
**臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌
土方量分析-南部地區**

**Threshold Criteria on the Initiation
Condition and the Minimum Landslide
Volume of Hillslope Debris Flows for
South Taiwan**

成果報告書

執行單位：國立屏東科技大學

執行期間：113年2月7日至113年12月31日

計畫主持人：陳天健 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)







臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析

-南部地區

摘要

全球氣候變遷，強降雨長延時之降雨事件逐漸增加，此種降雨型態造成更易於致生淺層崩塌，甚或演化成坡面型土石流。本研究團隊利用已發展新型淺層崩塌分析模式，作為雨量事件型崩塌量推估。透過收集臺灣南部地區 70 筆土石流災害事件，並針對 40 處坡面型土石流案例進行淺層崩塌模擬，經由蒐集建立土石流發生之回報時間及雨量資料，再針對各颱風及豪雨事件之 QPE 雨量，配合地文、水文、歷史崩塌圖資及土壤材料參數等資料，利用災前 DEM 地形分析，搭配土壤厚度推估模式，輸入「新型淺層崩塌分析模式」來推估土石流發生時間時之崩塌位置及土方量；最後研訂坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量關係模式。

經由分析結果顯示，主要崩塌發生時之 3 小時雨量高於 150mm/hr 者則達 52.5%，顯示 3 小時雨量是觸發土石流發生的重要因子。而 3 小時雨量低於 150 mm/hr 者，其土石流發生時之累積雨量都大於 300mm 以上，此結果呈現較低降雨強度事件之土石流觸發多肇因於高累積雨量。

坡面型土石流發生時之崩塌面積分析顯示主要崩塌面積分布至 1,100 至 230,000 m² 間，但主要多為 10,000 m² 以上，達 80.0%。其中土石流事件之主要發生崩塌面積 1,100 m²，即達到發生門檻。

坡面型土石流發生時之崩塌土方量分析結果顯示主要崩塌土方量分布至 2,300 至 450,000 m³ 間，但主要多為 10,000 m³ 以上，達 80.0%。主要崩塌土方量略有與總面積指數正比之趨勢。而土石流事

件之崩塌門檻土方量於 $2,300 \text{ m}^3$ 以上，即達到發生門檻。

坡面型土石流啟動條件之單因子模式分析，顯示若以坡面型土石流發生機率 80.0% 為基準，主要崩塌時雨量、3 小時雨量、累積雨量等指標之雨量門檻均有過低之虞，故不適用於預警作業。但若考慮坡面型土石流之最小崩塌面積門檻採 $1,100 \text{ m}^2$ ，最小主要崩塌土方量門檻 $2,300 \text{ m}^3$ ，兩者可適用於預警作業。

坡面型土石流另考慮建立雙因子之指標，分析結果顯示若同時考慮時雨量 50 mm/hr 及累積雨量 300 mm/hr ，結果顯示發生機率達 80.0%；其次，以同時考慮 3 小時雨量 150 mm/3hr 及累積雨量 300 mm/hr ，結果顯示發生機率達 82.5%。二者均適合作為坡面型土石流啟動門檻條件。

關鍵詞：淺層崩塌模式、坡面型土石流、崩塌土方量



Threshold Criteria on the Initiation Condition and the Minimum Landslide Volume of Hillslope Debris Flows for South Taiwan

Abstract

Global climate change has led to an increase in intense, prolonged rainfall events, which significantly contribute to shallow landslides and may even evolve into hillslope debris flows (HDFs). This study employs a newly developed shallow landslide analysis model to estimate landslide volume during rainfall events. Data from 70 HDF events in southern Taiwan were collected, with shallow landslide simulations conducted on 40 HDF events. The shallow landslide analysis model was applied to estimate landslide locations and volumes at the time of debris flow occurrence. Information on debris flow occurrence timing, and QPE rainfall data of typhoon and heavy rainfall events, combined with geomorphological, hydrological, landslide inventories, soil material parameters, soil thickness prediction model, and pre-disaster DEM terrain. Rainfall threshold and the minimum landslide volume threshold of hillslope debris flow triggering were established.

The analysis reveals that during major debris sliding, 52.5% of cases occurred with a 3-hour rain exceeding 150 mm/hr, highlighting the importance of 3-hour rain as a critical triggering factor. For cases of 3-hour rain below 150 mm/hr, cumulative rain during debris flow events was greater than 300 mm. This indicates that debris flow triggers in low-intensity rainfall events are primarily due to high cumulative rainfall.

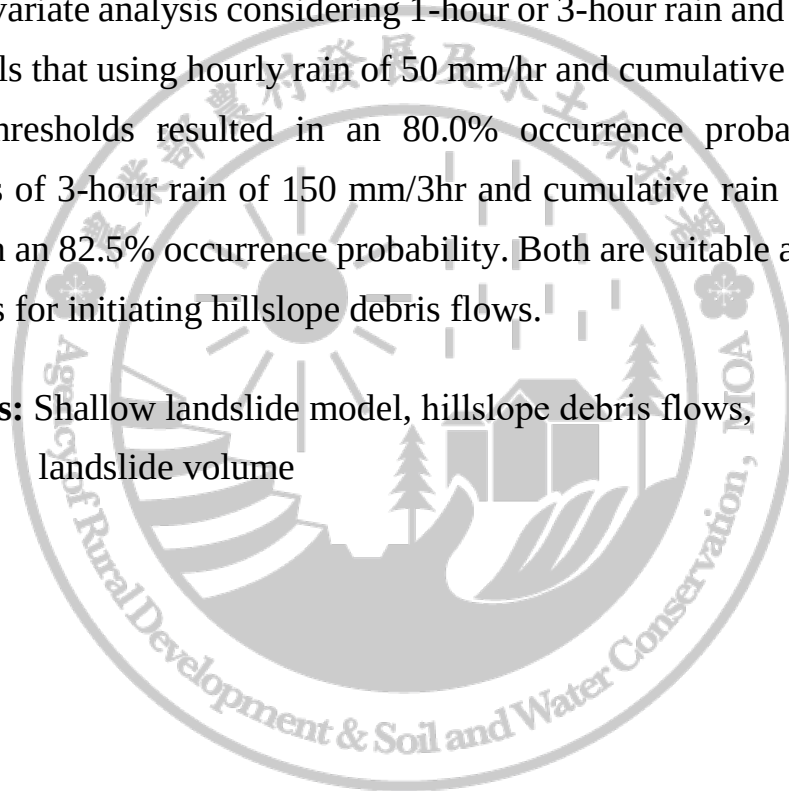
Analysis of landslide areas during major landslides shows that they range from 1,100 to 230,000 m², with 80.0% exceeding 10,000 m². The minimum landslide area for debris flow events was 1,100 m², meeting the occurrence threshold.

The analysis of landslide volumes reveals a range of 2,300 to 450,000 m³, with 80.0% exceeding 10,000 m³. There is a slight positive correlation between landslide volume and total area. The threshold for landslide volume leading to debris flow events was determined to be 2,300 m³.

A univariate analysis of triggering threshold for HDFs that considering an 80.0% occurrence probability, the thresholds for 1-hour rain, 3-hour rain, and cumulative rain during major debris slides are too low and unsuitable for early warning operation. Yet, the minimum landslide area and volume for hillslope debris flows were determined to be 1,100 m² and 2,300 m³, respectively.

A bivariate analysis considering 1-hour or 3-hour rain and cumulative rain reveals that using hourly rain of 50 mm/hr and cumulative rain of 300 mm as thresholds resulted in an 80.0% occurrence probability. The thresholds of 3-hour rain of 150 mm/3hr and cumulative rain of 300 mm resulted in an 82.5% occurrence probability. Both are suitable as threshold conditions for initiating hillslope debris flows.

Keywords: Shallow landslide model, hillslope debris flows, landslide volume



目次

摘要	I
Abstract.....	III
目次	V
表次	VII
圖次	IX
第一章 前言	1-1
第二章 計畫項目及時程進度	2-1
第一節 本年度計畫工作項目	2-1
第二節 工作進度	2-4
第三章 坡面型土石流與淺層崩塌相關文獻	3-1
第一節 淺層崩塌相關研究	3-1
第二節 土壤入滲及地下水滲流相關研究	3-6
第三節 坡面型土石流相關研究	3-13
第四節 淺層崩塌事件逐時崩塌土方量分析模式	3-20
第五節 網格式分析之崩塌範圍圈畫精進模式	3-26
第四章 研究區概述及研究資料收集與建置	4-1
第一節 研究區域及地質概述	4-1
第二節 研究區域基本圖資庫收集	4-4
第三節 研究區數值地形、地文、遙測等圖資收集	4-5
第五章 重大土砂災害資料庫及坡面型土石流發生時間及雨量資料 庫	5-1
第一節 重大土砂災害資料	5-1
第二節 坡面型土石流事件雨量資料庫	5-15
第三節 坡面型土石流事件雨量分析	5-30

第六章 推估事件研究區土壤厚度方法.....	6-1
第一節 前期建立之土壤厚度推估模式說明	6-1
第七章 土石流事件崩塌時機與面積分析.....	7-1
第一節 土石流事件案例說明	7-1
第二節 地文、水文分析參數說明	7-3
第三節 分析案例說明	7-5
第四節 分析成果綜合說明	7-19
第八章 建立南部地區坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土 方量體關係模式	8-1
第九章 結論與建議.....	9-1
第一節 結論	9-1
第二節 建議	9-4
參考文獻.....	參-1
附錄	附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨意見回覆辦理情形.....	附錄-1
附錄二、期中審查會議紀錄暨意見回覆辦理情形.....	附錄-3
附錄三、期末審查會議紀錄暨意見回覆辦理情形.....	附錄-7
附錄四、各坡面型土石流案例淺層崩塌模擬結果.....	附錄-9

表次

表 2-1 計畫工作進度表	2-4
表 3-1 邊坡坡度與崩塌深度關係文獻綜整表(詹勳全等，2015)	3-4
表 3-2 不同學者提出之以崩塌地面積推估體積之估算式(詹勳全等，2015)	3-5
表 3-3 區別分析之各因子使用代號表(陳天健等，2019)	3-17
表 3-4 樣本區區別分析結果	3-19
表 3-5 七因子皮爾森相關係數分析結果	3-19
表 3-6 淺層崩塌分析模式參數表(以南莊層為例)	3-21
表 3-7 北港溪流域各地層分區之材料參數	3-22
表 4-1 圖資基本資料表	4-4
表 5-1 歷年重大土石流災害事件表	5-2
表 5-2 土石流災害事件雨量資料表	5-30
表 5-3 土石流發生前之降雨延時表	5-36
表 5-4 土石流發生與發生前尖峰降雨之延遲表	5-38
表 6-1 各淺層崩塌範圍之面積	6-8
表 6-2 各淺層崩塌範圍之土方量體	6-9
表 7-1 土石流事件分析案例	7-1
表 7-2 各坡面型土石流案例淺層崩塌模擬採用參數表	7-3

表 7-3 2013/7/17 每小時淺層崩塌增量與面積	7-10
表 7-4 2008/8/8 每小時淺層崩塌數量與面積	7-18
表 7-5 發生崩塌開始各時序之崩塌面積表	7-24
表 8-1 坡面型土石流發生指標基準值	8-2
表 8-2 坡面型土石發生機率 80%之各指標因子門檻值	8-2



圖次

圖 3-1 擾動/未擾動邊坡降雨之地下水文示意圖.....	3-8
圖 3-2 土壤水分與張力關係示意圖(擷取自 TRIGRS user manual)	3-10
圖 3-3 集水區範圍示意圖(底圖來源 google earth)	3-15
圖 3-4 崩塌坡面分析單元圈繪流程圖(陳天健等人，2016).....	3-15
圖 3-5 分析單元劃定示意圖	3-16
圖 3-6 逐時淺層崩塌情形	3-25
圖 3-7 利用 SHALSTAB 網格式淺層崩塌模式分析，獲得之散佈式網 格變異點 (左:本團隊成果。右:陳映融等人，2022)	3-26
圖 3-8 崩塌輪廓範圍繪製	3-27
圖 3-9 各坡向崩塌面合併圖	3-27
圖 4-1 台灣南部地區研究區範圍	4-3
圖 4-2 研究區圖資收集套疊分布	4-6
圖 5-1 近年南部地區坡面型土石流分佈位置	5-1
圖 5-2 2006 年 0609 豪雨大津雨量站雨量組體圖	5-15
圖 5-3 2007 年 0809 豪雨瑪家雨量站雨量組體圖	5-16
圖 5-4 2007 年聖帕颱風甲仙雨量站雨量組體圖	5-16
圖 5-5 2007 年聖帕颱風新發雨量站雨量組體圖	5-17
圖 5-6 2008 年卡玫基颱風新發雨量站雨量組體圖	5-17
圖 5-7 2008 年卡玫基颱風甲仙雨量站雨量組體圖	5-18
圖 5-8 2008 年卡玫基颱風月眉雨量站雨量組體圖	5-18
圖 5-9 2008 年卡玫基颱風大津雨量站雨量組體圖	5-19
圖 5-10 2009 年莫拉克颱風新發雨量站雨量組體圖	5-19
圖 5-11 2009 年莫拉克颱風達卡努瓦雨量站雨量組體圖	5-20
圖 5-12 2009 年莫拉克颱風來義雨量站雨量組體圖	5-20

圖 5-13 2009 年莫拉克颱風口社雨量站雨量組體圖	5-21
圖 5-14 2010 年凡那比颱風小關山雨量站雨量組體圖	5-21
圖 5-15 2010 年凡那比颱風力里雨量站雨量組體圖	5-22
圖 5-16 2011 年南瑪都颱風石門山雨量站雨量組體圖	5-22
圖 5-17 2011 年南瑪都颱風檳榔雨量站雨量組體圖	5-23
圖 5-18 2012 年天秤颱風佳樂水雨量站雨量組體圖	5-23
圖 5-19 2012 年 0610 豪雨高雄市六龜區雨量組體圖	5-24
圖 5-20 2013 年康芮颱風枋山雨量站雨量組體圖	5-24
圖 5-21 2016 年 0611 豪雨阿禮雨量站雨量組體圖	5-25
圖 5-22 2016 年梅姬颱風六龜雨量站雨量組體圖	5-25
圖 5-23 2016 年梅姬颱風期山雨量站雨量組體圖	5-26
圖 5-24 2017 年尼莎暨海棠颱風楓港雨量站雨量組體圖	5-26
圖 5-25 2018 年 0823 熱帶低壓楓港雨量站雨量組體圖	5-27
圖 5-26 2021 年 0731 豪雨六龜雨量站雨量組體圖	5-27
圖 5-27 2021 年盧碧颱風暨 0806 水災新發雨量站雨量組體圖	5-28
圖 5-28 2021 年盧碧颱風暨 0806 水災小關山雨量站雨量組體圖 ..	5-28
圖 5-29 2023 年其他(0823)小關山雨量站雨量組體圖	5-29
圖 5-30 歷年土石流災害累積雨量組體圖	5-33
圖 5-31 土石流發生時累積雨量統計分布圖	5-34
圖 5-32 土石流發生時累積雨量與土石流發生前尖峰時雨量分布圖....	5-35
圖 5-33 累積降雨量與降雨延時分析圖	5-37
圖 5-34 土石流發生與尖峰降雨時間差	5-39
圖 5-35 累積降雨量與尖峰降雨延時分析圖	5-39
圖 6-1 330 處鑽探及 869 土鑽成果分布圖(重新分析自陳天健，2022)	6-2

圖 6-2 土鑽及鑽探現調資料統計圖(重新分析自陳天健，2022).....	6-3
圖 6-3 淺層崩塌厚度推估模式	6-4
圖 6-4 嘉縣 DF042 研究區域	6-5
圖 6-5 嘉縣 DF042 數值高程模型	6-6
圖 6-6 淺層崩塌分析模式第 18 小時之淺層崩塌發生範圍	6-7
圖 7-1 案例一(編號 HDF049)區域位置圖	7-5
圖 7-2 案例一災情最速報(資料來源:農業部農村水保署).....	7-7
圖 7-3 2008 年 7 月 17 日卡玫基颱風 QPE(105172)雨量組體圖.....	7-8
圖 7-4 逐時淺層崩塌情形	7-10
圖 7-5 案例一(編號 HDF032)區域位置圖	7-11
圖 7-6 案例二災情最速報-1(資料來源:農業部農村水保署).....	7-13
圖 7-7 案例二災情最速報-2(資料來源:農業部農村水保署).....	7-14
圖 7-8 2009 年 8 月 7-9 日莫拉克颱風 QPE(104290)雨量組體圖 ...	7-15
圖 7-9 逐時淺層崩塌情形	7-17
圖 7-10 各案例主要崩塌發生時間與土石流回報時間差	7-20
圖 7-11 各案例主要崩塌發生時間與土石流回報時間差統計	7-20
圖 7-12 主要崩塌時雨量與主要崩塌累積雨量關係分布圖	7-21
圖 7-13 主要崩塌 3 小時累積雨量時雨量與主要崩塌時雨量關係分布 圖	7-22
圖 7-14 主要崩塌面積與集水區面積關係圖	7-25
圖 7-15 主要崩塌面積比與集水區面積關係圖	7-25
圖 7-16 主要崩塌土方量與集水區面積關係圖	7-26
圖 7-17 主要崩塌時雨量與主要崩塌面積關係分布圖	7-27
圖 7-18 主要崩塌 3 小時雨量與主要崩塌面積關係分布圖	7-28
圖 7-19 主要崩塌累積雨量與主要崩塌面積關係分布圖	7-29

圖 8-1 主要崩塌時雨量及累積雨量雙因子圖	8-3
圖 8-2 主要崩塌 3 小時雨量及累積雨量雙因子圖	8-4



第一章 前言

近年全球氣候變遷，強降雨長延時之降雨事件逐漸增加，此種降雨型態造成更易於致生淺層崩塌，甚或演化成坡面型土石流。如 2000 年 9 月 5 日陽明山豪雨，造成多處邊坡發生坡面型土石流災害，多名居民遭沖失或掩埋，數十戶房屋遭損毀或掩埋。2009 年莫拉克颱風亦造成高屏溪流域數十起坡面型土石流，淹沒六龜、那瑪夏、桃源等區多處聚落民造成重大災害。2023 年八月卡努颱風造成南投縣仁愛鄉多起土石流災害。農村水保署現已利用中央氣象署之雨量資料，以有效累積雨量(R_t)及降雨強度(I)兩降雨參數之乘積為降雨驅動指標(RTI)，建置全台各村里總雨量土石流警戒基準值，與及時土石流警戒模式。然而後續若欲再精進預警模式，則納入集水區之微地形及崩塌趨勢等特性考量，是較可發展之方向。

土石流災害常為多次陣波土石流流動，如 2023 年南豐村土石流事件，期間發生多次較小土石流流動，而非一次性土石流形成。亦即其來自上游多次較小土砂崩塌轉化，而非一次性崩塌。因此事後調查之崩塌土方量為多次土石流累積而成，以此量建立土石流發生與崩塌量關係，將會出現高估土方量之狀況。

然國內對淺層崩塌導致之坡面型土石流(HDF)事件研究不多。國內外研究顯示，劇烈降雨時，坡面型土石流(Hillslope Debris Flows, HDF)主要由山坡之崩塌轉化而成(陳榮河，2004；游繁結，2001；周憲德，2005；黃宏斌等人，2005；陳天健等人，2016)，惟坡面型土石流啟動之發生條件與其最小崩塌土方量關係等研究，仍至今闕如，並無區域性可資土石流災害警戒應用之模式。

目前我國已建置高精度數位地形(LiDAR)資料，可提供精確之地形，可資坡地崩塌之預測；而農村水保署業已建置重大土砂災害歷史資料庫，掌握豐富土石流發生時間及雨量資料。其次，本研究團隊已收集超過 1000 筆土壤現地調查資料，建立本島山區土壤厚度推估模式；且也已發展新型淺層崩塌分析模式，可作為雨量事件型崩塌量推估。

基於此，本研究乃為應用前述資料、工具及分析模式，且掌握土石流發生時間。同時配合新崩塌預測模式，即可推估該降雨條件下之崩塌面積及土方量體，進一步建立土石流啟動條件與最小崩塌土方量關係。研究成果可提供農村水保署未來可更精確掌握土石流發生時機及其災害規模，甚而可提昇至於一颱風或豪雨事件期間，單一溪流多次性土石流之及時預警，進一步精進現有黃色與紅色警戒制度，提供災害預警之參酌，提高災害管理效能，保障居民安全。



第二章 計畫項目及時程進度

第一節 本年度計畫工作項目

本計畫研究區域以台灣南部山區為主。應用前期本研究團隊完成之「本島山區土壤厚度推估模式」及「新型淺層崩塌分析模式」，配合農村水保署重大土砂事件所調查之土石流發生時間及崩塌狀況資料，進行坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式。

首先，本研究收集研究案例，應用災前災後遙測影像取得崩塌面積及分布位置，再建立分析所需之發生時間及雨量、地文、水文、歷史崩塌圖資、土壤材料參數等資料，建立高解析度 DEM 分析地型，搭配土壤厚度推估，輸入「新型淺層崩塌分析模式」進以推估土石流發生時間時之崩塌位置及土方量；最後研訂坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式。

本年度研究工作主要內容如下：

一、蒐集高解析度數值地形、地質圖資及各事件航照圖資

建置計畫研究資料庫，包括野外調查資料，室內配合航空照片與衛星影像(配合 Google Earth 套疊圖層使用)等進行檢核。為本研究使用之相關圖資包括：內政部第三版 1/25000 地形圖、五萬分之一地質圖幅、以及高屏溪流域衛星影像及航空照片、流域崩塌圖層、數值高程模型 (LiDAR DEM) 之申請(農村水保署)等。應用地理資訊系統產製相關地文因子及適當資料格式，以供後續研究使用。

二、蒐集及彙整坡面型土石流與淺層崩塌相關文獻

坡面型土石流之區位主要位於邊坡之溝壑或坡面，起初小規模之崩塌，土砂匯流地表逕流後形成坡面型土石流向下方輸送，造成之災

害規模及影響區均較單純崩塌為大，主要危害空間集中於銜接坡面處或溝壑出口。山坡之崩塌易轉化成坡面型土石流相關研究包括：游繁結，(2001)、陳榮河(2004)、何明憲(2003)、陳晉琪、謝正倫、林慶偉(2004)，周憲德(2005)、黃宏斌等人(2005)、王隆昌(2005)、王振宇(2012)、陳天健等人(2015)。本計畫亦將持續收集與綜整相關之研究文獻，以策進研究成果。

三、建置研究區坡面型土石流事件及崩塌圖資資料庫

本研究預計彙整南部地區坡面型土石流案例及歷年崩塌圖資。確認災害型態為坡面型土石流、崩塌或其他災害，建置案例資料庫。收集到莫拉克颱風至今之崩塌圖層，建立事件型分析資料庫。如有最新崩塌及土石流事件，將再現地地形測量調查。

四、收集重大土砂災害歷史資料庫，建立坡面型土石流發生時間及雨量資料庫

主要以農村水保署業已建置重大土砂災害歷史資料庫，同時彙整本研究團隊近十數年坡面型土石流災害現地調查資料，掌握豐富土石流發生時間及雨量資料。

五、建立事件研究區地文、水文、土壤材料參數分析資料庫

本項工作主要獲得坡面型土石流集水區內之微地形地形特性及其地表地質狀況，建立事件研究區地文、水文、土壤材料參數分析資料庫，以利事件崩塌分析預測。

六、推估事件研究區土壤厚度(5*5m網格解析度)

本研究團隊收集超過 1000 筆土壤現地調查資料，建立本島山區土壤厚度推估模式。本研究進一步應用此模式，推估事件集水區每 5

*5m 網格之土壤厚度。

七、事件分時淺層崩塌土方量分析

彙整事件雨量歷時、地形、水文、地文、材料參數等資料，進行豪雨事件逐時淺層崩塌土方量分析，獲取土石流發生時間之雨量及崩塌土方量。

八、建立南部地區坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式

應用前項成果，研擬南部地區坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式。



第二節 工作進度

本計畫預定民國 113 年 12 月 31 日完成，工作期程如表 2-1 所示。

表 2-1 計畫工作進度表

工作項目	月次	113 年											執行進度
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
一、蒐集高解析度數值地形、地質圖資及各事件航照圖資													100%
二、蒐集及彙整坡面型土石流與淺層崩塌相關文獻													100%
三、建置研究區坡面型土石流事件及崩塌圖資資料庫													100%
四、收集重大土砂災害歷史資料庫，建立坡面型土石流發生時間及雨量資料庫													100%
五、建立事件研究區地文、水文、土壤材料參數分析資料庫													100%
六、推估事件研究區土壤厚度(5*5m 網格解析度)													100%
七、事件分時淺層崩塌土方量分析													100%
八、建立南部地區坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式													100%
期中報告													
期末報告													
百分比(%)		11	21	30	43	55	64	72	81	87	94	100	

 目前進度  預定進度

第三章 坡面型土石流與淺層崩塌相關文獻

第一節 淺層崩塌相關研究

一、淺層崩塌物理特性

淺層崩塌之破壞位置和大小與土壤厚度、地形、植生、地下水等因素有很大關係(Dietrich et al., 2008)，且大多位於土壤與岩盤交接處。Matsuura et al. (2003)於大雪區域進行長達 4 年之崩塌地監測，利用位移計估測淺層崩塌滑動面之範圍及規模，結果發現表層土壤大概為 0.5 公尺至 1.0 公尺，但在淺層滑動面深度則達到 4 公尺至 6 公尺。Elliott and Harty (2010)以崩塌深度 3 公尺為界線，小於 3 公尺為淺層，若超過則區分為深層崩塌，其中淺層崩塌移動速度快，深層崩塌則較為緩慢。

Casadei et al. (2003)發表淺層崩塌預測模式，此模式預測崩塌寬度會隨著植物根系強度及坡度的降低而增加，而當土壤越乾燥時，崩塌寬度越高。且模式結果與野外資料指出崩塌規模被土壤厚度、植物根系及地形區動之土壤飽和度所控制。Rickli and Graf (2009)於瑞士進行淺層崩塌試驗，發現在降雨後，淺層崩塌發生於裸露地之機會較森林地多，但在陡坡上則不然，推測為樹木重量在陡坡上會增加不穩定性，但植物根系能增加土壤抗剪力是絕對的。因此提出淺層崩塌之影響因子包括坡度、植生及降雨情形。

Renwick et al. (1982)指出當滑動面出現於風化岩盤或土壤覆蓋之地區，其深度較小，通常伴隨土石流、岩穴崩滑等災害。且主要影響因子為土壤內之孔隙水壓，當高強度降雨在短時間入滲至土層內，飽和土壤因抗剪力降低沿著岩盤產生滑動(即為淺層崩塌)。

二、 邊坡滑動面型態

滑動面形狀分佈，可歸納出四種主要滑動型態，分為平面型、圓弧型、對數螺旋型及楔型破壞。其主要受控於岩體弱面與材料特性，以下說明四種型態：

- (1) 平面型(Translational)：Hoek and Bray(1981)提到平面滑動大多由弱面或構造所控制。破壞時沿弱面發生剪切，形成似 U 型之凹槽。因此在崩崖後，為滑動體本身其多保留原來岩層結構，而滑動面呈直線段(Straight)，滑動面最後在趾部(Toe)才因堆積或受阻滑動面而出露。
- (2) 圓弧型(Rotational)：從力學機制觀點，圓弧型滑動面多出現在均質等向性之土體，材料凝聚力 C 主控，材料之強度行為，由於其為滑動及抵抗力矩主導土體之破壞，因此滑動面呈現圓弧形狀。因地質破碎不易形成整體平面滑動，所以圓弧滑動在形狀上，凹口向上類似碗狀。潘國樑(2007)，指出圓弧滑動在冠部崩崖出現處，呈現弧形狀，之後會再出現數個同心弧，此為階梯狀斷塊，類似正斷層，表示處在張力狀態下所形成。但在判斷上，仍以主崩崖為主，為一明顯判釋依據。
- (3) 對數螺旋型(Log spiral)：對數螺旋為圓弧型滑動的一種類型 (Spencer, 1969; Sarma and Tan, 2006; Chen, 1970; Goodman, 2000; 陳旺志、蔡光榮, 1990)，在判釋上與平面型與圓弧型較為不同，就材料而言，對數螺旋型滑動面多出現於具凝聚力 C 及高摩擦角 φ 之岩體材料或具部份弱面之非均質、非等量的岩體中，其破壞同時由滑動力與力矩主導，因此呈現對數螺旋型態。在對

數螺旋類型中，滑動面趾部(Toe)會出現彎曲線(Curve)，依 Goodman(2000)描述，此乃滑動面因受阻力而產生新破壞面，之中與其內部構造有關。

(4) 楔型破壞(Wedge failure)：坡面岩體遭受二組以上節理切割，致成楔型岩塊沿自由面滑落。

三、淺層崩塌深度

滑動面及其深度判釋方法方面，一般採用力學分析法，其為利用數值分析軟體、遙測及鑽探等方法，進行滑動規模推估分析。另一種滑動面分析法，則是利用災前災後數值高程地形(DEM)變異作為滑動面評估工具。

崩塌依其規模、面積可粗略分為深層崩塌與淺層崩塌。本研究著重於淺層崩塌。淺層崩塌主要界定為發生於岩盤上部風化層及表層崩積層的土壤，因此定義上，在深度在 5 公尺以下及岩盤上之土壤擾動則被劃定為淺層崩塌(黃宏斌，2010；Jonathan Peter McKenna，2011；Dietrich，2008)。但實際滑動面亦可能位於更深處，不穩定範圍也更大。

崩塌地深度估算模式方面，詹勳全等(2015)整理 Khazai and Sitar，(2000)、歐陽元淳(2003)、國家災害科技研究中心(2004)成果，如表 3-1 所示。該研究中亦比較前述三學者調查之崩塌體積與以坡度對照崩塌深度法推估崩塌體積之結果比較 (詹勳全等，2015)，指出 Khazai and Sitar(2000) 法所估算之崩塌量體，呈現部分高估部分低估情形，比較結果無明顯之規律；歐陽元淳 (2003)提出之定值法所推估之崩塌量體，多呈低估本研究所調查崩塌體積之情形；以國家災害科技研究

中心 (2004) 提出之方法進行崩塌量體估算時，多呈高估該研究所調查崩塌體積之情形(詹勳全等，2015)。

表 3-1 邊坡坡度與崩塌深度關係文獻綜整表(詹勳全等，2015)

坡面坡度 (度)	Khazai and Sitar (2000)	歐陽元淳 (2003)	國家災害科技研究中心 (2004)
<30	2.0	0.9	5.0
30~40	1.5	0.9	4.0
40~60	1.0	0.9	3.0
>60	0.5	0.9	2.0

四、崩塌面積與體積關係

詹勳全等(2015)等學者以現場調查搭配資料蒐集之方式，獲取 921 地震後台灣山區 181 處淺層崩塌地之地形條件、物理尺寸、自然環境特性及誘發崩塌原因等資訊，並進一步推估崩塌面積與崩塌體積之關係。結果顯示台灣山區淺層崩塌多發生於東南至西向坡、坡度小於 50 度、高程小於 1,200 公尺、且地質為三峽群及其相當地層及廬山層者；主要觸發崩塌之原因為降雨；淺層崩塌地之長、寬多以 100 公尺以下為主，崩塌深度多小於 2 公尺、崩塌量體多為 $10^3 \sim 10^5$ 立方公尺。此外，該研究分析崩塌地之面積與其崩塌量體，建立崩塌面積與崩塌量體間呈一對數線性關係，關係式如下所示：

$$\ln V = 0.687 \ln A + 2.326$$

惟崩塌面積與崩塌體積之迴歸式，係以崩塌面積介於 500 至 547,000 平方公尺之淺層崩塌區位所建立，因此後續引用此迴歸式時，應考量崩塌面積之大小，以使所推估之崩塌量體較具有代表性。

表 3-2 統整不同學者之以崩塌地面積推估體積之估算式(摘自詹勳全等，2015)，包括 Hovius et al. (1997)、陳樹群等(2010)及 Guzzetti

et al. (2008)等，研究區域包括紐西蘭、義大利及石門水庫與大甲溪集水區等地區。

表 3-2 不同學者提出之以崩塌地面積推估體積之估算式(詹勳全等，2015)

研究來源	研究區域	適用面積範圍	回歸公式
陳樹群等 (2010)	石門水庫集水區	$10^2 < A < 10^5$	$V = 0.04A^{1.368}$
陳樹群等 (2010)	大甲溪集水區	$10^2 < A < 2 \times 10^5$	$V = 1.92A^{1.10}$
Guzzetti et al. (2008)	義大利	$1 < A < 10^9$	$V = 0.0844A^{1.4324}$
Hovius et al. (1997)	紐西蘭	$10 < A < 10^6$	$V = 0.05A^{1.50}$

註：A 為崩塌地面積(平方公尺)；V 為崩塌體積(立方公尺)



第二節 土壤入滲及地下水滲流相關研究

過去淺層崩塌相關研究已建立出多種崩塌模擬模式，各有其優缺點及適用範圍，一般僅考慮單場有效降雨引致地下水位上升後邊坡的安定程度，無法確立破壞時間點，也未考慮降雨隨時間入滲至土壤中受含水量控制之速度及位置，因此地下水文狀態無從得知。

基於此本研究團隊(2023)配合入滲模擬及動態地下水文模式，並導入擾動區域邊坡因張力裂縫給予逕流補注加速坡面崩塌之概念，創立一套新淺層崩塌模式。

本模式以每 5m×5m 單一網格，應用無限邊坡破壞理論模式，同時考慮地表之垂直向入滲及土岩界面之水平向滲流，進而模擬隨時間變化之暫態水入滲與滲流行為。本模式亦同時考慮既有崩塌邊坡(擾動區)及原狀邊坡(非擾動區)二種坡面狀態。其中，擾動區加入垂直向裂縫逕流補注機制(5 倍之非擾動區滲透性)。然後，再進一步演算土岩界面上水平向補注後之地下水位高度。最後，將前述地下水高度比對臨界地下水位，即可之邊坡穩定。

新淺層崩塌模式之破壞條件有二：當地下水位高度超越土壤厚度者及入滲濕潤鋒與地下水位接觸者即為達到破壞，即安全係數 $FS < 1$ 之情況。

新淺層崩塌地地下水文模式，同時考慮邊坡垂直向入滲及水平向地下水二者隨著時間變化的暫態水文特性，同時結合無限邊坡理論。

水文模式中以動態(暫態模式)降雨為基礎，配合集水區現地調查資料分為考慮未擾動(原狀)土層及擾動(崩塌)土層二種狀況，如圖 3-1 中(a)及(b)所示。地下水模型包含垂直向及裂縫入滲、岩盤界面滲流特性。

原狀(未擾動)土層模型，包括最上表土層(原狀或崩積土)、岩盤界面上方堆積有較大礫石或風化岩塊、及岩盤面下為具節理之岩體等三層次；而擾動(舊崩塌)土層模型之土層及岩體模型同原狀土層之狀況，惟另考慮於土體上游存有裂縫。前述二種土層之推估土壤厚度、岩土材料參數、水文參數均有所不同。

首先，未擾動土層模型之模式，分析中僅考慮垂直向降雨入滲引致地下水位上升，如圖 3-1 (a)所示；而擾動土層模型之垂直向入滲模式，同前之非擾動(原狀土層)之狀況，惟多考慮土體存有裂縫導致增加地表逕流補注情形，如圖 3-1 (b)所示。前述二種土層之推估土壤厚度、岩土材料參數、水文參數均因土層而有所不同。

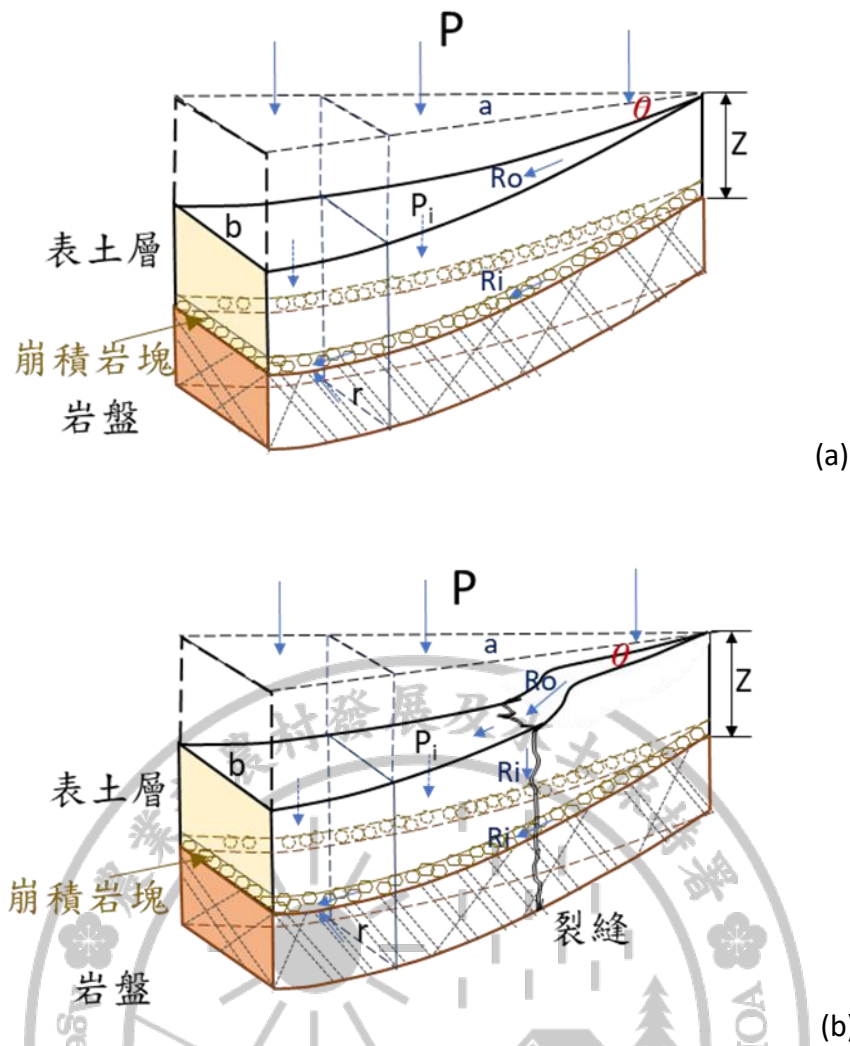


圖 3-1 擾動/未擾動邊坡降雨之地下水文示意圖

圖中 P 為降雨強度， P_i 為土壤入滲量， r 為深層排水量(排水為負，補注為正)， a 為上游匯水面積， θ 為坡度， b 為網格單位寬度， Z 為土壤厚度， R_o 為地表逕流量， R_i 為淺層地下滲流量。

地下水位隨著有效降雨入滲的影響而上升，當降雨超過入滲速率時地表即產生無法下滲之地表逕流量，若此時區位在擾動區域，即會流入裂縫轉換為地下水含量，反之位在未擾動區，則因表層無裂縫僅會直接流入河道不影響地下水文過程。

綜合概述水文模型，擾動土層之地下水分別來自地表入滲量及裂縫入滲補注量，未擾動土層僅考慮地表入滲量。而程式開發分為以下三大項：

1. 臨界地下水位模式

本研究之淺層崩塌模式假設為無限邊坡(Infinite Slope)破壞模式，且土壤深度不超過 5 公尺。其每個網格臨界地下水位推估方程式採用 SHALSTAB 模式中之：

$$h_{cr} = Z \times \left(\frac{C}{\gamma_w Z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \quad \text{式 3-1}$$

其中 θ 為坡度， ϕ 為土壤摩擦角， C 為土壤凝聚力， γ_s 土壤單位重， γ_w 為水單位重， Z 為土壤深度， h_{cr} 為臨界地下水位高度。

2. 垂直向入滲

地表垂直入滲模式之考慮，本研究採用 Green-Ampt(1911)入滲模式，假設濕潤峰前至飽和層，其入滲率 f 如下式表示：

$$f = K_s \left(\frac{h_0 + \phi_f}{Z_f} + 1 \right) \quad \text{式 3-2}$$

式中， f 為入滲率， K_s 為飽和滲透係數， h_0 為地表積水深度， ϕ_f 為土壤張力有關項， Z_f 為入滲深度。

在實際土層之滲流分析，水流入滲會在未飽和區與飽和區之間過渡，根據水分特性曲線定義，為一土壤體積水分與土壤張力

ϕ 之關係，如圖 3-2，土壤特性曲線會因為土壤質地特性的不同，曲線也會有所變化，本研究為了符合實際，不使用單一定值所測定之土壤滲透係數，而是根據土壤隨著深度變化之土壤體積含水量，分析各個時間在各土壤層之土壤張力值，進而利用 Green-Ampt 公式，推求隨著時間及深度空間的不同土壤入滲率情況。

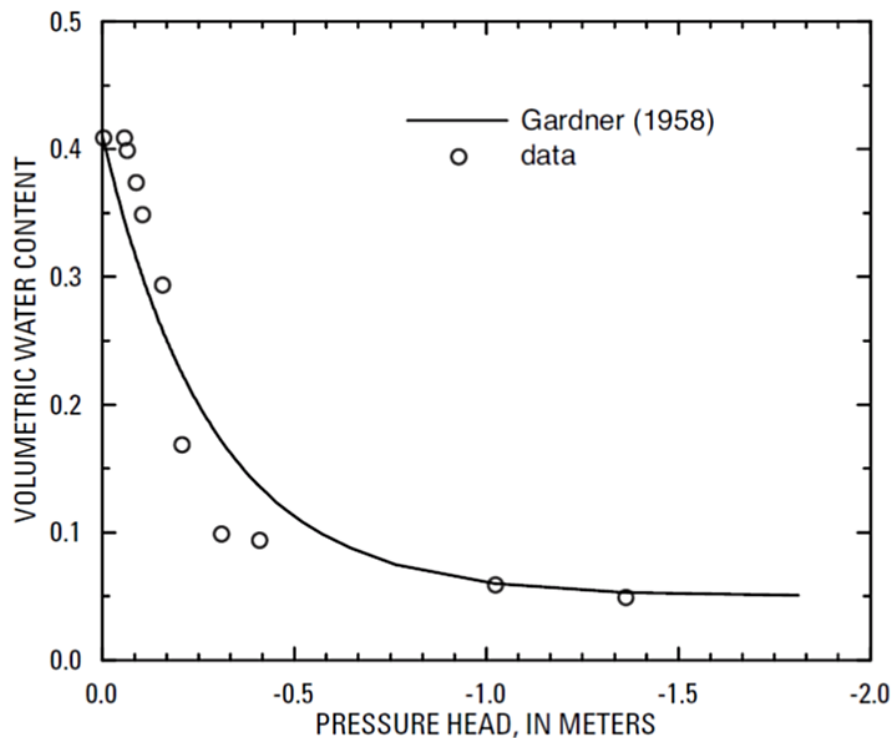


圖 3-2 土壤水分與張力關係示意圖(擷取自 TRIGRS user manual)

本研究參考林俐玲等人(2007)研究成果之臺灣中部坡地土壤水分特性曲線模式，選定黏質壤土水分特性曲線公式，配合易淹水計畫成果或實際測得之表土層體積水分，推估出各個土壤深度空間變化之不同土壤入滲率情況。

分析實測之表土層體積水分，可以發現表土層因未達到土壤水分飽和，所以土壤張力高使入滲率有較高之情形，隨著土壤深

度愈深，底層土壤因為體積水分趨近飽和，且深層土壤結構相較表土緊實，整體水分滲透情形就會隨之降低。

3. 裂縫逕流補注流量

此模式概念如圖 3-1 (b)所示，舊崩塌區地表存在許多裂縫或崩崖。當降雨強度超過崩塌區土壤入滲量時，地表逕流隨之形成。部分逕流流進裂縫，補注及蓄留岩盤裂隙及岩盤界面上方，成為深層地下水補注來源。水與裂縫間之流動速度甚高，很快速即能傳遞至擾動土層區內深處，最終形成在岩盤及土壤界面上之水平向滲透地下水。而逕流補注量則以洪峰流量計算公式計算之：

$$Q_P = \frac{CIA}{360} \quad \text{式 3-3}$$

其中 Q_P 為洪峰逕流量， C 為逕流係數， I 為降雨強度， A 為集水區面積，而計算之 Q_P 為總量，必須考慮到平松等人(1999)指出之裂縫特性，裂縫區之垂直向滲透係數為無裂縫區之滲透係數的 5 倍，依此於是進入裂縫之逕流量為無裂縫之入滲量 5 倍以內。

4. 地下水位

在岩盤界面上土壤層裂縫補注，參考 SHALSTAB 模式中土壤飽和滲透係數 K_s 與土壤厚度 Z 的關係，岩盤界面上之地下水位高度(由界面向上為正)公式如下式：

$$h = \frac{R_i}{K_s \times \sin\theta \times b \times \cos\theta} = \frac{(P - P_i - e) \times a \times \beta}{K_s \times \sin\theta \times b \times \cos\theta} \quad \text{式 3-4}$$

式中 P 為降雨強度， P_i 為土壤入滲量， e 為蒸發散量(忽略不計)， r 為深層排水量(排水為負，補注為正)， a 為上游匯水面積， β 為上游會水面積折減係數， K_s 為飽和土壤滲透係數， θ 為坡度， b 為網格單位寬度， h 為破壞面以上地下水位， Z 為土壤厚度， R_i 為淺層地下滲流流量， R_o 為地表逕流量。

除結合坡地穩定模式與地下水水文模式外，本研究設定計算格網破壞之條件有二，如下示。其中，若臨界水位高於地表時，因地下水升致地表後會滲出地表形成逕流，因此則該網格為絕對穩定。

- (1) 降雨激發之地下水水位高於臨界地下水位。
- (2) 入滲之濕潤峰面與上升之地下水水位接觸，亦即出現連通管原理，地下水水位將快速上升至地表，因而超過臨界地下水位，達到破壞條件。

5. 土壤厚度模式

土壤厚度經驗式參照陳天健(2022)研究成果之擾動區及未擾動區公式，配合數值地形模型產製出每 $5m \times 5m$ 之網格坡度圖，將網格與土壤厚度公式相乘即可產製出土壤厚度分布圖。

