

---

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

**The Recognition Model and Potential  
Evaluation Methodology of the Slope Type  
Debris Flow on the Mountain Village under  
the Extreme Weather Condition**

---

執行單位：國立屏東科技大學

執行期間：105 年 04 月 01 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳天健 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 105 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)



# 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

## 摘要

臺灣山坡地區域有數千聚落分佈其間，依原民會統計原住民聚落即達 731 處。於現今氣候變遷狀況下，許多聚落周緣之山坡地可能演化產生坡面型土石流，更因其緊鄰聚落社區，極易形成小災害但高危害度及大災損的高風險災害型態，惟因其未被劃入土石流潛勢溪流或大規模崩塌影響範圍區者，則常產生安全無虞之假象。本計畫應用崩塌坡面單元概念，建立聚落周緣山坡地之坡面型土石流易發生地形判釋模式，完成 7 項因子之坡面型土石流判釋模式，其正判率達 87.5%，土石流單元判釋成效優良。判釋模式再應用於高屏溪流域內荖濃里（晚期中新世沉積岩）及那瑪夏區達卡努瓦里（早期中新世沉積岩）與高雄市六龜區新發里（亞變質岩）岩地質區等三處聚落之評估，結果顯示適用性優良。本計畫成果可供事先勘定坡面型土石流高風險區預防災害，同時評估坡面型土石流潛勢，提供防災治理單位之防災預警參據應用。

**關鍵字：**坡面型土石流、崩塌分析單元、判釋模式、潛勢分級

# **The Recognition Model and Potential Evaluation Methodology of the Slope Type Debris Flow on the Mountain Village under the Extreme Weather Condition**

## **Abstract**

This study develops the recognition model and potential evaluation methodology of the slope type debris flow on the mountain village under the extreme weather condition, a hillslope type debris flow (HDF) topographic recognition model based on the Fisher discrimination method with 20 HDF and 20 landslide events induced by Typhoon in Kaoping River. Furthermore, the occurrence potential evaluation methodology was set up to the HDF units. The topographic recognition model consists of 7 variables, including effective watershed area index topography, hydrology, average channel gradient of the transport segment, form factor rate, depression ratio of the transport segment, average width of the initiation segment, and average gradient of watershed, and other landslide susceptibility factors and its classification rate reached 87.5%. The model and evaluation were conducted on three mountain villages to test the efficiency of recognition and potential model and a consistent result was found. It is expected that the recognition model and the occurrence potential evaluation methodology will improve the slope disaster prevention of HDF type.

**Keywords:** Hillslope type debris flow, slope unit, recognition model, potential evaluation methodology

# 目次

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 摘要 .....                   | I    |
| Abstract .....             | II   |
| 目次 .....                   | III  |
| 表次 .....                   | V    |
| 圖次 .....                   | VII  |
| 第一章 計畫緣起 .....             | 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 .....             | 2-8  |
| 第三章 相關文獻 .....             | 3-1  |
| 第一節 坡面型土石流定義與分類 .....      | 3-1  |
| 第二節 坡面型土石流與岩屑崩滑之差異 .....   | 3-5  |
| 第三節 坡面型土石流特性 .....         | 3-8  |
| 第四節 坡面型土石流之判釋準則 .....      | 3-9  |
| 第五節 分析單元定義 .....           | 3-10 |
| 第四章 研究區地質概況 .....          | 4-1  |
| 第一節 研究區地質與地質構造 .....       | 4-1  |
| 第二節 研究區聚落地形及地質說明 .....     | 4-2  |
| 第五章 分析單元劃分方法及因子資料庫 .....   | 5-1  |
| 第一節 坡面型土石流災害案例圖資及資料庫 ..... | 5-1  |
| 第二節 崩塌坡面單元劃分方法及程序 .....    | 5-2  |
| 第三節 研究區崩塌坡面分析單元圈繪成果 .....  | 5-9  |
| 第四節 研訂分析模式因子 .....         | 5-12 |
| 第六章 崩塌/坡面型土石流判釋準則 .....    | 6-1  |

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| 第一節 判釋模式 .....                | 6-1         |
| 第二節 區別分析判定模式驗證 .....          | 6-5         |
| 第三節 研究區坡面型土石流判釋成果 .....       | 6-7         |
| <b>第七章 坡面型土石流潛勢分級模式 .....</b> | <b>7-1</b>  |
| 第一節 潛勢分級模式 .....              | 7-1         |
| 第二節 坡面型土石流潛勢評估成果 .....        | 7-2         |
| <b>第八章 結論與建議 .....</b>        | <b>8-1</b>  |
| 第一節 結論 .....                  | 8-1         |
| 第二節 建議 .....                  | 8-2         |
| <b>參考文獻 .....</b>             | <b>參-1</b>  |
| <b>附錄 .....</b>               | <b>附錄-1</b> |
| 附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....     | 附錄-1        |
| 附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....     | 附錄-5        |

## 表次

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| 表 2-1 計畫工作進度預定表 .....              | 2-8  |
| 表 3-1 崩塌與流動之判釋基準(游繁結，2005).....    | 3-5  |
| 表 3-2 各類崩塌形態比較表(呂岡侃與徐美玲，2004)..... | 3-7  |
| 表 5-1 區別分析之各因子使用代號表 .....          | 5-12 |
| 表 5-3 沉積岩 C 值與 $\phi$ 值相關研究統整..... | 5-23 |
| 表 6-1 區別分析之各因子使用代號 .....           | 6-2  |
| 表 6-2 區別分析使用因子組合與過程 .....          | 6-2  |
| 表 6-3 區別分析結果.....                  | 6-3  |
| 表 6-4 區別因子之相關性檢定結果 .....           | 6-4  |
| 表 6-5 坡面型土石流與未發生土石流之驗證點位 .....     | 6-6  |
| 表 6-6 驗證區區別分析結果 .....              | 6-6  |
| 表 6-7 分析單元判釋成果及捕捉率 .....           | 6-7  |



## 圖次

|                                                     |      |
|-----------------------------------------------------|------|
| 圖 2-1 研究流程圖.....                                    | 2-2  |
| 圖 3-1 邊坡型(左)與山谷型(中)溪床型(右)(吳素慧，1997).....            | 3-3  |
| 圖 3-2 九種基本坡型(Parsons, 1988) .....                   | 3-7  |
| 圖 3-3 集水區範圍示意圖(底圖來源:google earth) .....             | 3-10 |
| 圖 3-4 台北市南港區崩塌分析單元劃定圖(歐陽希，2008) .....               | 3-11 |
| 圖 3-5 斜坡縱斷面之變坡點示意圖 (Giles and Franklin, 1998) ..... | 3-12 |
| 圖 3-6 以一級河集水區為例之斜坡單元示意圖(簡瑋延，2011)<br>.....          | 3-13 |
| 圖 4-1 研究區地質圖 (中央地質調查所，2009) .....                   | 4-1  |
| 圖 4-2 研究區高雄市六龜區新發里座落於荖濃溪左岸之河階地... ..                | 4-2  |
| 圖 4-3 研究區高雄市荖濃里座落於荖濃溪支流直瀨溪之河階地... ..                | 4-3  |
| 圖 4-4 研究區高雄市那瑪夏區達卡努瓦里座落於旗山溪之左岸河<br>階地.....          | 4-3  |
| 圖 5-1 坡面型土石流及崩塌事件所在位置 .....                         | 5-1  |
| 圖 5-2 崩塌坡面分析單元圈劃流程圖 .....                           | 5-2  |
| 圖 5-3 流向示意圖.....                                    | 5-3  |
| 圖 5-4 災前 DEM .....                                  | 5-5  |
| 圖 5-5 600 格/1.5 公頃 .....                            | 5-5  |
| 圖 5-6 200 格/0.5 公頃 .....                            | 5-5  |
| 圖 5-7 坡面分析單元.....                                   | 5-5  |
| 圖 5-8 分析單元發生區訂定程序 .....                             | 5-7  |
| 圖 5-9 分析單元圈劃範例圖 .....                               | 5-8  |
| 圖 5-10 圖層套疊後示意圖 .....                               | 5-8  |
| 圖 5-11 實地之分析單元 .....                                | 5-8  |

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| 圖 5-12 A 區分析單元圈畫成果圖 .....                                  | 5-9  |
| 圖 5-13 C 區分析單元圈畫成果圖 .....                                  | 5-10 |
| 圖 5-14 D 區邊坡單元圈畫成果圖 .....                                  | 5-11 |
| 圖 5-15 發生區圈畫示意圖(陳柏龍 2013).....                             | 5-13 |
| 圖 5-16 分析單元高程差與隘口 ( $H_0$ 之位置) 高程差之示意圖 ..                  | 5-14 |
| 圖 5-17 流動段長度示意圖 .....                                      | 5-15 |
| 圖 5-18 集水區形狀，狹長形(左)及寬圓形(右)(何明憲，2003)....                   | 5-17 |
| 圖 5-19 溪谷地形之定義(日本國土技術政策總和研究所，2007).                        | 5-18 |
| 圖 5-20 邊坡土壤濕潤指數示意圖 .....                                   | 5-20 |
| 圖 5-21 穩態降雨水文模式各項參數示意圖(Dietrich &<br>Montgomery，1994)..... | 5-21 |
| 圖 5-22 板岩、硬頁岩相關研究之區域分佈(陳柏龍，2013) .....                     | 5-24 |
| 圖 5-23 坡面與層面交角區分邊坡類型示意圖(陳柏龍，2013) ....                     | 5-26 |
| 圖 5-24a 順向坡之集水區平均坡度與崩塌深度.....                              | 5-26 |
| 圖 5-24b 順斜坡之集水區平均坡度與崩塌深度.....                              | 5-27 |
| 圖 5-24c 逆向坡之集水區平均坡度與崩塌深度 .....                             | 5-27 |
| 圖 5-24d 逆斜坡之集水區平均坡度與崩塌深度.....                              | 5-28 |
| 圖 5-25a 莫拉克颱風災後航照(立體圖).....                                | 5-29 |
| 圖 5-25b SHALSTAB 模式分析結果套疊災後航照(立體圖) .....                   | 5-29 |
| 圖 6-1 坡面型土石流與未發生土石流之區別函數分佈圖 .....                          | 6-4  |
| 圖 6-2 土石流發生三大條件之特性因子影響率 .....                              | 6-5  |
| 圖 6-3 A 邊坡單元判釋結果 .....                                     | 6-8  |
| 圖 6-4 C 邊坡單元判釋結果 .....                                     | 6-9  |
| 圖 6-5 D 邊坡單元判釋結果 .....                                     | 6-10 |
| 圖 7-1 分界指標 0 與 0.95 之潛勢分級結果 .....                          | 7-1  |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 圖 7-2 坡面型土石流潛勢分級示意圖 .....          | 7-2 |
| 圖 7-3 集水區 A 之潛勢分析結果.....           | 7-3 |
| 圖 7-4 集水區 C 之潛勢分析結果.....           | 7-4 |
| 圖 7-5 集水區 D 之潛勢分析結果.....           | 7-5 |
| 圖 7-6 三聚落周緣山坡地之坡面型土石流潛勢分級統計圖 ..... | 7-6 |



## 第一章 計畫緣起

臺灣全島現今土石流潛勢溪流計 1687 條，分為溪流型與坡面型兩種土石流潛勢溪流，其中主要以位於河道的溪流型土石流為主，其危害區位相當明確，主要位於河道、河岸及出口三區位。而坡面型土石流，其規模較小，以有效集水區大於 3 公頃以上之野溪為主，多出現於山坡單元，在土石流潛勢溪流中較少納入管理。

然近年全球氣候變遷，強降雨長延時之降雨事件逐漸增加，此種強降雨型態造成有效集水區小於 3 公頃的山坡單元，也發生坡面型土石流。如 2009 莫拉克於高雄市六龜區新發里區，造成 7 處邊坡發生坡面型土石流災害，30 多名居民遭沖失或掩埋，數十戶房屋遭損毀或掩埋。2010 梅姬颱風造成蘇澳鎮冷泉路的白雲寺和鄰近民宅遭緊鄰山坡土石流淹沒，9 人被遭泥流掩埋。國外方面，如 2012 年 7 月 11 日日本地區豪雨，九州阿蘇市一之宮町坂梨地區 6 人遭坡面型土石流埋沒，十數間民房遭沖毀或掩埋。2014 年 8 月廣島豪雨致使數聚落周邊山溝發生多起坡面型土石流，造成 73 人傷亡。

臺灣山坡地區域有數千聚落分佈其間，依原民會統計原住民聚落即達 731 處。於現今氣候變遷狀況下，許多聚落周緣之山坡地可能演化產生坡面型土石流，更因其緊鄰聚落社區，極易形成小災害但高危害度及大災損的高風險災害型態，惟因其未被劃入土石流潛勢溪流或大規模崩塌影響範圍區者，則常產生安全無虞之假象。由於坡面型土石流常位於坡面且無明顯地形特徵，在未發生前一般不易警覺，因此若能針對聚落周緣山坡事前區分出可能崩塌或坡面型土石流，標定出可能發生的位置及潛勢，即可提高災害管理效能，保障居民安全。

基於前述，本計畫旨在建立聚落周緣山坡地之坡面型土石流易發

生地形判釋模式，以能事先勘定坡面型土石流高風險區預防災害。同時研擬坡面型土石流潛勢評估模式，提供防災治理單位之防災預警參據應用。本年度預計針對高屏溪流域內典型沉積岩及亞變質岩地質區之三處聚落進行模式研究，研究區分別選定高雄市六龜區新發里（亞變質岩）、荖濃里（晚期中新世沉積岩）、及那瑪夏區達卡努瓦里（早期中新世沉積岩）等三處。

## 第二章 計畫項目及時程進度

### 第一節 本年度計畫工作項目

本計畫首先進行崩塌及坡面型土石流分析單元方法與發生區位判釋模式研究，完成各實際災害案例之分析單元，產製 20 項特性因子，建置成分析資料庫，研擬最佳判釋模式及潛勢分析，最後再完成三處聚落鄰近山坡之判釋及潛勢分析。基於達成計畫目標，本年研究工作規劃如下：

1. 建置坡面型土石流災害案例圖資及資料庫。
2. 研擬坡面分析單元劃分方法。
3. 研訂分析模式因子
4. 建置地文、水文分析資料庫
5. 崩塌潛勢分析
6. 建立崩塌/坡面型土石流判釋準則
7. 建立坡面型土石流地形潛勢分析模式
8. 完成研究區聚落山坡之判釋及潛勢分析

以上工作項目彙整成計畫研究流程圖如圖 2-1 所示。

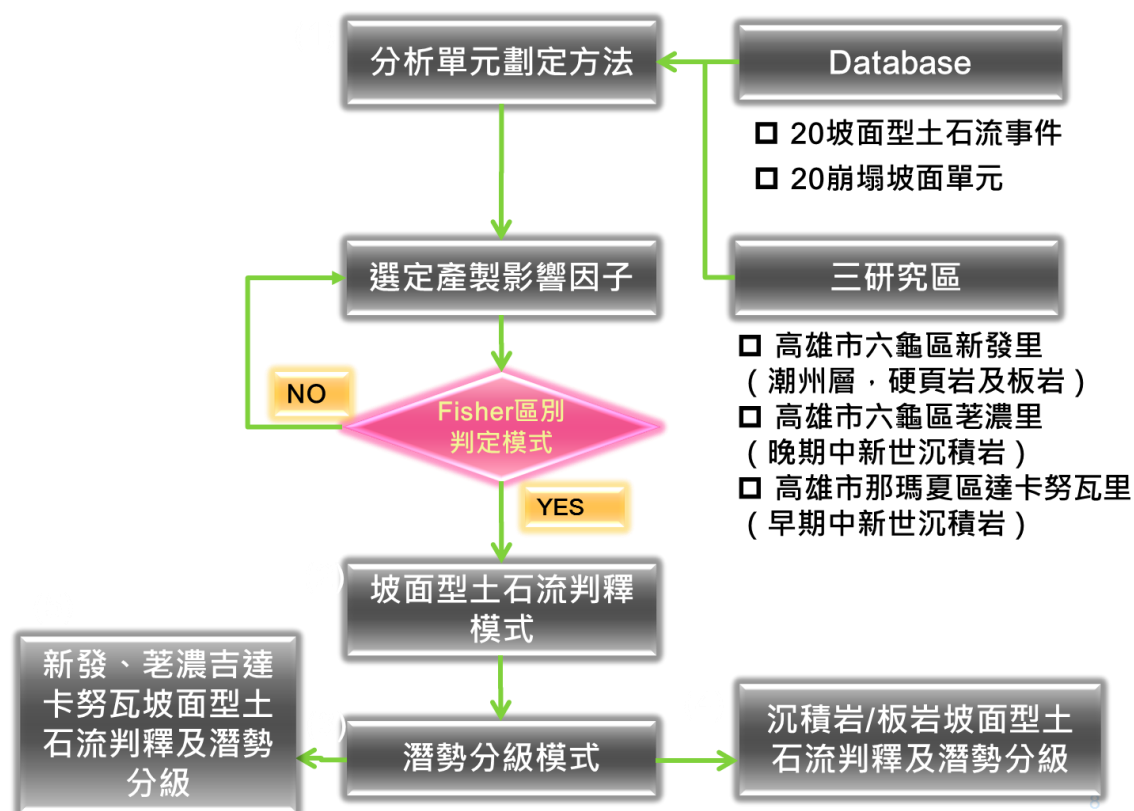


圖 2-1 研究流程圖

以下簡要說明各項工作：

### 一、建置坡面型土石流災害案例圖資及資料庫

本研究彙集高屏溪流域聚落周邊山坡內坡面型土石流案例，依據陳天健(2015)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，且進一步建置坡面型土石流災害案例圖資及資料庫。建置研究資料庫工作包括野外調查資料，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、高屏溪流域地質圖幅、高屏溪流域衛星影像或航空照片、高屏溪流域崩塌圖層、數值高程模型 (5x5m DEM) 等。應用地理資訊系統產製相關地文因子以供後續研究使用。本研究最終採用 60

筆坡面型土石流及崩塌災害案例做為模式研擬資料庫。

## 二、研擬坡面分析單元劃分方法

聚落週緣山坡地，同時具有一般崩塌及坡面型土石流兩種土石運移型態。坡面分析單元劃分方法之良窳，影響崩塌坡面與坡面型土石流地形判釋之效率，因此需深入研究適當之坡面分析單元劃分方法及程序。本研究依前項工作判釋結果，首先選取出坡面型土石流案例及崩塌案例，採用次集水區概念，配合災前 5×5m DEM 劃定該案例所在集水區範圍，初步產生邊坡分析單元之範圍，坡面型土石流以 HDF 表示，僅具崩塌坡面建置以 NDF 表示。逐次調整單元面積及地形出口等性質，求取吻合度最佳之分析單元劃分準則。而後，再應用此劃分準則，針對將聚落週緣之山坡逐一劃定分析單元。

## 三、研訂分析模式因子

本研究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。本研究參酌相關學者之研究，挑選出較適用之坡面型土石流之地文因子，因子中包括集水區面積、流動段長度、形狀係數、崩塌潛感、地形形狀等因子資料。經考慮後潛勢因子初步規劃如下：

- ◆ 集水區面積(WA)
- ◆ 土石流發生區面積(EWA)
- ◆ 有效集水指標(EWAI)
- ◆ 高程差
- ◆ 流動段平均坡度(ASF)
- ◆ 流動段長度( $L_f$ )
- ◆ 溪流線( $L_r$ )

- ◆ 形狀係數
- ◆ 集水區平均寬度(W)
- ◆ 坡面深寬比(HAR)
- ◆ 起伏比(TR)
- ◆ 坡面平均坡度
- ◆ 崩塌潛感面積比(RLSA)
- ◆ 淺層崩塌預測模式之  $q/T$  指標

#### 四、建置地文、水文分析資料庫

本研究進行崩塌及坡面型土石流案例分析單元，以及三處聚落鄰近山坡之分析單元，產製各特性因子之數值，建置成分析資料庫，以供後續判釋模式及潛勢分析作業應用。因其中部分因子較為特殊，以下簡要說明其特性因子。

- (1) 隘口高程比：為以隘口高程差除以集水區高程差，可得隘口高程比，隘口高程比可間接表示發生區位於坡面縱剖面之區位，值越大則表示隘口接近坡趾，為大型崩塌，流動區短，較不易形成土石流，反之，其值越小，隘口位於坡腹至坡頂間，其流動距離長，較易形成土石流。進一步探討 HDF 與 NDF 之流動段高程差與集水區高程差及隘口高程比分布情形，再以兩個因子之相互關係呈現結果。
- (2) 流動段長度( $L_f'$ )：應用地理資訊系統(GIS)中，套入數值地形，直接測繪之河道長度。為此是應用於正射投影觀念下產製而成，依照其工具所測繪之長度為水平距離(L)，但其真實長度為斜距( $L'$ )，將  $L_f$  除以  $\cos\theta_f$  可求其較真實之流動段長度。其中  $L_f'$  為採用本研究判釋之流動段長度之斜距(m)， $L_f$  為流動

段長度之水平投影距離(m)， $\theta_f$  為流動段之平均坡度( $^{\circ}$ )。

- (3) 集水區平均寬度(W)：為利用地理資訊系統(GIS)產製，分析單元之集水區面積(WA)與集水區之全長( $L_w$ )後，以集水區面積(WA)除以集水區之全長( $L_w$ )即計算集水區平均寬度。發生區平均寬度( $W_o$ )產製亦同於上述方法，發生區為土石流發生之材料來源，其形狀因子更能表示該區土石材料產生情形。
- (4) 坡面深寬比(HAR)：本研究將集水區分為兩個區位，以明顯看出整體集水區橫剖面變化情形。分別產製發生區深寬比( $HAR_o$ )及流動段深寬比( $HAR_f$ )，進一步探討整體集水區橫剖面變化與地形演化情形。深寬比為以坡面深 b 除以坡面寬 a 計算。進一步探討 HDF 與 NDF 之流動段深寬比、隘口深寬比及發生區深寬比分布情形，結果以兩個因子之相互關係呈現。以流動段與發生區之深寬比相除，若其值趨近於 1，表示發生區至流動段於地形上無明顯變化，反之則地形有明顯變化。其關係式如下： $HAR = HAR_f / HAR_o$ ；以隘口與發生區之深寬比及隘口與流動段之深寬比相除，若其值趨近於 1，表示上坡面至下坡面於地形上無明顯變化，反之，值越大則地形變化明顯。
- (5) 起伏比(TR)：為了更明顯看出整體集水區縱剖面變化情形，本研究計畫分別進行為發生區起伏比( $TR_o$ )、流動段起伏比( $TR_f$ )及集水區起伏比( $TR_w$ )三個區位之起伏比分析，以探討整體集水區縱剖面變化情形。利用地理資訊系統(GIS)產製之高程差( $\Delta H$ )與水平距離(L)後，以高程差( $\Delta H$ )除以水平距離(L)計算起伏比。

