

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

定量降雨與崩塌機率在土石流潛勢分析之應用
Quantitative Precipitation and Landslide Probability
for Potential Debris Flow Analysis



研究生：盧俊宏
指導教授：楊錦釗 博士
謝德勇 博士

中華民國九十八年六月

定量降雨與崩塌機率在土石流潛勢分析之應用
Quantitative Precipitation and Landslide Probability for
Potential Debris Flow Analysis

研究生：盧俊宏
指導教授：楊錦釗
謝德勇

Student: Chun-Hung Lu
Advisor: Jinn-Chuang Yang
Te-Yung Hsieh

國立交通大學
土木工程研究所
碩士論文



A Thesis Submitted to Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Civil Engineering
June 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

定量降雨與崩塌機率在土石流潛勢分析之應用

研究生：盧俊宏

指導教授：楊錦釗

謝德勇

國立交通大學土木工程學系

摘要

至今土石流潛勢溪流分析方式仍常以村里為單位，因此常發生數條土石流潛勢溪流共用同一參考雨量資訊(雨量站)與警戒值之情況，所以單點雨量站觀測到的降雨，並無法代表鄰近溪流集水區亦發生降雨。本研究以集水分區的概念出發，直接以溪流為單位進行土石流潛勢溪流之分析。接續利用物理崩塌模式模擬崩塌規模，而為考慮降雨空間不均勻分佈之影響，崩塌模式輸入之降雨資料採用定量降雨資料(QPESUMS)，最後藉由坡地崩塌機率與分佈情況，作為土砂來源的分析依據，藉此研判土石流潛勢分析之基礎。分別以石門水庫集水區於艾利颱風及南投仁愛鄉於辛樂克颱風和海棠颱風為例，結果顯示本研究提出之分析方法可提升評估之正確性。

關鍵字：定量降雨、坡地淺崩塌、風險評估模式、土石流

Quantitative Precipitation and Landslide Probability for Potential Debris Flow Analysis

Student: Chun-Hung Lu

Advisor: Jinn-Chuang Yang

Te-Yung Hsieh

Department of Civil Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

Up to date, the method of analyzing potential debris flow is still based on the area of village. So, it often happened that the same rainfall information (same rainfall gauge) and alert value were used to analyze the potential debris flow creeks which may belong to neighboring different sub-watershed. Therefore, the rainfall observed by a single rainfall gauge may not indicate that the rainfall also occurred in neighboring watershed around the gauge. This study is performed based on concept of watershed and taking the stream as the basic unit to analyze potential debris flow creek. The physical landslide model is used to quantify the landslide scale occurred in the watershed. In addition, to consider the effect on non-uniformity of spatial distribution of rainfall, the rainfall data of landslide model input is given from the quantitative precipitation data (QPESUMS). In the end, by taking into account landslide distribution in the watershed and its related probability,

the source of sediment is analyzed as the base to examine the potential occurrence of debris flow. Taking the typhoon Aere in the Shihmen Reservoir watershed, typhoons Sinlaku, and Haitang in Renai township (Nantou) as examples, the proposed analysis method raises the evaluation accuracy for the potential debris flow up to a certain extent.

Keywords: quantitative precipitation · shallow landslide · risk assessment model · debris flow



誌謝

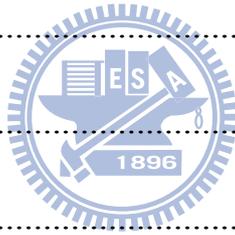
承蒙恩師楊錦釗教授與謝德勇博士兩年來悉心指導，得已使本論文順利完成，並且感謝口試委員賴進松教授、李天浩教授與張胤隆博士惠賜學生寶貴意見，使得本論文更臻完善，在此謹向各位老師特致萬分謝意。

就學期間，特別感謝研究室世偉學長、浩榮學長、建華學長、昇學學長、寰宇學長、仲達學長、歆瑜學姊、鏡如學姊、珊瑜學姊及曉萍學姊於學業上的指導和生活上的照顧，亦感謝同學振家、全謚、歆淳、冠曄、宇翔及伯傑在課業上的幫助與生活上的鼓勵，並感謝學弟妹昀軒、仁猷、群玲、琦雯給予的協助，同時感謝宏偉工程顧問公司周正先生、中央氣象局系統預報課張保亮課長、水保局土石流防災中心陳振宇主任與羅文俊工程員、水保局李卓倫先生的資料提供及台北科技大學沈志全與董書伯的操作指導，在此表示誠摯感謝。

最後感謝父母多年來的用心栽培及無限的支持與鼓勵，讓我得以不畏懼任何之困難，使得順利完成論文及獲取學位，感激之情永銘於心，僅將本論文與你們分享喜悅我的喜悅，最後對曾經幫助我與鼓勵我的每一個人致上最誠摯的謝意。

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
誌謝.....	IV
目錄.....	V
表目錄.....	VII
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	1
1.3 研究目的.....	4
1.4 章節介紹.....	4
第二章 研究流程與方法.....	6
2.1 研究流程說明.....	6
2.2 集水區劃分方法.....	7
2.3 定量降雨資料選用.....	8
2.4 集水區平均降雨分析之方法.....	8
2.5 崩塌機率分析方法.....	9
2.5.1 定率模式.....	9



2.5.2 序率模式.....	12
第三章 集水分區概念對土石流發生時間的影響	21
3.1 研究區域概述.....	21
3.2 集水分區劃分.....	21
3.3 定量降雨資料正確性檢視	22
3.4 土石流發生時間評估分析	23
第四章 水土整合概念對土石流發生的影響分析	48
4.1 研究區域概述.....	48
4.2 集水區劃分.....	48
4.3 坡地崩塌模式之參數.....	49
4.4 石門水庫集水區分析結果.....	49
4.5 南投仁愛鄉分析結果.....	53
第五章 結論與建議	74
5.1 結論.....	74
5.2 建議.....	75
參考文獻.....	77



表目錄

表 2-1 地質參數統計特性資料彙整表	16
表 2-2 地質參數變異係數比較表	16
表 3-1 土石流潛勢溪流對應之警戒雨量站和累積雨量值(仁愛鄉)....	26
表 3-2 同一點位上雨量站和 QPESUMS 資料差異(泰利颱風).....	27
表 3-3 同一點位上雨量站和 QPESUMS 資料差異(辛樂克颱風).....	28
表 3-4 QPESUMS 和觀測站累積雨量發生時間點(辛樂克).....	29
表 3-5 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 250mm 時間差異(辛樂克) ..	30
表 3-6 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 500mm 時間差異(辛樂克) ..	31
表 3-7 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 750mm 時間差異(辛樂克) ..	32
表 3-8 QPESUMS 和觀測站累積雨量發生時間點(泰利颱風).....	33
表 3-9 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 50mm 時間差異(泰利)	34
表 3-10 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 100mm 時間差異(泰利)	35
表 4-1 石門水庫集水區各潛勢溪流地文參數(1)	55
表 4-2 石門水庫集水區各潛勢溪流地文參數(2)	56
表 4-3 仁愛鄉各地質參數	57
表 4-4 艾利颱風後石門水庫集水區崩塌百分比	58
表 4-5 艾利颱風後真正發生土石流溪流之崩塌百分比	59

表 4-6 艾利颱風後真正發生土石流溪流之崩塌面積期望值百分比...59
表 4-7 石門水庫集水區相對應之崩塌面積期望值百分比.....60
表 4-8 辛樂克颱風後仁愛鄉崩塌百分比.....61
表 4-9 辛樂克颱風後真正發生土石流之崩塌面積期望值百分比.....61
表 4-10 辛樂克颱風於仁愛鄉崩塌百分比及崩塌面積期望值百分比.62
表 4-11 海棠颱風於仁愛鄉崩塌百分比及崩塌面積期望值百分比.....63



圖目錄

圖 1-1 數條土石流潛勢溪流以單一雨量站為警戒依據.....	5
圖 1-2 降雨與集水分區示意圖.....	5
圖 2-1 現行水保局警戒發布做法.....	17
圖 2-2 集水分區概念.....	17
圖 2-3 不同空間解析度之降雨觀測示意圖.....	18
圖 2-4 集水區平均降雨流程圖.....	18
圖 2-5 水土整合概念於土石流危險溪流分析示意圖.....	19
圖 2-6 水土整合概念流程圖.....	19
圖 2-7 最大坡降法.....	20
圖 2-8 無限流向法.....	20
圖 3-1 南投仁愛鄉土石流與其警戒雨量站及雨量站位置圖.....	36
圖 3-2 南投仁愛鄉 DTM.....	37
圖 3-3 仁愛鄉集水區劃分成果.....	38
圖 3-4 萬大站(辛樂克颱風).....	39
圖 3-5 文文社站(辛樂克颱風).....	39
圖 3-6 武界站(辛樂克颱風).....	39
圖 3-7 奧萬大站(辛樂克颱風).....	39

圖 3-8 仁愛站(辛樂克颱風)	40
圖 3-9 廬山站(辛樂克颱風)	40
圖 3-10 翠峰站(辛樂克颱風)	40
圖 3-11 瑞岩站(辛樂克颱風).....	40
圖 3-12 昆陽站(辛樂克颱風)	41
圖 3-13 合歡山站(辛樂克颱風)	41
圖 3-14 楓樹林站(辛樂克颱風)	41
圖 3-15 翠巒(辛樂克颱風)	41
圖 3-16 清流站(辛樂克颱風)	42
圖 3-17 阿眉站(辛樂克颱風)	42
圖 3-18 萬大站(泰利颱風)	42
圖 3-19 文文社站(泰利颱風)	42
圖 3-20 武界站(泰利颱風)	43
圖 3-21 奧萬大站(泰利颱風)	43
圖 3-22 仁愛站(泰利颱風)	43
圖 3-23 廬山站(泰利颱風)	43
圖 3-24 翠峰站(泰利颱風)	44
圖 3-25 瑞岩站(泰利颱風)	44
圖 3-26 昆陽站(泰利颱風)	44

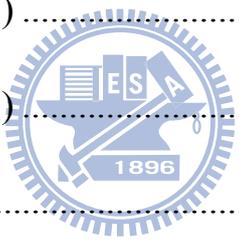


圖 3-27 合歡山站(泰利颱風)	44
圖 3-28 楓樹林站(泰利颱風)	45
圖 3-29 翠巒站(泰利颱風)	45
圖 3-30 清流站(泰利颱風)	45
圖 3-31 阿眉站(泰利颱風)	45
圖 3-32 同一點位上雨量站與 QPESUMS 之總雨量比(泰利颱風).....	46
圖 3-33 同一點位上雨量站與 QPESUMS 之總雨量比(辛樂克颱風)..	46
圖 3-34 水保局現行雨場分割法示意圖	47
圖 4-1 艾利颱風後土石流發生處(石門水庫集水區).....	64
圖 4-2 辛樂克颱風後土石流發生處(南投仁愛鄉).....	64
圖 4-3 石門水庫集水區 DTM.....	65
圖 4-4 集水區劃分成果	66
圖 4-5 艾利颱風平均降雨組體圖與累積雨量圖	67
圖 4-6 辛樂克颱風平均降雨組體圖與累積雨量圖	67
圖 4-7 石門水庫集水區崩塌機率	68
圖 4-8 不同崩塌機率所占百分比	69
圖 4-9 正確率示意圖	70
圖 4-10 崩塌機率示意圖(仁愛鄉)	71
圖 4-11 不同崩塌機率所占百分比	72

圖 4-12 不同崩塌潛勢區百分比.....73



第一章 緒論

1.1 研究動機

台灣位於歐亞板塊交界處，由於造山運動激烈，造成陡峭地勢及短而湍急之河川，加上近年來經濟發展快速及人口密度迅速之攀升，人們對土地需求日益增加，山坡地漸而被開發與使用，隨著過度人為開發與使用，因而每逢颱風、豪雨季節時，水土災害頻傳，例如洪水、山崩、地滑、土石流等，造成人民生命財產遭受重大損失，各項公共建設易受到嚴重破壞，其中又以土石流具速度快、範圍廣、破壞力大等特性，所造成的危害最為嚴重。因此，如何提升土石流潛勢的研判儼然是當前重要課題之一。

1.2 文獻回顧

現今土石流危險溪流判定係以水土分離概念(uncouple)進行分析，即事先以地文因子劃定土石流潛勢溪流，並藉由水文因子建立各潛勢溪流發生土石流之警戒條件。再於降雨期間，當觀測雨量超過警戒條件時，即判定該溪流為土石流危險溪流。

目前文獻中，前人常以統計分析方法(林美聆，2002、范正成，2002、王安培，2003、曾奕超，2004，吳雯慧，2006 等人)、現地調

查(謝正倫, 1992、張東炯、1996 等人)、衛星影像判勢及地理資訊系統(蘇育瑞, 1995、林昭遠, 2000、林信亨, 2002 等人)及模型試驗(江永哲, 1986、游繁結, 1993 等人)進行土石流潛勢高低之判別。另外, 水文因子所建立之土石流發生警戒關係式, 大致上可分為五種: (1) 降雨強度 I 及累積雨量 R 為指標($I-R$), 如謝正倫(1996)、范正成(2004)及詹錢登(2004)都是利用降雨強度和累積雨量劃定土石流臨界降雨線。(2) 降雨強度 I 及降雨延時 T 為指標($I-T$), 如 Caine(1980)及 Keifer(1987)都是以土石流發生之該場降雨事件建立臨界降雨線。(3) 降雨強度 I 及前期降雨 P 為指標($I-P$), 如吳積善(1990)以十分鐘降雨量及發生前 20 天之降雨量, 建立雲南蔣家溝溪之臨界雨量線。(4) 累積雨量 R 及降雨延時 T 為指標($R-T$), 如范正成(2002)以區別函數分析南投地區於 921 地震前土石流臨界降雨線。(5) 其他型為指標, 如船崎昌繼(1973)以平均年降雨量推估土石流發生前累積雨量及年平均降雨量之臨界關係。

但上述水土分離概念, 存在著以下幾點問題, 說明如下:

1. 未考量水的流動特性

於現今雨量站空間密度不足情況下, 往往有數條土石流潛勢溪流利用相同雨量站與警戒雨量作為判斷依據, 如圖1-1所示(圖中甲村有 A、B、C 及 D 土石流潛勢溪流, 利用甲雨量站之警戒雨

量作為判斷依據，而乙村則有6條土石流潛勢溪流利用乙雨量站之警戒雨量作為判斷依據)。而土石流形成第一要素即為充足之水分，其溪流水之來源係以落於該集水區之雨量有關，又降雨具有空間不均勻分布之特性，所以當單點雨量站觀測到降雨時，並無法代表鄰近溪流集水區亦有降雨發生。舉例而言(如圖1-2所示)，當甲雨量站達到警戒雨量標準時，即發布A、B、C、D為土石流危險溪流，並請求當地居民疏散，但實際上C、D集水區可能無風無雨。因此，未來土石流預報應以集水區的空間概念，真實反映降雨落於地面後水體於地表面之集流特性。

2. 未考量土砂的來源



土石流發生乃是水、土結合之現象，若僅有降雨只能稱為水流，必須水、土混合之後才有機會形成土石流。

3. 為考量機率的概念

土石流形成具諸多不確定性因素，如僅以「發生」或「未發生」為判別指標，除了造成土石流研判準確度的失準外，亦會降低民眾對研判結果的信賴度。

由上述可知，僅用降雨資訊為指標，實無法明確得知土砂來源，可能使土石流預報準確度受到較大之限制，因此本研究嘗試提出水土整合(couple)概念，且以現場實際案例進行分析探討。

1.3 研究目的

本研究主要目的乃以集水區角度出發，水土整合概念為基礎，結合崩塌機率之分析結果，希冀能提升土石流潛勢分析之精確度。

1.4 章節介紹

第一章為緒論，首先闡述本研究動機，並回顧水保局現行土石流危險溪流判定方式，最後提出本研究目的。

第二章為研究流程與方法，本章首先介紹整體的研究流程，再將使用方法做細部之簡介說明。

第三章為集水分區概念對土石流發生時間的影響，本章先行以總雨量比檢視定量降雨之正確性，並利用簡單案例探討土石流發生時間之差異性。

第四章為水土整合概念對土石流發生的影響分析，首先利用坡地崩塌模式對研究區域進行崩塌機率之分析，並以現場觀測資料探討土石流發生的正確率。

第五章為結論與建議，除了對本研究之成果做綜合性歸納說明外，並對未來方向提出建議。

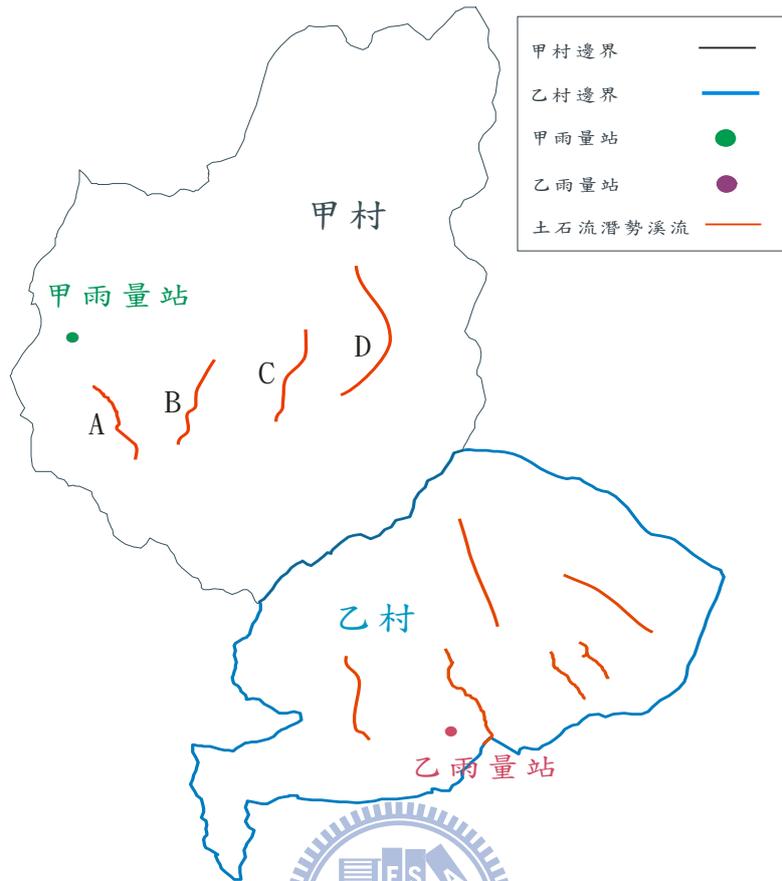


圖 1-1 數條土石流潛勢溪流以單一雨量站為警戒依據

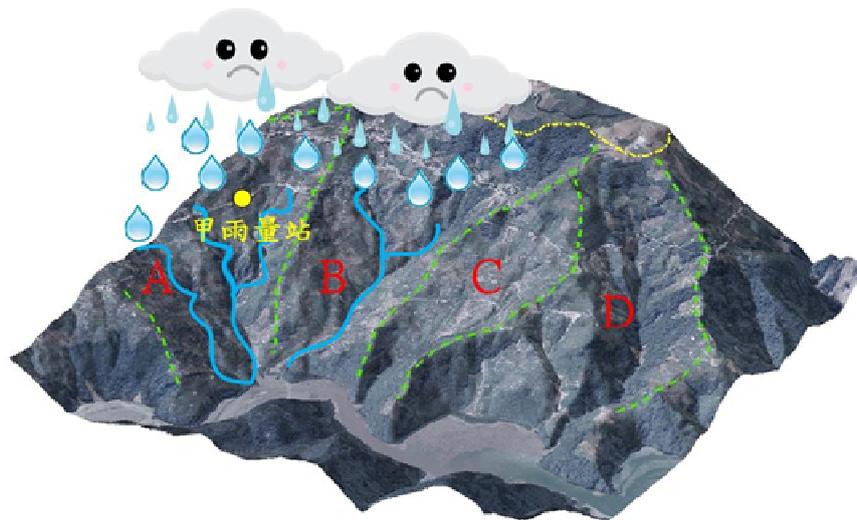


圖 1-2 降雨與集水分區示意圖

第二章 研究流程與方法

2.1 研究流程說明

現今土石流危險溪流分析方式(參考水保局作法)，係以村里為單位，將村里所涵蓋的土石流潛勢溪流均訂定相同的警戒雨量條件與參考雨量站，示意如圖 2-1 所示(甲村內甲雨量站之警戒雨量為 300mm，乙村內乙雨量站之警戒雨量為 400mm)。於颱風降雨期間，即可根據參考雨量站之觀測降雨資訊，當降雨條件達到警戒標準時，即發佈該溪流為土石流危險溪流。如前所述，此種分析方法主要存在二個問題，一為未考量水的流動特性，一為未考量砂的來源。因此，本研究將分別針對集水分區與水土整合兩個概念對土石流發生的影響進行研究探討。

以往土石流危險溪流的分析係以村里為單位，因此常為好幾條土石流潛勢溪流共用同一個參考雨量資訊(雨量站)與警戒值。本研究以集水分區的概念出發，因此可直接以溪流為單位進行土石流危險溪流的分析，示意如圖 2-2 所示。如圖 2-3 所示，本研究進一步引用空間格網式的定量降雨(quantitative precipitation)觀測資料，參考溪流集水區的範圍，利用座落於集水區的定量降雨觀測資料，可計算溪流集水區的平均降雨資訊，並將此平均降雨資訊設定為該溪流的參考雨量資

訊。至於警戒值部份，本研究將沿用各溪流以往的設定值，暫不針對此部份進行分析。藉由比較兩種方法(以往與本研究)之土石流危險溪流分析結果，可初步評估集水分區概念對土石流危險溪流判勢的影響。整體而言，此部份本研究的工作流程請參照圖 2-4 所示。

水土整合概念重點為同時考量水、砂效應對土石流形成的影響，在坡地土砂來源多緣自崩塌的現況下，本研究水土整合概念可示意如圖 2-5 所示。同樣以集水分區的概念出發，以溪流為單位進行土石流危險溪流的分析。以定量降雨的空間格網(如 QPESUM 空間解析度為 $1.3\text{km} \times 1.3\text{km}$)為基礎，將各格網點的定量降雨量匯入崩塌風險評估模式，計算各格網點的崩塌機率，作為水砂來源的評估依據。得到水、土來源後，理論上接下來的問題是如何解析水土混合後的水砂運動行為，以釐清坡地崩塌的泥砂是否能運移至溪流中，並據以研判其匯流後的含砂濃度是否足夠使溪流產生土石流的流況。本研究為簡化分析流程，將暫不考慮水土混合後的水砂運動行為，先以水、土來源(崩塌機率)作為水土整合概念對土石流危險溪流判勢影響的參考依據。此部份的研究流程如圖 2-6 所示。

2.2 集水區劃分方法

依地理資訊系統(ArcGIS9.2)之擴充套件 TauDEM(Tarboton, 2004)進行劃分，先將數值地形模型(DTM)匯入模組內，模組以最大坡降法

(在任意 3*3 的格網中，其流向是中心格網的單元流量全部進入最緩格網單元中，如圖 2-7 所示)及無限流向法(在 3*3 格網中，中心網格與其他周圍八個網格形成，依序計算各個三角形的坡度，並以最大三角形坡度做為該中心網格之坡度，且三角形坡向即為網格流向，如下圖 2-8)的觀念為基礎，用以求取水流方向，藉此萃取水系網，再依照比例決定所分配之面積值，即可求得各集水分區。

2.3 定量降雨資料選用

現階段已有許多用以求取定量降雨之技術，如雷達、衛星等。定量降雨預估方法，可分為較長時間(0-24 小時或 0-48 小時)及較短時間(0-3 小時或即時預估)兩種不同時間尺度之方法，其 0-3 小時之定量降雨即時預估法，主要為雷達回波推估降雨法，而在 0-24 小時或 0-48 小時定量降雨預估技術方面，大致可分為統計法和動力數值模式兩種方式。

由上述可知，現今有許多求取定降降雨之方法，在此本研究採用中央氣象局發展的高時空解析度之格網式定量降雨(QPESUMS)，其空間解析度大約 1.3km × 1.3km，時間解析度大約 10 分鐘。

2.4 集水區平均降雨分析之方法

集水區平均降雨雖可利用人工自行累加各格網之雨量資料而得，

但於邊界處須進一步考慮格網面積比例之問題，且由人工去演算也較不符合經濟效益，因此本研究藉由能自動計算格網 FEWS_TAIWAN 作為分析工具。先將集水區數化檔匯入 FEWS_TAIWAN 內，再給與氣象局網格式降雨資料(QPESUMS)，經由計算即可得知集水區平均降雨量。

2.5 崩塌機率分析方法

在評估降雨引發淺崩塌發生之可能性時，吾人利用楊錦釗(2008)所發展之坡地淺崩塌風險評估模式。該模式以力學為基礎，首先利用無限邊坡理論建立定率模式，再配合單因子敏感度分析法，將水力傳導係數、土壤凝聚力與摩擦角等三項具高度不確定性地質參數，定義為土砂風險管理因子。進一步利用一階變異數分析法，將其擴展為序率模式，達到計算崩塌機率之目的，以下分別說明定率與序率模式內容。

2.5.1 定率模式

邊坡破壞之標準可定義為對系統的載重(loading, S)超過系統阻抗能力(Resistance, R)，應用於無限邊坡穩定分析時，土層重力所產生之剪應力與土壤剪力強度(抗剪強度)，分別代表上述之載重與系統阻抗能力，當土層中某一臨界面其抗剪強度降低至小於剪應力，或其

剪應力增加至大於抗剪強度，即產生邊坡斜面之滑動破壞。因此土壤抗剪強度與重力所產生剪應力之比值，也就是安全係數(FS)，其值小於1時即代表坡地發生崩塌。利用莫爾庫倫理論所發展之無限邊坡穩定分析，配合時變壓力水頭之計算即可估計降雨入滲是否引發崩塌。安全係數計算方式可表示如下：

$$FS = \frac{\tan \phi - \frac{\psi(Z,t)\gamma_w \tan \phi}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{c}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha}}{\tan \alpha} \quad (2.1)$$

其中 FS 為安全係數，當 FS 大於1時土層為穩定，反之 FS 小於1時土層即為不穩定； t 為時間(T)； Z 為垂向深度(L)； $\psi(Z,t)$ 為第 t 時刻位於地表下方 Z 公尺處之壓力水頭(pressure head)(L)； ϕ 為土壤內摩擦角(friction angle)； c 為土壤凝聚力(cohesion) ($ML^{-1}T^{-2}$)； α 為坡度(slope angle)； γ_w 與 γ_{sat} 則分別代表地下水與飽和土壤之單位重(unit weight) ($ML^{-2}T^{-2}$)。

基於 Iverson 模式(Iverson, 2000)可知，在淺崩塌且土壤趨於飽和假設下，坡地因降雨而產生入滲之控制方程式可表示為：

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D_0 \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} \quad (2.2)$$

其中 $D_0 = K_{sat} / C_0$ ， K_{sat} 為飽和水力傳導係數(hydraulic conductivity) (LT^{-1})， C_0 表示 $C(\psi)$ 之最小值，而 $C(\psi) = d\theta/d\psi$ 表示含水量(θ)與壓力水頭之比值。由陳弘恩(2005)研究成果顯示， ψ 會隨著土層垂向深

