計畫編號：**ARDSWC-114-086**

114 年集水區不安定土砂運移模式建立與衝擊評估
Development of The Unstable Sediment Transport Model for Watersheds and Impact Assessment in 2025
(成果報告書)

執 行 單 位：創聚環境管理顧問股份有限公司

執 行 期 間：114 年 1 月 24 日至 114 年 12 月 10 日

計畫主持人：李璟芳 博士

協同主持人：李偉哲 技術總監、藍振維 技師、柳鈞元技師

研究人員：賴建志 工程師、武幕 工程師、李曼 工程師

農業部農村發展及水土保持署　編印

中華民國 114 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考）

114 年集水區不安定土砂運移模式建立與衝擊評估

摘要

本計畫主旨在回應近年玉穗溪、荖濃溪及旗山溪等集水區於凱米颱風、卡努颱風及豪雨事件中所產生之大規模土砂運移與交通中斷災害，為降低災害風險並提供下游公路及聚落防護決策依據，農業部農村發展及水土保持署委託本計畫建立與精進「不安定土砂運移數值模式」，評估集水區於不同降雨重現期及極端氣候情境下之土砂釋放量與堆積範圍。研究以 RAMMS 模式及 r.avaflow 等國內外先進數值模式為核心，結合高解析度 DEM、Planet 光學衛星、Sentinel-1 SAR InSAR 變形監測及山崩目錄資料，綜合分析四處不安定土砂集水區之短期衝擊模擬與兩處區域之長期土砂趨勢變化。同時，本計畫針對旗山溪與荖濃溪 191 處殘坡進行次像素位移追蹤與 InSAR 潛變評估，以建立坡面活動性等級，辨識潛在熱區並提供治理優先順序。研究成果包括產製不安定土砂危害圖、堆積深度圖、未來降雨趨勢下之情境模擬結果，並完成全臺 17 處集水區之水位觀測佈設與即時資料檢核。結果顯示，不安定土砂災害具「多源、突發、快速傳輸」特徵，透過模式參數率定與遙測驗證可有效量化土砂運移行為。本計畫建立之評估流程與資料平台可作為全臺不安定土砂治理、預警啟動及交通維持策略之重要依據，有助於提升集水區整體韌性並減輕極端氣候下的災害衝擊。

關鍵詞:不安定土砂衝擊評估、殘坡多時序地表形變評估、水位計觀測

Development of The Unstable Sediment Transport Model for Watersheds and Impact Assessment in 2025

Abstract

In recent years, extreme rainfall events associated with Typhoons Koinu, Khanun, and monsoonal storms have triggered large-scale sediment mobilization in unstable watersheds such as the Yusui, Laonong, and Qishan River basins, leading to severe damage to transportation infrastructure and downstream communities. To mitigate risks and support decision-making for disaster prevention, this study was commissioned by the Soil and Water Conservation Agency to establish and enhance an integrated Unstable Sediment Transport Modeling System. Advanced numerical models including RAMMS and r.avaflow were employed and calibrated using high-resolution DEMs, Planet optical imagery, Sentinel-1 SAR InSAR deformation data, and national landslide inventories. Four unstable watersheds were simulated under multiple rainfall scenarios to assess short-term sediment mobility and deposition impacts, while two additional basins were analyzed for long-term sediment yield trends incorporating climate change projections and engineering intervention scenarios. Furthermore, 191 residual slopes in the Laonong and Qishan basins were evaluated through sub-pixel offset tracking and InSAR-based creep monitoring to classify slope activity and identify hazardous sediment source zones. The modeling results produced sediment hazard maps, deposition depth maps, and transport pathways, providing critical guidance for slope stabilization, debris flow prevention, and infrastructure protection. Additionally, 17 hydrological monitoring stations were deployed to collect real-time water level data for model validation and early warning applications. The results demonstrate that unstable sediment hazards are driven by

complex multi-source mechanisms with rapid transport dynamics. The modeling framework and decision-support platform developed in this study offer a robust foundation for national sediment disaster management, climate adaptation planning, and resilient infrastructure design.

Keywords: Unstable Sediment Impact Assessment, Multi-Temporal Surface Deformation Assessment of Residual Slopes, Water Level Gauge Monitoring

目　錄

摘要 ..... **I**

Abstract ..... **II**

目　錄 ..... **IV**

表目錄 ..... **VIII**

圖目錄 ..... **XI**

第一章　前言 **1-1**

第一節　計畫緣起與目的 1-1
第二節　委託工作範圍 1-2
第三節　委託工作項目 1-3
第四節　預定工作進度 1-5
第五節　預期成果 1-5
第六節　工作流程 1-6

第二章　精進不安定土砂衝擊分析模式與模擬分析 **2-1**

第一節　集水區多重土砂來源之土砂及土石流運移模式盤點 2-1
第二節　四處不安定土砂集水區於不同降雨情境數值模擬 2-49
第三節　兩處不安定土砂集水區於長期土砂趨勢運移數值模擬 2-159

第三章　不安定土砂集水區殘坡長期變遷評估 **3-1**

第一節　圖資來源與評估方法 3-1
第二節　殘坡長期變遷評估成果 3-5

第四章　不安定土砂集水區殘坡短期潛變評估 **4-1**

第一節　荖濃溪與旗山溪殘坡多時序地表形變評估 4-1
第二節　山坡地鐵公路之高位移活動區位評估 4-25
第三節　雷達波變異偵測產製地貌變遷圖及廣域快篩分析 4-30

第五章　協助研提不安定土砂執行計畫 **5-1**

第一節　更新不安定土砂集水區土砂運移與衝擊執行計畫 5-1
第二節　不安定土砂執行更新作業方法更新 5-3

第六章 不安定土砂集水區流量率定觀測儀器租用與資料檢核 **6-1**

第一節　水位計規格與集水區觀測布署 6-1
第二節　水砂觀測檢核與平台介接 6-16
第三節　河道觀測斷面測量 6-30

第七章 初步結論與建議 **7-1**

第一節　初步結論 7-1
第二節　建議 7-7
參考文獻 參-1

附錄一、工作會議與各階段審查意見回覆表.....附錄一-1

附錄二、Planet 影像 PIV 時間序列觀測成果.....附錄二-1

附錄三、內政部 PS-InSAR 成果套疊分析.....附錄三-1

附錄四、InSAR 殘坡多時序地表形變評估.....附錄四-1

附錄五、不安定土砂集水區土砂運移與衝擊_執行計畫.....附錄五-1

附錄六、不安定土砂危害風險評估及作業方法.....附錄六-1

附錄七、野溪斷面測量與現況.....附錄七-1

表 目 錄

表 1-1 本計畫預定工作進度表 1-5
表 2-1 大崩、土石流與不安定土砂災害比較表 2-2
表 2-2 集水區不安定土砂整體評估要點 2-4
表 2-3 集水區不安定土砂運移模式彙整表 2-48
表 2-4 計畫集水區不同重現期雨量彙總表(對數皮爾森第三類) 2-84
表 2-5 玉穗溪不安定土砂運移模擬成果與危害評估表 2-96
表 2-6 RAMMS 塊體釋放法與流量歷線法於不安定土砂模擬比較 2-98
表 2-7 本計畫四處集水區邊坡殘坡土砂量推估 2-102
表 2-8 RAMMS 模式與其他文獻紊流黏滯摩擦係數建議值 2-108
表 2-9 RAMMS:DF 底床侵蝕參數建議表 2-111
表 2-10 本計畫四處集水區潛在土砂災害評估表 2-116
表 2-11 和仁野溪之摩擦係數率定表 2-117
表 2-12 和仁野溪各降雨情境下之摩擦係數選定表 2-118
表 2-13 三棧南溪之摩擦係數率定表 2-119
表 2-14 三棧南溪各降雨情境下之摩擦係數選定表 2-119
表 2-15 大清水溪之摩擦係數率定表 2-120
表 2-16 大清水溪各降雨情境下之摩擦係數選定表 2-121
表 2-17 木瓜溪之摩擦係數率定表 2-122
表 2-18 木瓜溪各降雨情境下之摩擦係數選定表 2-123
表 2-19 和仁野溪(花縣 DF025)RAMMS 數值模擬輸入參數表 2-124
表 2-20 三棧南溪(花縣 DF174)RAMMS 數值模擬輸入參數表 2-125
表 2-21 大清水溪(花縣 DF024) RAMMS 數值模擬輸入參數表 2-126
表 2-22 木瓜溪(東縣 DF059)RAMMS 數值模擬輸入參數表 2-127
表 2-23 RAMMS 數值模擬輸入參數表 2-132
表 2-24 和仁野溪(花縣 DF025)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表 .....

.....2-151
表 2-25 三棧南溪(花縣 DF174)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表.....
.....2-153
表 2-26 大清水溪(花縣 DF024)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表.....
.....2-155
表 2-27 木瓜溪(東縣 DF059)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表.2-157
表 2-28 玉穗溪歷年土石流災情表.....2-169
表 2-29 文里溪流域於山陀兒颱風災後短期復建工程表.....2-179
表 2-30 玉穗溪 RAMMS 數值模擬情境輸入參數表(無整治及已整治)2-180
表 2-31 文里溪 RAMMS 數值模擬情境輸入參數表(無整治及已整治)2-181
表 2-32 玉穗溪 RAMMS 數值模擬無整治情境輸出成果表.....2-185
表 2-33 玉穗溪 RAMMS 數值模擬已整治情境輸出成果表.....2-185
表 2-34 玉穗溪經整治工程後之效益分析表.....2-186
表 2-35 文里溪流域 RAMMS 數值模擬無整治情境輸出成果表.....2-191
表 2-36 文里溪流域 RAMMS 數值模擬已整治情境輸出成果表.....2-192
表 2-37 文里溪流域經短期復健整治工程之效益分析表.....2-193
表 3-1 PlanetScope 影像規格表.....3-5
表 3-2 108-114 年殘坡變位分級表(1/11).....3-7
表 3-3 108-114 年殘坡變位分級表(2/11).....3-8
表 3-4 108-114 年殘坡變位分級表(3/11).....3-9
表 3-5 108-114 年殘坡變位分級表(4/11).....3-10
表 3-6 108-114 年殘坡變位分級表(5/11).....3-11
表 3-7 108-114 年殘坡變位分級表(6/11).....3-12
表 3-8 108-114 年殘坡變位分級表(7/11).....3-13
表 3-9 108-114 年殘坡變位分級表(8/11).....3-14
表 3-10 108-114 年殘坡變位分級表(9/11).....3-15

表 3-11 108-114 年殘坡變位分級表(10/11) 3-16
表 3-12 108-114 年殘坡變位分級表(11/11) 3-17
表 4-1 本計畫建議 InSAR 邊坡潛變分級表 4-10
表 4-2 113-114 年殘坡 InSAR 變位分級表(1/5) 4-12
表 4-3 113-114 年殘坡 InSAR 變位分級表(2/5) 4-13
表 4-4 113-114 年殘坡 InSAR 變位分級表(3/5) 4-14
表 4-5 113-114 年殘坡 InSAR 變位分級表(4/5) 4-15
表 4-6 113-114 年殘坡 InSAR 變位分級表(5/5) 4-16
表 4-7 具緩慢變形類別大規模崩塌表 4-29
表 4-8 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風升降軌影像變異判識災點 4-33
表 4-9 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風升降軌影像變異判識災點 4-38
表 6-1 水位觀測站安裝佈設場址(2025/6/30 更新) 6-8
表 6-2 水砂觀測設備建置管理表 6-22
表 7-1 本計畫契約履約檢核表 7-6

圖 目 錄

圖 1-1 計畫集水區分布圖 1-2
圖 1-2 計畫工作架構與工項橫向關係圖 1-8
圖 2-1 集水區不安定土砂 2-1
圖 2-2 大崩、土石流與不安定土砂空間分布示意圖 2-2
圖 2-3 r.avaflow 數值模式之邏輯架構與資料組成 2-6
圖 2-4 r.avaflow 模擬紐西蘭 Acheron 土砂災害結果(Mergili et al., (2017)) 2-8
圖 2-5 MassMov2D 模式坐標系統 2-11
圖 2-6 MassMov2D 模擬案例成果(Molinari (2012), Iannacone (2013)).....2-12
圖 2-7 DAN3D 模式模擬流程圖(Aaron et al.,(2022)) 2-16
圖 2-8 DAN3D 模擬案例成果(Conlan(2018), Gardezi(2021)) 2-18
圖 2-9 DualSPHysics 模式模擬流程圖(Gesteira (2024)) 2-22
圖 2-10 DualSPHysics 模擬案例成果(DualSPHysics 官網) 2-23
圖 2-11 FLO-2D 模式模擬流程圖(Hsu (2010)).....2-29
圖 2-12 FLO-2D 模擬案例成果(Oh(2023), Qiu(2024)) 2-30
圖 2-13 CAESAR-Lisflood 模式模擬流程圖(Xie (2024)) 2-35
圖 2-14 CAESAR-Lisflood 模擬案例成果(Wang(2023), Xie (2024)) 2-37
圖 2-15 OpenLISEM 模式模擬流程圖(Bout(2018)) 2-41
圖 2-16 OpenLISEM 模式所需參數(Xiao(2020)) 2-42
圖 2-17 OpenLISEM 模擬案例成果(Xiao(2020)) 2-43
圖 2-18 不安定土砂運移模擬模式推薦選項 2-46
圖 2-19 河道條帶狀剖面分析示意圖-三棧南溪為例.....2-50
圖 2-20 木瓜溪 (東縣 DF059)集水區地形圖與地質圖 2-52
圖 2-21 木瓜溪 (東縣 DF059)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布 2-52
圖 2-22 木瓜溪 (東縣 DF059)集水區地形變異分析(2010~2023) 2-53

圖 2-23 木瓜溪 (東縣 DF059)河床地形變異帶狀分析(2010~2023) 2-53
圖 2-24 木瓜溪(東縣 DF059)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布 2-54
圖 2-25 知本雨量站(C0S700)山陀兒颱風期間雨量組體圖 2-54
圖 2-26 木瓜溪 (東縣 DF059)集水區山陀兒颱風前後對比 2-55
圖 2-27 木瓜溪 (東縣 DF059)山陀兒颱風災情概況 2-55
圖 2-28 木瓜溪(東縣 DF059)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像 2-56
圖 2-29 三棧南溪(花縣 DF174)集水區地形圖與地質圖 2-58
圖 2-30 三棧南溪(花縣 DF174)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布 2-59
圖 2-31 三棧南溪(花縣 DF174)集水區地形變異分析(2013~2022) 2-59
圖 2-32 三棧南溪(花縣 DF174)河床地形變異帶狀分析(2013~2022) 2-60
圖 2-33 三棧南溪(花縣 DF174)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布 2-60
圖 2-34 三棧雨量站(C1Z110)凱米颱風期間雨量組體圖 2-61
圖 2-35 三棧南溪(花縣 DF174)集水區 0403 地震前後對比 2-61
圖 2-36 三棧南溪(花縣 DF174)0403 地震後歷次土砂災情概況 2-62
圖 2-37 三棧南溪(花縣 DF174)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像 2-63
圖 2-38 大清水溪(花縣 DF024)集水區地形圖與地質圖 2-65
圖 2-39 大清水溪(花縣 DF024)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布 2-66
圖 2-40 大清水溪(花縣 DF024) 集水區地形變異分析(2013~2022) 2-66
圖 2-41 大清水溪(花縣 DF024) 河床地形變異帶狀分析(2013~2022) 2-67
圖 2-42 大清水溪(花縣 DF024)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布 2-67
圖 2-43 大清水溪(花縣 DF024) 0621 土石流災情(新聞報導) 2-68
圖 2-44 大清水溪(花縣 DF024) 0518 土石流災情(摘自 GeoPORT).....2-68

圖 2-45 大清水溪(花縣 DF024) 0518 土石流後河床縱坡變化(摘自 GeoPORT) 2-69
圖 2-46 大清水溪(花縣 DF024)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像.....2-69
圖 2-47 和仁野溪(花縣 DF025)集水區地形圖與地質圖 2-71
圖 2-48 和仁野溪(花縣 DF025)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布.....2-71
圖 2-49 和仁野溪(花縣 DF025)集水區地形變異分析(2013~2022) 2-72
圖 2-50 和仁野溪(花縣 DF025)河床地形變異帶狀分析(2013~2022) 2-72
圖 2-51 和仁野溪(花縣 DF025)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布 2-73
圖 2-52 和仁野溪(花縣 DF025)0403 地震後土砂災害情形 2-74
圖 2-53 和中雨量站(C0T9D0)凱米颱風期間雨量組體圖 2-75
圖 2-54 和仁野溪(花縣 DF025)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像.....2-75
圖 2-55 定量降雨情境設定 2-79
圖 2-56 臺灣北中南東四區未來降雨量改變率(%)推估圖：濕季.....2-82
圖 2-57 極端降雨下新生崩塌情境評估流程圖 2-83
圖 2-58 圖 BigGIS 平台查詢集水區內雨量站.....2-83
圖 2-59 大濁水雨量站 50%所對應之未來設計暴雨改變率.....2-83
圖 2-60 113 年降雨情境下之不安定土砂評估精進流程 2-86
圖 2-61 分布式降雨逕流模式輸入輸出概念 2-86
圖 2-62 114 年降雨情境下之不安定土砂評估精進流程圖 2-87
圖 2-63 113 年不安定土砂運移數值模擬分析流程圖 2-89
圖 2-64 114 年不安定土砂運移數值模擬分析流程圖 2-89
圖 2-65 災害事件擬合流出土砂量與特定控制點之淤埋深度-以玉穗溪為例 2-90
圖 2-66 本年度不安定土砂評估模式評估流程概念圖(塊體釋放法) 2-93

圖 2-67 殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係(塊體釋放法) 2-94
圖 2-68 玉穗溪不安定土砂危害圖(塊體釋放法) 2-95
圖 2-69 不安定土砂危害圖 2-97
圖 2-70 不安定土砂運移評估模擬流程圖 2-101
圖 2-71 RAMMS 庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區災害事件擬合) 2-105
圖 2-72 各定量降雨情境之 RAMMS 庫倫摩擦係數選定流程圖 2-105
圖 2-73 RAMMS 庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區無災害事件) 2-106
圖 2-74 等價摩擦係數與土砂量體關係圖(Lucas, 2014).....2-106
圖 2-75 RAMMS 紊流黏滯摩擦係數評估流程圖 2-108
圖 2-76 RAMMS 紊流黏滯摩擦係數(Deubelbeiss, 2012).....2-109
圖 2-77 正射影像套疊 5m 等高線-以大清水溪為例.....2-113
圖 2-78 坡度圖-以大清水溪為例.....2-114
圖 2-79 QGIS 工具箱 Terrian Profile 2-114
圖 2-80 V 型判釋法-以木瓜溪(東縣 DF059)為例 2-115
圖 2-81 2024 年凱米颱風事件造成和仁野溪(花縣 DF025)淤積土砂量 ..2-117
圖 2-82 2025 年 0518 豪雨事件造成大清水溪(花縣 DF024)淤積土砂量 2-120
圖 2-83 2024 年山陀兒颱風事件造成木瓜溪(東縣 DF059)淤積土砂量 ..2-122
圖 2-84 溪流線圖層(來源: BigGIS 圖台).....2-128
圖 2-85 高精度 DEM 產製之集水區圖資(以大清水溪為例) 2-129
圖 2-86 常見之不安定土砂模擬情境示意圖 2-131
圖 2-87 集水區內釋放塊體示意圖 2-131
圖 2-88 和仁野溪縱橫剖面分布圖 2-134
圖 2-89 和仁野溪之箱涵橫剖面(BB-BB') 2-136
圖 2-90 和仁野溪之鐵路橋橫剖面(CC-CC') 2-137
圖 2-91 和仁野溪之河道縱剖面(AA-AA').....2-135
圖 2-92 三棧野溪縱橫剖面分布圖 2-139

圖 2-93 三棧南溪箱涵聯外道路之橫剖面(BB-BB')....2-141
圖 2-94 三棧南溪三棧橋之橫剖面(CC-CC')....2-142
圖 2-95 三棧南溪鐵路橋之橫剖面(DD-DD')....2-143
圖 2-96 三棧南溪懷恩橋之橫剖面(EE-EE')....2-144
圖 2-97 三棧南溪之河道縱剖面(AA-AA')....2-140
圖 2-98 三棧南溪 24 小時 900mm 雨量情境之最大動量分布圖....2-145
圖 2-99 三棧南溪 24 小時 1,137mm 雨量情境(極端降雨)之最大動量分布圖.
....2-146
圖 2-100 大清水溪 24 小時 900mm 雨量情境之最大動量分布圖....2-147
圖 2-101 大清水溪 24 小時 1,137mm 雨量情境之最大動量分布圖....2-148
圖 2-102 木瓜溪 24 小時 900mm 雨量情境下最大動量分布圖....2-150
圖 2-103 木瓜溪 24 小時 1,076mm 雨量情境(極端降雨)下最大動量分布圖..
....2-150
圖 2-104 和仁野溪(花縣 DF025)不安定土砂危害圖 2-152
圖 2-105 三棧南溪(花縣 DF174)不安定土砂危害圖 2-154
圖 2-106 大清水溪(花縣 DF024)不安定土砂危害圖 2-156
圖 2-107 木瓜溪(東縣 DF059)不安定土砂危害圖 2-158
圖 2-108 文里溪(東縣 DF076 等 4 條)集水區地形圖與地質圖 2-161
圖 2-109 文里溪(東縣 DF076 等 4 條)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布....2-161
圖 2-110 文里溪(東縣 DF076 等 4 條)集水區地形變異分析(2010~2023)2-162
圖 2-111 文里溪(東縣 DF076)河床地形變異帶狀分析(2010~2023).....2-162
圖 2-112 文里溪(東縣 DF110)河床地形變異帶狀分析(2010~2023).....2-163
圖 2-113 文里溪(東縣 DF111)河床地形變異帶狀分析(2010~2023).....2-163
圖 2-114 文里溪集水區土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布 2-164
圖 2-115 太麻里雨量站(C0S690)山陀兒颱風期間雨量組體圖....2-164

圖 2-116 文里溪集水區山陀兒颱風土石流災情(摘自重大土砂災例) 2-165
圖 2-117 文里溪集水區殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像2-166
圖 2-118 玉穗溪溪集水區地形圖與地質圖 2-168
圖 2-119 玉穗溪集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布 2-170
圖 2-120 玉穗溪集水區地形變異分析(2010~2024) 2-170
圖 2-121 玉穗溪河床地形變異帶狀分析(2010~2024) 2-171
圖 2-122 玉穗溪集水區土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布 2-171
圖 2-123 玉穗溪源頭大規模崩塌地歷年滑移變化 2-172
圖 2-124 小關山雨量站(C1V220)凱米颱風期間雨量組體圖 2-172
圖 2-125 玉穗溪集水區凱米颱風前後對比 2-173
圖 2-126 玉穗溪 2024 年土石流災情概況 2-173
圖 2-127 玉穗溪集水區殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像2-174
圖 2-128 集水區長期土砂運移趨勢與模擬示意圖 2-177
圖 2-129 集水區土砂運移趨勢與模擬程序圖 2-178
圖 2-130 玉穗溪內辦理整治工程相對位置圖 2-178
圖 2-131 文里溪流域內辦理整治工程相對位置圖 2-179
圖 2-132 文里溪流域內沙崙溪、文里溪及北太麻里溪相對位置圖 2-182
圖 2-133 玉穗溪不安定土砂危害圖 2-187
圖 2-134 文里溪流域-沙崙溪(東縣 DF111)不安定土砂危害圖 2-194
圖 2-135 文里溪流域-文里溪(東縣 DF076)不安定土砂危害圖 2-195
圖 2-136 文里溪流域-文里溪(東縣 DF076)不安定土砂危害圖(續) 2-196
圖 2-137 文里溪流域-北太麻里溪(東縣 DF110)不安定土砂危害圖 2-196
圖 2-138 文里溪流域-北太麻里溪(東縣 DF110)不安定土砂危害圖(續) .2-197
圖 3-1 本計畫茎濃溪與旗山溪殘坡分布圖 3-2
圖 3-2 本計畫已蒐集 2019-2025 年 Planet 影像.....3-4
圖 3-3 高市 RS098 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測.....3-18

圖 3-4 高市 RS098 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖.....3-19
圖 3-6 高市 RS114 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測.....3-20
圖 3-7 高市 RS114 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖.....3-20
圖 3-8 高市 RS115 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測.....3-21
圖 3-9 高市 RS115 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖.....3-22
圖 3-10 高市 RS068 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測.....3-23
圖 3-11 高市 RS068 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖.....3-24
圖 3-12 高市 RS118 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測.....3-25
圖 3-13 高市 RS118 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖.....3-25
圖 3-14 高市 RS078 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測.....3-26
圖 3-15 高市 RS078 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖.....3-27
圖 4-1 InSAR 技術於集水區上游崩塌地之地表活動性觀測.....4-1
圖 4-2 唯金溪及拉克斯溪集水區範圍內殘坡 Sentinel-1 InSAR 敏感度圖 (a)升軌(b)降軌(c)雙軌.....4-4
圖 4-3 本計畫採取 DS-InSAR 處理流程.....4-6
圖 4-4 本計畫使用 Sentinel-1 影像時空基線圖.....4-11
圖 4-5 高市 RS059 殘坡 InSAR 敏感度圖.....4-17
圖 4-6 高市 RS059 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖.....4-17
圖 4-7 高市 RS060 殘坡 InSAR 敏感度圖.....4-18
圖 4-8 高市 RS060 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖.....4-18
圖 4-9 高市 RS114 殘坡 InSAR 敏感度圖.....4-19
圖 4-10 高市 RS114 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖.....4-19
圖 4-11 高市 RS115 殘坡 InSAR 敏感度圖.....4-20
圖 4-12 高市 RS115 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖.....4-20
圖 4-13 高市 RS116 殘坡 InSAR 敏感度圖.....4-21
圖 4-14 高市 RS116 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖.....4-21

圖 4-15 高市 RS120 殘坡 InSAR 敏感度圖 4-22
圖 4-16 高市 RS120 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖.....4-22
圖 4-17 高市 RS076 殘坡本計畫與內政部 PS-InSARA 成果地表變形速度圖 4-23
圖 4-18 高市 RS076 殘坡本計畫與內政部成果時間序列變形圖 4-24
圖 4-19 高市 RS083 殘坡本計畫與內政部 PS-InSARA 成果地表變形速度圖 4-24
圖 4-20 高市 RS083 殘坡本計畫與內政部成果時間序列變形圖 4-24
圖 4-21 臺灣本島 2019-2024 年地表垂直形變平均速度圖(內政部).....4-26
圖 4-22 清境地區 2018-2022 年地表垂直形變平均速度圖(內政部).....4-27
圖 4-23 阿里山森林鐵路 2019-2024 年地表垂直形變平均速度圖(內政部).. 4-27
圖 4-24 良里溪 2019-2024 年地表垂直形變平均速度圖(內政部).....4-28
圖 4-25 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風雷達變異區整合結果.....4-32
圖 4-26 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風升降軌影像變異區馬太鞍溪堰塞湖變異分析.....4-32
圖 4-27 2025 年 0728-0801 豪雨事件雷達變異區整合結果.....4-36
圖 4-28 22025 年 0728-0801 豪雨事件變異區馬太鞍溪堰塞湖變異分析4-37
圖 4-29 2025 年 0728-0801 豪雨事件變異區高市 RS078 殘坡變異分析...4-37
圖 5-1 不安定土砂集水區土砂運移與衝擊執行計畫 5-2
圖 5-2 不安定土砂業務推動分工 5-3
圖 5-3 不安定土砂危害風險評估及作業方法(更新版) 5-4
圖 6-1 水位監測設表格備規格及安裝場域 6-2
圖 6-2 水位計出廠前量測精度檢核測試 6-3
圖 6-3 部署水位計遴選原則 6-4
圖 6-4 本計畫建置之水位觀測站分布圖 6-7

圖 6-5 本計畫建置水位觀測站竣工圖(1) 6-9
圖 6-6 本計畫建置水位觀測站竣工圖(2) 6-10
圖 6-7 本計畫建置水位觀測站竣工圖(3) 6-11
圖 6-8 本計畫建置水位觀測站竣工圖(4) 6-12
圖 6-9 本計畫建置水位觀測站竣工圖(5) 6-13
圖 6-10 本計畫建置水位觀測站竣工圖(6) 6-14
圖 6-11 觀測區域維護作業流程圖 6-15
圖 6-12 水砂觀測設備維護檢測流程圖 6-16
圖 6-13 原始資料濾除歧異點示意圖 6-18
圖 6-14 資料檢核機制及對應產出資料架構 6-19
圖 6-15 CCTV 影像配合水尺檢核水位案例 6-20
圖 6-16 和仁野溪(花縣 DF025)水位計安裝前後底床淤積變化 6-20
圖 6-17 新增測站建立至觀測平台(以三棧溪-三棧橋測站為例).....6-22
圖 6-18 新增設備並完成介接(以三棧溪-三棧橋測站為例)).....6-23
圖 6-19 新增設備並完成介接(以三棧溪-三棧橋測站為例).....6-23
圖 6-20 本計畫建置水位觀測站清單頁面(水砂觀測平台) 6-24
圖 6-21 本計畫建置水位觀測站清單頁面 6-24
圖 6-22 花蓮縣-三棧南溪測站資料.....6-24
圖 6-23 花蓮縣-三棧溪-三棧橋測站資料 6-25
圖 6-24 花蓮縣-和仁野溪測站資料.....6-25
圖 6-25 南投縣-郡坑溪-信義橋測站資料 6-25
圖 6-26 花蓮縣-佗溪-池南橋測站資料 6-26
圖 6-27 花蓮縣-卓溪-無名溪測站資料 6-26
圖 6-28 花蓮縣-樂樂溪測站資料.....6-26
圖 6-29 花蓮縣-新城第三及第四排水測站資料.....6-27
圖 6-30 宜蘭縣-南澳北溪-新澳橋測站資料 6-27

圖 6-31 宜蘭縣-粉鳥林野溪測站資料.....6-27
圖 6-32 台東縣-沙崙溪-沙崙溪橋測站資料.....6-28
圖 6-33 台東縣-木瓜溪-鎮樂橋測站資料.....6-28
圖 6-34 台東縣-安朔溪-安朔橋測站資料.....6-28
圖 6-35 台東縣-文里溪-北里橋測站資料.....6-29
圖 6-36 花蓮縣-吉安溪-翠堤橋測站資料.....6-29
圖 6-37 新北市-金包里溪-長興宮測站資料.....6-29
圖 6-38 台東縣-華源南北坑測站資料.....6-30
圖 6-39 河道觀測斷面測量工作.....6-32
圖 6-40 三棧溪觀測斷面測量工作.....6-33
圖 6-41 和仁野溪觀測斷面測量工作.....6-34
圖 6-42 石公溪觀測斷面測量工作.....6-34
圖 6-43 茗溪(池南僑)觀測斷面測量工作.....6-35
圖 6-44 吉安溪(翠堤橋)觀測斷面測量工作.....6-35
圖 6-45 樂樂溪觀測斷面測量工作.....6-36
圖 6-46 新城第三及第四排水觀測斷面測量工作.....6-36
圖 6-47 南澳北溪(南澳橋)觀測斷面測量工作.....6-37
圖 6-48 粉鳥林野溪(宜縣 DF148)觀測斷面測量工作.....6-37
圖 6-49 沙崙溪(沙崙橋)觀測斷面測量工作.....6-38
圖 6-50 木瓜溪(鎮樂橋)觀測斷面測量工作.....6-38
圖 6-51 安朔溪(安朔橋)觀測斷面測量工作.....6-39
圖 6-52 文里溪(北里橋)觀測斷面測量工作.....6-39
圖 6-53 無名野溪(六津橋)觀測斷面測量工作.....6-40
圖 6-54 金包里溪(長興宮)觀測斷面測量工作.....6-40
圖 6-55 華源南北坑(防砂壩)觀測斷面測量工作.....6-41
圖 6-56 郡坑溪(信義橋)觀測斷面測量工作.....6-41

第一章　前言

第一節 計畫緣起與目的

民國 110 年 8 月 7 日盧碧颱風侵襲期間，荖濃溪支流玉穗溪爆發大規模土石流，進而沖毀下游台 20 線(南迴公路)明霸克露橋。民國 112 年 8 月 4 日 14:00 卡努颱風之西南氣流引致之強降雨，亦於玉穗溪誘發土石流，造成明霸克露鋼便橋橋墩毀損，中斷台 20 線雙線交通。民國 113 年 7 月 24 日凱米颱風期間，荖濃溪與旗山溪流域降雨量大於 1,000 毫米，造成大面積邊坡崩塌與土石流事件，影響多處道路與聚落。殷鑑於此，農村水保署乃未雨綢繆，針對重要集水區內不安定土砂進行預先評估，瞭解其於不同降雨情境下可能衍生之出流土砂量體規模與影響範圍，提供下游公路主管機關參考，以期降低災中人員生命財產損失。

本案工作項目將精進不安定土砂衝擊分析模式及模擬分析不安定土砂集水區，探討不同降雨情境及未來長期可能發生新生崩塌規模，評估集水區潛在土砂流出堆積範圍及深度，並就荖濃溪與旗山溪流域殘坡進行長期變遷及短期潛變評估，辦理不安定土砂集水區流量率定觀測儀器租用與資料檢核，以及相關不安定土砂技術諮詢服務。

第二節 委託工作範圍

本年度計畫範圍如圖 1-1 所示，包含下列三項工作範圍：

一、旗山溪與荖濃溪流域，針對 191 處殘坡區位進行長期變遷及短期潛變評估。

二、計畫團隊根據近年重大土砂災害點位、殘坡圖與不安定土砂出流口潛勢，經工作會議核定後(114 年 4 月 24 日)，以大清水溪之和仁野溪(花縣 DF025)、大清水溪(花縣 DF024)、三棧溪流域之三棧南溪(花縣 DF174)與知本溪流域之木瓜溪(東縣 DF059)，此 4 處集水區進行不安定土砂集水區運移影響衝擊評估。

三、另根據歷年重大土砂災害點位與不安定土砂出流口潛勢，經工作會議核定後(114 年 4 月 24 日)核定挑選荖濃溪流域之玉穗溪與文里溪(東縣 DF076, DF077, DF110, DF111)集水區，此 2 處集水區進行長期土砂運移趨勢模擬。

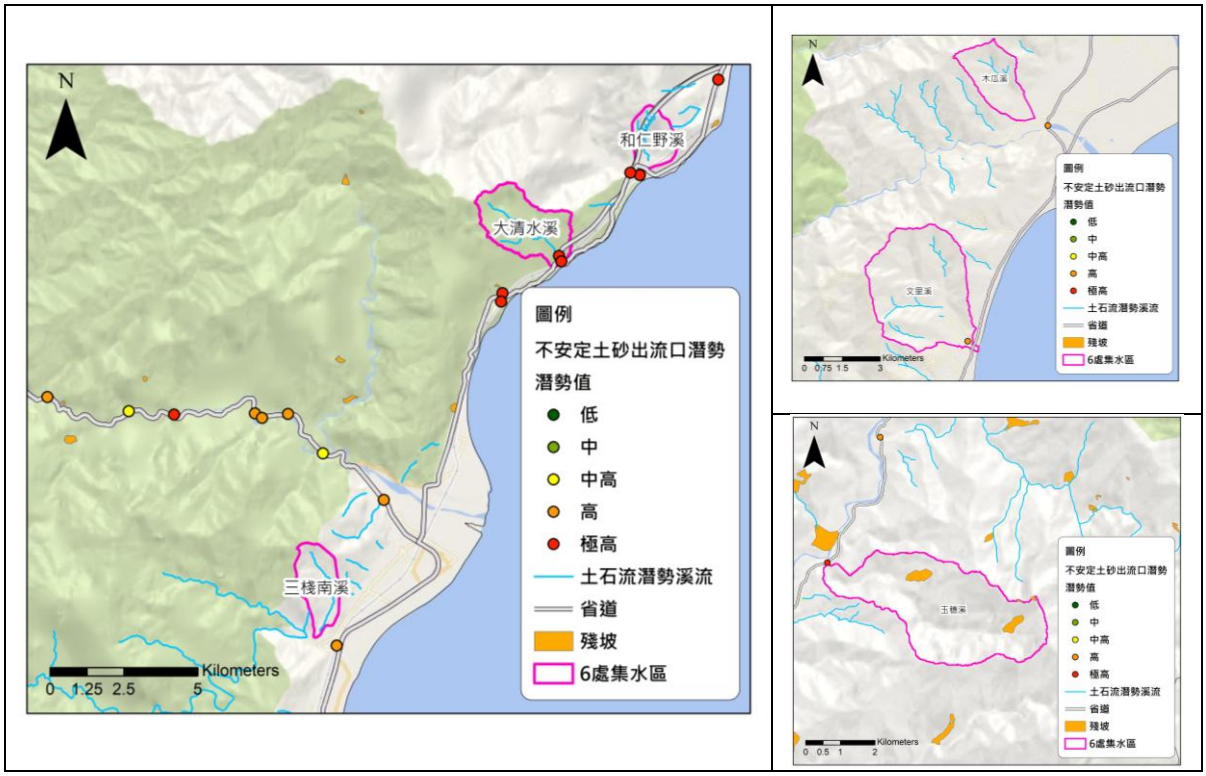


圖 1-1 計畫集水區分布圖

第三節 委託工作項目

依據「114 年集水區不安定土砂運移模式精進與衝擊評估」計畫(以下簡稱本計畫)委託專業服務採購說明之規定，其工作項目及內容如下：

一、精進不安定土砂衝擊分析模式及模擬分析

(一) 集水區多重土砂來源之土砂及土石流運移模式盤點：蒐集與盤點多重土砂來源及土石流運移評估模式之國內外相關文獻，比較其特點與適用性，並建議未來可嘗試應用於集水區數值模式。

(二) 由農村水保署署選定或同意之3處不安定土砂集水區(集水區逕流資訊由本署提供)，考量不同降雨情境下(例如：200、350、500、650、900 mm 與氣候變遷下極端降雨情境)降雨逕流轉化為土石流與殘坡土砂來源，模擬不安定土砂運移衝擊影響範圍。

(三) 由農村水保署署選定或同意之 2 處不安定土砂集水區，進行未來長期(至少三年)土砂運移趨勢之事件模擬，以每年發生一次重現期距五十年之降雨強度計算，瞭解在不同年度施設工程與否等7種情境及新增崩塌下之潛在土砂流出量，並產製集水區範圍之土砂出流堆積範圍與深度圖。

二、不安定土砂集水區殘坡長期變遷評估

利用 108~114 年 Planet 光學衛星影像(解析度至少 3 m)，對荖濃溪與旗山溪流域共 191 處(農村水保署署提供)殘坡，進行次像素位移追蹤法(Sub-pixel offset tracking；SPOT)分析 108~114 年變位，並建立多時序累計變位成果。

三、不安定土砂集水區殘坡短期潛變評估

(一) 運用 Sentinel-1 C 波段 SAR 影像，分析近二年(113-114)荖濃溪與旗山溪之 191 處殘坡區位之歷史多時序地表形變，依評估結果研訂合適之殘坡活動性危害等級，並依本署提供之 GNSS(或 GPS)地表形變數據或內政部相關測量監測資料檢核趨勢合理性,相關分析產製圖資與形變呈現方式須依農村水保署率定資料格式繳交上傳。

(二) 依據內政部提供合成孔徑雷達影像產製臺灣本島地表形變分析成果，協助本署加值分析山坡地的鐵公路之高位移活動區位。

(三) 運用 Sentinel-1 SAR 影像就 114 年度豪雨引致區域型崩塌災害事件，製作雷達波變異偵測產製地貌變遷圖及廣域快篩分析報告,以彌補無雲光學影像未取得前之土砂災害空間分布掌握(至少分析一期，如無颱風事件，則由農村水保署同意之降雨事件評估)，提供農村水保署或分署防災決策參考。內容須包含鐵路、公路、土石流潛勢溪流與不安定土砂集水區套疊之成果說明。

四、協助研提不安定土砂執行計畫與分署技術諮詢

(一) 協助農村水保署研提 115 年度「不安定土砂集水區土砂運移與衝擊」執行計畫，並依據 114 年執行情形，檢討更新「不安定土砂運移與衝擊評估作業方法」。

(二) 協助分署執行計畫之技術諮詢與檢視各流域產製之不安定土砂危害圖，並彙整不安定土砂危害圖成果供農村水保署上架至 BigGIS 系統或其它本署指定平台(依農保監字第 1142669545 號文，變更為增加 1 處集水區土砂衝擊模擬)。

五、不安定土砂集水區流量率定觀測儀器租用與資料檢核。

由農村水保署選定 17 處集水區，租用水位計至現場佈設(至 114 年計畫

結束)，電源備源系統可採太陽能儲電。設備結構需達防水抗潮，可應用於防砂壩、護岸、溝渠等人工構造物，即時遠端監控河川水位變化，並即時傳輸資料至雲端，透過遠端網路可即時掌握水情依時變。所觀測水位資料需經檢核分析，提供模式演算驗證之用。

第四節 預定工作進度

本計畫之預定工作進度詳見表 1-1 所示，包含招標文件明訂各項工作與報告印製等期程事宜。

表 1-1 本計畫預定工作進度表

項次	工作項目	單位	數量	民國114年											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	精進不安定土砂衝擊分析模式及模擬分析	式	1												
2	不安定土砂集水區殘坡長期變遷評估	式	1												
3	不安定土砂集水區殘坡短期潛變評估	式	1												
4	協助研提不安定土砂執行計畫與分署技術諮詢	式	1												
5	不安定土砂集水區流量率定觀測儀器租用與資料檢核	式	1												
6	報告印製繳交	式	1			(1)				(2)		(3)		(4)	(5)
工作期限：114年12月10日															
預估期程：(1)期初(工作執行計畫書)、(2)期中、(3)期末、(4)成果報告書初稿、(5)成果報告書等報告提送															

第五節 預期成果

本計畫執行主要不安定土砂危害圖為主軸，其預期成果如下：

一、建立受土砂災害影響之高潛勢重點集水區現況更新與基本資料蒐集，掌握區域內殘存土砂量體，提供土砂運移數值模擬後之影響範圍與堆積深度。

二、依溪流調查所得圖資與參數率定資料，進行優先關注溪流集水區不安定土砂運移數值模擬(考慮崩塌與土石流)，評估後續定量降雨情境與長期趨勢之潛在災害影響範圍。

三、以雷達衛星影像及光學遙測影像評估技術之優勢，提出集水區內溪床與坡面近期土砂變遷趨勢資訊，輔助釐清不安定土砂料源的地表活動性與潛在易致災熱區分布。

四、完成全臺 17 處特定集水區水位觀測資訊與介接，提供貴署防災計畫使用。

第六節 工作流程

本計畫依據採購說明，自自決標次日起至民國一百一十四年十二月十日完成，擬將工作範圍分進度提交各階段成果報告，各工作進度查核點及時程規劃如下：

五、期初簡報時需完成工作：

(一)提出本計畫各工作項目執行構想及作業流程、預定進度。

(二)針對工作項目二提出光學衛星影像需求，如數量或影像時間。

六、期中簡報時需完成工作：

(一)完成集水區多重土砂來源之土砂及土石流運移模式盤點。

(二)完成工作項目二:荖濃溪與旗山溪流域共 191 處殘坡 2 年變位分析(次像素位移追蹤法)。

(三)完成 17 處租用水位計佈設(依農保監字第 1142669545 號文，更改於 4 月底前先完成至少 7 站租用水位計佈設，餘 10 站建議於 6 月底前完成)。

七、期末簡報時需完成工作：除水位計維運、觀測及資料檢核分析工項須進行至履約期限，須完成其餘所有工作。

八、期末報告至契約完成期間，如委託機關發現問題仍需協助修正。

綜合招標文件七項工作項目的計畫工作架構與工項橫向關係如圖 1-2 所示，首先創聚團隊擬進行計畫所需之多元圖資盤點與蒐集(或申請)，進而針對不同圖資的適用屬性導入各項工作，而各項工作間的橫向串連關係也於架構圖中予以釐清，協助貴署瞭解各項工作成果產出的連貫性與前後關係。最後本計畫在工項一至工項三的應用上，將從不安定土砂的遙測判釋觀點上，提出集水區內的邊(殘)坡活動性整合評估，提供類似大規模崩塌遙測評估計畫的作法，建構一套能適用於全臺灣廣域且有效的雷達與光學(或多光譜)遙測危害度評估方案。再者；在工項四中，本團隊將延續前年度之執行成果，進行不安定土砂危害圖之模式精進更新與技術支援。最後，工項五則協助貴署部署水位計於重點關注集水區，提供 Wflow 模式之雨量轉逕流量校核所需之水位觀測資訊。

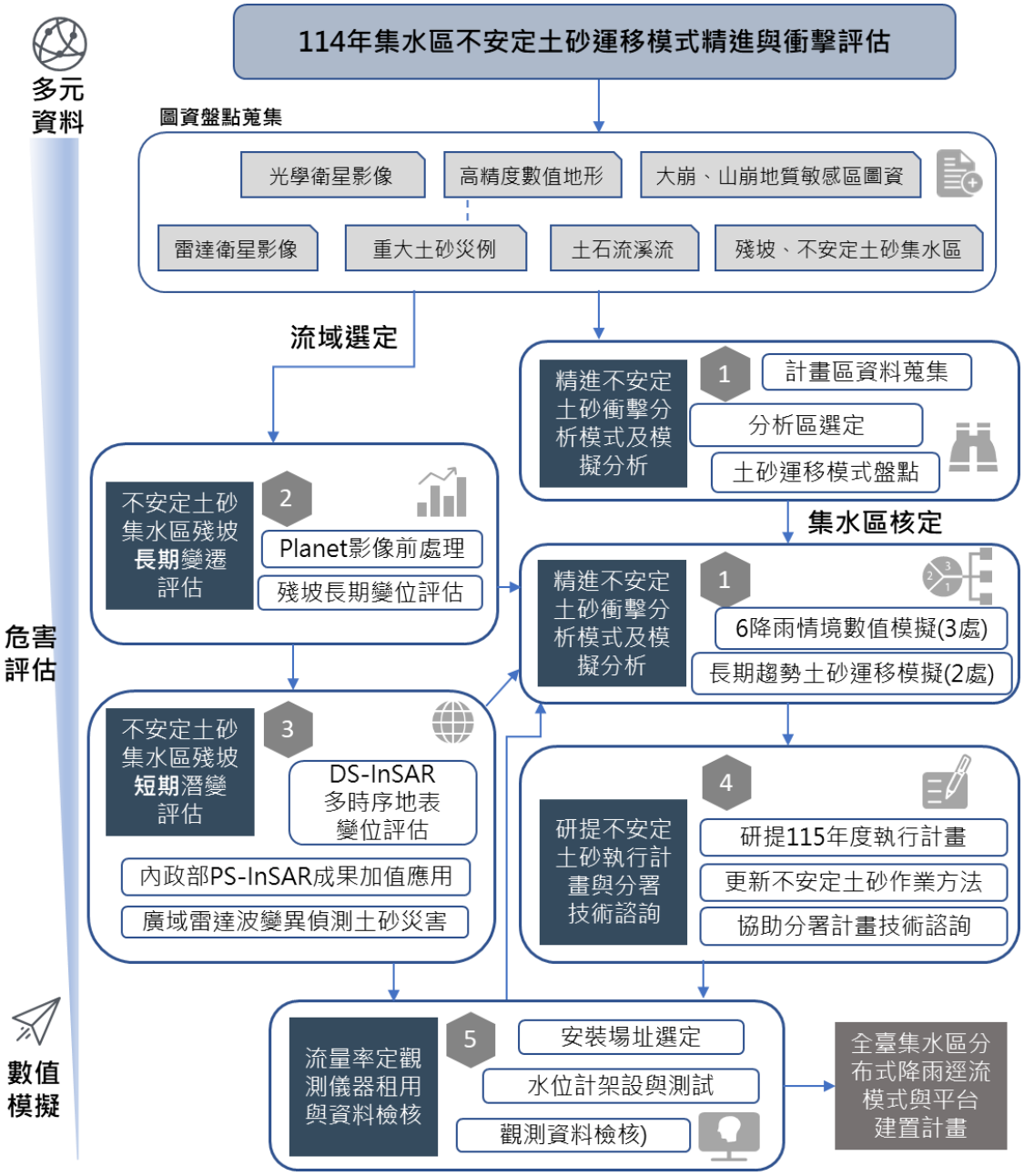


圖 1-2 計畫工作架構與工項橫向關係圖

第二章　精進不安定土砂衝擊分析模式與模擬分析

由於土石流潛勢溪流與大規模崩塌防災目前均已建立成熟之整備機制，為減少特定集水區於豪大雨時挾帶而下的不安定土砂，對下游地區與交通要道會合處造成災害。農村水保署仍持續精進防災作為及評估技術建置，以因應氣候變遷下的新型瞬發集水區不安定土砂災害，相關工作說明如后。

第一節 集水區多重土砂來源之土砂及土石流運移模式盤點

本計畫之探討目標所稱至不安定土砂(如圖 2-1)，係集水區內坡面或河道上，屬暫態平衡或不穩定狀態下之殘坡或河道堆積之大量土砂；在如降雨、地震等一定條件誘發下，其土砂運移行為將造成中下游土砂災害。其與大規模崩塌及土石流在定義上雖有所不同(表 2-1)，但其災害之發生空間分布經常交疊且互制影響(如圖 2-2 與圖 2-1)。在評估不安定土砂災害影響衝擊時，通常難以簡單地切割成個別災害予以獨立評估，常需要考量前兩者災害對不安定土砂的土砂遞移關聯性。



圖 2-1 集水區不安定土砂

資料來源:農村水保署技術研究發展平台

表 2-1 大崩、土石流與不安定土砂災害比較表

分類	定義	範圍大小	土砂災害特徵
大規模崩塌	指涉及深層岩土滑動、範圍廣大、體積巨大，可能持續多年緩慢位移或因劇烈觸發(如豪雨、地震)急遽滑動的崩塌地。	通常範圍達數公頃至數十公頃以上，深層滑動深度可達數十公尺。	因結構面弱帶(如斷層、裂隙)或地層軟弱造成整體坡體失穩，崩塌後產生大量土砂，易影響下游集水區安全。
土石流	係指泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物，受重力作用所產生之流動體，沿坡面或溝渠由高處往低處流動之自然現象。	以沿山區溪溝為主軸，涵蓋集水面積從小型流域(數十公頃)至中型流域(數百公頃)不等。	降雨達臨界值時，含大量岩石、泥沙及水分的泥石漿高速下移，具強大破壞力；土石流扇狀散布於溪流下游段。
不安定土砂	係指集水區內坡面或河道上，屬暫態平衡或不穩定狀態下之殘坡或河道堆積之大量土砂；在如降雨、地震等一定條件誘發下，土砂運移行為造成中下游土砂災害。	規模不一，從小規模數十平方公尺坡面鬆散土砂堆積至較大範圍的崩積層。	土砂顆粒尚未穩定，抗沖蝕能力低，一旦受外力作用(強降雨、坡面徑流)易形成土砂移動與沖蝕。



圖 2-2 大崩、土石流與不安定土砂空間分布示意圖

因此在估算不安定土砂量體時，必須同時整合「大規模崩塌」及「土石流」兩種災害源及運動機制的特性。一般而言大規模崩塌提供大量鬆散土砂源，決定整體土砂庫存量與可動土砂量基礎；而土石流是將這些土砂快速運移至下游的主要機制，影響土砂輸移途徑與最終淤積範圍。因此，在評估不安定土砂體積時，須同時考量崩塌源頭、地質結構、降雨誘發條件、溪溝與河道特性及土石流運動參數，以達到更精準的土砂量預估與風險評估目標。如同集水區總體治理策略，不僅考慮單一災害類型，而是以流域治理概念整合「大規模崩塌(上游)-不安定土砂(中游)-土石流(中下游)」為一完整防災鏈，針對不同河段、不同形態的災害源實施分區管理。表 2-2 則為根據此概念與 113 年度執行計畫經驗，重新統整不同評估階段所需考慮之研究方向與評估重點，從初始的資料蒐集、野外調查與測量、土砂量估算、水文與降雨情境、不安定土砂運移數值模擬分析、危害圖產製與校核及治理防災應用等面向逐一檢討。藉由以上整合式思維與因應策略，期盼能更有效率地釐清各類型災害與不安定土砂影響衝擊評估的互制關係，同時產製能適切反映下游聚落與交通基礎設施的土砂影響危害度圖。

表 2-2 集水區不安定土砂整體評估要點

評估階段	考量方向	具體作法
資料蒐集	彙整相關基礎資料：地形、地質、水文氣象、土地利用等	1.蒐集高精度數值高程模型(DEM)、地質圖、土地利用圖層、山崩目錄。 2.收集降雨紀錄、溪流流量觀測值及歷史災害案例。 3.利用 LiDAR、UAV、衛星影像提高空間解析度。
野外調查與測量	驗證與補充基礎資料，精確掌握不安定土砂的分布及厚度	1.標定不安定土砂堆積區位置與範圍。 2.現地土層採樣與工程地質調查：測量土層厚度、粒徑分布與含水狀態。 3.對潛在崩塌地、滑動區進行安定性評估，如現地剪力試驗或取樣進行室內力學測試。
土砂量估算	根據坡面地形與土砂厚度評估潛在土砂產量	1.利用 DEM 計算坡度與地形曲度，判斷土砂易堆積處(微地形判釋)。 2.套疊現地調查數據與 DEM，估算土砂體積(GIS 空間分析工具)。 3.根據大崩、殘坡與 InSAR 熱區分布，配合雨量折減計算合理土砂產量。
水文與降雨情境	結合降雨特性分析、逕流及坡面產砂機制，評估土砂運動啟動條件	1.訂定設計降雨條件（降雨強度、累積雨量、降雨歷時）。 2.模擬降雨逕流與土砂運移機制，設定合理之土砂釋放點源。 3.確立土砂起動臨界條件。
不安定土砂運移數值模擬分析	建立耦合地形-水文-土砂運動的數值模型	1.選擇合適的土砂移動數值模型(如 RAMMS)，將地形、土砂量與水文條件輸入。 2.設定土砂動力參數，如動態黏滯係數、臨界摩擦角、土砂-水混合比。 3.耦合地表逕流與土砂遷移，模擬土砂在降雨事件下的運移與堆積影響形態。
危害圖產製與校核	利用歷史災害案例或監測數據驗證模型精度，並做參數優化	1.與歷次災害發生範圍、淤積體積對照，檢視模型模擬結果。 2.適度調整模型參數：如摩擦係數、紊流黏滯係數等。
治理與防災應用	結合情境模擬成果，為防災與治理策略提供參考依據	1.由模擬結果標示不安定土砂移動潛勢路徑及淤積熱點。 2.提供後續規劃坡面水土保持工程、防砂壩、植生復育區位與軟硬體策略。

本計畫由 113 年不安定土砂評估計畫執行經驗中，得知 RAMMS 之點源土砂釋放模式對於單一集水區土砂運移堆積可符合模擬需求，但對於野溪集水區匯入主流之主支流水砂互制影響效應，現有模式暫無法滿足評估需求。

故本工作之重點在於預先盤點多重土砂來源及土石流運移評估模式之國內外相關文獻，比較其特點與適用性，並建議未來可嘗試應用於集水區土砂運移數值模式，以因應未來不安定土砂模擬評估情境與模式精進先導研究。經廣泛回顧 R.avaflow、MassMov2D、DAN3D、FLO-2D、CAESAR-Lisflood、DualSPHysics、OpenFOAM、GeoWEPP、OpenLISEM、LAPSUS 等模式，以下初步遴選較適用多點源不安定土砂運移之數值模擬模式與工具，其特色與功能概述分別如下：

(一)r.avaflow

1. **簡介與開發單位：**由奧地利維也納大學的 Martin Mergili 博士主導開發(https://www.landslidemodels.org/r.avaflow/)。r.avaflow 模式為支援 GIS 的開源軟體(圖 2-3)，適用於複合式山崩-土石流事件的動力學模擬(Pudasaini,et al., (2012), Mergili et al., (2017), Mergili et al., (2018), Mergili et al., (2020), Zheng et al., (2021), Shugar et al., (2021))，如崩塌、土石流、岩流、泥流及雪崩等。基於二維淺水方程及混合物流動理論，可同時考慮固態與流體物質。可自訂多個初始料源區，使其適用於集水區內多點源的土砂流模擬。r.avaflow 為一開源的二維數值模式，專門用於模擬各種重力驅動的快速流動現象(rapid mass movements)。

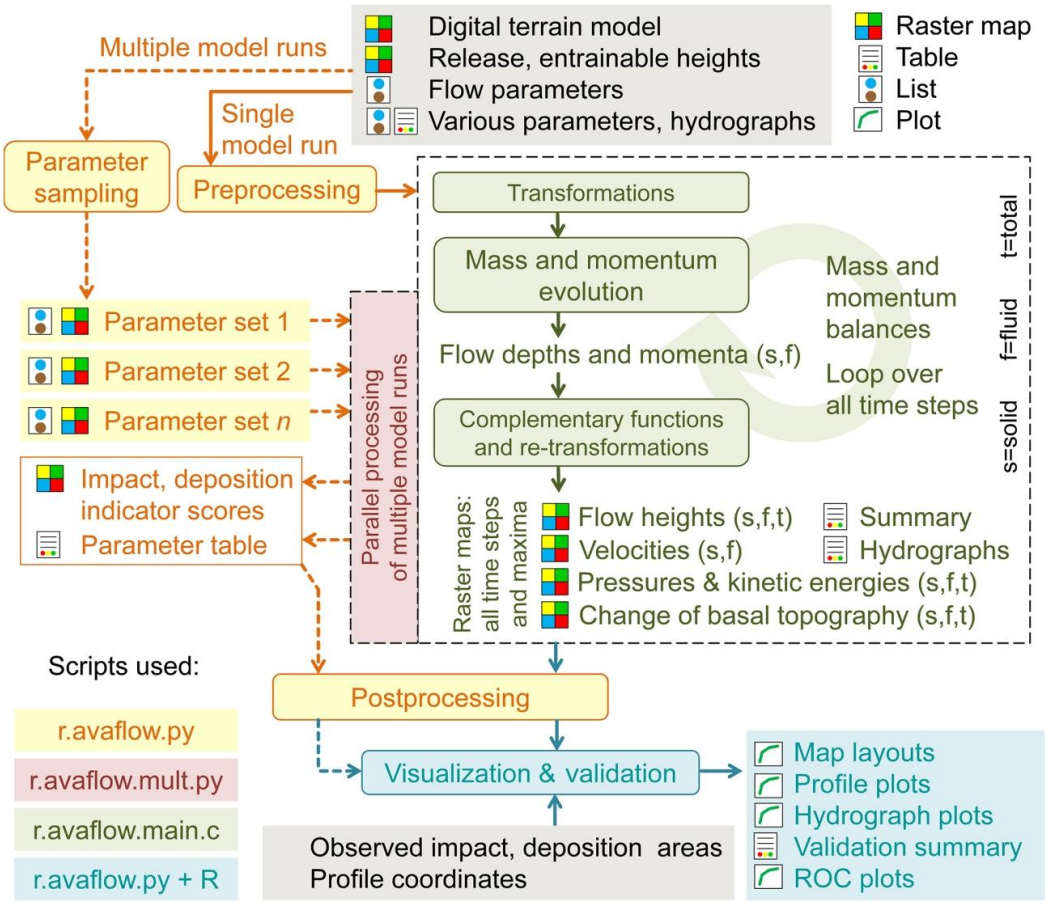


圖 2-3 r.avaflow 數值模式之邏輯架構與資料組成

2. **基本方程式**：r.avaflow 的核心功能在於重新分配質量與動量，並使用動態流動模式與數值方法來實現。。其創新之處在於能夠模擬多相流(multi-phase flow)，將流體區分為固相(如岩石)與液相(如泥水)，並考慮兩者之間的交互作用力。摩擦模型可選用 Voellmy-fluid、Frictional-turbulent、Bingham 等多種流變模型。此模組提供兩種實作方式：(1)單相淺水模式，採用 Voellmy 摩擦關係；(ii)以 Pudasaini(2012)的雙相流模型為基礎，並納入周圍阻力與數項數值增強處理。

該模型同時但分別計算固體與流體的質量與動量守恆，透過六個微分方程組構成六組通量與來源項：固體與流體的深度 (Ds, Df)、x 方向的固體與流體動量 $M_{sx} = D_{s \cdot vsx}$、$M_{fx} = D_{f \cdot vfx}$，以及 y 方向的固體與流體動量 $M_{sy} = D_{s \cdot vsy}$、$M_{fy} = D_{f \cdot vfy}$，其中 v 為流速。首先，定義固體

體積率為 α_s，流體體積率為 α_f，則 $\alpha_s + \alpha_f = 1$，各相的平均速度分別為 u_s 與 u_f。

質量守恆方程式如下：

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s u_s) = 0 \quad (2\text{-}1)$$

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f) = 0 \quad (2\text{-}2)$$

固體與流體相的動量守恆方程式以守恆形式(conservative form)表述如下：

$$\frac{\partial (\alpha_s \rho_s u_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s u_s \otimes u_s) = \alpha_s \rho_s f - \nabla \cdot \alpha_s T_s + p \nabla \alpha_s + M_s \quad (2\text{-}3)$$

$$\frac{\partial (\alpha_{sf} \rho_{sf} u_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u_f \otimes u_f) = \alpha_f \rho_f f - \alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \alpha_f \tau_f + M_f \quad (2\text{-}4)$$

上式中，f 為體積力密度，-Ts 為固體相的 Cauchy 應力張量(此處為負號形式)，τ_f 為流體額外應力(流體 Cauchy 應力張量為 Tf =−pI +τ_f)，M 為界面交互作用力密度(滿足 Ms + Mf = 0)，$p\nabla\alpha_s$ 為浮力項，p 為流體壓力(詳見 Pudasaini,et al., (2012))。

而 r.avaflow 之固體應力以 Mohr-Coulomb 塑性模型表示，流體應力則為增強型非牛頓剪黏應力，其取決於固體體積比梯度。介面動量傳輸包括黏滯阻力、浮力與虛質量效應(由固體與流體間相對加速度產生)。同時考慮固體與流體的交互作用導致變形、混合與分離，非牛頓黏性應力與固體體積比的輸運與擴散是模型中重要的一部分。數值方法使用高解析度的「總變差遞減非震盪中心差分法」(TVD-NOC)，避免非物理震盪。計算則使用 staggered grid，時間步依 CFL 條件自動調整。輸入與輸出以 GIS 網格(地面投影下為矩形)為單位，而為保持與地形對齊座標一致，會修正格網長度與面積。重力加速度以有限差分法從 DTM 計算，在地形對齊 x, y, z 軸方向中應用。所有輸入高程(垂直方向)會轉換為沿地形法線的深度；反之亦然。

3. **模式所需參數：**包含地形資料(數值高程模型(DEM))、釋放區設定(崩塌或土石流的起始位置、體積、深度、固液相比例)、流體材料參數(固相與液相的密度、內摩擦角、Voellmy 摩擦係數(μ)與紊流係數(ξ)、流體黏滯度等)、沖蝕參數等(用於模擬底床沖蝕的相關係數，如沖蝕速率)。

4. **模式適用性：**適用於模擬單一事件的快速、長延時(long-runout)的崩塌與土石流，能有效評估其流動路徑、影響範圍、堆積深度、速度，以進行災害潛勢評估與風險分析(圖 2-4)。

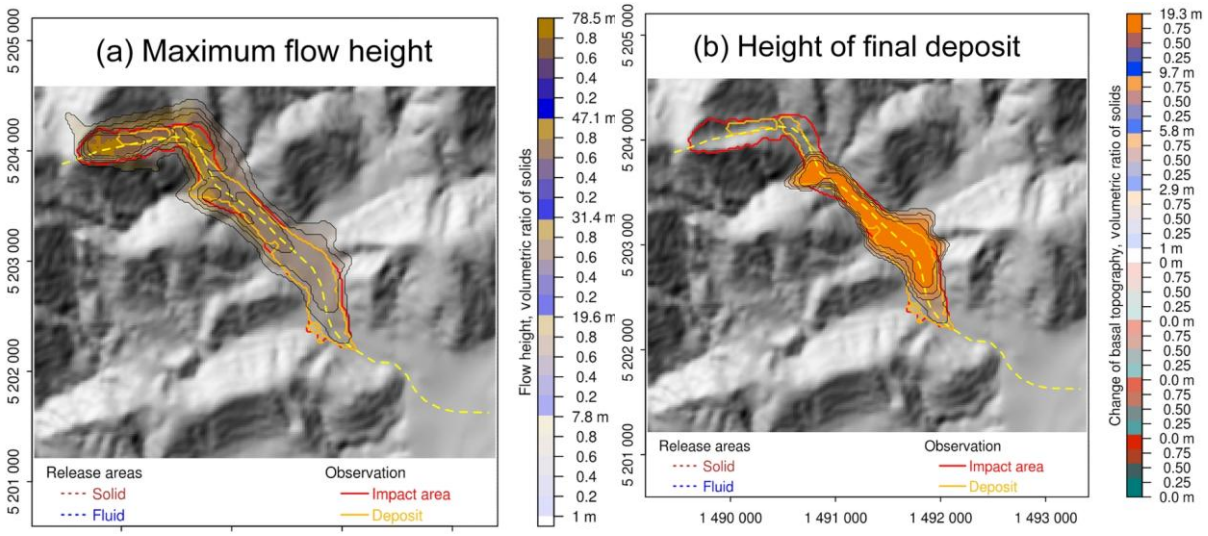


圖 2-4 r.avaflow 模擬紐西蘭 Acheron 土砂災害結果(Mergili et al., (2017))

5. **模式限制與需注意事項：**作為二維深度平均模式，無法解析流體垂直向的速度變化與壓力分佈。摩擦參數與沖蝕參數的選取對結果影響甚鉅，高度仰賴歷史土砂事件進行校驗與驗證(calibration & validation)。對初始釋放體積和位置的估算準確度非常敏感。本模式較難以捕捉細部湍流和顆粒尺寸分選等現象，且計算成本時間相對較高。此外，R.avaflow 假定流體與固體充分混合，對巨大塊石阻擋效應等描述有限，使用時需特別注意。

6. **支流與主流模擬能力：**r.avaflow 模式是基於地形主導土砂驅動的模式，只要地形(DEM)包含完整的支流與主流河道，即可模擬土石流從支流匯入主流的過程，並處理其匯流後的土砂運移行為。

7. **動床(erodible bed)模擬能力：**此為 R.avaflow 的核心功能之一，內建了多種沖蝕模型(如 Pudasaini,et al., (2012)的沖蝕理論)，能模擬土石流在運移過程中對底床材料的侵蝕與捲增(entrainment)，使得土石流體積沿途增加。

(二)MassMov2D

1. **簡介與開發單位：**由該模型由來自西班牙國家研究委員會(CSIC)、荷蘭烏得勒支大學和法國斯特拉斯堡大學的研究人員共同開發，一款專為土石流、泥流及邊坡崩塌而設計的二維模型。可考慮多個來源區，並透過設定初始堆積量或持續邊界輸入模擬集水區內多處土砂釋出。採用淺水波方程與黏滯非牛頓流模型，適用於風險區劃及土砂治理規劃。MassMov2D 為一個基於物理的二維 GIS 模式，用於模擬淺層滑動(shallow landslides)和土石流的擴散。本模式開發目標為在 GIS 環境下，利用簡化的物理方程快速評估災害範圍。

2. 基本方程式：本研究所採用之運動方程為淺水方程近似的深度平均模型，控制方程式包含質量連續方程與動量守恆方程，即 Saint-Venant 方程組，並以有限差分法進行數值積分求解(Begueria et al.,(2009), Molinari et al.,(2012), Iannacone et al.,(2013), Scaringi et al.,(2018), Ma et al.,(2021))。該模式奠基 Savage-Hutter 理論，將滑動之土砂體視為不可壓縮之連續介質，並納入底床摩擦力的影響。阻抗力(剪切阻力)部分可選用不同流變模型進行模擬，包括庫倫摩擦、Voellmy 摩擦(結合庫倫摩擦與速度依賴項)、Bingham 黏性模型等。透過流變模式的切換，可靈活模擬不同性質之地表流動行為，如乾式

滑移或濕式黏滯泥流，以提高模擬之物理真實性與適用性。依據圖 2-5 之坐標系統，質量守恆與動量方程式在 MassMov2D 中可表示如式(2-5), 式(2-6)與式(2-7)：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + c_x \frac{\partial (hu)}{\partial x} + c_y \frac{\partial (hv)}{\partial y} = 0 \qquad (2\text{-}5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c_x u \frac{\partial u}{\partial x} + c_y v \frac{\partial u}{\partial y} = -c_x g \left(S_x + k \frac{\partial (c_x h)}{\partial x} \right) + S_f q_x \qquad (2\text{-}6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + c_y v \frac{\partial v}{\partial x} + c_x u \frac{\partial v}{\partial y} = -c_{xy} g \left(S_y + k \frac{\partial (c_y h)}{\partial y} \right) + S_f q_y \qquad (2\text{-}7)$$

上式(2-5)中，h 表示沿與床面垂直方向的流體厚度；(u, v) 為沿床面方向的速度向量在 x 與 y 軸的分量(單位為 LT^{-1})；cx = cosαx 與 cy = cosαy 為床面方向餘弦係數(為從局部座標系轉換至全球坐標系的幾何修正因子)；αx 與 αy 則分別表示底床在 x 與 y 方向上與水平面的夾角，若下坡方向朝向 x 或 y 正方向時，該角度取負值。動量守恆方程(式(2-6)與式(2-6))以加速度(單位為 LT^{-2})表示，其中 g 為重力加速度。公式左側的第二與第三項表示對流加速度，即因空間位置變化而導致的時間變化率；而公式右側則表示局部(時間)加速度，即在固定位置上隨時間變化的速率。公式右側括號中的第一項表示重力造成的加速度，其中 Sx = tanαx 與 Sy = tanαy 分別為床面在 x 與 y 方向上的坡度(單位為 LL^{-1})。第二項中的空間導數表示壓力加速度，即因流體內部壓力差異導致的時間變化率。 Sf 則為流動阻力梯度(單位為 LL^{-1})，表示因與床面間的摩擦剪應力造成的動量耗散。

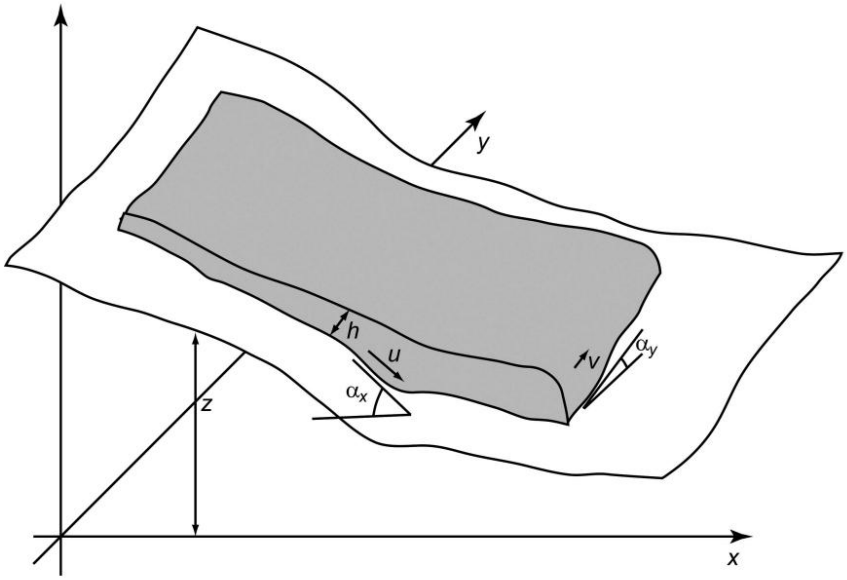


圖 2-5 MassMov2D 模式坐標系統

3. 模式所需參數：MassMov2D 模式在參數設定上需依所採用的流變模式進行調整。基本所需資料包含地形的數值高程模型(DEM)，以提供流動路徑與坡度資訊，並需設定崩塌釋放區的位置與厚度分佈，作為初始條件中的滑動體厚度(例如可設定為 h_ini)。此外，不同流變模型會對應不同的摩擦與動力參數。例如，在採用庫倫摩擦模型時，需給定流體密度與底床摩擦角；若選用 Voellmy 模型，則需提供如 Chezy 粗糙係數或等效的湍阻係數(ξ)，用以模擬速度相關的阻力；若採用黏性流動模型，則需進一步輸入動力黏滯係數與降伏應力等參數。除上述物理參數外，MassMov2D 亦引入一個名為 fluid_rate 的參數，模擬滑動體從固態向流態的轉變速率，特別適用於模擬漸進潤濕過程。此外，模式亦允許設定一項慣性項係數(inertial term)，用以描述滑動體運動的持續性與加速度反應。整體而言，模式透過這些參數的靈活設定，使其能夠因應不同類型的淺層崩塌與土石流模擬需求。

4. **模式適用性**：MassMov2D 模式專注於模擬坡地淺層崩塌及其引發之土石流的運動行為，特別適用於高山峽谷地形中沿既定溪谷向下運移的土石流事件。其核心功能在於模擬淺層崩塌後的擴散範圍、流動路徑與土石沖積扇形成，對於災害潛勢的快速初步評估具有實用價值。模型具有高運算效率，適合應用於大範圍山區流域，特別是在缺乏高解析度資料或需進行多案例模擬時。在實際應用方面，MassMov2D 曾成功用於回溯中國四川滑坡、奧地利 Wartschenbach 及法國 Faucon 等土石流案例(圖 2-6)，模擬結果與實地堆積形態高度一致，展現其在預測流動路徑與堆積分布上的準確性。因此，該模式廣泛應用於山區小流域與沖積扇地區，作為潛在影響範圍評估、災害熱區判斷與規劃管理決策之參考工具。

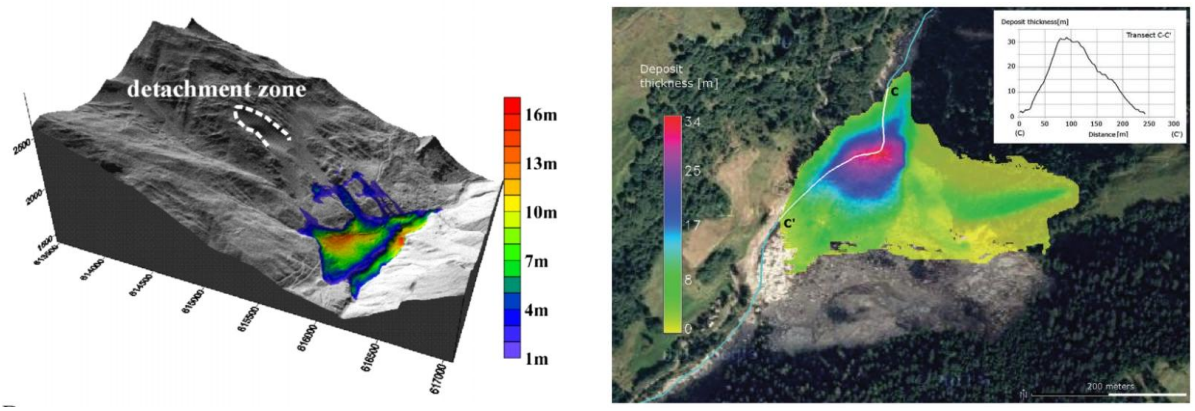


圖 2-6 MassMov2D 模擬案例成果(Molinari (2012), Iannacone (2013))

5. **模式限制與需注意事項**：MassMov2D 其在模擬坡地土石流運動方面雖具高效率與應用彈性，但在物理機制的完整性與適用範圍上仍存在若干限制。首先，MassMov2D 並不模擬崩塌啟動階段，使用者需事先定義滑動體的起始位置與體積，無法預測崩塌何時發生。此外，原始版本未明確納入沿程侵蝕機制，意即滑動質量在流動過程中假設不變，無法自動反映滑動體的卷增行為。若需考慮沖蝕增量，僅能透過調整阻力參數進行近似模擬，或需自行擴充模型功能。在流體力學描述方面，MassMov2D 採用簡化的深度平均理論，對於複雜流變

行為的解析能力有限，尤其在非常陡峭的坡面條件下，可能違反薄層流假設，導致模擬誤差。此外，模型假設土石流為單相等效流體，未區分固液組成與顆粒粒徑，因此無法描述如石塊篩分、粗細分離等現象。其摩擦參數亦多依據經驗值設定，缺乏明確的物理量測依據，易導致結果敏感度偏高。綜上，MassMov2D 適用於背景資料充足、且以地表滑動為主的案例，但對於含有強烈侵蝕、相變或異質材料流動的情境，應審慎使用並搭配其他工具輔助分析。

6. **支流與主流模擬能力：**MassMov2D 在模擬支流與主流的交互運動方面具備一定能力。由於其以網格為基礎進行計算，只要數值地形模型中包含完整的集水區河流網絡與溪谷地形，土石流即可依據地形自動選擇流動路徑，並可能在流經多條溝谷時自然產生分股或匯流的現象。這使得模式理論上能同時處理多條支流匯入主流的情境，並模擬不同初始滑動體在流域內的合併與堆積行為。實務應用中，MassMov2D 通常用於模擬單一來源的土石流事件，但若面對同一集水區內多處滑坡同時發生的情況，使用者亦可透過設定多個初始滑動體來模擬多重來源土石流的互動。這些土石流在匯流處將依照地形特徵自動合併，無需額外設定。然而，需注意的是，MassMov2D 模型缺乏對水相動態的細部處理，主要著重於固體流(滑動體)的動力行為，因此在支流水文變化與水-砂耦合方面的精度較低。整體而言，其支流與主流模擬能力雖具可行性，但仍有限制性，應用上需視應用條件與精度需求搭配使用。

7. **動床(erodible bed)模擬能力：**MassMov2D 在動床模擬方面的能力相對有限。模型原始設計假設底床為固定不動的基底(fixed bed)，滑動體在流動過程中質量保持不變，並不考慮沿途因沖刷造成的體積增量。這使得 MassMov2D 在模擬實際事件中土石流的擴容行為時存

在限制，也是其與如 R.avaflow 等具備沖蝕功能模式之主要差異之一。儘管如此，MassMov2D 仍能模擬流動過程的堆積行為，並輸出沉積厚度與最終堆積高度分佈圖，這些結果可作為分析河道壅塞與潛在堵塞區之依據。若使用者希望考慮動態沖蝕效應，則需額外手動修改 DEM 或透過多階段模擬迭代進行間接處理。此外，部分後續開發版本如 EDDA 1.0 或 2.0 已嘗試與侵蝕模型進行耦合，以補足原版缺乏動床模擬能力的不足。總體而言，MassMov2D 主要用於呈現已知滑體土量的運移與沉積，對動床變化的描述較為簡化，使用時應依模擬目標審慎考量其適用性。

(三) DAN3D (Dynamic ANalysis 3D)

1. **簡介與開發單位：**DAN3D 是一套著名的準三維數值模式(https://hungr-geotech.com/dan3d.html)，專為模擬高速、長距離運動的崩塌與土石流現象所設計。模型採用拉格朗日法(Lagrangian approach)，將滑動土體離散化為一系列質點，透過粒子追蹤的方式模擬其在複雜地形中的運動與堆積行為。DAN3D 將滑體視為等效流體，支援多種流變模式，可用於預測滑動體的流動範圍、堆積深度與可能影響區域，特別適用於評估快速山崩、岩屑流與大規模滑坡的潛勢與風險。該模式最初由加拿大英屬哥倫比亞大學(University of British Columbia, UBC)Oldrich Hung 教授及其研究團隊於 2004 至 2009 年間開發完成，目前由 BGC Engineering Inc. 與商業公司 Hungr Geotechnical 提供維護與技術支援。DAN3D 已廣泛應用於工程實務與國際災害案例中，是現今崩塌動態模擬領域中最具代表性的工具之一。

2. **基本方程式：**DAN3D 的理論基礎是從連續介質力學原理(principles of continuum mechanics)推導而來的深度平均控制方程式系統(system

of depth-averaged governing equations)。模型的推導始於質量守恆定律和動量守恆定律(Hungr (1995), Hungr et al.,(2009), Penna et al.,(2017), Conlan et al.,(2018), Conlan et al.,(2020), Gardezi et al., (2021), Aaron et al.,(2022))：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0 \tag{2-8}$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v \otimes v = -\nabla \cdot \mathrm{T} + \rho \mathrm{g} \tag{2-9}$$

式(2-8), (2-9)中，ρ 是材料體積密度，t 是時間，v 是速度向量，T 是應力張量，g 是重力加速度向量，∇ 表示梯度運算子。為實際模擬快速崩塌行為，模型進行了多項簡化和假設，如等效流體方法(equivalent fluid approach)，此方法將異質且複雜的山崩材料，模擬為由簡單流變關係控制的假設材料，其旨在提供易於使用的簡單解決方案，並僅需有限的參數進行經驗校準，同時考慮到快速山崩最重要的特性。在這種框架下，內部流變(internal rheology)通常假定為摩擦性(frictional)，並由一個參數-內摩擦角(internal friction angle)控制。基底流變(basal rheological model)及其相關參數(通常只有一兩個)則根據經驗校準程序選擇。在常數密度與不可壓縮(constant density and incompressible)性質方面，材料被假定為常數密度且不可壓縮。這是考慮顆粒材料中的密度變化相對於其他動態變數的變化而言很小。在邊界條件(boundary conditions)設定上，流體頂面處的應力為零，流體底部處的應力張量包括對應於靜水重力勢的法向應力(normal stress)，以及由適當流變關係決定的運動阻力剪應力(motion-resisting shear stress)。材料卷增(material entrainment)特性上，透過允許體積通量(volume flux)穿過基底邊界來解釋物質挾帶。挾帶行為包括直接的基底卷增(basal entrainment)和前端推掘(frontal plowing；指滑動體

在運動過程中，其前緣推動、掘起或擠壓前方靜止或鬆動土砂的現象。這種作用會導致滑體體積增加，並改變其動力行為與堆積型態)，儘管推掘在數學上被視為基底侵蝕的一部分。而隨著時變的床層物質進入山崩體的速率稱為侵蝕速度(erosion velocity)，且必須為正值(詳參見 Hungr et al.,(2009))。其模擬流程圖如圖 2-7 所示。

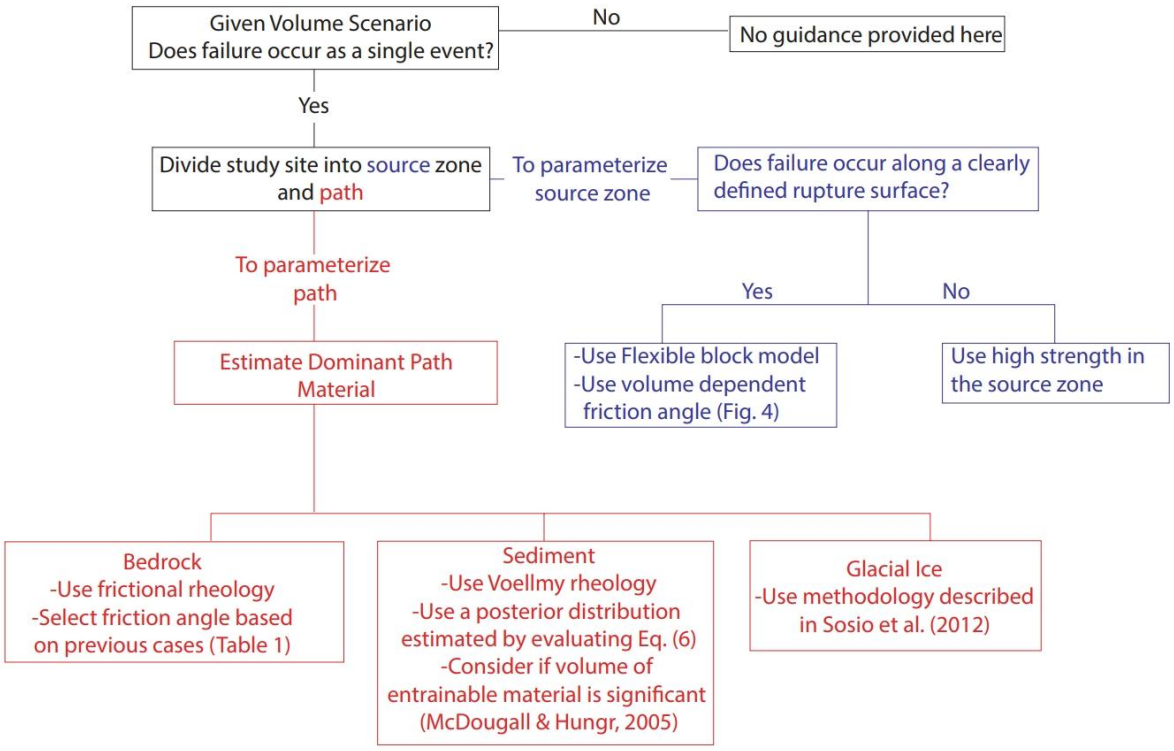


圖 2-7 DAN3D 模式模擬流程圖(Aaron et al.,(2022))

3. **模式所需參數：**DAN3D 模式在進行滑坡與土石流模擬時，需輸入多項地形與物理參數，以正確描述滑動體的動態行為。首先，必須提供滑動路徑的地形資料，通常以數值高程模型格式輸入，作為整體模擬的基礎地形。其次，需設定滑動體的三維幾何，包括其起始位置、厚度與範圍，作為初始滑動體的定義。在流變特性方面，DAN3D 支援多種模式(如摩擦式、Voellmy 模型、Bingham 模型等)，需根據所選模型輸入相對應的流變參數。主要包括滑體的體積密度、內部摩擦角(影響滑體內部應力傳遞係數)、基底摩擦係數、以及速度平方項所對應的紊流阻力係數(Voellmy 模型)。在使用 Voellmy 阻力模式時，

相當於滑動面靜摩擦係數。若採用黏性模式，則還需輸入賓漢應力與動力黏滯係數。DAN3D 亦支援空間變化的阻力設定，使用者可依區域指定不同的摩擦或阻力參數(例如源區設定高摩擦、堆積區設定低摩擦)，以模擬滑動過程中的能量耗散。此外，若考慮滑體中的潤滑層或含水率，也可輸入相關資料來反映材料條件對運動行為的影響。對於需要模擬路徑底床卷增的情境，DAN3D 也提供沖蝕參數(如沖蝕速率)作為可選輸入，以模擬滑動過程中對底床的掘取行為。新版本亦可輸入時間序列的入流流量曲線(hydrograph)，模擬連續供應料源的土石流事件，例如湖泊潰決或持續崩塌供源的場景。此多樣化的參數設定提供了 DAN3D 模式高度的靈活性與實務應用的擴充性。

4. **模式適用性**：DAN3D 特別適用於模擬高速、遠距離的大規模滑坡運動，例如岩體滑動、岩屑崩落(rock/debris avalanche)與土石流等災害事件。其設計目標即是針對具有劇烈運動動能與長延伸距離的崩塌體進行動力學模擬，因此在大型災害的工程分析、潛勢評估與災後回溯(back analysis)中被廣泛採用。DAN3D 已成功應用於多起國際知名案例，如 2006 年菲律賓南甘馬顏州 Guinsaugon 岩屑流事件，以及 2014 年美國華盛頓州 Oso 大崩塌，模擬結果有效還原滑動體的流動路徑與堆積分布，並提供下游風險範圍之評估依據(如圖 2-8)。在山區集水區內，當支流或側谷崩塌可能衝擊主河道或造成壅塞時，DAN3D 可用來評估崩塌體潛在運動路徑、最大影響範圍、流速與堆積厚度等關鍵指標，為災害防治與工程設計提供參考。相較於需高解析輸入與繁複計算的全三維模式，DAN3D 以其準三維架構與簡化物理假設，在保持合理模擬精度的同時具備良好的計算效率，適合用於大範圍地區的初步災害潛勢評估與敏感區診斷。

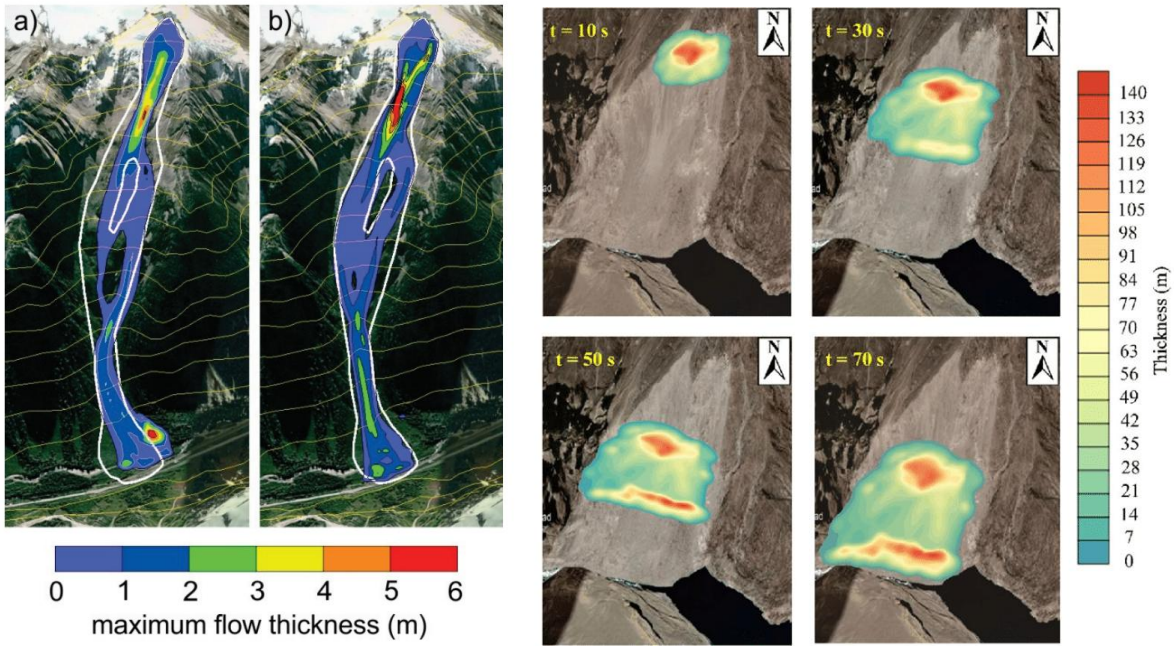


圖 2-8 DAN3D 模擬案例成果(Conlan(2018), Gardezi(2021))

5. **模式限制與需注意事項：**DAN3D 雖被廣泛應用於大規模崩塌與土石流的動力模擬，但其在模式架構與物理假設上仍存在若干限制與需注意事項。首先，DAN3D 採用等效流體的近似方法來模擬滑體運動，未細部區分固相與液相的動力交互作用，這使得模型無法準確捕捉土石流中常見的多波峰或陣發式流動行為。其次，模型對摩擦參數（如底摩擦係數 fff 及湍流阻力係數 ξ\xiξ）高度敏感，這些參數往往難以直接量測，通常需透過案例的反演分析加以標定，以模擬與實際滑動距離相符的結果。此外，原版 DAN3D 假設滑動體在初始時即瞬間液化並進入流動狀態（block start），未考慮實際滑體從靜止逐步破壞至崩塌的漸進失穩歷程。雖然此簡化假設在工程應用上常被接受以提高分析效率，但也受到部分學者（如 Iverson 等人）的質疑，認為其可能忽略部分重要的物理過程。再者，DAN3D 並無能力自行預測崩塌的觸發時間與初始體積，使用者必須事先提供相關初始條件，因此主要應用於災後回溯（back analysis）或情境模擬（scenario analysis），而非作為崩塌預警或觸發預測工具。最後，雖

然 DAN3D 名稱中帶有「3D」，但其實質為深度平均的準三維模型，並非完整的三維計算流體力學（CFD）模擬。加上作為商業軟體，其取得與授權成本相對較高，對於一般研究單位或地方政府單位可能存在使用門檻。因此在實際應用上，使用者需綜合考量其模擬目標、資料可得性與資源條件，以確保模型發揮最大效益。

6. **支流與主流模擬能力**：DAN3D 在模擬支流與主流間的土砂運移方面具備良好的表現。雖然其本質上是針對單一起始滑坡事件所設計的模擬工具，但由於採用了拉格朗日粒子法(SPH)架構，滑動體一旦進入複雜地形，如分岔的河道或支流系統，可自然地依據地形條件產生分流、匯流與碰撞等行為。此方法允許滑體在分支處同時沿多個方向運動，或在地形匯流點自動合併，無需額外設定特定通道或路徑。此外，DAN3D 亦支援多起始滑坡源的設定，雖可模擬同一場降雨誘發的多處崩塌事件，惟需使用者手動定義各滑體的初始位置與條件。這對於分析支流與主流之間多源滑動體如何交互作用、是否堵塞主河道等情境甚為實用。不過需要注意的是，DAN3D 並不內建完整的水文模組，亦不主動模擬河川基流或長時間的來水過程，若需考慮支流水量的時間變化或長時段模擬，建議搭配其他水文模式使用，以提供更全面的河谷動態評估。整體而言，DAN3D 在處理滑體於地形中的自由運動與支流主流間的自然匯流行為上具有高度靈活性與準確性。

7. **動床(erodible bed)模擬能力**：DAN3D 具備模擬動床(Erodible Bed)過程的能力，並在其動量守恆方程中整合了一個簡化的沖蝕模型。該模型基於 Hungr（1995）提出的理論，允許使用者設定一個侵蝕速率係數，用以描述滑動體在運動過程中對底床材料的掘取與捲入。此侵蝕機制被視為額外的質量與動量源項，當滑體沿程通過既有的鬆散

堆積物或風化層時，可逐漸增加其體積與動能，進而反映沖刷行為對流動性的增強。在模擬過程中，當滑體加速運動時，其前緣可能出現前緣堆掘作用」進一步擴大流動體積；反之，當滑體速度減緩，SPH 粒子逐漸靜止並沉積於地表，模型則可輸出最終堆積厚度分佈。然而，需注意的是 DAN3D 的侵蝕處理方式相對簡化，並不即時更新 DEM 中的地形高度，而是將沖蝕與堆積效應體現在模擬結果中的厚度變化。這種處理方式雖足以用於評估體積擴大與沉積減勢等效應，但若需更細緻的地形演變模擬(如局部河道沖刷)，仍需透過後處理工具或搭配其他專門的地貌演化模型進行補充分析。

(四) DualSPHysics

1. **簡介與開發單位：**DualSPHysics 為基於平滑粒子流體力學(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法開發的開源數值模擬程式，原始自 SPHysics 專案延伸而來，首次發表於 2011 年。該程式專注於模擬自由表面流體現象，特別適合處理如海浪、壩潰洪水、波浪衝擊等問題，並以其高度的可擴展性與 GPU 加速運算能力聞名。雖然最初並非為土砂模擬所設計，但隨著研究社群的推展，也逐漸擴展至土石流、泥沙輸移與地形變化等應用領域。DualSPHysics 由多家研究機構共同開發，包括西班牙維戈大學(University of Vigo)、英國曼徹斯特大學(University of Manchester)等。其官網(https://dual.sphysics.org/)提供完整的使用者手冊、範例程式與二次開發介面，允許研究人員進一步整合其他物理引擎(如剛體動力學模組 Project Chrono)與 DualSPHysics 耦合，進行多相物理交互模擬，提升在複雜工程問題中的應用彈性與精細度。整體而言，DualSPHysics 是一套功能靈活、擴充性強的通用 SPH 模型求解平台。

2. **基本方程式**：DualSPHysics 是一個開源的計算流體力學(CFD)求解器，主要用於解決自由表面流動問題。它採用光滑粒子流體動力學方法，屬拉格朗日無網格粒子方法。在 SPH 中，連續體被離散化為一系列物質點或粒子，這些粒子代表流體，其可與結構互動並展現大變形，邊界也可以移動，離散化的 Navier-Stoke 方程式在每個粒子的位置進行局部積分，並根據周圍粒子的物理特性計算(圖 2-9)。相鄰粒子的集合由基於距離的函數(通常是圓形或球形)與相關的平滑長度(smoothing length) h 決定，在每個時間步，都會為每個粒子計算新的物理量，然後其根據更新的值移動(Gómez-D alrymple et al.,(2006), Crespoet al.,(2008), Cherfils et al.,(2012), Gómez-Gesteira et al.,(2012)a,b, Crespo et al.,(2015), O'Connor et al.,(2021), Gesteira et al.,(2024))。以下是 DualSPHysics 模式中的基本控制方程式，包含連續方程式與動量守恆方程式：

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \sum_b m_b \, v_{ab} \cdot \nabla_a \mathrm{W}_{ab} \tag{2-10}$$

式(2-10)，DualSPHysics 中也可以套用 delta-SPH 公式，其引入一個擴散項來減少密度擾動。

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \sum_b m_b \, v_{ab} \cdot \nabla_a \mathrm{W}_{ab} + 2\delta h \sum_b m_b \, \overline{c_{ab}} \left(\frac{\rho_a}{\rho_b} - 1\right) \frac{1}{r_{ab}^2 + \eta^2} \cdot \nabla_a \mathrm{W}_{ab} \tag{2-11}$$

