森榮(1996)，針對花蓮地區土石流發生資料分析。以土壤孔隙比、土壤粒徑、溪床平均坡度和植生狀況為參數，提出花蓮地區之土石流發生臨界降雨線模式。范正成、姚政松(1997)則得到台東地區之發生模式，並合併花、東兩地區之資料，得到此兩地區之臨界降雨線公式。於1998年，范正成、彭光宗、張國良又提出南投地區之土石流發生臨界降雨線模式。1999年，范正成、吳明峰、彭光宗接著提出適用於南投縣陳有蘭溪流域之一級溪流之通用土石流臨界降雨線預測公式。

林成偉、游繁結探討流路坡度變化對土石流堆積之影響後，依質量不減原理與動量平衡之觀點，修正土石流堆積長度之理論式。

2.2.6 土石流區之現場調查報告

泉岩男、池谷浩、伊卷幹雄由水理試驗和現場調查著手，研究陡坡河床上砂礫堆與河床特性及水流阻抗之相關性，其研究成果豐碩。

在土石流流量方面，Van Dine (1985)在加拿大 Howe Sound 地區所推估之土石流尖峰流量與兩百年洪水尖峰流量關係，土石流流量最大值為40倍之洪水尖峰流量。歐國強(1991)以中國大陸渾水溝之兩種雨型，建立了土石流先端部比流量公式。同時，歐國強也分析大陸及日本土石流現場災區之土石流先端部流量與土石流流出規模關係。田達權、吳積善(1993)分析1987~1991年間大陸蔣家溝土石流運動特性，而以土石流單位重來表徵土石流流量之變化。

有關土石流之流動性質研究方面探討了土石流先端部之物理或流理性質、土石流之沖淤性質、土石流對底床之作用力與崩積土土石流化等項目。而土石流發生機制之研究文獻，則因其誘發原因之不同又可分為環境變化、河溪級序、土壤力學特性與地下水等誘因。土石流堆積機制方面之研究文獻於此期間內發表較少，主要針對影響土石流堆積現象物理及水理因子。有關土石流衝擊力之文獻主要可區分為相關理論研究和防制與設計應用。而土石流預測、預警系統或危險區域劃定方面之文獻又可因其對象之不同細分為土石流之預測、預警系統或危險區域之劃定與土石流之對策法等三種。土石流災區之現場調查報告方面主要可分為災情分析報告與規劃設計應用。

總而言之，這些文章幾乎涵蓋了所有土石流之相關問題研究，尤其是，以災區之現場調查報告最多，這些報告提供研究者所需要之珍貴現場資料，以及初步

分析結果，建立了進一步研究之基礎。

第三章、研究區域概述

3-1 地理位置

本計畫研究範圍為台大實驗林溪頭營林區，位於本實驗林西部，主要溪流為濁水河流域之支流北勢溪。本區南北長約 10 公里，東西寬由北而南漸次展開，約 2~4.6 公里間，轄 1-6 林班。行政區為南投縣鹿谷鄉內湖村，集水區面積約 2488 公頃。因 1-6 溪頭林班地受災最為嚴重，故此整合型研究計畫-坡地災害之發生機制，即以溪頭集水區為調查重點區。

3-2 氣候與水文

由溪頭氣象站知，平均氣溫以一、二月最低，七、八月最高；海拔一千公尺以下地區，甚少降至冰點以下。其雨量尚稱豐沛，由 1941-1996 五十五年間氣象資料平均得知氣溫 16.8°C，相對溼度 89%，降雨量為 2546.8 mm，蒸發量 471.8 mm。

全年可依降雨之情形，劃分為乾季與雨季，自十月至翌年四月為乾季，其餘月份為雨季，降雨集中於夏季，佔全年總降雨量約 80%。本區氣候上屬於熱帶濕潤氣候和熱帶重濕氣候之交替型態，亦即呈現夏季高溫多雨，冬季乾燥之氣候特徵。

3-3 地形、地質及土壤

溪頭地區地形上為三面環山之谷地，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。主體建物大都位於鳳凰山脈西側山麓上，主要聯絡道路為延平溪頭公路(投 151 縣道)，沿北勢溪右岸蜿蜒而上達溪頭。

本區地質多屬第三紀層，以砂岩為主，與砂質頁岩相互交疊而成層狀。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。

溪頭鄰近地區之主要斷層為陳有蘭溪斷層及其鄰近斷層。陳有蘭斷層屬於台灣構造之大斷層，在陳有蘭溪區域至少有 8 條斷層，有水坑斷層即為其中之一；這些斷層造成此區域之岩盤極度破碎，成為土石流材料之豐富來源。斷層亦對地形造成顯著影響，陳有蘭溪谷即沿主要斷層發育而成，反應出斷層岩盤破碎，形成明顯之差異侵蝕現象。桃芝颱風在桃芝坑造成大面積之山崩(921 時即有小規模之山崩)，其位置即為斷層所通過之位置，此亦反應斷層在此區域所造成之敏感地質條件。

