

國立臺灣師範大學

地理學系第四十八屆碩士論文

中小型埋積河谷地形特徵與地形反應之
研究：以新店溪支流為例



指導教授：沈淑敏

研 究 生：林文毓

中華民國一〇八年一月

國立臺灣師範大學地理學系碩士論文摘要

研究所別：地理學研究所碩士班

論文名稱：中小型埋積河谷地形特徵與地形反應之研究：以新店溪支流為例

指導教授：沈淑敏

研究生：林文毓

論文內容，共一冊，文約四萬餘字，共分五章十三節，並以一千餘字摘要說明

摘要

臺灣因地狹人稠，山區中小型溪流沿線的狹窄平緩谷床，也常被開發利用。這類谷床常是沈積物淤埋而成，暗示該集水區內較易因崩塌或土石流作用而供給大量沈積物，如不當開發很可能造成災害。若能了解此類埋積河谷的谷床地形單元分布和集水區特徵，並了解極端事件中流域發生的地形作用對谷床產生的影響，應有助於自然災害的減災。本研究以新店溪中游的平廣溪、小坑溪與磺窟溪三條支流為例，嘗試以地表幾何形態自動分類和數值航測系統判釋谷床地形單元分布，透過數值地形的分析了解各項地形特徵和潛在地形作用，並以 2015 年 8 月蘇迪勒颱風之影響來檢視極端事件造成這些中小型流域的地形再作用情形。

研究結果顯示，本研究區三條溪流之埋積谷床的寬度從 8 到 200 公尺不等，谷床地形單元以高約 2-3 公尺高的小階為主，其中面積較大之平廣溪的支流土石流扇發育較佳，佔據主流谷床的中游段。蘇迪勒颱風誘發研究區內的地形反應，以平廣溪主流谷床最顯著，多處被淤埋或溢淹，其他兩溪的源流和多條支流溪溝可判釋出沖蝕特徵。該些溪溝大多有歷史崩塌紀錄或埋積、土石流扇特徵，受強降雨事件驅動，發生土石流再作用。

參考周憲德(2016)推估溪流主導營力之流域險峻值(Melton's ratio)和主流長度的界檻值，可計算得知本研究區各子集水區和小坑溪主流的主導營力均為土石流，平廣溪與磺窟溪往下游則轉為高含砂水流和洪水作用。蘇迪勒颱風之

降雨強度雖可達 200 年一遇之程度，但降雨延時短、總降雨量有限，研究區的整體流域崩塌率並不高。平廣溪流域相對降雨最多，以致原就好發土石流之源流段和支流溪溝河道上儲存的土砂被驅動，加以主流谷床之上游與下游段邊坡發生崩塌，故使其上游段谷床被土石流掩埋、下游段受到洪水溢淹。值得提出的是，此次土石流作用的河段還包含部份理論推估的高含砂水流河段，這應該和歷次降雨事件類型與土砂供應來源具有空間偶然性有關。

本研究以位於西部麓山帶砂頁岩地層為主的三個中小型流域為例，發現蘇迪勒颱風這種短延時高強度的降雨事件，雖然沒有造成邊坡普遍性崩壞，但足以驅動支流河道的土砂下移與主流局部河段邊坡崩壞，使主流埋積谷床發生地形再作用。在臺灣山區有非常多類似形態的埋積谷床，應仍屬現生地形，若其支流溪溝或源流段儲存相當多沈積物，則表示具有較高的地形動態性，值得進一步檢視其地景特徵所暗示的災害風險。本研究也發現，由於中小型溪流的谷床多窄小，若採用數公尺精度的 DEM，透過地表幾何形態自動分類工具 (Geomorphon) 判釋谷底的平地形態 (flat)，可以快速判別谷床的有無與大致分布位置，但若要進一步區劃細部的地形單元範圍，則需要逐一測試並組合形態，相當費時，故建議採數值航測人工判釋圈繪為宜。

關鍵詞：埋積河谷、地形判釋、數值航測、流域險峻值、土石流、平廣溪、蘇迪勒颱風

Abstract

Taiwan is a highly populated mountainous island. Under the extremely high demand for land, even narrow waste-filled valley bottoms have been developed. Waste-filled valleys imply landslides and debris flow happen easily and supply deposit in that watershed, improper development may cause hazard. This research attempts to develop a (semi-)automatic procedure to identify the waste-filled valleys, of which the valley beds are characterized by debris flow fans and filled deposits. Three tributaries of the Xindian River in the northern Taiwan, are chosen as the study area, including the Ping Guang, the Xiao Keng and the Huang Ku Stream. The landform element classification is firstly applied (Geomorphon) to automatically identify the landform element of the waste-filled valleys and then verified by the result of the digital aerial photogrammetry. Melton's ratio (MR) is adopted to infer the major geomorphic processes along the streams. On-site investigation report immediately after the major event - Typhoon Soudelor in August, 2015 is also consulted..

The results show that the width of the valley bottoms is about 8 to 200 meters and the main landform element of the valley bottom is fill terraces with scarp 2 - 3 m. Tributary debris flow fans are relatively well-developed in the Ping Guang Stream and occupy the mid-stream valley bottom. Triggered by Typhoon Soudelor, with extremely high intensity but short duration rainfall pattern, the valley bottom of the Ping Guang Stream experienced the most significant geomorphic change and the sediment transport occurred in quite few tributary channels, which are characterized by valley fill, debris flow fan or historical landslides.

MR infers that the dominant geomorphic process in the upper streams and sub-catchments in the study area is debris flow, while it turns into hyper-concentration flow and sediment-laden flow in the downstream of the Ping Guang and Huang Ku stream. Short duration of Typhoon Soudelor only induced low landslides ratio in the study area. Sediments contributing into main valley, however, were probably stored in the tributary channels during the previous events. It should also be noted that debris flow extended into the hyper-concentration flow segment inferred by MR during Typhoon Soudelor along upper Ping Guang Stream. It is mainly due to the coupling of sediment supply both from the source area and landslides on the immediate valley sides. This research demonstrates the dynamic response on the valley bottoms of the lower-order drainage basins, which is not just controlled by the existing geological and geomorphic settings but also the pattern of the geomorphic-forming events.

Keywords: waste-filled valleys, landform identification, digital aerial photogrammetry, Melton's ratio, debris flow, Ping Guang Stream, Typhoon Soudelor

目錄

第一章 緒論	1
第一節 研究動機與目的.....	1
第二節 文獻回顧.....	3
第三節 研究方法與流程.....	17
第四節 研究區概況.....	26
第二章 埋積谷床地形分布與特徵	35
第一節 主流谷床地形分布與特徵.....	35
第二節 埋積支流、土石流扇地形與集水區特徵.....	45
第三節 小結.....	52
第三章 颱風事件對埋積河谷地形再作用情形	53
第一節 主流谷床地形單元所受之影響.....	54
第二節 邊坡與支流於颱風事件的變動.....	65
第三節 小結.....	79
第四章 討論	81
第一節 地表幾何形態於地形判釋之應用與限制.....	81
第二節 蘇迪勒颱風事件引致谷床地形作用與流域環境之關聯.....	88
第三節 影響支流子集水區溪溝沖蝕搬運土砂關係的因子.....	96
第五章 結論	101
參考文獻	103

圖次

圖 1-1 影響河段埋積作用因素之概念模式.....	5
圖 1-2 土石流作用分段示意圖.....	7
圖 1-3 平廣溪主流長度(L)與流域險峻值關係圖	11
圖 1-4 坡面與平面地形元素分類圖.....	13
圖 1-5 中心網格與鄰域的視角高程關係示意圖	14
圖 1-6 GEOMORPHON 分類之 10 種地表形態.....	15
圖 1-7 研究流程圖	18
圖 1-8 平坦度閾值(T)與天底角(Φ_N)天頂角(Φ_Z)差值之關係示意圖.....	20
圖 1-9 研究者於臺師大地理系地形實驗室使用數值航測系統判釋地形單元情形	22
圖 1-10 埋積谷床地形單元示意圖.....	22
圖 1-11 颱風前谷床地形原貌判釋對照圖	23
圖 1-12 颱風後地形作用影響範圍航照判釋示意圖	24
圖 1-13 中小型集水區谷床地形單元判釋流程圖.....	24
圖 1-14 研究區位置圖.....	27
圖 1-15 研究區坡度分布與坡度-頻率圖.....	28
圖 1-16 研究區地層分布與岩性組合圖.....	30
圖 1-17 蘇迪勒颱風災害點位圖.....	33
圖 2-1 平廣溪谷床地形單元平面分布圖.....	36
圖 2-2 平廣溪主流谷床橫剖面圖.....	37
圖 2-3 平廣溪埋積河段之上游的集水範圍.....	37
圖 2-4 平廣溪河道與谷床縱剖線圖.....	37
圖 2-5 平廣溪主流長度(L)與流域險峻值(MR)之關係	38
圖 2-6 平廣溪主流潛在地形作用對應河段.....	38
圖 2-7 小坑溪谷床地形單元平面分布圖.....	39
圖 2-8 小坑溪主流谷床橫剖面圖.....	39
圖 2-9 小坑溪埋積河段之上游的集水範圍.....	40
圖 2-10 小坑溪河道與谷床縱剖線圖.....	40
圖 2-11 小坑溪主流長度(L)與流域險峻值(MR)之關係	41
圖 2-12 小坑溪主流潛在地形作用對應河段.....	41
圖 2-13 磺窟溪谷床地形單元平面分布圖.....	42
圖 2-14 磺窟溪主流谷床橫剖面圖.....	42
圖 2-15 磺窟溪埋積河段之上游的集水範圍.....	43
圖 2-16 磺窟溪河道與谷床縱剖線圖.....	43
圖 2-17 磺窟溪主流長度(L)與流域險峻值(MR)之關係	44
圖 2-18 磺窟溪主流潛在地形作用對應河段.....	44

圖 2-19 航照影像(104.06.30)與 GEOMORPHON 自動判釋 6M DEM 形態比對	45
圖 2-20 GEOMORPHON 自動判釋谷床平地形態分布圖	46
圖 2-21 具有埋積特徵的支流子集水區分布圖	46
圖 2-22 具有埋積特徵的支流子集水區面積坡度分布圖	47
圖 2-23 具有埋積特徵的支流子集水區級序統計圖	47
圖 2-24 研究區土石流扇與扇階面積大小排列圖	49
圖 2-25 扇面平均坡度與河道平均坡降圖	49
圖 2-26 土石流扇與扇階集水區面積坡度分布圖	50
圖 2-27 谷口無扇子集水區面積坡度分布圖	50
圖 2-28 平廣溪子集水區溪溝長度(L)與流域險峻值(MR)之關係	51
圖 2-29 小坑溪子集水區溪溝長度(L)與流域險峻值(MR)之關係	51
圖 2-30 礮窟溪子集水區溪溝長度(L)與流域險峻值(MR)之關係	51
圖 3-1 研究區谷床土地利用例子	53
圖 3-2 蘇迪勒颱風造成之地形作用分布(平廣溪流域)	55
圖 3-3 蘇迪勒颱風後之平廣溪上游河段整體航照影像	56
圖 3-4 蘇迪勒颱風後之平廣溪上游 河段局部放大航照影像	56
圖 3-5 蘇迪勒颱風後之平廣溪上游 河段局部放大航照影像	56
圖 3-6 平廣溪上游河段颱風前後影像	57
圖 3-7 平廣溪上游主流河岸邊坡於蘇迪勒颱風期間發生之崩塌	57
圖 3-8 平廣路一段 365 號受災照	57
圖 3-9 蘇迪勒颱風後之平廣溪中游河段整體航照影像	58
圖 3-10 蘇迪勒颱風前後平廣溪中游河段局部放大之正射影像	59
圖 3-11 蘇迪勒颱風前後平廣溪中游河段局部放大之正射影像	59
圖 3-12 蘇迪勒颱風後平廣溪中游河段局部放大之正射影像	59
圖 3-13 蘇迪勒颱風後之平廣溪下游河段整體航照影像	60
圖 3-14 蘇迪勒颱風前後平廣溪下游(1)河段局部放大之正射影像	61
圖 3-15 蘇迪勒颱風前後平廣溪下游(2)河段局部放大之正射影像	61
圖 3-16 蘇迪勒颱風前後平廣溪下游(2)河段局部放大之正射影像	61
圖 3-17 蘇迪勒颱風造成之地形作用分布(礮窟溪與小坑溪流域)	63
圖 3-18 蘇迪勒颱風後之小坑溪、礮窟溪流域主流河段航照影像	63
圖 3-19 小坑溪上游蘇迪勒颱風後之正射影像	64
圖 3-20 小坑溪下游蘇迪勒颱風後之正射影像	64
圖 3-21 礮窟溪受蘇迪勒颱風影響之埋積小階正射影像	64
圖 3-22 研究區蘇迪勒颱風崩塌分布圖	67
圖 3-23 蘇迪勒颱風崩塌事件面積與坡度關係圖	68
圖 3-24 蘇迪勒颱風支流子集水區沖蝕(土石流)溪溝分布圖	69
圖 3-25 沖蝕(土石流)溪溝坡度與集水區面積散布圖	70
圖 3-26 PG04 集水區颱風前後之正射影像	71

圖 3-27 PG04 集水區之空拍影像.....	71
圖 3-28 PG05 集水區颱風前後之正射影像.....	72
圖 3-29 PG05 集水區溪溝近照.....	72
圖 3-30 PG34、PG35 集水區颱風前後之航照影像.....	73
圖 3-31 PG46 集水區颱風前後之正射影像.....	73
圖 3-32 PG46 集水區溪溝近照.....	74
圖 3-33 PG04 土石流扇災後正射影像(右)與土石流堆積近照(左).....	74
圖 3-34 PG44 集水區颱風前後之正射影像.....	75
圖 3-35 PG44 集水區土石流溪溝近照.....	75
圖 3-36 PG44 土石流扇整治後之空拍影像.....	76
圖 3-37 PG08 土石流災後正射影像(右)與土石流堆積近照(左).....	76
圖 3-38 PG35 土石流災後正射影像(右)以及從上游往下游拍攝之土石流堆積近照(左).....	76
圖 3-39 蘇迪勒颱風崩塌與土石流分布圖.....	78
圖 4-1 0.5M DTM 地形陰影圖(左)與 6M DEM 地形陰影圖(右)比較.....	82
圖 4-2 GEOMORPHON 自動判釋平地形態於谷床之分布.....	83
圖 4-3 人工判釋(黃線)與自動判釋(淺綠色區塊)谷床範圍比對.....	84
圖 4-4 萃取平地形態.....	87
圖 4-5 設定主、支流緩衝帶為谷底範圍.....	87
圖 4-6 設定主流緩衝帶為河道.....	87
圖 4-7 調整後之中小型集水區谷床地形單元判釋流程圖.....	87
圖 4-8 蘇迪勒颱風在平廣溪造成之影響以及不同方法判定地形作用分布河段.....	89
圖 4-9 平廣溪上游河段地形作用與反應示意圖.....	91
圖 4-10 平廣溪中游河段地形作用與反應示意圖.....	92
圖 4-11 平廣溪下游(1)河段地形作用與反應示意圖.....	93
圖 4-12 平廣溪下游(2)河段地形作用與反應示意圖.....	94
圖 4-13 歷史崩塌與埋積子集水區套疊蘇迪勒沖蝕(土石流)溪溝圖.....	97
圖 4-14 蘇迪勒颱風屈尺測站與福山測站逐時降雨量圖.....	98

表次

表 1-1 前人研究之土石流扇狀地坡度.....	7
表 1-2 前人研究集水區地形特性與土石流發生關係所使用之地形計測方法	9
表 1-3 流域長度及流域險峻值區分不同主導營力之門檻值	10
表 1-4 應用高精度數值高程模型於地形分析之相關研究	12
表 1-5 本研究使用資料與用途	19
表 1-6 本研究使用之航空照片數值檔編號.....	21
表 1-7 地形判釋標準一覽表.....	23
表 1-8 研究區流域基本資料.....	27
表 1-9 研究區地層與岩性.....	29
表 1-10 研究區內各類別土地使用所佔比例.....	31
表 1-11 福山測站各重現期雨量與蘇迪勒颱風累積雨量	32
表 1-12 蘇迪勒颱風於本研究區造成之災害事件	32
表 2-1 平廣溪各河段地形單元面積比例.....	36
表 2-2 支流溪溝埋積與谷口土石流扇關係.....	47
表 2-3 研究區土石流扇與扇階基本屬性.....	48
表 2-4 研究區各流域特徵資料總整表.....	52
表 3-1 蘇迪勒颱風各流域崩塌事件規模統計	65
表 3-2 研究區各岩性組合之崩塌事件規模統計	66
表 3-3 蘇迪勒颱風崩塌面積分類表.....	68
表 3-4 沖蝕(土石流)溪溝原地形特徵.....	69
表 3-5 蘇迪勒颱風前後子集水區主要溪溝之谷床變化個數統計表	71
表 3-6 各流域有無崩塌與沖蝕(土石流)之子集水區個數統計	77
表 4-1 不同平坦度閾值之幾何形態分類.....	85
表 4-2 蘇迪勒颱風發生沖蝕(土石流)子集水區與歷史崩塌或埋積特徵整理	97

第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

臺灣對於河流地形的研究可謂豐碩，例如：主要(高等級)河流的地形特徵判釋或河流地形變遷、演育(如楊貴三，1988；張瑞津等，2000；龔琪嵐、齊士崢，2004；陳立淳，2013；陳柔妃等，2016)；低等級河流與集水區的崩塌與土石流發生的機制以及地質、地形等控因(如游繁結、陳重光，1987；陳宏宇，1999；林昭遠、張力仁，2000；吳輝龍等，2004)。相對而言，介於其間的中等級溪流與其集水區的研究較少。然而在臺灣，由於山多平原少的地形條件加上人口增長的壓力，對土地的需求逐漸往山地拓展，許多山區中小型集水區河谷內平緩的谷床地形，也常成被開發利用，例如溪流谷口的扇狀地和河道兩側的小階地，都是民眾會選擇進行農業或居住的地點。

臺灣位處構造活動和季風與颱風主導的環境，山區地質破碎與地形陡峭的特性加上高強度的降雨事件，使邊坡容易受到風化侵蝕而產出豐富的土砂材料，甚至引發崩壞作用造成大量土石在河谷淤埋，使河谷出現相對平緩寬闊的埋積特徵。埋積谷床或沖積扇等地形顯示集水區內有大量沉積物的搬運與堆積，而且還會在極端事件中受到諸如土石流、洪水或邊坡崩塌等作用的影響，該些地點的土地開發利用，顯然有較高的受災風險，因此有必要判別其自然災害的影響範圍，進一步了解谷床地形特徵與變動。

臺灣山區河流眾多，需要以一套有系統的研究流程來判釋中小型埋積谷床的地形特徵與配置，討論其與集水區地文特徵的關係，以及在極端事件驅動下沈積物如何搬運、堆積與地形如何變化等。據此，本研究的具體目標為：

1. 發展一套應用地表幾何形態分類技術之半自動地形判釋流程，以快速判別埋積分布並輔助人工判釋方法劃定地形單元。

2. 進行數值地形計測之相關分析，以了解埋積谷床地形單元與其集水區特徵和主流的地形作用。

3. 檢視颱風造成的地形再作用，從極端事件下埋積河谷中的沉積物搬運與堆積狀況探討地形反應情形。

本研究以位於新店溪(8 級河)中游的三條支流平廣溪(5 級河)、小坑溪(4 級河)和磺窟溪(5 級河)為研究對象，相對於上述各項具體目標，本研究的主要工作項目如下：

1. 應用地表幾何形態分類方法——Geomorphon(半自動判釋)搭配數值航測系統檢視立體像對(人工判釋)，規劃地形判釋流程並實行操作、調整。
2. 引用、計算各項地形計測相關參數(如：流域險峻值)，彙整谷床地形單元與集水區地形特徵，以及主流潛在之地形作用。
3. 利用航照檢視蘇迪勒颱風前後地形變化進行描述，並與流域險峻值判定之潛在地形作用對照，釐清影響埋積谷床實際地形作用的因子。

第二節 文獻回顧

本研究之文獻回顧主要分為兩大部分，第一部分回顧地形定義與相關研究，首先對埋積河谷進行定義，並回顧山區河流沉積物搬運、堆積之研究，接著回顧可能影響埋積谷床的地形作用以及地形計測方式；第二部分回顧地形判釋的方法，整理目前數值航照以及光達數值高程模型等資料對於地形判釋的相關研究，以及自動判釋的相關方法，參考前人使用的方法以建立本研究之方法流程。

一、地形定義與相關研究

(一)埋積河谷定義

《地質學詞彙》(Jackson, 1997)和《地形の辞典》(鈴木隆介等, 2017)都提到 Valley fill 一詞，是指透過任何媒介堆積並填充在河谷中的未膠結沉積物。文獻中有關埋積谷之解釋，大多是以定性描述河谷被沉積物所堆積的狀態，例如《地形學百科》(Goudie, 2004)中有 buried valley¹一詞，指的是底岩被近期沉積物掩埋的山谷，其成因有冰河堆積、河流沖積、人為填積幾種類型；《地質學詞彙》(Jackson, 1997)的 filled valley¹解釋為在乾燥或半乾燥地區的廣闊山谷，其中包含大量的扇狀地、氾濫平原與湖泊沉積物所形成之沖積層；日本國土地理院在河流作用地形中有埋積谷之分類，其定義為：谷底由厚層沉積物堆疊之山谷，當河流無法搬運負荷物質時，山谷被岩屑掩埋所形成；《地形の辞典》(鈴木隆介等, 2017)中的埋積谷(waste-filled valley¹)指被厚層沉積物所堆積的山谷，是由於氣候變化伴隨而來的岩屑與降水量增加，流域環境中供應的大量岩屑與泥沙沉積物堆積所形成之地形，其堆積面會在山谷中形成細長而平坦的谷底平原，與谷壁之間有明顯的界線。這種谷底平坦並且與兩側谷壁之間有明顯坡度轉折的特徵，可作為埋積谷的判釋依據，例如彭義軒(2006)將土

¹ 教育部公布之《地球科學名詞》(1982)將 buried valley 譯為埋沒谷，將 filled valley 譯為填積谷，將 waste filled valley 譯為埋積谷。

石流作用所堆積大量土石的河段定義為埋積河段，以數值航測系統判釋陳有蘭溪各支流埋積河段分布狀況，以河谷是否呈現谷床平坦、谷壁陡直的舟底型河谷(Onda, 1992)為判釋標準。

由上述對於埋積河谷的說明可知，山谷中的厚層沉積物是形成埋積谷的重要關鍵，因此流域環境中勢必要有大量沉積物的供給、堆積，造成河谷被淤埋而形成平坦之谷床面。以下進一步回顧關於山區河流沉積物搬運、堆積之相關研究。

(二)山區河流沉積物搬運、堆積之相關研究

地形可視為物質移動(movement of mass)的產物，” Mountain Rivers” 一書的作者 Wohl(2000)曾提出山區河流沉積物的搬運、堆積情形取決於「沉積物供給(sediment supply)」、「河道形態(channel morphology)」和「水力(hydraulic)」的函數。河道形態和水力考量了河流的流能對於沉積物搬運堆積的影響，其中逕流量、集流時間等水文條件可以從集水區內的幾項地形特徵反映出來，例如集水區面積與起伏(Patton, 1988)、水系密度(Gregory and Gardiner, 1975; Day, 1978)、河流等級(Leopold and Miller, 1956; Blyth and Rodda, 1973; Patton and Baker, 1976)和集水區形狀(Strahler, 1964)。

沉積物供給方面，” Mountain Rivers” (Wohl, 2000)一書也提及山區河流的沉積物供給主要受到集水區及河道的地形作用影響，一集水區內的沉積物來源包含邊坡、谷底(谷床)和支流河道，且平常性(例如坡面沖刷、平均水量的支流匯入)和突發性(例如土石流、落石、洪水)的事件皆對沉積物來源有所影響；來自邊坡的沉積物供給受地質條件(岩性、構造)與氣候條件等控制風化侵蝕速率的因子有關，而來自河床與河岸的侵蝕也為山區河流貢獻了沉積物。Devrani and Singh(2014)研究喜馬拉雅山區阿勒格嫩達河河谷的埋積階地，提出影響某一河段埋積材料多寡的參數，包含來自主流上游(Q_i)、支流(Q_t)、邊坡(Q_h)、冰河或冰緣作用(Q_g)以及離開該河段(Q_o)的沉積物量，影響這些參數的控因包

含降雨事件(p)、構造活動(t)、植被覆蓋(b)等(圖 1-1)，若 $Q_i + Q_t + Q_h + Q_g > Q_o$ ，則表示該河段會發生堆積，尤其對 Q_h 而言，崩塌是重要的地形作用，會進一步影響支流(Q_t)的沉積物輸出形式。以邊坡而言，其與河道的耦合關係也是山區河流沉積物研究的關注焦點(e.g. Hovius et al., 2000 ; Harvey, 2001 ; Schrott et al., 2003)。例如，Hovius et al.(2000)研究臺灣中央山脈東側兩個集水區的坡地與河道連結關係，說明沉積物的輸出受到山坡的崩壞作用模式、速率以及河流網絡的搬運能力控制，而高強度的事件對這兩項控因極具主導性；除非進入河道的沉積物與河流搬運能力之間具有明顯差異，否則河流將碎屑搬運、清除的速率很快，該研究的結果顯示崩壞事件發生後的幾週內，除了最粗糙的崩積物之外，其他碎屑都被清除。

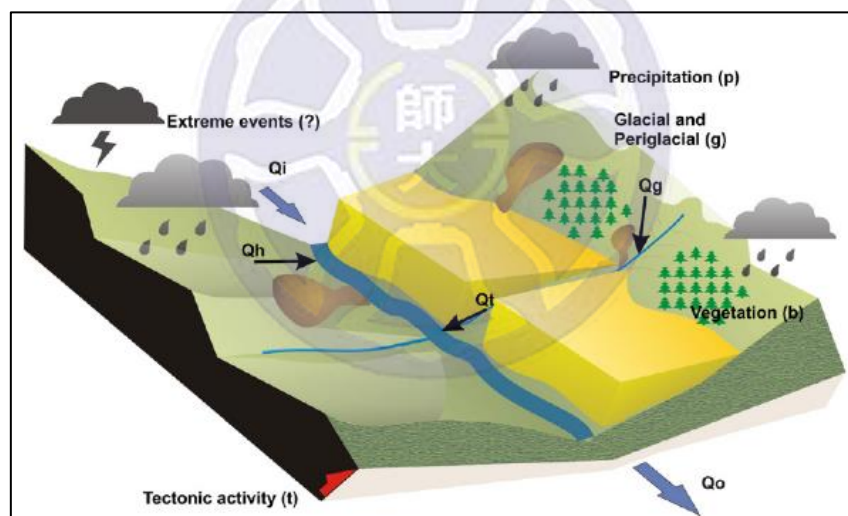


圖 1-1 影響河段埋積作用因素之概念模式(Devrani & Singh, 2014)

從上述回顧可知，山區河流的堆積受控於沉積物供給與河道的流能，尤其極端事件下有顯著的影響。在平常性的事件中雖然也會有河流搬運、堆積等作用，但對於埋積河谷的形成而言，沉積物要長期停留在谷底，表示平常性的河流搬運能力不足以帶走沉積物，而這一類的沉積物通常是崩塌與土石流作用產生的。Dadson et al.(2003)的研究說明臺灣侵蝕率每年約 3~6 mm，主要受到地

震或極端降雨事件引發的崩塌影響，顯示邊坡崩塌是臺灣山區沉積物供給的主要來源。這些崩塌與進而引發的土石流作用，是臺灣常見的山區河谷埋積材料來源，並可能在主流谷床或支流谷口留下埋積階地或扇狀地等地形證據，而這些地形仍會受當代地形作用(如土石流、洪水)的影響(李錫堤，1996；張瑞津，1997；翁毓穗等，2010；劉盈劭，2013)。以下進一步回顧可能影響埋積谷床的地形作用相關研究。

(三)影響埋積谷床的地形作用相關研究

前一部分的回顧提及埋積谷床的地形單元仍會受土石流或洪水等地形作用的影響，一般而言含砂水體的運動型態可依含砂體積濃度來分類，泥砂含量 3% 以下為挾砂水流，3%到 27%為高含砂水流(debris flood)，27%到 75%為土石流，75%以上為地滑，其中高濃度的高含砂水流常被視為土石流(詹錢登，2004)。不同含砂水體作用之土砂堆積形態也有所差異，以下針對土石流與洪水分別說明：

1. 土石流堆積地形形態特徵

一般土石流作用會以溪床坡度將其分為發生區(15 至 30 度)、流動區(6 至 15 度)與堆積區(3 至 6 度)三個部分(詹錢登，2000)(圖 1-2)。其中土石流堆積區受地形影響，其形態分為受兩岸限制而沿流動方向呈狹長形態的侷限型，以及具典型扇狀擴散形態的扇狀開闊型(今村遼平，2012，引自周憲德，2016)。由於土石流在流動過程中會因脫水減速而間歇流動甚至停滯(游繁結等，1996)，因此土石流流動區也可能發生埋積，其沉積物具有基質支持、逆級配、淘選度差的特徵，從航照影像上可見大小混雜的石塊與土砂堆積。根據文獻回顧第一部分之埋積谷形態特徵，河谷受土石流堆埋後會形成平坦之谷床面，當河流下切谷床後便會在河道兩側形成階地。

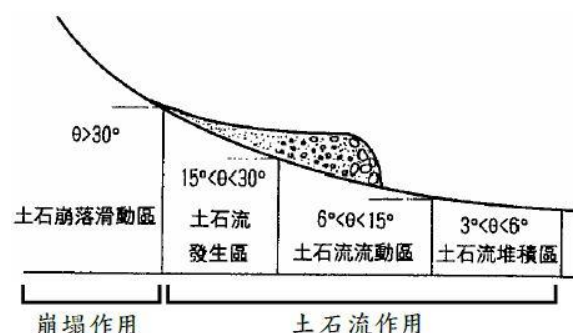


圖 1-2 土石流作用分段示意圖。改繪自詹錢登(2000)。

另一方面，支流的土石流作用可能導致其谷口出現扇狀地。土石流扇狀地的形成是由於土石流發生時，帶有巨大動能與直進慣性的大量土石順著溪谷向下游前進，其在衝出谷口後會再向前運行一段距離才逐漸停留堆積，後續的土石因流路受阻而向源頭淤埋或向側邊分散堆積，逐漸形成扇狀形態(游繁結、連惠邦，1999)，其土石堆積發展先直後橫，堆積區有中高旁低的特性(費立沅等，2012)。完整的土石流扇狀地包含大小土砂混雜、粗粒含量顯著的土石流錐，以及細粒土砂在土石流錐下游擴散淤積的沖積扇(游繁結、連惠邦，1999)，較陡峭的土石流錐和土砂流堆積之較平緩的沖積扇之間有坡度轉折，一般在界定土石流扇狀地危險區域時，是以土石流錐的堆積範圍為主。前人研究土石流的扇形堆積體坡度大多大於 3 度(表 1-1)。位於谷口以及具有較陡的扇狀形態，可以作為判釋扇狀地的參考。

表 1-1 前人研究之土石流扇狀地坡度

作者(年代)	研究地區	土石流扇狀地堆積坡度
蘆田和男(1975)	日本仁淀川流域	3~6 度
池谷 浩(1976)	日本小豆島	4~9 度
蔡元芳(1999)	南投縣信義鄉、苗栗縣火炎山等處	2.5~7.2 度
Kostaschuk et al.(1987)	加拿大亞伯達省近 Banff 地區	約大於 4 度
沈淑敏等(2007)	花東縱谷北段	5~24%(約 3~13 度)

本表整理自游繁結等(1999)、沈淑敏等(2007)

2.洪水堆積地形形態特徵

Pierson(2005)對洪水的定義包含一般含砂體積濃度(小於 5-10%)的高流量水體以及高含砂水流(泥砂體積濃度介於 5-10%至 20-60%)，這兩者的流動行為主要是受水流控制，而土石流則明顯會受到挾帶沉積物的控制；Wilford et al.(2004)的研究中則定義含砂量介於 20%到 47%者為高含砂水流，20%以下為洪水。高含砂水流和洪水地形會形成的堆積地形包含沙洲(bar)、沖積扇等，其沉積物顆粒相對土石流作用的沉積物小，圓磨度大多是圓到次圓。高含砂水流和洪水的沉積特徵仍有不同，高含砂水流沉積的水平分層較不明顯且淘選度差，其沉積物和河床中可能有較大的個別礫石碎屑；洪水的沉積通常具有明顯的水平分層，在各分層中的沉積物相對均質，較大的沉積物可能呈現覆瓦狀；當沉積物在乾燥狀態下，洪水堆積相對於高含砂水流鬆散易碎(Pierson, 2005)。航照影像判釋時可從細粒的土砂淤積推斷為高含砂水流或洪水作用，與土石流堆積的特徵區別；但從影像判釋沉積物特徵不易界定高含砂水流或洪水的作用，有學者應用集水區地形計測的方式，藉由集水區面積、高差與主流長度等參數，判定一流域內之土石流、高含砂水流與洪水作用，以下將進行地形計測相關回顧。

3.集水區地形計測

地形計測是將地表形態量化分析的方法，藉由各種地形參數的計算以了解地形形態特徵並探討地形作用，例如上述回顧山區河流沉積物搬運堆積相關研究時曾提到的集水區面積、起伏、水系密度、河流等級和集水區形狀等，皆為集水區地形計測的一部分。目前臺灣有許多使用集水區地形計測的研究方法，來探討地形條件與土石流發生的關係(例如表 1-2)。以 Gardiner(1990)對集水區地文因子的分類(流域尺度、流域梯度、流域形狀和流域網路)歸納臺灣土石流相關研究使用之集水區地形計測指標，參考前人使用的計測指標發現集水區面積、集水區平均坡度、河道平均坡降、形狀係數、水系密度等是常用的指標，

本研究將參考這幾項指標，應用在研究區內各個小支流中，以了解各子集水區的地形特性。

表 1-2 前人研究集水區地形特性與土石流發生關係所使用之地形計測方法

集水區地形計測項目		陳紫娥 (1997)	林昭遠等 (2000)	陳正文等 (2003)	吳輝龍等 (2004)	沈淑敏等 (2007)
流域 尺 度 類 因 子	集水區面積	V	V	V	V	V
	集水區周長	V			V	V
	集水區長度				V	V
	主流長度			V	V	
	集水區平均高程					
	集水區高差					V
	有效集水面積					V
流域 梯 度 類 因 子	集水區平均坡度		V	V	V	V
	起伏比	V				
	流域險峻值					V
	河道平均坡降	V	V	V		V
流域 形 狀 類 因 子	集水區寬度				V	
	形狀係數	V	V	V	V	V
	密集度				V	
	圓比值				V	
	細長比				V	
流域 網 絡 類 因 子	河流等級	V				
	水系密度 (河川頻率)	V	V	V		V
	河道蜿蜒度		V	V		

為了瞭解集水區的地形作用與潛在災害，也有學者利用流域險峻值 (Melton's ratio, MR) 來判定沖積扇的集水區主導營力 (例如 Jackson et al., 1987; Bovis and Jakob, 1999; Coe et al., 2003; De Scally and Owens, 2004; Wilford et al., 2004; 沈淑敏等, 2007)。流域險峻值由 Melton (1965) 提出，計算方式為溢流點以上高差除以溢流點以上集水面積之平方根。Wilford et al. (2004) 結合流域險峻值和流域長度，設定土石流、高含砂水流和洪水作用的門檻值以判別不同作用；周憲德等 (2016) 參考 Wilford et al. (2004) 的方法，蒐集台灣三期颱風共 41 個土石流災例進行分析，針對台灣北部地區的土石流溪流判定門檻值進行修正 (表 1-3)，並以流域險峻值及溪溝長度的關係判定平廣溪各子集水區和主流的地形作用 (圖 1-3)。本研究將參考周憲德 (2016) 提出之門檻值，針對研究區內三條流域的主流地形作用進行判定。

表 1-3 流域長度及流域險峻值區分不同主導營力之門檻值

	Wilford et al. (2004)		周憲德 (2016)	
研究地點	加拿大卑詩省		1996 賀伯颱風南投和社溪 1998 芭比絲颱風三芝員山村 2015 蘇迪勒颱風新北市及桃園復興鄉	
地形計測 參數 主導營力	流域長度 (L)	流域險峻值 (M)	溪溝長度 (L)	流域險峻值 (M)
洪水	--	<0.3	--	<0.3
高含砂水流	--	0.3-0.6	--	0.3-0.5
	>2.7 公里	>0.6	>4.0 公里	>0.5
土石流	<2.7 公里	>0.6	<4.0 公里	>0.5

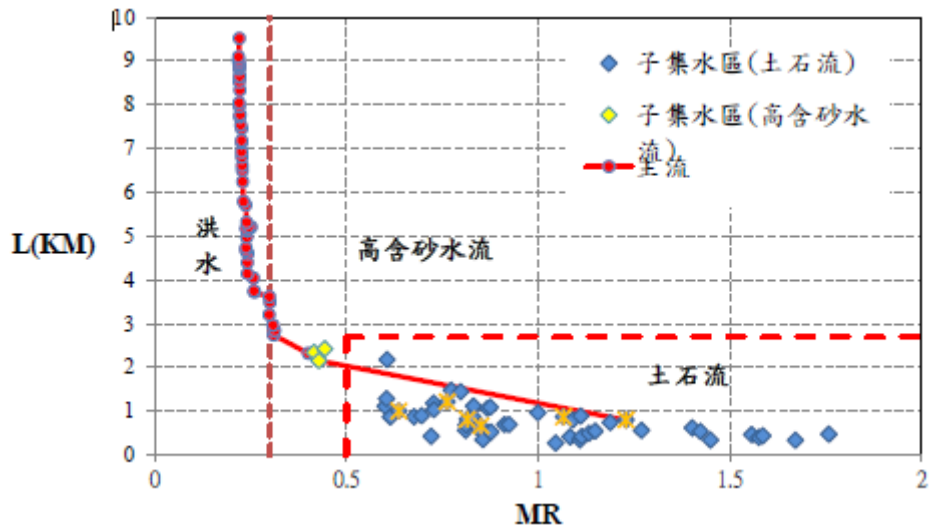


圖 1-3 平廣溪主流長度(L)與流域險峻值關係圖(周憲德，2016)

二、地形判釋方法相關研究

(一)數值航照與高精度數值地形模型於地形判釋之應用

航照立體像對具有同時做到幾何判釋與影像判釋的優點，有助於了解地真情況，幫助研究者建立整體區域的起伏感受並圈繪各種地形單元。目前有許多河流、構造、崩壞地形相關研究仰賴航照判釋，傳統使用桌上型立體鏡判釋紙本航照再轉繪至地圖以利進一步數化、分析研究(例如：楊貴三，1988；張瑞津等，2002、2003、2004；沈淑敏等，2005、2006；劉盈劭，2013)，現今可利用數值航測系統直接進行數化工作，甚至產製數值地形模型，進而做後續的分析(例如：彭義軒，2006；沈淑敏等，2007)。隨著航遙測技術的進展，現今可獲取的航遙測影像以及數值高程模型資料更加細緻，尤其以光達(LiDAR)產製之數值高程模型可濾除建物與植被等對原始地形面的干擾，也具有較佳的解析度、精確度，可清楚呈現真實地面的高程，使地形分析更加精確，對地形研究有極大助益。目前國內外已有許多學者利用光達產製的高精度數值高程模型對地表微地形進行觀察，判釋各項地形單元並進行分析(表 1-4)。