羅秉澤(2023)之坡度深度率定關係獲得崩塌土砂深度公式。以 H 表示表土土壤深度， θ 表示數值地形的坡度， H 與 θ 的關係如下式。

$$H = 8.1241 \text{ Exp}(-0.046\theta) \quad \text{式 3-5}$$

第三節 坡面型土石流相關研究

一、坡面型土石流之地形及材料特性

於地形上，Brunsden(1979)指出坡面型土石流常發生於具豐富與鬆散之沉積物坡面上、坡度陡、稀疏植物覆蓋表面，且之前並無溪流或下切渠道。林慶偉(2002)提出坡面型土石流主要指無明顯溪谷地形(經室內地形圖判釋作業與現地查核後)，受到上游崩塌地影響，由降雨觸發坡面崩塌，致使範圍擴大帶動土石流動，並於地形上新生成沖蝕溝地形；坡面型土石流發生於主要谷地兩側邊坡上，規模較小，站在主要谷地中可以一覽全貌，其流動的土石在主河谷邊緣堆積成土石堆積扇，堆積體坡度較其他崩塌形態的堆體平緩，且主軸較長(呂岡侃與徐美玲，2004)。

坡面型土石流主要發生於暴雨時或過後，為斜坡上的鬆散物質因重力作用而迅速運動之行為。由於此等現象係崩塌土體在向下移動時，同時呈現土石流動之行為，在災前相片基本圖上可能不具明顯之溝谷作為流動之渠道，但在實地上可發現在崩塌邊坡上有淺溝狀之蝕溝出現，此等蝕溝凹槽除可匯集逕流外，更可形成流動之流路；坡面型土石流發生區與流動區較無明顯之界面(游繁結等，2005)。

在材料方面，坡面型土石流為一個在陡坡上快速運動之水和沉積物的混合物(Jomelli, 2007)；其土石流動型態，可由上游崩落物質受水流帶動至下游並堆積而成之沖積扇地形作為判釋依據。與崩塌之堆積型態相比較，其坡度較為平緩且堆積扇的主軸長度較長，其亦與一般崩塌所形成的崖錐堆積有所不同(游繁結等，2005)。

中筋氏(1977)調查仁淀川流域 140 個土石流案例，將其發生類型

歸納為四類：

- (1) 大規模崩塌誘發型——主要為坡面、河岸發生大規模崩塌，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，使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造成，發生頻率佔 44%。
- (4) 溪床堆積物流動型——近飽和之堆積層由於逕流形成土石流，其發生頻率 5%。

從中筋氏(1997)之調查資料顯示，與邊坡崩塌相關之土石流型態達 95%。由此可知，土石流之發生與河岸邊坡土體崩塌，有相當密切之關係。

二、坡面型土石流地形判釋模式

研究團隊採用次集水區概念，進行坡面型土石流及崩塌分析單元劃分。就河岸或邊坡地形，依據土壤沖蝕程度可簡單分為邊坡坡面、溝壑、及野溪三種單元。後二者地形為多個同一匯水出口之小面積次集水區集結而成如圖 3-7 所示；而前者邊坡之坡面單元則非。

針對欲分析集水區範圍，配合 DEM 應用 GIS 之水文分析模組，產生各種次集水區分析單元範圍；再逐次調整單元門檻面積及地形出口等性質，求取吻合度最佳之地形分析單元劃分區。劃分程序如圖 3-8 所示。於地形單元圈繪後，我們將此類無同一匯流出口之坡面單元，

編為 S 邊坡。而具集水區地形者，再區分為坡面型土石流(HDF)及非土石流(NDF，即崩塌)單元。



圖 3-3 集水區範圍示意圖(底圖來源 google earth)

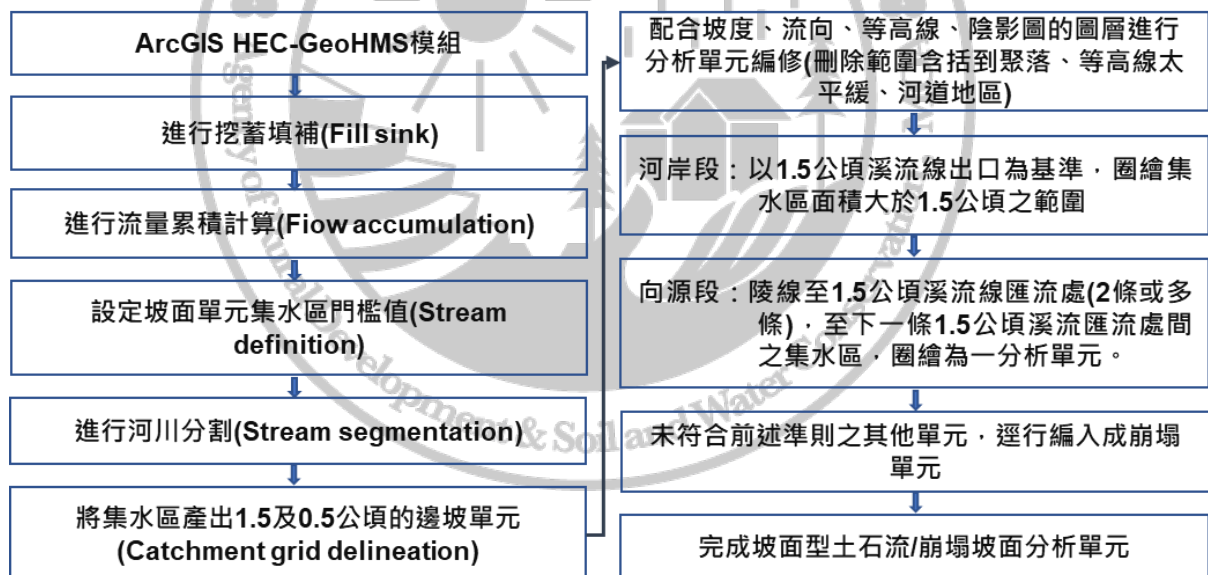


圖 3-4 崩塌坡面分析單元圈繪流程圖(陳天健等人，2016)

進一步應用陳天健等人(2016)所建立之坡面型土石流分析單元劃定方法(圖 3-5)，圖中之右圖分別標示出發生區(EWA)、出流口(pass)、流動段長度、及出口(以溢流點為終點)。

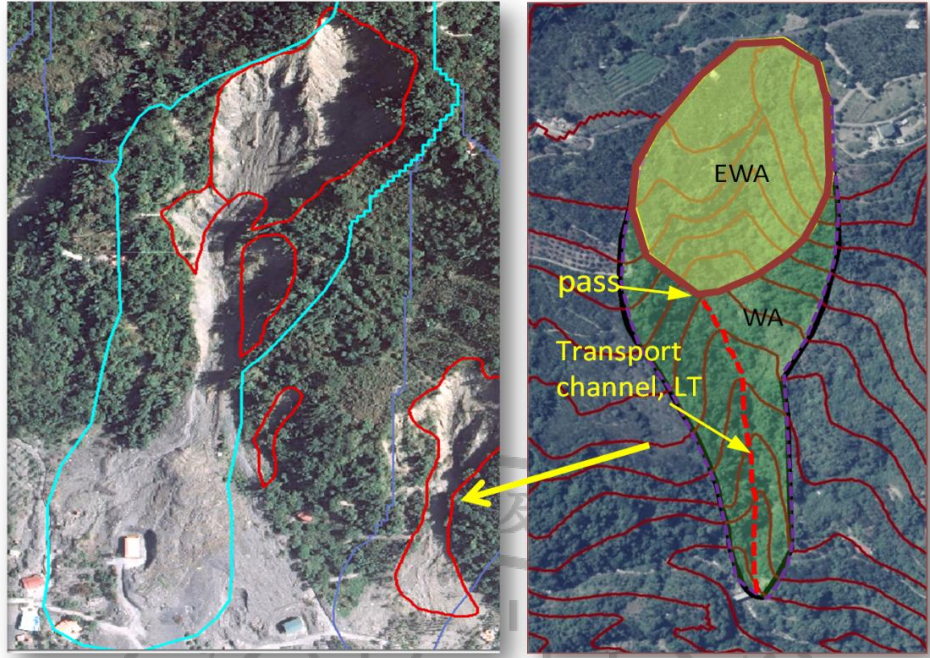


圖 3-5 分析單元劃定示意圖

1. 分析模式因子

區別分析為避免複共線性會有不利分類的影響，採逐步估算法 (step-wise estimation)，逐漸加入新的變數，將不適合的剔除直到模式合理為止。本研究進行區別分析時採用 SPSS 統計軟體進行分析，為了使兩母體驗前機率相同，坡面型土石流與未發生土石流，兩個群組各建議 32 筆以上分析母體，若干筆為驗證組。應用上述分析單元概念，圈繪地形分析單元，建置因子資料庫。並事先給予類別編號，坡面型土石流資料為 1 及未發生坡面型土石流為 2 作為分組變數。本研究選定地文因子及淺層崩塌因子共 19 項因子為預測變數，再以費雪區別分析(使

用代號如表 3-3 所示)，建立坡面型土石流與崩塌之判別公式。
本文簡要說明其中二因子。

表 3-3 區別分析之各因子使用代號表(陳天健等，2019)

特性因子	使用代號	特性因子	使用代號
集水區面積	WA	發生區平均寬度	AWI
集水區平均寬度	AW	發生區坡面平均坡度	AGI
集水區坡面平均坡度	AGW	發生區起伏比	CGI
流動段長度	LT	發生區深寬比	DRI
流動段深寬比	DRT	發生區形狀係數	FFI
流動段高程差	EDT	坡面平均坡度比	GRIR
流動段起伏比	CGT	有效集水指標	EWAI
流動段平均坡度	CST	形狀係數比	FFR
崩塌潛感面積	LSA	隘口高程比	EDPR
崩塌潛感面積比	RLSA		

(1) 分析單元面積(WA)

分析單元之面積即為原次分區之集水區面積，為利用災前 DEM 劃分出之分析單元範圍，佐以人工對照衛星影像或航照、等高線(10m)及同一匯水出口等條件編修範圍。最後再利用 GIS 計算其面積而得之。

(2) 有效發生區面積(EWA)

有效發生區面積為引用土石流發生區面積之概念。本研究採陳柏龍(2013)之定義：坡面型土石流發生區為流動區以上之集水區，如圖 3-5 所示，GIS 產製分析單元之溪流線，溪流線以上之集水區圈畫為坡面型土石流發生區，而本研究經測試後溪流線閾值以 0.005km^2 時，與現況吻合度最高。

2. 坡面型土石流判釋模式

本研究團隊應用陳天健等人(2016)發展沉積岩地質區坡面型土石流之判釋模式。該模式採用坡面型土石流及崩塌案例共 64 筆，應用坡面單元概念，圈繪土石流分析單元，建置因子資料庫，再利用費雪區別分析法(Fisher's discriminant method)，建立坡面型土石流判釋模式。

為避免模式中存在相依性高的因子，故先利用皮爾森相關性分析與偏相關分析，去除高度相關之因子組合，最後再利用費雪區別判定模式找出正判率與捕捉率最佳之因子組合。

考慮地形、集水區、水文等各項特性，經多方嘗試後由表 3-3 挑選 7 項較適用於坡面型土石流之地文因子，建立坡面型土石流判釋公式，而後再經以實際案例驗證模式效力。

經費雪分析進行崩塌及坡面型土石流案例區別分析，成果顯示，以七項因子做為組合時，模式可得到最佳之正判率。標準化之區別函數如下式：

$$y=0.12X_1-0.581X_2+0.011X_3+0.509X_4+0.051X_5-0.461X_6+0.186X_7$$

其中， y 為區別函數， $y>0$ 時，判為坡面型土石流，反之則為崩塌。 X_1 為集水區坡面平均坡度(AGW)、 X_2 為集水區平均寬度(AW)、 X_3 為發生區深寬比(DRI)、 X_4 為流動段長度(LT)、 X_5 為流動區深寬比(DRT)、 X_6 崩塌潛感面積比(RLSA)、 X_7 為形狀係數比(FFR)，其模式之正判率如表 3-4 所示。

當區別函數之係數為負值時，此因子與區別分析之線性函數成反比，如集水區平均寬度與判定模式呈負相關；反之，則與判定模式呈正相關，此類因子有：集水區坡面平均坡度、發生區深寬比、流動段長度、流動區深寬比、崩塌潛感面積比與形狀係數比。樣本區正判率為 87.5%。

表 3-4 樣本區區別分析結果

結果呈現	原始	預測		總和
	類別	DF	NDF	
個數	DF	29	3	32
	NDF	5	27	32
百分比%	DF	90.6	9.4	100
	NDF	15.6	84.4	100
整體正判率= $(29+27)/(32+32) \times 100\% = 87.5\%$				

集水區坡面平均坡度(AGW)、集水區平均寬度(AW)、發生區深寬比(DRI)、流動段長度(LT)、流動區深寬比(DRT)、崩塌潛感面積比(RLSA)與形狀係數比(FFR)七項因子，在皮爾森相關係數都屬於中、低相關性如表 3-5 所示，皆為互相獨立之因子，且在區別模式及驗證區皆有良好成效。

表 3-5 七因子皮爾森相關係數分析結果

	AGW	AW	DRI	LT	DRT	RLSA	FFR
AGW	1	-0.177	0.181	-0.049	0.090	-0.238	-0.131
AW	-0.117	1	0.313	0.462	0.365	-0.143	-0.114
DRI	0.181	0.313	1	0.183	0.194	-0.324	0.140
LT	-0.049	0.462	0.183	1	0.355	-0.427	0.299
DRT	0.090	0.365	0.194	0.355	1	-0.304	0.060
RLSA	-0.238	-0.143	-0.324	-0.427	-0.304	1	-0.245
FFR	-0.131	-0.114	0.140	0.299	0.060	-0.245	1

第四節 淺層崩塌事件逐時崩塌土方量分析模式

淺層崩塌主要界定為在深度在 5 公尺以下發生於岩盤上部風化層及表層崩積層的土壤 (黃宏斌, 2010; Jonathan Peter McKenna, 2011; Dietrich, 2008)。配合 DEM 解析度, 計算之網格單位為 5 公尺。以下以南莊層為例。

1. 分析參數設定

水文分析模組計算各個坡面網格之上游匯水面積 a , 配合現地坡度、推估土層厚度及土壤材料物理性質, 計算崩塌臨界地下水位。模式分析之參數整合如表 3-6。

另依據地表入滲(垂直向)及岩盤界面滲流(水平向)、裂縫入滲、岩盤補注等參數。導入各個網格逐時降雨歷線、土層水分性質、地表降雨入滲係數及飽和滲流係數, 搭配地層坡度及厚度、擾動種類等。



表 3-6 淺層崩塌分析模式參數表(以南莊層為例)

參數	符號	數值 (擾動 / 未擾動)	單位
凝聚力	c	5 / 8	kPa
摩擦角	ϕ	28 / 32	°
坡度	θ	由 5m×5m DEM 產製	°
上游匯水面積	a	由 5m×5m DEM 產製	m ²
土壤單位重	γ_s	19 / 21	kN/m ³
水單位重	γ_w	9.81	kN/m ³
土壤厚度	z	公式推估	m
時雨量	r	各網格之空間推估雨量	mm
垂直向入滲	kv	0.002	cm/s
水平向入滲(考慮界面流及岩盤裂縫流)	kh	0.02 (採 kv*10)	cm/s
入滲率	f	$f = K_s \left(\frac{h_0 + \phi_f}{Z_f} + 1 \right)$	cm/s
飽和滲透係數	Ks	0.002	cm/s
地表積水深度	h ₀	一般採 0	cm
土壤張力	ϕ_f	(θ, ϕ_f)隨土壤體積水分變化之土壤張力	cm
入滲深度	Z _f	(T, Z _f)隨時間變化之入滲深度	cm

註：

1. $f = K_s \left(\frac{h_0 + \phi_f}{Z_f} + 1 \right)$ 採用 Green-Ampt (1911) 入滲模式
2. $\theta(\phi_f) = 0.029778 + 0.564222 / [1 + (0.0699\phi_f)^{1.25}]^{0.2}$ (林俐玲等, 2007)

● C、 ϕ 、 γ_s 係數參考理由說明

以中新世晚期南莊層為例，其由砂頁岩互層組成，地質材料脆弱、節理發達，因此 C、 ϕ 、 γ_s 係數參考中央地礦中心之易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第三期 100 年度):集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(1/3)。以中部流域材料參數之南莊層做為參考(表 3-7)。

表 3-7 北港溪流域各地層分區之材料參數

地層分區	Γ_s (kN/m^3)	C (kPa)	ϕ ($^\circ$)	K (10^{-6}m/sec)	D ($10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$)	I_z (10^{-7}m/sec)
紅土台地堆積層	19	22.1~45	30~34	0.083~83	0.16~160	0.083~83
沖積層	16.5~19.5	2.5~3.5	23.1~32	25~2900	75~8800	25~2900
階地堆積層	19.5~23	2.3~3.5	23~28	0.63~0.74	1.8~22	0.63~74
頭嵙山層香山段	21	11.17~57	24~27	0.04~40	0.008~80	0.04~40
階地堆積層	19.5~23	2.3~3.5	23~28	0.63~0.74	1.8~22	0.63~74
頭嵙山層香山段	21	11.17~57	24~27	0.04~40	0.008~80	0.04~40
卓蘭層	22.4	11.3~57.5	31~39	0.5~500	1~1000	0.5~500
頭嵙山層火炎山段	26	9.28~51	26~30	0.062~62	0.12~120	0.062~62
桂竹林層	23.2	19.4~99	25~28	0.0001~0.1	0.0002~0.2	0.0001~0.1

註：分析參數是以地層分區之表層風化層為主。參數範圍值上限值為該分層之初始給定值、下限值則為考量水系、道路、構造及既有崩塌位置後之參數弱化值。

● 土壤厚度 Z

土壤厚度 Z 參考-集水區坡面表土及崩積土層之厚度與地形關係。參考羅秉澤(2023)之坡度深度率定關係獲得崩塌土砂深度公式。以 H 為表土土壤深度， θ 為地形坡度，H 與 θ 的關係如下式。

$$H = 8.1241 \text{ Exp}(-0.046\theta)$$

● 土壤水分特性曲線

土壤水分特性曲線參考-台灣中部坡地土壤水分特性曲線之研究及水分移動之模擬（林俐玲等，2007），其大肚山區黏質壤土水分特性曲線公式：

$$\theta(\phi f) = 0.029778 + 0.564222 / [1 + (0.0699 \phi f)^{1.25}]^{0.2}$$

其中， θ ：土壤體積水分； ϕf ：土壤張力

2. 分析結果

利用上述的參數配合地下水位入滲模式，選取 2012 年 0610 豪雨事件作為淺層崩塌模擬情況，如圖 3-6 所示。



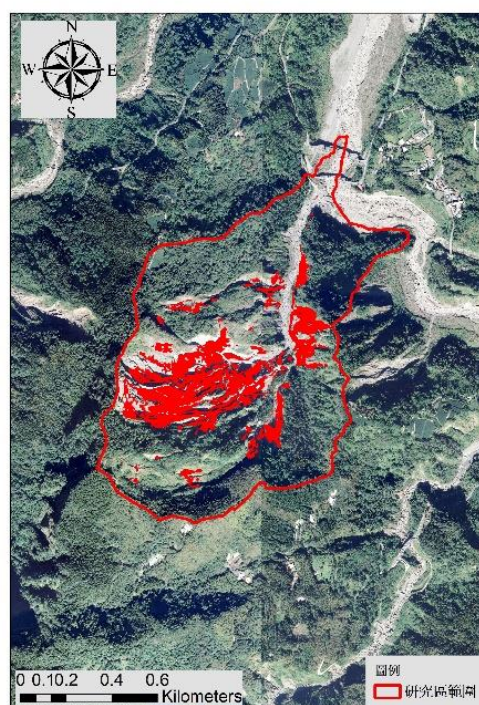
2012/06/09/16:00



2012/06/09/17:00



2012/06/09/18:00



2012/06/09/19:00

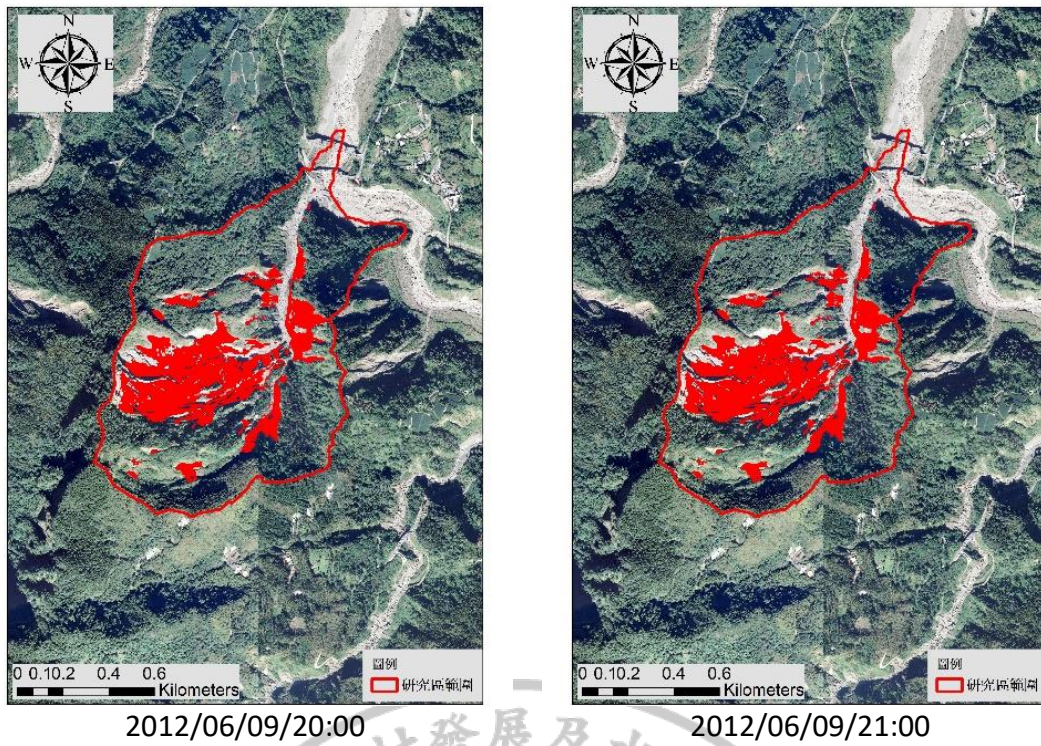


圖 3-6 逐時淺層崩塌情形



第五節 網格式分析之崩塌範圍圈畫精進模式

傳統上常用之淺層崩塌模式分析或影像自動判釋方法大多採用像元式 (pixel-based) 或網格式的分析方法，藉由特定統計或演算法的分析與分類，逐一賦予影像中每個像元(網格)一種類別。

既有影像分析之像元式分類法大多僅藉由像元之光譜分布(NDVI)的差異進行分類，不易呈現地貌間之空間關聯性，如崩塌區內殘坡或植被之影響，分類結果易常有雜訊 (salt & pepper) 產生，影響分類的精度和結果。此種雜訊及散布變異點狀況亦出現於崩塌地預測及不安定區塊分析結果，如圖 3-7 所示。此乃利用淺崩模式進行網格式潛勢分析，獲得之散佈式不安定區網格分布，常出現崩塌地邊界不確定之狀況，如左圖中紅色點為高崩塌潛勢點，綠色為低潛勢點。進一步放大則會出現類似陳映融等人(2022)研究中出現群聚之不安定網格點，但邊界混淆難以界定，通常需採人工進一步編修。

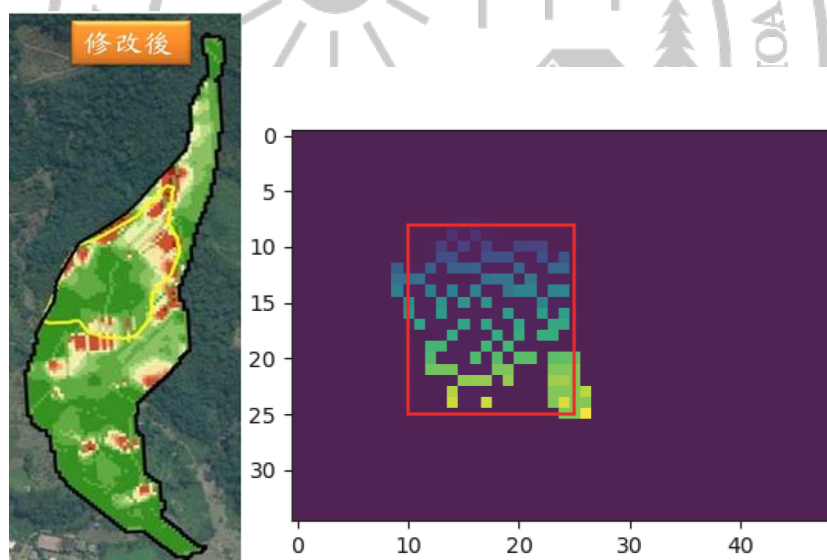


圖 3-7 利用 SHALSTAB 網格式淺層崩塌模式分析，獲得之散佈式網格變異點 (左:本團隊成果。右:陳映融等人，2022)

淺層崩塌模式分析之結果，分類成 8 個不同的坡向後，進行分群，再利用淺層崩塌輪廓範圍的圈繪分析程式模組，將每個群體空缺的部分填補成一個完整的崩塌面(圖 3-8)，在將同一個小時 8 個不同坡向的崩塌面進行合併(圖 3-9)。而後計算該時段的崩塌面積及土方量體。

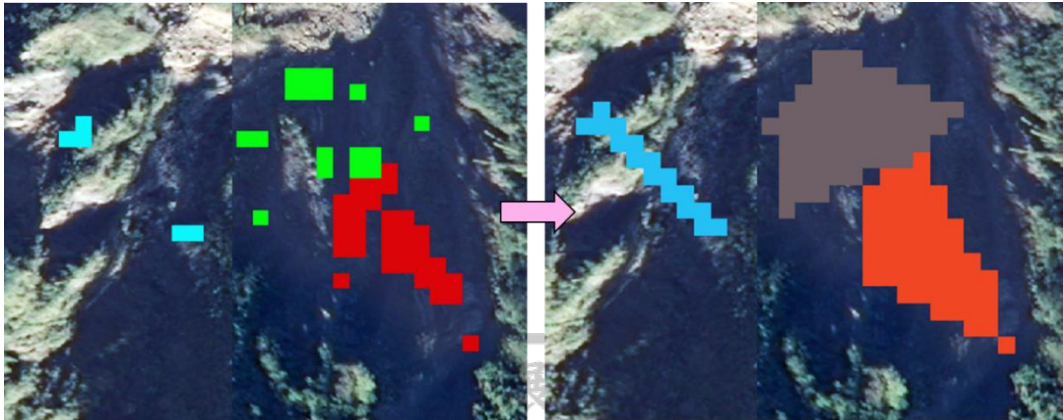


圖 3-8 崩塌輪廓範圍繪製

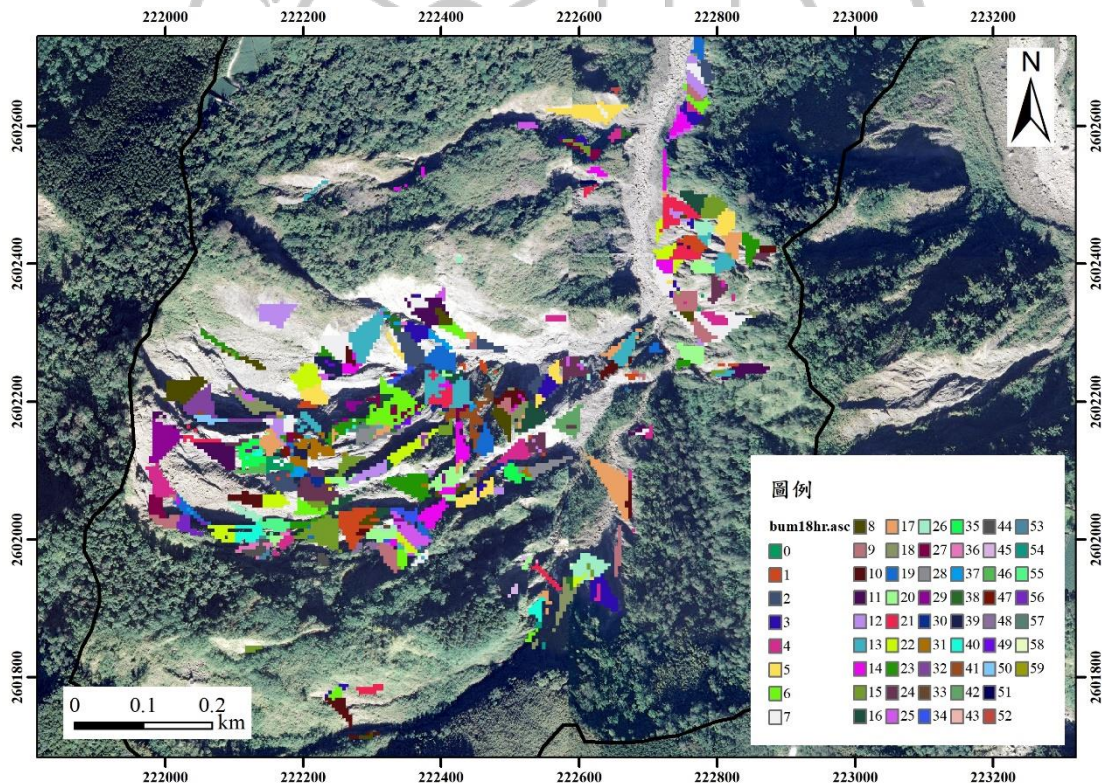


圖 3-9 各坡向崩塌面合併圖



第四章 研究區概述及研究資料收集與建置

第一節 研究區域及地質概述

本計畫研究區域以臺灣南部山區為主(如圖 4-1)，曾文溪以南至恆春半島。臺南市、高雄市與屏東縣。地形為中央山脈西側陷落，且為阿里山、玉山山脈南行的末端，平原廣闊。高屏溪流貫其中，高屏溪為臺灣流域面積最廣的河川。河流堆積旺盛，上游坡陡流急，河川出谷口易形成沖積扇；下游平緩彎曲，多氾濫及沖積平原。

曾文溪流域位於臺灣西南部，北鄰急水溪，東界高屏溪，南接鹽水溪，西臨臺灣海峽。曾文溪主流全長 139 公里，為臺灣第四長河流，流域面積 1,177 平方公里，其中多為山地，平地面積僅佔 14%，源頭海拔高 2,440 公尺，其主要支流有後堀溪、菜寮溪、官田溪等，主流發源於阿里山脈之水山（標高 2,609 公尺），集水區地形即以流域東北端的溪流源頭區地勢最高，往西南方向地勢高度漸減，主流路隨地勢由東北往西南方向蜿蜒流經阿里山山脈地區，並流入曾文水庫；曾文溪重要支流有後堀溪及菜寮溪。後堀溪發源於三角南山（標高 1,186 公尺），流經南化區，於玉井區西南方匯入曾文溪。菜寮溪發源於牛湖山（標高 798 公尺），流經左鎮區後匯入主流。

曾文溪流域內的地層與構造線大致呈東北-西南向或南北向，受應力之影響岩體的節理或破裂面接近東西向，而曾文溪主流流向大致為東西向，部份河段順著節理面切過地層及形成橫谷，另河道與地層走向平行的即為縱谷，此縱橫交錯的特殊水系於玉井、楠西一帶十分常見。曾文溪流域斷層線及構造線大多呈北北東—南南西走向，經過的斷層包含觸口斷層、六甲斷層、新化斷層以及旗山斷層，分布地層

主要為三民頁岩、紅花子層、長枝坑層、糖恩山砂岩、南庄層及卓蘭層。

高屏溪流域包括旗山溪、隘寮溪、高屏溪、荖濃溪等，全長 171 公里為全臺第二長之河川，流域面積為 3,257 平方公里。高屏溪上游主流為荖濃溪，發源於中央山脈玉山東坡與秀姑巒山西南坡支流合流後，向南流入高雄市境內，流經桃源、寶來、土壠、荖濃、六龜至大津與濁口溪匯流後，過竹子門出谷，入屏東平原後，納入東側之隘寮溪，稱二重溪，續流至嶺口與南下之旗山溪（楠梓仙溪）合流後，始稱高屏溪。

地層與地質構造亦呈北北東—南南西走向延伸，流域內出露之地層可以土壠灣斷層以及潮州斷層的連線概略劃分為兩大區塊，斷層線以東出露地層以脊樑山脈帶之變質岩與亞變質岩地層為主，包含大南澳片岩、十八重溪層(板岩)、達見砂岩、畢祿山層 (板岩及硬砂岩)、佳陽層(板岩)及廬山層(板岩)；斷層以西出露地層則屬西部麓山帶之沈積岩地層為主，包括南港層、南莊層、桂竹林層、古亭坑層與頭嵙山層 之相當地層，岩性以砂岩、粉砂岩、頁岩與泥岩為主。

高屏溪流域之地層與區域性地質構造大致呈北北東—南南西走向，主要斷層包含隘寮北溪斷層、關山斷層、土壠灣斷層、高中斷層、潮州斷層以及六龜斷層，潮州斷層與土壠灣斷層以西屬於西部麓山帶地質區，分布地層主要為三民頁岩、長枝坑層、糖恩山砂岩、階地堆積層與沖積層。

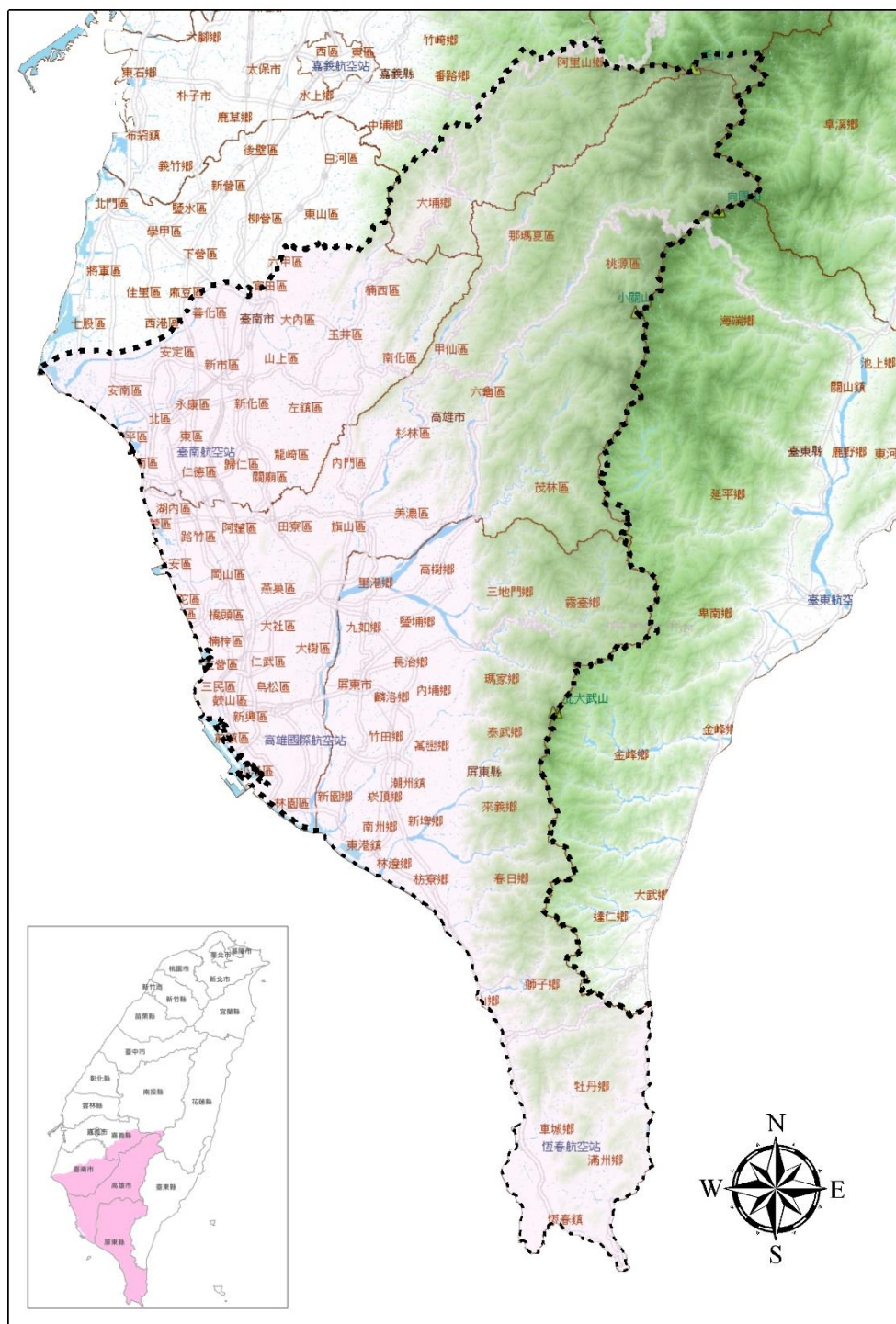


圖 4-1 台灣南部地區研究區範圍

第二節 研究區域基本圖資庫收集

本研究蒐集臺灣南部地區坡面型土石流案例。再依據陳天健等(2015, 2016)坡面型土石流之現地產狀特性描述，確認災害型態為坡面型土石流、崩塌或其他災害，且建置坡面型土石流災害案例資料庫。

災害資料除收集各研究文獻、調查報告等，亦根據水保局重大土石災例之災害類型判定崩塌或土石流者為依據，室內配合航空照片與衛星影像(配合 Google Earth 套疊圖層使用)等進行災害型態檢核。同時本計畫亦收集與綜整相關之研究文獻，以策進研究成果。

目前本研究逐步收集及建置研究資料庫，除野外調查資料外，同時於室內配合基本圖資如航空照片與衛星影像(配合 Google Earth 套疊圖層使用)等進行檢核，並進一步應用地理資訊系統產製相關因子供研究使用。本研究已蒐集相關圖資如表 4-1 所示。

表 4-1 圖資基本資料表

使用圖資	時期	來源
1/25000 地形圖	第三版	內政部
莫拉克災前航照	2005	農林航空測量所
莫拉克災後航照	2009	農林航空測量所
莫拉克災前崩塌圖層	2004	農村水保署
莫拉克災後崩塌圖層	2009	經濟部地礦中心
地質圖	-	經濟部地礦中心
地形圖	2000	1/25000 經建版
數值高程模型(5m/1m)		內政部提供

第三節 研究區數值地形、地文、遙測等圖資收集

本研究使用之相關圖資包括：內政部第三版 1/25000 地形圖、流域地質圖資、研究區災前後航空照片或衛星影像、地質敏感區圖層、崩塌目錄、災前數值高程模型（5x5mDEM）及近年 LiDAR 等，應用地理資訊系統產製相關分析因子以供後續研究使用。

依實際案例，配合影像判釋、崩塌圖資圈繪、數值地形、進行崩塌單元與坡面型土石流單元之地文、水文、崩塌等因子產製資料，同時建置成統計分析資料庫。



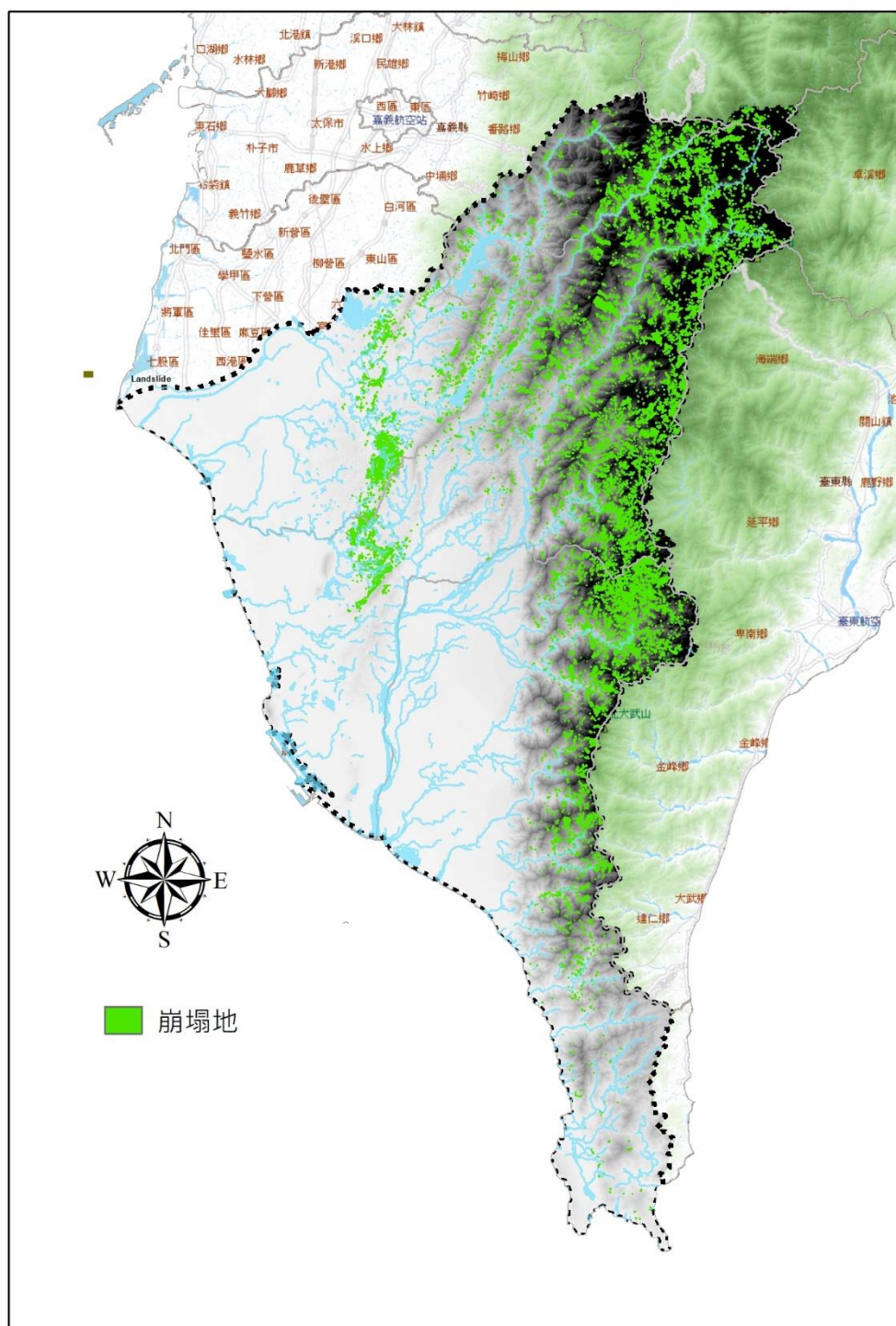


圖 4-2 研究區圖資收集套疊分布

第五章 重大土砂災害資料庫及坡面型土石流發生時間及雨量資料庫

第一節 重大土砂災害資料

本節收集臺灣南部地區近年重大土砂事件，其中，主要針對坡面型土石流事件進行收集及研究，共收集 70 筆土石流災害事件，分布如圖 5-1 所示。詳細災害綜整於表 5-1。

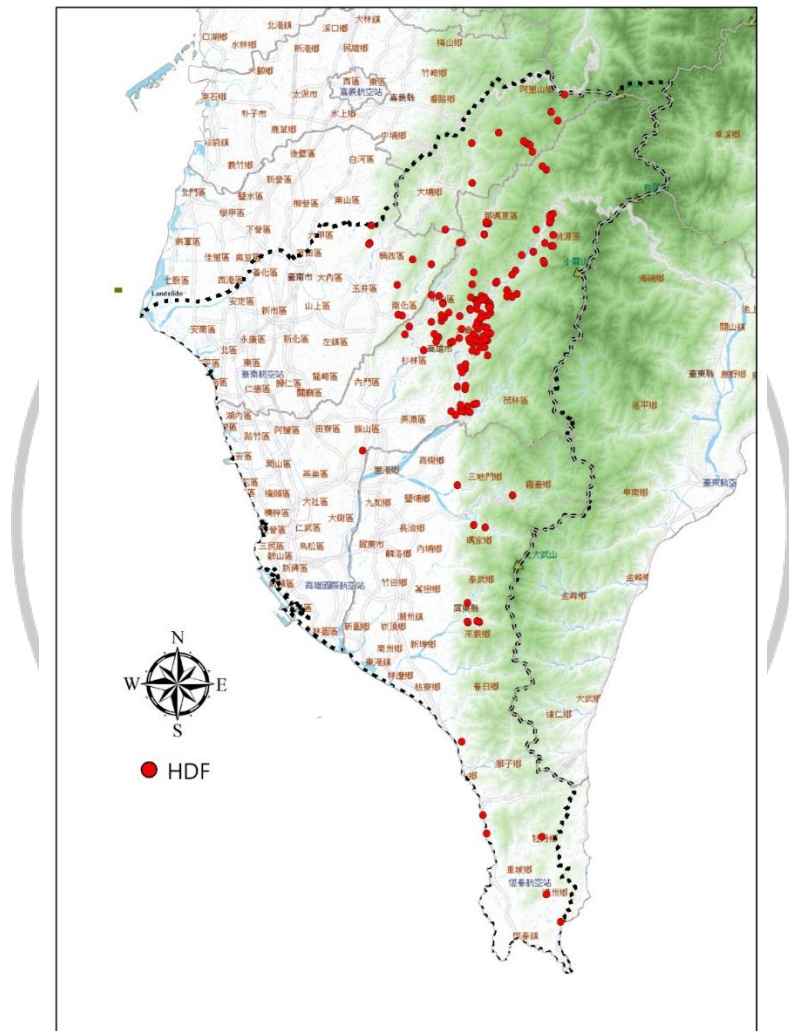


圖 5-1 近年南部地區坡面型土石流分佈位置

表 5-1 歷年重大土石流災害事件表

序號	年度	災害事件	縣市	鄉鎮	村里	災害地點	坐標(TWD97)		災情描述
							X	Y	
1	2006	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	六龜鄉大津村 (大津靈修營地對面野溪)	214027	2533855	連日大雨導致上游崩塌範圍擴大，又 6 月 9 日大豪雨使崩塌土石含水量突增，且溪床坡度提供足夠之勢能進而導致土石流發生。
2	2006	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	六龜鄉大津村 (津鳳宮後方野溪)	213973	2533632	95 年 0609 豪雨期間，津鳳宮後方野溪於 6 月 10 日 6 時爆發土石流，造成下方津鳳宮及鄰近房屋受損。
3	2007	0809 豪雨	屏東縣	三地門鄉	達來村	好茶橋	218891	2510525	三地門鄉與霧台鄉交接處的好茶溪(屏東 006)於 8 月 13 日發生土石流災害，其土石料源初步判斷主要為上游左側邊坡發生崩落地情形，崩塌範圍長約 430 公尺、寬約 140 公尺、深約 2 公尺，初步估計約有 121,000 立方公尺崩塌量崩落至下游溪床造成土石流災害。
4	2007	0809 豪雨	屏東縣	瑪家鄉	瑪家村	獅子橋	216589	2511001	因連續大雨導致好茶獅子橋上游右側野溪發生大規模崩塌災害，且所降下之大豪雨使土石含水量突增，且溪床坡度提供足夠之勢能，使流動的土體轉化成為土石流造成災害。
5	2007	聖帕颱風	高雄市	甲仙區	東安里	白雲巷 20-1、20-2 號	211593	2553074	受災地點位處鹽桑坑溪上游支流之野溪河谷旁，因聖帕颱風連日大豪雨導致坡面土石含水量突增，且坡面坡度提供足夠之勢能，使流動的土體轉化成為土石流造成災害。
6	2007	聖帕颱風	高雄市	六龜區	寶來里	寶來一橋(台 20 線里程 80K 處)	218090	2556401	自 8 月初起因帕布颱風、梧提颱風及聖帕颱風接連侵襲臺灣，導致南部地區連日豪雨不斷，並造成新寶來溫泉渡假村對岸之野溪集水區內坡地崩塌範圍擴大，而後 8 月 18 日至 20 日降下之大豪雨使崩塌於溪床之土石含水量突增，且溪床坡度提供足夠之勢能，使流動的土體轉化成為土石流。

