
集水區坡面表土及崩積土層之厚度與地形
關係-基於工程地質探勘資料成果
成果報告書

**Investigation on Top-Soil Thickness
Corresponding Topographic Attribute on
the Hillslope in Mountain Area Based on
Engineering Geological Investigation
Databank**

執行單位：國立屏東科技大學

執行期間：111 年 01 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳天健 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

集水區坡面表土及崩積土層之厚度與地形關係-基於 工程地質探勘資料成果

摘要

邊坡坡面表土及崩積層厚度是淺層崩塌及坡面型土石流量體預測、災害預警模式或土砂治理規劃，非常重要之參數，惟目前山區表土及崩積層厚度，確尚無可實用之工具可茲估算應用。基於此，本年度計畫研究目標為建立臺灣本土之山區邊坡表土及崩積層厚度評估模式，期以精進集水區上游淺層崩塌不安定土方量體評估模式，提供災害預警模式建立或防災規劃之參酌。

本研究首先蒐集國內多年來山區工程地質鑽探資料及現地土壤土鑽試驗，建立表層土壤及崩積層厚度分析資料庫。再搭配其所在地形特性，考慮各種地形特性因子，如坡度、地形曲率、區位、地質因子，建立描述性最佳之表土及崩積層厚度與地形關係。最後，依採用淺層崩塌定義，針對不安定土方之深度 5m 以下之狀況，擬定可茲應用之臺灣本土山區表土及崩積層厚度評估模式。推估式如下，其中， y 為土壤(不安定土方)厚度， x 為坡面坡度。

一、 由地質分區

● 未擾動區域部分:

1. 西部麓山帶與中央山脈西翼: $y = -0.0248x + 1.8863$
2. 海岸山脈地質區: $y = -0.0385x + 2.0023$ 。

● 擾動區域部分

1. 西部麓山帶(新第三紀沉積盆地): $y = -0.00055x + 4.6514$
2. 中央山脈西翼(第三紀亞變質岩): $y = -0.0274x + 5.0395$

3. 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩): $y = -0.0435x + 4.7662$

二、由區位分區

● 未擾動區域部分:

1. 坡頂處: $y = -0.0381x + 3.1783$

2. 坡腹處: $y = -0.035x + 2.1633$

3. 坡腳處: $y = -0.0132x + 1.3189$

● 擾動區域部分

1. 頭部: $y = -0.0024x + 4.486$

2. 坡體: $y = -0.0454x + 5.4012$

3. 坡腳: $y = -0.0156x + 4.5555$

關鍵字：土壤厚度、坡度、淺層崩塌、地形

Investigation on Top-soil Thickness Corresponding Topographic Attribute on the Hillslope in Mountain Area Based on Engineering Geological Investigation Databank

Abstract

The depth of unstable soil is the critical parameter for evaluations of the mass quantification, disaster pre-warning act, and mitigation plan on shallow landslide and hillslope debris flow. However, no practical data or model could be used in Taiwan island. Therefore, this research projector attends to develop the soil depth model for evaluating on shallow landslide. More than 470 bore-logs of engineering geological investigation databank and 800 topsoil drills from reports of The Central Geological Survey (CGS) were collected in the study. The topsoil depth and colluvium depth for each bore-logs were recognized through the texture, regolith, weathering condition, and shearing structure etc. feature evaluations. Topographic features includes slope gradient, location, regolith, curvature were correlated to topsoil depths to develop the correlation equations. Based on the definition of the shallow landslide that the depth is less than 5m, we took only the depth in 5 m if the colluvium depth is deeper than 5 m in the case of the large-scale landslide region. Last, the appropriate correlation equations were developed as follows. (in the equation, y: topsoil depth, x: slope gradient, unit: meter)

1. geology zoning

● undisturbed terrain:

- (1) cenozoic formations of the foothill region in western Taiwan and west part of the central range of Taiwan: $y = -0.0248x + 1.8863$
- (2) The Coastal Range of eastern Taiwan: $y = -0.0385x + 2.0023$

● disturbed terrain:

- (1) cenozoic formations of the foothill region in western Taiwan:
 $y = -0.00055x + 4.6514$
- (2) west part of the central range of Taiwan: $y = -0.0274x + 5.0395$
- (3) the coastal range of eastern Taiwan: $y = -0.0435x + 4.7662$

2. locations in the slope or landslide mass

● undisturbed terrain: ridge, hillside, slope foot

- (1) ridge: $y = -0.0381x + 3.1783$
- (2) hillside: $y = -0.035x + 2.1633$
- (3) slope foot: $y = -0.0132x + 1.3189$

● disturbed terrain:

- (1) ridge $y = -0.0024x + 4.486$
- (2) hillside: $y = -0.0454x + 5.4012$
- (3) slope foot: $y = -0.0156x + 4.5555$

Keywords: topsoil depth, slope gradient, shallow landslide, topography

目次

摘要	I
Abstract.....	III
目次	V
表次	VII
圖次	VIII
第一章 前言.....	1-1
第二章 計畫項目及時程進度	2-1
第一節 本年度計畫工作項目	2-1
第二節 工作進度	2-4
第三章 國內外表土及崩積層厚度與地形相關文獻.....	3-1
第一節 土壤厚度相關研究	3-1
第二節 地調所計畫之坡面表土及崩積層厚度推估模式 ..	3-13
第三節 崩塌相關研究	3-16
第四章 研究區概述及研究資料庫收集與建置	4-1
第一節 研究區域及地質概述	4-1
第二節 研究區域基本圖資料庫收集	4-5
第三節 研究區暨 34 處大崩區高解析度數位地型、區域地質圖 資、地形圖等基礎圖資建置.....	4-7
第五章 工程探勘資料庫與土壤厚度調查	5-1
第一節 表土及崩積層鑽探及地形資料	5-2
第二節 土壤厚度野外調查	5-7
第三節 山坡地土地利用限度調查資料庫與土層厚度比對	5-11
第六章 應用 UAV 調查崩塌區及坑溝表土及崩積層厚度之技術研發	6-1

第一節 校內室外 UAV 影像像素及深度測量方法·····	6-1
第二節 案例驗證·····	6-12
第七章 坡面表土及崩積層厚度與邊坡微地形相關性分析·····	7-1
第一節 鑽探資料·····	7-1
第二節 坡度因子分析·····	7-4
第三節 地質因子分析·····	7-10
第四節 區位因子分析·····	7-15
第五節 地形曲率因子分析·····	7-19
第八章 建立坡面表土及崩積層厚度推估模式·····	8-1
第一節 建立坡面表土及崩積層厚度推估模式·····	8-1
第二節 小規模崩塌之地形特性分析·····	8-3
第九章 結論·····	9-1
參考文獻·····	參-1
附錄·····	附錄-1
附錄一、計畫核定審查意見回覆辦理情形·····	附錄-1
附錄二、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形·····	附錄-5
附錄三、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形·····	附錄-9
附錄四、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形·····	附錄-13
附錄五、34 處大崩區之數位地形與鑽孔位置圖·····	附錄-15

表次

表 2-1 計畫工作進度表	2-4
表 3-1 坡度與土壤厚度關係(摘自 Khazai and Sitar, 2000)	3-8
表 3-2 坡度與土壤厚度關係(摘自 國家災害防救科技中心，2004)	3-9
表 3-3 地調所坡度與土壤厚度推估公式比較(摘自 易淹水計畫報告)	3-15
表 3-4 邊坡坡度與崩塌深度關係文獻綜整表(詹勳全等，2015)	3-18
表 3-5 國內外相關崩塌面積與土方冪次經驗式列表	3-20
表 3-6 不同學者提出之以崩塌地面積推估體積之估算法(詹勳全等， 2015)	3-21
表 4-1 研究蒐集之基本圖資	4-5
表 5-1 比對結果表	5-13
表 6-1 案例一厚度與未擾動土層之最大厚度線性公式比較....	6-13
表 6-2 案例一厚度與擾動土層之坡體處線性公式比較.....	6-13
表 6-3 案例二厚度與未擾動土層之最大厚度線性公式比較....	6-15
表 6-4 案例二厚度與擾動土層之坡體處線性公式比較.....	6-15
表 6-5 案例三厚度與未擾動土層之最大厚度線性公式比較....	6-17
表 6-6 案例三厚度與擾動土層之坡體處線性公式比較.....	6-17

圖次

圖 3-1 土壤生成速率與土壤厚度關係(摘自 Carson and Kirkby1972)	3-2
圖 3-2 花崗岩完全的風化剖面中出現的特徵(摘自 B.P.Ruxton and L.Berry,1957).....	3-3
圖 3-3 土壤化育層及剖面圖(改繪自地調所(2007)).....	3-4
圖 3-4 司馬庫斯林道之崩積層	3-6
圖 3-5 崩積層分類示意圖(摘自董家鈞、楊賢德，2001).....	3-7
圖 3-6 土壤厚度與邊坡曲率之關係圖(摘自林伯勳等人，2011).....	3-9
圖 3-7 土壤厚度調查範圍 (調查範圍如上圖中所標示之 O, A, B 層，改繪自美國 USDA 土壤調查手冊/地調所(2007))	3-11
圖 3-8 土壤厚度調查現場作業狀況 (地調所 2007)	3-12
圖 3-9 地調所計畫之土壤厚度調查成果圖(摘自易淹水計畫報告)	3-14
圖 3-10 最大土壤厚度與坡度關係圖(摘自易淹水計畫報告)...	3-14
圖 3-11 深層崩塌各地形特徵示意圖 (摘自魏倫瑋等人，2012)	3-17
圖 3-12 詹勳全等與其他學者成果比較(詹勳全等，2015)	3-22
圖 4-1 臺灣地形圖	4-2
圖 4-2 全臺地質分區圖(何春蓀，1997)	4-4
圖 4-3 鑽探調查及土壤現地土鑽試驗之點位分布圖	4-6
圖 4-4 34 處大規模崩塌重點區分佈圖	4-7
圖 4-5 花蓮縣-玉里鎮-D018(安通)鑽探位置分布圖	4-8
圖 4-6 花蓮縣-卓溪鄉-D007(太平) 鑽探位置分布圖	4-8
圖 4-7 南投縣-仁愛鄉-D066(廬山) 鑽探位置分布圖	4-9
圖 5-1 中央地質調查所工程地質探勘資料庫系統.....	5-1
圖 5-2 工程地質探勘資料庫系統鑽探孔位分布圖	5-2
圖 5-3 470 孔鑽探分布圖(每一點代表一專案工程)	5-3

圖 5-4 鑽探成果之表土及崩積層厚度數量統計(全部鑽探案例)	5-4
圖 5-5 鑽探成果之表土及崩積層厚度數量統計(擾動案例).....	5-5
圖 5-6 鑽探成果之表土及崩積層厚度數量統計(未擾動案例)...	5-6
圖 5-7 869 處土壤深度野外調查分布圖	5-9
圖 5-8 土壤厚度野外調查之數量統計	5-10
圖 5-9 山坡地土地利用限度調查資料庫之土壤深度及土鑽位置分布圖.....	5-12
圖 6-1 UAV 測量長度校正之大型標尺布幕及標尺	6-2
圖 6-2 屏科大水保系館之 UAV 影像長度率定之大型標尺布幕及地面距離控制標尺及距離標示(UAV 視角).....	6-3
圖 6-3 UAV 距離標尺 10 公尺之標尺(UAV 視角).....	6-3
圖 6-4 UAV 距離標尺 20 公尺之標尺(UAV 視角).....	6-4
圖 6-5 UAV 距離標尺 30 公尺之標尺(UAV 視角).....	6-4
圖 6-6 0.0-1.0m 及 2.0-3.0m 一公尺長度標尺之像素數分析結果	6-6
圖 6-7 0.0-5.0m 之五公尺長度標尺之像素數分析結果	6-6
圖 6-8 0.0-5.0m 之五公尺長度標尺之像素數分析結果	6-7
圖 6-9 寶來大規模崩塌地 UAV 影像長度律定之大型標尺布幕，標尺正上方，距離標尺 0m (UAV 視角垂直拍攝).....	6-8
圖 6-10 UAV 距離標尺 16m 之標尺(UAV 視角).....	6-9
圖 6-11 UAV 距離標尺 50m 之標尺(UAV 視角).....	6-9
圖 6-12 0-1m 經校正後距離與像素的分析結果	6-10
圖 6-13 寶來(1-2m)與屏科大(2-3m)經校正後距離與像素的分析結果.....	6-11
圖 6-14 案例一之位置圖(218933, 2556899)	6-12
圖 6-15 案例一之實測位置及範圍	6-13
圖 6-16 案例二之位置圖(222838, 2557435)	6-14
圖 6-17 案例二之實測位置及範圍	6-15
圖 6-18 案例三之位置圖(222866, 2557278)	6-16
圖 6-19 案例三之實測位置及範圍	6-17

圖 7-1 405 處鑽探成果分布圖	7-2
圖 7-2 858 處土鑽成果分布圖	7-2
圖 7-3 土鑽及鑽探現調資料統計圖	7-3
圖 7-4 鑽探全部案例表土及崩積層厚度與坡度分布圖	7-5
圖 7-5 土壤厚度與坡度(5m*5m)分布關係	7-6
圖 7-6 土壤厚度與坡度(10m*10m)分布關係	7-6
圖 7-7 未擾動及土鑽案例之表土及崩積層厚度與坡度分布圖 ..	7-7
圖 7-8 已擾動案例之土及崩積層厚度與坡度分布圖	7-8
圖 7-9 未擾動案例各坡度之最大土壤厚度與坡度之關係	7-9
圖 7-10 未擾動案例各坡度之平均土壤厚度與坡度之關係	7-9
圖 7-11 西部麓山帶(新第三紀沉積盆地)表層厚度與坡度分布圖 ..	7-10
圖 7-12 中央山脈西翼 (第三紀亞變質岩)表層厚度與坡度分布圖	7-11
圖 7-13 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩)表層厚度與坡度分布圖	7-11
圖 7-14 西部麓山帶與中央山脈西翼線性回歸圖	7-12
圖 7-15 西部麓山帶(新第三紀沉積盆地)崩積層厚度與坡度分布圖	7-13
圖 7-16 中央山脈西翼 (第三紀亞變質岩)崩積層厚度與坡度分布圖	7-13
圖 7-17 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩)崩積層厚度與坡度分布圖	7-14
圖 7-18 坡頂之表層厚度與坡度分布圖	7-16
圖 7-19 坡腹之表層厚度與坡度分布圖	7-16
圖 7-20 坡腳之表層厚度與坡度分布圖	7-16
圖 7-21 頭部之崩積層厚度與坡度分布圖	7-17
圖 7-22 坡體之崩積層厚度與坡度分布圖	7-18
圖 7-23 坡腳之崩積層厚度與坡度分布圖	7-18

圖 7-24 水平曲率因子與表土及崩積層厚度之分布狀況.....	7-20
圖 7-25 水平曲率因子與表土及崩積層厚度之統計	7-20
圖 7-26 垂直曲率因子與表土及崩積層厚度之分布狀況.....	7-21
圖 7-27 垂直曲率因子與表土及崩積層厚度之統計	7-21
圖 8-1 莫拉克颱風事件高屏溪小規模崩塌數量分布圖(<5 公頃)..	8-3
圖 8-2 小規模崩塌與地形坡度之關係(DEM 4m 網格)	8-4
附圖 4-1 花蓮縣-玉里鎮-D018(安通)鑽探位置分布圖	附錄-15
附圖 4-2 花蓮縣-卓溪鄉-D007(太平)鑽探位置分布圖	附錄-15
附圖 4-3 花蓮縣-卓溪鄉-D010(卓溪)鑽探位置分布圖	附錄-16
附圖 4-4 南投縣-仁愛鄉-D066(廬山)鑽探位置分布圖	附錄-16
附圖 4-5 南投縣-國姓鄉-T002(九份二山)鑽探位置分布圖	附錄-17
附圖 4-6 屏東縣-霧臺鄉-D038(光明巷)鑽探位置分布圖....	附錄-17
附圖 4-7 桃園市-復興區-D021(義興)鑽探位置分布圖	附錄-18
附圖 4-8 高雄市-茂林區-D048(萬山)鑽探位置分布圖	附錄-18
附圖 4-9 新北市-石碇區-T001(大崙山)鑽探位置分布圖	附錄-19
附圖 4-11 新竹縣-尖石鄉-D052(梅花)鑽探位置分布圖	附錄-20
附圖 4-13 新竹縣-尖石鄉-D097(鎮西堡)鑽探位置分布圖..	附錄-21
附圖 4-14 臺東縣-大武鄉-D021(大鳥)鑽探位置分布圖	附錄-21
附圖 4-15 臺東縣-大武鄉-D022(大鳥)鑽探位置分布圖	附錄-22
附圖 4-17 臺東縣-延平鄉-T001(紅葉)鑽探位置分布圖	附錄-23
附圖 4-18 臺東縣-延平鄉-T001(紅葉)鑽探位置分布圖	附錄-23

第一章 前言

近年全球氣候變遷，強降雨長延時之降雨事件逐漸增加，此種降雨型態造成更易於致生淺層崩塌及坡面型土石流災害。劇烈降雨時，山坡之崩塌易轉化成坡面型土石流(Hillslope Debris Flows, HDF) (游繁結，2001；陳榮河，2004；周憲德，2005；陳天健等 2009，2015，2019)。而淺層崩塌及坡面型土石流之預測能力，則顯著影響災害預警之效力。

災害預警指標主要包括發生的時機、空間、及量體。於發生空間方面，近年研究團隊已建立臺灣本島山區主要 4 地質區之坡面型土石流判釋模式(Hsu et al. 2016，陳天健等 2015，2019，2020)，可事前標定其可能發生的位置及潛勢，亦初步建立坡面型土石流發生面積門檻模式。

但無論淺層崩塌及坡面型土石流量體預測、災害預警模式或土砂治理規劃，邊坡坡面表土及崩積層厚度是非常重要之參數。惟目前山區表土及崩積層厚度，確尚無可實用之工具可茲估算應用。因此，本研究目標乃意欲建立臺灣本土之山區表土及崩積層厚度評估模式，以提供防災分析及管理應用。

基於此，本年度計畫研究目標，預期建立臺灣本土之山區邊坡表土及崩積層厚度評估模式，以精進集水區上游坡面型土石流啟動之崩塌地形及量體評估模式，提供災害預警模式建立或防災規劃之參酌。

第二章 計畫項目及時程進度

第一節 本年度計畫工作項目

本研究蒐集國內山區多年來工程地質鑽探資料及現地土壤土鑽試驗資料，經篩選及審查後，獲取表層土壤及崩積層厚度資料，再搭配其空間資訊及與其所在地形特性，建立分析資料庫。而後，本項分析將考慮各種地形特性因子，如坡度、地形曲率、區位、地質等因子，嘗試建立描述性最佳之表土及崩積層厚度與地形關係。最後，再研擬可茲應用之臺灣本土山區表土及崩積層厚度評估模式。

本年研究工作主要工作內容如下：

一、國內外表土及崩積層厚度與地形相關文獻蒐集及彙整

本計畫亦持續收集與綜整相關之研究文獻，以策進研究成果。如國內外學者之土壤厚度與地形空間關係，常用模型包括：(a)與高程線性相關性；(b)與坡度線性相關性；(c)與坡度指數相關性；(d)與曲率、邊坡剖面區位和坡度的組合；(e)或綜合上述地形因子，同時加入地質和地貌等因子的模型。

二、研究區暨34處大崩區高解析度數位地型、區域地質圖資、地形圖等基礎圖資建置

建置計畫研究資料庫，包括野外調查資料，室內配合航空照片與衛星影像(配合 Google Earth 套疊圖層使用)等進行檢核。為本研究使用之相關圖資包括：內政部第三版 1/25000 地形圖、五萬分之一地質圖幅、購置研究區衛星影像及航空照片、數值高程模型 (LiDAR DEM) 等。應用地理資訊系統產製相關地文因子

以供後續研究使用。

三、 工程探勘資料收集及資料庫建置(水保局、地調所、其他機關及民間單位)

本研究彙整水保局、地調所、其他機關及民間單位等探勘資料。水保局主要彙整 34 處大規模崩塌地之優良鑽探資料；中央地質調查所部分，除收集該單位之工程地質探勘資料庫外，同時收集土壤深度現地土鑽試驗調查報告。本計畫進一步加值前資料，建立分析資料庫。依據分析鑽探位置之地形特性，區分為未擾動及已擾動案例，分別代表鑽探位置其是否位於前期崩塌地，如邊坡已具有崩崖、滑動體等特徵，將之歸類於已擾動案例。同時適時實施野外調查查核鑽探資料。

四、 應用 UAV 調查崩塌區及坑溝表土及崩積層厚度之技術研發

崩塌區及坑溝上游或源頭區域，通常很難到達，即使到達後亦不易測量完整表土及崩積層厚度。當經費充足時，我們可應用 UAS 建立 LiDAR DSM 再配合空拍建立 3D 地型；或利用 UAS 航拍影像利用軟體產製 DSM。然前述作業經費所費不貲。因此本計畫預計發展簡易適合研究計畫尺度之 UAS 量測崩塌源頭表土及崩積層厚度之方法。

五、 坡面表土及崩積層厚度與邊坡微地形相關性分析

本項分析將考慮各種地形特性因子，如坡度、地形曲率、區位、地質等因子，嘗試建立描述性最佳之表土及崩積層厚度與地形關係。依前期研究成果，鑽探案例將分為未擾動及擾動地形案

例。其區位方面，位擾動邊坡依其坡長將坡面分為三等分，分為上邊坡、中邊坡及坡腳；已擾動案例則分為冠部及崩崖、滑動體、及坡腳等三區位。地形坡度因子採以鑽探所在位置，取 10m 或 5m 網格範圍之平均坡度。其他因子如高程、岩性、曲率、構造等等亦將探討及分析，建立描述性最佳之表土及崩積層厚度與地形關係。

六、 建立坡面表土及崩積層厚度推估模式

彙整前項成果，建立臺灣本土之山區表土及崩積層厚度評估模式，以提供防災分析及管理應用。

第二節 工作進度

本計畫預定民國 111 年 12 月 31 日完成，工作期程如表 2-1 所示。

表2-1 計畫工作進度表

工作項目	月次	111 年											
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1. 國內外表土及崩積層厚度與地形相關文獻蒐集及彙整													
2. 研究區暨 34 處大崩區高解析度數位地型、地質圖資、地形圖等基礎圖資建置													
3. 工程探勘資料收集及資料庫建置(水保局、地調所、其他機關及民間單位)													
4. 應用 UAV 調查崩塌區及坑溝表土及崩積層厚度之技術研發													
5. 坡面表土及崩積層厚度與邊坡地形相關性分析													
6. 建立坡面表土及崩積層厚度推估模式													
預定進度累積百分比(%)		2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

第三章 國內外表土及崩積層厚度與地形相關文獻

本章綜整土層厚度相關研究基礎與應用文獻，另因本計畫最終目標為將成果用於淺層崩塌量體估算，因此亦蒐集淺層崩塌定義及深度相關文獻。首先，本章首先彙整土壤層、崩積層與地形相關定義及說明，而後在說明淺層崩塌相關文獻。

第一節 土壤厚度相關研究

一、土壤層

1. 土壤之生成

土壤是地球表面由岩石風化而成的疏鬆層，多數由黏土礦物組成並含有空氣、水分和腐植質，而且有微生物活躍在它的中間，此一鬆散物質叫做土壤。土壤的生成作用為增加土壤厚度最主要的方式，Ahnert(1970)及 Dietrich.et.al.(1995)皆認為母岩遭受風化的機會會隨著土壤的增厚而減小，因此土壤生成速率與土壤厚度成一指數遞減的關係，但 Dietrich et al.(1995)的研究則更多的顯示生物作用是導致母岩崩解的主因，當土壤厚度增加時，地表生物作用對母岩的破壞力降低，因此減低了母岩的崩解速率。而 Carson and Kirkby(1972)則認為土壤的生成乃受土壤中的水分循環所控制，生成速率會在某一特定厚度時達到最快，因此提出一個鐘形的函數關係如圖 3-1，圖中虛線為鐘形假設曲線，實線為土壤生成速率與土壤厚度的指數遞減關係。

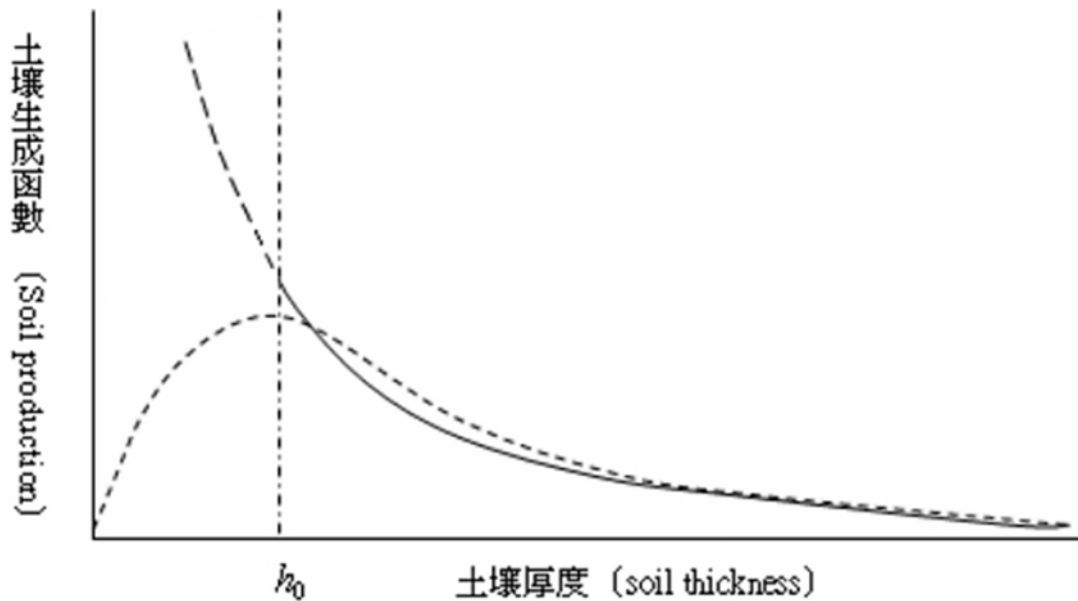


圖 3-1 土壤生成速率與土壤厚度關係(摘自 Carson and Kirkby1972)

2. 風化岩層

一般稱作風化層，此層是指位於未改變或新鮮基岩之上的所有風化物質，如圖 3-2。許多研究都集中在潮濕熱帶和亞熱帶氣候下岩層的風化剖面，雖然不同岩石類型和氣候下的剖面特徵存在差異，但圖中花崗岩的深層風化剖面表現出了許多共同特徵，故以此為例。由此圖清楚顯示，風化岩層(風化層)之定義，係指風化岩石且未經搬運之原狀土及岩層。若已經侵蝕、搬運、再經沉積作用之土層，則稱為崩積層或沖積層等。

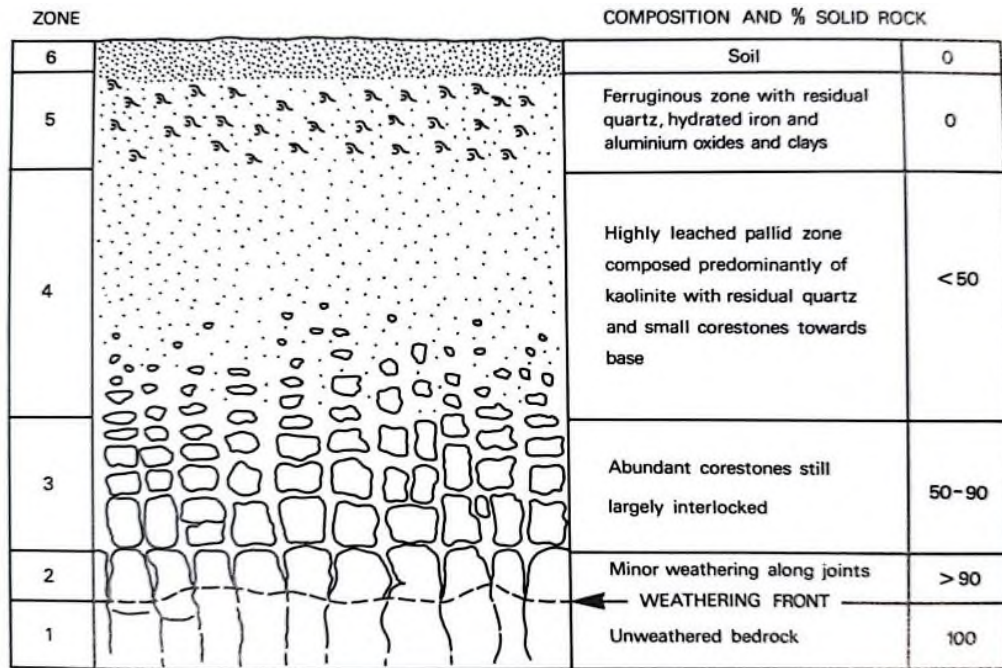


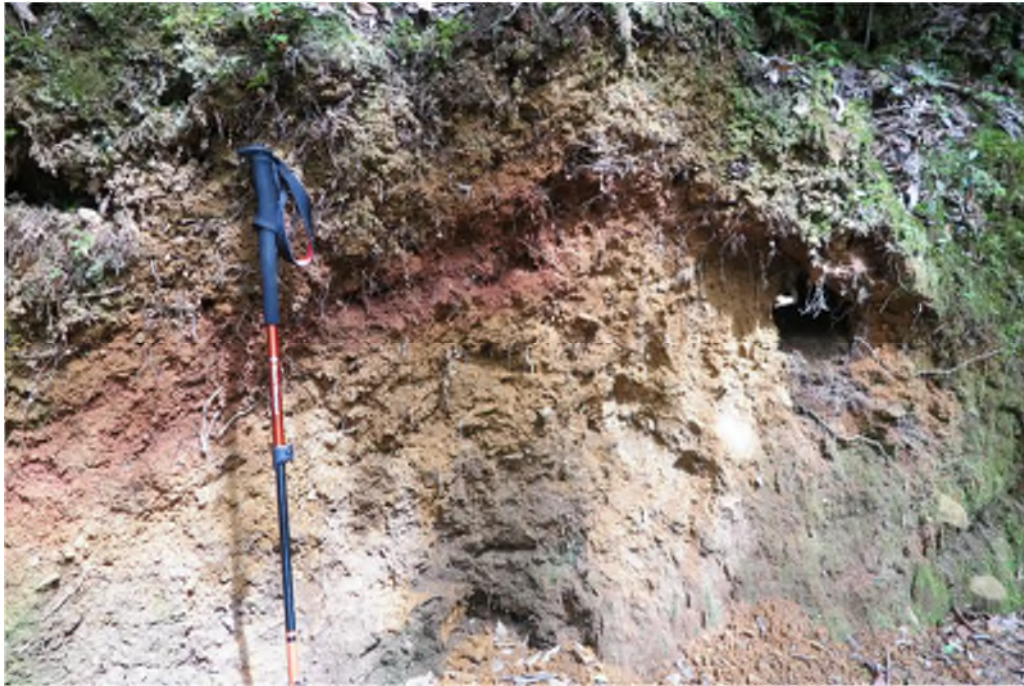
圖 3-2 花崗岩完全的風化剖面中出現的特徵(摘自 B.P.Ruxton and L.Berry,1957)

3. 土壤化育層

岩層以上之風化未經搬運之原狀土及風化岩石，各層次連接起來整體稱之『土體』。發育良好的土壤剖面，由若干性質不同的層次所組成，這種層次稱之『土壤化育層』(soil horizon)。如圖 3-3 土壤剖面圖所示。

土壤化育層指風化層中依有機物或物化性質細分之土層層次。通常指地表表層部分之某一個垂直面，主要包含 O、A、E、B、C 等層次；一般簡單分為 ABC 三層。O 層 (Organic surface soil/樹葉腐植有機層)；A 層表土 (Surface soil/腐植/表土層/淋溶帶)，內包括 E 層 (鐵鋁矽的氧化物或膠質)；B 層 (Subsoil/心土/澱積層)，包括 K 層 (碳酸鈣、碳酸鎂)；C 層 (Substratum

基層)。C 層以下稱為 R 層(rock)，一般不將 R 層列入土壤體部分。



(土壤化育層，地點:司馬庫斯林道)

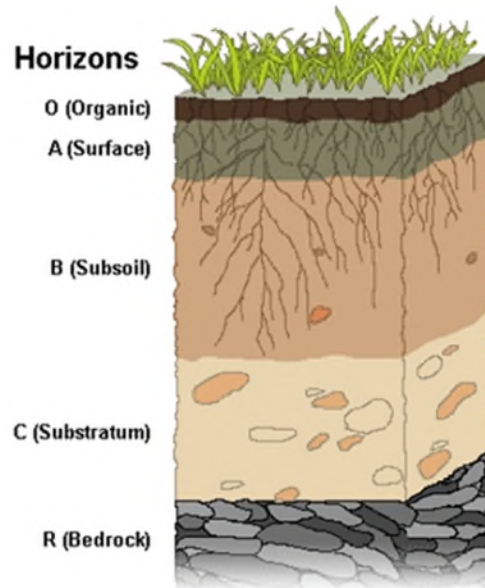


圖 3-3 土壤化育層及剖面圖(改繪自地調所(2007))