- (6) 坡面平均坡度：利用地理資訊系統(GIS)之空間模組內的坡度分析(Spatial Analysis Slope)，可由集水區範圍內之數值高程模型計算出集水區坡面平均坡度，並應用此方法另計算發生區坡面平均坡度，進一步探討 HDF 與 NDF 之集水區坡面平均坡度、發生區坡面平均坡度及坡面平均坡度比分布情形。
- (7) 崩塌潛感面積比(RLSA)：本研究使用崩塌潛感面積比方法，以期獲得更具代表影響土石流發生之材料因子，崩塌潛感面積比為崩塌潛感面積(LSA)除以集水區面積(WA)，取其百分比。當崩塌潛感面積比越大，此區域之可能崩塌範圍較廣；反之則可能崩塌範圍較小。
- (8) 崩塌潛勢分析：土石流三大發生條件材料因子部分，大多是採各種坡度值當作可能觸發崩塌的指標，為了找出更能代表集水區內崩塌特性，本研究利用 SHALSTAB 淺層崩塌模式進行坡面不穩定之範圍分析，預測崩塌範圍面積作為模式分析因子。SHALSTAB 分析模式所需輸入各項參數  $C$ 、 $\phi$ 、 $b$ 、 $\gamma_s$ 、 $\gamma_w$  為定值， $\theta$ 、 $Z$ 、 $a$  則為變動之值，詳細請參考 Dietrich & Montgomery (1994)。

## 五、建立崩塌/坡面型土石流判釋準則

本研究分為二階段工作，首先應用崩塌及坡面型案例，建立地形判釋模式。而後再應用判釋模式進行三處聚落山坡分析，由分析成果再修訂模式，已獲得最佳之坡面型土石流地形判釋模式。操作採用 SPSS 統計軟體進行區別分析，建立坡面型土石流判定模式。為了使兩母體驗前機率相同，坡面型土石流與崩塌兩個群組將先各選定 20 筆觀測資料，進行坡面型土石流判別。由前述

特性因子中選出指標因子進行區別分析，觀察其正判率，取得最佳判定之因子組合，而訂定坡面型土石流判釋模式。為檢核判釋模式之效力，本研究保留部分約崩塌及坡面型土石流約各 10 筆案例，作為判釋模式效力之檢測樣本。而後再應用於本研究之三處研究區，進行適當修訂，以獲得最佳之判釋模式。

#### 六、建立坡面型土石流地形潛勢分析模式

延續前項得到坡面型土石流判釋成果，配合 3 個聚落作為驗證樣本群，依照區別函數值進行驗證，最後進行坡面型土石流潛勢分級。土石流發生潛勢之高低可提供防災避難規劃優先順序之參考，本研究坡面型土石流潛勢分級之方法，是將函數值分佈曲線累積百分比分成三份，將斜率最高之上升段設為中潛勢，其前後分別為低潛勢與高潛勢。當機率依序累加後可得累積積率百分比曲線為虛線，將此曲線面積分成高中低三潛勢等分。

## 第二節 工作進度

本計畫目前預定民國 105 年 12 月 31 日完成，工作期程如表 2-1 所示，其中黑色為預定工作進度，灰色為計畫執行進度。

表2-1 計畫工作進度預定表

| 工作項目                       | 月次  | 105 年 |     |     |     |     |      |      |      |  |
|----------------------------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|--|
|                            | 4 月 | 5 月   | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |  |
| 1. 建置坡面型土石流災害<br>案例圖資及資料庫  |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 2. 研擬聚落周緣山坡之坡<br>面分析單元劃分方法 |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 3. 研訂分析模式因子                |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 4. 期中報告                    |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 5. 建置地文、水文分析資<br>料庫        |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 6. 崩塌潛勢分析                  |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 7. 建立崩塌/坡面型土石流<br>判釋準則     |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 8. 建立坡面型土石流地形<br>潛勢分析模式    |     |       |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 進度累計百分比(%)                 | 2   | 12    | 22  | 34  | 51  | 66  | 83   | 95   | 100  |  |

## 第三章 相關文獻

就地形觀點，土石流分為溪流型與坡面型(Hillslope type debris flow)兩種。溪流型土石流之區位多位於河谷地形，災害多肇因於河道中游之沖刷與下游之土石撞擊及淤埋等情況，災害規模較鉅。對於其成因與影響，近年國內外有較多之研究與認識。而坡面型土石流則主要出現於大地震震後降雨或劇烈天氣事件(如集集地震與2009莫拉克颱風等)，其區位主要位於邊坡之溝壑或坡面，由小規模崩塌匯流地表逕流後向下方輸送，災害規模及影響區均較小，主要危害之空間集中於銜接坡面處或溝壑出口。

本章進行相關文獻整理，首先彙整國內外坡面型土石流相關定義與分類，接著為集水區及分析單元定義，最後判別模式及其因子的介紹。

### 第一節 坡面型土石流定義與分類

台灣發生之土石流依型態可分為溪流型土石流與坡面型土石流等兩種。而兩種土石流之發生產狀、地形、地貌、機制、區位等特性各有所不同。近年來，坡面型土石流產狀特性及地文特徵於周憲德(2002)、林慶偉(2002)、游繁結(2005)等學者研究中已有初步認識。但「坡面型」土石流之名稱並無統一，本研究沿用 Jomelli 等人 (2007) 稱之為坡面型土石流(Hill Slope Debris Flow, HDF)。另有部份研究亦稱之為流體化崩塌(Fluidized Landslide Slope)之一種。

就發生區位而言，坡面型土石流源頭常位於凸坡或平直坡地形，經常為溪流型土石流流動段兩側邊坡上，成為溪流型土石流料源之一，與崩塌與地滑之發生區位極為類似。在國內外有關於坡面型土石流的相關研究中，部分研究對坡面型土石流之名詞定義與外觀特徵，有較

多之說明，茲綜整如下：

在區位分類上 Takahashi(1981)根據土石流發生區位置，將土石流進行分類。其中發生於陡峭的岩盤或崖錐部位的土石流稱為「slope type debris flow」。此類土石流常沿坡面蝕溝發生，流動距離短。

在地貌分類中，詹錢登等(2000)引用 Takahashi(1981)描述，將土石流按照發生的地貌條件，劃分成河谷型土石流及山坡型土石流兩類，其中本研究坡面型土石流屬山坡型土石流。張石角(1985)將 Varnes(1978)所提到，土石料源為停積於斜坡之鬆散物質及崩塌產生之物質之崩塌物，因暴雨或滲流作用，使邊坡物質破壞形成之土石流稱為山坡型或邊坡型土石流。而吳素慧(1997)根據張石角(1985)上述之研究，將土石流以地形再分為三類，第 1 類型土石流較為接近坡面型土石流；第 2、3 類型土石流則較為接近溪流型土石流：

#### (1) 邊坡型土石流

通常為暴雨發生時或其後，斜坡上的鬆散物質在重力作用下迅速滑動所形成者，如圖 3-1(左)所示。

#### (2) 山谷型土石流

邊坡已向內侵蝕成一深長的槽谷，堆積於谷內的崩塌物質，在暴雨時飽和水分向下移動，並衝出狹小的隘口，如圖 3-1(中)所示。

#### (3) 溪床型土石流

坡度較陡的溪床上所積累的巨厚堆積層，隨著暴雨的發生而形成的土石流動，如圖 3-1(右)所示。



圖 3-1 邊坡型(左)與山谷型(中)溪床型(右) (吳素慧，1997)

連惠邦、林柏壽、薛祖淇(2000)將崩落型土石流，分為與溪流作用無關之主動崩落型土石流(坡面型土石流)及受溪流作用之被動式崩落型土石流(溪流型土石流)。

游繁結(1990)、高橋保等(1983)將發生於山腹斜面崩落之土砂土石流化現象，稱之為崩落型土石流。游繁結(2005)等人，發現火炎山區域邊坡土體運動方式，除表土沖蝕外，應可分為崩塌與坡面流動兩種型態：

#### (1) 崩塌

係指邊坡斜面上土體崩落之現象，土、石、岩塊等土體間非呈連續體之運動，此等不連續之空間亦未充斥水或泥漿等流體，故其運動至緩坡處停積之範圍較小。

#### (2) 坡面流動

主要發生於暴雨時或過後，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，可由上游崩落物質受水流帶動至下游並堆積而成沖積扇之地形作為判釋依據，且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，與一般崩塌所形成的崖錐堆積有所不同。

廖偉民(2001)依水文啟動條件分為：1.溪床型土石流，為土體內之滲透係數較大，且因溪床水流匯集，造成之土石流。2.崩塌型土石流，土體內孔隙水壓升高，使土體崩塌所致。

## 第二節 坡面型土石流與岩屑崩滑之差異

游繁結(2005)等人針對火災山區域研究中，指出邊坡土體運動方式除表土沖蝕外，應可分為崩塌與坡面流動兩種型態，這兩種型態之判釋基準如表 3-1 所示。其中，崩塌與坡面流動之詳細描述如下：

### (1) 崩塌

係指邊坡斜面上土體崩落之現象，其崩落之行為包括落石、塌陷、崩滑等運動型態，而運動之特徵為土、石、岩塊等土體間非呈連續體之運動，亦即運動土體內部之土、石、岩塊等粒子之間有不連續之空間存在，此等不連續之空間亦未充斥水或泥漿等流體，故其運動至緩坡處停積之範圍較小。

表3-1 崩塌與流動之判釋基準(游繁結，2005)

| 特性\類型   | 崩塌              | 坡面流動                       |
|---------|-----------------|----------------------------|
| 發生位置    | 邊坡斜面            | 崩塌斜面或沖蝕溝                   |
| 堆積形式    | 崖錐              | 舌狀或扇狀堆積                    |
| 停積範圍    | 小於 2 倍崩塌高       | 大於 2 倍崩塌高                  |
| 堆積形狀    | 縱軸不一定大於橫軸       | 縱軸大於橫軸                     |
| 植株      | 傾倒之林木尚附著枝葉      | 林木樹幹表皮充分磨損幾乎無枝葉附著          |
| 堆積區粒徑分布 | 堆積表面之土石無明顯之篩分現象 | 堆積表面之前緣有較粗大之石、礫材料，有明顯之篩分現象 |

### (2) 坡面流動

主要發生於暴雨時或過後，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，在相片基本圖上可能不具明顯之溝谷，作為流動之渠道，但於實地上可發現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。此外，發生區與流動區並無明顯之界面，但可由上游崩落物質受水流帶動至下游並堆積而成沖積扇之地形作為判釋依據，且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，與一般崩塌所形成的崖錐堆積有所不同。

游繁結(2005)就地形方面，將各調查之邊坡破壞地區依 Parsons(1988)之分類歸納(圖 3-2)，顯示火炎山地區邊坡破壞坡型為內聚凸坡與平行凸坡坡型。其中，崩塌以平行凸坡坡型為主，土石流則均發生在內聚凸坡坡型。一般凸坡有較多的土砂料源供應，並易形成坡陡環境造成崩塌，而內聚凸坡坡型有利於逕流集中產生侵蝕，並維持流動坡度條件，使得崩塌土體得以短距離形成土石流。

呂岡侃與徐美玲(2004)於南投縣九九峰地區現地調查發現，坡面土砂運動的形態如表 3-2 所示。其指出，坡面型土石流其地形形狀多呈碗狀，有利於雨量的有效聚集，不但容易引發崩塌，也容易攜帶土石在上緩下陡的邊坡轉折處切出較深的溝谷，並形成隘口。崩塌之物質首先集中於邊坡凹陷處，接著被水流冲刷而流動，在其下移過程中土石不斷攪拌，並切蝕邊坡摧毀邊坡上原有植生，結果樹幹殘枝或大塊石礫經常被卡於隘口形成障礙，造成後方土石的累積，直到土石壓力超過阻礙物的強度，才一舉沖出隘口，在坡腳形成堆積，此種塊體運動的主軸長度、深度和面積均顯著大於岩屑滑落和岩層滑崩。

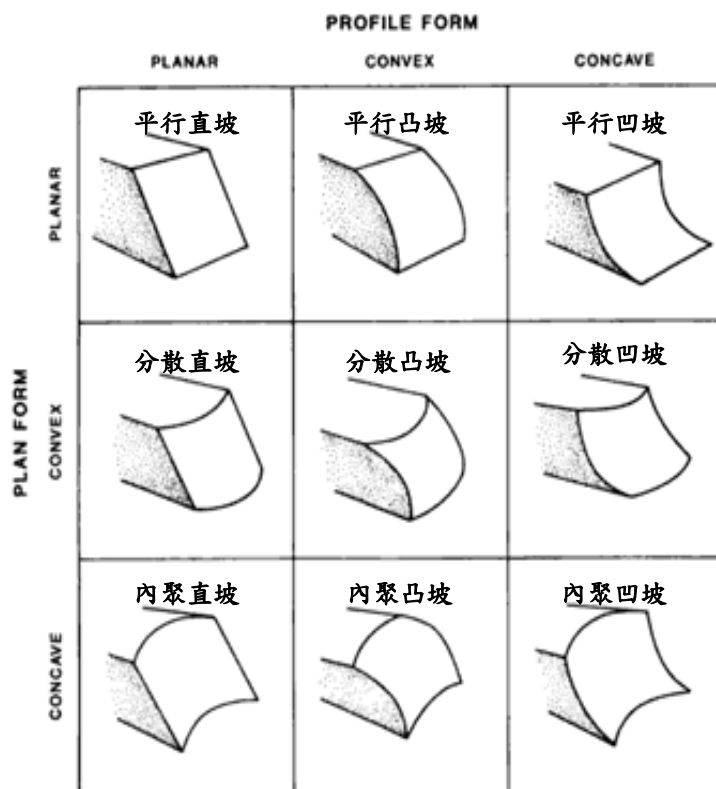


圖 3-2 九種基本坡型(Parsons, 1988)

表3-2 各類崩塌形態比較表(呂岡侃與徐美玲，2004)

| 觀察參數<br>崩塌形態 | 崩塌形狀 | 崩塌位置               | 隘口有無            | 邊坡坡形                                                                                          |
|--------------|------|--------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 岩屑滑落         | 橫平面狀 | 1. 坡面及坡底<br>2. 全邊坡 | 無               | <br>平行禿坡 |
| 岩屑滑崩         | 碗狀   | 坡頂                 | 有<br>(2 至 4 公尺) | <br>內聚禿坡 |
| 邊坡型土石流       | 碗狀   | 全邊坡                | 有<br>(4 至 6 公尺) | <br>內聚禿坡 |

### 第三節 坡面型土石流特性

本研究引述王振宇(2012)對於坡面型土石流綜整之地形產狀特徵如下：於地形上，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，且之前無溪流或下切渠道(Brunsdén, 1979)；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(林慶偉, 2002)；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，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並無明顯之界面(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)；整體土石流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，且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，與一般崩塌所形成的崖錐堆積有所不同(游繁結等, 2005)。

#### 第四節 坡面型土石流之判釋準則

陳天健等人(2015)歸納高屏溪流域坡面型土石流之現地產狀特性及文獻描述，擬定出坡面型土石流判釋準則 12 項如下：

依地形與產狀觀點，坡面型土石流具有下列 12 項明顯特徵：

- (1) 災前崩塌源頭地形為凸坡或平直坡
- (2) 發生於溝壑或坡面地形，且不具明顯溪谷
- (3) 屬零級河序 (zero order river)
- (4) 河道長度短
- (5) 發生區多位於坡腹或向源侵蝕區位
- (6) 源頭崩塌地成碗狀
- (7) 集水區內崩塌規模較小
- (8) 發生區與流動區不易區別，且坡度較陡
- (9) 具隘口地形並連接一土石流流槽
- (10) 由新生崩塌地轉化為土石流
- (11) 流動區劇烈槽化作用
- (12) 堆積區顆粒稜角明顯

上述各項特徵可提供學者現地調查與室內影像判釋等作業應用。上述項產狀特徵前 9 項為地形特徵，第 10 項為機制特性，最後 2 項為產狀特徵。12 項為於經與坡面型土石流實例比對具有高符合率。

## 第五節 分析單元定義

### 一、集水區定義及劃分

行政院農委會水土保持手冊(2005)中所定義之集水區，即沿山嶺線圍繞而成一以溪谷為中心的集水區域，在集水區內的坡面有各種不同的土地利用方式，但沿坡面流動的水流乃至於入滲至地下的地下水流，最終將匯集於溪谷中的流路沿河溪流至湖、海，如圖 3-3 所示。水土保持法提到集水區係指溪流一定地點以上天然排水所匯集地區。水利署定義則是集水區為針對某條河流而言，在某定點內，匯集該河流地表水的區域。

整體而言，集水區是一個以山脊線為邊界的水文系統，而集水區的邊界及面積大小則需視集水區出口指定，加以確定。集水區為多個同一匯水出口之小面積次集水區集結而成。



圖 3-3 集水區範圍示意圖(底圖來源:google earth)

集水區之劃定能先行以地理資訊系統水文分析模組工具進行電腦自動化劃定作業。一般較常被應用之分析工具為 ArcGIS 之 ArcHydro 模組。一般而言，ArcHydro 自動畫定集水區之單位網格是數值地形模型資料之解析度及設定參數而有所變異。

歐陽希(2008) 利用 ArcHydro 水文分析模組進行集水區之圈畫，其以河川級序零級河之次集水區為劃定基礎，求得較合宜之集水區分析單元如圖 3-4。再針對次集水區分析單元，產製崩塌特性因子資料庫，進行台北市崩塌特性之分析研究，探討各地質區之崩塌潛感代表性坡度因子。

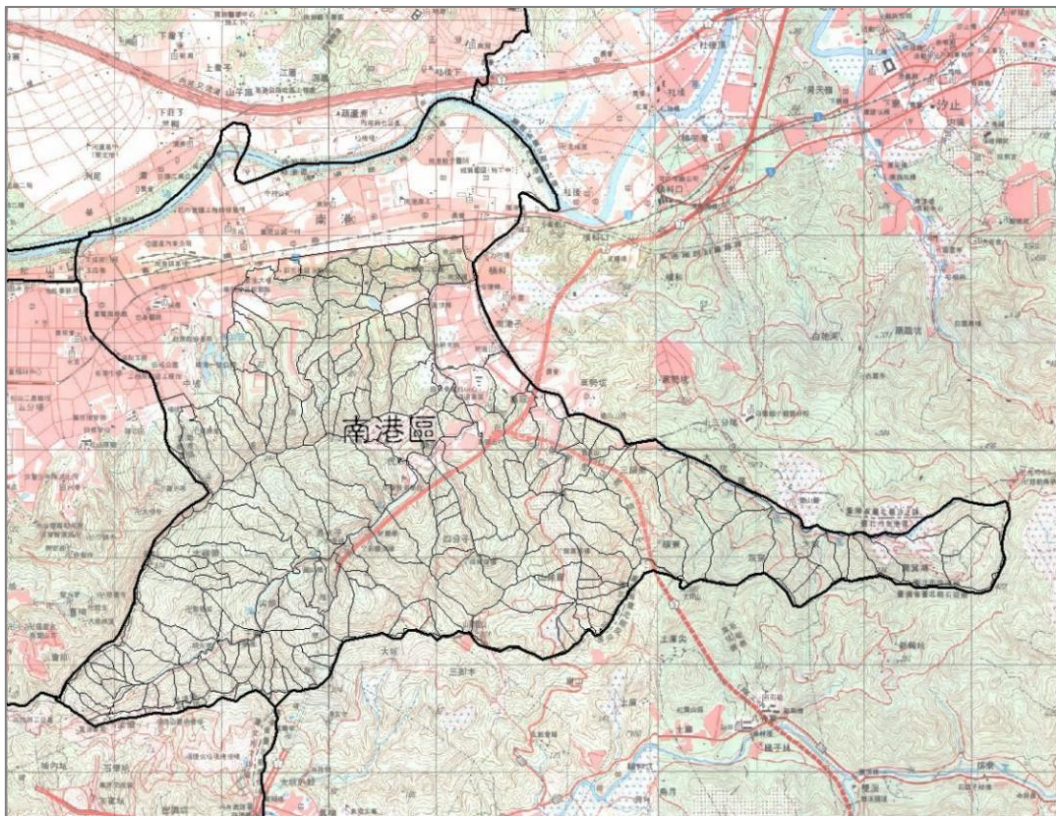


圖 3-4 台北市南港區崩塌分析單元劃定圖(歐陽希，2008)

陳天健等人(2016)研究中則針對坡面型土石流提出地形判釋方法，其採以次集水區觀念劃分坡面型土石流分析單元，結果可提供山坡地區域進行潛勢評估，標定高風險集水區。

## 二、坡面分析單元定義

坡面單元劃分方法依應用需求有諸多種劃分方式(李錫堤，2009)。坡面分析單元或稱斜坡單元(slope unit)有兩種地形定義，一為斜坡縱斷面上的各個最小單元，另一為侵蝕基準以上的整個斜坡系統 (Penck, 1953)，而本研究劃分之分析單元內較為接近第二種定義。

### (一) 斜坡縱斷面上各個單元

就斜坡縱斷面地形而言，在一個二維的斜坡縱斷面上，以變坡點 (breaks of slope) 為上下邊界分割的單元，將山坡分成數個斜坡單元，此單元具有相對較同質的形狀和岩性 (Giles and Franklin, 1998)，如圖 3-5，圖中有三個變坡點，將一個斜坡分成四個斜坡單元山脊 A、坡頂 B、坡腹 C、及坡腳 D。本研究應用此區分法之概念，將分析單元縱斷面分為發生段(AB)，流動段(C)及堆積段(D)等之微地形。

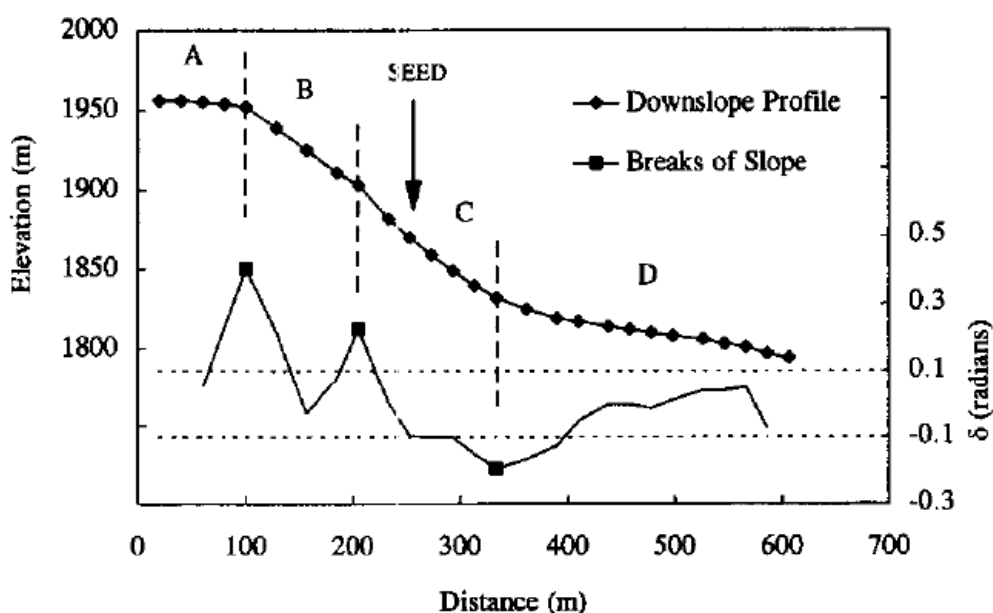


圖 3-5 斜坡縱斷面之變坡點示意圖 (Giles and Franklin, 1998)

## (二) 侵蝕基準以上的整個斜坡系統 (Penck, 1953)

此定義較常被運用在坡地災害研究上，一個小集水區以水系為侵蝕基準，以上的左右兩側斜坡各被視為一個斜坡單元 (Carrara et al., 1991; Xie et al., 2004)，如圖 3-6 所示。