7	2008	卡枚基颱風	台南市	楠西區	照興里	-	196028	2566867	卡枚基颱風來襲期間，本地於 7 月 17 日 17 時爆發土石流，造成溪流下游芒 果園淤埋，一輛機車遭沖走。 土石淤埋：土石淤埋下游約 1000 平方公尺芒果園。
8	2008	卡枚基颱風	台南市	楠西區	龜丹里	鐵谷山橋處野溪	201447	2558648	卡枚基颱風來襲本地發生土石流，造成溫泉橋護欄損毀，大量土石淤積河道， 果園淤埋，溪流護岸損傷。
9	2008	卡枚基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	寶來一號橋(台 20 線里程 80k 處)	218799	2556182	野溪於 7 月 17 日 23:00 爆發土石流，土石淤塞河道並溢流至台 20 線里程 80k 處(近寶來一號橋西側)，造成交通受阻，野溪上游側之部分產業道路沖毀。
10	2008	卡枚基颱風	高雄市	甲仙區	東安里	高 130 線 3.7k 處南邑慈恩第 11 號橋	210441	2554978	甲仙鄉東安村油礦巷崩坪坑於 7 月 17 日晚間，因卡枚基颱風帶來之超大豪雨導致崩坪溪山洪爆發，洪水夾帶大量土石沖刷而下，導致崩坪溪沿線產業道路及房舍嚴重毀損。
11	2008	卡枚基颱風	高雄市	杉林區	木梓里	福德寺 (台 21 線 24.2k 與高 129 線銜接，順高 129 線直行約 3.2km，奇潭橋前左轉 100m)	202967	2548832	卡枚基颱風帶來豪雨，造成野溪上游大面積崩塌，大量土石崩落，於 97 年 7 月 17 日晚上 23 時發生土石流，造成河道改變，護岸嚴重毀損，兩岸道路及 果園遭土石淤埋。
12	2008	卡枚基颱風	台南市	楠西區	灣丘里	井湖產業道	204502	2563704	卡枚基颱風來襲期間，本地於 7 月 18 日爆發土石流，土石淤埋民宅 2 戶，淤埋井湖產業道路約 50 公尺。
13	2008	卡枚基颱風	台南市	南化區	關山里	南市 DF041(關山 12 號橋)	208213	2562684	後堀溪暴漲沖毀關山 12 號橋。另台南 A035(南市 DF041) 土石流潛勢溪流亦因坡地崩塌導致土石流，致使下游 1 戶民宅受損。

臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析-南部地區

14	2008	卡枚基颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	三民國中對面側野溪	219021	2570974	因卡枚基颱風帶來之超大豪雨導致學校對面之野溪土石崩落，大量土石沖刷而下堆積於三民國中籃球場內達 4,000 立方公尺，籃球場右側操場則是遭泥砂所覆蓋，厚度達 10~15cm
15	2008	卡枚基颱風	高雄市	六龜區	中興里	六龜鄉中興村聖母宮(台 27 線 21.7K 處)	214015	2542262	因上游坡面崩塌，大量泥砂流入河道中，造成河道土石淤滿，以致洪水溢流 將河道中之泥砂帶至兩岸，造成部分護岸毀損、道路及民宅遭土石淤埋。林 務局連續潛壩上游小崩塌，寬 20 公尺，長 15 公尺，高 10 公尺。
16	2008	卡枚基颱風	高雄市	桃源區	建山里	台 20 線 78.4k 處	218224	2555698	高雄縣桃源鄉建山村後方野溪，上游因卡枚基颱風所帶來之超大豪雨引發洪 水，溪床沖刷深 1~3m，兩岸侵蝕約 5~50m 不等，同時夾帶巨石於 7 月 18 日 凌晨 3 時造成建國橋及建山二橋毀損，產業道路建山巷沖毀約 200m，台 20 線及護岸沖毀約 50m。
17	2008	卡枚基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	高市 DF046	217329	2555463	高雄縣六龜鄉寶來村土石流潛勢溪流高雄 A028 附近之五龍宮，其後方坡地 於 7 月 18 日凌晨 3 點爆發土石流災害，初估約有 1 萬 5 千立方公尺之土石淤 埋廟宇，土石同時造成前述之潛勢溪流堵塞致使河水泥流漫淹侵入民宅，另 農路共約 80 公尺受阻中斷
18	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	六龜鄉中興村 24 鄰 (大智瀑布北側，約位於 台 27 線 17k 處)	213302	2538429	高縣 DF048 土石流潛勢溪流(大智瀑布北側野溪)於 8 月 7 日晚間 20 時爆發土 石流，初估約 50 萬立方公尺之土石沖毀掩埋多處民宅及部分果園苗圃，並造 成台 27 線受阻中斷約 400 公尺。
19	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	六龜鄉寶來村(五龍宮) (台 20 線轉入寶建路約 200 公尺處)	217318	2555478	寶來村五龍宮後方既有崩塌地，因莫拉克颱風挾帶豪雨造成崩塌範圍持續擴大，大量土石沿土石流潛勢溪流(高縣 DF043)衝出，掩埋下游處之五龍宮與 兩戶民宅，並阻斷寶建路及台 20 線交通約 300 公尺，

20	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	六龜鄉寶來村(大埔部落)	217520	2555428	土石流潛勢溪 DF043 於莫拉克颱風時爆發土石災害，大量土砂由高縣 DF043 潛勢溪流河道傾洩至台 20 線，淤埋鄰近民宅兩戶、五龍宮與住戶耕地，土砂 溢淹堆積於道路，阻斷通往上方建山國小寶建路、台 20 線交通。
21	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	阿里山鄉	山美村	山美部落 (第 4 鄰山美國小附近)	216196	2589733	莫拉克颱風夾帶豪雨引至上游坡地崩塌並爆發土石流災害，土石流由嘉 129 線與嘉縣 DF057 交會處排水箱涵溢流，造成山美國小與數戶民宅遭土石淤埋，阻斷道路約 100 公尺(嘉 129 線靠近山美段 209 號電線桿處)，排水渠道亦遭土石撞擊毀損。
22	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	大埔鄉	茄苳村	茄苳村(9 鄰木瓜坑)(嘉 149 接近台南嘉義縣界處)	210934	2569586	乾水坑(嘉縣 DF053)於莫拉克颱風造成土石流災害，現場堆有大量土砂，於轉彎處溢流，土石淤滿河道並沖毀桃水溪橋及既有護岸，阻斷 嘉 149 縣道約 100 公尺，有上百隻雞鴨遭土石 流掩埋土石流出量估計達約 10 萬立方公尺。
23	2009	莫拉克颱風	台南市	南化區	玉山里	青山宮	201599	2552697	青山宮旁之野溪上游林班地，受莫 拉克颱風所挾帶來之持續豪雨沖 刷，約於 8 月 8 日傍晚爆發土石流 沿野溪溢流而下，大量土石淹埋侵 入羌黃坑多戶民宅，
24	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	阿里山鄉	茶山村	雅米阿那部落(茶山村 1 鄰)	216297	2578851	雅米阿那聚落旁清茶橋野溪上游於莫拉克颱風時引發土石流災情，土石破壞美寮部落聯絡道與清茶橋，阻斷道路合計約 40 公尺長，所幸並未對部落造成直接傷害。
25	2009	莫拉克颱風	屏東縣	來義鄉	義林村	來義鄉義林村(義林大橋左岸 堤防及義林村 7 號旁)	215422	2491747	義林大橋上、下游左岸堤防遭洪水衝擊崩塌，崩落土石淤積河道。義林村 7 號上方土石流潛勢溪流(DF026)發生土石流災害，土石衝入下游三戶民宅。
26	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	大津里	六龜鄉大津村(津鳳宮)	214010	2533640	本處邊坡曾於 95 年 6 月 9 日豪雨發生大量土石及岩屑沿編號高縣 DF046 土石流潛勢溪傾瀉而下之情形，造成邊坡下方農路遭土石淤埋，農路下方排水箱涵及排水溝遭土石堵塞。98 年 8 月 8 日莫拉克颱風引進西南氣流，降下 豪雨，

臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析-南部地區

									舊崩塌坡地遭大雨沖蝕，土石再次崩塌淤埋防砂壩，大量土石沿著高 縣 DF046 土石流潛勢溪及津鳳宮後方沖蝕溝傾瀉而下。
27	2009	莫拉克颱風	屏東縣	來義鄉	來義村	來義鄉來義村 (屏 110 線 16.6k 處來社橋)	217706	2491851	因莫拉克颱風帶來之超大豪雨，導致來社溪山洪暴發，並造成集水區內多處 大規模之崩塌，推測上游岸坡崩塌土石堵塞河道形成堰塞湖。8 月 8 日近午 時分，形成之堰塞湖潰決，大量土石伴隨洪水直衝而下，沖毀來義村沿溪之 堤防、道路、橋梁及民宅。洪水過後，堆積之土石抬昇河道超過 15 公尺高， 初估土砂量超過千萬立方公尺。
28	2009	莫拉克颱風	屏東縣	三地門鄉	口社村	三地門鄉口社村 (位於 185 線約 15.5k 處)	213351	2518962	本村地質屬於廬山層，現勘中發現崩塌之區域以新鮮的板岩為基盤岩性，上 覆風化板岩及沖積層為主。由歷年災害顯示，每逢雨季，山洪沖刷邊坡，易 造成大量土砂岩屑材料自上邊坡沖刷而影響農路，地表逕流夾雜土砂淤埋溪 流下游河道、排水設施及部分民宅。本次災情發生於 98 年 8 月 8 日 13 時， 因莫拉克颱風夾帶充沛雨勢，造成溪流下游與沙溪林道道路交會處，溪流右 岸發生土石崩塌，下游河道遭土石淤埋，造成土砂漫地流之情形，所幸無人 傷亡。
29	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	那瑪夏鄉瑪雅村 (台 21 線三民國中)	219088	2570763	高縣 DF003 土石流潛勢溪流於 8 月 8 日下午爆發土石流災害，初估約 4 萬立 方公尺之土石侵入瑪雅村和平巷 1-20 號民宅及三民國中教室，並造成台 21 線受阻中斷，上方甲仙農場林道損毀，總計約 500 公尺道路損毀，
30	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	那瑪夏鄉瑪雅村 (台 21 線月兒橋旁文物館)	219053	2571064	文物館旁野溪於 8 月 8 日下午爆發土石流，初估約 2 萬立方公尺之土石侵入 瑪雅村文物館及三民國中，並造成台 21 線受阻中斷，上方甲仙農場林道損 毀，總計約 400 公尺道路損毀，所幸並未造成任何人員傷亡。
31	2009	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	拉芙蘭里	桃源鄉梅蘭村(樟山國小)	231588	2572274	樟山國小旁之野溪林班地，受莫拉克颱風所挾帶之持續豪雨沖刷，於 8 月 8 日大約 16 時爆發土石流災害，3 條野溪與台 20 線交會處皆發生土石溢流， 造成樟山國小學生宿舍與 1 戶民宅遭土石淤埋，阻斷道路約 200 公尺，

32	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	六龜鄉寶來村(建山一橋)(位於台 20 線約 76.5k 處)	217200	2554780	台 20 線建山一橋處之打鐵坑溪於莫拉克颱風期間爆發土石流，大量土石阻塞 河道並掩埋建山一橋，造成台 20 線交通中斷及建山一橋毀損。另打鐵坑溪流 域發生多處大範圍之河岸沖刷及崩塌，除造成集水區多處農路中斷外，另因 建山一橋上游左岸之邊坡崩塌而掩埋邊坡下方寶來村伯特利華林民宿(寶建 路 1-6 號)之 3 棟民宅。
33	2009	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	建山里	桃源鄉建山村(建山二橋)(位於台 20 線約 78.4k 處)	218240	2555745	台 20 線建山二橋處之野溪(高縣 DF061)於莫拉克颱風期間爆發土石流，造成 建山二橋遭沖毀及台 20 線交通中斷，且大量土石堆積於下游匯流入荖濃溪河 口處；且因荖濃溪主河道受野溪流出之土石擠壓，引致荖濃溪洪流改衝擊向 左岸(野溪匯流處之對岸)，造成台 20 線對岸之邊坡崩塌及高 133 線道路中斷。
34	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	西安里	甲仙鄉西安村(和南巷 42 號附近)	208242	2551287	玉凌宮旁野溪之上游第 32 林班地，受莫拉克颱風所挾帶來之持續豪雨沖刷， 野溪兩側邊坡崩塌，約於 8 月 8 日 20 時爆發土石流沿野溪溢流而下，致野溪 河道變寬淤積大量土石，並侵入野溪沿線和南巷多戶民宅，幸無人傷亡。 颱風過後於上游發現二處疑似堰塞湖之水潭 1 處約為 0.6 公頃，1 處為 0.05 公頃，面積都非常小，因野溪部分堆積土石，加上該地點有低窪處，形成地 面水塘，為避免西安村居民疑慮，林務局已派員前往清除，並於 24 日降挖導 流，目前已無積水現象，解除西安村居民疑慮。
35	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	關山里	三聖宮、震威宮(關山社區)	209757	2556474	莫拉克颱風期間降下超大豪雨，造成關山社區周邊發生土石流、洪水等災害， 土石流潛勢溪流高縣 DF010 挾帶土石於三聖宮前台 21 線箱涵溢流，沿台 21 線擴散並淤積造成道路中斷，損壞三聖宮下邊坡護岸及路旁的候車亭。逕流 沿台 21 線漫流，水流在道路下邊坡被排放，造成中和巷數戶民宅淹水。

臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析-南部地區

36	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	甲仙鄉東安村(崩坪溪)(油礦四號橋)	210455	2554959	高雄縣甲仙鄉東安村油礦巷之崩坪溪(高縣 DF017),因莫拉克颱風帶來之超大豪雨導致上游既有崩塌地擴大崩塌,並於 8 月 8 日晚間爆發土石流,大量土石沿河道而下沖毀並掩埋溪畔產業道路、護岸及多戶民宅,大量土石淤埋 堵塞河道內並掩埋下游匯流處之油礦四號橋,暫時中斷高 130 線交通。
37	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	台 27 線 13k 處	214000	2542255	六龜鄉中興村土石流潛勢溪流高縣 DF050 於 8 月 8 日晚間爆發土石流,土石淤塞河道並向外溢流,掩埋沿溪農路並侵入鄰溪 9 戶民宅、慧濟寺及農地。此次土石流災害初估堆積土石量達 10 萬立方公尺,由於居民已先行疏散,故未造成任何人員傷亡。由於土石流堆積之土石堵塞河道後,溪水改沿聖母宮處巷道漫流,造成巷道兩側約 80 餘戶淹水,而巷道路面亦遭洪水沖刷而破損
38	2009	莫拉克颱風	屏東縣	來義鄉	義林村	來義鄉義林村(大後社區)	215347	2495590	東縣來義鄉義林村大後社區東側野溪於 8 月 9 日午夜爆發土石流,土石堵塞箱涵、淤埋道路、果園及 4 戶工寮,所幸此次災害並未造成任何人員傷亡。
39	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	六龜鄉新發村(高 133 線 4.5k 處青山溫泉渡假村)	218120	2552950	六龜鄉新發村青山溫泉渡假村後方野溪(高縣 DF052)集水區上游坡地,於莫拉克颱風期間多處發生大規模崩塌,崩塌土石混合溪水形成土石流直衝而下,沖毀高 133 線,青山溫泉渡假村盡遭土石淤埋,堆積區頂點處之溪床亦受土石流沖刷影響而切深加寬,致使右岸鄰溪之 2 戶民宅地基淘空岌岌可危。初估本次土石流災害堆積土石最深超過 5 公尺高度,總堆積量達 80 萬立方公尺以上。
40	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	甲仙鄉東安村咖啡巷(11 鄰)	210209	2552665	台 20 線 55K+400 處咖啡巷旁野溪(高縣 DF016),因莫拉克颱風所挾帶而來的豪雨造成溪水暴漲,持續沖刷導致野溪凹岸崩塌,洪水挾帶崩落土石於 8 月 8 日 21 時沿野溪爆發土石流,土石堵塞箱涵造成土石沿台 20 線溢流擴散。土石流影響區之 5 戶民宅及舊林務局工作站遭土石沖毀,土石流 出量估計約達 5 萬立方公尺。

41	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	六龜鄉新發村(六龜大佛)	217010	2550443	六龜鄉新發村於 8 月 8 日晚間九時，因莫拉克颱風所挾帶超大豪雨，引起新 開山坡地多處土石災情，其中六龜大佛後方坡地發生崩塌後，引發土石流向 大佛兩側下方流動堆積，導致六龜大佛下方兩側多戶民宅掩埋，堆積土石深 約 1~3m。
42	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	六龜鄉新發村新開部落 (高 133 線 7.2k 處荖濃溪溫泉會館)	217292	2551284	六龜鄉新發村 23 鄰(新開部落)後方野溪集水區上游坡地，於莫拉克颱風期間 發生大規模崩塌，崩塌土石混合溪水形成土石流直衝而下，高 133 線兩側新發村 23 鄰 30 戶民宅盡遭土石掩埋，32 位居民僅 4 人及時逃出，造成 28 人 死亡。此外，荖濃溪溫泉會館部份房舍亦遭毀損，而堆積區頂點處之溪床受 土石流冲刷影響切深加寬，致使天闊溫泉 SPA 會館部分渡假木屋地基淘空岌岌可危。初估本次土石流災害堆積土石最深超過 6 公尺高度，堆積面積廣達 20 公頃，總堆積量達 100 萬立方公尺以上。
43	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	大田里	甲仙鄉大田村 (高 129 線 1.1k 仙橋處)	203840	2550328	甲仙鄉大田村仙林巷於 8 月 8 日晚間，因莫拉克颱風帶來超大豪雨導致高縣 DF013 土石流潛勢溪山洪爆發，洪水夾帶大量土石冲刷而下，初估淤積土石 約 6,000 立方公尺，導致高 129 線交通中斷，並波及仙橋旁仙林巷 10 號民宅。此外，另於仙橋上游約 300 公尺處之左岸支流溪床有一土石流堆積區產生， 初估堆積土石約 1 萬立方公尺，
44	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	阿里山鄉	里佳村	(169 線終點銜接里佳村聚落道路約 400 公尺處及里佳大橋)	221514	2588790	烏奇哈溪山洪爆發，里佳村 4 鄰臨溪邊民宅遭洪水挾帶土石掩埋，里佳大橋兩側土堤遭洪水沖毀。
45	2009	莫拉克颱風	高雄市	杉林區	集來里	杉林鄉集來村(火山橋)(台 21 線約 249K 處)	206646	2545692	98 年 8 月 9 日清晨 5 時發生嚴重土石流災變，土石沖毀 8 戶民宅及台 21 線火山橋，堆積高度達 4 公尺以上，河口交會高灘地香蕉、椰子等農作全數流失，砂石 場建築與機具全毀，野溪兩岸山壁多處大範圍崩塌

臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析-南部地區

46	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	六龜鄉新發村(6 鄰)	215812	2547379	六龜鄉新發村因莫拉克颱風所挾帶超大豪雨，導致新開山坡地多處發生土石 災情，造成道路多處中斷，且多戶民宅與農舍遭土石掩埋或摧毀，其中 6 鄰 因土石流災害，導致兩個民眾遭土石掩埋罹難。：土石流影響區約有 7 棟房舍遭大量土石侵入掩埋，另房舍旁邊菜 園亦遭掩埋。
47	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	高市 DF004	218648	2568618	於 8 月 9 日下午爆發土石 流，沖毀並掩埋道路及多戶民宅。崩塌面積約 5,000 平方公尺，土石堆積約 7 萬立方公尺。
48	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	那瑪夏鄉南沙魯村(三景宮)	218648	2568618	高雄縣那瑪夏鄉南沙魯村之那托爾薩溪，因莫拉克颱風帶來之超大豪雨導致 上游山坡崩塌，並於 8 月 9 日下午爆發土石流，大量土石沿河道而下，並沖 毀掩埋台 21 線及大量民宅，暫時中斷台 21 線道之交通。
49	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	六津橋 (台 27 線 20k 處)	213963	2534790	凡那比颱風降下豪雨，土石流潛勢溪高縣 DF047 溪水暴漲，挾帶上游原崩塌 堆積土石，並淘刷河道兩岸坡地，大量土石冲刷而下，造成本區爆發土石流 災害。土石堆積於荖濃溪匯流處，初估量體約 8 萬立方公尺，土石流潛勢溪 流高縣 DF047 河道因土石淤埋抬昇約 3 公尺，台 27 線部分路段、六津橋及當 地公用蓄水池亦遭土石掩埋。
50	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	大津社區活動中心北側野溪 (台 27 線 23.7k)	212968	2532827	經過 98 年莫拉克颱風後東側山坡地有多處零星崩塌，而此次凡那比颱風為六龜地區帶來急促雨勢，其中大津村之社區活動中心以北約 250 公尺處之野溪因溪水暴漲，將上游零星崩塌處土石帶至台 27 線，造成省道台 27 線交通阻斷。
51	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	津鳳宮 (台 27 線 22.5k)	214010	2533640	土石流潛勢溪流高縣 DF072 上游山坡地有多處零星崩塌，因本次凡那比颱風造成上游崩塌地擴大，原崩塌堆積土砂及新增崩塌土石經溪水運移至下游，河道內多數土石淤埋，所幸下游治理工程完善，並未對津鳳宮週邊民宅造成 嚴重損害。土石淤埋約 200 立方公尺之土石堆積於土石流潛勢溪流高縣 DF072 河道。

52	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	文武里	六龜高中 (台 27 甲線 2k 處)	212130	2533582	苦苓坑溪(高縣 DF071)上游山坡地有多處零星崩塌，經過凡那比颱風造成上游崩塌地擴大，雨勢造成溪水暴漲，上游處土石運移挾帶漂流木，於無名橋處堵塞，造成潛勢溪流溪水溢淹至兩岸，阻斷聯通道路並沖毀另一無名橋
53	2010	凡那比颱風	屏東縣	來義鄉	義林村	義林活動中心、屏 110 線聯外道路	215301	2491940	凡那比颱風帶來大量豪雨，義林部落 59 號民宅旁野溪於 99 年 9 月 19 日約下午 23 時爆發洪水災害，砂泥流淤埋聯外道路並流入數戶民宅；野溪穿越聯外 道路後於轉彎處再次溢流，大量淤埋河道並土砂堆積於義林活動中心及托兒所。
54	2010	凡那比颱風	屏東縣	來義鄉	來義村	來義鄉來義村(東、西部落)(來義一號橋)	217274	2491964	災區上游集水區及來社溪沿岸於莫拉克颱風時發生多處崩塌，土石嚴重淤積河道，本次凡那比颱風造成崩塌持續擴大，溪水挾帶土砂運移堆積至災區形成洪水災害。於莫拉克颱風後設置之臨時土堤潰決，洪水挾帶土砂溢淹至部落，使東、西部落內大部分民宅 受災，掩埋深度最深約達 1 層樓高，來社橋遭沖毀。
55	2011	南瑪都颱風	屏東縣	滿洲鄉	滿州村	老佛順天宮	230940	2437874	南瑪都颱風期間，滿州村老佛野溪陸續發生三 次崩塌型土石流。 29 日土砂泥流溢淹至民宅、農田及順天宮；30 日土石流淤埋民宅及順天宮近半層樓高；31 日 土石流再次發生，完全淤埋順天宮。 9 房屋受損：共 8 棟(民宅 5 棟，鐵皮屋 2 棟， 寺廟 1 棟)。道路毀損老佛路遭土砂淤埋約 300m。
56	2011	南瑪都颱風	屏東縣	牡丹鄉	牡丹村	縣道 199 線 20K~20.5K 處及牡丹五號橋	230132	2449265	1.牡丹五號橋上游野溪於 2005 年 7 月海棠颱風、2009 年 8 月莫拉克颱風皆發生土石流災害。據訪談當地居民得知，每逢颱風豪雨常有土石災害發生。 2.本次災害於牡丹鄉縣道 199 線 20K 處坡面發生下邊坡崩塌，崩塌面積長約 40 公尺、寬約 30 公尺。縣道 199 線 20.4K 處路基受雨水的沖刷，使路基淘空深 約 7 公尺、長約 10 公尺、寬約 3 公尺。 3. 縣道 199 線 20.5K 處上邊坡發生崩塌，崩塌

臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析-南部地區

									面積約長 30 公尺、寬 20 公尺。 4. 牡丹五號橋上游野溪爆發土石流
57	2012	0610 豪雨	高雄市	六龜區	興龍里	舊潭二號橋	216247	2545577	曾於 2009 年莫拉克颱風期間集水區發生崩塌，約於 8/9 日凌晨 2-4 時發生土石流，期間因崩塌土石短暫堵塞河道，潰決後導致瞬間大量土石下移造成災害。本次災害 6 月 09 日起連日豪雨，造成高市 DF076 上游集水區坡地崩塌災害，溪水暴漲夾帶土石、漂木造成溢流。
58	2012	0610 豪雨	高雄市	六龜區	新發里	和平巷 135 號	215578	2547965	本次 0610 豪雨挾帶豪雨，潛勢溪流高市 DF080 河道上游河岸崩塌，受溪水挾帶堆積河道土砂，造成本次土石流災害。
59	2012	天秤颱風	屏東縣	滿洲鄉	港口村	久光橋	233765	2432399	土石流潛勢溪流屏東 DF064 受天秤颱風連日豪雨影響，漂流木及土砂淤埋溪床致溪水溢流，發生土石流災害，
60	2013	康芮颱風	屏東縣	獅子鄉	南世村	南世內獅聯絡道路	214205	2468063	受康芮颱風外圍環流及西南氣流影響，屏東地區連日 豪雨，獅子鄉南世村-土石流潛勢溪流屏東 DF038 發生土石流災害，造成下方聯絡道路中斷。土砂堆積概估規模，長約 130 公尺、寬約 70 公尺，堆積深度約 2.5 公尺，堆積土方約 15000 立方公尺。
61	2016	0611 豪雨	屏東縣	霧台鄉	霧台村	霧大二號橋	224265	2516958	土石流沖毀霧大二號橋，造成道路中斷約 40 公尺。土石流影響範圍長約 300 公尺、寬約 35 公尺、沖刷深度約 5 公尺，土石堆積面積 10,500 平方公尺，堆積土方量約 52,500 立方公尺。
62	2017	尼莎暨海棠颱風	屏東縣	枋山鄉	善餘村	台 26 線約 3.9K 之 380 號橋	218374	2453530	土石流潛勢溪流屏東 DF054 因上游崩塌，洪水挾帶大量土石流入下游，在通洪斷面不足情況下使得洪水溢流橋面並流入河道右岸房舍，及造成農地流失、護岸損壞，台 26 線屏鵝公路 因此淹水道路中斷。

63	2016	其他(0906)	台南市	南西區	照興里	南市 DF0320	195861	2566692	受到鋒面影響,9 月 5 日南市 DF-032 源頭再次發生崩塌,崩塌材料暫積於河道,6 日再受強降雨事件,大量暫積材料隨著地表逕流下移,造成下游河道淤塞,溢流到河岸兩側及道路上。土砂堆積面積約 6,700 平方公尺,堆積土方量約 4,500 立方公尺。
64	2016	梅姬颱風	高雄市	六龜區	荖濃里	頂濃路 31 號	217130	2553900	受梅姬颱風降雨影響,土石流潛勢溪流高市 DF097 發生土石流,土砂堆積面積約 0.3 公頃。
65	2016	梅姬颱風	高雄市	旗山區	新光里	後厝巷 27 號	194630	2525785	受梅姬颱風帶來之豪雨影響,旗山區後厝巷上方邊坡發生沖蝕,崩落之土砂堆積於後厝巷數戶民宅後方。崩塌範圍長約 150 公尺、寬約 80 公尺,平均深度約 0.5 公尺,崩塌面積約 12,000 平方公尺,崩塌土方量約 6,000 立方公尺;土砂堆積面積約 7000 平方公尺,堆積土方量約 3000 立方公尺。
66	2018	0823 熱帶低壓	屏東縣	獅子鄉	竹坑村	台 26 線屏鵝公路 386 號橋	219183	2449965	台 26 線屏鵝公路 386 號橋上游坑溝兩岸崩塌及邊坡部分土砂沖蝕,強降雨使逕流挾帶土砂沿著坑溝下移,逕流挾帶土砂下造成土砂堆積橋面。災害規模:坑溝崩塌面積約 0.6 公頃,深度約 1 公尺,土方量約 6000 立方公尺;邊坡崩塌面積約 10 公頃,深度約 0.3 公尺,土方量約 30000 立方公尺。
67	2021	0731 豪雨	高雄市	六龜區	中興里	台 27 線 14K(扇平山莊)	214241	2541341	台 27 線 14K 處(扇平山莊上方野溪)河道發生沖蝕崩塌,夾帶大量土砂、石塊流經扇平林道,淤滿過路箱涵與靜水池,造成溢流,土砂由此處開始堆積至下方新發公路(台 27 線),兩處民宅受損,崩塌範圍長約 70 公尺、寬約 30 公尺,面積約 2,100 平方公尺,平均崩塌深度約 1.4 公尺,崩塌土方約 3,000 立方公尺;堆積範圍(扇狀)長約 150 公尺,寬約 50 公尺,面積約 3,750 平方公尺,平均堆積深度約 0.8 公尺,堆積量體約 3,000 立方公尺

臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析-南部地區

68	2021	盧碧颱風暨 0806 水災	高雄市	六龜區	新發里	美崙山溫泉渡假山莊	218042	2552023	因颱風引進西南氣流所帶來之強降雨，使美崙山兩條野溪河道向下及兩側刷深，引發土石流並堆積於民房，造成嚴重災情。野溪上游並無明顯崩塌，但河道刷深產生之土砂量，造成土砂堆積區長約 90 公尺，寬約 30 公尺，堆積面積約 2,700 平方公尺，平均堆積深度約 1 公尺，堆積量體約 2,700 立方公尺。
69	2021	盧碧颱風暨 0806 水災	高雄市	六龜區	新發里	高 133 鄉道檳園渡假山莊旁野溪	217832	2551883	高 133 鄉道檳園渡假山莊旁無名野溪發生土石流，因為長時間降雨，造成河岸邊坡土壤含水量上升而崩塌。且於高 133 鄉道旁河道流心呈 90 度轉彎，至使河道內大量土砂來不及排出，造成溢流，土砂於河道下游段開始堆積直至高 133 線道路二側。
70	2021	盧碧颱風暨 0806 水災	高雄市	桃源區	勤和里	台 20 線明霸克露橋	228344	2565172	受盧碧颱風之長延時強降雨，使玉穗溪流量增加，挾帶大量土砂後沖毀明霸克露橋，並掩埋部分台 20 線道路。
71	2023	其他(0823)	高雄市	桃源區	勤和里	臺 20 線明霸克露橋	228344	2565172	臺 20 線明霸克露橋因 8 月下旬連日午後雷陣雨，土砂含水量高，玉穗溪滯留河道不安定土砂下移至與荖濃溪匯流口淤積，鋼便橋上方原滯洪沈砂池現已淤滿，鋼便橋處土石壅高 7 公尺，原通行人車臨時道路遭土石淹沒，淹沒深度約 4 公尺高。2.災害規模：堆積區範圍長約 400 公尺，寬約 400 公尺，面積約 102,000 平方公尺，平均堆積深度約 2.1 公尺，堆積量體約 214,000 立方公尺。

資料來源：農村水保署

第二節 坡面型土石流事件雨量資料庫

本項工作為收集研究區重大災害案例之雨量紀錄資料。除颱風豪雨外亦納入西南氣流紀錄。現階段已蒐集(1996-2023)雨量資料，包括有中央氣象署及農村水保署二單位的雨量資料，中央氣象署的雨量資料主要區分成兩大部分，第一部分是署屬測站資料，第二部分是自動雨量站資料。其中，重大颱風及豪雨事件，如 2006 年 0609 豪雨、2007 年聖帕颱風、2008 年卡玫基颱風、2009 年莫拉克颱風、2012 年 0610 豪雨、2016 年 0611 豪雨及 2023 年其他(0823)事件等，分別繪製其雨量組體圖，分別如圖 5-2 至圖 5-29 所示。