度變大，且 ψ 越大時則 FS 越小，所以本研究於此之壓力水頭乃為破壞最大與土層垂向深度最大處之值。求解式(2.2)需要之初始條件與邊界條件可表示如下：

初始條件

$$\psi(Z,0) = (Z - d_z) \cos^2 \alpha \quad (2.3)$$

其中 d_z 為初始地下水水位(groundwater table) (L)。

邊界條件

若坡地土層厚度為 d_{Lz} ，且土層底部為不透水邊界，則坡地底部之邊界條件可表示為：

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(d_{Lz}, t) = \cos^2 \alpha \quad (2.4)$$

考量土壤入滲能力時變效應，則地表面降雨入滲邊界條件如以下

二式表示：

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0, t) = -I_z / K_{sat} + \cos^2 \alpha \quad \text{if } \psi(0, t) \leq 0 \text{ and } t < T_d \quad (2.5)$$

$$\psi(0, t) = 0 \quad \text{if } \psi(0, t) > 0 \text{ and } t < T_d \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0, t) = \cos^2 \alpha \quad \text{if } t > T_d \quad (2.7)$$

其中 I_z 為降雨強度(rainfall intensity) (LT^{-1})； T_d 為降雨延時(rainfall duration) (T)。

在數值方法上，Tsai and Yang (2007)利用有限差分法求解式(2.2)。先假設降雨完全入滲，也就是入滲能力大於降雨強度，利用式(2.5)計算壓力水頭分佈，若地表面之壓力水頭小於或等於零($\psi(0,t) \leq 0$)，表示完全入滲之假設正確並計算下一個時距；然而若地表面之壓力水頭大於零($\psi(0,t) > 0$)，表示產生窪蓄現象(ponding)，即入滲能力小於降雨強度，在不考慮窪蓄造成漫地流(overland flow)水深影響下，改變地表邊界條件，令地表面之壓力水頭為零，如式(2.6)所示，再進行壓力水頭分佈之計算。

2.5.2 序率模式

基於上述定率模式之理論基礎，當土層剪力大於剪力強及發生崩塌，因此崩塌機率(P_f)可定義為土壤剪力強度大於剪應力之機率並以如下方程式表示

$$P_f = \Pr\left[\frac{R}{L} \leq 1\right] = \Pr[FS \leq 1] \quad (2.8)$$

其中， $\Pr[\]$ 代表機率； R/L 為作業函數 f (performance function)。

欲求解式(2.8)之崩塌機率 P_f 必須知道安全係數之機率密度函數型態(probability density function, PDF)。根據 Yarahmadi Bafghiz and Verdel (2005)之研究，安全係數之 PDF 近似為常態分佈，因此若能知道安全係數之期望值(expectation)與變異數(variance)，則可據以推求

崩塌機率。

本模式採用一階變異數分析法以分析安全係數之期望值與變異數。式(2.8)中若作業函數 f 之輸出 FS 受不確定性因子 \mathbf{X} 所影響，其中 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_I]^T$ ， T 為轉置符號，則 FS 可表示為

$$FS = f(\mathbf{X}) = f(x_1, x_2, \dots, x_I) \quad (2.9)$$

將 FS 以泰勒級數(Taylor series)在點 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0$ 展開並忽略二次以上之高階項則可得如下方程式

$$FS \approx FS_0 + \sum_{i=1}^I (x_i - x_{i0}) \left(\frac{\partial FS}{\partial x_i} \right)_{\mathbf{X}_0} \quad (2.10)$$

其中 $FS_0 = f(\mathbf{X}_0)$ 。式(2.10)為線性方程式，因此依據線性組合原理，若展開點 \mathbf{X}_0 為 \mathbf{X} 之平均值 $\mu_{\mathbf{X}}$ ，則 FS 之期望值與變異數可表示為

$$E[FS] \approx FS|_{\mu_{\mathbf{X}}} \quad (2.11)$$

$$Var[FS] \approx \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \left(\frac{\partial FS}{\partial x_i} \right)_{\mathbf{X}_0} \left(\frac{\partial FS}{\partial x_j} \right)_{\mathbf{X}_0} Cov(x_i, x_j) \quad (2.12)$$

其中 $E[]$ 、 $Var[]$ 與 $Cov()$ 分別代表期望值、變異數與共變異數運算子。

結合式(2.1)、(2.11)與(2.12)，安全係數之期望值與變異數如下所示：

$$E[FS] = \frac{\tan(E[\varphi])}{\tan \alpha} - \frac{E[\psi(Z,t)] \times \gamma_w \times \tan(E[\varphi])}{\gamma_{sat} \times Z \times \sin \alpha \times \cos \alpha} + \frac{E[c]}{\gamma_{sat} \times Z \times \sin \alpha \times \cos \alpha} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} Var[FS] = & \left\{ \frac{\sec^2(E[\varphi])}{\tan \alpha} - \frac{E[\psi(Z,t)] \times \gamma_w \times \sec^2(E[\varphi])}{\gamma_{sat} \times Z \times \sin \alpha \times \cos \alpha} \right\}^2 \times Var[\varphi] + \\ & \left(\frac{1}{\gamma_{sat} \times Z \times \sin \alpha \times \cos \alpha} \right)^2 \times Var[c] + \\ & \left\{ \frac{-\gamma_w \times \tan(E[\varphi])}{\gamma_{sat} \times Z \times \sin \alpha \times \cos \alpha} \right\}^2 \times Var[\psi(Z,t)] \end{aligned} \quad (2.14)$$

式(2.13)與式(2.14)中，凝聚力與摩擦角之期望值與變異數需事先給定(可參照表 2-1 與表 2-2)，而壓力水頭之期望值與變異數則必須進一步探討。

由於定率模式坡地入滲控制方程式中，僅水力傳導係數為具有不確定性之地質參數，可令壓力水頭 $\psi = g(K_{sat})$ ，因此相似於利用泰勒級數展開以分析安全係數統計特性之方法，壓力水頭之期望值與變異數可依據式(2.11)與式(2.12)表示為

$$E[\psi(Z,t)] = g(E[K_{sat}]) \quad (2.15)$$

$$Var[\psi(Z,t)] = \left(\frac{\partial \psi(Z,t)}{\partial K_{sat}} \right)_{K_{sat}=E[K_{sat}]}^2 \times Var[K_{sat}] \quad (2.16)$$

式(2.15)與式(2.16)中，由於水力傳導係數之期望值與變異數為已知，因此壓力水頭之期望值 $E[\psi(Z,t)]$ 可直接利用定率模式加以計算。而壓力水頭變異數之計算上，本研究以數值微分並利用一階中央差分法推求 $\partial \psi(Z,t) / \partial K_{sat}$ ，其差分式可表示為

$$\frac{\partial \psi(Z, t)}{\partial K_{sat}} = \frac{g(E[K_{sat}] + \Delta K_{sat}) - g(E[K_{sat}] - \Delta K_{sat})}{2\Delta K_{sat}} \quad (2.17)$$

其中 ΔK_{sat} 表示 K_{sat} 之微小增量。

利用式(2.13)、(2.14)、(2.15)與(2.16)求出安全係數之期望值與變異數後，即可根據常態分佈之定義以下式推求坡地之崩塌機率：

$$P_f = \Pr[FS \leq 1] = \frac{1}{\sqrt{2\pi Var[FS]}} \times \int_{-\infty}^1 e^{-\frac{(x-E[FS])^2}{2Var[FS]}} dx \quad (2.18)$$



表 2-1 地質參數統計特性資料彙整表

地質參數	變化範圍	各階動差		機率密度函數	文獻出處
ϕ (角度)	-	平均值 標準差	16.5~37.5 1.6~7.5	常態分佈	註 1
	30~47	平均值 變異係數	35 0.1~0.5	對數常態分佈	註 2
c (kpa)	-	平均值 標準差	2.5~350 1.6~83.3	常態分佈	註 1
	0~100	平均值 變異係數	50 0.1~0.5	對數常態分佈	註 2
	37.9~82.7	平均值 標準差 偏態係數 峰態係數	54.7 10.2 3.6 21.7	skew-beta distribution	Harr (1977)
γ_{sat} (KN/m ³)	-	平均值 標準差	13.5~26 0.98~1.47	未提到	註 3
K_{sat} (m/s)	$10^{-11} \sim 10^{-2}$	$\ln K_{sat}$ 標準差	0.447~2.6	對數常態分佈	Fetter (1994) and Gelhar(1993)

註 1：Chung and Tang (2005); Shou and Chen (2005); Refice and Capolongo (2002); and Harr (1977)

註 2：Sivakumar Babu and Mukesh (2003); Lee et al. (1983); and Griffiths and Fenton(2000)

註 3：Yarahmadi Bafghi and Verdel (2005); Sivakumar Babu and Mukesh (2003);Refice and Capolongo (2002)

表 2-2 地質參數變異係數比較表

地質參數 出處	γ_{sat}	ϕ	c
Lumb (1974)	0.05~0.10	0.05~0.15	0.20~0.50
Mulder and Vanasch (1988)		0.36	0.22
Harr (1987)	0.03	0.07 for gravel	0.40
		0.12 for sand	
Chen et al. (2007)	0.0031~0.03	0.098~0.237	0.20~0.899
Harr (1977)	0.01~0.03	0.05~0.20	0.10~0.80
Husein Malkawi (2000)	0.01~0.04	0.05~0.20	0.10~0.40
Sivakumar Babu and Mukesh (2003)		0.10~0.50	0.10~0.50

註：變異係數(coefficient of variance, COV)定義為參數標準差除以期望值

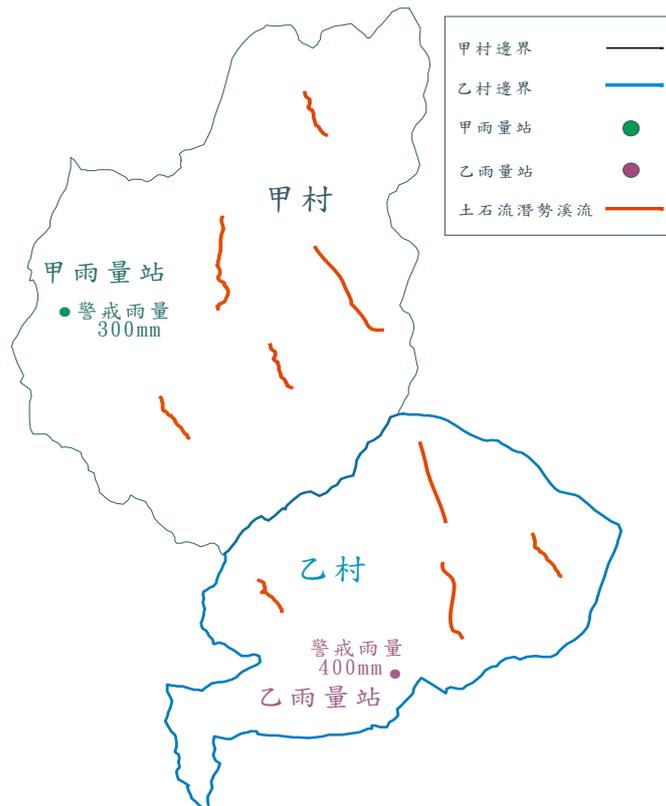


圖 2-1 現行水保局警戒發布做法

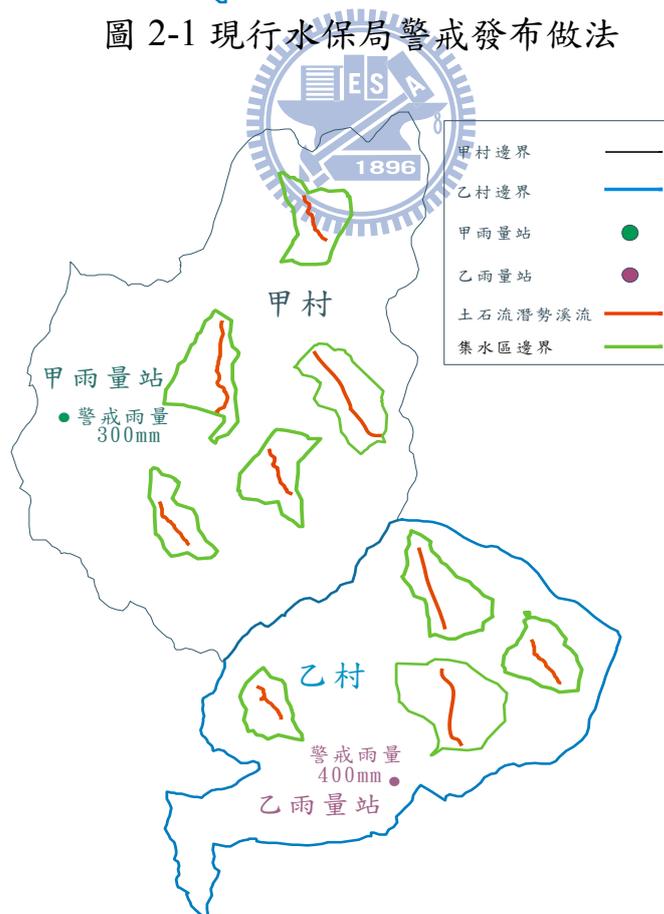
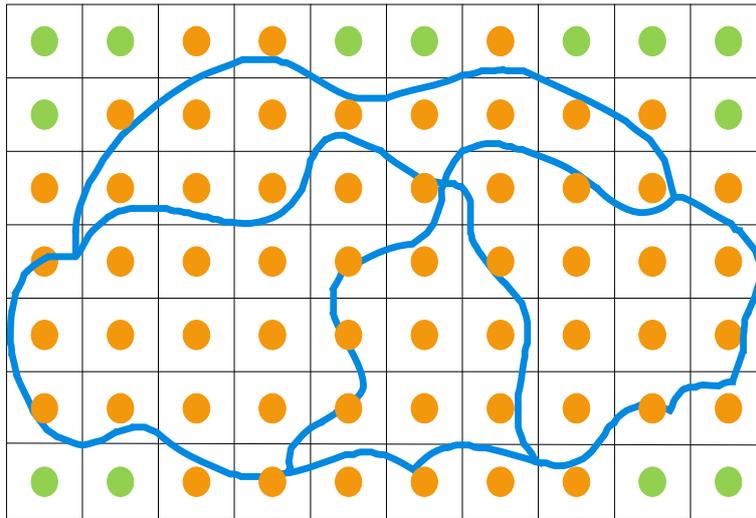


圖 2-2 集水分區概念



集水區分區線 ————

格網式定量降雨 ●

格網式定量降雨 ●

圖 2-3 不同空間解析度之降雨觀測示意圖

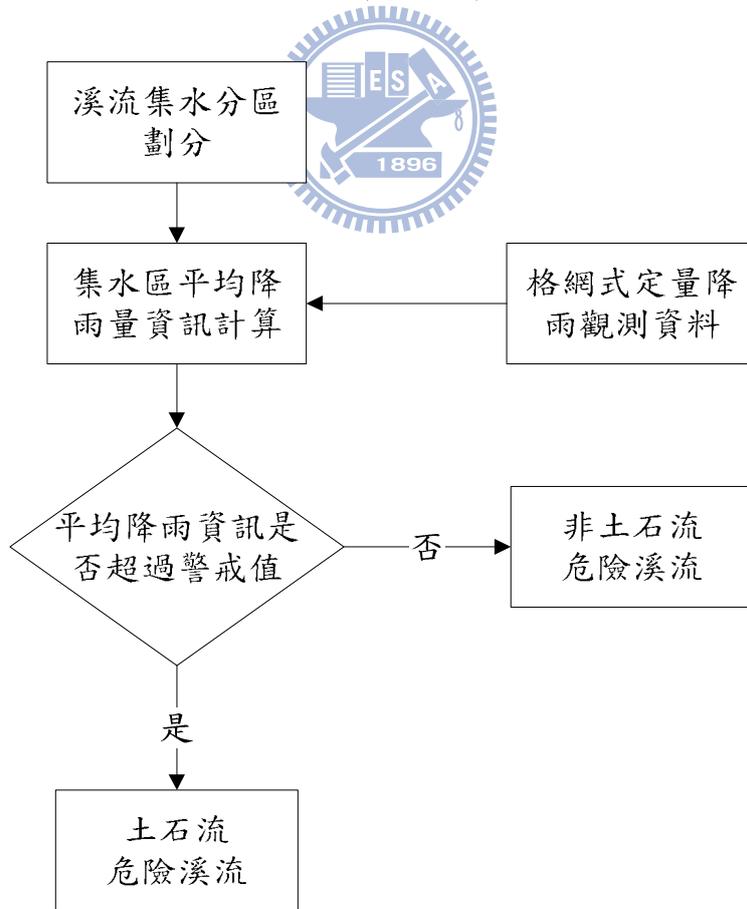


圖 2-4 集水區平均降雨流程圖

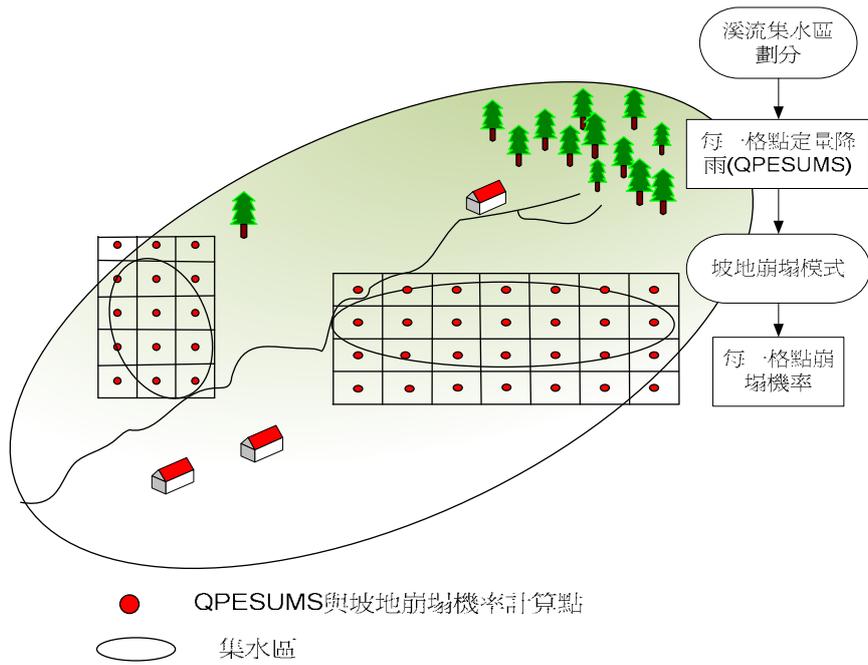


圖 2-5 水土整合概念於土石流危險溪流分析示意圖

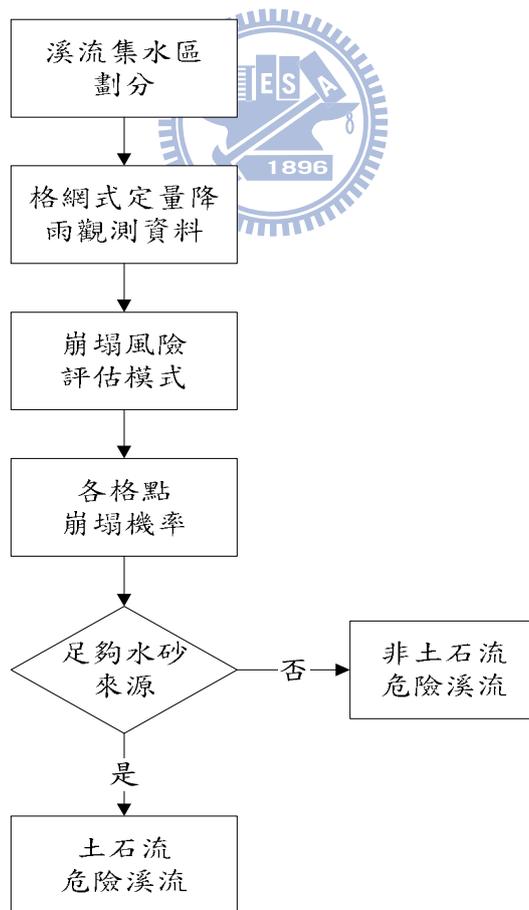


圖 2-6 水土整合概念流程圖

3	2	4
7	5	8
7	1	9

圖 2-7 最大坡降法

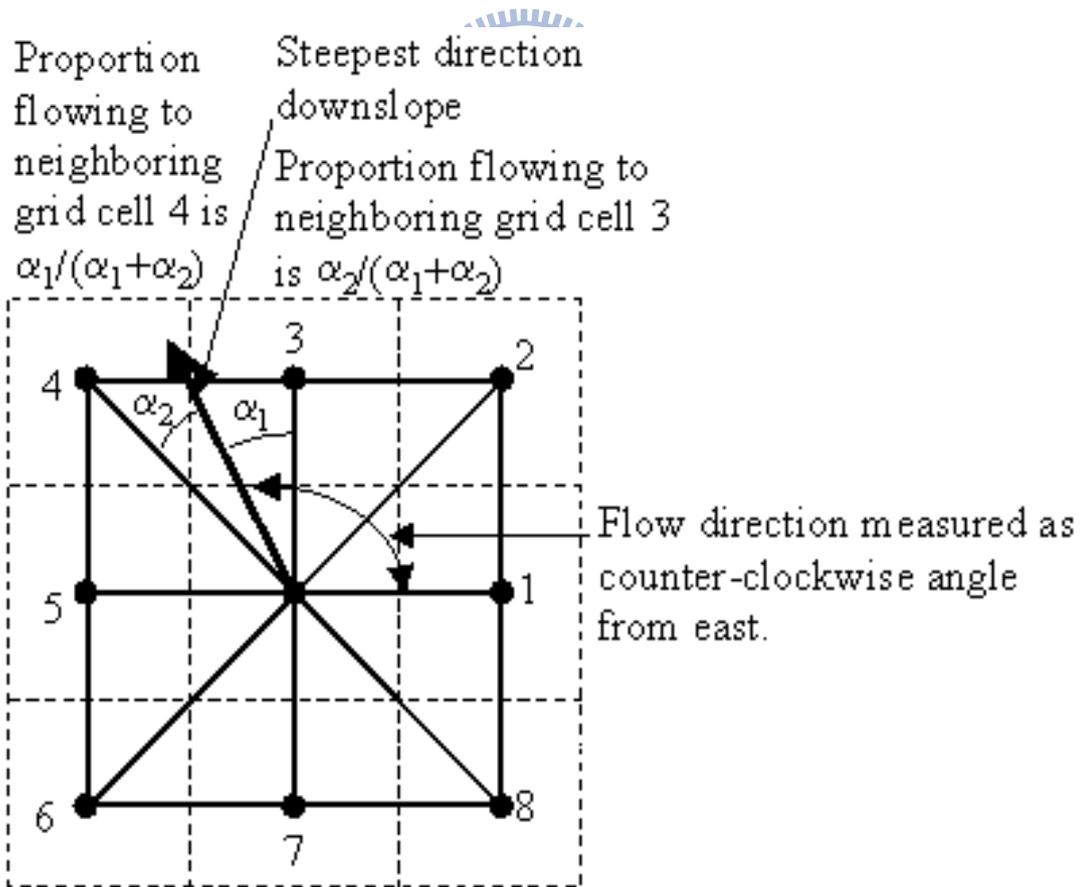


圖 2-8 無限流向法

第三章 集水分區概念對土石流發生時間的影響

第二章已說明研究流程與所使用方法，本章主要的內容是集水分區概念對土石流發生時間的影響。首先說明選取之研究區域，再簡述集水區劃分結果，並引入定量降雨資料作為正確性之檢視，最後藉由案例探討土石流發生時間的差異性。

3.1 研究區域概述

南投仁愛鄉境內有 29 條土石流潛勢溪流與 14 個雨量觀測站。如圖 3-1 所示，警戒值判定的參考雨量站包括仁愛、廬山、清流及武界，而各參考雨量站對應土石流潛勢溪流如圖中圓框所示，其警戒雨量均為總降雨量達 250mm。各土石流與相對應之警戒雨量站和累積雨量基準值相關資訊，如表 3-1 所示。本研究區域內所需之土石流潛勢溪流及雨量站等數化檔，為水保局所提供。

3.2 集水分區劃分

將仁愛鄉 DTM(如圖 3-2)匯入 TAUDEM 中，進行集水區劃分，再依土石流潛勢溪流位置選取所需之集水區。圖 3-3 為仁愛鄉集水區劃分成果，其 DTM 為工研院能環所 2000 年所製作之地表高程資料，精度為 40m×40m。

3.3 定量降雨資料正確性檢視

雨量站能正確掌握該點降雨量的大小，然而定量降雨(QPESUMS)是利用雷達天線發射高能電磁波射向大氣中，當電磁波碰到雲中的小水滴、水晶或雨滴時，便會造成電磁波的反射與散射，再以天線接收所反射與散射之微弱電磁波，此有許多不確定性因素存在，間接造成雨量資料準確性問題的質疑，因此本研究以辛樂克颱風及泰利颱風為例，分析南投仁愛鄉境內 14 個雨量站所量測之雨量比對該雨量站所在位置之 QPESUMS 雨量差異性，並藉由總雨量比(QPESUMS 總雨量/雨量站總雨量)檢視定量降雨資料之正確性，當其總雨量比越接近於 1 時，表示 QPESUMS 總雨量與雨量站總雨量之降雨資料越相符。

圖 3-4 至圖 3-17 為辛樂克颱風雨量站所量測之雨量比對該雨量站所在相同之 QPESUMS 雨量差異性，發現唯獨昆陽雨量站觀測記錄不齊全，造成昆陽站總雨量差異最大(約 323mm)外，其餘各站降雨歷程均相符。於泰利颱風雨量站所量測之雨量比對該雨量站所在相同之 QPESUMS 雨量差異性，如圖 3-18 至圖 3-31，得知昆陽雨量站及阿眉雨量站之總雨量分別為 1.5mm 與 0mm，推估可能為機件故障所造成之關係外，其餘各站降雨歷程均相符。由圖 3-32 及圖 3-33 可看出泰利颱風及辛樂克颱風之總雨量比差異圖，其值如表 3-2 及表 3-3 所示，可看出於泰利颱風中昆陽站為 103.053、翠巒為 0.855 及阿眉站

為 0(泰利颱風)，在辛樂克颱風中昆陽站為 1.698(辛樂克颱風)及萬大為 0.835(辛樂克颱風)外，其餘各站總雨量比均接近 1。

由上述可知，除雨量站資料觀測記錄不齊全或是故障外，及些許站為 0.8 左右，其餘各雨量站所量測之雨量比對該雨量站所在相同之 QPESUMS 雨量，降雨歷程均有相符合現象，且總雨量比均趨近於 1，可知 QPESUMS 雨量資料之準確度是合理的。

3.4 土石流發生時間評估分析

本研究乃以 QPESUMS 雨量資料求取各土石流集水分區之平均降雨量，並以土石流發佈時間觀點，比較土石流危險溪流發佈時間之差異性。



目前水保局警戒雨量發佈時間之做法乃採用雨場分割法，其雨場分割法為：一場連續降雨過程，以時雨量大於 4mm 為有效降雨時間之開始，而以時雨量連續 6 小時均小於 4mm 處為有效降雨的結束，如下圖 3-34 所示。因此，本研究將辛樂克颱風及泰利颱風之 QPESUMS 降雨資料及警戒雨量站降雨資料，依雨場分割法進行時間差異性比較。