集集大地震 (1999/09/21) 造成台灣中部嚴重之災情，在溪頭地區亦觸發大規模之山崩。主要崩坍地點包括：(1) 鳳凰山脈西側 - 如米堤坑、土地公崙坑、三號坑、二號坑、一號坑、鹿寮坑等；及(2) 嶺頭山脈北側 - 如巨石坑、桃芝坑、流籠坑及救國坑。大量崩坍土石堆置於野溪之上游，這些土石即成為日後發生土石流之主要土石來源。

集集地震之後，桃芝颱風 (2001/07/31)，在台灣中部及東部帶來大量豪雨，

在溪頭地區，三小時內雨量高達 400 mm 以上，最大降雨強度高達 150 mm/小時，在豪雨之沖刷之下，土石順流而下，形成土石流，在園區內達 11 處土石流之多。園區內之主要溪流，幾乎全部發生土石流，造成園區房舍、飲水、供電、排水系統、道路之嚴重損害。不但造成溪頭遊樂區無法開放，遊客無法入園遊憩，間接也影響鹿谷鄉觀光產業之收入，間接社會損失龐大。

3-4 崩塌地分佈及現況

溪頭地區之主要土石流溪谷，共有 17 條，分別為：米堤坑、三號坑、二號坑、一號坑、鹿寮坑、神木坑、巨石坑、流籠坑、救國坑及入園道路之和平橋、奮鬥橋、尚進橋、正義橋、大孝橋及大仁橋等野溪；而上游地區有大量土石堆置，尚未形成土石流之野溪河谷者有桃芝坑及土地公崙坑。17 條土石流溪谷之總集水面積為 1516.7 公頃，崩塌面積超過 135.8 公頃。這些土石流溪谷之坡度均陡，上游坡度介於 55~30 度之間，中、下游之坡度介於 37~20 度之間，較平緩者下游之坡度可降至 10 度以下。因此，未來如果有豪雨，這些堆積土石將可能往下游移動，造成下游房舍、設施之重大損害，甚至危及人員傷亡。

第四章 結果與討論

從溪頭之地形、地質資料分析得知，溪頭之山坡地坡度陡峻、斷層多、屬於崩積層堆積型態，在大地震過後，原本結構不緊密之崩積型態更顯得鬆散，在桃芝颱風高降雨強度之侵襲下，原本構築在山腳和崩積層上之設施、房舍就很難避免不受土砂災害之威脅。

此外，溪頭旅館區附近有許多防災用之潛壩群，這些潛壩之溢洪口設計過於保守，雖然讓旅館區免於遭受土石流之威脅；但卻形成土石流直進之層層阻礙，因而迫使土石流中途改道轉向，造成不可挽回之人命、財產損失。

為了讓溪頭免於土石流之威脅，除了需要對溪頭土石流發生之機制作更深入之試驗研究外，在試驗研究之同時，必須有幾項之緊急處理措施。首先是，邊坡裸露之坡面，宜檢討其自然復育之速度和可能性，如果復育之速度過慢，且復育過程中有可能遭受到多次颱風豪雨之侵襲時，就有必要以人工復育來加速其植生恢復之速度。植生方法必須視坡度大小、坡面土壤之質地、厚度，岩盤裸露程度等加以選擇。坡頂地區必須檢視是否仍然有裂縫之存在，如果有裂縫存在時，靠近坡頂處之裂縫土塊需加以去除，較後方之裂縫則必須加以填補，以防止其繼續擴大。

由於溪頭地區雨量之分布極不平均，雨季時常有土砂災害或土壤沖蝕之情況發生，旱季時，尤其在旅客多之旺季，則常有缺水之顧慮，不僅用水量吃緊，遊客也很難有親水之機會，因此，溪頭地區之排水規劃並不是完全將水排出區外之北勢溪即可，其排水之規劃設計，必須依照豐枯期之雨量差異規劃設計多處之滯洪池或滯留池，這些規劃之基本要求乃是，豐水期時能排出多餘之逕流；在枯水期時則有蓄水之功能。

針對不同野溪之土石流肇因和泥砂來源，制定緊急處理措施和中長期整治計畫。尤其是緊急處理措施，必須能立即、有效地防止未來災害規模之擴大和災害損失之增加。因此，在規劃、設計上除了能顧及到中長期整治計畫之規劃、配置外，也要發揮其緊急防災之功能。尤其是，以溪頭實驗林之教學、遊憩功能而言，所有工程之規劃設計都必須顧及到安全、經濟、生態和景觀等要求。

試驗研究方面，因為崩積層之孔隙比較一般沖積層地質大很多，所以，在試驗材料方面，除了需要大坡度之水槽或水工模型試驗場外，高滲透或滲漏材料之準備亦不可或缺，試驗流量則以高強度降雨為設計基準。本研究除了基本之土石流發生機制試驗外，計畫在未來一年以水工模型試驗和數值模擬三號坑在桃芝颱風過後之土石流侵襲狀況，並檢視目前緊急處理後各項工程構造物之防災效果。