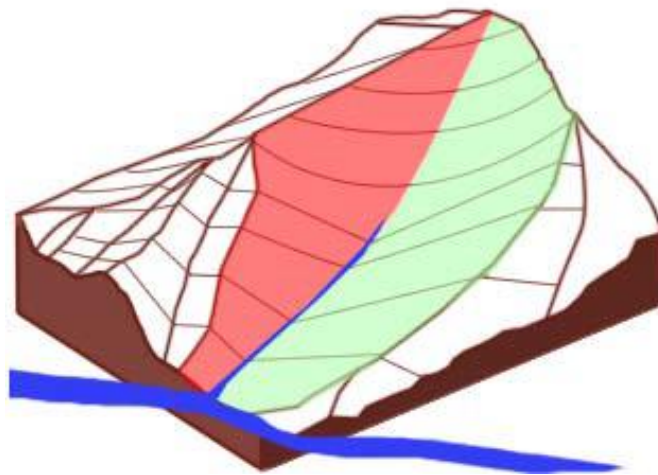


圖 3-6 以一級河集水區為例之斜坡單元示意圖 (簡瑋延，2011)

## 三、 小結

本研究原採用「次集水區概念」，訂出分析單元劃分方法及程序。但於期中報告時，委員建議應以坡面崩塌單元，作為分析之單元，因此本研究最終改以「崩塌坡面單元」概念，作為判釋分析之單元，其劃分方法臧於後續章節說明。



## 第四章 研究區地質概況

### 第一節 研究區地質與地質構造

本研究區主要位於荖濃溪與旗山溪流域，地層與地質構造亦呈北北東—南南西走向延伸如圖 4-1 所示，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(中央地質調查所，2009)。

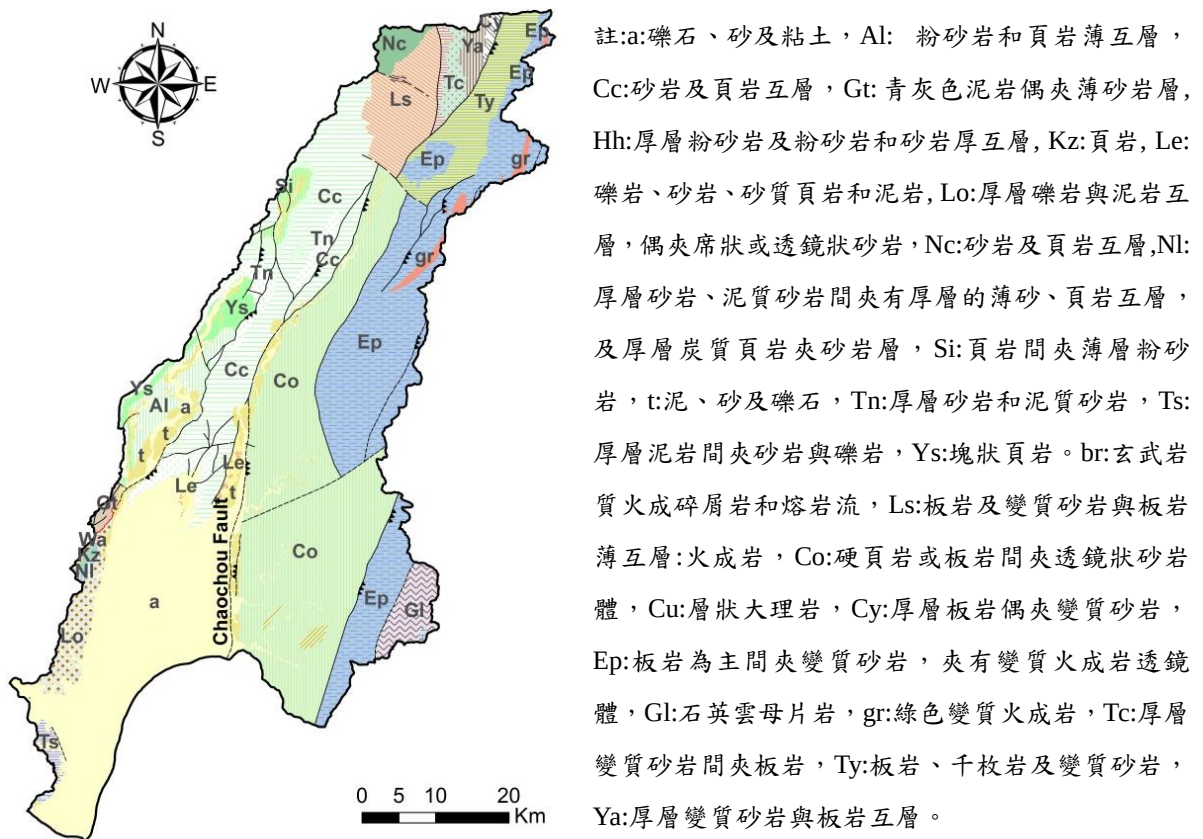


圖 4-1 研究區地質圖 (中央地質調查所，2009)

## 第二節 研究區聚落地形及地質說明

本研究區高雄市六龜區新發里座落於荖濃溪左岸之河階地如圖 4-2 所示，高在海拔 300 公尺至 360 公尺之間。聚落所在地層主要為沖積層、階地堆積層，坡地則以潮州層為主。潮州層為亞變質岩，以硬頁岩及板岩為主，間夾厚至薄層變質砂岩。

高雄市荖濃里座落於荖濃溪支流直瀨溪之左右岸之河階地如圖 4-3 所示，高約在海拔 400 至 500 公尺之間。附近地質構造主要為土壠灣斷層，部落所在地層及山坡主要為晚期中新世沉積岩長枝坑層。長枝坑層由很厚的深灰色頁岩和淡灰色細粒砂岩組成，含有不少的海相化石，砂岩很緻密堅硬，部份且為石灰質，主要成分為亞混濁砂岩。

高雄市那瑪夏區達卡努瓦里座落於旗山溪之左岸河階地如圖 4-4 所示，高約在海拔 700 至 800 公尺之間。本里位於馬雅只沖積扇端階地，附近地質構造主要為紅花子背斜中心通過，部落鄰近坡地為早期中新世沉積岩三民頁岩。三民頁岩主由黑灰色堅硬頁岩組成，間夾砂岩薄和砂岩頁岩的薄互層所組成。

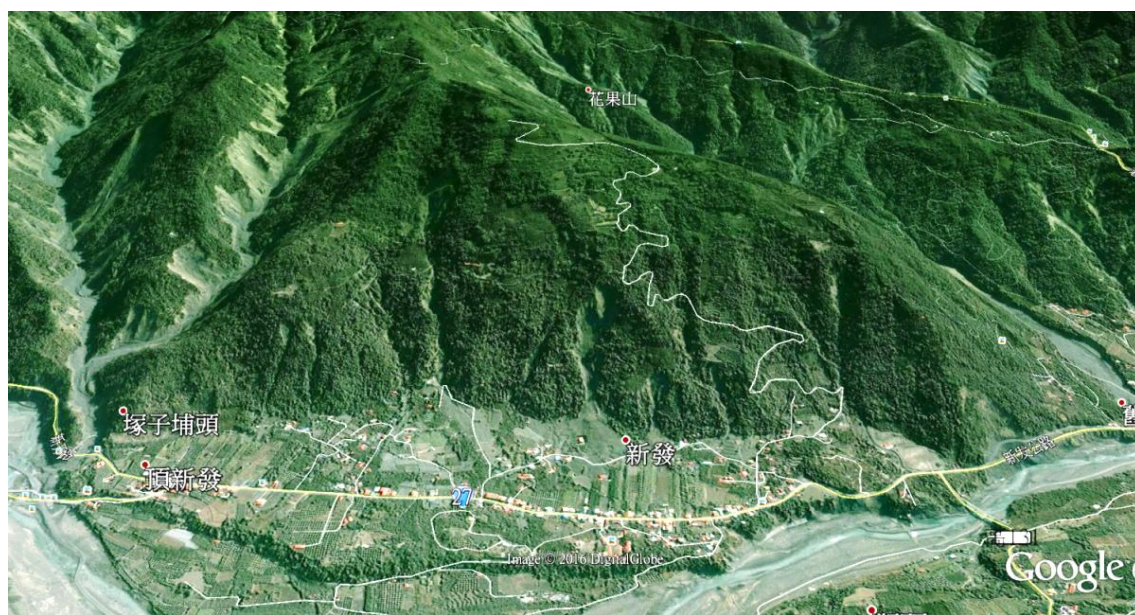


圖 4-2 研究區高雄市六龜區新發里座落於荖濃溪左岸之河階地



圖 4-3 研究區高雄市荖濃里座落於荖濃溪支流直瀨溪之河階地



圖 4-4 研究區高雄市那瑪夏區達卡努瓦里座落於旗山溪之左岸河階地



## 第五章 分析單元劃分方法及因子資料庫

### 第一節 坡面型土石流災害案例圖資及資料庫

本研究收集高屏溪流域 2009 年莫拉克颱風豪雨引致之坡面型土石流案例（陳天健等，2015），作為判釋模式研擬資料庫。使用的坡面型土石流災害目錄，均為確認具有土石流堆積特性之坡面型土石流點位。每一事件均比對莫拉克風災前後之航照，確認災前其集水區為無明顯崩塌與流槽且植被良好。最後配合崩塌斜坡分析單元之特性，選出 20 處面積小於 20 公頃之坡面型土石流事件(以 HDF 表示)，點位分布如圖 5-1。為提供判別分析，本文另建置未發生土石流之崩塌坡面單元 20 處(NDF 表示)，點位分布亦請參見圖 5-1。

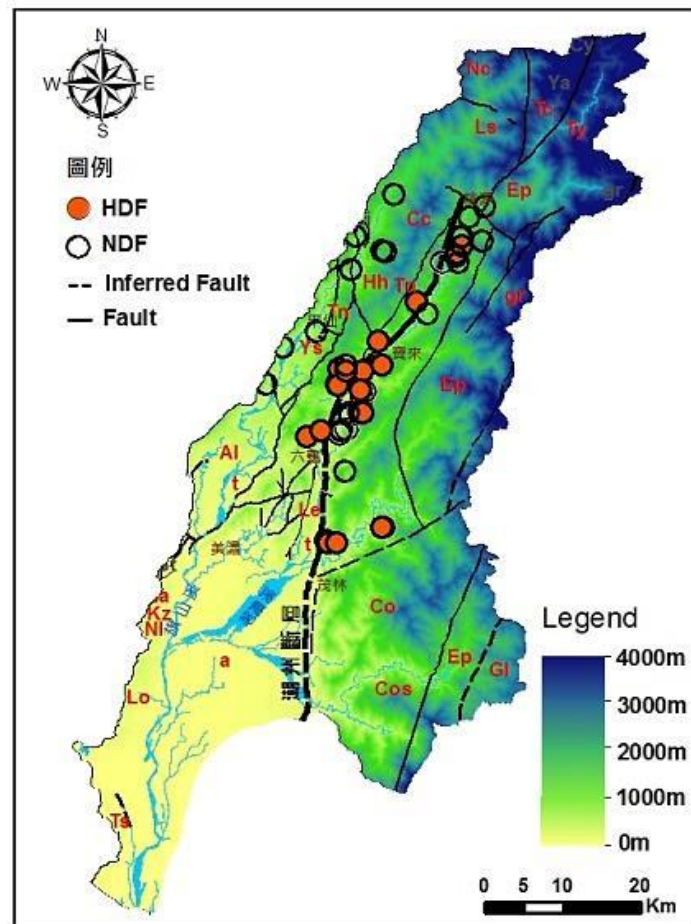


圖 5-1 坡面型土石流及崩塌事件所在位置

## 第二節 崩塌坡面單元劃分方法及程序

坡面單元劃分方法依應用需求有諸多種劃分方式(李錫堤,2009),本研究原採用「次集水區概念」,訂出分析單元劃分方法及程序。但於期中報告時,委員建議以坡面崩塌單元,作為分析之單元,因此本研究最終改以「崩塌坡面單元」概念,作為判釋分析之單元。

然「崩塌坡面單元」尚未有合宜之劃分程序,因此本研究需先完成單元劃分方法進行探討與適用性研究,歷經多種原則與方法之嘗試,由選取出坡面型土石流案例及崩塌案例,配合災前 DEM 劃定該案例所在集水區範圍,產生各種邊坡分析單元範圍;再逐次調整單元面積及地形出口等性質,求取吻合度最佳之分析單元劃分準則,最終適用之劃分程序如圖 5-2 所示。其中所獲取之分析單元,將再依坡面型土石流判釋準則判定是否為土石流潛勢單元,若為坡面型土石流者以 HDF 表示,若僅具崩塌坡面者以 NDF 表示;未符合劃分選取之其他邊坡單元,進行編入成崩塌單元(NDF)。

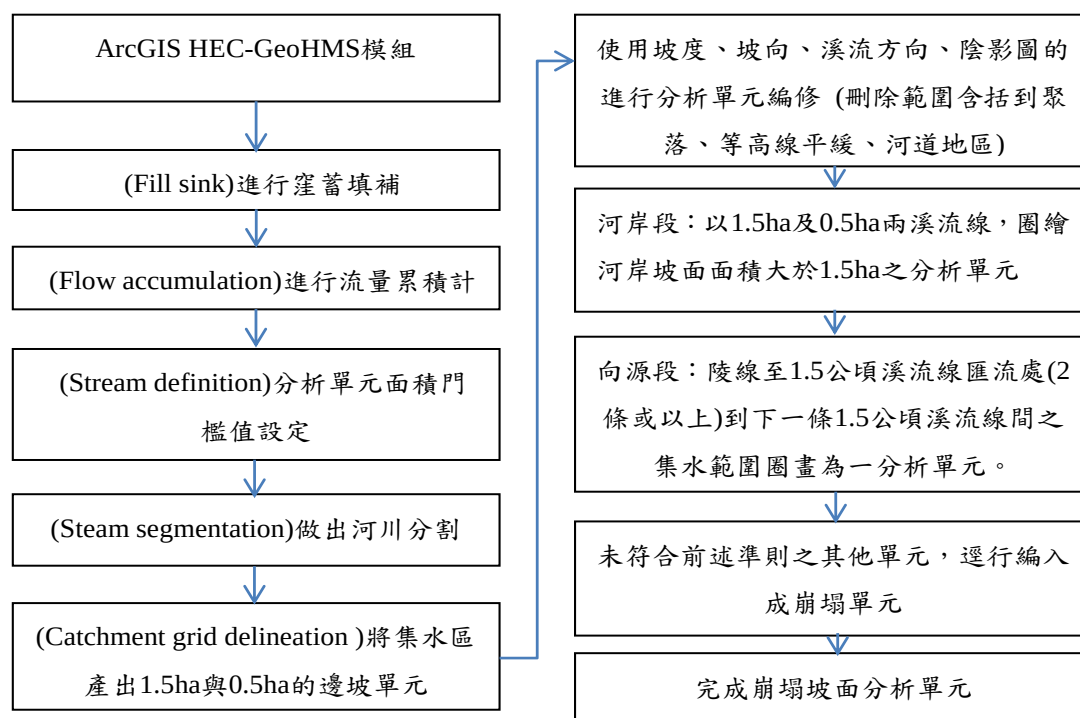


圖 5-2 崩塌坡面分析單元圈劃流程圖

### 一、崩塌坡面單元劃分方法說明

水文模組分析依同一匯水出口處為控制點的作為水文單元，其操作首先為決定 stream definition 門檻值，門檻面積(DEM 格數) 設定值越小時，所產生之分析單元較為密集，反之數值越大則分析單元面積越大。本研究劃定分析單元時，佐以流向圖判定匯水方向及出口，其中若無統一匯水出口之分析單元，則判釋為潛在崩塌單元，不進入下階段坡面型土石流判釋模式分析。

應用 GIS 流向工具計算災前 DEM，每一網格可得到八個方向，這八個方向組成流向圖如圖 5-3 所示。流向工具的輸出是從中心出發的各個方向值，值範圍介於 1 到 255 之間的整型柵格。例如，如果最陡下降方向位於當前處理像元的左側，則將該處理像元的流向編碼將為 16。如果某像元低於八個相鄰像元，則將為該像元指定其相鄰像元的最低值，並將流向定義為朝向此像元。

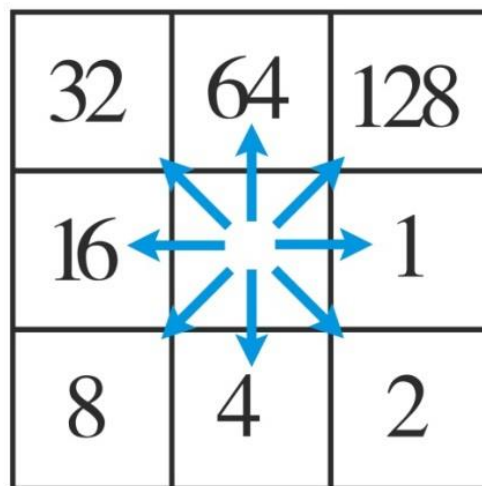


圖 5-3 流向示意圖

本研究所使用之 DEM 為 5 米，圖 5.4 為研究區之災前 DEM。

如圖 5.2 操作程序：

1. 將次集水區地形，分為向源侵蝕區、河槽區及河岸邊坡區等區域，再進一步圈畫崩塌坡面分析單元。
2. 分析單元集水區門檻數值設為 1.5ha 及 0.5ha，換算 DEM 網格為 600 格及 200 格。先劃設 1.5ha 及 0.5ha 集水區範圍圖層。
3. 套疊兩圖之溪流線，決定出分析單元之最低點位置。
4. 使用坡度、坡向、溪流方向、陰影圖的進行分析單元編修 (刪除範圍含括到聚落、等高線平緩、河道地區)。
5. 河岸段：以 1.5ha 及 0.5ha 兩溪流線，圈繪河岸坡面面積大於 1.5ha 之分析單元。
6. 向源段：陵線至 1.5 公頃溪流線匯流處(2 條或以上)到下一條 1.5 公頃溪流線間之集水範圍圈畫為一分析單元。
7. 未符合前述準則之其他單元，逕行編入成崩塌單元。
8. 完成崩塌坡面分析單元。

全研究區之 1.5ha 範圍及 0.5ha 集水區範圍畫分成果如圖 5-5 及圖 5-6 所示。再配合集流地形概念修正邊坡分析單元之範圍(圖 5-7)。

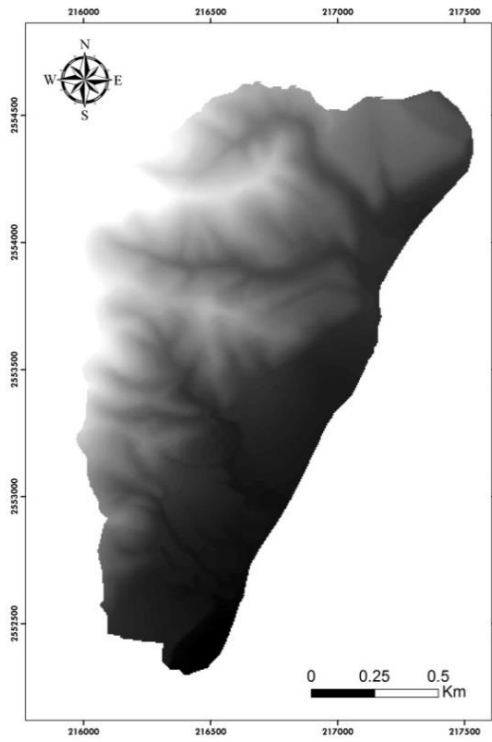


圖 5-4 災前 DEM

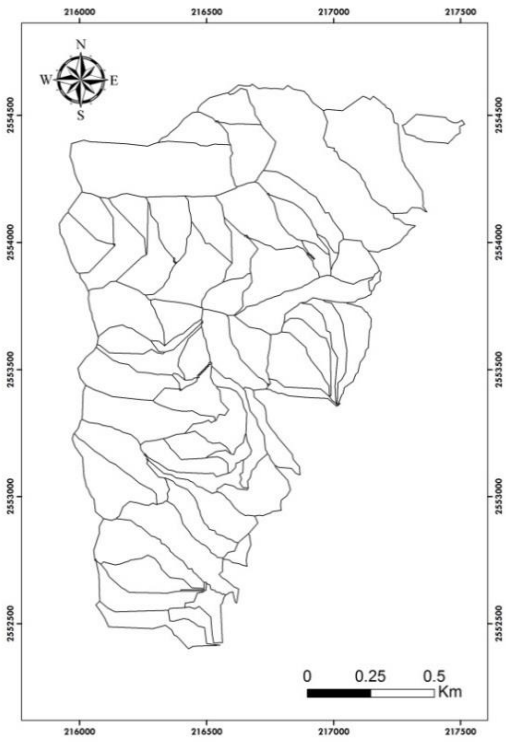


圖 5-5 600 格/1.5 公頃

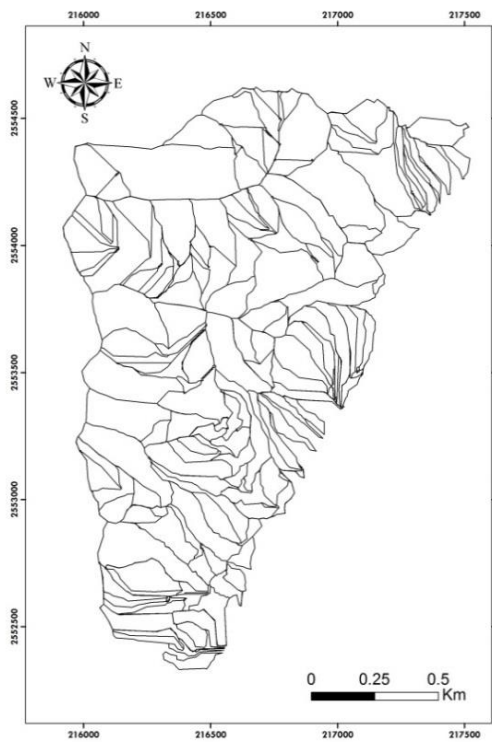


圖 5-6 200 格/0.5 公頃

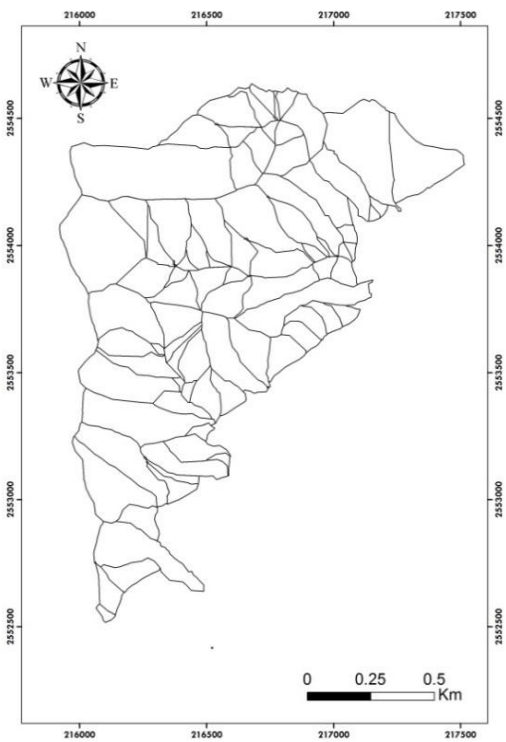


圖 5-7 坡面分析單元

彙整前述成果後，再決定每一分析單元之發生段、流動段及堆積段地形位置，劃分流程如圖 5-8 所示。其中，發生區決定原則為，1.分析單元上游區有 2 條 0.5 公頃溪流線交會處，視為隘口，隘口以上區域及劃定為發生區。若無則以 2.利用坡度圖沿著坡面陡-緩-陡之地形，找到等高線圖束縮處，設為隘口，隘口以上區域及劃定為發生區。而分析單元下游之地形開闊處以下，視為堆積區。介於隘口與堆積區之間，則為流動區。