表 3-4 為辛樂克颱風於仁愛鄉之警戒雨量站與 QPESUMS 累積雨量，依雨場分割法所得之時間點，發現各集水區 QPESUMS 與警戒雨量站之累積雨量的時間點各有其提早或延後現象。若以警戒雨量時間

為基準，分別對累積雨量 250mm、500mm 及 750mm 進行時間差異性分析，如表 3-5、表 3-6 及表 3-7 所示，發現若以仁愛鄉土石流預報發佈時間點而言(累積雨量為 250mm 時)，時間延後最多為南投 001 集水區的三小時二十分，而南投 A001 則無誤差，時間提前最多的為南投 063 及南投 064 集水區之二小時三十分。由累積雨量 500mm 來看，得知延後最多為南投 008 集水區的九小時，其延後最少為南投 A022 的四十分，至於提早最多和最少分別為南投 064 集水區之八小時五十分與南投 A013 集水區之十分鐘，於累積雨量達 750mm 時，可知延後最多與最少分別為南投 008 集水區之十二小時二十分與南投 060 集水區之十分，而時間提早最多及最少分別為南投 062 集水區的七小時三十分及南投 A001 集水區之二十分。

由於泰利颱風各警戒雨量站之累積雨量，除廬山雨量站達到仁愛鄉 250mm 之警戒雨量標準外，其餘各站均未達其警戒雨量標準。因此以雨場分割法，分別選取積雨量 50mm、100mm 及 150mm 之時間點，如表 3-8 所示。由於累積雨量達 150mm 時，僅有廬山警戒雨量站有達其標準，其餘各警戒雨量站與 QPESUMS 累積雨量均未超過 150mm，因此只比較累積雨量達 50mm、100mm 時，各集水區時間差異性(以警戒雨量站為基準)，如 3-9 及表 3-10 所示。於累積雨量 50mm 中，發現時間延後最多為南投 001、南投 018、南投 A006 及南

投 A008 集水區之一小時三十分，延後最少為十分(南投 003、南投 004、南投 058、南投 059、南投 A022 及南投 A106 之集水區)，提早最多及最少時間分別為南投 063 集水區之六小時二十分與南投 059、南投 060 及南投 A002 集水區之十分；若選取累積雨量 100mm 為參考依據，可知延後最多雨延後最少則為南投 001 集水區之四小時五十分及南投 004、南投 014 及南投 A013 集水區之 10 分，而提前最多及最少則為南投 064 集水區的六小時十分與南投 003 集水區之二十分。

由案例分析可知，降雨的不均勻特性，倘若未來能更真實掌握降雨之情形，即可提供發佈時間點之正確性。



表 3-1 土石流潛勢溪流對應之警戒雨量站和累積雨量值(仁愛鄉)

縣市	鄉鎮	村里	潛勢溪流編號	溪流名稱/地標	警戒值/參考雨量站 1/參考雨量站 2
南投縣	仁愛鄉	互助村	南投 058	北港溪支流/無	250mm/清流/仁愛
			南投 059	北港溪支流/互助國小	250mm/清流/仁愛
			南投 A022	野溪/重劃紀念橋	250mm/清流/仁愛
			南投 A106	梅子林/清流吊橋	250mm/清流/仁愛
		法治村	南投 018	武界/法治國小	250mm/武界/文文社
			南投 019	野溪/無	250mm/武界/文文社
			南投 A014	野溪/無	250mm/武界/文文社
		南豐村	南投 003	下眉橋溪/下眉橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 004	南山橋溪/南山橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 005	楓子林橋溪/楓子林橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 006	南山橋溪/豐林橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 A001	東眼溪/眉溪	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 A002	南山溪/南山橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 A003	坑溝/同德橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 A004	野溪/無	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 A005	野溪/無	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 A006	本部溪/本部溪橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 A008	觀音橋溪/觀音瓏橋	250mm/仁愛/楓樹林
			南投 011	野溪/無	250mm/武界/文文社
			南投 014	野溪/萬豐國小	250mm/武界/文文社
		春陽村	南投 002	霧社溪支流/春陽溫泉	250mm/廬山/仁愛
		新生村	南投 060	北港溪支流/眉原	250mm/清流/仁愛
			南投 062	北港溪支流/中興大學實驗林場	250mm/清流/仁愛
			南投 063	野溪/萱野	250mm/清流/仁愛
			南投 064	野溪/無	250mm/清流/仁愛
			南投 061	北港溪支流/無	250mm/廬山/仁愛
		萬豐村	南投 A013	野溪/無	250mm/武界/文文社
		精英村	南投 001	塔羅灣溪/警光山莊	250mm/廬山/仁愛
		親愛村	南投 008	野溪/親愛國小	250mm/廬山/仁愛
總計	29 條				

表 3-2 同一點位上雨量站和 QPESUMS 資料差異(泰利颱風)

點位	CWB 觀測 值之總雨量 (mm)	QPE 觀測值 之總雨量 (mm)	總雨量差值 (mm)	總雨量比 (QPE/CWB)
萬大	141.5	138.54	2.96	0.979
文文社	151	142.5	8.5	0.944
武界	129.5	118	11.5	0.911
奧萬大	175	170.79	4.21	0.976
楓樹林	119	126.08	7.08	1.059
仁愛	128	126.08	1.92	0.985
廬山	152.5	144	8.5	0.944
翠峰	180	165.46	14.54	0.919
瑞岩	146.5	153.67	7.17	1.049
昆陽	1.5	154.58	153.08	103.053
合歡山	177.5	180.42	2.9	1.016
翠巒	315.5	269.71	45.79	0.855
清流	101.5	119.21	14.11	1.134
阿眉	0	130.46	130.46	0

表 3-3 同一點位上雨量站和 QPESUMS 資料差異(辛樂克颱風)

點位	CWB 觀測 值之總雨量 (mm)	QPE 觀測值 之總雨量 (mm)	總雨量差 值(mm)	總雨量比 (QPE/CWB)
萬大	1036.00	865.29	170.71	0.835
文文社	1056.00	1026.00	30.00	0.972
武界	760.50	778.38	17.88	1.024
奧萬大	918.00	889.21	28.79	0.969
楓樹林	1259.00	1238.46	20.54	0.984
仁愛	982.50	1029.63	47.13	1.048
廬山	1161.00	1352.75	191.75	1.165
翠峰	905.50	936.21	30.71	1.033
瑞岩	821.00	862.25	41.25	1.050
昆陽	462.50	785.13	322.63	1.698
合歡山	1087.50	1138.50	51.00	1.047
翠巒	907.00	911.79	4.79	1.005
清流	822.00	894.25	72.25	1.088
阿眉	1281.00	1229.71	51.29	0.960

表 3-4QPESUMS 和觀測站累積雨量發生時間點(辛樂克)

集水區 累積雨量	南投 001		南投 002		南投 003		南投 004		南投 005	
	雷達	警戒雨量站								
250(mm)	14-09-2008 10:10	14-09-2008 06:50	14-09-2008 07:00	14-09-2008 06:50	14-09-2008 12:30	14-09-2008 12:20	14-09-2008 12:10	14-09-2008 12:20	14-09-2008 11:50	14-09-2008 12:20
500(mm)	14-09-2008 22:40	14-09-2008 17:20	14-09-2008 16:40	14-09-2008 17:20	14-09-2008 23:40	15-09-2008 00:50	14-09-2008 22:30	15-09-2008 00:50	14-09-2008 20:40	15-09-2008 00:50
750(mm)	15-09-2008 10:50	15-09-2008 03:50	15-09-2008 03:20	15-09-2008 03:50	15-09-2008 08:00	15-09-2008 09:10	15-09-2008 07:30	15-09-2008 09:10	15-09-2008 07:00	15-09-2008 09:10
集水區 累積雨量	南投 006		南投 008		南投 011		南投 014		南投 018	
	雷達	警戒雨量站								
250(mm)	14-09-2008 11:20	14-09-2008 12:20	14-09-2008 10:00	14-09-2008 06:50	14-09-2008 11:20	14-09-2008 08:30	14-09-2008 11:20	14-09-2008 08:30	14-09-2008 10:50	14-09-2008 08:30
500(mm)	14-09-2008 19:10	15-09-2008 00:50	15-09-2008 06:20	14-09-2008 17:20	14-09-2008 20:10	15-09-2008 04:20	15-09-2008 01:30	15-09-2008 04:20	15-09-2008 06:20	15-09-2008 04:20
750(mm)	15-09-2008 05:50	15-09-2008 09:10	15-09-2008 18:30	15-09-2008 03:50	15-09-2008 06:40	15-09-2008 13:00	15-09-2008 08:30	15-09-2008 13:00	15-09-2008 18:10	15-09-2008 13:00
集水區 累積雨量	南投 019		南投 058		南投 059		南投 060		南投 061	
	雷達	警戒雨量站								
250(mm)	14-09-2008 10:50	14-09-2008 08:30	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50	14-09-2008 14:40	14-09-2008 14:50	14-09-2008 13:00	14-09-2008 14:50
500(mm)	15-09-2008 06:30	15-09-2008 04:20	15-09-2008 04:20	15-09-2008 03:30	15-09-2008 04:20	15-09-2008 03:30	15-09-2008 01:40	15-09-2008 03:30	14-09-2008 18:40	15-09-2008 03:30
750(mm)	15-09-2008 14:30	15-09-2008 13:00	15-09-2008 14:00	15-09-2008 11:50	15-09-2008 13:50	15-09-2008 11:50	15-09-2008 12:00	15-09-2008 11:50	15-09-2008 03:50	15-09-2008 11:50
集水區 累積雨量	南投 062		南投 063		南投 064		南投 A001		南投 A002	
	雷達	警戒雨量站								
250(mm)	14-09-2008 12:50	14-09-2008 14:50	14-09-2008 12:20	14-09-2008 14:50	14-09-2008 12:20	14-09-2008 14:50	14-09-2008 12:20	14-09-2008 12:20	14-09-2008 11:50	14-09-2008 12:20
500(mm)	14-09-2008 19:10	15-09-2008 03:30	14-09-2008 19:00	15-09-2008 03:30	14-09-2008 18:40	15-09-2008 03:30	14-09-2008 23:20	15-09-2008 00:50	14-09-2008 20:20	15-09-2008 00:50
750(mm)	15-09-2008 05:20	15-09-2008 11:50	15-09-2008 05:20	15-09-2008 11:50	15-09-2008 04:50	15-09-2008 11:50	15-09-2008 08:50	15-09-2008 09:10	15-09-2008 06:50	15-09-2008 09:10
集水區 累積雨量	南投 A003		南投 A004		南投 A005		南投 A006		南投 A008	
	雷達	警戒雨量站								
250(mm)	14-09-2008 11:50	14-09-2008 12:20	14-09-2008 11:40	14-09-2008 12:20	14-09-2008 11:20	14-09-2008 12:20	14-09-2008 11:10	14-09-2008 12:20	14-09-2008 10:50	14-09-2008 12:20
500(mm)	14-09-2008 20:20	15-09-2008 00:50	14-09-2008 20:00	15-09-2008 00:50	14-09-2008 19:00	15-09-2008 00:50	14-09-2008 19:00	15-09-2008 00:50	14-09-2008 17:50	15-09-2008 00:50
750(mm)	15-09-2008 06:40	15-09-2008 09:10	15-09-2008 06:30	15-09-2008 09:10	15-09-2008 05:50	15-09-2008 09:10	15-09-2008 05:50	15-09-2008 09:10	15-09-2008 05:30	15-09-2008 09:10
集水區 累積雨量	南投 A013		南投 A014		南投 A022		南投 A106			
	雷達	警戒雨量站	雷達	警戒雨量站	雷達	警戒雨量站	雷達	警戒雨量站		
250(mm)	14-09-2008 10:40	14-09-2008 08:30	14-09-2008 10:00	14-09-2008 08:30	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50		
500(mm)	15-09-2008 04:10	15-09-2008 04:20	15-09-2008 06:20	15-09-2008 04:20	15-09-2008 04:20	15-09-2008 03:30	15-09-2008 04:30	15-09-2008 03:30		
750(mm)	15-09-2008 09:50	15-09-2008 13:00	15-09-2008 18:30	15-09-2008 13:00	15-09-2008 14:00	15-09-2008 11:50	15-09-2008 15:00	15-09-2008 11:50		

表 3-5 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 250mm 時間差異(辛樂克)

集水區	QPESUMS	觀測站	差異性
南投 001	14-09-2008 10:10	14-09-2008 06:50	3 小時 20 分
南投 002	14-09-2008 07:00	14-09-2004 06:50	10 分
南投 003	14-09-2008 12:30	14-09-2008 12:20	10 分
南投 004	14-09-2008 12:10	14-09-2008 12:20	-10 分
南投 005	14-09-2008 11:50	14-09-2008 12:20	-30 分
南投 006	14-09-2008 11:20	14-09-2008 12:20	-1 小時
南投 008	14-09-2008 10:00	14-09-2004 06:50	3 小時 10 分
南投 011	14-09-2008 11:20	14-09-2008 08:30	2 小時 50 分
南投 014	14-09-2008 11:20	14-09-2008 08:30	2 小時 50 分
南投 018	14-09-2008 10:50	14-09-2008 08:30	2 小時 20 分
南投 019	14-09-2008 10:50	14-09-2008 08:30	2 小時 20 分
南投 058	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50	40 分
南投 059	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50	40 分
南投 060	14-09-2008 14:40	14-09-2008 14:50	-10 分
南投 061	14-09-2008 13:00	14-09-2008 14:50	-1 小時 50 分
南投 062	14-09-2008 12:50	14-09-2008 14:50	-2 小時
南投 063	14-09-2008 12:20	14-09-2008 14:50	-2 小時 30 分
南投 064	14-09-2008 12:20	14-09-2008 14:50	-2 小時 30 分
南投 A001	14-09-2008 12:20	14-09-2008 12:20	0 分
南投 A002	14-09-2008 11:50	14-09-2008 12:20	-30 分
南投 A003	14-09-2008 11:50	14-09-2008 12:20	-30 分
南投 A004	14-09-2008 11:40	14-09-2008 12:20	-30 分
南投 A005	14-09-2008 11:20	14-09-2008 12:20	-1 小時
南投 A006	14-09-2008 11:10	14-09-2008 12:20	-1 時 10 分
南投 A008	14-09-2008 10:50	14-09-2008 12:20	-1 小時 30 分
南投 A013	14-09-2008 10:40	14-09-2008 08:30	2 小時 10 分
南投 A014	14-09-2008 10:00	14-09-2008 08:30	1 小時 30 分
南投 A022	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50	-40 分
南投 A106	14-09-2008 15:30	14-09-2008 14:50	40 分

提前為負，延後為正

表 3-6 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 500mm 時間差異(辛樂克)

集水區	QPESUMS	觀測站	差異性
南投 001	14-09-2008 22:40	14-09-2008 17:20	5 小時 20 分
南投 002	14-09-2009 16:40	14-09-2008 17:20	-40 分
南投 003	14-09-2008 23:40	15-09-2008 00:50	-1 小時 10 分
南投 004	14-09-2008 22:30	15-09-2008 00:50	-2 小時 20 分
南投 005	14-09-2008 20:40	15-09-2008 00:50	-2 小時 20 分
南投 006	14-09-2008 19:10	15-09-2008 00:50	-5 小時 40 分
南投 008	15-09-2008 06:20	14-09-2008 17:20	9 小時
南投 011	14-09-2008 20:10	15-09-2008 04:20	-8 小時 20 分
南投 014	15-09-2008 01:30	15-09-2008 04:20	-3 小時 50 分
南投 018	14-09-2008 06:20	15-09-2008 04:20	2 小時
南投 019	14-09-2008 06:30	15-09-2008 04:20	2 小時 10 分
南投 058	14-09-2008 04:20	15-09-2008 03:30	50 分
南投 059	15-09-2008 04:20	15-09-2008 03:30	50 分
南投 060	15-09-2008 01:40	15-09-2008 03:30	-1 小時 50 分
南投 061	14-09-2008 18:40	15-09-2008 03:30	-8 小時 50 分
南投 062	14-09-2008 19:10	15-09-2008 03:30	-8 小時 20 分
南投 063	14-09-2008 19:00	15-09-2008 03:30	-8 小時 30 分
南投 064	14-09-2008 18:40	15-09-2008 03:30	-8 小時 50 分
南投 A001	14-09-2008 23:20	15-09-2008 00:50	-1 小時 30 分
南投 A002	14-09-2008 20:20	15-09-2008 00:50	-4 小時 30 分
南投 A003	14-09-2008 20:20	15-09-2008 00:50	-4 小時 30 分
南投 A004	14-09-2005 20:00	15-09-2008 00:50	-4 小時 50 分
南投 A005	14-09-2008 19:40	15-09-2008 00:50	-5 小時 50 分
南投 A006	14-09-2005 19:00	15-09-2008 00:50	-5 小時 50 分
南投 A008	14-09-2008 17:50	15-09-2008 00:50	-7 小時
南投 A013	15-09-2008 04:10	15-09-2008 04:20	-10 分
南投 A014	15-09-2008 06:20	15-09-2008 04:20	2 小時
南投 A022	15-09-2008 04:20	15-09-2008 03:30	40 分
南投 A106	15-09-2008 04:30	15-09-2008 03:30	1 小時

提前為負，延後為正

表 3-7 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 750mm 時間差異(辛樂克)

集水區	QPESUMS	觀測站	差異性
南投 001	15-09-2008 10:50	15-09-2008 03:50	7 小時
南投 002	15-09-2008 03:20	15-09-2008 03:50	-30 分
南投 003	15-09-2008 08:00	15-09-2008 09:10	-1 小時 10 分
南投 004	15-09-2008 07:30	15-09-2008 09:10	-1 小時 40 分
南投 005	15-09-2008 07:00	15-09-2008 09:10	-2 小時 10 分
南投 006	15-09-2008 05:50	15-09-2008 09:10	-3 小時 20 分
南投 008	15-09-2008 18:30	15-09-2008 03:50	12 小時 20 分
南投 011	15-09-2008 06:40	15-09-2008 13:00	-5 小時 20 分
南投 014	15-09-2008 08:30	15-09-2008 13:00	-4 小時 30 分
南投 018	15-19-2008 18:10	15-09-2008 13:00	5 小時 10 分
南投 019	15-09-2008 14:30	15-09-2008 13:00	1 小時 30 分
南投 058	15-09-2008 14:00	15-09-2008 11:50	2 小時 10 分
南投 059	15-09-2008 13:50	15-09-2008 11:50	2 小時
南投 060	15-09-2008 12:20	15-09-2008 11:50	10 分
南投 061	15-09-2008 03:50	15-09-2008 11:50	-7 小時
南投 062	15-09-2008 05:20	15-09-2008 11:50	-7 小時 30 分
南投 063	15-09-2008 05:20	15-09-2008 11:50	-6 小時 30 分
南投 064	15-09-2008 04:50	15-09-2008 11:50	-7 小時
南投 A001	15-09-2008 08:50	15-09-2008 09:10	-20 分
南投 A002	15-09-2008 06:50	15-09-2008 09:10	-2 小時 20 分
南投 A003	15-09-2008 06:40	15-09-2008 09:10	-2 小時 30 分
南投 A004	15-09-2008 06:30	15-09-2008 09:10	-2 小時 40 分
南投 A005	15-09-2008 05:50	15-09-2008 09:10	-3 小時 20 分
南投 A006	15-09-2008 05:50	15-09-2008 09:10	-3 小時 20 分
南投 A008	15-09-2008 05:30	15-09-2008 09:10	-3 小時 40 分
南投 A013	15-09-2008 09:50	15-09-2008 13:00	-3 小時 10 分
南投 A014	15-09-2008 18:30	15-09-2008 13:00	5 小時 30 分
南投 A022	15-09-2008 14:00	15-09-2008 11:50	2 小時 10 分
南投 A106	15-09-2008 15:00	15-09-2008 11:50	3 小時 10 分

提前為負，延後為正

表 3-8QPESUMS 和觀測站累積雨量發生時間點(泰利颱風)

集水區 累積雨量	南投 001		南投 002		南投 003		南投 004		南投 005	
	雷達	警戒雨量站								
50(mm)	01-09-2005 00:50	31-08-200523:20	31-08-2005 23:50	31-08-2005 23:20	01-09-2005 00:30	01-09-2005 00:20	01-09-2005 00:30	01-09-2005 00:20	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:20
100(mm)	01-09-2005 08:00	01-09-2005 03:10	01-09-2005 04:40	01-09-2005 03:10	01-09-2005 08:10	01-09-2005 08:30	01-09-2005 08:40	01-09-2005 08:30	01-09-2005 09:30	01-09-2005 08:30
150(mm)	-----	01-09-2005 15:00	-----	01-09-2005 15:30	-----	-----	-----	-----	-----	-----
集水區 累積雨量	南投 006		南投 008		南投 011		南投 014		南投 018	
	雷達	警戒雨量站								
50(mm)	01-09-2005 00:50	01-09-2005 00:20	01-09-2005 00:30	31-08-2005 23:20	01-09-2005 01:30	01-09-2005 00:30	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:30	01-09-2005 02:00	01-09-2005 00:30
100(mm)	01-09-2005 09:20	01-09-2005 08:30	01-09-2005 07:20	01-09-2005 03:10	01-09-2005 09:50	01-09-2005 09:00	01-09-2005 09:10	01-09-2005 09:00	01-09-2005 11:20	01-09-2005 09:00
150(mm)	-----	-----	-----	01-09-2005 15:00	-----	-----	-----	-----	-----	-----
集水區 累積雨量	南投 019		南投 058		南投 059		南投 060		南投 061	
	雷達	警戒雨量站								
50(mm)	01-09-2005 01:50	01-09-2005 00:30	01-09-2005 08:40	01-09-2005 08:50	01-09-2005 08:40	01-09-2005 08:50	01-09-2005 07:40	01-09-2005 08:50	01-09-2005 05:10	01-09-2005 08:50
100(mm)	01-09-2005 11:10	01-09-2005 09:00	01-09-2005 15:20	01-09-2005 16:50	01-09-2005 15:00	01-09-2005 16:50	01-09-2005 12:40	01-09-2005 17:00	01-09-2005 10:50	01-09-2005 16:50
150(mm)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
集水區 累積雨量	南投 062		南投 063		南投 064		南投 A001		南投 A002	
	雷達	警戒雨量站								
50(mm)	01-09-2005 02:50	01-09-2005 08:50	01-09-2005 02:30	01-09-2005 08:50	01-09-2005 01:50	01-09-2005 08:50	31-08-2005 23:50	01-09-2005 00:20	01-09-2005 00:10	01-09-2005 00:20
100(mm)	01-09-2005 11:00	01-09-2005 16:50	01-09-2005 11:00	01-09-2005 16:50	01-09-2005 10:40	01-09-2005 16:50	01-09-2005 06:00	01-09-2005 08:30	01-09-2005 08:10	01-09-2005 08:30
150(mm)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
集水區 累積雨量	南投 A003		南投 A004		南投 A005		南投 A006		南投 A008	
	雷達	警戒雨量站								
50(mm)	01-09-2005 00:40	01-09-2005 00:20	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:20	01-09-2005 01:40	01-09-2005 00:20	01-09-2005 01:50	01-09-2005 00:20	01-09-2005 01:50	01-09-2005 00:20
100(mm)	01-09-2005 09:10	01-09-2005 08:30	01-09-2005 09:30	01-09-2005 08:30	01-09-2005 10:20	01-09-2005 08:30	01-09-2005 10:30	01-09-2005 08:30	01-09-2005 10:30	01-09-2005 08:30
150(mm)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
集水區 累積雨量	南投 A013		南投 A014		南投 A022		南投 A106			
	雷達	警戒雨量站	雷達	警戒雨量站	雷達	警戒雨量站	雷達	警戒雨量站		
50(mm)	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:30	01-09-2005 01:20	01-09-2005 00:30	01-09-2005 09:00	01-09-2005 08:50	01-09-2005 09:00	01-09-2005 08:50		
100(mm)	01-09-2005 09:10	01-09-2005 09:00	01-09-2005 09:50	01-09-2005 09:00	01-09-2005 15:50	01-09-2005 16:50	01-09-2005 16:10	01-09-2005 16:50		
150(mm)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----		

表 3-9 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 50mm 時間差異(泰利)

集水區	QPESUMS	觀測站	差異性
南投 001	01-09-2005 00:50	31-08-2005 23:20	1 小時 30 分
南投 002	31-08-2005 23:50	31-08-2005 23:20	30 分
南投 003	01-09-2005 00:30	01-09-2005 00:20	10 分
南投 004	01-09-2005 00:30	01-09-2005 00:20	10 分
南投 005	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:20	40 分
南投 006	01-09-2005 00:50	01-09-2005 00:20	30 分
南投 008	01-09-2005 00:30	31-08-2005 23:20	1 小時 10 分
南投 011	01-09-2005 01:30	01-09-2005 00:30	1 小時
南投 014	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:30	30 分
南投 018	01-09-2005 02:00	01-09-2005 00:30	1 小時 30 分
南投 019	01-09-2005 01:50	01-09-2005 00:30	1 小時 20 分
南投 058	01-09-2005 08:40	01-09-2005 08:50	-10 分
南投 059	01-09-2005 08:40	01-09-2005 08:50	-10 分
南投 060	01-09-2005 07:40	01-09-2005 08:50	-1 小時 10 分
南投 061	01-09-2005 05:10	01-09-2005 08:50	-3 小時 40 分
南投 062	01-09-2005 02:50	01-09-2005 08:50	-5 小時
南投 063	01-09-2005 02:30	01-09-2005 08:50	-6 小時 20 分
南投 064	01-09-2005 01:50	01-09-2005 08:50	-7 小時
南投 A001	31-08-2005 23:50	01-09-2005 00:20	-30 分
南投 A002	01-09-2005 00:10	01-09-2005 00:20	-10 分
南投 A003	01-09-2005 00:40	01-09-2005 00:20	20 分
南投 A004	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:20	40 分
南投 A005	01-09-2005 01:40	01-09-2005 00:20	1 小時 20 分
南投 A006	01-09-2005 01:50	01-09-2005 00:20	1 小時 30 分
南投 A008	01-09-2005 01:50	01-09-2005 00:20	1 小時 30 分
南投 A013	01-09-2005 01:00	01-09-2005 00:30	30 分
南投 A014	01-09-2005 01:20	01-09-2005 00:30	50 分
南投 A022	01-09-2005 09:00	01-09-2005 08:50	10 分
南投 A106	01-09-2005 09:00	01-09-2005 08:50	10 分

提前為負，延後為正

表 3-10 QPESUMS 和觀測站累積雨量達 100mm 時間差異(泰利)