表 1-4 應用高精度數值高程模型於地形分析之相關研究

整理自林美聆、陳彥澄(2014)，陳奕中等(2014)，謝有忠等(2016)

作者 (年代)	研究內容	資料 解析度	LiDAR 資料應用方 式
Schulz (2004)	判釋大型複合型態之崩塌及崩塌潛勢地區。	1.8m	產製坡度及不同角度之陰影圖。
Schulz (2005)	進行微地形分析，判釋可能發生崩塌之冠部。	1.8m	產製不同角度之陰影圖、坡度圖、等高線圖和地形剖面。
Miner et al.(2010)	比對航照正射影像及光達數值地形對於崩塌地地形起伏表現之差異。	1m	產製陰影圖、坡度圖與坡向圖。
林美聆等 (2014)	透過航照、衛星影像及光達日照陰影圖，判釋崩塌及土石流等地質敏感區域。並比對三種資料之判釋成果。	1m	建立八方位日照陰影圖。
陳奕中等 (2014)	結合地形開闊度分析於構造地形特徵判釋。	1m	將開闊度結合坡度產製紅色立體投影圖。
謝有忠等 (2016)	以不同地形計測方法所產製的圖層進行分析，判釋崩塌地微地形。	1m	產製坡度、陰影圖、坡向、曲率、地表粗糙度、特徵比值、開闊度等分析資料。
陳柔妃等 (2016)	探討基隆河的河階分布與水系發育。	2m	進行水系分析以產製水系網絡和集水區邊界，並產製坡度、坡向等地形資料。

航照資料與高精度的數值地形模型確實可幫助室內判釋作業，尤其數值地形模型的每一個網格都具有高程值，可進行地形計測以產製坡度、陰影圖、開闊度圖等具有視覺化效果的圖資，幫助判釋、了解複雜的地形訊息。前人應用航照與光達產製數值高程模型於地形判釋，多是以人工判釋來進行，但隨著解析度提升、資料量的增加，可進行地形分析的範圍愈多，以人工判釋、數化的方法會非常耗時，因此對於判釋地形地物的發展應以自動或半自動化為趨勢。

(二)自動判釋相關研究

目前運用數值地形模型所發展的地形自動判釋方法，大多是分類出地表的基本幾何形態(morphometric)而非特定地形(landform)。地表的幾何形態亦可稱為地形元素(Landform element)，是組成地形單元的一部分，可以表徵其主要形態(R.A.MacMill & P.A.Shary, 2009)。對整體形態分布的瞭解有助於土壤調查、植被分布調查與景觀測繪等工作，也能透過這些形態的分類、組合來了解一個地形區的特徵。使用數值高程模型進行地形元素分類的方法，通常是以地形計測的量化分析推導各種地形參數，藉此描述地表的各種幾何形態。地形參數的類型包含高程、高差、坡度、坡向、曲率(Evans, 1972；Pike, 1988)、開闊度(Yokoyama, 2002)等等。例如 Dikau et al.(1995)以縱向和正切曲率為基礎，分類出九種類型的坡面形態：凸形山脊型(nose)、凸形直線型(shoulder slope)、凸形谷型(hollow shoulder)、直線山脊型(spur)、平面直線型(planar slope)、直線谷型(hollow)、凹形山脊型(spur foot)、凹形直線型(foot slope)以及凹形谷型(hollow foot) (圖 1-4a)；Wood(1996)使用曲率進行地形分類，將地表分為六個平面形態：山峰、山脊、平地、鞍部、河道和窪地(圖 1-4b)。

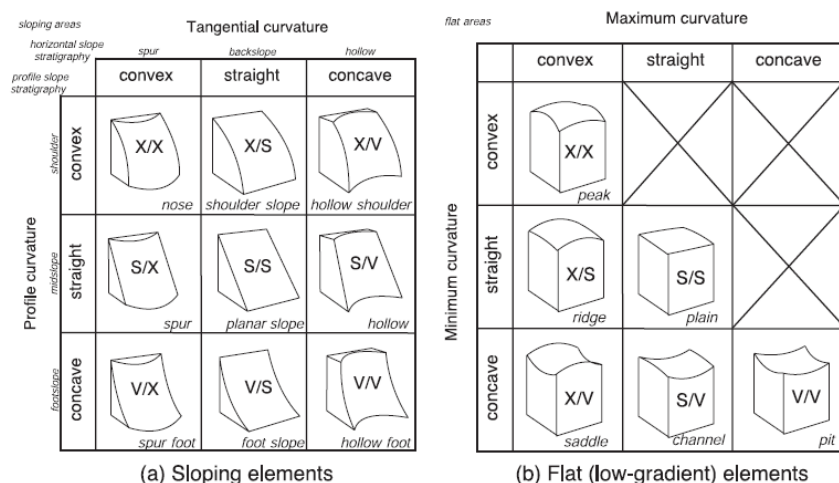


圖 1-4 坡面與平面地形元素分類圖

圖片引自 Schmidt and Hewitt(2004)

Schmidt and Hewitt(2004)參考 Wood(1996)以及 Dikau et.al(1995)應用曲

率分類地形元素的方式，透過模糊分類(fuzzy classification)方法從坡度和曲率等微分幾何資料中得到形態元素，接著評估整體地形景觀的背景狀況將形態重新分類，將前人的分類方法合併為一次就能得到所有 15 種坡面與平面形態的方法。Drăguț and Blaschke(2006)則提出一種以物件導向式影像分析為基礎的地表形態分類方法，首先以數值地形模型產製高程、縱向曲率(profile curvature)、橫向曲率(plan curvature)和坡度梯度(slope gradient)圖層；接著透過影像分割將上述圖層中相對均質的物件分類出山峰、趾坡、陡坡、緩坡、肩部、窪地(negative contacts)、頭坡、側坡、鼻坡九種地形元素。

Jasiewicz and Stepinski(2011, 2013)以 Yokoyama et al.(2002)提出的開闊度(Openness)概念為基礎，以待推測網格為中心，比較中心網格和其八個方位鄰域之間的視角，找出中心網格與八個鄰域之間的高程關係(圖 1-5)，歸納出平地(flat)、山峰(peak)、山脊(ridge)、肩部(shoulder)、山嘴(spur)、直坡(slope)、窪地(pit)、山谷(valley)、山腳(footslope)和山窪(hollow)等十種常見的地表形態(圖 1-6)。該方法僅需數值高程資料，不需再進行坡度和曲率等微分幾何的運算，透過開闊度運用之地形通視概念，可不受限於固定的運算窗格大小，在地形分類上所需花費的計算成本相對較低，其分類概念是識別與特定地形對應的整個地形型態，類似模仿人工判釋時對於地形分類的理解。

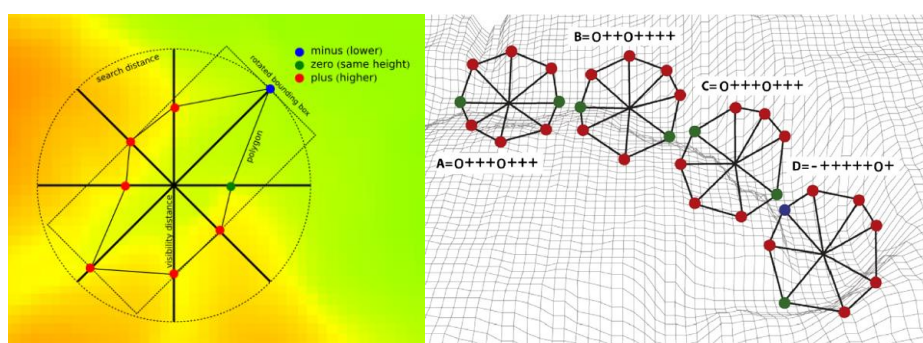


圖 1-5 中心網格與鄰域的視角高程關係示意圖

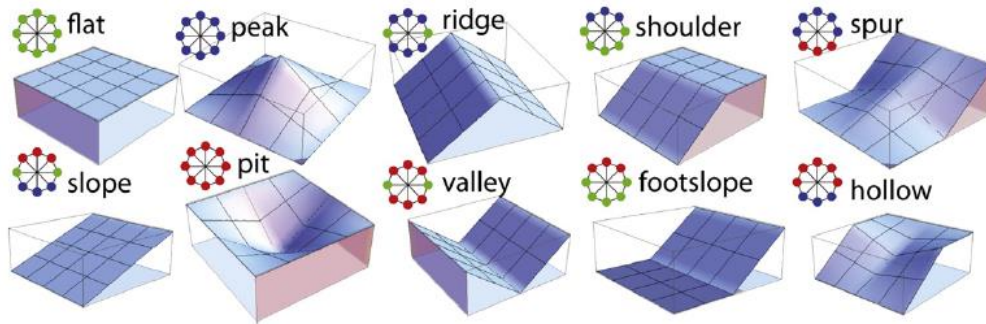


圖 1-6 Geomorphon 分類之 10 種地表形態

目前也有研究應用多種空間分析的組合，或是物件導向分析方法，來進行特定地形單元的判釋。例如 Norini et al.(2016)根據沖積扇地形特徵，結合 GIS 的水系、曲率、坡度、剖線等工具的分析，透過試誤或訓練的過程調整適當閾值，以半自動的方式找出沖積扇的頂點和扇面範圍。而物件導向分類是指將相關性較高的的相鄰像元合併成一個區塊形成影像物件，再針對每個影像物件的特徵進行分類。以物件導向分析進行地形判釋的研究，例如 Asselen and Seijmonsbergen(2006)以半自動化的方法判釋奧地利西部 Montafon 地區的山區地形，將空載光達產製之高精度數值高程模型轉化為坡度圖層，並使用物件影像分析方法將坡度圖層分割、均質化為影像區塊，結合河道向量資料、坡度與高程的區域統計資料，將影像區塊進行地形單元分類，然後將相鄰的相似地形單元合併以呈現出近似真實地形單元的結果，分類出河階、沖積扇、崩塌地、崖錐坡、陡崖、冰河地形、淺切河道與深切河道等八種特徵地形。莊心凱(2012)結合地形資訊與物件式影像分析方法，判釋荖濃溪的谷中氾濫原與周邊區域的地形特徵，使用數值地形模型輔助衛星影像，將坡度和比高做為地貌指標(landform index)產製地貌主題圖層(landform thematic layer)，藉此應用地形資訊來輔助光譜影像資訊，分類出流路、沙洲、高灘地、河階、沖積扇、崩塌地及人工構造物等地物類別。其中數值地形資訊以及其衍生的地貌主題圖層對於整體泛濫原範圍和河階地的判釋上具有相當程度的幫助，但對於沖積扇的判釋有資料上的限制，因此該研究對沖積扇的判釋僅使用影像資料為參考。

本研究的研究對象為埋積河谷，需判釋河谷底部是否具有平坦之谷床，且判釋目標為尺度較小的集水區，期望能快速檢視具有谷底平坦特徵的河谷，才進一步檢視谷床上的地形單元分布。考量判釋技術的易操作性以及可判釋的結果，本研究認為 Jasiewicz & Stepinski(2011, 2013)開發之 Geomorphon 工具可避免複雜的幾何運算過程，而且對於不同的地形尺度和地表起伏程度有較高的設定彈性，不會受限於固定的窗格大小，最終也能分類出平坦地的形態，因此選擇以此方法為地形自動判釋的工具。



第三節 研究方法與流程

本研究主要工作包含地形判釋、數值地形計測兩部分，研究期間也輔以野外調查。研究流程如圖 1-7 所示。地形判釋部分利用降階處理 6 公尺數值高程模型進行地表幾何形態分類，對應航照人工判釋數化的谷床邊界與地形單元，另一方面也使用兩期航照判釋颱風前後的地形變化。數值地形計測部分則藉由水系、坡度、比高、流域險峻值等方法了解研究區內的地形單元特徵以及地形作用。

研究資料方面，本研究使用的資料與用途如表 1-5 所示。在數值地形資料的使用上，本研究可獲取的數值地形資料有兩種。一種為降階處理 6 公尺數值高程模型，另一種則是研究者透過數值航測系統匹配航照立體像對自行產製數值地形模型。前者是經濟部中央地質調查所光達進行測製，具有濾除植被與地表建物的優點，可呈現真實地表起伏的「數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)」；後者無法濾除植被與地表建物，所產製之地形資料為「數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)」。為方便理解，本研究在名詞使用上以一般習慣之「數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)」指稱數值航測所產製的地形資料。考量資料的特性，本研究在進行地表幾何形態分類以及數值地形計測時是使用 6 公尺數值高程模型。

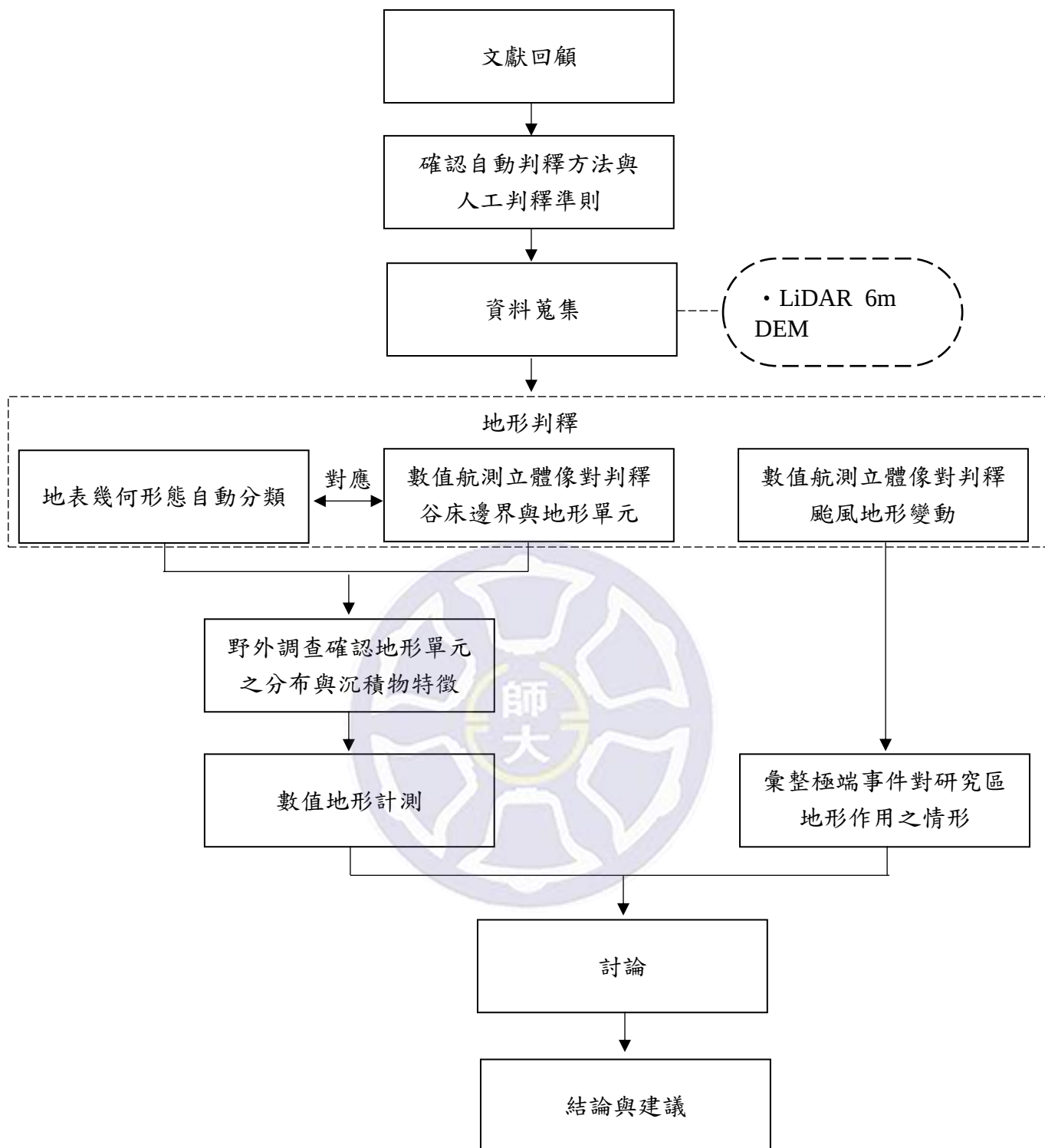


圖 1-7 研究流程圖

表 1-5 本研究使用資料與用途

資料名稱	測製時間	來源	資料用途
降階處理 6 公尺 數值高程模型	2014 年測製 2017 年降階處理	經濟部 中央地質調查所	產製水系與集水區等資料、自動判釋地表幾何形態、進行數值地形分析
航空照片數值檔	2015 年 6 月 30 日 2015 年 8 月 10 日	行政院農業委員會林務局農林航空測量所	匹配立體像對進行地形判釋、颱風前後地形變化判釋
1/5000 正射影像	2015 年 6 月 30 日 2015 年 8 月 10 日 2016 年 12 月 13 日	行政院農業委員會林務局農林航空測量所	颱風前後地形變化之描述
二萬五千分之一 岩性組合圖	資料分屬兩期： 2002-2005 2006-2009	經濟部 中央地質調查所	研究區岩性組合與地層資料
五萬分之一分幅 地質圖：新店、 桃園	新店：2000 年 桃園：1996 年	經濟部 中央地質調查所	研究區構造線資料
航照判釋山崩目錄	2006-2013 年 (研究區範圍內為 2008 年)	經濟部 中央地質調查所	檢視歷史崩塌紀錄

以下詳細說明本研究所使用的各種方法：

一、地形判釋

本研究欲判釋的目標為颱風事件前的谷床地形原貌，以及颱風過後的崩塌與溪溝沖蝕(土石流)分布。使用的判釋方法包含自動判釋產製地表幾何形態，以及人工判釋數值航測系統立體像對數化地形單元，以下分別說明這兩種方法以及判釋標準和流程。

1.地表幾何形態分類

本研究選用 Jasiewicz and Stepinski(2013)設計的 Geomorphon 模組，在 GRASS GIS7.2.1 版本的平台上產製研究區的地表幾何形態。該工具僅需數入兩項必要參數，分別為搜尋半徑與平坦度閾值。搜尋半徑為待推測中心至鄰域的最大距離，至少為 3 個網格，較大的搜尋半徑表示以更大的視野檢視地形分類，較小的搜尋半徑則是從局部尺度來看地形分類；平坦度閾值為決定待推測中心和鄰域相對高低關係的數值，透過與天底角(nadir angle)和天頂角(zenith angle)差值的比較決定待推測中心及鄰域的高低關係(圖 1-8)。平坦度閾值設定愈大，可接受的地表起伏程度愈廣，代表可判釋的「平地」形態愈多。

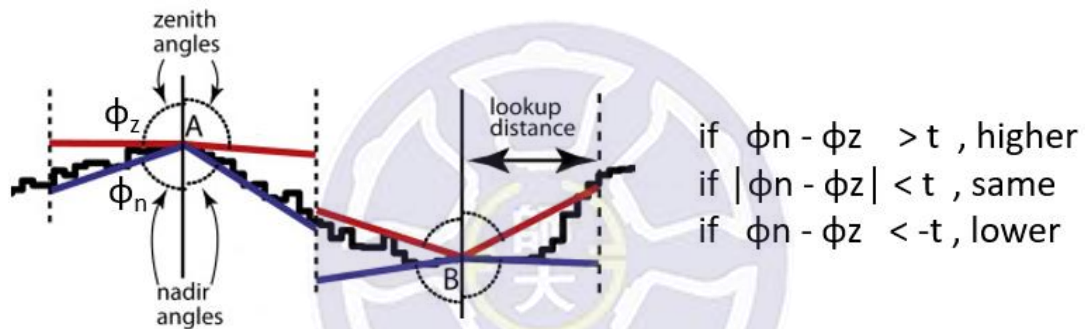


圖 1-8 平坦度閾值(t)與天底角(ϕ_n)天頂角(ϕ_z)差值之關係示意圖

若 $\phi_n - \phi_z > t$ ，表示鄰域網格比待推測中心網格高；若 $|\phi_n - \phi_z| < t$ ，表示鄰域網格和待推測中心網格高度相同；若 $\phi_n - \phi_z < -t$ ，表示鄰域網格比待推測中心網格低。

考量本研究區中三條河流的谷床寬度範圍僅約 30 到 200 公尺，因此在 Geomorphon 的參數設定上，固定搜尋半徑為最小距離 3 個網格，以本研究所使用的 DEM 解析度而言相當於 18 公尺，以求最細緻的形態分類結果。平坦度方面則以谷底平均坡度為參考，初步設定 20 度為上限。將在 GRASS GIS 平台產製出的幾何形態輸出為網格資料後，再輸入至 ArcGIS10.2 軟體中進行進一步的比對。

2.數值航測系統判釋航照立體像對

本研究利用數值航測系統的立體像對功能，判釋、數化蘇迪勒颱風前的谷床邊界與谷床中的地形單元(圖 1-9)，並將判釋結果和地表幾何形態分類進行對應，編修谷床和地形單元的範圍。另一方面，以立體像對觀察蘇迪勒颱風造成的地形變化，包含崩塌地的數化以及溪溝沖蝕(土石流)的判釋，也檢視主流谷床受土石流或洪水作用影響的地形單元，藉由比對颱風前後的變動，說明地形再作用情形。

本研究使用之數值航測系統為 Leica 開發的遙感影像處理系統 ERDAS IMAGINE 2016，在該系統之 IMAGINE Photogrammetry 建立數值航照專案檔，輸入坐標系統、平均航高、航測相機參數以及內、外方位參數等資料後，可在 Stereo Analyst 中開啟專案檔，配合 3D 顯示器與專用的主動式快門眼鏡即可在電腦上檢視立體像對並進行數化。使用的影像為農林航空測量所拍攝之航空照片數值檔(表 1-6)，航拍使用之相機為 DMC，其焦距長度(f)為 120mm，像元尺寸(s)為 12 μm ，影像之空間三角(外方位)資料亦來自農林航空測量所的航空攝影紀錄資料(農林航空測量所，2015)(附錄 1)。本研究使用的兩期航照資料平均航高(H)約為 3400 公尺，根據地面解析度計算公式 $GSD = H \times \frac{s}{f}$ ，可得航照地面解析度為 34 公分。由於颱風過後的航照資料未涵蓋全研究區範圍，平廣溪與礮窟溪上游有部分缺漏，另外有部分地區有雲遮情形，為本研究資料使用上之限制。

表 1-6 本研究使用之航空照片數值檔編號

任務	日期	影像編號
150630c	2015 年 6 月 30 日	0001~0010、0020~0029、0042~0047
150810c	2015 年 8 月 10 日	0007~0015、0024~0032
150810e	2015 年 8 月 10 日	0001~0002

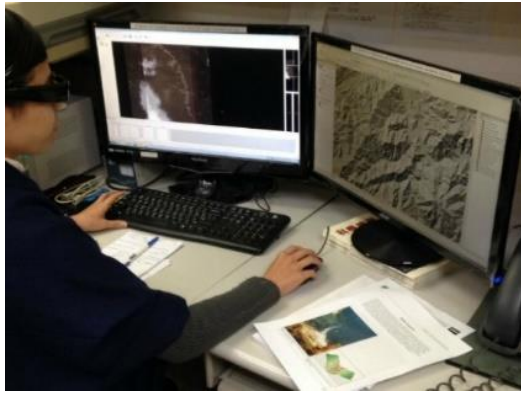


圖 1-9 研究者於臺師大地理系地形實驗室使用數值航測系統判釋地形單元情形

3.地形單元判釋標準與流程

本研究欲判釋颱風事件前的谷床地形單元，以及颱風過後的崩塌地與沖蝕（土石流）溪溝（圖 1-10）。颱風前之地形原貌需界定谷床邊界以確認谷床範圍，並判釋河道兩側小階地與支流谷口的扇狀地，本研究稱前者為「埋積小階」，是指河谷受大量沉積物堆埋形成埋積谷床後，再經河道下切後所形成的階地，原谷床成為高於河床的階面並有臨河的階崖；後者為土石流作用所堆積形成的「土石流扇」，若扇體與主流河道落差達 10 公尺視為扇階。航照判釋操作性定義與對應之地表幾何形態分類如表 1-7 所示，並以圖 1-11、圖 1-12 對判釋範圍示意。

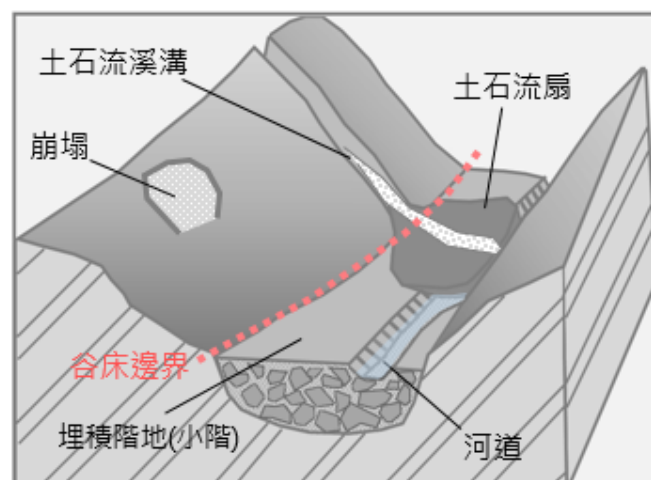


圖 1-10 埋積谷床地形單元示意圖

表 1-7 地形判釋標準一覽表

項目		航照判釋標準	Geomorphon 形態分類
颱風前 谷床 地形 原貌	埋積谷床 範圍	河谷底部平坦面， 與谷壁有坡度轉折界線	谷床：平地(flat) 邊界：坡腳(footslope)
	埋積小階	階崖頂至谷床邊界或土石流扇扇端	階面：平地(flat) 階崖頂：肩部(shoulder)
	土石流扇	扇頂自谷口畫起，以扇形堆積體無 起伏處或碰到主流河道處為扇端	扇端：扇狀外緣的坡腳 形態*
	扇階	扇形堆積體與河道落差達 10 公尺， 數化扇面範圍	階面：平地(flat) 階崖頂：肩部(shoulder)
颱風 後 地形 作用 影響 範圍	崩塌	颱風後坡面明顯裸露者	--
	溪溝沖蝕 (土石流)	颱風後溪溝具明顯土砂沖蝕者	--
	土石流扇 堆積範圍	土石堆積於扇面範圍	--
	埋積小階受 影響範圍	階面有明顯受主流側蝕或溢淹土砂 情形	--

*依土石流扇的堆積特性，扇端應有由陡變緩的坡度轉折，因此以坡腳形態為標準。

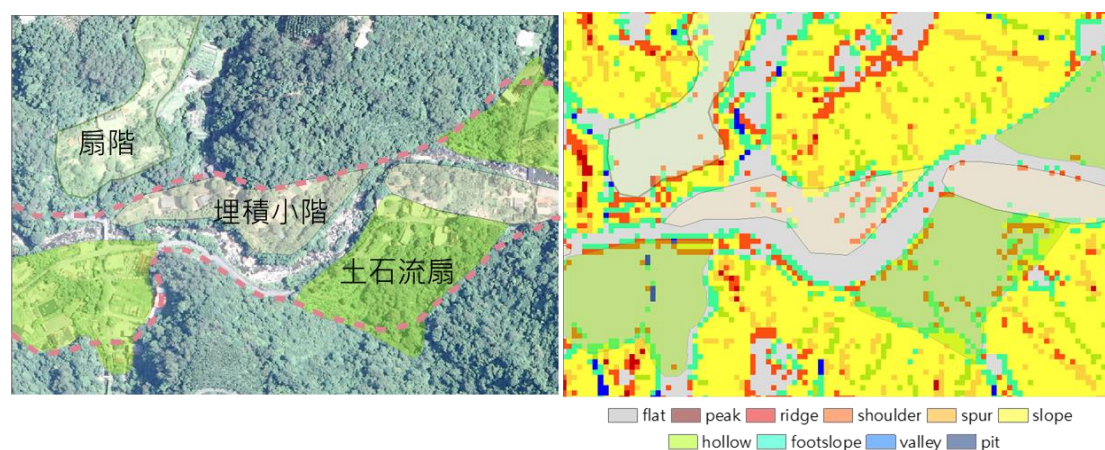


圖 1-11 颱風前谷床地形原貌判釋對照圖

左圖為航照判釋範圍，右圖為 Geomorphon 自動分類之地表幾何形態。



圖 1-12 颱風後地形作用影響範圍航照判釋示意圖

本研究運用半自動判釋地表幾何形態分類，搭配航照人工判釋查找出埋積地形，將航照判釋數化的地形單元與地表幾何形態邊界在 ArcGIS10.2 之平台中套疊、比對，以確認谷床地形單元分布，判釋流程如圖 1-13。

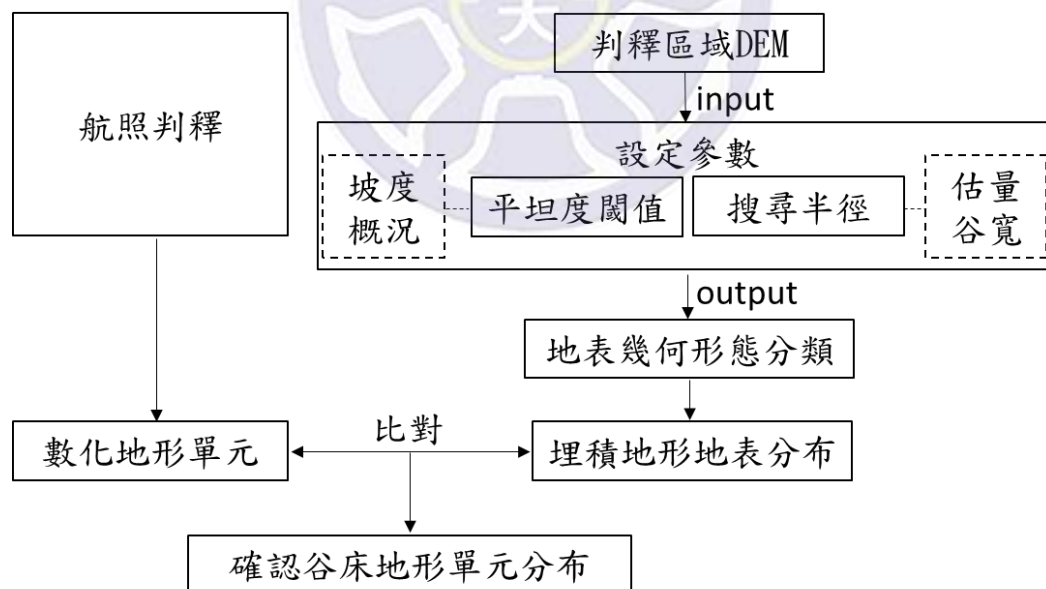


圖 1-13 中小型集水區谷床地形單元判釋流程圖

二、野外調查

本研究將室內判釋之地形單元結合地形陰影圖與岩性資料等，繪製研究區內的地形特徵圖，並實際至現場檢核是否有誤判之地形單元。考量交通可及性，本研究以道路沿線之線抽樣模式進行查核，確認地形單元之分布，同時也尋找土石流堆積之露頭證據。

三、數值地形計測

數值地形計測主要用於谷床地形單元和集水區，以得知埋積小階、土石流扇和流域環境的各項地形特徵數值。本研究使用光達產製之 6 米數值高程模型進行地形計測，利用 Arc GIS10.2 之空間分析工具(Spatial Analyst Tools)中的水文(Hydrology)工具產製研究區內的水系、集水區，並計算河流級序、主流長度、河道高差與坡降、集水區面積、流域險峻值等地形計測參數，也利用空間分析工具內的地表(Surface)工具產製坡度與陰影圖等資料。為了解影響主流的主要地形作用，本研究參考周憲德(2016)對平廣溪(台灣北部)地區修正的流域險峻值，於主流設定數個出水點(Outlet)並計算各出水點之集水面積，並以分水嶺最高點和出水點的高程計算高差，以此計算主流的流域險峻值只了解其潛在的地形作用。

另一方面，為瞭解河道兩岸地形單元(谷床面)的縱剖面趨勢，本研究使用 ArcGIS 外掛的高程剖面工具(EZ Profiler 9.3)繪製主流及兩側谷床面之縱剖線，主流縱剖線為 ArcGIS 水文工具產製之河道流深線，兩側谷床面則取平行於流深線的埋積小階階面中線，若谷床面上有土石流扇，則取通過扇體的橫剖線。為了解埋積小階的比高，也計算階面中線兩端點投影至流深線上的端點高差。

第四節 研究區概況

本研究以新店溪三個相鄰的支流(平廣溪、小坑溪、磺窟溪)為研究區，這三條溪流的河谷皆有出現寬平的埋積谷床特徵，其流域面積雖小，但河谷中也已有土地利用之行為，在極端降雨事件中具有受災風險，例如 2015 年 8 月 7 日至 9 日侵襲台灣之蘇迪勒颱風便造成本區發生土砂災害。本節介紹研究區內的位置與地形、地質概況、土地利用情形，以及蘇迪勒颱風在本區造成的災害事件。

一、位置與地形

本區三個流域的基本資料統整如表 1-8 所示。平廣溪、小坑溪、磺窟溪是隸屬於新店溪流域中三條相鄰的支流，位於新店溪中游河段的西側，分別發源於加九嶺山北側、東獅頭山北側與獅仔頭山東側。本研究使用 ArcGIS10.2 之水文工具自 6mDEM 中產製水系，設定集流閾值為 300 個網格，在此閾值計算下，新店溪為 8 級河，三條小溪分別為 5 級、4 級、5 級，在新店溪流域中，屬於中等級的河流。三個流域以各支流匯入主流處起算以上集水範圍為一子集水區，主流上游則以溪流匯入谷床明顯加寬處的位置為出水口起算至流域邊界的集水範圍為集水區，總計共有 106 個子集水區。

本區地勢自西向東低降，主流路大體上皆由西南往東北流，並分別於廣興、小坑口與磺窟口匯入新店溪主流(圖 1-14)。研究區內以平廣溪的主流長度最長、流域面積最大，而磺窟溪次之、小坑溪最小，主流坡降則相反以小坑溪為最大、平廣溪最小。整體而言，本區坡度大多分布在 20 至 40 度之間(圖 1-15)，有三分之二的子集水區平均坡度在 30 度以上，多數子集水區坡度條件位在土石崩落滑動區(詹錢登，2000)。(各子集水區資料詳見附錄 2)

表 1-8 研究區流域基本資料

項目(單位)	平廣溪(PG)	小坑溪(XK)	磺窟溪(HK)
子集水區數量	62	17	27
主流長度(km)	10.5	3.4	5.8
主流平均坡降(%)	8.90%	21.61%	12.21%
流域面積(km ²)	19.5	2.6	8.9
流域平均坡度(度)	31.87	30.63	25.67