式(2-11)中，$\overline{c_{ab}} = 0.5(c_a + c_b)$；而 η^2=0.01h^2，δ 為 delta-SPH 係數。這項的設計目的是在求解每個粒子的質量守恆時，對密度場中較高波數成分進行濾波，以降低整個粒子系統中的雜訊。該擴散項可展開為一階與二階的貢獻，其中二階項對應其擴散特性，而一階項若所使用的核函數為完備(complete kernel)時，其值近似為零。換言之，delta-SPH 擴散項透過濾除高頻雜訊，有助於提升模擬中密度場的穩定性與準確度。

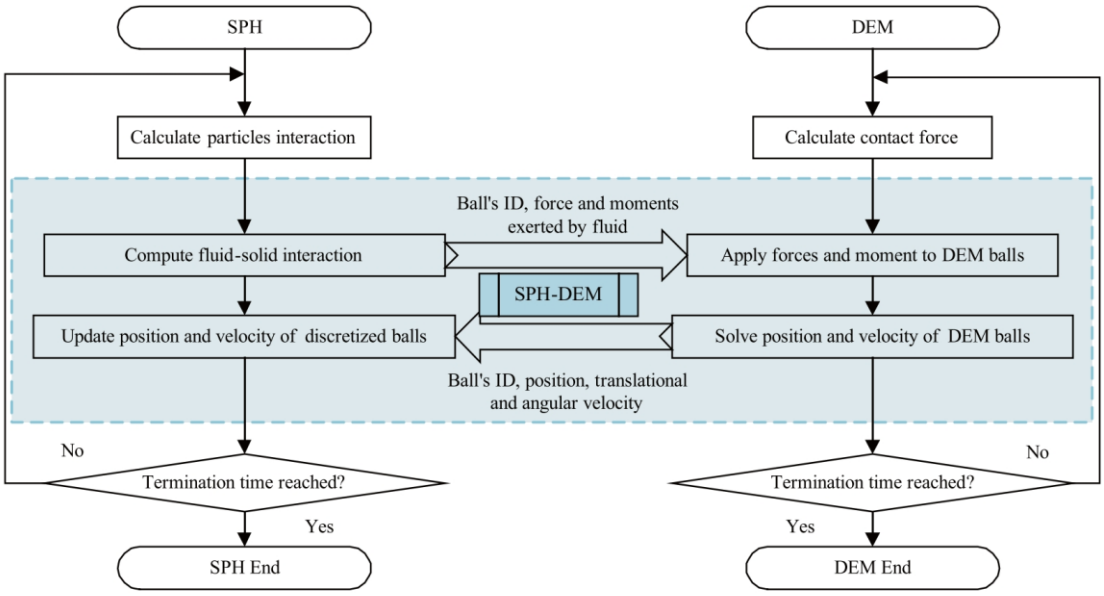


圖 2-9 DualSPHysics 模式模擬流程圖(Gesteira (2024))

3. **模式所需參數：**DualSPHysics 模式所需參數因模擬對象與目的不同而有所變化，具有高度的彈性與自訂性。基本上，使用者需先定義幾何與粒子配置，包括邊界幾何形狀、初始流體分佈及粒子間距，這些設定將直接影響模擬解析度與計算負荷。在流體性質方面，需輸入流體的密度與動態黏滯係數，並設定壓縮性相關參數，如聲速(sound speed)，以確保滿足 SPH 方法下的壓縮性控制。模擬時間步長則透過 CFL 條件控制，避免數值不穩定。

   當應用於土石流或非牛頓流體模擬時，需額外輸入屈服應力、流變指數等參數，例如使用 Herschel–Bulkley 模型計算剪切稠度。若模擬中包含固體顆粒(如土砂、礫石)，這些顆粒可作為獨立粒子建模，並需透過外部剛體模組(如 Project Chrono)定義其粒徑、密度、摩擦係數、彈性恢復係數等接觸特性，以實現固液耦合動態模擬。此外，DualSPHysics 亦允許透過粒子源注入方式模擬降雨或持續入流情境，或設定初始靜水池破壞模擬壩潰行為。總體而言，DualSPHysics 模式的參數設定極具彈性與細緻度，但相對需要使用者具備流體動力

學與數值方法的基本知識與相關參數來源，才能依據不同模擬目標正確調整相關物理與數值參數，確保模擬的準確性與穩定性。

4. **模式適用性**：DualSPHysics 特別適合應用於需要高精度解析三維流場與自由液面變化的情境，如潰壩洪水、波浪衝擊構造物、水槽實驗重建等案例。由於其採用平滑粒子流體力學方法進行全拉格朗日模擬，對於追蹤高速變形流體與複雜邊界行為具有極佳的能力，並可細緻呈現流固耦合現象。在工程應用中，DualSPHysics 已廣泛被用來模擬壩潰洪水對下游基礎設施的衝擊效應，以及浮體、水工設施的互動分析。在山區災害模擬方面，也有實例證明其對泥石流運動具備良好適用性。研究如 Pande 等人便曾利用 DualSPHysics 功回溯模擬印度某山區泥石流事件，不僅再現了約 16 m/s 的峰值流速，模擬結果與實測堆積範圍亦高度吻合。由於 SPH 模型能自然地考慮顆粒間接觸與流體互動，特別適合模擬水砂混合流與漂浮木石等不規則介質的運動(圖 2-10)。此外，DualSPHysics 支援 GPU 加速技術，使其在模擬數百萬粒子的情況下計算效率較傳統 SPH 方法提升數十倍，進一步擴展了其在高解析度模擬與大型問題上的應用潛力。整體而言，DualSPHysics 是一套兼具精細度的模擬工具，適用於需解析微觀動力細節與強烈非線性流動情境。

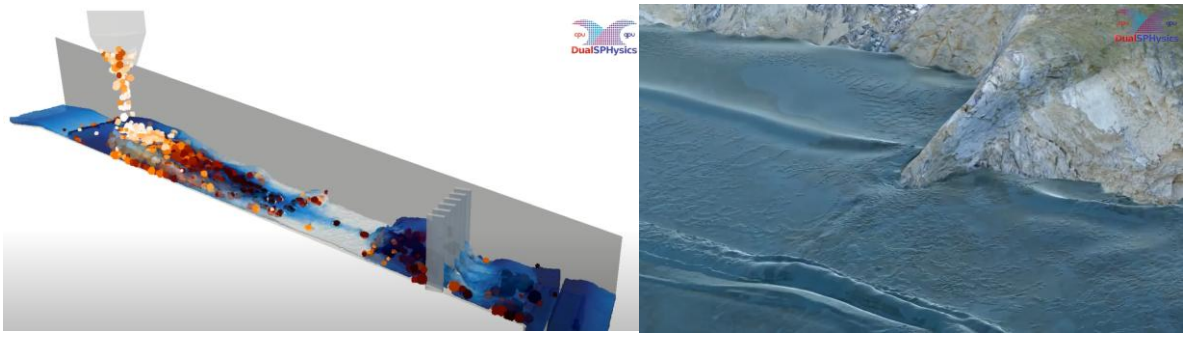


圖 2-10 DualSPHysics 模擬案例成果(DualSPHysics 官網)

5. **模式限制與需注意事項：**DualSPHysics 在實際應用上仍存在若干限制與使用上的注意事項。首先，其最大限制為極高的計算資源需求。由於 SPH 方法需將模擬空間離散為大量粒子，若欲解析稍具規模的流域或事件，所需粒子數將成指數級成長。即使採用 GPU 加速，大規模模擬(例如 10^5立方公尺以上)仍可能耗時數小時至數天，難以達到工程實務所需的時效。因此，DualSPHysics 多用於中小尺度(約 10^3–10^4 m^3)的精細事件模擬，而不適合整個集水區的多年地形演變或流域級長期模擬。此外，DualSPHysics 的初始條件設定對模擬結果具有高度敏感性，特別是在土石流模擬中，如何準確初始化飽和滑體分佈與邊界條件，是決定模擬精度的關鍵因素。SPH 模型本身也存在數值耗散問題，若未妥善調整人工黏性參數，可能出現過度平滑或數值震盪等不穩定現象。此外，DualSPHysics 並不內建降雨-流量歷線模組，若需模擬暴雨引發的泥流或水文事件，必須先在外部水文模式中完成流量歷線計算，再將結果作為 DualSPHysics 的邊界條件輸入，這也提高了模型整合與操作的複雜度。另因 DualSPHysics 模式為開源框架，其客製化與應用通常需使用者具備相當程度的流體力學理論與程式撰寫能力(C++為主)，以修改參數模組或擴充土砂處理功能。邊界條件如注入流、開口牆面或剛體交互設定等亦較為複雜，需透過精確的程式碼與配置來操作。因此，該模式雖功能強大，卻相對具有較高的學習門檻，適合已有長期數值模擬經驗與工程背景的研究人員或高階使用者操作。

6. **支流與主流模擬能力：DualSPHysics** 理論上具備模擬支流與主流間土砂運移與交互作用的能力，尤其因其基於 SPH 方法，能以粒子運動捕捉多條水流在匯流處的疊加與干涉現象。這種拉格朗日粒子架構使其在模擬任意複雜三維幾何邊界(如多支流交匯、彎曲河道、分

叉通道)時表現出高度彈性與準確性。實際應用中，已有研究透過在小型山區流域內設置多個入流源來代表多條支流，成功模擬主河道匯流處泥流波前的重合與動力干涉，展現其可捕捉局部匯流區域細部動力過程的能力。然而，由於 SPH 模擬需大量粒子離散空間，當模擬區域涵蓋整個網狀河系或長距離主流時，粒子數將劇增，導致計算成本急遽上升，即便使用 GPU 加速仍難以於合理時間內完成模擬。因此在實務應用上，DualSPHysics 多半用於重點區段或局部敏感區，如山口段主流與支流匯合區、壩體潰決下游短距段等情境。上游支流則建議以簡化的流入邊界條件處理，例如穩定入流源或時間變化流量設定，以節省粒子資源並維持模擬穩定性。總體而言，DualSPHysics 能夠有效處理局部範圍內的支流與主流匯流現象，並具備高度物理真實性，但在大尺度集水區全面模擬方面，仍受限於粒子數與硬體計算資源負載，實務應較不適合大範圍集水區模擬精度與耗費較大計算成本。

7. **動床(erodible bed)模擬能力**：DualSPHysics 具備模擬動床過程的潛力，但需透過特殊設定或外掛模組實現。其本體並未內建地形更新或底床變形模組，但使用者可利用粒子化方式表示河床，將床面離散為一組固定的土沙粒子，並設定當受力(如剪應力)超過臨界值時，即解除其固定狀態，讓其隨主流一同運動。此方法已被部分學者成功應用於橋墩繞流沖刷模擬中，精確再現淘刷坑的發展過程，顯示 DualSPHysics 在微觀層級上能有效描述沖蝕與再沉積機制。另一種更進階的模擬策略是結合 CFD 與 DEM(離散元素法)，即所謂 SPH-DEM 耦合。此架構中 DualSPHysics 負責模擬流體場，而 Project Chrono 等剛體動力引擎則處理固體顆粒運動與接觸行為。透過此類耦合，可模擬大量顆粒在流體驅動下的起動、搬運、碰撞與再

沉積，更貼近自然河床變化的實際物理行為。例如 Van den Bout 等學者即已嘗試使用 DualSPHysics 結合 Project Chrono，應用於土石流動床互動的模擬研究。儘管如此，需注意 DualSPHysics 進行動床模擬仍存在一定門檻。首先需具備額外程式開發能力或使用社群已分享的副模組，其次為模擬顆粒層級的動床演化所需粒子數龐大，計算成本極高，且時間尺度限制使其較難以處理長時間或大範圍的地形演變問題。

(五)FLO-2D

1. **簡介與開發單位：**FLO-2D 是一套廣泛應用於洪水、泥流與土石流模擬的商業二維數值模式，由美國學者 O'Brien 等人於 1990 年代開發，並由 FLO-2D Software, Inc. 持續維護與更新。該模式採用有限差分法(finite difference method)，在規則網格系統上求解流體運動方程，具備高度穩定性與工程適用性。FLO-2D 不僅適用於傳統河川洪水與都市淹水模擬，也已整合土石流與泥沙傳輸模組，可用來模擬含沙洪流、泥漿流等災害情境。隨著模型功能的擴展與模組化發展，FLO-2D 已成為多國政府與工程單位(如美國 FEMA)認可的防災分析工具，在全球洪氾風險評估與災害管理中獲得廣泛應用。其官方網站亦提供完整的技術手冊、範例與技術支援，方便使用者依實務需求進行模擬設計與分析，是一套功能完善、應用成熟的商業級洪水與土石流模擬軟體。

2. **基本方程式：**FLO-2D 主要用於模擬洪水和土石流事件。該模型能夠預測土石流的水力特性，例如淹沒範圍、最大淤積深度和淤積體積。FLO-2D 的開發者 O'Brien 在 1988 年提出此模型，並由 O'Brien 和 Julian 在 1998 年發展完成。其透過求解質量守恆和動量守恆方程式來模擬土石流的運動特性(Hsu et al.,(2010), Lin et al., (2011), Wu

et al., (2013), Ding et al., (2023), Ohet al., (2023), Jia et al., (2024), Qiu et al., (2024))。FLO-2D 將地形劃分為大小和形狀均勻的方形網格，並在八個流動方向上定義流動，這些方向包括東、西、南、北、東南、西南、東北和西北方向(圖 2-11)。在每個方向上，都假設流體密度恆定且為靜水狀態。FLO-2D 模型中主要使用的基本控制方程式包括連續方程式(式(2-12))與動量方程式(式(2-13), (2-14))，說明如下：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (uh)}{\partial x}+\frac{\partial (vh)}{\partial y}=i \tag{2-12}$$

式(2-12)中，h：土石流深度；u, v：分別為土石流在 x 和 y 方向上的速度分量；i：降雨強度(入滲)；t：時間。

$$S_{fx}=S_{bx}-\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{\partial u}{g\partial t}-u\frac{\partial u}{g\partial x}-v\frac{\partial u}{g\partial y} \tag{2-13}$$

$$S_{fy}=S_{by}-\frac{\partial h}{\partial y}-\frac{\partial v}{g\partial t}-u\frac{\partial v}{g\partial x}-v\frac{\partial v}{g\partial y} \tag{2-14}$$

FLO-2D 主要使用動態波動量方程式(dynamic wave momentum equation)。式(2-13)與式(2-14)描述了土石流在 x 和 y 方向上的力平衡。包含流動深度、深度平均速度、重力加速度、摩擦坡度(friction slope)和床面坡度(bed slope)等項。其中：S_{fx}, S_{fy}：分別為 x 和 y 方向上的摩擦坡度、S_{bx}, S_{by}：分別為 x 和 y 方向上的床面坡度、g 為重力加速度。

對於高密度土石流，其剪應力特性與一般流體不同，因此流變模型對於固液混合物的模擬至關重要。FLO-2D 流變方程式(Rheological Equations)可表為

$$S_f=S_y+S_v+S_{td}=\frac{\tau_y}{\gamma_m h}+\frac{K\eta u}{8\gamma_m h^2}+\frac{n^2u^2}{h^{4/3}} \tag{2-15}$$

式(2-15)中，Sy：屈服坡度(yield slope)，表示對應於滑動需克服的屈服剪應力；Sv：黏滯坡度(viscous slope)反映因黏滯性所產生的能量

損失；Std：紊流-擴散坡度(turbulent-dispersive slope)表示由紊流與粒子擴散造成的坡度損耗；τy：賓漢屈服應力(Bingham yield stress)材料開始流動前所需的最小剪應力；η：賓漢動態黏滯係數(Bingham dynamic viscosity)描述土石流在流動狀態下的黏滯阻力；γm：土石流單位重(unit weight of debris flow)；K：層流阻力參數(resistance parameters for Laminar flow)，描述層流條件下的阻力特性。n：曼寧糙率係數(Manning's roughness coefficient)反映河道表面粗糙度對流速的影響。h：土石流深度(depth of debris flow)垂直方向的流體厚度。u：速度分量(velocity components)指流動在不同方向上的速度值。

分析結果顯示，河道坡度與體積濃度是影響 FLO-2D 模型中土石流路徑模擬最關鍵的參數。這些控制方程式共同作用，使 FLO-2 能夠數值模擬土石流的流動過程、堆積範圍和危險區域的變化。此外，FLO-2D 假設流動符合淺水方程式，其不考慮河床沖刷或沉積，也無法模擬沖擊波和水力跳躍。值得注意的是，也不模擬泥石流啟動過程中的河道侵蝕和內部水體震盪(不支援土石流在運動過程中對底床材料的侵蝕與捲增)。

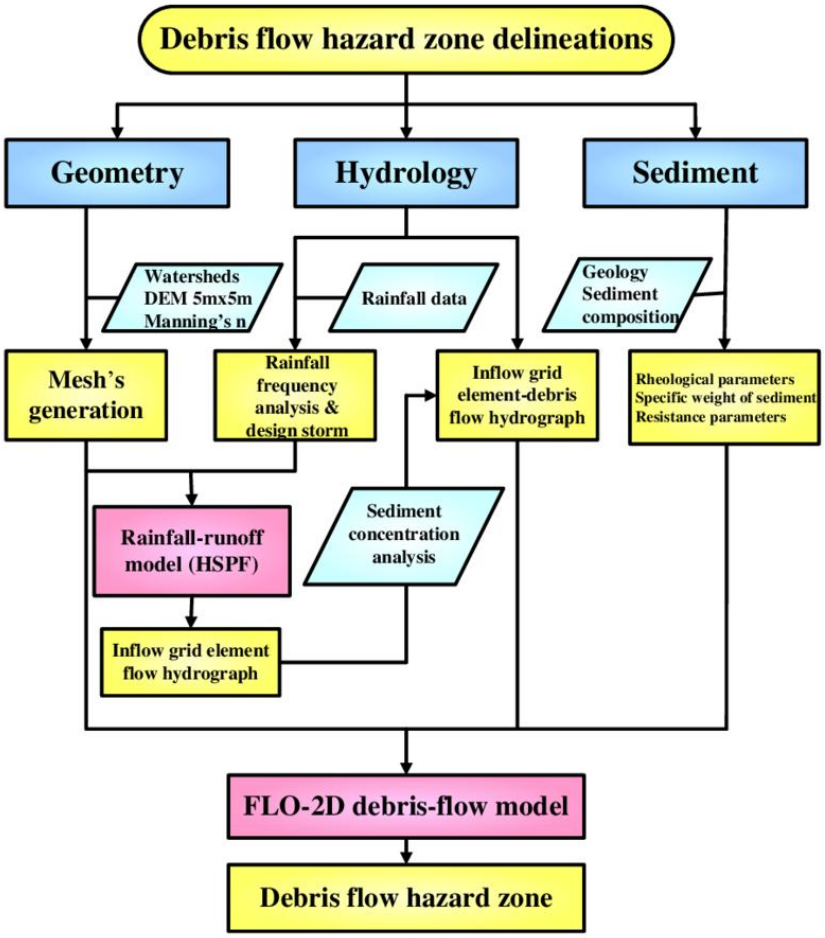


圖 2-11 FLO-2D 模式模擬流程圖(Hsu (2010))

3. **模式所需參數**：FLO-2D 模式在進行洪水、泥流與土石流模擬時，需輸入多項地形、水文與物理參數，這些參數對模擬精度與計算穩定性皆具有關鍵性影響。首先，使用者需提供地形資料與計算網格，包括數值高程模型與設定規則或不規則的網格系統，並可細部描繪渠槽與氾濫平原等地形特徵。在水文條件方面，FLO-2D 支援直接輸入流量歷線(inflow hydrograph)或區域降雨資料(rainfall hyetograph)，可根據模擬目的選擇不同邊界條件來源。進一步模擬泥流或含砂洪水時，則需設定相關的流變與水力參數，如屈服應力(yield stress)、黏滯係數(viscosity)、土砂體積濃度與曼寧糙率(Manning's n)等。在能量損耗計算方面，FLO-2D 允許設定層流阻力係數 K，若未指定，模型會依據曼寧值自動推估。這些參數的彈性設計使 FLO-2D 可廣泛應用

於不同地形與災害條件下的洪水與土石流模擬任務，特別適合用於結合現地調查資料與風險評估分析。一般而言，使用 FLO-2D 模式時五個重要的參數，分別為河道坡度、體積濃度、屈服應力、黏滯係數以及土砂密度。

4. **模式適用性**：FLO-2D 原本主要應用於平原與都市地區的洪氾模擬，如河川氾濫、都市淹水與潰壩洪波傳遞等。然而隨著泥流與泥砂模組的加入，其適用範圍已擴展至山區流域與土石流災害的模擬領域。在山區中小型集水區，FLO-2D 可同時模擬主溪道洪水氾濫與沿程泥砂的沖刷、捲增與沉積過程，特別適用於分析如森林火災地區因暴雨引發的含砂泥石流等複合型災害情境。透過調整土砂參數與泥流流變性質，使用者可有效預測土石流可能淹沒範圍、堆積深度與堆積分布(圖 2-12)。此外，FLO-2D 具備圖形介面操作與 GIS 整合功能，使用者可直接匯入地形、土地利用與水文資料，進行多情境模擬與災害風險評估，對於工程師而言具有極高的應用便利性。因此在全球許多國家與地區，FLO-2D 曾被廣泛應用於土石流防災規劃、潛勢區劃設計與河道治理工程中，成為水利與地質災害領域常見的分析工具。

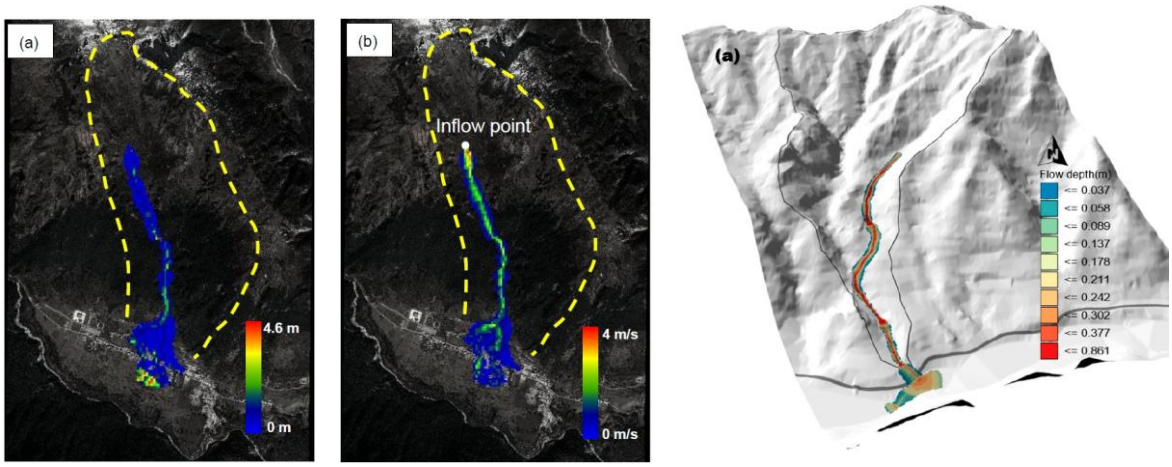


圖 2-12 FLO-2D 模擬案例成果(Oh(2023), Qiu(2024))

5. **模式限制與需注意事項：**FLO-2D 雖為一套功能完整且廣泛應用的二維洪水與土石流模擬工具，但其在應用上仍存在若干限制與使用注意事項。首先，FLO-2D 為商業授權軟體，使用者需購買授權才能使用完整功能，對部分單位可能構成成本門檻。其次，其運算基礎為固定正方形網格，雖利於數值穩定性與結構化運算，但在處理複雜地形邊界(如彎曲河道、地形轉折)時擬合能力有限，可能導致局部解析度不足或形狀誤差。此外，網格解析度將直接影響模擬結果的空間精度與計算時間，高解析度雖可提升模擬細節，但需配合更小的時間步長以維持穩定性，導致整體計算耗時顯著增加。在物理近似方面，FLO-2D 對土石流的模擬主要採二階段計算流程，先模擬水力流動，再以泥砂模組處理濃度、侵蝕與沉積。雖模型可考慮泥流濃度對黏滯性與降伏應力的影響，但泥水兩相並非完全同步耦合，對極高濃度或含有大顆粒(如巨石、漂浮物)的複雜土石流，難以完整捕捉顆粒離散運動與非連續行為。此外，FLO-2D 提供多達 11 種泥砂經驗公式，每一公式適用範圍不同，使用者需具備一定經驗與資料基礎以判斷選用與校準參數，否則可能導致模擬結果差異顯著。FLO-2D 亦不具備內建的山坡崩塌起始模擬功能，即無法自動模擬滑動體的起動與下滑過程。當模擬山坡滑動體(如崩塌、落石)快速湧入河道情境時，需由使用者預先定義成上游邊界條件(如瞬間入流量或物質波峰)，這對於高動能事件的模擬將造成一定限制。另 FLO-2D 與其他模型（如 Debris-2D）不同，FLO-2D 模擬中的流動無法自動停止，除非使用者手動終止計算。由於 FLO-2D 的終止是透過使用者定義的最大計算時間來設定的，因此最終的土石流擴散範圍可能會相差一個數量級。這意味著使用者必須手動設定模擬時間，如此也會顯著影響模擬結果的準確性與客觀性。

6. **支流與主流模擬能力**：FLO-2D 具備良好的支流與主流土砂運移模擬能力，特別適用於涵蓋完整集水區與多條支溝的複雜地形。其採用規則網格覆蓋整個模擬區域，水流與土砂在模擬過程中會依據地形高程自動匯集、擴散與沉積，支流與主流的交會與疊加效應能夠自然呈現，無需使用者額外指定流動路徑。使用者亦可透過設定多個上邊界入流條件，模擬不同支流或源區之來水與土砂量，進而模擬其進入主流後的動力交互影響與堆積行為。此外，為兼顧模擬效率與解析度，FLO-2D 亦提供渠道單元(channel units)功能，可將主要溝谷或主流河道以一維明渠模式處理，此舉可在保持物理準確性的同時大幅提升計算效率，特別適用於山區或縱深長距離的河道模擬。這種混合處理方式使 FLO-2D 相對能靈活應對多支流匯流與主河道下游洪水傳遞等情境，應用於洪氾模擬、土石流匯入與堆積風險評估等工程分析中。

7. **動床(erodible bed)模擬能力**：FLO-2D 在動床模擬方面存在明顯限制，其進階版本雖具備泥砂傳輸模組，可模擬泥砂在流動過程中的輸送與沉積，並能設定最大泥砂濃度與土砂輸送容量，當流體的含砂量未達飽和條件時，模型將啟動簡化的侵蝕機制，代表有限度的溪床沖刷作用。此功能使得 FLO-2D 可呈現局部泥砂捲增與淤積的結果，對災害範圍與堆積厚度的估算有所幫助。然而，FLO-2D 並不具備即時地形更新或高解析沖刷模擬功能，無法模擬流動過程中河床高程的持續變化，也無法描繪土石流對溪床與河岸的切割與深層侵蝕行為。在泥石流啟動階段，如滑體與溪溝之間的強烈交互、底床被快速掘取的過程，FLO-2D 僅能透過參數控制或邊界條件近似呈現，缺乏物理層面的動態耦合。相關研究亦指出，此類侵蝕過程的準確模擬是 FLO-2D 未來需強化的重要方向。其動床模擬能力相較於如

R.avaflow 或 DAN3D 等具專門侵蝕模組的模式仍較為簡化，對需高精度沖刷分析的應用則可能不足。

(六)CAESAR-Lisflood

1. **簡介與開發單位**：CAESAR-Lisflood(或簡稱 CL)是一套結合地形演化與洪水動力學的開源數值模式，屬於景觀演化模型(landscape evolution model, LEM)，專門用來模擬集水區在水流作用下，歷經數十年至數千年時間尺度的侵蝕、泥砂輸送與地貌改變。其特色在於能耦合地貌長期變遷與極端降雨事件對地形的短期衝擊，具備時間與空間雙尺度分析能力。該模型最初由英國赫爾大學(University of Hull)Tom Coulthard 教授領導開發，整合了早期的 CAESAR 地形演化模型與 LISFLOOD-FP 二維淺水方程水動力模組，並於 2013 年前後釋出。目前 CAESAR-Lisflood 採 GPLv3 授權，已全面開源，由全球使用者社群透過 SourceForge 平台持續維護與更新。此模式被廣泛應用於模擬集水區在氣候變遷、極端降雨與人為干擾下的沖蝕淤積分布、河道演化、土砂通量與洪水溢淹行為等地貌與水文過程整合問題。

2. **基本方程式**：CAESAR-Lisflood 模式透過整合其核心元件來模擬地貌演變，其中包括 Lisflood-FP 水動力模型。CL 模型中的水動力流動路徑模組(hydrodynamic flow routing module)是基於 Lisflood-FP 方法，該方法使用基於守恆的淺水方程式慣性公式(conservation-based inertial formulation of the shallow water equations)。如圖 2-13，Lisflood-FP 的核心是一個二維水動力流動模型，其能守恆質量並部分守恆動量。使得模型能夠計算水流深度和速度，並引導流量在數值高程模型網格單元之間流動(Coulthard et al., (2013), Pearson et al., (2020), Ramirez et al., (2020), Ramirez et al., (2022), Li et al., (2023),

Wang et al., (2023), Wolstenholme et al., (2024), Xie et al., (2024))。Lisflood-FP 為一維慣性模型，源自完整的淺水方程式，並在 x 和 y 方向應用以模擬在網格格網上的二維流動。該方法在空間上是二階的，在時間上是一階的，但使用了半隱式處理摩擦項以幫助穩定性。為了計算細胞之間的流量(Q)，使用了方程式(2-16)

$$Q = \frac{q - gh_{flow}\Delta t\frac{\Delta(h+z)}{\Delta x}}{(1+gh_{flow}\Delta tn^2|q|/h_{flow}^{10/3})}\Delta x \quad (2\text{-}16)$$

其中，q 是前一次迭代的細胞間通量(m^2s^{-1})，g 是重力加速度(ms^{-2})，n 是曼寧粗糙係數($m^{1/3}s^{-1}$)，h 是水深(m)，z 是高程(m)，h_{flow} 是細胞之間的最大水流深度，x 是網格細胞寬度(m)，而 t 是時間(s)。在確定了細胞周緣四個邊界的流量後，細胞水深 h 使用式(2-17)進行更新：

$$\frac{\Delta h^{i,j}}{\Delta t} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x^2} \quad (2\text{-}17)$$

此處 i 和 j 是細胞坐標。Lisflood-FP 公式化的最後一部分是時間步長 t，其受淺水 CFL 條件控制，

$$\Delta t_{max} = \alpha\frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \quad (2\text{-}18)$$

式(2-18)中，α 是一個係數，通常定義在 0.3 到 0.7 之間。這個係數增強了模型的穩健性，因為 CFL 條件對於非線性系統而言是必要而非充分的穩定條件。如式(2-18)所示，這受到網格細胞大小和水深的強烈影響。然而，Lisflood-FP 流動模型存在局限性。其為一個簡單的儲存單元流動模型，雖然包含慣性，但這僅限於單個細胞的基礎性質。因此，它無法模擬例如水流被偏轉到曲流外側等完整二維解才能確定的效果。此外，正如 Bates et al., (2010)和 Neal et al., (2012)所指出的，該流動模型應僅在亞臨界流條件和漸變流下應用。在地貌模型中，流域的某些區域水流會流經陡峭的地形，且水深較淺。在這些

區域，亞臨界流假設不太可能成立，因此 CAESAR-Lisflood 的結果只能被視為問題的初步近似值。

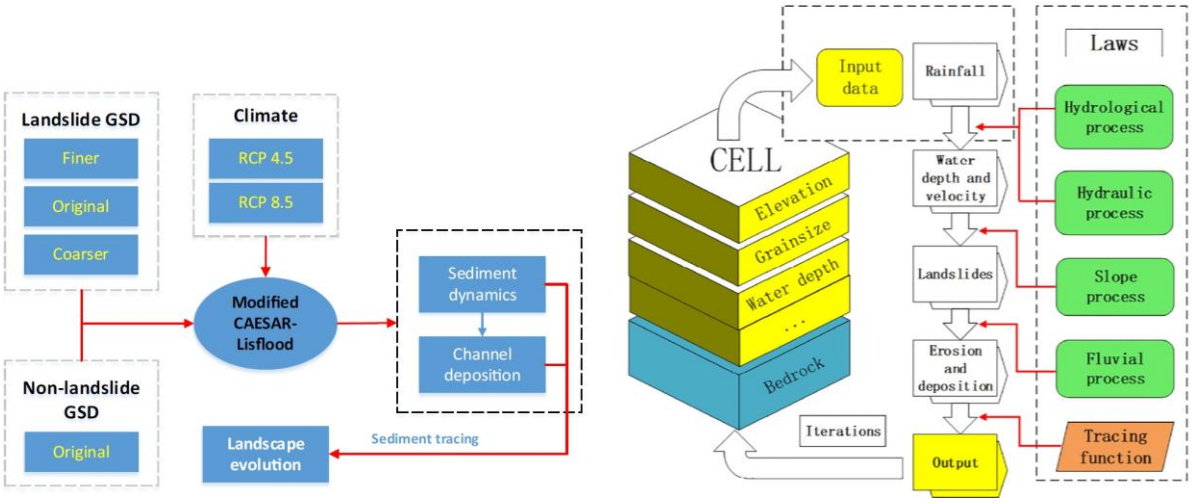


圖 2-13 CAESAR-Lisflood 模式模擬流程圖(Xie (2024))

3. **模式所需參數：**CAESAR-Lisflood 模型在進行河川地貌演化與土砂動力模擬時，需輸入多項地形、水文與地質參數，這些資料對模擬準確性與時空尺度的掌握具有關鍵影響。首先，模型需要一套高解析度的數值高程模型作為初始地形基礎，並可包含初始河道寬度與深度等資訊。其次，水文氣候資料方面，使用者需提供降雨量或流量的時間序列資料，可為歷史實測、合成暴雨歷線，甚至長達數十年以上的年序列輸入，以支援短期暴雨模擬與長期氣候變遷情境下的地貌演化分析。在地表材料屬性方面，模型需設定不同粒徑級別(從黏土、砂礫至卵石)的空間分佈與比例，這些數據將影響泥砂侵蝕、搬運與沉積過程。此外，亦需輸入泥砂比重與選擇適當的泥砂運移公式，用以描述不同流況下的搬運模式。水流阻力部分則可採用曼寧糙率(Manning's n)或 Darcy-Weisbach f 等水力粗糙係數來控制流速與能量損耗。若模擬區域包含崩塌風險地形，模型亦允許設定土壤內摩擦角或臨界坡度，以啟動淺層崩塌模組。此外，對於進行長期模擬的情境，CAESAR-Lisflood 亦支援設定地殼抬升率或海平面變化速率，

以反映構造變動或基準面變化對地貌演化的影響。若時序資料不足或分析目標為區域長期變化，亦可採用年平均降雨值或事件統計降雨來簡化水文輸入，提升運算效率。總結 CAESAR-Lisflood 模式提供高彈性參數設定，適合模擬集水區在各種氣候與地形條件下的地貌與土砂變遷過程。

4. **模式適用性**：CAESAR-Lisflood 適用於處理從短期洪水事件到數百年、甚至數千年的河川與流域地貌演化問題。其獨特之處在於可同時模擬短期水流動力(透過 Lisflood 模組)與長期地貌演化(透過 CAESAR 模組)，因此能處理多尺度、跨時空的沖淤變遷與河道演化問題。這使得該模型非常適合用於研究氣候變遷、土地利用變遷、大型工程設施(如水庫、攔砂壩)對河川地形與土砂輸出的長期影響。在山區集水區應用方面，CAESAR-Lisflood 能有效模擬高能量環境下的沖刷與淤積過程(圖 2-14)，例如森林砍伐對坡面與河道泥砂供應的影響、土石流後泥砂輸出的變遷，以及大型漂流木堵塞所造成的水沙調節作用等。此外，該模型亦被廣泛應用於模擬河流改道、人工整治工程對地貌反應的評估與未來泥砂產量的預測等課題。實務案例顯示，無論在單一洪水事件中局部河床高程變化的解析，或是在評估長期構造與氣候驅動下的景觀演化趨勢，CAESAR-Lisflood 都展現出適用性與可靠性，特別適合山區集水區動態河川系統的研究與管理規劃。

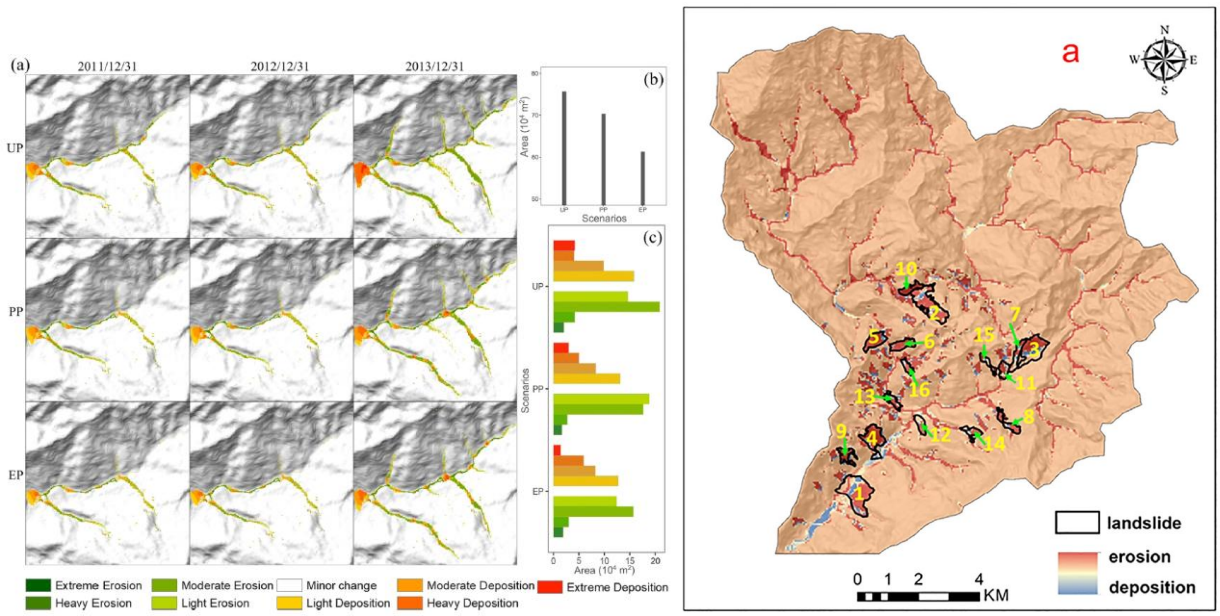


圖 2-14 CAESAR-Lisflood 模擬案例成果(Wang(2023), Xie (2024))

5. **模式限制與需注意事項：**CAESAR-Lisflood 在實際應用上亦有若干限制與需注意事項。首先，其核心設計針對的是中長期尺度的沖蝕與輸砂演化，並不適用於模擬單一、快速發生的土石流事件。模型的時間步長一般為小時至每日級距，無法解析土石流、崩塌或極短時間內高能流體所產生的秒級動力行為。此外，其物理基礎主要採用慣性淺水近似(inertial shallow water approximation)，對於極短波長、急陡河道中可能出現的高頻水力變化存在一定誤差。在泥砂模擬方面，模型以河床牽引式輸砂為主，適用於細砂至中礫級別的河川條件；但對於具有巨石滾動、塊體滑移或泥石流推移等粗粒主導的坡溪環境，物理機制未能充分涵蓋，需使用者特別小心進行參數校驗與模擬結果詮釋。再者，河岸侵蝕的處理方式亦較為簡化，通常採超過臨界剪應力後將岸格移除，可能無法完整反映彎道展寬或側向侵蝕等河道調整過程。在運算效率上，儘管 CAESAR-Lisflood 相對於全 Navier-Stokes 模型具有較高效能，並已支援多核心並行計算加速，但若針對大面積流域使用細網格進行長期模擬，計算資源需求仍相當可觀。再者，模型對輸入的泥砂粒徑分佈與水文條件敏感度高，若初始條件

或參數不完整，特別是在資料不足的區域，將顯著影響模擬的可信度與結果解釋的科學性。因此，在應用 CAESAR-Lisflood 進行山區河川與地貌模擬時，建議使用者詳實廣泛地蒐集水文與地質資料，並搭配實地調查與多組參數測試，以提高模擬成果的可信度與解釋力。

6. **支流與主流模擬能力**：CAESAR-Lisflood 在模擬支流與主流間的土砂匯流與交互影響方面具備高度能力，這也是其具代表性的核心功能之一。該模式設計之初即針對全流域尺度進行開發，能夠全面模擬複雜河網系統中，各支流與主流之間的水沙傳遞、匯流過程與交會反應。降雨會在流域中各地產生逕流，並依據 DEM 網格高程沿支流至主河道自然匯集，泥砂亦隨著水流進行搬運，並在網絡節點處動態交匯與沉積。更進一步地說，CAESAR-Lisflood 可模擬河道寬度與深度的時間變化，根據沖淤條件出現分叉與淤高等自然演化行為，對於多股河道(braided river)的模擬也具一定解析能力。這使得其特別適合應用於山區多支流的集水區中，能有效捕捉主、支流之間的泥砂互制關係與整體輸出變化。整體而言，CAESAR-Lisflood 不僅具備模擬全流域降雨逕流與水力傳輸的能力，也能反映不同支流輸砂對主河道輸出的影響，是進行集水區長期土砂動態分析的理想工具。

7. **動床(erodible bed)模擬能力**：CAESAR-Lisflood 在模擬土石流對溪流底床的侵蝕與堆積效應方面具高度適用性。該模式能於每一時間步自動更新各格網的地形高程，動態反映因水流侵蝕、土砂搬運與沉積所導致的高程變化。這使得模型不僅能模擬垂向沖刷與堆積，也能處理如側蝕、崩岸與河道遷移等地貌變遷行為。在模擬時間上，CAESAR-Lisflood 可涵蓋從單一洪水事件造成的瞬時地形變化，到長達數十年至百年以上的地貌演化過程。例如已有研究利用該模式成功重建過去兩百年內的河道淤積與洪氾痕跡，並延伸預測未來五

十年可能的河床變化趨勢。模型具備多粒徑泥砂組成模擬功能，可反映粒徑分選與遷移過程，如細顆粒被沖走、粗粒殘留在河床形成覆蓋層(armor layer)等現象，進一步提升模擬物理真實性。

(七)OpenLISEM

1. **簡介與開發單位：**OpenLISEM 是一套開源、基於物理的地理資訊系統模式，專門設計來模擬降雨事件期間，集水區內的水文反應與土壤沖蝕過程。原始模型名稱「LISEM」來自荷蘭 Limburg 區域開發的土壤沖蝕模型，後續發展為現今的 OpenLISEM，由荷蘭瓦赫寧恩大學(Wageningen University)、烏特勒支大學(Utrecht University/ITC)與國際熱帶農業中心(CIAT)等機構合作開發，並由 Victor Jetten 教授等人持續維護與擴充。OpenLISEM 強調模擬單一暴雨事件下的短期動態反應，涵蓋逕流形成、土壤侵蝕、沉積、地表蓄水與小尺度崩塌等多項過程。模型運行於 GIS 網格架構上，能直接讀取遙測資料與土壤地圖，整合性強，易於應用於資料基礎較好的地區。近年來，OpenLISEM 已擴充成支援多災種的「OpenLISEM Hazard」框架，新增滑坡、土石流等模組，使其可同時模擬洪峰、崩塌與土砂災害的交互作用。由於模型結構開放、計算效率高且便於區域應用，在熱帶山區（如印尼）與地中海地區等暴雨強度高、地表敏感的環境中，受到研究與實務單位的廣泛採用。

2. **基本方程式：**OpenLISEM 模型整合了水文、坡地崩塌及土石流的模擬(De Roo & Offermans (1995), Stolte et al. (2003), Barros et al. (2014), Ferket et al. (2014), Bout et al. (2018), De Vugt (2018), Xiao (2020), Barros et al. (2021))，模擬架構流程圖如圖 2-15 所示。模型中的地表漫流計算基於完整的淺水 Saint-Venant 方程式，包含連續方程式(質量守恆)以及 x、y 方向的動量方程式如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(hu_x)}{\partial x}+\frac{\partial(hu_y)}{\partial y}=R-1 \quad (2\text{-}19)$$

$$\frac{\partial hu_x}{\partial t}+\frac{\partial(hu_x^2)}{\partial x}+\frac{\partial(hu_xu_y)}{\partial y}=gh(S_x-S_{f,x}) \quad (2\text{-}20)$$

$$\frac{\partial hu_y}{\partial t}+\frac{\partial(hu_y^2)}{\partial y}+\frac{\partial(hu_xu_y)}{\partial x}=gh(S_y-S_{f,y}) \quad (2\text{-}21)$$

$$S_x=-\frac{d(\frac{gh^2}{2})}{dx}-gh(S_{fx}) \quad (2\text{-}22)$$

$$S_y=-\frac{d(\frac{gh^2}{2})}{dy}-gh(S_{fy}) \quad (2\text{-}23)$$

$$S_f=\frac{g}{n^2}\frac{\vec{u}\left|\vec{u}\right|}{h^{4/3}} \quad (2\text{-}24)$$

上列諸式中，h：水流深度(m)、u：水流速度(ms^{-1})、t：時間、R：降雨量(m)、I：入滲量(m)、g：重力加速度(ms^{-2})、S_f：摩擦坡降項(ms^{-2})、S：動量源項 (ms^{-2})、n：曼寧糙度係數(s m$^{-1/3}$)。而坡地穩定性方程式 (Infinite-Slope Method)模型採用無限邊坡法來評估坡地穩定性，其核心是計算安全係數(Factor of Safety, SF)。當安全係數小於 1 時，坡體即判定為不穩定。另在土石流方程式(Two-Phase Debris Flow Equations)為了模擬洪水和非均勻土石流的流動態與交互作用，模型導入 Pudasaini (2012)提出的兩相流方程式。這組方程式可處理從非黏性流、高含砂流到土石流的平滑過渡。在特定網格滿足失穩條件時，以設定的起始厚度啟動滑坡，隨後依據二相流動力在格網中流動。OpenLISEM 使用材料點法(MPM)實現固體塊體在流動中結構破裂、流體釋放等複雜行為，其餘模式理論可詳見 Bout et al.,(2018)。

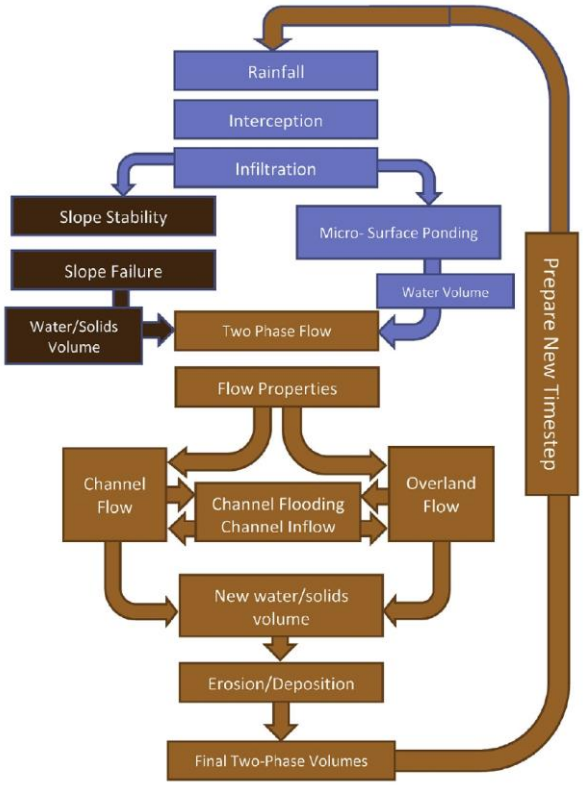


圖 2-15 OpenLISEM 模式模擬流程圖(Bout(2018))

3. 模式所需參數：OpenLISEM 模式屬於空間顯式、物理基礎的事件尺度集水區模擬工具，其模擬效能高度依賴輸入參數的完整性與解析度。首先，高解析度的數值高程模型為必要輸入，因為地形坡度與微地形起伏直接影響地表逕流的集聚與流向，並控制滑坡誘發與泥砂動態。地表條件部分則須輸入土地利用圖與土壤圖層，以便設定不同類型地表的水文、力學與沖蝕參數(如圖 2-16)。在水文參數方面，模型可接受來自雨量計或氣象雷達的降雨歷線資料，作為暴雨驅動力。入滲參數如飽和水力傳導度、田間含水量、孔隙率與初始含水量則為地表蓄水與下滲模組所需，並與土壤水力屬性密切相關。此外，雨滴動能參數(由雨強推估)也會影響對地表的侵蝕強度。土壤沖蝕與地表水力阻力則透過曼寧粗糙係數、土壤可蝕性指數(K 值)與覆蓋類型(如植被遮蔽與截留)加以設定。土地覆蓋圖可進一步提供植被根系強化土壤強度的資訊，間接影響斜坡穩定性。對於整合土石流或滑坡模

擬的「Hazard 模組」，還需額外輸入滑坡潛勢圖層，內容涵蓋潛在滑體厚度、黏聚力、內摩擦角與孔隙壓力參數等，供斜坡穩定與滑動啟動條件判斷使用。此外，若模擬土石流事件，需提供流變參數，例如黏度、固液比與體積濃度等。若模擬孔隙壓力衰散過程，則需孔隙壓力消散係數等特定物理參數。綜合觀之，OpenLISEM 需輸入參數眾多，但多數可由實測、遙測資料或文獻提供之標準範圍獲得作為建模初期的參考依據。

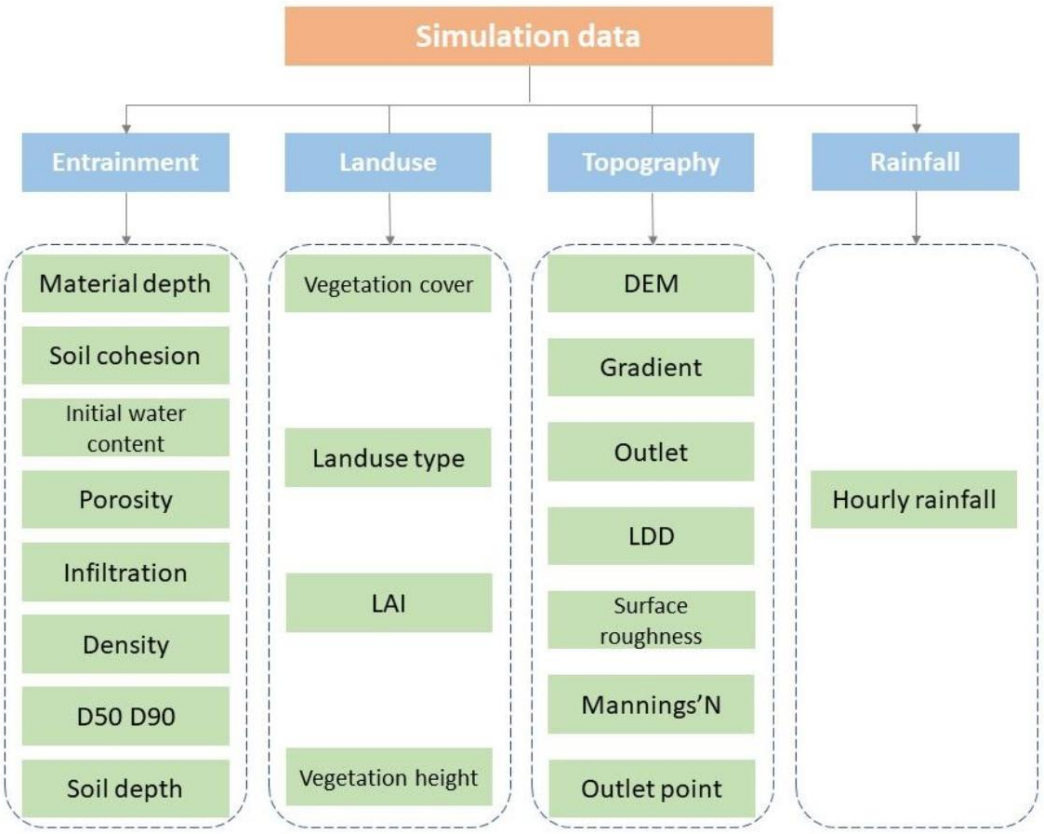


圖 2-16 OpenLISEM 模式所需參數(Xiao(2020))

4. **模式適用性：**OpenLISEM 模式適用於分析單一強降雨事件所引發的洪水與泥砂災害，其設計理念即以事件尺度風險評估為主軸。該模式可模擬降雨後從坡面產流、土壤沖蝕，到溝道泥石流與下游洪峰形成的完整災害過程，並將上述流程整合在同一計算框架中運行，對於坡地與河道連動型災害具備適用性。在應用層面，OpenLISEM 適合運用於山區小流域的模擬，能有效預測洪峰流量與輸砂量。實務上，該

模式已於印尼與中國四川等地進行案例校驗(圖 2-17)，顯示其對於高能量暴雨條件下的地表反應具有良好的再現能力。此外，OpenLISEM 亦適用於城鄉交界地區的暴雨模擬，如曾結合區域氣象模式(WRF)成功應用於非洲烏干達首都 Kampala 的短時強降雨淹水預測。OpenLISEM 最新版本已整合淺層滑動模組，擴大其對山坡地災害模擬的適用範圍，使其能涵蓋滑坡誘發、地表潰決與泥石流湧入等過程。整體而言，OpenLISEM 也適合應用於需要短時間內做出快速情境模擬的情境，為山區洪水、土石流與土壤侵蝕等天然災害提供預警與風險評估。

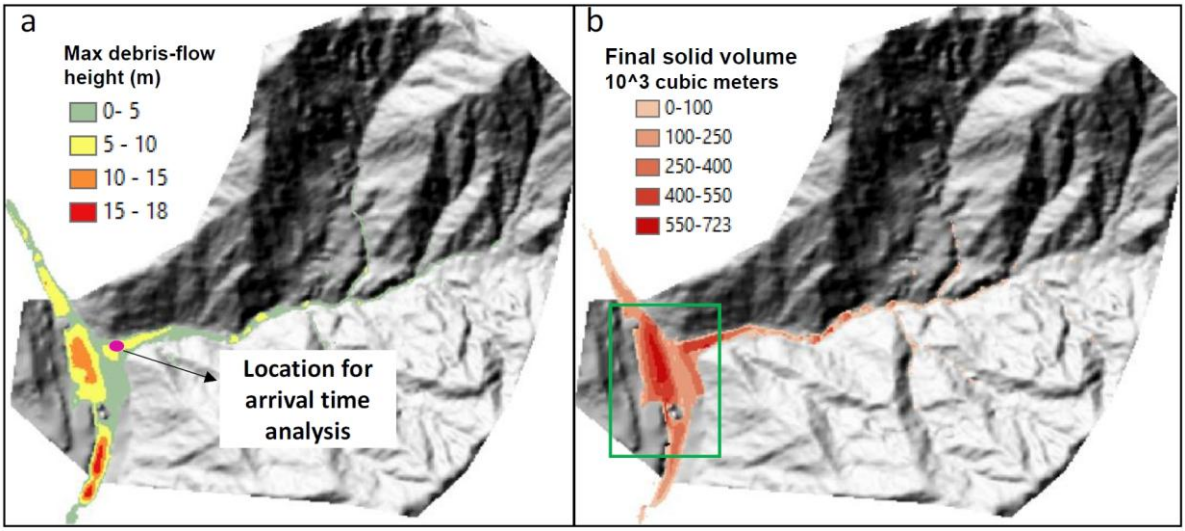


圖 2-17 OpenLISEM 模擬案例成果(Xiao(2020))

5. 模式限制與需注意事項：OpenLISEM 雖能精細描繪暴雨過程中坡面侵蝕、滑動與泥砂傳輸，但在應用上亦存在若干限制與需注意事項。該模式屬於單次事件模型，模擬結束後不會將地形變化結果(如沖刷、堆積)累積至下一事件，導致無法連續追蹤長期地貌演變。若需模擬多年或數十年的地形變遷，通常須與如 LAPSUS 等長期景觀演化模式結合運用。再者，OpenLISEM 為高度參數化模型，涵蓋大量空間變數與物理參數，如土壤、降雨、土地利用、滑動材料等。這雖提供高度模擬彈性，但也導致參數不確定性高與校準難度大。在實務應用

中，常見多組不同參數組合皆能擬合觀測結果的情形(即參數補償效應)，這可能影響結果可解釋性與模擬穩定性。另外，OpenLISEM 的模擬結果對輸入資料的解析度相當敏感。若 DEM 資料解析度過低，將無法準確捕捉細部坡向與匯流路徑，影響逕流與侵蝕計算結果；若降雨資料時空分辨率不夠，也會低估極端暴雨下的瞬時反應。至於其 Hazard 模組雖已擴充至滑坡模擬，能處理淺層滑動與滑塊運移，但對於大型深層崩塌或高動能土石流的模擬能力仍有限，目前仍處於實驗階段，若需進行大規模崩塌的物理模擬，則建議搭配顆粒法或高階流變模型進行補充分析。

6. **支流與主流模擬能力：**OpenLISEM 的核心優勢在於其能完整模擬支流與主流間的水沙耦合與匯流過程。作為一套基於格網的分散式集水區模型，OpenLISEM 可在空間上逐格計算逕流、侵蝕與泥砂傳輸，並自動將每個格網單元的逕流與泥沙輸出向下游鄰格傳遞。在河網交匯處，水量與砂量將自然疊加，因此本質上即內建了支流與主流互制模擬能力，無需額外建構分支結構或管網模型。OpenLISEM 的 Hazard 模組允許同時設定多個滑坡源點或泥流觸發區，這些來自支溝的泥砂流可沿逕流路徑進入主河道，形成多股水砂交會的疊加現象。例如 Van den Bout 等人針對義大利 Scaletta 流域進行的研究中，成功模擬出來自 395 處淺層滑坡的泥砂流匯入主溪後集結成大規模泥石流的過程，展現出 OpenLISEM 在處理多源頭、多支流泥砂彙流時的模擬能力與物理合理性。OpenLISEM 不僅支援在地形控制下的分支集水路徑運算，也具備描述滑體從坡面流入溝道、再至主流集結的連續過程，適用於評估山區多源性泥砂災害的發生條件與可能範圍。此優勢使其成為全集水區整體水砂風險評估情境模擬的重要工具。

7. **動床(erodible bed)模擬能力**：OpenLISEM 具備相當完整的動床模擬能力。在事件模擬期間，模型可針對每一個格網動態計算地表與河道的侵蝕與沉積過程，並根據局部水動力條件與泥砂濃度狀態調整土砂的運移行為。於坡面區，若降雨產生的侵蝕量超過流體的輸送能力，泥沙會立即在當地沉積；若未達上限則持續向下游遞移。對於河道網格，當局部流速下降或運移能力不足時，OpenLISEM 會將多餘的泥砂沉積於當前網格內，反映自然中常見的減勢沉積現象。在土石流模擬方面，OpenLISEM 的 Hazard 模組支援泥流流體對沿程地表的再侵蝕行為，能模擬滑流於山坡或溝谷中攜帶鬆動物質，增加其體積與能量，並在流末形成扇形沉積區。該功能已被多篇案例研究驗證，例如成功重現泥石流從山谷出口沖出後，在坡趾扇狀堆積的地貌特徵，顯示其對複雜土砂運移過程具備良好回溯能力。值得注意的是，雖然模型可於事件內即時計算侵蝕與沉積，但不會即時修改 DEM 地形資料進行回饋模擬。換言之，OpenLISEM 所記錄的是事件過程中每格的土壤厚度變化量，而非直接更新高程。因此若進行跨事件的連續模擬，需由使用者將模擬結果中的淤積／沖刷資料手動加總更新地形後，需再進行下一事件模擬。整體而言，OpenLISEM 在事件尺度內已具備動床模擬所需的水動力-土砂耦合功能，對於坡面沖蝕、泥砂輸移、河道堆積與泥石流堵谷等地形動態均能提供有效分析，為暴雨災害情境評估與地貌回溯研究提供了可靠的模擬平台。

(八)不安定土砂運移模式歸納建議

綜合前述七種數值模式後，本計畫整理如表 2-3，統整七種數值模式在(1)適用性；(2)支援多相流；(3)支援主支流土砂互制模擬；(4)支援動床模擬；(5)參數取得難易度；(6)限制與注意事項；(7)開源/付費等功能的比較。若以針對土石流與不安定土砂等快速質量移動動力學

分析為目標，且能直接考慮多個土砂料源的初始土砂釋放情境，並綜合考量多點源降雨水文輸入能力、取得費用(開源)、模擬效率與防災單位操作推廣性，本節所盤點的七個模式，以下三個是未來後續計畫建議可嘗試評估的不安定土砂運移模式選擇(圖 2-18)：

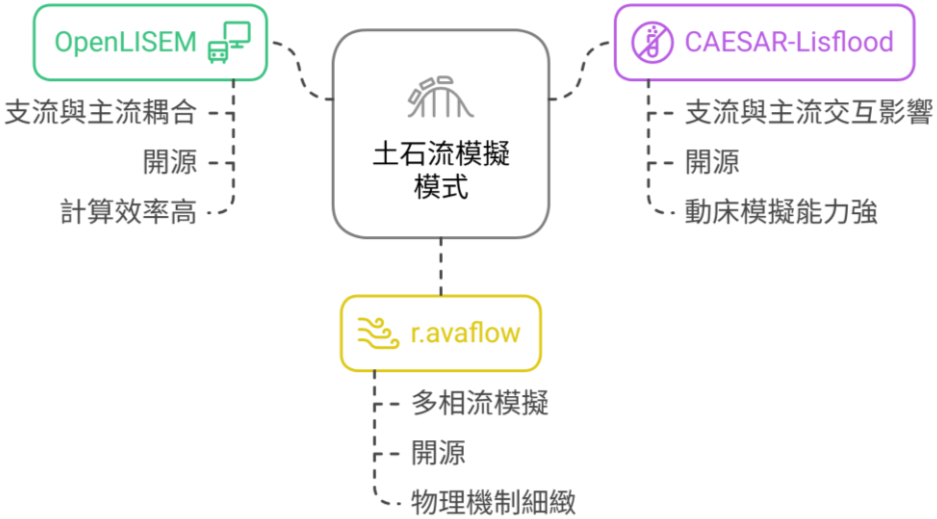


圖 2-18 不安定土砂運移模擬模式推薦選項

1. **OpenLISEM**：模式功能與文獻回顧中明確指出其核心優勢在於能「完整模擬支流與主流間的水沙耦合與匯流過程」。且為一套開源、基於 GIS 的模式，整合性強且易於應用，較適合防災單位推廣。模式可以直接接受降雨歷線資料，模擬從降雨、逕流、崩塌到土石流的完整災害鏈。同時，其計算效率高，具備完整的動床模擬能力，能處理多點源災害，整體功能最為全面且均衡。

2. **CAESAR-Lisflood**：此模式在模擬「支流與主流間的土砂匯流與交互影響方面具備高度能力」。同樣為開源軟體，並且核心功能就是模擬全流域尺度的地貌演化與水砂運移，可以直接輸入流量時間序列資料。其動床模擬能力非常出色，能即時更新地形高程。雖然其設計更偏向中長期地貌演化，對於單一暴雨事件的計算效率可能不如

OpenLISEM，但其在集水區整體土砂通量評估上的物理基礎較為紮實，為進行流域尺度研究的理想工具。

3. **r.avaflow**：此模式同樣為開源軟體，且支援多相流模擬，物理機制更為細緻 。在主支流模擬方面，只要 DEM 完整，便能模擬土石流從支流匯入主流的過程。 r.avaflow 也具備動床侵蝕的核心功能。雖然報告指出其「計算成本時間相對較高」，但其優勢在於對土石流動力學的完整描述，特別是當需要精準分析多相流行為時，此模式是重要的考慮選項。

表 2-3 集水區不安定土砂運移模式彙整表

模式名稱	適用性	支援多相流	支援主支流土砂互制模擬	支援動床模擬	參數取得難易度	限制與注意事項	開源/商業
R.avaflow	山區崩塌、土石流、雪崩	○ (二相模式)	○	○	中高	運算成本高、參數需耦合	部分開源 (需授權)
MassMov2D	坡地泥石流運移	X (單相近似)	△	△	中	不含觸發、無動床耦合	開源
DAN3D	大型山崩與滑坡災害模擬	X (等效流體)	○	○	高	無預測觸發、需大量反演	商業軟體
DualSPHysics	局部泥流、小尺度精細模擬	△ (需轉換)	△	△	高	需 GPU 且參數多	開源
FLO-2D	洪水與土石流	△ (部分限制)	○	X	中	計算量大、泥沙模式簡化	商業軟體
CAESAR-Lisflood	河道形態長期演變與輸沙	○ (土石流:二相模式)	○	○	中	不適單一泥流事件、需長時資料	開源
OpenLISEM	單次暴雨誘發土石流與洪水	○ (二相模式)	○	○	中高	參數補償效應、未即時回饋地形	開源
符號說明: ○(優良)、△(部分限制)、X(無法滿足)							

第二節 四處不安定土砂集水區於不同降雨情境數值模擬

近年來台灣接連遭受 2023 年卡努颱風、2024 年花蓮 0403 強烈地震，接著遭受 7 月凱米颱風、10 月山陀兒颱風、10 月康芮颱風多個颱風侵襲，造成各地災害產生，其中凱米颱風與康芮颱風對於花東山區與高屏山區產生多處嚴重災情，山陀兒颱風也造成台東縣在多起土石流災情，團隊蒐集全台歷年山崩目錄來建構重大土砂災害事件清單，並藉由現地勘查、新聞報導與航遙測影像...等多種方法綜合評估各集水區災害規模與二次致災風險。

團隊利用農村水保署協助申請之高精度數值地形，進行多時期數值地形地形變異分析，掌握近 10 年來集水區邊坡崩塌分布與規模量體，有效補足山崩目錄中缺乏的量體資訊，另針對河道範圍進行條帶狀剖面(Swath profile) 分析上中下游河段的沖淤趨勢(圖 2-19)，條帶狀剖面係針對河道中線向左右各取固定帶寬（width），對該帶寬內所有像素值做取樣統計，並繪出沿線統計值，不同於傳統縱剖面只看單一線上像素值容易受極值影響，條帶狀剖面是把橫向河床 2D 地形訊息濃縮成 1D 帶狀統計曲線，可以更有效的統計各河段的沖淤變化(Pérez-Peña et al., 2017，謝有忠，2016)。

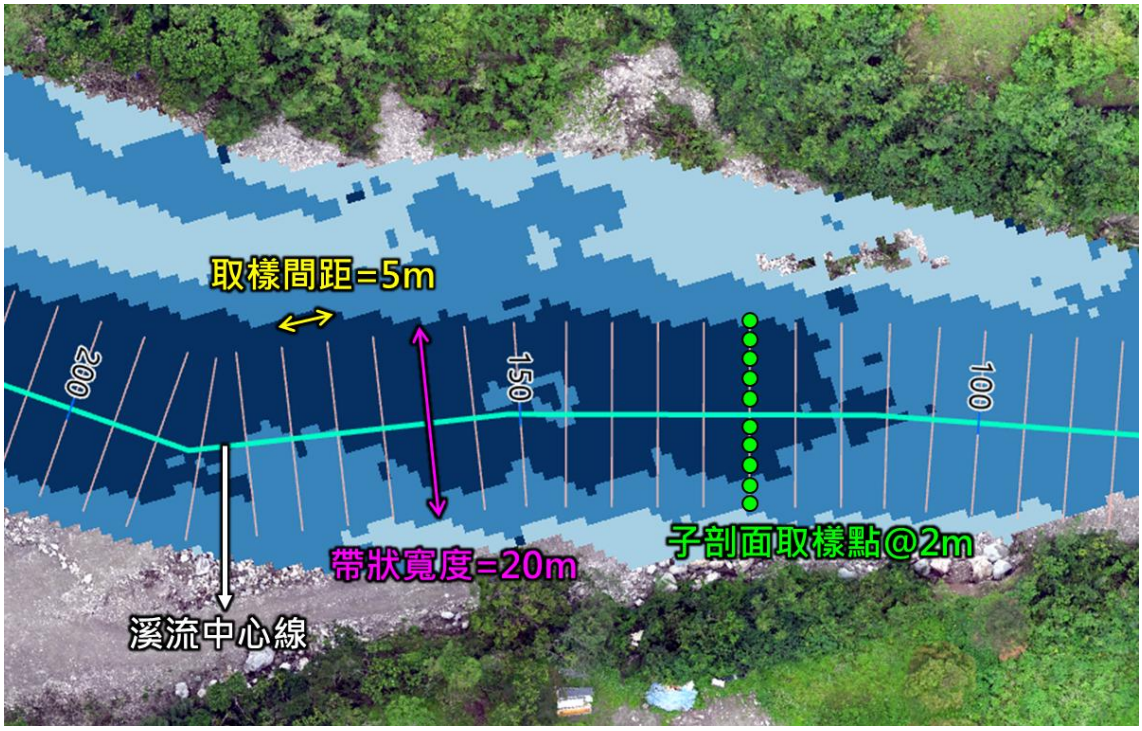


圖 2-19 河道條帶狀剖面分析示意圖-三棧南溪為例

經團隊提報與工作會議討論後，今年度選定台東縣卑南鄉的木瓜溪 (東縣 DF059)、及花蓮縣秀林鄉的大清水溪(花縣 DF024)、和仁野溪(花縣 DF025)與三棧南溪(花縣 DF174)，此四處集水區作為本案不安定土砂集水區影響評估對象，進行 200、350、500、650、900mm 與氣候變遷下極端降雨情境下，將降雨逕流將殘坡與河道堆積物轉化為土石流，模擬不安定土砂運移衝擊影響範圍，以下針對四處集水區進行基本資料說明。

一、集水區基本資料概述

(一) 台東縣卑南鄉木瓜溪(東縣DF059)

木瓜溪位於台東縣卑南鄉知本溫泉旁邊(圖 2-20)，為知本溪的支流，主流長約 4.1 公里，縱坡高差約 1,100 公尺，集水區面積 510 公頃，源頭區主要岩性為板岩夾變質砂岩，中游則為板岩夾硬頁岩互層，下游則為知本溪河階地。

木瓜溪集水區內只有一條土石流潛勢溪流(東縣 DF059)，並無潛在

大規模崩塌(圖 2-21)，木瓜溪集水區在 2017 年間發生數處坡面崩塌，崩塌面積約 4.3 公頃，而從 2010 年至 2023 年間的地形變異分析圖來看變異集中於歷史崩塌處與蝕溝內(圖 2-22)，坡面崩塌深度普遍介於 3~9 公尺，河床地形變異分析(圖 2-23)中可見主要淤積區在鎮樂橋上防砂壩，淤積約 3~5 公尺，中下游河道則無明顯土砂淤積情形，初步研判 2017 年崩塌量體無明顯下移。木瓜溪集水區主要保全對象有民宅 5 戶以上、東 58 鄉道、鎮樂橋與千歲橋，鎮樂橋上下游側皆有防砂壩與潛壩，下游河道則有系列固床工與跌水工(圖 2-24)。

然而 2024 年山陀兒颱風帶來近 1,500 毫米的降雨量(圖 2-25)，使得木瓜溪源頭區發生多處崩塌(圖 2-26)，崩塌面積總計約 10.67 公頃，換算集水區崩塌率約 2.1%，且崩塌範圍與 2017 年山崩目錄高度重疊，屬於舊崩塌復發。大量崩積土砂伴隨降雨逕流形成土石流，中游鎮樂橋的大樑遭土石流衝擊嚴重受損，下游 194 縣道的千歲橋也慘遭溢淹，使得知本溫泉區聯外交通受阻(圖 2-27)，災後衛星顯示下游河道大幅淤積並有部分河段溢淹兩岸農田之跡象，匯流口亦有土石流沖積扇堆積，然而中下游河道仍有大量土砂淤積且已無囚砂空間，仍有土砂下移致災風險。

木瓜溪集水區內無農村水保署判釋之殘坡，但有地礦中心環境地質圖的多處老山崩與 1 處順向坡(圖 2-28)，顯示集水區內地質條件不佳，顯示集水區內地質條件不佳，且山陀兒颱風崩塌地集中於源頭區老山崩範圍內，未來土砂災害風險仍高，建議持續關注。

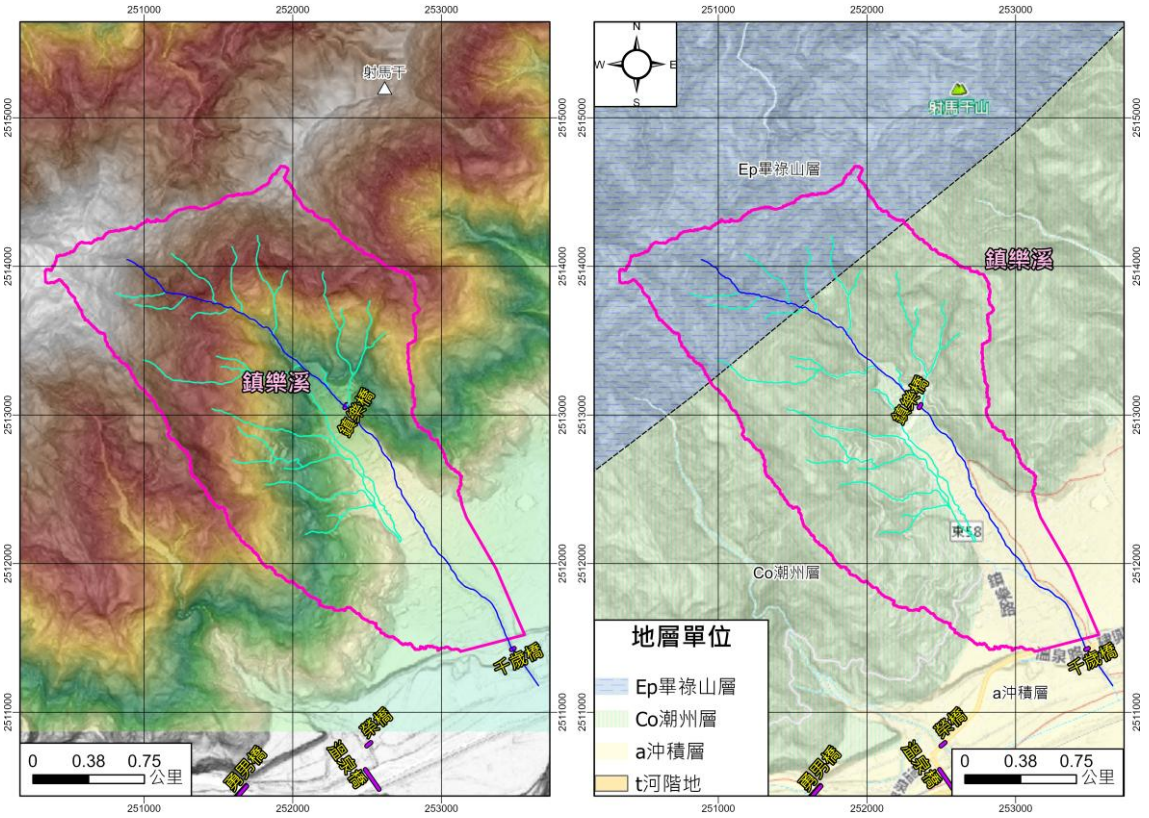


圖 2-20 木瓜溪(東縣 DF059)集水區地形圖與地質圖

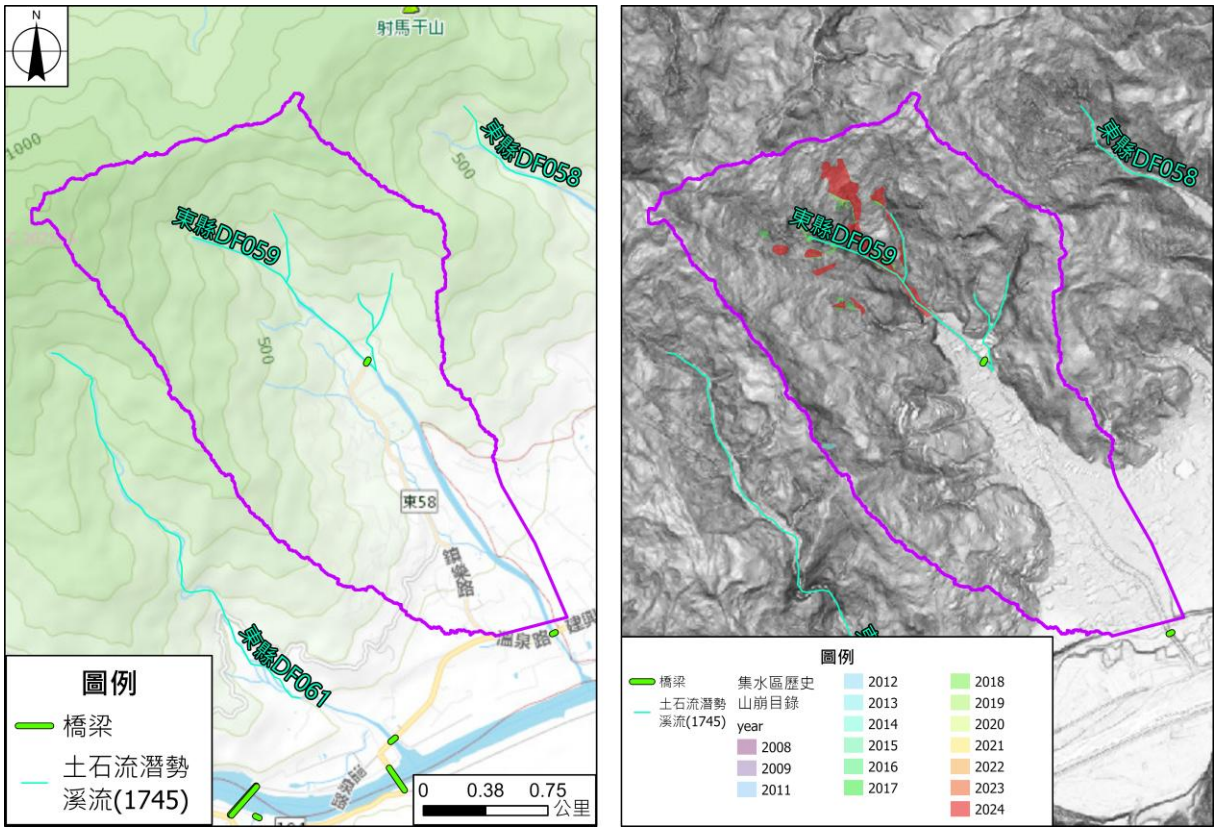


圖 2-21 木瓜溪(東縣 DF059)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布

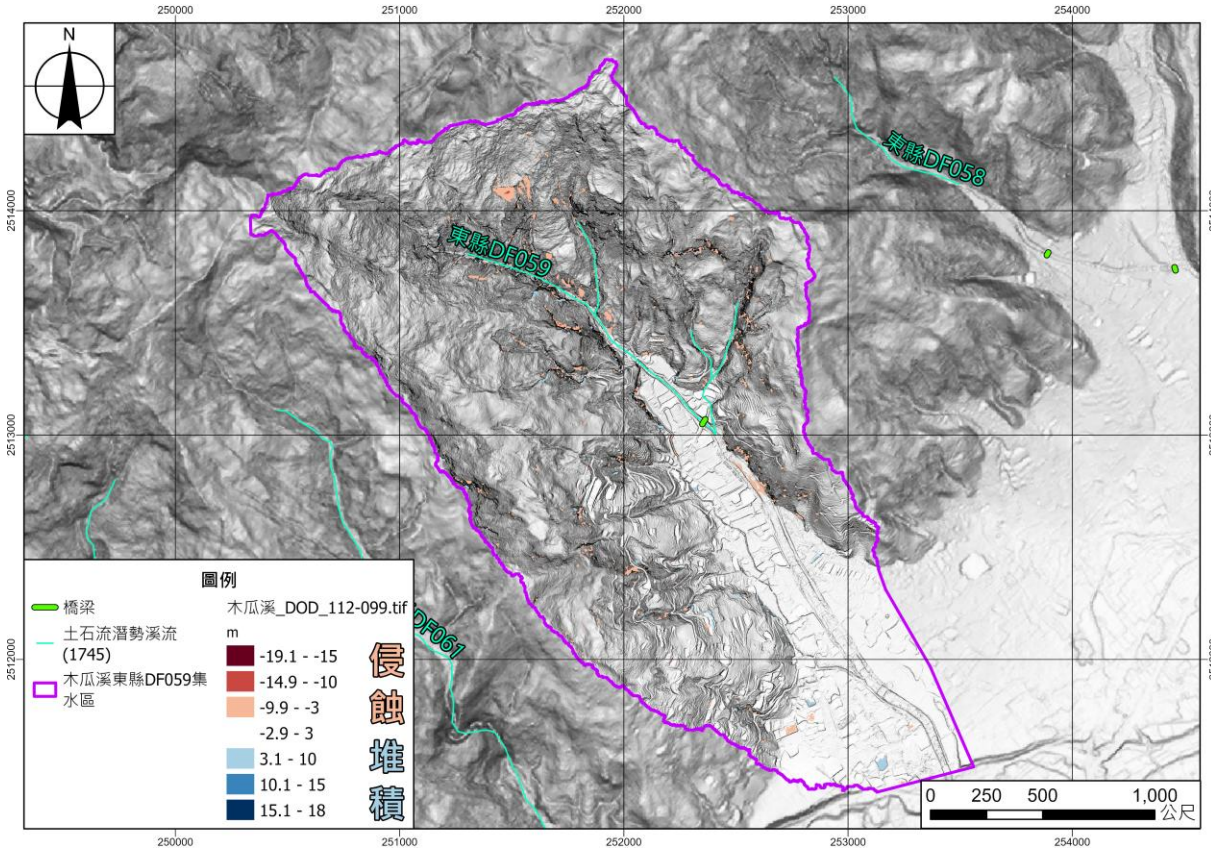


圖 2-22 木瓜溪(東縣 DF059)集水區地形變異分析(2010~2023)

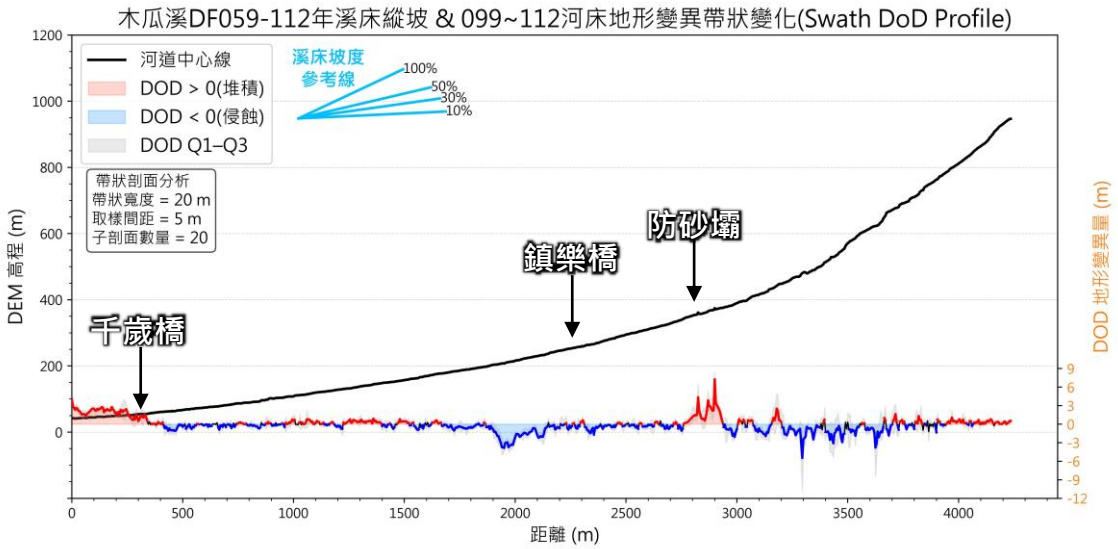


圖 2-23 木瓜溪(東縣 DF059)河床地形變異帶狀分析(2010~2023)

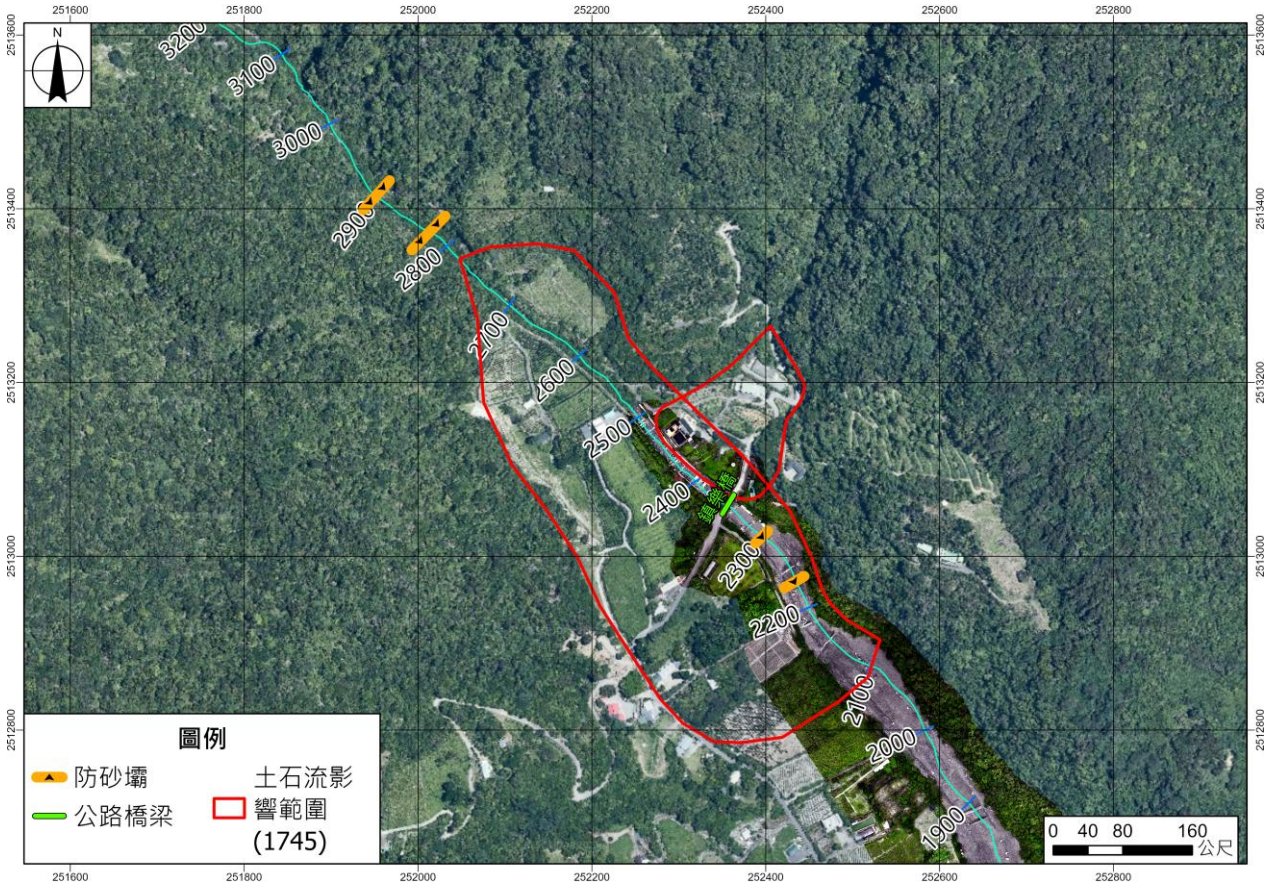


圖 2-24 木瓜溪(東縣 DF059)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布

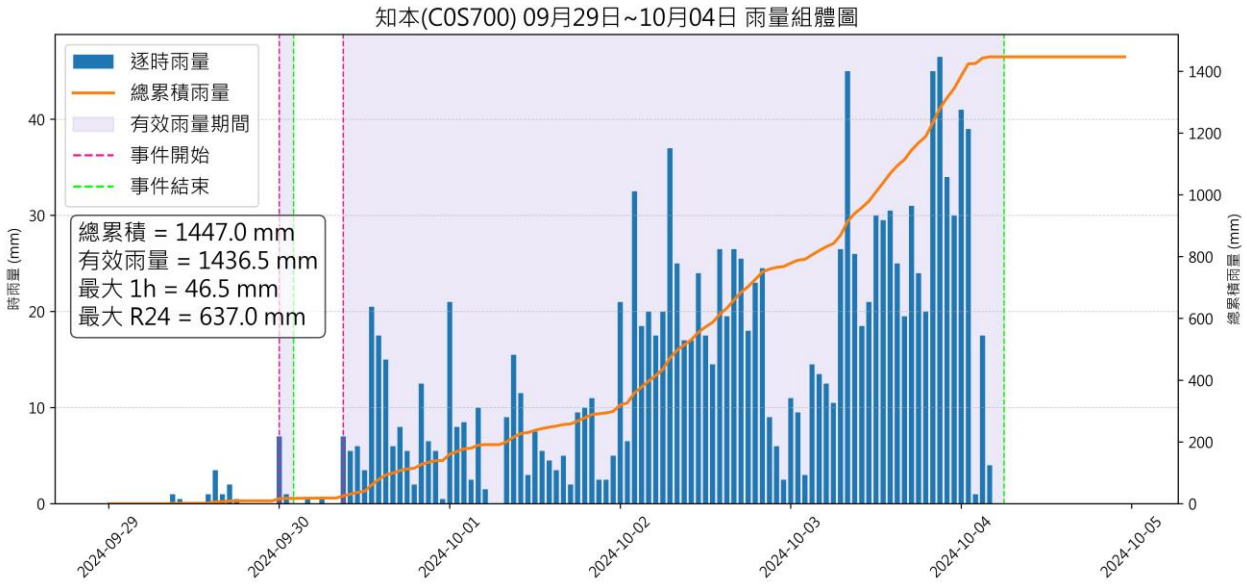


圖 2-25 知本雨量站(C0S700)山陀兒颱風期間雨量組體圖

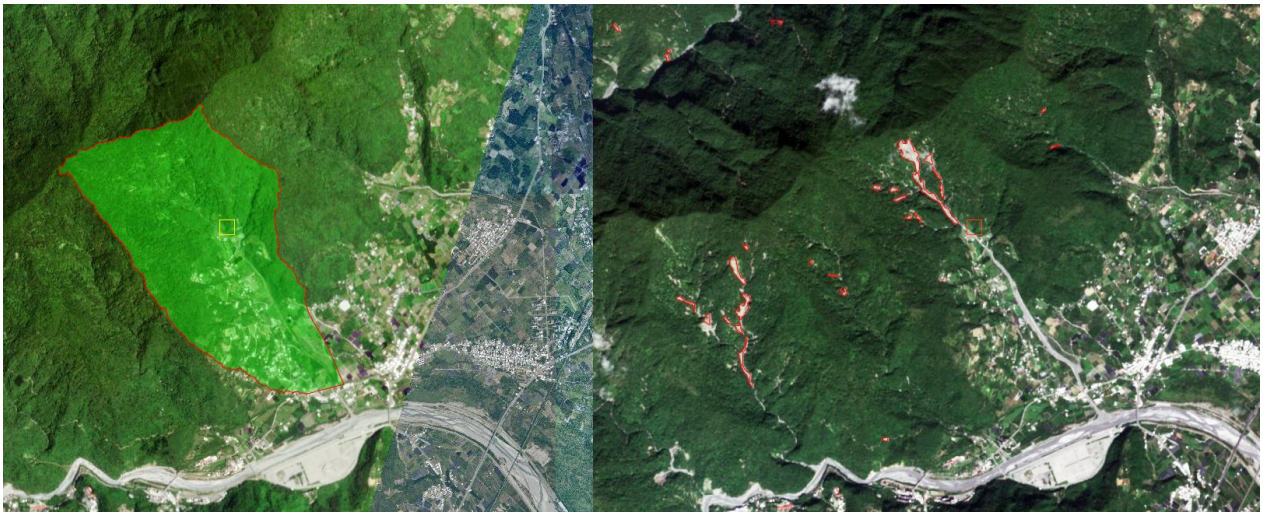


圖 2-26 木瓜溪(東縣 DF059)集水區山陀兒颱風前後對比



中游鎮樂橋土石流溢淹



鎮樂橋大樑嚴重受損(黃振全組長攝)



下游千歲橋土石流溢淹



下游河道嚴重淤積

圖 2-27 木瓜溪(東縣 DF059)山陀兒颱風災情概況

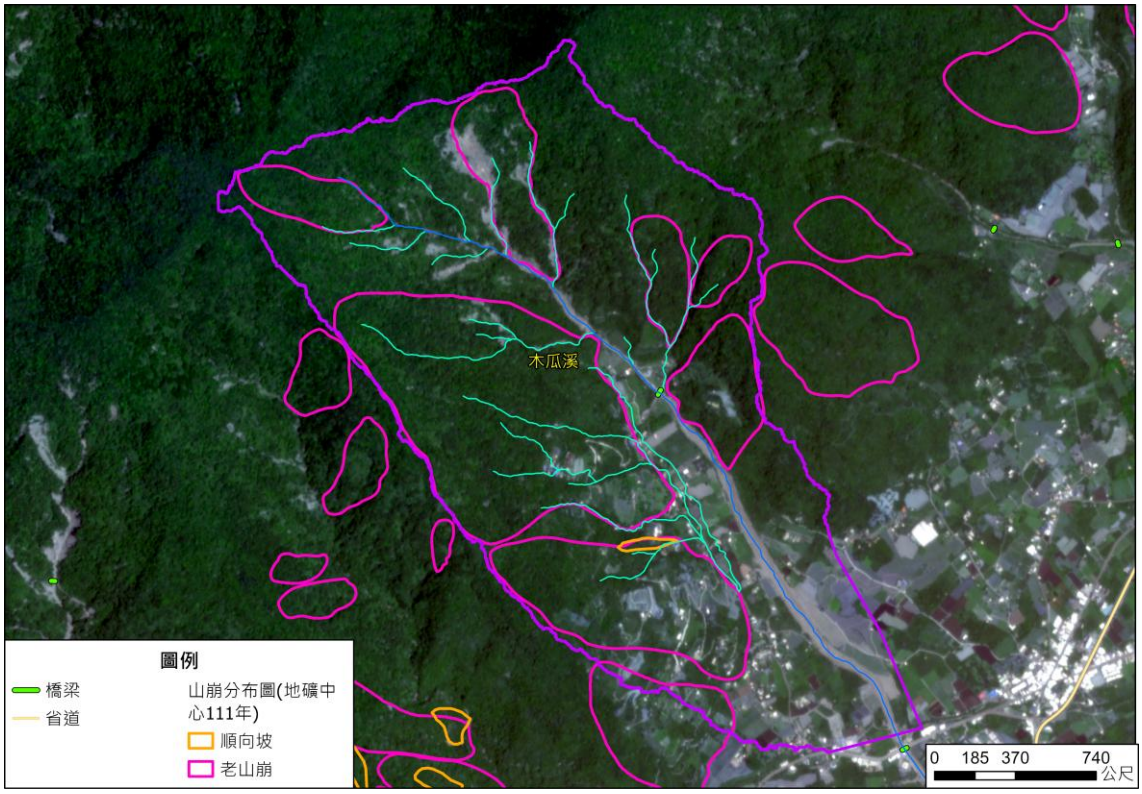


圖 2-28 木瓜溪(東縣 DF059)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像

(二) 花蓮縣秀林鄉三棧南溪(花縣DF174)

三棧南溪位於花蓮縣秀林鄉三棧部落北側(圖 2-29)，為三棧溪支流，溪流長 3.4 公里，縱坡高差約 1,300 公尺，集水區面積 332 公頃，主要岩性為厚層大理岩與片麻岩。

三棧南溪於 2024 年前僅零星小規模崩塌也無潛在大規模崩塌地，而 2024 年 0403 地震後集水區源頭發生大面積崩塌並多次發生土石流，因此公告為土石流潛勢溪流(圖 2-30)。根據 2013~2022 年間的地形變異分析圖(圖 2-31)，在 2024 年 0403 地震前集水區內除了礦場開挖外，僅零星邊坡有變異跡象但初步研判為地形誤差所致，河床地形變異分析可見中上游河床有輕微淤積，下游河床則無明顯變動與侵蝕跡象(圖 2-32)。三棧南溪集水區主要保全對象有民宅 1~4 戶以上、三棧聚落聯外道路與箱涵橋，箱涵橋上游側有一座防砂壩，中下游河道則有系列固床工(圖 2-33)。

