

行政院農業委員會林務局 105 年度

科技計畫研究報告

105 農科-12.11.3-務-e1

國有林集水區水文與崩塌關係之調查及分析(II)

期末報告書

執行單位:國立臺灣大學

中華民國 105 年 11 月

目次

摘要.....	viii
1 前言.....	- 1 -
1.1 計畫起源及研究背景.....	- 1 -
1.2 研究目的及本文構成.....	- 2 -
2 土砂災害類型及位置調查.....	- 4 -
2.1 背景及目的.....	- 4 -
2.2 方法.....	- 4 -
2.2.1 歷年衛星影像之判釋與比較.....	- 4 -
2.2.2 現地人工探查.....	- 6 -
2.3 結果.....	- 7 -
2.3.1 衛星影像分析結果.....	- 7 -
2.3.2 人工探查結果.....	- 13 -
2.4 討論.....	- 18 -
2.4.1 利用遷急線分析瞭解哈盆溪集水區及粗坑溪集水區地勢變動.....	- 18 -
2.4.2 粗坑溪沿岸坡面土砂移動事件連動性之探討.....	- 21 -
2.4.3 衛星影像與人工探查之差異.....	- 22 -
2.4.4 蘇迪勒颱風在烏來地區與福山試驗中心造成災害比較.....	- 25 -
2.4.5 蘇迪勒颱風在福山地區造成災害與其他土砂移動事件之比較.....	- 27 -
2.5 小結.....	- 28 -
3 窄域集水區源頭部水文動態監測及土砂移動調查.....	- 31 -
3.1 背景及目的.....	- 31 -
3.2 方法.....	- 31 -
3.2.1 試驗地介紹.....	- 31 -
3.2.2 地表與基岩面地形.....	- 32 -
3.2.3 地表與基岩面地形.....	- 34 -
3.2.4 土壤物理性質調查.....	- 35 -
3.2.5 植生分布及基徑.....	- 35 -
3.2.6 水文現象觀測.....	- 36 -
3.3 樣區環境因子調查結果.....	- 40 -
3.3.1 土壤厚度空間分布及地表面、基岩面地形起伏.....	- 40 -
3.3.2 土壤物理性質.....	- 43 -
3.3.3 植生分布.....	- 43 -
3.4 樣區水文動態監測結果.....	- 44 -
3.4.1 表層土壤含水率空間分布.....	- 44 -

3.4.2	降雨量、淺層土壤含水率、基岩面孔隙水壓、地表逕流量之時間變化	- 46 -
3.5	小結.....	- 53 -
4	蘇迪勒及梅姬颱風期間監測樣區之水文動態及土砂移動.....	- 54 -
4.1	背景及目的.....	- 54 -
4.2	蘇迪勒及梅姬颱風概況.....	- 54 -
4.2.1	蘇迪勒颱風災害概況.....	- 54 -
4.2.2	梅姬颱風災害概況.....	- 56 -
4.3	蘇迪勒及梅姬颱風對樣區之影響.....	- 57 -
4.3.1	蘇迪勒颱風樣區水文動態及土砂移動.....	- 57 -
4.3.2	梅姬颱風樣區水文動態及土砂移動.....	- 64 -
4.4	蘇迪勒及梅姬颱風水文動態及土砂移動比較.....	- 71 -
4.5	小結.....	- 72 -
5	廣域水文地質探查技術研發-簡易貫入試驗改良、地下水井鑽探及地中音探查試行.....	- 74 -
5.1	背景與目的.....	- 74 -
5.2	材料與方法.....	- 75 -
5.2.1	簡易貫入試驗改良.....	- 75 -
5.2.2	簡易地下水井挖掘機測試.....	- 78 -
5.2.3	地中音探測儀測試.....	- 80 -
5.3	測試結果.....	- 84 -
5.3.1	簡易貫入試驗改良-汽油引擎貫入測試結果	- 84 -
5.3.2	簡易地下水井挖掘機測試結果.....	- 88 -
5.3.3	地中音探測儀測試結果.....	- 91 -
5.4	小結.....	- 95 -
6	綜合討論與結論.....	- 97 -
6.1	綜合討論與未來建議.....	- 97 -
6.2	結論.....	- 100 -
7	參考文獻.....	- 102 -
	附錄一 期末報告審查會議回覆.....	- 104 -
	附錄二 計畫調查進度及人力計畫執行進度甘特圖.....	- 113 -
	附錄三 工作項目及評核標準檢查表.....	- 115 -

圖目錄

圖 1.1 研究架構圖。.....	- 3 -
圖 2.3 衛星影像處理流程圖。.....	- 5 -
圖 2.4 現地人工探查路線。.....	- 6 -
圖 2.5 2013 年及 2015 年衛星影像以及崩塌區塊圈繪。圖中的紅色區塊 即為圈繪之崩塌區塊。.....	- 7 -
圖 2.6 利用 2013 年及 2015 年衛星影像圈繪崩塌地變動區塊結果。.....	- 8 -
圖 2.7 衛星影像圈繪崩塌事件投影面積分布直方圖。.....	- 9 -
圖 2.8 衛星影像圈繪崩塌事件坡度分布直方圖。.....	- 9 -
圖 2.9 衛星影像圈繪崩塌事件坡向分布直方圖。.....	- 9 -
圖 2.10 福山地區集水區分界圖。.....	- 10 -
圖 2.11 (a) 哈盆溪集水區及粗坑溪集水區全域坡度分布比例直方圖。 (b) 哈盆溪、粗坑溪及雙埤路區域各坡度土砂移動事件數量分布 直方圖。.....	- 11 -
圖 2.12 (a) 哈盆溪集水區及粗坑溪集水區全域坡向分布比例直方圖。 (b) 哈盆溪、粗坑溪及雙埤路區域各坡向土砂移動事件數量分布 直方圖。.....	- 12 -
圖 2.13 土砂移動事件。.....	- 13 -
圖 2.14 水源林道後段大型崩塌導致林道無法通行。.....	- 14 -
圖 2.15 水源林道土砂移動事件數量比例圓餅圖。.....	- 14 -
圖 2.16 粗坑溪土砂移動事件數量比例圓餅圖。.....	- 15 -
圖 2.17 雙埤路土砂移動事件數量比例圓餅圖。.....	- 16 -
圖 2.18 三條人工探查路線崩塌地表面積分布直方圖。.....	- 17 -
圖 2.19 三條人工探查路線崩塌地坡度分布直方圖。.....	- 17 -
圖 2.20 人工調查土砂移動事件類型位置分佈圖。.....	- 18 -
圖 2.21 衛星影像圈繪土砂移動事件與其附近遷急線之相對位置。.....	- 19 -
圖 2.22 土砂移動事件於各地形區域分布面積比例。.....	- 21 -
圖 2.23 人工探查土砂移動事件發生點位以及福山 10 m 高程等高線圖。	- 22 -
圖 2.24 衛星影像圈繪結果及人工調查點位整合圖。.....	- 23 -
圖 2.25 人工調查點位 51~53 之探勘現地照片及衛星影像圈繪結果比較。	- 24 -
圖 2.26 衛星影像圈繪及人工探查範圍判定示意圖。.....	- 25 -
圖 3.1 集水區尺度觀測樣區位置及地形。.....	- 32 -
圖 3.2 簡易貫入計裝置。.....	- 35 -
圖 3.3 儀器設置及測量分布點位。.....	- 36 -
圖 3.4 本研究在福山氣象站設置的兩座傾斗式雨量筒.....	- 37 -

圖 3.5 圖中淺藍色線條為地表逕流式意圖。.....	- 38 -
圖 3.6 張力計構造、觀測位置示意圖及現地設置張力計照片。.....	- 39 -
圖 3.7 量水堰現地照片。.....	- 39 -
圖 3.8 土壤厚度次數分配圖。.....	- 40 -
圖 3.9 地表面、地表面、基岩面地形之土壤厚度、坡度、集流面積(CA)和地形濕潤指數(TWI)的空間分布。.....	- 41 -
圖 3.10 樣區中 A、B、C 三地點之地滑特徵。.....	- 42 -
圖 3.11 土壤孔隙率與飽和水力傳導度的空間分布。.....	- 43 -
圖 3.12 加權植生密度及加權斷面積的空間分布。.....	- 44 -
圖 3.13 集水區尺度含水率時間序列與空間分布。.....	- 45 -
圖 3.14 表層含水率監測位置。.....	- 46 -
圖 3.15 2016.1~2016.6 降雨量、表層土壤水分動態。.....	- 47 -
圖 3.16 2016.1~2016.6 降雨量、表層土壤水分動態。.....	- 48 -
圖 3.17 基岩面孔隙水壓位置。.....	- 49 -
圖 3.18 2016.1~2016.6 降雨量、基岩面孔隙水壓動態之總是飽和、經常飽和監測群之時間變動。.....	- 50 -
圖 3.19 2016.1~2016.6 降雨量、基岩面孔隙水壓動態之有時飽和，幾乎無飽和監測群之時間變動。.....	- 50 -
圖 4.1 蘇迪勒颱風路徑圖。.....	- 55 -
圖 4.2 蘇迪勒颱風期間福山雨量站累積降雨。.....	- 55 -
圖 4.3 2016 年梅姬颱風路徑及雨量圖。.....	- 56 -
圖 4.4 蘇迪勒颱風後福山植物園聯外道路坍方樣貌。.....	- 57 -
圖 4.5 蘇迪勒颱風後，前往樣區登山步道坍方樣貌。.....	- 58 -
圖 4.6 蘇迪勒颱風後，地表逕流觀測點 No. 3 集流土壩樣貌。.....	- 58 -
圖 4.7 蘇迪勒颱風後，受風倒木撞擊張力計毀損樣貌。.....	- 59 -
圖 4.8 蘇迪勒颱風後，設置於基岩面上張力計陶瓷頭毀損地點。.....	- 60 -
圖 4.9 蘇迪勒颱風之降雨組體圖、表層土壤水分動態監測。.....	- 62 -
圖 4.10 (a)蘇迪勒颱風事件之降雨強度及累積雨量、基岩面上全觀測點之平均孔隙水壓及地中飽和量時間變化，(b)地中飽和帶分布之時間變化。.....	- 63 -
圖 4.11 梅姬颱風後，樣區崩塌範圍。.....	- 64 -
圖 4.12 梅姬颱風後樣區崩塌情況。.....	- 65 -
圖 4.13 樣區內的地滑裂縫如紅色箭頭所示。.....	- 65 -
圖 4.14 梅姬颱風後 10 月 7 日發現之新增崩塌。.....	- 66 -
圖 4.15 梅姬颱風 9 月 26-28 日之降雨組體圖、表層土壤水分動態監測、土壤平均體積含水率、基岩面孔隙水壓動態。.....	- 67 -
圖 4.16 梅姬颱風 9 月 26-28 日之降雨組體圖、表層土壤水分動態監測土壤平均體積含水率、基岩面孔隙水壓動態。.....	- 68 -

圖 4.17 (a)梅姬颱風事件之降雨強度及累積雨量、基岩面上全觀測點之平均孔隙水壓及地中飽和量時間變化，(b)地中飽和帶分布之時空變化。.....	- 70 -
圖 4.18 梅姬颱風後，基岩面上張力計陶瓷頭毀損地點及毀損時間	- 71 -
圖 4.19 2016 年 9 月降雨強度及累積雨量。.....	- 72 -
圖 5.1 (a) 模擬土層示意圖 (b) 模擬實驗不同深度地下水音測量結果。.....	- 74 -
圖 5.2 POST DRIVER-CEPD 52 汽油引擎活塞打樁機簡易結構說明 ..	- 75 -
圖 5.3 不同尺寸之貫入錐頭。.....	- 76 -
圖 5.4 腳踏式槓桿拉拔裝置。.....	- 76 -
圖 5.5 打樁機貫入試驗計組合完成圖。.....	- 77 -
圖 5.6 汽油引擎活塞打樁機貫入試驗現地測試照片。.....	- 77 -
圖 5.7 輕便岩芯鑽探設備。.....	- 79 -
圖 5.8 採土打樁管各部件說明。.....	- 80 -
圖 5.9 採土打樁管組合示意圖。.....	- 80 -
圖 5.10 地下水音生成示意圖。.....	- 80 -
圖 5.11 地中音測量過程及裝置示意圖。.....	- 81 -
圖 5.12 地中音測量裝置頻率過濾示意圖。.....	- 81 -
圖 5.13 PD1~PD60 獲取示意圖。.....	- 82 -
圖 5.14 微地形圖繪製。.....	- 82 -
圖 5.15 CS 立體微地形圖繪製流程圖。.....	- 83 -
圖 5.17 試驗地 A 測試點與簡易貫入點的相對分佈示意圖。.....	- 84 -
圖 5.18 試驗地 A 打樁機貫入試驗測試結果與簡易貫入結果之比較	- 85 -
圖 5.19 試驗地 B 測試點與簡易貫入點的相對分佈示意圖。.....	- 86 -
圖 5.20 試驗地 B 打樁機貫入試驗測試結果與簡易貫入結果之比較	- 87 -
圖 5.21 輕便岩芯鑽探設備（鑽井機）現地試用照片。.....	- 89 -
圖 5.22 採土打樁管現地測試（2016/10/03）。.....	- 90 -
圖 5.23 建議鑽井試驗之流程。.....	- 90 -
圖 5.24 利用採土打樁管取出之土芯。.....	- 90 -
圖 5.25 樣點地形說明。.....	- 91 -
圖 5.26 福山樣區代表值整理圖。.....	- 92 -
圖 5.27 立體為地形圖判示。.....	- 93 -
圖 5.28 (a) 山坡等高線圖 (b) 山坡 CS 立體微地形圖。.....	- 94 -
圖 5.29 CS 立體圖。.....	- 94 -

表目錄

表 2.1	水源林道可測量之土砂移動事件特性整理.....	14 -
表 2.2	粗坑溪沿岸土砂移動事件特性整理.....	15 -
表 2.3	雙埤路土砂移動事件特性整理.....	16 -
表 2.4	粗坑溪集水區及哈盆溪集水區遷急線特性整理.....	20 -
表 2.5	各地形區域分類判定依據.....	20 -
表 2.6	衛星影像圈繪及人工探查面積資料比較.....	24 -
表 2.7	蘇迪勒風災造成福山與烏來地區土砂災害比較.....	26 -
表 2.8	蘇迪勒颱風在福山地區造成災害與其他土砂移動事件比較.....	28 -
表 4.1	福山測站於不同重現期之累積雨量表.....	55 -
表 5.1	HONDA GX35 四行程引擎規格.....	75 -
表 5.2	鑽探設備二行程引擎.....	79 -
表 5.3	試驗地 A 打樁機貫入測試.....	84 -
表 5.4	試驗地 B 打樁機貫入測試.....	86 -
表 5.5	汽油引擎活塞打樁機貫入試驗與簡易貫入試驗優缺比較....	88 -
表 5.6	簡易地下水挖掘機測試結果.....	89 -
表 5.7	各測點代表值及 5 次量測中無記錄到地下水音的次數整表.....	93 -
表 5.8	廣域水文地質探查技術研發之三種測試優劣分析比較分析.....	95 -

研究團隊說明

(一) 計畫主持人

姓名：梁偉立

所屬機關：國立臺灣大學 森林環境暨資源學系

職稱：副教授

聯絡電話：02-33664616

電郵：liangwl@ntu.edu.tw

(二) 其他研究人員

機 關 名 稱	單 位 名 稱	研 究 人 員	職 稱
國立臺灣大學	森林環境暨資源學系	歐宛妮	研究助理
國立臺灣大學	森林環境暨資源學系	林松駿	研究助理
國立臺灣大學	森林環境暨資源學系	洪鳳栩	研究助理
國立臺灣大學	森林環境暨資源學系	李勝倫	研究助理
國立臺灣大學	森林環境暨資源學系	周坤宇	研究助理
國立臺灣大學	森林環境暨資源學系	鄭名宏	大學生
國立臺灣大學	森林環境暨資源學系	陳鵬中	大學生

環境，可以預知地表地形與地中地形會有很大的差異，因此進行土壤厚度調查進而建立土壤厚度資料庫，將是今後淺層崩塌預測治理上不可缺的項目。至於更深層的水文地質環境資訊取得上，地質鑽探、地下水井設置是一有效的方法，然而臺灣山區或是國有林班地多陡峭環境，車輛無法進入之處幾乎無法施行，廣域之地下水文地質探測法仍為一待解決的問題。

1.2 研究目的及本文構成

本研究計畫以國有林集水區上游區域長期觀測樣區建置為主軸，選定林業試驗所福山研究中心做為調查對象，該地區的優勢是人為影響小，除了聯外道路及辦公房舍外，人工建築少，且遊客有總量管制，對於探討自然條件下水文與土砂移動現象關聯，唯一絕佳的地點。整體計畫基於圖 1.1 之研究架構進行：

- 建置窄域監測樣區（第一年）

建立長期地表、地中、地下水文觀測系統，藉由人工、自動記錄觀測體制，探討控制集水區源頭部位水文反應。第 3 章簡單彙整前期（第一年）的調查成果。

- 廣域調查樣區之土砂移動類型分布調查（第二年）

2015 年 8/6 – 8/9 蘇迪勒颱風所帶來的豪雨，對試驗地福山植物園區有嚴重的影響，為了瞭解蘇迪勒颱風所造成土砂災害的類型及位置，本年度首先比較風災後新拍之衛星影像圖及歷史衛星影像圖，圈繪地貌變化或土砂移動位置。因試驗地多為天然林所覆蓋，小規模或是林冠下之土砂移動未必顯示於衛星影像圖，因此以人工探查方式，經由登山步道或是可通行路徑，記錄周遭土砂移動類型以及地點。第 2 章詳本年度調查成果。

- 颱風時期窄域監測樣區之水文、崩塌動態（第一、二年）

2015 年蘇迪勒颱風及 2016 年梅姬颱風侵襲下，監測樣區均記錄颱風期間水文反應，而梅姬颱風期間樣區發生崩塌，因此藉由兩颱風時期監測資料，探討水文反應與崩塌之間的關係，詳述於第 4 章。

- 廣域水文地質探查技術研發（第二年）

國有林班地之多陡峭、車輛無法進入之環境中，不可視之地中地下之水文地質資訊不易取得，除了小面積的詳細調查外，若欲擴大尺度，調查技術的研發為關鍵。本年度對簡易貫入試驗、簡易地下水井挖掘、地中音調查等技術進行改良及試用，探討其應用於山區環境之可能性。試驗結果詳述於第 5 章。

- 國有林班地上游集水區水與土砂移動之關係及特性

第 6 章統整上述各項調查結果，並探討國有林班地上游集水區水與土砂移動之關係及特性，提出相關議題之建言。

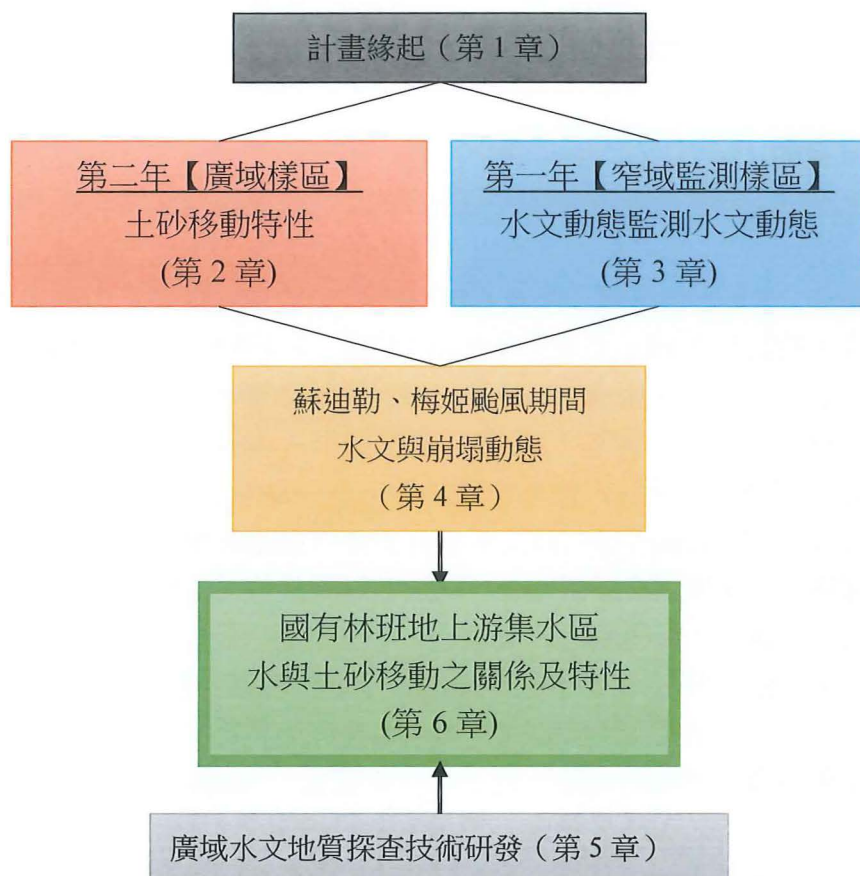


圖 1.1 研究架構圖。

2 土砂災害類型及位置調查

2.1 背景及目的

蘇迪勒颱風為2015年對台灣影響最大的颱風事件，主要降雨集中於新北市及宜蘭縣山區，魏倫瑋等（2015）調查指出，蘇迪勒颱風在烏來地區超過百處規模不一的崩塌事件，台9 甲線、環山路及平廣路沿線造成道路斷裂及土砂災害導致保全對象損害，統計結果顯示區域沿線總計183處土砂移動事件以及26處保全對象受損或道路斷裂，災害總面積約37.4 ha，顯見蘇迪勒颱風之影響。另外根據國家災害防救科技中心（張志新等，2015）災情統計，全臺道路中斷47處、水利設施受損17處及農業損失總計22億8,290萬4,000元，其中新北市、宜蘭縣、花蓮縣坡地災情較多。林業試驗所福山研究中心位於本次蘇迪勒颱風降雨中心及主要災情影響範圍內，上年度調查結果顯示，蘇迪勒颱風造成福山研究中心聯外道路多處坍方以及路基流失，使得園區封園數周，以及園區內登山道邊坡淺層坍方等災情，顯示山區道路邊坡為一崩塌高潛勢地點。為了瞭解蘇迪勒颱風於福山研究中心區域所造成土砂災害的類型及位置，本年度首先比較風災後新拍之衛星影像圖及歷史衛星影像圖，圈繪地貌變化或土砂移動位置。因試驗地多為天然林所覆蓋，小規模或是林冠下之土砂移動未必顯示於衛星影像圖，因此輔以人工探查方式，經由登山步道或是可通行路徑，記錄周遭土砂移動類型以及地點，藉由大尺度衛星影像判讀及詳細試驗地勘查，彙整土砂移動類型、狀態及分佈位置。

2.2 方法

2.2.1 歷年衛星影像之判釋與比較

本計畫使用物件導向影像分類軟體（eCognition，Trimble）對於蘇迪勒颱風前後 2013/9/3 及 2015/11/29 之衛星空拍影像進行影像判釋。本計畫使用美國 DigitalGlobe 公司以 WorldView-2 太陽同步衛星拍攝之彩色四波段衛星影像，地面解析度為 0.5 m。判釋流程主要分為影像分割以及影像分類（鄭雅文等，2008）兩個部分（圖 2.3）。影像分割是物件導向分類法用以生成影像物件的基礎步驟，原始影像是由許多像素（pixel）所構成，利用 Multiresolution Segmentation 演算法（多重尺度分割）將高相關性的像素合併為影像物件（Baatz et al., 2000），物件內容可提供影像中的資訊包含形狀與紋理資訊等，更有利於地物的辨識與分類（莊雲翰，2002）。之後對分割完成的影像物件進行影像分類，使用其光譜資料進行常態化差值植生指標（Normalized Difference Vegetation Index；NDVI）計算，Rouse et al.（1974）利用植物進行光合作用時會吸收可見光紅光波段並且反射紅外光波段的特性，提出 NDVI 之概念，NDVI 定義為近紅外光波段減紅光波段除以兩者之和，利用此指標可以判斷植生反射量之多寡，進行植生動態變化監測，其公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{式 2.1})$$

其中 NIR 為近紅外光段，R 為紅光段。NDVI 的值介於 1 至-1 之間，數值越接近 1 代表其植生覆蓋度越高，越低則代表水體、雲霧、裸露地等，而其中的水體包含水、雲、雪等容易反射比紅外光更多的紅光段，所以容易產生負值，而土壤、裸地、岩石等因為容易反射相近的紅光與近紅外光，所以理論上數值常接近於 0，但是因為每次拍攝衛星影像之狀況及條件不同，所以通常在每次處理衛星影像時仍需對於各類型地貌的門檻值進行校正。本計畫中門檻值校正的方法為，將 2013 年及 2015 年福山地區衛星影像先進行光譜校正後，從兩年分衛星影像內取出確定為植生及裸露地的區塊，各自選定一定數量的樣本，利用兩個年度所採樣本的光譜資料共同進行統計後，確立可以區分出植生及裸露地的 NDVI 門檻值，經過計算後，本次衛星影像判釋使用之門檻值為 0.5。利用此門檻值對於兩年度之影像物件進行分類，進而區分出植生以及裸露地之區域。最後將 2013 年及 2015 年衛星影像判釋之結果進行疊合，圈繪出兩年度衛星影像中 NDVI 值由植生變動為裸露地的區域，判定為蘇迪勒颱風後所產生之土砂移動事件。

利用上述衛星影像圈繪出的崩塌事件範圍，搭配經度 5m 福山試驗地數值高程模型圖層 (Digital Elevation Model, DEM)，進行各崩塌事件發生地點之地形判釋，以及坡度、坡向之分析。

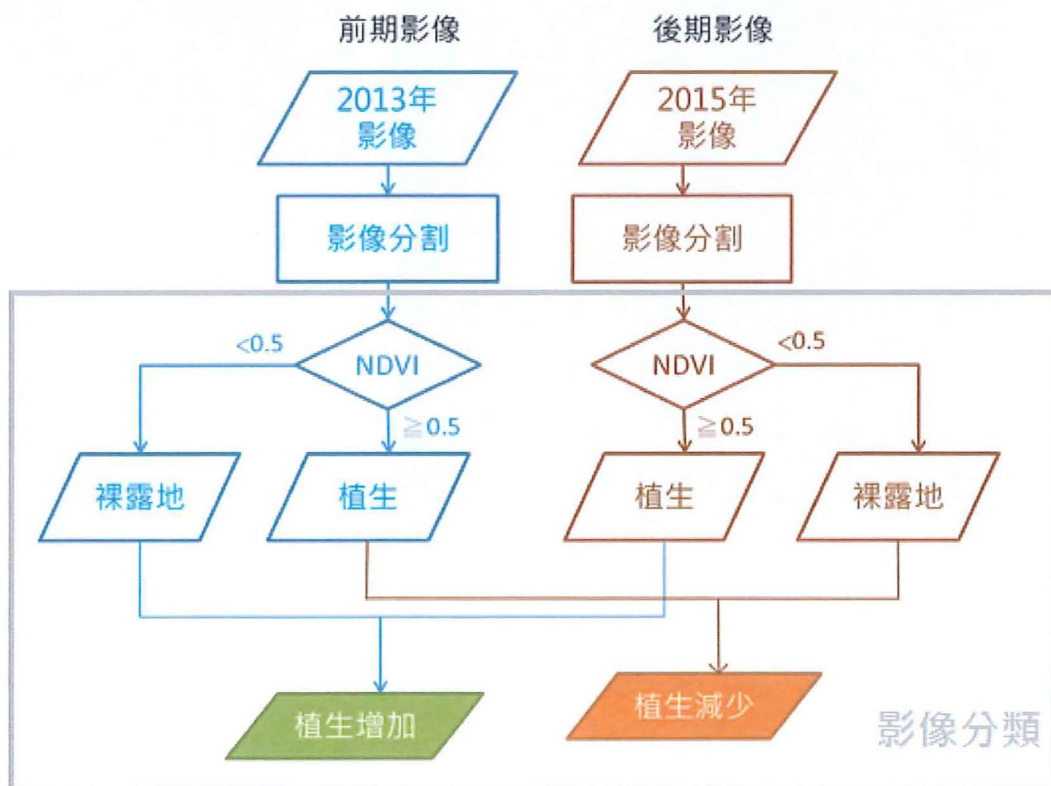


圖 2.3 衛星影像處理流程圖。

2.2.2 現地人工探查

以人工步行方式，沿著福山研究中心內水源林道、雙埤路以及粗坑溪三條路線進行土砂移動調查。圖2.4a中顯示個調查路線以及水系分佈，水系狀似緊鄰稜線，其乃俯視圖不易看出稜線及山谷之區別所至，圖2.4b則顯示了視覺上差異。

關於崩塌地調查項目，使用GPS全球衛星定位儀（eTrex 30, GARMIN）記錄航跡以及座標點位的功能，記錄土砂移動事件發生的位置，並且使用雷射測距儀（TruPulse 360B, LASER TECHNOLOGY），測量事件地表面的相對座標及高程，用以測量土砂移動事件之面積、坡度等規模數據，再使用相機、比例尺等工具對於土砂移動事件的現況做影像記錄。