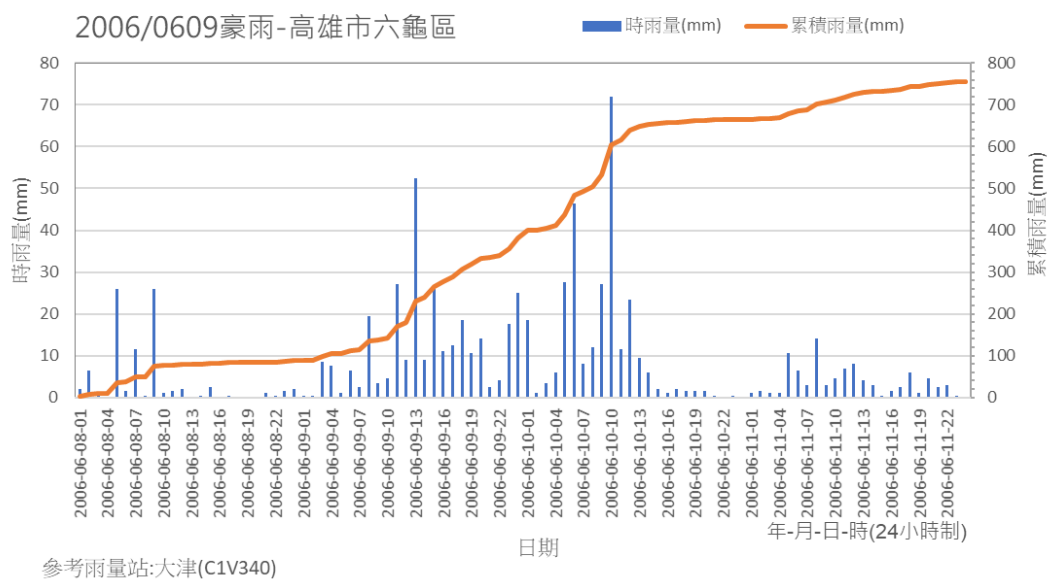


圖 5-2 2006 年 0609 豪雨大津雨量站雨量組體圖

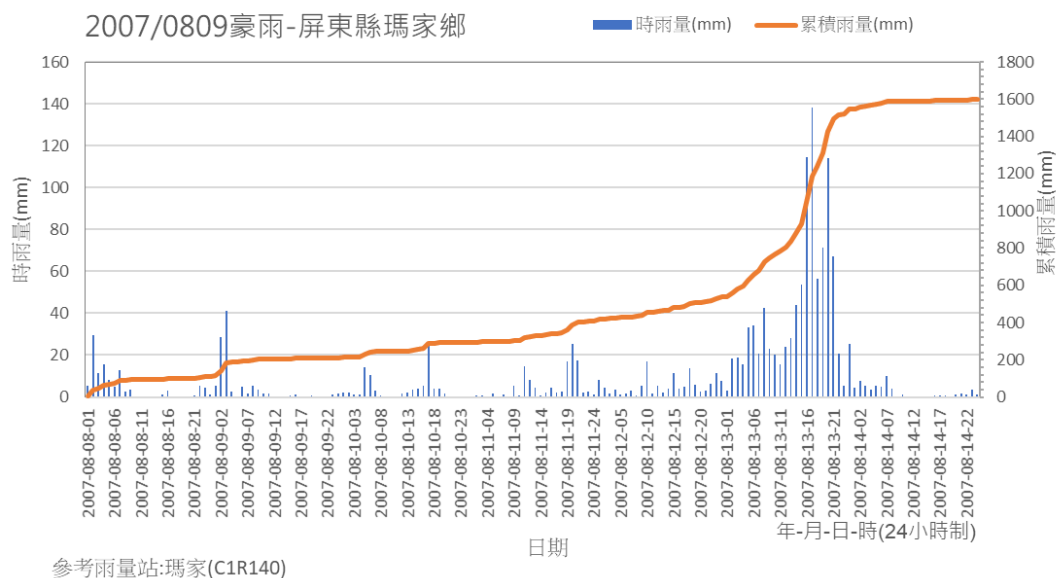


圖 5-3 2007 年 0809 豪雨瑪家雨量站雨量組體圖

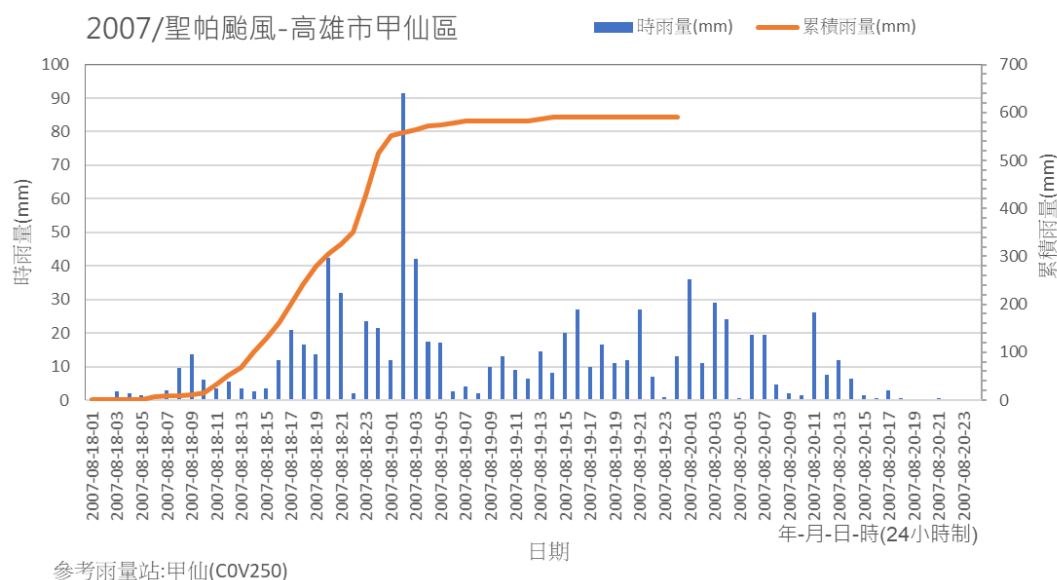


圖 5-4 2007 年聖帕颱風甲仙雨量站雨量組體圖

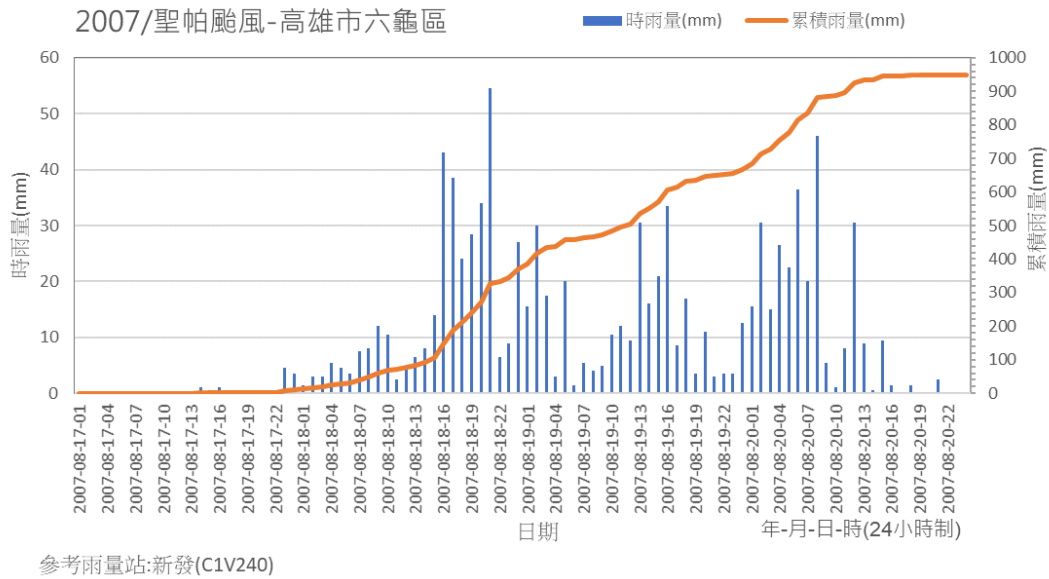


圖 5-5 2007 年聖帕颱風新發雨量站雨量組體圖

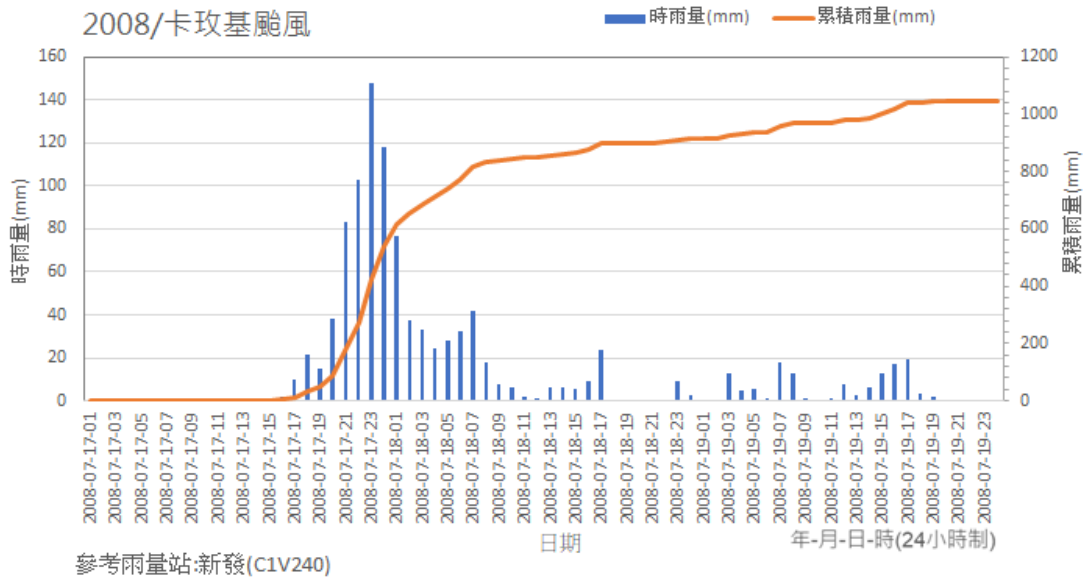


圖 5-6 2008 年卡玫基颱風新發雨量站雨量組體圖

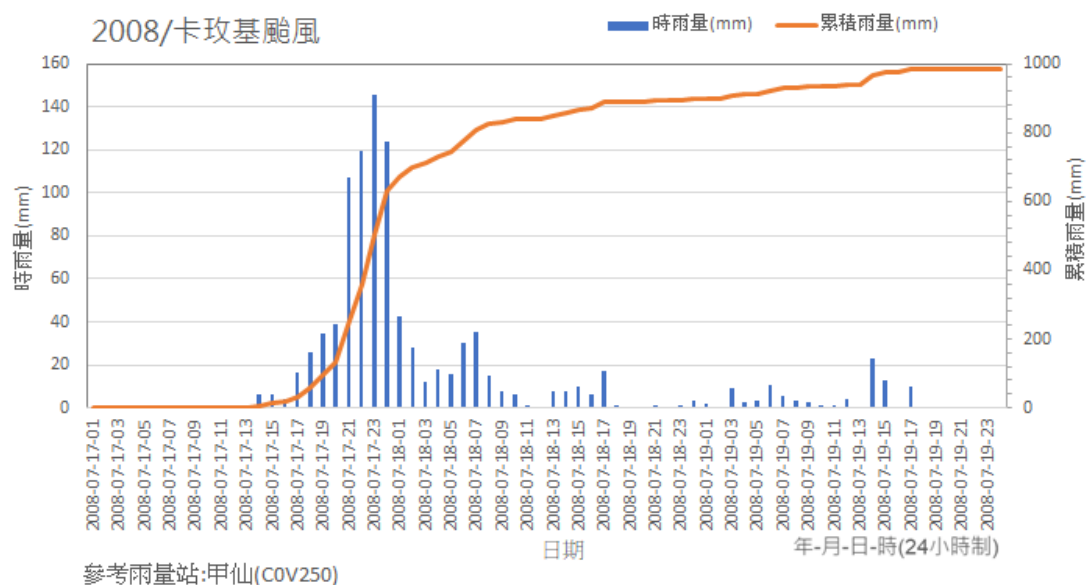


圖 5-7 2008 年卡玖基颱風甲仙雨量站雨量組體圖

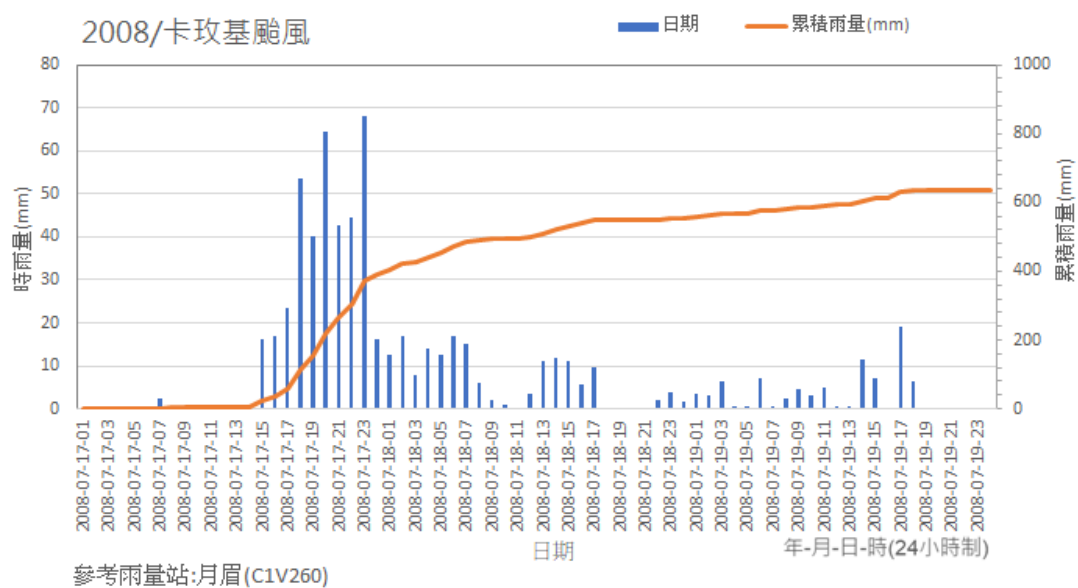


圖 5-8 2008 年卡玖基颱風月眉雨量站雨量組體圖

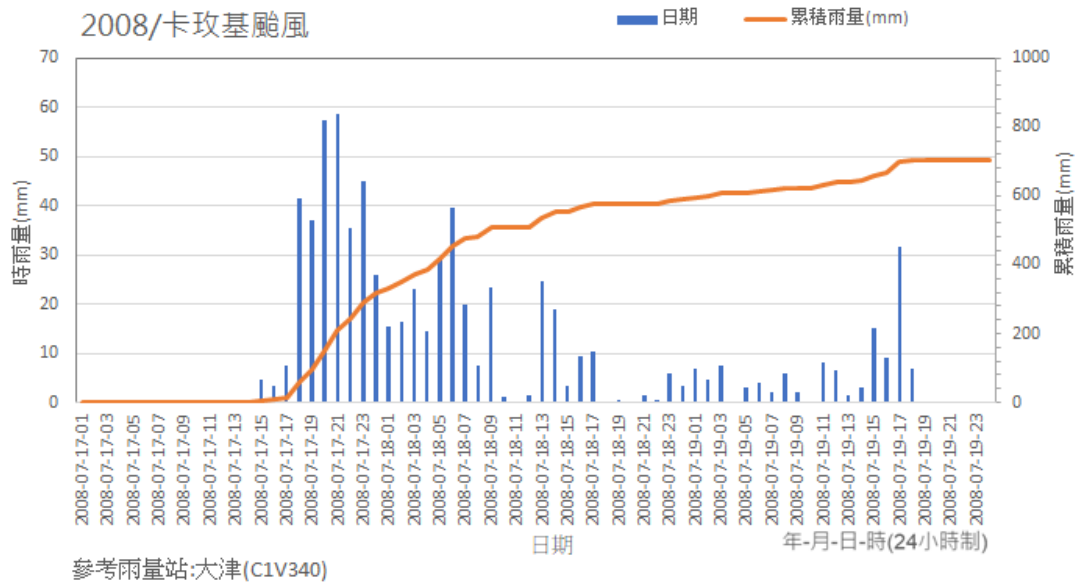


圖 5-9 2008 年卡玫基颱風大津雨量站雨量組體圖

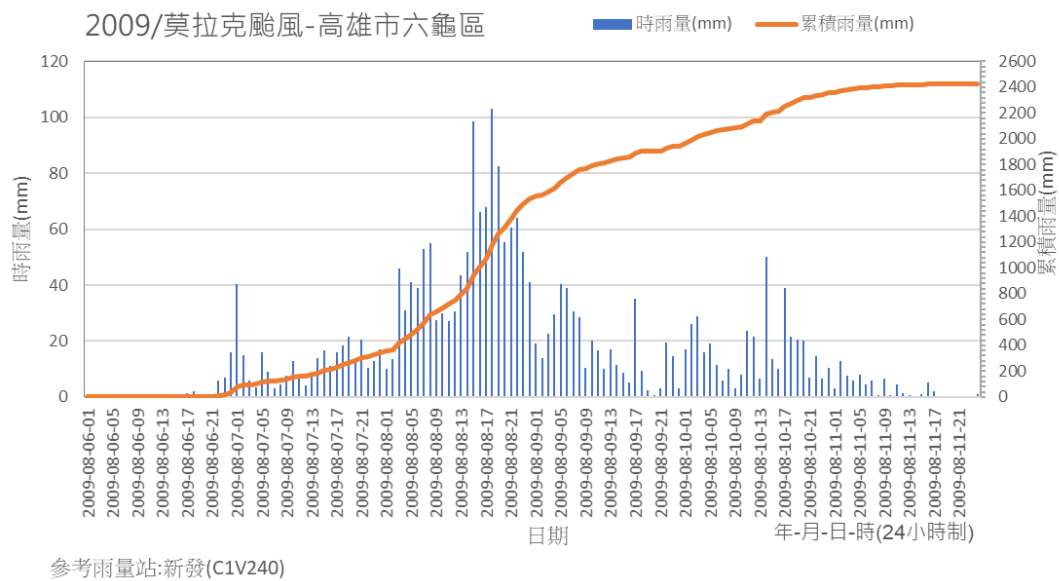


圖 5-10 2009 年莫拉克颱風新發雨量站雨量組體圖

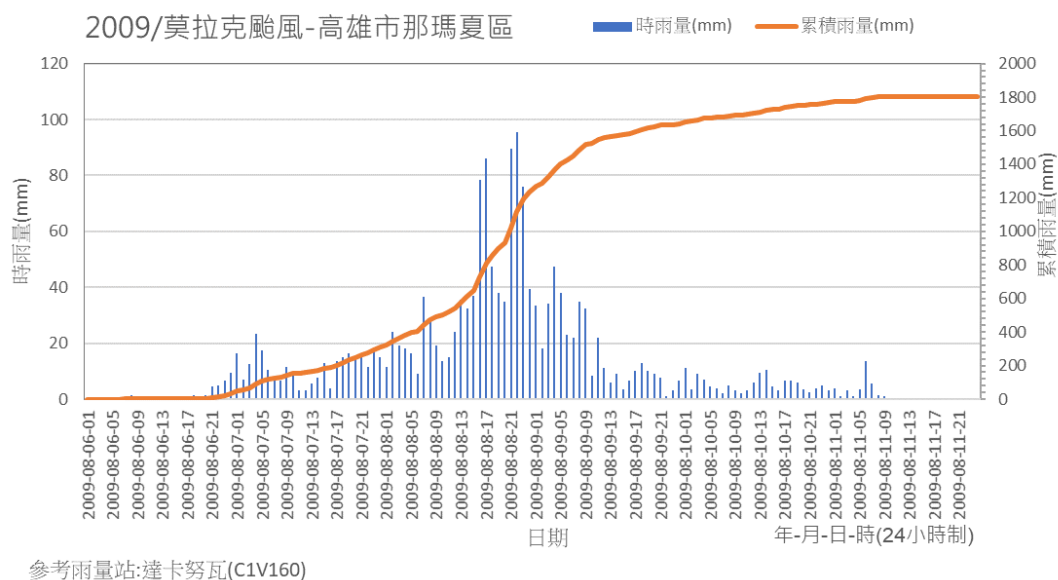


圖 5-11 2009 年莫拉克颱風達卡努瓦雨量站雨量組體圖

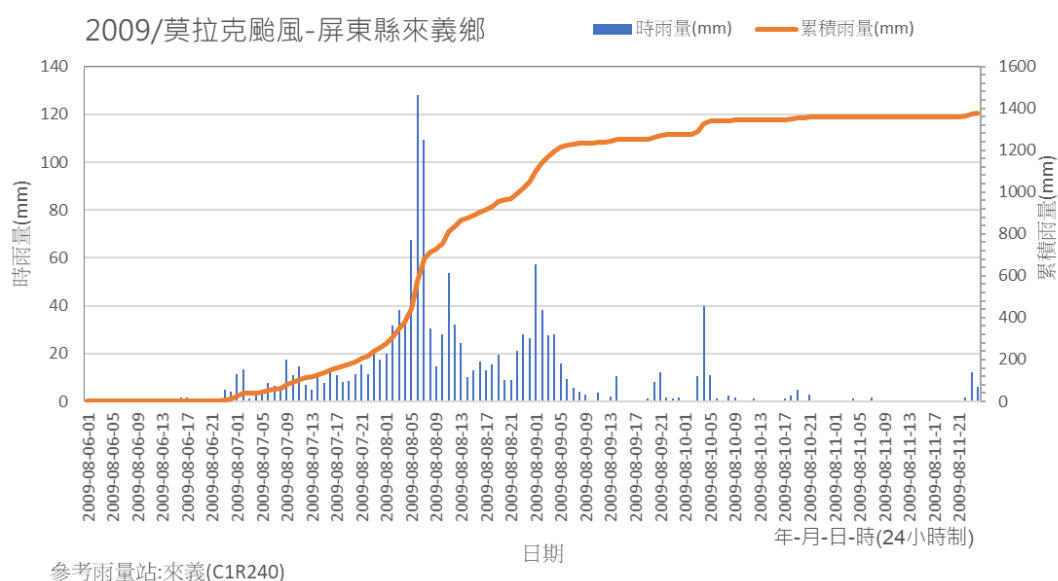


圖 5-12 2009 年莫拉克颱風來義雨量站雨量組體圖

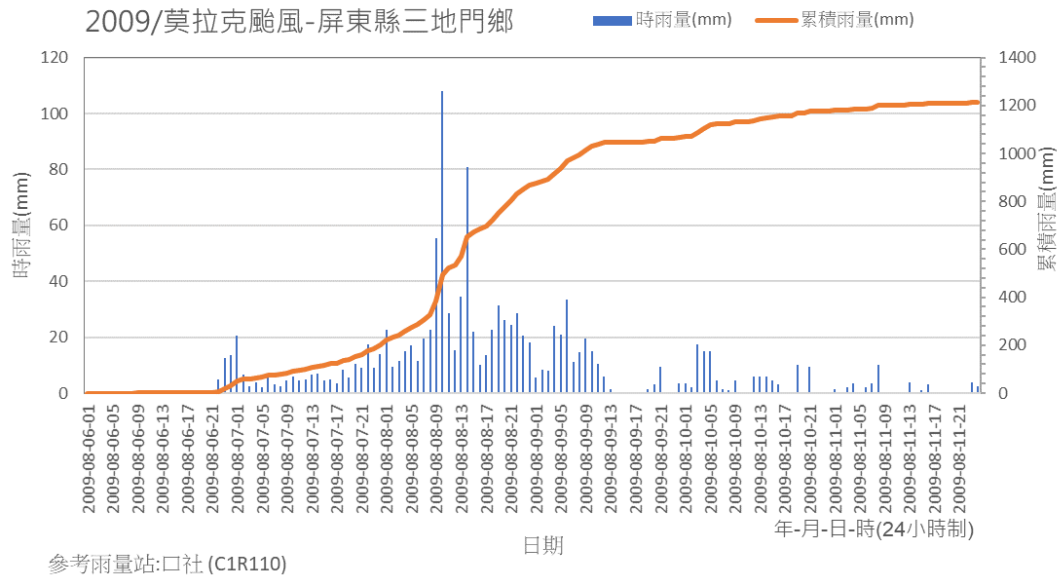


圖 5-13 2009 年莫拉克颱風口社雨量站雨量組體圖

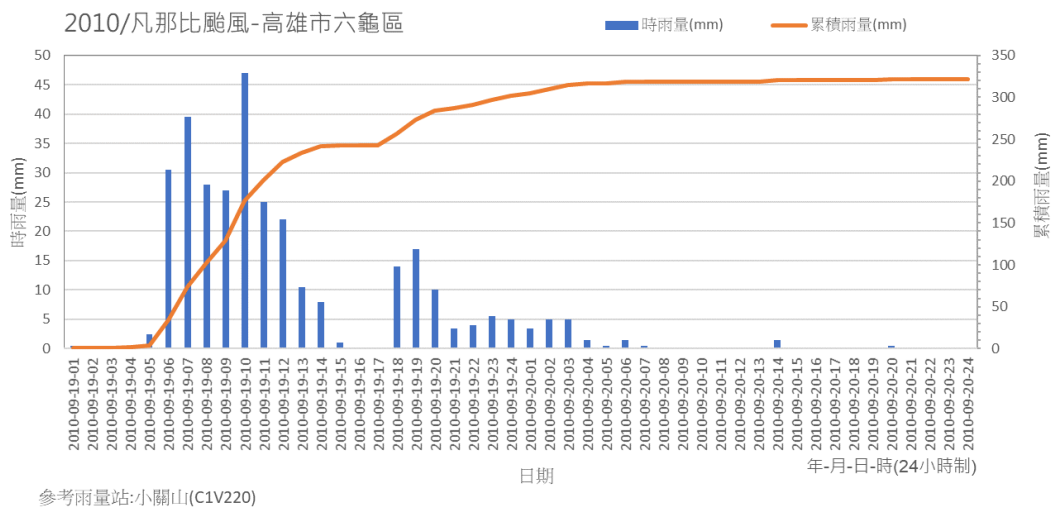


圖 5-14 2010 年凡那比颱風小關山雨量站雨量組體圖

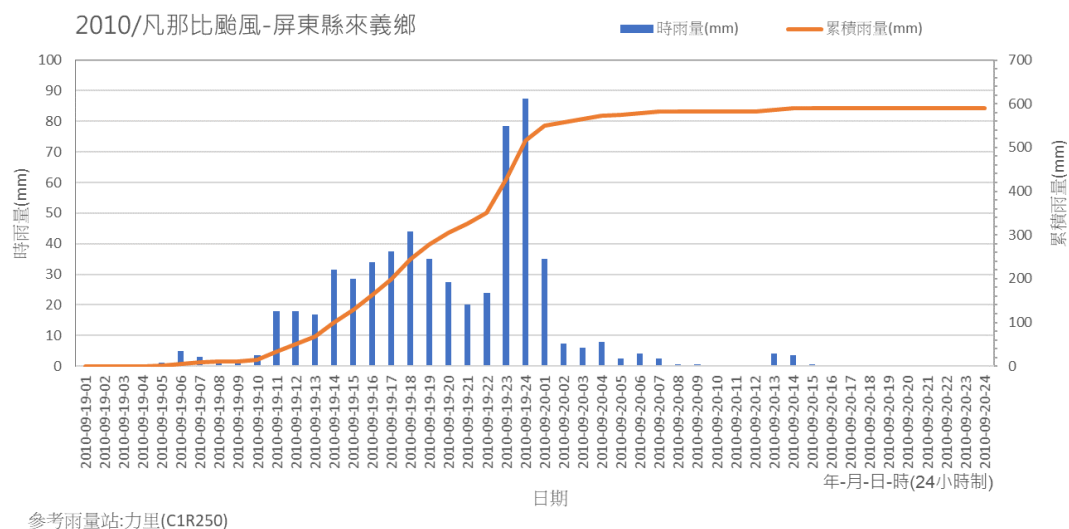


圖 5-15 2010 年凡那比颱風力里雨量站雨量組體圖

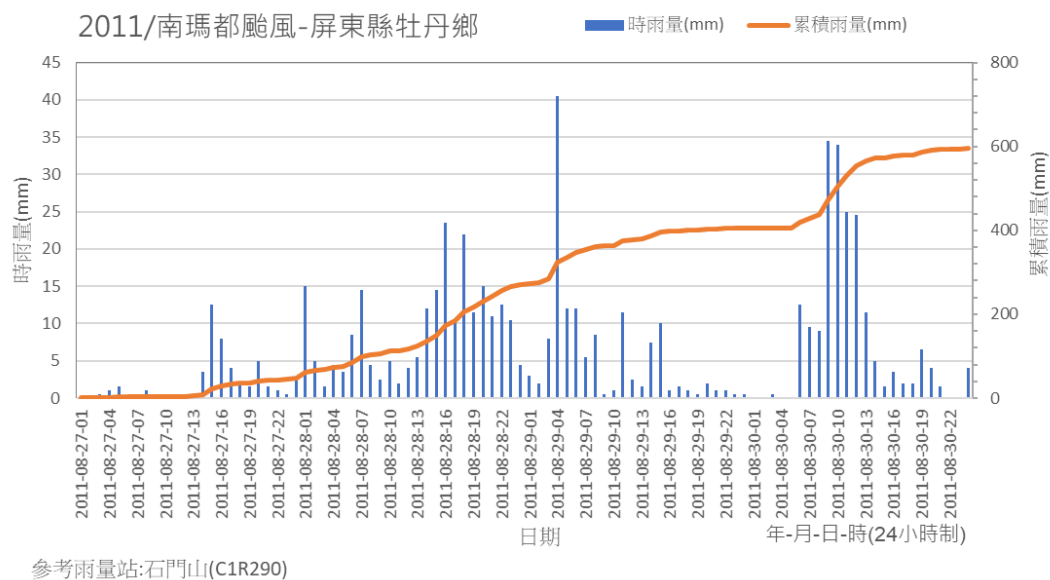


圖 5-16 2011 年南瑪都颱風石門山雨量站雨量組體圖

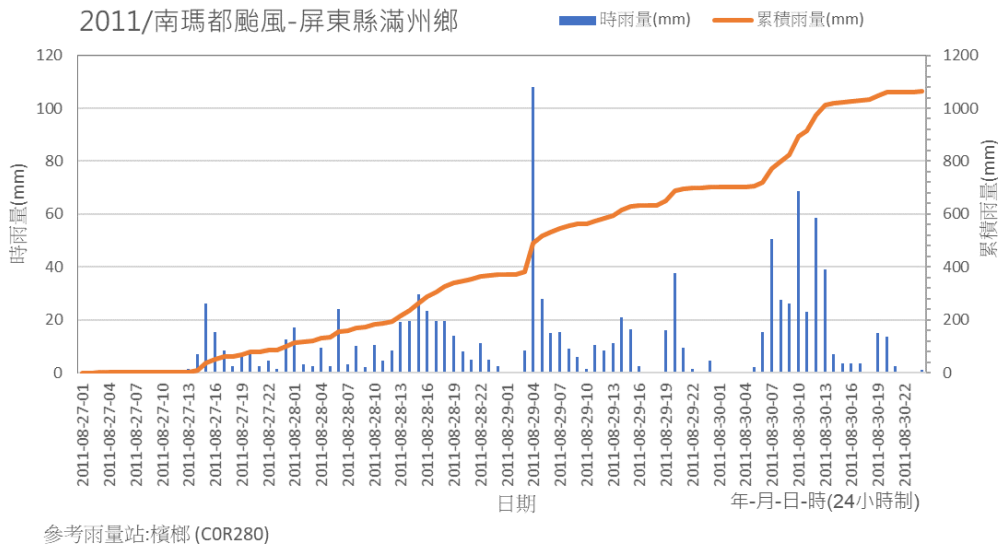


圖 5-17 2011 年南瑪都颱風檳榔雨量站雨量組體圖

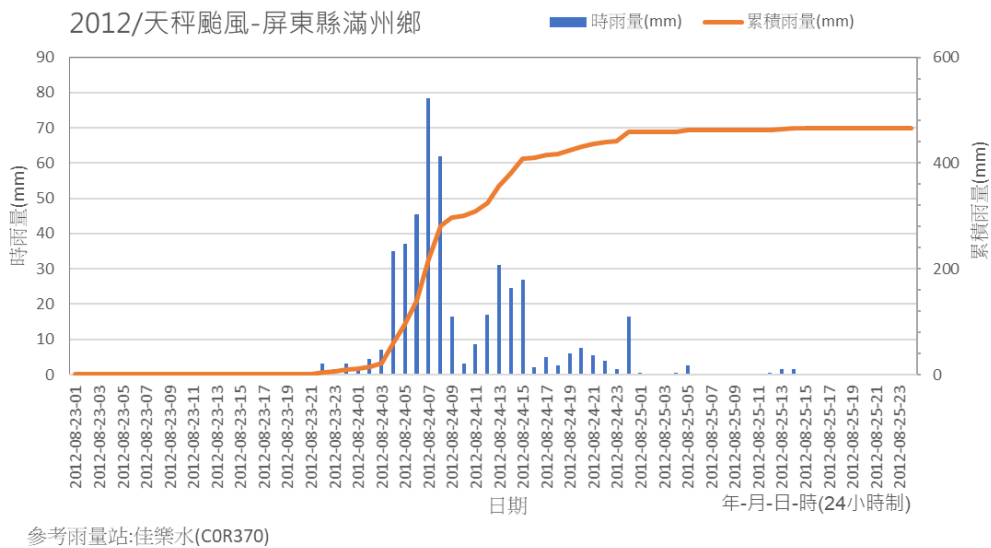


圖 5-18 2012 年天秤颱風佳樂水雨量站雨量組體圖

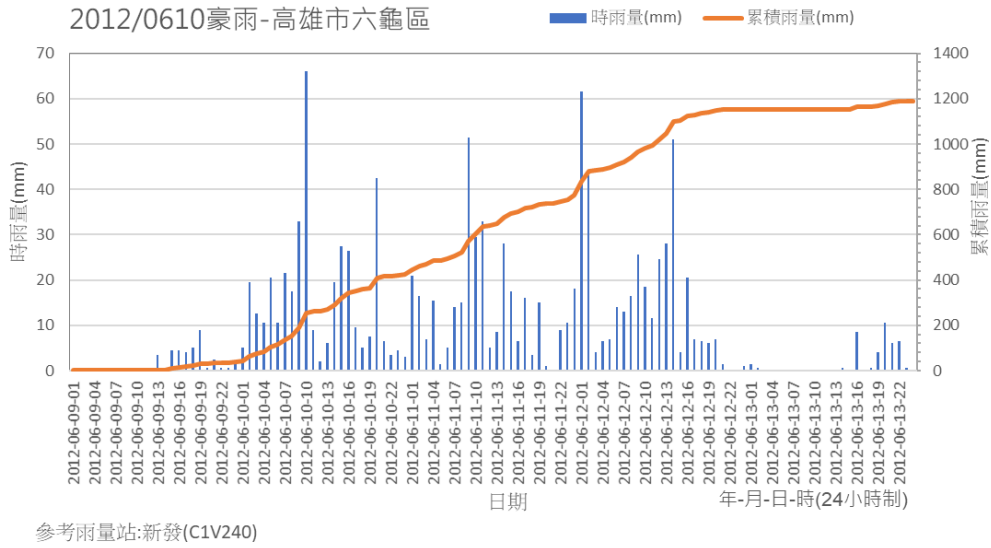


圖 5-19 2012 年 0610 豪雨高雄市六龜區雨量組體圖

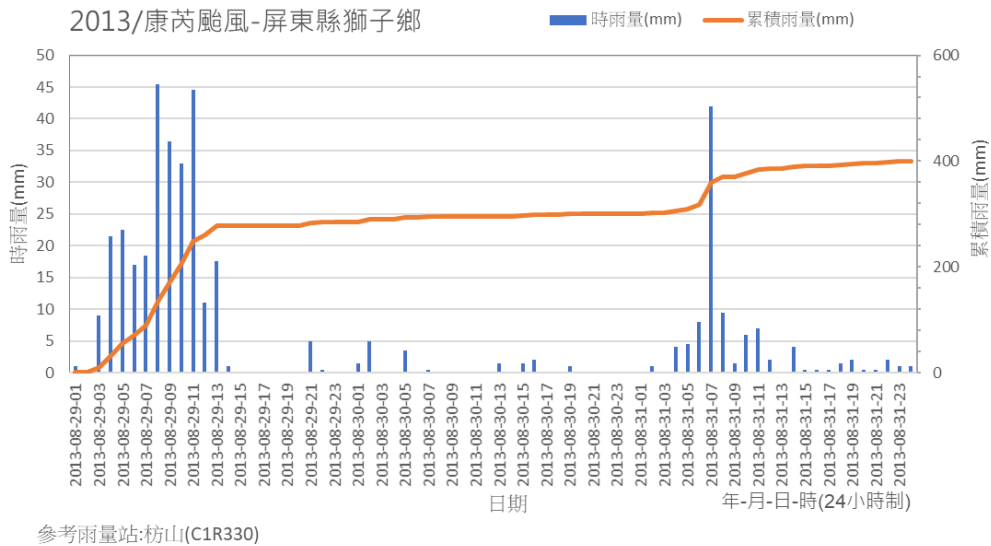


圖 5-20 2013 年康芮颱風枋山雨量站雨量組體圖

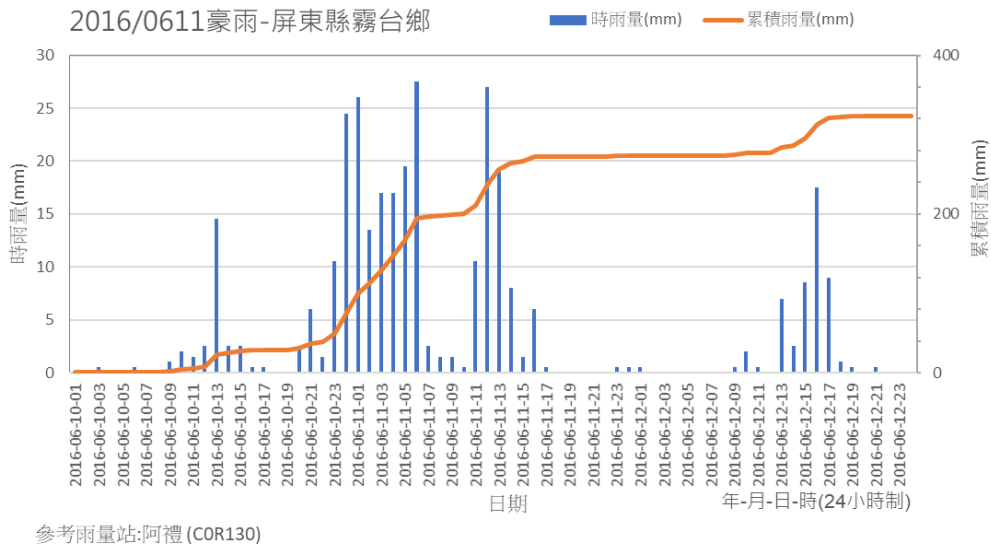


圖 5-21 2016 年 0611 豪雨阿禮雨量站雨量組體圖

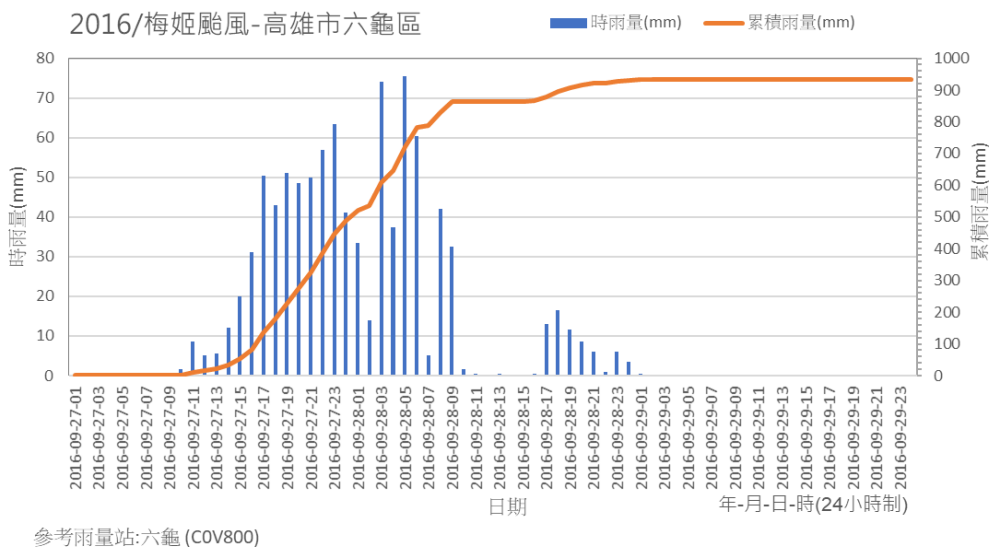


圖 5-22 2016 年梅姬颱風六龜雨量站雨量組體圖

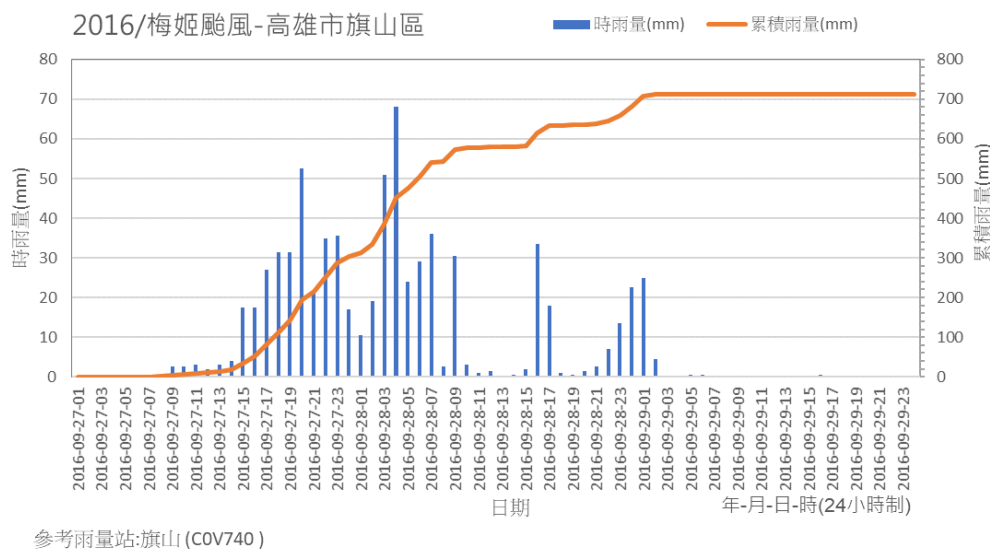


圖 5-23 2016 年梅姬颱風期山雨量站雨量組體圖

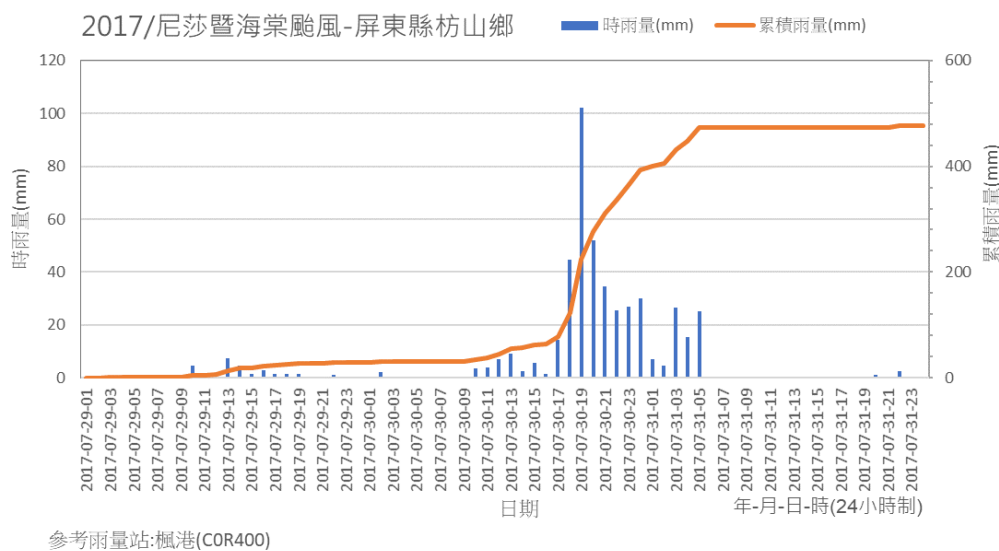


圖 5-24 2017 年尼莎暨海棠颱風楓港雨量站雨量組體圖

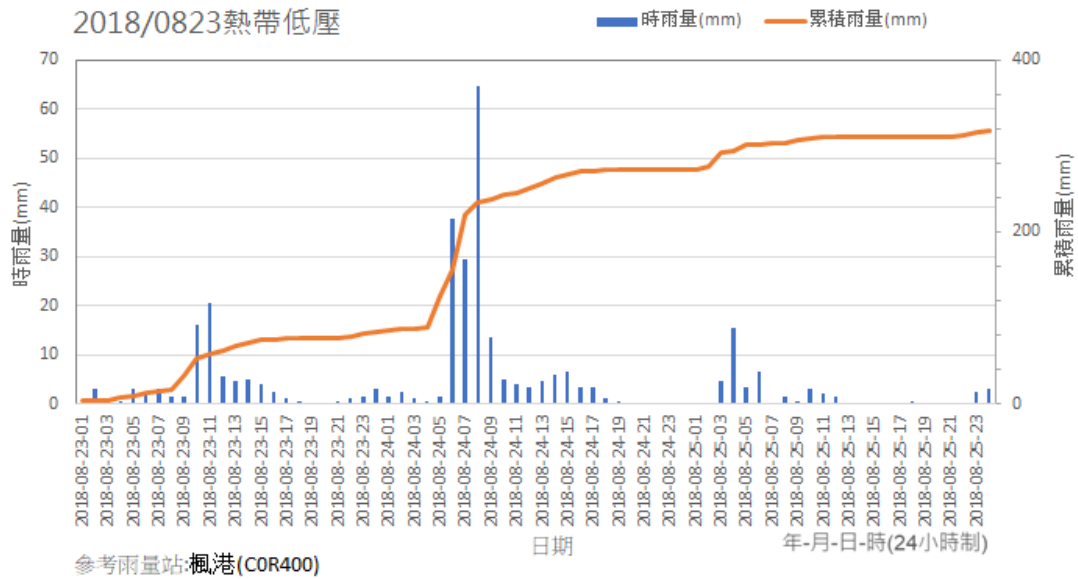


圖 5-25 2018 年 0823 熱帶低壓楓港雨量站雨量組體圖

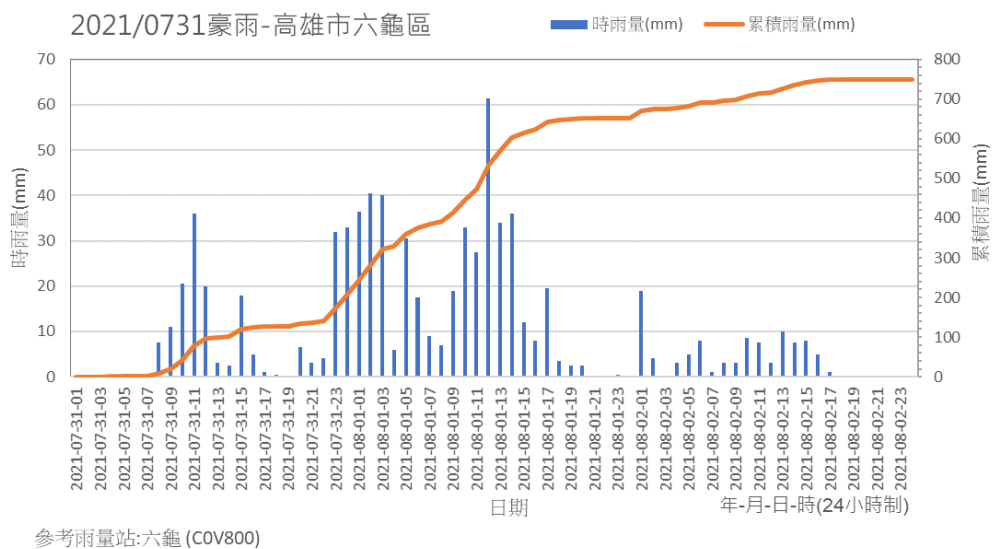


圖 5-26 2021 年 0731 豪雨六龜雨量站雨量組體圖

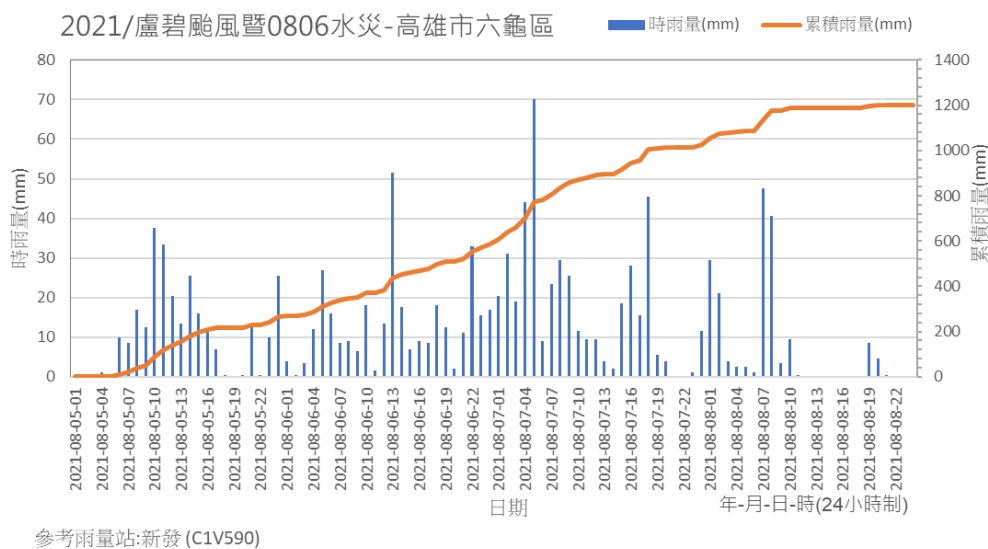


圖 5-27 2021 年盧碧颱風暨 0806 水災新發雨量站雨量組體圖

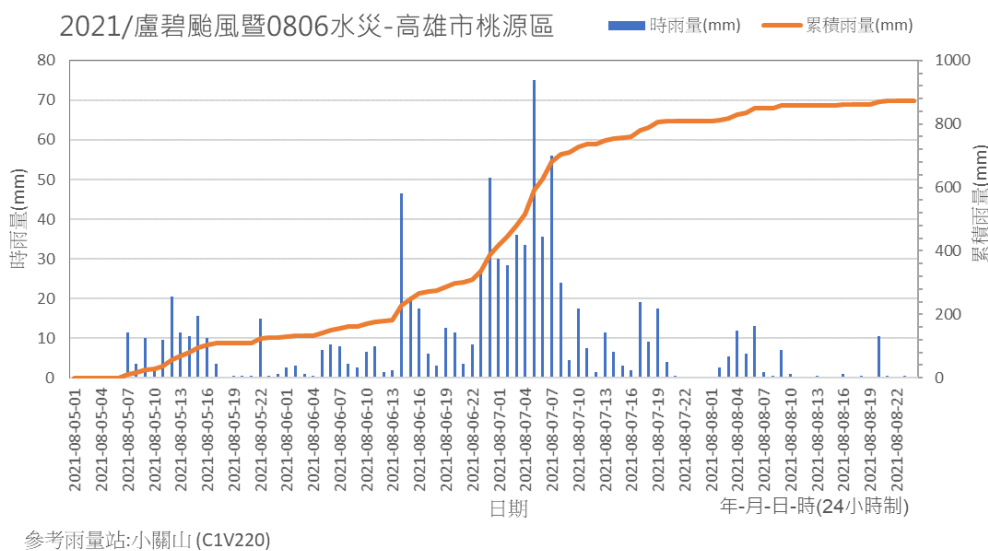


圖 5-28 2021 年盧碧颱風暨 0806 水災小關山雨量站雨量組體圖

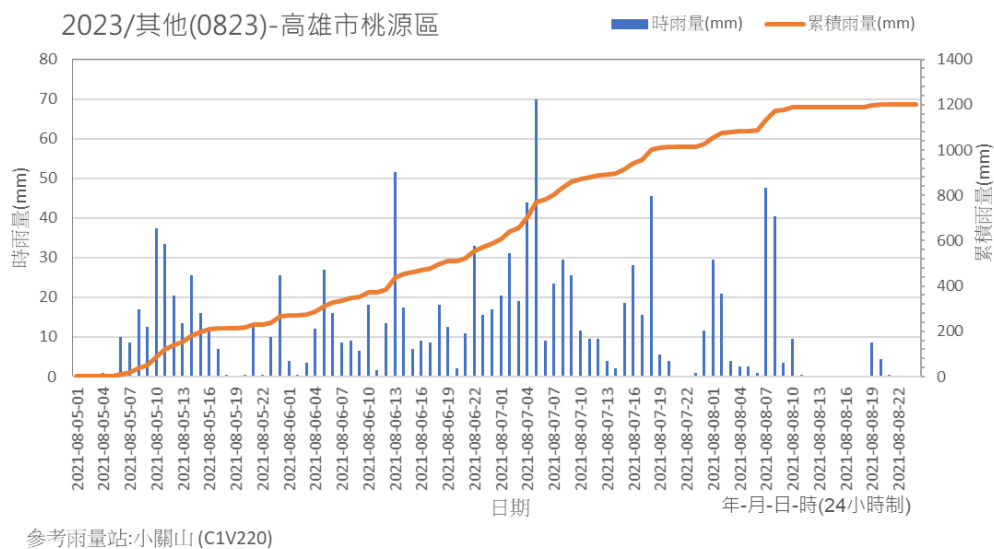


圖 5-29 2023 年其他(0823)小關山雨量站雨量組體圖



第三節 坡面型土石流事件雨量分析

本節進一步分析土石流發生時之降雨水文特性，以供後續災害模擬分析之參酌。表 5-2 中彙整各事件之土石流發生時間、發生時累積雨量，及發生前之尖峰時雨量。

表 5-2 土石流災害事件雨量資料表

編號	年度	災害事件	縣市	鄉鎮	村里	參考雨量站	災害發生時間 年-月-日-時	發生時 累積雨量	發生前 尖峰時雨量
001	2006	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	大津 (C1V340)	2006-06-09-18	308	52.5
002	2006	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	大津 (C1V340)	2006-06-10-06	484.5	46.5
003	2007	0809 豪雨	屏東縣	三地門鄉	達來村	瑪家 (C1R140)	2007-08-13-19	1312.5	114.5
004	2007	0809 豪雨	屏東縣	瑪家鄉	瑪家村	瑪家 (C1R140)	2007-08-13-19	1312.5	114.5
006	2007	聖帕颱風	高雄市	六龜區	寶來里	新發 (C1V240)	2007-08-20-12	925.5	46
007	2008	卡枚基颱風	台南市	楠西區	照興里	楠西(C1O920)	2008-07-17-17	114.5	57.5
008	2008	卡枚基颱風	台南市	楠西區	龜丹里	楠西(C1O920)	2008-07-17-20	307.5	80
009	2008	卡枚基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	新發 (C1V240)	2008-07-17-23	422.5	148
010	2008	卡枚基颱風	高雄市	甲仙區	東安里	甲仙 (C0V250)	2008-07-17-23	505.5	145.5
011	2008	卡枚基颱風	高雄市	杉林區	木梓里	月眉 (C1V260)	2008-07-17-23	68.5	68
012	2008	卡枚基颱風	台南市	楠西區	灣丘里	楠西(C1O920)	2008-07-17-24	683.5	104
013	2008	卡枚基颱風	台南市	南化區	關山里	關山(C1O880)	2008-07-17-24	517.5	137.5
014	2008	卡枚基颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	表湖 (C0V150)	2008-07-18-01	380	101
015	2008	卡枚基颱風	高雄市	六龜區	中興里	C1V340 (大津)	2008-07-18-02	349	58.5
016	2008	卡枚基颱風	高雄市	桃源區	建山里	新發 (C1V240)	2008-07-18-03	687.5	148
017	2008	卡枚基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	新發 (C1V240)	2008-07-18-03	687.5	148
018	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	新發 (C1V240)	2009-08-07-20	315	40.5
019	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	新發 (C1V240)	2009-08-07-21	304.5	40.5
020	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	新發 (C1V240)	2009-08-07-21	304.5	40.5
021	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	阿里山鄉	山美村	龍美 (C1M390)(舊地名為瀨頭))	2009-08-08-02	590.5	32.5
022	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	大埔鄉	筋荖村	馬頭山 (COM410)	2009-08-08-03	720	53.5

第五章 重大土砂災害資料庫及坡面型土石流發生時間及雨量資料庫

023	2009	莫拉克颱風	台南市	南化區	玉山里	北寮 (C1O830)	2009-08-08-17	663	88
024	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	阿里山鄉	茶山村	龍美 (C1M390)(舊地名為瀨頭)	2009-08-08-17	1113	57
025	2009	莫拉克颱風	屏東縣	來義鄉	義林村	來義 (C1R240)	2009-08-08-04	377	38
026	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	大津里	大津 (C1V340)	2009-08-08-09	549.5	45
027	2009	莫拉克颱風	屏東縣	來義鄉	來義村	來義 (C1R240)	2009-08-08-11	808.5	109.5
028	2009	莫拉克颱風	屏東縣	三地門鄉	口社村	尾寮山 (COR100)	2009-08-08-13	1578.5	117
029	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	達卡努瓦 (C1V160)	2009-08-08-16	726	78.5
030	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	達卡努瓦 (C1V160)	2009-08-08-16	726	78.5
031	2009	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	拉芙蘭里	復興 (C1V210)	2009-08-08-16	658	72
032	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	新發 (C1V240)	2009-08-08-17	1076.5	98.5
033	2009	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	建山里	復興 (C1V210)	2009-08-08-17	741	83
034	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	西安里	甲仙 (C0V250)	2009-08-08-20	1321.5	93.5
035	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	關山里	關山 (C1O880)	2009-08-08-20	762	33.5
036	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	甲仙 (C0V250)	2009-08-08-20	1321.5	93.5
037	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	新發 (C1V240)	2009-08-08-20	1317.5	103
038	2009	莫拉克颱風	屏東縣	來義鄉	義林村	來義 (C1R240)	2009-08-08-20	961.5	109.5
039	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	新發 (C1V240)	2009-08-08-20	1317.5	103
040	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	甲仙 (C0V250)	2009-08-08-20	1319.6	93.5
041	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	新發 (C1V240)	2009-08-08-21	1330.7	103
042	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	新發 (C1V240)	2009-08-08-21	1330.7	103
043	2009	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	大田里	甲仙 (C0V250)	2009-08-08-22	1328.5	93.5
044	2009	莫拉克颱風	嘉義縣	阿里山鄉	里佳村	龍美 (C1M390)(舊地名為瀨頭)	2009-08-09-01	1584	75.5
045	2009	莫拉克颱風	高雄市	杉林區	集來里	月眉 (C1V260)	2009-08-09-05	1030.8	79.5
046	2009	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	新發 (C1V240)	2009-08-09-06	1585.6	103
047	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	達卡努瓦 (C1V160)	2009-08-09-17	1593	95.5
048	2009	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	達卡努瓦 (C1V160)	2009-08-09-17	1409.9	95.5
049	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	大津 (C1V340)	2010-09-19-18	322	42.5