2024 年 0403 地震造成集水區源頭高陡邊坡處 18.15 公頃新生崩塌(圖 2-35)，崩塌率約 5.5%，起初大量土砂堆積於上游河內，但在 0620 豪雨、 0629 豪雨中第一波泥石流下移溢淹箱涵橋，隨後凱米颱風帶來約 450 毫米的累積雨量，最大時雨量達 74 mm(圖 2-34)。大量不安定土砂隨強降雨逕流往下游運移輸送爆發大規模土石流，在多次清疏河道後，0917 與山陀兒颱風期間仍有小規模土石流出，康芮颱風期間再次有大規模土石流流出，再次淤滿防砂壩庫容區並淤埋箱涵橋，也造成下游河道大幅淤積墊高(圖 2-36)。

三棧南溪中游窄長的河道並有兩處瓶頸窄口，下游防砂壩緊鄰箱涵橋，且溢洪口高於箱涵橋面，使得箱涵橋多次遭土石流淤埋，三棧南溪匯入三棧溪主流處河道再次因地形束縮，並於匯流口形成沖積扇擠迫/抬

升生主河道，造成對岸三棧國小與三棧聚落嚴重威脅，儘管多次清疏然而中下游河道仍有大量土砂淤積且已無囚砂空間，仍有土砂下移致災風險。

三棧南溪集水區內無農村水保署判釋之殘坡，但有地礦中心環境地質圖的老山崩分布(圖 2-37)，顯示集水區內地質條件尚可，老山崩分布於礦場道路，近年無明顯活動跡象，但 0403 地震後造成集水區大面積岩屑崩滑與落石，大量崩積材料殘留河道，未來數年內土砂災害風險仍高。

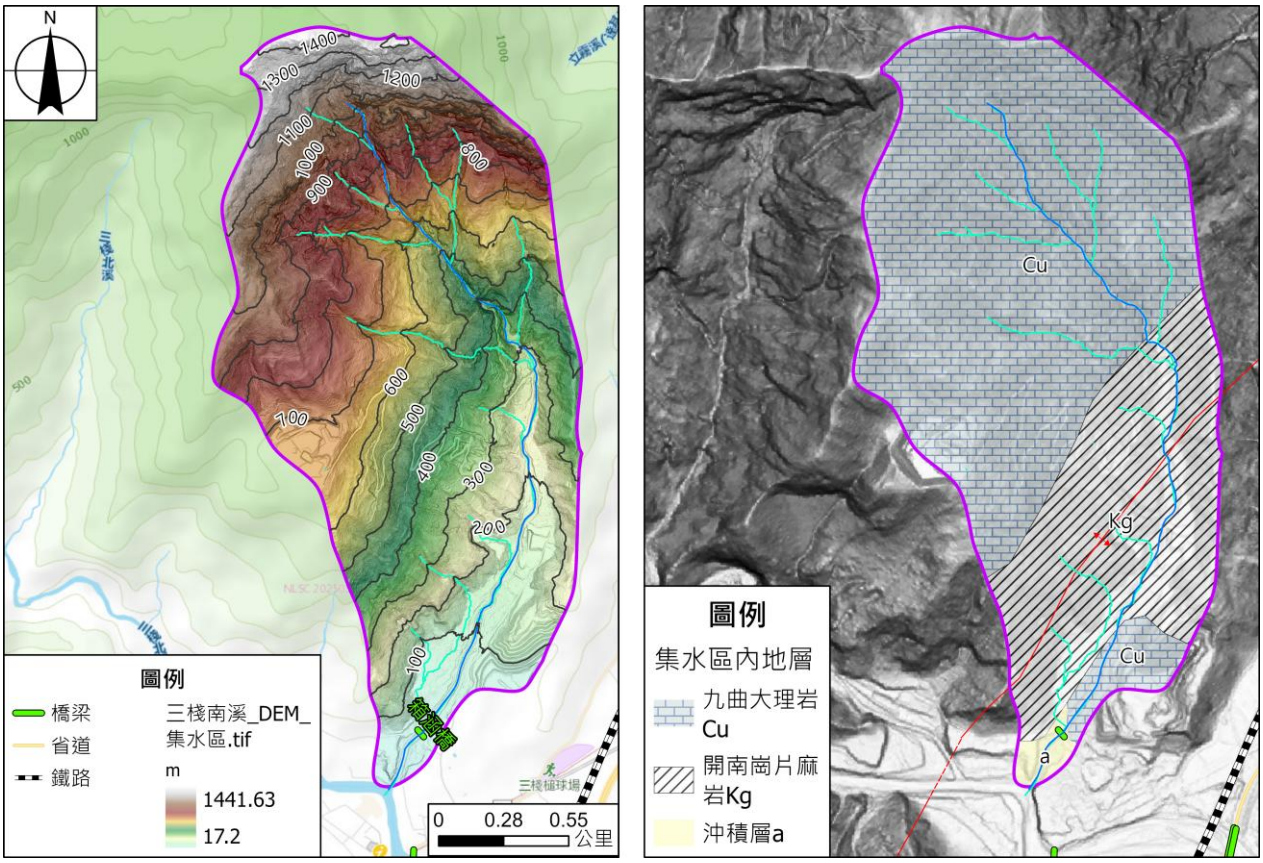


圖 2-29 三棧南溪(花縣 DF174)集水區地形圖與地質圖

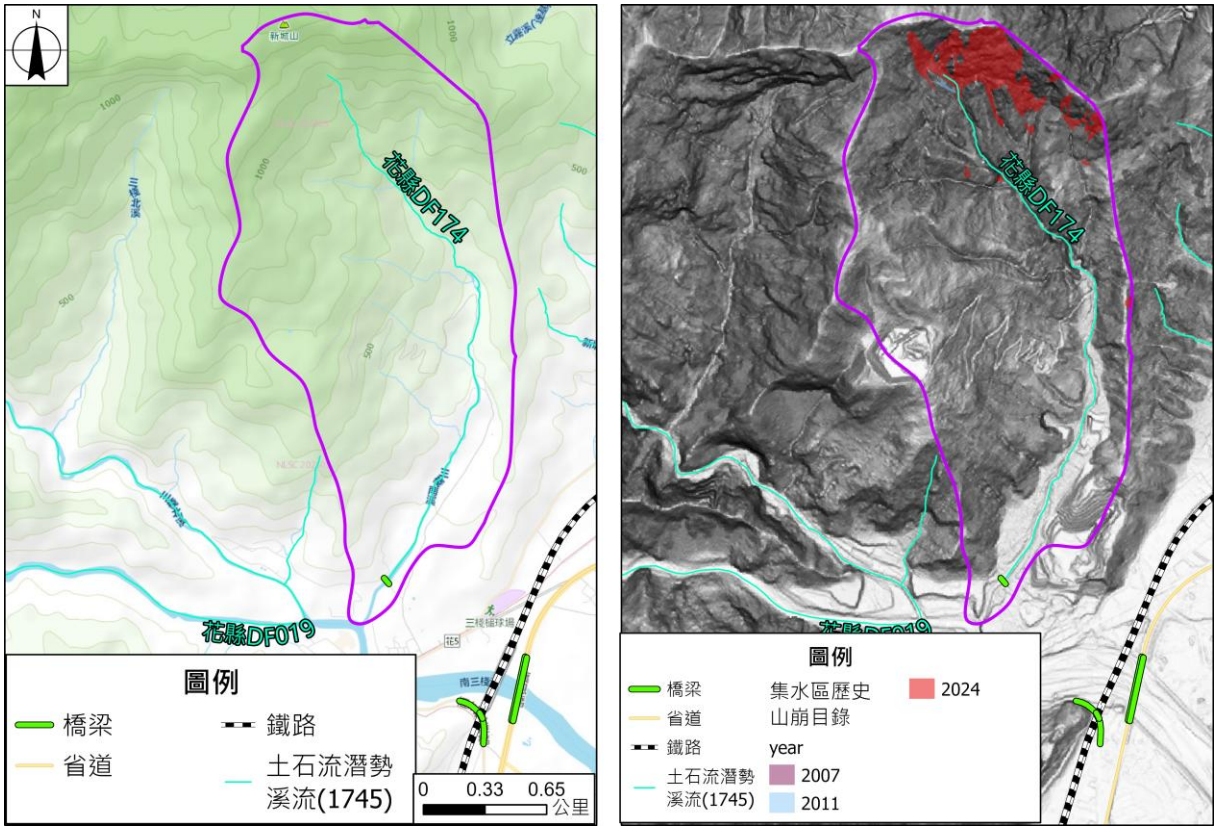


圖 2-30 三棧南溪(花縣 DF174)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布

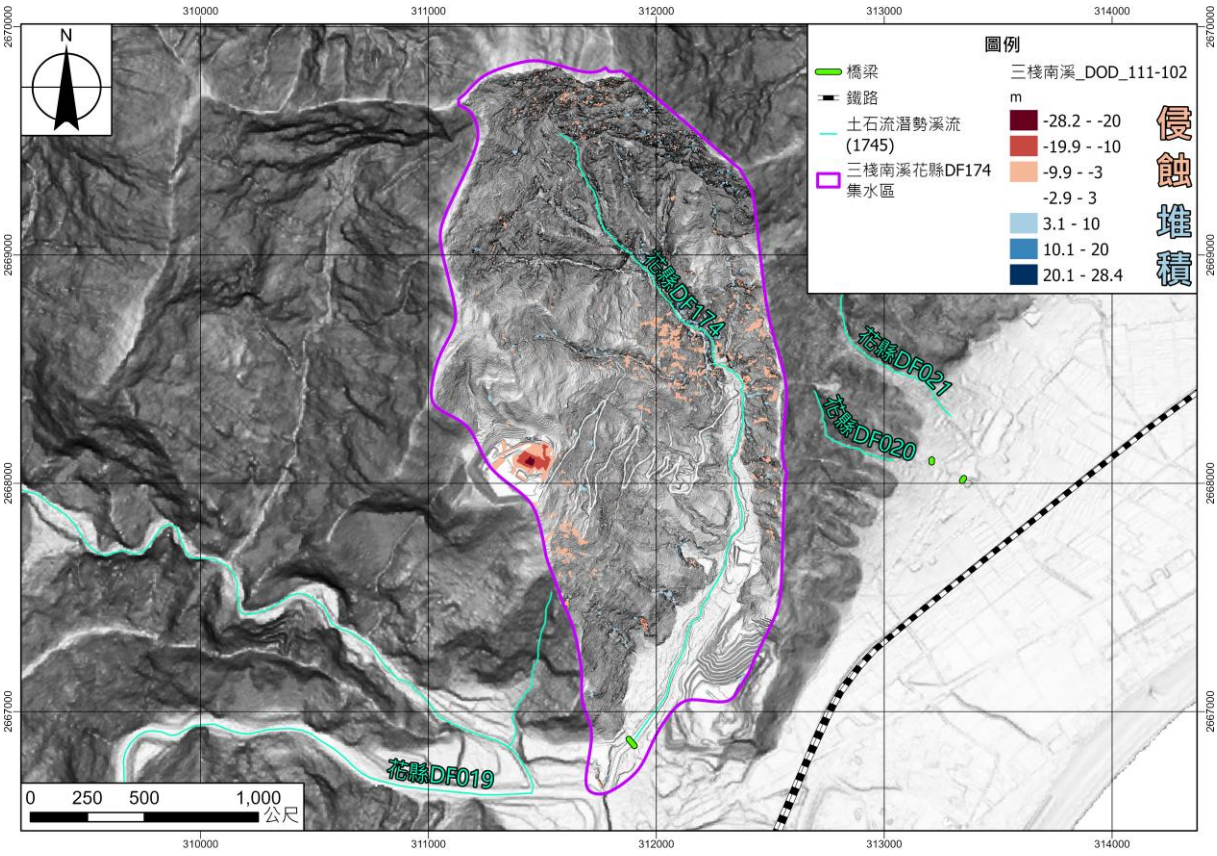


圖 2-31 三棧南溪(花縣 DF174)集水區地形變異分析(2013~2022)

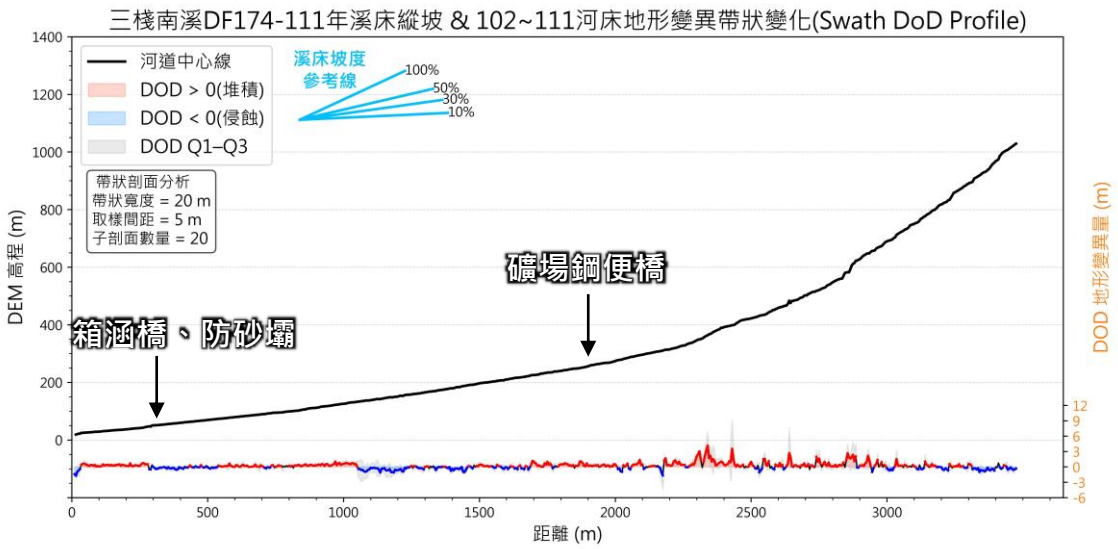


圖 2-32 三棧南溪(花縣 DF174)河床地形變異帶狀分析(2013~2022)

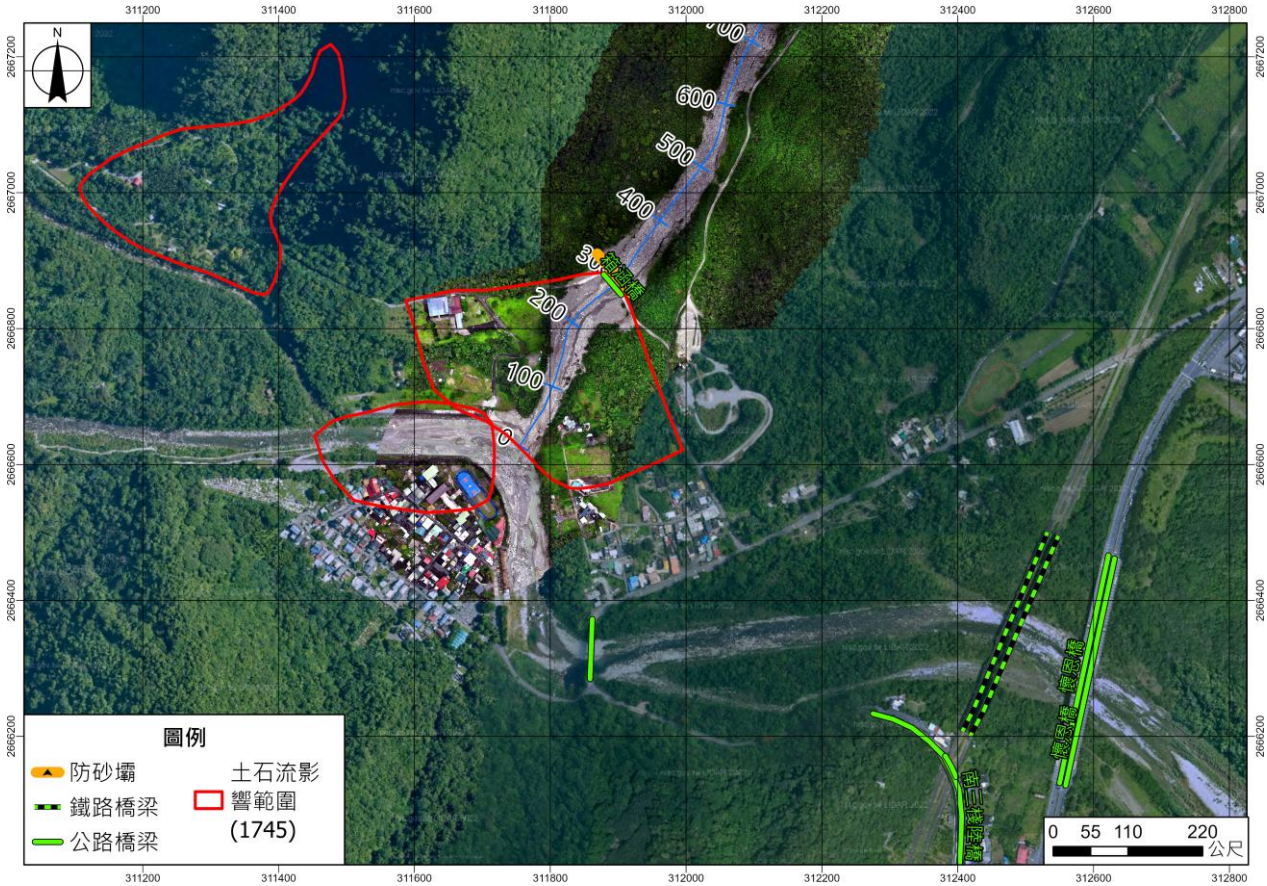


圖 2-33 三棧南溪(花縣 DF174)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布

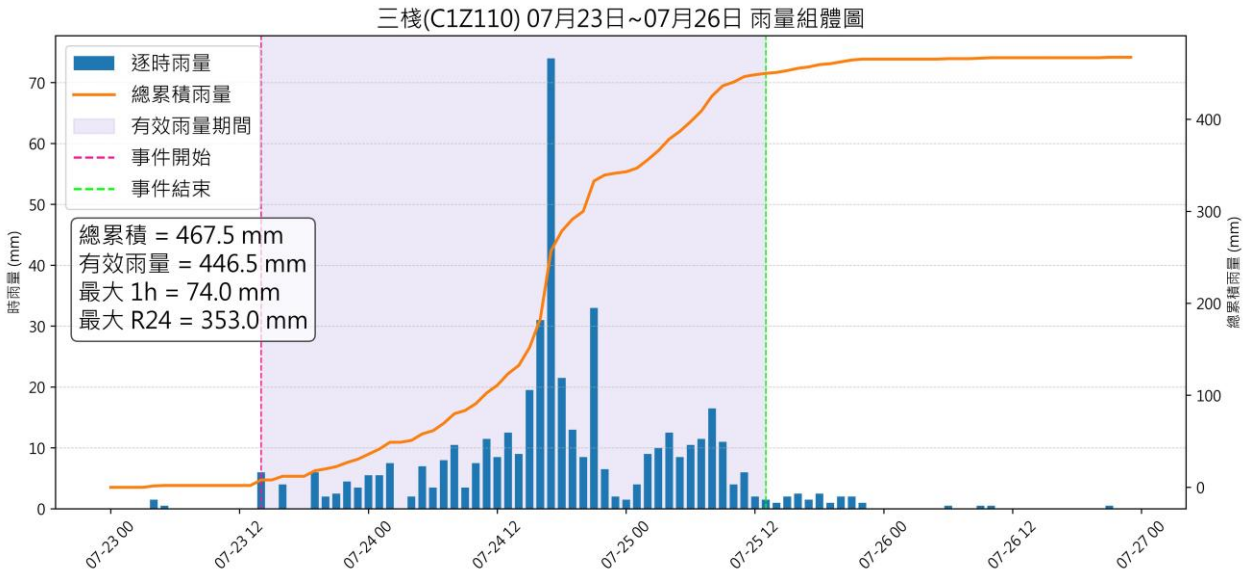


圖 2-34 三棧雨量站(C1Z110)凱米颱風期間雨量組體圖



圖 2-35 三棧南溪(花縣 DF174)集水區 0403 地震前後對比

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2024/6/20 降雨引發泥石流(新聞報導)</td><td>2024/6/29 降雨引發泥石流(新聞報導)</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>凱米颱風土石流淤埋箱涵橋與防砂壩</td><td>2024/9/17 降雨引發土石流</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>山陀兒颱風期間土石流</td><td>康芮颱風期間土石流</td></tr>
</table>

圖 2-36 三棧南溪(花縣 DF174)0403 地震後歷次土砂災情概況

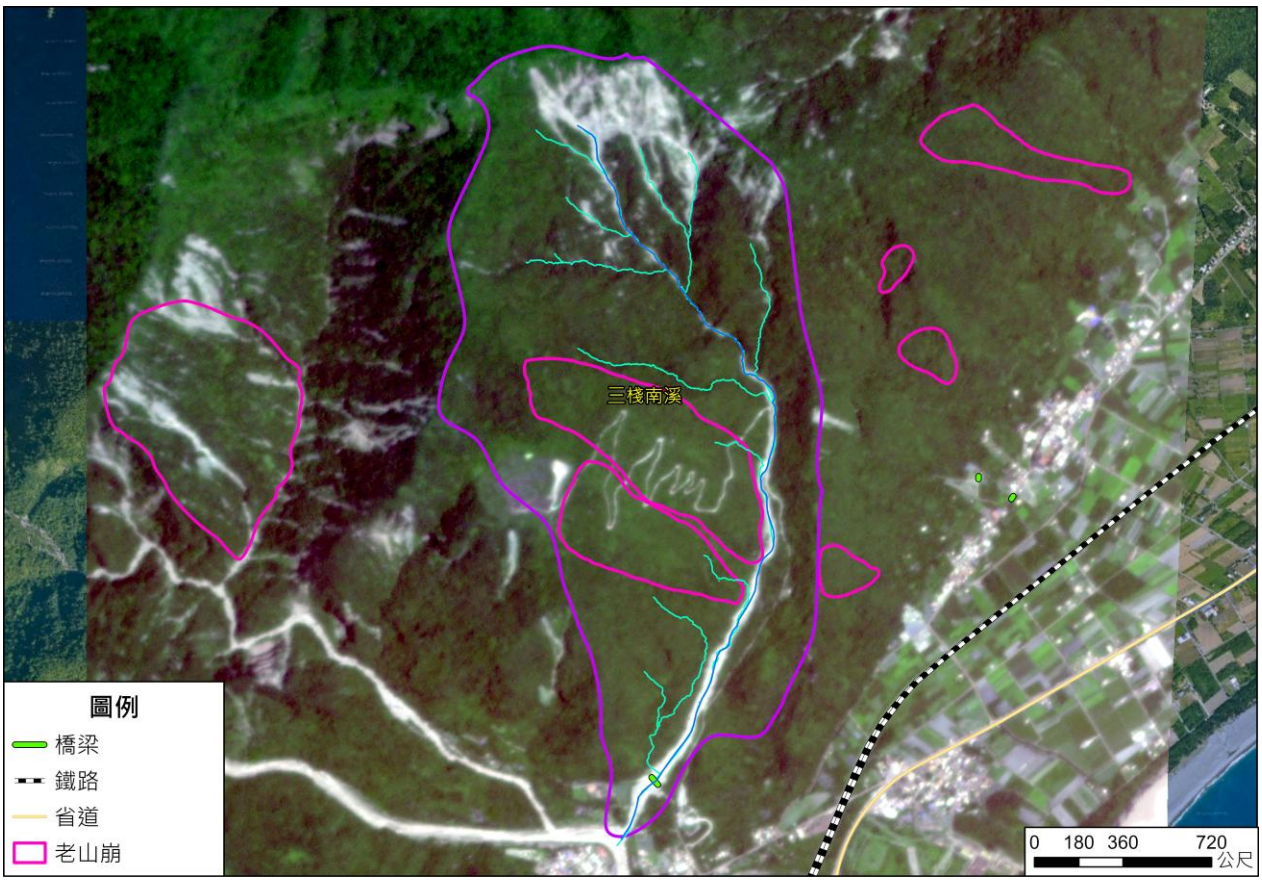


圖 2-37 三棧南溪(花縣 DF174)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像

(三) 花蓮縣秀林鄉大清水溪(花縣 DF024)

大清水溪位於花蓮縣秀林鄉，主流長約 3.1 公里，縱坡落差約 900 公尺，集水區面積 562 公頃，集水區內多為厚層大理岩並有礦業開採紀錄，下游為大量溪流沖積物所構成的堆積層並有台 9 線與台鐵北迴線經過。

大清水溪上游常年有崩塌發生伴隨大面積岩壁裸露，但無潛在大規模崩塌分布(圖 2-39)，連帶造成下游土石流災情，2013 至 2023 年間地形變異分析顯示多數變異集中在中上游蝕溝處(圖 2-40)，坡面無明顯深層崩塌，河床地形變異分析(圖 2-41)可現中上游坡度陡峭有較明顯的侵蝕趨勢，中下游則無明顯變化。大清水溪集水區主要保全對象有台 9 線、台 9 丁線、台鐵北迴線，0403 地質震後林業保育署於台 9 線上游側新建一座防砂壩 (圖 2-42)。

然而 2024 年 0403 地震造成集水區大量崩塌，崩塌面積總計 33.38 公頃，崩塌率約 5.9%，地震後多次零星降雨造成崩塌土砂逐漸下移，2024 年 6 月 20~21 日上游集水區短延時強降雨造成土石流噴濺至台鐵西正線橋台上，造成列車出軌事故(圖 2-43)，凱米颱風、山陀兒颱風與康芮颱風期間則無明顯土砂災情傳出。

然而 2025 年 5 月 18 日上游集水區強降雨再次造成土石流爆發(圖 2-44)，且此次土石流規模更甚 0621 事件，造成甫剛完工的梳子壩淤積近 8 公尺，大量岩塊直接衝擊台鐵西正線橋面，災後調查發現下游普遍淤積 3~5 公尺，河床縱坡大幅減緩(圖 2-45)，大量不安定土砂下移造成下游河床瞬間大幅淤積，使得鐵公路橋梁通洪斷面不足面臨土石流威脅。

大清水溪集水區內無農村水保署判釋之殘坡，也無地礦中心環境地

質圖的老山崩與順向坡(圖 2-46)，顯示集水區內地質條件尚佳，少有大規模崩塌之跡象，但 0403 地震後造成集水區大面積岩屑崩滑與落石，大量崩積材料殘留河道，未來數年內土砂災害風險仍高。

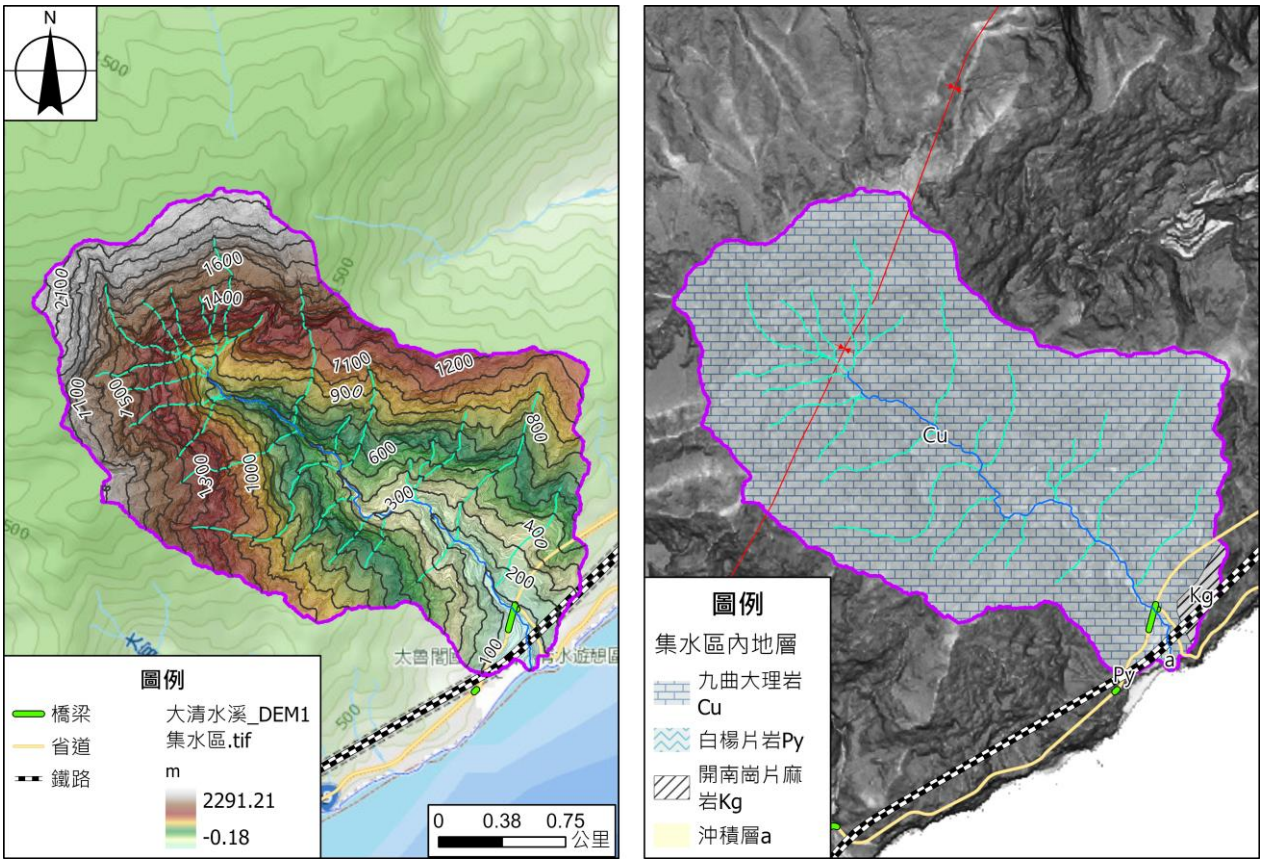


圖 2-38 大清水溪(花縣 DF024)集水區地形圖與地質圖

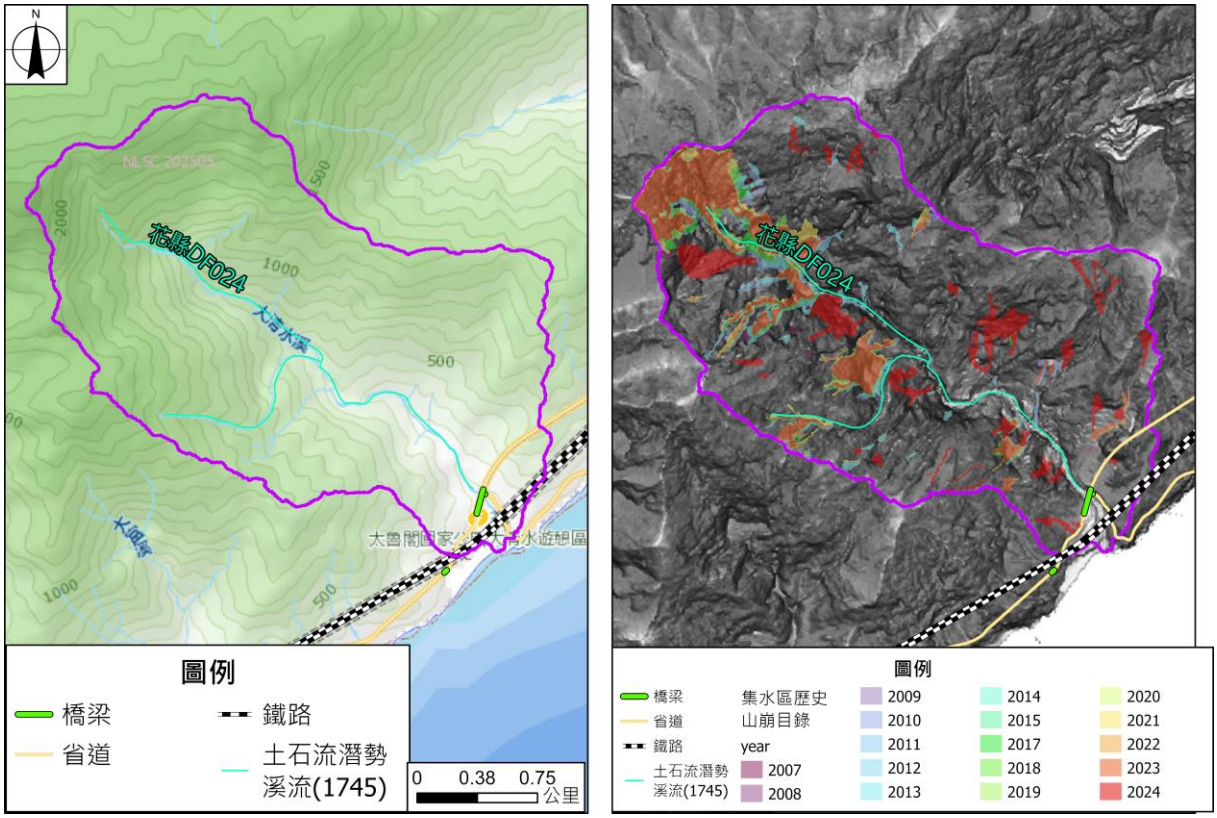


圖 2-39 大清水溪(花縣 DF024)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布

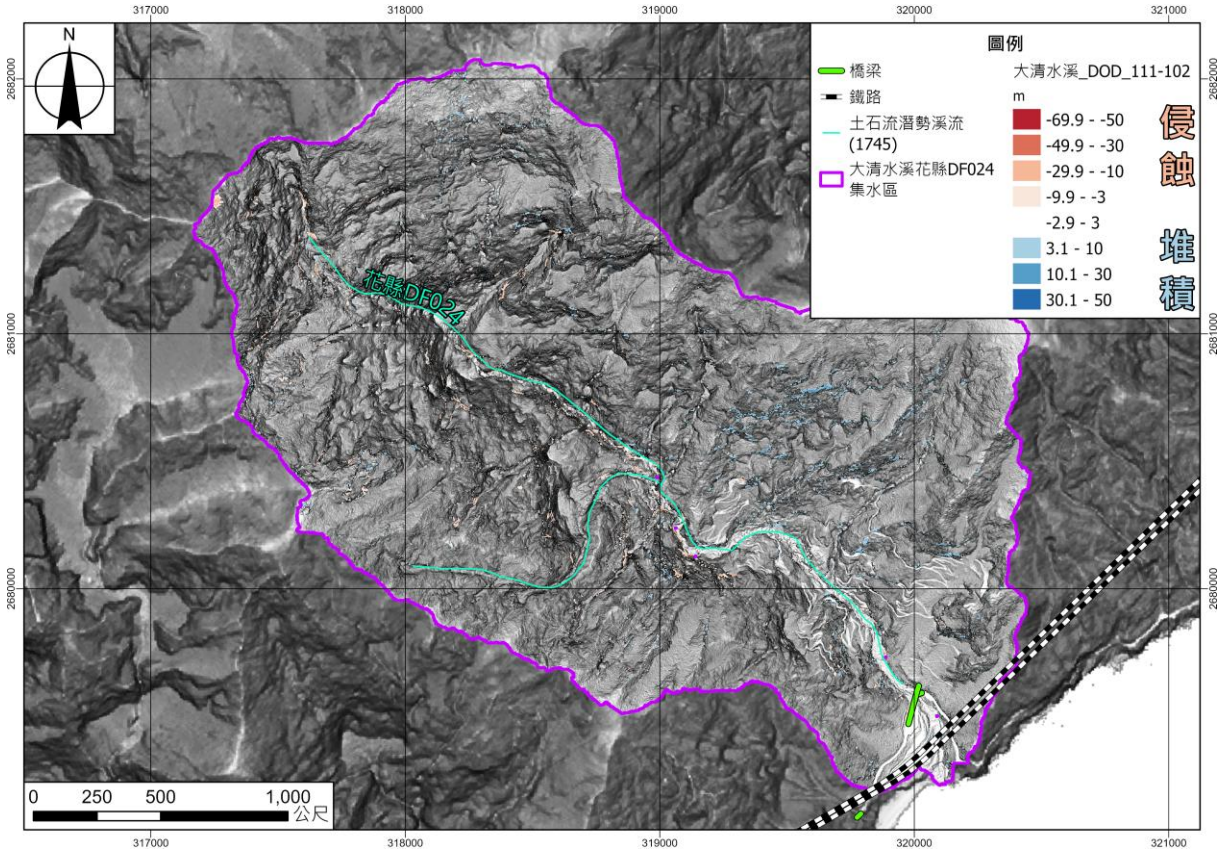


圖 2-40 大清水溪(花縣 DF024) 集水區地形變異分析(2013~2022)

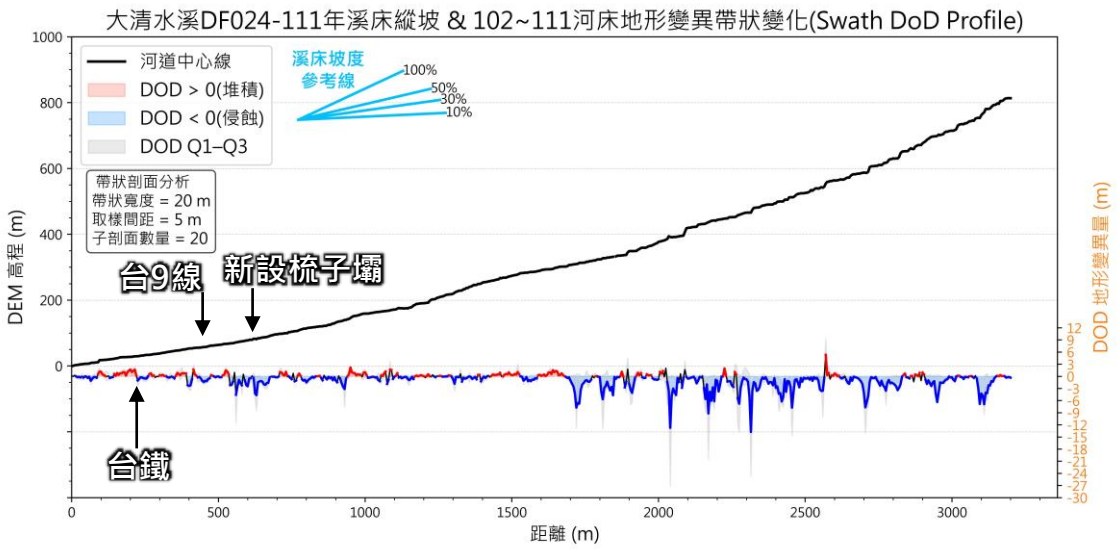


圖 2-41 大清水溪(花縣 DF024) 河床地形變異帶狀分析(2013~2022)

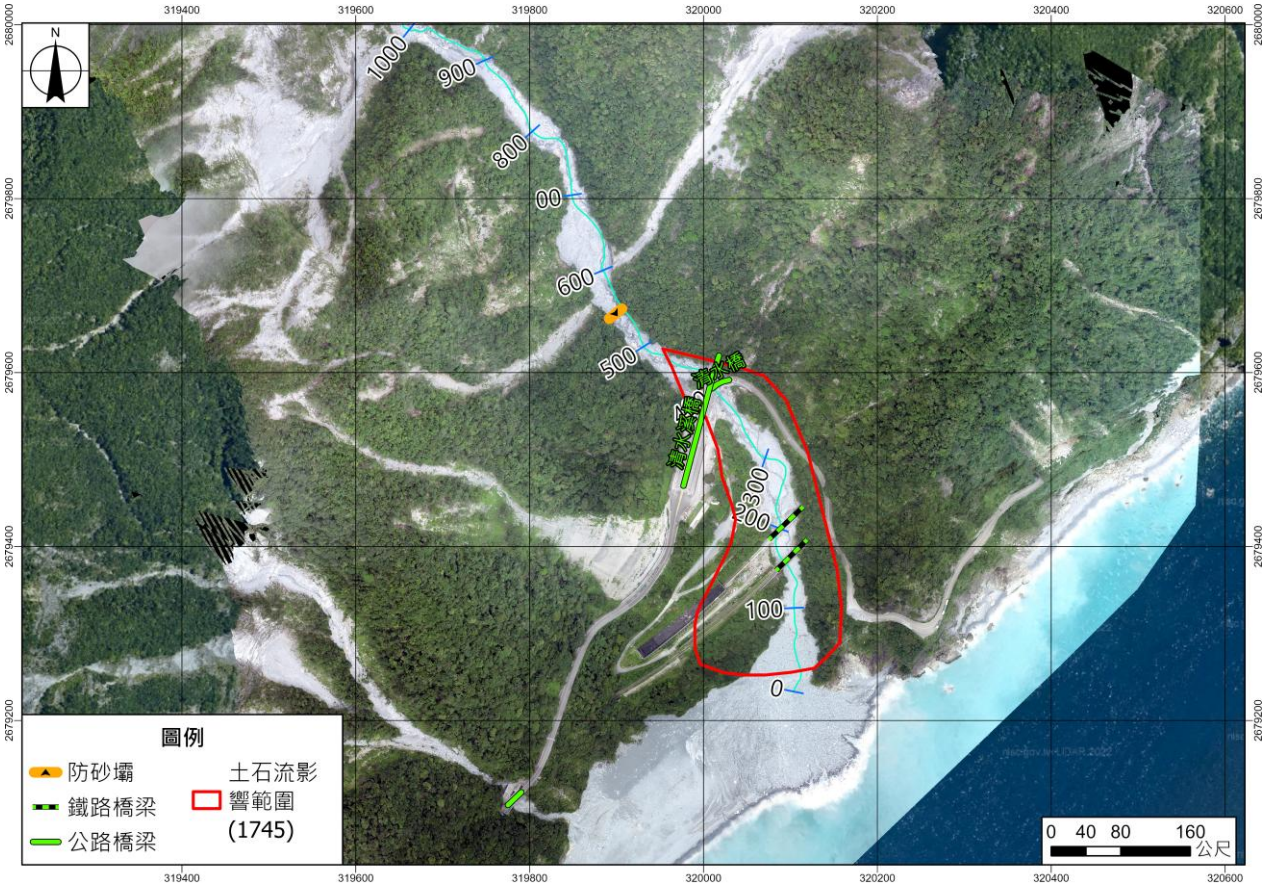


圖 2-42 大清水溪(花縣 DF024)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布



(a)2024/6/21 16 時 30 分土石流噴濺至西正線



(b)災中河道現況



(c)災中流路受阻情形



(d)台鐵橋上殘留土砂

圖 2-43 大清水溪(花縣 DF024)0621 土石流災情(新聞報導)



圖 2-44 大清水溪(花縣 DF024)0518 土石流災情(摘自 GeoPORT)

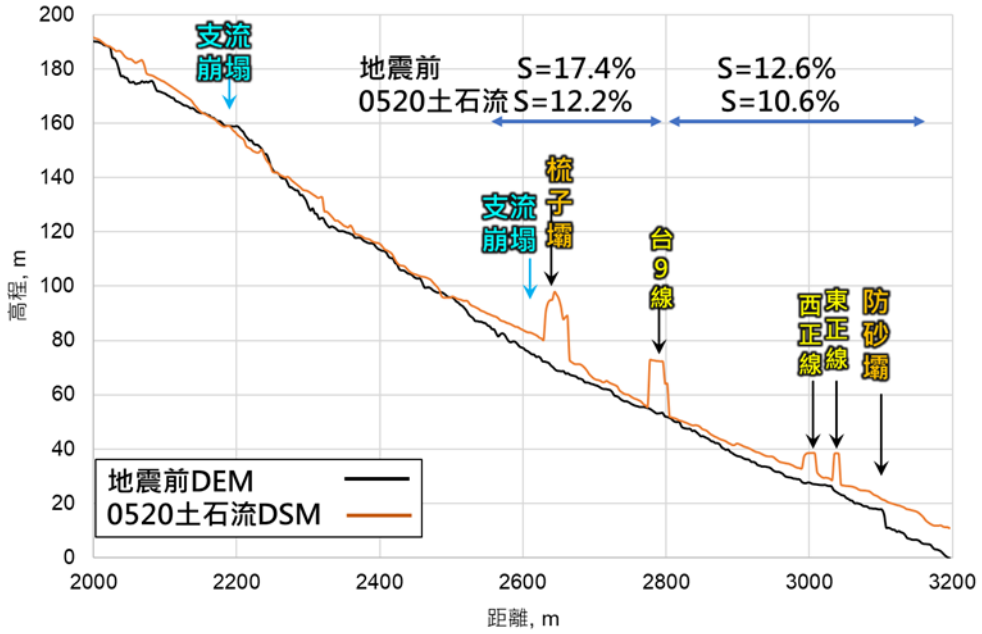


圖 2-45 大清水溪(花縣 DF024)0518 土石流後河床縱坡變化(摘自 GeoPORT)

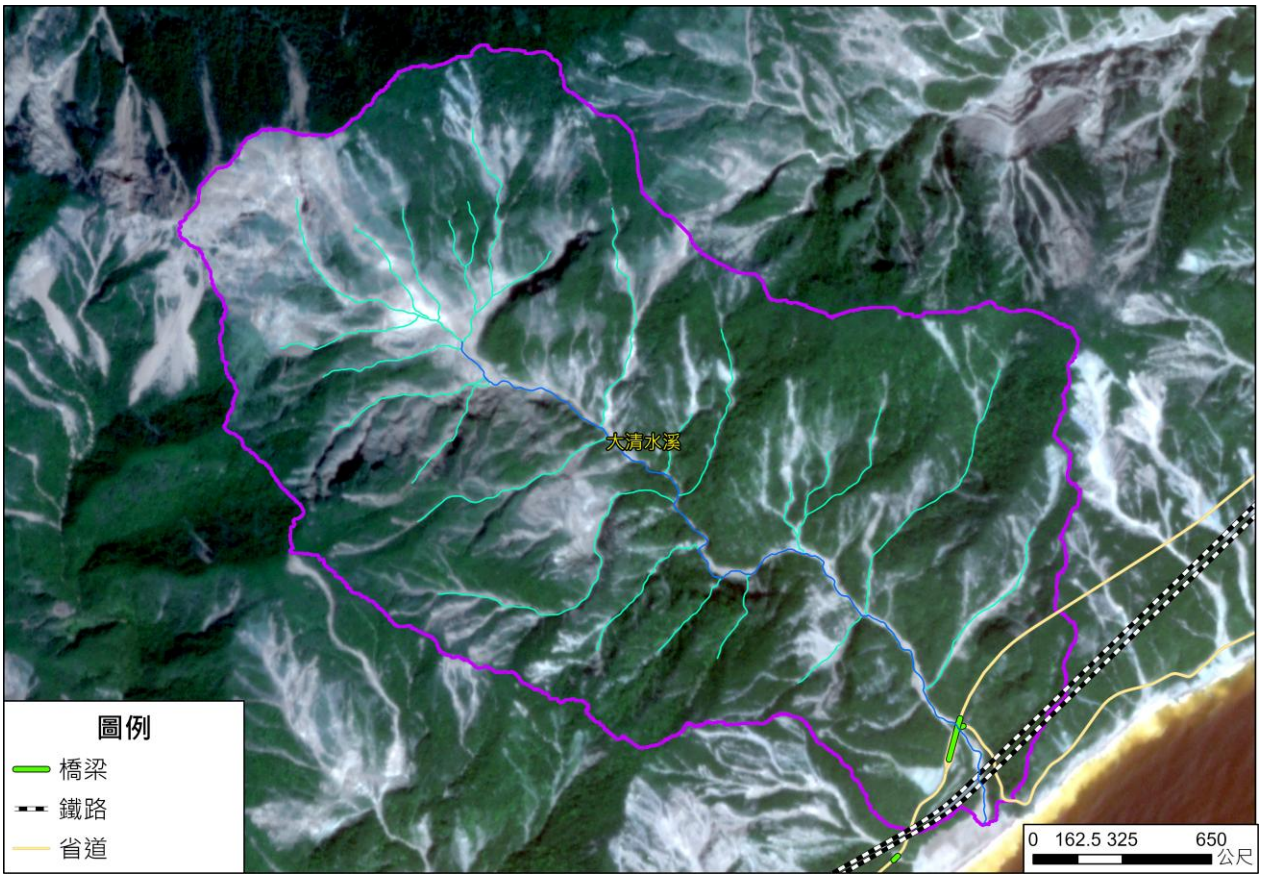


圖 2-46 大清水溪(花縣 DF024)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像

(四) 花蓮縣秀林鄉和仁野溪(花縣 DF025)

和仁野溪位於花蓮縣秀林鄉,主流長約 2.4 公里,縱坡落差約 1,200 公尺,集水區面積 252 公頃(圖 2-47),集水區內多為厚層大理岩與片麻岩,並有礦業開採紀錄,下游為大量溪流沖積物所構成的堆積層,下游計有一座防砂壩,壩的溢流口寬約 30 公尺,但因下游側有台 9 丁線與台鐵北迴線經過,水工構造物束縮河道至約 10 公尺寬,也使得台 9 丁線箱涵橋成為溪流瓶頸段。

和仁野溪上游僅有數次零星崩塌記錄,無潛在大規模崩塌分布(圖 2-48),2013 至 2023 年間地形變異分析顯示多數變異為中上游蝕溝處(圖 2-49),坡面無明顯崩塌,河床地形變異分析(圖 2-50)中上游坡度陡峭有較明顯的侵蝕趨勢,中下游坡度快速減緩而有些許淤積情形。和仁野溪集水區主要保全對象有和仁聚落民宅 5 戶以上、台 9 丁線與箱涵橋,箱涵橋上游側有一座防砂壩,河道束縮段則有系列固床工(圖 2-51)。

然而 2024 年 0403 地震造成集水區大量崩塌,崩塌面積總計 13.38 公頃,崩塌率約 6.3%,地震後多次降雨造成崩塌土砂逐漸下移,既有防砂壩庫容區已經淤滿(圖 2-52),並有部分土砂淤積於台 9 丁線箱涵橋下,造成通洪斷面不足,凱米颱風期間累積雨量達 560 毫米(圖 2-53),洪水位一度逼近溢淹箱涵橋,山陀兒颱風與康芮颱風後有大量細顆粒礫石淤積於下游台鐵橋下,少有大型岩塊下移。

和仁野溪集水區內無農村水保署判釋之殘坡,也無地礦中心環境地質圖的老山崩與順向坡(圖 2-54),顯示集水區內地質條件尚佳,少有大規模崩塌之跡象,但 0403 地震後造成集水區大面積岩屑崩滑與落石,大量崩積材料殘留河道,未來數年內土砂災害風險仍高。

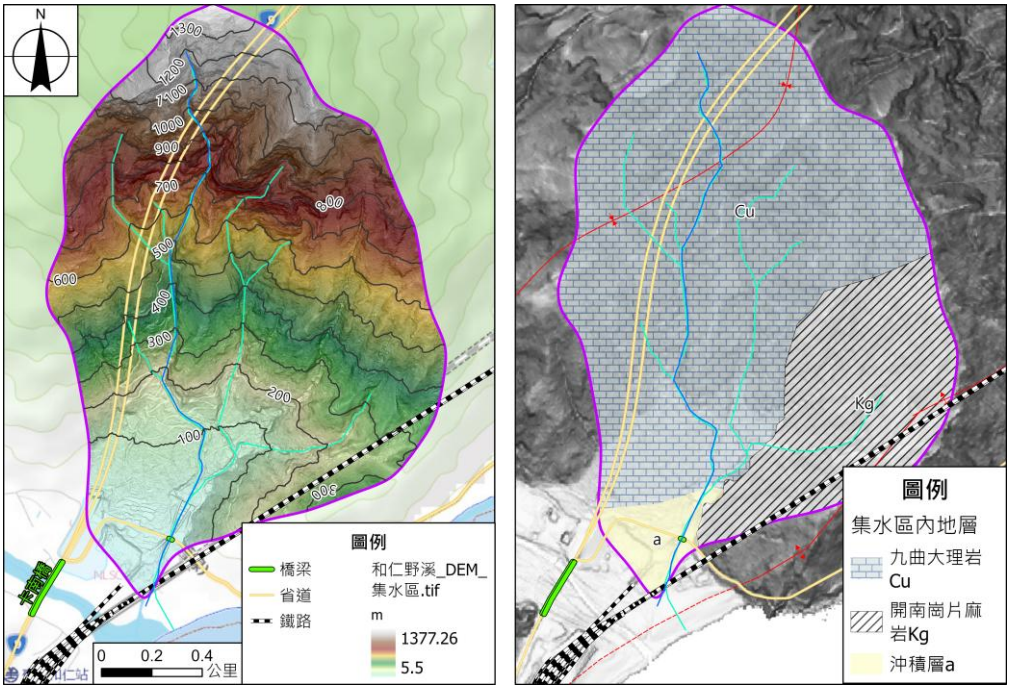


圖 2-47 和仁野溪(花縣 DF025)集水區地形圖與地質圖

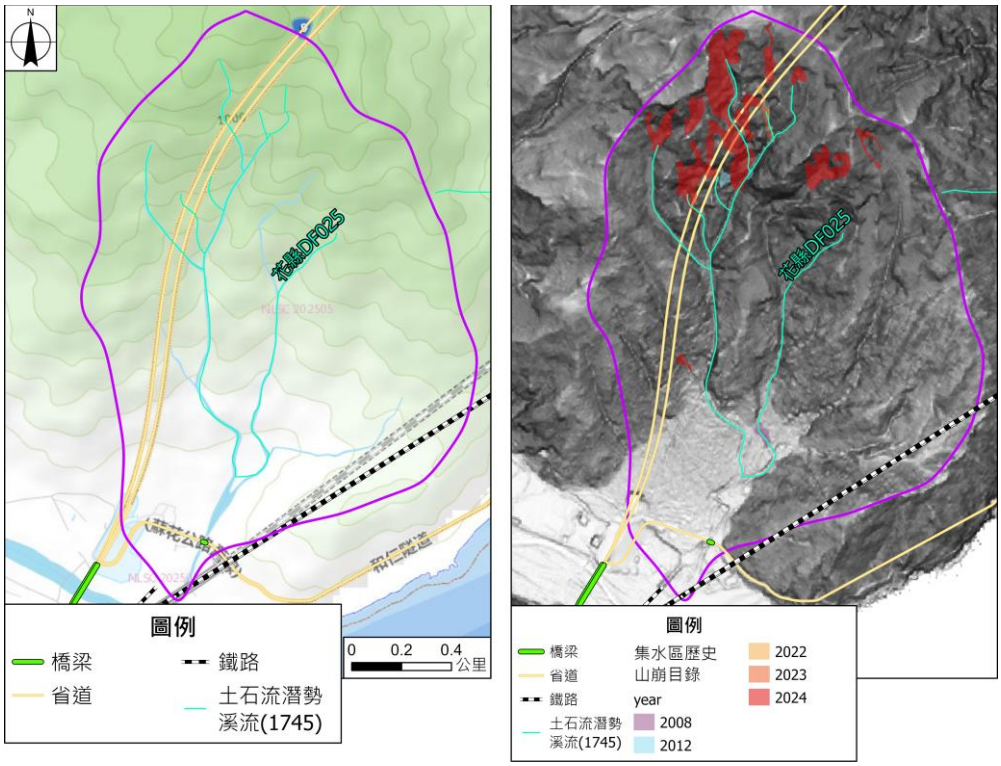


圖 2-48 和仁野溪(花縣 DF025)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布

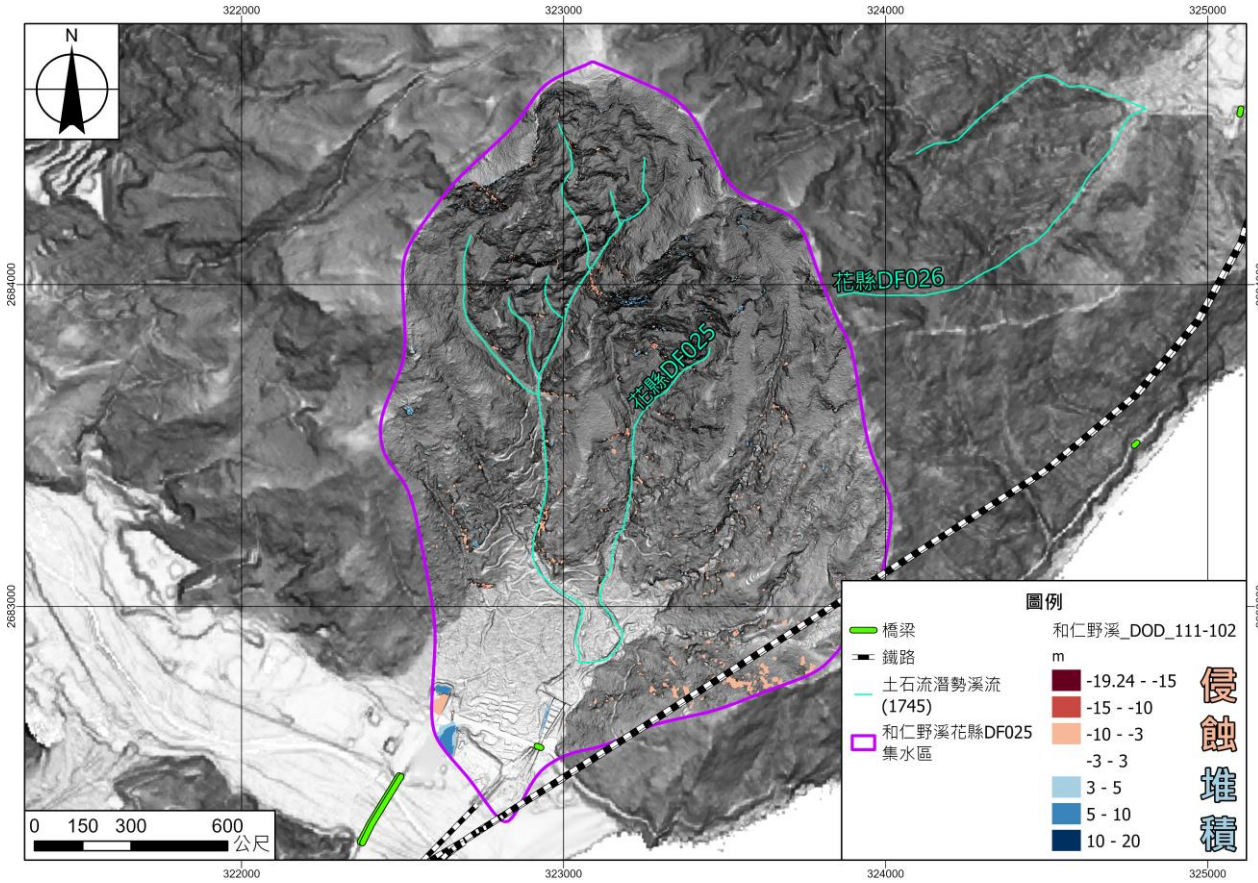


圖 2-49 和仁野溪(花縣 DF025)集水區地形變異分析(2013~2022)

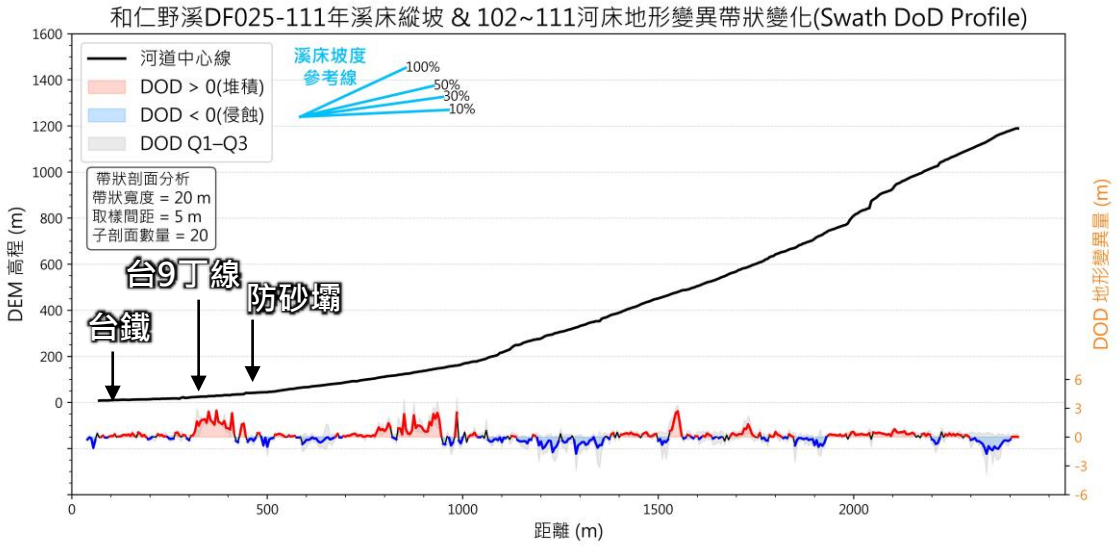


圖 2-50 和仁野溪(花縣 DF025)河床地形變異帶狀分析(2013~2022)



圖 2-51 和仁野溪(花縣 DF025)土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布



0426 豪雨土石淤積防砂壩



0629 豪雨箱涵橋淤積情形



凱米颱風洪水情形



康芮颱風洪水情形



康芮後台鐵橋下淤積情形



台 9 丁線箱涵橋現況

圖 2-52 和仁野溪(花縣 DF025)0403 地震後土砂災害情形

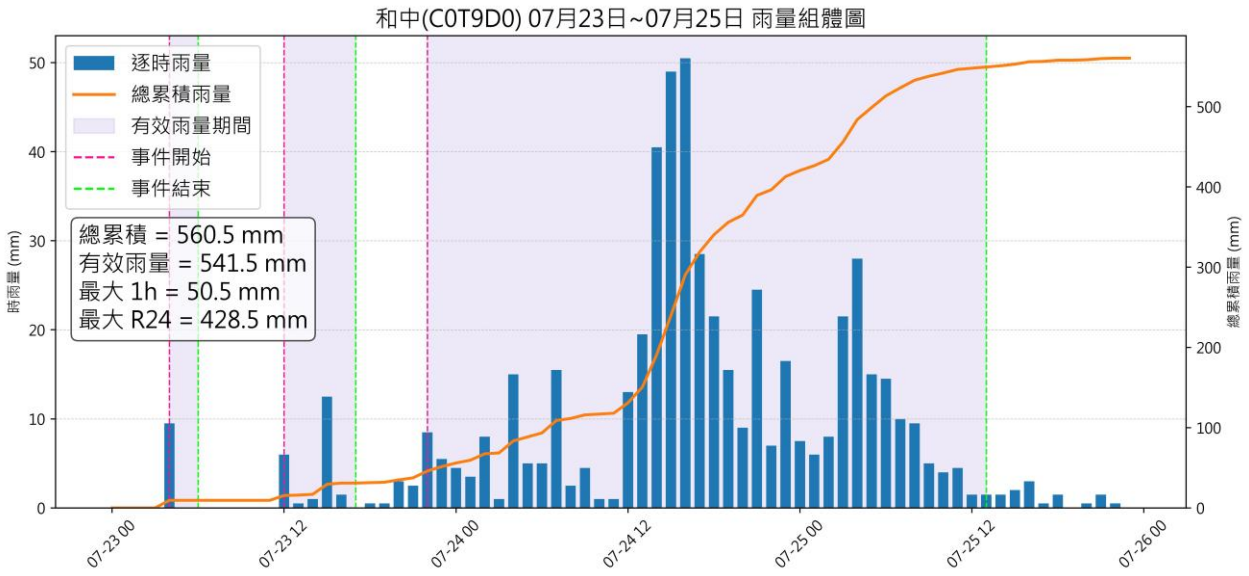


圖 2-53 和中雨量站(C0T9D0)凱米颱風期間雨量組體圖

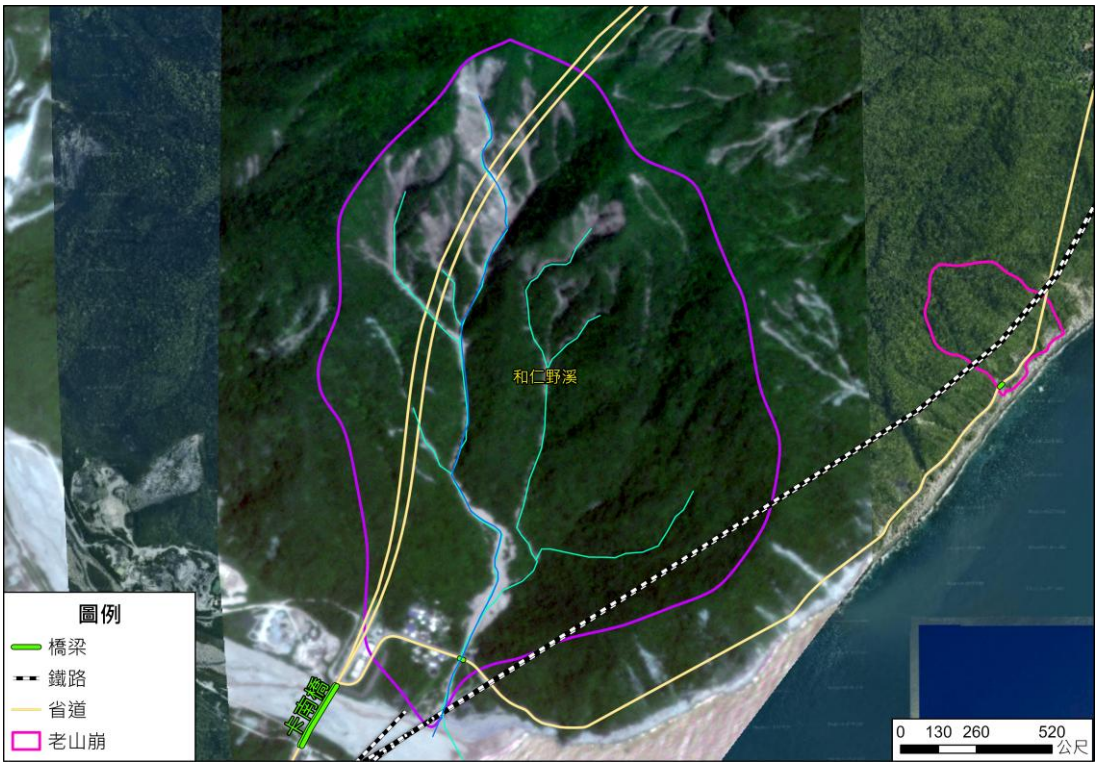


圖 2-54 和仁野溪(花縣 DF025)殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像

二、不安定土砂集水區數值模擬

本節工作乃著眼於貴署於集水區不安定土砂災害之長期課題，針對 RAMMS 適用性與限制性、四處集水區之 RAMMS 數值模擬分析流程與地形

建模、模擬參數量化、動床邊界條件、不安定土砂模擬情境及不安定土砂危害圖評估成果等進行說明。

(一) RAMMS適用性與限制性

RAMMS 特別適合應用於需要三維土砂運移過程的情境，如土石流、淺層崩塌等案例。由於其採用模式以淺水波方程為基礎，在模擬過程中考量質量守恆性與動量守恆性，確保坡面土砂進入河道後，其量體將完整進入計算系統內無質量損失且保持土砂運移過程中動量的變化合理性。在工程應用中，RAMMS 已廣泛被用來劃定危險區域、進行風險評估、設計基礎設施、優化減災措施以及土地利用規劃。在山區災害模擬方面，也有實例證明其對土石流運動具備良好適用性。研究如 Kumar 等人便曾利用 RAMMS 成功回溯模擬印度喜馬偕爾邦 205 號國道山崩與土石流事件，不僅模擬結果與運移距離、實際土砂堆積高度吻合。由於塊體釋放法與流量歷線法考慮流體力學互動，特別適合模擬崩塌型與溪流型土石流等二相流的運動。此外，RAMMS 雖未支援 GPU 加速技術，但使用操作介面簡單且能快速模擬土石流之狀況。整體而言，RAMMS 是一套適合簡單操作且輸入參數(摩擦係數、紊流參數)較少的模擬工具，適用於快速掌握土砂災害規模之情境。RAMMS 在實際應用上仍存在若干限制與使用上的注意事項。首先，其最大限制為野溪支流與主河道之土砂互制尚有技術限制，尚無法完全滿足多條支流土砂互制評估需求。

關於土石流三階段模擬限制，依據「水庫淤積體之研究(謝明昌、謝正倫，1994」之實驗過程中顯示，土石流扇狀地在發展的過程中會有三個階段。土石流出了山谷進入平緩地區之後開始淤積；其淤積的發展可分底下三種的階段；

第一階段：其主要的淤積範圍集中在扇狀地的長度方向，而扇狀地

的寬度幾乎和山谷出口等寬。等到扇狀地的長度發展到達極限之後，扇狀地的發展進入第二階段。

第二階段：在此階段中，土石流的流出角度開始擴大，扇狀地開始往寬度方向發展，扇面逐漸展開，等到扇狀地的寬度也達到一個極限不再變寬之後，扇狀地的發展進入第三階段。

第三階段：在此階段中，土石流在扇狀地上從原有的漫地流轉變成流動寬度變小、流深和流速卻增加的渠道流，隨著渠道的左右擺動，扇狀地的形狀也開始呈現不規則的型態。

所以如何判斷模擬的結果已經到達第二階段的終點，是本計畫裡其中重要關鍵。由於 RAMMS 模式只能模擬到第二階段結束，無法模擬第三階段，建議判斷的方法是看扇狀地的長度寬度以及坡度由這三個指標來判斷。故透過各摩擦係數的 RAMMS 數值模擬，獲得土石流堆積扇的長度、寬度與縱軸坡度，其檢核土砂影響範圍依據如下：

(1) 檢核土石流堆積扇長度之極限值、

(2) 檢核土石流堆積扇寬度之極限值、

(3) 檢核土石流堆積扇頂點至尾端為 5~6 度。

由三項土石流堆積扇隨時間發展之幾何參數，作為數值模擬檢核土砂影響範圍的重要依據。

(二) 四處不安定土砂集水區影響衝擊評估

近年來台灣接連遭受 2023 年卡努颱風、 2024 年花蓮 0403 強烈地震，接著遭受 7 月凱米颱風、10 月山陀兒颱風、10 月康芮颱風多個颱風侵襲，造成各地災害產生，其中凱米颱風與康芮颱風對於花東山區與高屏山區產生多處嚴重災情，團隊蒐集全台近年山崩目錄來建構重大土砂災害事件清單，並藉由現地勘查、新聞報導與航遙測影像...等多種

方法綜合評估各災害規模與二次致災風險，並根據農保監字第1142669757 號「114 年集水區不安定土砂運移模式精進與衝擊評估」、「114 年全臺集水區分布式降雨逕流模式與平台建置」及「114 年巨量空間地理資訊平台維運計畫」第 1 次聯合工作會議紀錄之決議，挑選花蓮縣秀林鄉之和仁野溪(花縣 DF025)、花蓮縣秀林鄉之三棧南溪(花縣 DF174)、花蓮縣秀林鄉之大清水溪(花縣 DF024)、台東縣卑南鄉的木瓜溪(東縣 DF059)，此四處集水區作為不安定土砂集水區影響評估對象，進行 200、350、500、650、900 mm 與氣候變遷下極端降雨情境下，將降雨逕流轉化為土石流與殘坡土砂來源，模擬不安定土砂運移衝擊影響範圍，並已於第 2-2-1 節針對四處集水區進行基本資料說明。

(三) 降雨情境下之不安定土砂評估

不安定土砂災害的誘因，主要以降雨為主要誘發因子，搭配集水區內之最大可能土砂料源進行 RAMMS 數值模擬，以瞭解各降雨情境下土砂運移對下游地區之影響與衝擊。以下茲分為定量降雨情境與極端降雨下新生崩塌情境分節說明。

1. 定量降雨情境:

為提供溪流集水區下游基礎設施或交通要道之不同情境土砂影響範圍，本流程參考中央氣象署降雨分級定義(大雨、豪雨、大豪雨及超大豪雨)、農村水保署公開之 114 年土石流潛勢溪流(200 mm 至 650 mm)與 114 年大規模崩塌警戒雨量範圍(300 mm 至 1,500 mm；如圖 2-55)。為避免特定集水區(如高屏溪流域)因年雨量豐沛，致使採用頻率年降雨情境不易區隔不同降雨情境分布值，經工作會議討論決議，設定上仍以 24 hr 延時累積降雨值為定量分析情境，同時參考潛在誘發土石流與大規模崩塌災害的警戒雨量上限與下限值，如

中央氣象署發布之豪雨(200 mm)為定量降雨起始值，以集水區 200 mm、350 mm、500 mm、650 mm、900 mm 為五種基本定量降雨情境，逐步往上遞加，而最大情境雨量值則設定極端氣候情境為第六種，以涵蓋土石流與大規模崩塌之警戒雨量值(如 900 mm；114 年公開之大規模崩塌 79 處僅一處警戒雨量值為 1,500 mm)。承上，定量降雨情境設定為集水區內 24 hr 累積雨量 200 mm - 900 mm 等五種情境。

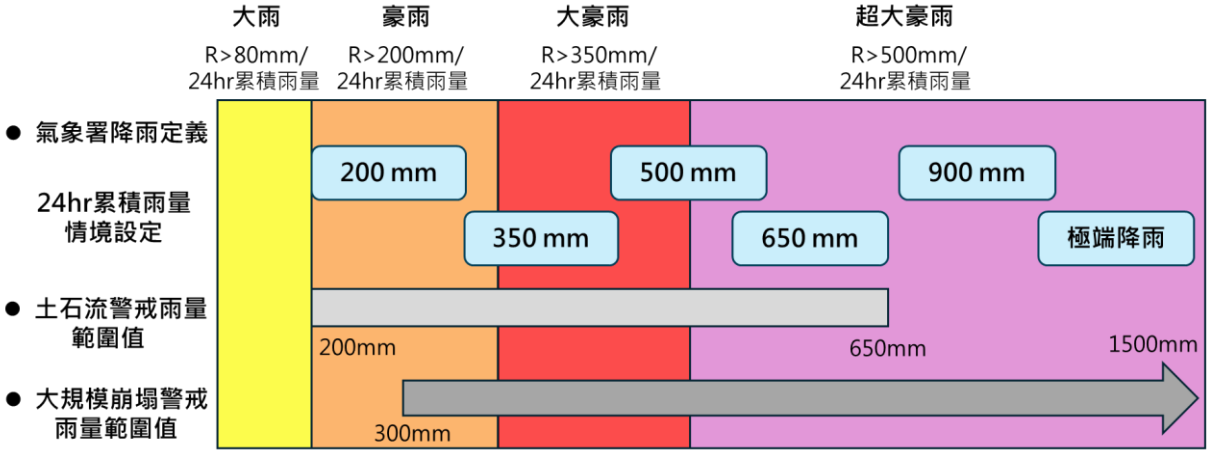


圖 2-55 定量降雨情境設定

1. 極端降雨情境:

在前節所提之五個定量降雨情境外，近年來山區集水區因局部性暴雨屢次造成崩塌或土石流等土砂災害。這些災害除對下游保全對象肇生威脅外，也對橫跨集水區溪流段之交通要道造成影響。根據氣候變遷災害風險調適平台指出(國家災害防救科技中心；https://dra.ncdr.nat.gov.tw/)，若以 21 世紀末(2081-2100 年)的臺灣為對象，臺灣在巴黎協議的目標下，RCP 2.6 情境下的預測顯示，溫度上升可能僅限於攝氏 1 度以內。然而，如果未能及時落實減碳目標，根據 RCP 4.5 情境的預測，臺灣的氣溫可能上升攝氏 1.3 到 1.8 度；在 RCP 6.0 情境下，上升幅度可能為攝氏 1.7 到 2.1 度；而在最惡

劣情況下(RCP 8.5)，21 世紀末臺灣的氣溫則可能上升攝氏 3.0 到 3.6 度。

若以較常見的推估模式情境 RCP 4.5 與 RCP 8.5 探討，根據相關氣候推估研究，隨著氣候暖化程度的提高，臺灣未來的降雨量呈現出濕季(汛期)降雨增加的趨勢。以基期(1986-2005 年)平均降雨量為基準，在 RCP 4.5 情境下，預測 21 世紀末(2081-2100 年)臺灣的濕季降雨量將增加；而在 RCP 8.5 情境下，21 世紀末臺灣的濕季降雨量預計將增加 14% 至 20%，並且西部地區的增加幅度將比東部更加明顯。進一步分析臺灣北、中、南、東四區的平均降雨量變化，目前臺灣濕季降雨主要集中在北部和南部山區(圖 2-56)，而西側沿海地區的降雨量較少。然而，未來的預測顯示，無論是在 RCP 4.5 或 RCP 8.5 情境下，臺灣各地的平均降雨量都將增加。值得注意的是，南部地區(如臺南、高雄、屏東縣)的濕季降雨量增加幅度將是最為顯著的。基於上述推論，為簡化推估流程，評估時建議參酌 TCCIP 網站 - 氣候變遷降雨頻率分析 - 設計暴雨改變率平台(https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_06_02.aspx)。參考集水區位處流域空間分布，同時考量水保設施現行防洪設施保護標準之重現期，來進行氣候變遷下之的暴雨改變率(增加幅度)推估查詢。其詳細步驟與流程(圖 2-57)說明如下：

(1). 集水區空間分布：選擇擬評估子集水區坐落位處的主要集水區名稱，例如高屏溪和曾文溪。

(2). 水保設施防洪標準之降雨重現期：降雨重現期是指某個特定降雨事件在一定時間內重複發生的頻率。以集水區為對象，林地的防洪標準為 25 年，而野溪坡地的防洪標準為 50 年

(水保技術規範第 65 條：防砂壩、潛壩、整流工程、堤防、護岸及丁壩等以重現期距五十年)。

(3). 集水區內代表雨量站選定:先使用 BigGIS 網站查詢集水區內雨量站(如圖 2-58)，在 TCCIP 網站平台上選擇集水區內代表性的雨量站，例如，梅山雨量站為代表唯金溪集水區內的代表站點。若集水區內無可查詢雨量站，則挑選最鄰近的雨量站或水文特性上較為接近者。

(4). 氣候變遷 RCP 情境選擇：RCP(Representative Concentration Pathway)是一種描述未來溫室氣體排放情境的方法，可根據不同的排放情境(例如 RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5)來預測未來的氣候變化。若下游無明確保全對象,初步建議可以 RCP 4.5 情境(中等排放情境：代表全球溫室氣體排放量會持續增加，但在中期後趨於穩定，降雨量的增加可能會較為明顯，但不至於達到最嚴重的情況)為評估依據。惟若集水區下游存在重要保全對象者(如鐵公路橋梁與聚落等)，則建議採用 RCP 8.5 情境(極端高排放情境：代表全球溫室氣體排放量持續快速增加，並未採取有效的減排措施。此情況下，降雨量的增加可能會非常明顯且對集水區產生較大的影響)。

(5). 一日降雨改變率查詢：查詢一日(24 hr) 50% 的降雨改變率，瞭解未來降雨的變化趨勢。全臺五大流域內雨量站之一日降雨改變率可查閱 113 年度「不安定土砂危害風險評估及作業方法」。

(6). 頻率年降雨情境加入降雨改變率之累積雨量計算：假設一定量的降雨情境，根據前項降雨改變率計算未來的一日累積雨量。以大清水溪集水區為例，其坐落於和平溪流域內，考量

野溪與坡地的水保設施之防洪標準為 50 年重現期，惟考慮氣候變遷，取其較大值 200 年重現期。因大清水溪下游有台 9 丁線與鐵路橋梁通過主流，屬於交通設施之重要保全對象。對於 RCP 情境遴選，建議選用 RCP 8.5 情境採取保守估計。如圖 2-59，經查詢 1 日(對應定量降雨 24 hr 累積雨量)50%的未來設計暴雨改變率為 28%。最後將該值視為增量納入前一節最大定量降雨情境的預設雨量，如探討 200 年重現期距在極端降雨下的境況(以大濁水雨量站之常態機率分布為例)，其可能降下的雨量如下，並依此進行集水區降雨逕流之推估。

範例： 大清水溪之 200 年重現期之極端降雨值：888.5 (mm)•(1+0.28) = 1,137.3 (mm)

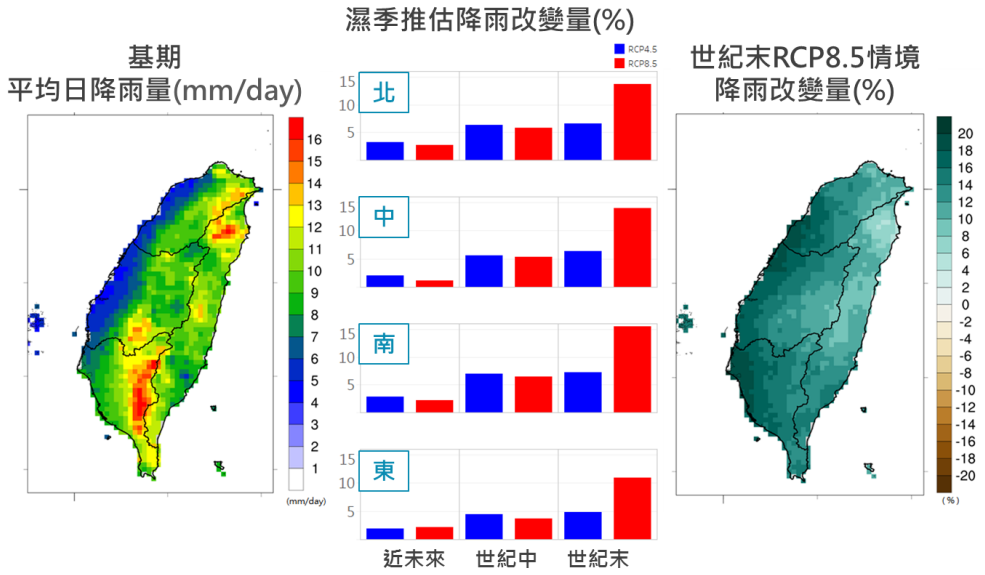


圖 2-56 臺灣北中南東四區未來降雨量改變率(%)推估圖：濕季

(來源：https://dra.ncdr.nat.gov.tw/)

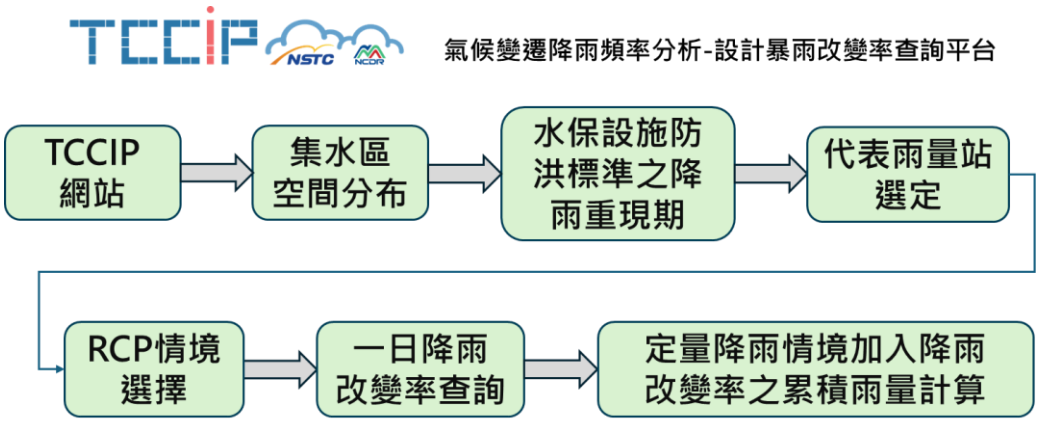


圖 2-57 極端降雨下新生崩塌情境評估流程圖

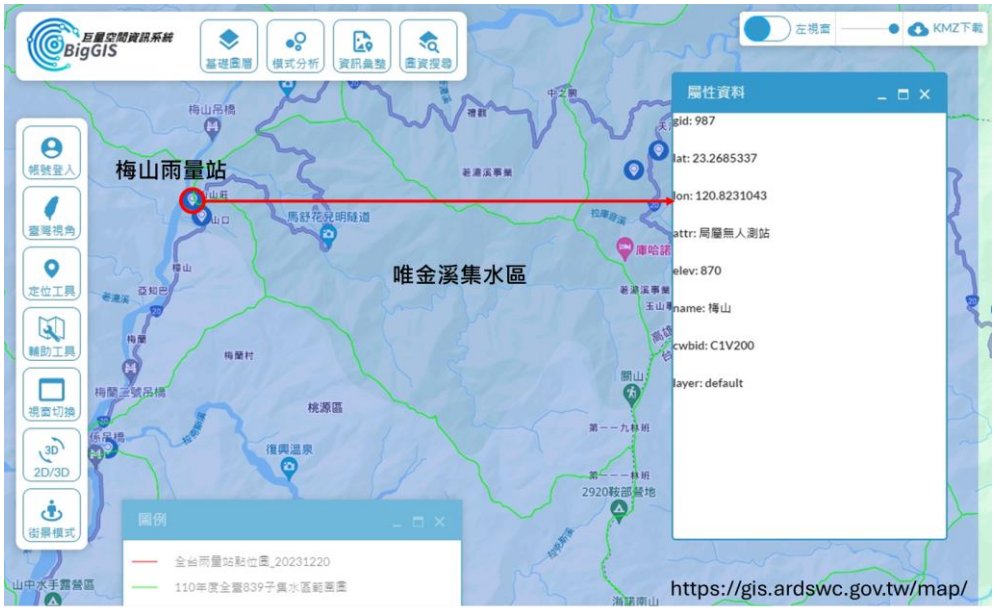


圖 2-58 BigGIS 平台查詢集水區內雨量站

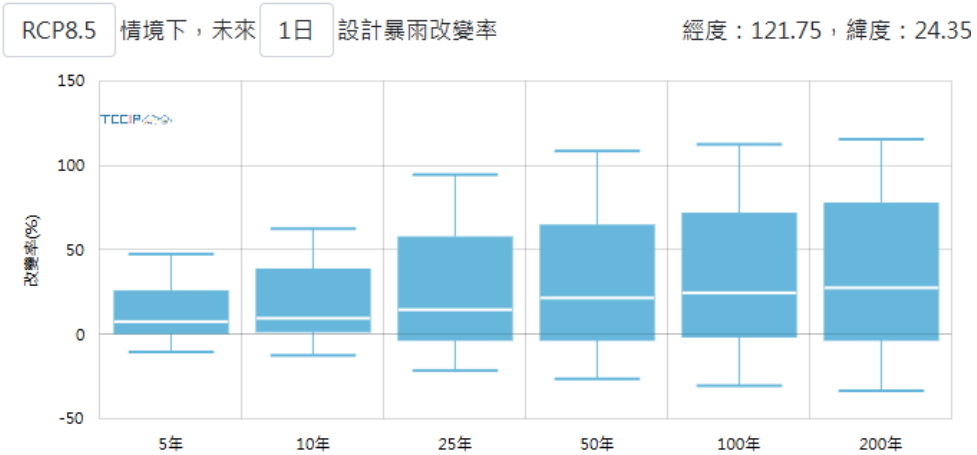


圖 2-59 大濁水雨量站 50%所對應之未來設計暴雨改變率

(來源：https://dra.ncdr.nat.gov.tw/)

以本計畫之評估集水區而言，如表 2-4 所示，四處不安定土砂模擬與兩處長期土砂運移模擬四個不同重現期之 24 hr 累積雨量值主要分布於 641.8-1,182.8 mm 區間，而極端情境下(200 年重現期之降雨值乘上 RCP 8.5 情境降雨改變率)約介於 1,137 - 1,478.5 mm。若與大規模崩塌警戒雨量極值(1,500 mm)相較，極端情境下所推估之雨量值與之相當，可獲致較為保守之極端情境，供數值模擬研析較危險之溢淹境況。惟本流域歷年年雨量均高於台灣其他區域，最低 25 年重現期降雨值均近似於土石流潛勢溪流警戒雨量最大值(650 mm)，故採用頻率年進行數值模擬採用雨量時，需注意是否涵蓋常時較易發生之降雨區間(如累積雨量 200 mm - 500 mm)。

表 2-4 計畫集水區不同重現期雨量彙總表(對數皮爾森第三類)

溪流集水區	鄰近雨量站	重現期降雨量[mm]				
		25 年	50 年	100 年	200 年	極端情境
和仁野溪	大濁水	641.8	725.8	807.8	888.5	1,137
三棧南溪	大濁水	641.8	725.8	807.8	888.5	1,137
大清水溪	大濁水	641.8	725.8	807.8	888.5	1,137
木瓜溪	上里	661.7	711.9	753.8	789.1	1,076
玉穗溪	小關山	940.4	1,030.2	1,110.5	1,182.8	1,478.5
文里溪	上里	661.7	711.9	753.8	789.1	1,076

(四) 數值模擬分析流程

考量極端降雨下新生崩塌情境(如集水區內新生崩塌率增加 2%以上或新生崩塌 10 公頃以上)、配合不同降雨情境及降雨逕流轉化為土石流關係,精進不安定土砂對下游保全對象危害或影響之分析模式及流程,為本計畫的重要關鍵課題。如圖 2-60 所示，首先，在河道產砂量的部分，由於臺灣絕大多數集水區不若荖濃溪流域存在完整的多期地表變遷地形與圖資。113 年度計畫分析流程導入即時氣象資訊的 QPESUMS 網格式雨量資料，透過集水區溪流的水文與地文資料蒐集，結合開源 Wflow 模式建置分布式降雨逕流關係，如圖 2-61 所示。模式的輸入資料來源，可包含降雨量或特定位置點的流量資料，而模式輸出檔案為以數值地形高程模型網格解析度為基礎的網格流量資訊。當獲取降雨量與流量的空間分布後，接著將 Wflow 與 Delft-FEWS 平台整合，進行歷史豪雨事件的率定測試與驗證。在取得特定集水區(或土石流潛勢溪流)較為客觀的降雨-逕流歷線後，便可透過土石流體積濃度(Cv)與土石流流量公式來量化不同降雨情境下的初始不安定土砂量體，至此可估算集水區河道內的潛在不安定土砂量體(創聚，2024)。

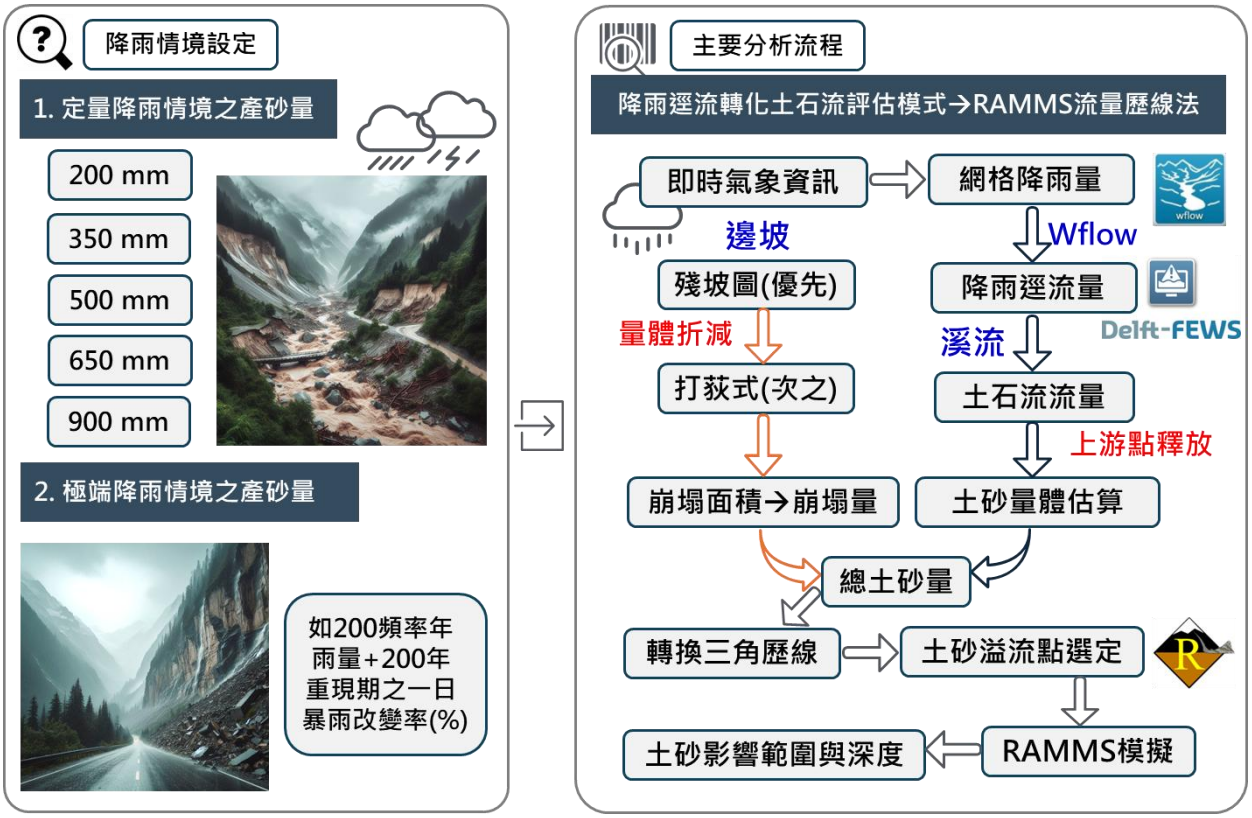


圖 2-60 113 年降雨情境下之不安定土砂評估精進流程

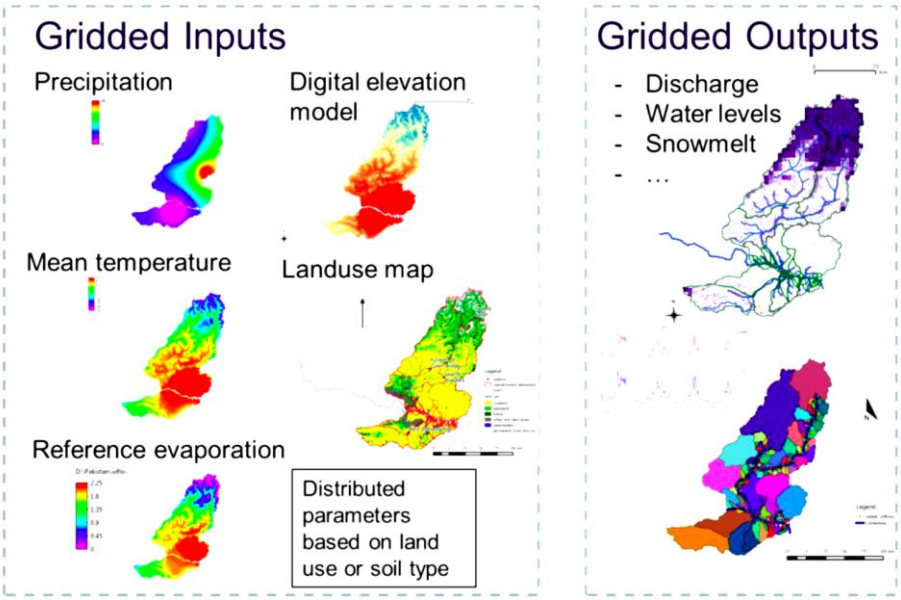


圖 2-61 分布式降雨逕流模式輸入輸出概念

資料來源:Wflow 官方網站

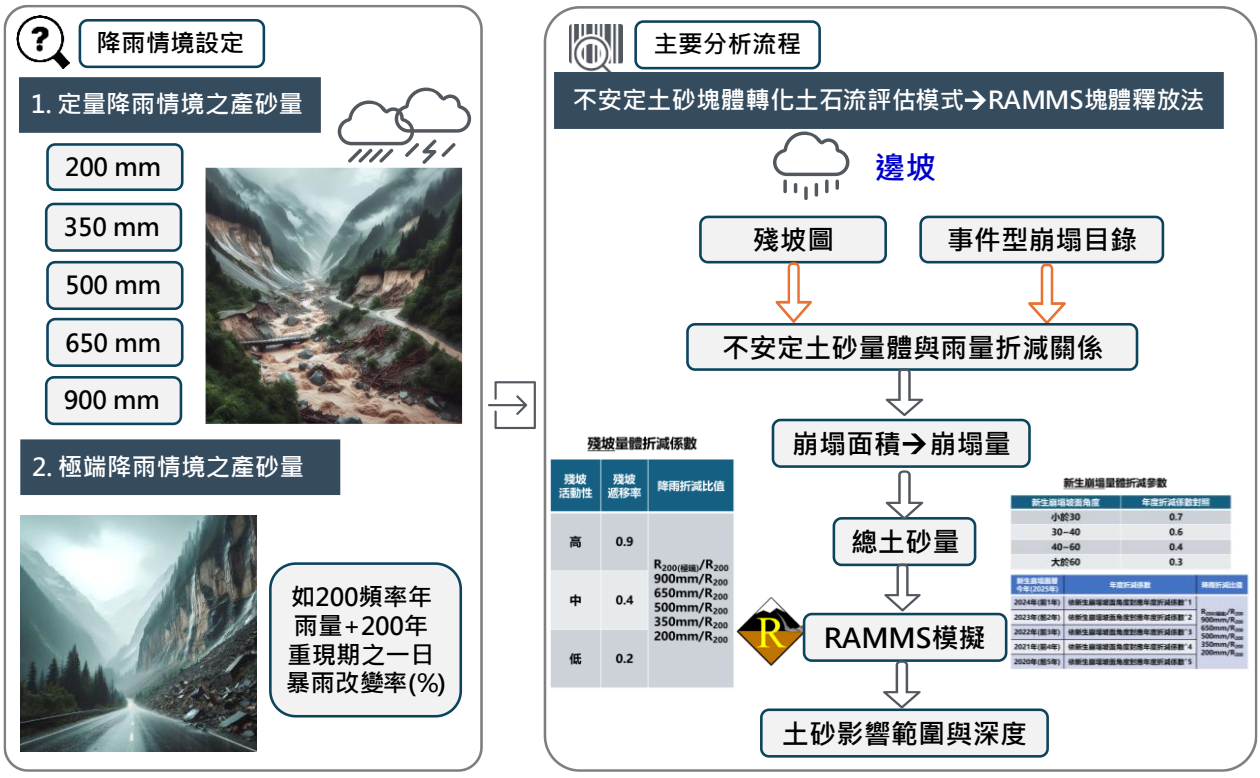


圖 2-62 114 年降雨情境下之不安定土砂評估精進流程圖

然對於溪流兩側邊坡上可能受降雨引致的不同崩塌，包含潛在大規模崩塌地(深層崩塌)範圍內的再復發活動塊體、表土或崩積層的淺層岩屑崩滑量體等，必需同步納入避免低估實際災害規模。對此，過去已有諸多文獻以歷史災害崩塌面積-體積回歸經驗式、水文演算、現場量測值等，闡述如何評估集水區新生崩塌的土砂量體評估方式(Rickenmann(1999)、蔡元芳(1999)、李璟芳等(2015, 2017)、Lee et al.,(2016))。