Catani et al.,(2010)指出，土壤厚度 h 在其研究中是指基岩深度(DTB)，或水文特性第一次顯著變化的深度，被廣泛認為是

眾多地表和地下過程，例如景觀演變 Heimsath et al.,(1997,2000,2001b)，土壤保護 Gabet and Dunne,(2003)，作物保護 Schumacher et al.,(1999)，沉積物預算 Reid and Dunne,(1996)，滑坡(Johnson and Sitar,1990；Wu and Sidle,1995；Van Asch et al.,1999)，以及土壤水分儲存和保持能力(Boer et al.,1996；Lexer and Honninger,1998)，儘管如此它仍是在流域尺度上測量山坡系統物理變量中最不了解和最難的變量之一。

林伯勳等人(2011)之研究建議，宜於坡腹調查土壤厚度，用以代表該區平均厚度。

4. 崩積層

崩積層為重力作用之下，已經侵蝕、搬運、再堆積而成之土層(圖 3-4)。岩屑崩滑、落石或地滑後於坡腳堆積之材料等均稱為崩積層(Colluvial deposit)。崩積層的特徵為土壤不具層理，顆粒的淘選不佳，粗細混雜，若為岩屑堆積，顆粒常為陵角發達。土層組織相對鬆散、強度低，變形性高，逕流入滲率高，雨季常具地下水。



圖 3-4 司馬庫斯林道之崩積層

依照不同的堆積材料和邊坡運動特性，可將崩積層分為 3 類(董家鈞及楊賢德 2001)：(1)岩塊堆積崩積層；(2)土石混合堆積崩積層；以及(3)岩層滑動崩積層，其三種分類方式示意圖如圖 3-5，此三種分類說明如下：

- (1) 岩塊堆積崩積層：因岩石墜落或傾覆型山崩機制所形成之崩積層，規模多較小，泥質含量低，岩塊多呈顆粒支持構造，亦即岩塊間相互接觸而填充少量的土壤。此類崩積層多分佈於節理發達之陡坡。
- (2) 土石混合堆積崩積層：由土石崩移或滑動所形成。此類崩積層屬於基質支持。地層滲透性較顆粒支持之岩塊堆積崩積層為差，故地下水位受降雨之影響較大，亦即地表逕流與其入滲對邊坡穩定之影響大。

- (3) 岩層滑動崩積層：屬岩層滑動之崩積層堆積，常與順向坡滑動有極高之相關性。此類崩積層不易由鑽探柱狀圖得知，因崩積地層層次多與斜坡坡面相同，故若有透水岩層上覆不透水岩層，則極易形成受壓水層，因而降低崩積層之穩定性，然此類之崩積層移動方式應以潛變為主。

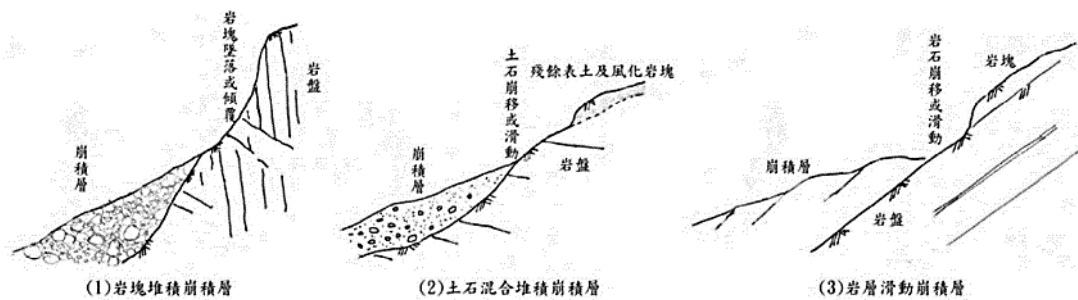


圖 3-5 崩積層分類示意圖(摘自董家鈞、楊賢德，2001)

二、 土壤厚度和地形的關係

目前國內外研究大多發現土壤厚度之分布，主要認為與坡度及地形曲率有關(Heimsath et al., 1999；姜壽浩和徐美玲，2006；林伯勳等人，2011)，其次為地質岩性。

Saulnier et al.,(1997)指出，土壤厚度通常透過非常簡單的模型來估計，常用的方法是基於土壤厚度與海拔或坡度梯度之間的線性相關性，但由於缺乏對曲率、岩性和土壤序列或鏈中的相對位置等基本參數的考慮，此類模型的性能通常很差 Catani et al.,(2010)。

在有限的區域內，Moore et al.(1993)和 Odeha et al.(1994)發現 A 層的厚度與傾角和濕度指數等地形屬性有很好的相關性(摘自

Beven and Kirkby 1979)。

Gilbert (1877)；Jenny(1941)；Hack(1960)；Carson and Kirkby(1972)假設土壤性質與地形有關，並建議使用質量守恆方程進行土壤轉移。而 Park et al.(2001)使用類似的方法表明了土壤深度和地形特徵指數之間的明確關係，土壤運輸能力的形態測量。同時也顯示了 h 與一些地形屬性（如地表曲率、地形濕度指數和上坡集水面積）之間的顯著統計相關性。

Gilbert(1877)提出以土壤生成函數(Soil Production Function)模擬土壤厚度發育，以量化說明區域地景演化(Landscape Evolution)過程。

三、各項因子和土壤厚度之關係

1. 坡度

Khazai and Sitar (2000)於 San Francisco Bay 區域進行密集式土壤厚度鑽掘調查，並將坡度分成四個區間，坡度介於 30 度至 60 度之間，並假定區間內厚度為定值如表 3-1 所示，而國家災害防救科技中心(2004)則依循 Khazai and Sitar (2000)之研究成果，提出類似的分類區間如表 3-2 所示。

表3-1 坡度與土壤厚度關係(摘自 Khazai and Sitar, 2000)

坡度 (degree)	土壤平均厚度(m)
<30	2.0
30 至 40	1.5
40 至 60	1.0
>60	0.5

表3-2 坡度與土壤厚度關係(摘自 國家災害防救科技中心，2004)

坡度 (degree)	土壤平均厚度(m)
<30	5.0
30 至 40	4.0
40 至 60	3.0
>60	2.0

2. 曲率

土壤厚度不僅與坡度有直接關係，且深受地形曲率 (Terrain Curvature)影響(林伯勳等人，2011)，如圖 3-6 所示。

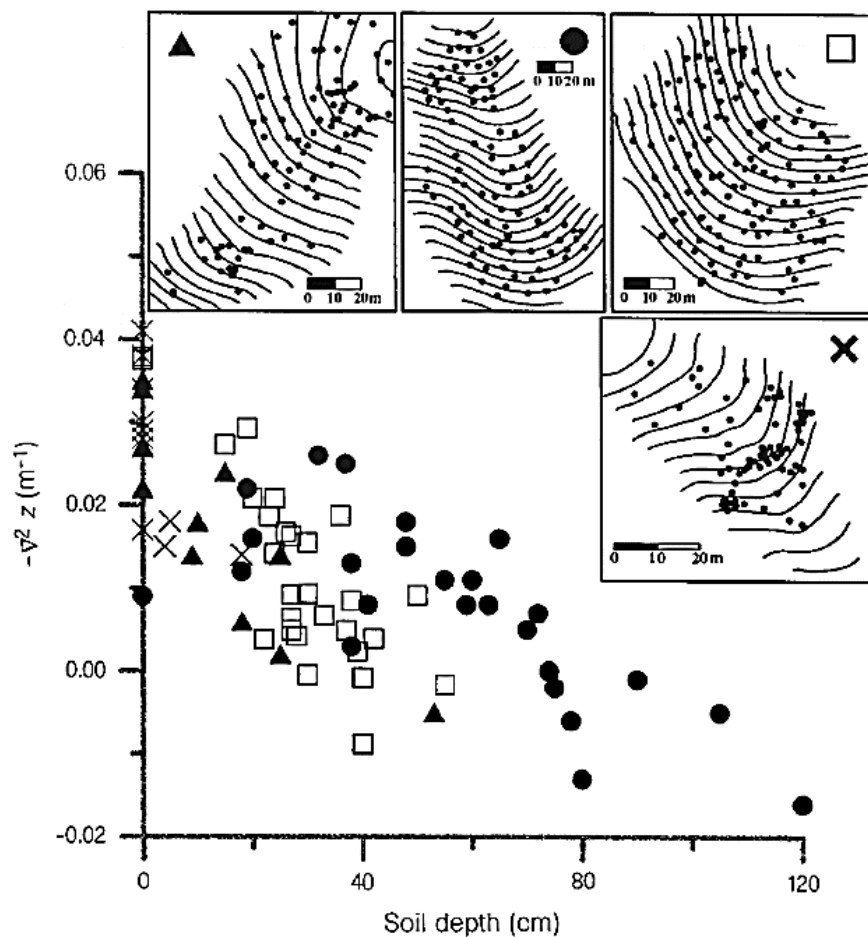


圖 3-6 土壤厚度與邊坡曲率之關係圖(摘自林伯勳等人，2011)

四、地調所土壤厚度調查

地調所 2006 至 2010 間進行淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫(地調所，2007，2008，2009，2010)。為建立山區建構廣域淺層水文地質模型，進行包括土壤厚度、土壤水文資料進行現地調查。表層風化土層厚度之調查為相當重要的工作項目之一，除可比較各類岩層之風化程度外，土壤厚度隨坡度之變化情形亦為本計畫之研究重點。為達上述目標，土壤厚度調查之數量需達一定代表性。

土壤厚度調查計畫之目的係瞭解各集水區於不同坡度或地形、地質條件下之土壤可能深度，本計畫土壤厚度之調查範圍依據美國 USDA 土壤調查手冊係為 O, A, B 層，如圖 3-7 所示，故亦可視為風化土層之厚度調查，調查與後續分析之成果可提供(1) 建立山區土壤厚度與坡度之關係，(2) 提供大範圍降雨導致淺層崩塌分析時風化土層之崩塌厚度資料。土壤厚度調查之調查方法說明如下。

● 調查方式

山地農牧局於 1979 年起之數年間，針對台灣地區 1000 公尺以下山坡地土壤進行「山坡地土壤調查計畫」，該計畫主要係建立山坡地土壤之基本資料，另亦調查土壤厚度，惟該計畫採用 hand auger 方式進行深度調查，惟實際初始調查發現 hand auger 因採用人力，其所能探查之範圍土壤厚度最深僅於 1.2 公尺以內。調查資料將土層厚度(亦稱土壤有效深度)分為 ABCD 四等級，土壤深度 A 級: >90cm；B 級: 90-50cm；C 級: 50-20cm，D 級: 0-20cm。

而地調所之調查計畫則採用小型機械傳動式設備進行深度調查(如圖 3-8 所示)，本調查設備可適用之範圍最深可達土壤厚度為 5 公尺處。土壤厚度調查位置於各集水區選擇適當地點進行，並將地形及地質條件之差異納入考慮，調查深度約為 1 至 5 公尺。

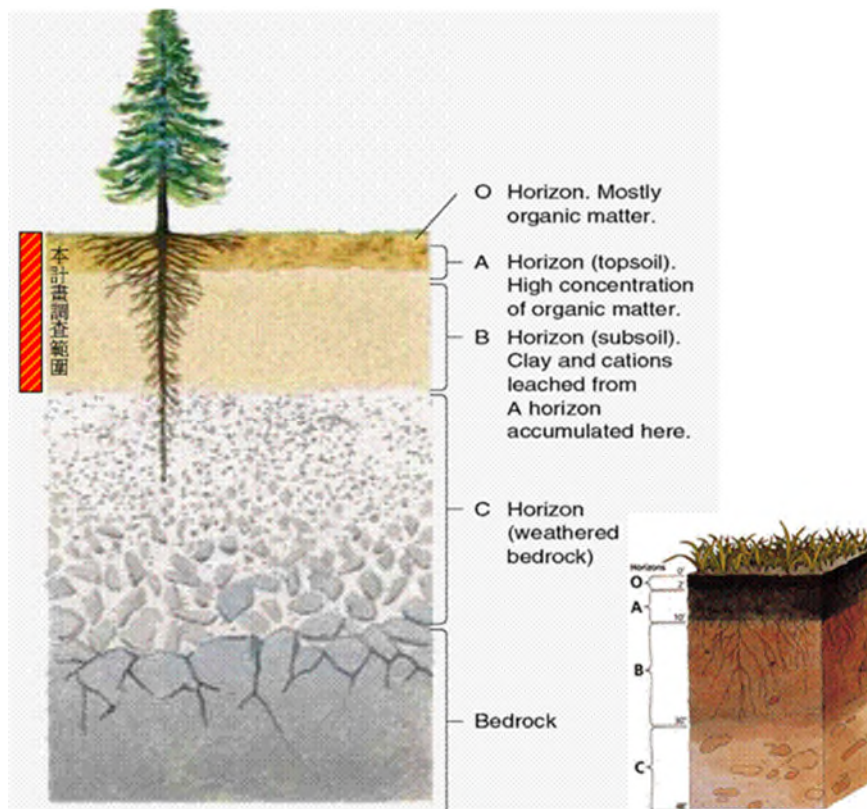
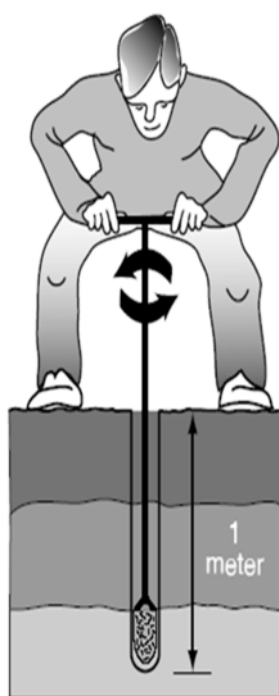


圖 3-7 土壤厚度調查範圍 (調查範圍如上圖中所標示之 O, A, B 層，改繪自美國 USDA 土壤調查手冊/地調所(2007))



(a) 傳統 Hand Auger 調查方式



(b) 現地土壤厚度之調查方式

圖 3-8 土壤厚度調查現場作業狀況 (地調所 2007)

第二節 地調所計畫之坡面表土及崩積層厚度推估模式

本研究於此先彙整該計畫於三大流域(大漢溪、大甲溪、濁水溪)之土壤厚度調查整體分析成果，提供後續研究之參考。

本節內容為取自地調所計畫之易淹水調查計畫成果。圖 3-9 為三大流域(大漢溪、大甲溪、濁水溪)之土壤厚度調查整體分析成果，圖中顯示有超過 96% 之土壤厚度均集中於 0 至 2 公尺之間。其中有 3 調查點落在三角形趨勢範圍之外，該 3 處調查點位置均於梨山地區，該區域因有人工開墾，土壤厚度較厚。若僅考慮相近坡度下所得之最大土壤厚度與坡度進行統計迴歸如圖 3-10 所示，可得相關係數甚高之結果，所得之指數迴歸方程式為如下：

$$\ln Depth = -0.0266 \times slope_angle + 1.31 \quad , R^2 = 0.81 \quad (\text{式 3-1})$$

圖中數據點為相近坡度下所得之最大土壤厚度，且未考慮圖 3-9 中梨山地區 3 處成果。此推估式提供後續集水區山崩與水文地質關聯性分析之參考資料。針對淺層滑動之崩塌厚度，Khazai and Sitar (2000) 亦提出以經驗法進行推估，其經驗法顯示崩塌厚度與坡度有關，如表 3-3 所示。若將本計畫上述之迴歸公式與 Khazai and Sitar 等之經驗法及 Salciarini (2006)等人之結果進行比較，結果相仿。

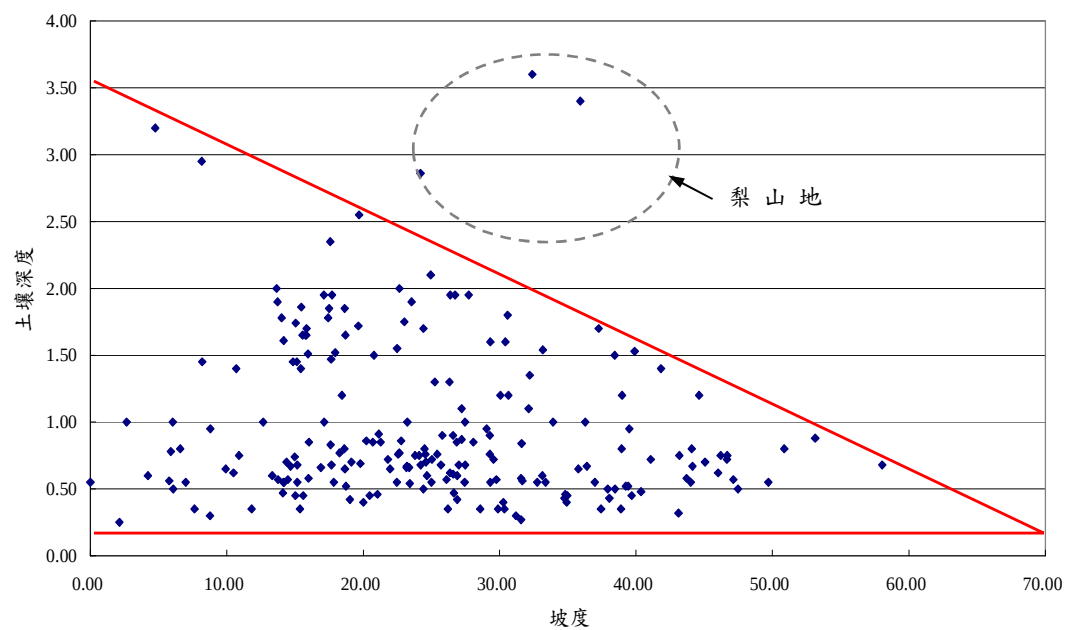


圖 3-9 地調所計畫之土壤厚度調查成果圖(摘自易淹水計畫報告)

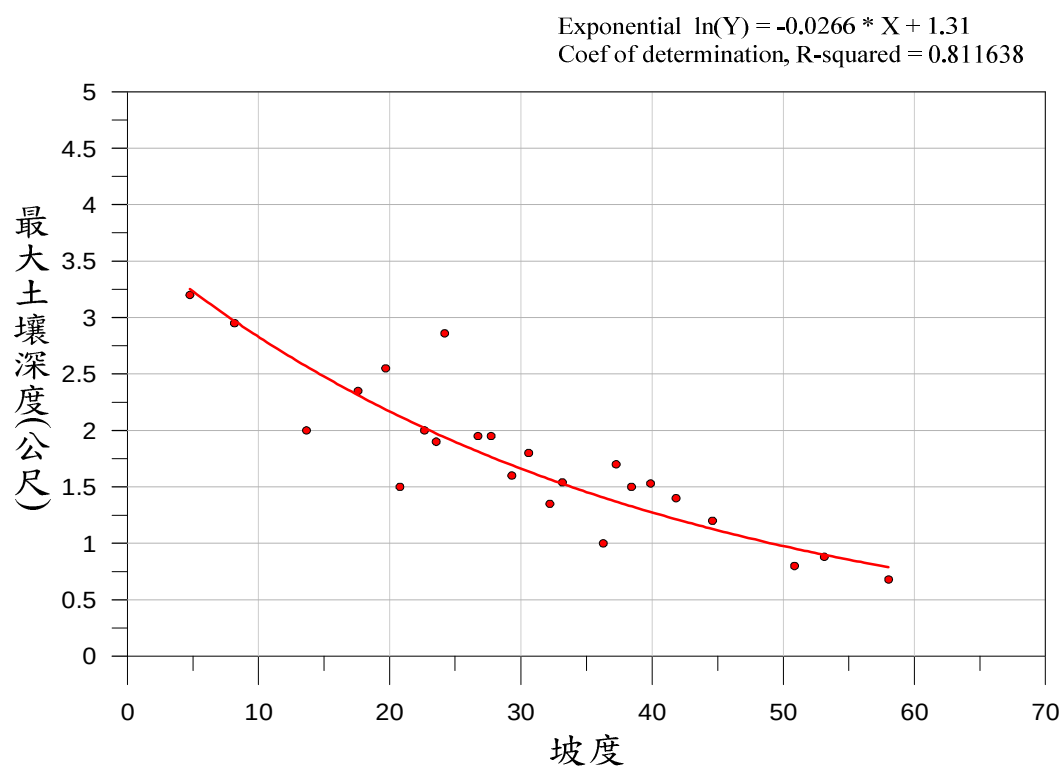


圖 3-10 最大土壤厚度與坡度關係圖(摘自易淹水計畫報告)

表3-3 地調所坡度與土壤厚度推估公式比較(摘自易淹水計畫報告)

坡面坡度 (度)	Khazai and Sitar (2000) 淺層滑動平均崩塌深度 (m)	Delmonaco et al. (2003) Salciarini et al. (2006)	計畫迴歸公式推估之 土壤厚度 d (m)
< 30	2.0	2.33 (30 度)	$d > 1.67$ (<30 度)
30 至 40	1.5	1.80 (35 度)	$d = 1.46$ (35 度)
40 至 60	1.0	0.83 (50 度)	$d = 0.98$ (50 度)
> 60	0.5	0.50 (60 度)	$d < 0.75$ (>60 度)

第三節 崩塌相關研究

一、邊坡破壞模式

邊坡破壞之稱呼於各領域有所不同，土木工程稱之坍方或坍塌，水土保持稱為崩塌，而地質領域則稱為山崩。各學者依據崩塌範圍、規模大小、地質、地形、機制等條件之不同，而有不同之分類。美國公路研究委員會(Highway Research Board, HRB)則依據坡地災害動移機制的不同，將其區分為崩落(Fall)、傾覆(Topple)、滑動(Slide)、流動(Flow)及側滑(Spread)五類。本研究主要研究土壤搬運後之最終狀態，因此將不採前述分類方法。

本研究之崩塌指邊坡斜面上土體崩落之現象，土、石、岩塊等土體間非呈連續體之運動，此等不連續之空間亦未充斥水或泥漿等流體，故其運動至緩坡處停積之範圍較小。依其滑動面深度，簡單分為淺層崩塌及深層崩塌。

1. 淺層崩塌

Renwick et al.(1982)指出當滑動面出現於風化岩盤或土壤覆蓋之地區，深度較小，通常伴隨土石流，岩穴前滑等災害時，稱為淺層崩塌。

Santacana et al.(2003)認為淺層崩塌為小規模的弧型滑動、平面滑動及土泥流動等行為，而 Liu et al.(2009)則認為當邊坡材料為土壤時，「墜落」、「傾倒」、及「移動」之分類可歸類為淺層崩塌之行為。

Casadei et al.(2003)發表淺層崩塌預測模式，此模式預測崩塌寬度會隨著植物根系強度及坡度的降低而增加，且當土壤越

乾燥，崩塌寬度越大。且模式結果與野外資料指出崩塌規模被土壤厚度，植物根系及地形區動之土壤飽和度所控制。

2. 深層崩塌

日本土木研究所於 2008 年提出日本深層崩塌潛勢溪流檢出方法說明書（日本土木研究所，2008），其中深層崩塌各部位之地形特徵含山頂緩坡面（圖 3-11 之 b）、雙重（多重）山陵（圖之 c 與 d）、張裂縫（圖之 e）、反斜崖地形（圖之 f）、弧狀張裂縫（圖之 g）、岩盤潛移坡面或地滑地形（圖 h）以及遷急線（圖 i）等(魏倫璋等人，2012)。

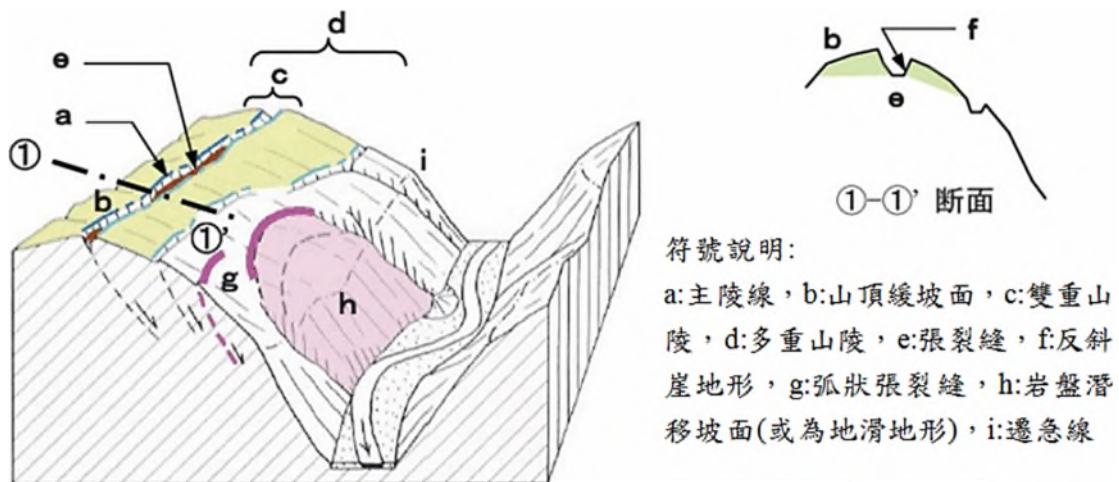


圖 3-11 深層崩塌各地形特徵示意圖（摘自魏倫璋等人，2012）

二、崩塌厚度定義

關於崩塌厚度，包含發生崩塌之邊坡表面距地層主要滑動面之深度不超過 5 公尺(Fell et al.,2000)、或是崩塌深度小於 0.1 倍(Santacana et al., 2003)或 1 倍(Giannecchini, 2006)崩塌長度之崩塌，稱為淺層崩塌。經濟部中央地質調查所則定義：崩塌之滑移面位於地表下 5 公尺至 10 公尺以上，且具備顯著之高陡崩崖及坡趾處較顯著的堆積區為

其最重要的地形特徵，稱為深層崩塌。崩塌量則與土壤厚度有密切關係，亦為風化層之厚度（中央地調所，2008）。

日本國土交通省砂防部將崩塌災害規模依據大小分為「深層崩壞」及「表層崩壞」，並將「表層崩壞」定義滑動深度為 0.5 至 2 公尺之間，反之則屬於「深層崩壞」（詹勳全等人，2015）。

黃宏斌(2010)；Jonathan Peter McKenna(2011)；Dietrich(2008)指出淺層崩塌主要界定為發生於岩盤上部風化層及表層崩積層的土壤，因此定義上，在深度在 5 公尺以下及岩盤上之土壤擾動，定為淺層崩塌。

淺層崩塌深度與坡度關係方面，詹勳全等(2015)整理 Khazai and Sitar，(2000)、歐陽元淳(2003)、國家災害科技研究中心(2004)成果如表 3-4 所示。

表3-4邊坡坡度與崩塌深度關係文獻綜整表(詹勳全等，2015)

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

三、崩塌面積與體積關係

崩塌土方與崩塌面積之量體關係式最早由 Simonett(1967)提出；而後至今許多研究利用不同地區之崩塌事件資料，以類似形式建立土方與面積關係式。惟對於崩塌事件之運動型態(movement type)、崩塌面積定義及崩塌土方推估方式則互有差異。相關研究整理如下表 3-5。

詹勳全等(2015)以現場調查搭配資料蒐集之方式，獲取 921 地

震後 台灣山區 181 處淺層崩塌地之地形條件、物理尺寸、自然環境特性及誘發崩塌原因等資訊，並進一步推估崩塌面積與崩塌體積之關係。結果顯示台灣山區淺層崩塌多發生於東南至西向坡、坡度小於 50 度、高程小於 1200 公尺、且地質為三峽群及其相當地層及廬山層者；主要觸發崩塌之原因為降雨；淺層崩塌地之長、寬多以 100 公尺以下為主，崩塌深度多小於 2 公尺、崩塌量體多為 10^3 至 10^5 立方公尺，

此外，該研究分析崩塌地之面積與其崩塌量體，建立崩塌面積與崩塌量體間呈一對數線性關係，關係式如下所示：

$$\ln V = 0.687 \ln A + 2.326 \quad (\text{式 3-2})$$

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

表3-5 國內外相關崩塌面積與土方冪次經驗式列表

文獻來源	崩塌土方經驗式	崩塌面積(m ²)
Simonett (1967)	$V_e = 0.1479A_L^{1.368}$	$2.3 \times 10^0 \sim 1.9 \times 10^5$
Rice et al. (1969)	$V_e = 0.234A_L^{1.11}$	$2.1 \times 10^0 \sim 2.0 \times 10^2$
Guthrie and Evans (2004)	$V_e = 0.1549A_L^{1.0905}$	$7.0 \times 10^2 \sim 1.2 \times 10^5$
Korup (2005)	$V_e = 0.00004A_L^{1.95}$	$> 1.0 \times 10^6$
Imaizumi and Sidle (2007)	$V_e = 0.39A_L^{1.31}$	$1.0 \times 10^1 \sim 3.0 \times 10^3$
Imaizumi et al. (2008)	$V_e = 0.19A_L^{1.19}$	$5.0 \times 10^1 \sim 4.0 \times 10^3$
Guzzetti et al. (2008)	$V_e = 0.0844A_L^{1.4324}$	$1.0 \times 10^1 \sim 1.0 \times 10^9$
Guzzetti et al. (2009)	$V_e = 0.074A_L^{1.45}$	$2.0 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^9$
Larsen et al. (2010)	$V_e = 0.224A_L^{1.262}$ for soil-based landslides $V_e = 0.234A_L^{1.41}$ for bedrock landslides	$1.0 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^8$
陳樹群等(2010)	$V_e = 0.04A_L^{1.38}$	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^5$
陳樹群等(2010)	$V_e = 1.92A_L^{1.10}$	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^5$
劉哲欣等(2011)	$V_e = -0.0004A_L^2 + 0.4547A_L$	$3.0 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^6$
Tseng et al. (2013)	$V_e = 0.452A_L^{1.242}$ for total disturbed area	$1.1 \times 10^2 \sim 2.0 \times 10^5$
Tseng et al. (2013)	$V_e = 2.510A_L^{1.206}$ for crown area	$0.9 \times 10^2 \sim 0.5 \times 10^5$

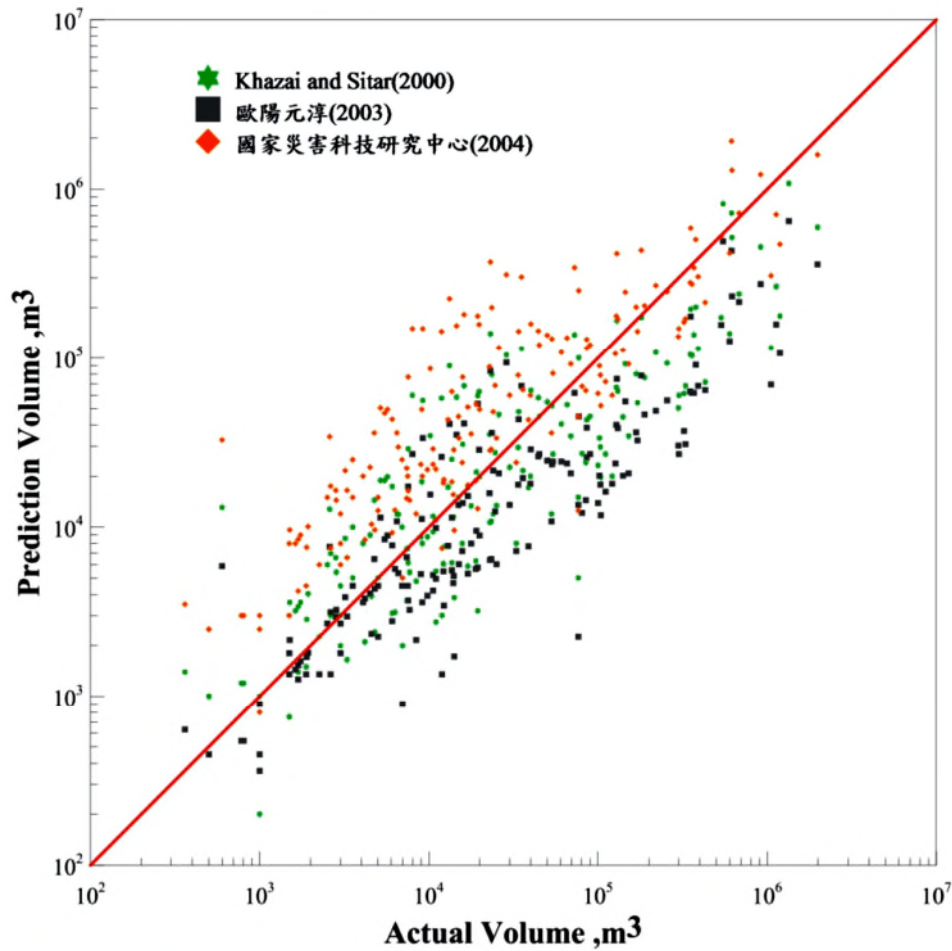
表 3-6 統整不同學者提出之以崩塌地面積推估體積之估算式(摘自 詹勳全等(2015))，包括 Hovius et al. (1997)、陳樹群等 (2010) 及 Guzzetti et al. (2008)等，研究區域包括紐西蘭、義大利及石門水庫與大甲溪集水區等地區。

表3-6不同學者提出之以崩塌地面積推估體積之估算式(詹勳全等，
2015)

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

註：A 為崩塌地面積 (平方公尺)；V 為崩塌體積 (立方公尺)

詹勳全等(2015)研究比較前述三學者調查之崩塌體積結果比較如圖 3-12。研究指出 Khazai and Sitar (2000) 法所估算之崩塌量體，呈現部分高估部分低估情形，比較結果無明顯之規律；歐陽元淳(2003)提出之定值法所推估之崩塌量體，多呈低估本研究所調查崩塌體積之情形；以國家災害科技研究中心 (2004) 提出之方法進行崩塌量體估算時，多呈高估該研究所調查崩塌體積之情形(詹勳全等，2015)。