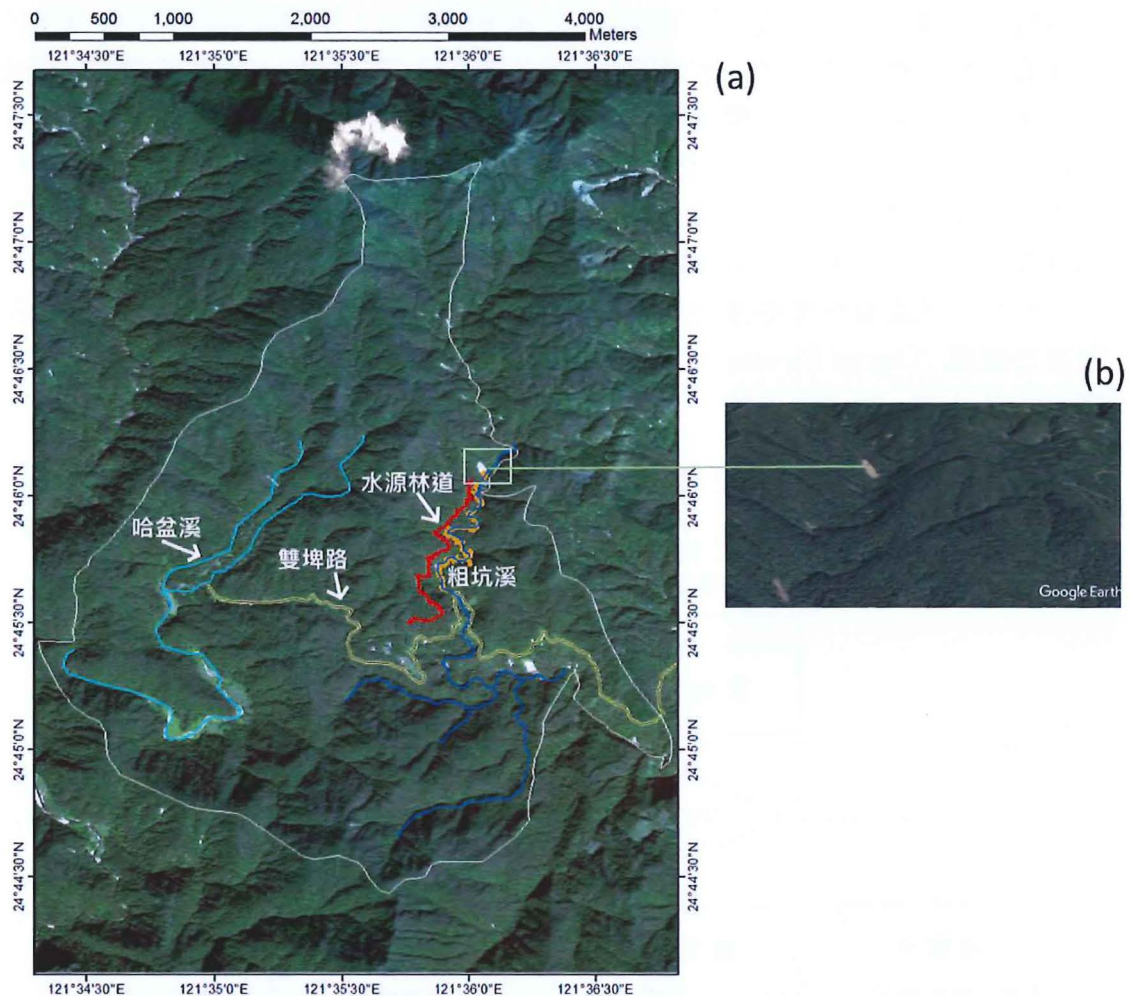


圖2.4 (a) 現地人工探查路線，及 (b) 調查對象之一崩塌地之google earth三維影像。圖2.4a紅色路線為沿水源林道之探查路段，橘色路線為沿粗坑溪之人工探查路段，雙黃線為雙埤路，藍色線段分別為粗坑溪及哈盆溪。白色線段內為福山研究中心區域。

2.3 結果

2.3.1 衛星影像分析結果

利用2013年及2015年衛星影像(圖2.5)可圈繪出的崩塌地變動區塊(圖2.6a)，可以看出發生位置主要多密集分布於粗坑溪沿岸(圖2.6b)及雙埤路兩側(圖2.6c)，另外哈盆溪集水區周圍也有少數事件分布(圖2.6d)，但相對於粗坑溪集水區較為零散。我們將利用軟體整個的每個區塊物件都視為一個單獨的土砂移動事件並進行統計，結果顯示由衛星影像觀測，福山區域內之崩塌變動事件總計141處，總投影面積推估約4.18 ha，其中以面積100 m²以下之事件所佔比例最多，為總數之50.4%，其中最大的事件投影面積為3576 m²，最小的事件則投影面積則為4 m² (圖2.7)。坡度之分析結果顯示，141處事件之平均坡度為23.0°，坡度分布範圍在0度~50度之間，依據坡度值域分布範圍，將坡度分布分為小於10°、10°~20°、20°~30°、30°~40°及40°~50°共5組，其中以小於10°佔所有事件比例33.3%為最高，其次以30°~40°佔所有事件比例19.9%及40°~50°佔所有事件比例19.2%為第二及第三(圖2.8)。坡向以北至東北、東北至東、東至東南、東南至南、南至西南、西南至西、西至西北、西北至北等八個方向進行分析，結果顯示，141處事件中，以東南至南(28.4%)為最多之坡向，其次以南至西南(17.0%)、西南至西(15.6%)及東至東南(14.9%)為常見崩塌坡向(圖2.9)。

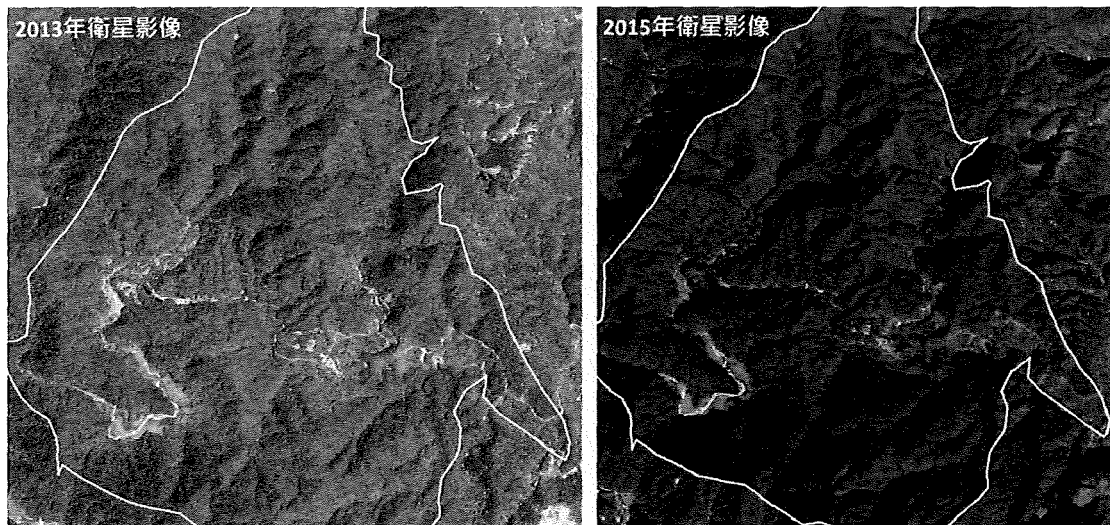


圖 2.5 2013 年及 2015 年衛星影像以及崩塌區塊圈繪。圖中的紅色區塊即為圈繪之崩塌區塊。

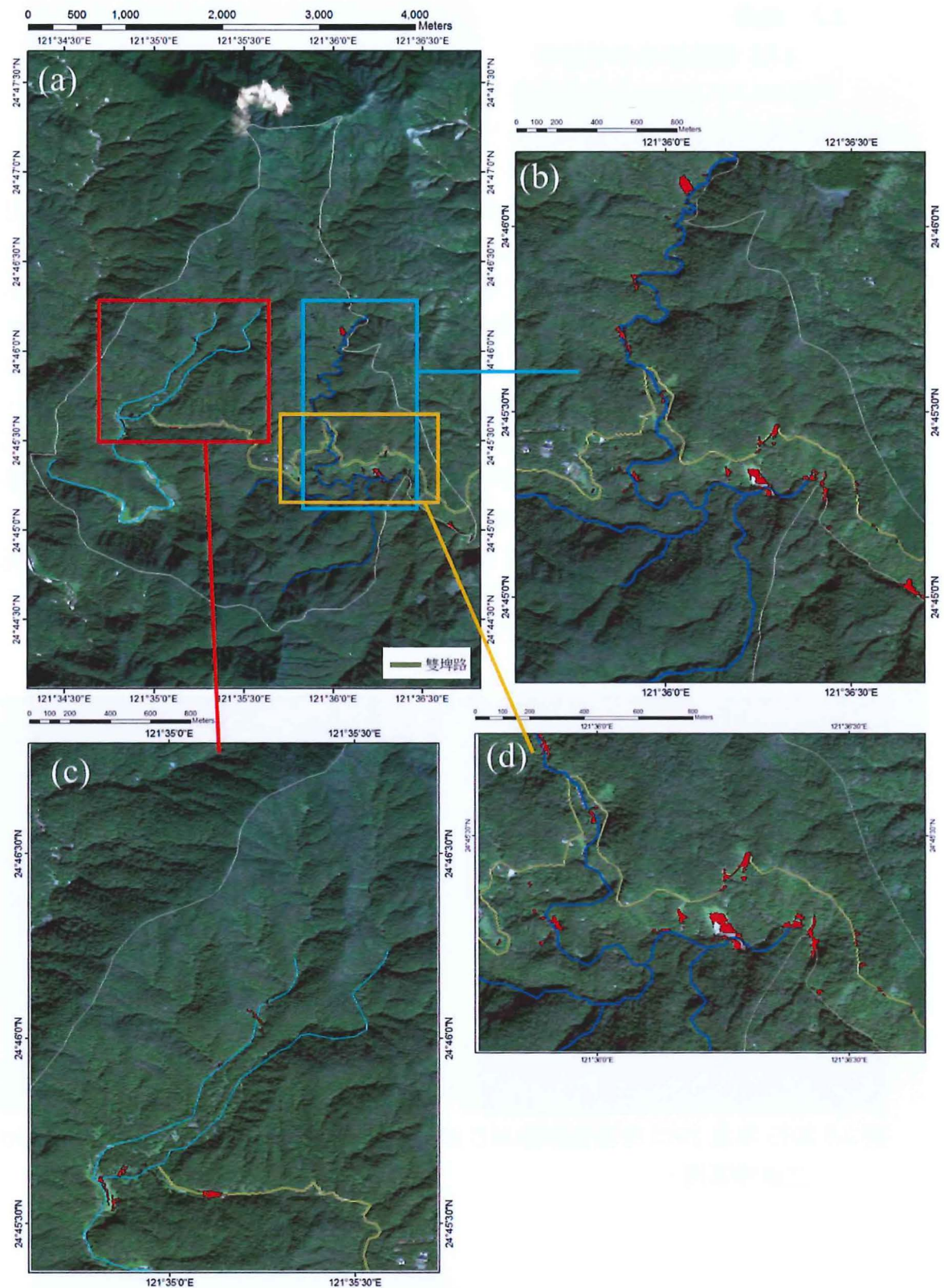


圖2.6 利用2013年及2015年衛星影像圈繪崩塌地變動區塊結果。底圖為2015衛星影像，紅色的區塊為蘇迪勒後產生崩塌變動之區塊，雙黃線為雙埤路。藍色線段分別為粗坑溪及哈盆溪。(a) 為福山試驗中心全域。(b) 為粗坑溪集水區。(c) 為哈盆溪集水區。(d) 為雙埤路沿線區域。

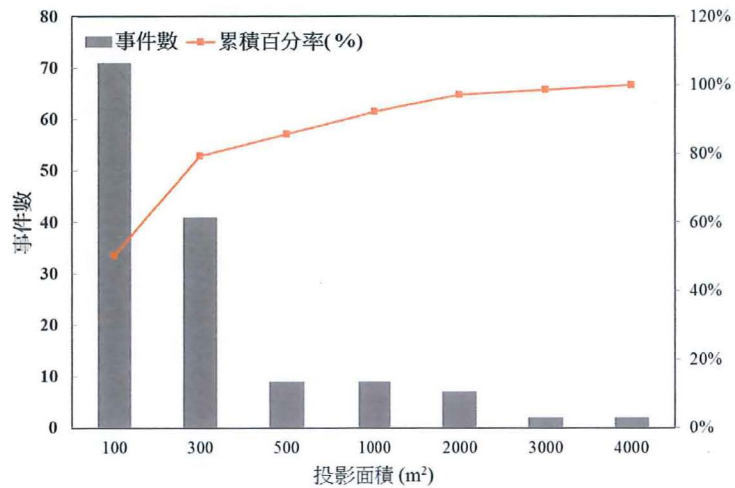


圖 2.7 衛星影像圈繪崩塌事件投影面積分布直方圖。

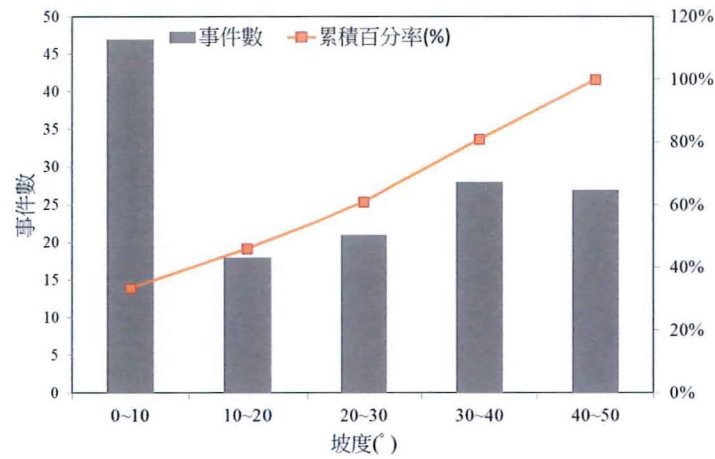


圖 2.8 衛星影像圈繪崩塌事件坡度分布直方圖。

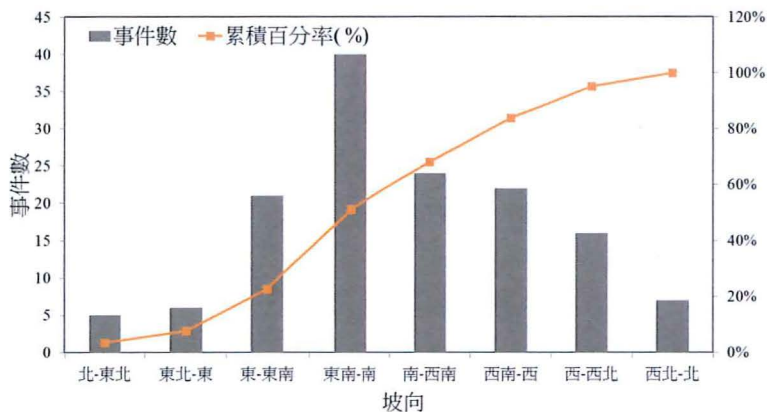


圖 2.9 衛星影像圈繪崩塌事件坡向分布直方圖。

由衛星影像圈繪之結果得知，以衛星影像所探查到蘇迪勒颱風過後所造成之崩塌事件主要分布於粗坑溪沿岸、雙埤路沿線，相較之下哈盆溪集水區中發生

區域東南-南向坡土砂移動事件共 15 件最多，其次南-西南坡向土砂移動事件 13 件，雙埤路區域之土砂移動事件則主要發生在東南-南向坡及西南-西向坡，分別為 4 件及 6 件。整體而言，三處區域皆在東南-南向坡向有較多的土砂移動事件，若以蘇迪勒颱風經過臺灣的路線進行判斷，發現蘇迪勒颱風是於台灣東岸中部登陸，在影響臺灣的時間裡，宜蘭及福山地區多受到東向至南向風影響，而哈盆溪與粗坑溪環境因子差異不大，集水區遇同一颱風崩塌結果卻有明顯差異，故推斷東南-南向坡應為福山地區受蘇迪勒颱風之迎風面，故造成此坡向之坡面有較多土砂移動事件發生，再利用經建會三版台灣地形圖進行地形判釋，發現粗坑溪集水區之東-南側雙連埤至宜蘭地區海拔較低，且多為平坦地勢，無其他地形遮擋，導致粗坑溪集水區因位處福山地區東南側而相較於哈盆溪集水區更為直接的受到強風及攔截地形雨的影響，加上粗坑溪對於其坡腳之侵蝕，使蘇迪勒颱風對粗坑溪集水區造成數量較多的土砂移動事件。但哈盆溪在西-西北向也有一定數量的事件，藉由衛星影像以及坡向圖疊加後進行判釋，發現哈盆溪區域西-西北向土砂移動事件多位於河道，且坡度多小於 10° ，推測這些事件可能為河道變動之區域。此外，相較於粗坑溪及哈盆溪集水區，雙埤路除了東南-南向之事件外，在西南-西向坡以及西-西北向坡也出現較多的事件，推測雙埤路因屬於人為開發道路，可能造成偏西向之邊坡不穩定，導致雙埤路相較於自然情況下此坡向更易產生土砂移動事件。

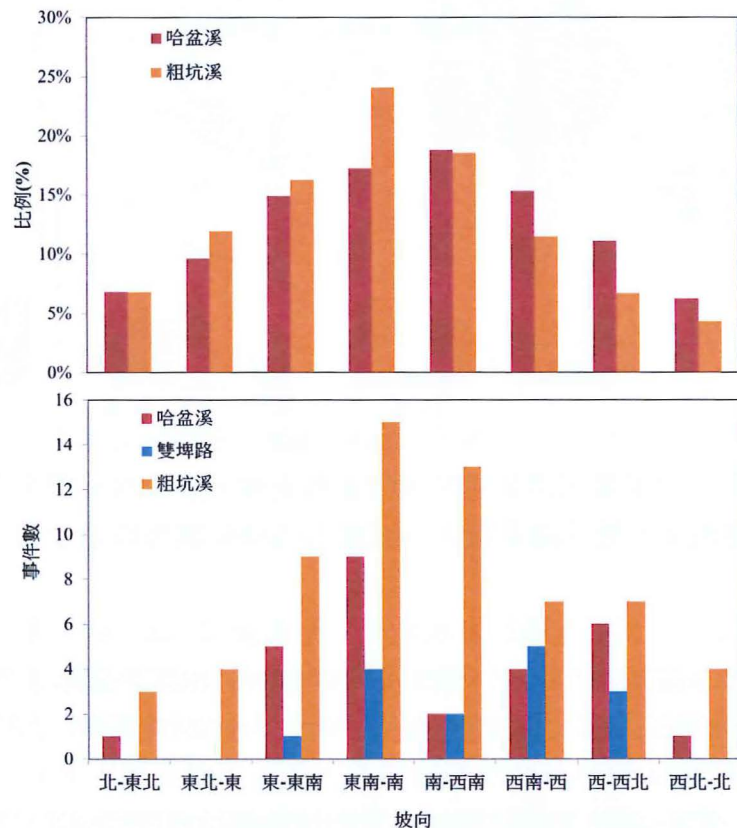


圖 2.12 (a) 哈盆溪集水區及粗坑溪集水區全域坡向分布比例直方圖。(b) 哈盆溪、粗坑溪及雙埤路區域之各坡向土砂移動事件數量分布直方圖。

2.3.2 人工探查結果

現今通行之山崩分類法仍未有統一之標準，目前各種分類法中，以Varns (1978) 所發表之山崩分類法最被廣為採用，以山崩運動型態及山崩料源種類作為分類之依據，經濟部中央地質調查所修改自Varns (1978) 的分類，將岩石之墜落及傾覆合稱為落石，岩石之滑動則稱為岩體滑動，並將所有岩屑、土材料之墜落、傾覆及滑動合稱為岩屑崩滑，針對岩石、岩屑及土之流動稱為土石流。因此，地調所將山崩分成岩屑崩滑、岩體滑動、落石及土石流等四類（楊樹榮等，2011）。但若依照此分類，本次調查之事件多屬於岩屑滑崩，並無法確切描述調查中所觀察到較小規模之事件。故依照目前調查結果，將福山試驗中心內的土砂移動事件以人為判釋大致分為四類，包括裂縫（圖2.13a）、山壁及路基崩塌（圖2.13b）、沖蝕溝或溪溝（圖2.13c）以及複合發生類型四類，其中裂縫意指崩塌或滑動部位上緣所產生的可見縫隙，其縫隙日後擴大甚至崩滑可能性高者，而複合發生類型意指同一測點發生同時發生一種類型以上的事件。。

水源林道總計有30處土砂移動事件（表2.1），主要以裂縫、山壁及路基崩塌為主，其中裂縫7處（佔本路線所有事件數量比例23%），山壁及路基崩塌13處（佔本路線所有事件數量比例44%），裂縫及崩塌複合發生4處（佔本路線所有事件數量比例13%），既存之沖蝕溝及溪溝6處（佔本路線所有事件數量比例20%）（圖2.15），一處大型坍方使得林道後段無法徒步通過（圖2.14），導致林道後段之崩塌事件目前無法以人力調查，而現地情況允許測量面積的崩塌事件在水源林道有6處，其他事件則以長度測量之方式表示其規模。測量結果顯示，可測量面積的6處崩場地，其平均表面積為47.7 m²，其中崩塌表面積最大為101.4 m²，最小為6.9 m²，6處崩塌事件的平均坡度則是46.8°，最大坡度為61.9°，最小坡度為29.6°。

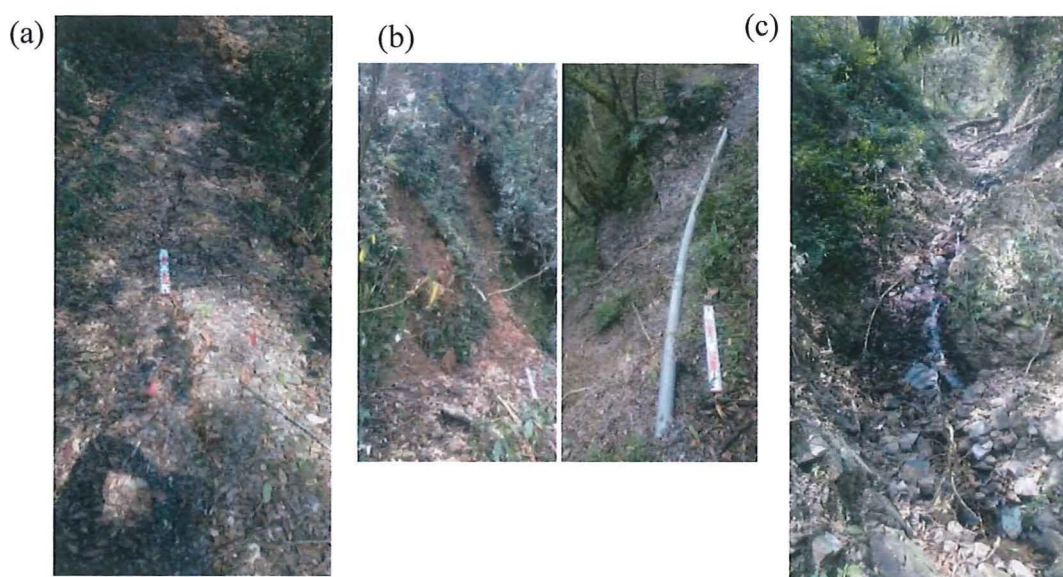


圖 2.13 土砂移動事件。(a) 裂縫，(b) 山壁及路基崩塌，(c) 沖蝕溝或溪溝。

221.2 m²，其中崩塌表面積最大為587.8 m²，最小為31.4 m²，平均坡度則是49.9°，最大坡度為56.4°，最小坡度為40.0°。2處蘇迪勒所造成的崩塌事件中，僅有1處事件（事件編號85）能進行人工測量，其崩塌表面積為587.8 m²，坡度為47.0°，為雙埤路人工調查事件中表面積最大的事件。

表 2.3 雙埤路土砂移動事件特性整理

測量地區	測點	面積(m ²)	投影面積(m ²)	坡度(°)	坡向
雙埤路	1	75.6	38.9	52.7	西北-北
	2	77.1	41.5	40.0	西南-西
	3	136.3	87.1	56.4	西-西北
	4	481.5	297.6	50.3	西-西北
	5	70.6	39.5	50.3	南-西南
	6	171.8	88.5	52.7	東南-南
	7	358.6	206.6	43.7	南-西南
	8	31.4	17.6	56.4	東-東南
	9	587.8	309.5	47.0	南-西南
Average		221.2	125.2	49.9	
Max		587.8	309.5	56.4	
Min		31.4	17.6	40.0	

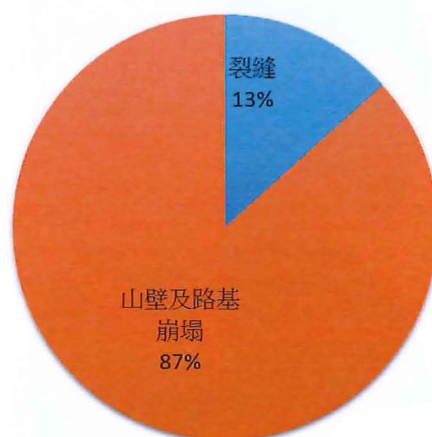


圖 2.17 雙埤路土砂移動事件數量比例圓餅圖。

經由人工探查結果得知，三條路線雖皆位於粗坑溪集水區附近，但所探查到的土砂移動事件型態及物理特性仍有一定程度的差異，為了瞭解造成差異之原因，將三條路線的土砂移動事件之人工調查結果進行比較。比較結果發現，水源林道

相對於雙埤路及粗坑溪屬於較小規模之土砂移動事件，觀測到的崩塌面積幾乎都分布在 100 m^2 以下，衛星影像多半受到樹冠遮蔽影響，而雙埤路以及粗坑溪沿岸之土砂移動事件則相對規模比較大，雙埤路觀測到的崩塌面積從小型到中大型皆有，而粗坑溪雖然目前調查樣本數偏少，但無論是觀測的樣本還是實地觀察也發現幾乎都是中大型的土砂移動事件（圖 2.18）。

從坡度的結果來看，水源林道及粗坑溪的崩塌地坡度多集中在 $40^\circ \sim 50^\circ$ ，而雙埤路之崩塌事件坡度多在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。水源林道及粗坑溪結果相近可能因為水源林道位於粗坑溪坡岸上方，雙埤路崩塌事件坡度略高於另外兩條路線（圖 2.19），推測因為雙埤路乃人工建造，其坡面及地基經過多次施工維護，使其淺層地質較其他兩地穩定，需要在較為陡峭的地形下才較有可能形成淺層之土砂移動事件。總結三處路線調查之結果，發現福山地區土砂移動多屬於山壁及路基之崩塌，尤其以坡度超過 $35^\circ \sim 40^\circ$ 之坡地為好發區域。

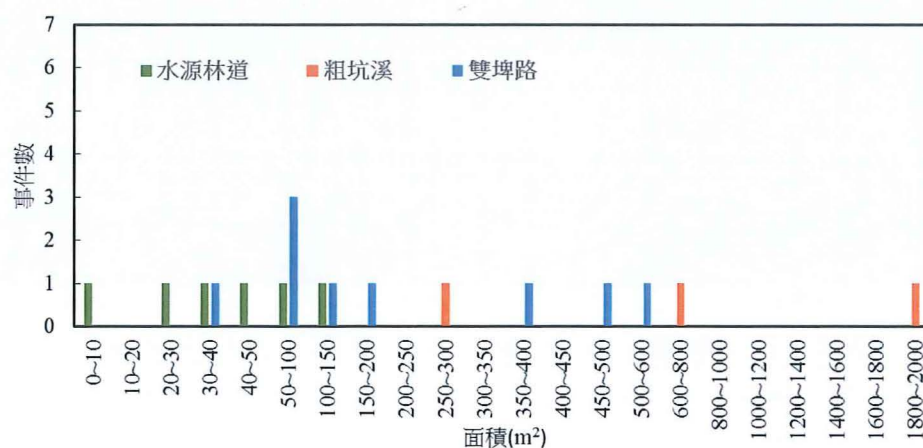


圖 2.18 三條人工探查路線崩塌地表面積分布直方圖。

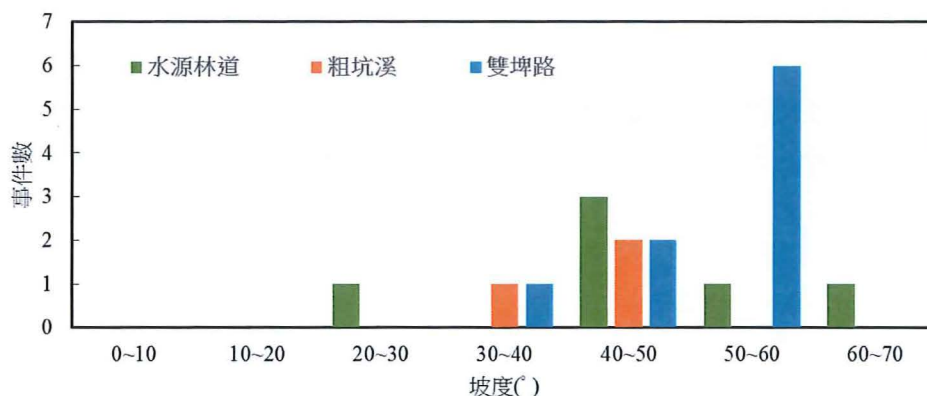


圖 2.19 三條人工探查路線崩塌地坡度分布直方圖。

從土砂移動事件來看，人工調查的結果顯示，三條路線都有出現山壁及路基的崩塌，屬於較廣泛出現的類型，而沖蝕溝則多發生在粗坑溪沿岸及水源林道，裂縫主要出現在水源林道及雙埤路，可能屬於岩屑滑崩冠部之裂縫或為人工建造之地基小範圍之位移引起的現象（圖2.20）。

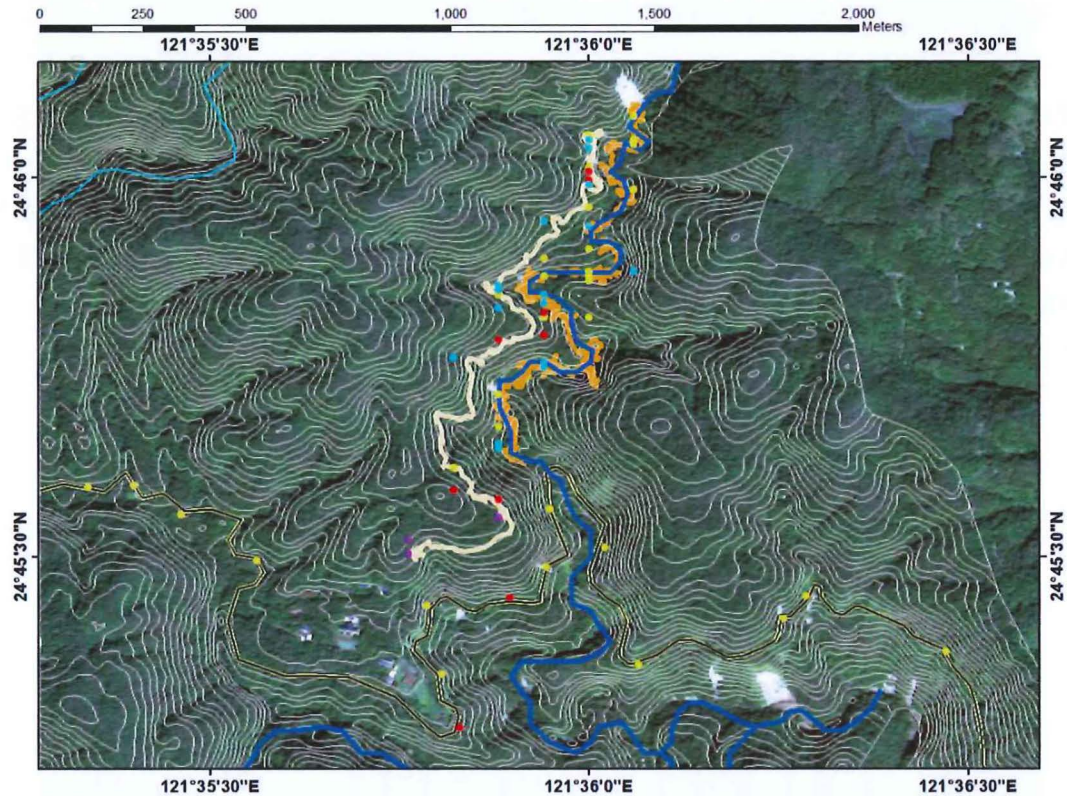


圖 2.20 人工調查土砂移動事件類型位置分佈圖。底圖為 2015 年衛星影像及福山 10 m 高程之等高線圖。黃色的點為山壁及路基崩塌分布位置。藍色的點為沖蝕溝或溪溝分布位置。紅色的點為裂縫分布位置。紫色的點為複合類型土砂移動分布位置。米色路線為沿水源林道之探查路段。橘色路線為沿粗坑溪知人工探查路段。雙黃線為雙埤路。深藍色線段為粗坑溪。

