

97-45-7331

MOTC-IOT-96-HIDB009

交通道路及橋墩遭受土石流衝擊 之對策研究(1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 97 年 3 月

97-45-7331

MOTC-IOT-96-HIDB009

交通道路及橋墩遭受土石流衝擊 之對策研究(1/4)

著 者：陳景文、曾志民、賴瑞應、陳俊吉
林伯融、薛仲傑、劉惠文、魏瓊蓉

交通部運輸研究所

中華民國 97 年 3 月

97

交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策研究
(1/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1009700838

定價 400 元

國家圖書館出版品預行編目資料

交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策研究. (1/4) / 陳景文等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民97.03
面 ; 公分
參考書目:面
ISBN 978-986-01-3902-0(平裝)

1. 道路養護 2. 橋樑工程 3. 土石流

442.17

97006755

交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策之研究(1/4)

著 者：陳景文、曾志民、賴瑞應、陳俊吉、林伯融、薛仲傑、劉惠文

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 97 年 3 月

印 刷 者：德輝興業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 120 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：400 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組• 電話：(02)23496880

五南文化廣場：臺中市中山路 6 號• 電話：(04)22260330

GPN：1009700838

ISBN：978-986-01-3902-0 (平裝)

著作財產權：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策研究(1/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-01-3902-0 (平裝)	政府出版品統一編號 1009700838	運輸研究所出版品編號 97-45-7331	計畫編號 96-H1DB009
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：賴瑞應 參與人員：魏瓊蓉 聯絡電話：04-26587170 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：陳景文 研究人員：曾志民、陳俊吉、林伯融、薛仲傑 劉惠文 地址：台南市大學路1號 聯絡電話：06-3450118		研究期間 自 96 年 3 月 至 96 年 11 月
關鍵詞：土石流、橋墩、路堤、衝擊力			
摘要： 過去相關單位在設計山區跨河道路及橋樑時，僅考量溪流洪水之水位及流速，並未充分考量洪水現象差異頗大之土石流衝擊效應，在路堤、橋墩結構型式及材料選用方面對於如何強化結構設計及選用加勁材料等橋樑主體改善對策則並未深入探討。有鑒於此，本計畫擬訂四年研究期間，透過數值模擬分析工具，深入了解橋涵及橋墩受土石流衝擊破壞成因及規模程度，並檢討現有設計準則，進而提出未來強化結構設計及加勁材料選用等橋樑主體改善對策，以作為公路主管機關規劃設計山區道路橋樑時之參考。 本研究考量災害歷史、橋樑設施規模與工法及集水區環境特性等三項因子，作為選擇跨河橋樑研究地點之參考依據。經由比較分析，後續擬以台 21 線新中橫公路之信義橋(89K+959)、十八重溪橋(98K+070)及新愛玉橋(108K+770)作為研究地點。為初步了解土石流之流動過程及影響範圍，本研究以南投縣信義鄉豐丘村十八重溪之支流(編號「南投 030」潛勢危險溪流)作為試算區域，進行二維土石流流況的初步模擬，並進行模擬參數之敏感度分析，探討不同參數變化對於土石流最大堆積深度與堆積範圍之影響程度，以作為未來後續計畫執行之參考。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
97 年 3 月	400	400	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: The Strategy on Highway Embankment and Foundation of Bridge Subjected to Debris Flow Induced Loads (1/4)			
ISBN(OR ISSN) ISBN978-986-01-3902-0 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009700838	IOT SERIAL NUMBER 97-45-7331	PROJECT NUMBER 96-H1DB009
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu, Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lai, Jui-Ying PHONE: (04) 26587170 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM March 2007 TO December 2007
RESEARCH AGENCY: NATIONAL CHENG KUNG UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chen, Jing-Wen PROJECT STAFF: Tseng, Chih-Ming; Chen, Chun-Chi; Lin, Bo-Rung; Liu, Hui-Wen ADDRESS: No.1, University RD., Tainan City 701, Taiwan, R.O.C. PHONE: (06) 3450118			
KEY WORDS: Debris flow, Foundation of Bridge, Embankment, Impact force			
ABSTRACT: The correlated organizations have considered the water level and the velocity of the flood in the streams; yet they haven't sufficiently considered the impact of the debris flow in phenomena that floods vary in a wide range. They also haven't considered issues concerning amelioration of the main structure of bridges such as how to strengthen the design of structure and select strong materials within the aspects of the structure of the embankment and the bridge and the selection of the usage of materials. Thus, this project drew up a research period lasting four years to thoroughly realize the reasons and the magnitude of the destruction of the structure of bridges and its piers by analytical tools that simulate values and review the present design criteria to provide strategies for improvement for the main structure of bridges such as fortify the design of structure and select strong materials for usage as a reference for designing roads and bridges in mountains by the Authorities that are responsible for highways. This project takes three factors--the history of damage, the magnitude of bridge facilities, and the environmental conditions of watersheds etc. into consideration to decide where to process the research regarding river-crossing bridges. After analysis and comparison, Shin-yi bridge, Shih-ba-chung River bridge and New-ai-yu bridge of highway # 21 were selected as the designated site for later use. To preliminarily understand the flowing process and the range of debris flow, this research uses the branch (numbered 「No.30」 potentially dangerous gully) of Shih-ba-chung River in Nantou county Shin-Yi township Feng-chiou village as a trial of calculation for the area to proceed rudimental simulation of the 2-Ds flow of debris flow and proceed sensitivity analysis of simulation parameters, and discuss what a sensibility to the parameters affect the depth of the maximum accumulation and the range on the accumulation as a reference to future project.			
DATE OF PUBLICATION March 2008	NUMBER OF PAGES 400	PRICE 400	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策研究(1/4)

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
圖目錄	VIII
表目錄	XIX
第一章 前言	1-1
1.1 計畫緣起與目的.....	1-1
1.2 工作內容與步驟.....	1-4
第二章 土石流相關文獻蒐集分析	2-1
2.1 土石流的定義及型態	2-2
2.1.1 土石流相關定義	2-2
2.1.2 土石流發生型態	2-4
2.1.3 潛勢溪流評估	2-11
2.2 土石流發生條件.....	2-13
2.2.1 地文因素對土石流發生潛在影響	2-13
2.2.2 降雨變化對土石流發生潛在的影響	2-21
2.3 土石流流動行為與堆積特性	2-23
2.3.1 土石流流動行為	2-23
2.3.2 土石流堆積特性	2-25
2.4 土石流流變理論.....	2-28
2.4.1 土石流流變模式	2-28

2.4.2 土石流變參數	2-31
2.5 土石流衝擊力評估	2-47
2.6 土石流規模及其危害行為	2-54
2.6.1 尖峰流量與土石流規模.....	2-54
2.6.2 集水區面積與土石流規模.....	2-56
2.6.3 土石流危害方式	2-58
2.7 土石流危險度評估	2-63
2.7.1 潛勢溪流發生度評估指標.....	2-63
2.7.2 保全對象危害度評估指標.....	2-65
2.7.3 潛勢溪流危險度評估	2-66
2.8 全台土石流潛勢溪流分布現況.....	2-68
2.9 土石流防治對策之機能及種類	2-75
2.10 小結	2-78
第三章 研究區域選定原則	3-1
3.1 陳有蘭溪流域環境概述	3-3
3.1.1 水系與地文環境.....	3-3
3.1.1.1 地質特性	3-9
3.1.1.2 粒徑分佈特性	3-21
3.1.2 氣象及水文環境	3-26
3.1.2.1 颱風事件降雨量分析	3-29
3.1.3 土地利用型態	3-38
3.1.4 交通動線及跨河橋樑.....	3-41
3.1.5 土石流潛勢溪流分佈情形.....	3-51

3.1.6 土石流臨界降雨特性.....	5-54
3.2 大甲溪流域環境概述	3-76
3.2.1 水系及地文環境.....	3-76
3.2.1.1 水系	3-77
3.2.1.2 地形.....	3-79
3.2.1.3 區域地質	3-81
3.2.2 氣象及水文環境.....	3-95
3.2.3 土地利用概況.....	3-99
3.2.4 交通動線	3-105
3.2.5 歷年颱風災害分析	3-105
3.2.6 土石流潛勢溪流分佈情形.....	3-113
第四章 研究區域介紹.....	4-1
4.1 信義橋(89K+959)	4-2
4.1.1 背景資料說明	4-2
4.1.2 災害歷史	4-5
4.1.3 橋樑搶修及修復情形.....	4-9
4.1.4 橋樑災後復建	4-14
4.1.5 現地勘查	4-22
4.2 十八重溪橋(98K+070)	4-28
4.2.1 背景資料說明	4-28
4.2.2 災害歷史	4-29
4.2.3 橋樑復建與河道整治	4-35
4.2.4 現地勘查	4-50

4.3 愛玉橋 (108K+770)	4-54
4.3.1 背景資料說明	4-54
4.3.2 災害歷史	4-57
4.3.3 野溪整治	4-64
4.3.4 橋樑復建	4-66
4.3.5 愛玉橋復建後現況	4-75
第五章 土石流流動模擬初步試算	5-1
5.1 FLO-2D 模式簡介	5-2
5.1.1 模式理論架構	5-2
5.1.2 模式假設與限制	5-8
5.2 數值模擬之運算流程	5-9
5.3 地形高程及降雨資料之取得	5-10
5.4 模式數值參數決定	5-12
5.5 試算成果說明與討論	5-16
5.5.1 參數敏感度分析	5-16
5.5.2 敏感度分析討論	5-27
第六章 本年度結論及後續研究方向	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 後續研究方向	6-3
參考文獻	參-1
附錄 1 期末審查會議紀錄回覆辦理	附錄 1-1
附錄 2 期末報告簡報資料	附錄 2-1

圖 目 錄

圖 2-1	堆積層內之應力分佈 (Takahashi, 1978)	2-8
圖 2-2	土石流危險溪流之判斷流程(水土保持局, 2002).....	2-12
圖 2-3	現地應力路徑圖 (Brand, 1981)	2-13
圖 2-4	San Francisco Bay 土石流災害紀錄	2-16
圖 2-5	土石流流動狀態及各波段之粒群示意圖 (詹錢登, 2000) ..	2-25
圖 2-6	賀伯颱風過後, 南投縣信義鄉豐丘村土石流扇狀地	2-27
圖 2-7	流變模式之剪應力及剪切率關係曲線 (詹錢登, 2000)	2-28
圖 2-8	土石流堆積臨界坡度示意圖 (Johnson and Rodine, 1984) ..	2-34
圖 2-9	土石流在流槽彎曲處的堆積情形 (Johnson and Rodine, 1984)	2-37
圖 2-10	Acquabona 流域位置及 1、2、3 號測站位置圖	2-38
圖 2-11	Moscardo Torrent 流域位置圖 (Arattano et al., 1997)	2-39
圖 2-12	Kamikamihorizawa Gully 的流域及儀器架設位置圖	2-41
圖 2-13	Curah Lengkong river 的流域位置圖 (Lavigne, 2004)	2-42
圖 2-14	蔣家溝流域位置圖 (周必凡等, 1991)	2-44
圖 2-15	土石流撞擊壩體示意	2-50
圖 2-16	兩完全彈性球體分別以速度 U_1 及 U_2 相互對撞.....	2-52
圖 2-17	土石流規模大小與土石流尖峰流量之關係 (Hung, 1984)	2-55
圖 2-18	尖峰強度推求最大一次土石流體積之關係圖.....	2-55
圖 2-19	土石流流出土方量與集水面積之關係圖 (Van Dine, 1985)	2-56
圖 2-20	臺灣土石流流出土方量與集水面積關係圖	2-58

圖 2-21	土石流危害方式	2-63
圖 2-22	土石流潛勢溪流危險度判定流程圖(水土保持局，2002).....	2-67
圖 2-23	臺灣工程地質分區及重大斷裂線分布(洪如江，2002).....	2-72
圖 2-24	臺灣高潛勢土石流區位與斷層線相關位置	2-73
圖 2-25	集集地震誘發之崩塌地分佈範圍圖	2-74
圖 2-26	日本關東大地震後 60 年內之崩塌地數量統計	2-74
圖 2-27	土石流防治方法（水土保持學會，1992）	2-77
圖 2-28	各種土石流防治工法型式及配置位置	2-78
圖 3-1	陳有蘭溪流域地形高程分佈	3-4
圖 3-2	陳有蘭溪流域坡度分佈圖（林基源，2003）	3-5
圖 3-3	陳有蘭溪流域坡向分佈圖（林基源，2003）	3-5
圖 3-4	陳有蘭溪河道縱斷面圖	3-7
圖 3-5	陳有蘭溪流域地質圖	3-14
圖 3-6(a)	陳有蘭溪主流左側之河岸崩塌 (郡坑三廊坑溪匯流處對面)	3-18
圖 3-6(b)	陳有蘭溪主流左側之河岸崩塌(豐丘村對岸)	3-18
圖 3-7	研究地區土壤分佈圖（林基源，2003）	3-21
圖 3-8	土石流堆積部與源頭部粒徑分布曲線（Johnson，1971）	3-22
圖 3-9	採樣位置圖	3-23
圖 3-10	現地粒徑分布曲線	3-24
圖 3-11	現地採樣地點(洪政宏，2007)	3-25
圖 3-12	現地粒徑分佈曲線與等重量替代模擬土石粒徑曲線	3-26
圖 3-13	陳有蘭溪雨量站相關位置圖	3-28
圖 3-14	賀伯颱風-信義雨量站降雨組體圖	3-30

圖 3-15	賀伯颱風-和社雨量站降雨組體圖	3-30
圖 3-16	賀伯颱風-阿里山雨量站降雨組體圖	3-30
圖 3-17	賀伯颱風-內茅埔雨量站降雨組體圖	3-31
圖 3-18	賀伯颱風-西巒雨量站降雨組體圖	3-31
圖 3-19	賀伯颱風-東埔雨量站降雨組體圖	3-31
圖 3-20	賀伯颱風-望鄉雨量站降雨組體圖	3-32
圖 3-21	賀伯颱風-龍神橋雨量站降雨組體圖	3-32
圖 3-22	桃芝颱風-神木村雨量站降雨組體圖	3-33
圖 3-23	桃芝颱風-望鄉雨量站降雨組體圖	3-33
圖 3-24	桃芝颱風-和社雨量站降雨組體圖	3-33
圖 3-25	桃芝颱風-信義雨量站降雨組體圖	3-34
圖 3-26	桃芝颱風-溪頭雨量站降雨組體圖	3-34
圖 3-27	桃芝颱風-神龍橋雨量站降雨組體圖	3-34
圖 3-28	桃芝颱風-新高口雨量站降雨組體圖	3-35
圖 3-29	桃芝颱風-排雲雨量站降雨組體圖	3-35
圖 3-30	敏督利颱風-神木村雨量站降雨組體圖	3-36
圖 3-31	敏督利颱風-望鄉雨量站降雨組體圖	3-36
圖 3-32	敏督利颱風-和社雨量站降雨組體圖	3-36
圖 3-33	敏督利颱風-信義雨量站降雨組體圖	3-37
圖 3-34	敏督利颱風-溪頭雨量站降雨組體圖	3-37
圖 3-35	敏督利颱風-神龍橋雨量站降雨組體圖	3-37
圖 3-36	敏督利颱風-新高口雨量站降雨組體圖	3-38
圖 3-37	敏督利颱風-排雲雨量站降雨組體圖	3-38

圖 3-38 桃芝風災後陳有蘭溪集水區土地利用分佈	3-40
圖 3-39 陳有蘭溪流域-台 21 線相關地理位置圖	3-42
圖 3-40 陳有蘭溪流域土石流潛勢溪流分佈情形	3-51
圖 3-41(a) 方法一：前後 24 小時以上無降雨之一場連續雨量示意圖	3-58
圖 3-41(b) 方法二：前後 12 小時以上無降雨之一場連續雨量示意圖	3-58
圖 3-41(c) 方法三：以雨量為 4mm-3hr 為基準之一場連續降雨示意圖	3-58
圖 3-41(d) 方法四：以雨量為 10mm-24hr 為基準之一場連續降雨示意圖	3-59
圖 3-41(e) 方法五：以雨量為 4mm-6hr 為基準之一場連續降雨示意圖	3-59
圖 3-41(f) 方法六：以雨量為 10mm-12hr 為基準之一場連續降雨示意圖	3-59
圖 3-42(a) 土石流發生降雨警戒區單線法劃定示意圖	3-61
圖 3-42(b) 土石流發生降雨警戒區雙線法劃定示意圖	3-62
圖 3-42(c) 土石流發生降雨警戒區三線法劃定示意圖	3-62
圖 3-43 臺灣地區歷年來土石流發生有效累積雨量和有效降雨強度關係 圖	3-63
圖 3-44 臺灣地區歷年土石流發生之有效降雨強度和降雨延時關係圖	3-63
圖 3-45 臺灣與日本地區土石流發生最大時雨量與累積雨量比較圖	3-64
圖 3-46(a) 群集 A 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)	3-66
圖 3-46(b) 群集 B 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)	3-67
圖 3-46(c) 群集 C 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)	3-68
圖 3-46(d) 群集 D 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)	3-69

圖 3-46(e) 群集 E 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.).....	3-70
圖 3-46(f) 群集 F 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.).....	3-71
圖 3-46(g) 群集 G 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.).....	3-72
圖 3-46(h) 群集 H 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.).....	3-73
圖 3-47 日本關東大地震後 60 年內之崩塌地數量統計.....	3-75
圖 3-48 大甲溪流域分段示意圖.....	3-76
圖 3-49 大甲溪流域水系分佈圖.....	3-80
圖 3-50 大甲溪流域地質圖.....	3-86
圖 3-51 大甲溪流域活動斷層圖.....	3-92
圖 3-52 大甲溪流域土壤分佈圖.....	3-94
圖 3-53 大甲溪流域月平均雨量圖.....	3-96
圖 3-54 大甲溪流域雨量站位置圖.....	3-98
圖 3-55 大甲溪流域現況土地利用圖.....	3-102
圖 3-56 大甲溪流域土地權屬.....	3-103
圖 3-57 大甲溪流域行政區域及主要道路分佈圖.....	3-104
圖 3-58 東勢至德基段之集集地震前崩塌位置及水系圖.....	3-112
圖 3-59 敏督利風災大甲溪流域災情位置圖.....	3-112
圖 3-60 大甲溪流域土石流潛勢分佈圖.....	3-114
圖 3-61 921 集集大地震前 (88/04/01)，德基-馬鞍壩崩塌地判釋圖	3-117
圖 3-62 921 集集大地震後 (88/10/31)，德基-馬鞍壩崩塌地判釋圖	3-117
圖 3-63 桃芝颱風後 (90/11/18)，德基-馬鞍壩間崩塌地判釋圖.....	3-118
圖 3-64 敏督利颱風後 (93/07/31)，德基-馬鞍壩間崩塌地判釋圖..	3-118

圖 3-65 艾利暨海棠颱風後 (93/10/21)，德基-馬鞍壩崩塌地判釋圖	3-119
圖 3-66 大甲溪流域，德基至馬鞍壩間土石流潛勢溪流位置圖	3-119
圖 4-1 信義橋上游牛相門及西巒大山崩塌分佈	4-2
圖 4-2 郡坑溪及其野溪集水區範圍圖	4-4
圖 4-3 賀伯颱風期間信義橋 A1 橋台附近大量土石淤積災況	4-6
圖 4-4 賀伯颱風期間信義橋橋面遭土石淤埋情形	4-6
圖 4-5 土石淤積造成信義橋樑淨空不足，橋面抬升流失	4-7
圖 4-6 桃芝颱風期間，信義橋第一、二跨橋面流失情形	4-7
圖 4-7 桃芝颱風後 P1 橋墩墩柱營水面遭土石流撞擊造成鋼筋外露 ..	4-8
圖 4-8 賀伯颱風期間，洪水土石沖刷毀損兩岸堤防	4-8
圖 4-9 桃芝颱風期間，下游側堤防址部遭沖刷淘空情況	4-9
圖 4-10 賀伯颱風過後，信義橋進行 P4 橋墩包墩補強	4-10
圖 4-11 民國 89 年 921 地震過後，信義橋再度進行包墩補強作業	4-10
圖 4-12 便道平面佈置示意圖	4-11
圖 4-13 便道引道剖面圖	4-11
圖 4-14 信義橋臨時便道情形	4-12
圖 4-15 怪手堆置管涵、清理河道	4-12
圖 4-16 臨時便道通車後之情形	4-13
圖 4-17 復建之 P1 全套管基樁施工	4-15
圖 4-18 預力梁施作及完成後吊裝之過程	4-16
圖 4-19 信義橋復建完成後通車之情形	4-17
圖 4-20 信義橋復建立、平面圖	4-18
圖 4-21 補強及重力式擋土牆、紐澤西護欄詳圖	4-19

圖 4-22 橋台平面、立面圖	4-20
圖 4-23 橋台及基礎配筋詳圖	4-21
圖 4-24 信義橋修建後現況	4-22
圖 4-25 信義橋修建後 p3 橋墩情形	4-22
圖 4-26 河道顆粒粒徑(攝於 96.09.27)	4-23
圖 4-27 桃芝颱風期間信義橋上游集水區新增崩塌地分佈情形	4-24
圖 4-28 敏督利颱風期間信義橋上游集水區新增崩塌地分佈情形	4-26
圖 4-29 敏督利颱風過境，上、下游側左岸設置頂型塊及砌石護岸之情形	4-27
圖 4-30 十八重溪流域集水區範圍圖	4-28
圖 4-31 十八重溪周遭地質圖	4-29
圖 4-32 賀伯颱風期間十八重溪橋北端橋孔遭土石淤埋情形	4-30
圖 4-33 碧利斯颱風過境，由橋樑上游側空拍情形	4-30
圖 4-34 碧利斯颱風過境，上游土石流沖積扇堆積情形	4-31
圖 4-35 桃芝颱風過後十八重溪橋 A1 橋台錯位破壞	4-31
圖 4-36 十八重溪橋上部結構遭推移達兩公尺之情形	4-32
圖 4-37 桃芝颱風後十八重溪橋梁 A2 橋台及護岸沖刷破壞情形	4-33
圖 4-38 賀伯颱風期間，郡大林道受災情形	4-34
圖 4-39 賀伯颱風期間，十八重溪橋南端橋台上游護岸破壞情形	4-34
圖 4-40 碧利斯颱風後十八重溪橋上游側土石流沖積扇擠壓河道情形	4-35
圖 4-41 桃芝颱風過後十八重溪橋南端橋面崩落情形	4-35
圖 4-42 桃芝颱風期間十八重溪支流集水區新增崩塌地分佈情形	4-36
圖 4-43 敏督利颱風期間十八重溪支流集水區新增崩塌地分佈情形 ..	4-37

圖 4-44 台 21 線陳有蘭溪橋筆石橋復建工程計畫路 線平面圖	4-38
圖 4-45 陳有蘭溪橋復建工程北段施工情形	4-39
圖 4-46 敏督利颱風過境上游主流緊逼左岸；下游側呈瓣狀流路	4-40
圖 4-47 陳有蘭溪橋復建工程北段 P4 全套管樁基礎施工過程	4-41
圖 4-48 陳有蘭溪橋復建工程北段墩柱施工完成情形	4-42
圖 4-49 陳有蘭溪橋復建工程北段鋼箱型梁分段組裝情形	4-43
圖 4-50 陳有蘭溪橋復建工程北段橋樑主進行配筋、組裝作業情形 ..	4-44
圖 4-51 陳有蘭溪橋復建工程橋樑結構灌漿情形	4-45
圖 4-52 陳有蘭溪橋復建工程北段 P3~P5 間橋面版鋼筋配置作業	4-46
圖 4-53 陳有蘭溪橋復建工程完工情況	4-46
圖 4-54 十八重溪橋毀損之平面 及縱斷面示意圖	4-47
圖 4-55 十八重溪鋼便橋緊急搶修工程圖	4-48
圖 4-56(1) P1~P3 橋墩帽梁處設施垂直止震塊並修復水平向止震塊...	4-49
圖 4-56(2) 橋台處止震塊施設圖	4-49
圖 4-57 P1~P3 橋墩採行鋼筋混凝土與鋼鈑圍繞工法之補強圖	4-49
圖 4-58 十八重溪橋從上游往下游拍攝之情形	4-50
圖 4-59 石籠堤防受土石、洪水流破壞	4-51
圖 4-60 現地初步測量	4-52
圖 4-61 十八重溪支流(南投 030)與十八重溪主河道匯集處	4-52
圖 4-62 十八重溪支流(南投 030)河道粒徑	4-53
圖 4-63 桃芝颱風前愛玉橋(圈示處)周邊環境概況空拍畫面	4-55
圖 4-64 新、就愛玉橋橋址位置圖	4-56
圖 4-65 桃芝颱風期間和社溪支流集水區新增崩塌地分佈情形	4-58

圖 4-66 桃芝風災後愛玉橋橋體及橋台翼牆遭土石流磨蝕的情形	4-58
圖 4-67 桃芝颱風愛玉橋在土石清除後由下游往上游拍攝之畫面	4-59
圖 4-68 愛玉橋受和社溪土石流淹沒淤埋之情形(林呈攝於 90.8.1)	4-60
圖 4-69 敏督利颱風期間和社溪支流集水區新增崩塌地分佈情形	4-61
圖 4-70 敏督利颱風後愛玉橋遭土石流淤塞及施工機具遭掩埋之情況	4-62
圖 4-71 敏督利颱風後愛玉橋上下游野溪河道遭土石嚴重淤滿之畫面	4-62
圖 4-72 愛玉橋上游野溪在歷經民多次颱風後河道土石堆積之情況..	4-63
圖 4-73 愛玉橋上游野溪左岸護岸基腳已被淘空(圈示處).....	4-63
圖 4-74 於敏督利颱風前由愛玉橋下游側往上游端所拍攝之畫面	4-65
圖 4-75 愛玉橋上游河道護岸情況.....	4-65
圖 4-76 愛玉橋復建工程之工程平面圖	4-67
圖 4-77 愛玉橋復建工程往神木村叉路之工程平面與縱面圖	4-68
圖 4-78 愛玉橋復建工程之線型平面與縱斷面圖	4-69
圖 4-79 愛玉橋復建工程往舊愛玉橋叉路之工程平面與縱面圖	4-70
圖 4-80 愛玉橋復建工程之橋墩橫斷面圖	4-71
圖 4-81 愛玉橋復建工程之 P1 橋墩詳圖	4-72
圖 4-82 愛玉橋復建工程之 P2 橋墩詳圖	4-72
圖 4-83 愛玉橋復建工程之鋼箱型梁平面配置及立面圖	4-73
圖 4-84 愛玉橋復建工程之上部結構詳圖	4-73
圖 4-85 愛玉橋復建工程橋址上游大量形成土石堆積於河道中之情形	4-74
圖 4-86 愛玉橋復建工程完工後現況(攝於 96.10.04)	4-75

圖 4-87 愛玉橋 P2 橋墩基礎補強情形(攝於 96.10.04).....	4-76
圖 5-1 模式試算區域位置圖	5-1
圖 5-2 座標系統圖	5-2
圖 5-3 描述流體變形之剪應力與剪應率關係	5-3
圖 5-4 降伏應力與體積濃度相對圖.....	5-7
圖 5-5 動力黏滯係數與體積濃度相對圖	5-7
圖 5-6 桃芝颱風路徑圖	5-11
圖 5-7 陳有蘭溪流域雨量觀測站分佈圖（交通部公路局，2004） ...	5-11
圖 5-8 桃芝颱風期間，和社雨量測站之降雨組體圖	5-12
圖 5-9 模擬區清水流流量歷線.....	5-13
圖 5-10 模擬區土石流流量歷線.....	5-13
圖 5-11 不同運動方程式堆積深度模擬結果比較	5-17
圖 5-12 不同運動方程式堆積區最大流速模擬結果比較.....	5-18
圖 5-13 體積濃度與堆積區土方量關係圖	5-19
圖 5-14 體積濃度與最大流速關係圖.....	5-19
圖 5-15 體積濃度 20%-80%對堆積深度之分佈圖	5-20
圖 5-16 體積濃度 20%-80%之最大流速分佈圖	5-21
圖 5-17 體積濃度（0.65-0.69）與堆積土方量關係圖	5-22
圖 5-18 體積濃度（0.65-0.69）與最大流速關係圖.....	5-22
圖 5-19 體積濃度 65%-69%對堆積深度之分佈圖	5-23
圖 5-20 體積濃度 65%-69%之最大流速分佈圖	5-23
圖 5-21 曼寧粗糙係數與堆積土方量關係圖	5-24
圖 5-22 曼寧粗糙係數與最大流速關係圖	5-24

圖 5-23	不同曼寧粗糙係數對深度分佈圖	5-25
圖 5-24	不同曼寧粗糙係數對最大流速之分佈圖	5-25
圖 5-25	比重與堆積土方量關係圖	5-26
圖 5-26	比重與最大流速關係圖	5-26
圖 5-27	不同土石比重所對應之堆積深度分佈圖	5-27
圖 5-28	不同土石比重對最大流速之分佈圖	5-27

表 目 錄

表 2-1	重大土石流案例集水區與崩塌特性之比較.....	2-10
表 2-2	土石流發生之坡度特性（周韋鉉，2006）.....	2-14
表 2-3	臺灣地區土石流之現場地形坡度（林炳森，1996）.....	2-15
表 2-4	土石流發生臨界公式一覽表.....	2-19
表 2-4	土石流發生臨界公式一覽表（續）.....	2-20
表 2-5	土石流發生之降雨特性（呂金彥，2002）.....	2-22
表 2-6	抗剪強度與體積濃度之關係（Vallejo，1989）.....	2-32
表 2-7	前人現地取樣試驗所得之賓漢降伏應力與賓漢黏滯係數整理表.....	2-35
表 2-8	Acquabona Creek 土石流流速與流動深度(Berti et al.，2000)	2-38
表 2-9	1990~1997 Moscardo Torrent 土石流資料.....	2-40
表 2-10	Moscardo Torrent 中利用地音探測於 3 測站測得之流速.....	2-40
表 2-11	Kamikamihorizawa Gully 1976 至 1980 之土石流實測資料...	2-41
表 2-12	Curah Lengkong river 1999~2001 年間土石流資料.....	2-43
表 2-13	蔣家溝 1996 至 1997 年間土石流資料整理（周必凡等，1991）...	2-45
表 2-14	日本土石流土砂流出量迴歸公式表（日本建設省，1989）	2-57
表 2-15	集水區內地質岩性發生度基準之評分指標(水土保持局，2002).....	2-64
表 2-16	保全對象危害度評估一覽表(水土保持局，2002).....	2-66
表 2-17	各縣市土石流潛勢溪流數量統計.....	2-71
表 3-1	陳有蘭溪流域各高程、坡度及坡向面積百分比（林基源，2003）....	3-3
表 3-2	陳有蘭溪流域主支流屬性.....	3-6
表 3-3	陳有蘭溪流域地層比對表.....	3-13

表 3-4	陳有蘭溪流域土壤組成百分比（林基源，2003）	3-20
表 3-5	明坑採樣結果（張世樺，2001）	3-22
表 3-6	現地明坑採樣結果(洪政宏，2007).....	3-25
表 3-7	阿里山氣象站（1971～2003）氣候資料統計表.....	3-27
表 3-8	陳有蘭溪流域雨量測站基本資料	3-27
表 3-9	研究區相關氣象站月平均降雨統計表（單位：公釐）	3-29
表 3-10	陳有蘭溪流域特定區域使用狀況表	3-39
表 3-11	土地使用分區統計表	3-39
表 3-12	桃芝颱風期間台 21 線新中橫公路橋樑災害彙整.....	3-43
表 3-13	七二水災期間台 21 線新中橫公路沿線災害彙整.....	3-44
表 3-14	台 21 線跨河橋樑結構形式表.....	3-49
表 3-14	台 21 線跨河橋樑結構形式表(續).....	3-50
表 3-15	陳有蘭溪流域土石流潛勢溪流基本屬性.....	3-52
表 3-15	陳有蘭溪流域土石流潛勢溪流基本屬性(續).....	3-53
表 3-16	國內外關於土石流發生降雨特性之相關研究文獻	3-54
表 3-17	不同定義之降雨參數指標.....	3-55
表 3-18	各種土石流降雨警戒值模式類型相關文獻.....	3-55
表 3-19	土石流發生降雨警戒參數計算有無考量前期降雨量	3-56
表 3-20	各種雨場分割方法曾經使用過之學者	3-57
表 3-21	各種警戒區劃分方法	3-61
表 3-22	歷年南投地區土石流發生期間之颱風暴雨降雨特性分析	3-65
表 3-23	民國 89 年 6 月~90 年間，南投地區土石流發生臨界降雨量.....	3-74
表 3-24	中央氣象局臺中氣象站資料表	3-96

表 3-25	大甲溪流域內雨量站位置分佈	3-97
表 3-26	大甲溪流域現況土地利用一覽表	3-100
表 3-27	大甲溪流域現況土地利用一覽表	3-101
表 3-28	七二水災期間台 8 線中橫公路沿線災害彙整.....	3-109
表 3-28	七二水災期間台 8 線中橫公路沿線災害彙整(續).....	3-109
表 3-29	大甲溪流域土石流潛勢溪流基本屬性.....	3-115
表 3-29	大甲溪流域土石流潛勢溪流基本屬性(續).....	3-116
表 4-1	郡坑溪上游支流基本屬性表.....	4-3
表 4-2(a)	郡坑溪上游十甲附近野溪整治斷面位置及項目表.....	4-24
表 4-2(b)	郡坑溪上游三十甲附近野溪整治斷面位置及項目表.....	4-25
表 4-2(c)	三十甲至郡坑溪口附近野溪整治斷面位置及項目表.....	4-25
表 4-3	民國 92 至民國 94 年各單位整治項目內容.....	4-36
表 4-4	愛玉橋基本資料表	4-54
表 4-5	愛玉橋復建工程之基本資料表.....	4-66
表 5-1	降伏應力、動力黏滯係數與體積濃度關係表.....	5-6
表 5-2	和社雨量測站在桃芝颱風期間之降雨量最大值.....	5-12
表 5-3	FLO-2D 模式使用參數值	5-16
表 5-4	不同控制方程式模擬結果.....	5-17
表 5-5	體積濃度與堆積深度、流速及土方量關係.....	5-19
表 5-6	體積濃度 (0.65-0.69) 堆積區模擬結果.....	5-22
表 5-7	曼寧粗糙係數 (0.025-0.4) 堆積區模擬結果.....	5-24
表 5-8	土石比重 (2.4-2.7) 堆積區模擬結果.....	5-26

第一章 前言

1.1 計畫緣起與目的

臺灣為一狹長型海島，位處歐板塊和菲律賓板塊之交界處，地質條件較為脆弱。全島面積約 36,000 平方公里，但 73.6% 為山坡地及高山林地，造就地勢相當險峻。其次，臺灣地區每年 5 月~10 月豐水期的颱風及梅雨季節所挾帶之集中性豪雨，造成降雨型崩塌的數量及規模居高不下；再者，從 921 集集大地震過後，因(a)溪谷堆積大量土石(b)溪谷側向邊坡之土石強度減弱，遇水較易崩解(c)排水路徑改變（包含地表及地下），使原先不易發生處較易發生及(d)裸露地增加，造成邊坡更容易被沖蝕及切割，而不穩定等因素使原本破碎的岩層更易產生新的地震型崩塌。在此兩大主因作用下所誘發之大規模崩塌，主要分佈於河系的邊坡及山稜線附近。

在特殊地文條件與水文環境交互作用下，臺灣地區許多 1~2 級河序溪流之集水區均符合(a)降雨量大(b)豐富鬆散土砂量及(c)陡峻的溪床坡度等潛在土石流發生屬性。早期山坡地開發利用行為尚屬低密度，民眾活動範圍並未進入土石流易致災區域，即使發生土石流也不致明顯波及民眾生命與財產安全，因而未受到重視。但是，近年隨著經濟大幅成長，山區開發程度也逐年擴大，政府為了均衡區域發展並促進經濟持續成長，正著手建立環島公路網，勢必造成開發範圍逐漸往山地區域發展。

山區道路及橋樑設施平時除扮演維持居民出入之交通及經濟活動功能外，更在颱風災害期間扮演居民疏散避難及救災之角色。根據農委會水土保持局委託財團法人成大研究發展基金會針對土石流潛勢溪流調查結果發現，臺灣地區目前有 1,420 條土石流潛勢溪流(農委會水土保持局，2002)，其中許多溪流與山區道路橋樑縱橫交錯。因土石流所帶來之流體壓力及挾帶的巨石、流木等衝擊力，可能造成橋樑結構

受損並因河床沖刷而導致橋基沈陷傾倒，造成避難及救災有效時程上極大影響，如民國 85 年賀伯颱風、87 年瑞伯颱風、90 年桃芝颱風及納莉颱風、93 年敏督利颱風及艾利颱風迄 94 年海棠颱風及泰利颱風等事件即是明顯例子。

過去目前相關單位在設計山區跨河道路及橋樑時，僅考量設計洪水之水位及流速，在路堤、橋墩結構型式及材料選用方面，並未充分考量洪水現象差異頗大之土石流衝擊效應。雖然財團法人臺灣營建研究院(1999)及國立臺北科技大學(2002)皆曾針對跨越土石流溪流之跨河橋樑設計準則進行研究，並提出以下數點重要結論與建議：

- 1.橋涵對路線土石流防治的措施，一般以排導工程與保護性措施為主，使土石流能順利通過路線設施所占的地段，不致對其造成破壞。在地形有利時，也可在路線設施上游修築攔擋和停淤工程，以減小土石流規模，增加路線設施的安全度。
- 2.在公路橋樑規劃方面，建議事項如下：
 - (1)重要公路橋樑應儘可能避開地質敏感地帶。
 - (2)土石流橋樑應提高設計標準，對土石流予以特殊考量。
 - (3)野溪儘可能採大跨距，橋臺宜置於溪床外，以加大土石流通水斷面。
 - (4)橋樑淨空之設計應考慮土石流之運動行為。
- 3.目前國內涵洞最大斷面僅為 3m×3m，而國內土石流之溪床堆積最大粒徑均超過 2.5m，故涵洞一遇土石流極易堵塞。因此建議在設計觀念上改採犧牲性涵洞，當土石流規模大到某一程度時，涵洞即因土石壓力而潰決，避免因涵洞壅塞導致土石沿路面流入民房或因土石回淤蓄積過大土石壓力，增加對溪流兩岸及河床的切刷能力。
- 4.「新建橋樑」規劃與準則建議事項：
 - (1)避開土石流發生潛能較高之區域，尤其對於可能經過土石流堆積

區之道路，應設法使道路位置往河川上游方向遷移。

(2)若道路位置受到諸多條件限制或無法避開土石流發生潛能較高之區域時，應考量是否有可能利用不同的道路結構型式因應處理。

(3)倘若上述方法皆不可行，則須考量於河川上游處，設立相關土石流防治工法作為屏障，或以交通管制方式，禁止人車在大雨時期通行該段道路，以降低土石流危害。

5.橋樑之規劃設計因應土石流於不同區段而有不同因應處理，通常土石流有發生段、輸送段、淤積段及停止段等四區段，根據這四種不同區段，橋樑因應土石流之規劃設計原則，可歸納出四種因應措施：

(1)道路橋樑局部改線

(2)土石流發生段及輸送段之因應措施，如橋樑或涵洞(攔阻措施)、過水路面及土石流遮護棚等。

(3)土石流淤積段及停止段之因應措施，如橋樑或涵洞(河床改善、設立攔阻措施、降低流動材料淤積)及明隧道等。

(4)土石流防治綜合治理。

過去相關研究對於跨越土石流溪流之跨河橋樑，僅提出相關因應土石流災害之橋樑設計準則及設計案例，並建議在河川上游處，設立相關土石流防治工法作為屏障。但對於如何強化結構設計及選用加勁材料等橋樑主體改善對策則並未深入探討。有鑒於此，本計畫擬訂四年研究期間，透過數值模擬分析工具，深入了解橋涵及橋墩受土石流衝擊破壞成因及規模程度，並期由檢討現有設計準則，進而提出未來強化結構設計及加勁材料選用等橋樑主體改善對策，以作為公路主管機關規劃設計山區道路橋樑時之參考。

1.2 工作內容與步驟

本委辦計畫全期預計以四年時間完成，首先將蒐集國內外相關土石流分析理論及臺灣歷次重大土石流災害記錄進行分析比對，透過系統性的方式選定一合適區域作為跨河道路橋樑之研究範圍，經由研究區域水文、地文及相關設施結構物的資料收集與分析，未來透過數值模擬分析工具，深入瞭解交通結構物受土石流衝擊破壞成因及規模程度，並期由檢討現有設計準則，確實瞭解穿越土石流溪流結構物之工程設計盲點，提出未來強化結構設計及加勁材料選用等改善對策。本研究冀望由實務性設計建議的提出，能作為未來交通主管單位設計山區跨河結構物及相關防災教育訓練課程之參考依據。

本計畫第一年之具體工作項目詳列如下：

- 1.土石流相關研究文獻蒐集與整理。
- 2.土石流相關分析理論蒐集與探討。
- 3.歷年重大土石流災害記錄蒐集分析。
- 4.交通結構物受土石流衝擊影響研究區域選定。
- 5.研究區域水文、地文及設施結構物資料蒐集分析。

本研究團隊第一年首先針對土石流之相關文獻、研究報告及災損案例進行蒐集整理分析，並進一步歸納整理相關土石流之分析理論與方法，以提供下一年度研訂交通結構物受土石流影響分析方法的參考。另外，本年度也針對研究區域內之水文、地文及設施結構物資料進行收集整理，以提供未來土石流對交通結構物衝擊之模擬分析與相關防治對策擬定之參考。為考量計畫執行之效益性與代表性，研究區域選定必須具備一定災害規模或代表性之交通結構物。因此，在研究區域選定原則係依據土石流發生災害歷史、土石流再發性、跨河道路及橋樑工程設施重要性等因子，選定一區域作為研究地點。因此，本研究計畫所需蒐集資料涵蓋過去國內外土石流相關研究、流域基本資

料、因颱風事件所爆發土石流之災害資料及跨河結構物基本資料等項目。

第二章 土石流相關文獻蒐集分析

土石流是指大量土石伴隨著水流急速流動的自然現象，土石流一詞源自 Murgang 或 Mure 之釋詞；日本釋為土石流，應與釋詞引用有關，一般譯為 Debris flow。臺灣直接引用日本之譯名，亦稱土石流。土石流主要發生於野溪坑溝，有時亦在山坡面，因含水量增加到一定含量時而發生流動現象，又稱為土流或泥流(Mud flow)。

土石流與一般崩塌(landslide)間最顯著的不同點是，土石流具有巨大礫石集中且隆起呈波段的先端部，流動時大小石塊間由於相互碰撞，時而發出隆隆巨響，在鄰近地區甚至可以感受到地面傳來的震動，其聲勢相當驚人。當土石流沿溪流流下，由於陡峭的溪床提供足夠的勢能，使其對溪床及其兩側岸坡進行淘刷而擴大土砂礫石的攜出規模，不僅造成溪谷及其沿岸邊坡土石的不穩，並加速惡化山坡地的水土資源保育功能。一旦大量土石流出谷口後，土石流先端部粗大礫石挾帶巨大的動量與直進的慣性作用，可以衝出谷口向前運行一段距離後才逐漸停積下來。後續的土石流動因流路受阻而有部分土砂呈溯源堆積，並使部分土砂朝側向分散流下淤積，而逐漸形成扇狀的堆積型態。

過去，土石流不僅在臺灣造成災害，於日本、美國、中國大陸以及奧地利等地亦釀成多起嚴重災害。在國內外有關土石流研究頗多，主要可分為六大主題（黃宏斌，1993）：

- 1.土石流的發生機制；
- 2.土石流的流動性質；
- 3.土石流的堆積特性；
- 4.土石流產生的衝擊力與防治工法；
- 5.土石流發生預測與危險區劃定以及土石流預警系統的開發、研究；
- 6.土石流現場調查報告、分析。

本計畫針對過去土石流相關研究進行整理、分析，由土石流基本定義、發生條件、流動機制、堆積特性、流變理論、危害行為及災害防治對策……等相關特性作一分析說明，以作為後續研究區域選定、土石流流動模擬及橋樑形變模擬之參考。

2.1 土石流的定義及型態

2.1.1 土石流相關定義

土石流為融合土、砂、礫石及水所形成之流動體，探究其種種行為均與以往固態物質或牛頓流體之認知上有所不同。自 Varnes (1958) 針對土石流進行定義後，後續有 Swanston (1976)、小橋 (1980)、土屋 (1980)、何春蓀 (1981)、蘆田 (1983)、Johnson & Rodine (1984)、林裕益 (1988)、周必凡 (1991)、水土保持技術規範 (1992) 等陸續提出，分別說明如下：

1.Varnes D. J. (1958)

土石流屬於濕流 (wet flow) 的一種，為含有高比例的粗質碎屑。經常在豪雨來臨時，因逕流所造成的急流沖刷地表土壤時發生，尤其是在具有深層堆積土壤的山坡地及植被除去時更易發生。

2.Swanston D. N. (1976)

土石流係指是包含沿著陡峻溪谷快速向下移動的水、土、岩石和有機體之混合流體。經常發生於陡坡的一次或二次溪谷，並由溪谷兩旁坡面土體滑入溪中，成堆積狀或運送而下。

3.小橋澄治 (1980)

土石流為土石與水結合一體，集體搬運而下，經常含有大岩塊、大礫石及流木。大的岩塊在前滾動、滑動而下。

4.屋昭彥 (1980)

依土砂運動與堆積方式，將土砂流動區分為土石流、泥流和土砂

流 (Sediment flow) 等三類。其中屬於土石流者，其先端部為含有巨大之岩石礫群，具衝擊力與破壞力，以及直進性，後續土砂則屬泥流或高濃度之土砂流。一般而言，先端部在坡度 $4^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 之地形停積，而後續水流越過停積的先端部後繼續流下，形成土石流堆積部，常為災害之原因。

5.何春蓀 (1981)

土石流是因地表面岩屑經飽和含水後，岩石、岩塊和土壤加水混合在一起的可塑性塊體運動。

6.蘆田和男 (1983)

土石流為水和土砂礫之混合物，基於水的作用，以相當速度流動的一種連續體。

7.Johnson & Rodine (1984)

土石流通常混合少量黏土、空氣與水之顆粒狀固體，在緩坡上快速流動之過程；有時土石流之組成物質也含有木頭、樹枝等。

8.林裕益 (1988)

土石流係指坡面上之未固結沈積物或風化礫石、岩屑等，由於受豪雨或逕流集中的影響，使地表層含水量迅速增加，若此含水量超過某種程度後，則坡面土體內部便呈不穩定狀態，隨即由洪流挾帶而下，並沿破壞面呈集體運動型態進行。

9.周必凡等人 (1991)

泥石流（或稱土石流）為鬆散土體和水的混合體在重力作用下，沿自然坡面流動之現象。

10.水土保持技術規範 (1992)

土石流是泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物受重力作用後所產生的流動體。巨觀而言，水與固態物質因充分混合之結果，使

土石流之運動型態與力學機制脫離一般牛頓流體之範疇，而呈現複雜之力學特性。

土石流與一般挾砂水流（sediment-laden flow）不同，土石流的特點是歷時短暫、同時又含有大量運動著的岩石鬆散碎屑物，並且爆發突然，出現頻率較低。由於土石流固體物質飽和度（泥砂體積濃度）如此之高，以至於土石流破壞力極高。具有高泥砂體積濃度乃是土石流重要特徵之一。

而土石流具有如下特點：即運動不穩定，通常呈現有巨流性質，巨礫集中於先端部，直進性強遇障礙物不產生繞流，撞擊力大。一般來說，土石流要具備（a）大量鬆散的堆積土體，（b）陡峻的地形，（c）一定強度的降水激發等三方面之條件。豐富的鬆散土砂能提供土石流所需的固態物質，充分之水分潤滑土石流內固體物質並降低固態物質的摩擦力，促使固態物質液化以助於流動，足夠大的坡度提供土石流流動的動力，使土石流克服摩擦力後繼續向低處流動。當土石流開始流動，對溝谷兩側及河床底部造成侵蝕沖刷，崩塌下來的破碎岩石便會直接增加土石流的土石方量。所以有時在上游地區些微的崩坍或不當棄土，經此連鎖反應，土石方猶如滾雪球般越來越多，終至不可收拾。

2.1.2 土石流發生型態

土石流成因複雜，對於土石流發生現象之描述常存有差異。因此，不同學者針對土石流之發生特性提出相關發生型態的分類方法，但大致都能符合實際現況，以下針對國內外學者對於土石流發生型態之分析成果作一說明。

1. 中筋氏（1977）調查日本仁淀川流域 140 個土石流災區，將其發生類型歸納為四類：

(1) 大規模崩塌誘發型：

主要乃坡面、溪岸發生大規模崩塌，規模大，破壞性強，發生頻率佔 19%。

(2)源頭部崩塌誘發型：

源頭部崩塌，再加上溪床堆積物，是土石量大增之土石流，發生頻率佔 32%。

(3)小規模崩塌誘發型：

流域內各處崩塌土砂堆積溪床而成，發生頻率 44%。

(4)溪床堆積物流動型：

近飽和之堆積層由於逕流形成蝕溝土石流，發生頻率佔 5%。

由中筋氏對日本土石流災區所調查的資料發現，土石流發生頻率較高的幾種類型，其發生大多伴隨溪流沿岸發生大小不一規模的崩塌，單純僅由溪床堆積物沖刷形成土石流所佔的比例相當小，由此可見邊坡土體崩塌與土石流的發生，應具有相當程度的關係。

2.武居有恆（1980）認為土石流發生可以概分為五種類型，包括：

(1)溪床沖刷型：

溪谷上堆積土砂之土石流化現象。

(2)天然壩潰決型：

山腹或溪谷之崩積物堆成天然土壩，受水流作用再度崩潰形成土石流之現象。

(3)山腹崩壞型：

山腹斜面崩落土砂之土石流化現象或崩落土砂衝擊溪床導致堆積物之土石流化現象。

(4)地滑型：

黏土質邊坡滑動之流動化現象。

(5)火山噴發型：

火山爆發所形成火山碎屑物之土石流或泥流現象。

3.張石角（1983）觀察並記錄臺灣曾發生土石流的災區，根據其發生機制大至區分為兩類：

(1)山谷型土石流：

堆積在山谷中之深厚未壓密土石，被豪雨帶來之強大逕流與沖蝕作用而形成。特徵是含水量高，可能在 60%以上，故運動極為快速。

(2)地滑型土石流：

發生於邊坡，由山崩或地滑產生。滑動面位於風化層內或風化層下淺處之地滑容易形成土石流。

4.山口伊左夫（1985）依土石流發生的因素，將土石流分為六類：

(1)黏土礦物生成地帶的土石流。

(2)來自新期火山性堆積物的土石流。

(3)來自風化細粒土堆積的土石流，呈大孔隙率的堆積，，由於降雨使孔隙水壓異常上升，引起土石流。此類土石流發生於山腹坡面的堆積土，亦有從急坡降溪床的堆積物所引發。

(4)由於溪流壅高形成的土石流。

(5)由火山灰的覆蓋而發生土石流。

(6)因火山爆發的土石流。

5.游繁結（1990）將山谷中堆積土砂受逕流之作用而發生的土石流謂之標準型土石流；將崩落土砂撞擊堆積土砂轉變為土石流之現象謂之崩落型土石流。

6.周必凡（1991）按照土石流觸發因素等將土石流分類為：

(1)激發類土石流：

由棉雨、大雨、暴雨、冰雪融冰、冰湖或水庫潰決等激發造成。

(2)觸發類土石流：

由強烈地震、火山、大爆破、崩塌、滑坡等觸發造成，地震強度一般需要在 7 級以上之地區。

(3)誘發類土石流：

由森林破壞、採礦煤渣、地下水湧流等誘發造成。

7.水土保持技術規範(1992)按照土石流內部組成顆粒大小及含量分為：

依組成材料粗、細泥砂顆粒之含量，可將土石流概分如下：

(1)礫石型土石流：

粒徑 0.1mm 以下之細顆粒，泥砂含量小於 10%，且粒徑 2.0mm 以上之礫石含量超過 50%者。

(2)泥流型土石流：

粒徑 0.1mm 以下之細顆粒泥砂含量超過 50%，且粒徑 2.0mm 以上之礫石含量小於 10%者。

(3)一般型土石流：

粒徑 0.1mm 以下之細顆粒泥砂含量為 10%~50%間者泛稱。

8.陳榮河（1999）彙整前人研究，認為土石流發生機制有四種：

(1)滑動型土石流：

Takahashi(1978)由理論推測，若邊坡坡度大於 20° ，滑動距離超過塊體厚度數十倍之距離，並有充足水量之供應，通常塊體會產生液化現象。大塊體滑動初期，除滑動面附近位移量較大外，滑動體內變形量並不大。若持續滑動，塊體內之變形量逐漸增大，

使整體結構逐漸瓦解，此時，若有足夠的水量加入於孔隙之中，使土體飽和並發生液化現象，終將形成土石流。

(2)潰壩型土石流：

由滑動造成之天然土石壩，其潰決常急遽發生於極短的時間內，特別是陡峭易發生土石流之溝谷處。潰壩型之土石流現象，包括溢流之沖蝕、土體之驟然崩潰與漸進式之破壞。

(3)沖蝕型土石流：

如圖 2-1 所示為兩種不安定情形。第一種情況為剪應力均大於剪力強度，故整個堆積層處於不穩定之狀態；第二種情況則僅於地表 a_L 之深度範圍內不穩定。

(4)孔隙水壓引發土石流：

地表下岩層破碎，而奉獻中地下水受到他處高水頭作用產生極大之正孔隙壓力，而造成局部土體破壞產生土石流。

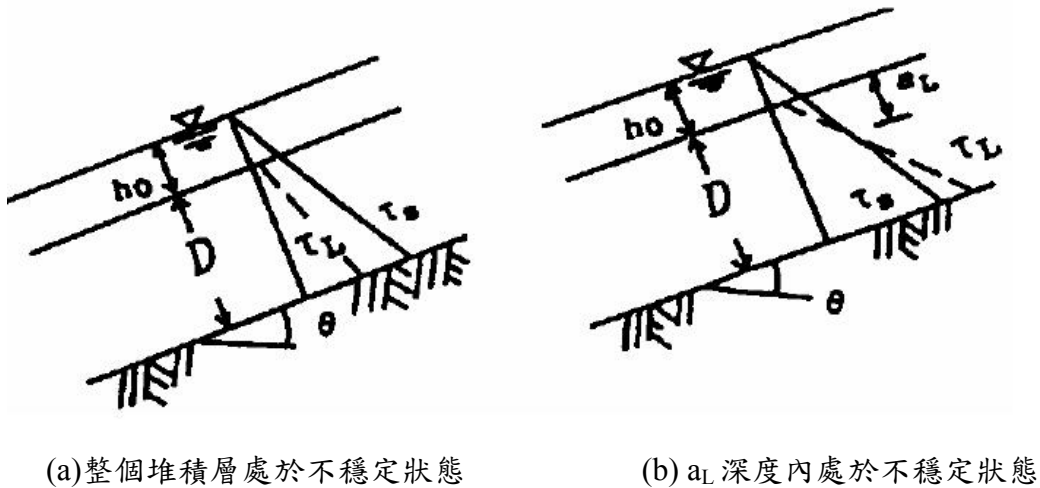


圖 2-1 堆積層內之應力分佈 (Takahashi, 1978)

9.洪如江（2002）依土石流誕生可能性分為以下四種：

(1)陡坡、峭壁或懸崖之崩塌；

- (2)河道堆積、崖錐或崩積層之沖刷；
- (3)天然堰（或壩）之潰決；
- (4)河床湧升之水流推動河道堆積土石。

部分學者稱第(1)類型土石流為『崩塌地土石流』，而第(2)、(3)、(4)類型土石流為『溪流型土石流』。絕大多數的土石流係由崩塌所觸發，而且崩塌之誕生先於土石流之誕生。

根據近年土石流災區現況調查成果得知(參考文獻)，多數土石流均伴隨著規模不一之土體崩塌，以歷年重大土石流災區崩塌率統計結果，其崩塌率（崩塌面積與集水區面積之比）多高於 5%，如表 2-1 所示，再次說明土石流發生與邊坡崩塌密切相關。

表 2-1 重大土石流案例集水區與崩塌特性之比較

地點	集水區特性				崩塌面積 (ha)	崩塌面積比 (%)
	面積 (ha)	高程落差 (m)	平均坡度 (%)	形狀 係數		
臺北縣瑞芳鎮 大粗坑	119.00	389.90	50.32	0.51	11.5	6.0
臺北縣金山鄉 重和村	150.60	540.02	25.30	0.15	2.5E-3	1.6E-5
苗栗縣卓蘭鄉 白布帆	143.84	812.31	50.94	4.16	1.2	0.83
南投縣水里鄉 二部坑	158.28	856.03	56.71	0.44	58.8	37.15
南投縣水里鄉 三部坑	368.60	951.34	12.00	0.36	59.5	16.1
南投縣信義鄉 豐丘野溪	165.60	1445.90	70.37	0.25	8.4	5.07
南投縣信義鄉 筆石溪	1680.00	1430.00	61.36	0.17	61.4	3.65
南投縣信義鄉 地利野溪	132.40	935.00	13.67	0.42	14.4	10.9
南投縣信義鄉 出水溪	861.00	1992.08	68.86	0.37	338.4	39.3
雲林縣古坑鄉 華山溪	161.00	778.09	64.80	0.25	7.23	4.49
嘉義縣阿里山 鄉乾坑溪	6407.00	1307.82	65.08	0.65	157.7	2.46
嘉義縣竹崎鄉 科尾坑	187.36	552.43	44.82	0.23	2.49	1.33
花蓮縣秀林鄉 銅門野溪	49.2	775.1	42.4	0.16	0.351	0.71
花蓮縣鳳林鎮 水源地	1100.0	833.4	43.2	0.57	13.5	1.23
花蓮縣萬榮鄉 見晴野溪	120.0	421.5	48.7	0.30	4.8	3.57
花蓮縣光復鄉 大興野溪	1393.0	950.0	21.2	0.71	36.0	2.58

2.1.3 潛勢溪流評估

對於土石流潛勢溪流之評估，各國有其不同評斷標準與依據，並無定論，臺灣地區土石流潛勢溪流判釋方法乃參考日本建設廳砂防部砂防課（1989）頒佈的土石流危險區域調查要領及謝正倫（1991）針對臺灣現況提出的部分修正，其流程可歸納如圖 2-2，茲將其內容敘述如下：

首先由地形圖(1/25,000 者為宜)，藉由地理資訊系統軟體中空間分析之功能，利用 DTM（數值地形）資料進行分析，找出溪床坡度 θ_1 大於 15 度之地點，並量測該點以上之集水面積 A_1 ，是否大於最小之有效集水面積 A_c (3 公頃)，若具備上述條件，則可視為高敏感度之土石流潛勢溪流，如果集水面積 A_1 小於 A_c 時，則可視現場調查結果方能判定。如果整條溪流之縱剖面中，並無大於 15 度之坡度者，則進一步找出溪床坡度大於 10 度之地點，並量測該點以上之集水面積 A_2 ，是否超過最小之有效集水面積 A_c ，若符合本條件者，則進行現場調查，以決定是否為土石流潛勢溪流，若坡度或面積皆不合於上述條件時，可將該溪流視為非土石流潛勢溪流。

其次以航照圖或衛星影象資料對上述所判釋之潛勢溪流進行驗證，驗證時主要以溪流之上游有無崩塌地，或其下游有無扇狀地及其它土石流之發生痕跡為主。最後將圖面判釋後之土石流潛勢溪流轉繪至地形圖，但需利用繪圖軟體將成果數化成圖層檔案，以建立基本資料庫，並可提供其他圖面資料的套疊、比對、相互查詢。

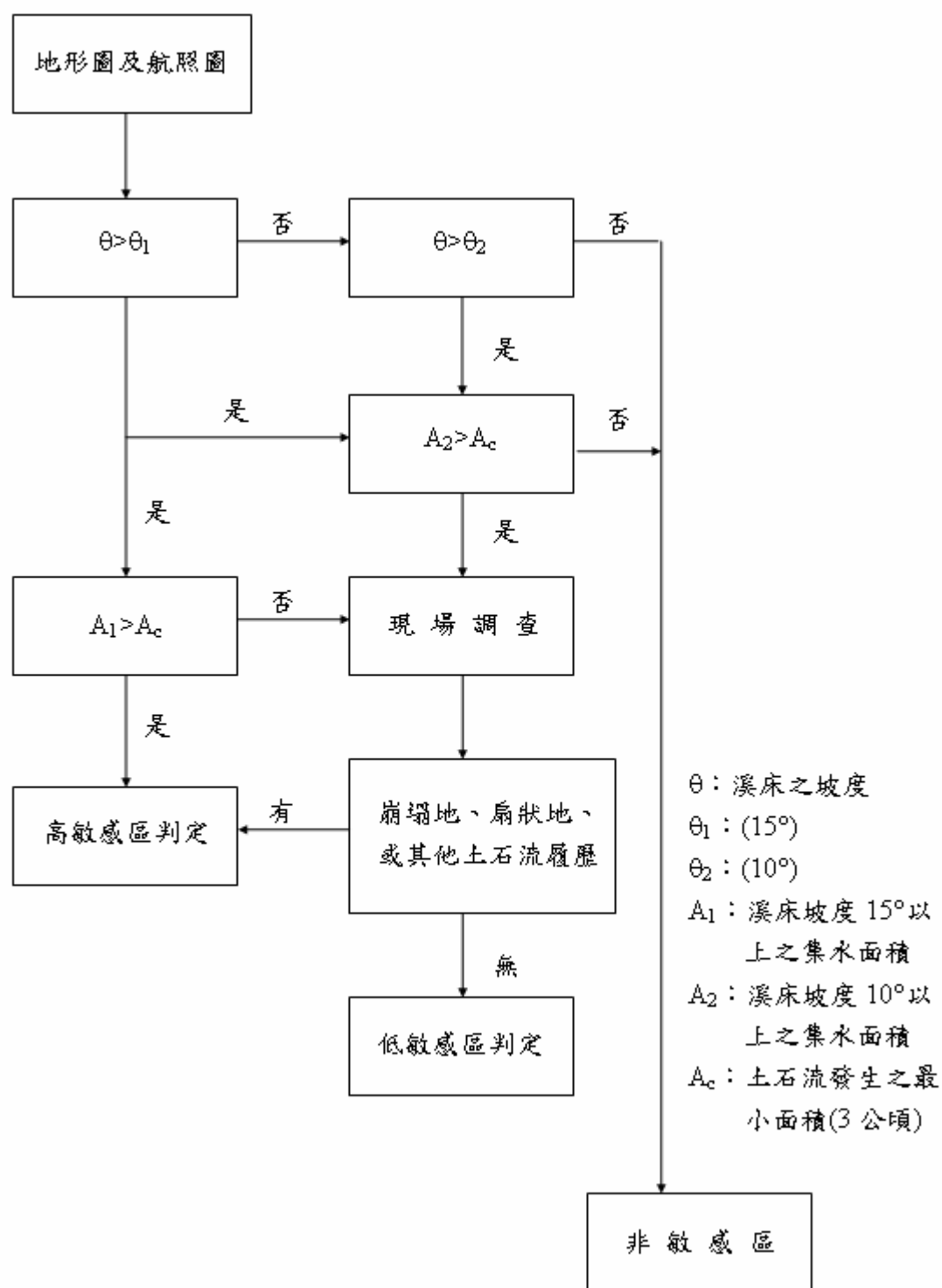


圖 2-2 土石流危險溪流之判斷流程(水土保持局，2002)

2.張立憲（1985）

若溪床坡度小於 15 度，則無法產生較大推移力促使土石流動；若溪床太陡，如坡度大於 40 度，則因細粒料在水中形成懸浮載（suspended load），不易混合成泥狀而產生土石流。

經由下表 2-2、表 2-3 整理得到國內外學者針對臺灣及國外土石流發生之坡度特性，表中顯示土石流發生溪床坡度大致位於 10 度~30 度之間。

表 2-2 土石流發生之坡度特性（周韋鉉，2006）

研究學者	研究地點	溪床坡度
Campbell (1975)	美國加州地點	26 度~45 度
Takahashi (1981)	美國地區	大於 15 度
山口伊佐夫（1985）	-----	18 度~20 度
蘆田和男（1983）	日本仁碓川流域	17 度~22 度
大同淳之（1970）	富士山西湖	20 度~30 度
游繁結（1987）	南投信義豐丘	17 度~23 度
謝正倫（1992）	花蓮	10 度~25 度
	臺東	10 度~20 度
林炳森（1993）	中橫關原橋附近	大於 15 度
林美聆（1994）	花蓮銅門村	大於 19 度
詹錢登（1997）	-----	15 度~30 度
陳榮河（1999）	新中橫公路	15 度~30 度
平野宗夫（1998）	室內試驗	15 度~22 度

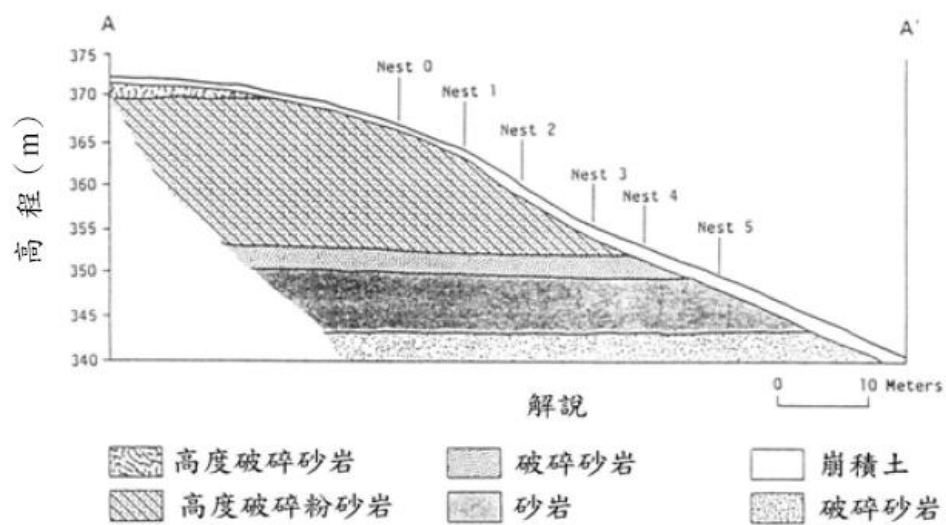
表 2-3 臺灣地區土石流之現場地形坡度(林炳森,1996)

豐 丘	74 年	發生部約 23 度，流動部平均坡度 13 度。
	75 年	發生部約 17 度，流動部平均坡度 10 度。
十八重溪	74 年	發生部約 17 度，流動部平均坡度 14 度。
	75 年	發生部約 15 度，流動部平均坡度 13 度。
金瓜石	76 年	溪床平均坡度 23 度。
北勢溪	78 年	溪床平均坡度 28 度。
銅門村	79 年	溪床平均坡度 22 度。
瀧橋	80 年	發生部約 28 度，流動部平均坡度 13~17 度。

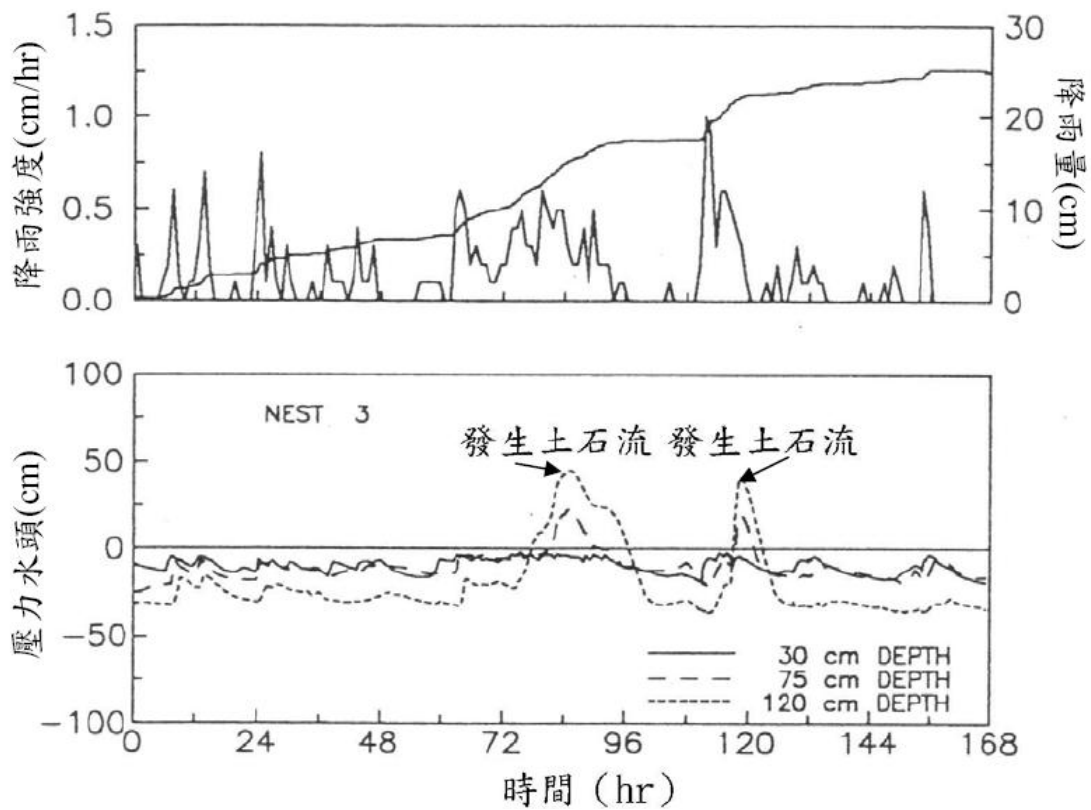
3.Johnson & Sitar (1992)

觀察 San Francisco Bay 地區發生土石流災害鄰近處所量得知水壓記錄，如圖 2-4(b)所示，在暴雨期間土體內有正的孔隙水壓被激發，且在深度為 120cm 處所量得知水壓值一開始均低於深度為 75cm 及 30cm 所量之水壓。而於第一次發生土石流的暴雨期間，深度 120cm 處之孔隙水壓有突然被激發的現象，待暴雨結束後，又回復至低於深度為 75cm 及 30cm 處之水壓。

當下場暴雨來臨時，又有相同情形發生。若觀察當地之地質剖面圖，如圖 2-4(a)所示，位於崩積土層下的岩層是相當破碎的，且 Sitar 等人於災後現場發現許多發生土石流之處，於數天甚至數個星期過後，仍有相當多的水從其出露的破碎底岩中滲出。因此推論被激發的水壓並不單純由降雨入滲所致，而是由於上坡處之降雨累積於破碎底岩而激發孔隙水壓。



(a)



資料來源：Johnson & Sitar，1992

(b)

圖 2-4 San Francisco Bay 土石流災害紀錄

4.林慶偉（1996）

林慶偉（1996）調查南投縣信義鄉和社社區之崩塌地指出，在砂頁岩互層之岩性中，砂岩常為良好之透水層，而頁岩則為不透水層，因而在砂頁岩介面亦形成一高孔隙水壓之介面。岩體之強度於此介面上將達到最低，而易於產生滑動，和社至神木村一帶之崩塌即多屬此類。豐丘地區亦因有斷層通過，斷層作用造成了鄰近地區的地層剪力節理發達，以致地質破碎嚴重。若暴雨帶來豐沛雨量，有可能蓄積於地下之破碎岩層而激發水壓，進而引發土石流。

5.高橋（1997）

首先利用靜力平衡觀念推導理論公式，基本假設如下：

- (1)堆積之土石材料為一無限邊坡厚度均勻之土體，顆粒組成疏鬆，坡面與水平面夾 θ 角。
- (2)假設土體沒有凝聚性、有平行地表之逕流產生，浸水土體已達飽和。
- (3)土體孔隙水沿坡面方向滲流，孔隙內無超孔隙水壓存在等條件下，建立了土石流發生之坡度需滿足 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 之理論模式：

土石流發生之最小坡度：

$$\tan \theta_1 \geq \frac{C_v(\gamma_s - \gamma_w)}{C_v(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w(1 + k^{-1})} \tan \phi \dots\dots\dots (2-1)$$

土石流發生之最大坡度：

$$\tan \theta_2 \geq \frac{C_v(\gamma_s - \gamma_w)}{C_v(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w} \tan \phi \dots\dots\dots (2-2)$$

式中， C_v ：土石體積濃度（固體顆粒體積/總體積）； γ_s ：土石顆粒之單位重； γ_w ：水單位重； θ ：坡角； ϕ ：土體之內摩擦角； k ：

經驗參數，可由試驗決定，大約為 0.7。

綜合上述推導結果，可能形成土石流坡度範圍為 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 。當 $\theta > \theta_2$ 時，堆積土層將形成剛體般整體滑動而非土石流動，崩落之泥砂可能堆積於下游坡度較緩處（ $\theta_1 < \theta < \theta_2$ ），其後者若有逕流經此崩積層，亦可能引發土石流。而當堆積層坡度時， $\theta < \theta_1$ 可能形成不成熟之土石流或土石不發生破壞。此外尚有許多學者針對土石流發生之臨界坡度進行相關研究，相關臨界坡度公式及其適用條件如表 2-4 所示。

表 2-4 土石流發生臨界公式一覽表

研究者	公式	符號說明	適用條件
Harris (1977)	$\tan \theta \geq \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_{sat}} \tan \phi$	γ_{sat} : 飽和土體單位體積重 γ_w : 水之單位體積重	1.考慮水位與堆積面齊平 2.採無限邊坡分析方法，滲流平行坡面之情形。
Takahashi (1977)	$\tan \theta \geq \frac{(1-n)(\gamma_s - \gamma_w)}{(1-n)(\gamma_t - \gamma_w) + \gamma_w(1 + \frac{h_0}{a})} \tan \phi$	γ_s : 土砂單位體積重 γ_w : 水之單位體積重 n : 土體之孔隙率 h_0 : 表面水深 a : 剪力破壞面距離堆積土層表面之深度	1.考慮水位與堆積層表面齊平並有地表逕流產生之情形。 2.假設一無限長土石堆積層，有平行坡面之逕流產生。
Sidle (1985)	$\tan \theta \geq \frac{\gamma_m a + (\gamma_{sat} - \gamma_m)(H - a)}{\gamma_m a + \gamma_{sat}(H - a)} \tan \phi$	γ_{sat} : 飽和土體單位體積重 γ_m : 地下水位以上堆積土體單位重 a : 堆積水位距地表高度 H : 堆積土體高度	1.考慮無限邊坡中有未飽和區存在之狀況。 2.適用情形為水位於堆積層表面以下；水位與堆積層表面齊平之狀況。
游繁結 (1987)	$\tan \theta \geq \frac{\tan \phi}{1 + \left[\frac{\gamma_w(H - a)}{\gamma_{sat}H - n\gamma_w(H - a)} \right]}$	γ_{sat} : 飽和土體單位體積重 γ_w : 水之單位體積重 n : 孔隙率 a : 堆積水位距地表高度 H : 堆積土體高度	1.考慮凝聚力。 2.適用情形為水位與堆積面齊平並水位在堆積面以下。

表 2-4 土石流發生臨界公式一覽表（續）

研究者	公式	符號說明	適用條件
江永哲 (1986)	$\tan \theta \geq \frac{\frac{c}{gH \cos \theta} + C_b(\rho_s - \rho) \frac{a}{H} \tan \phi}{C_b(\rho_s - \rho) \frac{a}{H} + \rho \frac{a}{H}}$	ρ_s ：土砂密度 ρ ：水之密度 c ：土體凝聚力 a ：堆積水位距地表高度 H ：堆積土體高度 h_0 ：表面水深 $C_b = 1-n$ ：砂粒體積濃度 n ：孔隙率	1.考慮凝聚力。 2.考慮滲流狀況。 3.水位面以上土體單位重視為乾土單位重，以下視為飽和單位重。
	$\tan \theta \geq \frac{\frac{c}{gH \cos \theta} + C_b(\rho_s - \rho) \tan \phi}{C_b(\rho_s - \rho) + \rho(1 + \frac{h_0}{H})}$	ρ_s ：土砂密度 ρ ：水之密度 c ：土體凝聚力 a ：堆積水位距地表高度 H ：堆積土體高度 h_0 ：表面水深 $C_b = 1-n$ ：砂粒體積濃度 n ：孔隙率	1.考慮凝聚力。 2.考慮滲流並有地表逕流狀況。 3.將地表逕流視為推移力，隨深度增加而增加。。
連惠邦 (1996)	$\tan \theta_c \geq \frac{\frac{C_h}{bH \sin \theta} + (\gamma_s - m\gamma_w)C_* \tan \phi}{[(\gamma_s - m\gamma_w)C_* + \gamma_w(m+n) - (m\gamma_w \tan \alpha \tan \phi)]}$	γ_s ：土砂單位體積重 γ_w ：水之單位體積重 H ：堆積土體高度 C_* ：堆積土體之泥砂體積濃度 C_h ：土體凝聚力 α ：滲流方向與地表之夾角 $m = h_d/H$ ； h_d ：地下水位於可能移動層之上的深度 $n = h_0/H$ ； h_0 ：表面流水深	1.考慮土體凝聚力。 2.適用於水位與堆積面齊平、水位在堆積面以上及以下三種情形。
林炳森 (1993)	$\tan \theta \geq \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w)H}{\gamma_{sat}H + \gamma_w h_0} \tan \phi$	γ_{sat} ：飽和土體單位體積重 γ_w ：水之單位體積重 H ：堆積土體高度	1.考慮地表逕流情形。 2.適用情形為水位於堆積層表面以下；水位與堆積層表面齊平之狀況。

2.2.2 降雨變化對土石流發生潛在的影響

在上述說明中指出，河溪或自然邊坡斜面上倘若具有足夠之土砂料源，配合一定強度或累積雨量的激發下使大量的水源潤滑土石流內固體物質並降低固體物質間摩擦力及凝聚力，在適當的坡度提供土石流體流動的動力，最後促使固體物質液化而流動，並使土石流體克服其內部之摩擦力及凝聚力後繼續向低處流動，就可能發生土石流。其中，重力條件及土砂料源在一定的空間和時間上具有不變或微變的特徵，屬於土石流發生的潛在因素；而降雨因隨著時間和空間的變異，不僅是土石流的組成物質，更是土石流發生的主要激發條件。

豐富的鬆散土石提供形成土石流所需之固體物質；水源降雨、冰川融雪和水體潰決等水動力皆可激發土石流，在世界各地絕大多數土石流均由降雨所激發，尤其是在臺灣地區因颱風所帶來的豪雨更是明顯。

在過去研究中，運用降雨量來推測誘發土石流可能發生之方法有三種，第一種以連續降雨之總量為推測方法，第二種為暴雨降雨強度之推測方法，第三種為連續降雨及暴雨之降雨強度，相互配合運用之推測方法，依據日本之記錄，連續降雨之累計降雨量大於 200mm 者，可能發生土石流；一場暴雨，連續降雨 12 小時之後前期累積降雨量達 150~200mm，降雨強度在 30~40mm/hr 時，歷時 3~6 小時即可能發生土石流。

過去臺灣地區已經有許多學者研究土石流發生與降雨間之關係。游繁結、陳重光（1987）調查南投信義鄉豐丘村分別受尼爾森及韋恩颱風影響所形成的土石流，發現 1985 年豐丘及十八重溪支流的土石災害由尼爾森颱風造成，最大降雨強度分別為 300mm/day 和 308mm/day；1986 年的土石流災害則由韋恩颱風所造成，最大降雨強度分別為 200mm/day 和 193mm/day。江永哲、林啟源（1991）分析臺灣地區七起土石流災害與降雨間關係，發現形成土石流的累積雨量至

少大於 150mm，且最大時降雨強度至少大於 40mm/hr，降雨需持續 12 小時以上。謝正倫等（1992）分析花東地區土石流危險溪流，發現降雨強度超過 27 mm/hr、累積雨量超過 360mm 時則有發生土石流之可能性。周憲德等（2002）分析整理發現，日本地區累積雨量達 100mm，持續 3-6 小時 30-40 mm/hr 的降雨即會發生土石流，累積雨量達 150-200mm 以上時，小於 30-40 mm/hr 的降雨也會發生土石流，累積雨量達 400 mm/hr 時，則土石流一定會發生；臺灣地區引發土石流的累積雨量值大部分大於 150mm，但也有少部分地區例外，例如 1999 年 9 月 21 日發生之集集大地震對中部邊坡造成嚴重破壞，山溝溪谷堆積大量不穩定的鬆散土石，其誘發土石流發生之降雨量較前述者大為降低，約為前者之 20~40%即可能造成土石流的發生，甚至當累積降雨量達到 10-30mm 即可誘發土石流的發生。表 2-5 為其他國內外學者針對降雨特性與土石流發生關係之整理。

表 2-5 土石流發生之降雨特性（呂金彥，2002）

研究學者		研究地點	降雨特性	
Campbell (1975) Ellen (1988)		美國加州地區	1.先行降雨量>254mm。 2.降雨強度>6.4mm/hr	
山口伊佐夫（1985）		日本地區	連續降雨>60mm	
池谷浩（1978）		日本地區	1.一場降雨初期	降雨強度>50mm/hr
			2.介於 1、3 之間	降雨量>60mm
				降雨強度>20mm/hr
			3.一場大雨後發生	降雨量>200mm
川上浩（1981）		日本宇原川	1.降雨強度 30~40mm/hr，持續 3~6 小時。 2.降雨強度 30~40mm/hr，持續 3~6 小時， 累積雨量達 150~200mm 以上。 3 累積雨量達 400mm 以上。	
李三畏（1981）		桃竹苗地區	1.日雨量>247mm。 2.降雨強度>88mm/hr。	
林炳森	（1993）	中橫關原橋	日雨量>200mm。	
	（2000）	神木村出水溪	1.日雨量>175mm。 2.降雨強度>28mm/hr。	
林美聆（1994）		花蓮銅門村	歐菲莉颱風日降雨量 431mm。	
陳榮河（1997）		花蓮銅門村	降雨尖峰發生後 2~3 小時。	

依據日本關東大地震對土石流及雨量關係的長期監測統計發現，大地震後，同一地區發生土石流之臨界降雨量約為地震前的一半，臨界降雨量隨時間日久，土質越趨堅固穩定而逐漸增加。依日本關東大地震之經驗，造成土石流發生重要指標的崩塌地數目，足足經過近四、五十年才恢復到大地震前之水準。換句話說，臺灣經 921 大地震後，山區坡面表土所受損傷，恐需經歷數十年才能回復到震前的穩定水準，此期間臺灣山區只要有豪雨發生，即可能隨時有土石流之情況產生。

2.3 土石流流動行為與堆積特性

2.3.1 土石流流動行為

當土石流於溪流上游形成後，由於溪流提供了足夠的勢能，使其沿河川沖刷底床泥砂並造成溪床不斷地下切掏刷，導致兩岸邊坡斜面土體崩滑流入溪流，使土石流如滾雪球般地擴大其土砂規模和致災能力。學者們由以往研究及現場觀測結果對於土石流的流動現象描述常存有差異，但是都能說明土石流的流動特性與現象。

以下為參考 Varnes(1958)、Takahashi(1977)、Johnson and Rodine(1984)、Hooke(年份)、Vandine(1985)、張立憲(1985)、游繁結(1987)、陳重光(1988)、林炳森(1993)、蘇育瑞(1995)等人的研究，整理如下：

- (1) 土石流為濕流的一種，組成材料之粒徑分佈受地質構造、岩性及風化程度之影響，其大小自數公尺至 0.01 公厘以下，粒徑分佈範圍十分廣泛，因此具有高度之集合搬運型態，不同於一般河床沖刷及表土沖蝕之個別搬運。流動過程中單位體積重量約在 $1400\text{kg/m}^3 \sim 2300\text{kg/m}^3$ 間。
- (2) 土石流爆發突然，很難預知其發生之準確時間，其發生時間應與該區域內堆積物厚度、地質成分、水文特性及地形特性等因子有關。土石流歷時較短，一次土石流過程一般從幾分鐘至幾小時。

- (3)一般土石流流動過程包括發生區、流動區與堆積區。發生區通常為溝谷堆積地質材料的主要來源地區，主要是由於溝谷兩側邊坡或源頭不穩定而產生崩塌。流動區指上游崩塌之地質材料與水混合後形成流體，在運動過程中流體材料向兩側之谷壁及谷底產生掏刷作用，使部分谷壁產生崩塌，導致溪谷中留下鋸齒或 V 型的痕跡。堆積區為土石流流體因為坡度變緩、流路變寬而產生堆積之現象，堆積區通常成扇形。
- (4)土石流含有高比例的粗質碎屑，且粒徑分佈十分廣泛，常發生於陡坡上。發生區的河床坡度大約在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，流動區坡度大約 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ，而堆積區坡度則以 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 最多，經常於豪雨或突然解凍時發生，尤其是在缺乏植生保護的坡地。
- (5)含水量高，土石流流動速度與其粒徑分佈、濃度及溪谷坡度等密切相關，其流速每秒可達幾公尺甚至幾十公尺。一般而言，礫石型土石流流速約在 $3 \sim 10 \text{ m/sec}$ 之間，而泥流型土石流流速則介於 $2 \sim 20 \text{ m/sec}$ 之間。依據日本之觀測資料（池谷，2000），土石流流速大致介於 $5 \sim 13 \text{ m/sec}$ （ $18 \sim 46.8 \text{ km/hr}$ ）之間，日本御岳所發生之山崩，土石流由山崩處直落而下，其速度曾高達 80 m/sec （ 278 km/hr ），同時沿溪谷沖下並留下鋸齒或 V 型的沖刷痕跡，且土石流表面之流速明顯高於其平均流速，這顯示土石流具有表面快而底面慢的速度分佈特性。
- (6)流動時較大的顆粒集中在前端流動呈波動狀，甚具衝擊力與直進性，且運動波之週期不一定，其流態與各波段顆粒大小分佈如圖 2-5 所示，前端粒徑較大，且堆高集中，破壞力大；後端則粒徑變小，濃度也變低。
- (7)土石流一旦開始流動，溪谷的水挾帶高濃度的土石向下運送，沿途所有大小物體或樹木均被捲入，甚至連直徑大至數公尺的礫石也隨之移動，有時一些較粗大的礫石會在流路中堆積成天然土壩而阻斷流路，但是土石流後續部分則因慣性而產生堆高，並因壓力之加大而迫使前端再次流動，也就是說土石流具有間歇運動之型態。

(8)當溪床坡度變緩且土石含量逐漸變小時，土石流則可能停止流動而開始堆積，停止時保持留下時之型態，後續則為含水量較多的土砂流，且往往越過前端部並繼續向下流動造成更大的災害。

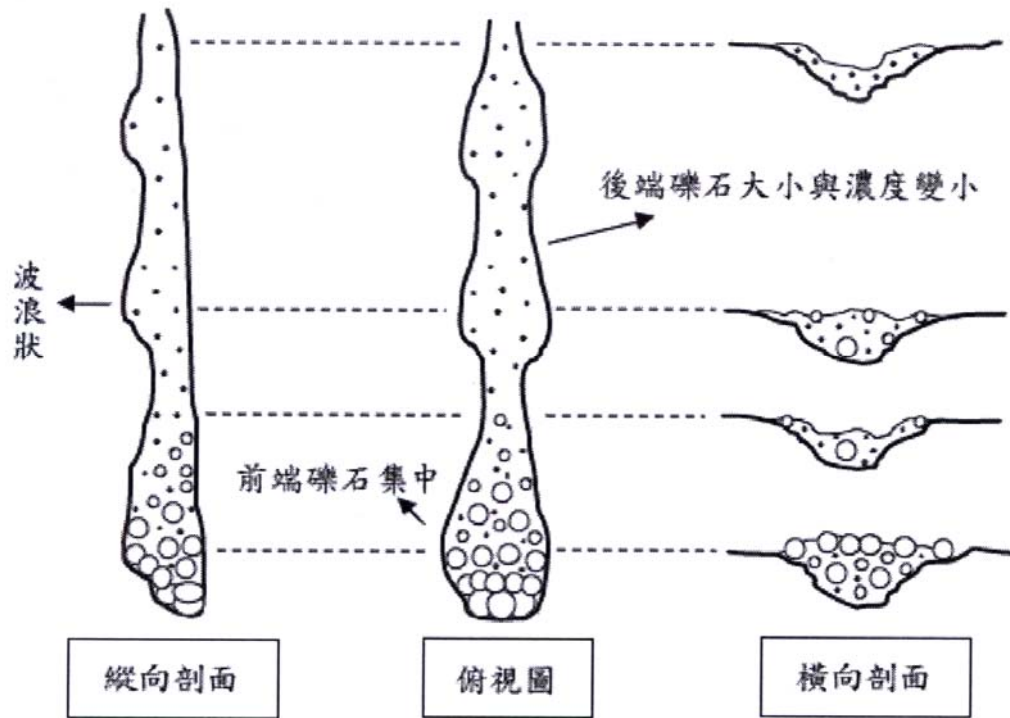


圖 2-5 土石流流動狀態及各波段之粒群示意圖（詹錢登，2000）

2.3.2 土石流堆積特性

當土石流沿著溪流流下，由於陡峭的溪床提供足夠的勢能，使其對溪床及兩側岸坡的土石進行掏刷，而擴大土砂礫石的攜出規模，不僅造成溪谷及其沿岸邊坡土石的不穩，惡化了山坡地水土資源保育之功能；一旦流下的大量土石流出谷口，進入坡度平緩和兩側失去兩岸邊坡束狹的主流沖積平原後，受地形坡度、坡向及土石流先端部粗大泥砂顆粒的流速和直進慣性作用，流體中較粗的泥砂顆粒可以向前運行一段距離後才逐漸停積下來，後續水流因流路受阻而有部分土砂呈溯源淤積，迅速地向谷口方向堆積，另有部分土砂則朝兩側流下，逐漸形成平面扇形的堆積型態，稱之為土石流扇狀地，如圖 2-6 所示。當下次土石流發生時，受扇狀地地形傾向及傾角之影響，主流可能擺到

相對低窪的地段，這樣主流在扇狀地上左右擺動，並越淤越高，扇狀地前源不斷向前推進，扇形面積將不斷擴大。

根據調查歸納得知，土石流扇狀地有以下幾個特徵：

- (1)土石流扇狀地可由多次流向不定的土石流，以輻射狀擴散堆積形成。堆積進行時，因坡度變為平緩，流速降低，對混凝土結構物之破壞力減弱，惟仍具有淤埋之能力。
- (2)微細土砂含量高且黏稠性的的土石流，常會形成數個舌狀堆積。
- (3)當後續土砂流量大時，可能會越過扇狀地，並攜走細小土砂而出現沖蝕溝，擴大受災面。
- (4)後續土砂流穿過扇狀地後，其所造成狹窄沖蝕溝之側岸，便成為一天然堤防。
- (5)通常土石流扇狀地前源粒徑較扇頂為大，惟在堆積剖面上，則無明顯的層次及規則性，以乃異於一般的挾砂水流。
- (6)扇狀地土石堆積厚度及縱坡度由扇頂向扇緣逐漸減小。

由於不少土石流潛勢溪流的土石爆發頻繁且規模多變，在扇狀地上的不同時期可以形成不同的平面型態及堆積土砂量，具有不同的演變特徵。同時，因土石流堆積土砂量及其平面型態之發展，涉及土石流可能的成災規模和防災對策之擬定，使得土石流在扇狀地上的流動行為和堆積機制一直受到廣泛的討論及研究。其中，土石流扇狀地土石堆積之平面型態，可勾勒出土石流可能的氾濫範圍，對扇狀地防災對策之擬定相當重要。一般劃定範圍之推估可依水土保持技術規範之劃定原則及現地地形變化對土石流流動影響，進行土石流危險範圍初步估算，其基本假設說明如下：

- (1)假設自溢流點流出後，扇狀地地形為土石流淹沒的關鍵。
- (2)假設土石流溢流後滿足水土保持技術規則之危險範圍劃定原則。
- (3)假設土砂流出量與扇狀地內潛勢範圍面積呈正相關。

水土保持技術規範第三百十三條第一項第三款：『土石流：其危險範圍之劃定方法，首先決定危險區之頂點 A，其以山谷之出口或坡度十度為頂點；其次由 A 點依據土石流最大擴展角度（105 度）向下游劃出一扇狀區域；最後以扇狀區內坡度二度之等坡度線 B 作為土石流之到達邊界，則該扇狀區與線 B 所涵括之範圍，即為土石流之危險範圍』。

其中，扇狀地頂點決定方式：

- (1)山谷出口處，地形開闊處起點。
- (2)土石流沖積扇頂點。
- (3)溪谷斷面突寬處。
- (4)溪谷坡度 10 度。

土石流扇狀區可能沖淤之最大範圍（圓半徑）則依池谷浩公式所得之淤積長度計算：

$$\log(L) = 0.42 \times \log(V \times \tan \theta_d) + 0.935$$

其中 $V=70,992A^{0.61}$ ， L ：淤積長度(m)； A ：集水區之總面積 (Km^2)； V ：土砂流出量(m^3)； θ_d ：下游坡度。其中土砂流出量可以衛星影像及現場調查推估所得之崩塌土方量近似。

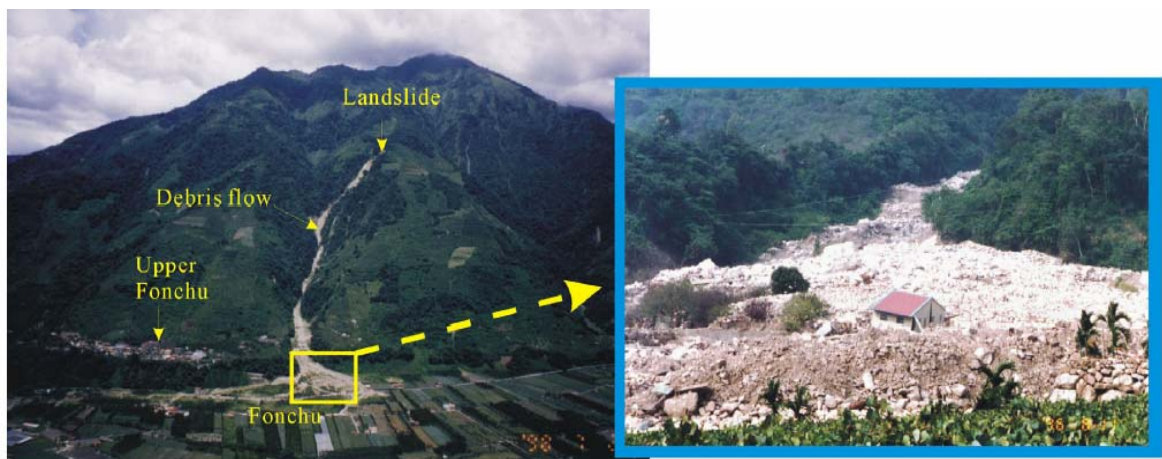


圖 2-6 賀伯颱風過後，南投縣信義鄉豐丘村土石流扇狀地
(林銘郎，2003)

2.4 土石流流變理論

2.4.1 土石流流變模式

土石流為泥、砂、石等固態物質與水混合之流動現象，土石流泥砂含量與粒徑大小的變化很大，造成它的流變特性有相當大的變化，在流動過程中包括泥、砂、石等固態物質的碰撞、摩擦與其周圍流體的交互作用，常脫離一般牛頓流體的範疇，而呈現較複雜的力學機制。土石流體應力與應變等參數之關係稱為流變模式（Rheological model）或本構關係式（Constitutive relation），由流變模式的建立可藉以探討土石流體的流動行為。目前許多研究人員以實驗分析或理論推導，提出各種流變模式，各模式皆有適用範圍，就數學模式來區分，主要分為四大類：牛頓流體模式、賓漢流體模式、幂定理模式及二項式模式，圖 2-7 為各流變模式以剪應力及剪切率間關係示意圖。

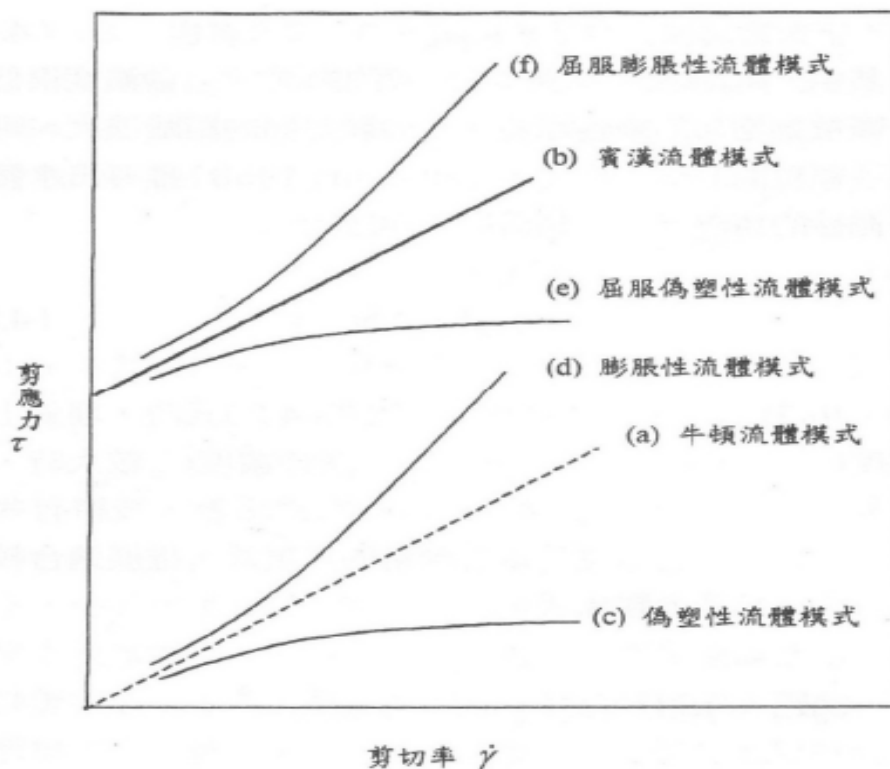


圖 2-7 流變模式之剪應力及剪切率關係曲線(詹錢登, 2000)

1. 牛頓流體模式

牛頓流體模式描述流體在受剪切力流動時，其剪切率與剪切力的關係為一通過原點座標的直線，其關係式可表示成

$$\tau = \eta \left(\frac{dV}{dz} \right) \dots\dots\dots (2-3)$$

式中， η 為黏滯係數（viscosity），在定溫、定壓下，流體之黏滯係數不會隨剪切率而變化。一般清水及低含砂濃度（小於 9%）水體，在層流情況下，其流變特性大致上都可以用牛頓流體模式來描述。