本研究之調查崩塌體積與以坡度對照崩塌深度法推估崩塌體積之結果比較

圖 3-12 詹勳全等與其他學者成果比較(詹勳全等，2015)

曾志民(2017)透過多期高精度數值地形比對獲得已知崩塌土方之資料，並進一步建立崩塌面積 A_L 與崩塌土方 V_e 之幂次量體關係式 $V_e = \alpha A_L^\gamma$ (其中 α 為截距(intercept)， γ 為指數係數(scaling exponent))，推估已發生崩塌之土方生產量為一具體可行之方式。

第四章 研究區概述及研究資料庫收集與建置

第一節 研究區域及地質概述

本年度研究區域主要收集山區既有的工程鑽探，資料收集範圍以台灣本島山區如圖 4-1 所示。臺灣本島主要的地層都呈長而狹的帶狀分布，大致和臺灣島的長軸平行，所有地層的時代從中央的脊樑山脈開始，向西部麓山地帶逐漸變新。

臺灣大致可以分為三個主要地質區：

1. 中央山脈地質區，本區又可以分為兩個地質亞區：中央山脈的西翼和脊樑山嶺，包括雪山和玉山兩個最高山嶺。中央山脈的東翼。
2. 西部麓山地質區。
3. 海岸山脈地質區。

中央山脈包括所有亞變質的第三紀地層和先第三紀的變雜岩系，它的東界是東臺灣的縱谷和它北面的太平洋；它的西界是一條構造線，在北段名叫屈尺斷層，在南段名叫荖濃溪或潮州斷層。

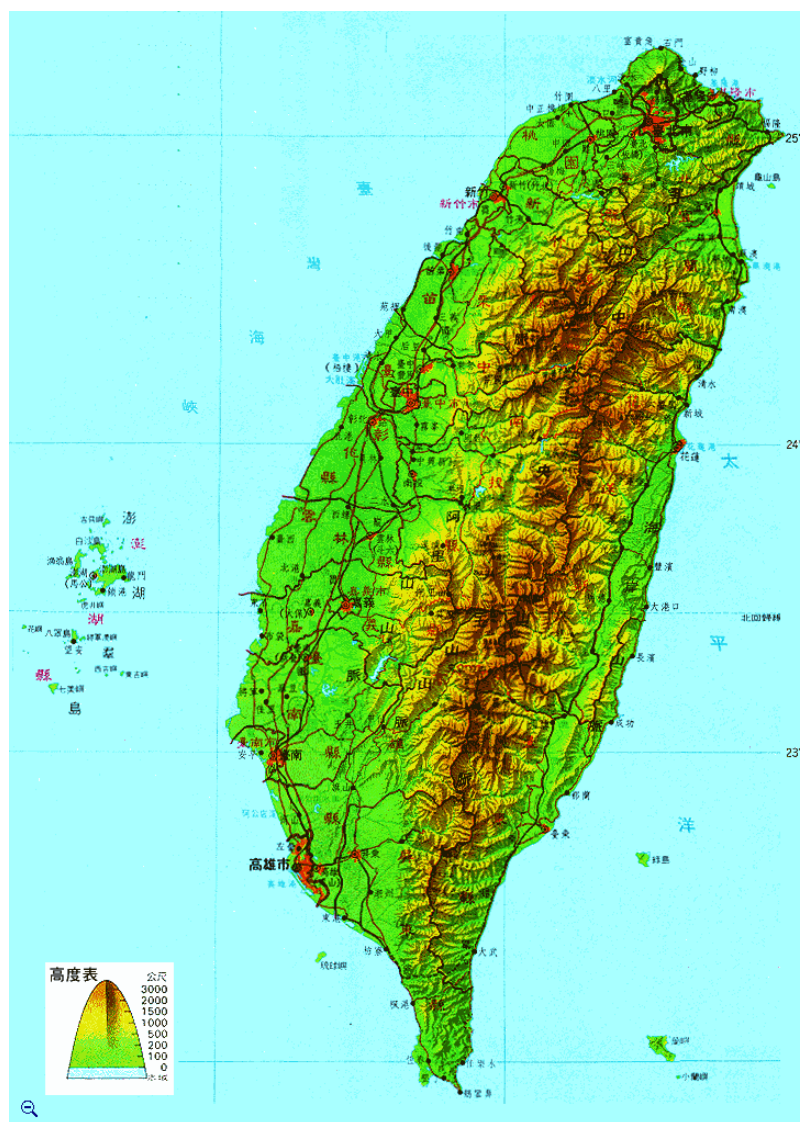


圖 4-1 臺灣地形圖

臺灣島大致可分為七大地質區(何春蓀，1997) 如圖 4-2 所示。

1. 洪流式玄武岩、
2. 濱海平原
3. 西部麓山帶
4. 中央山脈西翼：雪山山脈、脊樑山脈帶
5. 中央山脈東翼：太魯閣帶、玉里帶
6. 東部縱谷縫合帶
7. 海岸山脈

本計畫研究區，主要以山區的西部麓山帶、中央山脈西翼(雪山山脈、脊樑山脈帶)，及中央山脈東翼(太魯閣帶、玉里帶)等地質區。

西部麓山帶地質區 (III，新第三紀沉積盆地)，是由末變質的新第三紀碎屑岩層出露在中央山脈的西邊，形成西部麓山帶，並延伸到西部濱海平原和海岸臺地之下。除由新第三紀層組成，也有一小部漸新世的地層，主要的岩石是砂岩和頁岩的互層，局部夾有石灰岩和凝灰岩的凸鏡體或薄層，總厚度可以達到八千公尺以上。

中央山脈西翼地質區(IV)，主要分布在中央山脈的西翼、脊樑山嶺、和南部，在中央山脈東南翼也有一小帶本亞區的地層出露，主要由第三紀的亞變質岩層所組成。本亞區可再分為西部的雪山山脈帶 (IV a) 和東部的脊樑山脈帶 (IV b) 兩個不同岩性構造單位。

中央山脈東翼地質區(V) 位在中央山脈的東翼，由先第三紀的變質雜岩系組成。本亞區又可以再分為西部的太魯閣帶 (Va) 和東部的玉里帶 (Vb) 兩岩帶。

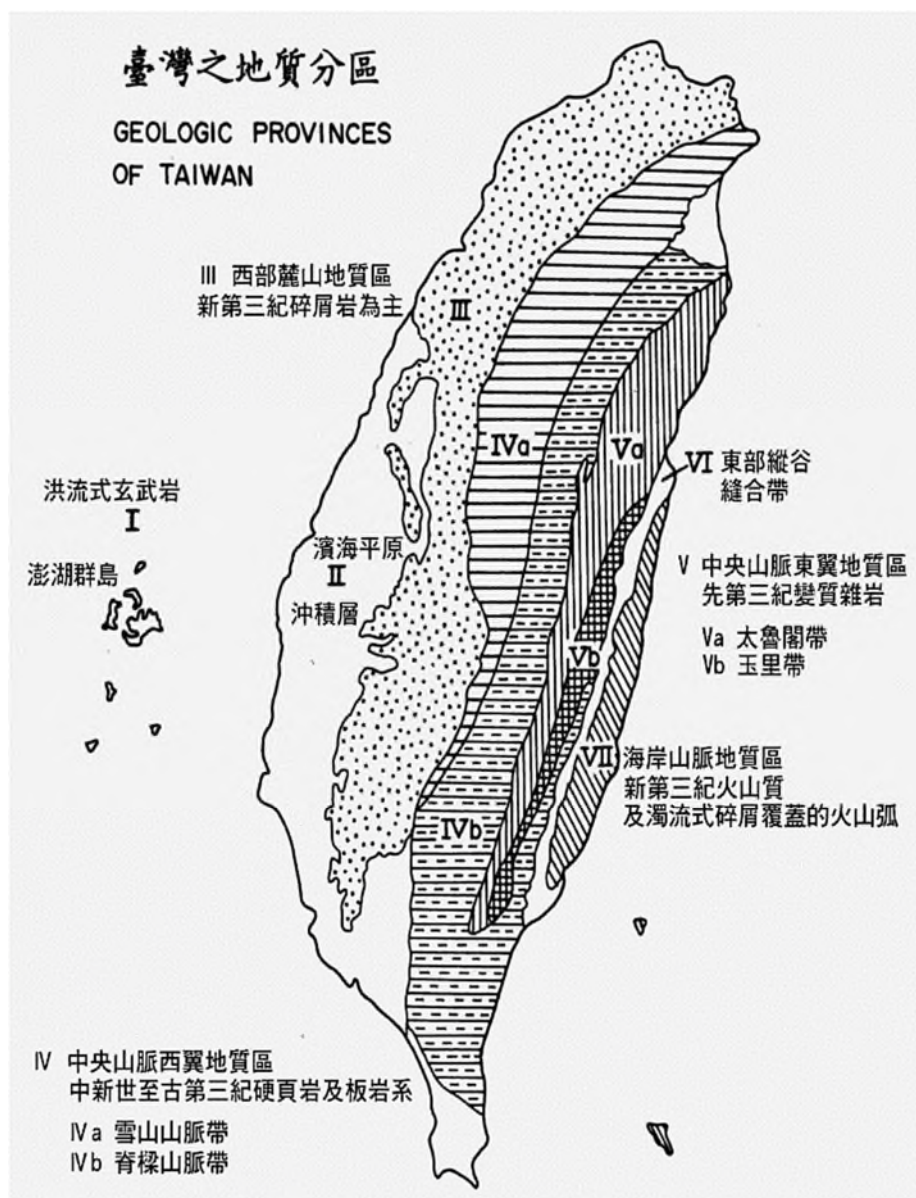


圖 4-2 全臺地質分區圖(何春蓀，1997)

第二節 研究區域基本圖資庫收集

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

表4-1 研究蒐集之基本圖資

使用圖資	時期	來源
1/25000 地形圖	第三版	內政部
莫拉克災前航照	2005	農林航空測量所
莫拉克災後航照	2009	農林航空測量所
莫拉克災前崩塌圖層	2004	水土保持局
莫拉克災後崩塌圖層	2009	中央地質調查所
地質圖	-	中央地質調查所
地形圖	2000	1/25000 經建版
34 處數值高程模型(5m/1m)		內政部提供
鑽探資料	2021	中央地質調查所/中興社
鑽探資料	1990-2022	青山工程顧問公司
土壤現地調查(869 點位)	2007-2010	中央地質調查所/中興社
土地利用限度調查(全台山坡地)	1995	農委會農業試驗所

為取得高品質之鑽探資料獲取土壤表層或崩積層厚度資料，本研究收集中央地質調查所之工程地質探勘資料庫及研究報告、青山顧問公司之崩塌地鑽探資料及水保局 34 處大規模崩塌，進以建立山區崩塌土層之厚度推估方法。

圖 4-3 為鑽探調查及土壤現地土鑽試驗之點位分布狀況，其中圓點鑽探孔位分布，星形符號則為野外土壤土鑽現調位置。

此外本研究另收集林務局農試所「山坡地土地利用限度調查」資

第三節 研究區暨 34 處大崩區高解析度數位地型、區域地質圖資、地形圖等基礎圖資建置

34 處大規模崩塌地分布如圖 4-4 所示。本研究已由水保局協助取得 34 處大崩區之數位地型(1m LiDAR DEM)。配合收集水保局 34 處崩塌地既有的鑽探結果來探討研究土壤厚度(含崩積層厚度)與地形關係。

圖 4-5 至圖 4-7 分別為花蓮縣-玉里鎮-D018、花蓮縣-卓溪鄉-D007 及南投縣-仁愛鄉-D066 大規模崩塌區域 1m DEM 套疊鑽探點位置分布圖。另 15 處有鑽探資料大崩區之數位地形與鑽孔位置圖詳如附錄五。



圖 4-4 34 處大規模崩塌重點區分佈圖

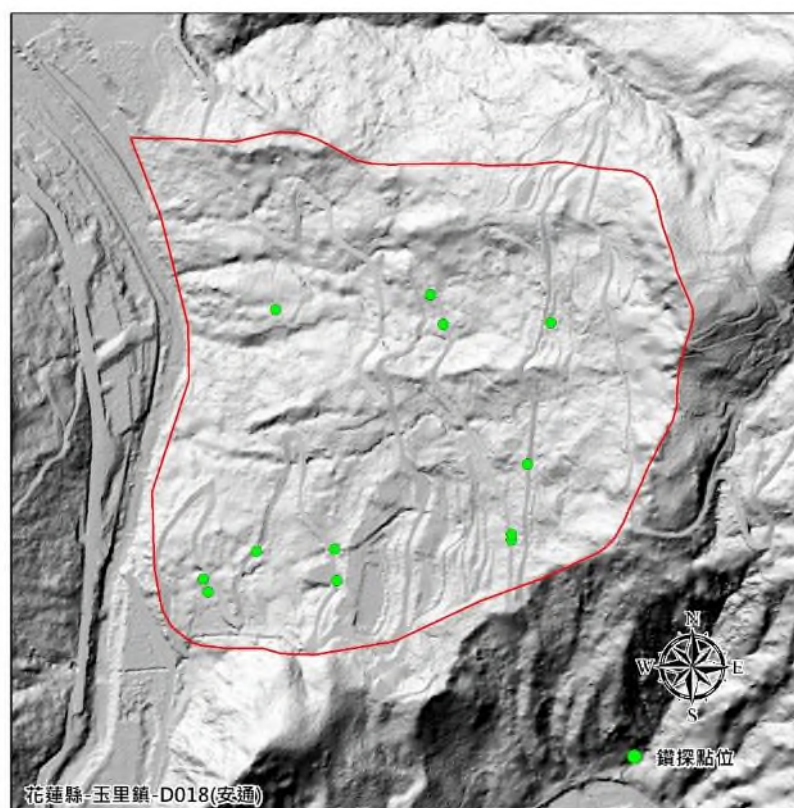


圖 4-5 花蓮縣-玉里鎮-D018(安通)鑽探位置分布圖

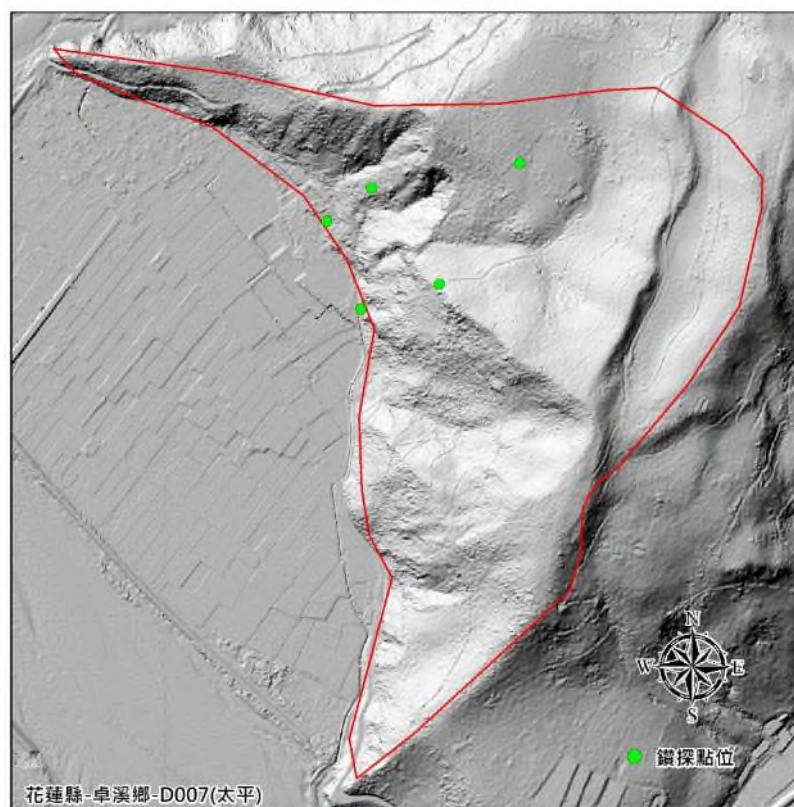


圖 4-6 花蓮縣-卓溪鄉-D007(太平) 鑽探位置分布圖

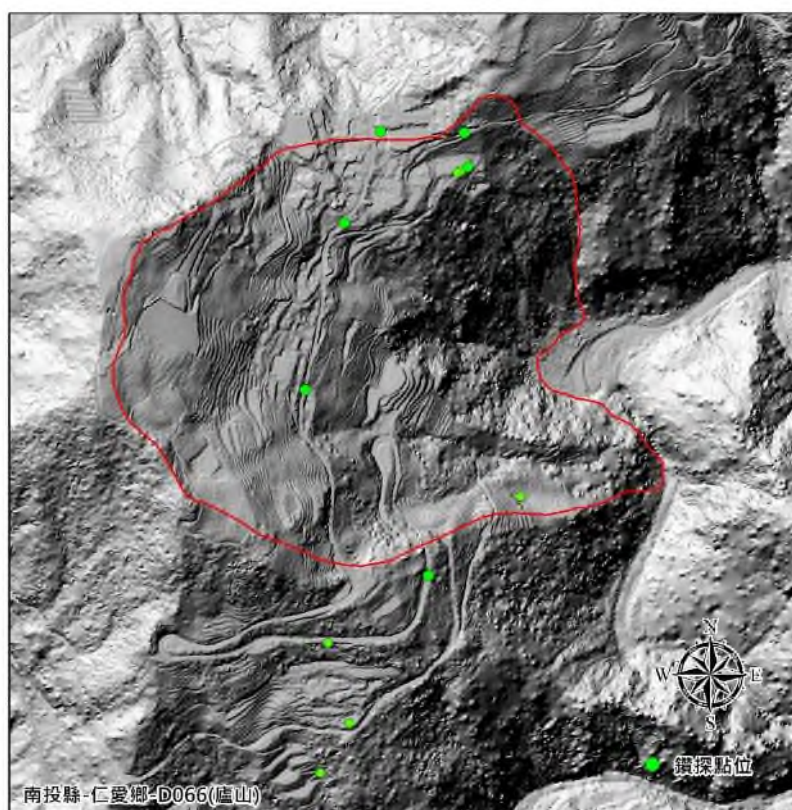


圖 4-7 南投縣-仁愛鄉-D066(廬山) 鑽探位置分布圖

此外，為研究地形與表土層及崩積層厚度之關係。配合應用之計畫研究資料庫，包括野外調查資料、航空照片與衛星影像、內政部第三版 1/25000 地形圖、五萬分之一地質圖幅等。配合相關地文、地形及地質等因子研究。

第五章 工程探勘資料庫與土壤厚度調查

本研究計畫目的為建立山區"自然"河岸山坡及集水區坡面表土及崩積層，如前章所述，目前已蒐集彙整水保局、地調所、林務局農試所土壤深度調查、中興顧問社、青山工程顧問公司等單位之探勘資料。

中央地質調查所之工程地質探勘資料系統的建置及應用是國家發展委員會國土資訊系統「NGIS2020 時空資訊雲建置計畫—落實智慧國土」的推動計畫。工程地質探勘資料庫系統（Geo2020）之鑽探孔位(如圖 5-1 及圖 5-2 所示)。截至 110 年 12 月 31 日止，共收錄鑽孔資料：51,652 孔，岩心總長度：1,778,473 公尺。惟該資料庫經剔除分自然山坡地鑽探資料，如平地、整地後建築工程、既有道路上等等，主要可用之鑽探孔位數量僅剩數百，且主要位置分佈較為集中於山區道路線型、電塔及水保局大規模崩塌區為主。



圖 5-1 中央地質調查所工程地質探勘資料庫系統



圖 5-2 工程地質探勘資料庫系統鑽探孔位分布圖

第一節 表土及崩積層鑽探及地形資料

山區坡面表層土壤厚度之估算模式，最初為基於地形學的地表風化及侵蝕平衡理論，發展出風化土層生成理論模式。然臺灣位於板塊會聚邊界，造山運動迅速，搬運及崩積作用旺盛，因此不適用前述土層生成模式。若以確切之鑽探地質資料及野外土壤深度調查作業，為最適當取得本土化之表層土壤厚度與地形關係之作法。

本研究目前依據地質調查所之工程地質探勘資料庫，同時彙集水保局大規模崩塌區鑽探調查成果，目前已收集 470 孔鑽探柱狀圖資料，分布如圖 5-3 所示，黃色點位為崩塌地調查計畫位置。

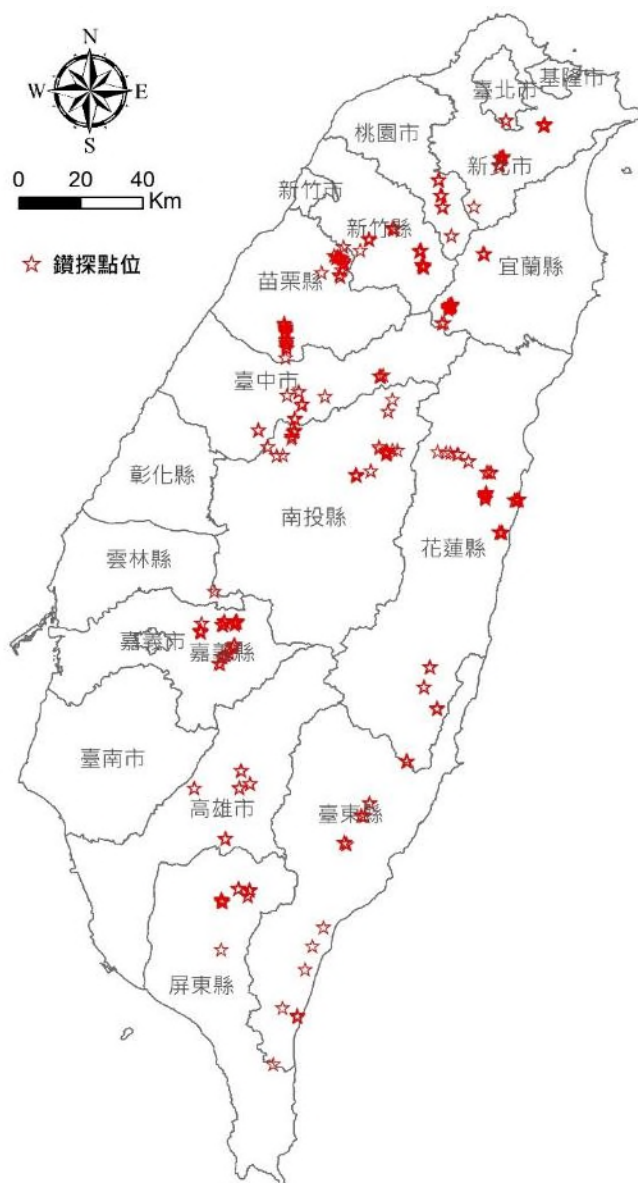


圖 5-3 470 孔鑽探分布圖(每一點代表一專案工程)

現有鑽探資料中，統計全部鑽探案例之表土及崩積層厚度，如圖 5-4 所示，圖中顯示將近 129 處約 27.4% 案例之崩積層厚度大於 20 公尺，最大可深達 93 公尺。而崩積層厚度小於 6 公尺者共 202 處，占總數之 43%。顯示現階段鑽探調查位置之崩積層厚度大致偏大。

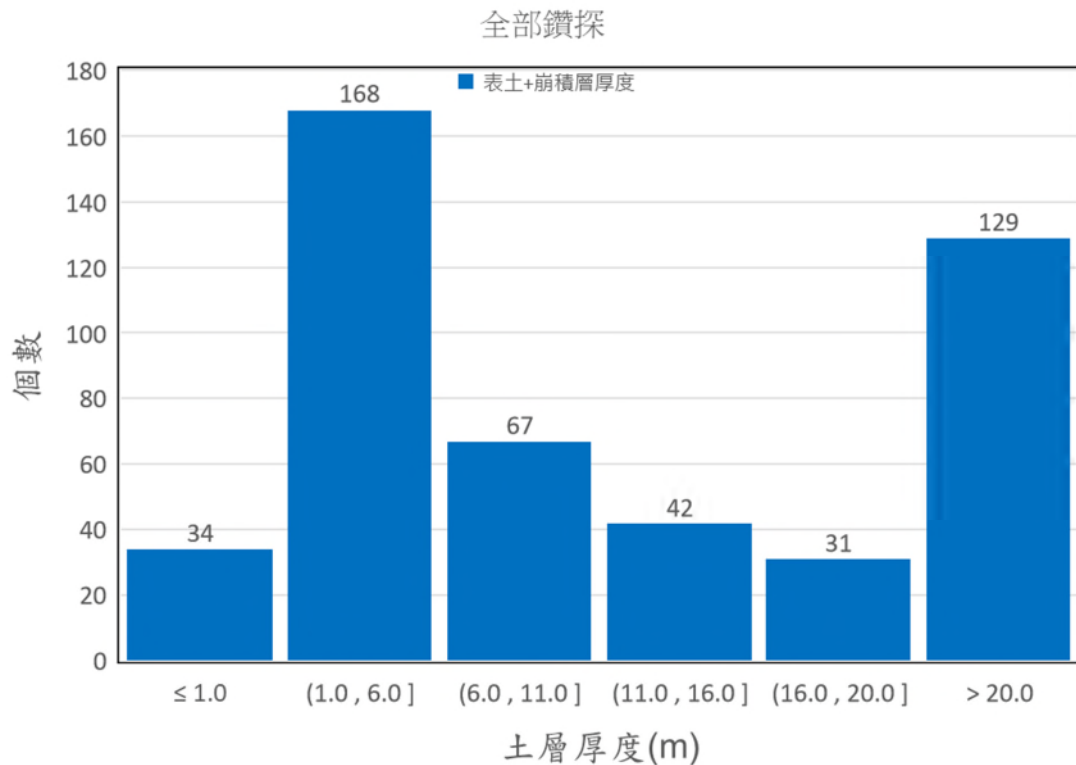


圖 5-4 鑽探成果之表土及崩積層厚度數量統計(全部鑽探案例)

本計畫進一步加值前資料，依據分析鑽探位置之地形特性，區分為未擾動及已擾動案例，分別代表鑽探位置其是否位於前期崩塌地。如邊坡已具有崩崖、滑動體等特徵，將之歸類於已擾動案例。此分類亦同時適時實施室內外影像或調查，查核鑽探資料。後續再進行表土及崩積層資料判識及彙整成果與統計分析。

現有鑽探資料中，其中位於已擾動地層案例為 280 孔，未擾動地層案例為 190 孔。

280 孔已擾動地層鑽探案例之表土及崩積層厚度統計如圖 5-5 所示，圖中顯示將近 125 處約 44.6% 案例之崩積層厚度大於 20 公尺，最大可深達 93 公尺。而崩積層厚度小於 10 公尺者共 67 處，僅總數之 23.9%。顯示已擾動地層之崩積層厚度大致偏大，其偏大之原因來

自於鑽探成果之判釋，為將滑動面以上之滑動體，均列為崩積層。已擾動案例多位於大規模崩塌或古崩塌地上，因此其崩積層深度偏大。

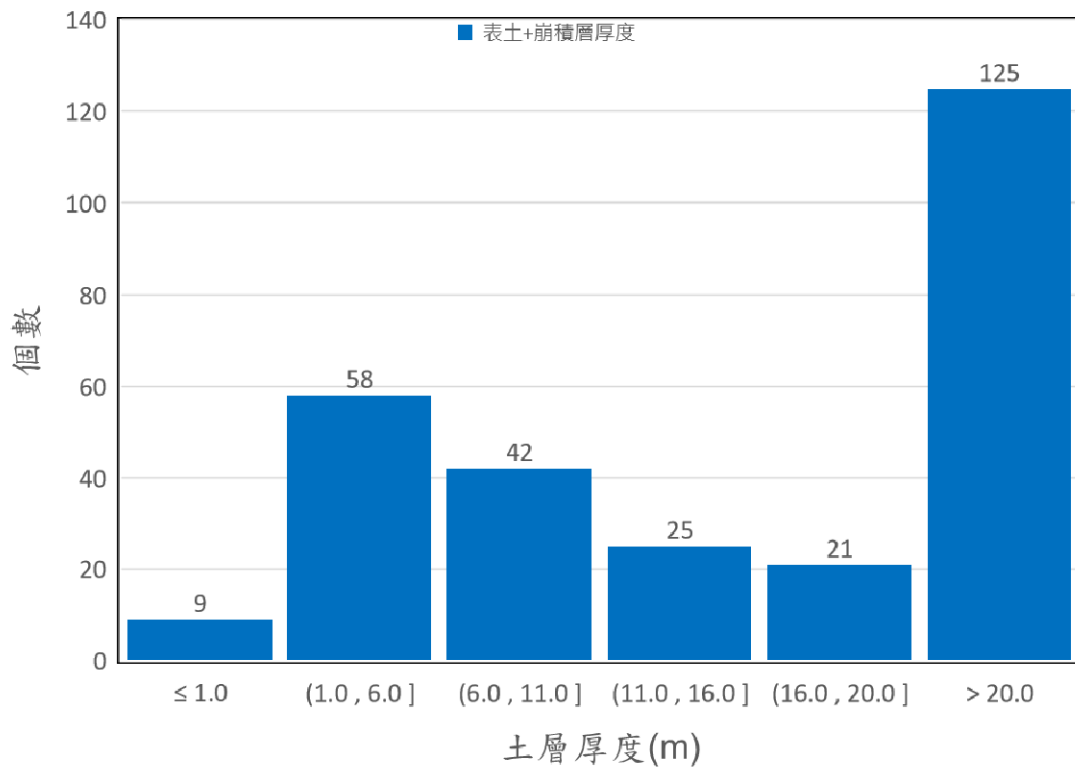


圖 5-5 鑽探成果之表土及崩積層厚度數量統計(擾動案例)

未擾動地層鑽探案例(190 孔)之表土及崩積層厚度統計，如圖 5-6 所示。圖中顯示將僅 4 處案例之崩積層厚度大於 20 公尺。而崩積層厚度位於小於 6 公尺者共 134 處，占總數之 70.5%；崩積層厚度於小於 10 公尺者共 155 處，占總數之 81.6%。顯示未擾動地層之崩積層厚度大致偏小於 10 公尺以下，多數小於 6 公尺。

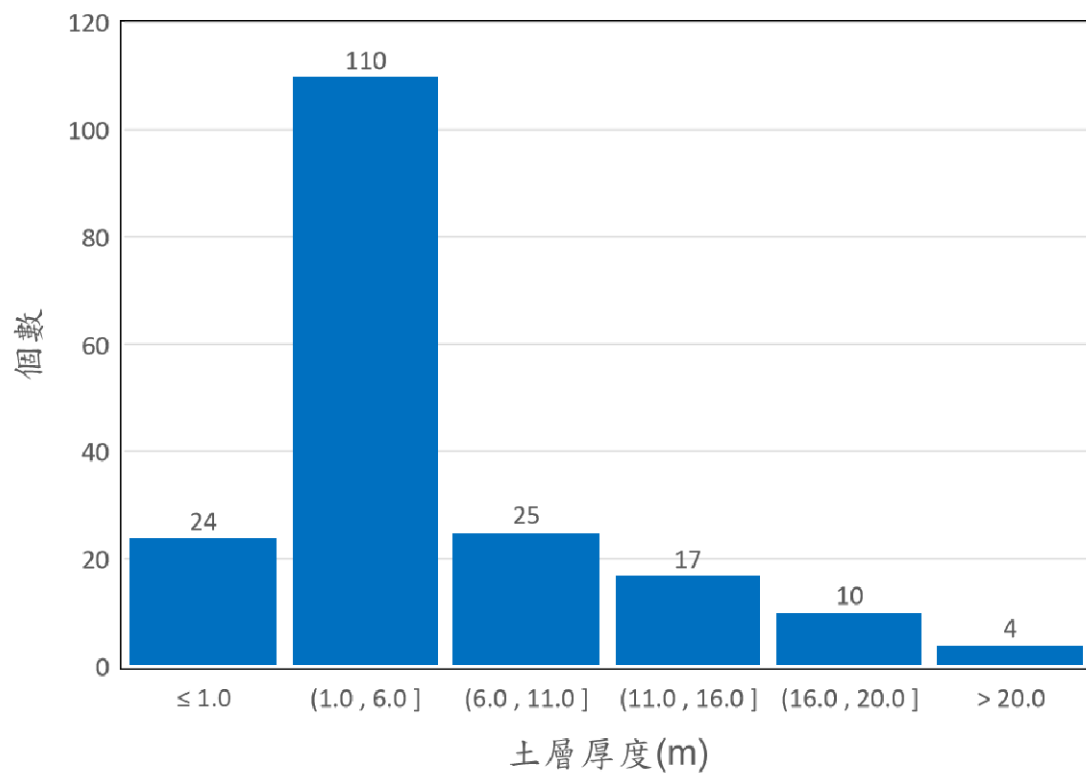


圖 5-6 鑽探成果之表土及崩積層厚度數量統計(未擾動案例)

第二節 土壤厚度野外調查

本章節之土壤厚度調查工作之歷史沿革及調查方法內容，為引用地質調查所 2006 至 2010 年間之淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫報告(地調所，2007，2008，2009，2010)。

民國 52 年至 60 年期間，鑑於使土地利用更加有效，省農林廳接受農復會及美籍學者指導，由中興大學土壤學系執行耕地土壤調查，先後對台中縣、南投縣等 8 個縣地區，完成田野調查與土壤調查報告書，建立台灣平地土壤的科學分類與應用基礎方向。