本計畫於 113 年計畫方法使用殘坡圖之殘坡面積，並依貴署大崩計畫率定之面積轉換體積經驗式獲取殘坡潛在土砂量，再依殘坡風險(高風險:不折減；中風險:折減 50%；低風險:折減 70%)與累積雨量量值(情境雨量/極端氣候下雨量)來適度折減，以降低模擬後集水區下游不合理之堆積深度(如堆積深度大於 20 - 30 m)。接著以三角歷線關係與土石流尖峰流量發生時間來推估土砂運移時長，最後再定義適當的土砂釋放點源，

如崩塌地與溪流的匯流點、土石流潛勢溪流溢流點或重要橋梁設施的交會點。由 113 年不安定土砂模式建立計畫執行經驗得知，當土砂釋放點位於集水區溪流中點時，由於 Wflow 納入計算之集水區面積較大，所計算之溪流逕流量轉換為土石流洪峰流量時，土砂量體放大效應常使集水區 RAMMS 下游模擬結果，高於歷史堆積記錄之土砂量與深度，且模擬時長甚為冗長(玉穗溪流域單一情境需耗時 3.5 - 7 天；以 5 m 精度 DEM 為例)(圖 2-63)。因 RAMMS 無法模擬土石流在扇狀地上從原有的漫地流轉變成流動寬度變小、流深和流速卻增加的渠道流，隨著渠道的左右擺動，扇狀地的形狀也開始呈現不規則的型態，且 RAMMS 流量歷線法無法多點釋放，故經 114 年 2 月 14 日第 1 次工作會議決議採行 RAMMS 塊體釋放法(block release)驗證比對 2021 年盧碧颱風(Shiu.2023)與 2023 年凱米颱風事件流出土砂量與特定控制點之淤埋深度，如河道出流口之土砂堆積高度，由圖 2-65 可顯示，Case A 及 Case B 之土砂堆積高度、最大高度及堆積量之數值近似於災害事件之計算量。經驗證後，擬採用塊體釋放法進行計四處畫集水區不安定土砂運移模擬，相關模擬流程詳圖 2-64 所示。

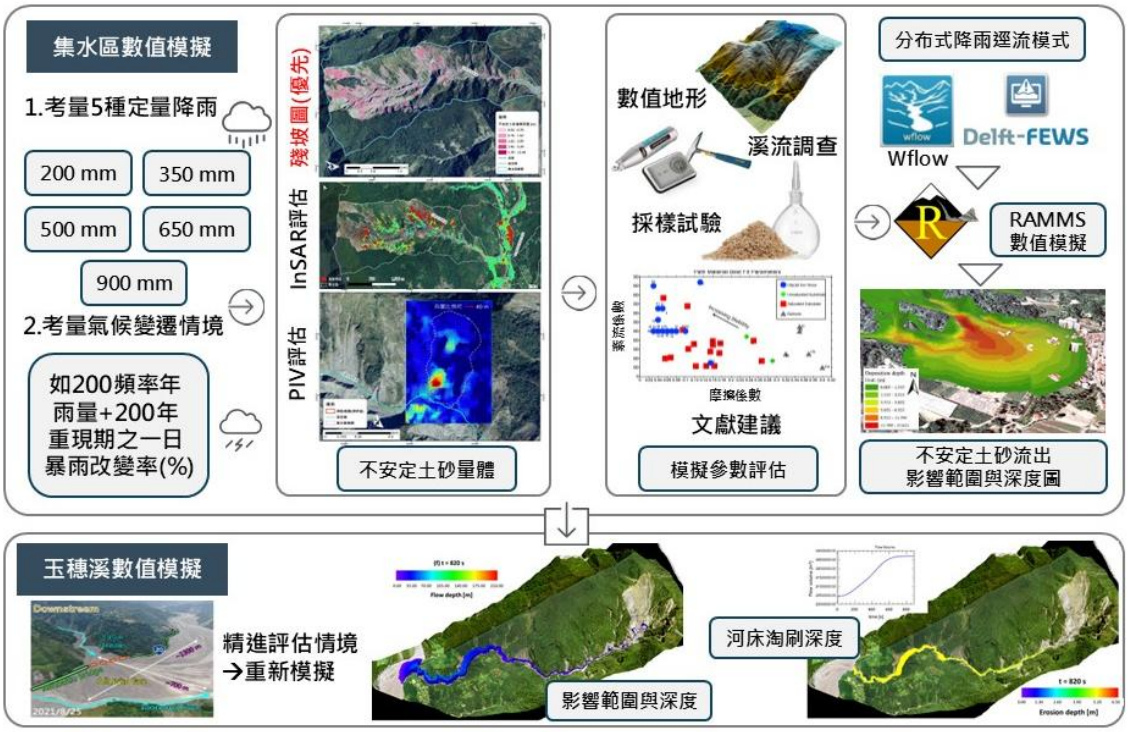


圖 2-63 113 年不安定土砂運移數值模擬分析流程圖

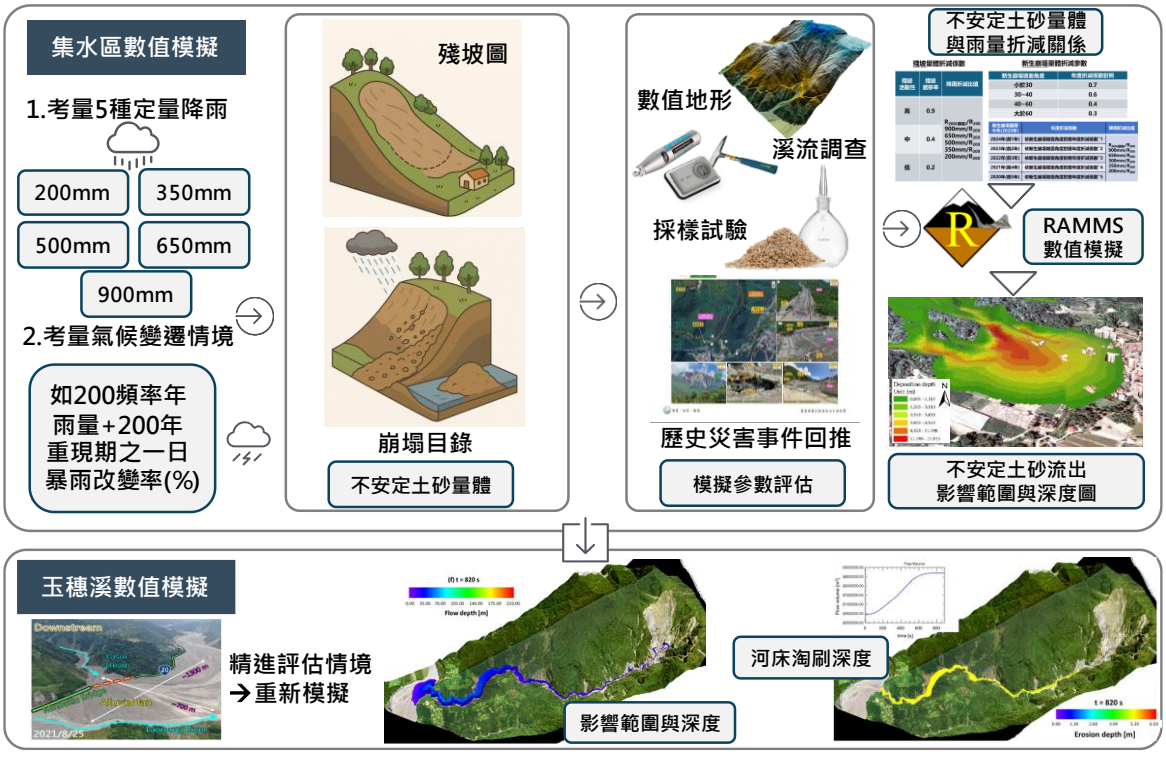


圖 2-64 114 年不安定土砂運移數值模擬分析流程圖

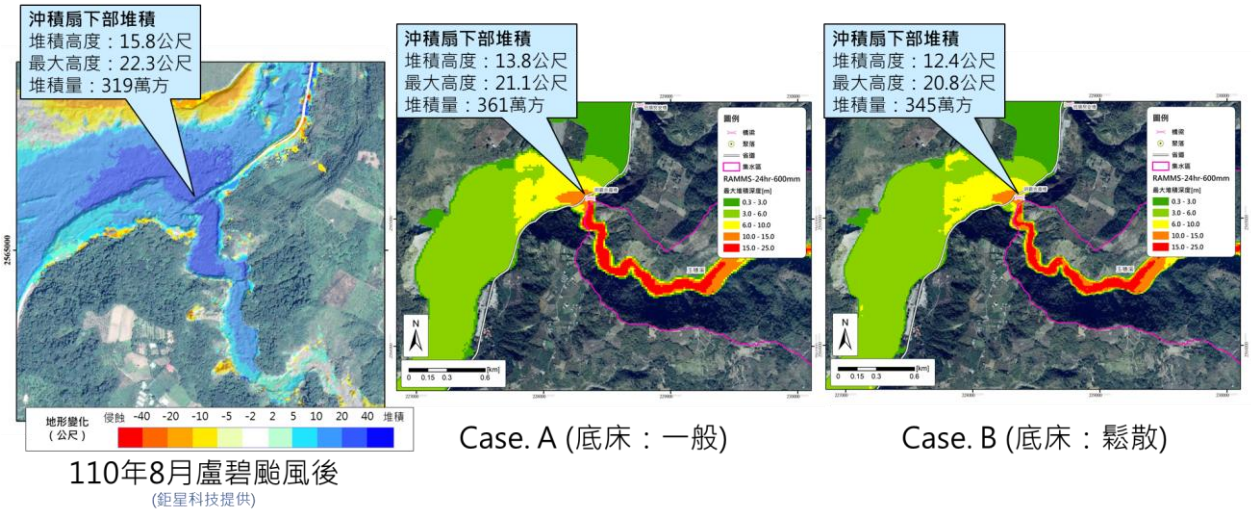


圖 2-65 災害事件擬合流出土砂量與特定控制點之淤埋深度-以玉穗溪為例

為考量極端降雨下新生崩塌情境(如集水區內新生崩塌率增加 2%以上或新生崩塌 10 公頃以上)、配合不同降雨情境(24 hr 累積雨量達 200 mm、350 mm、500 mm、650 mm、900 mm 以及極端降雨情境)並參考農村水保署提供全台殘坡圖面積與近五年崩塌目錄面積作為不安定土砂來源，精進不安定土砂對下游保全對象危害或影響之重要關鍵課題。如圖 2-64 所示，本(114 年)年度計畫 RAMMS 模擬將以塊體釋放法為主要模擬方法，不安定土砂料源參考農村水保署提供全台殘坡圖面積與近五年崩塌目錄面積，並於模擬土石流量體考慮底床為可沖刷之動床條件，而係透過 RAMMS : DF 之動床-侵蝕模組將沿程受剪應力掏刷並捲入之河床、岸坡鬆散土砂一併納入，完整反映崩塌-沖刷交互作用對輸砂規模的影響。「殘坡」與「崩塌目錄」兩者於土砂量體供應條件，在殘坡上，參酌殘坡活動性(分為高、中、低)，分別給予殘坡遞移率為 0.9, 0.4, 0.2 之折減值；而崩塌目錄考慮多屬淺層崩塌，則以【年度折減係數設定原則】作為土砂量體折減依據，關於【年度折減係數設定原則】詳述三點如下:

1. 年度折減係數設定原則

(1). 坡度影響考量:依據崩塌區域之坡度條件，設定不同的年度折減係數，以反映坡度對崩塌體遞移與穩定性變化之影響。

(2). 時間折減條件:考量崩塌體隨時間推移，其遞移量與活動性逐年減少，故年度折減係數依不同年度對應坡度條件，按「年度折減係數(年數)」方式遞減計算。

(3). 坡度效應更新以最新一期新生崩塌範圍內之 DEM 或 DSM 資料計算坡度，據以推估坡度分級，並設定近五年之年度折減係數；同時假設崩塌區之坡度在該期間內不變。

另為評估 24 小時不同累積降雨情境下之不同土砂運移境況，採各集水區之 200 年重現期雨量為折減基準值(分母)，可配合 200, 350, 500, 650, 900 mm 與極端氣候情境雨量(分子)來給予不同程度的土砂生產折減比例。舉例來說，當玉穗溪於 900 mm / 24 hr 雨量情境下，如屬高活動性的殘坡塊體，其土砂量體折減值為 0.9·(900 mm /1,258 mm)=0.64(土砂流出比為原量體的 64%)。相同降雨情境下(900 mm/24 hr)，而該集水區內如存在新增崩塌目錄為近 2 年且坡度為 35 度之崩塌地，其崩塌量體折減係數為$(0.4)^2$·(900 mm /1,258 mm)= 0.11(土砂流出比為原量體的 11%)。待崩塌面積折減係數獲取後，其不安定土砂量體估算以下兩種原則評估之。

(1). 或崩塌面積大於 10 ha 者：採用大規模崩塌之面積-體積回歸經驗式。

$$V = 0.1025*A^{1.401}\text{(農村水保署，2023)} \qquad (2\text{-}25)$$

上式中，A 為殘坡或崩塌目錄面積。

(2). 面積小於 10 ha 者：以崩塌面積所處之坡度淺層崩塌深度(h)。如坡度小於 30 度：崩塌深度採 1.7 m；坡度介於 30 – 40 度：崩塌深度採 1.5 m；坡度介於 40 – 60 度：崩塌深度給予 1.0 m(地礦中心，2010)。

經取得各殘坡與崩塌目錄之土砂量體後，依據調查所得圖資、調查成果與力學試驗參數率定資料，並考慮底床為可沖刷之動床條件及重要工程結構物影響，進行溪流集水區不安定土砂運移數值模擬，每條溪流數值模擬五種 24 小時累積降雨情境(如 200, 350, 500, 650, 900 mm)，及配合 NCDR 已率定之氣候變遷降雨日增值來設定極端情境雨量參數，以瞭解不同降雨情境及新增崩塌下之潛在土砂流出量，並產製集水區範圍之土砂出流堆積範圍與深度圖。如圖 2-68 所示，為大清水溪集水區於 6 種定量降雨(200 - 900 mm)與極端氣候變遷下雨量(1,478 mm)之模擬不安定土砂危害圖，表 2-5 為模擬後對下游保全對象之危害評估表(含鐵路橋與公路橋樑)。

另考慮模擬參數(摩擦係數、紊流黏滯摩擦係數及底床侵蝕參數)之合理性，於進行四處計畫集水區不安定土砂運移數值模擬前，團隊將針對集水區內曾發生重大土砂災害事件，已針對發生土石流期間雨量近似於六種 24 小時累積降雨情境(如 200, 350, 500, 650, 900 mm,極端降雨情境)，藉由擬合土砂堆積範圍或特定控制點之土砂堆積深度以檢核模擬參數。透過上述方式得到合適的模擬參數，故可以藉此參數當作基準，以利後續集水區不安定土砂運移數值模擬。

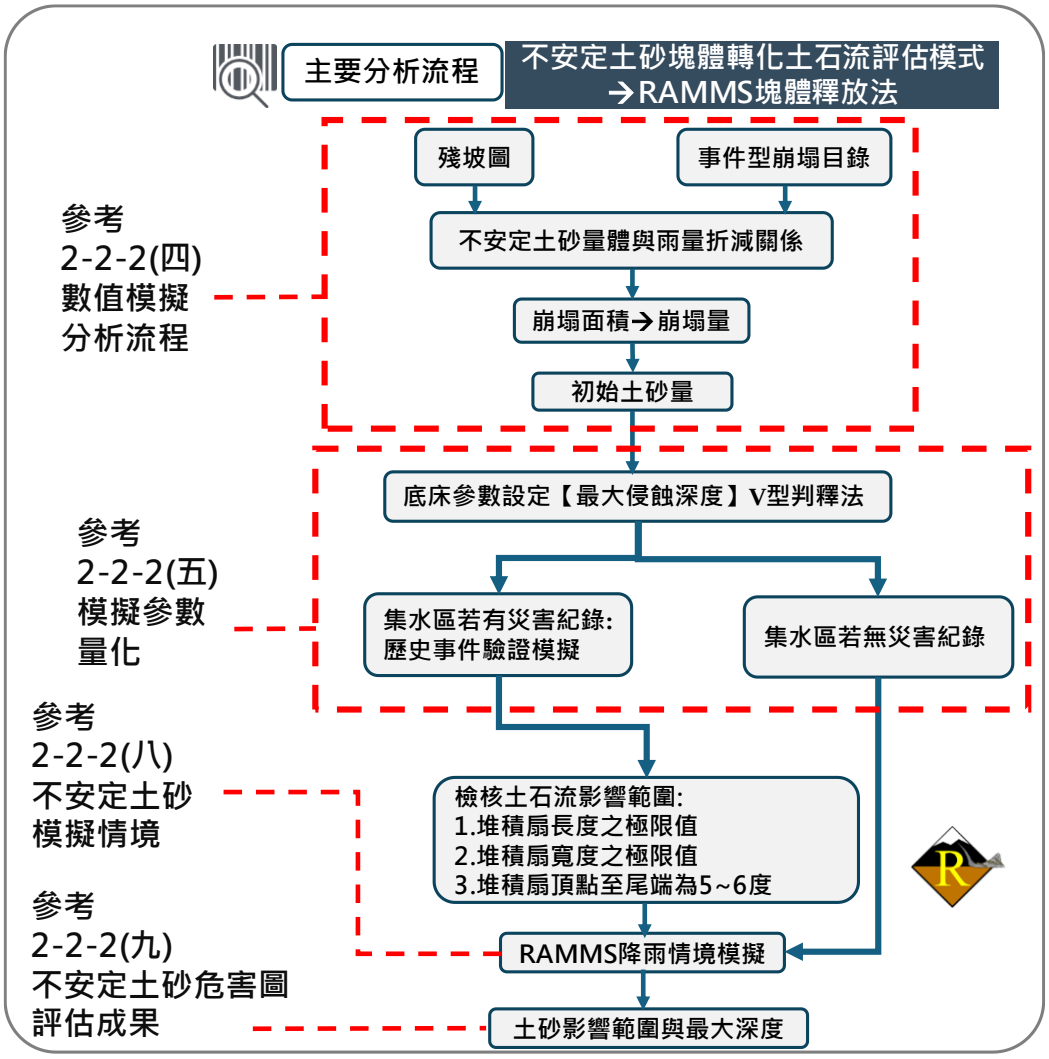


圖 2-66 本年度不安定土砂評估模式評估流程概念圖(塊體釋放法)

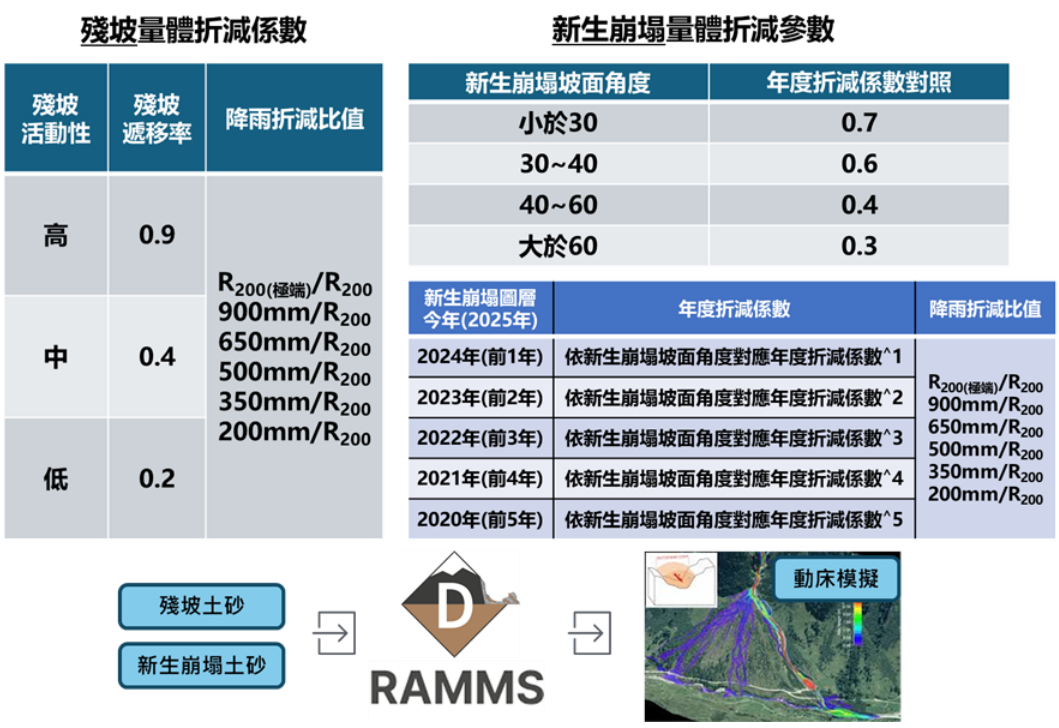
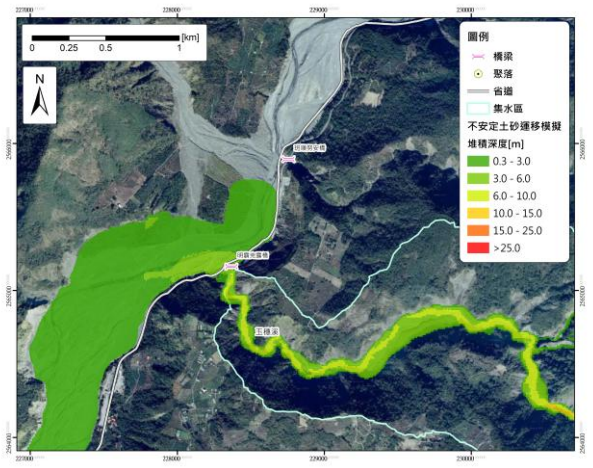
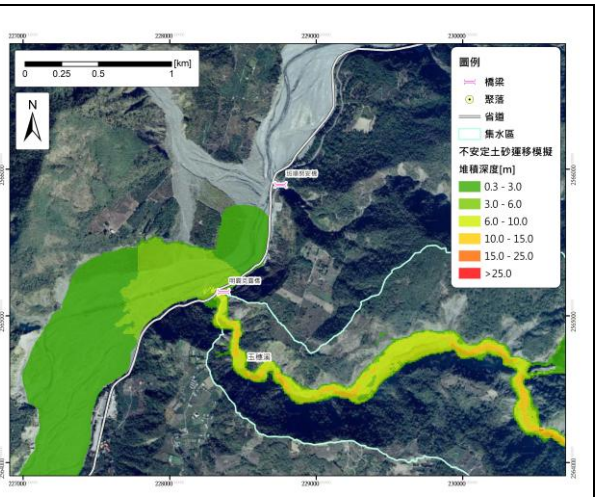


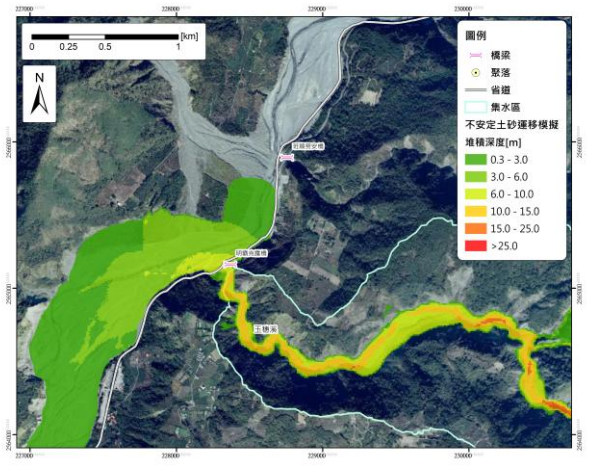
圖 2-67 殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係(塊體釋放法)



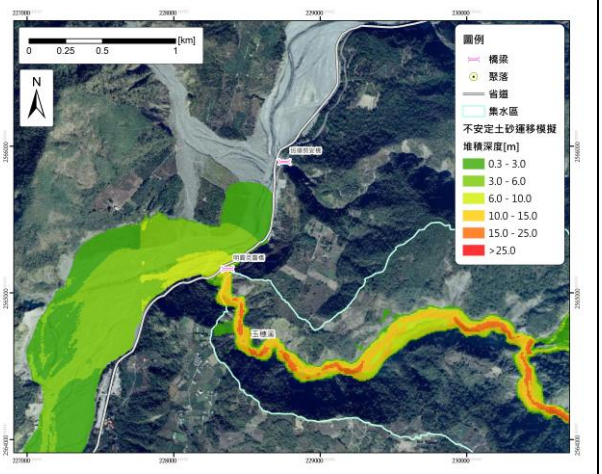
(a) 24 hr 累積雨量 200 mm



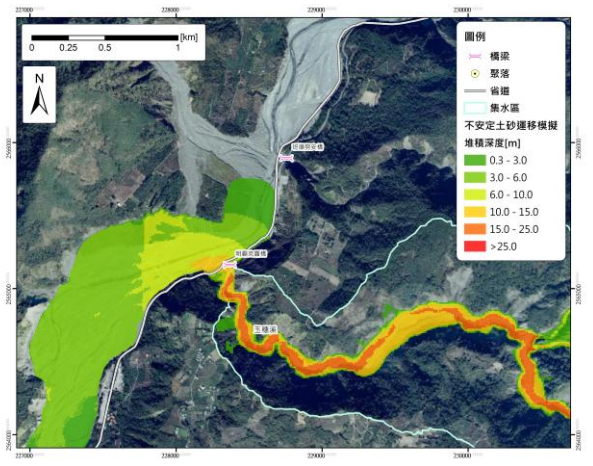
(b) 24 hr 累積雨量 350 mm



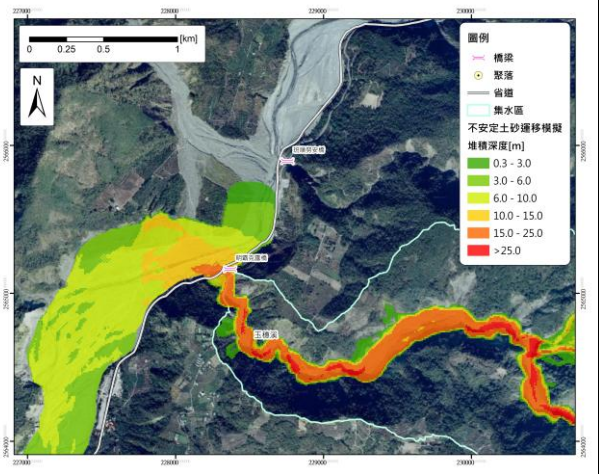
(c) 24 hr 累積雨量 500 mm



(d) 24 hr 累積雨量 650 mm



(e) 24 hr 累積雨量 900 mm



(f) 24 hr 累積雨量 1,478 mm

圖 2-68 玉穗溪不安定土砂危害圖(塊體釋放法)

表 2-5 玉穗溪不安定土砂運移模擬成果與危害評估表

輸入參數	數值					
累積雨量情境 (mm)	200	350	500	650	900	1,485
流出土砂量體 (m^3)	1,645,789	2,344,456	3,029,250	3,523,398	4,570,225	6,927,259
潛在影響聚落	無	無	無	無	無	無
潛在影響公路橋	無	無	明霸克露橋(台 20 線鋼便橋)	明霸克露橋(台 20 線鋼便橋)	明霸克露橋(台 20 線鋼便橋)	明霸克露橋(台 20 線鋼便橋)

依據農保監字第1142670212 號「114 年集水區不安定土砂運移模式精進與衝擊評估」第 4 次工作會議紀錄不安定土砂危害度圖之土砂堆積深度為 7 級距指標(圖 2-69)。由最低的溢淹補償標準 30 cm(參據土石流及大規模崩塌災害救助種類及標準，第五條第二款)至高度 1 m當成第一級，接著以3 m(一層樓高度)、6 m(二層樓高度)、10 m、15 m、20 m及>25 m(參考歷史發生之最大土砂堆積深度)，訂定不同集水區不安定土砂危害度圖之統一出圖標準。惟部分流域集水區若歷史溢淹深度較大者(如>20 m)，仍建議視狀況保留最大堆積深度級距之滾動調整空間。

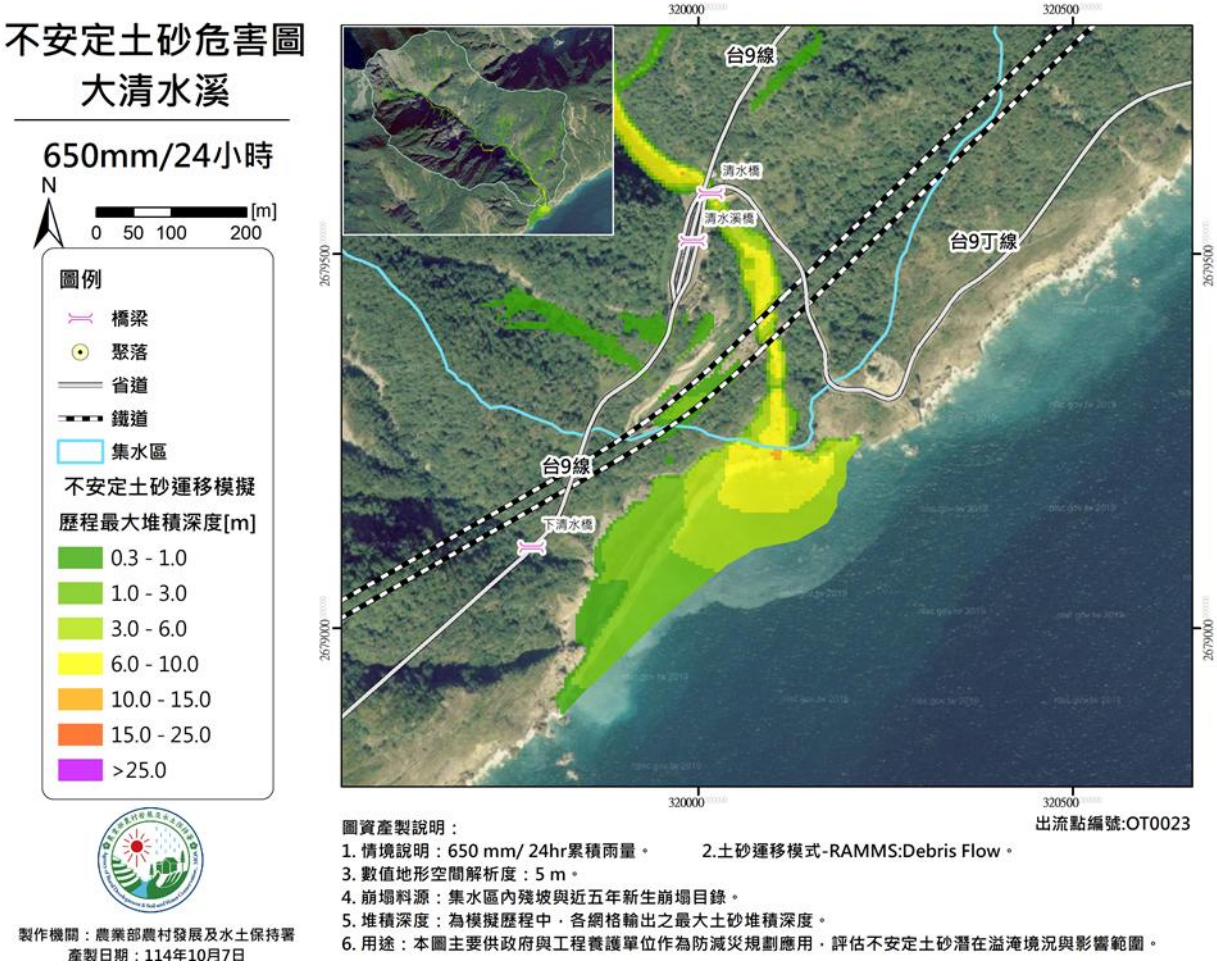


圖 2-69 不安定土砂危害圖

另綜觀不安定土砂數值模擬工作經 113 年度(創聚)之相關案例分析成果,顯示流量歷線法與塊體釋放法各有其優勢,相關優劣比較如表 2-6所示,如參數給定合宜，兩方法對於最終模擬結果可收相仿成效，本年度除改以 RAMMS 塊體釋放法評估集水區不安定土砂運移情境外，仍將持續蒐集歷年土砂災害圖資之完備案例(如貴署於災後產製數值地形、空拍正射影像、現場調查資料)，研析兼顧合理性且具效率的評估方法納入研究探討範疇，以利後續可能適用情境之評估精進。

表 2-6 RAMMS 塊體釋放法與流量歷線法於不安定土砂模擬比較

評估參數	塊體釋放法	流量歷線法
降雨情境	需評估集水區內最大歷史降雨量或採極端氣候降雨量為最大值，並進行比例假設崩塌塊體於不同降雨條件下之崩壞比。	可由降雨(可考慮雨型分布)結合 Wflow 模式推估集水區定量降雨或頻率年之地表逕流與土石流洪峰流量。
模擬時程	時程較短，相同 DEM 空間解析度條件下，以當前最高運算規格 CPU 並採玉穗溪集水區為模擬案例，單一情境可於 1.5 天內完成。	時程甚長，相同 DEM 空間解析度條件下，以當前最高運算規格 CPU 並採玉穗溪集水區為模擬案例，單一情境耗時約 3 - 4 天完成。
適用集水區內土砂運移情境	可實踐不同殘坡於不同時序下，於集水區內主流之崩壞轉化為土石流之土砂互制效應。對於集水區內已知殘存崩塌量體者，適合用於快速評估對下游之衝擊風險。	可實踐集水區內泥流型土石流與高含砂水流之情境，惟土砂初始流量需配合降雨特性與相關採樣與力學試驗進行複雜評估，其模擬結果之影響範圍高估實際範圍。
模擬後之流出土砂量合理性	適於崩塌型土砂災害主導之集水區，可設定集水區內不同時間與空間分布之崩塌塊體崩壞條件與順序，對於中等規模與大規模崩塌邊坡能有較佳的實況契合程度，對於模式輸入參數之推估相對簡便(不需考慮雨型與土砂釋放點)。模擬後之集水區流出土砂量較不易過估。	適合溪流型(溪床堆積土砂為主)土砂災害集水區使用。若將逕流量(清水流)轉換為土石流洪峰流量納入模擬，隨集水區面積增加或溪流較長者，於溪流中游釋放情境與動床模式下之捲增效應土砂量較易高估集水區實際產砂量。另殘坡土砂量之適度折減亦為必要考慮條件。

關於不安定土砂運移數值模擬分析，採用 RAMMS : Debris Flow 數值模擬模式，不安定土砂運移數值結合 RAMMS 評估分析流程可參照圖 2-70 所示。首先針對申請取得最近期高精度數值地形配合無雲光學遙測影像進行集水區範圍劃分，包含溪流線與溪流範圍數化等工作。根據 RAMMS : DF 研發團隊建議，模擬所使用之地形精度，如集水區範圍甚廣建議採 5 m 空間解析度，如集水區範圍較小，則最佳解析度應以 2 m 為限，避免地形上之局部孔洞或奇異點造成特定網格在數值運算時無法收斂。以荖濃溪流域之子集水區為例，其集水區面積多介於 10^1-10^2 km^2(中興社，2023年)，另考量臺灣高解析度 DEM 產製更新時程較長，RAMMS開發團隊建議集水區面積大於 10 公頃者，可先以 10 m 空間解析度之 DEM 作為分析地形基礎，若集水區面積小於 10 公頃或需要探討局部地形之土砂運移現象者，則建議使用優於 5 m空間解析度 DEM 進行分析。本操作流程採用 RAMMS 模式之「塊體釋放法」進行土砂來源區設定。首先，參考農村水保署之殘坡圖及崩塌目錄置入 RAMMS 數值地形模型之介面中作為塊體釋放區。接續依據建立之「殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係圖」，對原始崩塌面積進行雨量條件折減，以獲得實際釋放條件下之有效塊體面積。

1. 有效塊體面積作為選用土砂體積經驗式之依據：

(1).若有效塊體面積大於 10 公頃時，採用大規模崩塌之面積－體積回歸式。

(2).若有效塊體面積小於 10 公頃時，則採用地礦中心所提出經驗法則。以崩塌面積所處之坡度淺層崩塌深度(h)。如坡度小於 30 度：崩塌深度採 1.7 m；坡度介於 30 – 40 度：崩塌深度採 1.5 m；坡度介於 40 - 60 度：崩塌深度給予 1.0 m。

取得塊體體積後，再依 RAMMS 模式之幾何設定原則，以「塊體體積 除以 RAMMS 中對應釋放區之地表斜面面積」，推算各釋放區之塊體厚度（即初始崩塌深度），並作為 RAMMS 模擬輸入條件。

上述塊體深度輸入完成後，得以確認不安定土砂總量(殘坡圖+崩塌目錄)。後續模擬參數調校部分可參考【模擬參數量化】小節所闡述之內容，考量集水區是否歷史災害紀錄為條件並進行摩擦係數、紊流摩擦係數以及底床參數-最大侵蝕深度等合理之參數調整。最後將所需參數輸入 RAMMS : DF 模式中進行土砂運移模擬，模擬完成後產製「不安定土砂影響範圍圖」與「不安定土砂堆積深度圖」，供後續防災產品發布與應用。

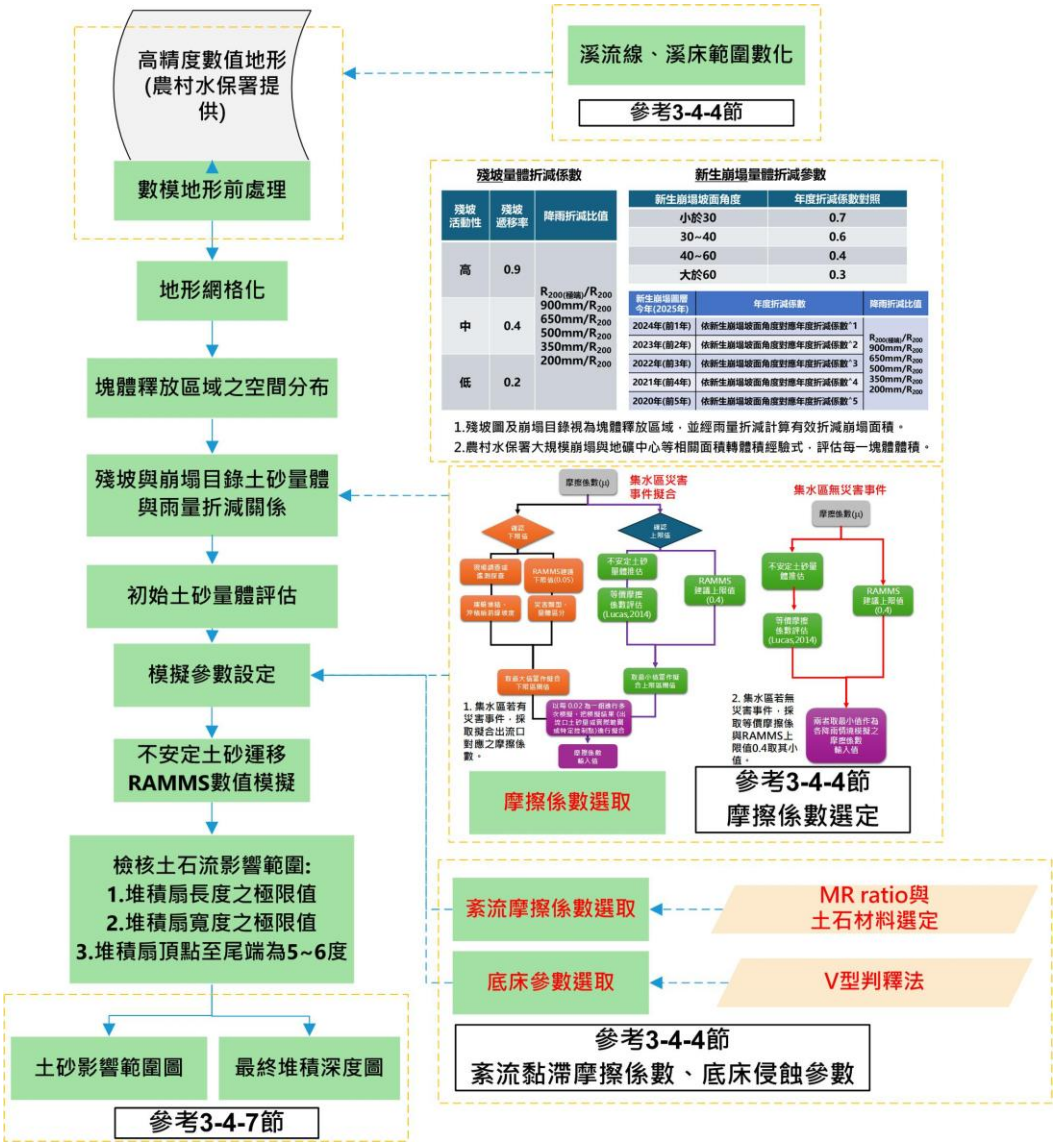


圖 2-70 不安定土砂運移評估模擬流程圖

本(114)年度計畫之四處集水區之 RAMMS 數值地形建模採用內政部 2016 年後測繪之 1 m 精度 DEM 。著眼於電腦運算時效(採用 Intel i9 處理器)與模擬時間之平衡，如表 2-7 所示；並參酌 RAMMS 開發團隊建議面積 10 km^2 以下集水區，可逕採用 5 m 數值地形進行建模，而大於面積 10 km^2 之集水區，則建議適度放寬至 10 m 地形精度進行建模。依此原則，和仁野溪(花縣 DF025)、三棧南溪(花縣 DF174)、大清水溪(花縣 DF024)、木瓜溪(東縣 DF059)皆採用 5 m 數值地形建模。

表 2-7 本計畫四處集水區邊坡殘坡土砂量推估

集水區名稱	集水區面積[km^2]	地形建模精度[m]
和仁野溪(花縣DF025)	2.57	5
三棧南溪(花縣DF174)	3.00	5
大清水溪(花縣DF024)	5.61	5
木瓜溪(東縣DF059)	5.28	5

(五) 模擬參數量化

如何合理且不過估的輸入力學參數與邊界條件是土砂數值模擬中最重要的關鍵課題。相對於其他的數值模式，本操作流程採用 RAMMS 之優點為簡化參數的輸入數量，同時 RAMMS 使用手冊(RAMMS, 2022)、現場調查或遙測調查(災後 DSM)、等價摩擦係數評估、MR-Ratio(周憲德, 2021)也提供主要參數的應用範圍參考值，對於過去沒有採樣試驗與文獻分析的集水區也能納入評估。

由於 RAMMS : DF 為連續體組成律模式，以二相流(two-phase flow)模擬土石流或崩塌運移整體巨觀運動行為，數值求解方法採用有限體積法(finite volume method, FVM)，以固定空間網格進行計算，忽略流動歷程中之局部微觀碰撞行為(如波峰之巨礫彈跳行為)。以下就 RAMMS 模式之動床模擬中，三個重要的力學參數：(1)摩擦係數(Coulomb friction, μ)、(2)紊流黏滯摩擦係數(viscous-turbulent friction, ξ)、(3)底床侵蝕參數(erosion information)等項目，說明如何從現場調查到室內試驗所得的結果來研擬合理輸入參數，供未來擴大應用重要集水區時的參數輸入參考基準。

1. **摩擦係數(μ)**：集水區內堆積材料的摩擦係數是土砂數值模擬中最常使用的基本參數。RAMMS : DF 手冊中指出，與法向應力呈正比的乾庫倫摩擦參數的選擇，需要使用參考資訊(如現場調查資訊、流動

段現場照片、流速和流動深度推估、地形測量以及河床質材料組成)來對模型進行校準，且應由具有土石流分析專業的人員來完成。如圖 2-71 所式，為不安定土砂模式所需摩擦係數評估流程圖。可先區分該集水區過去是否曾發生土石流災害事件。如有災害事件記錄則可取得出流口土砂量或實際範圍或特定控制點等參考資訊進行校準，其方法說明如下:

(1).依據【摩擦係數選定】之方法可獲得摩擦係數的合理範圍區間：

A.區間上限值：採用 RAMMS 使用手冊建議值 0.4(φ 約為 22º)。若等價摩擦係數法(Lucas et al., 2014)所得最大值低於 0.4，則以該值為上限。

B.區間下限值：採用 RAMMS 使用手冊建議值 0.05(φ 約為 3º)。若集水區內曾發生之土砂事件後測繪淤積地形之沖積扇安息角所得最小值高於 0.05(φ 約為 3º)，則以該值為下限。

(2).再由此區間之摩擦係數，以每 0.02 為一組進行多次模擬，把模擬結果擇一條件(出流口土砂量或實際範圍或特定控制點)進行擬合。

(3).將擬合後之摩擦係數並使用線性內插法計算各降雨情境對應之摩擦係數，再進行 RAMMS 模擬(圖 2-72)。包含「定量降雨」與「極端降雨」情境，分別得到對應的影響範圍與堆積高度，作為風險情境評估。

考量臺灣地區集水區仍有多數尚未進行採樣及試驗工作，如無現地長期研究，實較難取得雨量與摩擦係數變化之關聯性。鑑此，可初步採用等價摩擦係數(equivalent friction coefficient)之概念。意即從本分析流程前端已確立或概估之不安定土砂總量體(V)，並於 RAMMS 模式中採用邊坡塊體釋放法(block relaease)模擬者，可配合文獻中大量土

砂災害事件之回歸關係(如圖 2-74；Lucas et al., 2014)進行初估；如下式(2-25) :

$$\tan\theta = H/\Delta L' = 1.200V^{-0.089} \quad \text{(Lucas et al., 2014)} \quad (2\text{-}26)$$

適用範圍：$10^2 < V < 10^{10}\ m^3$

上式中，因 Lucas 研究成果之迴歸相關係數達 0.9 且蒐集各國發生地滑、崩塌等土砂災害災例，故 $\tan\theta$ 值可視為集水區內之假設庫倫摩擦角使用。圖 2-74 也也反映了當土砂量體規模愈大時，其崩滑或流動距離可以達到愈遠。此與現實世界中，當集水區內面臨降雨累積值愈大時，邊坡與溪床上可被帶動的土砂量體將呈正比，可作為摩擦係數上限值；集水區內曾發生之土砂事件後測繪淤積地形之沖積扇安息角，可作為摩擦係數下限值。

若當集水區無災害事件時，可依摩擦係數評估流程之參考(1).計算各定量降雨與極端降雨情境之不安定土砂量體；(2).計算各定量降雨與極端降雨情境之等價摩擦係數(3).等價摩擦係數與 RAMMS 使用手冊建議值 0.4，兩者取其保守值(即較小的 μ 值)，作為各降雨情境數值模擬的輸入摩擦係數參考值(圖 2-73)。

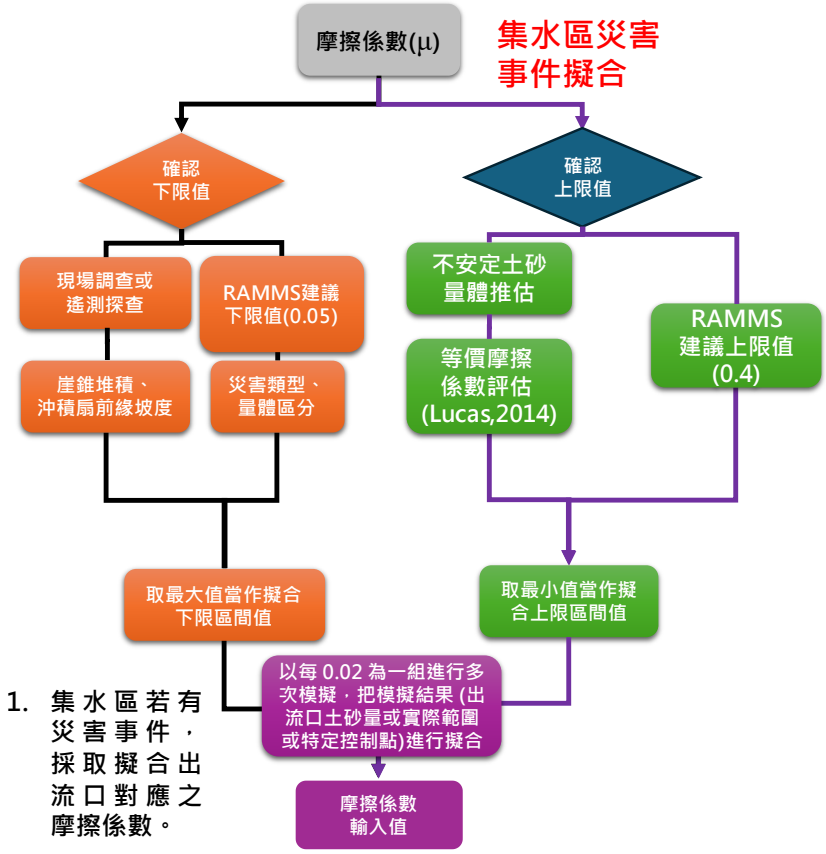


圖 2-71 RAMMS 庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區災害事件擬合)



圖 2-72 各定量降雨情境之 RAMMS 庫倫摩擦係數選定流程圖

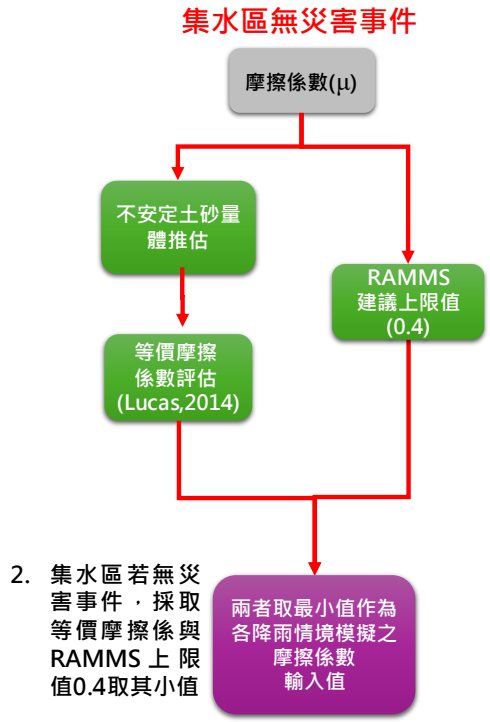


圖 2-73 RAMMS 庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區無災害事件)

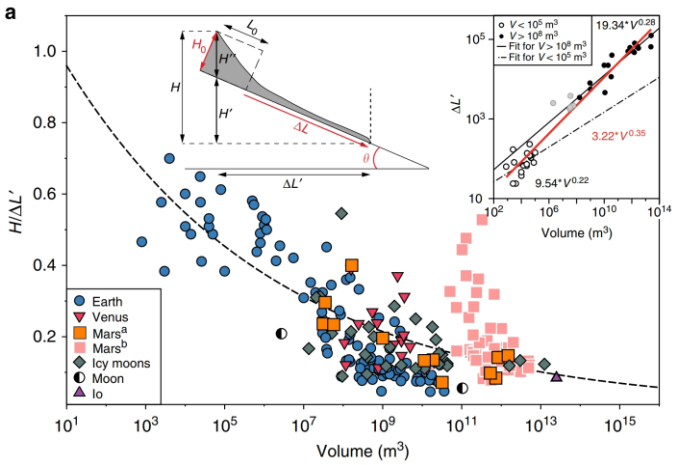


圖 2-74 等價摩擦係數與土砂量體關係圖(Lucas, 2014)

2. **紊流黏滯摩擦係數(ξ)**：在 RAMMS：DF 數值模擬參數中，紊流黏滯摩擦係數(ξ)一直是當前較難從試驗中獲得的輸入參數。由於 RAMMS 所提出的 Voellmy 模型考慮了固相的阻力(μ 表示為內剪切角的正切值)和黏性或湍流流體相(ξ 為使用流體動力學論證引入)。摩擦係數決定了流動所呈現的運動行為。當水流接近停止時，μ 值佔有主導地位；反之，當水流快速運行時，

則改由 ξ 值主控流體的運移特徵。自 RAMMS 從問世以來，研發團隊除於瑞士南部 Illgraben 集水區(面積: 8.9 km^2)持續以定點觀測站從事土石流事件觀測與模式參數校核外，也提出了相關的 ξ 應用值區間建議供使用者採用。如圖 2-75 所示，所建議之紊流黏滯摩擦係數 ξ 值設定流程圖，主要為透過流域險峻值 MR ratio 以及流域長度(L)(周憲德，2021)推測土石流材料組成類型來提供使用者評估適切的 ξ 值。計算流域險峻值 MR ratio 如下式:

$$MR = H/\sqrt{A} \qquad \text{(周憲德, 2021)} \qquad (2\text{-}27)$$

H(km)：集水區溢流點以上高程差；

A(km2)：溢流點以上集水區面積

如表 2-8 所示，紊流黏滯摩擦係數 ξ 值用於描述土砂流動的紊流行為，一般而言，較小的 ξ 值普遍被視為顆粒為主導地位的土石流現象；而相對較大的 ξ 值，則多與近似紊流流況的泥流型土石流為主。RAMMS 研究團隊建議在沒有任何資料的狀況下，初步可以土石流材料組成的特性來區分，如圖 2-76 所示，若屬礫石型土石流，ξ 值可設定 100 - 200 [m/s^2]區間，若偏向泥流型土石流，ξ 值可設定於 200 - 1,000 [m/s^2]區間。



圖 2-75 RAMMS 紊流黏滯摩擦係數評估流程圖

表 2-8 RAMMS 模式與其他文獻紊流黏滯摩擦係數建議值

土石流材料組成類型	紊流黏滯摩擦係數 ξ [m/s²]	流域險峻值	集水區土砂災害類型	流域長度
泥流型土石流	1,000	MR<03	洪水	-
	500	0.3=<MR<=0.43	高含砂水流+土石流	L=<14 km
礫石型土石流	200	0.43<MR	高含砂水流+土石流	7 km-<L=<14 km
	100	0.43<MR	土石流	L<7 km

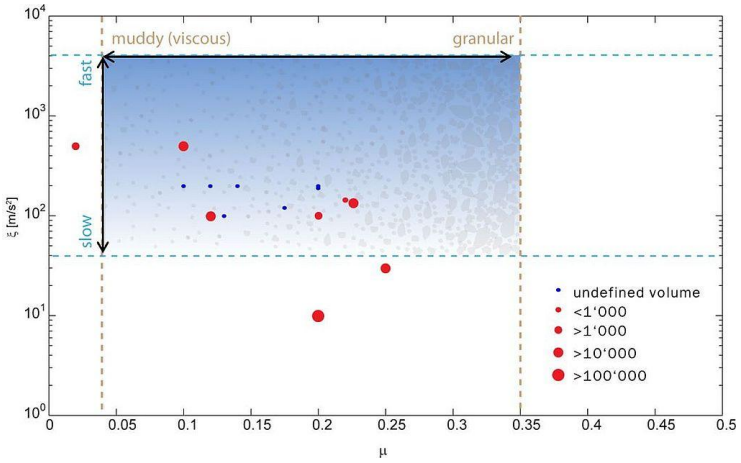


圖 2-76 RAMMS 紊流黏滯摩擦係數(Deubelbeiss, 2012)

3. **底床侵蝕參數**：RAMMS：DF 模式的侵蝕模組可模擬土石流造成的溪流底床沉積物侵蝕深度。藉由該附加的動床(erobed bed)模式，使用者可預測土石流沿著河道移動時體積的增加，意即土石流所帶來的捲增效應(entrainment effect)，使集水區下游的土砂流出量大於上游的初始量體。此處所提的底床侵蝕是指由於河床沉積物夾帶，而造成的溪床高程的下降(Frank et al., 2015, 2017）。動床侵蝕模組基於瑞士 Illgraben 土石流觀測站現場觀測數據以及重複的地面雷射掃瞄所開發，現場觀察表明，侵蝕深度隨著水流強度的增加而增加，隨著基底剪切應力的增加，侵蝕速率亦可能增快。RAMMS 團隊由現場的觀察結果也指出，小規模土砂運移並非每次事件都造成溪床沉積物侵蝕作用，因此該模型包含一個臨界剪應力，僅當任何給定單元中的剪應力超過侵蝕開始時的臨界剪應力值τc。侵蝕演算法預測最大潛在侵蝕深度em，作為每個網格單元中計算的基礎剪應力函數：

$$e_m=0 \quad \text{for} \quad \tau<\tau_c \tag{2-28}$$

$$e_m=\frac{dz}{d\tau}(\tau-\tau_c) \quad \text{for} \quad \tau\geq\tau_c \tag{2-29}$$

式(2-29)中，潛在侵蝕深度(每kPa)dz/dτ控制垂直侵蝕速率(z方

向)，作為河床剪應力的線性函數。RAMMS 研究團隊使用埋在河床中的感測器觀察到 Illgraben 測站，所屬河道的沉積物侵蝕速率為向下方向的 0.025 m/s。堆積物被挾帶直至達到侵蝕深度 em 時停止：

$$e_t \leq e_m，dz/dt = 0.025 \quad (2\text{-}29)$$

其中e_t是時間t時的侵蝕深度(相對於模擬初始值)，z為垂直坐標。

如溪床發生侵蝕後超過任何給定單元中的剪切應力，則RAMMS自動調整最大侵蝕深度(相對於模擬開始時的初始河床高程)，並且可能會發生額外的侵蝕，直到到達em的新值。RAMMS模擬過程中河床高程不會改變。使用者可以透過選擇後處理選項瞭解因侵蝕或沉積而引起的地形變化。表 2-9 為RAMMS建議底床侵蝕參數對照表，其中也納入了現場調查與遙測影像的判釋應用原則。

表 2-9 RAMMS:DF 底床侵蝕參數建議表

參數	使用建議說明
底床材料密度：(kg/m^3)	建議使用模擬土砂材料相同的密度，除非有更詳細的底床資訊。
侵蝕速率：(m/s) •鬆散、潮濕沉積物： 0.05 m/s •一般：0.025 m/s；預設值。 •密集沉積物：0.013 m/s	土石流從沉積物底床中挾帶物質的速率(捲增速率)。現場可用的值非常少，因此我們建議使用基於 Berger 等人於 2011 年發表的工作的常量值(0.025 m/s)。此為模型用於挾帶的速率，直到達到預測的侵蝕深度。增加該值將導致溪床沉積物以更快的速度被侵蝕，可能導致相對較大的泥石流前緣波峰。
潛在侵蝕深度：(每kPa） •深(0.2/kPa) •中(0.1/kPa)；預設值。 •淺(0.05/kPa)	此參數控制最大潛在侵蝕深度，作為每個單元中達到的最大剪切應力的函數。該值實際上是將e_m與每個計算單元的最大剪切應力進行關聯的斜率。若將此參數的值調整為0.2(/kPa)，最大潛在侵蝕深度將加倍。
臨界剪應力：(kPa) •低 (0.5 kPa) •中(1.0 kPa)；預設值。 •高(1.5 kPa)	此為侵蝕開始發生的值。可合理預期由緊密堆積礫石組成的溪床存在較大的臨界剪應力，而由飽和砂礫石組成的溪床將會有較低的臨界剪應力。預設建議值是由Schurch(2011)研究數據來進行曲線擬合而得。
最大侵蝕深度：(m) 預設值0.0。	若可透過現場調查(河階地與溪床高程差)或多期遙測影像或地形圖(歷史溪床深度最大變化)，使用者可直接設定潛在侵蝕沉積物層的最大深度(例如，在某些情況下，我們可能知道只有有限數量的沉積物可用)。RAMMS模式預設值為0.0 m，表示模擬過程中將由侵蝕演算法計算各網格單元的最大侵蝕深度。

於 RAMMS：DF 擬合歷史重大災例事件之土砂量，藉以找尋各集水區於定量降雨情境下合適之輸入參數(摩擦係數)，發現若未設定最大侵蝕深度，造成捲增土砂量大量增加，導致河道流出出流口之土砂量大於實際土砂量。故計畫團隊為求擬合土砂量之精確性，與農村水保署於 9 月 23 日前往國立成功大學拜會謝正倫教授請益，討論不安定土砂運移模擬之精進作為建議以V型判釋法，設定最大侵蝕深度，藉以控制模擬過程中捲增土砂量。V 型判釋法說明如下列敘述:

(1).採用內政部測繪之 1 米精度 DEM 資料，製作成坡度圖與等高線圖，並依據指定集水區之河段分界與溪床範圍劃定：以溪床坡

度轉折點界定河段(如圖 2-78)，上–中游 15°、中–下游 6°，並劃定各河段之溪床範圍，溪床範圍劃設原則參考 2-2-2 小節(七)動床邊界條件。（土石流潛勢溪流劃設作業流程與方法，2023）

(2).上游發生區與中游流動區之剖面選取,(国土技術政策総合研究所資料－砂防基本計画策定指針，2007）：

A.上游發生區：先取一代表性橫剖面 BB；自該剖面向上、下游各約 250 公尺，再各取一橫剖面，共 3 個剖面(如圖 2-77)。

B.中游流動區：比照上游方式選取 3 個剖面。

C.注意事項:建議剖面選取避開隘口、固床工（跌水、急坎）、橋梁束縮段、匯流口、橋台、護岸端點、堆積扇端緣。A.匯流口避開距離至少約 50～100 公尺，B.固床工（跌水、急坎）避開距離至少約 30 公尺，C.橋台避開距離至少約 20～30 公尺。

(3).上游發生區與中游流動區之平均最大侵蝕深度求取:

A.採用 QGIS 軟體中 Terrian Profile 工具箱，確認溪床範圍與剖面之交點判定左右兩岸坡面位置，如圖 2-79 所示。Terrian Profile 工具箱簡單使用說明如下:

a.於 Qgis 介面，點選 Plugins 選單，搜尋 Terrian Profile 工具箱。

b.進入 Terrian Profile 介面，選擇加入至 Terrian Profile 的數值地形資料(DEM)，再點選 Add Layer。

c.點選 Selected layer，選擇加入至 Terrian Profile 的剖面。確認床範圍與剖面之交點判定左右兩岸坡面位置。

B.透過上述步驟已確認左右兩岸坡面位置，以剖面兩岸坡面之斜率

向河谷內延伸作斜線，求其於河床垂直下方之交點。

(4).該交點至河床底部之垂直距離，即為該剖面的「最大侵蝕深度」。

A.區段平均值：將 3 個剖面的最大侵蝕深度取平均，作為該區（發生區或流動區）的「平均最大侵蝕深度」，並設定於 RAMMS 中最大侵蝕深度(圖 2-80)。

(5).下游堆積區屬河床平坦地，於 RAMMS 中將最大侵蝕深度設定為 0。



圖 2-77 正射影像套疊 5 m 等高線-以大清水溪為例

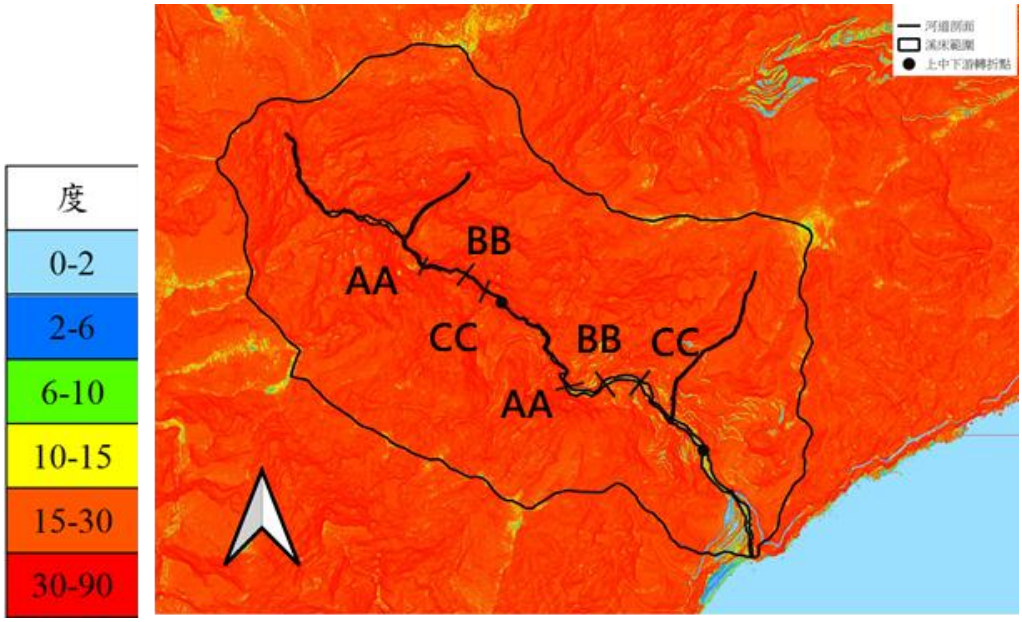


圖 2-78 坡度圖-以大清水溪為例

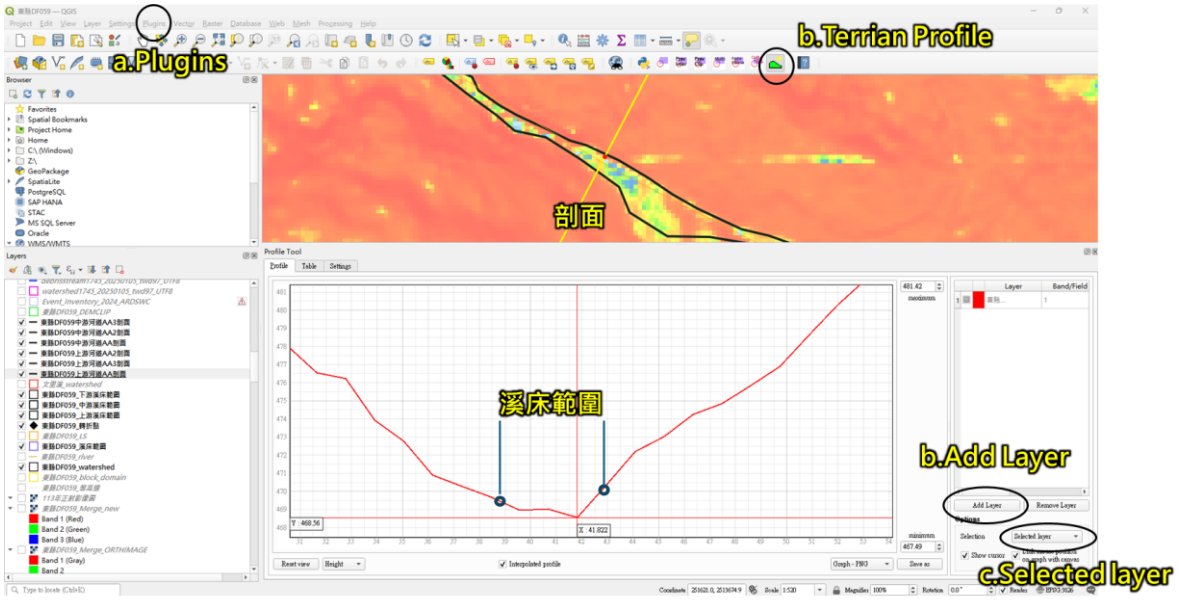


圖 2-79 QGIS 工具箱 Terrian Profile

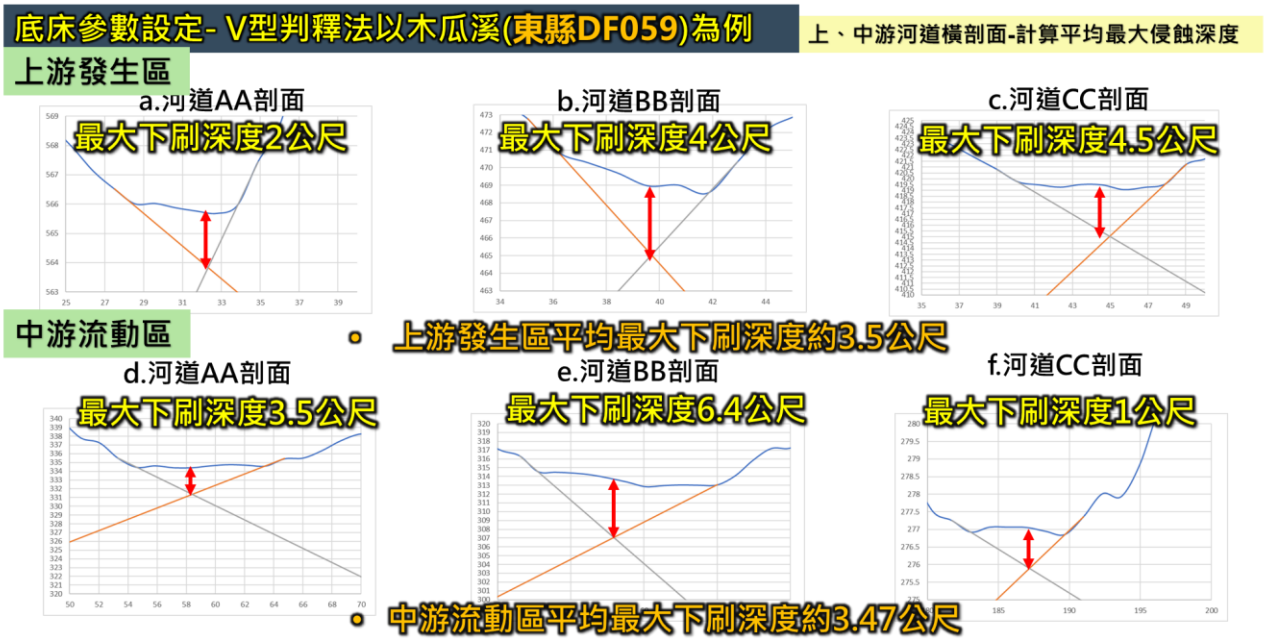


圖 2-80 V 型判釋法-以木瓜溪(東縣 DF059)為例

(六) 四處集水區 RAMMS 模擬輸入參數

經本節研擬之 RAMMS 模式各項參數輸入建議與流程，在模擬前置階段，根據流域險峻值(Melton ratio)評估(周憲德等，2020)，如表 2-10 所示，釐清本計畫四處集水區潛在土砂災害可能型式。而在流域險峻值評估結果，其分類指標已於臺灣數個重大流域研析並驗證(如蘭陽溪、新店溪、陳有蘭溪等)。根據評估結果，得知和仁野溪(花縣 DF025)、三棧南溪(花縣 DF174)與大清水溪(花縣 DF024)集水區較易產生土石流災害，木瓜溪(東縣 DF059)則以土石流及高含砂水流型態較為常見，該值同樣可提供紊流黏滯摩擦係數的另項參考依據，使值域可再行細化區分；如和仁野溪(花縣 DF025)、三棧南溪(花縣 DF174)與大清水溪(花縣 DF024)因有較多粗顆粒礫石堆積，溪流底床內岩盤地形較為普遍，故紊流黏滯係數設定為礫石型土石流(200 m/s^2)，且底床沖蝕參數給予相對較低之侵蝕條件。木瓜溪(東縣 DF059)之 Melton ratio 相較上述 3 處集水區為低，顯示可能為高含砂水流，故紊流黏滯係數設定為泥流型土石流區間(500

m/s^2)。

另評估摩擦係數選定，依據「摩擦係數選定流程圖（如圖 2-75 所示）」且本計畫 4 處集水區皆有土石流災害事件，故以事件紀錄之土砂堆積量進行擬合，評估發生災害時之摩擦係數。後續再以線性內插法，計算各定量降雨情境對應之摩擦係數，各溪流數值模擬擬合評估結果茲說明如後：

表 2-10 本計畫四處集水區潛在土砂災害評估表

集水區名稱	紊流黏滯摩擦係數 ξ [m/s^2]	流域險峻值 Melton ratio	集水區土砂災害類型	流域長度
和仁野溪 (花縣 DF025)	100	0.68	土石流	2.317 km
三棧南溪 (花縣 DF174)	100	0.58	土石流	3.458 km
大清水溪 (花縣 DF024)	100	0.68	土石流	3.663 km
木瓜溪 (東縣 DF059)	500	0.36	高含砂水流、土石流	3.828 km

1. **和仁野溪(花縣DF025)：**為確保 RAMMS 模式中摩擦係數設定之合理性，本研究於進行集水區土砂運移模擬前，採用實際災害事件作為參考依據。以 2024 年凱米颱風為代表事件，該次颱風造成和仁野溪土砂堆積量約 80,000 m^3，如圖 2-81 所示（農村水保署花蓮分署，2024），其對應之24小時累積雨量為 428.5 mm。依據本研究建立之「摩擦係數選定流程圖（如圖 2-71 所示）」，針對不同摩擦係數設定進行多組RAMMS模擬，並與實際堆積量體進行擬合比對（如表 2-11 所列）。模擬結果顯示，當摩擦係數設定為 0.08 時，模擬堆積量約為 97,550 m^3，與實際事件之

80,000 m³最為接近，故選定摩擦係數 0.08 作為和仁野溪基準參數。基於上述擬合成果，後續針對不同定量降雨情境，以線性內插方式推估其對應之摩擦係數值（如表 2-12 所列），並作為 RAMMS 模擬之輸入參數，以反映不同降雨強度下土砂運移阻力之變化趨勢。



資料來源:農村水保署花蓮分署

圖 2-81 2024 年凱米颱風事件造成和仁野溪(花縣 DF025)淤積土砂量

表 2-11 和仁野溪之摩擦係數率定表

模擬溪流名稱	和仁野溪					
摩擦係數	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08
初始量體 (m^3)	44,345					
最終流出量體 (m^3)	181,970	178,213	174,552	102,787	99,971	97,550

表 2-12 和仁野溪各降雨情境下之摩擦係數選定表

模擬溪流名稱	和仁野溪						
24 小時累積降雨情境(mm)	200	350	428.5 (凱米颱風)	500	650	900	1,137
摩擦係數	0.09	0.083	0.08	0.077	0.071	0.06	0.05

2. **三棧南溪(花縣DF174)：**為確保 RAMMS 模式中摩擦係數設定之合理性，本研究於進行集水區土砂運移模擬前，採用實際災害事件作為參考依據。以 2024 年凱米颱風為代表事件，該次颱風造成三棧南溪土砂堆積量約 190,000 m^3（農村水保署花蓮分署，2024），其對應之 24 小時累積雨量為 353 mm。依據本研究建立之「摩擦係數選定流程圖（如圖 2-71 所示）」，針對不同摩擦係數設定進行多組 RAMMS 模擬，並與實際堆積量體進行擬合比對（如表 2-13 所列）。模擬結果顯示，當摩擦係數設定為 0.18 時，模擬堆積量約為 194,207 m^3，與實際事件之 190,000 m^3 最為接近，故選定摩擦係數 0.18 作為三棧南溪基準參數。基於上述擬合成果，後續針對不同定量降雨情境，以線性內插方式推估其對應之摩擦係數值（如表2-14 所列），並作為 RAMMS 模擬之輸入參數，以反映不同降雨強度下土砂運移阻力之變化趨勢。

表 2-13 三棧南溪之摩擦係數率定表

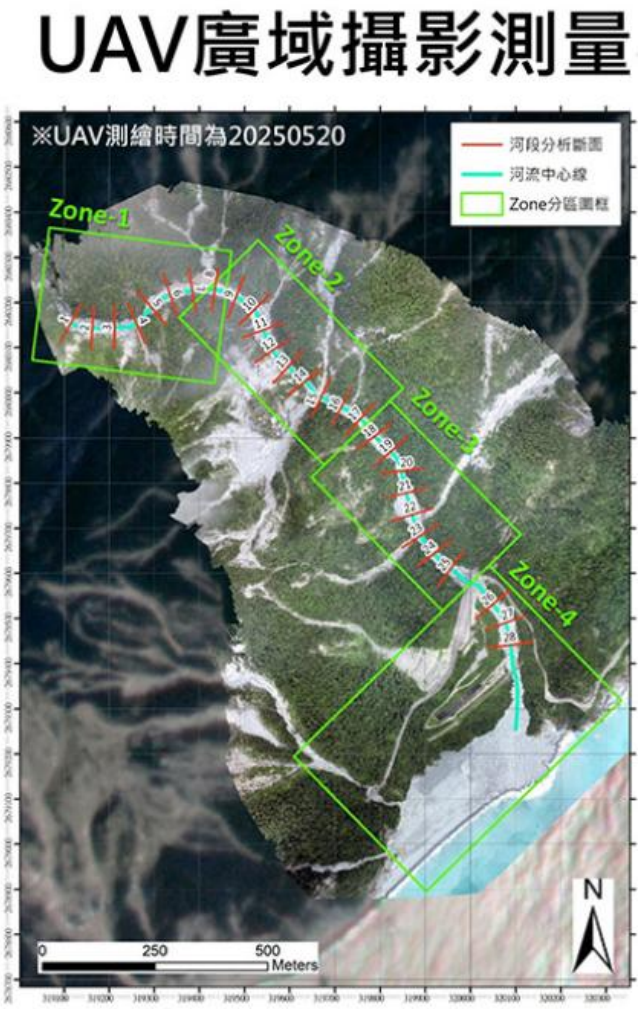
模擬溪流名稱	三棧南溪					
摩擦係數	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10
初始量體 (m^3)	48,554					
最終流出量體 (m^3)	214,794	205,214	183,160	170,946	159,319	149,065

表 2-14 三棧南溪各降雨情境下之摩擦係數選定表

模擬溪流名稱	三棧南溪						
24 小時累積降雨情境(mm)	200	350	353 (凱米颱風)	500	650	900	1,137
摩擦係數	0.205	0.18	0.18	0.14	0.11	0.07	0.05

3. 大清水溪(花縣 DF024)：為確保 RAMMS 模式中摩擦係數設定之合理性，本研究於進行集水區土砂運移模擬前，採用實際災害事件作為參考依據。以 2025 年 0518 豪雨為代表事件，該次豪雨造成大清水溪出流口土砂堆積量約 60,875 m^3，如圖 2-82 所示(國科會災防科技方案- GeoPORT 計畫，2025)，其對應之 24 小時累積雨量為 95.5 mm。依據本研究建立之「摩擦係數選定流程圖（如圖 2-71 所示）」，針對不同摩擦係數設定進行多組 RAMMS 模擬，並與實際堆積量體進行擬合比對（如表 2-15 所列）。模擬結果顯示，當摩擦係數設定為 0.36 時，ZONE-4 出流口模擬堆積量約為 63,374 m^3，與實際事件 ZONE-4 出流口模擬堆積量 60,875 m^3最為接近，故選定摩擦係數 0.36 作為大清水溪基準參數。基於上述擬合成果，後續針對不同定量降雨情境，以線性內插方式推估其對應之摩擦係數值(如表 2-16 所列)，並作為 RAMMS 模擬之輸入參數，以反映不同降雨強度下土砂

運移阻力之變化趨勢。



資料來源：國科會災防科技方案- GeoPORT計畫，2025

圖 2-82 2025 年 0518 豪雨事件造成大清水溪(花縣 DF024)淤積土砂量

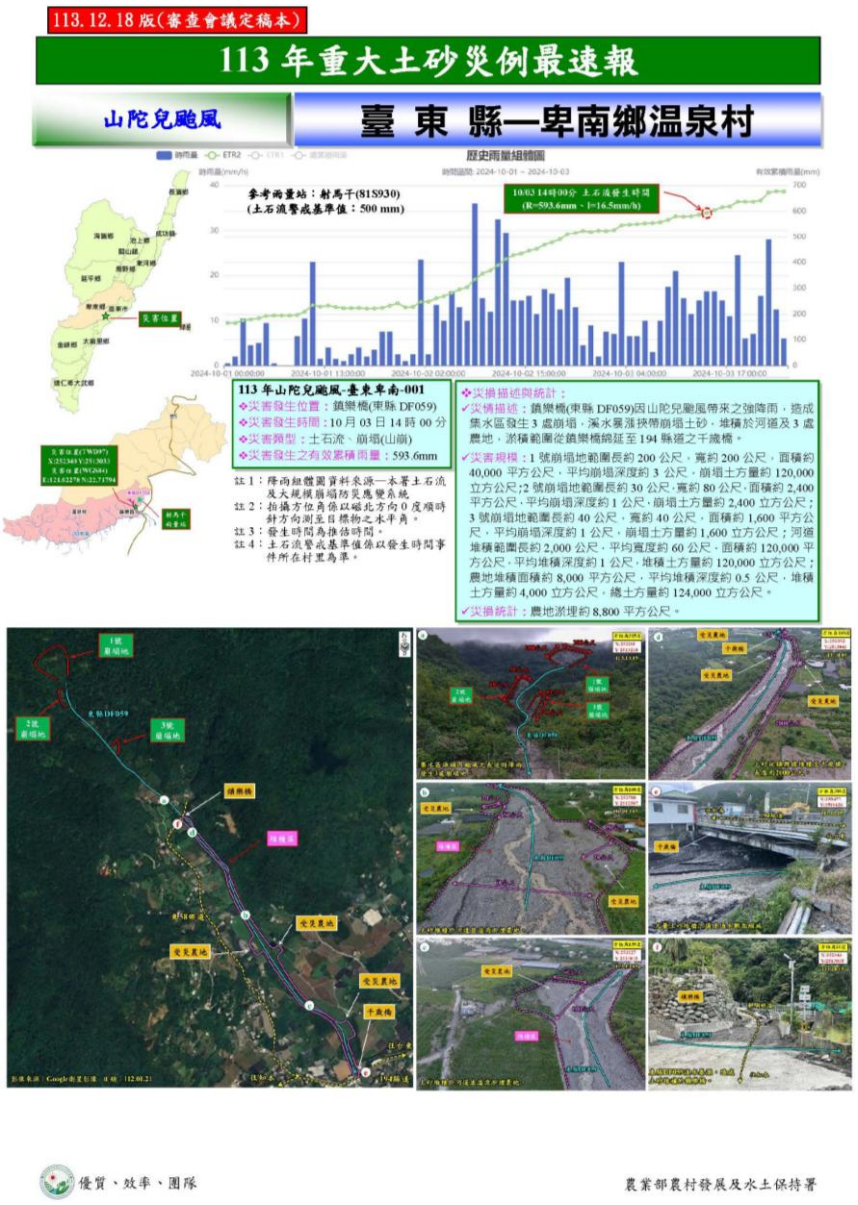
表 2-15 大清水溪之摩擦係數率定表

模擬溪流名稱	大清水溪					
摩擦係數	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26
初始量體 (m^3)	54,913					
最終流出量體 (m^3)	63,374	50,594	50,127	45,708	44,222	43,765

表 2-16 大清水溪各降雨情境下之摩擦係數選定表

模擬 溪流名稱	大清水溪						
24 小時 累積降雨 情境(mm)	95.5 (2025 0518 豪雨)	200	350	500	650	900	1,137
摩擦係數	0.36	0.33	0.30	0.26	0.22	0.16	0.10

4. **木瓜溪(東縣DF059)：**為確保 RAMMS 模式中摩擦係數設定之合理性，本研究於進行集水區土砂運移模擬前，採用實際災害事件作為參考依據。以 2024 年山陀兒颱風為代表事件，該次颱風造成木瓜溪土砂堆積量約 124,000 m³，如圖 2-83 所示（農村水保署，2024），其對應之 24 小時累積雨量為 637 mm。依據本研究建立之「摩擦係數選定流程圖（如圖 2-71 所示）」，針對不同摩擦係數設定進行多組 RAMMS 模擬，並與實際堆積量體進行擬合比對（如表 2-17 所列）。模擬結果顯示，當摩擦係數設定為 0.12 時，模擬堆積量約為 126,670 m³，與實際事件之 124,000 m³ 最為接近，故選定摩擦係數 0.12 作為木瓜溪基準參數。基於上述擬合成果，後續針對不同定量降雨情境，以線性內插方式推估其對應之摩擦係數值（如表 2-18 所列），並作為 RAMMS 模擬之輸入參數，以反映不同降雨強度下土砂運移阻力之變化趨勢。



資料來源：農村水保署重大土砂災例，2024

圖 2-83 2024 年山陀兒颱風事件造成木瓜溪(東縣 DF059)淤積土砂量

表 2-17 木瓜溪之摩擦係數率定表

模擬溪流名稱	木瓜溪					
摩擦係數	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06
初始量體 (m^3)	50,965					
最終流出量體 (m^3)	164,774	147,701	126,670	114,172	108,558	103,412

表 2-18 木瓜溪各降雨情境下之摩擦係數選定表

模擬溪流名稱	木瓜溪						
24 小時累積降雨情境(mm)	200	350	500	637mm (山陀兒颱風)	650	900	1,137
摩擦係數	0.19	0.166	0.142	0.12	0.118	0.078	0.05

表 2-19 和仁野溪(花縣 DF025)RAMMS 數值模擬輸入參數表

參數名稱	輸入參數值					
情境雨量(mm)	200	350	500	650	900	1,137
數值地形(m)	5	5	5	5	5	5
初始不安定土砂量體(m^3)	18,162	31,852	44,141	57,781	80,775	101,936
模擬時間步(s)	100	100	100	100	100	100
土砂單位重(ρ, kg/m^3)	2,751	2,751	2,751	2,751	2,751	2,751
土砂摩擦係數(μ)	0.09	0.083	0.077	0.071	0.06	0.05
紊流黏滯係數(ξ, m/s^2)	100	100	100	100	100	100
上游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(密集沉積物)：0.013 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：2.25 m					
中游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(一般)：0.025 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：1.9 m					
下游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(鬆散、潮濕沉積物)：0.05 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：0 m					

表 2-20 三棧南溪(花縣 DF174)RAMMS 數值模擬輸入參數表

參數名稱	輸入參數值					
情境雨量(mm)	200	350	500	650	900	1,137
數值地形(m)	5	5	5	5	5	5
初始不安定土砂量體(m^3)	24,029	41,275	61,726	78,943	109,807	137,337
模擬時間步(s)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
土砂單位重(ρ, kg/m^3)	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661	2,661
土砂摩擦係數(μ)	0.205	0.18	0.14	0.11	0.07	0.05
紊流黏滯係數(ξ, m/s^2)	100	100	100	100	100	100
上游底床參數	1.底床材料密度：2,661 kg/m^3 2.侵蝕速率(密集沉積物)：0.013 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：12 m					
中游底床參數	1.底床材料密度：2,661 kg/m^3 2.侵蝕速率(一般)：0.025 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：3 m					
下游底床參數	1.底床材料密度：2,661 kg/m^3 2.侵蝕速率(鬆散、潮濕沉積物)：0.05 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：0 m					

表 2-21 大清水溪(花縣 DF024) RAMMS 數值模擬輸入參數表

參數名稱	輸入參數值					
情境雨量(mm)	200	350	500	650	900	1,137
數值地形 (m)	5	5	5	5	5	5
初始不安定土砂量體(m^3)	43,837	78,077	109,844	143,251	197,813	250,054
模擬時間步(s)	500	500	500	500	500	500
土砂單位重 (ρ, kg/m^3)	2,751	2,751	2,751	2,751	2,751	2,751
土砂摩擦係數 (μ)	0.36	0.33	0.30	0.26	0.22	0.16
紊流黏滯係數 (ξ, m/s^2)	100	100	100	100	100	100
上游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(中)：0.025 m/s 3.潛在侵蝕深度(高)：0.05/kPa 4.臨界剪應力(高)：1.5 kPa 5.最大侵蝕深度：19 m					
中游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(中)：0.025 m/s 3.潛在侵蝕深度(高)：0.05/kPa 4.臨界剪應力(高)：1.5 kPa 5.最大侵蝕深度：4 m					
下游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(中)：0.025 m/s 3.潛在侵蝕深度(高)：0.05/kPa 4.臨界剪應力(高)：1.5 kPa 5.最大侵蝕深度：0 m					

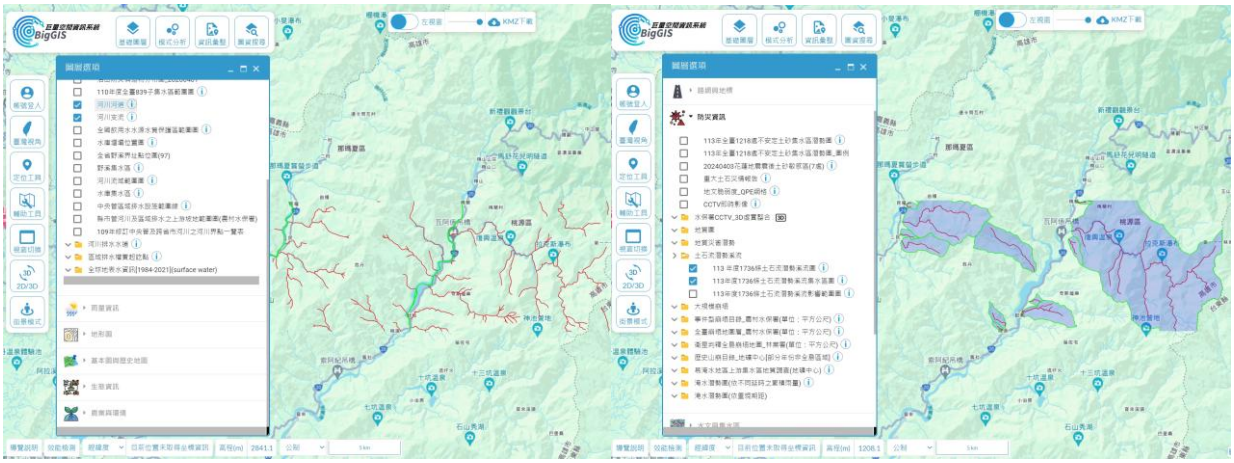
表 2-22 木瓜溪(東縣 DF059)RAMMS 數值模擬輸入參數表

參數名稱	輸入參數值					
情境雨量(mm)	200	350	500	650	900	1,076
數值地形 (m)	5	5	5	5	5	5
初始不安定土砂量體(m^3)	16,059	28,370	40,505	52,182	72,316	86,505
模擬時間步(s)	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
土砂單位重 (ρ, kg/m^3)	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550
土砂摩擦係數 (μ)	0.19	0.166	0.142	0.118	0.078	0.05
紊流黏滯係數 (ξ, m/s^2)	500	500	500	500	500	500
上游底床參數	1.底床材料密度：2,550 kg/m^3 2.侵蝕速率(密集沉積物)：0.013 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：3.5 m					
中游底床參數	1.底床材料密度：2,550 kg/m^3 2.侵蝕速率(一般)：0.025 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：3.47 m					
下游底床參數	1.底床材料密度：2,550 kg/m^3 2.侵蝕速率(鬆散、潮濕沉積物)：0.05 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：0 m					

(七) 動床邊界條件

為了反映不安定土砂運移淘刷溪流底床之捲增現象，在數值模式中需先界定動床邊界條件，如集水區溪流線與溪床範圍線，以供代入數值模擬模式中使用。其建議使用圖資來源與劃設原則說明如下：

1. **溪流線**：為求溪流線的劃設標準均有統一規則，如圖 2-84 所示，對於不同空間尺度集水區之一般溪流線可參考農村水保署(BigGIS 圖台:核心圖層-水文與集水區)之「河川河道」與「河川支流」圖層(水利署開放資料)。若評估集水區為已知之土石流潛勢溪流，則建議參考農村水保署每年更新公開之(BigGIS圖台:核心圖層-防災資訊)「土石流潛勢溪流圖」，如 114 年公開之 1,745 條土石流潛勢溪流圖。前述相關資料亦可由政府資料開放平台(https://data.gov.tw/)下載使用。



(a) 河川河道與河川支流線　　(b) 土石流潛勢溪流線

圖 2-84 溪流線圖層(來源：BigGIS 圖台)

2. **溪床範圍數化**：溪床範圍的數化旨要在於土砂運移動床模擬之邊界線，意即給予數值模式可侵蝕溪床之範圍。劃設時建議以最近期之集水區 DEM 套疊光學影像與等高線圖，影像空間解析度以 50 cm以下之無雲衛星影像或 1 m 精度 DEM (本計畫採

用)為優選考量，套合後以人工方式數化溪流邊界；如圖 2-85。值得注意的是，圈繪時對於溪床上既有之階地、土石流遺留之側積堤或堆積鬆散材料均應劃入，其皆可能於爾後集水區土砂運移時形成捲增侵蝕的料源。溪床線範圍內如地質構造為新鮮岩盤(如硬頁岩)出露者，建議將岩盤溪流段另行圈繪，於底床沖刷模式模擬時將其扣除範圍，以反映岩盤較不易受底床侵蝕之合理現象。

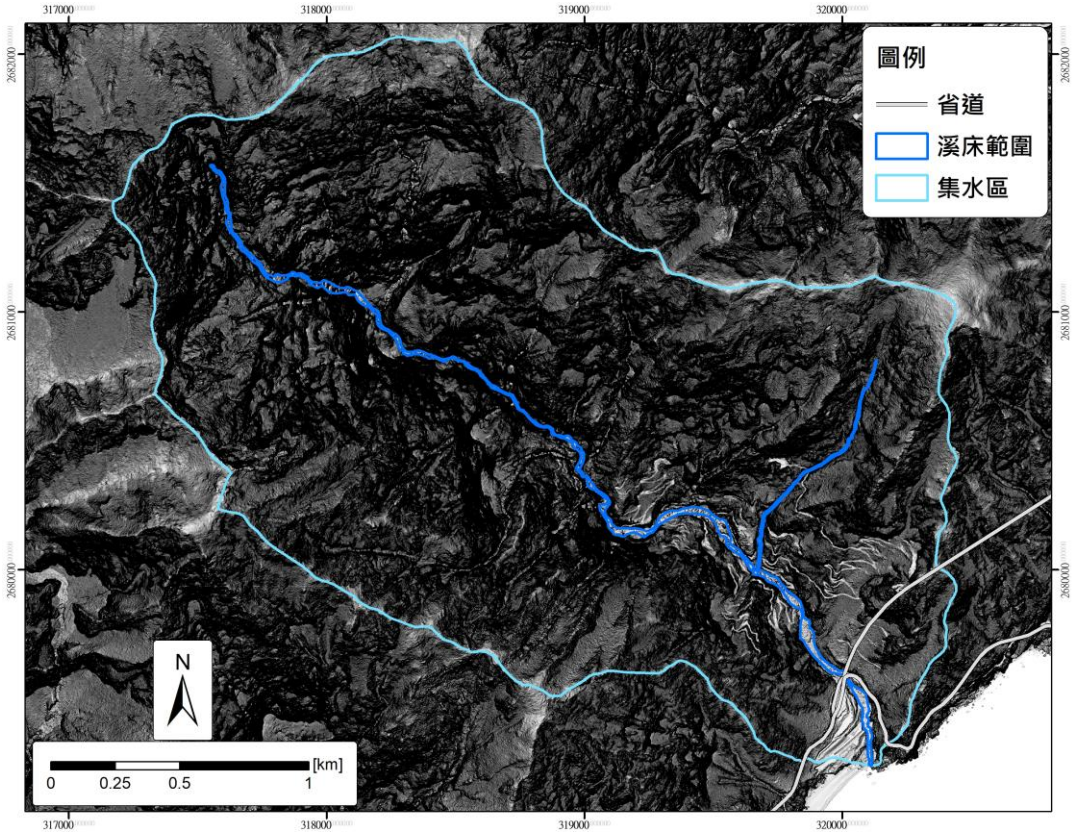
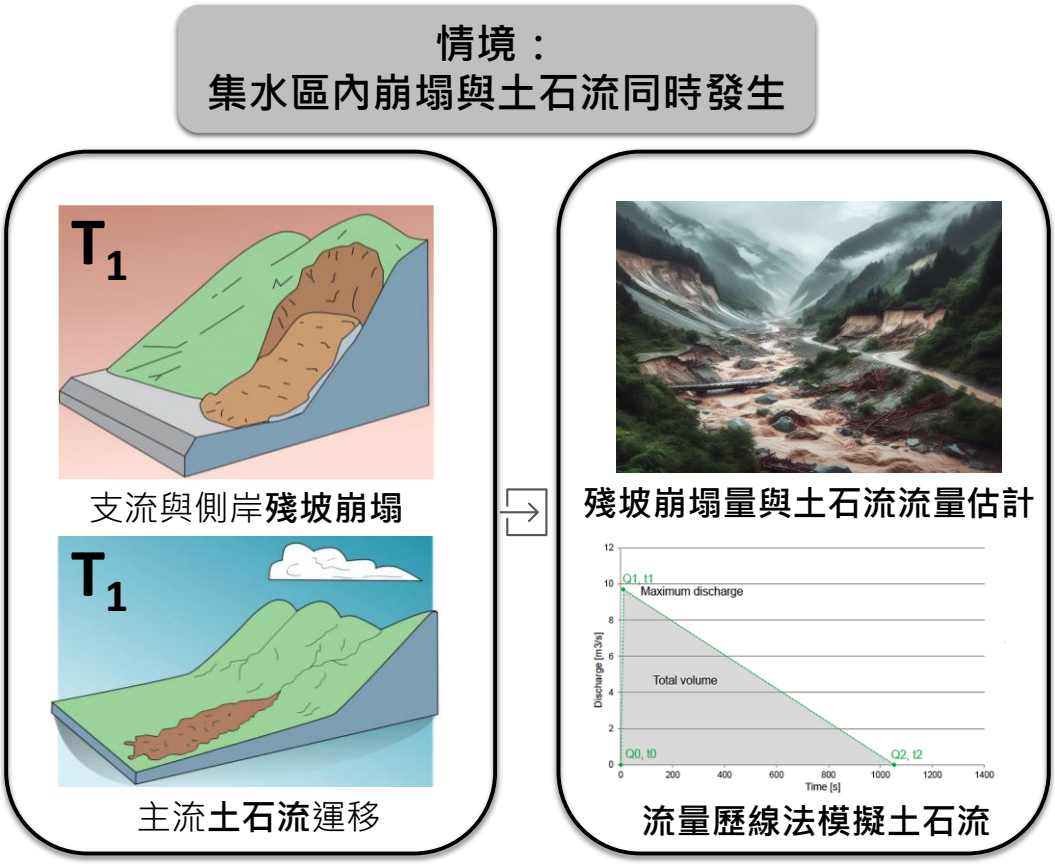