2. 賓漢流體模式

賓漢流體模式描述流體在受剪時，當作用之剪切力小於某臨界值 τ_y （賓漢降伏應力）時，流體不會發生流動，及剪切率（ $\dot{\gamma}$ ）為 0；當 $\tau > \tau_y$ 時，流體開始流動後，其所承受之剪切力與流動剪切率成正比線性關係：

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (2-4)$$

式中， τ_y 為賓漢降伏應力（Bingham yield stress）； η 為賓漢黏滯係數（Bingham viscosity）。

根據過去研究顯示，一般土石流之流變特性可以用賓漢流體模式來描述。

3. 幂定理模式

具有降伏應力之幂定理模式可以視為含砂水體流變模式之廣義表達式，其剪切力與剪切率之關係為

$$\tau = \tau_y + m \dot{\gamma}^n \dots\dots\dots (2-5)$$

式中，參數 m 為流體稠度指標 (Consistency index)， m 值越高表示流體黏滯性越大；參數 n 為流體流動指標 (Flow behavior index)，代表流體偏離牛頓流體特性的指標。

4.二項式模式

二項式模式是一種考量塑性、黏性、碰撞及紊動的模式。O' Brien et.al. (1993) 引述 O' Brien & Julien(1985)流變模式定義：

高濃度土砂流(hyperconcentrated sediment flow)其總剪應力 τ 由下列五項剪應力構成：

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \dots\dots\dots (2-6)$$

τ_c : 凝聚性降伏應力 (cohesive yield stress)；

τ_{mc} ：莫爾-庫倫剪應力 (Mohr-Coulomb shear stress)；

τ_v ：黏滯剪應力 (viscous shear stress)；

τ_t ：紊流剪應力 (turbulent shear stress)；

τ_d ：擴散剪應力 (dispersive shear stress)。

再將上式定義如下：

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dV}{dz} \right) + (\rho_m l^2 + a_i \rho_s \lambda^2 d_s) \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \dots\dots\dots (2-7)$$

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \dots\dots\dots (2-8)$$

其中 λ 由 O' Brien et.al. (1993) 引用 Bagnold (1954) 定義，如下式：

$$\lambda = \left[\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \dots\dots\dots (2-9)$$

式中： τ_y ：賓漢降伏應力（Bingham yield stress）；

η ：賓漢黏滯係數（Bingham dynamic viscosity）； V ： x 、 y 軸方向上之流速； ρ_m ：土石流密度； ρ_s ：土石流體中固體密度； h ：土石流流動深度；

l ：Prandtl 長度係數，Julien et al.（1991）假設 $l=0.4h$ ； C_v ：體積濃度；

d_s ：顆粒粒徑，蔡元芳（1999）取 $d_s = d_{50}$ （中值粒徑）；

a_i ：經驗係數 Takahashi（1980）假設為 0.01；

C_* ：顆粒靜止接觸時之最大體積濃度。

2.4.2 土石流流變參數

1. 體積濃度

土石流的體積濃度（ C_v ）是指土石流體單位體積中黏土、粉土、砂、石等土石固態物質所佔有之體積百分比，定義如下：

$$C_v = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \dots\dots\dots (2-10)$$

上式中： γ_m ：土石流體單位重； γ_s ：土石固態物質單位重， $\gamma_s = G_s \times \gamma_w$ ； G_s ：土石固態物質比重； γ_w ：水單位重。

土石流體單位重定義如下：

$$\gamma_m = (1 - C_v)\gamma_w + C_v\gamma_s \dots\dots\dots (2-11)$$

重量濃度（ C_w ）一般比體積濃度易求得，下式為體積濃度與重量濃度關係：

$$C_v = \frac{C_w}{G_s - G_w(G_s - 1)} \dots\dots\dots (2-12)$$

Vallejo (1989) 在研究泥流的穩定分析中，統計多位學者的研究，依土石流體積濃度 C_v 將複合土的性質分為如下三種情形討論（如表 2-6 所示）

- (1) $C_v > 0.8$ 時，混合物的抗剪強度主要由粗顆粒間的摩擦力提供。
- (2) $0.8 > C_v > 0.55$ 時，混合物之抗剪強度主要由粗顆粒間的摩擦力和基質的凝聚力所提供。
- (3) $C < 0.55$ 時，混合物之抗剪強度主要由基質之凝聚力所提供。

表 2-6 抗剪強度與體積濃度之關係（Vallejo，1989）

組合材料	試驗種類	粗顆粒所佔體積比例 (Grain concentration ratio, C_v)			資料來源
		剪力強度 ≡ 粗顆粒 間摩擦	剪力強度 = 粗顆粒 間摩擦 + 粒料強度	剪力強度 ≡ 細粒料 強度	
砂和黏土	三軸	> 0.70	0.70~0.50	< 0.50	Paduana (1966)
砂和黏土	直剪	> 0.80	0.80~0.62	< 0.62	Kurata and Fujishita (1960)
砂和黏土	圓錐貫入		?~0.45	< 0.45	Rodine and Johnson (1976)
砂和黏土	十字片剪		?~0.58	< 0.58	Vallejo (1981)
砂和冰	三軸		?~0.42	< 0.42	Goughnour and Andersland (1968)
礫石和黏土	三軸	> 0.90	0.90~0.80	< 0.80	Rico and Orozco (1975)
礫石和黏土	十字片剪		?~0.49	< 0.49	Vallejo (1981)
平均值		> 0.80	0.80~0.55	< 0.55	

〔註〕粗顆粒(Grains):砂或礫石(Sand or Gravel)，細粒料(Matrix):黏土或冰

2. 土石流平衡泥砂體積濃度(C_∞)

高橋保 (1977) 依據堆積層之剪力理論與 Terzaghi 所提出之土壤抗剪強度，在忽略凝聚力之條件下導出流動中土石流泥砂體積濃度估算式：

$$C_{\infty} = \frac{\gamma_w \tan \theta}{(\gamma_s - \gamma_w) \times (\tan \phi - \tan \theta)} \dots\dots\dots (2-13)$$

式中， γ_s 為顆粒密度， γ_w 為水密度， ϕ 為土壤內摩擦角，與泥砂性質及其緊密程度相關，其值介於 $26^{\circ} \sim 48^{\circ}$ 之間， θ 為溪流上游段坡度。必須注意的是，如果含砂濃度 C_v 小於平衡濃度 C_{∞} 時，堆積層將遭受沖刷，反之，如果 $C_v > C_{\infty}$ ，會有部份砂石由土石流體中淤落。

此外，上式中 γ_w 是指水的密度，因此上式適合分析礫石型土石流，如以上式分析泥流型土石流，則須以土石流中泥漿體的密度 γ_m 取代上式中水的密度。此外，由於一般山地河溪沿程溪床坡度急遽變化，應用上式時，土石流泥砂體積濃度經常是隨著溪床坡度而變化。但是，式 (2-13) 係基於平衡條件下的土石流流況所建構，而平衡狀態土石流流況的存在條件是河溪長度必須大於其發展長度，在驟變的溪床坡度下是很難出現的。因此，上式中溪床坡度應指在土石流流動段約 5 倍河寬的溪流長度所對應之平均坡度，而此區段的溪床坡度常介於 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

3. 土石流降伏應力與黏滯係數

前人研究中，土石流的降伏應力與黏滯係數的估算與求取主要分別利用力學觀念及現地估計，介紹如下：

(1) 現地估計方法

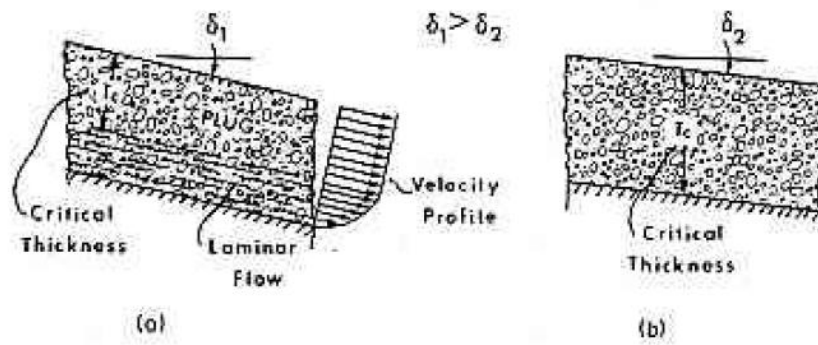
Johnson & Rodine (1984) 提出以下方法估計賓漢降伏應力

(a) 臨界坡度法：

(b) 利用無限邊坡的概念，如圖 2-8 所示，使土石流停止流動之門檻剪應力為賓漢降伏應力

$$\tau_y = T_c \gamma_m \sin \delta \dots\dots\dots (2-14)$$

(c) 上式中： T_c ：臨界流動深度 (m)； δ ：堆積坡度 ($^{\circ}$)。



- (a) 土石流流動時，土石流表面坡度(δ_1)大於臨界堆積面坡度 (δ_2)；且流動深度大於臨界深度(T_c)與流速垂直剖面分佈示意圖。
- (b) 土石流堆積時，臨界堆積面坡度(δ_2)與臨界堆積深度(T_c)。

圖 2-8 土石流堆積臨界坡度示意圖 (Johnson and Rodine, 1984)

(d) 特殊大石塊尺寸：

$$\tau_y = 2.19 \times 10^{-4} \times l_{\min} (\gamma_b - n_v \gamma_m) \dots \dots \dots (2-15)$$

(e) 式中， γ_b ：特殊大石塊單位重 (kN/m^3)； $l_{\min}$ ：特殊大石塊個個軸向中，最短軸長度 (m)； n_v ：特殊大石塊體積淹沒程度； $n_v = 1$ 完全淹沒， $n_v = 1/4$ ，四分之一淹沒。

(2) 室內試驗方法：

一般土石流漿體部分，依據試驗儀器限制決定取樣的最大粒徑。較常用的為旋轉式流變計；試驗時量測轉矩與轉速，求取管壁剪力與外視剪切率 (apparent shear strain rate)，經由回歸分析求得賓漢降伏應力與賓漢黏滯係數。將過去學者依現地估計方法所得之賓漢降伏應力與賓漢黏滯係數整理如表 2-7 所示，其中 Johnson & Pierson 依現場估計方法得到之賓漢降伏應力介於 600 ~ 3,800 Pa，賓漢黏滯係數 8 ~ 810 Pa-s；而 Berti 與 Genevois 兩位學者所求的降伏應力約在 18 ~ 5,400 Pa，黏滯係數約在 1 ~ 1,214 Pa-s 之間，可見土石流的流變特性不易掌握。

表 2-7 前人現地取樣試驗所得之賓漢降伏應力與賓漢黏滯係數整理表

前人研究	賓漢降伏應力(Pa)	賓漢黏滯係數(Pa-s)	體積濃度 Cv(%)	試驗方法	試體來源
Dai et al. (1980)	0.6~83	0.01~0.1	5~33	旋轉式流變計	-----
Kang & Zhang (1980)	0.4~40	0.02~0.32	16~40	旋轉式流變計	-----
Qian et al. (1980)	0.15~15	-----	22~51	旋轉式流變計	-----
Fei (1981)	0.11~40	-----	10~47	旋轉式流變計	-----
O'Brien & Davies (1991)	0.1~100	0.04~10	10~45	旋轉式流變計	Colorado Rocky
Phillips & Davies (1991)	50~300	20~238	61~65	平板式流變計	-----
Major & Pierson (1992)	12~405	0.2~27.9	44~66	旋轉式流變計	North Fork Toutle
Philippe (1995)	24.5~535	-----	33~60	平板式流變計	法國土石流溪流
	120~370	-----	61~79.6	旋轉式流變計	法國土石流溪流
Zou (1996)	36~550	-----	43~55.7	旋轉式流變計	-----
詹錢登 (1997)	2.5~30	0.008~0.06	25~43	管式流變計	神木村出水溪土樣
Philippe (1998)	41.1~96.5	-----	29.9~43.5	平板式流變計	Moscardo Torrent
Wang , Fei & Chen (2000)	16.4~274.7	-----	54~72	旋轉式流變計	蔣家溝試體
Hubl & Steinwendtner (2001)	89~30.5	1.8~12.9	50~60	輸送渠道流變計	Moschergraben
	36~79	2.5~6.3	50~60	輸送渠道流變計	Wartschenbach

4. 土石流平均流速

目前土石流平均流速有以高橋保公式、曼寧經驗公式及超高現象現地土石流監測方式獲得

(1) 高橋保(1978)

$$U_d = \frac{2}{5d_s} \left\{ \frac{g \sin \theta}{0.02} \left[C + (1-C) \frac{\rho}{\rho_s} \right] \right\}^{1/2} \left[\left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right] \times h_d^{3/2} \dots\dots\dots (2-16)$$

式中， U_d 為土石流平均流速(m/sec)； d_s 為平均粒徑(m)； C 為土石流濃度(假設等於平衡濃度 C_∞)。

(2) Manning-Strickler Equation (1891)

$$U_d = \frac{k_n}{n} h_d^{2/3} S_o^{1/2} \dots\dots\dots (2-17)$$

式中， h_d = 土石流深度，； n = 粗糙率，於土石流先端部 $n = 0.1$ ，後續流 $n = 0.06$ ，具襯砌流路工 $n = 0.03$ 。在英制單位， $k_h = 1.486$ ；在公制單位， $k_h = 1$ 。

(3) 超高現象(superelevation)估計土石流平均流速

(a) Johnson & Rodine (1984)：

(b) 提出野外推估方法，如圖 2-9 所示：

$$V = (g \psi \cos \theta \tan \beta)^{1/2} \dots\dots\dots (2-18)$$

(c) 式中： ψ = 流槽曲率半徑 (m)； β = 流動中土石流的傾斜角度 (°)。

(d) Hunger et. al. (1984)

$$\Delta h = k \frac{bV^2}{\psi g} \dots\dots\dots (2-19)$$

(e)式中： Δh ＝流槽兩端堆積的高差(m)； b ＝土石流表面寬(m)； k ＝修正係數，建議採用 $k=2.5$ 計算。

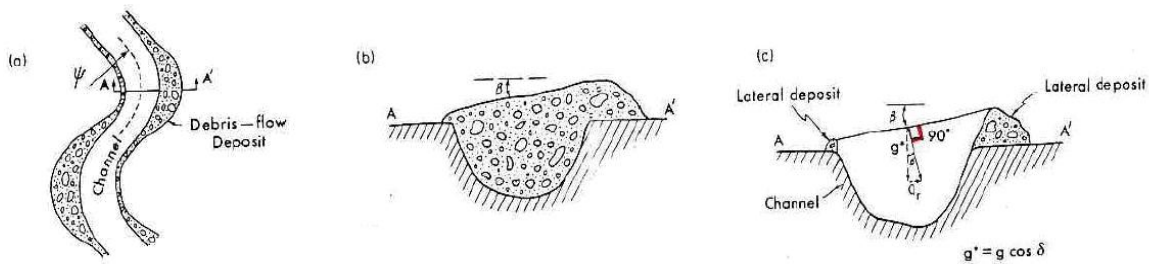


圖 2-9 土石流在流槽彎曲處的堆積情形
(Johnson and Rodine, 1984)

(4)現地土石流監測

現地量測土石流特性對於理論與實際兩方面都相當重要，現地量測可以用來定義流變之行為，也可以用來修正數值模型。但由於土石流發生之不可預測性，再加上土石流發生地點不易進入，儀器架設昂貴，因此世界上目前僅有少數的土石流危險區域架設儀器，進行相關資料蒐集。以下介紹幾個世界上著名的土石流觀測區：

(a)Acquabona Creek

(b)Acquabona Creek 位於義大利境內，為 Boite River 的支流，多羅邁特山 (Dolomite) 的東方，流域面積約為 0.3 km^2 ，平均坡度約為 18 度，年雨量約在 900~1500mm 左右，每年發生 1~2 次土石流，地理環境如圖 2-10 所示。Acquabona 流域於 1997 年起架設儀器觀察土石流，分別在發生區、流動區及下游堆積區設置測站，包含雨量計、水壓計、地音探測器 (geophone)、聲波探測 (ultrasonic logs)、影像紀錄 (video-records)。以下所

蒐集到的資料為堆積區 3 號測站之記錄，包含地聲探測及影像紀錄兩種不同地流速資料，資料如表 2-8 所示（Genevois and Tecca，2001； Genevois et al.，2000；Berti et al.，2000）。

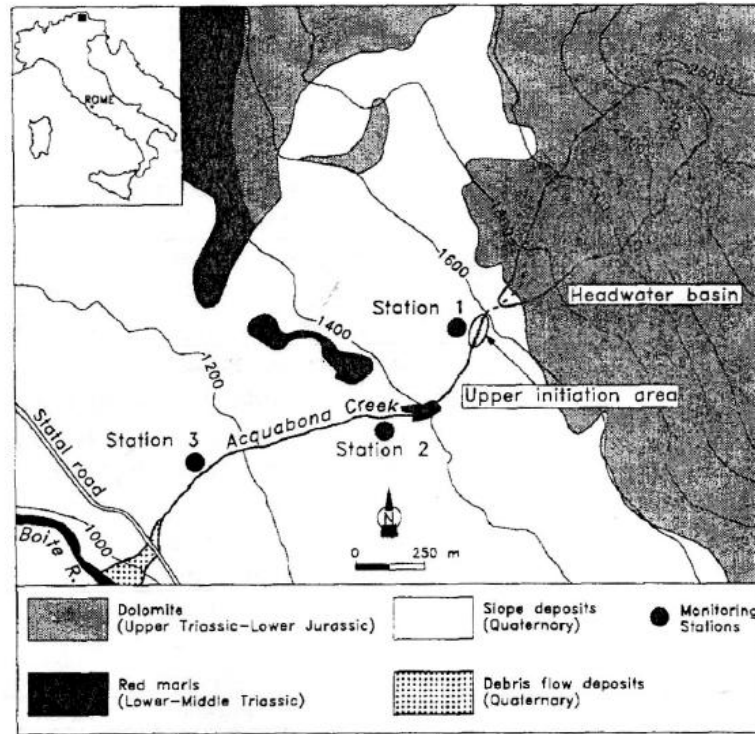


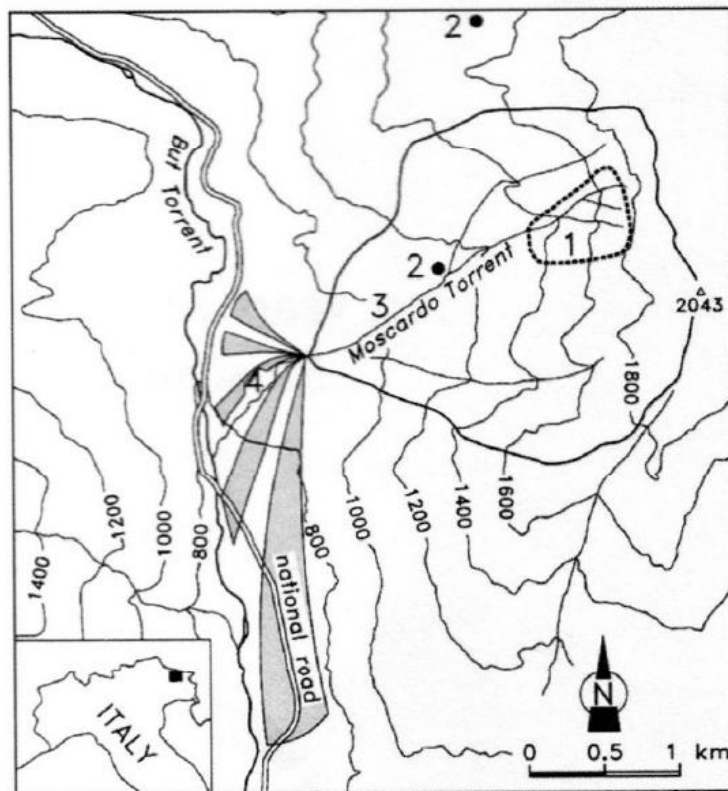
圖 2-10 Acquabona 流域位置及 1、2、3 號測站位置圖
(Berti et al.，2000)

表 2-8 Acquabona Creek 土石流流速與流動深度(Berti et al.，2000)

日期	波別	流速-地音探測 (m/s)	流速-影像紀錄 (m/s)	流動深度 (cm)
25/07/1998	第一波	0.47	2.20	150.0
	第二波	0.83	1.40	85.0
27/07/1998	第一波	1.05	2.36	150.0
	第二波	0.91	-----	-----
17/08/1998	第一波	1.81	3.44	1.64
	第二波	2.63	5.17	0.36
	第三波	4.00	4.18	0.33

(c) Moscardo Torrent

(d) Moscardo Torrent 位於義大利東北方處，流域面積 4.1 km²，平均坡度為 20 度，年平均雨量為 1660mm，每年至少會發生一次土石流，地理環境如圖 2-11 所示。Moscardo 自 1989 年起開始架設觀測儀器，包含地音探測器 (geophone)、聲波探測 (ultrasonic logs)、攝影機。以下針對 1990 至 1997 年間的 13 場土石流記錄，整理如表 2-9 及表 2-10 所示 (Arattano et al., 1997; Arattano, 1999; Marchi, 2002)。



(1) 土石流發生區 (2) 設置雨量計
(3, 4) 設置聲波探測、地音探測器以及攝影機。

圖 2-11 Moscardo Torrent 流域位置圖 (Arattano et al., 1997)

表 2-9 1990~1997 Moscardo Torrent 土石流資料 (Arattano et al., 1997)

事件時間	平均流速 (m/s)	最大流量 (cm ³ /s)	最大流動深度 (m)		堆積體積 (m ³)
17/08/1990	1.0	-----	0.69	deposution	-----
13/08/1991	5.0	88.0	2.13	2.20	19000
30/09/1991	1.9	24.0	1.67	2.40	3250
01/09/1992	2.5	46.0	2.24	1.90	5800
11/07/1993	3.0	14.0	2.12	1.04	5600
19/07/1993	0.9	3.0	0.74	0.94	730
20/07/1993	4.3	16.0	2.30	1.52	6350
14/09/1993	2.5	10.0	1.47	1.41	3800
18/07/1994	4.0	-----	2.09	1.51	-----
22/06/1996	3.5	140.0	2.85	2.00	16800
08/07/1996	4.0	195.0	3.65	2.27	15600
27/06/1997	2.9	25.0	3.90	2.10	16

表 2-10 Moscardo Torrent 中利用地音探測於 3 測站測得之流速

22/06/1996	Sation 1 & 2	Sation 2 & 3	Sation 3 & 4
第一波流速 (m/s)	7.1	8.5	7.2
第二波流速 (m/s)	7.1	7.1	7.7
第三波流速 (m/s)	6.7	6.7	7.1

(e)Kamikamihorizawa Gully

(f)Kamikamihorizawa Gully 位於日本北方，流域面積約 0.8 km²，平均河道坡度為 15.8 度，從 1962 年 Yakedake 火山爆發後，Kamikamihorizawa 的土石流發生頻率增加，每年都發生數次的土石流，其流域相關位置如圖 2-12 所示。自 1975 年起在下游處附近陸續架設儀器來觀察土石流，並採用兩種不同的速度計，分別為 radar speedometer 和 filter speedometer 來對土石流進行觀察，並從 1977 年起陸續獲得流速相關資料，表 2-11 為 1976 至 1980 年間土石流實測資料整理 (Okuda and Suwa, 1981; Slaymaker, 1991)。

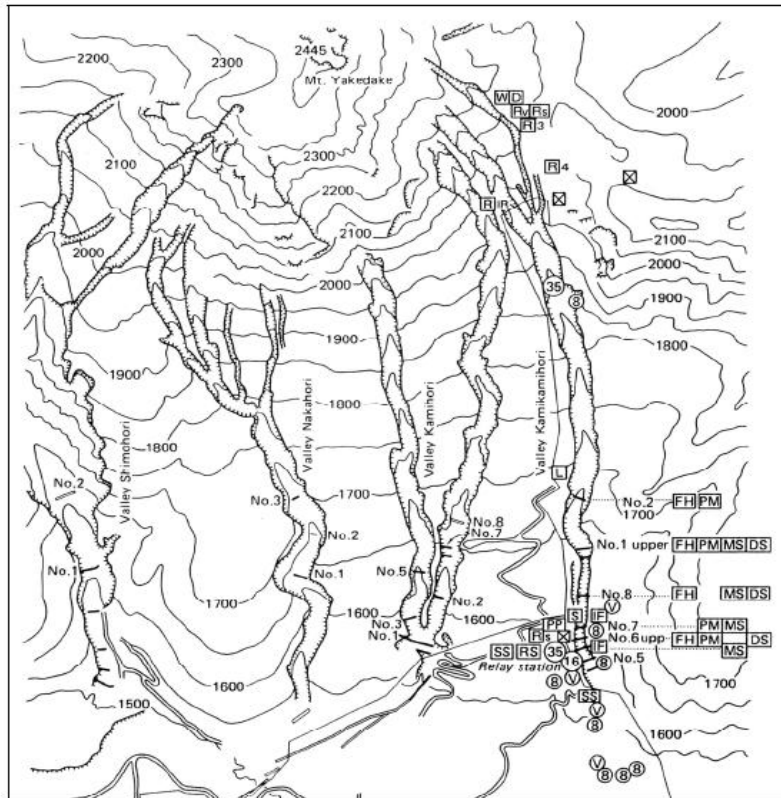


圖 2-12 Kamikamihorizawa Gully 的流域及儀器架設位置圖

表 2-11 Kamikamihorizawa Gully 1976 至 1980 之土石流實測資料

發生時間	前端平均流速 (m/s)	qmax (m ³ /sec)	Distance (m)	Dmax (m)	最大流動深度 (m)	Discharged volume (m ³)
1976/07/19	3.40	124.0	607	2.3	3.4	9200
1976/08/03	3.90	103.0	718	3.1	3.2	6400
1976/08/14	4.20	----	----	----	----	-----
1978/08/17	5.10	98.0	627	6.0	3.8	11500
1978/09/04	1.90	24.0	599	1.9	1.5	710
1978/09/29	2.20	22.0	565	0.5	1.9	-----
1979/09/21	3.30	98.0	755	5.6	3.4	14800
1980/07/19	0.88	5.1	116	1.2	1.0	-----
1980/08/23	4.30	65.0	321	3.3	1.0	5100

(g)Curah Lengkong river

(h)Curah Lengkong river 位在印尼爪哇島的 Semeru 火山上流域面積約為 25.8 km²，平均河道坡度為 17.2 度，其流域相關位置如圖 2-13 所示。Semeru 火山從 1967 年第一次爆發後，大約每 1 至 7 年會爆發一次，也因此提供了不少土石流材料。學者在 Curah Lengkong river 的下游設置觀測點（海拔 825 公里處），透過直接觀測來獲得平均流速及流動深度。平均流速是藉由量測岸邊的表面流速來獲得；流動深度則是讀取岸邊的刻度表；流量則是河道寬度、平均流速、平均流身三者乘積。以下蒐集 1999 至 2001 年間 21 處土石流相關資料，如表 2-12 所示（Lavigne and Suwa, 2004；Lavigne, 2004）。

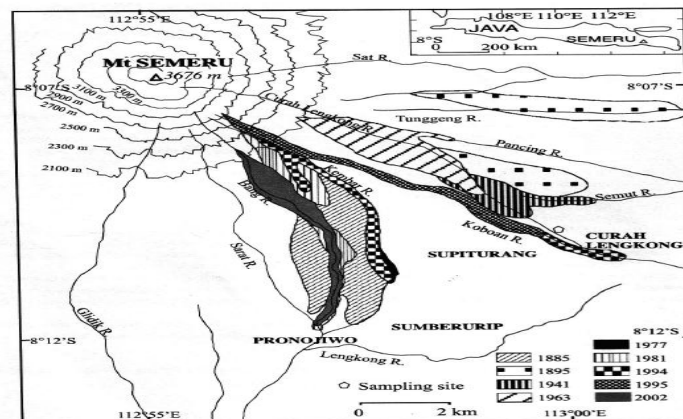


圖 2-13 Curah Lengkong river 的流域位置圖（Lavigne, 2004）

表 2-12 Curah Lengkong river 1999~2001 年間土石流資料 (Lavigne, 2004)

發生時間	前端流速 (m/s)	尖峰流速 (m/s)	最大流動深度 (m)	最大流量 (m ³ /sec)	輸砂體積 (m ³)
1999/11/21	5.8	5.9	0.8	67	65000
1999/11/23	6.2	6.5	1.0	95	146000
2000/02/04	5.0	5.0	1.0	100	134000
2000/02/25	1.9	5.5	2.5	175	354000
2000/03/08	3.8	5.0	1.0	100	105000
2000/03/23	1.4	4.5	1.3	104	153000
2000/03/24	2.3	6.0	3.5	245	402000
2000/03/27	2.3	6.0	3.5	245	502000
2000/03/28	2.0	5.0	1.5	150	283000
2000/04/09	2.7	5.0	1.5	120	245000
2000/04/13	1.5	5.0	1.0	100	190000
2000/04/14	2.5	5.0	0.9	85	108000
2000/04/15	1.4	5.0	1.5	135	233000
2000/07/28	1.5	6.0	3.0	240	430000
2000/11/13	3.3	6.0	3.0	180	444000
2000/11/15	4.3	5.0	1.0	100	115000
2000/11/19	2.5	6.0	3.0	210	429000
2000/11/20	4.0	6.0	3.5	245	396000
2000/11/23	4.3	4.5	1.0	90	88000
2000/11/26	3.0	5.7	3.0	180	499000
2001/04/16	1.7	4.5	1.0	90	70000
2001/04/23	2.5	4.0	0.6	54	80000
2001/05/22	4.5	5.0	2.0	200	24300

(i) 蔣家溝

(j) 蔣家溝位於雲南省境內，首都昆明東北方約 200 公里處為金沙江 (Jinsha River) 的支流，流域面積約為 47.1 km²，平均坡度約為 6 度，每年發生 10 至 20 次土石流，流域相關位置如圖 2-14 所示。東川 (dongchuan) 土石流觀測站設置在蔣家溝流通溝道之較直段 (約 270 公尺)，其坡度約為 3%，取 200 公尺的溝道在其兩岸設置標記並直接量測流體的寬度、流動深度及觀測時間，推算其

流速及流量。表 2-13 記錄 1966 至 1997 年間蔣家溝土石流的資料 (Hamilton and Zhang, 1997; 楊仁文等, 1998; 周必凡等, 1991)。

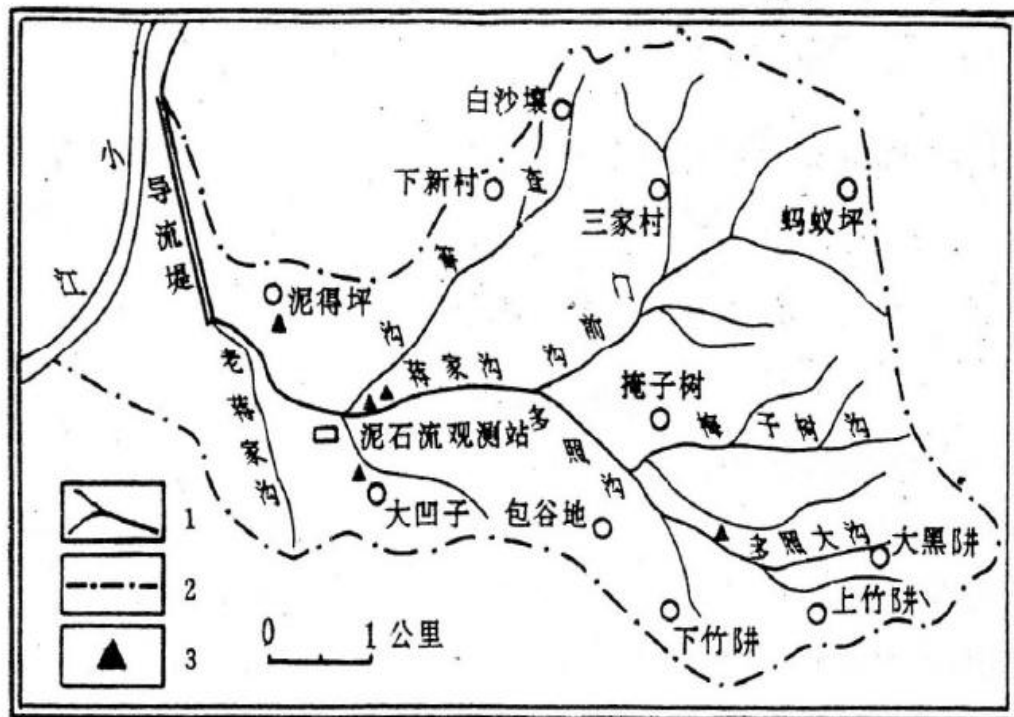


圖 2-14 蔣家溝流域位置圖 (周必凡等, 1991)

表 2-13 蔣家溝 1996 至 1997 年間土石流資料整理（周必凡等，1991）

發生時間	單位重 (t/m ³)	流動深度 (m)	前端流速 (m/s)	Bed slope (Ic)
1966/07/23	-----	-----	7.74	0.055~0.070
1967/07/30	-----	-----	7.66	0.055~0.070
1967/08/05	-----	-----	7.30	0.055
1974/06/29	1.83	0.17	3.67	0.055
1974/06/30	2.10	0.40	0.67	0.060
1974/07/16	2.00	0.45	0.75	0.055~0.070
1974/08/04	-----	-----	5.90	0.055~0.070
1974/08/28	-----	-----	7.59	0.055~0.070
1975/06/11	-----	-----	8.58	0.055~0.070
1975/06/15	-----	-----	9.02	0.055~0.070
1975/07/04	-----	-----	5.85	0.063
1975/07/05	1.95	1.40	7.81	0.063
1975/07/22	2.21	2.10	9.30	0.055
1975/08/08	2.27	2.04	6.90	0.055
1975/08/10	1.83	0.60	3.90	0.058
1975/08/11	1.80	0.56	3.68	0.066
1975/11/06	2.21	3.72	9.15	0.063
1982/07/08	2.33	1.80	7.30	0.056
1983/06/02	2.08	1.90	7.60	0.050
1983/08/13	2.11	1.40	8.00	0.067
1983/08/28	2.19	1.10	6.10	0.059
1984/06/14	2.23	3.00	11.2	0.061
1985/07/25	2.25	1.67	7.30	0.061
1985/07/26	2.25	1.54	7.50	0.060
1985/07/27	2.20	2.14	8.90	0.060
1985/07/31	2.20	3.38	11.5	0.060
1985/08/02	2.15	2.47	8.80	0.060
1985/08/11	2.20	1.11	5.50	0.060
1986/07/22	2.25	1.84	7.80	0.052
1986/07/23	2.11	1.54	8.01	0.052
1986/07/24	2.20	1.80	6.90	0.056
1986/07/28	2.25	2.97	11.0	0.053
1997/08/28	1.75	0.40	3.33	----

5. 土石流尖峰流量

Takahashi (1991) 在土石流達平衡濃度土石流流量 (C_∞) 時 (土石流冲刷與淤積平衡)，由土石與水質量守恆推得單位寬度土石流量 Q_d 與水流流量 Q_w 間相互關係：

$$Q_d = \frac{C_*}{C_* - [S_b - (1 - S_b)C_*]C_\infty} Q_w \dots\dots\dots (2-20)$$

式中， Q_d 為土石流尖峰流量(cms)， Q_w 為清水洪峰流量(cms)， C_* 為堆積層濃度，依一般現場調查結果約為 0.6 ~ 0.7， S_b 為堆積層飽和度。若 $C_\infty > 0.9$ 則令

$C_\infty = 0.9 C_*$ ，對飽和堆積土體 ($S_b = 1$)，可將上式簡化為

$$Q_d = \frac{C_*}{C_* - C_\infty} Q_w \dots\dots\dots (2-21)$$

若 $C_\infty = 0.8 \sim 0.9 C_*$ ，則土石流量約為水流量之 5 ~ 10 倍。

此外，根據土石流發生時之降雨量資料，可推求清水流洪峰流量，即

$$Q_w = C * Ir * A \dots\dots\dots (2-22)$$

式中， C =逕流係數； A =集水區面積； Ir =土石流發生時最大平均降雨強度。

6. 土石流輸送能力

- (1) 土石流可能搬動之土砂量 (1997，日本全國治水防砂協會) 藉著土石流搬動的土砂量，利用計畫規模之降雨量乘集水區面積求得總出水量，依此流量再與土石流濃度相乘計算出移動土砂量。

$$V_{ec} = \frac{10^3 * \rho_w * A}{1 - n} \left(\frac{C_\infty}{1 - C_\infty} \right) f_r \dots\dots\dots (2-23)$$

式中：A=集水區面積 (km²)，n=孔隙率 (≒0.4)，C_∞=流動中土石流之土砂容積濃度，f_r=流出修正率；f_r=0.05(logA-2.0)+0.05。

(2)依土砂水理推算之土砂量一般較適合河床較陡河川之流出泥砂量推估，相關公式有：藤田、高橋、水山式、土研式、勃朗式 Meyer-Peter-Mueller (MPM 式) 等，以下資舉 MPM 式表示如下：

$$\frac{Q_b}{B_m / (\sigma / \rho - 1) g \cdot dm^3} = 8 \times \left\{ \frac{RI}{(\sigma / \rho - 1) dm} \cdot \beta - \phi_c \right\}^{1.5} \dots\dots\dots (2-24)$$

式中：Q_b=流沙量，B_m=河寬，φ_c=臨界曳引力 (φ_c=0.047)，g=重力加速度，I=河床坡度，R=水力半徑，dm=平均粒徑，β=與河床粗糙度有關的係數。

2.5 土石流衝擊力評估

根據土石流攜出粒徑調查之最大粒徑，可估算其可能的衝擊力。土石流衝擊力係指壩體上游面遭土石流直接撞擊之力量，可分為流體衝擊力和巨礫衝擊力兩種，前者係屬面的衝擊力，與壩體安定性分析有關；後者為點的撞擊，為評估混凝土材料的耐撞程度，與混凝土強度和厚度相關，而與壩體整體安定性無關。相關針對土石流衝擊力研究整理如下：

1.水山高久 (1979)

將土石流衝擊力以流體理論說明土石流對攔砂壩之正面衝擊力為：

$$F = \rho \cdot h \cdot \frac{u^2}{g} \dots\dots\dots (2-25)$$

其中：

F ：衝擊力(單位寬度之土石流荷重 ton/m)

ρ ：土石流密度(ton/m³)

h ：土石流平均深度(m)

u ：土石流流速(m/sec)

g ：重力加速度(9.81 m/sec²)

水山並引述雪崩之正面瞬間衝擊力為該式計算值之 2 倍。若以完全彈性球體之假設推導得土石流中巨礫對混凝土攔砂壩之衝擊力如下式：

$$F = 241u^{1.2} \cdot R^2 \dots\dots\dots (2-26)$$

其中：

F ：巨礫衝擊力(ton)

u ：流速(m/sec)

R ：巨礫之半徑(m)

且經燒岳土石流之實測檢算後，將上式修正成下式：

$$F = 48.2u^{1.2} \cdot R^2 \dots\dots\dots (2-27)$$

2.水山高久等人(1985)

水山高久等人(1985)為探討土石流對鋼管壩之衝擊力，於渠槽中測定土石流流速、波高、洪水波形狀和壩體後方之堆積情況後，代入模式計算，發現其實測值均低於計算值。試驗渠槽長 10m、寬 0.3m，坡度有 15°、20°、25°三種，試驗材料為直徑 10~15mm、15~20mm、20~25mm 三種礫石，與直徑 15~16mm 之玻璃球。同年，利用直徑 70mm 鐵球與水泥牆模擬土石流對混凝土攔砂壩之衝擊力，並探討各

種不同厚度、不同緩衝材料對鐵球衝擊力之消減效益，最後指出實驗結果與理論模式所求得者十分接近。

3.山口伊佐夫(1985)

山口伊佐夫（1985）以球體撞擊理論，導出土石流中巨礫對混凝土壩體衝擊力為：

$$F = 426u^{1.2} \cdot R^2 \dots\dots\dots(2-28a)$$

並建議巨礫對混凝土攔砂壩衝擊力如式即：

$$F = 50u^{1.2} \cdot R^2 \dots\dots\dots(2-28b)$$

上式並用於妙高高原土石流防治工法上。

4.林弘群(1994)

林弘群（1994）以流體 K_a 、 H 、 γ 動壓理論加上堆積土層產生之側向力總和為基礎，分析鋼管壩所受之衝擊應力，其衝擊應力為：

$$\begin{aligned} P = f \cdot b + \sigma_a &= \frac{\gamma_m}{g} \cdot h \cdot (\Delta u)^2 \cdot b + K_a \sigma_z \\ &= \frac{\gamma_m}{g} \cdot h \cdot (\sqrt{2}u)^2 \cdot b + K_a \cdot H \cdot \gamma \dots\dots\dots(2-29) \\ &= 2 \cdot b \cdot h \cdot \frac{\gamma_m}{g} \cdot u^2 + K_a \cdot H \cdot \gamma \end{aligned}$$

式中 K_a 為主動土壓力係數； b 為土石流寬度與單位寬度之比例； h 為土石流撞擊壩體之瞬間波高； γ_m 為土石流單位重； u 為土石流波速； g 為壩後堆積土石單位重； γ 為堆積物比重； H 為壩後土石堆積高度。

其中假設土石流到達壩面之瞬間其波速大小（速率）並未減少，且撞擊瞬間，土石流之流動方向受制於水槽側壁，僅視同其完全向壩體揚起，如圖 2-15 所示，則其速率變量（ Δu ）為 $\sqrt{2}u$ 。

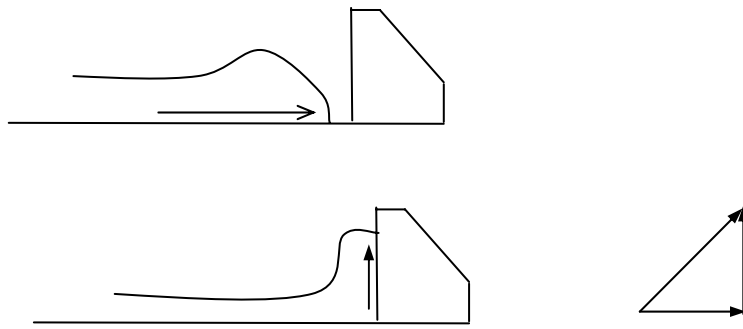


圖 2-15 土石流撞擊壩體示意

5.水土保持設計規範(1992)

土石流水理計算出之土石流衝擊力分為土石流撞擊力 P_f 和巨礫撞擊力 P_d ，公式如下：

(a) 土石流流體衝擊力 P_f (為均佈力)

$$P_f = \alpha \frac{\gamma_m}{g} h_d U_d^2 \dots\dots\dots (2-30)$$

式中， P_f = 單位寬土石流流體力 (t/m)， $\alpha \doteq 1$ ， γ_m = 土石流單位重 (t/m^3)。

(b) 土石流巨礫衝擊力 (為集中力)

礫石衝擊力 P_d ：屬非彈性碰撞，依日本經驗公式可表示為：

$$P_d = 12.0 U_d^{1.24} D_E^2 \dots\dots\dots (2-31)$$

式中， P_d = 礫石衝擊力 (t)， D_E = 設計粒徑 (m)

理論公式：周必凡(1991)根據完全彈性體碰撞理論，說明球體對防砂壩的衝擊力，經推導後得：

$$F = \left[\frac{4}{3} \pi (k_1 + k_2)^{0.4} \right] \left[\frac{5 \rho_s \pi^2}{4g} \right]^{0.6} U^{1.2} R^2 \dots\dots\dots (2-32)$$

$$k_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}, k_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \dots\dots\dots (2-33)$$

其中 F 為球體對防砂壩的衝擊力(ton), ν_1 及 ν_2 分別為防砂壩及球體的柏松比(Poisson' s ratio), E_1 及 E_2 分別為防砂壩及球體的楊氏模數(Young' s Modulus)(kgf/m²), ρ_s 為球體密度(kg/m³), U 為球體對防砂壩的相對速度(m/sec), R 為球體的半徑(m)。土石流在高速運動下, 挾帶之巨礫對障礙物之衝擊作用相當大。實際上土石流中大石塊對攔砂壩的衝擊時, 不完全符合彈性假設, 而且接觸面會發生斷裂、摩擦、微小表面破壞以及流體壓力的緩衝作用等。因此大石塊對擋土牆的衝擊力應表示為

$$F = K_c \left[\frac{4}{3} \pi (k_1 + k_2)^{0.4} \right] \left[\frac{5 \rho_s \pi^2}{4g} \right]^{0.6} U^{1.2} R^2 \dots\dots\dots (2-34)$$

式中, K_c 為修正係數, 其值可根據實驗和野外實測資料來決定。依據日本土石流衝擊力試驗 $K_c \approx 0.1$, 考量實驗精度及安全考量, 可取 $K_c \approx 0.2$ (詹錢登, 2000)。由上式可知大石塊對攔砂壩的衝擊力與石塊移動速度的 1.2 次方成正比、石塊大小的平方成正比、與石塊密度的 0.6 次方成正比, 而且可知大石塊對攔砂壩的衝擊力隨石塊及攔砂壩的剛度(楊氏模數)增加而增加。

6. 詹錢登(2000)

依據兩完全彈性球體衝擊理論, 速度分別為 U_1 及 U_2 的兩完全談性球體相互對衝時, 如圖 2-16 所示, 其中 r_1 及 r_2 分別為球 1 及球 2 的波桑比, E_1 及 E_2 分別為球 1 及球 2 的楊氏係數, U_r 為兩球體之相對速度, $U_r = U_1 + U_2$ 。假如兩球體材質相同, 但半徑不同, 其相對半徑比 $r_r = r_1/r_2$ (考量 $r_1 \geq r_2$)

$$\frac{p_c}{k_2^{-0.4} \rho_s^{0.6} \gamma_2^2 U_r^{1.2}} = \frac{4\pi^{0.2}}{3} \left(\frac{5}{4} \right)^{0.6} \frac{1}{(1 + \gamma_r)^{0.2} (1 + \gamma_r^3)^{0.6}}$$

上式說明兩材質相同球體相衝擊時，其衝擊力隨相對半徑比增加而減小。

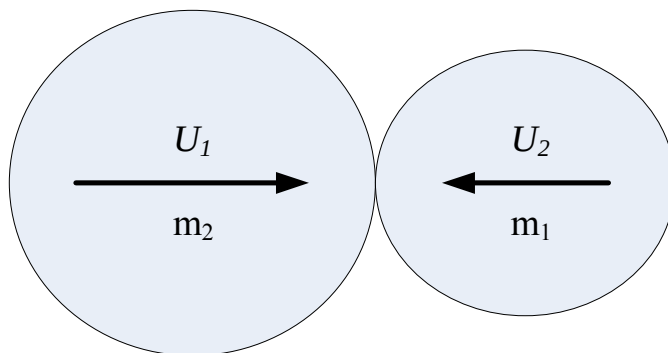


圖 2-16 兩完全彈性球體分別以速度 U_1 及 U_2 相互對撞

橋墩若設立於溪床中，則土石流對於橋墩之作用力應予以考慮。一般而言，土石流對於橋墩之作用力可分成下列二種：

1. 土石流衝擊力。
2. 巨礫撞擊力。

此二種作用力可經由理論數值分析求得，或以下列經驗公式計算之。

1. 土石流體衝擊力 F

$$F = \beta \frac{\gamma_d}{g} h u^2 \dots\dots\dots (2-35)$$

$$\rho_d = \sigma \ C_{d\infty} + \rho(1 - C_{d\infty}) \dots\dots\dots (2-36)$$

式中

$$\beta \approx 1$$

ρ_d ：土石流密度 $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

σ ：砂粒之密度，約 2500~2700 $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

ρ ：流體之密度，約 1000~1200 $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

2. 巨礫撞擊力 P

(1) 巨礫撞擊力，由於非彈性碰撞，日本經驗公式為：

$$P = 48U_u^{1.24} R^2 \dots\dots\dots (2-37)$$

式中： P ：巨礫撞擊力(ton)

R ：巨礫之半徑(m)

(2) 另外撞擊力亦可採用理論公式如下：

$$P = n\omega^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (2-38)$$

$$\omega = \left(\frac{5U_u^2}{4n_1 \times n} \right)^{\frac{2}{5}}$$

$$n = \left(\frac{16R}{9\pi^2(K_1 + K_2)^2} \right)^{\frac{1}{2}} ; n_1 = \frac{1}{m_2}$$

$$K_1 = \frac{(1-u_1^2)}{\pi E_1} ; K_2 = \frac{(1-u_2^2)}{\pi E_2}$$

式中：

P ：巨礫撞擊力(ton)

m_2 ：巨礫之質量(kg)

R ：巨礫之半徑(m)

u_1 ：橋墩混凝土之波松比(Poisson's Ratio)

u_2 ：巨礫之波松比(Poisson's Ratio)

E_1 ：混凝土之楊氏模數(Young's Modulus) $\left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right)$

E_2 ：巨礫之楊氏模數

2.6 土石流規模及其危害行為

2.6.1 尖峰流量與土石流規模

土石流規模是指一次土石流流至土石流沖積扇的總體積及土石流流出總土方量。土石流規模大小是土石流防治工作人員制訂防治策略之依據。土石流土砂量之推估，一般可採兩種方式，其一為依據地形圖、現場調查及過去土石流記錄資料予以決定；其二採用日本經驗現場調查後所得之經驗公式，但目前爭議較大。

國內外土石流的研究時間較短，土石流規模目前雖可由尖峰流量或集水區面積之簡化理論及經驗進行估算，但仍須更多資料及研究以提高其可靠度。以下針對國內外學者分別由尖峰流量及集水區面積進行土石流規模估算方式進行說明：

1.Hunger et al. (1984)

Hunger et al. (1984) 將 10 個流量與規模案例整理繪圖，分析土石流規模大小與土石流尖峰流量之關係，發現土石流尖峰流量愈大土石流規模愈大，如圖 2-17 所示。

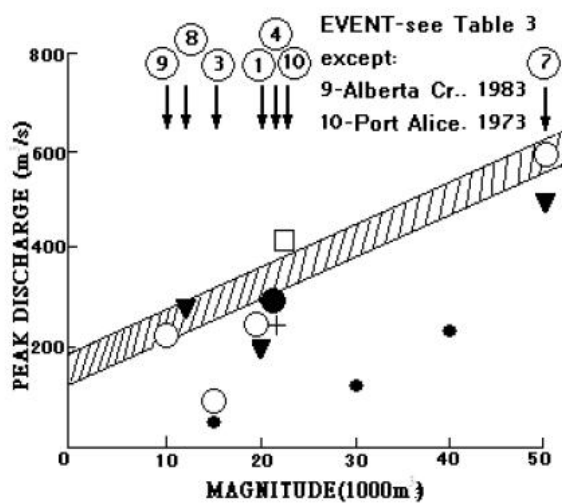


圖 2-17 土石流規模大小與土石流尖峰流量之關係 (Hung, 1984)

2. Bovis & Jakob (1999)

Bovis & Jakob (1999) 研究結果顯示，土石流之材料組成不同（泥流、礫石流）所示用之由尖峰流量推求最大一次土石流體積之經驗式應有所不同，如圖 2-18 所示。

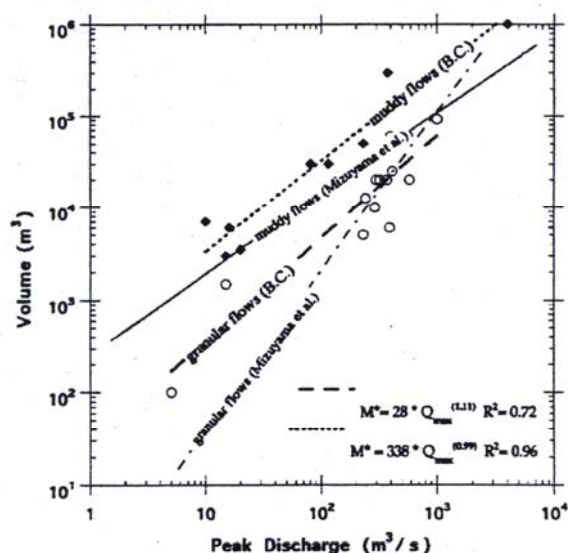


Figure 5. Relations between peak discharge and magnitude for British Columbian debris flows. Included for comparison are regressions for 'granular' and 'muddy' debris flow types computed by Mizuyama *et al.* (1992) from Japanese and Chinese data sets. Regression equations from Mizuyama *et al.* (1992): muddy flows, $M^* = 795 Q_{max}^{0.85}$, $R^2 = 0.74$; granular flows, $M^* = 13 Q_{max}^{1.33}$, $R^2 = 0.78$

圖 2-18 尖峰強度推求最大一次土石流體積之關係圖
(Bovis and Jakob, 1999)

2.6.2 集水區面積與土石流規模

1. Van Dine(1985)

Van Dine (1985) 整理土石流規模估算方法，分為比較法、經驗法、單位體積法及修正單位體積法等，並運用各方法分析加拿大 Howe Sound 地區土石流規模，針對土石流流出土方量 V (m^3) 與集水區面積 A (km^2) 之關係進行迴歸，發現集水區面積愈大，引發土石流規模也愈大，大致呈線性關係，即 V (m^3) = 10,000 A (km^2)，如圖 2-19 所示。

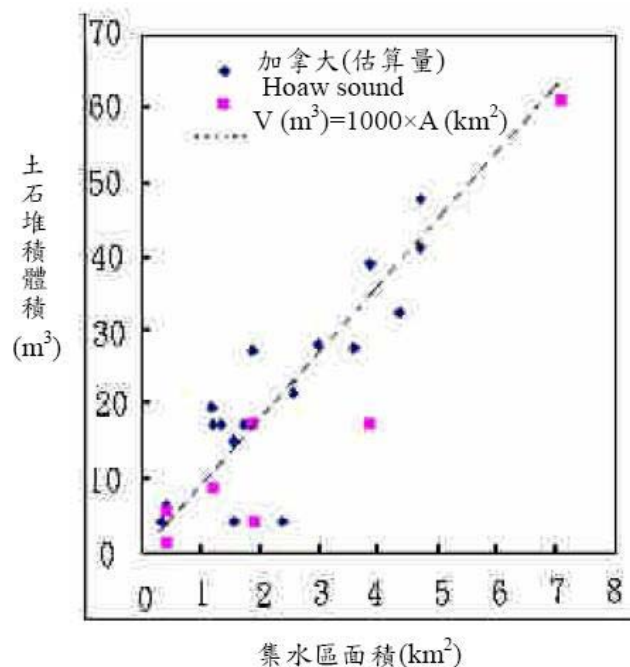


圖 2-19 土石流流出土方量與集水面積之關係圖 (Van Dine, 1985)

2. 游繁結等人(1996)

游繁結等人 (1996) 研究成果顯示，由於臺灣土石流發生區常有斷層造成之岩體破裂形成豐富之土石材料。若以南投縣陳有蘭溪土石流的調查結果為例，陳有蘭溪的土石流流出土方量與集水面積呈線性比例(林銘郎與周憲德, 1997)。陳有蘭溪的土石流流出土方量 V (m^3) 與集水區面積 A (km^2) 關係約為： V (m^3) = 30,000 A (km^2)。若

與加拿大 Howe Sound 地區土石流相互比較，陳有蘭溪的土石流流出土方量約是加拿大 Howe Sound 地區土石流規模的 3 倍。

3.池谷浩(1980)與謝正倫(1993)

日本建設省（1989）將日本土石流流出土方量與集水面積關係迴歸如表 2-14 所示，其中 M50 表示不被超越機率為 50%之土砂流出量；蔡元芳（1999）將臺灣案例加以比較，指出臺灣土石流流出土方量在 $M50=13600A^{0.61}$ 以上，建議估算式則採用較保守而集水區內土砂流出機率較高的 $M90=70992 A^{0.61}$ 與 $M95=113968 A^{0.61}$ ，其中 A 為集水區面積，單位為平方公里（km²），土方量 M 單位為立方公尺（m³）；而行政院農委會（2001）於桃芝颱風後調查出 168 處土石流災害現場結果，將本省之土石流流出土方量與集水面積迴歸如圖 2-20，更建議在估算本省其餘未發生災害之土石流潛勢溪流其可能土方量，最好採用不被超越機率為 90%以上較為保險。

表 2-14 日本土石流土砂流出量迴歸公式表（日本建設省，1989）

土砂流出量 不被超越機率	迴歸方程式 (A : km ² , M : m ³)
50%	$M50=19498A^{0.56}$
70%	$M70=48930A^{0.56}$
80%	$M80=81452A^{0.56}$
90%	$M90=120418A^{0.56}$
95%	$M95=304878A^{0.56}$
99%	$M99=511369A^{0.56}$

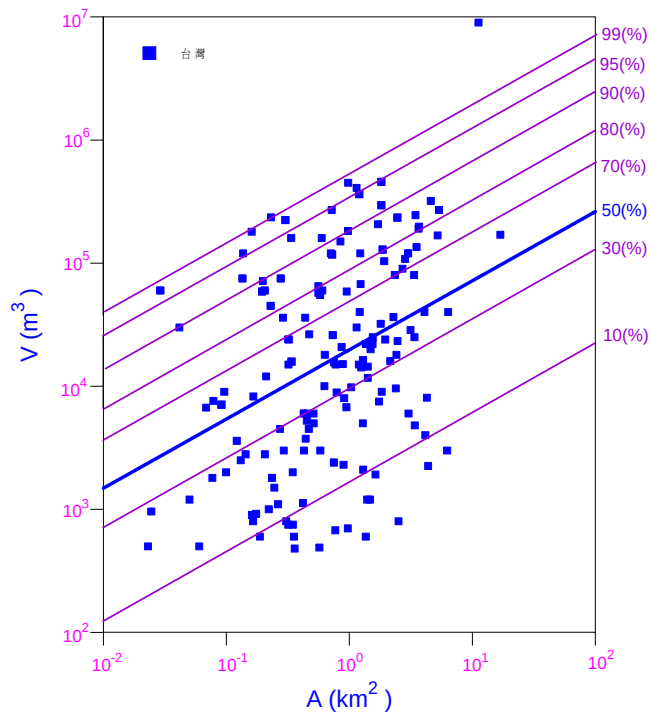


圖 2-20 臺灣土石流流出土方量與集水面積關係圖
(行政院農委會，2001)

2.6.3 土石流危害方式

土石流危害方式多種多樣，大體上可概括為三大類：侵蝕危害、搬運危害及堆積危害，各大類又包括直接危害和間接危害兩類，如圖 2-21 所示。

1. 侵蝕危害

(1) 直接危害: 土石流侵蝕的直接危害主要包括坡面侵蝕和河溪侵蝕。

a. 坡面土石流侵蝕：這主要發生於坡面源地，包括裸露坡、荒草坡、灌叢坡和森林坡以及耕作陡坡（坡度大於 15° ）。侵蝕的方式有紋溝土石流侵蝕、細溝土石流侵蝕及典型坡面土石流侵蝕三種。

b. 紋溝土石流侵蝕：

(a) 紋溝土石流侵蝕在時間上幾乎與其流體的形成同步出現，歷

時短暫、具有陣性，在一個地區（或流域）一場（次）土石流侵蝕過程中首先發生；在空間上主要分佈於散流坡，尤其裸露鬆散土質坡（如陡坡耕地）上最為發育，紋溝分佈斷續，未成水系；在規模上為最小，長、寬、身依次為數十厘米、十餘厘米和 1~3cm；主要危及散流坡土壤層，使之土層減薄，肥力下降。

(b)細溝土石流侵蝕：

(c)細溝土石流侵蝕在時間上與紋溝土石流侵蝕相似；在空間上主要分佈於散流坡下方以及覆蓋著（森林、灌叢和草坡）的坡面上，可彼此結合成水系；在規模上較紋溝土石流的侵蝕量大，細溝的長度、寬度和深度可分別達十米、數米和 20~30cm。主要危及坡地土壤層，使之失去腐殖質和淋溶層，而造成局部地區裸露或裸岩坡。

(d)典型坡面土石流侵蝕：

(e)典型坡面土石流侵蝕與淺層地滑土石流的形成幾乎同步進行，故稱典型坡面土石流侵蝕。與紋溝、細溝土石流侵蝕大體相似，不同之處在於坡面土石流侵蝕在時間上，出現於久雨後的暴雨過程，即大面積坡地上蓄滿產流的條件下；在空間上，與細溝土石流侵蝕相似，即多發生於土壤層較薄、地下水位較高、土層含水飽和、土質較緊密、孔隙率較小、顆粒結構較差及坡度較陡的坡段上，包括裸露坡、草被坡、灌叢坡和山林坡等地段；主要破壞土壤層，使之破壞殆盡而成裸露坡。

c.河溪土石流侵蝕：土石流對河溪侵蝕方式有下蝕、側蝕、溯源侵蝕、前進侵蝕和局部沖刷等，危害河溪沿程各種設施、交通路線、電力水利工程等。這樣侵蝕的線形特徵與坡面土石流侵蝕危害有所區別。在一條溝道內，土石流的侵蝕具體方式，一般上游以下蝕為主，兼有溯源侵蝕；中游的土石流則沖淤互見；

下游卻以局部沖刷為主，加速土石流串流改道，擴大堆積危害範圍等。

(2)間接危害

所謂土石流侵蝕的間接危害係只因土石流侵蝕所引起的伴生災害，如產生的新崩塌、地滑和水土流失或增強其危害程度。

- a.產生新的地滑和崩塌：在土石流侵蝕作用下，溝床不斷加深、兩岸坡度變陡、溝長增加，谷坡上、下方的張、壓力裂隙出現，進而發展成地滑，此即土石流侵蝕產生的新地滑。而新地滑的強烈活動，除增加源地土量和補給量外，還增加原地滑體的含水量，故分佈面廣的強烈地滑乃是加劇土石流發生的條件之一。
- b.加劇山區水土流失：土石流侵蝕是一種嚴重的水土流失，所謂嚴重係指土石流侵蝕土層深度或其搬運外移量均遠遠大於地表的土壤層之水土流失。地面土壤層水土流失的深度一般僅限於腐殖質層、淋溶層、澱積層和母質層等，整個剖面的總厚度不過數十厘米，最大厚度不超過 2 公尺。土石流侵蝕坡面土層的厚度既可限於土壤層內，如紋溝土石流、細溝土石流和坡面土石流；又可下深至母質層下的機械風化岩屑層，乃至某些基岩層達數十米之深。從水土流失的模量來看，土壤層的一般水土流失為數十至數千噸/平方公里·年，而土石流則可達數萬噸/平方公里·年。
- c.加劇水旱災害的頻次和程度：土石流侵蝕破壞山區植被、土壤、渠系後，便可加劇水旱災害的頻次和成災的嚴重程度。
- d.促進分水嶺外移，擴大流域：由於土石流具有溯源侵蝕能力，故可促進分水嶺外移、擴大流域，使河溪地表逕流量增加，進而可加劇土石流活動。

2.搬運危害

在土石流流動過程中，由於流體含高濃度土砂、慣性強、動力大，

除搬運大量泥、砂、石塊和巨礫出山口造成種種危害外，還直接產生衝擊、飛濺土石流體殘塊落擊、磨蝕、彎道超高埋沒等危害方式；間接危害方式主要為竄流改道及擴大危害區範圍。

(1)直接危害：

- a.土石流衝擊危害：與河溪土石流侵蝕危害相比，土石流衝擊危害係指流體整體或其中塊石、巨礫具有很大動能，可沖毀橋樑、堤壩、房屋、渠道、管線和車輛等固定設施與人、畜、車輛等活動目標；而土石流河溪侵蝕危害卻往往通過改變溝道地貌，破壞溪床或其兩岸建築設施地基穩定性而實現的。
- b.土石流飛濺殘塊落擊危害：在土石流高速或超高速奔流中，由於流體內土粒、石塊彼此間碰撞和氣孔體積壓縮等，致使局部吐實流體向流體上空和兩岸飛濺再返回地面，擊毀沿岸設施或使人畜傷亡。
- c.土石流砸擊危害：土石流進入堤壩庫區減速，在溢流口過壩時，流體內石塊、巨礫大致以重力加速度加速致使動能遽增，直接砸擊壩體下游坡使之成洞或壩基懸空，最後倒塌造成毀壩事故；可增大壩體下游坡度的措施來抑制砸擊危害。
- d.土石流磨蝕危害：土石流動中，流體內大量泥、砂、石塊對沿程接觸的各種保護對象和防制工程表面進行磨蝕。磨蝕的速度在一場土石流過程中可達數毫米至數厘米，其中以混凝土堰口較快，鐵質堰口較慢；可在過流堰口樹立鋼筋以加大粗糙的措施、防止磨蝕危害。
- e.土石流彎道超高淤埋危害：濃稠土石流的慣性強，在運動中直進性強，易淤埋各種設施、草地和活動中的人畜。

(2)間接危害：

土石流搬運過程中有衝擊和侵蝕危害，又有堆積、堵塞危害。當這兩類危害相互結合，便可使土石流竄流改道。在新的河道內

又可出現上述種種土石流搬運的直接危害。

3.堆積危害

土石流堆積的直接危害主要為淤埋和堵塞，間接危害包括淤高河床與積淤成灘等災害。

(1)直接危害：

- a.土石流淤埋災害：土石流進入平緩河段或山麓開闊地段，便發生整體停積或部分停積，大量泥砂可埋沒各種設施、摧毀各類資源（如農田、森林、牧場、城鎮、礦山）等，淤埋的厚度變幅很大，約 0.2~150 公尺。
- b.土石流堵塞危害：土石流強烈堆積既可阻斷自身流路，又可阻斷支流出口和幹流，形成天然堤壩或封閉性窪地、沼澤和湖泊。

(2)間接危害：

- a.迅速抬高幹流河床：迅速抬高幹流河床帶來種種危害，包括降低河溪的排洪能力、增加洪澇災害、改變河形並喪失航運之力、縮短沿岸鐵路、公路、渠系、城鎮、工礦等有效的使用時期，降低土石流災區建設投資意識和開發效益等。
- b.險灘阻（礙）航：土石流注入江河，既可直接堆積成灘又可經江河水流改造（即沖走細小顆粒）成灘，該類險灘將會隨土石流堆積而加劇。

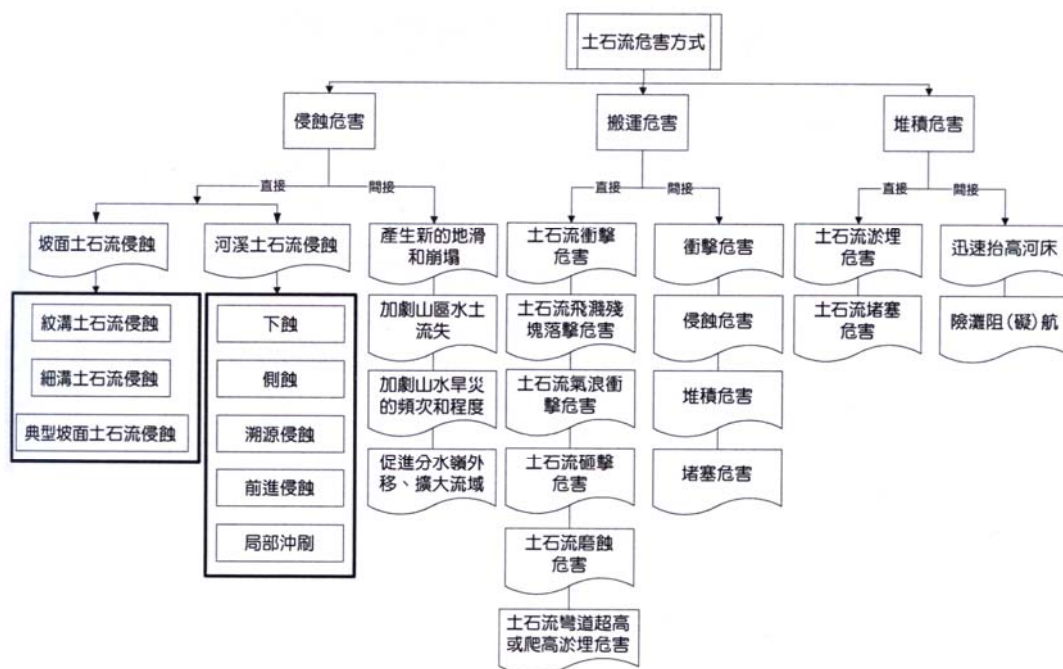


圖 2-21 土石流危害方式

2.7 土石流危險度評估

針對土石流潛勢溪流集水區之危險度，行政院農委會水土保持局(2002)提出一套評估方式，說明如下。

2.7.1 潛勢溪流發生度評估指標

土石流潛勢溪流發生度之評估，一般係以有效集水面積、集水區內岩體的岩性、通過集水區內的斷層長度及溪流上游的崩塌面積等 4 項因素進行評分(水土保持局，2002)，各項因子之評分過程說明如下。

1.有效集水面積：

一定的降雨特性及地質條件下，集水面積的大小可以代表逕流量及崩積物之大小，有效集水面積的大小與土石流發生的三個基本條件中之”足夠的水供應有”直接相關，又因有效集水面積乃指 15° 以上的集水面積，其與”足夠的坡度”亦相關，故將有效集水面積作為

誘發土石流危險度之重要評估指標。基準及得分如下：

(1) $A_{15} > 50$ 公頃， $W=50$

(2) $15 < A_{15} < 50$ 公頃， $W=30$

(3) $A_{15} < 15$ 公頃， $W=15$

2.集水區內地質之岩性：

土石流的發生與當地出露之岩石種類（岩性）有關，因為不同種類的岩體對水的透水性不同及其受應力作用後產生的擾動和破碎程度亦不相同；又土石流發生時，流動過程中對溪床造成側蝕及向下侵蝕所獲得的土石補充，因岩性之不同而會有所差異，其將使得土石流規模產生不同程度之擴大因而造成嚴重災害。因為抵抗侵蝕作用的能力亦因岩性而有所不同，故岩性實為危險度區分的重要誘發指標。本省有關於土石流調查的統計資料在地質方面相當缺乏，所以參考日本建設省土木研究所調查日本境內土石流發生所處之地質所佔的比例結果及參考本省地質之特性，而訂定的地質岩性之危險度基準，相關基準及得分如表 2-15 所示。

表 2-15 集水區內地質岩性發生度基準之評分指標(水土保持局，2002)

溪流所在之地質環境	岩性分類	評分
片岩，板岩	廣域變質岩	$W=10$
古第三紀沈積岩(包括中新世岩層)	古第三紀亞變質岩	$W=6$
新第三紀及更新世岩層臺地堆積層（全新世）	新第三紀沈積岩	$W=3$

3.通過集水區內斷層長度與總面積比值(I)：

臺灣位處造山運動活躍的板塊帶，地質構造運動頻繁，岩體受擠壓之應力作用而呈現斷層、褶皺、破裂面等構造極為發達，因造山運

動時地殼迅速抬升，河流下切與側蝕作用強烈，使得臺灣山地地形陡峭、河川短而急促。在斷層和褶皺等地質構造附近的岩體，由於受到構造應力的作用，常有較發達的破裂面發育，其鄰近的岩體亦較破碎，有利於岩石的風化且易造成落石及崩塌的發生。因此，斷層和褶皺所導致的破碎岩體實為土石流發生的土石來源之一，故以斷層長度作為誘發土石流之評估指標。但因不同的潛勢溪流其集水面積亦不相同，為了比較其差異，將原定之指標三【通過集水區內之斷層長度】改為通過集水區內之斷層長度與總面積之比值(I)，其評分基準如下：

$$(1) I > 1.5, W=10$$

$$(2) 0 < I < 1.5, W=6$$

$$(3) I = 0, W=3$$

4.溪流上游崩塌面積與總面積比值(Ac)：

溪流上游之崩塌面積可以衛星影像及現場調查推得，因崩塌地之土石較為鬆軟且表土無植被，並直接崩落於溪床而成為溪床堆積物，大雨來時雨水易與土砂混合，而崩塌地通常在溪流的上游，因此有陡坡的助引，當有足夠的水供應時，相當容易發生土石流，故崩塌地係引發土石流條件中之土石量的另一來源，所以將崩塌地列為誘發土石流之指標。為進行不同潛勢溪流間的相互比較，將原指標四【溪流上游之崩塌面積】修改為溪流上游之崩塌面積與總面積之比值(Ac)，其評分基準如下：

$$(1) Ac \geq 0.016, W=30$$

$$(2) 0.016 > Ac \geq 0.0055, W=20$$

$$(3) Ac < 0.0055, W=10$$

2.7.2 保全對象危害度評估指標

所謂保全對象包含住戶、學校、旅舍、公共建築物、公路、橋樑、農地等對象。土石流在溢流處開始淤積、漫流時，由溢流處到保全對

象的距離為緩衝段，用以代表居民避難時間長短，距離愈短則則避難時間越短，危害度愈高，若距離愈長，相對下游的居民有較充分的時間避難，甚至較長的距離可能在土石流未及保全對象之前早已經淤積停止，所以溢流處至淤積範圍內若有保全對象，則其危害度相對較高。

相關保全對象主要區分為以下三類(如表 2-16 所示):1.保全住戶：包含住戶、學校、旅舍、公共建築物；2.保全道路：包含重要公路、橋樑；3.保全耕地：包含農地、果園等。依上述保全對象分類方式分別給予不同之權重評分，其權重值如下，各項評分值加總後即為保全危害度(水土保持局，2002)。

表 2-16 保全對象危害度評估一覽表(水土保持局，2002)

評估指標	判斷基準	評分
住戶、學校、旅舍、公共 建築(有民眾居住者)	15 戶以上	P=70
	5-15 戶	P=50
	5 戶以下	P=30
重要公路、橋樑、道路	有	P=20
	無	P=0
農田、果園	有	P=10
	無	P=0

2.7.3 潛勢溪流危險度評估

將土石流潛勢溪流集水區有效集水面積、集水區內岩體之岩性、通過集水區內之斷層長度及溪流上游之崩塌面積等四個評估指標值加總後 ($W_1+W_2+W_3+W_4$) 即為土石流之發生度，將各類保全對象權重值加總後 ($P_1+P_2+P_3$) 即為保全危害度，最後再將發生度乘上保全對象危害度後即可得各土石流潛勢溪流之危險度。如此依等級值劃分為高、中、低三個潛勢溪流危險度等級，相關流程如圖 2-22 所示。

危險度＝土石流發生度×保全對象危害度

危險等級值=高：危險度評分＞70%

危險等級值=中：30%＜危險度評分＜70%

危險等級值=低：危險度評分＜30%

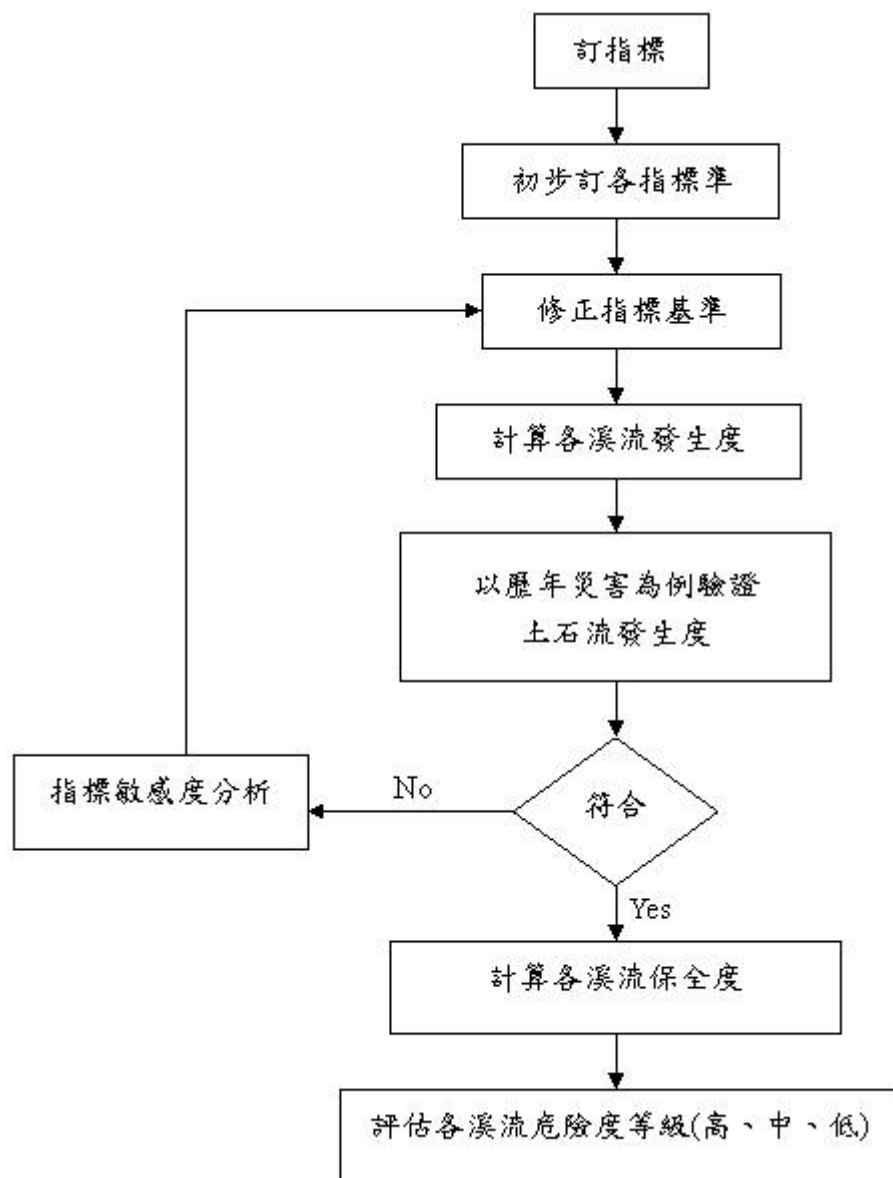


圖 2-22 土石流潛勢溪流危險度判定流程圖(水土保持局，2002)

2.8 全臺土石流潛勢溪流分布現況

近 10 年來，國內土石流災害之數量及規模在歷經數次大規模風災及震災後，屢創新高。例如賀伯颱風、集集地震、桃芝颱風、敏督利颱風及海棠颱風之後，土石流之潛勢溪流數量遽增，同時土石流發生位置亦有明顯改變。依據農委會水土保持局歷年之調查結果(1999, 2000, 2001, 2002)顯示，土石流潛勢溪流之調查可以分為五個階段來探討，依據調查標準之改變以及九二一地震之影響，敘述如下：

● 第一階段調查

第一階段之調查，於民國 80 年～85 年間執行，調查的區域為全臺灣地區，土石流災害類型係以溪流型土石流為主。調查之標準為有效集水面積大於 10 公頃，當時之調查項目包含了溪流位置、溪流概況。調查結果顯示，當時全臺灣地區之土石流潛勢溪流共有 485 處，其中中部重建區六縣市共計有 134 處土石流潛勢溪流。

● 第二階段調查

第二階段之調查，於民國 88 年 11 月～89 年 2 月間執行，調查區域為中部 921 震災重建區南投縣、苗栗縣、臺中縣市、彰化縣、雲林縣及嘉義縣等六個縣市，調查之災害類型同樣係以溪流型土石流為主，但因九二一地震之影響，調查標準由原本的有效集水面積大於 10 公頃，調整至有效集水面積大於 3 公頃。調查項目包括溪流位置、出口座標、溪流概況、崩塌地狀況、溪床堆積狀況、災害歷史、溢流點概況簡圖、保全戶數、緊急聯絡人及危險等級評估。調查結果顯示，中部地區在九二一地震後共計有 370 處之土石流潛勢溪流，其中高危險度之潛勢溪流共計有 105 處，中危險度之土石流潛勢溪流共計有 207 處，低危險度之土石流潛勢溪流共計有 58 處，分佈情形以南投縣境內 181 處最為嚴重。

● 第三階段調查

第三階段之調查，於民國 90 年 5 月～12 月間執行，調查區域為北部地區包括宜蘭縣、臺北市、臺北縣、基隆市、新竹縣、新竹市及桃園縣等七縣市，調查標準與第二階段調查相同，為有效集水面積大於 3 公頃，調查之災害類型同樣為溪流型土石流。調查項目包含溪流位置、溪流概況、崩塌地狀況、溪床堆積狀況、災害歷史、溢流點概況簡圖、保全戶數、緊急聯絡人及危險等級評估、保全對象普查、影響範圍劃定、緊急水土保持工程建議。調查結果顯示，北部地區所判定之土石流潛勢溪流共有 528 處（含調查區內原農委會公佈之 485 處潛勢溪流 131 處），潛勢溪流數目由原本之 131 處增加為 528 處。

● 第四階段調查

第四階段之調查，主要係因桃芝風災後，土石流災害重創中部七縣市，於是針對桃芝風災進行土石流危險溪流之調查，執行期間為民國 90 年 9 月～12 月，調查區域為中部重建區六縣市與花蓮縣。調查之標準仍為有效集水面積大於 3 公頃，調查災害類型則首次加入了坡面型的土石流，並包含溪流型土石流在內。調查之主要項目包含溪流位置、溪流概況、崩塌地狀況、溪床堆積狀況、災害歷史、溢流點概況簡圖、保全戶數及緊急聯絡人、危險等級評估、桃芝風災土石流災害發生時間、災害影響範圍、雨量資料。調查結果顯示，中部重建區在桃芝風災後共有 655 處地點發生土石流災害，依土石流型態分類屬溪流型者共 483 處、坡面型者共 172 處。發生土石流災害且下游災害範圍內有保全對象者共計 224 處，屬為原土石流潛勢溪流(921 震後調查成果)共計 186 處，屬新增訂之土石流潛勢溪流共計 38 處，其餘 431 處屬發生土石流但其災害範圍內無保全對象者(造成道路、橋樑中斷等)。至於花蓮地區，調查結果自原先之 77 處(民國八十年至八十五年間之調查成果)，增加至 160 處，共計新增 83 處土石流潛勢溪流。依土石流潛勢溪流之類型分類屬溪流型者共 149 處，坡面型者共 11 處。

● 第五階段調查

第五階段之調查，主要針對南部及東部地區包含臺南縣市、高雄縣市、屏東縣以及臺東縣進行土石流危險溪流之調查，執行期間為民國 90 年 10 月～91 年 4 月。調查之標準仍為有效集水面積大於 3 公頃，保全對象 3 戶以上，調查災害類型則同樣包含溪流型土石流及坡面型土石流。調查之主要項目包含溪流位置、溪流概況、崩塌地狀況、溪床堆積狀況、災害歷史、溢流點概況簡圖、保全戶數及緊急聯絡人、危險等級評估、桃芝風災土石流災害發生時間、災害影響範圍、雨量資料。調查結果顯示，南部及東部由原先之 144 處（民國八十年至八十五年第一階段全國土石流調查）增加為 319 處，共計增加 175 處。依土石流型態分類屬溪流型土石流者共 305 處，屬坡面型土石流者共 14 處，主要以溪流型土石流為主。各縣市之分佈數量分別為臺南縣 39 處、高雄縣市 57 處、屏東縣 63 處、臺東縣 160 處，以臺東縣境內數量最多。

由以上五階段之土石流潛勢溪流調查結果顯示，在調查災害類型調整及調查門檻值調降後，全臺灣目前土石流潛勢溪流總數為 1420 處。各縣市土石流潛勢溪流調查數量統計情形，如表 2-17 所示，其中以臺北縣 214 處居首，南投縣 199 處居次，花蓮縣及臺東縣 160 處並列第三。

表 2-17 各縣市土石流潛勢溪流數量統計

區域	縣市別	土石流潛勢溪流數量
中部區域	南投縣	199
	苗栗縣	70
	臺中縣	82
	臺中市	3
	彰化縣	7
	雲林縣	9
	嘉義縣	43
其他區域	宜蘭縣	124
	臺北市	49
	基隆市	34
	臺北縣	214
	桃園縣	43
	新竹縣	64
	花蓮縣	160
	臺南縣	39
	高雄縣	54
	高雄市	3
	屏東縣	63
	臺東縣	160
	合計	1420

資料來源：行政院農委會水土保持局

依據臺灣地理、大地構造特色、地層以及岩性等可將臺灣地區分成七個地質區，如圖 2-23 所示。七個地質分區分別為：I. 澎湖地區、II. 濱海平原區、III. 西部麓山地質區、IV. 中央山脈西翼地質區、V. 中央山脈東翼地質區、VI. 東部縱谷及 VII. 海岸山脈地質區(方中權，2000)。這些地質區通常由斷層構造線區隔，各區之界線均平行臺灣島之長軸，自西向東分布。圖 2-23 中亦標示土石流主要發生地帶(洪如江，2002)，主要集中於陳有蘭溪流域、臺東縱谷、紅土礫石台地與平原或盆地交接之邊坡、基隆河上游(指源頭至三貂嶺附近)等四個位置，可發現臺灣土石流發生主要地帶，幾乎與臺灣大斷裂帶有直接或間接之關係。

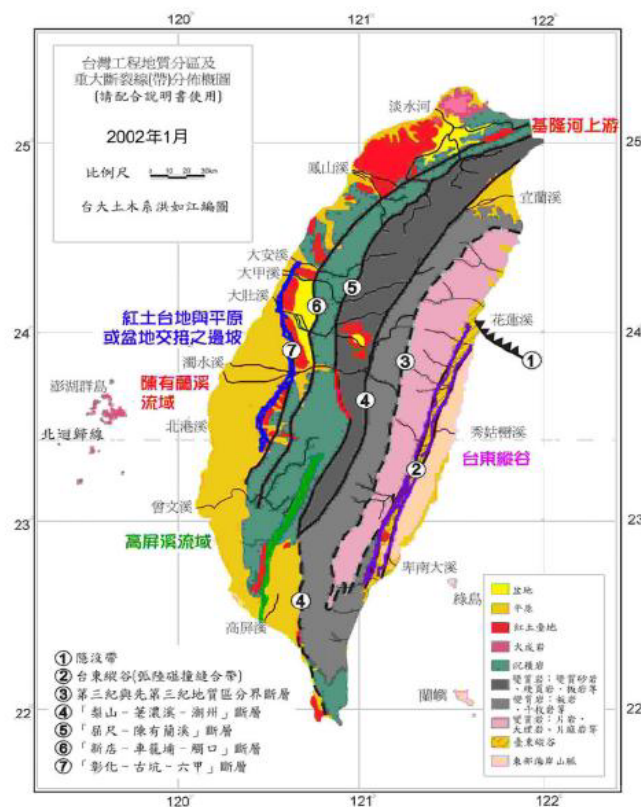


圖 2-23 臺灣工程地質分區及重大斷裂線分布(洪如江，2002)

此外，Lin and Jeng(2000)則針對臺灣土石流潛勢溪流之源頭與斷層線進行疊合，如圖 2-24 所示。圖中顯示這些土石流大都源自地質構造複雜、岩石破碎風化、地震頻繁及山崩災害多的地區。根據 Keefer(1984)提出自震央到地震所誘發的崩塌地最大距離是地震規模的函數，考量 921 集集大地震為近百年來幾次規模較大的地震，在地震規模所對應的崩塌地分佈範圍約為 $20,000\text{km}^2$ ，即震央往外延伸約 80 km 的半徑範圍。進一步根據行政院農委會調查報告(2000)，集集大地震在臺灣島上所引發的崩塌地集中於震央往外 60 公里的半徑範圍內(如圖 2-25 所示)，涵蓋大部份中部區域。由日本關東大地震後之崩塌地數量逐年變化之統計資料顯示(如圖 2-26 所示)，關東大地震所產生之崩塌地雖經人工植生復育，但在震後 40 年(自 1920~1960 年)崩塌地數目方可由震後之 2000 處降回地震前之 233 處，亦即在大地震後 40 年內，崩塌土石流等坡地災害仍層出不窮。

由此可見，未來數十年期間，臺灣地區之崩塌及土石流等土砂災害高潛勢地點仍將集中於中部地區，因此本計畫擬由中部區域篩選適合研究地點。由第一章關於桃芝颱風及敏督利颱風期間之災情說明可知，道路橋樑受洪水或土石流衝擊損毀案例多數集中於南投縣陳有蘭溪流域台 21 線及臺中縣大甲溪流域台 8 線兩處。後續章節將針對陳有蘭溪流域及大甲溪流域分別進行環境概述，說明水文、地文、土地利用、交通動線及土石流潛勢溪流分布情形，以進一步篩選適合研究地點。

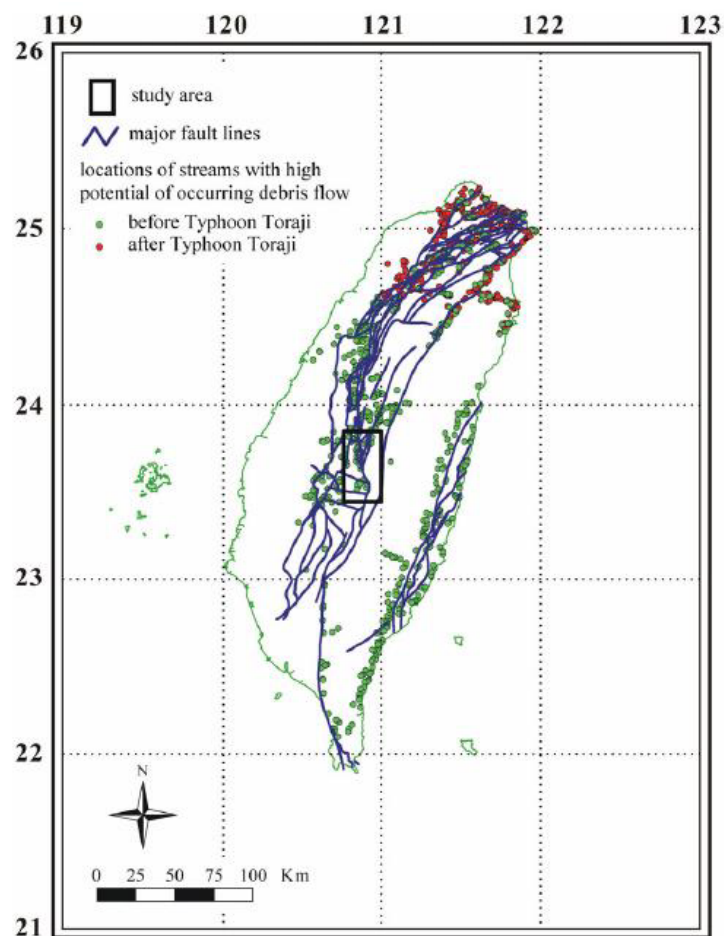


圖 2-24 臺灣高潛勢土石流區位與斷層線相關位置
(Lin and Jeng, 2000)



圖 2-25 集集地震誘發之崩塌地分佈範圍圖

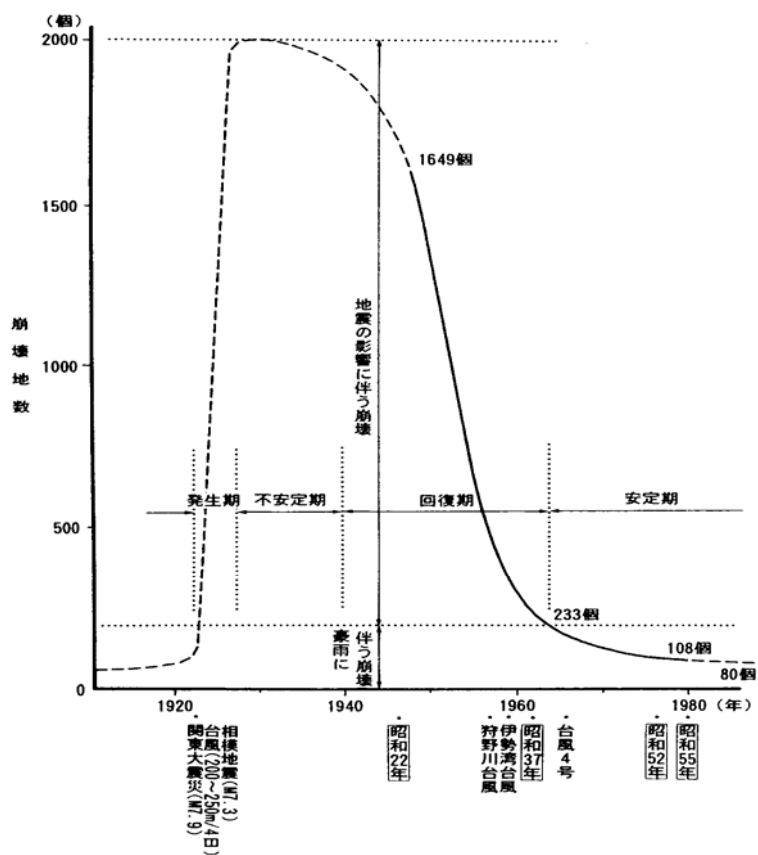


圖 2-26 日本關東大地震後 60 年內之崩塌地數量統計

2.9 土石流防治對策之機能及種類

完善之土石流防治措施，應將硬體與軟體措施並行施作，以達最佳效果；除硬體防治工法可有效地攔阻土石流之大量土砂，使其流速與破壞力減低外，如能配合預警與監測系統之軟體防災措施，將能對土石流之現場動態更有進一步之掌握。

1. 土石流防治原則

土石流防治措施之規劃與設計應掌握下列原則（水土保持學會，1992）：

- (1) 土石流危險溪流與區域之確定：利用地形圖及航空照片並配合現場調查，可以有效的判釋出具有潛在危險之溪流與區域。準確的危險溪流判釋可使規劃與設計先期化，防止土石流災害於未然。
- (2) 經確定為具有土石流潛在危險溪流或區域，在硬體之防治措施未完成前，需儘速設立土石流預警系統。已完成硬體防治措施者，在撤除警報系統時應謹慎考慮。
- (3) 土石流防治措施之規劃與設計，事先需依該區預估之土石流設計流出量（Q）、計畫容許排放量（E）、計畫攔砂量（C）、計畫淤積量（D）與計畫土石流發生抑制量（B）等各土砂量，以滿足 $Q - E - (C + D + B) = 0$ 關係式。

2. 土石流防治對策

土石流防治目的是控制土石流之發生或發展，減輕或消除對被防護對象的危害，使被治理之流域恢復或建立起新的良性生態平衡。針對土石流防治方法與目的的不同，土石流防治對策可分為預防對策（軟體措施）與防治對策（硬體措施）兩種方法，如圖 2-27 所示。預防對策（軟體措施）是一種迴避土石流災害的方法，包括土地利用之範圍、土石流危險區的劃定、住宅之遷移、土石流情報資訊傳遞、土石流警報避難系統之建立及對鄰近居民進行土石流災害防治示範

教育等等。防治對策（硬體措施）是針對土石流之發生、流動與堆積等特性，分別依地形條件之選擇而採取適當之工程手段。

(1)預防對策：針對土石流之流動特質、發生機制、堆積範圍、流出土砂量，配合當地溪流調查所得之地形因子、地質資料、氣候條件與地圖判釋，求得土石流可能形成時之雨量強度，做為土石流危險度之預警指標，並建立道路、村落預警系統或限制土地之利用。

(a)警報系統之設置：配合當地之地形、地質、土壤條件，尋求土石流可能發生時之雨量強度以作為警報發放之依據。

(b)避難場所及路線之安排：界定土石流發生可能影響範圍，安排演練避難逃生之路線及聚集安全場所。

(c)宣導教育：適當適時的宣導教育大眾，讓國民瞭解土石流災害之嚴重性，進而促成防災共治之目標。

(d)維護管理制度：適時適當之維護及有效的管理可預防災害之發生。

(e)緊急災害小組之成立：事權統一及迅速確實有效的搶修補救乃必要條件。

(2)防治對策：土石流防治硬體措施，依水土保持手冊之說明可分為抑制、攔阻、疏導、淤積、緩衝等方式。渡邊正幸等（1980）首先提出土石流防治措施需具備減少土石流之洪峰土砂量、延遲土石流到達時間、減少土石流之總流出量與將粗大礫石與土石流分離等四項基本功能為目標。故土石流防治工程方法與一般防砂設施相近，一般各型攔砂結構物以直接攔阻或抑制以減輕土石流之危害，其工法型式及配置位置如圖 2-28 所示。

(a)抑制工法：主要用在溪谷之上游處，上游坡度較陡、侵蝕能力較強且對溪床堆積物及側岸產生產生劇烈的沖蝕以獲得土石料源，因此以抑制方法防止溪床及側岸沖蝕並阻止土石流獲得土石材料之補充為主，此類工法包含固床工、防砂壩、潛壩、連續壩及山腹工等。

- (b)攔阻工法：主要用在溪谷之中上游處，中上游坡度較上游坡度緩和，當土石流在上游獲得充分之土石材料後，其土石濃度近乎飽和，因此對溪床冲刷能力也相對降低；然而先端之巨礫與流木的衝擊力仍強，動量仍相當大，因此此處以攔阻工法將土石料攔阻下來。此類工法包括封閉式攔砂壩及開放式攔砂壩，如：重力式、框格式、梳子型、橫樑式攔砂壩與透水柵及格柵攔砂壩等。
- (c)淤積工法：主要用在溪谷之中下游處，採用局部加大溪床的寬度或局部減緩溪床的坡度，進而達到使土石料於事先規劃妥當之區域內產生淤積。此類工法包括沉砂池及圍堤。
- (d)疏導工法：主要用於中、下游區域或扇狀地上，將土石流導入渠道或導流堤等誘使其流動體沿所規劃之安全路線流動。
- (e)緩衝林帶：主要應用於土石流出口之扇狀地上，以帶狀之樹林為緩衝區，避免土石流直接侵襲。