在民國 70 年代，省農林廳又針對台灣地區海拔 1000 公尺以下的山坡地作土壤調查，調查方法：先在室內判釋航照及地形圖，預定鑽探土樣地點，一般在宜農牧之地，以每隔 200 至 250 公尺，最大至 500 公尺鑽探一孔，鑽探深度最大 120 公分或土鑽不能通過之深度為止，建立現場土壤剖面觀察紀錄並採樣於試驗室作進一步分析；其主要目的在建立描繪於 1/25000 地形圖上的土壤圖與山坡地土壤調查報告，以農業應用為觀點，將不同類型的土壤加以分類、分區界線標示於圖上，作農業方面的土地利用與管理的依據。

淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫之工作目標，在於河流廣域流域之山區集水區的水文地質方面研究與探討，於廣域淺層水文地質模型建構時，所需的表層風化土壤厚度調查。該計畫原先規劃採用 hand auger 方式進行調查，惟實際調查發現 hand auger 因採用人力，其所能探查之範圍較適用於土壤厚度少於 1.2 公尺之狀況，至於深度在 1.2 公尺以上則有限制，所以改採用小型機械傳動式設備進行深度調查，最深可達土壤厚度為 5 公尺處。本項調查在於不同坡

度或地形、地質條件下，選擇適當地點，利用小型機械傳動式設備進行深度調查，以探討不同環境下之土壤厚度；

於現場調查方面，無論坡度狀況，一律採垂直於坡度方向鑽入，鑽入最大深度以 5 公尺為基準，若大於 5 公尺則不再加深鑽桿長度，直接紀錄大於 5 公尺；若小於 5 公尺，則需儘量鑽入並確定無法鑽進為止。

該現地調查作業，首先定義現場調查位置之選取原則：(1) 排除崩塌區域及避免山溝侵蝕位置，以自然形成的邊坡為主；(2) 涵蓋不同的地質地層位置；(3) 取不同坡度狀況；(4) 河床位置不選。路線訂定則依據主要河流、主要道路、並以 DEM 配合各相關圖資進行調查位置套疊以先行了解各調查流域的地形狀況，最終完成調查路線選定。調查記錄依序記錄各調查位置的坐標（二度分帶，TWD97）、所在位置、坡度、土壤厚度及鑽掘出的土壤狀況描述等資料。

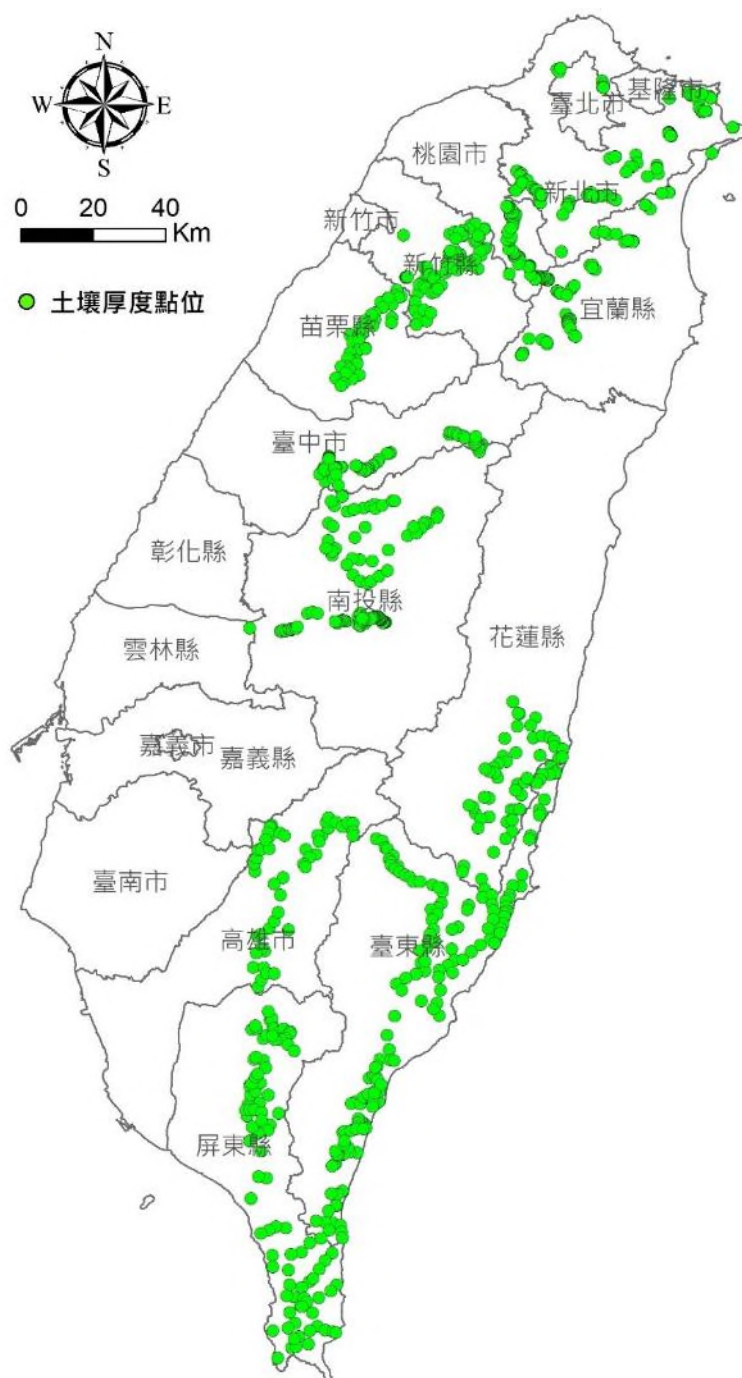


圖 5-7 869 處土壤深度野外調查分布圖

本研究彙整地調所2006至2010年間進行淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫(參考文獻)中，土壤厚度野外調查共869處現地調查資料，分布如圖5-7所示，圖中點位為土壤厚度調查位置。

現有鑽探資料中，統計全部鑽探案例之表土及崩積層厚度，如圖

5-8所示，圖中顯示618處約71.1%案例之崩積層厚度小於1.0公尺，深度2公尺以內的計有736處，占總數84.7%。簡要比對前節未擾動鑽探資料，顯示現階段工程地質鑽探調查成果之崩積層厚度大致偏大。

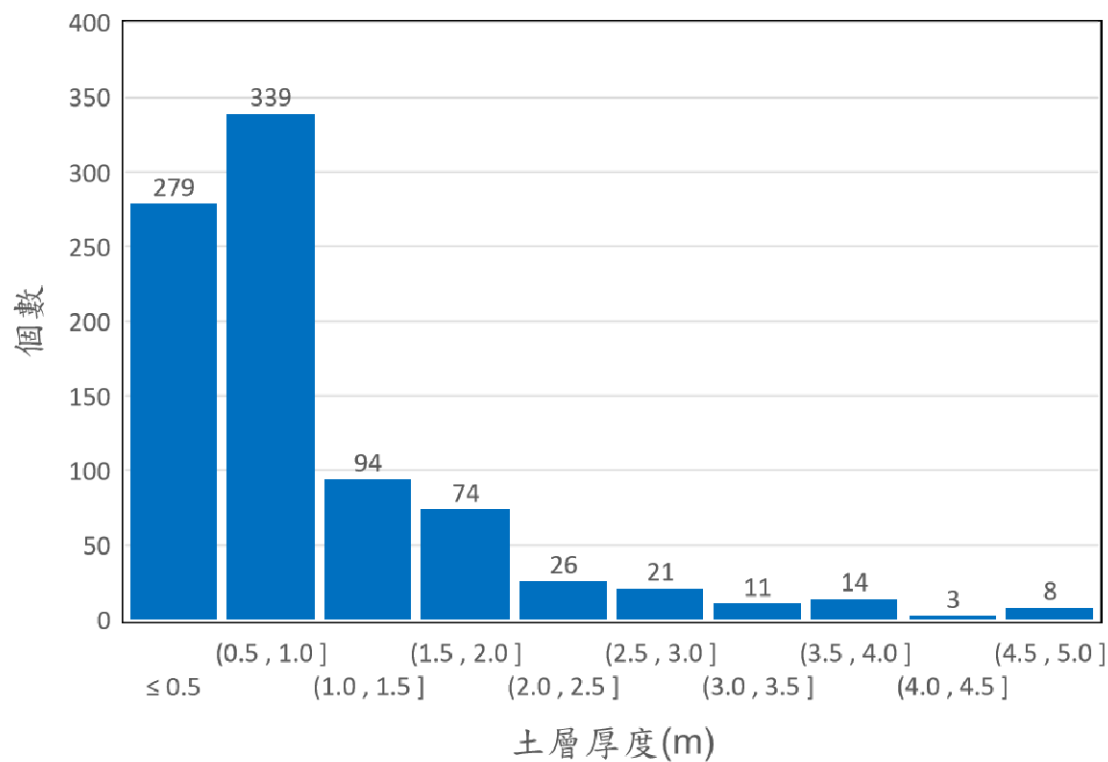


圖 5-8 土壤厚度野外調查之數量統計

第三節 山坡地土地利用限度調查資料庫與土層厚度比對

本研究另收集林務局農試所「山坡地土地利用限度調查」資料庫資料。該調查為以農業及林業為目的，並將土層厚度(亦稱土壤有效深度)分為 A、B、C、D 四等級，土壤深度 A 級大於 90 公分；B 級 90-50 公分；C 級 50-20 公分，D 級 0-20 公分。其土壤調查深度最深僅達 1.2 公尺。

本研究進一步選用 200 處土鑽資料，套疊土鑽位置重疊之土壤深度分級進行比對，圖 5-9 為山坡地土地利用限度調查圖層與本研究未擾動土層分布圖。

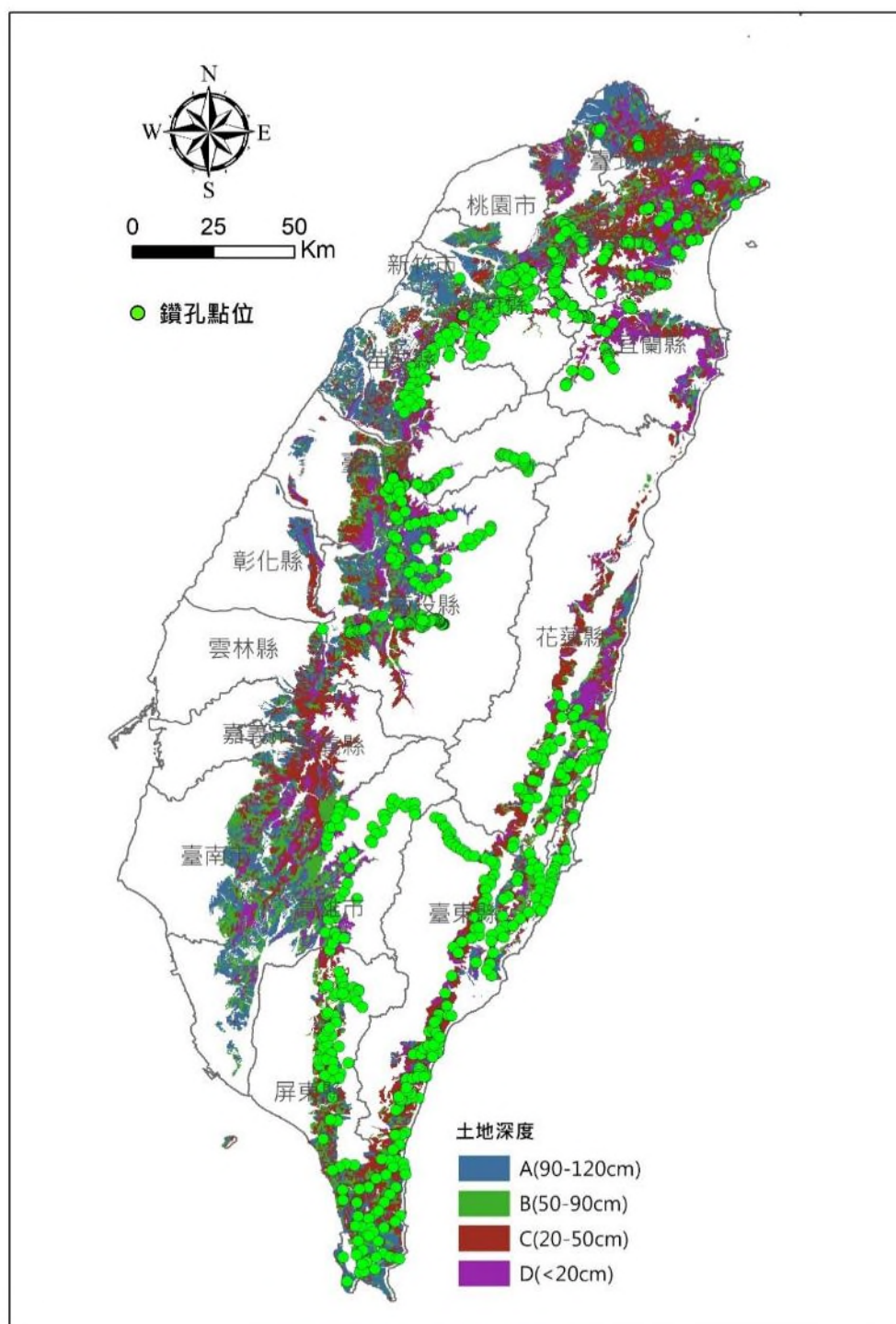


圖 5-9 山坡地土地利用限度調查資料庫之土壤深度及土鑽位置分布圖

本研究將實際鑽孔資料與山坡地土地利用限度調查圖層近 200 個點位進行比對，如表 5-1，比對結果發現正確率僅達 27%，相符程度不佳。推估其原因可能山坡地土地利用限度調查圖層，為以調查點

位資料推估擴大至面圖資，且以農業目的為主，與土鑽調查之目的略有不同，因此兩者成果較不相符。

表5-1比對結果表

比對點位個數(個)	準確個數(個)	不準確個數(個)	正確率(%)
200	54	146	27

第六章 應用 UAV 調查崩塌區及坑溝表土及崩積層厚度之技術研發

崩塌區及坑溝上游或源頭區域，通常很難到達，即使到達後亦不易測量完整表土及崩積層厚度。於經費充足時，我們可應用 UAS 建立 LiDAR DSM 再配合空拍建立 3D 地型；或利用 UAS 航拍影像利用軟體產製 DSM。然前述作業經費所費不貲。因此本計畫發展適合研究計畫尺度之簡易 UAS 量測崩塌源頭表土及崩積層厚度之方法。

本計畫工作首先分別進行校內及野外 UAV 影像像素及標尺長度關係。後續再應用至 3 個崩塌案例，進行坡面表土及崩積層厚度與邊坡地形特性分析研究。

第一節 校內室外 UAV 影像像素及深度測量方法

一、校內室外空拍影像像素及長度率定方法

本研究目前應用測量學影像校正方法，進行土層厚度量測。本計畫首先製作實尺寸之大型標尺布幕，如圖 6-1 所示。UAV 採用 DJI PHANTOM 4 PRO+V2.0，於屏科大水土保持系中庭空曠場地，豎立標尺，再將 UAV 設置於各種距離水平距離拍攝標尺影像進行校準，建立 UAV 水平距離與標尺照片長度之校準關係。而後再以此關係，於實地邊坡土層照片，應用拍攝距離校準方式，推估坡面土層厚度。

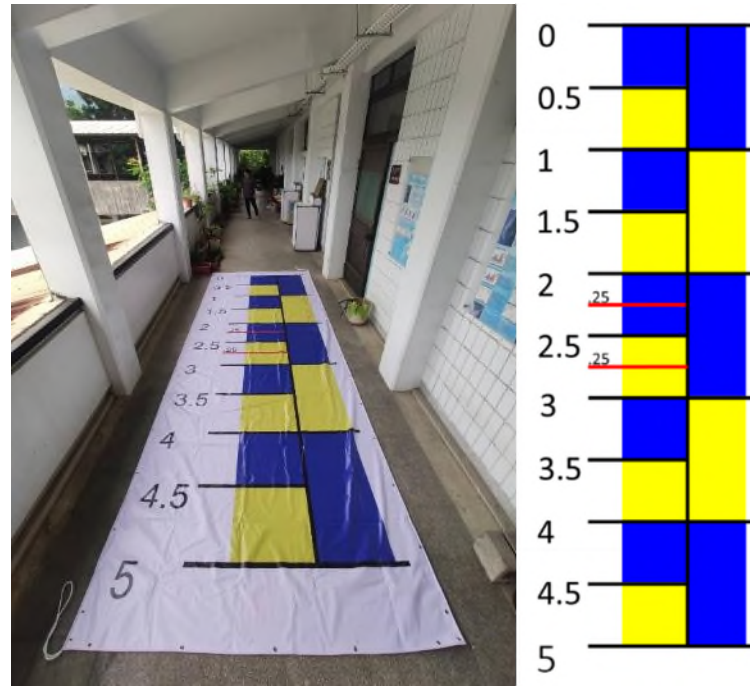


圖 6-1 UAV 測量長度校正之大型標尺布幕及標尺

圖 6-1 為將大型 5 公尺標尺，垂掛於牆面，切齊牆底拉一條皮捲尺作為距離良測之基準。本研究目前使用 6 個距離進行校正，分別為 10、15、20、25、30 及 35 公尺。在設置好標尺後，再於 UAV 底部懸掛一垂心，以確認水平距離之正確位置。UAV 之飛行高度控制於距地表 5 公尺。依次 6 個距離分別進行拍攝，拍攝方式為相機角度為正攝。圖 6-2 至圖 6-5 分別為 UAV 距標尺 10 公尺、20 公尺及 30 公尺之影像。



圖 6-2 屏科大水保系館之 UAV 影像長度率定之大型標尺布幕及地面
距離控制標尺及距離標示(UAV 視角)



圖 6-3 UAV 距離標尺 10 公尺之標尺(UAV 視角)



圖 6-4 UAV 距離標尺 20 公尺之標尺(UAV 視角)



圖 6-5 UAV 距離標尺 30 公尺之標尺(UAV 視角)

二、空拍影像率定分析

影像率定分析為使用小畫家軟體計算 UAV 相片影像之像素，由於 UAV 拍攝鏡頭之像素為固定。因此每張相片像素皆為 5472*3078。分析方法為計算在每一水平距離時，正攝相片內標尺一公尺長度之格數。

本研究分別分析各水平距離相片，0.0-1.0 公尺(鏡頭上部)、2.0-3.0 公尺(鏡頭中央)、0.0-5.0 公尺(鏡頭全部範圍)等三長度之像素數，分析結果如圖 6-6 及圖 6-7 所示。2.0-3.0 公尺(鏡頭中央)分析結果，獲得之關係式為 $y = 4137.6x - 1.033$ ， R^2 值達 0.9998。經與 0.0-1.0 公尺結果比對，顯示兩者 1 公尺長度之像素數目相當接近，因此爾後能以此關係式，於實地拍攝邊坡土層照片，推估坡面土層厚度。

實際應用時，為由 UAV 正面拍攝之影像直接量測土壤厚度像素數，因此本研究再進行 5 公尺長度之誤差比分析。作法為採用標尺中間(2-3 公尺)一公尺之像素乘以 5 倍，再與 0-5 公尺之像素數進行像素差異比率，結果如圖 6-8 所示。圖中顯示像素差異比率約在 1% 左右，誤差甚低，因此可符合實用所需。

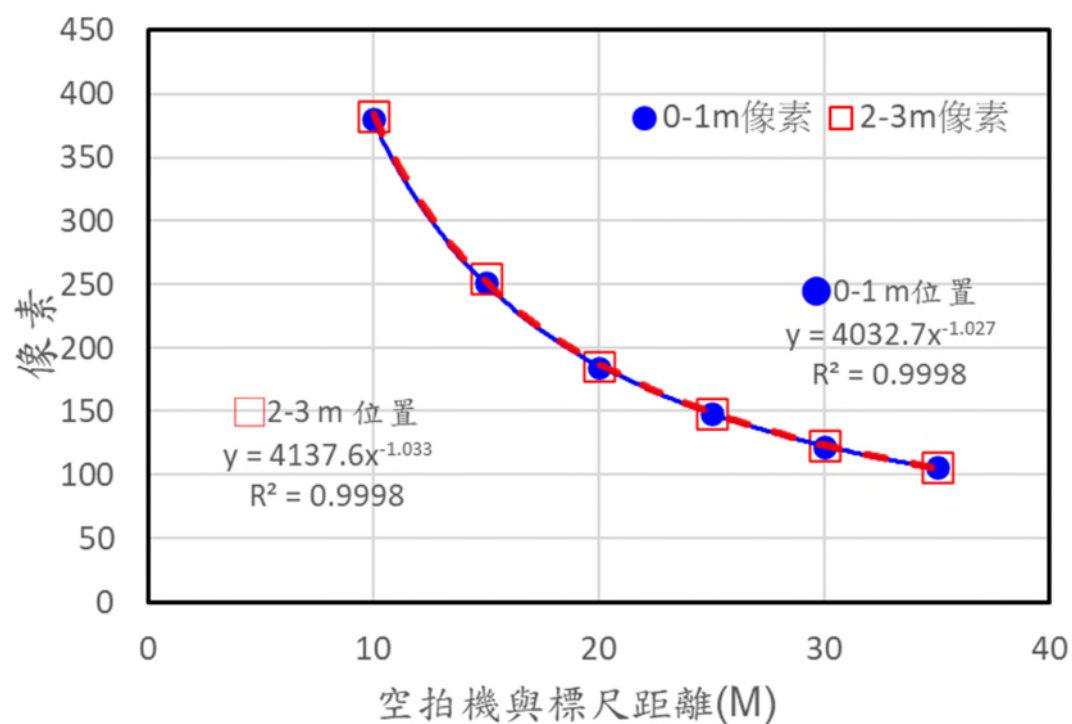


圖 6-6 0.0-1.0m 及 2.0-3.0m 一公尺長度標尺之像素數分析結果

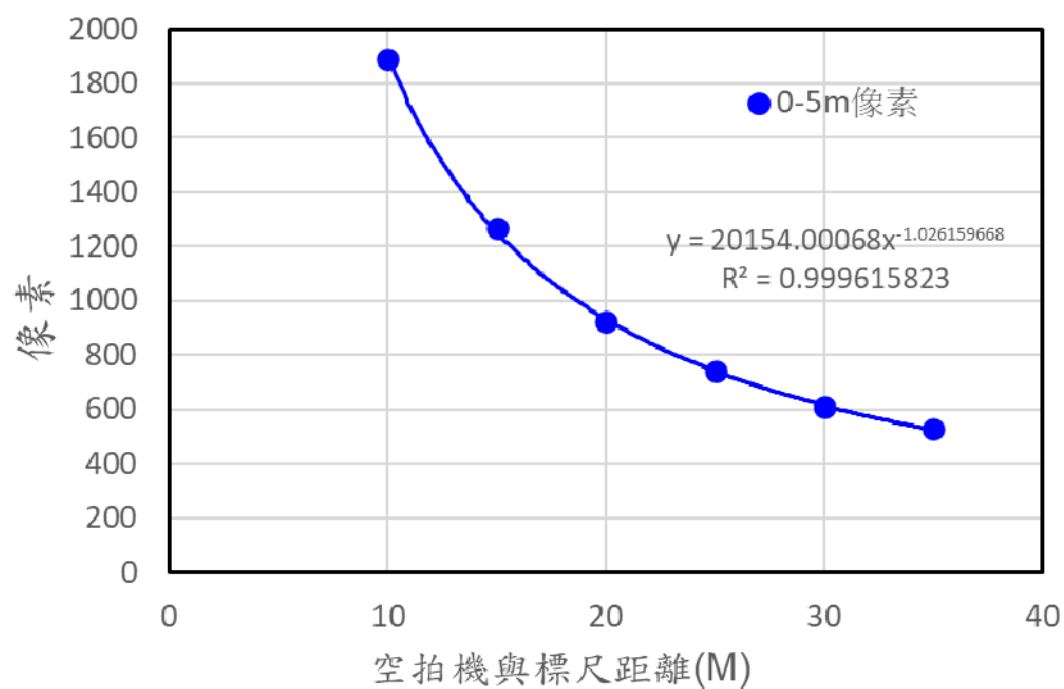


圖 6-7 0.0-5.0m 之五公尺長度標尺之像素數分析結果

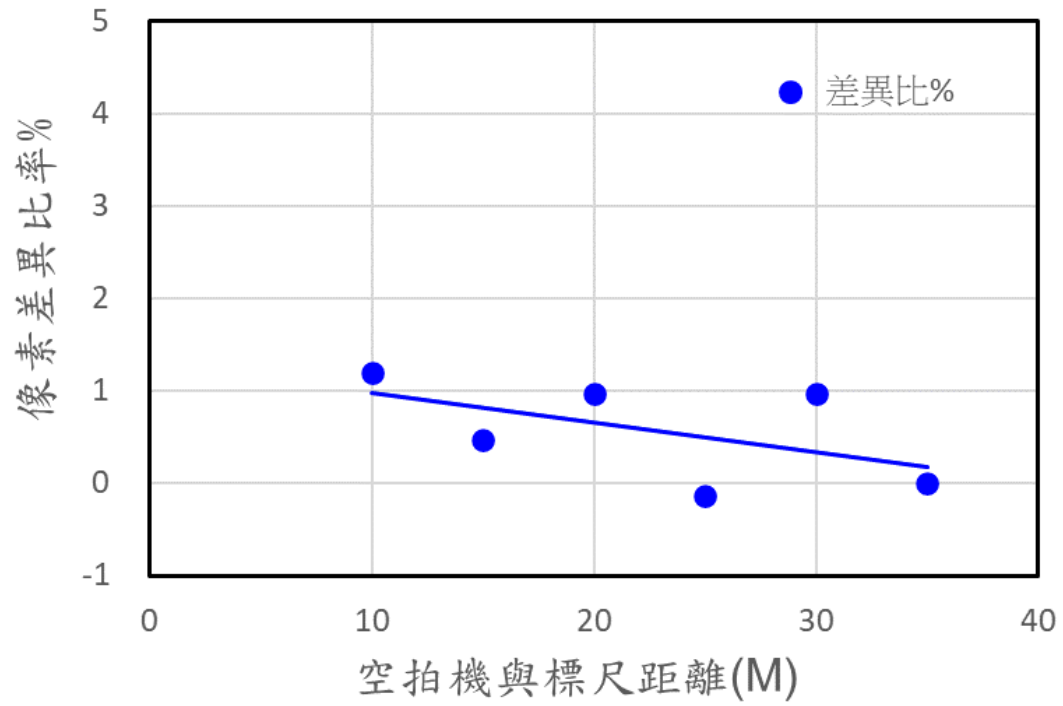


圖 6-8 0.0-5.0m 之五公尺長度標尺之像素數分析結果

三、野外空拍影像像素及長度率定

本研究進一步實際於野外現地進行影像校正，地點位於高雄縣六龜區寶來村之一實際坡面，坡面高度約 3 公尺，坡面坡度 50 度。首先豎立標尺，再將 UAV 設置於各種距離水平距離拍攝標尺影像進行校準，建立 UAV 水平距離與標尺照片長度之校準關係。

而在距離測量方面則採用無人機本身之 GPS 系統定位後，利用 Google Earth 進行量測，範圍大至從 7 公尺至 105 公尺，拍攝角度皆為正攝，以下將舉幾張照片說明。圖 6-9 為標尺正上方拍攝，距離標尺 0 公尺，圖 6-10 及圖 6-11 分別為距離標尺 16 公尺及 50 公尺之影像。



圖 6-9 寶來大規模崩塌地 UAV 影像長度律定之大型標尺布幕，標尺正上方，距離標尺 0m (UAV 視角垂直拍攝)



圖 6-10 UAV 距離標尺 16m 之標尺(UAV 視角)



圖 6-11 UAV 距離標尺 50m 之標尺(UAV 視角)

影像率定分析方法與前節之分析方法相同，此處直接呈現率定結果。野外校正之標尺鋪設在坡度 50 度之坡面，因此計算須將其校正 90 度，方能進行比較，圖 6-12 為厚度 0 至 1 公尺，校正後距離與像素的關係圖。

結果顯示，在 0 至 1 公尺之範圍內，兩者之結果近乎一致，現地率定方面獲得之關係式為 $y = 2986.5x^{-0.926}$ ， R^2 值達 0.9969，結果良好。

圖 6-13 為寶來標尺 1-2 公尺位置與屏科大 2-3 公尺位置經校正後距離與像素的分析結果。選用剛好位於鏡頭中央位置於屏科大中庭案例為 2-3 公尺，而寶來案例之鏡頭中央部分剛好為 1-2 公尺，因此將兩者合併分析比對。結果顯示，雖 R^2 值皆相當良好，但仍有些許差別，兩者之像素最大差距約為 28，換算成厚度約 10 公分，屬於測量誤差。換算成厚度誤差約 10cm/1m，屬於測量誤差。

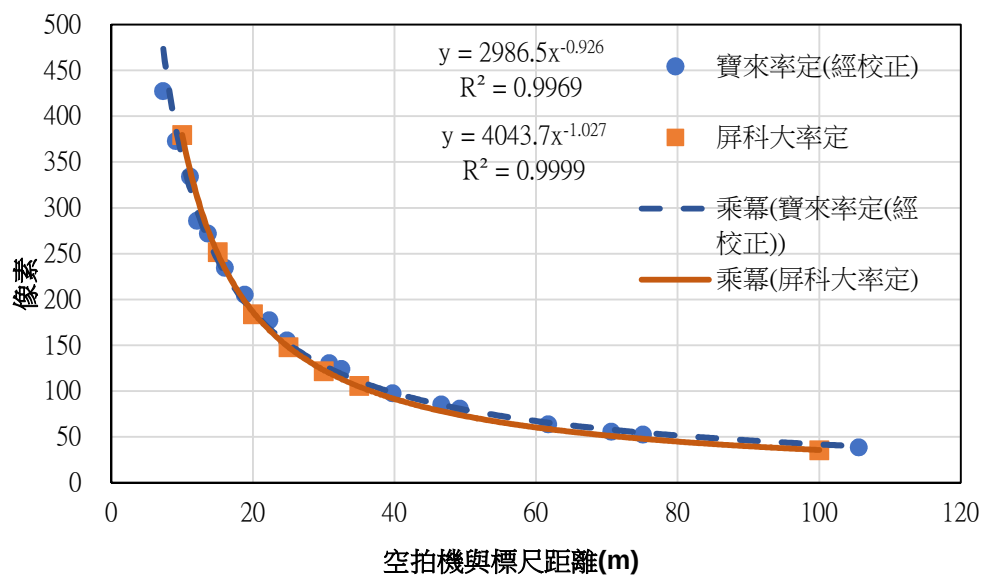


圖 6-12 0-1m 經校正後距離與像素的分析結果

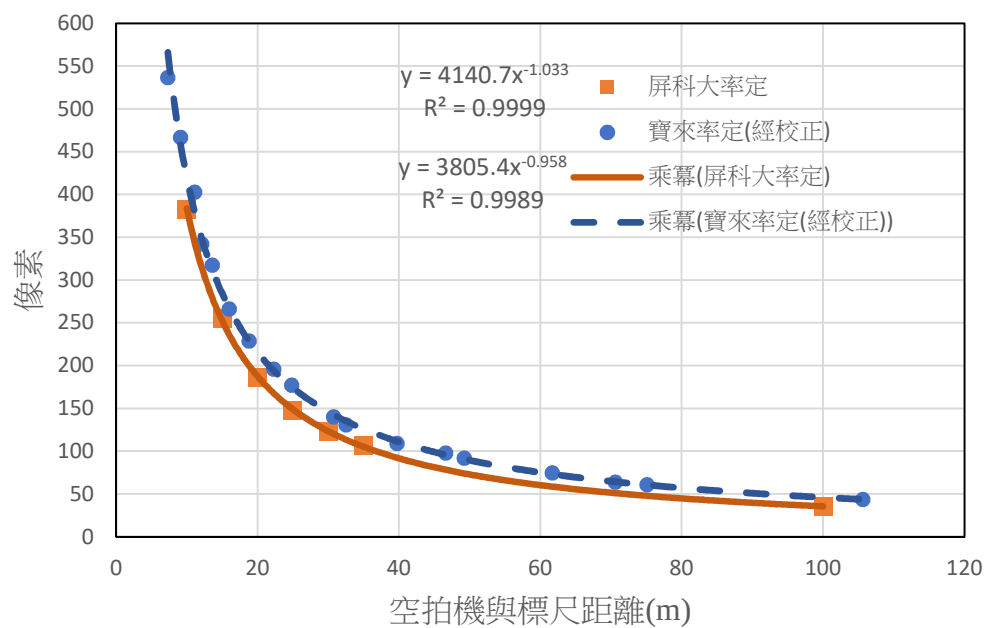


圖 6-13 寶來(1-2m)與屏科大(2-3m)經校正後距離與像素的分析結果

第二節 案例驗證

本研究選取 3 個案例位置進行 UAV 的實際應用及驗證。

一、 案例一

UAV 的實際應用案例一位於高雄縣六龜區桃源里崩塌地，案例之二度分帶座標為 218933, 2556899。地層屬長枝坑層以砂岩夾頁岩為主。位置圖如圖 6-14 所示，崩塌地側邊出露之土層深度分布狀況如圖 6-15 所示。

表 6-1 為案例一 UAV 經校正量測之土壤厚度，坡度約由 29.1 至 42.7 度，量測之土壤厚度分布約由 1.5 至 3.5 公尺。表中另與下一章之未擾動土層之最大厚度推估公式成果比較，主要厚度差為 0.27 左右。另表 6-2 呈現量測之土壤厚度與擾動土層之坡體處土壤厚度推估公式成果比較，其主要厚度差為 0.50 左右。