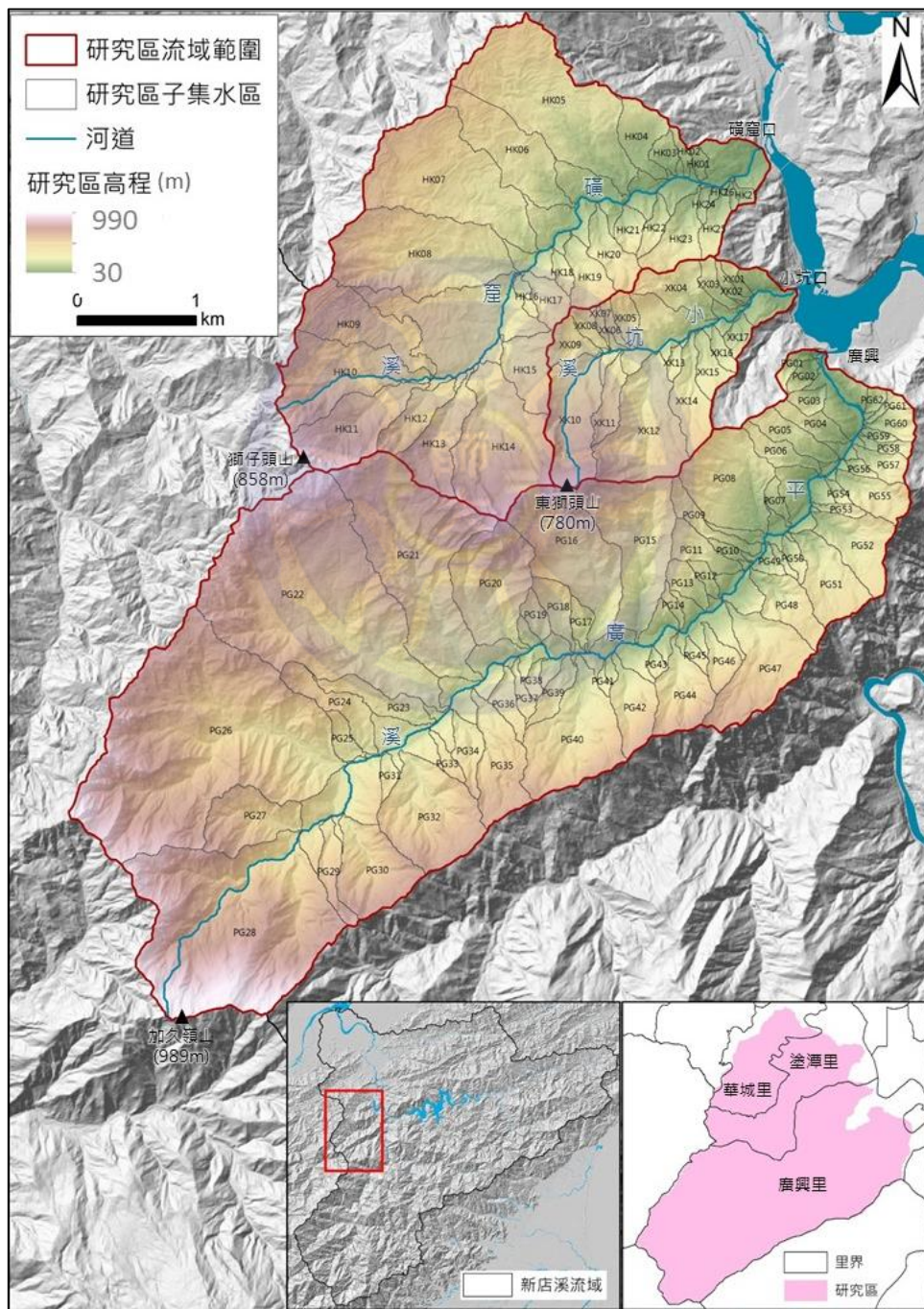


圖 1-14 研究區位置圖

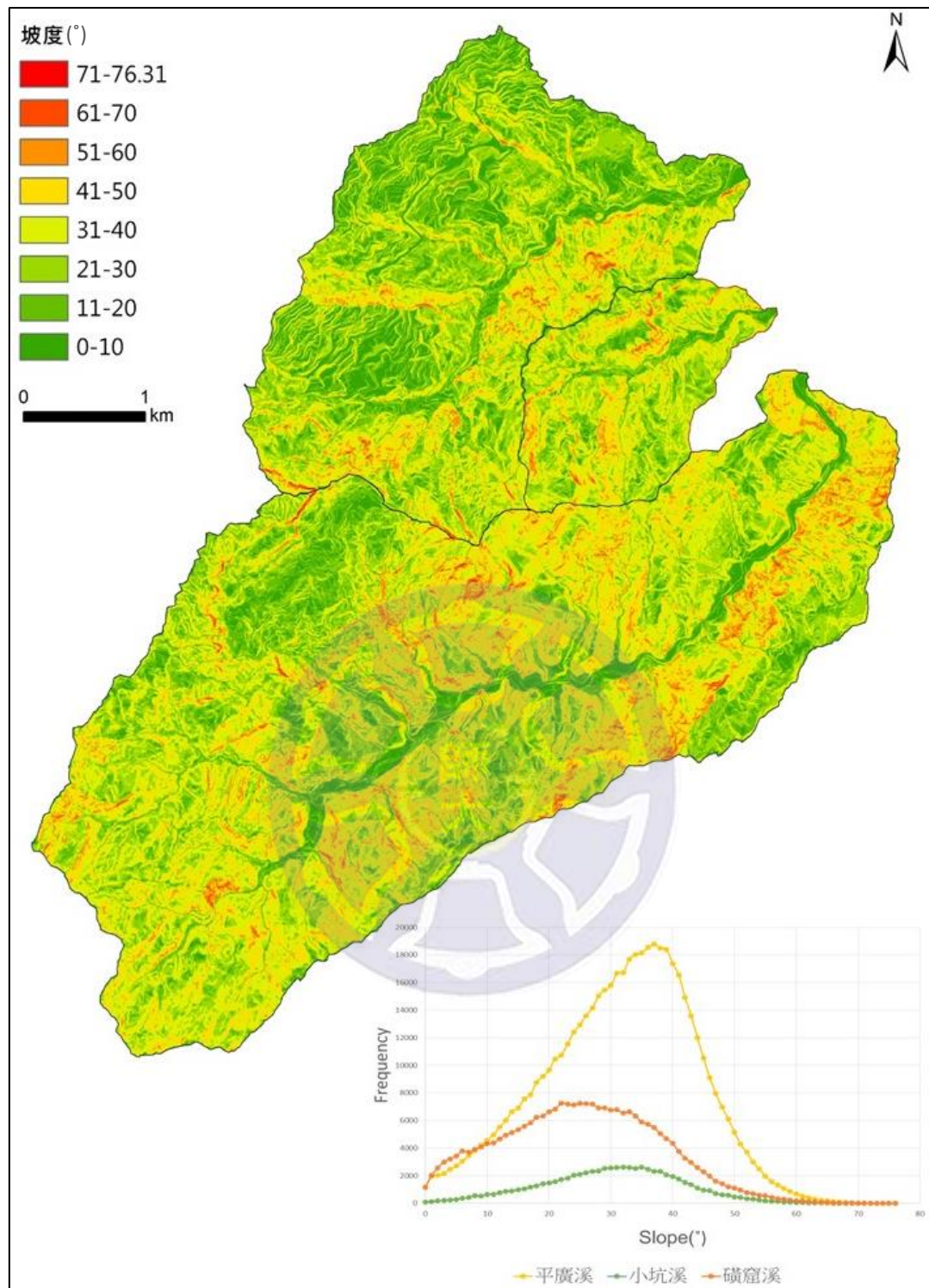


圖 1-15 研究區坡度分布與坡度-頻率圖

橫軸為坡度，縱軸表示某一坡度在本區出現的次數。坡度-頻率圖顯示本區坡度大多分布在 20 至 40 度，其中平廣溪與小坑溪多集中在 30 至 40 度之間。

二、地質概況

本研究區包含古第三紀漸新世地層與新第三紀中新世地層，地層自下而上分別為粗窟層、大桶山層、木山層、大寮層、石底層，除了粗窟層與大桶山層具有輕度變質之硬頁岩，其餘地層之岩性以砂岩與頁岩為主(圖 1-16)。本研究採用經濟部中央地質調查所 1:25000 岩性組合圖的資料，參考沈淑敏等(2017)繪製地形特徵圖時將岩性組合圖簡約化之原則，依照主、次要岩層厚度所占比例，將單層、偶夾合併為「單層」，互層、間夾合併為「互層」。各地層之岩性描述如表 1-9 所示。

本區地質構造主要為東北—西南走向，由北而南有礮窟向斜、有木向斜、鹿母潭斷層、屈尺斷層、龜山向斜等構造線，另外有西北—東南走向之忠治斷層和信賢斷層通過平廣溪流域(圖 1-16)。周憲德等人(2016)調查平廣溪流域之岩層走向並統計微水系之流向，認為在早期地質年代中，該區受西北—東南向的大地應力擠壓影響因而發展出東北—西南走向之主要構造線，並發展出平廣溪主流線型，該方向之大地應力亦造成剪切節理發育，一至四級之水系流向符合剪切節理的走向，可見地質構造與節理的發育影響本區水系之發展。

表 1-9 研究區地層與岩性

地層	岩性 (轉載自林朝宗, 2000)	本研究簡約化之研究區內 各地層所含岩性
石底層 (St)	白色至淺灰色砂岩與頁岩互層， 含煤層。	砂岩、頁岩互層
大寮層 (Tl)	厚層砂岩及砂岩與頁岩互層，下 部夾玄武岩質凝灰岩體。	砂岩、頁岩互層 砂岩 頁岩
木山層 (Ms)	白色至淺灰色砂岩及砂岩與頁岩 薄互層，含薄煤層。	砂岩、頁岩互層 砂岩
大桶山層 (Tt)	深灰色硬頁岩偶夾薄層至厚層泥 質粉砂岩及薄層細粒砂岩，夾凝 灰岩凸鏡體。	砂岩、硬頁岩互層 硬頁岩
粗窟層 (Tk)	灰色薄層至厚層粉砂岩與深灰色 硬頁岩互層，偶夾薄層細粒砂岩。	砂岩、硬頁岩互層 變質砂岩、硬頁岩互層

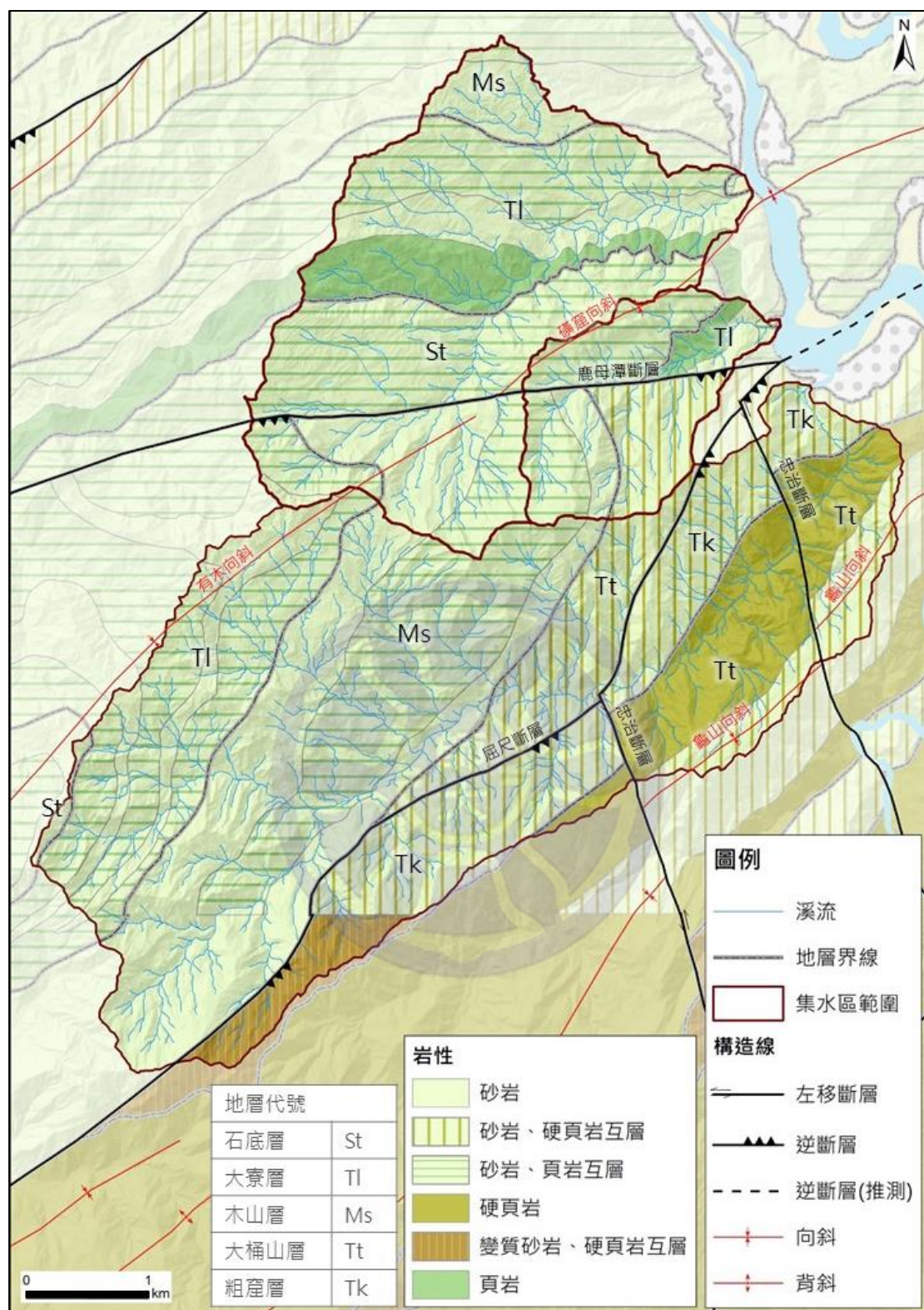


圖 1-16 研究區地層分布與岩性組合圖

三、土地利用

本研究區位於新北市新店區境內，包含廣興、塗潭與華城三個里，沿谷床而行的主要道路有平廣路一段、小坑二路和新潭路二段，以及其他數條產業道路進入山區。本區主要為森林用地，佔全區約 84% 之面積，人為土地利用多集中在谷床與部分平緩的坡地，多數為農業用地。建築用地方面，除磺窟溪流域有大面積坡地型社區(例如大台北華城、秀岡山莊等)的建設，其餘大多沿谷床分布，或零星散布在坡地上。交通、建築、公共設施與遊憩使用土地等與人為建設相關的土地使用類別合計佔全區約 5% 的面積(表 1-10)。

表 1-10 研究區內各類別土地使用所佔比例

類別	佔研究區面積比例
農業	7.87%
森林	84.13%
交通	1.90%
水利	0.49%
建築	2.74%
公共設施	0.27%
遊憩	0.45%
其他	2.14%

※本研究整理自民國 95-97 年之國土利用調查成果。

三、蘇迪勒颱風造成本區之災害事件

2015 年 8 月 7 日至 9 日侵襲台灣的蘇迪勒颱風在北台灣造成多起災情，此次颱風事件在福山雨量站紀錄之三天內累積降雨達 792 毫米，其重現期經推估在北部地區有超過 100 年頻率年之訊號(張志新等，2015)，其中以福山測站不同重現期之累積雨量來對應，蘇迪勒颱風 3、6、12 小時最大降雨量更高於 200 年重現期(表 1-11)(魏倫瑋等，2015)。此次颱風事件在本區引發多起土砂災害，尤其以平廣溪的災害密度最高，造成多處房屋損毀甚至人命損失(表 1-12、圖 1-17)。

表 1-11 福山測站各重現期雨量與蘇迪勒颱風累積雨量
(轉載自魏倫璋等，2015)

重現期	5 年	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
3 小時累積雨量	156.3	178.3	202.8	219.2	234.3	248.4
6 小時累積雨量	248.1	279.6	312.2	332.8	350.9	367.3
12 小時累積雨量	389.2	450.0	515.7	558.6	597.4	633.2
24 小時累積雨量	583.2	678.7	782.0	849.4	910.6	967.0
蘇迪勒颱風累積雨量	3 小時	6 小時	12 小時	24 小時		
	253.0	442.5	670.0	768.5		

表 1-12 蘇迪勒颱風於本研究區造成之災害事件
(整理自行政院農業委員會水土保持局，2015)

編號	受災地點	溪流	災害 類型	土石流潛勢溪流 (公開年份)
1	小坑溪	小坑溪	土石流	新北 DF224 (105)
2	廣興路一段 138 巷 21 號	平廣溪支流	洪水 土石流	
3	平廣路一段 7 號民宅旁	平廣溪	洪水 崩塌	
4	平廣路一段 22 號	平廣溪支流	崩塌	
5	平廣路一段 30 號	平廣溪支流	崩塌 (沖蝕)	
6	平廣路一段 88 巷	平廣溪支流	崩塌 (沖蝕)	新北 DF091 (91)
7	平廣溪下游左側邊坡	平廣溪	洪水 崩塌	
8	平廣路一段 151 號民宅旁	平廣溪支流	土石流	新北 DF227 (105)
9	平廣路一段 273 號	平廣溪支流	土石流	新北 DF226 (105)
10	平廣路一段 330 號	平廣溪	洪水	
11	平廣路一段 365 民宅旁	平廣溪	土石流	新北 DF225 (105)

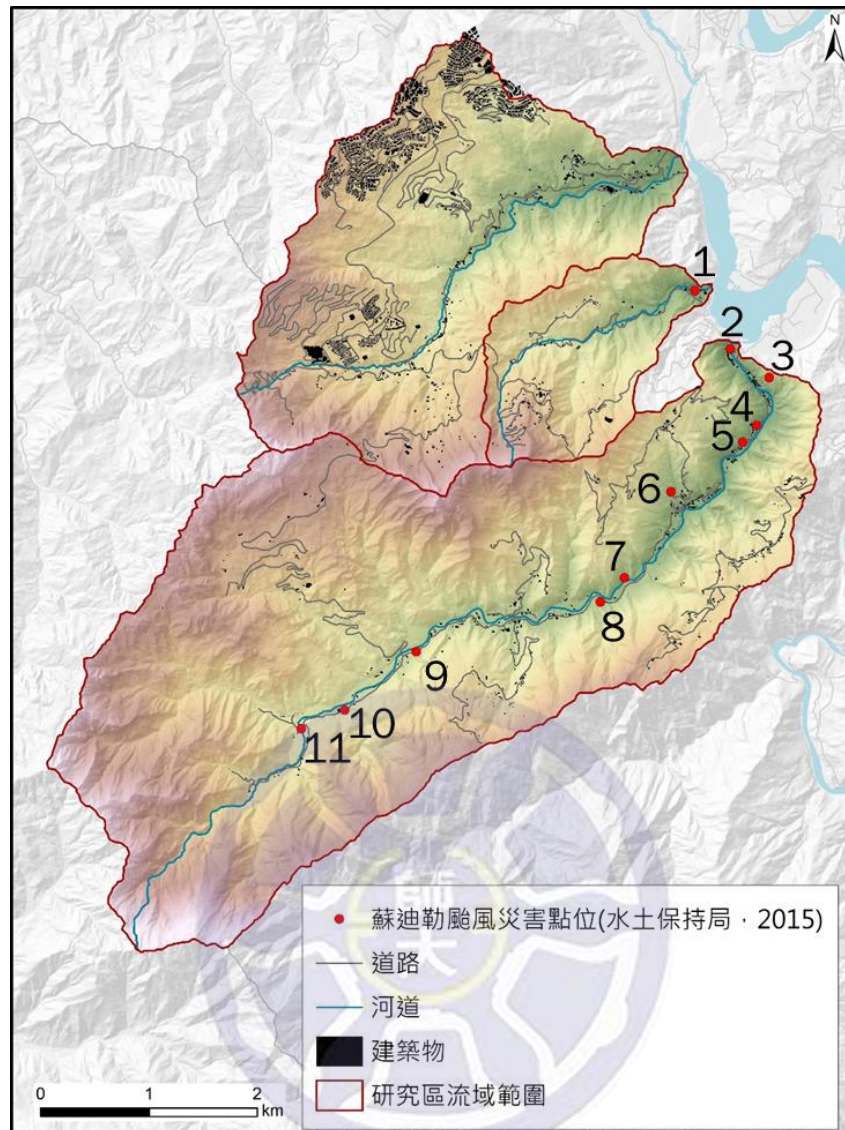


圖 1-17 蘇迪勒颱風災害點位圖
(災害點位編號參見表 1-12)



第二章 埋積谷床地形分布與特徵

本研究在主流谷床以數值航測系統檢視立體像對判釋地形單元的分布，並以地表幾何形態進行對照、輔助航照人工判釋，確認地形單元的邊界；也藉由 Geomorphon 工具產製的地表幾何形態，判釋研究區內支流的埋積分布。本章首先說明主流谷床地形單元的分布與特徵，並計算主流的流域險峻值以了解影響主流之地形作用，第二節再進一步說明支流的埋積分布、谷口土石流扇與各子集水區的特徵。

第一節 主流谷床地形分布與特徵

地形單元判釋結果顯示，研究區內三個流域的主流谷床以埋積小階分布為主，有 14 處支流的谷口有土石流扇，其中以平廣溪中游的土石流扇分布最為密集。另有 4 處支流有與河道落差達 10 公尺以上之扇階，本研究不將扇階視為谷床上的地形單元。以下分別說明各流域主流谷床地形特徵，以及埋積河段源流集水區面積和流域險峻值：

1. 平廣溪

從平面檢視平廣溪的主流，其谷床地形單元包含河道、河道兩側的埋積小階與土石流扇，埋積小階階面與土石流扇扇面各佔谷床 54.5% 和 22.6% 的面積。以埋積小階和土石流扇的分布大致上可以將平廣溪分為三個河段，埋積小階在上游與下游河段較為連續且佔該河段谷床面積比例較多；中游谷床面積較大，多土石流扇分布(圖 2-1、表 2-1)。整體主流谷床寬度大致介於 50 到 210 公尺之間，河道寬度則大約有 5 到 20 公尺寬(圖 2-2)。建築使用土地多分布於下游河段，共有 4.4 公頃的建築用地，中上游建築用地分布較為零星，共約 2.5 公頃，其餘有 12.2 公頃的農業用地；平廣溪有四個土石流扇的扇面有建築用地，而三個扇階的谷口也有土地利用情形。以主流上游谷床開始出現明顯寬平

特徵為出水口起算其上游集水面積，平廣溪主流開始出現埋積特徵的上游主要為 PG28 子集水區，其集水面積約為 200 公頃，集水區平均坡度為 33.37 度，另外也有約 30 公頃、平均坡度 34.24 度的子集水區(PG27)溪流匯入，兩個子集水區合計之集水面積整體佔流域總面積的 12%(圖 2-3)。

縱向檢視主流河道和谷床的形態，平廣溪主流自分水嶺到河谷出現埋積的河段坡降為 28.87%，埋積河段整體坡降為 3.90%，分別檢視埋積河段上、中、下游的坡降，依序為 8.13%、3.16%、2.13%(圖 2-4)。本研究也取埋積小階中線之頭、尾高度值，將該點投影至與河道流心線垂直的對應點，藉此了解埋積小階與河道的落差(比高)，結果顯示小階的比高大多介於 2 到 6 公尺。

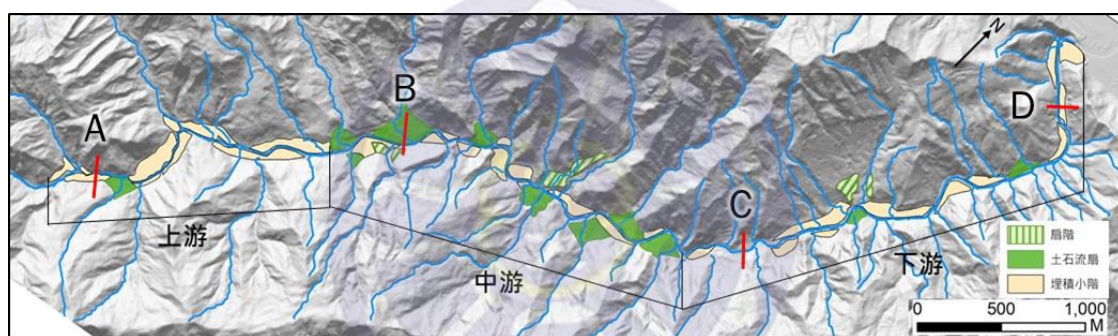
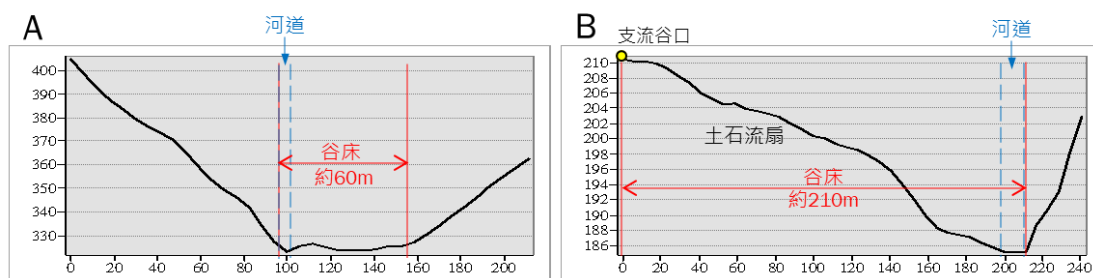


圖 2-1 平廣溪谷床地形單元平面分布圖

表 2-1 平廣溪各河段地形單元面積比例

	上游	中游	下游
谷床面積(ha)	18.8844	27.9428	24.1687
埋積小階佔谷床面積比例	78.0%	32.3%	61.6%
土石流扇佔谷床面積比例	7.1%	47.7%	5.7%



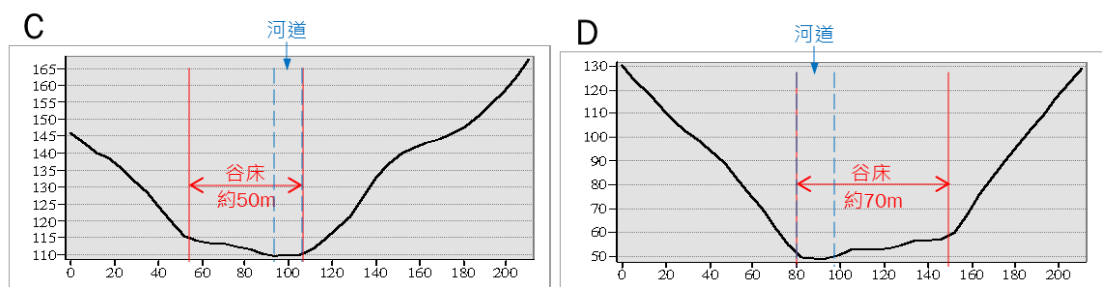


圖 2-2 平廣溪主流谷床橫剖面圖(剖面位置見圖 2-1)

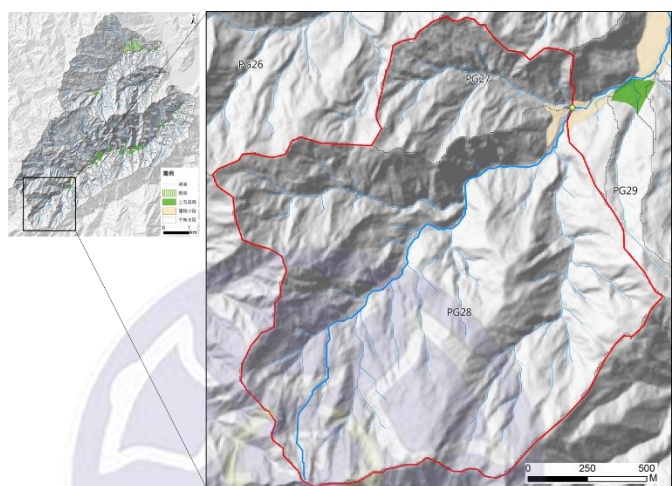


圖 2-3 平廣溪埋積河段之上游的集水範圍

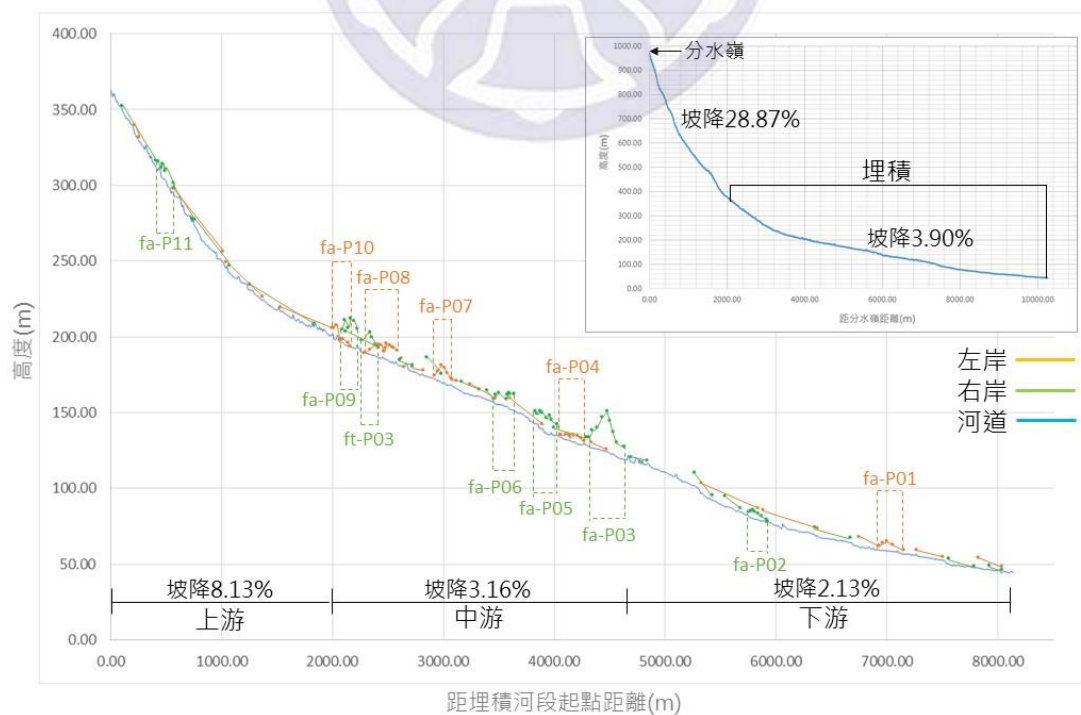


圖 2-4 平廣溪河道與谷床縱剖線圖

為了解影響平廣溪主流的主要潛在地形作用，本研究計算主流河段不同出水點之流域險峻值，結果顯示平廣溪主流進入埋積河段之後是以高含砂水流作用為主，並在主流長度(出水點沿主流河道至分水嶺最高點距離)約 3.7 公里處轉化為洪水作用(圖 2-5、圖 2-6)。

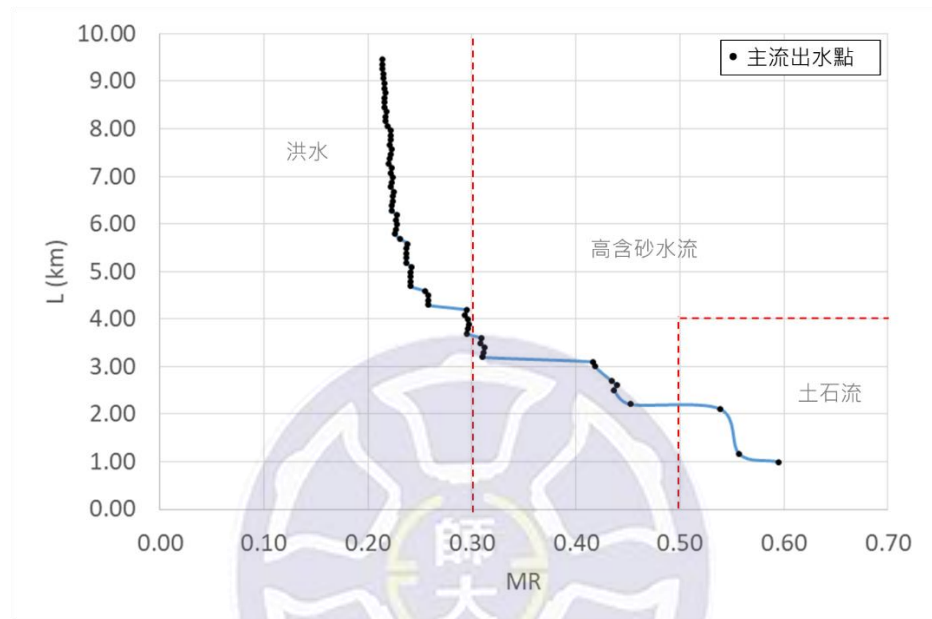


圖 2-5 平廣溪主流長度(L)與流域險峻值(MR)之關係

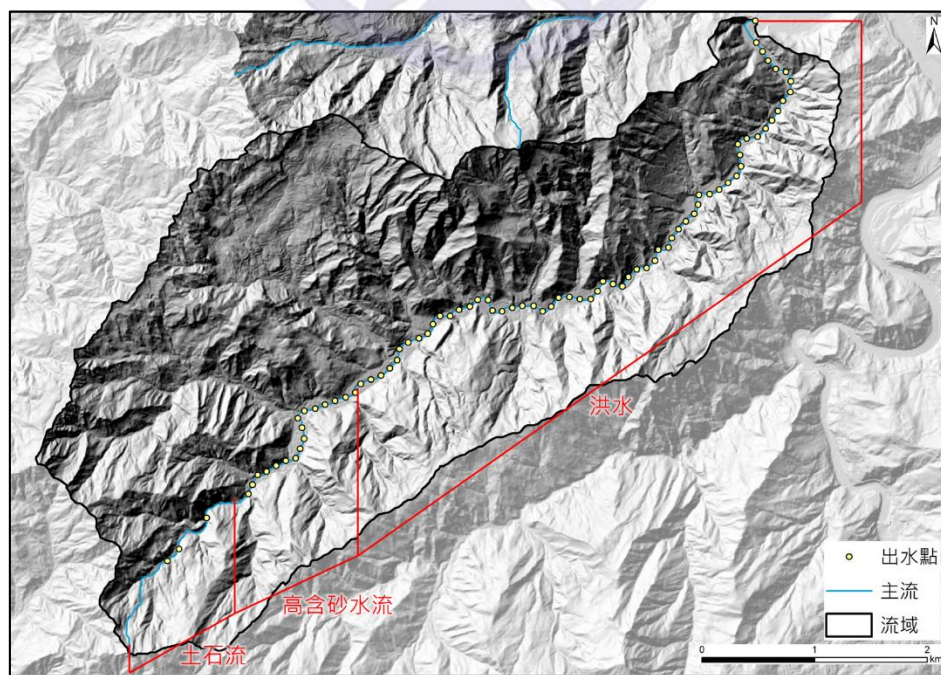


圖 2-6 平廣溪主流潛在地形作用對應河段

2.小坑溪

小坑溪為本研究區最小的流域，其流域總面積僅平廣溪流域面積的 13%，主流以埋積小階的分布為主，階面佔谷床面積約 70.2%(圖 2-7)，谷床的寬度最窄約 8 公尺，最寬在下游約有 150 公尺，主流河道寬度在 8 到 12 公尺左右(圖 2-8)。谷床土地利用集中在最下游谷口處並以農業為主(約有 1 公頃)，沿谷床僅有約 0.5 公頃的建築用地。小坑溪主流埋積河段的上游集水區為 XK9、XK10 兩個集水區(圖 2-9)，集水面積合計約 50 公頃，佔小坑溪流域總面積 19%。檢視小坑溪主流縱剖面，自分水嶺到河谷出現埋積的河段坡降為 40.63%，埋積河段坡降為 12.96%(圖 2-10)，埋積小階與河道的比高大約落在 1 到 7 公尺之間。

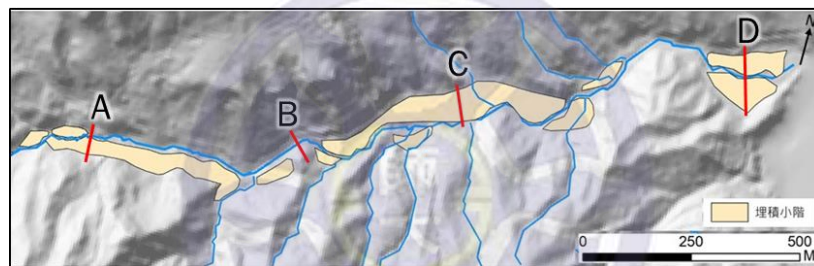


圖 2-7 小坑溪谷床地形單元平面分布圖

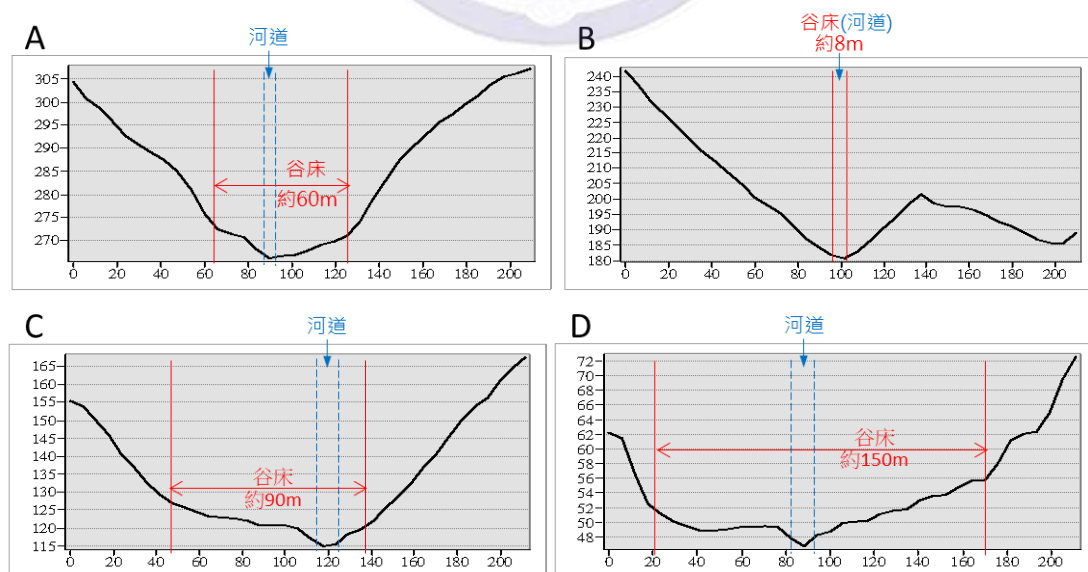


圖 2-8 小坑溪主流谷床橫剖面圖(剖面位置見圖 2-7)

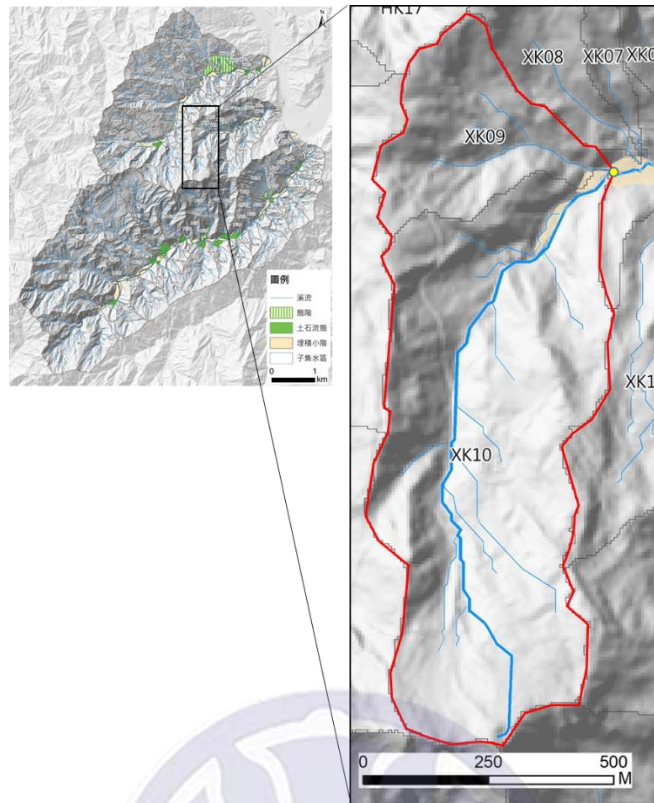


圖 2-9 小坑溪埋積河段之上游的集水範圍

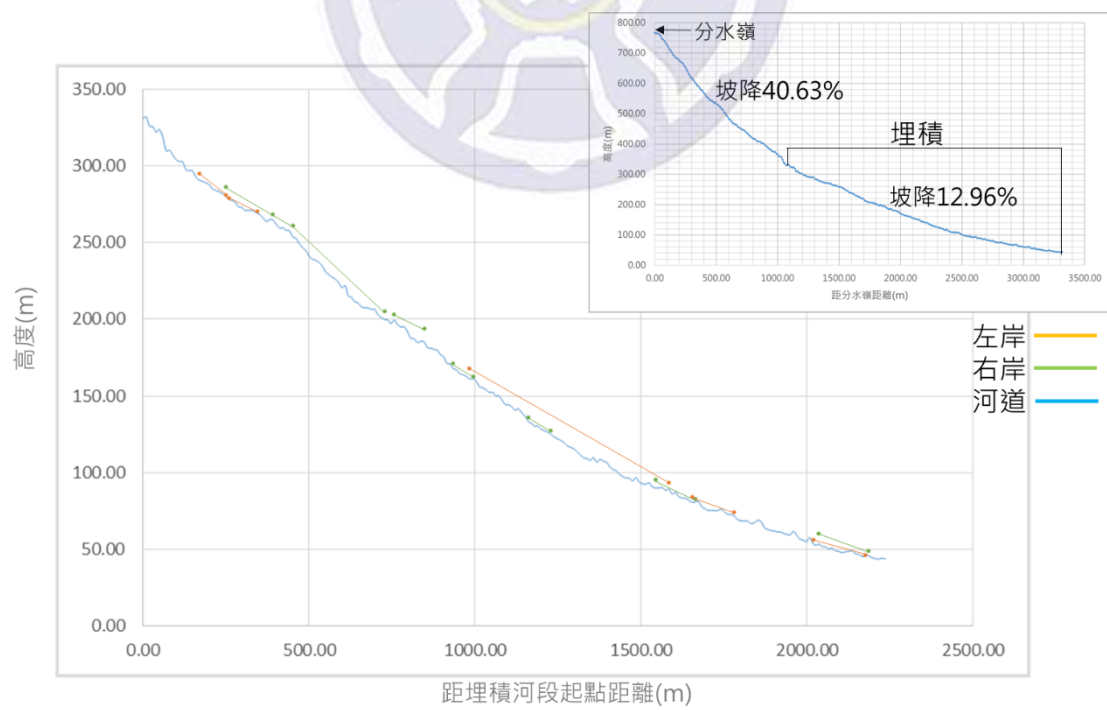


圖 2-10 小坑溪河道與谷床縱剖線圖

小坑溪主流潛在地形作用方面，根據主流河段各出水點之上游集水區總面積與高程差計算流域險峻值，結果顯示小坑溪流域以土石流和高含砂水流的作用為主，而土石流轉化為高含砂水流的位置約在主流距離分水嶺約 2.1 公里處，本流域無潛在洪水作用(圖 2-11、圖 2-12)。