臺灣坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量分析-南部地區

050	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	大津 (C1V340)	2010-09-19-20	460.5	70
051	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	新發 (C1V240)	2010-09-19-21	443	66.5
052	2010	凡那比颱風	高雄市	六龜區	文武里	新發 (C1V240)	2010-09-19-21	443	66.5
053	2010	凡那比颱風	屏東縣	來義鄉	義林村	來義 (C1R240)	2010-09-19-23	507	65.5
054	2010	凡那比颱風	屏東縣	來義鄉	來義村	來義 (C1R240)	2010-09-19-23	507	65.5
055	2011	南瑪都颱風	屏東縣	滿洲鄉	滿州村	檳榔 (C0R280)	2011-08-29-07	518.9	108
056	2011	南瑪都颱風	屏東縣	牡丹鄉	牡丹村	牡丹 (C1R340) 原(C0R340) 站於 1999/4/12 變更為 (C1R340)站	2011-08-29-14	576.5	83
057	2012	0610 豪雨	高雄市	六龜區	興龍里	新發 (C1V240)	2012-06-10-14	321.6	66
058	2012	0610 豪雨	高雄市	六龜區	新發里	新發 (C1V240)	2012-06-10-16	358	66
059	2012	天秤颱風	屏東縣	滿洲鄉	港口村	佳樂水 (C0R370)	2012-08-24-07	220.5	78.5
060	2013	康芮颱風	屏東縣	獅子鄉	南世村	枋山 (C1R330)	2013-08-31-07	389	42
061	2016	0611 豪雨	屏東縣	霧台鄉	霧台村	阿禮 (C0R130)	2016-06-11-07	165	27.5
062	2017	尼莎暨海棠颱風	屏東縣	枋山鄉	善餘村	楓港 (C0R400)	2016-07-30-22	327.2	102
063	2016	其他(0906)	台南市	南西區	照興里	楠西 (C1O921)	2016-09-06-16	84	28.5
064	2016	梅姬颱風	高雄市	六龜區	荖濃里	建山國小 (81V820)	2016-09-27-22	245.5	31.5
065	2016	梅姬颱風	高雄市	旗山區	新光里	旗山 (C0V740)	2016-09-28-03	368	74
066	2018	0823 熱帶低壓	屏東縣	獅子鄉	竹坑村	楓港 (C0R400)	2018-08-24-05	178	37.5
067	2021	0731 豪雨	高雄市	六龜區	中興里	六龜 (C0V800)	2021-08-02-09	581	61.5
068	2021	盧碧颱風暨 0806 水災	高雄市	六龜區	新發里	新發 (C1V590)	2021-08-07-12	889	70
069	2021	盧碧颱風暨 0806 水災	高雄市	六龜區	新發里	新發 (C1V590)	2021-08-07-13	889	70
070	2021	盧碧颱風暨 0806 水災	高雄市	桃源區	勤和里	小關山 (C1V220)	2021-08-07-15	817	75
071	2023	其他(0823)	高雄市	桃源區	勤和里	小關山 (C1V220)	2023-08-22-19	38	7.5

一、土石流發生時累積雨量

收集 2006 年至 2023 年土石流發生案例，根據參考的雨量站資料，雨量站，(站號) 包括大津(C1V340)、瑪家(C1R140)、甲仙(C0V250)、新發(C1V240)、月眉(C1V260)、表湖 (C0V150)、楠西(C1O920)、復興(C1V210)、關山(C1O880)、來義(C1R240)、尾寮山(C0R100)、龍美(C1M390)、馬頭山(C0M410)、牡丹(C1R340)、檳榔 (C0R280)、佳樂水(C0R370)、枋山(C1R330)、旗山 (C0V740)、阿禮 (C0R130)、楓港(C0R400)、六龜 (C0V800)、達卡努瓦(C1V160)等 20 站。歷年土石流事件之累積雨量組體圖繪製如圖 5-30 所示。

圖 5-31 中顯示土石流發生時之累積雨量主要分布於 500mm 以上，達 62 例。其中大於 1,000mm 以上者有 25 例，發生於 2009 年莫拉克颱風及 2007 年 8 月 9 日豪雨。最高累積雨量達 1,589mm(莫拉克颱風)，最低則為去年 2023 年 6 月高雄市桃源區的玉穗溪土石流事件。

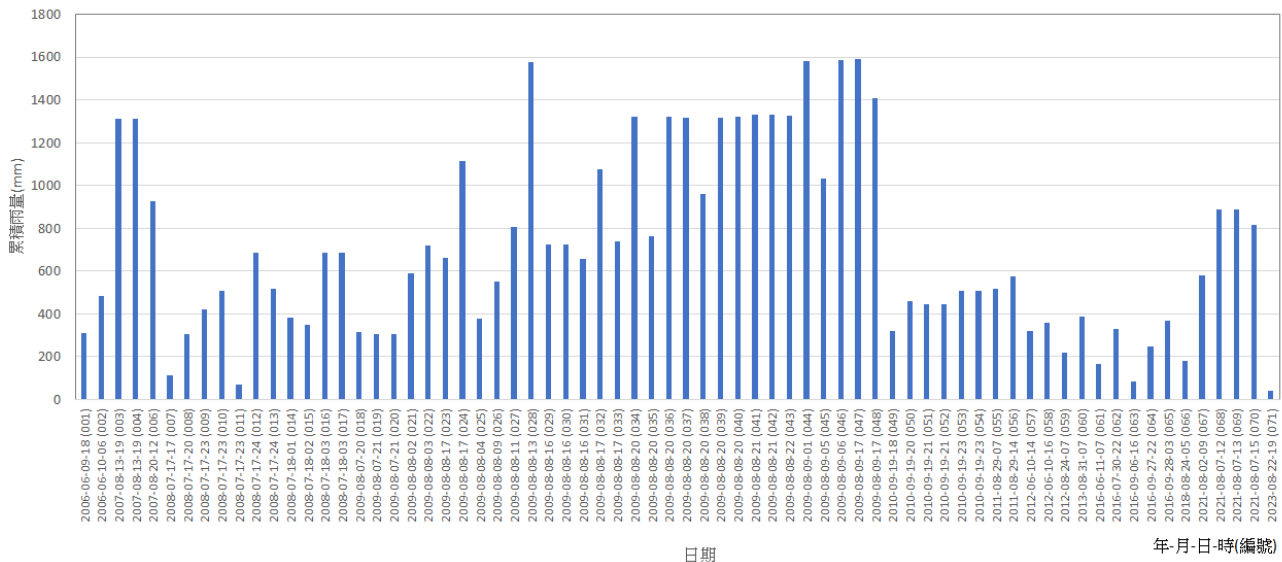


圖 5-30 歷年土石流災害累積雨量組體圖

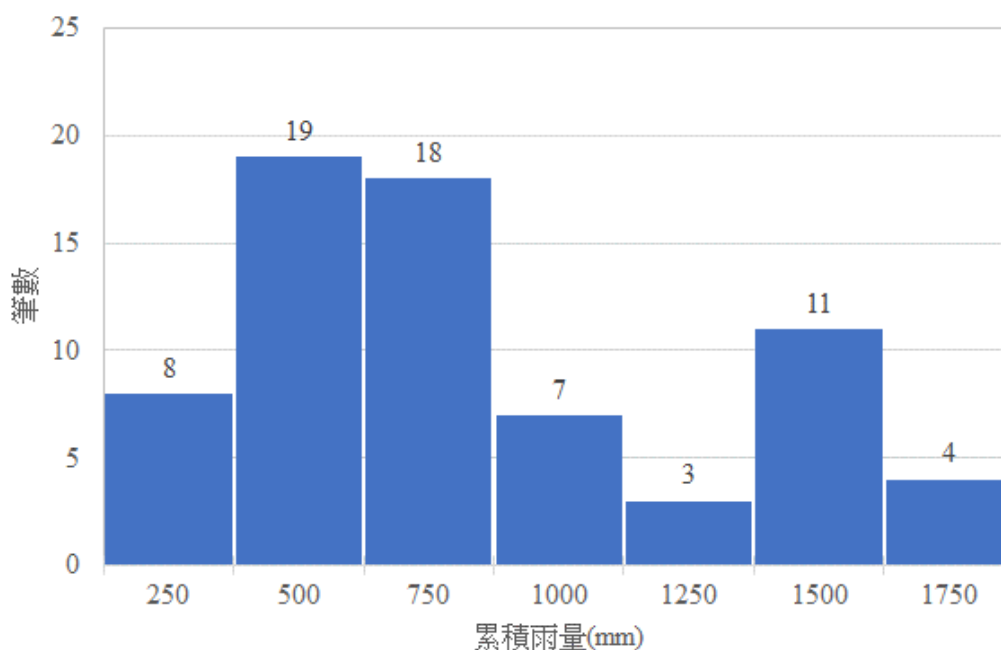


圖 5-31 土石流發生時累積雨量統計分布圖

二、土石流發生前之尖峰雨量

若單純分析土石流發生之當時時雨量，將出現許多於非常低的發生時雨量狀況，則若考慮分析土石流發生前之尖峰雨量，則獲得較具水文意義的之降雨特性出現。圖 5-32 中顯示大部分土石流發生前之尖峰雨量大於 50mm 以上之強降雨。在高發生累積雨量之案例，此現象更明顯，其尖峰降雨強度甚至超過 80mm/hr。

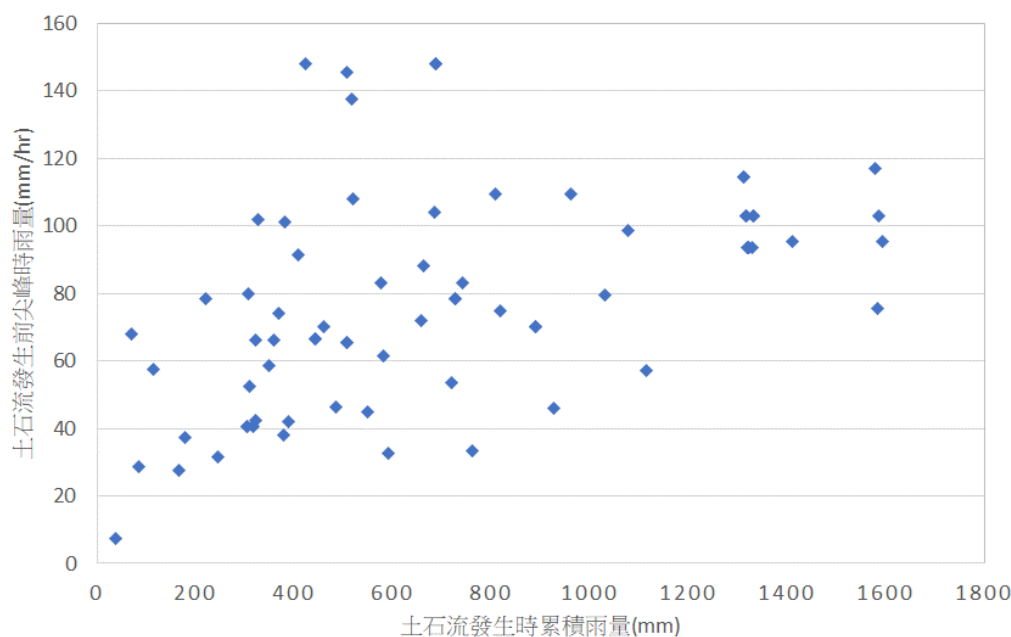


圖 5-32 土石流發生時累積雨量與土石流發生前尖峰時雨量分布圖

三、土石流發生前之降雨延時

降雨延時與累積雨量呈現正相關。收集 2006 年至 2023 年的土石流事件資料，經由降雨延時分佈圖趨勢分析(圖 5-33)，從累積降雨量與降雨延時的關係(表 5-3)，得出當累積降雨量大於 200mm，且降雨延時超過 30 小時，會有較高的機率發生土石流。

表 5-3 土石流發生前之降雨延時表

NO	雨場開始時間 年-月-日-時	災害發生時間 年-月-日-時	土石流發生前 之降雨延時	NO	雨場開始時間 年-月-日-時	災害發生時間 年-月-日-時	土石流發生前之 降雨延時
1	2006-06-09-03	2006-06-09-18	15	42	2009-08-06-21	2009-08-08-21	48
2	2006-06-09-03	2006-06-10-06	24	43	2009-08-06-21	2009-08-08-22	49
7	2007-07-17-13	2008-07-17-17	4	26	2009-08-06-22	2009-08-08-09	35
8	2007-07-17-13	2008-07-17-20	7	28	2009-08-06-22	2009-08-08-13	39
10	2007-07-17-13	2008-07-17-23	10	34	2009-08-06-22	2009-08-08-20	46
11	2007-07-17-13	2008-07-17-23	10	36	2009-08-06-22	2009-08-08-20	46
12	2007-07-17-13	2008-07-17-24	11	40	2009-08-06-22	2009-08-08-20	46
13	2007-07-17-14	2008-07-17-24	10	41	2009-08-06-22	2009-08-08-21	47
15	2007-07-17-14	2008-07-18-02	12	46	2009-08-06-22	2009-08-09-06	56
9	2007-07-17-16	2008-07-17-23	7	25	2009-08-06-23	2009-08-08-04	29
14	2007-07-17-16	2008-07-18-01	9	27	2009-08-06-23	2009-08-08-11	36
16	2007-07-17-16	2008-07-18-03	11	38	2009-08-06-23	2009-08-08-20	45
17	2007-07-17-16	2008-07-18-03	11	49	2010-09-19-02	2010-09-19-18	16
3	2007-08-12-08	2007-08-13-19	3	50	2010-09-19-02	2010-09-19-20	18
4	2007-08-12-08	2007-08-13-19	27	51	2010-09-19-02	2010-09-19-21	19
6	2007-08-17-22	2007-08-20-12	62	52	2010-09-19-02	2010-09-19-21	19
45	2009-08-06-19	2009-08-09-05	58	53	2010-09-19-05	2010-09-19-23	18
21	2009-08-06-20	2009-08-08-02	30	54	2010-09-19-05	2010-09-19-23	18
22	2009-08-06-20	2009-08-08-03	31	56	2011-08-27-13	2011-08-29-14	49
24	2009-08-06-20	2009-08-08-17	45	55	2011-08-27-14	2011-08-29-07	41
29	2009-08-06-20	2009-08-08-16	44	57	2012-06-09-15	2012-06-10-14	23
30	2009-08-06-20	2009-08-08-16	44	58	2012-06-09-15	2012-06-10-16	25
35	2009-08-06-20	2009-08-08-20	48	59	2012-08-24-01	2012-08-24-07	6
44	2009-08-06-20	2009-08-09-01	52	60	2013-08-31-04	2013-08-31-07	3
47	2009-08-06-20	2009-08-09-17	68	61	2016-06-10-21	2016-06-11-07	10
48	2009-08-06-20	2009-08-09-17	69	62	2016-07-29-10	2016-07-30-22	36
18	2009-08-06-21	2009-08-07-20	23	63	2016-09-06-13	2016-09-06-16	3
19	2009-08-06-21	2009-08-07-21	24	64	2016-09-27-10	2016-09-27-22	12
20	2009-08-06-21	2009-08-07-21	24	65	2016-09-27-14	2016-09-28-03	13
23	2009-08-06-21	2009-08-08-17	44	66	2018-08-22-05	2018-08-24-05	48
31	2009-08-06-21	2009-08-08-16	43	67	2021-07-31-08	2021-08-02-09	49
32	2009-08-06-21	2009-08-08-17	44	68	2021-08-05-04	2021-08-07-12	56
33	2009-08-06-21	2009-08-08-17	44	69	2021-08-05-04	2021-08-07-13	57
37	2009-08-06-21	2009-08-08-20	47	70	2021-08-05-07	2021-08-07-15	56
39	2009-08-06-21	2009-08-08-20	47	71	2023-08-22-15	2023-08-22-19	4

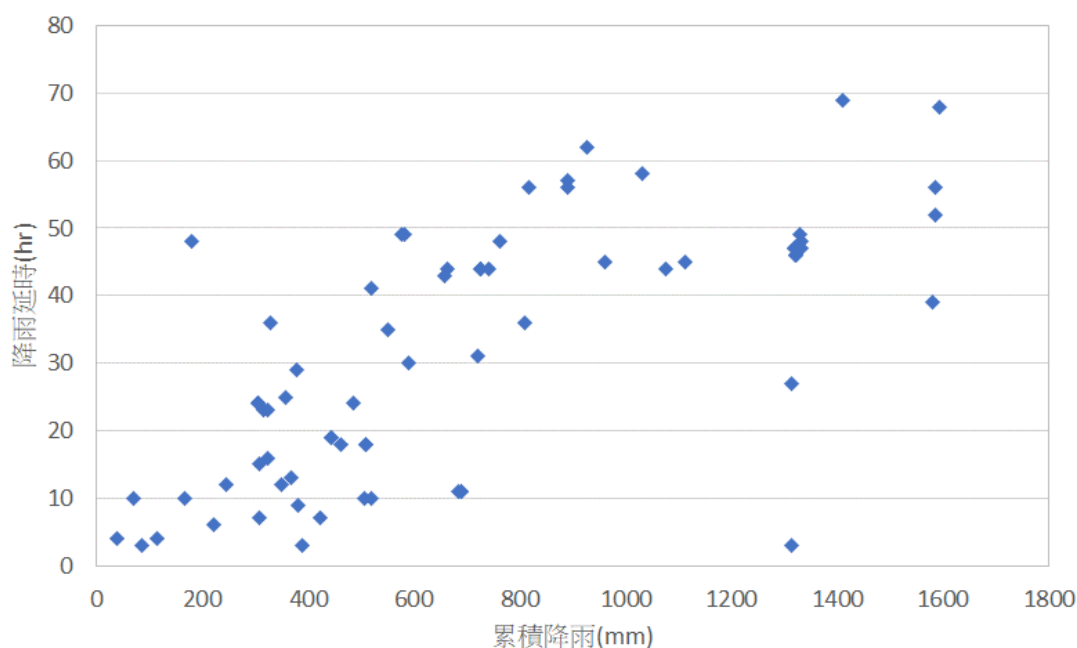


圖 5-33 累積降雨量與降雨延時分析圖

四、土石流發生與尖峰降雨之延遲時間

由表 5-4 及圖 5-34 中顯示，共計 47 事件土石流發生時間落後於局部尖峰雨量。圖 5-35 顯示累積雨量高時，發生前之前期尖峰降雨不需太高，即達到土石流發生狀況；而累積雨量小時，則往往發生前之會有較強之前期尖峰降雨。其機制可能與地下水上升速率有關。

另由前期尖峰降雨與發生時之時間差顯示，以莫拉克颱風事件為例，莫拉克颱風在 8 月 6 日至 9 日侵襲台灣長達 64 小時，其中降雨延遲達 10 小時以上約有 8 件，此類土石流事件可能與河道堰塞再形成堰塞壩潰決之狀況有關。

表 5-4 土石流發生與發生前尖峰降雨之延遲表

NO	土石流發生時間 年-月-日-時	發生前尖峰時間 年-月-日-時	延遲 時間	NO	土石流發生時間 年-月-日-時	發生前尖峰時間 年-月-日-時	延遲 時間
1	2006-06-09-18	2006-06-09-13	5	37	2009-08-08-20	2009-08-08-18	2
2	2006-06-10-06	2006-06-10-06	0	38	2009-08-08-20	2009-08-08-07	13
3	2007-08-13-19	2007-08-13-16	3	39	2009-08-08-20	2009-08-08-18	2
4	2007-08-13-19	2007-08-13-16	3	40	2009-08-08-20	2009-08-08-18	2
6	2007-08-20-12	2007-08-20-08	4	41	2009-08-08-21	2009-08-08-18	3
7	2008-07-17-17	2008-07-17-17	0	42	2009-08-08-21	2009-08-08-18	3
8	2008-07-17-20	2008-07-17-20	0	43	2009-08-08-22	2009-08-08-18	4
9	2008-07-17-23	2008-07-17-23	0	44	2009-08-09-01	2009-08-09-01	0
10	2008-07-17-23	2008-07-17-23	0	45	2009-08-09-05	2009-08-08-18	11
11	2008-07-17-23	2008-07-17-23	0	46	2009-08-09-06	2009-08-08-18	12
12	2008-07-17-24	2008-07-17-22	2	47	2009-08-09-17	2009-08-08-22	19
13	2008-07-17-24	2008-07-17-23	1	48	2009-08-09-17	2009-08-08-22	19
14	2008-07-18-01	2008-07-18-01	0	49	2010-09-19-18	2010-09-19-18	0
15	2008-07-18-02	2008-07-17-21	5	50	2010-09-19-20	2010-09-19-20	0
16	2008-07-18-03	2007-07-17-23	4	51	2010-09-19-21	2010-09-19-20	1
17	2008-07-18-03	2008-07-17-23	4	52	2010-09-19-21	2010-09-19-20	1
18	2009-08-07-20	2009-08-07-01	19	53	2010-09-19-23	2010-09-19-18	5
19	2009-08-07-21	2009-08-07-01	20	54	2010-09-19-23	2010-09-19-18	5
20	2009-08-07-21	2009-08-07-01	20	55	2011-08-29-07	2011-08-29-04	3
21	2009-08-08-02	2009-08-07-23	3	56	2011-08-29-14	2011-08-29-05	9
22	2009-08-08-03	2009-08-08-02	1	57	2012-06-10-14	2012-06-10-10	4
25	2009-08-08-04	2009-08-08-03	0	58	2012-06-10-16	2012-06-10-10	6
26	2009-08-08-09	2009-08-08-08	0	59	2012-08-24-07	2012-08-24-07	0
27	2009-08-08-11	2009-08-08-07	1	60	2013-08-31-07	2013-08-31-07	0
28	2009-08-08-13	2009-08-08-10	1	61	2016-06-11-07	2016-06-11-06	1
29	2009-08-08-16	2009-08-08-16	4	62	2016-07-30-22	2017-07-30-19	3
30	2009-08-08-16	2009-08-08-16	3	63	2016-09-06-16	2016-09-06-15	1
31	2009-08-08-16	2009-08-08-16	0	64	2016-09-27-22	2016-09-27-21	1
23	2009-08-08-17	2009-08-08-17	0	65	2016-09-28-03	2016-09-28-03	0
24	2009-08-08-17	2009-08-08-17	0	66	2018-08-24-05	2018-08-24-05	0
32	2009-08-08-17	2009-08-08-15	2	67	2021-08-02-09	2021-08-01-12	21
33	2009-08-08-17	2009-08-08-17	0	68	2021-08-07-12	2021-08-07-05	7
34	2009-08-08-20	2009-08-08-18	2	69	2021-08-07-13	2021-08-07-05	8
35	2009-08-08-20	2009-08-08-16	4	70	2021-08-07-15	2021-08-07-05	10
36	2009-08-08-20	2009-08-08-18	2	71	2023-08-22-19	2023-08-22-19	0

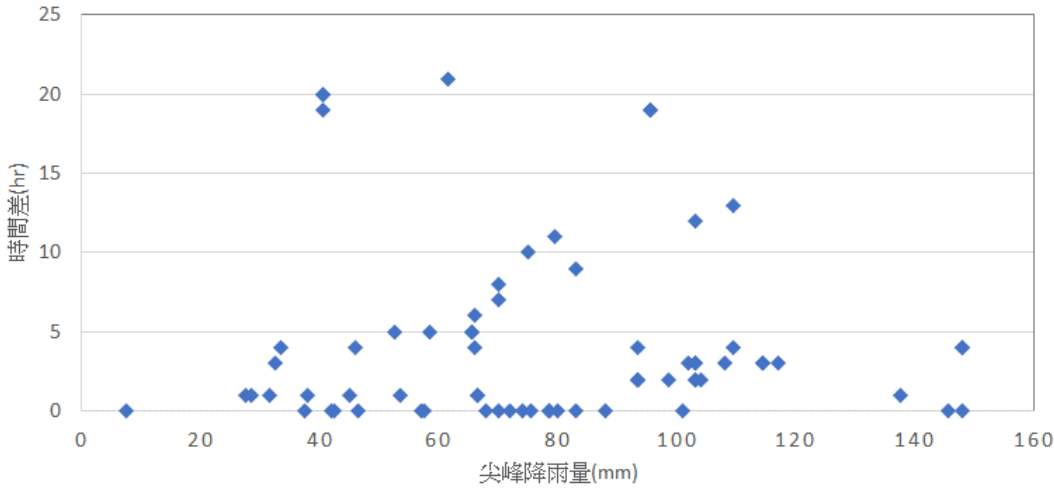


圖 5-34 土石流發生與尖峰降雨時間差

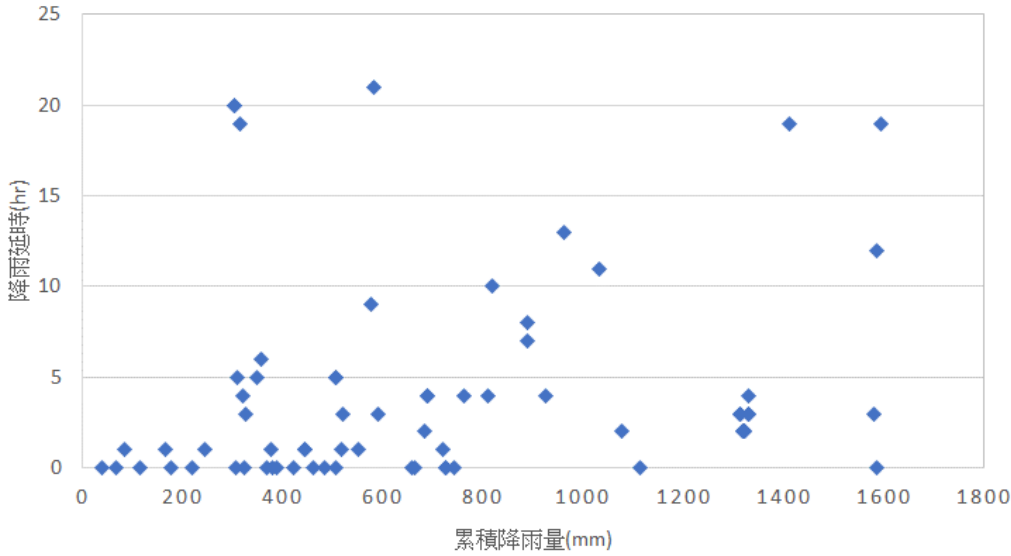


圖 5-35 累積降雨量與尖峰降雨延時分析圖



第六章 推估事件研究區土壤厚度方法

第一節 前期建立之土壤厚度推估模式說明

一、表土層厚度分析資料庫說明

本團隊於前期研究計畫中收集了地調所 2007 至 2010 間淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫(經濟部地礦中心(原地調所), 2007, 2008, 2009, 2010), 進行表層風化土壤厚度調查研究。其中, 鑽探資料取自經濟部地礦中心工程地質探勘資料庫、青山工程顧問公司、及易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2011、2012、2013、2014、2015、2016、2017、2018)。其次, 土壤現地調查取自易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2007、2008、2009、2010、2013)

除工程地質探勘資料庫及研究報告、青山顧問公司之崩塌地鑽探資料外, 本團隊另加收集農村水保署 34 處大規模崩塌, 共計 330 處鑽探及 869 土鑽成果, 進以建立山區崩塌土層之厚度推估方法, 如圖 6-1 所示。紅點為 330 處鑽探成果位置分布。藍點為 869 處土鑽成果位置分布。

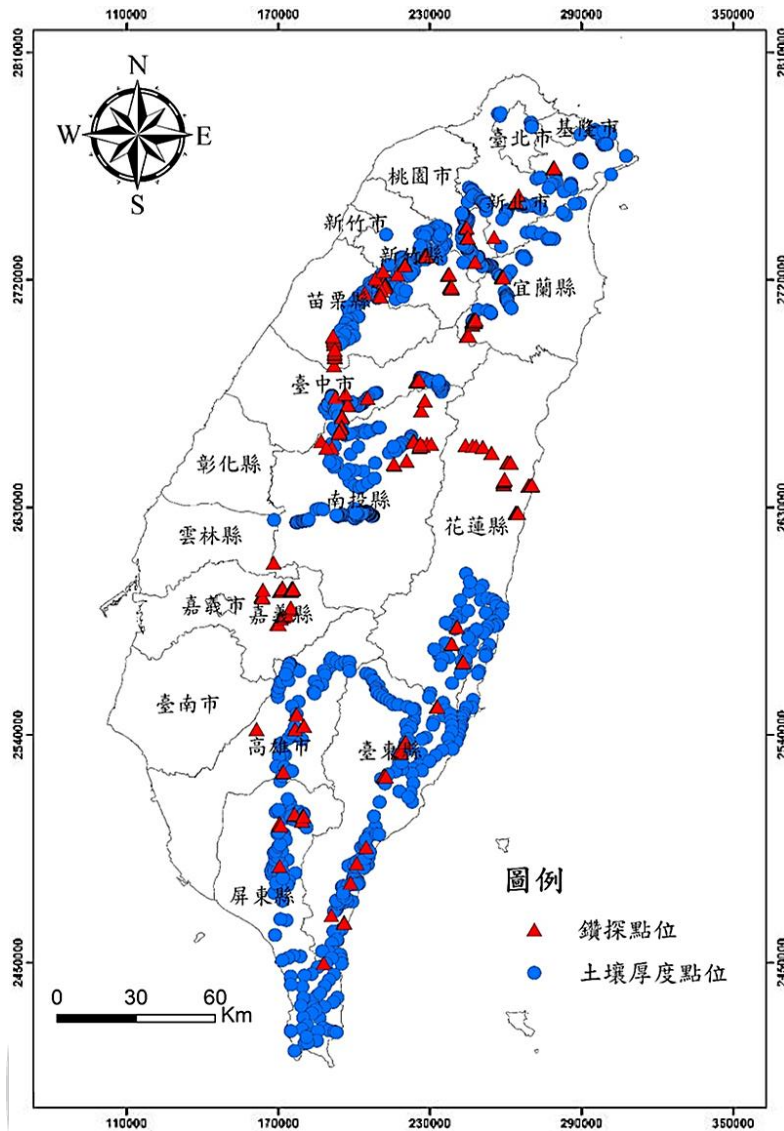


圖 6-1 330 處鑽探及 869 土鑽成果分布圖(重新分析自陳天健，2022)

二、土鑽及鑽探資料統計

本研究逐一檢視 330 處鑽探及 869 處土鑽調查成果，確認鑽探品質及資料完整性後，篩選出鑽探 287 處與土鑽 853 處案例，繪成長條圖進行比較分析，如圖 6-2。於土鑽資料中，厚度多小於 1m，而 1m 以上之個數約佔 33%。鑽探資料分為為擾動區及擾動區二類。未擾動案例表土層厚度 1m 以下資料較少僅 14 處，大部分集中於 6m 以下；

擾動案例之崩積層厚度通常較厚，即使表土層厚度在 20m 以上仍有 38% 的佔比。

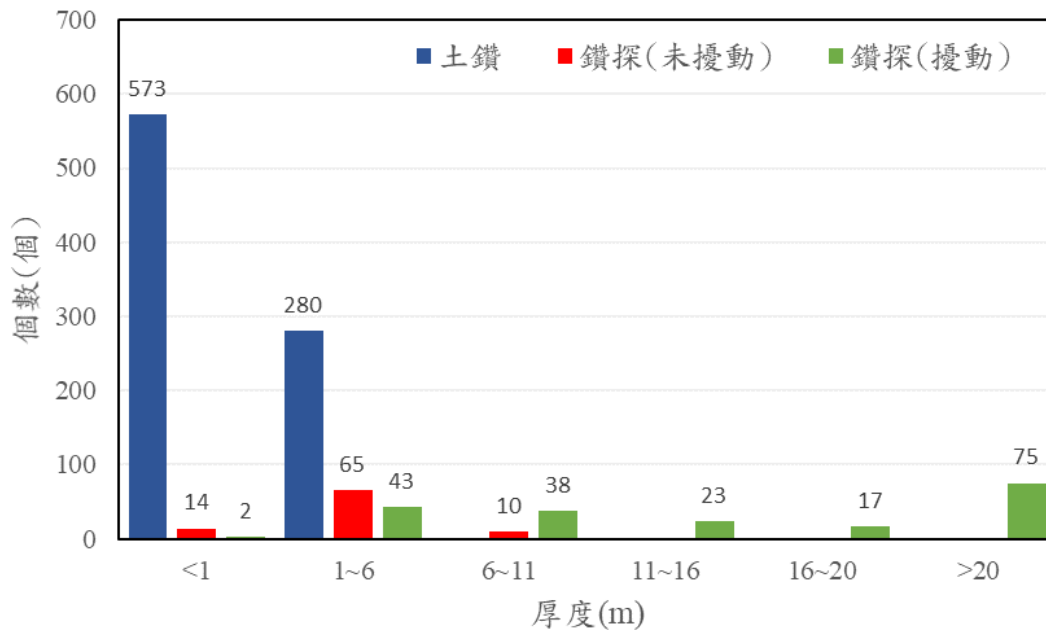


圖 6-2 土鑽及鑽探現調資料統計圖(重新分析自陳天健，2022)

三、淺層崩塌厚度分析

研究團隊重新分析資料庫，以建立淺層崩塌適用之土層厚度推估模式。為符合淺層崩塌定義，本研究將崩積土層厚度 5m 以上者，最深僅計為 5m，再匹配坡度因子進行分析，得出淺層崩塌厚度推估模式如圖 6-3。結果顯示，坡度分布區間為 10 至 63 度，隨坡度上升厚度下降，呈指數相關，迴歸式 $y = 8.1241e^{-0.046x}$ ， R^2 值達 0.54。其中 x 為坡度， y 為崩積土層厚度。

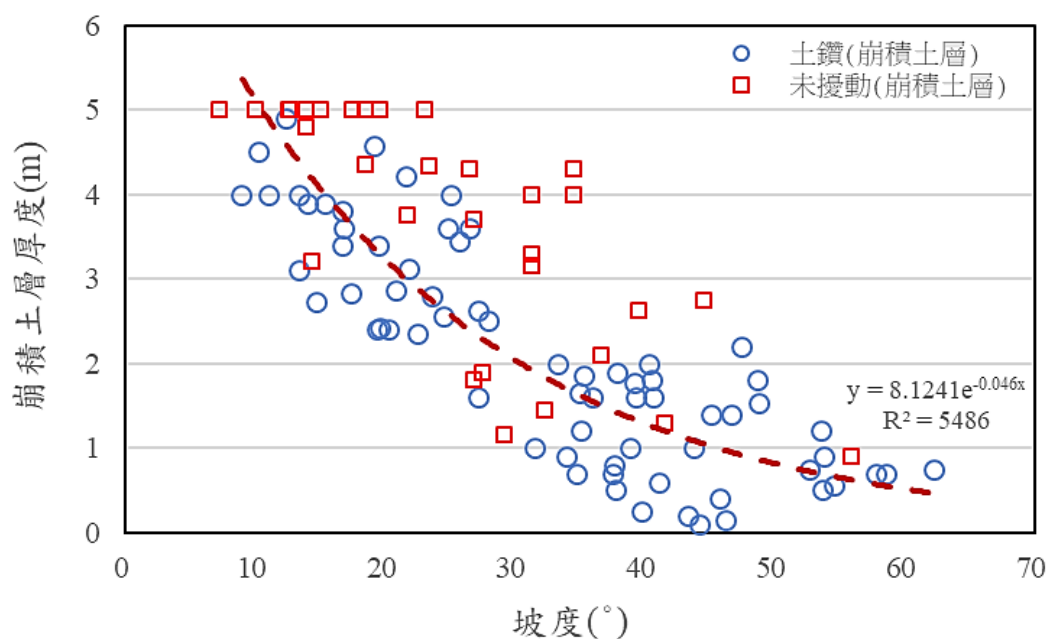


圖 6-3 淺層崩塌厚度推估模式

四、計算淺層崩塌面積及土方量體

本節說明崩塌面積與土方量體估算方法，案例選用阿里山流域集水區土石流潛勢溪流其中之一，嘉縣 DF042 作為建立模式之研究區域如圖 6-4 所示。以 2012 年 6 月 9 日豪雨事件作為建立模式之研究案例，因該區域在 2012 年 6 月 9 日爆發土石流，使縣道 149 甲線於阿里山溪轉彎處地基淘刷，道路受損，來吉大橋上游兩側砌石護岸。

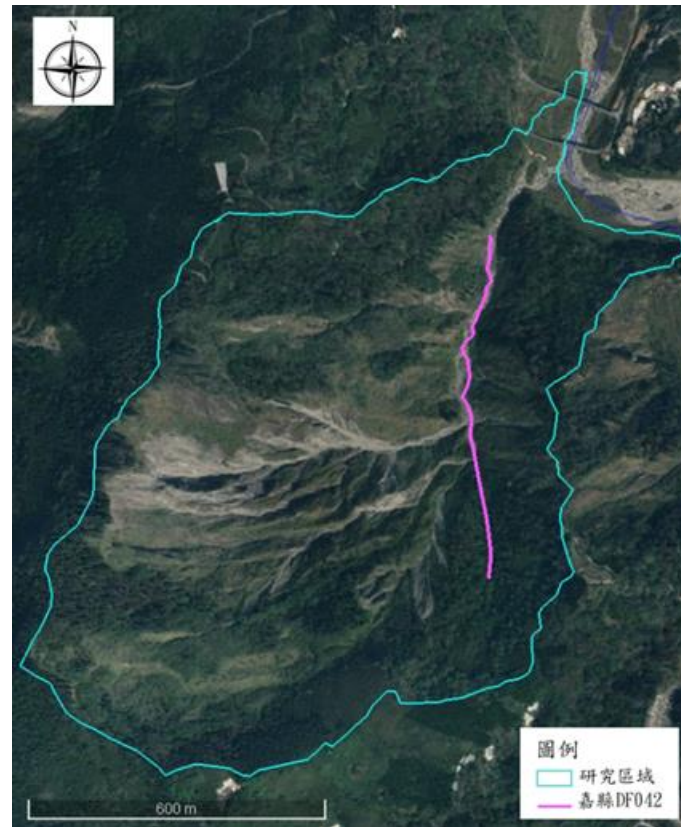


圖 6-4 嘉縣 DF042 研究區域

本研究利用嘉縣 DF042 集水區 DEM 計算各網格之相關參數的空間分佈情況，依照模式的需求，產製數值高程模型(DEM)、土地利用(Land Use)、土壤類型(Soil Type)、QPESUMS 雨量、流向、集水區匯水網格等六項資料。數值高程模型(DEM)為 5m×5m 網格，如圖 6-5 所示。

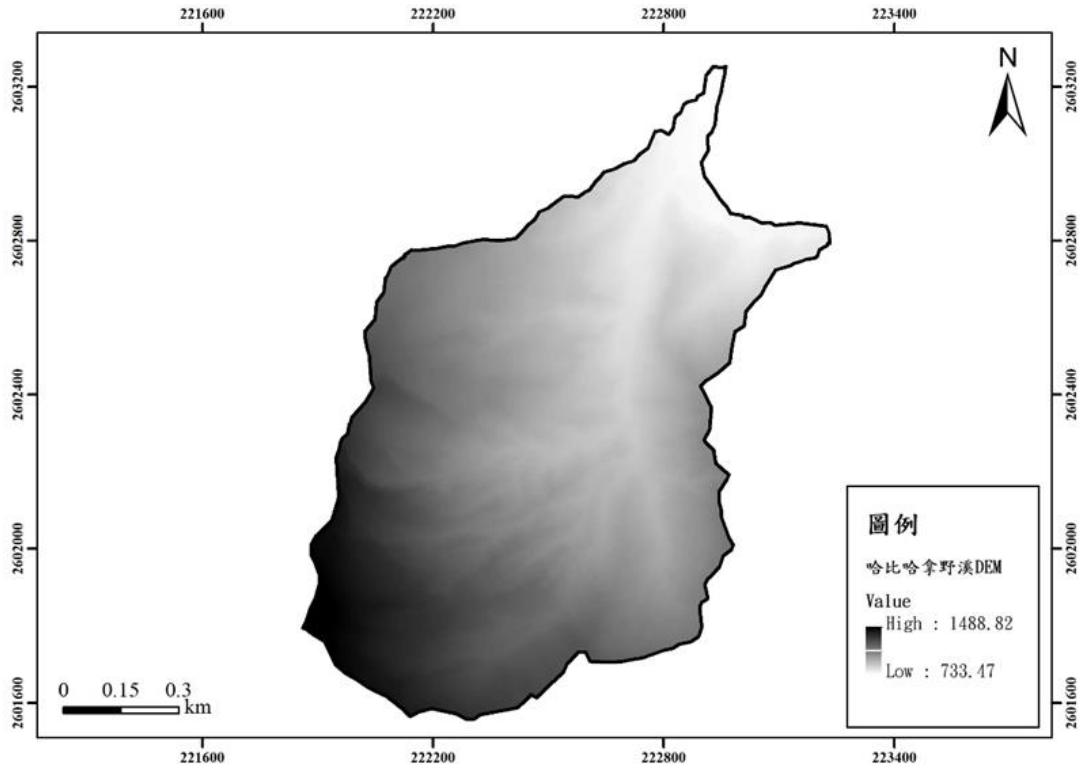


圖 6-5 嘉縣 DF042 數值高程模型

應用淺層崩塌分析模式配合 2012 年 6 月 9 日豪雨事件，求得之淺層崩塌發生範圍。此一範圍需再經崩塌變異點輪廓圈畫程序，以求得較符合實際崩塌特性之崩塌區範圍如圖 6-6 所示。而後，再將此圖資匯入計算淺層崩塌面積及土方量體之程式碼中，進行運算，即可求出集水區內各淺層崩塌之面積，淺層崩塌面積計算結果如表 6-1 所示。進一步計算崩塌土方量體，本研究土方量體計算是使用前節之淺層崩塌之崩積土層推估公式 $y = 8.1241e^{-0.046x}$ ，進行土壤厚度計算，各淺層崩塌範圍的土方量體，如表 6-2 所示。

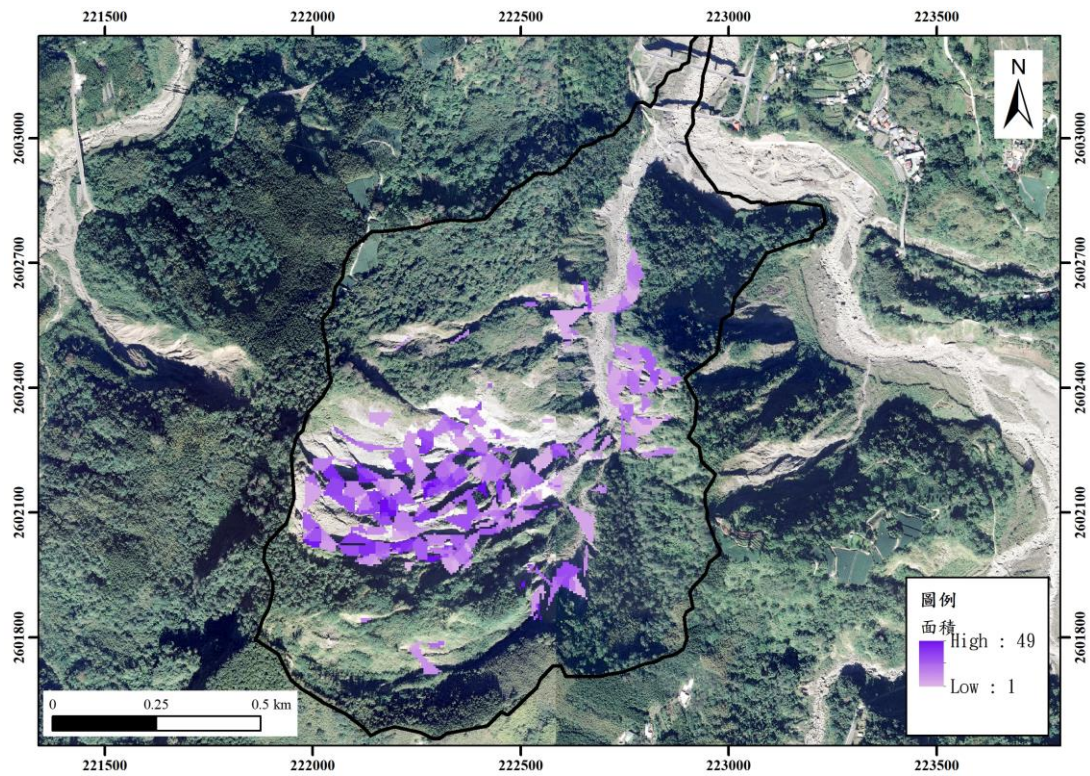


圖 6-6 淺層崩塌分析模式第 18 小時之淺層崩塌發生範圍



表 6-1 各淺層崩塌範圍之面積

淺層崩塌範圍編號	面積(m ²)	淺層崩塌範圍編號	面積(m ²)
1	3675	26	3225
2	3900	27	4275
3	7300	28	3250
4	5200	29	1600
5	2825	30	1275
6	7475	31	3725
7	3725	32	1450
8	5100	33	2650
9	5300	34	1975
10	3850	35	950
11	4475	36	1350
12	6100	37	1875
13	5050	38	1550
14	4350	39	75
15	7350	40	750
16	9225	41	500
17	4600	42	575
18	3075	43	150
19	2825	44	450
20	4150	45	625
21	2500	46	975
22	2050	47	175
23	3825	48	500
24	5525	49	150
25	2900		