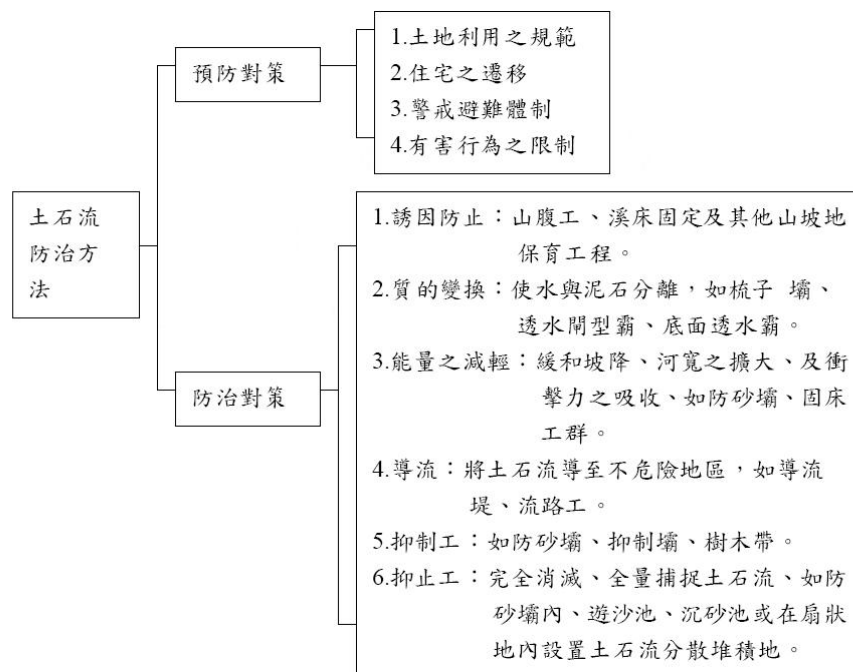


圖 2-27 土石流防治方法（水土保持學會，1992）

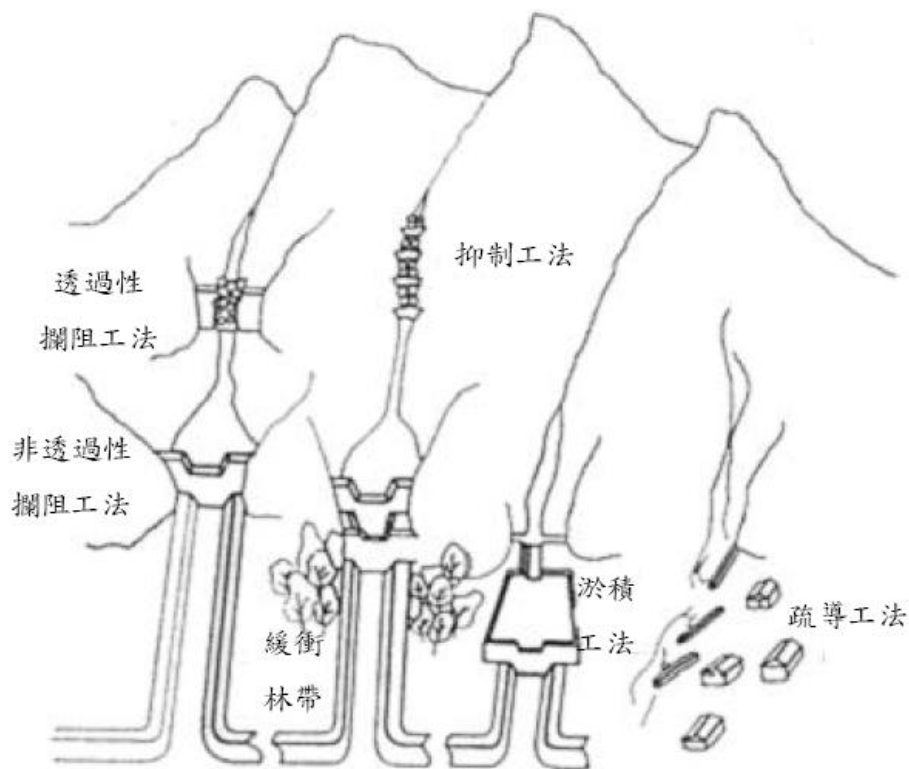


圖 2-28 各種土石流防治工法型式及配置位置（水土保持學會，1992）

2.10 小結

針對以上資料蒐集，可應用於未來數值模擬分析所需之參考依據彙整如下：

1. 土石流流變模式：

土石流體應力與應變等參數關係稱為流變模式或本構關係式，由此模式的建立可藉由探討土石流體的流動行為。

(1) 牛頓流體模式

牛頓流體模式描述流體在受剪切力流動時，其剪切率與剪切力的關係為一通過原點座標的直線，其關係式可表示成

$$\tau = \eta \left(\frac{dV}{dz} \right)$$

(2) 賓漢流體模式

賓漢流體模式描述流體在受剪時，當作用之剪切力小於某臨界值 τ_y （賓漢降伏應力）時，流體不會發生流動，及剪切率（ $\dot{\gamma}$ ）為 0；當 $\tau > \tau_y$ 時，流體開始流動後，其所承受之剪切力與流動剪切率成正比線性關係：

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}$$

(3) 幂定理模式

具有降伏應力之幂定理模式可以視為含砂水體流變模式之廣義表達式，其剪切力與剪切率之關係為

$$\tau = \tau_y + m \dot{\gamma}^n$$

(4) 二項式模式

高濃度土砂流(hyperconcentrated sediment flow)其總剪應力 τ 由下列五項剪應力構成：

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d$$

本研究所採用 FLO-2D 套裝軟體，此模式採用 O' Brien & Julien(1988)提出包含降伏剪應力、黏滯力、碰撞力及紊流應力之二項式模式。

2. 土石流流變參數

(1) 體積濃度

土石流的體積濃度（ C_v ）是指土石流體單位體積中黏土、粉土、砂、石等土石固態物質所佔有之體積百分比，定義如下：

$$C_v = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w}$$

(a) 土石流平衡泥砂體積濃度 (C_∞)

高橋保 (1977) 依據堆積層之剪力理論與 Terzaghi 所提出之土壤抗剪強度，在忽略凝聚力之條件下導出流動中土石流泥砂體積濃度估算式：

$$C_\infty = \frac{\gamma_w \tan \theta}{(\gamma_s - \gamma_w) \times (\tan \phi - \tan \theta)}$$

由前人學者敏感度分析結果，體積濃度為土石流流動過程，很重要之影響因子，因此，本研究團隊於後續參數率定時，將訂定較合理之數據作為土石流流動模擬時之參數。

3. 土石流降伏應力與黏滯係數

前人研究中，土石流的降伏應力與黏滯係數的估算與求取主要分別利用力學觀念及現地估計，現地估計法介紹如下：

Johnson & Rodine (1984) 提出以下方法估計賓漢降伏應力

(1) 臨界坡度法：

(a) 利用無限邊坡的概念，使土石流停止流動之門檻剪應力為賓漢降伏應力

$$\tau_y = T_c \gamma_m \sin \delta$$

(b) 特殊大石塊尺寸：

$$\tau_y = 2.19 \times 10^{-4} \times l_{\min} (\gamma_b - n_v \gamma_m)$$

本研究區域經由前人學者做現地試驗結果，土石流流動行為較符合特殊大石塊尺寸之方式。

4. 土石流平均流速

(1)高橋 保(1978)

$$U_d = \frac{2}{5d_s} \left\{ \frac{g \sin \theta}{0.02} \left[C + (1-C) \frac{\rho}{\rho_s} \right] \right\}^{1/2} \left[\left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right] \times h_d^{3/2}$$

(2)Manning-Strickler Equation (1891)

$$U_d = \frac{k_n}{n} h_d^{2/3} S_o^{1/2}$$

(3)超高現象(superelevation)估計土石流平均流速

(a)Johnson & Rodine (1984) 提出野外推估方法：

$$V = (g \psi \cos \theta \tan \beta)^{1/2}$$

(b)Hunger et. al. (1984)

$$\Delta h = k \frac{bV^2}{\psi g}$$

由土石流流動模擬之結果得知土石流流速，將與前人學者所提出之經驗公式進行比較與探討。

5. 土石流尖峰流量

Takahashi (1991) 在土石流達平衡濃度土石流流量 (C_∞) 時 (土石流沖刷與淤積平衡)，由土石與水質量守恆推得單位寬度土石流量 Q_d 與水流流量 Q_w 間相互關係：

$$Q_d = \frac{C_*}{C_* - [S_b - (1 - S_b)C_*]} C_\infty Q_w$$

數值模擬進行洪水模式演算時，給定降雨事件之總雨量及累積百分比，分析清水流之洪峰流量，再依據土石流發生時間配合放大因子，轉換求得土石流洪峰流量，近而與此經驗公式求得之結果做

比較。

6. 土石流衝擊力評估

本研究計畫將運用未來土石流數值模擬之結果(包括堆積深度與流速)，代入 2.5 節前人建議之衝擊力評估方法，並且做更進一步分析與探討。

第三章 研究區域選定原則

臺灣本島位於東亞大陸棚之邊緣，島上地形受到歐亞大陸板塊、菲律賓海板塊與太平洋海板塊的相互碰撞擠壓之影響，使得臺灣本島地勢陡峭、地質破碎，再經由風化、雨蝕、地震等環境因素作用下，造成山區中經常發生大規模土砂災害的情形，其中以土石流災害最為嚴重。民國八十八年 921 集集大地震後，更引發了兩萬多處崩塌，此崩塌處多位於溪谷流域之源頭或上游，成為土石流之料源，進而衍生近 250 處之土石流災害，花蓮、南投及苗栗等皆有土石流災情傳出，由以南投縣新中橫公路陳有蘭溪流域及大甲溪流域土石流災害最為嚴重，除此之外，本計畫為考量計畫執行之效益性及代表性，針對集水區環境特性、地質特性及災害歷史等三項因子，作為選擇研究區域之參考依據，各評估因子分別敘述如下：

1. 災害歷史：

為能確保數值模式計算結果之合理性與正確性，有賴足夠數量災害事件之災情調查資料，作為數值模式參數率定及模式驗證之依據。因此某一地點過去是否曾發生土石流災害，為本計畫評估研究地點之首要因素。

從災害事件統計資料可得知，經過賀伯、桃芝及敏督利等風災後，省道台 21 線中 127K 至 146K 大迴彎及位於陳有蘭溪主之流上之 26 座跨河結構物，為問題最嚴重之地區；而台 8 線因 1999 年 921 大地震發生後，西段谷關青山段路基傾毀迄今仍未修復，2004 年敏督利颱風所造成之七二水災，讓 921 災後已經十分脆弱的中橫公路再度受創，柔腸寸斷。本研究團隊經諸多事件考量，選定陳有蘭溪流域及大甲溪流域為研究區域，颱風事件所爆發土石流災害的歷史資料彙整，請見本章節後續詳述。

2. 橋樑設施規模：

就本計畫之目的而言，「道路及橋樑設施受土石流衝擊影響評估」

為主要重點工作之一，因此研究地點之選定上，必須考量研究區域內既有跨河道路橋樑工程之代表性。一般而言，跨河道路及橋樑之設計工法應依其運動過程(發生、流動、淤積)中所屬區段以及可能造成之危害方式(淤埋、沖刷、撞擊、磨蝕、堵塞、漫流改道、彎道超高、擠壓主河道等)而有所不同，故所選定研究區域內之既設道路橋樑工程設施，在規模及工法上必須具備代表性。根據災害程度與交通重要性，本研究團隊則選定陳有蘭溪及大甲溪流域為研究區域，詳細災害彙整請閱本章後續詳述。

3.集水區環境特性：

集水區環境特性包含地質特性、地形特徵、崩塌地分佈、集水面積、河道現況、植生狀況、堆積物分佈與土地利用型態等皆為影響土石流再發潛勢之重要評估指標。

陳有蘭溪流域區域之山脈坡度陡峭，斷層及摺皺等地質構造豐富，岩質膠節不良、鬆散，岩帶破碎且多易裂之弱面，河岸邊坡甚不穩定，隨處可見蝕溝和崩塌並普遍存在崩積層，再加上土地的超限利用，使得大量破碎岩塊和沿屑堆積溪床。921 集集大地震之影響，使集水區土砂生產潛能更大為提高，對於後續土石流之發生頻率勢必有明顯之提昇影響。

大甲溪流域亦從 921 集集大地震後，因溪谷堆積大量土石，側向邊坡之土石強度減弱，遇雨水容易崩解，裸露地增加，造成邊坡易被沖蝕及切割，崩塌地及土石流潛勢溪流數量大幅增加，由以石岡壩至馬鞍壩區段，松鶴一溪、松鶴二溪、阿邦溪、石文溪及稍來溪等均為發生土石流高危險區域。

故依據土石流災害歷史、土石流再發性、跨河道路及橋樑工程設施重要性、集水區環境特性等因子，選定陳有蘭溪及大甲溪流域為研究地點。後續章節則針對選定之研究區域，陳有蘭溪及大甲溪流域作資料彙整及介紹。

3.1 陳有蘭溪流域環境概述

3.1.1 水系與地文環境

陳有蘭溪發源於玉山北麓的塔塔加鞍部，流域面積約為 448km²，周圍為一連綿山峰，由北往南延伸至玉山，為南北狹長的馬蹄狀山峰。陳有蘭溪流域整體地形大致為南高北低、東高西低，為典型的縱谷地形。流域平均高度約為 1591 公尺，其中低於 500 公尺僅佔少數，主要為河道氾濫平原；500~1,000 公尺約佔 20%，主要為沖積扇及低位階地；1,000~2,000 公尺所佔面積為最大，約佔一半，主要分佈在玉山北麓及望鄉山與西巒大山西坡；2,000 公尺以上約佔面積之 1/4。

流域平均坡度約為 63.98%，其中坡度低於 5%之平地僅佔 2.2%；坡度在 5%~30%的緩坡地約佔 10%；30%~55%約佔 23.1%，主要為陡坡地；而流域內坡度在 55%的極陡坡所佔面積為最大，約佔 64.7%，各坡度及坡向所佔面積整理如表 3-1 及圖 3-1~圖 3-3。

表 3-1 陳有蘭溪流域各高程、坡度及坡向面積百分比（林基源，2003）

高程 (m)	面積 (ha)	百分比 (%)	坡度級別	坡度 (%)	面積 (ha)	百分比 (%)	坡向	百分比 (%)
304~500	1372	3.1	一級坡	<5%	980	2.2	北方	13.3
500~1000	8899	19.9	二級坡	5%~15%	1708	3.8	東北方	15.3
1000~1500	11114	24.8	三級坡	15%~30%	2779	6.2	東方	12.0
1500~2000	10606	23.7	四級坡	30%~40%	3151	7.0	東南方	10.0
2000~2500	8081	18.0	五級坡	40%~55%	7209	16.1	南方	9.9
2500~3000	3672	8.2	六級坡	>55%	28948	64.7	西南方	13.2
3000~3500	879	2.0					西方	13.9
3500~3926	152	0.3					西北方	12.4
合計	44775	100						

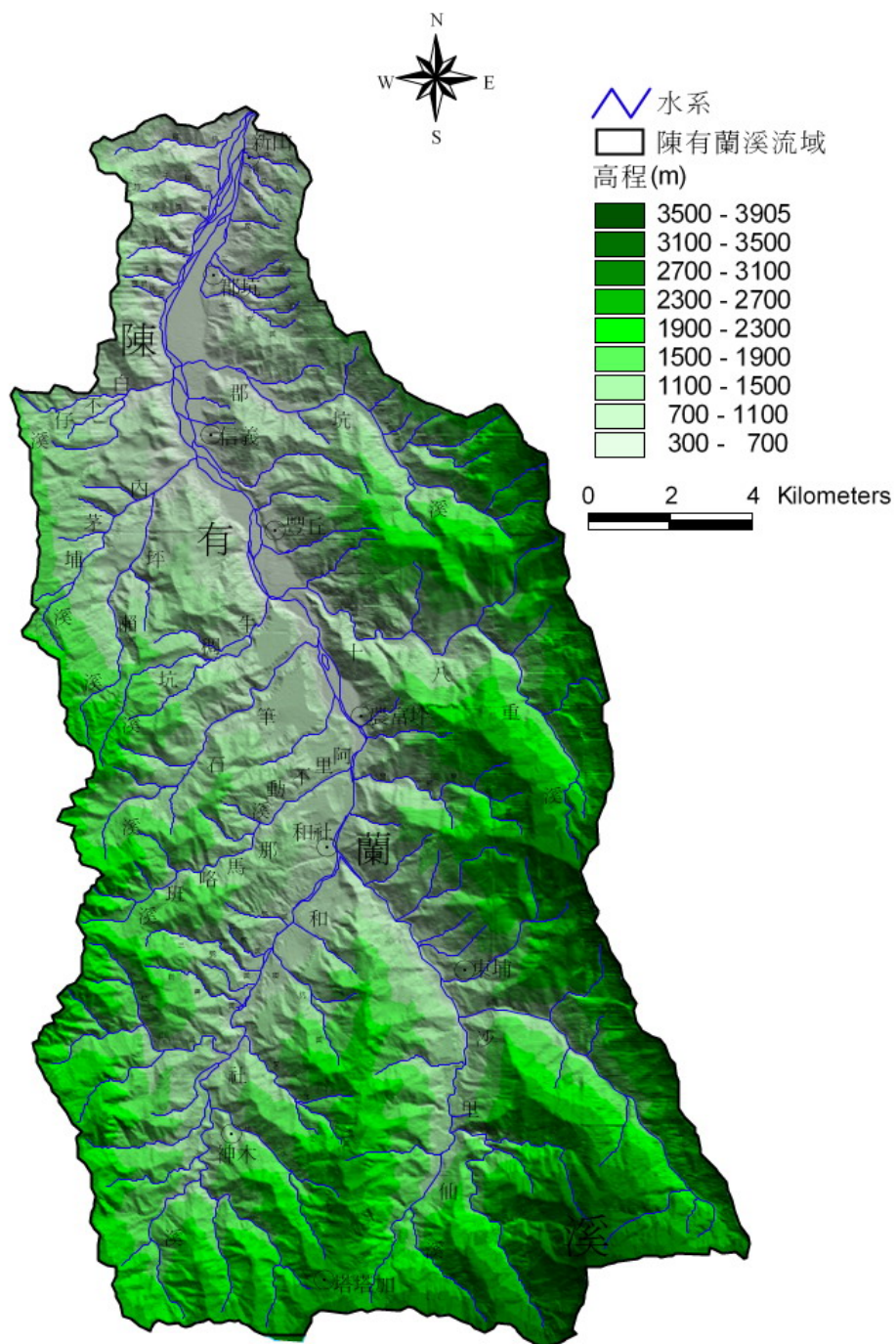


圖 3-1 陳有蘭溪流域地形高程分佈

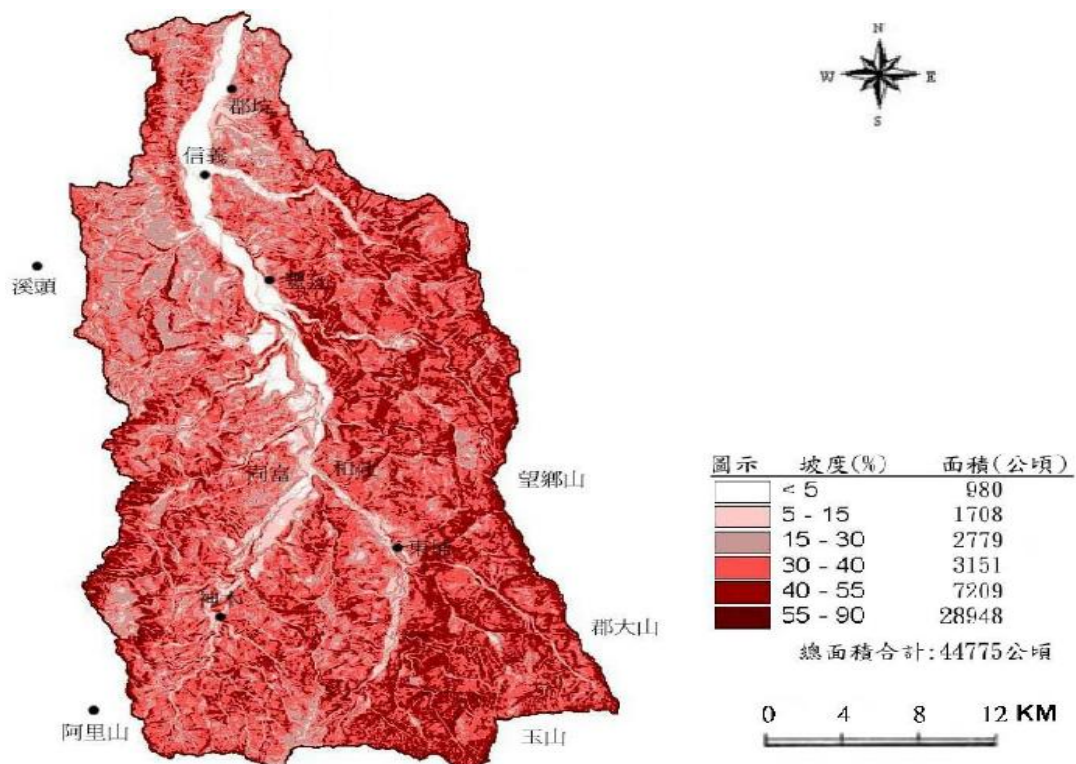


圖 3-2 陳有蘭溪流域坡度分佈圖（林基源，2003）

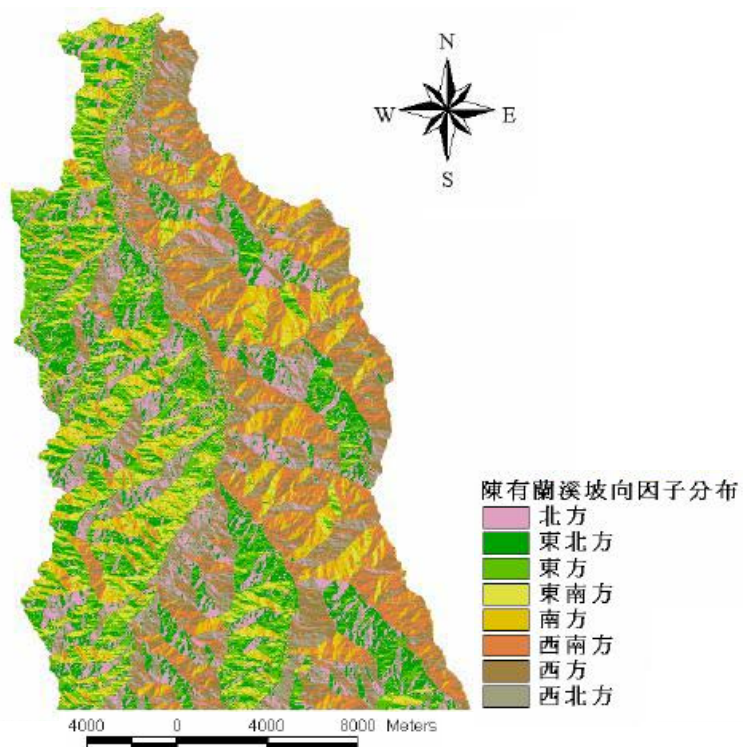
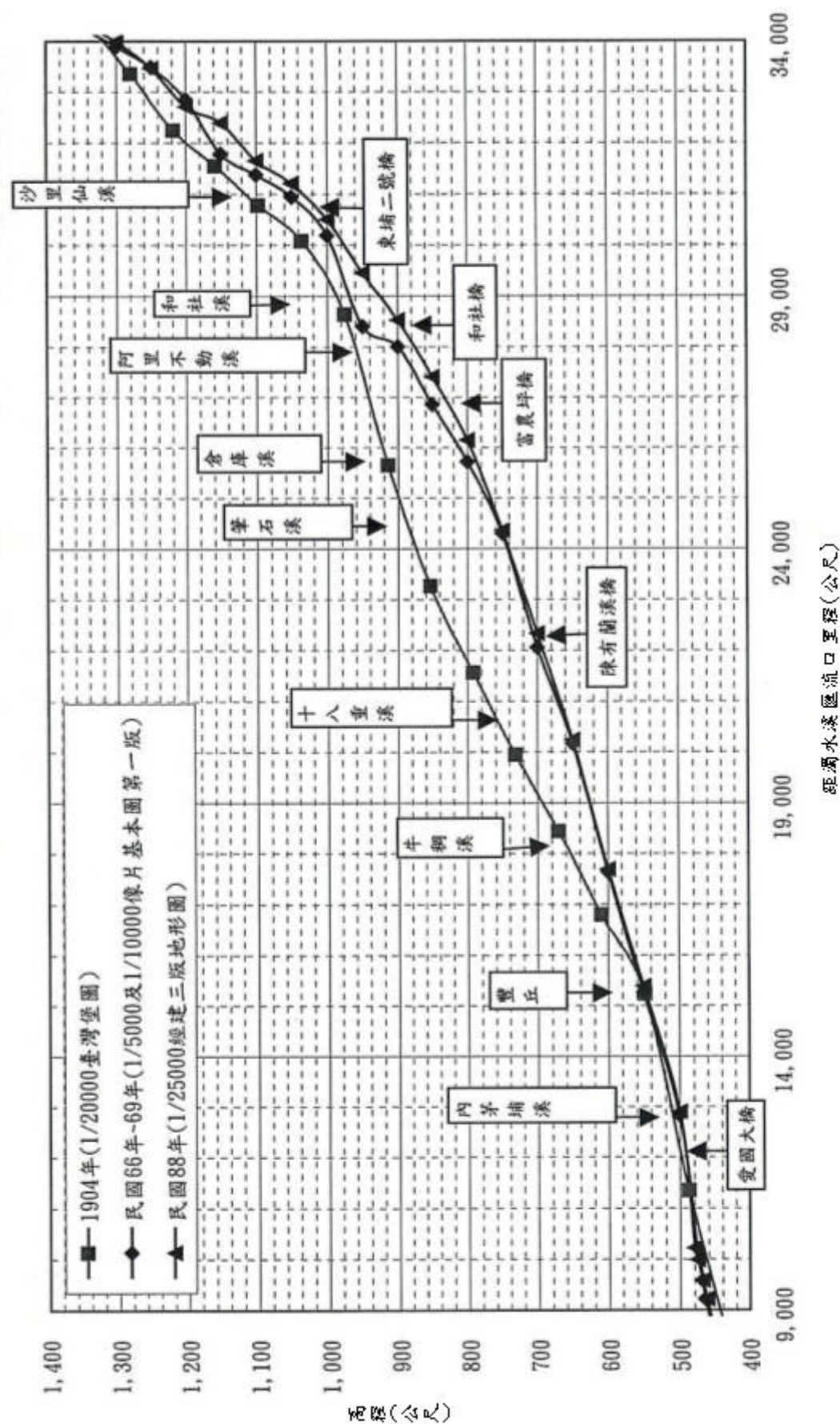


圖 3-3 陳有蘭溪流域坡向分佈圖（林基源，2003）

陳有蘭溪主流主要匯集玉山與阿里山山脈東西向、郡大山西面之水流，流至水里鄉龍神橋附近向北匯入濁水溪主流，主流長約 42.1km，一般河寬介於 100m~200m 之間。陳有蘭溪河床坡降陡急、河道高差大，主流河道縱斷面如圖 3-4 所示。由發源地高度 2,900 公尺至最低點處的高度 310 公尺與濁水溪合流處計算，平均河床坡度高達 6.1%，坡度之陡峭約為濁水溪之 3.7 倍，屬於典型山地河川型態。其中上游主要由支流沙仙里溪匯入所形成，中游附近則有阿里不動溪與筆石溪，至於陳有蘭溪下游至龍神橋則有郡坑溪、十八重溪、內茅埔溪、牛稠坑溪以及白布仔溪等五條主要支流匯入。此外，西南側水系包括出水溪，郝馬嘎班溪以及愛玉子溪等三條溪流，於神木大橋附近匯合往北流入和社溪，沿線包含多條支流以及野溪，例如松山溪、四號溪、三號溪、二號溪以及一號溪等，和社溪經和社地區匯入陳有蘭溪主流，表 3-2 為陳有蘭溪流域主支流屬性表。

表 3-2 陳有蘭溪流域主支流屬性

集水區	集水區面積 (km ²)	河川主流長 (km)	河川總長 (km)	河川總 數 (km)	平均高程 (m)	流域等級
陳有蘭溪	447.94	50.27	347.57	123	1589.79	-----
白布仔溪	9.91	-----	-----	-----	-----	3
郡坑溪	31.37	14.31	34.9	15	1476.2	3
內茅埔溪	23.88	10.29	23.64	9	1230.61	3
十八重溪	43.5	16.31	26.13	9	1891.88	3
筆石溪	17.3	10.15	14.95	6	1434.51	3
阿里不動溪	15.01	9.29	13.60	6	1494.27	2
和社溪	92.44	18.78	67.68	25	1729.47	4
松山溪	-----	6.1	-----	-----	-----	-----
神木溪	-----	8.0	-----	-----	-----	-----
沙仙里溪	113.1	12.58	28.46	7	2255.58	4
竹子腳坑溪	1.99	-----	-----	-----	-----	1
牛稠坑溪	9.91	7.38	11.39	3	1311.83	2
蒼庫溪	2.33	3.56	3.6	1	1039.62	1
八頂溪	8.07	3.68	3.72	1	2182.56	-----



(資料來源：中興工程顧問股份有限公司)

圖 3-4 陳有蘭溪河道縱斷面圖

由上表結果可知，陳有蘭溪流域中，兩大支流子集水區分別為和社溪流域的 92.44 平方公里及沙里仙溪流域的 113.1 平方公里。此外除支流郡坑溪流域為 31.37 平方公里外，其餘多數支流集水區面積均小於 20 平方公里。流域內緊鄰主流的 1 級河川眾多，主要支流中筆石溪、郡坑溪、白布仔溪、內茅埔溪及十八重溪等為 3 級河川，僅和社溪與沙里仙溪為 4 級河川。綜觀全流域，陳有蘭溪流域水系連結狀況不佳且支流流域之地勢起伏較大，且大部分支流流域接近圓形，河流能量傳輸效能極佳。

陳有蘭溪為標準的斷層谷(地層斷裂處，易受侵蝕形成谷地)，斷層由頂崁之西起，達至塔塔加鞍部，河谷呈直線，曲線不發達，兩側支流也多短小，流域形狀十分狹長。陳有蘭溪下游信義為蘆竹與亞里不通沖積扇構成，蘆竹南沖積扇是規模最大者。沿陳有蘭溪溪谷之台 21 線公路路段內主要地形可區分為河谷地形及崖錐地形，而河谷地形又可分為下游之寬闊河谷地形及上游之陡峭河谷地形（成功大學防災研究中心，1999），各地形之特性說明如下：

- 1.下游寬闊河谷地形：陳有蘭溪及長度較長、流域較寬之支流，河道均已達到河川發育之中年期，故河道之堆積作用遠較侵蝕作用盛行，因此常見有寬谷、沖積扇（如新鄉、羅娜、久美、望鄉等）及河階台地（如郡坑、信義及愛國等階地）等代表堆積作用的地形單元，此等寬闊河谷的地形主要分佈於郡坑至神和橋之間。除堆積作用外，許多局部河段亦存在侵蝕行為，主要作用於土石流堆積區之對岸或河道彎曲處。當較大洪水通過時，往往對於鄰近公路下邊坡造成侵蝕及淘空基腳導致路基流失。
- 2.上游陡峭溪谷地形：陳有蘭溪或其支流之上游地區河床坡降較陡，屬侵蝕作用盛行之幼年期河谷。河谷中常見有瀑布、峽谷及因向源侵蝕所造成之崩塌地，顯示該類河段之側向與下切河床之侵蝕力發達，主要分佈於神和橋至回頭彎處及夫妻樹附近地區。

3.崖錐地形：除河谷之地形作用外，沿著主要山嶺的河谷兩側常可見因岩層塊體運動所產生之崖錐地形。崖錐是由地形上方之岩體，經崩移、堆積作用後而產生的崩積岩塊或風化土壤(舊崩積土)所組成，崩積位置通常原為較低窪或坡度較緩之處。崖錐的組成材料相對於周邊之岩體通常較為鬆軟且坡度亦較為平緩，因此較容易成為人類開發或工程施工所選取之處。但因崖錐處地勢低窪，常位於坡地排水之路徑上，往往成為容易致災的危險地帶。崖錐地形廣泛地分佈於台 21 線路段，其中以新山附近、陳有蘭溪橋北側、望美橋至 120k 處及烏乾坑隧道至同富隧道間路段數量較多。

3.1.1.1 地質特性

所謂地質特性的探討係指研究(a)坡體中地形的陡峭狀況、溪谷、窪地、滲水、堆積等幾何形狀分佈、現地植生的生長、人為開挖的現象以及其他原地表的自然地形狀況等地貌表徵；(b)坡體中土壤及岩石等地層的分佈情形，不連續面在地層中的延伸狀況，地層受擠壓之摺皺及斷層的變形現象等地質構造的變化；(c)地質材料的組成及其特殊自然物理性質和力學強度；(d)地下水在坡體內提供巨大的上舉力及側向水壓力而影響坡體的穩定性，地下水相對於地質材料的風化、侵蝕作用，對於地質構造及地層分佈的淘刷、沖刷作用等水文地質條件；(e)自然界的風化營力，下雨相對於地表逕流的沖刷、侵蝕作用以及火山爆發和地震的震動力量等地質作用。

1.岩性：

本區地質材料組成依臺灣地質分區，主要以陳有蘭溪斷層為界，區分為東側以大雪山山脈帶古第三紀變質岩所構成之中央山脈西翼地質區，以及西側以新第三紀沈積岩所組成之西部麓山帶地質區。東側古第三紀變質岩區域中，出露之地層由西向東依序為水流長層、白冷層、廬山層、眉溪砂岩、佳陽層、達見砂岩、十八重溪層，其組成岩性主要為板岩、硬頁岩、變質砂岩與石英岩。西側地層屬中新世至上新世之沈積岩層，各地層由老至新分別為南港層、南莊層、屬於桂

林層之關刀山砂岩段、十六份頁岩與魚藤坪砂岩以及沖積層（經濟部水利署第四河川局，2004），相關地層比對表與地質圖分別如表 3-3 及圖 3-5 所示。

(1)水長流層：

自郡坑下游處開始出露，往南至郡坑地區，十甲、豐丘北溪皆有本層出露。本層出露於信義酒莊附近，在地形上多為平緩之丘陵地，地層走向介於 $N49^{\circ} W$ 至 $N9^{\circ} E$ 之間，向西傾斜，傾角介於 50° 至 65° 之間。主要由灰黑色硬頁岩和輕度變質的頁岩所組成，組成顆粒小，受風化後常呈鉛筆狀構造或球狀風化，岩塊小易崩解。

(2)白冷層：

分佈於流域東北方，出露在郡坑溪下游，自陳有蘭溪與濁水溪交會處（神龍橋）、新山地區、郡坑地區上游、三十甲上游，往南延伸至九層坑上游，豐丘上游最終到農富坪北方（陳有蘭溪橋對岸），出露於郡坑溪口至十八重溪口沿線公路上，略呈南北分佈。節理發達且地層呈破碎狀，地層走向約 $N40^{\circ} E$ ，向東傾斜約 50° 左右。本層之東西兩側以斷層為界，分別與十八重溪及水長流層接觸。依岩性出露不同，主要由白色或灰白色、堅硬、粗粒至細礫之礫石狀石英質，厚層至塊狀變質砂岩所組成，其中夾有灰色的緻密砂岩或深灰色硬頁岩和板岩之互層。砂岩的層厚從 20 公分~2 公尺不等，也有成塊狀者。砂岩一般膠結堅強並具有交錯層，局部是礫岩狀砂岩，如南平坑、黑石坑上游出露之白冷層中，即可發現此類具有細礫之礫石狀石英質砂岩。另外白冷層的變質砂岩堅硬，抗風化能力強，地形上常呈陡峻山地或瀑布，而崩落的岩塊常呈巨礫甚至巨石，特徵明顯，在河床上極易辨識。

(3)廬山層：

分佈於流域最東側，地層走向為 $N5^{\circ} E$ 至 $N20^{\circ} E$ 之間，向東傾斜，傾角介於 40° 至 66° 之間，主要為暗灰色板岩組成，

局部夾有細粒砂岩，板岩之劈裂發達。

(4)佳陽層：

為暗灰色板岩所構成，板岩劈理發達、顆粒細小，整合在達見砂岩之上。

(5)達見砂岩：

出露於東埔溫泉、雲龍瀑布及彩虹瀑布等地區，地層走向為 $N20^{\circ} W$ 至 $N20^{\circ} E$ 之間，向東傾斜，傾角介於 30° 至 60° 之間。主要以青灰色夾灰白色、細至粗粒之變質砂岩與板岩互層為主，其中青色的達見砂岩容易辨認，其抗風化力與岩石強度都比其他地層高。

(6)十八重溪層：

十八重溪層係李春生（1979）首先提出的地層名稱，分佈於流域東側，經由郡坑溪溯溪而上，板岩開始出露處即為本層，同樣地由十八重溪溯溪而上也可見本層出露，較南可於陳有蘭溪東岸（筆石對岸）發現本層出露，地層走向介於 $N29^{\circ} E$ 至 $N57^{\circ} W$ 之間，向東傾斜約 51° 左右。主要由黑色至暗灰色之厚層板岩所組成，其中偶夾有數公分至數十公分之薄層變質砂岩以及板岩和變質砂岩所形成黑白相間的薄葉互層，為主要岩性特徵。十八重溪層的板岩則受岩石中發育之板劈理影響，常沿板劈理面破壞，而易呈碎屑岩塊。

(7)南港層：

本層分佈於流域南側，在和社至神木、龍華國小前野溪、郝馬嘎班溪下游及出水溪下游，主要以塊狀至厚層粉砂岩和深灰色緻密頁岩之互層及厚層深灰色頁岩所構成。其中頁岩多呈球狀風化，部分較大岩塊容易崩解，於河床中多為小岩塊。出露之厚層粉砂岩常因岩性抗風化差異大，也會出現瀑布或陡壁之地形，如龍華國小前野溪溯溪而上時，即可遇到陡壁及數處小瀑布。

(8)南莊層：

本層出露地點可以分成兩部分，一部份出露於流域西北方，由坪林地區往南經米籠坑、竹仔腳坑、火燒寮坑而逐漸縮小分佈範圍，而終於惡浪坑溪南側；另一部份出露於流域南區，略成馬蹄形，多為溪流之上游。地層走向介於 $N17^{\circ} E$ 至 $N39^{\circ} E$ 之間，向西傾斜，傾角介於 48° 至 71° 之間。主要由淡青灰色厚層砂岩、粉砂岩、深灰色頁岩及砂岩與頁岩之薄葉互層所構成，主要仍以淡灰色細粒的厚層砂岩為主。其中厚層砂岩由於岩層較厚且堅硬，風化後常呈現巨大的岩塊，可以在多處溪流中發現此類巨石，即為南莊層風化後之岩塊。另外於坪林地區溪床、山坡地到處可見南莊層風化巨石。

(9)桂竹林層：

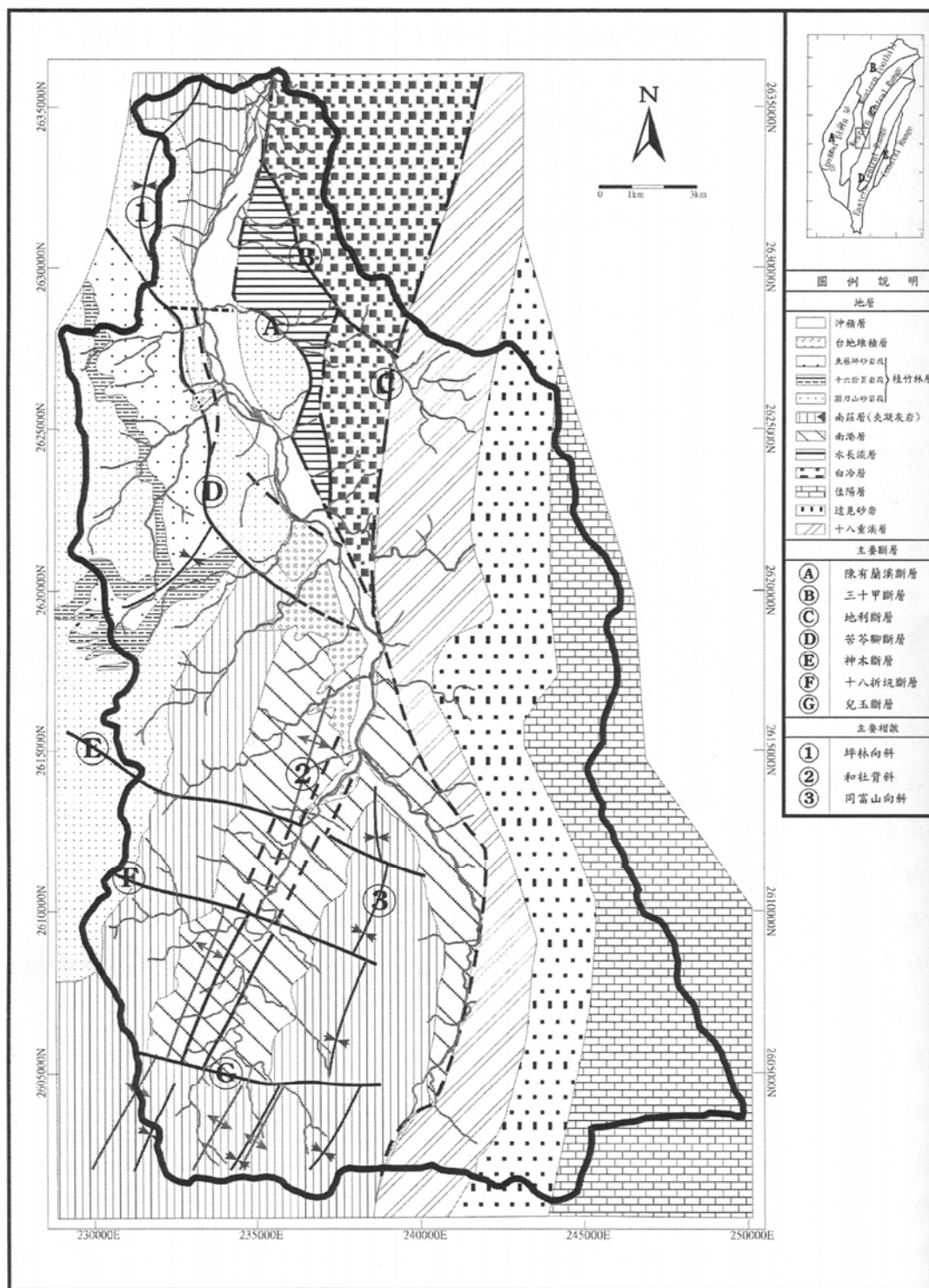
可將其分成三岩段，包含關刀山砂岩段、十六份頁岩段和魚藤坪砂岩段。關刀山砂岩段由細粒至中粒的淡青色砂岩組成，間夾少許深灰色頁岩，主要部分為厚層泥質砂岩，而砂岩多為厚層塊狀。十六份頁岩段大部分由深灰色頁岩所組成，地形上常呈低凹地，尤其介於關刀山砂岩與魚藤坪砂岩之間，常可經由明顯的地形變化辨識。魚藤坪砂岩段以砂岩為主，但仍含有多量頁岩互層，其中砂岩多為厚層灰色至淡灰色細粒為主之泥質砂岩。另外在本區域中所出露之岩層，其中關刀山砂岩與魚藤坪砂岩之厚層砂岩，由於岩層較厚且堅硬，風化後常呈現巨大的岩塊，頁岩較易受風化作用影響而成碎屑，風化作用嚴重時崩壞成泥狀。

(10)沖積層：

主要分佈於研究區中陳有蘭溪主流與西側各支流交會處，如內茅埔溪口、牛稠坑溪口、筆石溪口及阿里不動溪溪口等處。大部分地區是沿著陳有蘭溪之西側發展，堆積物的主要來源為兩側山區的崩塌岩屑，此岩屑的成分包括砂岩、頁岩、板岩、變質砂岩、火成岩等。

表 3-3 陳有蘭溪流域地層比對表

	新地三紀沈積岩		古第三紀變質岩		
更新世	階地堆積物				
上新世	卓蘭層 錦水頁岩		廬山層		
	魚藤坪砂岩 十六份頁岩 關刀山砂岩	桂 竹 林 層			
中新世					
南莊層					
南港層					
漸新世 至 始新世			水長流層		
			新高層 或 白冷層	眉溪砂岩 佳陽層 玉山主山層 達見砂岩 十八重溪層	



資料來源：「陳有蘭溪(上游段)治理規劃檢討計畫」，水利署第四河川局，2004。

圖 3-5 陳有蘭河流域地質圖

2.地質構造

陳有蘭溪流域主要斷層有陳有蘭溪斷層、三十甲斷層、地利斷層、苦苓腳斷層、神木斷層、十八折坑斷層及兒玉斷層等，主要摺皺有坪林向斜、和社背斜及同富山向斜等（水利署第四河川局，2004）。分別說明如下：

(1)陳有蘭溪斷層及其分支（如沙里仙斷層及東埔斷層）：

此斷層系統是本區主要的斷層構造，並為本區分隔古第三紀變質岩與新第三紀沈積岩之界面斷層（boundary fault），主要沿陳有蘭溪發育，略呈南北走向，往南則呈西北-東南走向。地表顯示此為一高角度逆衝斷層，但因地層對比不易，無法確定斷層之錯動量，但由其具界面斷層之特性推估，此斷層之錯動量在數千公尺以上。

(2)三十甲斷層：

自郡坑野溪沿西北-東南走向，經郡坑地區、三十甲上游區域，再切入郡坑溪。由於斷層兩側岩性差異極大，斷層西側水長流層分佈區域地形較低緩，東側白冷層分佈區域地形高陡，地形突然變化處，即為本斷層。

(3)神木斷層、十八折坑斷層與兒玉斷層等：

分佈於和社南方，此斷層系統皆為具有走向滑移或斜滑移特性之高角度斷層，其中前兩者切過關刀山砂岩、南莊層及南港層。兒玉斷層切過南莊層及南港層，並以此斷層為界。

(4)地利斷層：

分佈在郡坑溪中游、白冷層與十八重溪接觸處，為本斷層出露位置。本斷層大致呈南北走向，向南經十八重溪於農富坪接入陳有蘭溪斷層。

(5)苦苓腳逆斷層：

略呈西北東南走向，於白不仔溪後轉為接近南北走向，在風櫃斗附近又轉回西北東南走向。主要通過白不仔溪、內茅埔溪及牛稠坑溪等下游處，主要切過地層以桂竹林層之砂岩段和部分南莊層。

(6)坪林向斜：

位於陳有蘭溪流域西北，主要為東北-西南走向，坪林向斜切過米籠坑、竹子腳上游，經過南莊層及關刀山砂岩段。

(7)和社背斜：

位於陳有蘭溪流域南區，軸部切過阿里不動溪下游、新興溪、松山溪及郝馬嘎班溪西側支流，背斜軸呈北北東-南南西走向，且為神木斷層、十八折坑斷層及兒玉斷層所截切。

(8)同富山向斜：

位於和社背斜與陳有蘭溪斷層之間，陳有蘭溪流域之東南處，向斜軸為南北走向，為一寬廣而緩之向斜構造，被神木斷層、十八折坑斷層及兒玉斷層等三條橫移斷層所截切。

3.崩塌地

本區崩塌類型包括淺層崩積層滑落、層面滑動及岩塊滑落等數種。淺層崩積層滑落主要見於溪流兩側，多為河流侵蝕，坡腳移除後所造成，部分出現於開發山坡與產業道路旁之邊坡破壞，則與人為開發所造成之影響有關。淺層崩積層滑落所滑動的土石材料以崩積層為主，包括岩屑、土壤等，例如位於陳有蘭溪左岸，郡坑三廊坑溪及豐丘對岸之邊坡，直接受陳有蘭溪主流側侵作用的影響，坡腳受侵蝕而產生淺層崩積滑落(如圖 3-6(a)及圖 3-6(b)所示)。另外發生土石流之溪流，在發生區、流動區沿岸幾乎都可發現不同規模的淺層崩積層滑落，如南平坑、黑石坑、郡坑口、米籠坑……等溪流。

層面滑動則由層面位態控制所造成，或稱順向坡滑動，發生於層面位態的傾斜方向與坡面傾斜方向一致處。本區出露岩層，不論變質岩或沈積岩都有此種類型之崩塌破壞，白冷層、南港層、南莊層及桂竹林層都有厚層砂岩夾頁岩之岩層。當此種砂頁互層之岩層，位態傾向與坡向一致時，很容易發生層面滑動，滑落大量土石。南平坑、黑石坑及郡坑口等土石流發生溪流，其主要鬆散土石材料來源即由層面滑動造成之崩塌所提供。層面滑動所滑落之土石材料，除上述崩積層外，還有岩盤之崩積岩塊。岩塊滑落主要由岩性、不連續面及地質構造影響而造成。一般而言，岩塊中之破裂面經常伴隨著斷層或摺皺等地質構造之發育而產生。因此在斷層或摺皺位置附近之岩體常有較發達之破裂面產生，使岩體顯得格外破碎而有助於崩塌或岩塊崩落之發生。另外依據野外調查結果發現，接近地質構造分佈之位置常出現不少的崩塌地發育情形，顯示多數崩塌地發育與地質構造有極密切之關係。例如米籠坑上游坪林向斜通過處即有崩塌地發育；三十甲土石流發生溪流其源頭崩塌地即位於斷層帶上，岩體極為破碎，為一受斷層影響所發育的崩塌地之最佳例證；另外還有豐丘、十八重溪支流、出水溪、……等支流，上游集水區受地質構造通過影響而有崩塌地的發育。

根據上述地文環境背景之說明可知，本區山脈坡度陡峭，斷層及摺皺等地質構造豐富，岩質膠節不良、鬆散，岩帶破碎且多易裂之弱面，河岸邊坡甚不穩定，隨處可見蝕溝和崩塌並普遍存在崩積層，再加上土地的超限利用，使得大量破碎岩塊和沿屑堆積溪床。九二一集集大地震之影響，使集水區土砂生產潛能更大為提高，對於後續土石流之發生頻率勢必有明顯之提昇影響。



圖 3-6(a) 陳有蘭溪主流左側之河岸崩塌
(郡坑三廊坑溪匯流處對面)



圖 3-6(b) 陳有蘭溪主流左側之河岸崩塌(豐丘村對岸)

4. 土壤概況

陳有蘭溪流域之土壤類型及分布概況如圖 3-7 及表 3-4 所示，各土壤特性說明如下：

(1) 崩積土：

為鄰近高山地區之土壤物質因滾落、滑降、甚至崩塌等位移作用而生成者。新生成者表土有機物多者，表層較暗者稱為暗色崩積土；堆積時間較久其有機物已分解殆盡顏色較淡者，稱為淡色崩積土。基本上，土壤剖面沒有化育作用，多發生於山區坡度緩和的崩積地形上，含石量約 25%，通氣、排水良好，可用作農牧地，但須做好水土保持工作。

(2) 石質土：

石質土屬很新的土壤，多為滾落石塊、碎片或細粒組成。土壤性質與原母岩相似，無明顯的化育層次。若為落崩積土，剖面中混有多量有機質，土壤甚肥沃，排水良好。底土顏色與母岩相近，表土呈極強酸性至微酸性 (pH 4.5~6.2)，pH 平均值約為 5.6，呈中酸性。表面土壤構造為團粒狀或屑粒狀，剖面中含石量 >80%，存留多量半風化母岩，底土以下為砂頁岩層。石質土的主要土系為五股坑系，係由砂頁岩崩積化育所成，排水良好，多位於陡坡地形，土層通常小於 20 公分，質地隨母岩而變，以壤土或砂質壤土為主。

(3) 沖積土：

為海拔 100 公尺以下低平地區最常見之土壤型，分佈面積僅次於山區的石質土。臺灣河流短促湍急，不斷夾帶新的風化侵蝕物質沖積於較低平地區，故沖積土一般均屬於成土不久的幼年土。因為不斷有直接源於山區新鮮且礦質多的碎土塊，其沃力較高，為臺灣最重要且完全利用的農業土壤，部分沖積土以經由長期灌溉利用轉變為黏土類的水稻田。

(4)黃壤(弱育土、淋溶土)：

經由弱度化育而生成之土壤，有時可因淋洗作用較強而使粘粒明顯往剖面下層移動，養分（鉀、鈉、鈣、鎂）有的已流失而呈黃、黃棕或紅棕色，且有明顯之土壤構造生成。多生成於丘陵地上相對地形較安定、坡度起伏較緩和之處。土壤多呈酸性，肥力偏低，須做好肥培管理及水土保持，才可做農牧用地。

(5)紅壤(極育土、氧化物)：

此乃自第四紀洪積層物質，近百萬年來經高溫多雨，乾濕循環交替之條件下，使土壤中之物質淋洗殆盡，僅剩大部份為鋁、鐵氧化物質者。主要分佈於臺灣西部之各個洪積層臺地上，是臺灣最古老的土壤。紅壤土層深厚，一般在 2 至 5 公尺，有時厚達 20 至 30 公尺者亦有。土壤構造明顯，通氣、排水良好，物理性質絕佳。唯土壤呈強酸性，肥力差，粘性及可塑性佳，因此生產力差，但可配合適當之肥培管理亦可使作物生產達高產量。目前大都種植茶葉、鳳梨、甘蔗等農作物。

表 3-4 陳有蘭溪流域土壤組成百分比（林基源，2003）

土壤種類	面積 (ha)	百分比 (%)
未調查區	33892.64	75.74
石質土	1873.44	4.19
沖積土	400.32	0.89
紅壤	0.64	0.00
崩積土	5496.16	12.28
黃壤	14.08	0.03
雜地	3073.76	6.87

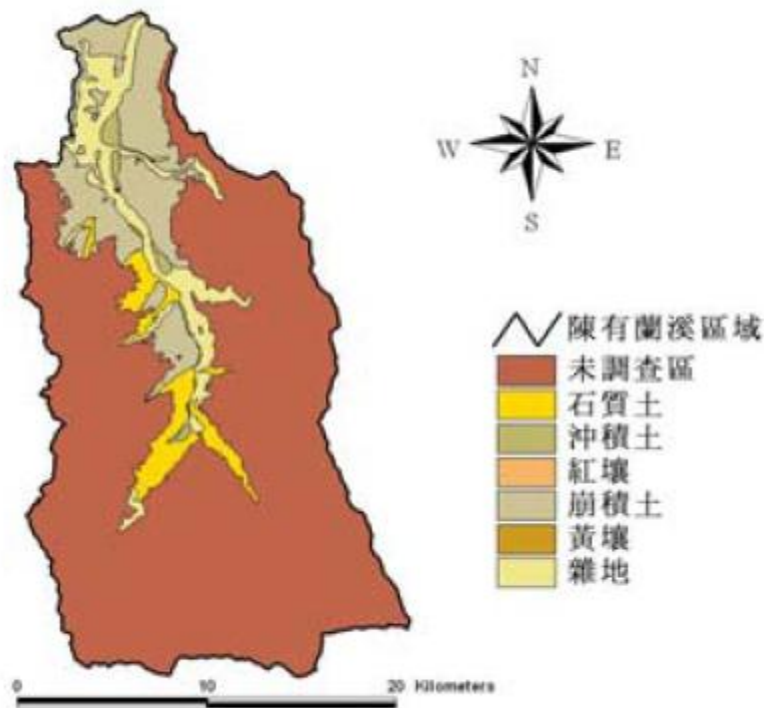


圖 3-7 研究地區土壤分佈圖（林基源，2003）

3.1.1.2 粒徑分佈特性

為瞭解土石流材料特性，需對土石流發生現場進行採樣，判別結構型態，以利實驗室內進行各種相關試驗；並適切模擬現地土石結構特性與瞭解溪谷不同位址之細料含量變化情形。

Johnson 等（1971）調查美國加利福尼亞州之土石流，在源頭部與堆積部採樣，結果發現土石堆積材料在源頭部與堆積部的粒徑分布曲線相似，如圖 3-8 所示。其認為土石流在傳輸過程中，粒徑分布的改變影響很小。

若是採用源頭部的材料時，在採樣的標準上很難取捨，因為在源頭部之礫石大者至數公尺，且本研究地區地形高低起伏落差大，上游地區坡度由其坡度陡峻，人員、器具及樣品的搬運均有相當大的困難，基於上述各項因素之考慮，因此，以陳有蘭溪為界，粗略分為西側沉積岩，東側變質岩；選擇土石流災害頻繁之陳有蘭西側之神木地區及其東側三廊坑溪地區為代表，於土石流堆積部從事採樣作業。

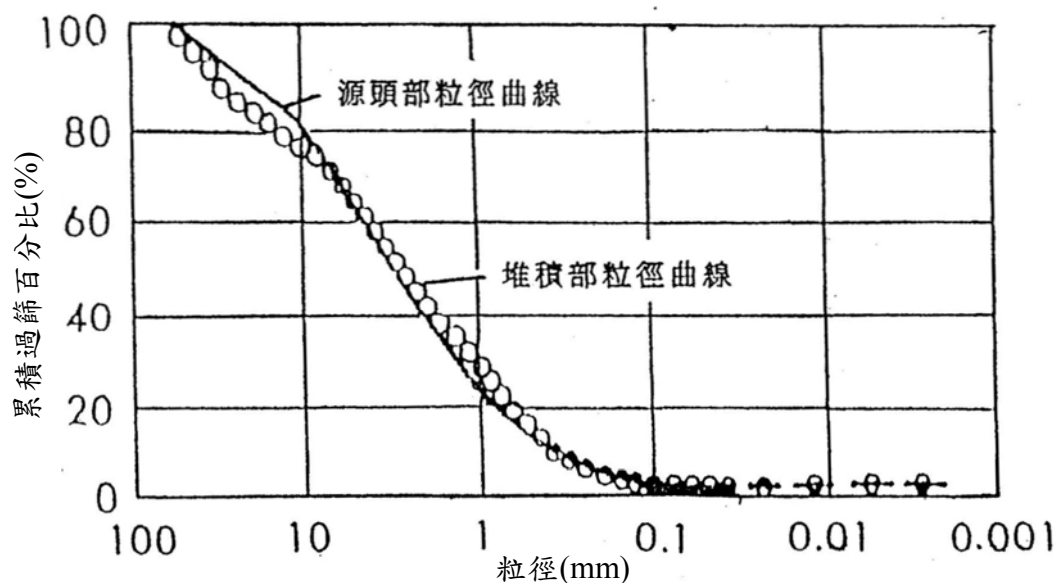


圖 3-8 土石流堆積部與源頭部粒徑分布曲線 (Johnson, 1971)

1.神木村(陳冠宏, 2006)

神木村迄今已發生過多次重大土石流災害，921 地震後之土石流又使出水溪河床堆積大量土石，陳冠宏(2006)經現場實地勘查，選定出水溪中游段溪床為採樣地點，採樣位置如圖 3-10 所示，此處地勢平坦，較易進行挖掘工作。現地取回之土石材料，進行一般物理性質試驗如：土壤之級配、含水量、礫石之吸水率、比重、細料土壤之液限、塑限等基本試驗，參考張世樺 (2001) 分析成果，如表 3-5 所示。

表 3-5 明坑採樣結果 (張世樺, 2001)

土濕土重 (kg)	體積 (m ³)	現地密度 (ton/m ³)	細 料 比 重	液 限	塑 限	現地 乾密度 (ton/m ³)	含水量 (%)	礫石含量 (%)	#200 篩 以下含量 (%)	粒徑 0.1mm 以 下含量 (%)
2140	1.10	1.94	2.65	16	NP	1.72	12.8	81.3	4.7	8.5

土石流類型：礫石型土石流

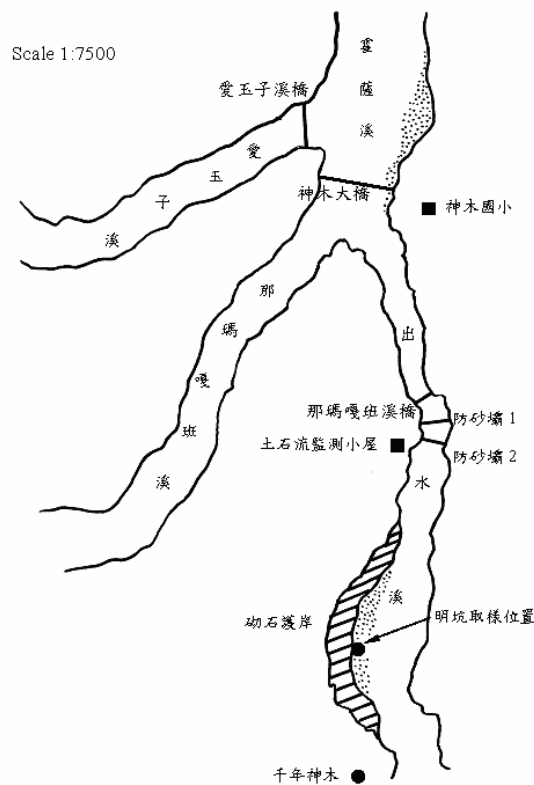


圖 3-9 採樣位置圖

由於土石流堆積部區域甚廣，在現地以明坑取樣方式進行篩分析所獲得之粒徑分布曲線僅能代表該採樣點，若單就一試驗點之粒徑分布曲線欲模擬現地之粒徑分佈實為不夠客觀，且土石流並非均質之流動體，堆積部亦是如此，因此參考近年來在神木地區進行現地明坑篩分析試驗所得之粒徑分布曲線：中興大學土木系—林智勇（1998）、臺灣大學土木系—丁伯欣（1999）、臺灣大學農工系—朱嘉政（2001），如圖 3-10 所示，取其平均值。平均之現地粒徑分佈曲線中粒徑 $< 0.1\text{mm}$ 之細粒料為 8.5 %，依池谷浩（1980）礫石型土石流之細粒料含量為 20% 以下，因此將當地土石流之類型歸類為礫石型土石流。

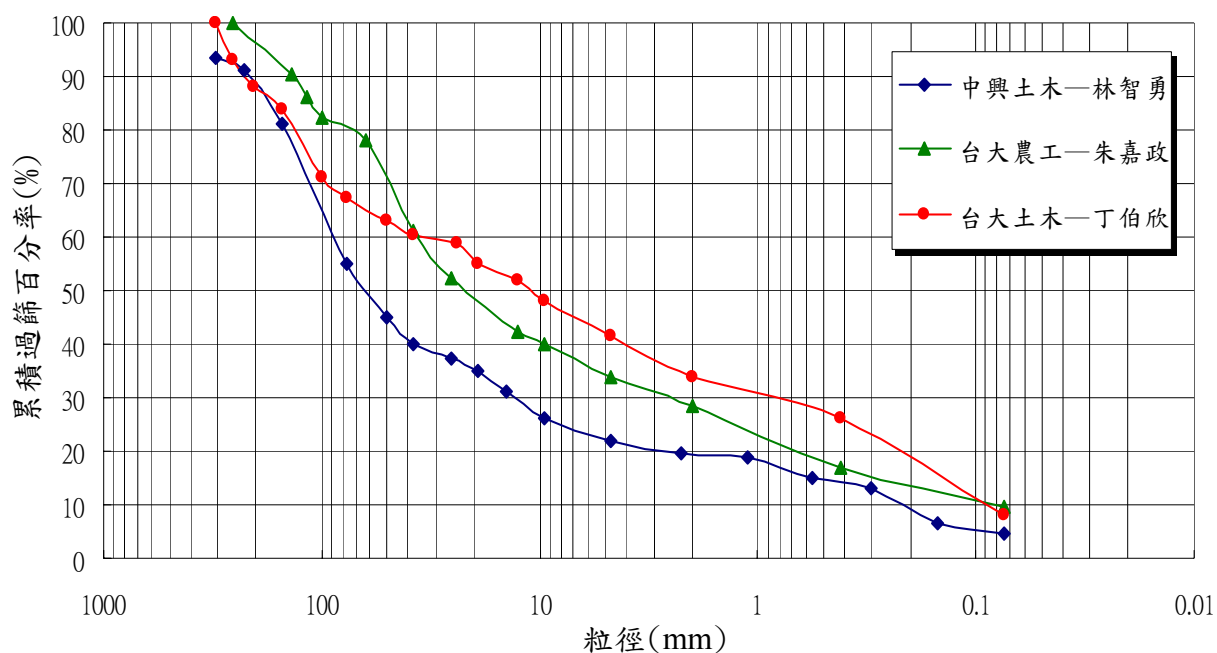


圖 3-10 現地粒徑分布曲線

2.三廊坑溪地區 (洪政宏，2007)

三廊坑溪經歷 921 前後許多重大土石流災害，將原本上游土石帶至中下游，但經現場探勘結果，仍有大量土石堆積於上游處，故本研究採樣地點為三廊坑溪中上游處，採樣位置如圖 3-11 所示，該處為人員較易到達且易挖掘。洪政宏(2007)於南投縣水里鄉上安村三廊坑溪現地取樣，以明坑取樣方式進行篩分析，其土壤物理性質如表 3-6 所示，粒徑分佈狀況如圖 3-12 所示。試驗模擬結果平均之現地粒徑分佈曲線中粒徑 $<0.1\text{mm}$ 之細粒料為 5.3 %，根據謝正倫（1991）土石流組成材料分類中 0.1mm 之細粒料小於 10 %為礫石型土石流，因此將當地土石流之類型歸類為礫石型土石流。

表 3-6 現地明坑採樣結果(洪政宏，2007)

濕土重	體積	現地密度	現地乾密度	含水量	礫石含量	#200 以下	0.1mm 以下	液性限度	縮性限度
(KG)	(m3)	(t/m3)	(t/m3)	(%)	(%)	(%)	(%)	-	-
1173.5	0.576	2.037	1.917	5.0	77.6	4.1	5.3	NP	NP

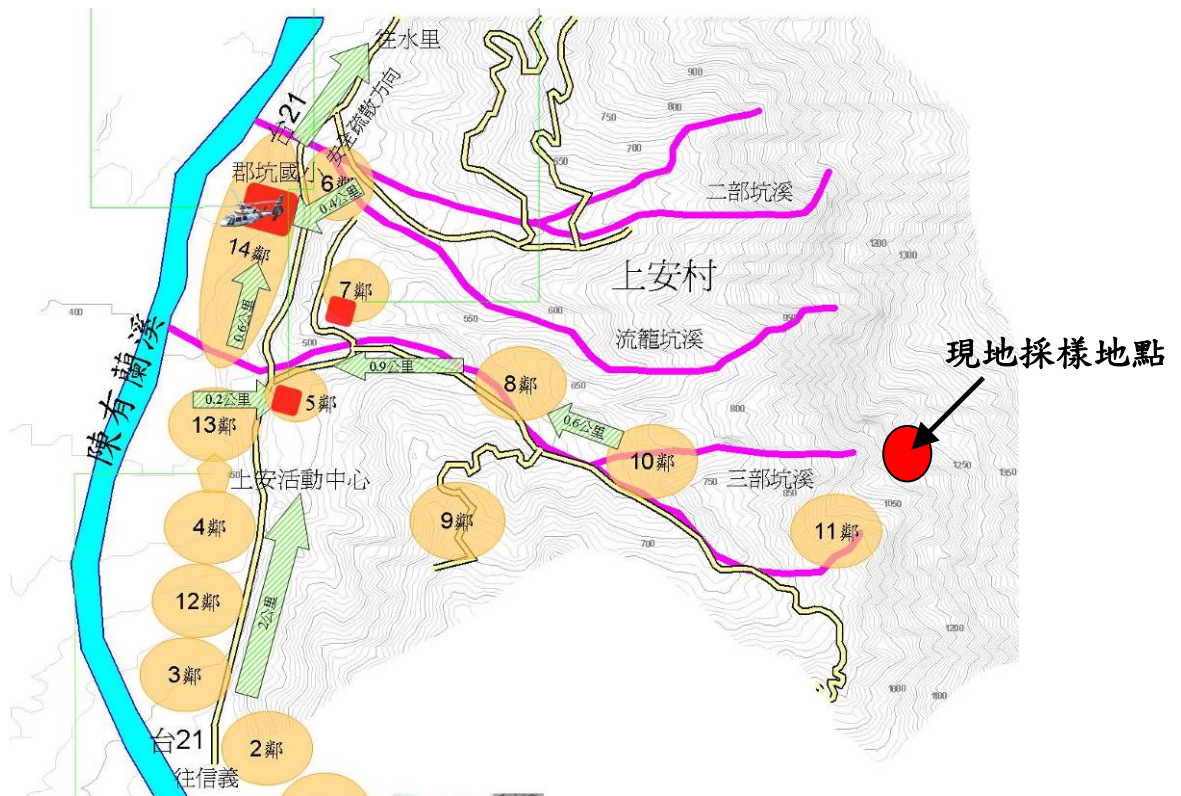


圖 3-11 現地採樣地點(洪政宏，2007)

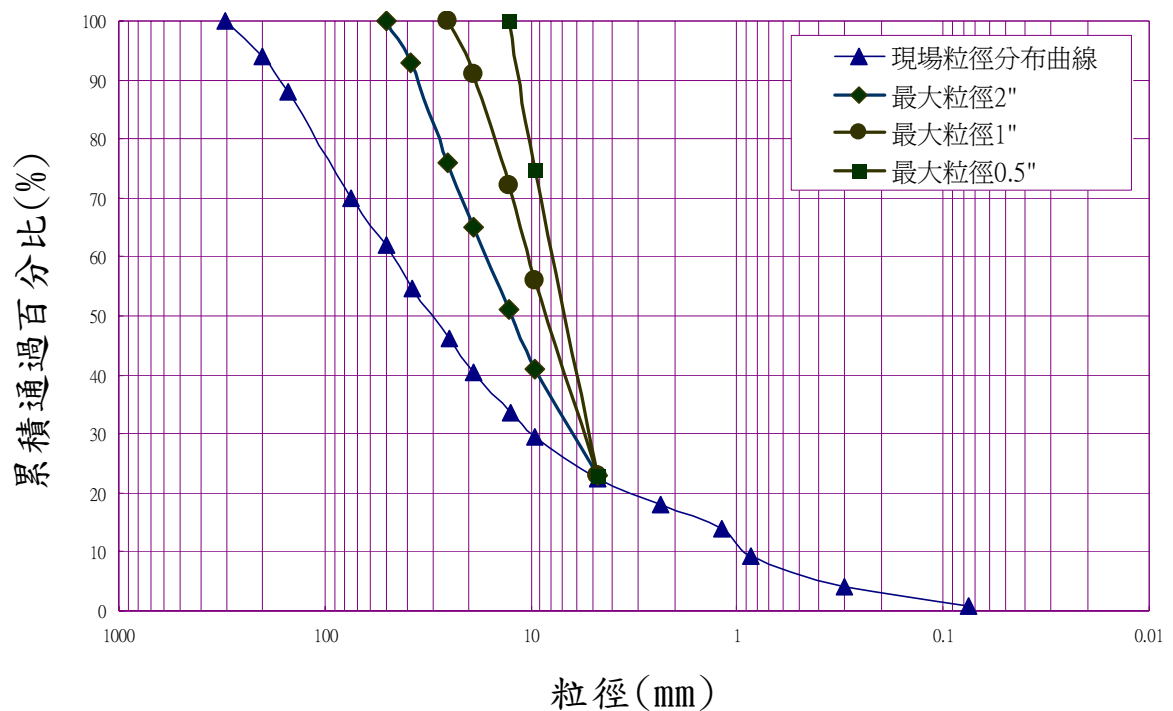


圖 3-12 現地粒徑分佈曲線與等重量替代模擬土石粒徑曲線
(洪政宏，2007)

3.1.2 氣象及水文環境

陳有蘭溪流域氣候類型依桑士偉氏-臺灣氣候分類應屬熱帶潤濕氣候及熱帶重濕氣候之交替型態，主要降雨集中在 5~8 月之颱風、梅雨季節。降雨天數佔總天數之 2/3，降雨頻率相當頻繁。依表 3-7 中央氣象局阿里山氣象站觀測資料顯示，該地區年平均氣溫約攝氏 10.8 度，平均降雨量約 3810 公釐；相對濕度介於 80%~93%，平均濕度約 86%，屬於高濕度之氣候（水利署第四河川局，2004）。

圖 3-13 為陳有蘭溪流域之雨量站分布，流域內共有龍神橋、信義、溪頭、望鄉、和社、神木村及新高口等七個雨量測站，基本資料如表 3-8 所示。表 3-9 為 1996 年至 2005 年近十年間東埔、望鄉、內茅埔(2)、西巒及龍神橋等五處測站月平均雨量統計分析成果，表中顯示 5 月~8 月豐水期之月平均降雨量，約為 9 月~翌年 4 月枯水期月平均降雨量之 4 倍；流域內高海拔地區測站(望鄉站，海拔 2,300m)年平均雨量較低海

拔地區測站(龍神橋站，海拔 296m)大約將近一倍。上述說明顯示，陳有蘭溪流域降雨特性不論時間分布或空間分佈均極為不均。

表 3-7 阿里山氣象站（1971～2003）氣候資料統計表

項目 月份	降雨量 (mm)	降雨天數 (日)	平均氣溫 (°C)	相對濕度 (%)	最高氣溫 (°C)	最低氣溫 (°C)
1 月	88	8	5.7	81	11.4	1.5
2 月	132	9	6.8	85	11.8	2.7
3 月	154	11	9.0	82	14.2	4.7
4 月	249	13	11.2	85	16.1	7.4
5 月	519	20	12.7	90	17.0	9.1
6 月	694	21	14.0	90	18.3	10.7
7 月	592	21	14.3	90	19.2	10.6
8 月	794	23	14.1	93	18.6	10.7
9 月	354	19	13.3	91	18.3	9.6
10 月	129	12	12.0	88	17.6	8.0
11 月	47	7	9.8	84	15.6	5.4
12 月	60	7	7.1	80	13.0	2.6
合計(或平均)	3810	169	10.8	86.6	15.9	6.9

表 3-8 陳有蘭溪流域雨量測站基本資料

站 號	站 名	經度	緯度	海拔(m)	設站日期
C1I08	信義	120°50'34" E	23°41'29" N	536	1992/7/1
C1I07	和社	120°52'51" E	23°35'33" N	777	1992/7/1
C0H9A	神木村	120°15'08" E	23°19'54" N	1595	1999/2/1
C1I10	溪頭	120°47'57" E	23°39'47" N	1771	1992/7/1
C1I06	望鄉	120°54'58" E	23°27'12" N	2300	1992/7
C1I16	龍神橋	120°51'49" E	23°46'53" N	296	1993/3/1
C1M44	新高口	120°52'13" E	23°28'51" N	2540	1992/5/1

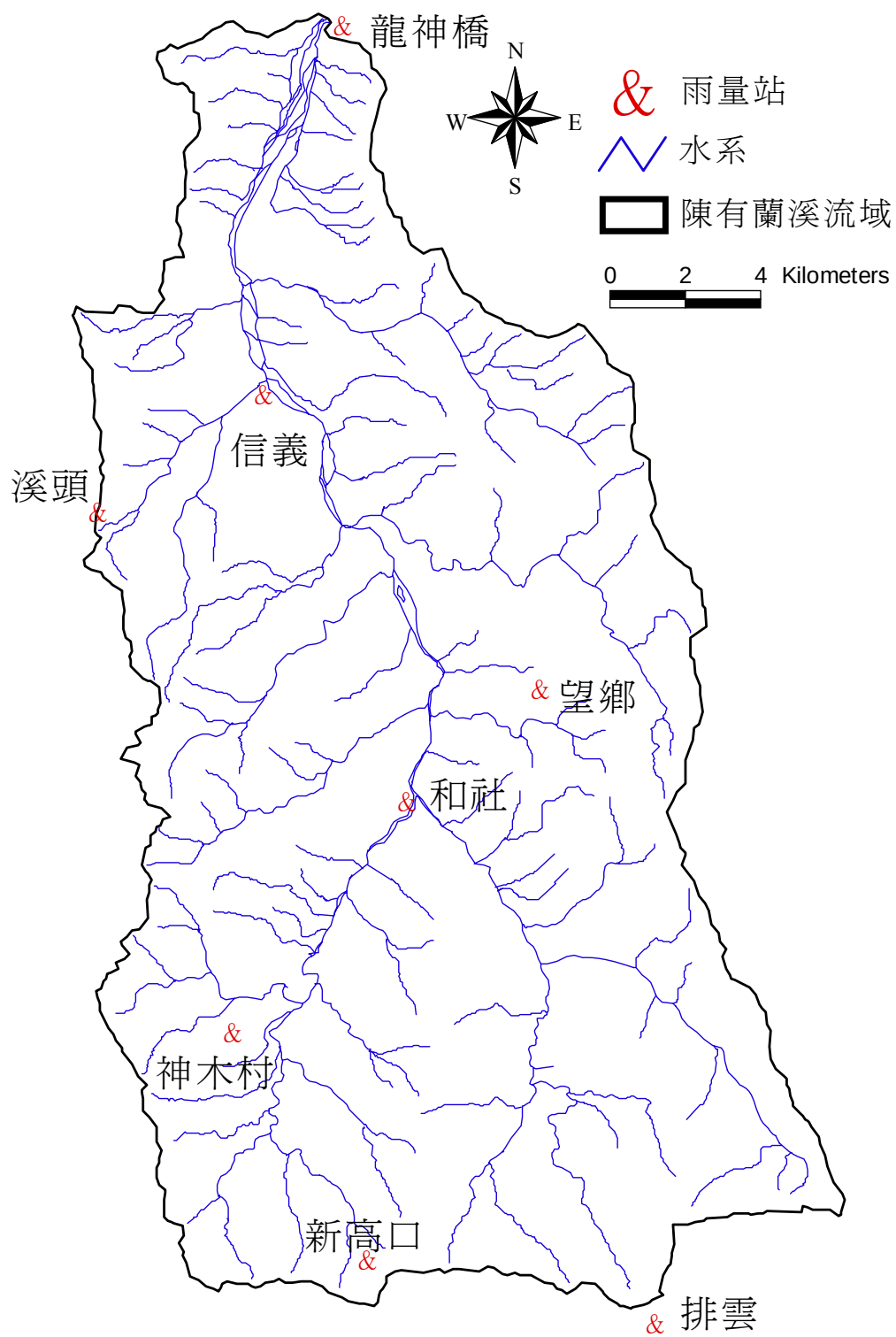


圖 3-13 陳有蘭溪雨量站相關位置圖

表 3-9 研究區相關氣象站月平均降雨統計表（單位：公釐）

氣象站名稱 月份	東埔	望鄉	內茅埔(2)	西巒	龍神橋	月平均
一月	46.0	57.7	36.1	60.3	49.6	49.9
二月	77.2	78.5	68.4	89.0	80.0	78.6
三月	99.0	85.6	44.2	119.8	72.8	94.3
四月	133.3	133.5	116.5	150.4	97.3	126.2
五月	251.6	262.2	274.9	335.1	208.9	266.5
六月	264.4	262.4	256.7	342.4	255.2	276.2
七月	406.4	459.0	357.4	495.6	222.4	388.2
八月	393.6	482.8	339.9	518.0	207.5	388.4
九月	169.1	167.0	136.7	197.3	78.0	149.6
十月	129.5	123.4	78.9	114.0	30.2	95.2
十一月	35.1	40.9	15.0	28.8	14.3	26.8
十二月	53.8	44.2	36.7	49.7	29.9	42.9
合計	2059.0	2197.2	1811.4	2500.4	1346.1	1982.8

3.1.2.1 颱風事件降雨量分析

池谷浩(1980)與謝正倫(1993)分別依據日本與臺灣土石流災害期間之降雨資料分析指出，土石流發生時間與尖峰降雨量發生時間關係密切。本研究針對民國 85 年 7 月 31 日之賀伯颱風、90 年 7 月 30 日桃芝颱風及 93 年 7 月 2 日敏督利颱風期間，整理分析中央氣象局陳有蘭溪流域雨量站之雨量資料，探討累積雨量與降雨強度特性。

1. 賀伯颱風

圖 3-14 至圖 3-21 為賀伯颱風期間，陳有蘭溪流域各雨量測站之降雨量組體圖，其中以阿里山測站之累積降雨量 1,994.5mm 及最大時雨量 112.5mm/hr 為最大值。

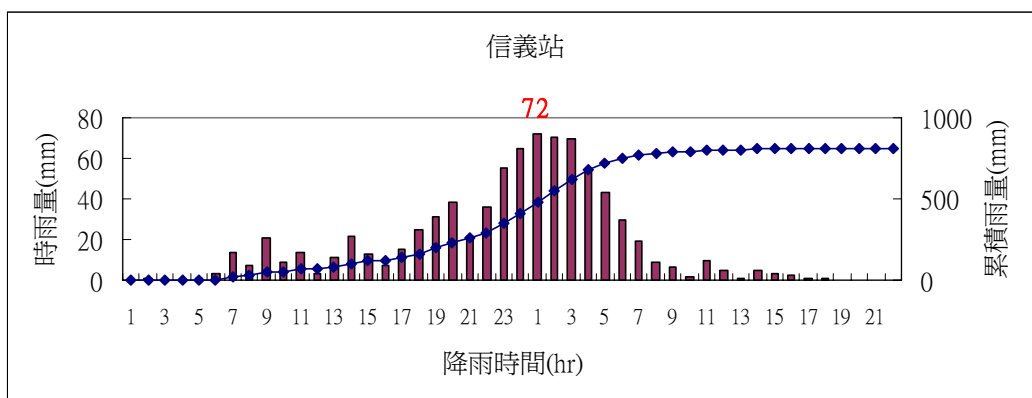


圖 3-14 賀伯颱風-信義雨量站降雨組體圖

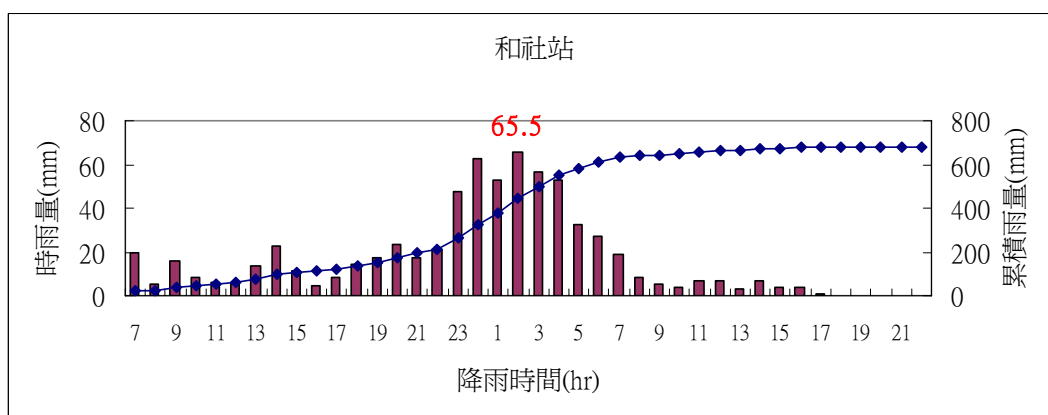


圖 3-15 賀伯颱風-和社雨量站降雨組體圖

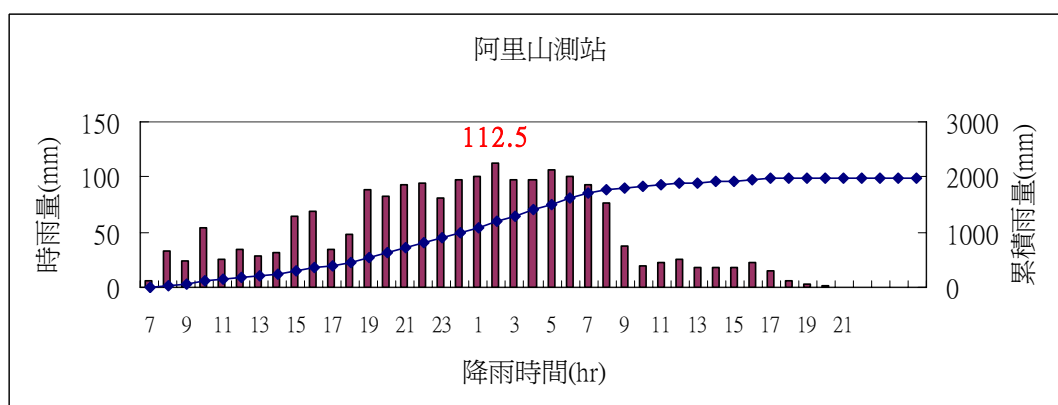


圖 3-16 賀伯颱風-阿里山雨量站降雨組體圖

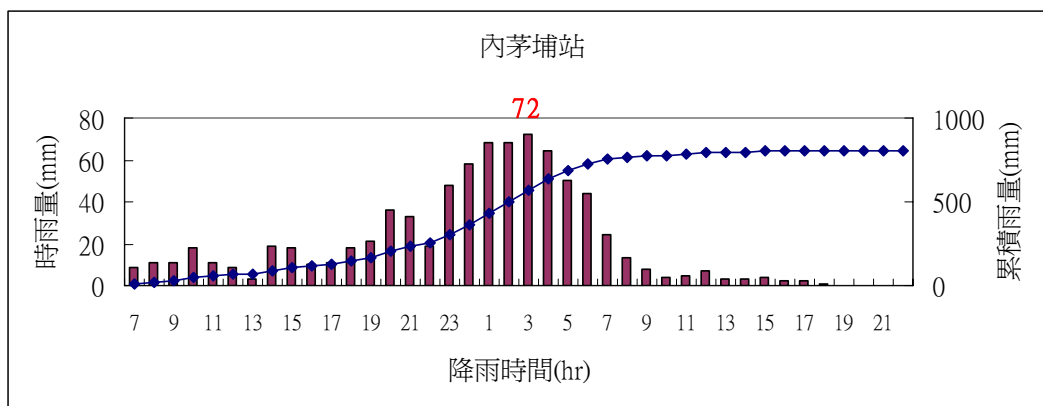


圖 3-17 賀伯颱風-內茅埔雨量站降雨組體圖

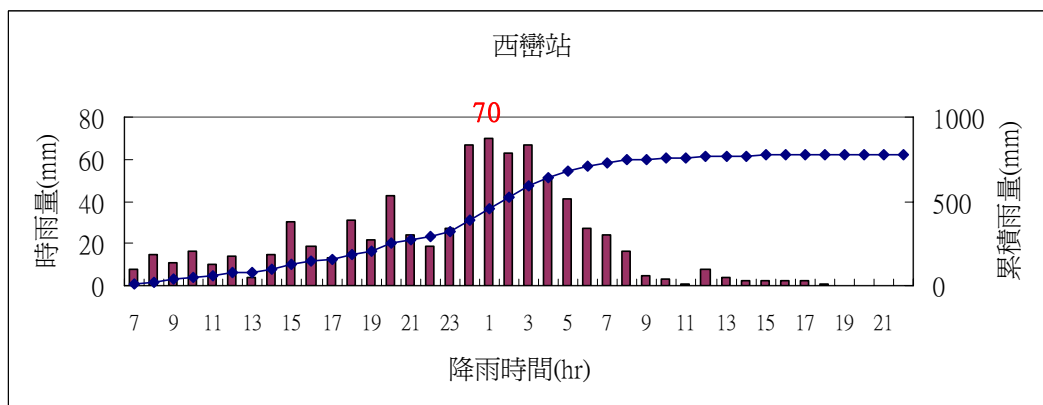


圖 3-18 賀伯颱風-西巒雨量站降雨組體圖

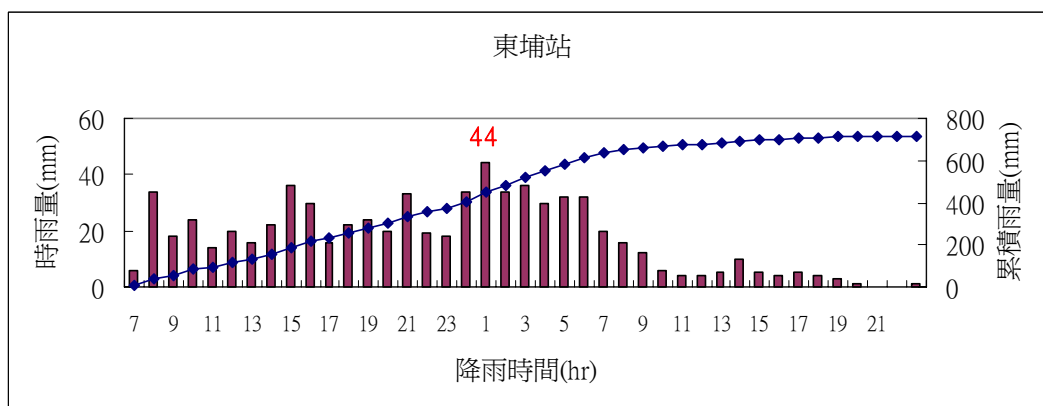


圖 3-19 賀伯颱風-東埔雨量站降雨組體圖

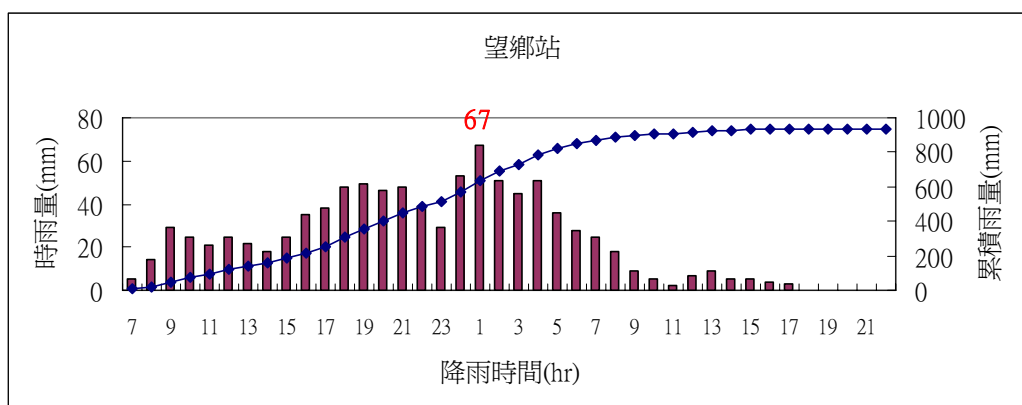


圖 3-20 賀伯颱風-望鄉雨量站降雨組體圖

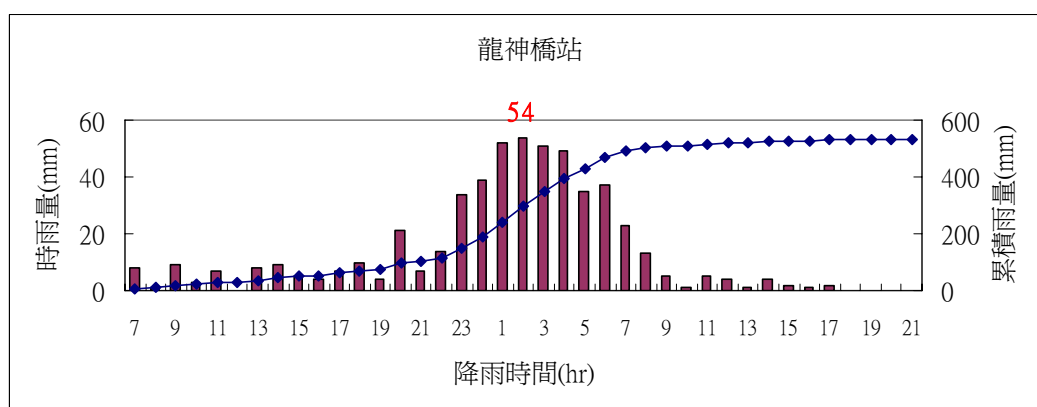


圖 3-21 賀伯颱風-龍神橋雨量站降雨組體圖

2. 桃芝颱風

圖 3-22 至圖 3-29 為桃芝颱風期間，陳有蘭溪流域各雨量測站之降雨量組體圖，其中以神木測站之累積降雨量 634mm 為最大值，最大時雨量(125.5mm/hr)則發生在信義測站。

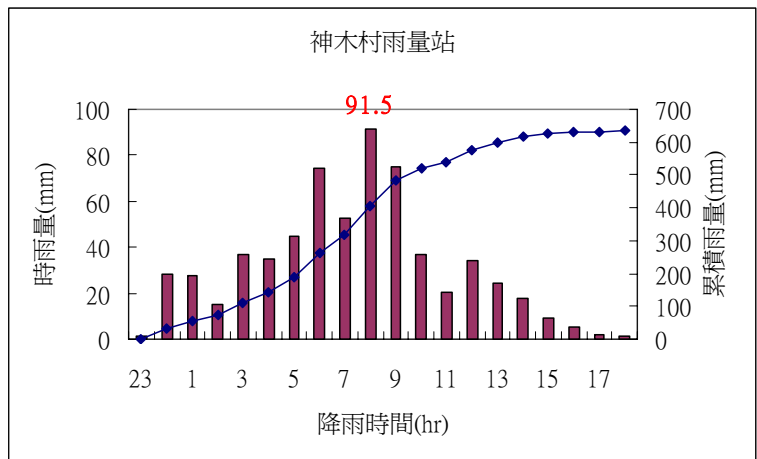


圖 3-22 桃芝颱風-神木村雨量站降雨組體圖

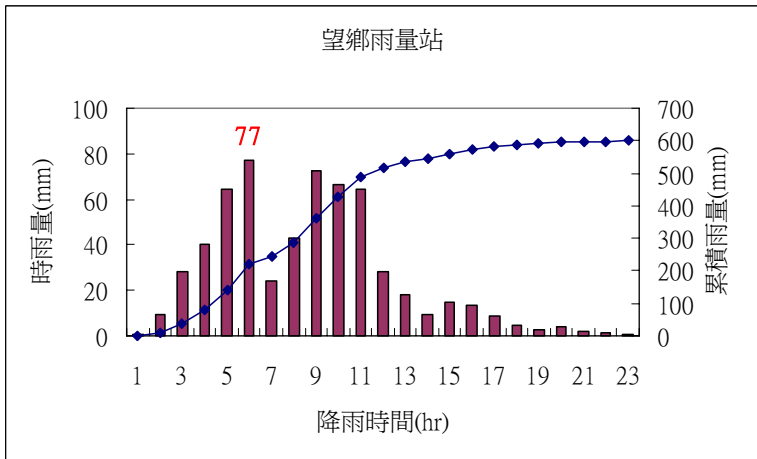


圖 3-23 桃芝颱風-望鄉雨量站降雨組體圖

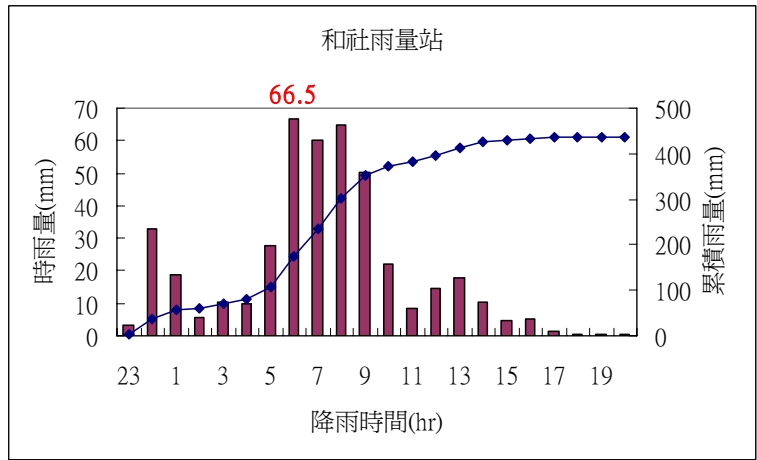


圖 3-24 桃芝颱風-和社雨量站降雨組體圖

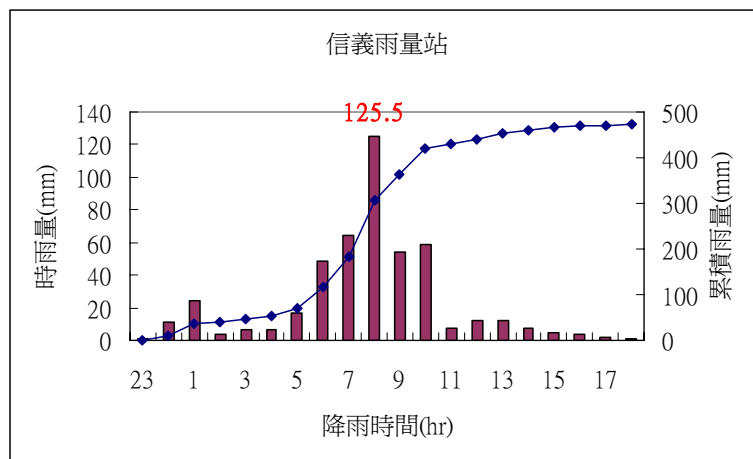


圖 3-25 桃芝颱風-信義雨量站降雨組體圖

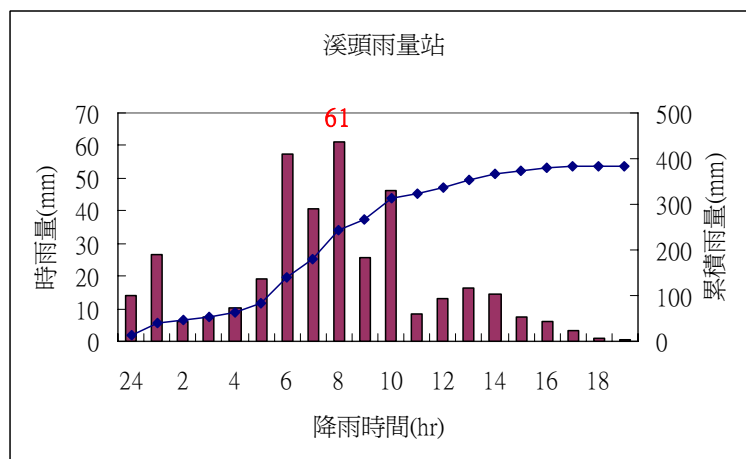


圖 3-26 桃芝颱風-溪頭雨量站降雨組體圖

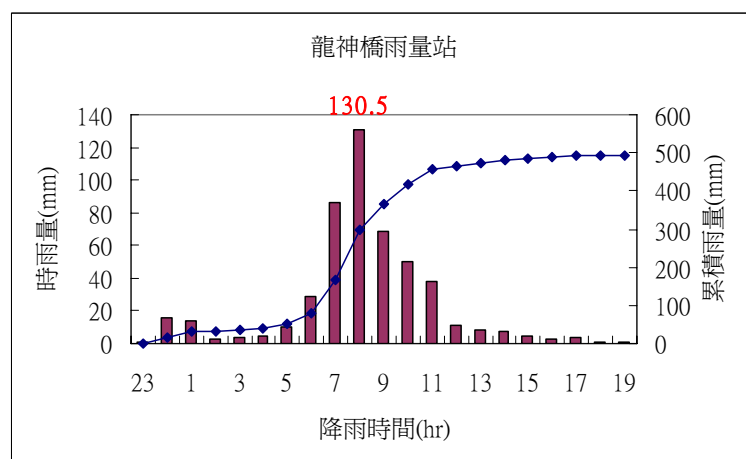


圖 3-27 桃芝颱風-神龍橋雨量站降雨組體圖

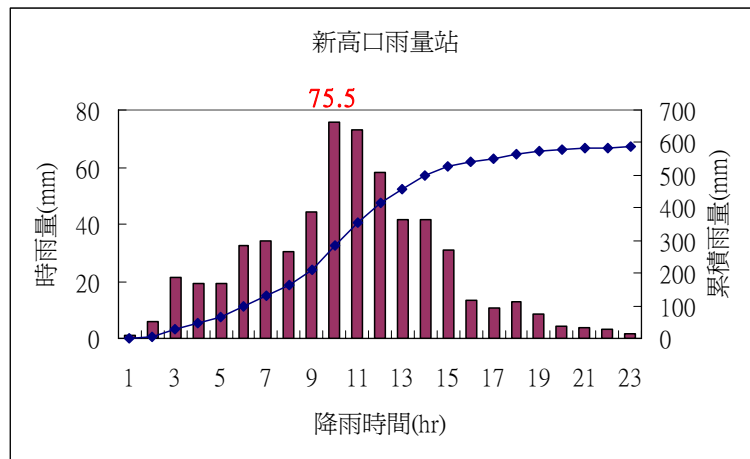


圖 3-28 桃芝颱風-新高口雨量站降雨組體圖

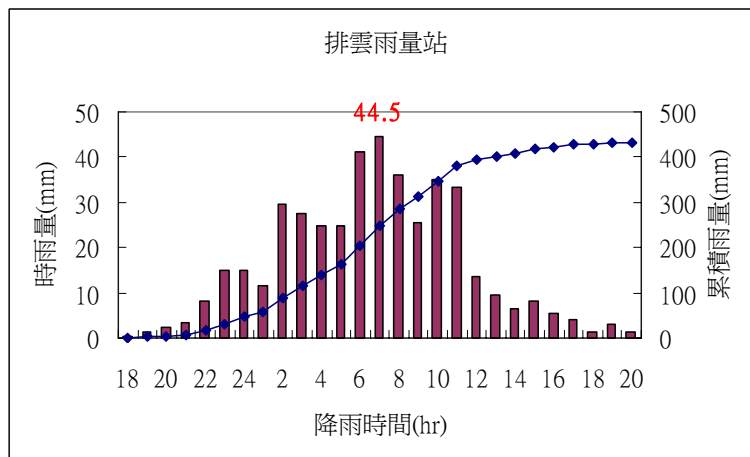


圖 3-29 桃芝颱風-排雲雨量站降雨組體圖

3.敏督利颱風

圖 3-30 至圖 3-37 為敏督利颱風期間，陳有蘭流域各雨量測站之降雨量組體圖，其中以神木測站之累積降雨量 1407mm 為最大值，最大時雨量(100mm/hr)出現在神龍橋測站。