圖 6-14 案例一之位置圖(218933, 2556899)



圖 6-15 案例一之實測位置及範圍

表6-1 案例一厚度與未擾動土層之最大厚度線性公式比較

點位	UAV 校正 厚度(m)	10m DEM 坡度(°)	未擾動土層之最大厚度 $y = -0.0553x + 3.9384$	相差 (m)
P1	1.5	42.7	1.58	0.08
P2	1.7	36.0	1.95	0.25
P3	2.6	29.0	2.33	0.27
P4	2.4	32.7	2.13	0.27
P5	1.9	35.8	1.96	0.06
P6	1.7	41.8	1.63	0.07
P7	3.5	29.1	2.33	1.17

表6-2 案例一厚度與擾動土層之坡體處線性公式比較

點位	UAV 校正 厚度(m)	10m DEM 坡度(°)	擾動土層之坡體厚度 $y = -0.0222x + 2.962$	相差 (m)
P1	1.5	42.7	2.01	0.50
P2	1.7	36.0	2.16	0.46
P3	2.6	29.0	2.32	0.28
P4	2.4	32.7	2.24	0.16
P5	1.9	35.8	2.17	0.27
P6	1.7	41.8	2.03	0.33
P7	3.5	29.1	2.32	1.18

二、 案例二

UAV 的實際應用案例二位於高雄縣六龜區寶來里崩塌地，案例之二度分帶座標為 222838, 2557435。地層屬樟山層為主，以輕度變質板岩夾部分出露玄武質火成岩為主。位置圖如 6-16 所示，崩塌地側邊出露之土層深度分布狀況如圖 6-18 所示。

表 6-3 為案例二 UAV 經校正量測之土壤厚度，坡度約由 33.1 至 47.4 度，量測之土壤厚度分布約由 1.29 至 2.0 公尺。表中另與下一章之未擾動土層之最大厚度推估公式成果比較，主要厚度差為 0.1-0.42 公尺左右。另表 6-4 呈現量測之土壤厚度與擾動土層之坡體處土壤厚度推估公式成果比較，其主要厚度差為 0.15-0.62 公尺左右。



圖 6-16 案例二之位置圖(222838, 2557435)



圖 6-17 案例二之實測位置及範圍

表6-3 案例二厚度與未擾動土層之最大厚度線性公式比較

點位	UAV 校正厚度 (m)	10m DEM 坡度(°)	未擾動土層之最大厚度 $y = -0.0553x + 3.9384$	相差 (m)
P1	2.00	36.6	1.9	0.1
P2	1.78	41.8	1.6	0.18
P3	1.66	38.7	1.8	0.14
P4	1.29	47.4	1.3	0.01
P5	1.66	46.5	1.4	0.26
P6	1.58	35.0	2.0	0.42
P7	1.75	33.1	2.1	0.35

表6-4 案例二厚度與擾動土層之坡體處線性公式比較

點位	UAV 校正厚度 (m)	10m DEM 坡度(°)	擾動土層之坡體厚度 $y = -0.0553x + 3.9384$	相差 (m)
P1	2.00	36.6	2.15	0.15
P2	1.78	41.8	2.03	0.25
P3	1.66	38.7	2.10	0.44
P4	1.29	47.4	1.91	0.62
P5	1.66	46.5	1.93	0.27
P6	1.58	35.0	2.19	0.61
P7	1.75	33.1	2.23	0.48

三、 案例三

UAV 的實際應用案例三位於高雄縣六龜區寶來里崩塌地，案例之二度分帶座標為 222866, 2557278。地層屬樟山層為主，以輕度變質板岩夾部分出露玄武質火成岩為主。位置圖如 6-18 所示，崩塌地側邊出露之土層深度分布狀況如圖 6-19 所示。

表 6-5 為案例二 UAV 經校正量測之土壤厚度，坡度約由 33.1 至 47.4 度，量測之土壤厚度分布約由 1.74 至 2.41 公尺。表中另與下一章之未擾動土層之最大厚度推估公式成果比較，主要厚度差為 0.0-0.45 公尺左右。另表 6-6 呈現量測之土壤厚度與擾動土層之坡體處土壤厚度推估公式成果比較，其主要厚度差為 0.0-0.33 公尺左右。



圖 6-18 案例三之位置圖(222866, 2557278)



圖 6-19 案例三之實測位置及範圍

表6-5 案例三厚度與未擾動土層之最大厚度線性公式比較

點 位	UAV 校正厚度 (m)	10m DEM 坡度(°)	未擾動土層之最大厚度 $y = -0.0553x + 3.9384$	相差 (m)
P1	1.74	42.5	1.6	0.14
P2	2.02	34.7	2.0	0.02
P3	2.19	34.7	2.0	0.19
P4	2.13	30.5	2.3	0.17
P5	2.20	32.2	2.2	0.00
P6	2.41	31.1	2.2	0.21
P7	2.05	26.1	2.5	0.45

表6-6 案例三厚度與擾動土層之坡體處線性公式比較

點 位	UAV 校正厚度 (m)	10m DEM 坡度(°)	擾動土層之坡體厚度 $y = -0.0553x + 3.9384$	相差 (m)
P1	1.74	42.5	2.02	0.28
P2	2.02	34.7	2.19	0.17
P3	2.19	34.7	2.19	0.00
P4	2.13	30.5	2.28	0.14
P5	2.20	32.2	2.25	0.05
P6	2.41	31.1	2.27	0.14
P7	2.05	26.1	2.38	0.33

第三節 小結

1. 校內與野外校正曲線在 0 至 1m 之範圍內，兩者之結果近乎一致，現地率定方面獲得之關係式為 $y = 2986.5x - 0.926$ ， R^2 值達 0.9969，結果良好。而若在標尺中間部分將兩者合併分析比對，結果顯示，雖 R^2 值皆相當良好，惟稍有些許差別，兩者之像素最大差距約為 28，換算成厚度約 10/1m 測量誤差。
2. 在案例驗證部分，本研究將 UAV 校正之土層厚度與迴歸公式進行比對，比對之迴歸式分別為未擾動土層之最大厚度與擾動土層之坡體區位，使用最大厚度比對之原因為其分析得出之迴歸式顯著受地形坡度影響。而使用擾動土層之坡體厚度原因為，三案例皆為已擾動區域，並且三者之區位皆位於坡體處。
3. 結果顯示使用最大厚度比對之結果最大值相差 0.45 公尺，最小差距為 0m，比對結果雖較為良好。而使用擾動土層之坡體區位進行比對，結果顯示最大值相差 0.62 公尺，最小差距為 0 公尺，相較於最大厚度雖結果較差。

第七章 坡面表土及崩積層厚度與邊坡微地形相關性 分析

本項分析主要考慮各種地形特性因子，如高程、坡度、地形曲率、區位等因子，嘗試建立描述性最佳之表土及崩積層厚度與地形關係。地形坡度因子採以鑽探所在位置之網格範圍平均坡度代表之。

第一節 鑽探資料

本研究將收集之470處鑽探成果及869處土鑽調查成果，經逐一檢視及鑽探品質及資料完整性後，篩選具高品質鑽探405處與858處土鑽成果，前二者位置分布圖如7-1及圖7-2所示。

本研究進一步分析鑽探位置之地形特性，將現有鑽探圖區分為未擾動及已擾動案例，分別代表鑽探位置其是否位於前期崩塌地中。若邊坡已具有崩崖、滑動體等特徵，將之歸類於已擾動案例。

本研究綜整土鑽及鑽探成果繪成長條圖，進行比較如圖7-3所示。圖中可看出於土鑽資料中，厚度多小於1公尺，而1公尺以上之個數約佔33%。而在未擾動案例資料部分，1公尺以下資料則較少，大部分集中於11公尺以下。擾動案例資料，由於崩積層厚度通常較厚，大部分深度超過20公尺。



圖 7-1 405 處鑽探成果分布圖



圖 7-2 858 處土鑽成果分布圖

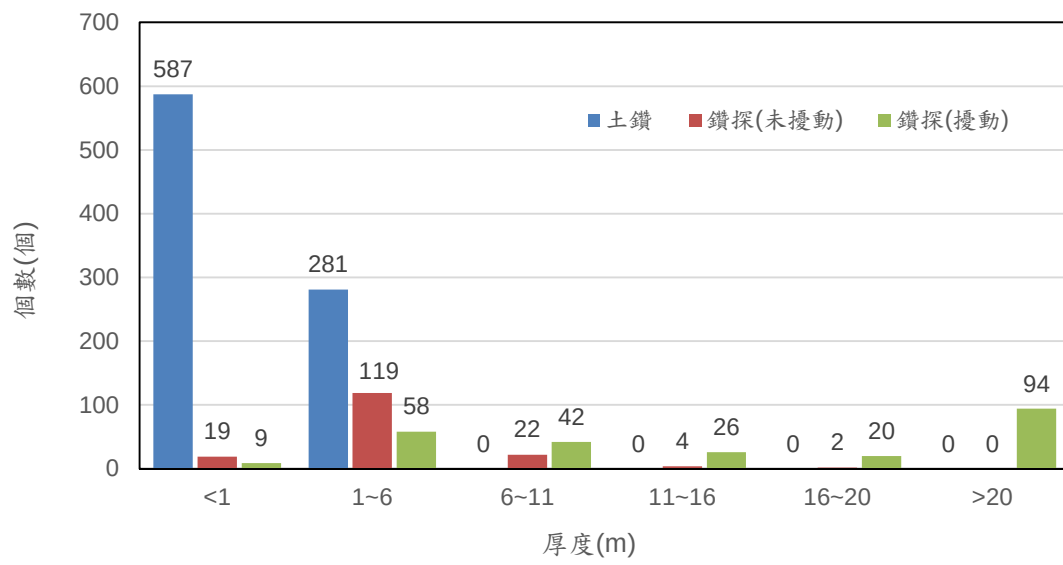


圖 7-3 土鑽及鑽探現調資料統計圖

第二節 坡度因子分析

一、全部案例坡度與土壤厚度分析

本文將鑽探全部案例之表土及崩積層厚度與坡度分布繪製成圖7-4。圖中顯示地形較平緩其表層及崩積層厚度較大，隨地形坡度增大，厚度有縮小之趨勢。但整體而言，崩積層厚度變異程度非常巨大，兩者關係趨勢不佳。

本研究另將收集之858處野外現地調查成果，萃取其表土及崩積層厚度與坡度資料，繪製成圖7-5及圖7-6。圖7-5為野外現地調查所在位置之5m*5m網格單元之土壤厚度與坡度分布圖；而圖7-6則為10m*10m網格之分析結果。

圖7-5中顯示土鑽試驗成果之分布狀況，因採樣能力關係土壤最深僅達5m，然主要土壤厚度多小於2公尺。而就坡度方面，主要土壤厚度分布於5度至50度間之地形。現調土壤地形較平緩其崩積層厚度較大，隨地形坡度增大，崩積層厚度有縮小之趨勢。

本研究建立土壤厚度與坡度整體分布趨勢線如藍色虛線所示，其 $y = -0.0141x + 1.3176$ 。 $R^2 = 0.0424$ 。 y 為土壤厚度(m)， x 為坡度(°)。總體趨勢為隨坡度增加，土壤厚度遞減。

另原地調所淹水計畫報告中，採用現地量測坡度與DEM網格坡度，兩坡度取平均坡度，而後再與土壤厚度建立建立一關係式。圖7-5中加入此關係式如圖中棕色虛線所示。比對兩趨勢線，顯示兩者趨勢相近，地調所關係公式估算之土壤厚度較大；但整體而言兩者推估土壤厚度之差異不大。

為比較分析網格面積大小對野外調查土壤厚度之影響，本研究分繪出5m網格(25m²)及10m網格(100m²)進行比較。圖7-6為 10m*10m網

格之分析結果。趨勢公式為 $y = -0.0166x + 1.3779$ ， $R^2 = 0.0552$ 。y 為土壤厚度(m)，x 為坡度($^\circ$)。圖中另繪出地調所之趨勢線(棕色線)及 5*5m 網格之趨勢線(藍色線)。結果顯示 10m 網格所建立之土壤厚度與坡度之關係，與 5m 網格結果甚為相近。總體趨勢為隨坡度增加，土壤厚度遞減。

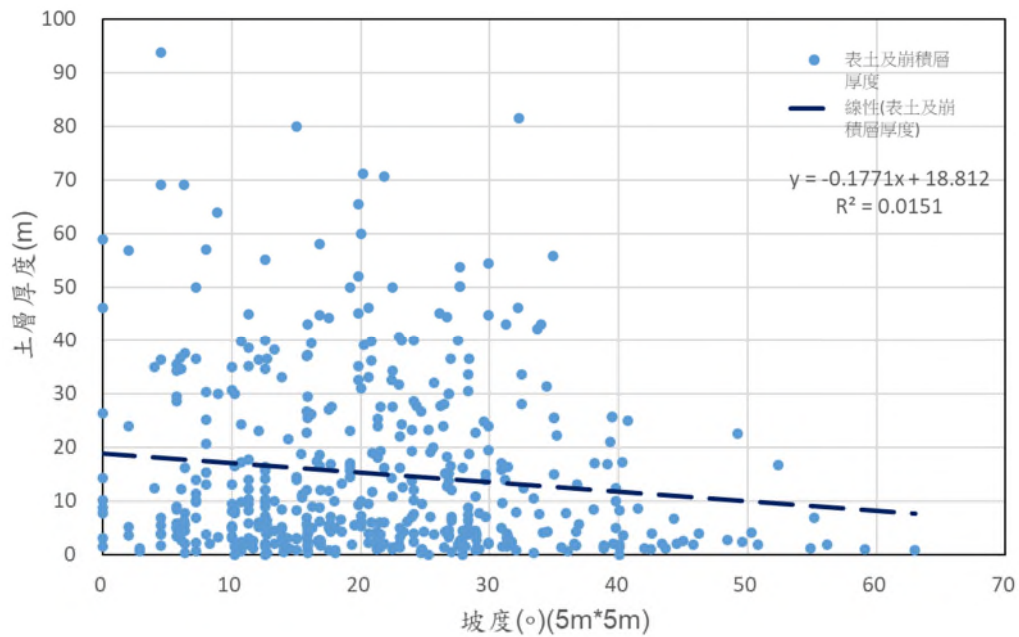


圖 7-4 鑽探全部案例表土及崩積層厚度與坡度分布圖

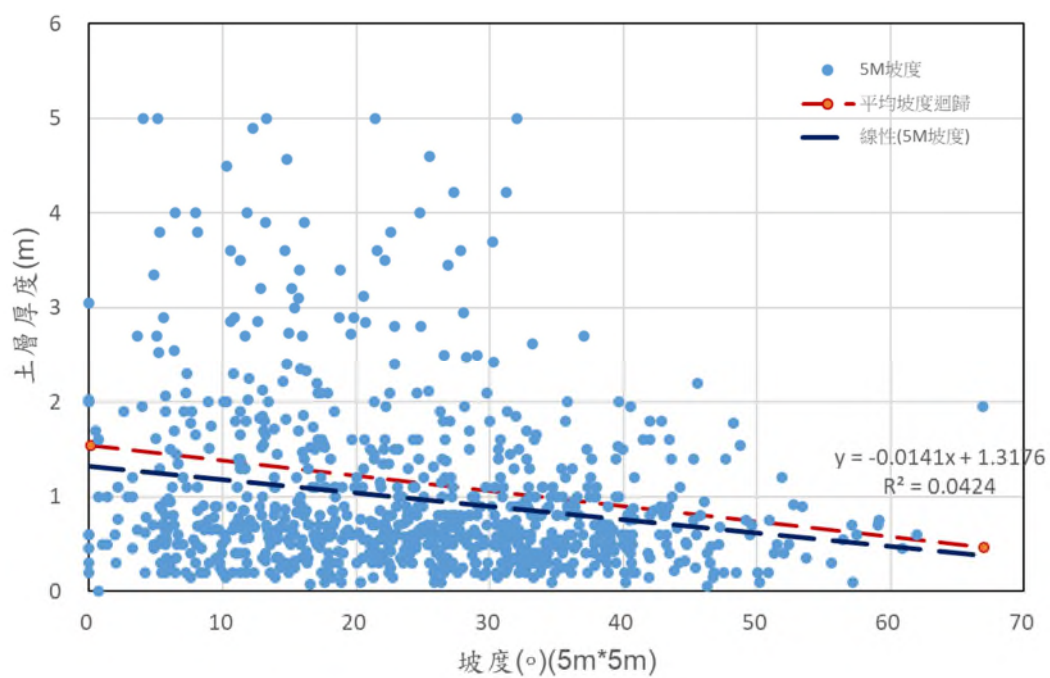


圖 7-5 土壤厚度與坡度(5m*5m)分布關係

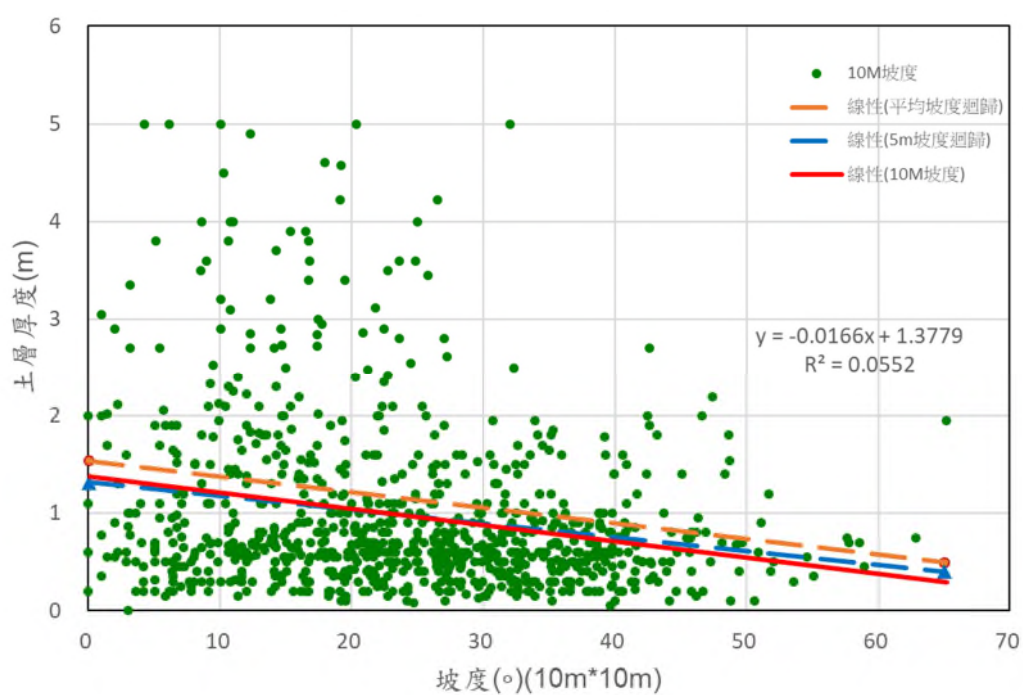


圖 7-6 土壤厚度與坡度(10m*10m)分布關係

二、未擾動及擾動案例坡度因子分析

本研究將現有鑽探資料區分為未擾動(156)及擾動(249)案例二類型。未擾動案例與土鑽成果合併分析。圖 7-7 及圖 7-8 分別顯示二類案例之表土及崩積層厚度與坡度分布狀況。

圖 7-7 顯示未擾動及土鑽案例表層厚度，隨形坡度增加而稍有減少，其厚度未擾動部分主要分布於 6 公尺以下，最深達近 10 公尺，平均厚度約為 3.5 公尺。土鑽部分主要分布於 2 公尺以下，最深達近 5 公尺，平均厚度約為 1.2 至 0.2 公尺。

圖 7-8 擾動崩塌地之崩積層厚度與坡度分布關係。其雖也具有崩積層厚度隨坡度增加而下降之趨勢，但厚度可由數米變動至 80 公尺之深度，此一結果於實務上無法應用，將再進一步研究。

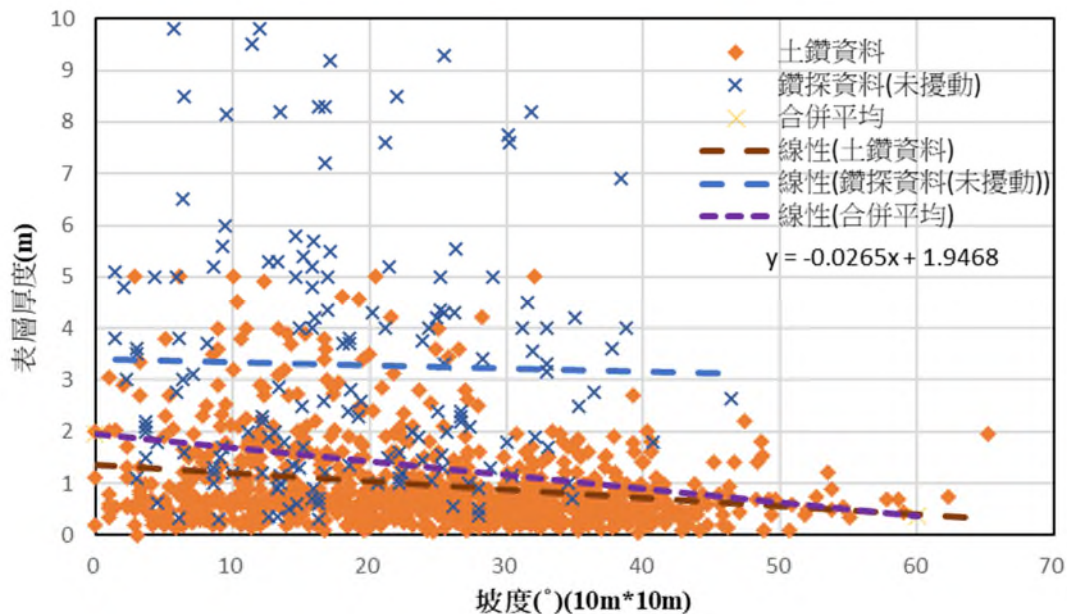


圖 7-7 未擾動及土鑽案例之表土及崩積層厚度與坡度分布圖

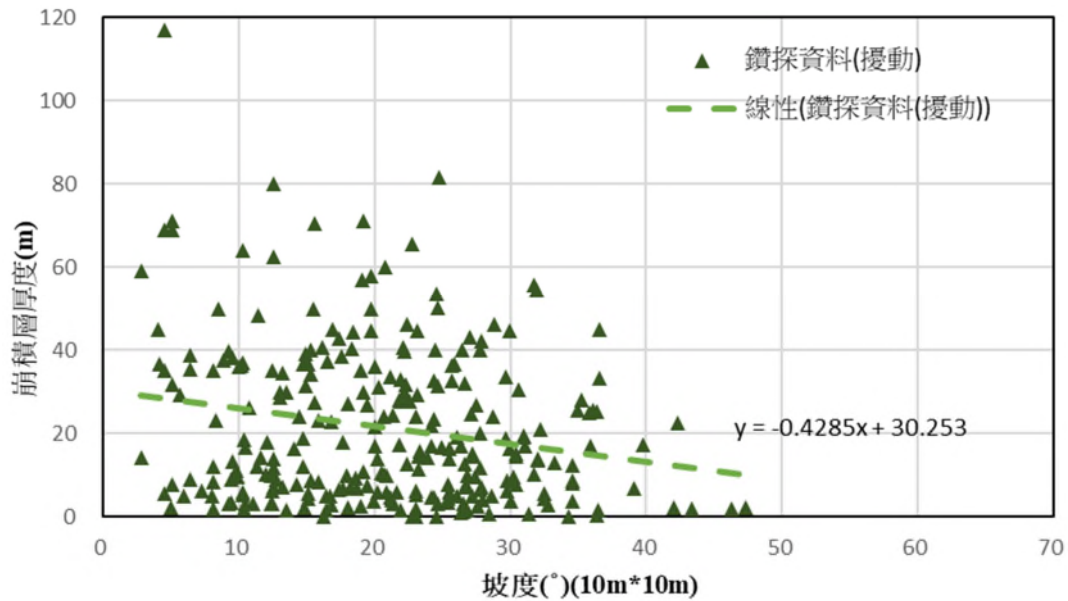


圖 7-8 已擾動案例之土及崩積層厚度與坡度分布圖

本研究進一步針對未擾動案例各坡度之最大厚度及平均厚度與坡度之關係進行分析。圖 7-9 為未擾動案例各坡度之最大厚度與坡度之關係。由圖中得出之趨勢線如紅色虛線，其關係式為 $y = -0.0553x + 3.9384$ 。 $R^2 = 0.5119$ 。隨坡度 0 度增加至 60 度，最大土壤厚度約由 4 公尺漸變至 0.6 公尺。顯著受地形坡度影響。

圖 7-10 為未擾動土層各坡度之平均厚度與坡度之關係，圖中得出之趨勢線如紅色虛線所示，其關係式為 $y = -0.0091x + 1.117$ 。 $R^2 = 0.2982$ 。隨坡度 0 度增加至 60 度，平均土壤厚度約由 1.1 公尺漸變至 0.6 公尺。

比對二圖可看出，總體趨勢也皆為隨坡度增加，土壤厚度遞減，但兩者得出之厚度仍有差異，且各坡度之土壤厚度與地形坡度之關係較不顯著。

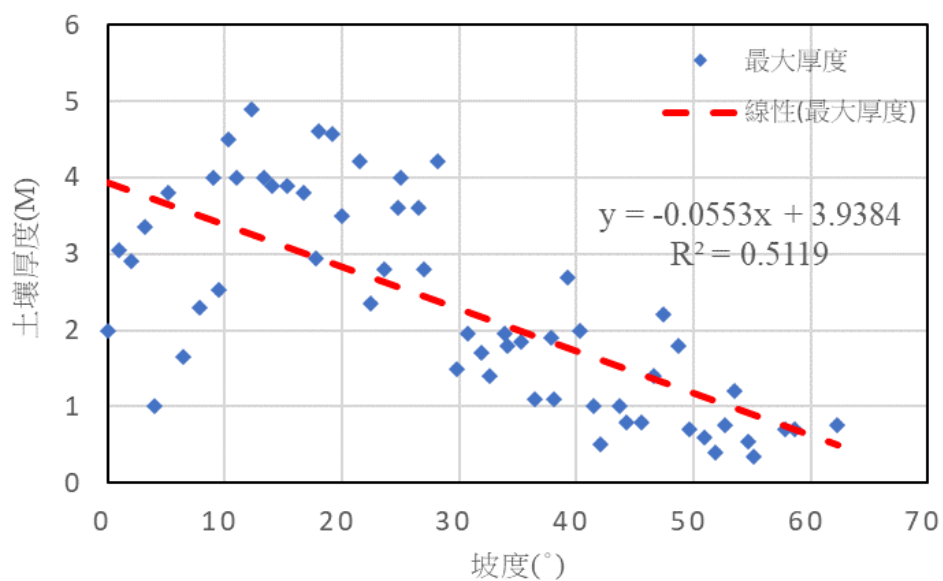


圖 7-9 未擾動案例各坡度之最大土壤厚度與坡度之關係

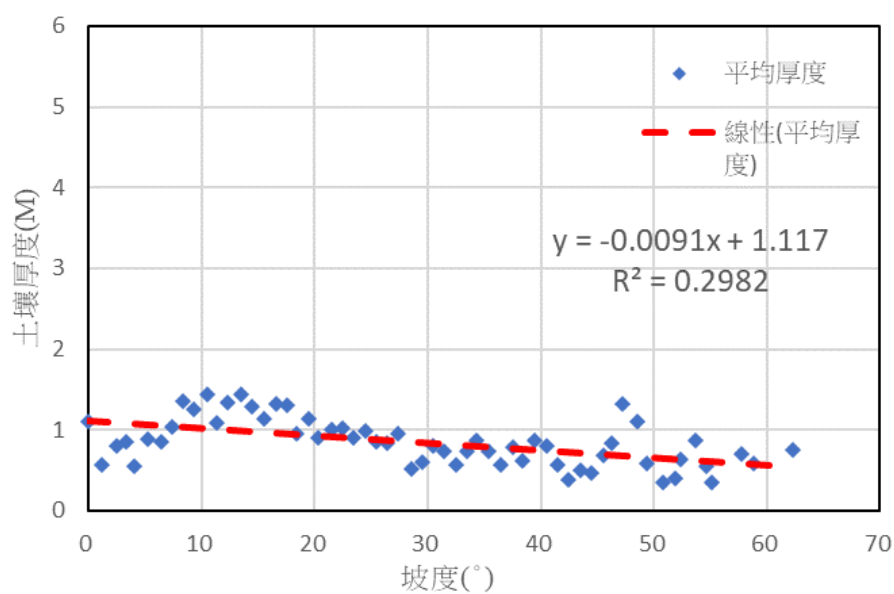


圖 7-10 未擾動案例各坡度之平均土壤厚度與坡度之關係

第三節 地質因子分析

由於坡度因子分析結果關係趨勢不佳，因此採用第二進行分析。本研究之鑽孔位置分布台灣全島，若想將其有效分類，地質條件將成為一個重要因素，因此在這方面本研究將依照鑽孔位置將其分為三大地質區，分別為西部麓山帶(新第三紀沉積盆地)、中央山脈西翼雪山山脈和脊樑山脈帶(第三紀亞變質岩)及海岸山脈地質區(新第三紀火山岩)。

● 未擾動及土鑽案例分析

未擾動及土鑽案例分析如圖 7-11 至圖 7-13 所示。三者皆採用淺層崩塌定義，不安定土方之最大深度取 5m 進行分析。分析結果可看出，三地質區於坡度為 0 度時之表層厚度皆大致為 2 公尺，且隨坡度增加厚度越小。其中西部麓山帶(沉積岩)與中央山脈西翼(變質岩)之趨勢甚為相似，如圖 7-14 所示，其關係式為 $y = -0.0248x + 1.8863$ 。另於坡度介於 20 至 40 度時，沉積岩及變質岩之厚度皆大約介於 1 公尺，而海岸山脈地質區之表土深度小於 1 公尺。