集水區	QPESUMS	觀測站	差異性
南投 001	01-09-2005 08:00	01-09-2005 03:10	4 小時 50 分
南投 002	01-09-2005 04:40	01-09-2005 03:10	1 小時 30 分
南投 003	01-09-2005 08:10	01-09-2008 08:30	-20 分
南投 004	01-09-2005 08:40	01-09-2008 08:30	10 分
南投 005	01-09-2005 09:30	01-09-2008 08:30	1 小時
南投 006	01-09-2005 09:20	01-09-2008 08:30	50 分
南投 008	01-09-2005 07:20	01-09-2005 03:10	4 小時 10 分
南投 011	01-09-2005 09:50	01-09-2005 09:00	50 分
南投 014	01-09-2005 09:10	01-09-2005 09:00	10 分
南投 018	01-09-2005 11:20	01-09-2005 09:00	2 小時 20 分
南投 019	01-09-2005 11:10	01-09-2005 09:00	2 小時 10 分
南投 058	01-09-2005 15:20	01-09-2005 16:50	-1 小時 30 分
南投 059	01-09-2005 15:00	01-09-2005 16:50	-1 小時 50 分
南投 060	01-09-2005 12:40	01-09-2005 16:50	-4 小時 20 分
南投 061	01-09-2005 10:50	01-09-2005 16:50	-6 小時
南投 062	01-09-2005 11:00	01-09-2005 16:50	-5 小時 50 分
南投 063	01-09-2005 11:00	01-09-2005 16:50	-5 小時 50 分
南投 064	01-09-2005 10:40	01-09-2005 16:50	-6 小時 10 分
南投 A001	01-09-2005 06:00	01-09-2008 08:30	-2 小時 30 分
南投 A002	01-09-2005 08:10	01-09-2008 08:30	-20 分
南投 A003	01-09-2005 09:10	01-09-2008 08:30	40 分
南投 A004	01-09-2005 09:30	01-09-2008 08:30	1 小時
南投 A005	01-09-2005:10:20	01-09-2008 08:30	1 小時 50 分
南投 A006	01-09-2005 10:30	01-09-2008 08:30	2 小時
南投 A008	01-09-2005 10:30	01-09-2008 08:30	2 小時
南投 A013	01-09-2005 09:10	01-09-2008 09:00	10 分
南投 A014	01-09-2005 09:50	01-09-2008 09:00	50 分
南投 A022	01-09-2005 15:50	01-09-2008 16:50	-1 小時
南投 A106	01-09-2005 16:10	01-09-2008 16:50	-40 分

提前為負，延後為正

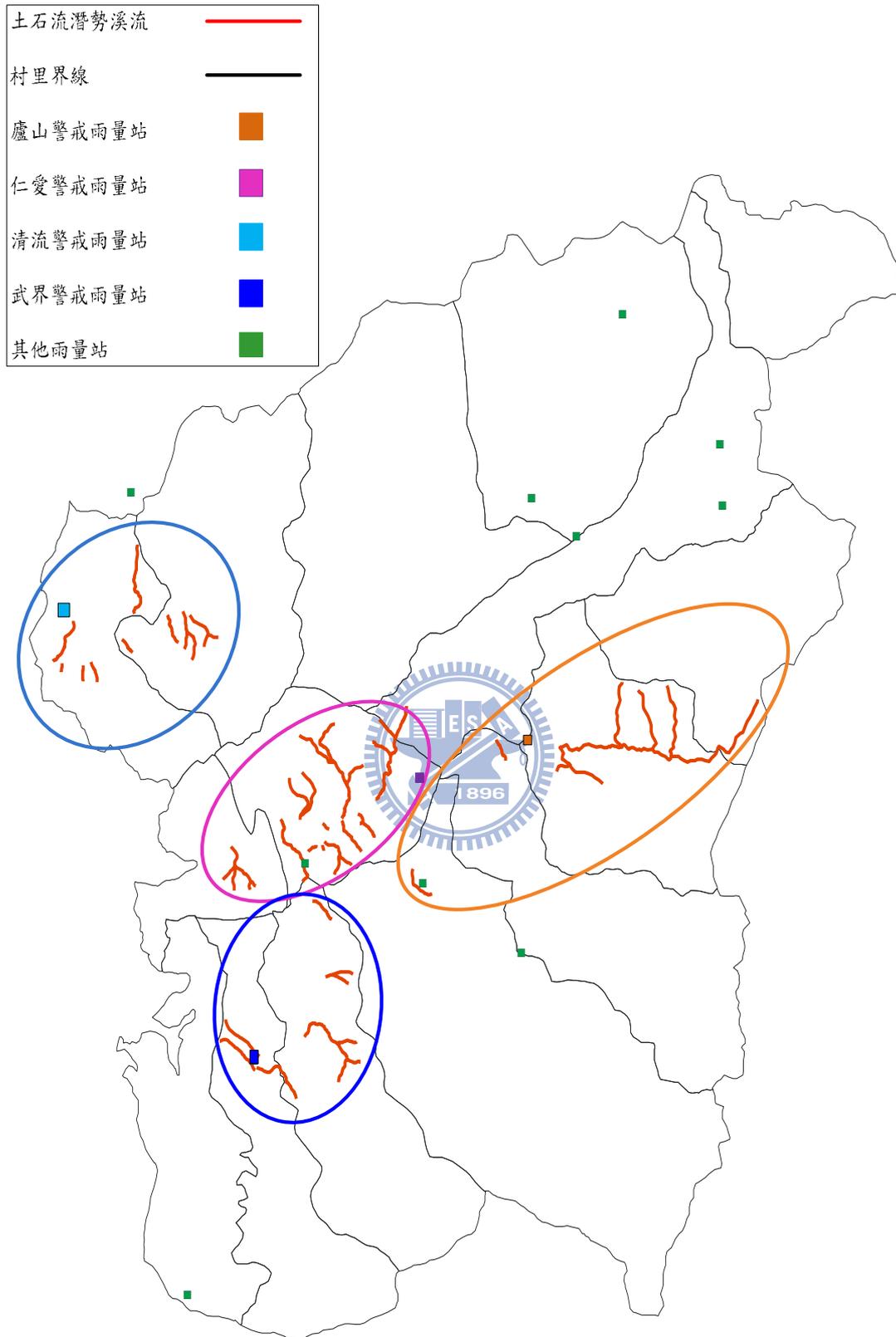


圖 3-1 南投仁愛鄉土石流與其警戒雨量站及雨量站位置圖

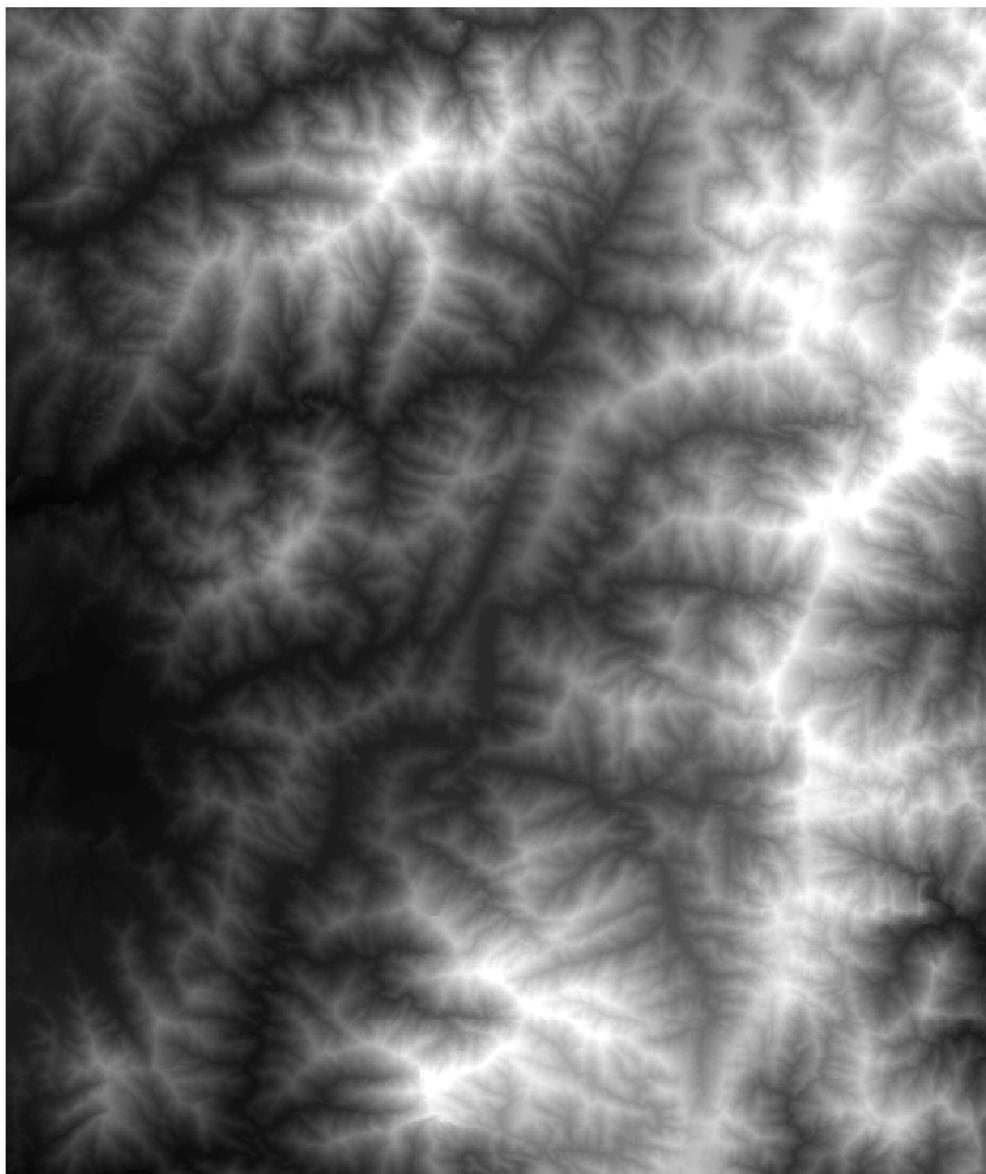


圖 3-2 南投仁愛鄉 DTM

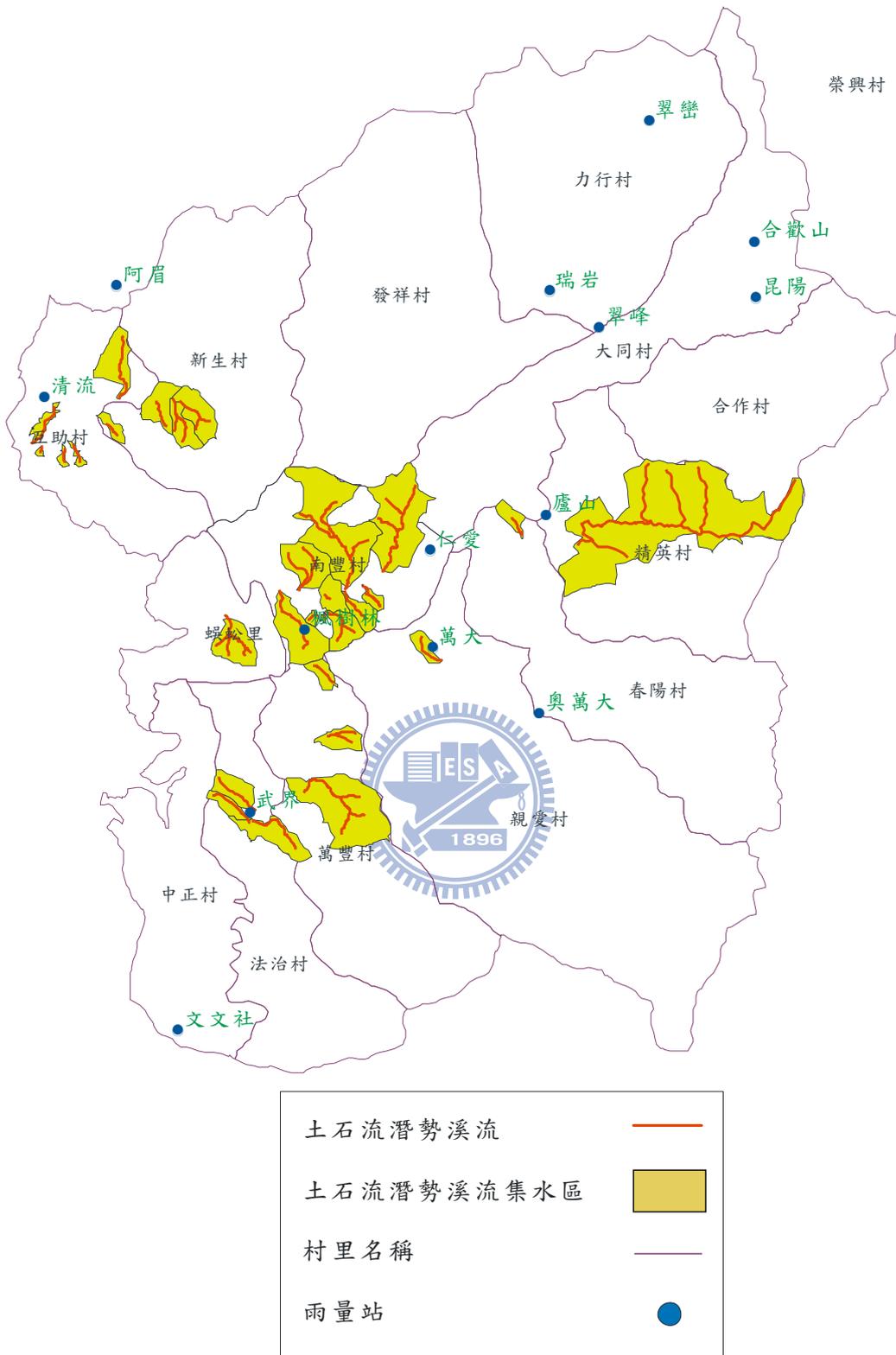


圖 3-3 仁愛鄉集水區劃分成果

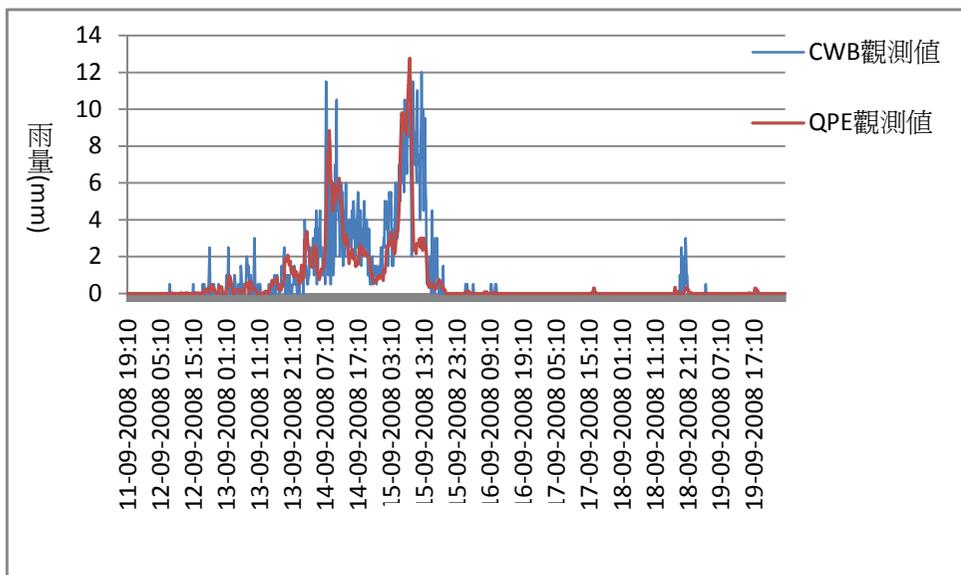


圖 3-4 萬大站(辛樂克颱風)

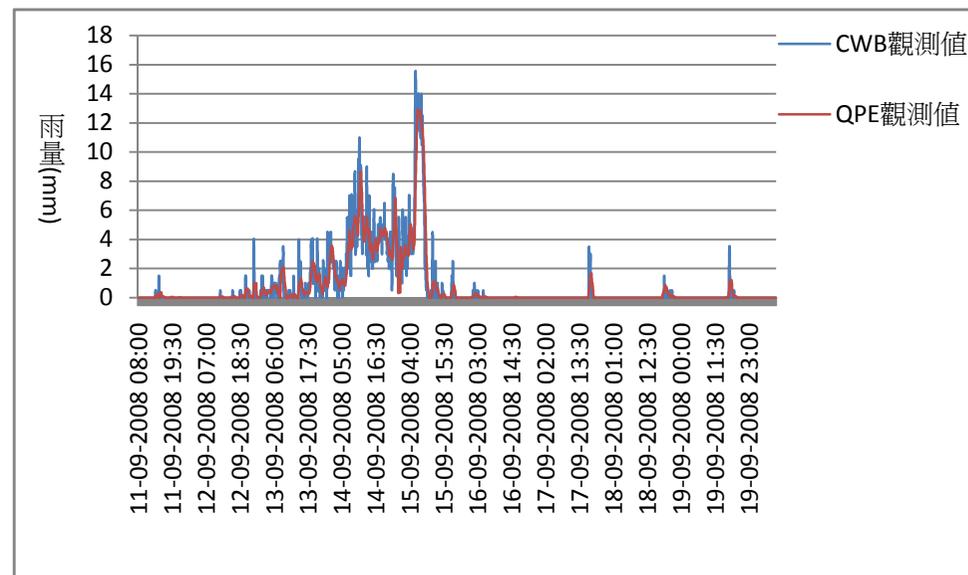


圖 3-5 文文社站(辛樂克颱風)

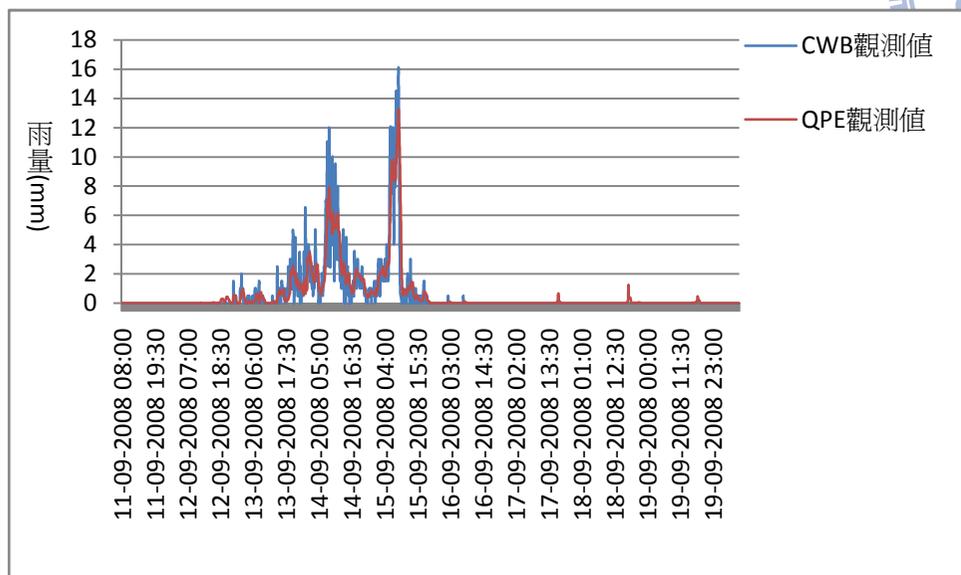


圖 3-6 武界站(辛樂克颱風)

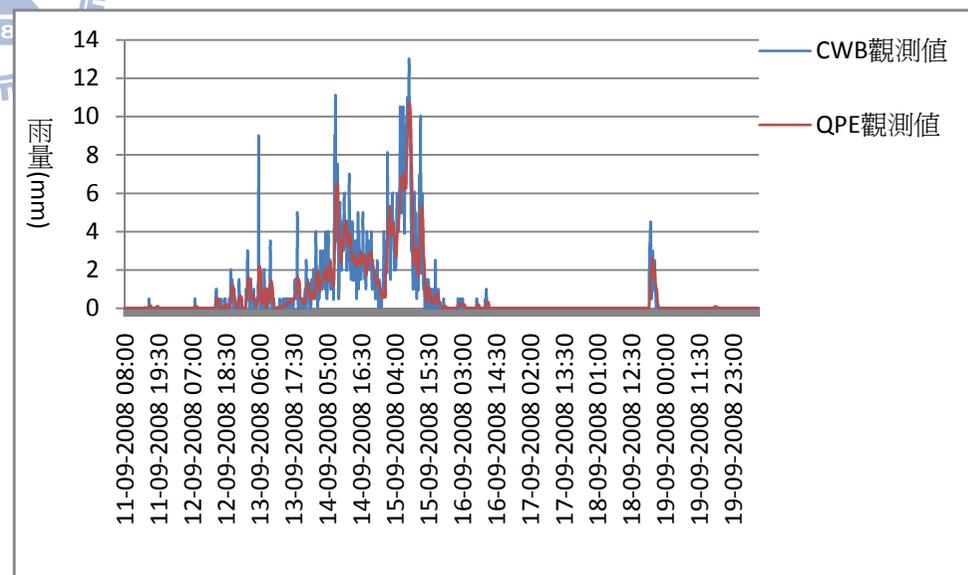
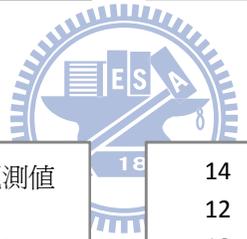


圖 3-7 奧萬大站(辛樂克颱風)



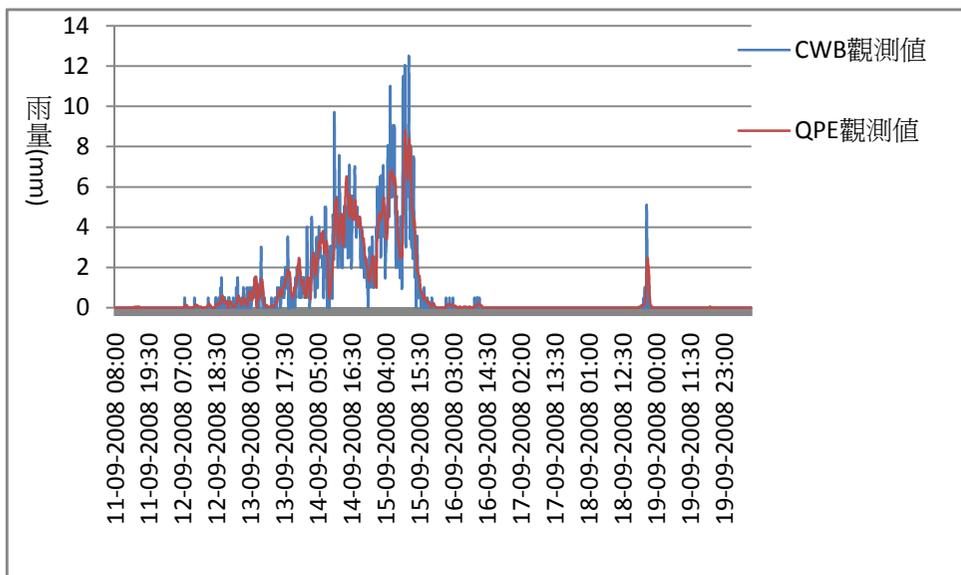


圖 3-8 仁愛站(辛樂克颱風)

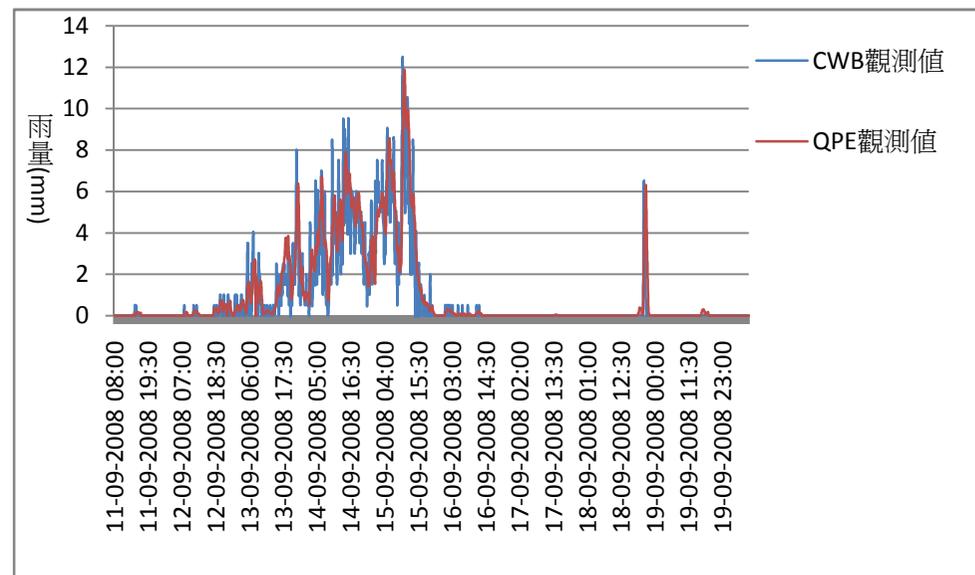


圖 3-9 廬山站(辛樂克颱風)

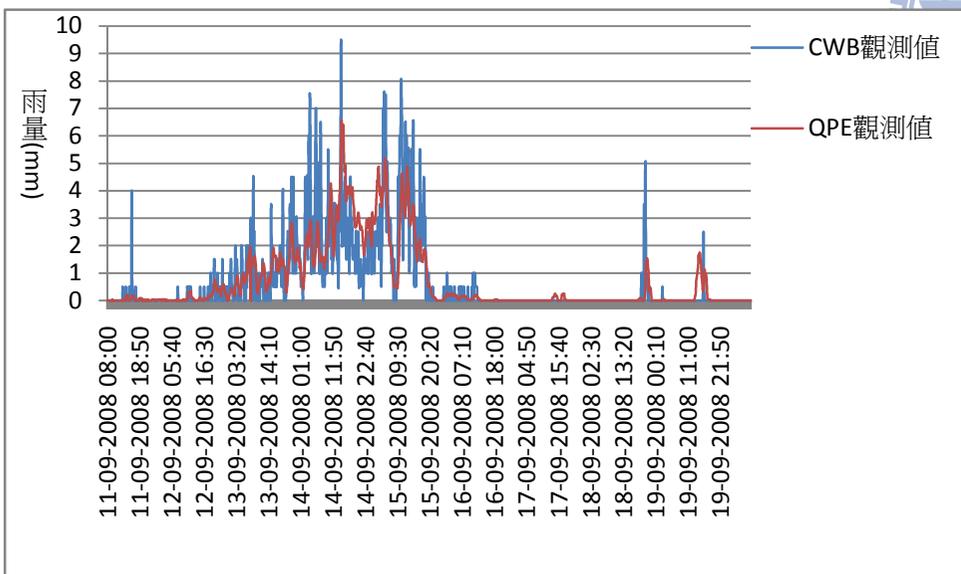


圖 3-10 翠峰站(辛樂克颱風)