分析單元之發生、流動及堆積等區之圈劃範例如圖 5-9 所示，彙整前述二程序之分析單元劃分成果如圖 5-10 與圖 5-11 所示。

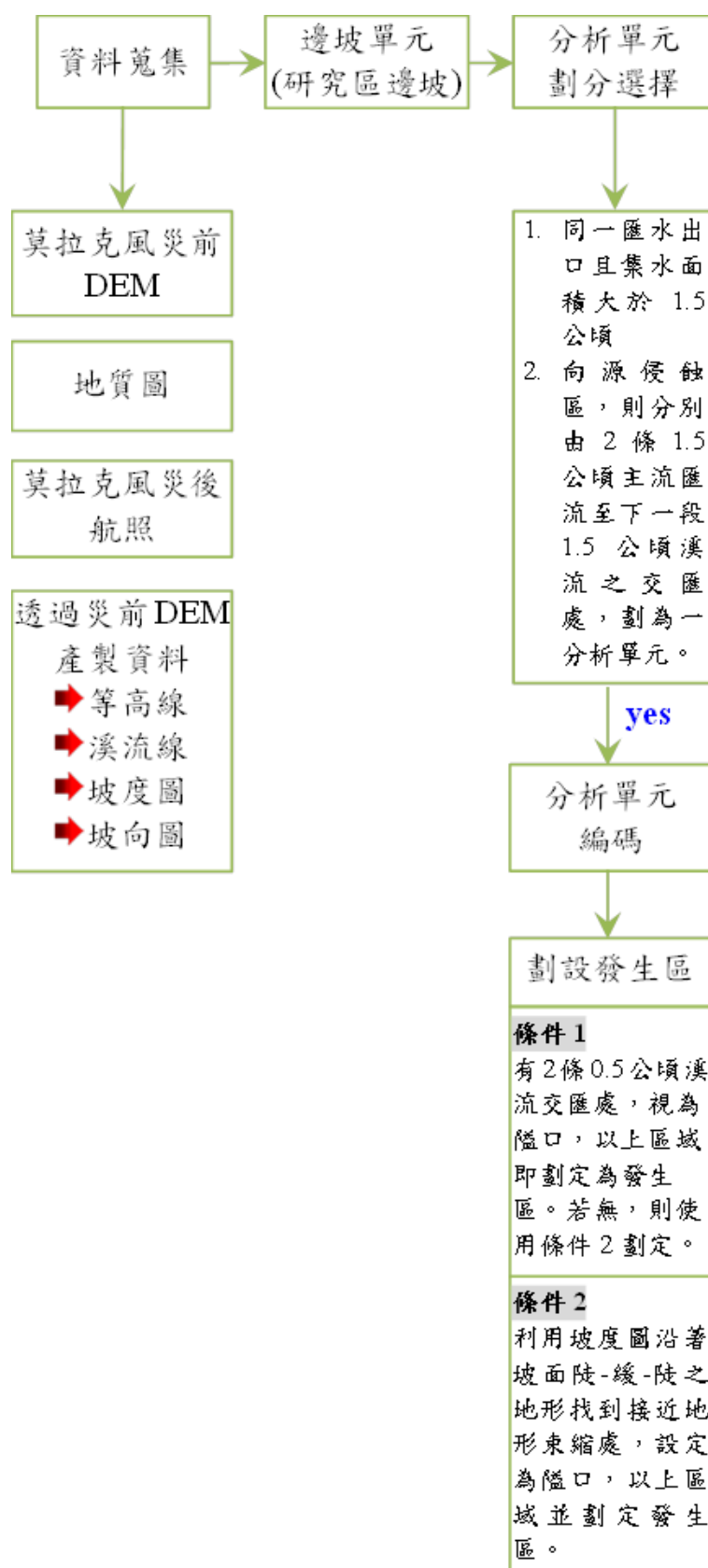


圖 5-8 分析單元發生區訂定程序

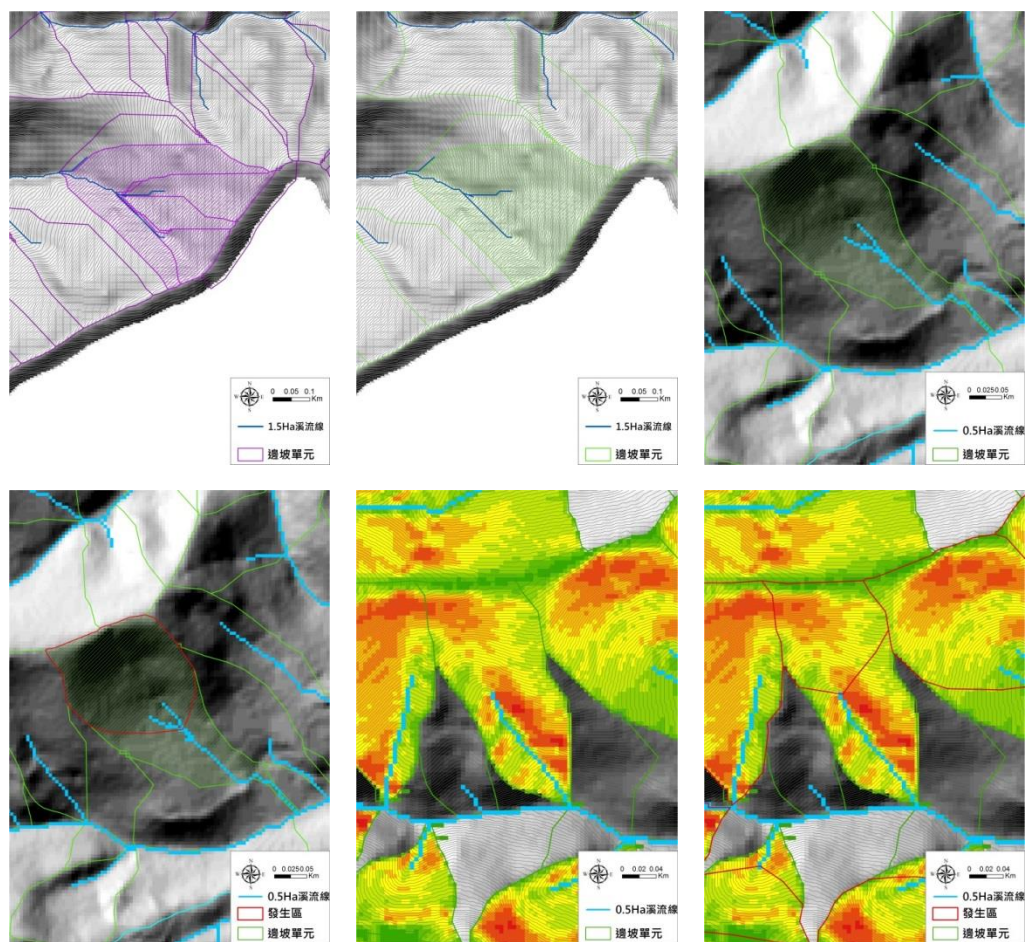


圖 5-9 分析單元圈劃範例圖

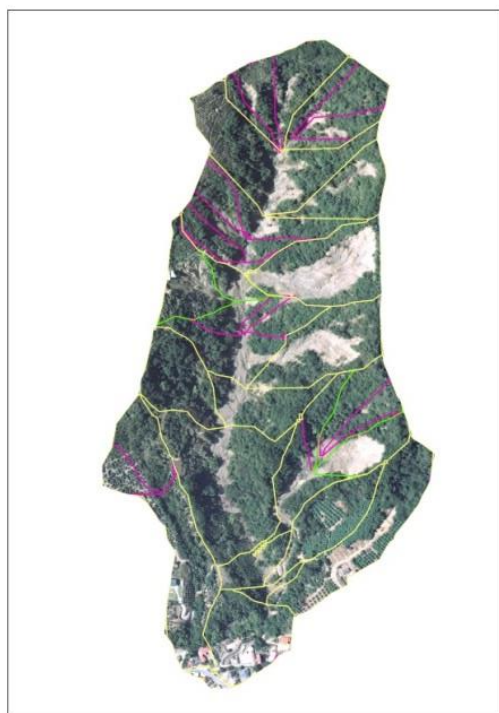


圖 5-10 圖層套疊後示意圖

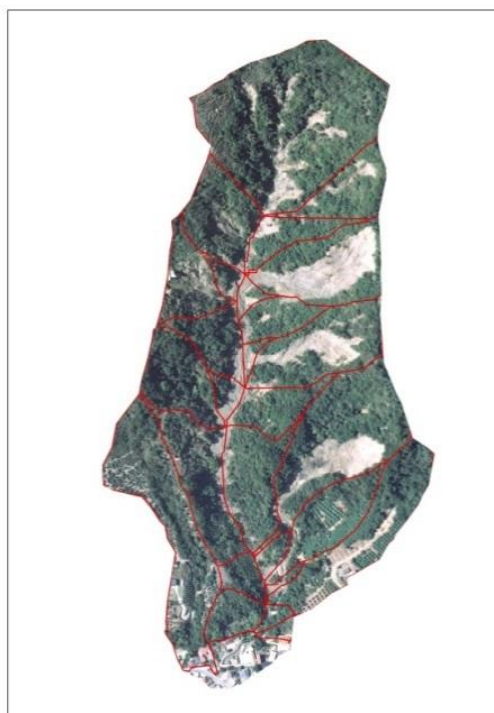


圖 5-11 實地之分析單元

### 第三節 研究區崩塌坡面分析單元圈繪成果

依據上節程序繼而進行研究區高雄市六龜區新發地區(A 區)、荖濃(C)及那瑪夏區達卡努瓦里(D 區)之分析單元劃分，成果如圖 5-12 至圖 5-14 所示。獲得分析單元數目共計為 286 筆。其中，發生坡面型土石流案例之分析單元(圖中紅色單元)，於 A 區有 6 處，B 區有 3 處，而 C 區則有 2 處，共計 11 處實際發生坡面型土石流事件。

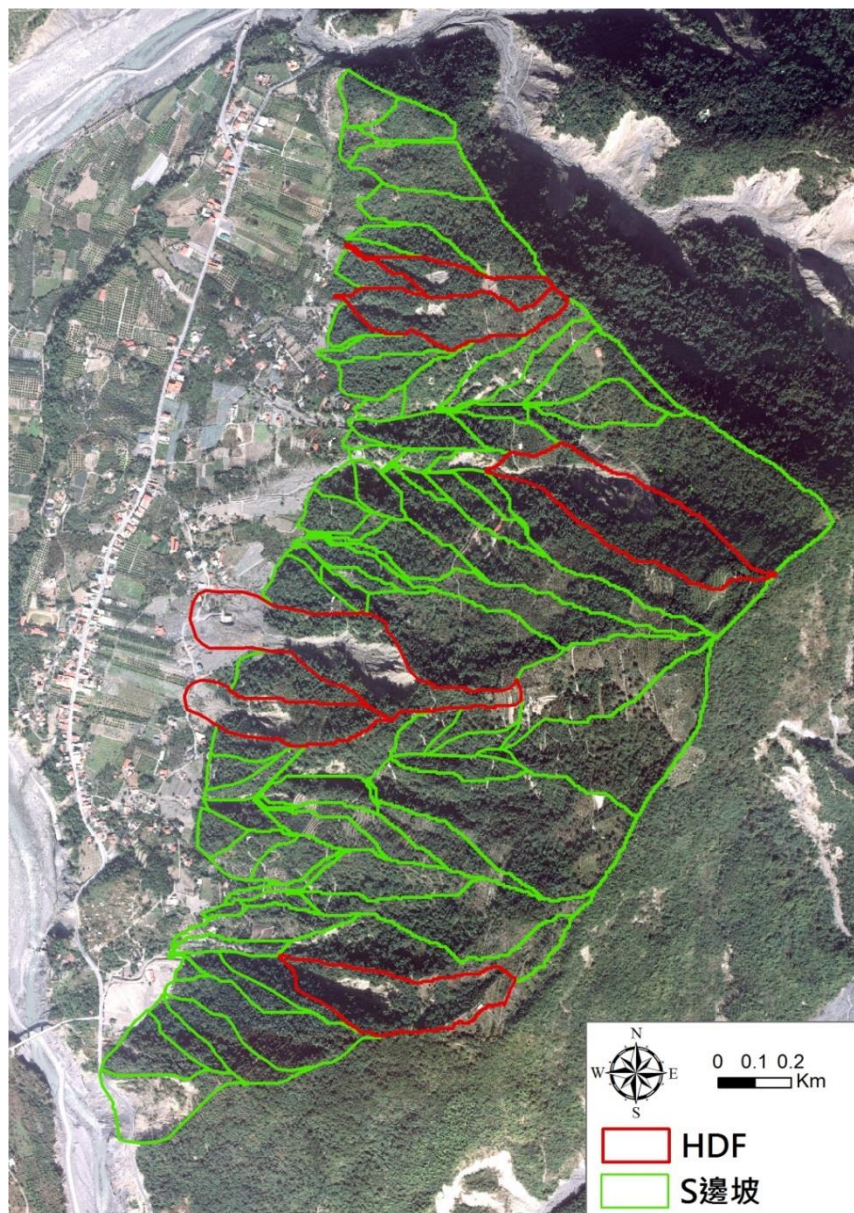


圖 5-12 A 區分析單元圈畫成果圖

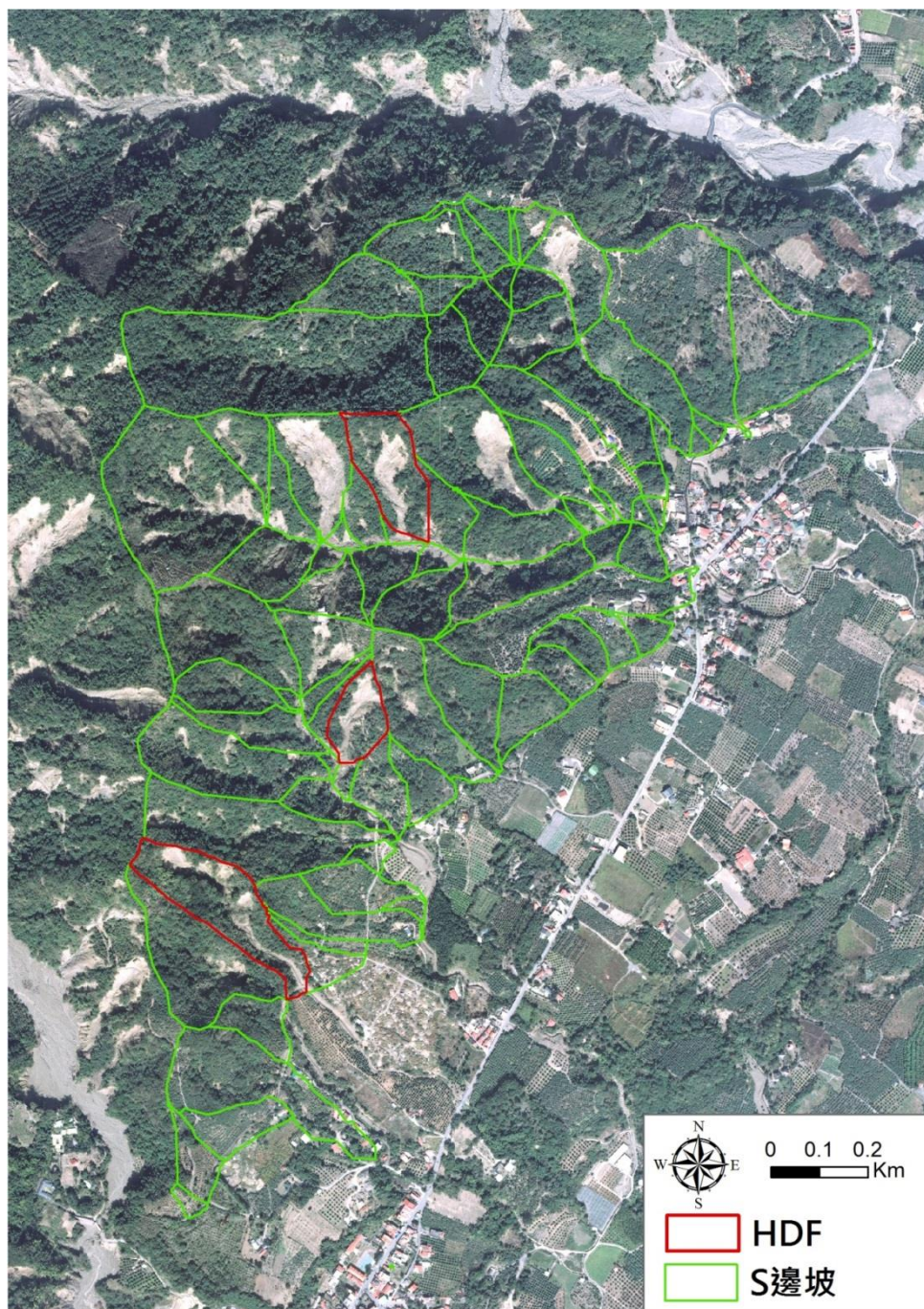


圖 5-13 C 區分析單元圈畫成果圖

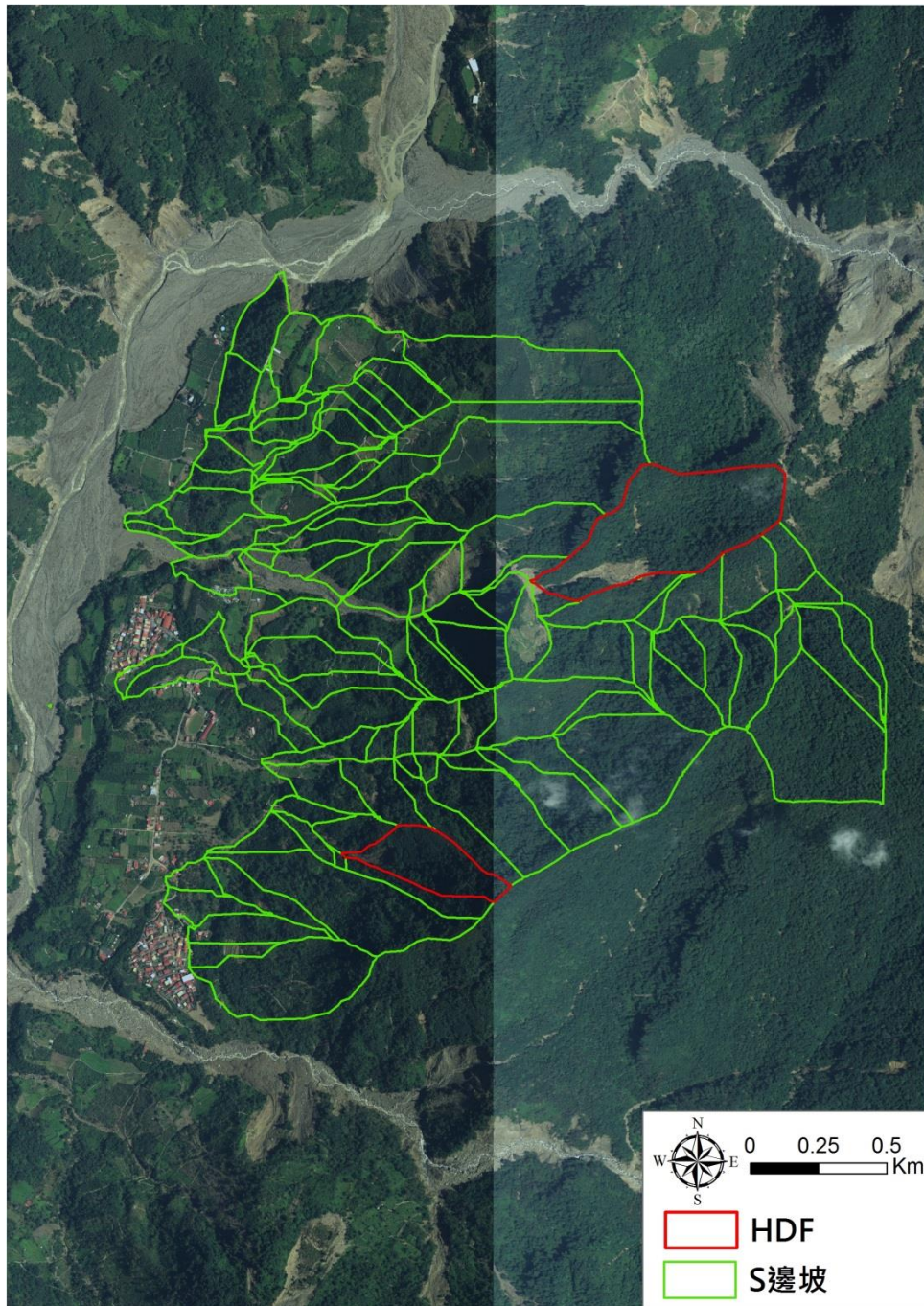


圖 5-14 D 區邊坡單元圈畫成果圖

## 第四節 研訂分析模式因子

研究資料庫首先建置野外土石流災害目錄，同時配合災前及災後遙測影像與數值高程模型（DEM）等，獲取土石流與崩塌地之地文、水文、類型、產狀、災害範圍等資訊，再於地理資訊系統平台加值產製各項判釋因子，其中坡面型土石流與崩塌坡面目錄各 30 處，共計 60 處災害目錄。其中 40 筆用於發展判釋模式，另 20 處作為模式測試之用。本文使用之相關圖資，包括：野外地形及產狀調查記錄、內政部第三版 1/25000 地形圖、流域地質圖幅、衛星影像及航空照片、莫拉克颱風崩塌圖層、以及災前數值高程模型等。

本研究分別考慮地形、集水區、水文等各項特性，經多方嘗試後挑選 20 項較適用於坡面型土石流之地文因子，因子如表 5-1 所示。下節將說明較重要因子之定義及產製方法。

表5-1 區別分析之各因子使用代號表

| 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   | WO   |
| 有效集水指標     | EWAI | 發生段深寬比    | HARO |
| 形狀係數比      | FR   | 發生區坡面平均坡度 | HASO |
| 集水區平均寬度    | W    | 發生區起伏比    | TRO  |
| 隘口高程比      | DHPR | 流動段長度     | LF   |
| 崩塌潛感面積     | LSA  | 流動段高程差    | DHF  |
| 崩塌潛感面積比    | RLSA | 流動段平均坡度   | ASF  |
| 集水區坡面平均坡度  | HASW | 流動段起伏比*   | TRF  |
| 發生區坡面平均坡度比 | HASR | 流動段深寬比    | HARF |
| 發生區形狀係數    | FO   | 崩塌潛勢指標    | q/T  |

## 一、地文、水文分析資料庫

本研究採用陳天健(2016)所建立之坡面型土石流潛勢判釋模式所需項因子建立因子資料庫。因子產製方法，模式因子說明如次。

### 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 5-15 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  $0.005\text{km}^2$  時，與現況吻合度最高。



圖 5-15 發生區圈畫示意圖(陳柏龍 2013)