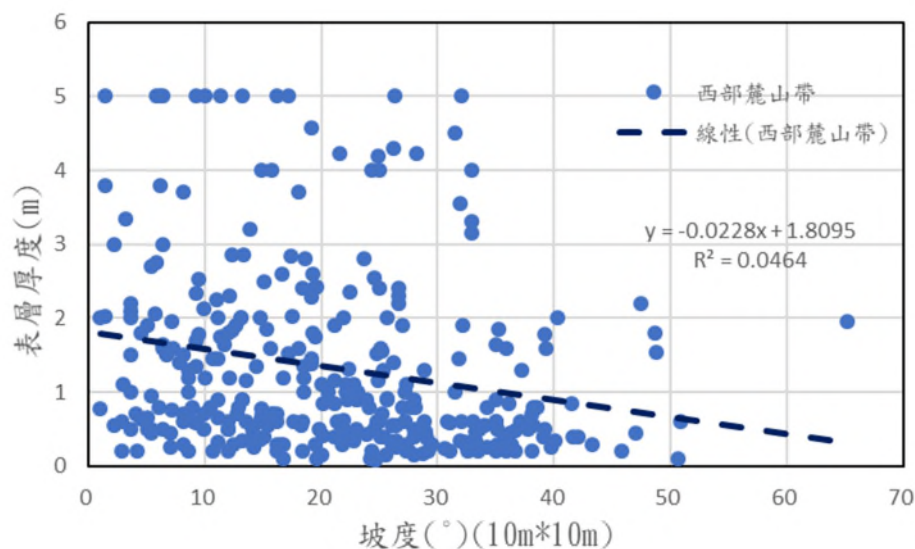


圖 7-11 西部麓山帶(新第三紀沉積盆地)表層厚度與坡度分布圖

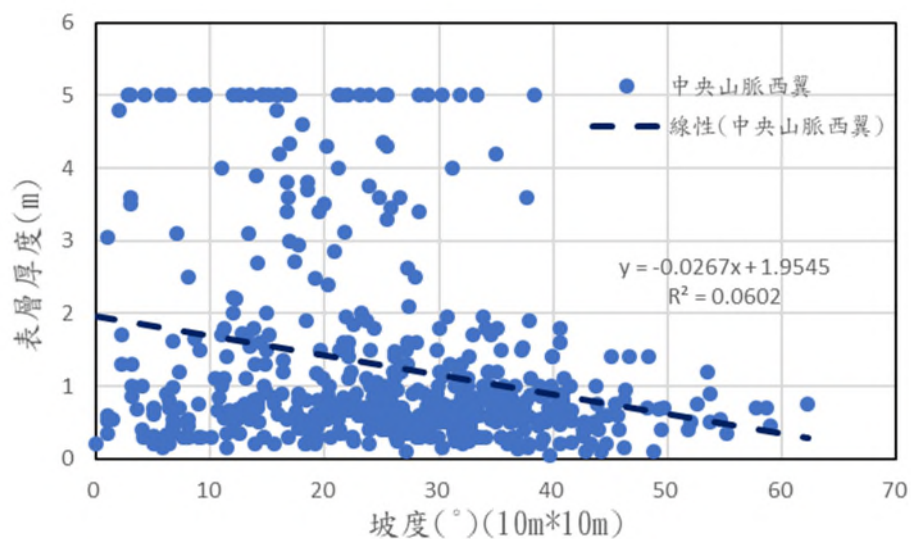


圖 7-12 中央山脈西翼 (第三紀亞變質岩)表層厚度與坡度分布圖

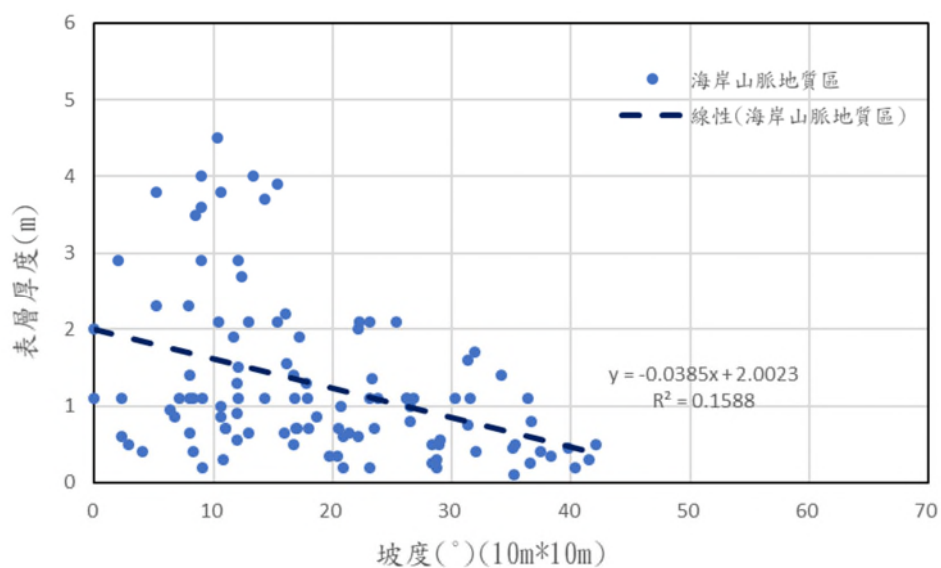


圖 7-13 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩)表層厚度與坡度分布圖

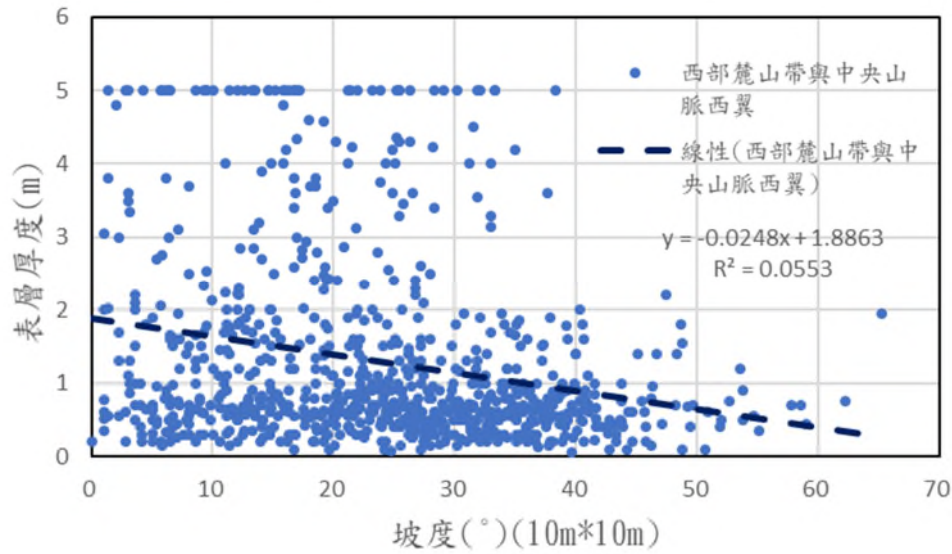


圖 7-14 西部麓山帶與中央山脈西翼線性回歸圖

● 擾動案例分析

擾動案例分析如圖 7-15 至圖 7-17 所示。三者皆採用淺層崩塌定義，不安定土方之最大深度取 5m 進行分析。圖中可看出各地質區在坡度為 0 度時之崩積層厚度皆不同，於西部麓山帶(沉積岩)之厚度大約為 4.6 公尺，中央山脈西翼(變質岩)之厚度接近 5 公尺，海岸山脈地質區(火成岩)之厚度則約為 4.5 公尺。三者雖皆有隨坡度增加厚度越小之趨勢，惟沉積岩及火成岩在坡度 30 度以上之資料缺乏，造成趨勢不明顯，因此這部分還有待確認。

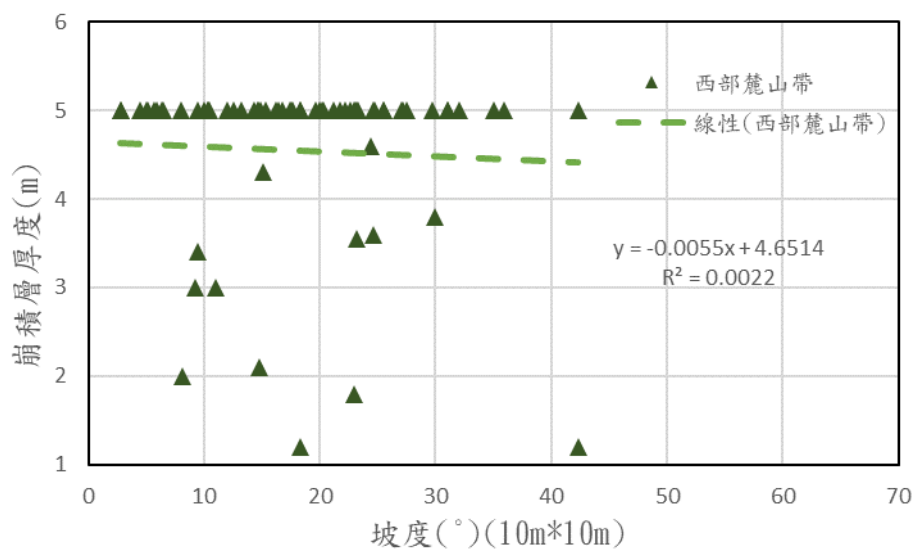


圖 7-15 西部麓山帶(新第三紀沉積盆地)崩積層厚度與坡度分布圖

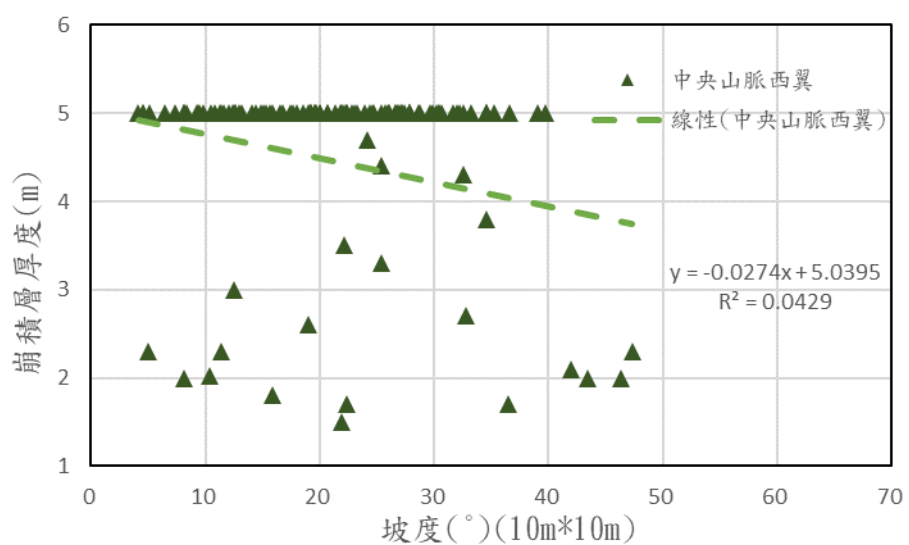


圖 7-16 中央山脈西翼 (第三紀亞變質岩)崩積層厚度與坡度分布圖

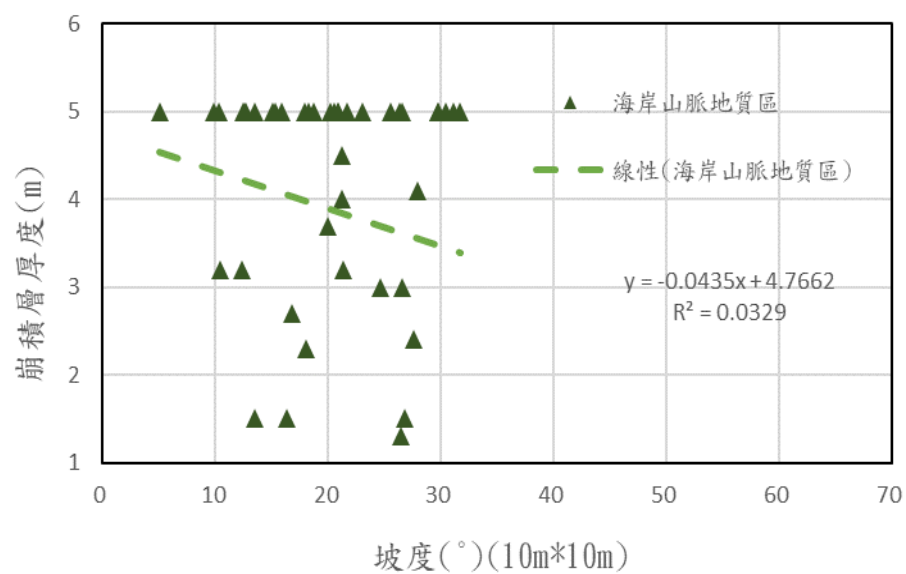


圖 7-17 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩)崩積層厚度與坡度分布圖

第四節 區位因子分析

本研究針對區位與土層深度間之關係進行討論，將未擾動坡面依邊坡型態分為三等分，而在擾動土層部分，本研究則依大規模崩塌地形形態，將資料分為頭部、坡體及坡腳三部分進行分析。

● 未擾動及土鑽案例分析

未擾動案例之坡頂、坡腹及坡腳三區位分析成果如圖 7-18 至圖 7-20 所示。三者皆採用淺層崩塌定義，不安定土方之最大深度取 5m 進行分析。圖 7-18 坡頂部分可看出，厚度隨坡度的增加減少。在坡度 0 度時表層厚度為三個區位中最高，達約 3.2 公尺，其次依序為坡腹 2.1 公尺及坡腳 1.2 公尺。而在坡度 20 至 40 度的部分，坡頂的位置大約為 2.5 至 1.7 公尺，坡腹為 1.5 至 0.8 公尺，坡腳則為 1 至 0.8 公尺。

本研究也另外使用 5 公尺以下之厚度進行分析，得出各區位之迴歸結果仍有所差異，可看出區位的不同對土層厚度有所影響。

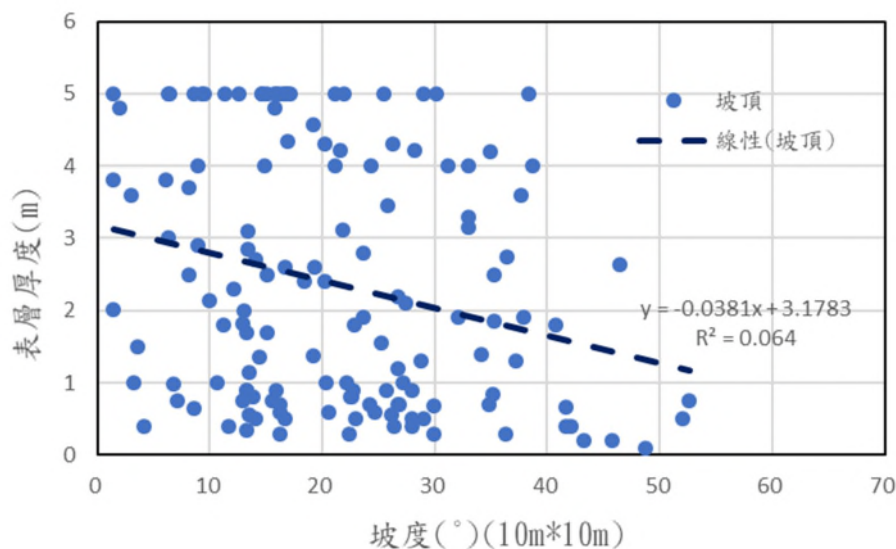


圖 7-18 坡頂之表層厚度與坡度分布圖

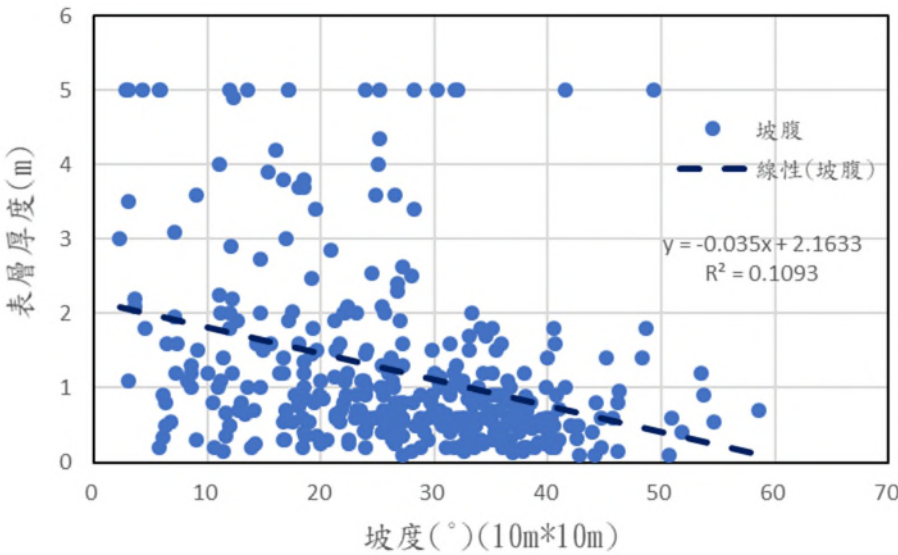


圖 7-19 坡腹之表層厚度與坡度分布圖

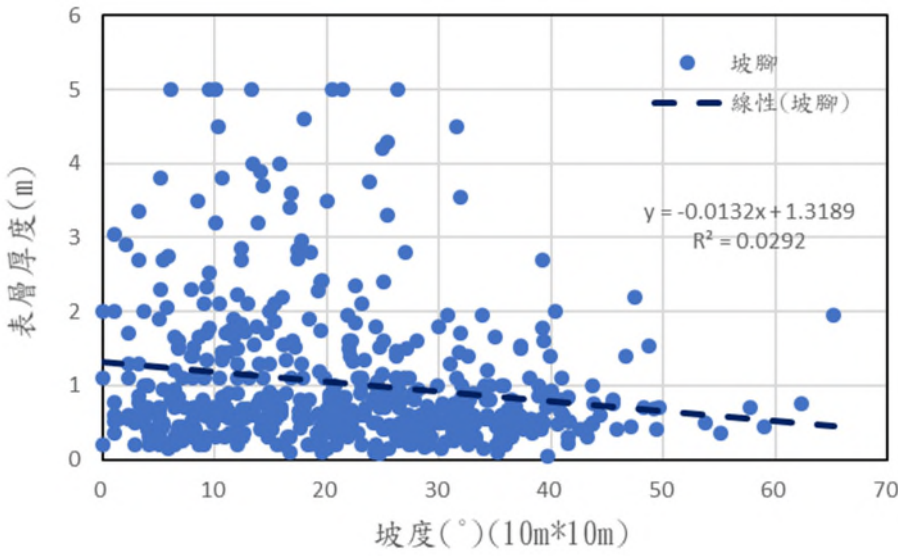


圖 7-20 坡腳之表層厚度與坡度分布圖

● 擾動案例分析

擾動案例之頭部、坡體及坡腳三區位分析成果如圖 7-21 至圖 7-23 所示。三種區位皆採用淺層崩塌定義，不安定土方之最大深度取 5m 進行分析。由三圖中可看出區位位於頭部及坡腳處，在坡度 5 度時，厚度約為 4.5 公尺，20 至 40 度時約為 4 至 4.5 公尺。可看出頭部之厚度變化較不明顯，而坡體及坡腳皆有隨坡度增加厚度減少之趨勢。

另僅取 5 公尺以下厚度分析發現，坡腳處之後度為三者中最高，其次為坡體和頭部，並且坡腳處之厚度與坡度的變化相較於另外兩者不甚明顯。

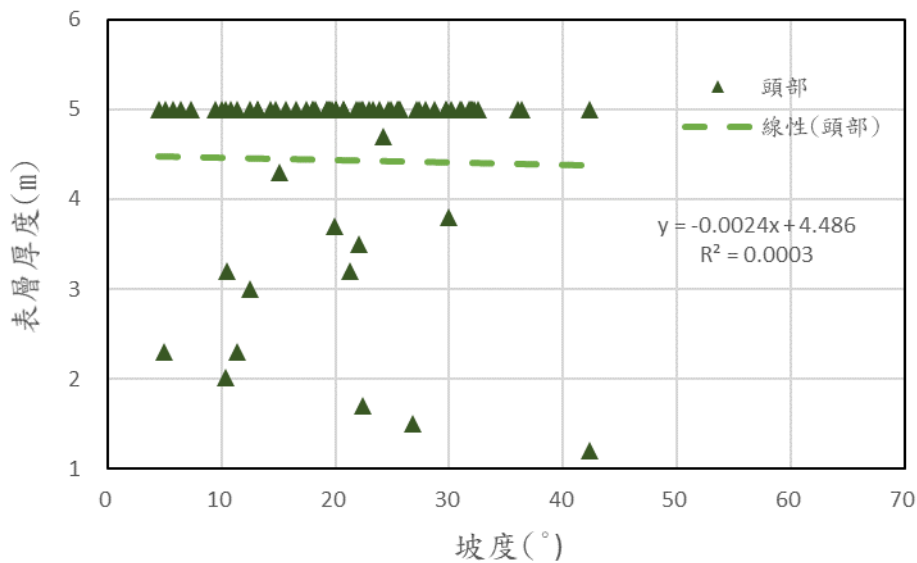


圖 7-21 頭部之崩積層厚度與坡度分布圖

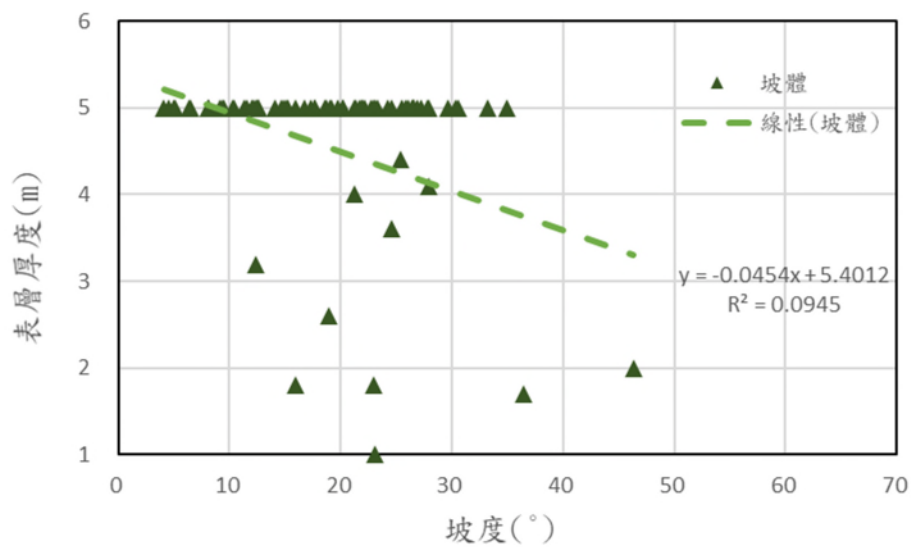


圖 7-22 坡體之崩積層厚度與坡度分布圖

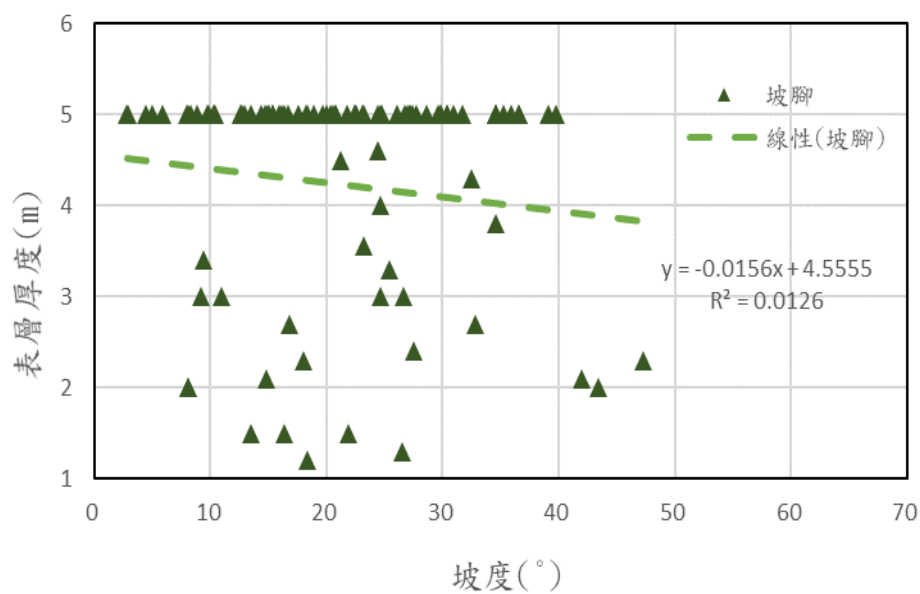


圖 7-23 坡腳之崩積層厚度與坡度分布圖

第五節 地形曲率因子分析

本研究針對未擾動地層水平曲率因子與表土及崩積層厚度之分布進行分析。地形曲率因子採鑽探所在位置，取 5*5m 之平均曲率，同時分別針對水平曲率與垂直曲率，取對數曲率進行分析。

圖 7-24 及圖 7-25 為水平對數曲率分析結果，圖 7-26 及圖 7-27 為垂直對數曲率分析結果。雖分別為水平向及垂直向，但兩向之土壤厚度與曲率之分布關係相當類似。

水平對數曲率分析結果，圖中可看野外調查地點之地形多位於水平對數曲率之 0.5 至 3 間，地形之正(凸形)或負值水平曲率(凹形)與表土及崩積層厚度之關係，兩者相似較為明顯。

垂直對數曲率分析結果，圖中可看野外調查地點之地形多位於水平對數曲率之 0.2 至 2 間，地形之正(凸形)或負值水平曲率(凹形)與表土及崩積層厚度之關係，兩者相似較為明顯。

當水平曲率越大，土壤厚度也越小；垂直向地形亦有類似趨勢。總體而言，表土及崩積層厚度與地形曲率因子無明顯趨勢關係。

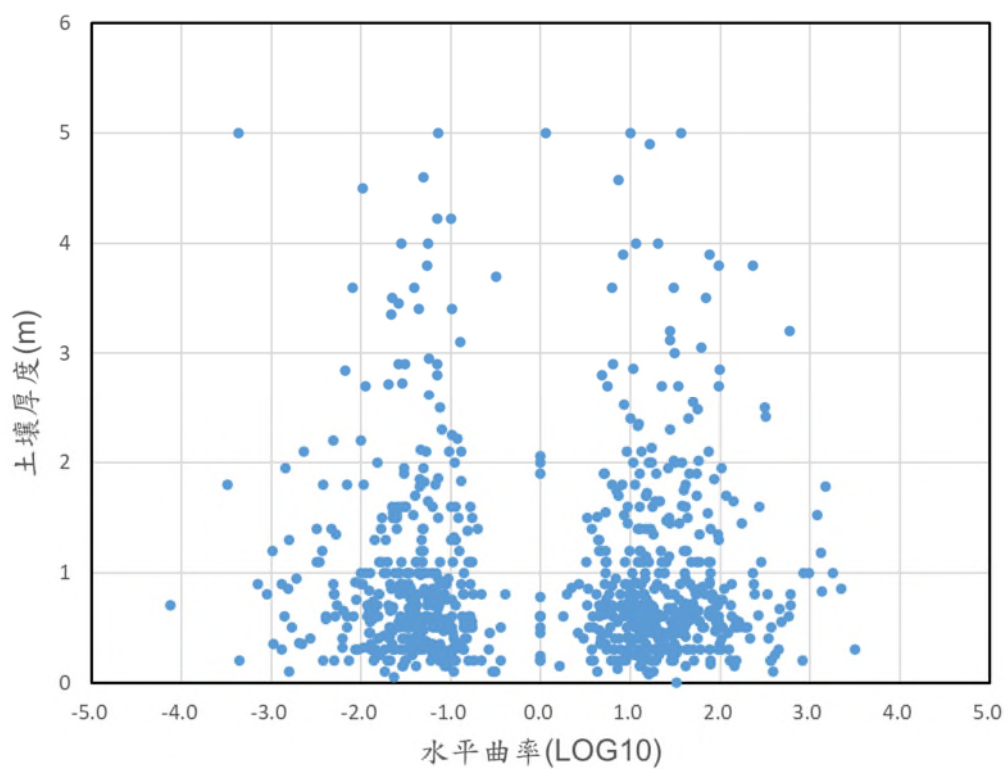


圖 7-24 水平曲率因子與表土及崩積層厚度之分布狀況

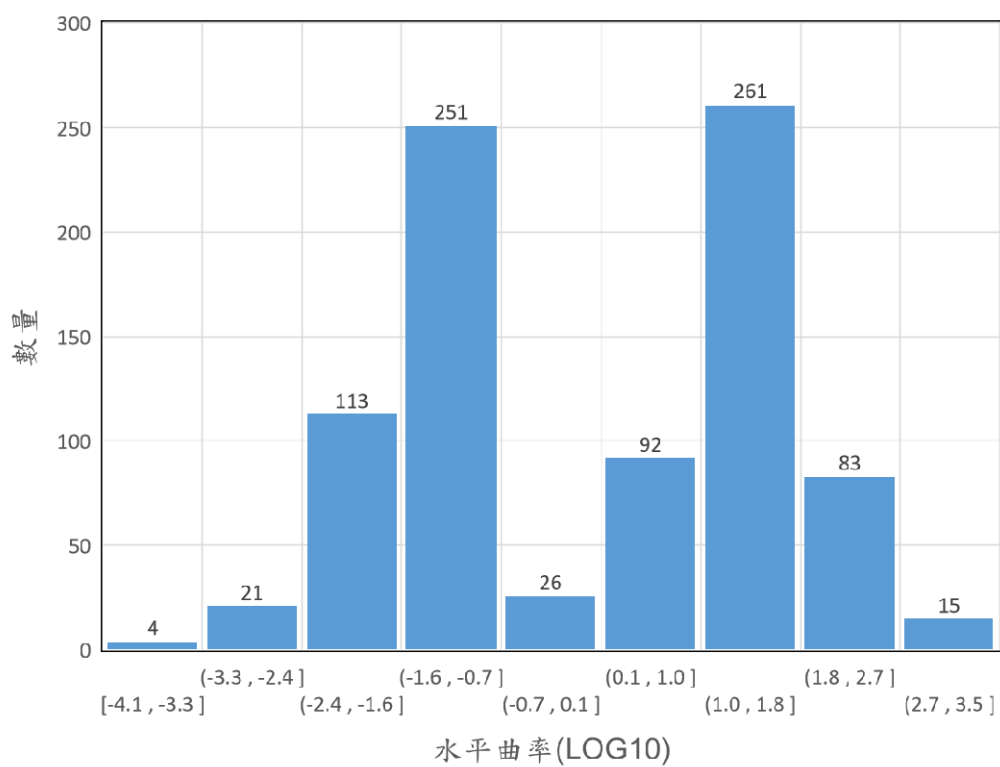


圖 7-25 水平曲率因子與表土及崩積層厚度之統計

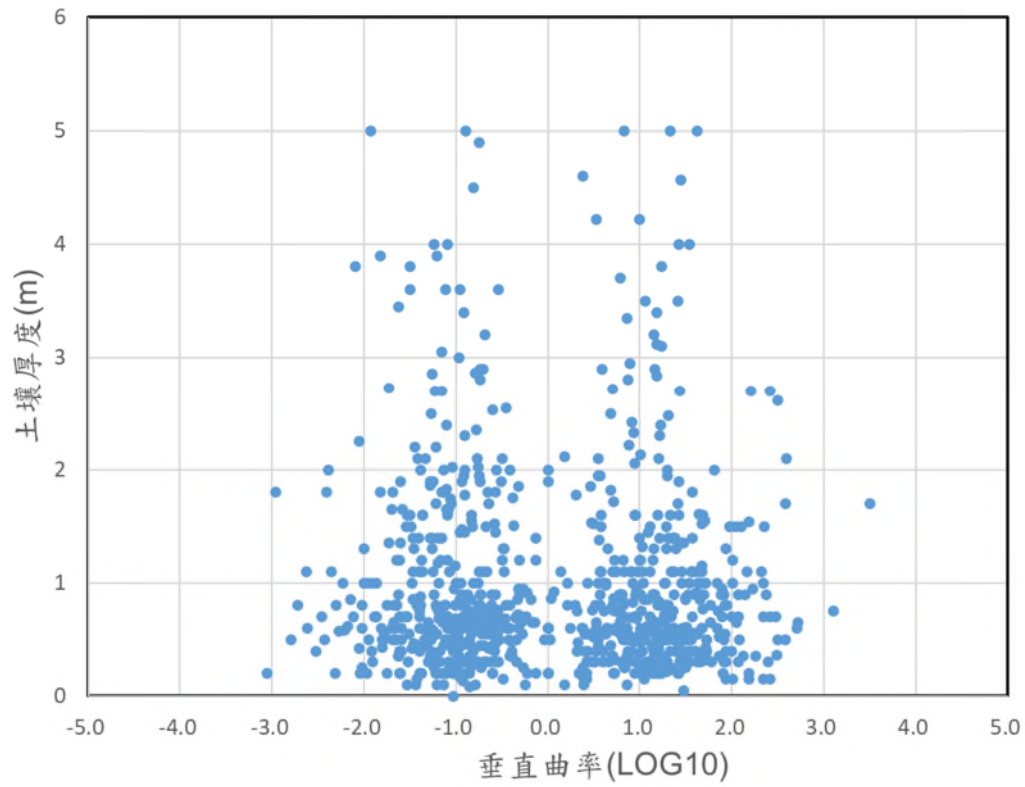


圖 7-26 垂直曲率因子與表土及崩積層厚度之分布狀況

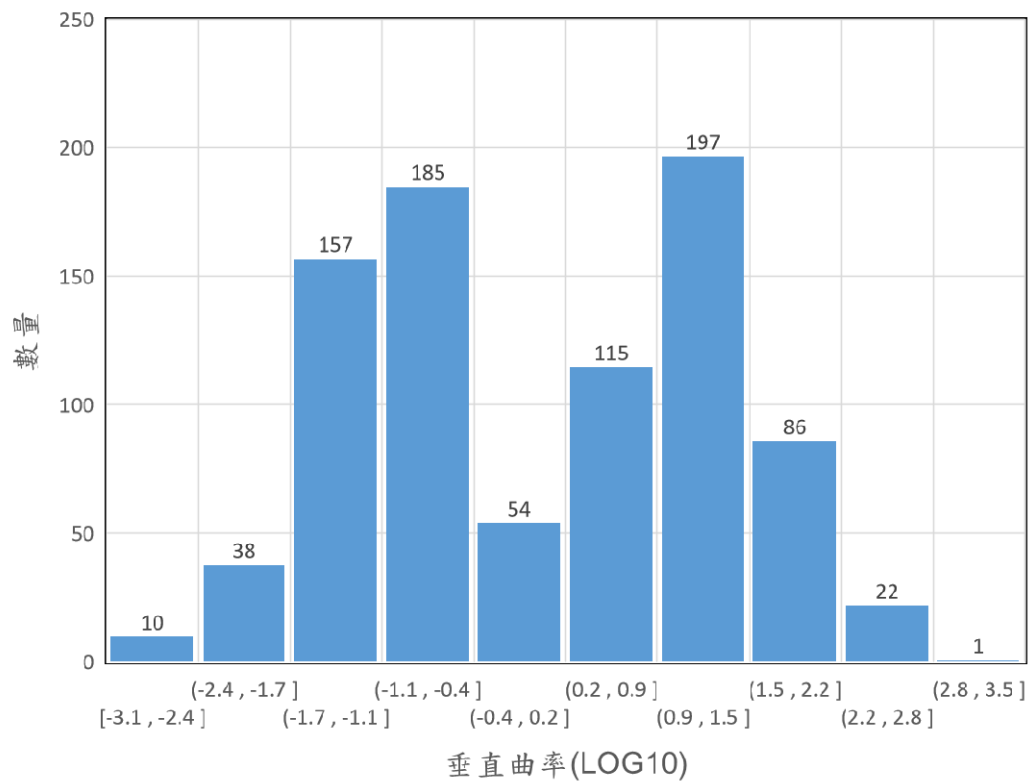


圖 7-27 垂直曲率因子與表土及崩積層厚度之統計

第八章 建立坡面表土及崩積層厚度推估模式

第一節 建立坡面表土及崩積層厚度推估模式

本研究建立坡面表土及崩積層厚度推估模式之目的，為將應用於淺層崩塌之崩塌厚度推估。然依定義淺層崩塌之崩塌厚度大多不超過 5 公尺，因此本研究針對擾動及未擾動(含土鑽試驗)案例資料，另繪出厚度 5 公尺以下之土壤厚度(或可視為不安定土方之深度)與坡度關係之迴歸線。未擾動土層案例部分因與實際值差距不大因此採用全部案例之平均厚度。而擾動案例部分，厚度差距較大，因此採用 5 公尺以下之土壤厚度與坡度關係迴歸線進行後續分析。