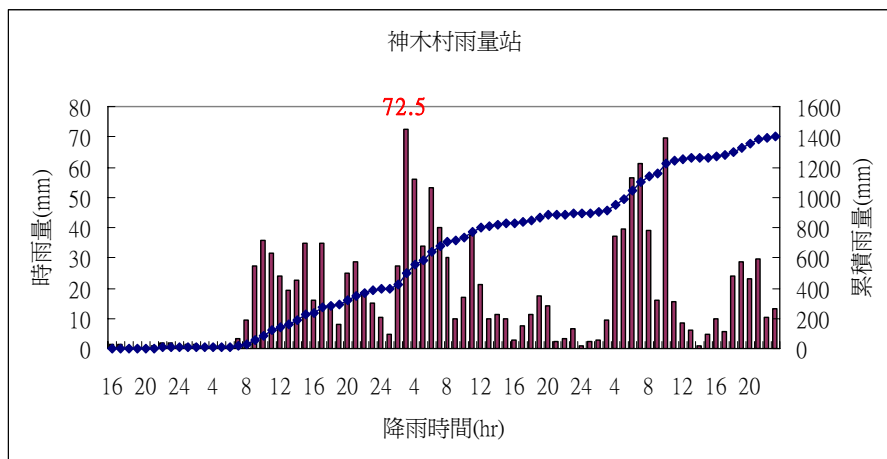


圖 3-30 敏督利颱風-神木村雨量站降雨組體圖

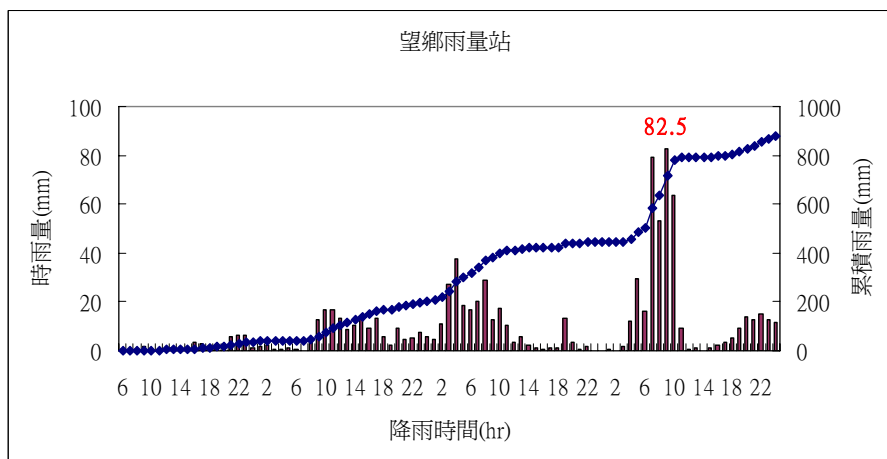


圖 3-31 敏督利颱風-望鄉雨量站降雨組體圖

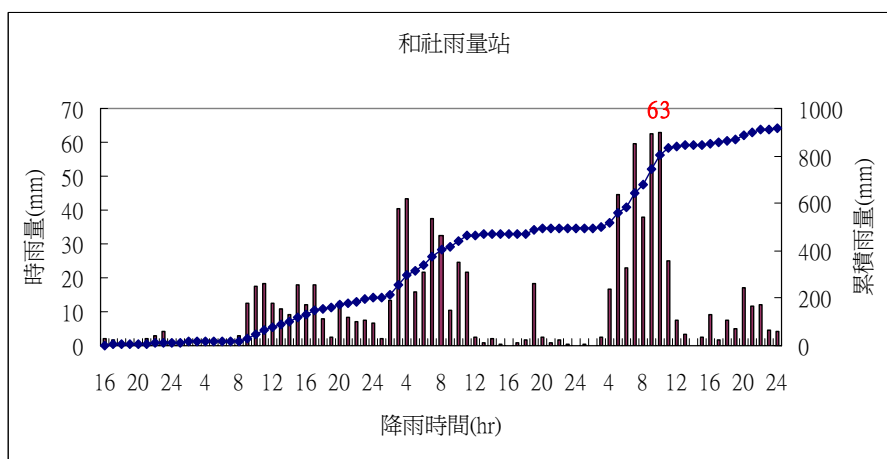


圖 3-32 敏督利颱風-和社雨量站降雨組體圖

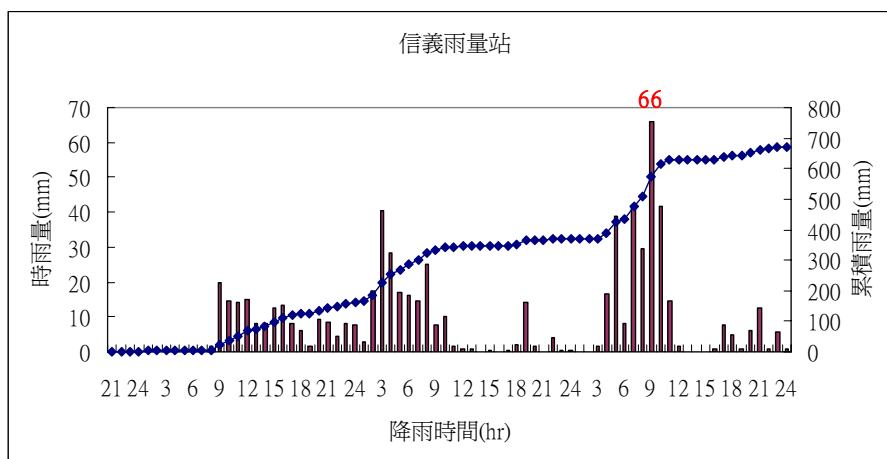


圖 3-33 敏督利颱風-信義雨量站降雨組體圖

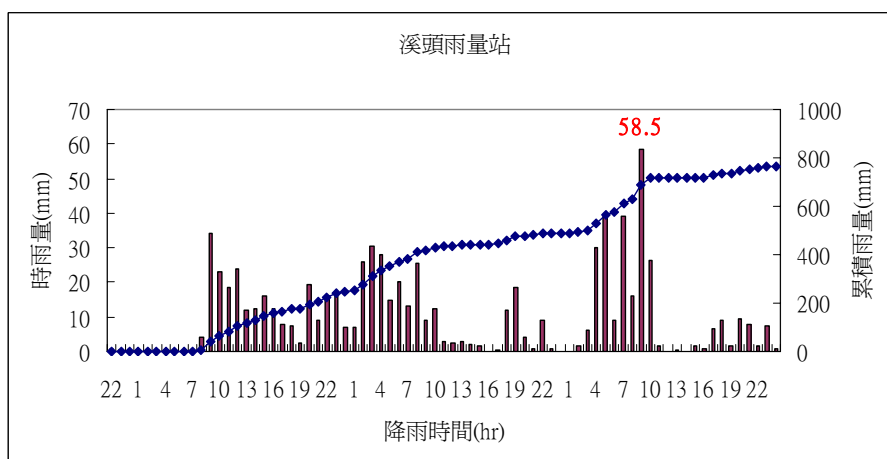


圖 3-34 敏督利颱風-溪頭雨量站降雨組體圖

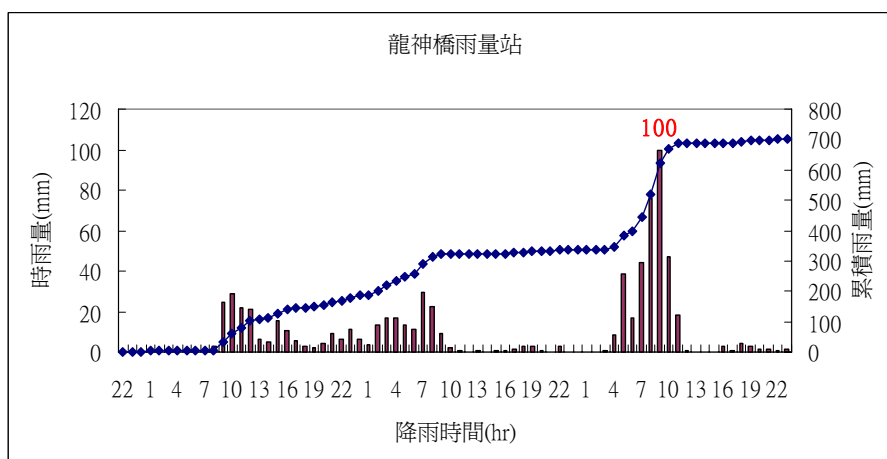


圖 3-35 敏督利颱風-神龍橋雨量站降雨組體圖

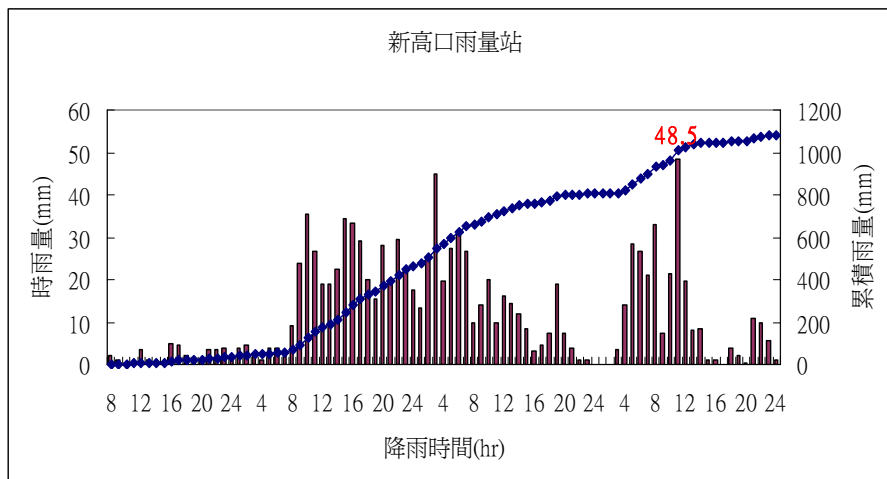


圖 3-36 敏督利颱風-新高口雨量站降雨組體圖

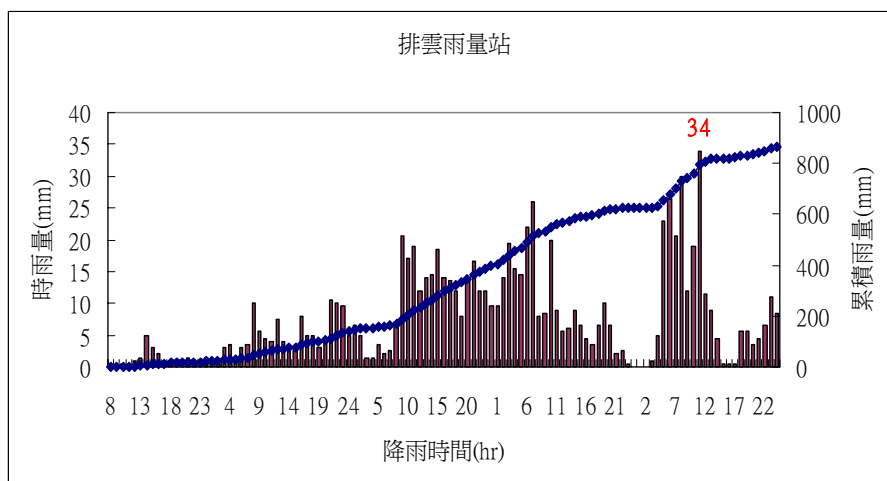


圖 3-37 敏督利颱風-排雲雨量站降雨組體圖

3.1.3 土地利用型態

陳有蘭溪集水區總面積約為 44,700 公頃，其中森林區及國家公園所佔面積約佔整體之 80%，相關特定區域使用狀況如表 3-10 所示。此外，本計畫再針對陳有蘭溪流域土地使用進行分類，共分為 A、林業使用、B、河川地、C、沼澤地、D、建成地、E、草地及 F、農業使用地等六大類，其中陳有蘭溪集水區主要以林業使用佔大多數，約佔整體八成，各土地使用分區統計結果如表 3-11 及圖 3-38 所示。陳有蘭溪流域含熱、寒及溫三大氣候帶，因此植群分佈亦因不同海拔高程而呈現不同之林相，大部分以天然雜木林、人工闊葉林、人工針葉林及

竹類為主。近年來受到周遭觀光產業發展的影響，部分淺山林地大多被超限開墾利用，區域內主要坡地利用經營型態亦因而呈現多元化，集水區中主要種植檳榔、梅樹、蔬菜及其他短期耕作作物。在觀光業的帶動下，區域內之高山茶種植面積亦有逐年增加之傾向，且竹產品亦在本區域內因應旅遊季節而有多元化之情形。

表 3-10 陳有蘭溪流域特定區域使用狀況表

土地區域型態	面積 (ha)	使用率	土地區域型態	面積 (ha)	使用率
鄉村	62.88	0.2	河川區	80.16	0.3
森林區	25586.72	57.1	林班地	1217.60	2.7
都市計畫區	227.20	0.5	山坡地保育區	4922.88	11.0
國家公園	10591.20	23.6	一般農業區	316.00	0.7
特定農業區	212.32	0.5	未調查區	1527.68	3.4

表 3-11 土地使用分區統計表

土地利用區分	面積 (ha)	使用率	土地利用型態	面積 (ha)	使用率
林業使用	35029.41	78.2	建成地	268.77	0.6
河川地	3583.57	8.0	草地	1612.61	3.6
農業使用地	4300.29	9.6			

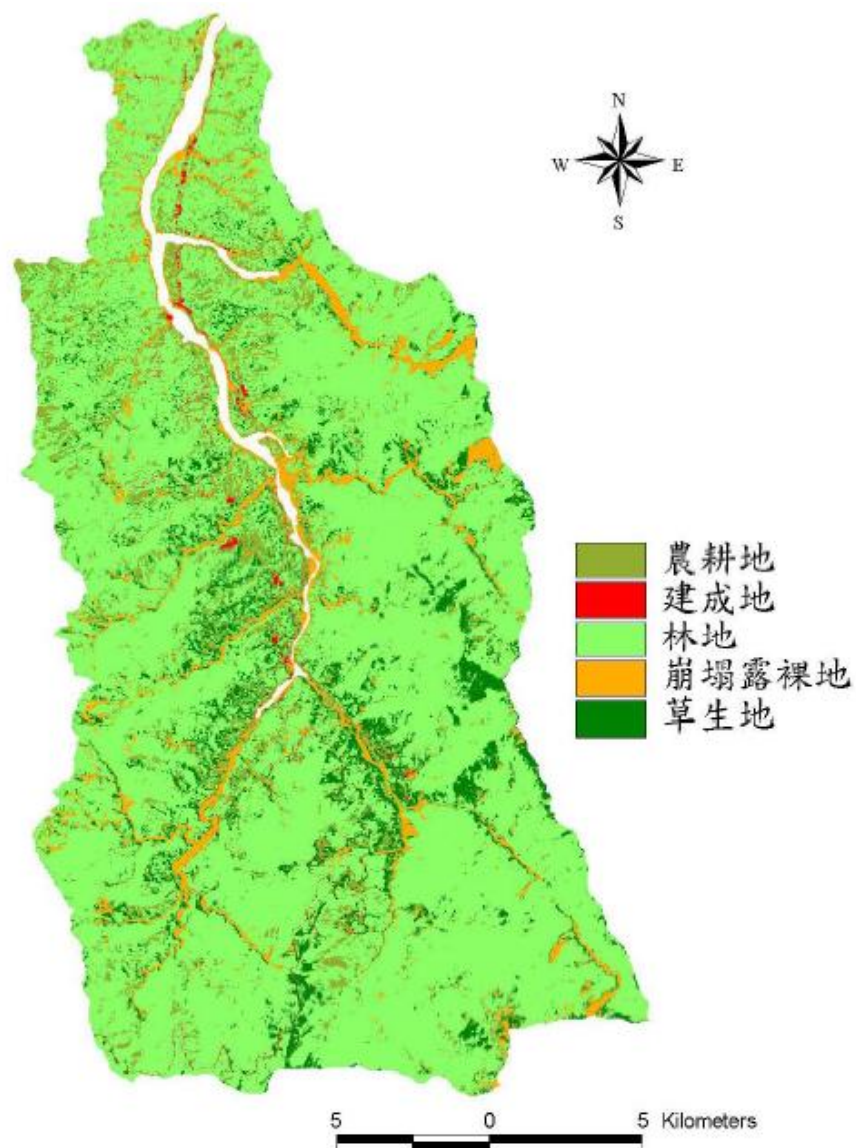


圖 3-38 桃芝風災後陳有蘭溪集水區土地利用分佈

3.1.4 交通動線及跨河橋樑

陳有蘭溪流域主要交通道路為台 21 線新中橫公路-水里玉山線，路線相關位置如圖 3-39 所示，由水里行經塔塔加遊客中心（台 21，83K 至 151K），向南沿途經信義、和社、神木至東埔山垭口，並於嘉義玉山線會合再連接台 18 線至阿里山，用以連結玉山國家公園及阿里山風景區，全長共 71 公里。公路前段(頂崁～神木)約 34 公里，大致沿陳有蘭溪水系而建，後段(神木～塔塔加)約 45 公里，則繞行同富山及東埔山興建。台 21 線道路工程於民國 68 年開工，以玉山為樞紐，分由東、西、北端向中央推進。其中改善舊車道水里至神木 34 公里部分，於民國 72 年完成；全部工程則於 79 年 12 月完工，民國 80 年 1 月 1 日正式竣工通車。台 21 線新中橫公路沿途風景秀麗，景色多變，歷經熱帶、溫帶及寒帶等三大天候條件，故成為通往玉山國家公園、阿里山風景區、日月潭風景區與東埔溫泉旅遊景點之主要觀光大道，亦是臺灣中部和嘉南等兩大地區門戶互通之重要輸運通道，經濟效益不容忽視。但由於道路沿線地質構造脆弱，岩層多變複雜，在 11 年的施工期間，台 21 線曾多次改線，尤其在同富山東側斜坡更是災害頻傳。王鑫等人(1991)曾比較施工前、施工中、完工後三個時期公路邊坡環境，以瞭解道路開挖工程對邊坡穩定的影響。研究結果發現，本區道路開挖工程對邊坡穩定及景觀的衝擊，破壞非常巨大。省道台 21 中 127K 至 146K 大迴頭彎及位於陳有蘭溪主支流上之 26 座跨河結構物，為全線工程問題最嚴重的地區。過去颱風、豪雨侵襲下，該路段發生多處坍方、落石、路面裂陷、路基流失及土石流等災情，造成全線道路幾近柔腸寸斷。

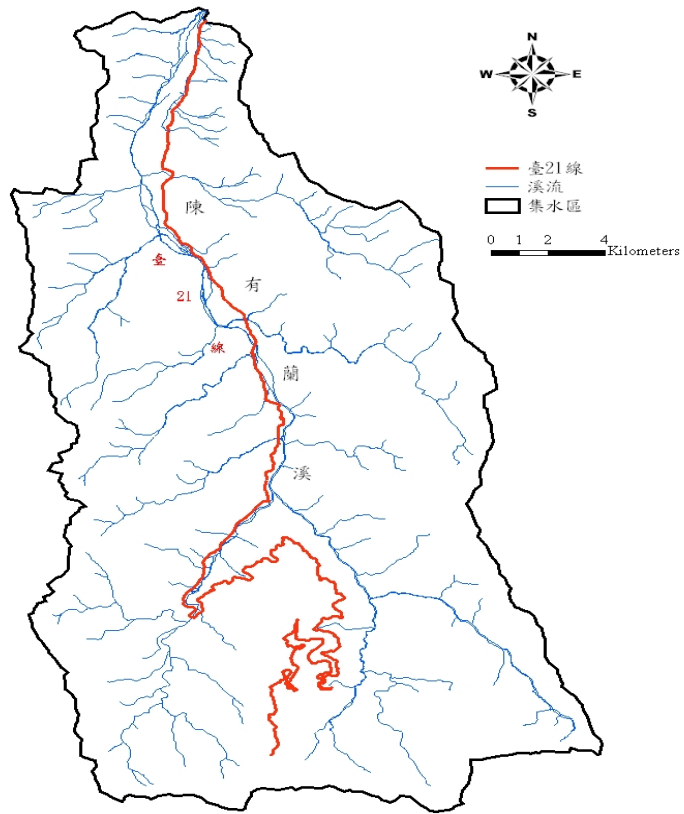


圖 3-39 陳有蘭溪流域-台 21 線相關地理位置圖

歷年颱風暴雨期間，跨河橋樑多次遭受洪水及土石流衝擊損毀，例如民國 90 年桃芝颱風及 93 年敏督利颱風皆引發台 21 線公路及橋樑多處土石流並造成嚴重災情，表 3-12 及 3-13 分別為桃芝颱風及敏督利颱風(七二水災)期間台 21 線沿線橋樑受土石流影響而毀損之災情整理。

表 3-12 桃芝颱風期間台 21 線新中橫公路橋樑災害彙整

災害地點	受災概況	災害原因
台 21 線 87K+500 郡安橋	淤積土石沖毀橋樑	土石流發生後土石堆積
台 21 線 88K+340 上安橋	完全遭土石流掩埋	上游整治工程損毀，上安橋遭土石掩埋
台 21 線 91K+000 信義橋	第一、二跨橋面流失，水里端引道沖毀二十公尺。	橋樑淨空不足，大量土石流無法通過。
台 21 線 98K+000 十八重溪橋	第一、二、三跨橋面位移，第六跨橋面落橋。	東北側發生土石流，堵塞橋孔及掩埋橋面。
台 21 線 98K+100 陳有蘭溪橋	全部流失	上游土石流撞擊筆石溪河口對岸崩坍地後，合併陳有蘭溪主流流量，沖毀橋樑。
台 21 線 99K+900 筆石橋	第一、二跨流失。	瞬時流下大量土石流
台 21 線 103K+104 望鄉橋	第一、二跨橋面流失。	土石流發生後撞擊北側橋墩
台 21 線 113K+200-113K+700 松泉橋	橋樑全部流失	土石流及邊坡崩落
台 21 線 113K+200-113K+700 神和橋	橋樑全部流失	土石流及邊坡崩落
台 21 線 110K+300 新興橋	橋樑全部流失	上游嚴重土石流災害及湍急水流

資料來源：「七二水災災區調查與復建策略研擬」，2004。

表 3-13 七二水災期間台 21 線新中橫公路沿線災害彙整

災害地點	災害形式	受災概況
南投縣 信義鄉	洪水災害	陳有蘭溪、上安村至郡坑口 段堤防遭洪水衝擊導致潰堤
南投縣 信義鄉	洪水災害	愛國橋上游堤防遭洪水沖毀
南投縣 信義鄉	土石流災害	台 21 線豐丘明隧道端南端 沙里仙洞橋遭土石流 覆沒橋面及阻斷道路
南投縣 信義鄉	坡地災害	風櫃斗局部路段 土石崩坍阻斷道路
南投縣 信義鄉	洪水災害	十八重溪橋洪流 淘刷河床使橋墩外露
南投縣 信義鄉	洪水災害	陳有蘭溪鋼便橋遭洪水沖毀
南投縣 信義鄉	洪水災害	台 21 線筆石溪鋼便橋 遭洪水土石流沖毀
南投縣 信義鄉	洪水災害	羅娜橋產生裂縫
南投縣 信義鄉	土石流災害、 洪水災害	農富坪橋兩岸之路基均遭土 石流及洪水截斷，並造成堤 防嚴重損毀
南投縣 信義鄉	土石流災害、 洪水災害	隆華橋左岸橋台、護岸與路 基遭土石流與洪水沖毀
南投縣 信義鄉	土石流災害、 洪水災害	愛玉橋遭土石流淹沒，松 泉、神和鋼便橋遭沖毀
南投縣 信義鄉	土石流災害、 洪水災害	110 k 明隧道北端便道路基流 失
南投縣 信義鄉	土石流災害、 洪水災害	神木大橋右岸路基崩陷，愛 玉子橋左岸橋護岸損毀

資料來源：「七二水災災區調查與復建策略研擬」，2004。

台 21 線目前有 15 座跨河橋樑，基本資料如表 3-14 所示，其中各跨河橋樑歷年颱風暴雨期間之損壞災情分別說明如下：

1.壽山橋（83K+325）

民國 90 年桃芝颱風期間，壽山橋跨越之平坑溪發生土石流災情。土石流經壽山橋及附近土地公廟時開始淤積，橋樑因淨高不足導致土石堆高撞擊、磨損壽山橋，使該橋樑大樑受到損壞。

2.新安橋（83K+630）

原為台 21 線公路之路段，公路下方埋設一 3m 跨徑之箱涵用以排水，但於賀伯颱風來襲期間，該路段遭土石流撞擊作用完全沖毀，路基亦完全流失。賀伯颱風後遂興建一單跨徑橋樑，即今日新安橋。新安橋歷經碧利斯、桃芝、敏督利等颱風期間均無任何土石流災情發生，但因新安橋上游處南平坑溪集水區土石組成膠結疏鬆，未來仍有崩塌可能性，進而形成土石流材料來源，因此需密切注意。

3.郡坑橋（86K+572）

民國 85 年賀伯颱風期間，郡坑橋跨越之二廊坑溪發生土石流災情。由於橋樑淨高明顯不足，導致土石流撞擊、溢淹過橋面及道路，橋孔亦遭淤滿，甚至部分土石衝入民宅，造成嚴重災害。桃芝颱風過後，雖無發生斷橋事件，但因橋樑淨高仍不足，導致堆積在河道的土石撞擊、磨損而損及橋樑結構。

4.郡安橋（86K+901）

民國 90 年桃芝颱風過境，二廊坑溪上游支流形成土石流，土石流匯入二廊坑溪主流後，大量土砂繼續往下游運移，造成河道兩側遭受沖刷侵蝕，土石流規模更形擴大。後續遂於郡安橋上游約 500m 二廊坑溪主流彎道處，直接沖蝕淤埋郡坑村民宅，並匯入流籠坑溪堵塞、撞擊而沖毀郡安橋。

5.上安橋（87K+794）

民國 90 年桃芝颱風期間三部溪爆發嚴重土石流，上安橋橋涵遭土石流阻塞、橋面遭土石掩埋導致交通中斷，但所幸橋樑結構並未遭土石沖毀流失。

6.信義橋（89K+959）

民國 85 年賀伯颱風侵台期間，信義橋跨越之郡坑溪發生土石流，土石衝擊造成右岸 A1 橋台至 P3 橋墩之間有大量土石淤積，橋體部分預力樑與墩柱帽樑因受巨石撞擊與磨蝕作用導致鋼筋外露情形，但橋樑結構並未受損，而 P3 橋墩至左岸 A2 橋台間則為洪水流動之深槽區。民國 90 年桃芝颱風來襲再次引發郡坑溪土石流，大量土石淤積於 A1 橋台至 P3 橋墩之間，導致橋樑淨空不足並造成第一、二跨徑橋面版流失，P1 橋墩迎水面受土石撞擊致鋼筋外露，而淤積於 A1 橋台至 P3 橋墩之間土石再因洪水被挑流而攻擊左側護岸。

7.沙里仙洞橋（94K+481）

沙里仙洞橋跨越豐丘北溪（沙里仙洞溪），位於豐丘北溪（沙里仙洞溪）與陳有蘭溪匯流口。民國 90 年桃芝颱風、93 年敏督利颱風及 95 年六九暴雨期間，大量的土石流將沙里仙洞橋阻塞後從橋面越流通過，導致橋樑遭到完全淹沒。

8.十八重溪橋（97K+401）

橫跨十八重溪且距離十八重溪與陳有蘭溪匯流口約 1km，民國 85 年賀伯颱風期間，上游側十八重溪支流爆發土石流，於橋樑下方及上游形成大型沖積扇，使橋樑下方通水斷面減少，土石幾近淤滿橋孔，但未損及橋樑主體結構。民國 89 年碧利斯颱風過境，P1 至 P4 橋墩間橋孔淤塞情況較之前更為嚴重，但仍未對橋樑主結構有任何損傷。民國 90 年桃芝颱風過境，十八重溪支流再度爆發土石流，此次因沖積扇淤高並逼近橋樑樑版結構，導致土石流直接撞擊、浮托橋面版，

P3 橋墩上的二孔橋面版產生錯位傾斜，且第一、二、三橋孔有大量土石溢淤其上並堵塞橋孔。

9.陳有蘭溪橋（98K+402）

陳有蘭溪橋主要橫跨陳有蘭溪，橋址處陳有蘭溪河段恰為彎曲型河道，北側橋台位於河道凹岸，南側橋台位於河道凸岸。民國 85 年賀伯颱風北側橋台與橋基遭洪流沖刷，造成橋樑之引道、北側橋台及 P1 橋墩因側向沖刷而毀壞。民國 90 年桃芝颱風過境期間，因橋址上游側筆石溪發生土石流並匯入陳有蘭溪，造成巨石及砂礫淤積，部分土石被水流夾帶往下游側陳有蘭溪橋，造成橋墩基礎與橋面版被巨大流石撞擊毀損，橋體上部結構遭洪流沖失。

10.筆石橋（99K+117）

筆石橋橫跨筆石溪，距離筆石溪與陳有蘭溪匯口約 30m。民國 90 年桃芝颱風來襲，筆石溪中上游引發嚴重土石流，由於筆石橋址及下游河道束縮的影響，土石流加速通過橋址，造成北側橋孔上部結構遭沖毀流失，中間橋墩受土石撞擊剪裂，僅餘南側橋台及部分橋面版。

11.松泉橋、神和橋（112K+798；112K+887）

松泉橋及神和橋兩座橋樑均跨越和社溪，位於松山溪及和社溪匯口下游不遠處。民國 85 年賀伯颱風襲台期間，由於洪水及土石流交互作用，造成神和橋上游側橋台翼牆與背填土遭沖刷崩落，中間橋墩遭颱風沖刷淘空與石塊撞擊嚴重受損，至於松泉橋在此次颱風事件並無任何災損發生。民國 90 年桃芝颱風期間，和社溪上游神木村及上游各支流均爆發土石流。大量土石沿著和社溪往下游流動，其中松泉橋、神和橋恰位於土石流流動段，對橋樑主體產生浮托、磨蝕及撞擊效果，導致兩座橋樑均在此次事件中慘遭沖毀流失。

12.愛玉橋（114K+008）

愛玉橋跨越和社溪支流野溪，民國 90 年桃芝颱風及民國 93 年

敏督利颱風期間，和社溪上游神木地區爆發大量土石流往下游流動。土石流到達愛玉橋野溪匯流口時恰為過彎河段，大量土石堆積於此處並阻礙愛玉橋上游野溪所流下土石，土石逐漸淤滿並使橋址處產生土石壅高現象。壅高過程中土石流對橋底樑版浮托作用不明顯，並未造成樑版結構因土石流推移而損壞。

13.望鄉橋（103K+850）

望鄉橋橫跨陳有蘭溪及阿里不動溪匯流口，屬於阿里不動溪集水區。民國 90 年桃芝颱風來襲，阿里不動溪因豪雨發生土石流，順流而下土石撞毀望鄉橋北側 P2 橋墩，造成第二及第三跨橋面版流失。復建後的望鄉橋加長中間橋面版的跨徑，可容許更大量土石通過，但由於阿里不動溪河床堆積了相當豐富的崩積土或過去土石流的堆積物，未來豪雨期間仍有持續運移之可能，因此必須注意。

14.新興橋（109K+997）

新興橋跨越和社溪支流-三號溪，民國 85 年賀伯颱風侵襲下，大量土石流由三號溪上游集水區傾洩而下。橋樑主體和河床間淨高不足及舊有河道寬度太窄，導致大量土石無法順利通過。原本位於河道中央之 P1 橋墩遭到撞擊而損毀，第一、二跨橋面版流失，且左右兩岸受土石沖刷作用，造成 A1 橋台傾斜。民國 90 年桃芝颱風期間，因橋體淨高增加並未發生土石流直接撞擊主樑之災例。但包覆位於攻擊坡上之 P1 橋墩右側護岸及土石，因土石流沖刷而流失，所幸 P1 橋墩未遭到沖刷或是撞擊，橋樑整體在此風災期間並無發生斷橋事件。

表 3-14 台 21 線跨河橋樑結構形式表

橋樑名稱	興建/復建時間	上部結構型式	下部結構型式	橋面長度(m)	橋面淨寬(m)	橋樑跨距(m)
壽山橋 (83K+325)	72.6.1 (興建)	RCT 型樑	單柱橢圓型橋墩	41.2	7.5	1@20.6
新安橋 (83K+630)	86.8 (賀伯風災後興建)	鋼製箱型樑	無	65	9.2	1@65
郡坑橋 (86K+572)	86.9 (賀伯風災後復建) 93.5 (桃芝風災後復建)	RC 版樑	無	10	7.2	1@65
郡安橋 (86K+901)	70.6.1 (興建) 92.2.19 (桃芝風災後復建)	RCT 型樑 RCI 型樑	無	20 35	7.6 10.0	1@20 1@35
上安橋 (87K+794)	73.6.1 (興建) 92.6.17 (桃芝風災後復建)	RC 版樑 PCI 型樑	無	10 30	8.3 8.5~10.0	<u>1@8.3</u> 1@8.5~10.0
信義橋 (89K+959)	70.6.1 (興建) 92.9 (桃芝風災後復建)	PCI 型樑	無	180	7.6	6@30
沙里仙洞橋 (94K+481)	90.2.1 (興建)	PC 樑	無	15	9	1@15
十八重溪橋 (97K+401)	70.7 (興建)	RCI 型樑	單支圓柱及沈箱基礎	210	7.5	6@35
陳有蘭溪橋 (98K+402)	70.7 (興建) 87.3 (賀伯風災後復建)	RC 類-PCI 型樑	單支圓柱及沈箱基礎	175 200	7.5	5@35 2@30+4@35

表 3-14 台 21 線跨河橋樑結構形式表(續)

筆石橋 (99K+117)	70.7 (興建)	RC 類-PCT 型樑	單支圓柱及沈箱基礎	40	7.5	2@20
松泉橋 (112K+798)	71.1.8 (興建)	RC 類-PCI 型樑	單支圓柱及沈箱基礎	40	7.5	1@40
神和橋 (112K+877)	71.1.8 (興建)	RC 類-PCI 型樑	單支圓柱及沈箱基礎	40	7.5	1@40
愛玉橋 (114K+008)	72.1.12 (興建)	RC 類-PCI 型樑	無	20.2	7.5	1@20.2
望鄉橋 (103K+850)	71.4 (興建) 92.7 (桃芝風災後復建)	RC 類-PCT 型樑 RC 類-PC 箱型樑	懸臂式橋墩 及沈箱基礎	90 130	7.5 10.0	1@20+2@35 2@35+1@60
新興橋 (109K+997)	71.3 (興建) 86.10 (賀伯風災後復建)	RC 類-PCI 型樑 鋼製箱型樑	單支圓柱沈箱基礎 全套管基樁	75 100	7.5 9.5	3@25 2@20+1@60

3.1.5 土石流潛勢溪流分佈情形

依據農委會水土保持局委託財團法人成大研究發展基金會對土石流潛勢溪流歷年（1999～2000）調查結果，目前陳有蘭溪流域共有土石流潛勢溪流共 34 條，相關位置及基本屬性分別整理如圖 3-40 及表 3-15，其中高潛勢溪流佔 15 條，中潛勢溪流佔 6 條，低潛勢溪流佔 13 條。

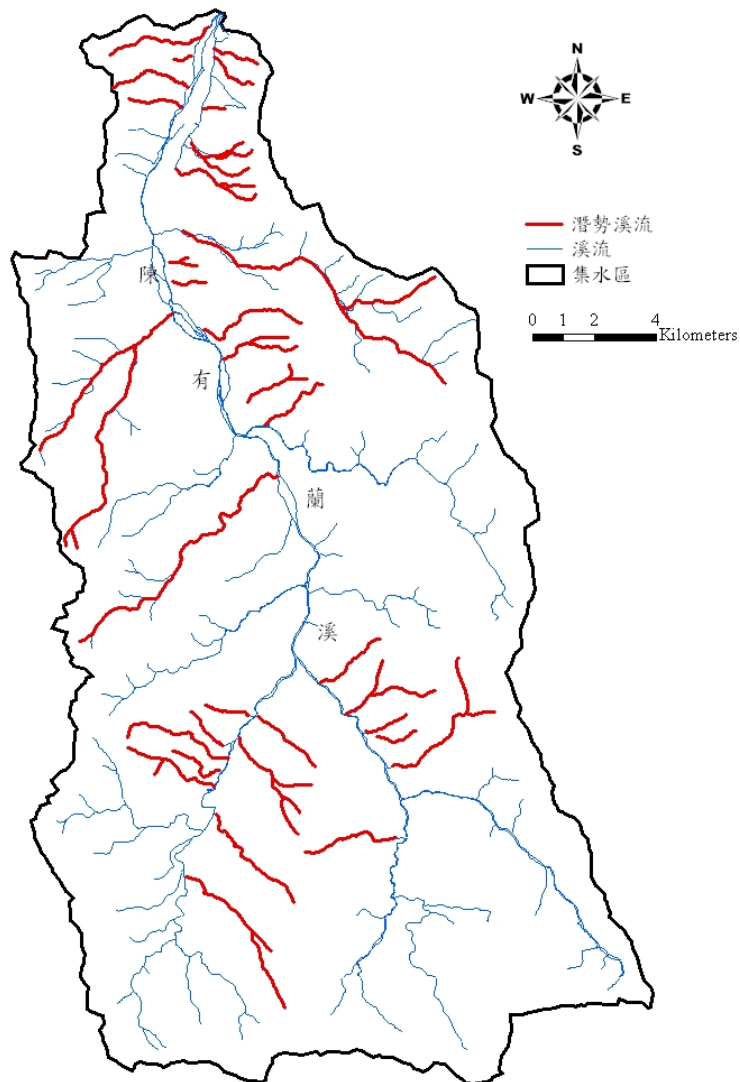


圖 3-40 陳有蘭溪流域土石流潛勢溪流分佈情形

表 3-15 陳有蘭溪流域土石流潛勢溪流基本屬性

土石流 編號	X 座標	Y 座標	鄉鎮	村里	溪流 潛勢	溪流名稱	溪流長度 (m)	集水面積 (ha)	有效面積 (ha)	地質
南投 025	235741	2629642	水里鄉	新山村	中	陳有蘭溪支流	1440.0	103.0	82.0	古第三紀變質岩
南投 026	234520	2623714	信義鄉	明德村	中	郡坑溪	11130.0	3069.0	688.0	古第三紀變質岩
南投 027	235199	2620610	信義鄉	豐丘村	低	陳有蘭溪支流	4673.0	387.0	179.0	古第三紀變質岩
南投 028	235780	2619732	信義鄉	豐丘村	低	陳有蘭溪支流	2673.0	193.0	181.0	古第三紀變質岩
南投 029	236644	2618531	信義鄉	豐丘村	高	陳有蘭溪支流	1929.0	162.0	162.0	古第三紀變質岩
南投 030	237068	2617595	信義鄉	豐丘村	低	十八重溪	2307.0	208.0	208.0	古第三紀變質岩
南投 031	238980	2609284	信義鄉	豐丘村	低	陳有蘭溪支流	2498.0	182.0	166.0	古第三紀變質岩
南投 032	240117	2608436	信義鄉	豐丘村	低	陳有蘭溪支流	3129.0	556.0	556.0	古第三紀變質岩
南投 033	241429	2607353	信義鄉	豐丘村	高	陳有蘭溪支流	1457.0	143.0	111.0	古第三紀變質岩
南投 034	242139	2606771	信義鄉	豐丘村	高	陳有蘭溪支流	5256.0	811.0	703.0	古第三紀變質岩
南投 035	240543	2604211	信義鄉	東埔村	低	烏乾坑溪	2388.0	263.0	114.0	新第三紀沈積岩
南投 036	236587	2606805	信義鄉	神木村	低	和社溪支流(頭坑)	3001.0	427.0	356.0	新第三紀沈積岩
南投 037	234501	2606085	信義鄉	神木村	低	和社溪支流(四號溪)	2738.0	230.0	208.0	新第三紀沈積岩
南投 038	235394	2606789	信義鄉	神木村	高	和社溪支流(三號溪)	3770.0	311.0	161.0	新第三紀沈積岩
南投 039	235527	2607294	信義鄉	神木村	中	和社溪支流(二號溪)	1296.0	52.0	52.0	新第三紀沈積岩
南投 040	236571	2608149	信義鄉	同富村	高	和社溪支流(一號溪)	1509.0	163.0	163.0	新第三紀沈積岩
南投 065	232494	2629825	水里鄉	興隆村	低	陳有蘭溪支流	3084.0	349.0	115.0	新第三紀沈積岩
南投 066	234156	2628725	水里鄉	興隆村	低	陳有蘭溪支流	2492.0	201.0	41.0	新第三紀沈積岩
南投 067	232641	2628124	水里鄉	興隆村	低	陳有蘭溪支流	1622.0	113.0	69.0	新第三紀沈積岩
南投 068	235622	2629355	水里鄉	新山村	高	陳有蘭溪支流	1684.0	148.0	108.0	古第三紀變質岩
南投 069	234685	2626755	水里鄉	郡坑村	高	陳有蘭溪支流	1871.0	158.0	96.0	古第三紀變質岩
南投 070	234685	2626755	水里鄉	上安村	高	陳有蘭溪支流	2423.0	105.0	59.0	古第三紀變質岩

表 3-15 陳有蘭溪流域土石流潛勢溪流基本屬性(續)

土石流 編號	X 座標	Y 座標	鄉鎮	村里	溪流 潛勢	溪流名稱	溪流長度 (m)	集水面積 (ha)	有效面積 (ha)	地質
南投 071	234408	2625719	水里鄉	上安村	高	陳有蘭溪支流	2442.0	334.0	147.0	古第三紀變質岩
南投 072	233968	2621103	信義鄉	自強村	高	陳有蘭溪支流	9244.0	2370.0	690.0	新第三紀沈積岩
南投 073	236542	2615469	信義鄉	羅娜村	高	陳有蘭溪支流	8913.0	1784.0	187.0	新第三紀沈積岩
南投 074	237435	2607726	信義鄉	同富村	低	陳有蘭溪支流	1821.0	152.0	223.0	新第三紀沈積岩
南投 075	235584	2604455	信義鄉	同富村	高	陳有蘭溪支流	4209.0	674.0	398.0	新第三紀沈積岩
南投 076	234517	2602913	信義鄉	神木村	高	陳有蘭溪支流	5755.0	863.0	524.0	新第三紀沈積岩
南投 A087	235097	2627860	水里鄉	新山村	高	郡坑溪	1572.0	51.0	51.0	古第三紀變質岩
南投 A110	235568	2606371	信義鄉	神木村	高	陳有蘭溪支流	2193.0	83.0	28.0	新第三紀沈積岩
南投 A117	234365	2629377	水里鄉	興隆村	低	柑子林	442.45	7.43	7.43	新第三紀沈積岩
南投 A120	234216	2622855	信義鄉	明德村	中	陳有蘭溪下流	602.08	35.40	35.46	古第三紀亞變質岩
南投 A121	234337	2622149	信義鄉	明德村	中	內茅埔溪	861.0	56.0	56.0	古第三紀亞變質岩

3.1.6 土石流臨界降雨特性

根據水保局(2003)委辦計劃研究成果，蒐集 24 篇國內外探討土石流發生降雨警戒值模式的相關文獻，如表 3-16 所示。經過歸納分類後，對於土石流發生之臨界降雨特性研究上，主要分為五個部分進行探討，說明如下。

表 3-16 國內外關於土石流發生降雨特性之相關研究文獻

	相關文獻	篇數
國內	謝正倫(1995,2000)、江永哲與林啟源(1991)、范正成與姚正松(1997)、陳晉琪(2000)、黃俊耀(2000)、姚善文(2001)、范正成(1999,2001)、詹錢登(2002)	10
	相關文獻	篇數
國外	Caine(1980)、Cannon-Ellen(1985)、Wieczorek(1987)、Keefer(1987)、Marchi(2000)、Wilson(1997) 青木佑久(1980)、瀨尾克美與橫部幸裕(1978)、瀨尾克美與船崎昌繼(1972)、川上浩(1981)、網干(1972)、吳積善(1990)、譚萬沛(1991)、孟河清(1991)	14

資料來源：「以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定」，水土保持局，2003。

1. 降雨參數定義

常用的降雨參數指標包括降雨強度 I 、降雨延時 T 、及前期降雨量 P ，而降雨參數的定義會因研究者的不同定義而異。如表 3-17 所示。

表 3-17 不同定義之降雨參數指標

降雨參數指標	相 關 定 義
降雨強度 I	十分鐘降雨強度 I_{10} 、一小時降雨強度 I_{60} 、當日降雨強度 I_d 、有效降雨強度 I_e 、一場降雨之平均降雨強度 I
累積雨量 R	本次累積雨量 R 、本次有效累積雨量 R_e 、4 小時累積雨量 R_{4hrs} 、總有效累積雨量 R_{te}
降雨延時 T	有效降雨延時 T_e 、一場降雨之降雨延時 T
前期降雨量 P	發生當日前 7 天之有效累積雨量 P_7 發生當日前 14 天之累積雨量 PR_{14} 發生當日前 14 天之有效累積雨量 P_{14} 發生當日前 20 天之有效累積雨量 P_{20} 發生當日 10 分鐘激發雨量前至降雨開始的累積雨量 P_0

資料來源：「以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定」，水土保持局，2003。

2. 降雨模式分類

依據前人在降雨參數上選定的不同，土石流發生降雨模式大致上可區分為五種：第一種是以降雨強度 I 及累積雨量 R 為模式應用指標 (I - R 模式)；第二種是以降雨強度 I 及降雨延時 T 為模式應用指標 (I - T 模式)；第三種是以累積雨量 R 及降雨延時 T 為應用指標 (R - T 模式)；第四種是以降雨強度 I 及前期降雨量 P_0 (I - P_0 模式)；第五種是以其它降雨參數為模式應用指標決定土石流發生臨界降雨線(詹錢登與李明熹，2004)，各類參考文獻如表 3-18 所示。

表 3-18 各種土石流降雨警戒值模式類型相關文獻

模式類型	相關定義
I-R	謝正倫(1995,2000)、江永哲與林啟源(1991)、范正成與姚正松(1997)、瀨尾克美與橫部幸裕(1978)、川上浩(1981)、譚萬沛(1991)、孟河清(1991)
I-T	陳晉琪(2000)、黃俊耀(2000)、姚善文(2001)、Caine(1980)、Cannon-Ellen(1985)、Wieczorek(1987)、Keefer(1987)、Marchi(2000)
R-T	范正成(1999,2001)、青木佑久(1980)
I-P	網干(1972)、吳積善(1990)
其他	瀨尾克美與船崎昌繼(1972)、Wilson(1997)

資料來源：「以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定」，水土保持局，2003。

3.前期降雨量考量

因過去部分研究指出，當場降雨量為土石流之激發因素，前期降雨量則為土石流形成之潛在因素。前期降雨量的多寡，影響堆積物質之含水狀況，進而影響激發土石流所需之降雨量之多寡。因此造成有效累積雨量的計算方式有兩種：一種是不考量前期降雨量，只單獨計算當場降雨的有效累積雨量；另一種則將前期降雨量乘上一權重值加上當場降雨量的有效累積雨量。表為計算有效累積雨量，考量前期降雨之情形，表 3-19 為各種前期降雨量之計算方法

表 3-19 土石流發生降雨警戒參數計算有無考量前期降雨量

有無考慮 前期降雨量	相關文獻
有	譚萬沛(1991)、孟河清(1991)、謝正倫(1995, 2000) 網干(1972)、吳積善(1990)、詹錢登(2002)
無	瀨尾克美與船崎昌繼(1973)、范正成與姚正松(1997)、瀨尾克美與橫部幸裕(1978)、江永哲與林啟源(1991)、Caine(1980)、Cannon-Ellen(1985)、Wieczorek(1987)、Keefer(1987)、Marchi(2000)、陳晉琪(2000)、黃俊耀(2000)、姚善文(2001)、青木佑久(1980)、范正成(1999,2001)

資料來源：「以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定」，水土保持局，2003。

4.雨場分割方法

降雨事件是大大小小的不連續事件組合而成，因此在計算各種降雨參數前，首先須先對一場連續降雨做定義(即對降雨事件進行雨場分割)。根據前人之研究結果(如表 3-20 所示)，歸納出六種雨場分割方法，相關說明如下：

方法一：連續降雨過程，其前後連續 24 小時均無降雨，如圖 3-41(a) 所示。

方法二：連續降雨過程，其前後連續 12 小時均無降雨，如圖 3-41(b) 所示。

方法三：連續降雨過程中，以時雨量大於 4 mm 即為有效降雨時間之開始，而以時雨量連續 3 小時均小於 4 mm 之開始點為有效降雨結束處。將有效降雨開始與結束之間視為一場有效連續降雨(其中延時為當場降雨之有效降雨延時，累積雨量為當場降雨之有效累積雨量)，如圖 3-41(c)所示。

方法四：連續降雨過程中，以前 24 小時累積雨量達 10 mm 處為有效降雨之開始，而以其後 24 小時累積雨量低於 10 mm 之開始點為有效降雨結束處。將有效降雨開始與結束之間視為一場有效連續降雨(其中延時為當場降雨之有效降雨延時，累積雨量為當場降雨之有效累積雨量)，如圖 3-41(d)所示。

方法五：針對方法三降雨延時估算過短的缺點改善之，將門檻值從 3 小時修正為 6 小時。一場連續降雨的過程中，以時雨量大於 4 mm 為有效降雨時間之開始，而以時雨量連續 6 小時均小於 4 mm 處為有效降雨的結束。將有效降雨開始到結束視為一場有效連續降雨，如圖 3-41(e)所示。

方法六：針對方法四降雨延時估算稍長的缺點改善之，將門檻值從 24 小時縮短至 12 小時。一場連續降雨的過程中，以前 12 小時累積雨量達 10 mm 處為有效降雨之開始，而以其後 12 小時累積雨量低於 10 mm 處為有效降雨的結束。將有效降雨開始至結束視為一場有效連續降雨，如圖 3-41(f)所示。

表 3-20 各種雨場分割方法曾經使用過之學者

雨場分割	相關文獻
方法一	陸源忠(1995)、謝正倫等人(1995, 2000)、陳晉琪(2000)
方法二	譚萬沛(1999)
方法三	陸源忠(1995)、謝正倫等人(1995, 2000)、江永哲與林啟源(1991)黃俊耀(2000)、瀨尾克美與船崎昌繼(1973)
方法四	范正成(1999, 2001)

註：陸源忠(1995)、謝正倫等人(1995, 2000) 的雨場分割方法乃採用方法一及方法三之綜合

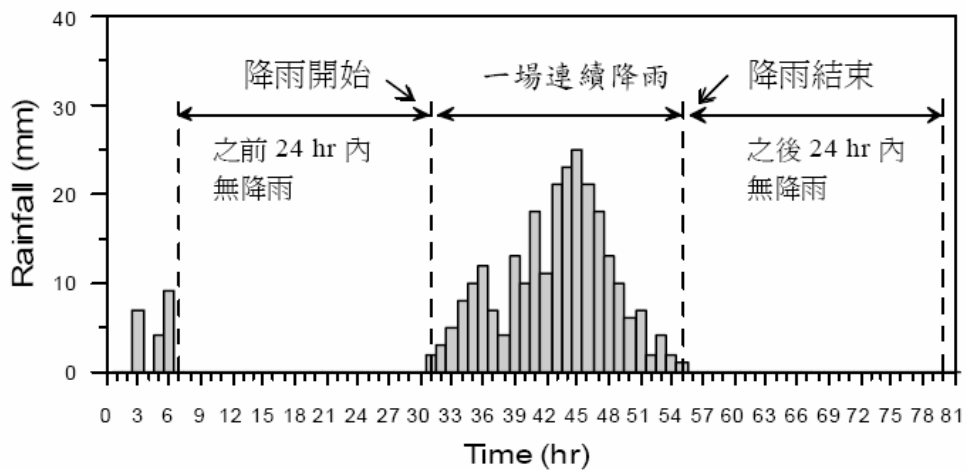


圖 3-41(a) 方法一：前後 24 小時以上無降雨之一場連續雨量示意圖

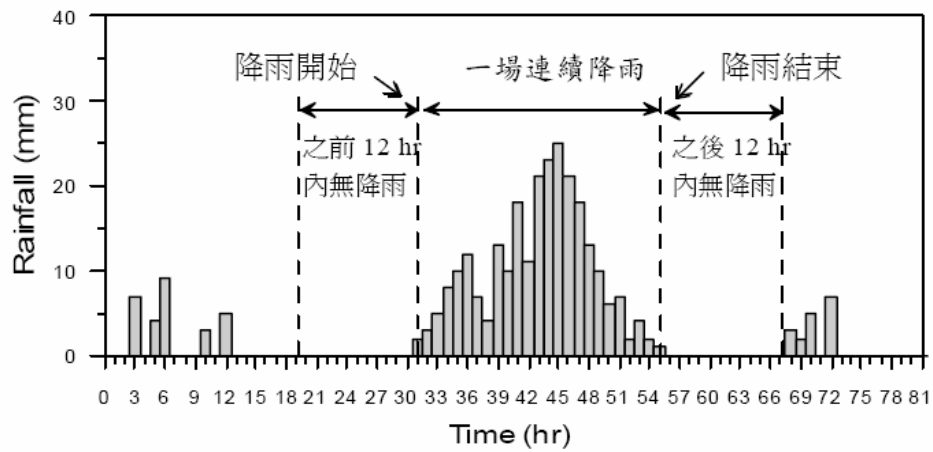


圖 3-41(b) 方法二：前後 12 小時以上無降雨之一場連續雨量示意圖

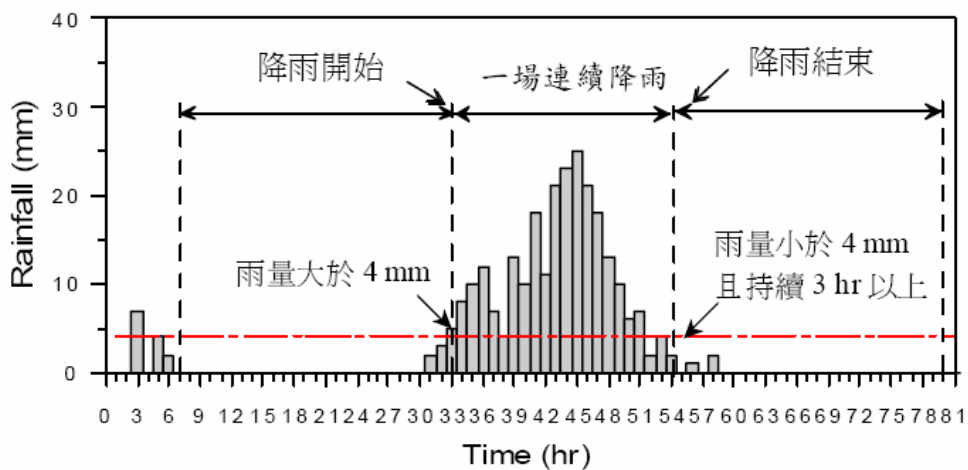


圖 3-41(c) 方法三：以雨量為 4mm-3hr 為基準之一場連續降雨示意圖

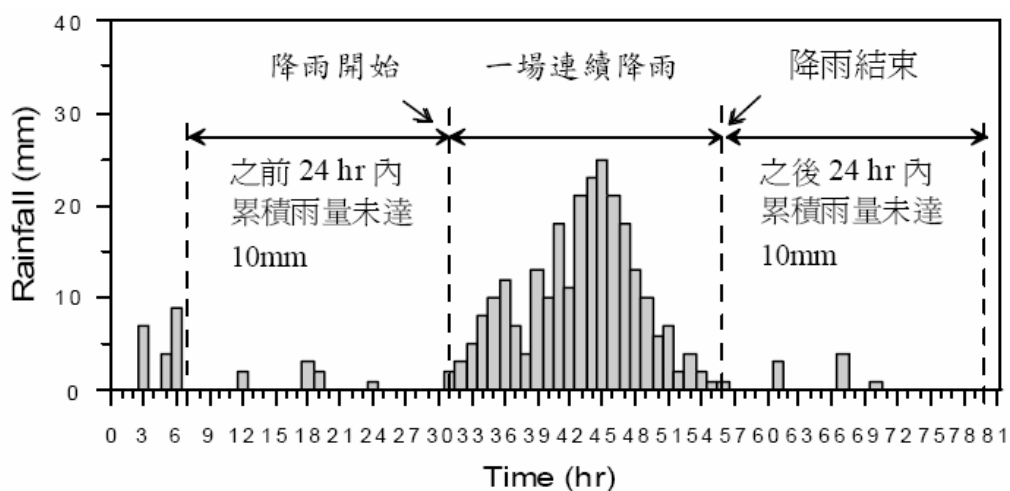


圖 3-41(d) 方法四：以雨量為 10mm-24hr 為基準之一場連續降雨示意圖

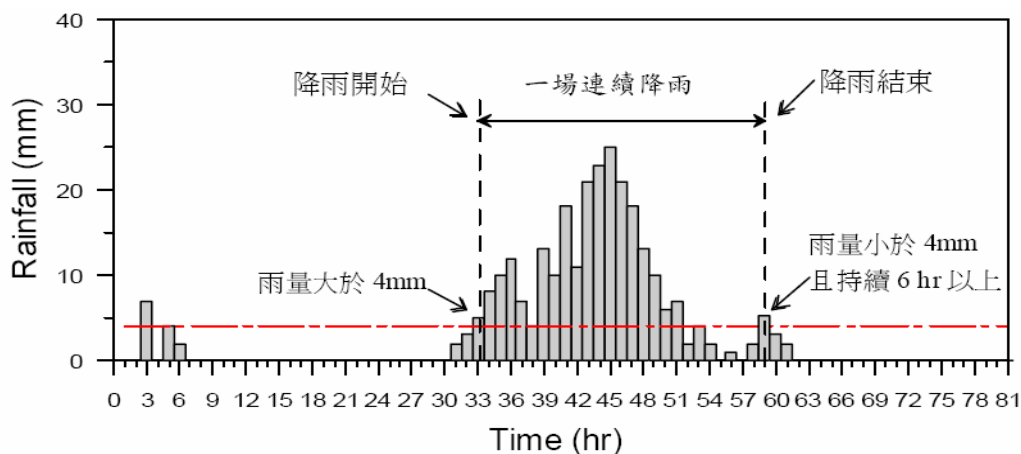


圖 3-41(e) 方法五：以雨量為 4mm-6hr 為基準之一場連續降雨示意圖

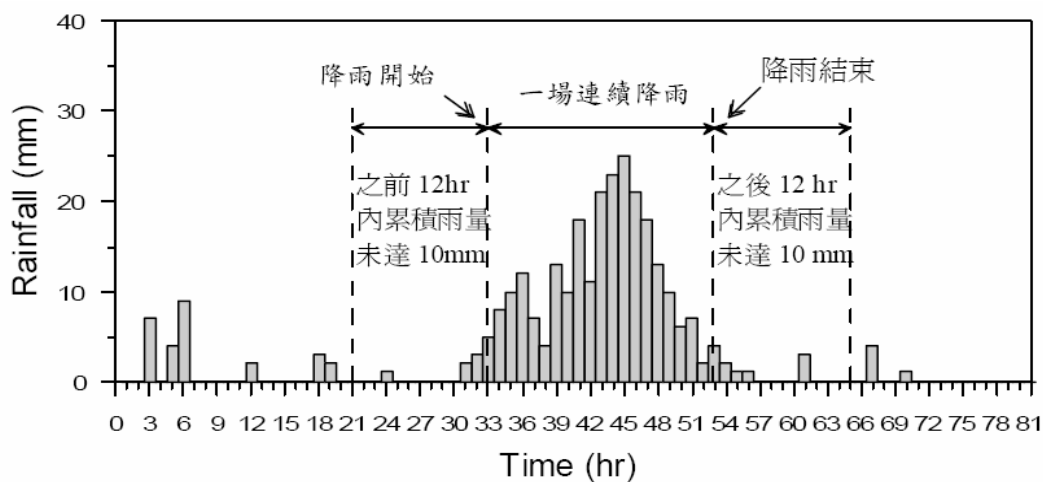


圖 3-41(f) 方法六：以雨量為 10mm-12hr 為基準之一場連續降雨示意圖

5.警戒區劃分

根據水保局(2003)委辦計劃研究成果，過去前人採用警戒分區方法如表 3-21 所示，在土石流發生警戒區域劃分方式大致可歸納為三種類型：1、單線法；2、雙線法及三線法等三種方式，說明如下：

單線法：以兩個降雨參數為指標，建立一條臨界降雨線，將區域分為土石流不發生區(無災區)與土石流發生區(災害區)，如圖 3-42(a)所示。

雙線法：以使用兩個降雨參數指標，劃定一條臨界降雨線及一條受災線，將

區域分為土石流不發生區(無災區)、小規模土石流發生區(小災區)及大規模土石流發生區(大災區)，如圖 3-42(b)所示。

三線法：以兩個降雨參數指標，劃定一條警戒基準線、一條避難基準線及一條臨界降雨線，將區域分為土石流不發生區(無災區)與土石流發生區(災害區)。而無災區又分為三個區域：警戒基準線以下的安全區、警戒基準線與避難基準線間的警戒區及避難基準線與臨界降雨線間之避難區，如圖 3-42(c)所示。

表 3-21 各種警戒區劃分方法

警戒線	警戒區劃分	作者
單線法	土石流不發生區 (無災區) 土石流發生區 (災害區)	Caine (1980)、Cannon-Ellen (1985)、Keefer et al.(1987)、 Wieczorek (1987)、Wilson (1997)、Deglunuti-Marchi (2000)、瀨尾克美與船崎昌繼(1973)、青木佑久(1980)、 譚萬沛(1991)、孟河清(1991)、江永哲與林啟源(1991)、 陸源忠(1995)、范正成與姚正松(1997)、陳晉琪(2000)、 黃俊耀(2000)、姚善文(2001)、范正成(1999, 2001)
雙線法	土石流不發生區 (無災區) 土石流發生區 (小災區) (大災區)	網干壽夫(1972)、吳積善(1990)
三線法	土石流不發生區 (安全區) (警戒區) (避難區) 土石流發生區 (災害區)	瀨尾克美與橫部幸裕(1978)、 謝正倫(1995, 2000)

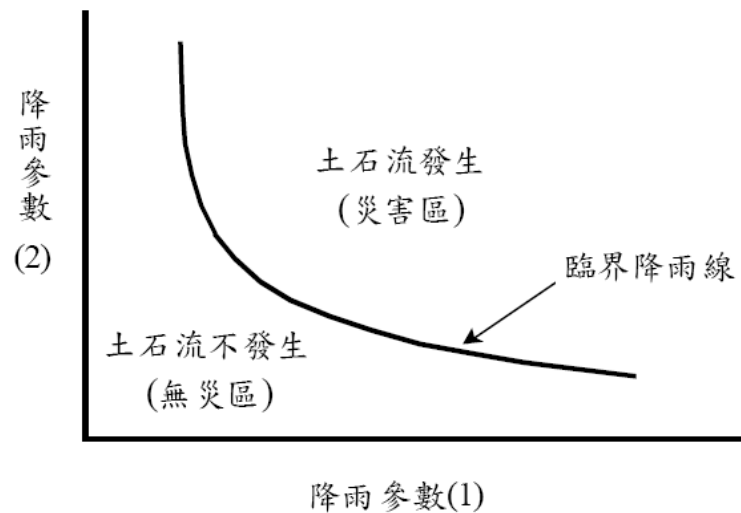


圖 3-42(a) 土石流發生降雨警戒區單線法劃定示意圖

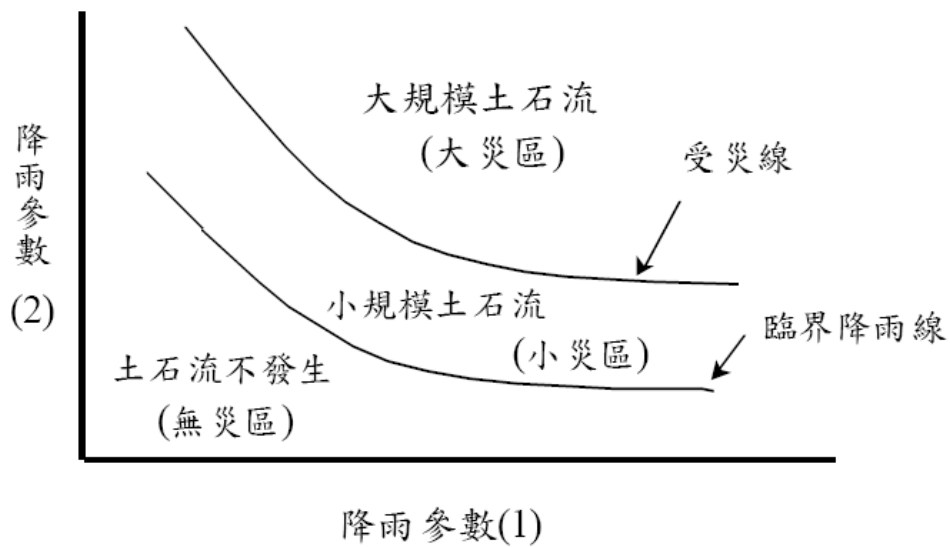


圖 3-42(b) 土石流發生降雨警戒區雙線法劃定示意圖

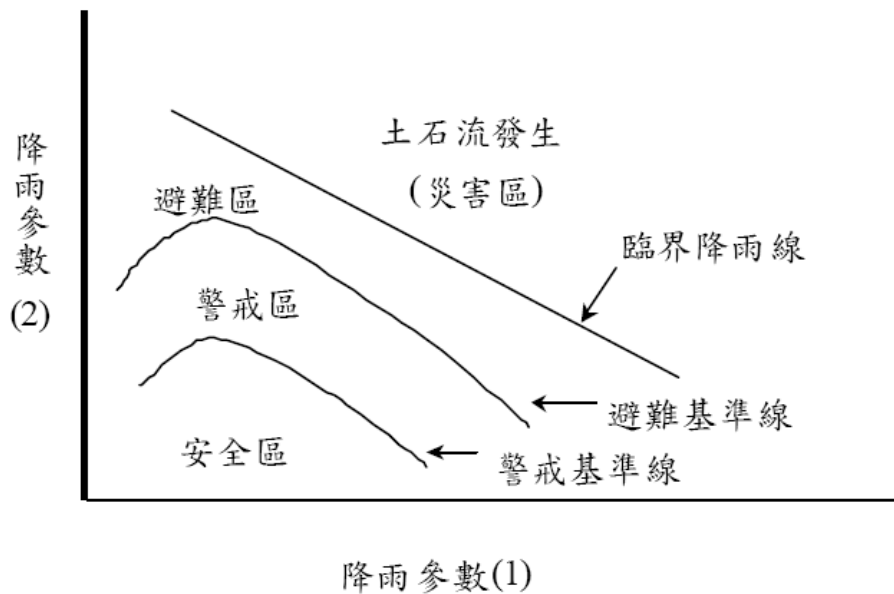
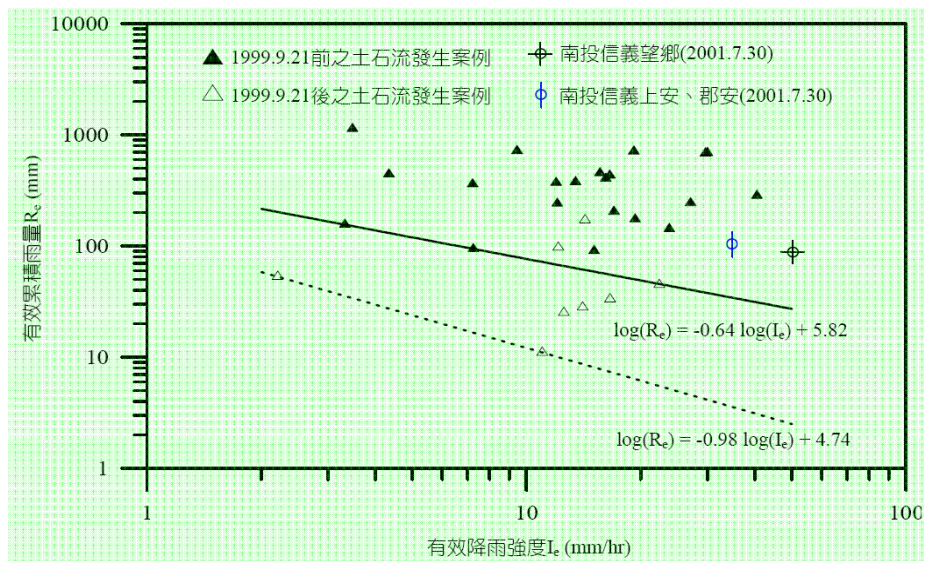


圖 3-42(c) 土石流發生降雨警戒區三線法劃定示意圖

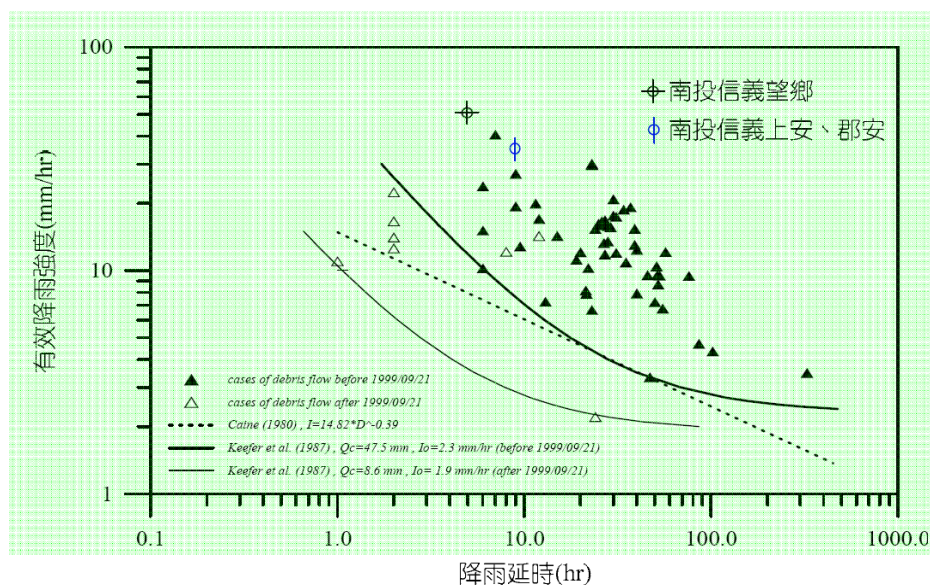
臺灣地區土石流發生的有效降雨強度大小在地震前後雖然仍集中於 10~20 mm/hr 之間，變化不大；但是土石流發生的有效累積雨量在地震前後則有明顯的改變，亦即發生土石流的有效累積雨量於地震後有降低的趨勢(交通部公路總局，2005)，如圖 3-43 所示。



資料來源：「台 21 線等公路橋樑歷年颱洪土石流冲刷災害復建資料編撰」，交通部公路總局

圖 3-43 臺灣地區歷年來土石流發生有效累積雨量和有效降雨強度關係圖

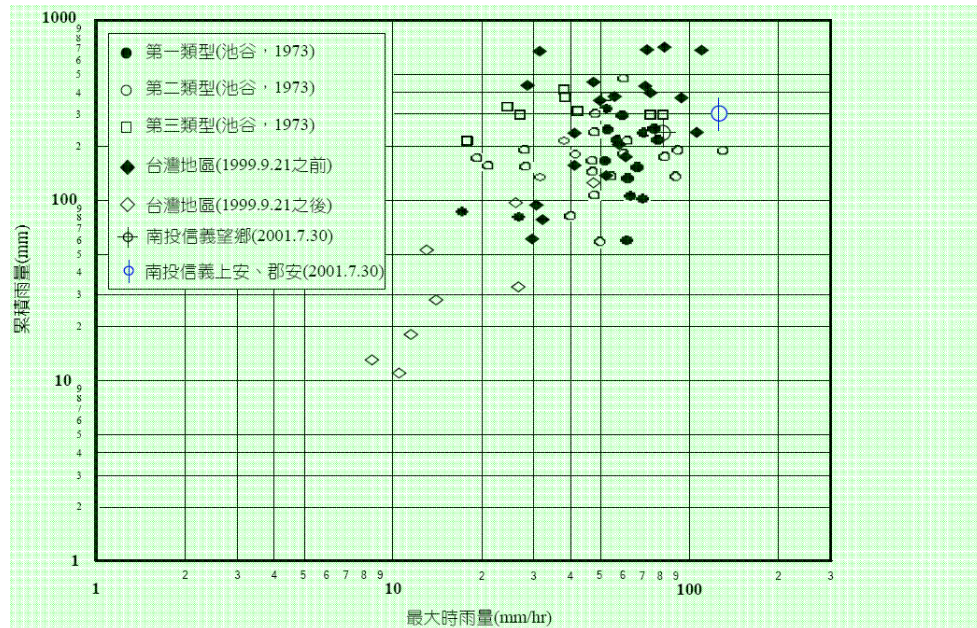
進一步根據圖 3-44 之降雨延時及有效降雨強度關係可知，921 集集大地震後土石流發生案例延時大部分降低至 12 小時以下，更有幾場土石流的降雨延時僅有 2 小時便發生土石流。921 地震後之中部山區，土壤受到地震地表加速度之影響而更鬆散，土石流發生所需的臨界水量大幅降低，亦即在一般的降雨條件下就會有發生土石流的可能。



資料來源：「台 21 線等公路橋樑歷年颱洪土石流冲刷災害復建資料編撰」，交通部公路總局

圖 3-44 臺灣地區歷年土石流發生之有效降雨強度和降雨延時關係圖

此外，若由圖 3-45 可知臺灣地區在 921 地震前所發生的土石流與日本地區所發生的土石流累積雨量與最大時雨量相差不大；其中最大時雨量超過 30 mm 居多，累積雨量則以 100 mm 以上佔多數，且有部份案例之累積雨量遠高於日本地區。但在 921 地震後，累積雨量與最大時雨量明顯下降。特別在中部山區，發生土石流時之最大時雨量大部分小於 30 mm，累積雨量大多數小於 50 mm。



資料來源：「台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰」，交通部公路總局

圖 3-45 臺灣與日本地區土石流發生最大時雨量與累積雨量比較圖

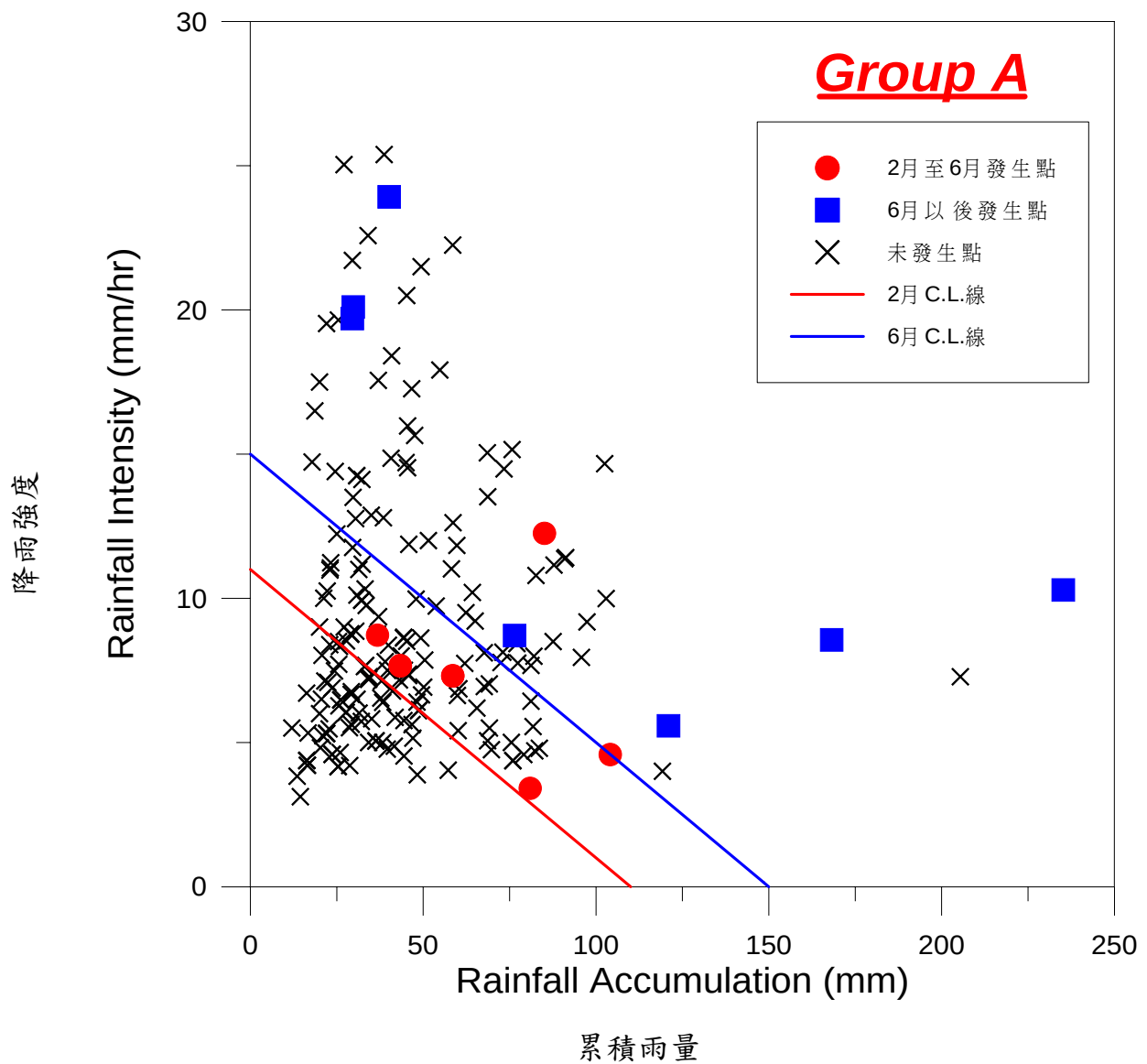
依水保局（2001）委辦計畫之研究成果顯示，降雨特性中以累積雨量及降雨強度兩者對土石流發生與否影響最大。本計畫蒐集、整理歷年南投地區相關土石流發生期間之颱風暴雨降雨特性，如表 3-22 顯示在本區土石流發生於 921 集集大地震發生前具有以下特性：

- (1) 土石流發生降雨型態以颱風降雨佔據大部分。
- (2) 不考量前期降雨影響下，土石流發生時的累積雨量有 80% 超過 150 mm。
- (3) 土石流發生時的降雨延時 50% 超過 12 小時。
- (4) 土石流發生時的平均降雨強度均大於 10 mm/hr。

表 3-22 歷年南投地區土石流發生期間之颱風暴雨降雨特性分析

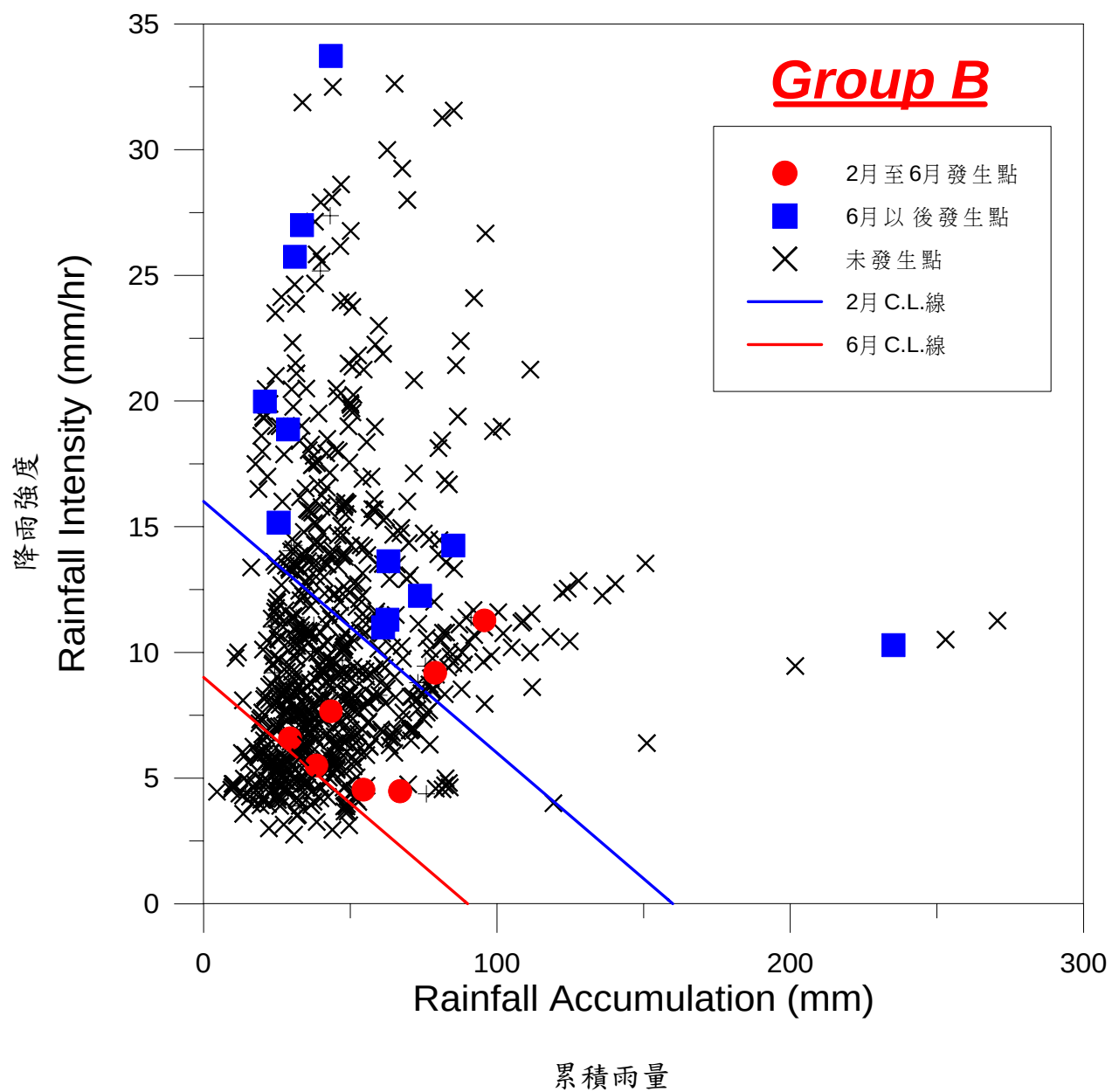
編號	發生地點	發生時間	降雨型態	前期降雨量 (mm)	累積雨量 (mm)	有效累積雨量 (mm)	降雨延時 (hr)	有效降雨強度 (mm/hr)	最大時雨量 (mm/hr)
1	南投信義豐丘	74/08/23	尼爾森颱風	7.6	236	243.6	9	27.1	41
2	南投信義豐丘	75/08/22	韋恩颱風	0.1	204	204.1	12	17.0	58
3	南投縣溪頭	78/09/12	豪雨	---	377	377	28	13.5	56
4	南投信義豐丘	85/08/01	賀伯颱風	4.1	685	689.1	23	30.0	72
5	南投信義神木	85/08/03	降雨	205.3	78	283.3	7	40.5	32
6	南投信義神木	88/07/20	降雨	5.7	137	142.7	6	23.8	52.5
7	南投埔里	89/07/01	降雨	0.2	33	33.2	2	16.6	26.5
8	南投水里郡坑	89/07/20	降雨	7.1	18	25.1	2	12.6	11.5
9	南投鹿谷茅埔	89/07/20	降雨	16.8	28	44.8	2	22.4	14
10	南投信義神木	89/07/21	降雨	15.1	13	28.1	2	14.1	8.5
11	南投信義神木	89/07/22	降雨	---	11	11	1	11.0	10.5
12	南投信義神木	89/08/04	降雨	---	53	53	24	2.2	13
13	南投仁愛合作	89/08/23	碧利斯颱風	---	97	97	8	12.1	26
14	南投信義望鄉	90/07/30	桃芝颱風	---	219	219	5	43.8	77
15	南投信義神木村	90/07/30	桃芝颱風	---	407.5	407.5	10	40.8	91.5
16	南投信義和社	90/07/30	桃芝颱風	---	175.5	175.5	8	21.9	66.5
17	南投信義	90/07/30	桃芝颱風	---	308	308	10	30.8	125.5
18	南投鹿谷溪頭	90/07/30	桃芝颱風	---	242.5	242.5	9	26.9	61.0
19	南投信義望鄉	93/07/04	敏督利颱風	---	695.0	695.0	60	11.6	82.5
20	南投信義神木村	93/07/03	敏督利颱風	---	481	481	20	24.1	72.5
21	南投信義和社	93/07/03	敏督利颱風	---	725.0	725.0	49	14.8	62.5
22	南投信義	93/07/03	敏督利颱風	---	568.0	568.0	49	11.6	66
23	南投鹿谷溪頭	93/07/03	敏督利颱風	---	687.0	687.0	48	14.3	58.5

其次，該研究報告於 921 集集大地震後，針對中部地區土石流危險溪流以地質因子、地文因子及崩塌因子等三部分進行統計，並將性質相近之潛勢溪流建立群集加以分析。經由統計資料之率定及檢驗，並透過各群集中潛勢溪流發生與否之檢驗，劃分由民國 89 年 2 月至 6 月及 89 年 6 月至 90 年間，各群集之土石流發生臨界降雨線分佈情形，如圖 3-46 所示。從圖 3-46 (a) ~3-46 (h) 中可明顯發現，在民國 89 年二月至六月，各群集之 C.L.線遠比六月以後之 C.L.線為低，表示 921 地震效應對土石流發生臨界線之影響會漸漸隨時間降低。此外，表 3-23 為民國 89 年 6 月至 90 年間，南投地區不同鄉鎮土石流發生臨界降雨量之差異變化。



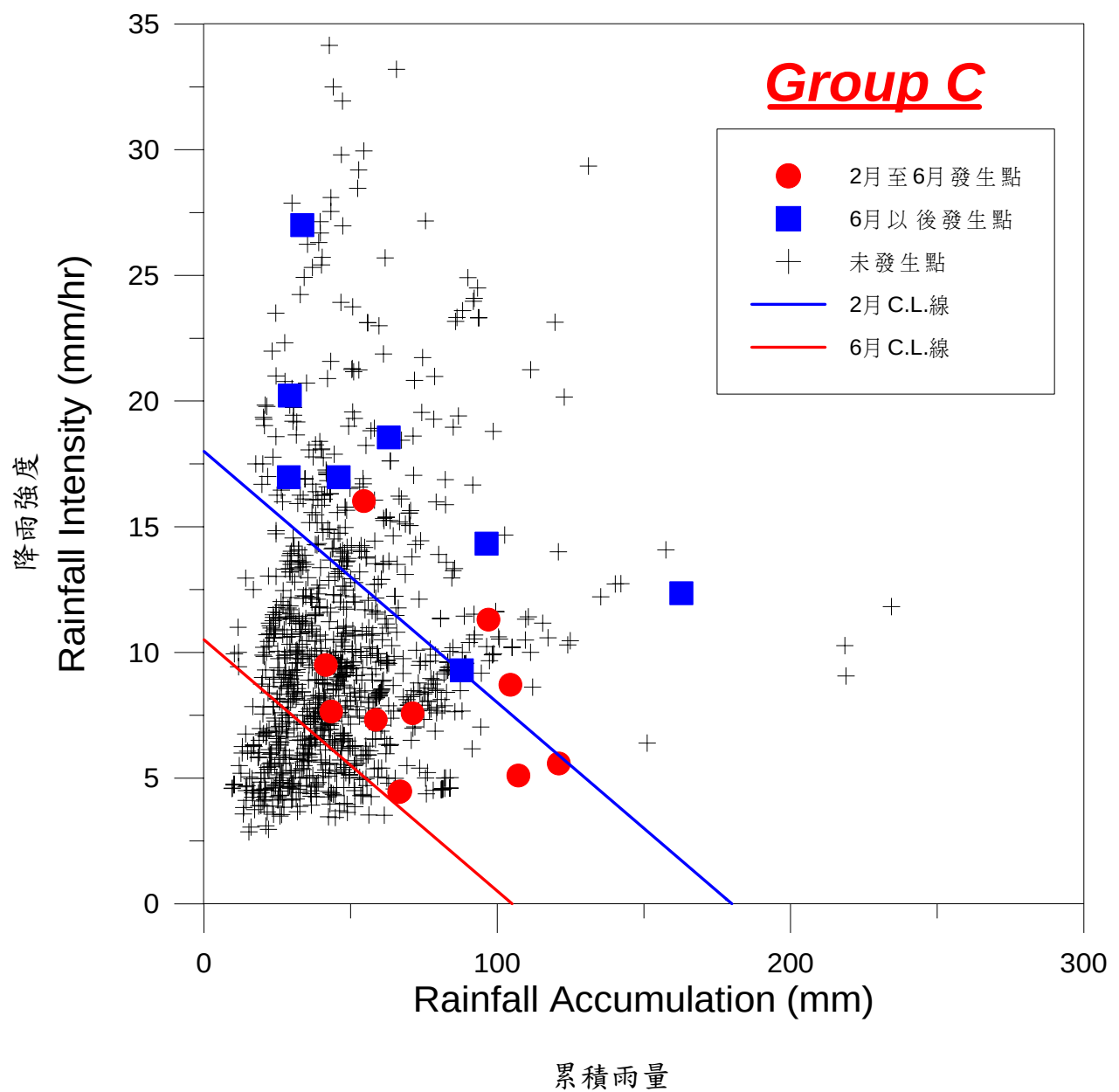
資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(a) 群集 A 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)



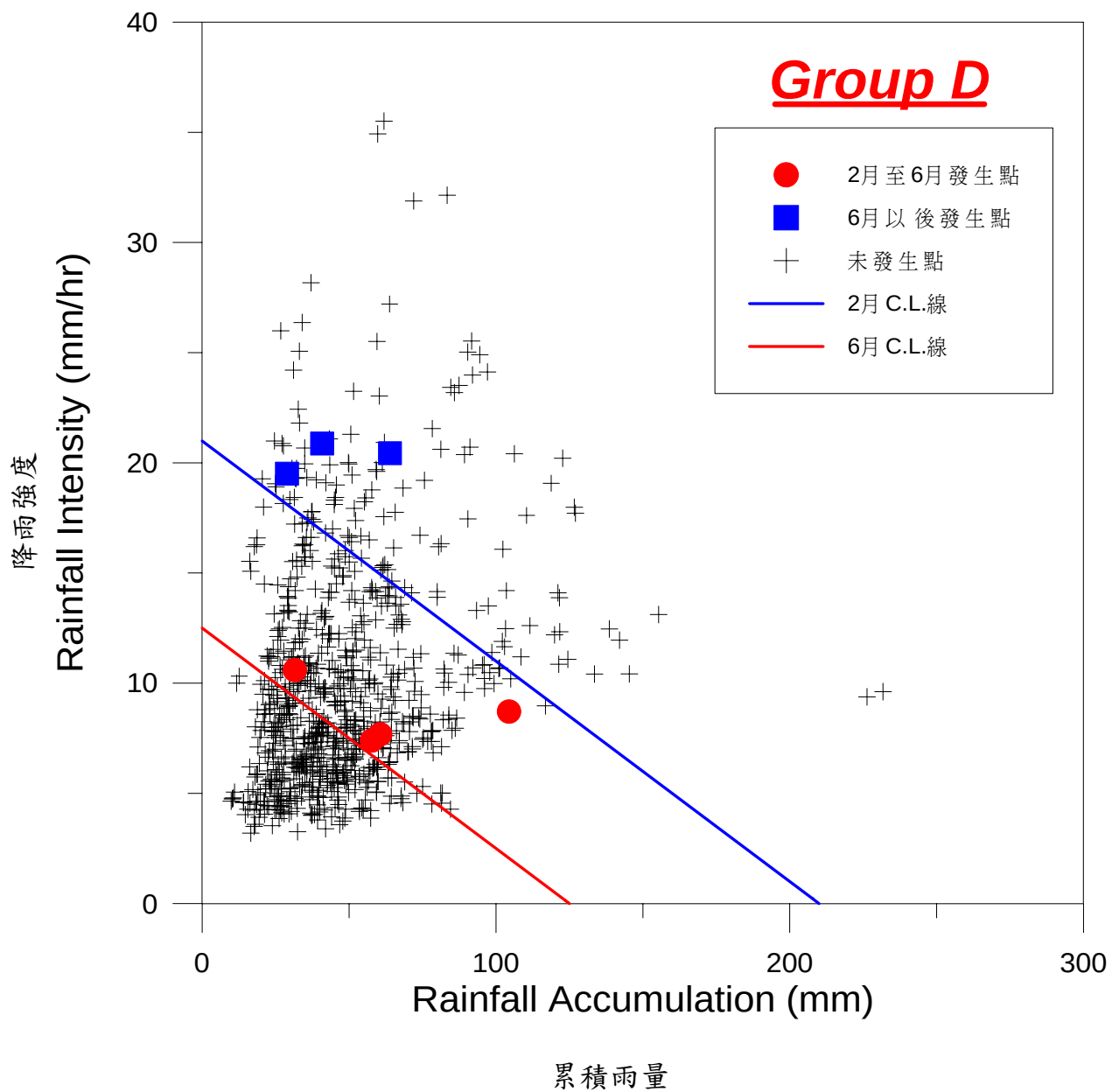
資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(b) 群集 B 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)



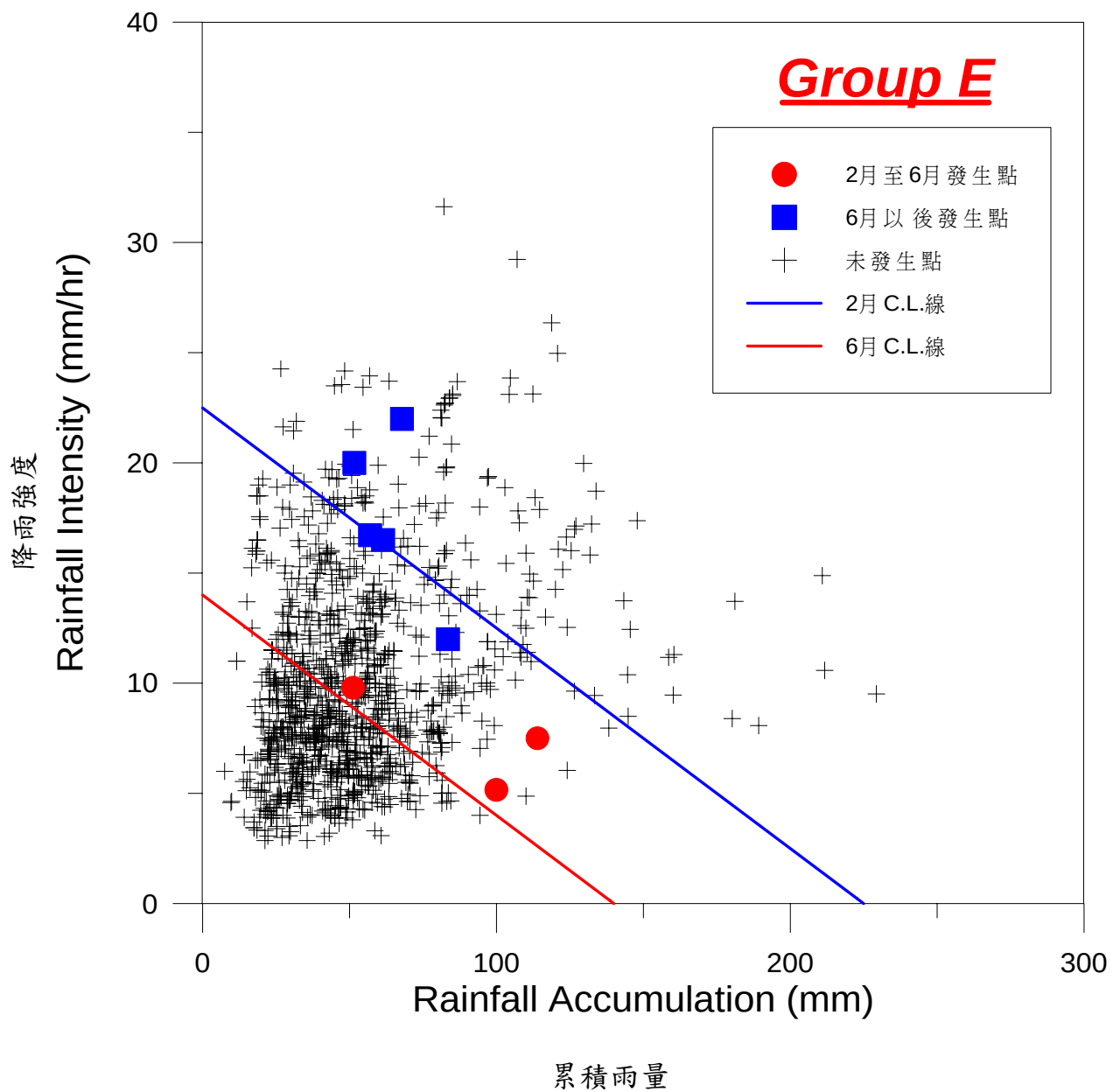
資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(c) 群集 C 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)



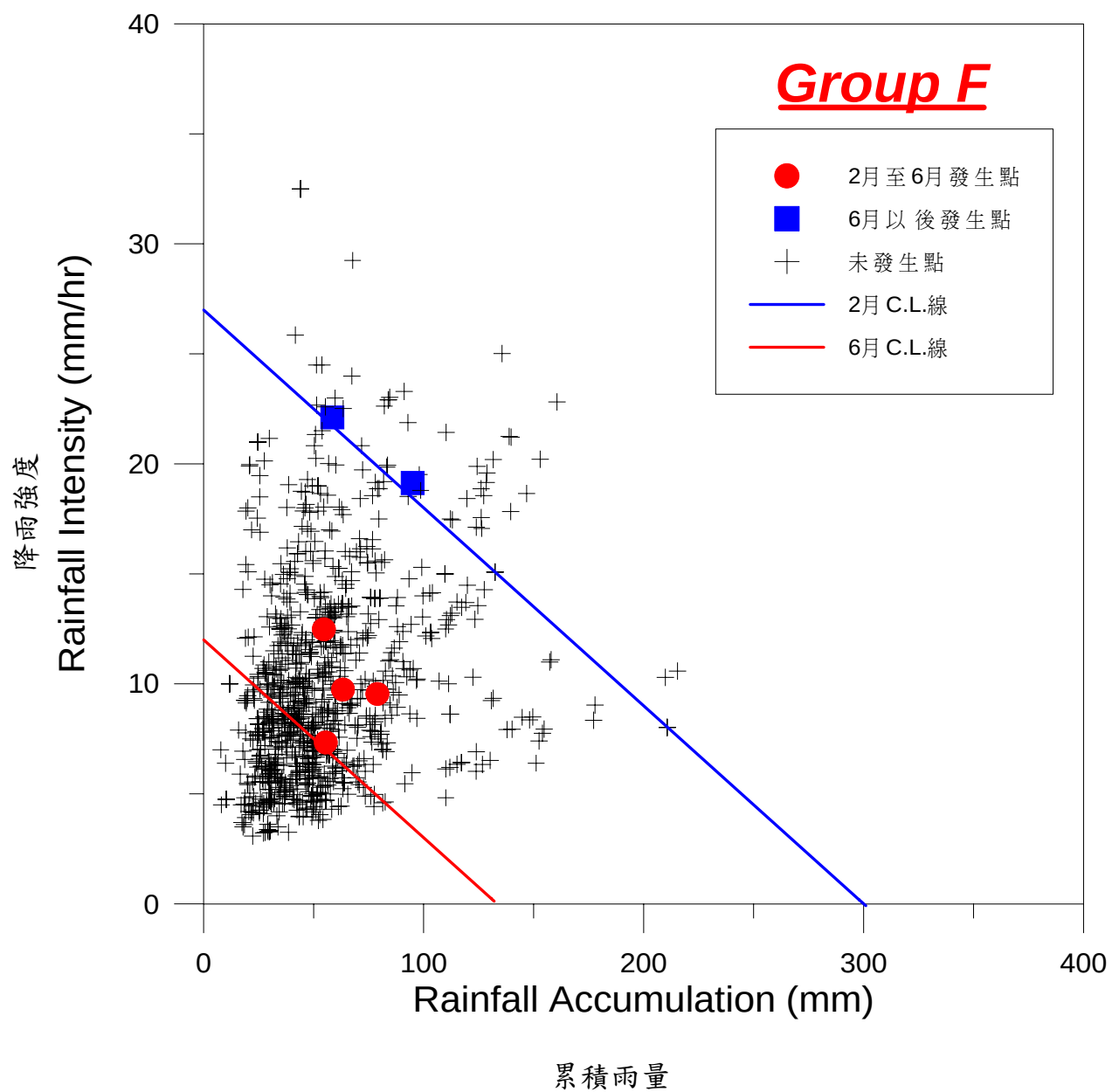
資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(d) 群集 D 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)



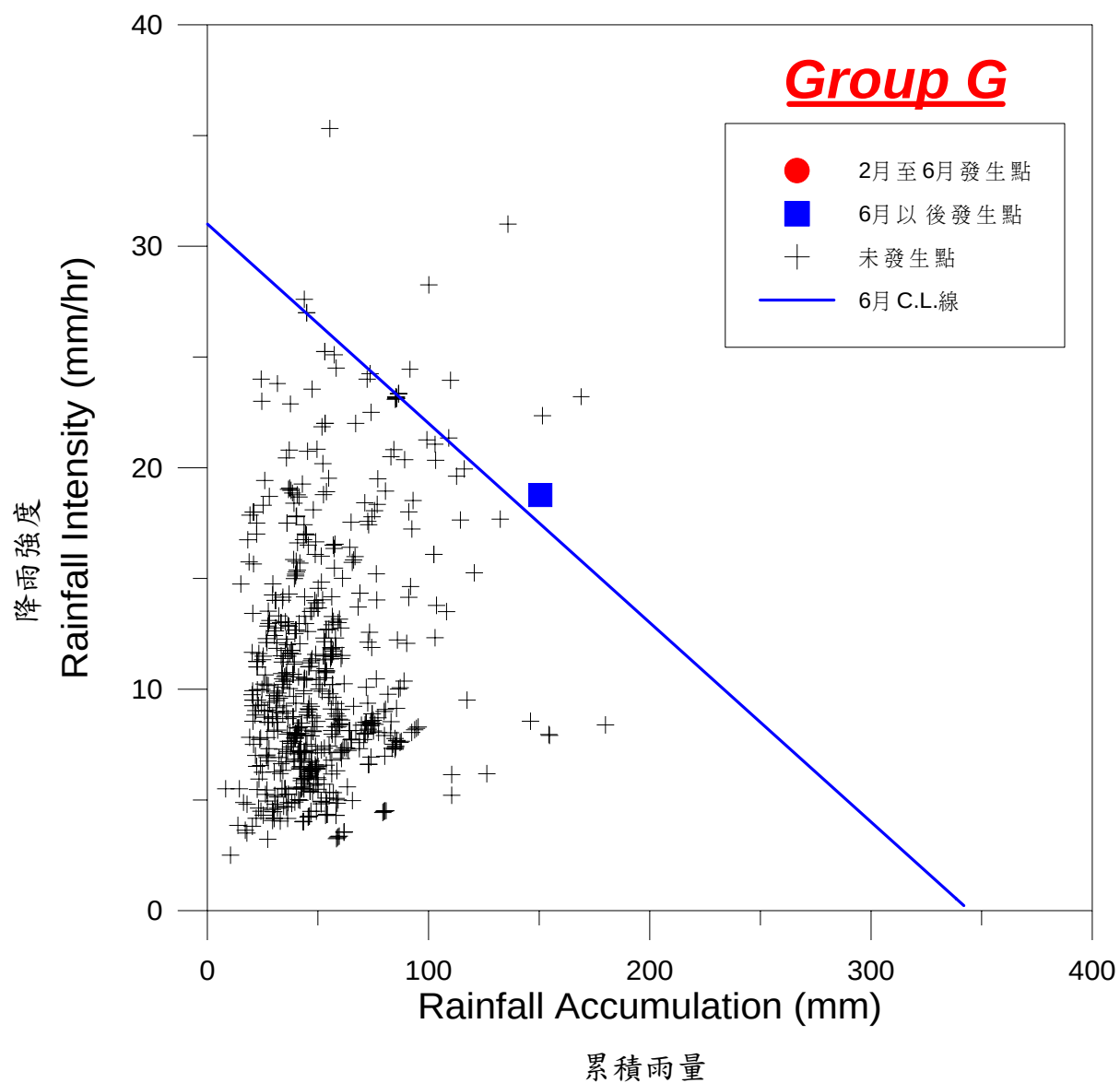
資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(e) 群集 E 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)



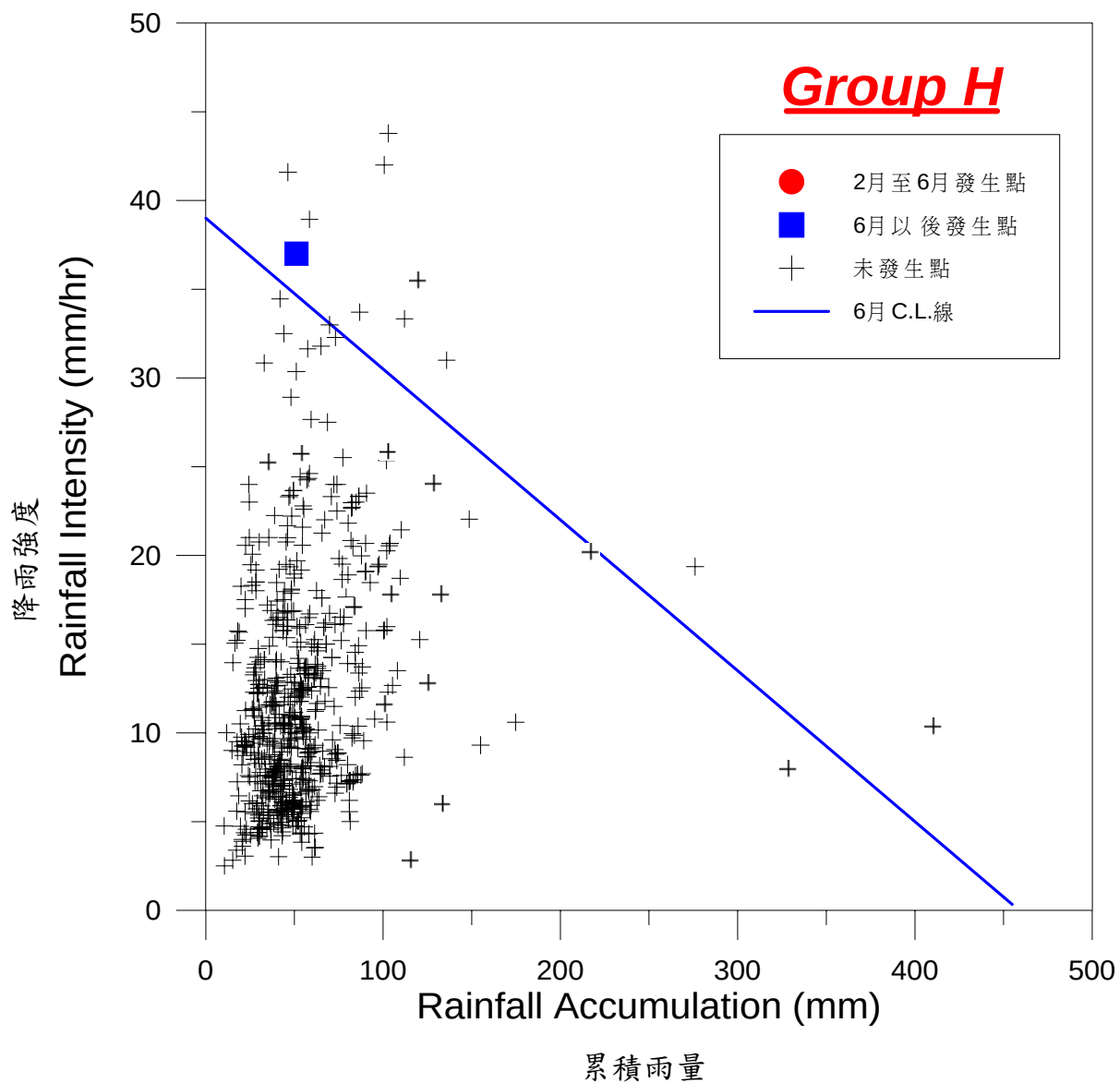
資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(f) 群集 F 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)



資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(g) 群集 G 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)



資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

圖 3-46(h) 群集 H 之土石流發生臨界降雨線圖(Critical line, C.L.)