圖 2-85 高精度 DEM 產製之集水區圖資(以大清水溪為例)

(八) 不安定土砂模擬情境

不安定土砂的產生和遞移與集水區內邊坡內在體質、地形條件、人為開發、氣候條件及外部營力等條件息息相關，本作業方法列舉較為常見之情境(如圖 2-86)，作為不安定土砂之數值模擬之應用情境說明。一般條件下,可先以「降雨造成殘坡與溪流同時誘發不安定土砂運移情境」進行數值模擬，其屬同時考慮殘坡崩塌與溪流主流之土砂運移行為。此情境之操作流程茲分述如下。

降雨造成崩塌與溪流同時誘發不安定土砂運移：此為長延時(或高強度)降雨較常見之現象，集水區內殘坡(裸露邊坡)開始崩塌、同時伴隨新生崩塌,如圖 2-86。而溪流主流內之鬆散堆積土砂受到降雨逕流之浸潤，逐漸達到飽和狀態，土砂材料之摩擦係數降低，受底床坡度與重力堆積影響而開始向下游以土石流形式遞移。此種情境下，由於崩塌現象與土石流運移可能同時發生且交互影響，對於溪流動床之沖刷捲積量與殘坡及崩塌的土砂量可以累計加總。而在 RAMMS：DF 的模擬過程中，採用塊體釋放法(適合崩塌型土砂災害主導之集水區)，則需將集水區內不安定土砂量總量視為總釋放量體。操作上以套疊農村水署殘坡圖及近 5 年事件型崩塌目錄，計畫集水區內若有兩者相關圖資，將此視為塊體釋放來源(如圖 2-87)，於此情境模擬中「土石流量體」並非僅計入初始塊體，而係透過 RAMMS：DF 之動床-侵蝕模組將沿程受剪應力掏刷並捲入之河床、岸坡鬆散土砂一併納入，完整反映崩塌-沖刷交互作用對輸砂規模的影響，避免低估對下游保全標的之威脅。藉由初始塊體釋放及動床-侵蝕模組以評估不安定土砂運移與動床侵蝕淘刷的土砂增量，瞭解對下游保全對象的影響範圍與堆積深度。



(圖來源：https://www.usgs.gov/media/images/types-landslides)

圖 2-86 常見之不安定土砂模擬情境示意圖

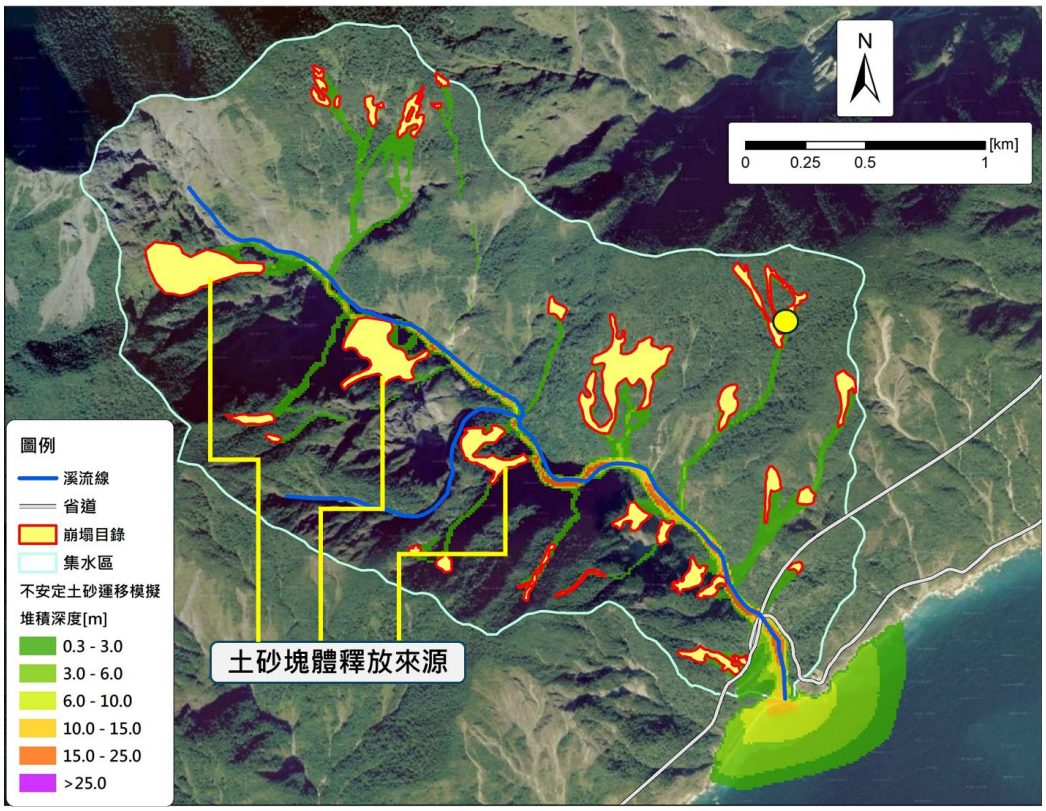


圖 2-87 集水區內釋放塊體示意圖

如表 2-23，為本計畫四處集水區之不安定土砂運移數值模擬情境設定說明，其判斷上共參考殘坡圖分布、崩塌目錄分布兩種遙測評估成果，如圖所示。由於目前四處集水區內並無活動性較高之大規模崩塌地，其情境設定採用「降雨造成崩塌與溪流同時誘發不安定土砂運移」，意即同時考慮溪流動床之沖刷捲積量與殘坡和崩塌之不安定土砂運移情境。其套疊殘坡圖未落於四處集水區內，故以近 5 年(2020-2024)事件型崩塌目錄為塊體釋放來源，因塊體來源多落於集水區上游處，故於模擬過程之動床淘刷形成的捲增量體較大，可達總體流出土砂量體之 36%~87%，可於中下游段形成底床沖刷，反映下游最終之土石流流增量。

表 2-23 RAMMS 數值模擬輸入參數表

集水區名稱	情境設定	不安定土砂釋放點	情境設定假設基礎
和仁野溪 (花縣 DF025)	降雨造成崩塌與溪流同時誘發不安定土砂運移	上游	集水區內無殘坡分布，且套疊近 5 年(2020~2024)農村水保署事件型崩塌目錄，僅 2024 年崩塌目錄分布於集水區內。
三棧南溪 (花縣 DF174)		上游	
大清水溪 (花縣 DF024)		上、中、下游	
木瓜溪 (東縣 DF059)		上游	

(九) 不安定土砂危害圖評估成果

根據模擬輸入參數評估，續於 RAMMS 模式進行地形建模及適當地貌編修後，輸入所需參數以塊體輸入法模擬堆積影響範圍與保全對象危害評估表，其結果如表 2-24 至 表 2-27。圖 2-104 至圖 2-107 分別為 RAMMS 模擬不同 24 hr 累積降雨情境下，和仁野溪(花縣 DF025)、三棧南溪(花縣 DF174)、大清水溪(花縣 DF024)、木瓜溪(東縣 DF059)

之不安定土砂運移後最大堆積影響範圍與深度。本計畫數值模擬採用塊體釋放法，最終之土砂影響範圍應以模擬歷程中，每個地形網格最大的流動堆積深度來產製不安定土砂危害圖，而非過去採用 RAMMS 模擬最終堆積深度圖，始可瞭解長延時降雨情境下，對於集水區下游段保全對象的最大危害程度。另本計畫之數值模擬為研析不安定土砂於匯流口之基本淤積現象，本評估暫不考慮主支流溪水之複雜互制影響情境，各溪流數值模擬評估結果茲說明如後：

1. **和仁野溪(花縣 DF025)**：經 RAMMS 模擬不同雨量之不安定土砂運移影響範圍，評估結果如表 2-24與不安定土砂危害圖如圖 2-104。由動床模擬顯示，隨著 200 mm~1,137mm 累積雨量值的初始量體，顯示最終的土砂產量約增加 44~66%。經套疊保全對象圖層，和仁野溪(花縣 DF025)下游鄰近聚落為和仁部落(花縣 DF025右岸)，而跨越溪流之公路箱涵位於台 9 線 63.7 K(雙孔箱涵，單高約 5 公尺，單寬約 5 公尺)，跨越溪流之鐵路位於台 9 線 63.7 K往溪流下游約 180 公尺處新和仁橋梁。根據 RAMMS 模擬結果，在 24 小時累積降雨 200 mm、350 mm、500 mm、650 mm、900 mm以及極端氣候(1,137 mm)情境下，對於和仁部落均無土砂直接衝擊影響。而在公路橋梁方面，於350 mm、500 mm、650 mm、900 mm以及極端氣候(1,137 mm)下，其運移過程中位於台 9 線雙孔箱涵河道分別最大土砂淤積深度約達 5.2~7.9 公尺，仍可能有溢淹之疑慮，詳台 9 丁線箱涵橫剖面圖以及河道縱剖面，其中剖面圖顯示為數值地形(DEM 藍色)以及 RAMMS 模擬過程中最大土砂堆積高度(黃色)，如圖 2-89 及 圖 2-90 所示。最後以鐵路橋梁方面，新和仁溪橋於

500 mm、650 mm、900 mm以及極端氣候(1,137 mm)下，其運移過程中位於台 9 線雙孔箱涵河道分別最大土砂淤積深度約達 4.1~4.7 公尺，仍可能有溢淹之疑慮，仍須留意未來颱風及強降雨事件後之狀況，詳鐵路橋橫剖面圖以及河道縱剖面，如圖 2-89 及圖 2-91 所示。

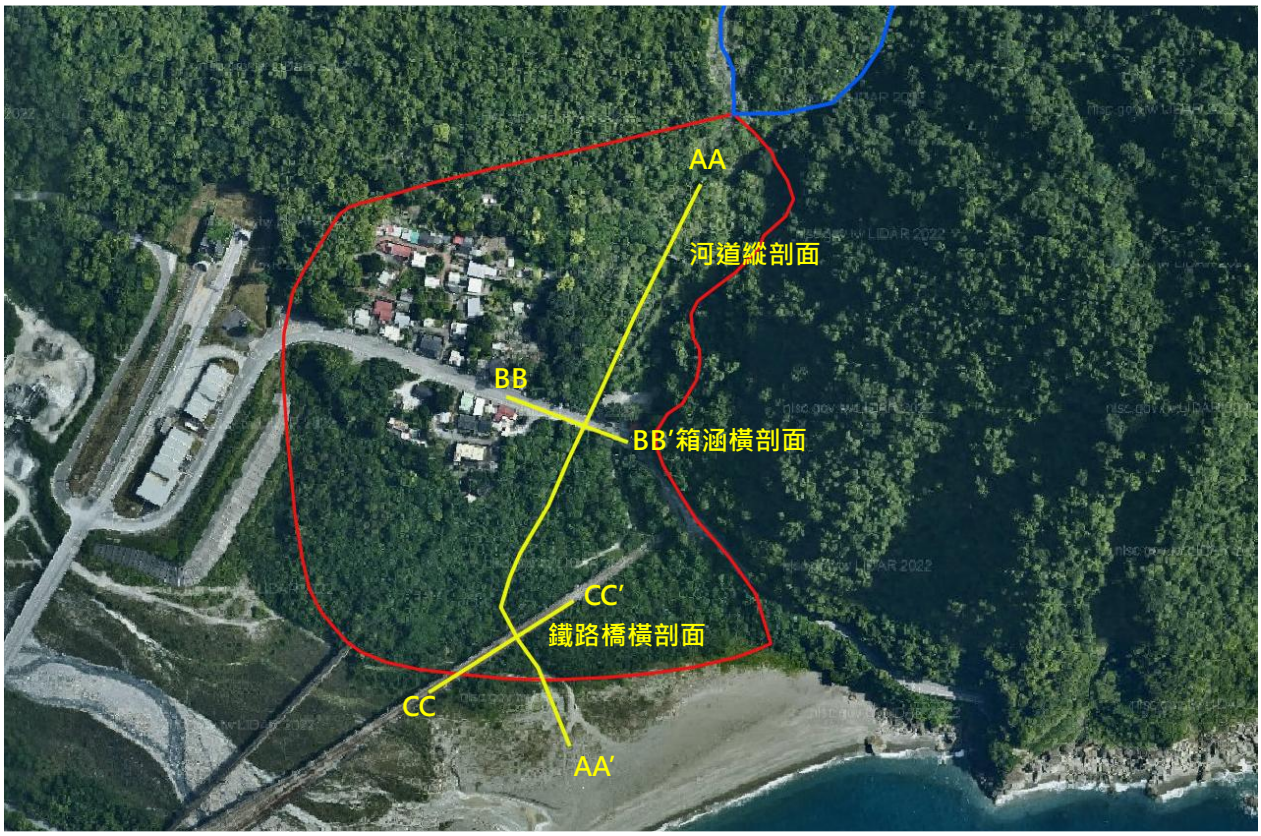
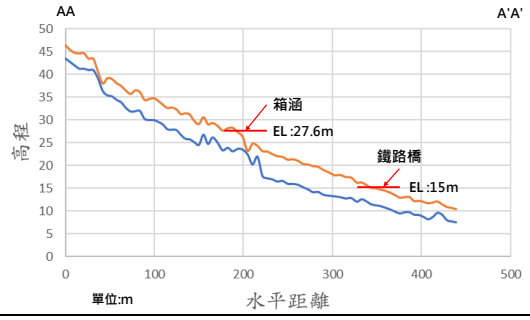
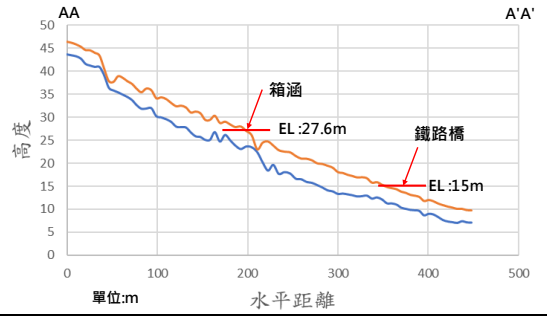


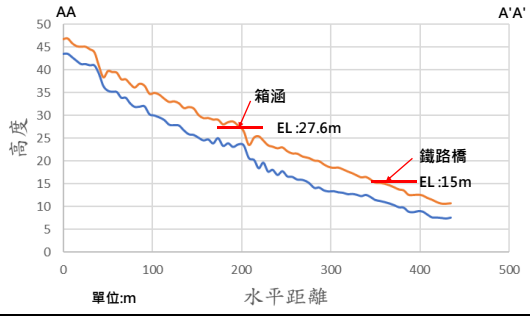
圖 2-88 和仁野溪縱橫剖面分布圖



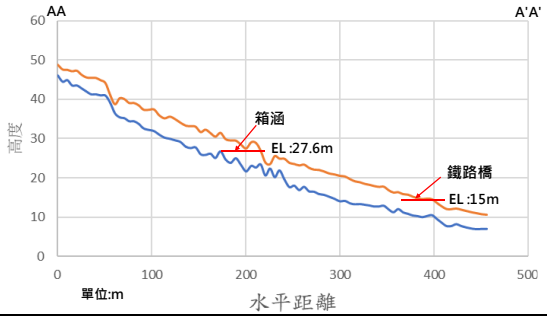
(a) 24 hr 累積雨量 200 mm



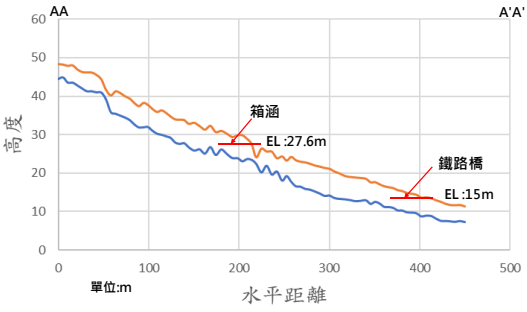
(b) 24 hr 累積雨量 350 mm



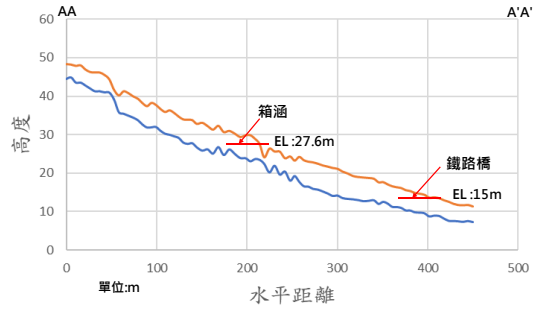
(c) 24 hr 累積雨量 500 mm



(d) 24 hr 累積雨量 650 mm

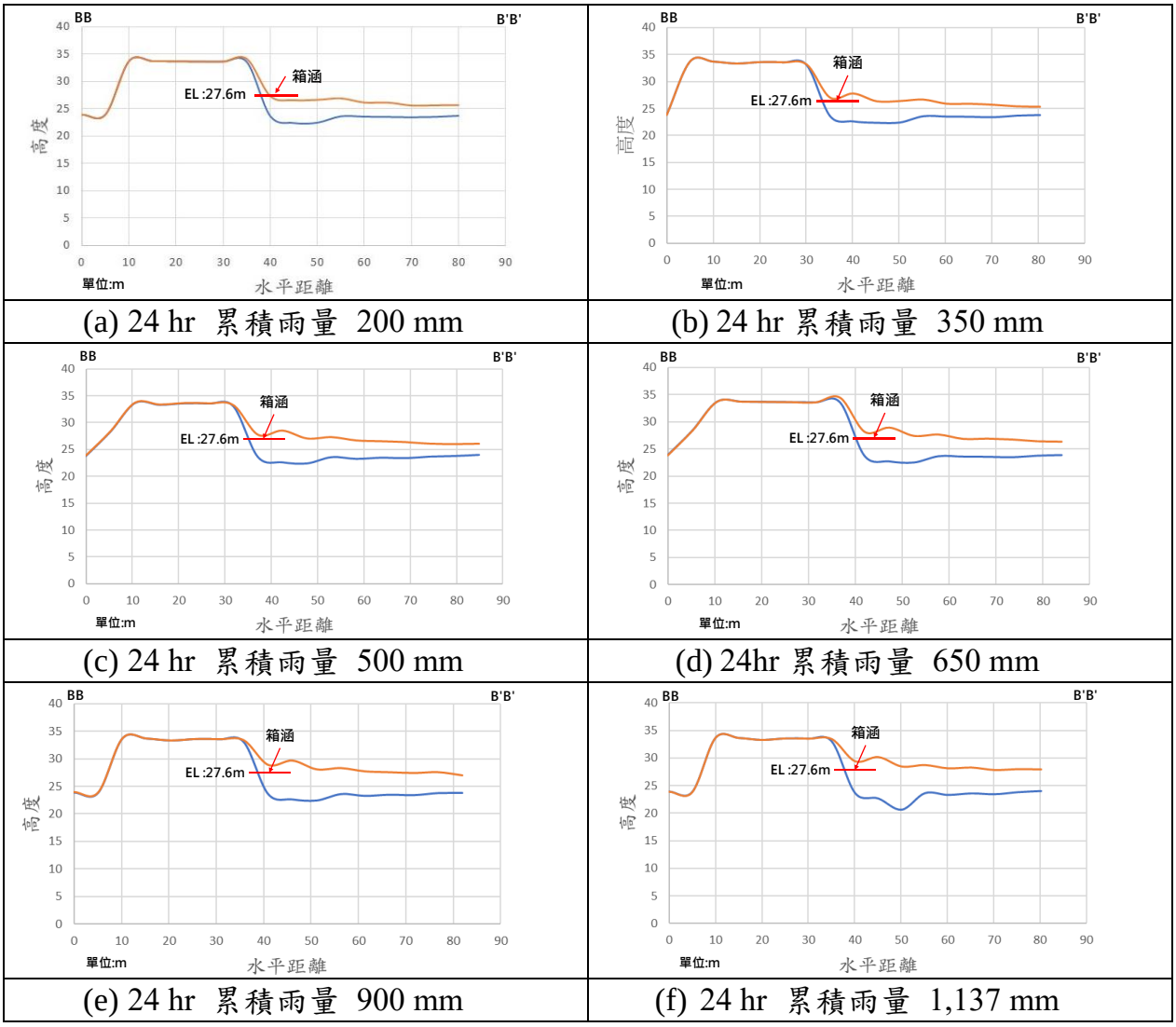


(e) 24 hr 累積雨量 900 mm



(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-89 和仁野溪之河道縱剖面(AA-A'A')



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm

(b) 24 hr 累積雨量 350 mm

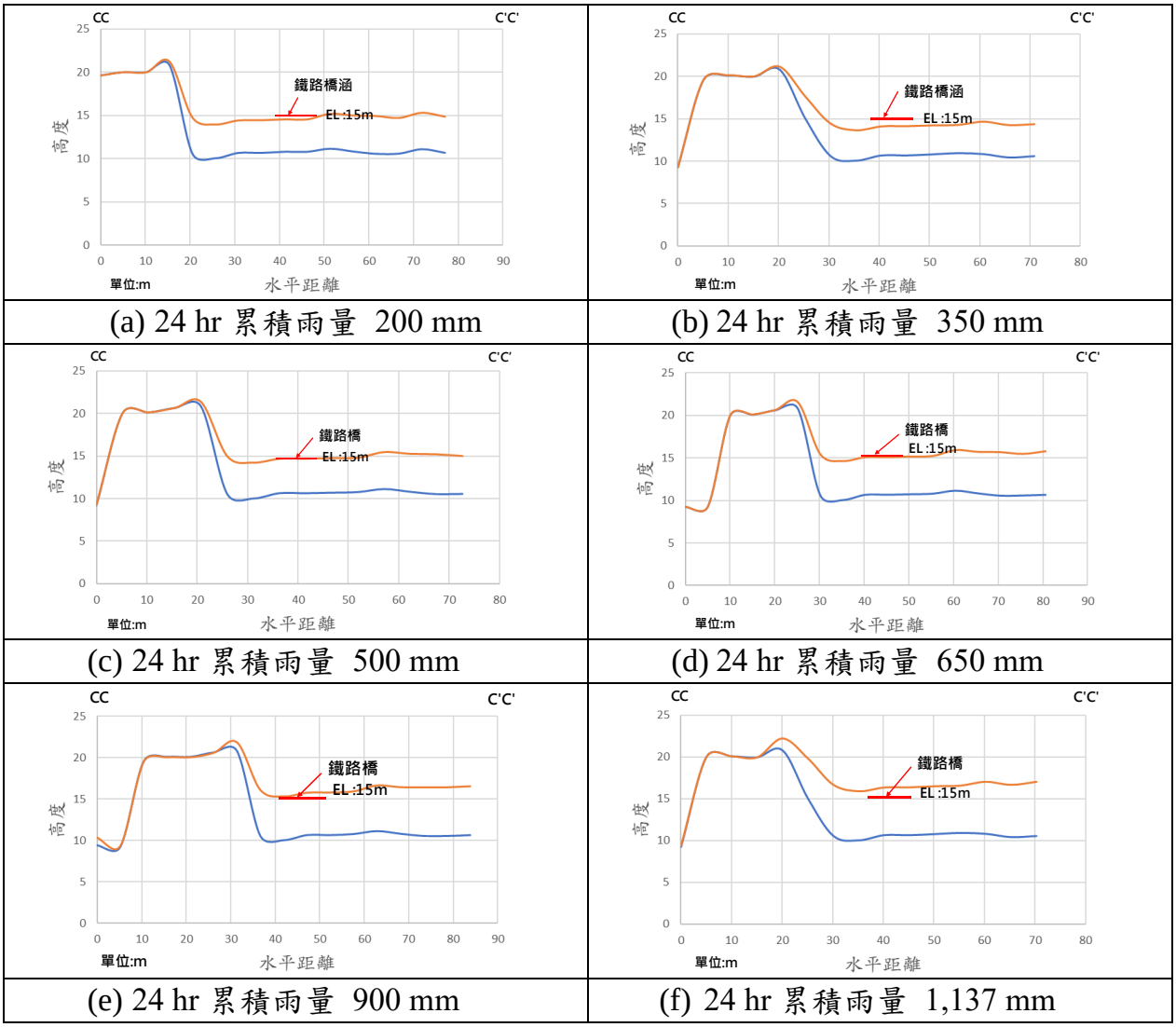
(c) 24 hr 累積雨量 500 mm

(d) 24hr 累積雨量 650 mm

(e) 24 hr 累積雨量 900 mm

(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-90 和仁野溪之箱涵橫剖面(BB-B'B')



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm

(b) 24 hr 累積雨量 350 mm

(c) 24 hr 累積雨量 500 mm

(d) 24 hr 累積雨量 650 mm

(e) 24 hr 累積雨量 900 mm

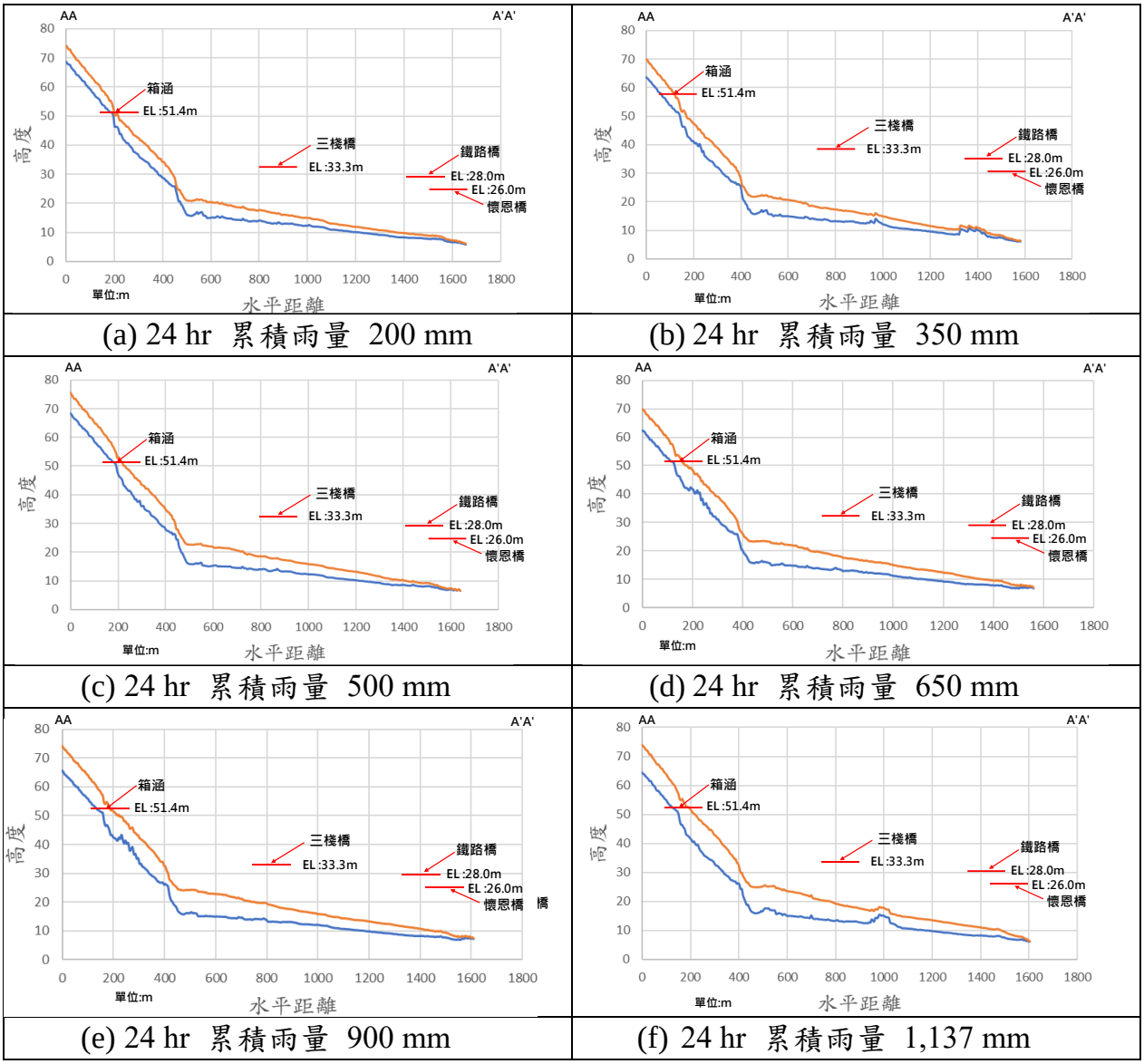
(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-91 和仁野溪之鐵路橋橫剖面(CC-C'C')

2. **三棧南溪(花縣DF174)：**經 RAMMS 模擬不同雨量之不安定土砂運移影響範圍，評估結果如表 2-25 與不安定土砂危害圖如圖 2-105。由動床模擬顯示，隨著 200 mm~1,137 mm 累積雨量值的初始量體，顯示最終的土砂產量約增加 53~83% 不等。經套疊保全對象圖層，三棧南溪下游鄰近聚落為三棧部落位於三棧溪右岸，而跨越溪流之公路橋梁為三棧部落聯外道路-三棧橋(橋下淨高約 20 m，溪床落兩墩柱)，跨越溪流之鐵路橋梁為鐵路橋(橋下淨高約 20 m，溪床落兩墩柱)，跨越溪流之公路橋梁為台 9 線懷恩橋(橋下淨高約 20 m，溪床落兩墩柱)。根據 RAMMS 模擬結果，本集水區於各雨量情境下，三棧南溪對於鄰近部落均無直接衝擊影響。而在公路橋梁方面，於 24 小時 350 mm、500 mm、650 mm、900 mm 以及極端氣候(1,137 mm)下，僅三棧聯外道路與溪流交會箱涵，仍有溢淹之疑慮，詳三棧南溪箱涵聯外道路橫剖面圖、三棧橋橫剖面圖、懷恩橋橫剖面圖以及河道縱剖面圖，其中剖面圖顯示為數值地形(DEM 藍色)以及 RAMMS 模擬過程中最大土砂堆積高度(黃色)，如圖 2-93、圖 2-94、圖 2-95 及圖2-97 所示。在鐵路橋梁方面，於各雨量情境下尚未有土砂造成橋墩之衝擊影響，詳鐵路橋橫剖面圖，如圖 2-96 所示。



圖 2-92 三棧野溪縱橫剖面分布圖

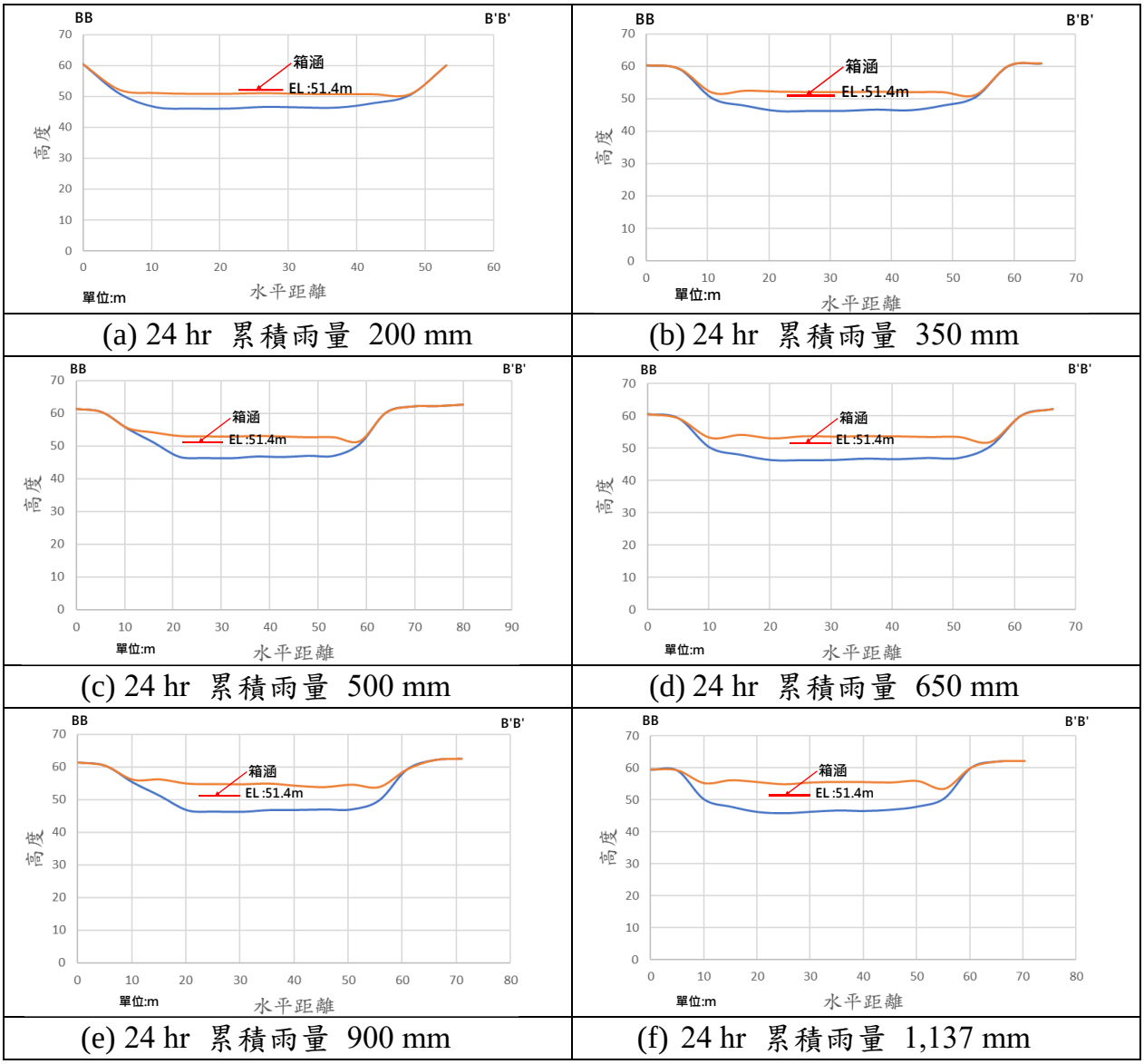


(a) 24 hr 累積雨量 200 mm　(b) 24 hr 累積雨量 350 mm

(c) 24 hr 累積雨量 500 mm　(d) 24 hr 累積雨量 650 mm

(e) 24 hr 累積雨量 900 mm　(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-93 三棧南溪之河道縱剖面(AA-A'A')



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm

(b) 24 hr 累積雨量 350 mm

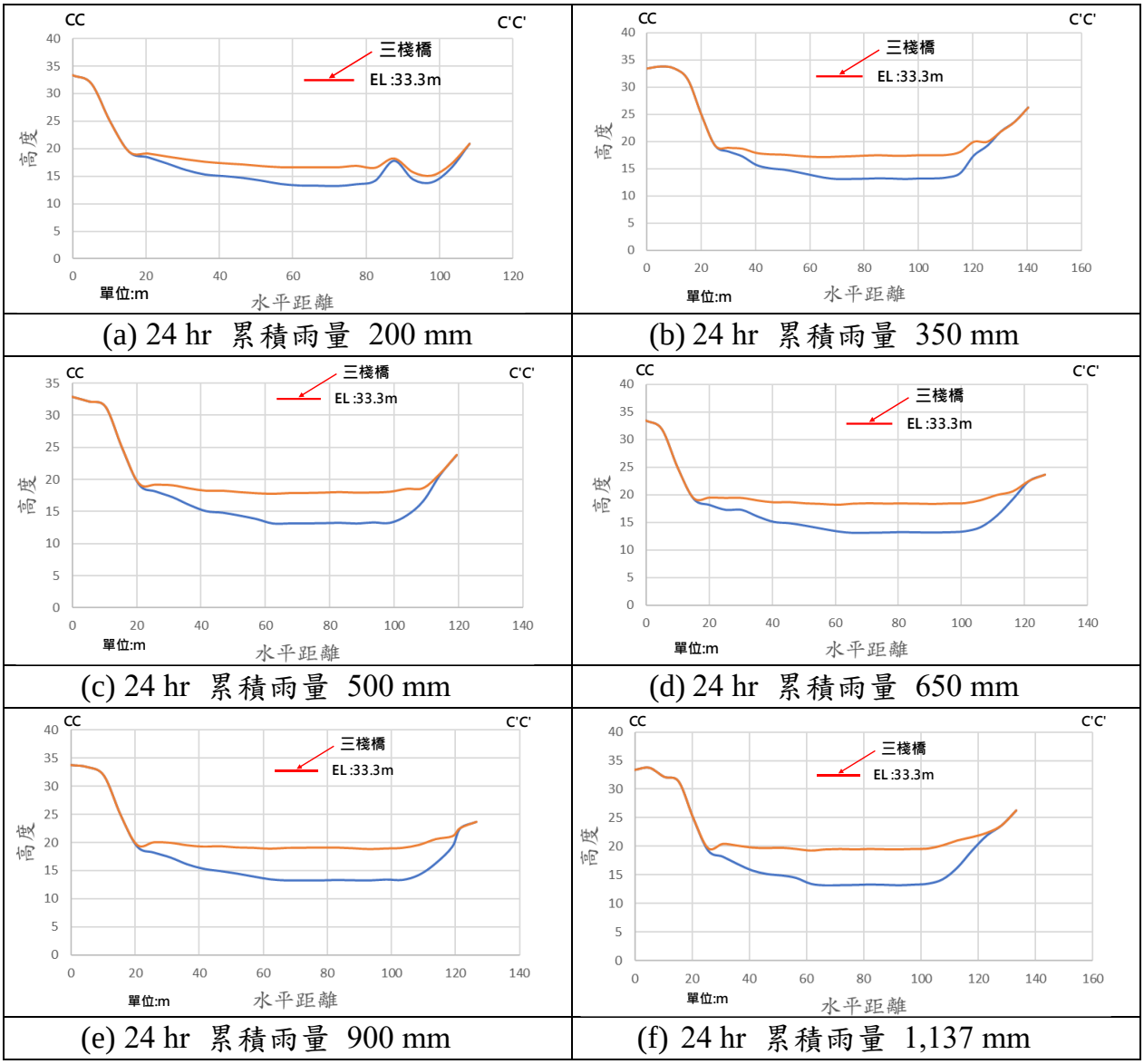
(c) 24 hr 累積雨量 500 mm

(d) 24 hr 累積雨量 650 mm

(e) 24 hr 累積雨量 900 mm

(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-94 三棧南溪箱涵聯外道路之橫剖面(BB-B'B')



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm

(b) 24 hr 累積雨量 350 mm

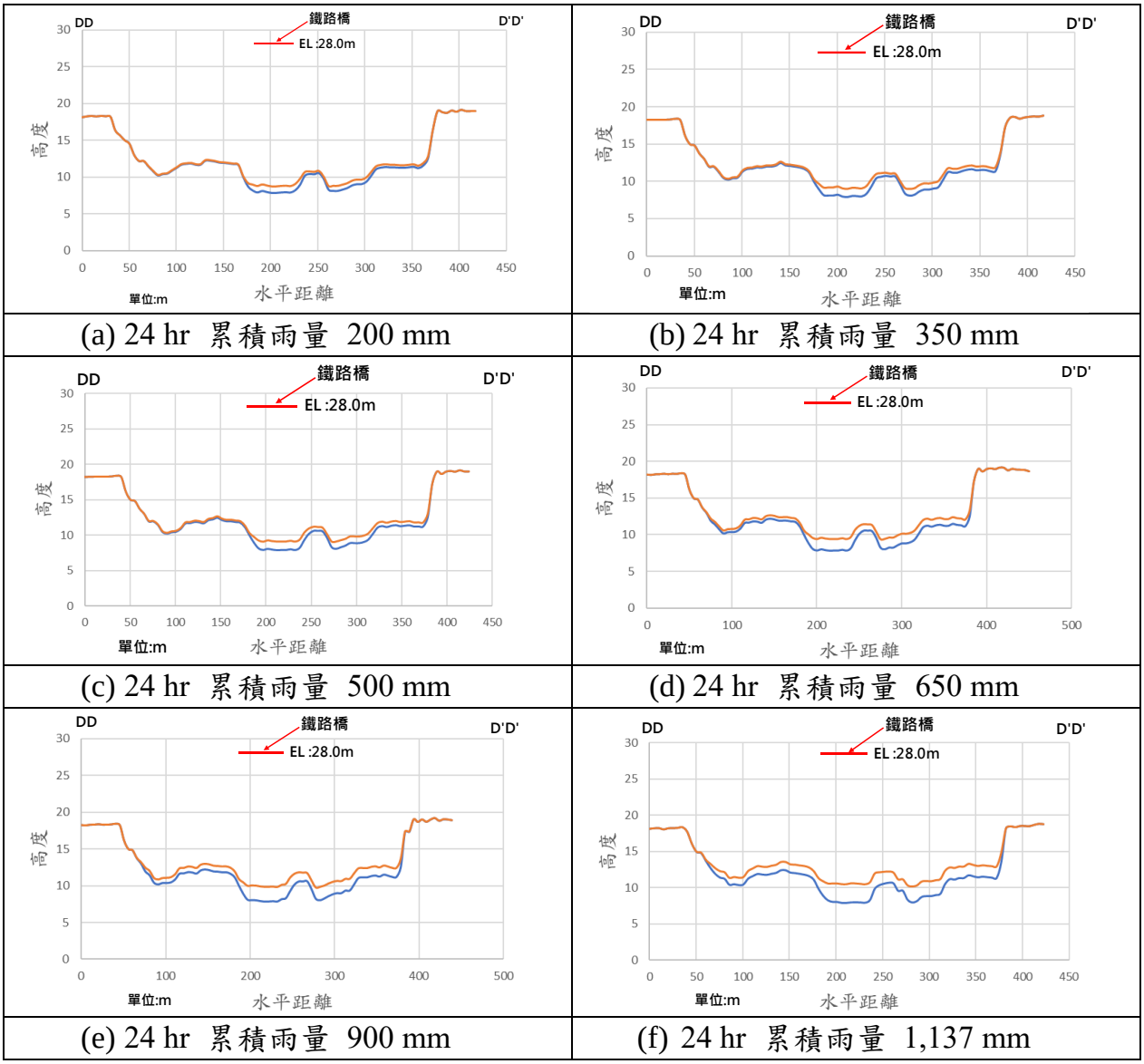
(c) 24 hr 累積雨量 500 mm

(d) 24 hr 累積雨量 650 mm

(e) 24 hr 累積雨量 900 mm

(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-95 三棧南溪三棧橋之橫剖面(CC-C'C')



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm

(b) 24 hr 累積雨量 350 mm

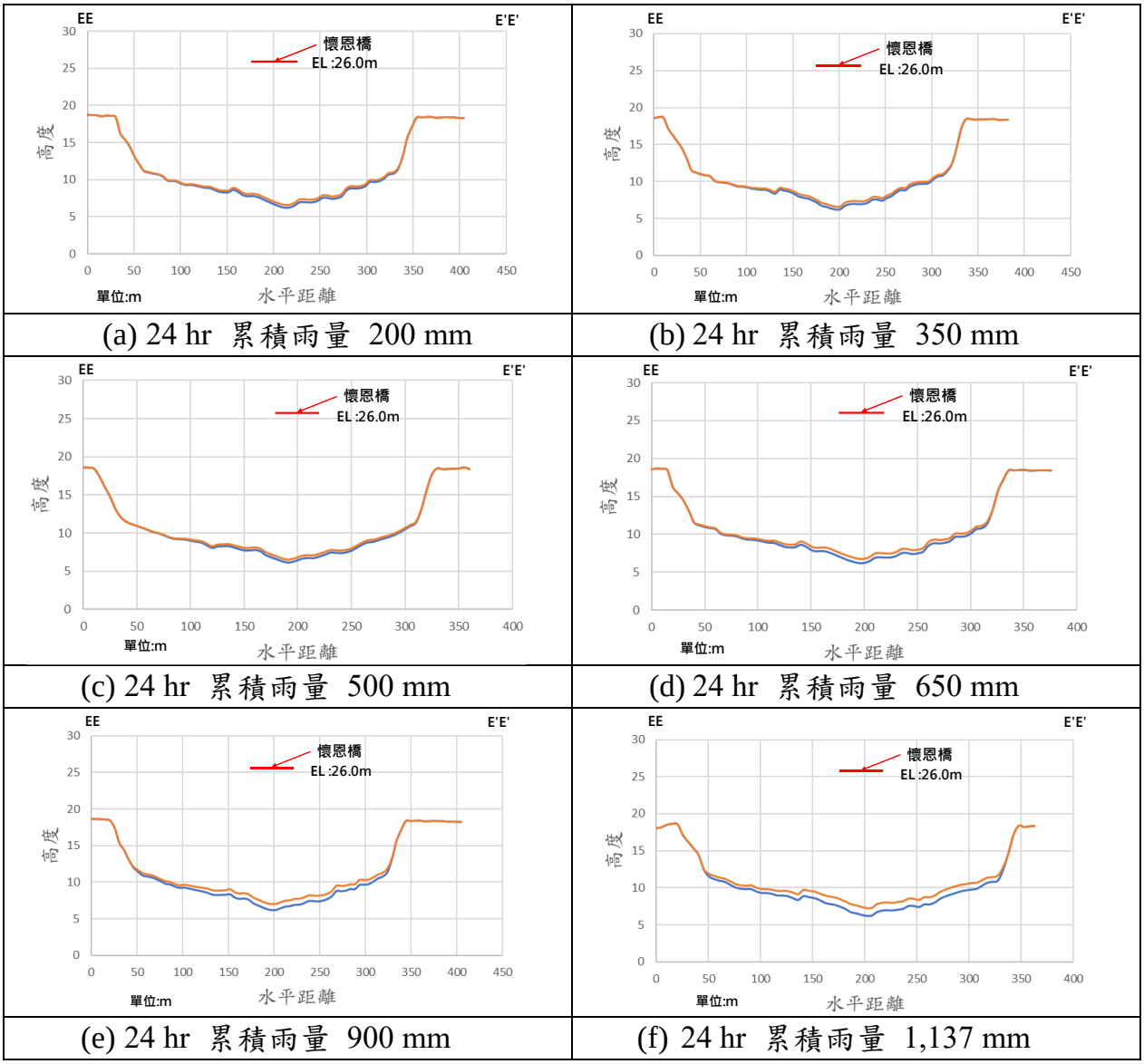
(c) 24 hr 累積雨量 500 mm

(d) 24 hr 累積雨量 650 mm

(e) 24 hr 累積雨量 900 mm

(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-96 三棧南溪鐵路橋之橫剖面(DD-D'D')



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm　(b) 24 hr 累積雨量 350 mm

(c) 24 hr 累積雨量 500 mm　(d) 24 hr 累積雨量 650 mm

(e) 24 hr 累積雨量 900 mm　(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-97 三棧南溪懷恩橋之橫剖面(EE-E'E')

三棧南溪不安定土砂危害圖可觀察到，24 小時 900 mm 雨量情境模擬之土砂堆積範圍大於 24 小時累積 1,137 mm 雨量情境，三棧南溪模擬結果在1,137 mm 雨量情境下塊體體積較900mm雨量情境大，模擬過程中土砂下移衝擊三棧國小北側護岸，易較900 mm 雨量情境更容易消散能量，其兩種情境下模擬歷程中最大動量分布圖，如圖 2-98 及圖 2-99 所示。因此 1,137 mm 情境模擬成果較於 900 mm 情境模擬成果有大量土砂堆積於三棧南溪與三棧溪匯流口，故 1,137 mm 模擬成果僅少量土砂流入三棧溪下游處。



圖 2-98 三棧南溪 24 小時 900 mm 雨量情境之最大動量分布圖



圖 2-99 三棧南溪 24 小時 1,137 mm 雨量情境(極端降雨)之最大動量分布圖

3. **大清水溪(花縣DF024)：**經RAMMS模擬不同雨量之不安定土砂運移影響範圍，評估結果如表 2-26與不安定土砂危害圖如圖 2-106。由動床模擬顯示，隨著 200 mm~1,137 mm累積雨量值的初始量體，顯示最終的土砂產量約增加 75%。經套疊保全對象圖層，大清水溪下游鄰近未有聚落，而跨越溪流之公路橋梁為台 9 丁線 68.9 K清水橋(橋下淨高約 10 m)、台 9 線 158.1K 清水溪橋(蘇花改高架)，而跨越溪流之鐵路橋梁為東大清水溪橋(斷面寬約 20 公尺，高約 12 公尺)、西大清水溪橋(斷面寬約 18 公尺，高約 6 公尺)。根據RAMMS模擬結果，本集水區於鐵路橋梁方面，在各種降雨情境下，其運移過程中皆會造成西大清水溪橋受土砂波及影響，該橋樑若遭破壞將直接導致鐵路交通

阻斷。模擬結果於累積雨量 900 mm與極端降雨情境，公路橋梁(清水橋)橋涵可能遭土砂堵塞，土砂溢淹後衝擊台 9 丁線影響交通安全，該橋樑若破壞將可能造成道路交通堵塞，值得後續特別關注。

大清水溪不安定土砂危害圖可觀察到， 24 小時 900 mm 雨量情境模擬之河道出口土石流堆積扇出口堆積高度大於24小時累積 1,137 mm 雨量情境。大清水溪 1,137 mm 極端降雨情境之上游崩塌量較 900 mm 定量雨量情境顯著增加，致使更多土砂物質沿溪道下移至出海口。由於其流動能量與動量大幅提升，部分土砂材料已超出 RAMMS 模擬邊界範圍之外，其兩種情境下模擬歷程中最大動量分布圖，如圖 2-100及圖 2-101所示。

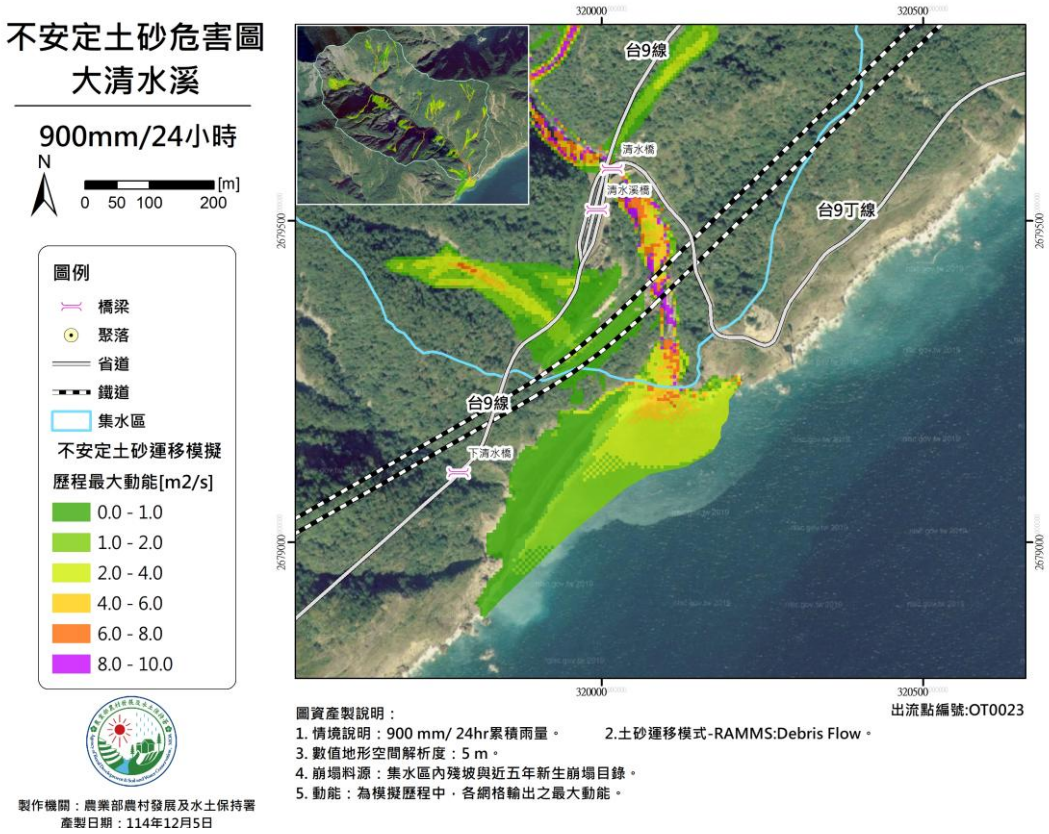


圖 2-100 大清水溪 24 小時 900 mm 雨量情境之最大動量分布圖

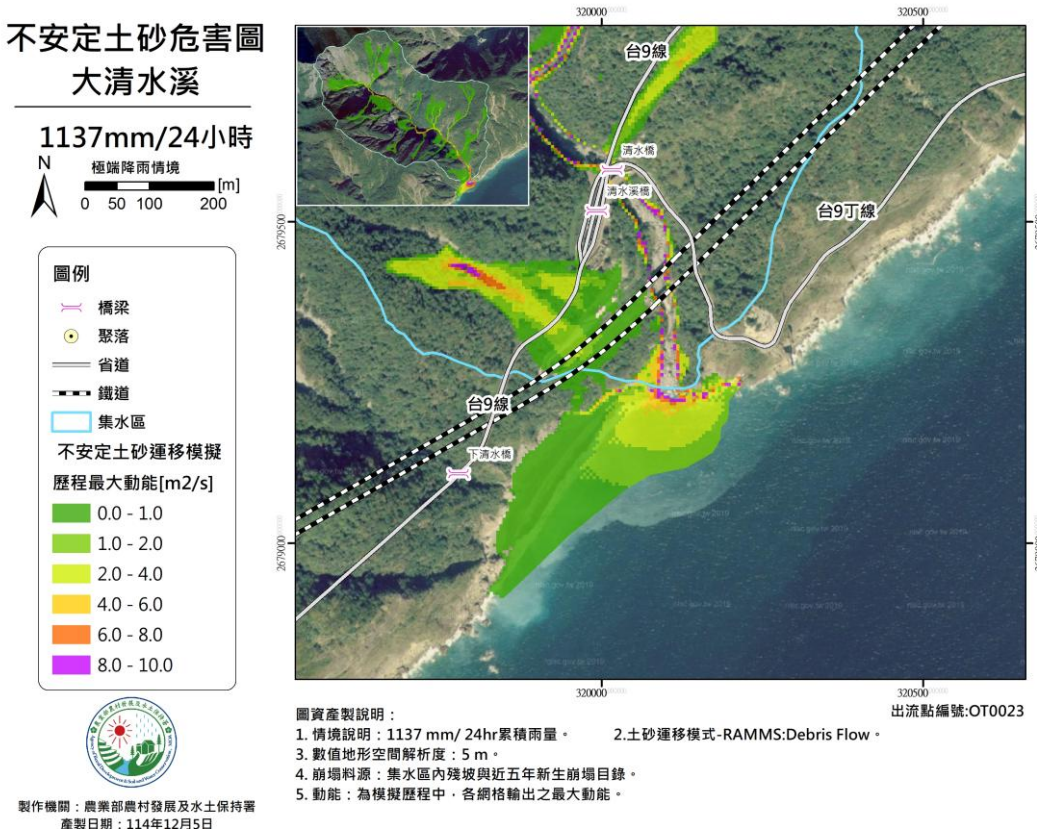


圖 2-101 大清水溪 24 小時 1,137 mm 雨量情境之最大動量分布圖

4. **木瓜溪(東縣DF059)**：由RAMMS模擬不同雨量之不安定土砂運移影響範圍，評估結果如表 2-27 與不安定土砂危害圖如圖 2-107。經動床模擬成果顯示，隨著 200 mm~1,076 mm 累積雨量值的初始量體，顯示最終的土砂產量增加達 36~39%。套疊保全對象圖層後，木瓜溪下游鄰近聚落為鎮樂部落位於木瓜溪右岸，而跨越溪流之公路橋梁為東 58 線-鎮樂橋(橋下淨高約 5 m)、194 線-千歲橋(橋下淨高約 5 m)、台 9 線-知本橋、台 11 線-新知本橋。根據 RAMMS 模擬結果，本集水區在 24 小時各累積降雨情境下，木瓜溪對於上游右岸處之鎮樂部落均無直接衝擊影響。而東 58 線-鎮樂橋方面，模擬成果顯示在 24 小時累積降雨 350、650、900 mm及極端氣候等情境(1,076 mm)下，仍可能造成橋涵堵塞之疑慮，其土砂堆積深度約從 4.8~6.9 公

尺。而 194 線-千歲橋方面，模擬成果顯示在 24 小時累積降雨 650、900 mm及極端氣候等情境(1,076 mm)下，仍可能造成橋涵堵塞使土砂溢流至路面之疑慮，其土砂堆積深度約從 5.2~7.0 公尺。而知本橋、新知本橋及鐵路橋方面，於各降雨情境下均無直接衝擊影響。故鎮樂橋在本集水區各雨量模擬情境中易受不安定土砂影響，需特別關注土砂對於橋墩之衝擊影響。

木瓜溪不安定土砂危害圖可觀察到，24 小時 900 mm 雨量情境模擬之土砂堆積範圍大於 24 小時累積 1,076 mm 雨量情境，木瓜溪模擬結果在 1,076 mm 雨量情境下塊體體積較 900 mm 雨量情境大，模擬過程中土砂下移衝擊知本溪南側護岸，易較 900 mm 雨量情境更容易消散能量，其兩種情境下最大動量分布圖，如圖 2-102 及圖 2-103 所示。因此 1,076 mm 情境模擬成果較於 900 mm 情境模擬成果有大量土砂堆積於木瓜溪與知本溪匯流口，故 1,076 mm 模擬成果僅少量土砂流入知本溪下游處。

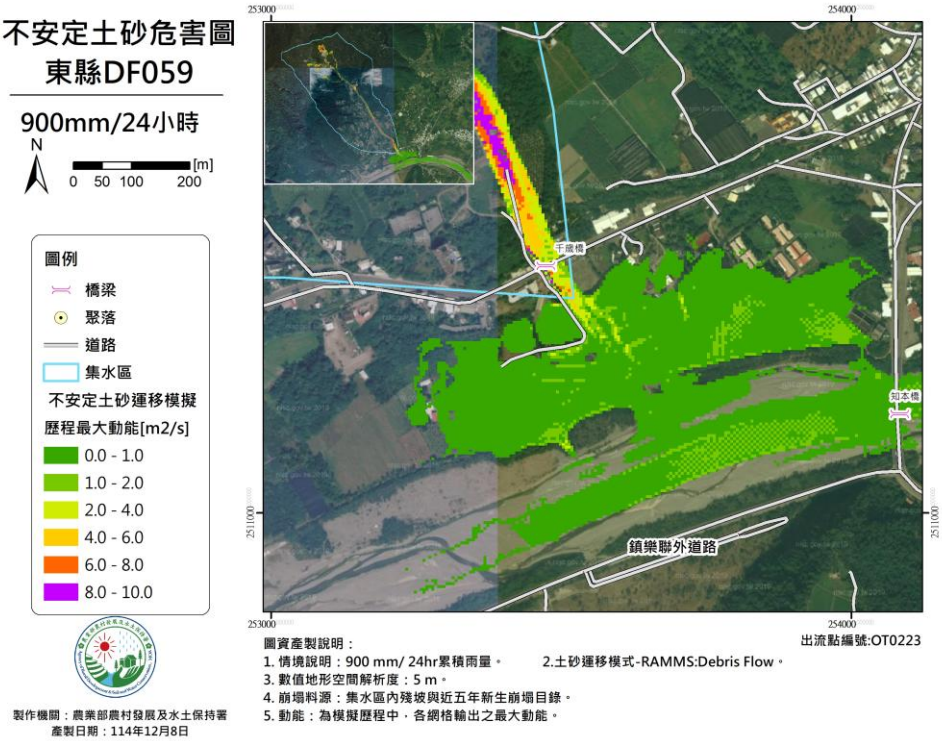


圖 2-102 木瓜溪 24 小時 900 mm 雨量情境下最大動量分布圖

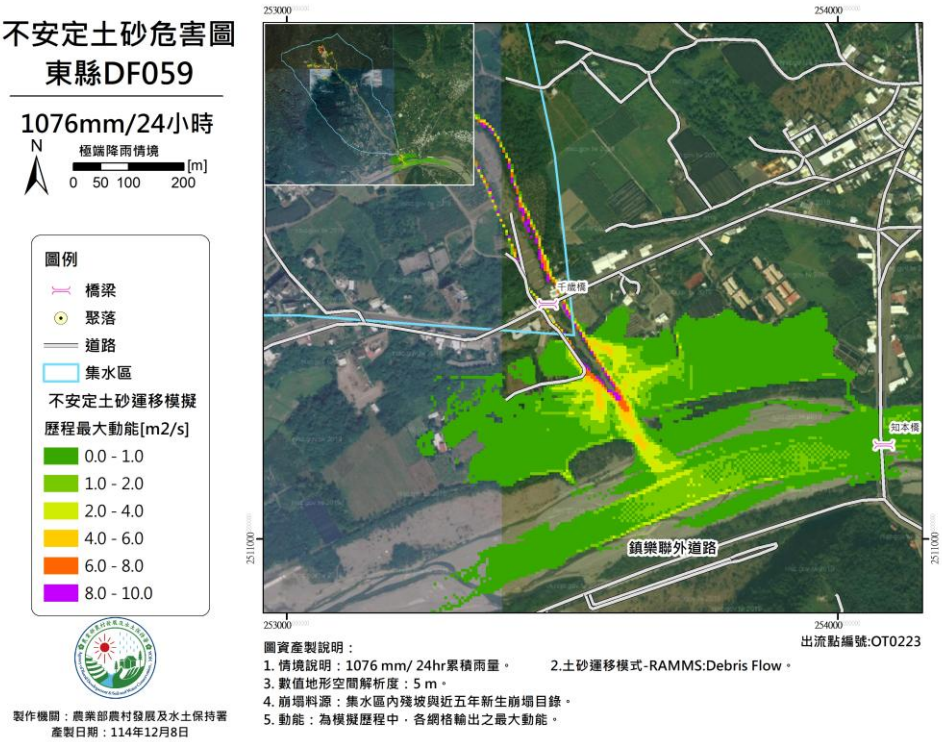
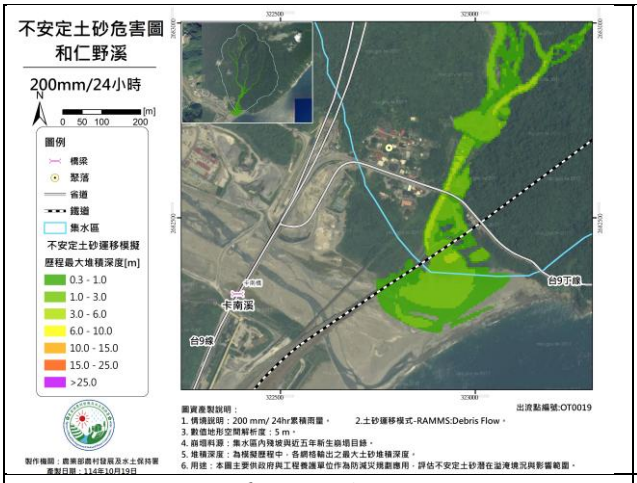


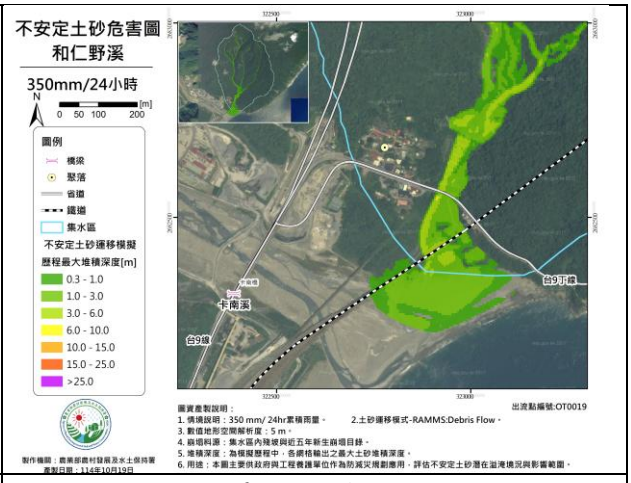
圖 2-103 木瓜溪 24 小時 1,076 mm 雨量情境(極端降雨)下最大動量分布圖

表 2-24 和仁野溪(花縣 DF025)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表

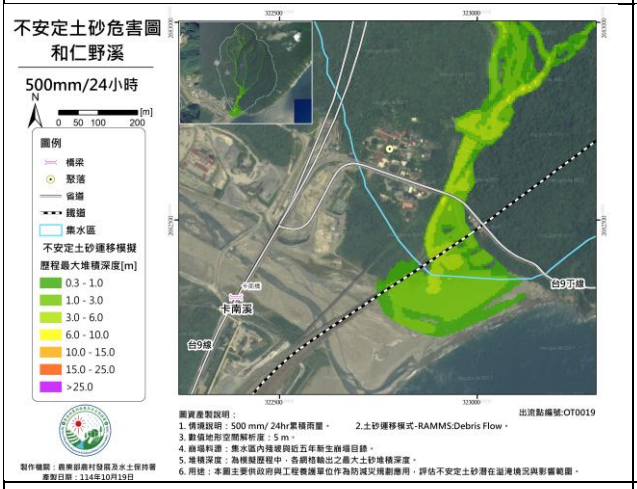
輸出成果	數值					
累積雨量情境(mm)	200	350	500	650	900	1,137
捲增量體(V_f, m^3)	32,253	44,347	53,005	60,741	72,000	81,145
最終流出量體(V_f, m^3)	49,970	75,940	96,977	118,381	152,652	182,982
雙孔箱涵 H_{max} (m)	4.2	5.2	5.9	6.5	7.3	7.9
新和仁溪橋 H_{max} (m)	2.7	3.6	4.1	4.5	4.7	4.7
潛在影響聚落	無	無	無	無	無	無
潛在影響公路橋梁	無	台 9 丁線雙孔箱涵	台 9 丁線雙孔箱涵	台 9 丁線雙孔箱涵	台 9 丁線雙孔箱涵	台 9 丁線雙孔箱涵
潛在影響鐵路橋梁	無	無	新和仁溪橋	新和仁溪橋	新和仁溪橋	新和仁溪橋



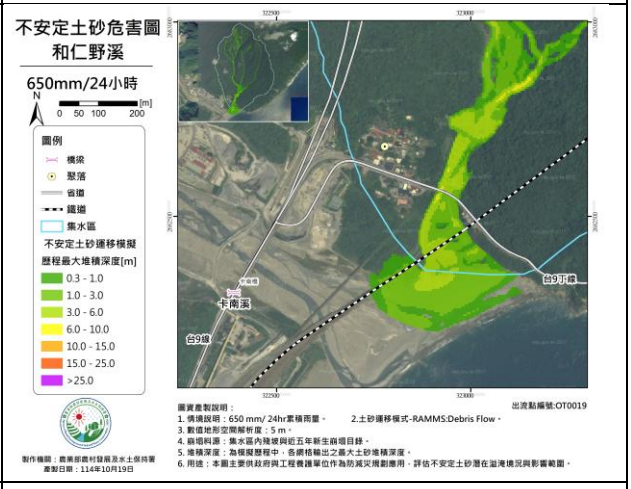
(g) 24 hr 累積雨量 200 mm



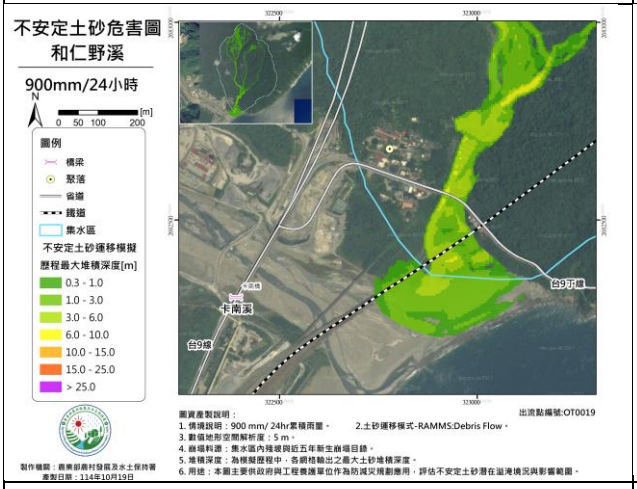
(h) 24 hr 累積雨量 350 mm



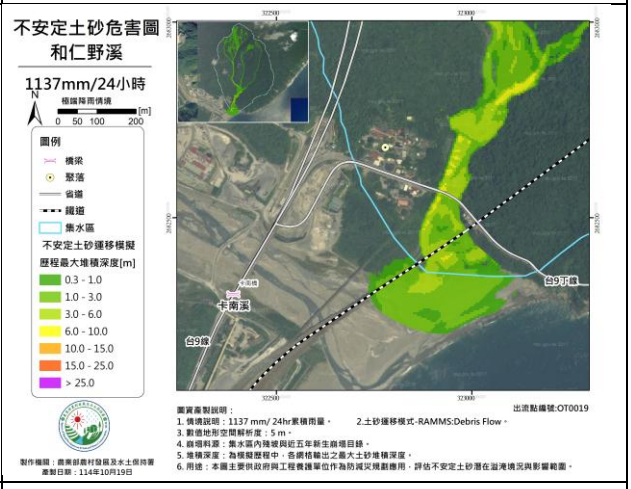
(i) 24 hr 累積雨量 500 mm



(j) 24 hr 累積雨量 650 mm



(k) 24 hr 累積雨量 900 mm



(l) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-104 和仁野溪(花縣 DF025)不安定土砂危害圖

表 2-25 三棧南溪(花縣 DF174)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表

輸出成果	數值					
累積雨量情境 (mm)	200	350	500	650	900	1,137
捲增量體(m^3)	120,980	135,613	138,070	134,103	143,792	157,320
最終流出量體 (V_f, m^3)	144,716	176,723	199,705	212,989	253,545	294,619
箱涵 H_{max} (m)	4.2	5.3	6.6	6.9	5.7	6
三棧橋 H_{max} (m)	3.4	4.1	4.4	4.5	4.9	5.5
鐵路橋 H_{max} (m)	0.8	1.1	1.1	0.9	0.3	-
懷恩橋 H_{max} (m)	0.3	0.4	0.4	-	-	-
潛在影響聚落	無	無	無	無	無	無
潛在影響 公路橋梁	無	箱涵	箱涵	箱涵	箱涵	箱涵
潛在影響 鐵路橋梁	無	無	無	無	無	無



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm



(b) 24 hr 累積雨量 350 mm



(c) 24 hr 累積雨量 500 mm



(d) 24 hr 累積雨量 650 mm



(e) 24 hr 累積雨量 900 mm



(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

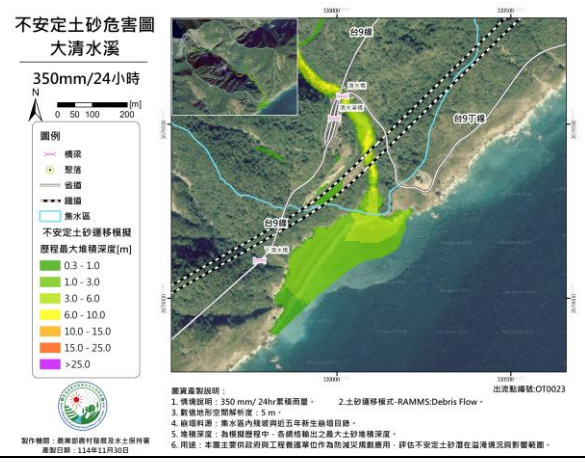
圖 2-105 三棧南溪(花縣 DF174)不安定土砂危害圖

表 2-26 大清水溪(花縣 DF024)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表

輸出成果	數值					
累積雨量情境(mm)	200	350	500	650	900	1,137
捲增量體(m^3)	105,642	122,164	123,114	120,537	114,193	105,621
最終流出量體(V_f, m^3)	46,950	49,491	58,005	72,309	79,665	191,894
台 9 丁線清水橋 H_{max}(m)	6.0	7.1	7.7	8.5	9.9	10.0
東大清水溪橋 H_{max}(m)	5.0	6.3	7.1	8.3	8.9	8.9
西大清水溪橋 H_{max}(m)	5.3	6.6	7.7	8.7	8.7	8.7
潛在影響聚落	無	無	無	無	無	無
潛在影響公路橋梁	無	無	無	無	台 9 丁線 68.9K 清水橋	台 9 丁線 68.9K 清水橋
潛在影響鐵路橋梁	西大清水溪橋	西大清水溪橋	西大清水溪橋	西大清水溪橋	西大清水溪橋	西大清水溪橋



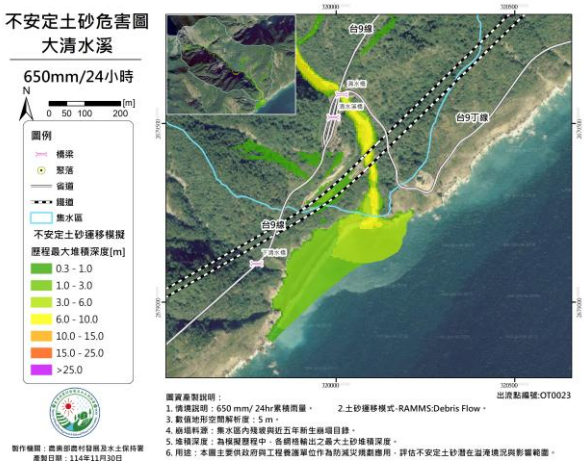
(a) 24 hr 累積雨量 200 mm



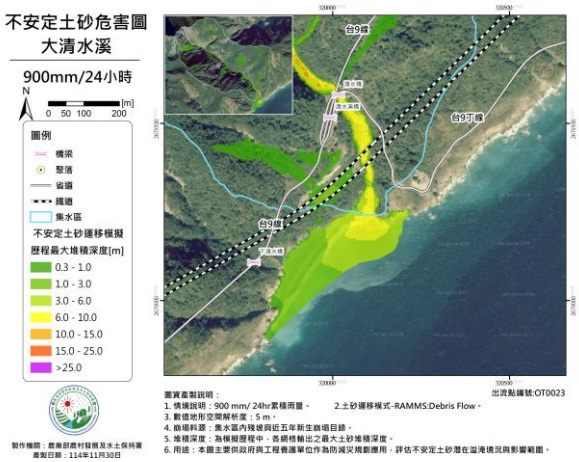
(b) 24 hr 累積雨量 350 mm



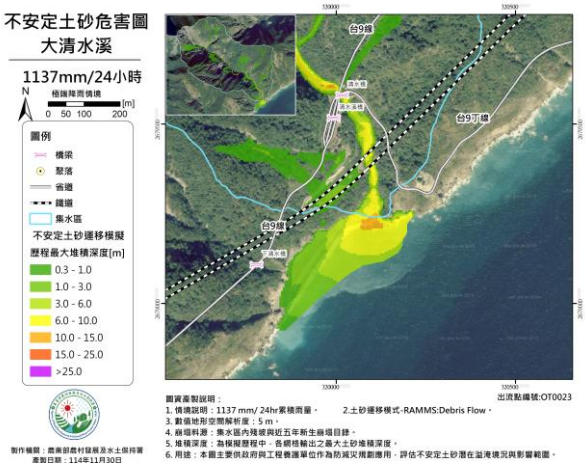
(c) 24 hr 累積雨量 500 mm



(d) 24 hr 累積雨量 650 mm



(e) 24 hr 累積雨量 900 mm



(f) 24 hr 累積雨量 1,137 mm

圖 2-106 大清水溪(花縣 DF024)不安定土砂危害圖

表 2-27 木瓜溪(東縣 DF059)不安定土砂運移模擬成果與危害評估表

輸出成果	數值					
累積雨量情境(mm)	200	350	500	650	900	1,076
捲增量體(m^3)	66,049	71,477	71,589	76,220	85,526	86,803
最終流出量體 (V_f, m^3)	82,085	111,791	125,988	128,313	143,897	157,921
鎮樂橋 H_{max} (m)	3.9	5.6	5.9	5.0	4.8	6.9
千歲橋 H_{max} (m)	4.0	4.0	4.8	5.2	6.0	7.0
知本橋 H_{max} (m)	0.9	1.0	1.0	1.2	1.8	1.9
新知本橋 H_{max} (m)	0.5	0.5	0.78	0.8	1.0	-
鐵路橋 H_{max} (m)	-	0.4	0.4	0.4	0.6	-
潛在影響聚落	無	無	無	無	無	無
潛在影響公路橋梁	無	鎮樂橋	鎮樂橋	鎮樂橋 千歲橋	鎮樂橋 千歲橋	鎮樂橋 千歲橋
潛在影響鐵路橋梁	無	無	無	無	無	無



(a) 24 hr 累積雨量 200 mm



(b) 24 hr 累積雨量 350 mm



(c) 24 hr 累積雨量 500 mm



(d) 24 hr 累積雨量 650 mm



(e) 24 hr 累積雨量 900 mm



(f) 24 hr 累積雨量 1,076 mm

圖 2-107 木瓜溪(東縣 DF059)不安定土砂危害圖

第三節 兩處不安定土砂集水區於長期土砂趨勢運移數值模擬

2024 年高屏山區接連遭受 7 月凱米颱風、10 月山陀兒颱風與康芮颱風等多個颱風侵襲，造成多處土石流災害發生，多處公路橋梁、聚落民宅面臨嚴峻土砂風險，團隊蒐集全台近年山崩目錄來建構重大土砂災害事件清單，並藉由現地勘查、新聞報導與航遙測影像...等多種方法綜合評估各災害規模與二次致災風險，從中挑選出具崩塌規模與致災次數頻繁的台東縣太麻里鄉文里溪與高雄市桃源區玉穗溪集水區，此二處集水區作為進行未來長期(至少三年)土砂運移趨勢事件模擬，以每年發生一次重現期50年之降雨強度計算，瞭解不同年度工程設施影響與否等 7 種情境及新增崩塌範圍下潛在土砂流出量，產製集水區範圍之土砂出流堆積範圍與深度，供下游保全對象防減災參考使用，以下針對二處集水區進行基本資料說明。

一、集水區基本資料概述

(一) 台東縣太麻里鄉文里溪(東縣 DF076、東縣 DF077、東縣 DF110與東縣 DF111)

文里溪位於台東縣太麻里市區北側，主要包含 4 條支流，主流長約 3.6~5.5 公里，縱坡高差 500~700 公尺，集水區面積約 1,640 公頃，集水區內地層主要為潮州層的板岩夾硬頁岩，中下游則為多條支流所構成的沖積扇與高位河階地(圖 2-108)。

文里溪集水區包含 4 條土石流潛勢溪流(東縣 DF076、東縣 DF077、東縣 DF110 與東縣 DF111)，並有一處潛在大規模崩塌地(東縣 LL003)，歷史山崩多集中在東縣 DF076 與東縣 DF111 上游(圖 2-109)，2010~2023 年間的地形變異分析顯示東縣 DF076 與東縣 DF111 上游有較多的變異，地形變異分布與歷史山崩分布相符合，河床地形變異分

析顯示東縣 DF076 上游有小規模堆積(圖 2-111)，東縣 DF110 上游則為些許侵蝕刷深(圖 2-112)，東縣 DF111 則互有局部堆積與侵蝕(圖 2-113)，四條支流匯流後下游地形則多為局部侵蝕，並於出海口處有明顯堆積。文里溪集水區主要保全對象有新興部落與北大麻里部落民宅、台 9 線與台鐵南迴線，以及多座橋梁，文里溪河道原本有有五座防砂壩，但於 2024 年山陀兒颱風土石流中皆已淤滿並有部分溢流(圖 2-114)。

2024 年山陀兒颱風降雨集中於台東山區，太麻里雨量站(C0S690)累積雨量近 900 毫米，豪雨造成北太麻里地區發生多處新生崩塌，崩塌土砂轉化為土石流造成中下游多處橋梁受損，產業道路中斷，並有部分土砂溢流造成多處民宅、護岸與農田受損(圖 2-116)。

文里溪集水區內雖無農村水保署判釋之殘坡，但有多處屬於地礦中心環境地質圖的老山崩與順向坡(圖 2-117)，顯示集水區內地質條件不佳，未來土砂災害規模與風險仍高，因此團隊建議以木瓜溪集水區作為本案長期土砂運移趨勢事件模擬目標，評估治理工程成效、潛在土砂流出量與堆積深度，了解不安定土砂對下游保全對象(北太麻里聚落、台 9 線和台鐵橋)的潛在危害。

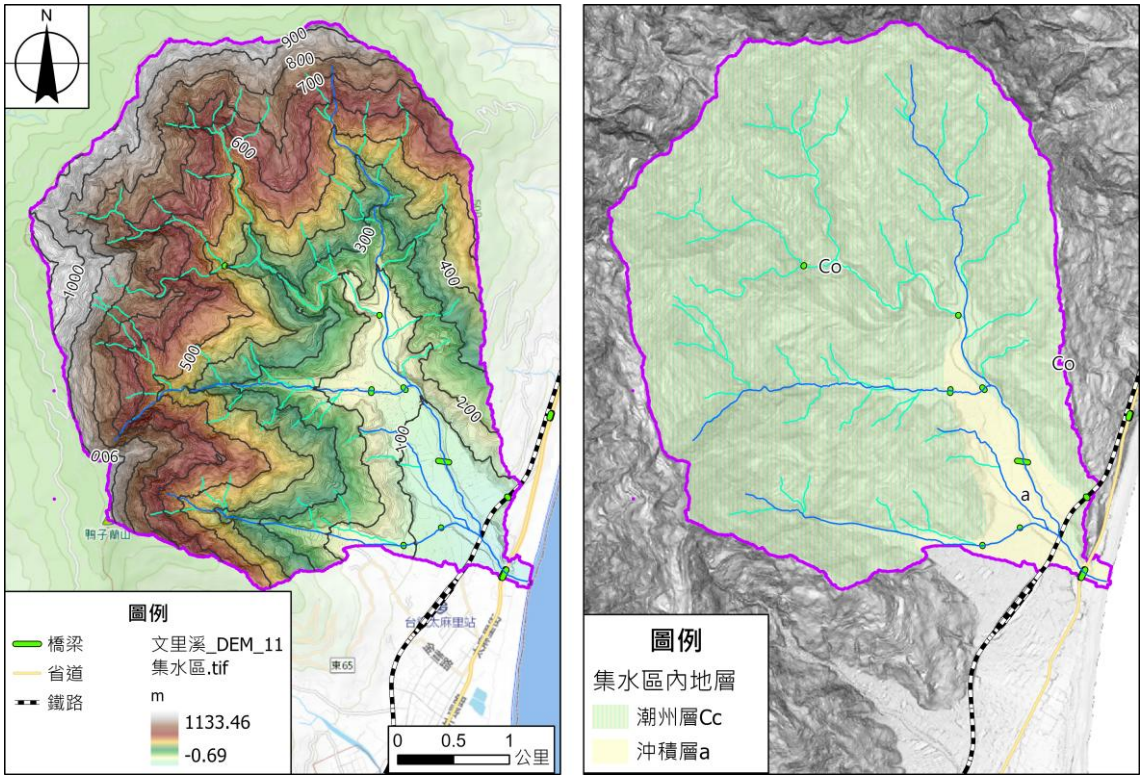


圖 2-108 文里溪(東縣 DF076 等 4 條)集水區地形圖與地質圖

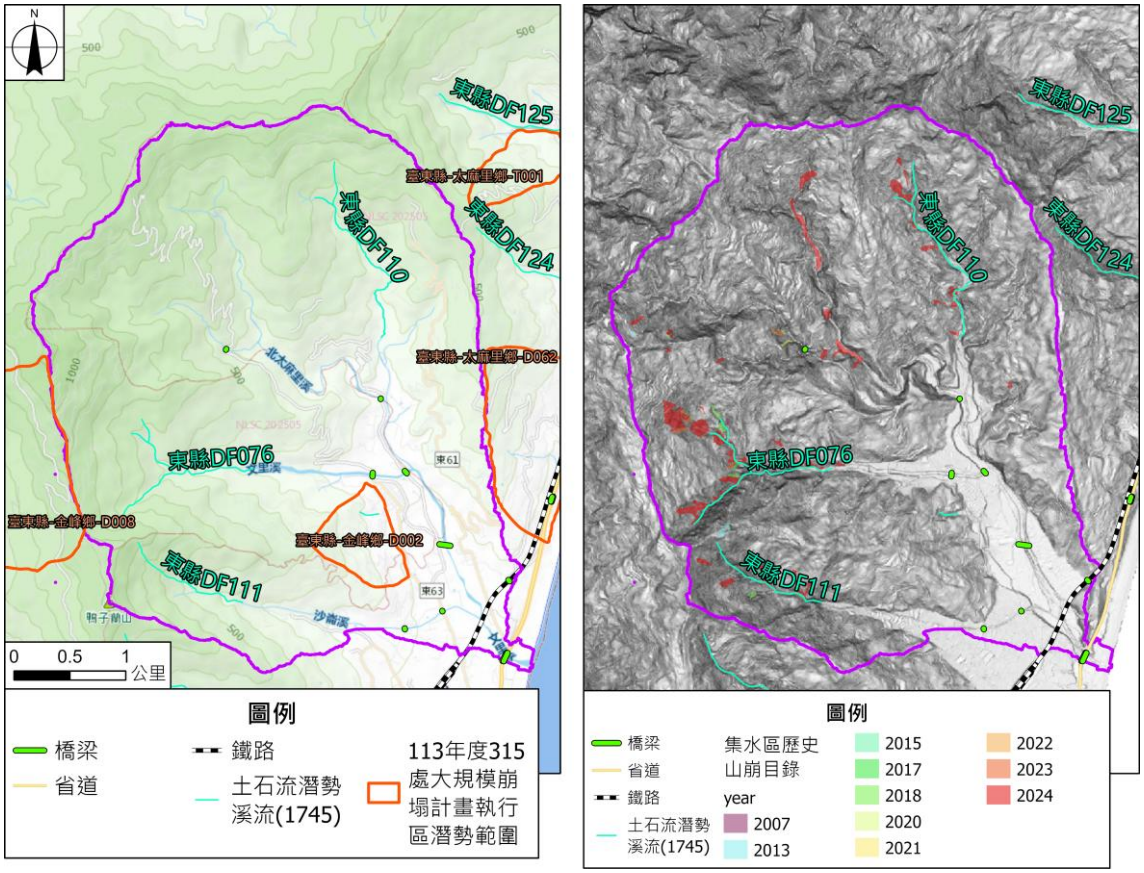


圖 2-109 文里溪(東縣 DF076 等 4 條)集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布

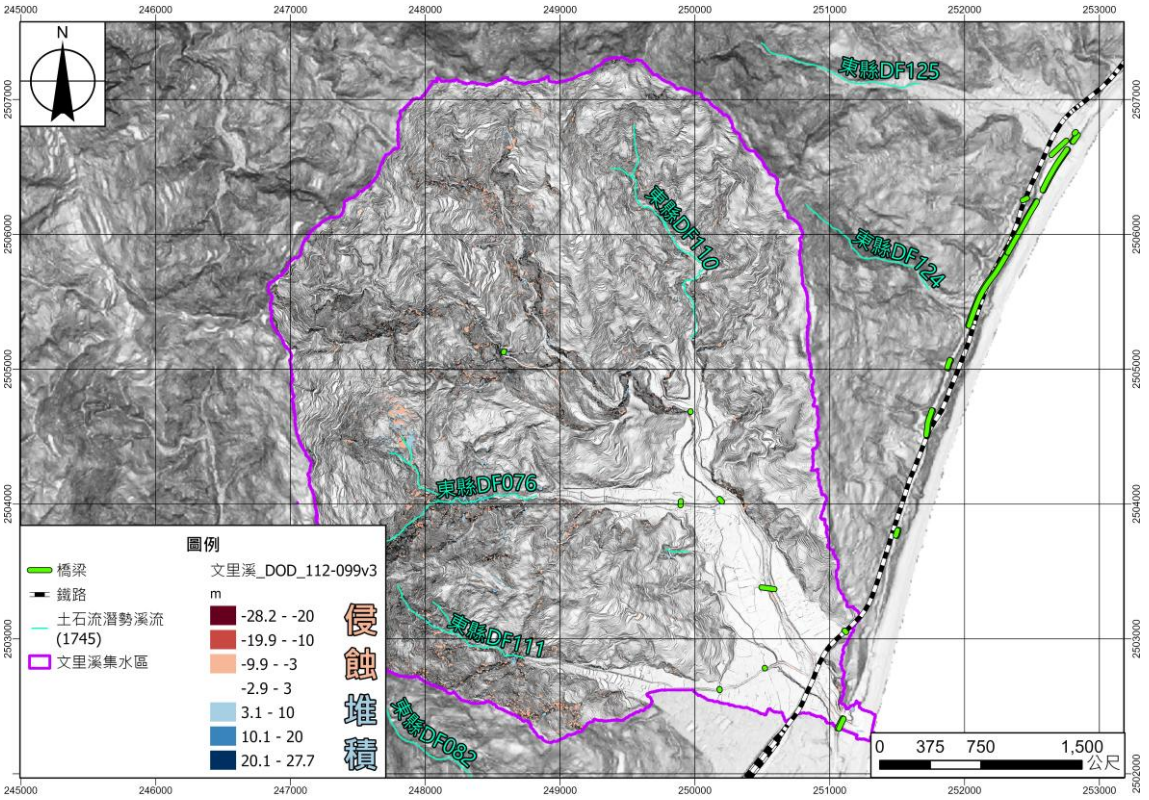


圖 2-110 文里溪(東縣 DF076 等 4 條)集水區地形變異分析(2010~2023)

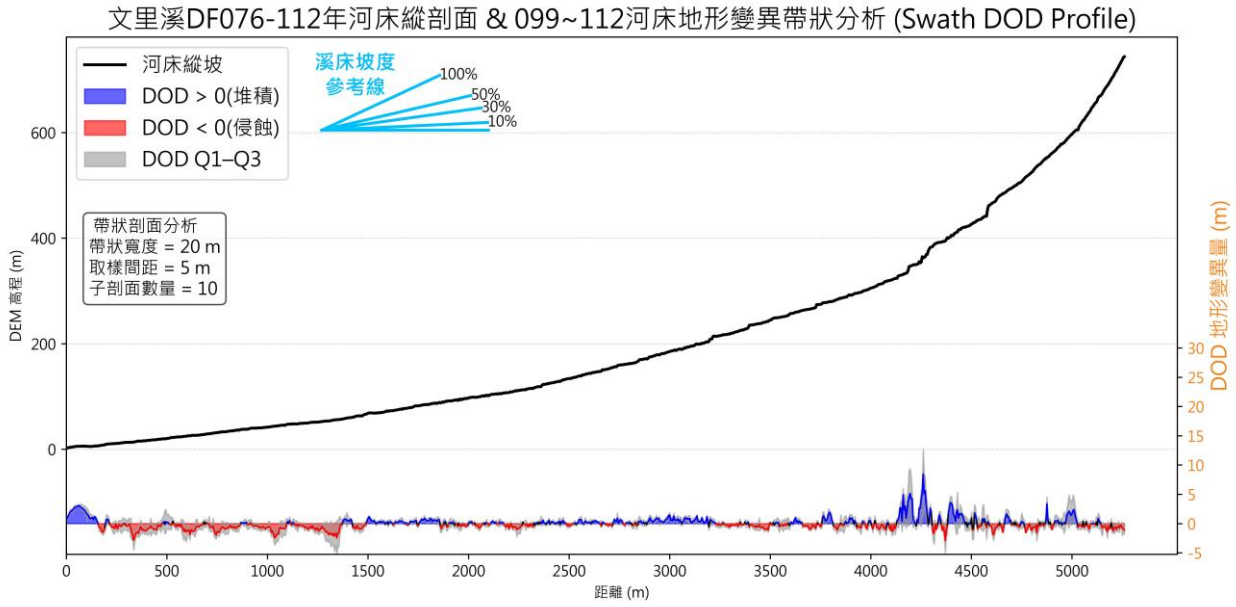


圖 2-111 文里溪(東縣 DF076)河床地形變異帶狀分析(2010~2023)

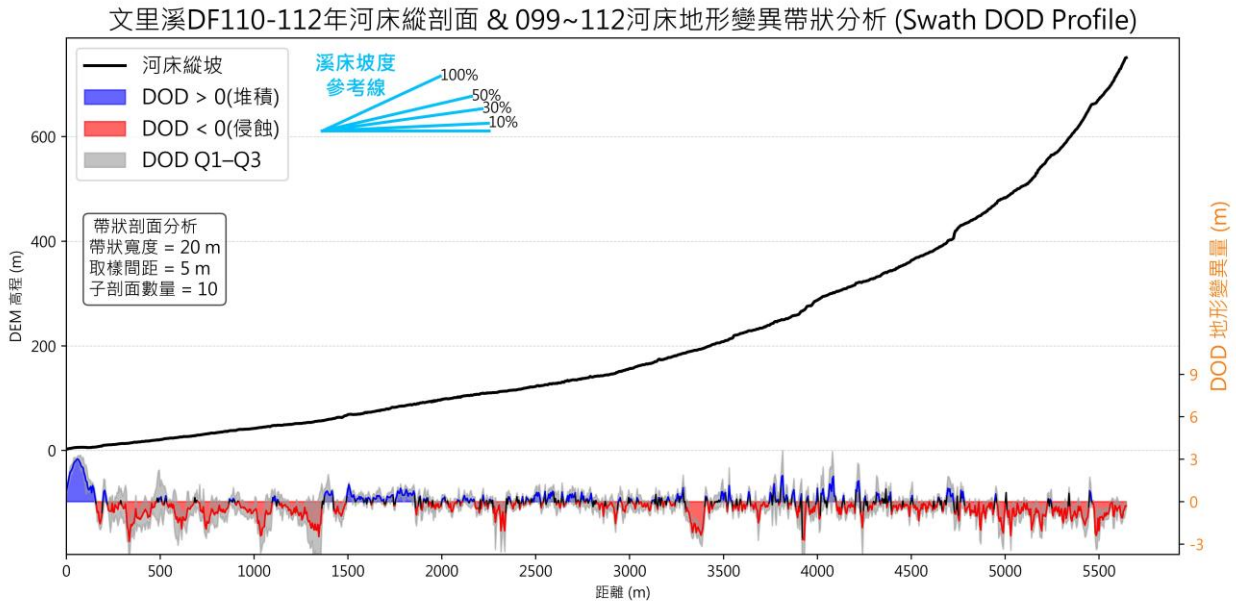


圖 2-112 文里溪(東縣 DF110)河床地形變異帶狀分析(2010~2023)