一、 由地質分區

● 未擾動區域部分:

西部麓山帶(新第三紀沉積盆地)與中央山脈西翼(第三紀亞變質岩)雖地質構造不同，但於分析結果得出兩者線性迴歸值相當相似。因此本研究將西部麓山帶(沉積岩)與中央山脈西翼(變質岩)歸類為一個迴歸關係。得出：

1. 西部麓山帶(沉積岩)與中央山脈西翼: $y = -0.0248x + 1.8863$
2. 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩): $y = -0.0385x + 2.0023$

● 擾動區域部分

因三種地質構造之分析結果皆有所差距，因此本研究將區分為三種迴歸公式，分別為：

1. 西部麓山帶(新第三紀沉積盆地): $y = -0.00055x + 4.6514$

2. 中央山脈西翼(第三紀亞變質岩): $y = -0.0274x + 5.0395$
3. 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩): $y = -0.0435x + 4.7662$

二、由區位分區

由分析成果顯示 5m 內之土壤厚度(或可視為不安定土方之深度)與坡度關係分析結果。可看出不論是擾動或未擾動區域，各區位得出之迴歸線皆有所差異，其迴歸公式如下：

● 未擾動區域部分：

1. 坡頂處: $y = -0.0381x + 3.1783$
2. 坡腹處: $y = -0.035x + 2.1633$
3. 坡腳處: $y = -0.0132x + 1.3189$

● 擾動區域部分

1. 頭部: $y = -0.0024x + 4.486$
2. 坡體: $y = -0.0454x + 5.4012$
3. 坡腳: $y = -0.0156x + 4.5555$

其中， y 為土壤(不安定土方)厚度， x 為坡面坡度。

第二節 小規模崩塌之地形特性分析

前節研究成果期冀未來研究成果應用於淺層崩塌之量體評估，因此於此淺層崩塌事件進行分析。本文針對 2009 莫拉克颱風事件高屏溪小規模崩塌數量分布圖 8-1 長條圖所示，圖中顯示約 70% 的崩塌變異點面積為小於 0.5 公頃，約 27% 之崩塌面積介於 0.5 至 3 公頃。結果顯示颱風引致的崩塌案例，主要為 3 公頃以下。

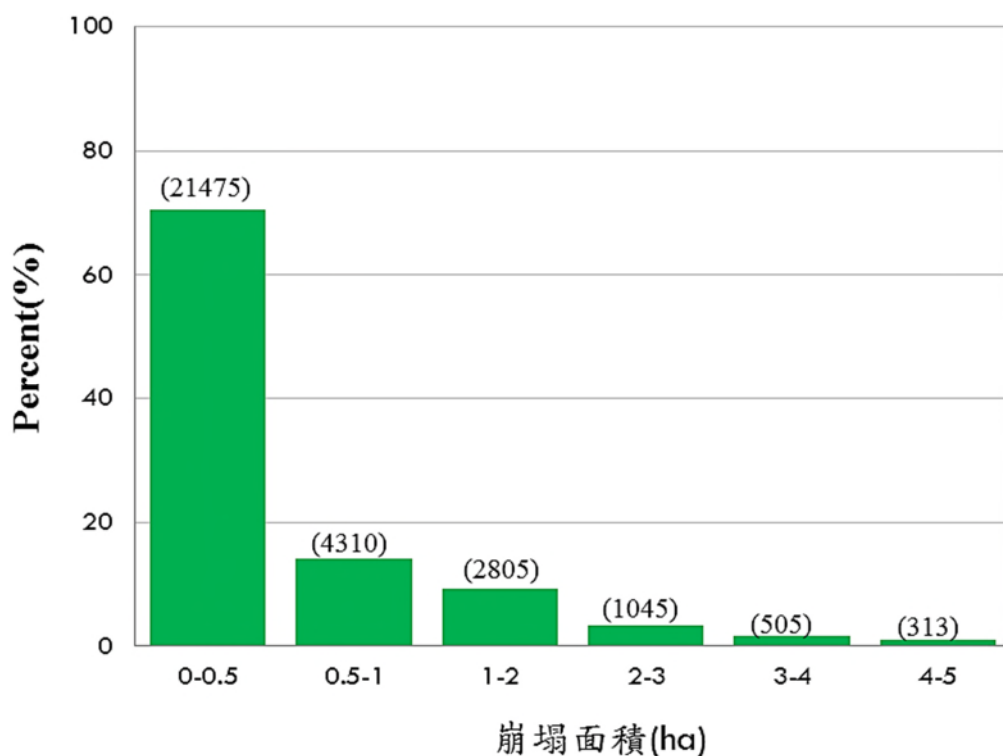


圖 8-1 莫拉克颱風事件高屏溪小規模崩塌數量分布圖(<5 公頃)

本研究進一步篩選與坡面型土石流較相關之崩塌地，崩塌面積 500 m² 至 30,000 m² (3 公頃) 之變異點，進行坡度分析如圖 8-2 所示。圖小規模崩塌與地形坡度之關係(4m DEM 網格)所示，超過 80% 以上的崩塌面積(網格)超過坡度 30 度，約 17% 之崩塌面積介於 15 至 30 度間，顯示淺層崩塌(或小規模崩塌)與坡度高度相關，坡度大於 15 度以上其崩塌之趨勢方逐漸升高，而主要崩塌則位於坡度大於 30 度之

坡面。

應用前節推估公式估計該表層不安定表土層厚度，以坡度 15 及 30 度帶入，計算之未擾動區表層不安定土壤厚度約為 1.58 公尺與 1.16 公尺。若於擾動區域，其表層不安定土壤厚度則約 2.50 公尺與 2.48 公尺。

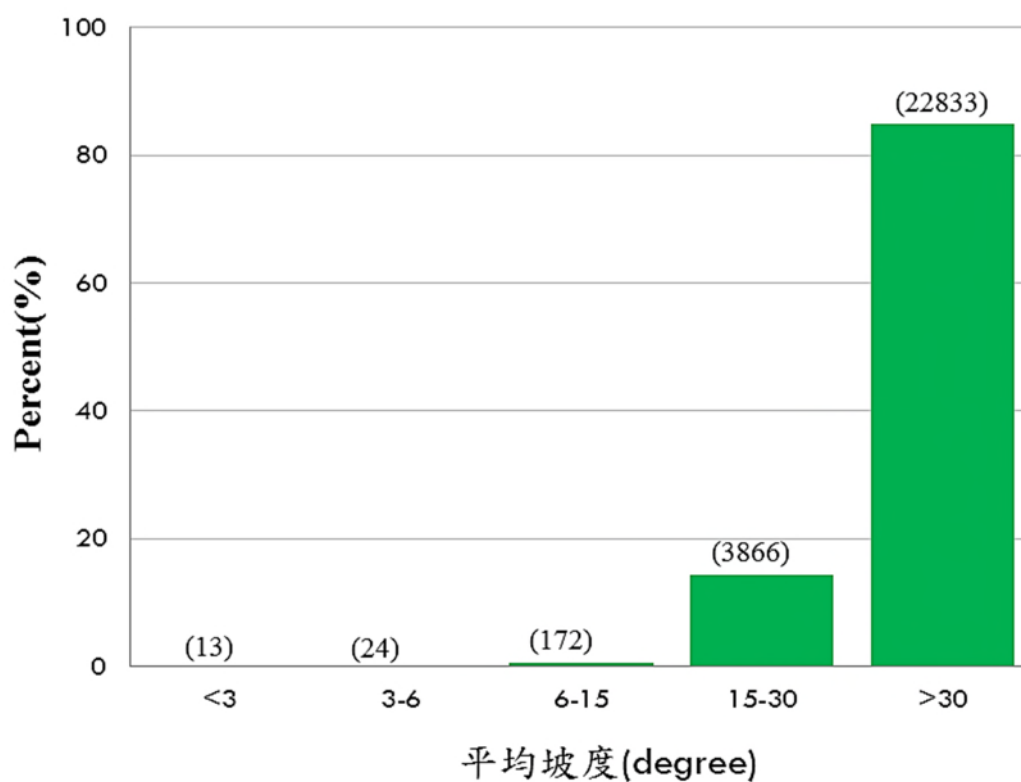


圖 8-2 小規模崩塌與地形坡度之關係(DEM 4m 網格)

第九章 結論

本研究完成建立工程探勘資料收集及資料庫，研發 UAV 調查崩塌區及坑溝表土及崩積層厚度之技術，建立坡面表土及崩積層厚度推估模式，精進坡面型土石流啟動之崩塌地形及量體評估模式，可供勘定坡面型土石流高潛勢區域，提供相關單位之防災預警參據及風險分析應用。結論如下：

1. 本計畫蒐集彙整水保局、地調所、林務局農試所土壤深度調查、中興顧問社、青山工程顧問公司等單位之探勘資料。共計 470 孔鑽探柱狀圖資料，土壤厚度野外調查 869 處現調資料，經逐一檢視，確認可用於分析 405 孔鑽探與 858 處土壤厚度野外調查。
2. 本計畫另收集林務局農試所「山坡地土地利用限度調查」資料庫資料。本研究選用 200 個點位真實鑽孔資料與山坡地土地利用限度調查資料進行比對，比對結果發現吻合率僅達 27%，相符程度不佳。
3. 本計畫研發適合研究計畫尺度之簡易 UAS 量測崩塌源頭表土及崩積層厚度之方法，建立像素與厚度之校正公式，誤差約在 10cm/1m 以內。
4. 綜合分析土鑽資料中，其土壤厚度多小於 2 公尺，而 1 公尺以上之個數約僅佔 33%。而在地質鑽探之未擾動案例資料部分，1 公尺以下資料則較少，大部分集中於 11 公尺以下；擾動案例資料，由於崩積層厚度通常較厚，大部分深度超過 20 公尺。
5. 本研究建立土鑽資料之土壤厚度與坡度關係式， $y = -0.0141x + 1.3176$ ， $R^2 = 0.0424$ 。y 為土壤厚度(m)，x 為坡度(°)。總體趨勢

為隨坡度增加，土壤厚度遞減。

6. 本研究將現有鑽探資料區分為未擾動(156)及擾動(249)案例二類型，未擾動案例與土鑽成果合併分析。未擾動及土鑽案例表層厚度，隨形坡度增加而稍有減少，其厚度未擾動部分主要分布於 6 公尺以下，最深達近 10 公尺，平均厚度約為 3.5 公尺。
7. 擾動崩塌地之崩積層厚度與坡度分布關係。其雖也具有崩積層厚度隨坡度增加而下降之趨勢，但厚度可由數米變動至 80 公尺之深度，此一結果於實務上無法應用。本研究基於淺層崩塌之定義，其崩塌厚度大多不超過 5 公尺，另以厚度 5 公尺為限，建立土壤厚度(或可視為不安定土方之深度)與坡度關係之迴歸線。
8. 本研究建立坡面表土及崩積層厚度推估模式，其式中， y 為土壤(不安定土方)厚度， x 為坡面坡度。分析成果如次。

一、由地質分區

● 未擾動區域部分:

西部麓山帶(新第三紀沉積盆地)與中央山脈西翼(第三紀亞變質岩)雖地質構造不同，但於分析結果得出兩者線性迴歸值相當相似。因此本研究將西部麓山帶(沉積岩)與中央山脈西翼(變質岩)歸類為一個迴歸關係。得出:

1. 西部麓山帶與中央山脈西翼: $y = -0.0248x + 1.8863$

2. 海岸山脈地質區: $y = -0.0385x + 2.0023$ 。

● 擾動區域部分

因三種地質構造之分析結果皆有所差距，因此本研究將區分為三種迴歸公式，分別為:

1. 西部麓山帶(新第三紀沉積盆地): $y = -0.00055x + 4.6514$
2. 中央山脈西翼(第三紀亞變質岩): $y = -0.0274x + 5.0395$
3. 海岸山脈地質區(新第三紀火山岩): $y = -0.0435x + 4.7662$

二、由區位分區

由分析成果顯示 5m 內之土壤厚度(或可視為不安定土方之深度)與坡度關係分析結果。可看出不論是擾動或未擾動區域，各區位得出之迴歸線皆有所差異，其迴歸公式如下：

● 未擾動區域部分：

1. 坡頂處: $y = -0.0381x + 3.1783$
2. 坡腹處: $y = -0.035x + 2.1633$
3. 坡腳處: $y = -0.0132x + 1.3189$

● 擾動區域部分

1. 頭部: $y = -0.0024x + 4.486$
2. 坡體: $y = -0.0454x + 5.4012$
3. 坡腳: $y = -0.0156x + 4.5555$

參考文獻

1. 王振宇，坡面型土石流判勢準則與地形演化作用，碩士論文，國立屏東科技大學，水土保持研究所，屏東，2012。
2. 王隆昌，溪頭地區坡地型土石流地形及發生特性研究，碩士論文，國立成功大學，地球科學研究所，臺南，2005。
3. 呂岡侃，徐美玲，「南投縣九九峰土石流發生區之地形特徵」，地理學報，第 38期，第 1-16頁，2004。
4. 何明憲，臺灣中部災區坡地型土石流發生特性之研究，碩士論文，國立臺灣大學，土木工程學研究所，臺北，2003。
5. 行政院農業委員會水土保持局，桃芝颱風災區土石流災害潛勢分析成果報告，2001。
6. 經濟部中央地質調查所，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置 第1期— 集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫，2007。
7. 經濟部中央地質調查所，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置 第 2 期—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(1/3)，2008。
8. 經濟部中央地質調查所，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置 第 2 期—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2/3)，2009。
9. 經濟部中央地質調查所，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置 第 2 期—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(3/3)，2010。
10. 李錫堤，「山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望」，臺灣公共工程學刊 第五卷 第一期，第1-29頁，2009。
11. 林美聆，陳天健，「研修土石流潛勢溪流影響範圍劃設方法」，農業委員會水土保持局研究報告，2010。

12. 林美聆、陳天健，王國隆，機率化土石流潛勢溪流影響範圍劃設與分析，農委會水土保持局，2011。
13. 林美聆，陳天健，洪鳳儀，王國隆，賴達倫，陳有蘭溪流域示範區土石流溪流潛勢分析方法，防災國家型科技計畫九十年度成果報告，2001。
14. 林慶偉、謝正倫與王文能，“集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響。”，臺灣之活動斷層與地震災害研討會，124-134頁，2002。
15. 游繁結，吳仁明，翁緯明，「礫石層邊坡形成土石流之微地形探討」，中華水土保持學報，第 37 卷，第 4 期，第 329-340 頁，2005。
16. 周憲德，山崩型土石流災害之探討---子計畫：邊坡淺層崩塌引發土石流之機制研究(I)，國科會研究計畫，2005。
17. 周憲德，土石流防災與監測之研究---土石流潛勢判定模式之研究，國科會研究計畫，1999。
18. 周憲德，“邊坡破壞與地滑轉化成土石流之研究(一)”，國家科學委員會研究計畫，NSC90-2625-z-008-006，2002。
19. 游繁結，土石流災害防治之研究-以南投示範區(陳有蘭溪)為對象-子計畫：溪谷邊坡崩滑土體之土石流化機制研究(I)，國科會研究計畫，2001。
20. 游繁結、吳仁明、翁緯明，“礫石層邊坡形成土石流之微地形探討”，中華水土保持學報，第37卷，第4期，329-340頁，2005。
21. 建設省河川局砂防部砂防課，土石流危險溪流および土石流危險區域調査要領，日本，1989。

22. 陳天健、吳嘉俊，莫拉克颱風重點聚落勘查-坡地災害組II，國家災害防救科技中心，2009。
23. 陳天健、羅元勳、楊婉君、陳柏龍，「坡面型土石流地形判釋分析模式」，中華水土保持學報，第47卷，第2期，95-102頁，2016。
24. 陳天健、王振宇、陳柏龍 (2015.09)，坡面型土石流之地形特徵與判別方法，中華水土保持學報, 46(3): 133-141.(Scopus and GEOBASE)
25. 陳天健，「花東變質岩區聚落周緣坡地之坡面型土石流區位預測及潛勢評估方法」，農業委員會水土保持局研究報告，2019。
26. 陳天健、陳思妤，基於坡面型土石流潛能之溪流型土石流潛勢評估模式-板岩地區，中華水土保持學報，50(3):89-101，2019。
27. 陳天健，「精進沉積岩地質區聚落周緣坡地之坡面型土石流判釋及潛勢評估方法」，農業委員會水土保持局研究報告，2018。
28. 陳天健，「建立聚落周緣山坡坡面型土石流判釋模式及潛勢評估方法-中南東部沈積岩及變質岩區」，農業委員會水土保持局研究報告，2017。
29. 陳天健，「劇烈天氣下聚落周緣山坡坡面型土石流易發生區位及潛勢評估方法」，農業委員會水土保持局研究報告，2016。
30. 陳天健、楊婉君、陳柏龍，坡面型土石流地形判釋分析模式，中華水土保持學報，47(2): 52-61，2016。
31. 陳晉琪、李明熹、臧運忠、張師鐸、呂家豪、陳欣玫，“臺灣

- 土石流堆積特性之研究”，農業委員會水土保持局研究報告，2007。
32. 陳晉琪、謝正倫、林慶偉，「臺灣中部地區土石流發生溪流之地形特性」，中華水土保持學報，第三十五卷，第一期，第25~34頁，2004。
33. 陳榮河，坡地災害引起土石流發生機制之整合研究—總計畫暨子計畫：邊坡破壞引發土石流之機制研究-以土石流源頭為對象，國科會研究計畫，2004。
34. 曾國源、張斐章，以共用臨域類神經網路架構土石流預警系統之研究，中華水土保持學報，第37卷，第3期，259-270頁，2006。
35. 羅元勳，考慮集水區內小規模土石流潛能之溪流型土石流潛勢溪流評估模式，碩士論文，國立屏東科技大學，水土保持研究所，屏東，2017。
36. 鍾明修，坡面型土石流判釋模式與溪流型土石流潛勢評估方法-以中南部第三紀沉積岩為例，碩士論文，國立屏東科技大學，水土保持研究所，屏東，2020。
37. 黃宏斌，胡聖賢，李偉哲，黃彥文，蘇立明，「坡地土石流發生機制研究」，國家科學委員會研究計畫，NSC90-2625-z-002-017，2002。
38. 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生，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): 19-28，2015。
39. 謝育樺，南投地區土石流發生潛勢分析，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，2007。

40. 謝正倫，桃芝颱風災區土石流災害潛勢分析成果報告書，行政院農業委員會水土保持局，2001。
41. H. M. Shu, T.C. Chen*, W.C. Yang, Y.X. Luo, 2016.06, "Interpretation and Analysis of Potential Fluidized Landslide Slope," Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 47(2), 101-110. ISSN 0046-5828
42. Benda, L., Hassan, M. A., Church, M., and May, C.L., "Geomorphology of Steepland Headwaters: The transition From Hillslopes to Channels." Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) Vol. 41, No.4, pp.835-851, 2005.
43. Brunsden, D., In process in geomorphology, Edward Arnold Ltd., London, pp. 130-186, 1979.
44. Cruden, D. M., and D. J. Varnes, Landslide types and processes, in Landslides: Investigation and Mitigation, edited by A. K. Turner, and R. L. Schuster, pp.26-75, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., 1996.
45. Dietrich, W.E. and Montgomery, D.R., "A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding," Water Resources research, Vol. 30, No.4, pp. 1153-1171, 1994.
46. Evans, S. G., "Landslides and surficial deposits in urban area of British Columbia." Canadian Geotechnical Journal, Vol.19, pp.269-288, 1982.
47. Hungr, O., Morgan, G. C., Kellerhals, R., "Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, No.4, pp. 663-677, 1984.
48. Iverson, R. M., M. E. Reid, R. G. La Husen, Debris flow mobilization from landslides, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., Vol. 25, pp.85-138, 1997.

49. Jakob, M., and Hungr, O., Debris-flow hazards and related phenomena : Springer, Berlin, New York, 170 p, 2005.
50. Jeng-Wen Lin, Cheng-Wu Chen, Cheng-Yi Peng, “Potential hazard analysis and risk assessment of debris flow by fuzzy modeling,” Natural Hazards, 2012, Vol. 64, No.1, pp.273-282, 2012.
51. Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., and Pech, P., “Is the Response of Hill Slope Debris Flows to Recent Climate Change Univocal? A Case Study in the Massif Des Ecrins (French Alps),” Climatic Change, Vol. 85, pp.119-137, 2007.
52. Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., and Arnáez, J., “Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows: A Case Study in the Flysch Sector of the Central Spanish Pyrenees,” Mountain Research and Development, Vol. 22, No. 1, pp.32-39, 2002.
53. Stock J. and Dietrich W. E., “Valley incision by debris flows: 7 - 105/04/13 17:23:09 Evidence of a topographic signature,” Water Resources Research, Vol.39, No.4, April, 2003.
54. Shu, H. M., Chen, T.C.*, Yang, W.C., and Luo, Y.X., (2016), “ Interpretation and Analysis of Potential Fluidized Landslide Slope,” Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 47 No.2:101-110. June 2016. ISSN 0046-5828 (Author for correspondence, EI)
55. Thomas Glade, “Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology , ” Geomorphology , Vol. 66, No.1-4, pp.189-213, 2005.
56. Takahashi T , Debris flows. Annu Rev Fluid Mech Vol.13, pp.57-77, 1981.
57. Yang Z.Y., Chen T.C.*, Lin C.W., and Lin S.C., (2016), “Rainfall landslide in Sedimentary and Sub-Metamorphic Rock - an example in Kaoping River Basin,” Journal of Applied Science and Engineering,

19(2):169-176 (Author for correspondence, EI.)

附錄

附錄一、計畫核定審查意見回覆辦理情形

項次	委員意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見		
一	採用鑽探資訊，其數量是否足夠？是否可使用土地利用限度調查之土壤深度成果？	(1)計畫目的為建立山區"自然"河岸山坡坡面表土及崩積層，首先主要彙整地調所之工程地質探勘資料庫系統（Geo2020）之鑽探孔位。惟該資料庫經剔除分自然山坡地鑽探資料，如平地、整地後建築工程、既有道路上等等，主要可用之鑽探孔位數量僅剩數百，且主要位置分佈較為集中於山區道路線型、電塔及水保局大規模崩塌區為主。由台灣山區幅員廣闊，因此本計畫將再補收收集相關單位、企業等資料，以增加研究之資料庫。 (2)「土地利用限度調查」為以農業及林業為目的，其土壤調查深度僅最深達 2m，因此

		於土壤深度 2m 內資料可資應用。本研究將納入此一資料，補充山坡淺層之土壤層深度資料。
二	坡面表土及崩積層厚度與邊坡地形相關性分析，建議除了分析，也要加上驗證。	本計畫工作納入將選取 3 個崩塌案例，進行坡面表土及崩積層厚度與邊坡地形特性分析研究。
三	本計畫請以補助經費 710 仟元調整編列。	遵照辦理。
四	本年度執行期限請修正為自 111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日。(11.5 個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 11.5 個月內編列。年終獎金亦配合計畫期限比例調整。	遵照辦理。
五	六「計畫內容」(七)預期效益可量化效益建請加強補充與量化，尤以學術創新成就為最，並請補充說明效益內容。	業已增補本計畫產出之學術創新論文發表數量及說明內容
六	人事費占總經費之比例，以不超過百分之五十為原則。	本研究將進行大量鑽探資料彙整分析、岩心判釋比對、厚

		度及邊坡微地形相關性分析、與建立坡面表土與崩積層厚度推估模式，同時將進行崩塌區野外案例調查研究，工作量大且所需專業度高，且須具專業分析技術及實務經驗，非一般兼任助理可勝任，因此懇請同意聘任專任研究助理經費之編列。
七	「行政管理費」請按計畫經費總額(不含行政管理費)之10%調整計算。【行政管理費=(計畫經費總額-行政管理費)×10%】	遵照辦理。
八	各期報告書數量請以期初報告(工作執行計畫書)10本、期中報告5本報告書、期末報告書5本及成果報告書5本為原則。	遵照辦理。

附錄二、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	委員意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見		
一	應用鑽探與調查結果分析、方法應屬可行，文獻顯示過去有很多已建立之關係。	謝謝委員肯定。
二	對過去成果如 P.41 之圖 4-17 等迴歸分析結果建議線性關應附上 r^2 等檢定結果。	遵照辦理。
三	所規劃 UAV 調查技術應屬可行，執行上應特別注意安全與正確的判定，如 P.35 之討論。	遵照辦理。
四	本研究選取 3 個崩塌案例進行坡面表土及崩積層厚度與邊坡地形特性研究，請說明研究區位選之原則或依據。	遵照辦理。目前該項工作規畫於期末完成。
五	本研究應用 UAV 技術調查崩塌區及坑溝表土及崩積層厚度，請說明其準確性或可靠性如何管控(或驗證機制為何)。	請詳見第六章。
六	請說明影響坡面表土及崩積層厚度之物理因子(機制)，	本項問題困難度甚高，研究團隊將再努力研究。

	俾供模式建置之應用，以確保模式之準確性。	
七	未有預定工作進度內容。	請見第二章
八	本工作執行計畫書目前「相關文獻」之整理尚稱完善，期許後續期中、期末報告能再更加精進。	遵照辦理。
九	研究區包括水保局 34 處大規模崩塌區，然其與(a)西部麓山帶;(b)中央山脈西翼;(c)中央山脈東翼之研究主軸是否契合？	研究 34 處大規模崩塌區主要是考慮其是已經滑動的地層案例狀況。而西部麓山帶等地質區則是考慮其位置，兩者分別是不同之考慮條件。
十	利用 UAV 規劃 3 處崩塌案例，其選定位置為何？	將在期末報告呈現。
十一	各統計迴歸式，請賦予 R^2 值。	遵照辦理。
十二	本計畫蒐集之現地土壤原始數據，建議於計畫結束後一併交付本局納入資料庫，擴大資料價值。	遵照辦理。
十三	使用鑽探等資料建立坡度與土層厚度等關係式時，建議應考量地質與地層類型。	謝謝委員寶貴意見。
十四	目前 UAV 建立 3D 模型，如搭配 eGNSS 等，其精度應可	謝謝委員寶貴建議。目前尚待深入了解 3D 模型之精度中。

	於模型上直接量測距離(厚度)。	
十五	表土及崩積層厚度評估模式 是否有驗證的方式？	請詳見第六章
十六	請補充拍攝校準方式，如何 推估坡面土層厚度，經驗證 結果如何？	請詳見第六章
十七	利用 UAV 調查崩塌及坑溝 表土崩積層厚度，後續是否 會進行現地調查去做驗證？	目前已規劃野外調查。
十八	建議可考慮加入山坡定查定 相關結果，例如:土壤有效深 度、土壤沖蝕程度等，納入研 究探討。	謝謝委員寶貴意見。

附錄三、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	委員意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見		
一	請強化論述應用 UAV 調查崩塌地區坑溝表土及崩積層厚度(或範圍)之可靠性，俾以提升災害預警之效能。	謝謝指導，請見第六章內文說明
二	請增列期中摘要內容，俾以具體說明計畫期中階段執行成果。	謝謝指導
三	P58，本計畫已建立土壤厚度與坡度分布迴歸關係式，惟無論 5m×5m(圖 7-5)及 10m×10m(圖 7-6)其 R^2 皆偏低，判識結果之合理性及妥適性宜再檢討。	謝謝建議。因資料取自真實鑽探及土鑽資料，實際土壤深度變異性大，因此 R^2 偏低。後續若有機會，將再深入分析。
四	請於期末列表綜整評析本計畫所建立本土山區邊坡表土與崩積層厚度評估模式，與其他模式之差異性，含物理機制、模擬結果及可靠性，俾以彰顯計畫之貢獻及提供災害預警應變之應用。	謝謝建議。
五	P67，本研究以 2009 年評析高屏溪小規模崩塌數量分布(圖 8-3)，結果說明颱風引致的崩塌面積主要在 3ha 以下，建議應就其崩塌機制或原因予以研討，俾以確切說明崩塌面積大小之影響因	謝謝指導。因本計畫目標為建立土壤深度推估模式。因此崩塌現象之機制，尚未包含於計畫工作。

	子，以供其他流域崩塌面積(範圍)推估之應用。	
六	UAV、UAS 在文中意思是否相同，請釐清。	兩名詞略有不同，本報告統一採用 UAV 一詞。
七	P39，提及依分析鑽探位置之地形特性，區分為未擾動及已擾動案例，建議補充說明分類之依據或圖層，以及如何依不同地形特性做出分類。	謝謝指導，請詳第五章第一節
八	第六章提及之標尺律定、影像律定分析，但仍未說明如何應用 UAV 推估土層厚度及其驗證結果。	謝謝指導。請見第六章內文說明
九	P3，「購置」研究區衛星影像及航照、數值模型(LiDAR DEM)，本計畫似無購置以上圖資料，請確認。	本計畫似無購置以上圖資料
十	P4，如使用 UAV LiDAR，為何不同時產製 DEM？	謝謝指導。本計畫工作未產製 UAV LiDAR。
十一	P14，圖 3-6 之內容，宜有說明。	謝謝指導
十二	P48，使用長 10 公尺之大型布標作為參照物，亦即每處拍攝位置須將之懸掛在目標物上，實務上是否可行(如，人員是否可及)？	請見第六章內文說明
十三	P55 指出，圖 7-2 較具有良好分布，但其 R2 亦不佳，此描述是否合宜？	謝謝指導。內容已更新，請見第七章內文說明
十四	承上，圖 7-2 黑色虛線代表	謝謝指導。內容已更新，請見

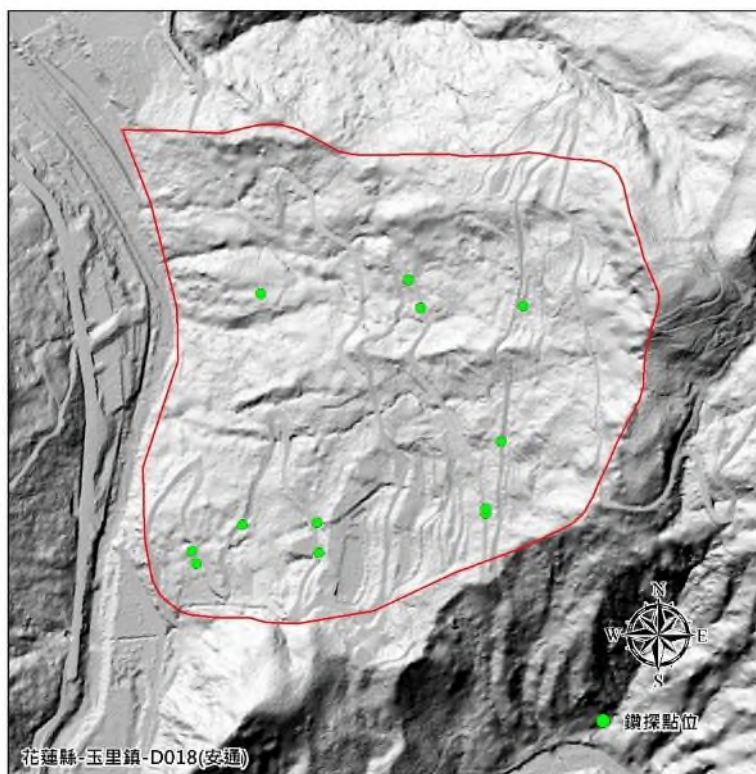
	意思為何？請標示於圖例，且其迴歸式是屬於哪條線？	第七章內文說明
十五	建議可擴大蒐集山坡地查定針對土壤有效深度進行相關研究。	謝謝指導。請見第五章第三節內文說明
十六	請說明表土及崩積土厚度評估模式驗證規劃及驗證方式。	謝謝指導。請見第六章第二節內文說明

附錄四、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

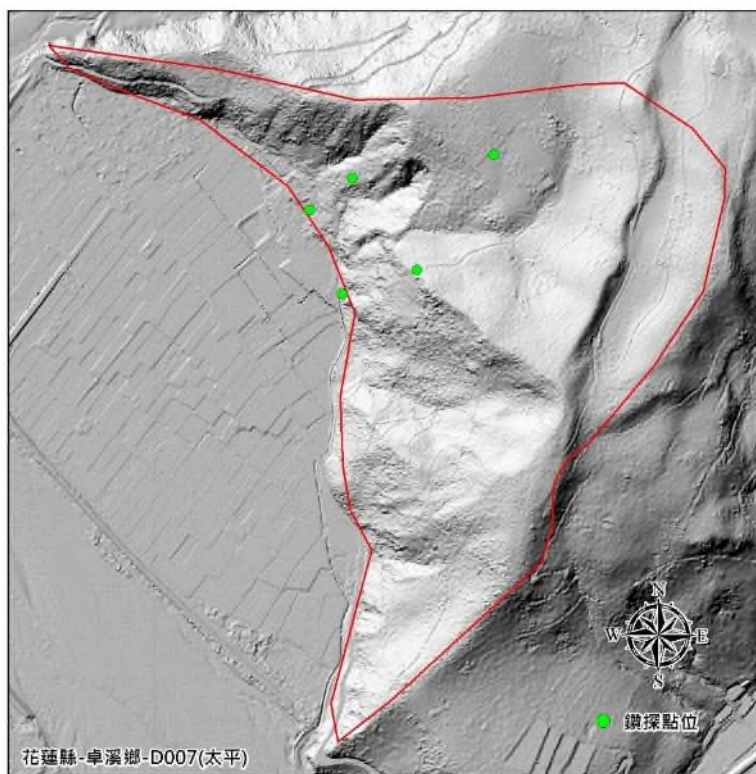
項次	委員意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見		
一	UAV 所得影像的粒徑及土壤厚度之驗證如何進行？不均勻土砂如何計算其平均值。	礙於崩塌區不易攀爬，本研究採用雷射測距儀現地量測。採用 5m 網格來計算為平均值。
二	創新性高，惟受限資料收集困難與精度難確認，增加分析難度，建議可先縮小範圍，逐一釐清相關變因，再逐漸擴大範圍，較能找出影響土層厚度變化的因素。	謝謝委員建議。
三	回歸所推出代表式的決定係數偏低，可否說明原因或是後續可能需要研究納入的因子。	因統計數量甚多，迴歸係數 R 平方項，即容易偏低。後續若採分區統計乃有可能提高該係數。
四	未來研究是否可將不安定土方厚度與坡度之估算，與地被植物結合，進一步了解是否會影響崩塌率，或是探討不安定(擾動)土層可能易崩落(或移動)深度，進一步了解不安定土層之風險。	謝謝委員建議。
五	應用各類資料進行比較，並應用 UAV 進行技術輔助探測。	謝謝委員建議。
六	可運用於土地可利用調查及淺崩土砂量估算。	謝謝委員建議。
七	建議針對不同坡度與土層厚度之關係說明以線性式回歸	本研究亦使用多項式及對數等進行回歸，惟其結果差異甚