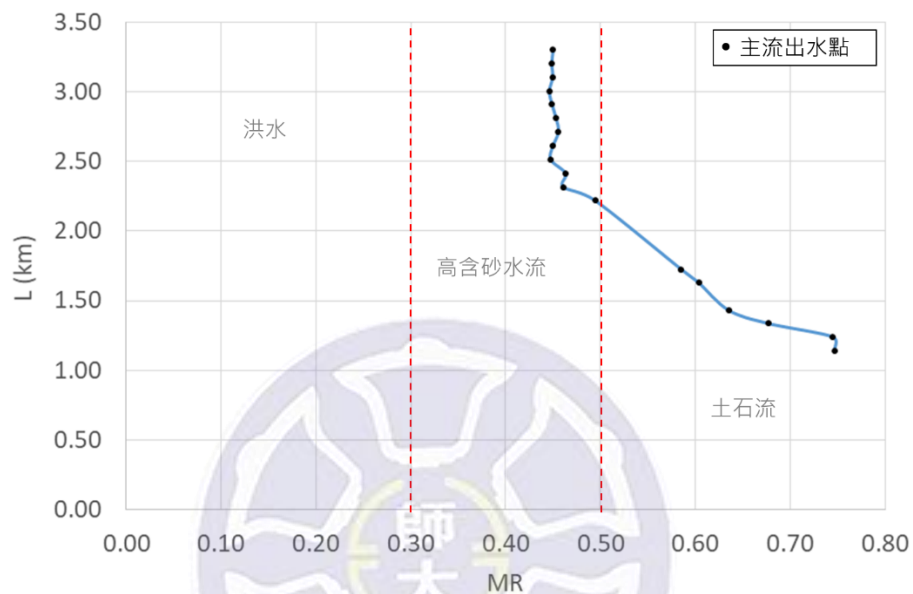


圖 2-11 小坑溪主流長度(L)與流域險峻值(MR)之關係

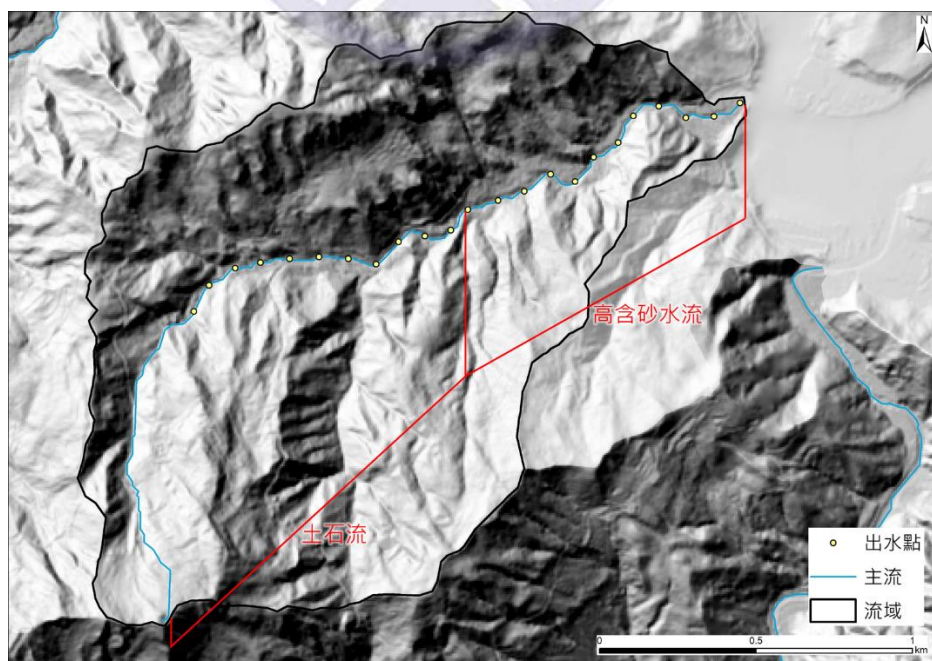


圖 2-12 小坑溪主流潛在地形作用對應河段

3. 礮窟溪

礮窟溪主流谷床主要的地形單元為埋積小階，另外有三處支流谷口有土石流扇，階面與扇面在谷床上的面積大約佔 7.6% 和 5.7% (圖 2-13)，谷床寬度大約介於 35 到 180 公尺之間，河道寬度約 9 到 20 公尺 (圖 2-14)。谷床的建築土地利用多位於上游，整體谷床的建築用地共約 2.6 公頃，另外有 9 公頃的農業用地。其主流河段上游集水區約有 86 公頃，佔礮窟溪流域總面積 10% (圖 2-15)。主流河道坡降方面，礮窟溪自分水嶺到埋積河段的坡降為 29.76%，埋積河段則是 8.72% (圖 2-16)，埋積小階比高大多介於 2 到 6 公尺之間。

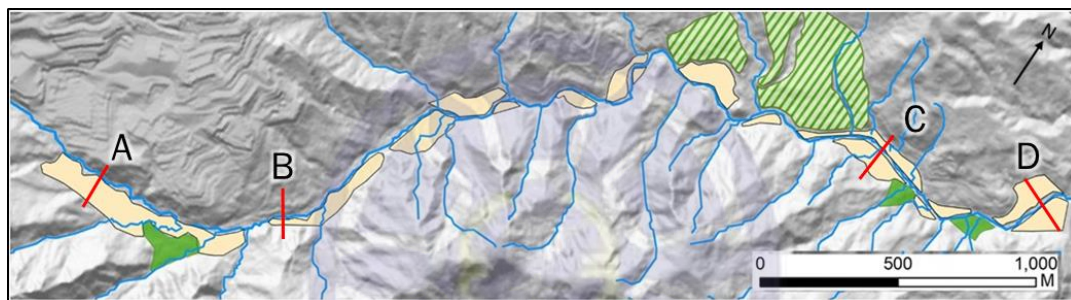


圖 2-13 礮窟溪谷床地形單元平面分布圖

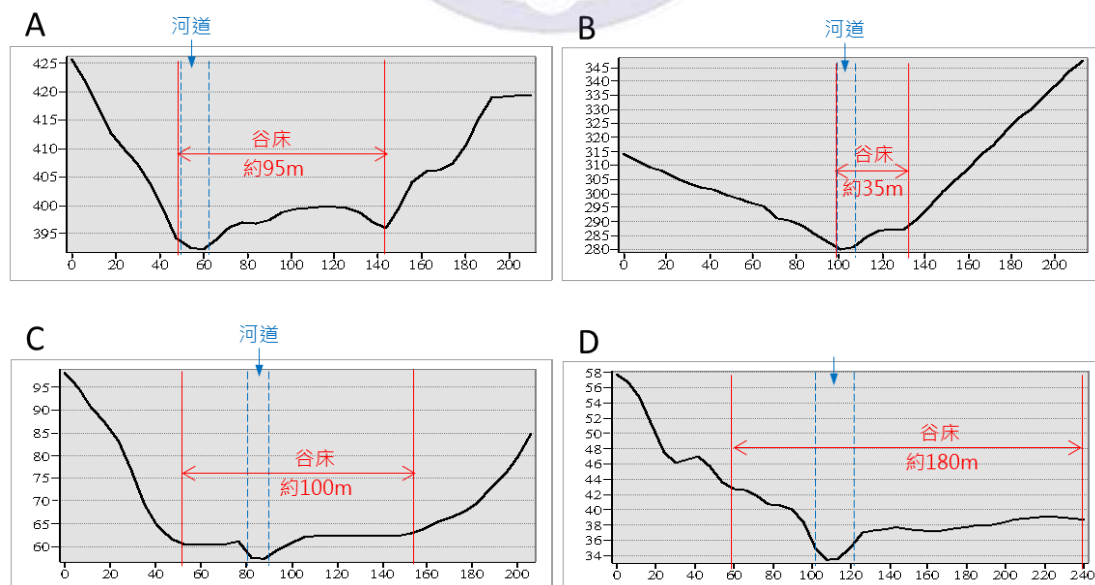


圖 2-14 礮窟溪主流谷床橫剖面圖(剖面位置見圖 2-13)

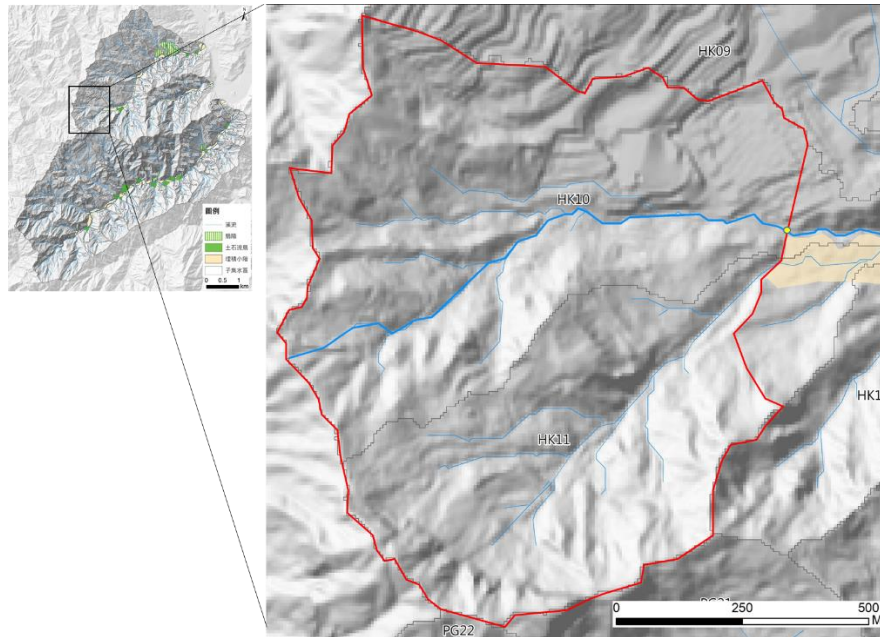


圖 2-15 磺窟溪埋積河段之上游的集水範圍

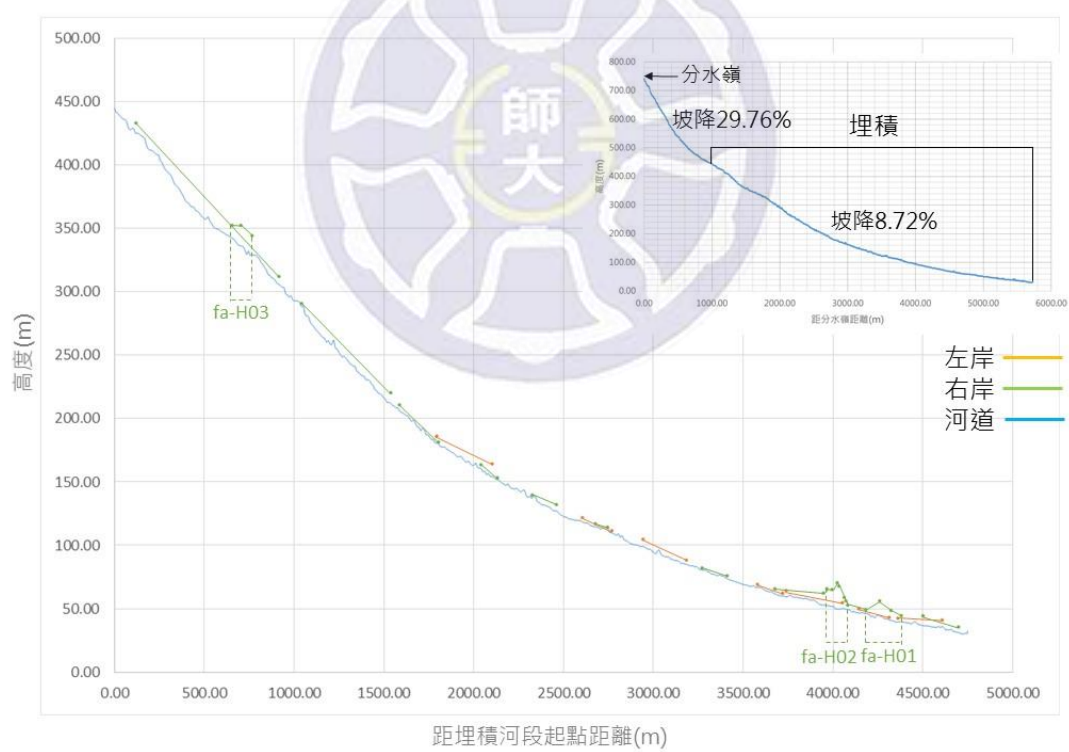


圖 2-16 磺窟溪河道與谷床縱剖線圖

計算礮窟溪主流各出水點集水區的流域險峻值以推斷其主流河段的地形作用，結果顯示主流開始出現埋積特徵之河段為高含砂水流的作用為主，至主流長度約 2 公里處則逐漸轉化為洪水作用(圖 2-17、圖 2-18)。

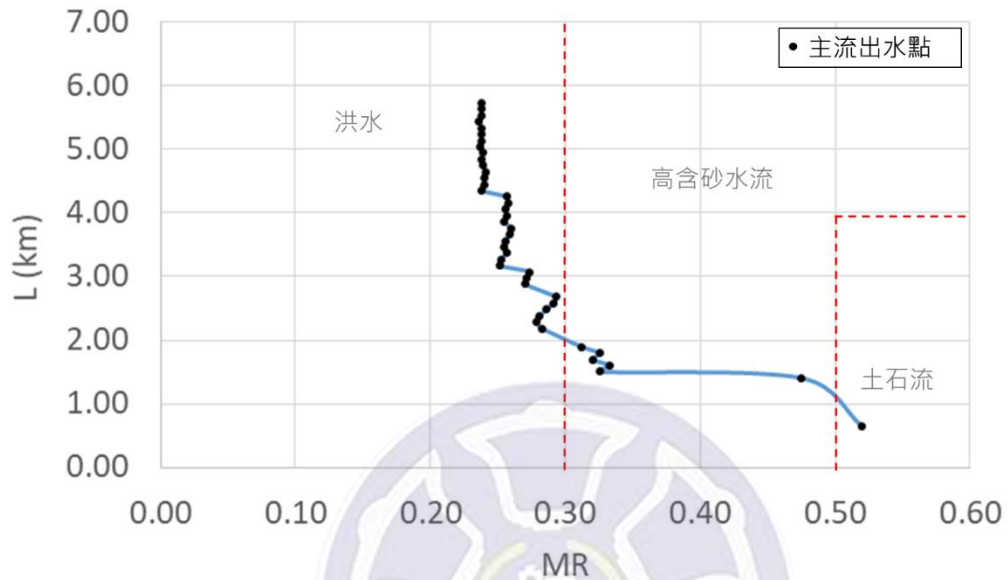


圖 2-17 礮窟溪主流長度(L)與流域險峻值(MR)之關係

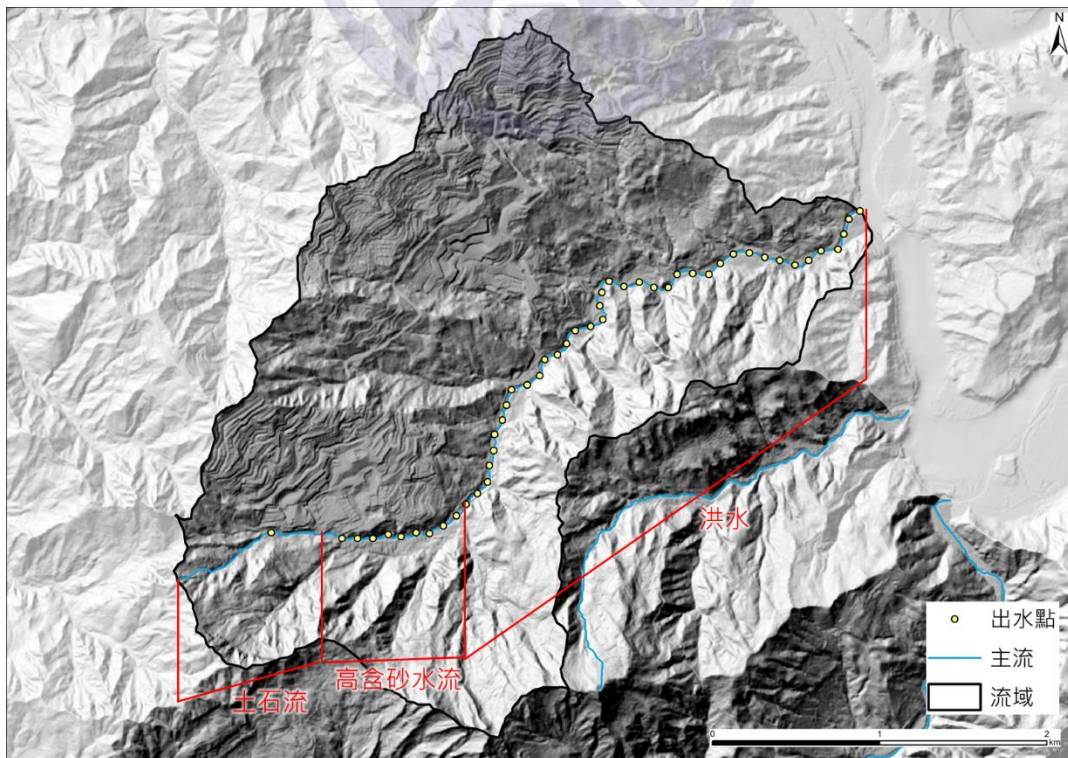


圖 2-18 礮窟溪主流潛在地形作用對應河段

第二節 埋積支流、土石流扇地形與集水區特徵

除了主流埋積谷床地形單元分布，本研究進一步逐一檢視各流域支流是否有埋積特徵。由於航照判釋會受到植被覆蓋影響而不易確認是否有平坦谷床，因此以濾除地上物的 LiDAR 資料進行 Geomorphon 自動判釋平地形態分布，可找出支流的埋積分布(例如圖 2-19)。以自動判釋方法產製平地形態(圖 2-20)搭配航照判釋，找出研究區內有 27 個子集水區河谷中有埋積情形(圖 2-21)，這些具有埋積特徵的子集水區面積大多在 50 公頃以上，集水區平均坡度在 20 度以上(圖 2-22)，多數為 3 級河(圖 2-23)；所有支流有埋積的子集水區當中，有 9 個谷口有土石流扇或扇階特徵(表 2-2)。

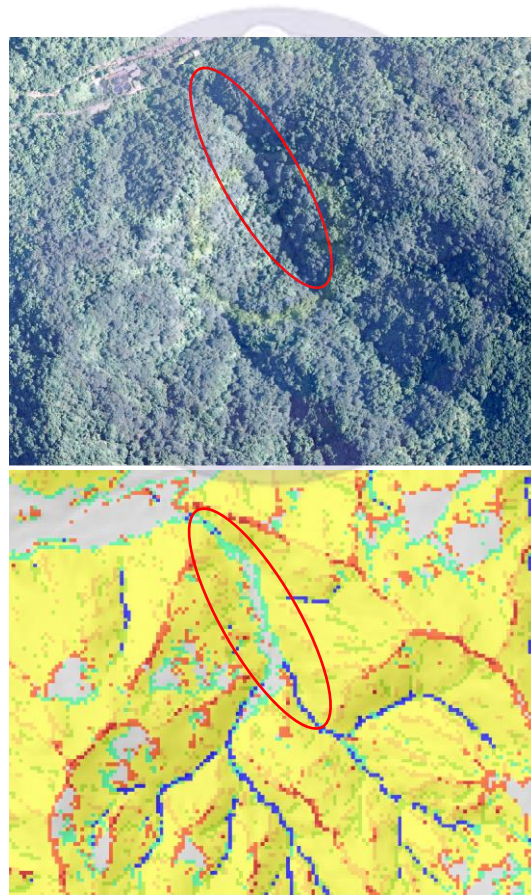


圖 2-19 航照影像(104.06.30)與 Geomorphon 自動判釋 6m DEM 形態比對
(以 PG32 集水區為例)

由於航照判釋受植被覆蓋影響不易確定支流的埋積狀況，因此以自動判釋平地形態找出埋積特徵。

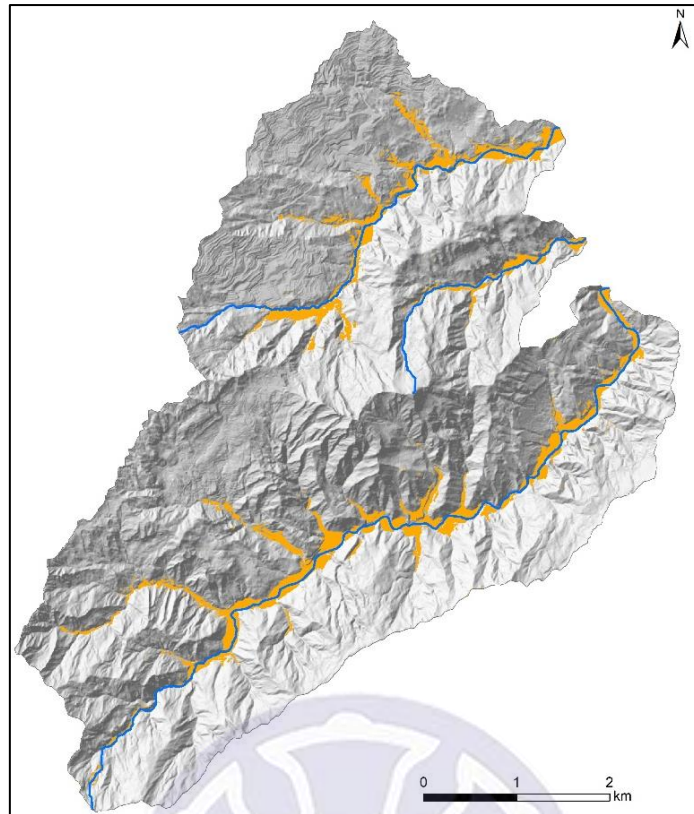


圖 2-20 Geomorphon 自動判釋谷床平地形態分布圖

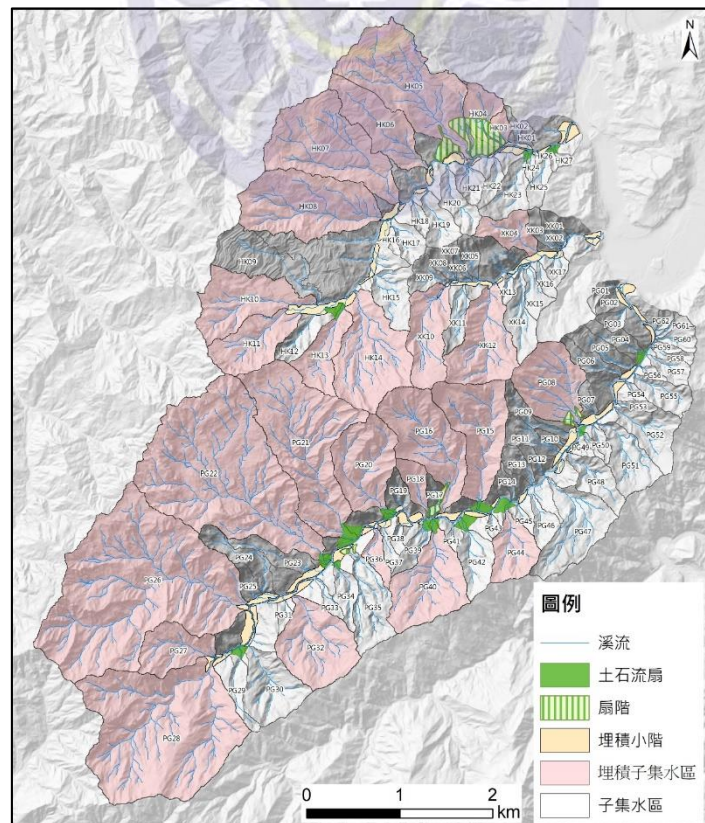


圖 2-21 具有埋積特徵的支流子集水區分布圖

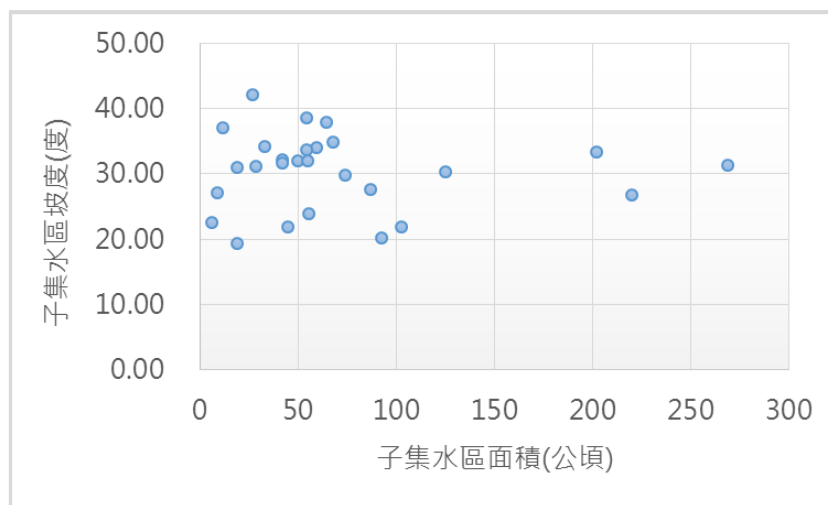


圖 2-22 具有埋積特徵的支流子集水區面積坡度分布圖



圖 2-23 具有埋積特徵的支流子集水區級序統計圖

表 2-2 支流溪溝埋積與谷口土石流扇關係

	有埋積特徵	無埋積特徵
有土石流扇或扇階	9	9
無土石流扇或扇階	18	70

本研究總共判釋出 14 個土石流扇，11 個位於平廣溪，3 個位在礮窟溪流域。另外有 4 處谷口具有扇狀特徵但其與河道高差達 10 公尺，本研究視為扇階，其中 3 個位於平廣溪，1 個在礮窟溪。由於扇階也可作為指示土石流作用之地形證據，因此本節將扇階也納入說明。表 2-3 為研究區內各土石流扇及扇階的基本屬性資料。

表 2-3 研究區土石流扇與扇階基本屬性

地形 編號	扇面面積 (公頃)	扇面 平均坡度 (%)	流經扇體之 河道坡降 (%)	所屬子集水區			
				代號	溪溝最大 級序	面積 (公頃)	平均坡度 (度)
fa-P01	0.93	28.26	23.95	PG04	2	9.63	31.11
fa-P02	0.60	26.90	23.87	PG49	1	2.15	29.99
fa-P03	2.07	43.26	30.38	PG44	3	26.74	31.11
fa-P04	1.84	12.13	6.29	PG15	3	64.25	28.06
fa-P05	2.33	30.54	21.79	PG42	3	21.72	41.49
fa-P06	2.03	17.88	11.82	PG40	3	54.62	42.22
fa-P07	1.35	33.45	19.40	PG20	3	54.22	37.92
fa-P08	4.26	20.18	9.30	PG21	3	125.16	38.93
fa-P09	0.54	39.26	21.90	PG34	2	11.79	32.05
fa-P10	1.52	27.23	8.15	PG22	4	219.59	38.62
fa-P11	1.39	29.30	20.49	PG29	1	12.00	30.41
fa-H01	0.74	24.74	18.74	HK27	1	2.12	31.11
fa-H02	0.74	39.06	20.74	HK23	2	19.20	29.99
fa-H03	1.79	25.96	16.38	HK13	2	28.53	31.11
ft-P01	1.62	36.72	12.41	PG08	3	49.45	31.98
ft-P02	2.35	31.54	17.13	PG16	3	67.51	34.83
ft-P03	0.70	31.00	21.09	PG35	3	33.32	30.63
ft-H01	18.71	36.35	12.01	HK05	4	114.84	21.93

*地形編號說明：fa 為土石流扇，ft 為扇階，P 為平廣溪，H 為磺窟溪。

*子集水區編號說明：PG 為平廣溪，HK 為磺窟溪。

本區的土石流扇面積皆在 5 公頃以下，大多落在 0.5 至 2.5 公頃之間，面積最大的土石流扇為 PG21 子集水區谷口的土石流扇(編號 fa-P08)，其面積為 4.26 公頃，其次為面積 2.33 公頃的 PG42 子集水區土石流扇(編號 fa-P05)，最小的土石流扇僅 0.54 公頃(編號 fa-P09) (圖 2-24)；扇階方面，平廣溪三個扇

階的階面面積都在 3 公頃以下，而磺窟溪的扇階面積達 18.71 公頃。進一步檢視扇面坡度與流經扇體的河道平均坡降(圖 2-25)，研究區內之土石流扇與扇階的扇面坡度都在 10%(相當於 6 度)以上，最陡的土石流扇(fa-P03)扇面坡度甚至可達 43.26%(相當於 23.4 度)，土石流扇之扇面平均坡度大多落在 25%至 30%(14 至 17 度)之間，整體而言本研究區的土石流扇具有面積小、坡度陡的特徵；扇階面的平均坡度則皆在坡度 30%至 40%(17 至 22 度)之間。

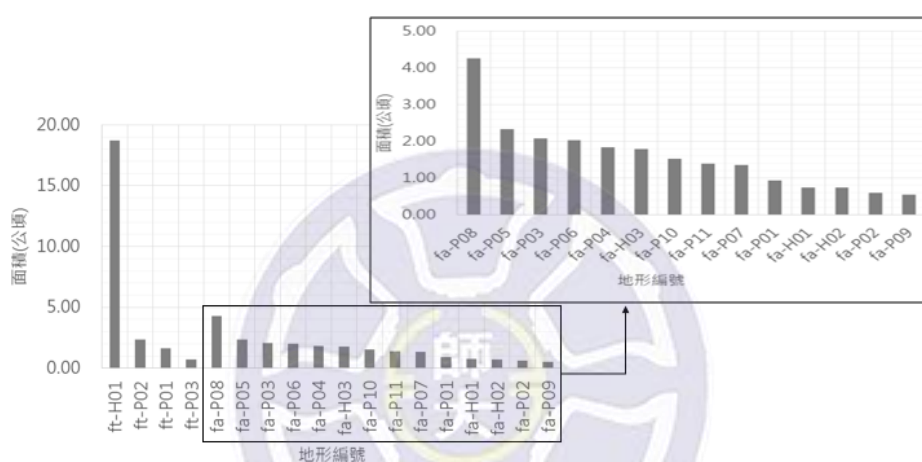


圖 2-24 研究區土石流扇與扇階面積大小排列圖

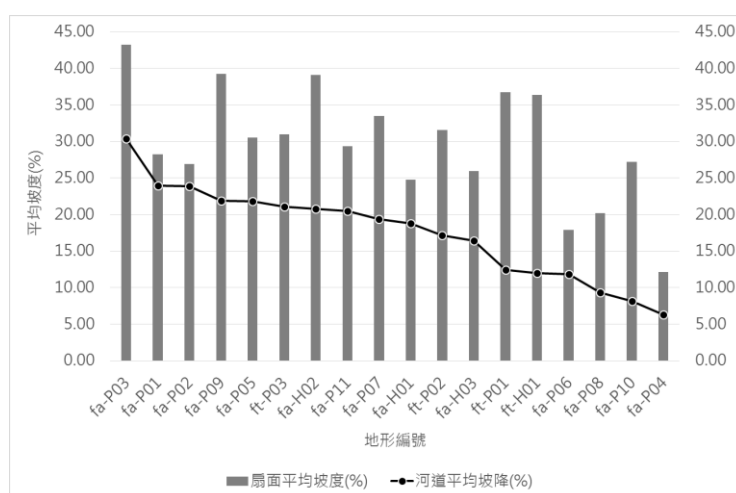


圖 2-25 扇面平均坡度與河道平均坡降圖
(依河道坡降排序)

根據表 2-3 可知土石流扇(扇階)子集水區的溪溝最大級序多為在 3 級，尤其扇階所屬的子集水區級序都在 3 級以上。檢視各土石流扇與扇階所屬子集水區的面積與坡度，多數子集水區的坡度在 30 度以上（圖 2-26）。其餘谷口無扇且坡度也在 30 度以上的子集水區，溪溝級序以 1、2 級為主，僅 8 個子集水區的溪溝級序在 3 級以上(圖 2-27)。



圖 2-26 土石流扇與扇階集水區面積坡度分布圖

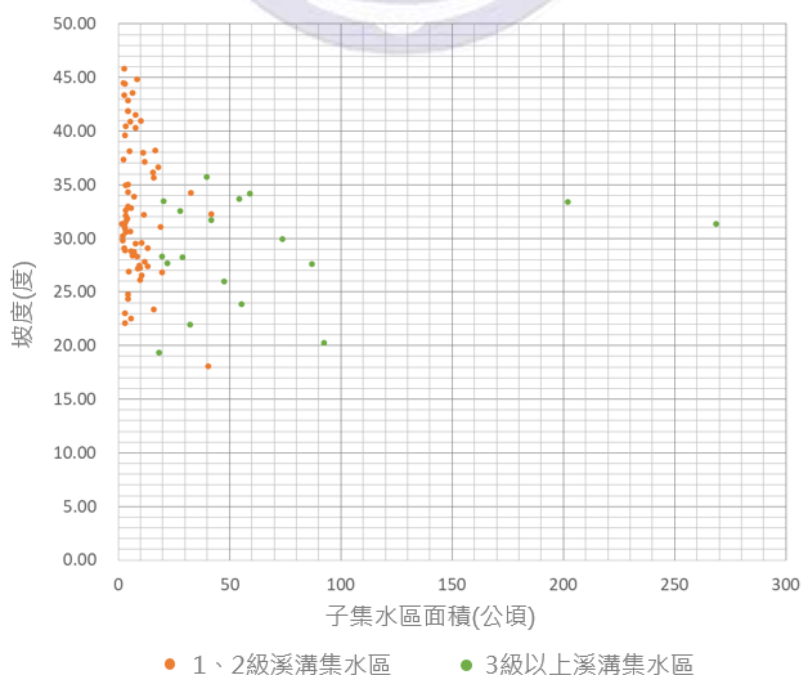


圖 2-27 谷口無扇子集水區面積坡度分布圖

為了解各個子集水區潛在地形作用，本研究計算三個流域內個別的子集水區流域險峻值，結果顯示研究區內的子集水區幾乎以土石流作用為主，僅平廣溪和礮窟溪有少數高含砂水流作用的子集水區(圖 2-28、圖 2-29、圖 2-30)。

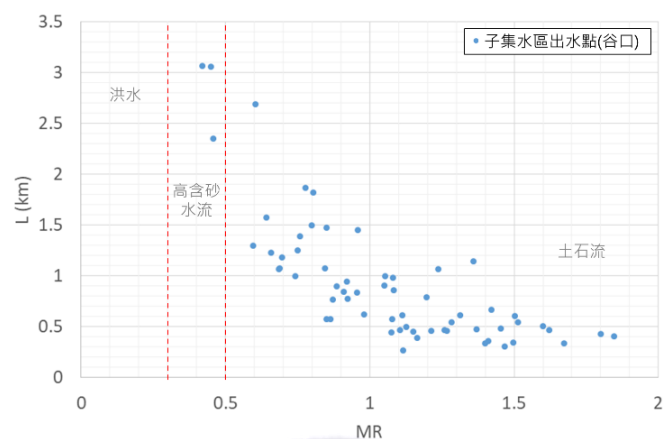


圖 2-28 平廣溪子集水區溪溝長度(L)與流域險峻值(MR)之關係

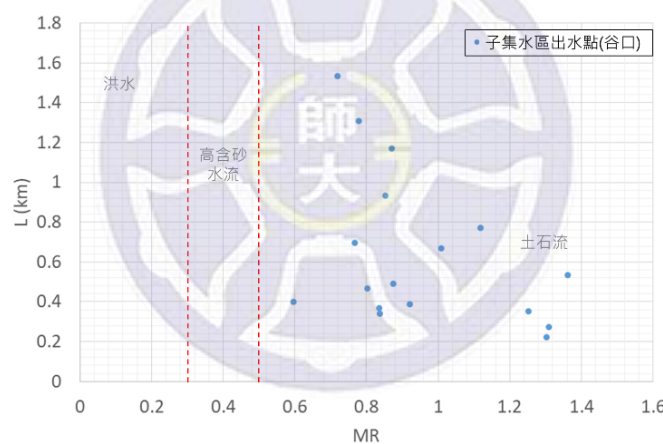


圖 2-29 小坑溪子集水區溪溝長度(L)與流域險峻值(MR)之關係

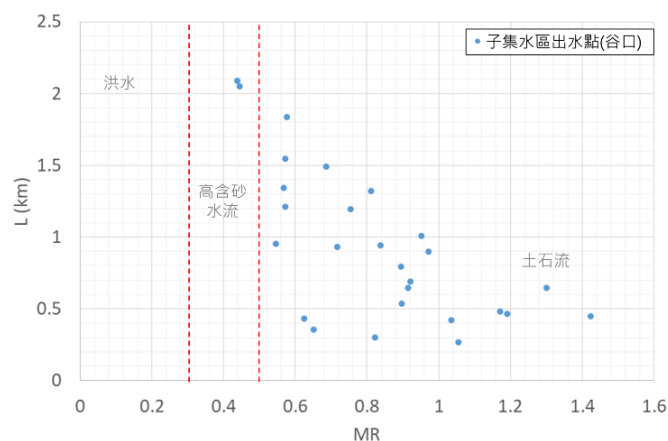


圖 2-30 礮窟溪子集水區溪溝長度(L)與流域險峻值(MR)之關係

第三節 小結

本研究區各流域的主流特徵總整如表 2-4 所示。從地形判釋結果可知三條埋積河谷中的地形單元以谷床受河道下切而形成比高約 2 到 6 公尺的埋積小階為主。谷床多為農業土地利用，亦有零星建築用地分布。研究區內的埋積谷床尚有土石流扇的分布，多位於平廣溪中游；土石流扇普遍面積小、坡度陡，土石流扇溪溝的級序多為 3 級以上。檢視流域險峻值和主流長度的關係以推定主流河段的地形作用，平廣溪與磺窟溪在源流的集水區具有潛在的土石流作用，至主流埋積特徵出現後則轉化為高含砂水流，往下游逐漸轉為洪水作用；小坑溪則沒有潛在的洪水作用。

導致流域內有連續埋積谷床與土石流扇，應有整個流域內各河段的邊坡或子集水區提供大量沉積物，土石流扇暗示該子集水區具有土石流的作用，而谷口無扇但卻有埋積特徵的支流子集水區，也有發生土石流的可能性。根據各子集水區流域險峻值與溪溝長度的關係判定，亦得出多數子集水區具有潛在的土石流作用。