2.4 討論

2.4.1 利用遷急線分析瞭解哈盆溪集水區及粗坑溪集水區地勢變動

衛星影像圈繪之結果顯示，在粗坑溪區域之土砂移動事件總共圈繪 63 處，在哈盆溪區域之土砂移動事件總共圈繪 28 處，在雙埤路區域之土砂移動事件總共圈繪 15 處。蘇迪勒風災在粗坑溪集水區內造成之土砂移動事件數量遠高於哈盆溪集水區及雙埤路，但粗坑溪集水區及哈盆溪集水區全域之坡度、坡向分布比例之差異並不是非常明顯，也就是說土砂移動事件多發於在看似地形環境相似的兩集水區之一，是一值得深究的議題。比較圖 2.6b 與 2.6c，發生於粗坑溪之土砂移動事件看似位於地形坡度變化大的位置，因此我們利用福山地區網格精度 5 m 之數值高程模型，製作之 10 m 等高線圖及坡度圖，套疊後進行兩區域之遷急線位置及數量進行判釋。就地形變化而言，坡地或河谷環境中坡度急遽變化處稱

為遷急點，遷急點的連線則稱為遷急線，這樣的地形特徵具有土砂沖蝕、易生崩塌之特性 (Crosby et al., 2006)。為了瞭解調查區域之遷急線分佈，高程由高至低、坡度由小變大處、坡度於垂直等高線方向 20 m 內變化超過 20° 的等高線段區域，即判定為遷急線。經由人工判釋遷急線後，對於粗坑溪集水區及哈盆溪集水區進行遷急線密度分析，藉以表示該區域地勢變化程度。遷急線判釋結果如圖 2.21 以及表 2.4，粗坑溪集水區面積 1746070 m^2 ，區域內共有 175 處遷急線，遷急線總長 9850.6 m，平均遷急線長 56.3 m，集水區內遷急線密度為 100.2 處/100 ha，粗坑溪集水區內平均每 ha 有 56.4m 的遷急線，哈盆溪集水區集水區面積 3573070 m^2 ，區域內共有 260 處遷急線，遷急線總長 14409.3 m，平均遷急線長 55.4 m，集水區內遷急線密度為 72.8 處/100 ha，粗坑溪集水區內平均每 ha 有 40.3 m 的遷急線，此結果顯示粗坑溪集水區遷急密度以及連續性較哈盆溪高，代表粗坑溪集水區內地勢變動較哈盆溪集水區明顯。

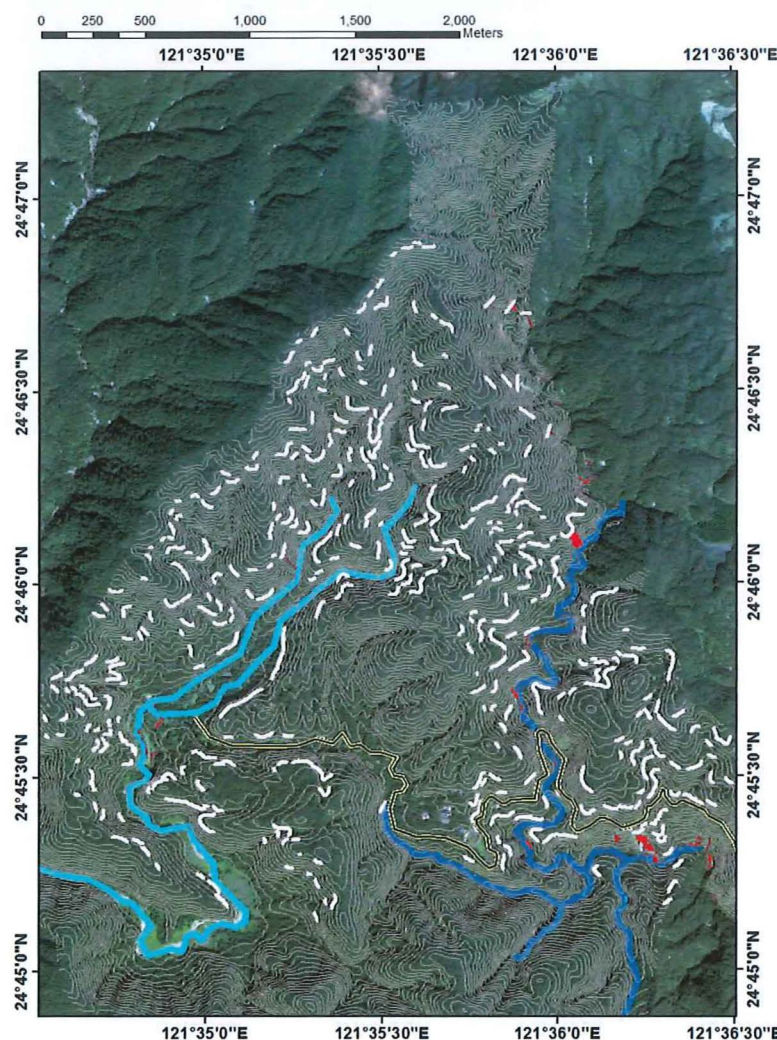


圖 2.21 衛星影像圈繪土砂移動事件與其附近遷急線之相對位置。圖中灰色線段為福山地區內地形等高線，白色線段為土砂移動事件附近之遷急線位置，紅色區塊為衛星影像圈繪之土砂移動事件，深藍色線段為粗坑溪，淺藍色線段為哈盆溪，雙黃線為雙埤路。

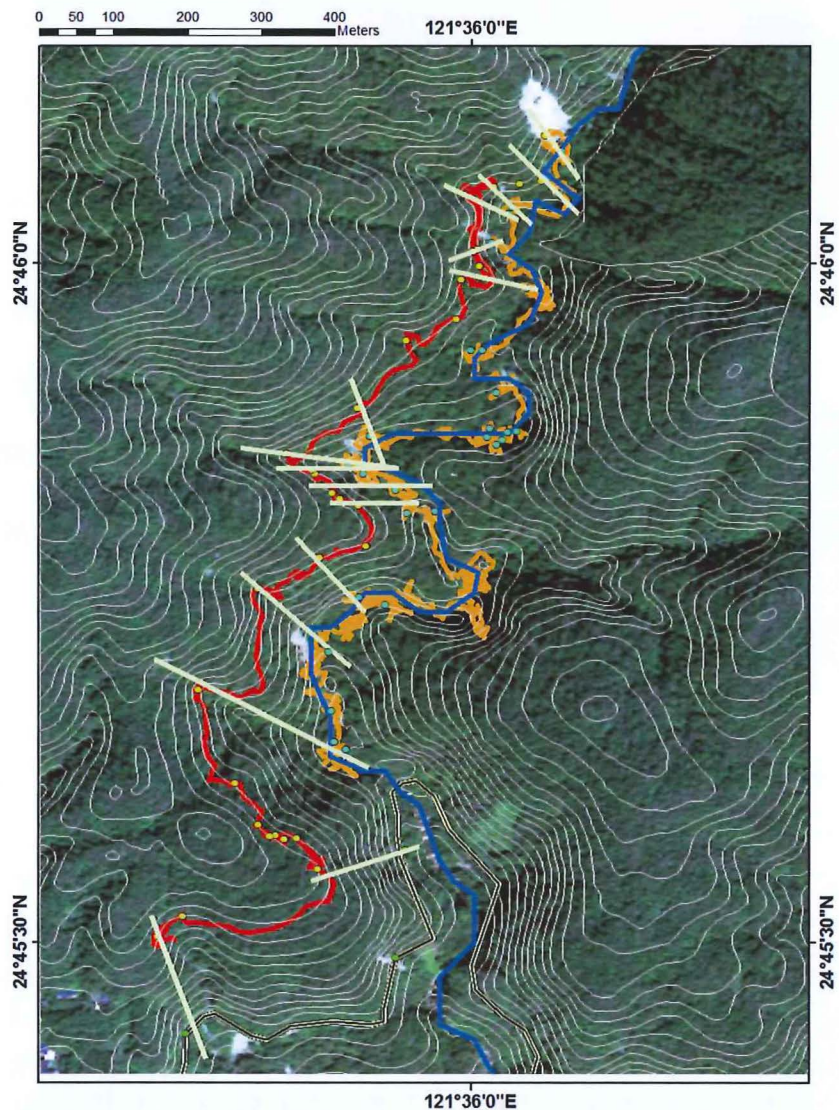


圖 2.23 人工探查土砂移動事件發生點位以及福山 10 m 高程之等高線圖。水源林道土砂移動事件為黃色圓點。粗坑溪沿岸土砂移動事件為藍綠色圓點。紅色路線為沿水源林道之探查路段。橘色路線為沿粗坑溪知人工探查路段。雙埤路土砂移動事件為綠色圓點。藍色線段為哈盆溪。淺綠色虛線為參考地形等高線所畫同坡面崩塌事件。

2.4.3 衛星影像與人工探查之差異

將衛星影像圈繪之崩塌地變動區塊圖層與人工探查之點位及路線疊合並進行判釋（圖2.24），比較後發現：

1. 水源林道：因天然林樹冠遮蔽以及多數崩塌規模較小的原因，衛星影像並沒有圈繪到水源林道內多數的崩塌事件。
2. 雙埤路及粗坑溪：因其上方無遮蔽屬於較開闊之地形，衛星影像所圈繪的也多侷限在這兩條測線上。然而現地人工探查的結果，有些點位的崩塌地未顯示

於衛星影像上，除了衛星影像判釋之反射光譜特性的差異外，這些地點多在坡度較大的地方，山壁岩屑崩落難以透過衛星影像判定。

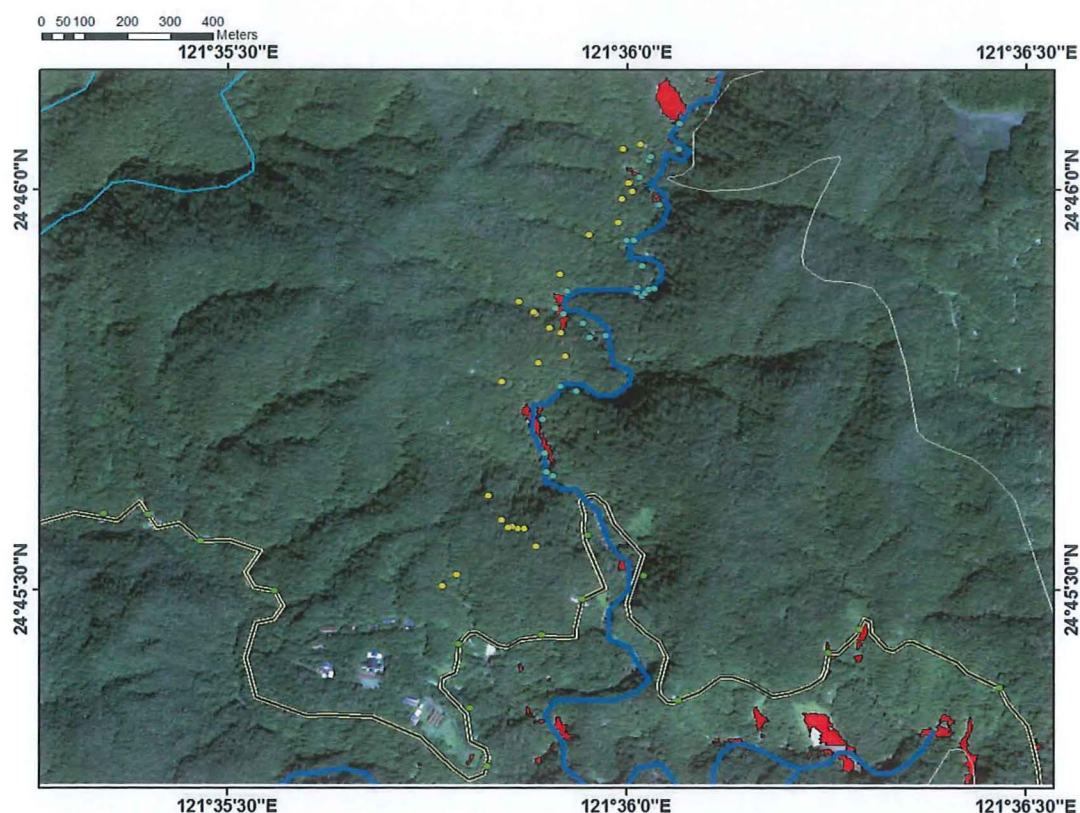


圖 2.24 衛星影像圈繪結果及人工調查點位整合圖。底圖為 2015 衛星影像。紅色的區塊為衛星圈繪之蘇迪勒颱風後產生崩塌變動之區塊；黃色圓點為水源林道人工探查之土砂移動事件點位。藍色圓點為粗坑溪沿岸人工探查之土砂移動事件點位。綠色圓點為雙埤路人工探查之土砂移動事件點位。深藍色線段為粗坑溪。雙黃線為雙埤路。

除了上述的限制外，就崩塌位置、數量、面積的判定上，我們也發現衛星影像與人工探查的差異。就崩塌位置及數量而言，人工探查判釋為單一的崩塌事件，但在衛星影像判釋法中有被判定成兩個或更多事件的情形發生，如圖2.25，紅色的區塊為衛星影像圈繪之崩塌地，藍色的點則為人工探查點位，在人工探查時此區域判釋為3個事件，但是衛星影像圈繪時，卻將此區域判定為8塊大小不一、不相連接的事件區塊。

就崩塌面積而言，比較兩筆衛星影像與人工探查地點的資料(表2.6，圖2.26)，點45現地測量的大小比衛星圈繪的結果明顯的大，但是在點38的結果則相反，衛星影像圈繪的範圍面積比人工探查測量的投影面積大，衛星影像在越大尺度的崩塌事件上的測量能得到較小的誤差。若將兩筆資料加總後再進行比較，發現兩種測量方法之面積結果差距就拉近，因此崩塌事件的面積會受到衛星影像判釋、圈繪方法的影響，與現地實際狀況有差異。

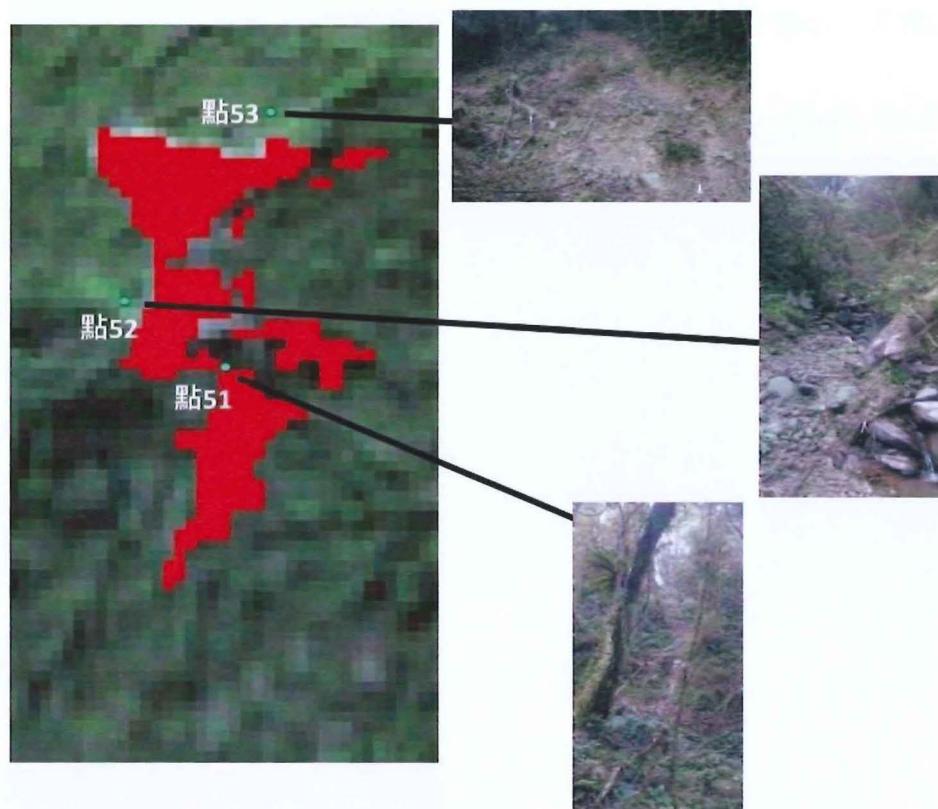


圖 2.25 人工調查點位 51~53 之探勘現地照片及衛星影像圈繪結果比較。人工調查現場判別為 3 處崩塌事件，但衛星影像圈繪判釋為 8 處不同區塊事件。

表 2.6 衛星影像圈繪及人工探查面積資料比較

點位	投影面積 (m^2)	衛星影像 圈繪編號	衛星影像 圈繪面積(m^2)	事件
45	567.5	35	192	崩塌、倒木
38	1331.7	34	1956	崩塌、倒木
點位加總	1899.2		2148	

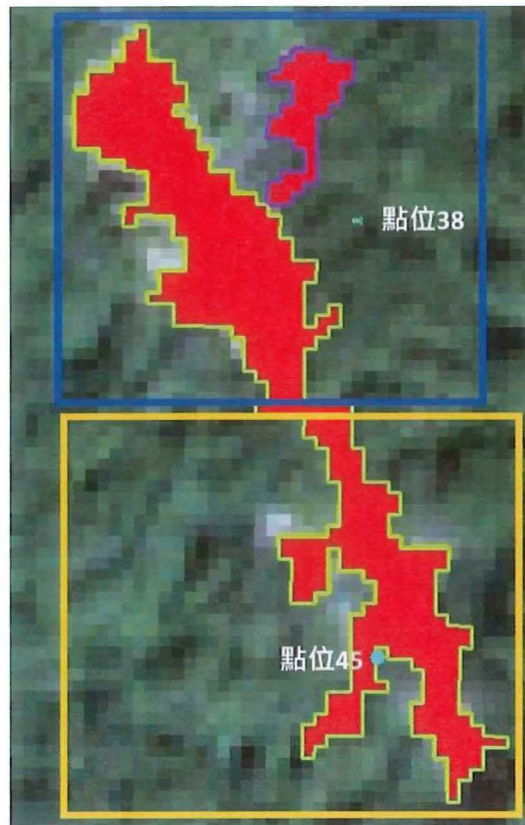


圖 2.26 衛星影像圈繪及人工探查範圍判定示意圖。紅色區塊為衛星影像圈繪之崩塌事件範圍。藍色點位為人工調查之崩塌事件 GPS 座標位置，綠色框線範圍為衛星影像圈繪點位 45 事件之範圍，紫色框線範圍為衛星影像圈繪點位 38 事件範圍。黃色方框為人工調查現地判釋點位 45 之崩塌事件範圍，藍色方框為人工調查現地判釋點位 38 之崩塌事件範圍。

2.4.4 蘇迪勒颱風在烏來地區與福山試驗中心造成災害比較

我們將目前得到的衛星圈繪結果以及人工調查的測量結果與蘇迪勒颱風在烏來地區（南勢溪集水區、烏來區之台9甲線、環山路及平廣路沿線等地）所造成的災害情形進行比較（表2.7），根據張志新等（2015）在2015年蘇迪勒颱風災害調查彙整報告中所指出，烏來地區因地層受到多條斷層分布的影響，坡體內不連續面廣泛延伸，集水區內之地層因雨水浸潤、沖刷，容易產生崩解狀態，進而使得坡體產生破壞滑動，部分坡體在人為過度的開發下，也造成烏來地區多處土砂移動災害的原因，此現象與本次調查，衛星影像圈繪之結果顯示，蘇迪勒颱風在福山地區所造成之土砂移動災害多發生在雙埤路沿線坡面之崩塌及路基坍塌，以及人工架設之林道路基坍塌之結果基本吻合，也與魏倫瑋等（2015）在蘇迪勒颱風於臺灣北部之山崩致災機制初探中所舉例烏來地區平廣路等多處道路沿線發生土砂災害的結果類似，另外魏倫瑋等（2015）也整合烏來地區因蘇迪勒颱風造成之災害特性，指出蘇迪勒颱風於台灣北部造成之山崩災害多屬岩屑崩滑之類型，其中規模較大者通常係硬頁岩之風化，或發生於30至50度順向坡之陡坡

表 2.8 蘇迪勒颱風在福山地區造成災害與其他土砂移動事件之比較

	福山地區 土砂移動事件	2004~2010 年台灣其他地區 181 處淺層崩塌
高程分布	福山試驗中心海拔 400~1400m 土砂移動事件多分布在 600~800m	淺層崩場地分布於 46.0~2361.6 m 北部區域以小於 400 m 比例較高
坡度分布	坡度分布範圍在 0°~50°之間 小於 30°佔所有事件比例 60% 30°~50°事件佔所有事件比例約 40%。	坡度分布範圍 10°~76°之間 坡度 50°以下佔全部崩場地之 87.3%，30~40°32.0%， 20~30°29.3%。
坡向分布	東南至南（28.4%） 南至西南（17.0%） 西南至西（15.6%） 東至東南（14.9%） 為常見崩塌坡向	東南及南向坡（44.2%） 東南至西向坡（71.9%）
整合結果	福山地區土砂移動事件海拔略高於北部其他事件 福山地區土砂移動事件於低坡度發生比例較高 福山地區土砂移動事件坡向分布與其他事件吻合	

2.5 小結

本研究利用衛星影像圈繪以及人工調查之方式，針對蘇迪勒颱風對於林試所福山研究中心區域內之土砂災害進行調查，並將目前所得結果與烏來地區進行比較，所獲結論如下：

1. **衛星影像圈繪：**利用蘇迪勒颱風前後 2013 年及 2015 年之衛星影像分析，顯示福山區域內因蘇迪勒颱風產生 141 處崩塌事件，主要分佈在雙埤路沿路及粗坑溪沿岸。崩塌總投影面積推估約 4.18 ha，其中以面積 100 m² 以下之事件所佔比例最多（50.4%）；平均坡度為 23.0°，小於或大於 30° 分別佔所有事件比例 60%及 40%；坡向以東南至南為最多（28.4%），主要受蘇迪勒颱風迎風面。衛星影像圈繪可以較為快速且大範圍的確立崩塌事件的位置以及面積資料，但因受到植被冠層以及崩塌地位置的影響，其判釋及解讀仍會與現地狀況有所差異。
2. **人工調查：**人工調查結果顯示水源林道總計30處土砂移動事件，粗坑溪沿岸 27處以及雙埤路15處，此方法能獲得現地狀況以及樹冠層下小規模事件之資訊，但耗時長，且因為地形等因素，許多人力不可及的地區無法進行調查，但判斷土砂移動類型，對於輔助影像判釋有莫大成效。

3. **利用遷急線分析瞭解哈盆溪集水區及粗坑溪集水區地勢變動：**利用遷急線分析發現粗坑溪集水區遷急線密度以及連續性高於哈盆溪，顯示粗坑溪集水區之地形變化程度較哈盆溪明顯，再將各範圍內之土砂移動事件依不同地形區域進行面積分布之分析，發現粗坑溪集水區內之土砂移動事件面積分布於遷急線區域45%為最高，而哈盆溪集水區內之土砂移動事件面積分布則以河道變動為主，暗示地形變動可能為導致粗坑溪集水區之土砂移動事件遠高於哈盆溪集水區之成因之一。
4. **粗坑溪沿岸坡面土砂移動事件連動性之探討：**水源林道內多為小規模之土砂移動事件，粗坑溪及雙埤路則多為中大規模。坡度的結果來看，水源林道及粗坑溪的崩塌地坡度結果相近多集中在 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 且略小於雙埤路之崩塌事件坡度，此結果暗示雙埤路具有邊坡工程助力，使其淺層地質較其他兩地穩定，需要在較為陡峭的地形下才較有可能形成淺層之土砂移動事件。總結三處路線調查之結果，發現福山地區土砂移動多屬於山壁及路基之崩塌，尤其以坡度超過 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之坡地為好發區域。比對水源林道及粗坑溪之土砂移動事件點位，發現多數水源林道內之土砂移動事件，皆可在其下方（粗坑溪沿岸）找到相對應的事件，暗示粗坑溪沿岸順向坡側之土砂移動可能具有連動性。
5. **衛星影像與人工探查之差異：**衛星影像圈繪之結果會受到物件導向分析法的影響，崩塌地的判定區塊可能會與現地狀況不符合，可以配合人工調查結果一起解讀進行修正，而目前的結果顯示衛星影像圈繪之事件面積越大，其判定圈繪的事件面積越大跟人工調查的實際結果誤差可能會越小。總體而言，雖然利用衛星影像圈繪之方法快速便利且可以處理大範圍之資料，但仍需進行人工調查以取得現地狀況，可以輔助影像圈繪之判讀以及校正，使結果更貼近於現地狀況。
6. **蘇迪勒風災造成福山與烏來地區土砂災害比較：**蘇迪勒颱風降雨中心位於台灣北部及宜蘭地區，對於北部區域及山區造成衝擊，以本次調查結果與蘇迪勒颱風對於烏來地區造成之土砂災害比較，發現本次蘇迪勒颱風造成福山與烏來之崩塌事件多好發在道路邊坡及路基，以及溪流沿岸。好發坡度多約在 $30 \sim 50$ 度，多數事件以小規模崩塌為主。蘇迪勒颱風其短延時，強降雨之特性使得順向坡土體容易崩解滑動，加上坡度較為陡峭，其上的岩屑土體就容易崩落形成崩塌，而烏來地區因其長期人為開發導致其事件規模總體而言比福山大、對於保全對象之影響也更加嚴重，未來應對於好發崩塌地點如道路邊坡以及溪流沿岸坡面等地區需多加監測及注意，以利於未來土砂災害之防範。

位置及基部直徑(如圖 3.3c),記錄對象為周長大於 10 cm (即基徑大於 3.2 cm) 者,樣區中滿足此條件的樹木總共有 519 棵。

● 加權植生密度 (Wvd) 及加權斷面積 (Wba)

為了探討植生大小及分布對地表含水率是否有影響,參考 Tromp-van Meerveld and McDonnell (2006) 的分析方法,分別以加權植生密度 (weighted vegetation density, Wvd) 與加權斷面積 (weighted basal area, Wba) 評估各地表含水率測量樣點 (後詳述) 受植生的影響。各樣點的 Wba 及 Wvd 係利用式 3 計算:

$$Wba = \sum_{i=1}^n ba_i \times e^{-L_i}$$

$$ba = 1 \rightarrow Wba = Wvd \quad (\text{式 3.3})$$

式 (3.3) 中 n 是樣區內基部周長大於 10cm 的植株數, ba 是各植株的基部面積 (basal area, m^2), e^{-L} 用來表示各植株的權重, e 代表自然對數的底數, L 是植株與測量樣點的距離(m), L 越大則權重越小,亦即距離越遠的植株,對於樣點的影響就越小。 Wvd 的計算方式則僅考慮樣點周圍的植株數量與距離的影響,而不考慮各植株的基徑大小,因此即可設定 $ba = 1$ 。

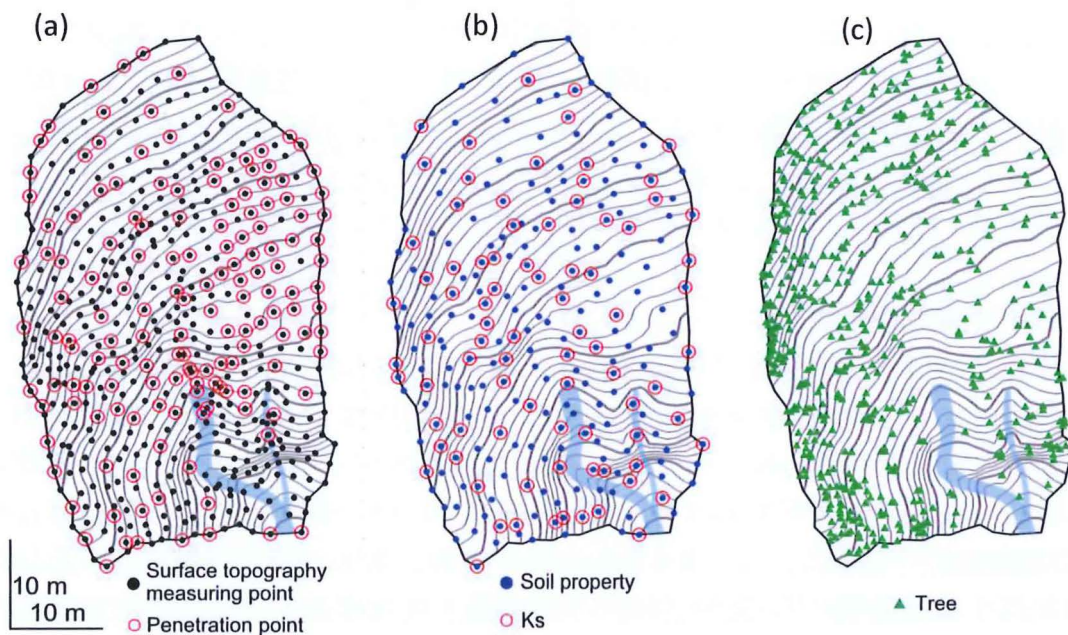


圖 3.3 儀器設置及測量分布點位。(a) 微地形測點及貫入測點, (b) 土壤物理性質採樣點及飽和水力傳導度(Ks)測點, (c) 植生分布

3.2.6 水文現象觀測

水文觀測項目可分自動監測及人工觀測兩大類。人工觀測主要包括高測點數的地表含水率測量及地中音測量;自動監測則包括降雨量、多深度含水率、基岩

面上孔隙水壓、地表逕流，自動監測儀器並每月進行校正，以消彌儀器監測基礎值之時間變動誤差。藉由以上的觀測體制，即可掌握地表（或土壤表層 10~20 cm 深）、地中（基岩面、土壤岩層交界面）、地下（岩層中）之水文動態。