### 3. 有效集水指標(EWAI)

有效集水指標為模式中代表匯水能力之影響因子，定義如式 5.1:

$$EWAI = \frac{EWA}{WA} \quad \text{式 5.1}$$

式中 EWA 為坡面型土石流發生區面積面積，WA 為分析單元面積。當有效集水指標越大，代表坡面型土石流發生區之匯水量對此集水區影響力越大；反之則較小。

### 4. 高程差

利用地理資訊系統(GIS)產製，分析單元最高點至土石流出流口之高程差。方法為由數值高程模型產製(DEM)取得兩點高程後相減，即可求得集水區高程差  $\Delta H_w$ 。

$$\Delta H_w = h_t - h_d \quad \text{式 5.2}$$

其中， $h_t$  為集水區最高點高程， $h_d$  為集水區出流口高程，詳如圖 5-16 所示，本研究亦應用上述概念，產製「流動段」高程差( $\Delta H_f$ )及「發生區」高程差( $\Delta H_o$ )。

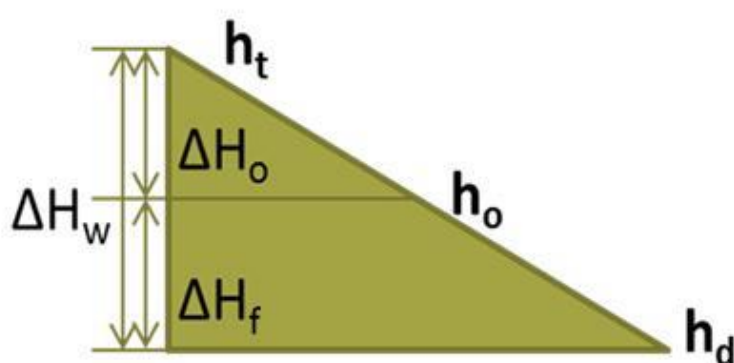


圖 5-16 分析單元高程差與隘口 ( $H_o$ 之位置) 高程差之示意圖

以隘口高程差除以集水區高程差，可得隘口高程比(式 5.3)，隘口高程比可間接表示發生區位於坡面縱剖面之區位，值越大則表示隘口接近坡趾，為大型崩塌，流動區短，較不易形成土石流，反之，其值越小，隘口位於坡腹至坡頂間，其流動距離長，較易形成土石流。其中， $\Delta H_w$  為集水區高程差(m)， $\Delta H_o$  為隘口高程差(m)。

$$\text{隘口高程比} = \frac{\Delta H_o}{\Delta H_w} \quad \text{式 5.3}$$

流動段長度地理資訊系統(GIS)中所直接測繪之河道長度為正射投影長度，所測繪之長度為投影之水平距離(L)，但其真實長度為斜距(L')，如圖 5-17 所示。本文利用式 5.4 求其較真實之流動段長度。其中， $L'_f$  為流動段長度之斜距(m)， $L_f$  為流動段長度之水平投影距離(m)， $\theta_f$  為流動段之平均坡度(°)。

$$L'_f = \frac{L_f}{\cos \theta_f} \quad \text{式 5.4}$$

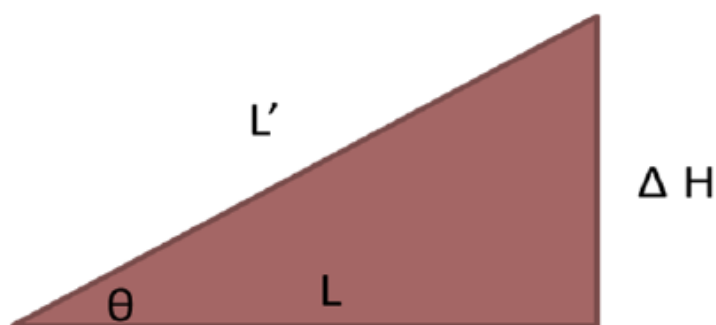


圖 5-17 流動段長度示意圖

應用上述概念，求取集水區之全長  $L'_w$ ，其中， $L'_w$  為集水區長度之斜距(m)， $L_w$  為集水區沿谷線量測之水平投影距離(m)，

$\Delta H_w$  為集水區高程差(m)，再經由式 5.5 取得發生區長度  $L_o'$ (m)。

$$L_o' = L_w' - L_f' \quad \text{式 5.5}$$

## 5. 流動段平均坡度

流動段平均坡度之求取方法，係利用地理資訊系統(GIS)查詢功能測得流動段長度及流動段高程差，再根據詹錢登(2000)之計算方式：

$$\text{流動段平均坡度} = \theta_f = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta H_f}{L_f}\right) \quad \text{式 5.6}$$

其中， $L_f$  為流動段長度之投影長度(m)，意即水平距離， $\Delta H_f$  為流動段高程差(m)。

## 6. 形狀係數

本研究所使用之集水區形狀係數修改自 Horton(1932)提出之形狀係數，將集水區之全長( $L_w'$ )取代主要河道長度(L)，利用地理資訊系統(GIS)產製之集水區面積(WA)與集水區之全長( $L_w'$ )後，即可代入式 5.7 計算集水區形狀係數  $F_w$ 。

$$F_w = \frac{WA}{L_w'^2} \quad \text{式 5.7}$$

發生區形狀係數( $F_o$ )與集水區形狀係數概念相似，土石流發生所需之主要三條件：水、材料、坡度，其中土石流發生區就包括了集水區中水與材料兩樣條件，可見發生區之重要性，因此發生區形狀係數更能表現出土石流之水量的提供變化，可視為發生區匯水量的一種指標。

$$F_o = \frac{EWA}{L_o'^2} \quad \text{式 5.8}$$

式中， $L_o'$  為發生區長度(隘口沿谷線至發生區頂端之斜距，可由式 5.8 取得)，EWA 為發生區面積。

形狀係數所代表的意義為單位主要河川長度之流域面積。因此若形狀係數較大，集水區外觀成寬圓形；反之，則呈狹長形，如圖 5-18 所示。

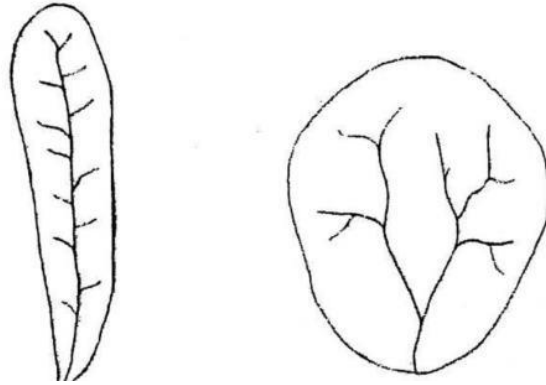


圖 5-18 集水區形狀，狹長形(左)及寬圓形(右)(何明憲，2003)

#### 7. 集水區平均寬度

利用地理資訊系統(GIS)產製之集水區面積(WA)與集水區之全長( $L_w'$ )後，即可代入式 5.9 計算集水區平均寬度。

$$W_o = \frac{WA}{L_w'} \quad \text{式 5.9}$$

發生區平均寬度( $W_o$ )產製亦同於上述方法，發生區為土石流發生之材料來源，其形狀因子更能表示該區土石材料產生情形，關係如下式：

$$W_o = \frac{EWA}{L_o'} \quad \text{式 5.10}$$

式中， $L_o'$  發生區長度(可由式 5.5 取得)，EWA 為發生區面積。

## 8. 坡面深寬比

為了瞭解整體分析單元集水區橫剖面變化情形，本研究將集水區分為兩個區位，分別產製發生區深寬比( $HAR_o$ )及流動段深寬比( $HAR_f$ )，以進一步探討整體集水區橫剖面變化與地形演化情形。本文採用日本國土技術政策總和研究所 (2007)溪谷地形之定義，利用兩萬五千分之一地形圖(圖 5-19)取集水區、發生區及流動段之最大寬度作為坡面寬  $a$ ，該平面之深度為坡面深  $b$ ，代入式 5.11 計算深寬比。

$$HAR = \frac{b}{a} \quad \text{式 5.11}$$

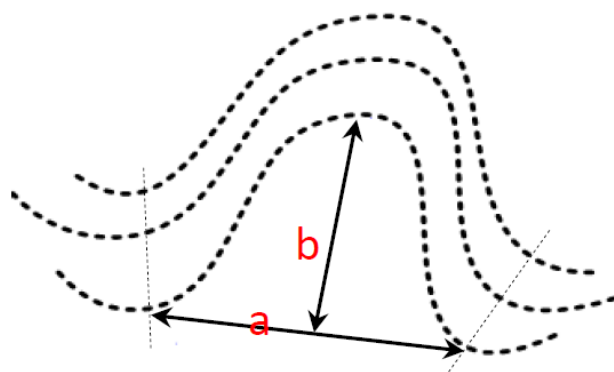


圖 5-19 溪谷地形之定義(日本國土技術政策總和研究所，2007)

## 9. 起伏比

為瞭解集水區縱剖面變化情形，本研究產製了發生區起伏比( $TR_o$ )、流動段起伏比( $TR_f$ )及集水區起伏比( $TR_w$ )，以探討整體集水區縱剖面變化情形。其利用 GIS 產製之高程差( $\Delta H$ )與水平距離( $L$ )後，即可代入式 5.12 計算起伏比。

$$TR_i = \frac{\Delta H}{\text{集水區之水平距離}} \quad \text{式 5.12}$$

## 10. 坡面平均坡度

為採 GIS 空間模組內的坡度分析(Spatial Analysis Slope)，配合集水區內之數值高程模型，計算出集水區坡面平均坡度，並應用此方法另計算發生區坡面平均坡度。

## 11. 崩塌潛勢指標

大多數土石流因崩塌液態化而轉變為土石流(Iverson et al., 1997)，材料來源除了流動過程掏刷底槽之外，主要為崩塌所提供，Campbell(1975)、Van Steijn(1988)、姚善文(2001)均提到，暴雨或颱風所帶來的降雨，造成邊坡土體孔隙壓力上升，進而誘發坡地型土石流發生。因此，降雨造成之淺層崩塌與土石流之發生潛勢息息相關。

## 二、SHALSTAB 模式介紹

一般廣域降雨促崩模式受限於資料精度與計算時間，故常假設為無限邊坡破壞模式，模擬豪雨所造成之岩屑崩滑型山崩(或稱淺層崩塌)。至於降雨的影響若直接以某一降雨量所提高之地下水位來表示，而不考慮降雨入滲歷程，則稱之為穩態模式(steady-state model)。由於影響地下水位變化之因素甚多，如何估計降雨所提高的地下水位是穩態模式最重要的關鍵。

一般有地下水位之無限邊坡 (如圖 5-20 所示)，其滑動安全係數可以下式表示：

$$FS = \frac{[(1-m)\gamma + m\gamma'] \cdot Z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi + c}{[(1-m)\gamma + m\gamma_s] \cdot Z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} \quad \text{式 5.13}$$

其中，Z 為覆土層厚度， $\theta$  為坡度， $m = h/Z$  為顯示地下水位高

之參數， $h_w$  為地下水面離滑動面的深度； $c$ 、 $\phi$  為邊坡材料之有效凝聚力與摩擦角； $\gamma$ 、 $\gamma_s$ 、 $\gamma'$  分別為邊坡材料之總體單位重、飽和單位重與有效單位重。Dietrich and Montgomery(1994, 1998)應用上述觀念，結合降雨-水文模式(Hydrologic Model)與無限邊坡之坡地穩定模式(Slope Stability Model)，提出廣域淺層崩塌分析模式 SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability)，主要應用於評估坡面穩定性，可用於預測發生淺層崩塌之區域。

在坡地穩定模式中，Dietrich & Montgomery (1994)以莫爾庫倫破壞準則(Mohr-Coulomb failure criterion)為基礎模式，利用無限邊坡法(Infinite Slope)進而推估之模式，其評估穩定性的方程式為：

$$\frac{h}{Z} = \frac{C}{\gamma_w \cdot Z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left[ \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right] \quad \text{式 5.14}$$

其中  $\theta$  為坡度， $\phi$  為土壤摩擦角， $C$  為土壤凝聚力， $\gamma_s$  土壤單位重， $\gamma_w$  為水單位重， $Z$  為土壤深度， $h$  為地下水位高度。而 Dietrich & Montgomery (1994)將土壤深度與地下水位高度的比值，稱為土壤濕度指數(soil wetness index)，此方程式中除了土壤飽和情況外，還需考慮坡度與摩擦角變化所造成的影響，來決定坡面穩定程度。

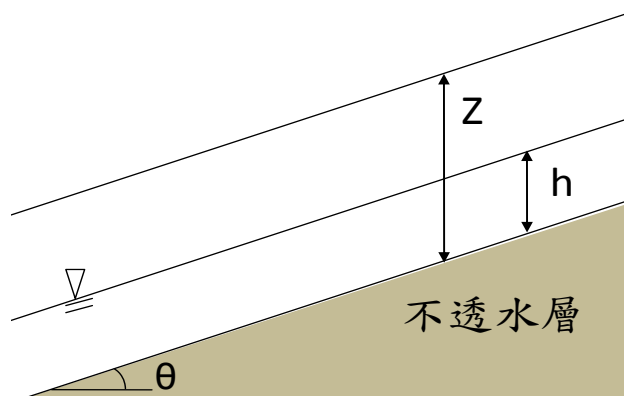


圖 5-20 邊坡土壤濕潤指數示意圖

在水文模式中，Dietrich & Montgomery (1994)利用穩態降雨為基礎，配合經過 O,Loughlin(1986)以 Beven and Kirkby(1979)發展之 TOPMODEL 模式改寫的 TOPOG 模式來運算，假設自然降雨與濕度空間分佈有關聯，配合達西定律將方程式代換為：

$$q \cdot a = k \cdot \sin\theta \cdot h \cdot \cos\theta \cdot b \quad \text{式 5.15}$$

此式所運用各單位如圖 5-21 所示，圖中  $a$  為上坡排水面積， $b$  為淺層排水寬度， $d$  為地表逕流深度， $e$  為蒸發散量， $h$  為破壞面以上水位， $p$  為降雨強度(其亦為式 5.15 之  $q$ )， $\theta$  為崩塌坡度， $r$  為深層排水量， $T$  為土壤傳輸係數， $Z$  為土壤厚度， $udb$  為飽和漫地流流量， $TMb$  為淺層地下滲流流量。

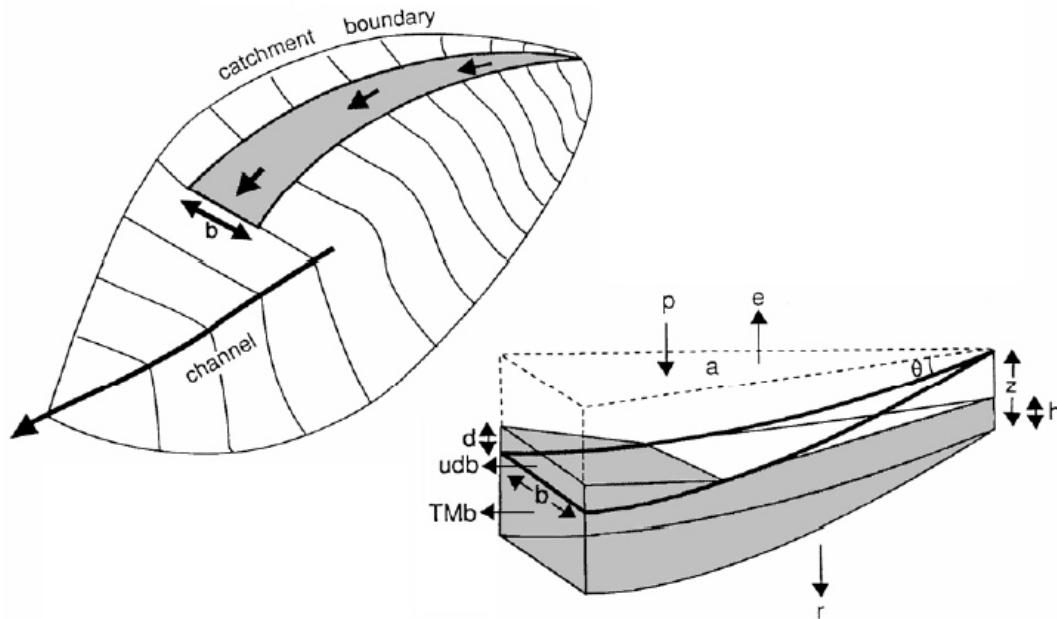


圖 5-21 穩態降雨水文模式各項參數示意圖(Dietrich & Montgomery , 1994)

在飽和土壤的淺層地表下之逕流，根據土壤的導水係數  $T$  與土壤深度  $z$  的關係，可將方程式改為下式：

$$T \cdot b \cdot \sin\theta = k \cdot \sin\theta \cdot h \cdot \cos\theta \cdot b \quad \text{式 5.16}$$

將式 5.15 與式 5.16 結合可得式 5.17。

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin\theta} \quad \text{式 5.17}$$

式 5.14 以土壤臨界強度考慮土壤中飽和的狀態；式 5.17 則考慮土壤中的飽和狀態以降雨在土壤中傳導，兩式同為推求土壤濕潤度，將兩式結合後可得式 5.18，最後此式為結合坡地穩定模式與水文模式之 SHALSTAB 模式。

$$\frac{q}{T} = \left\{ \frac{C}{\gamma_w \cdot Z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\psi} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left[ 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right] \right\} \left[ \frac{b \sin\theta}{a} \right] \quad \text{式 5.18}$$

#### (一) 定值參數之設定

SHALSTAB 模式設定中， $\gamma_s$  與  $\gamma_w$  採用， $\gamma_s=1800\text{kg/m}^3$ 、 $\gamma_w=1000\text{kg/m}^3$ ， $b$  值為數值高程模型(DEM)資料中每網格之單位寬度 5m，套疊地調所之地質圖，可查出 60 筆樣本於高屏溪流域，多位於潮州層，且主要以板岩及硬頁岩為主，少數為夾砂岩互層。本研究以陳柏龍(2013)整理近年學者對於板岩、硬頁岩之  $C$  值與  $\phi$  值，如表 5-2 及圖 5-22，選定林美聆等學者調查結果之  $C$  值 17.8kPa、 $\phi$  值 25 度，作為變質岩土壤地質之參數，沉積岩土壤地質參數如表 5-3，為前人研究南港層及鹽水坑等沉積岩地質之  $C$  值與  $\phi$  值平均參數，本研究使用之沉積岩土壤地質參數為  $C$  值 11.7kPa、 $\phi$  值 27.3 度。

表5-2 板岩、硬頁岩C值與 $\phi$ 值相關研究統整(陳柏龍，2013)

| 參數<br>分類        | C 值(kPa)  |         |          | $\phi$ 值(degree) |     |          |
|-----------------|-----------|---------|----------|------------------|-----|----------|
|                 | 表土堆<br>積層 | 風化<br>層 | 新鮮<br>岩盤 | 表土堆<br>積層        | 風化層 | 新鮮<br>岩盤 |
| 地質調查所<br>(1987) | 無         | 無       | 無        | 無                | 無   | 35       |
| 洪如江<br>(1993)   | 無         | 無       | 無        | 28               | 無   | 無        |
| 李明翰<br>(2003)   | 0.5       | 3       | 5        | 30               | 25  | 25       |
| 林美聆等<br>(2008)  | 59.8      | 17.8    | 5.9      | 30               | 25  | 32       |
| 王金山等<br>(2009)  | 30        | 90      | 111      | 30~35.2          |     | 29       |

表5-3 沉積岩C值與 $\phi$ 值相關研究統整

| 參數            | 地層及岩性             | C 值(kPa) | $\phi$ 值<br>(degree) |
|---------------|-------------------|----------|----------------------|
| 鍾欣翰<br>(2008) | M2 南港層<br>(砂岩及頁岩) | 無        | 無                    |
| 陳建新<br>(2011) | M3 南港層<br>(砂岩及頁岩) | 無        | 無                    |
| 陳建新<br>(2011) | Ysk 鹽水坑(頁岩)       | 3        | 25                   |
| 鍾明劍<br>(2011) | Ysk 鹽水坑(頁岩)       | 17.8     | 25                   |
| 陳建元<br>(2013) | 頁岩                | 90       |                      |
| Average       |                   | 11.7     | 27.3                 |

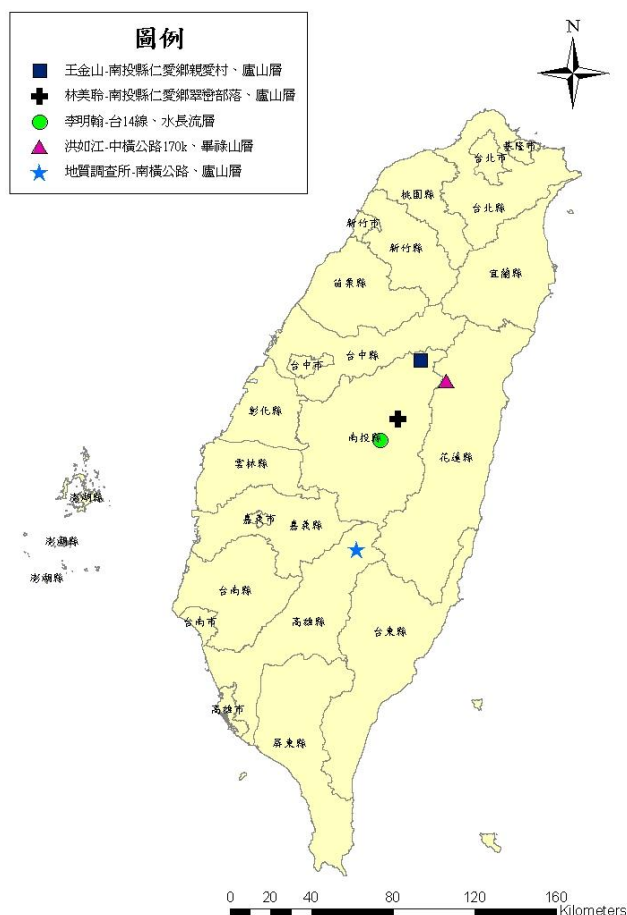


圖 5-22 板岩、硬頁岩相關研究之區域分佈(陳柏龍，2013)

## (二) 變值參數之設定

SHALSTAB 模式參數中， $a$  值與  $\theta$  值皆利用地理資訊系統求得。而參數  $Z$  值為土壤深度且在 SHALSTAB 模式中原本為定值，但考慮地下水除了在土壤層範圍以外，也會由裂隙進入到風化較為嚴重之岩層，此處才是崩塌發生時真實滑動面，而在整個集水區中土壤及高度風化層之深度因該有所變化並非定值，藉此本研究將  $Z$  值資料更改為滑動面可能之深度並且更改設定為變值。

為求取  $Z$  值在集水區之變化，本研究先將集水區邊坡類型依據水土保持技術規範(2003)第三十一條以坡面與岩

層之不連續面位態關係分為：

1. 順向坡：

凡坡面與層面走向大致平行(或兩面走向之交角在二十度內)，且坡面傾向與層面傾向一致者。

2. 逆向坡：

凡坡面與層面走向大致平行(或兩面走向之交角在二十度內)，且坡面傾向與層面傾向相反者。

3. 斜交坡：

凡坡面與層面之走向交角大於 20 度以上者。而斜交坡依照坡面與岩層位態傾向之交角可再細分為兩種不同邊坡類型：

A 順斜坡：凡坡面與層面之走向交角大於 20 度以上者，坡面與層面之傾向交角大於 20 度到 90 度之間稱為順斜坡

B 逆斜坡：凡坡面與層面之走向交角大於 20 度以上者，坡面與層面之傾向交角大於 90 度到 160 度之間稱為逆斜坡。

本研究將邊坡類型依上述分為順向坡、逆向坡、順斜坡、逆斜坡四種如圖 5-23 所示。以現有 30 處坡面型土石流主崩塌之數值高程模型，建置最大崩塌深度，將四種邊坡類型以集水區平均坡度與最大崩塌深度，分別建立坡度與深度關係如圖 5-24a、5-24b、5-24c 及 5-24d 所示。利用四種邊坡類型之 Z 值公式計算集水區內每一網格內 Z 值作為輸入參數資料。