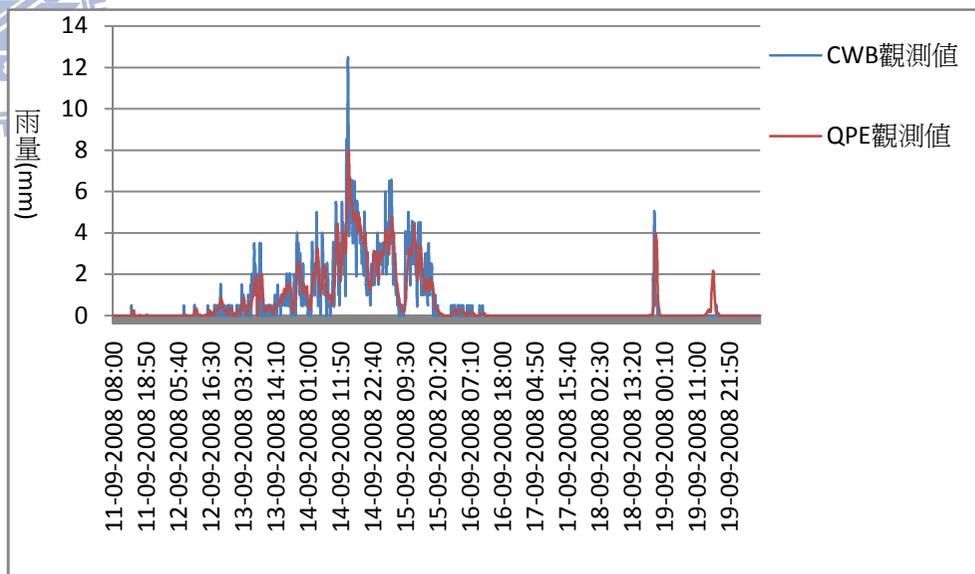


圖 3-11 瑞岩站(辛樂克颱風)

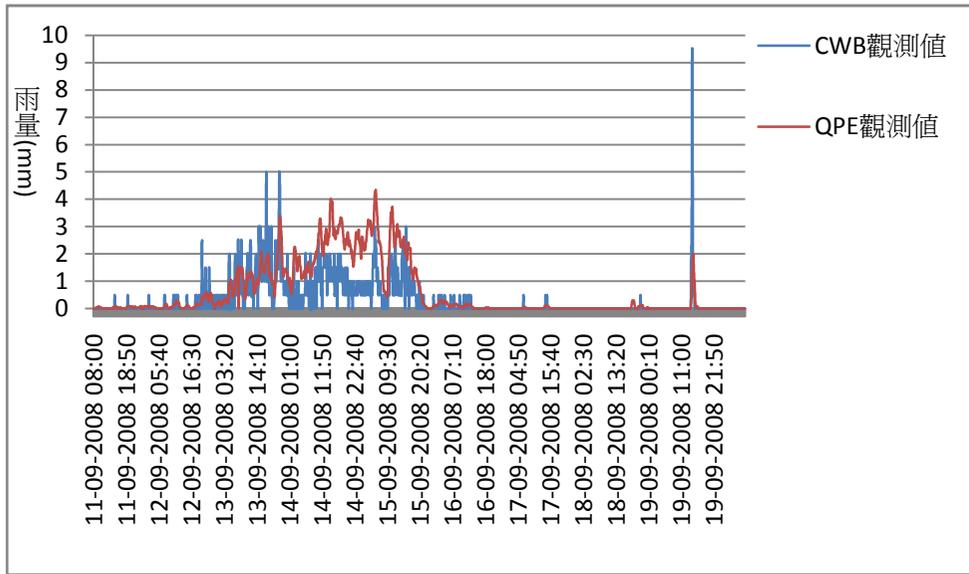


圖 3-12 昆陽站(辛樂克颱風)

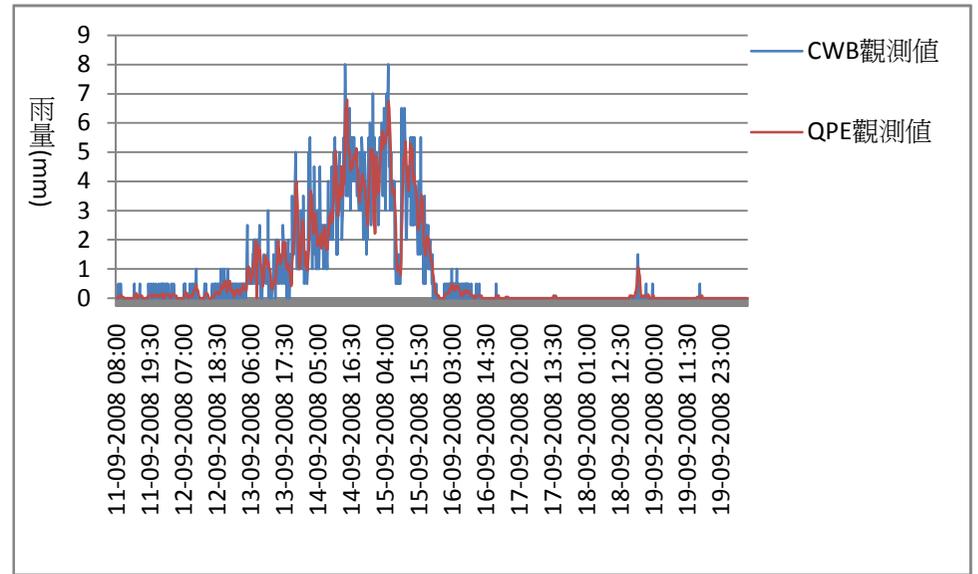


圖 3-13 合歡山站(辛樂克颱風)

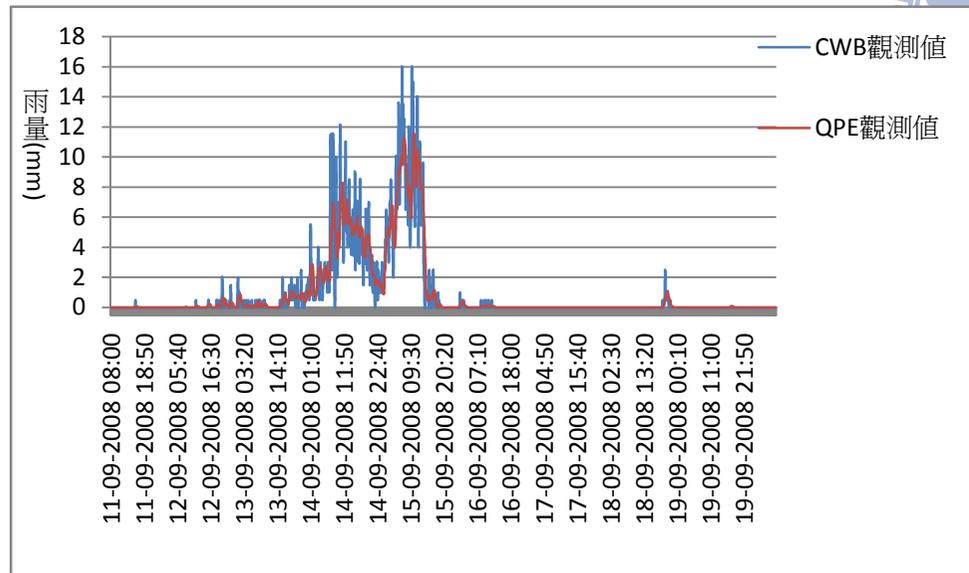


圖 3-14 楓樹林站(辛樂克颱風)

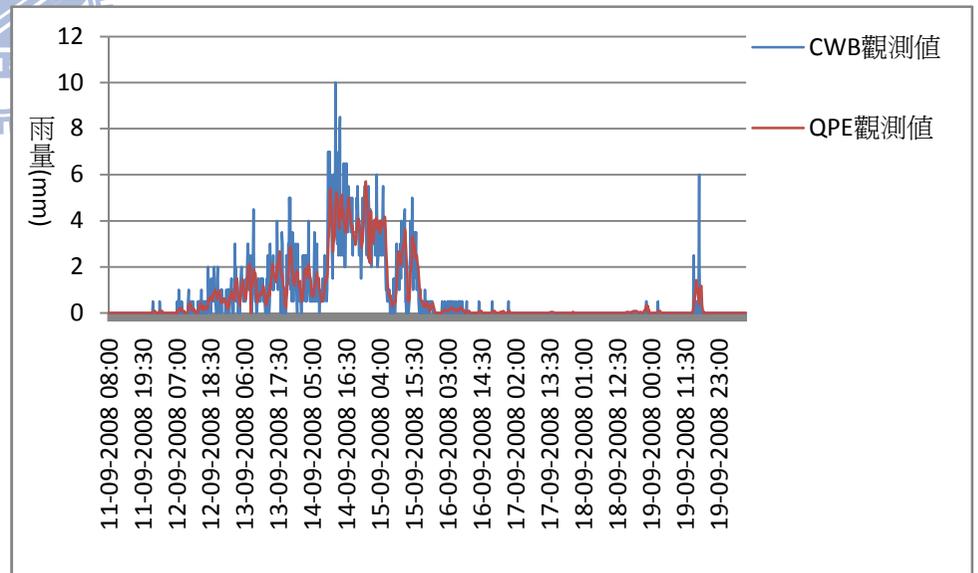


圖 3-15 翠巒(辛樂克颱風)

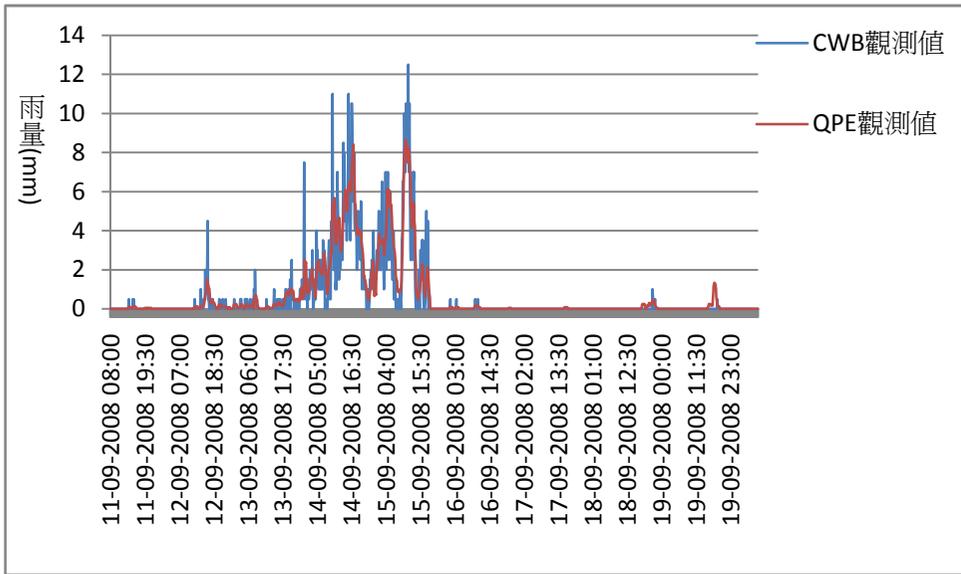


圖 3-16 清流站(辛樂克颱風)

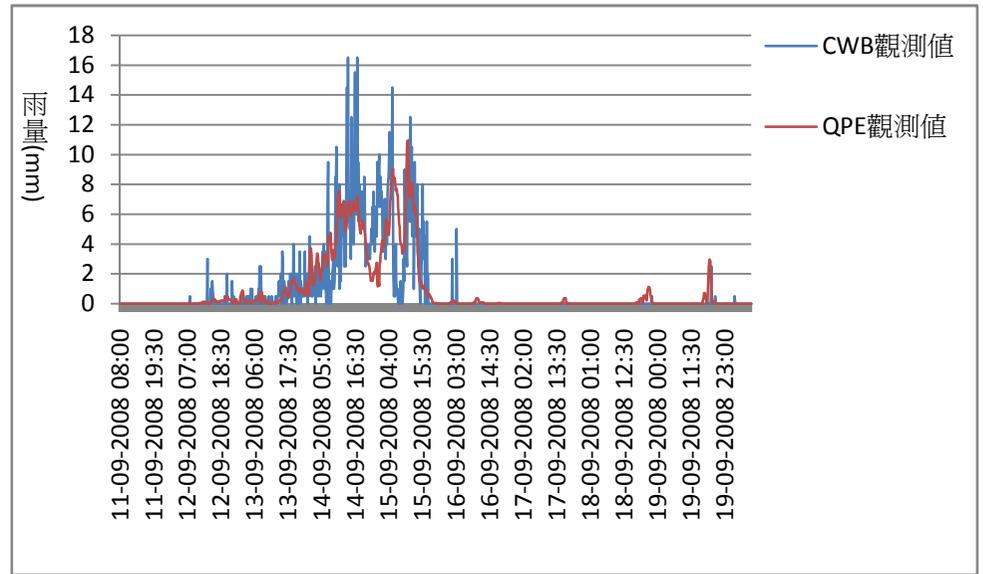


圖 3-17 阿眉站(辛樂克颱風)

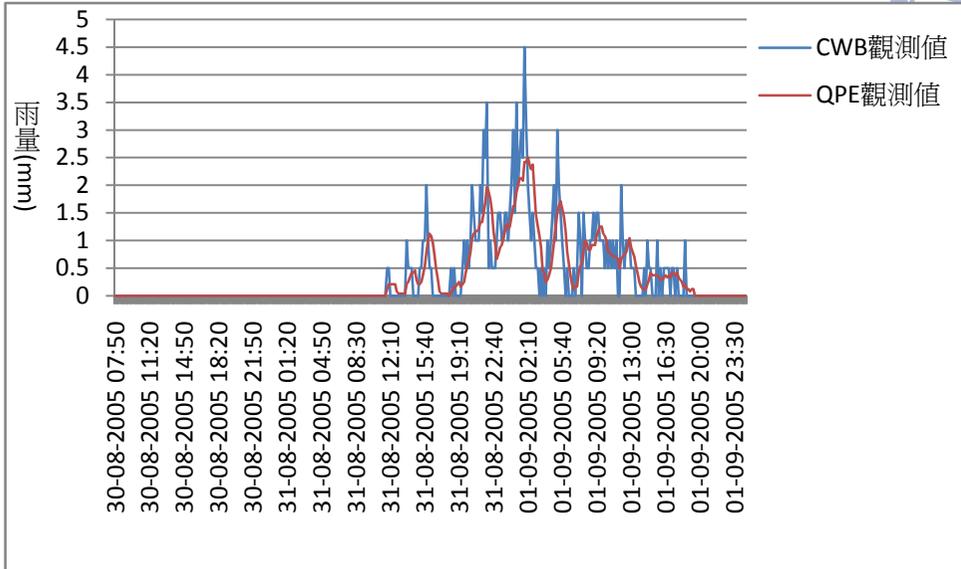


圖 3-18 萬大站(泰利颱風)

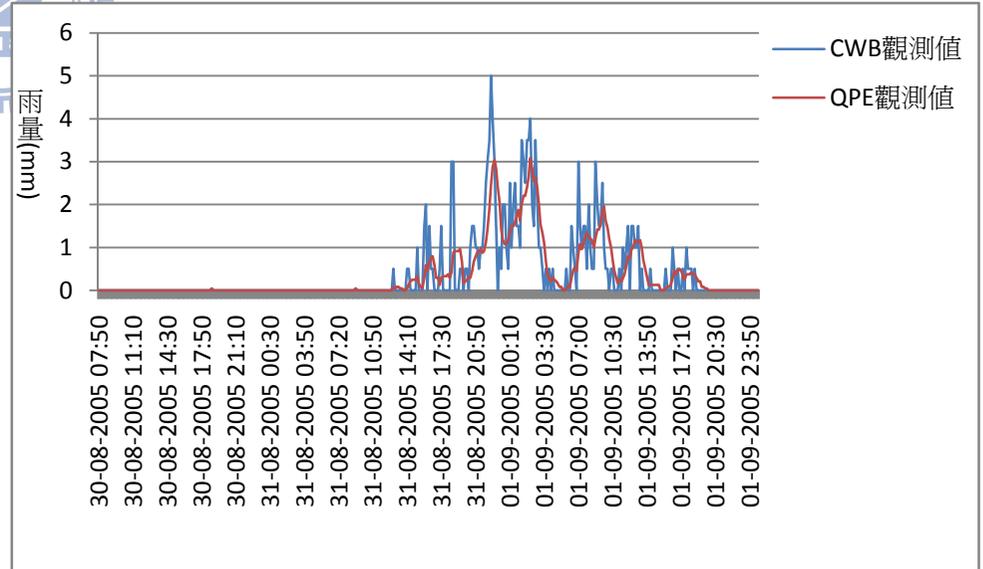


圖 3-19 文文社站(泰利颱風)

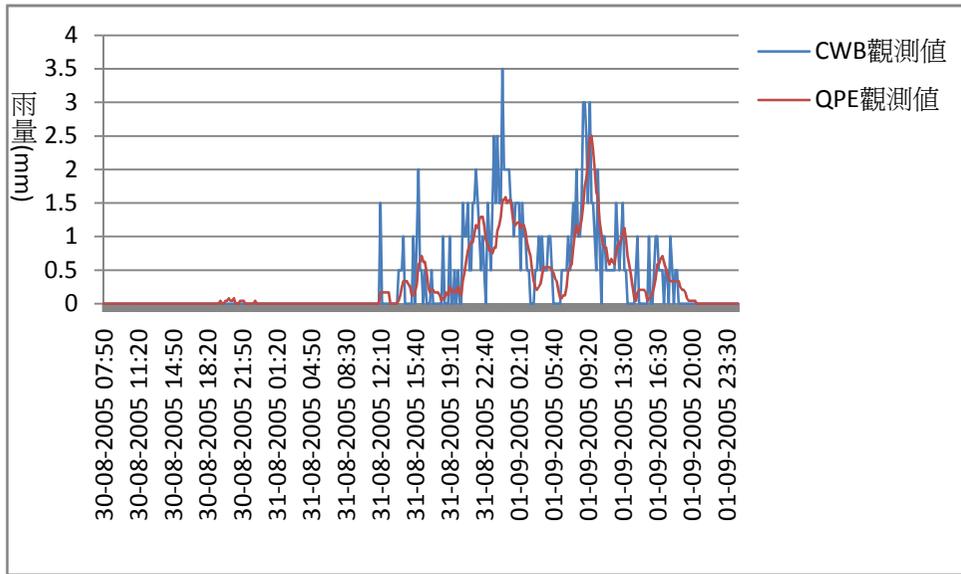


圖 3-20 武界站(泰利颱風)

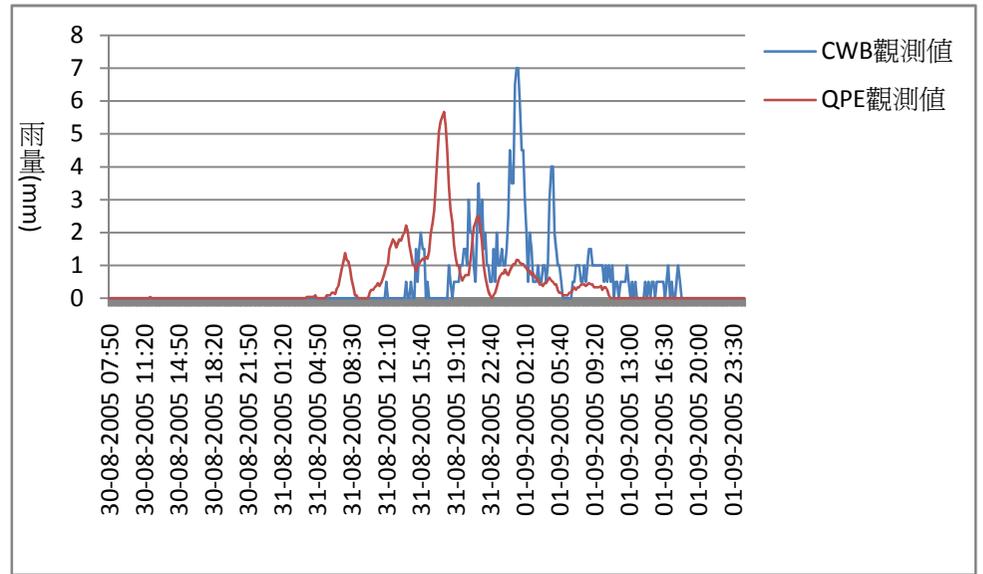


圖 3-21 奧萬大站(泰利颱風)

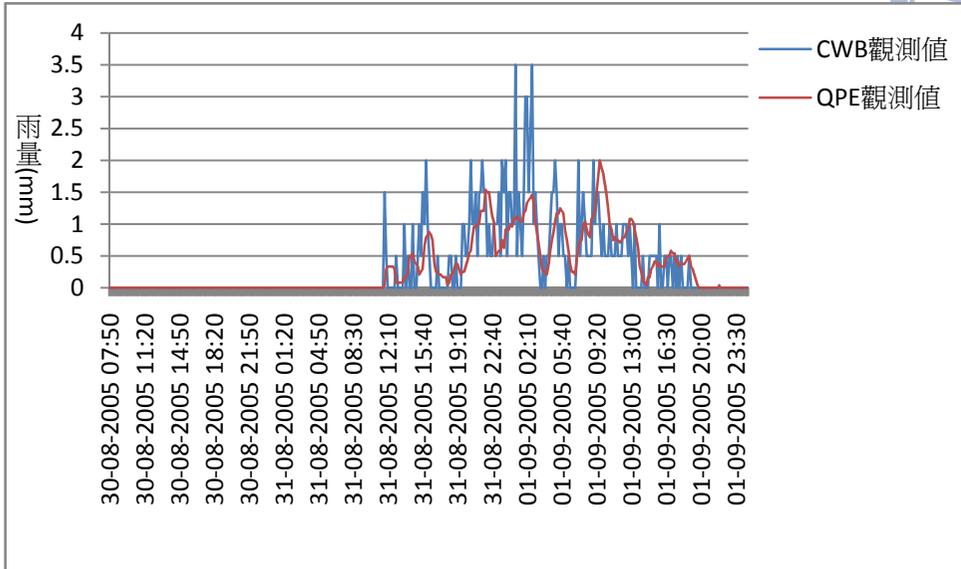


圖 3-22 仁愛站(泰利颱風)

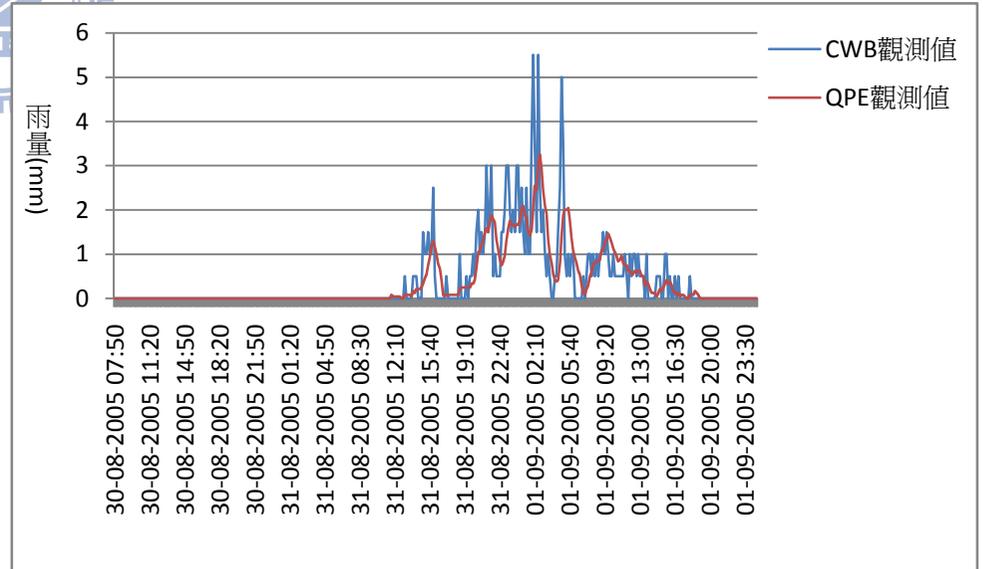


圖 3-23 廬山站(泰利颱風)

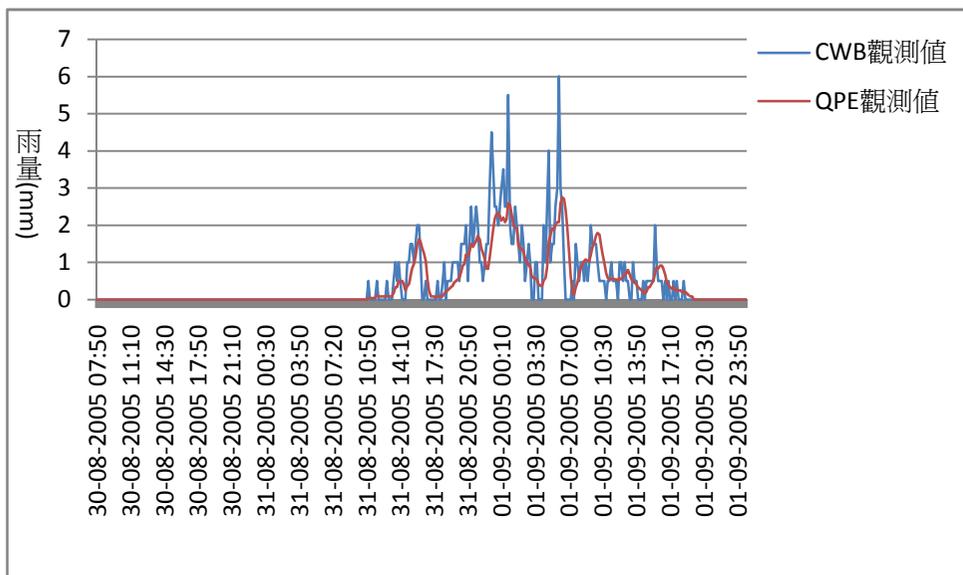


圖 3-24 翠峰站(泰利颱風)

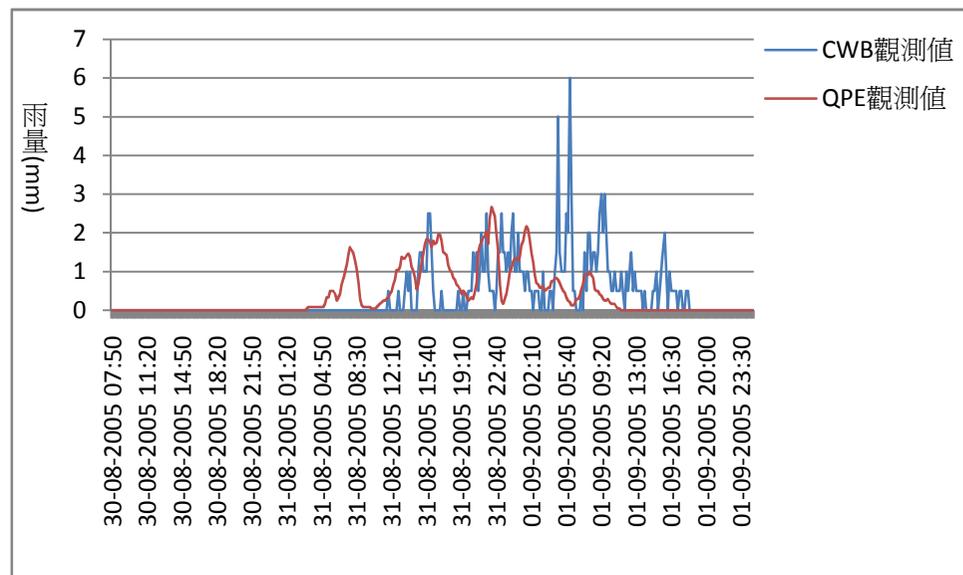


圖 3-25 瑞岩站(泰利颱風)