- 降雨量

研究期間的雨量資料由架設在福山氣象站的兩種傾斗式雨量筒 (Rain collector, DAVIS INSTRUMENTS) 觀測記錄 (圖 3.4)。當降雨量累積 0.5 mm 或 0.2mm 時，傾斗即傾倒一次。0.2mm 的雨量筒觀測時間 2015 年 3 月至 2016 年 6 月，0.5 mm 雨量筒觀測期間 2016 年 5 月至 2016 年 9 月。2016 年 9 月梅姬颱風的降雨分析主要採取 0.5 mm 的雨量筒觀測值。



圖 3.4 本研究在福山氣象站設置的兩座傾斗式雨量筒

研究中降雨事件的分割以連續 12 小時未降雨為基準，當 5 分鐘內 (2015/04/17 前的資料) 或 10 分鐘內 (2015/04/17 後的資料) 有降雨量大於或等於 0.2 mm，而之前有連續 12 小時以上沒有降雨，則視為降雨事件的開端；當降雨事件中遇到連續 12 小時未降雨，則視最後降雨的時間點為降雨停止時間，而下一場降雨事件開始的時間則為這場降雨事件的終止時間，每場降雨事件包含降雨期間和降雨停止後連續未降雨期間。

- 表層土壤含水率

為了解表層土壤含水率 (θ) 的空間變異，本研究在前述微地形測量時建立的樣點上利用手持式土壤水分計 (HydroSense II, Campbell Scientific, USA) 測量表層土壤的 θ ，該儀器為一時間領域反射儀 (time domain reflectrometer, TDR)，其原理是測量電磁訊號在已知長度探針上的傳輸時間，計算土壤的誘電係數 (dielectric constant)，誘電係數受到土壤中水分含量的多寡所影響，透過率定式加以換算。儀器使用之校正式由儀器開發商自行率定並儲存於儀器本體。

計畫執行前之 2012 年 7 月至 2013 年 8 月，共進行 12 次調查，調查間隔約一個月 (Liang *et al.*, 2014)。調查樣點共有 470 個 (圖 3.5b)，每次調查均使用長

透過現地觀察地貌特徵，在圖 3.10 的 A 處為一平台，其坡度相當小，為一典型地滑地之特徵。而在 B 處亦為一小平台，可觀察到在其上端為一高 2 m 的落差，推測此處可能是由於岩層滑動形成的滑落崖。坡面的 C 處位於壓力水頭觀測範圍的下方，可見到高度達 4 m 的裸露岩壁，說明整個坡面下方對岩層的支撐力是很小的，坡面下段的岩層可能因此先發生滑動，進而坡面中段也有較小規模的滑動，而坡面上段則因距離較遠，因此發生滑動的現象尚不明顯。

根據地表面地形、基岩面地形比較（圖 3.9）、地表地貌（圖 3.10），可推測在坡面中、下段岩層的擾動較大，基岩面較為破碎，而坡面上段擾動較小，基岩面較不破碎。而基岩面的破碎程度，可能是影響水分移動的因子，因此地表水分與地中水分之分布特性，極有可能受到兩者地形特性不同的影響而異。

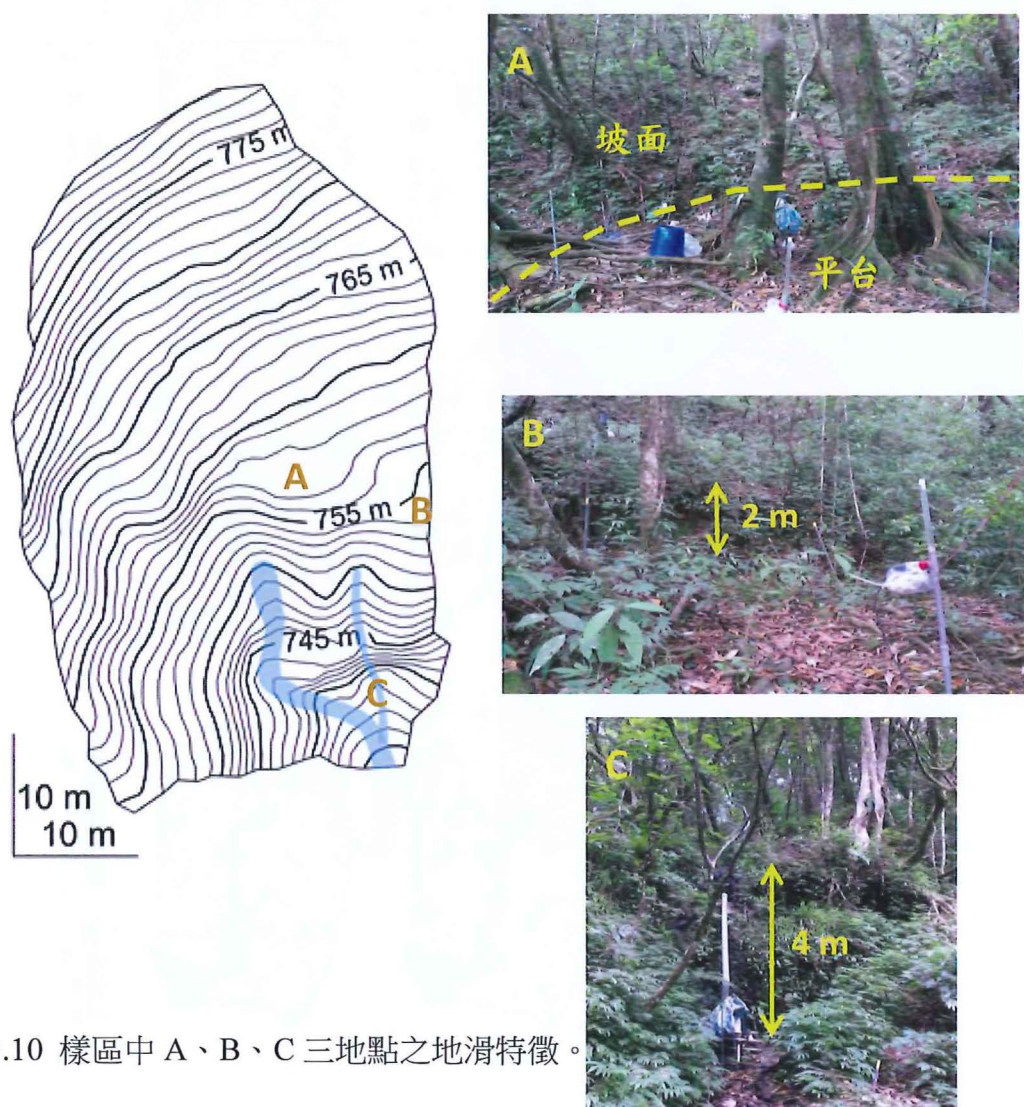


圖 3.10 樣區中 A、B、C 三地點之地滑特徵。

3.3.2 土壤物理性質

土壤孔隙率及飽和水力傳導度的空間分布如圖 3.11。樣區內土壤孔隙率的變動範圍係從 0.35 到 0.76 cm^3/cm^3 ，主沖蝕溝一帶及西側坡面的孔隙率較低，沖蝕溝受地表逕流沖蝕影響，土壤含量少、礫石多，西側坡面同樣表層 10 cm 以內多為礫石分布，因此採樣時採樣器多被完整礫石所填滿，其土樣孔隙率低。樣區北側谷源坡面的孔隙率較高，西北側稜線的孔隙率最高，此區域多為殘積土，礫石含量少，採樣時採樣器多為森林土壤，其土樣孔隙率高。

水力傳導度在土壤飽和時為一定值，在不飽和時則為含水率或壓力水頭的函數，本研究欲將水力傳導度視為土壤的固有性質加以討論，故僅測量土壤的飽和水力傳導度(K_s)， K_s 值的變動範圍從 0.0024-0.83 cm/s 不等，其分布趨勢與孔隙率相近，沖蝕溝的 K_s 值最低，西側邊坡最高，谷源的 K_s 值介於兩者之間。沖蝕溝附近的 K_s 值較低，顯示該區域土壤的入滲能力差，因此存在經常性的地表逕流，西側邊坡的入滲能力最強，因此該處經常保持乾燥，與現場觀測到的現象相符。

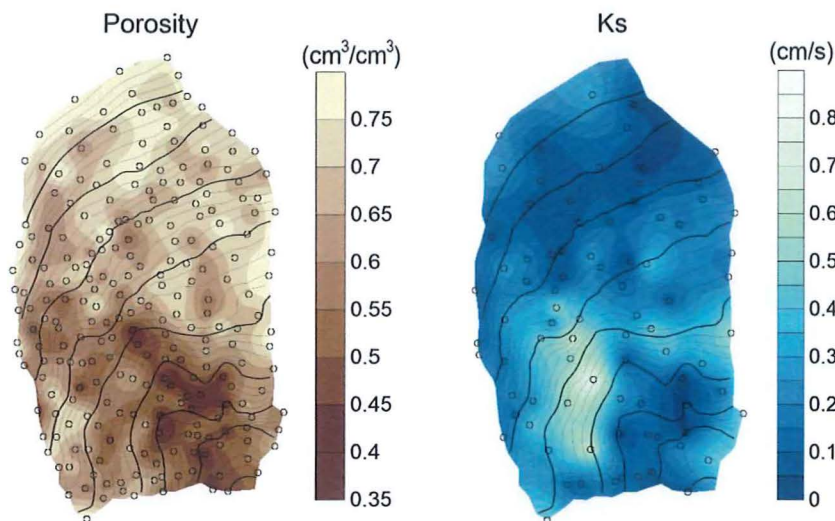


圖 3.11 土壤孔隙率與飽和水力傳導度的空間分布。土壤採樣位置如圓圈所示。

3.3.3 植生分布

本樣區內基部圓周在 10 cm 以上的植株共有 519 株，其中以樟科、殼斗科為主的闊葉樹占多數，平均基徑為 16.3 cm(最大：114.6、最小：3.2 cm)，基部總面積為 20.38 m^2 ，林分密度 3460 株/ha，基徑較大的林木多分布於樣區右邊平台以上的區域，樣區西側稜線上林木分布較密集，但基徑多在 50 cm 以下，少有超過 80 cm 者，沖蝕溝及其上方的崩塌帶則幾乎沒有植生，其兩側邊坡則皆有植生分布。

Wvd 與 Wba 的計算結果如圖 3.12。Wvd 不考慮林木基徑的大小，故其推算結果在林木密集的西側稜線較高，谷源東側、北側及平台雖有數株基徑較大的林

3.4.2 降雨量、淺層土壤含水率、基岩面孔隙水壓、地表逕流量之時間變化

上年度所建立之監測樣區位於粗坑溪沿岸之一沖蝕溝源頭，各項監測資料本年度仍持續收集，本章簡述 2016 年 1 月起至 6 月底颱風以前已收集並彙整之水文資料時間動態及趨勢。

地表水文動態的監測共有 10 個監測點（圖 3.14），可二分為樣區中間靠近沖蝕溝之監測群，以及上坡處之監測群，降雨及表層含水率時間變動之監測結果分別顯示於圖 3.15 及 3.16。

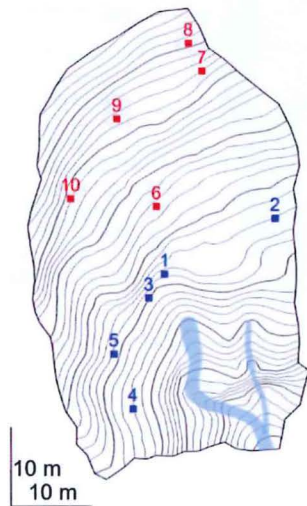


圖 3.14 表層含水率監測位置，分別靠近沖蝕溝之 No.1~5，上坡處之 No.6~10。等高線為地表地形。

就降雨時間分布趨勢而言，在 1-3 月期間降雨強度較弱但延時較長，屬於典型東北季風所造成的降雨型態；在 4-6 月期間降雨強度較強但延時較短，多為午後雷陣雨的降雨型態。

表層土壤含水率的監測資料有若干缺測的狀況（圖 3.15、3.16 斷續部分），主要集中於 1 月及 6 月後期，主要來自豪雨濕氣滲入儀器所影響，造成資料的雜訊甚至無法測量。4 月前降雨強度較小，可以發現表層土壤含水率的上升或下降較為和緩；4 月之後強降雨事件明顯增加，表層土壤含水率上升或下降也越趨急速或劇烈，在所有測點均可以發現這樣的趨勢。若比較深度別的反應差異，大多數測點在降雨前後 0-10 cm 的土壤含水率的上升下降變化最劇烈，而越往深層土壤的變動越小，推測主要表層含水率主要受垂直入滲所控制。然而也可以發現一些例外的情形，例如 No.1 的 40 cm、No.6 的 30-50 cm，反應都較表層大，除了各深度孔隙率或結構差異的影響，優勢路徑也是可能的因子，特別是在天然林中植生根系分布複雜，入滲後的水分極有可能沿著根系快速到達較深層處，造成 30-50 cm 的含水率變動較 10-20 cm 劇烈。

比較樣區中間靠近沖蝕溝之監測群（圖 3.15）及上坡處之監測群（圖 3.16）表層土壤水分變動，大致上前者含水率較低、上升下降程度和緩，如 No. 2、5；而後者土壤含水率較高、降雨、無降雨之間的變動也較劇烈，如 No. 6、10，顯示出上坡源頭部位表層水分變動起伏較大。若就樣區整體含水率空間分布特性而

言，空間分布特性依坡地單元而異，側邊坡之含水率較低，因此源頭坡地之含水率分布則依乾濕狀態而異。

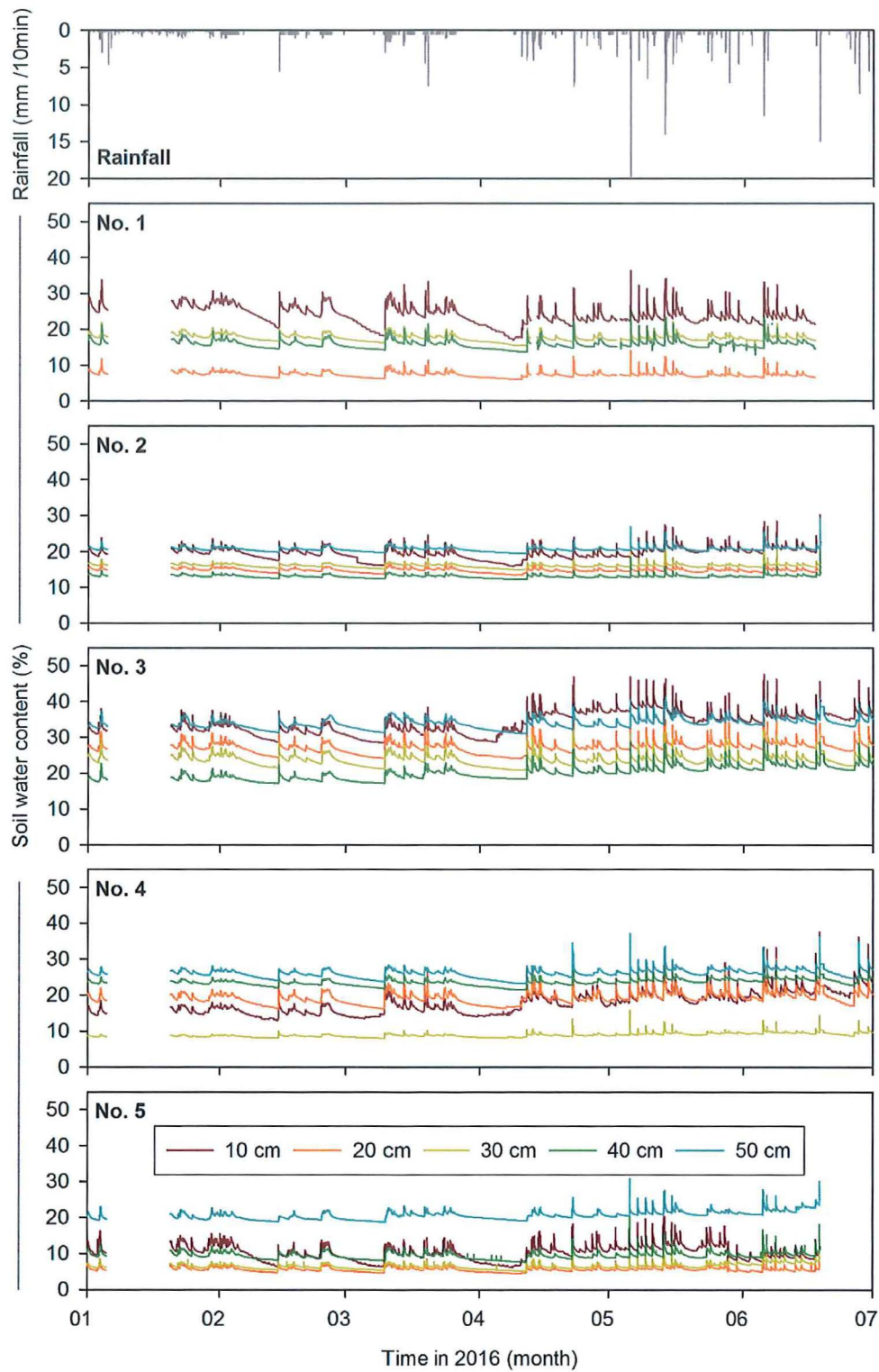


圖 3.15 2016.1~2016.6 降雨量、表層土壤水分動態監測點 No.1~5 之深度 10、20、30、40、50 cm 土壤體積含水率。

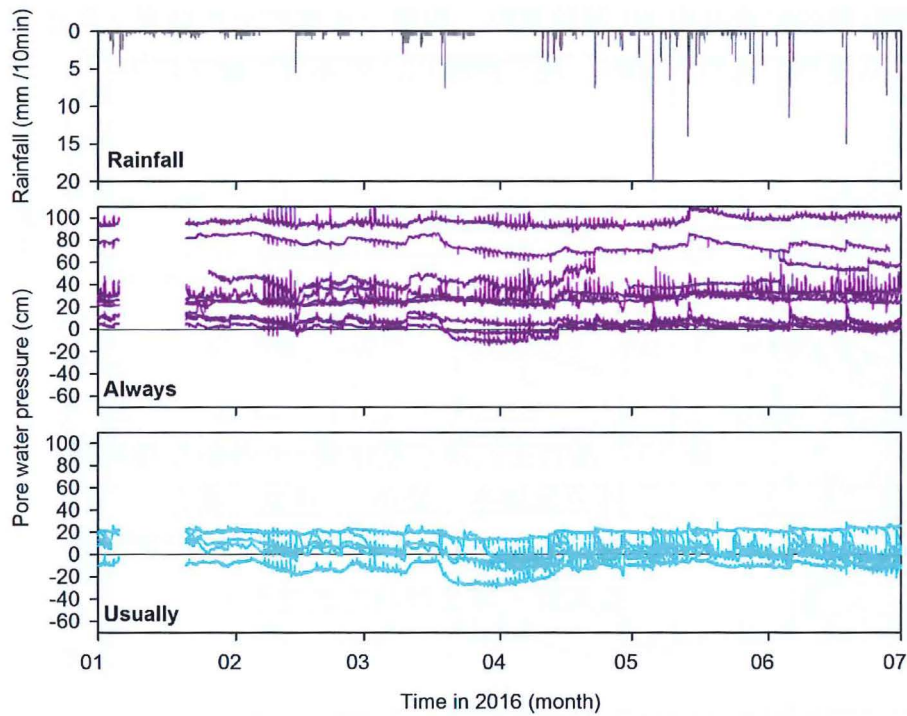


圖 3.18 2016.1~2016.6 降雨量、基岩面孔隙水壓動態之總是飽和（always，11 測點）、經常飽和（usually，6 測點）監測群之時間變動。

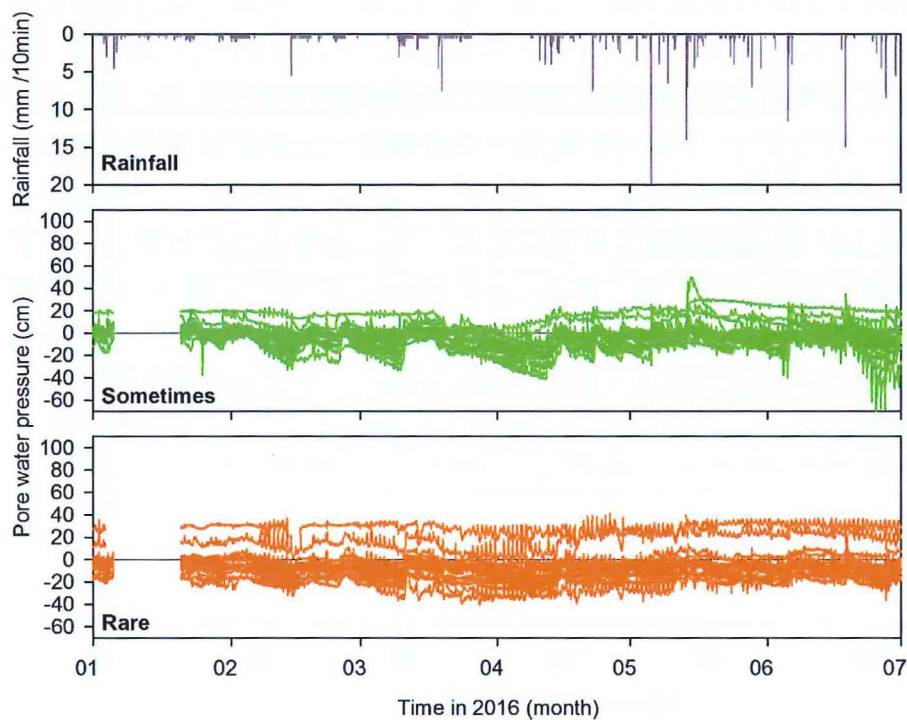


圖 3.19 2016.1~2016.6 降雨量、基岩面孔隙水壓動態之有時飽和（sometimes，21 測點）、幾乎無飽和（rare，22 測點）監測群之時間變動。

地表逕流共有 3 個監測點（圖 3.20），分別為小沖蝕溝下的 No. 1、大沖蝕溝下的 No. 2 以及更下游的 No. 3。圖 3.21 及圖 3.22 分別顯示上年度使用之壓力式水位計及本年度新設置靜電容量式水位計所測得的量水堰水高變化，壓力式水位計雖廣為使用，但是其測量值會隨大氣壓力而變動，即便現場設有大氣壓力監測並加以校正，所測得的水壓雜訊仍大，對於本計畫使用的小型量水堰觀測而言，誤差頗大，因此本年度導入新的水位觀測儀器，其原理乃利用氣相及液相不同的靜電容量來判定水位高低，圖 3.22 的結果也顯示其測定值安定、雜訊少。

本年度的觀測結果顯示，No. 1 在小沖蝕溝下相較於其他兩處流量少，流量隨著降雨強度上升而增加，但降雨結束後便急速下降，單場降雨前後的流量差異並不大，因此長期平均流量的起伏並不大。No. 2、3 皆位於大沖蝕溝之下，就長期平均流量來看，具有季節變化，4 月之前流量較少，4 月之後流量較大。若比較 No. 2、3 的差異，No. 2 靠近源頭處，而 No. 3 除了 No. 2 處主要流量的供給外，還有其他潛在的供給路徑（圖 3.20 中箭頭），因此降雨時的流量 No. 3 略大於 No. 2。此外，No. 2、3 與 No. 1 不同，除了單場雨量所造成的直接逕流外，推估還有地下水的供給程度大，以五月中旬的變動為例，No. 2、3 在強降雨後水量仍較降雨前大，但 No. 1 則在降雨後回復到降雨前的水量。

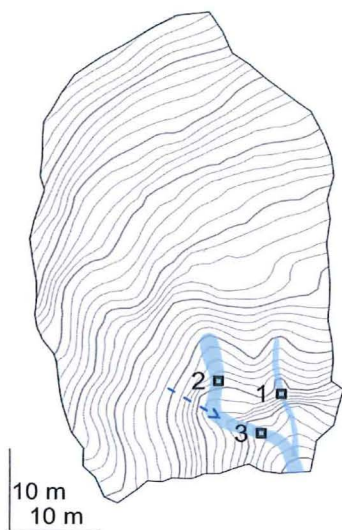


圖 3.20 地表逕流觀測位置。圖中箭頭為 No. 3 潛在流量供給路徑。等高線為地表地形。

4.2.2 梅姬颱風災害概況

2016 年 9 月份中主要有 3 個影響台灣之颱風。第一個是強烈颱風莫蘭蒂於 9 月 13 日至 15 日發布陸上颱風警報，主要影響範圍於南台灣及花東地區，其於宜蘭地區造成的雨量雖不多，颱風警報期間累積雨量只有 116.8 mm，但陣風達到八級強風，造成樣區徑級較大的枝幹折斷，使一隻張力計斷裂。第二個是於 9 月 16 日至 18 日有中度颱風馬勒卡，台灣主要受到東面環流影響，風向偏西風，福山地區受地形屏障，宜蘭測站的最高風速為七級風，於警報期間累積雨量只有 37.0 mm。

對樣區影響大的梅姬颱風於 2016 年 9 月 25 日 23 時 30 分發布海上颱風警報，26 日 11 時 30 分發布海上陸上颱風警報，28 日 17 時 30 分解除颱風警報。根據中央氣象局資料梅姬颱風於 27 日下午兩點於花蓮市登陸，於晚間 9 時 10 分從雲林縣麥寮鄉移至台灣海峽。梅姬颱風雖為中颱，但其風場大，環流廣闊，颱風登陸前風向西北風，影響北部與西部雨勢，東部受屏障所以雨勢不大，於 27 日颱風登陸後，梅姬颱風風場分布，主要在中心北側的風勢較強，又以東北面的風速更強，配合颱風進入台灣時背景駛流效應有加強風速的導因，於 27 日整天於北部持續吹強勁東風，對於宜蘭地區易造成較大影響，使宜蘭及花東山區有豪大雨，宜蘭測得最大陣風達 17 級，直到颱風於晚間出海後，風向轉為西南風，開始對西南部地區產生影響。宜蘭測站測得的最大 24 小時連續降雨累積可達 156.9 mm，颱風期間宜蘭測站降雨共 164.9 mm。

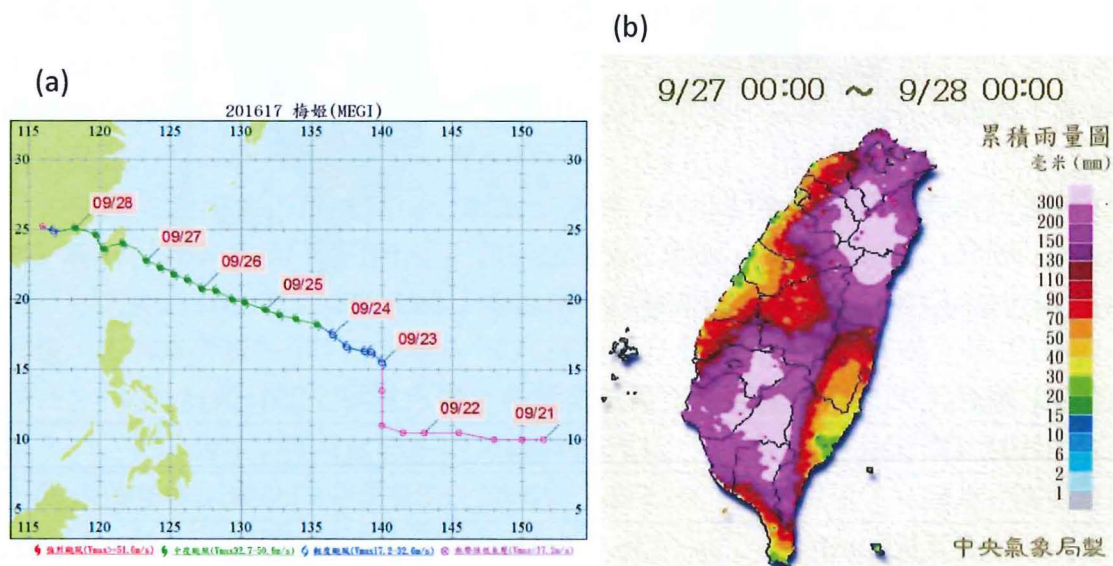


圖 4.3 2016 年梅姬颱風路徑及雨量圖。(a)梅姬颱風路徑圖。(b)梅姬颱風 27 日全台累積雨量圖。(資料來源：颱風資料庫)

梅姬颱風挾強風豪雨侵台，於宜蘭及東部地區的山區造成些微崩塌狀況，其降雨分布及路徑與蘇迪勒颱風相似，於東北部及西南部造成的降雨累積最多。颱風造成新北市烏來地區新烏路附近崩塌，桶後溪水位暴漲，影響聯外交通。福山植物園只有粗坑溪集水區有較多的崩塌事件，桶後溪集水區崩塌事件較少，聯外道路也無中斷。

4.3 蘇迪勒及梅姬颱風對樣區之影響

4.3.1 蘇迪勒颱風樣區水文動態及土砂移動

蘇迪勒颱風除了重創烏來山區，也對福山植物園區有嚴重的影響，如第二章所示，造成福山與烏來之崩塌事件多好發在道路邊坡及路基，以及溪流沿岸，風災後福山植物園區的聯外道路多處坍方，因此封園數週，圖 4.4 可見路基坍方及流失的狀況。



圖 4.4 蘇迪勒颱風後福山植物園聯外道路坍方樣貌。

除了聯外道路、車道路基淘空的災情外，前往樣區的登山道邊坡也有多處發生淺層崩塌，如圖 4.5 所示，多為表土層的崩塌，登山道只剩雙腳的寬度，直 2015 年 11 月現場調查還發現邊坡還有零星土砂滑落、崩落發生，還未穩定。