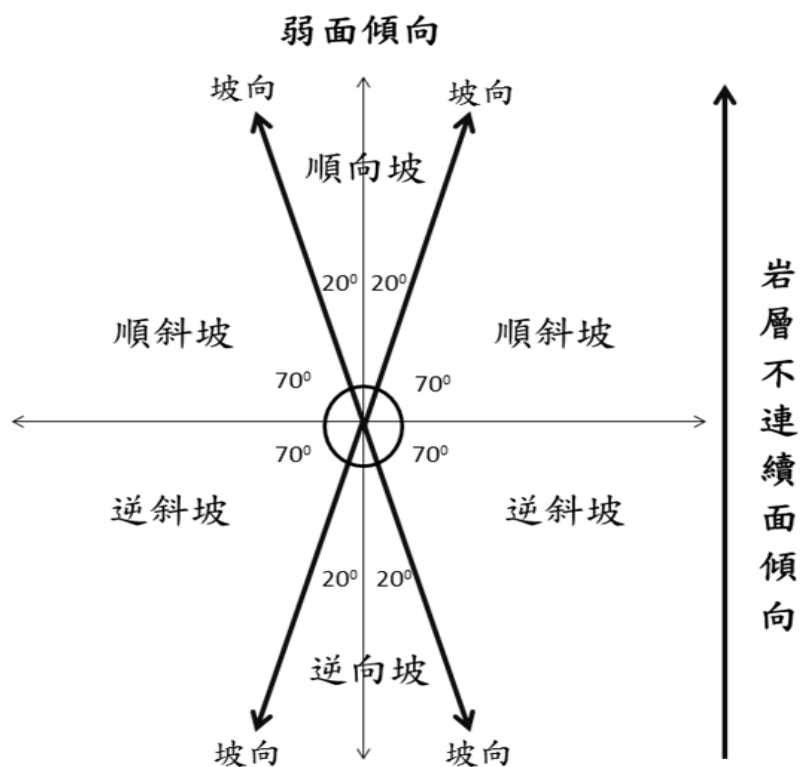


圖 5-23 坡面與層面交角區分邊坡類型示意圖(陳柏龍，2013)

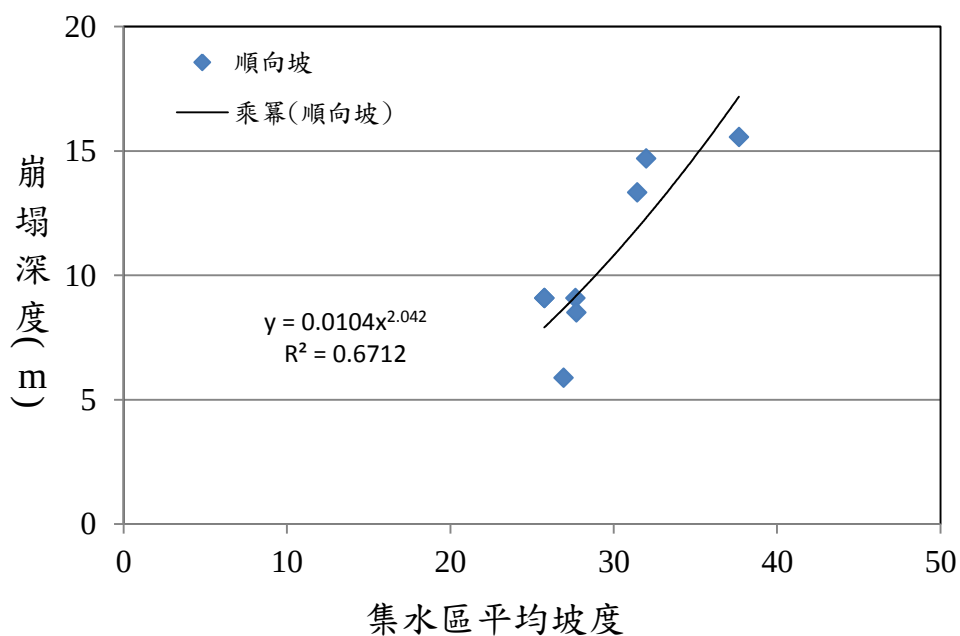


圖 5-24a 順向坡之集水區平均坡度與崩塌深度

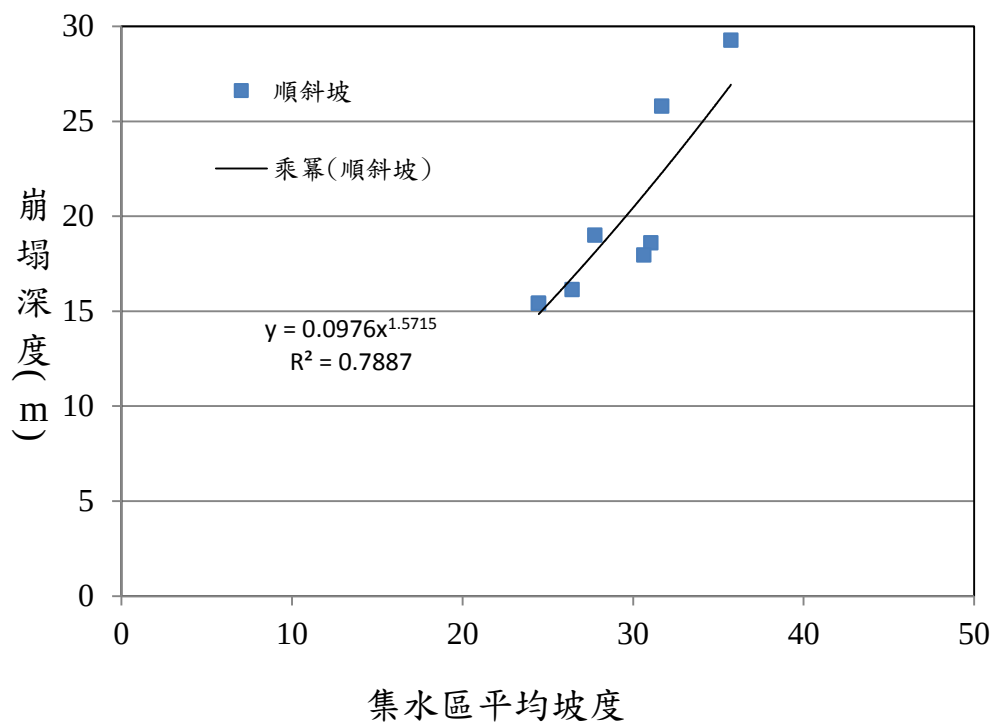


圖 5.24b 順斜坡之集水區平均坡度與崩塌深度

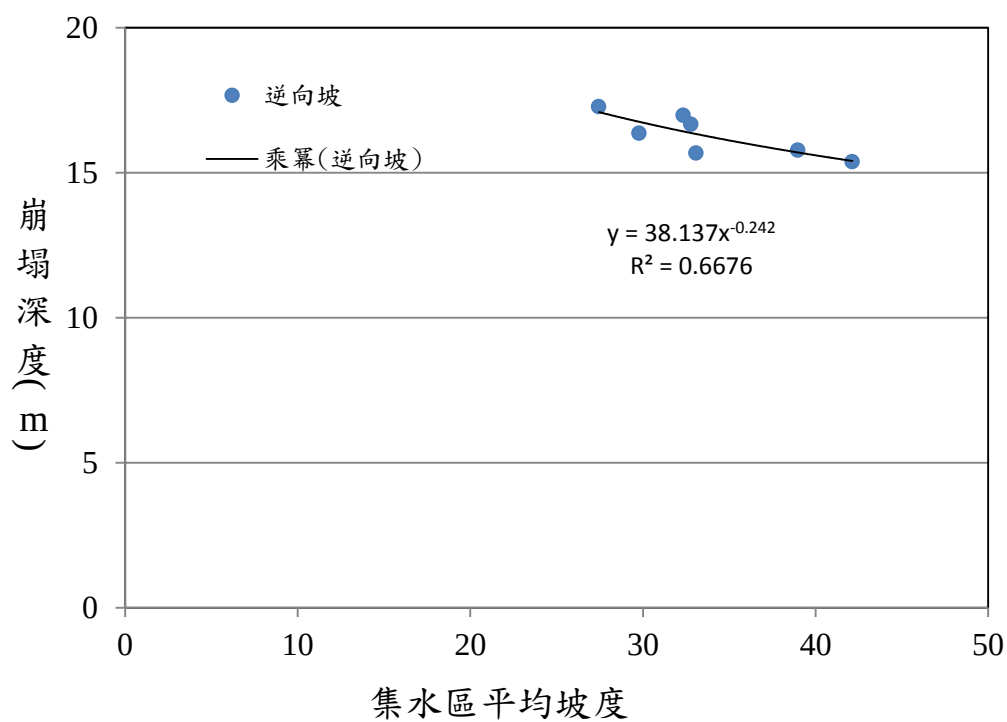


圖 5-24c 逆向坡之集水區平均坡度與崩塌深度

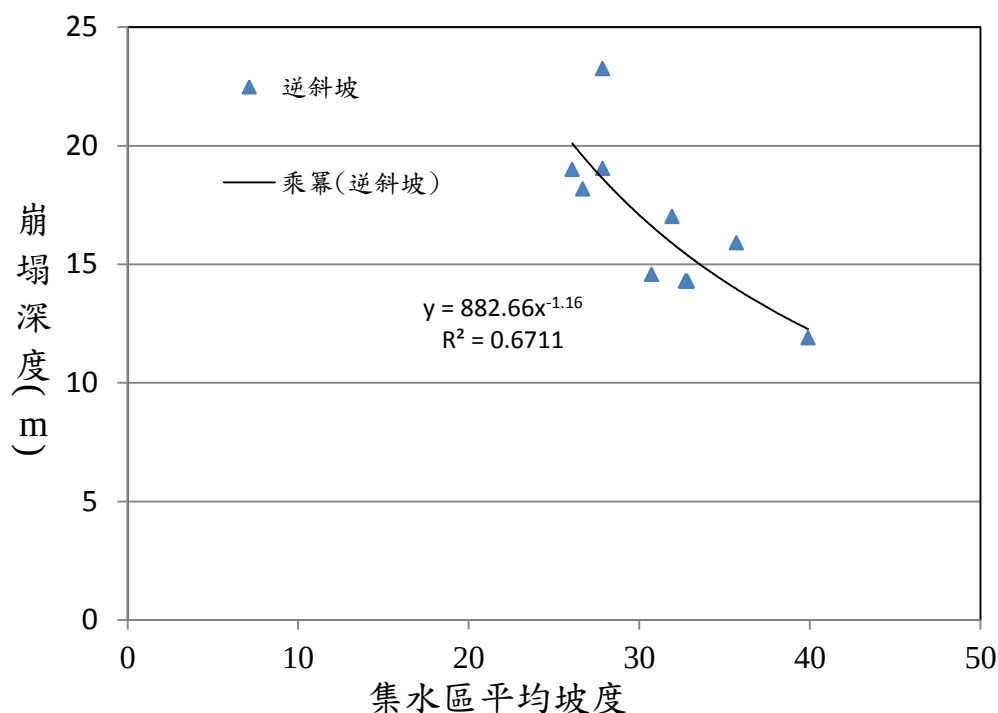


圖 5-24d 逆斜坡之集水區平均坡度與崩塌深度

SHALSTAB 模式分析後可得每網格之  $q/T$  值， $q/T$  值大於 0 為坡面較穩定； $q/T$  值小於 0 則為坡面較不穩定，不穩定之區域為可能崩塌處，可視為土石流材料之預測。SHALSTAB 模式結果如圖 5-25a 及 5-25b 所示，套疊災後航照後發現不穩定區域多落於河道(越靠近下游，集水面積  $a$  值越大)。

利用 GIS 比對坡面型土石流之主崩塌圖層中之  $q/T$  值分布，人工比對後發現崩塌多分佈於  $q/T$  值於 -0.75 至 -2 之間，因此，本研究計算此區間佔不穩定區域之面積百分比，稱為  $q/T$  值面積百分比，作為特性因子之一加入區別分析。



圖 5-25a 莫拉克颱風災後航照(立體圖)

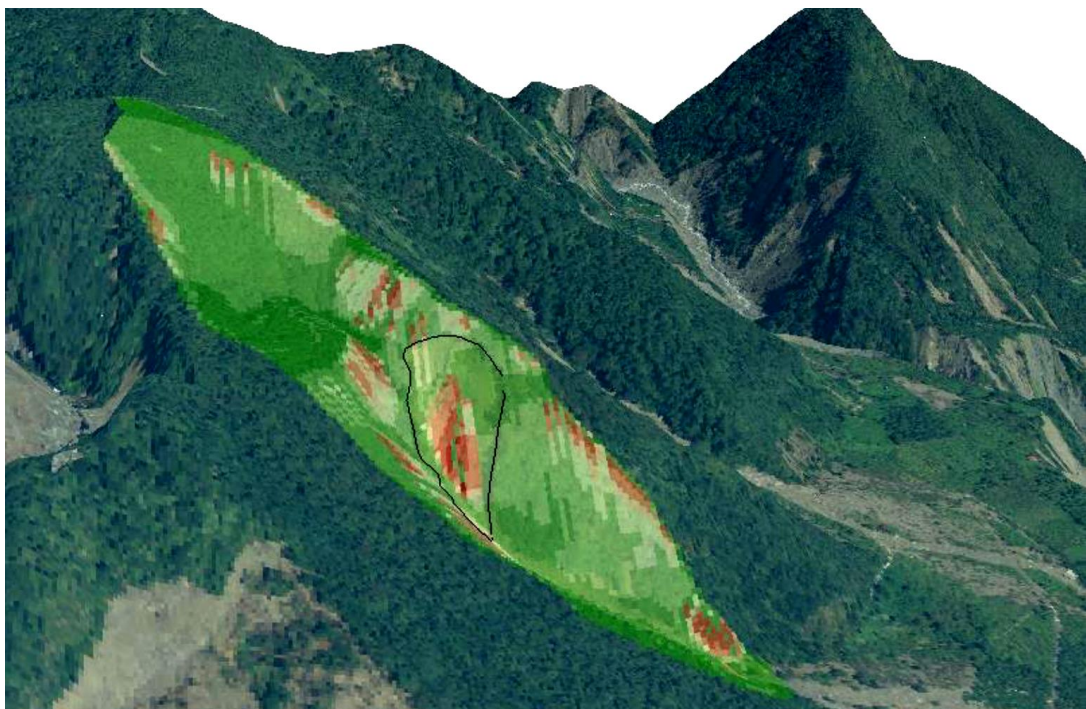


圖 5-25b SHALSTAB 模式分析結果套疊災後航照(立體圖)



## 第六章 崩塌/坡面型土石流判釋準則

本研究採用費雪區別分析法(Fisher's discriminant method)建立坡面型土石流判定模式。彙總前節所建置特性因子，再加入淺層崩塌預測模式結果，共 20 項因子進行區別分析，進一步觀察土石流材料因子對於區別分析之正判率影響，取得最佳判定之 7 項地文因子，建立坡面型土石流判釋模式。最後再圈選出 20 個實際案例驗證模式效力。

### 第一節 判釋模式

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，兩個群組各選定 30 筆觀測資料，共 60 個樣本，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，此時坡面型土石流潛勢分析模式中之判別因子至多為 12 個，因此，選定地文因子及淺層崩塌因子共 20 項因子為預測變數進行區別分析(將資料輸入 SPSS 時使用代號如表 6-1 所示)。

首先將 20 個判別因子放入，觀察正判率之變化，類似因子之間選擇判釋率較差之因子逐一剔除，僅剩一個因子代表同一類因子，最後再嘗試刪減至以最少因子時其正判率最佳之組合，其剔除過程如表 6-2。

表6-1 區別分析之各因子使用代號

| 特性因子      | 使用代號 | 特性因子    | 使用代號 |
|-----------|------|---------|------|
| 集水區面積     | WA   | 有效集水指標  | EWAI |
| 發生區凹陷程度   | HARO | 流動段深寬比  | HARF |
| 隘口高程比     | DHPR | 流動段高程差  | DHF  |
| 發生區起伏比    | TRO  | 流動段起伏比  | TRF  |
| 發生區形狀係數   | FO   | 形狀係數比   | FR   |
| 集水區平均寬度   | W    | 發生區平均寬度 | WO   |
| 流動段平均坡度   | ASF  | 流動段長度   | LF   |
| 崩塌潛感面積    | LSA  | 崩塌潛感面積比 | RLSA |
| 集水區坡面平均坡度 | HASW | 坡面平均坡度比 | HASR |
| 發生區坡面平均坡度 | HASO | q/T 百分比 | QT   |

表6-2 區別分析使用因子組合與過程

| 使用因子組合                                                                          | 正判率   |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| WA+EWAI+DHF+DHPR+ASF+LF+FO+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT | 86.7% |
| EWAI+DHF+DHPR+ASF+LF+FO+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT    | 86.8% |
| EWAI+DHPR+ASF+LF+FO+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT        | 86.7% |
| EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT           | 86.7% |
| EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT             | 90.0% |
| EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT                  | 86.7% |
| EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT                      | 88.3% |
| EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+RLSA+QT                                | 83.3% |
| EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+QT                                     | 86.7% |
| EWAI+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+QT                                          | 88.3% |
| EWAI+ASF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+QT                                             | 90.0% |
| EWAI+ASF+FR+WO+HARF+HASR+LSA                                                    | 87.5% |

20 項特性因子資料輸入 SPSS 進行區別分析程序，並逐一剔除觀察正判率之變化選出正判率最佳之組合，可得標準化之區別函數(式 6.1)：

本文逐一篩選及剔除因子觀察正判率之變化結果。最後獲得 7 項因子之模式，正判率最佳之組合達 87.5%。此 7 項因子之區別函數如下：

$$y=0.099X_1+0.858X_2-0.261X_3-1.272X_4-0.157X_5+1.009X_6+0.952X_7 \quad \text{式 6.1}$$

其中， $y$  為區別函數， $X_1$  為形狀係數比， $X_2$  為坡面平均坡度比， $X_3$  為有效集水指標， $X_4$  為發生區平均寬度， $X_5$  為流動段平均坡度， $X_6$  為流動段深寬比， $X_7$  為崩塌潛感面積。若區別函數值  $y$  大於 0，判定為坡面型土石流；

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，即：有效集水指標、發生區平均寬度、流動段平均坡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：形狀係數比、坡面平均坡度比、流動段深寬比、崩塌潛感面積。若區別函數值  $y$  大於 0，判定為坡面型土石流；當區別函數值  $y$  小於 0，則判定為未發生土石流。區別分析之判定結果如表 6-3 所示，整體正判率為 87.5%，其中各項影響因子經相關性檢定(表 6-4)後，為中低度相關，代表各項因子彼此之間不會互相影響為獨立因子。

表6-3 區別分析結果

| 結果呈現                                            | 原始  | 預測  |     | 總和  |
|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                                 | 類別  | HDF | NDF |     |
| 個數                                              | HDF | 18  | 2   | 20  |
|                                                 | NDF | 3   | 17  | 20  |
| 百分比(%)                                          | HDF | 90  | 10  | 100 |
|                                                 | NDF | 15  | 85  | 100 |
| 整體正判率 = $(18+17)/(20+20) \times 100\% = 87.5\%$ |     |     |     |     |

表6-4 區別因子之相關性檢定結果

| 相關矩陣 | FR    | HASR  | EWAI  | WO    | ASF   | HARF  | LAS   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FR   | 1.000 | .155  | -.087 | .518  | -.095 | .273  | .116  |
| HASR | .155  | 1.000 | -.234 | .010  | .202  | -.068 | -.313 |
| EWAI | -.087 | -.234 | 1.000 | .275  | -.083 | -.165 | .545  |
| WO   | .518  | .010  | .275  | 1.000 | -.355 | .394  | .540  |
| ASF  | -.095 | .202  | -.083 | -.355 | 1.000 | -.442 | -.038 |
| HARF | .273  | -.068 | -.165 | .394  | -.442 | 1.000 | -.125 |
| LAS  | .116  | -.313 | .545  | .540  | -.038 | -.125 | 1.000 |

圖 6-1 為發生坡面型土石流及未發生土石流區別函數之分佈情況，x 軸為區別函數，y 軸分別為資料數佔全資料之百分比。坡面型土石流之函數值分佈於-1.12~4.47 之間；而未發生土石流之函數值分佈於-3.74~0.9 之間。

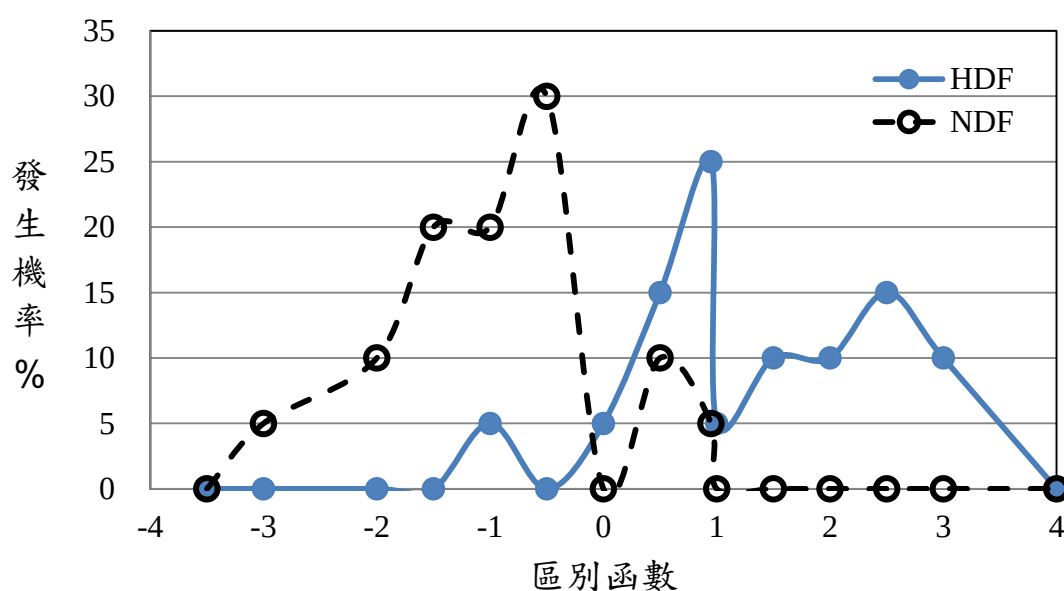


圖 6-1 坡面型土石流與未發生土石流之區別函數分佈圖

測試各因子對於正判率之影響，統計區別函數各因子之係數絕對值，如圖 6-2 所示，材料因子(HASR, LSA)、地形因子(HARF, ASF)、水文因子(EWAI, FR, WO)，其中材料因子對於正判率影響最為大，代表崩塌之預測，對於判別坡面型土石流之發生極為重要。