表 6-2 各淺層崩塌範圍之土方量體

淺層崩塌範圍編號	面積(m ²)	土方量體(m ³)	淺層崩塌範圍編號	面積(m ²)	土方量體(m ³)
1	3675	4123.919436	26	3225	2885.770343
2	3900	3712.909108	27	4275	6101.222065
3	7300	11950.63181	28	3250	3275.682117
4	5200	5863.931212	29	1600	1922.800244
5	2825	3530.792282	30	1275	1436.975643
6	7475	10001.36669	31	3725	3095.55218
7	3725	3701.944554	32	1450	1385.952443
8	5100	5050.919411	33	2650	3300.392071
9	5300	5080.701847	34	1975	2089.180565
10	3850	4131.197664	35	950	953.8650966
11	4475	4886.694869	36	1350	1435.569892
12	6100	6619.657003	37	1875	1609.420013
13	5050	5234.33919	38	1550	1535.088004
14	4350	4257.618278	39	75	73.9946419
15	7350	7524.282814	40	750	796.8317454
16	9225	10698.18441	41	500	505.5940743
17	4600	4831.472617	42	575	419.2151847
18	3075	3595.418221	43	150	101.1986708
19	2825	3257.349667	44	450	492.5431429
20	4150	4517.729463	45	625	623.1859455
21	2500	2223.290091	46	975	868.9202933
22	2050	2092.111793	47	175	225.3204783
23	3825	4109.396133	48	500	487.7340868
24	5525	5110.655243	49	150	200.1042314
25	2900	3111.204799			



第七章 土石流事件崩塌時機與面積分析

第一節 土石流事件案例說明

分析案例選用南部地區 40 處土石流事件，案例如表 7-1 所示。

案例分布包括位於高雄 36 處，屏東 4 處。主要岩層包括：潮州層、糖
恩山砂岩、三民頁岩、長枝坑層、隘寮腳層、鹽水坑頁岩、牡丹層、
階地堆積層。

表 7-1 土石流事件分析案例

序號	HDF_NO	坐標 (TWD97)		所屬 縣市	所屬土石流 潛勢溪流編號	災害事件	集水區面積 (m ²)
		X	Y				
1	HDF034	214056	2533852	高雄市	高市 DF049	2006 年 0609 豪雨	134,949
2	HDF035	214106	2533671	高雄市	高市 DF075	2006 年 0609 豪雨	219,298
3	HDF002	217465	2558346	高雄市	高市 DF047	2007 年 聖帕颱風	153,261
4	HDF003	217489	2558128	高雄市	高市 DF047	2007 年 聖帕颱風	26,003
5	HDF004	214313	2555783	高雄市	高市 DF020	2008 年 卡枚基颱風	264,635
6	HDF005	213478	2555124	高雄市	高市 DF020	2008 年 卡枚基颱風	377,801
7	HDF054	201966	2549886	高雄市	高市 DF021	2008 年 卡枚基颱風	254,224
8	HDF027	215049	2542341	高雄市	高市 DF053	2008 年 卡枚基颱風	423,368
9	HDF029	215044	2542330	高雄市	高市 DF053	2008 年 卡枚基颱風	742,229
10	HDF059	217078	2555584	高雄市	高市 DF046	2008 年 卡枚基颱風	58,941
11	HDF060	217221	2555470	高雄市	高市 DF046	2008 年 卡枚基颱風	29,966
12	HDF032	214151	2538278	高雄市	高市 DF051	2009 年 莫拉克颱風	307,304
13	HDF001	219215	2570751	高雄市	高市 DF006	2009 年 莫拉克颱風	117,291
14	HDF043	231598	2572467	高雄市	高市 DF087	2009 年 莫拉克颱風	35,227
15	HDF044	231581	2572405	高雄市	高市 DF087	2009 年 莫拉克颱風	52,053
16	HDF006	217106	2554943	高雄市	高市 DF073	2009 年 莫拉克颱風	24,308
17	HDF067	208766	2551418	高雄市	高市 DF071	2009 年 莫拉克颱風	703,263

18	HDF011	218705	2552701	高雄市	高市 DF055	2009 年 莫拉克颱風	248,414
19	HDF012	218703	2552699	高雄市	高市 DF055	2009 年 莫拉克颱風	184,348
20	HDF013	210321	2552421	高雄市	高市 DF019	2009 年 莫拉克颱風	99,016
21	HDF057	210328	2552425	高雄市	高市 DF019	2009 年 莫拉克颱風	247,563
22	HDF018	217168	2550448	高雄市	高市 DF102	2009 年 莫拉克颱風	303,046
23	HDF017	217322	2550911	高雄市	高市 DF078	2009 年 莫拉克颱風	303,047
24	HDF016	203638	2550574	高雄市	高市 DF016	2009 年 莫拉克颱風	128,937
25	HDF033	215122	2534836	高雄市	高市 DF050	2010 年 凡娜比颱風	128,938
26	HDF037	230080	2438061	屏東縣	屏縣 DF070	2011 年 南瑪都颱風	208,755
27	HDF036	231821	2452050	屏東縣	N	2011 年 南瑪都颱風	32,558
28	HDF024	216650	2545542	高雄市	高市 DF076	2012 年 0610 豪雨	156,190
29	HDF025	216647	2545537	高雄市	高市 DF076	2012 年 0610 豪雨	206,348
30	HDF021	216026	2547825	高雄市	高市 DF107	2012 年 0610 豪雨	54,064
31	HDF038	233911	2432929	屏東縣	屏縣 DF064	2012 年 天秤颱風	23,769
32	HDF045	214098	2467986	屏東縣	屏縣 DF040	2013 年 康芮颱風	37,452
33	HDF007	216838	2553975	高雄市	高市 DF097	2016 年 梅姬颱風	48,594
34	HDF008	216415	2553910	高雄市	高市 DF097	2016 年 梅姬颱風	138,211
35	HDF009	216415	2553910	高雄市	高市 DF097	2016 年 梅姬颱風	24,683
36	HDF010	216542	2553911	高雄市	高市 DF097	2016 年 梅姬颱風	26,569
37	HDF031	214404	2541340	高雄市	高市 DF114	2021 年 0731 豪雨	290,986
38	HDF015	217906	2551837	高雄市	高市 DF113	2021 年 盧碧颱風暨 0806 水災	65,589
39	HDF014	218088	2552050	高雄市	高市 DF112	2021 年 盧碧颱風暨 0806 水災	227,914
40	HDF046	232920	2563173	高雄市	N	2021 年 盧碧颱風暨 0806 水災	407,179

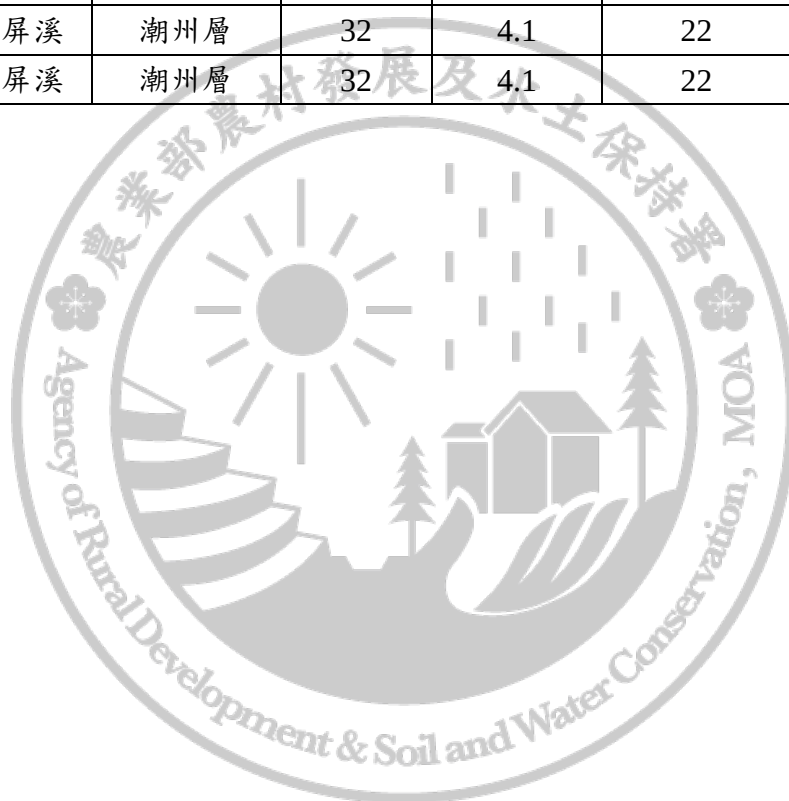
第二節 地文、水文分析參數說明

土石流事件案例淺層崩塌模擬參數，採用經濟部地質調查及礦業中心所調查之材料及水文參數成果，模擬分析依據案例所在岩層狀況選用相應之單位重、土壤凝聚力、土壤摩擦角、滲透係數 K 等，如表 7-2 所示。

表 7-2 各坡面型土石流案例淺層崩塌模擬採用參數表

HDF_NO	流域	地層	摩擦角 ϕ	凝聚力 c	土單位重 γ	水利傳導度 K
HDF034	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF035	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF002	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF003	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF004	高屏溪	糖恩山砂岩	33	4.6	22	0.00008
HDF005	高屏溪	糖恩山砂岩	33	4.6	22	0.00008
HDF054	高屏溪	糖恩山砂岩	33	4.6	22	0.00008
HDF027	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF029	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF032	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF059	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF060	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF001	高屏溪	三民頁岩	30	2.5	22	0.00006
HDF043	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF044	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF006	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF067	高屏溪	糖恩山砂岩	33	4.6	22	0.00008
HDF011	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF012	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF013	高屏溪	隘寮腳層	35	0.6	22	0.00002
HDF057	高屏溪	隘寮腳層	35	0.6	22	0.00002
HDF018	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF017	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF016	高屏溪	鹽水坑頁岩	21	3.3	22	0.00007

HDF033	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF037	四重溪	階地堆積層	23	2.3	19.5	0.000063
HDF036	東港溪	牡丹層	23	4.5	22	0.00001
HDF024	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF025	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF021	東港溪	牡丹層	23	4.5	22	0.00001
HDF038	東港溪	牡丹層	23	4.5	22	0.00001
HDF045	東港溪	牡丹層	23	4.5	22	0.00001
HDF007	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF008	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF009	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF010	高屏溪	長枝坑層	30	3.1	22	0.000017
HDF031	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF015	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF014	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005
HDF046	高屏溪	潮州層	32	4.1	22	0.00005



第三節 分析案例說明

一、案例一(編號 HDF027)

(一)地理位置

案例一位於高雄市六龜區中興里，屬荖濃溪流域，為高市 DF053 土石流潛勢溪流集水區內之坡面型土石流單元。集水區面積 423,368 平方公尺，地形高程由東向西遞減，平均高程為 783 公尺、坡面平均坡度 32%，坡向以西向、西北向最多，區域地層以潮州層為主。



圖 7-1 案例一(編號 HDF027)區域位置圖

(二)災害概述

因 2008 年 7 月 18 日卡玫基颱風影響，導致集水區上游坡面崩塌，大量泥砂流入河道中，造成河道土石淤滿，以致洪水溢流將河道中之泥砂帶至兩岸，造成部分護岸毀損、道路及民宅遭土石淤埋等災害。詳細災害如圖 7-2 農水保署災情最速報。



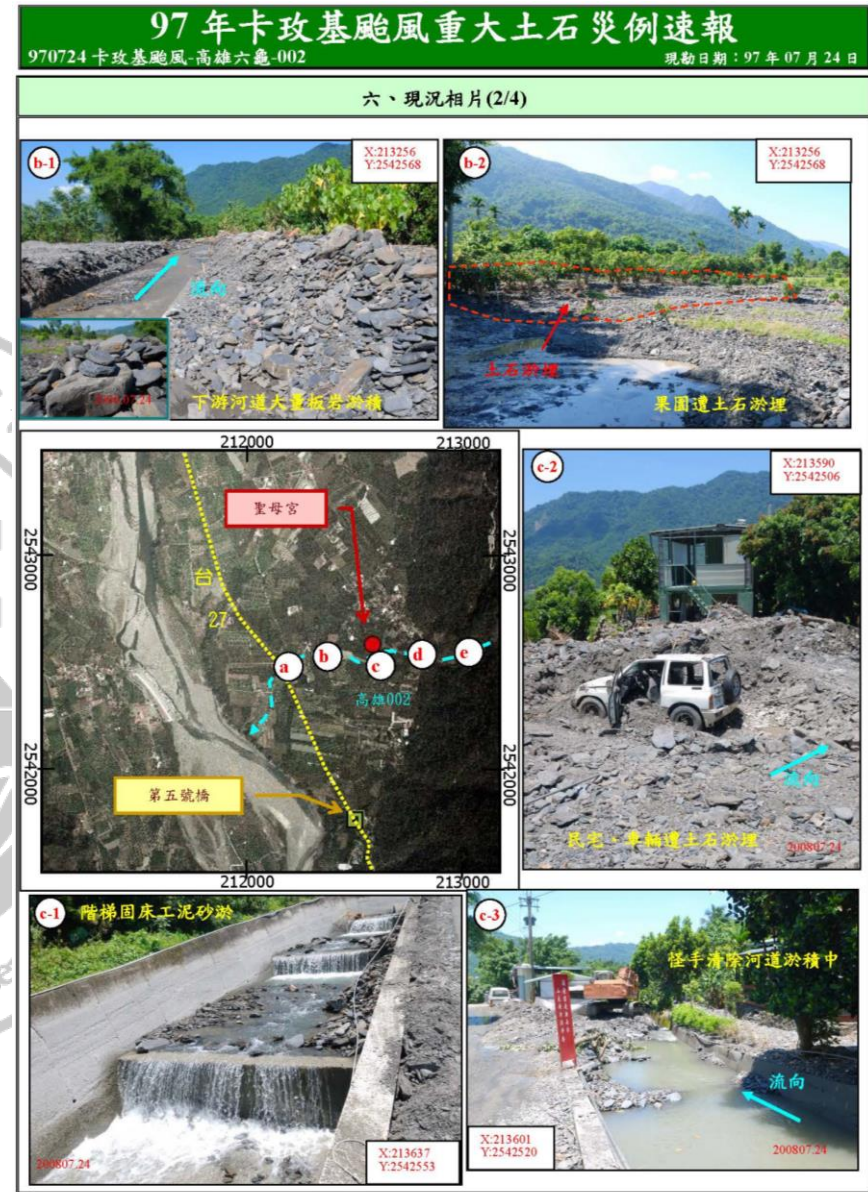


圖 7-2 案例一災情最速報(資料來源:農業部農村水保署)

(三)雨量資料

本案例採用 QPE105172 網格雨量資料，製作雨量分布組體圖如圖 7-3 所示。開始崩塌時間為 2008 年 7 月 17 日 21 時，累積雨量為 238mm，結束崩塌 2008 年 7 月 17 日 23 時，累積雨量達 452mm，災害發生 2008 年 7 月 18 日 3 時累積雨量累積為 666mm。

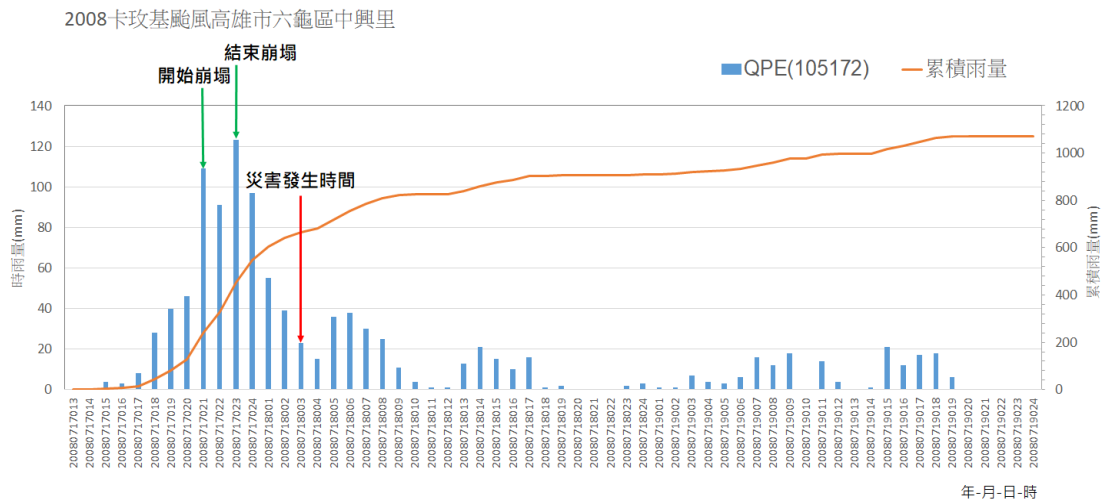


圖 7-3 2008 年 7 月 17 日卡玖基颱風 QPE(105172)雨量組體圖

(四)參數設定

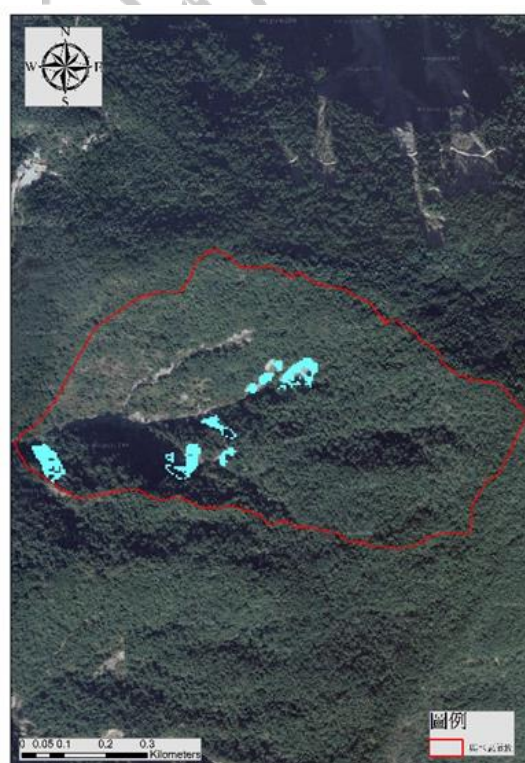
研究區地質為潮州層，因此 C 、 ϕ 、 γ_t 係數參考經濟部地礦中心之易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第三期 100 年度):集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(1/3)。以南部流域材料參數之潮州層做參考 $C=32(\text{kPa})$ 、 $\phi=32(\text{度})$ 、 $\gamma_t=22(\text{kN/m}^3)$ 。

(五)分析結果

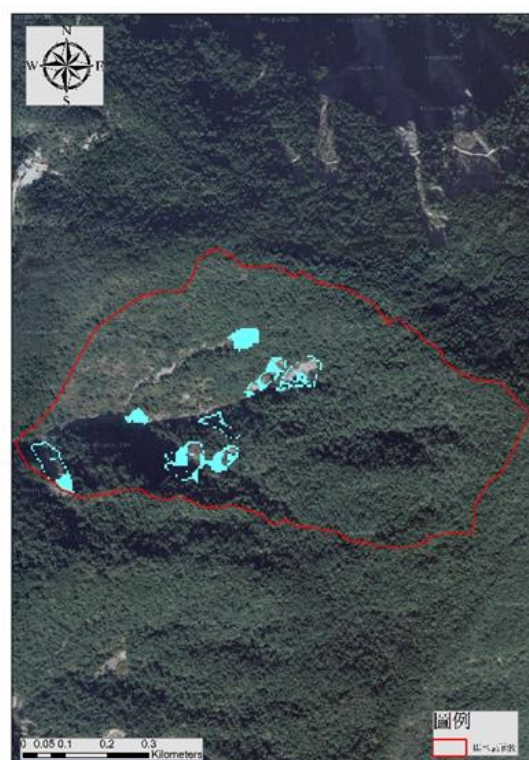
綜合雨量資料及區域地文資料，本案例針對 2008 年卡枚基颱風事件進行淺層崩塌模擬，分析崩塌時間及位置推估。分析結果顯示淺層崩塌地開始發生時間為 2008 年 7 月 17 日 21 時。至最終崩塌時間為 2008 年 7 月 17 日 23 時。崩塌開始至完全結束崩塌之淺層崩塌模擬情形如圖 7-4 所示，每小時淺層崩塌數量與面積如表 7-3。經比對 QPE 降雨組體圖以及土石流發生回報時間，顯示應用本模式分析可獲得合理結果。



2017/07/17/21:00



2017/07/17/22:00



2017/07/17/23:00

圖 7-4 逐時淺層崩塌情形

表 7-3 2013/7/17 每小時淺層崩塌增量與面積

降雨時間 年-月-日-時	崩塌網格數量(個)	崩塌面積(m ²)
2008-07-17-21	75	1,875
2008-07-17-22	550	13,750
2008-07-17-23	672	16,800
總計	1,297	32,425

二、案例二(編號 HDF032)

(一)地理位置

案例二位於高雄市六龜區中興里，屬荖濃溪流域，為高市 DF051 土石流潛勢溪流集水區內之坡面型土石流單元。集水區面積 307,304 平方公尺，地形高程由東向西遞減，平均高程為 691 公尺、坡面平均坡度 28%，坡向以西南向、西向最多，境內地質屬潮州層，岩性為硬頁岩或板岩間夾透鏡狀砂岩體。



圖 7-5 案例一(編號 HDF032)區域位置圖

(二)災害概述

2009 年 8 月 8 日因莫拉克颱風夾達強大降雨，以至於當日晚間 20 時爆發土石流災害。集水區內崩塌面積約 10 公頃，土石堆積約有 50 萬立方公尺，大量土石沖毀掩埋多處民宅及部分果園苗圃，並造成台 27 線受阻中斷約 400 公尺。詳細災害詳如農村水保署災情最速報圖 7-5 及圖 7-6 所示。



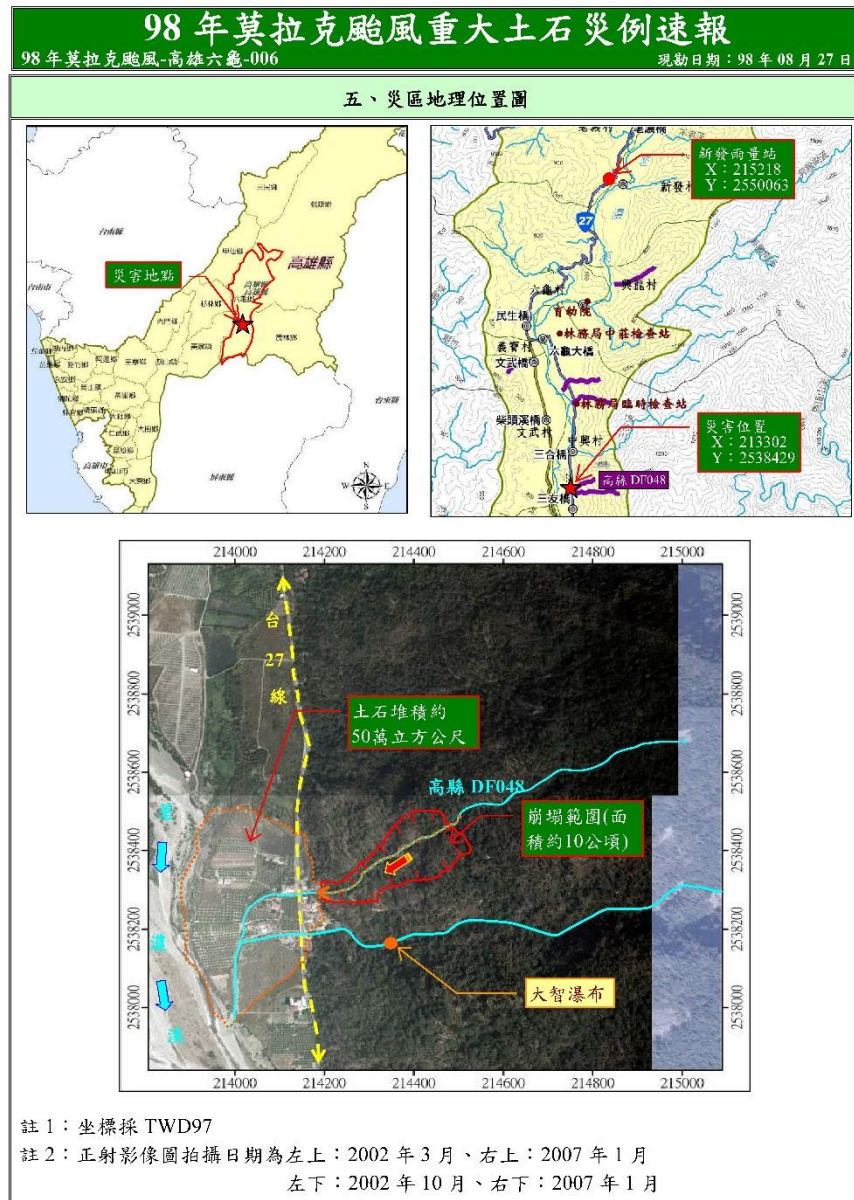


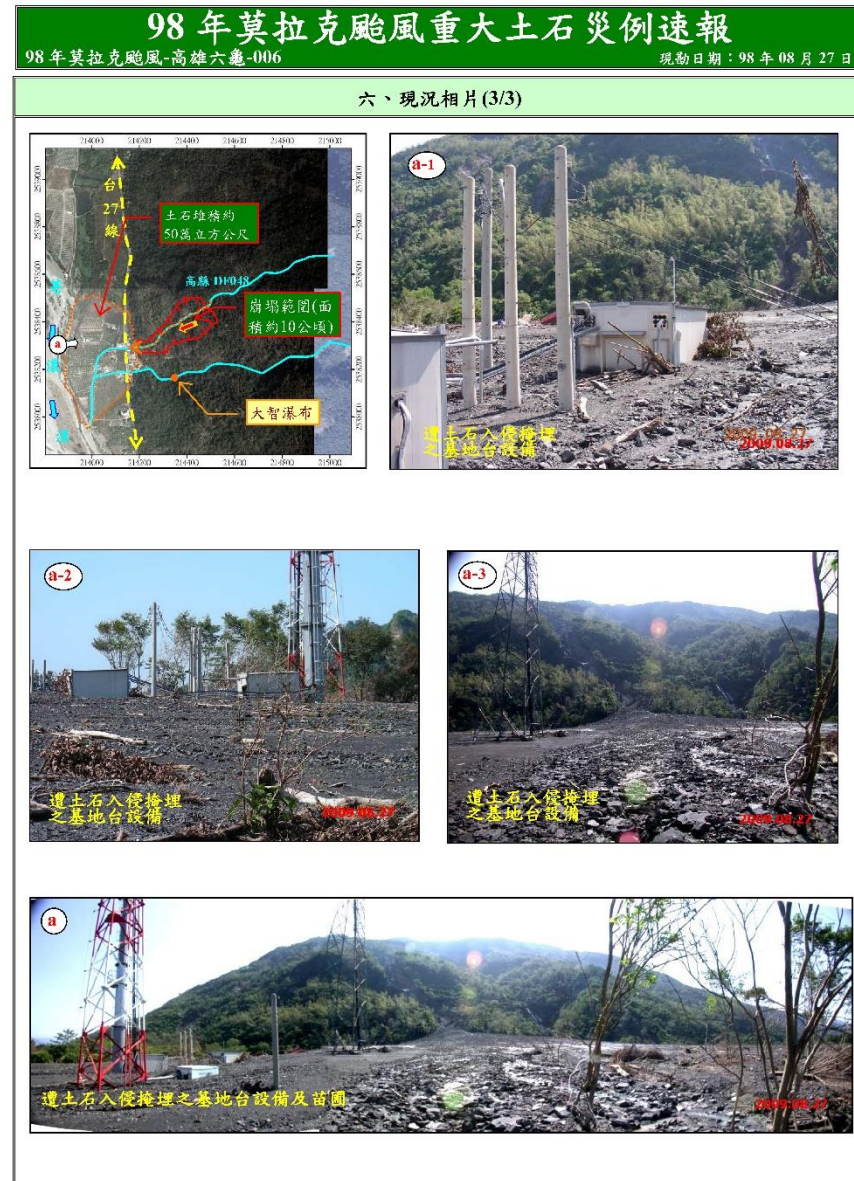
圖 7-6 案例二災情最速報-1(資料來源:農業部農村水保署)



優質、效率、團隊

附錄 B-43 5/6

行政院農業委員會水土保持局



優質、效率、團隊

附錄 B-43 6/6

行政院農業委員會水土保持局

圖 7-7 案例二災情最速報-2(資料來源:農業部農村水保署)

(三)雨量資料

本案例採用 QPE104290 網格雨量資料，製作雨量分布組體圖如圖 7-8 所示。開始崩塌時間為 2009 年 8 月 8 日 4 時，累積雨量為 471mm，結束崩塌 2009 年 8 月 8 日 8 時，累積雨量達 668mm，災害發生 2009 年 8 月 8 日 20 時累積雨量累積為 1,273mm。

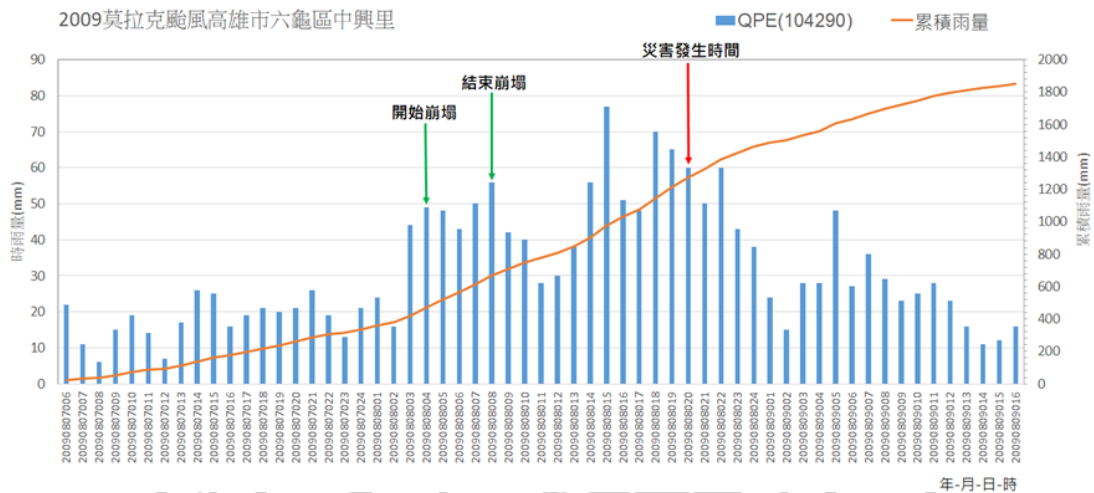


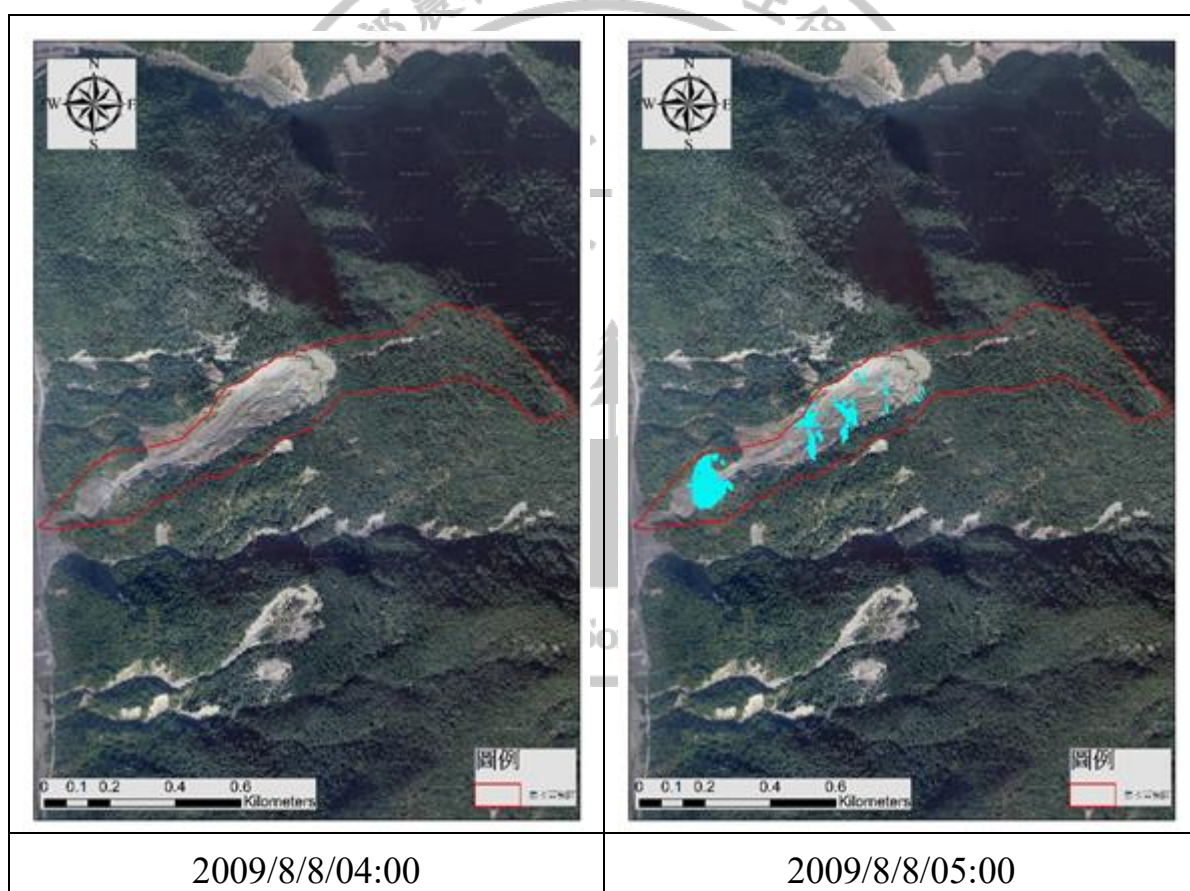
圖 7-8 2009 年 8 月 7-9 日莫拉克颱風 QPE(104290)雨量組體圖

(四)參數設定

研究區地質為潮州層，因此 C 、 ϕ 、 γ_t 係數參考經濟部地礦中心之易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第三期 100 年度):集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(1/3)。以南部流域材料參數之潮州層做參考 $C=32(\text{kPa})$ 、 $\phi=32(\text{度})$ 、 $\gamma_t=22(\text{kN/m}^3)$ 。

(五)分析結果

綜合雨量資料及區域地文資料，本案例針對 2009 年莫拉克颱風事件進行淺層崩塌模擬，分析崩塌時間及位置推估。分析結果顯示淺層崩塌地開始發生時間為 2009 年 8 月 8 日 4 時。至最終崩塌時間為 2009 年 8 月 8 日 8 時。崩塌開始至完全結束崩塌之淺層崩塌模擬情形如圖 7-9 所示，每小時淺層崩塌數量與面積如表 7-4。經比對 QPE 降雨組體圖以及土石流發生回報時間，顯示應用本模式分析可獲得合理結果。



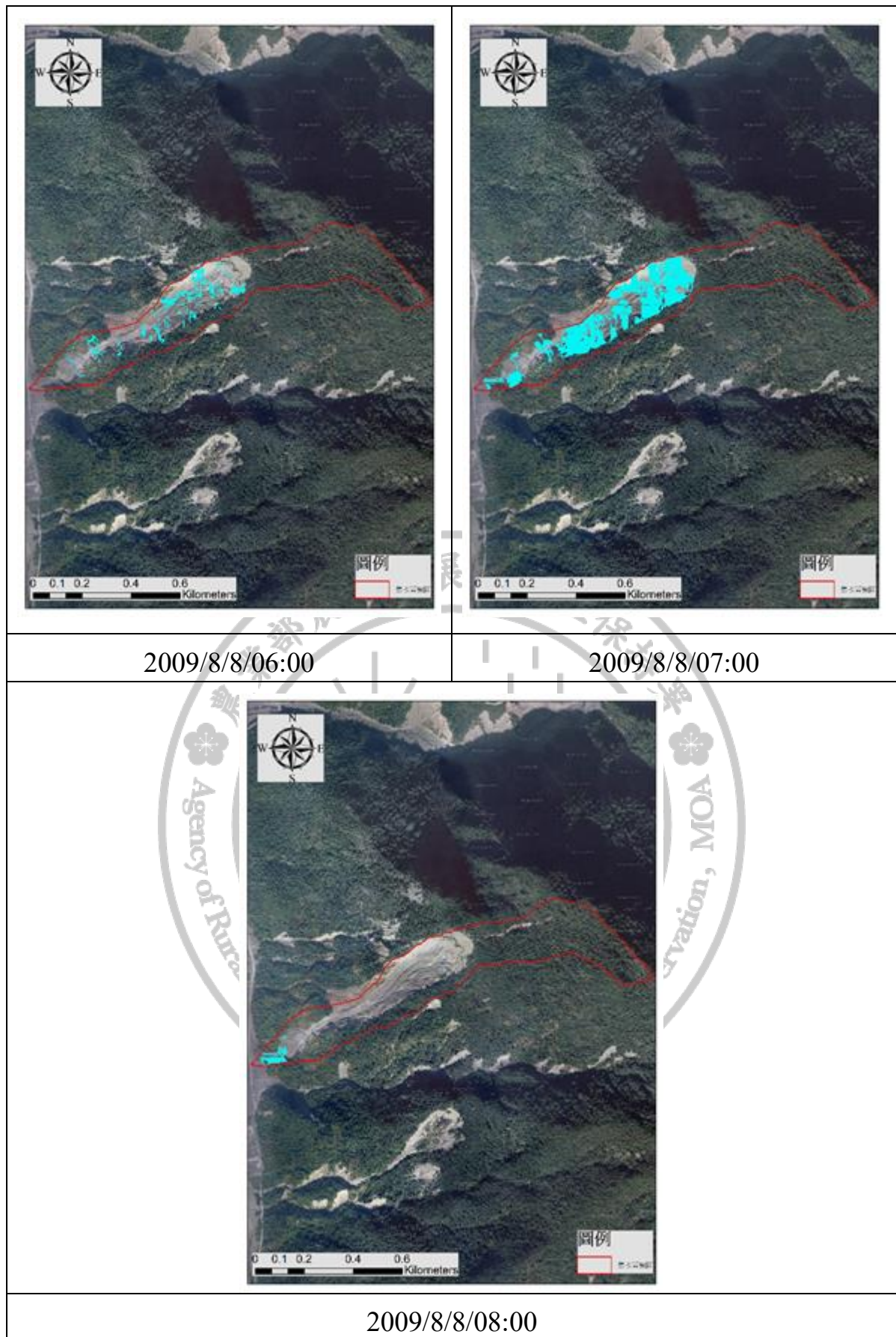


圖 7-9 逐時淺層崩塌情形

表 7-4 2008/8/8 每小時淺層崩塌數量與面積

降雨時間 年-月-日-時	崩塌網格數量(個)	崩塌面積(m ²)
2009-08-08-04	4	100
2009-08-08-05	990	24,750
2009-08-08-06	633	15,825
2009-08-08-07	2,845	71,125
2009-08-08-08	141	3,525
總計	4,613	115,325



第四節 分析成果綜合說明

針對土石流發生時之降雨及崩塌狀況，依據模擬成果分析如下。

一、主要崩塌時間與土石流回報時間差

主要崩塌時間與土石流回報時間差分析成果如圖 7-10 所示，圖中兩者時間差最大可達 33 小時，此案例位於高雄市六龜區寶來一號橋野溪，經綜和雨量與崩塌分析結果，本處於 2008 年聖帕颱風出現二波密集強降雨，第一波為較強降雨(主要崩塌時間)，土石流回報時間則位於第二波次強降雨後 4 小時。另扇平山莊 2021 年 8 月 2 日 9 時土石流案件時間差達 21 小時，經檢視降雨歷線，回報時間前後數小時之時降雨量均小 10 mm/hr，而主要崩塌模擬時間則位於該事件降雨雨勢最強時，因此判斷淺崩分析成果應為合理。而 2009 年 8 月 8 日事件則為莫拉克颱風，因其為長延時強降雨，因此模擬分析多為提前狀況。

圖 7-11 統計所有案例之模擬分析主要崩塌時間與回報時間差，顯示時間差分布長短皆有，此可能受限於大風雨時，土石流察覺不易，或聚落位於下游，因此土石流回報時間，僅能做為參考。

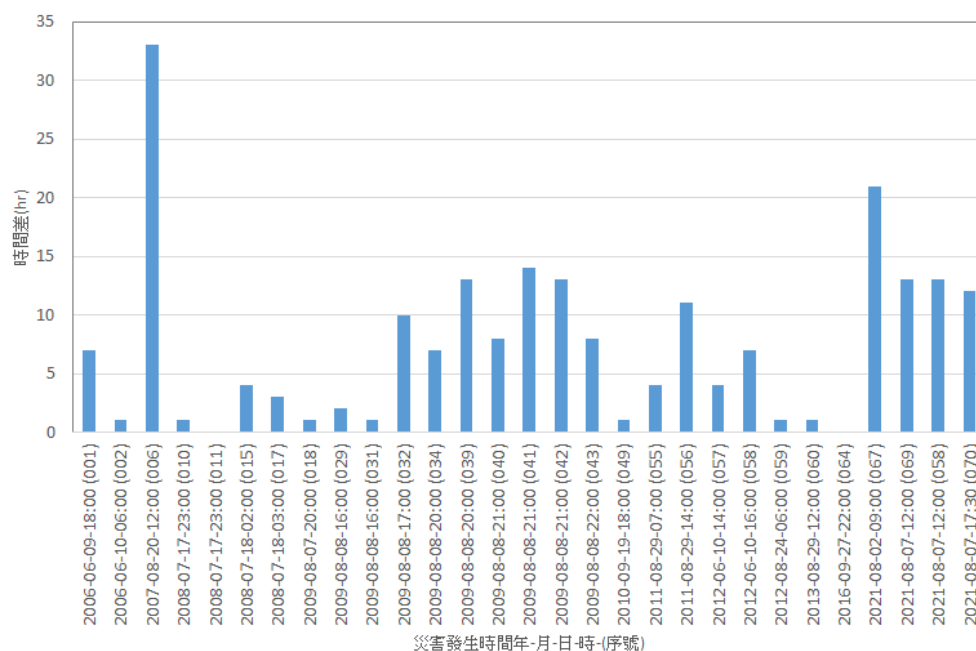
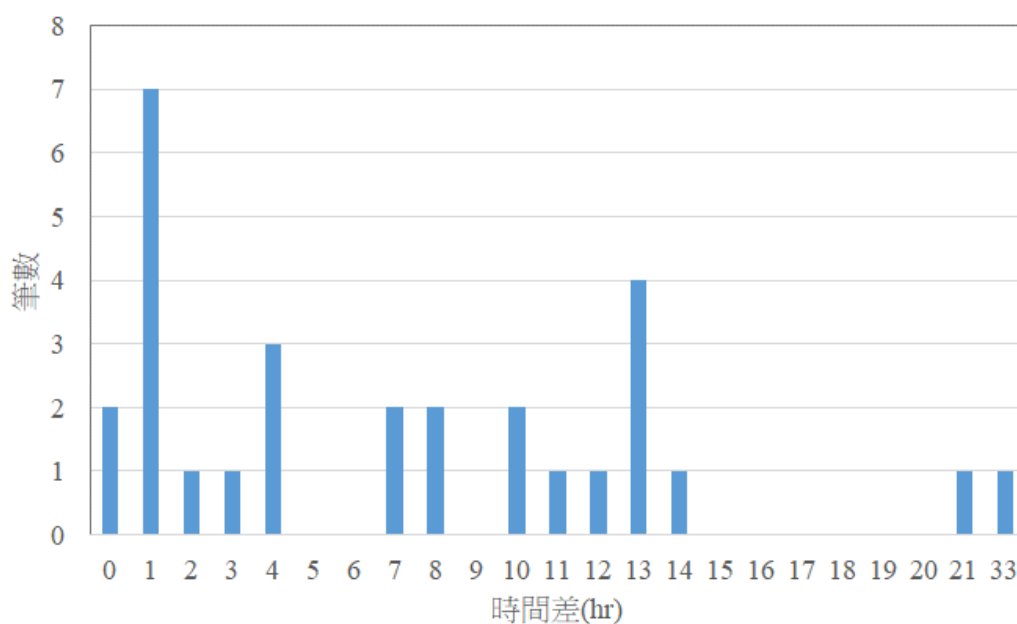


圖 7-10 各案例主要崩塌發生時間與土石流回報時間差



時間差	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	33
筆數	2	7	1	1	3	0	0	2	2	0	2	1	1	4	1	0	0	0	0	0	0	1	1

圖 7-11 各案例主要崩塌發生時間與土石流回報時間差統計

二、主要崩塌時之雨量分析

主要崩塌發生時之時雨量與該時累積雨量分析成果如圖 7-12 所示，其中考慮強降雨影響有延後效果，因此分析之時雨量採用主要崩塌之發生前一小時與該小時二者時雨量較大者。圖中顯示崩塌時雨量主要分布於 30 至 130 mm/hr 間。崩塌時雨量高於 30mm/hr 者達 90%。而高於 50mm/hr 者則達 55%。圖中可注意的是，崩塌時雨量低於 50mm/hr 者，除二案例外，其餘案例當時之累積雨量都大於 300mm 以上，已出現相當高降雨量之狀況。