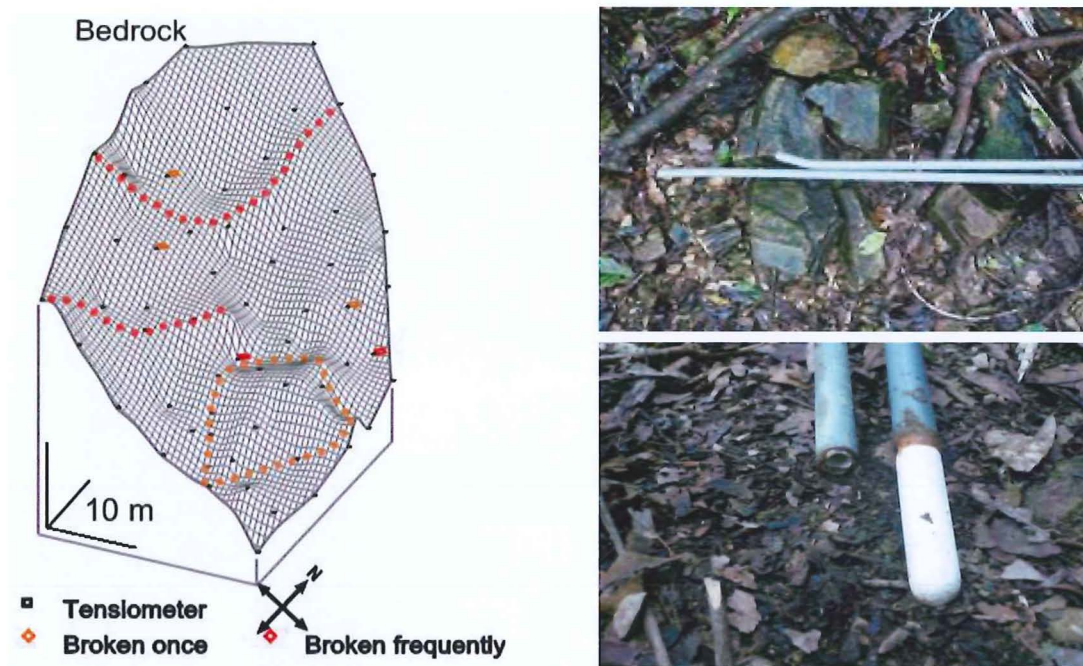


圖 4.8 蘇迪勒颱風後，設置於基岩面上張力計陶瓷頭毀損地點（左圖中橘色位置）與頻繁發生陶瓷頭毀損地點（左圖中紅色位置），以及陶瓷頭毀損狀樣貌及 PVC 管因地中滑動應力而彎折。

8/6 – 8/9 蘇迪勒颱風為一大型的降雨事件，圖 4.9 彙整了蘇迪勒颱風期間地表、地中之水文動態，其中表層土壤水分監測點 No.1~10 之含水率變動分別為該位置深度 10~50 cm 之平均體積含水率值，基岩面孔隙水壓動態則是由四個型態：總是飽和、經常飽和、有時飽和、幾乎無飽和的樣點中所選出的代表性樣點之監測結果，地表逕流量則為三處觀測點之監測結果。

此降雨事件中累積雨量達 370.4 mm，8/6 事件初期即有間歇性降雨，8/7 上午開始發生持續性降雨，直到 8/8 凌晨達降雨強度急遽增加，最大降雨強度為 13.4 mm/10min，8/8 上午雨勢漸小、中午過後降雨便停止。

表層含水率方面，除了 No. 8 在降雨尖峰前便因雨水滲入而故障，其他測點均完整紀錄表層水分的反應過程，反應趨勢與 7.1 節長期變動大致相同，No. 5 的反應較和緩、No. 6 的反應較劇烈，含水率隨著降雨強度增減，各測點平均含水率於降雨尖峰時達到最高，降雨過後則迅速下降。

第三章分類了基岩面孔隙水壓具有總是、經常、有時飽和、幾乎無飽和等四個空間分布特性，在蘇迪勒颱風降雨事件中，總是飽和樣點在降雨事件前後始終維持飽和狀態，變動幅度小，反應時間慢，在降雨尖峰過後才微幅地上升。經常飽和樣點在降雨前為近飽和狀態，在降雨強度增強時便開始上升、立即飽和，降

雨尖峰前後的變動不大，降雨結束後便緩緩地下降。有時飽和的樣點的反應與上述經常飽和樣點類似，但是飽和量少、反應時間慢、降雨後並無明顯下降，整體升降幅度小。幾乎無飽和的樣點在降雨初期為不飽和狀態且乾燥，反應時間較上述兩者慢，降雨尖峰時才迅速上升、接近飽和，與有時飽和類型樣點一樣，飽和量少、反應時間慢、降雨後並無明顯下降。由此結果可知，在蘇迪勒颱風期間，連平常難以飽和的樣點都接近飽和或是飽和，在降雨尖峰前後基岩面上飽和帶擴大及連結性最大，以坡地穩定的角度來看，這個時間點也是降雨事件期間穩定性最低的時候。

地表逕流方面，三處監測量水堰水位均隨著降雨強度敏銳反應，在降雨初期的逕流量 No. 3 最大、No. 1 最小，符合 7.1 節所彙整的長期趨勢，但降雨尖峰前 No. 3 便突然下降，此乃集水土壩被沖蝕土砂淤滿，無法收集溢流的逕流量。降雨尖峰時 No. 1、2 流量達到最大，降雨尖峰與逕流尖峰（洪鋒）幾乎延遲現象，此為源頭集水區之特性，但是 No. 1 流量在降雨尖峰過後變迅速下降，No. 2 卻有另一波尖峰的發生，此為降雨逕流中常見的反應，洪鋒主要由直接逕流所供給，後續的尖峰為基底流的上升所貢獻，因此可以推論前者主要由降雨事件所產生的新水（new water）組成，後者為舊水（old water）或是入滲至深層再度回歸地表的地下水所貢獻，其中也可能包含基岩面飽和帶成分。

於 10 月 7 日發現樣區崩塌範圍再度擴大，新增的崩塌地如圖 4.11 藍色虛線以下之範圍，位於谷源稜線的崩塌面積增加，原本位於沖蝕溝以上之平坦平台從地滑裂縫處往下崩落，平台上的大型木本植物已連根倒落在沖蝕溝中央（如圖 4.14）。於 7 日當天有下雨的情況，沖蝕溝有鬆軟的黃土崩積其上，有多個出水口持續排水。綜合圖 4.11 兩次的崩塌範圍之擴大，研究樣區的水分計、量水堰、水位計、張力計等儀器，多有損壞或被掩埋。



圖 4.14 梅姬颱風後 10 月 7 日發現之新增崩塌，位於樣區中間平坦處。

此次梅姬颱風的水文動態如圖 4.15 及圖 4.16，於 9 月 26 日 11:20 開始降雨，至 27 日 2:00 間為間歇性降雨，在此期間表層土壤含水率及基岩面孔隙水壓較無變化，2:00 後開始穩定供雨，表層土壤含水率開始上升，基岩面孔隙水壓直到 27 日 6:00 後才開始有變化。圖 4.15 儀器設置位於樣區較高處，圖 4.16 儀器設置位於樣區南邊較低處，包含沖蝕溝及沖蝕溝側邊坡，基岩面孔隙水壓最先由 4.16 圖中位於樣區地勢較低的 $\psi 1-\psi 10$ 之反應上升且逐漸飽和，並隨降雨越大持續增加，如圖 4.15 位於樣區坡面上方的基岩面孔隙水壓對於降雨的反應時間大致有越慢的趨勢，原本就位於飽和的地方隨於降雨稍緩後水勢才開始穩定上升，而原本介於飽和帶及不飽和帶附近則須更久的反應時間，或幾乎無反應，孔隙水壓於約 28 日 6:00 降雨較歇後才開始降低。表層含水率則於隨雨量增高而穩定上升，隨雨量漸歇而降低，反應時間較基岩面孔隙水壓短，與降雨強度變化趨勢吻合。

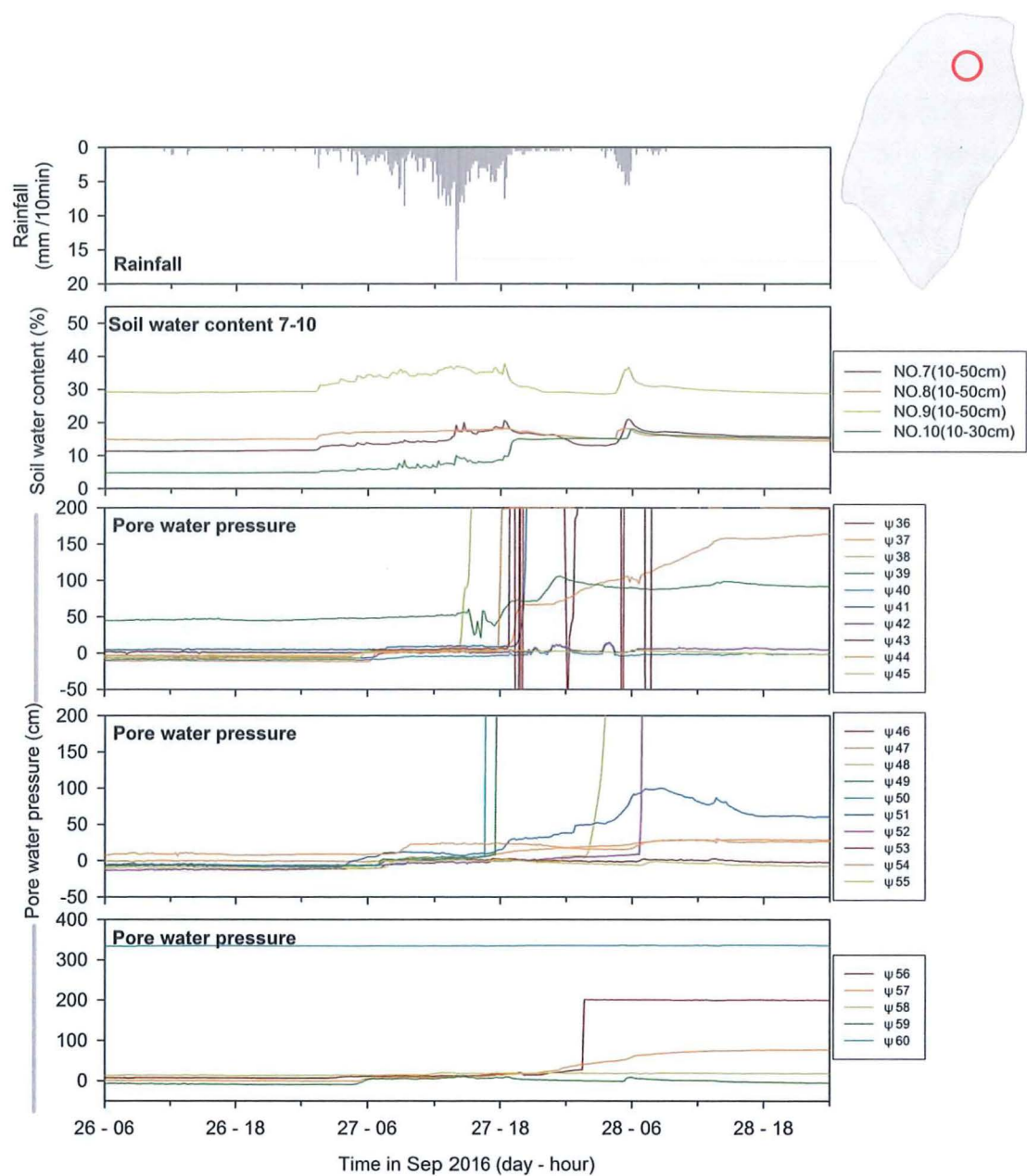


圖 4.15 梅姬颱風 9 月 26-28 日之降雨組體圖、表層土壤水分動態監測點 No. 7~9 深度為 10~50cm、No.10 深度為 10-30cm 的土壤平均體積含水率、基岩面孔隙水壓動態，孔隙水壓編號如圖 3.5 所示。

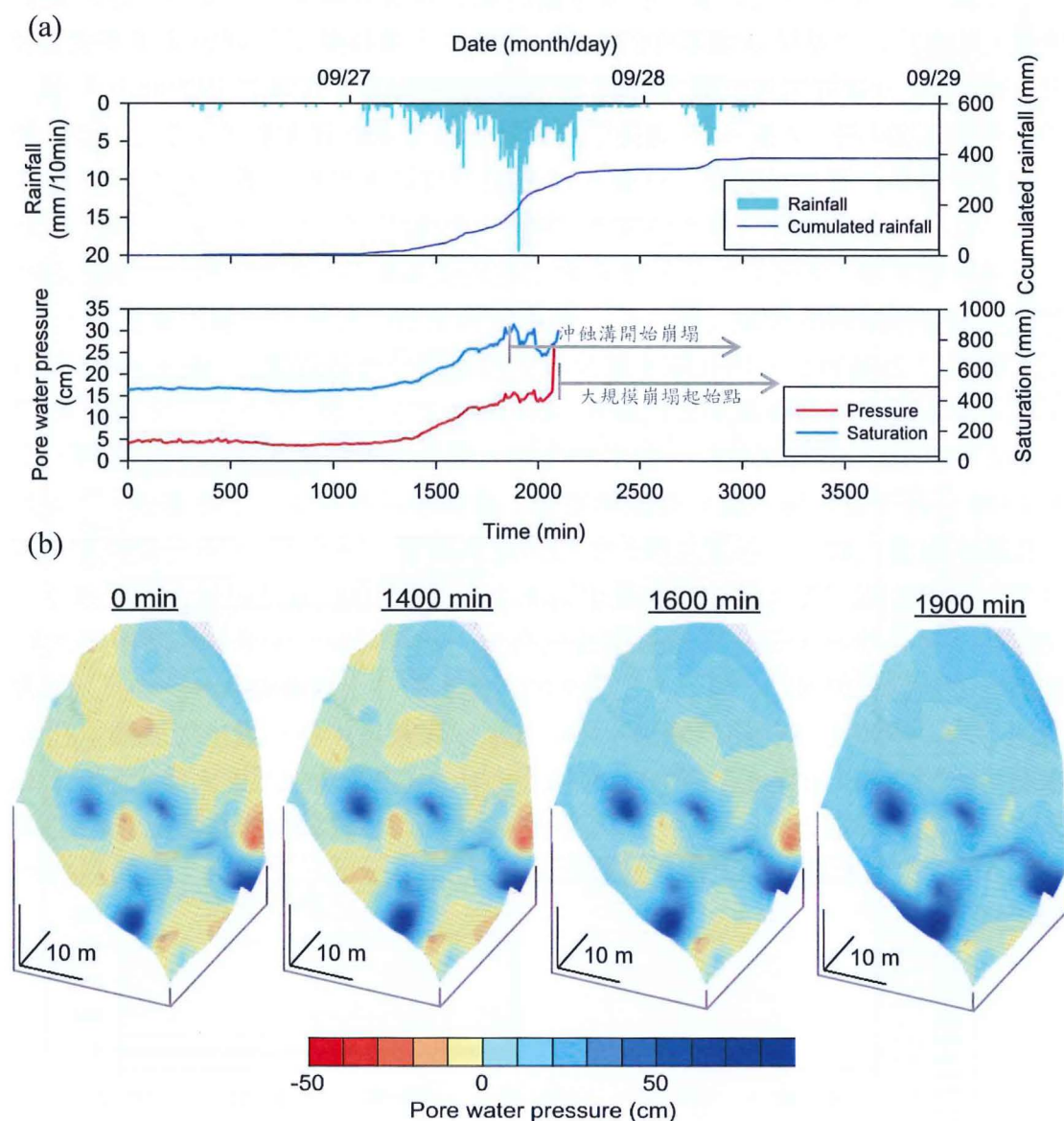


圖 4.17 (a)梅姬颱風事件之降雨強度及累積雨量、基岩面上全觀測點之平均孔隙水壓及地中飽和量時間變化，(b)地中飽和帶分布之時空變化。

由基岩面張力計陶瓷頭損毀的時間及地點，大致可推測在整場降雨事件中樣區崩塌範圍的順序及區塊（圖 4.18）。紅色圓點為最早出現數值偏差的張力計設置地點，於樣區最大沖蝕溝的河道低處，於 27 日 12:00 後，此時雨量已逐漸增加，但尚未到達最大雨量。14:00 為 10 分鐘雨量最大值，橘色圓點為 14:00-16:00 間張力計毀損地點，主要於樣區最低處，為谷地地形，在 12:00-16:00 間可能先從河道谷地發生崩塌。樣區西側的邊坡同樣有一處陶瓷頭損毀，地點於 9 月 31 日發現的樣區崩塌範圍內，推測側邊坡約於此時間開始產生崩塌。16:00 後張力計毀損數量增加，包含圖 4.18 資料消失的張力計位置如圖黃色圓點處，此時沖

蝕溝應有大規模崩塌的現象，於樣區西側稜線小型谷地同樣有張力計毀損，崩塌位置較前一時段高。18:00 後西側稜線的谷地又有一張力計毀損，其位置比前一時段的張力計位置地勢較高，可得知此區是從地勢較低處先開始崩塌，邊角掏空後，邊坡再逐漸往下崩塌。於 20:00 雨量漸歇後，地中持續有滑動的情況，樣區谷源仍有張力計毀損。

圖 4.18 梅姬颱風後，設置於基岩面上張力計陶瓷頭毀損地點及毀損時間

4.4 蘇迪勒及梅姬颱風水文動態及土砂移動比較

蘇迪勒與梅姬颱風路徑及降雨量相似，由以上的結果（圖 4.10 和 4.17）蘇迪勒及梅姬颱風水文分布可大致歸納基岩面飽和帶的變動過程：在降雨初期飽和帶僅零星地存在於上坡處，而大量飽和帶存在於下坡處，特別是沖蝕溝以及樣區左下方低窪處有高飽和帶的存在，研判該處為地下水所造成的舊有飽和帶；隨著雨水供給的增加，飽和帶相互連結往下坡處擴大，並且在中央靠右坡面處有一特定的擴張路徑，此主要為降雨事件中雨水供給所形成的新生飽和帶，其擴張方式主要以側向流動為主，降雨結束後並未快速消逝。在疑似早期曾發生地滑或崩塌的位置（下坡之平緩地及隆起地），是較難飽和的區域，以及一旦飽和後最先消逝的區域，研判該區域的基岩面較為破碎，飽和帶易往深層滲漏。

梅姬颱風期間，樣區發生崩塌事件，相較於蘇迪勒颱風後無發生崩塌現象，其原因除了樣區持續有觀察到地滑現象（圖 4.8），另一大因素可能是颱風前的降雨事件導致基岩面的飽和帶分布不同：2015 年七、八月福山較少降雨事件發生，

5 廣域水文地質探查技術研發-簡易貫入試驗改良、地下水井鑽探及

地中音探查試行

5.1 背景與目的

一般對於不可視之地層或水文地質調查常採鑽探法，或輔以震波探測、放射能探測、大地比電阻法等地球物理探測試驗。鑽探為單點侵入式調查，可取得並觀察實際的岩芯樣本，地質判讀精度高，但因操作機具及費用的限制，不易適用廣域探測，特別是臺灣山區或是國有林班地多陡峭環境，車輛無法進入之處幾乎無法施，因此適用於陡峭環境、數人即可操作的水文地質調查技術研發，成為取得地表下水文地質資訊的關鍵。

就土壤厚度而言，簡易貫入試驗為一有效的方法，其測量原理為將貫入計放置於土壤表面並使貫入桿與重力方向平行，將重錘自打擊頭拉升50 cm至頂端後，使之自由落下撞擊打擊頭，將貫入桿打入土壤，記錄每一次擊打後貫入桿位移的距離（貫入量），並以貫入阻抗值代表土壤硬度進而推估土壤厚度，可用以判斷土壤及岩層特性。上年度計畫中的土壤深度便是以此試驗計進行測定。雖然該設備輕巧、1~2人即可操作，但多點式貫入試驗仍花費大量人力，對於土壤厚度3~5公尺處，往往一處就需要1~2小時，若能減少重錘撞擊、拉拔時間，將有助於廣域之調查。就深層的水文地質環境資訊或是地下水井設置而言，Gabrielli and McDonnell (2012) 研發出簡易地質鑽探、地下水井挖掘系統，其自行改裝的鑽孔機特色為輕量，單人可背負，適用於車輛無法到達之山區地下水井設置。此外，日本的拓和株式會社於2013年開發地中音測定裝置用以改良地下水之探測方式。地中音測定裝置能夠藉由測量地下水流動時所發出的聲響，來推斷地下水流的位置，並且由於其設備相當簡單及輕便，能夠單人即進行多樣點數及大範圍的測量。多田泰之等（2007）曾於土層中埋設水管模擬地下水路，並測量不同位置之地下水流音（圖5.1a），其結果發現地下水路正上方測得的地下水音最強，隨著距離增加而變小，並隨著流量的增加以及深度的增加，地下水音均會降低（圖5.1b），若能利用地下水流音的特性，期待能對找出山區地下水流動的特定地點。

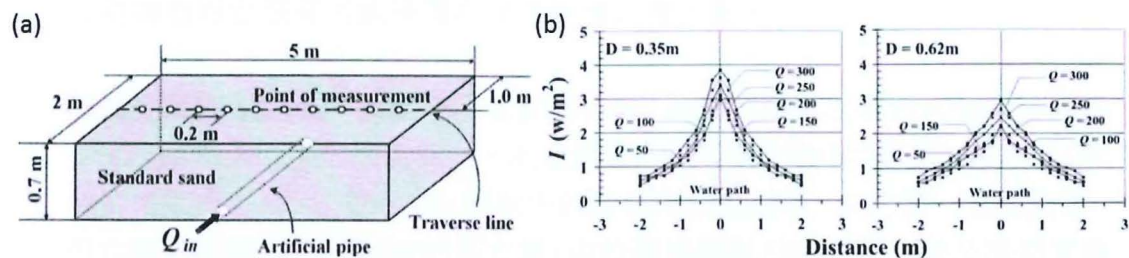


圖 5.1 (a) 模擬土層示意圖 (b) 模擬實驗不同深度地下水音測量結果。圖中 Q 為流量，距離 0 公尺為地下水路的正上方，y 軸的 I 為聲音強度的單位， D 為水管埋設深度（多田泰之等，2007）。

基於上述背景，為了解儀器之不同設計所得之結果，本章進行廣域水文地質探查技術研發及測試，主要包括簡易貫入試驗改良、地下水井鑽探測試，最後藉由地中音探查，探討地下水文流音與地表地形之相關性。

5.2 材料與方法

5.2.1 簡易貫入試驗改良

簡易貫入試驗改良項目包括撞擊動力、貫入錐頭、拔取設備之改良。

撞擊動力：為了減少簡易貫入試驗中重錘自由落下所花費的人力及時間，本計畫試用汽油引擎活塞打樁機（POST DRIVER-CEPD 52, CHRISTIE ENGINEERING）作為貫入試驗之動力（圖5.2），該打樁機搭載HONDA GX35四行程引擎，其規格如表5.1。貫入設備利用此引擎之動力，以機械式原理轉換為打擊活塞的快速運動，再以運動中的活塞敲擊貫入目標，以達貫入的效果。



圖 5.2 POST DRIVER-CEPD 52 汽油引擎活塞打樁機簡易結構說明。

表 5.1 HONDA GX35 四行程引擎規格

排氣量	35.8 cc	使用燃料	92 or 95 無鉛汽油
最大馬力	1.3HP / 7000 rpm / 1.0kw	油箱容量	0.65L
最大扭力	0.19kgm / 5500 rpm	機油容量	0.1L
氣缸內徑*行程	39*30mm	起動方式	手動
燃料消耗量	265g / 1Hp / 1Hr	淨重	3.33kg
點火方式:	電子點火		

貫入錐頭：製作三種直徑(20mm-TYPE(A)、40mm-TYPE(B)、60mm-TYPE(C))，錐頭角度 60° 共 3 個不同尺寸之錐頭(圖 5.3)進行貫入測試，記錄其現地操作以及貫入結果，找尋最合適搭配汽油引擎活塞打樁機進行現地操作貫入試驗之錐頭規格。此外，為了搭配汽油引擎活塞打樁機之使用，參考打樁機撞擊引導管之口徑，製作直徑符合汽油引擎打樁機之口徑，長度為 17 公分的轉接頭，中心製作符合貫入計口徑(16mm)之插槽，以及保護銜接止付螺絲之撞擊頭，撞擊頭與貫入計組合後，插入轉接頭插槽時，轉接頭會完全包覆撞擊頭與貫入計之接合處，進行測試，其目的主要為維持貫入過程貫入計之穩定，使打樁裝機施力在正確的貫入方向，以及避免引擎活塞直接打擊貫入計鑽桿導致鑽桿變形損壞。

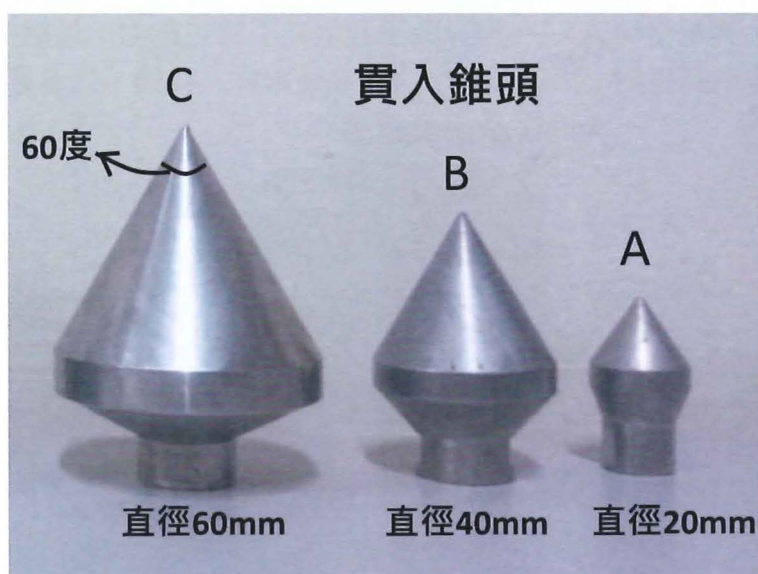


圖 5.3 不同尺寸之貫入錐頭。

拔取設備：自製腳踏式槓桿千斤頂作為拔取已貫入土壤層之設備並且進行試用。本次試驗自製之腳踏式槓桿千斤頂如圖 5.4，利用槓桿支點、轉向關節以及符合拉拔對象直徑之金屬套環，將腳踏下踩之力量轉換為向上拉拔之垂直力量，以期能有別於簡易貫入試驗之傳統拔取方式，能快速將貫入計拔出。



圖 5.4 腳踏式槓桿拉拔裝置。

測試流程：將製作好的撞擊頭與不同尺寸的錐頭，搭配原本簡易貫入尺寸之鑽桿（直徑 16mm）及延長桿組合（圖 5.5），將其插入轉接頭之插槽後，搭配汽油引擎活塞打樁機配進行貫入實驗，測量方法是將貫入計放置於土壤表面並使貫入桿與重力方向平行，將打樁機以人力抬至貫入計上方，並將打樁機之撞擊引導管扣至轉接頭上方，亦及為轉接頭部分放入撞擊引導管內直至碰到撞擊活塞，裝置設置完畢即可開始試驗（圖 5.6）。



圖 5.5 打樁機貫入試驗計組合完成圖。



圖5.6 汽油引擎活塞打樁機貫入試驗現地測試照片，圖中為打樁機貫入設置完成準備進行貫入的情形（2016.07.27）。

試驗開始時，由記錄人員宣告試驗開始，同時由打樁機操作人員將打樁機油門按壓到底並固定不動，視為維持最大出力，由於貫入速度極快，由記錄人員手

持碼表，記錄每貫入一定深度所耗費時間，並且由記錄人員宣告試驗停止。所以與簡易貫入之貫入數據採用單位打擊次數所貫入的長度表示，也就是 Nh （次/10 cm）不同。

簡易貫入之測量方法是將貫入計放置於土壤表面並使貫入桿與重力方向平行，將 2 kg 重錘自打擊頭拉升 50 cm 至頂端後，使之自由落下撞擊打擊頭，將貫入桿打入土壤，記錄每一次擊打後貫入桿位移的距離（貫入量）。貫入數據的換算處理，以阻抗值 N_h （擊打次數/10 cm）代表土壤硬度：

$$Nh = 10 \times N/d \quad (\text{式 5.1})$$

式 (5.1) 中 N (次) 為連續擊打次數， d (cm) 為相對應的貫入量， N_h 值代表針對同一土層要貫入 10 cm 所需的擊打次數，數值越大代表土壤硬度越高，當貫入錐頭撞擊到基岩面時，每次擊打的貫入量會變得很小，前人研究曾指出，當連續擊打 10 次而貫入量不到 1 cm 時（即 $N_h > 100$ ），視為接觸至基岩面(Okimura and Tanaka, 1980; Yoshimatsu et al., 2002)。

打樁機貫入試驗之貫入數據則採用單位時間所貫入的長度來代表土壤硬度，也就是 Npd （秒/10 cm）值：

$$Npd = 10 \times s/d \quad (\text{式 5.2})$$

（式5.2）中 s （秒）為貫入所耗時間， d （cm）為相對應的貫入量， Npd 值代表針對同一土層要貫入 10 cm 所需的時間，數值越大代表土壤硬度越高。

試驗地點：本次試驗選定兩個點 A 與 B，其中 A 點進行 20mm、40mm 及 60mm 錐頭之打樁機貫入測試。B 點進行 20mm 及 40mm 錐頭之打樁機貫入測試。兩個點位皆有進行簡易貫入試驗以作為對照比較。本次器材測試對於以下幾點進行觀測記錄：

1. 汽油引擎活塞打樁機是否能運用在貫入試驗中
2. 不同尺寸之錐頭運用在打樁機貫入試驗中之效果及適用性
3. 打樁機貫入試驗使用不同尺寸錐頭測試之結果與簡易貫入結果之比較
4. 打樁機貫入試驗與簡易貫入試驗之優缺點比較

5.2.2 簡易地下水井挖掘機測試

本計畫選用輕便岩芯鑽探設備（SHAW PORTABLE CORE DRILLING EQUIPMENT）（圖 5.7）進行地下水井鑽探測試，搭載 Tanaka 270 PFDH, re-gearred 引擎，其規格如表 5.2，鑽井設備利用此引擎之動力，以機械式原理轉換為鑽井設備的快速轉動，帶動鑽管及鑽頭鑽入地表及岩層，本機器使用鑽管口徑為 41mm。



圖 5.7 輕便岩芯鑽探設備。

表 5.2 鑽探設備二行程引擎（Tanaka 270 PFDH, re-gear）規格

排氣量	27cc	使用燃料	92 or 95 無鉛汽油
最大馬力	1.4HP	油箱容量	0.67L
點火方式	電子點火	起動方式	手動

搭配汽油引擎打樁設備：搭配汽油引擎打樁設備，在淺層土壤之鑽探階段能以汽油引擎打樁設備進行，待探測至岩層面再以輕便岩芯鑽探設備進行，本計畫開發同鑽探管徑（41 mm）之不鏽鋼採土打樁管，並以汽油引擎打樁設備搭配輕便岩芯鑽探設備進行地下水井鑽探試驗，測試其可行性、鑽探效果以及實驗流程之建立。採土打樁管之結構如圖 5.8，其中採土打樁管管身為每段 1 m，管徑外徑 41 mm 之不銹鋼管所製作，每段之間製作螺牙以作為連接之使用，並製作鑽頭用於貫入端貫入土壤使用，以及打擊頭用於保護撞擊端之管身螺紋，以免打樁過程中螺紋變形，最後製作轉接頭套在組合完成之打擊頭與打樁管上，以符合打樁機之口徑，用以確保貫入方向之穩定，以及減少打擊頭及打樁管身變形的可能性，組合完成如圖 5.9。