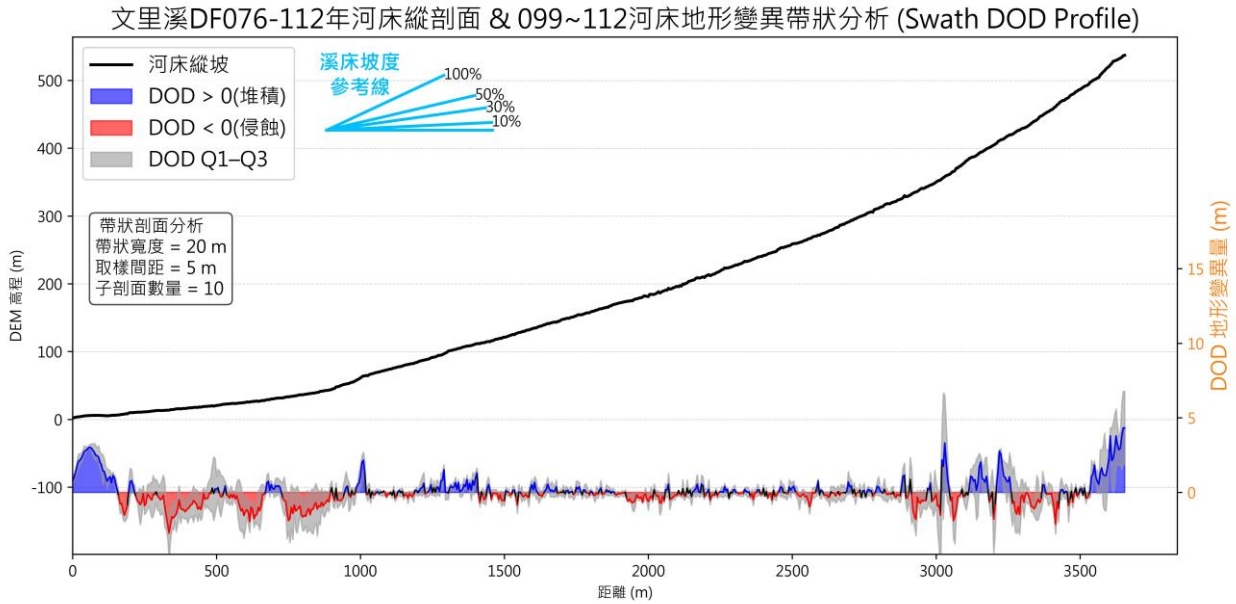


圖 2-113 文里溪(東縣 DF111)河床地形變異帶狀分析(2010~2023)

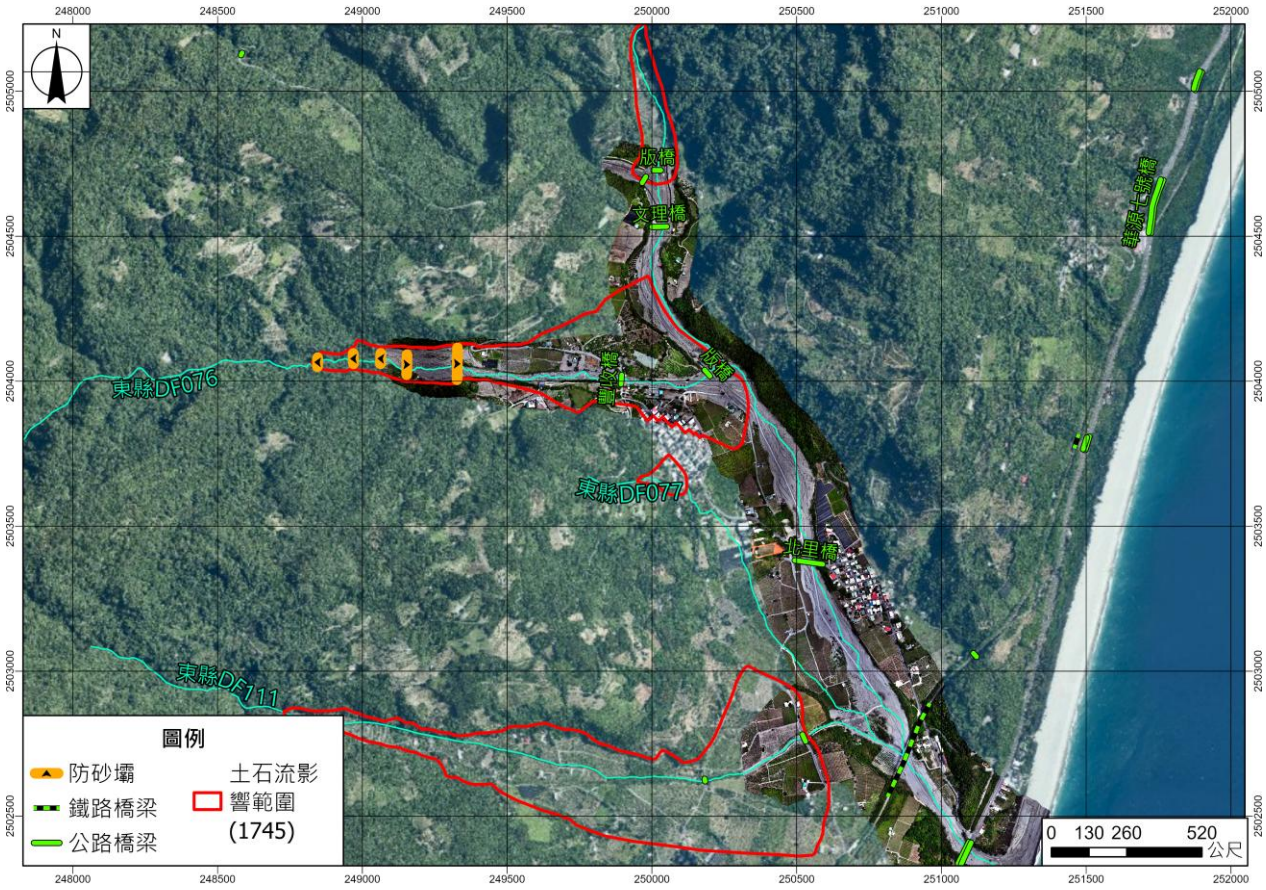


圖 2-114 文里溪集水區土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布

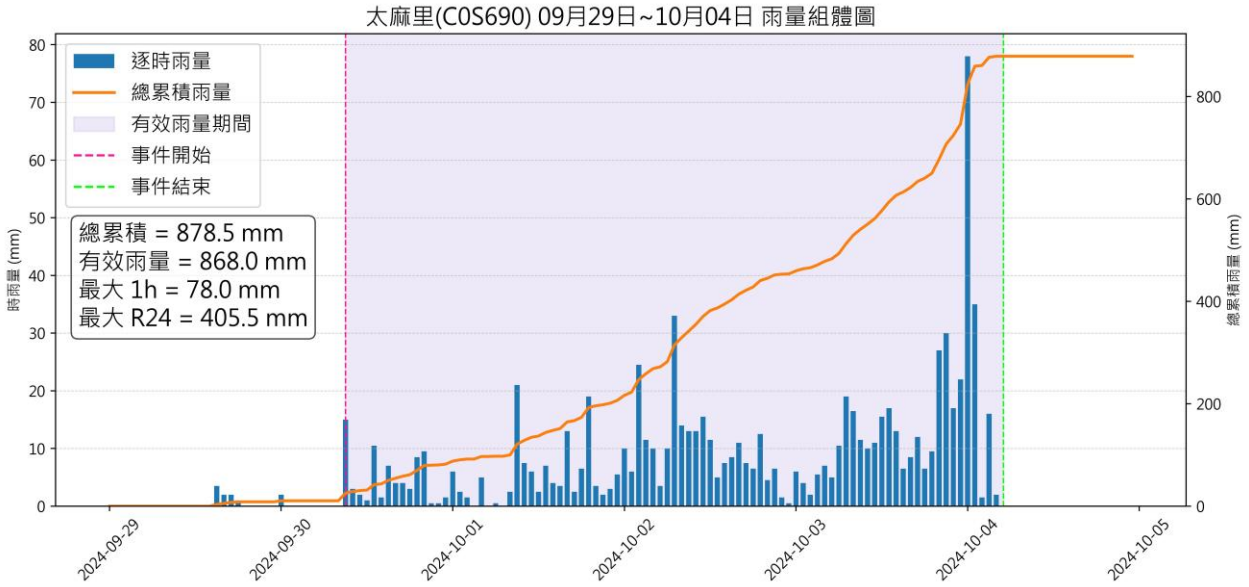


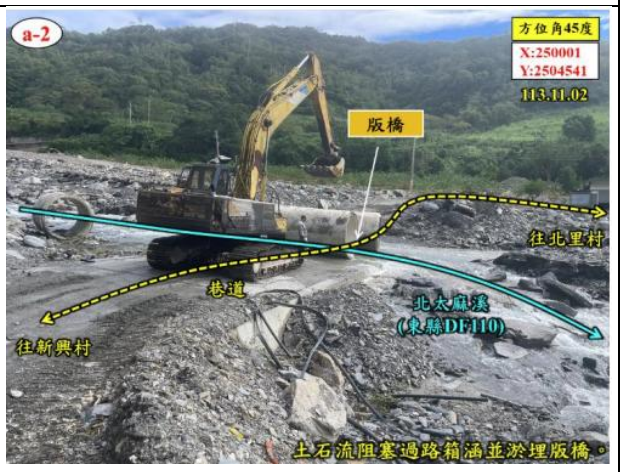
圖 2-115 太麻里雨量站(C0S690)山陀兒颱風期間雨量組體圖



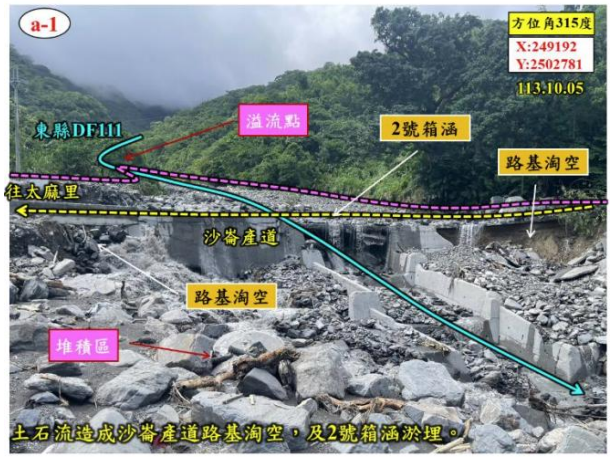


東縣 DF076 山陀兒颱風土石流災情





東縣 DF110 山陀兒颱風土石流災情





東縣 DF111 山陀兒颱風土石流災情

圖 2-116 文里溪集水區山陀兒颱風土石流災情(摘自重大土砂災例)

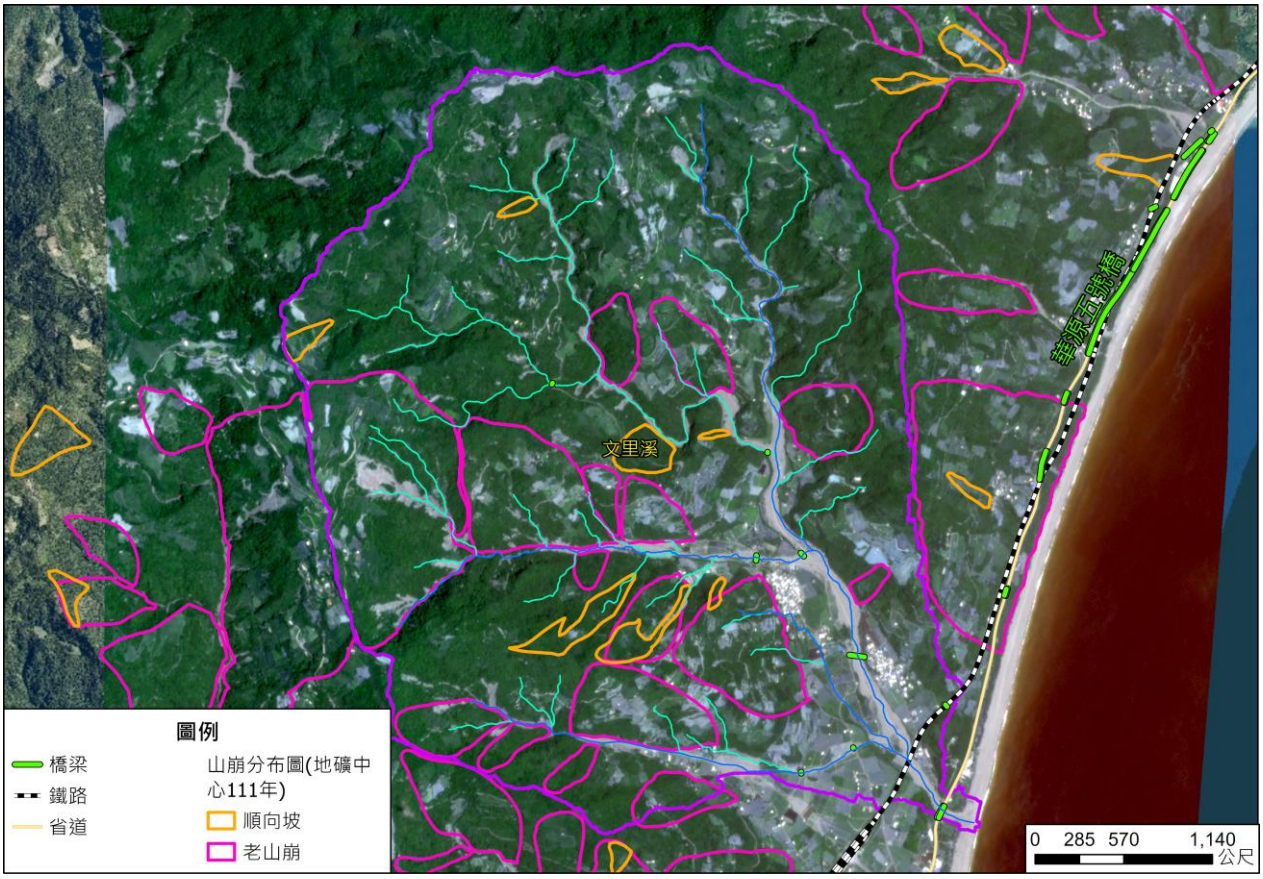


圖 2-117 文里溪集水區殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像

(二) 高雄市桃源區玉穗溪

玉穗溪位於高雄市桃源區，為荖濃溪中游支流，溪流長度 8.1 公里，縱坡落差約 1,300 公尺，集水區面積 1,231 公頃，上游主要岩性為畢祿山層的板岩夾變質砂岩，中下游則為潮州層的厚層硬頁岩夾板岩，常見岩體塑性變形之崩移構造，岩體破碎容易崩塌(圖 2-118)。在 2009 年莫拉克颱風後玉穗溪發生多次土石流災害(表 2-28、圖 2-119)，數次阻斷下游台 20 線使桃源三里陷入孤島，大量土石流料源來自於玉穗溪源頭一處大規模崩塌地，從 2010~2024 年地形變異分析圖(圖 2-120)中可見該崩塌地持續滑移(圖 2-123)，大量崩積土砂輸送至中下游使河床縱坡變化甚鉅(圖 2-121)。玉穗溪集水區主要保全對象有台 20 線南橫公路與明霸克露橋(現為河床便道)，下游河道原本有有五座防砂壩，但皆於 2021 年盧碧颱風土石流中淤埋(圖 2-122)。

玉穗溪最為嚴重的土石流災害發生於 2021 年盧碧颱風，原本即殘破不堪的坡體在 8 月 6 日發生全面破壞(圖 2-123)，估計崩塌量體達 9.9 百萬立方公尺，土石流沖毀明霸克露橋，使下游匯流口處淤積達 25 公尺(Liu et al., 2023)，坡腹量體的流失也造成山頂的張力裂隙拉伸達 5~10 公尺。2023 年卡努颱風造成玉穗溪土石流並使台 20 線鋼便橋受損，2024 年凱米颱風累積雨量達 1,400 毫米(圖 2-124)，源頭區殘坡塊體崩塌造成下游土石流(圖 2-125)，隨後的康芮颱風亦造成玉穗溪土石流爆發，鋼便橋嚴重受損(圖 2-126)。

現今玉穗溪中上游邊坡仍有大面積殘坡，殘坡面積共 34 公頃(圖 2-127)，河床也殘留有大量土石流材料，然而舊有防砂構造物皆已淤埋或損毀喪失囚砂功能，大量不安定土砂極有可能在未來數年內因降雨逕流持續使土砂運移至下游荖濃溪主流，恐危害台 20 線河床便道交通安全，

公路局與權責機關已投入緊急災修工程，因此團隊建議以玉穗溪集水區作為本案長期土砂運移趨勢事件模擬目標，評估治理工程成效、潛在土砂流出量與堆積深度，了解不安定土砂對下游保全對象台 20 線的潛在危害。

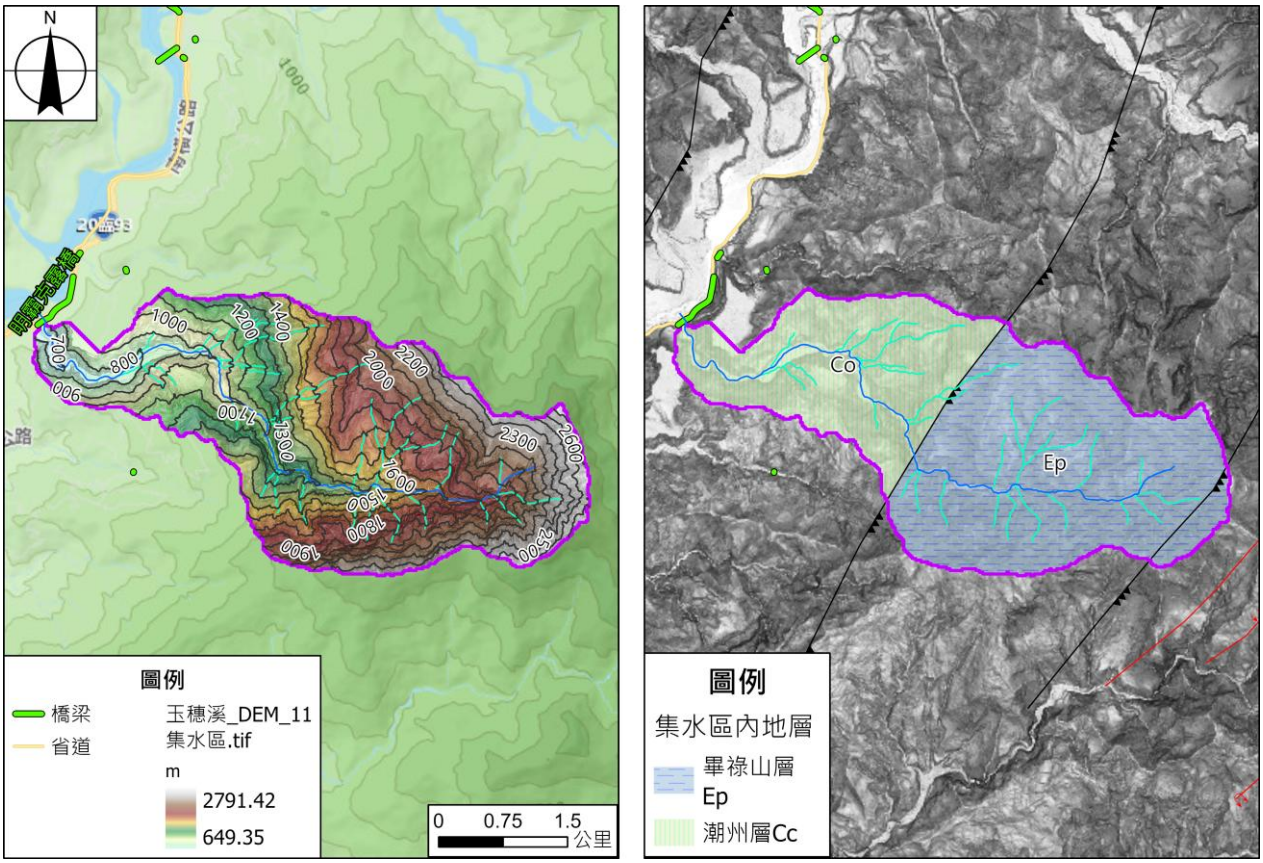


圖 2-118 玉穗溪溪集水區地形圖與地質圖

表 2-28 玉穗溪歷年土石流災情表

年份	事件	單日最大降雨		災損及影響
		日期	降雨量 (mm)	
2009	莫拉克颱風	8/8	1,173	荖濃溪流域邊坡及支流普遍發生崩塌與土石流，谷床大量掩埋。
2015	杜鵑颱風	9/27	176	荖濃溪暴漲、玉穗溪土石流、河床淤高。
2016	0611 豪雨	6/11	526	台 20 線勤和至復興河床便道路基流失，玉穗農路中斷。
	梅姬颱風	9/26	364	玉穗溪土石流、河床便道淤高中斷。
2019	0517 豪雨	5/18	434.5	玉穗溪土石流
2021	盧碧及 0806 豪雨	8/7	423	玉穗溪暴發土石流沖出大面積土石流扇，出毀 2017 年通車之明霸克露橋。
2023	卡努颱風	8/4	304	颱風外圍環流導致玉穗溪土石流，沖毀明霸克露橋鋼便橋橋墩。
	0822 豪雨	8/22	339	玉穗溪爆發土石流，台 20 鋼便橋與溪床便道受阻。
2024	凱米颱風	7/26	943	荖濃溪暴漲沖毀明霸克露橋。
	山陀兒颱風	10/2	60	荖濃溪暴漲沖毀台 20 溪床便道。
	康芮颱風	10/31	420	玉穗溪土石流沖毀鋼便橋、荖濃溪暴漲沖毀溪床便道。

註 1 資料來源：王慶雄(2018)、林司秦等(2023)、新聞報導。

註 2 本表雨量採用小關山雨量站紀錄。

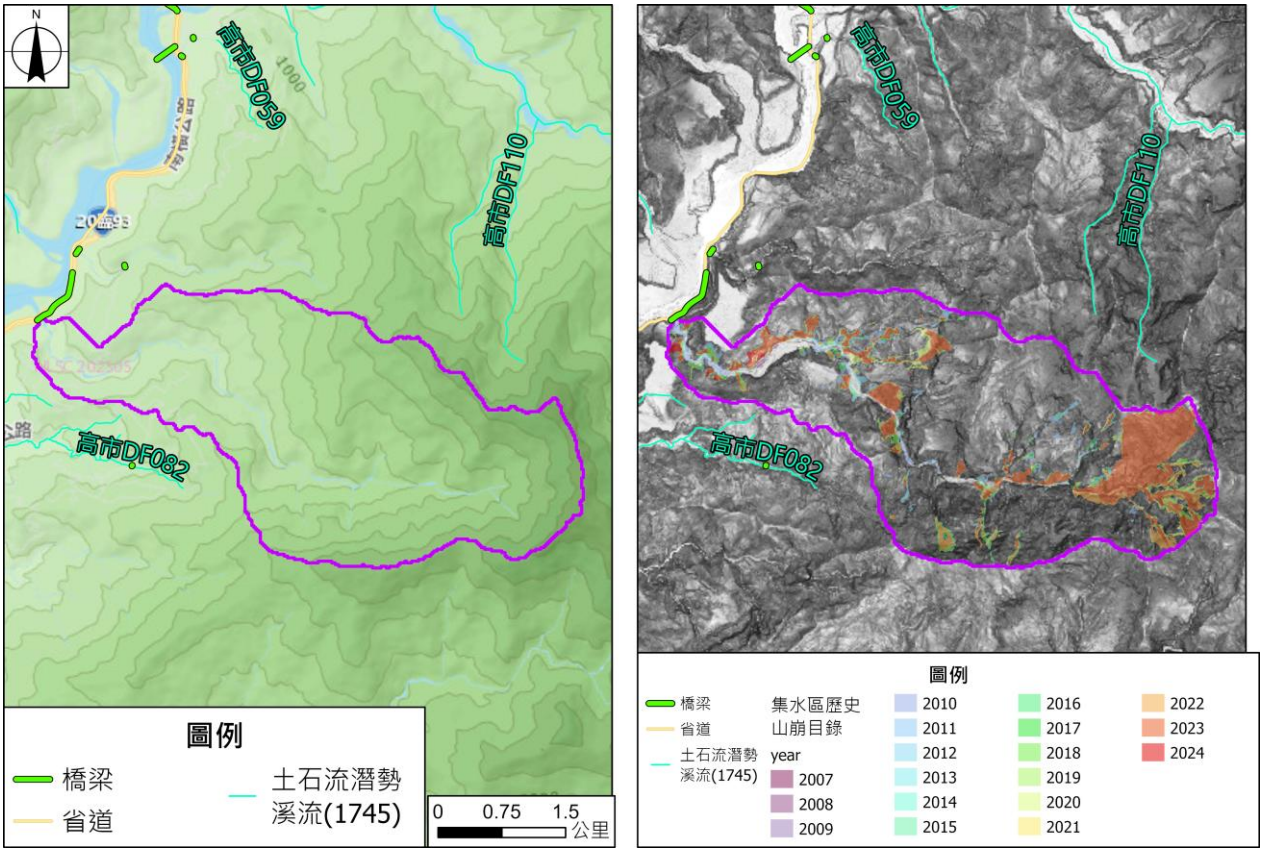


圖 2-119 玉穗溪集水區土石流潛勢溪流及大崩分布與歷年山崩分布

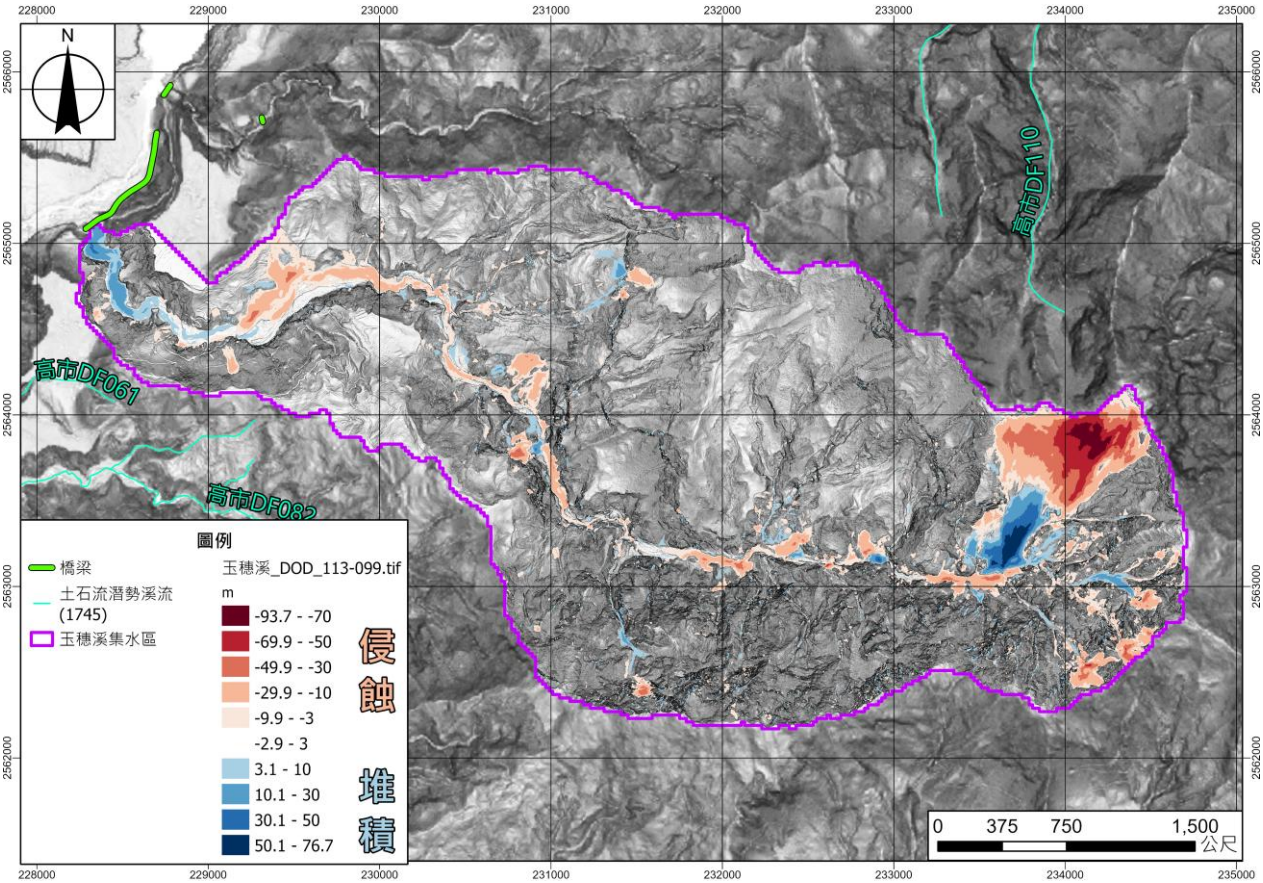


圖 2-120 玉穗溪集水區地形變異分析(2010~2024)

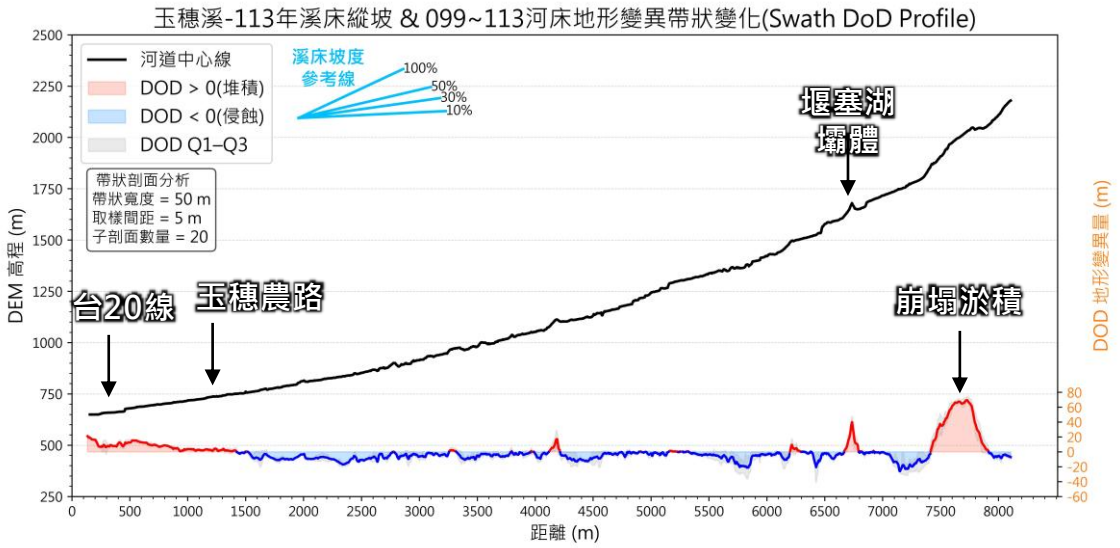


圖 2-121 玉穗溪河床地形變異帶狀分析(2010~2024)

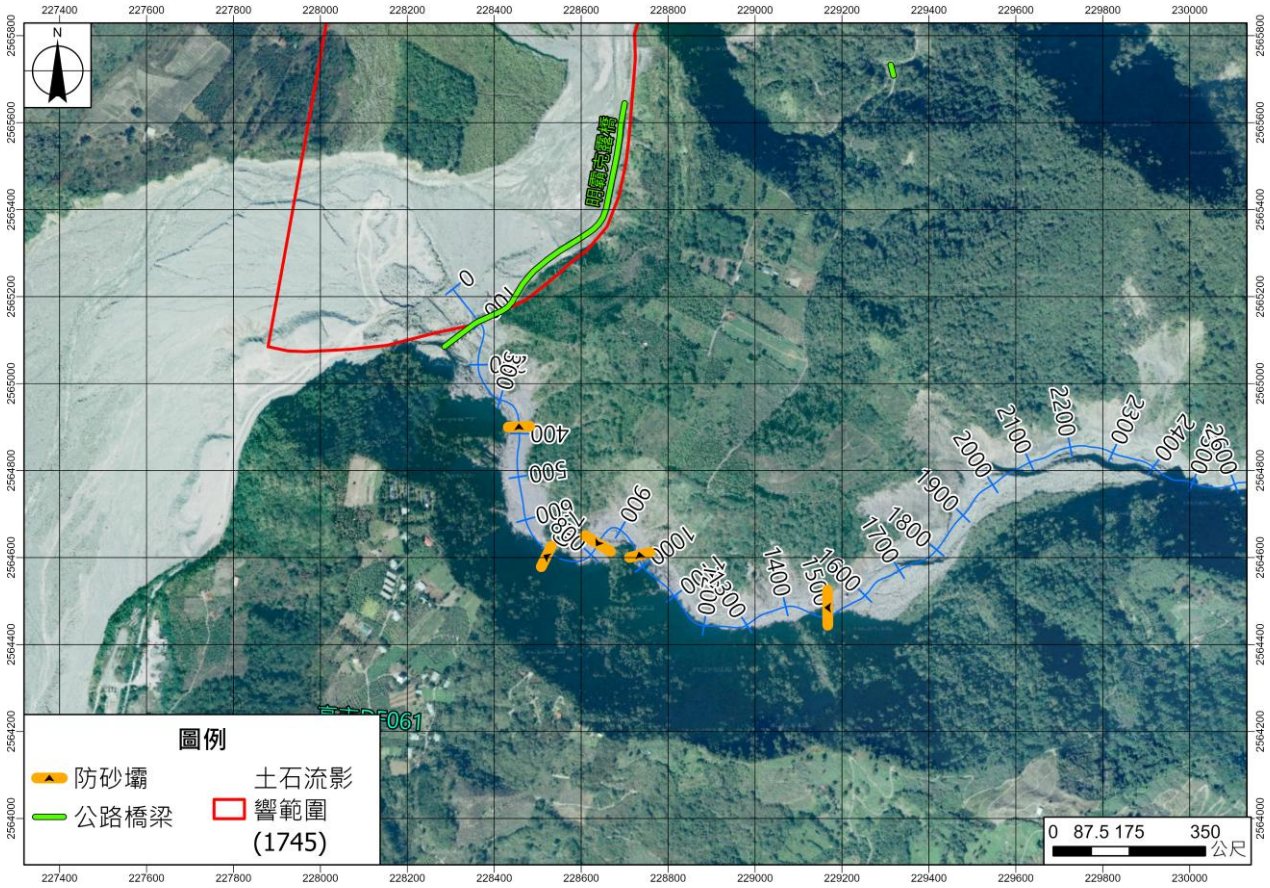


圖 2-122 玉穗溪集水區土石流影響範圍與橋梁、防砂壩分布

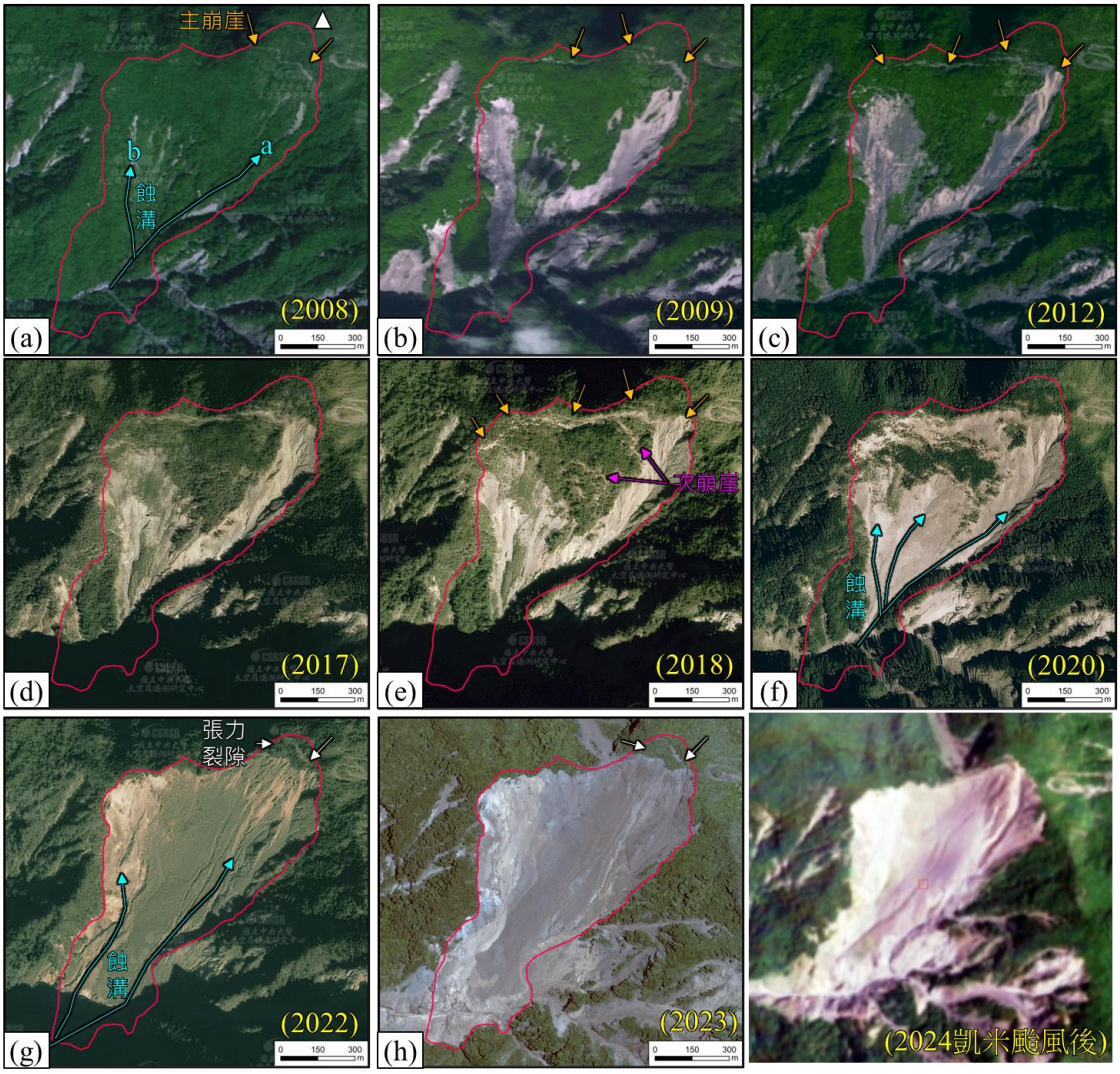


圖 2-123 玉穗溪源頭大規模崩塌地歷年滑移變化

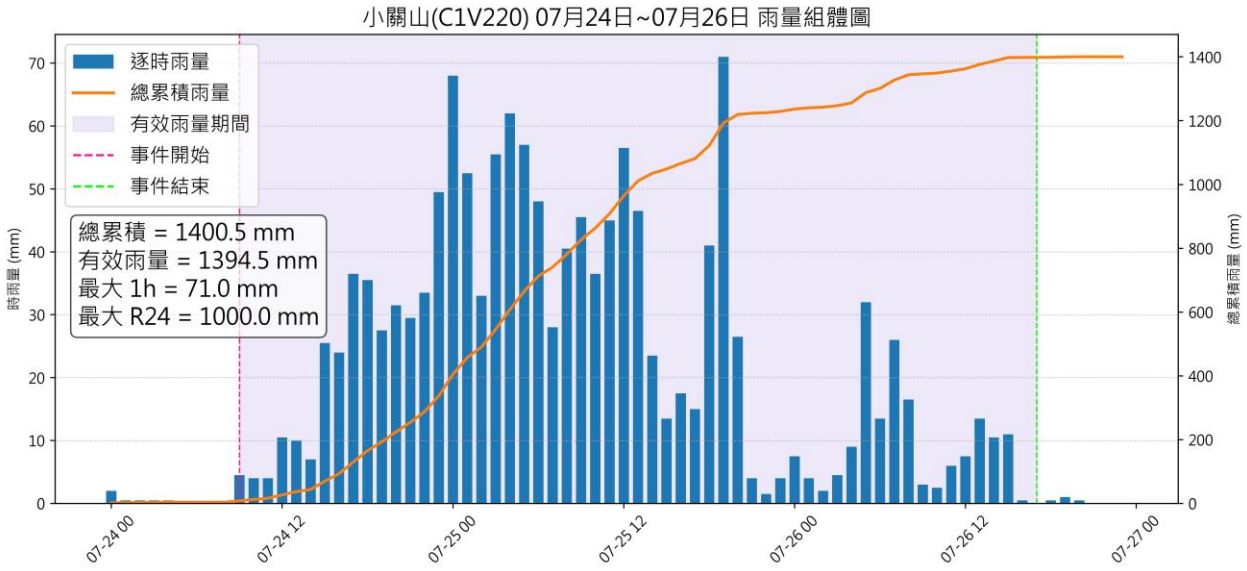


圖 2-124 小關山雨量站(C1V220)凱米颱風期間雨量組體圖



圖 2-125 玉穗溪集水區凱米颱風前後對比



(a) 凱米颱風土石流情形



(b) 康芮颱風土石流情形

圖 2-126 玉穗溪 2024 年土石流災情概況

資料來源:公路局

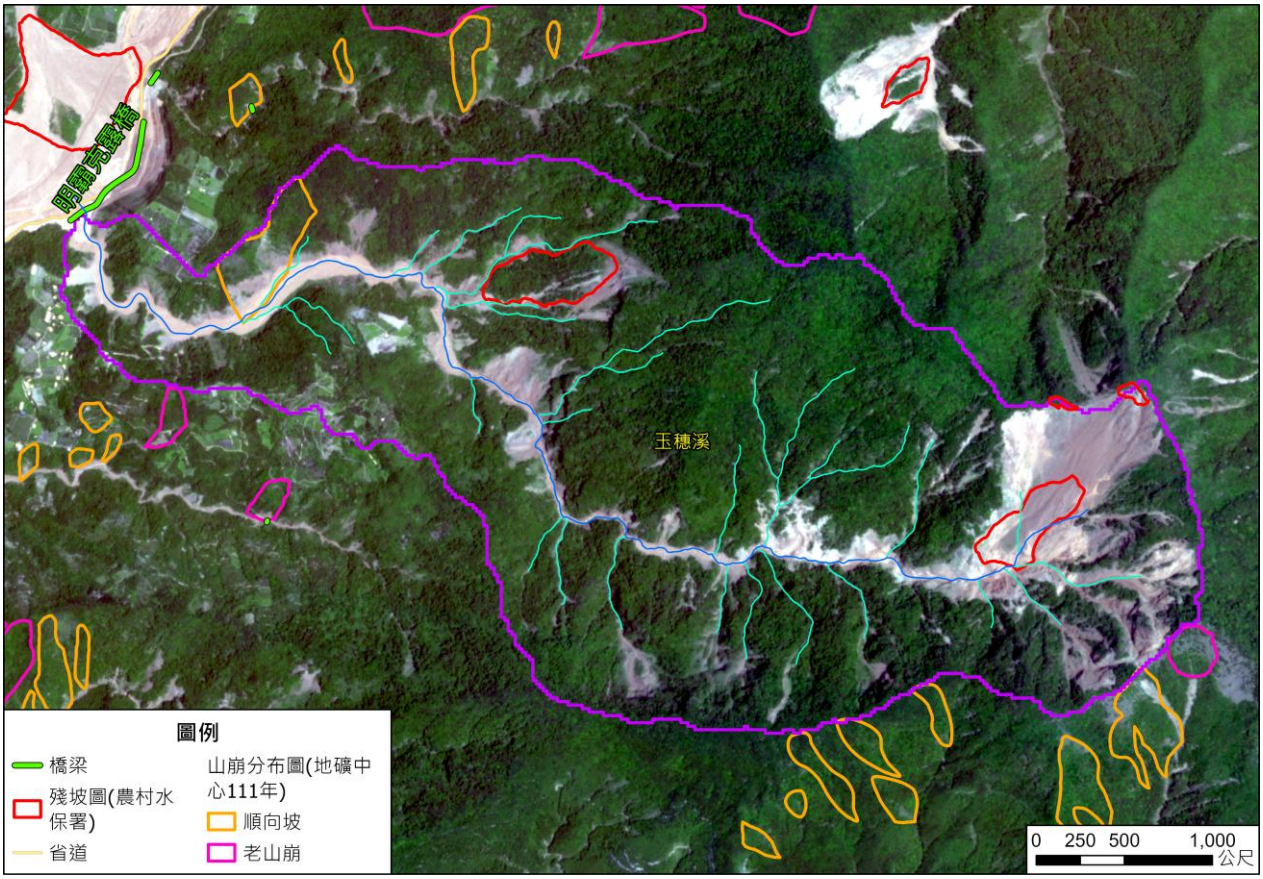


圖 2-127 玉穗溪集水區殘坡、順向坡與老山崩分布套疊 25Q1 衛星影像

二、長期土砂運移趨勢數值模擬

分別於 8 月 22 日與國立成功大學謝正倫老師以及 9 月 23 日第 4 次工作會議討論確認本小節模擬方法，本節將呈現 RAMMS 模擬成果。

如圖 2-128 所示，本節數值模擬分析擬以參考第 2-2-2 節評估流程，並根據農保監字第 1142669757 號「114 年集水區不安定土砂運移模式精進與衝擊評估」、「114 年全臺集水區分布式降雨逕流模式與平台建置」及「114 年巨量空間地理資訊平台維運計畫」第 1 次聯合工作會議紀錄指定 2 處集水區分別為玉穗溪及文里溪進行分析。首先以集水區由內政部國土測繪中心最新產製 DEM 或 DSM 地形為基礎(如圖 2-129)，配合全臺各流域打荻式經驗式(參考農村水保署 2024)推估殘存土砂量(或 DoD 圖層)，視為當年度集水區內之剩餘堆積土砂量。再配合 7 種情境(如無治理第 0

年、第 1 年、第 2 年及第 3年 與已治理第 1 年、第 2 年及第 3 年)及 50 年重現期距降雨(考量野溪與坡地的水保設施之防洪標準)並參考前述「殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係」推估集水區內土砂量體資訊，導入 RAMMS 中之塊體釋放法模組，模擬 7 種及新增崩塌下對於既有殘坡或崩積土砂量之土砂運移境況。

本節操作流程，先將 2024 年(第 0 年)模擬所得之最終土砂堆積結果輸出，視為 2025 年(第 1 年)有無治理工程之地形特徵，重新模擬集水區內土砂遞移之RAMMS初始建模地形來源，並重複模擬 2026 年(第 2 年)之有無治理工程的不安定土砂運移結果，以此類推 2027 年(第 3 年)之模擬程序，詳圖 2-129 所示。因 2024 年(第 0 年)至 2027 年(第 3 年)集水區內塊體來源對應之近 5 年度事件型崩塌目錄皆不一致，故參考農村水保署(2024)採用全臺各流域迴歸打荻式經驗式評估崩塌量體，並透過【殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係】，計算有效崩塌量體，其作為無整治第 0 年模擬情境下之崩塌量體，將崩塌量體平均分配至農村水保署事件型崩塌區位，藉此可確認各塊體之輸入塊體深度。另模擬參數部分，參考不安定土砂危害圖之評估流程，進各參數設定。因本兩處集水區情境為針對未來連續 3 年無整治及已整治之模擬情境下土砂運移趨勢，故假設集水區未來無發生土砂災害之摩擦係數選定流程，(1).確認各年度之不安定土砂量體；(2).計算各定量降雨與極端降雨情境之等價摩擦係數(3).等價摩擦係數與RAMMS使用手冊建議值 0.4，兩者取其保守值(即較小的 μ 值)，作為各降雨情境數值模擬的輸入摩擦係數參考值。

後續將無整治第 0 年模擬所得之最終土砂堆積結果輸出，視為無整治第 1年RAMMS模擬初始建模地形來源，並重複模擬第 2 年之長期土砂運移結果，以此類推第 3 年；另已整治情境下，先採用無整治第 0 年模擬

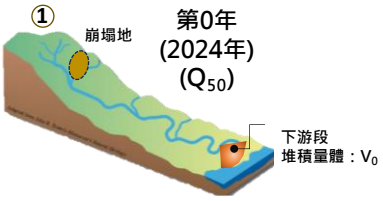
所得之數值地形結果，再依據治理權責機關提供之預計工程設計圖並配合 RAMMS 內建之 DAM 建置功能或地形編修予以適度加入已整治第 1 年模擬，並重複模擬第 2 年之長期土砂運移結果，以此類推第 3 年之模擬程序。

參考第 2-2-2 節(五)模擬參數量化之相關內容，針對玉穗溪與文里溪集水區擬定長期土砂運移趨勢數值模擬參數表，詳表 2-30與表 2-31所示。

如圖 2-128 所示，為集水區之工程改善方案規劃階段之成效預先模擬，除產製本計畫之土砂流出範圍與深度圖外，更可進一步檢視治理工程方案，是否滿足貴署於坡地保育治理政策議題中，「坡地災害風險鑑別及公開」措施下災害範圍降低 30%的目標。本計畫將蒐集水土保持工程管考系統中玉穗溪及文里溪流域之整治工程，玉穗溪參考高雄市桃源區公所辦理【明霸克露橋上游清疏二期工程】，其工程內容為清疏土砂量：150,000 m^3(長: 500 公尺;寬: 50 公尺;高: 6 公尺)、臨時土砂佈設區，玉穗溪清疏工程位置詳圖 2-130所示；文里溪流域則參考農村水保署臺東分署辦理【文里溪豐收橋上游護岸工程】工程內容為設置固床工 2 座、導流堤 1 座，【金峰鄉土砂災害復建工程】工程內容為修復既有防砂壩以及臺東縣辦理【太麻里文里溪匯流口第一期清疏工程】工程內容為清疏土砂量：150,000 m^3(長: 1,500 公尺;寬: 50 公尺;高: 2 公尺)，文里溪相關整治工程位置詳圖 2-131 及表 2-29 所示。

數值模擬情境組數說明表：7組

年份	第0年 (2024)	第1年 (2025)	第2年 (2026)	第3年 (2027)
無治理	1 (雨量Q_{50}) 以最近一期DEM為模擬地形	2 (雨量Q_{50}) 以情境1堆積區為模擬地形	3 (雨量Q_{50}) 以情境2堆積區為模擬地形	4 (雨量Q_{50}) 以情境3堆積區為模擬地形
有治理	-	5 (雨量Q_{50}) 以情境1堆積區為模擬地形	6 (雨量Q_{50}) 以情境5堆積區為模擬地形	7 (雨量Q_{50}) 以情境6堆積區為模擬地形



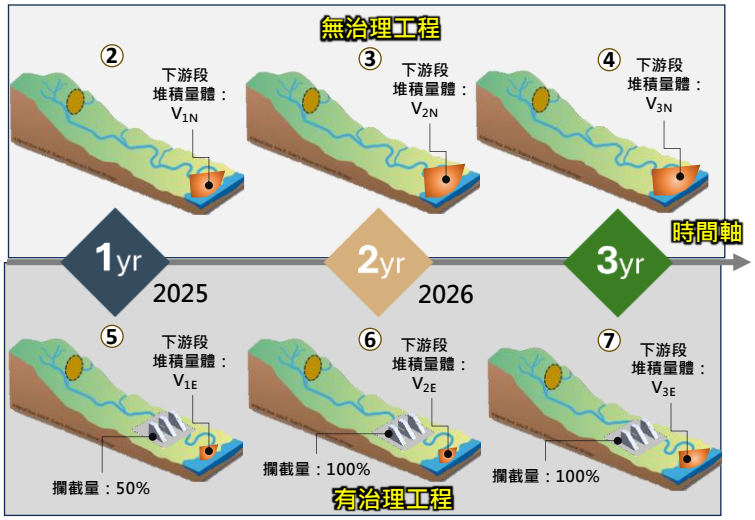


圖 2-128 集水區長期土砂運移趨勢與模擬示意圖

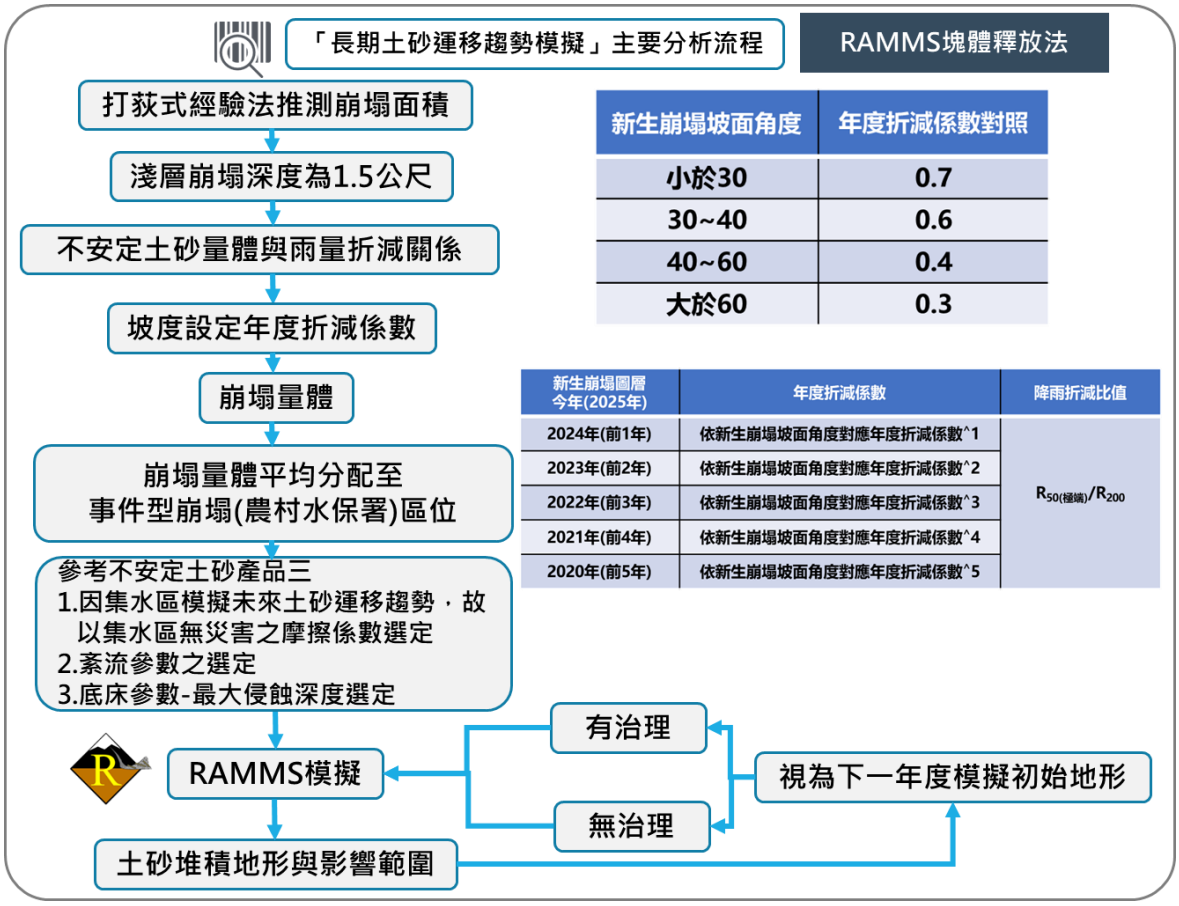


圖 2-129 集水區土砂運移趨勢與模擬程序圖

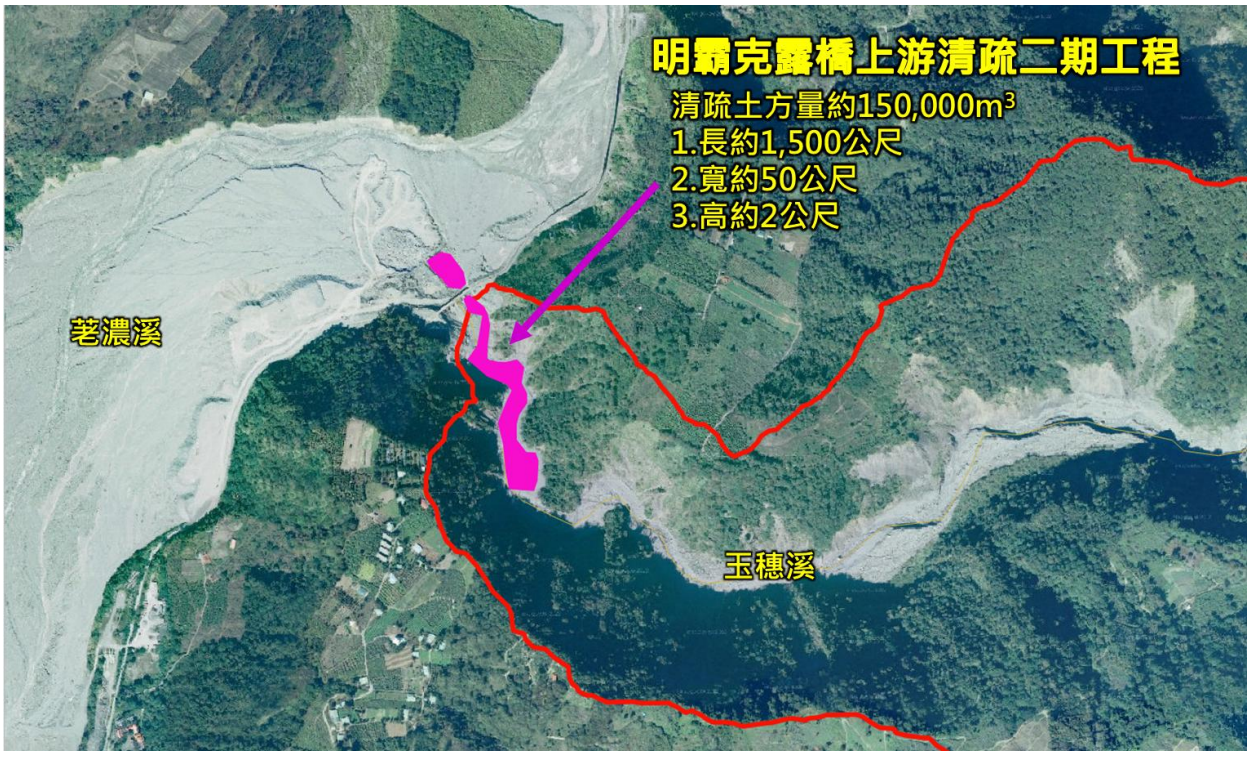


圖 2-130 玉穗溪內辦理整治工程相對位置圖



圖 2-131 文里溪流域內辦理整治工程相對位置圖

表 2-29 文里溪流域於山陀兒颱風災後短期復建工程表

治理工程名稱	整治工程內容
金峰鄉土砂災害復建工程	文里 2 號左壩翼修復，修復尺寸 (長約 33 公尺，寬約 2 公尺，高約 4 公尺) 文里 2-1 號左壩翼修復，修復尺寸 (長約 27 公尺，寬約 2.6 公尺，高約 5 公尺) 文里 3 號右壩翼修復，修復尺寸 (長約 5 公尺，寬約 2 公尺，高約 5.5 公尺) 文里 4 號右壩翼修復，修復尺寸 (長約 8 公尺，寬約 2.2 公尺，高約 3 公尺)
文里溪豐收橋上游護岸工程	溪流右岸導流堤 1 座，修復尺寸 (長約 77 公尺，寬約 5 公尺，高約 2 公尺) 溪流固床工 2 座 (長約 1.7 公尺，寬約 26 公尺，高約 2 公尺)
太麻里文里溪匯流口第一期清疏工程	針對北太麻里溪與文里溪匯流之河道， 清疏土方量約 127,000 m^3 (長約 1,270 公尺，寬約 50 公尺，高約 2 公尺)

表 2-30 玉穗溪 RAMMS 數值模擬情境輸入參數表(無整治及已整治)

參數名稱	輸入參數值			
無整治 模擬年度	第 0 年 (2024)	第 1 年 (2025)	第 2 年 (2026)	第 3 年 (2027)
情境雨量(mm)	1,105 (50 年重現期距降雨量)			
數值地形 (m)	5			
初始不安定土砂量體(m^3)	89,855	51,498	26,869	16,902
總流出土砂量體(無整治)(m^3)	678,972	454,205	328,271	294,465
總流出土砂量體(已整治)(m^3)	-	439,171	327,350	289,949
模擬時間步(s)	5,000	5,000	5,000	5,000
土砂單位重(ρ, kg/m^3)	2,740	2,740	2,740	2,740
土砂摩擦係數(μ)	0.4	0.4	0.4	0.4
紊流黏滯係數(ξ, m/s^2)	500	500	500	500
上游底床參數	1.底床材料密度：2,740 kg/m^3 2.侵蝕速率(密集沉積物)：0.013 m/s 3.潛在侵蝕深度(淺)：0.05/kPa 4.臨界剪應力(高)：1.5 kPa 5.最大侵蝕深度：6.83 m			
中游底床參數	1.底床材料密度：2,740 kg/m^3 2.侵蝕速率(密集沉積物)：0.013 m/s 3.潛在侵蝕深度(淺)：0.05/kPa 4.臨界剪應力(高)：1.5 kPa 5.最大侵蝕深度：5.42 m			
下游底床參數	1.底床材料密度：2,740 kg/m^3 2.侵蝕速率(密集沉積物)：0.013 m/s 3.潛在侵蝕深度(淺)：0.05/kPa 4.臨界剪應力(高)：1.5 kPa 5.最大侵蝕深度：0 m			

表 2-31 文里溪 RAMMS 數值模擬情境輸入參數表(無整治及已整治)

參數名稱	輸入參數值			
模擬年度	第 0 年 (2024)	第 1 年 (2025)	第 2 年 (2026)	第 3 年 (2027)
情境雨量(mm)	711.9 (50 年重現期距降雨量)			
數值地形(m)	5			
初始不安定土砂量體(m^3)	159,821	87,783	48,216	26,439
總流出土砂量體(無整治)(m^3)	586,623	447,798	428,907	369,282
總流出土砂量體(已整治)(m^3)	-	428,702	321,143	246,770
模擬時間步(s)	5,000	5,000	5,000	5,000
土砂單位重(ρ, kg/m^3)	2,740	2,740	2,740	2,740
土砂摩擦係數(μ)	0.4	0.4	0.4	0.4
紊流黏滯係數(ξ, m/s^2)	1,000	1,000	1,000	1,000
上游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(密集沉積物)：0.013 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：10.67 m			
中游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(一般)：0.025 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：5 m			
下游底床參數	1.底床材料密度：2,751 kg/m^3 2.侵蝕速率(鬆散、潮濕沉積物)：0.05 m/s 3.潛在侵蝕深度(中)：0.1/kPa 4.臨界剪應力(中)：1.0 kPa 5.最大侵蝕深度：0 m			

據模擬輸入參數評估，續於 RAMMS 模式進行地形建模及適當地貌編修後，輸入所需參數以塊體輸入法模擬堆積影響範圍與保全對象危害評估表，其結果如表 2-32 至表 2-36。圖 2-133 至圖 2-138 分別為RAMMS模擬無整治第 0 年至第 3 年以及已整治第 1 年至第 3 年下，玉穗溪與文里溪流域之不安定土砂運移後最大堆積影響範圍與深度，另文里溪流域內主要含有4處土石流潛勢溪流集水區，其中經套疊事件型崩塌目錄後顯示 3 處土石流潛勢溪流集水區有崩塌區位，主要分別為沙崙溪(東縣 DF111)、文里溪(東縣 DF076)及北太麻里溪(東縣 DF110)，故以針對 3 處下游保全對象之區位進行產製不安定土砂危害圖，沙崙溪(東縣 DF111)、文里溪(東縣 DF076)及北太麻里溪(東縣 DF110)相對位置圖詳圖 2-132 所示。

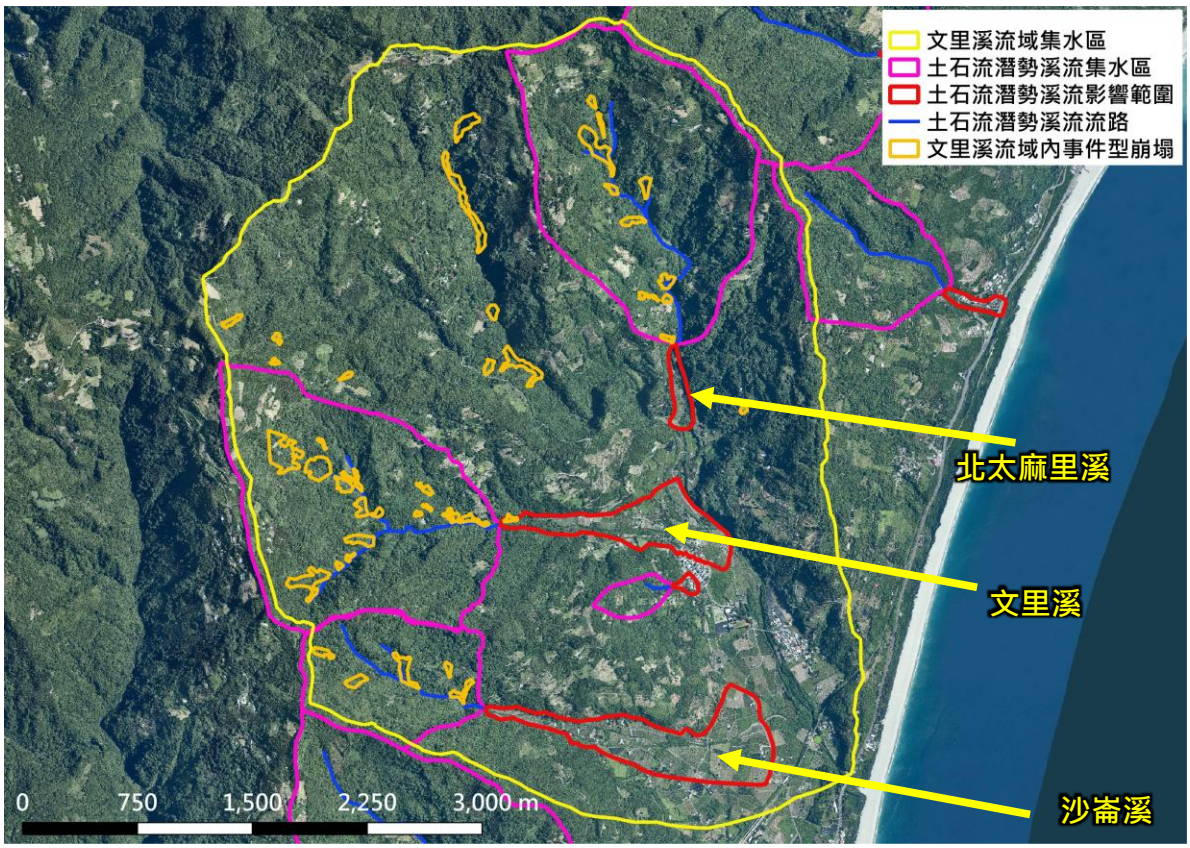


圖 2-132 文里溪流域內沙崙溪、文里溪及北太麻里溪相對位置圖

另本計畫之數值模擬為研析不安定土砂於匯流口之基本淤積現象，本評估暫不考慮主支流溪水之複雜互制影響情境，各溪流數值模擬評估結果茲說明如後：

1. **玉穗溪**：經 RAMMS 模擬無整治及已整治之不安定土砂運移影響範圍，評估結果如表 2-32 及表 2-33 與不安定土砂危害圖如圖 2-133。透過表 2-32 及表 2-33 所示，玉穗溪於無整治第 1 年至第 3 年之最終出流土砂流出量體整體下降約 159,740 m^3，玉穗溪於已整治第 1 年至第 3 年之最終出流土砂流出量體整體下降約 149,222 m^3，符合實際集水區逐年復育現象；玉穗溪於第 1 年經治理後之攔截土砂量約 15,034 m^3，且與治理前相較最終流出土砂量體降低約 3.3%；玉穗溪流域於第 3 年經治理後之攔截土砂量約 4,516 m^3，且與治理前相較最終流出土砂量體降低約 1.5%，經工程效益評估計算，此清疏工程之益本比計算為 1.87，顯示大於 1 代表已達成工程整治效益目標，詳表 2-34 所示。經套疊保全對象圖層，玉穗溪下游鄰近未有聚落，而跨越溪流之公路橋梁為台 20 線 94.2K 明霸克露橋(橋下淨高約 15 m)。根據 RAMMS 模擬結果，本集水區於公路橋梁方面，在各情境下，其運移過程中未造成明霸克露橋受土砂波及之影響。

圖 2-133 可觀察到玉穗溪無整治第 0 年、第 1 年、第2年及第 3 年模擬土砂溢淹範圍最遠端距離沖積扇中心點分別為 3,060、1,745、1,011及 971 公尺，顯示集水區內坡面植生逐漸復育且崩塌材料下移至河道內逐年漸少，故河道出流口土砂量整體隨年度增加而降低，而無整治第 0 年、第 1 年、第 2

年及第 3 年模擬出流口土砂堆積最大深度位置皆位於明霸克露橋與荖濃溪匯流口附近河道，其明霸克露橋下游土砂最大深度分別為 3.3、3.2、2 及 1.75 公尺。經整治工程(清疏)後，玉穗溪第 1 年、第 2 年及第 3 年模擬土砂溢淹範圍最遠端距離沖積扇中心點分別為 1,360、998 及 769 公尺，顯示經整治工程後攔截大量土砂量體，而已整治第 1 年、第 2 年及第 3 年模擬出流口土砂堆積最大深度位置皆位於明霸克露橋與荖濃溪匯流口附近河道，其明霸克露橋下游土砂最大深度分別為 5.2、4.9、及 3.44 公尺，因明霸克露橋上游清疏二期工程，其工程內容位於明霸克露橋附近河道進行清疏，故於數值模擬地形於此位置挖深，然而進入 RAMMS 模擬已整治(清疏完成)情境下土砂運移期間，坡面及溪床上不安定土砂堆積於清疏位置並減少明霸克露橋下游出口土砂量，使明霸克露橋橋梁下游堆積扇型範圍縮小，如圖 2-133 所示。

表 2-32 玉穗溪 RAMMS 數值模擬無整治情境輸出成果表

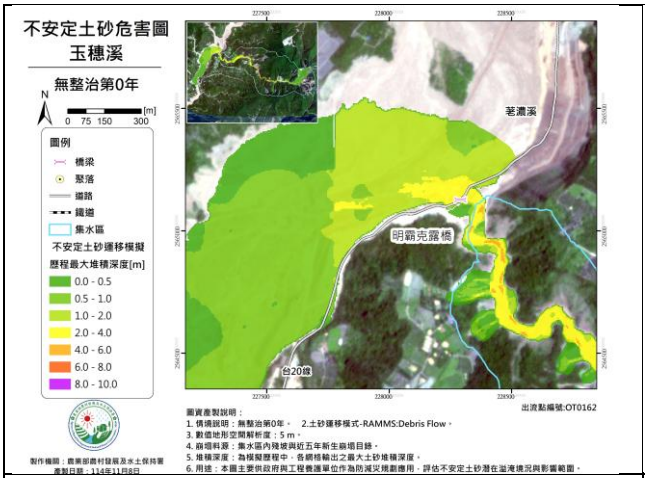
輸出成果 (無整治)	輸出參數值			
模擬年度	第 0 年 (2024)	第 1 年 (2025)	第 2 年 (2026)	第 3 年 (2027)
明霸克露橋 土砂堆積深度 (m)	3.3	3.2	2.5	2.3
捲增量體 (m^3)	597,282	405,945	301,710	279,240
最終流出量體 (m^3)	678,972	454,205	328,271	294,465

表 2-33 玉穗溪 RAMMS 數值模擬已整治情境輸出成果表

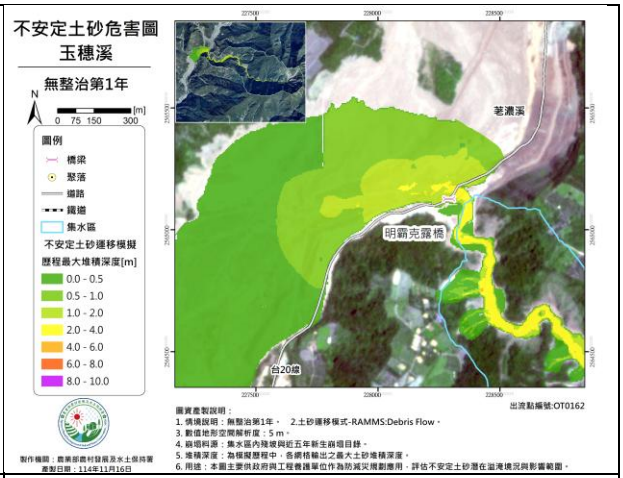
輸出成果 (已整治)	輸出參數值		
模擬年度	第 1 年 (2025)	第 2 年 (2026)	第 3 年 (2027)
明霸克露橋 土砂堆積深度 (m)	2.2	1.8	1.6
捲增量體 (m^3)	404,592	301,359	274,057
最終流出量體 (m^3)	439,171	327,350	289,949

表 2-34 玉穗溪經整治工程後之效益分析表

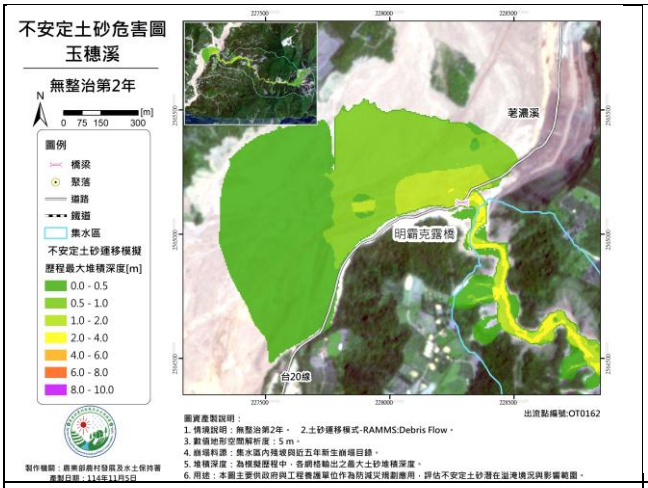
玉穗溪							
項目				體積/數量	單價(仟元)	小計(仟元)	總計(仟元)
直接效益	防災效益	防砂效益		159,740 m³	0.075	11,980.5	12,349.5
		土地利用效益		10,000 m³	0.003	30	
		地上物保護效益	果園農地	-	300	0	
			保護房屋	-	500		
		工程維護效益(工程費 5 %)			6,780	339	
間接效益	直接總效益總和 * 20%						299.3
年計畫效益							12,648.8
項目			利率(%)		小計(仟元)		總計(仟元)
固定成本	年利息		0.06		2,605		5,479
	年償債積金		0.06		2,605		
	年稅捐		0.0062		269		
運轉與維護成本			0.03		1,301		1,301
計畫年計成本							6,780
益本比＝12,648,800/6,780,000＝1.87							



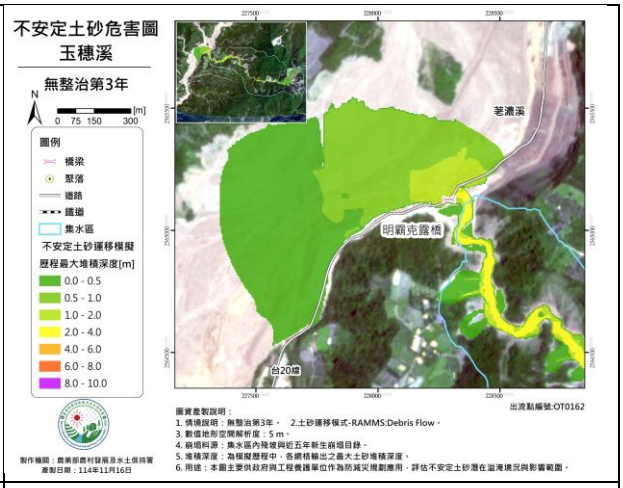
(a) 無整治第 0 年



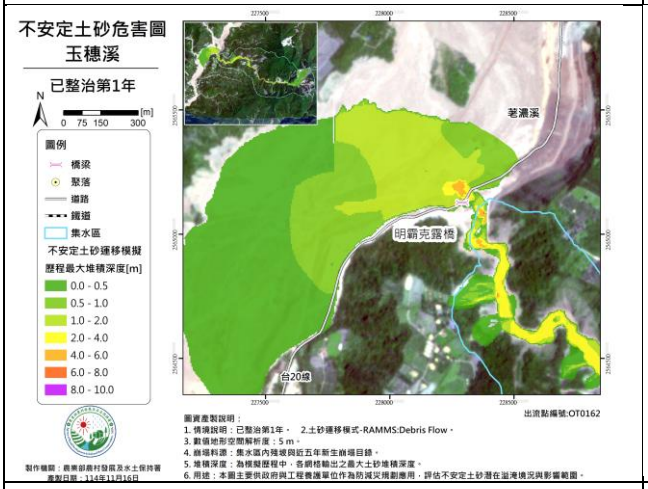
(b) 無整治第 1 年



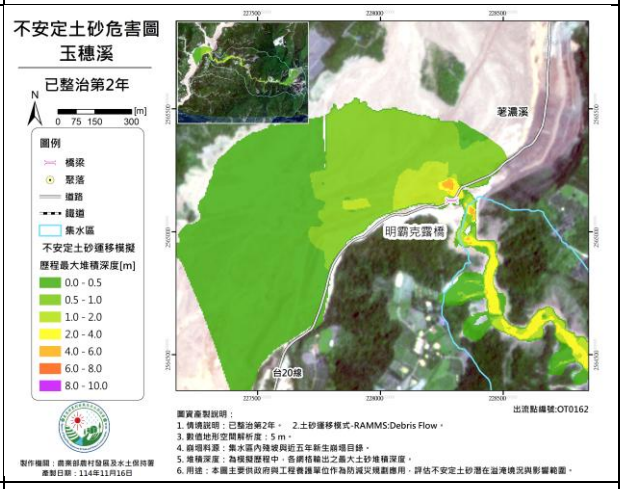
(c) 無整治第 2 年



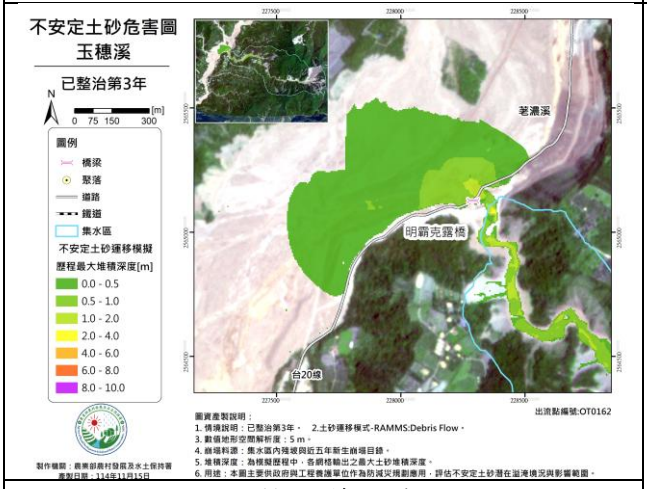
(d) 無整治第 3 年



(e) 已整治第 1 年



(f) 已整治第 2 年



(g) 已整治第 3 年

圖 2-133 玉穗溪不安定土砂危害圖

3. **文里溪流域**：經RAMMS模擬無整治及有整治之不安定土砂運移影響範圍，評估結果如表 2-35 及表 2-36 與不安定土砂危害圖如圖 2-134 至圖 2-138。文里溪流域於無整治第 1 年至第 3 年之最終出流土砂流出量體整體下降約78,516 m^3，玉穗溪於已整治第 1 年至第 3 年之最終出流土砂流出量體整體下降約181,932 m^3，兩者情境下以符合實際集水區逐年復育現象。透過表 2-30 所示，文里溪流域於第 3 年經治理後之攔截土砂量約122,512 m^3，且與治理前相較最終流出土砂量體降低約 33.2%，顯示經整治工程後文里溪流域之攔截土砂量可達 30%以上，且經工程效益評估計算，短期復建工程之益本比為 2.5(表 2-37)，其顯示大於 1 ，代表已達成工程整治效益目標。以下分別說明文里溪流域內經套疊保全對象圖層之沙崙溪、文里溪及北太麻里溪之狀況:

A.沙崙溪：沙崙溪(東縣 DF111)下游兩岸皆為沙崙部落，而跨越沙崙溪之公路橋梁位於(淨高約 3 公尺)沙崙橋。根據 RAMMS 無整治情境模擬結果(表 2-35 及 圖 2-134)，沙崙溪(東縣 DF111)無整治各年度情境下，對於沙崙部落之南側區域造成土砂直接衝擊影響，而在公路橋梁方面，其運移過程中位於沙崙橋皆未造成橋涵堵塞及土石溢淹之疑慮。

因沙崙溪經查詢水土保持工程管考系統未有辦理短期復建工程，故 RAMMS 已整治與無整治情境模擬土砂堆積結果幾乎無明顯變化，故無產製已整治情境之不安定土砂圖。

B. 文里溪：文里溪(東縣 DF076)下游右岸鄰近聚落為新興部落，而跨越文里溪之公路橋梁位於台 9 線 385.9K(淨高約 18 公尺)北太麻里橋，跨越文里溪之鐵路橋梁位於北太麻里橋往溪流上游約 370 公尺處(淨高約 30 公尺)，而跨越文里溪之道路橋梁豐收橋位於東 63 線 0 K(淨高約 3.5 公尺)。根據 RAMMS 無整治情境模擬結果(表 2-35 及圖 2-135)，文里溪(東縣 DF076)對於新興部落之北側區域造成土砂直接衝擊影響。而在公路橋梁方面，於無整治第 2 年及第 3 年下，其運移過程中位於東 63 線豐收橋分別最大土砂淤積深度約達 4.4~4.7 公尺，仍可能有溢淹之疑慮，而位於台 9 線 385.9K 北太麻里橋皆未有橋涵堵塞及溢淹之疑慮，最後以鐵路橋梁方面，鐵路橋皆未有橋涵堵塞及溢淹之疑慮。

根據 RAMMS 已整治情境模擬結果(表 2-36 及 圖 2-135)，文里溪(東縣 DF076)僅已整治第 1 年度情境下，對於新興部落之北側區域造成土砂直接衝擊影響，而在公路橋梁方面，東 63 線豐收橋、台 9 線 385.9K 北太麻里橋與無整治模擬成果相同。鐵路橋梁方面，鐵路橋仍與無整治模擬成果相同，皆未有橋涵堵塞及土石溢淹之疑慮。

C. 北太麻里溪：北太麻里溪(東縣 DF110)下游兩岸鄰近聚落為北太麻里部落，而跨越北太麻里溪之公路橋梁位於文里橋(淨高約 3 公尺)以及北里中路橋(淨高約 3 公尺)。根據 RAMMS 無整治情境模擬結果(表 2-35 及圖 2-137)，北太麻里溪(東縣 DF110)無整治各年度情境下，對於北太

麻里聚落皆未造成土砂直接衝擊影響。在公路橋梁方面，僅於無整治第 1 年下，其運移過程中位於北里中路橋最大土砂淤積深度約達 3 公尺，仍可能有溢淹之疑慮，而位於文里橋皆未造成橋涵堵塞及溢淹之疑慮。

根據 RAMMS 已整治情境模擬結果(表 2-36 及圖 2-137)，北太麻里溪(東縣 DF110)已整治各年度情境下，對於北太麻里聚落皆未造成土砂直接衝擊影響。而在公路橋梁方面，文里橋及北里中路橋皆未造成橋涵堵塞及土石溢淹之疑慮。

表 2-35 文里溪流域 RAMMS 數值模擬無整治情境輸出成果表

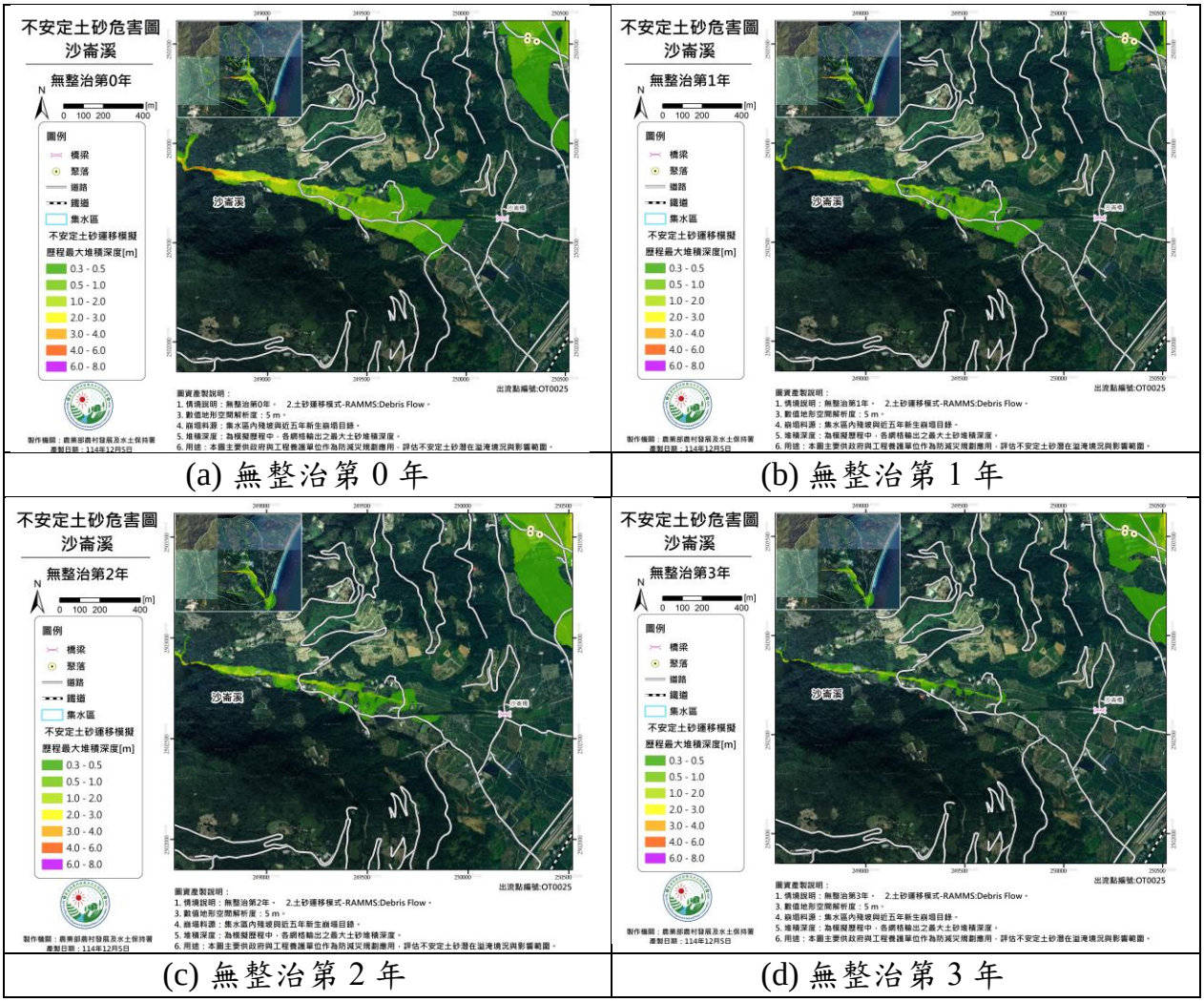
輸出成果 (無整治)	輸出參數值			
模擬年度	第 0 年 (2024)	第 1 年 (2025)	第 2 年 (2026)	第 3 年 (2027)
沙崙橋 (m)	0.1	0.2	0.1	0.1
豐收橋 (m)	3.1	2.6	4.7	4.4
北里中路橋 (m)	3.0	2.1	1.7	1.3
文里橋 (m)	2.3	1.8	2.0	1.0
北里橋 (m)	2.5	2.0	2.5	3.1
北太麻里橋 (m)	1,9	2.4	2.5	2.8
鐵路橋 (m)	1.7	1.9	2.8	2.3
捲增量體 (m^3)	431,934	407,689	347,939	350,172
最終流出量體 (m^3)	586,623	447,798	428,907	369,282

表 2-36 文里溪流域 RAMMS 數值模擬已整治情境輸出成果表

輸出成果 (已整治)	輸出參數值		
模擬年度	第 1 年 (2025)	第 2 年 (2026)	第 3 年 (2027)
沙崙橋 (m)	0.2	0.1	0.1
豐收橋 (m)	2.8	2.4	2.0
北里中路橋 (m)	2.1	1.2	0.9
文里橋 (m)	2.0	1.8	1.2
北里橋 (m)	2.0	1.6	1.7
北太麻里橋 (m)	2.4	2.8	2.7
鐵路橋 (m)	2.2	1.7	1.7
捲增量體 (m^3)	347,215	283,093	230,412
最終流出量體 (m^3)	428,702	321,143	246,770

表 2-37 文里溪流域經短期復健整治工程之效益分析表

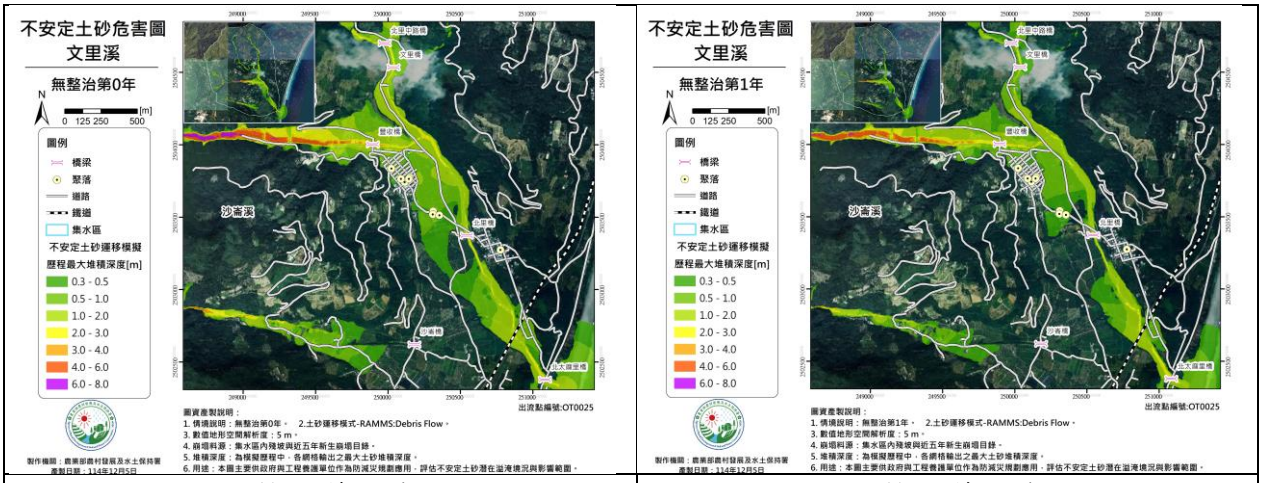
文里溪流域							
項目				體積/數量	單價(仟元)	小計(仟元)	總計(仟元)
直接效益	防災效益	防砂效益		122,512 m^3	0.075	1,688.4	89,630
		土地利用效益		90,719 m^3	0.003	272.2	
		地上物保護效益	果園農地	58.4ha	300	85,520	
			保護房屋	136	500		
		工程維護效益(工程費 5 %)			42,978	2148.9	
間接效益	直接總效益總和*20%						17,926
年計畫效益							107,556
項目			利率(%)		小計(仟元)		總計(仟元)
固定成本	年利息		0.06		16,511		34,728
	年償債積金		0.06		16,511		
	年稅捐		0.0062		1,706		
運轉與維護成本			0.03		8,250		8,250
計畫年計成本							42,978
益本比＝107,556,000/42,978,000＝2.50							



(a) 無整治第 0 年　(b) 無整治第 1 年

(c) 無整治第 2 年　(d) 無整治第 3 年

圖 2-134 文里溪流域-沙崙溪(東縣 DF111)不安定土砂危害圖

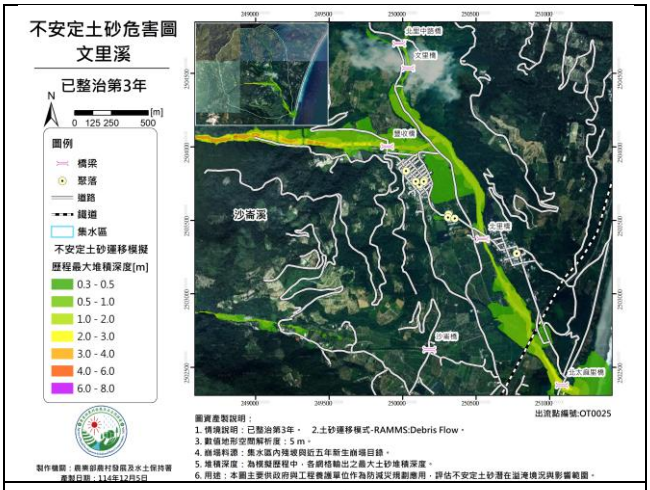


(a) 無整治第 0 年　(b) 無整治第 1 年

(c) 無整治第 2 年　(d) 無整治第 3 年

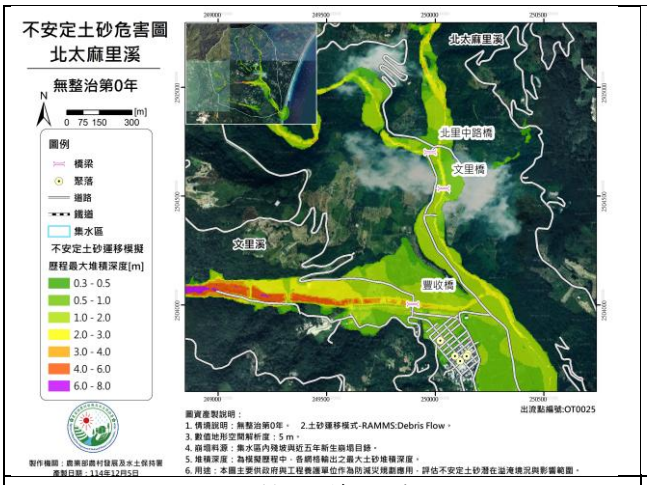
(e) 已整治第 1 年　(f) 已整治第 2 年

圖 2-135 文里溪流域-文里溪(東縣 DF076)不安定土砂危害圖

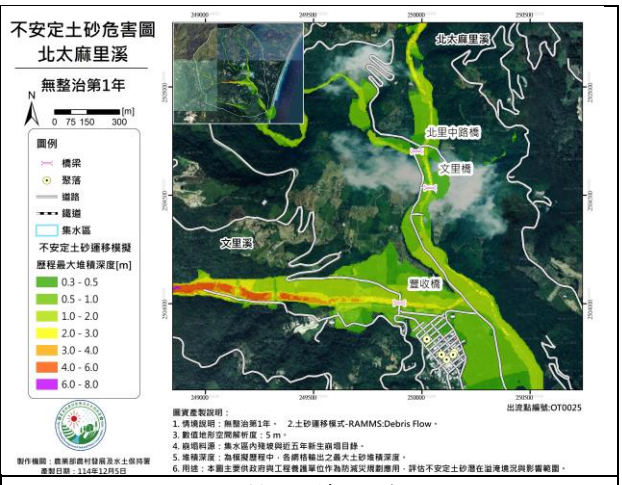


(g) 已整治第 3 年

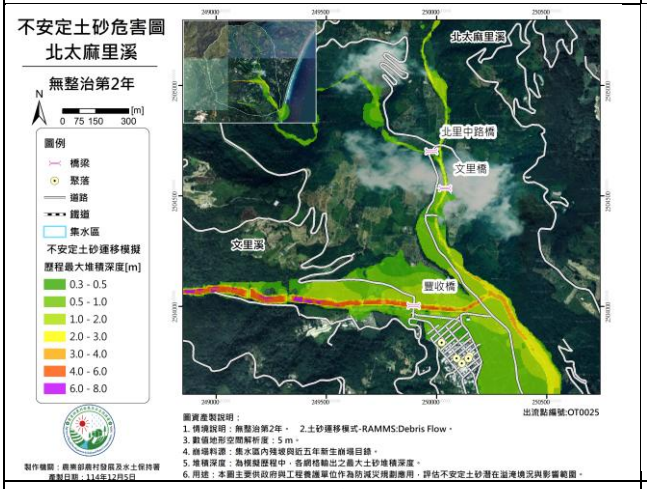
圖 2-136 文里溪流域-文里溪(東縣 DF076)不安定土砂危害圖(續)