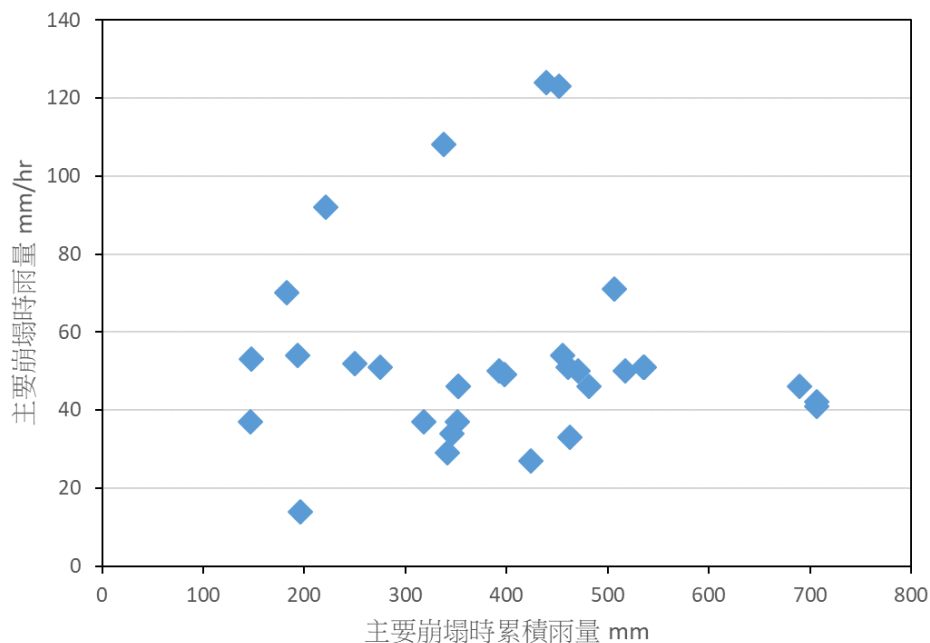


圖 7-12 主要崩塌時雨量與主要崩塌累積雨量關係分布圖

主要崩塌發生時之 3 小時雨量與該時累積雨量分析成果，如圖 7-13 所示，其中分析之 3 小時雨量為採用主要崩塌發生當時及前

二小時之累加雨量。圖中顯示崩塌 3 小時雨量主要分布於 40 至 380 mm/hr 間。3 小時雨量高於 100mm/hr 者達 63.3%。而高於 150mm/hr 者則達 43.3%。圖中可注意的是，3 小時雨量低於 150mm/hr 者，除三案例外，其餘案例當時之累積雨量都大於 300mm 以上，已出現相當高降雨量之狀況。

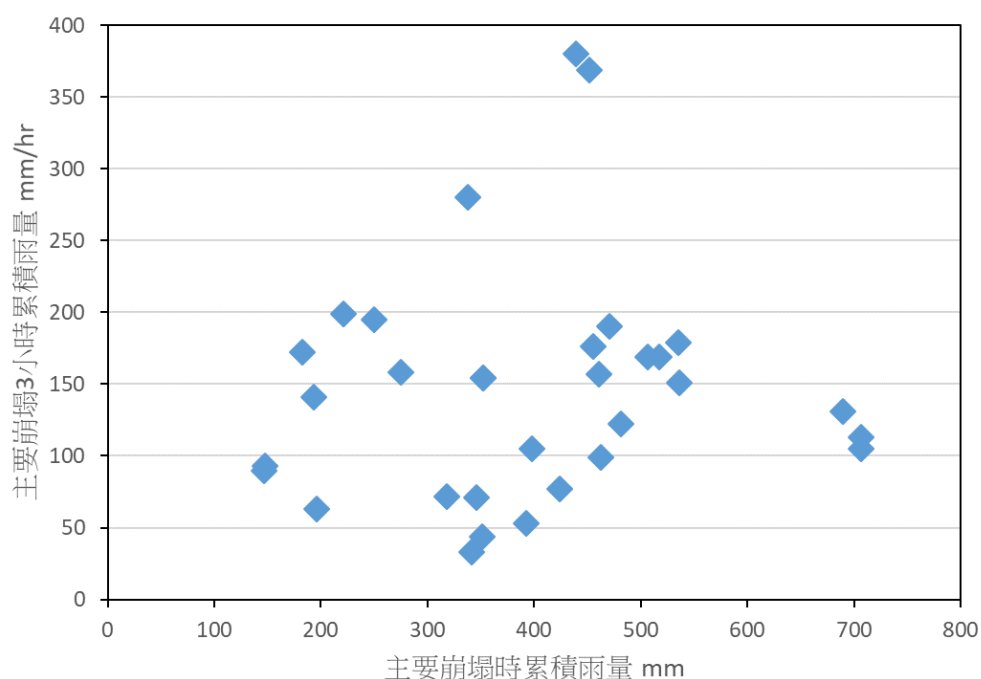


圖 7-13 主要崩塌 3 小時累積雨量時雨量與主要崩塌時雨量關係分布圖

三、主要崩塌面積與土方量分析

主要崩塌發生時間點及崩塌面積與土方量分析成果如

表 7-5 所示。主要崩塌面積與集水面積關係如圖 7-14 所示。圖中顯示主要崩塌面積分布至 1,100 至 220,000 m^2 間，但主要多為 10,000 m^2 以上，達 80%。而高於 45,000 者則達 42.5%。圖中可注意的是，於 2008 年 7 月之高雄六龜區中興里高市 DF053 土石流潛勢溪流集水區內之 HDF029 坡面型土石流(累積雨量為 369mm)及高雄市桃源區建山里高市 DF059 土石流潛勢溪流集水區內之 HDF059 坡面型土石流 (主要崩塌前 3 小時累積雨量為 380mm/hr)二土石流事件，其主要發生崩塌面積僅 1,125 及 1,475 m^2 ，該二處之集水區最終崩塌總面積分別僅 2,444 及 2,316 m^2 。此顯示土石流事件之崩塌面積門檻於 1,100 m^2 ，即達到發生門檻。

主要崩塌面積比與集水面積關係如圖 7-15 所示。主要崩塌面積比為主要崩塌面積與集水總面積之比值。圖中顯示主要崩塌面積比分布至 0.01 至 0.82 間，並無明顯規律趨勢。由此顯示崩塌與集水區面積大小相關性不高，主要仍受控於地形因素及材料性質。

表 7-5 發生崩塌開始各時序之崩塌面積表

序號	HDF_NO	主要崩塌發生時間 年-月-日-時	主要崩塌面積 (m ²)	主要崩塌土方量 (m ³)
1	34	2006-06-09-11	85,425	154,060
2	35	2006-06-10-05	171,100	275,448
6	2	2007-08-19-03	99,350	144,266
6	3	2007-08-19-03	21,125	31,421
10	4	2008-07-17-22	68,250	118,288
10	5	2008-07-17-22	220,225	447,101
11	54	2008-07-17-23	75,050	131,072
15	27	2008-07-17-23	16,800	14426
15	29	2008-07-17-23	1,125	2,444
17	59	2008-07-17-24	1,475	2,316
17	60	2008-07-17-24	8,800	13,640
18	32	2009-08-07-19	71,125	151,983
29	1	2009-08-08-14	20,700	41,782
31	43	2009-08-08-15	17,200	33,057
31	44	2009-08-08-15	33,500	60,063
32	6	2009-08-08-07	13,700	24,382
34	67	2009-08-08-13	175,950	319,277
39	11	2009-08-08-08	194,650	307,253
39	12	2009-08-08-08	117,375	179,010
40	13	2009-08-08-13	15,350	25,608
40	57	2009-08-08-13	13,025	32,324
41	18	2009-08-08-07	21,225	22,439
42	17	2009-08-08-08	138,175	267,702
43	16	2009-08-08-14	63,325	133,796
49	33	2010-09-19-17	106,500	173,457
55	37	2011-08-29-03	77,900	182,295
56	36	2011-08-29-03	13,675	31,044
57	24	2012-06-10-10	52,575	106,146
57	25	2012-06-10-10	41,100	88,334
58	21	2012-06-10-09	40,750	74,154
59	38	2012-08-24-05	10,905	14,311
60	45	2013-08-29-11	12,450	23,204
64	7	2016-09-27-22	9,475	22,938
64	8	2016-09-27-22	20,450	45,563
64	9	2016-09-27-19	8,700	12,371
64	10	2016-09-27-22	9,175	20,475
67	31	2021-08-01-13	3,800	8,967
69	15	2010-08-06-23	2,725	4,204
68	14	2021-08-06-23	84,075	105,162
70	46	2021-08-07-05	109,725	123,172

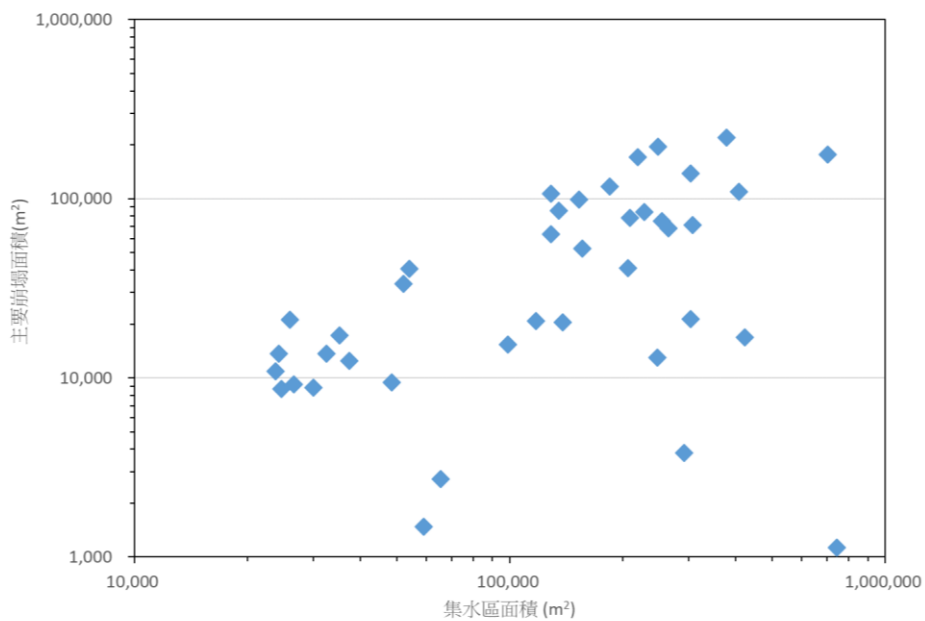


圖 7-14 主要崩塌面積與集水區面積關係圖

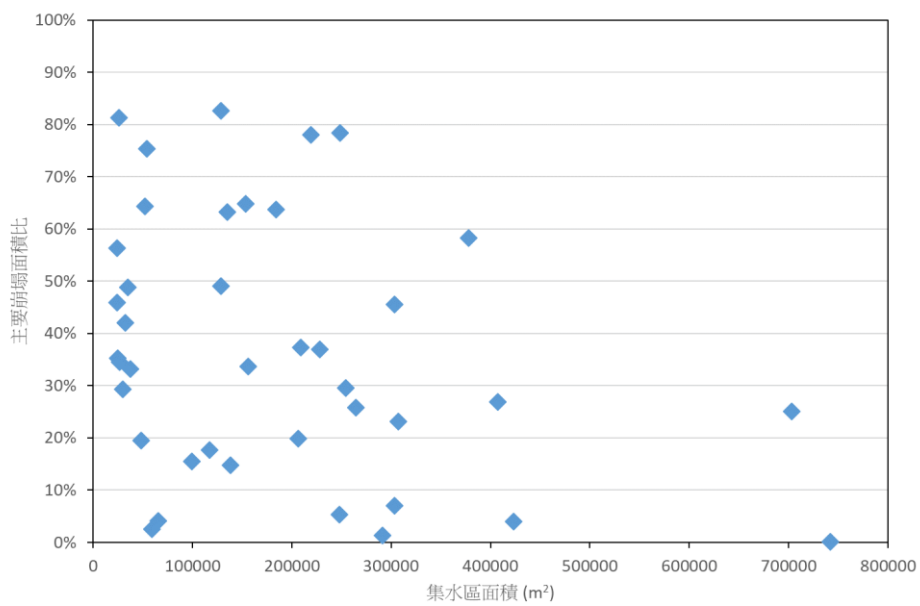


圖 7-15 主要崩塌面積比與集水區面積關係圖

主要崩塌土方量與集水面積關係如圖 7-16 所示。圖中顯示主要崩塌土方量分布至 2,300 至 450,000 m^3 間差異甚大，但主要多為 100,000 m^3 以上，達 90%。主要崩塌土方量略有與總面積指數正比之趨勢。圖中可注意的是，於 2008 年 7 月之高雄六龜區中興里之 HDF029、扇高雄桃源區建山里之 HDF059 與 2021 年 8 月高雄市六龜區新發里 HDF015 及中興里 HDF031 這四處坡面型土石流事件，其主要發生崩塌土方量分別僅為 2,444、2,316、4,204 及 8,967 m^3 。此顯示土石流事件之崩塌門檻土方量於 2,300 m^3 左右，即達到發生門檻。

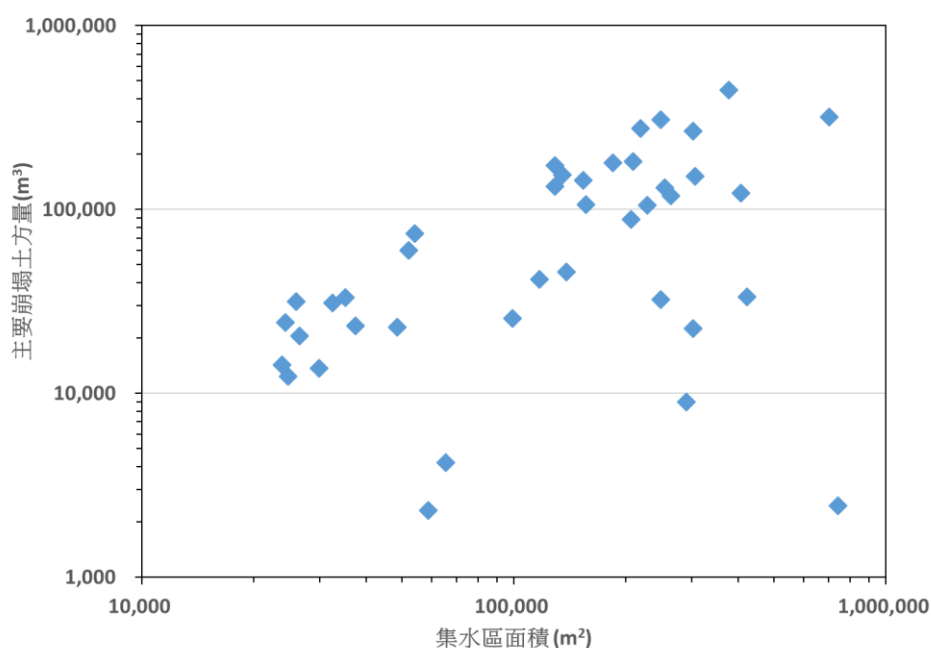


圖 7-16 主要崩塌土方量與集水區面積關係圖

四、主要崩塌時之雨量與崩塌面積分析

本節主要分析主要土石流觸發時-降雨特性及主要崩塌面積之相關性。考慮之降雨因子包括：主要崩塌發生時之時雨量、3 小時雨量及累積雨量。

主要崩塌發生時之時雨量與主要崩塌面積分析成果，如圖 7-17 所示，其中考慮強降雨影響有延後效果，因此分析之時雨量採用主要崩塌之發生前一小時與該小時二者時雨量較大者。圖中顯示於較低降雨強度事件(時雨量 $<50\text{mm/hr}$)，除檳園渡假山莊旁野溪(HDF015)案例外(時雨量 34mm /累積雨量 346mm)，主要崩塌面積多超過 $10,000\text{m}^2$ 。較低降雨強度事件之土石流觸發多肇因於高累積雨量。

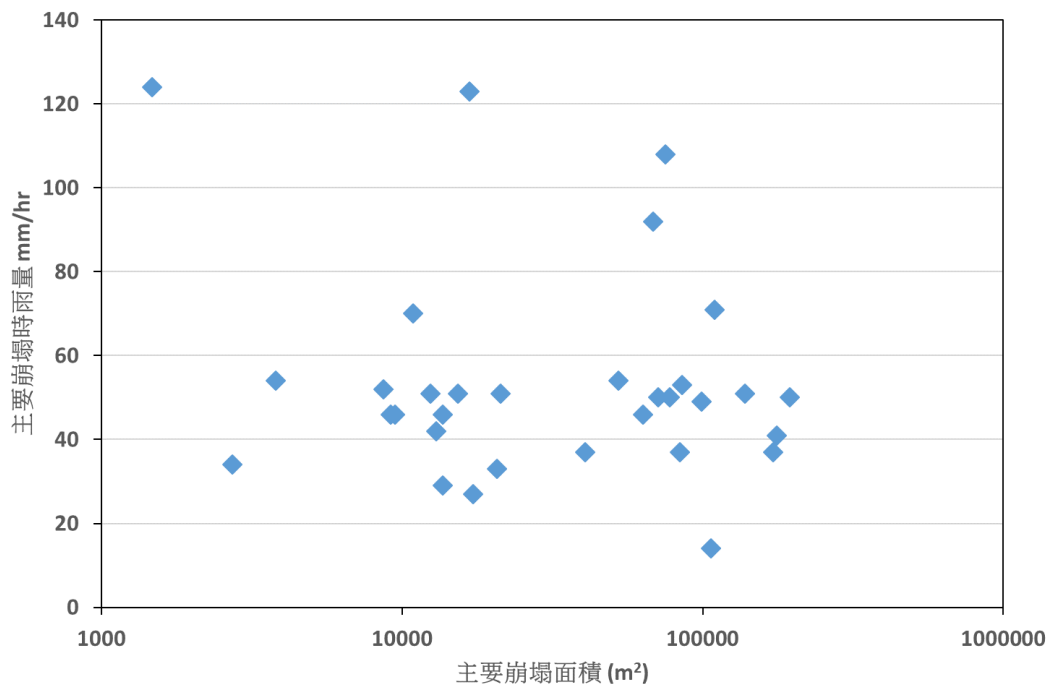


圖 7-17 主要崩塌時雨量與主要崩塌面積關係分布圖

主要崩塌發生時之 3 小時雨量與主要崩塌面積分析成果，如圖 7-18 所示。圖中顯示於較低降雨強度事件(時雨量 $<50\text{mm/hr}$)，除檳園渡假山莊旁野溪(HDF015)案例外(時雨量 34mm /累積雨量 346mm)，主要崩塌面積多超過 $10,000\text{m}^2$ 。此趨勢與時雨量者相似。

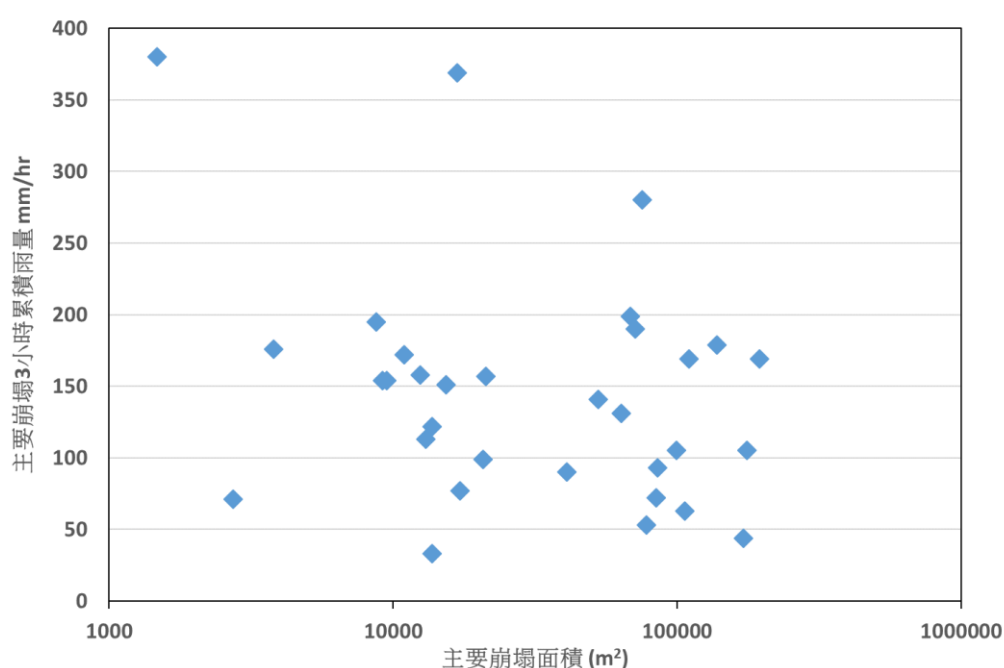


圖 7-18 主要崩塌 3 小時雨量與主要崩塌面積關係分布圖

主要崩塌發生時之累積雨量與主要崩塌面積分析成果，如圖 7-19 所示。檢視事件之雨量資料，顯示圖中較低累積雨量之土石流事件(雨量 $<300\text{mm/hr}$)，多肇因於高強度 3 小時雨量，其所致成的主要崩塌面積亦不小，多超過 $10,000\text{m}^2$ ，可見除累積雨量因子外，3 小時雨量一是觸發土石流發生的重要因子。

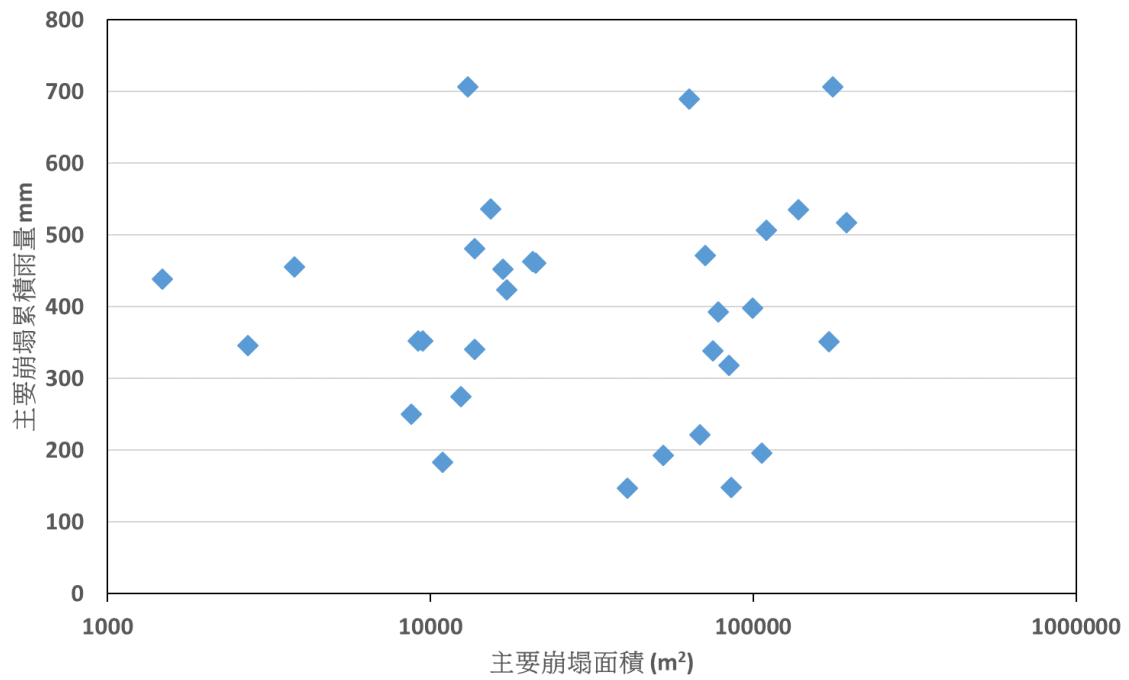


圖 7-19 主要崩塌累積雨量與主要崩塌面積關係分布圖





第八章 建立南部地區坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式

應用前項成果，研擬南部地區坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式。

一、坡面型土石流之單因子模式

本節依前節分析成果進一步加值研究坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式。首先，以單一因子進行發生機率分析，其中各因子依經驗選用較常可能發生坡面型土石流門檻值。各因子分析成果如表 8-1 所示。

- (1) 因子一:主要崩塌時雨量 50 mm/hr，發生次數機率為 55.0%；
時雨量 90 mm/hr，發生次數機率為 17.5%。
- (2) 因子二:主要崩塌 3 小時雨量 100 mm/3hr，發生次數機率為 72.5%；3 小時雨量 150 mm/3hr，發生次數機率為 52.5%。
- (3) 因子三:主要崩塌累積雨量 300 mm/hr，發生次數機率為 75.0%；
累積雨量 350 mm/hr，發生次數機率為 65.0%。
- (4) 因子四: 主要崩塌面積 10,000(m²)，發生次數機率為 80.0%；
崩塌面積 45000(m²)，發生次數機率為 42.5%。再者，**最小主要崩塌面積為 1,125(m²)**。
- (5) 因子六: 主要崩塌土方量 15000 (m³)，發生次數機率為 82.5%；

土方量 10000 (m^3)，發生次數機率為 90.0%。而最小主要崩塌土方量為 2,444 (m^3)。

若以坡面型土石流發生機率 80%為基準，各指標門檻結果如表 8-2 所示。惟此成果中主要崩塌時雨量、3 小時雨量、累積雨量均有過低之虞，較不太適用於土石流防災應變作業。

表 8-1 坡面型土石流發生指標基準值

編號	指標	基準值	發生機率
1	主要崩塌時雨量(mm/hr)	50	55.0%
2	主要崩塌前 3 小時累積雨量(mm/3hr)	100	72.5%
3	雨場開始到主要崩塌累積雨量(mm)	300	75.0%
4	主要崩塌面積(m^2)	10,000	80.0%
5	主要崩塌面積比	0.1	82.5%
6	主要崩塌土方量(m^3)	15,000	82.5%

表 8-2 坡面型土石發生機率 80%之各指標因子門檻值

編號	指標	基準值	發生機率
1	主要崩塌時雨量(mm/hr)	35	85.0%
2	主要崩塌前 3 小時累積雨量(mm/3hr)	90	80.0%
3	雨場開始到主要崩塌累積雨量(mm)	250	80.0%
4	主要崩塌面積(m^2)	10,000	80.0%
5	主要崩塌面積比	0.15	80.0%
6	土方量(m^3)	22,000	80.0%

二、坡面型土石流之雙因子模式

本研究進行坡面型土石流之發生啟動雙因子門檻分析，採用前節之土石流發生雨量分析。同時考慮 1 小時雨量或 3 小時雨量與累積雨量之雙因子。圖 8-1 為 1 小時雨量與累積雨量之雙因子模式，於前節單因子模式之主要崩塌時雨量選以 50 mm/hr 時，發生次數機率為 50%；而崩塌累積雨量選以 300 mm/hr，其發生次數機率為 73.3%。若同時考慮時雨量選以 50 mm/hr 及累積雨量選以 300 mm/hr，如圖中紅色需線索框定範圍，僅二處低於此門檻。發生機率達 80.0%。

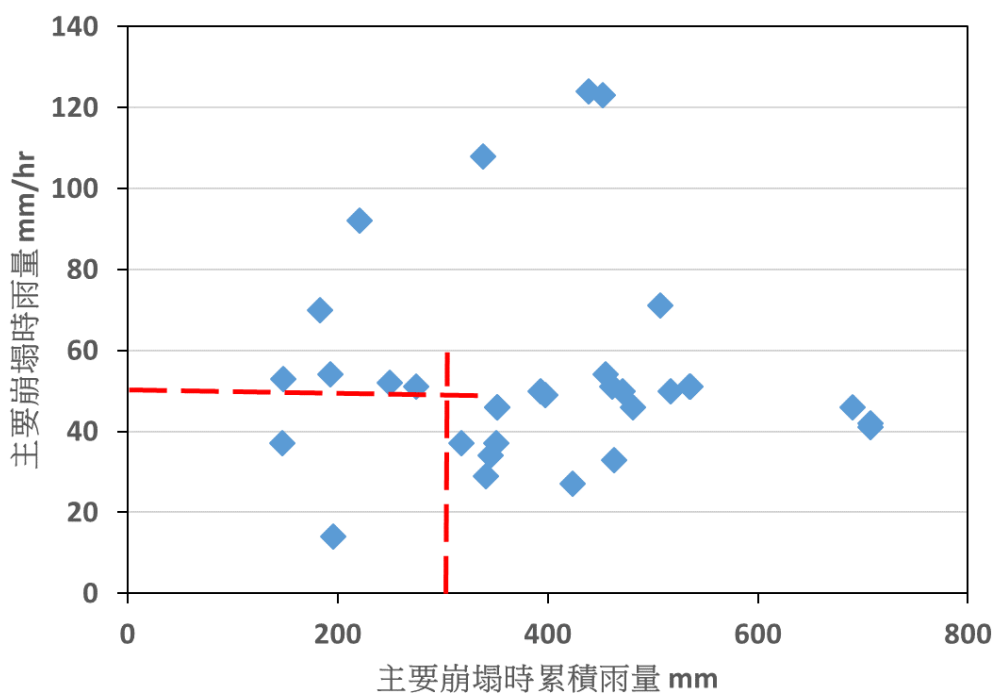


圖 8-1 主要崩塌時雨量及累積雨量雙因子圖

圖 8-2 為 3 小時雨量與累積雨量之雙因子模式，於前節單因子模式之主要崩塌 3 小時雨量選以 150 mm/3hr 時，發生次數機率為 52.5%；而崩塌累積雨量選以 300 mm/hr，其發生次數機率為 75.0%。若同時考慮 3 小時雨量選以 150 mm/3hr 及累積雨量選以 300 mm/hr，如圖中紅色需線索框定範圍，僅三處低於此門檻。發生機率達 82.5%。

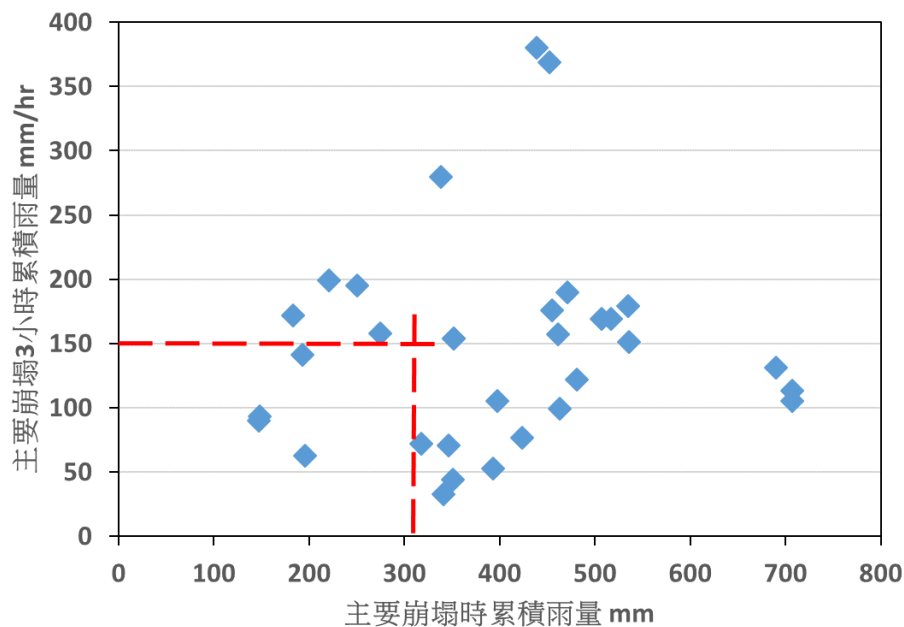


圖 8-2 主要崩塌 3 小時雨量及累積雨量雙因子圖

綜合以上，由前述分析成果顯示雙因子具有較佳之機率，未來坡面土石流預警基準可參考應用。基準一：時雨量以 50 mm/hr 及累積雨量 300 mm/hr。基準二：3 小時雨量選以 150 mm/3hr 及累積雨量選以 300 mm/hr。另外，坡面型土石流之最小崩塌面積及土方量方面，崩塌面積門檻為 $1,125(m^2)$ ，而最小主要崩塌土方量門檻則 $2,444(m^3)$ 。

第九章 結論與建議

第一節 結論

- 一、本計畫應用前期本研究團隊完成之「本島山區土壤厚度推估模式」及「新型淺層崩塌分析模式」，配合農村水保署重大土砂災害事件所調查之土石流發生時間及崩塌狀況資料，收集研究案例進行坡面型土石流啟動之條件與所需最小崩塌土方量體關係模式。
- 二、單純分析土石流發生之時雨量，結果顯示大部分土石流發生前之尖峰雨量大於 50mm 以上之強降雨。在高發生累積雨量之案例，此現象更明顯，其尖峰降雨強度甚至超過 80mm/hr。
- 三、降雨延時與累積雨量呈現正相關。本計畫收集 2006 年至 2023 年的土石流事件資料，經由降雨延時分佈圖趨勢分析(圖 5-33)，從累積降雨量與降雨延時的關係，得出當累積降雨量大於 200mm，且降雨延時超過 30 小時，會有較高的機率發生土石流。
- 四、雨量分析結果顯示累積雨量高時，發生前之前期尖峰降雨不須太高，即達到土石流發生狀況；而累積雨量小時，則往往發生前之會有較強之前期尖峰降雨。
- 五、本計畫分析案例選用了南部地區 40 處土石流事件，其中高雄 36 處，屏東 4 處。分析案例所採用之模擬參數，為引用經濟部地質調查及礦業中心所調查之材料及水文參數成果，模擬分析結果尚佳，可供為未來分析研究之參酌。

- 六、分析案例一(編號 HDF027) 針對 2008 年卡枚基颱風事件及案例二(編號 HDF032) 針對 2009 年莫拉克颱風事件，所進行之淺層崩塌模擬，經比對 QPE 降雨組體圖以及土石流發生回報時間，顯示應用本模式分析可獲得合理結果。
- 七、主要崩塌發生時之時雨量與該時累積雨量分析，結果顯示崩塌時雨量主要分布於 30 至 130 mm/hr 間。崩塌時雨量高於 30mm/hr 者達 86.7%。而高於 50mm/hr 者則達 50%。分析結果中可注意的是，崩塌時雨量低於 50mm/hr 者，其累積雨量都大於 300mm 以上，已出現相當高降雨量。
- 八、主要崩塌發生時之 3 小時雨量與該時累積雨量分析，結果顯示 3 小時雨量高於 100mm/hr 者達 63.3%。而高於 150mm/hr 者則達 43.3%。分析結果中可注意的是，3 小時雨量低於 150mm/hr 者，其累積雨量都大於 300mm 以上，已出現相當高降雨量。
- 九、主要崩塌發生時間點及崩塌面積與土方量分析結果，顯示主要崩塌面積分布至 2,700 至 320,000 m² 間，但主要多為 10,000 m² 以上，達 93%。而高於 45,000 者則達 60%。分析結果中可注意的是，於 2008 年 7 月之高雄六龜區中興里高市 DF053 土石流潛勢溪流集水區內之 HDF029 坡面型土石流(累積雨量為 369mm)及高雄市桃源區建山里高市 DF059 土石流潛勢溪流集水區內之 HDF059 坡面型土石流 (主要崩塌前 3 小時累積雨量為 380mm/hr)二土石流事件，其主要發生崩塌面積僅 1,125 及 1,475m²，該二處之集水區最終崩塌總面積分別僅 2,444 及 2,316 m²。顯示土石流事件之崩塌面積門檻於 1,100 m²，即達到發生門檻。

- 十、主要崩塌面積比與集水面積關係，結果顯示主要崩塌面積比分布至 0.01 至 0.83 間，並無明顯規律趨勢。由此顯示崩塌與集水區面積大小相關性不高，主要仍受控於地形因素及材料性質。
- 十一、主要崩塌土方量與集水面積關係，結果顯示主要崩塌土方量分布至 4,000 至 490,000 m^3 間差異甚大，但主要多為 10,000 m^3 以上，達 90%。主要崩塌土方量略有與總面積指數正比之趨勢。
- 十二、主要崩塌發生時之時雨量、3 小時雨量與主要崩塌面積分析，結果顯示較低降雨強度事件，除檳園渡假山莊旁野溪案例外，主要崩塌面積多超過 10,000 m^2 。較低降雨強度事件之土石流觸發多肇因於高累積雨量。
- 十三、主要崩塌發生時之累積雨量與主要崩塌面積分析，結果顯示較低累積雨量之土石流事件(雨量<300mm/hr)，多肇因於高強度 3 小時雨量，其所致成的主要崩塌面積亦不小，多超過 10,000 m^2 ，可見除累積雨量因子外，3 小時雨量是觸發土石流發生的重要因子。
- 十四、坡面型土石流之單因子模式分析，若以坡面型土石流發生機率 80%為基準，各指標指標門檻結果顯示主要崩塌時雨量、3 小時雨量、累積雨量均有過低之虞，坡面型土石流之最小崩塌面積及土方量方面，崩塌面積門檻為 1,125(m^2)，而最小主要崩塌土方量門檻則為 2,444(m^3)。
- 十五、坡面型土石流同時考慮 1 小時或 3 小時雨量與累積雨量之雙因子分析，同時考慮時雨量選以 50 mm/hr 及累積雨量選以 300 mm/hr，結果顯示僅二處低於此門檻，發生機率达 80%；

3 小時雨量與累積雨量之雙因子模式，同時考慮 3 小時雨量選以 150 mm/3hr 及累積雨量選以 300 mm/hr，結果顯示僅三處低於此門檻。發生機率達 82.5%。

第二節 建議

- 一、統計所有案例之模擬分析主要崩塌時間與回報時間差，顯示時間差分布長短皆有，此可能受限於大風雨時，土石流察覺不易，或聚落位於下游，因此土石流回報時間，僅能做為參考。
- 二、坡面型土石流之雙因子模式，同時考慮 1 小時雨量或 3 小時雨量與累積雨量之雙因子。成果顯示雙因子具有較佳之機率，未來坡面土石流預警基準可參考應用。



參考文獻

1. 陳天健，「建立聚落周緣山坡坡面型土石流判釋模式及潛勢評估方法-中南東部沈積岩及變質岩區」，農業委員會水土保持局研究報告，2017。
2. 陳天健，「劇烈天氣下聚落周緣山坡坡面型土石流易發生區位及潛勢評估方法」，農業委員會水土保持局研究報告，2016。
3. 羅元勳，考慮集水區內小規模土石流潛能之溪流型土石流潛勢溪流評估模式，碩士論文，國立屏東科技大學，水土保持研究所，屏東，2017。
4. 王振宇，坡面型土石流判勢準則與地形演化作用，碩士論文，國立屏東科技大學，水土保持研究所，屏東，2012。
5. 王隆昌，溪頭地區坡地型土石流地形及發生特性研究，碩士論文，國立成功大學，地球科學研究所，臺南，2005。
6. 呂岡侃，徐美玲，「南投縣九九峰土石流發生區之地形特徵」，地理學報，第 38 期，第 1-16 頁，2004。
7. 何明憲，台灣中部災區坡地型土石流發生特性之研究，碩士論文，國立臺灣大學，土木工程學研究所，臺北，2003。
8. 行政院農業委員會水土保持局，桃芝颱風災區土石流災害潛勢分析成果報告，2001。
9. 李錫堤，「山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望」，台灣公共工程學刊 第五卷 第一期，第 1-29 頁，2009。
10. 林美聆，陳天健，「研修土石流潛勢溪流影響範圍劃設方法」，農業委員會水土保持局研究報告，2010。
11. 林美聆、陳天健，王國隆，機率化土石流潛勢溪流影響範圍劃設與分析，農委會水土保持局，2011。

12. 林美聆，陳天健，洪鳳儀，王國隆，賴達倫，陳有蘭溪流域示範區土石流溪流潛勢分析方法，防災國家型科技計畫九十年度成果報告，2001。
13. 林慶偉、謝正倫與王文能，“集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響”，臺灣之活動斷層與地震災害研討會，124-134 頁，2002。
14. 游繁結，吳仁明，翁緯明，“礫石層邊坡形成土石流之微地形探討”，中華水土保持學報，第 37 卷，第 4 期，第 329-340 頁，2005。
15. 周憲德，山崩型土石流災害之探討-子計畫：邊坡淺層崩塌引發土石流之機制研究(I)，國科會研究計畫，2005。
16. 周憲德，土石流防災與監測之研究-土石流潛勢判定模式之研究，國科會研究計畫，1999。
17. 周憲德，邊坡破壞與地滑轉化成土石流之研究(一)，國家科學委員會研究計畫，NSC90-2625-z-008-006，2002。
18. 游繁結，土石流災害防治之研究-以南投示範區(陳有蘭溪)為對象-子計畫：溪谷邊坡崩滑土體之土石流化機制研究(I)，國科會研究計畫，2001。
19. 游繁結、吳仁明、翁緯明，“礫石層邊坡形成土石流之微地形探討”，中華水土保持學報，第 37 卷，第 4 期，第 329-340 頁，2005。
20. 建設省河川局砂防部砂防課，土石流危險溪流および土石流危險區域調查要領，日本，1989。
21. 陳天健、吳嘉俊，莫拉克颱風重點聚落勘查-坡地災害組 II，國家災害防救科技中心，2009。
22. 陳天健、楊婉君、陳柏龍，坡面型土石流地形判釋分析模式，中華水土保持學報，47(2): 52-61，2016.06.(Scopus and GEOBASE)
23. 陳天健、王振宇、陳柏龍，坡面型土石流之地形特徵與判別方法，

- 中華水土保持學報, 46(3): 133-141, 2015.09.(Scopus and GEO BASE)
24. 陳晉琪、李明熹、臧運忠、張師鐸、呂家豪、陳欣玫, “台灣土石流堆積特性之研究”, 農業委員會水土保持局研究報告, 2007。
 25. 陳晉琪、謝正倫、林慶偉, 「台灣中部地區土石流發生溪流之地形特性」, 中華水土保持學報, 第三十五卷, 第一期, 第 25~34 頁, 2004。
 26. 陳榮河, 坡地災害引起土石流發生機制之整合研究—總計畫暨子計畫: 邊坡破壞引發土石流之機制研究-以土石流源頭為對象, 國科會研究計畫, 2004。
 27. 曾國源、張斐章, 以共用臨域類神經網路架構土石流預警系統之研究, 中華水土保持學報, 37 (3), 259-270, 2006。
 28. 黃宏斌, 胡聖賢, 李偉哲, 黃彥文, 蘇立明, 「坡地土石流發生機制研究」, 國家科學委員會研究計畫, NSC 90-2625-Z-002-017, 2002。
 29. 謝育樺, 南投地區土石流發生潛勢分析, 國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文, 2007。
 30. 謝正倫, 桃芝颱風災區土石流災害潛勢分析成果報告書, 行政院農業委員會水土保持局, 2001。
 31. Benda, L., Hassan, M. A., Church, M., and May, C. L., “Geomorphology of Steepland Headwaters: The transition From Hillslopes to Channels.” Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 41(4):835-851, 2005.
 32. Brunnsden, D., In process in geomorphology, Edward Arnold Ltd., London, pp. 130-186, 1979.
 33. Cruden, D. M., and D. J. Varnes, Landslide types and processes, in

- Landslides: Investigation and Mitigation, edited by A. K. Turner, and R. L. Schuster, pp. 26–75, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., 1996.
34. Dietrich, W.E. and Montgomery, D.R., “A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding,” *Water Resources research*, Vol.30, NO.4, pp. 1153-1171, 1994.
 35. Evans, S. G., “Landslides and surficial deposits in urban area of British Columbia.” *Canadian Geotechnical Journal*, 19, 269-288, 1982.
 36. Hungr, O., Morgan, G. C., Kellerhals, R., “Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, No. 4 : pp. 663-677, 1984.
 37. Iverson, R. M., M. E. Reid, R. G. LaHusen, Debris flow mobilization from landslides, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 25, 85–138, 1997.
 38. Jakob, M., and Hungr, O., *Debris-flow hazards and related phenomena*: Springer, Berlin, New York, 170 p, 2005.
 39. Jeng-Wen Lin, Cheng-Wu Chen, Cheng-Yi Peng, “Potential hazard analysis and risk assessment of debris flow by fuzzy modeling,” *Natural Hazards*, 2012, 64(1), 273-282, 2012.
 40. Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., and Pech, P., “Is the Response of Hill Slope Debris Flows to Recent Climate Change Univocal? A Case Study in the Massif Des Ecrins (French Alps),” *Climatic Change*, Vol. 85, pp.119-137, 2007.
 41. Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., and Arnáez, J., “Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows: A Case Study in the Flysch Sector of the Central Spanish Pyrenees,” *Mountain Research and Development*, Vol. 22, NO. 1, pp.32-39, 2002.
 42. Shu, H. M., Chen, T.C.*, Yang, W.C., and Luo, Y.X., “Interpretation and Analysis of Potential Fluidized Landslide Slope,” *Geotechnical*

- Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 47 No.2: 101-110.
June 2016, 2016. ISSN 0046-5828 (Author for correspondence, EI)
43. Stock J. and Dietrich W. E., "Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature," *Water Resources Research*, 39(4), April 2003.
44. Thomas Glade, "Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology," *Geomorphology*, 66(1-4), 189–213, 2005.
45. Takahashi T Debris flows. *Annu Rev Fluid Mech* 13:57-77, 1981.
46. Yang Z.Y., Chen T.C.*, Lin C.W., and Lin S.C., "Rainfall landslide in Sedimentary and Sub-Metamorphic Rock - an example in Kaoping River Basin," *Journal of Applied Science and Engineering*, 19(2): 169-176, 2016. (Author for correspondence, EI,)





附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨意見回覆辦理情形

委員意見	回覆辦理情形
一、業務單位(組、中心、小組)審查意見	
(一)本計畫擬建立南部地區坡面型土石流啟動之條件與最小崩塌土方量及建立土石流啟動雨量及所需最小土砂量體關係模式，以發展颱風豪雨期間土石流發生之預警系統，值得探討研究。	謝謝委員肯定
(二)以 2023 年南豐村土石流事件而言，可能屬於多次坡面小規模岩屑質崩塌引致土石流陣波型流動與致災，的確是屬於本計畫提出的關鍵課題。如果能夠針對本次計畫所提的南部地區舉例，則更具代表性。	謝謝委員提供寶貴建議，本計畫將會盡可能收集此種多次土石流事件，納入分析研究。
(三)一次降雨事件，多次坡面小規模岩屑質崩塌的量體，尚須加入溪床動床的泥砂、兩岸因河床刷深引致側崩塌的量體，才是真正土石流沖積	囿於研究資料及事件作業時間有限，因此本年度計畫將先著重崩塌型土石流案例。後續年度於分析資料及案例則可擴充考量溪床動床的泥砂、兩岸因河床刷深引