表 2-4 研究區各流域特徵資料總整表

	平廣溪	小坑溪	磺窟溪
谷床寬度(m)	50-210	10-150	35-180
谷床地形單元分布 (佔谷床面積比例)	埋積小階 (47.1%) 土石流扇 (25.6%)	埋積小階 (60.6%)	埋積小階 (63.0%) 土石流扇 (9.6%)
埋積小階比高(m)	2~6	1~7	2~6
埋積主流坡降(%)	3.90%	12.96%	8.72%
埋積主流集水面積(ha)	約 200	約 50	約 86
主流潛在地形作用 (自分水嶺到匯入新店溪)	土石流 →高含砂水流 →洪水	土石流 →高含砂水流	土石流 →高含砂水流 →洪水

第三章 颱風事件對埋積河谷地形再作用情形

颱風所帶來的高強度降雨常是影響地形變動的因子，容易誘發崩塌與土石流作用，極端降雨事件為臺灣集水區發生崩塌侵蝕的重要驅動力。以地形演育的角度而言，颱風事件可檢視地形作用的復發情形，並能藉此檢視埋積谷中的沉積物搬運堆積狀況。本區有許多在埋積小階與土石流扇上的土地利用行為(例如圖 3-1)，都可能在未來發生地形再作用時造成災害事件。透過蘇迪勒颱風災害調查彙整報告(張志新等，2015)與水保局之重大土石災情報告(水土保持局，2015)可知，蘇迪勒颱風造成本區發生崩塌、土石流與洪水等災害，本研究透過航照判釋蘇迪勒颱風後之地形變動，於本章說明在蘇迪勒颱風的極端降雨事件下，主流地形單元受的影響以及邊坡和支流發生的崩塌與沖蝕狀況。

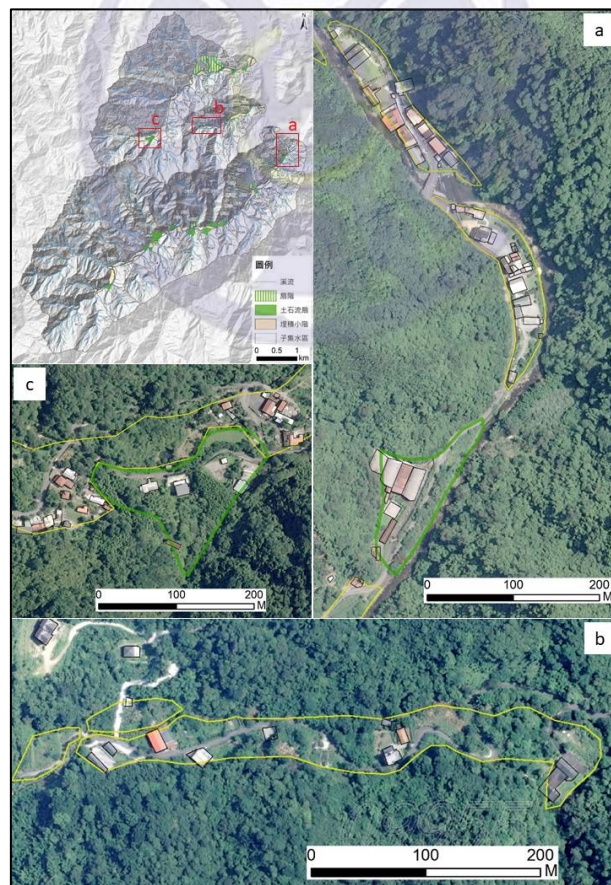


圖 3-1 研究區谷床土地利用例子。A、b、c 分別為平廣溪、小坑溪、磺窟溪，黃線為埋積小階範圍，綠線為土石流扇範圍。(影像拍攝時間：104.06.30)

第一節 主流谷床地形單元所受之影響

颱風造成短延時高強度的降雨容易導致山區溪水暴漲，加上支流與邊坡帶來的大量崩塌土砂沉積物，進而產生高含砂濃度的洪水甚至土石流，影響主流谷床上的地形單元。本節敘述研究區內三個流域之主流谷床地形單元受主流地形作用影響的情形，以航照判釋推測主流發生之地形作用。

1. 平廣溪

根據第二章地形單元判釋的結果，平廣溪主流可根據谷床的地形特徵分為三個河段(圖 3-2)，此處檢視蘇迪勒颱風對平廣溪這三個河段谷床地形單元影響的情形。

(1) 上游

從航照影像來看，上游河段的地形單元普遍受到土砂淤埋(圖 3-3)，放大影像檢視河道的沉積物特徵，可見本河段上半部分河道明顯有大小不一的石塊與土砂混雜(圖 3-4)，到下半部分的河道中才漸無混雜的土石堆積(圖 3-5)；部分埋積小階與土石流扇外緣可判釋到被側蝕的狀況(圖 3-6)。從影像中亦可見到上游河段集水範圍內之 PG26、PG27、PG28、PG29、PG30、PG32 等集水區的溪溝有明顯土砂沖蝕(土石流)並搬運大量土石沉積物匯入主流的情形，另外在本河段的主流河岸邊坡亦有崩塌(圖 3-7)產出大量土砂；根據災後即時的現地災情照片可看到明顯的土石流堆積特徵(圖 3-8)。綜合以上航照判釋到的情況與照片證據，推定本河段的上半部分因接收支流與邊坡的大量土砂而發生土石流作用淤埋或側蝕上游谷床地形單元，下半部分則逐漸轉化為高含砂水流(洪水)溢淹影響。

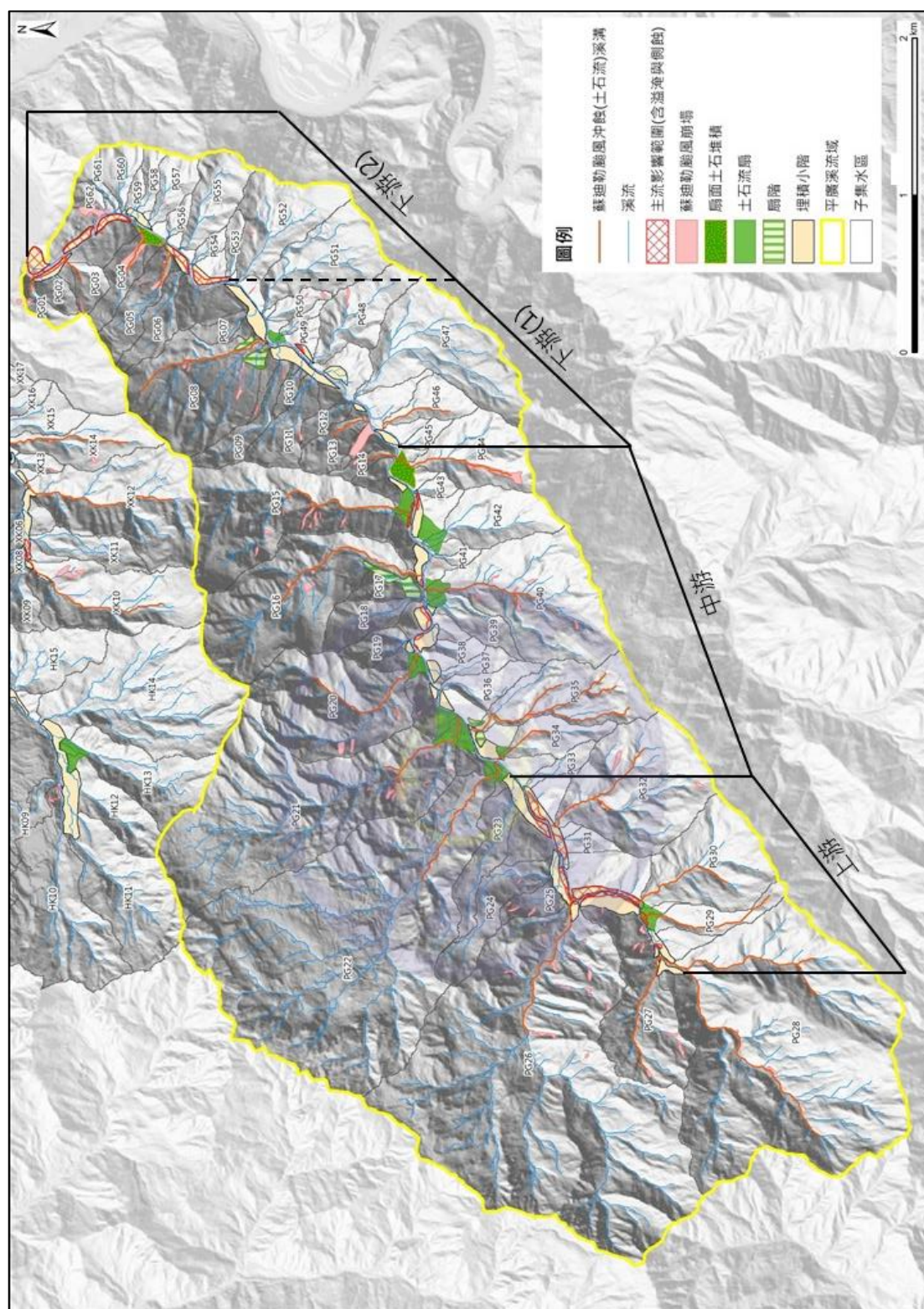


圖 3-2 蘇迪勒颱風造成之地形作用分布(平廣河流域)
 (※「主流影響範圍」指主流河道發生的土石流或洪水對地形單元之影響區域)

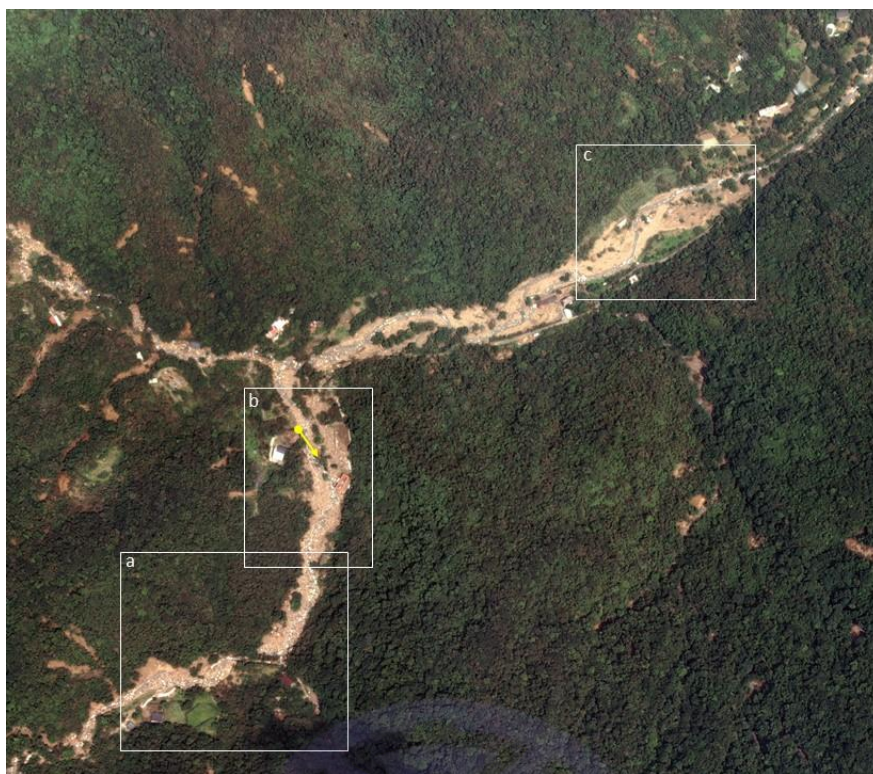


圖 3-3 蘇迪勒颱風後之平廣溪上游河段整體航照影像
(航照影像拍攝時間：104.08.10)



圖 3-4 蘇迪勒颱風後之平廣溪上游
河段局部放大航照影像
(位置參見圖 3-3 白框 b)



圖 3-5 蘇迪勒颱風後之平廣溪上游
河段局部放大航照影像
(位置參見圖 3-3 白框 c)



圖 3-6 平廣溪上游河段颱風前後影像(位置參見圖 3-3 白框 a)
從颱風後之影像可明顯看出土石流扇與埋積小階被側蝕、淤埋之狀況。



圖 3-7 平廣溪上游主流河岸邊坡於蘇迪勒颱風期間發生之崩塌
此崩塌地現已有植生(2018.07.14 拍攝)。



圖 3-8 平廣路一段 365 號受災照(拍攝位置與角度參見圖 3-3 黃色箭頭)
(照片轉載自張志新等，2015)

(2) 中游

平廣溪中游為該流域土石流扇分布最密集之河段，從影像中檢視颱風造成的主流中游整體谷床影響情況，大多沒有受到嚴重的土砂淤埋(圖 3-9)，僅有少部分埋積小階與土石流扇外緣被溢淹、側蝕(例如圖 3-10、圖 3-11)；河道整體而言以水砂為主，河道中無顯著的大小混雜石塊堆積，且有部分河段出現類似沙洲的堆積特徵(見圖 3-11 之颱風後河道)。除了主流河道對地形單元的影響之外，有部分的土石流扇或埋積小階可判釋到明顯的土砂堆積情形則是受到支流發生的沖蝕(土石流)影響，例如 PG44 集水區之溪溝沖出大量土石流土砂材料甚至進入主流河道(圖 3-12)。本河段其餘支流沒有明顯大量的土砂匯入主流堆積，主流的邊坡亦無大範圍之崩塌情形。整體而言主流中下游河段沒有土石流作用的跡象，部分河段有出現沙洲堆積特徵，因此以航照判釋看到的現象推定，本河段部分被溢淹與側蝕的地形單元是受主流的洪水或高含砂水流作用所影響。



圖 3-9 蘇迪勒颱風後之平廣溪中下游河段整體航照影像
(航照影像拍攝時間：104.08.10)



圖 3-10 蘇迪勒颱風前後平廣溪中游河段局部放大之正射影像
(位置參見圖 3-9 白框 a)



圖 3-11 蘇迪勒颱風前後平廣溪中游河段局部放大之正射影像
(位置參見圖 3-9 白框 b)



圖 3-12 蘇迪勒颱風後平廣溪中游河段局部放大之正射影像
(位置參見圖 3-9 白框 c)

(3)下游

下游河段根據所受的影響程度可再細分為兩段(圖 3-2、圖 3-13)，第一河段的兩岸埋積小階整體來說沒有明顯的土砂淤埋或側蝕跡象(圖 3-13 左)，僅有一處理積小階和土石流扇扇端受到溢淹、側蝕(圖 3-14)，本河段受主流地形作用的影響程度較小；第二河段的埋積小階從影像中可看出大多有土砂淤積情形(圖 3-13 右、圖 3-15、圖 3-16)，在蘇迪勒颱風期間最下游河段的地區亦有淹水災情(張志新等，2015) (圖 3-16 右上)，谷床地形單元明顯有受主流的地形作用影響。另一方面，下游河段的 PG04 子集水區發生嚴重的土石流，大量土砂材料堆積在其谷口的土石流扇並進到主流河道中；在整個下游河段中亦有兩處發生在主流河岸邊坡的崩塌也導致土石進入主流堆積。然而整個下游河段的主流河道本身沒有看出土石流作用的大小混雜沉積物特徵，從影像上來看本河段主流應是受洪水或高含砂水流作用為主。



圖 3-13 蘇迪勒颱風後之平廣溪下游河段整體航照影像
左為下游(1)、右為下游(2) (航照影像拍攝時間：104.08.10)



圖 3-14 蘇迪勒颱風前後平廣溪下游(1)河段局部放大之正射影像
(位置參見圖 3-13 白框 a)



圖 3-15 蘇迪勒颱風前後平廣溪下游(2)河段局部放大之正射影像
(位置參見圖 3-13 白框 b)



圖 3-16 蘇迪勒颱風前後平廣溪下游(2)河段局部放大之正射影像
(位置參見圖 3-13 白框 c)

上述彙整蘇迪勒颱風對平廣溪流域的影響情況，以下說明研究區內另兩區流域——小坑溪和磺窟溪於蘇迪勒颱風期間主流所受的影響。

2. 小坑溪

小坑溪為本研究區內面積最小的流域，整條主流的地形單元皆為埋積小階，蘇迪勒颱風期間本流域有局部邊坡發生崩塌，以及部分溪溝發生沖蝕(土石流)，亦有部分主流的谷床地形單元受到影響(圖 3-17)。從航照影像來看，小坑溪整體主流谷床的地形單元無顯著受土砂堆積痕跡(圖 3-18)，僅在主流上游和最下游的埋積小階有明顯的土砂溢淹、淤埋情形(圖 3-19、圖 3-20)；然而放大檢視河道中的沉積物特徵可見到上游至下游有較大的石塊與土砂混雜，依此判斷小坑溪主流應有發生土石流作用。造成小坑溪上游埋積小階被淤埋的土石來源最主要來自 XK10 子集水區的崩塌與土石流材料，下游則有右岸邊坡的崩塌提供大量碎屑材料進入主流河道之中被搬運下移。

3. 磺窟溪

磺窟溪為研究區最北的流域，主流谷床地形以埋積小階的分布為主，本流域在蘇迪勒颱風事件中無傳出災情。根據航照影像的判釋，磺窟溪主流河道兩岸的埋積小階在本次颱風事件中幾乎無土砂堆積的情況(圖 3-17、圖 3-18)，僅有一處小階受到支流土石流的堆積和局部主流河道側蝕(圖 3-21)，主流河道中無明顯大小混雜的土砂堆積，影像判釋上磺窟溪在颱風後的河水相對於平廣溪主流河水較不混濁，本次事件中主流應無發生土石流作用，局部受側蝕的地形單元可能是受洪水所影響。

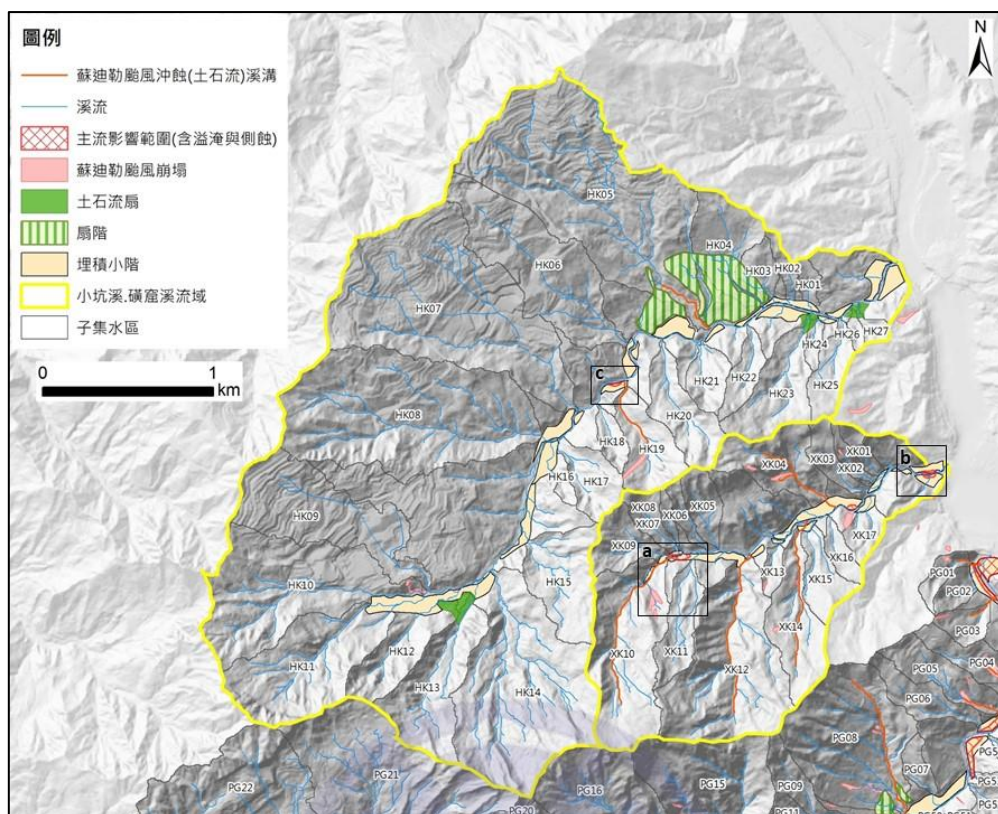


圖 3-17 蘇迪勒颱風造成之地形作用分布(磺窟溪與小坑溪流域)

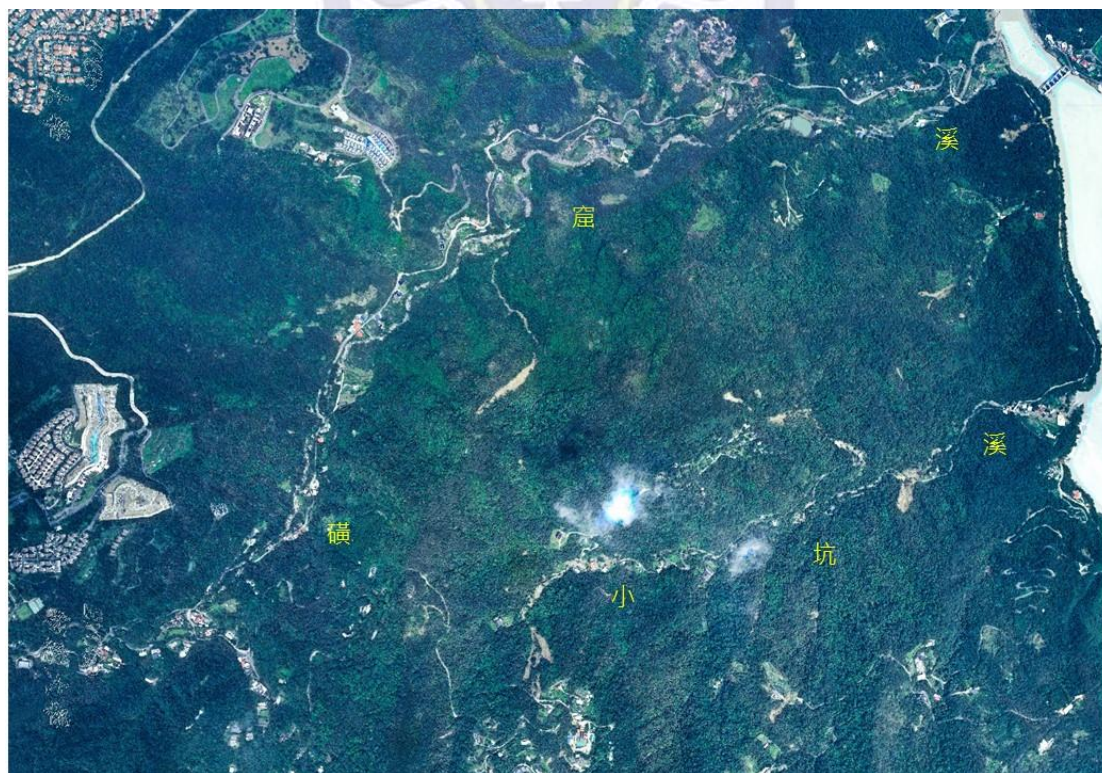


圖 3-18 蘇迪勒颱風後之小坑溪、磺窟溪流流域主流河段航照影像
(航照影像拍攝時間：104.08.10)



圖 3-19 小坑溪上游蘇迪勒颱風後之正射影像(位置參見圖 3-17a)



圖 3-20 小坑溪下游蘇迪勒颱風後之正射影像(位置參見圖 3-17b)



圖 3-21 磺窟溪受蘇迪勒颱風影響之埋積小階正射影像(位置參見圖 3-17c)

第二節 邊坡與支流於颱風事件的變動

在極端事件中，崩塌與土石流是造成大量沉積物侵蝕與搬運的重要作用。邊坡崩塌所提供的大量土砂是谷床埋積物的主要來源，崩塌除了在主流河岸發生並直接進入河道導致堰塞、淤埋，在支流子集水區崩塌所產出的崩積材料也可能引發溪溝沖蝕甚至土石流造成埋積。本節描述研究區內崩塌的規模與分布、支流的溪溝沖蝕(土石流)分布和地形變動。

1. 邊坡崩塌的規模與分布

蘇迪勒颱風在本區造成共 108 個崩塌，主要為岩屑崩滑的形式，多處為本次事件中新生的崩塌地。以單位面積內的崩塌個數來看研究區內各流域的破碎程度，本次事件中平廣溪的破碎程度最高，每平方公里有 4.82 個崩塌，小坑溪其次為 3.85 個，礮窟溪僅 0.45 個。另以單位流域面積內的崩塌面積定義為崩塌密度看各流域的崩塌嚴重程度，平廣溪和小坑溪的崩塌密度相近，前者每平方公里有 0.61 公頃，後者為 0.56 公頃，而礮窟溪每平方公里僅 0.08 公頃的崩塌面積(表 3-1)。本研究也套疊崩塌地與岩性圖層，統計不同岩性地區的崩塌數並計算破碎程度與密度，結果顯示砂岩、硬頁岩互層的區域最破碎，每平方公里有 6.39 處崩塌，而在硬頁岩分布區域發生的崩塌嚴重程度最高，平均每平方公里有 1.45 公頃的崩塌(

表 3-2)。

表 3-1 蘇迪勒颱風各流域崩塌事件規模統計

	平廣溪	小坑溪	礮窟溪
崩塌個數	94	10	4
破碎程度(個數/km ²)	4.82	3.85	0.45
崩塌總面積(ha)	11.94	1.46	0.68
崩塌密度(ha/km ²)	0.61	0.56	0.08

表 3-2 研究區各岩性組合之崩塌事件規模統計

岩性	研究區內 各岩性面 積(km ²)	崩塌地			
		個數	破碎程度 (個數 /km ²)	面積 (ha)	密度 (ha/km ²)
砂岩	8.42	17	2.02	2.33	0.28
頁岩	1.35	0	0	0	0
硬頁岩	2.40	12	5	3.49	1.45
砂岩、頁岩互層	11.59	37	3.19	3	0.26
砂岩、硬頁岩互層	6.57	42	6.39	5.26	0.8
變質砂岩、硬頁岩互層	0.61	0	0	0	0

歸納本次事件中各個崩塌的面積，多數的崩塌地面積在 0.2 公頃以下，共有 94 個，佔全區 87.03%，多位於支流溪溝的邊坡(圖 3-22)，其中有 84 個位在平廣溪流域、小坑溪 7 個而礮窟溪 3 個(表 3-3)。大於 0.6 公頃的崩塌地佔所有崩塌地個數的 3.7%，都位在平廣溪流域，其中兩處崩塌造成該支流溪溝發生嚴重的土石流，另外兩處崩塌則發生於主流河道的邊坡(圖 3-22a, b)，導致土砂直接進到平廣溪主流谷床中。套疊坡度圖計算每一崩塌地的平均坡度並統計各平均坡度區間的崩塌地個數，進一步檢視崩塌面積與平均坡度的關係，可以發現蘇迪勒颱風造成之崩塌多發生於平均坡度 30 至 40 度之間，而面積在 0.4 公頃以上的崩塌地也集中在此坡度區間(圖 3-23)。

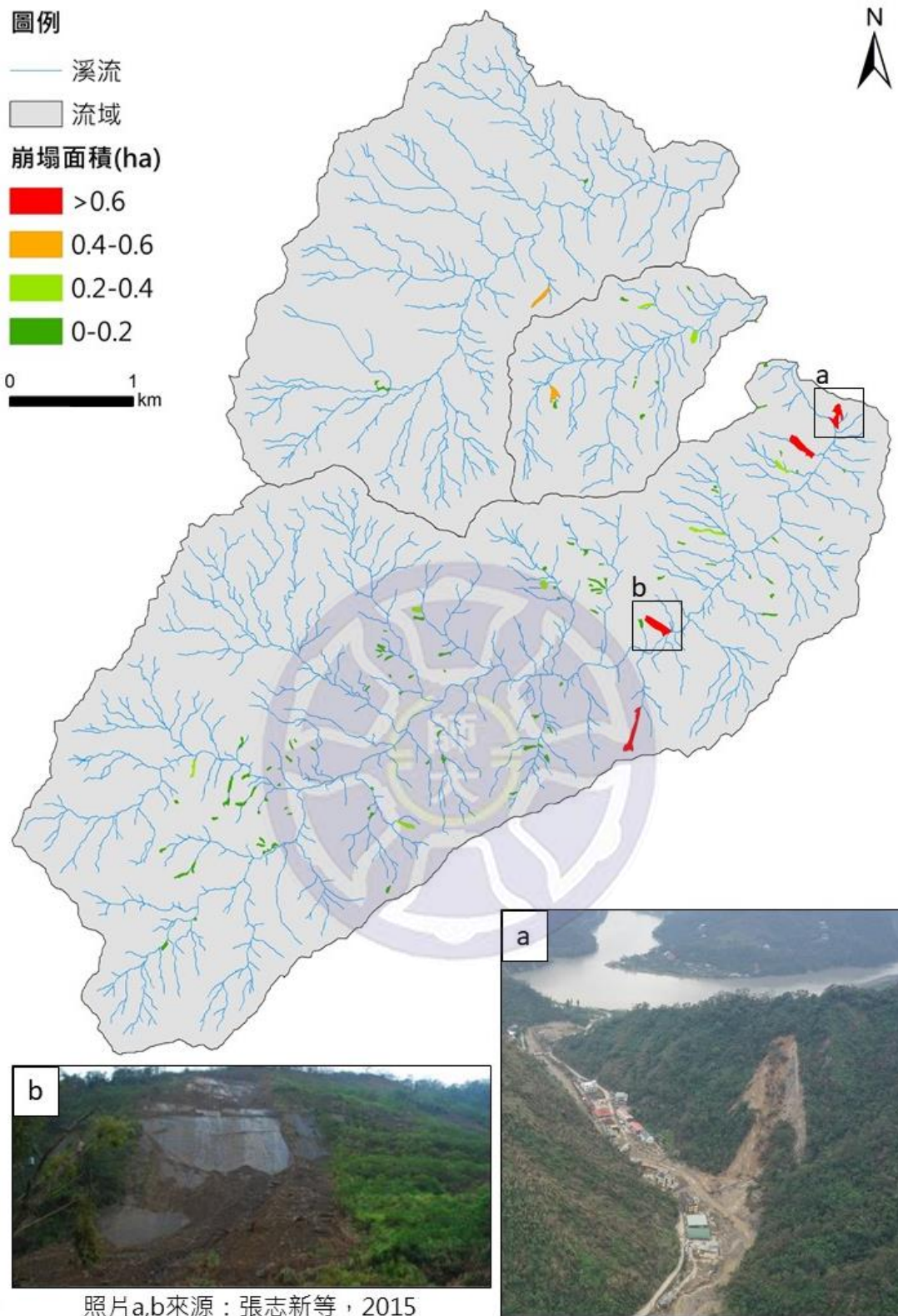


圖 3-22 研究區蘇迪勒颱風崩塌分布圖

表 3-3 蘇迪勒颱風崩塌面積分類表

崩塌面積 (ha)	全區		平廣溪		小坑溪		礮窟溪	
	個數	%	個數	%	個數	%	個數	%
0-0.2	94	87.04	84	77.78	7	6.48	3	2.78
0.2-0.4	8	7.41	6	5.56	2	1.85	0	0
0.4-0.6	2	1.85	0	0	1	0.93	1	0.93
>0.6	4	3.7	4	3.7	0	0.00	0	0
總計	108	100	94	87.04	10	9.26	4	3.7

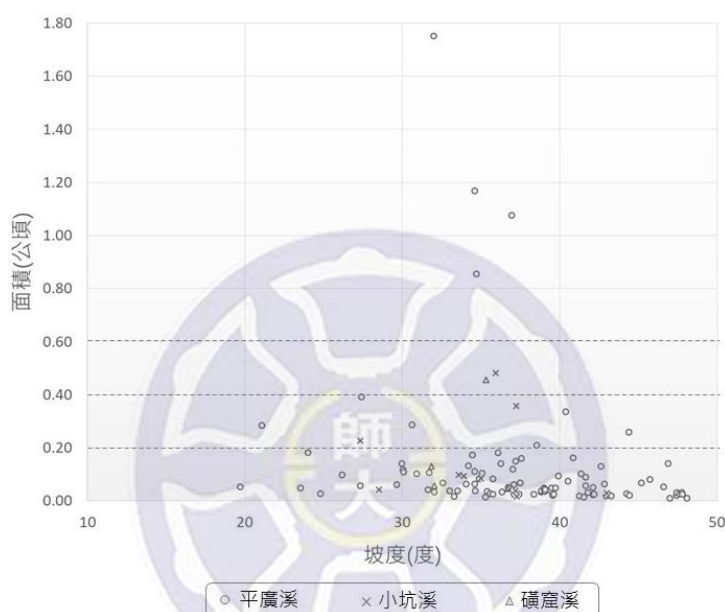


圖 3-23 蘇迪勒颱風崩塌事件面積與坡度關係圖

2. 支流河道的溪溝沖蝕(土石流)分布與地形變化

極端降雨通常會造成河川流量提升，促使河流搬運能力增加，將更多原先位於河道、谷床或來自邊坡的土砂碎屑帶到下游，造成支流有土砂沖蝕的情形，大量的土砂供應甚至會造成土石流的狀況，影響谷床寬度與谷口的堆積地形。檢視在蘇迪勒颱風剛過之後研究區內各條支流的土砂沖蝕、堆積狀況，有 29 個支流子集水區的溪溝出現沖蝕(土石流) (圖 3-24)，其中 23 條位於平廣溪，4 條在小坑溪，2 條位在礮窟溪流域；所有發生沖蝕(土石流)的溪流中，有 20 個支流具有埋積或是谷口具有土石流扇或扇階的特徵(表 3-4)，有 12 個子集水區的溪溝目前被劃定為土石流潛勢溪流。

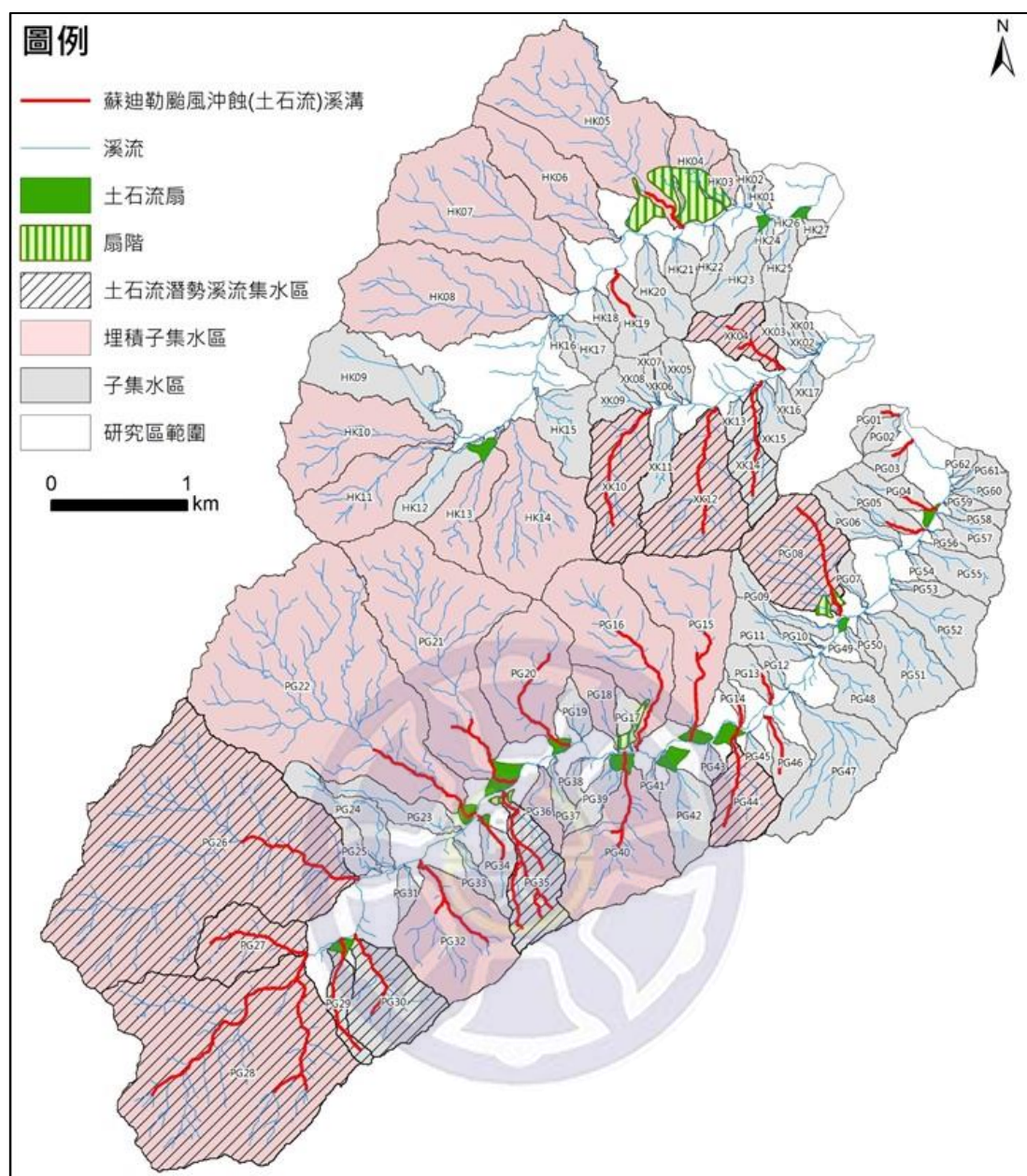


圖 3-24 蘇迪勒颱風支流子集水區沖蝕(土石流)溪溝分布圖

表 3-4 沖蝕(土石流)溪溝原地形特徵

	颱風前 溪溝有埋積特徵	颱風前 溪溝無埋積特徵
谷口「有」土石流扇或扇階	9	4
谷口「無」土石流扇或扇階	7	9

以航照判釋颱風事件前的各支流谷床形態，這 29 條發生沖蝕(土石流)的支流當中，有 13 條支流的主要溪溝谷床無明顯平底形態，這些支流的集水區面積較小、主要溪溝的坡度皆在 30% 以上；另外 16 條可在航照上判釋出主要溪溝下游呈現較寬平的埋積谷床特徵，顯示這些支流在前期地形事件中可能曾發生土石流並且堆積土砂材料，這 16 個集水區的面積大多在 50 公頃以上，主要溪溝的坡度相較於無明顯平底形態的溪溝緩(圖 3-25)。

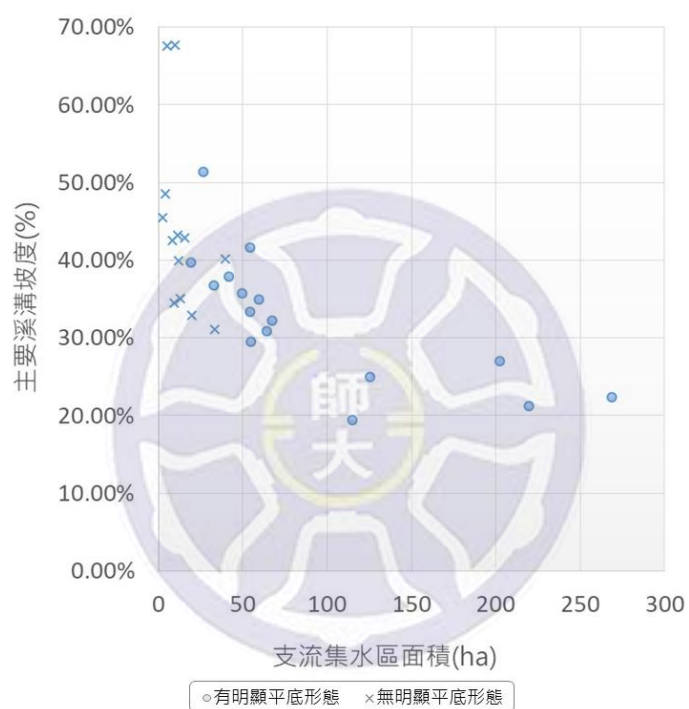


圖 3-25 沖蝕(土石流)溪溝坡度與集水區面積散布圖

比較這幾條沖蝕(土石流)溪溝在颱風後的谷床寬度變化(表 3-5)，多數發生沖蝕(土石流)的溪溝谷床無顯著的寬度變化，僅平廣溪流域內的 PG04、PG05、PG34、PG35、PG46 集水區的主要溪溝可以判釋出谷床有明顯加寬情形，顯示這 5 條溪溝有較大的土石流發生造成植被沖開，並且可能有較多土石堆積在支流溪谷中(圖 3-26、圖 3-28、圖 3-30、圖 3-31)。