第五章結論

溪頭肇災之原因有地形陡峻、斷層多、高強度降雨、房舍多集中於谷口處、原有整治計畫和排水規劃不夠整體等。因此，除了從事更深入之水槽試驗、數值模擬和水工模型試驗，以瞭解土石流發生、運移和堆積之機制外，溪頭地區之緊急處理和中長期整體治理計畫亦是不可或缺之工作項目。

參考文獻

1. 中華水土保持學會(1992)，「水土保持手冊-工程篇」，中華水土保持學會。
2. Varnes, D.J.(1958)，「Landslides and engineering practice」，Highway Research Board, Special Report 29, pp.20-27。
3. Robert, L.S., and Raymond, J.K.(1978)，「Landslide Analysis and Control」，Specil Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp.17-27。
4. 何春蓀(1981)，「普通地質學」，五南圖書公司，台北。
5. 周必凡、李德基、羅德富、呂儒仁、楊慶溪(1991)，「泥石流防治指南」，科學出版社，北京，第 96-108 頁。
6. 李德基(1997)，「泥石流減災理論與實踐」，中國科學院水利部，成都山地災害與環境研究所。
7. 張立憲(1985)，「土石流特性之探討」，中華水土保持學報，第 16 卷，第 1 期，第 135-141 頁。
8. 游繁結、陳重光(1987)，「豐丘土石流災害之探討」，中華水土保持學報，第 18 卷，第 1 期，第 76-92 頁。
9. 林炳森、馮賜陽、李俊明(1993)，「礫石層土石流發生特性之研究」，中華水土保持學報，第 24 卷，第 1 期，第 55-64 頁。
10. 詹錢登(1997)，「土石流理論教材大綱」，行政院教育部顧問室，編號 86-土木-教材-C011。
11. 何敏龍(1997)，「土石流發生機制與流動制止結構物之研究」，國立台灣大學土木工程研究所博士論文。

12. 小橋澄治(1979)，“土石流”，新砂防特集，第 20-21 頁。
13. 片岡順、竹田泰雄、飯田修(謝豪榮譯)(1985)，“根據現地觀測分析土石流之流動”，土石流及其防治論文集，pp.91-109。
14. Takahashi, T.(1978)，“Mechanical characteristics of debris flow”，J.Hydraulics Div，ASCE，Vol.104，No.8，pp.1153-1169。
15. Johnson, A.M., and Rodine, J.D.(1984)，“Debris flow”，Slope Instability, John Wiley & Son Ltd., pp.257-361。
16. Vandine, D.F.(1985)，“Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera”，Can. Geotech, J.22，pp.44-68。
17. 武居有恆(1980)，“地表崩壞.土石預測之對策”，鹿島出版社，第 37-181 頁。
18. 蘆田和男、高橋保(1983)，“河川之土砂災害之對策”，森北出版株式會社，第 55-75 頁。
19. 游繁結(1990)，“崩落型土石流之機制研究(II)-土石流衝擊力之探討”，行政院國家科學委員會防災科技研究報告，NSC79-0414-P005-04B。
20. 山口伊佐夫(1985)，“防砂工程學”，國立台灣大學森林學系譯，台北，第 150-174 頁。
21. 張石角(1983)，“台灣土石流災害”，洪水與泥砂災害學術研究會論文集，第 27-29 頁。
22. Takahashi, T.(1991)，“Debris flow”，A.A. Balkema Publishers，Netherlands。
23. 謝正倫(1993)，“土石流預警系統之研究(II)”，國立成功大學台南水工試驗所研究試驗報告第 139 號。
24. 陳榮河(1999)，“土石流之發生機制”，土工技術，第 74 期，第 21-28 頁。
25. 謝正倫(1991)，“土石流災害危險範圍之分析與預測”，行政院國家科學委員會專題報告，NSC80-0410-E-006-029。
26. 崔之久(1996)，“泥石流沈積與環境”，海洋出版社，北京。
27. 錢寧、萬兆惠(1991 版)，“泥沙運動力學”，科學出版社，pp.435-447。
28. 陳榮河、黃燦輝、蔡丁貴、范正成、林美聆、陳宏宇(1994)，“花蓮地區土石流之研究(二)”，行政院國家科學委員會，報告編號 NSC82-0414-P002-026-B。
29. 謝正倫、江志浩、陳禮仁(1992)，“花東兩縣土石流現場調查與分析”，中華水土保持學報，第 23 卷第 2 期，pp.109-122。
30. Takahashi, T.(1981)，“Estimation of potential debris flows and their hazardous zones；soft countermeasures for a disaster”，Journal of Natural Disaster Science，Volume 3，Number 1，pp.57-89。
31. Takahashi, T.(1981)，“Debris flow”，Ann. Rev. Fluid Mech. 13，pp.57-77。
32. Egashira, S.& Ashida, K.(1992)，“Unified View of the Mechanics of Debris Flow and Bed-Load”，Advances in Micromechanics of Granular Materials，Elsevier Science Publishers B. V.，pp.391-400。