	的依據？	小，為便於使用，最後決定採線性回歸。
八	建議可用其他回歸式進行分析？或是統計檢定。	謝謝委員建議。

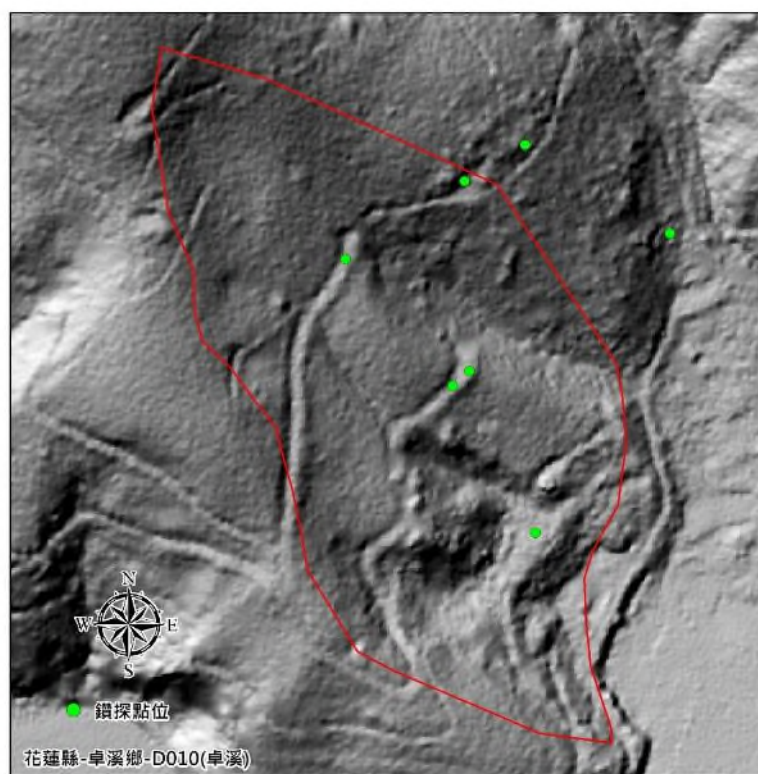
附錄五、34 處大崩區之數位地形與鑽孔位置圖



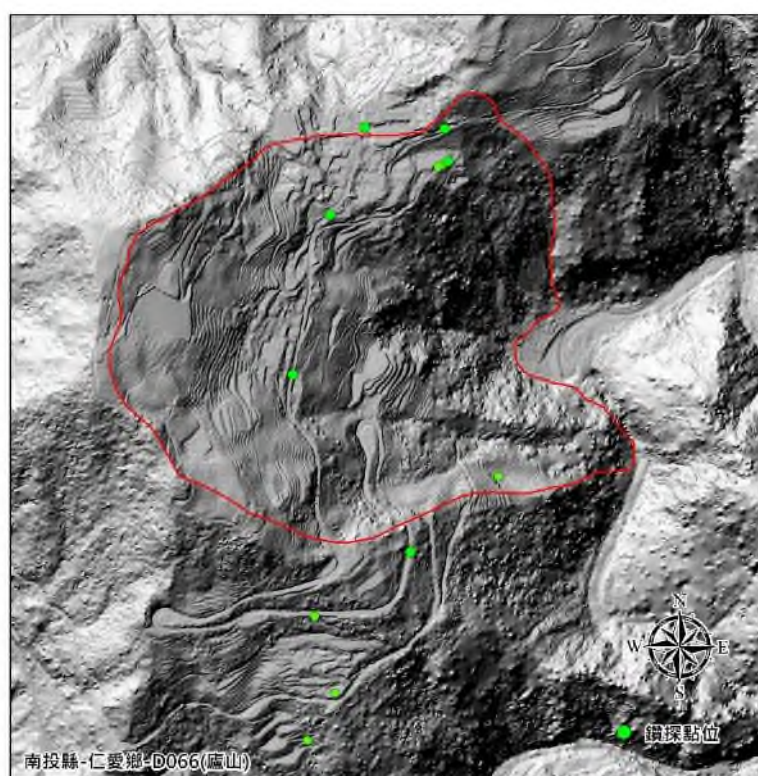
附圖 4-1 花蓮縣-玉里鎮-D018(安通)鑽探位置分布圖



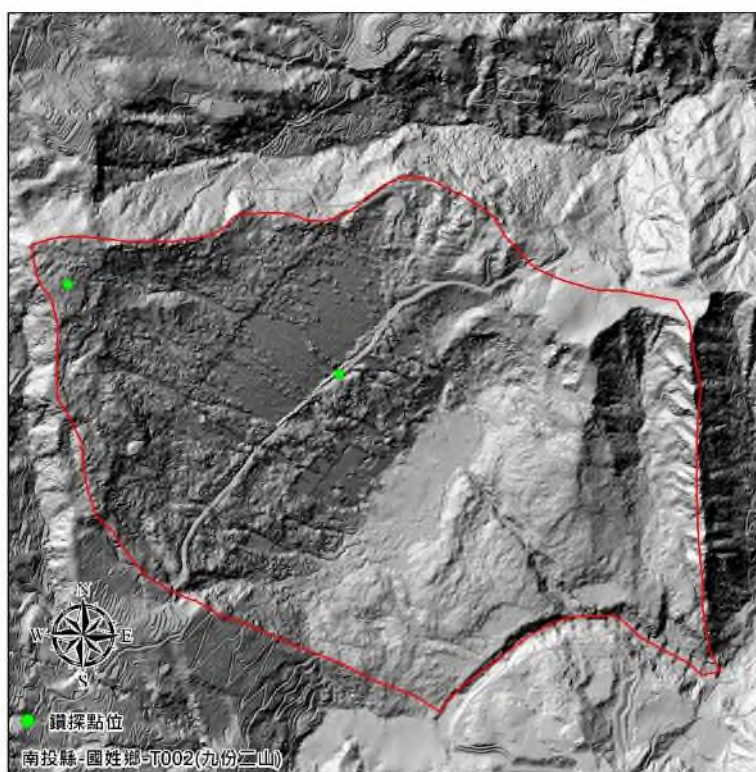
附圖 4-2 花蓮縣-卓溪鄉-D007(太平)鑽探位置分布圖



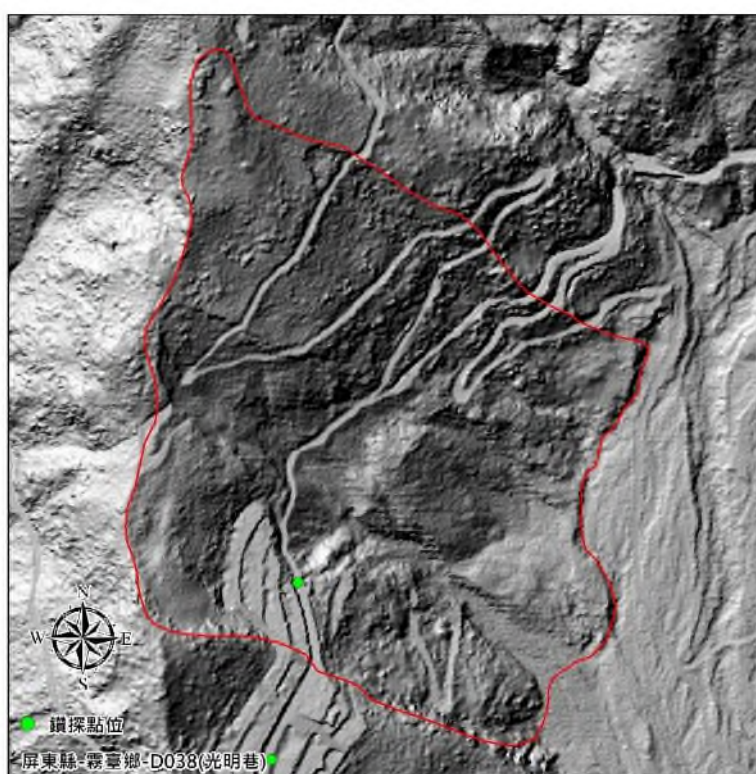
附圖 4-3 花蓮縣-卓溪鄉-D010(卓溪)鑽探位置分布圖



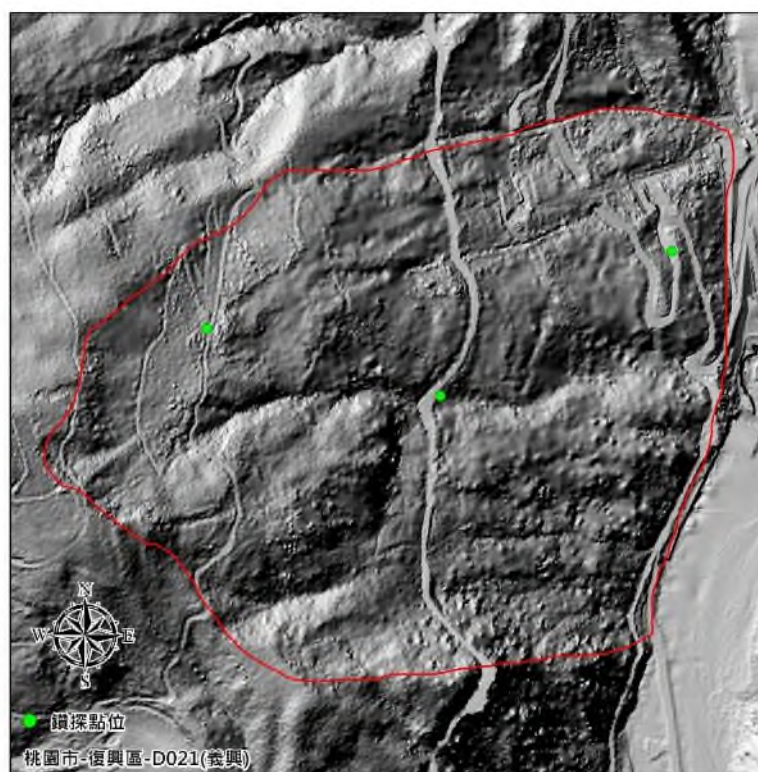
附圖 4-4 南投縣-仁愛鄉-D066(廬山)鑽探位置分布圖



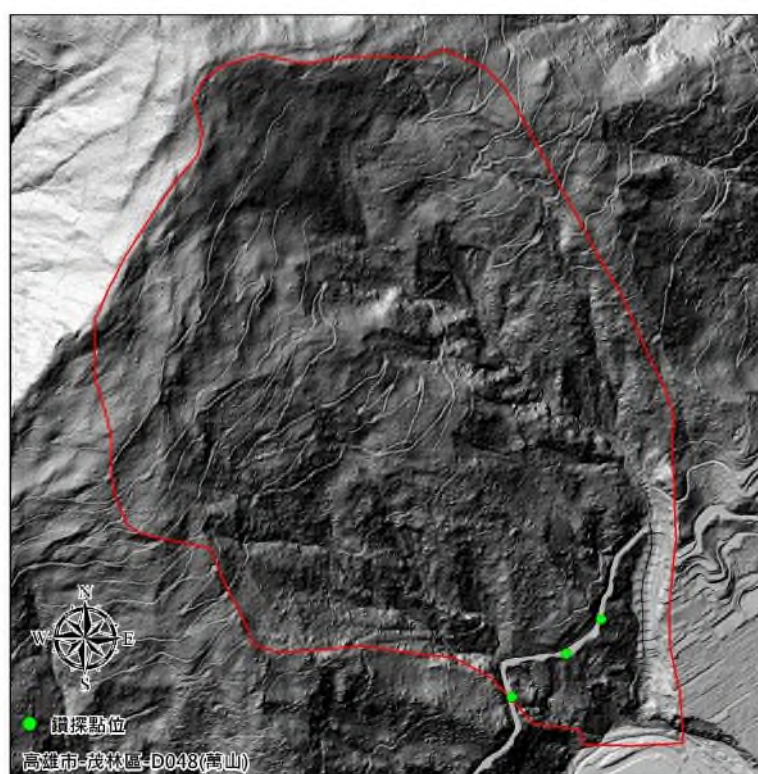
附圖 4-5 南投縣-國姓鄉-T002(九份二山)鑽探位置分布圖



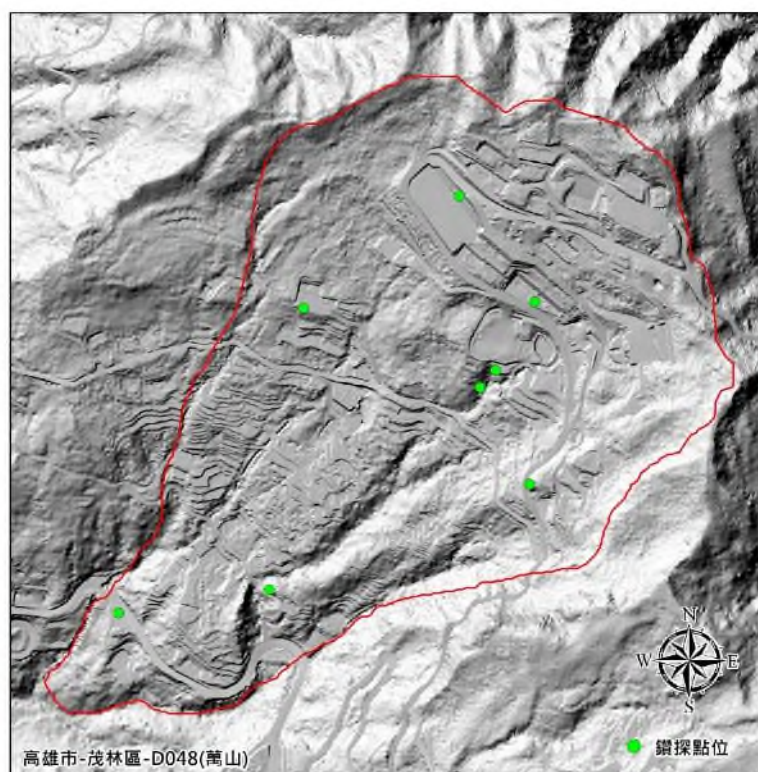
附圖 4-6 屏東縣-霧臺鄉-D038(光明巷)鑽探位置分布圖



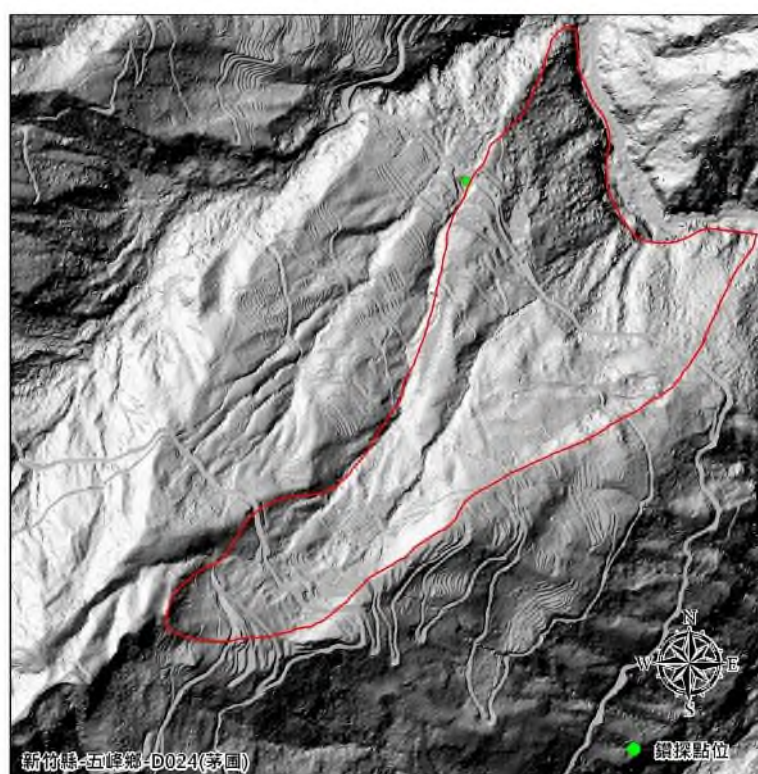
附圖 4-7 桃園市-復興區-D021(義興)鑽探位置分布圖



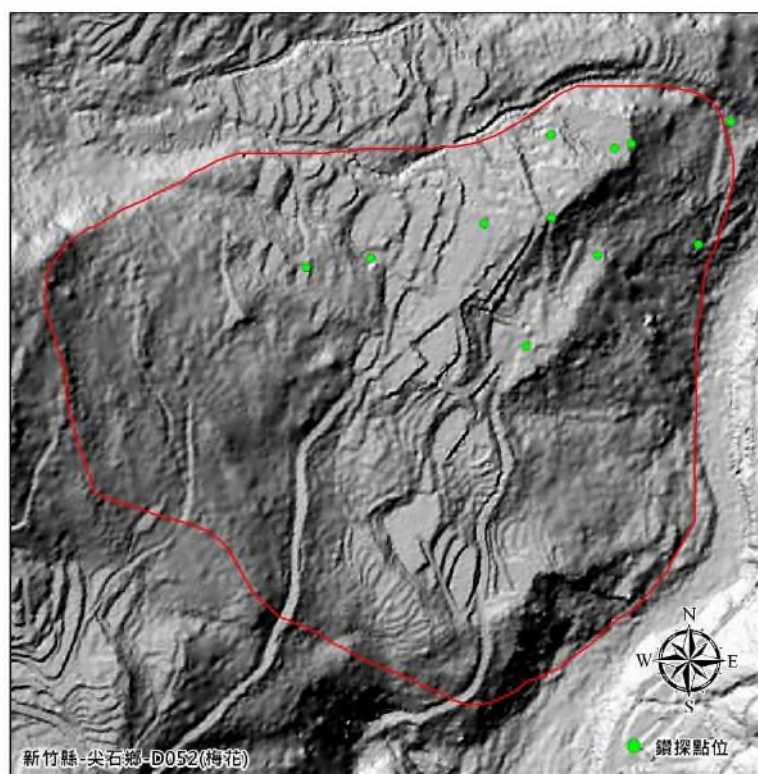
附圖 4-8 高雄市-茂林區-D048(萬山)鑽探位置分布圖



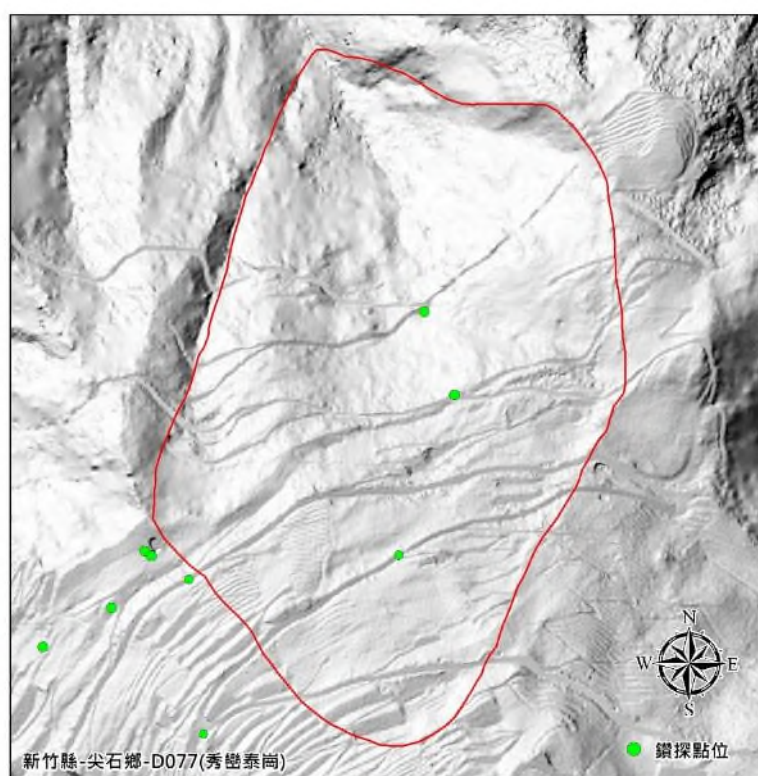
附圖 4-9 新北市-石碇區-T001(大崙山)鑽探位置分布圖



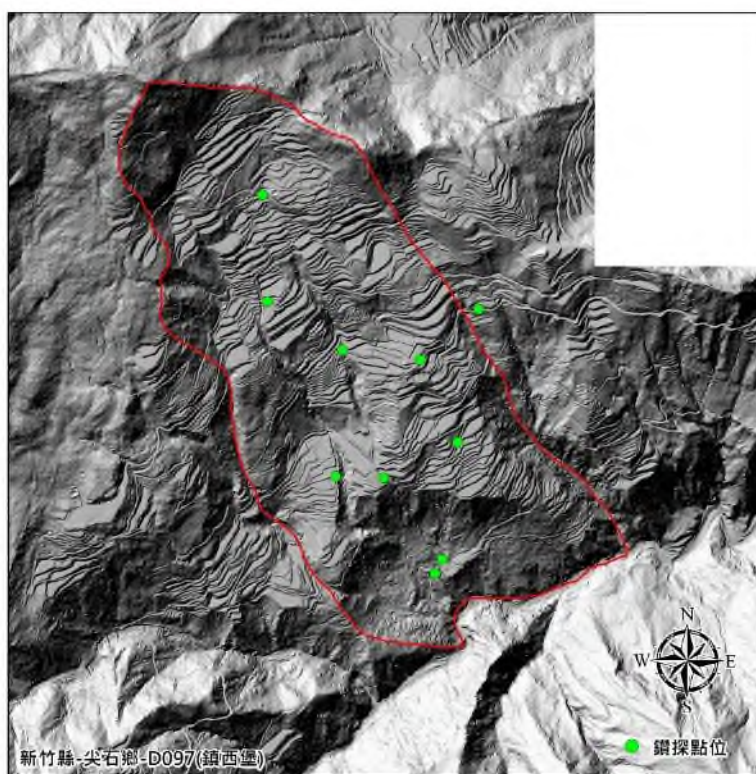
附圖4-10 新竹縣-五峰鄉-D024(茅園)鑽探位置分布圖



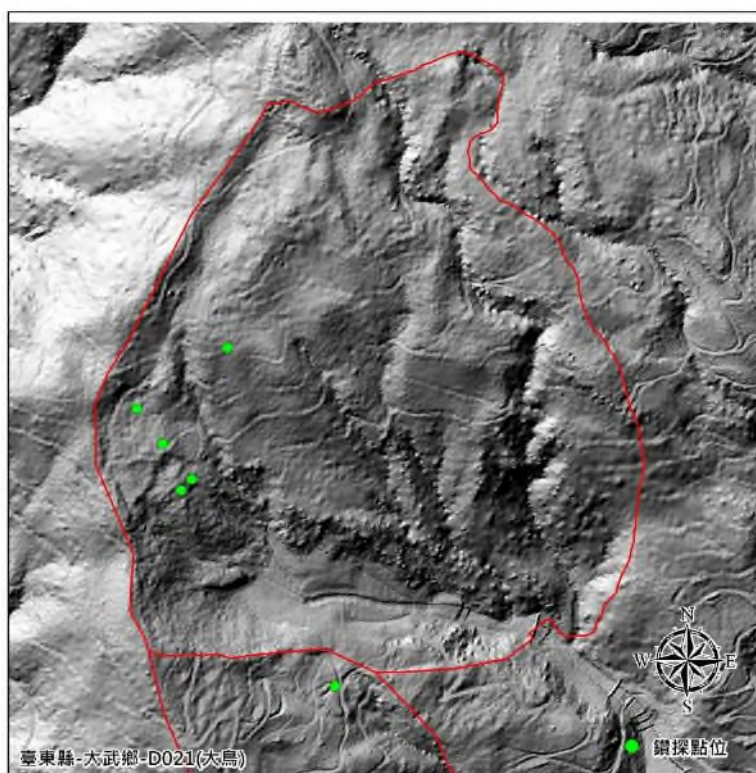
附圖 4-11 新竹縣-尖石鄉-D052(梅花)鑽探位置分布圖



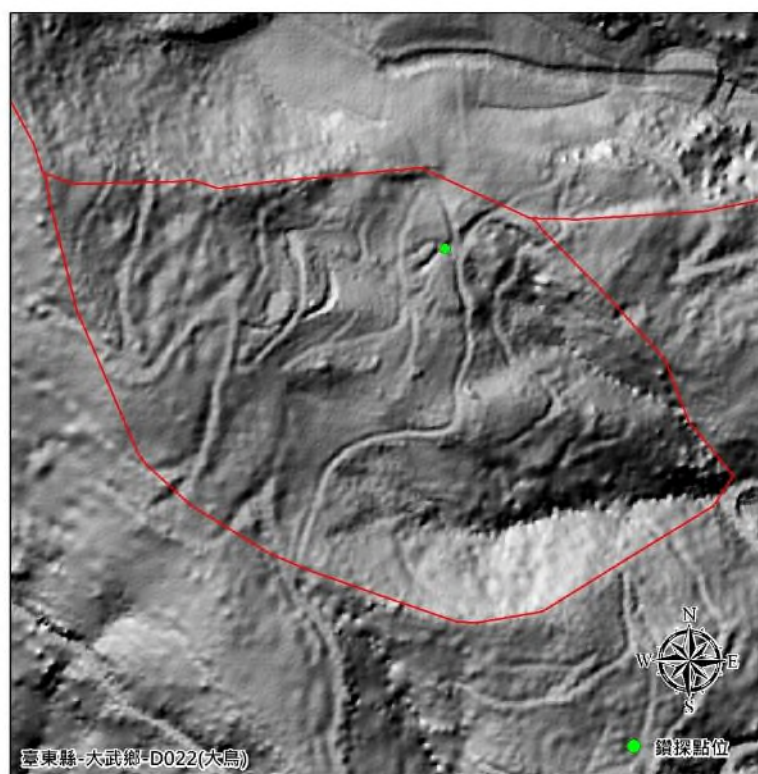
附圖4-12 新竹縣-尖石鄉-D077(秀巒泰崗)鑽探位置分布圖



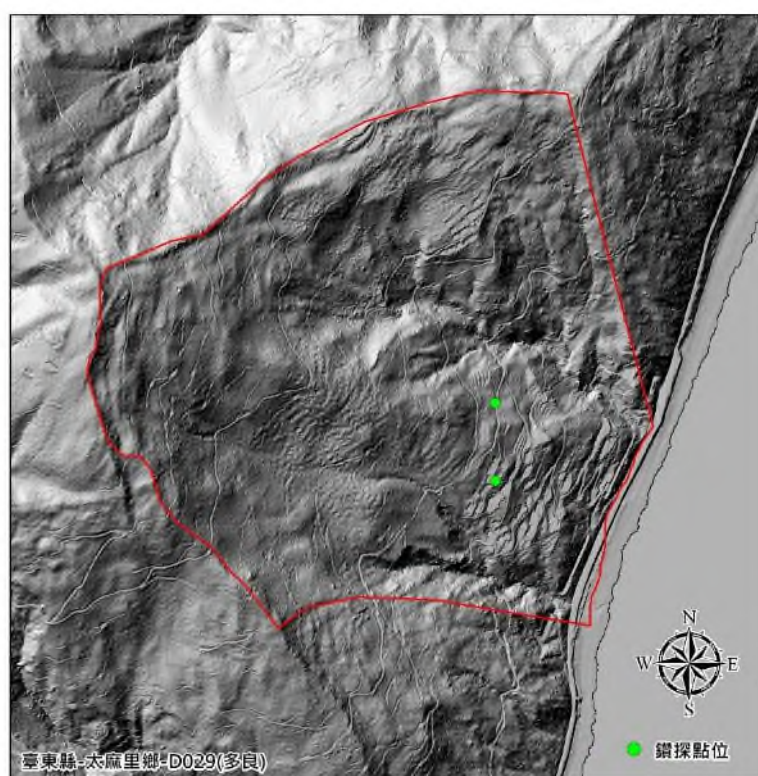
附圖 4-13 新竹縣-尖石鄉-D097(鎮西堡)鑽探位置分布圖



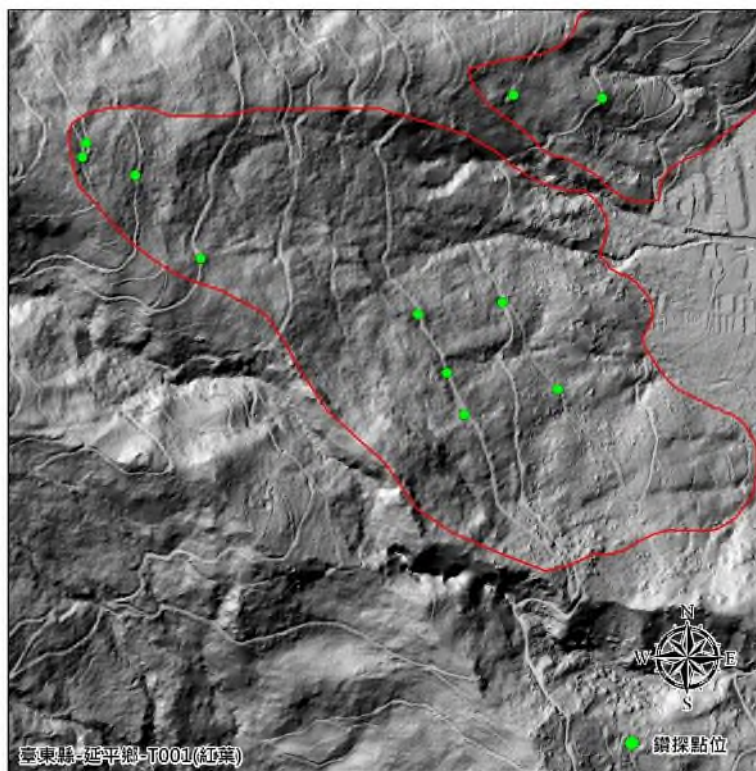
附圖 4-14 臺東縣-大武鄉-D021(大鳥)鑽探位置分布圖



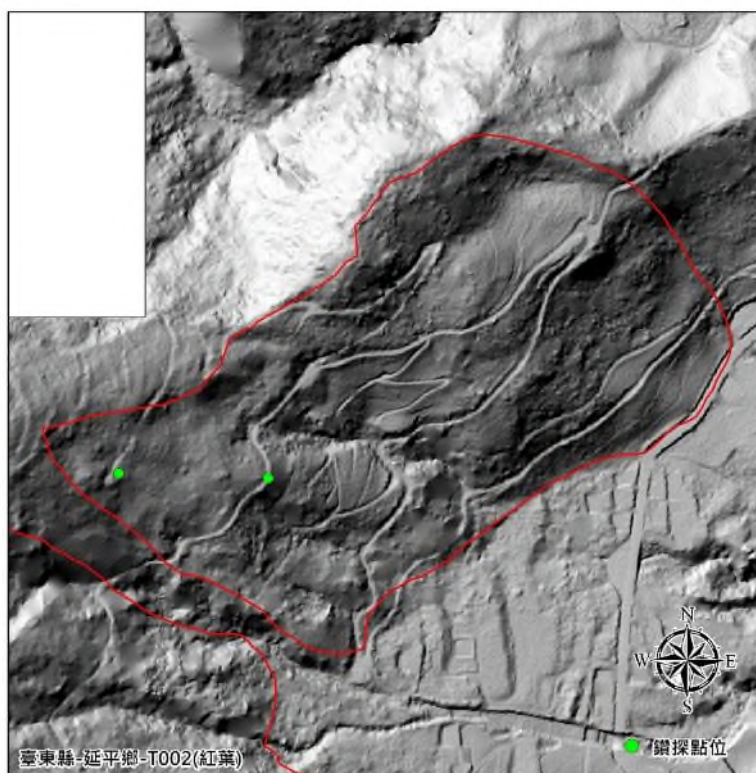
附圖 4-15 臺東縣-大武鄉-D022(大島)鑽探位置分布圖



附圖4-16 臺東縣-太麻里鄉-D029(多良)鑽探位置分布圖



附圖 4-17 臺東縣-延平鄉-T001(紅葉)鑽探位置分布圖



附圖 4-18 臺東縣-延平鄉-T001(紅葉)鑽探位置分布圖