表 3-5 蘇迪勒颱風前後子集水區主要溪溝之谷床變化個數統計表

		蘇迪勒颱風後谷床變化								
		平廣溪(62 條)			小坑溪(17 條)			磺窟溪(27 條)		
颱風前谷床平底形態		A	B	C	A	B	C	A	B	C
平廣溪	無明顯平底形態	6	5	37						
	具有平底形態	12	0	2						
小坑溪	無明顯平底形態				1	0	12			
	具有平底形態				3	0	1			
磺窟溪	無明顯平底形態							1	0	16
	具有平底形態							1	0	9

*代號說明：A-河道受明顯土石沖刷，谷寬無明顯變化，B-河道受明顯土石沖刷，谷床加寬，C-無可偵測之變化



圖 3-26 PG04 集水區颱風前後之正射影像(位置參見圖 3-24)

左為蘇迪勒颱風前之影像，河谷植生茂密無明顯寬平的谷床，但谷口有土石流扇且有房屋建設。右為蘇迪勒颱風後，大面積邊坡崩塌產出的土砂將谷床沖刷加寬，並堆積在土石流扇上。目前本土石流溪溝已有整治(圖 3-27)。



圖 3-27 PG04 集水區之空拍影像(2018.07.15 拍攝)。溪溝已進行整治。



圖 3-28 PG05 集水區颱風前後之正射影像(位置參見圖 3-24)
蘇迪勒颱風前(左)谷床狹窄且植生茂密(圖 3-29a)。蘇迪勒颱風後(右)集水區發生崩塌，大量土砂沖刷河谷致使谷床加寬。目前此溪溝已進行整治(圖 3-29b)。



圖 3-29 PG05 集水區溪溝近照

照片 a 為蘇迪勒颱風前之 Google 街景影像(攝於 2015.07)，谷床狹窄且植生茂密；照片 b 為該河谷之近況(攝於 2018.02.16)，由於蘇迪勒颱風時受土石沖刷、堆埋而加寬，考量谷床上的大量土砂材料容易造成下一次土石流災害，目前該溪溝已進行整治。

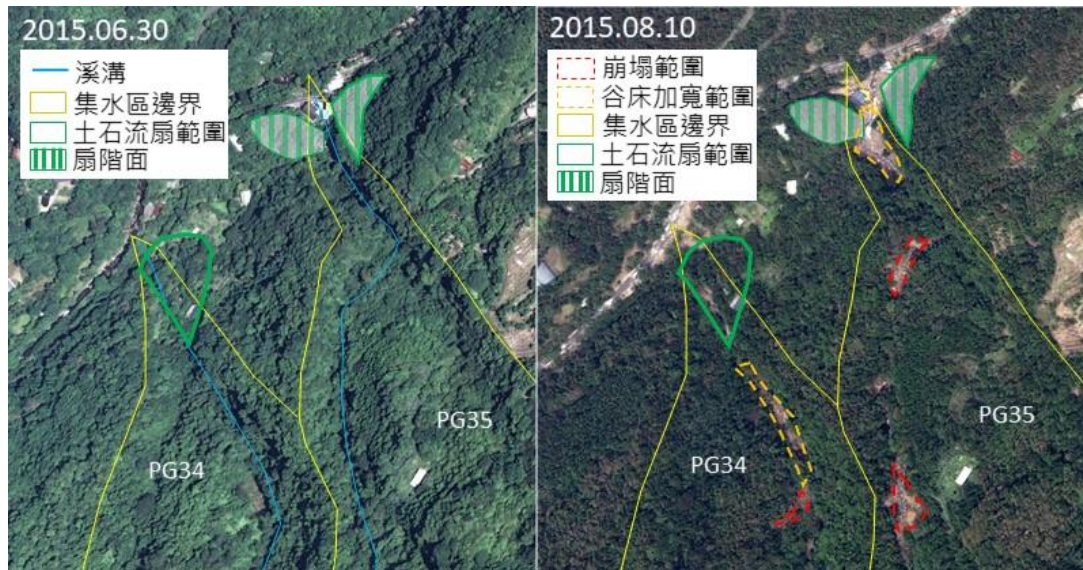


圖 3-30 PG34、PG35 集水區颱風前後之航照影像(位置參見圖 3-24)
PG34 集水區谷口具有土石流扇特徵，PG35 集水區谷口有扇階特徵，暗示其曾發生土石流。蘇迪勒颱風前(左圖)兩條溪溝植生茂密，航照上判釋不出有明顯寬平的谷床；蘇迪勒颱風後(右圖)植被被沖開而較能看出其下游谷床寬度。



圖 3-31 PG46 集水區颱風前後之正射影像(位置參見圖 3-24)
蘇迪勒颱風前(左圖)該溪溝植生茂密(圖 3-32a)。蘇迪勒颱風後(右圖)集水區內無崩塌發生，但有明顯沖蝕加寬的情形。目前本土石流溪溝已有整治(圖 3-32b)。



圖 3-32 PG46 集水區溪溝近照。照片 a 為蘇迪勒颱風前之 Google 街景影像(攝於 2015.07)，照片 b 為該河谷之現況(攝於 2017.09.22)。

土石流扇是前期地形作用所留下的塊體流動堆積特徵，在類似的地形地質與氣候條件下，土石流扇所屬的溪溝仍有再度發生土石流的可能性，在蘇迪勒颱風事件中便有案例映證。在本次颱風事件發生土石流且谷口具有土石流扇或扇階的 13 條溪溝中，PG04 和 PG44 兩個子集水區谷口的土石流扇，扇面受土石流作用影響而有新的土石堆積，這兩個土石流扇的集水區源頭有顯著的崩塌發生，因此帶來大量沉積物(圖 3-33、圖 3-34)；PG08 與 PG35 集水區谷口有扇階特徵，於本次事件中階面雖未受影響，但溪溝有明顯的土石流溢淹、堆積情形，甚至造成房屋受損(圖 3-37、圖 3-38)。



圖 3-33 PG04 土石流扇災後正射影像(右)與土石流堆積近照(左)。
本次颱風事件造成大量土砂堆積於土石流扇之扇面，並沖毀扇面上之房舍。



圖 3-34 PG44 集水區颱風前後之正射影像(位置參見圖 3-24)

颱風前此集水區之谷口即有土石流扇，且溪溝谷口處有房舍(圖 3-35a)，扇面上有小塊農地利用；颱風後土石流在扇面上堆積大量土石並造成房屋損毀(圖 3-35 圖 3-35b)，目前該土石流溪溝已整治完畢(圖 3-36)。



圖 3-35 PG44 集水區土石流溪溝近照

照片 a 為蘇迪勒颱風前之 Google 街景影像(攝於 2015.07)，照片 b 為颱風過後之土石堆積狀況(轉載自張志新等，2015)。



圖 3-36 PG44 土石流扇整治後之空拍影像(2017.11.26 拍攝)



圖 3-37 PG08 土石流災後正射影像(右)與土石流堆積近照(左)(照片轉載自水土保持局，2015)



圖 3-38 PG35 土石流災後正射影像(右)以及從上游往下游拍攝之土石流堆積近照(左)(照片轉載自周憲德等，2016)

3.各支流子集水區的崩塌與沖蝕(土石流)溪溝分布

在本次颱風事件中，研究區內有 14 塊崩塌地發生在主流河道兩岸，其餘崩塌多發生在支流子集水區溪溝兩側的邊坡，三個流域共 106 個子集水區當中，有 37 個子集水區內有發生崩塌，各子集水區的崩塌可能引致支流溪溝發生土石流。本研究檢視蘇迪勒颱風造成之崩塌與沖蝕(土石流)溪溝的分布(圖 3-39)，統計各流域有無崩塌與沖蝕之子集水區個數，顯示「有崩塌，有沖蝕(土石流)」的子集水區共有 24 個，「有崩塌，無沖蝕(土石流)」的子集水區共 13 個，「無崩塌，有沖蝕(土石流)」的子集水區為 5 個，其餘皆無發生崩塌與沖蝕(土石流)事件(表 3-6)。

表 3-6 各流域有無崩塌與沖蝕(土石流)之子集水區個數統計

		崩塌							
沖蝕 (土石流)		有				無			
		平廣溪	小坑溪	礮窟溪	總計	平廣溪	小坑溪	礮窟溪	總計
	有	19	3	2	24	4	1	0	5
	無	10	2	1	13	29	4	24	64

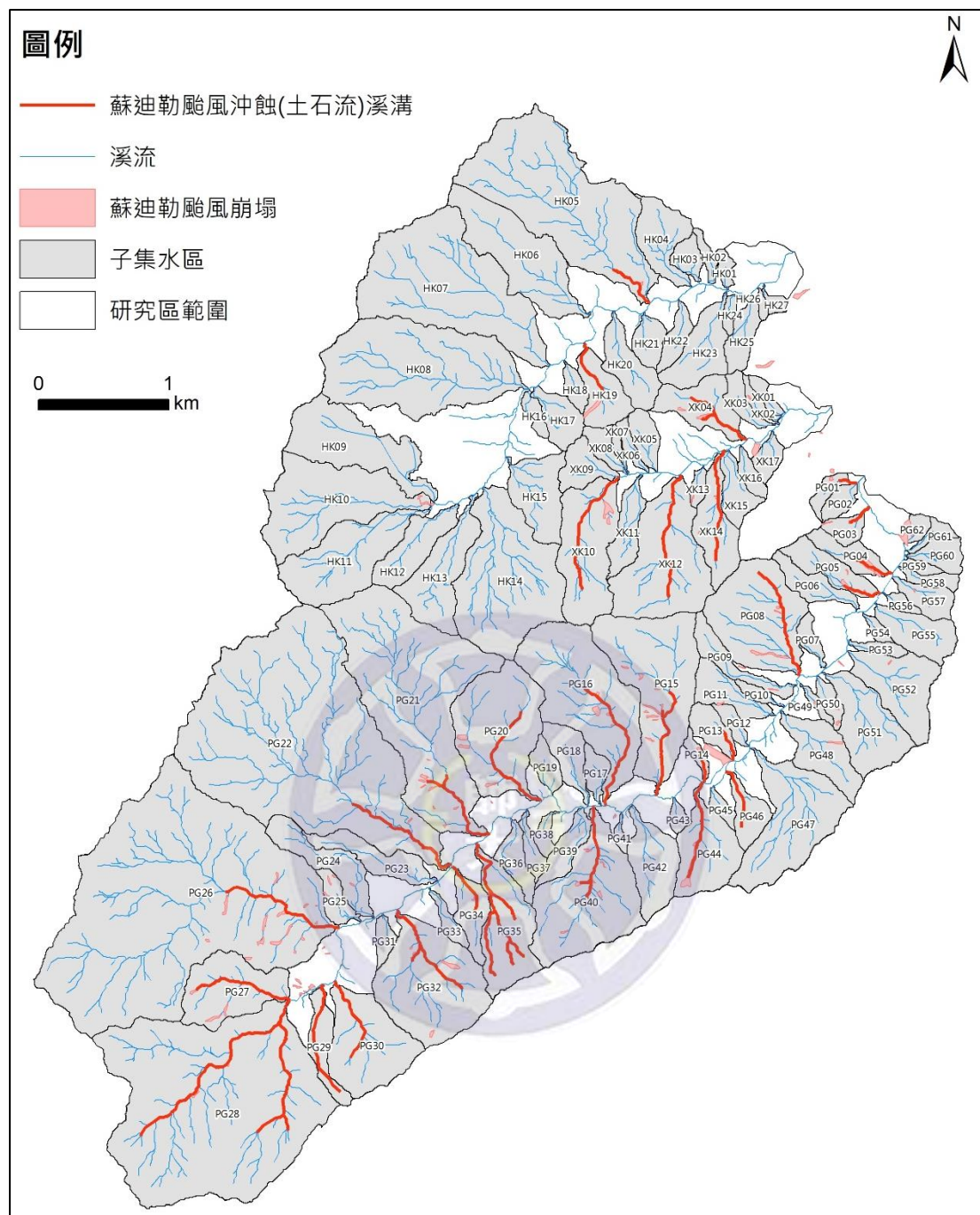


圖 3-39 蘇迪勒颱風崩塌與土石流分布圖

第三節 小結

本研究以數值航測系統檢視立體像對，判釋 2015 年 8 月 7 日至 9 日之間侵襲台灣的蘇迪勒颱風對研究區造成的影響，應用兩期航照資料(2015.06.30、2015.08.10)，比對蘇迪勒颱風前後的地表變化以判別主流地形單元受側蝕或溢淹的影響範圍、邊坡與支流的崩塌沖蝕情形。主流方面顯示平廣溪的上游河段與小坑溪的河道有大小不一的石塊與土砂混雜，而平廣溪最下游河段谷床還有明顯土砂淤埋，礮窟溪谷床則無明顯影響。邊坡與支流部分，整體而言本次事件中的崩塌率並不高，各子集水區的崩塌面積多在 0.2 公頃以下，但有部分發生在主流河岸谷壁；發生沖蝕(土石流)作用的溪溝共有 29 條，支流沖蝕出的土砂材料和主流河岸的崩塌沉積物進入主流，也對主流谷床地形造成影響。

根據地形單元受影響範圍以及河道中的沉積物特徵，判斷主流發生之地形作用，結果為：平廣溪上游主要發生土石流，並逐漸轉化為高含砂水流(洪水)，至中下游則以高含砂水流或洪水的作用為主；小坑溪判斷有土石流作用的影響，礮窟溪根據主流河道的河水與沉積物特徵判斷主流為洪水作用，但無溢淹。

另一方面本研究整理各支流子集水區有無發生崩塌與土石流的分布，可歸納出四種狀況，其中「無崩塌，有沖蝕(土石流)」者尚需進一步從沉積物的供應和驅動沉積物下移的因子進行討論，將於第四章說明。



第四章 討論

本章對研究使用之判釋流程方法以及研究區埋積河谷在極端事件下的地形作用反應進行討論。第一部份將針對「採用 Geomorphon 產製地表幾何形態以輔助人工判釋」的方法，討論其應用與限制；第二部份主要討論主流在颱風事件之地形反應，由於蘇迪勒颱風在平廣溪有較顯著的影響，因此本章節會針對平廣溪來討論蘇迪勒颱風期間，其子集水區土石流與河道邊坡崩塌等地形作用，和主流谷床地形反應的關聯。最後討論研究區內支流子集水區崩塌與溪溝沖蝕搬運土砂關係的影響因子。

第一節 地表幾何形態於地形判釋之應用與限制

前人應用 Geomorphon 工具產製地表幾何形態分類，大多用於大範圍的區域地形分類，藉由全區各種形態的分類以進行地形景觀(例如：Michal Veselský et al., 2015；Frankl et al., 2016；Kramm et al., 2017)、土壤(例如：Ashtekar et al., 2014；Silva et al., 2015)和植被(例如：Antonello et al., 2017)的相關調查；近年則也有研究者應用該工具產製的其中某種形態來判別坡單元邊界，例如 Wei Luo et al.(2017)以山脊形態來劃分坡單元以進行崩塌研究。本研究所要探討的不同於前人研究中對整個大尺度區域的形態分布，而是希望能藉由這個自動判釋工具，以較快的速度找到埋積谷床，因此試圖以 Geomorphon 分類地表幾何形態中的「平地(flat)」形態來查找谷床是否具有平坦的特徵。本節說明數值地形資料的選擇、自動判釋與人工判釋的比較，並根據實際操作經驗調整地形判釋流程。

1. 數值地形資料的選擇

以數值航空攝影測量技術產製航照立體像對匹配數值地形模型，或者由光達(LiDAR)技術產製數值高程模型，是目前常見的數值地形資料獲取方式。本研究嘗試將從農林航空測量所購置的颱風前航拍影像匹配立體像對製作數值地形模型，初步可產製出解析度達 0.5 公尺網格的資料。然而本研究所選擇的研究區為植被茂密的山區，部分坡地與谷床尚有建物，以數值航測系統自行產製的 DTM 無法濾除植被與地上物(建築、電塔等)，將 0.5 公尺數值地形模型轉為地形陰影圖(Hillshed)與 LiDAR 產製並降階處理的 6 公尺數值高程模型陰影圖比較後(圖 4-1)，本研究認為雖然自行產製的 0.5 公尺數值地形模型解析度非常高，但也因植被與地上物的存在而容易造成自動判釋誤判，因此以 LiDAR 產製可表現原地形面的 DEM 進行自動判釋較佳。

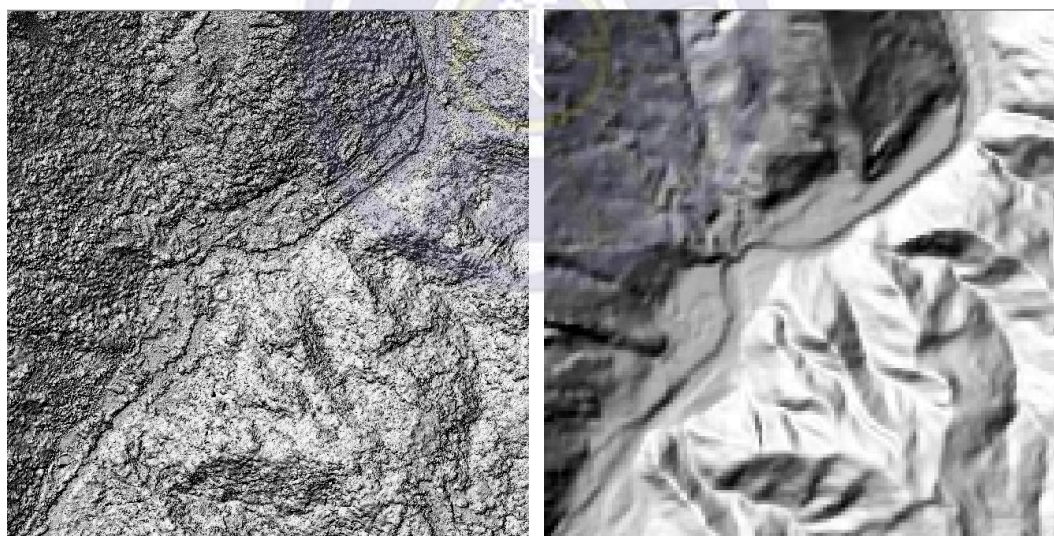


圖 4-1 0.5m DTM 地形陰影圖(左)與 6m DEM 地形陰影圖(右)比較

以 6 公尺數值高程模型進行地表幾何形態分類的結果，初步能夠判釋出主流與部份支流的埋積分布(圖 4-2 左)。然而較高解析度的資料通常需申請甚至受到管制而不易取得，目前政府公開可供下載的數值高程模型為 20 公尺網格間距的資料，本研究應用之 Geomorphon 自動判釋地表幾何形態方法在此解析度

的資料下是否仍有其可用性？因此本研究也以同樣的判釋流程將 20 公尺數值高程模型進行地表幾何形態分類，檢視使用該解析度的資料是否仍堪用於查找埋積分布。判釋出的平地形態分布結果(圖 4-2 右)雖然相較於 6 公尺數值高程模型粗略，甚至有部分支流子集水區無判釋出平地形態，但埋積寬度達 30 公尺以上的支流谷床仍能被局部判釋出埋積特徵，20 公尺 DEM 產製的平地形態整體而言有 61%與 6 公尺數值高程模型產製的平地形態重疊。未來若要在高解析度資料有限的情況下，應用目前政府公開的 20 公尺 DEM 於其他河谷的判釋，還是能判釋出埋積寬度 30 公尺以上的谷床。

以 6 公尺數值高程模型大致上可判別谷寬約 10 公尺以上的支流谷床是否具有平地形態，若有更高解析度的 DEM 理應可判別更窄的溪溝中是否有平地形態，但在使用更高解析度資料時則需考慮自動判釋到的平地形態是否僅為河道之河床而非埋積谷床。

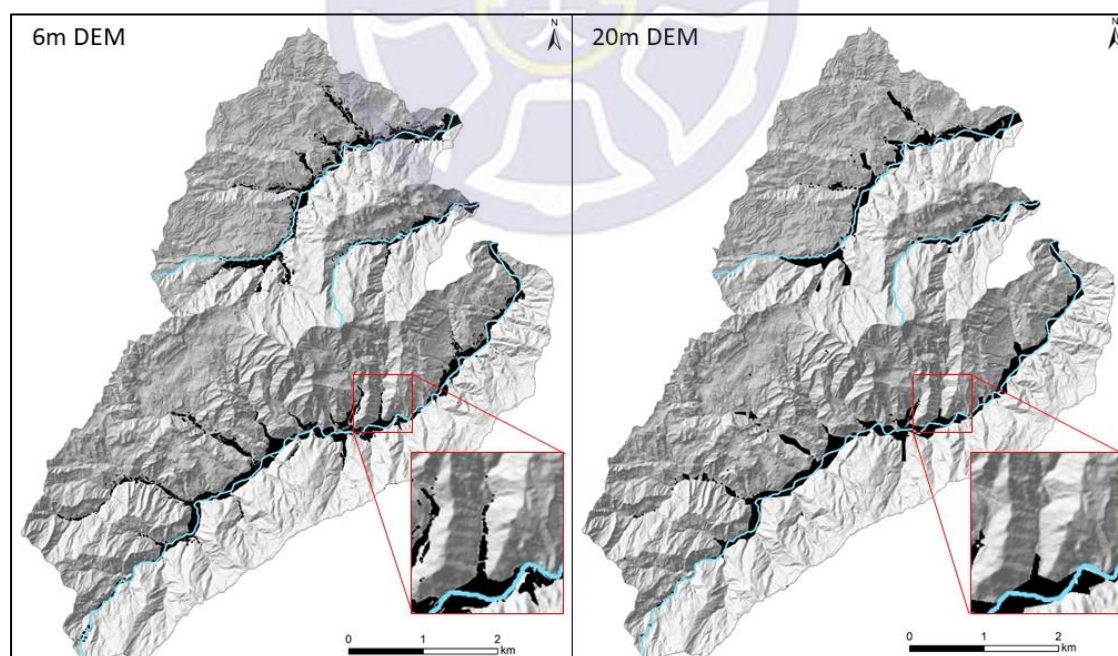


圖 4-2 Geomorphon 自動判釋平地形態於谷床之分布
(底圖之地形陰影圖皆為 6m DEM 產製)

2.自動判釋與人工判釋比較

本研究的判釋目標包含谷床範圍與谷床上的細部地形單元，以自動判釋技術找出平地形態分布位置得知谷床分布範圍時，也檢視「坡腳(footslope)形態」以比對谷床邊界(若無坡腳形態則以平地形態邊緣視做谷床邊界)，另一方面本研究亦以數值航測系統人工判釋立體像對數化谷床與谷壁的交界求取谷床範圍，並以 Geomorphon 自動判釋的結果和航照判釋谷床範圍進行比對，結果顯示谷床邊界僅部分吻合(例如圖 4-3)。局部吻合區域主要是谷壁與谷床的交界明顯，人工數化時容易判別，而不吻合的部分可能與人工判釋航照立體像對時受植被覆蓋影響有關。建議若要以人工判釋方式檢核自動判釋成果，以 LiDAR 產製的數值高程模型製作地形陰影圖進行數化以避免植被覆蓋的問題。

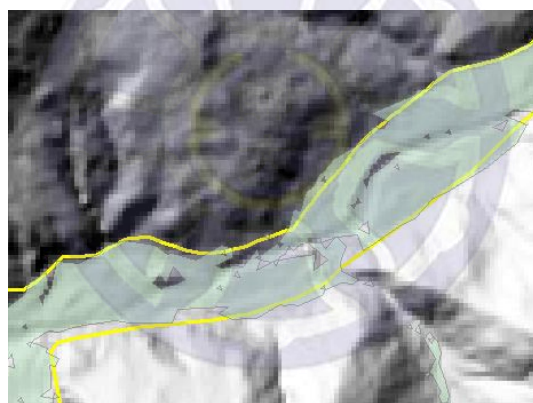
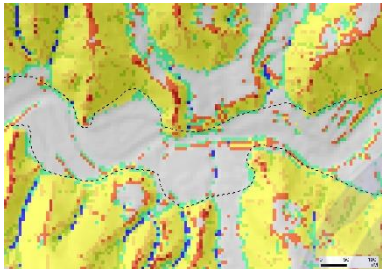
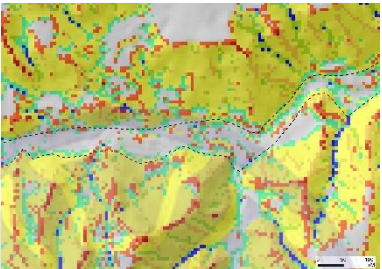
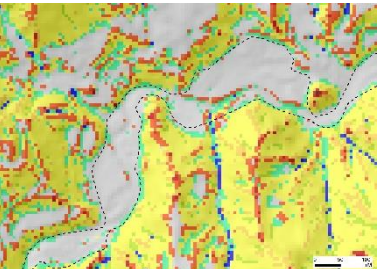
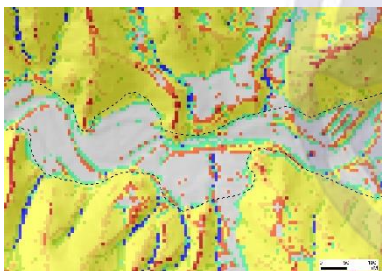
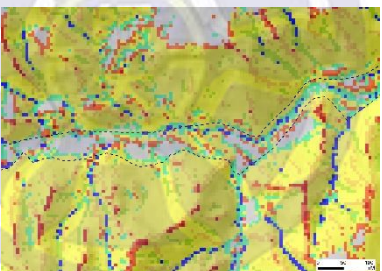
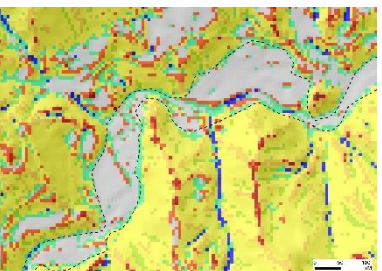
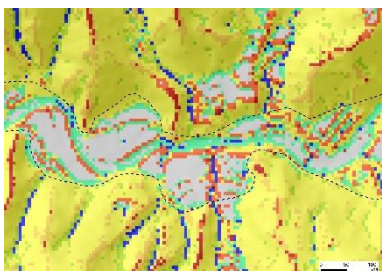
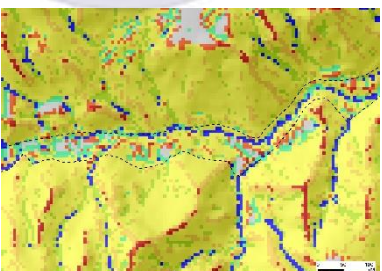
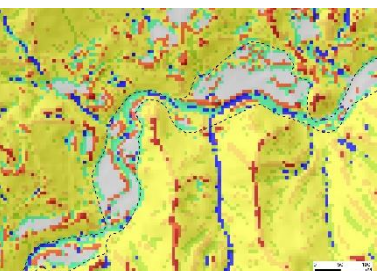
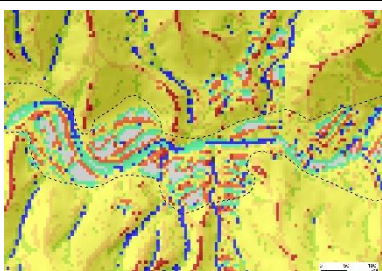
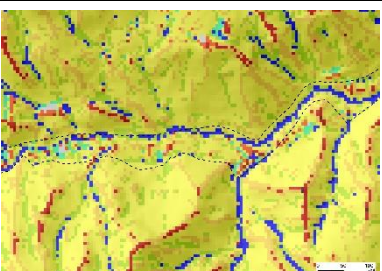
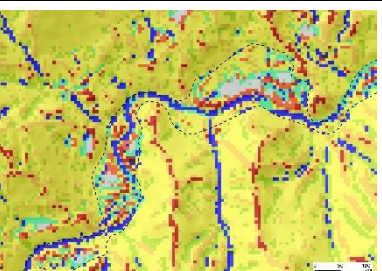


圖 4-3 人工判釋(黃線)與自動判釋(淺綠色區塊)谷床範圍比對

而在判釋谷床上的細部地形單元方面，若要進一步將自動判釋之「形態」組合為「地形單元」，由於較大的平坦度閾值會忽略較細微的地形起伏，因此需要逐步檢視更小平坦度閾值的形態連續性以確認地形單元邊界，例如表 4-1 顯示在平廣溪與磺窟溪以平坦度閾值 10 度所呈現之形態分類有較明確連續的地形單元邊界，小坑溪在 15 度閾值時才可判釋出部份地形單元邊界。找到適當閾值分類出的地表幾何形態結果後，再以人工判斷方式將地表幾何形態連接、組合、劃定單一地形單元的範圍。

從表 4-1 的例子可知，不同尺度的流域適用的閾值不同，而谷床上坡度變異性較大的地形單元(如土石流扇)，也不適用單一閾值，若要單純以地表幾何形態分類的結果進行地形單元劃定，這樣逐一測試、組合形態的過程反而更為費時。因此本研究在圈繪地形單元方面仍以人工判釋為主，在可能誤判的區域，才以地表幾何形態輔以檢核、編修。

表 4-1 不同平坦度閾值之幾何形態分類

平坦度 閾值	平廣溪	小坑溪	磺窟溪
20 度			
15 度			
10 度			
5 度			
圖例			

3.依實際操作經驗調整之地形判釋流程

本研究使用 Geomorphon 自動判釋的目的主要是快速查找出埋積谷床分布，自動判釋目標為位於谷底的平地形態，本研究初步設定的搜尋半徑為 3 個網格，平坦度以 20 度為上限，首先確認參數設定之結果可分類出平地形態，並萃取出來(圖 4-4)。然而以整個流域進行自動判釋，較平緩的坡面也會產製出平地形態，因此需要進一步篩選平地形態分布的位置。本研究以 ArcGIS 產製的主支流主要流路為中心，設定緩衝帶(Buffer)以排除大部分非谷床的區域，以本研究區估量到的谷寬設定主流緩衝帶為 200 公尺，支流為 50 公尺(圖 4-5)，先將緩衝帶之外位在坡面的平地形態刪除，緩衝帶內可能劃入的坡地則搭配陰影圖或航照影像進行確認。在主流部分由於較寬的河道也會被判定為平地，因此估量河道寬度後以主流流路為中心劃定 5 公尺緩衝帶視為河道(圖 4-6)。而後續若要確認人工判釋地形單元範圍，再依照需要調整平坦度閾值以進行編修。

根據上述操作經驗，本研究補充谷底之 Geomorphon 平地形態(flat)篩選方法、步驟，以及以地表幾何形態檢核、編修航照判釋地形單元流程，調整後的地形判釋流程如圖 4-7。此流程方法需搭配 GRASS GIS、數值航測系統與 ArcGIS 三種軟體，GRASS GIS 與數值航測系統主要用於產出幾何形態分布與地形範圍等資料，而篩選、比對及編修的過程則都在 ArcGIS 中執行。

Geomorphon 產製的是地表基本幾何形態而非特定地形單元，地表的幾何形態是組成地形單元的一部分，自動判釋目前可做到快速了解一地區普遍性的特徵，透過平地形態(flat)掌握平緩的地形面分布，而該平緩面的形態是屬於何種地形單元的地形面(例如埋積小階階面、土石流扇面、扇階面或河道等)，仍需透過地形單元的位置、形狀、與河道的比高、水系等資訊，以人為判斷進行確認、圈繪。

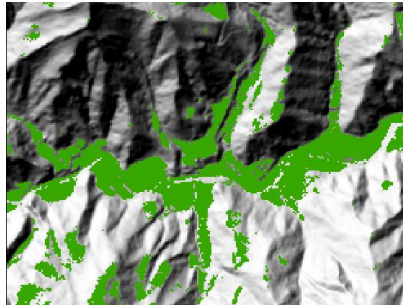


圖 4-4 萃取平地形態

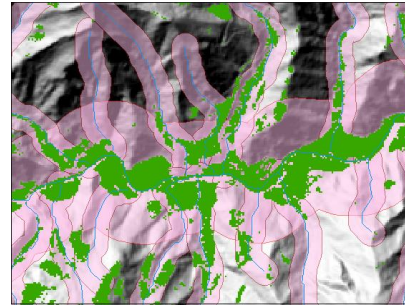


圖 4-5 設定主、支流緩衝帶為谷底範圍

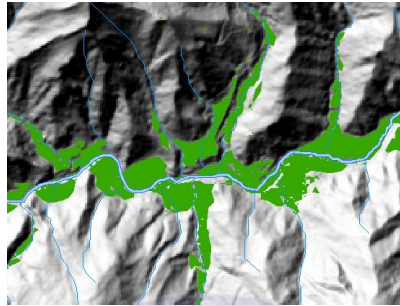


圖 4-6 設定主流緩衝帶為河道

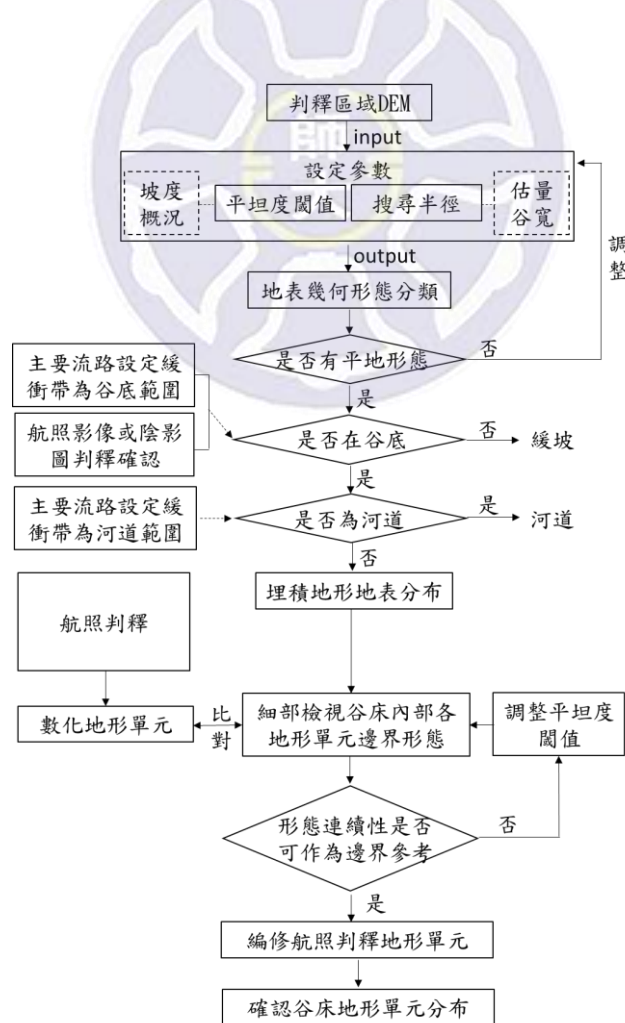


圖 4-7 調整後之中小型集水區谷床地形單元判釋流程圖

第二節 蘇迪勒颱風事件引致谷床地形作用與流域環境之關聯

蘇迪勒颱風導致研究區內三個流域受到不同程度的影響，其中以平廣溪有最顯著的變化，除了主流本身的地形作用，支流子集水區與邊坡的土砂搬運、堆積也可能影響主流對谷床的作用行為。平廣溪為研究區內受蘇迪勒颱風影響最劇的流域，其上游及下游的谷床均有受主流影響的痕跡，也有較多災後立即性的災害調查報告可供參考，因此本節針對平廣溪討論其主流河段地形反應和颱風後的流域環境土砂事件關聯，將流域險峻值判定的潛在地形作用(詳見第二章)、航照判釋的實際地形作用(詳見第三章)與颱風後沿主流的現地災害調查點位(詳見第一章)進行比對(圖 4-8)，討論蘇迪勒颱風造成的主流地形反應差異可能原因。因本研究調查時間為 2017 年 6 月至 2018 年 12 月，故災害事件過後立即性的現地調查，主要參考水土保持局之土砂災害調查報告(水土保持局，2015)。

流域險峻值判別潛在地形作用、航照推定的實際地形作用以及水土保持局土砂災害調查報告分別代表數值地形計測、航照判釋與現地調查三種對地形作用判別的方式。結果顯示這三種方法在埋積主流上游河段上半部(流向自南向北)的判別有所差異，數值地形計測方法判別結果為高含砂水流，但航照判釋與現地調查顯示為土石流作用。而主流轉向東後往更下游河段的地形作用判定，這三種方式的結果大致相符，是以高含砂水流(洪水)作用為主。而在各河段地形作用下，平廣溪主流自上游到下游河段呈現不同的地形反應，谷床地形單元受到主流影響的程度亦有差別，根據颱風後流域受影響的狀況(詳見第三章)，上游與最下游河段主流谷床受到溢淹或側蝕的情形最為明顯，但中游卻幾乎不受影響，顯示主流地形作用可能因局部外在因素而導致谷床地形反應差異。以下說明上游河段地形作用判別差異原因，以及流域環境的土砂事件對谷床地形的作用反應關係。