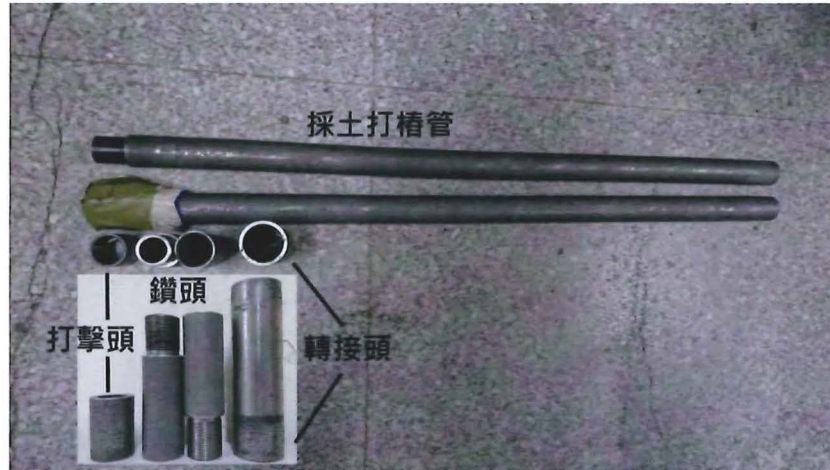


圖 5.8 採土打樁管各部件說明。

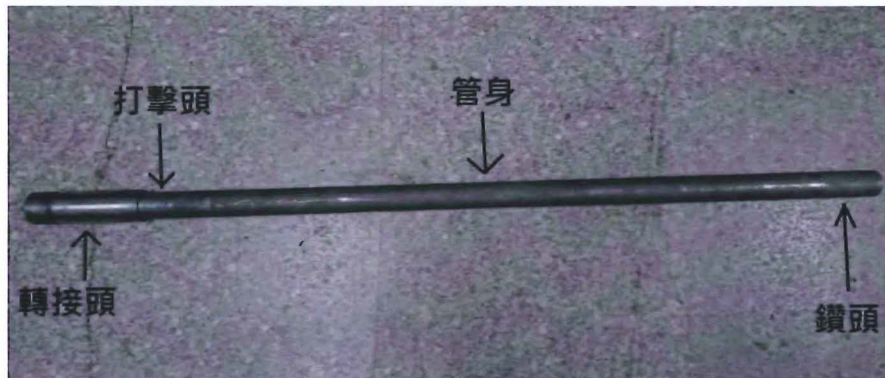


圖 5.9 採土打樁管組合示意圖。現場使用時轉接頭套入管身時會完全覆蓋打擊頭，圖內打擊頭露出主要作為示意用途。

5.2.3 地中音探測儀測試

關於地中音的測量原理：在地下水音未產生時，土壤不飽和區（土壤、空氣及水共存的區域）中有些區域的空氣可能會被土壤以及土壤之間的水分所困住（圖 5.10a），此時若是有水流從箭頭 1 的位置流入，會將被困住的空氣向箭頭 2 的方向擠出形成水膜（圖 5.10b），此水膜破裂時所發出的聲音即為地下水音。

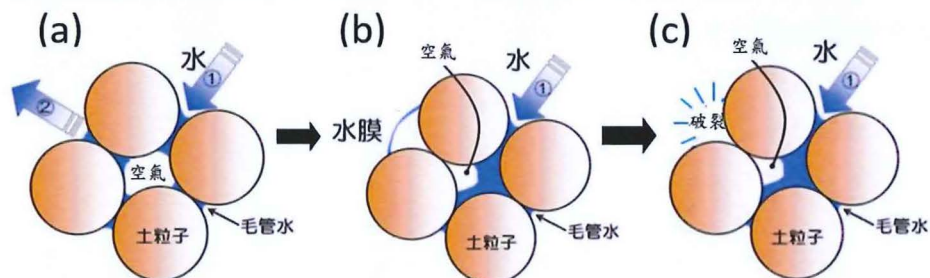


圖 5.10 地下水音生成示意圖(改編自 Underground sound measuring device Gas-03 (ver1.03) instruction manual, 2013)。

地中音測定裝置是用來測量地下水音的裝置，其測量過程如圖 5.11 所示，地中音測定裝置能藉由 sensor 收集地中音，並將之轉換成電壓輸入至裝置內進行內部運算以及儲存，之後連接電腦並將資料輸出至電腦，以人工的方式將地下水音篩選出來以及做分析。

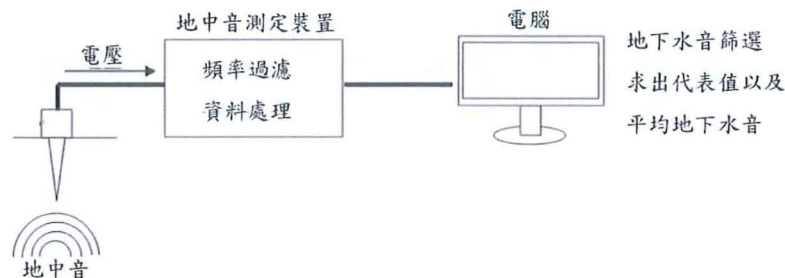


圖 5.11 地中音測量過程及裝置示意圖（Underground sound measuring device Gas-03 (ver1.03) instruction manual, 2013）。

地中音測定裝置藉由 sensor 接收地中音後，會以壓電性效應將之轉換成電壓輸入至裝置之中。因地中音測定裝置接收到的聲音除了目標的地下水音外，尚包括風聲、電線振動聲等各式雜音，因此測定裝置能削減特定頻率外的聲音（圖 5.12），以便測量者辨識地下水音、降低雜音的干擾、及減少整體的誤差。根據現地的狀況，本研究三次的過濾範圍均選取 300~800Hz。

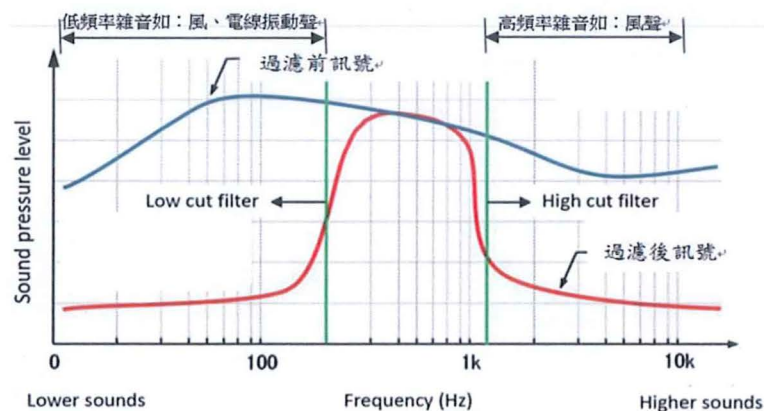


圖 5.12 地中音測量裝置頻率過濾示意圖，藍線為原本的聲音，紅線為過濾後的聲音，兩條綠色的線為頻率過濾的上界及下界（改編自 Underground sound measuring device Gas-03 (ver1.03) instruction manual, 2013）

頻率過濾後，測定裝置在每次的測量以 2000 筆/秒接收資料，並以 200 筆(可選擇)為一個單位，選取 200 筆中最大的數值計做 PD 值(由於接收速度相當快，可視為該時間區段的最大值)，以此連續獲得 60 筆 PD 值，計做 PD1~PD60 (PD 值的數值為儀器經過運算之後的數值，該數值正比於聲音的強度)(圖 5.13)，為測量一次所得資料。

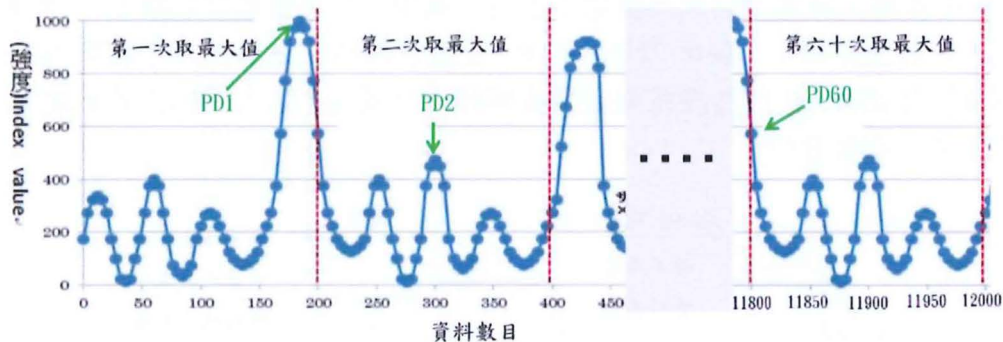


圖 5.13 PD1~PD60 獲取示意圖。此處是以 2000 筆/秒為例（改編自 Underground sound measuring device Gas-03 (ver1.03) instruction manual, 2013）。

將 60 筆 PD 值輸入電腦，佐以錄音檔，以人工方式將地下水音出現的點予以標出，之後將最大的三筆地下水音的數值做平均即得該點的代表值。然福山地下水音出現較不頻繁，偶有 60 筆 PD 值中僅有一、兩點有記錄到或甚至無地下水音，以致無法計算代表值的情況，因此 10/01 的測量為，各樣點重複測量 5 次，以 300 筆 PD 值中地下水音最大的 3 筆平均當作代表值，並記錄 5 次測量中無出現地下水音的次數，以供之後做參考。

CS 立體微地形圖繪製：有鑑於以往利用地形圖以及空拍圖判視地形，對於判視技術有相當高的門檻，若是利用暈渲圖以及鳥瞰圖這兩種常用的立體地形圖，又會因選取不同的參數，而改變整張圖的呈現方式，以圖 5.14 黑框處地形為例，右圖的兩條溝予人較左圖寬且深的感覺，鳥瞰圖同理。

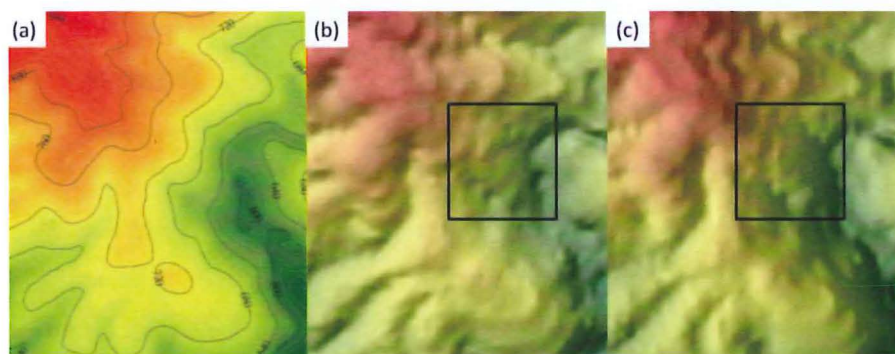


圖 5.14 微地形圖繪製 (a) 福山樣區分層設色圖 (b) 福山樣區暈渲圖 (315、45) (c) 福山樣區暈渲圖 (270、30)；括號內的數字為 ARCGIS 製圖時的參數 (azimuth、altitude)

因此日本長野縣總合中心基於 1.能夠呈現地形的凹凸變化，以便於判斷地形 2.不會因為使用者選取的參數不同而對地形有不同的判讀 3.有立體感，使人較易把握地形 4.容易繪製，這四項原則而研發出了 CS 立體圖。CS 立體圖繪製流程如圖 5.15 所示，僅需數值高程圖以及 ArcGIS 即可繪製，利用 ArcGIS 中 slope、

focal statistic、curvature 及 contour 功能，將高程圖轉換取得坡度圖、曲率圖及等高線圖，再佐以特定的透明度做疊圖，即可製成。

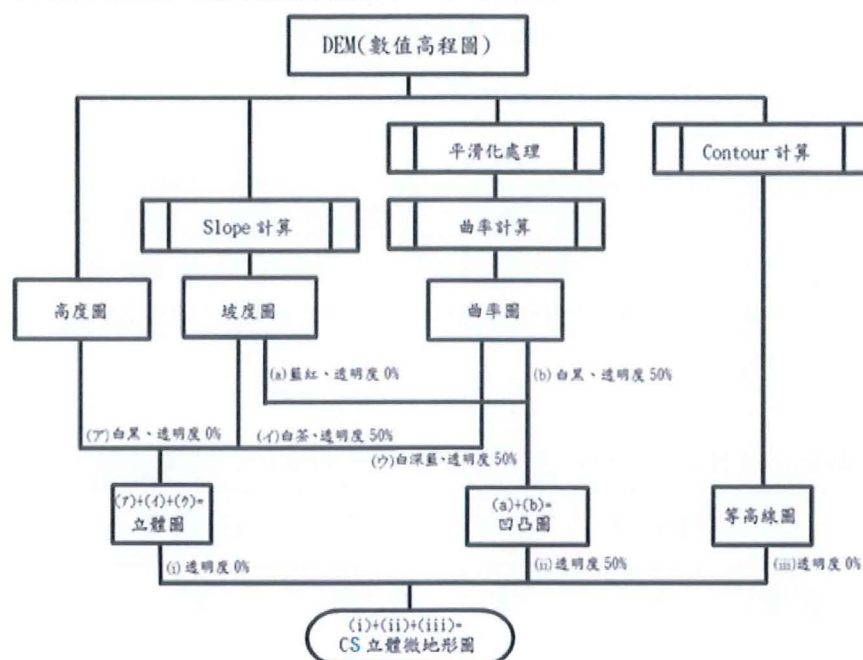


圖 5.15 CS 立體微地形圖繪製流程圖。

樣區設置：地中音進行了三次探測，前兩次（2016/02/04、2016/05/27）沿著樣區步道取樣，第三次（2016/10/01）沿著水管路取樣，三次取樣均採用非等間距設點於步道旁，各樣點之間的距離均大於 9 公尺（圖 5.16）。

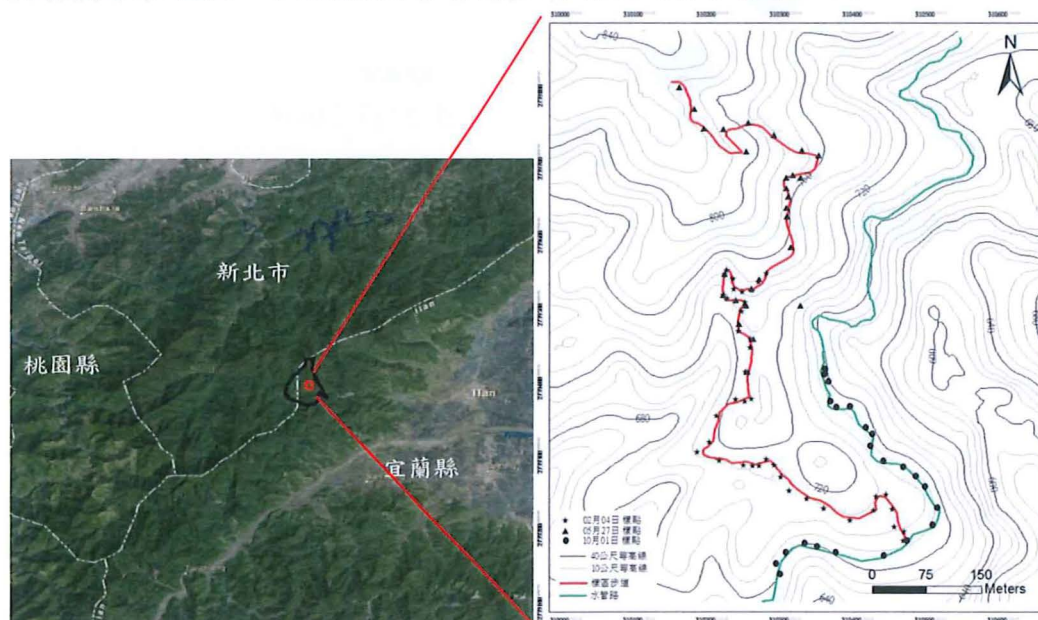


圖 5.16 福山試驗林位置圖。左圖中黑線所圈住的區域為福山試驗林的範圍，紅線所圈住的區域為樣區範圍。右圖中綠色路線為水管路，紅色路線為樣區步道。星形標記為 2016/02/04 於樣區步道之測點，三角形標記為 2016/05/27 於樣區步道之測點，圓形標記為 2016/10/01 於水管路之測點。

5.3 測試結果

5.3.1 簡易貫入試驗改良-汽油引擎貫入測試結果

我們於試驗地 A 進行了 5 次打樁機貫入試驗測試（表 5.3），測試點與簡易貫入點的相對分佈如圖 5.17。資料比較結果顯示（圖 5.18），在 5 次打樁貫入實驗中，使用 TYPE A 錐頭的 1 次及 TYPE B 錐頭的 3 次與簡易貫入的結果做比較，大致上皆能判定出阻抗程度較高的區域（深度 80~100 cm 處），而以簡易貫入之土壤硬度 $N_h \geq 100$ 做為基岩面定義去做換算的話，TYPE B 錐頭的 3 次結果顯示大約在 $N_{pd} = 10$ 左右的區域可能為基岩面，TYPE A 及 B 的錐頭則因為貫入直徑不同顯示與簡易貫入略為不同的關係。TEST4 的結果也顯示打樁機貫入可以測量到較深的地層。

表 5.3 試驗地 A (N 24° 45'31.57", E 121° 35'51.73") 打樁機貫入測試

測試	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
錐頭類型（直徑）	A	B	B	B	C

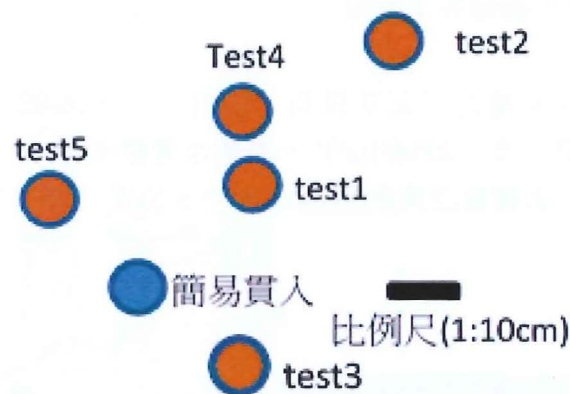


圖 5.17 試驗地 A 測試點與簡易貫入點的相對分佈示意圖

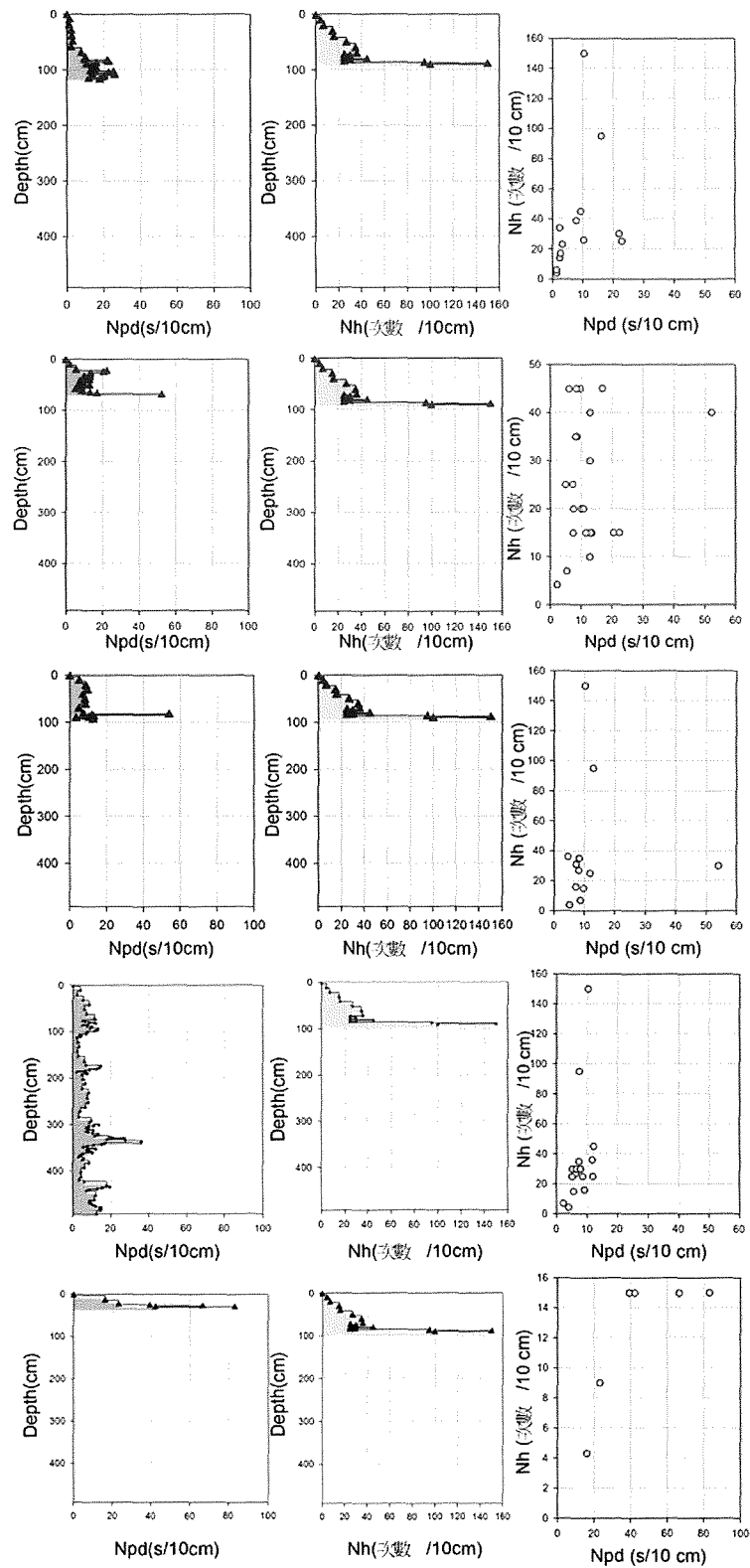


圖 5.18 試驗地 A 打樁機貫入試驗測試結果與簡易貫入結果之比較。圖由左至右之順序為打樁機貫入試驗土壤深度-硬度圖、簡易貫入試驗土壤深度-硬度圖、打樁貫入阻抗值對應同深度簡易貫入阻抗值關係分佈圖。

我們於試驗地 B 進行了 3 次打樁機貫入試驗測試（表 5.4），測試點與簡易貫入點的相對分佈如圖 5.19。資料比較結果顯示（圖 5.20），與測試點 A 結果相似，使用 TYPE A 與 TYPE B 錐頭大致上皆能判定出阻抗程度較高的區域，以簡易貫入之土壤硬度 $N_h \geq 100$ 做為基岩面定義去做換算的話，TYPE A 錐頭的 2 次結果顯示大約在 $N_{pd} = 8$ 左右的區域可能為基岩面，而 TYPE B 錐頭的 1 次結果顯示大約在 $N_{pd} = 10$ 左右的區域可能為基岩面。

表 5.4 試驗地 B（N 24° 45'31.57"，E 121° 35'51.73"）打樁機貫入測試

測試	TEST 6	TEST 7	TEST 8
錐頭類型（直徑）	B	A	A

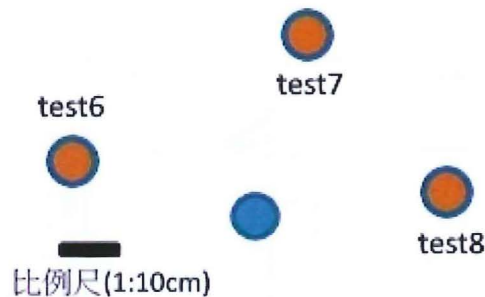


圖 5.19 試驗地 B 測試點與簡易貫入點的相對分佈示意圖。

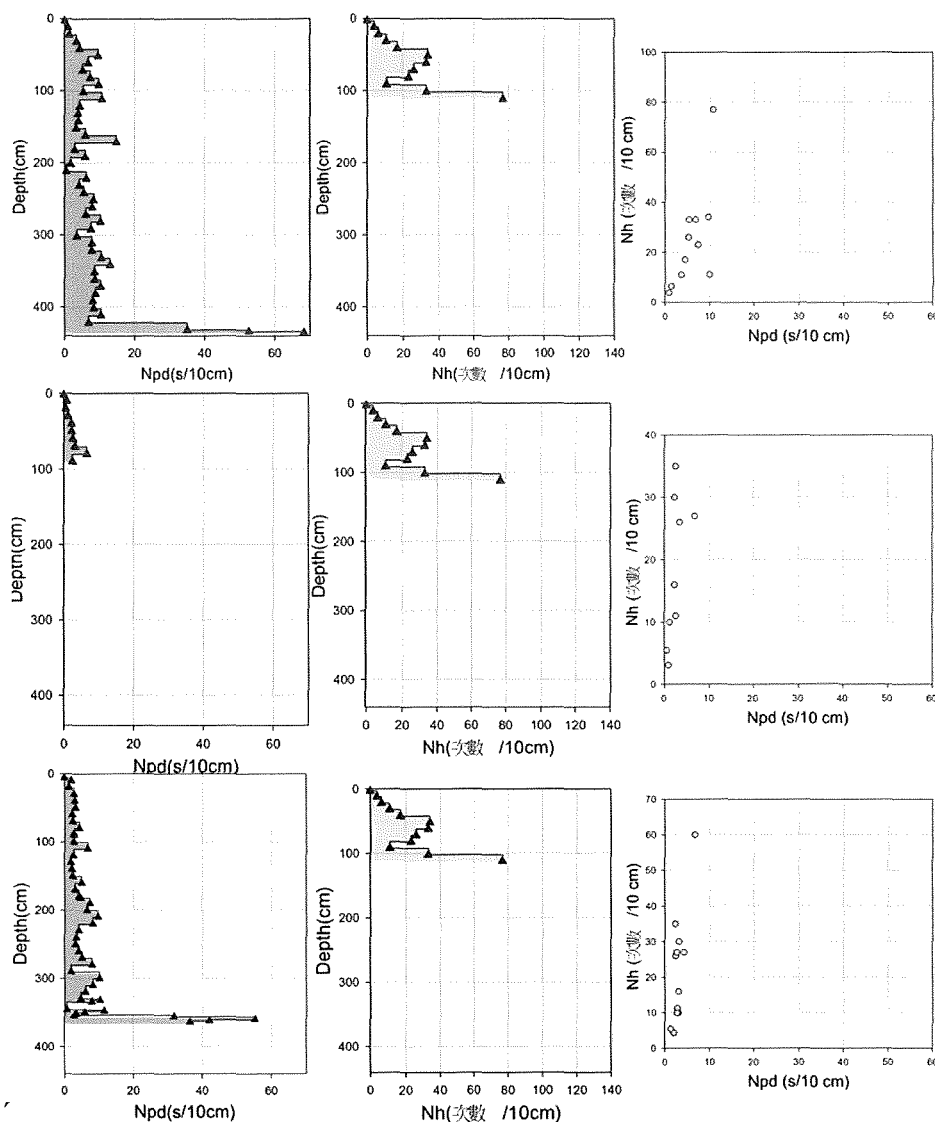


圖5.20 試驗地B打樁機貫入試驗測試結果與簡易貫入結果之比較。圖由左至右之順序為打樁機貫入試驗土壤深度-硬度圖、簡易貫入試驗土壤深度-硬度圖、打樁貫入阻抗值對應同深度簡易貫入阻抗值關係分佈圖。

以上述結果得知，汽油引擎活塞打樁機適合運用在貫入試驗中，其遠超過人力之貫入動力可以快速地縮短整個貫入試驗所需的時間，而貫入過程之動力來自於機器出力也可以減少試驗人員的操作負擔，惟需要施力用以控制貫入之方向。但也因其貫入速度快導致觀測小尺度的貫入深度比較困難，以及打擊次數難以量化，所以改用每貫入一定深度所需時間做為記錄方法，也使得收到的觀測資料相對於簡易貫入較不精細。

為了提升貫入試驗操作中對於貫入深度的可觀測程度，我們必須稍微減緩打樁機貫入之速度，所以決定增加貫入試驗中的阻抗程度。除了原本直徑 20mm (TYPE A) 的貫入錐頭，我們另外製作了直徑 40mm (TYPE B) 及 60mm (TYPE C) 的錐頭進行測試，以期能找到較為適合打樁機貫入之尺寸。現地觀察的結果

顯示，原本簡易貫入尺寸直徑 20mm 的錐頭阻抗程度太小，貫入速度較快使得貫入深度之觀測較為不易，而 60mm 的錐頭其阻抗程度太大無法順利進行貫入試驗，且無法達到簡易貫入可達之貫入深度。40mm 現地操作的結果顯示其貫入速度適中，適合進行貫入深度之觀測，其表現適用於打樁機貫入試驗的操作。

整合上述之結果，我們整理出汽油引擎活塞打樁機貫入試驗與簡易貫入試驗比較之優缺點（表 5.5），汽油引擎活塞打樁機貫入試驗在貫入速度、省力程度以及可探測土壤深度上具有顯著的優越性，可以幫助我們快速地進行土壤深度的較廣泛圍調查，而且也可以蒐集到較深土層的數據，深度可超過 5 公尺，而簡易貫入則有儀器輕量以及可以獲得較精細資料的優點。

表 5.5 汽油引擎活塞打樁機貫入試驗與簡易貫入試驗優缺比較

	簡易貫入	汽油引擎活塞打樁機貫入
貫入速度	慢，5 公尺深度可能需要 1 至 2 個小時	快，5 公尺深度僅需 15 至 30 分鐘
省力程度	貫入需人力操作較費力	貫入動力來自機器出力
儀器重量	輕量且攜帶方便	打樁機機體沉重 且較不好攜帶
試驗精度	相對精細 (觀測尺度：1 公分)	相對較不精細 (觀測尺度：2-10 公分)
可探測深度	相對較淺 (多在 5 公尺以內) (相同地點試驗請詳見 p84~87)	深 (輕易可超過 5 公尺以上) (相同地點試驗請詳見 p84~87)
所需最少人數	2 人	2 人

拔取設備：本計畫製作之腳踏式槓桿千斤頂圖（5.4），在腳踏板下壓的過程中利用套環將貫入計或鑽管固定並拉起，目前在野外的測試成果不論在貫入計還是鑽管或採土打樁管皆能順利使用。

5.3.2 簡易地下水井挖掘機測試結果

本計畫對於簡易地下水井挖掘機進行兩次試用測試（圖 5.21），兩次結果如表 5.6，第一次試驗耗時 1.5 小時，總計鑽入 149 cm，第二次試驗耗時 2 小時，總計鑽入 64cm。兩次試驗均發現在土壤層中鑽井機容易受土壤黏滯力影響，特別是黏土層成分多之深度鑽入較為困難，耗時耗力，需要多次清理鑽頭才能繼續使用；但若到達岩石甚至岩層時，其鑽入效果好，速度也較快。