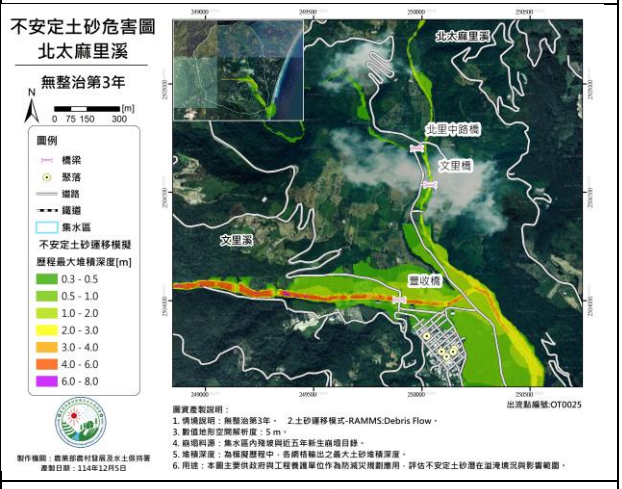
(h) 無整治第 0 年



(i) 無整治第 1 年

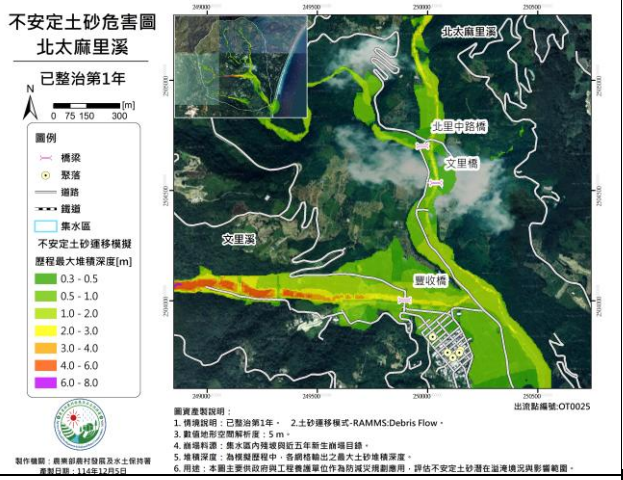


(j) 無整治第 2 年

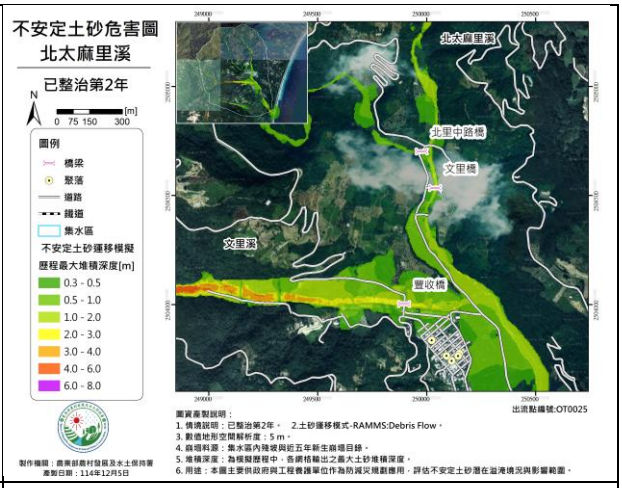


(k) 無整治第 3 年

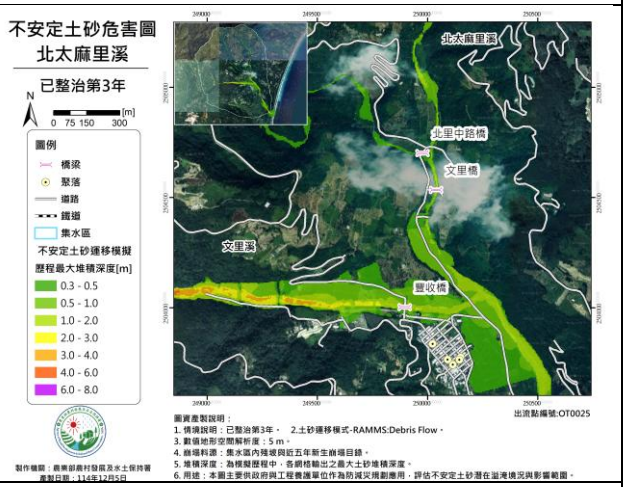
圖 2-137 文里溪流域-北太麻里溪(東縣 DF110)不安定土砂危害圖



(l) 已整治第 1 年



(m) 已整治第 2 年



(n) 已整治第 3 年

圖 2-138 文里溪流域-北太麻里溪(東縣 DF110)不安定土砂危害圖(續)

第三章　不安定土砂集水區殘坡長期變遷評估

第一節 圖資來源與評估方法

本工項利用 108~114 年Planet光學衛星影像(解析度至少 3 m)，對荖濃溪與旗山溪流域共 191 處(本署提供)殘坡(分布如圖 3-1)，進行次像素位移追蹤法(Sub-pixel offset tracking；SPOT)分析 108~114 年變位，並建立多時序累計變位成果，評估後續發生大規模崩塌趨勢及風險。InSAR 分析工作主要針對集水區內河道內、殘坡等區域進行活動性評估，其可偵測之變形主要為較為慢速的變形，如每年毫米級至幾十公分之變形量，然而當地表擁有公尺級之快速滑移情形時，較不適用於 InSAR 地表變形評估，本小節使用例年光學衛星影像的位移觀測，採次像素位移追蹤法進行分析評估，對於不同量級的地表變形以不同分析工具進行掌握。

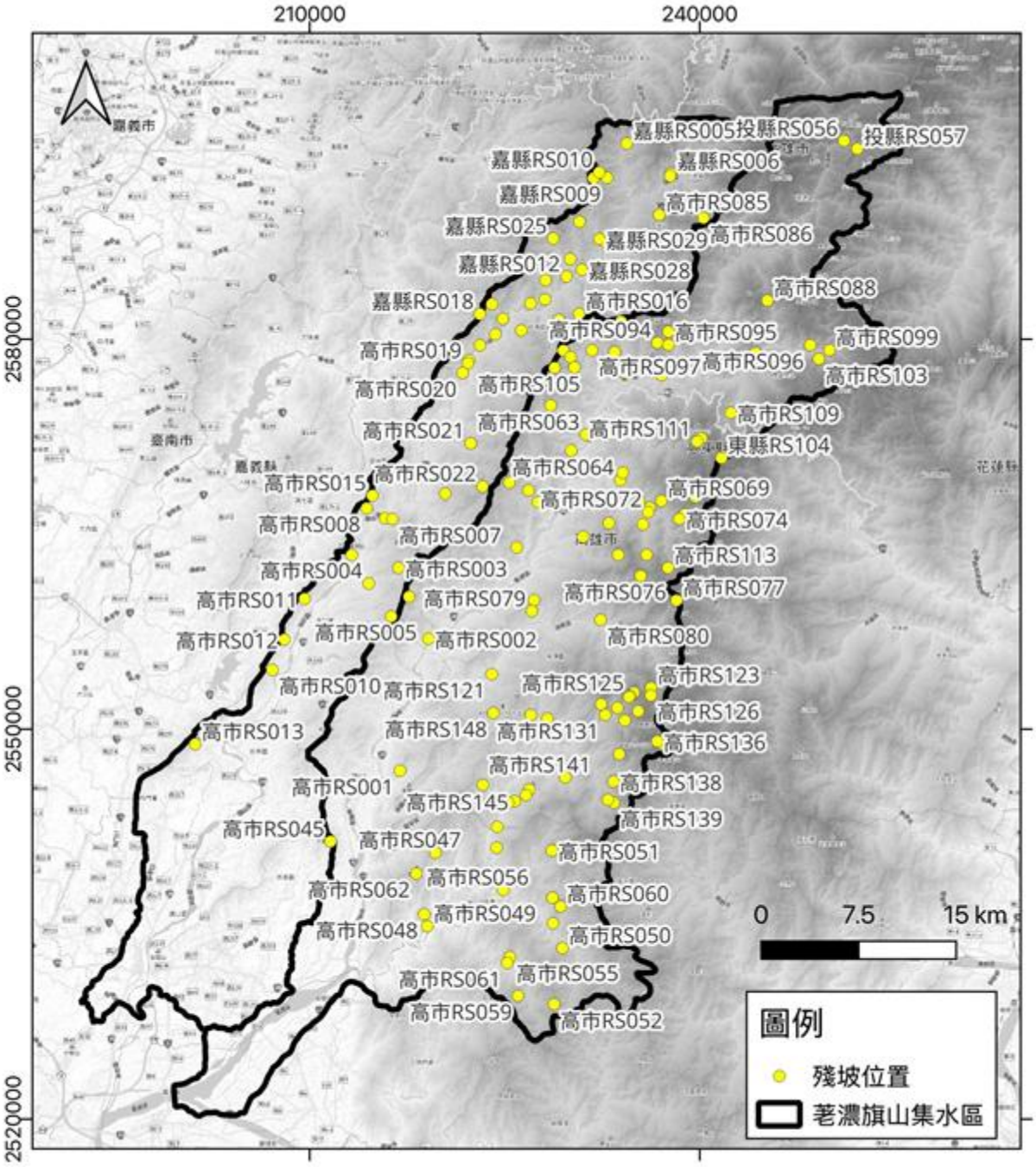


圖 3-1 本計畫荖濃溪與旗山溪殘坡分布圖

本計畫採用次像素位移追蹤法(Beyer et al., 2018)，流程主要來自於使用多角度衛星影像，或 UAV 影像建立影像配對時，使用影像特徵找到左像與右像進行影像對準(alignment)時，可同時評估兩張影像之各像素偏移量，

可用於衛星影像偏移估算(Mueting & Bookhagen, 2024)。而於本計畫衛星影像水平位移評估，則可使用前、後期影像作為左、右像推估兩張影像間的偏移量。首先將前後兩張影像進行正規化(normalized)，以確保兩張影像色調相同，並分別於低解析度及全解析度進行互相關進行偏移量估算，使用區塊匹配(block mathcing)法，將影像區分成較小的滑動視窗在右像影像內一定距離內進行標準化互相關(Normalized Cross-Correlation, NCC)評估視窗內相似程度及偏移量。為得到較高品質成果，本計畫將進一步進行次像素精化(sub-pixel refinement)，利用基於貝葉斯期望最大化的加權仿射自適應窗口相關(Bayes expectation-maximization (EM) weighted affine-adaptive window correlator)(Broxton et al., 2009; Nefian et al., 2009)。此方法能夠生成極高質量的立體匹配結果，並有效降低影像噪聲。貝葉斯次像素相關法使用來自左影像的可變形模板視窗(包括旋轉、縮放和平移)，從而精準對準右側影像中的正確匹配位置。

一般而言，此法評估所得之邊坡滑移速度向量較 InSAR 分析法為大，顯示該不穩定塊體對於集水區之土砂來源貢獻通常較高(潛勢與風險均高)。此資訊可直接反饋於邊坡不安定土砂之數值模擬，儘可能以防災力求保守的觀點，推估集水區內最大潛在土砂量，以利掌握不安定土砂對於溪流溢流點外，對於當地交通設施的衝擊影響評估。

本計畫已蒐集 2019 年至 2025 年兩流域內 Level-3B 等級 Planet 影像，如圖 3-2 所示，產品名稱為 PlanetScope Analytic Ortho Scene Product，

為正射，並轉換至大氣層頂(Top of Atmosphere, TOA)輻射之四波段多光譜影像，適合用來做分析應用，相關規格如表 3-1 所示。

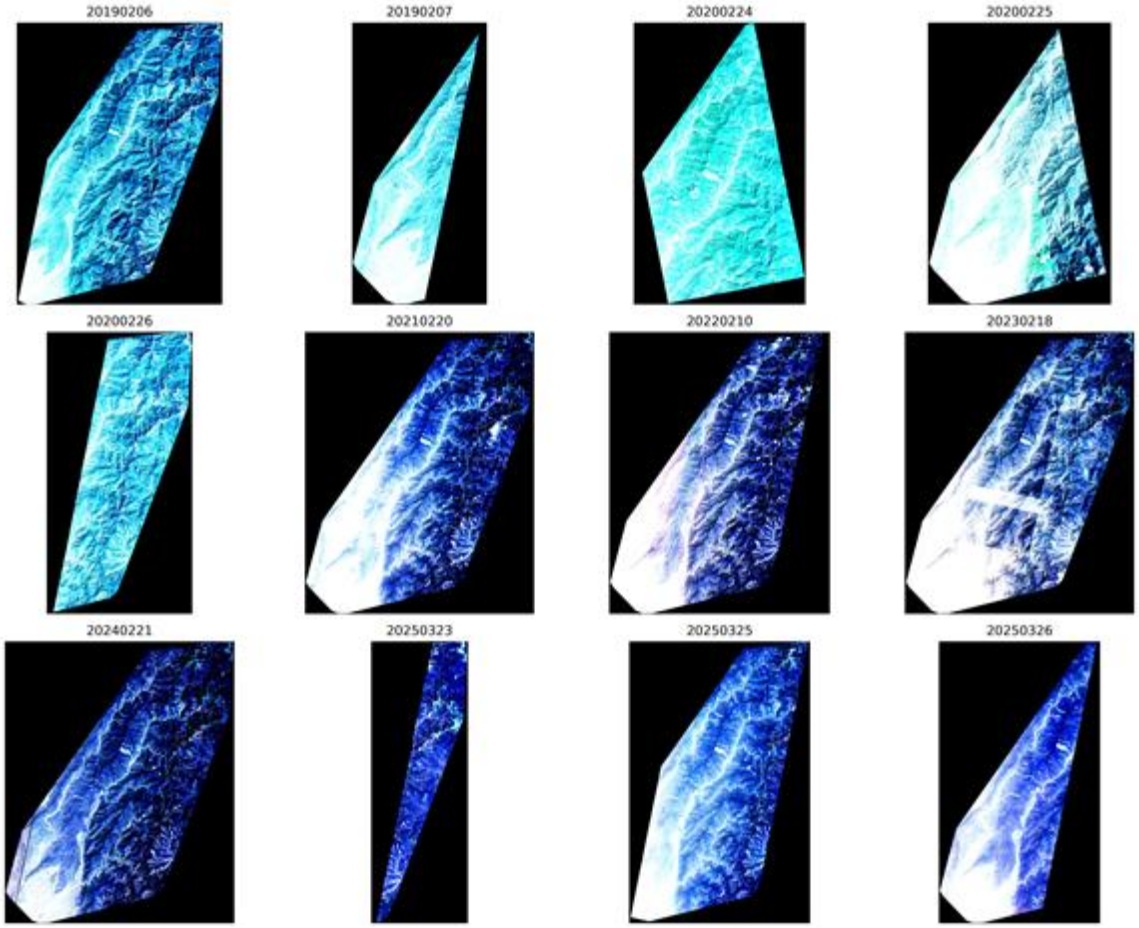


圖 3-2 本計畫已蒐集 2019-2025 年 Planet 影像

表 3-1 PlanetScope 影像規格表

規格	敘述
波段	紅(590-670nm) 綠(500 -590 nm) 藍(455 -515 nm) 近紅外(780- 860 nm)
地面採樣距離	3.7 m
解析度	3 m
Bit Depth	12-bit (DN), 16-bit (Radiance)
位置精度	<10m RMSE

第二節 殘坡長期變遷評估成果

本計畫業已完成 108~114 年Planet光學衛星影像荖濃溪與旗山溪流域共 202 處殘坡進行次像素位移追蹤法評估各殘坡之水平活動性，最終萃取各殘坡的時序累積變位量。各殘坡範圍首先將各年份光學影像裁切至各殘坡周圍 500 公尺左右之範圍，並剔除無涵蓋範圍的影像，因各日期影像涵蓋範圍不一，各殘坡的使用影像也不相同。針對各殘坡的影像，本計畫將時序影像分別與首張影像進行次像素位移，並將各影像逐一換算至相對於首張影像，以進行累積量的萃取。

表 3-2 為各殘坡進行次像素位移追蹤法評估後之累積水平位移綜整表，當一處殘坡位置有多個子殘坡時，各子殘坡的編號將依序進行 US 編號。表中風險為原始貴署評估殘坡圖資內之風險等級，日期則代表各日期相對首張影像之累計變位量(單位：公尺)，本計畫初步進行線性回歸計算各子殘坡的近 7 年的年平均變為速度(單位：公尺/年)，最終將各殘坡平均速度使用自然間斷法(Natural Breaks)初步分成 3 級，分別為低(<3.81)、中(≥3.8及<10.12)、高(≥10.12)等級，以了解各殘坡之活動性排序，個數分別為

117、79、4 處。

各殘坡分析完成後，每處殘坡皆會產製兩張成果圖，分別為以時序影像呈現累積變位量及萃取殘坡代表點位進行展示時間序列變位量，範例如圖 3-5及圖 3-6 所示。圖 3-3 中首列為各日期相對首張影像之東西向累積變位量，並以東為正，故顏色偏藍代表該像素往東偏移，偏紅代表該像素往西偏移，單位為像素；第二列為各日期相對首張影像之南北向累積變位量，北為正，顏色偏藍代表該像素往北偏移，偏紅代表該像素往南偏移，單位為像素；第三列為各日期相對首張影像之綜合向累積變位量，即為第一列及第二列成果之合力變位量，以綠到紅代表累計變位量，愈紅代表變位量越大。第四列則為各日期相對首張影像之綜合向累積變位向量場，箭頭顏色代表變位量級，方向代表該日期變位方向，各日期分別以各日期 planet 光學影像作為底圖。

另針對每處殘坡挑選重要點位進行時間序列變形量展示，如圖 3-4 所示，該點位時間序列變形量以黑線代表，背景則萃取鄰近雨量站，轉換成月雨量進行展示，此圖可協助了解殘坡之變位量之歷史變位情形，是否為等速、再加速、亦或趨緩等情形。本計畫遴選活動性較高之殘坡於報告內文內，其餘殘坡成果收錄於附錄二。

表 3-2 108-114 年殘坡變位分級表(1/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
1	嘉縣 RS005	US	0.00	-	-	1.93	3.45	6.00	7.57	10.67	-	13.62	-	2.20	低	高
2	嘉縣 RS006	US	0.00	-	-	2.88	3.60	7.20	9.67	12.25	-	20.12	-	3.01	低	低
3	嘉縣 RS007	US	0.00	-	-	2.94	4.29	6.59	8.37	12.38	-	20.04	-	2.94	低	低
4	嘉縣 RS008	US	0.00	4.35	-	-	6.15	7.69	10.02	14.04	-	20.34	-	2.98	低	高
5	嘉縣 RS009	US	0.00	3.66	-	-	6.95	9.60	11.30	14.15	-	18.63	-	2.86	低	中
6	嘉縣 RS010	US	0.00	3.52	-	-	5.46	6.84	8.35	11.15	-	15.86	-	2.32	低	中
7	嘉縣 RS011	US	0.00	3.14	-	-	5.96	8.21	11.16	12.82	-	16.86	-	2.65	低	低
8	嘉縣 RS012	US	0.00	4.33	-	-	3.89	6.39	7.44	8.61	-	12.53	-	1.76	低	低
9	嘉縣 RS013	US	0.00	8.03	-	-	6.08	8.84	11.30	13.93	-	18.50	-	2.56	低	高
10	嘉縣 RS014	US	0.00	4.40	-	-	4.78	6.16	9.02	10.55	-	14.65	-	2.14	低	低
11	嘉縣 RS015	US	0.00	6.66	-	-	5.00	8.97	10.78	13.40	-	19.37	-	2.73	低	中
12	嘉縣 RS016	US	0.00	6.60	-	-	10.25	16.64	19.65	24.16	-	24.16	-	4.11	中	中
13	嘉縣 RS018	US	0.00	3.53	-	-	5.89	8.03	9.27	10.16	-	13.71	-	2.04	低	低
14	嘉縣 RS019	US	0.00	11.77	-	-	10.27	17.47	18.02	19.39	-	21.40	-	3.07	低	低
15	嘉縣 RS020	US	0.00	4.54	-	-	4.35	9.15	10.61	13.62	-	17.60	-	2.72	低	低
16	嘉縣 RS021	US	0.00	3.58	-	-	5.34	9.10	11.33	13.58	-	14.56	-	2.45	低	中
17	嘉縣 RS022	US	0.00	3.26	-	-	6.86	10.19	12.65	16.03	-	19.23	-	3.13	低	低
18	嘉縣 RS024	US	0.00	3.72	-	-	4.87	6.75	7.88	10.21	-	14.06	-	2.05	低	低
19	嘉縣 RS025	US	0.00	3.68	-	-	5.94	8.94	10.72	14.21	-	17.72	-	2.78	低	低
20	嘉縣 RS026	US	0.00	-	-	2.09	5.68	8.14	9.90	12.67	-	15.88	-	2.57	低	中
21	嘉縣 RS027	US	0.00	3.50	-	-	6.59	10.71	15.49	20.55	-	25.58	-	4.22	中	高
22	嘉縣 RS028	US	0.00	5.73	-	-	5.50	7.90	9.18	12.07	-	17.19	-	2.40	低	低

表 3-3 108-114 年殘坡變位分級表(2/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
23	嘉縣 RS029	US	0.00	-	-	1.69	6.38	9.04	10.65	14.61	-	20.65	-	3.25	低	低
24	投縣 RS056	US	0.00	-	-	2.04	4.31	6.40	7.51	11.00	13.22	-	-	2.14	低	低
25	投縣 RS057	US	0.00	-	-	2.67	2.66	2.66	5.62	6.06	6.06	-	-	0.98	低	中
26	東縣 RS104	US	0.00	-	-	2.42	6.97	9.80	8.38	9.50	-	14.71	-	2.10	低	低
27	高市 RS001	US	0.00	-	3.37	-	6.17	7.15	12.80	13.22	-	13.22	-	2.32	低	低
28	高市 RS002	US	0.00	-	4.93	-	8.88	8.42	9.62	10.31	-	9.94	-	1.45	低	高
29	高市 RS003	US	0.00	-	2.92	-	6.65	8.38	13.10	15.80	-	18.99	-	3.14	低	中
30	高市 RS004	US	0.00	-	2.45	-	3.78	6.39	9.44	11.05	-	15.45	-	2.44	低	中
31	高市 RS005	US-2	0.00	-	5.24	-	8.54	10.54	16.36	19.01	-	17.95	-	3.14	低	高
32	高市 RS005	US-1	0.00	-	4.34	-	7.07	9.93	8.72	9.24	-	8.72	-	1.32	低	高
33	高市 RS006	US	0.00	-	2.62	-	5.78	8.92	13.03	14.81	-	18.37	-	3.06	低	低
34	高市 RS007	US-1	0.00	-	3.53	-	5.70	7.70	12.11	14.39	-	17.66	-	2.86	低	低
35	高市 RS007	US-2	0.00	-	9.36	-	7.37	11.33	14.91	19.66	-	24.59	-	3.60	中	低
36	高市 RS008	US	0.00	-	2.63	-	6.68	8.39	12.22	13.81	-	13.81	-	2.44	低	低
37	高市 RS009	US-2	0.00	-	1.91	-	3.89	4.97	7.86	10.29	-	12.58	-	2.06	低	低
38	高市 RS009	US-1	0.00	-	2.16	-	4.33	6.56	9.70	12.60	-	16.09	-	2.63	低	低
39	高市 RS010	US-2	0.00	-	4.50	-	5.82	12.54	13.94	15.98	-	-	19.67	3.17	低	低
40	高市 RS010	US-1	0.00	-	2.18	-	2.65	9.33	10.42	11.89	-	-	14.38	2.47	低	低
41	高市 RS011	US	0.00	-	2.29	-	5.31	5.99	6.77	9.21	-	12.11	-	1.82	低	低
42	高市 RS012	US	0.00	-	2.94	-	3.59	8.05	9.56	11.34	-	-	16.44	2.54	低	中
43	高市 RS013	US	0.00	-	10.27	-	12.02	3.82	3.34	3.70	-	-	0.00	-0.76	低	高
44	高市 RS014	US	0.00	-	5.22	-	9.28	12.81	15.76	17.70	-	18.45	-	3.05	低	低

表 3-4 108-114 年殘坡變位分級表(3/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
45	高市 RS015	US	0.00	-	4.30	-	9.16	13.83	19.48	24.24	-	29.97	-	4.94	中	低
46	高市 RS016	US-2	0.00	4.84	-	-	8.88	9.66	12.56	16.16	-	18.23	-	2.85	低	高
47	高市 RS016	US-1	0.00	4.37	-	-	7.95	10.26	13.78	17.93	-	20.41	-	3.32	中	高
48	高市 RS017	US	0.00	5.78	-	-	9.85	13.41	17.30	23.03	-	23.03	-	3.91	中	中
49	高市 RS018	US	0.00	6.97	-	-	8.80	14.79	15.49	19.41	-	23.48	-	3.59	中	高
50	高市 RS019	US-1	0.00	3.94	-	-	4.39	8.66	11.76	16.28	-	17.88	-	3.02	低	中
51	高市 RS019	US-2	0.00	3.56	-	-	4.00	11.48	15.93	18.18	-	19.93	-	3.55	中	中
52	高市 RS020	US	0.00	5.36	-	-	8.99	15.50	20.78	27.23	-	30.35	-	5.16	中	低
53	高市 RS021	US-2	0.00	2.82	-	-	7.19	8.65	10.82	12.43	-	18.72	-	2.79	低	中
54	高市 RS021	US-1	0.00	2.34	-	-	7.38	9.21	11.11	13.57	-	18.07	-	2.83	低	中
55	高市 RS021	US-4	0.00	3.55	-	-	6.21	9.33	13.95	17.34	-	21.60	-	3.53	中	中
56	高市 RS021	US-3	0.00	3.44	-	-	9.41	12.89	17.45	22.45	-	24.37	-	4.19	中	中
57	高市 RS022	US	0.00	4.90	-	-	7.84	10.67	15.20	18.64	-	18.86	-	3.22	低	低
58	高市 RS045	US	0.00	-	3.33	-	5.54	10.97	17.53	23.29	-	24.41	-	4.40	中	低
59	高市 RS046	US	0.00	-	3.05	-	4.64	11.46	14.13	17.34	-	19.06	-	3.35	中	中
60	高市 RS047	US	0.00	-	3.66	-	4.98	10.06	14.23	17.03	-	18.41	-	3.21	低	低
61	高市 RS048	US	0.00	-	2.45	-	4.71	8.20	14.93	18.94	-	18.95	-	3.52	中	低
62	高市 RS049	US	0.00	-	2.71	-	6.27	9.91	19.99	24.12	-	26.26	-	4.76	中	低
63	高市 RS050	US	0.00	-	-	2.92	5.79	11.28	15.49	19.85	-	20.15	-	3.66	中	中
64	高市 RS051	US	0.00	-	-	2.14	6.01	11.62	15.19	20.52	-	26.51	-	4.42	中	中
65	高市 RS052	US	0.00	-	-	4.01	6.68	7.92	8.73	10.74	-	14.71	-	2.10	低	低
66	高市 RS053	US	0.00	-	-	2.90	5.65	11.10	14.59	19.02	-	20.22	-	3.58	中	低

表 3-5 108-114 年殘坡變位分級表(4/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
67	高市 RS054	US	0.00	-	-	3.09	5.05	9.85	11.43	16.16	-	19.19	-	3.17	低	低
68	高市 RS055	US	0.00	-	-	2.44	5.60	12.07	19.41	22.48	-	26.04	-	4.65	中	中
69	高市 RS056	US	0.00	-	-	4.20	7.58	15.92	20.52	28.64	-	35.05	-	5.89	中	低
70	高市 RS057	US	0.00	-	-	1.84	5.55	12.13	15.70	21.03	-	21.03	-	3.92	中	中
71	高市 RS058	US	0.00	-	-	1.67	4.17	9.42	14.35	20.81	-	26.37	-	4.50	中	低
72	高市 RS059	US-2	0.00	-	-	1.17	4.55	10.53	16.20	20.67	-	24.14	-	4.33	中	低
73	高市 RS059	US-1	0.00	-	-	3.48	6.42	11.83	17.59	24.06	-	27.40	-	4.74	中	低
74	高市 RS060	US	0.00	-	-	3.07	5.81	9.87	13.67	19.37	-	19.42	-	3.47	中	高
75	高市 RS061	US-1	0.00	-	-	1.26	4.76	10.22	16.79	20.37	-	24.69	-	4.38	中	中
76	高市 RS061	US-2	0.00	-	-	1.31	4.90	10.74	16.97	21.32	-	25.66	-	4.55	中	中
77	高市 RS062	US-2	0.00	-	4.51	-	5.59	7.78	8.86	11.59	-	14.41	-	2.14	低	低
78	高市 RS062	US-1	0.00	-	3.87	-	6.08	9.07	13.16	17.23	-	20.60	-	3.37	中	低
79	高市 RS063	US	0.00	-	-	3.76	6.21	10.58	14.01	17.46	-	18.74	-	3.22	低	中
80	高市 RS064	US-2	0.00	-	-	6.64	9.87	14.72	20.36	23.94	-	25.11	-	4.24	中	中
81	高市 RS064	US-1	0.00	-	-	6.29	10.78	13.57	17.95	19.93	-	23.91	-	3.74	中	中
82	高市 RS065	US	0.00	-	-	4.66	7.95	13.25	16.52	20.14	-	23.09	-	3.83	中	中
83	高市 RS066	US	0.00	-	-	3.75	7.16	10.87	14.99	17.22	-	19.40	-	3.27	中	低
84	高市 RS067	US	0.00	-	-	2.35	5.73	8.61	7.99	9.25	-	10.57	-	1.68	低	低
85	高市 RS068	US-4	0.00	-	-	3.59	6.76	9.71	10.57	13.23	-	10.04	-	1.86	低	高
86	高市 RS068	US-2	0.00	-	-	2.05	2.07	2.98	3.90	4.94	-	7.96	-	1.11	低	高
87	高市 RS068	US-1	0.00	-	-	3.70	5.03	9.21	11.54	11.88	-	14.50	-	2.34	低	高
88	高市 RS068	US-3	0.00	-	-	4.60	9.20	16.75	25.58	38.90	-	52.99	-	8.61	高	高

表 3-6 108-114 年殘坡變位分級表(5/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
89	高市 RS068	US-6	0.00	-	-	5.81	9.49	15.66	18.62	22.54	-	25.27	-	4.17	中	高
90	高市 RS068	US-5	0.00	-	-	6.06	11.28	18.56	22.71	25.81	-	30.12	-	4.97	中	高
91	高市 RS069	US	0.00	-	-	4.86	7.38	12.02	16.68	19.76	-	22.81	-	3.79	中	低
92	高市 RS070	US	0.00	-	-	7.58	10.89	15.95	22.72	27.15	-	30.47	-	5.01	中	中
93	高市 RS071	US	0.00	-	-	7.50	13.34	19.36	25.14	28.86	-	30.94	-	5.18	中	中
94	高市 RS072	US	0.00	-	-	6.21	10.67	17.59	23.38	28.49	-	33.64	-	5.57	中	中
95	高市 RS073	US	0.00	-	-	4.81	6.54	10.71	15.10	16.57	-	19.30	-	3.17	低	中
96	高市 RS074	US	0.00	-	-	5.22	7.68	13.95	18.01	21.08	-	27.13	-	4.35	中	低
97	高市 RS075	US	0.00	-	3.71	-	7.76	11.10	15.10	18.86	-	19.45	-	3.38	中	低
98	高市 RS076	US	0.00	-	-	3.95	9.15	16.69	21.57	25.31	-	29.02	-	5.00	中	中
99	高市 RS077	US	0.00	-	-	4.27	7.94	10.85	13.13	16.60	-	19.39	-	3.10	低	中
100	高市 RS078	US	0.00	-	-	3.31	5.58	13.72	18.22	22.17	-	29.42	-	4.89	中	中
101	高市 RS079	US	0.00	-	-	3.59	4.76	8.43	10.99	11.73	-	12.71	-	2.13	低	中
102	高市 RS080	US	0.00	-	-	3.74	5.85	9.30	10.80	11.92	-	15.34	-	2.37	低	高
103	高市 RS081	US	0.00	-	5.71	-	9.15	12.77	16.33	17.16	-	19.00	-	3.06	低	低
104	高市 RS082	US-2	0.00	2.76	-	-	6.84	12.98	17.13	21.24	-	27.48	-	4.57	中	中
105	高市 RS082	US-1	0.00	4.50	-	-	7.42	13.25	17.09	20.52	-	26.43	-	4.26	中	中
106	高市 RS083	US-2	0.00	-	-	2.36	4.43	8.37	11.26	12.18	-	15.07	-	2.52	低	中
107	高市 RS083	US-1	0.00	-	-	2.57	4.95	10.73	15.75	19.89	-	23.65	-	4.10	中	中
108	高市 RS084	US	0.00	-	4.71	-	9.51	9.75	11.18	13.10	-	16.01	-	2.34	低	中
109	高市 RS085	US	0.00	-	-	10.94	18.46	19.60	25.13	33.20	-	38.52	-	5.88	中	中
110	高市 RS086	US	0.00	-	-	5.64	7.21	7.03	4.37	4.37	-	0.80	-	-0.11	低	低

表 3-7 108-114 年殘坡變位分級表(6/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
111	高市 RS087	US	0.00	-	-	1.91	3.53	5.88	7.67	11.30	-	16.72	-	2.58	低	低
112	高市 RS088	US	0.00	-	-	2.96	3.60	4.68	5.54	6.97	7.54	-	-	1.15	低	低
113	高市 RS089	US-1	0.00	-	-	5.76	8.49	11.74	14.22	18.80	-	24.93	-	3.76	中	高
114	高市 RS089	US-2	0.00	-	-	6.31	6.66	8.40	9.94	12.17	-	12.72	-	1.87	低	高
115	高市 RS090	US	0.00	-	-	4.05	4.30	4.30	4.07	4.07	-	2.73	-	0.28	低	低
116	高市 RS091	US-1	0.00	-	-	6.01	7.57	9.68	10.54	13.11	-	9.69	-	1.62	低	低
117	高市 RS091	US-2	0.00	-	-	4.89	5.75	7.69	8.21	9.70	-	9.03	-	1.38	低	低
118	高市 RS092	US	0.00	-	-	5.05	5.55	6.81	6.58	8.77	-	8.19	-	1.16	低	中
119	高市 RS093	US-3	0.00	-	-	2.94	5.42	9.82	13.51	18.89	23.90	-	-	3.94	中	中
120	高市 RS093	US-2	0.00	-	-	3.47	5.55	13.49	12.23	21.37	22.37	-	-	3.86	中	中
121	高市 RS093	US-1	0.00	-	-	1.44	5.06	15.66	14.33	23.98	21.22	-	-	4.15	中	中
122	高市 RS094	US	0.00	-	-	5.90	7.67	11.23	11.74	16.46	-	14.40	-	2.40	低	低
123	高市 RS095	US-2	0.00	-	-	4.90	4.47	6.33	5.25	7.01	-	7.44	-	0.96	低	中
124	高市 RS095	US-3	0.00	-	-	5.88	6.37	7.80	6.27	8.83	-	6.64	-	0.90	低	中
125	高市 RS095	US-1	0.00	-	-	4.12	4.35	8.43	8.32	11.23	-	10.18	-	1.71	低	中
126	高市 RS096	US	0.00	-	-	2.42	3.46	3.46	6.06	9.67	15.24	-	-	2.22	低	中
127	高市 RS097	US	0.00	-	-	8.19	11.75	17.33	21.26	26.94	-	29.07	-	4.73	中	中
128	高市 RS098	US-1	0.00	-	-	6.02	9.28	18.26	20.06	25.84	35.79	-	-	5.57	中	高
129	高市 RS098	US-2	0.00	-	-	2.65	3.93	9.69	11.26	15.99	20.14	-	-	3.33	中	高
130	高市 RS099	US	0.00	-	-	2.47	4.00	4.00	6.12	7.47	11.01	-	-	1.60	低	低
131	高市 RS100	US	0.00	2.31	-	-	3.83	5.70	7.48	8.40	-	14.41	-	2.09	低	中
132	高市 RS101	US-4	0.00	-	-	6.70	10.57	17.72	25.41	30.75	-	27.50	-	5.11	中	高

表 3-8 108-114 年殘坡變位分級表(7/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
133	高市 RS101	US-3	0.00	-	-	7.58	10.22	15.41	22.14	26.11	-	22.97	-	4.14	中	高
134	高市 RS101	US-2	0.00	-	-	5.96	9.46	13.80	20.67	23.90	-	22.15	-	3.99	中	高
135	高市 RS101	US-1	0.00	-	-	5.93	7.62	11.83	16.40	18.52	-	15.22	-	2.80	低	高
136	高市 RS102	US	0.00	2.52	-	-	2.90	3.66	6.17	7.09	-	10.32	-	1.53	低	低
137	高市 RS103	US	0.00	-	-	4.14	5.14	5.14	5.50	8.04	7.44	-	-	1.07	低	低
138	高市 RS104	US	0.00	-	-	3.42	4.35	6.32	7.86	10.26	-	15.67	-	2.27	低	中
139	高市 RS105	US-2	0.00	2.22	-	-	5.09	7.02	11.76	13.02	-	18.72	-	2.98	低	低
140	高市 RS105	US-1	0.00	2.62	-	-	5.70	8.05	13.97	16.21	-	22.23	-	3.60	中	低
141	高市 RS106	US	0.00	-	-	9.17	11.21	15.73	19.59	23.00	-	21.53	-	3.54	中	中
142	高市 RS107	US	0.00	-	-	6.21	6.14	8.18	7.10	7.16	-	6.59	-	0.80	低	低
143	高市 RS108	US	0.00	2.86	-	-	4.60	6.86	10.93	14.96	-	20.38	-	3.24	低	低
144	高市 RS109	US-1	0.00	-	-	2.59	3.30	5.56	7.00	7.47	-	11.30	-	1.67	低	中
145	高市 RS109	US-3	0.00	-	-	2.99	5.79	8.86	13.13	21.19	-	26.34	-	4.33	中	中
146	高市 RS109	US-2	0.00	-	-	1.10	2.95	4.01	4.32	5.52	-	9.18	-	1.33	低	中
147	高市 RS110	US-2	0.00	-	-	2.80	6.36	11.52	12.13	14.77	-	19.33	-	3.09	低	中
148	高市 RS110	US-1	0.00	-	-	2.93	6.09	9.13	9.76	13.01	-	14.93	-	2.42	低	中
149	高市 RS111	US-1	0.00	-	-	3.34	6.48	7.34	7.93	8.41	-	10.11	-	1.48	低	中
150	高市 RS111	US-2	0.00	-	-	16.56	32.72	35.61	47.74	54.88	-	63.24	-	9.91	高	中
151	高市 RS112	US	0.00	-	-	3.04	4.40	4.40	3.11	3.11	-	0.00	-	-0.05	低	低
152	高市 RS113	US	0.00	-	-	4.96	9.60	18.95	25.86	28.49	-	33.78	-	5.80	中	中
153	高市 RS114	US	0.00	5.13	-	-	8.67	17.75	24.06	30.94	-	33.82	-	5.93	中	高
154	高市 RS115	US-3	0.00	4.64	-	-	5.22	18.58	28.43	12.78	-	12.78	-	2.71	低	高

表 3-9 108-114 年殘坡變位分級表(8/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
155	高市 RS115	US-1	0.00	4.20	-	-	7.92	21.11	26.31	7.92	-	7.92	-	1.71	低	高
156	高市 RS115	US-4	0.00	4.58	-	-	6.46	24.36	46.71	70.05	-	92.53	-	15.83	高	高
157	高市 RS115	US-2	0.00	2.38	-	-	6.16	19.48	27.88	14.13	-	16.68	-	3.33	中	高
158	高市 RS116	US-1	0.00	2.58	-	-	7.61	12.29	18.03	23.12	-	26.79	-	4.64	中	中
159	高市 RS116	US-2	0.00	4.01	-	-	6.11	11.03	15.50	19.07	-	23.47	-	3.87	中	中
160	高市 RS117	US	0.00	-	-	3.18	7.99	13.91	20.72	22.35	-	26.67	-	4.61	中	低
161	高市 RS118	US	0.00	-	-	9.35	22.72	31.64	42.35	51.03	-	51.50	-	9.05	高	高
162	高市 RS119	US	0.00	-	-	5.90	11.54	19.38	24.48	30.01	-	33.07	-	5.64	中	低
163	高市 RS120	US-1	0.00	-	-	5.32	11.88	7.70	9.73	9.53	-	5.99	-	0.85	低	高
164	高市 RS120	US-3	0.00	-	-	3.19	6.67	10.31	9.88	7.34	-	7.34	-	1.17	低	高
165	高市 RS120	US-2	0.00	-	-	3.22	8.54	13.17	17.13	19.01	-	19.32	-	3.45	中	高
166	高市 RS121	US	0.00	-	4.80	-	5.75	7.49	9.92	11.82	-	13.85	-	2.11	低	中
167	高市 RS122	US	0.00	-	-	3.90	8.11	10.94	16.44	18.80	-	23.63	-	3.84	中	低
168	高市 RS123	US	0.00	-	-	3.76	5.87	9.99	12.43	14.48	-	18.48	-	2.94	低	中
169	高市 RS124	US	0.00	-	-	5.28	7.76	5.34	5.93	6.02	-	7.32	-	0.77	低	中
170	高市 RS125	US	0.00	-	-	3.65	8.10	10.88	14.51	17.08	-	21.68	-	3.47	中	低
171	高市 RS126	US	0.00	-	-	5.28	8.88	12.46	17.35	20.30	-	26.07	-	4.12	中	中
172	高市 RS127	US	0.00	-	-	3.57	8.86	12.62	17.35	20.69	-	24.71	-	4.12	中	低
173	高市 RS128	US	0.00	-	-	1.88	3.77	5.68	7.82	9.06	-	10.94	-	1.80	低	中
174	高市 RS129	US	0.00	-	-	3.62	7.72	13.92	21.94	27.82	-	36.72	-	6.09	中	中
175	高市 RS130	US	0.00	-	-	2.20	3.26	2.20	4.47	4.47	-	7.16	-	0.96	低	中
176	高市 RS131	US	0.00	-	-	2.72	5.23	8.37	11.96	13.55	-	17.75	-	2.88	低	低

表 3-10 108-114 年殘坡變位分級表(9/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
177	高市 RS132	US	0.00	-	-	2.29	4.13	7.23	10.85	14.23	-	18.62	-	3.05	低	低
178	高市 RS133	US	0.00	-	-	2.82	5.14	9.14	15.52	20.37	-	23.96	-	4.14	中	低
179	高市 RS134	US	0.00	-	-	1.81	3.46	6.62	8.77	20.82	-	20.82	-	3.73	中	中
180	高市 RS135	US	0.00	-	-	2.22	5.61	6.92	9.99	11.27	-	14.77	-	2.35	低	低
181	高市 RS136	US-1	0.00	-	-	2.65	6.31	7.90	11.43	12.88	-	16.14	-	2.61	低	低
181	高市 RS136	US-5	0.00	-	-	2.24	5.15	6.13	8.73	9.97	-	13.31	-	2.08	低	低
182	高市 RS136	US-4	0.00	-	-	1.59	4.37	6.44	9.21	11.46	-	14.47	-	2.40	低	低
183	高市 RS136	US-3	0.00	-	-	1.93	5.48	8.56	12.61	13.77	-	18.24	-	3.01	低	低
184	高市 RS136	US-2	0.00	-	-	2.07	5.52	7.16	10.68	11.78	-	15.46	-	2.50	低	低
185	高市 RS137	US	0.00	-	-	2.13	4.55	6.79	9.20	10.56	-	13.57	-	2.19	低	高
186	高市 RS138	US	0.00	-	-	3.90	6.57	8.66	10.42	12.97	-	15.47	-	2.41	低	低
187	高市 RS139	US	0.00	-	-	2.62	3.93	5.72	6.66	8.83	-	12.22	-	1.83	低	中
188	高市 RS140	US	0.00	-	-	2.47	4.29	6.60	7.53	10.72	-	15.11	-	2.30	低	低
189	高市 RS141	US	0.00	-	-	3.55	6.37	14.08	22.07	30.96	-	37.14	-	6.41	中	高
190	高市 RS142	US	0.00	-	-	3.16	7.11	12.50	14.21	21.44	-	34.34	-	5.18	中	高
191	高市 RS143	US-1	0.00	-	-	3.17	8.06	12.23	19.11	23.80	-	23.92	-	4.36	中	中
192	高市 RS143	US-2	0.00	-	-	4.75	8.98	13.44	20.17	27.54	-	34.37	-	5.64	中	中
193	高市 RS144	US	0.00	-	-	4.54	9.96	14.39	21.02	27.32	-	34.14	-	5.61	中	中
194	高市 RS145	US	0.00	-	-	4.50	9.04	12.44	17.26	24.54	-	29.30	-	4.80	中	中
195	高市 RS146	US	0.00	-	-	2.57	7.18	9.33	14.30	17.20	-	21.15	-	3.52	中	高
196	高市 RS147	US	0.00	-	2.82	-	6.33	8.17	13.94	16.42	-	19.99	-	3.34	中	中
197	高市 RS148	US-1	0.00	-	6.25	-	12.31	7.31	9.15	8.04	-	8.28	-	0.89	低	高

表 3-11 108-114 年殘坡變位分級表(10/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
198	高市 RS148	US-2	0.00	-	3.41	-	3.93	6.56	9.90	12.82	-	14.18	-	2.37	低	高
199	高市 RS148	US-3	0.00	-	3.48	-	3.63	5.22	6.98	9.83	-	13.78	-	2.03	低	高
181	高市 RS148	US-4	0.00	-	4.43	-	7.28	10.28	13.76	16.75	-	17.68	-	2.96	低	高
182	嘉縣 RS005	US	0.00	-	-	1.93	3.45	6.00	7.57	10.67	-	13.62	-	2.20	低	高
183	嘉縣 RS006	US	0.00	-	-	2.88	3.60	7.20	9.67	12.25	-	20.12	-	3.01	低	低
184	嘉縣 RS007	US	0.00	-	-	2.94	4.29	6.59	8.37	12.38	-	20.04	-	2.94	低	低
185	嘉縣 RS008	US	0.00	4.35	-	-	6.15	7.69	10.02	14.04	-	20.34	-	2.98	低	高
186	嘉縣 RS009	US	0.00	3.66	-	-	6.95	9.60	11.30	14.15	-	18.63	-	2.86	低	中
187	嘉縣 RS010	US	0.00	3.52	-	-	5.46	6.84	8.35	11.15	-	15.86	-	2.32	低	中
188	嘉縣 RS011	US	0.00	3.14	-	-	5.96	8.21	11.16	12.82	-	16.86	-	2.65	低	低
189	嘉縣 RS012	US	0.00	4.33	-	-	3.89	6.39	7.44	8.61	-	12.53	-	1.76	低	低
190	嘉縣 RS013	US	0.00	8.03	-	-	6.08	8.84	11.30	13.93	-	18.50	-	2.56	低	高
191	嘉縣 RS014	US	0.00	4.40	-	-	4.78	6.16	9.02	10.55	-	14.65	-	2.14	低	低
192	嘉縣 RS015	US	0.00	6.66	-	-	5.00	8.97	10.78	13.40	-	19.37	-	2.73	低	中
193	嘉縣 RS016	US	0.00	6.60	-	-	10.25	16.64	19.65	24.16	-	24.16	-	4.11	中	中
194	嘉縣 RS018	US	0.00	3.53	-	-	5.89	8.03	9.27	10.16	-	13.71	-	2.04	低	低
195	嘉縣 RS019	US	0.00	11.77	-	-	10.27	17.47	18.02	19.39	-	21.40	-	3.07	低	低
196	嘉縣 RS020	US	0.00	4.54	-	-	4.35	9.15	10.61	13.62	-	17.60	-	2.72	低	低
197	嘉縣 RS021	US	0.00	3.58	-	-	5.34	9.10	11.33	13.58	-	14.56	-	2.45	低	中
198	嘉縣 RS022	US	0.00	3.26	-	-	6.86	10.19	12.65	16.03	-	19.23	-	3.13	低	低
199	嘉縣 RS024	US	0.00	3.72	-	-	4.87	6.75	7.88	10.21	-	14.06	-	2.05	低	低
200	嘉縣 RS025	US	0.00	3.68	-	-	5.94	8.94	10.72	14.21	-	17.72	-	2.78	低	低

表 3-12 108-114 年殘坡變位分級表(11/11)

序號	殘坡編號	子殘坡	20190206	20200224	20200225	20200226	20210220	20220210	20230218	20240221	20250323	20250325	20250326	平均速度(m/年)	活動分級	圖資原始活動分級
201	嘉縣 RS026	US	0.00	-	-	2.09	5.68	8.14	9.90	12.67	-	15.88	-	2.57	低	中

*「–」為無影像資料

位處天池集水區拉庫因溪旁之高市 RS098 殘坡分析成果如圖 3-3 及圖 3-4 所示，此殘坡滑移方向主要面東南，與坡向吻合，屬於持續潛移，其中 US-1 塊體為主要位移區域，如圖 3-4(b)所示，累計至 2025 年達 35 公尺位移量，US-1 塊體活動性分級為中。

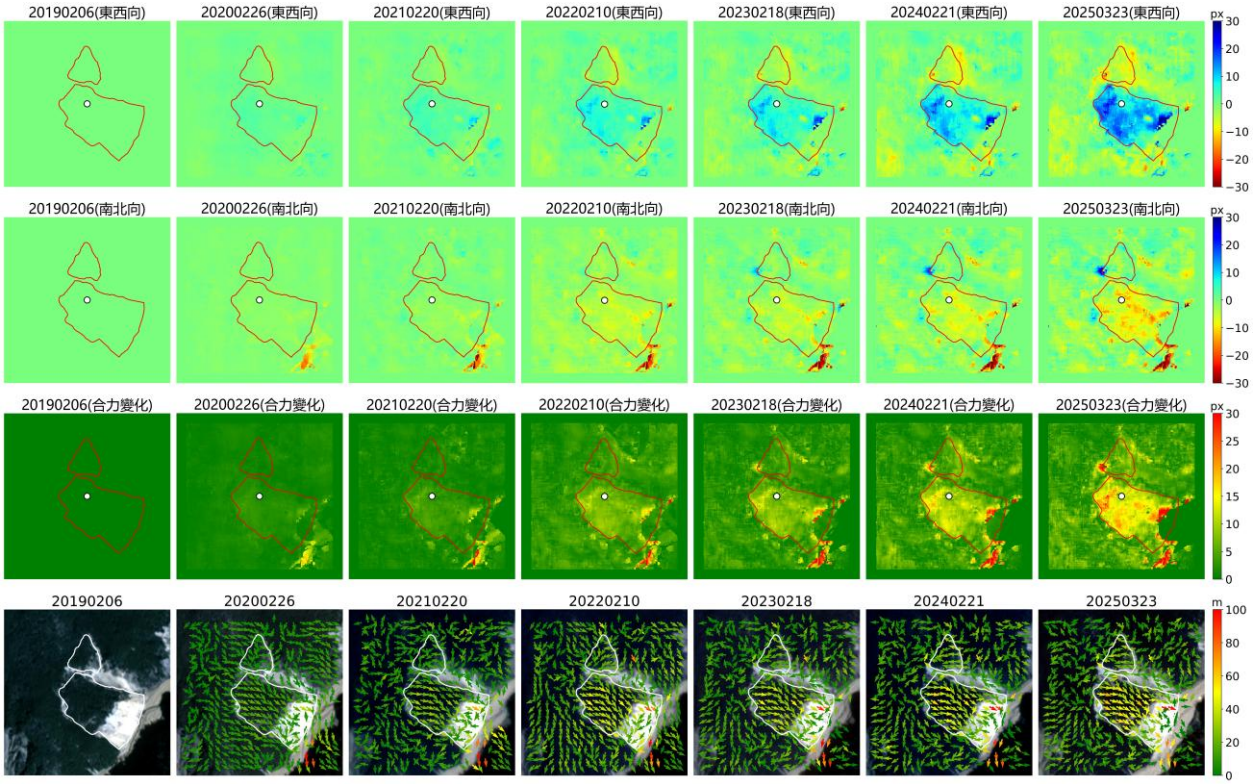
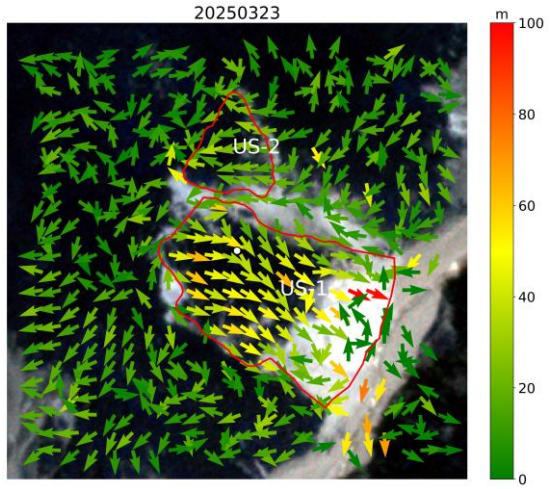
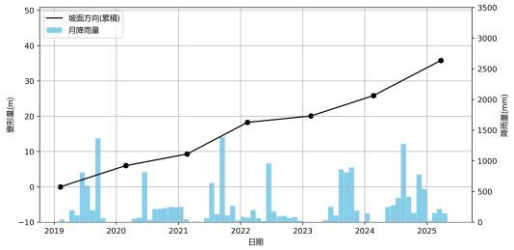


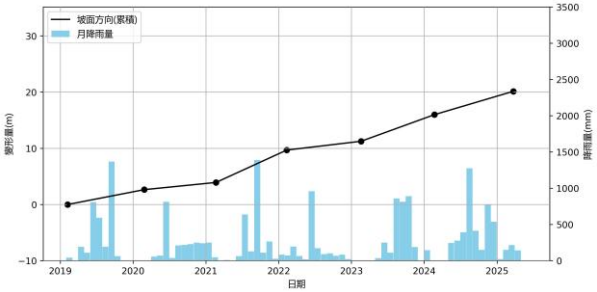
圖 3-3 高市 RS098 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測



(a) 累積位移位移速度圖



(b) US-1 殘坡時間序列位移圖



(c) US-2 殘坡時間序列位移圖

圖 3-4 高市 RS098 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖

位處布堂布那斯溪之高市 RS114 殘坡分析成果如圖 3-5 及圖 3-6 所示，此殘坡主要活動區域為坡頂附近區域，於 2021 年開始具有較為明顯的位移，滑移方向主要面東南，累計至 2025 年達 80 至 90 公尺位移量，其餘區域尚稱穩定，如圖 3-6 (c)單一點位時間序列所示。整體殘坡變形速度則達 30 公尺，活動性分級為中。

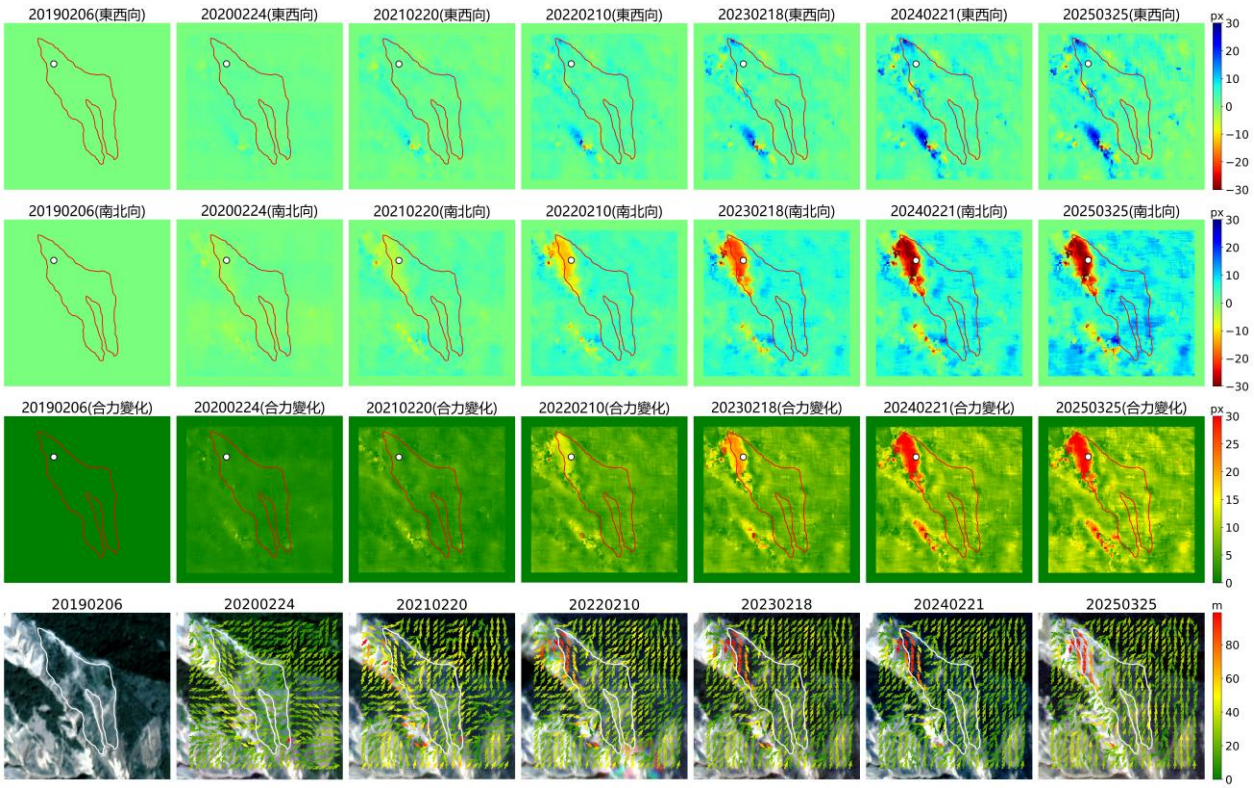
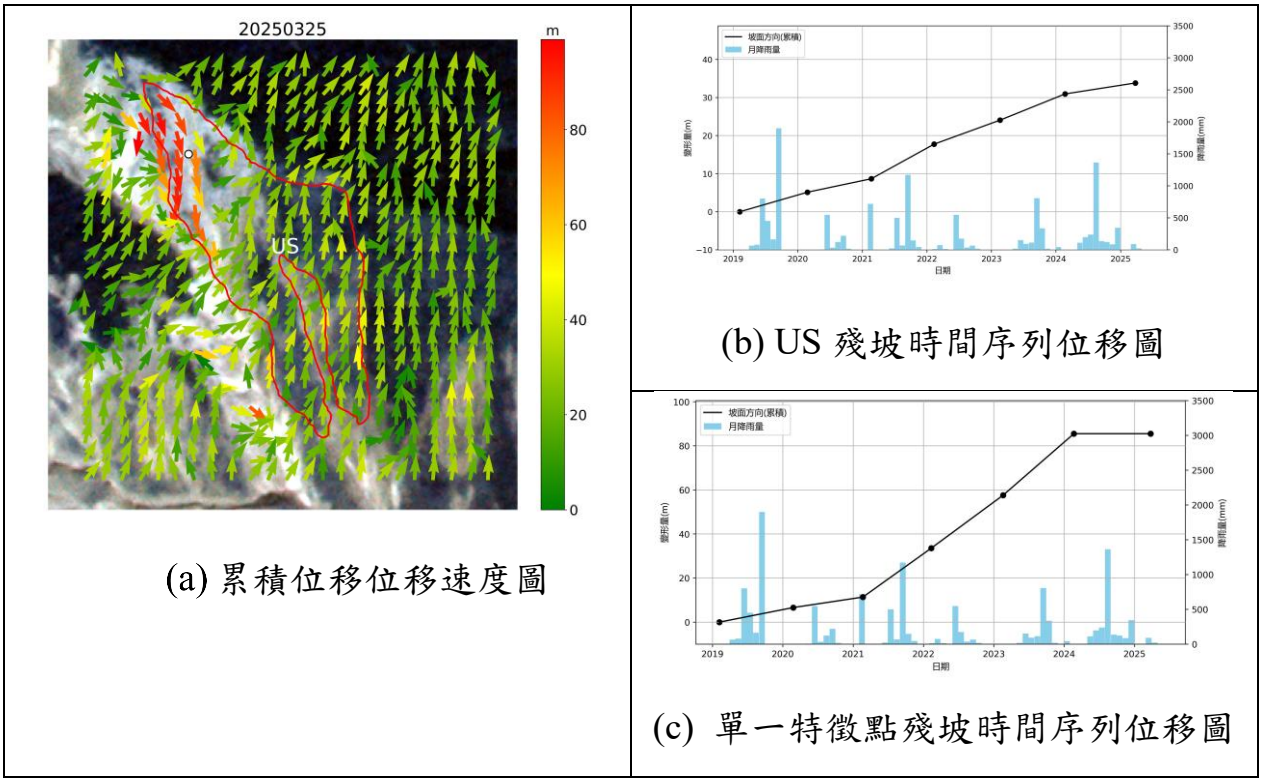


圖 3-5 高市 RS114 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測



(a) 累積位移位移速度圖

(b) US 殘坡時間序列位移圖

(c) 單一特徵點殘坡時間序列位移圖

圖 3-6 高市 RS114 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖

位於布堂布納斯溪中游段之高市 RS115 殘坡分析成果如圖 3-7及圖 3-8 所示，坡坡中段塊體，包括 US-1(圖 3-8 (b))、US-2(圖 3-8 (c))、US-3(圖 3-8 ((d)位置曾於2022/02/10及2023/02/18有劇烈跳動，惟後續成果有回復為原無位移狀態，估計為影像本身偏移所致，其餘本處邊坡主要活動區域位於坡頂 US-4 塊體位置，如圖 3-8 (e)所示，活動方向主要向西南，於 2021 年開始位移，並達到目前約 90 公尺左右累積變形量量級。

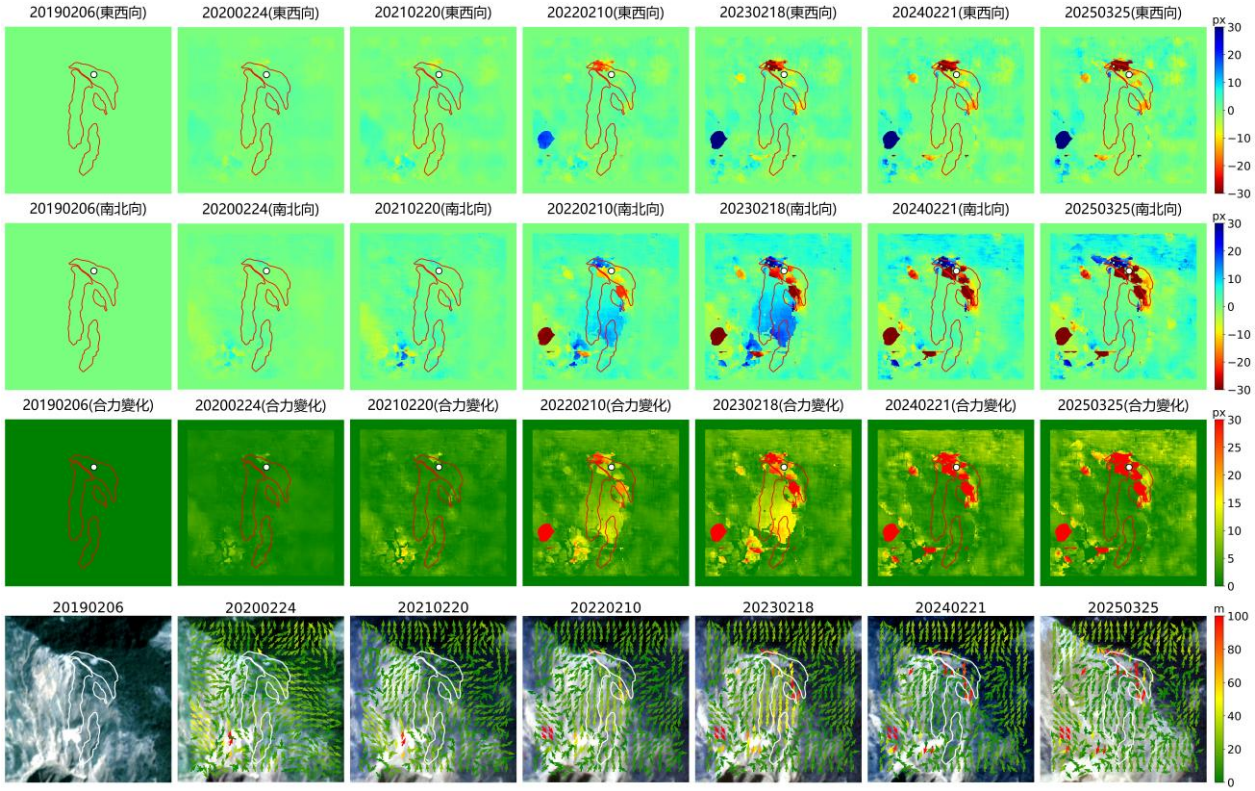
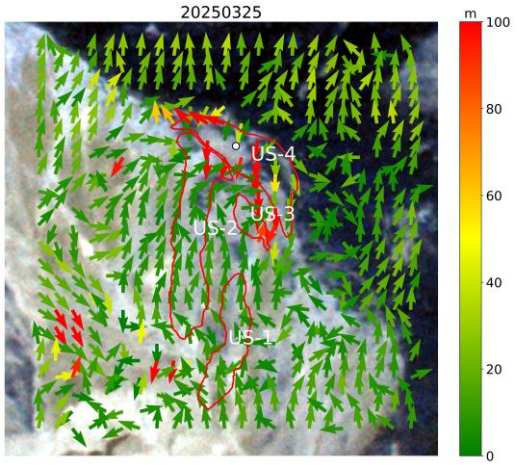
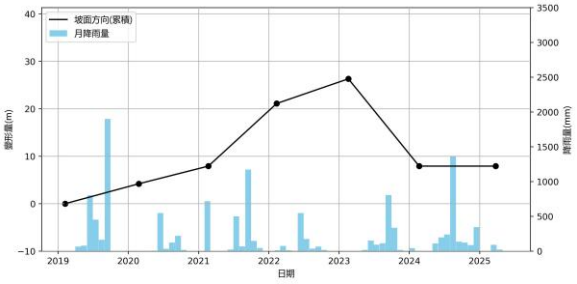


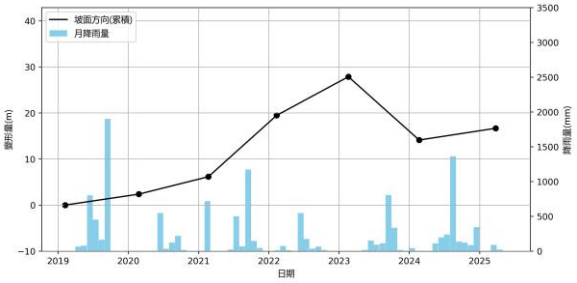
圖 3-7 高市 RS115 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測



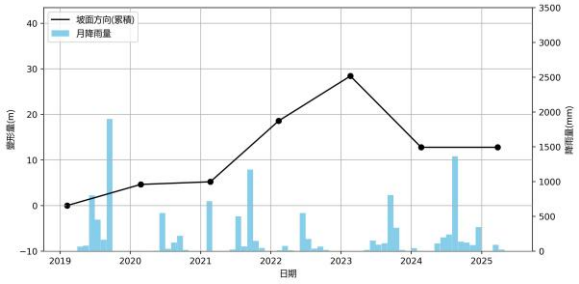
(a) 累積位移位移速度圖



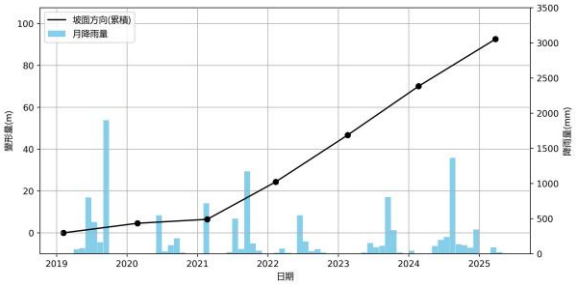
(b) US-1 殘坡時間序列位移圖



(c) US-2 殘坡時間序列位移圖



(d) US-3 殘坡時間序列位移圖



(e) US-4 殘坡時間序列位移圖

圖 3-8 高市 RS115 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖

位於拉克斯溪上游高市 RS068 殘坡分析成果如圖3-9及圖3-10所示，此殘坡有 6 塊子殘坡組成，US-1(圖 3-10 (b))、US-2(圖 3-10 (c))、US-4(圖 3-10 (e))塊體較無明顯變形，分級為低，位於殘坡位置中央之 US-3 由 2022 年開始具有明顯向南變形，由 2021 及 2022 年開始加速位移，並於 2025 年累計約 50 公尺位移變形量，如圖 3-10 (d)。其餘 US-5(圖 3-10 (f))及 US-6(圖 3-10 (g))則相較活動性分類為中。

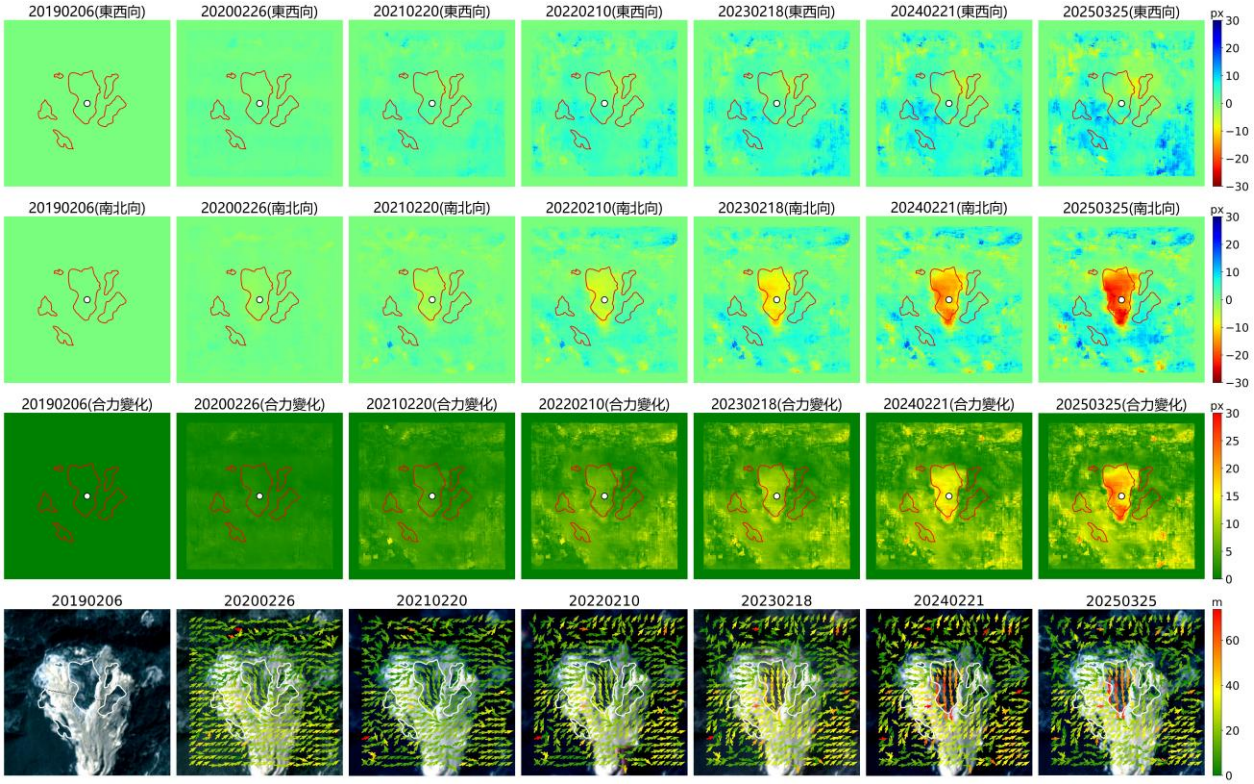
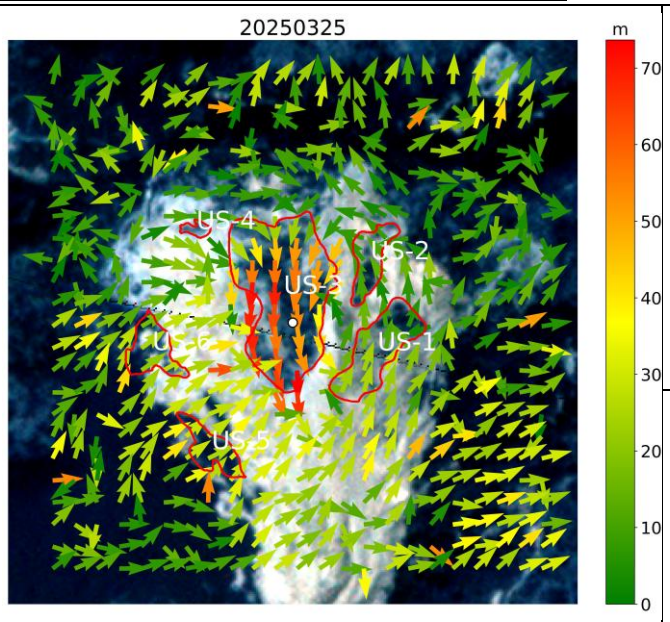
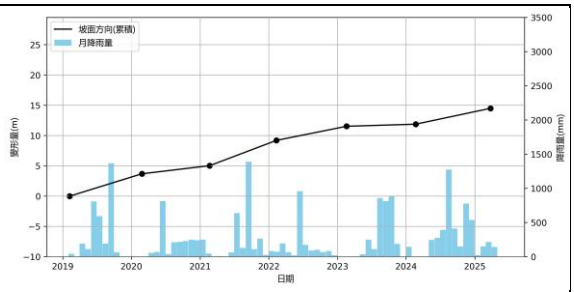


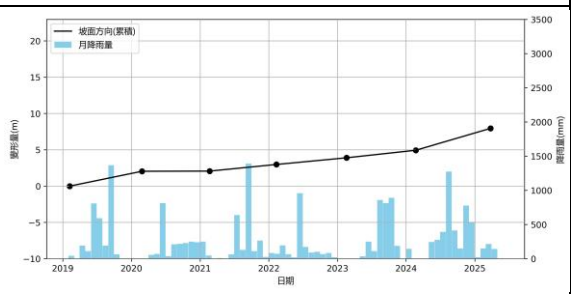
圖 3-9 高市 RS068 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測



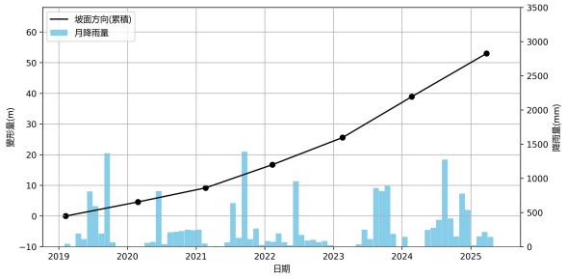
(a) 累積位移位移速度圖



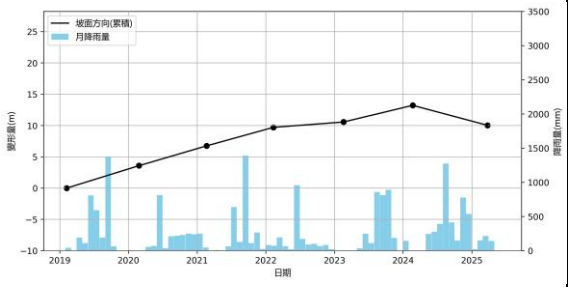
(b) US-1 殘坡時間序列位移圖



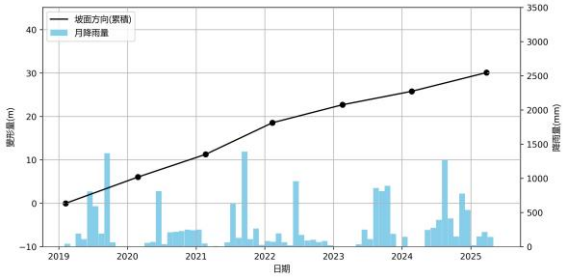
(c) US-2 殘坡時間序列位移圖



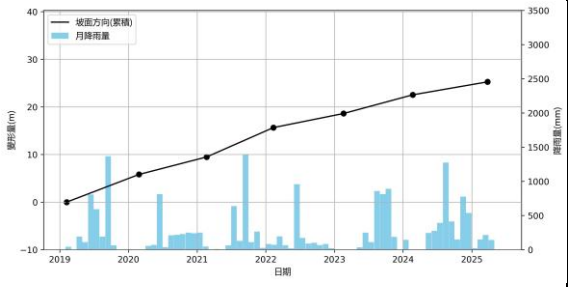
(d) US-3 殘坡時間序列位移圖



(e) US-4 殘坡時間序列位移圖



(f) US-5 殘坡時間序列位移圖



(g) US-6 殘坡時間序列位移圖

圖 3-10 高市 RS068 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖

位於拉克斯溪上游高市 RS118 殘坡分析成果如圖 3-11 及圖 3-12 所示，此殘坡東側明顯具有往東北方位移跡象，並於 2022 年起始具有變形，累計至 2025 年具有約 51 公尺之水平位移量，如圖 3-12(b)所示，活動性分級為高。

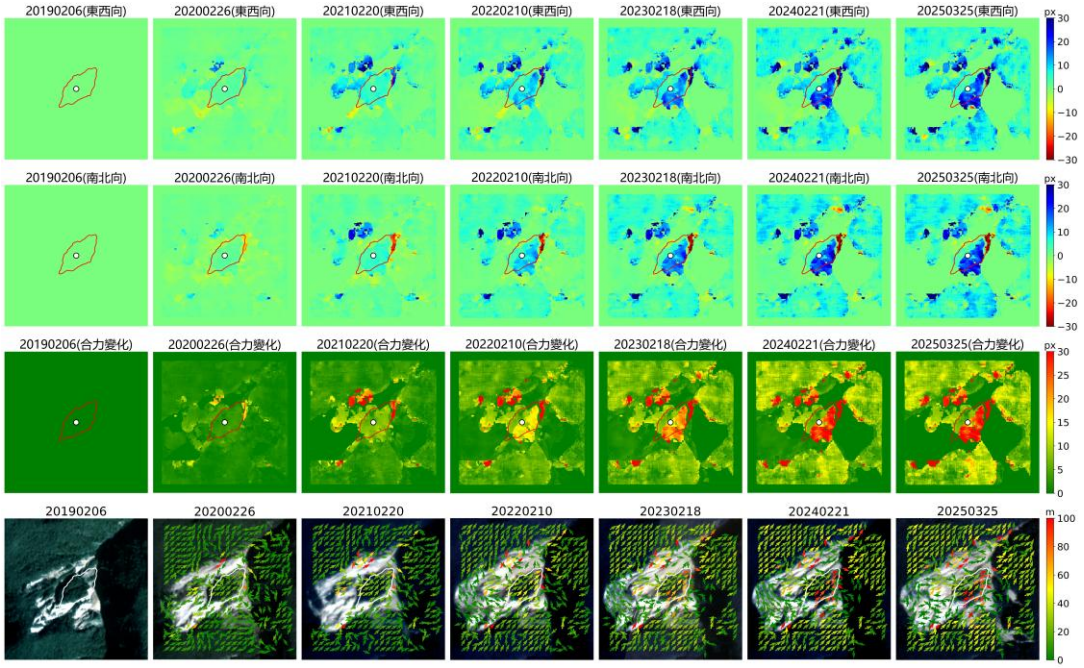
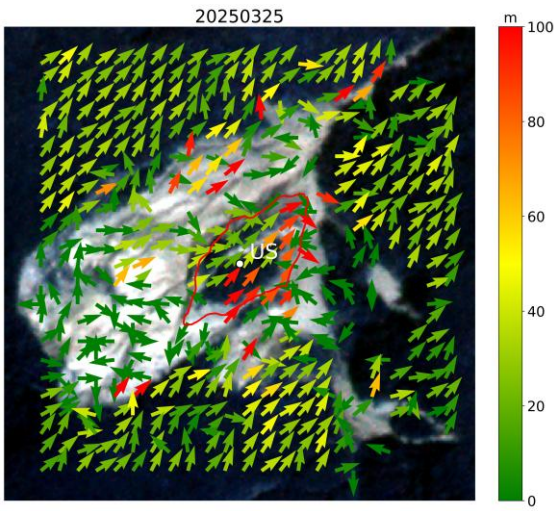
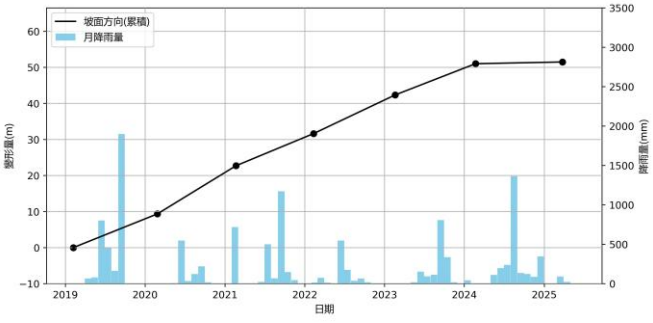


圖 3-11 高市 RS118 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測



(a) 累積位移位移速度圖



(b) US 殘坡時間序列位移圖

圖 3-12 高市 RS118 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖

位於寶來集水區高市 RS078 殘坡分析成果如圖 3-13及圖 3-14所示，此殘坡活動平均累積變形約 30 公尺，活動性分級為中，如圖 3-14 (b)所示。然而本殘坡內有次主要活動區域，為西南側塊體，滑動方向向南偏東，並於 2021 年開始具有變位趨勢，累計至 2025 年約有 70 公尺之變位量，如圖3-14 (b)該塊體時間序列位移量。

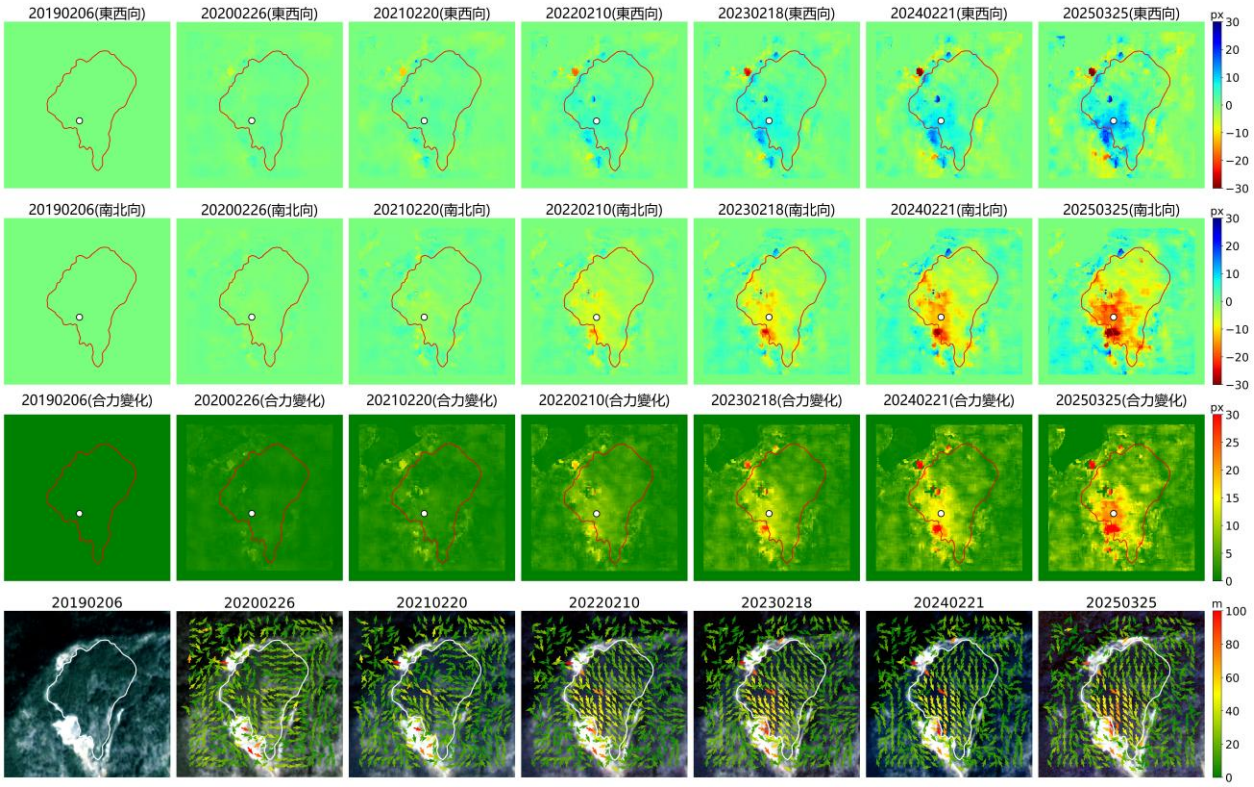
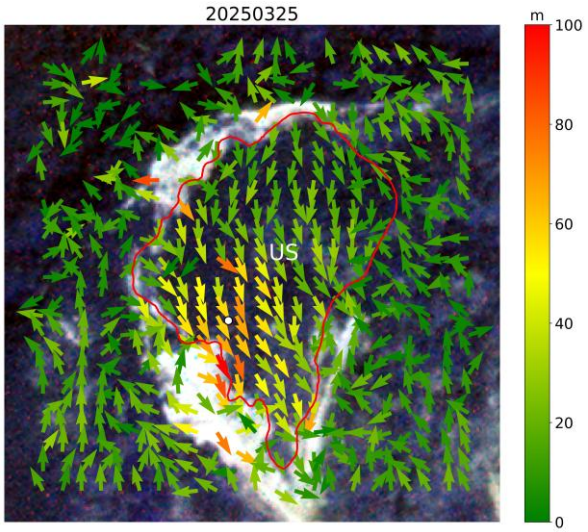
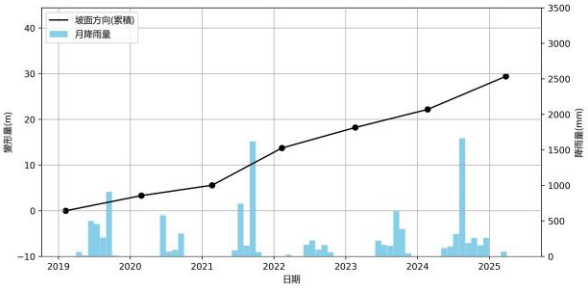


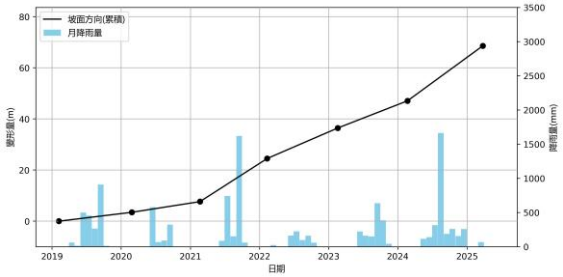
圖 3-13 高市 RS078 殘坡 2019-2025 年 Planet 影像水平位移偵測



(a) 累積位移位移速度圖



(b) US 殘坡時間序列位移圖



(c) 單一特徵點殘坡時間序列位移圖

圖 3-14 高市 RS078 殘坡 2019-2025 年水平時間序列位移圖

第四章　不安定土砂集水區殘坡短期潛變評估

第一節　荖濃溪與旗山溪殘坡多時序地表形變評估

應用衛星遙測技術於大範圍地貌變遷偵測，已蔚然成為近年國土安全與天災防治的重要科技，本工項需運用開放雷達衛星(本計畫擬以歐洲太空總署之 Sentinel-1 雷達衛星)SAR影像，針對荖濃溪與旗山溪之 191 處殘坡區位之歷史多時序地表形變(如圖 4-1)。此外，亦針對內政部提供全台地表變形圖加值分析，並於特定災害事件，以雷達影像之強度資訊提供地表變異區位。以下茲分項說明如后。

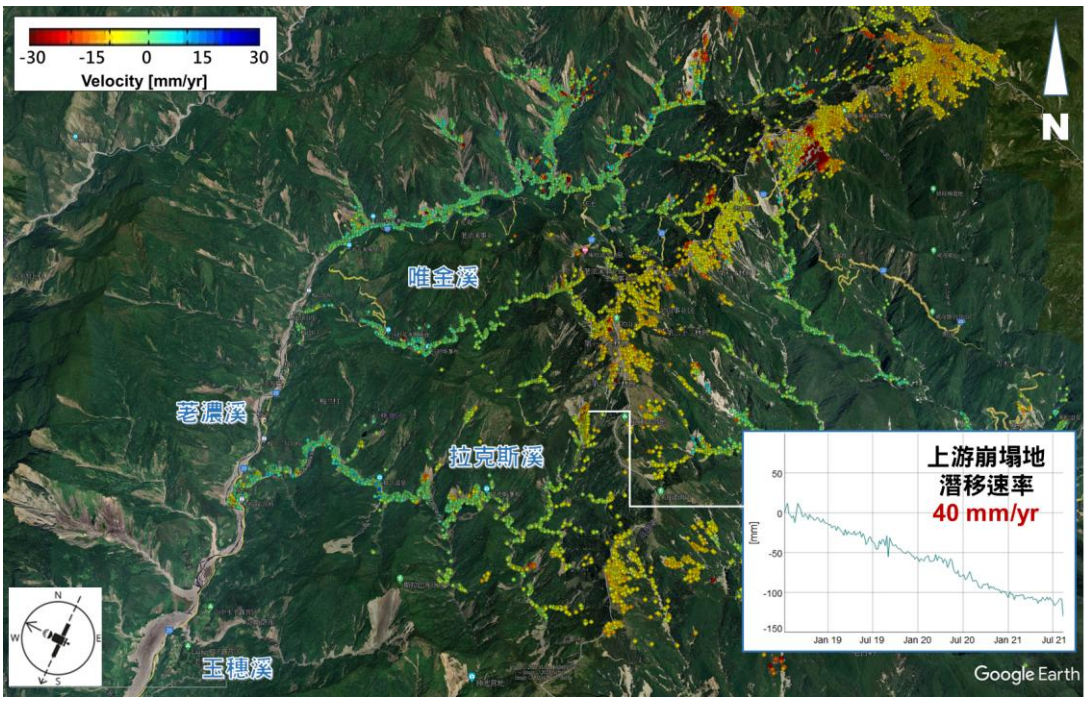


圖 4-1 InSAR 技術於集水區上游崩塌地之地表活動性觀測

本工項運用 Sentinel-1 C 波段SAR影像，分析近二年(113-114)荖濃溪與旗山溪之 191 處殘坡區位之歷史多時序地表形變，依評估結果研訂合適

之殘坡活動性危害等級，並依本署提供之 GNSS(或GPS)地表形變數據或內政部相關測量監測資料檢核趨勢合理性,相關分析產製圖資與形變呈現方式須依本署率定資料格式繳交上傳。

本小節將運用開放雷達衛星升軌及降軌合成孔徑雷達(Synthetic Aperture RADAR, SAR)影像，透過差分干涉(Differential Interferometry)技術解析)荖濃溪與旗山溪之 191 處殘坡區位及其活動性。合成孔徑雷達因屬主動式感測器，不受雲霧影響且日夜都能觀測，透過同地區、同軌道之時間序列影像的相位(phase)資訊,評估地表於影像時間段內之潛移變形趨勢。

本計畫擬採用近二年(113-114 年)之歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)所發射免費開放之 C-波段波長 5.56 公分之 Sentinel-1 雷達衛星影像，選用專為干涉分析所設計之 IW(Interferometric Wide Swath Mode)模式，空間解析度約為 14 公尺，採用 VV 偏極為主。目前單一軌道在台灣地區的重返週期為 12 天，目前第三顆 Sentinel-1C 衛星於 2024 年 12 月發射，若後續於計畫期間內可取得影像，本計畫優規加值納入原分析時間序列影像中，預期在減少重返天數、分析時間段內增加多餘觀測影像的條件下可獲得更佳之變形成果。

於 InSAR 分析殘坡活動性前，需先評估各殘坡所坐落坡向，進而決定以何種軌道之雷達影像進行 InSAR 分析。因本計畫殘坡區域多屬山區，地形起伏較大且有各種坡向，其面向感測器入射方向之將會面臨幾何扭曲效應區域，背向感測區則可能落於陰影區，故本計畫採用 van Natijne et al.