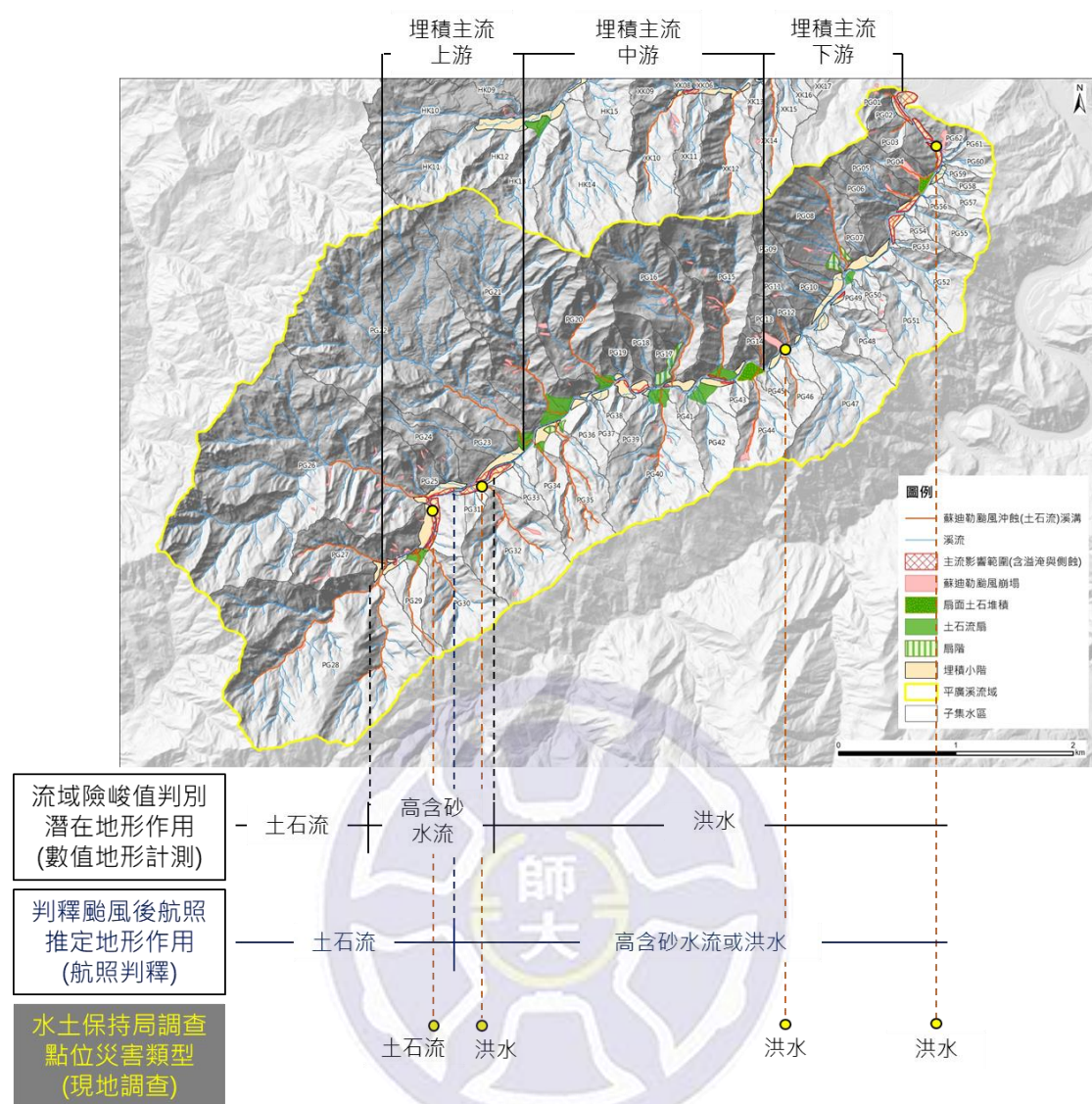


圖 4-8 蘇迪勒颱風在平廣溪造成之影響以及不同方法判定地形作用分布河段

1.上游河段地形作用判別差異可能原因

平廣溪上游河段的埋積小階普遍受到土砂淤埋，亦有部分被側蝕的跡象，本河段有多處支流有明顯土砂沖蝕(土石流)，主流河岸的邊坡也有崩塌(詳見第三章)。根據水土保持局 104 年蘇迪勒颱風重大土砂災例最速報(水土保持局，2015)，上游河段上部的河岸崩塌曾束縮通洪斷面形成堰塞，周憲德(2016)認為崩塌土砂堰塞導致河流向右改道因而側蝕右岸，而該堰塞也造成較下游河段在潰壩時洪峰流量提高，且該河段經現勘無明顯土石流撞擊破壞痕跡，認為土砂

運移型態符合流域險峻值之判定，是以高含砂水流或洪水為主。然而本研究經詳細判釋高精度航照，得知該河段具有大小混雜的土石流堆積特徵，水土保持局的災害調查也顯示有土石流災情，崩塌堰塞導致後續潰壩時洪峰流量提高可能進而產生高含砂水流作用，但除此之外該崩塌產生之大量土砂也成為土砂材料來源，而崩塌堰塞造成河流改道側蝕谷床地形單元，被側蝕掉的部分也形成土石流料源，而潰壩後流量快速提升的同時也會混合大量崩積與側蝕材料至下部的河段堆積。

另一方面，本河段的上游子集水區(PG26、PG27、PG28、PG29、PG30)經流域險峻值和溪溝長度的判定，PG26 和 PG28 有潛在之高含砂水流作用，其餘皆為土石流作用，顯示這些集水區具有輸出較多土砂的潛力，本次颱風事件亦以航照判釋出這幾條溪溝有沖蝕(土石流)情形，而這些子集水區的主要溪溝坡度介於 12 到 22 度，以詹錢登(2000)對土石流作用分段的門檻而言，為土石流發生區和搬運區，而進到主流河段後，本河段主流坡度約 4 度，屬於土石流堆積區，支流運移出的土石也容易堆積在主流河段中。從航照判釋的沉積物特徵來看，上游河段主流轉向東後仍有部分土石流堆積特徵應是來自 PG26 子集水區以及左岸埋積小階被側蝕的土砂材料。

從上述實例可見，上游河段有來自邊坡、谷床和支流等多來源的土砂沉積物，由於上游河段主流坡降漸緩，這些顆粒大小混雜的沉積物停留在本河段以致航照可判釋土石流堆積特徵，往更下的河段則漸以較細顆粒沉積物為主。以流域險峻值判定地形作用，只有考慮主流長度與該點以上的集水區高程差異和面積，未考量其他土砂材料來源的搬運、堆積，因此造成該方法與航照判釋及現地調查判別地形作用上的差異。以數值地形模型進行地形計測判斷的潛在地形作用雖可能因特定事件下的土砂供應而與實際情況有所不同，但在幫助了解一流域在未發生極端事件時的災害評估仍有其可用性。現地調查為最了解地表真實情況最直接的方式，但也最為耗時，在有限的資源與成本下要進行全面性的調查與評估，利用數值地形模型與數值航照進行判釋為可行的替代方式。

2.流域環境的土砂事件對谷床地形的作用反應關係

平廣溪上游與最下游河段主流谷床埋積小階受主流影響程度最為顯著，如前所述，上游河段在蘇迪勒颱風時，邊坡、谷床和支流均供給大量土砂沉積物，甚至因河道被堰塞而造成一系列連鎖反應，導致主流谷床明顯受到土石流作用，颱風期間也可能因堰塞潰壩後瞬間提高的流量而出現高含砂水流作用影響(圖 4-9)。而中游河段主流依流域險峻值判定應具有潛在的洪水作用，從航照判釋上來看本次颱風事件僅有部分小階和土石流扇受側蝕、溢淹，多位在河道急劇轉彎處；而本次颱風事件在水土保持局的調查中本河段主流並無相關災情報告，顯示主流的地形作用對該河段沒有造成嚴重的影響，也沒有明顯受到支流或河岸邊坡的土砂事件影響主流的作用。

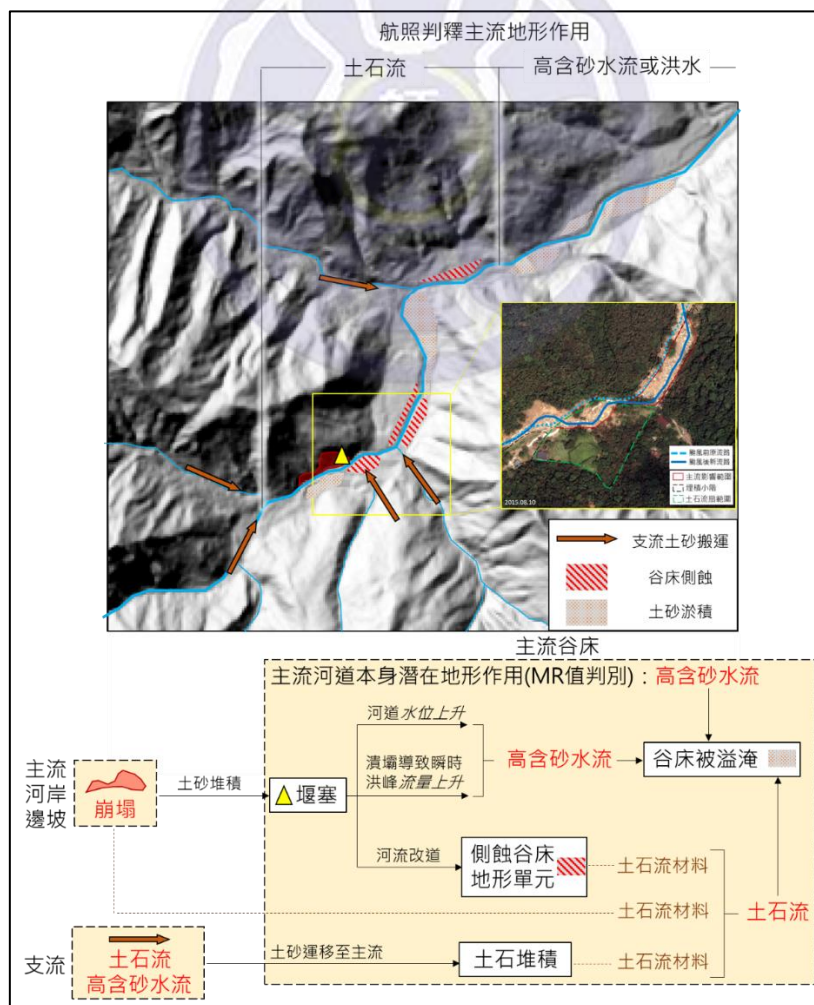


圖 4-9 平廣溪上游河段地形作用與反應示意圖

中游河段邊坡無崩塌發生，而子集水區的流域險峻值與溪溝長度關係判別地形作用顯示幾乎是土石流作用，僅 PG18 為高含砂水流。本次颱風雖有數條支流溪溝發生沖蝕，但僅 PG44 子集水區的土石流堆積有進入河道，根據 104 年蘇迪勒颱風重大土砂災例最速報(水土保持局，2015)描述，該溪溝的土石流堆積甚至造成臨時堰塞。從航照判釋來看，該溪溝的土石流堆積除了造成其堆積處上游水位升高導致左岸埋積小階和右岸土石流扇扇端部分溢淹，並無造成主流本身形成土石流作用。其餘各支流溪溝搬運的土砂從航照判釋上看不出有明顯大量沉積物進入主流河道後堆積，以 PG35 為例，其沖出的大量土砂大多停留在谷床埋積小階(參見第三章圖 3-30、3-38)，而多數有沖蝕現象的溪溝所搬運的大顆粒土砂可能還留在支流河道中。中游河段的地形作用整體而言如圖 4-10 所示。

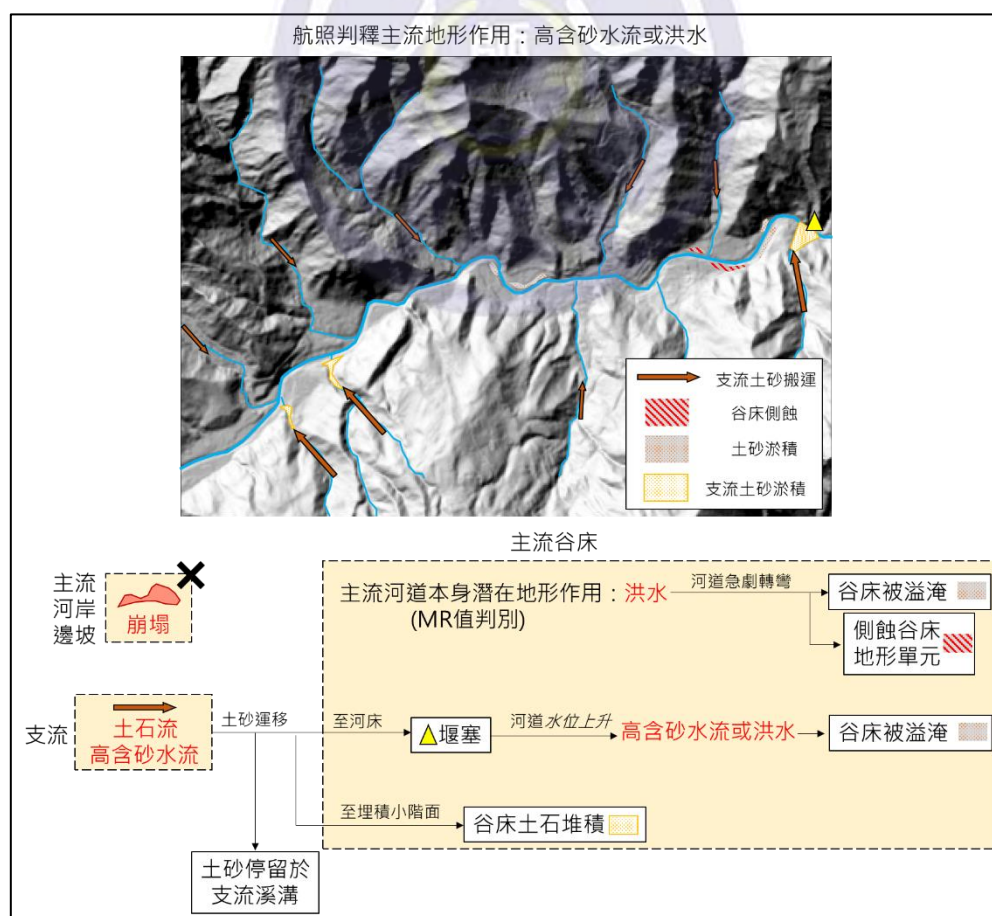


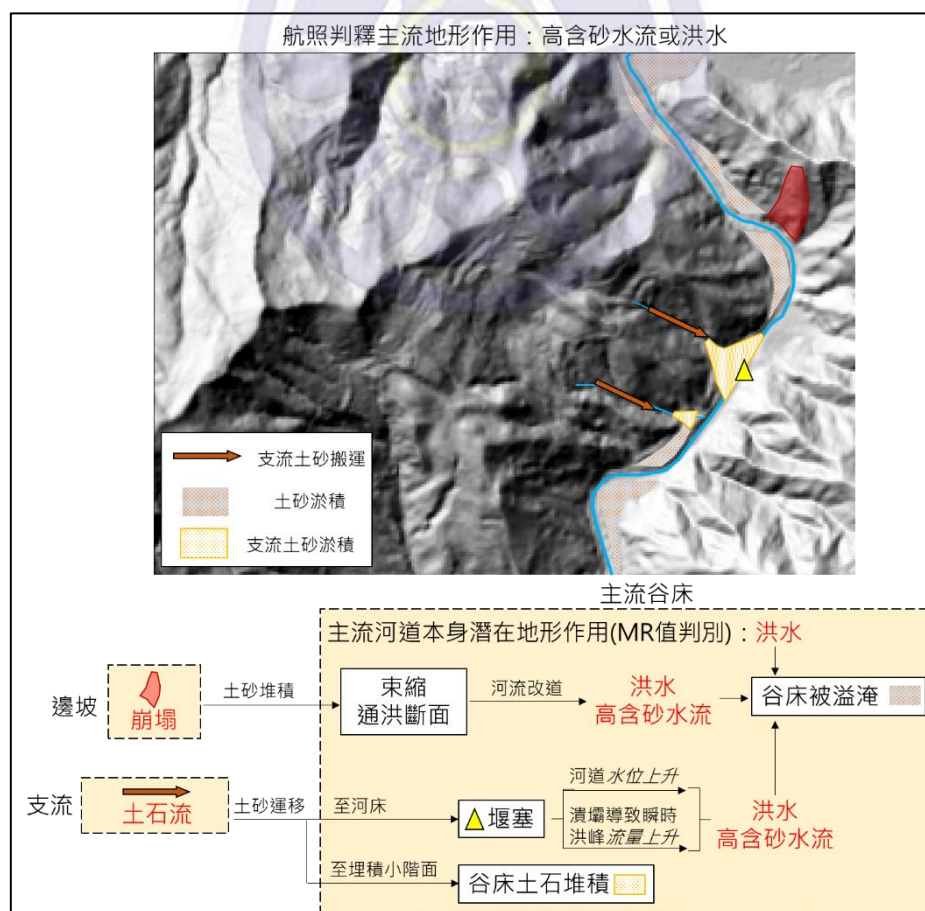
圖 4-10 平廣溪中游河段地形作用與反應示意圖

下游河段的地形作用以流域險峻值判定是以洪水作用為主，水土保持局的災害調查中亦有洪水災害紀錄，而流域險峻值與溪溝長度關係判別潛在地形作用顯示下游河段子集水區皆為土石流作用。本研究從航照影像上主要看到主流為較細顆粒的土砂淤積，因此判定主流為高含砂水流或洪水的影響。下游河段坡降僅 2.13%(約 1 度)，不易再有土石流搬運作用，且下游河段流量較高，應以水流的作用主導。本河段上下半部有明顯影響程度上的差異，上半部河段(下游(1))發生沖蝕的支流沒有判釋到大量土砂進到主流河道堆積，大多土砂在埋積小階上堆積，例如 PG08 子集水區的土石流溪溝谷口為埋積小階，土砂材料除了在小階上堆積之外，因道路建設溪流以箱涵方式從道路下方通過，在蘇迪勒颱風事件中溪溝的土石材料也受箱涵阻擋而較少進入主流河道。本河段左岸雖有一處邊坡的舊崩落地復發崩塌作用導致土石進到河道中，但本次颱風事件中未造成堰塞。下游(1)河段的地形作用反應如圖 4-11 所示。



圖 4-11 平廣溪下游(1)河段地形作用與反應示意圖

下半部河段(下游(2))谷床普遍受土砂淤積，探究下半部河段受到嚴重洪水溢淹影響的原因，除了和新店溪河水高漲導致平廣溪排水不及，也應和 PG04 集水區大範圍崩塌所導致的土石流以及右岸的崩塌造成大量土砂進入河道引發的後續反應有關，這兩起土砂災害事件發生的時間為 8 月 8 日凌晨。PG04 集水區之土石流搬運大量土砂進入主流河道中形成臨時堰塞(張志新等，2015)，堰塞湖上游的埋積小階因河道水位提高影響而受到迴水溢淹；堰塞湖下游主流右岸的崩塌則造成大量崩積土砂材料束縮河道通洪斷面(水土保持局，2015)，其崩積材料改變河道流路使埋積小階易受河水溢淹，而在 PG04 集水區土石流造成的臨時堰塞湖潰決後，洪水混雜兩處崩塌土石流的土石溢淹下游。本研究檢視颱風後航照為 8 月 10 日，可見洪水消退後埋積小階被土砂淤積情形。下游(2)河段之地形作用整體而言如圖 4-12。



綜合上述各河段的邊坡支流土砂事件對主流的地形作用影響，可知邊坡與支流搬運至主流的沉積物是否造成主流河道堰塞或改道，為影響主流地形作用的一項重要因素，並致使谷床的地形反應在空間分布上有差異。本區在蘇迪勒颱風事件中崩塌率整體而言較低，引發沖蝕(土石流)的支流溪溝佔平廣溪流域中所有支流的三分之一，僅有部分谷床被作用反應。某次特定極端事件前的埋積谷床特徵，顯示的是該次事件之前，過去各次事件的地形作用、反應累積至今的結果，而在特定事件發生後所產生的影響，顯示出在該次事件的各種條件(例如降雨特性、埋積谷床前期沉積物累積狀態)交互作用呈現的反應。蘇迪勒颱風在平廣溪導致局部河段作用反應，但對平廣溪地形配置來說並無顯著改變，不同於一次性的大型土砂搬運或洪水事件造成整個河段全面性的作用(例如莫拉克颱風於陳有蘭溪流域的影響，楊明德等，2009)，蘇迪勒颱風引致土砂事件對主流地形反應的影響表現出埋積谷床地形建成的一種方式。

應用數值地形模型進行地形計測以判別潛在地形作用，是以集水區面積、坡降等反應流量與流能的參數來進行評估，可幫助從整體流域的角度檢視河道可能發生的土砂傳遞行為；而航照判釋可幫助檢視集水區內整體的邊坡與支流土砂供應情形。藉由數值地形模型與數值航照進行地形判釋與數值地形計測，可彌補現地調查的一些限制(例如人力與時間成本、交通易達性等)，三種方式的搭配可相輔相成。

第三節 影響支流子集水區溪溝沖蝕搬運土砂因子

河岸邊坡的崩塌會直接影響主流河道的地形反應，支流子集水區內的崩塌土砂則尚需經過溪溝沖蝕搬運至主流，本研究針對研究區內各子集水區颱風前後判釋到的邊坡與溪溝變化情形，整理出「有崩塌，有沖蝕(土石流)」、「有崩塌，無沖蝕(土石流)」、「無崩塌，有沖蝕(土石流)」以及「無崩塌，無沖蝕(土石流)」的情形。其中「有崩塌，無沖蝕(土石流)」顯示子集水區產出的土砂可能還停留在邊坡未搬運下移至溪溝；而「有崩塌，有沖蝕(土石流)」和「無崩塌，有沖蝕(土石流)」的情形代表子集水區土砂有搬運下移。本次颱風事件無崩塌或者崩塌率低的子集水區仍有明顯沖蝕情形，其沉積物的供應可能來自於歷史崩塌埋積的土砂；而能夠驅動沉積物下移的因子則可能和降雨特性有關。本節從歷史崩塌或埋積特徵以及研究區降雨特性來進行說明。

1. 歷史崩塌紀錄與埋積特徵

根據各子集水區颱風前後地形變化調查(詳見附錄3)，將颱風後發生沖蝕(土石流)的圖層套疊歷史崩塌目錄(含潛在大規模崩塌)圖層以及埋積特徵子集水區(圖4-13)，彙整發生沖蝕的子集水區是否具有歷史崩塌以及埋積特徵如表4-2。從表4-2可發現蘇迪勒颱風在平廣溪發生沖蝕(土石流)的子集水區在過去多有歷史崩塌產出土砂，即便沒有歷史崩塌的相關紀錄，谷床中的埋積特徵也暗示過去土砂崩落堆積，形成沖蝕(土石流)的料源。而沒發生崩塌卻有沖蝕(土石流)作用的PG13和PG46也一樣有歷史崩塌或潛在大規模崩塌紀錄，PG13之溪溝位於一處舊崩塌地邊緣；PG46的溪溝位置則與潛在大規模崩塌邊界相符，該溪溝可能為坡面受重力作用而產生較脆弱之裂隙，因而容易在極端降雨事件中受到沖蝕。無歷史崩塌且颱風前無埋積特徵，在本次颱風事件中出現明顯沖蝕情形的6個子集水區，則顯示其集水區內可能因崩塌率高或崩塌位置近溪溝河道使崩塌產出的土砂足以在本次颱風事件對沖蝕的作用造成影響。

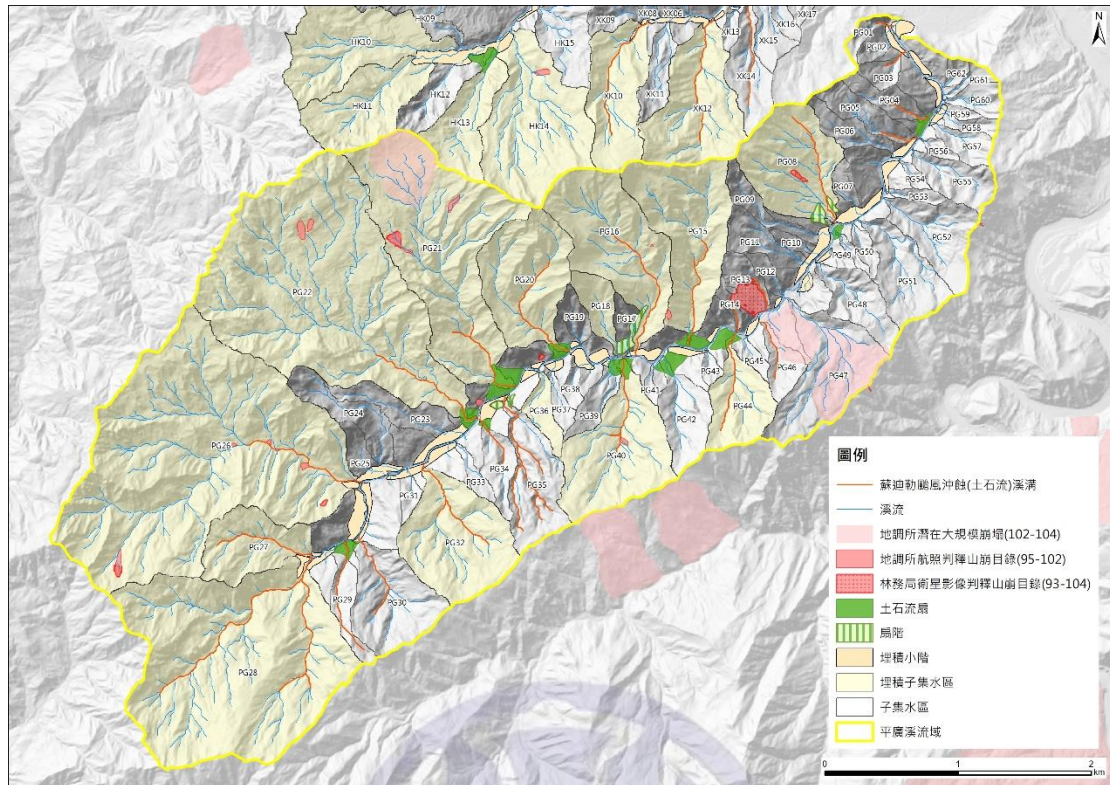


圖 4-13 歷史崩塌與埋積子集水區套疊蘇迪勒沖蝕(土石流)溪溝圖
(以平廣溪流域為例)

表 4-2 蘇迪勒颱風發生沖蝕(土石流)子集水區與歷史崩塌或埋積特徵整理
(以平廣溪流域為例)

有崩塌 有沖蝕(土石流)	有歷史崩塌 颱風前有埋積特徵	PG08、PG15、PG16、PG21、 PG22、PG26、PG40
	有歷史崩塌 颱風前無埋積特徵	PG14
	無歷史崩塌 颱風前有埋積特徵	PG20、PG27、PG28、PG32、 PG44
	無歷史崩塌 颱風前無埋積特徵	PG01、PG03、PG04、PG05、 PG34、PG35
無崩塌 有沖蝕(土石流)	有歷史崩塌 颱風前無埋積特徵	PG13、PG46

2.研究區降雨特性

蘇迪勒颱風在新店溪流域的降雨中心位在福山測站，在福山雨量站紀錄之三天內累積降雨達 792 毫米。張志新等(2015)比對蘇迪勒(2015 年)、蘇拉(2012 年)、辛樂克(2008 年)和薔蜜(2008 年)等幾次颱風事件福山測站的降雨特性，顯示 3、6、12 小時累積雨量均高於另外三次颱風；魏倫瑋等(2015)比對福山測站不同延時累積雨量重現期，在 3、6、12 小時最大降雨量更有高於 200 年重現期的情形，並指出蘇迪勒颱風這種短時間強降雨的特性是造成北部地區之區域型土砂災害的因子。本研究區的平廣溪流域鄰近氣象站為屈尺測站，該測站所記錄的雨量資料更能反映研究區的降雨特性。比對蘇迪勒颱風期間屈尺測站和福山測站的逐時降雨(圖 4-14)，從降雨組體圖中可見蘇迪勒颱風在福山地區的降雨型態是屬於後峰型，而屈尺測站的降雨雖在 8 月 7 日晚上 8 點有一個峰值，但主要降雨還是在颱風事件的後半段時間，屈尺測站與福山測站具有類似的後峰型短延時強降雨。

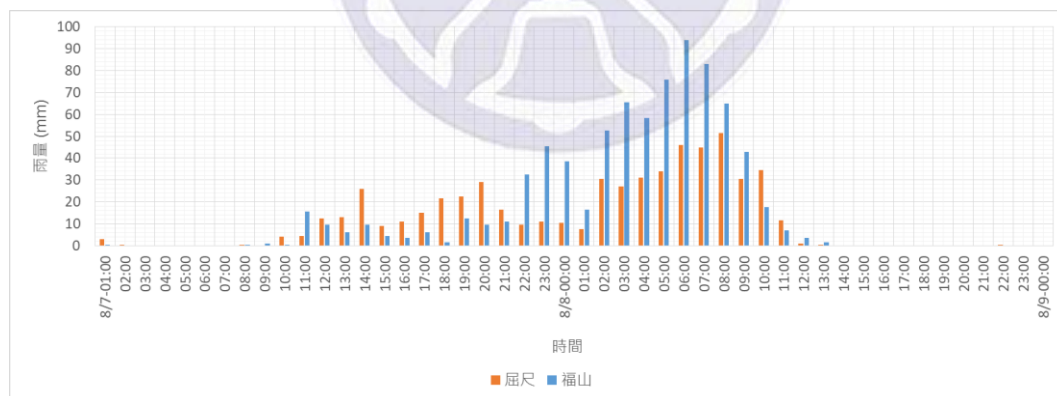


圖 4-14 蘇迪勒颱風屈尺測站與福山測站逐時降雨量圖
(資料來源：中央氣象局)

吳亭燁等(2016)以經驗公式推算蘇迪勒颱風之泥砂濃度，說明短延時強降雨容易導致小集水區瞬時泥砂濃度極高的現象。本次颱風造成原水濁度飆升達 3.9 萬影響大台北地區供水，多歸咎於南勢溪上游的崩塌，但除了新生崩塌土砂

進入河道的影響，河道中原先堆積的歷次事件土砂也是造成原水濁度升高的來源之一，例如南勢溪上游的札孔溪流域中河道有明顯土石堆置，尤其以東札孔溪最嚴重，未來遇強降雨事件很可能導致崩塌與河道堆積土砂沖蝕下移(黎明工程顧問股份有限公司，2009；引自陳曼莉，2017)。蘇迪勒颱風期間札孔溪流域新增崩塌率為 0.24，崩塌率相對其他南勢溪的支流低(林宜羣，2016)，但河道有明顯土砂沖蝕情形，而本研究區亦有崩塌率低甚至無崩塌卻發生沖蝕(土石流)的溪溝(例如 PG22 與 PG28 崩塌率在 0.1%以下)。顯示如此短延時強降雨的特性除了造成局部邊坡發生崩塌，降雨造成的瞬時洪峰流量也足以驅動先前土砂事件所堆積於谷床河道中的沉積物，因此出現無崩塌或者崩塌率低的子集水區仍有明顯沖蝕情形，並導致原水濁度升高，顯示降雨特性亦為影響支流子集水區溪溝沖蝕搬運土砂關係的因子。





第五章 結論

臺灣山區有許多具有埋積特徵的中小等級溪流，而且常已有人為開發利用，甚至有聚落或建物分布在谷床，易受土石流或山洪等自然災害的影響，需要有系統的調查，並繪製其分布位置，進一步了解其地形特徵和作用反應。本研究嘗試建立一套地形判釋流程以快速掌握河谷中的埋積谷床分布，藉由航照判釋與地形計測了解流域地形特徵，以新店溪的埋積支流平廣溪、小坑溪與礮窟溪為研究樣區，以蘇迪勒颱風降水強度達 200 年一遇的事件檢視其地形的再作用，得出以下結論：

1. 本研究建立一半自動判釋中小型集水區谷床地形的流程，包含自動判釋地表幾何形態分類，結合航照人工判釋，可同時掌握幾何形態與真實地表影像與立體起伏感受。以 LiDAR 產製的數值高程模型自動判釋 30 公尺寬的谷床來說，使用 20 公尺 DEM 已有不錯成效，能達到與 6 公尺 DEM 50%以上的判釋結果。然而 DEM 自動判釋產製的是地表基本幾何形態而非特定地形單元，地形單元的判別仍需以人工判釋進行圈繪，幾何形態則用於輔助確認邊界。
2. 研究樣區三條溪流的主流谷床寬度從 8 到 200 公尺不等，最窄處僅有河道無埋積小階，最寬處則為土石流扇發育；谷床地形以比高約 2 到 6 公尺的埋積小階為主，其中流域面積相對最大的平廣溪中游段多為支流土石流扇所佔。三條溪流之谷床土地利用多為農業，建物零星散布，而谷床最寬的平廣溪下游有較密集的建築土地利用分布，也成為潛在的受災體。
3. 本研究引用周憲德(2016)判定台灣北部地區土石流溪流之流域險峻值修正門檻值，進行研究區潛在地形作用的判定。平廣溪與礮窟溪自源流集水區至埋積特徵出現後的主流地形作用依序以土石流、高含砂水流和洪水為主，小坑

溪則沒有判定出洪水作用；子集水區則多判別定具有土石流作用。然而平廣溪實際以航照判釋到土石流作用比流域險峻值推估的更向下游延伸至高含砂水流的河段，谷床邊坡之崩塌沉積物直接加入來自源流段的土石流甚至造成堰塞，為本次事件中影響主流谷床地形反應的重要因子。主河道邊坡崩塌的時空偶然性導致實際谷床上地形作用與流域險峻值推估有所差異。

4. 判釋蘇迪勒颱風前後航照立體像對所得到的地形變化以及比對公部門災害立即的現地調查資料，可知：(1)平廣溪上游和下游有明顯土石流或洪水溢淹情形，小坑溪受到土石流作用影響，磺窟溪水為高漲但無發生溢淹；(2)研究區有多條溪溝發生沖蝕，而這些支流集水區多有歷史崩塌且溪溝多有埋積或土石流扇特徵，顯示過去曾發生土石流作用。

綜而言之，本次颱風事件在研究區內的崩塌率並不高，但有多條溪溝發生沖蝕輸出土砂進入主流河道，尤其以位於研究區南側且降雨量相對最大的平廣溪最明顯。平廣溪主流谷床上游段和下游段遭受土石流與洪水作用而淤埋，僅中游段因支流谷口土石流扇面比高較大，以局部側蝕為主。顯然蘇迪勒颱風這種短延時高強度降雨所導致的瞬時洪峰流量，足以驅動主流谷床中的土砂下移，而支流河道所儲存的前期土砂事件沉積物，成為本次主流地形作用的重要料源之一。臺灣中低海拔山區溪流有許多具有類似本研究區之埋積谷床的型態，由蘇迪勒颱風的案例可推知，該類地形應屬現生地形，仍會受到當代地形作用影響，具有高度的地形動態性與致災可能性。而透過地形計測、航照判釋與現地調查的相互搭配，有助於了解中小型埋積河谷中地形變動的空間變化，進而推知地形作用歷程。

參考文獻

一、中文文獻

尹承遠、翁勳政、吳仁明、歐陽湘(1993)。台灣土石流之特性。工程地質技術應用研討會(V)論文集，70-90。

李錫堤(1996)。從地形學的觀點看陳有蘭溪的賀伯風災。地工技術，57，17-24。

吳佐川(1992)。台灣地區崩塌地區特性之研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。

吳亭燁、張駿暉、劉哲欣、施虹如、張志新(2016)。極端降雨引致坡地災害對新店河流域之衝擊與影響。災害防救科技與管理學刊，第5卷第2期，19-39。

吳輝龍、陳文福、張維訓(2004)。集水區地文特性因子與土石流發生機率間相關性之研究—以陳有蘭溪為例。中華水土保持學報，35(3)，251-259。

沈淑敏、張瑞津、楊貴三(2005)。活動構造地形判釋及資料建置分析(1/2)。地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫，新北市：經濟部中央地質調查所。

沈淑敏、張瑞津、楊貴三(2006)。活動構造地形判釋及資料建置分析(2/2)。地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫，新北市：經濟部中央地質調查所。

沈淑敏、葉懿嫻、黃健政、張瑞津、劉盈劭(2007)。花東縱谷北段的土石流扇和土石流溪溝的認定。中華水土保持學報，38(4)，311-324。

沈淑敏、羅佳明、王聖鐸(2017)。細緻化地質地貌特徵地圖製作研究。國家災害防救科技中心委託辦理計畫(編號：NCDR-S-106038)，未出版。

林宜羣(2016)。蘇迪勒颱風後新店溪上游國有林土砂災害治理策略及作為。台灣林業，Vol.42 No.6，3-21。

林朝宗(2000)。五萬分之一臺灣地質圖新店圖幅。新北市：經濟部中央地質調查所。

林昭遠、張力仁(2000)。地文因子對土石流發生影響之研究—以陳有蘭溪為例。中華水土保持學報，31(3)，227-237。

林美聆、陳彥澄(2014)。應用光達地形資料於莫拉克災後陳有蘭溪流域崩塌與土石流地質敏感地區判釋與分析。航測及遙測學刊，18(2)，129-143。

周憲德(2016)。坡地土砂災害之地文因子綜整判定及現地判釋(以平廣溪集水區為例)。行政院農業委員會水土保持局創新研究計畫成果報告(編號：SWCB-105-127)。南投縣：行政院農業委員會水土保持局。

翁毓穗、沈淑敏、莊永忠(2010)。莫拉克颱風在楠梓仙溪誘發之洪水與土石流作用及其溢淹範圍的含意。中國地理學會會刊，45，59-74。

國立編譯館(1982)。地球科學名詞。臺北市：國立編譯館。

郭基賢、楊貴三(2005)。台灣地區大型崩塌地之地理特性研究。地圖：中華民國地圖學會會刊，15，103-114。

張瑞津(1997)。陳有蘭溪流的地形環境與自然災害之關係。中國地理學會會刊，25，43-64。

張瑞津、鄧國雄、劉明錡(2000)。新店溪河階之地形學研究。臺灣師大地理研究報告，33，179-198。

張瑞津、楊貴三、沈淑敏(2002)。台灣島河階地形資料庫的建置(1/3)－北部地區。地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫，新北市：經濟部中央地質調查所。

張瑞津、楊貴三、沈淑敏(2003)。台灣島河階地形資料庫的建置(2/3)－南部地區。地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫，新北市：經濟部中央地質調查所。

張瑞津、楊貴三、沈淑敏(2004)。台灣島河階地形資料庫的建置(3/3)－東部地區。地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫，新北市：經濟部中央地質調查所。

張志新、王俞婷、傅鏗璇、林又青、張駿暉、劉哲欣、呂喬茵、吳啟瑞、蘇元風(2015)。2015年蘇迪勒颱風災害調查彙整報告。新北市：國家災害防救科技中心。

陳榮河、江英政(1999)。新中橫公路邊坡破壞之調查。第二屆土石流研討會論文集。

陳立淳(2013)。荖濃溪勤和地區全新世河流地形演育。國立中正大學地震研究所碩士論文。

陳宏宇、蘇定義、陳琨銘(1999)。土石流發生機制與地質環境之相關性。地工技術，74，5-20。

陳柔妃、詹瑜璋、張國楨、謝有忠(2016)。應用空載光達數值地形模型於基隆河之河流地形研究。航測及遙測學刊，21(1)，1-12。

- 陳奕中、侯進雄、謝有忠、陳柔妃、吳若穎(2014)。高解析度空載光達資料結合地形開闢度分析於構造地形特徵之應用。航測及遙測學刊，18(2)，67-78。
- 陳曼莉(2017)。強化新店溪水源高濁度原水操作策略之研究。中華民國自來水協會 106 年度研究計畫。台北市：中華民國自來水協會。
- 莊心凱(2012)。結合地貌主題圖層及物件式影像分析方法應用於山區氾濫原及周邊區域特徵判釋。臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 游繁結、陳重光(1987)。豐丘土石流災害之探討。中華水土保持學報，18(1)，76-92。
- 游繁結、賴建信(1996)。不同粒徑組成之土石流流動特性研究。中華水土保持學報，27(3)，213-222。
- 游繁結、連惠邦(1999)。土石流扇狀地危險區劃定之評述。地工技術，74，57-66。
- 彭義軒(2006)。埋積河段的分佈、轉變特性—陳有蘭溪北段支流流域的個案研究。國立臺灣師範大學地理學系碩士論文。
- 費立沅、紀宗吉、吳文隆、楊智堯(2012)。土石流扇狀地危險度分析案例探討。中華技術，93，124-135。
- 楊明德、林基源、林蔚榮、黃凱翔、吳東諺(2009)。莫拉克颱風於陳有蘭溪流域之災害調查。中華水土保持學報，40(4)，345-358。
- 楊貴三(1988)。新店溪中游河流地形的研究。地理教育，14，85-97。
- 詹錢登(2000)。土石流概論。臺北市：科技圖書股份有限公司。
- 詹錢登(2004)。豪雨造成的土石流。科學發展，374，14-23。
- 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生(2015)。台灣山區淺層崩塌地特性調查與分析。中華水土保持學報，46(1)，19-28。
- 劉盈劭(2001)。地形敏感性的比較研究-以陳有蘭溪北段小支流為例。國立臺灣師範大學地理學系碩士論文。
- 劉盈劭(2013)。陳有蘭溪源流區之崩塌與土石流發生特性與空間差異：以和社溪流域為例。國立臺灣師範大學地理學系博士論文。
- 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋(2016)。地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋。航測及遙測學刊，20(4)，263-277。

魏倫瑋、黃韋凱、黃春銘、李璟芳、林聖琪、紀宗吉(2015)。蘇迪勒颱風於臺灣北部之山崩致災機制初探。中華水土保持學報，46(4)，223-232。

龔琪嵐、齊士崢(2004)。楠梓仙溪流域的河階地與地形演育。地理學報，38，47-62。

二、英文文獻

Ashtekar, J. M., Owens, P. R., Brown, R. A., Winzeler, H. E., Dorantes, M., Libohova, Z., ... & Hempel, J. (2014). Digital mapping of soil properties and associated uncertainties in the Llanos Orientales, South America. *Arrouays, D.; McKenzie, N.*, 367-372.