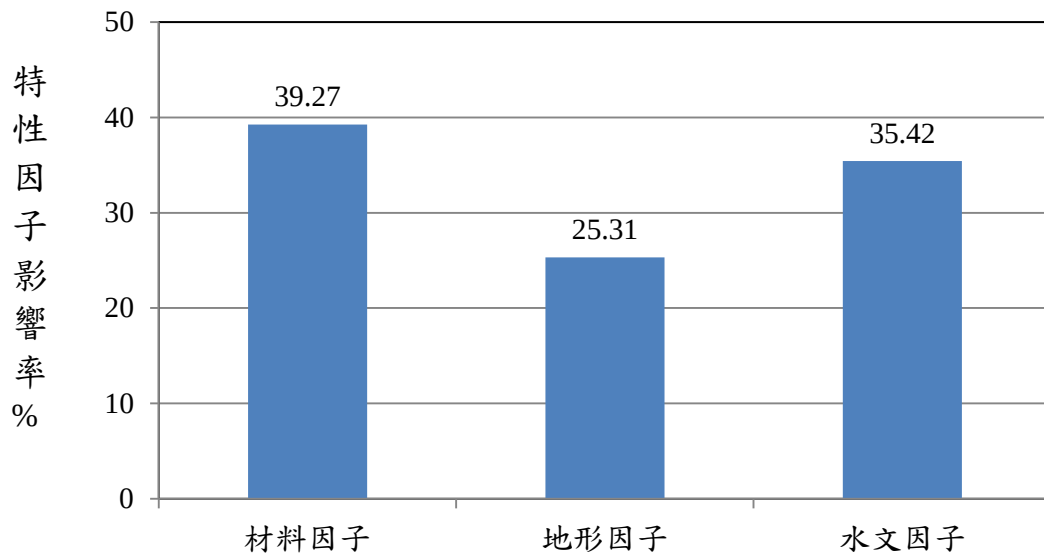


圖 6-2 土石流發生三大條件之特性因子影響率

## 第二節 區別分析判定模式驗證

區別分析不只停留在描述各類組間變異上的關係，還能夠對未知所屬之類組加以區別分類，故本研究之驗證組以區別函數進行分類，藉以驗證本研究之潛勢模式可行性。驗證樣本為選自同一研究試區(高屏溪流域)，母體樣本附近之坡面型土石流與未發生土石流之坡面集水區各 10 筆資料，點位分佈如表 6-5 示。

表6-5 坡面型土石流與未發生土石流之驗證點位

| HDF 驗證 | 鄉鎮  | 村里  | NDF 驗證 | 鄉鎮   | 村里  |
|--------|-----|-----|--------|------|-----|
| H31    | 六龜區 | 新發里 | N31    | 六龜區  | 中興里 |
| H32    | 六龜區 | 建山里 | N32    | 六龜區  | 中興里 |
| H33    | 六龜區 | 建山里 | N33    | 六龜區  | 中興里 |
| H34    | 六龜區 | 新發里 | N34    | 六龜區  | 新發里 |
| H35    | 六龜區 | 新發里 | N35    | 六龜區  | 新發里 |
| H36    | 六龜區 | 新發里 | N36    | 六龜區  | 新發里 |
| H37    | 六龜區 | 新發里 | N37    | 甲仙區  | 關山里 |
| H38    | 六龜區 | 新發里 | N38    | 阿里山鄉 | 新美村 |
| H39    | 茂林區 | 多納里 | N39    | 桃源區  | 梅山里 |
| H40    | 桃源區 | 復興里 | N40    | 桃源區  | 梅蘭里 |

依前節之特性因子產製方法，產製 20 筆驗證點位之 7 項區別因子資料(形狀係數比、坡面平均坡度比、有效集水指標、發生區平均寬度、流動段平均坡度、流動段深寬比、及崩塌潛感面積)，代入式 5.19，得到驗證結果，如表 6-6 所示，可看出判別情況良好，計算各點位驗證所得到之 Y 值，統計其判別率為 80%，由此可知，此坡面型土石流潛勢判定模式可有效判別出高屏溪流域坡面之可能發生坡面型土石流之機率。

表6-6 驗證區區別分析結果

| 結果呈現                                          | 原始  | 預測  |     | 總和  |
|-----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                               | 類別  | HDF | NDF |     |
| 個數                                            | HDF | 7   | 3   | 10  |
|                                               | NDF | 1   | 9   | 10  |
| 百分比(%)                                        | HDF | 71  | 30  | 100 |
|                                               | NDF | 10  | 90  | 100 |
| 整體正判率 = $(7+9)/(10+10) \times 100\% = 80.0\%$ |     |     |     |     |

### 第三節 研究區坡面型土石流判釋成果

進一步應用前節判釋模式進行三研究區聚落周緣坡面單元判釋分析。結果顯示 A 邊坡單元判釋結果（圖 6-3）坡面型土石流實際發生 6 筆，捕捉 6 筆；崩塌單元實際發生 14 筆，捕捉 11 筆，整體捕捉率 85%，如表 6-7 所示。C 邊坡單元判釋結果（圖 6-4）坡面型土石流實際發生 3 筆，捕捉 2 筆；崩塌單元實際發生 30 筆，捕捉 20 筆，整體捕捉率 67%，如表 6-7 所示。D 邊坡單元判釋結果（圖 6-5）坡面型土石流實際發生 2 筆，捕捉 0 筆；崩塌單元實際發生 14 筆，捕捉 14 筆，整體捕捉率 88%，如表 6-7 所示。整體共計 11 處坡面型土石流單元，正確捕捉數量為 8 處，捕捉率約為 73%。而崩塌單元之捕捉率則為 88.5%。

表6-7 分析單元判釋成果及捕捉率

| 研究區       | A    |     | C   |     | D   |     |
|-----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 類型        | HDF  | NDF | HDF | NDF | HDF | NDF |
| 實際發生      | 6    | 14  | 3   | 30  | 2   | 14  |
| 捕捉        | 6    | 11  | 2   | 20  | 0   | 14  |
| 捕捉率       | 85%  |     | 67% |     | 88% |     |
| HDF 事件捕捉率 | 100% |     | 67% |     | 0%  |     |

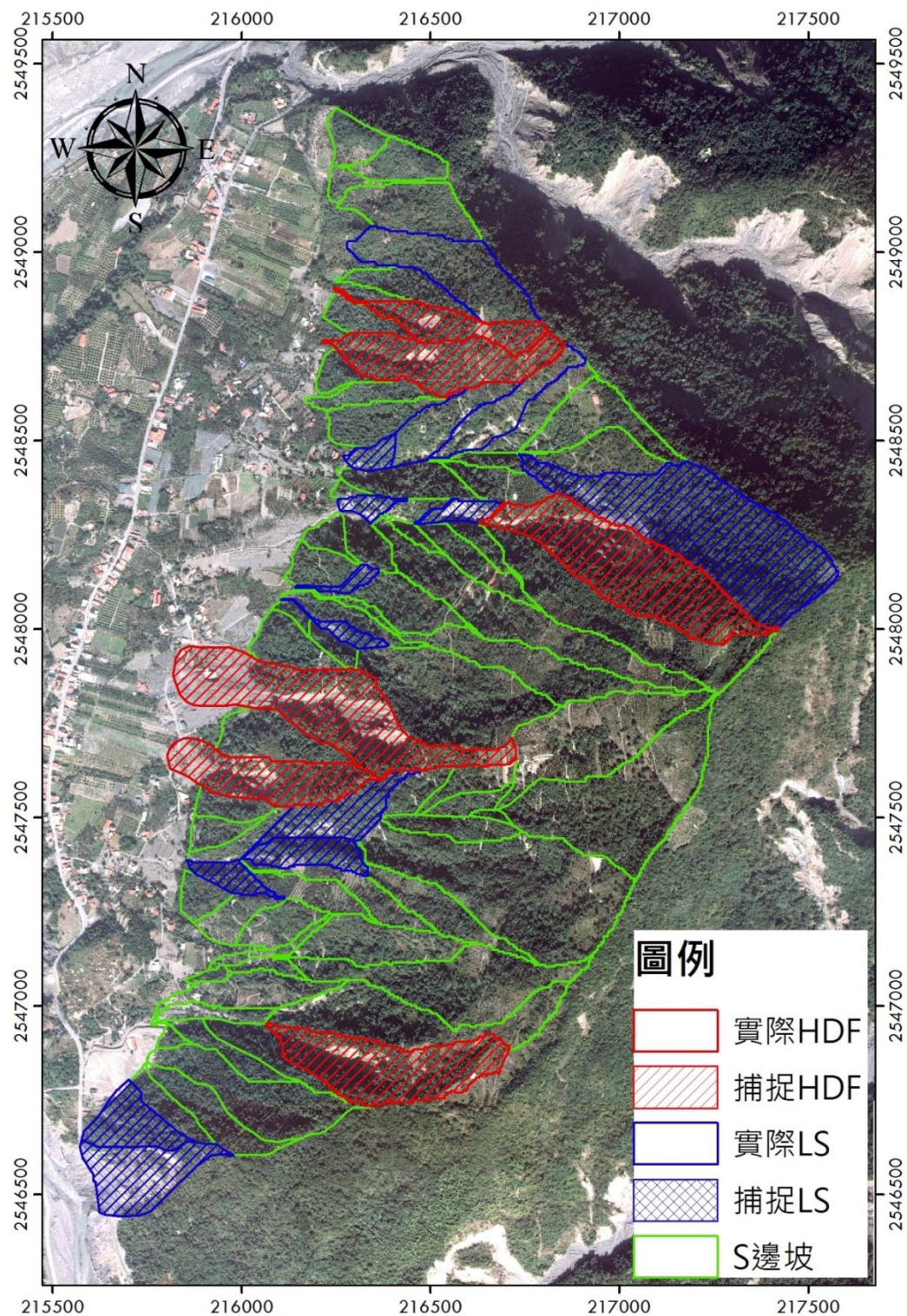


圖 6-3 A 邊坡單元判釋結果

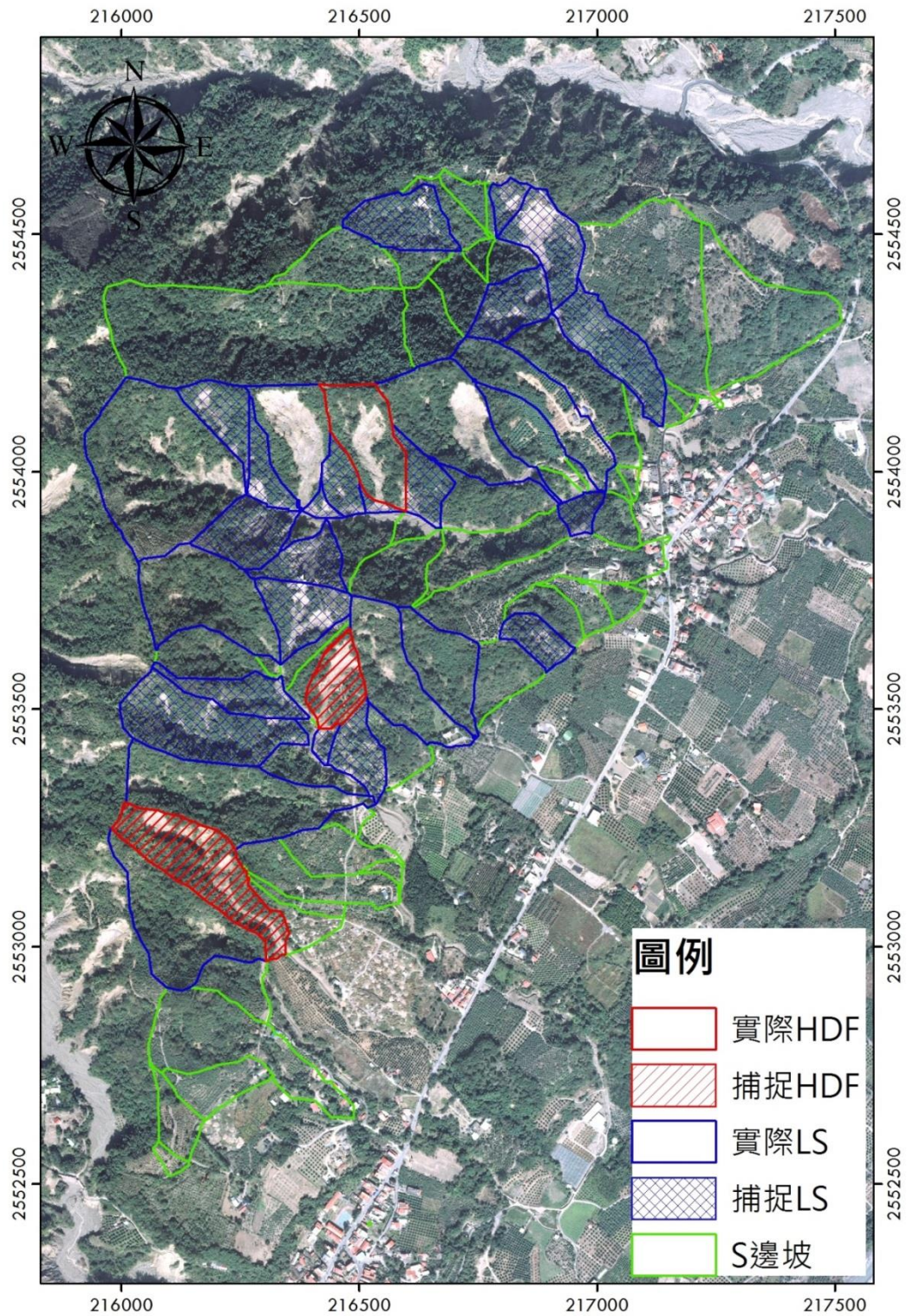


圖 6-4 C 邊坡單元判釋結果

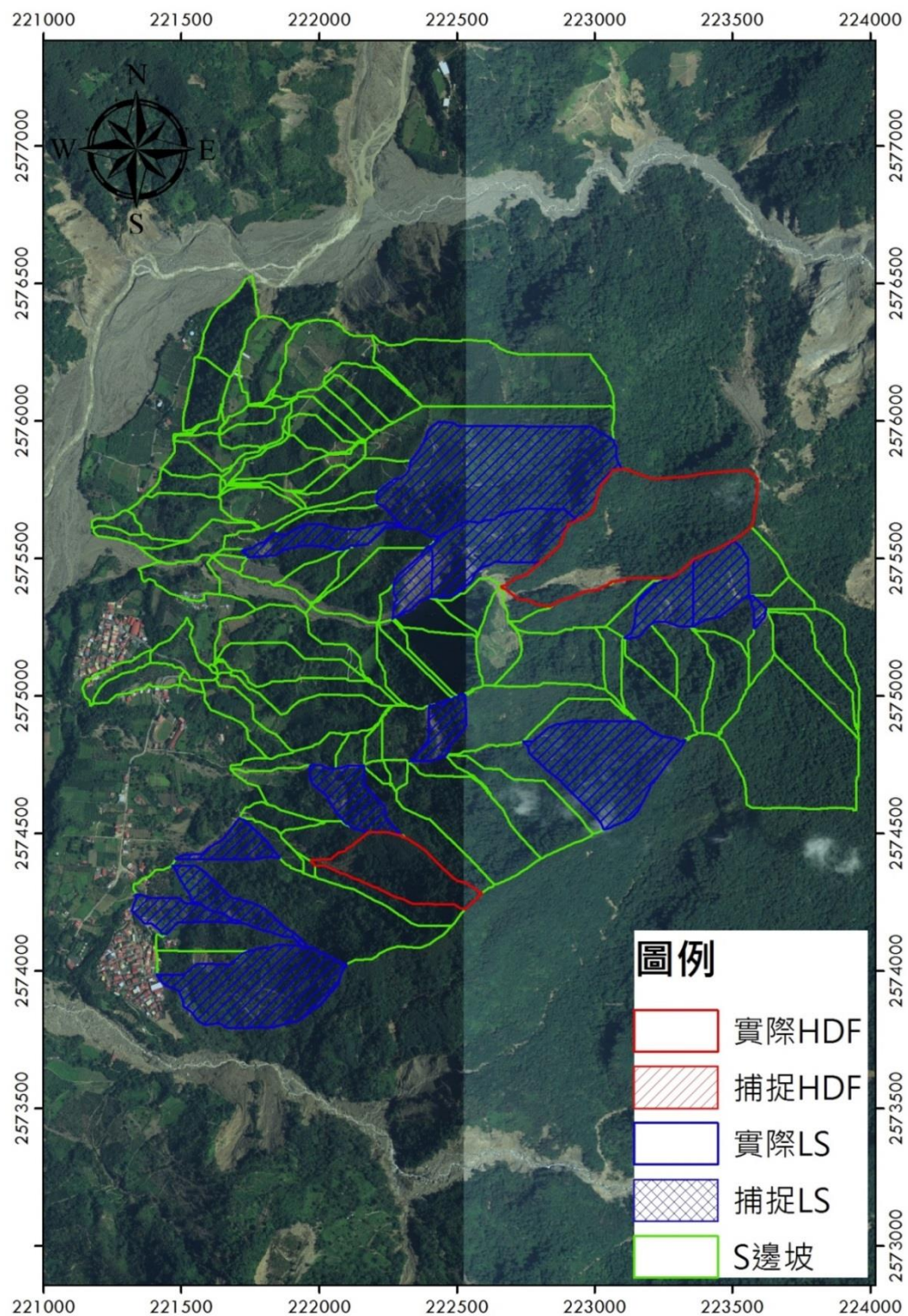


圖 6-5 D 邊坡單元判釋結果

## 第七章 坡面型土石流潛勢分級模式

本章進一步依照區別分析結果之區別函數值，擬定坡面型土石流潛勢分級模式。

### 第一節 潛勢分級模式

本研究首先建立坡面型土石流潛勢分析模式，而後再應用至研究區中，進行個單元之土石流潛勢分級評估。坡面型土石流潛勢分級之方法，為將函數值分佈曲線累積百分比分成三份，其分別為低中與高潛勢。潛勢分級圖如圖 7-1 所示，其中橫座標代表區別函數值之區間，實線代表區間內發生機率，當機率依序累加後可得累積積率百分比曲線為虛線，將此曲線面積分成三等份，以指標 0 與 0.95 為分界，當區別函數值小於 0 時屬於低潛勢區，區別函數值落於 0 到 0.95 之間為中潛勢區，區別函數值大於 0.95 為高潛勢區。坡面型土石流及未發生土石流之坡面各 30 筆，資料潛勢分級結果如圖 7-2 所示。

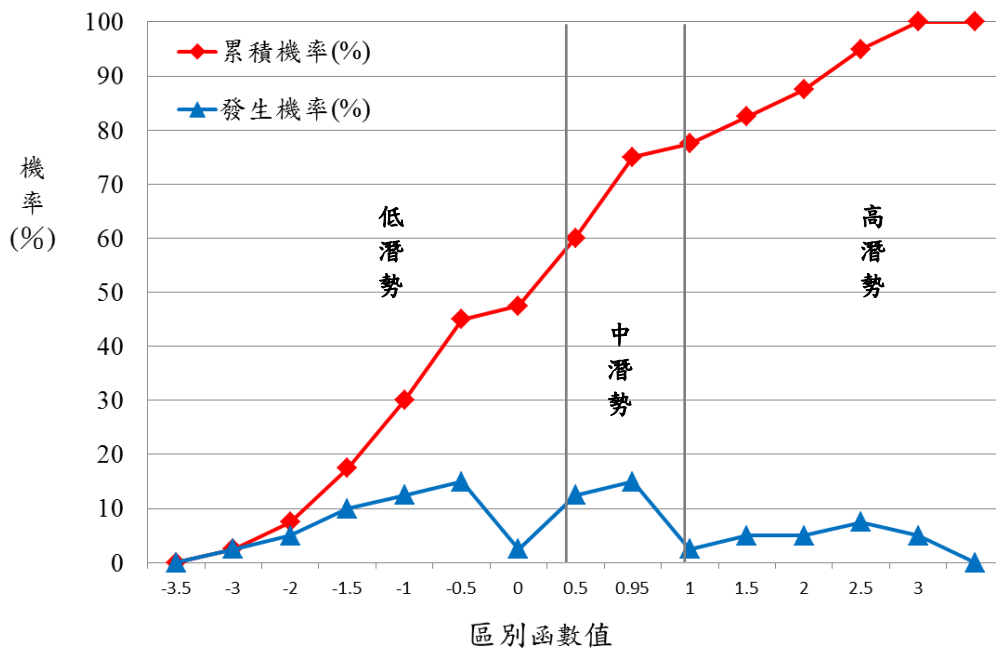


圖 7-1 分界指標 0 與 0.95 之潛勢分級結果

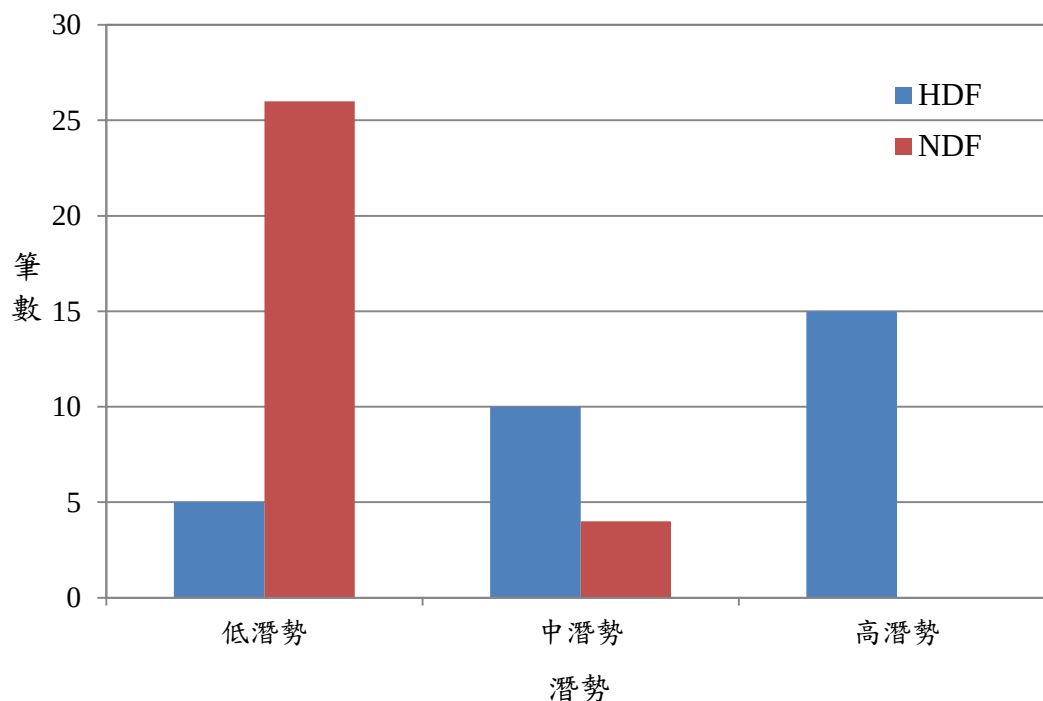


圖 7-2 坡面型土石流潛勢分級示意圖

## 第二節 坡面型土石流潛勢評估成果

各區坡面型土石流潛勢分級示意如圖 7-3、圖 7-4 及圖 7-5 所示。其中，11 處坡面型土石流單元中，高中低三潛勢分為 3、5、3 處。另就判釋評估結果統計如圖 7.6 所示，A 區有 8 筆、C 區有 11 筆、D 區有 26 筆；中潛勢中 A 區有 17 筆、C 區有 7 筆、D 區有 2 筆；高潛勢中 A 區有 8 筆、C 區有 10 筆、D 區 0 筆。整體而言，潛勢分級成果與各分析單元發生坡面型土石流或崩塌之趨勢相近。同時由此分級結果，可視為中潛勢以上即可能發生坡面型土石流。