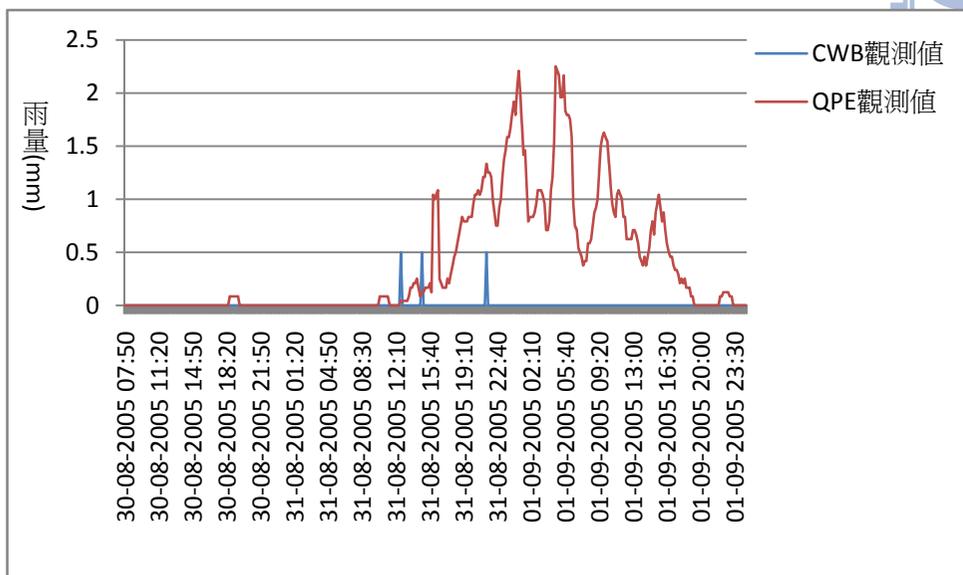


圖 3-26 昆陽站(泰利颱風)

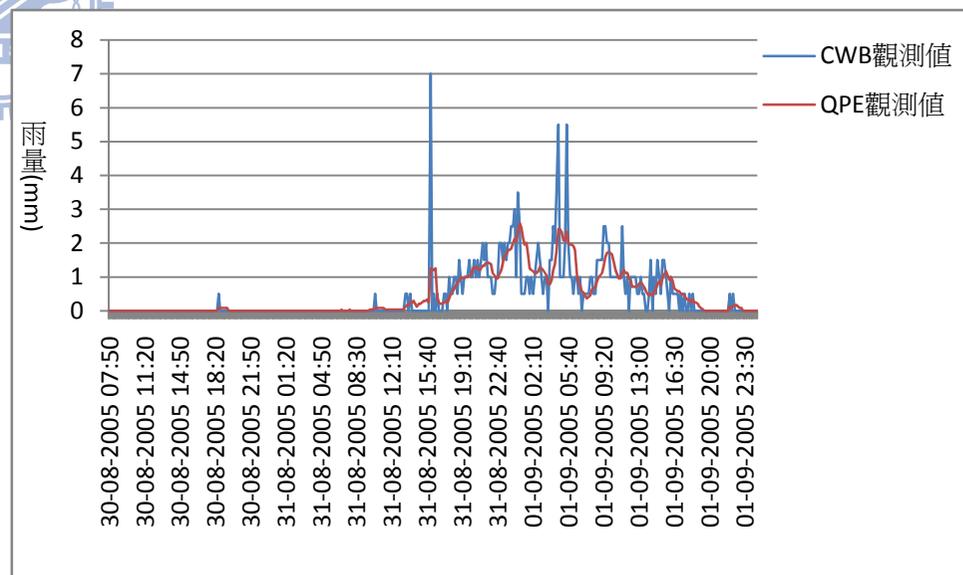


圖 3-27 合歡山站(泰利颱風)

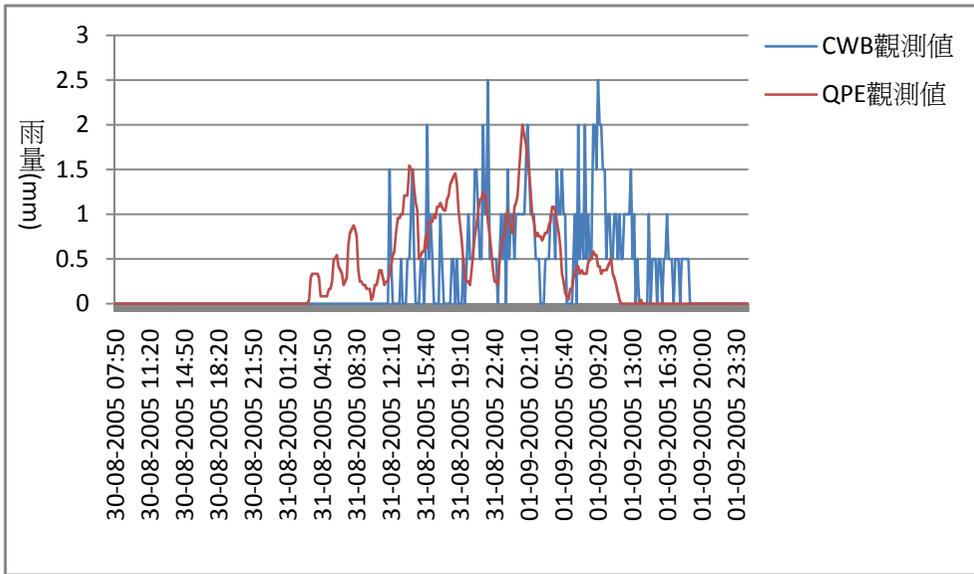


圖 3-28 楓樹林站(泰利颱風)

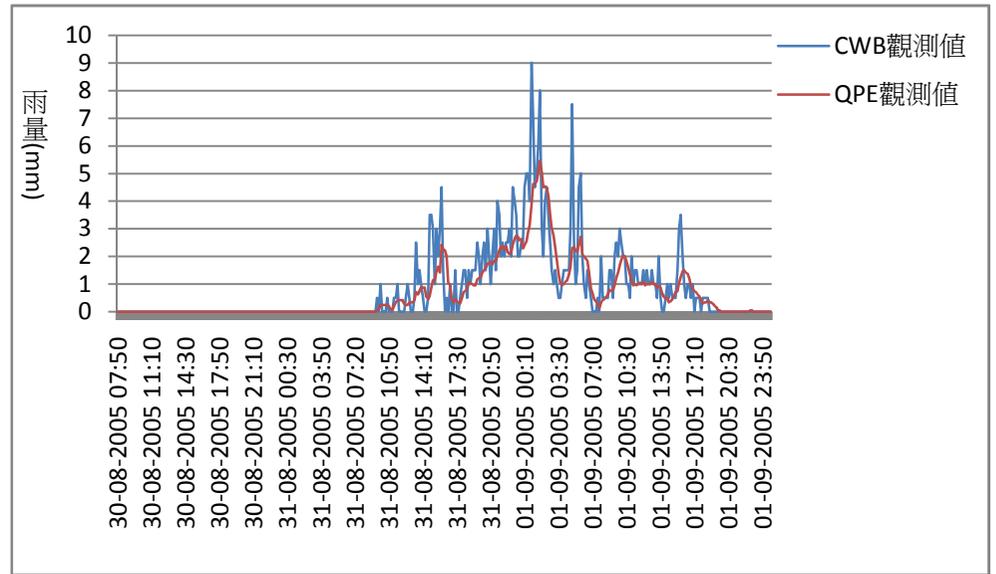


圖 3-29 翠巒站(泰利颱風)

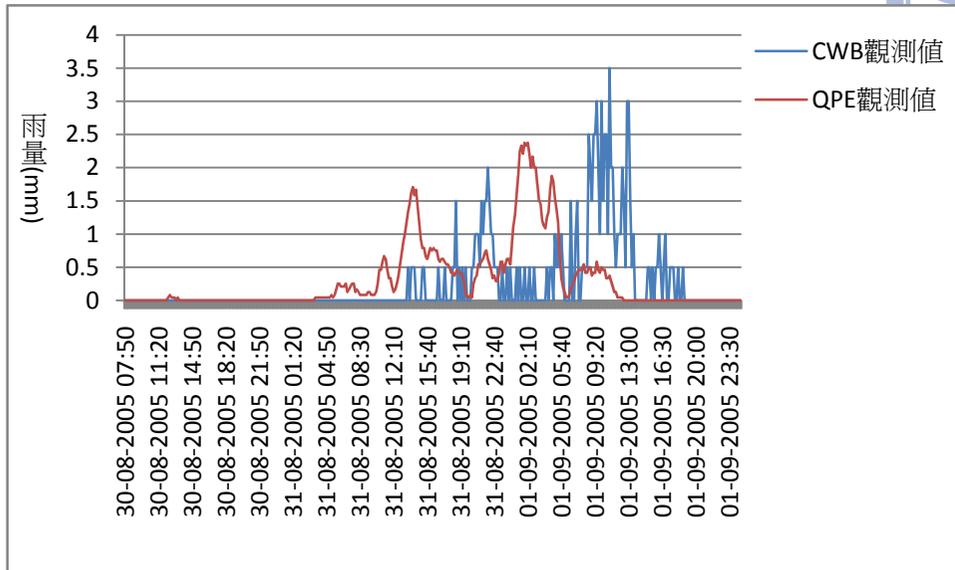


圖 3-30 清流站(泰利颱風)

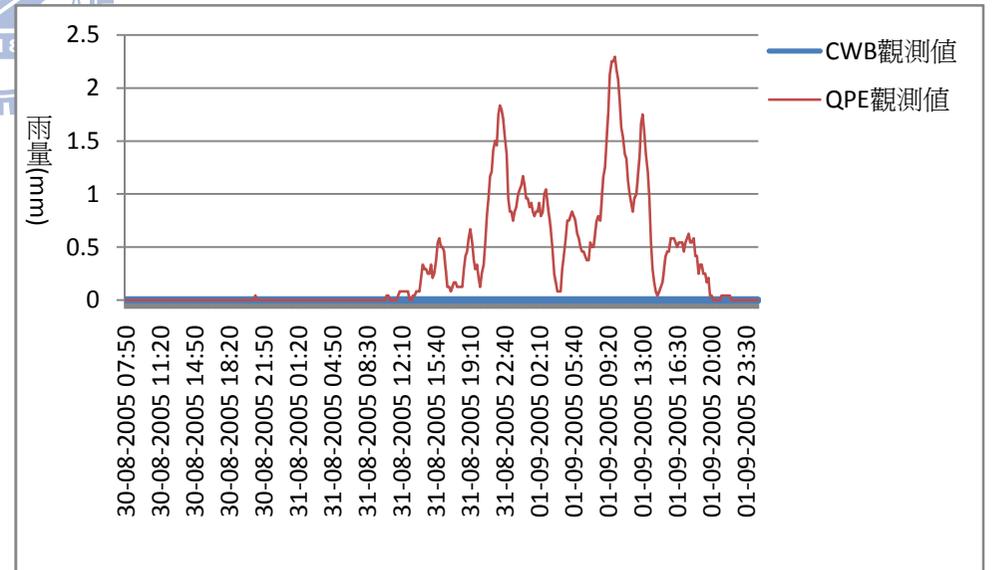


圖 3-31 阿眉站(泰利颱風)

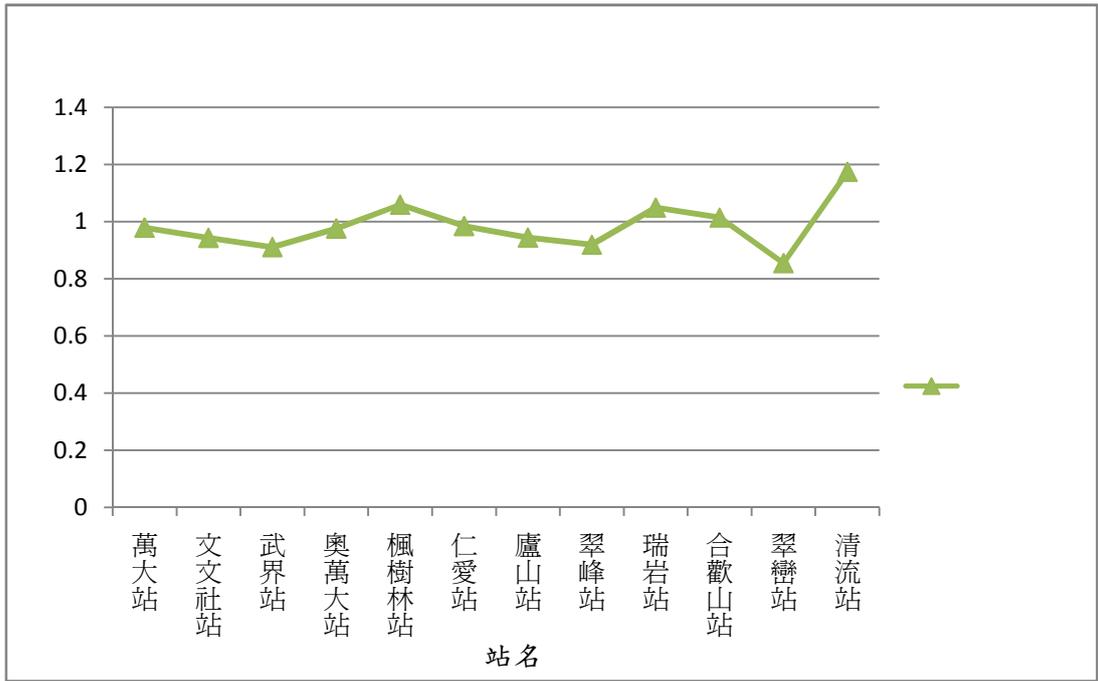


圖 3-32 同一點位上雨量站與 QPESUMS 之總雨量比

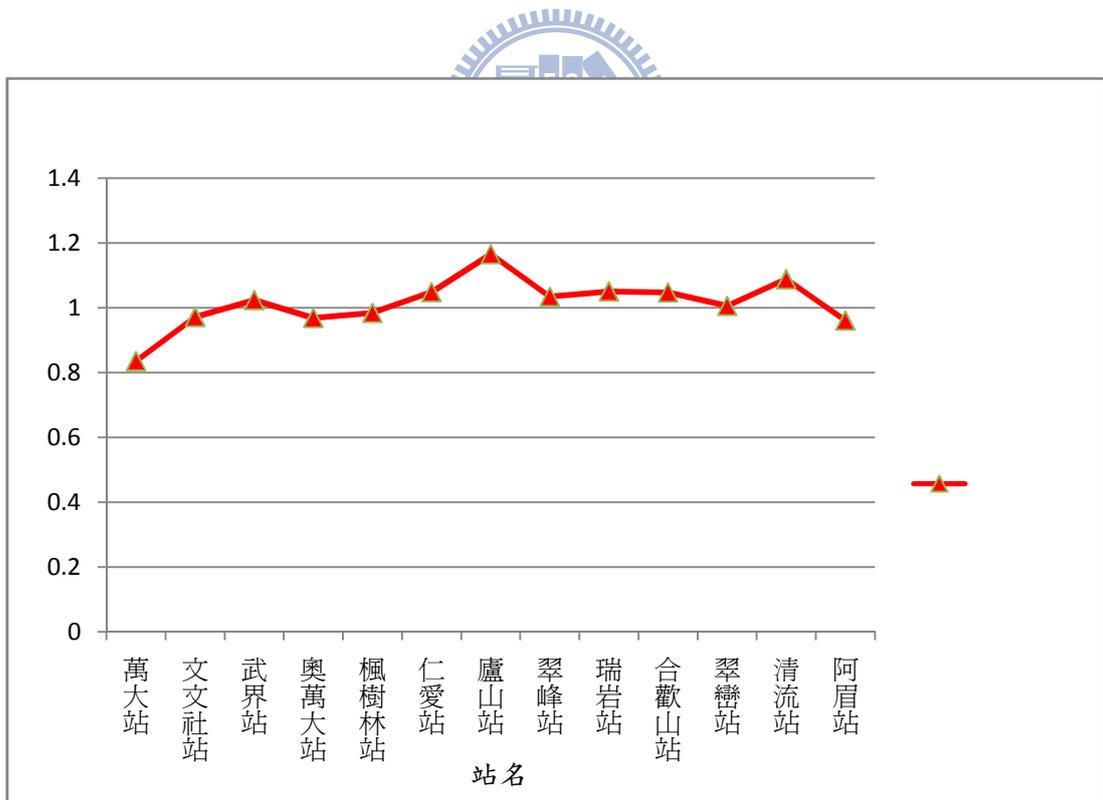
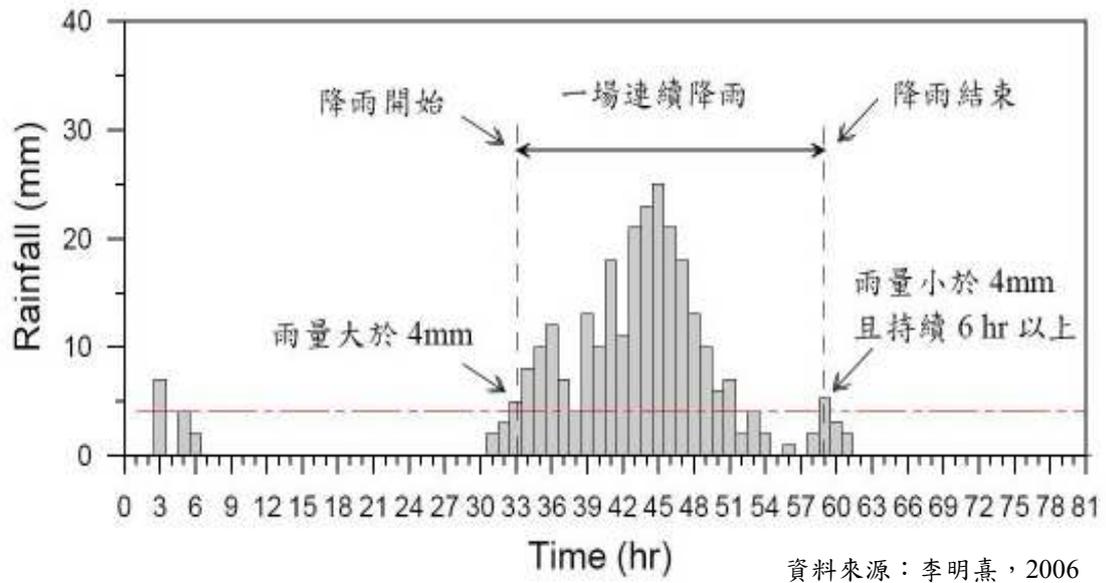


圖 3-33 同一點位上雨量站與 QPESUMS 之總雨量比



資料來源：李明熹，2006

圖 3-34 水保局現行雨場分割法示意圖



第四章 水土整合概念對土石流發生的影響分析

4.1 研究區域概述

根據北水局(2006)『石門水庫集水區航照判釋及地理資訊系統建置』中，石門水庫集水區於艾利颱風後確有發生土石流的溪流，分別為新竹 A042、野溪 2、野溪 3、野溪 4、野溪 5、野溪 6 及野溪 7，如圖 4-1 所示。依其水保局發佈資訊得知，南投仁愛鄉於辛樂克颱風後確有發生土石流的溪流，則為南投 003 及南投 004，如下圖 4-2。

艾利颱風於石門水庫集水區(大溪鎮、復興鄉及尖石鄉土石流警戒雨量依序為 550mm、300mm 及 250mm)及辛樂克颱風於南投仁愛鄉(警戒雨量為 250mm)，其累積雨量均超過土石流警戒雨量，即表示水的來源是無疑慮的，而土石流乃為水、砂之混合體，因此除了考量水的來源外，需進一步探討土砂之來源。因此，本研究藉由坡地崩塌的機率與分布情況，作為土砂來源的分析依據。其石門水庫集水區境內土石流潛勢溪流數化檔，為水保局防災中心所提供。

4.2 集水區劃分

南投仁愛鄉集水區劃分方法於 3.2 節中已做說明，此不再贅述。將石門水庫集水區 DTM 匯入 TAUDEM 中，進行集水區劃分，再依

土石流潛勢溪流及艾利颱風後真正發生之土石流位置選取所需之集水區。其 DTM 資料為水保局 2000 年所製作之地表高程資料，精度為 40m×40m，如圖 4-3，其石門水庫集水區劃分成果，如圖 4-4 所示。

4.3 坡地崩塌模式之參數

以石門水庫集水區及南投仁愛鄉為案例，進行崩塌機率模擬分析，此模式所需之地質參數為坡度、土層厚度、初始地下水位、土壤單位重、土壤凝聚力、土壤內摩擦角及水力傳導係數。

模擬所需之坡度均由地理資訊系統(ArcGIS9.2)分析 DTM 所得。而石門水庫集水區其它地質參數，則引用『石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究之報告書(2008)』中，於艾利颱風後最符合崩塌情況之參數定率與驗證所得之參數，其集水區地質參數平均值如表 4-1 及表 4-2 所示。南投仁愛鄉水力傳導係數則引用王永琪(2004)現地試驗資料，其餘地質參數均採用蔡易達(2003)之現地試驗資料，其集水區地質參數平均值如表 4-3 所示。艾利颱風及辛樂克颱風之模擬時間分別為 2004 年 08 月 23 日 9 點至 25 日 9 與 2008 年 09 月 13 日 20 點至 15 日 19 點。其雨量示意圖如圖 4-5 及圖 4-6 所示。

4.4 石門水庫集水區分析結果

根據蘇歆婷(2007)『降雨引發坡地潛崩塌模式之建立與應用』中，

以安全係數小於 1 表示會崩塌，且 50%崩塌機率之安全係數期望值為 1。因此，此處定義崩塌機率 50%以上之坡地為崩塌潛勢區，則由模擬結果可得石門水庫集水區於艾利颱風後，其土石流潛勢溪流集水區崩塌機率示意圖，如圖 4-7 所示。表 4-4 為各土石流潛勢溪流集水區崩塌機率超過 50%之崩塌面積與崩塌百分比，其中崩塌面積為崩塌機率超過 50%之格點乘上 40m*40m，而崩塌百分比為崩塌面積除以各集水區面積。將崩塌面積可視為土砂來源的量，集水區面積可視為水來源的量，所以崩塌百分比之物理意義有類似體積濃度(土砂/水)之意謂。因此本研究以此觀點為基礎，對其石門水庫集水區與南投仁愛鄉之土石流潛勢溪流進行崩塌百分比之分析。

接續為了分析本研究與水保局土石流研判之正確性，本研究定義一正確率研判指標，如下所示：

	本研究	水保局
正確率	$\frac{\text{真正發生土石流之溪流個數}}{\text{崩塌百分比大於(等於)臨界值的溪流個數}} \times 100\%$	$\frac{\text{真正發生土石流之溪流個數}}{\text{超過警戒雨量之溪流個數}} \times 100\%$

本研究定義臨界值乃為真正發生土石流溪流中的最小崩塌百分比，而石門水庫集水區於艾利颱風後發生之土石流溪流共 7 條，分別為新竹 A042、野溪 2、野溪 3、野溪 4、野溪 5、野溪 6 及野溪 7。由表 4-4 可知，大於(等於)臨界值之崩塌百分比分別為桃園 006、桃園 009、桃園 014、桃園 015、新竹 A041、新竹 A042、野溪 2、野

溪 3、野溪 4、野溪 5、野溪 6 及野溪 7 等 12 條，於表 4-5 得石門水庫集水區於艾利颱風後真正發生土石流溪流的崩塌百分比，依據前述臨界值之依據，可知臨界值為野溪 5 的 2.09。由此可知本研究正確率為 $7/12=58.33\%$ 。於艾利颱風來臨時全部土石流均超過其警戒雨量 (共 35 條)，因此可得水保局正確率為 $7/35=20\%$ 。

進一步彙整各集水區崩塌潛勢區內之崩塌機率分布情形，如圖 4-8 所示。由圖中可知各集水區之崩塌機率主要介於 50%~60% 區間，除了桃園 006、桃園 008、桃園 009、桃園 014、桃園 015、桃園 016、桃園 A041、桃園 A042、新竹 A040 及新竹 A041 集水區之崩塌機率有大於 60% 外，其餘大於 60% 以上之崩塌機率，均為土石流危險溪流真正發生處，由此可知高崩塌機率地區跟土石流之發生有其相對應之關係。然而前述假設大於 50% 即為崩塌，並未考量不同機率的權重，因此提出崩塌面積期望值之概念做為其修正。本研究考量崩塌機率大於 50% 以上之值作為加權，定義崩塌面積期望值、崩塌面積期望值百分比及正確率如下：

$$\text{崩塌面積期望值} = \sum (40\text{m} \times 40\text{m}) \times P_i \quad (P_i: \text{大於 } 50\% \text{ 崩塌機率})$$

$$\text{崩塌面積期望值百分比} = \frac{\text{崩塌面積期望值}}{\text{集水區面積}} \times 100\%$$

	本研究	水保局
正確率	$\frac{\text{真正發生土石流之溪流個數}}{\text{崩塌面積期望值百分比大於(等於)臨界值的溪流個數}} \times 100\%$	$\frac{\text{真正發生土石流之溪流個數}}{\text{超過警戒雨量之溪流個數}} \times 100\%$

利用上述所得之崩塌面積期望值，可進一步分析崩塌面積期望值百分比(崩塌面積期望值/土石流各集水區面積)，此處臨界值定義為真正發生土石流溪流的最小崩塌面積期望值百分比。前述已知石門水庫集水區之真正發生土石流溪流共 7 條，其各別崩塌面積期望值百分比如表 4-6 所示，得知臨界值為新竹 A042 的 1.16。由表 4-7 可得，大於(等於)臨界值之崩塌面積期望值百分比分別為桃園 015、新竹 A040、新竹 A042、野溪 2、野溪 3、野溪 4、野溪 5、野溪 6 及野溪 7 等 9 條，因此本研究正確率為 $7/9=77.77\%$ 。於艾利颱風來臨時全部土石流均超過其警戒雨量值(共 35 條)，所以水保局正確率為 $7/35=20\%$ 。

上述方法雖已考量權重關係，但由圖 4-9 可知上列兩種方法只探討第一區塊(實際發生土石流 \cap 模擬有發生土石流)而已，而在統計學上正確率必須同時滿足第一區塊及第三區塊(實際未發生土石流 \cap 模擬未發生土石流)，於此判斷模擬是否有發生土石流，則採用大於等於真正發生土石流之最小崩塌百分比及最小崩塌面積期望值百分比為基準，其正確率如下所示：

$$\text{正確率} = \frac{\text{實際發生土石流} \cap \text{模擬有發生土石流} + \text{實際未發生土石流} \cap \text{模擬未發生土石流}}{\text{所有土石流}}$$

將表 4-4 與表 4-7 利用統計方法分析可得崩塌百分比正確率為 $(7+23)/35=85.71\%$ ，而崩塌面積期望值百分比正確率為 $(7+27)/35=97.14\%$ 。