表 3-23 民國 89 年 6 月~90 年間，南投地區土石流發生臨界降雨量

縣市名稱	鄉鎮名稱	有效降雨強度(mm/hr)	有效累積雨量(mm)
南投縣	中寮鄉	9	90
南投縣	仁愛鄉	8	80
南投縣	水里鄉	8	80
南投縣	名間鄉	19	229
南投縣	竹山鎮	9	90
南投縣	信義鄉	7	75
南投縣	埔里鎮	7	75
南投縣	草屯鎮	8	80
南投縣	國姓鄉	8	80
南投縣	魚池鄉	7	75
南投縣	鹿谷鄉	8	80
南投縣	集集鎮	11	112

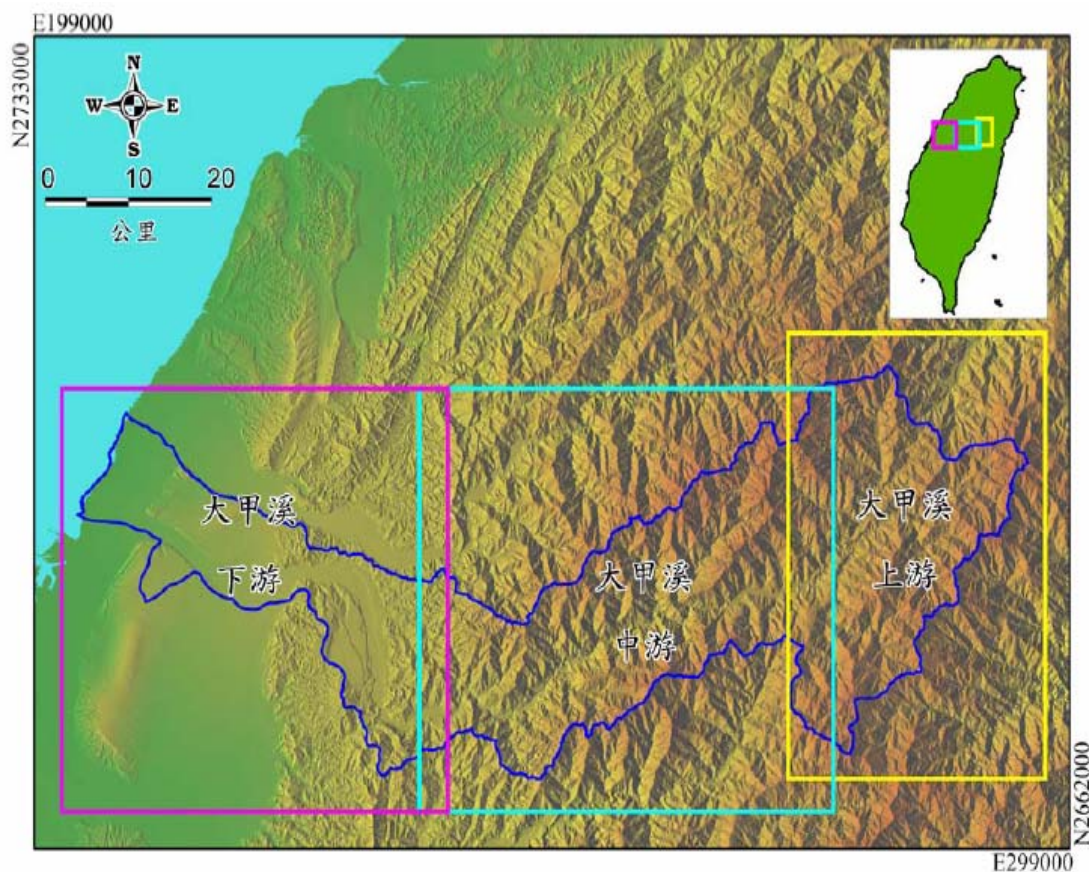
資料來源：「土石流警戒分區雨發生基準值之研究」，水土保持局，2001。

經由上述說明可知，在 921 集集大地震前，臺灣山區發生土石流的水文誘因是長延時之降雨，並累積相當的雨量後才爆發土石流。然而在 921 大地震發生初期土石流發生有效累積雨量及降雨延時皆較以往案例明顯下降，甚至只要零星降雨即有可能導致土石流發生，尤其是民國 89 年 2 月 21 日所發生之幾場土石流災害，其發生之雨量值可說創下臺灣有史以來之新低(有效累積雨量不到 50mm，有效降雨強度不到 5mm/hr)，然而隨時間之延長，土石流之臨界降雨線卻明顯升高。圖 3-47 為日本關東大地震後之崩塌地數目統計，大地震後雖經人工植生復育，但在震後 40 年(1920~1960)後，崩塌地數量方可回復至震前水準(由震後 2000 處回復至震前 233 處)。因此可預期在數十年內，崩塌及土石流仍將是必須面對之天然災害。

3.2 大甲溪流域環境概述

3.2.1 水系及地文環境

大甲溪流域之「上游」，泛指德基水庫以上之溪段，最上游為南湖溪，於松茂附近匯聚合歡溪及七家灣溪諸支流後，形成大甲溪幹流，始名大甲溪；「中游」係指德基水庫以下至馬鞍寮間之溪段，河谷受山勢挾制，幹流兩側有眾多支流來匯；「下游」則指馬鞍寮以下至河口間之溪段，幹流流出馬鞍寮後，河谷開始展寬、河床內河道分歧，幹流再轉向北流經過東勢、石岡後轉向西流，始進入平原地帶，如圖 3-48 所示。



大甲溪流域土石流現象初步研究 (2005)，周漢強

圖 3-48 大甲溪流域分段示意圖

3.2.1.1 水系

大甲溪為臺灣第三大河流，位於臺灣省中西部，北鄰大安溪，南界烏溪，流域多屬山嶺與台地約占百分之九十，平地僅占百分之十。本溪發源於中央山脈之次高山及南湖大山，全長 124.2 公里，流域面積為 1,235.7 平方公里，年平均逕流量約 21 億立方公尺。

大甲溪上游左岸發源於南湖大山、中央尖山及合歡山良南湖溪、耳無溪及合歡溪等支流；右岸則發源於大壩尖山、次高山、大雪山之七家灣溪、四季朗溪、志樂溪及匹亞桑溪等支流。因此，本流域分水嶺高峰多在三千公尺以上，為典型急流河川，由德基水庫至谷關間長 25 公里之河床，平均坡降 1/43，河床寬約 20 至 30 公尺，岸峻流急，岩盤外露，為大甲溪水力最豐之一段，兩岸重山峻嶺，稜線部份標高約為 2,500 至 3,000 公尺。自谷關以下至天輪電廠間兩岸較為開展，河床寬達百公尺，再西行至馬鞍寮以後，西出山嶺，約束頓減，河寬達 500 公尺以上。

在天輪至石岡間大甲溪東側之山勢較高，約在 500 至 2,000 公尺之間；西側則山勢較緩，平均高度在 500 至 600 公尺左右。而大甲溪中游地形起伏大，河床陡急，匯流後的大甲溪幹流至德基以下呈帶狀分布，大約在德基下游 3 公里處匯入志樂溪，沿途再納入匹亞桑溪、小雪溪、馬崙溪、鞍馬溪、稍來溪、十文溪等數條溪，流經谷關、白冷、馬鞍寮等至東勢流入平原。大甲溪下游處則將大肚溪台地與后里台地截開分離，呈網狀流路，迂迴於臺中盆地北端，並堆積大量砂礫於河口，造成沖積扇，復與大安溪沖積扇相疊，成一合流沖積扇。因此，下游地形開展寬闊、坡度平緩、坡降僅 1/90，過石岡後蜿蜒西流，而在清水鎮及大安鄉交界處附近流入臺灣海峽。

由於大甲溪上游地形群山環伺、河谷峭聳，源頭係由伊卡瓦溪及南湖溪匯流而成，其中以源出於劈亞南鞍部的伊卡瓦溪為本流，東側納入七家灣溪後向南流。至於南湖溪則發源於南湖大山，並有合歡溪及畢祿溪的匯流。伊卡瓦溪及南湖溪於太保久處匯流後始成為大甲溪

幹流。上游有七家溪、合歡溪及南湖溪三大支流，於蘇木會合順流而下至太保久附近與伊卡丸溪匯合後始名大甲溪。流經梨山、佳陽至達見，河幅較寬廣，以下則成帶形，經谷關、白冷、馬鞍寮至東勢流入平原，過石岡蜿蜒西北流於清水附近入海。因此，大甲溪其支流有南湖溪、耳無溪、碧綠溪、合歡溪、有勝溪、七家灣溪、雪山溪、司界蘭溪等，相關水系分佈如圖 3-49 所示，說明如下：

1. 七家灣溪大甲溪上游的主要源流，發源於桃山(3,325 公尺)、池有山(3,301 公尺)、品田山(3,524 公尺)、雪山北峰(3,702 公尺)、雪山（又稱興隆山，海拔 3,886 公尺）之南側面。諸源流高度皆超過 3,000 公尺以上。西北側的品田溪與池有溪匯入桃山西溪（又稱無名溪），於武陵吊橋附與北來的桃山溪匯集成七家灣溪主流；而後在武陵農場本部附近，有西側的雪山溪（又稱武陵溪）匯入七家灣溪本流，全長 15.3 公里，集水面積 5,603 公頃。在武陵國民賓館附近萬壽橋和迎賓橋間，與有勝溪匯流形成大甲溪主流。
2. 有勝溪大甲溪上游源流發源於羅葉尾山(2,715 公尺)，全長約 11.4 公里，本流最源頭段（思源埡口）位於宜蘭縣大同鄉境內。上游在思源埡口附近和蘭陽溪上游河谷分水，並被其搶水，而成為無能溪。從思源埡口至七家灣溪合流處的流長約 10 公里，在臺中縣和平鄉境內：此河段鄰近中部東西橫貫公路宜蘭支流（台 7 甲）。在勝光附近（馬鯡橋）有馬鯡溪匯入。其下，在香菇橋附近，則又有香菇溪匯入本流，本流南流至武陵國民賓館前迎賓橋附近，與七家灣溪匯合成大甲溪上游的主流。
3. 司界蘭溪又名蘇七蘭溪或四季朗（蘭）溪。發源於雪山南斜面，流至佳陽大山(3,287 公尺)與大劍山(3,593 公尺)兩山之間。在環山西北方約 500 公尺，海拔約 1,550 公尺處，注入大甲溪主流。司界蘭溪曾是臺灣櫻花鉤吻鮭的重要歷史分布河流，也是環山部落泰雅族原住民主要漁獵活動的重要溪流。
4. 南湖溪發源於南湖大山(3,740 公尺)、南湖北山(3,535 公尺)、南湖南

山(3,448)、中央尖山(3,703 公尺)、無明山(3,449 公尺)等中央脊樑山地的北側面。本溪為大甲溪流域中最大支流，其上源來自耳無溪及米米拉喜溪，其中耳無溪發源於無明山，在節孝東南方注入南湖溪。本溪在環山部落西南 2 公里處（海拔約 1,490 公尺）匯入大甲溪。

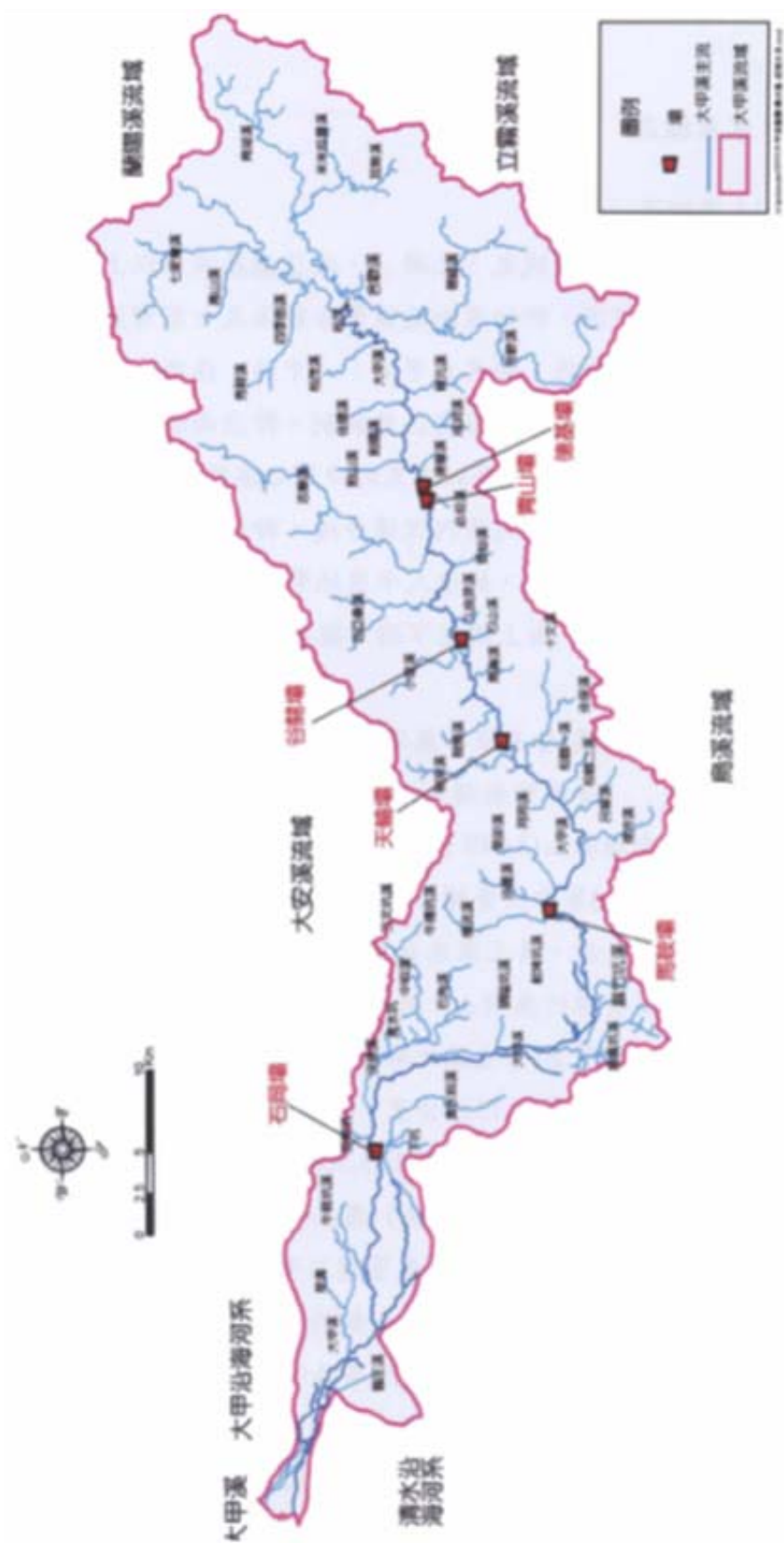
5.合歡溪發源於鈴鳴山(3,271 公尺)、畢祿山(3,370 公尺)、北合歡山(3,422 公尺)的北側斜面一帶，海拔超過 3,000 公尺以上的山嶽群。流長 27.5 公里，為大甲溪上游之第二大支流。合歡溪匯集碧綠溪後，沿太保久稜線（梨山—天池間的稜線）東側，與大甲溪並行，但北流形成河間地域。其與南湖溪合流地帶，海拔約 2,300 至 1,500 公尺間，亦出現與南湖溪側平岩山稜線相對稱之角階地形。

6.十文溪源自基隆山(2,937 公尺)北斜面，在谷關與博愛間匯注大甲溪，全長約 9.9 公里。

3.2.1.2 地形

大甲溪由上游自下游，經梨山、青山、谷關、和平、天冷，至馬鞍寮轉而北向流至東勢鐵橋（原臺鐵舊山線）後轉而向西，經石岡壩續向西流入海，大甲溪兩岸階地發育頗佳且分佈很廣，低位河階散佈於河道兩旁，距河床高度約在十公尺以內；高位河階高出河床五十公尺以上。

而大甲溪在天輪至石岡間約呈『Z』字型流路，東北側山勢較高，約在 500~1,000 公尺之間；西南側山勢較緩，平均高度在 500~600 公尺左右。在大茅埔-雙冬斷層兩側，因地層年代及岩石膠結程度不同，以致地形高度及地形特徵也有所分別。斷層東側中新世砂岩及頁岩之地區，地形高度較高，地形特徵上常有豚背脊（hogback）及單面山（cuesta）等特殊地形。斷層西側區域為更新世厚層礫岩夾透鏡狀砂岩之頭嵙山層，地形高度較低，地形特徵方面因受差異侵蝕影響，長形成明顯的鋸齒狀（zigzag）地形或圓丘狀（hummock）地形。



(資料來源:「大甲溪下游段河道運動態穩定平衡分析檢討」,經濟部水利署,2006)

圖 3-49 大甲溪流域水系分佈圖

3.2.1.3 區域地質

臺灣西部麓山帶之地層由中新世、上新世及更新世之沈積岩所組成；東部麓山帶地質構造與摺曲較為複雜且較緊密，西部麓山帶地質構造較為疏鬆也較輕微。地形現象主要顯現了由東向西漸次降低的丘陵地、台地、盆地及沖積平原。

車籠埔斷層呈南北延伸，北連三義斷層，南接大尖山、觸口斷層，為臺灣西部麓山帶中分隔內麓山帶與外麓山帶之主要逆斷層。內麓山帶地形上多屬山地；外麓山帶則以盆地、台地、沖積平原為主。大茅埔-雙冬斷層位於車籠埔斷層東方十餘公里，亦做南北延伸，北端越過大甲溪漸轉東北方向延展。

1. 岩性

以下依經濟部中央地質調查所出版之臺灣地質圖（圖 3-50），針對主要地層及構造進行說明：

(1) 桂竹林層：

桂竹林層係以厚層砂岩及夾頁岩層為主，通常被認為臺灣北部中新世地層之最上層地層，本區出現橫坑背斜之兩翼、大茅埔斷層以東區域及三義逆衝斷層斷塊上盤。因中間夾一頁岩盤，故層序由下而上主要分為關刀山砂岩、十六份頁岩及魚藤坪砂岩三段。關刀山砂岩岩性為泥質砂岩，因泥質砂岩多成鈣質，故質堅耐蝕厚度一般介於 150~280 公尺。十六份頁岩段以頁岩為主，間而參雜含石英礫之碎岩碎塊，岩層厚度變化由橫坑有向北遞減之趨勢，一般介於 10~50 公尺。魚藤坪砂岩段以青灰色或黃灰色泥質砂岩為主，偶夾砂頁薄層互層，於橫坑背斜兩翼出露厚度約為 300 公尺。

(2) 卓蘭層：

卓蘭層於本區分佈範圍相當廣泛，主要以大湖附近之汶水為頂點沿著沿著大湖向斜軸部分分別向西南方向延伸直至大甲

溪南岸石岡附近。除了新社台地群覆蓋以外均可於地表看見明顯的露頭，往東南方向延伸至大安溪北岸坪林始向西南轉折至大甲溪北岸之橫坑，及大甲溪河床與左岸台地崖面上，除少部分為台地覆蓋以外均為卓蘭層之出露範圍。本層主要岩性均由砂岩、粉砂岩、泥岩及頁岩之互層組成，因屬於上新世岩層，沈積年代新且經歷的地質年代短，岩質略為鬆軟之厚層砂岩及少許頁岩為主，故岩化膠結程度較低且因砂頁岩互層其岩性強弱不一，在地形上大都為低矮之丘陵地形或是傾角平緩的單面山地形，以在東勢至豐原間有廣泛之分佈。皆成單斜層構造，普遍向東南作 30~45 度之傾斜。本層總厚近 2,000 公尺。

(3)頭嵙山層：

頭嵙山層主要分佈在東勢新伯公以南及大茅埔以北之地區，本層岩性主要由兩種異相岩石所組成：一為上段以礫岩為主；一為下段以細砂岩及頁岩互層為主，砂岩底部偶夾礫岩層。頭嵙山層與上方紅土台地或階地堆積層成交角不整合方式接觸，而以整合方式覆蓋在卓蘭層之上。故下段與卓蘭層極為類似，主要以礫石層之出現與否作為研判區別，當砂岩底部有礫岩層出現時才算是頭嵙山層，本層總厚計 1,300 公尺。

(4)錦水頁岩：

錦水頁岩向上向下分別和卓蘭層及桂竹林層整合接觸。頁岩呈深灰色，具有發育良好的球狀剝離構造，通常夾有暗灰色凸鏡狀砂岩層以及粉砂岩和泥岩的薄層。有些地方頁岩的淘選度很差，並且富含泥灰岩結核。錦水頁岩僅出露於石岡附近。

(5)廬山層：

廬山層大部分由黑色到深灰色的硬頁岩、板岩及千枚岩和深灰色的硬砂岩互層組成，含有零星散佈的泥灰岩團塊，含有不規則的石英脈，偶夾薄層細粒變質砂岩或粉砂岩，局部出現厚層變質砂岩，或葉理發育完整且具有絲絹光澤的千枚岩。在

萬大水庫附近，夾有數薄層凸鏡狀玄武岩質火成岩。本層主要分佈在大甲溪流域上游梨山以東，合歡山、大禹嶺及南湖大山一帶，和它西邊的雪山山脈帶中間可能隔著一個斷層，這就是梨山斷層或蘭陽溪斷層。

(6)紅土台地堆積層

本層分佈在大甲溪左岸台地，由新社以南至中興嶺及大甲溪左岸之東興均為其涵蓋範圍，海拔高度約在 400~600 公尺。岩性主要以卵礫石為主，間夾泥砂，因受淋洗風化作用，台地表面覆蓋一層厚約 2~3 公尺的紅土層。

(7)南莊層：

在本區域南莊層中沒有可採的延續煤層，在這一帶的南莊層主要為淡灰色到灰白色的細粒砂岩和深灰色頁岩，砂岩呈塊狀或厚層狀，但具有南莊層特徵的白砂岩發育非常不良，或完全消失不見。砂岩-砂岩-頁岩所成的薄葉層仍然是本層的特色，也是岩性指準，常和深灰色頁岩和不規則的煤線共生。

(8)大坑層：

大坑層整合位於前述漸新世粗坑層之上，其下部由淡灰色厚層到中層的砂岩和深灰色頁岩構成，厚約二百到三百公尺，其上部由深灰色頁岩和砂岩及頁岩的互層構成，約厚四百到五百公尺。頁岩中含有海綠石，海綠石的富集帶也在多處地點發現。本層分佈於南勢附近，以北北東方向呈帶狀分佈。

(9)水裡坑層：

水裡坑層主要為塊狀至厚層砂岩和暗灰色緻密頁岩的互層，其中部有一富含化石的頁岩段。水裡坑層的上下兩岩段皆以厚層或塊狀淺灰色砂岩為主，常構成懸崖陡坡，砂岩中有灰黑色頁岩的夾層。水裡坑層的中下段中富含海綠石，但上段則無。本層分佈於南勢、馬鞍寮至東勢一帶，以北北東方向呈帶狀分佈。

(10)達見砂岩：

達見砂岩主要分布於大甲溪沿岸德基壩至青山壩及谷關壩至谷關分廠間，呈東北西南方向分布。岩性以厚層或塊狀白色粗粒變質砂岩為主，偶夾板岩或變質頁岩互層。達見砂岩厚度達二千七百公尺，可將其分為上中下三部分，各部分皆有不同之岩性。上部為厚層中至粗粒石英狀砂岩，夾有少量的頁岩或炭質頁岩，層厚約七百五十公尺；中部為粗粒塊狀石英岩，具有發達之交錯層，層厚約一千三百公尺；下部為細至粗粒石英岩、粉砂岩及少量板岩為主，層厚約六百五十公尺。由於達見砂岩岩性堅硬，區域內地形陡峭，常有瀑布形成。地層面呈高角度，且節理發達，易發生崩塌。表層風化土石崩落為主，導致大量土石淤堆於河道內。

(11)佳陽層：

佳陽層主要分布於本集水區東南側德基壩至梨山之間，與達見砂岩交錯出現，呈東北西南方向分布。岩性主要以厚層黑色或深灰色板岩為主，岩層間偶夾細粒砂岩或粉砂岩，並具有發育良好之板劈理。佳陽層於本集水區出露之岩層厚度約一千四百公尺，且有許多厚層砂岩夾層。

(12)白冷層：

白冷層主要分布在谷關分廠以西至馬鞍壩以東區域，為本集水區中涵蓋最廣的地層，呈東北西南方向分布。岩性為厚層白色細至粗粒石英質砂岩，其中夾有灰色或深灰色硬頁岩或板岩互層，其厚度可達二千五百公尺。

(13)水長流層：

水長流層位於馬鞍壩的北方區域，僅涵蓋本計畫小部分的集水區域。岩性以深灰色或黑色硬頁岩為主，偶夾薄層暗灰色細粒泥質砂岩或粉砂岩，岩層厚度約一千公尺。

(14)階地堆積層：

本層主要分佈在大甲溪主流與較大支流之兩岸，堆積物皆來自階地上游流域之岩層，高出於河床達百餘公尺。故所含之岩石材料常與上游出露之岩層有關，大都為礫石、砂及泥所組成，膠結鬆軟。本區階地面常呈數階疊狀方式堆積，階地面高出河床約 5 公尺至數十公尺，分佈於東勢對岸之新社、大南、水夜寮一帶。

(15)沖積層：

現代沖積層見於河床中，大甲溪沿岸之沖積材料均來自上游流域之出露岩層，大都為礫石夾帶砂、泥所組成，其中由硬砂岩或石英岩所成之礫石，為混凝土之良好骨材。堆積厚度決定於河床之相對高度，但因上游水壩與攔砂壩之阻隔，造成侵蝕性河道，除了河床砂石流失致使沖積層變薄外，部分河段基岩更直接裸露。

由上述資料說明，大甲溪流域依地形發育及地質特色，可依石岡、馬鞍與梨山三個分歧點，分成四個不同的河谷地形。石岡以西為沖積平原區，地形平坦，屬於大臺中沖積平原的一部份。自石岡至馬鞍屬於溪谷的下游區，沿岸有許多台地，溪谷兩側多屬緩起伏的丘陵地，高度多在五十公尺到一百公尺之間，地質上多為台地堆積層，以及更新世膠結不佳的地層，如卓蘭層與頭嵙山層。馬鞍及梨山之間則屬於中上游區，溪谷完全穿流於崇山峻嶺中，河谷多半呈 V 字型，狹窄且坡度亦較陡。兩岸地形高度在兩百至兩千公尺之間。地質上多為中新世和漸新世的堅硬岩層，如白冷層、達見砂岩層等。自梨山以上則屬於上游源頭區，河流兩岸山嶺的高度多在兩千公尺以上。臺灣著名的山岳如大壩尖山南湖大山合歡山等均在此區。地質上為中央山脈地質區的古第三紀地層，主要由輕度變質的板岩所構成。

2. 摺皺

流域內主要摺皺構造分為石圍牆向斜、東勢背斜、內灣向斜及大橫屏山向斜等，茲分別就區域內摺皺進行說明：

(1) 石圍牆向斜：

本構造分佈於大安溪流域卓蘭附近至大甲溪新社一帶，北與獅潭（紙湖）向斜與大湖（新開）向斜共同構成一向斜系列，屬於大湖向斜之南延部分。大湖向斜東翼卓蘭層傾角平緩僅約 10 度左右，而西翼卓蘭層傾角相當急陡約在 50~80 度之間，南與石圍牆向斜之間有九房厝斷層與梅子斷層，屬於一向南傾沒之向斜構造。

(2) 東勢背斜：

東勢背斜發育於大湖向斜東邊之開展背斜構造，呈北北東走向，軸部大約與大湖背斜之軸部平行，兩翼傾角小於 20 度。於 921 集集大地震中九房厝斷層與梅子斷層所形成之隆昇地塊軸線恰與本背斜軸線吻合，故東勢背斜可能屬於活動之背斜摺皺構造。

(3) 內灣向斜：

內灣向斜位處東勢背斜以東 1 公里處，軸線與之平行，亦屬於活動之向斜構造。

(4) 大橫屏山向斜：

本向斜位於八寶堰之南南東方，於馬鞍寮以東至大茅埔山之間被白毛山斷層所截，向南延伸約 21 公里。大橫屏山向斜軸部呈北北東走向並向南傾沒，而桂竹林層亦出露於此軸部附近，為一不對稱之向斜構造。

3. 斷層

流域內主要斷層構造分別為車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層。另依據 921 地震後中央地質調查所（2000）最新發佈之臺灣活動斷層（詳如圖 3-51 所示），流域內之活動斷層計有獅潭、神桌山、三義、

大甲、鐵砧山（大甲東）、屯子腳、清水、彰化、車籠埔、大茅埔-雙冬等十條斷層，其中獅潭、神桌山、屯子腳與車籠埔屬第一類活動斷層（最近一萬年來活動的斷層），而三義、大甲、鐵砧山（大甲東）屬於第二類活動斷層（最近十萬年來活動的斷層），其餘清水、彰化、大茅埔-雙冬斷層則屬於第三類存疑性活動斷層（斷層之存在或活動年代不明者）。值得一提的是員林、田中斷層併入彰化斷層，橫山、大甲東斷層合稱鐵砧山斷層。而車籠埔斷層則因 921 地震後造成地表嚴重災害，由原來的第二類斷層提升為第一類活動斷層，以下分別進行說明：

(1)獅潭斷層：

獅潭（又稱紙湖）斷層屬於第一類活動斷層，為一逆移斷層，呈北北東走向，斷層面向西傾斜約 72~85 度。斷層位在苗栗縣獅潭鄉紙湖東方，由大東勢向北延伸，經小東勢、圳頭、北寮、紙寮至上十股，常約 15 公里。大江二郎（1936）及大塚彌之助（1936）指出：本斷層為 1935 年 4 月 21 日新竹-臺中規模 7.1 地震所伴生的地震斷層。

(2)神桌山斷層：

神卓山斷層屬於第一類活動斷層，為 1935 年 4 月 21 日新竹-臺中規模 7.1 所伴生的逆移斷層（Hsuand Chang, 1979），呈北北東走向。本斷層平行獅潭斷層，位於後者東方約 2 公里的八卦山脈稜脊西側，為斷續出現的裂縫及延伸不長的小斷層，總延伸長度約 5 公里。經中央地調所調查，歷經多年的侵蝕破壞，野外並未再見斷層露頭。

(3)三義斷層：

本斷層屬於第二類活動斷層，孟昭彝（Meng, 1963）將三叉斷層（三義至大湖段）與銅鑼斷層（三義以南跨大安溪段）合稱三義斷層。石再添等（1984）在后豐大橋東方約 1.5 公里的大甲溪北岸發現三義斷層之斷層帶，桂竹林層向西逆掩於頭嵙山層上。本斷層由大甲溪呈北偏東 10 度走向延伸至三義間，

至三義附近後突轉為北偏東 70 度走向延續至重河、雙連潭至大窩，全長約 19 公里。

(4)大甲斷層：

本斷層為第二類活動斷層，依據徐鐵良與張憲卿（1979）認為本斷層為沖積層掩覆之逆斷層，頭嵙山層由東南側向西逆衝而與沖積層接觸，呈北至北北東走向。斷層位於后里台地之西緣，由通宵附近經過大甲東緣，向南延伸至大甲溪北岸，長約 7 公里。本斷層向南可能連接位於大肚台地西側的清水斷層。

(5)鐵砧山斷層：

鐵砧山斷層又稱為大甲東斷層，屬於第二類活動逆移斷層，斷層呈北北東走向，因位於大甲斷層及清水斷層之東側，亦可能為兩者之副斷層。斷層由鐵砧山東側經大甲東聚落西緣、尾山東側甲南東方的客莊、橫山和清水第一公墓及沙鹿東方的竹林，長約 15 公里。斷層的南段（又稱橫山斷層）在犁分、竹林附近併入清水斷層。

(6)屯子腳斷層：

屯子腳斷層於分類上屬於第一類活動斷層，呈 $N60^{\circ}E$ 走向，為右移兼具逆移斷層。斷層北端由后里台地東北隅的泰安車站附近，向西南西方向延伸，經下后里、內埔（屯子腳），越過大甲溪而至大肚台地北段之清泉崗附近，全長約 14 公里，本斷層所經過之岩層均為更新世的紅土台地礫石層或現代沖積層。依潘國樑等（1983）指出此斷層向東北延伸經泰安車站、枕頭山到十分，可能與紙湖地震斷層相連接。

(7)清水斷層：

清水斷層屬第三類存疑性斷層，其範圍可能向北延伸連接后里台地西緣之大甲斷層，向南延伸沿著八卦台地西緣的彰化斷層。本斷層在大肚台地的長度約為 22 公里，斷層呈弧形延伸，

由甲南經清水到沙鹿的一段，呈東北走向，沙鹿以南為北北東走向，龍井以南則呈北北西走向。

(8)彰化斷層：

本斷層屬於存疑性活動斷層因位在彰化斷層沿線發現斷層露頭，故研判可能為盲斷層。範圍位於八卦台地西緣，由烏溪南方經彰化市、員林、出水至田中東源里，石再添與楊貴三（1985）將本斷層分為三段：北段為彰化斷層呈北北西走向，中段稱為員林斷層約呈南北走向，南段稱為田中斷層為南北走向，長約 32 公里。

(9)車籠埔斷層：

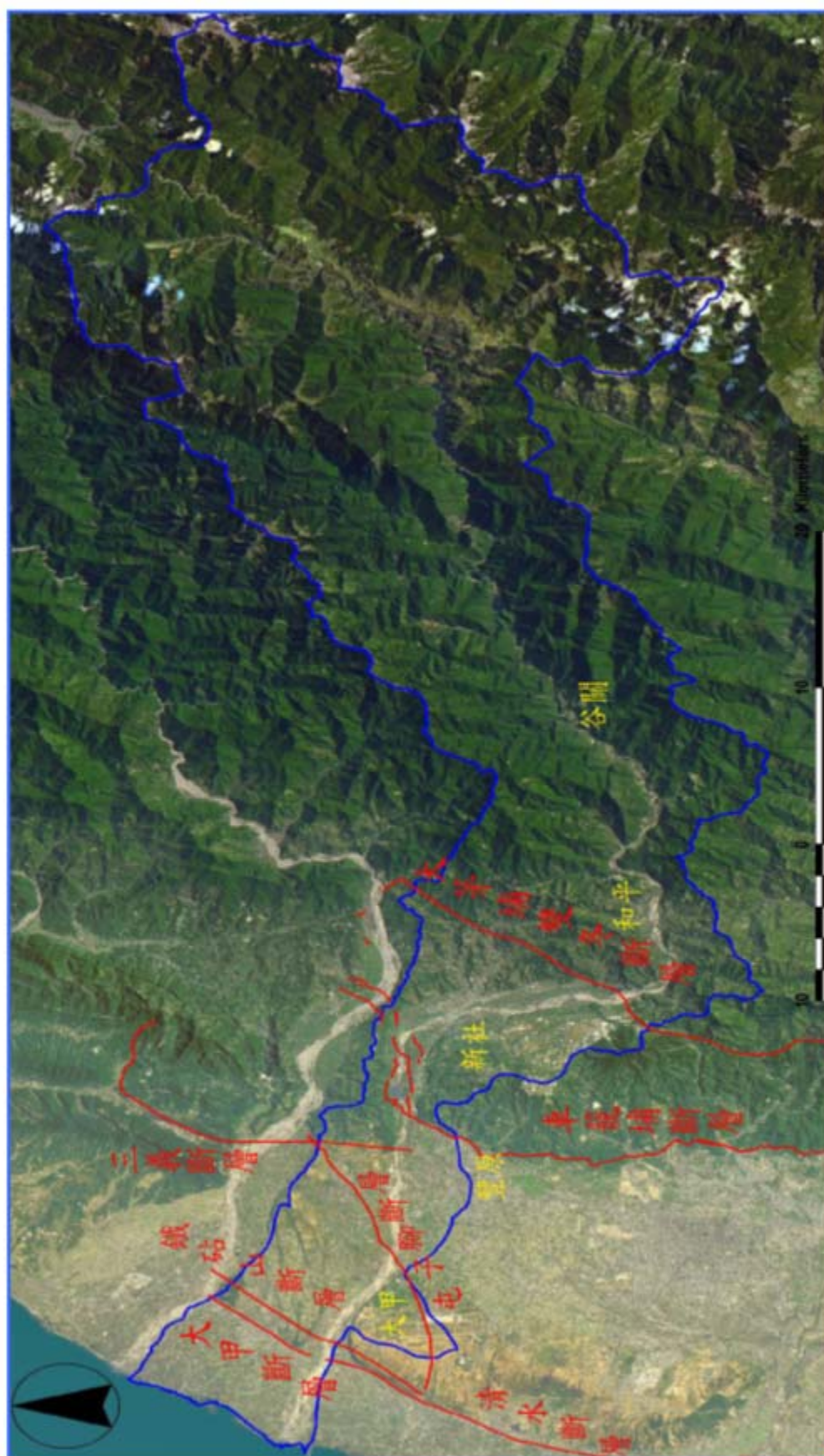
車籠埔斷層原屬第二類之逆衝斷層，範圍北自豐原南至名間，為臺中盆地與豐原、南投兩丘陵之交界線，總長約 60 公里，呈南北走向並以 30 度傾角向東傾斜。東側上盤地層為晚上新世錦水頁岩及早更新世頁岩質為主的卓蘭層，西側下盤地層為晚更新世以卵礫石為主的頭嵙山層及現代沖積層。因為 921 集集大地震造成中部地區地表嚴重錯動與車籠埔斷層之延伸，使地表破裂總長度達 100 公里以上。車籠埔北端延伸範圍為石岡、東勢與卓蘭地區，地表破裂在大甲溪石岡壩附近埤豐橋呈東北走向，而後轉為東西走向，在梅子、校栗埔一帶，斷層又轉為東北走向。南端延伸範圍在濁水溪以南竹山地區，大致成南北走向，長約 13 公里。

以往大部分地質學者以斷層上、下盤出露岩石的相似情況，而推測大尖山斷層往北延伸應連接雙冬斷層。但 921 地震時車籠埔斷層及大尖山斷層在地表出露情形相當明顯，依經濟部水利規劃試驗所八十九年度『雲林湖山湖南水庫地震研究及影響評估報告』中實地踏勘後之地質圖來看，接續大尖山斷層後的車籠埔斷層，在地形上是以彎曲的走向南北延伸，根據測量所得之地面斷層曲線長度約為 100 公里左右。不過，真正造成車籠埔斷層整塊區域質量滑動的斷層面在地表下應該是接近

平面的，在水平投影面上也就是接近直線；只是因為地形高度不同所造成的差異性及彎曲，使得地表上斷層長度較實際值為大。因此，藉助該踏勘測得之資料，保守推估得控制車籠埔斷層的長度應該是 87.5 公里（由臺中縣東勢至嘉義縣詔安寮）。故車籠埔斷層及大尖山斷層這兩條斷層應屬同一條斷層，而且是相當活躍的活動斷層。

(10)大茅埔-雙冬斷層：

大茅埔-雙冬斷層為成南北走向之逆衝斷層，位於車籠埔斷層之東約十餘公里，北由東勢經雙冬至集集大山，為豐原與南投兩丘陵的東界，斷層南段稱為哮貓斷層，北段稱為大茅埔斷層，總長度約為 55 公里，以 50 度傾角向東傾斜。大茅埔-雙冬斷層東側上盤岩層由漸新世至中新世的砂岩及頁岩所構成，包括甚多較緊密的摺曲及斷層，構造複雜；而西側下盤則由上新世至更新世之卓蘭層、頭嵙山層構成，岩層約作南北走向，向東傾斜，構成單純的單斜構造。由於本斷層活動時代不明確，暫時歸類於第三類存疑性活動斷層。



(資料來源：「大甲溪下游段河道動態穩定平衡分析檢討」，經濟部水利署，2006)

圖 3-51 大甲溪流域活動斷層圖

4.土壤資料

本流域河段之土壤分佈（詳圖 3-52）主要以崩積土及沖積土為主，並有部分紅壤，茲分述如下：

(1)崩積土：

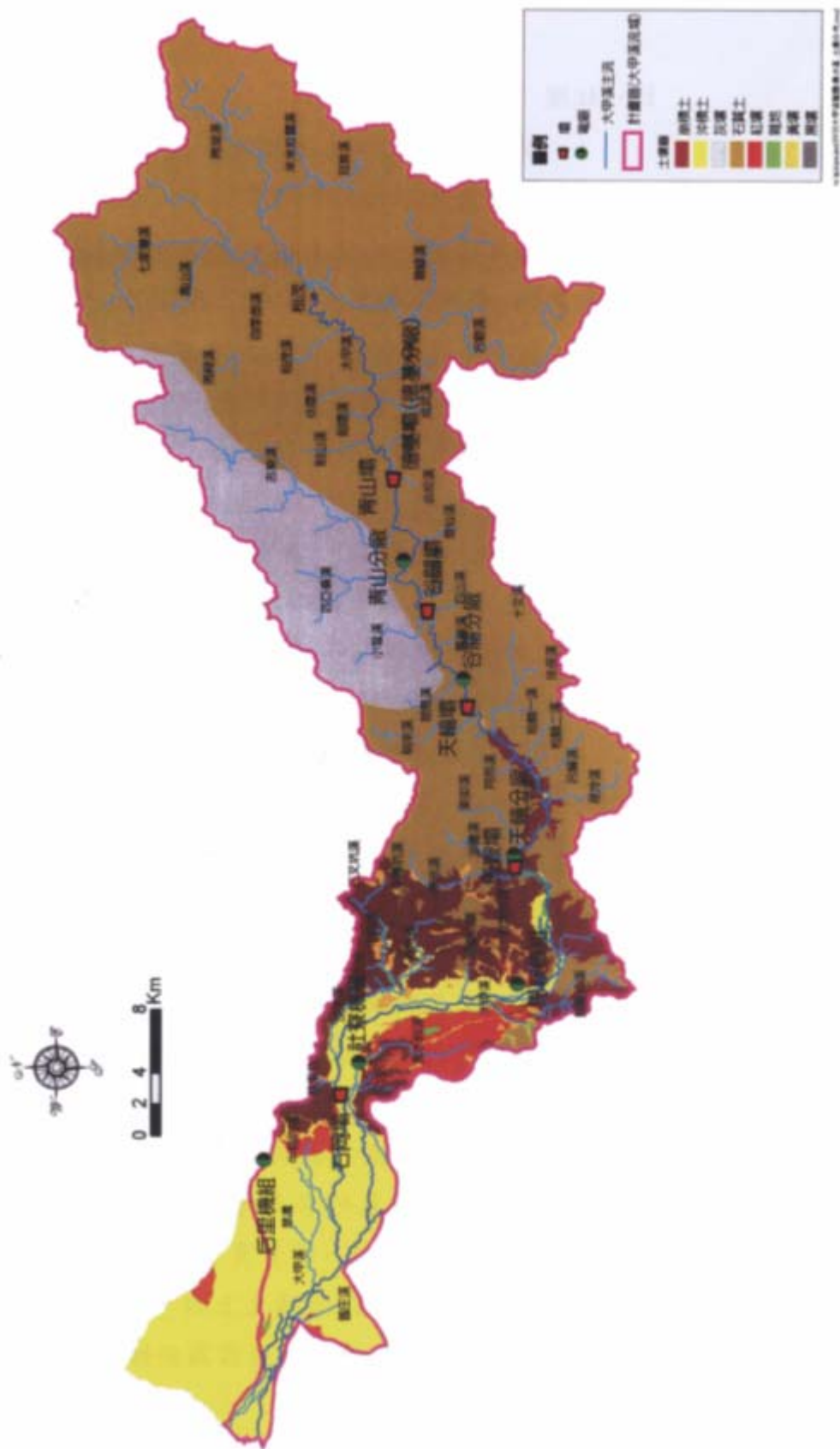
崩積土多分佈在豐原至南勢村間之丘陵地河谷或陡坡，以及沿南勢村至谷關溪谷兩側陡壁分佈，因節理或劈理等弱面發達，裸露風化或溝谷侵蝕而崩落於山谷中，多呈角礫狀夾砂土，堆積疏鬆，透水性佳，而穩定性差。

(2)沖積土：

沖積土分佈於大甲溪流域下游豐原以下及各支流之溪谷間，係由溪水搬運上游或兩側崩積土所產生之土石。主要組成物質以未固結之礫石、砂及泥為主，礫石偶有方向性排列，常發育為河灘地或沖積扇。

(3)紅壤：

新社及后里台地頂部及丘陵之緩坡地區發育有紅壤，紅壤乃自第四紀洪積層物質，經高溫多雨，乾濕循環交替之條件下，使土壤中之物質淋洗殆盡，僅剩大部份為鋁、鐵氧化物者。紅壤土層深厚，一般在 2 至 5 公尺，有時厚達 20 至 30 公尺者亦有。土壤構造明顯，通氣、排水良好，物理性質絕佳。唯土壤呈強酸性，肥力差，粘性及可塑性佳，因此生產力差。



(資料來源：「大甲溪下游段河道動態穩定分析檢討」，經濟部水利署，2006)

圖 3-52 大甲溪流域土壤分佈圖

3.2.2 氣象及水文環境

大甲溪流域約位在北緯 24° 9' 至 24° 24' 之間，全區在副熱帶氣候區。根據中央氣象局臺中氣象站於 1971 至 2004 年氣象資料顯示（表 3-24 所示），上游梨山地區年均溫在 15°C 左右，中游達見至谷關、東勢鎮、新社鄉一帶約在 19°C 上下，下游沿海五鄉鎮，溫度在 20~25°C 之間；在雨量方面，流域東部因山嶽重疊，故地形雨頗為豐富，而西部沿海地區，地勢低，降雨量少，全年降雨日數在 90~140 日之間，各單位的降雨強度皆超過 10mm，影響水土保持甚鉅，特別是上游和平鄉東半部脊樑山麓一帶，常超過 15mm，容易造成土壤沖刷及洪患；以分佈情形而言，上游年雨量在 3,000~3,500mm 之間，谷關至石岡的下游地區，約在 2,000~2,500mm 之間，下游沿海及盆地地區則在 1,500 至 2,000mm 左右。

流域內氣溫受到地形影響頗為顯著，山地丘陵多南北走向，故氣溫之變化受此影響，平地平均氣溫約為 23.7°C。而全年最高溫約高達 27.8°C，最低溫度則為 17.6°C。全年之中以 7、8 兩月最熱，多高達 27°C 以上，歷年最高溫與最低溫分別發生在 7 月的 33.4°C 及 1 月的 11.9°C。而相對濕度變化則不大，於 73% 至 80% 之間變化。

如圖 3-53 所示，大甲溪流域之降雨量以 5 至 10 月為最多，因流域此時處於迎風帶，雨量頗豐，同時因天氣炎熱造成對流旺盛導致雷雨亦增。而到了 7、8 月多為颱風季節，更會受到氣流挾帶大量颱風雨。每年 11 月至翌年 4 月則為乾旱期，因地處東北季風背風帶，雨量甚少，乾旱期的雨量約僅維持全年雨量之 25% 左右。

表 3-24 中央氣象局臺中氣象站資料表

項目	降雨量	平均氣溫	相對濕度	最高溫度	最低溫度
單位	公釐 (mm)	攝氏度 (℃)	百分比 (%)	攝氏度 (℃)	攝氏度 (℃)
1 月	34.0	16.3	75.6	22.8	11.9
2 月	79.6	17.0	77.5	22.9	13.0
3 月	85.4	19.5	77.3	25.4	15.1
4 月	121.5	23.1	77.7	28.4	18.9
5 月	202.0	25.8	79.1	30.5	22.1
6 月	305.7	27.6	79.3	32.2	24.0
7 月	220.3	28.5	76.8	33.4	24.6
8 月	283.2	28.1	78.6	32.7	24.5
9 月	89.8	27.2	76.8	32.2	23.6
10 月	17.2	24.9	74.2	30.4	21.0
11 月	19.0	21.5	73.4	27.5	17.1
12 月	24.9	17.9	73.7	24.3	13.2
合計	1482.5	23.1	76.7	28.6	19.1
統計時間	1971-2004	1971-2004	1971-2004	1971-2004	1971-2004

(資料來源：中央氣象局，2005)

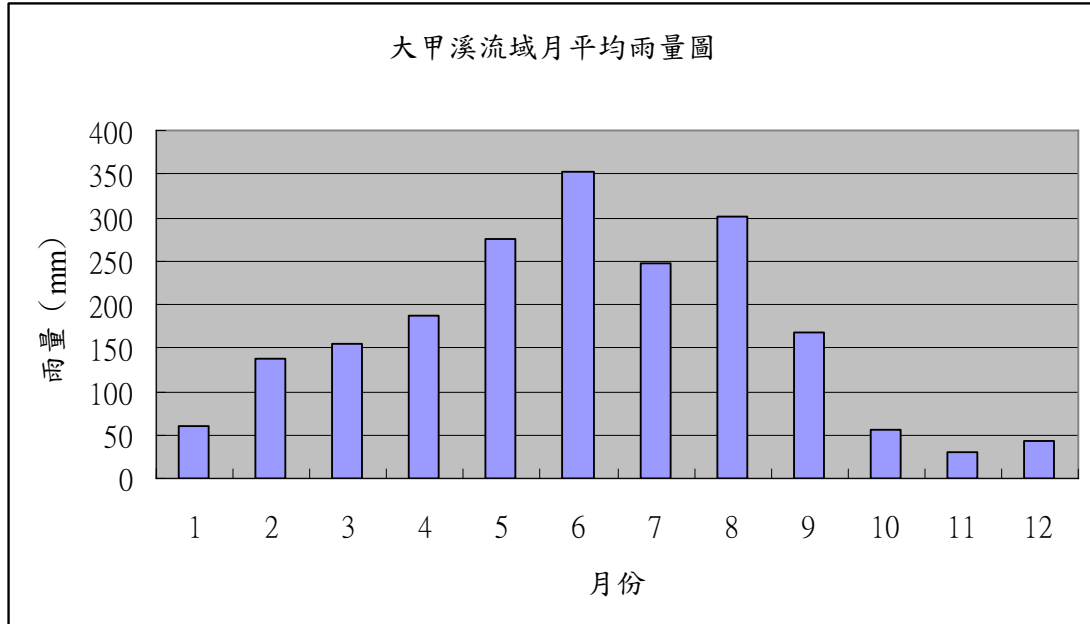
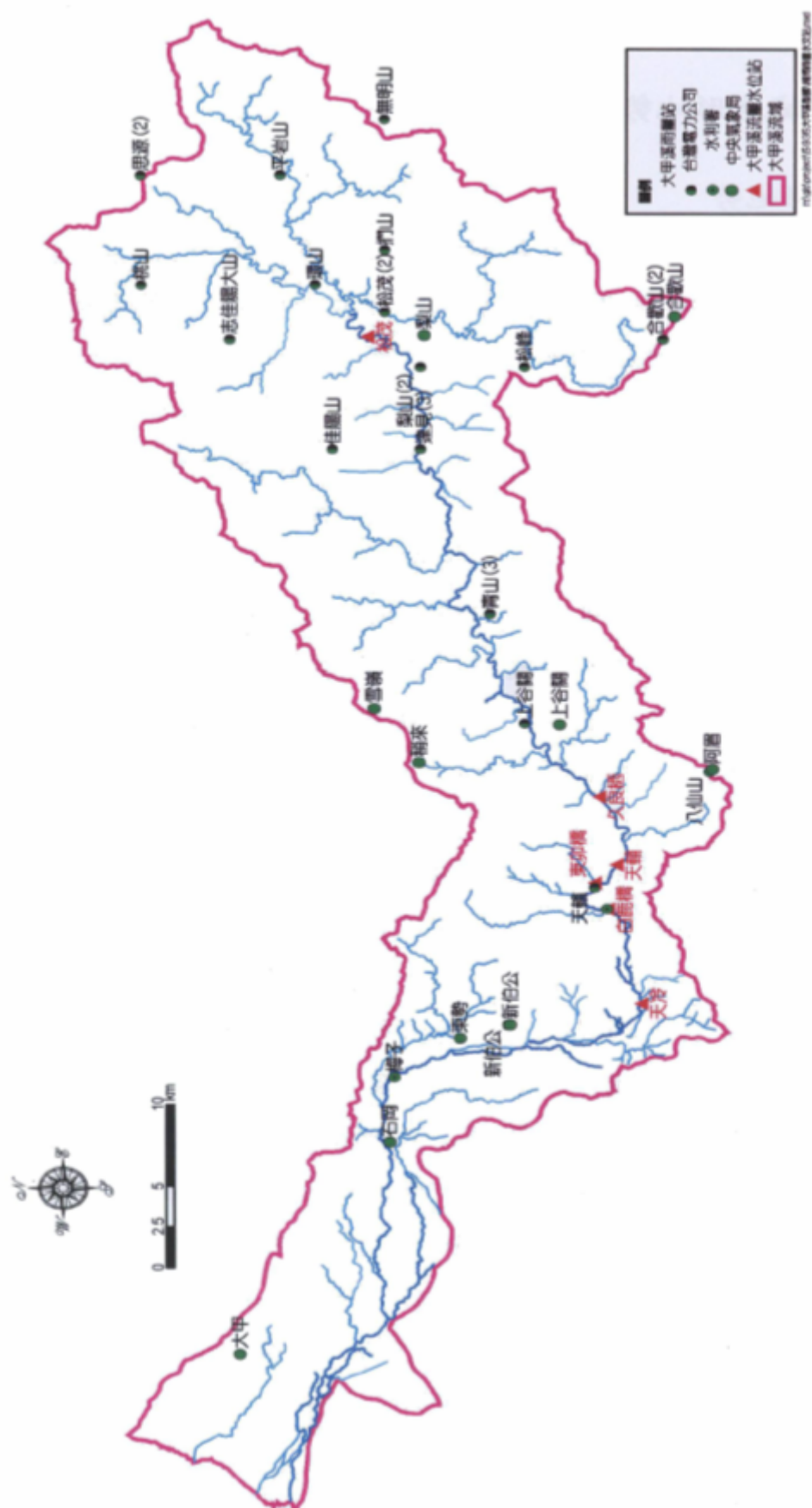


圖 3-53 大甲溪流域月平均雨量圖

大甲溪流域內主要雨量站計有中央氣象局梨山、合歡山、阿眉、稍來、東勢、上谷關、雪嶺、新伯公、石岡及大甲等 10 站。而屬於水利署雨量站則又有白鹿、梅子及八仙山等 10 站，其中八仙山於敏督利颱風過後已受損，暫無接收資料，且八仙山、梅子與白鹿測站資料多有缺漏，且記錄年份較短。而臺電公司現有之思源、環山、梨山(2)、松茂(2)、達見(3)、青山(3)、上谷關、天輪(2)、新伯公、志家陽大山、平岩山、佳陽山、桃山、松峰、捫山、無明山及合歡山(2)等 17 站。其中青山雨量站於 921 地震受損，而德基水庫上游部分一些較高的雨量站，因為維修不易及前往取得資料的路途危險艱難，因此考慮移除，撤站的有志家陽大山、桃山等站，各雨量站基本資料及位置分佈如表 3-25 及圖 3-54 所示。

表 3-25 大甲溪流域內雨量站位置分佈

編號	站名	所屬	X 座標	Y 座標	縣市	鄉鎮
C1H850	翠巒	中央氣象局	272209.24	2676610.50	南投縣	仁愛鄉
C0F950	合歡山	中央氣象局	276875.85	2671173.29	南投縣	仁愛鄉
C0F900	雙崎	中央氣象局	239481.78	2687210.91	臺中縣	和平鄉
C1F880	阿眉	中央氣象局	248588.25	2669209.84	臺中縣	和平鄉
C1F870	上谷關	中央氣象局	251100.45	2677762.27	臺中縣	和平鄉
C1F890	稍來	中央氣象局	249294.94	2684684.28	臺中縣	和平鄉
C1F940	雪嶺	中央氣象局	251889.43	2686345.69	臺中縣	和平鄉
C0F860	梨山	中央氣象局	275498.57	2683538.11	臺中縣	和平鄉
C1F850	東勢	中央氣象局	232256.98	2682541.90	臺中縣	東勢鎮
C1F910	新伯公	中央氣象局	233015.33	2679802.82	臺中縣	東勢鎮
C1F920	石岡	中央氣象局	225859.92	2686243.11	臺中縣	石岡鄉
41F260	松峰	臺電	273699.92	267907.74	臺中縣	仁愛鄉
41H220	合歡山	臺電	275405.98	2671667.27	臺中縣	仁愛鄉
40F280	天輪	臺電	241533.56	2675338.78	臺中縣	和平鄉
41F190	志佳陽大	臺電	275421.15	2694648.40	臺中縣	和平鄉
41F200	平岩山	臺電	285517.51	2691993.65	臺中縣	和平鄉
41F210	佳陽山	臺電	268608.00	2689192.40	臺中縣	和平鄉
41F220	桃山	臺電	278737.17	2699361.83	臺中縣	和平鄉
41F140	青山(三)	臺電	258463.14	2680876.32	臺中縣	和平鄉
40F130	達見	臺電	268614.08	2684577.73	臺中縣	和平鄉
40F150	上谷關	臺電	251692.85	2679028.04	臺中縣	和平鄉
40F500	伯公	臺電	233072.60	2679960.97	臺中縣	東勢鎮



(資料來源：「大甲溪下游段河道動態穩定平衡分析檢討」，經濟部水利署，2006)

圖 3-54 大甲溪流流域雨量站位置圖

3.2.3 土地利用概況

大甲溪河道內土地利用可概以石岡壩為界，上游多屬山區地形、谷地較小，雜林果樹種植為主，下游因屬沿海平原，腹地較廣，以水稻農作為主。近十年來，造成大甲溪流域明顯改變其土地利用情形，應以九二一地震最為顯著。

依據經濟部水利署水利規劃試驗所（2005）分析成果，大甲溪流域土地利用現況情形及九二一地震前後之土地利用狀況，分別詳圖 3-55 及表 3-26～表 3-27 所示。九二一地震前後除了常綠闊葉林、墓地、溪流、草生地、雞豬舍寮、竹林、崩塌地有增加外，其餘土地利用均有減少之現象，其中崩塌地增加 2,851 公頃為最多，減少的土地利用型式則以果園之 906 公頃為最多。

總而言之，林地利用部份（包括針葉林及禾草草坡，針葉、落葉闊葉及常綠闊葉混合林，針葉林，針葉林及常綠闊葉混合林等四種形式）共減少 1,350 公頃，農地共減少 1,164 公頃，崩塌地則增加 2,851 公頃。此外，依據農委會水土保持局及林務局提供平地及山坡地土地權屬資料，可知大甲溪流域已登錄土地分佈及土地權屬情形，流域已登錄地土地權屬見圖 3-56 所示，流域內以國有地 1,053.61 平方公里佔全流域面積 80.61%為最高。

表 3-26 大甲溪流域現況土地利用一覽表

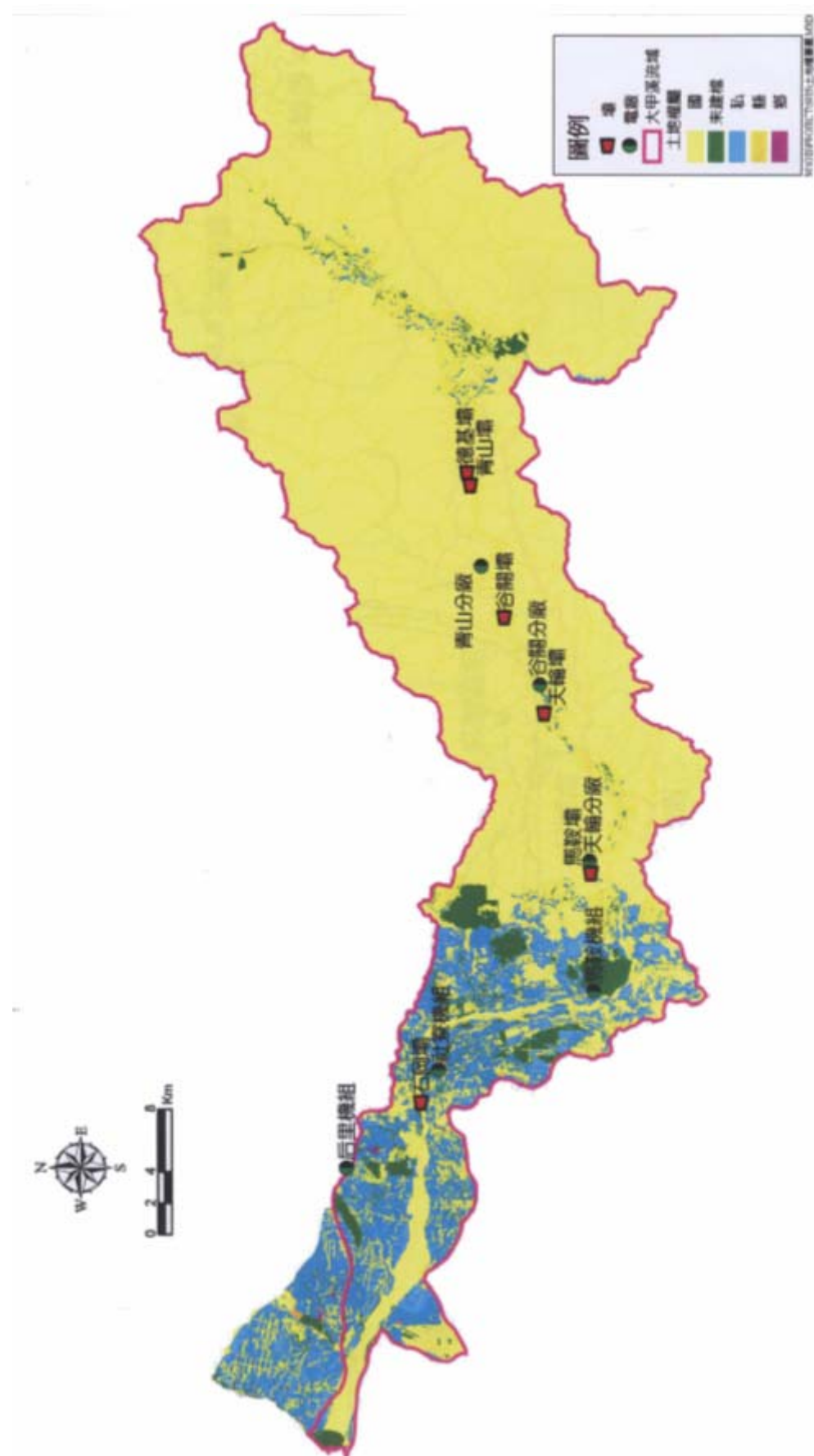
土地利用類型	利用面積(公頃)	面積百分比(%)
旱田	5510.80	4.43
常綠闊葉林	21004.38	16.88
建築區	2369.28	1.90
水田	5584.00	4.49
墓地	287.65	0.23
溪流	4307.55	3.46
可種植裸露地	204.26	0.16
荒地	1723.18	1.39
道路系統	1387.76	1.12
草生地	2626.74	2.11
灌木林	12.69	0.01
公園綠地廣場	2.07	0.00
雞豬舍寮	112.75	0.09
軍事用地	922.76	0.74
景觀區	33.28	0.03
水池	53.12	0.04
針葉林及禾草草坡	2251.20	1.81
針葉、落葉闊葉及常綠闊葉混交林	14624.20	11.76
針葉林	28843.61	23.19
針葉、常綠闊葉混交林	8316.13	6.68
竹林	553.05	0.44
茶園	42.93	0.03
果園	7980.05	6.41
檳榔	702.22	0.56
崩塌地	4174.00	3.36
開墾地	0.02	0.00
造林地	10305.81	8.28
防火線	122.64	0.10
菜園	341.88	0.27
總面積	124400.00	100.00

(資料來源：「大甲溪下游段河道動態穩定平衡分析檢討」，經濟部水利署，2006)

表 3-27 大甲溪流域現況土地利用一覽表

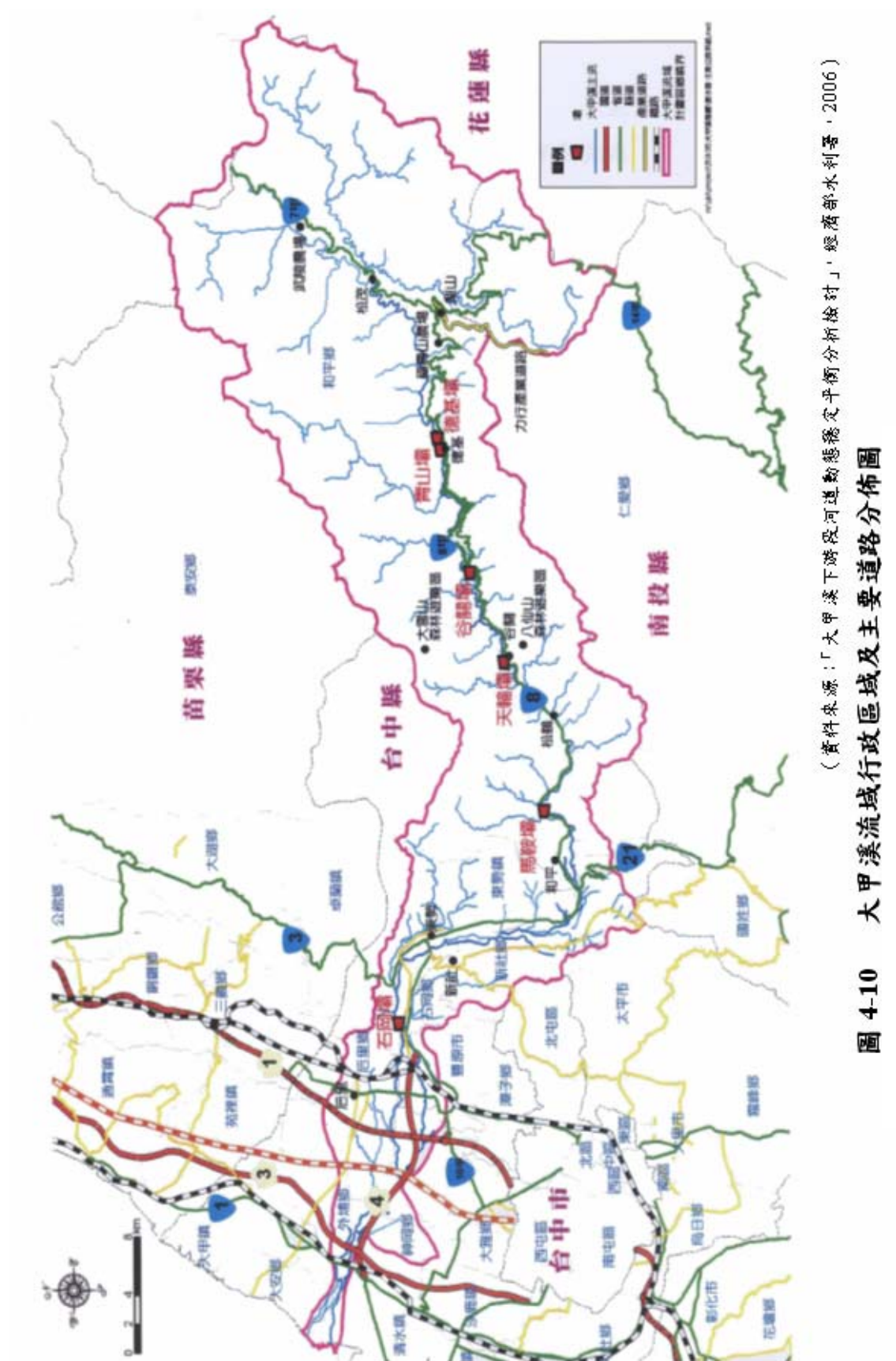
土地利用類型	地震前土地利用 (m^2)	地震後土地利用 (m^2)	地震後土地利用變化 (m^2)
旱田	58,842,113.94	57,572,219.33	-1,269,894.61
常綠闊葉林	221,274,355.35	224,225,278.20	2,950,922.85
建築區	29,083,543.92	24,767,298.89	-4,316,245.03
水田	58,265,312.57	58,250,540.24	-14,772.33
墓地	2,668,033.02	3,000,690.70	332,657.68
溪流	44,689,489.08	44,935,023.94	245,534.86
可種植裸露地	2,139,095.67	2,130,818.85	-8,276.82
荒地	19,778,848.87	17,975,668.79	-1,803,180.08
道路	14,726,650.29	14,541,046.01	-185,604.28
草地	28,925,622.46	29,052,883.06	127,260.60
灌木林	389,458.51	232,429.17	-157,029.34
公園綠地廣場	69,481.50	60,329.51	-9,151.99
雞豬舍寮	1,170,672.27	1,176,236.39	5,564.12
軍事用地	9,627,746.68	9,625,949.89	-1,796.79
景觀區	347,329.30	347,178.20	-151.10
水池	579,710.96	554,107.36	-25,603.60
檳榔	9,309,373.21	7,368,044.61	-1,941,328.60
竹林	5,061,501.71	5,830,091.71	768,590.00
果園	98,792,057.62	89,186,031.76	-9,606,025.86
針葉林	309,598,934.07	302,081,815.33	-7,517,118.74
茶園	526,151.46	451,649.45	-74,502.01
崩塌地	8,656,610.87	37,167,044.43	28,510,433.56
開墾地	32,024.31	157.04	-31,867.27
針葉林及禾草草坡	23,659,396.58	23,483,760.03	-175,636.55
針葉、落葉闊葉及 常綠闊混交林	156,267,132.47	153,316,188.90	-2,950,943.57
針葉、常綠闊葉混 交林	92,402,495.51	89,544,286.01	-2,858,209.50
造林地	107,693,422.22	107,506,875.48	-186,546.74
防火線	1,280,927.04	1,279,296.44	-1,630.60
菜園	3,371,805.29	3,566,357.03	194,551.74
合計	1,309,229,296.75	1,309,229,296.75	0.00

(資料來源：「大甲溪下游段河道動態穩定平衡分析檢討」，經濟部水利署，2006)



(資料來源：「大甲溪下游段河道動態穩定平衡分析檢討」，經濟部水利署，2006)

圖 3-56 大甲溪流域土地權屬



3.2.4 交通動線

中部橫貫公路自民國四十五年至四十九年由人力闢建完成，中部橫貫公路路線分為主線、支線及供應線，主線由東勢經梨山、大禹嶺，再沿立霧溪經關原、慈恩、洛韶、天祥而至太魯閣，沿線千岩峻秀，萬壑爭流，風景綺麗，全長 194.2 公里，編定為臺 8 線公路；支線由梨山北行經武陵而至宜蘭，全長 111.7 公里，編定為臺 7 甲線公路；供應線則由霧社經鳶峰、昆陽接大禹嶺與臺 8 線相接，全長 42.2 公里，編定為臺 14 甲線公路。其中台 8 線路段西段溯大甲溪溪谷蜿蜒東行，於大禹嶺（合歡山垭口）以下，轉入慈恩溪、瓦黑爾溪（立霧溪上游）溪谷東行，至迴頭灣南行，走陶塞溪右岸抵天祥，天祥以下沿立霧溪主流東行，進入「鑿壁嵌徑，懸崖而行」的驚險路段，其間經過九曲洞、燕子口、長春祠，深峽絕壁，激流奔瀑，堪稱「極天地之大美、得山水之清趣、盡鬼斧之神工」。

台 8 線路段西段溯大甲溪溪谷而行，沿途經過臺中縣和平鄉、石岡鄉、東勢鎮及新社鄉，且因該路段下游地區因開發較早，人口密集，交通路網極為稠密，交通逐漸發展構成一緊密的交通系統，如圖 3-57 所示。然而，因 1999 年九二一大地震發生後，西段谷關青山段路基傾毀迄今仍未修復，2004 年敏督利颱風所造成之七二水災，讓九二一災後已經十分脆弱的中橫公路再度受創，原本已經復建近完工的臺 8 線也因此中斷，目前暫以梨山經由華岡、果五區至力行產業替代道路作為替代性聯外道路，未來將以台 14 號省道及台 14 甲號省道作為規劃之替代道路。

3.2.5 歷年颱洪災害分析

大甲溪流域自民國 88 年 921 地震後，使脆弱地形更形破碎，在歷經多次風災、水災後，大量土石下移造成河道嚴重淤積。因此在大甲溪災害型態中，由馬鞍寮以上為山區河川型態，災害型態以土石災害為主，而馬鞍寮至石岡屬兩岸高地形勢洪患較小，石岡以下至河口因地勢較低，以洪水災害為主。大甲溪集水區之地形、地貌及地表堆積等特徵，顯示在歷史中應已發生大規模搬運及堆積現象。

近年來之災害可追溯至賀伯風災，其後遭 921 集集大地震之侵襲，區域內溝谷之數目及面積明顯增加，發生廣泛崩塌現象，而桃芝颱風及敏督利颱風挾帶豪雨來襲，更促使上游崩塌加劇，並發生大規模地質材料的搬運及溝谷間之切蝕及堆積情形，拓寬加長或新生多條土石流。另一主因歸咎於計畫區地層構造複雜、斷裂摺皺發達、源頭處邊坡坡陡、穩定性差，經 921 地震造成大量崩塌，流域內各子集水區大量堆積土石，實為敏督利颱風中發生土石流之主要土石來源。大甲溪流域受到 921 大地震、90 年桃芝及納莉颱風之影響，於該區域發生嚴重災害，以下針對歷年災害背景及相關環境資料進行分析說明。

1.921 大地震(民國 89 年 9 月 21 日)

(1)災情：

百年強震，強度超過 450gal，震災包含臺中縣東勢、石岡、豐原及和平鄉等地。道路設施以台八線谷關德基破壞最為嚴重，水利設施方面為石岡壩引水調蓄功能受損，德基水庫邊坡大面積崩滑，震後邊坡表面大量土石崩落，造成集水區每遇颱風大雨即有大量土砂下移。

(2)災害成因：

因規模 7.3 強震，震源深度約 1.1km，屬於強烈且淺層之地震，其釋放能量之大導致大甲溪沿岸邊坡極度不穩定。

2.桃芝颱風（民國 90 年 7 月 30 日）

(1)災情：

大甲溪流域大量土石滑落，土石淤積至橋樑樑底高，導致洪水溢堤淹入兩側住家及漫流台八線。許多支流、野溪等皆湧入大量土石匯入大甲溪，使大甲溪河床淤高 2 至 3 公尺，以谷關發電廠尾水出水口淤積達 9 公尺最為嚴重。

(2)災害成因：

桃芝颱風為一高強度及高雨量之颱風，且大甲溪流域經 921

強震後邊坡極不穩定，大量降雨使得崩塌土方皆匯入大甲溪河床，導致通洪斷面不足造成洪災發生。

3.敏督利颱風（民國 93 年 7 月 2 日）

(1)災情：

- a.大甲溪流域之災害包括中橫梨山一帶對外交通全面中斷、台八線路基及橋樑多處受損，台八線谷關至德基段部分路段路基流失，如表 3-28 所示。
- b.河床抬昇約 10 公尺，兩岸遭受洪災；而谷關河段河床淤高約 15-20 公尺。
- c.臺電所屬大甲溪電廠四座分廠（德基、青山、谷關及天輪）受損嚴重無法發電。
- d.中上游馬鞍壩至天輪壩河道淤積嚴重，並以松鶴部落段及谷關溫泉段最為嚴重，土砂淤積量總計約四百八十萬立方公尺，而各河段之淤積土石量約六百萬立方公尺。
- e.三叉坑到雙崎路段坍方、東勢鎮東坑路、東崎路一帶居民因溪水暴漲受洪水淹沒，中崙及白冷嚴重受損、三叉坑及松鶴地區遭土石流損毀有 15 戶及 40 餘戶。
- f.下游河段主河道之舊堤防沖毀 550 公尺、豐洲堤防沖毀 300 公尺、客庄堤防沖毀 500 公尺、石城護岸沖毀 150 公尺及南勢堤防損毀 350 公尺，國道 4 號神岡交流道附近路基，亦被淘空達百餘公尺。
- g.崩塌地及土石流潛勢溪流數量大幅增加，保守估計崩塌土石量約 3 億立方公尺。
- h.發生土石流之區段及溪流：石岡壩至馬鞍壩區段，沙連溪支流中崙溪及石角溪發生土石流；馬鞍壩至天輪壩區段，東卯溪、冷裡溪、松鶴一溪、松鶴二溪、阿邦溪、石文溪及稍來溪等均發生土石流；德基水庫至上游集水區段，左岸之必坦溪發生土石流，下移土砂堆積排洪隧道進口，影響大壩排洪安全；達

盤溪、成武溪、晉元溪等支流發生土石流，造成台八線跨河橋樑受損。

- i.天輪壩至德基水庫區段，於七二水災及艾利颱風後，有匹亞桑溪、志樂溪、馬崙溪、石山溪及久良屏溪等發生土石流，導致土石於河谷嚴重淤積，淤積量約 1,040 萬立方公尺。
- j.水保局負責治理山坡地在敏督利颱風搶修經費約 5,800 萬元、復建經費約 57,800 萬元。上游地區林務局所管轄之區域，林道受損嚴重外，另外東卯溪、阿邦溪、十文溪……等等皆爆發嚴重土石流災害，概估敏督利颱風後之搶修經費約 1,100 萬元。

(2)災害成因：

致災成因與桃芝颱風相似，但嚴重性更加大數倍，數條支流爆發土石流直接對居民造成威脅，土石匯入主流後即導致主流改道及洪水溢淹之情形。

表 3-28 七二水災期間台 8 線中橫公路沿線災害彙整

災害地點	位置座標		災害形式	受災概況
	X	Y		
台中縣東勢鎮	232855	2676526	土石流災害 洪水災害	台 8 線 8k+070 處永安橋遭沖毀
臺中縣東勢鎮	232734	2674932	坡地災害	台 8 線 9k+700 處石頭滾落掩埋路面
臺中縣東勢鎮	232832	2674244	洪水災害	台 8 線 10k+800 處龍安橋附近路基流失約 200 公尺
臺中縣東勢鎮	233229	2673751	土石流災害	台 8 線 11k+200 處發生土石流
臺中縣東勢鎮	233724	2673230	坡地災害	台 8 線 12k 處上邊坡崩坍掩埋路面
臺中縣東勢鎮	234206	2673135	坡地災害	台 8 線 12k+500 處上邊坡崩坍掩埋路面
臺中縣和平鄉	242666	2674464	洪水災害	台 8 線 24k+400 處路基流失
臺中縣和平鄉	242796	2674440	坡地災害	台 8 線 24k+500 處上邊坡崩坍掩埋路面
臺中縣和平鄉	244393	2673902	坡地災害	台 8 線 26k+600 處上邊坡崩坍掩埋路面
臺中縣和平鄉	245920	2674267	洪水災害	台 8 線 28k+400 處附近淹水未退
臺中縣和平鄉	247581	2675653	土石流災害	台 8 線 30k+500 處麗陽旁野溪發生土石流中斷道路
臺中縣和平鄉	249224	2676913	洪水災害	台 8 線過篤銘橋往收費站處路基流失道路中斷
臺中縣和平鄉	251932	2678354	洪水災害	台 8 線 35k+350 處路基流失
臺中縣和平鄉	251927	2678454	土石流災害	台 8 線 38k 穿雲橋遭土石流沖毀
臺中縣和平鄉	252252	2678718	土石流災害	台 8 線 38k 谷關東方保安分隊旁映虹野溪發生土石流，沖毀映虹橋
臺中縣和平鄉	253445	2679561	土石流災害	台 8 線 39K+800 遭土石流沖毀道路中斷
臺中縣和平鄉	253627	2679728	土石流災害	台 8 線 40K+050 遭土石流沖毀道路中斷
臺中縣和平鄉	255033	2680007	土石流災害	台 8 線 42K+130 道路中斷
臺中縣和平鄉	255546	2680251	土石流災害	台 8 線 43K+300 道路中斷
臺中縣和平鄉	256176	2680358	土石流災害	台 8 線 44K+220 道路中斷
臺中縣和平鄉	256973	2680784	土石流災害	台 8 線 45K+650 處敬勤橋遭土石沖毀道路中斷
臺中縣和平鄉	257328	2681002	土石流災害	台 8 線 46K+600 道路中斷

表 3-28 七二水災期間台 8 線中橫公路沿線災害彙整(續)

災害地點	位置座標		災害形式	受災概況
	X	Y		
臺中縣和平鄉	260186	2681718	土石流災害	台 8 線 51K+950 道路中斷
臺中縣和平鄉	260511	2681576	土石流災害	台 8 線 52K+400 道路中斷
臺中縣和平鄉	260775	2681495	土石流災害	台 8 線 52K+700 道路中斷
臺中縣和平鄉	263135	2682780	土石流災害	台 8 線 57K+780 道路中斷
臺中縣和平鄉	263387	2682809	土石流災害	台 8 線 58K+050 道路中斷
臺中縣和平鄉	264004	2682642	土石流災害	台 8 線 58K+800 道路中斷
臺中縣和平鄉	264414	2682679	土石流災害	台 8 線 59K+230 道路中斷

資料來源：整理自「七二水災災區調查與復建策略研擬」，2004。

4. 艾利颱風（民國 93 年 8 月 24 日）

(1) 災情：

共 3 人失蹤，松鶴部落 5、6 鄰 71 戶住家僅剩 2 戶，松鶴派出所也淹水兩層，員警全部撤離；通訊失聯，部落對外聯絡的三條橋樑全數中斷。松鶴社區上游防洪缺口洪水溢流，造成最大淹水深度約 120 公分，平均淹水深度約 60 公分，淹水範圍約 2.4 公頃。

(2) 災害成因：

致災成因與敏督利風災相似。

5. 海棠颱風（民國 94 年 7 月 18 日）

(1) 災情：

大甲溪谷關段台 8 線 27k 至 32k 段路基嚴重淘空，橋樑多處受損，阿邦溪爆發土石流，完全掩蓋台 8 線路段。松鶴部落遭松鶴一溪、二溪及大甲溪爆發洪水的三方夾擊作用下，造成和平鄉逾 3,000 人受困。

(2)災害成因：

由於海棠颱風挾帶集中性驚人雨量。以大甲溪中游段而言，其致災因素包含土石流的直接衝擊主流的洪水氾濫，其原因皆為河床原本已嚴重淤積加上土石的瞬間大量排出導致。

6. 95 年 0609 豪雨（民國 95 年 6 月 9 日）

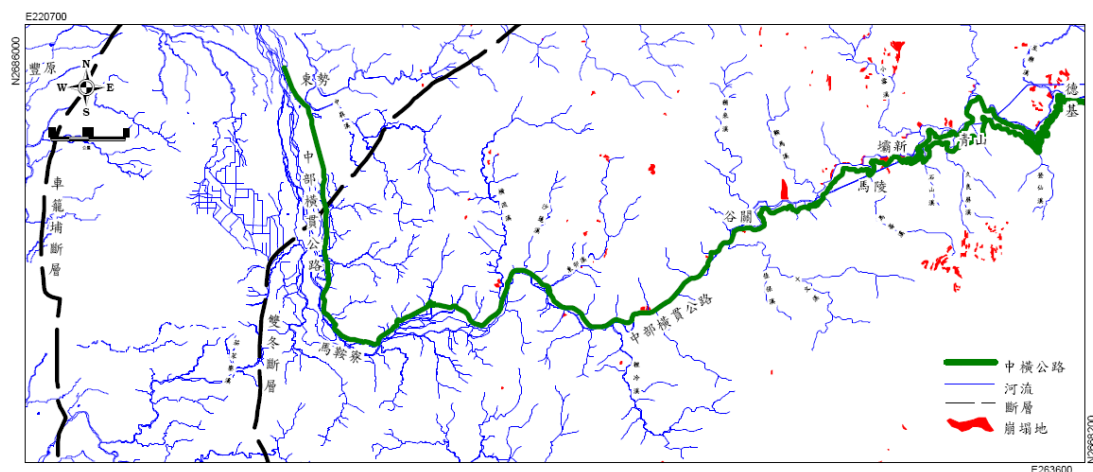
(1)災情：

梨山降雨超過 800 公釐，大甲溪上游德基水庫，因為松茂進水口大量水源注入水庫，水庫緊急洩洪。德基水庫洩洪量達 750cms，大甲溪再度暴漲，中橫公路被溪水部分淹沒，谷關和松鶴部落再度變成孤島。中橫公路麗陽營區至松鶴部落的阿邦溪路段，遭大甲溪水暴漲淹沒，加上阿邦溪的土石流，27.5km 德芙蘭以及麗陽營區附近都有長達 70 公尺的路基遭到淘空，使得松鶴往谷關交通中斷。臺中縣稍來山區，32 小時下了 514mm 的雨量，台 8 縣中橫公路跟台 7 甲線有多處坍方，梨山地區對外交通完全中斷，新建長青橋水位也逼近橋面。

(2)災害成因：

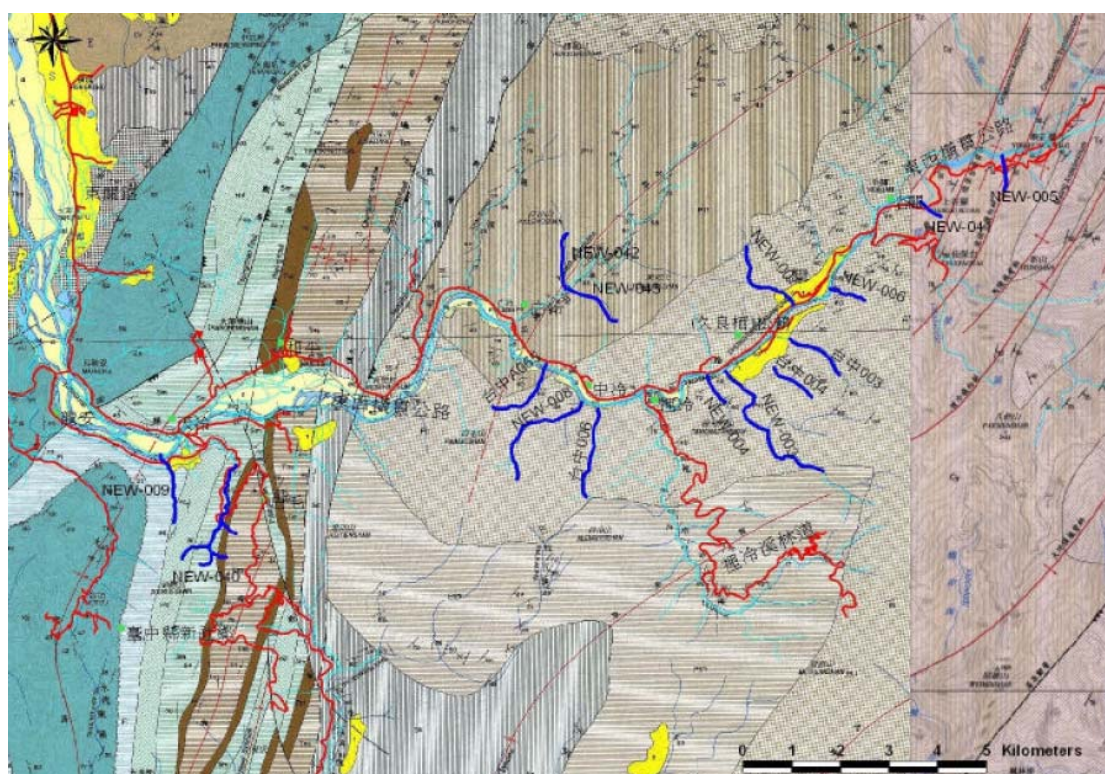
由於此次洪水事件於先前全台有已有十餘日之局部降雨，以致土壤含水量飽和，再加上 6 月 9 日前後之超大豪雨，因此導致洪水災情。