表 5.6 簡易地下水挖掘機測試結果

測試	TEST 1	TEST 2
耗時	1.5 小時	2 小時
深度	149 cm	64 cm



圖 5.21 輕便岩芯鑽探設備（鑽井機）現地試用照片（2016/01/27）。

為了解決輕便岩芯鑽探設備在鑽探過程中受土壤黏滯力影響造成鑽井試驗時間拉長，本計畫搭配汽油引擎打樁設備以及採土打樁管，用於土壤層之鑽井試驗中，以其能縮短鑽井之耗時，並確立其效果以及鑽井實驗之流程。本計畫於野外進行測試（圖 5.22），預期之實驗流程為，於選定進行鑽井試驗之地點進行汽油引擎打樁機貫入試驗以確立基岩面之深度範圍，接下來以打樁機及採土打樁管進行土壤層之貫入採土作業，待貫入至基岩面深度範圍再改用輕便岩芯鑽探設備進行鑽探，鑽探至可觀測地下水之深度後，進行水井以及地下水位觀測試驗之架設（圖 5.23）。觀測結果顯示，利用汽油引擎打樁機貫入之探測，試驗地點之基岩面深度範圍約為 74 公分左右，接下來使用汽油引擎式打樁機以及採土打樁管，在土壤層進行貫入及採土作業，觀測結果顯示汽油引擎式打樁機以及採土打樁管在土壤層之貫入速度明顯較輕便岩芯鑽探機在土壤層的鑽入速度來的快，在黏土層貫入方式較不受到黏滯力的影響，可以順利的深入地下，也能順利的將表層土芯取出（圖 5.24）。在貫入至基岩面之深度範圍後，汽油引擎式打樁機以及採土打樁管之貫入速度明顯下降，甚至無法繼續深入土層中，經過反覆測試約在 5~8

秒內貫入深度沒有改變即可視為到達基岩面處。達到基岩面後，使用輕便岩芯鑽探設備繼續鑽入直到可探測地下水之深度。本次試驗因適逢梅姬颱風，於梅姬颱風後兩天進行測試，其地下以及地表逕流仍然充沛，導致鑽井地點於土壤層有大量逕流溢出，影響輕便岩芯鑽探設備鑽桿之轉動，且地下逕流之導致土層不斷坍塌，無法順利使用輕便岩芯鑽探設備鑽入。



圖 5.22 採土打樁管現地測試 (2016/10/03)。

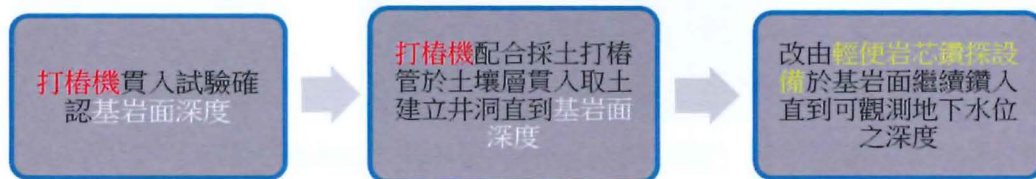


圖 5.23 建議鑽井試驗之流程。



圖 5.24 利用採土打樁管取出之土芯。

5.3.3 地中音探測儀測試結果

各樣點地形及代表值：將各樣的代表值依據數值大小分成 4 個區間。各點的數值以及分布如圖 5.25 所示，紅色的部分代表地形凸起的區域，藍色的部分代表地形凹陷的區域，黃色則介於兩者之間，代表地形平緩的區域。圖 5.25b 中三黑色箭頭所指處為沖蝕溝，圖 5.25c 中黑色箭頭所指處為崩塌地、白色箭頭為該點下方有一塊無樹木的區域。

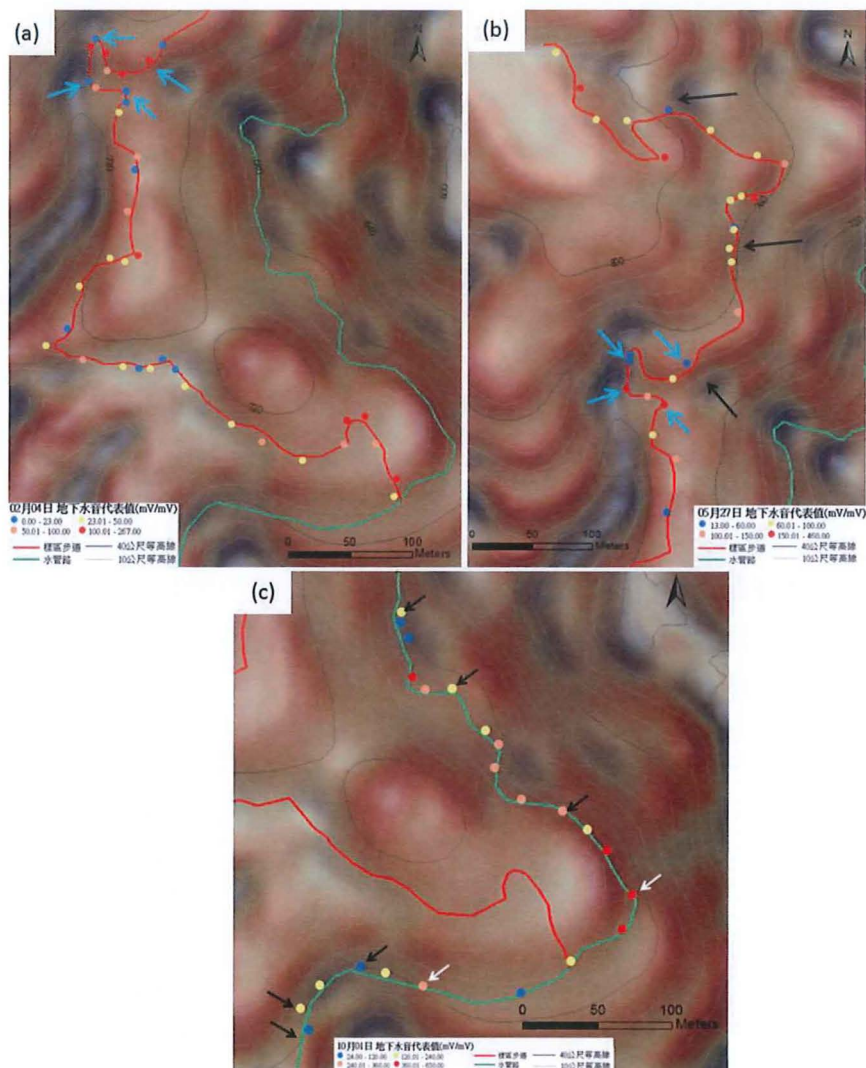


圖 5.25 樣點地形說明。(a) 2 月 4 日 (b) 5 月 27 日 (c) 10 月 1 日福山樣區樣點代表值 CS 立體微地形圖。圖 (b) 中黑色箭頭所指處為沖蝕溝，圖 (c) 中黑色箭頭所指處為崩塌地、白色箭頭為該點下方有一塊無樹木的區域。圖 (b) (c) 中藍色箭頭所指處為兩次觀測中，地下水音代表值大小相反的地點。

將圖 5.25a、b、c 中地下水音較強以及較弱的區域分別挑選出來，整理成圖 5.26。福山樣區地下水音較強的區域為 A 區及 D 區，其中 A 區域為一較寬的稜線，10 月 1 日的調查主要是沿著稜線的遷急線 (A 框中深紅色處)，顯示於稜線

上地形變化較劇烈之處（稜線上夾於兩黃色區域中深紅色的區域）地下水較為活躍，且在 A 區觀測時，也發現水管路上存有平行於道路的裂縫，顯示該地地層有些微滑動的現象，與地中音觀測結果相符。另外，2 月 4 日於黃色區域也觀測到相當強的地下水音，可能為稜線雖然集水能力不佳，然而於寬稜地形較平緩處地下水較容易囤積，而造成該地地下水較多，並且又不失去其流動性。D 區域雖然地下水音代表值也很大，然而圖 5.25a、b 藍色箭頭所指處量測出的代表值大小幾乎完全相反（紅色變藍色，藍色變紅色），可能是各點測量次數的問題，必須增加樣點數以及測量次數，以方便了解該地地下水音代表值實際的大小。B、C、E 區域則為地下水音代表值較低的點，由圖 5.25c 可看出 B 區域大部分樣點均設置在崩塌發生的位置，其代表值反而與預期相反，反而是 10 月 1 日量測到最低的區域。推測可能是由於設點的方式所導致，前人研究中，崩塌地測量是沿著崩塌地上緣未崩塌的區域設點，樣線上測點有著較為一致的土壤性質，而本研究由於樣點均設置於道路旁，進行崩塌地量測時，測點均落於崩塌地的堆積部或崩塌地的中央，導致量測地點土壤較少、岩石較多且較富含空隙，震動波較難傳遞、接觸較不緊密，造成接收到的數值較小，測量點土壤性質也迥異於其餘測點。與圖 5.25c 中白色箭頭處的點相比，該點下方有一塊無樹木的區域，可能為較早前的崩塌區域，白色箭頭的兩點均有較高的代表值，因此於崩塌地的數值普遍不高可能是由於設點位置的問題。C 區為一沼澤窪地，於沼澤邊設置的樣點下方不足 50 公分深處即為水面，又該區水幾乎無流動現象，造就該區域代表值較小。E 區域可能是由於該地坡度較無變化（圖 5.26 紅、藍色較淡且接近黃色），而造成該地地下水音較小。

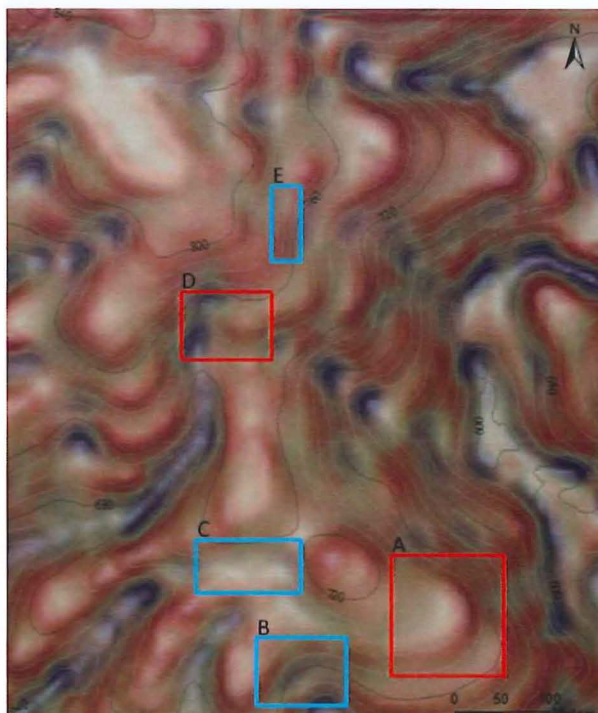


圖 5.26 福山樣區代表值整理圖。圖中地下水音較強的區域為紅框所框住，較弱則為藍框，左上角英文字為方框的編號

代表值及地下水音頻率的關係：表 5.7 為 2016 年 10 月 1 日各測點的代表值以及 5 次量測中無記錄到地下水音的次數，代表值最大的幾點 ($>340\text{mV/mV}$) 5 筆資料均有記錄到地下水音，而代表值介於 200 與 340mV/mV 的測點，卻有 6 點於測量時存有紀錄不到地下水音的資料，此外，將 5 筆資料地下水音的發生次數作加總，得知有 7 點的地下水音發生次數小於 5 (表紅字部分)，顯示若於各點觀測的次數過少，則誤判為無地下水音的錯誤將會增加，代表值也可能無法計算，建議各點宜測量至少 3 次以上，用以降低誤差。

表 5.7 2016 年 10 月 1 日各測點代表值及 5 次量測中無記錄到地下水音的次數整理表。

表中 D 為代表值 (mV/mV)， $\times$ 為 5 次量測中無記錄到地下水音的次數，紅字為 5 筆資料地下水音的發生次數作加總後地下水音發生次數小於 5 的點。

Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D	145	106	24	389	284	192	217	270	288	331	250	152
$\times$	3	3	3	0	0	2	1	3	0	2	3	4
Site	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
D	394	651	486	142	100	277	221	83	190	208	55	
$\times$	0	0	0	4	3	1	0	0	0	1	0	

CS 立體微地形圖的優缺點：在優點的部分，CS 立體微地形圖僅須利用 DEM 圖及 ARCGIS 內建功能即可作成。在視覺呈現的方面，CS 立體圖可以 1.同時呈現出坡度以及曲率的特性，並且附加了立體感，使人在觀看時可以立即明白各地整體的大地形的起伏狀態 (立體視覺效果)，以圖 5.27 為例，如果單以 10m 等高線圖來看 (圖 5.27a)，只能看出該地為稜線以及大致上的坡度，然而若是以 CS 立體微地形圖來看 (圖 5.27b)，則除了上述的性質，還可看出整個稜線呈現出些微階梯狀的性質，判視結果與最精細的 1m 等高線圖相近 (圖 5.27c)，並在視覺呈現上較為優秀 2.可以將微地形特徵顯露出來，如山坡面積狹小的集水點，或是微隆起處 (圖 5.28b)，雖仔細判視圖 5.28a 也可看出同樣的地形，然而 CS 立體微地形圖較等高線圖易於辨識微地形。

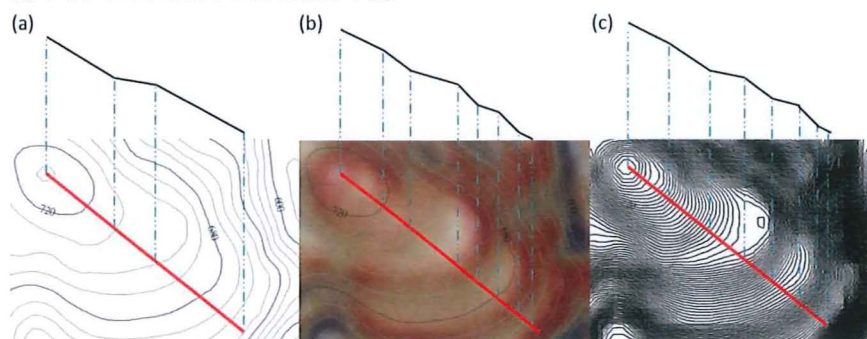


圖 5.27 立體微地形圖判示。(a) 稜線等高線圖 (間距 10m) (b) 稜線 CS 立體微地形圖 (c) 稜線等高線圖 (間距 1m)。圖片上方的黑線為沿著紅線，對三張圖剖面的判斷的示意圖

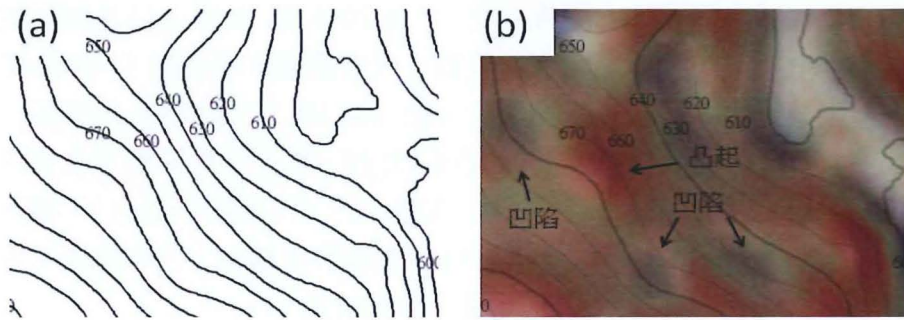


圖 5.28 (a) 山坡等高線圖 (b) 山坡 CS 立體微地形圖。

而與傳統用來繪製立體地形圖的暈渲圖以及鳥瞰圖相比，CS 立體圖的技術門檻相對的較低，並且對於地形的呈現效果較好，以暈渲圖為例（圖 5.29a），暈渲圖在繪製時必須根據當地的地形以及位置，來決定光源的角度以及高度，依據光源的位置差異，觀察到的東西也不同，進而造成判讀上的誤差，且視覺效果較不佳，顏色較單調，而 CS 立體圖是由坡度、曲率以及高度圖疊合而成，並無參數選擇問題，因此不會有這些問題的產生，且在視覺呈現上以紅藍色區分凸凹地，有較良好的視覺效果。

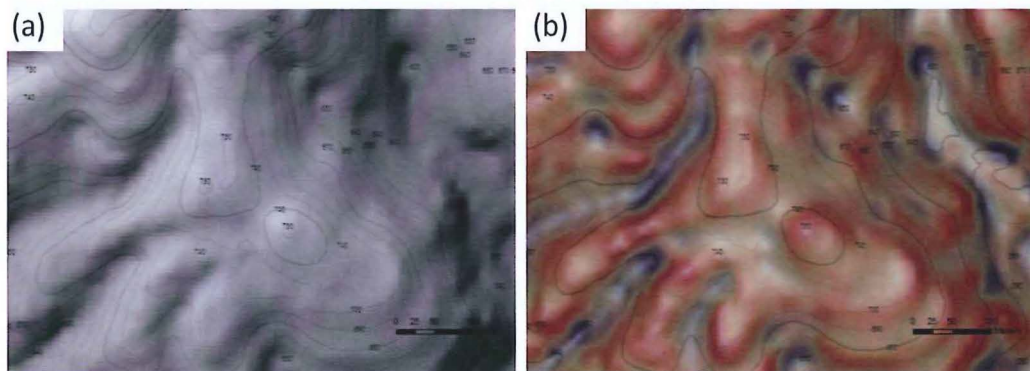


圖 5.29 CS 立體圖。(a) 福山樣區暈渲圖 (b) 福山樣區 CS 立體微地形圖。暈渲圖是以角度：315、高度：45 繪製而成。

在缺點的部分，雖然 CS 立體微地形圖並不因參數選擇不同而有判視上的誤差，但刻劃地形起伏的效果是否良好有賴於各層透明度選擇，更甚者須調整對比及光度，但 CS 立體微地形圖是由 5 張圖疊合成，調整視覺效果時各層之間會互相影響，增加調整的困難度，使得其在製作時十分花費時間。

地形與地下水音的關係：由結果得知，代表值較大的區位可能位於稜線（黃色部分）及其遷急線上，而沿澤窪地、較無坡度變化的坡地則有較低的代表值。但除了地形之外，仍可能有其餘潛在因素可能影響地下水音的強度，包含土壤結構及地質。土壤的粒徑比例會影響量測到的地下水音的大小，一方面孔隙越大，地下水於孔隙流動時的速度也會越快，使得該地地下水音較強，另一方面，如討論中所述，孔隙越大，其所能生成的氣泡也越大，而地下水音也會越強。地質的

不同確實可能會造成地下水音的代表值大小有明顯差異，以花崗岩及玄武岩為例，花崗岩測到最小的地下水音比玄武岩測到的最大的地下水音還來的大。

表 5.8 廣域水文地質探查技術研發之三種測試優劣分析比較分析

	簡易貫入試驗改良： 汽油引擎活塞打樁機	簡易地下水井挖掘機	地中音探測儀
功能	探測土壤層深度 了解土壤層阻抗分布	以鑽探方式達到地下水層，建立簡易地下水井，以供觀測地下水文之資訊	利用地中音之方式判斷地下水流之位置
優點	探測速度快 探測深度相對較深	對於堅硬地層仍能以鑽探方式打通，可探及深度較深	儀器輕便，測量方式容易且快速，可以進行較大範圍之探查
缺點	測量之阻抗資訊精度較簡易貫入差	於淺層土壤容易受黏土之黏滯力影響鑽探效果	觀測地中音資訊之判斷及處理較為複雜

5.4 小結

本計畫進行廣域水文地質探查技術研發及測試，主要包括簡易貫入試驗改良、地下水井鑽探測試、地中音探查法試行，其結果可以歸納如下：

1. **簡易貫入試驗改良：**汽油引擎活塞打樁機適合運用在貫入試驗中，相比於簡易貫入，其快速貫入、省力以及探測深度更深的特性有助於廣域土壤厚度之探測。三種直徑規格之錐頭試用結果顯示，TYPE A 阻抗太小貫入過於快速不利於現地貫入深度之觀測，TYPE C 阻抗太大無法貫入至基岩面，TYPE B 貫入速度適中且能探測至基岩面可能為目前較為適合搭配打樁機貫入之規格。與簡易貫入之結果比較，以簡易貫入之土壤硬度 $N_h \geq 100$ 做為基岩面定義，TYPE A 之結果換算約 $N_{pd}=8$ ，TYPE B 之結果換算約 $N_{pd}=10$ 左右可以做為基岩面定義，但因目前僅為測試，其測點之樣本數仍然太少，正確之基岩面阻抗值之校正仍待日後蒐集更多實驗樣本進行換算。
2. **簡易地下水井挖掘機測試：**地下水挖掘設備目前進行兩次試用，兩次試驗均發現在土壤層中鑽井機容易受土壤黏滯力影響，耗時耗力，但若到達岩石甚至岩層時，其鑽入效果好，速度也較快。為了解決輕便岩芯鑽探設備在鑽探過程中受土壤黏滯力影響造成鑽井試驗時間拉長，本計畫搭配汽油引擎打樁設備以及採土打樁管，用於土壤層之鑽井試驗中，對於土壤層之貫入以及取土效果較輕量岩芯鑽探設備卓越，未來在進行鑽井試驗中，可以在淺層之

土壤層之鑽探深入使用汽油引擎打樁設備以及採土打樁管，待貫入至岩層再使用輕量岩芯鑽探設持續深入探測直到可觀察地下水位之深度。

3. **地中音探測儀測試：**地中音探測儀所測得代表值較大的區位可能位於稜線（黃色部分）及其遷急線上，而沼澤窪地、較無坡度變化的坡地則有較低的代表值，因此地形和地下水確實是有其關連性存在。此外由於福山地下水音發生頻率較低，各點宜測量至少 3 次以上，用以降低誤差。而本研究嘗試繪製 CS 立體微地形圖時發現，雖然 CS 立體微地形圖於繪製時較為繁瑣，不過相較於單以等高線圖或是傳統立體圖的暈渲圖以及鳥瞰圖，其在視覺效果、地形辨識以及微地形呈現等方面十分優秀。

6 綜合討論與結論

6.1 綜合討論與未來建議

本章彙整本計畫研究成果，討論以國有林集水區上游區域之水文反應與土砂移動關係，調查結果衍生出一些值得探討的議題，簡單歸納如下，並且對於未來的研究及調查方向提出建議。

- 能否從地表環境資訊評估崩塌、地滑潛勢區域？

可視的地表環境資訊是土砂災害預測、評估中重要的項目，地表地形坡度、集流面積等地形量，或是地表陷落、隆起等地形特徵，都常用來評估崩塌、地滑等土砂移動現象，近年來利用高精度地表地形圖、航照圖、衛星圖來評估大規模崩塌的可能性也廣受討論。相較於不可視的地下資訊，地表資訊較容易取得，對於土砂移動現象初期判釋上也有許多助益。例如本研究窄域監測樣區可以由地表環境資訊看出潛在滑動的位置，地表陷落部位（滑落崖）、隆起部位為典型地滑型態，加上該位置的植生密度較低、基徑大，意味著位置受到的干擾多，長期下來只有基徑大的林木可以存留，更增加此推測（地滑發生）的信賴程度。廣域樣區調查結果也發現，由地形起伏高的位置（遷急線）發生崩塌的機率高。

然而地表資訊之應用有所侷限，地中不可視的資訊往往更為重要，例如在域監測樣區地表地形並無明顯遷急線（坡度急遽變化連線），但基岩面上卻可以發現兩條明顯的遷急線，研判此為地質背斜構造所造成，在這位置上常為地中易飽和或是地中逕流流動路徑，且在強降雨時有變位、移動的徵兆；基岩面低窪處常為水分匯集之區域，然而樣區中間部位的低窪處卻難以飽和，原因是該位置可能為地滑滑動區域，干擾大、基岩面裂縫多。以上都說明了地表地形與基岩面地形有很大的差異。

地中資訊雖不易取得，但卻是不可忽視的一環，因此地下水文地質相關探測技術的研發相對重要，特別是臺灣山區或是國有林班地多陡峭環境，車輛無法進入之處幾乎無法施重機具調查，因此適用於陡峭環境、數人即可操作的水文地質調查技術研發，成為取得地表下水文地質資訊的關鍵。

- 坡地地中水文動態與崩塌、地滑的關連？

坡地淺層地層可大致分為土壤層、風化岩層及母岩，而土壤層及風化岩層的交界面（層）稱為基岩面（Soil-bedrock interface），基岩面上的飽和帶動態與逕流反應及坡地穩定有很大的關聯。本研究調查的結果發現地中棲止水與地下水均會影響基岩面飽和帶的動態，若僅就水文的觀點來看（圖 6.1），淺層崩塌發生主要與基岩面的棲止水最為相關，而地滑的發生主要與地下水最為相關；前者主要是土壤層岩層交界的暫時存在的飽和帶，後者主要是岩層中長期存在的飽和帶。然而棲止水與地下水並非獨立的兩個地中水文項目，兩者常常在基岩面上或是岩層中混合，也就是第 3 章所探討的“新水”與“舊水”的混合現象。近年來也有透過兩者間的交互作用來探討深層崩塌發生的機制，雖然其關係還未完全被瞭解，但

顯示了地中飽和水分動態的重要性。為了解坡地水文動態及崩塌地滑機制，地下水分布、深度、流徑等調查方法的研發，也是未來研究努力的重要項目之一。

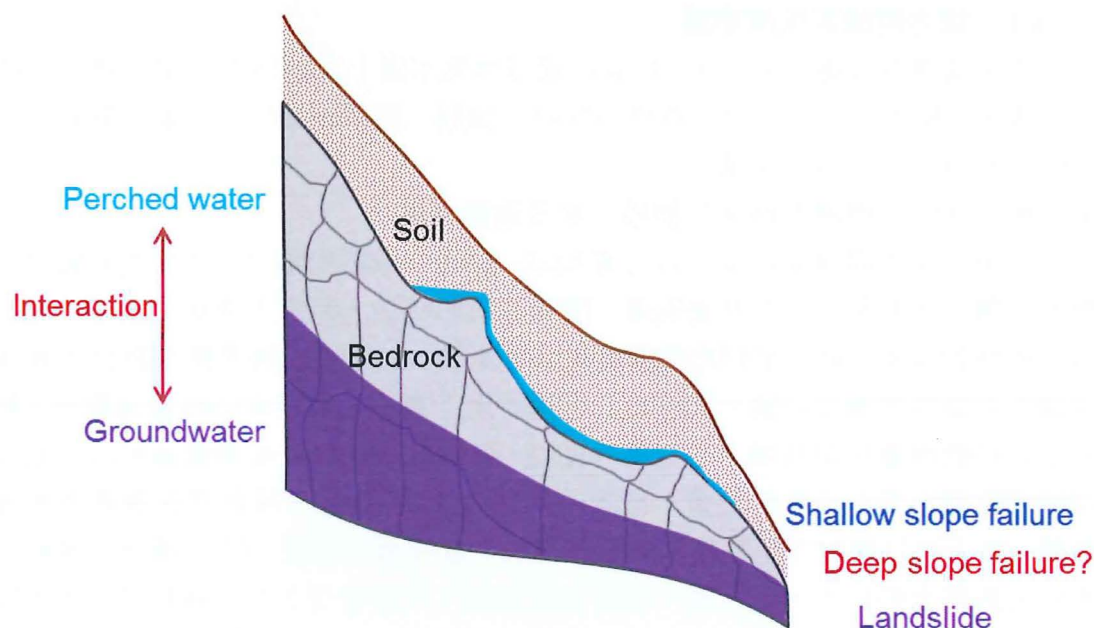


圖 6.1 坡地地中水文項目與土砂移動種類關連示意圖。坡地水文項目包括棲止水 (perched water)、地下水 (groundwater) 以及兩者的交互作用 (interaction)，土砂移動種類包括淺層崩塌 (shallow slope failure)、地滑 (landslide) 以及深層崩塌 (deep slope failure)。

- 降雨特性、土壤厚度、基岩面地形濕潤指數對地中水文動態的影響以及崩塌、地滑的關連？

本調查研究發現土壤厚度與基岩面地形濕潤指數的空間分布難以區分易飽和區域、難飽和區域，但是卻與飽和帶形成過程的時間特性相關。對於降雨強度大、降雨延時短的降雨事件，在未飽和或近飽和狀態下主要的影響因子為土壤厚度（與飽和帶呈負相關），當飽和帶形成後，其擴大、流動的過程為基岩面地形濕潤指數所控制（與飽和帶呈正相關），在飽和帶形成初期或是降雨強度高的時間點，這兩個因子皆有所貢獻（也就是雙重影響重疊時期），可以解釋淺層崩塌多發生於降雨強度大的機制。然而就降雨強度小但降雨延時長的降雨事件中，土壤厚度及地形濕潤指數的影響就不明顯，研判滲漏進深層的飽和水分的比例較強降雨時來得高。

由逕流反應也可以印證以上的現象，在降雨強度大、降雨延時短的降雨事件中，逕流量的增減反應非常敏銳，涵養於土壤或岩層中的雨水量較少；然而降雨強度小、降雨延時長的降雨事件中，逕流量的變化便相對緩和許多，涵養於土壤或岩層中的雨水量較多。

基於以上降雨特性與水文動態的現象，可以推論在降雨強度大、降雨延時短的降雨事件中，誘發淺層崩塌的可能性高；在降雨強度小、降雨延時長的降雨事件中，誘發地滑的可能性高。

● **低人為擾動、植生覆蓋良好之森林地，為何會發生崩塌或相關土砂移動？**

臺灣特有之地形與氣候條件下，集水區上游多為森林坡地，卻也常因颱風、豪雨、地震等外力，破壞其邊坡穩定平衡，造成淺層崩塌、深層崩塌、地滑、土石流等土砂移動現象的發生，進而影響中下游地區人民生命財產與公共設施的安全。森林在崩塌抑制上的功能備受關注甚至期待，然而森林坡地的土砂移動現象卻也是經常、頻繁、“自然”地發生，這兩者看似矛盾的爭論，主要原因來自於大眾對於森林公益功能的“過度期待”以及土砂移動機制不甚瞭解而來。

本計畫研究地點位於人為影響小、人工建築少、遊客有總量管制的福山研究中心，結果顯示不論是 2015 年蘇迪勒颱風或是 2016 年梅姬颱風，均造成觀測樣區大量的土砂移動。土砂移動乃一自然現象，除了平常自然地土砂輸出外，受到降雨、地震等外部力影響，會有造成大量、快速的土砂移動，若無保全對象的損傷，這樣的自然現象常被大眾忽視。由本計畫拍攝的衛星影像圖也可發現，除了河道周邊大部分還是植被所覆蓋，也就是植生覆蓋良好之地，人工探查發現，在這片林冠覆蓋良好之地面、地中，強大外部力的作用下，依然會有土砂移動。換言之，看似一片綠覆之下，其中土砂或許已在移動。同上述，地中資訊雖不易取得，但卻是不可忽視的一環。