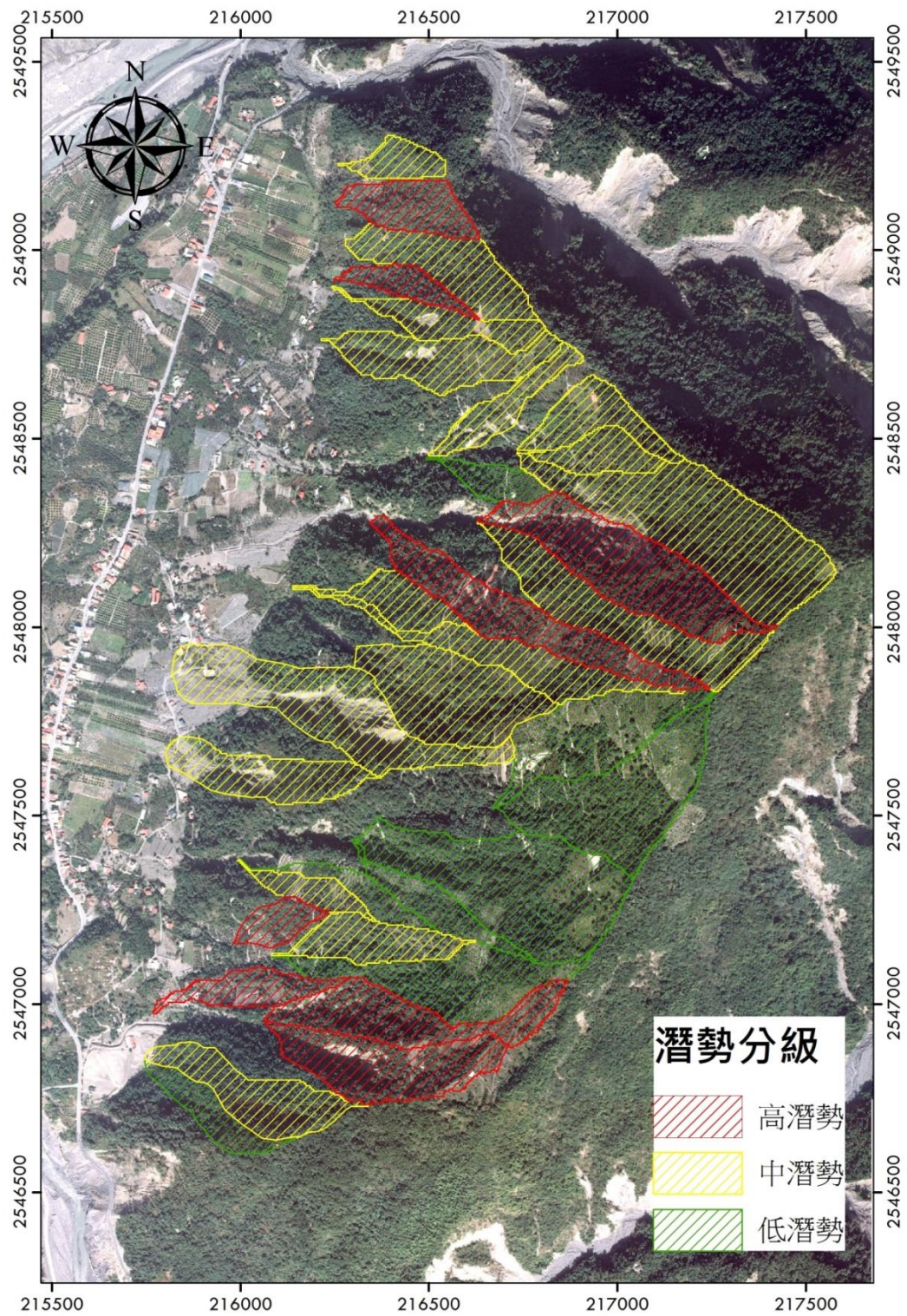


圖 7-3 集水區 A 之潛勢分析結果

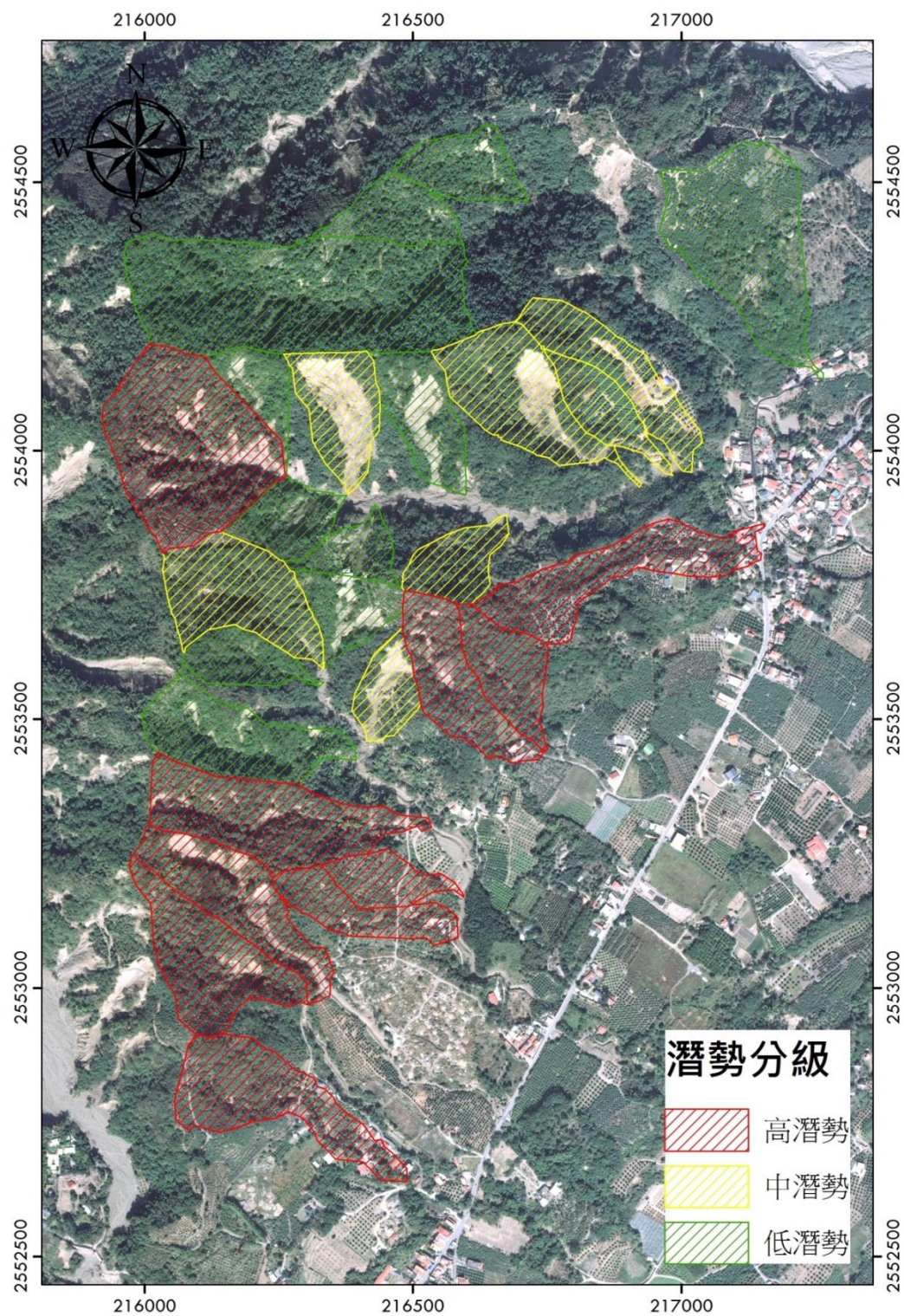


圖 7-4 集水區 C 之潛勢分析結果

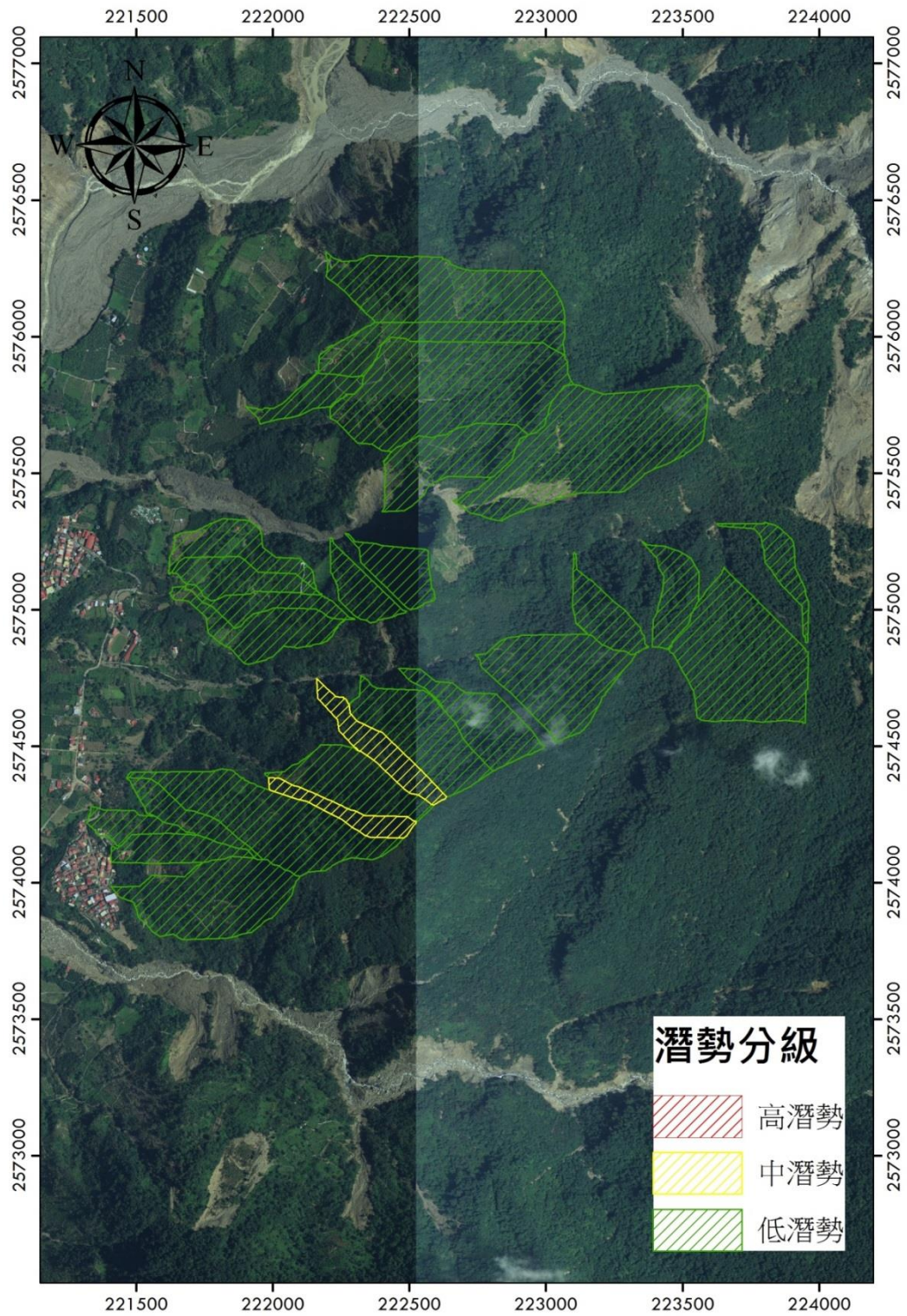


圖 7-5 集水區 D 之潛勢分析結果

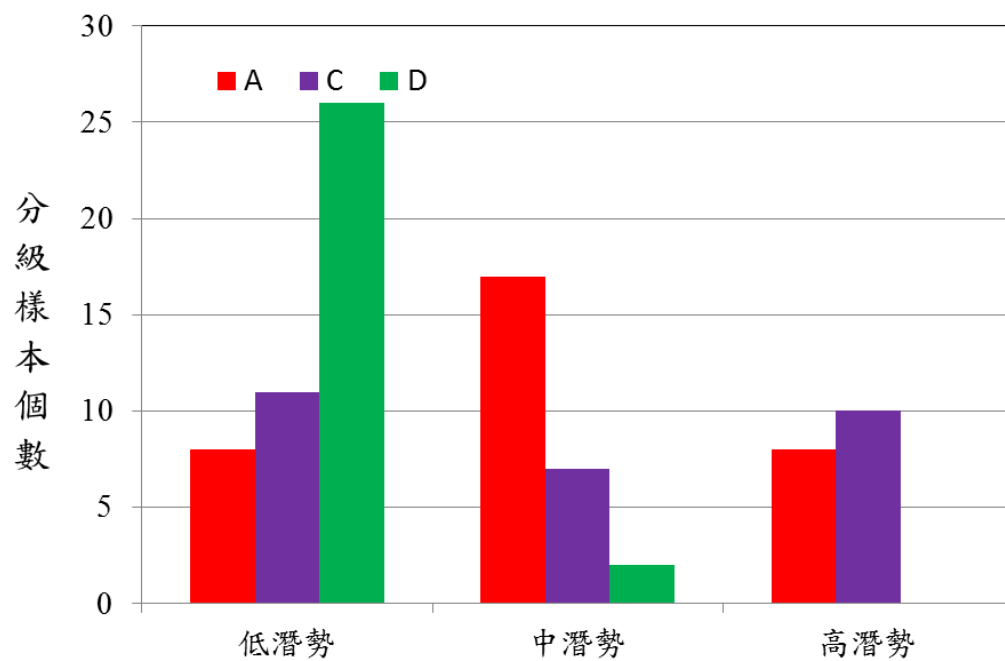


圖 7-6 三聚落周緣山坡地之坡面型土石流潛勢分級統計圖

## 第八章 結論與建議

### 第一節 結論

本研究以坡面型土石流為研究對象，依據土石流三樣條件適當坡度(地形因子)、充分的水量(水文因子)及足夠之土砂量(材料因子)，挑選出 20 項特性因子建立資料庫，以區別分析建置坡面型土石流潛勢判定模式，並進行驗證，也完成坡面型土石流潛勢評估模式，並進行驗證。並將模式應用於 3 研究區進行測試，結果良好。其綜整結果如下：

1. 本研究收集本研究收集高屏溪流域 2009 年莫拉克颱風豪雨引致之坡面型土石流案例 40 處，崩塌事件 40 處。同時建置 19 項因子分析資料庫。
2. 本研究以「崩塌坡面單元」概念，作為判釋分析之單元。歷經多種原則與方法之嘗試，目前已完成分析單元劃分模式，應用性優良。
3. 本文完成 7 項因子之坡面型土石流判釋模式，獲得正判率達 87.5%，土石流單元判釋成效優良。其應用至三研究區時，亦可達到不錯捕抓率。
4. 本研究完成坡面型土石流潛勢評估模式，並將得到之結果應用於三研究區進行土石流潛勢分級，成果可提供致災坡面之危險程度評估之參酌。
5. 綜合研究成果顯示，坡面型土石流之邊坡單元，災前即已具有初期沖蝕發育地形，因此本文發展出量化判釋方法，提供作為評估山坡發生坡面型土石流事件之潛能，希冀能早期掌握土石流危險區域，降低災害之衝擊。

## 第二節 建議

1. 本研究主要應用崩塌坡面單元概念，針對高屏溪流域內荖濃里（晚中新世沉積岩）及那瑪夏區達卡努瓦里（早期中新世沉積岩）與高雄市六龜區新發里（亞變質岩）岩地質區之三處聚落，發展出坡面型土石流判釋模式與潛勢分級評估方法。建議未來應再增加更多處聚落，以掌握評估模式於沉積岩及亞變質岩地質區之可靠度。
2. 就全島上有火山地質(北部)、廣域變質岩(花東)、海岸山脈地質(花東)、第四紀地質區(如九九峰、火焰山)等區，近年亦出現坡面型土石流災害(如 2016 台東紅葉村)，建議亦需發展適宜之判釋與潛勢分級模式，以供防災管理之需。
3. 坡面單元劃分方法依應用需求有諸多種劃分方式，本研究主要應用「崩塌坡面單元概念」為主，惟應用「次集水區單元概念」成效如何，亦值得進一步探討。

## 參考文獻

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. 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年度成果報告，2001。
10. 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。
11. 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。
12. 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。
  13. 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。
  14. 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。
  15. 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。
  16. 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，329-340頁，2005。
  17. 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。
  18. 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。
  19. 陳天健、羅元勳、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，第47卷，第2期，95-102頁，2016。
  20. 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。
  21. 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。

22. 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。
23. 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，第37卷，第3期，259 -270頁，2006。
24. 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，NSC90-2625-z-002-017，2002。
25. 謝育樺，南投地區土石流發生潛勢分析，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，2007。
26. 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。
27. 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) Vol. 41, No.4, pp.835-851, 2005.
28. Brunsden, D., In process in geomorphology, Edward Arnold Ltd., London, pp. 130-186, 1979.
29. 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.
30. 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.
31. Evans, S. G., "Landslides and surficial deposits in urban area of British Columbia." Canadian Geotechnical Journal, Vol.19,

- pp.269-288, 1982.
32. 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.
  33. Iverson, R. M., Reid, R. G., LaHusen, M. E., Debris flow mobilization from landslides, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., Vol. 25, pp.85-138, 1997.
  34. Jakob, M., and Hungr, O., Debris-flow hazards and related phenomena : Springer, Berlin, New York, 170 p, 2005.
  35. Jeng-Wen Lin, Cheng-Wu Chen, Cheng-Yi Peng, “Potential hazard analysis and risk assessment of debris flow by fuzzy modeling,” Natural Hazards, 2012, Vol. 64, No.1, pp.273-282, 2012.
  36. 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.
  37. 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.
  38. Stock J. and Dietrich W. E., “Valley incision by debris flows: 7 - 105/04/13 17:23:09 Evidence of a topographic signature,” Water Resources Research, Vol.39, No.4, April, 2003.
  39. Thomas Glade, “Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology , ” Geomorphology , Vol. 66, No.1-4, pp.189-213, 2005.
  40. Takahashi T , Debris flows. Annu Rev Fluid Mech Vol.13, pp.57-77, 1981.

## 附錄

### 附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

| 項次       | 委員意見                                                       | 回覆辦理情形                                                                            |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 報告內容審查意見 |                                                            |                                                                                   |
| 一        | 坡面型土石流之發生特性與潛勢評估工作為現今坡地災害防治工作仍急缺乏之一塊，極需產、官、學界共同努力彌補此一研究區塊。 | 謝謝委員建議。                                                                           |
| 二        | 建議坡面型土石流與岩屑崩滑之差異疑有明確之說明。                                   | 坡面型土石流、崩塌與岩屑崩滑之說明請詳見第三章文獻回顧第二節。                                                   |
| 三        | 崩塌坡面單元與坡面型土石流集水區單元之差異宜有充分之說明。                              | 請見第三章文獻回顧第五節與第五章分析單元劃分方法及因子資料庫第二節說明。                                              |
| 四        | 坡面型土石流之潛勢評估各因子是否彼此獨立宜加以說明。                                 | 已補充於第六章 崩塌/坡面型土石流判釋準則第一節表 6.4，目前因子相關性較高者為 LSA 與 EWAI 及 WO 兩因子相關性達 0.54 左右，餘因子則較低。 |
| 五        | 坡面型土石流之潛勢評估為何納入有效集水區之概念？                                   | 本研究依委員建議，改以崩塌坡面單元概念，作為判釋分析                                                        |

|   |                                                                        |                                                                                                                                  |
|---|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | 其物理意義需加以說明。                                                            | 之單元。                                                                                                                             |
| 六 | 本計畫有關坡面型土石流發生之潛勢特性因子多達 20 項(表 4.5)，是否過多？建議可以進一步透過坡面分類或標準化挑選較具代表性之特徵因子。 | 研究成果之最終為採 7 代表性較高之因子作為判釋模式。                                                                                                      |
| 七 | 本計畫研究流域為高屏溪流域，其結果能否推演至其他流域，建議補充。                                       | 研究區主要以亞變質岩及沉積岩區為主。就全島上有火山地質(北部)、廣域變質岩(花東)、海岸山脈地質(花東)、第四紀地質區(如九九峰、火焰山)等區，近年亦出現坡面型土石流災害(如 2016 台東紅葉村)，建議亦需發展適宜之判釋與潛勢分級模式，以供防災管理之需。 |
| 八 | 有關坡面型土石流潛勢分級之分界指標為何不採用機率而採用區別函數值，建議補充。                                 | 謝謝指正。坡面型土石流潛勢分級之分界指標已納入發生機率概念。                                                                                                   |
| 九 | 坡面型土石流明確定義為何？如何與地調所岩屑崩滑及水土保持局土石流進行區隔？                                  | 請見坡面型土石流、崩塌與岩屑崩滑之說明請詳見第三章文獻回顧第二節。                                                                                                |

|    |                                                            |                                                                |
|----|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 十  | 坡面單元劃分時，若考慮集水區面積大於 3ha 以上時，和目前土石流潛勢溪流有效集水區面積劃定方法相同，如何進行區分？ | 本研究改以「崩塌坡面單元」概念，作為判釋分析之單元。歷經多種原則與方法之嘗試，目前已完成分析單元劃分模式，應用性優良。    |
| 十一 | 本計畫先選出 20 種因子，最後篩選出 8 種，是否進行獨立性及顯著性檢定，請說明。                 | 謝謝指正。請見第六章第一節內容說明。                                             |
| 十二 | 統計分析部分採用 SPSS 軟體做計算，建議應先就採用演算方式作物理意義之說明。                   | 本研究採用費雪(FISHER)區別分析法，其數學原理及物理意義與多數多變量統計分析書籍有相當完整說明，因此於報告中未再贅述。 |



## 附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

| 項次       | 委員意見                                        | 回覆辦理情形                                                                                                                      |
|----------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 報告內容審查意見 |                                             |                                                                                                                             |
| 一        | 本計畫目標介於大規模崩塌及土石流間之坡地災害，對本局建立全流域坡地防災工作有正面助益。 | 謝謝委員建議。                                                                                                                     |
| 二        | 惟如何區隔坡面型土石流與現行土石流及淺層崩塌為未來重要研究方向。            | 本計畫研究最終目標即希冀建立全台各地質區適用之坡面型土石流與潛層崩塌之區分方法。                                                                                    |
| 三        | 潛勢評估宜界定坡面型土石流與崩塌如何區分或其關聯性。                  | 請詳見崩塌/坡面型土石流判釋準則第一節內容。本研究採用費雪區別分析法建立坡面型土石流判定模式。坡面型土石流與崩塌（未發生坡面型土石流）單元兩組各選定 30 筆觀測資料，共 60 個樣本，最後獲得 7 項因子之模式，正判率最佳之組合達 87.5%。 |
| 四        | P11 表 2 中 D 邊坡單元坡面型土石流發生的捕捉率為 0，其原因可以加以探討。  | 經檢視研究資料，D 邊坡之捕捉率可能因本計畫取得達卡努瓦地區之 DEM 品質不佳所致，若能取得更佳品質及更高                                                                      |

|   |                            |                                 |
|---|----------------------------|---------------------------------|
|   |                            | 解析度，應能有效改善捕捉率。                  |
| 五 | 分析使用的 DEM 網路格尺寸是多少，需要很精細嗎？ | DEM 解析度應大於 5m, 如有更高解析度的 DEM 更佳。 |