綜觀上述因素，大甲溪流域災情是以 921 地震時受創最劇，尤其谷關至德基間最為嚴重，中橫公路因此而封路（如圖 3-58 所示）。桃芝颱風雖有災害，但並不嚴重，而敏督利風災在此區損害嚴重並且往西側延伸至和平、天冷地區均傳出災害，致使谷關至白冷間台八線道路柔腸寸斷，部分橋樑沖毀，松鶴部落被土石流嚴重侵襲，相關災情分佈如圖 3-59 所示。



(資料來源：『大甲溪九二一地震災後治理規劃 檢討』，經濟部水利處水利規劃試驗所，2000)

圖 3-58 東勢至德基段之集集地震前崩塌位置及水系圖



(資料來源：『敏督利颱風及七二豪雨水文分析』，經濟部水利署，2004)

圖 3-59 敏督利風災大甲溪流域災情位置圖

3.2.6 土石流潛勢溪流分佈情形

依據農委會水土保持局委託財團法人成大研究發展基金會對土石流潛勢溪流歷年（1999～2000）調查結果顯示，目前大甲溪流域中共有土石流潛勢溪流 40 條，相關位置及基本屬性分別整理於圖 3-60 及表 3-29，其中高潛勢溪流佔 9 條，中潛勢溪流佔 25 條，低潛勢溪流則佔 6 條。本流域中溪流型土石流位置主要分佈在中海拔山區，如和平鄉的博愛村、天輪村、中坑村、南勢村及自由村等地。此外，雖然高潛勢溪流型多集中於中海拔山區，但經過去現勘資料，和平鄉之博愛村松鶴、裡冷、白冷等部落雖然位於中潛勢溪流附近，土石流爆發情形卻相當嚴重。

依據中興工程『大甲溪流域德基至馬鞍段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究』（2006），以遙測資料及現勘調查結果顯示，由(1)921 集集大地震(2)桃芝颱風(3)敏督利颱風及(4)艾利暨海棠颱風等四次重要崩塌地影響事件，利用各區域分段不同集水區之崩塌面積、崩壞比、新增崩塌面積、新增崩塌崩壞比、持續崩塌面積、持續崩塌崩壞比、崩壞復育面積、崩壞復育比、新生崩塌率及再現崩塌率等，劃分德基至馬鞍壩之間土石流發生區域，其中，四次崩塌事件判釋圖及德基壩至馬鞍壩間土石流發生位置，分別如圖 3-61 至圖 3-66 所示。

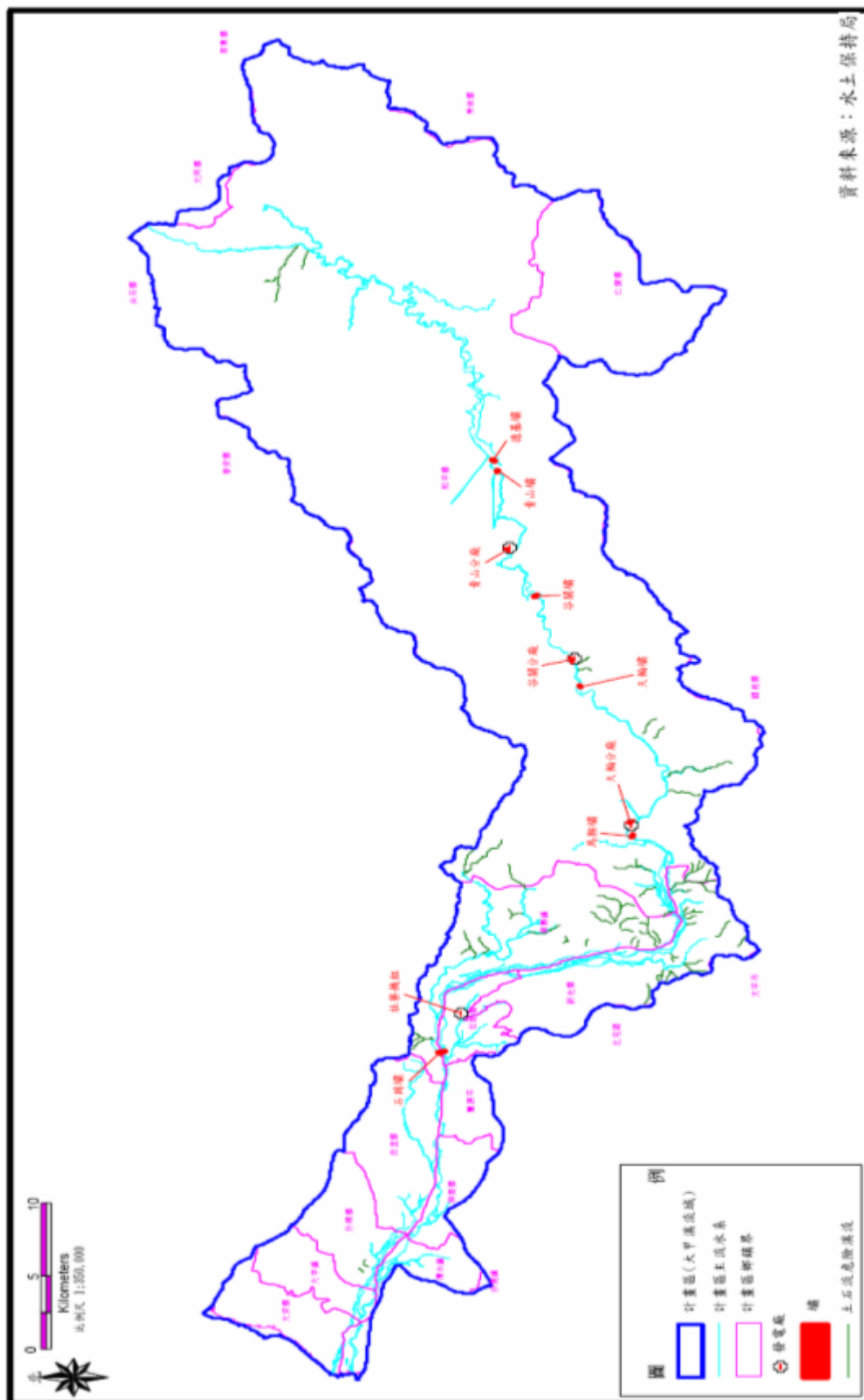


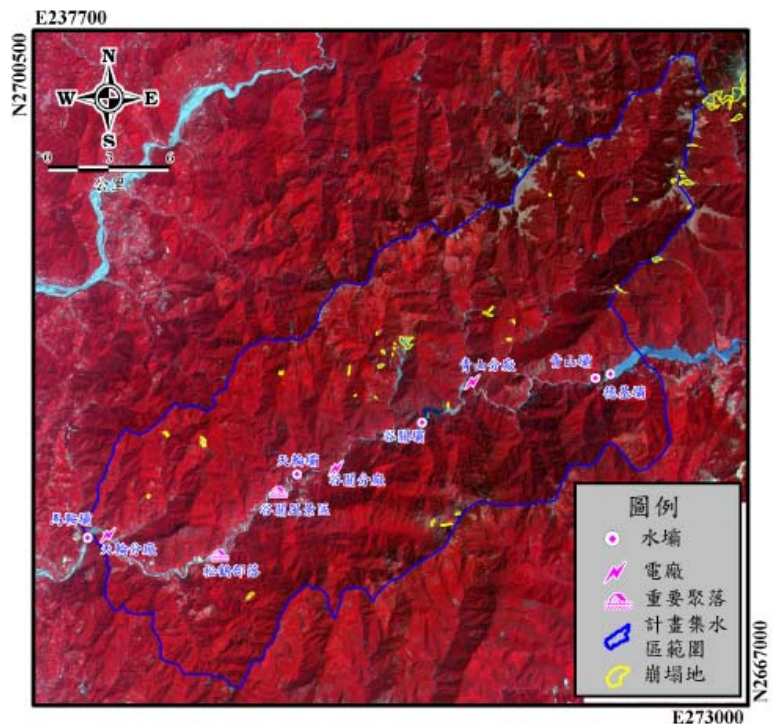
圖 3-60 大甲溪流域土石流潛勢分佈圖

表 3-29 大甲溪流域土石流潛勢溪流基本屬性

土石流 編號	X 座標	Y 座標	鄉鎮	村里	溪流 潛勢	溪流名稱	溪流長度 (m)	集水面積 (ha)	有效面積 (ha)	地質
臺中 001	280578	2694880	和平鄉	平等村	中	七家灣溪支	4212	2114.0	629.0	古第三紀變質岩
臺中 002	280170	2694236	和平鄉	平等村	中	七家灣溪支	1279	147.0	133.0	古第三紀變質岩
臺中 003	247514	2674952	和平鄉	博愛村	中	松鶴坑溪	1339	371.0	339.0	古第三紀變質岩
臺中 004	247193	2674359	和平鄉	博愛村	中	無名	1026	47.0	47.0	古第三紀變質岩
臺中 005	244592	2673519	和平鄉	博愛村	中	裡冷溪	4424	1997.0	801.0	古第三紀變質岩
臺中 006	243589	2673482	和平鄉	天輪村	中	大甲溪支流	1887	443.0	143.0	古第三紀變質岩
臺中 007	231867	2672582	新社鄉	中和村	中	溪頭二號橋野溪	1544	164.0	55.0	新第三紀沈積岩
臺中 008	231400	2673595	新社鄉	中和村	中	水涵坑野溪	812	66.0	8.0	新第三紀沈積岩
臺中 009	229351	2674650	新社鄉	中和村	低	南華莊野溪	1508	48.0	5.0	新第三紀沈積岩
臺中 010	229389	2671901	新社鄉	協成村	中	大崩山野溪	1545	165.0	89.0	新第三紀沈積岩
臺中 011	228955	2671448	太平市	頭汴里	高	田寮仔側野溪	959	34.0	18.0	新第三紀沈積岩
臺中 A007	236919	2681666	東勢鎮	隆興里	低	北坑橋野溪	2147	73.0	10.0	新第三紀沈積岩
臺中 A008	235222	2681846	東勢鎮	隆興里	中	坪埔野溪	1004	208.0	35.0	新第三紀沈積岩
臺中 A009	233997	2681471	東勢鎮	隆興里	中	石角國小旁野溪	2256	175.0	28.0	新第三紀沈積岩
臺中 A013	226626	2686967	東勢鎮	太興里	中	珍東坑溪	1857	116.0	26.0	新第三紀沈積岩
臺中 A014	233374	2679236	東勢鎮	上城里	中	上城里野溪	780	31.0	9.0	新第三紀沈積岩
臺中 A015	233075	2678181	東勢鎮	慶東里	低	頭溢坑溪支流溪	415	9.0	23.0	新第三紀沈積岩
臺中 A016	225707	2681689	新社鄉	南村里	中	牛欄溪	2767	224.0	78.0	新第三紀沈積岩
臺中 A017	234592	2676632	東勢鎮	慶福里	高	永安橋野溪	3124	526.0	116.0	新第三紀沈積岩

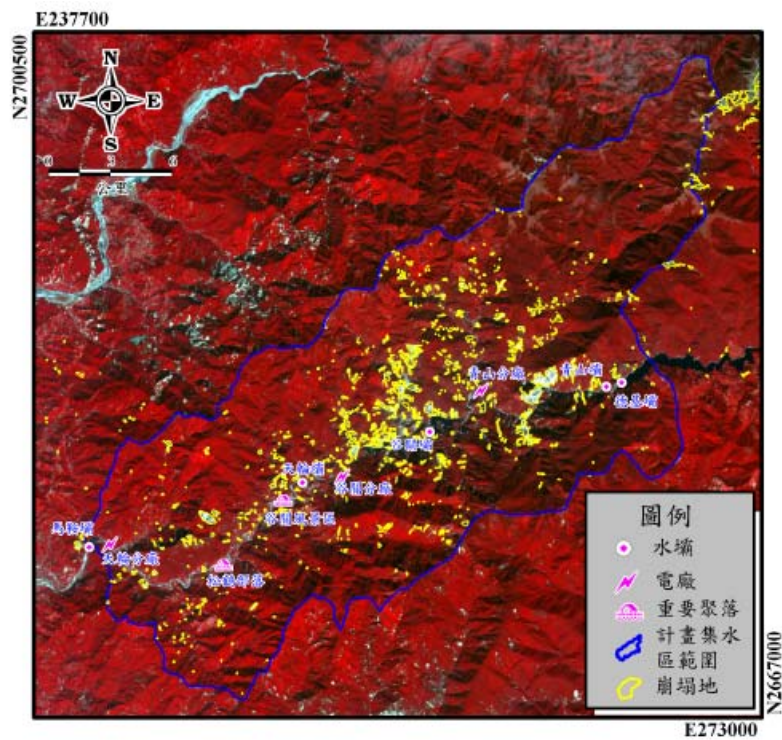
表 3-29 大甲溪流域土石流潛勢溪流基本屬性(續)

臺中 A018	234234	2676413	東勢鎮	慶福里	高	永安橋野溪	1464	97.0	21.0	新第三紀沈積岩
臺中 A019	234109	2675989	東勢鎮	慶福里	高	永安橋野溪	756	52.0	46.0	新第三紀沈積岩
臺中 A020	233154	2673936	東勢鎮	慶福里	中	重慶橋野溪	1080	73.0	41.0	新第三紀沈積岩
臺中 A021	232954	2674164	東勢鎮	慶福里	中	復興橋野溪	2295	180.0	20.0	新第三紀沈積岩
臺中 A022	232916	2675325	東勢鎮	慶福里	中	樹明橋野溪	508	18.0	6.0	新第三紀沈積岩
臺中 A023	232949	2675651	東勢鎮	慶福里	中	茅煙坑溪	654	25.0	10.0	新第三紀沈積岩
臺中 A025	236870	2674475	和平鄉	南勢村	高	樹德橋野溪	1175	52.0	28.0	新第三紀沈積岩
臺中 A026	237017	2673232	新社鄉	福興村	中	福民橋野溪	3293	447.0	9.0	新第三紀沈積岩
臺中 A027	236751	2673130	新社鄉	福興村	中	白毛台野溪	1141	38.0	10.0	新第三紀沈積岩
臺中 A028	235356	2672632	新社鄉	福興村	高	東埔 11 橋野溪	417	8.0	2.0	新第三紀沈積岩
臺中 A029	235315	2673456	和平鄉	南勢村	高	大同橋野溪	743	34.0	16.0	新第三紀沈積岩
臺中 A030	235186	2672523	新社鄉	福興村	中	東埔 10 橋野溪	1417	49.0	5.0	新第三紀沈積岩
臺中 A031	234846	2672503	新社鄉	福興村	低	東埔 9 橋野溪	624	21.0	3.0	新第三紀沈積岩
臺中 A032	234456	2672147	新社鄉	福興村	低	東埔 7 橋野溪	594	20.0	16.0	新第三紀沈積岩
臺中 A033	233684	2670637	新社鄉	中和村	中	抽藤坑野溪	1477	93.0	49.0	新第三紀沈積岩
臺中 A034	233039	2669547	新社鄉	中和村	中	抽藤坑野溪	882	37.0	14.0	新第三紀沈積岩
臺中 A035	232346	2673493	新社鄉	龍安村	中	豐埔三橋野溪	567	32.0	1.0	新第三紀沈積岩
臺中 A036	231356	2673816	新社鄉	中和村	低	十股林野溪	1036	48.0	5.0	新第三紀沈積岩
臺中 A037	229865	2672021	新社鄉	協成村	高	抽藤坑野溪	240	6.0	4.0	新第三紀沈積岩
臺中 A038	229737	2672223	新社鄉	協成村	高	抽藤坑對岸野溪	377	4.0	2.0	新第三紀沈積岩
臺中 A043	224742	2672507	太平市	坪村里	中	七搖橋野溪	1181	81.0	1.0	新第三紀沈積岩



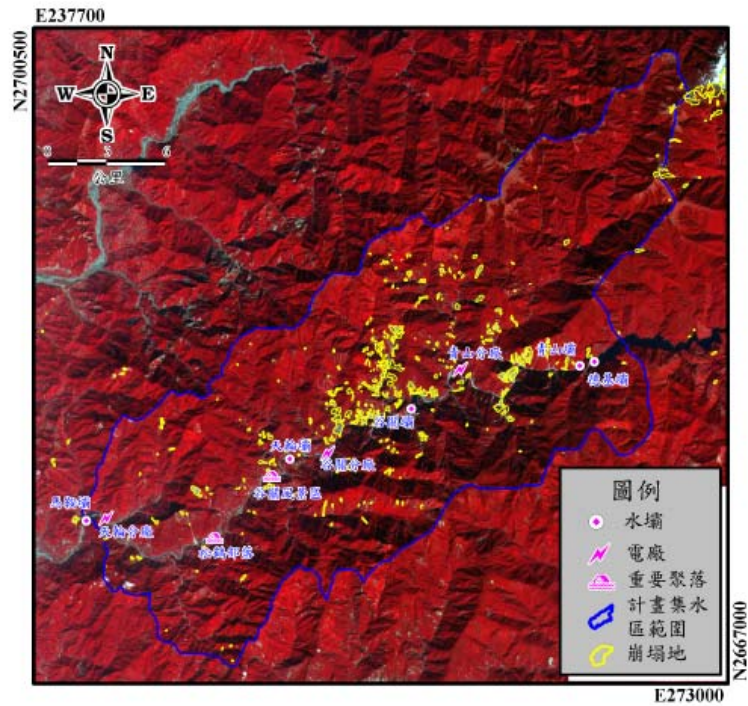
(資料來源：大甲溪流域德基至馬鞍段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究，2006)

圖 3-61 921 集集大地震前 (88/04/01)，德基-馬鞍壩崩塌地判釋圖



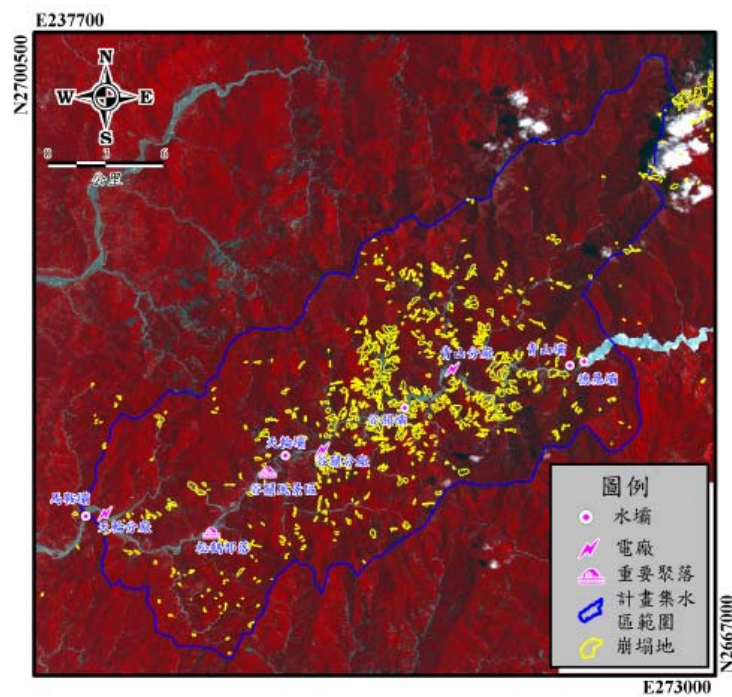
(資料來源：大甲溪流域德基至馬鞍段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究，2006)

圖 3-62 921 集集大地震後 (88/10/31)，德基-馬鞍壩崩塌地判釋圖



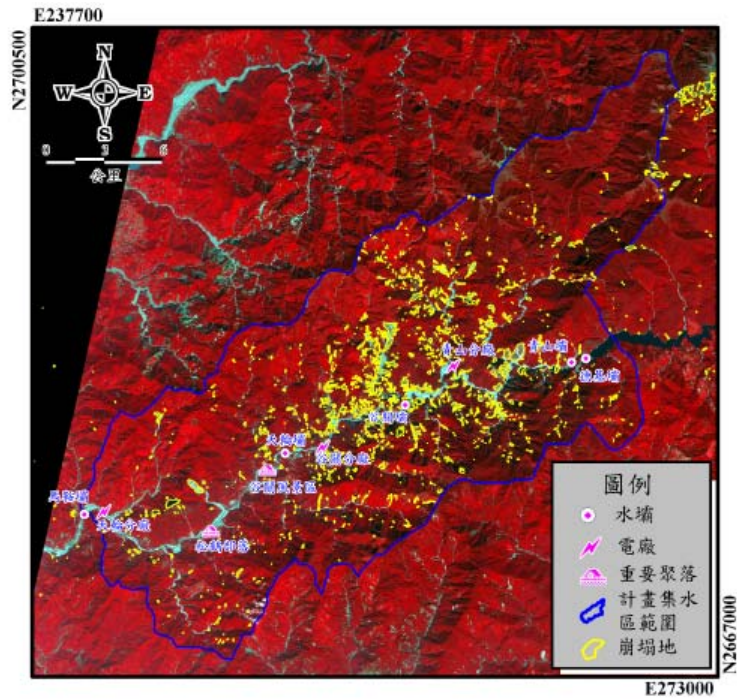
(資料來源：大甲溪流域德基至馬鞍段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究，2006)

圖 3-63 桃芝颱風後 (90/11/18)，德基-馬鞍壩間崩塌地判釋圖



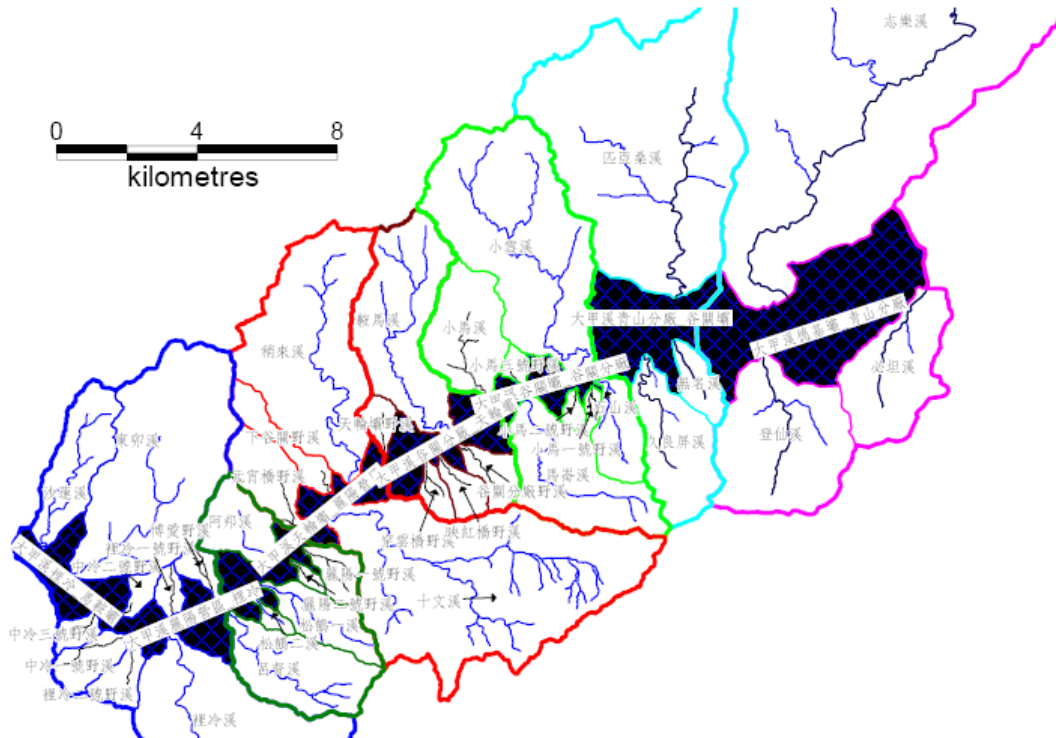
(資料來源：大甲溪流域德基至馬鞍段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究，2006)

圖 3-64 敏督利颱風後 (93/07/31)，德基-馬鞍壩間崩塌地判釋圖



(資料來源：大甲溪流域德基至馬鞍壩段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究，2006)

圖 3-65 艾利暨海棠颱風後 (93/10/21)，德基-馬鞍壩崩塌地判釋圖



(資料來源：大甲溪流域德基至馬鞍壩段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究，2006)

圖 3-66 大甲溪流域，德基至馬鞍壩間土石流潛勢溪流位置圖

第四章 研究區域介紹

依據第三章針對大甲溪流域環境之分析說明顯示，大甲溪流域之台 8 線跨河橋樑在桃芝颱風及敏督利颱風期間皆有多處橋樑受土石流衝擊影響而損毀。因此不論就災害歷史、橋樑規模工法代表性亦或是土石流復發潛勢而言，皆為適當之研究地點選擇。然而由於九二一地震地表加速度在流域內誘發大規模地表崩塌，因此後續近年數次颱風引發之崩塌及土石流規模皆明顯大於以往，對於跨河橋樑往往造成全面性之毀損；換言之，整體橋樑結構連同道路路基一併沖毀流失。其次九二一地震造成台 8 線西段谷關青山段路基傾毀迄今仍未修復，2004 年敏督利颱風所造成之七二水災，讓九二一災後已經十分脆弱的台 8 線中橫公路再度受創，柔腸寸斷。綜合上述，雖然大甲溪流域台 8 線跨河橋樑適合作為研究地點，但由於交通可及性及該路段大規模毀損，對於現場調查及橋樑結構損壞成因探討皆將造成極大困難，因此本計畫未將台 8 線跨河橋樑列為研究地點之考量。

依據第三章陳有蘭溪流域地文特性、水文環境、台 21 線橋樑結構設施及土石流災害分布等分析說明可知，陳有蘭溪流域之土石流災害歷史豐富，同時土石流再發潛勢亦高。在跨河橋樑結構類型方面，具有橋墩設施之橋樑上部結構分為預力樑及鋼製箱型樑，下部結構則為沈箱基礎及全套管基樁兩類，其中以信義橋、十八重溪橋及愛玉橋等橋樑較具代表性。因此，本計畫後續擬以台 21 線新中橫公路之信義橋(89K+959)、十八重溪橋(98K+070)及愛玉橋(108K+770)作為研究地點，以下針對上述三座橋樑基本資料、災害歷史、橋樑復建及河道整治等內容進行說明，以利瞭解研究地點之初步概況。

4.1 信義橋(89K+959)

4.1.1 背景資料說明

信義橋位於南投信義鄉台 21 線 89K+959，主要為連接水里與信義之交通要道。信義橋完工於民國 70 年 6 月，橋樑總長 180 公尺，橋面淨寬 7.6 公尺，上部結構採用預力混凝土（PCI）簡支樑，下部結構則為懸臂式單柱圓形橋墩及沈箱基礎。橋樑周遭地質因信義橋位於陳有蘭溪斷層線上，恰為南莊層與變質岩之交界處，其中南莊層為新第三紀沈積岩，岩性為淡灰色厚砂岩偶夾薄層頁岩，呈現砂頁岩薄互層。

信義橋主要跨越郡坑溪（南投 026，危險等級中級），距離與陳有蘭溪匯流口約 1 公里，郡坑溪土石流類型為溪流型，土石源自於上游西巒大山及牛相鬥崩塌之大量土石（詳圖 4-1），橋址處因河道坡度約 5 度，屬於土石流堆積區與淤積區。郡坑溪上游支流野溪共分三部分：十甲附近上游野溪、三十甲附近上游野溪及三十甲至郡坑溪口間野溪，集水區與上游支流野流相關位置及基本屬性分別如圖 4-2 及表 4-1 所示。

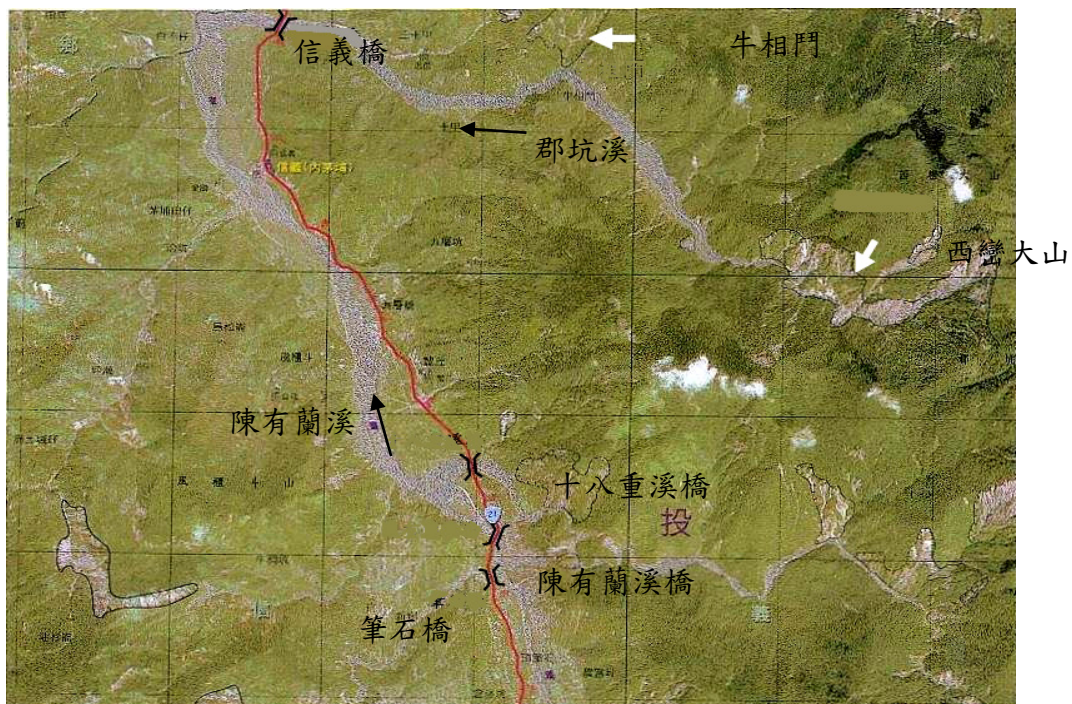


圖 4-1 信義橋上游牛相鬥及西巒大山崩塌分佈

表 4-1 郡坑溪上游支流基本屬性表

溪流名稱	集水區		溪流		崩塌地	
	面積 (ha)	高差 (m)	長度 (m)	平均坡度 (°)	位置	面積 (ha)
十甲上游野溪	73.62	624	1620	38.52%	溪流源頭及中 游兩岸	1.67
三十甲 上游野溪	201.38	988	2880	34.31%	中上游兩岸	23.81
三十甲至 郡坑溪口野溪	31.68	376	1060	35.47	中上游兩岸	0.4

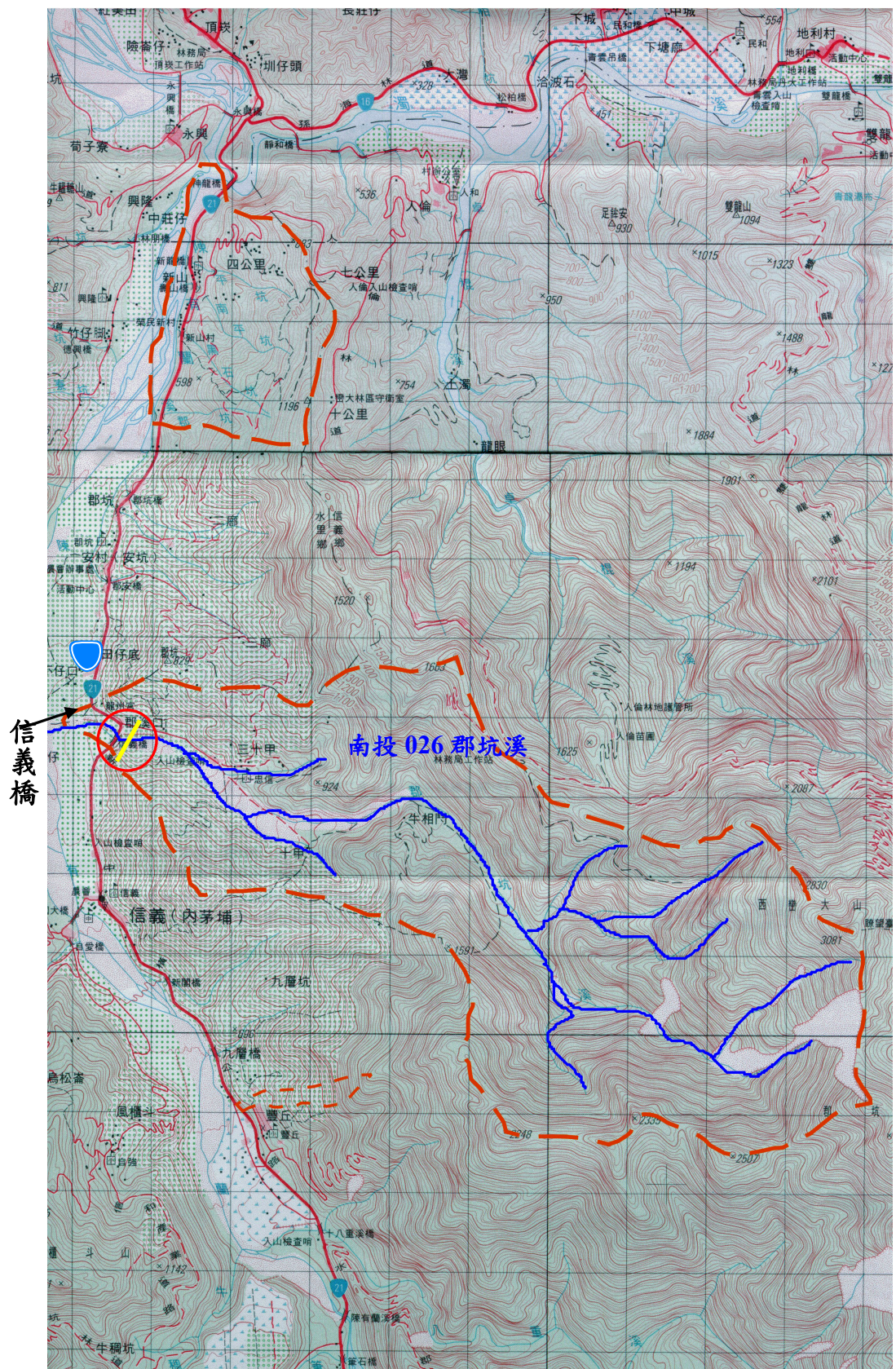


圖 4-2 郡坑溪及其野溪集水區範圍圖

4.1.2 災害歷史

信義橋於 85 年賀伯颱風及 90 年桃芝颱風事件中雖有土石流爆發，但伴隨有部分洪水效應介入土石流對信義橋之衝擊作用；在兩次土石洪水事件中，右岸 A1 橋台至 P3 橋墩均因受到橋樑引道的阻滯、橋樑淨高不足，導致大量土石淤積其中；然而在賀伯颱風期間，信義橋並未發生斷橋事件，土石僅對部分預力樑與墩柱帽樑產生撞擊與磨蝕作用，造成鋼筋外露之情形（圖 4-3～圖 4-4）。但在桃芝颱風期間，信義橋卻發生斷橋事件。主要原因乃是 921 集集大地震過後，郡坑溪及其野溪中蘊含大量鬆散土石，在暴雨、洪水及橋樑淨高不足等原因作用下，造成大量土石無法順利通過，導致 P1 橋墩傾倒，其上部第一、二跨橋面慘遭流失（圖 4-5～圖 4-7）。

此外，兩次颱風洪事件中，由於溪水暴漲、水流湍急，導致上游溪床與西邊之大量土石形成高濃度挾砂水流。在流動過程中，由於橋址上游處約 800 公尺附近微幅轉彎導致挾砂水流靠 A2 橋台凹岸沖刷而下，造成 P3 橋墩至 A2 橋台形成洪水流動之深槽區。在沖刷及撞擊相互作用下，造成 A2 橋台附近堤防破壞，毀損長度達百餘公尺（圖 4-8～圖 4-9）。（圖 4-1～圖 4-9 資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005）



圖 4-3 賀伯颱風期間信義橋 A1 橋台附近大量土石淤積災況



圖 4-4 賀伯颱風期間信義橋橋面遭土石淤埋情形



圖 4-5 土石淤積造成信義橋樑淨空不足，橋面抬升流失



圖 4-6 桃芝颱風期間，信義橋第一、二跨橋面流失情形



圖 4-7 桃芝颱風後 P1 橋墩墩柱營水面遭土石流撞擊造成鋼筋外露



圖 4-8 賀伯颱風期間，洪水土石沖刷毀損兩岸堤防



圖 4-9 桃芝颱風期間，下游側堤防址部遭沖刷淘空情況

4.1.3 橋樑搶修及修復情形

1. 賀伯颱風

賀伯颱風後，為防止土石流再次來襲造成橋墩遭巨石或流木撞擊而受損，工程單位遂針對橋墩結構部分進行包墩補強作業。信義橋包墩補強方式則採用實心狀之方式進行，並在外層包覆鋼板，藉以加強橋墩下部結構並提升橋墩耐撞程度。然而包墩補強使信義橋橋墩在沈箱頂部與樑帽間形成一短柱，造成 921 集集大地震時信義橋橋墩因短柱效應產生剪力破壞。震後再次進行包墩補強作業，將先前未包覆之部分一併包覆補強，避免形成短柱效應，並進一步加強墩柱結構整體強度（圖 4-10～圖 4-11 所示）。(圖 4-10～圖 4-11 資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱洪土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)



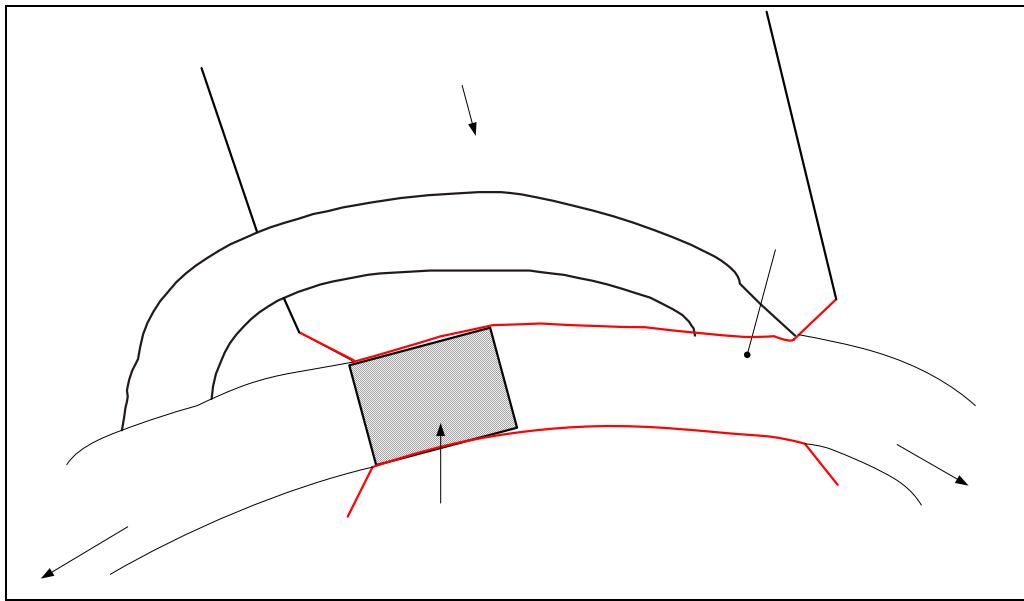
圖 4-10 賀伯颱風過後，信義橋進行 P4 橋墩包墩補強



圖 4-11 民國 89 年 921 地震過後，信義橋再度進行包墩補強作業

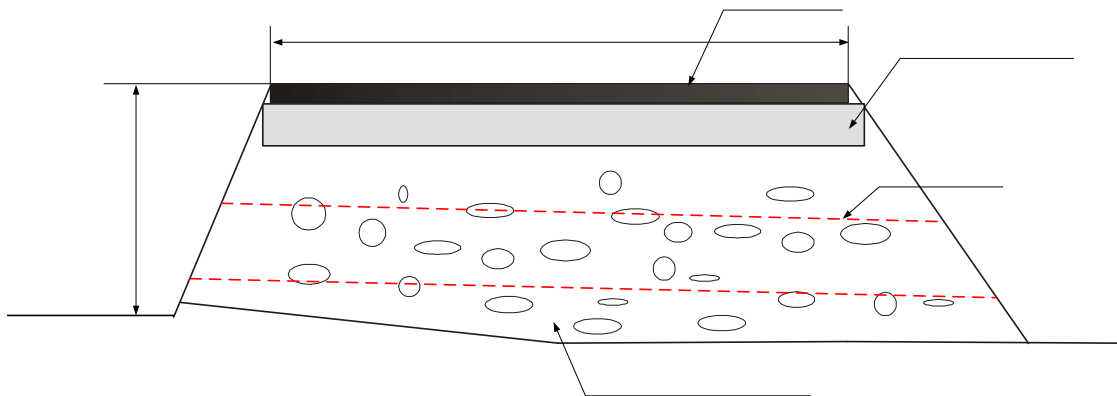
2.桃芝颱風

信義橋於桃芝颱風風災來襲(90.7.30~90.7.31)，引發土石流，再度因土石流淤積造成橋樑淨空不足，大量土石流無法順利通過，導致 P1 橋墩傾倒、第一、二跨橋面流失、水里端引道沖毀約 20m。為達快速搶通，工程單位施作臨時便道於 90.8.16 完成通車。示意圖如圖 4-12~圖 4-13 所示；搶通情形如圖 4-14~圖 4-16 所示。



【資料來源：公路總局第二區養護工程處】

圖 4-12 便道平面佈置示意圖



【資料來源：公路總局第二區養護工程處】

圖 4-13 便道引道剖面圖



圖 4-14 信義橋臨時便道情形



(資料來源：林呈攝於 90.8.3)

圖 4-15 怪手堆置管涵、清理河道



(資料來源：第二區養護工程處)

圖 4-16 臨時便道通車後之情形

4.1.4 橋樑災後復建

信義橋災後復建方案係將受損之第一、二跨重建，並於水里端加建一跨，以增加通洪寬度及排洪量，復建工程於 91.11.29 開工，92.9.3 竣工。施工過程如圖 4-17~圖 4-19 所示，橋樑竣工細部結構圖如圖 4-20~圖 4-23 所示。(圖 4-19~圖 4-23 資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)



(資料來源：第二區養護工程處)

圖 4-17 復建之 P1 全套管基樁施工

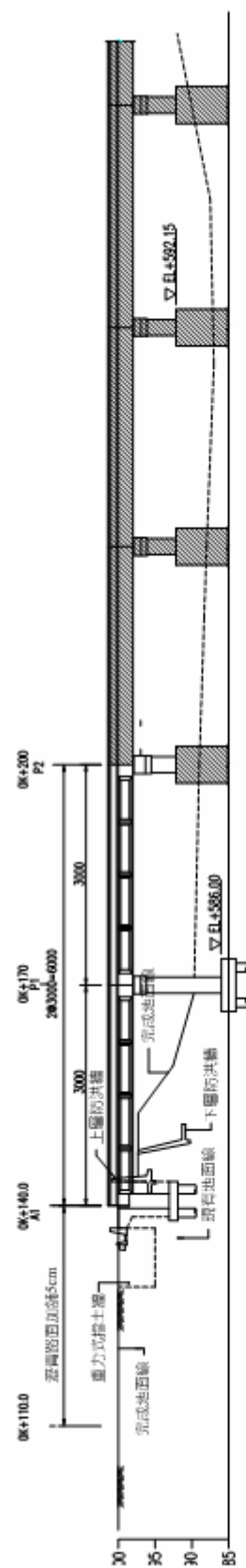
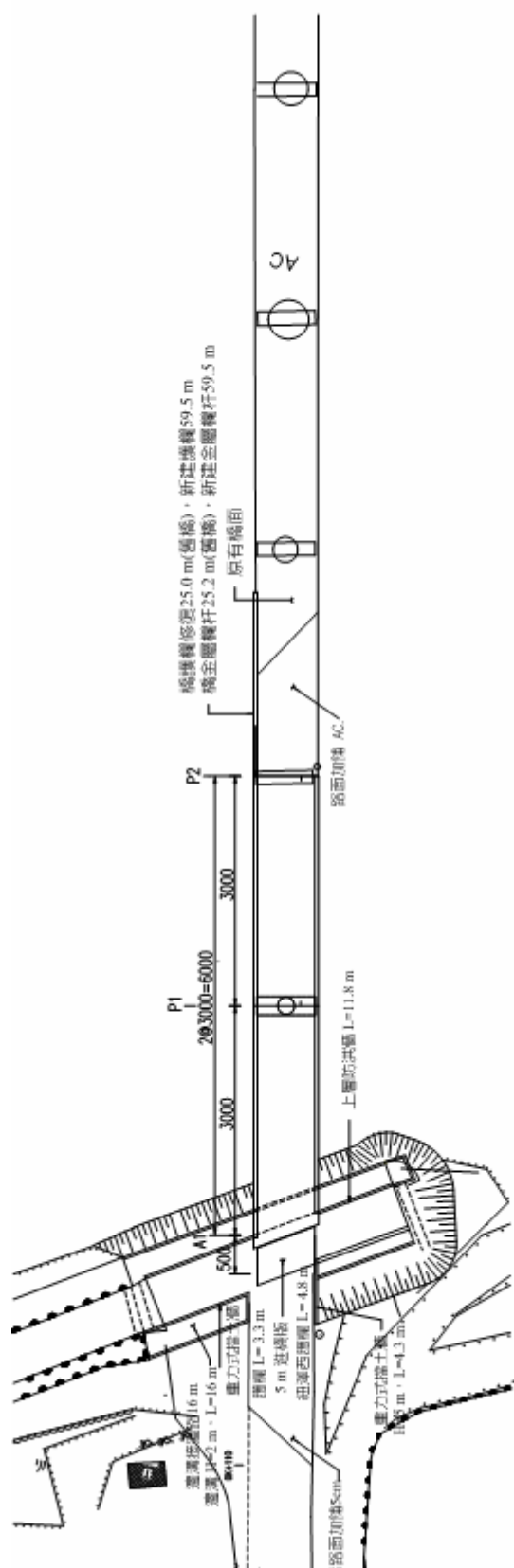


(資料來源：第二區養護工程處)

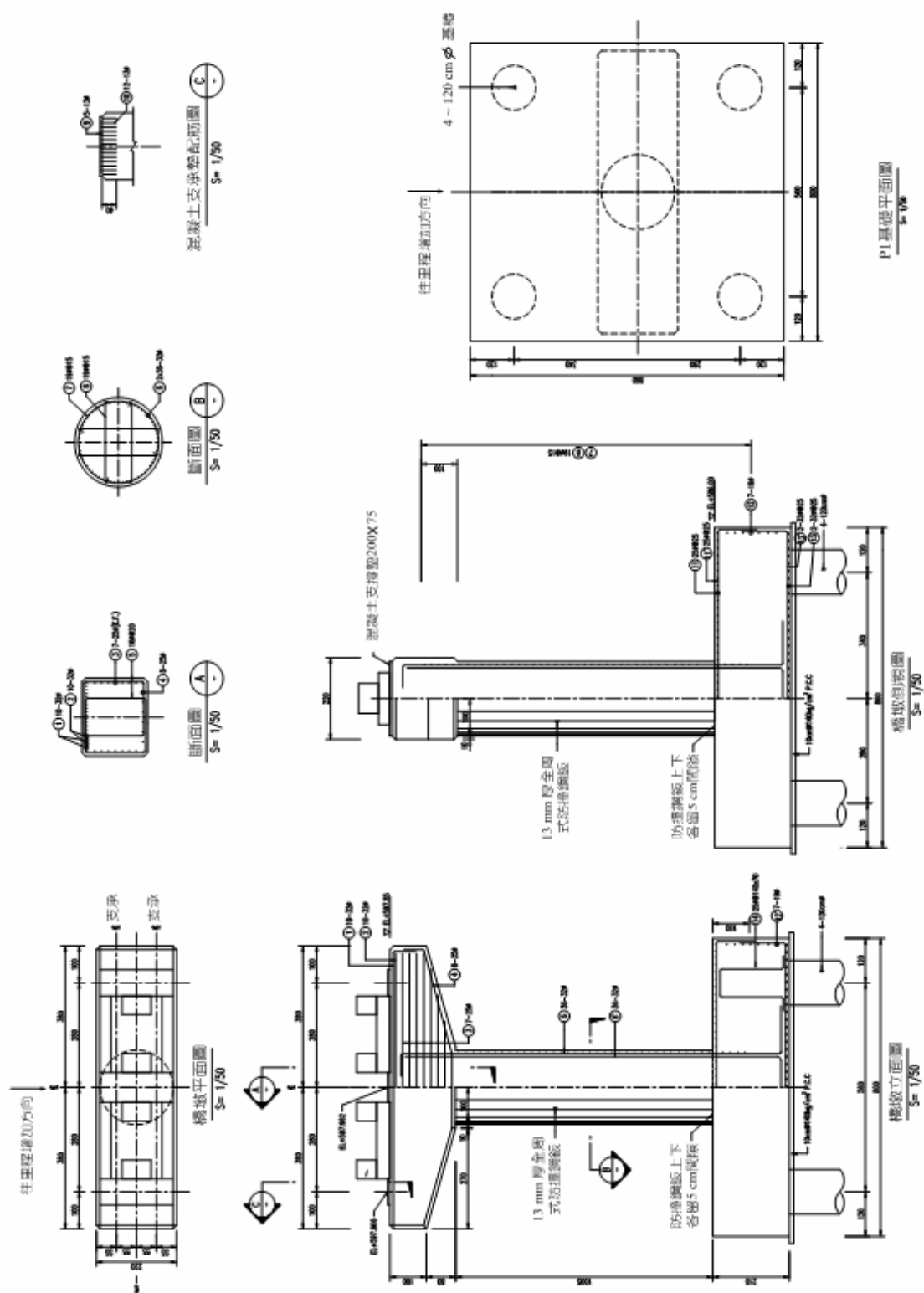
圖 4-18 預力梁施作及完成後吊裝之過程



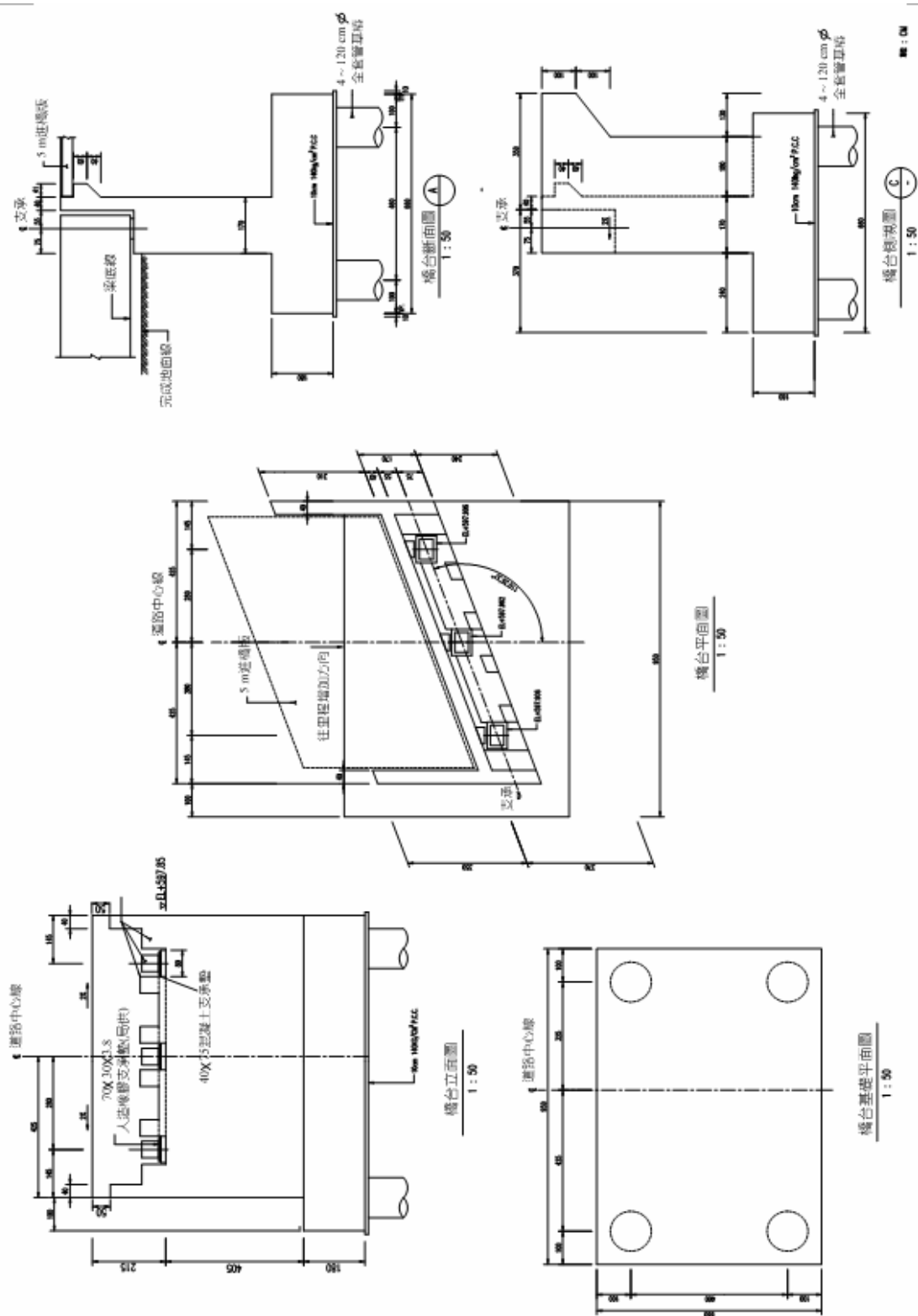
圖 4-19 信義橋復建完成後通車之情形



(資料來源：「台21線零公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害暨建資料編纂」，交通部公路總局，2005)

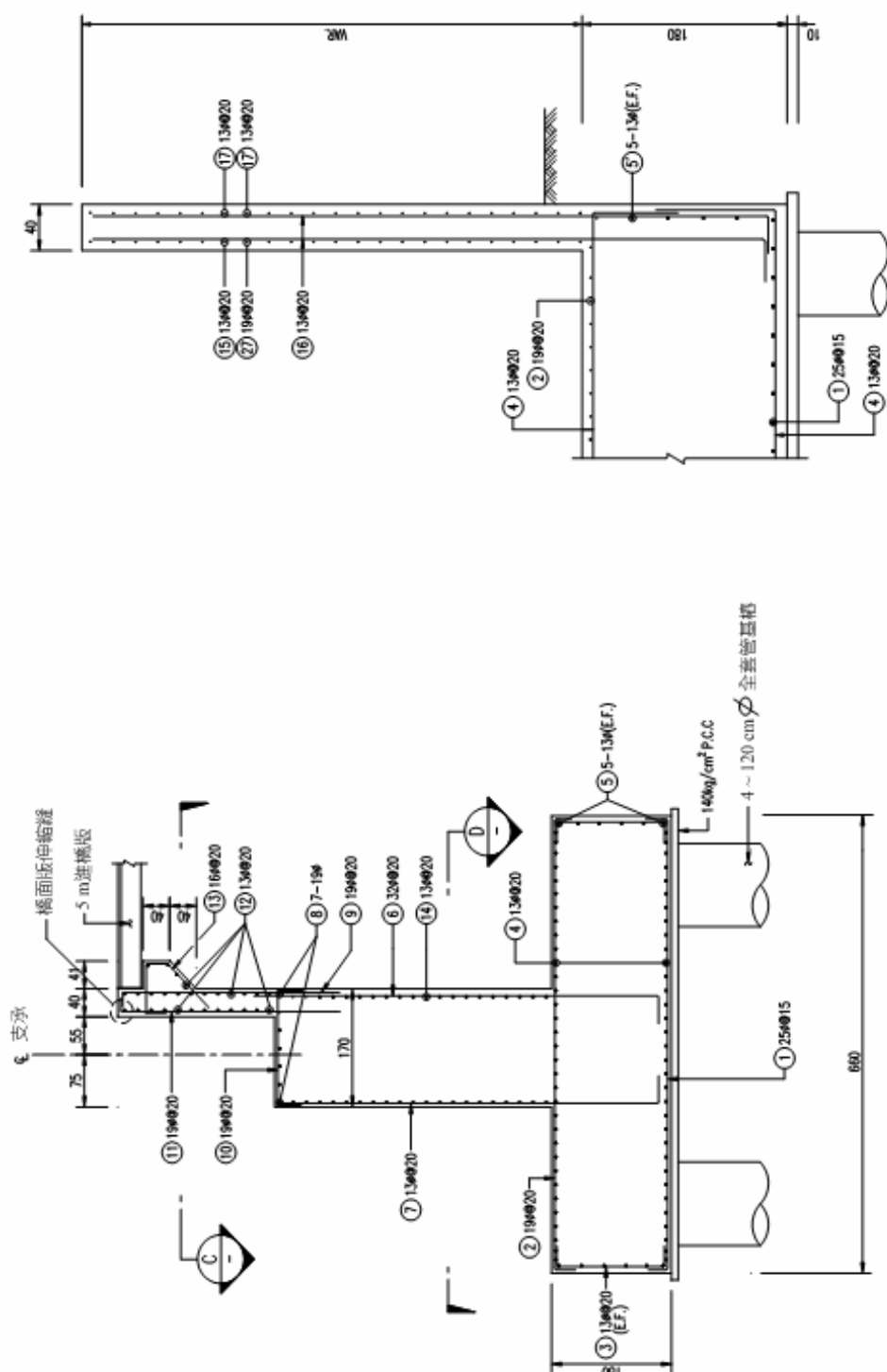


(資料來源：「台21線等公路橋樑歷年墮洪土石流沖刷災害重建資料編纂」，交通部公路總局，2005)



(資料來源：「台21線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編纂」，交通部公路總局，2005)

圖 4-22 橋台平面、立面圖



斷面圖 A
S= 1/50 S-9

斷面圖 B
S= 1/50 S-9

(資料來源：「台21線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰」，交通部公路總局，2005)

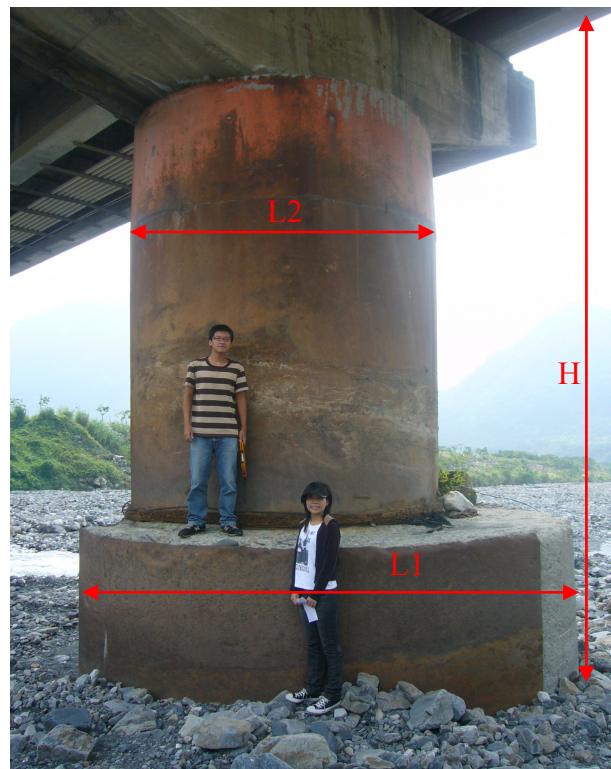
圖 4-23 橋台及基礎配筋詳圖

4.1.5 現地勘查

本研究團隊於 96.09.27 及 96.10.04 前往研究區橋址地點現勘，進行現地初步調查與測量。圖 4-24 為下游端往上游端拍攝之修建後照片；圖 4-25 為現地量測橋墩之情形；圖 4-26 為溪床表層的顆粒分布狀況，由於信義橋位於郡坑溪下游匯接陳有蘭溪處，因此，河床表層較無大尺寸之顆粒。



圖 4-24 信義橋修建後現況



P3橋墩周長
L1=9.82m
L2=15.8m
橋樑淨高
H=8.25m



圖 a



圖 b



圖 d



圖 a. 大顆粒 L=110cm , W=70cm

圖 b. 中顆粒 L=46cm , W=30cm

圖 c. 小顆粒 L=12cm , W=11cm

圖 d. 微小顆粒 L=W=1~2cm

圖 c

圖 4-26 河道顆粒粒徑(攝於 96.09.27)

圖 4-27 為信義橋上游集水區在桃芝颱風後之崩塌地分布，桃芝颱風過後郡坑溪崩塌面積達 $558,626\text{m}^2$ 之多（崩塌率約 0.19%）。相關單位依上游支流基本屬性及其支流周遭保全對象不同，針對溪流進行治理。主要作法包含穩定岸坡、控制流心及攔阻土石控制土石流發展，分別設置了潛壩、石籠壩、副壩及固床工等設施，各支流相關施設項目及相關位置如表 4-2(a)～表 4-2(c)所示。

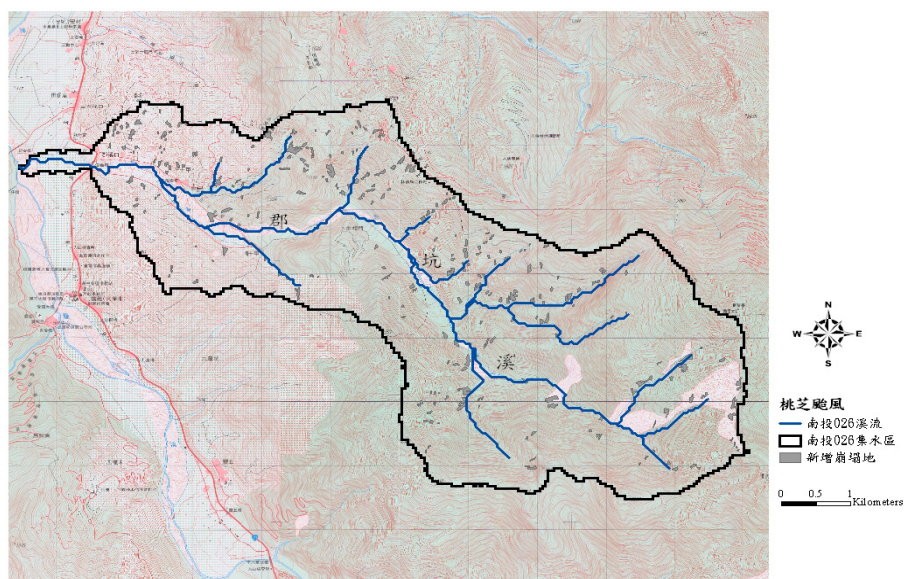


圖 4-27 桃芝颱風期間信義橋上游集水區新增崩塌地分佈情形

表 4-2(a) 郡坑溪上游十甲附近野溪整治斷面位置及項目表

十甲附近上游野溪支流			
位置	項目	高度(m)	長度(m)
0k+040	固床工	1.5	8.2
0k+080	固床工	1.5	9.2
0k+120	固床工	1.5	8.2
0k+160	固床工	1.5	9.2
0k+200	固床工	1.5	11.2
0k+244	副壩	2.5	31.2
0k+256.5	潛壩	5.0	39.9
0k+288	副壩	3.3	27.4
0k+300	潛壩	5.0	31.6
0k+328	潛壩	5.0	32.6
0k+020~200	溪床疏濬	---	180.0

(資料來源：水土保持局第三工所，2002)

表 4-2(b) 郡坑溪上游三十甲附近野溪整治斷面位置及項目表

三十甲上游野溪			
位置	項目	高度(m)	長度(m)
0k+167	副壩	2.5	41.7
0k+180	潛壩	5.0	49.7
0k+434	副壩	3.0	20.7
0k+450	潛壩	7.0	29.2
0k+547	副壩	2.5	20.2
0k+560	潛壩	5.0	28.2
0k+577	副壩	2.5	25.2
0k+590	潛壩	5.0	39.2
0k+787	副壩	2.5	23.7
0k+800	潛壩	5.0	22.7
0k+817	副壩	2.5	18.7
0k+830	潛壩	5.0	20.7
0k+847	副壩	3.8	22.2
0k+860	潛壩	5.0	25.2
0k+887	副壩	2.8	18.7
0k+900	潛壩	5.0	27.7
0k+920	固床工	2.5	23.2
0k+953.65	副壩	2.5	28.7
0k+971.44	潛壩	7.0	45.2

(資料來源：水土保持局第三工所，2002)

表 4-2(c) 三十甲至郡坑溪口附近野溪整治斷面位置及項目表

三十甲至郡坑溪口野溪			
位置	項目	高度(m)	長度(m)
0k+115	石籠壩	4.0	53.0

(資料來源：水土保持局第三工所，2002)

敏督利颱風過境後郡坑溪崩塌情形經整治後，有明顯改善，如圖 4-28~圖 4-29 所示，崩塌面積為 203,152 m²（崩塌率為 0.07%）。信義橋經整治後並未有災損情形發生，但因洪水作用使得河床些微淤高，左岸因受到鼎型塊及砌石護岸之保護亦免於洪水侵蝕。

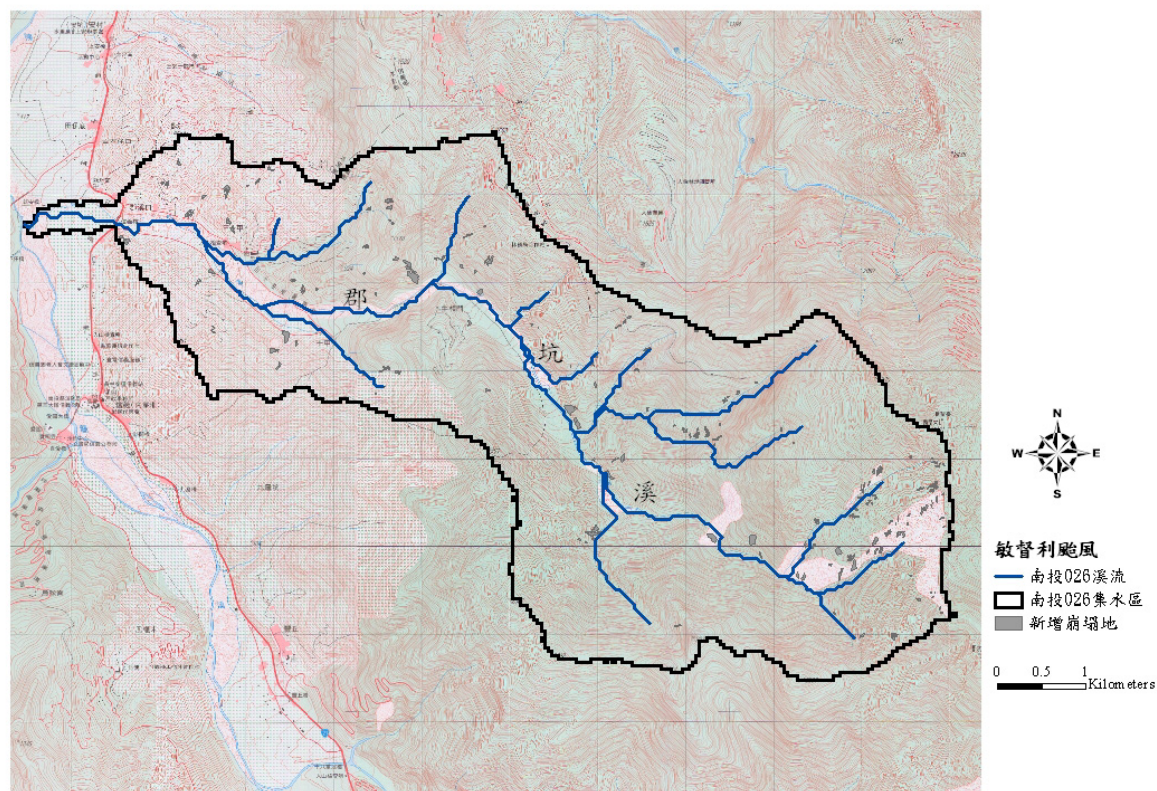


圖 4-28 敏督利颱風期間信義橋上游集水區新增崩塌地分佈情形



(資料來源：「台 21 線等公路橋樑歷年颱風沖刷土石流災害復建資料編撰」，交通部公路總局，2005)

圖 4-29 敏督利颱風過境，上、下游側左岸設置頂型塊及砌石護岸之情形

4.2 十八重溪橋(98K+070)

4.2.1 背景資料說明

十八重溪橋位於南投縣信義鄉豐丘村台 21 線 98K+070 處，為聯絡信義及和社主要通道。本橋樑完工於民國 70 年 7 月，橋樑總長 210 公尺（6@35m），橋淨寬 7.5m，上部結構型式採用簡支預力混凝土 I 型樑，下部結構則為單柱圓形橋墩及沈箱基礎。橋樑周遭地質主要由古第三紀變質岩所組成，橋址位於水流長層和白冷層之間。十八重溪橋雖橫跨十八重溪，但真正造成十八重溪橋土石流災情卻是位在橋址處上游側約 100 公尺處之十八重溪支流（潛勢編號-南投 030），如圖 4-30 所示。南投 030 溪流集水區面積約為 208 公頃，主流長度約為 2,307 公尺，溪流平均坡度為 31.4° ，且有一上下游高度落差極大之邊坡崩塌陡崖，海拔由 2,250m 急遽降至 650m，乃是造成十八重溪支流土石流劇烈運動主因之一。

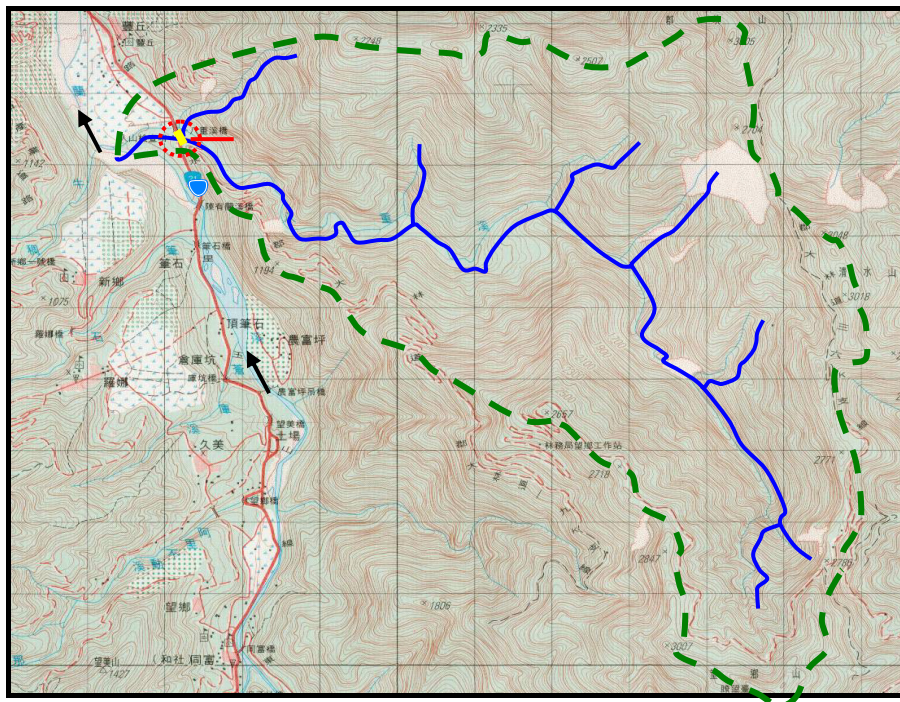


圖 4-30 十八重溪流域集水區範圍圖

十八重溪地層屬於十八重溪層，主要由黑色至暗灰色板岩所組成，偶夾砂岩互層，具有極密枝葉理狀岩理且甚薄之片理，造成岩石易順葉理方向開裂；支流部分則位於地利斷層線上，且鄰近陳有蘭溪斷層線，地質上為白冷層，主要由白色或灰白色石英質砂岩組成，夾灰色硬頁岩及板岩，表層多為組織疏鬆、孔隙發達且膠結不良之土礫石，如圖 4-31 所示。(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

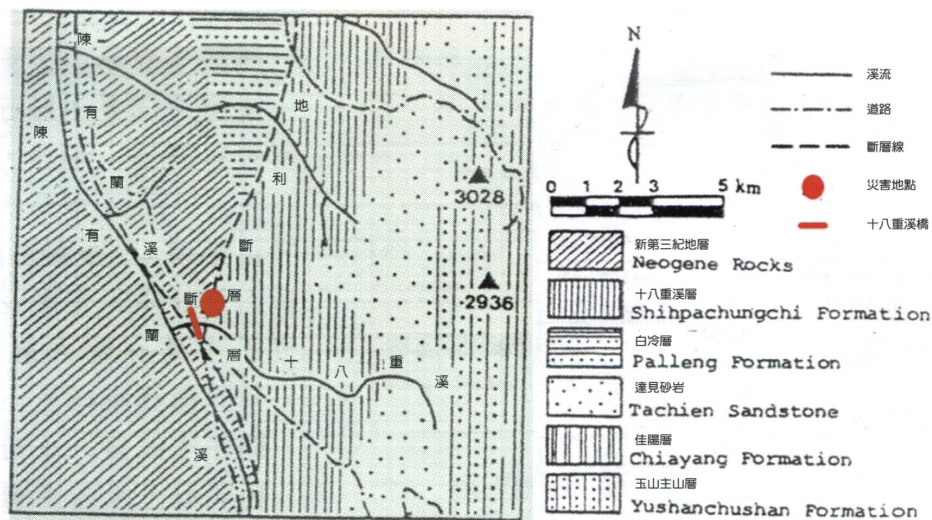


圖 4-31 十八重溪周遭地質圖

4.2.2 災害歷史

歷經民國 85 年賀伯颱風、89 年碧利斯颱風及 90 年桃芝颱風過程中，十八重溪橋因嚴重土石流衝擊，對於橋樑衝擊三者皆頗為類似，均因橋址右側支流豪雨宣洩下大量黃褐色之土石流，於橋樑下方及上游處形成大型沖積扇，造成土石幾近淤滿橋孔。但不同的是賀伯颱風及碧利斯颱風期間，雖然土石淤滿橋孔，但未造成橋樑主體結構任何損壞（詳如圖 4-32～圖 4-34）；然而在桃芝颱風期間，因土石流沖積扇的規模持續擴大，使得淤高情形越益嚴重並逼近橋樑樑版系統，導致土石直接撞擊、浮托橋面版，造成 P3 橋墩上端二孔橋面版產生錯位傾斜（圖 4-35～圖 4-36）。



(臺灣公路工程，2004)

圖 4-32 賀伯颱風期間十八重溪橋北端橋孔遭土石淤埋情形



(臺灣公路工程，2004)

圖 4-33 碧利斯颱風過境，由橋樑上游側空拍情形



(臺灣公路工程，2004)

圖 4-34 碧利斯颱風過境，上游土石流沖積扇堆積情形



(臺灣公路工程，2004)

圖 4-35 桃芝颱風過後十八重溪橋 A1 橋台錯位破壞



(臺灣公路工程，2004)

圖 4-36 十八重溪橋上部結構遭推移達兩公尺之情形



(資料來源：「台 21 線等公路橋樑歷年颱風沖刷土石流沖刷災害復建資料編撰」，交通部公路總局，2005)

圖 4-37 桃芝颱風後十八重溪橋梁 A2 橋台及護岸沖刷破壞情形

此外，在賀伯颱風、碧利斯颱風及桃芝颱風三次颱洪事件中，由於大型沖積扇逐漸形成，導致十八重溪主河道因通水斷面減小，溪洪通過時產生加速效應而發生河道束縮沖刷，加大洪流對河床淘刷能力。賀伯颱風期間，造成凸岸側之郡林大道護岸河床及十八重溪橋南側橋台基腳遭劇烈側向侵蝕，於災後導致護岸產生百餘公尺下沉損壞之災情；在桃芝颱風期間，亦由於洪流攻擊凸岸處護岸及南側橋台，除護岸產生多處下沉損壞之外，並造成橋台及其翼牆塌陷破壞，在橋台端的橋面版因此失去支持而崩落(詳如圖 4-38～圖 4-41 所示)。(圖 4-38～圖 4-41 資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱洪土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

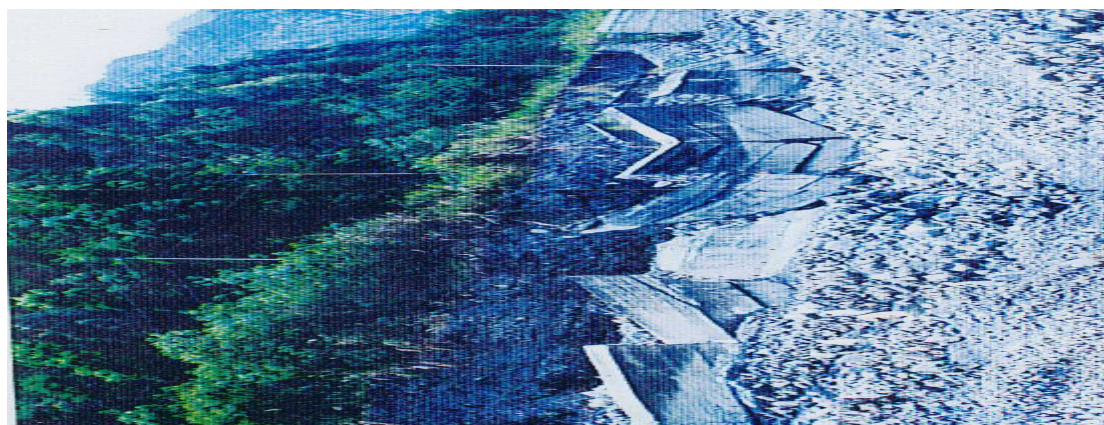


圖 4-38 賀伯颱風期間，郡大林道受災情形



圖 4-39 賀伯颱風期間，十八重溪橋南端橋台上游護岸破壞情形

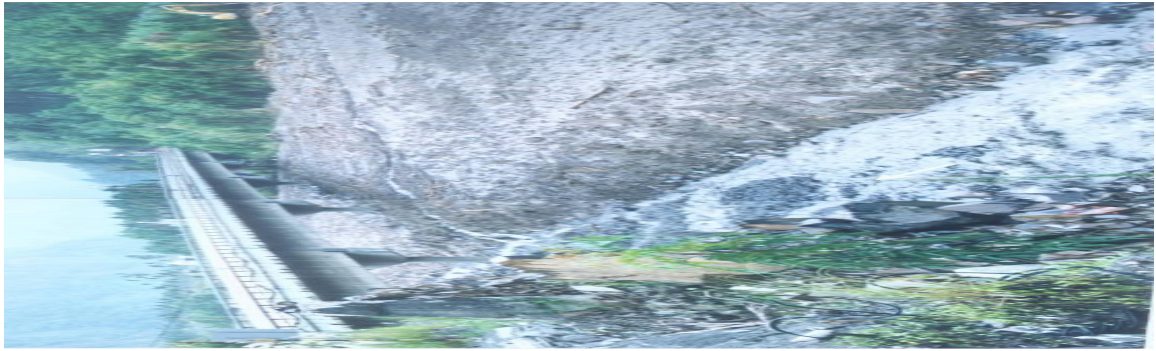


圖 4-40 碧利斯颱風後十八重溪橋上游側土石流沖積扇擠壓河道情形



(資料來源：臺灣公路工程，2004)

圖 4-41 桃芝颱風過後十八重溪橋南端橋面崩落情形

4.2.3 橋樑復建與河道整治

桃芝颱風與敏督利颱風期間過後，林務局與水保局於 92~96 年間均針對十八重溪上游支流進行整治工作，十八重溪崩塌面積由原先 30,159 m² 降至 13,231 m² (崩塌率由 1.42% 降至 0.62%)，相關崩塌地分佈及整治工作內容分別如圖 4-42~4-43 及表 4-3 所示。

表 4-3 民國 92 至民國 94 年各單位整治項目內容

工程名稱	工程工程	具體措施	實施項目	執行單位
十八重溪野溪 整治工程	源頭處理(1式) 打樁編柵 87300(m2)	優先治理	土石流源頭處理	林務局 (92 年度)
十八重溪野溪 整治工程	源頭處理(1式) 打樁編柵 87300(m2)	優先治理	土石流源頭處理	林務局 (93~96 年度)
十八重溪野溪 整治工程	源頭處理(1式) 打樁編柵 87300(m2)	優先治理	土石流及崩塌地源 頭處理	水土保持局 (92 年度)
十八重溪支流 整治工程	防砂壩 2 座、 梳子壩 1 座	重點區	土石流重點區	水土保持局 (93~96 年度)

(資料來源：水土保持局，濁水溪流域整體治理規劃報告書，2003)

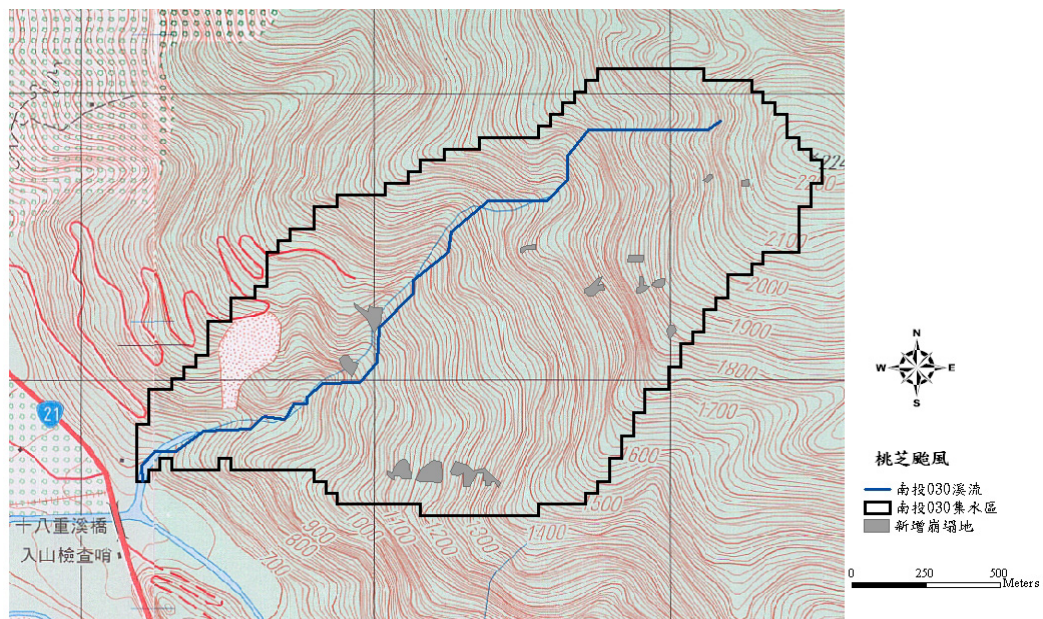


圖 4-42 桃芝颱風期間十八重溪支流集水區新增崩塌地分佈情形

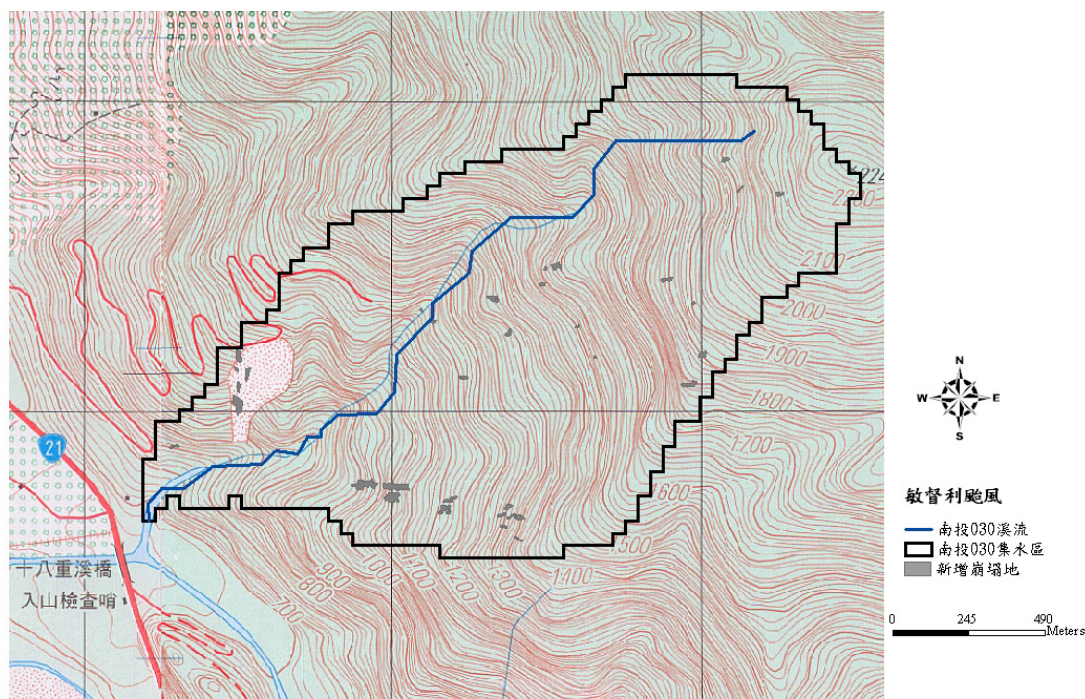
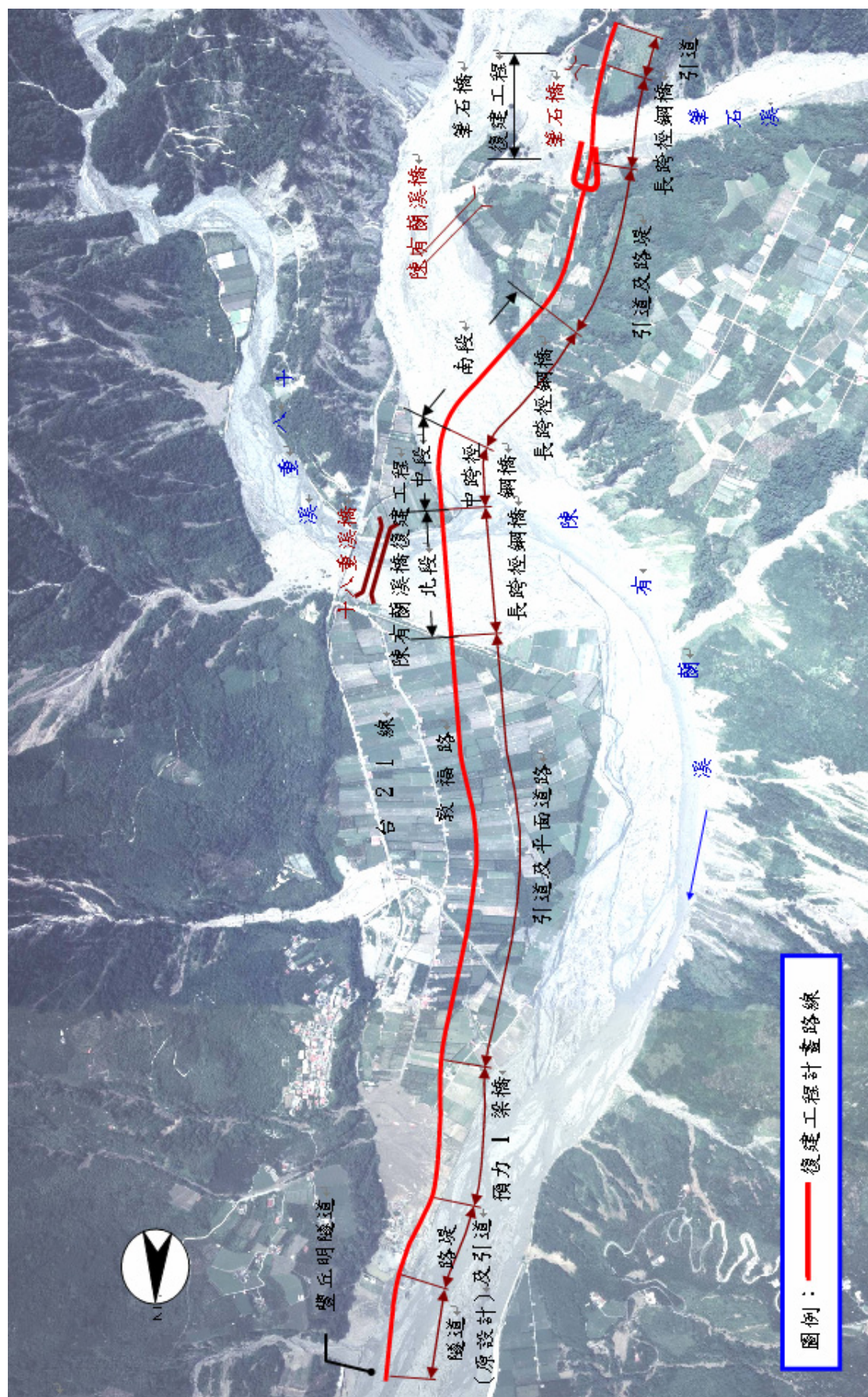


圖 4-43 敏督利颱風期間十八重溪支流集水區新增崩塌地分佈情形

此外，桃芝颱風引發大規模土石流，台 21 線十八重溪橋、陳有蘭溪橋及筆石橋等三座橋樑均遭土石流沖毀，導致信義鄉聯外交通完全中斷。公路總局第二區養護工程處為使災區交通恢復暢通，遂緊急辦理『桃芝颱風災害台 21 線十八重溪橋、陳有蘭溪橋及筆石橋緊急復建工程』，由於鄰近地區土石流災害嚴重，無法於原址重建，故著手規劃復建路線及橋址重新選定，並將十八重溪橋復建橋樑視為陳有蘭溪橋一部份，如圖 4-44 所示。本工程於民國 95 年 10 月 20 日竣工；工程於十八重溪北側陸地設立北端 A1 橋台，由 A1 橋台至 P4 墩柱間復建工程稱為陳有蘭溪復建工程北段；另外，為聯絡郡林大道，由復建工程 P4 墩柱起，沿著十八重溪南岸高灘地興建一聯絡道橋樑。

因本段上游支流為一高危險潛勢溪流（南投 030），將使本橋段難於避免土石流沖蝕作用。為此，陳有蘭溪橋樑北段係採用長跨徑橋樑，由 A1 橋台至 P4 橋墩全長共 346 公尺，橋樑淨寬為 10 公尺；上部結構之樑體採用鋼箱型樑，下部結構橋墩型式中 P1～P3 橋墩採單支圓柱橋墩，P4 橋墩採用雙支圓柱橋墩，基礎型式皆為樁基礎，工程相關施作情形及細部橋樑結構如圖 4-45～圖 4-57。



(資料來源：台21線等公路橋樑歷年颱風沖刷土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-44 台 21 線陳有蘭溪橋筆石橋復建工程計畫路線平面圖

南投 030 土石流潛勢溪流

十八重溪橋

陳有蘭溪橋復建工程北段(A1~P4)之橋址線



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-45 陳有蘭溪橋復建工程北段施工情形



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-46 敏督利颱風過境上游主流緊逼左岸；下游側呈瓣狀流路



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-47 陳有蘭溪橋復建工程北段 P4 全套管樁基礎施工過程



(資料來源：台21線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編纂，交通部公路總局，2005)

圖 4-48 陳有蘭溪橋復建工程北段墩柱施工完成情形



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年變洪土石流沖刷災害復建資料彙編，交通部公路總局，2005)

圖 4-49 陳有蘭溪橋復建工程北段鋼箱型梁分段組裝情形



(資料來源：台21線等公路橋樑歷年颱風沖刷土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-50 陳有蘭溪橋復建工程北段橋樑主進行配筋、組裝作業情形



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-51 陳有蘭溪橋復建工程橋樑結構灌漿情形



圖 4-52 陳有蘭溪橋復建工程北段 P3~P5 間橋面版鋼筋配置作業



圖 4-53 陳有蘭溪橋復建工程完工情況

(圖 5-52~圖 5-53 資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

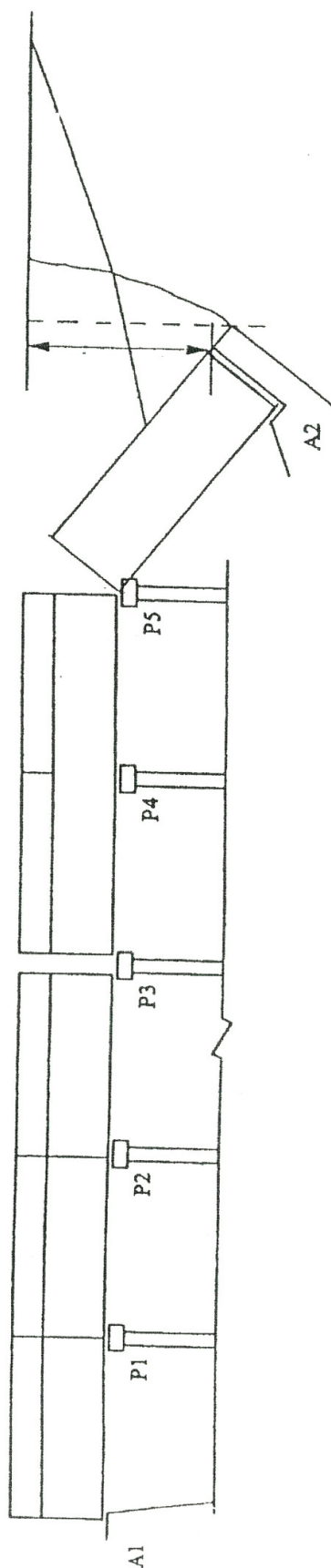


圖 4-54 十八重溪橋毀損之平面及縱斷面示意圖
(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱洪土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

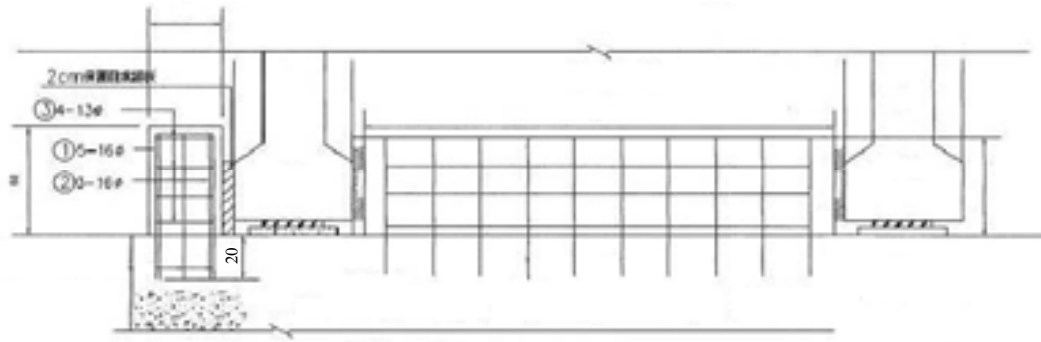


圖 4-56 (1) P1~P3 橋墩帽梁處設施垂直止震塊並修復水平向止震塊

40

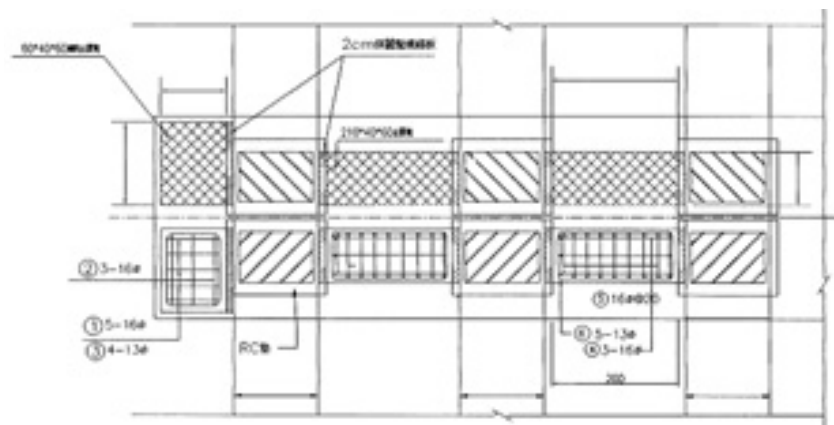
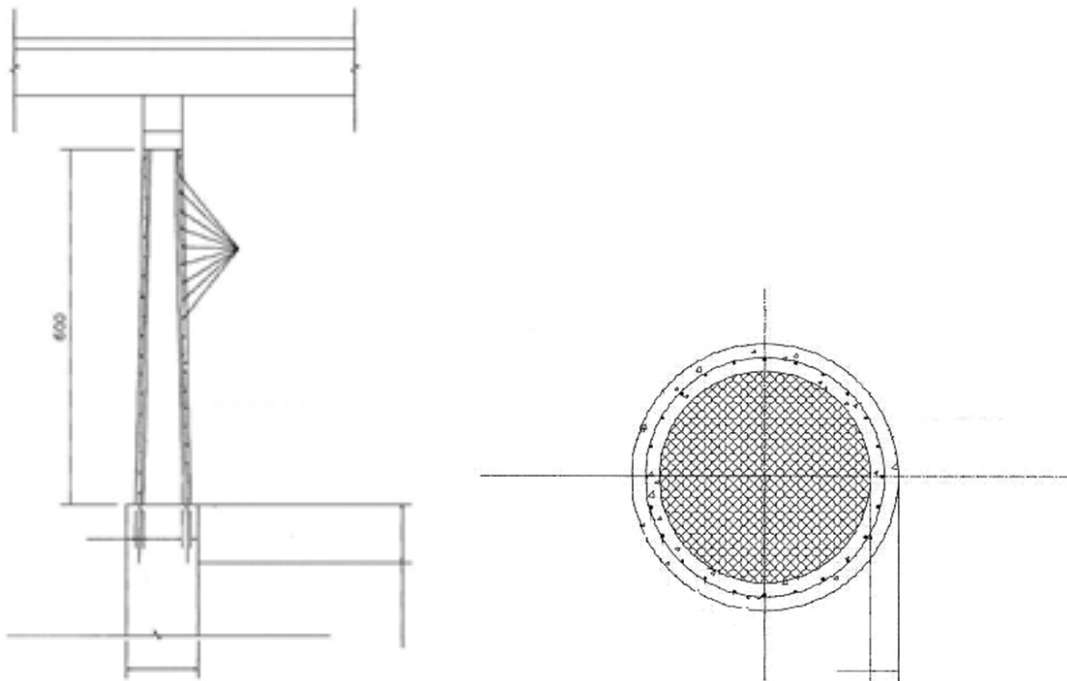