長久以來，森林在崩塌抑制上的機能備受期待，主要來自於樹木根系穩固土壤或是侵入岩層的觀測或思考，然而對於根系未到達破壞面或是土壤厚度較大的狀態下，樹木根系的抑制崩塌效果只侷限於淺層土壤中。森林在崩塌抑制機能上的有其限界，於低人為擾動、植生覆蓋良好之森林地如福山試驗區，也常會因颱風、豪雨、地震等外力破壞坡地穩定平衡，因此就邊坡穩定及坡地水文過程的觀點而言，森林公益功能有再評估的需要，除了多面向評估各項因子間的關係，如何利用降雨強度、坡度、坡向、地下水等造成土砂移動之因子定量地評估森林在崩塌抑制上的正面及負面效益、瞭解其限界，是今後必須努力的方向；此外，將科學調查結果傳遞給大眾，也有助於降低對“森林公益功能的過度期待”以及“土砂移動機制不甚瞭解”間的落差。

● **未來水文、崩塌相關研究調查上的方向？硬體或軟體工程處置上的方式？**

崩塌、地滑、沖蝕等等土砂移動皆為自然現象，而道路開設、山坡地開發、引水灌溉等人為因素也有可能誘發或促進土砂移動。在崩場地治理作為上常見的有硬體工程、植生栽植等方法，當對保全對象有潛在威脅時，硬體工程的補強可為即時、強度大的手段；對於無保全對象或是硬體工程難以執行區域，植生復育工程為一溫和的方法。但是，若無法掌握土砂移動現象的機制、影響因子，也落入「頭痛醫頭、腳痛醫腳」之窠臼，地表面的草本或木本植被，並無法證明該地

處於一土砂穩定的狀態，特別是本調查區域之環境及氣候特性，植生之自然回復速度快，就小型的崩塌擾動而言，經過數個月即可觀察到地表植生的回復。

本調查研究最主要的所見也在於瞭解水文機制進而探討崩落地滑發生原因上，必須要先瞭解其機制才能有效地思考治理方式。因為地表資訊有所侷限，地中資訊的取得為今後該努力的目標。本研究發現地表地形與基岩面地形有所差異，類似的土壤厚度調查在日本已為公部門重點調查項目，在臺灣仍為缺乏，甚至無類似本研究的高密度的土壤厚度調查資料。就臺灣年輕的地質條件、殘積崩積土壤岩層交雜的環境，可以預知地表地形與地中地形會有很大的差異，因此進行土壤厚度調查進而建立土壤厚度資料庫，將是今後淺層崩塌預測治理上不可缺的項目。至於更深層的水文地質環境資訊取得上，地質鑽探、地下水井設置是一有效的方法，然而臺灣山區或是國有林班地多陡峭環境，車輛無法進入之處幾乎無法施行，因此簡易調查裝置的研發將有突破此困境的關鍵（例如本研究中自製及改良的簡易貫入計便是單人、雙人可操作的調查裝置）。

最後則是關於監測樣區的選定與長期觀測。窄域監測樣區的崩塌並非先前可以預知，但在初期現場探勘時藉由微地形、地貌、甚至林木分布等狀況研判此為高潛勢區域，這樣的判別標準需要大量現場經驗外，若非專家學者確實為難題。本研究也指出地質結構對於地中地形、水文動態的潛在影響，因此地質圖上背斜向斜、斷層地點，可為樣區建立時地點之選擇。本調查研究樣區雖然面積不大，但藉由高密度的調查項目，可統整分析地表到地下的水文動態。當瞭解其機制後，才能思考有效的治理方針。而本計畫所觀測到蘇迪樂颱風後的崩塌分佈主要由豪雨所造成，現今許多氣候變遷相關研究也指出未來短延時強降雨的降雨型態逐年增加（吳宜昭等，2010），可預估這樣的崩塌型態的發生也會越趨頻繁。藉由長期的監測，更可分析降雨特性的影響，特別是極端降雨出現頻率越來越高的現在，調查資料的長期累積更為重要。

6.2 結論

本研究計畫為期兩年（2015-2016 年），以國有林集水區上游區域水文反應及土砂移動調查主軸，選定林業試驗所福山研究中心做為調查地點，除了於集水區建立窄域監測樣區，觀察地表、地中、地下水文反應，並透過風災後廣域樣區的調查，分析土砂移動區域之環境特性，探討控制集水區上游區域水文行為、土砂移動之主要控制因子。所得主要結論可歸納如下：

1. **廣域樣區土砂移動特性：**蘇迪勒颱風前後 2013 年及 2015 年之衛星影像分析，輔以現地人工探查，顯示福山區域內因蘇迪勒颱風產生 141 處崩塌事件，主要分佈在雙埤路沿路及粗坑溪沿岸。土砂移動多屬於山壁及路基之崩塌，尤其以坡度超過 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之坡地為好發區域。比對水源林道及粗坑溪之土砂移動事件點位，發現多數水源林道內之土砂移動事件，皆可在其下方（粗坑溪沿岸）找到相對應的事件，暗示粗坑溪沿岸順向坡側之土砂移動可能具有連動性。粗坑溪集水區內之土砂移動事件面積分佈於遷急線區域 45% 為最高，

而哈盆溪集水區內之土砂移動事件面積分布則以河道變動為主，暗示地形變動可能為導致粗坑溪集水區之土砂移動事件遠高於哈盆溪集水區之成因之一。

2. **窄域監測樣區水文反應特性：**表層水文反應主要是以雨水的垂直入滲為主，其空間分布依坡地單元而異。無論是乾燥或濕潤狀態下，沖蝕溝周邊之含水率較高，側邊坡之含水率較低，但源頭坡地之含水率分布則依乾濕狀態而異，乾燥時含水率之空間變異較小，但在濕潤的狀況下則表現出高空間變異。基岩面上飽和帶反應特性可分為總是、經常、有時、幾乎無飽和四個型態，前兩者主要受地下水變動的影響，後兩者主要受降雨事件所提供給的雨水入滲、移動所影響。地表逕流具有季節變化，除了單場雨量所造成的直接逕流外，推估還有地下水的供給。
3. **颱風期間水文動態及土砂移動：**2015 年的蘇迪勒颱風與 2016 年梅姬颱風路徑、風力及降雨分布相似，且土地利用、地形、土壤等相同環境條件下，皆為短時間強降雨的降雨型態，但前者使窄域監測樣區地層開始滑動，後者使樣區崩塌。兩場降雨之臨前含水狀況不同，前者較為乾燥，後者為濕潤，因此梅姬颱風帶來的強風強雨，造成樣區內土砂沖刷及風倒木，以及土體崩塌事件，沖蝕溝、側邊坡及谷源都有崩塌發生。樣區崩塌順序可能由谷地開始往上坡崩塌，下坡土砂崩落後促使谷源稜線上之土石崩落。從張力計的損壞分布也可看出自蘇迪勒颱風後樣區有持續滑動的跡象，大多位於崩塌潛勢較高的遷急線附近，於颱風強降雨後谷源也有張力計毀損情況，可推測整個樣區幾乎都有地滑移動狀態。
4. **廣域水文地質探查技術研發：**本計畫進行簡易貫入試驗改良、地下水井鑽探測試、地中音探查法試行。汽油引擎活塞打樁機適合運用在貫入試驗中，相比於簡易貫入，其快速貫入、省力以及探測深度更深的特性有助於廣域土壤厚度之探測。簡易地下水井挖掘機容易受土壤黏滯力影響，耗時耗力，但若到達岩石甚至岩層時，其鑽入效果好，速度也較快，因此對於土壤層可使用汽油引擎打樁設備，待貫入至岩層再使用輕量岩芯鑽探設備，即可達到地下水位之深度。地中音探測儀所測得代表值較大的區位位於稜線及其遷急線上，而沼澤窪地、較無坡度變化的坡地則有較低的代表值，此結果可推測稜線部位地下水流流動快，坡度平緩處則較慢。

7 參考文獻

- Baatz, M. and A. Schäpe, 2000. Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (eds.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 12-23
- Beven, K. J., and M. J.Kirkby, 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- Crosby BT, Whipple KX. 2006. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. *Geomorphology* 82: 16–38.
- Gabrielli, C. P. and McDonnell, J. J., 2011. An inexpensive and portable drill rig for bedrock groundwater studies in headwater catchments. *Hydrol. Process.* 26, 622- 632
- Liang, W.-L., F.-X. Hung, M.-C. Chan, and T.-H. Lu, 2014. Spatial structure of surface soil water content in a natural forested headwater catchment with a subtropical monsoon climate. *Journal of Hydrology*, 516, 210-221.
- Okimura, T. and Tanaka, S., 1980. Researches on soil horizon of weathered granite mountain slope and failed surface depth in a test field. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 33(1), 7-16.
- Rouse, J.W., haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, p. 371 Greenbelt, Md.
- Tarboton, D. G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.
- Tromp-van Meerveld, H. J. and McDonnell, J.J., 2006. On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale. *Advances in Water Resources*, 29(2), 293-310.
- Underground Sound Measuring Device GAS-03 (Ver1.03) Instruction Manual
Publication date First edition: November 7, 2013 Edited by: Technical Innovation Center, TAKUWA Corporation
- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33

- Yamakawa, Y., K. Kosugi, N. Masaoka, J. Sumida, M. Tani, and T. Mizuyama, 2012. Combined geophysical methods for detecting soil thickness distribution on a weathered granitic hillslope, *Geomorphology*, 145-146, 56-69.
- 吳宜昭、陳永明、朱容練，2010. 台灣氣候變遷趨勢，國家災害防救科技中心
- 林光清、洪富文、程煒兒、蔣先覺、張雲翔 1996. 福山試驗林土壤調查與分類，*臺灣林業科學*，11:159-174。
- 林耿帆，2012. 以物件為基礎之光達點雲分類，國立臺灣大學工學院土木工程學系碩士論文。
- 林登秋 2012. 颱風對森林生態系的影響：福山啟示錄，*林業研究專訊* 19，(6):53-58。
- 林榮潤、周伯儀、許世孟、林燕初、張閔翔、黃智昭、費立沅，2013. 應用孔內水文地質調查成果於山崩潛勢評估，*中華水土保持學報*，44(3): 245-254。
- 洪耀明、萬綯、蘇苗彬、林裕益，2009. 崩塌地地下水位變化之即時預測，*水保技術*，4(3)：181-189。
- 張志新、王俞婷、傅鏗漩、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，國家災害防救科技中心
- 莊雲翰，2002. 結合影像區塊及知識庫分類之研究 —以 IKONOS 衛星影像為例，國立中央大學土木工程學系碩士論文
- 黃麗娟、林昭遠，2007. 植生指標應用於土地利用分類判釋之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文
- 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
- 楊樹榮、林忠志、鄭錦桐、潘國樑、蔡如君、李正利，2011. 臺灣常用山崩分類系統，第十四屆大地工程研討會
- 鄭雅文、史天元、蕭國鑫，2008. 物件導向分類於高解析度影像自動判釋，*航測及遙測學刊*，13(4)：273-284
- 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
- 經濟部中央地質調查所—地質資料整合查詢
- 多田泰之・藤田正治・提大三・小山敢・河合隆行・奥村武信・本田尚正，2007. 地中水みちと崩壊発生位置の関連性，*砂防学会誌*，Vol.60, No.4 p25-33

附錄一 期末報告審查會議回覆

審查委員	審查意見	意見回覆	辦理情形
廖副局長一光	1. 哈盆溪及粗坑溪只能稱為集水區，而非流域	謹遵指示辦理。	已修正全文，例如 2.3.1 節 (P.7)。
	2. 圖 2.7 崩塌坡度以小於 10 度最多？值得探討。	感謝寶貴意見。哈盆溪及粗坑溪集水區土砂移動事件在較小坡度比例較高之結果，主要來自於河道周遭的環境變動，包括河道變動、崩塌材料崩積、河川淘刷、河道沿岸坡腳侵蝕等，與一般崩塌特性不同。	已補充說明於 2.3.1 節 (P.11)。
	3. P.45 圖 3.13 集水區乾濕圖之背景條件為何？	感謝寶貴意見。12 次調查結果均可計算其平均含水率，依照平均含水率的大小，每次可得判斷這 12 次最乾燥 (θ_{driest})、第二乾燥 (θ_{dry})、中間值 (θ_{mid}) 及最溼潤 (θ_{wet}) 狀態。	已補充說明於 3.4.1 節 (P.44)。
	4. 張力計陶瓷頭斷裂損壞原因探討是土壤滑動應力造成？	感謝寶貴意見。陶瓷頭若發生斷裂時，張力計內部的水會快速流逝，造成測定值快速變化、異常。於現場觀察時，連接陶瓷頭之 pvc 管也有彎曲的現象。因此所以推測為土壤滑動應力造成。	詳細內容已補充說明，請參照圖 4.8 (P.60) 及 4.3.1 節 (P.59)。
	5. 打樁和貫入測試與樁桿材料、尺寸及土壤或岩層直接相關。	感謝寶貴意見。為了瞭解儀器之不同設計所得之結果，為試驗目的	已補充說明於 5.1.節 (P.74)。

		之一。關於土壤及岩層特性，則可透過貫入阻抗值來判斷，為試驗所欲得之結果。	
	6. P.18 遷急線的定義可否再說明，如何判釋？僅能以人工判釋？遷急線判釋的意義。	感謝寶貴意見。遷急線為坡度變化急遽的區域，本計畫利用人工判釋，坡度於垂直等高線方向 20 m 內變化超過 20° 的等高線段區域，即判定為遷急線。	已補充說明於 2.4.1 節 (P.18-19)。
	7. P.98 所述看似一片「綠色」，「綠色」應請修正為「植被覆蓋」或「綠覆」。	謹遵指示辦理。	已修正於 6.1 節 (P.99)。
酈委員 寶成	1. 本計畫屬森林集水區之基礎研究工作，不可多得的計畫，值得各單位的支持。建議對於都市邊之森林集水區也可納入爾後研究案。	感謝寶貴意見。都市邊的森林集水區水文收支及土砂移動對於住宅安全都十分重要，可作為未來研究之參考。	雖此建議超出本計畫範圍，將此建議納入日後研究方向之參考。
	2. 有關本計畫之「遷急線」是否有引用依據？	謹遵指示辦理。	已補充說明於 2.4.1 節，並附上參考文獻 (P. 19)。
	3. 對於本計畫自訂研發「簡易貫入之打樁機」，其可達深度為何？是否可以探測代表淺層土層厚度。	感謝寶貴意見。目前測試之最深深度可達 5 公尺。基岩面深度則可比對傳統及改良貫入計之貫入抵抗值以定之。	已補充說明於 5.3.1 節 (P.88)；基岩面深度之說明則於 P. 84。
	4. 對於本計畫自行研發「簡易地下水井挖掘機」，其可達深度為何？是否可以探測代表地下水位深度。	感謝寶貴意見。目前測試之最深深度為 64 公分。地下水位深度可利用水位計探測。	本儀器之測試結果、限制以及建議事項已補充說明於 5.3.2 節 (P.88-90)。
	5. 對於本計畫，採用「地中音探測儀」，其精	感謝寶貴意見。若於各點觀測的次數過少，則	已補充說明於 5.3.3 節 (P.93)。

	確度為何？是否可適用。	誤判為無地下水音的錯誤將會增加，代表值也可能無法計算，建議各點宜測量至少3次以上，用以降低誤差。	
	6. 依本計畫之結論陳述，爾後研究方向是可朝定量的研究，可供後續規設參考依據。如降雨強度、坡度、坡向、地質、地下水與土砂移動之關係量化式，值得後續研究。	感謝寶貴意見。	已補充說明於6.1節(P.99)，並將此建議納入日後研究之參考。
	7. 建議對於計畫中陳述「土壤層」、「基岩面」等定義及圖示，請多加描述。另對於土壤及基岩之過渡帶是否需陳述。	感謝寶貴意見。坡地淺層地層可大致分為土壤層、風化岩層及母岩，而土壤層及風化岩層的交界面(層)稱為基岩面 (Soil-bedrock interface)，基岩面上的飽和帶動態與逕流反應及坡地穩定有很大的關聯。	已補充說明於6.1節(P.97)。
	8. 對於崩塌及地滑等判釋，可加套繪環境及區域地質圖之地質判斷。	感謝寶貴意見。	因中央地質調查所提供之環境及區域地質圖精度範圍較廣，福山樣區均被歸類為同一種地質帶，因此現有資料難以判斷地質與崩塌地滑間的關係。
	9. 建議可於粗坑溪及哈盆溪集水區下游控制點設置流量及土砂沉淤	感謝寶貴意見。	本計畫以國有林集水區上游區域水文反應

	之監測站，可完整做出該集水區土砂運移的觀測。		及土砂移動調查主軸，下游之土砂運移觀測之建議，可作為未來研究計畫訂定之參考。
	10. P.20 表 2.5「沖蝕溝區域」及「河道變動區域」之定義，是否可更明確。	感謝寶貴意見。前者位於坡地中，後者位於河道。	已補充說明於表 2.5 (P.20)。
	11. 本計畫對於 2 次颱風有土壤飽和與地下水高度關係有定性之研究，爾後可以定量之關係研究。	感謝寶貴意見。	已於第 6.1 節補充說明 (P.99)，建議納入日後研究之參考。
王委員 昭堡	1. 摘要內容「短時間強降雨」請修正為「短延時強降雨」。	謹遵指示辦理。	已修正於摘要 (P.viii)。
	2. 在本計畫樣區為低人為擾動、植生覆蓋良好之森林地，在受到降雨、地震外部力量影響，會有大量、快速土砂移動，建議可將本計畫觀測樣區受到臨界雨量於綜合討論與結論中加強論述。	謹遵指示辦理。	已於第 6.1 節補充說明 (P.99)，建議納入日後研究之參考。
	3. 哈盆溪與粗坑溪環境因子差異不大，集水區遇同一颱風豪雨事件崩塌反應卻有明顯差異，除環境因子會影響，颱風風向與集水區坡面走向是否也是影響因子。	感謝寶貴意見。東南-南向坡應為福山地區受蘇迪勒颱風之迎風面，故造成此坡向之坡面有較多土砂移動事件發生。	已補充說明於 2.3.1 節 (P.12)。
羅東林 區管理 處	1. 兩年調查粗坑溪沿線均有大量崩塌地，但今年本處溪流魚類及生態調查在粗坑溪列入調查重點，但該處有三座攔砂	感謝寶貴意見。	此建議超出本計畫範圍，可建議納入日後研究之參考。

	壩及魚梯均未被破壞及土石淤積。		
	2. 所調查範圍崩塌大多屬福山植物園屬林業試驗所範圍，建議將調查提供林試所參考整治以利下游人民生命其財產安全。	謹遵指示辦理。	日後可配合貴單位整治需要提供資訊。
	3. 該調查地區林木植被良好，所產生之崩塌是否有自然復育的可能。	感謝寶貴意見。本調查區域之環境及氣候特性，植生之自然回復速度快，就小型的崩塌擾動而言，經過數個月即可觀察到地表植生的回復。	已於第 6.1 節補充說明 (P.100)。
	4. 圖 2.4 等有些圖表的溪流走向有異，是否需修正。(圖 23 溪流走向合理，圖 2.4 好像不合理)	感謝寶貴意見。其乃俯視圖不易看出稜線及山谷之區別所至，並無錯誤。	已補充說明於 2.2.2 節、圖 2.4b (P.6)。
東勢林區管理處	1. 報告書內淺層深層崩塌建議有所定義。	感謝寶貴意見。破壞深度僅至土壤層或風化岩層者為淺層崩塌，達岩盤者為深層崩塌。	已補充說明於前言 (P.1)。
	2. 前言 P.1 「...多數淺層崩塌發生於降雨強度最強的時刻」，此一現象似乎很不容易精確觀測，是本報告研究所得？或為引用？如為引用建議提供出處，並列入參考文獻。	謹遵指示辦理。	已修改語意，並列出參考文獻 (P.1)。
	3. 前一點之現象是否還適用於近年極端氣候？是否有其適用條件以及是否適用發生在河岸、坡面及所有地質地形？	感謝寶貴意見。現今許多氣候變遷相關研究也指出未來短延時強降雨的降雨型態逐年增加，可預估這樣的崩塌型態的發生也會越	已補充說明於第 6.1 節 (P.100)。

		趨頻繁。	
	4. P.8 文字說明中「雙黃線為雙埠路」但圖中不易辨識，建議可以圖例替代說明。	謹遵指示辦理。	已修改圖 2.6 (P.8)，使其更明瞭。
	5. P.100 第 3 點結論為降雨臨前含水較為濕潤造成樣區崩塌，建議補充其條件，如：相同土地利用、地形、土壤等條件下，以免外界對林地造成誤解。	謹遵指示辦理。	已依建議修改於 6.1 節 (P.101)。
南投林區管理處	1. P.31 建議窄域集水區源頭部水文動態監測所擇定的粗坑溪上游樣區於研究背景與目的詳加論述，俾使與研究目的為絕佳地點佐證。	謹遵指示辦理。該地可同時觀測水文反應及土砂移動，但對於本研究之目的而言是為絕佳之地點，因此規劃此處為觀測樣區。	已補充說明於 3.2.1 節 (P.31)。
	2. P.95 建議增列廣域水文地質探查技術研發進行三種測試優劣分析比較分析表。	謹遵指示辦理。	已增列表 5.8 於 5.4 節 (P.95)。
	3. P.88 建議表 5.5 汽油引擎活塞貫入與簡易貫入試驗優缺比較分析表，第 5 項可探測深度納入試驗樣區地形及地質條件應討論與探測深度 5m 之關聯性。	謹遵指示辦理。	已增列表 5.5 於 5.3.1 節 (P.88)。
	4. P.96 第 2 點坡地水文動態與崩塌地滑詳細補充各項水文特性（如：分布深度流徑）相互影響關聯，提出未來可研究之深度定量定性方向或評估對策方案。	謹遵指示辦理。水文與崩塌地滑間的定量定性關係仍為科學上待闡明的問題，本計畫主要提出“新水”與“舊水”的混合現象，並探討祈雨崩塌地滑的關聯。	已補充說明，並加入此建議，強調個性調查的重要性，請參照 6.1 節 (P.97-98)。
嘉義林	1. 部分內文似有誤	謹遵指示辦理，此為誤	詳細內容已修

區管理處	植，請檢核。如（1）水源林道土砂移動事件處數，P.13 寫「30 處」，P.28 寫「28 處」。（2）P.32 倒數第二行，（圖 3.2a）是否應為（圖 3.3a）為正確（3）P.67 上面第二張圖，左上方 Soil water content 1-5，與右標 NO.7~NO.10 不一致（4）P.74 地中音強度大小之文字敘述，與圖 5.1（b）呈現資訊，似不一致。	植。（1）應修正為 30 處（2）應修正為（圖 3.1c）為正確。（3）左上方 Soil water content 1-5 應改為 7-10。（4）應修正為地下水路正上方測得的地下水音最強，隨著距離增加而變小，並隨著流量的增加以及深度的「增加」，地下水音均會降低。	改於 P.28 、 P.32 、 P.67 、 P.74 。
	2. 蘇迪勒已有部分張力計發現斷裂點，與本年梅姬大崩塌關聯性多大，有無預警可能。	感謝寶貴意見。蘇迪勒颱風後，張力計頻繁出現斷裂的位置大約位於遷急線附近，梅姬颱風的大崩塌範圍也包含遷急線位置，可大致推測遷急線判釋可能可以作為潛勢崩塌預警。	已補充說明於 4.5 節（P.73）。
	3. 本年梅姬颱風分別於 9/30、10/7 發現崩塌，關聯性多大，有無預警可能。	感謝寶貴意見。該處是在說明 9/30-10/7 期間崩塌範圍擴大的觀測結果，就預警而言基岩面遷急線可作為參考。	已補充說明於 4.3.2 結（P.64） 4.5 節（P.73）。
	4. 各崩塌發生機制是否相同，差異在哪？可再多予研討。	感謝寶貴意見。目前就崩塌發生之預測能力有其侷限，其中一個原因就是相關因子及機制的複雜性，因此就特定地點即時間之預警仍為日後努力之方向。	已補充說明於 6.1 節（P.97-100）。
	5. 建議於圖 4.18 補繪遷急線以供比對關聯性。	謹遵指示辦理。	已補繪於圖 4.18（P.71）。
	6. P.66 文字敘述圖	謹遵指示辦理。	已增列於圖 4.15

	4.15 設於較高處，圖 4.16 設於較低處，是否能以圖示呈現，並標明。		及 4.16 (P.67-68)。
台東林區管理處	摘要部份建議再針對計畫成果多納入相關可量化數值，內容可再充實。	謹遵指示辦理。	已補充說明於摘要 (P.viii)。
花蓮林區管理處	1. 坡度表示有些為文字或符號，建議應統一 (如 P.27、P.28)。	謹遵指示辦理。	已將坡度單位符號統一為「°」，例如 P.27、P.28。
	2. 簡易貫入試驗與地中音探測儀，在地形選擇使用上是否有那些限制或應注意事項?	謹遵指示辦理。	使用上的限制及比較已補充說明於表 5.8 (P.95)。
屏東林區管理處(書面資料)	1. P.68 圖 4.16 其中 Ψ1~Ψ35 在 27-18 以後因崩塌造成損壞而沒有數據資料，建議於圖 4.16 下方備註說明。	謹遵指示辦理。	已修正於圖 4.16 (P.68)。
	2. P.90 內文「...梅姬颱風過後進行測試，因土壤層大量逕流溢出致無法順利鑽入作業。」最後是否完成測試?若未完成，是否影響成果?	感謝寶貴意見。本計劃期間僅試行鑽探，由於風災影響未順利打井完成，但已建立並建議鑽井試驗流程。	簡易地下水井挖掘機鑽入作業試驗建議流程已補充說明於圖 5.23、5.3.2 節 (P.89-90)。
	3. P.99 結論建議進行長期監測，俾累積長期調查資料。惟礙於各單位經費拮据之限制，恐難以持續進行長期監測計畫。建議規劃團隊考量本區域之地形、地質條件、崩塌情形及保全對象等因素，提出適宜之監測期程 (ex:3-5 年)，另相關退場機制條件是否可補充說明。	感謝寶貴意見。	本計畫主要調查國有林集水區水文與崩塌關係，此建議似為建立監測之作業程序，超出本計畫範圍，因此將此建議納入日後研究之參考。

集水區 治理組	可加強定性描述低人為擾動、植生覆蓋良好之森林地，也常會因颱風、豪雨、地震等外力破壞邊坡穩定平衡，進而定量評估森林在崩塌抑制及其界限。	謹遵指示辦理。	已納入此建議並補充說明於6.1 節 (P.99)。
------------	--	---------	---------------------------

附錄二 計畫調查進度及人力計畫執行進度甘特圖

本計畫前期著重於觀測樣區土砂移動之地形地質特徵分析及廣域水文地質探查技術研發，9月因為梅姬勒風災造成聯外道路中斷、樣區崩塌、樣區儀器毀損，後期除了例行觀測項目外，著重於樣區觀測體制之修復。

	2016 年									
	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	
風災型態調查										
衛星影像判讀										
試驗地勘查										
梅姬颱風探查							風災		閉園	
土砂移動之地形地質特徵分析										
地形特徵分析										
地質及其他環境條件分析										
廣域水文地質探查技術研發										
簡易貫入試驗計改良										
簡易地下水井挖掘機試用										
地下水音響探測										
現地試用性彙整										
水土反應過程中地文、植生、氣象主要影響因子分析										
監測樣區水文資料持續收集										
地文、植生、氣象對水文過程知影響分析										
期中期末報告撰寫										

- 計畫調查日期及人力

本計畫執行開始（2016.3）至今（2016.11），野外調查日數共 35 日、104 人次，平均每月 3.8 日、11.6 人次。

調查日期	人力	調查日期	人力
2016/03/17	3	2016/07/21	2
2016/03/18	3	2016/07/22	2
2016/03/31	3	2016/07/27	3
2016/04/07	3	2016/07/28	3
2016/04/22	3	2016/08/11	4
2016/04/29	2	2016/08/16	4
2016/05/12	2	2016/08/17	4
2016/05/13	2	2016/08/18	4
2016/05/20	3	2016/08/30	3
2016/05/27	3	2016/09/09	3
2016/05/28	3	2016/09/10	3
2016/06/03	2	2016/09/21	4
2016/06/04	2	2016/09/22	4
2016/06/16	2	2016/09/23	4
2016/06/17	2	2016/09/30	4
2016/06/23	2	2016/10/01	4
2016/07/14	3	2016/10/7	3
2016/07/15	3		

附錄三 工作項目及評核標準檢查表

工作項目自主檢查表					
重要工作項目	預定進度	105 年			
		1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
風災型態調查	工作內容	水文監測樣區維護	水文監測樣區維護、崩塌地滑觀測樣區選定	樣區維護	樣區維護
	達成與否	達成	達成	達成	達成
土砂移動之地形地質特徵分析	工作內容	地表含水率空間分布探測	水文地質探測	地下水音響探測	資料分析
	達成與否	達成	達成	達成	達成
廣域水文地質探查技術研發	工作內容	簡易貫入試驗計改良	簡易地下水井挖掘機試用	地下水音響探測	現地試用性彙整
	達成與否	達成	達成	達成	達成
水土反應過程中地文、植生、氣象主要影響因子分析	工作內容	監測樣區水文資料持續收集	監測樣區水文資料持續收集	地文、植生、氣象對水文過程知影響分析	地文、植生、氣象對水文過程知影響分析
	達成與否	達成	達成	達成	達成
期中期末報告撰寫	工作內容	--	期中報告撰寫	--	期末報告撰寫
	達成與否		達成		達成

期末評核標準檢查表

項目	達成與否	辦理情形
1. 各代表性風災類型之地形、地質特徵分析是否完成。	達成	土砂移動事件以人為判釋大致分為四類，包括裂縫、山壁及路基崩塌、沖蝕溝或溪溝、以及複合發生類型四類，主要分佈在雙埤路沿路及粗坑溪沿岸，哈盆溪流於則較少。 其他細節詳述於第 2 章。
2. 廣域水文地質探查技術研發及應用是否合宜。	達成	主要包括簡易貫入試驗改良、地下水井鑽探測試，地中音探查技術試行。三者是節結果均呈現廣域水文水文地質探查技術之革新。 其他細節詳述於第 5 章。
3. 地文、植生、氣象對水文過程之影響分析是否完成。	達成	計畫執行程果發現，就地表、地中、地下水文動態，其現控制因子均不同。 其他細節詳述於第 3 章。