4.5 南投仁愛鄉分析結果

為瞭解南投仁愛鄉境內各土石流潛勢溪流集水區之風險機率，示意圖如圖 4-10 所示。可由圖 4-11 和圖 4-12 求得各崩塌機率區間百分比(各崩塌區間格點數/總崩塌格點數)及各崩塌潛勢百分比(各崩塌潛勢區面積/土石流各集水區面積)，而在各崩塌機率區間百分比中，發現崩塌機率隨著機率值之升高而有逐漸增加趨勢，接著由崩塌潛勢百分比中，可發現南投 003(57.54%)、南投 004(54.05%)及南投 063(54.72%)各崩塌潛勢百分比分別為前三名。南投仁愛鄉於辛樂克颱風後真正發生之土石流為南投 003 及南投 004，其崩塌百分比及崩塌面積期望值百分比，如表 4-8 及表 4-9 所示，得知崩塌百分比與崩塌面積期望值百分比之臨界值為南投 004 的 54.54 及南投 004 的 42.72。若依據石門水庫集水區正確率判斷標準，如表 4-10 所示，發現大於(等於)臨界值之崩塌百分比及崩塌面積期望值百分比，均為南投 003、南投 004 及南投 063，依正確率定義可知其正確率均為 $2/3=66.67\%$ 。其累積雨量均超過警戒雨量值(共 29 條)，得知水保局之正確率則為 $2/29=6.90\%$ 。進一步以統計學方法做分析(考量第三區塊)，可

知臨界值之崩塌百分比及崩塌面積期望值百分比為南投 004 的 54.05 及 42.72，因此崩塌百分比正確率為 $(2+26)/29=96.55\%$ ，而崩塌面積期望值百分比正確率則為 $(2+26)/29=96.55\%$ 。

接續利用上述方法對海棠颱風進行驗證比較(真正發生之土石流為南投 002)，由表 4-11 可知未考量權重時，本研究崩塌百分比正確率為 $1/19=5.26\%$ (水保局為 $1/29=3.45\%$)；若考量權重則崩塌面積期望值百分比正確率為 $1/17=5.88\%$ (水保局為 $1/29=3.45\%$)；再依據統計方法做分析可求解崩塌面積百分比正確率為 $(1+10)/29=37.93\%$ ，而崩塌面積期望值百分比正確率則為 $(1+12)/29=44.83\%$ 。



表 4-1 石門水庫集水區各潛勢溪流地文參數(1)

土石流 編號	集水區平均 坡度(度)	初始地下水水 位平均值(m)	土壤單位重平 均值(N/m ³)	凝聚力平均 值(N/m ²)	內摩擦角 平均值(度)	水力傳導係數 平均值(m/s)	土層厚度 (m)
桃園 003	25.15	3.859	19164.71	13536.93	35.64	2.66E-05	3.859
桃園 004	22.87	4.022	19400.00	12227.26	34.98	2.5E-05	4.022
桃園 005	26.69	3.748	18510.89	16032.57	34.64	2.51E-05	3.748
桃園 006	25.27	3.850	19400.00	12488.30	36.05	2.67E-05	3.850
桃園 007	24.09	3.935	19400.00	12384.72	35.65	2.61E-05	3.935
桃園 008	26.84	3.738	19395.54	12561.83	36.20	2.7E-05	3.738
桃園 009	32.59	3.326	18822.45	15346.50	35.89	2.6E-05	3.326
桃園 010	35.83	3.094	20006.23	22779.31	35.27	2.51E-05	3.094
桃園 011	34.04	3.222	19618.67	20170.38	35.25	2.56E-05	3.222
桃園 012	31.12	3.431	18999.24	15743.45	35.06	2.52E-05	3.431
桃園 013	29.22	3.567	18880.40	15897.82	34.71	2.63E-05	3.567
桃園 014	29.82	3.567	18414.36	16375.08	34.65	2.62E-05	3.524
桃園 015	36.42	3.052	18913.37	16182.93	35.29	2.53E-05	3.052
桃園 016	34.76	3.171	18976.54	16214.70	34.89	2.61E-05	3.171
桃園 017	29.44	3.552	19396.99	12731.81	37.50	2.77E-05	3.552
桃園 018	25.53	3.832	21217.01	28111.35	31.20	2.55E-05	3.832
桃園 A033	19.78	4.243	19137.71	22549.83	33.50	2.58E-05	4.243
桃園 A034	19.08	4.293	19100.00	23675.35	33.04	2.55E-05	4.293
桃園 A035	16.53	4.476	20174.81	11605.66	30.89	2.47E-05	4.476
桃園 A037	16.37	4.487	20772.00	22132.52	28.24	2.51E-05	4.487
桃園 A038	16.35	4.489	21500.00	35344.67	25.43	2.57E-05	4.489
桃園 A039	22.35	4.059	20280.00	17402.05	32.49	2.63E-05	4.059
桃園 A040	24.52	3.904	19686.63	14245.22	35.83	2.73E-05	3.904
桃園 A041	20.6	4.185	19070.35	11599.96	33.59	2.57E-05	4.185
桃園 A042	28.34	3.630	19585.14	13710.50	36.48	2.69E-05	3.630
桃園 A043	34.58	3.184	19826.92	15783.46	36.61	2.94E-05	3.184
新竹 A040	30	3.512	20271.58	17429.84	32.84	2.72E-05	3.512
新竹 A041	30.21	3.496	19022.38	19199.20	34.06	2.57E-05	3.496
新竹 A042	29.36	3.557	19168.86	14074.70	37.13	2.78E-05	3.557
野溪 2	35.97	3.084	19557.83	14260.41	38.21	3.01E-05	3.084
野溪 3	31.03	3.438	20300.00	16980.24	31.66	2.51E-05	3.438
野溪 4	34.93	3.159	20289.66	17789.52	33.03	2.68E-05	3.159

表 4-2 石門水庫集水區各潛勢溪流地文參數(2)

土石流 編號	集水區平均 坡度(度)	初始地下水水 位平均值(m)	土壤單位重平 均值(N/m ³)	凝聚力平均 值(N/m ²)	內摩擦角 平均值(度)	水力傳導係數 平均值(m/s)	土層厚度 (m)
野溪 5	21.39	4	19791.14	20784.58	30.87	2.59E-05	4.128476
野溪 6	39.91	2.802	18777.66	15129.85	35.50	2.79E-05	2.802
野溪 7	29.12	3.575	19400.00	12765.49	36.47	2.92E-05	3.575

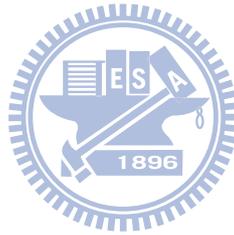


表 4-3 仁愛鄉各地質參數

縣市	鄉鎮	土石流編號	集水區平均坡度(度)	土壤單位重平均值(N/m ³)	凝聚力平均值(N/m ²)	內摩擦角平均值(度)	水力傳導係數(m/s)	土層厚度平均值(m)	初始地下水水位平均值(m)
南投縣	仁愛鄉	南投 001	32.604	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 002	23.421	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 003	35.71	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 004	34.231	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 005	33.938	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 006	32.605	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 008	27.097	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 011	32.773	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 014	25.188	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 018	30.458	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 019	29.254	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 058	29.966	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 059	27.615	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 060	24.624	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 061	30.742	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 062	29.435	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 063	34.673	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 064	32.52	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A001	29.605	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A002	31.6	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A003	24.008	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A004	29.895	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A005	34.437	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A006	32.539	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A008	33.387	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
		南投 A013	30.14	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00
南投 A014	23.968	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00		
南投 A022	13.57	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00		
南投 A106	30.22	18032.00	17493.00	27.26	5.56E-05	4.00	4.00		

表 4-4 艾利颱風後石門水庫集水區崩塌百分比

集水區	崩塌面積(ha)	崩塌百分比(%)
桃園 003	0.96	1.31
桃園 004	0.00	0.00
桃園 005	1.44	0.81
桃園 006	4.80	3.60
桃園 007	0.16	0.63
桃園 008	0.48	1.34
桃園 009	3.20	3.48
桃園 010	0.96	0.63
桃園 011	0.48	0.60
桃園 012	0.96	0.76
桃園 013	0.96	0.99
桃園 014	2.40	2.77
桃園 015	23.04	9.01
桃園 016	0.8	1.40
桃園 017	0.32	0.61
桃園 018	0.00	0.00
桃園 A033	0.00	0.00
桃園 A034	0.00	0.00
桃園 A035	0.16	0.78
桃園 A037	0.00	0.00
桃園 A038	0.00	0.00
桃園 A039	0.00	0.00
桃園 A040	0.32	0.58
桃園 A041	0.16	0.57
桃園 A042	1.60	0.73
桃園 A043	0.48	1.29
新竹 A040	0.32	2.04
新竹 A041	16.32	2.30
新竹 A042	0.96	2.22
野溪 2	1.44	5.59
野溪 3	0.80	6.26
野溪 4	0.32	2.29
野溪 5	0.48	2.09
野溪 6	5.92	20.13
野溪 7	1.76	5.44

表 4-5 艾利颱風後真正發生土石流溪流之崩塌百分比

集水區	崩塌百分比(%)
新竹 A042	2.22
野溪 2	5.59
野溪 3	6.26
野溪 4	2.29
野溪 5	2.09
野溪 6	20.13
野溪 7	5.44



表 4-6 艾利颱風後真正發生土石流溪流之崩塌面積期望值百分比

集水區	崩塌面積期望值百分比(%)
新竹 A042	1.16
野溪 2	3.50
野溪 3	3.74
野溪 4	1.42
野溪 5	1.38
野溪 6	11.86
野溪 7	3.71

表 4-7 石門水庫集水區相對應之崩塌面積期望值百分比

集水區	崩塌面積期望值百分比(%)
桃園 003	0.68
桃園 004	0.00
桃園 005	0.14
桃園 006	0.66
桃園 007	0.32
桃園 008	0.93
桃園 009	1.12
桃園 010	0.11
桃園 011	0.10
桃園 012	0.13
桃園 013	0.17
桃園 014	0.57
桃園 015	1.56
桃園 016	0.80
桃園 017	0.31
桃園 018	0.00
桃園 A033	0.00
桃園 A034	0.00
桃園 A035	0.39
桃園 A037	0.00
桃園 A038	0.00
桃園 A039	0.00
桃園 A040	0.29
桃園 A041	0.35
桃園 A042	0.42
桃園 A043	0.67
新竹 A040	1.16
新竹 A041	0.47
新竹 A042	1.16
野溪 2	3.50
野溪 3	3.74
野溪 4	1.42
野溪 5	1.38
野溪 6	11.86
野溪 7	3.71

表 4-8 辛樂克颱風後仁愛鄉崩塌百分比

集水區	崩塌百分比(%)
南投 003	57.54
南投 004	54.05

表 4-9 辛樂克颱風後真正發生土石流之崩塌面積期望值百分比

集水區	崩塌面積期望值百分比(%)
南投 003	45.21
南投 004	42.72

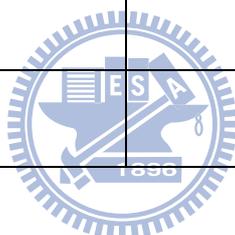
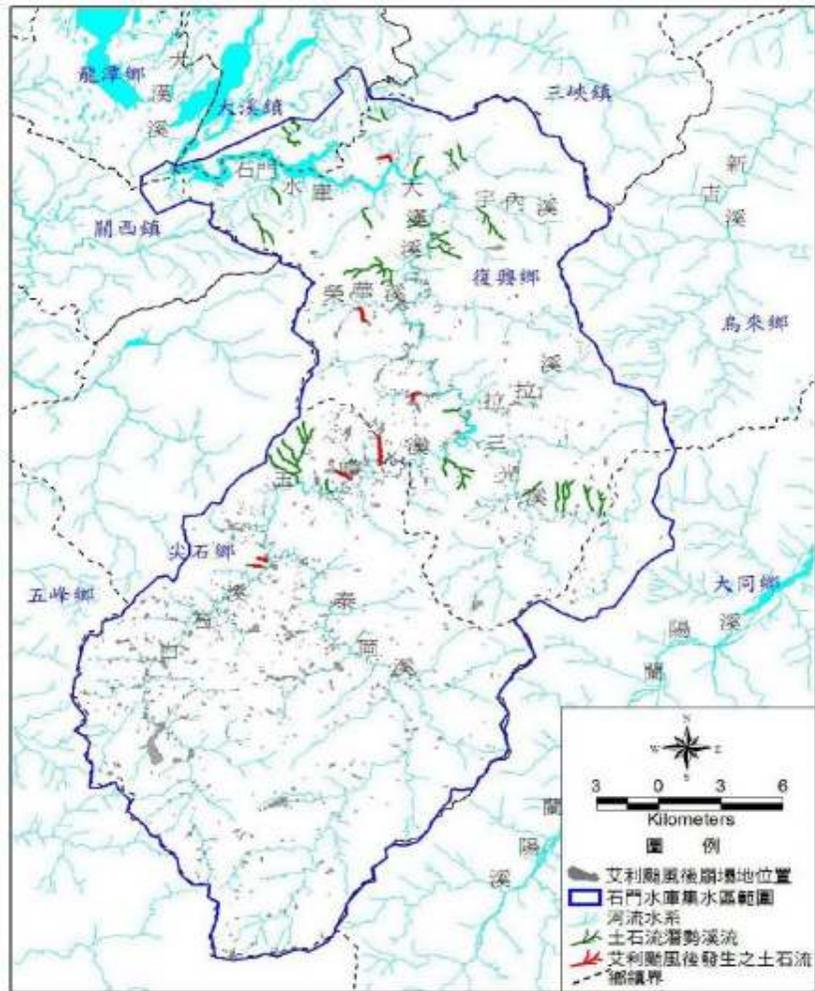


表 4-10 辛樂克颱風於仁愛鄉崩塌百分比及崩塌面積期望值百分比

縣市	鄉鎮	土石流 編號	崩塌 百分比(%)	崩塌面積期望值百分比(%)
南投縣	仁愛鄉	南投 001	45.30	34.87
		南投 002	29.36	22.05
		南投 003	57.54	45.21
		南投 004	54.05	42.72
		南投 005	49.69	38.11
		南投 006	47.16	36.07
		南投 008	28.21	21.06
		南投 011	48.39	37.53
		南投 014	27.66	20.25
		南投 018	40.92	30.50
		南投 019	34.15	26.39
		南投 058	47.25	36.07
		南投 059	41.32	32.44
		南投 060	33.17	26.03
		南投 061	37.63	29.06
		南投 062	39.75	31.40
		南投 063	54.72	43.96
		南投 064	50.56	39.21
		南投 A001	37.36	28.41
		南投 A002	43.41	33.38
		南投 A003	26.40	20.27
		南投 A004	34.19	26.75
		南投 A005	53.29	40.72
		南投 A006	47.68	36.97
		南投 A008	48.75	37.77
		南投 A013	39.92	30.17
		南投 A014	26.48	19.64
南投 A022	14.96	10.81		
南投 A106	48.48	36.96		

表 4-11 海棠颱風於仁愛鄉崩塌百分比及崩塌面積期望值百分比

縣市	鄉鎮	土石流 編號	崩塌 百分比(%)	崩塌面積期望值百分比(%)
南投縣	仁愛鄉	南投 001	28.81	17.33
		南投 002	16.84	11.11
		南投 003	37.33	26.95
		南投 004	36.70	25.56
		南投 005	20.21	14.59
		南投 006	24.79	15.61
		南投 008	6.93	4.91
		南投 011	23.80	15.23
		南投 014	3.52	2.96
		南投 018	4.84	3.56
		南投 019	6.80	4.82
		南投 058	12.36	8.54
		南投 059	18.18	12.12
		南投 060	13.69	9.46
		南投 061	16.86	11.02
		南投 062	22.48	15.13
		南投 063	40.33	30.14
		南投 064	26.86	16.75
		南投 A001	22.52	15.42
		南投 A002	25.04	15.89
		南投 A003	10.96	8.26
		南投 A004	25.07	15.90
		南投 A005	27.57	17.12
		南投 A006	22.18	15.19
		南投 A008	23.99	15.36
		南投 A013	11.76	8.94
		南投 A014	4.12	3.31
		南投 A022	1.40	0.98
南投 A106	13.38	9.38		



資料來源:石門水庫集水區航照判釋及地理資訊查詢系統建置成果報告

圖 4-1 艾利颱風後土石流發生處(石門水庫集水區)

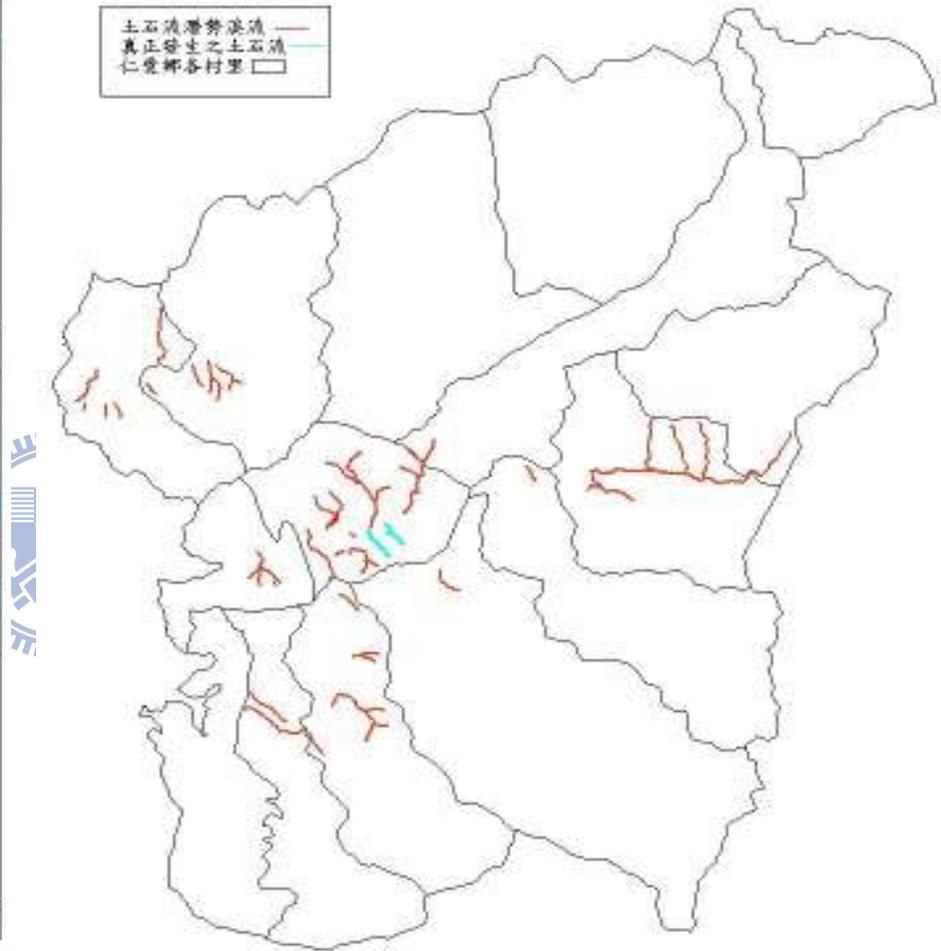


圖 4-2 辛樂克颱風後土石流發生處(南投仁愛鄉)