圖 4-56 (2) 橋台處止震塊施設圖



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-57 P1~P3 橋墩採行鋼筋混凝土與鋼鈑圍繞工法之補強圖

4.2.4 現地勘查

本研究團隊於 96.9.27 及 96.10.04 於十八重溪橋現勘，進行現地初步測量與調查。圖 4-58 為從上游端往下游端拍攝之現地情形，下游端紅色橋面為新陳有蘭溪橋；圖 4-59 為左岸橋墩旁之石籠堤防遭沖刷而掏空破壞；圖 4-60 為現地量測橋墩之情形；圖 4-61 為十八重溪支流(南投 030)與十八重溪主河道匯集處之情形；圖 4-62 為溪床表層的顆粒分布，由於十八重溪橋位於十八重溪主、支流交會處，因此溪床中有許多大尺寸之顆粒，對橋墩之衝擊力有一定之影響。

(a)



圖 4-58 十八重溪橋從上游往下游拍攝之情形

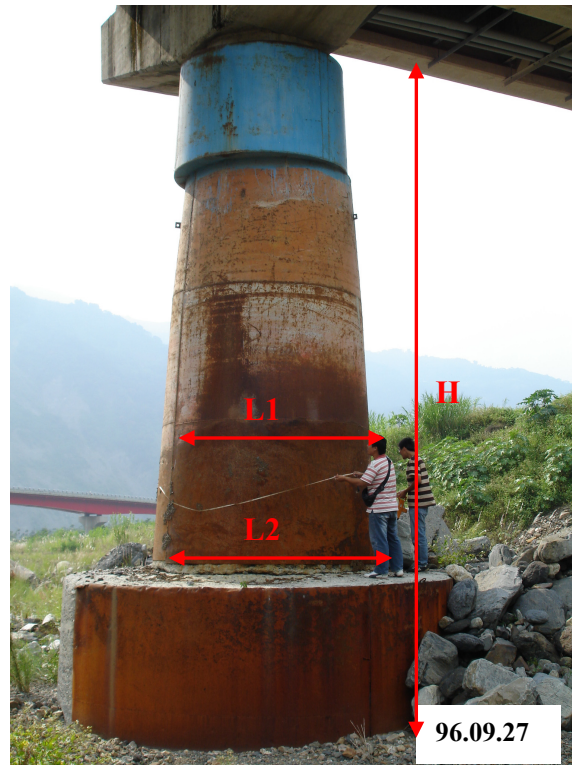
(b)



圖 4-58 十八重溪橋從上游往下游拍攝之情形



圖 4-59 石籠堤防受土石、洪水流破壞



橋墩周長
 $L1=8.65\text{m}$
 $L2=9.15\text{m}$
 橋樑淨高
 $H=9.9\text{m}$

圖 4-60 現地初步測量

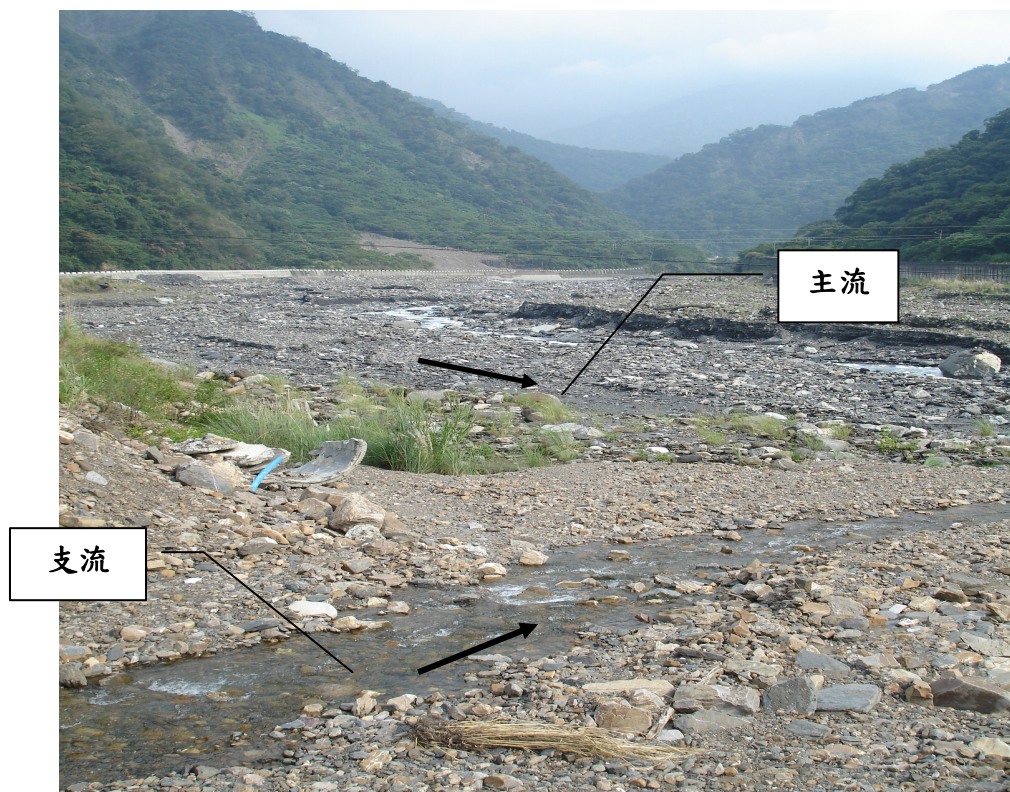


圖 4-61 十八重溪支流(南投 030)與十八重溪主河道匯集處



圖 4-62 十八重溪支流(南投 030)河道粒徑

4.3 愛玉橋 (108K+770)

4.3.1 背景資料說明

愛玉橋位於南投縣信義鄉台 21 線(108K+770)處，為通過神和橋(108K+877)後約一公里處往塔塔加鞍部所必經之橋樑，如圖 4-63 所示，圖 4-64 為新、舊愛玉橋橋址位置圖，本橋樑所跨越之溪流為和社溪支流野溪，亦是行政院農業委員會水土保持局所劃分之土石流潛勢危險溪流，編號為「南投 075」。此野溪溪流長度約為 4300m，集水區面積為 674 公頃，平均坡度約在 23%~28%之間。

愛玉橋基本資料如表 4-4 所示，於民國 72 年 1 月 12 日竣工完成，上部結構為 RC 預力 I 型梁，為單跨距、兩線道之橋梁，橋長 20.2 m，橋寬 7.5 m。

表 4-4 愛玉橋基本資料表

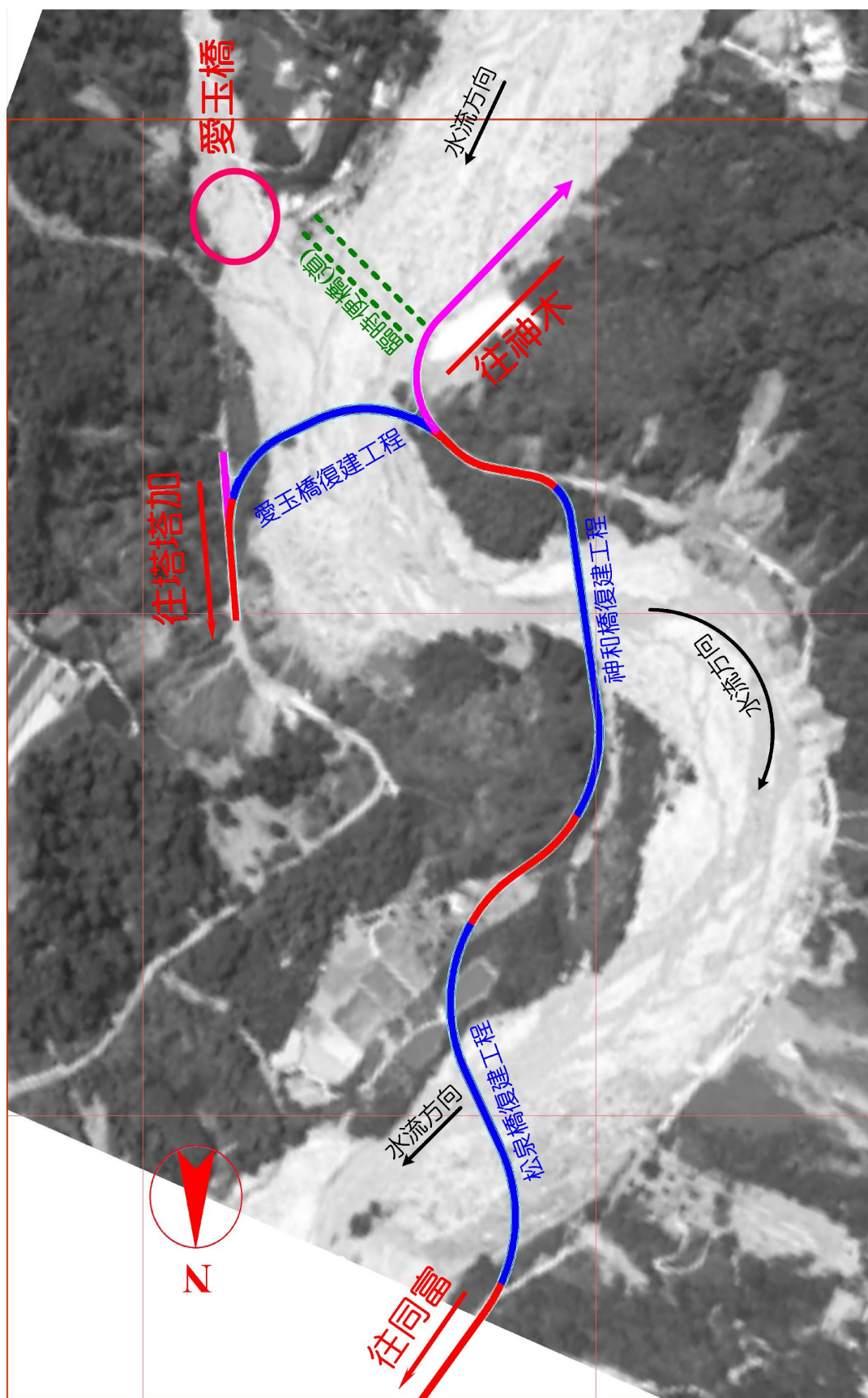
橋 名	愛玉橋
建造年月	72.1.12
跨越溪流	野溪
上部結構	RC 預力 I 型梁
下部結構	(無橋墩)
橋面長度	20.2 m
淨 寬	7.5 m
車 道 數	2
孔 數	1
跨 距	20.2 m

(資料來源：第二區養護工程處，1998)



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-63 桃芝颱風前愛玉橋(圈示處)周邊環境概況空拍畫面



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風沖刷土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-64 新、就愛玉橋橋址位置圖

4.3.2 災害歷史

1. 桃芝颱風

愛玉橋於桃芝颱風中遭受到土石流的侵襲，橋體本身並未遭土石流沖毀，僅遭土石流掩埋與磨蝕。桃芝颱風後土石鬆動增加許多崩塌地，如圖 4-65 所示。愛玉橋上游野溪大量土石流流入和社溪前，因愛玉橋跨距僅為 20.2 m，通水斷面較小，不足以使土石流快速順利通過，且位於和社溪上游的神木村地區也同樣爆發大規模土石流災害，大量的土石混著洪水滾滾而下，當土石流到達愛玉橋野溪匯流口時河道正處於過彎河段，大量土石便堆積於此處，也阻礙了愛玉橋上游野溪所流下之土石。因此土石逐漸淤滿河道使得橋址處產生土石壅高現象，惟在此過程之中土石流對橋底梁版的浮托作用不明顯，故未造成梁版隨著土石流之推移而往下游移動，然在土石流的流動過程中大小不一的石塊也會對橋體產生相互的磨蝕。因野溪匯流口處遭和社溪土石流的阻擋使流速減緩，本橋乃被逐漸淤高的土體所掩埋。

圖 4-66 為桃芝颱風後愛玉橋上游野溪發生土石流，土石滿溢堆積於河道及其兩岸、及愛玉橋遭掩埋後狀況。圖 4-67 中為桃芝颱風過後清除淤積土石後的愛玉橋，相片中可清楚看見橋體及上游側橋台翼牆遭土石流磨蝕後的痕跡，其中值得注意的是由於本橋位在土石流堆積區內，橋面下的淨高就顯的格外重要，由圖中可以發現，橋下通水斷面土石的挖除清淤可避免當再次發生土石流時，不會因橋下通水斷面不足而阻礙土石的通過，避免產生橋面版遭土石流所抬托。

桃芝颱風過境期間受到和社溪土石流的阻擋，使得由愛玉橋上游野溪流下的土石堆淤於匯流口處，進而造成愛玉橋(圈示處)遭土石流淹沒淤埋後，如圖 4-68 所示。

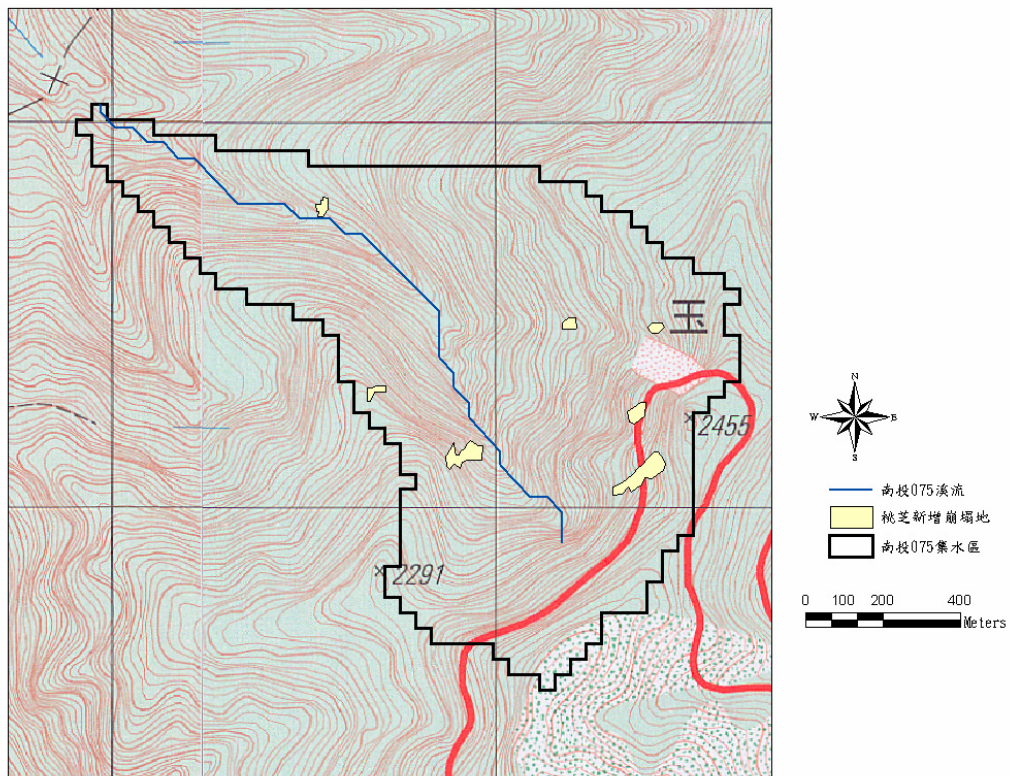


圖 4-65 桃芝颱風期間和社溪支流集水區新增崩塌地分佈情形



圖 4-66 桃芝風災後愛玉橋橋體及橋台翼牆遭土石流磨蝕的情形



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-67 桃芝颱風愛玉橋在土石清除後由下游往上游拍攝之畫面



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-68 愛玉橋受和社溪土石流淹沒淤埋之情形(林呈攝於 90.8.1)

2.敏督利颱風

民國 93 年 7 月敏督利颱風侵襲臺灣，位於土石流潛勢危險溪流「南投 075」下游的愛玉橋，再一次遭受土石流侵襲。圖 4-69 為敏督利颱風期間上游集水區新增之崩塌地，在此次的土石流災害中，如同桃芝颱風所受的土石流災害，本橋於敏督利颱風期間再次遭土石掩埋。在敏督利颱風過境後所引進強烈的西南氣流作用下，使得災況更為嚴重。圖 4-70 為已遭土石流掩埋之愛玉橋及一旁遭掩埋的機具，圖 4-71 則為愛玉橋野溪河道幾乎被泥砂、石塊所淤滿之災情。敏督利風災後，由於愛玉橋僅遭土石掩埋磨蝕並未對橋體有嚴重的損害，因此第二區養護工程處僅對本區域的土石進行局部清除以利快速通車。圖 4-72 中可見畫面右下角為松泉神和鋼便橋拆除後所施建的臨時替代便道，另者，圖 4-73 中可見橋址上游護岸已遭淘空的情形。

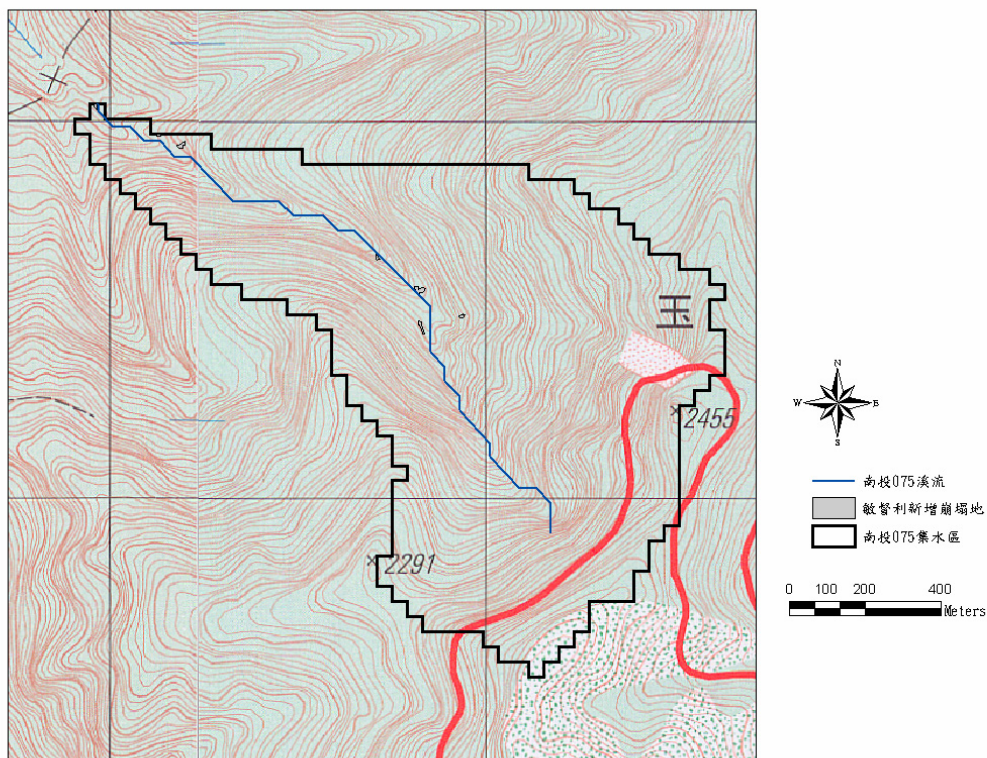


圖 4-69 敏督利颱風期間和社溪支流集水區新增崩塌地分佈情形



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-70 敏督利颱風後愛玉橋遭土石流淤塞及施工機具遭掩埋之情況



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-71 敏督利颱風後愛玉橋上下游野溪河道遭土石嚴重淤滿之畫

(攝於 93.7.10)



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-72 愛玉橋上游野溪在歷經民多次颱風後河道土石堆積之情況

(攝於 94.10.01)



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-73 愛玉橋上游野溪左岸護岸基腳已被淘空(圈示處)

(攝於 94.10.01)

4.3.3 野溪整治

根據林務局南投林區管理處之「陳有蘭溪和社溪上游重點區段整體治理規劃工程報告」(2004)所指出，在愛玉橋上游野溪僅於下游地區設有護岸及固床工。鑒於此一野溪曾經發生過土石流災害，為防止上游大量土石繼續向下游移動而造成災損，乃研議於本野溪河道內，興建3座連續砌塊石潛壩，間距約50 m，有效高度為5 m。圖4-74～圖4-75為流路所堆積的土石清除後，河岸部分以乾砌石作為河道護岸、部分以RC牆作為護岸的情形。桃芝風災後，愛玉橋上游左岸側所興建之護岸、右岸則為正在興建施工中的攔砂壩，以及橋址處上下游側兩岸皆以土石流留下之石塊，以就地取材方式配合生態工法，堆砌成的乾砌石護岸。

本橋上游野溪集水區由於地質結構性質鬆散脆弱，雖無常水流，然而一旦遇到上游集水區暴雨，野溪流路之快速逕流，使河道有向下切蝕及向源侵蝕的情況發生。對於河道岸壁也易產生側向侵蝕，更易使得河道岸壁產生崩塌，大量崩落的土石堆積於溪床提供了土石流發生的原料主要來源。

南投林區管理處對於愛玉橋上游野溪崩塌地的處理重點為防治土石流再次發生，崩塌地的處理係由現場調查研判崩塌發生的原因、及其規模與機制後實施崩塌地處理，其方法簡要概述如下(南投林區管理處，2004)：

- (1) 消除誘因之方法：包括源頭之裂縫填補、截排水、危木處理、土石挖填、整坡、地表水與地下水的排除等。
- (2) 增加抵抗力之方法：包括土壤改良、排樁、地錨、擋土等。
- (3) 植生方法：包括打樁編柵、植草木苗法、噴植法、鋪植生帶法、穴植法及土壤袋植生等。交通不便處可以空中撒播方式處理。



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-74 於敏督利颱風前由愛玉橋下游側往上游端所拍攝之畫面



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

(攝於 93.6.2)

圖 4-75 愛玉橋上游河道護岸情況

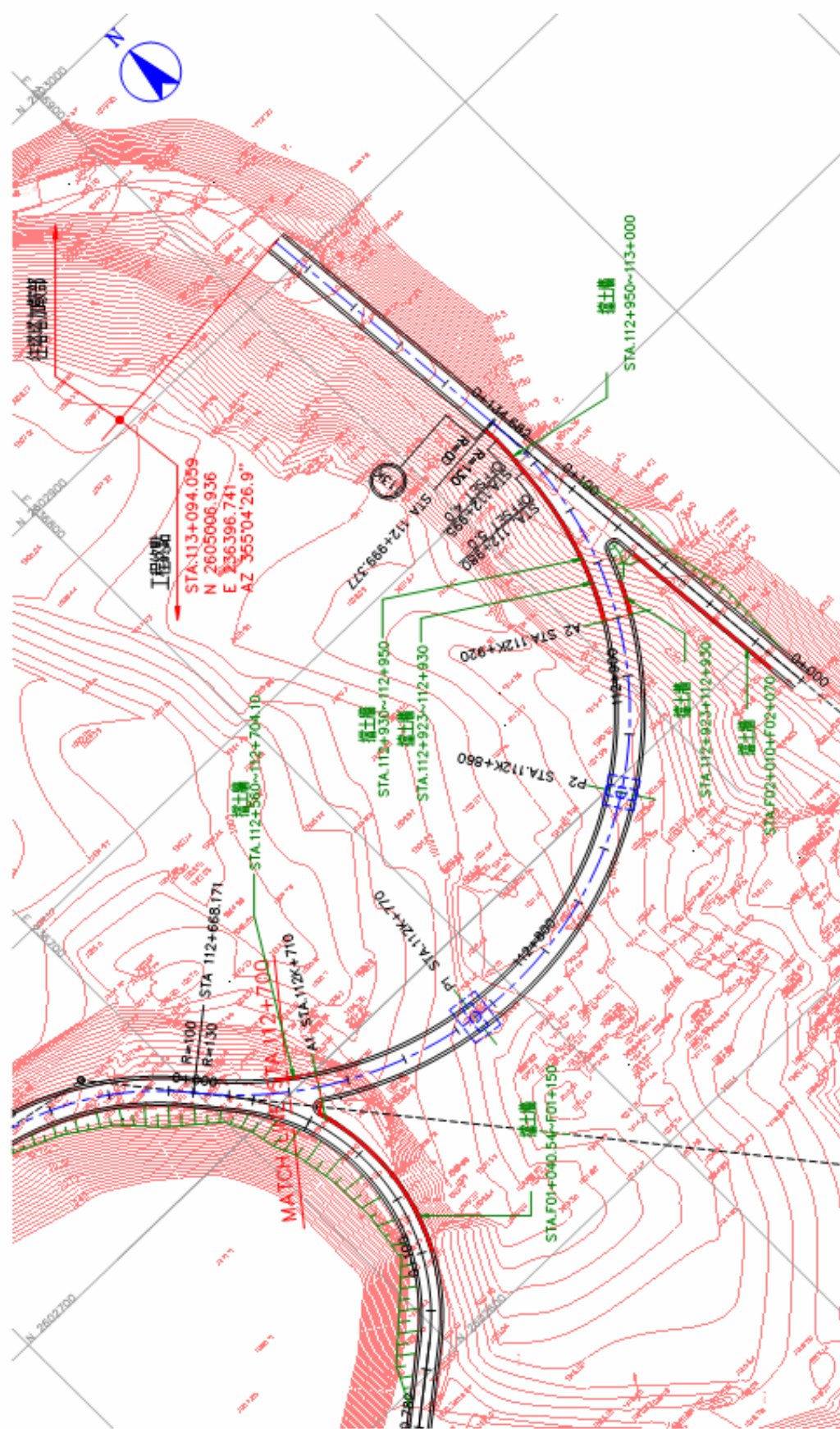
4.3.4 橋樑復建

愛玉橋在歷經了桃芝及敏督利颱風後甚幸未遭沖毀，惟因跨越於好發土石流的野溪「南投 075」之上，遭土石流沖損的潛勢仍然存在。因此於民國 93 年起復建工程開始施工之松泉橋、神和橋與愛玉橋改線工程，其目的為避開土石流的侵襲，與避免造成公路及橋梁交通中斷。表 4-5 為愛玉橋復建工程之基本資料表，圖 4-76~4-84 為愛玉橋細部結構設計圖，圖 4-85 為桃芝颱風後，愛玉橋復建工程橋址處，上游大量形成土石堆積於河道中之情形。

表 4-5 愛玉橋復建工程之基本資料表

橋名	愛玉橋
建造年月	95.9.18
跨越溪流	和社溪
上部結構	鋼箱型梁
下部結構	單支圓柱型橋墩及樁基礎
橋面長度	210 m
淨寬	10 m
車道數	2
孔數	3
跨距	(60+90+60) m

(資料來源：第二區養護工程處)



【資料來源：第二區養蠶工程處】

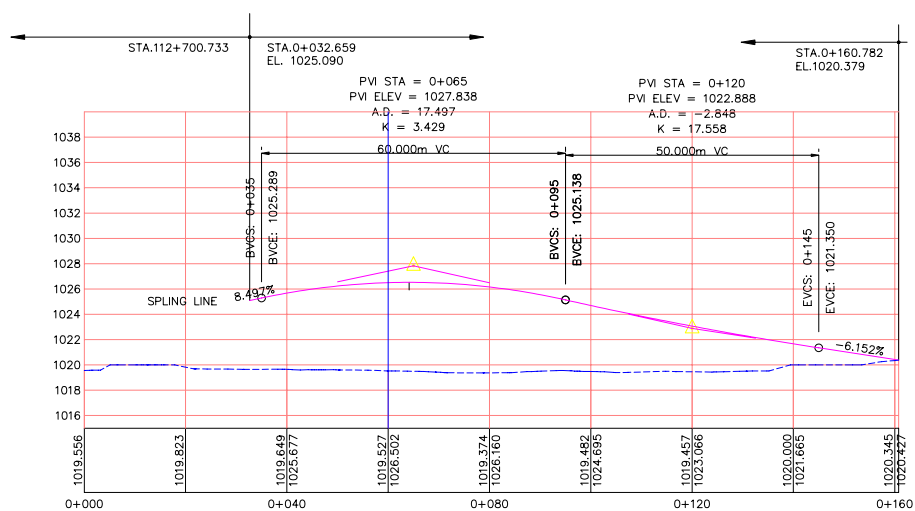
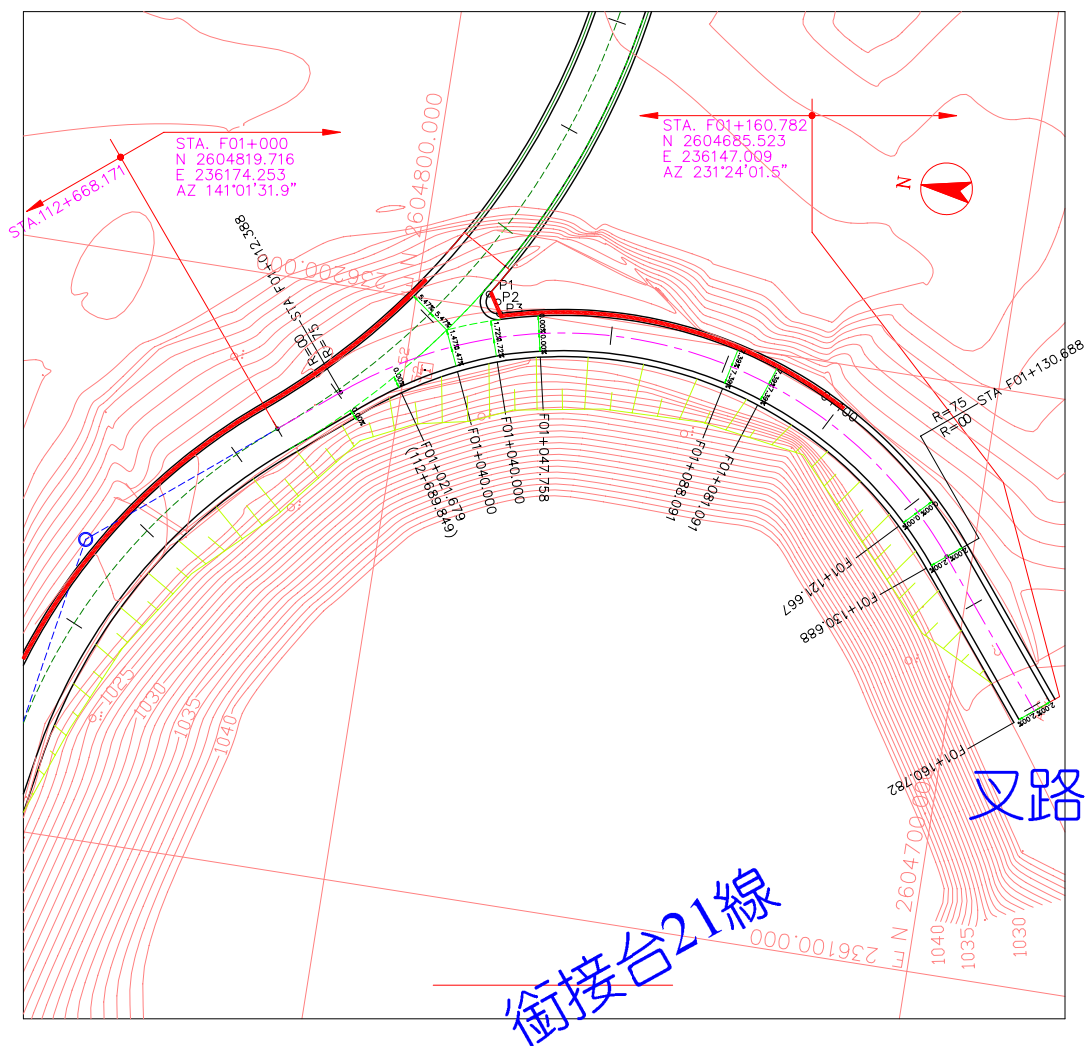
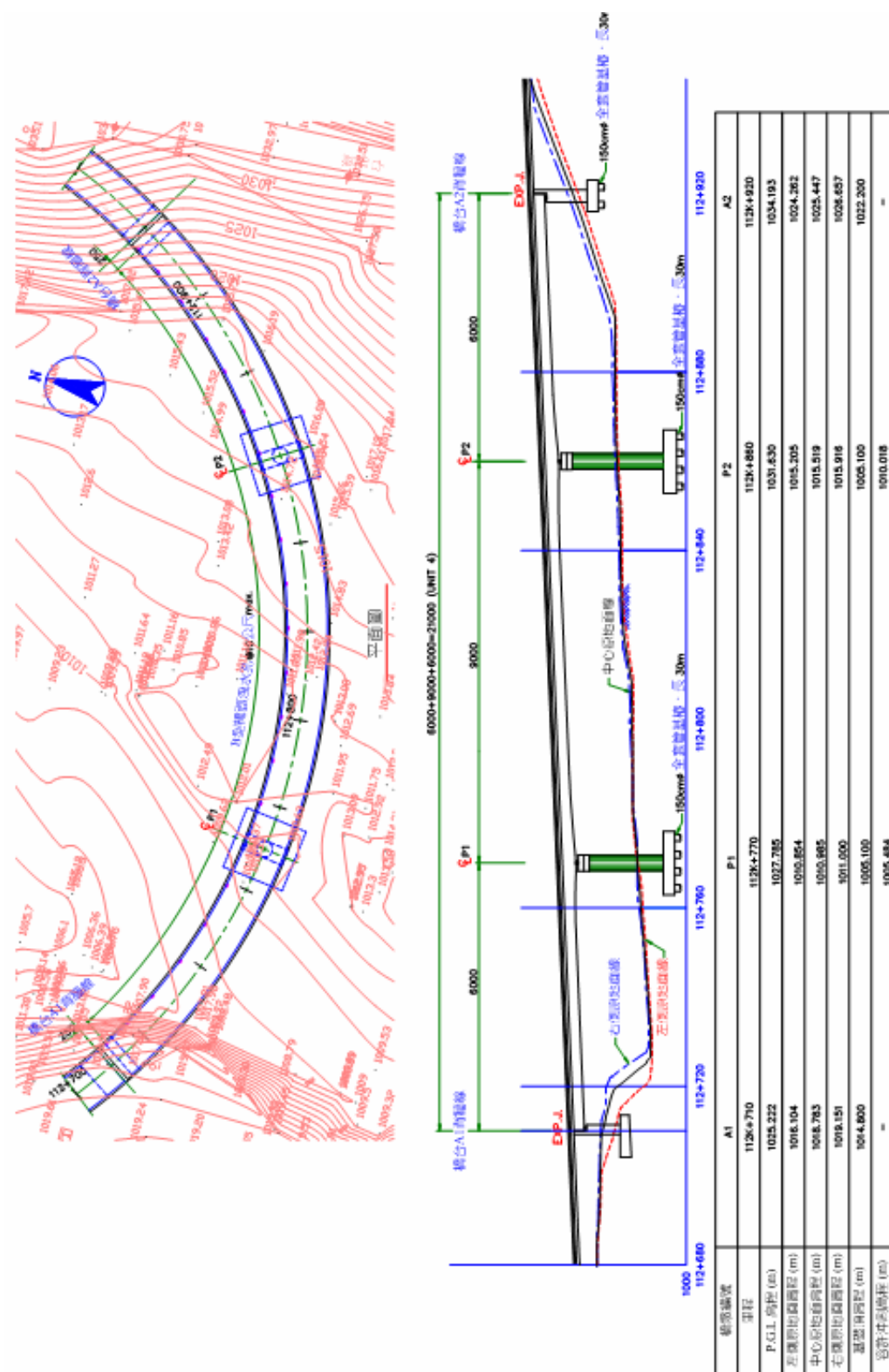


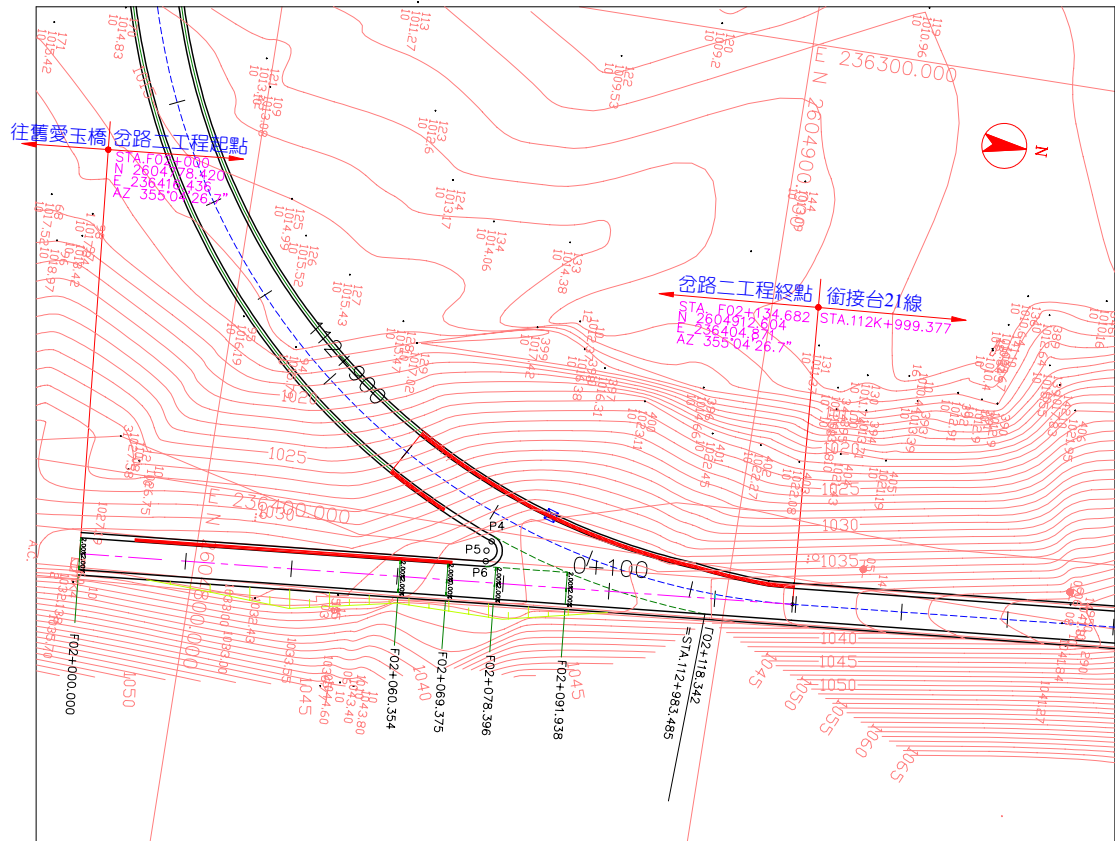
圖 4-77 愛玉橋復建工程往神木村叉路之工程平面與縱面圖



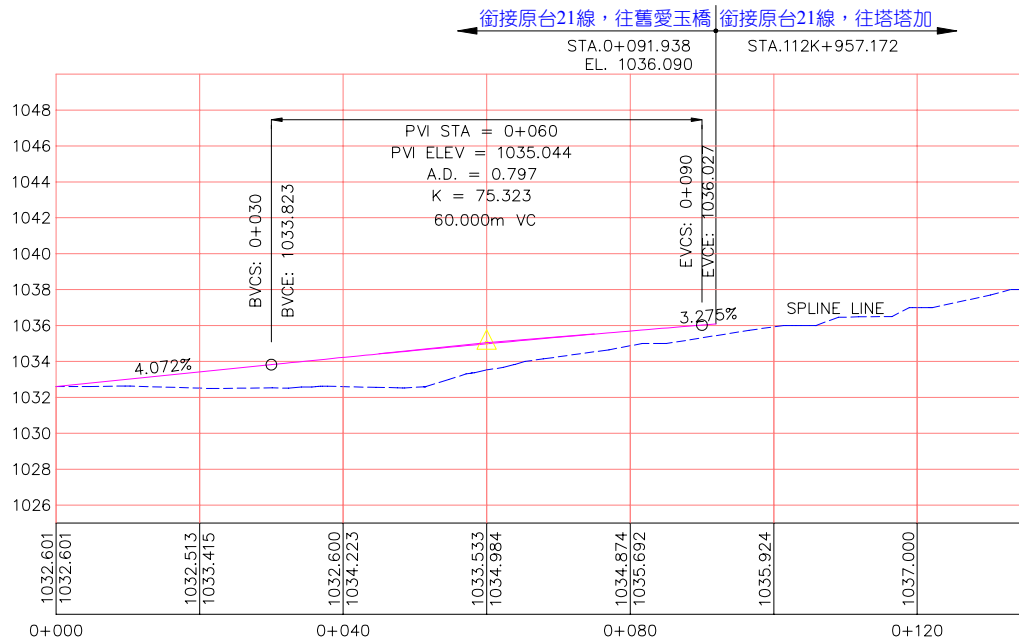
立面圖

【資料來源：第二區養護工程處】

圖 4-78 愛玉橋復建工程之線型平面與縱斷面圖



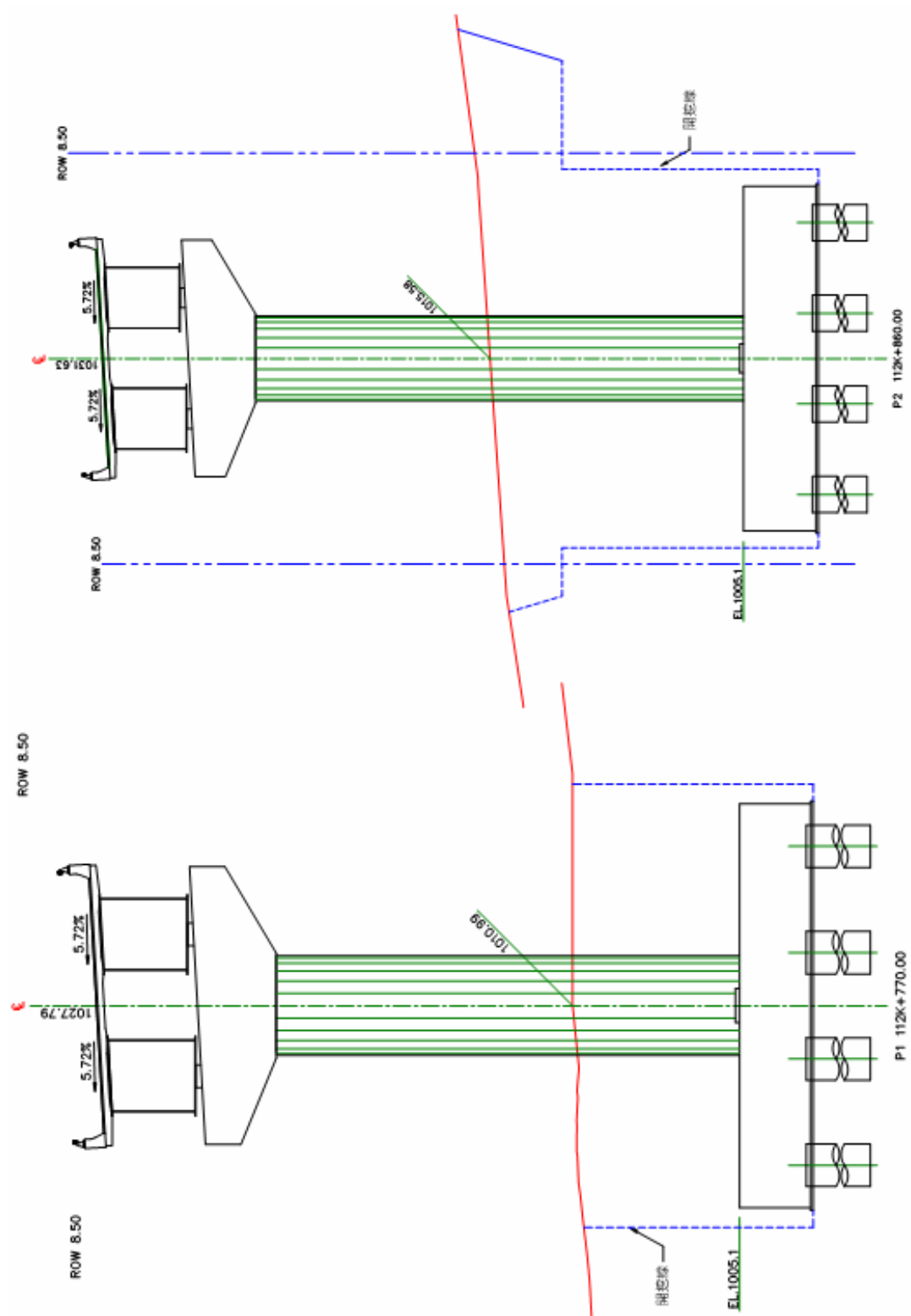
112K+940(RT)平面圖



112K+940(RT)縱面圖

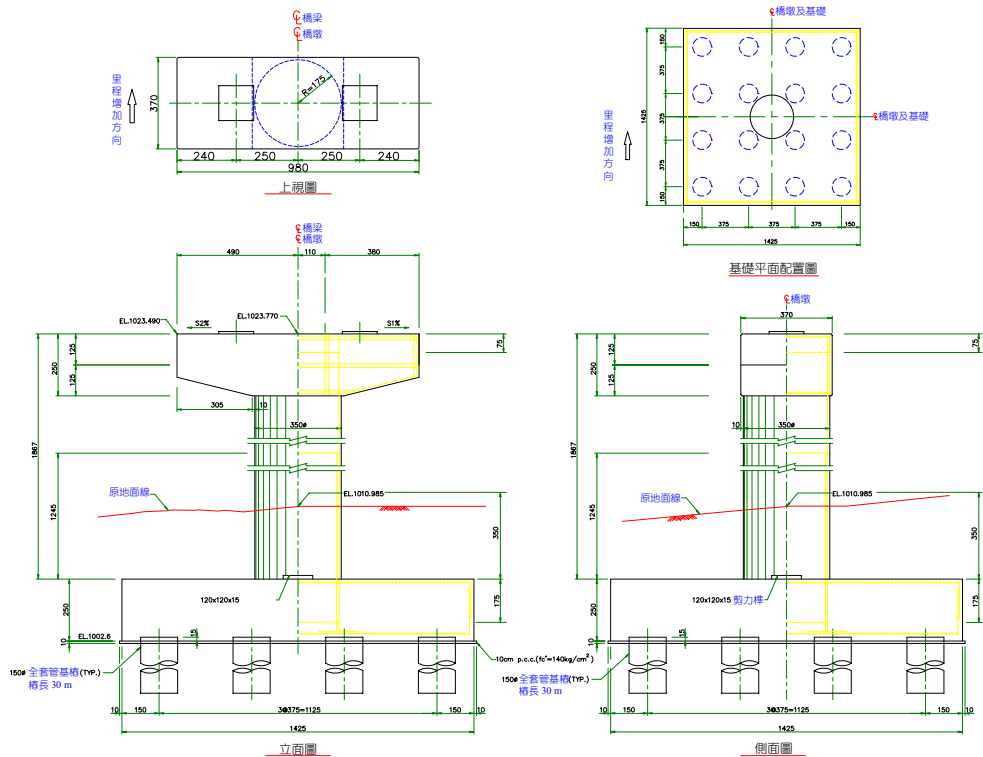
【資料來源：第二區養護工程處】

圖 4-79 愛玉橋復建工程往舊愛玉橋叉路之工程平面與縱面圖



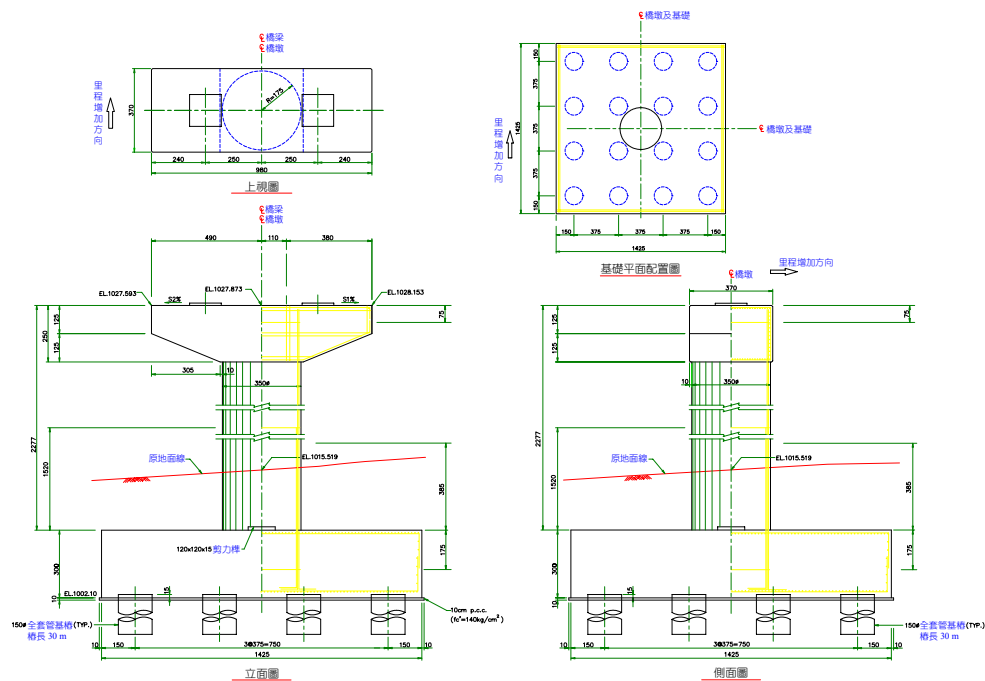
(資料來源：第二區養護工程處)

圖 4-80 愛玉橋復建工程之橋墩橫斷面圖



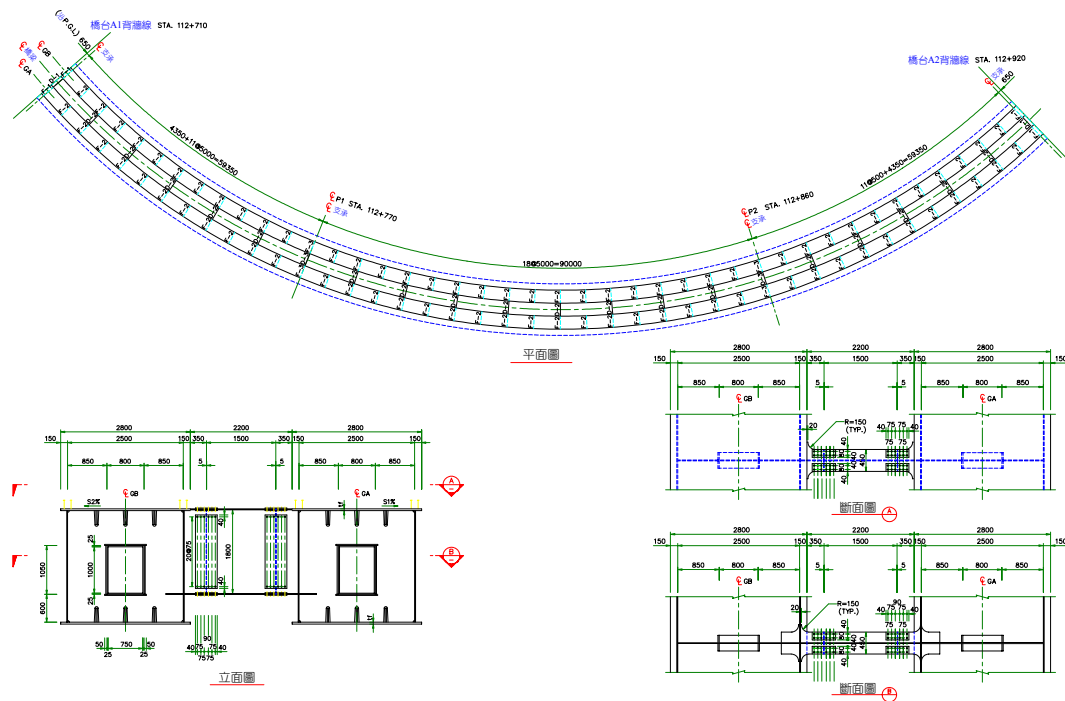
(資料來源：第二區養護工程處)

圖 4-81 愛玉橋復建工程之 P1 橋墩詳圖



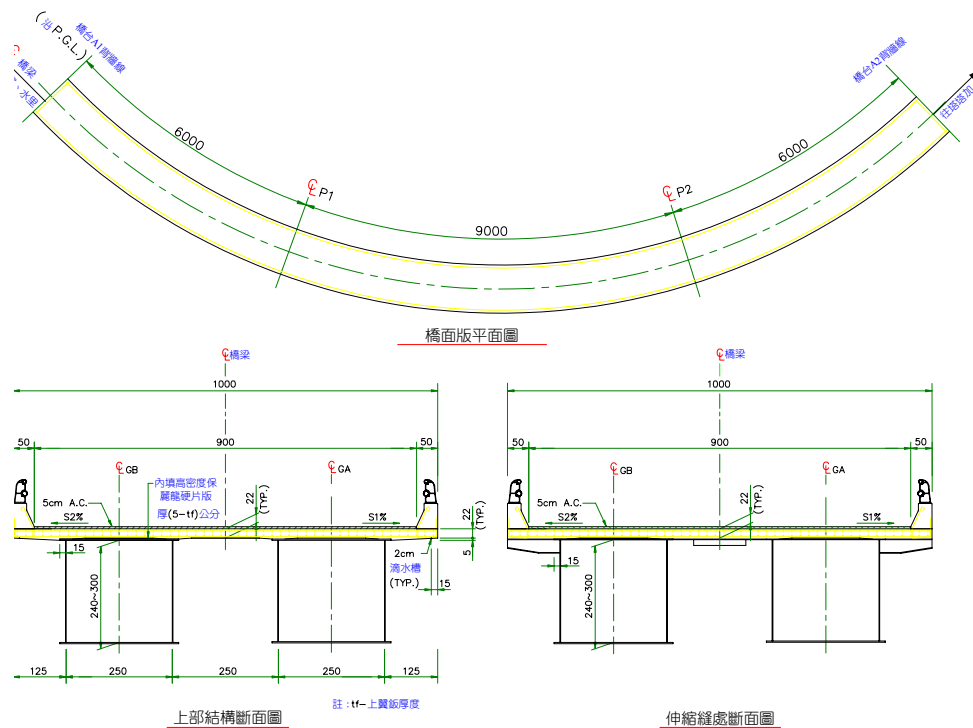
(資料來源：第二區養護工程處)

圖 4-82 愛玉橋復建工程之 P2 橋墩詳圖



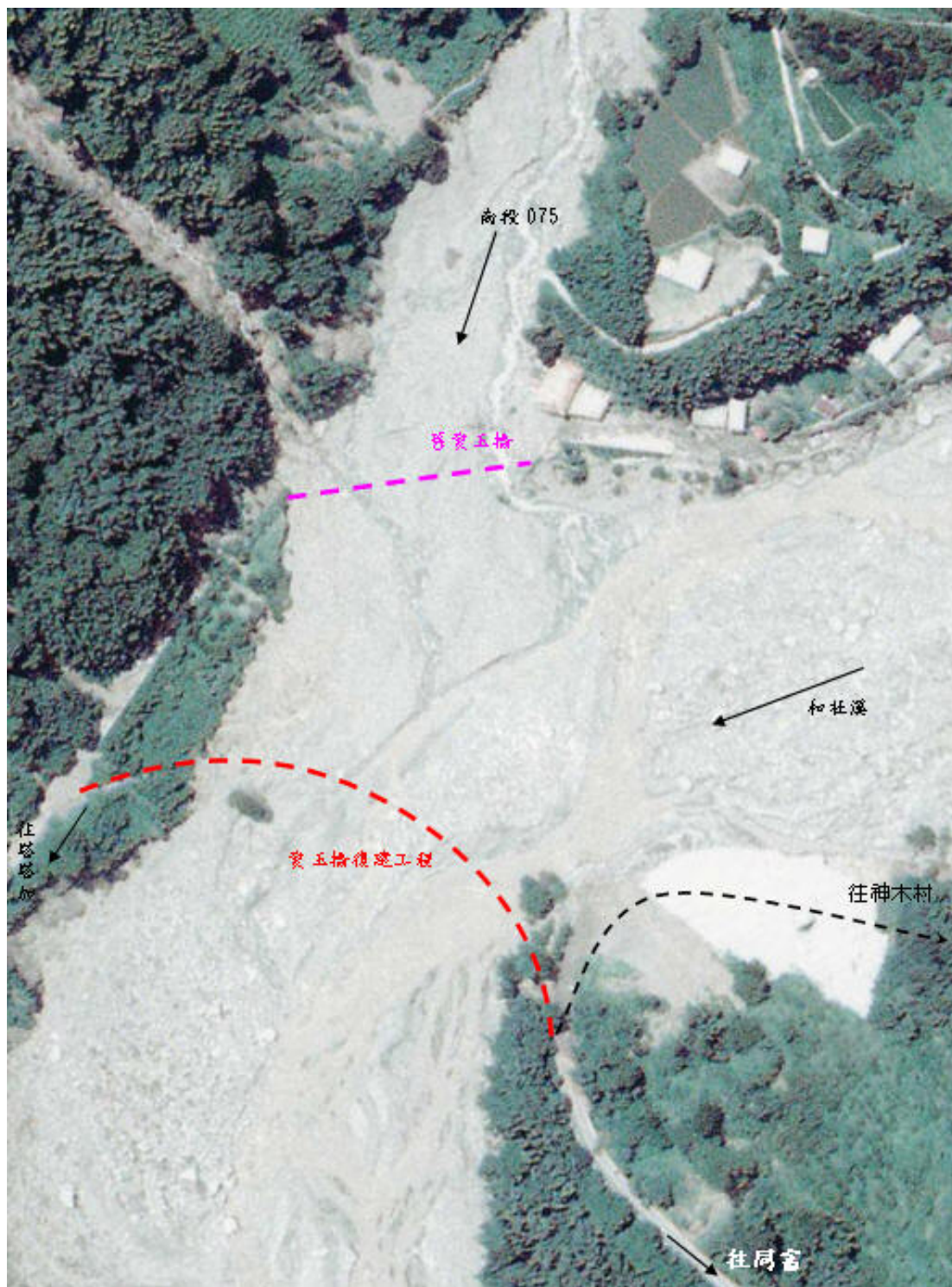
【資料來源：第二區養護工程處】

圖 4-83 愛玉橋復建工程之鋼箱型梁平面配置及立面圖



【資料來源：第二區養護工程處】

圖 4-84 愛玉橋復建工程之上部結構詳圖



(資料來源：台 21 線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

圖 4-85 愛玉橋復建工程橋址上游大量形成土石堆積於河道中之情形

4.3.5 愛玉橋復建後現況

愛玉橋復建工程於 95.09.18 完工，本計畫團隊於 96.10.04 至愛玉橋橋址進行現勘。因橋墩受洪水土石沖蝕破壞，目前正進行基礎補強工作，如圖 4-86~圖 4-87 所示。



圖 4-86 愛玉橋復建工程完工後現況(攝於 96.10.04)



圖 4-87 愛玉橋 P2 橋墩基礎補強情形(攝於 96.10.04)

第五章 土石流流動模擬初步試算

為初步了解土石流之流動過程及影響範圍，本計畫利用二維洪災模式 FLO-2D 進行土石流流況模擬。本模式係採用 O' Brien & Julien(1988)提出包含降伏剪應力、黏滯力、碰撞力及紊流應力之二項式流變模式(Quadratic rheological model)，搭配連續方程式與動力波方程式，配合網格化之數值地形模型(DTM)進行演算模擬。本年度先以南投縣信義鄉豐丘村十八重溪之支流(編號「南投 030」潛勢危險溪流)為試算區域(位置如圖 5-1 所示)，溪流主流長度約為 2,307m，全區地勢陡峻，海拔由高程 2,250m 急遽降至 650m，平均坡度達 39° ，平均高程達 1,420m。本計畫今年度首先進行土石流況初步模擬，並針對模擬參數進行敏感度分析，探討不同參數變化對於土石流最大堆積深度與堆積範圍之影響程度，以作為未來後續計畫執行之參考。

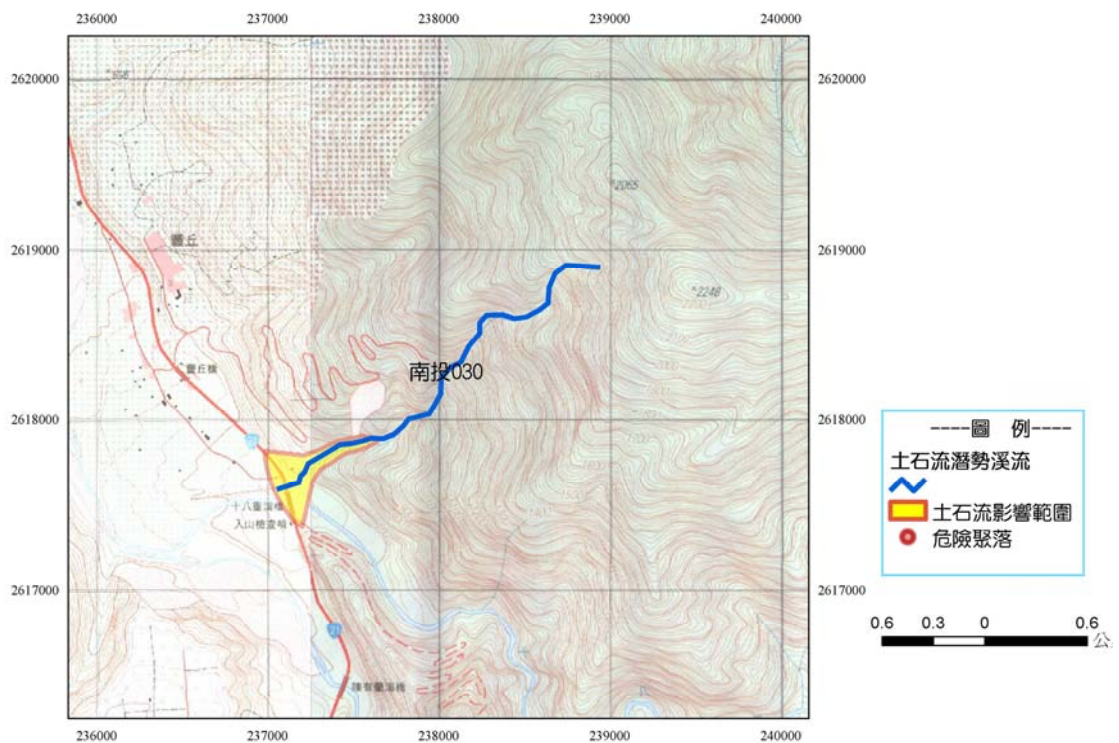


圖 5-1 模式試算區域位置圖

5.1 FLO-2D 模式簡介

FLO-2D 模式為 O' Brien & Julien、Fullerton (1993) 研發所提出之洪水與土石流套裝軟體，可應用於都市淹水、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，可模擬流況包括漫地流、都市洪水、泥流及土石流等。在渠道穩態流況之模擬，和現地實測資料與 HEC-2 計算結果比對，流動深度與流速皆有相當一致的結果。

5.1.1 模式理論架構

FLO-2D 模式利用中央有限差分數值方法(central finite difference scheme)求解二維淺水流(shallow water)方程式，得到水深平均流速及流動深，座標系統如圖 5-2 所示。連續方程式及動量方程式如(6-1)~(6-3)式所示，其中動量方程式為動力波方程式(kinematic wave)。

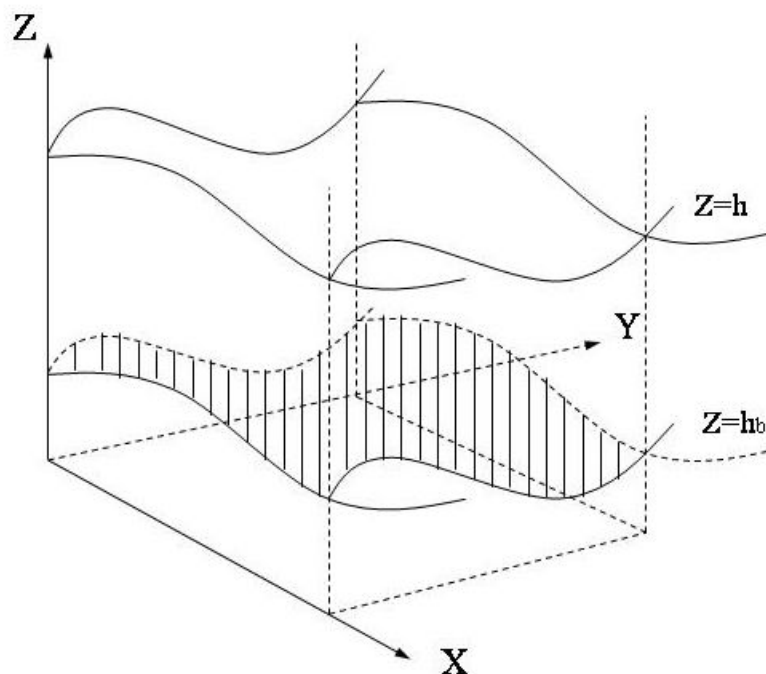


圖 5-2 座標系統圖

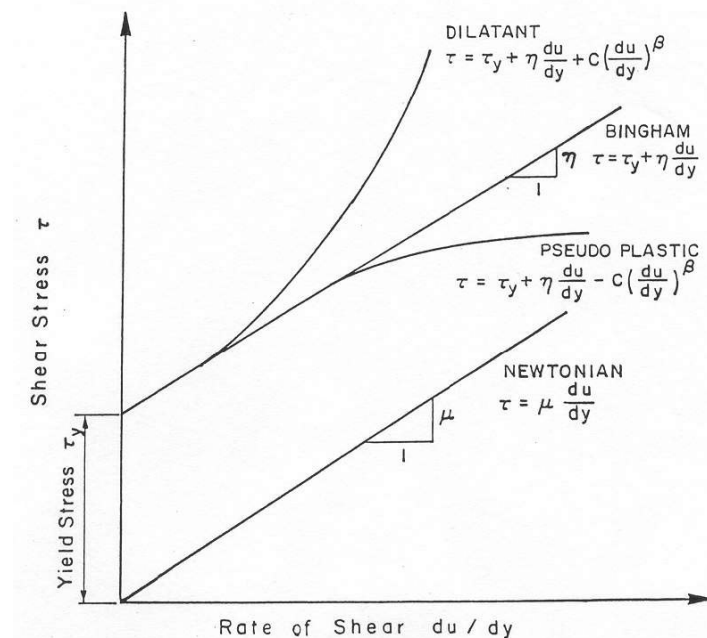
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hV_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hV_y)}{\partial y} = i \dots\dots\dots (5-1)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right) - \frac{V_y}{g} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} \right) \dots\dots\dots (5-2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right) - \frac{V_x}{g} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} \right) - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} \right) \dots\dots\dots (5-3)$$

式中， h 為流動深， V_x 及 V_y 分別為 x 方向及 y 方向之平均流速， i 為超滲降雨強度， t 為時間， S_{fx} 及 S_{fy} 分別為 x 方向及 y 方向之摩擦坡降， S_{ox} 及 S_{oy} 分別為 x 方向及 y 方向之底床坡降， g 為重力加速度。

土石流的流動過程中，礫石、泥砂與水之間的交互作用流變特性已脫離一般牛頓流體(Newtonian fluid)的範圍，屬非牛頓流體(Non-Newtonian fluid)範疇，如圖 5-3 所示。



資料來源：FLO-2D USERS MANUAL, 2006.

圖 5-3 描述流體變形之剪應力與剪應率關係

O' Brien and Julien (1985) 提出一套適用於高含砂水流、土石流及泥流之流變模式如下式，高濃度含砂水流之總剪應力由五項剪應力構成。

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \dots\dots\dots (5-4)$$

其中：

τ_c ：凝聚降伏應力（cohesive yield stress）

τ_{mc} ：莫爾-庫倫剪應力（Mohr-Coulomb shear stress）

τ_v ：黏滯剪應力（viscous shear stress）

τ_t ：紊流剪應力（turbulent shear stress）

τ_d ：離散剪應力（dispersive shear stress）

O' Brien and Julien 將式(6-4)定義為：

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dV}{dz} \right) + \left(\rho_m l^2 + a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2 \right) \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \dots\dots\dots (5-5)$$

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \dots\dots\dots (5-6)$$

其中：

λ 由 O' Brien et al. (1993) 引用 Bagnold (1954) 定義，如下式：

$$\lambda = \left[\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \dots\dots\dots (5-7)$$

τ_y ：賓漢降伏應力（Bingham yield stress）

η ：賓漢黏滯係數（Bingham dynamic viscosity）

V ：x、y 軸方向上之流速

ρ_m ：土石流密度

ρ_s ：土石流體中固體密度

l ：Prandtl 長度係數，Julien et al. (1991) 假設 $l = 0.4h$

h ：土石流流動深度

C_v ：體積濃度

d_s ：顆粒粒徑，蔡元芳 (1999) 取 $d_s = d_{50}$ (中值粒徑)

a_i ：經驗係數，Takahashi (1980) 假設為 0.01

C_* ：顆粒靜止接觸時之最大體積濃度

式(5-5)之流變模式屬於圖 5-3 中膨脹性流體之一種。

再將式(5-5)改寫成坡降形式：

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta u}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \dots\dots\dots (5-8)$$

其中：

S_y ：降伏坡降

S_v ：黏滯坡降

S_{td} ：紊流-擴散坡降

τ_y ：降伏應力

η ：動力黏滯係數

γ_m ：土石流體的單位重

K ：層流阻滯係數

n ：曼寧 n 值

降伏應力 (τ_y) 和黏滯係數 (η)，主要依據泥砂濃度變化，其經驗關係由以下兩式表示：

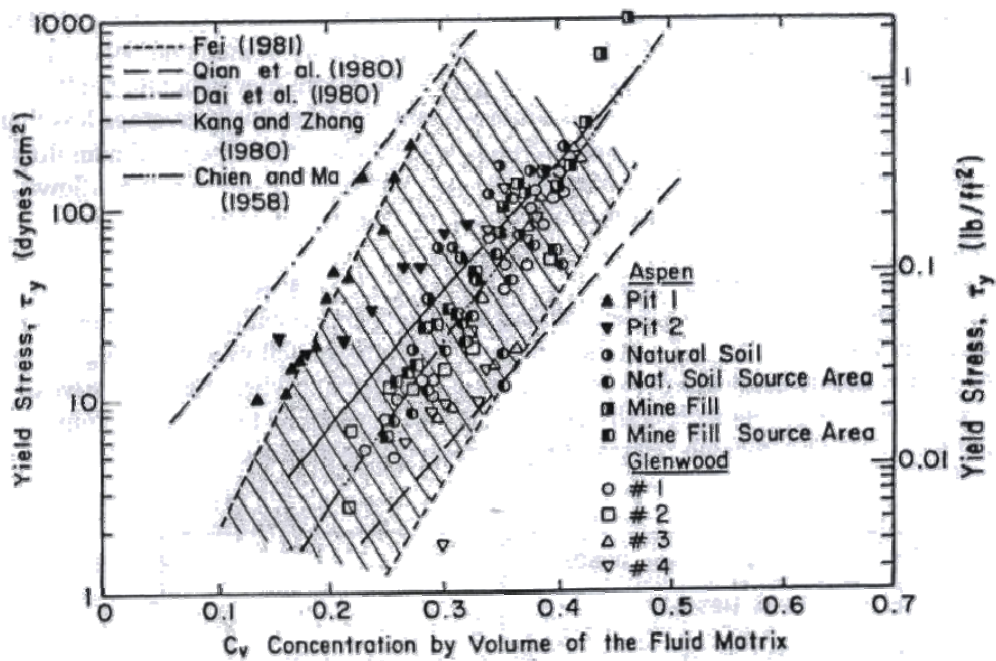
$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \dots\dots\dots (5-9)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \dots\dots\dots (5-10)$$

α_i 和 β_i 為經驗係數，由實驗室經驗決定（O' Brian and Julian，1988）。表 5-1 為體積濃度、降伏應力與動力黏滯係數關係表，圖 5-4 與圖 5-5 為降伏應力、動力黏滯係數與體積濃度關係圖。

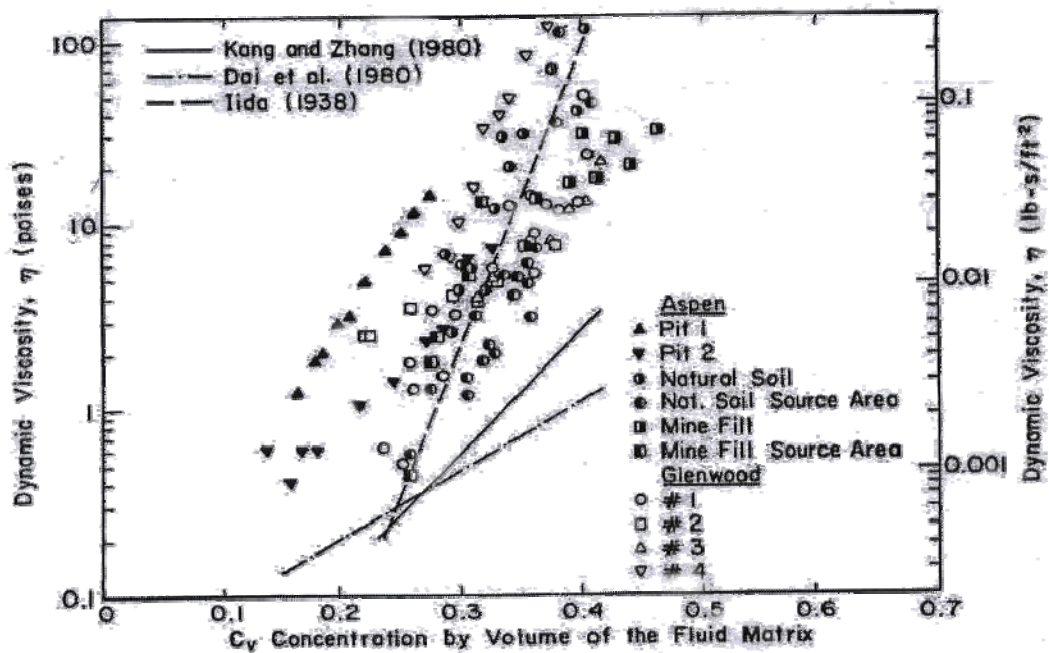
表 5-1 降伏應力、動力黏滯係數與體積濃度關係表

Yield Stress and Viscosity as a Function of Sediment Concentration				
Source	$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$		$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$	
	α_1	β_1	α_2	β_2
Field Data				
Aspen Pit1	0.181	25.7	0.036	22.1
Aspen Pit2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood1	0.0345	20.1	0.00283	23
Glenwood2	0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relationships Available from the Literature				
Iida(1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	-	-	0.0075	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.05	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.0047	22.2	-	-
資料來源：FLO-2D USERS MANUAL, 2006.				



資料來源：FLO-2D USERS MANUAL, 2006.

圖 5-4 降伏應力與體積濃度相對圖



資料來源：FLO-2D USERS MANUAL, 2006.

圖 5-5 動力黏滯係數與體積濃度相對圖

5.1.2 模式假設與限制

1. FLO-2D 模式之假設條件：

- 淺水波假設
- 水深方向為靜水壓分佈(hydrostatic pressure distribution)
- 差分時間間隔內為穩流(steady flow)
- 滿足穩流阻抗方程式(steady flow resistance equation)
- 各網格點的高程與曼寧值僅有單一值

2. FLO-2D 模式之模擬限制：

- 定床(rigid bed)模式，無法模擬底床沖淤現象。
- 無法模擬震波(shock wave)與水躍(hydraulic jump)現象

5.2 數值模擬之運算流程

FLO-2D 模擬主要分為清水演算與土石流演算兩大部分：

1. 清水流演算

- (1) 依據模擬區域內之數值高程設定各網格點之曼寧係數 n 值。
- (2) 決定土石流可能出流點位置，以獲得洪水流量歷線。通常出流點的位置可能會發生在河道轉彎處、河道斷面突寬處、溪流坡度驟減處、地形開闊處等地方，可參考水土保持技術規範（2003）及謝正倫（1991）、林銘郎（2002）流動區與堆積區之劃分，決定土石流出流點位置，並假設此點以下只有土石停淤而沒有溪床刷深之現象。
- (3) 依據集水區內雨量站於土石流災害發生期間所量得之時雨量降雨資料整理分析，可得到該流域的降雨歷線。
- (4) 利用 FLO-2D 的水文模式進行清水流演算，以上述所決定之出流點作為清水流量的紀錄點，得到清水流流量歷線。

2. 土石流模式

- (1) FLO-2D 二維土石流數值模式中，假設土石流發生時之 C_v 為運算體積濃度 C_v^* ，未發生時 C_v 為 0。而土石流開始發生至結束時間由現地訪查資料所得；若缺乏訪查資料則參考池谷浩（1980）與謝正倫（1993）方法，假設達到最大時雨量值為土石流入流開始，最大時雨量發生後兩小時降雨為土石流結束。
- (2) 土石流演算：土石流流量計算，係以流入點之土石流中清水流量流量歷線乘以放大因子 BF（bulking factor），決定土石流流量歷線，BF 由體積濃度計算如下：

$$BF = \frac{1}{1 - C_v} \dots\dots\dots (5-11)$$

(3)輸入流變參數及其他材料參數。

(4)進行土石流模式的模擬，最後得到最終流深，也因此可得到土石流的堆積範圍與堆積深度，進而推估堆積土方量。

5.3 地形高程及降雨資料之取得

應用 FLO-2D 二維土石流數值模式於現地模擬時，首先必須收集模式模擬所需要輸入的地形資料與降雨資料。分別說明如下：

1.地形資料

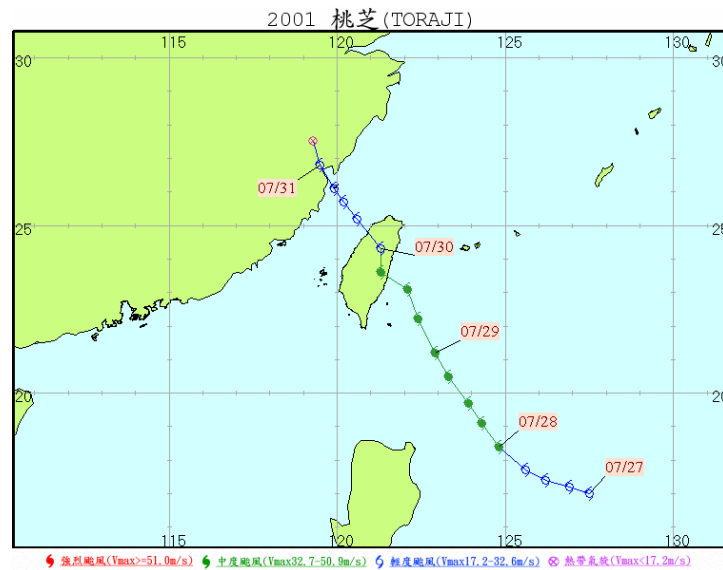
FLO-2D 模式模擬溪流土石流流況時，需要分析區域之地形高程資料。本計畫利用數值地形模型 (Digital Terrain Model ; DTM)，藉以產生計算區網格之高程。數值地形資料初步以農林航空測量所於 1999 年製作之全台灣 40m×40mDTM 資料，並以林昭遠等 (2000) 研發之「集水區資訊系統」程式切割模擬區域內之地形高程，其次再由 FLO-2D 模式根據 20m×20m 地形資料以三角網格內差求得高程，給定分析區域內各網格點之 x、y 座標值與對應之高程值。

2. 降雨資料

本計畫擬初步試算之颱風事件為民國 90 年 7 月 30 日侵襲台灣之桃芝颱風 (Toraji)，行進路徑如圖 5-6 所示。桃芝颱風在呂宋島東方海面生成後以西北轉北北西的方向移動，朝台灣東部陸地接近，於 7 月 30 日 0 時 10 分左右登陸花蓮秀姑巒溪口，並於當日 10 時 20 分左右由新竹附近離開本島進入台灣海峽北部。

圖 5-7 為陳有蘭溪流域目前設置之雨量測站分佈，本模擬區域附近並無雨量測站。但就地理位置與地勢高程關係來看，本區約位在信義與和社 (同富) 之間，所以在雨量資料上則可援用信義站 (EL.485m) 或和社站 (EL.987m) 的觀測值。因此，本計畫以較接近模擬區域平均高度之和社雨量測站作為桃芝颱風降雨資料來源。

桃芝颱風期間，和社雨量測站之降雨量分佈如圖 5-8 及表 5-2 所示，總累積雨量為 437mm，最大時降雨強度為 66.5mm/hr。



資料來源：中央氣象局網站

圖 5-6 桃芝颱風路徑圖

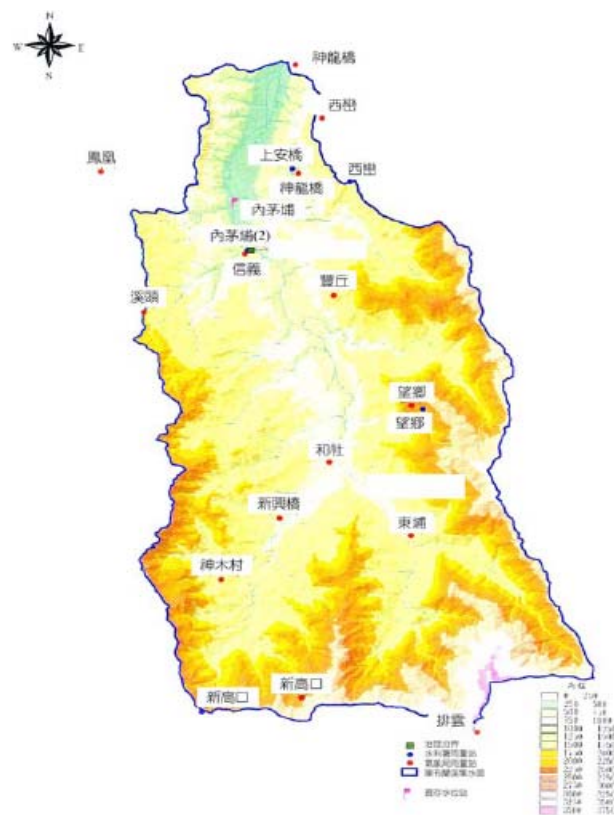


圖 5-7 陳有蘭河流域雨量觀測站分佈圖（交通部公路局，2004）

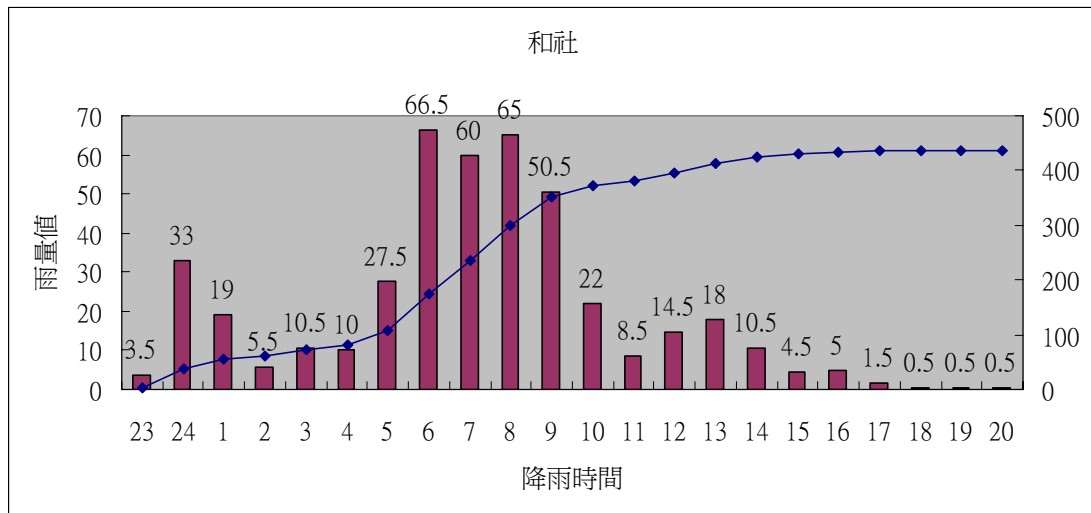


圖 5-8 桃芝颱風期間，和社雨量測站之降雨組體圖

表 5-2 和社雨量測站在桃芝颱風期間之降雨量最大值

地名	雨量站	2001/07/30 桃芝颱風	
		最大時雨量 (mm/hr)	最大日雨量 (mm)
南投縣信義鄉 同富村	和社站	66.5	437.0

5.4 模式數值參數決定

1. 土石流流量歷線與模擬時間

在進行洪水模式演算時，給定降雨事件之總雨量及累積百分比，分析清水流流量，如圖 5-9 所示。再依據土石流發生時間配合放大因子 BF (bulking factor) [式(6-11)]，利用清水流量歷線得到土石流流量歷線。FLO-2D 模式中，假設土石流發生時之 C_v 為運算體積濃度 C_v^* ，未發生時 C_v 為 0，而土石流發生時間由於缺乏觀測紀錄，因此參考池谷浩（1980）與謝正倫（1993）提出之方法，假設達到時雨量尖峰值時為土石流發生時間，最大時雨量發生後兩小時降雨為

土石流結束，土石流由當日上午 6 時發生至早上 9 時結束，總模擬時間為 3 小時。

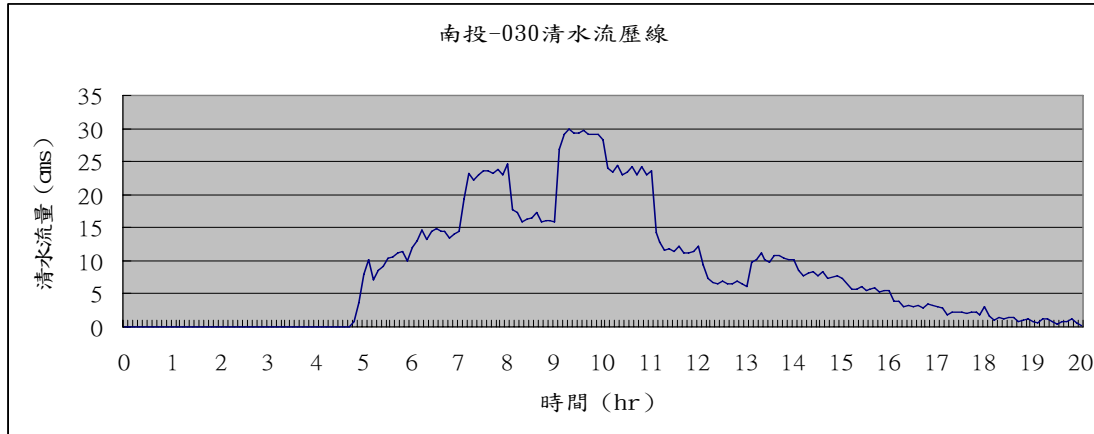


圖 5-9 模擬區清水流流量歷線

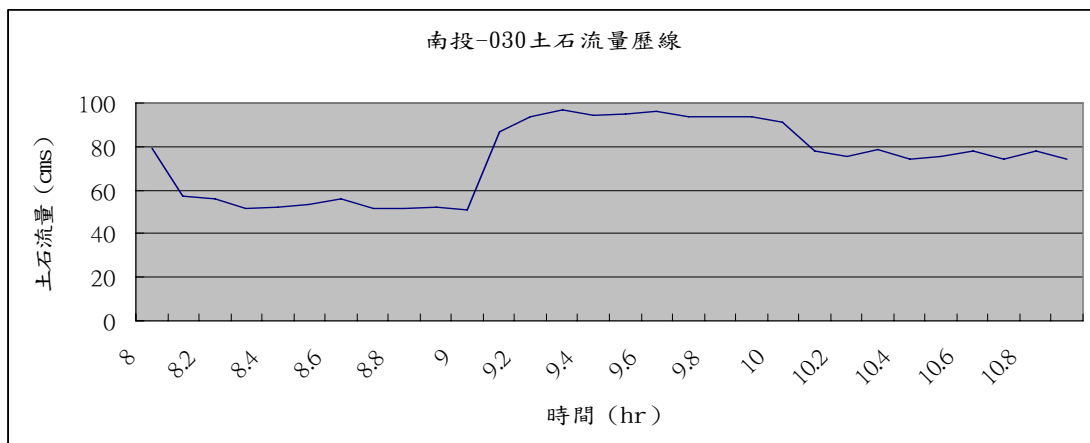


圖 5-10 模擬區土石流流量歷線

2. 體積濃度

FLO-2D 模式中，土石流的體積濃度為重要影響因子之一。在流變參數中，體積濃度位於降伏應力及動力黏滯係數關係式的指數位置，故體積濃度越大，降伏應力與動力黏滯係數也越大，相對來說，總剪應力與阻力亦越大。

謝正倫（1998）根據 Takahashi（1977）所推導之土石流平衡濃

度公式，估計土石流在堆積狀態下之體積濃度 C_v 為 0.67；林美聆（2000）模擬賀伯颱風期間和社地區土石流時，採用體積濃度 $C_v=0.69$ 作為模擬參數。根據陳有蘭溪（上游段）治理規劃檢討計畫（2004）研究成果，在陳有蘭溪流域不同地點進行現地採樣進行粒徑分析成果顯示，本研究地點與林美聆（2000）模擬和社地區之材料特性相近。因此，體積濃度 C_v 初步採用 $C_v=0.69$ 。

3. 降伏應力 τ_y 及黏滯係數 η

詹錢登（1997）針對南投縣神木村出水溪土壤試樣進行流變特性試驗分析探討，試驗中利用管式流變計得知體積濃度介於 0 ~ 0.45，剪應率範圍介於 0 ~ 3000 (1/sec) (請確認單位!!!)。試驗結果顯示，降伏應力 (τ_y) 與動力黏滯係數 (η) 均會隨著體積濃度增加而呈指數上升，試驗分析結果歸納如下：

當 $C_v > 0.21$ 時：

賓漢降伏應力：

$$\tau_y = 0.0811e^{13.72C_v} \dots\dots\dots (5-12)$$

賓漢黏滯係數：

$$\eta = 0.000462e^{11.24C_v} \dots\dots\dots (5-13)$$

FLO-2D 模式，以給定 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 與 C_v ，決定分析之降伏應力與黏滯係數。模式中流變參數輸入值參考詹錢登（1997）之試驗結果如下：

$$\alpha_1=0.811、\alpha_2=0.00462、\beta_1=13.72、\beta_2=11.24。$$

4. 土石流體中土石比重 (Gs)

陳重光、游繁結（1988）針對十八重溪右岸之土石流跡地進行調查，調查結果顯示，本地區土石比重 Gs 大都介於 2.66 至 2.74 之

間，最大及最小值分別出現在發生部與堆積部前端，在土石流運動分區中，發生部比重為 2.73，流動部為 2.70，堆積部為 2.71，以及堆積部前端為 2.67。由於堆積部前端易因比重小之材料攜出堆積於此，在模擬過程時不將堆積部前端比重考慮，採用調查地點另三區之平均比重 G_s 為 2.71。

5.層流阻滯係數 (K)

漫地流在經天然渠道或人工渠道表面，可能會隨坡度、形狀及植生狀況而變化，如漫地流流經有植生表面時所產生的阻力會較流經泥土表面時來的大 (O' Brian, 1998)。模式試算時所使用之漫地流層流阻滯係數 K 值為 FLO-2D 使用手冊上所建議使用值 2,285。

6.曼寧粗糙係數 (n)

Johnson 等 (1971) 調查美國加利福尼亞洲之土石流，發現在源頭部與堆積部採樣，結果發現土石流堆積材料在源頭部與堆積部礫徑分佈曲線相似，認為在土石流傳輸過程中，礫徑分佈的改變影響很小。陳榮河、林美聆等人 (1991, 1992, 1994) 於花蓮銅門村土石流區，在源頭部、流動部與堆積部分三個時期九個明坑進行採樣，結果亦顯示三期礫徑分佈曲線大致相近。

由上述結果顯示，土石流傳輸過程中，對粒徑分佈的改變很小。因此，根據陳有蘭溪（上游段）治理規劃檢討計畫（2004），在本地點堆積部進行現地採樣，並利用不同計算方法估算本區曼寧粗糙係數 n 值為 0.028~0.035。經與周必凡等人 (1991) 之建議值比對，本研究以最大值 0.035 作為模式輸入參數。表 5-3 為本模式進行土石流數值模擬試算時採用之參數值。

表 5-3 FLO-2D 模式使用參數值

輸入參數		初始值	
賓漢降伏應力 τ_y (Pa)	α_1	1202.2	0.0811
	β_1		13.72
賓漢黏滯係數 η (Pa-s)	α_2	1.21	0.000462
	β_2		11.24
曼寧粗糙係數值 n		0.035	
土石顆粒比重 G_s		2.71	
層流阻滯係數 K		2285	
體積濃度 Cv		0.69	

5.5 試算成果說明與討論

5.5.1 參數敏感度分析

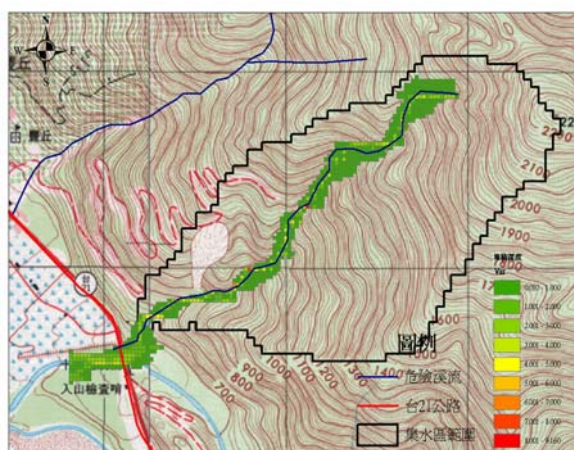
為了解 FLO-2D 模式應用於現地案例時數值參數對模擬結果之影響程度，本節針對模式之參數特性進行敏感度分析。首先固定部分模擬參數及模擬時間不變，改變模式演算方法、體積濃度、流變參數、土石比重及曼寧粗糙係數等因子，藉以瞭解不同參數變化對最大堆積深度、堆積土方量及流速造成之影響。

1. 模式演算方法之影響

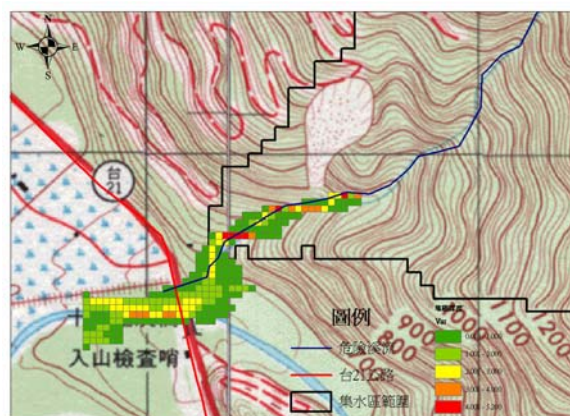
在 5.1.1 節中曾經提到 FLO-2D 提供動力波模式及擴散波模式進行洪水及土石流問題之模擬，在 5-2 式與 5-3 式為代表力平衡之動量方程式，而動力波（dynamic wave model）為動量方程式主體；擴散方程式（diffusion wave model）為省略式中最後三項，將擴散波模式與動力波模式在相同初始參數條件對南投-030 潛勢溪流進行模擬，分析結果展示於表 5-4 及圖 5-11~圖 5-12，經比較發現，兩種模式對於堆積區模擬並無太大差異；所以在堆積模擬時，擴散波模式可視為一不失精度之簡化模擬之模式。

表 5-4 不同控制方程式模擬結果

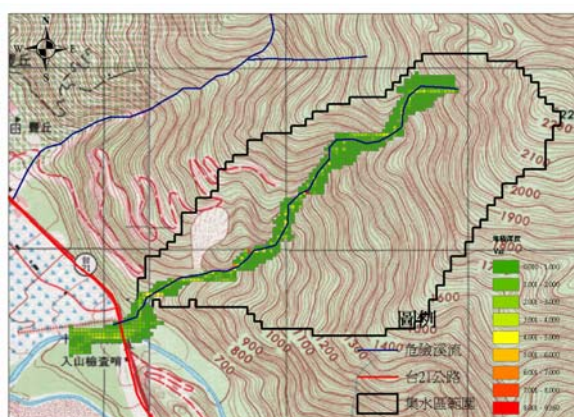
模擬項目 方程式	全流域		
	最大流速（m/s）	最大深度（m）	堆積土方量（m3）
動力波方程式	26.85	9.18	
擴散波方程式	26.85	9.16	
模擬項目 方程式	堆積區		
	最大流速（m/s）	最大深度（m）	堆積土方量（m3）
動力波方程式	13.36	5.22	113740
擴散波方程式	13.36	5.20	113732