扇的致災的總土砂量體，建議主持人能夠適當的運用如南豐村土石流事件等有比較好記錄與資料案作為研究成果校核的案例。	致側崩塌的河岸型土石流類型。
(四)坡面型土石流啟動條件與所需最小崩塌土方量關係模式是採用統計方法，還是有物理式在其中。	坡面型土石流啟動條件與所需最小崩塌土方量關係模式，預計採用統計方法建立分析模式。
(五)本計畫探討台灣南部山區坡面型土石流之啟動條件與最小崩塌土方量，邊坡內有平行於坡面滲流，可能在特定階段發生邊坡破壞；此種破壞型態與土石流之間的關係，若需要界定，即使以土壤含水量區隔似也有一定的模糊地帶。	謝謝委員建議。本計畫所用之淺層崩塌模式，將同時考慮入滲及邊坡內之平行坡面滲流等之水文條件。土層厚度以前計畫所研發之土壤厚度推估模式，推估崩塌深度，危機於淺層崩塌定義，最深深度目前設定為 5m。

附錄二、期中審查會議紀錄暨意見回覆辦理情形

委員意見	回覆辦理情形
一、業務單位(組、中心、小組)審查意見	
(一)本計畫於期中報告已初步完成 2006-2023 年間重大土石流災害事件蒐集(表 5-1)、坡面型土石流雨量事件資料庫(表 5-2)，分析了發生時的累積雨量、發生前的尖峰雨量、發生前之降雨延時、發生與尖峰降雨之延遲時間等分析、推估了崩塌量體與土壤厚度，並初步開發了淺層崩塌事件之分時崩塌土石方量分析模式，預期在期末可以完成南部地區坡面型土石流之啟動條件與所需崩塌土石方量體關係式，期中報告成果符合預期，建議通過。	謝謝委員肯定
(二)本計畫期中尚未討論及土石流之啟動條件，建議及早開始。	謝謝委員建議，本團隊持續運作中。
(三)對於量體之推估，南部地區有些案例已經有兩次 LIDAR DTM 資料，如果能夠經由農	謝謝委員肯定

村水保署之協助，取得兩期資料之 LIDAR DTM 進行量體定量評析，與用土壤厚度之推求作一評析，將會是重要貢獻。	
(四)花蓮地區受 0403 花蓮地震的影響在花蓮地區之土石流二次災害的土石流潛勢溪流，很多可能都屬於坡面型土石流，相較於西部地區，源頭區坡度較陡，土石流溪流長度較短，在堆積區之擴幅角較寬廣，會是坡面型土石流研究的重要場域，建議及早蒐集資料，以利本研究後續之應用發展。	謝謝委員建議
(五)P6 表 2-1 計畫工作進度表(甘特圖)中僅有預定進度，缺實際進度及權重資料，仍請團隊在檢視並修正。	謝謝委員建議
(六)機關名稱報告書內仍有舊機關名稱，建議團隊在逐一檢視並修正，例 P38 舊機關名稱:農林航空測量所、水保局等。	謝謝委員建議

(七)P75 圖 5-32 土石流發生時 累積雨量與土石流發生前尖 峰時雨量分布圖中橫軸中部 份時間重疊建議團隊在逐一 檢視並修正。例 2008-07-17- 23、2009-08-08-20 等。	謝謝委員，已重新修正。



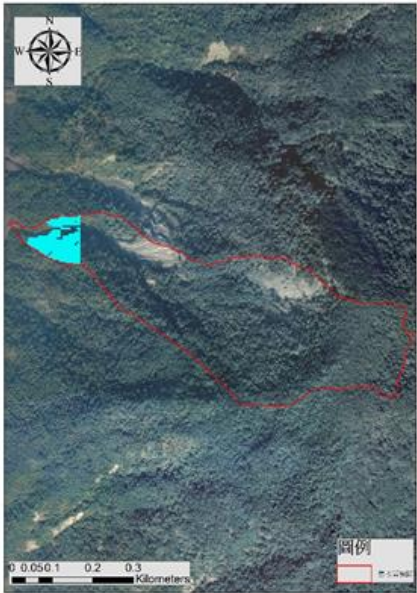
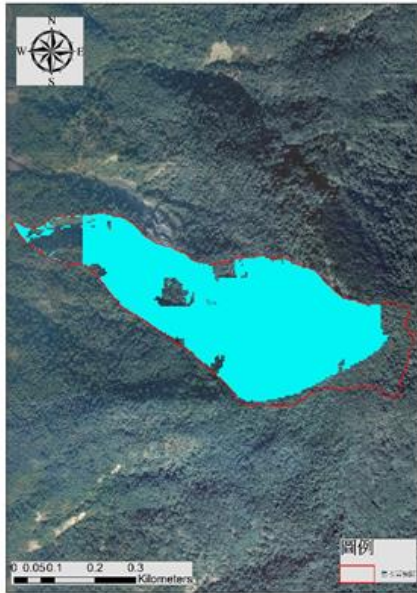


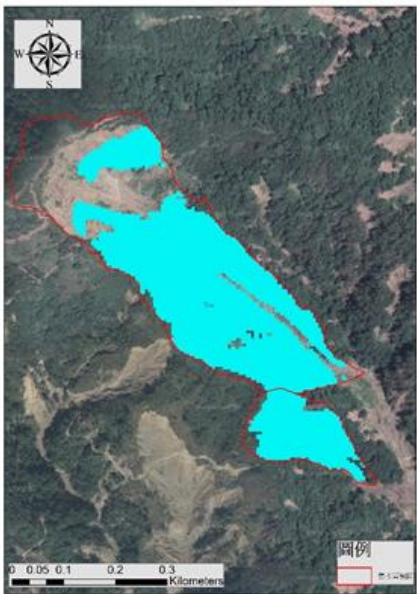
附錄三、期末審查會議紀錄暨意見回覆辦理情形

委員意見	回覆辦理情形
一、業務單位(組、中心、小組)審查意見	
(一)本研究以由雙因子分析優於單因子分析成果，其顯示累積雨量300mm是發生土石流的重要因子。因為物理上累積時間長短會反應於土壤飽和度和地下水位高度的變化程度。因此，在本研究中對於降雨累積時間之長短該如何考量?請補充說明。	累積雨量已包含前期有效降雨，因此累積雨量的時間長短效應已涵蓋在前期降雨量因子中。
(二)台灣地形、季節與降雨型態，各地區不同且迎風與背風面易影響坡面土石流，建議進一步分析坡面坡向、地形、季節之交互影響結果。	謝謝委員的建議，我們將於後續計畫中進一步分析研究。
(三)成果與實際案件發生之契合度、分析預警之可靠性。	謝謝委員的建議，我們將於後續計畫中進一步分析研究。
(四)土石流啟動條件面積10000m ² ，是否因不同地質條件而需調整?	是，土石流的發生條件會因地質條件不同而有所調整。目前本案適用於中南部地區。



附錄四、各坡面型土石流案例淺層崩塌模擬結果

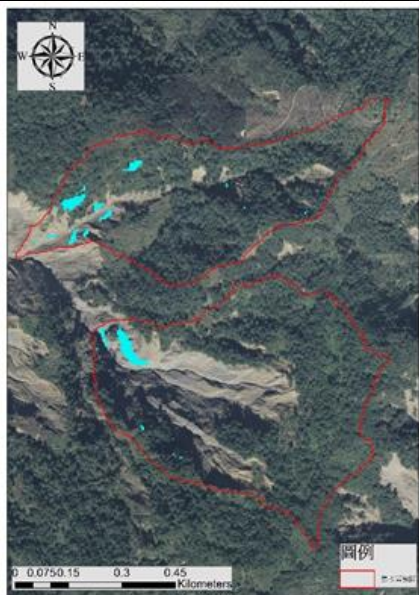
編號 HDF035 災害事件：2006/0609 豪雨 坐標位置(TWD97)：【214056 , 2533564】	
	
開始發生崩塌 2006/6/9/23:00	主要/結束發生崩塌 2006/6/9/23:00

編號 HDF002、HDF003 災害事件：2007/聖帕颱風 坐標位置(TWD97)：【216491 , 2558002】、【216578 , 2558055】	
	
開始發生崩塌 2007/8/19/03:00	主要/結束發生崩塌 2007/8/20/02:00

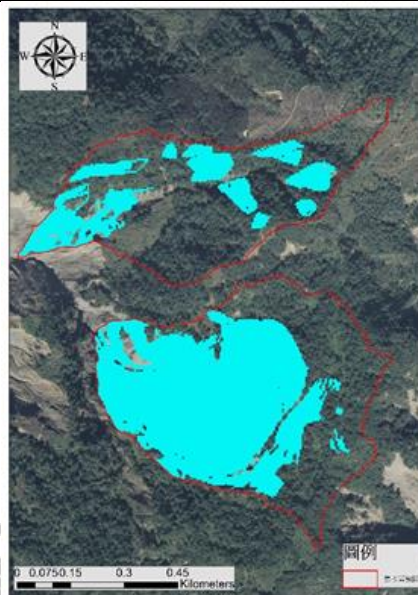
編號 HDF004、HDF005

災害事件：2008/卡玫基颱風

坐標位置(TWD97)：【213095, 2555317】、【213482, 2555128】



開始發生崩塌 2008/7/17/21:00

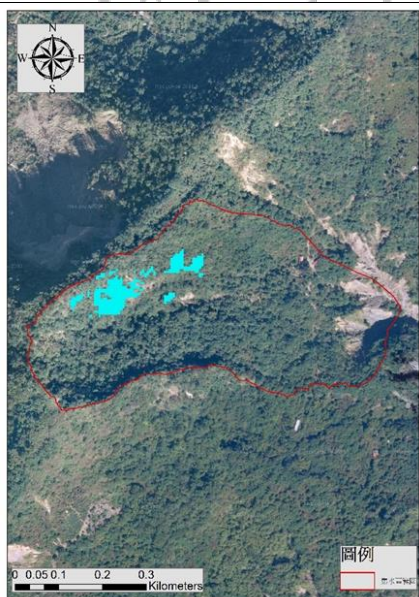


主要/結束發生崩塌 2008/7/17/22:00

編號 HDF054

災害事件：2008/卡玫基颱風

坐標位置(TWD97)：【201965, 2549898】



開始發生崩塌 2008/7/17/20:00



主要/結束發生崩塌 2008/7/17/23:00

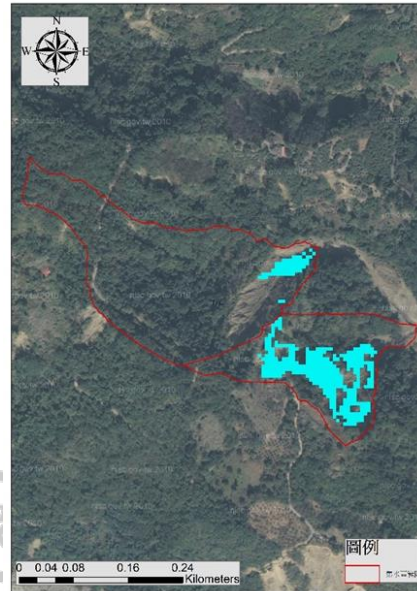
編號 HDF059、HDF060

災害事件：2008/卡玫基颱風

坐標位置(TWD97)：【217075, 2555584】、【217218, 2555469】



開始發生崩塌 2008/7/17/23:00

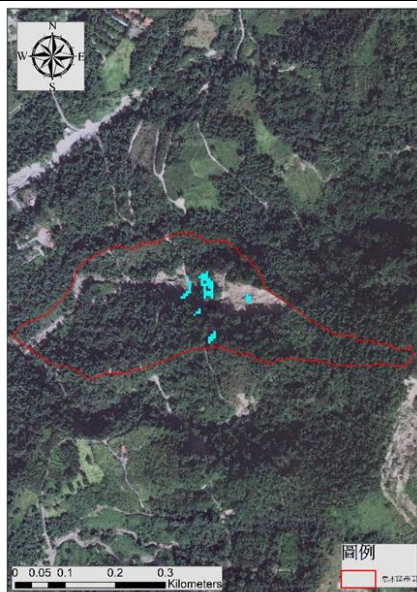


主要/結束發生崩塌 2008/7/17/24:00

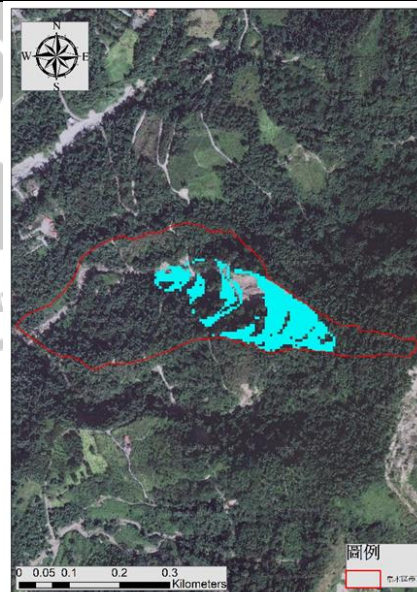
編號 HDF001

災害事件：2009/莫拉克颱風

坐標位置(TWD97)：【219177, 2570755】



開始發生崩塌 2009/8/8/07:00

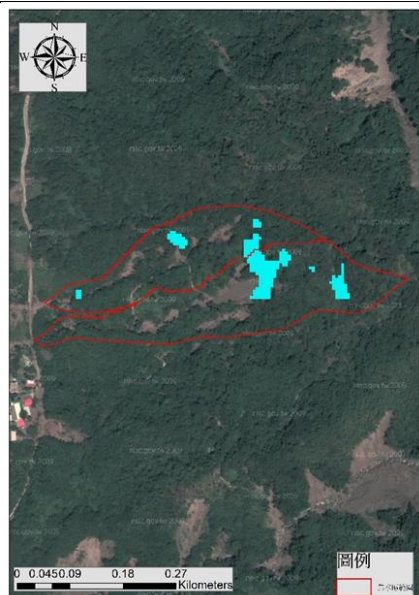


主要/結束發生崩塌 2009/8/8/14:00

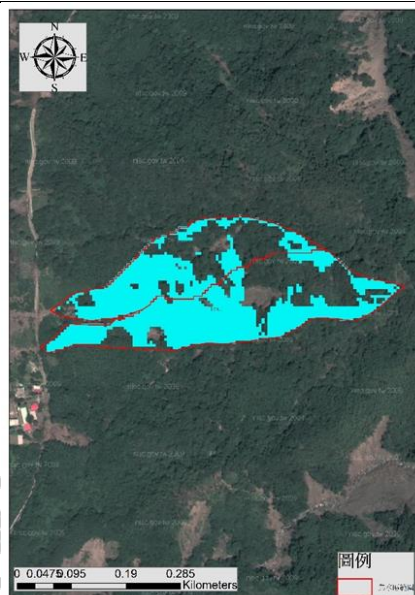
編號 HDF043、HDF044

災害事件：2009/莫拉克颱風

坐標位置(TWD97)：【231599, 2572467】、【231582, 2572405】



開始發生崩塌 2008/8/8/05:00



主要/結束發生崩塌 2008/8/8/15:00

編號 HDF006

災害事件：2009/莫拉克颱風

坐標位置(TWD97)：【217104, 2554947】



開始發生崩塌 2009/8/8/03:00

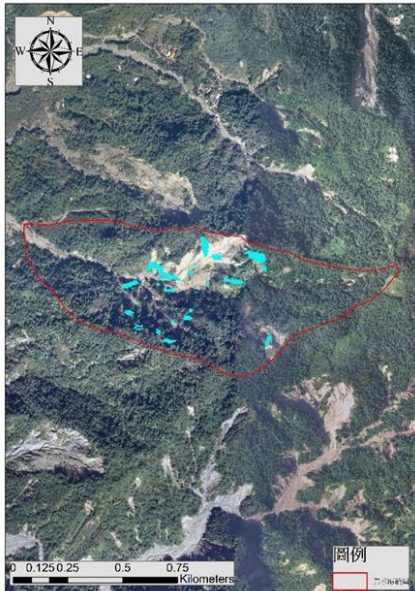


主要/結束發生崩塌 2009/8/8/07:00

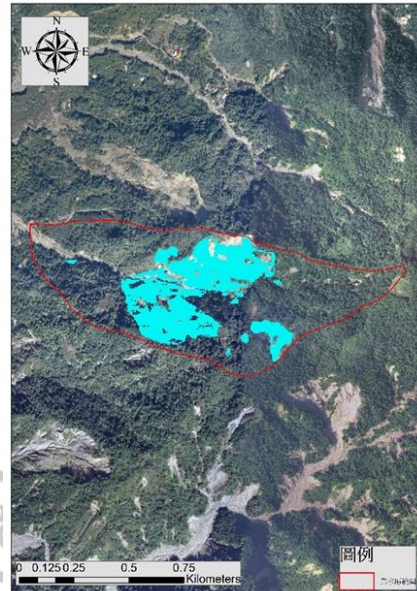
編號 HDF067

災害事件：2009/莫拉克颱風

坐標位置(TWD97)：【208781, 2551409】



開始發生崩塌 2009/8/8/07:00



主要發生崩塌 2009/8/8/13:00

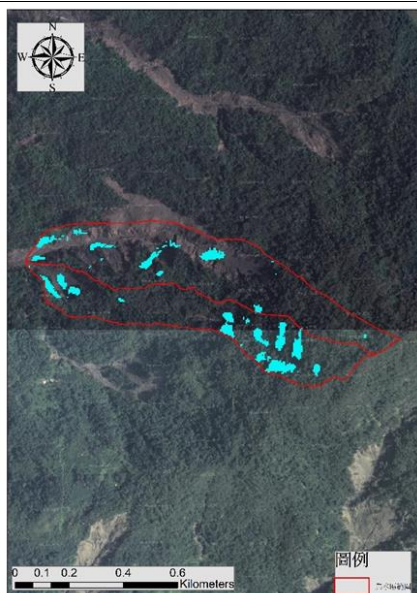


結束發生崩塌 2009/8/8/14:00

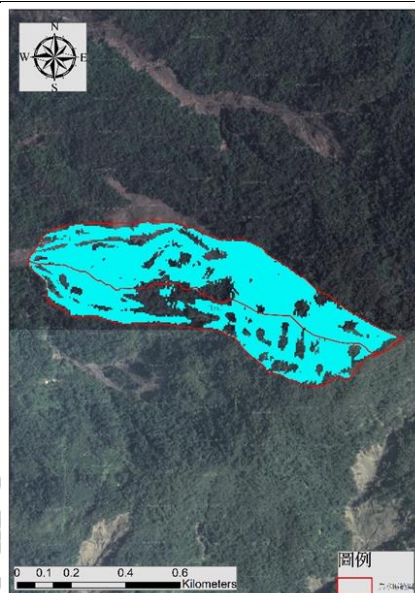
編號 HDF0011、HDF012

災害事件：2009/莫拉克颱風

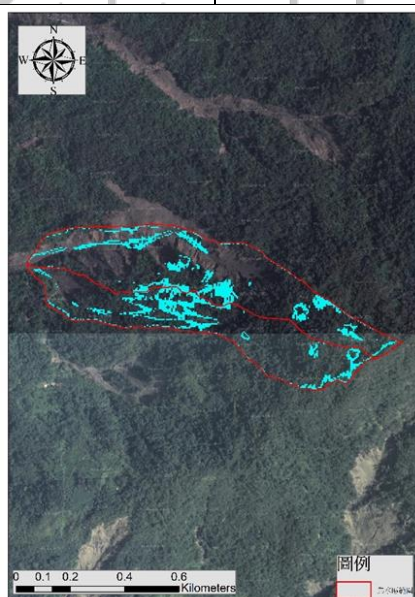
坐標位置(TWD97)：【218705, 2552700】、【218703, 2552696】



開始發生崩塌 2009/8/8/07:00



主要發生崩塌 2009/8/8/08:00

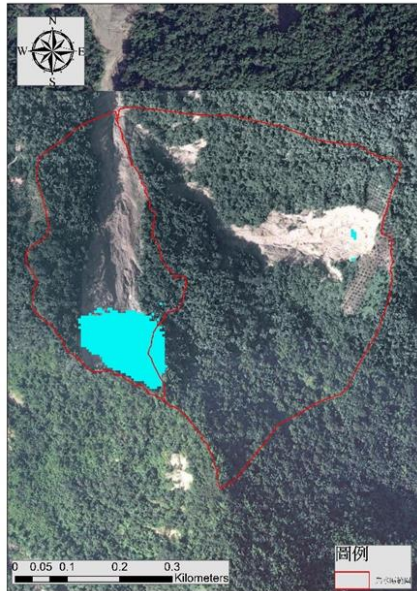


結束發生崩塌 2009/8/8/13:00

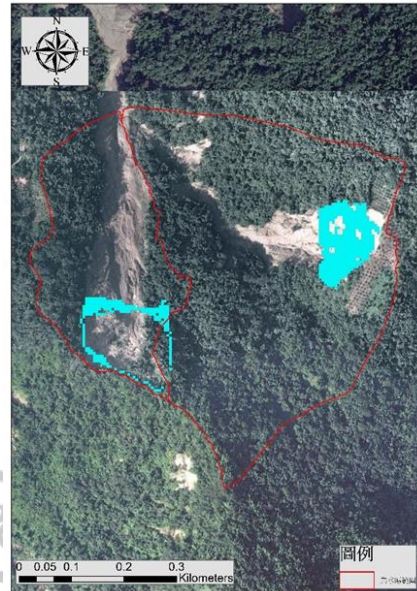
編號 HDF013、HDF057

災害事件：2009/莫拉克颱風

坐標位置(TWD97)：【210319, 2552418】、【210329, 2552424】



開始發生崩塌 2008/8/8/07:00

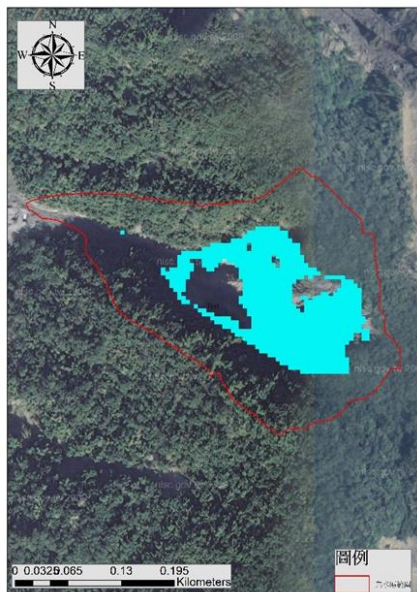


主要/結束發生崩塌 2008/8/8/13:00

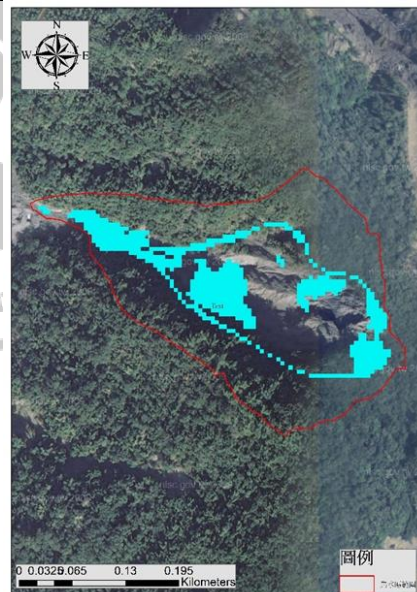
編號 HDF018

災害事件：2009/莫拉克颱風

坐標位置(TWD97)：【217169, 2550447】



開始發生崩塌 2009/8/8/07:00

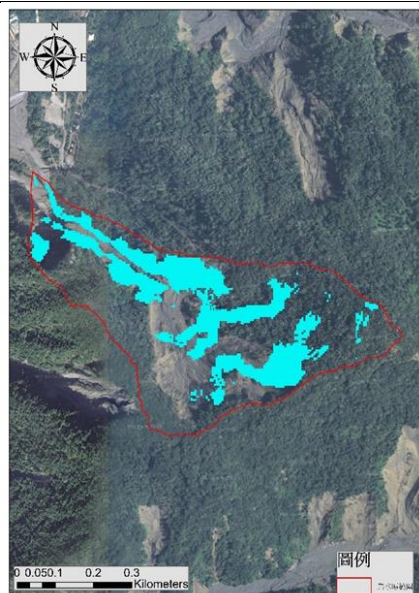


主要/結束發生崩塌 2009/8/8/08:00

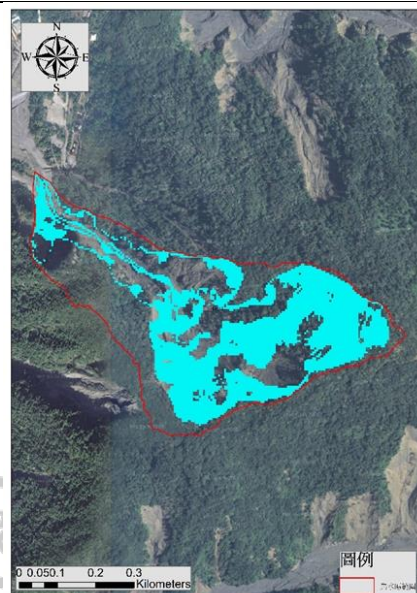
編號 HDF017

災害事件：2009/莫拉克颱風

坐標位置(TWD97)：【217324 , 2550904】



開始發生崩塌 2009/8/8/07:00

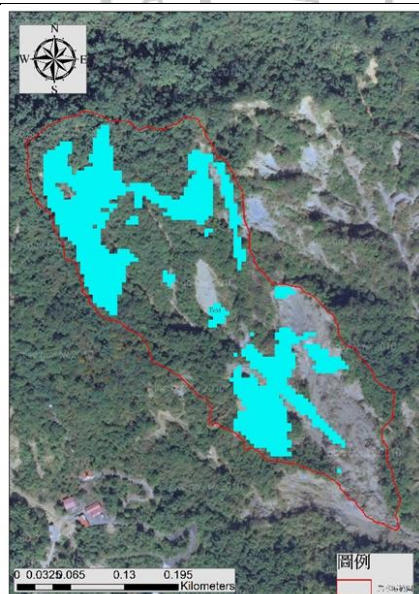


主要/結束發生崩塌 2009/8/8/08:00

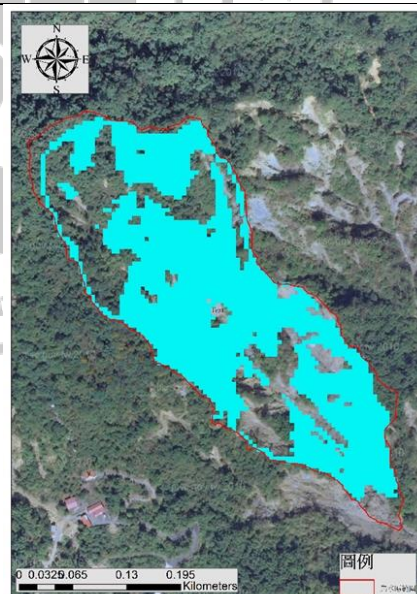
編號 HDF016

災害事件：2009/莫拉克颱風

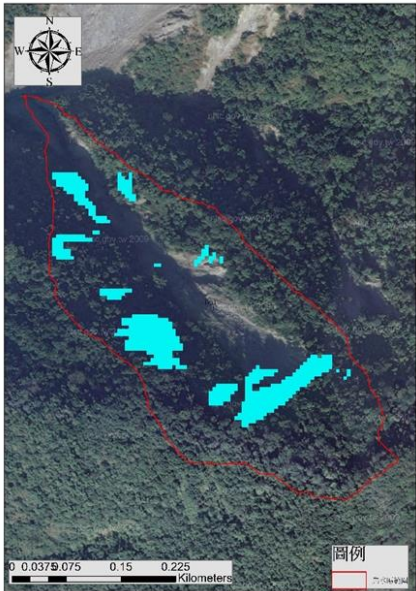
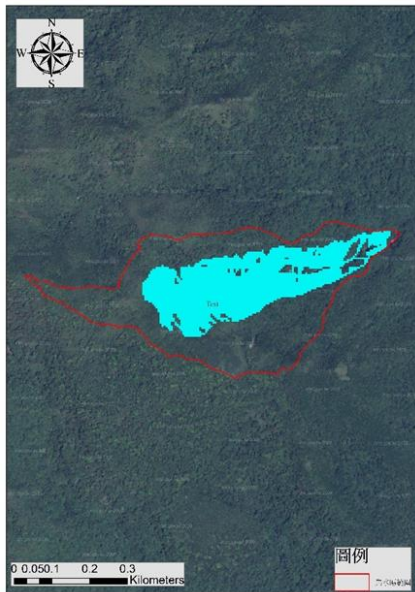
坐標位置(TWD97)：【203635 , 2550577】



開始發生崩塌 2009/8/8/13:00



主要/結束發生崩塌 2009/8/8/14:00

編號 HDF033 災害事件：2010/凡那比颱風 坐標位置(TWD97)：【215121 , 2534834】	
	
開始發生崩塌 2010/9/19/12:00	主要/結束發生崩塌 2010/9/19/17:00
編號 HDF037 災害事件：2011/南瑪都颱風 坐標位置(TWD97)：【230075 , 2438059】	
	
開始發生崩塌 2011/8/28/15:00	主要/結束發生崩塌 2011/8/29/03:00

編號 HDF036

災害事件：2011/南瑪都颱風

坐標位置(TWD97)：【231821, 2452052】



開始發生崩塌 2011/8/28/17:00

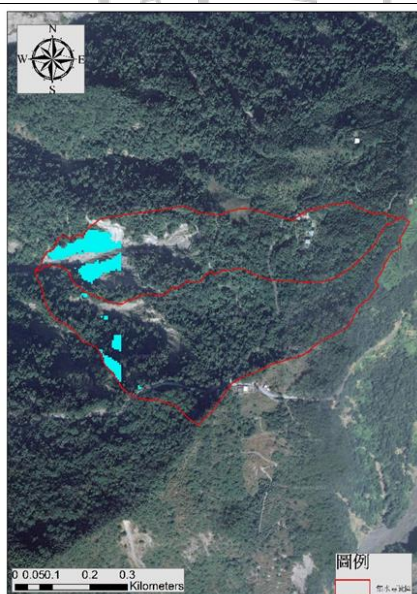


主要/結束發生崩塌 2011/8/29/03:00

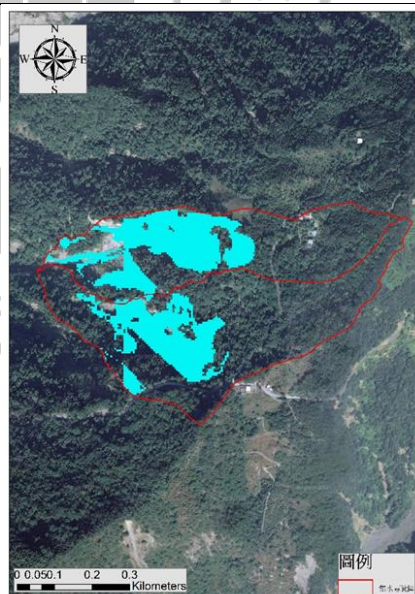
編號 HDF024、HDF025

災害事件：2012/0610 豪雨

坐標位置(TWD97)：【216649, 2545542】、【216646, 2545538】



開始發生崩塌 2012/6/10/09:00

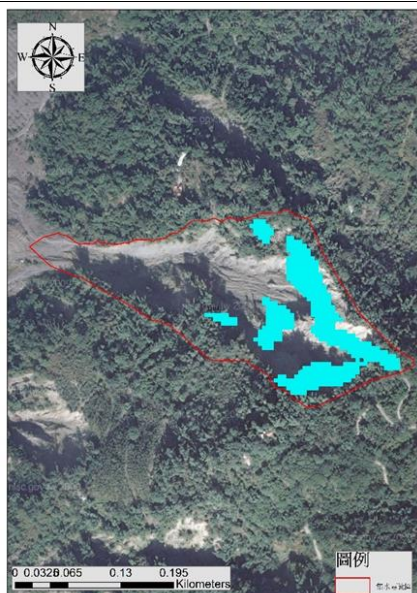


主要/結束發生崩塌 2012/6/10/10:00

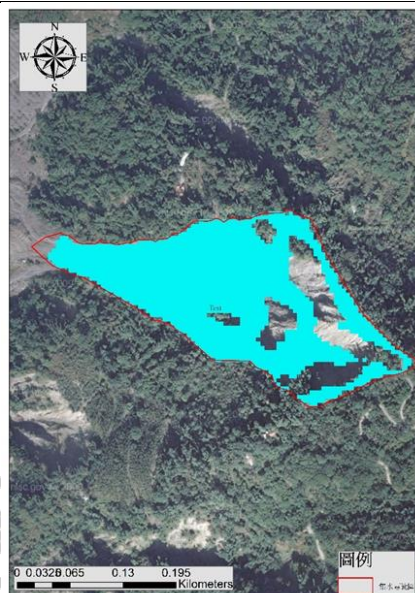
編號 HDF021

災害事件：2012/0610 豪雨

坐標位置(TWD97)：【216027, 2547824】



開始發生崩塌 2012/6/10/08:00

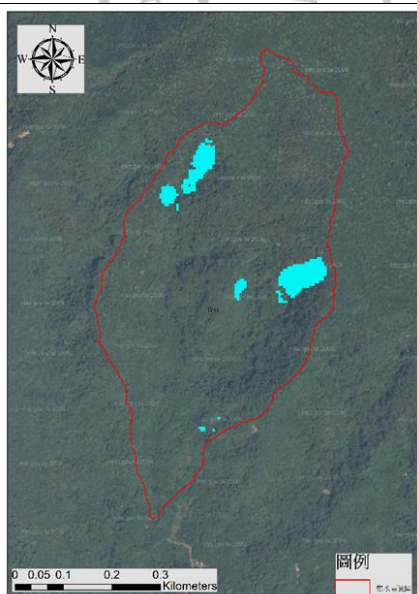


主要/結束發生崩塌 2012/6/10/09:00

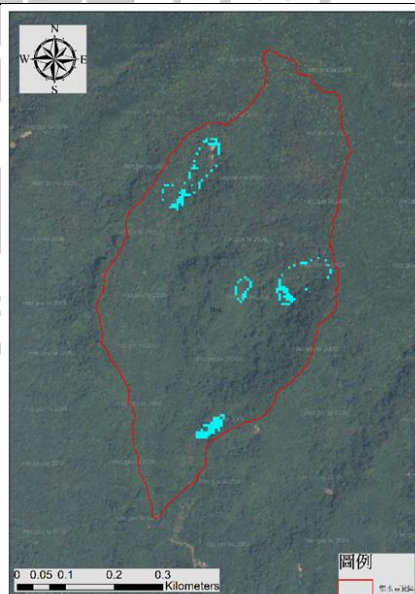
編號 HDF038

災害事件：2012/天秤颱風

坐標位置(TWD97)：【233913, 2432964】



開始發生崩塌 2012/8/24/07:00



主要/結束發生崩塌 2012/8/24/08:00

編號 HDF045

災害事件：2013/康芮颱風

坐標位置(TWD97)：【214097, 2467987】



開始發生崩塌 2013/8/29/11:00



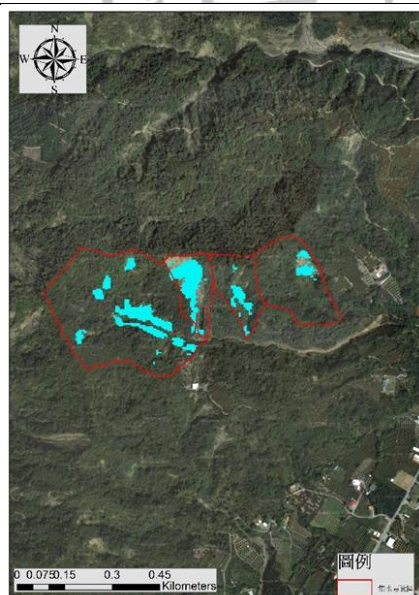
主要/結束發生崩塌 2013/8/29/11:00

編號 HDF010、HDF009、HDF008、HDF007

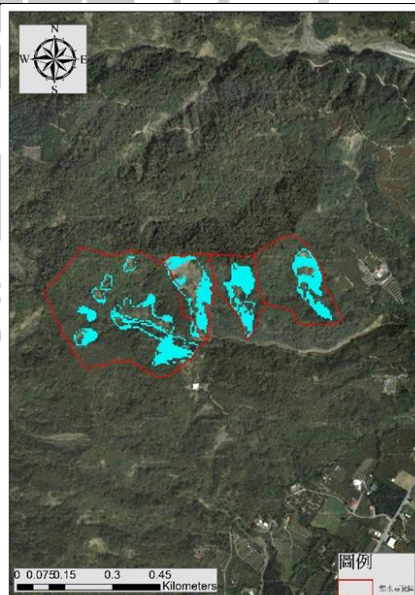
災害事件：2016/梅姬颱風

坐標位置(TWD97)：【216411, 2553911】、【216414, 2553913】

(97)：【216541, 2553918】、【216834, 2553975】



開始發生崩塌 2016/9/27/19:00

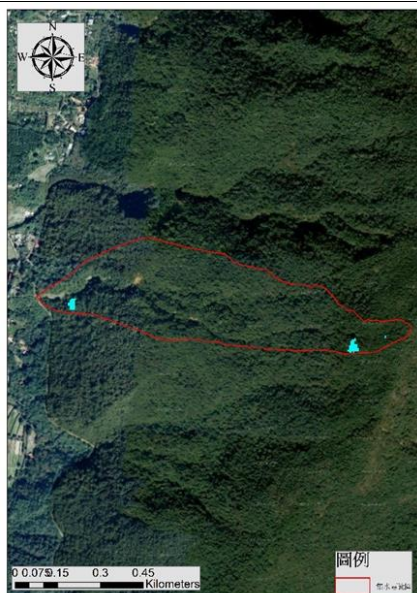


主要/結束發生崩塌 2016/9/27/22:00

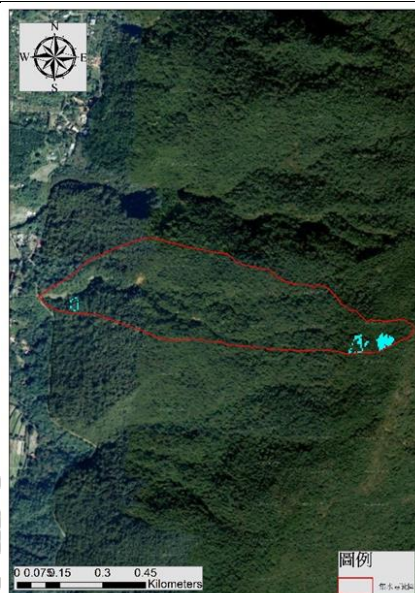
編號 HDF031

災害事件：2021/ 0731 豪雨

坐標位置(TWD97)：【214409 , 2541345】



開始發生崩塌 2021/8/1/12:00

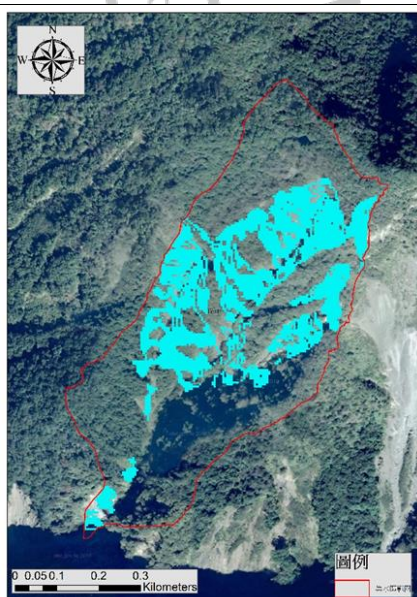


主要/結束發生崩塌 2021/8/1/13:00

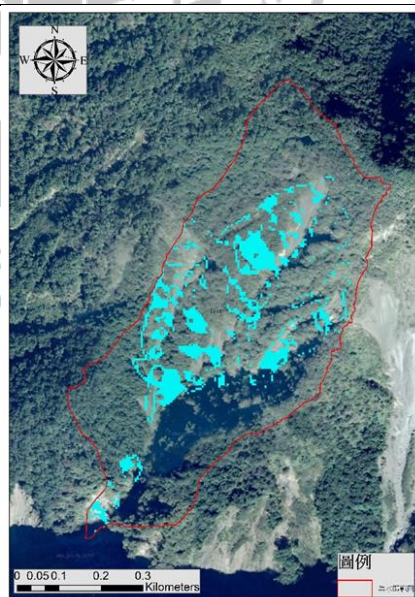
編號 HDF046

災害事件：2021/盧碧颱風

坐標位置(TWD97)：【232927 , 2563202】



開始發生崩塌 2021/8/7/05:00



主要/結束發生崩塌 2021/8/7/07:00

編號 HDF0015

災害事件：2021/盧碧颱風

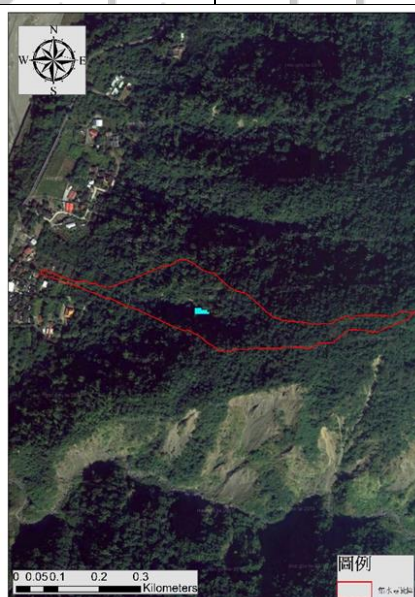
坐標位置(TWD97)：【217912, 2551389】



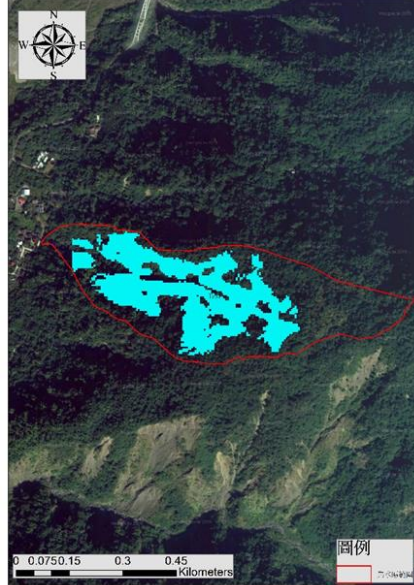
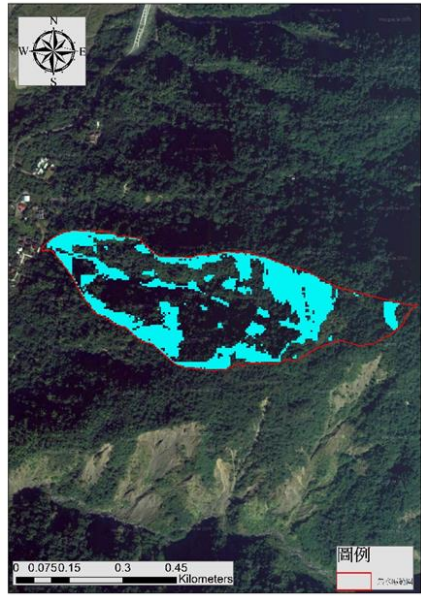
開始發生崩塌 2021/8/6/13:00



主要發生崩塌 2021/8/6/23:00



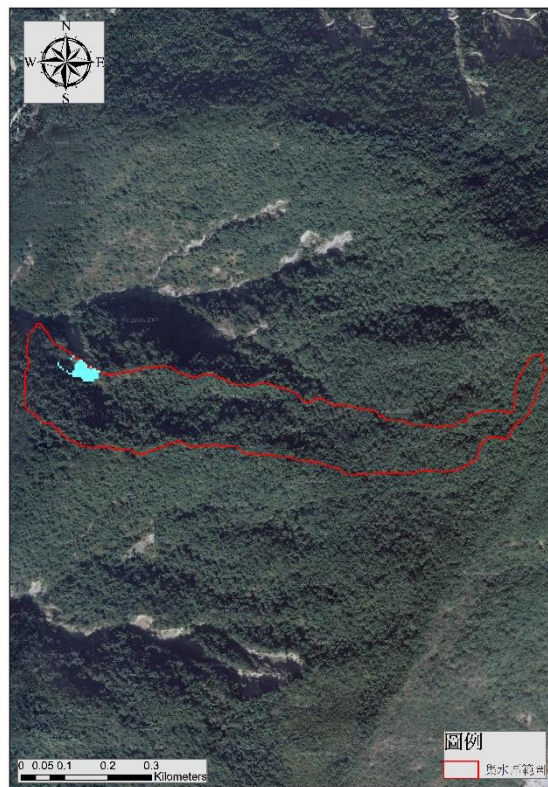
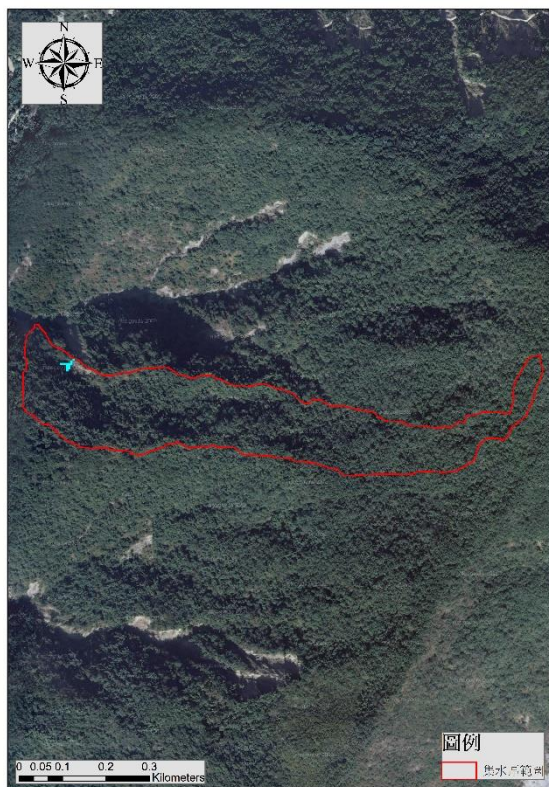
結束發生崩塌 2021/8/7/05:00

編號 HDF0014 災害事件：2021/盧碧颱風 坐標位置(TWD97)：【218102 , 2552068】	
	
開始發生崩塌 2021/8/6/13:00	主要發生崩塌 2021/8/6/23:00
	
結束發生崩塌 2021/8/7/05:00	

編號 HDF029

災害事件：2008/卡玫基颱風

坐標位置(TWD97)：【215038, 2542331】



開始發生崩塌 2008/7/17/21:00

主要/結束發生崩塌 2008/7/17/23:00