Antonello, A., Franceschi, S., Floreancig, V., Comiti, F., & Tonon, G. (2017). Application of a pattern recognition algorithm for single tree detection from LiDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-4/W2, 27-33.

Blyth, K. and J.C. Rodda (1973). A stream length study. *Water Resources Research*, 9, 1454-1461.

Bovis, M. J., & Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth surface processes and landforms*, 24(11), 1039-1054.

Coe, J.A., Godt, J.W., Parise, M., & Moscariello, A. (2003). Estimating debris-flow probability using fan stratigraphy, historic records, and drainage-basin morphology, Interstate 70 highway corridor, central Colorado, USA. *In USA Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos (Switzerland)*, Vol. 2, 1085-1096.

Day, D.G. (1978). Drainage density changes during rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 3, 319-326.

Drăguț, L. & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81(3-4), 330-344.

De Scally, F.A., & Owens, I.F. (2004). Morphometric controls and geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(3), 311-322.

- Devrani, R. and Singh, V. (2014). Evolution of valley-fill terraces in the Alaknanda Valley, NW Himalaya: Its implication on river response studies. *Geomorphology*, 227, 112–122.
- Dikau, R., Brabb, E. E., Mark, R. K., & Pike, R. J. (1995). Morphometric landform analysis of New Mexico. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*, 109–126.
- Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Hsieh, M. L., Willett, S. D., ... & Lague, D. (2003). Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 426(6967), 648.
- Evans, I. (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (Ed.), *Spatial analysis in geomorphology*. Methuen: Harper & Row, 17–90.
- Frankl, A., Lenaerts, T., Radusinović, S., Spalevic, V., & Nyssen, J. (2016). The regional geomorphology of Montenegro mapped using Land Surface Parameters. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 60(1), 21–34. doi: 10.1127/zfg/2016/0221
- Gardiner, V. (1990). Drainage Basin Morphometry, in Andrew Goudie (Eds), *Geomorphological Techniques* (pp.79–91). New York: Routledge.
- Goudie, A.S. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. London; New York: Routledge.
- Gregory, K.J. and V. Gardiner (1975). Drainage density and climate. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 19, 287–298.
- Harvey, A.M. (2001). Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. *Catena*, 42(2–4), 225–250.
- Hovius, N., Stark, C., Hao-Tsu, C., & Jiun-Chuan, L. (2000). Supply and Removal of Sediment in a Landslide-Dominated Mountain Belt: Central Range, Taiwan. *The Journal of Geology*, 108(1), 73–89. doi: 10.1086/314387
- Jackson, L.E., Kostaschuk, R.A. and MacDonald, G.M. (1987). Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. In J.E. Costa & G.F. Wieczorek (eds), *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation, Reviews in Engineering Geology*, 7, 115–124.
- Jackson, Julia A (1997). *Glossary of geology*. Alexandria, Va: American

Geological Institute.

Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147–156.

Kramm, T., Hoffmeister, D., Curdt, C., Maleki, S., Khormali, F., & Kehl, M. (2017). Accuracy assessment of landform classification approaches on different spatial scales for the Iranian loess plateau. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11), 366. doi: 10.3390/ijgi6110366

Leopold, L.B. and J.P. Miller (1956). Ephemeral streams—hydraulic factors and their relation to the drainage net. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 282-A, 1–37.

Luo, W., & Liu, C. C. (2018). Innovative landslide susceptibility mapping supported by geomorphon and geographical detector methods. *Landslides*, 15(3), 465–474. doi: 10.1007/s10346-017-0893-9

MacMillan, R. A., & Shary, P. A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. *Developments in soil science*, 33, 227–254.

Norini, G., Zuluaga, M. C., Ortiz, I. J., Aquino, D. T., & Lagmay, A. M. F. (2016). Delineation of alluvial fans from Digital Elevation Models with a GIS algorithm for the geomorphological mapping of the Earth and Mars. *Geomorphology*, 273, 134–149.

Onda, Y. (1992). Influence of water storage capacity in the regolith zone on hydrological characteristics, slope processes and slope form. *Zeit. Geomorph. N.F.*, 36, 165–178.

Patton, P.C. (1988). Drainage basin morphometry and floods. In V.R. Baker, R.C. Kochel, & P.C. Patton (Eds.), *Flood geomorphology* (pp. 51–64). New York, NY: John Wiley and Sons.

Patton, P.C. and V.R. Baker (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12, 941–952.

Pike, R. (1988). The geometric signature: quantifying landslide–terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, 20, 491–511.

Pierson, T. C. (2005). Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds. *U.S. Geological Survey Fact Sheet*, 2004–

3142, 4 p.

Strahler, A.N.(1964).Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In V.T. Chow (Eds), *Handbook of applied hydrology* (pp.4-40 to 4-74). New York, NY: McGraw Hill.

Schmidt, J. & Hewitt, A. (2004). Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, 121(3-4), 243-256.

Schrott, L., Hufschmidt, G., Hankammer, M., Hoffmann, T., & Dikau, R. (2003). Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology*, 55(1-4), 45-63.

Stepinski, T.F. & Jasiewicz, J. (2011). Geomorphons-a new approach to classification of landforms. *Proceedings of Geomorphometry*, 2011, 109-112.

Silva, S. H. G., Menezes, M. D. D., Mello, C. R. D., Góes, H. T. P. D., Owens, P. R., & Curi, N. (2016). Geomorphometric tool associated with soil types and properties spatial variability at watersheds under tropical conditions. *Scientia Agricola*, 73(4), 363-370.

van Asselen, S., & Seijmonsbergen, A. C. (2006). Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. *Geomorphology*, 78(3-4), 309-320.

Veselský, M., Bandura, P., Burian, L., Harciníková, T. & Bella, P. (2015). Semi-automated recognition of planation surfaces and other flat landforms: a case study from the Aggtelek Karst, Hungary. *Open Geosciences*, 7(1).doi: 10.1515/geo-2015-0063

Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., & Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1), 61-66.

Wood, J. (1996). The geomorphological characterisation of digital elevation models(Doctoral dissertation). Retrieved from <https://lra.le.ac.uk/handle/2381/34503>

Wohl, E. (2000). *Mountain Rivers*. Washington, DC: American Geophysical Union.

Yokoyama, R., Shlrasawa, M., Pike, R.J. (2002). Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models.

Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68, 257–265.

三、日文文獻

鈴木隆介、砂村繼夫、松倉公憲(2017)。地形の辞典。京都，日本：日本地形学連合。

四、網路資料

国土地理院(無日期)。4・河川の作用による地形。取自：

http://www.gsi.go.jp/kikaku/tenkei_kasen.html

行政院農業委員會林務局農林航空測量所(無日期)。航空攝影紀錄資料。取自：

https://www.afasi.gov.tw/aerial_search

行政院農業委員會水土保持局(無日期)。重大土石災情報告。取自：

<http://246.swcb.gov.tw/disasterInfo/ImpDisasterReport.aspx>

交通部中央氣象局(無日期)。觀測資料查詢。取自：[https://e-](https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp?fbclid=IwAR0fePrS_VwPqjIK3RW_IHtwTdR6738tm_lRhGWNv1bIQjQn7OQBrUKQbh8)

[service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp?fbclid=IwAR0fePrS_VwPqjIK3RW_IHtwTdR6738tm_lRhGWNv1bIQjQn7OQBrUKQbh8](https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp?fbclid=IwAR0fePrS_VwPqjIK3RW_IHtwTdR6738tm_lRhGWNv1bIQjQn7OQBrUKQbh8)

附錄 1、 本研究使用航照之外方位參數

任務：150630c (2015 年 6 月 30 日)

PHOTO_ID	TWD97_E	TWD97_N	TWD97_H	OMEGA	PHI	KAPPA	STD_X	STD_Y	STD_H	STD_OMEGA	STD_PHI	STD_KAPPA
0001	299974.357	2751273.825	3411.304	-0.059658	-1.483459	81.669537	0.042250	0.027343	0.039635	0.004868	0.004765	0.010906
0002	300051.573	2751837.947	3409.940	-0.587641	-5.549526	81.620717	0.042600	0.027583	0.040872	0.005072	0.004934	0.010958
0003	300095.082	2752532.715	3407.092	-0.272357	-9.470733	84.190491	0.042625	0.027693	0.040929	0.005376	0.005064	0.011035
0004	300082.719	2753224.208	3408.103	0.201690	-3.503826	88.581852	0.042580	0.027465	0.040604	0.005256	0.005035	0.011109
0005	300057.425	2753915.936	3410.566	-0.038132	2.879261	92.518366	0.042305	0.027473	0.039880	0.004630	0.004653	0.011012
0006	300054.143	2754608.188	3409.452	0.052441	2.977420	93.485645	0.042198	0.027389	0.039493	0.004481	0.004564	0.010987
0007	300068.963	2755301.175	3407.318	0.008543	3.157709	93.827966	0.042277	0.027379	0.040243	0.004510	0.004647	0.011026
0008	300085.102	2755992.901	3408.188	0.219826	0.545971	93.006854	0.042337	0.027727	0.041141	0.004459	0.004626	0.011007
0009	300077.681	2756686.181	3407.880	0.607538	-4.575313	92.873158	0.042218	0.027862	0.041029	0.004342	0.004507	0.010952
0010	300056.471	2757377.699	3406.192	0.328816	-1.984437	94.121598	0.042262	0.027802	0.041113	0.004372	0.004541	0.010947
0020	302593.360	2758076.767	3407.812	-0.094229	-1.483060	-89.024448	0.041912	0.027204	0.039394	0.004187	0.004393	0.012717
0021	302588.985	2757383.870	3407.380	0.068752	-0.362557	-89.603324	0.041898	0.027165	0.039325	0.004116	0.004350	0.012669
0022	302583.757	2756692.008	3407.289	0.073859	0.078649	-89.872718	0.041786	0.027171	0.039103	0.004054	0.004306	0.012628
0023	302582.337	2756000.010	3408.168	0.153885	0.884961	-90.024361	0.041875	0.027123	0.039384	0.004037	0.004326	0.012600
0024	302584.054	2755306.670	3409.486	0.129302	0.585715	-89.778083	0.041714	0.027114	0.038990	0.003961	0.004263	0.012547
0025	302586.981	2754615.074	3410.425	0.062843	-0.032984	-89.429027	0.041728	0.027102	0.039122	0.003952	0.004264	0.012510
0026	302590.161	2753921.947	3411.269	0.040999	-0.175930	-89.421116	0.041698	0.027110	0.039076	0.003959	0.004265	0.012470
0027	302593.284	2753230.746	3411.354	0.097374	0.208854	-89.424722	0.041706	0.027105	0.039110	0.003992	0.004282	0.012421
0028	302596.290	2752537.634	3411.179	0.062468	-0.134475	-89.430085	0.041773	0.027105	0.039261	0.004047	0.004314	0.012360
0029	302599.325	2751845.163	3411.643	0.112412	0.103963	-89.199341	0.041773	0.027111	0.039328	0.004086	0.004338	0.012301
0042	305128.226	2753243.371	3410.679	0.072856	1.801256	90.697708	0.040433	0.026920	0.039681	0.004161	0.004278	0.012101
0043	305131.577	2753936.461	3410.101	0.059160	0.375264	90.174097	0.040588	0.026970	0.040153	0.004234	0.004360	0.012061
0044	305129.356	2754628.122	3407.928	0.070945	-0.669888	90.317866	0.040570	0.026989	0.040145	0.004201	0.004324	0.012004

0045	305117.162	2755321.048	3406.112	0.190711	-2.076559	90.663579	0.040450	0.026989	0.039852	0.004177	0.004287	0.011937
0046	305101.446	2756013.150	3408.638	0.282316	-0.896169	91.278735	0.040581	0.027018	0.040215	0.004250	0.004361	0.011913
0047	305098.225	2756704.876	3410.488	-0.139503	4.004067	91.779473	0.040535	0.027077	0.040183	0.004273	0.004356	0.011821

任務：150810c (2015 年 8 月 10 日)、150810e (2015 年 8 月 10 日)

PHOTO_ID	TWD97_E	TWD97_N	TWD97_H	OMEGA	PHI	KAPPA	STD_X	STD_Y	STD_H	STD_OMEGA	STD_PHI	STD_KAPPA
0007	305099.756	2752550.867	3384.130	0.006497	-1.822066	90.553691	0.035748	0.029519	0.053819	0.004410	0.004396	0.012049
0008	305100.707	2753243.205	3382.379	-0.167972	1.870773	90.642128	0.035735	0.029551	0.053872	0.004464	0.004415	0.012043
0009	305117.808	2753935.792	3380.420	-0.074582	4.174529	90.019396	0.035980	0.029549	0.054179	0.004561	0.004525	0.012072
0010	305131.758	2754627.219	3380.517	0.063264	-3.909486	89.617201	0.035717	0.029583	0.053929	0.004370	0.004395	0.012005
0011	305123.449	2755319.211	3381.001	0.160768	-4.527266	89.695979	0.035683	0.029538	0.053736	0.004266	0.004332	0.011972
0012	305105.993	2756011.444	3382.285	0.253509	-1.618215	90.490970	0.035750	0.029532	0.053906	0.004192	0.004347	0.011966
0013	305090.647	2756704.785	3382.058	0.085987	0.640136	90.885552	0.035448	0.029542	0.053546	0.004088	0.004275	0.011927
0014	305080.994	2757397.004	3381.480	0.079783	0.888066	91.406619	0.035661	0.029537	0.053838	0.004063	0.004290	0.011896
0015	305077.787	2758089.558	3380.591	0.113439	1.328333	91.399913	0.035431	0.029552	0.053573	0.004012	0.004232	0.011841
0024	302565.869	2758075.036	3381.185	-0.047478	-1.500135	-88.871726	0.030259	0.026621	0.046713	0.004358	0.004442	0.012912
0025	302572.461	2757383.542	3382.773	-0.062854	2.222037	-89.439255	0.030129	0.026614	0.046450	0.004299	0.004396	0.012867
0026	302585.332	2756690.356	3383.708	0.036778	0.476451	-88.843825	0.030295	0.026587	0.046668	0.004329	0.004473	0.012832
0027	302590.362	2755998.703	3381.696	0.179892	-0.909092	-88.982596	0.030101	0.026604	0.046371	0.004170	0.004357	0.012737
0028	302593.359	2755306.582	3380.871	0.059158	0.196933	-89.022131	0.030058	0.026576	0.046279	0.004089	0.004319	0.012689
0029	302595.912	2754613.735	3380.510	0.043295	-0.001027	-88.976814	0.029927	0.026556	0.046107	0.004016	0.004280	0.012633
0030	302598.977	2753922.044	3381.032	0.044712	-0.038163	-88.994150	0.029881	0.026565	0.046001	0.003990	0.004255	0.012576
0031	302602.030	2753229.089	3380.070	0.026021	0.227382	-89.597188	0.029957	0.026561	0.046062	0.004047	0.004296	0.012536
0032	302604.488	2752537.351	3380.987	-0.040192	0.131287	-89.693363	0.030103	0.026596	0.046236	0.004155	0.004375	0.012473
0001	300087.800	2752526.753	3894.161	0.195372	-2.071145	-89.242721	0.029656	0.030234	0.047050	0.004544	0.004637	0.014073
0002	300076.196	2751835.233	3889.180	0.111116	-2.166599	-89.562792	0.029552	0.030275	0.046835	0.004553	0.004632	0.014068

附錄 2、子集水區基本資料彙整表

編號	溪溝級序	谷口地形	集水區面積(ha)	集水區平均坡度(度)	溪溝長度(m)	溪溝高差(m)	溪溝平均坡度(%)	形狀係數	集水區最大高差(m)	流域險峻值	崩塌率(%)
PG01	1		4.2624	34.35	541.36	262.39	48.47%	0.15	265.09	1.28	1.48%
PG02	1		4.9608	38.15	460.26	250.38	54.40%	0.23	270.39	1.21	
PG03	2		5.472	40.87	392.04	264.62	67.50%	0.36	272.45	1.16	0.94%
PG04	2	fa-P01	9.6264	28.06	769.66	265.05	34.44%	0.16	270.68	0.87	18.20%
PG05	2		13.2588	27.38	940.93	329.77	35.05%	0.15	335.13	0.92	2.51%
PG06	2		10.3536	26.53	907.47	327.29	36.07%	0.13	337.81	1.05	
PG07	1		4.2012	24.82	574.01	170.19	29.65%	0.13	174.12	0.85	
PG08	3	ft-P01	49.4496	31.98	1226.49	438.64	35.76%	0.33	463.01	0.66	0.94%
PG09	1		11.358	32.17	1140.72	451.35	39.57%	0.09	458.31	1.36	0.30%
PG10	1		2.8512	28.90	451.46	189.77	42.03%	0.14	194.19	1.15	
PG11	2		13.1184	29.11	775.27	326.01	42.05%	0.22	334.61	0.92	0.53%
PG12	1		4.0392	31.86	469.98	217.15	46.20%	0.18	221.76	1.10	
PG13	2		8.5608	28.30	571.88	242.87	42.47%	0.26	252.34	0.86	
PG14	1		2.9448	31.01	461.59	209.57	45.40%	0.14	217.25	1.27	4.81%
PG15	3	fa-P04	64.2528	37.92	1822.50	563.36	30.91%	0.19	645.54	0.81	0.91%
PG16	3	ft-P02	67.5108	34.83	1868.51	602.41	32.24%	0.19	639.60	0.78	0.58%
PG17	2		5.652	32.84	573.58	248.00	43.24%	0.17	256.05	1.08	
PG18	2		11.6712	37.15	792.75	405.97	51.21%	0.19	409.22	1.20	
PG19	2		6.3648	43.56	486.41	349.57	71.87%	0.27	366.76	1.45	
PG20	3	fa-P07	54.2232	38.62	1477.52	615.99	41.69%	0.25	625.85	0.85	0.94%
PG21	3	fa-P08	125.1648	30.41	2687.74	672.67	25.03%	0.17	676.49	0.60	0.31%
PG22	4	fa-P10	219.5928	26.76	3055.04	650.46	21.29%	0.24	667.65	0.45	0.02%
PG23	2		15.9084	23.37	1250.25	293.71	23.49%	0.10	299.43	0.75	
PG24	2		19.6848	26.84	1452.29	422.73	29.11%	0.09	425.86	0.96	0.19%

編號	溪溝級序	谷口地形	集水區面積(ha)	集水區平均坡度(度)	溪溝長度(m)	溪溝高差(m)	溪溝平均坡度(%)	形狀係數	集水區最大高差(m)	流域險峻值	崩塌率(%)
PG25	2		7.182	28.71	620.91	259.69	41.82%	0.19	262.50	0.98	2.42%
PG26	5		268.7256	31.31	3062.30	686.65	22.42%	0.29	687.99	0.42	0.49%
PG27	2		32.7168	34.24	1065.68	392.15	36.80%	0.29	392.59	0.69	1.10%
PG28	4		202.0464	33.37	2348.27	634.93	27.04%	0.37	651.35	0.46	0.09%
PG29	1	fa-PG 11	11.9988	31.34	1067.75	426.28	39.92%	0.11	428.48	1.24	
PG30	3		39.8412	35.72	1072.62	430.74	40.16%	0.35	433.86	0.69	
PG31	2		4.2624	35.01	471.60	258.12	54.73%	0.19	259.79	1.26	
PG32	3		59.2776	34.11	1300.05	455.13	35.01%	0.35	457.76	0.59	0.96%
PG33	1		4.4172	32.99	603.60	312.69	51.80%	0.12	316.06	1.50	
PG34	2	fa-PG 09	11.7864	34.21	858.66	371.16	43.23%	0.16	371.97	1.08	0.31%
PG35	3	ft-PG 03	33.318	30.63	1386.88	431.29	31.10%	0.17	438.11	0.76	0.48%
PG36	2		8.9316	27.16	846.15	266.80	31.53%	0.12	271.61	0.91	
PG37	1		4.8456	26.91	615.58	243.08	39.49%	0.13	244.83	1.11	
PG38	1		3.4992	32.15	446.10	198.34	44.46%	0.18	201.02	1.07	
PG39	2		9.6552	26.15	899.70	271.84	30.21%	0.12	274.88	0.88	
PG40	3	fa-PG 06	54.6192	32.05	1577.33	466.06	29.55%	0.22	473.73	0.64	0.90%
PG41	1		1.836	30.22	338.96	184.10	54.31%	0.16	189.57	1.40	
PG42	3	fa-PG 05	21.7188	38.93	1001.41	457.74	45.71%	0.22	490.52	1.05	
PG43	1		2.7396	43.37	303.91	235.32	77.43%	0.30	242.76	1.47	
PG44	3	fa-PG 03	26.7372	42.22	980.61	503.85	51.38%	0.28	558.33	1.08	4.03%
PG45	1		3.0924	44.45	408.63	316.18	77.38%	0.19	324.80	1.85	
PG46	2		10.1664	40.95	667.13	451.24	67.64%	0.23	453.56	1.42	
PG47	3		47.7072	25.93	1500.58	547.59	36.49%	0.21	551.09	0.80	
PG48	3		20.3472	33.46	1076.53	378.61	35.17%	0.18	381.41	0.85	0.64%
PG49	1	fa-PG 02	2.1456	41.49	428.96	263.24	61.37%	0.12	263.65	1.80	1.02%

編號	溪溝級序	谷口地形	集水區面積(ha)	集水區平均坡度(度)	溪溝長度(m)	溪溝高差(m)	溪溝平均坡度(%)	形狀係數	集水區最大高差(m)	流域險峻值	崩塌率(%)
PG50	1		4.3452	41.88	473.24	284.06	60.02%	0.19	285.70	1.37	2.20%
PG51	3		28.926	28.20	1185.56	366.43	30.91%	0.21	374.08	0.70	
PG52	3		27.8316	32.52	1000.79	382.16	38.19%	0.28	391.73	0.74	0.11%
PG53	1		3.4776	40.44	507.24	288.97	56.97%	0.14	298.41	1.60	
PG54	1		2.3688	44.48	339.20	249.83	73.65%	0.21	257.64	1.67	
PG55	2		16.524	38.18	840.06	360.43	42.91%	0.23	388.31	0.96	
PG56	1		2.6244	45.83	345.38	239.03	69.21%	0.22	242.65	1.50	
PG57	2		8.46	44.83	614.29	379.69	61.81%	0.22	382.12	1.31	0.21%
PG58	1		4.284	42.89	542.75	294.32	54.23%	0.15	313.45	1.51	
PG59	1		2.3328	37.39	356.99	209.53	58.69%	0.18	215.25	1.41	
PG60	2		7.668	40.34	497.62	305.04	61.30%	0.31	311.63	1.13	
PG61	1		3.3372	34.96	470.48	295.68	62.85%	0.15	296.19	1.62	
PG62	1		3.0492	39.62	271.83	180.14	66.27%	0.41	194.92	1.12	
XK01	1		3.33	32.65	272.47	141.58	51.96%	0.45	239.01	1.31	
XK02	1		3.1536	30.93	532.69	241.42	45.32%	0.11	241.71	1.36	1.17%
XK03	1		6.246	28.36	669.94	248.49	37.09%	0.14	252.19	1.01	
XK04	2		19.0044	31.05	934.79	370.78	39.66%	0.22	372.13	0.85	1.64%
XK05	2		7.6716	29.50	386.82	171.89	44.44%	0.51	254.85	0.92	
XK06	1		3.312	30.54	350.88	144.46	41.17%	0.27	227.68	1.25	
XK07	1		1.9548	29.82	221.56	90.79	40.98%	0.40	181.99	1.30	
XK08	2		5.7456	28.82	342.16	106.72	31.19%	0.49	200.76	0.84	
XK09	2		10.5228	29.60	399.01	118.09	29.60%	0.66	193.19	0.60	
XK10	2		41.7492	32.27	1309.90	496.96	37.94%	0.24	502.90	0.78	0.62%
XK11	2		11.7	27.80	772.53	270.39	35.00%	0.20	382.48	1.12	
XK12	4		54.3636	33.63	1534.97	511.63	33.33%	0.23	530.98	0.72	

編號	溪溝級序	谷口地形	集水區面積(ha)	集水區平均坡度(度)	溪溝長度(m)	溪溝高差(m)	溪溝平均坡度(%)	形狀係數	集水區最大高差(m)	流域險峻值	崩塌率(%)
XK13	1		2.9376	31.39	368.95	139.86	37.91%	0.22	143.01	0.83	1.93%
XK14	3		19.9044	28.29	1168.36	384.42	32.90%	0.15	387.90	0.87	0.60%
XK15	2		9.7416	27.28	696.04	236.97	34.05%	0.20	239.46	0.77	
XK16	1		4.4568	24.38	492.34	179.73	36.51%	0.18	184.76	0.88	
XK17	2		5.4468	30.64	466.22	185.79	39.85%	0.25	187.51	0.80	
HK01	1		2.934	23.02	352.41	111.58	31.66%	0.24	111.58	0.65	
HK02	1		3.1284	22.10	535.36	153.99	28.76%	0.11	158.76	0.90	
HK03	2		5.6628	22.52	433.27	147.76	34.10%	0.30	148.90	0.63	
HK04	3		18.5652	19.31	950.62	229.12	24.10%	0.21	234.84	0.55	
HK05	4	ft-H01	114.84	21.93	2091.16	407.37	19.48%	0.26	470.24	0.44	0.05%
HK06	3		32.2632	21.91	1490.95	383.53	25.72%	0.15	389.48	0.69	
HK07	4		92.6532	20.20	2052.28	422.74	20.60%	0.22	428.06	0.44	
HK08	3		87.0192	27.57	1837.39	488.73	26.60%	0.26	538.08	0.58	
HK09	2		40.4863	18.08	1211.68	293.99	24.26%	0.28	364.72	0.57	
HK10	3		55.3997	23.84	1343.04	313.90	23.37%	0.31	421.86	0.57	0.12%
HK11	3		41.9112	31.70	1191.88	362.72	30.43%	0.30	488.65	0.75	
HK12	2		18.0108	36.67	1005.28	401.84	39.97%	0.18	403.56	0.95	
HK13	2	fa-H03	28.53	31.11	1320.39	428.11	32.42%	0.16	433.89	0.81	
HK14	4		73.8324	29.90	1547.49	479.06	30.96%	0.31	492.07	0.57	
HK15	3		22.1508	27.63	929.06	333.58	35.91%	0.26	337.81	0.72	
HK16	1		3.5496	31.72	462.33	220.32	47.65%	0.17	224.28	1.19	
HK17	2		11.07	37.96	644.09	302.44	46.96%	0.27	303.99	0.91	
HK18	1		4.4892	41.90	449.62	297.95	66.27%	0.22	301.72	1.42	
HK19	2		15.678	36.14	794.63	340.16	42.81%	0.25	353.98	0.89	2.90%
HK20	2		15.9624	35.66	898.73	387.52	43.12%	0.20	388.55	0.97	

編號	溪溝級序	谷口地形	集水區面積(ha)	集水區平均坡度(度)	溪溝長度(m)	溪溝高差(m)	溪溝平均坡度(%)	形狀係數	集水區最大高差(m)	流域險峻值	崩塌率(%)
HK21	2		7.7004	41.50	479.93	324.15	67.54%	0.33	324.96	1.17	
HK22	1		6.9732	33.86	645.34	340.77	52.80%	0.17	343.58	1.30	
HK23	2	fa-H02	19.1988	29.99	941.65	331.46	35.20%	0.22	366.57	0.84	
HK24	1		2.592	29.09	420.21	158.86	37.81%	0.15	166.48	1.03	
HK25	2		9.3744	27.49	687.64	279.55	40.65%	0.20	282.09	0.92	
HK26	1		1.5012	31.34	266.77	125.13	46.91%	0.21	129.11	1.05	
HK27	1	fa-H01	2.1204	31.11	298.32	117.14	39.27%	0.24	119.76	0.82	

*子集水區編號說明：PG 為平廣溪，XK 為小坑溪，HK 為礮窟溪。*谷口地形編號說明：fa 為土石流扇，ft 為扇階，P 為平廣溪，H 為礮窟溪。



附錄 3、子集水區地形變化調查彙整表

編號	扇	扇階	谷床	邊坡崩塌
PG 01	2-B	2-B	1-A	2-A
PG 02	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 03	2-B	2-B	1-A	2-A
PG 04	1-A	2-B	1-B	2-A
PG 05	2-B	2-B	1-B	2-A
PG 06	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 07	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 08	2-B	1-B	2-A	1-A
PG 09	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 10	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 11	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 12	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 13	2-B	2-B	1-A	1-B
PG 14	2-B	2-B	1-A	1-A
PG 15	1-B	2-B	2-A	1-A、C(上游)
PG 16	2-B	1-B	2-A	1-A、C(上游)
PG 17	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 18	2-B	2-B	2-C	2-B
PG 19	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 20	1-B	2-B	2-A	2-A、C(上游)
PG 21	1-B	2-B	2-A	1-A、C(上游)
PG 22	1-B	2-B	2-A	1-A、C(上游)
PG 23	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 24	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 25	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 26	2-B	2-B	2-A	1-A、C(上游)
PG 27	2-B	2-B	2-A	2-A
PG 28	2-B	2-B	2-A	2-A、C(上游)
PG 29	1-B	2-B	1-A	2-C
PG 30	2-B	2-B	1-A	2-C
PG 31	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 32	2-B	2-B	2-A	2-A
PG 33	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 34	1-B	2-B	1-B	2-A
PG 35	2-B	1-B	1-B	2-A
PG 36	2-B	2-B	2-C	2-B
PG 37	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 38	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 39	2-B	2-B	1-C	2-B

編號	扇	扇階	河谷	崩塌
PG 40	1-B	2-B	2-A	1-A
PG 41	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 42	1-B	2-B	1-C	2-B
PG 43	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 44	1-A	2-B	2-A	2-A
PG 45	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 46	2-B	2-B	1-B	1-B
PG 47	2-B	2-B	1-C	1-B
PG 48	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 49	1-B	2-B	1-C	2-A
PG 50	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 51	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 52	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 53	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 54	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 55	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 56	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 57	2-B	2-B	1-C	2-A
PG 58	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 59	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 60	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 61	2-B	2-B	1-C	2-B
PG 62	2-B	2-B	1-C	2-A
XK 01	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 02	2-B	2-B	1-C	2-A
XK 03	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 04	2-B	2-B	2-A	2-A
XK 05	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 06	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 07	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 08	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 09	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 10	2-B	2-B	2-A	2-A、C(上游)
XK 11	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 12	2-B	2-B	2-A	2-B
XK 13	2-B	2-B	1-C	2-A
XK 14	2-B	2-B	1-A	2-A
XK 15	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 16	2-B	2-B	1-C	2-B
XK 17	2-B	2-B	1-C	1-B

編號	扇	扇階	河谷	崩塌
HK 01	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 02	2-B	2-B	1-C	1-B
HK 03	2-B	2-B	2-C	2-B
HK 04	2-B	2-B	2-C	2-B
HK 05	2-B	1-B	2-A	1-A
HK 06	2-B	2-B	2-C	1-B
HK 07	2-B	2-B	2-C	2-C
HK 08	2-B	2-B	2-C	2-C
HK 09	2-B	2-B	1-C	2-C
HK 10	2-B	2-B	2-C	2-A、C(上游)
HK 11	2-B	2-B	2-C	2-C
HK 12	2-B	2-B	1-C	2-B、C(上游)
HK 13	1-B	2-B	2-C	2-B、C(上游)
HK 14	2-B	2-B	2-C	1-B、C(上游)
HK 15	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 16	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 17	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 18	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 19	2-B	2-B	1-A	2-A
HK 20	2-B	2-B	1-C	1-B
HK 21	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 22	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 23	1-B	2-B	1-C	2-B
HK 24	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 25	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 26	2-B	2-B	1-C	2-B
HK 27	1-B	2-B	1-C	2-B

※子集水區颱風前後地形變化代碼說明

地形	颱風前狀態	颱風後變化
扇、扇階	1-有扇(扇階) 2-無扇(扇階)	A.扇面有新堆積或出現新扇 B.無變化
谷床	1-無明顯平底形態(陡、窄) 2-河谷有平底形態(緩、寬)	A.有沖蝕(土石流)，寬度無明顯變化 B.有沖蝕(土石流)，谷床加寬 C.無明顯變化
邊坡崩塌	1-有歷史崩塌紀錄與潛在大規模崩塌徵兆： 依據 95-102 年地調所航照判釋山崩目錄 102-104 年林務局衛星影像判釋山崩目錄 102-104 地調所潛在大規模崩塌調查 2-無歷史崩塌與潛在大規模崩塌徵兆	A.有發生崩塌 B.無崩塌發生 C.航照因雲遮或闕漏而無法判釋

謝辭

研究所兩年半的學習，終於告一個段落了！從第一年的各種摸索、嘗試，第二年的研究、調查，到最後半年的彙整、書寫，在這些過程中不時會想著我在做什麼？我做這些要幹什麼？研究的學習過程中好像有時會跳入一個漩渦裡打轉，常常搞得自己頭昏眼花、緊張胃痛。但幸好這條學習的道路並不孤單，總能得到許多人的幫助，無論是給予研究的建議、心情上的鼓勵安慰、生活上的支持，萬分感謝有這麼多人陪著我走過這兩年半！

能夠產出這本論文，首先最為感謝的就是指導我的沈淑敏老師了！在我還在摸索時給予我方向，在我開始混亂時帶著我聚焦，除了從老師身上學到許多地形學專業知識，也從老師身上學到做事的態度；除了研究方面的學習，擔任老師各種課程的助教和計畫的助理，在幫忙課程和計畫的過程也讓我有機會拓展視野，雖然有時候事情真的很多，但最後收到修課學生的回饋、看到計畫的成果，就覺得一切都很有意義！這些都要謝謝沈老師給我的機會。再來要感謝一發時擔任評論人的王聖鐸老師，對我的論文研究方法與使用資料方面，提供了許多建議與指導，尤其在數值測系統方面，雖然很可惜我錯過了航空攝影測量課程，但多虧有老師協助，讓我學會使用數值航測系統中的立體像對判釋數化以及DTM產製，活化研究室裡的數值航測系統工作站！接著要感謝二發的評論人，同時也是口試委員的謝有忠先生，提醒了我在探討沉積物搬運堆積時還應注意的因子，以及建議未來可以針對使用資料和沉積物供給控因等方面更深入討論的面向；還要感謝同樣也是口試委員的陳毅青老師，對於本研究的地形學意義給予寶貴意見，並提醒從一些圖表中還可延伸探討的問題。另外還要感謝國家災害防救科技中心的張志新組長，因為有組長拋出地形製圖計畫的構想，讓我的論文方向走向了地形判釋，也因為有計畫經費的補助，讓研究過程中購買航照、野外調查等必要的花費可以有經費支持使研究更為順利(計畫名稱：細緻化地質地貌特徵地圖製作研究；計畫編號：NCDR-S-106038)！

這兩年半以來，除了受惠於師長們的指導，也很慶幸有學長姊和同儕們的幫忙與陪伴。在地形室有牧笛學長、勝煒學長，感謝你們在我每次發表演練時給予很多建議，也在地形室各項事務或課程助教及計畫工作中給予各種照顧和幫忙；感謝空間室的翎嘉學姊在我摸索數值航測系統時細心指導、陪我一起嘗試解決問題。同儕方面，唸研究所第一位認識的同學就是貿傑了，很感謝有貿傑一起擔任環境學程的助理，在工作上幫了各種忙，也讓我可以更快的熟悉師大；感謝祐程，多虧有你嫻熟的 GIS 技術，我每次遇到 GIS 問題總能向你請教到解決方法，還常常可以透過你認識各種鳥類，出野外時更增添樂趣；感謝昭蓉，畢業後無縫接軌的來承擔計畫，忙碌的工作之餘還在產製 DTM 和相關分析上給予我幫助；感謝承樺指導我使用空拍機，也在課程助教和地形製圖計畫上幫了很多忙；感謝碩班的各位同學們，有大家在一起互相取暖、鼓勵，學習之路一點都不孤單，尤其文蕙是一起從彰師大來到臺師大的戰友，很感謝文蕙願意偶爾聽我吐苦水，雖然研究方向不同，但還是會提供我一些想法去突破盲點。在研究室度過的這段時間裡，也感謝認識到大學部學弟妹們，因為有大家在，地形室能夠成為歡樂的小空間，在精神上紓解了做研究的壓力，在計畫或研究方面有即時的人力支援，而每次參與例會的過程聽大家的報告，對我也是寶貴的學習。最後要感謝我的家人，在我決定要念研究所甚至要延畢半年時，儘管家中有一點經濟上的壓力，仍接受我的任性，默默的支持著我，讓我在生活上可以得到支持，每天可以吃飽睡好有力氣繼續面對學業挑戰。

畢業總意味著另一個階段的開始，當初因為想讓自己有著更多可能性而選擇唸了研究所，現在多多少少有比大學畢業時進步一點了吧！期許自己在面對下一個階段的挑戰時，能將自己所累積的各種可能性發揮出來，並勇敢的往前走！

文毓

2019.02.23

謹記於臺師大地理系 地形實驗室