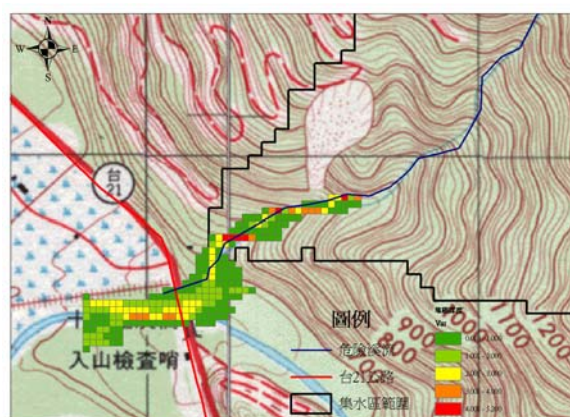
(a)動力波全流域堆積深度



(b)動力波堆積區深度

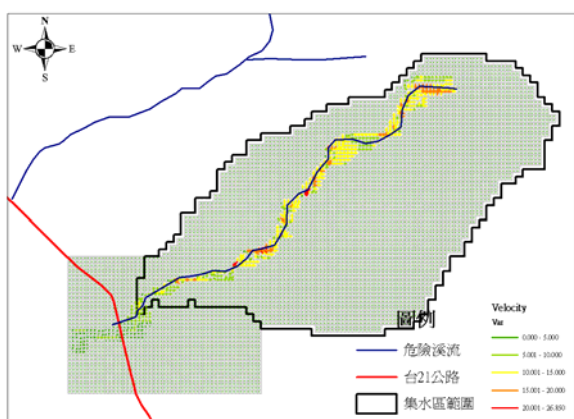


(c)擴散波全流域堆積深度

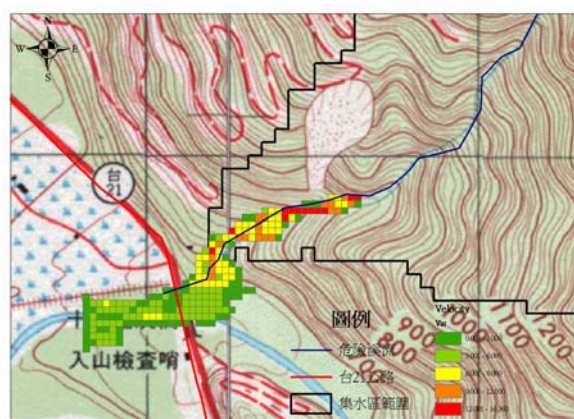


(d)擴散波堆積區深度

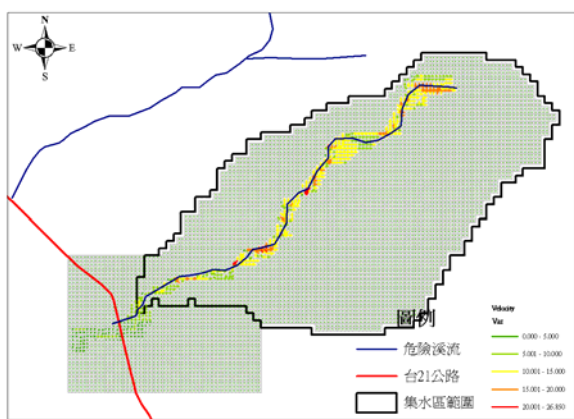
圖 5-11 不同運動方程式堆積深度模擬結果比較



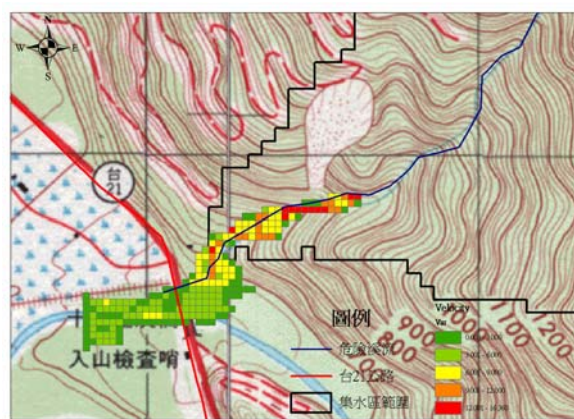
(a)動力波全流域流速



(b)動力波堆積區流速



(c)擴散波全流域流速



(d)擴散波堆積區流速

圖 5-12 不同運動方程式堆積區最大流速模擬結果比較

2.體積濃度之影響

當體積濃度改變時，其最大堆積深度、堆積範圍及流速相關關係如表 5-5 及圖 5-13～圖 5-16(d)所示，由圖中發現，當體積濃度小於 50%時，土石流流深、流速及堆積土方量變化較有限，而當體積濃度超過 50%時，對於堆積土方量、流速及堆積深度變化較為明顯。

推測此原因乃因體積濃度的改變導致土石流流量、降伏應力及黏滯係數都隨之增加，在此三個因子的加成作用下，流動過程中的土石流量成線性增加，但降伏應力卻成非線性的增加，體積濃度由 50%至 60%時，流量僅增加原先 0.5 倍，但降伏應力卻增加至原先 2 倍之多，導致流速在此處遽減之情形造成。

表 5-5 體積濃度與堆積深度、流速及土方量關係

體積濃度	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
最大深度 (m)	2.45	2.53	2.63	2.79	3.85	5.39	8.25
最大流速 (m/s)	15.98	16.32	16.72	17.42	16.74	16.29	15.94
堆積土方量 (m ³)	33168	35508	38740	43672	71348	120400	228528

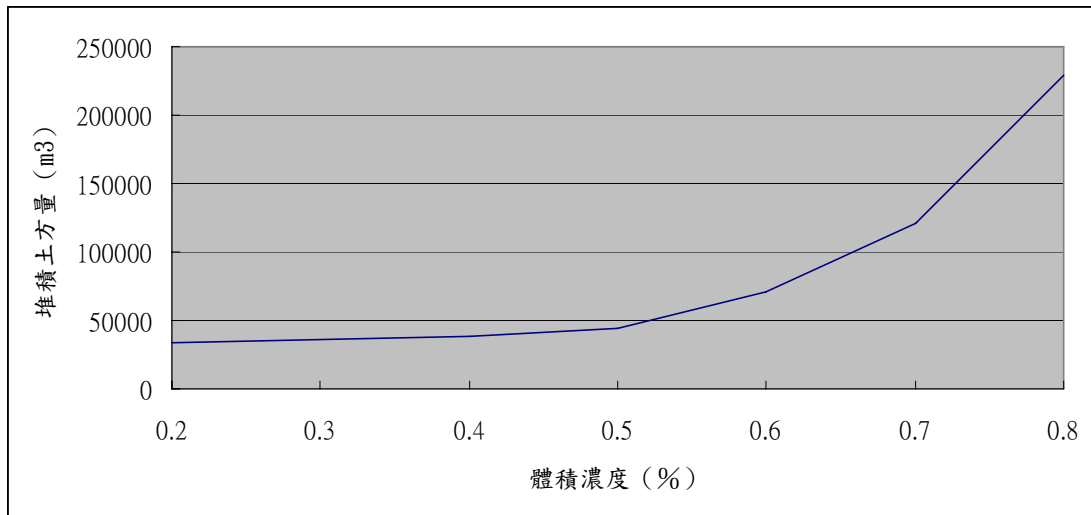


圖 5-13 體積濃度與堆積區土方量關係圖

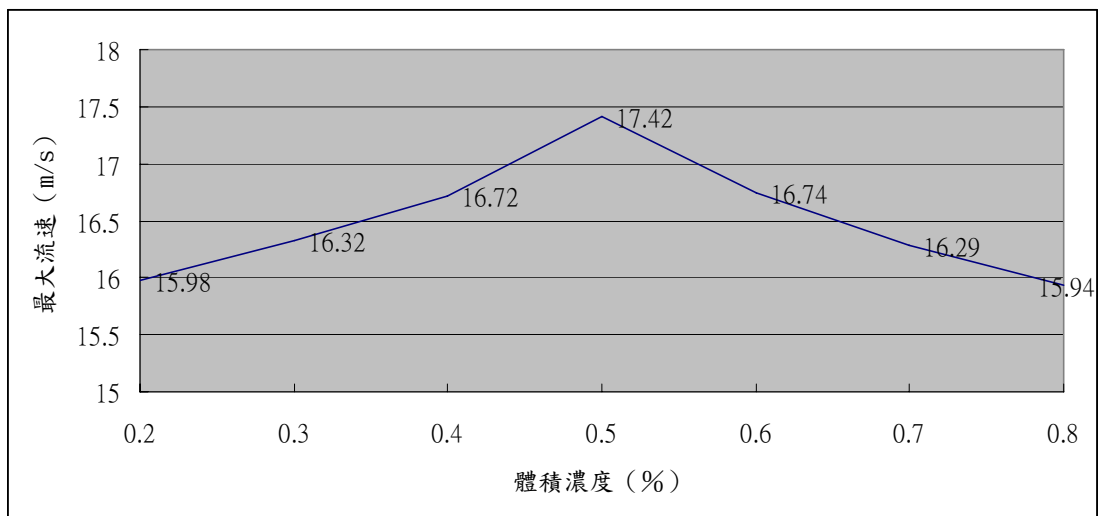


圖 5-14 體積濃度與最大流速關係圖

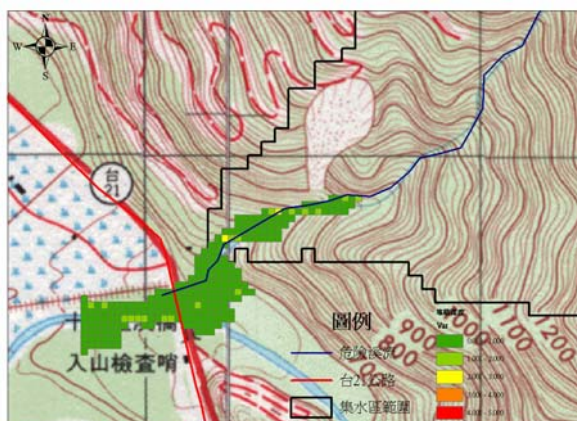


圖 5-15(a) 體積濃度 20%之深度

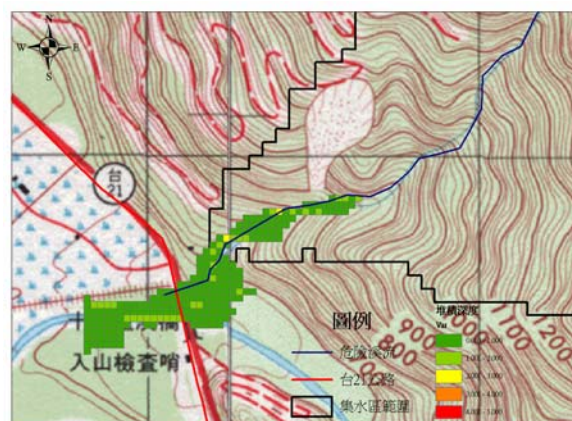


圖 5-15(b) 體積濃度 40%之深度



圖 5-15 (c) 體積濃度 60%之深度

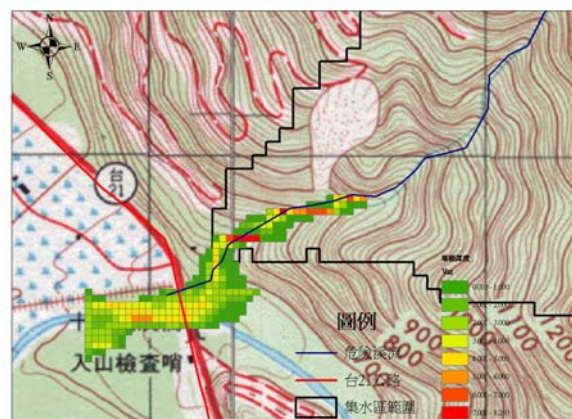


圖 5-15 (d) 體積濃度 80%之深度

圖 5-15 體積濃度 20%-80%對堆積深度之分佈圖

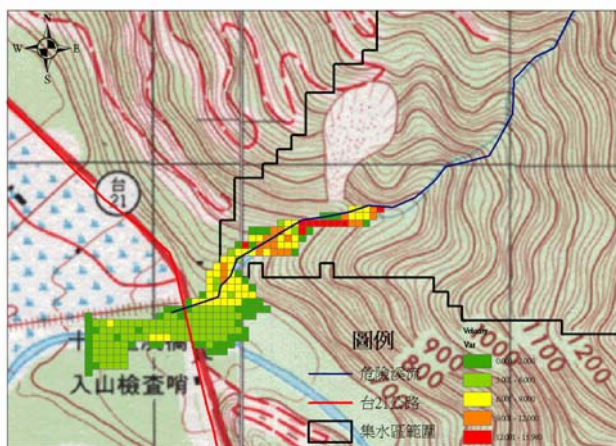


圖 5-16(a) 體積濃度 20%之速度

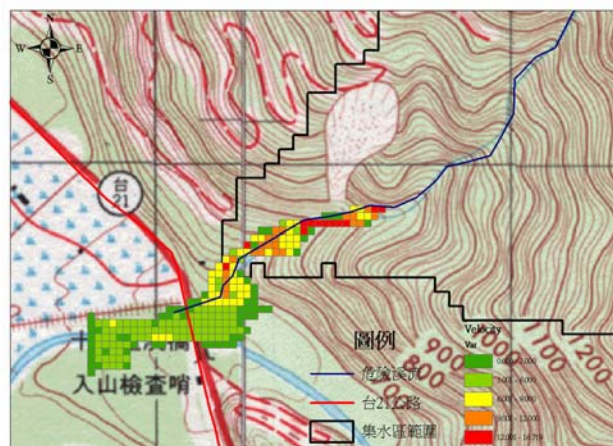


圖 5-16(b) 體積濃度 40%之速度



圖 5-16(c) 體積濃度 60%之速度

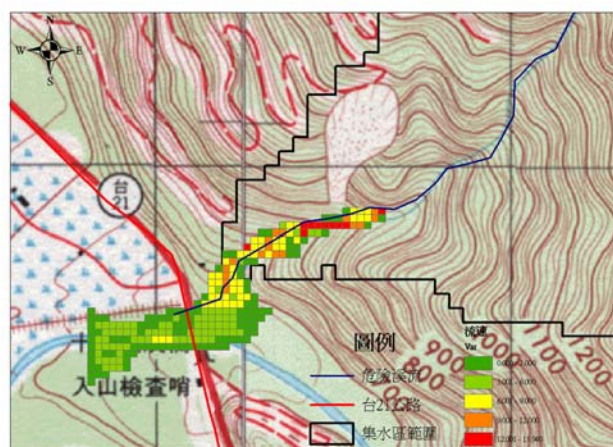


圖 5-16(d) 體積濃度 80%之速度

圖 5-16 體積濃度 20%-80%之最大流速分佈圖

此外，在微小之體積濃度變化對堆積土方量、深度及流速分析結果中，發現最大堆積深度隨體積濃度增加、流速隨之減小，而流動距離亦減小，此結果與趙啟宏(2003)利用模擬水槽之推論相同，相關結果如表 5-6 及圖 5-17~5-20 (d) 所示。

表 5-6 體積濃度 (0.65-0.69) 堆積區模擬結果

體積濃度	0.65%	0.66%	0.67%	0.68%	0.69%
最大深度 (m)	4.54	4.69	4.86	5.03	5.2
最大流速 (m/s)	16.52	16.49	16.44	16.38	16.36
堆積土方量 (m ³)	91592	96480	101756	107480	113732

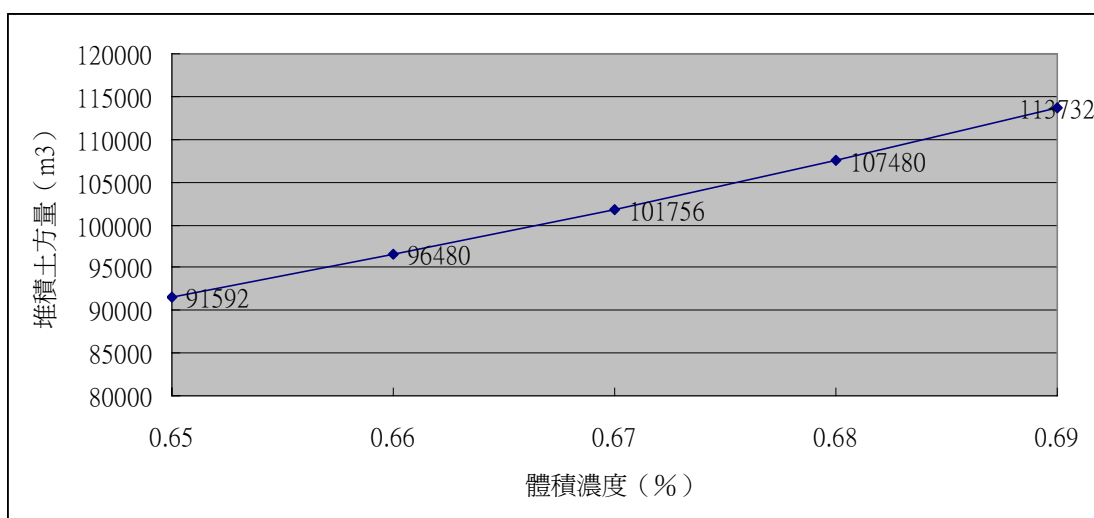


圖 5-17 體積濃度 (0.65-0.69) 與堆積土方量關係圖

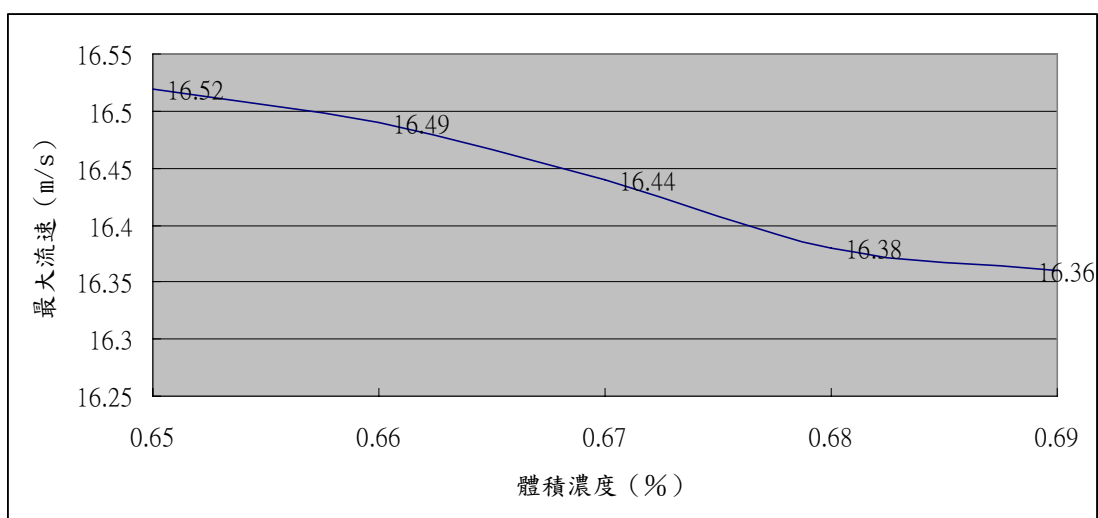


圖 5-18 體積濃度 (0.65-0.69) 與最大流速關係圖

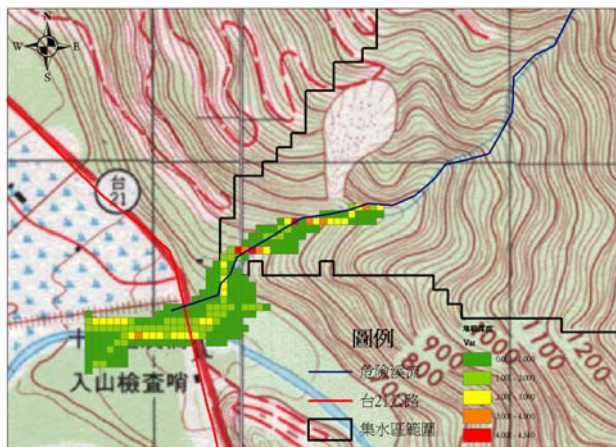


圖 5-19 (a) 體積濃度 65%之深度

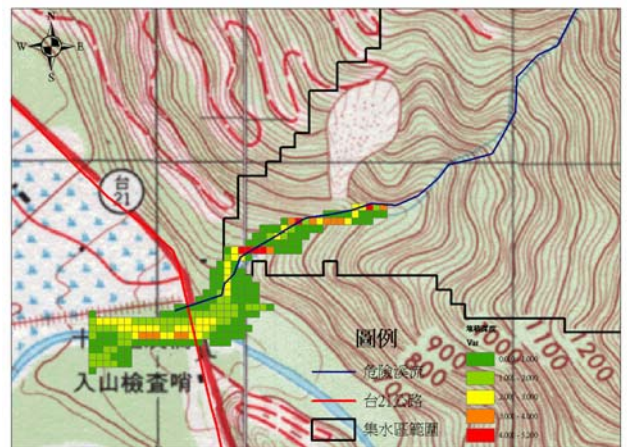


圖 5-19 (b) 體積濃度 69%之深度

圖 5-19 體積濃度 65%-69%對堆積深度之分佈圖

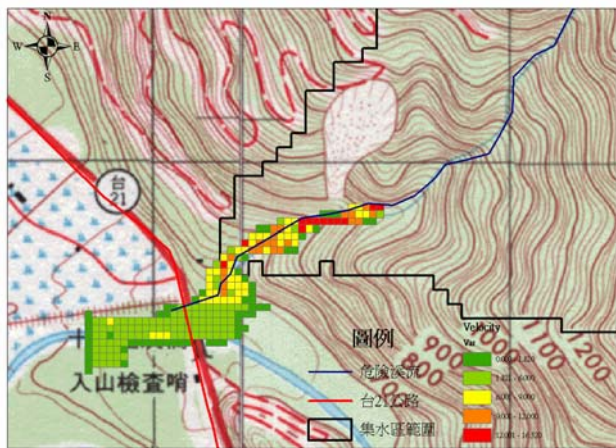


圖 5-20 (a) 體積濃度 65%之速度

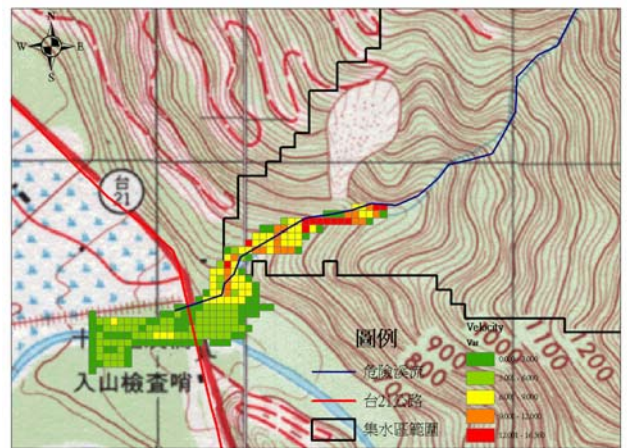


圖 5-20 (b) 體積濃度 69%之速度

圖 5-20 體積濃度 65%-69%之最大流速分佈圖

3. 曼寧粗糙係數之影響

當曼寧粗糙係數 n 值有所變動時，對於模擬之土石流深度與流速關係如表 5-7 及圖 5-21~5-24(b)所示，由於曼寧粗糙係數 n 反映著底床的粗糙度，因此隨著曼寧粗糙係數的增加，使堆積於河道中土石量大增，而使堆積區最後堆積量受到微幅變動，但對於堆積型態上並無多大影響。

然而，在堆積速度分佈上，隨著曼寧粗糙係數的增加，最大流速

雖然變化不大，但對於堆積區流動速度的分佈確有著明顯的改變，顯示曼寧粗糙係數對於土石流流動過程有著相當大的影響。

表 5-7 曼寧粗糙係數 (0.025-0.4) 堆積區模擬結果

曼寧粗糙係數	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4
最大深度 (m)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
最大流速 (m/s)	16.41	16.37	16.33	16.31	16.29
堆積土方量 (m ³)	113784	113672	113436	113312	113268

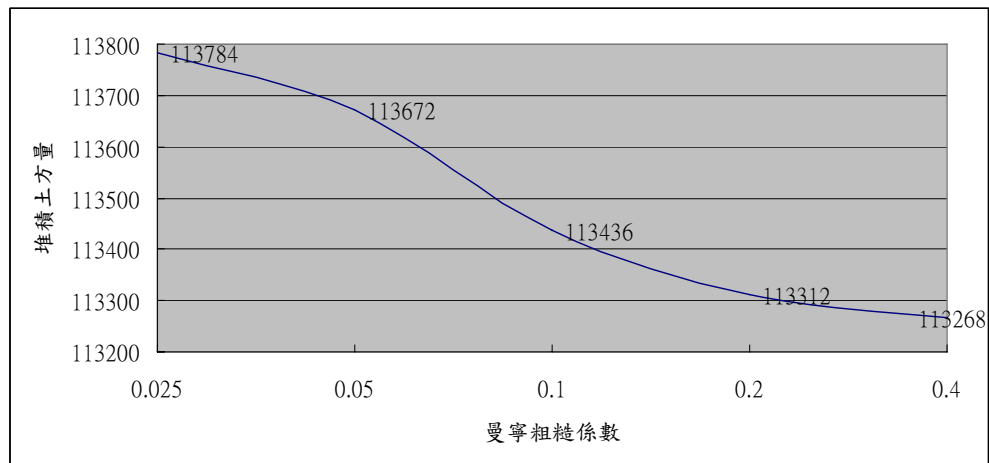


圖 5-21 曼寧粗糙係數與堆積土方量關係圖

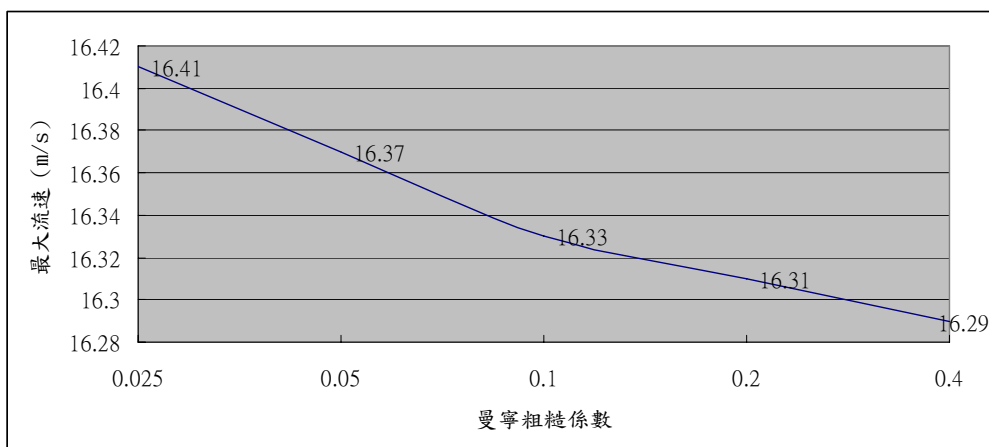


圖 5-22 曼寧粗糙係數與最大流速關係圖

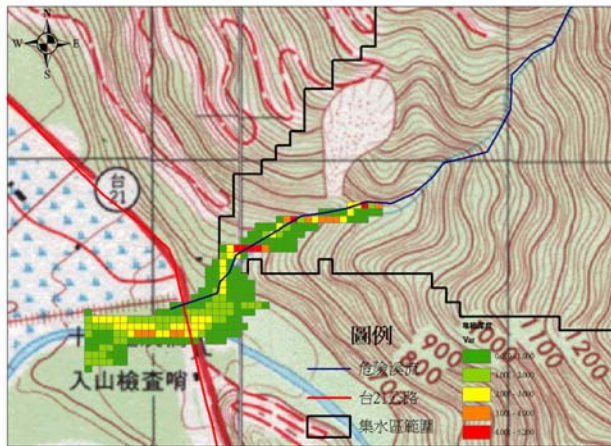


圖 5-23(a) 曼寧粗糙係數 (0.025) 模擬深度

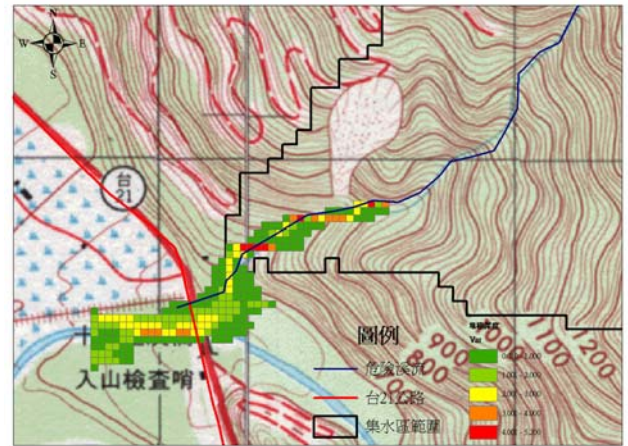


圖 5-23(b) 曼寧粗糙係數 (0.4) 之模擬深度

圖 5-23 不同曼寧粗糙係數對深度分佈圖

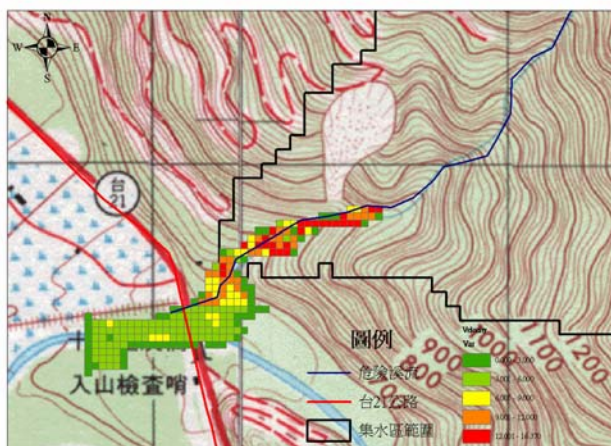


圖 5-24(a) 曼寧粗糙係數 (0.025) 模擬速度

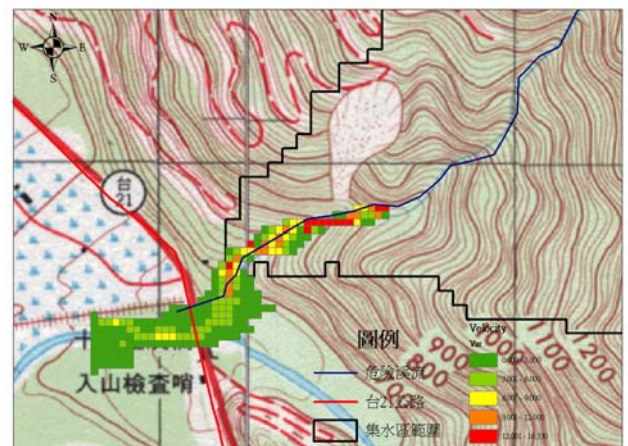


圖 5-24(b) 曼寧粗糙係數 (0.4) 之模擬速度

圖 5-24 不同曼寧粗糙係數對最大流速之分佈圖

4. 比重之影響

藉由模擬結果可知 (如表 5-8 及圖 5-25~5-28(b)所示), 當比重改變時, 最大堆積深度與堆積土方量有逐漸減小趨勢但並無明顯之變化; 而隨土石比重越重, 表示土石流的動量越大, 流速隨比重增加而有逐漸增加趨勢, 此現象與一般現地情形多有符合, 但其變化趨勢並不明顯。綜合模擬結果顯示比重改變對堆積過程影響不大。

表 5-8 土石比重 (2.4-2.7) 堆積區模擬結果

比重	2.4	2.5	2.6	2.7
最大深度 (m)	5.21	5.21	5.2	5.2
最大流速 (m/s)	16.29	16.32	16.33	16.34
堆積土方量 (m ³)	114748	114384	114064	113784

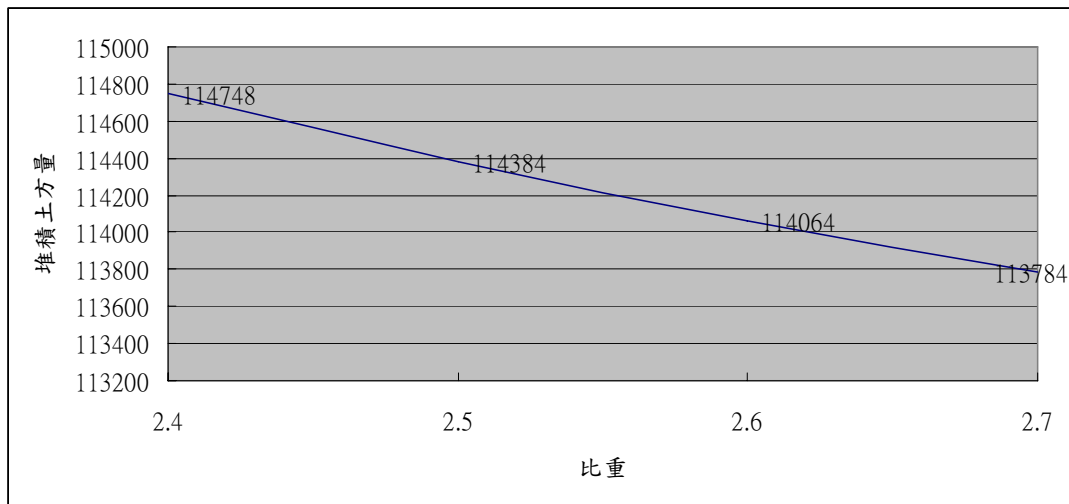


圖 5-25 比重與堆積土方量關係圖

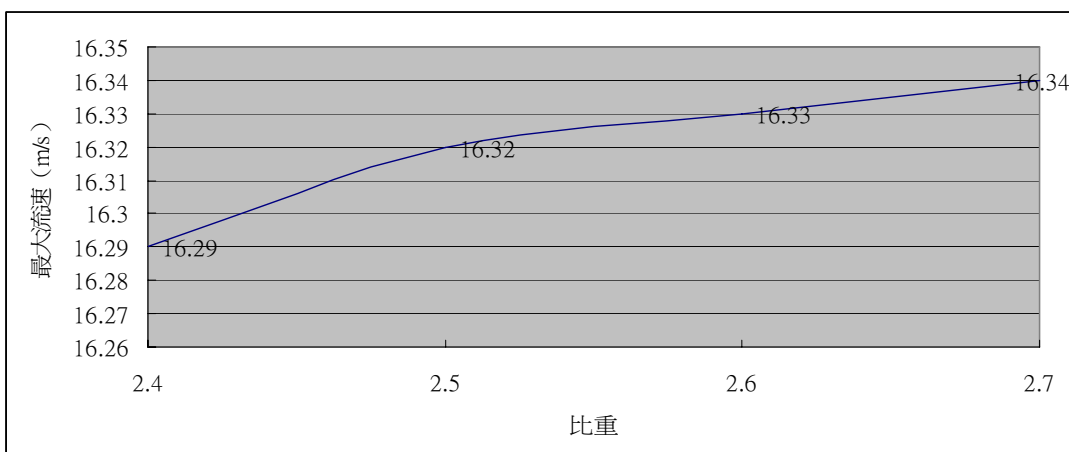


圖 5-26 比重與最大流速關係圖

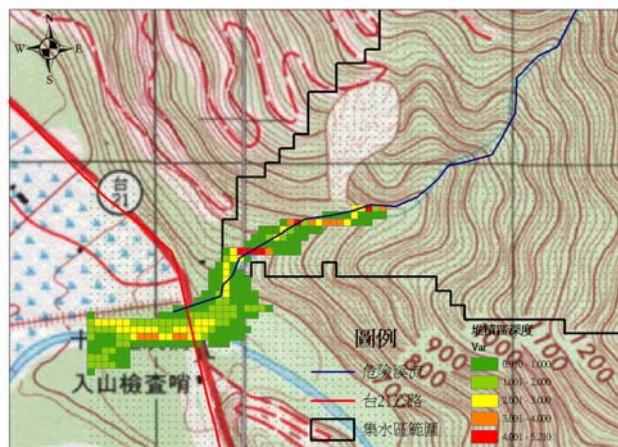


圖 5-27(a) 比重為 2.4 之模擬深度

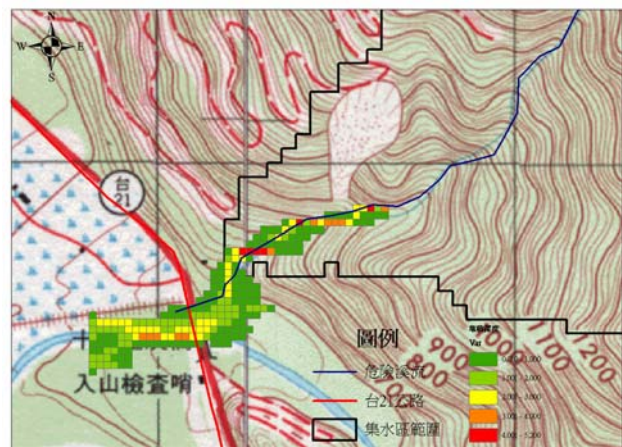


圖 5-27(b) 比重為 2.7 之模擬深度

圖 5-27 不同土石比重所對應之堆積深度分佈圖

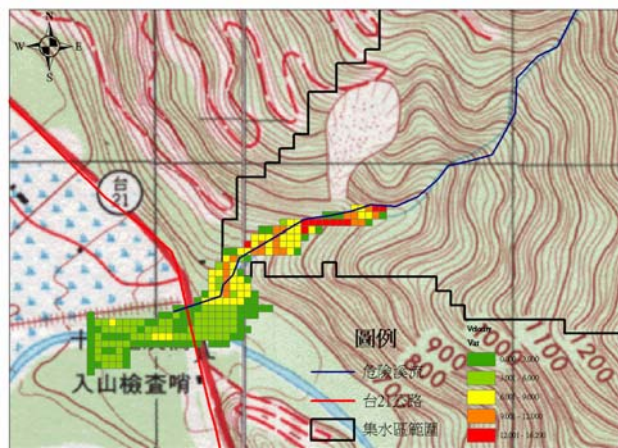


圖 5-28 (a) 比重為 2.4 之模擬速度

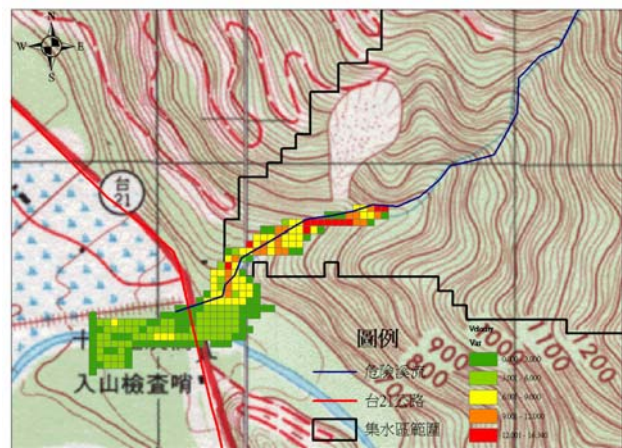


圖 5-28 (b) 比重為 2.7 之模擬速度

圖 5-28 不同土石比重對最大流速之分佈圖

5.5.2 敏感度分析討論

1. 動力波與擴散波方程式對於堆積型態模擬結果之差異影響有限，因此在節省運算時間的考量下，可應用擴散波方程式進行土石流況之探討分析。
2. 由於體積濃度的改變對於模擬時之流量、流體之降伏應力及黏滯係數三者有著不同的加乘效果，在體積濃度小於 50% 時，流速有隨之增加現象，但大於 50% 時，流速卻隨之遞減；推究此原因應是當體積濃度

小於 50%時，流體內阻力小於流體流動之力；體積濃度大於 50%時，阻力顯著增加而影響後續模擬結果。由此可知，體積濃度在模擬過程中為主要因子。

3. 曼寧粗糙係數對於堆積型態影響不大，但卻對堆積區流速分佈有著明顯影響，反映著河道底床粗糙程度對流動現象的影響。河道越粗糙，對流動過程中土石流流速有降低之效果，此結果與一般自然現象相符。
4. 土石比重的改變對於堆積土方量、堆積深度及流速影響均有限。因此，土石比重屬於模式中較不敏感因子。
5. 總結參數敏感性分析成果顯示，體積濃度的改變同時連帶影響流量、降伏應力及黏滯係數。因此，在模式參數之影響程度方面，以體積濃度為最主要，其次為曼寧粗糙係數，至於土石比重及動量方程式之差異，在本次試算區域及模擬颱風事件下，對模擬結果並無太大影響。

第六章 本年度結論及後續研究方向

以往相關單位在設計山區跨河結構物時多半僅考量設計洪水之水位及流速，在跨河橋樑橋墩結構型式及材料選用方面，並未充分考量洪水現象差異頗大之土石流衝擊效應。財團法人臺灣營建研究院(1999)及國立臺北科技大學(2002)皆曾針對跨越土石流溪流之跨河橋樑設計準則進行研究，但研究結論僅針對跨越土石流溪流之跨河結構物，提出相關因應土石流災害之橋樑設計準則及設計案例，建議在河川上游處，設立相關土石流防治工法作為屏障，然而對於如何強化結構設計及選用加勁材料等橋樑主體改善對策則並未深入探討。

有鑑於此。交通部運輸研究所於 96 年度委託財團法人成大研究發展基金會執行『交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策研究』，擬藉由 4 年期之研究計畫，深入了解跨河橋樑受土石流衝擊破壞成因及規模程度，並期由檢討現有設計準則，進而提出未來強化結構設計及加勁材料選用等橋樑主體改善對策。本計畫執行迄今已完成第一年度成果，以下提出數點結論及後續研究方向。

6.1 結論

1. 依據行政院農委會水土保持局委託財團法人成大研究發展基金會之調查結果顯示，臺灣地區中部重建區在 921 集集大地震後歷經桃芝風災之作用，原有之土石流潛勢溪流由原先 377 條遽增至 654 條。因此未來數十年期間，臺灣地區之崩塌及土石流等土砂災害高潛勢地點仍將集中於中部地區。本計畫初步由中部區域篩選適合研究地點。
2. 依據桃芝颱風及敏督利颱風期間之災情分析說明可知，道路橋樑受洪水或土石流衝擊損毀案例多數集中於南投縣陳有蘭溪流域台 21 線及臺中縣大甲溪流域台 8 線兩處集水區。

3. 九二一地震地表加速度在大甲溪流域內誘發大規模地表崩塌，因此震後數次颱風引發之崩塌及土石流規模皆明顯大於以往，對於跨河橋樑往往造成全面性之毀損；換言之，整體橋樑結構連同道路路基一併沖毀流失。其次九二一地震造成台 8 線西段谷關青山段路基傾毀迄今仍未修復，敏督利颱風造成之七二水災，更讓震災後已經十分脆弱的台 8 線中橫公路再度受創。因此雖然大甲溪流域台 8 線跨河橋樑適合作為研究地點，但由於交通可及性及橋樑結構大規模毀損，對於現場調查及橋樑結構損壞成因探討皆將造成極大困難，因此本計畫未將台 8 線跨河橋樑列為研究地點之考量。
4. 依據陳有蘭溪流域地文特性、水文環境、台 21 線橋樑結構設施及土石流災害分布等分析說明顯示，陳有蘭溪流域之土石流災害歷史豐富，同時土石流再發潛勢亦高；在跨河橋樑結構類型方面，具有橋墩設施之橋樑上部結構分為預力樑及鋼製箱型樑，下部結構則為沈箱基礎及全套管基樁兩類，具有代表性。因此本計畫由陳有蘭溪流域台 21 線進一步篩選適合研究地點。
5. 為考量計畫執行之效益性及代表性，本計畫考量災害歷史、橋樑設施規模與工法及集水區環境特性等三項因子，作為選擇跨河橋樑研究地點之參考依據。經由比較分析，本計畫選擇台 21 線新中橫公路之信義橋(85K+959)、十八重溪橋(94K+070)及愛玉橋(108K+770)作為後續研究地點。
6. 為初步了解土石流之流動過程及影響範圍，本計畫利用二維洪災模式 FLO-2D 進行土石流流況模擬。本年度先以南投縣信義鄉豐丘村十八重溪之支流(編號「南投 030」潛勢危險溪流)作為試算區域，初步模擬桃芝颱風期間之土石流流況及堆積影響範圍，並針對模擬參數進行敏感度分析，探討不同參數變化對於土石流最大堆積深度與堆積範圍之影響程度，以作為未來後續計畫執行之參考。

7. 利用衛星影像及航空照片判釋所得之桃芝颱風期間十八重溪支流土石流影響範圍，與數值模式模擬結果進行初步比對。在土石流堆積影響範圍上，大致上有不錯的模擬結果。
8. 總結參數敏感性分析成果顯示，體積濃度的改變同時連帶影響流量、降伏應力及黏滯係數。因此，在模式參數之影響程度方面，以體積濃度為最主要，其次為曼寧粗糙係數，至於土石比重及動量方程式之差異，在本次試算區域及模擬颱風事件下，對模擬結果並無太大影響。

6.2 後續研究方向

1. 本計畫未來三個年度擬訂工作項目包含橋樑結構對土石流流動過程影響之模擬分析、橋樑結構受土石流衝擊力影響之形變模擬分析、現有橋樑結構設計準則檢討、橋樑結構加勁強化改善對策研擬及成效評估等。
2. 本計畫下一年度擬利用平面二維土石流流動數值模式，針對本年度訂定之三處研究地點，模擬土石流受到跨河橋樑影響之流動過程，包含流動深度、流動速度及土砂濃度產生之變化。
3. 針對三處研究地點，持續收集歷年土石流災害災情紀錄、橋樑破壞情形以及歷次橋樑改建竣工資料，以作為土石流流動受橋樑結構影響模擬中，數值參數率定及模式驗證之參考依據。
4. 針對三處研究地點，進行歷次颱風事件期間，跨河構造物對土石流流動之影響模擬分析，據以初步分析歷次橋樑結構受土石流衝擊影響之力學破壞機制。
5. 針對三處研究地點，模擬設計降雨事件下，跨河構造物對土石流流動之影響情形，以提供後續未來相關改建方案評估之比對參考。

參考文獻

1. Arattano, M., Andrea, M.D., Marchi, L. (1997), "Debris flow monitoring activities in an instrumented watershed on the Italian Alps, "In Proceedings of the 1st International Conference on Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment", San Francisco, California, USA, ASCE, New York, pp.506-515.
2. Arattano, M. (1999), "Monitoring the propagation of a debris flow along a torrenty", Hydrological Sciences Journal, Vol. 44, No. 5, 1999, pp.811-823.
3. Bagnold, R.A. (1954), "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear", Proceeding Royal Society of London, series A, No. 225, pp. 49-63.
4. Berti, M., Genevois, R., Tecca, P.R., (1999), "Field observations of a debris flow event in the Dolomites", Geomorphology, Vol. 29, pp. 265-274.
5. Berti, M., Genevois, R., LaHusen, R., Simoni, A., Tecca, P.R.(2000), " Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps)", Physics and
6. Bovis, M.J. and Jakob, M., (1999), The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity, Earth Surface Process and Landforms 24, 1039-1054.
7. Caine, N. (1980), "The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows," Geografiska Annaler, Vol .62, pp.23-27.
8. Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, Vol. 25, No. 9, pp. 707-715.
9. Genevois, R., Galgaro, A., Tecca, P.R. (2001), "Image analysis for debris flow properties estimation", Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science, Vol. 26, No. 9, pp. 623-631
10. Genevois, R., Tecca, P.R., Berti, M. (2000), "Debris-flow in the

- Dolomites: Experimental data from a monitoring system'', In Proceedings of the 2nd International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction , and Assessment, Taipei, Taiwan, Balkema, Rotterdam, Netherlands,pp.283-291.
- 11.D. and Prior, D.B., eds. , pp. 257-361.
 - 12.Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J. and Hutchinson, J.N. (2001), "A review of the classification of landslides of the flow type", Environmental and Engineering Geoscience, Vol. 7, No. 3, pp. 221-238.
 - 13.Johnson, A.M. and Rodine, J.R. (1984), "Debris flow", in Slope Instability, Brunsden, and Prior, D.B., eds. , pp. 257-361.
 - 14.Julien, P.Y. and Lan, Y.Q. (1991), "On the rheology of hyperconcentrations", J. Hyd. Engng., ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 346-353.
 - 15.Keefer, D. K. et al. (1987), "Real-Time Landslides Warning During Heavy Rainfall", Science, Vol. 238, pp. 921-925.
 - 17.Lavigne, F, Suwa, H.(2004), "Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia", Geomorphology, Vol. 61, No. 1-2, pp. 41-58.
 - 18.Lavigne, F. (2004), "Rate of sediment yield following small-scale volcanic eruptions: a quantitative assessment at the Merapi and Semeru stratovolcanoes, Java, Indonesia", Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 29, No. 8, pp. 1045-1058.
 - 19.Okuda, S. and Suwa, H.(1981), "Some relationships between debris flow motion and micro-topography for the Kamikamihori Fan, North Japan Alps", Catchment Experiments in fluvial geomorphology, Norwich [Norfolk] : Geo Books, pp. 447-464.
 - 20.Sitar, N. , Anderson, S.A. and Johnson, K.A.(1992) , "Condition for initiation of rainfall-induced debris flows.", Stability and performance of

- slopes and embankments : proceeding of a special conference at U.C. Berkeley, ASCE.
21. Vallejo, L.E. (1989), An extension of the particulate model of stability analysis for mudflows, *Soils And Foundation* 29, No.3, 1-13.
 22. Van Dine, D.F. (1985), Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian cordillera, *Can Geotech. J.* 22, 44-68.
 23. Wieczorek, G.F. (1987), "Effect of Rainfall Intensity and Duration on Debris Flows in Central Santa Cruz Mountains," California, *Flows/ Avalanches : Process, Recognition and Mitigation*, Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, Vol .7, pp.93-104.
 24. Wilson, R. C. (1997), "Normalizing rainfall/debris-flow thresholds along U. S. pacific coast for long-term variation in precipitation climate", *Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ed. Chen, C-L, Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers, August 7-9, 1997, San Francisco, pp.32-43.
 25. 經濟部水利署 (2002), 『大甲溪攔河堰可行性規劃計畫』成果報告，經濟部水利署水利規劃試驗所。
 26. 經濟部水利署 (2006), 『大甲溪流域防洪預警系統先期規劃』成果報告，逢甲大學。
 27. 交通部公路局 (1997), 『賀伯颱風公路災害搶修及復建工程』成果報告。
 28. 行政院公共工程委員會 (1998), 『賀伯颱風災害及復建工程紀實』成果報告。
 29. 行政院農委會水土保持局 (2001), 『土石流警戒分區與發生基準值之研究』成果報告，國立成功大學防災研究中心。
 30. 行政院農委會水土保持局 (2002), 『土石流發生降雨警戒值模式之研究』成果報告。
 31. 行政院農委會水土保持局 (2003), 『以降雨因子進行土石流警戒基

- 準值訂定』成果報告，財團法人成大研究發展基金會。
- 32.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 79-11 號。
- 33.謝正倫 (1991)，『土石流預警系統之研究 (Ⅰ)』，研究試驗報告第 130 號，國立成功大學臺南水工試驗所。
- 34.謝正倫 (1993)，『土石流預警系統之研究 (Ⅱ)』，研究試驗報告第 139 號，國立成功大學臺南水工試驗所。
- 35.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)』，行政院國科學委員會報告，編號：NSC82-0414-P002-026-B。
- 36.范正成 (2001)，『臺灣地區道路橋涵系統土石流危險區觀測與預警之研究 (三)』，交通部科技顧問室。
- 37.謝正倫 (2002)，『土石流潛勢溪流調查計畫』成果報告，國立成功大學防災研究中心。
- 38.山口伊佐夫 (1985)，「防砂工程學」，國立臺灣大學森林學系譯，臺北，第 150-174 頁。
- 39.日本建設省河川局砂防部砂防課 (1989)，「土石流危險溪流土石流危險區域調查要領」。
- 40.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，第 2-87 頁。
- 41.吳積善等人 (1990)，『雲南蔣家溝土石流之觀測研究』，中國大陸科學技術出版社。
- 42.周必凡、李德基、呂儒仁、羅德富、楊慶溪 (1991)，『泥石流防災指南』，科學出版社，第 21 頁。
- 43.中華水土保持學會 (1992)，「水土保持手冊」。
- 44.詹錢登 (2000)，『土石流概論』，科技圖書股份有限公司出版。

- 45.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。
- 46.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。
- 47.游繁結 (1987),「土石流發生機制之研究」,中華水土保持學報,第 18 卷,第 2 期,第 28-40 頁。
- 48.江永哲、林啟源 (1991),『土石流發生之雨量特性分析』,中華水土保持學報,第 22 卷,第 2 期,第 21-37 頁。
- 49.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 22 卷,第 2 期,第 109-122 頁。
- 50.謝正倫、陸源忠、游保杉、陳禮仁 (1995),『土石流發生臨界降雨線設定方法之研究』,中華水土保持學報,第 26 卷,第 3 期,第 162-172 頁。
- 51.周憲德、廖偉民、姚善文 (2001),『發生土石流之臨界降雨特性分析』,中華土木水利工程學刊,第 32 卷,第 1 期,第 1-8 頁。。
- 52.范正成、吳明峰 (2001),『一級溪流土石流危險因子及其與臨界降雨線之關係』,中華水土保持學報,第 32 卷,第 3 期,第 227-234 頁。
- 53.林呈等 (2002),『跨越土石流溪流之橋樑工程問題探討-以新中橫公路三座橋樑為例』,中華水土保持學報,第 32 卷,第 4 期,第 245-260 頁。
- 54.劉格非、黃名村 (2002),「土石流之現場數值模擬-應用於南投縣神木村」,中華水土保持學報,第 33 卷,第 3 期,第 215-221 頁。
- 55.陳晉琪、謝正倫、林慶偉 (2004),『臺灣中部地區土石流災害溪流之地形特性』,中華水土保持學報,第 35 卷,第 1 期,第 25-34 頁。
- 56.陳榮河 (1999),『土石流之發生機制』,地工技術,第 74 期,第 21-28 頁。

- 57.范正成、吳明峰、彭光宗 (1999),『豐丘土石流發生臨界降雨線之研究』,地工技術,第 74 期,第 39-46 頁。
- 58.林炳森、林基源 (1999), "土石流之衝擊力與防治工法介紹", 地工技術第 74 期,第 67-80 頁。
- 59.方中權 (2000),『臺灣各地質分區岩層在工程上之特性』,地工技術雜誌,第 79 期,第 5-26 頁。
- 60.洪如江 (2002),『臺灣土石流的時空背景』,地工技術雜誌,第 89 期,第 101-110 頁。
- 61.陳榮河、歐泰林 (2006),『區域性土石流之發生機制』,地工技術,第 110 期,第 25-34 頁。
- 62.顧承宇等 (2006),『集集地震後土石流災害案例研究-以大甲溪流域為例』,地工技術,第 110 期,第 85-96 頁。
- 63.廖敏坤、吳瑞龍 (2002),『桃芝颱風災害台 21 線 97K+100 十八重溪橋便道搶修報告』,臺灣公路工程,第 28 卷,第 10 期,第 43-48 頁。
- 64.何鴻文、陳俊堯 (2002),『桃芝颱風土石流受災重建橋樑復建規劃與災因研析』,臺灣公路工程,第 29 卷,第 4 期,第 2-36 頁。
- 65.吳瑞龍等 (2004),『台 21 線十八重溪橋樑上部結構遭土石流推移復建工程施工』,臺灣公路工程,第 30 卷,第 8 期,第 20-24 頁。
- 66.譚萬沛 (1991),『降雨泥石流的臨界雨量研究』,第二屆全國泥石流學術會議論文集,第 136-142 頁。
- 67.孟河清 (1991),『泥石流的發生及降雨』,第二屆全國泥石流學術會議論文集,第 143-148 頁。
- 68.周必凡、胡平華、游勇、程尊蘭 (1991),「蔣家溝泥石流表面流速公式驗證研究」,山地研究,第9 卷,第3 期,第171-178 頁。
- 69.張石角 (1993),「臺灣土石流災害」,洪水與泥砂災害學術研究會論文集,第27-29 頁。

- 70.尹承遠、翁勳政、吳仁明、歐陽湘(1993)，"臺灣土石流之特性"，工程地質應用技術研討會(V)論文集，工研院能資所，新竹，第70-90頁。
- 71.范正成、姚正松（1997），『臺灣東部地區土石流發生的水文及地文條件應用於土石流預警之初步研究』，中華民國第一屆土石流研討會，第125-139頁。
- 72.謝正倫、蔡元芳（1998），「土石流扇狀地之三維堆積地形」，中國土木水利工程學刊，第十卷，第四期，第719-730頁。
- 73.謝正倫（2001），『桃芝颱風土石流災害發生基準初步研究』，土石流災害及防治對策研討會論文集，第83-102頁。
- 74.陸源忠（1995），『土石流發生臨界降雨線設定方法之研究』，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 75.何敏龍（1997），「土石流發生機制與流動制止結構物之研究」，博士論文，國立臺灣大學土木工程研究所。
- 76.謝有忠（1999），『陳有蘭溪流域土石流發育之地質控制』，成功大學地球科學研究所碩士論文。
- 77.蔡元芳（1999），『土石流扇狀地形狀特性之研究』，成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
- 78.陳晉琪（2000），『土石流發生條件及發生機率之研究』，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 79.黃俊耀（2000），『臺灣地區土石流發生臨界降雨特性之研究-以花蓮、臺東及南投縣為例』，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 80.姚善文（2001），『土石流發生之水文特性探討』，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 81.黃婷卉（2002），『土石流發生降雨特性之研究-以陳有蘭溪流域為主』，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。

- 82.趙啟宏 (2004)，「土石流數值模擬及流變參數特性之探討」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論。

附錄 1 期末審查會議紀錄回覆辦理

交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

☐期中☒期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：「交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策研究（1/4）」

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
科顧室許技正書王		
1. 本研究報告文獻蒐集成果豐富，對於研究團隊的辛勞與努力表示感佩之意。	感謝委員肯定。	
2. 本研究為四年期，是否有計畫在四年間針對研究區域內選擇具代表性之標的，於颱風季節時期進行監測，以獲取實際數據，供研究者之參據。	未來將視計畫經費狀況，斟酌考量是否做實地監測。	同意合作研究單位之說明與處理情形。
3. 不同橋材、橋型、橋齡、距離潛勢區遠近，對於受土石流之影響大小可能均有不同，建議研究單位納入考量。	本計畫將在後續研究納入探討。	同意合作研究單位之說明與處理情形。
4. 本研究之課題為「交通道路及橋樑遭受土石流衝擊之對策研究」，對於交通道路是否納入研究乙節應予釐清，是；則請加強，否；建議在前端說明。惟本研究第 18 頁是有道路設施之工作項目，請研究單位卓參。	道路遭受土石流衝擊主要發生在跨河處，跨河構造物小至涵洞，大者則為橋樑。對於涵洞構造受土石流衝擊之對策，財團法人台灣營建研究院(1999)及國立台北科技大學(2002)皆有深入研究，並提出犧牲式涵洞等建議對策。因此本計畫工作範疇著重在橋樑結構遭受土石流衝擊時之破壞機制探討，並提出改善對策。關於工作範疇之界定已於期末報告修正稿中加強說	同意合作研究單位之說明與處理情形。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單 位審查意見
	明。道路部份則將於後續研究，針對高處長建議之研究區域納入未來研究範圍考量。	
5. 土石流之內涵如粒料之粒徑大小會因不同區域或有不同大小之粒徑組合，其對於橋墩之衝擊亦會有不同程度之影響，建議考量。	此部份為本計畫後續研究工作，研究團隊將針對此問題做進一步探討。	同意合作研究單位之說明與處理情形。
二工處高處長邦基		
1. 本研究所採用之土石流分析模式應與歷年相關災損案例做驗證。	本工作團隊將在第二期計畫，針對模擬進行驗證。	同意合作研究單位之說明與處理情形。
2. 道路遭土石流損害之案例可參考台 8 線 30k 之案例，苗栗縣 130 縣道火炎山附近之案例也可參考，相關資料可洽相關單位索取。	本計畫將於後續研究，針對委員建議之研究區域地點(台八線 30K)進行資料蒐集與補充。	同意合作研究單位之說明與處理情形。
3. 未來交通道路與橋樑對土石流之設計處理對策，建議可分為新建結構物與既有結構物兩類來定訂設計處理對策，新建結構物以選線來避開土石流之侵害，既有結構物以如何保護結構物來思考。相關設計處理對策可洽詢國內較大之幾家顧問公司。	感謝委員指導，未來後續工作將依循此方向進行。	同意。
賴研究員聖耀		
1. 土石流之衝擊力受土石顆粒尺寸大小影響很大，而相關災害事件中，土石顆粒分佈不均，是否能針對研究區最適宜的顆粒尺寸提供相關選定方法。	本研究團隊後續將針對土石流粒徑大小對衝擊力之影響，進一步進行資料蒐集與分析。	同意合作研究單位之說明與處理情形。
2. 土石流之模擬以體積濃度影響較為明顯，能否針對研究區域之土石流體積濃度如何測定提供說明。	土石流體積濃度之訂定可參考 Shieh(1997) 針對 Takahashi(1982) 實驗資料及迴歸式所修正的輸砂平衡濃度公式，此公式於成果報告中已有充分說明。	同意合作研究單位之說明與處理情形。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單 位審查意見
3. 建議未來能針對分析模式所需之相關參數做現場調查。	本計畫將廣泛參閱研究區相關災害研究報告，不足部分再進行現場調查。	同意合作研究單位之說明與處理情形。
主辦單位意見		
1. 研究團隊已完成本研究第一年主要工作項目，包括土石流相關研究文獻蒐集整理、土石流相關分析理論蒐集與探討及研究區域相關水文、地文、設施結構物資料蒐集與整理，並額外增加土石流流動模擬初步試算章節，研究團隊的付出值得肯定。	感謝委員肯定。	
2. 第一章之內容頗似提送服務建議書的模式撰寫，建議修正。	感謝委員指正，遵照辦理。	同意。
3. 報告章節建議做一調整，建議文獻蒐集整理分析後，能針對未來擬使用之土石流分析模式做說明，並列出模式各參數所需的相關資料與本研究蒐集之資料是否足夠做說明，接著針對本研究範圍之選取原則來選定研究範圍，範圍選定後再選定研究對象，然後針對研究對象未來分析所需之相關基本資料做介紹說明。	感謝委員指正，遵照辦理。	同意。
4. 針對研究對象之三座橋樑基本資料，建議增加橋樑與河床之淨高資料。	本研究團隊將針對此部分進行資料蒐集。	同意。

附錄 2 期末報告簡報資料

期末報告

交通道路及橋墩遭受土石流衝擊之對策研究(1/4)



委託單位：交通部運輸研究所
執行單位：財團法人成大研究發展基金會
簡報者：陳景文 教授
中華民國 96 年 11 月 14 日

前言 研究區選用原則 橋址概況 初步模擬試算 結論及後續研究

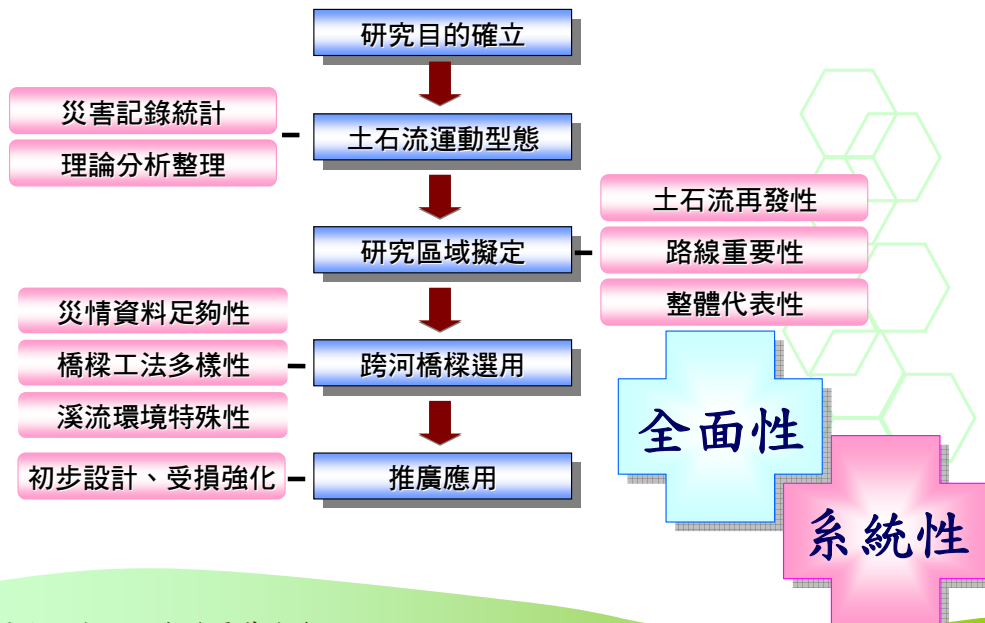
簡報大綱

- 前言
- 研究區選用原則
- 橋址概況
- 模擬初步試算
- 結論與後續研究



財團法人成大研究發展基金會 2

階段性規劃



研究區選用原則

再發性：

中部地區受921地震影響，**崩塌地分佈遽增**，蘊含極豐富之土石流料源，如：大甲溪流域於震後崩塌地增加達2,851公頃之多。

重要性：

台8線：由於**交通可及性**及**現場調查橋樑結構損壞成因**探討皆將造成極大困難，本計畫未將台8線跨河橋樑列為研究地點之考量。

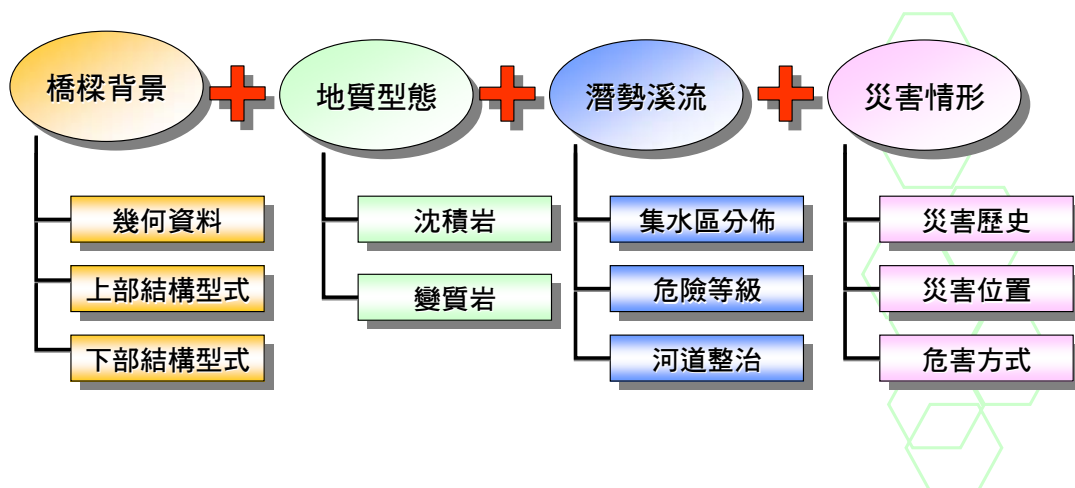
台21線：土石流災害歷史豐富，同時土石流再發潛勢亦高。跨河橋樑結構類型眾多，**現地調查較為便利**。

代表性：

台8線：路線西段溯大甲溪溪谷而行，地質以**變質岩**為主。

台21線：信義段沿陳有蘭溪溪谷興築，陳有蘭溪以東為**變質岩**，以西為**沈積岩**，地質上具明顯差異。

研究區跨河橋樑評選作業



橋樑結構VS潛勢溪流

台21線（陳有蘭溪流域）					
橋樑名稱	河流名稱	上部結構型式	下部結構型式	橋面長度 (m)	橋樑跨距 (m)
信義橋 (89K+959)	郡坑溪	PC I型樑	-----	180	6@30
十八重溪橋 (97K+401)	十八重溪	RCI型樑	單支圓柱及 沈箱基礎	210	6@35
陳有蘭溪橋 (98K+402)	陳有蘭溪	RC類-PC I型樑	單支圓柱及 沈箱基礎	175 200	5@35 2@30+ 4@35
筆石橋 (99K+117)	筆石溪	RC類-PCT型樑	單支圓柱及 沈箱基礎	40	2@20
舊愛玉橋 (114K+770)	野溪	RC預力I型樑	無橋墩	20.2	1@20.2

橋樑背景

- 信義橋(89K+959)：連接水里與信義之交通要道
- 十八重溪橋(97K+401)：為信義及和社主要通道
- 新愛玉橋(108K+770)：同富往塔塔加鞍部必經橋樑

橋樑名稱	興建/復建時間	上部結構型式	下部結構型式	橋面長度(m)	橋面淨寬(m)	橋樑跨距(m)
信義橋 (89K+959)	70.6.1 (興建) 92.9 (桃芝風災後復建)	PC I型樑	懸臂式單柱橋墩 及沈箱基礎	180	7.6	6@30
十八重溪橋 (97K+401)	70.7 (興建)	RCI型樑	單支圓柱沈箱基礎	210	7.5	6@35
新愛玉橋 (108K+770)	95.9.18(興建)	剛箱型樑	單支圓柱型橋墩及 樁基礎	210	10	2@60 1@90

潛勢溪流分佈情形

- 信義橋
南投026-郡坑溪主流及其上游支流
溪流型土石流
危險等級-中級
- 十八重溪橋
南投030-十八重溪支流
坡地型土石流
危險等級-高級
- 舊愛玉橋
南投075-和社溪支流
溪流型土石流
危險等級-高級

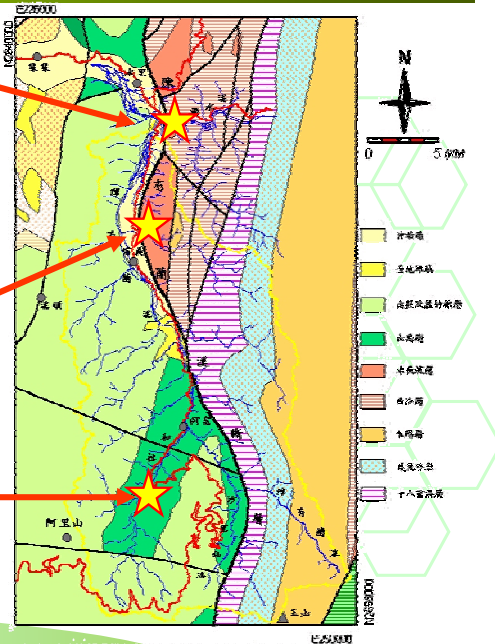
溪流名稱	橋樑名稱	集水區面積(公頃)	溪流長度(m)	泥砂出流量(m³)	淤積長度(m)	土石流流動區段
郡坑溪	信義橋	3069	11130	936139.18	960	土石流停止區及土砂淤積區
十八重溪	十八重溪橋	208	2307	1097619.51	842	土石流淤積及土砂流發生區
南投075	愛玉橋	674	4273	3773045	2779	土石流停止區

地質型態

- 信義橋（89K+959）
新第三紀沈積岩及古第三紀變質岩交界處。

- 十八重溪橋（97K+401）
古第三紀變質岩。

- 新愛玉橋（108K+770）
新第三紀沈積岩。



財團法人成大研究發展基金會

11

台21線114K+008舊愛玉橋

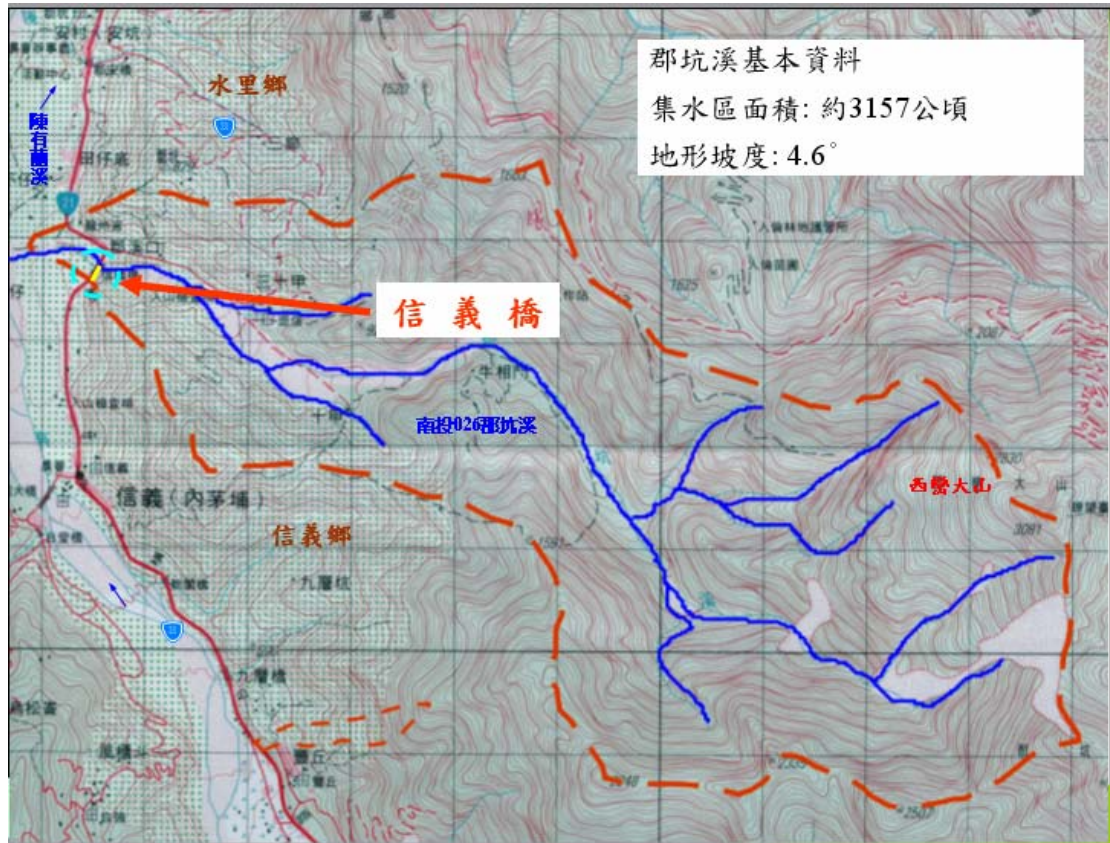


左圖為敏督利颱風後愛玉橋遭土石流淤塞及施工機具遭掩埋之情況；右圖為愛玉橋上下游野溪河道遭土石嚴重淤滿之情況。



財團法人成大研究發展基金會

23



前言	研究區選用原則	橋址概況	初步模擬試算	結論及後續研究
----	---------	------	--------	---------

台21線89K+959信義橋



賀伯颱風



賀伯颱風

災害時間：
賀伯和桃芝風災

作用力：
土石流伴隨部分洪水作用

橋樑衝擊：
淨高不足、撞擊、磨蝕作用

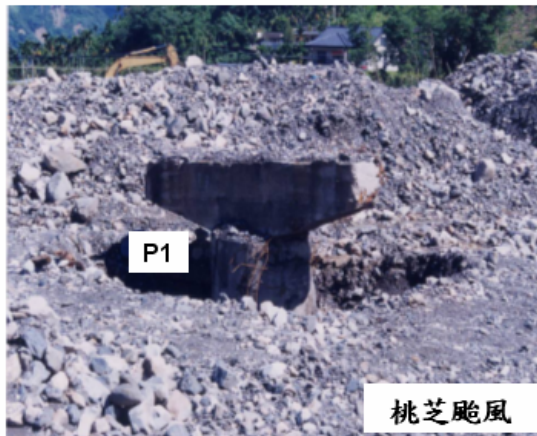


財團法人成大研究發展基金會

14

台21線89K+959信義橋

桃芝颱風

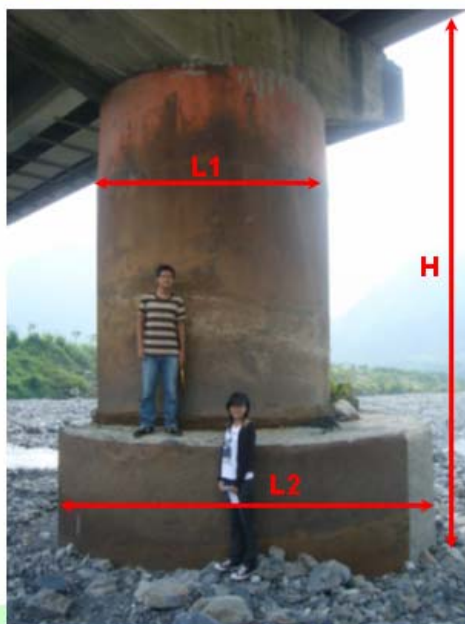


桃芝颱風

右圖為桃之颱風期間，信義橋第一、二跨橋面流失情形；圖左為P1橋墩墩遭土石流撞擊造成鋼筋外露情況。



台21線89K+959信義橋



P3橋墩周長

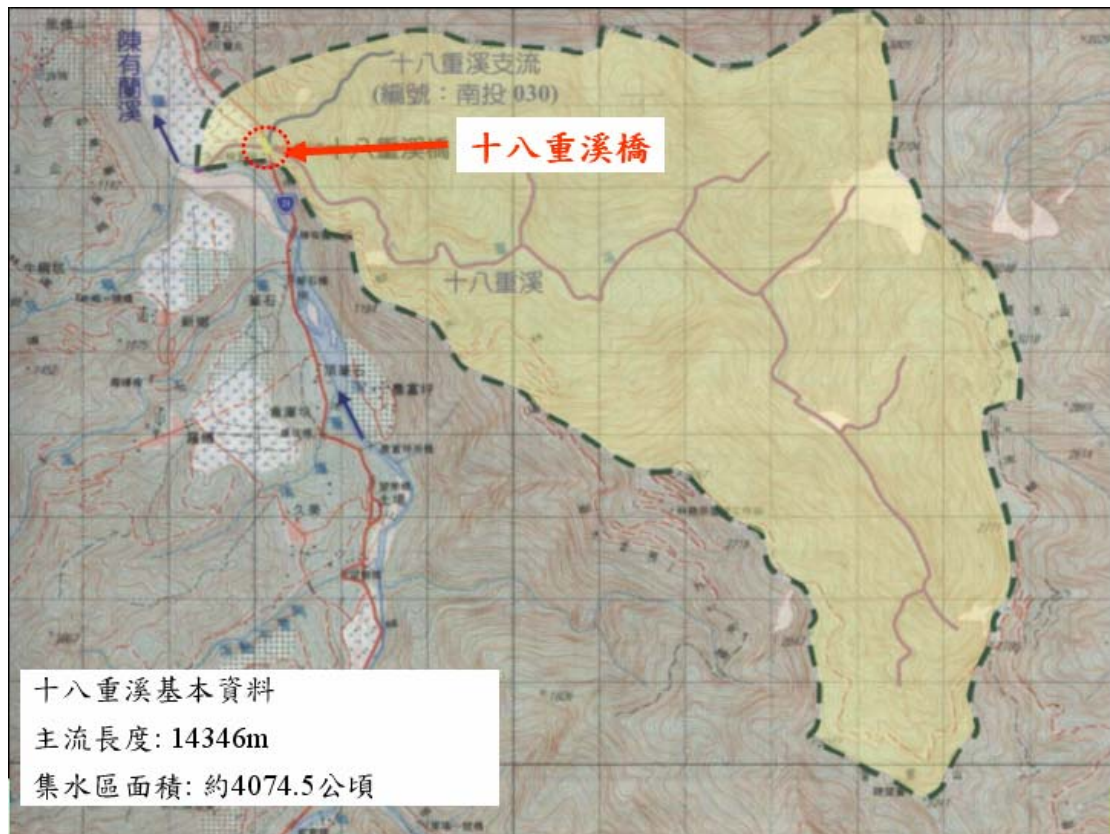
L1=9.82m

L2=15.8m

橋樑淨高

H=8.25m





台21線98K+070十八重溪橋

桃芝颱風



桃芝颱風過境後，造成十八重溪橋上游側右岸(南投030)之土石流災害，使橋台、橋墩孔遭土石掩埋淤塞(左圖)及橋樑上部結構被土石流所頂拖推移而形成錯位的破壞情形(右圖)。



財團法人成大研究發展基金會

災害時間：

賀伯、碧利斯及桃芝風災

作用力：

土石流伴隨部分洪水作用

橋樑衝擊：

淨高不足、撞擊、浮托作用



桃芝颱風

9

十八重溪橋址現況



石籠堤防破壞



橋墩周長

$L1=8.65m$

$L2=9.15m$

橋樑淨高

$H=9.9m$



財團法人成大研究發展基金會

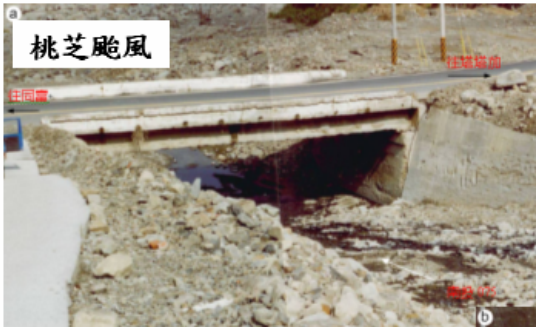
拍攝日期

2007/09/27

20

台21線114K+008舊愛玉橋

桃芝颱風



災害時間：

桃芝、敏督利風災

作用力：

單純土石流作用

橋樑衝擊：

掩埋磨蝕、撞擊、托浮

左圖為桃芝風災後愛玉橋橋體及橋台翼牆遭土石流磨蝕的情形；右圖為愛玉橋在土石清除後由下游往上游拍攝之畫面。



桃芝颱風



財團法人成大研究發展基金會

22



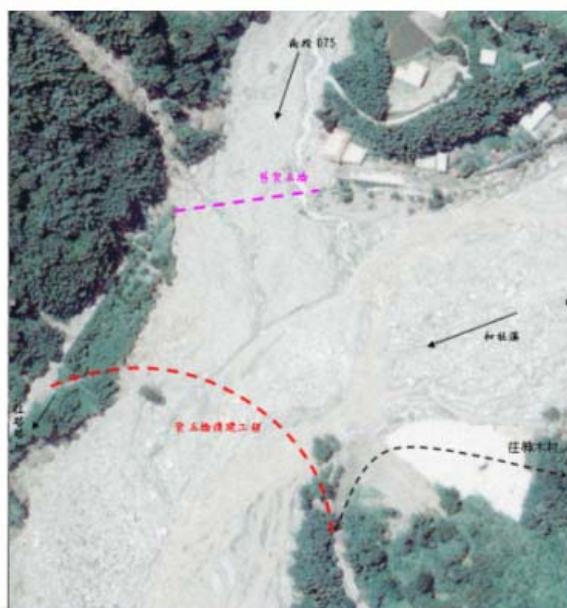
愛玉橋復建後現況-新愛玉橋

愛玉橋復建工程之基本資料表

橋名	愛玉橋
建造年月	95.9.18
跨越溪流	和社溪
上部結構	鋼箱型梁
下部結構	單支圓柱型橋墩及橋基礎
橋面長度	210 m
淨寬	10 m
車道數	2
孔數	3
跨距	(60+90+60) m

(資料來源：第二區養護工程處)

台21線108K+770新愛玉橋



左圖為愛玉橋復建工程橋址上游大量形成土石堆積於河道中之情形。

(資料來源：台21線等公路橋樑歷年颱風土石流沖刷災害復建資料編撰，交通部公路總局，2005)

新愛玉橋現況



(攝於96.10.04)

愛玉橋復建工程於95.09.18完工，本計畫團隊於96.10.04至愛玉橋橋址進行現勘。因橋墩受洪水土石沖蝕破壞，目前正進行基礎補強工作，左圖為愛玉橋P2橋墩基礎補強情形。



研究區資料蒐集整理(1/2)

橋樑名稱	溪流名稱	興建/復建時間	橋面長度(m)	橋面淨寬(m)	橋樑跨距(m)	上部結構型式	下部結構型式
信義橋 (89K+959)	邵坑溪	70.6.1 (興建) 92.9 (桃芝風災後復建)	180	7.6	6@30	PC I型樑	懸臂式單橋墩及沈箱基礎
十八重溪橋 (97K+401)	十八重溪	70.7 (興建)	210	7.5	6@35	RCI型樑	單支圓柱箱基礎
新愛玉橋 (108K+770)	野溪 (南段075)	95.9.18(興建)	210	10	2@60 1@90	剛箱型樑	單支圓柱型橋墩及橋基礎



研究區資料蒐集成果(2/2)

橋樑名稱	地質型態	集水區面積 (公頃)	溪流長度 (m)	泥砂出流量 (m ³)	淤積長度 (m)	土石流流動區段
信義橋 (89K+959)	新第三紀 沈積岩及 古第三紀 變質岩交 界處	3069	11130	936139.18	960	土石流停止區及 土砂淤積區
十八重溪橋 (97K+401)	古第三紀 變質岩	208	2307	1097619.51	842	土石流淤積及土 砂流發生區
新愛玉橋 (108K+770)	新第三紀 沈積岩	674	4273	3773045	2779	土石流停止區

土石流初步模擬試算

- 為初步了解土石流之流動過程及影響範圍，本計畫利用二維洪災模式FLO-2D進行土石流流況模擬，本年度先以南投縣信義鄉豐丘村十八重溪之支流(編號「南投030」潛勢危險溪流)作為試算區域。
- 本計畫今年度首先進行土石流況初步模擬，並針對模擬參數進行**敏感度分析**，探討不同參數變化對於土石流**最大堆積深度**與**堆積範圍**之影響程度，以作為未來後續計畫執行之參考。

FLO-2D 模式簡介

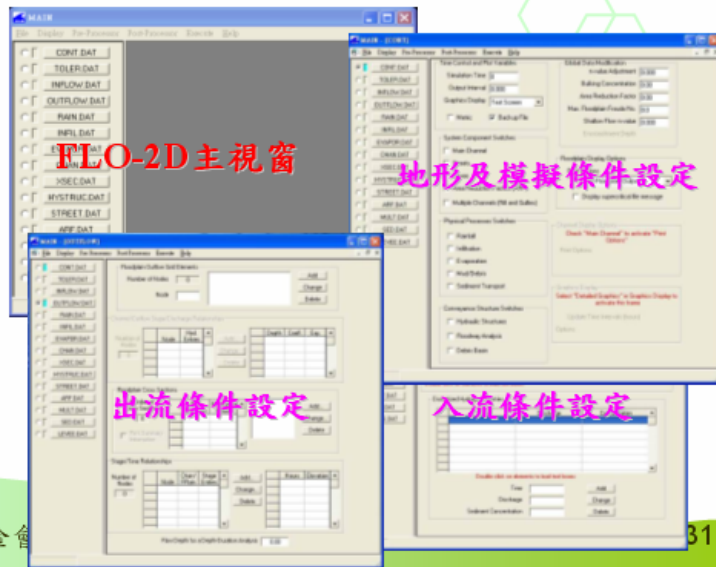
FLO-2D模式主要由O'Brien、Julian、Fullerton (1985)等所提出之**二維數值模式**。

➤ 模擬對象

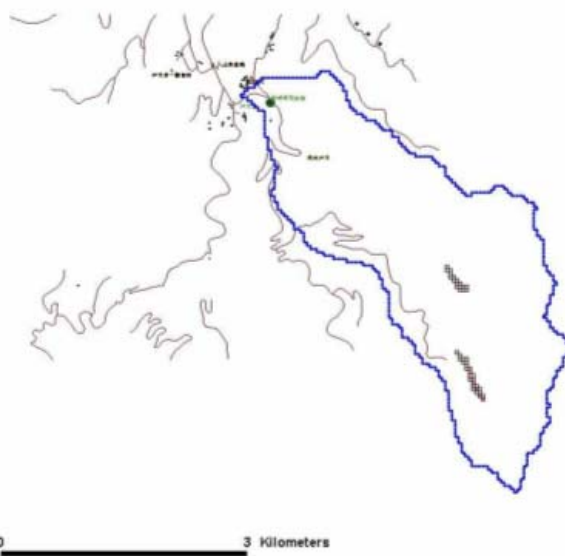
- 洪水
- 土石流

➤ 模擬成果

- 流動速度 (V)
- 堆積深度 (H)



FLO-2D模擬過程



➤ 基礎原理

- 非牛頓流體模式
- 中央有限差分

➤ 基本假設

- 淺水波假設
- 滿足穩定流阻滯方程式
- 靜水壓力分佈
- 差分時間間隔內為穩定流
- 分析網格點斷面與水力粗糙度為均值
- 每一個網格點的高程與曼寧值僅有單一值

➤ 限制條件

- 無法模擬刷深之現象 (∴定床模式)
- 無法模擬震波與水躍現象



參數敏感度分析

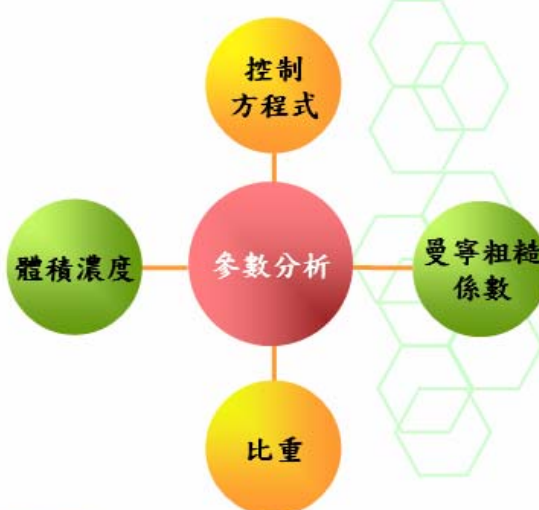
➤ 固定模擬時間及部分參數，探討當**運算參數變化**對模擬結果之影響。

(一) 控制方程式

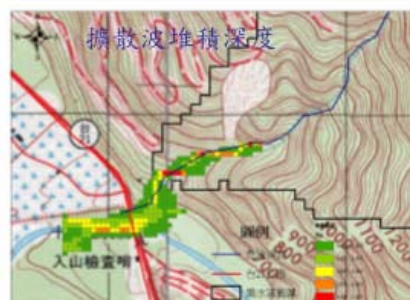
(二) 體積濃度

(三) 曼寧粗糙係數

(四) 比重



參數敏感度分析-控制方程式



模擬項目		全流域		
方程式	最大流速 (m/s)	最大深度 (m)	堆積土方量 (m³)	
動力波方程式	26.85	9.18		
擴散波方程式	26.85	9.16		
模擬項目		堆積區		
方程式	最大流速 (m/s)	最大深度 (m)	堆積土方量 (m³)	
動力波方程式	13.36	5.22	113740	
擴散波方程式	13.36	5.20	113732	

動力波模式：

以動量方程式為主體

擴散波模式：

動量方程式簡化模式

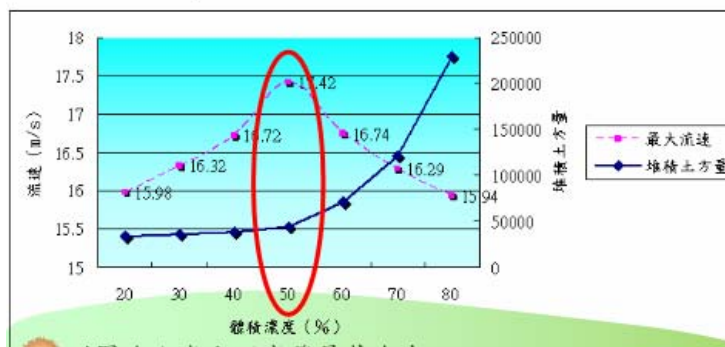
模擬結果：

運算模式改變對堆積區無顯著影響

參數敏感度分析-體積濃度 (1/2)

不同體積濃度之模擬結果

體積濃度	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
最大深度 (m)	2.45	2.53	2.63	2.79	3.85	5.39	8.25
最大流速 (m/s)	15.98	16.32	16.72	17.42	16.74	16.29	15.94
堆積土方量 (m ³)	33168	35508	38740	43672	71348	120400	228528



體積濃度：

控制模擬時之土石流流量、降伏應力及黏滯係數

模擬結果：

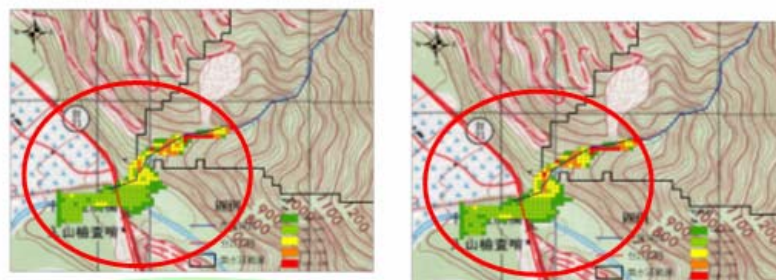
在 $C_v = 50\%$ 有極顯著變化

原因探討：

流體內部阻力增加

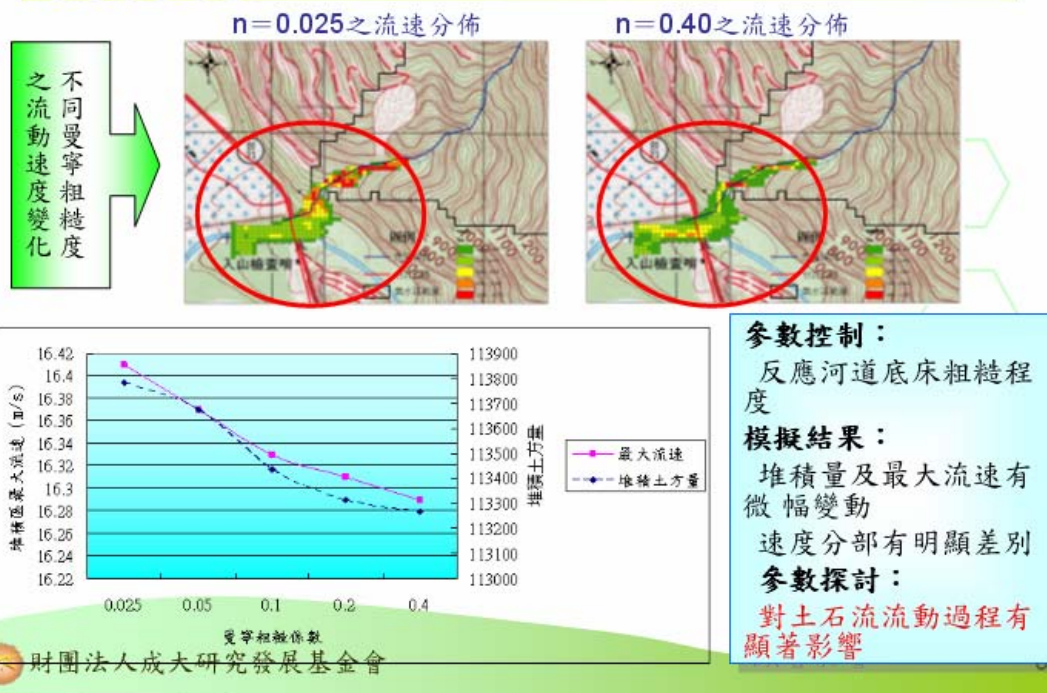
參數敏感度分析-體積濃度 (2/2)

體積濃度 20、80

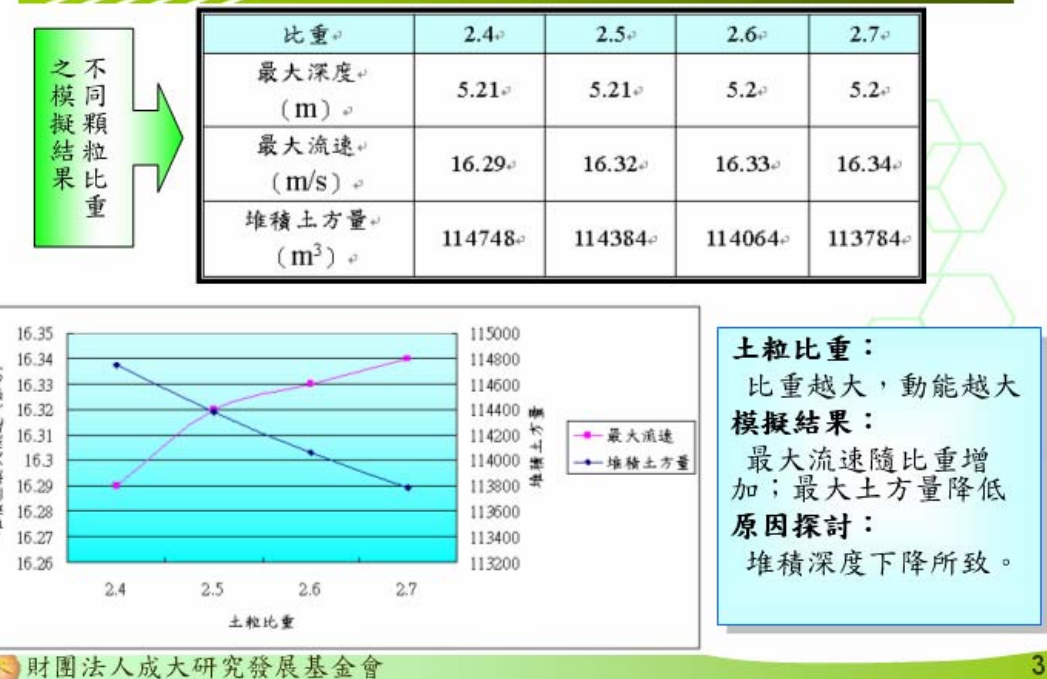


體積濃度 20、50
之流動速度分佈

參數敏感度分析-曼寧粗糙度



參數敏感度分析-土石顆粒比重



敏感度分析結果

- 動力波與擴散波方程式對於堆積型態模擬結果之差異影響有限，因此在節省運算時間的考量下，**可應用擴散波方程式進行土石流流況分析**。
- **體積濃度**影響模擬過程之**土石流流量、降伏應力及黏滯係數**，因而造成堆積區模擬結果有顯著變化，為模擬過程之主要參數。
- **曼寧粗糙係數**雖對堆積區模擬結果影響不大，但對**流動速度**分佈確有顯著影響，選用時需依現地情況謹慎訂定。
- **土石比重**的改變對於堆積土方量、堆積深度及流速**影響均有限**。因此，土石比重屬於模式中較不敏感因子。



結論 (1/2)

- 未來數十年期間，台灣地區之崩塌及土石流等土砂災害高潛勢地點仍將集中於**中部地區**。本計畫初步由中部區域篩選適合研究地點。
- 依據桃芝颱風及敏督利颱風期間之災情分析可知，道路橋樑受洪水或土石流衝擊損毀案例多數集中於南投縣**陳有蘭溪流域台21線**及台中縣**大甲溪流域台8線**兩處集水區。
- 921集集大地震後，颱風引發之崩塌及土石流規模皆明顯大於以往，對於跨河橋樑往往造成全面性之毀損；震後造成台8線部份路基傾毀迄今仍未修復，敏督利颱風更讓震災後之台8線中橫公路再度受創。因此，**基於交通可及性及橋樑結構之毀損規模**，對於現場調查及橋樑結構損壞成因探討皆將造成極大困難，因此本計畫**未將台8線跨河橋樑列為研究地點之考量**。



結論 (2/2)

- 研究中顯示，陳有蘭溪流域之土石流災害歷史豐富，土石流再發潛勢高，跨河橋樑結構類型具代表性，因此，本計畫將由**陳有蘭溪流域台21線**進行研究地點之篩選。
- 本計畫考量**災害歷史**、**橋樑設施規模與工法**及**集水區環境特性**等三項因子，作為選擇跨河橋樑研究地點之參考依據。經由比較分析，本計畫後續擬以台21線新中橫公路之**信義橋**(89K+959)、**十八重溪橋**(98K+070)及**新愛玉橋**(108K+770)作為研究地點。



後續研究 (1/2)

1. 本計畫未來三個年度擬訂工作項目包含：
 - a. 土石流流動過程對橋樑結構影響之模擬分析。
 - b. 橋樑結構受土石流衝擊力影響之變形模擬分析。
 - c. 現有橋樑結構設計準則檢討
 - d. 研擬強化橋樑結構之對策及成效評估。



後續研究 (2/2)

2. 針對研究地點之集水區相關資料進行細部調查分析，以瞭解橋址河床變遷特性及集水區上游土砂生產運移特性。



期末報告

簡報完畢
敬請指教