圖 4-3 石門水庫集水區 DTM

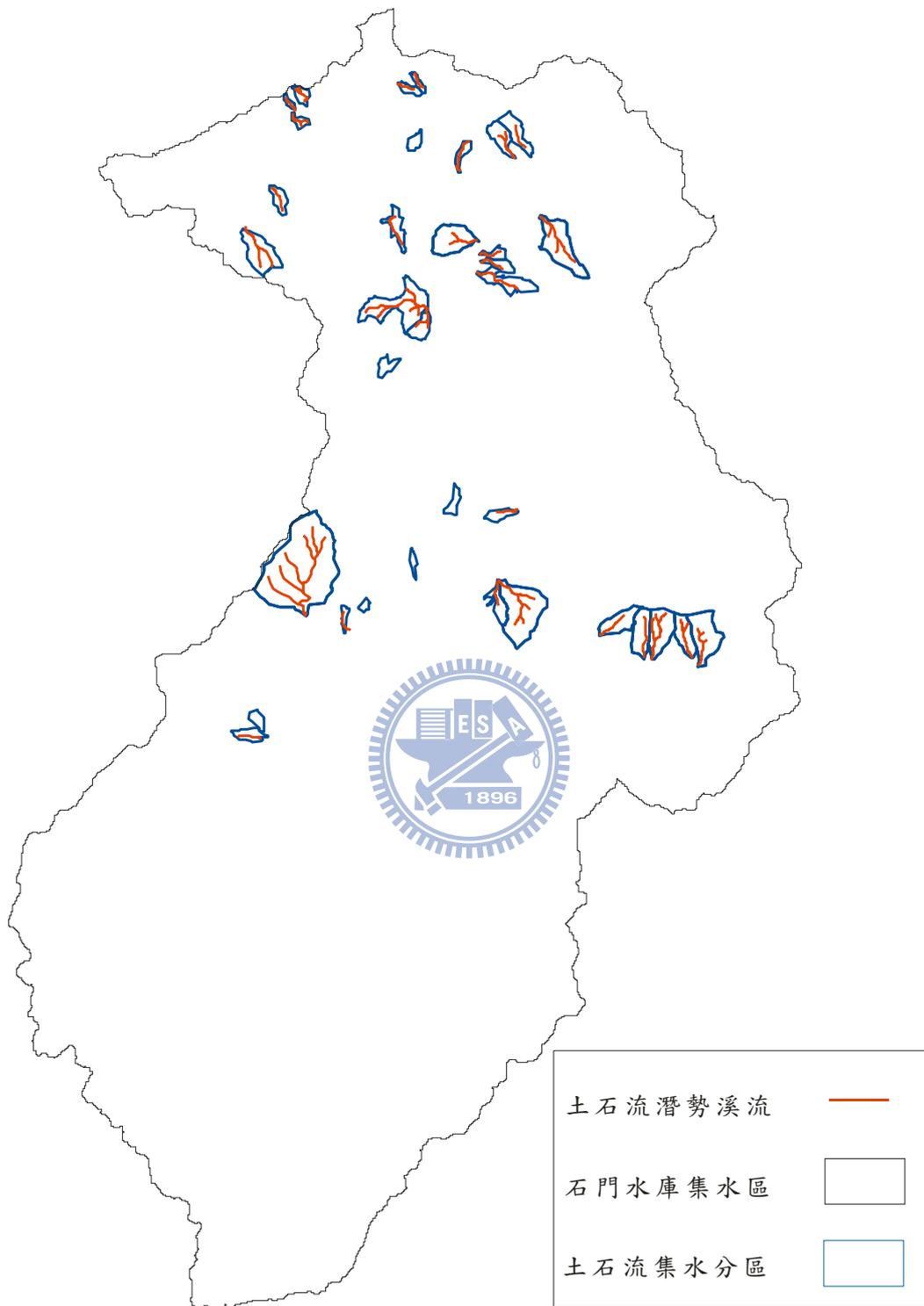


圖 4-4 集水區劃分成果

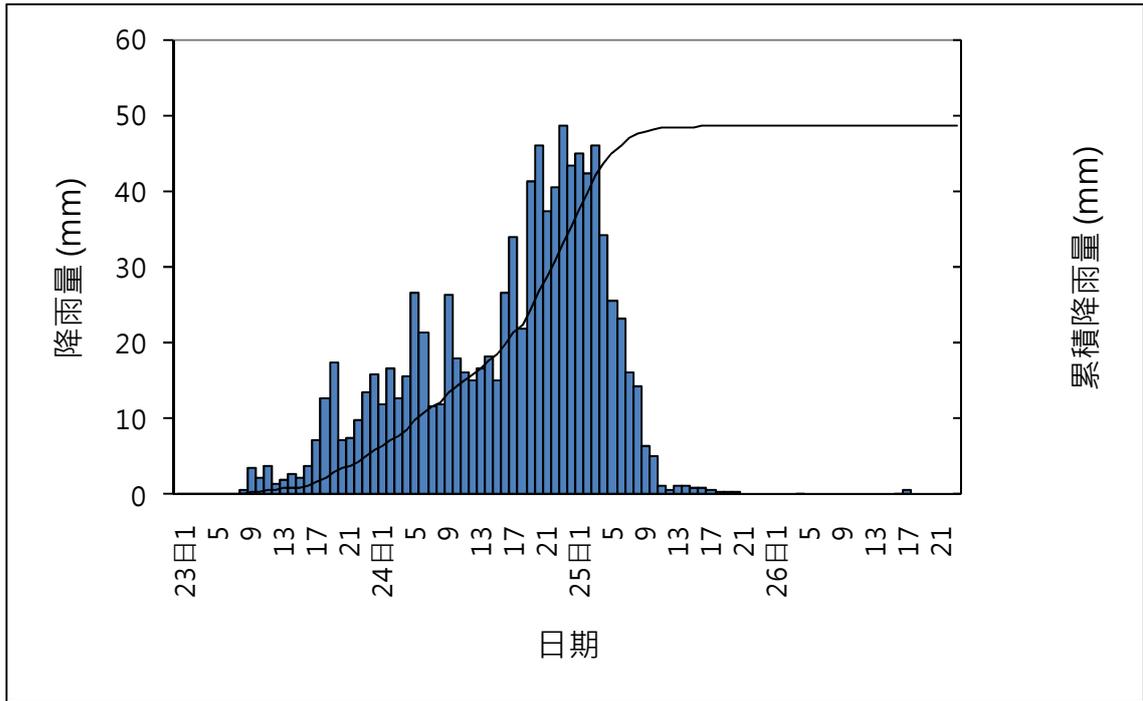


圖 4-5 艾利颱風平均降雨組體圖與累積雨量圖

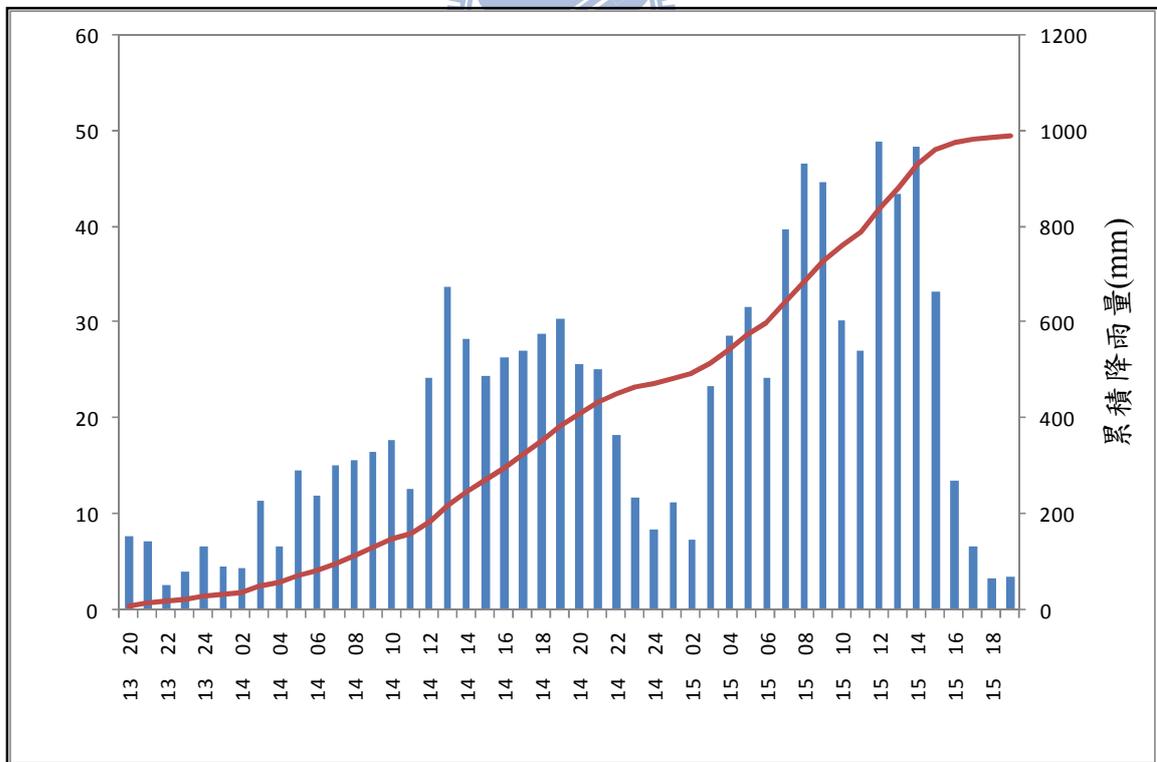


圖 4-6 辛樂克颱風平均降雨組體圖與累積雨量圖

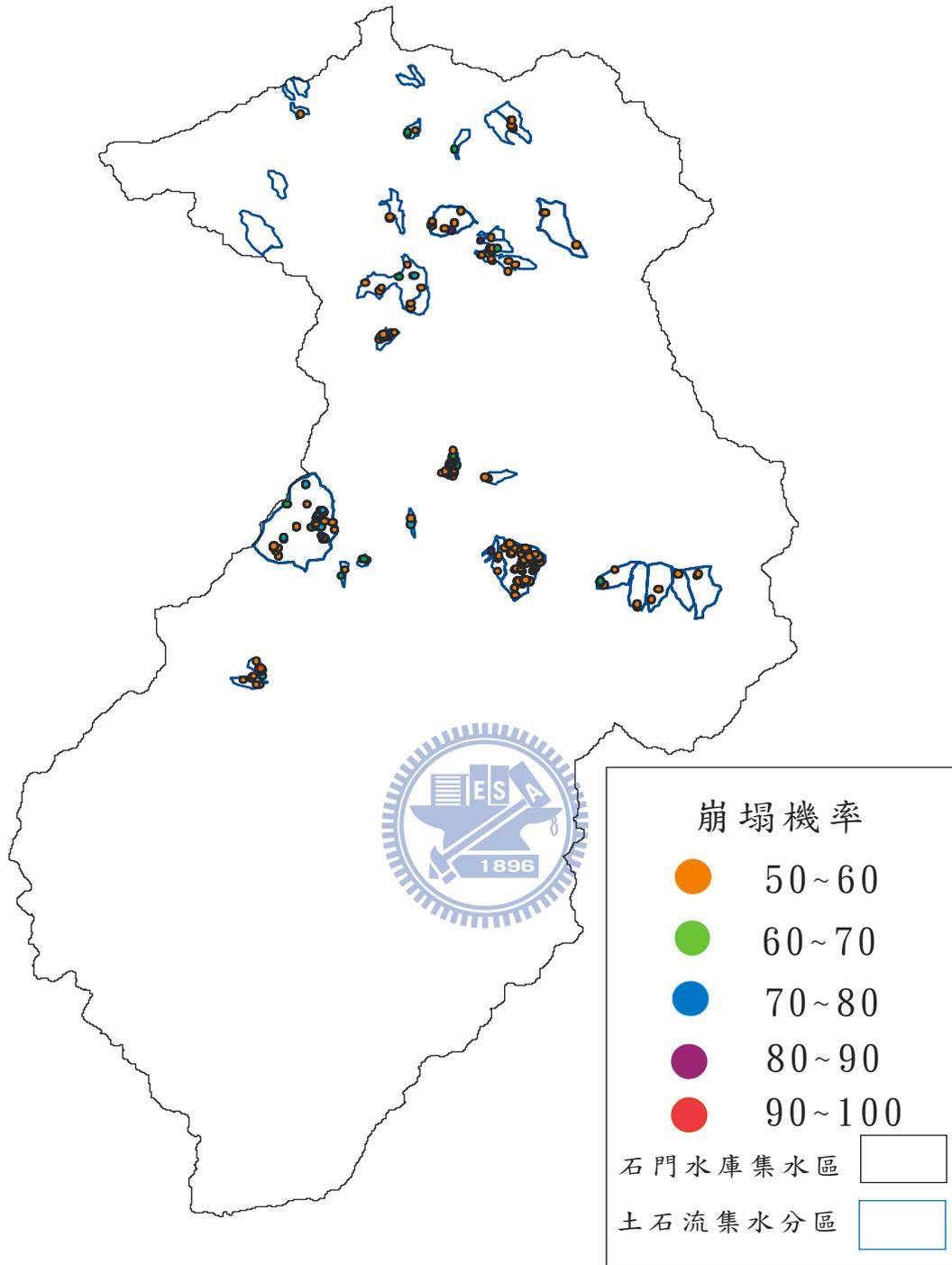


圖 4-7 石門水庫集水區崩塌機率

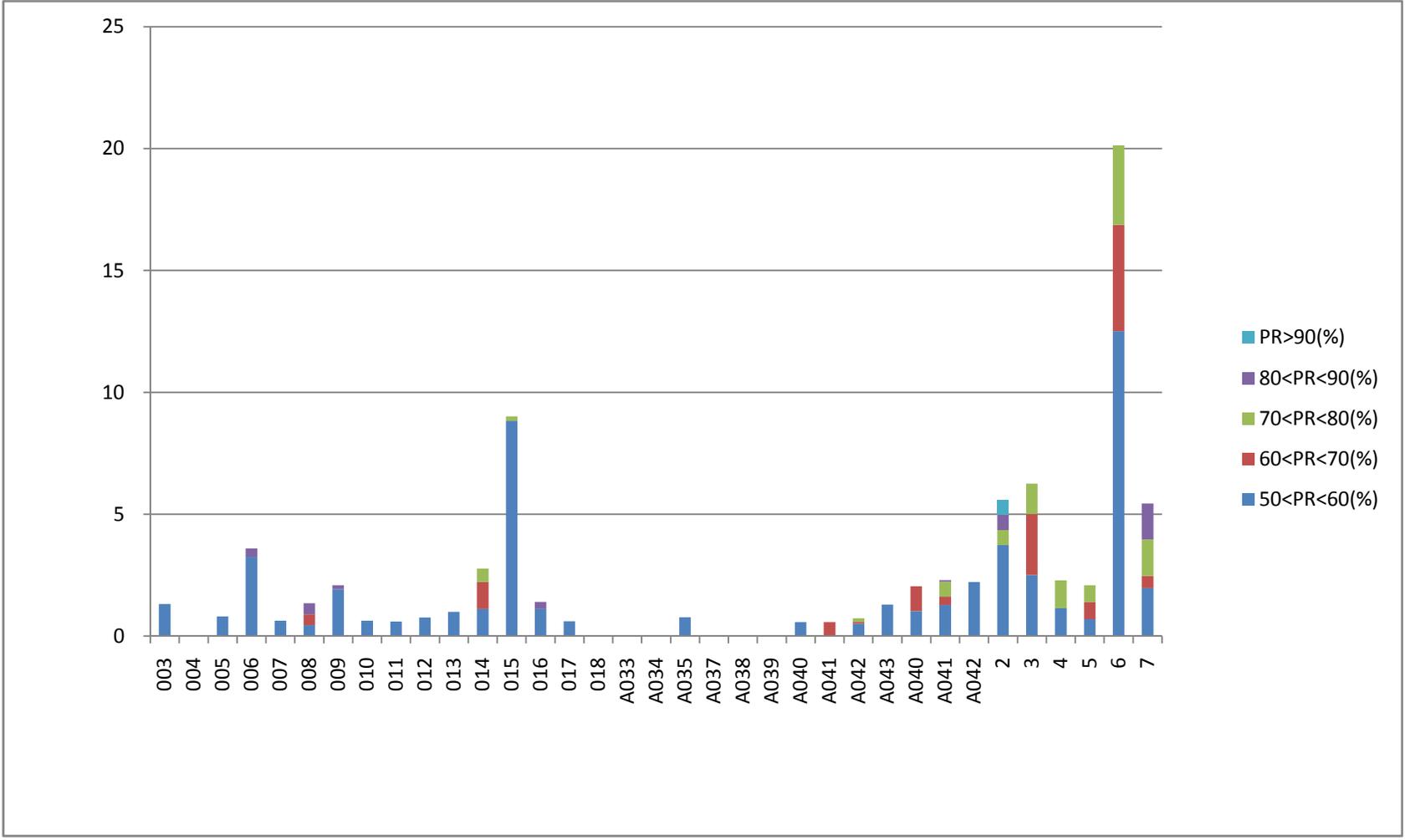
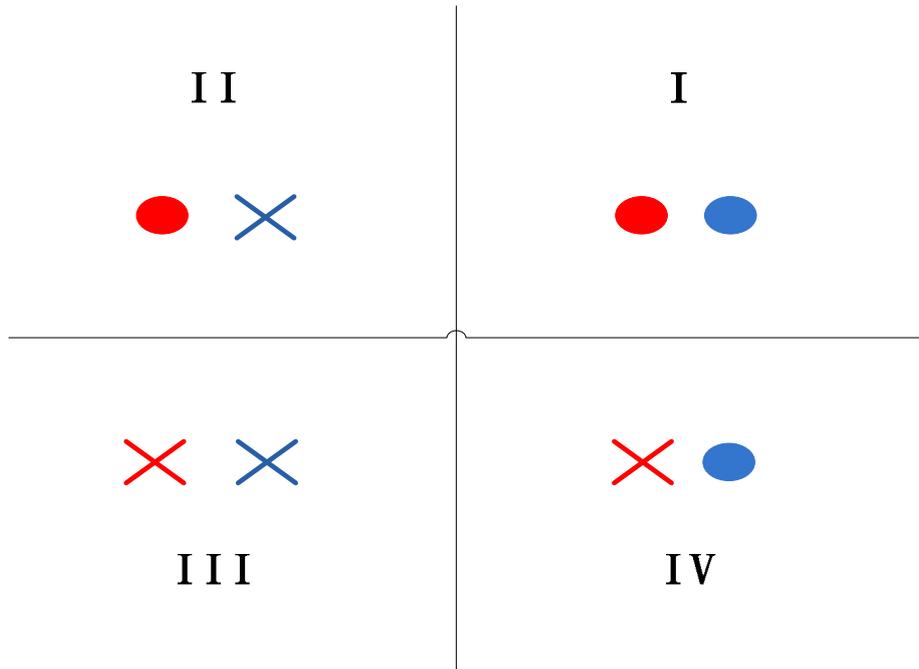


圖 4-8 不同崩塌機率所占百分比



- 實際發生土石流
- 模擬有發生土石流
- × 實際未發生土石流
- × 模擬未發生土石流

圖 4-9 正確率示意圖

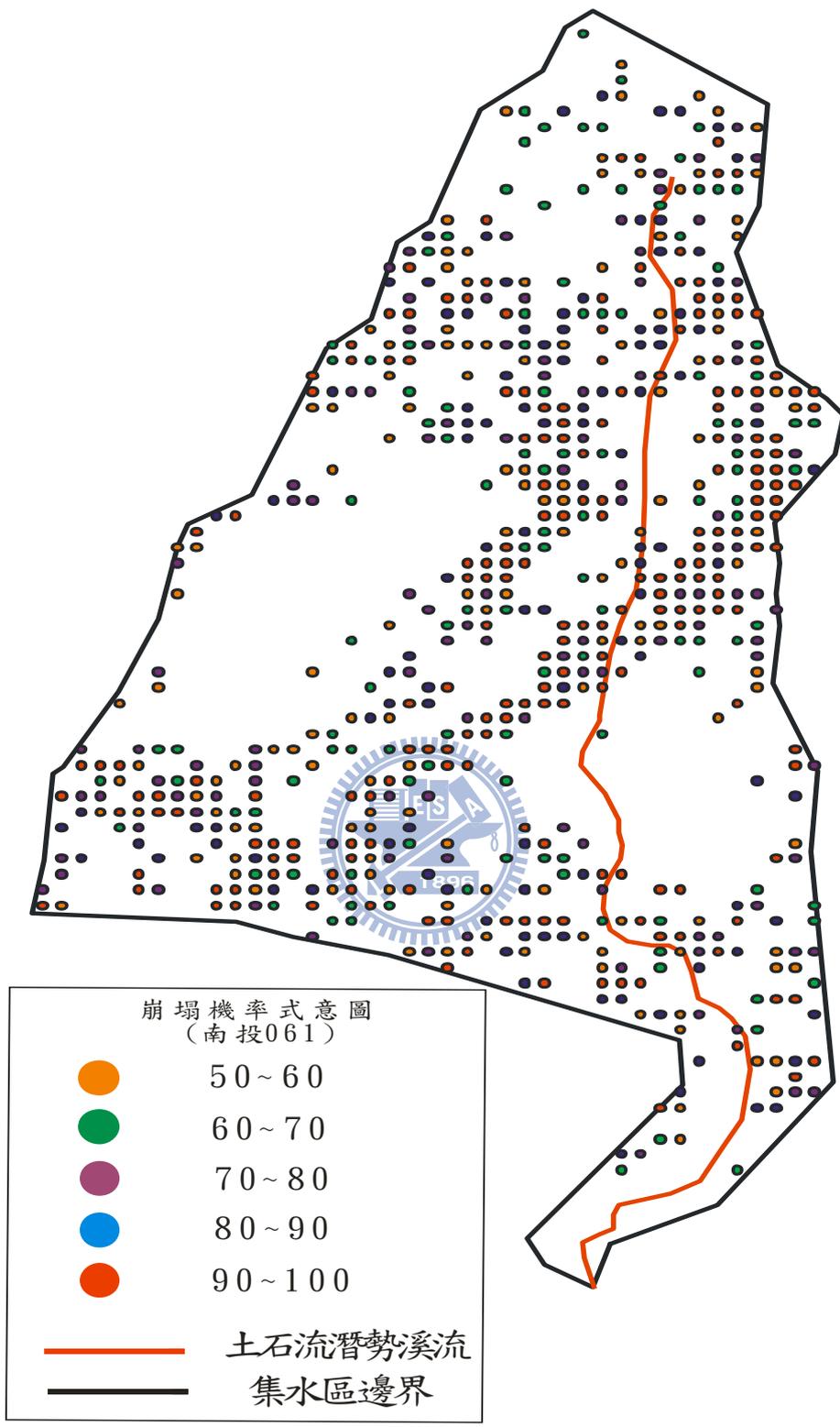


圖 4-10 崩塌機率示意圖(仁愛鄉)

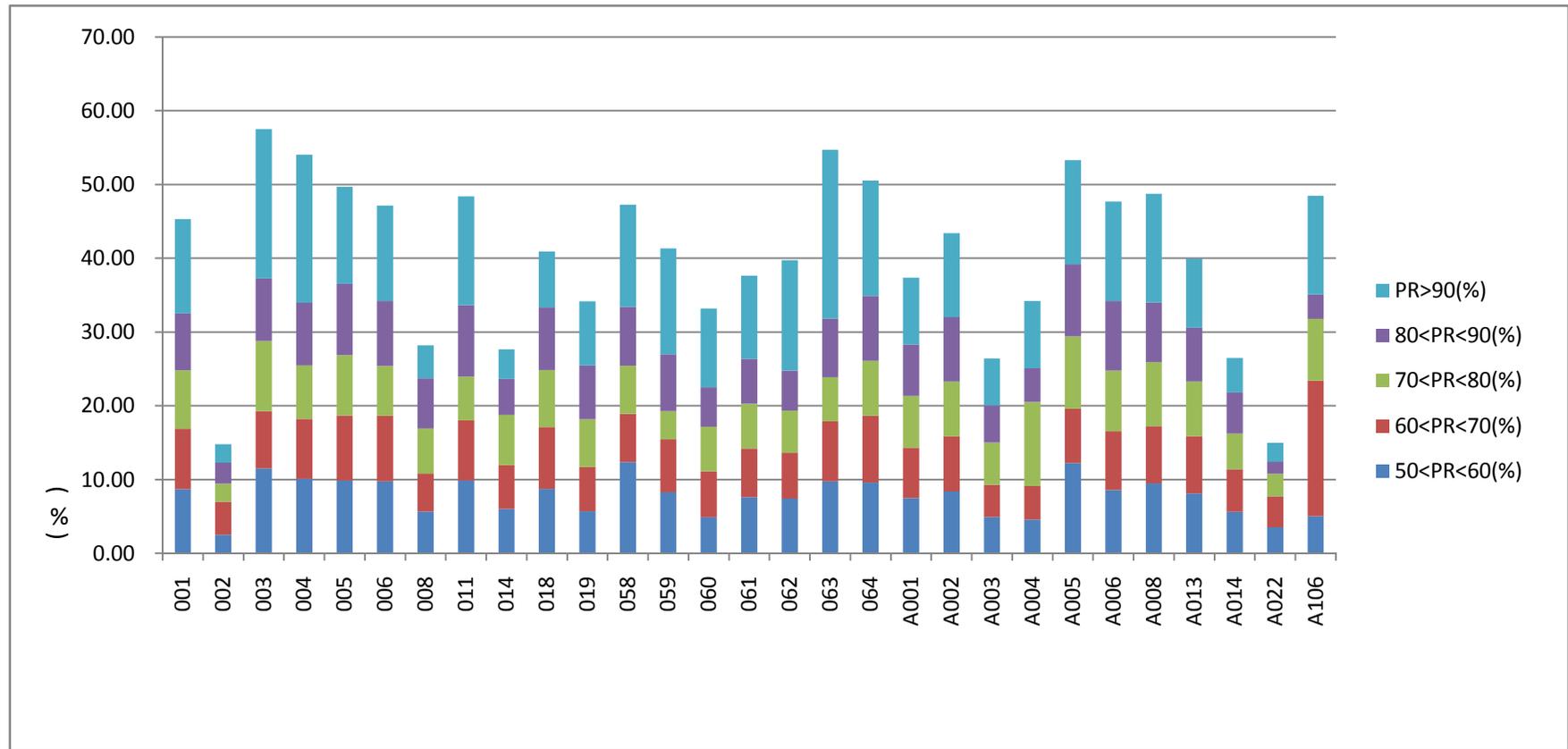


圖 4-11 不同崩塌機率所占百分比

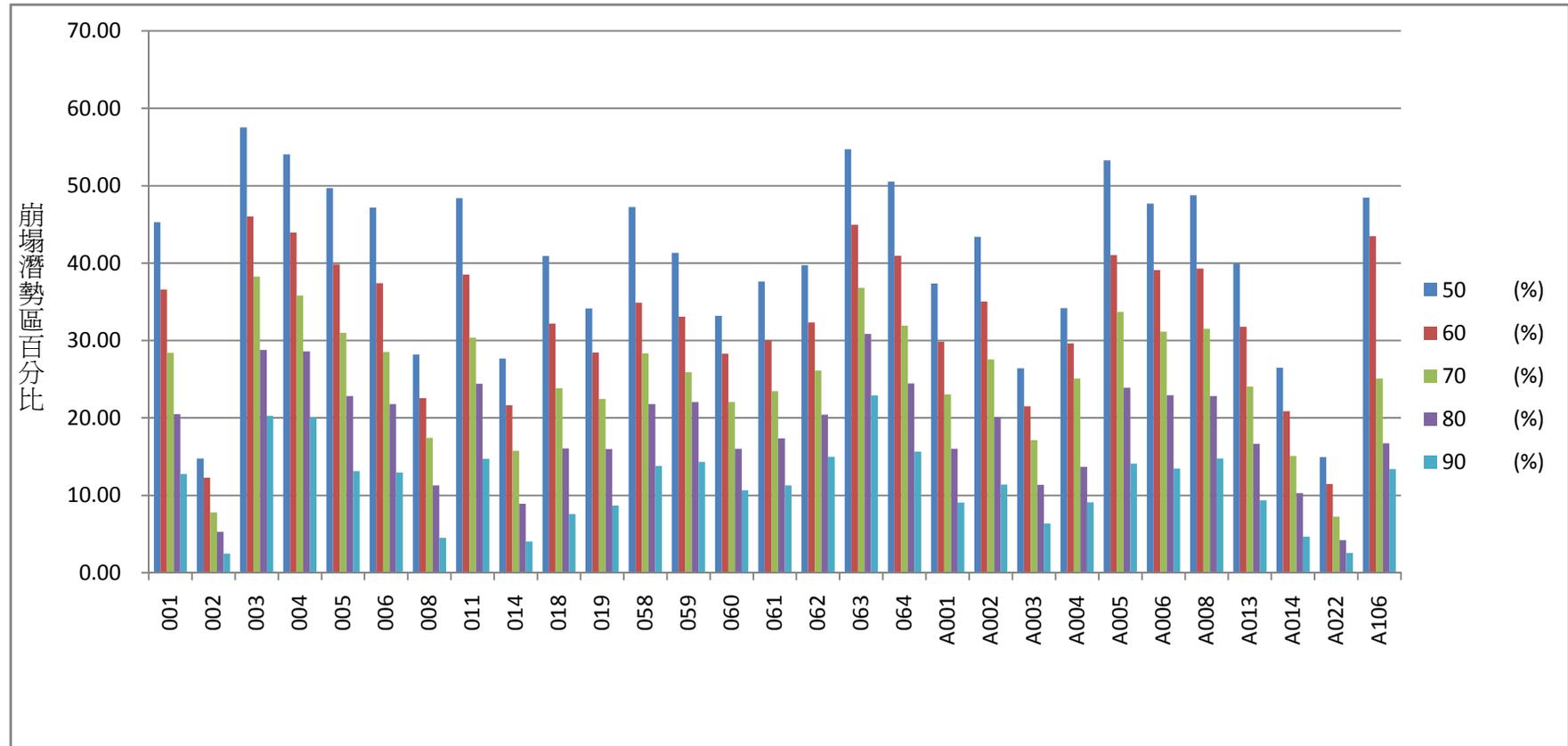


圖 4-12 不同崩塌潛勢區百分比

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究以總雨量比檢視定量降雨之正確性，並比較土石流發佈時間點差異性，且依石門水庫集水區於艾利颱風後和南投仁愛鄉於辛樂克颱風後所發生之土石流為案例，進行土石流風險評估，其成果歸納如下：

1. 除了雨量站有故障或資料缺失外，其總雨量比(雨量站所量測之總雨量/該雨量站所在相同之 QPESUMS 網格總雨量)均趨近於 1。
2. 以南投仁愛鄉警戒雨量 250mm 及 50mm 為基準，於辛樂克颱風及泰利颱風，得知警戒雨量發佈時間差異最多分別為三小時二十分與一小時三十分。
3. 於石門水庫集水區與南投仁愛鄉之案例，得知崩塌潛勢區面積百分比比較大者和土石流真正發生處有其相對應關係。
4. 石門水庫集水區於艾利颱風模擬案例中，以崩塌百分比作為研判指標時，正確率為 58.33%(水保局正確率為 20%)，以崩塌面積期望值百分比為研判指標，正確率提昇為 77.77%(水保局正確率為 20%)。
5. 南投仁愛鄉集水區於辛樂克颱風模擬案例中，發現以崩塌百分比

和崩塌面積期望值百分比作為研判指標時，正確率均為 66.67% (水保局正確率均為 6.90%)。

6. 南投仁愛鄉集水區於海棠颱風模擬案例中，若以崩塌百分比和崩塌面積期望值百分比作為研判指標時，崩塌百分比正確率為 5.26%(水保局正確率為 3.40%)，而崩塌面積期望值百分比正確率提昇為 5.88%(水保局正確率為 3.45%)。

5.2 建議

1. 本研究目前以整個集水區作為分析，未釐清坡地崩塌後水、砂運移機制，未來可進一步探討含砂濃度及崩塌土砂運移，來具體反映土石流的流況。
2. 本文進行南投仁愛鄉集水區崩塌風險評估時，由於缺乏現地的地文參數資料，因此僅能以有限的調查資料做其假設，未來應可考慮對土石流發生地區進行現地試驗，以更能精確掌握當地之現況。
3. 本研究定義之臨界值僅對目前案例做假設，還未能真正求解土石流發生時實際之臨界值，未來可進一步探討更多場土石流發生事件，藉此求解土石流發生時之實際臨界值，以作為正確率真正判別之指標。
4. 現今土石流乃是一種非牛頓流體現象，因此未來可考量流變關係

及體積濃度等相關因子做分析，較能訂定出一適用於土石流危險溪流之判定準則。

5. 目前僅能得知各集水區崩塌區間潛勢的機率及分布情形，還無法有效的作為土石流警戒發佈之參考，未來可結合更多的因素(如水砂運移機制等)，研擬土石流發生之可能機率以作為土石流潛勢溪流的參考警戒值。



參考文獻

林信亨，「地理資訊系統應用於土石流危險溪流危險度判定之研究」，

國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，2000。

林美聆等，「地理資訊系統及類神經網路應用於土石流危險溪流危險

度判定」，地工技術，第 90 期，73-84 頁，2002。

林文賜，「集水區空間資訊萃取及坡面泥砂產量推估之研究」，國立中

興大學水土保持學研究所博士論文，2002。

林正道，「土石流危險度之模糊迴歸分析和綜合評判」，中原大學土木

工程學研究所碩士論文，2003。

林基源，「陳有蘭溪流域土石流發生潛勢判定模式之研究」，國立中興

大學土木工程學研究所博士論文，2003。

蔡易達，「南投地區依及溪流土石流發生機率即時評估及驗證」，國立

台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2003。

王永琦，「土壤先前含水量對沖蝕影響之研究」，國立中興大學水土保

持學研究所碩士論文，2004。

陳弘恩，「降雨引發坡地潛崩塌模式之建立與探討」，國立交通大學土

木工程學研究所碩士論文，2005。

李明熹，「土石流發生降雨警戒分析及其應用」，國立成功大學水利及

- 海洋工程學研究所博士論文，2006。
- 行政院農業委員會水土保持局，「土石流潛勢區之雨量估計與即時預報技術發展研究」，國立台灣大學，2006。
- 經濟部水利署北區水資源局，「石門水庫集水區航照判釋及地理資訊系統建置」，財團法人工業技術研究院，2006。
- 謝育樺，「南投地區土石流發生潛勢分析」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，2007。
- 經濟部水利署，「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究(3/3)」，國立交通大學，2008。
- Caine, N.(1980), “The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows.” *Geografiska Annaler*, 62: 23-27.
- J. D. Cheng etc al.(2000) “Hydrometeorological and site factors contributing to disastrous debris-flows in Taiwan.” *Proceedings of The Second International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation* pp. 583-592.
- Keefer, D. K.etc al.,(1987) “Real-Time Landslide Warning During Heavy Rainfall.” *Science*, 238: 921-925.
- P. S. Lin and J. C. Hung(2000) “Risk assessment of potential debris-flows using GIS.” *Proceedings of The Second International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, pp. 431-440.

Tsai T. L. and Yang J. C.(2007) “Modeling of rainfall-triggered shallow Landslide.” *Environmental Geology*, Vol. 50: 525-534.

Yarahmadi Bafghi, A. R., Verdel, T.,(2005) “Sarma-based key-group method for rock slope reliability analysis.” *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 29: 1019-1043.