(2022)提出之敏感度指標，為 0 至 1 值域內之指標，描述下邊坡滑移方向(downslope)變形在視衛星方向(Line oO Sight, LOS)入射條件下之適合程度，本指標越接近 1 代表地表越適合該軌道 InSAR 分析。其在不考慮地表植被覆蓋之條件下，使用哥白尼數值高程模型（Copernicus DEM）為基底萃取地表坡向及坡度，擷取坡度大於 5 度以上之地區，搭配 Sentinel-1 升軌及降軌之入射條件，並去除陰影區域後，將地表各像素計算出 0~1 值域之指標。

本計畫以 InSAR 敏感度指標進行評估各殘坡適合使用之軌道，如圖 4-2所示，其中圖 4-2(a)為 Sentinel-1 升軌軌道所分析之指標，顯示面東邊坡此指標會接近 1；反之，圖 4-2(b)為 Sentinel-1 降軌軌道所分析之指標，數值接近 1 的區域主要落於向西邊坡，而針對兩者升軌及降軌敏感度指標，取其大值後，則可預覽集水區範圍內適合 InSAR 分析之區域(圖 4-2(c))。本計畫將於確定殘坡分布後，逐一套疊升軌及降軌敏感度指標後，取殘坡範圍平均指標較大之軌道進行 InSAR 分析，如位於南北坡向之殘坡，可能於升軌及降軌敏感度指標皆出現 0.4~0.6 較為居中之數值，則視何種軌道分析成果較佳呈現於報告中。

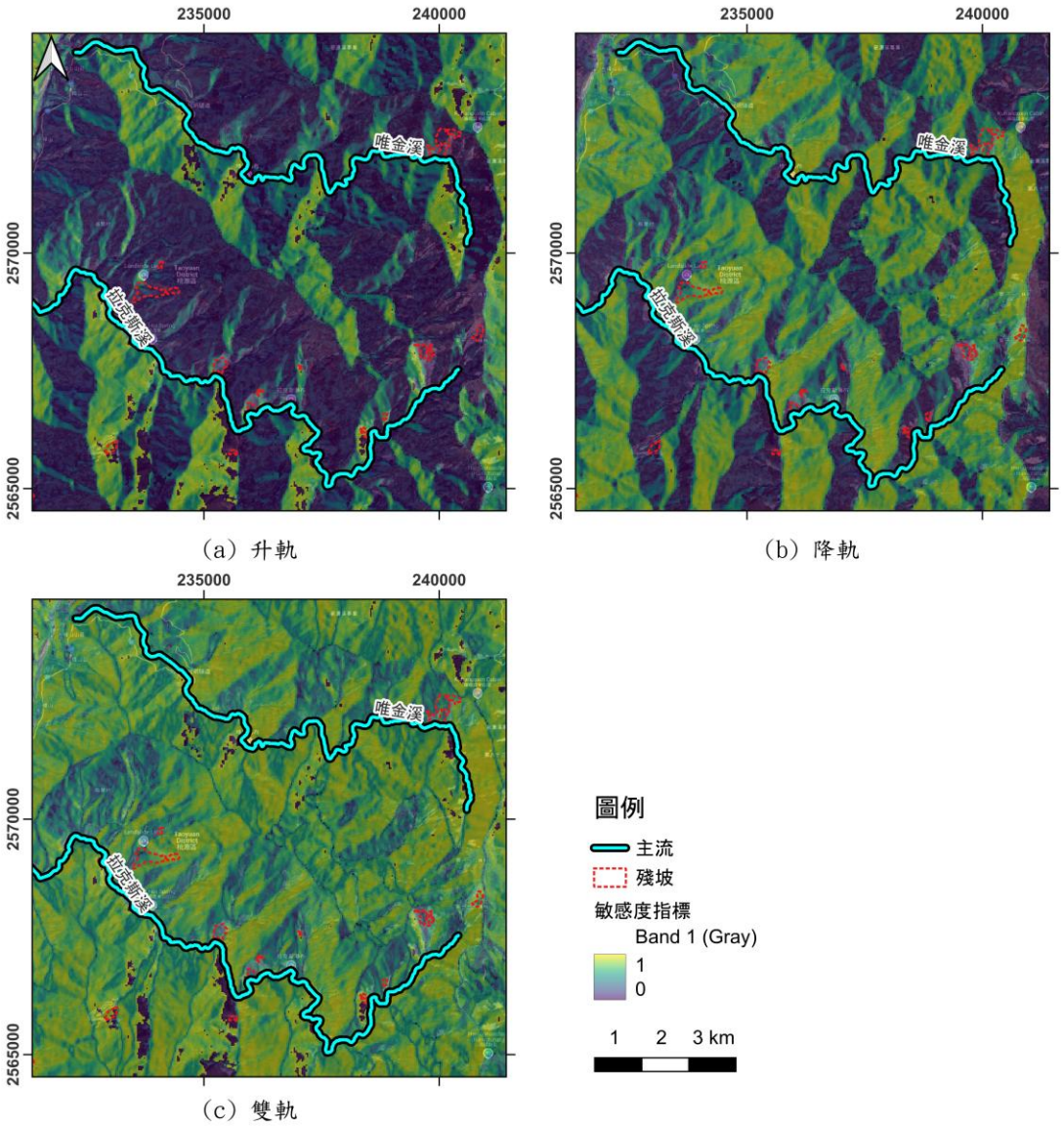


圖 4-2 唯金溪及拉克斯溪集水區範圍內殘坡 Sentinel-1 InSAR 敏感度圖 (a)升軌(b)降軌(c)雙軌

目前成熟之多時相 InSAR 分析技術主要有兩大類，分別為以永久散射點差分合成孔徑干涉雷達(Persistent Scatterers InSAR, PS-InSAR)及短基線差分干涉技術(Small BAseline Subset)兩大類為主(Xue et al., 2020)。前者主要透過萃取地表強度穩定之永久散射點，因此種散射點的相位資訊並不會因獲取時間的不同造成失相關，採用時間及空間基線較為居中的影像作為單一主影像，剩餘影像與主影像進行差分干涉分析後，以週期圖

(periodogram)方式計算各點位之變形速度及高程差異(Ferretti et al., (2000, 2001))；後者則著中在地表廣域連續性變形，主要偵測地表樣態均勻分布之分佈式散射體(Distributed Scatter, DS)，影像像對並非採單一主影像，而使用時間基線及空間基線序列上之鄰近影像遴選像對，每幅干涉像對可採濾波以強化干涉條紋的顯現，最終再透過觀測方程式奇異值分解(Singular Value Decomposition, SVD)取得各點之時間序列變形量(Berardino et al., 2002)。

本計畫區域並非城市地區並無眾多人工構造物作為 PS 點，計畫區內河道、殘坡等裸地皆屬 DS 觀測點位，故不能僅使用 PS-InSAR 作為主要分析方法，且針對 DS 點如以常觀 SBAS 方法分析，於干涉像對濾波時，傳統上使用基於罩窗(window-based)的濾波方法及多視處理(multi-looking)，增加干涉條紋顯現的同時降低影像解析度，導致平滑化之 InSAR 地表變形成果較適合針對廣域連續性變形而常忽略較小尺度之變形區域。鑑此，為解決上述問題，本計畫擬採用優化過後的 DS-InSAR 分析方法，處理流程如圖 4-3 所示，在全解析度影像下進行多時相濾波處理，可在提升地表觀測點分佈點的分佈時保有原始影像之空間解析度，屬新一代之 DS-InSAR 分析方法，其處理流程敘述如後。

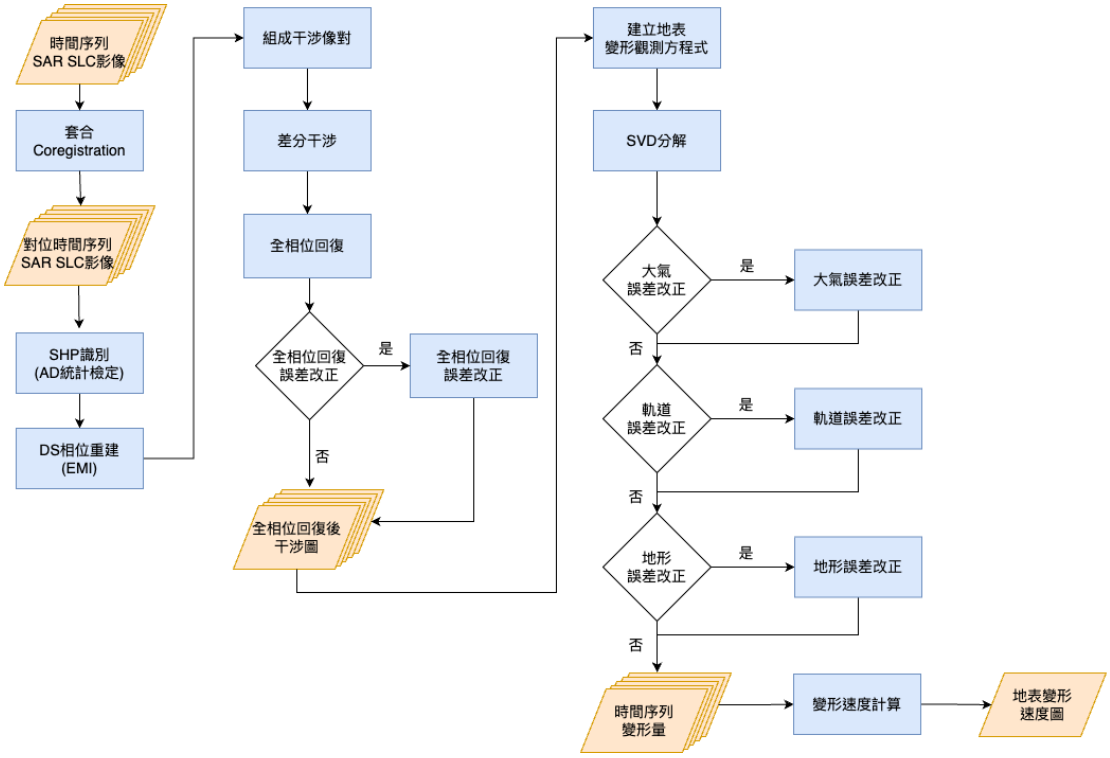


圖 4-3 本計畫採取 DS-InSAR 處理流程

DS-InSAR 分析方法優化過程在於 DS 點位萃取及 DS 點的相位重建，最終達到以時間序列相位及離近點位資訊達到全解像度之濾波效果。首先，因 DS 點主要為 SAR 時間序列影像上呈現與鄰近像素散射特性特性相似之點位，需先確立影像內各像素與鄰近像素是否為同一類地物，故參照(Ferretti et al., 2011)提出的概念，以無參數檢定每一像元與鄰近像元強度時間序列是否一致，以判別各像元與鄰近相同地物的像元範圍。本計畫擬以 Anderson-Darling (AD)檢定(Pettitt(1976))為主要統計檢定方法，而不採 Kolmogorov-Smirnov 檢定，因 AD 檢定對於函數尾部具有更多的權重且更為準確，較適合於干涉雷達應用(Parizzi & Brcic, 2011)。待與離近像素逐一進行統計檢定後，即可確立統計同質像素(Statistically Homogeneous Pixel, SHP)的範圍，並以此為基礎進行 DS 點之識別及相位重建。

DS 相位重建是基於以經過套合至單一影像的單複數影像(Single Look Complex, SLC)影像集來處理，因相位資訊尚未經過全相位回復(Phase unwrapping)，相位數值尚為於正負π之間，故需將此纏繞(wrapped)相位進行重建處理，是一非線性複雜的最優化解算過程。目前常見之相位重建方法有如phase triangulation algorithm (PTA) (Ferretti et al., 2011)、eigenvalue decomposition (EVD) (Fornaro et al., 2015)及EMI(Eigendecomposition-based Maximum-likelihood-estimator of Interferometric phase) (Ansari et al., 2018)等方法，本計畫將採用 EMI 相位重建法，其引入 EVD 法之特徵分解(Eigendecomposition)以及 PTA 法之最大相似度估計(Maximum likeihood)，前者可以將 PS 點與 DS 點散射機制分離處理，而最大似然估計則可兼具運算之效率。另如本計畫影像蒐集較多時，則將引入 Squential 分析方法(Ansari et al., 2017)，其並非使用點位鄰近像元的所有時間段相位資訊，而採分段式時間間隔內進行重建，可剔除時間間隔較長導致低同性的相位資料，在保有同樣精度下增加運算速度。

經重新 DS 相位重建後，尚需以 SBAS 方式進行組合干涉相對並將纏繞相位回復進行全相位回復後方可進行建立觀測方程式解算地表變形量。考量近期研究指出使用序列式影像組成像對會引入衰退訊號(fading signal)，導致最終解算地表變形速度有些微偏差，因此本計畫將採取在時空間基線分佈坐標下以德勞內三角形(Delaunay triangulation)組成像對，可避免引入此類誤差(Mirzaee et al., 2023)。因每一像對已經過相位重建，等同進行濾波

處理，依照德勞內三角形組成像對方式後進行每幅相對的差分干涉及全相位回復，再依照像對組成方式建立觀測方程式後以 SBAS 解算方式評估時間序別變形量，最終再藉由時間序列萃取年平均速度或累積變形量以作後續評估及繪圖所用。然而 InSAR 分析技術實則隱含許多誤差，如大氣對流層誤差、電離層誤差、軌道傾斜誤差、地形誤差、全相位回復誤差等，故於解算完地表變形成果後，將先進行審視成果之合理性，如產生之地表變形分佈與上述誤差吻合，則將進行誤差校正以確保解算成果之準確性。

本計畫後續欲進行分級時，本計畫將各殘坡 LOS 方向分析成果轉換成下邊坡滑移方向之變形速度，畫使用內政部開放 20 米數值高程模型，計算坡度及坡向後，將各 InSAR 觀測點萃取所作落位置之坡度及坡向。LOS 方向變形轉換至坡面滑移方向變形量可藉由下式進行轉換(Notti et al., 2014)：

$$V_{slope} = \frac{V_{LOS}}{C} \tag{4-1}$$

常數 C 為邊坡方向變形於 LOS 方向變形之占比，亦即對於 LOS 方向投影至坡面方向時之敏感程度。而 C 則可透由下式計算得知：

$$\mathrm{C} = (\cos(\mathrm{S})\sin(\mathrm{A}-90°))(\cos(90-\alpha)\cos(270-\gamma)) + (-1\cos(S)\cos(A-90)(\cos(90°-\alpha)\cos(270°-\gamma)) + \sin(S)cos(\alpha) \tag{4-2}$$

式(4-2)中，A 為 InSAR 觀測點所在坡向，S 為所在坡度，α 為入射角，γ 為視衛星方向水平方位角。然而對於某些地區坡面方向及 LOS 方向差異較大地區，其 C 值會接近 0 導致邊坡方向變形趨近於無限大，為了避

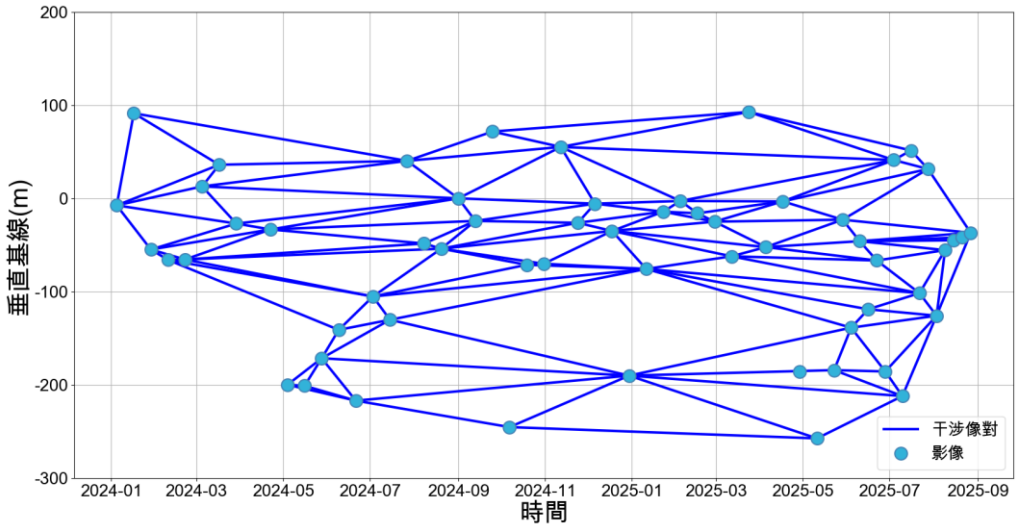
免轉換時過度誇大變形速度，InSAR 觀測點再計算完常數 C 後，如-0.3≤C<0時，將 C 值固定為-0.3；反之0≤C<0.3時，將 C 值固定為0.3(Herrera et al., 2013)，並將坡度小於 10 度之區域保留原變形速度，因地勢平坦區域地表變形以垂直沉降為主，故不予進行投影轉換。

於荖濃溪與旗山溪之 191 處殘坡區位歷史多時序地表形變分析後，為評估 InSAR 分析成果並進行量化分級。本計畫已初步蒐集國內外邊坡監測與大崩監測之 InSAR 遙測文獻，目前仍多以觀測「邊坡潛變」為重點，而非應用於快速或遽變式崩塌。故仍建議以 Sentinel-1 衛星現行 12 天重返週期之頻率與其雷達波長，所能推估之最大形變量進行分級，參照日本地滑學會(1978)之分級方式，原將變形速度區分成五級，分別為低(<0.5 mm/月)、中低(0.5-2 mm/月)、中(2-10 mm/月)、中高(10-35 mm/月)、高(>35 mm/月)，因 InSAR 成果通常以年變形速度表示，其中高及高分及轉換成年變形速度後均會過大(如 12 cm/yr以上)，故將原低、中低、中分級以無明顯、緩慢、明顯取代，如表 4-1 所示，於成果報告中呈現各殘坡之等級，較易於管理各流域集水區內各殘坡之活動性。

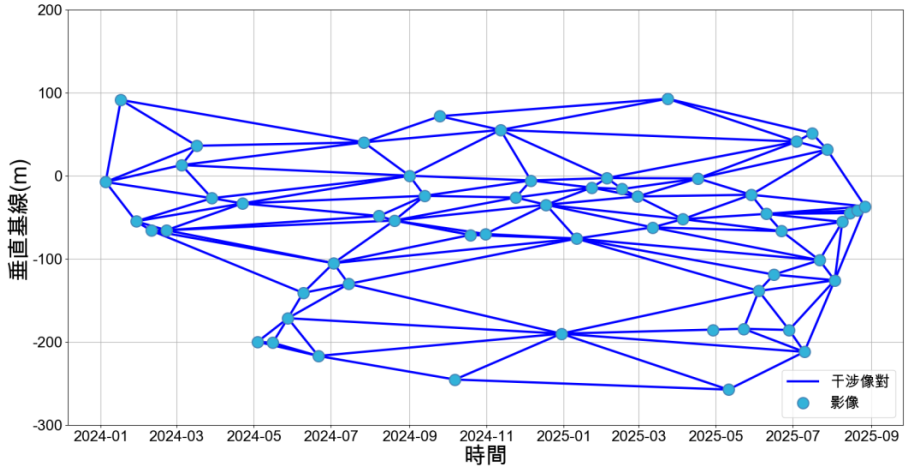
表 4-1 本計畫建議InSAR邊坡潛變分級表

分級	速率(mm/月)	速率(mm/年)	變動意義
無明顯(C)	<0.5	<6	無
緩慢(B)	0.5-2	6-24	潛變
明顯(A)	2-10	24-120	略顯著

本計畫業已完成 2024 年 1 月至 2025 年 9 月之 Sentinel-1 升軌及降軌雷達影像，並涵蓋殘坡範圍進行 InSAR 多時序分析，以 12 天重返週期進行拍攝，升軌及降軌分別有 49 及 63 幅，本計畫採用之影像時空間基線圖如圖 4-4，圖中每一點為使用影像在序列影像中時間與垂直基分布的位置，橫軸為影像日期，縱軸為影像間相對的垂直空間基線位置，各兩點連線則表示由哪兩張影像所組成的干涉像對。Sentinel-1 影像的空間基線皆在正負 200 公尺內，適合用於分析干涉分析，並於圖 4-4 上的空間、時間基線坐標系上使用德勞內三角形新增像對，以期獲得較佳的分析成果。小基線組成相對數量，升軌為 116 對，降軌為 149 對。



(a) 升軌



(b) 降軌

圖 4-4 本計畫使用 Sentinel-1 影像時空基線圖

本計畫依序挑選各殘坡適合軌道分析後，進行 InSAR 多時序分析獲得初始 LOS 方向變形速度成果後，使用內政部 20 公尺網格數值地形高程模型，產製坡向、坡度後，每個 InSAR 觀測點萃取各自所坐落坡向、坡度數值後，依照前述方法進行計算轉換邊坡方向投影轉換係數後，將整體 InSAR 成果依照各自轉換係數投影至下邊坡滑移方向，而後依照表 4-1 級距區分為低、中、高三級，如欲南北向變坡有進行雙軌分析，則採活動性分

級較高者作為最終分級。本計畫分析 201 處殘坡活動性分級之低、中、高分級之數量分別為 97、64、13 處，無觀測點分級共計 27 處。以下將舉分級高之殘坡進行案例說明，其餘殘坡成果收錄於附錄四。

表 4-2 113-114 年殘坡InSAR變位分級表(1/5)

編號	殘坡編號	子殘坡	適合軌道	升軌變形速度 (mm/yr)	降軌變形速度 (mm/yr)	升軌分級	降軌分級	綜合分級
1	嘉縣 RS005	US	雙軌	2.66	無明顯	-2.69	無明顯	無明顯
2	嘉縣 RS006	US	升軌	-13.24	緩慢	-	-	緩慢
3	嘉縣 RS007	US	升軌	-12.98	緩慢	-	-	緩慢
4	嘉縣 RS008	US	升軌	-	-	-	-	-
5	嘉縣 RS009	US	升軌	-7.24	緩慢	-	-	緩慢
6	嘉縣 RS010	US	升軌	1.91	無明顯	-	-	無明顯
7	嘉縣 RS011	US	升軌	-3.78	無明顯	-6.24	緩慢	無明顯
8	嘉縣 RS012	US	升軌	-2.45	無明顯	-	-	無明顯
9	嘉縣 RS013	US	降軌	-27.09	顯著	-9.51	緩慢	緩慢
10	嘉縣 RS014	US	升軌	-11.68	緩慢	-	-	緩慢
11	嘉縣 RS015	US	升軌	-3.15	無明顯	-	-	無明顯
12	嘉縣 RS016	US	升軌	-7.29	緩慢	-1.37	無明顯	緩慢
13	嘉縣 RS018	US	升軌	-	-	-	-	-
14	嘉縣 RS019	US	升軌	-	-	-	-	-
15	嘉縣 RS020	US	升軌	8.96	無明顯	12.93	無明顯	無明顯
16	嘉縣 RS021	US	雙軌	-22.13	緩慢	3.41	無明顯	緩慢
17	嘉縣 RS022	US	升軌	-	-	-	-	-
18	嘉縣 RS024	US	升軌	-4.72	無明顯	-	-	無明顯
19	嘉縣 RS025	US	降軌	-	-	-0.89	無明顯	無明顯
20	嘉縣 RS026	US	降軌	-	-	23.12	無明顯	無明顯
21	嘉縣 RS027	US	升軌	-10.57	緩慢	33.41	無明顯	緩慢
22	嘉縣 RS028	US	升軌	-2.91	無明顯	-	-	無明顯
23	嘉縣 RS029	US	升軌	0.35	無明顯	-6.55	緩慢	無明顯
24	投縣 RS056	US	升軌	-	-	-	-	-
25	投縣 RS057	US	升軌	-4.03	無明顯	-	-	無明顯
26	東縣 RS104	US	升軌	5.33	無明顯	-	-	無明顯
27	高市 RS001	US	降軌	-	-	-	-	-
28	高市 RS002	US	升軌	-2.08	無明顯	-	-	無明顯
29	高市 RS003	US	升軌	4.01	無明顯	-	-	無明顯
30	高市 RS004	US	升軌	-	-	-	-	-
31	高市 RS005	US-2	降軌	-	-	-10.92	緩慢	緩慢
32	高市 RS005	US-1	降軌	-	-	-3.52	無明顯	無明顯
33	高市 RS006	US	降軌	-	-	2.22	無明顯	無明顯
34	高市 RS007	US-1	降軌	-	-	-0.69	無明顯	無明顯
35	高市 RS007	US-2	降軌	-	-	3.20	無明顯	無明顯
36	高市 RS008	US	升軌	-	-	-	-	-
37	高市 RS009	US-2	升軌	-	-	-	-	-
38	高市 RS009	US-1	升軌	-13.33	緩慢	-	-	緩慢
39	高市 RS010	US-2	升軌	-	-	-	-	-
40	高市 RS010	US-1	升軌	-	-	-	-	-
41	高市 RS011	US	升軌	-	-	-	-	-
42	高市 RS012	US	升軌	-	-	-	-	-
43	高市 RS013	US	升軌	-4.05	無明顯	-	-	無明顯

表 4-3 113-114 年殘坡InSAR變位分級表(2/5)

編號	殘坡編號	子殘坡	適合軌道	升軌變形速度(mm/yr)	降軌變形速度(mm/yr)	升軌分級	降軌分級	綜合分級
44	高市 RS014	US	降軌	-	-	-10.31	緩慢	緩慢
45	高市 RS015	US	升軌	-	-	-	-	-
46	高市 RS016	US-2	降軌	-	-	-14.31	緩慢	緩慢
47	高市 RS016	US-1	降軌	-	-	-14.83	緩慢	緩慢
48	高市 RS017	US	降軌	-	-	-14.51	緩慢	緩慢
49	高市 RS018	US	降軌	41.07	無明顯	5.02	無明顯	無明顯
50	高市 RS019	US-2	升軌	-3.17	無明顯	-	-	無明顯
51	高市 RS019	US-1	升軌	4.57	無明顯	-	-	無明顯
52	高市 RS020	US	升軌	-	-	-	-	-
53	高市 RS021	US-1	降軌	-	-	-	-	-
54	高市 RS021	US-2	降軌	-	-	-15.61	緩慢	緩慢
55	高市 RS021	US-4	降軌	-	-	-22.32	緩慢	緩慢
56	高市 RS021	US-3	降軌	-	-	-22.14	緩慢	緩慢
57	高市 RS022	US	降軌	-	-	-8.99	緩慢	緩慢
58	高市 RS045	US	降軌	-	-	-7.71	緩慢	緩慢
59	高市 RS046	US	升軌	-0.48	無明顯	-	-	無明顯
60	高市 RS047	US	降軌	-	-	-	-	-
61	高市 RS048	US	降軌	-	-	-17.40	緩慢	緩慢
62	高市 RS049	US	降軌	-	-	-18.79	緩慢	緩慢
63	高市 RS050	US	升軌	2.28	無明顯	-	-	無明顯
64	高市 RS051	US	升軌	3.99	無明顯	-	-	無明顯
65	高市 RS052	US	升軌	-22.45	緩慢	-	-	緩慢
66	高市 RS053	US	降軌	-	-	2.24	無明顯	無明顯
67	高市 RS054	US	降軌	-	-	-11.87	緩慢	緩慢
68	高市 RS055	US	降軌	-	-	-0.73	無明顯	無明顯
69	高市 RS056	US	降軌	-	-	-4.59	無明顯	無明顯
70	高市 RS057	US	降軌	-	-	8.75	無明顯	無明顯
71	高市 RS058	US	降軌	-	-	-13.38	緩慢	緩慢
72	高市 RS059	US-2	升軌	-33.79	顯著	-	-	顯著
73	高市 RS059	US-1	升軌	-34.02	顯著	-	-	顯著
74	高市 RS060	US	升軌	-24.71	顯著	-22.78	緩慢	顯著
75	高市 RS061	US-2	降軌	-	-	9.01	無明顯	無明顯
76	高市 RS061	US-1	降軌	-	-	6.27	無明顯	無明顯
77	高市 RS062	US-2	升軌	-20.73	緩慢	-	-	緩慢
78	高市 RS062	US-1	升軌	-	-	-	-	-
79	高市 RS063	US	升軌	-2.59	無明顯	-	-	無明顯
80	高市 RS064	US-2	降軌	-	-	10.33	無明顯	無明顯
81	高市 RS064	US-1	降軌	-	-	1.83	無明顯	無明顯
82	高市 RS065	US	升軌	-	-	-	-	-
83	高市 RS066	US	降軌	-	-	-0.30	無明顯	無明顯
84	高市 RS067	US	降軌	-10.08	緩慢	-9.68	緩慢	緩慢
85	高市 RS068	US-2	雙軌	10.30	無明顯	-5.48	無明顯	無明顯
86	高市 RS068	US-6	雙軌	4.76	無明顯	-3.72	無明顯	無明顯
87	高市 RS068	US-3	雙軌	-4.32	無明顯	-10.43	緩慢	緩慢
88	高市 RS068	US-1	雙軌	13.67	無明顯	-5.03	無明顯	無明顯
89	高市 RS068	US-5	雙軌	2.24	無明顯	-12.29	緩慢	緩慢
90	高市 RS068	US-4	雙軌	3.68	無明顯	-10.33	緩慢	緩慢
91	高市 RS069	US	升軌	0.71	無明顯	-	-	無明顯
92	高市 RS070	US	降軌	-	-	-13.95	緩慢	緩慢
93	高市 RS071	US	升軌	-8.19	緩慢	-	-	緩慢
94	高市 RS072	US	升軌	-3.45	無明顯	-	-	無明顯
95	高市 RS073	US	升軌	-	-	-	-	-

表 4-4 113-114 年殘坡InSAR變位分級表(3/5)

編號	殘坡編號	子殘坡	適合軌道	升軌變形速度 (mm/yr)	降軌變形速度 (mm/yr)	升軌分級	降軌分級	綜合分級
96	高市 RS074	US	升軌	-6.96	緩慢	-	-	緩慢
97	高市 RS075	US	升軌	0.39	無明顯	-	-	無明顯
98	高市 RS076	US	升軌	-5.43	無明顯	-	-	無明顯
99	高市 RS077	US	降軌	-	-	-2.05	無明顯	無明顯
100	高市 RS078	US	雙軌	0.53	無明顯	-3.16	無明顯	無明顯
101	高市 RS079	US	降軌	-	-	0.71	無明顯	無明顯
102	高市 RS080	US	降軌	-	-	10.20	無明顯	無明顯
103	高市 RS081	US	升軌	-13.42	緩慢	-	-	緩慢
104	高市 RS082	US-2	升軌	-3.31	無明顯	-	-	無明顯
105	高市 RS082	US-1	升軌	-5.73	無明顯	-	-	無明顯
106	高市 RS083	US-1	降軌	-	-	-0.03	無明顯	無明顯
107	高市 RS083	US-2	降軌	-	-	-30.29	顯著	顯著
108	高市 RS084	US	升軌	-0.77	無明顯	-	-	無明顯
109	高市 RS085	US	降軌	-	-	0.05	無明顯	無明顯
110	高市 RS086	US	降軌	-	-	1.42	無明顯	無明顯
111	高市 RS087	US	降軌	-	-	-4.75	無明顯	無明顯
112	高市 RS088	US	升軌	-8.26	緩慢	-	-	緩慢
113	高市 RS089	US-2	降軌	-	-	2.17	無明顯	無明顯
114	高市 RS089	US-1	降軌	-	-	2.28	無明顯	無明顯
115	高市 RS090	US	雙軌	-2.21	無明顯	-1.00	無明顯	無明顯
116	高市 RS091	US-1	雙軌	8.75	無明顯	-1.18	無明顯	無明顯
117	高市 RS091	US-2	雙軌	2.09	無明顯	1.65	無明顯	無明顯
118	高市 RS092	US	雙軌	-8.49	緩慢	-0.47	無明顯	緩慢
119	高市 RS093	US-1	升軌	7.43	無明顯	-	-	無明顯
120	高市 RS093	US-3	升軌	-3.88	無明顯	-	-	無明顯
121	高市 RS093	US-2	升軌	4.23	無明顯	-	-	無明顯
122	高市 RS094	US	升軌	-	-	6.44	無明顯	-
123	高市 RS095	US-1	升軌	-2.50	無明顯	-6.63	緩慢	無明顯
124	高市 RS095	US-2	升軌	-11.31	緩慢	2.39	無明顯	緩慢
125	高市 RS095	US-3	升軌	1.17	無明顯	-1.98	無明顯	無明顯
126	高市 RS096	US	升軌	-1.88	無明顯	-	-	無明顯
127	高市 RS097	US	降軌	-	-	7.15	無明顯	無明顯
128	高市 RS098	US-1	升軌	-6.47	緩慢	-	-	緩慢
129	高市 RS098	US-2	升軌	-	-	-	-	-
130	高市 RS099	US	升軌	0.51	無明顯	-	-	無明顯
131	高市 RS100	US	升軌	-10.22	緩慢	-	-	緩慢
132	高市 RS101	US-3	升軌	-3.20	無明顯	-	-	無明顯
133	高市 RS101	US-2	升軌	-9.94	緩慢	-	-	緩慢
134	高市 RS101	US-4	升軌	2.29	無明顯	-	-	無明顯
135	高市 RS101	US-1	升軌	-9.52	緩慢	-	-	緩慢
136	高市 RS102	US	升軌	-	-	-	-	-
137	高市 RS103	US	升軌	-6.75	緩慢	-	-	緩慢
138	高市 RS104	US	升軌	-8.83	緩慢	-	-	緩慢
139	高市 RS105	US-2	升軌	-22.64	緩慢	-	-	緩慢
140	高市 RS105	US-1	升軌	-	-	-	-	-
141	高市 RS106	US	升軌	-9.58	緩慢	-	-	緩慢
142	高市 RS107	US	升軌	-11.60	緩慢	-	-	緩慢
143	高市 RS108	US	降軌	-	-	-19.80	緩慢	緩慢
144	高市 RS109	US-3	升軌	-1.81	無明顯	-	-	無明顯
145	高市 RS109	US-2	升軌	-	-	-	-	-
146	高市 RS109	US-1	升軌	11.69	無明顯	-	-	無明顯
147	高市 RS110	US-2	降軌	-	-	5.88	無明顯	無明顯

表 4-5 113-114 年殘坡InSAR變位分級表(4/5)

編號	殘坡編號	子殘坡	適合軌道	升軌變形速度 (mm/yr)	降軌變形速度 (mm/yr)	升軌分級	降軌分級	綜合分級
148	高市 RS110	US-1	降軌	-	-	-1.56	無明顯	無明顯
149	高市 RS111	US-2	降軌	-	-	14.01	無明顯	無明顯
150	高市 RS111	US-1	降軌	-	-	6.66	無明顯	無明顯
151	高市 RS112	US	降軌	-	-	-0.28	無明顯	無明顯
152	高市 RS113	US	升軌	-3.88	無明顯	-	-	無明顯
153	高市 RS114	US	降軌	-	-	-41.07	顯著	顯著
154	高市 RS115	US-1	降軌	-	-	-45.23	顯著	顯著
155	高市 RS115	US-4	降軌	-	-	-65.16	顯著	顯著
156	高市 RS115	US-3	降軌	-	-	-93.16	顯著	顯著
157	高市 RS115	US-2	降軌	-	-	-36.30	顯著	顯著
158	高市 RS116	US-2	降軌	-	-	-37.50	顯著	顯著
159	高市 RS116	US-1	降軌	-	-	-15.35	緩慢	緩慢
160	高市 RS117	US	升軌	-	-	-	-	-
161	高市 RS118	US	升軌	-1.74	無明顯	-	-	無明顯
162	高市 RS119	US	降軌	-	-	-14.20	緩慢	緩慢
163	高市 RS120	US-1	降軌	-	-	-8.53	緩慢	緩慢
164	高市 RS120	US-2	降軌	-	-	-31.86	顯著	顯著
165	高市 RS120	US-3	降軌	-	-	-13.97	緩慢	緩慢
166	高市 RS121	US	降軌	-	-	-	-	-
167	高市 RS122	US	降軌	-	-	-4.34	無明顯	無明顯
168	高市 RS123	US	升軌	-0.16	無明顯	-	-	無明顯
169	高市 RS124	US	降軌	-	-	6.94	無明顯	無明顯
170	高市 RS125	US	降軌	-	-	4.63	無明顯	無明顯
171	高市 RS126	US	升軌	-2.58	無明顯	-	-	無明顯
172	高市 RS127	US	降軌	-	-	8.54	無明顯	無明顯
173	高市 RS128	US	降軌	-25.26	顯著	1.75	無明顯	無明顯
174	高市 RS129	US	降軌	-	-	-15.03	緩慢	緩慢
175	高市 RS130	US	降軌	-	-	0.84	無明顯	無明顯
176	高市 RS131	US	升軌	-1.95	無明顯	7.80	無明顯	無明顯
177	高市 RS132	US	升軌	-17.97	緩慢	-	-	緩慢
178	高市 RS133	US	降軌	-	-	-7.50	緩慢	緩慢
179	高市 RS134	US	降軌	-	-	-5.48	無明顯	無明顯
180	高市 RS135	US	升軌	-7.45	緩慢	-	-	緩慢
181	高市 RS136	US-5	升軌	-21.85	緩慢	-	-	緩慢
182	高市 RS136	US-2	升軌	-10.40	緩慢	-	-	緩慢
183	高市 RS136	US-4	升軌	1.10	無明顯	-	-	無明顯
184	高市 RS136	US-1	升軌	-4.72	無明顯	-	-	無明顯
185	高市 RS136	US-3	升軌	5.70	無明顯	-	-	無明顯
186	高市 RS137	US	降軌	-	-	-29.96	顯著	顯著
187	高市 RS138	US	降軌	-	-	-7.75	緩慢	緩慢
188	高市 RS139	US	降軌	-	-	-5.09	無明顯	無明顯
189	高市 RS140	US	降軌	-	-	-5.63	無明顯	無明顯
190	高市 RS141	US	降軌	-	-	-7.34	緩慢	緩慢
191	高市 RS142	US	降軌	-	-	-28.30	顯著	顯著
192	高市 RS143	US-1	升軌	-1.41	無明顯	-	-	無明顯
193	高市 RS143	US-2	升軌	-9.66	緩慢	-	-	緩慢
194	高市 RS144	US	升軌	-7.27	緩慢	-	-	緩慢
195	高市 RS145	US	升軌	-21.74	緩慢	-	-	緩慢
196	高市 RS146	US	升軌	-13.47	緩慢	-	-	緩慢
197	高市 RS147	US	升軌	-0.49	無明顯	-	-	無明顯
198	高市 RS148	US-2	雙軌	1.19	無明顯	-	-	無明顯
199	高市 RS148	US-3	雙軌	-	-	2.52	無明顯	無明顯

表 4-6 113-114 年殘坡InSAR變位分級表(5/5)

編號	殘坡編號	子殘坡	適合軌道	升軌變形速度 (mm/yr)	降軌變形速度 (mm/yr)	升軌分級	降軌分級	綜合分級
200	高市 RS148	US-1	雙軌	-9.43	緩慢	-3.02	無明顯	緩慢
201	高市 RS148	US-4	雙軌	-10.33	緩慢	-4.67	無明顯	緩慢

高市 RS059 殘坡套疊InSAR敏感度指標後如圖 4-5 所示，此殘坡坡面向東，適合升軌進行觀測，113-114 年Sentinel-1升軌成果如圖 4-6 所示，原始此殘坡LOS方向變形速度約為-2 cm/yr，經投影轉換後變形速度量級約大於 -3 至 -5 公分，活動性分級為明顯。

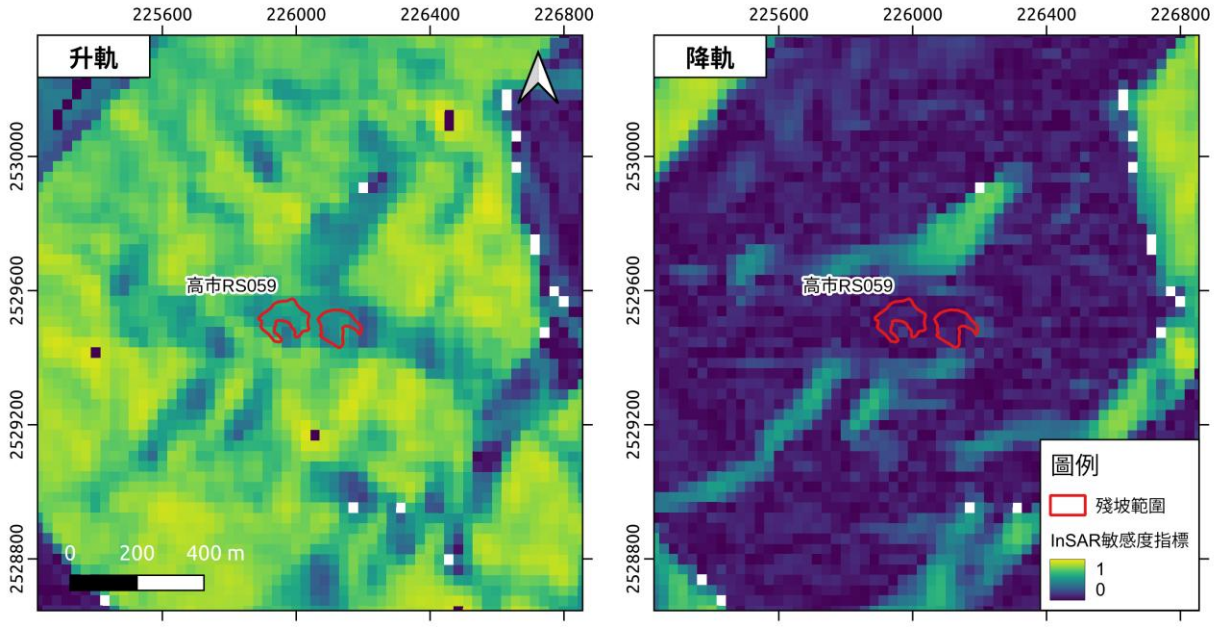


圖 4-5 高市 RS059 殘坡 InSAR 敏感度圖

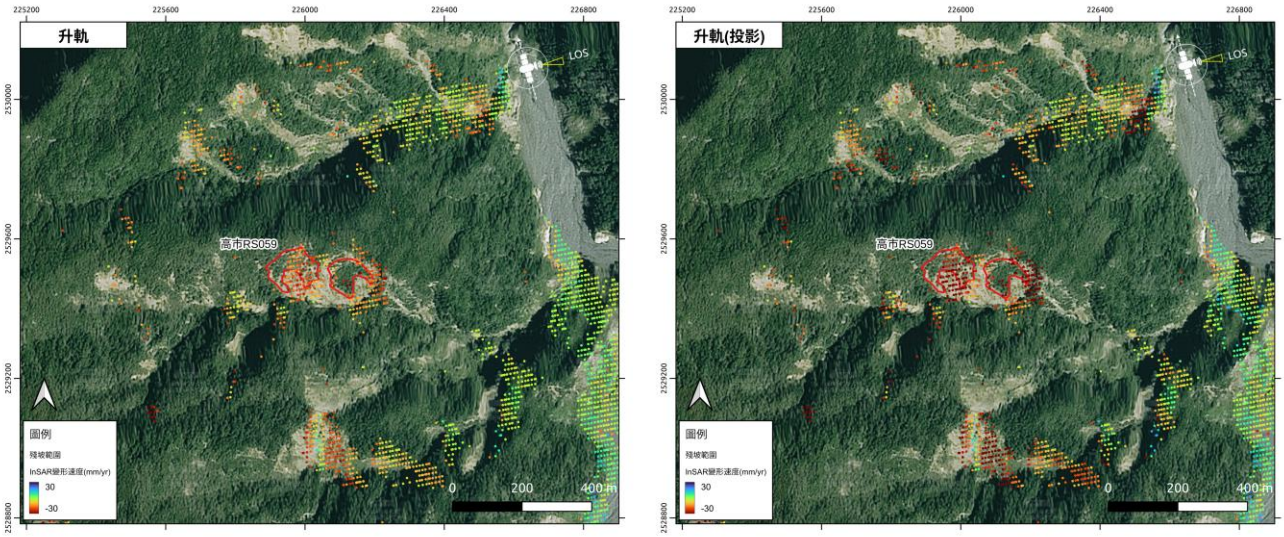


圖 4-6 高市 RS059 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖

高市 RS060 殘坡套疊 InSAR 敏感度指標後如圖 4-7 所示，此殘坡坡面向南，本計畫選擇升軌進行觀測，113-114 年 Sentinel-1 升軌成果如圖 4-8 所示，原始成果顯示此殘坡下邊坡區域近年持續進行掏刷，變形速度約有 -1至-2 cm/yr，經投影過後變形速度則些微放大至-3 至-4 cm/yr左右的變形量級，活動性分級為明顯。

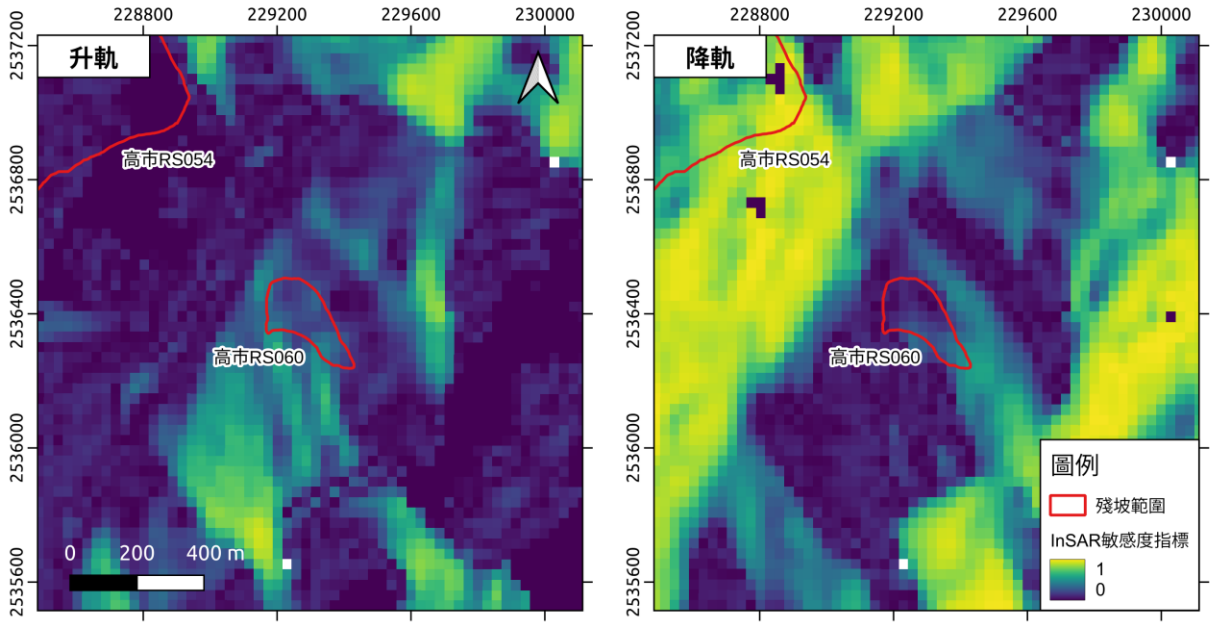


圖 4-7 高市 RS060 殘坡 InSAR 敏感度圖

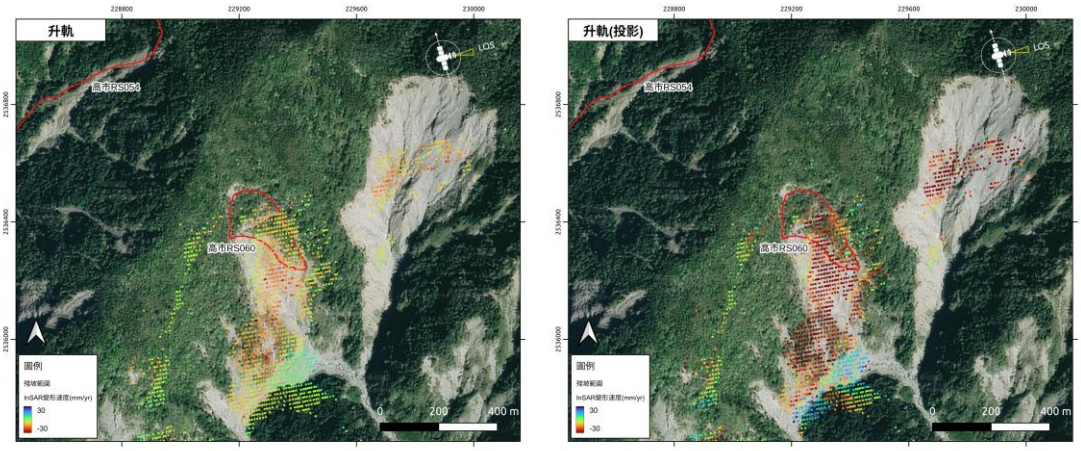


圖 4-8 高市 RS060 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖

高市 RS114 殘坡套疊 InSAR 敏感度指標後如圖 4-9 所示，此殘坡坡面向南，本計畫選擇與鄰近殘坡一致的降軌進行觀測，113-114 年 Sentinel-1 升軌成果如圖 4-10 所示，原始成果顯示此殘坡整個坡面均有沉陷 InSAR 觀測點坐落，絕大部分為-2.5 cm/yr以上的觀測點，未投影前即為活動性明顯。而投影過後多變形速度放大至-6 至-8 cm/yr，說明此殘坡近期活動性明顯。

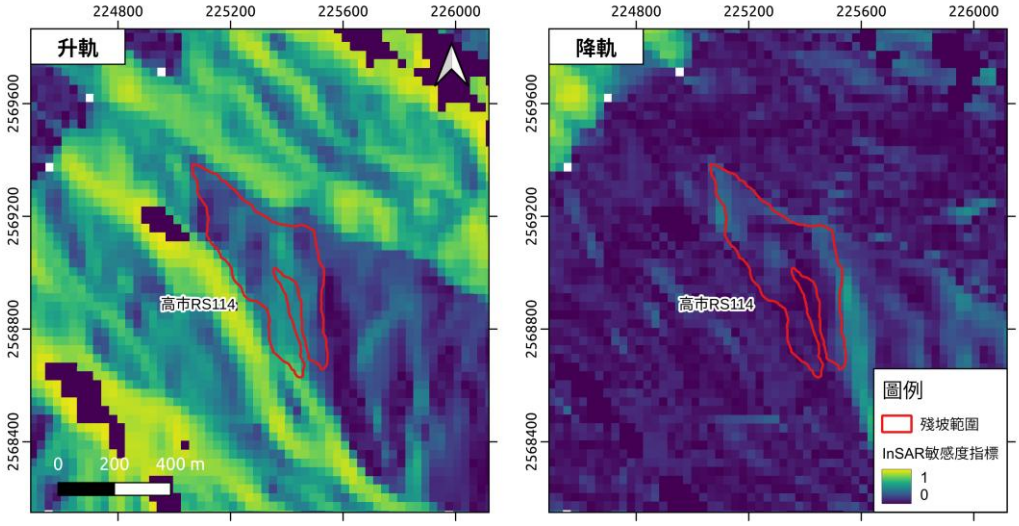


圖 4-9 高市 RS114 殘坡 InSAR 敏感度圖

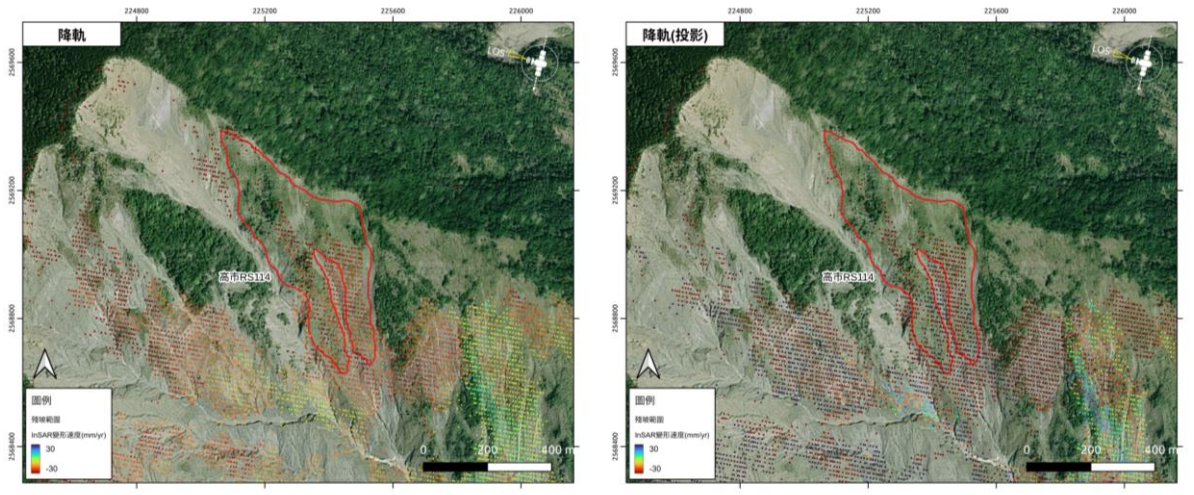


圖 4-10 高市 RS114 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖

高市 RS115 殘坡套疊 InSAR 敏感度指標後如圖 4-11 所示，此殘坡坡面向西南，選擇降軌進行觀測，113-114 年 Sentinel-1 降軌成果如圖 4-12 所示，原始成果顯示此殘坡整個坡面均為沉陷 InSAR 觀測點坐落，整個坡面活動性均為明顯，平均變形速度達-3 cm/yr以上，經過投影轉換後，整個坡面平均速度提升至-4 cm/yr，活動性分級為明顯。其餘此殘坡西側區域也有同樣變形趨勢，說明布唐布那斯溪集水區北側邊坡活動性近期均較高。

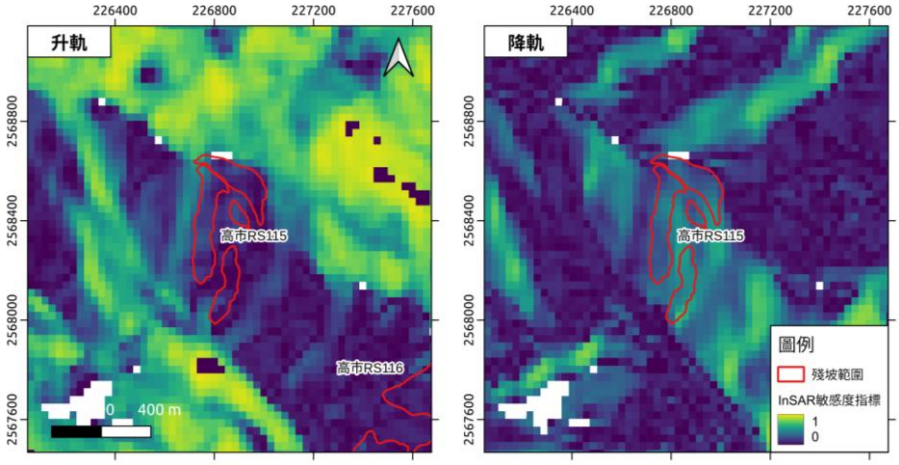


圖 4-11 高市 RS115 殘坡 InSAR 敏感度圖

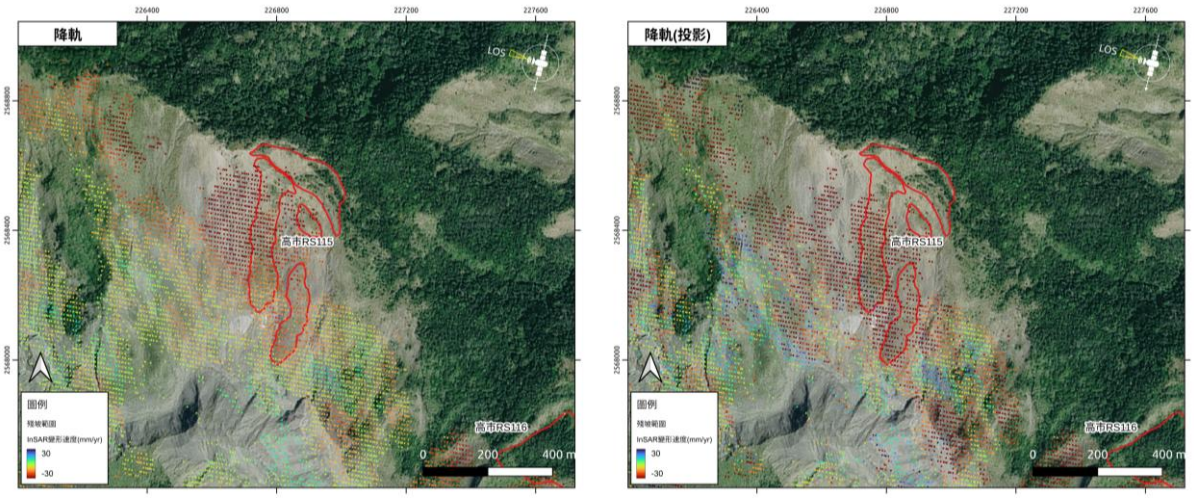


圖 4-12 高市 RS115 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖

高市 RS116 殘坡套疊InSAR敏感度指標後如圖 4-13 所示，此殘坡坡面向西南，選擇降軌進行觀測，113-114 年 Sentinel-1 降軌成果如圖 4-14 所示，原始成果顯示此殘坡主要活動區域位於坡面中段位置，變形速度約為-2 cm/yr。因主要活動區與上邊坡塊體重疊較多，此殘坡活動性高區域主要為上邊坡區域，投影後變形速度平均可達 -3 cm/yr，活動性分級為明顯，下邊坡塊體平均約為-1.5 mm/yr，活動性分級為緩慢。

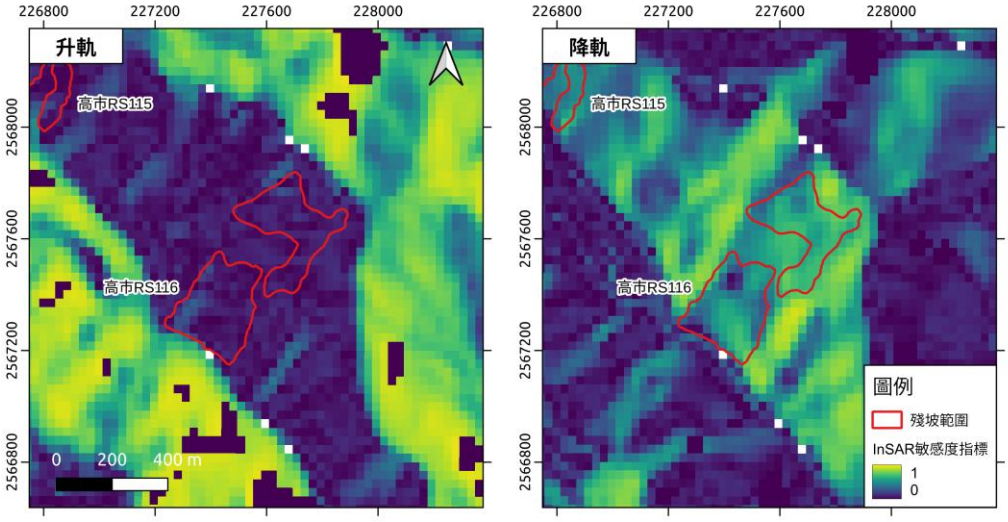


圖 4-13 高市 RS116 殘坡 InSAR 敏感度圖

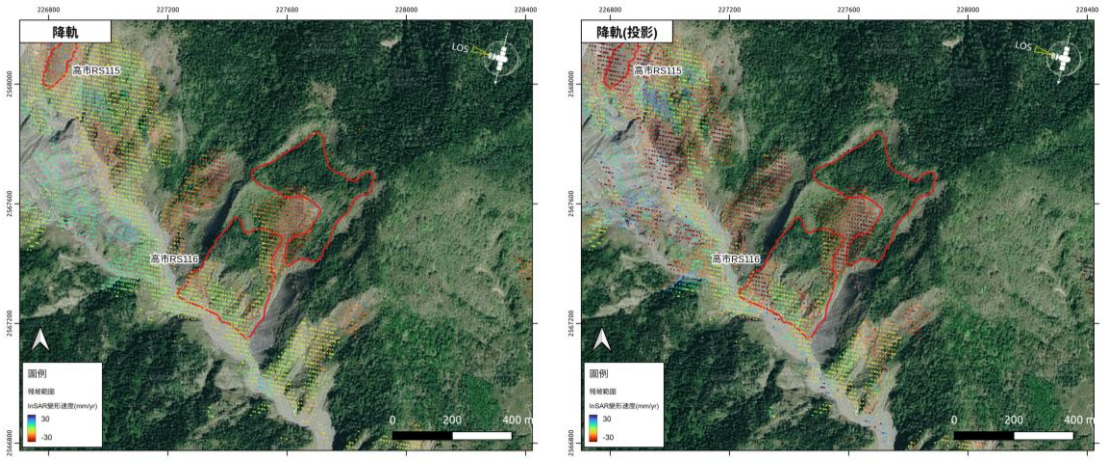


圖 4-14 高市 RS116 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖

高市 RS120 殘坡套疊 InSAR 敏感度指標後如圖 4-15 所示，此殘坡坡面向西南，選擇降軌進行觀測。113-114 年 Sentinel-1 降軌成果如圖 4-16 所示，原始成果顯示本邊坡活動區域主要與整個崩塌地重合，變形速度約為-1 cm/yr，投影過後則約為-2 cm/yr。此殘坡主要是快速變形觀測點於坡頂位置與殘坡重合，故活動性分級為明顯，其餘坡面位置平均變形速度，則均有到達活動性緩慢之量級，也因此崩塌地面積範圍較大，故於內文先行說明。

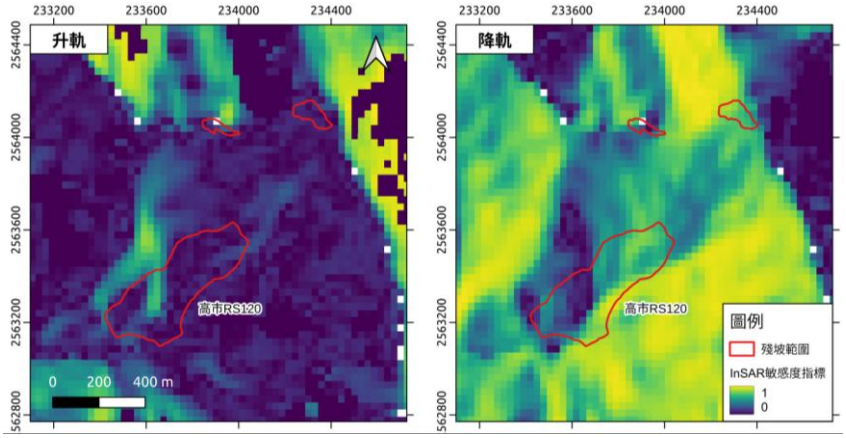


圖 4-15 高市 RS120 殘坡 InSAR 敏感度圖

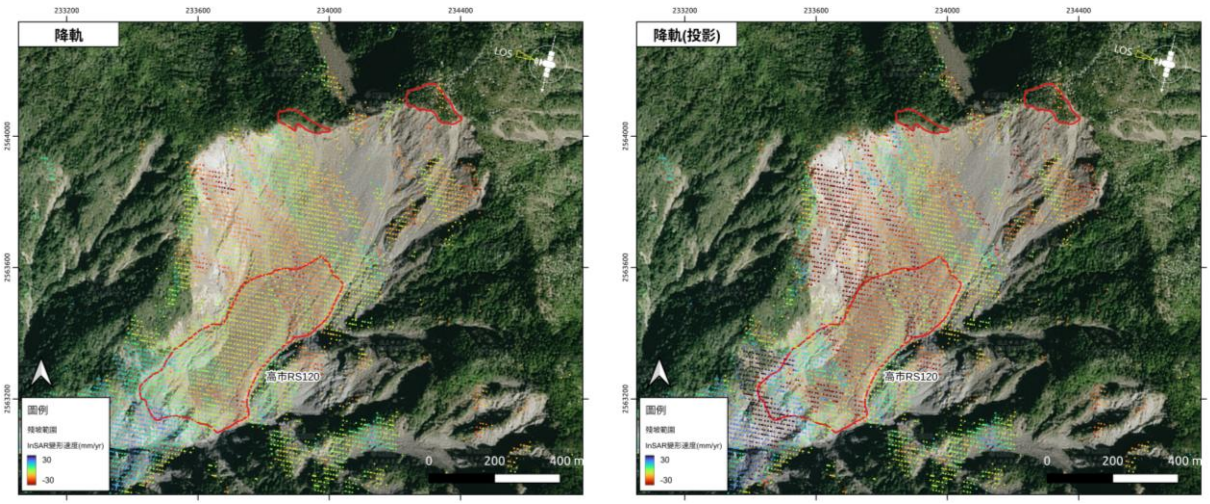


圖 4-16 高市 RS120 殘坡 Sentinel-1 113-114 年地表變形速度圖

經查本署提供之 GNSS(或GPS)地表形變數據觀測區域主要位於潛在大規模崩塌區，並無涵蓋本計畫殘坡區域，為驗證本計畫產製圖資之合理性，挑選與本計畫產製 InSAR 觀測點重疊之殘坡與內政部提供合成孔徑雷達影像產製臺灣本島地表形變分析成果進行套疊比對，如高市 RS076 殘坡(圖 4-17)及高市 RS083 殘坡圖 4-19)所示，如此二個面積較大之殘坡，本計畫與內政部圖資均有 InSAR 觀測點坐落，儘管兩者時間段並不相同，惟 2024 年具有部分區間重疊。圖 4-17 顯示兩成果均顯示高市 RS076 殘坡坡面主要為穩定狀態，於圖 4-18 時間序列變形量也均顯示暫為穩定，重疊區間段變形趨勢相同。高市 RS083 殘坡成果(圖 4-19)中內政部 PS-InSAR 成果顯示下邊坡塊體近年來也均顯示穩定狀態，與本計畫產製成果相似，且重疊時間序列區間趨勢也相同為平穩狀態，說明本計畫與內政部 PS-InSAR 成果有一定的相似程度。

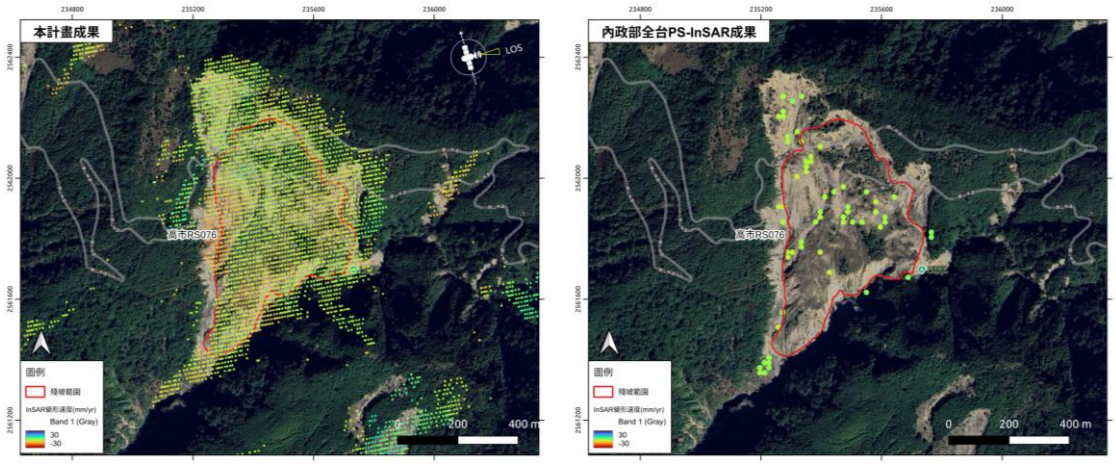


圖 4-17 高市 RS076 殘坡本計畫與內政部 PS-InSARA 成果地表變形速度圖

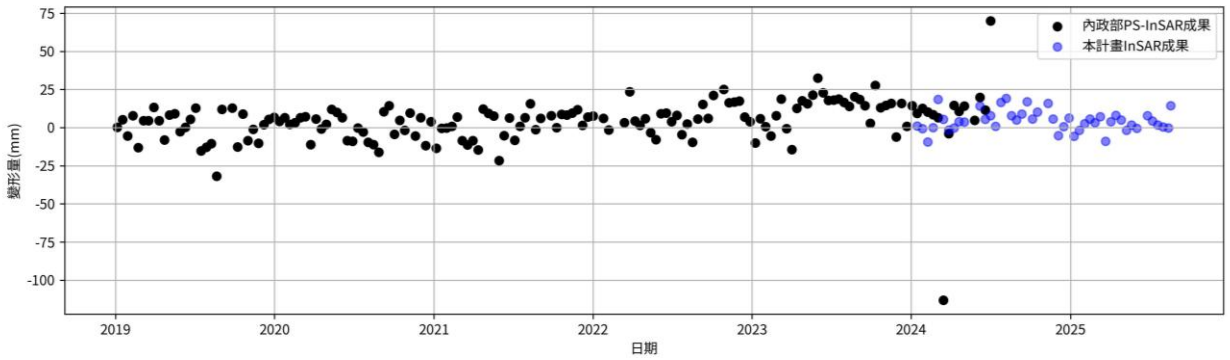


圖 4-18 高市 RS076 殘坡本計畫與內政部成果時間序列變形圖

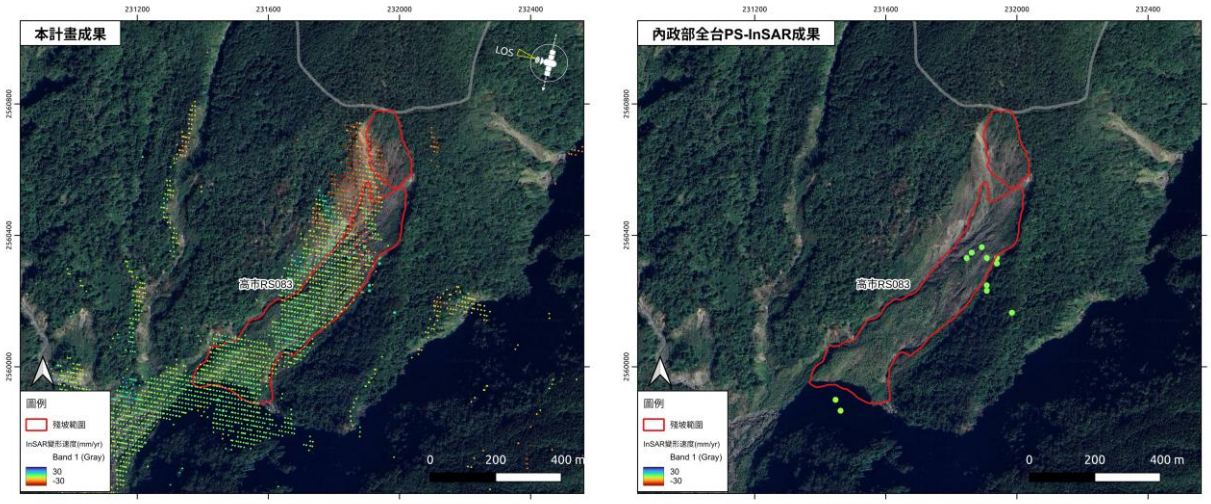


圖 4-19 高市 RS083 殘坡本計畫與內政部 PS-InSARA 成果地表變形速度圖

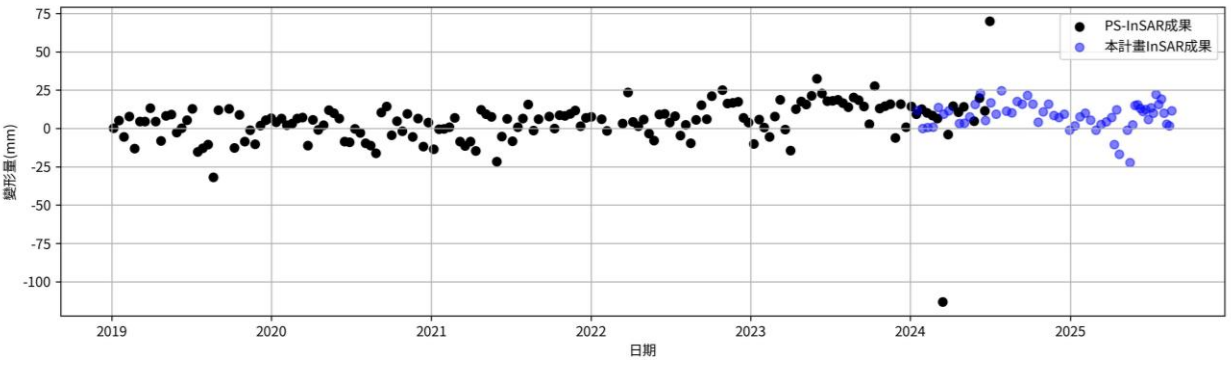
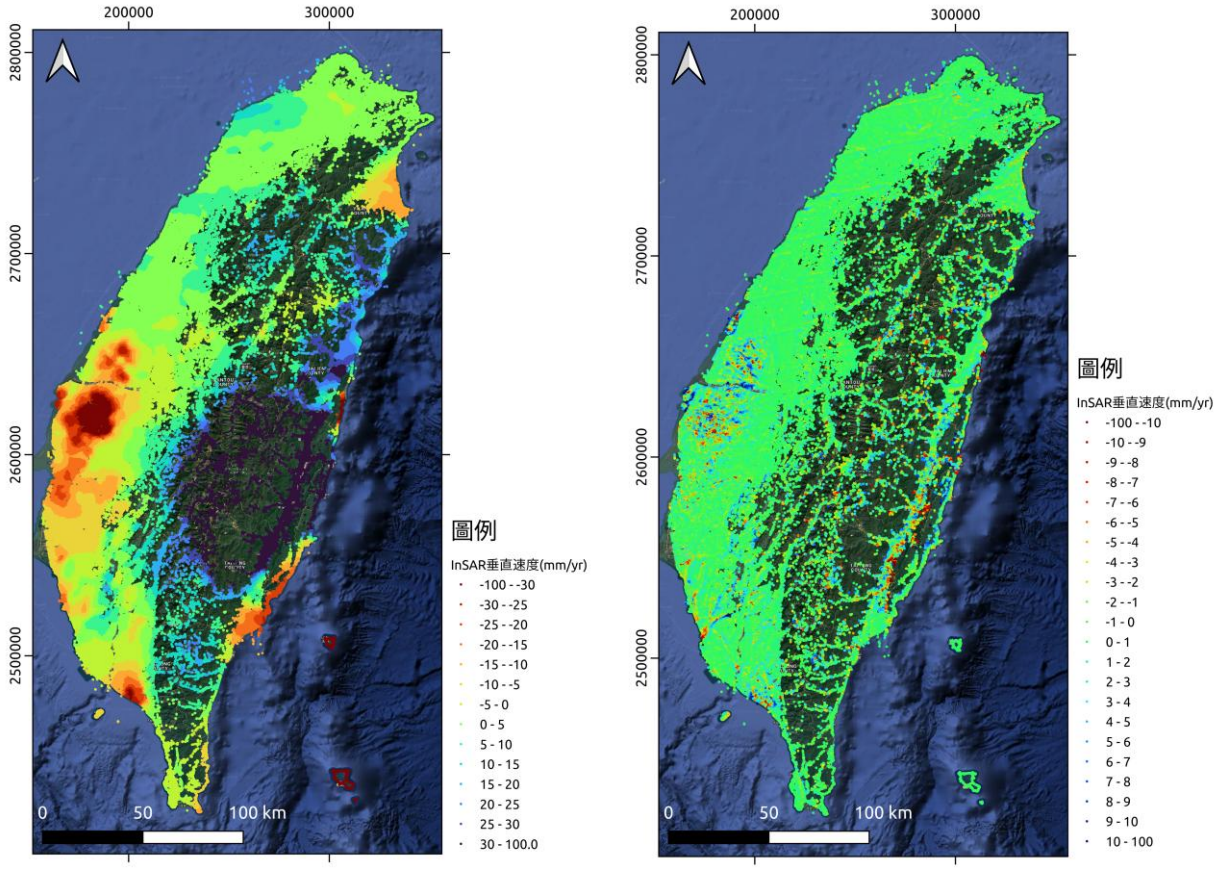


圖 4-20 高市 RS083 殘坡本計畫與內政部成果時間序列變形圖

第二節 山坡地鐵公路之高位移活動區位評估

本工項將依據內政部提供合成孔徑雷達影像產製臺灣本島地表形變分析成果，協助貴署加值分析山坡地的鐵公路之高位移活動區位。目前得知內政部提供之全台 InSAR 網格式分析成果，使用 Sentinel-1 A/B C 波段雷達影像，資料分析時間 2019 至 2024 年，分為視衛星方向及垂直方向變形成果，如圖 4-21(a)所示。本資料分析成果涵蓋全台本島區域，包含山區及平原區，本計畫將協助貴署進行資料處理，篩選山坡地範圍與鐵公路相關之變形熱區，以了解近期之潛在致災區域。因網格式資料於 GIS 分析時較難操作，本計畫轉換成向量格式，並以點圖徵形式呈現，並將時間序列資料儲存於各 PS 點的屬性資料內，以利於後續萃取時間序列累積變形量。此外，內政部提供之變形速度，為已經過 GNSS 連續站校正過後之成果，故變形速度為 GNSS 座標框架下，成果反應為台灣本島地殼構造運動之情形，如圖 4-21(a)內雲林地區明顯地層下陷區、台灣本島中央山脈區域大範圍抬升等現象，如欲直接採用此成果進行小範圍的鐵公路套疊，則無法實際反應出地表現況，在無外部參考資料可扣除構造運動的情況下，本計畫參考 Bekaert et al.(2020)的進行局部濾波處理的方式，扣除明顯區域大範圍變形，將每個 PS 點的時間序列的每日變形量，扣除每個點周圍兩公里內範圍內所有 PS 點位的該日平均變形量，最後使用後處理過後的時間序列變形量重新進行線性回歸，萃取最終各 PS 點變形情形，此方式變形量所代表意義為相對周遭兩公里內的相對變形，可較為良好對應反應小範

圍實際之變形，後處理過後之成果如圖 4-21(b)所示。



(a) 原始資料　　(b)去除背景值

圖 4-21 臺灣本島 2019-2024 年地表垂直形變平均速度圖(內政部)

本計畫交選公路、鐵路及不安定土砂極高潛勢集水區進行套疊分析，將具有較顯著變形區域進行說明，其餘相關鐵公路及集水區部分，因點位較為稀疏且並無明確 InSAR 觀測點群聚，收錄於附錄三。公路部分，挑選清境地區台 14 線甲線里程7K週緣區域，可發現一明顯較大之沉陷熱區，如圖 4-22 所示，紅色區域代表地表沉陷，此區域相比於廣域其他 PS 點，具有 5-8 mm/yr的垂直沉陷量，時間序列也顯示具有歷史滑移跡象，累計 5 年則達 40 mm以上沉陷量，可做為初判滑移塊體活動性之依據。

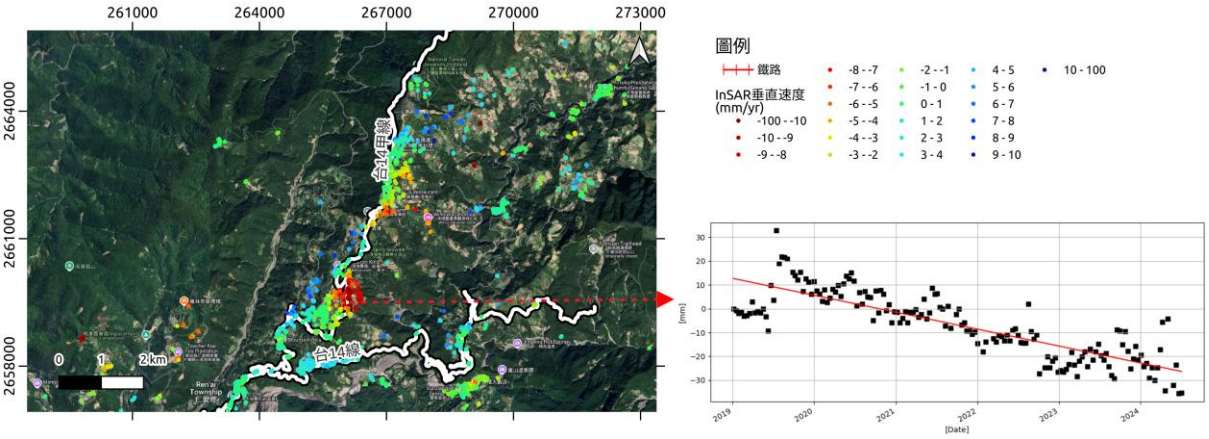


圖 4-22 清境地區 2018-2022 年地表垂直形變平均速度圖(內政部)

鐵路部分，本計畫初步挑選阿里山森林鐵路作為展示，如圖 4-23所示，沿線聚落皆有些許 PS 點坐落，惟分布較為稀疏，且並無明顯沉陷區域顯示。

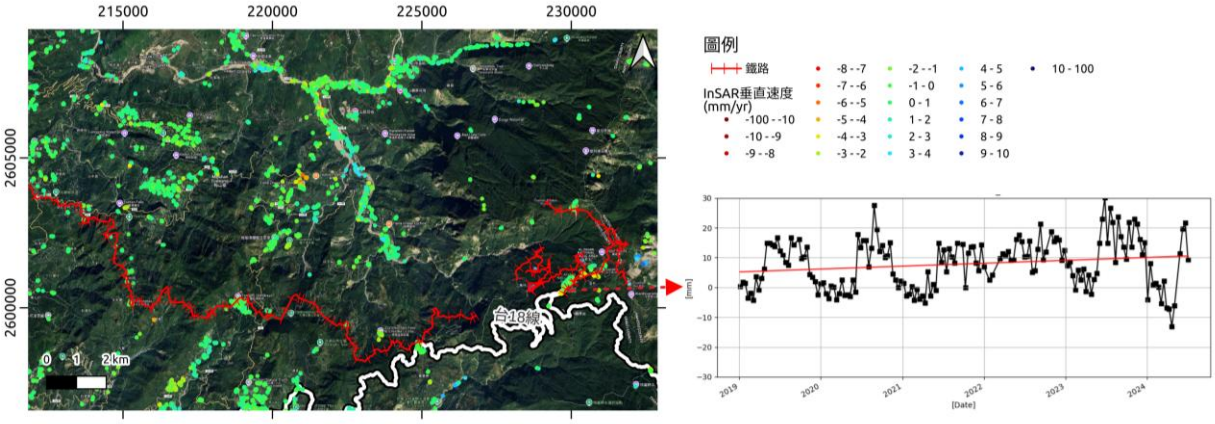


圖 4-23 阿里山森林鐵路 2019-2024 年地表垂直形變平均速度圖(內政部)

本計畫另套疊 114 年不安定土集水區圖層，挑選極高潛勢集水區，且具有明顯沉陷區域，良里溪如圖 4-24 所示，其支流上游段有一明顯沉陷群聚點位，變形速度約為-8.5 mm/yr。

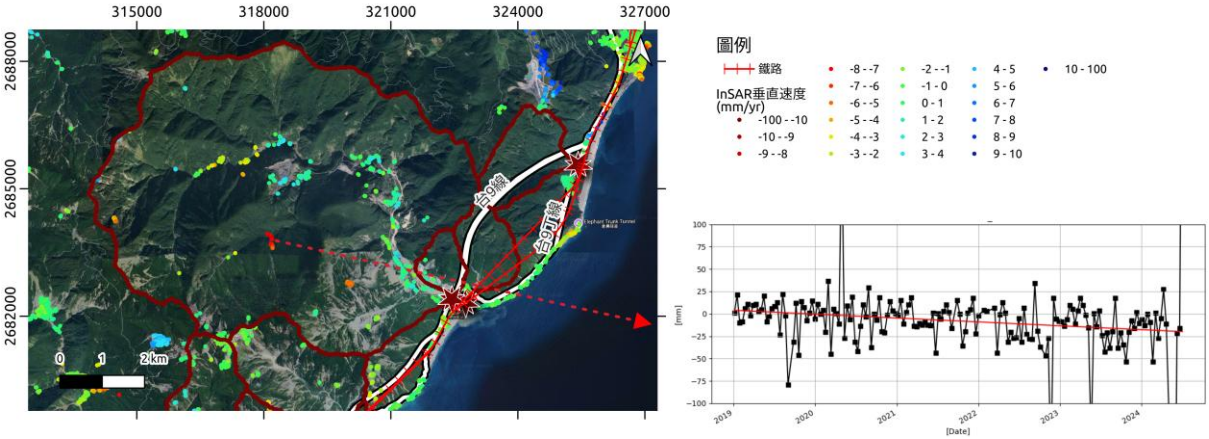


圖 4-24 良里溪 2019-2024 年地表垂直形變平均速度圖(內政部)

本計畫另將內政部 InSAR 成果套疊 334 處經盤點與鐵公路重疊之大規模崩塌，以評估大規模崩塌影響鐵公路之活動性分析，將各大規模崩塌點位內進行地表變形平均，依照不存在永久散射體、無明顯地表變形(>-2 mm/yr)、緩慢地表變形(-2~-10 mm/yr)、明顯地表變形 (-10~-35 mm/yr)。極明顯地表變形(<-35 mm/yr)五個等級，並進行統計各類別之數量，不存在永久散射體為 193 處、無明顯變形為 122 處、緩慢地形變形為 19 處，緩慢地形變形之 19 處大規模崩塌編號詳列於表 4-7。

表 4-7 具緩慢變形類別大規模崩塌表

類別	大規模崩塌編號
緩慢地形變形	南投縣-仁愛鄉-D001,南投縣-仁愛鄉-D049,南投縣-仁愛鄉-D057,南投縣-仁愛鄉-D063,南投縣-仁愛鄉-D132,南投縣-仁愛鄉-D200,南投縣-仁愛鄉-D781,宜蘭縣-大同鄉-D007,宜蘭縣-大同鄉-D066,宜蘭縣-蘇澳鎮-D003,桃園市-復興區-D049,臺中市-和平區-D028,臺中市-和平區-D344,臺東縣-卑南鄉-D041,臺東縣-太麻里鄉-D025,臺東縣-太麻里鄉-D040,臺東縣-太麻里鄉-D062,花蓮縣-秀林鄉-D402,花蓮縣-豐濱鄉-D018

第三節 雷達波變異偵測產製地貌變遷圖及廣域快篩分析

本計畫擬運用 Sentinel-1 SAR 影像就114年度豪雨引致區域型崩塌災害事件，製作雷達波變異偵測產製地貌變遷圖及廣域快篩分析報告，以彌補無雲光學影像未取得前之土砂災害空間分布掌握(至少分析一期，如無颱風事件，則由本署同意之降雨事件評估)，提供本署或分署防災決策參考。內容須包含鐵路、公路、土石流潛勢溪流與不安定土砂集水區套疊之成果說明。

目前常見之雷達變異偵測分析方法，主要透過事件前後影像之地表反射強度差異進行偵測，可使用前後影相減，或計算後向散射歸一化指標(NDSI)等方式計算出差異後，取合適之門檻值進行萃取強度變化較大之區域。本計畫將使用log ratio方法計算前後期影像差異，其公式如下(Jung & Yun, 2020)：

$$I_{ratio} = 10 \times \log_{10}\left(\frac{I_{pre}}{I_{post}}\right) \quad (4\text{-}3)$$

其中I_{ratio}為事件前後的影像變化程度，I_{pre} 為事件前影像強度，I_{post} 為事件後影像強度，而如果影像單位為 dB 時，則等同I_{pre}-I_{post}。計算完後，統計像幅內I_{ratio}值，並取 95 或 99 分位之數值做為門檻值後，萃取變異區域。雜訊濾除原則為濾除河道土砂、平地與受地形幾何扭曲影響之視域，並保留面積>1 公頃之變遷熱區。

一、2025年丹娜絲颱風、薇帕颱風

本計畫於 114 年 7 月 21 日通知啟動遙測判釋工作，針對丹娜絲颱風(2025/7/4-7/9)、薇帕颱風(2025/7/17-7/21)後潛在崩塌地之雷達變異偵測，本計畫採用 Sentinel-1 升軌(2025/06/14(災前)、2025/07/20(災後))及降軌(2025/06/28(災前)、2025/07/22(災後))為像對進行變異分析，並整合於圖 4-25，其中最為顯著之變異區包含雲林草嶺清水溪堰塞湖(已溢流)、花蓮馬鞍溪堰塞湖及蓮縣卓溪鄉樂樂溪堰塞壩(已溢流)。其中目前最主要關注為花蓮馬鞍溪堰塞湖，如圖 4-26 所示，馬鞍溪上游堰塞湖距下游最近聚落為萬榮鄉明利村馬太鞍部落，沿河道量測約 15 公里，並於 114 年 9 月 23 日開始溢流。其餘偵測出之崩塌地，則彙整於表 4-8，本計畫已於 114 年 7 月 28 日函送相關崩塌地判釋圖資、彙整表格等相關成果於農業部農村發展及水土保持署減災監測組(文號：創字第 1140003034 號)。



圖 4-25 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風雷達變異區整合結果

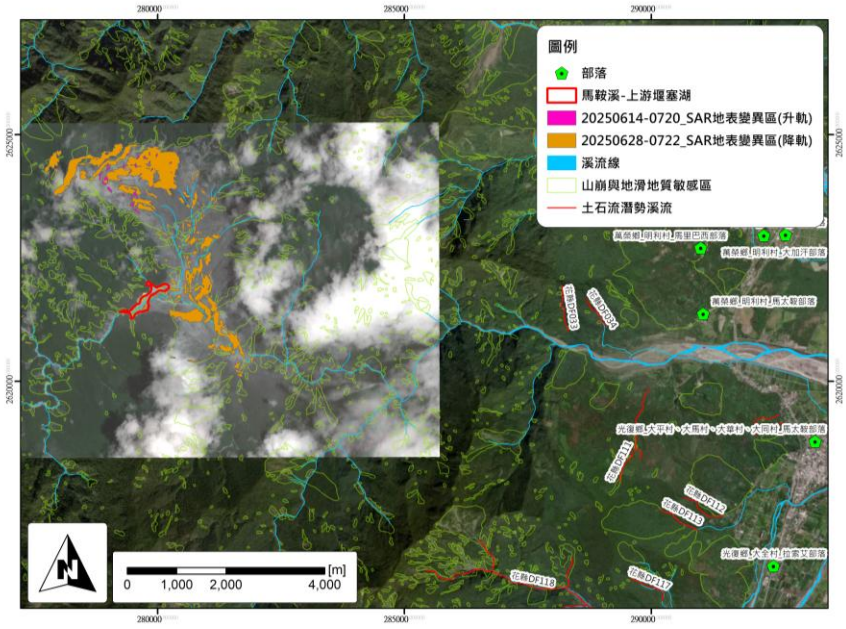


圖 4-26 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風升降軌影像變異區馬太鞍溪堰塞湖變異分析

表 4-8 2025年丹娜絲颱風、薇帕颱風升降軌影像變異判識災點

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積(ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
1	南投縣	信義鄉	望美村	1.24	232693.296	2608256.284	-	-	Sentinel-1	20250614	Sentinel-1	20250720
2	台東縣	延平鄉	紅葉村	1.17	254701.491	2529653.737	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250710
3	台東縣	金峰鄉	歷坵村	1.22	242139.689	2498544.843	-	山坡地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250710
4	台東縣	達仁鄉	新化村	1.42	230038.867	2474542.461	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250710
5	屏東縣	霧台鄉	大武村	1.40	229286.069	2516415.284	-	保安林	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250710
6	屏東縣	三地門鄉	達來村	1.40	217423.238	2511370.066	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250710
7	花蓮縣	卓溪鄉	卓溪村	3.11	265793.591	2586906.203	-	林班地	Sentinel-1	20250614	Sentinel-1	20250720
8	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	1.14	266885.785	2586335.078	-	林班地	Sentinel-1	20250614	Sentinel-1	20250720
9	花蓮縣	卓溪鄉	卓溪村	1.69	264815.976	2587064.664	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
10	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	5.72	277893.4	2624471.428	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
11	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	2.62	279738.248	2623521.05	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
12	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	24.59	278547.375	2624366.276	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
13	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	43.04	281052.854	2621544.76	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
14	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	1.43	280611.73	2622435.252	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
15	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	2.41	281017.757	2622483.099	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
16	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	2.04	280747.494	2623672.764	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
17	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	11.32	279010.104	2624425.436	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
18	花蓮縣	萬榮鄉	馬遠村	12.04	280628.842	2621333.982	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積(ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
19	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	3.87	280995.515	2622813.66	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
20	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	1.52	280713.443	2622848.268	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
21	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	4.03	279698.221	2623621.97	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
22	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	5.69	279433.624	2623882.606	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
23	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	71.12	279852.225	2624306.83	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
24	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	1.24	279865.949	2623795.568	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
25	花蓮縣	萬榮鄉	馬遠村	2.50	281378.78	2620665.348	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
26	花蓮縣	萬榮鄉	馬遠村	1.01	281090.383	2620711.909	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
27	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	1.23	281191.593	2622939.309	-	林班地	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250722
28	雲林縣	古坑鄉	草嶺村	3.77	216337.034	2608762.814	-	保安林	Sentinel-1	20250628	Sentinel-1	20250710

二、2025年0728-0801豪雨事件

本計畫於 114 年 7 月 31 日通知啟動遙測判釋工作，針對 0728 豪雨事件後潛在崩塌地之雷達變異偵測，本計畫採用 Sentinel-1 升軌(2025/07/20 (災前)、2025/08/01 (災後))及降軌(2025/07/22 (災前)、2025/08/03 (災後))及 ALOS-2(2025/06/08(災前)、2025/08/03(災後))為像對進行變異分析，並整合於圖 4-27，主要變異熱區落於台灣南部高屏溪流域、東部卑南溪、花蓮溪與秀姑巒溪。變異熱區面積>2 ha者，僅有已知之馬鞍溪上游崩塌地與寶來溪中游殘坡(編號:高市 RS078、高市 RS079)。圖 4-28 為馬鞍溪上游崩塌地分析成果，因於今年 7 月 21 日以後發生崩塌，故於前次升軌類別變異成果並無偵測大面積變化，而於本次分析則可見大範圍地表變異,且與崩塌地輪廓相吻合,而 ALOS-2 影像也於本區域偵測出同像變異。圖 4-29 顯示高市 RS078 殘坡於各類影像均有分析出變異,寶來溪變異區因變異區面積較大(~14 ha)，且位於兩野溪支流匯流口，建議持續評估堰塞湖形成可能性。其餘偵測出之崩塌地，則彙整於表 4-9。本計畫已於 114 年 8 月 11 日函送相關崩塌地判釋圖資、彙整表格等相關成果於農業部農村發展及水土保持署減災監測組(文號：創字第 1140003295 號)。

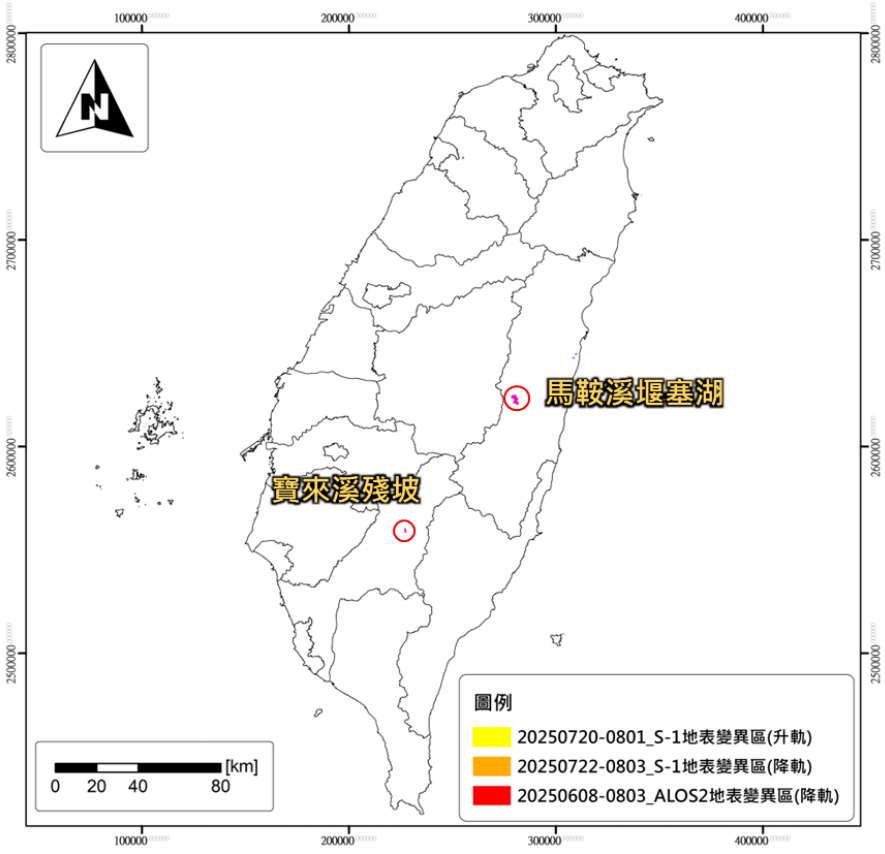


圖 4-27 2025年0728-0801豪雨事件雷達變異區整合結果

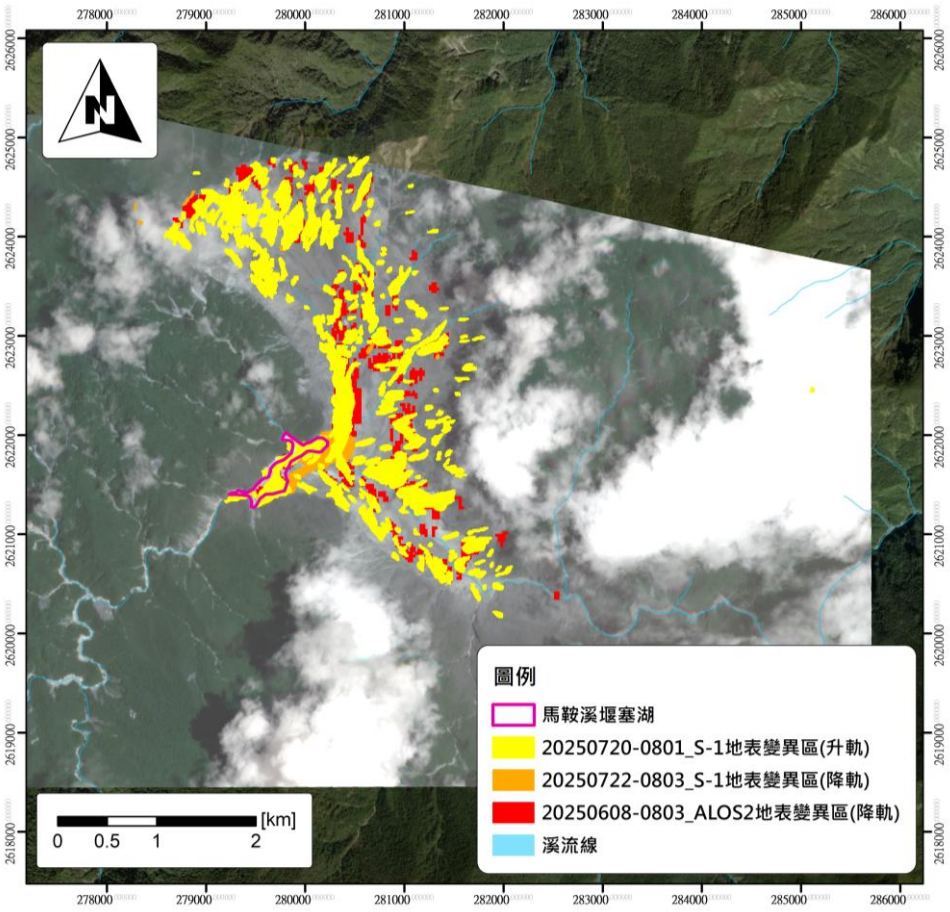


圖 4-28 2025 年 0728-0801 豪雨事件變異區馬太鞍溪堰塞湖變異分析

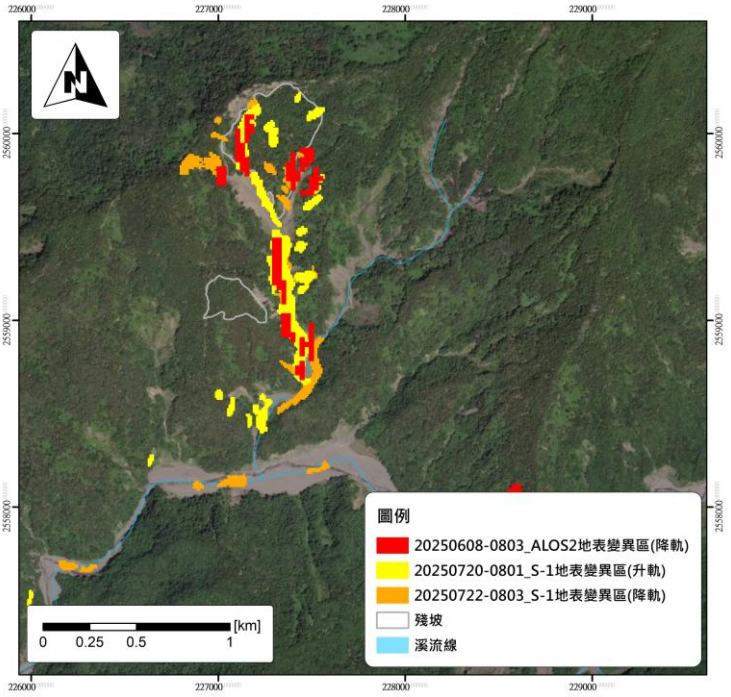


圖 4-29 2025 年 0728-0801 豪雨事件變異區高市 RS078 殘坡變異分析

表 4-9 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風升降軌影像變異判識災點

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積 (ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
1	台東縣	延平鄉	紅葉村	2.56	242268.792	2527186.429	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
2	台東縣	延平鄉	紅葉村	0.18	250583.191	2526968.709	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
3	台東縣	延平鄉	紅葉村	0.17	241771.951	2537620.968	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
4	台東縣	延平鄉	紅葉村	2.49	242231.871	2527197.248	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
5	台東縣	延平鄉	紅葉村	0.17	241771.951	2537620.968	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
6	嘉義縣	梅山鄉	瑞峰村	1.39	216390.675	2608243.278	-	-	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
7	嘉義縣	竹崎鄉	緞繻村	0.19	209868.968	2605155.753	-	山坡地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
8	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.12	232810.178	2525765.321	-	保安林	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
9	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.18	232687.848	2525778.468	-	保安林	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
10	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.45	230038.086	2518843.714	-	保安林	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
11	屏東縣	三地門鄉	大社村	1.01	218014.136	2527025.757	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
12	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.17	227872.349	2515933.776	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
13	屏東縣	霧台鄉	佳暮村	0.20	223428.14	2518775.962	-	山坡地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
14	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.87	228144.467	2521823.673	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
15	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.13	231666.442	2524106.891	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
16	屏東縣	霧台鄉	阿禮村	0.15	235496.667	2516568.645	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
17	屏東縣	霧台鄉	佳暮村	1.13	223539.916	2518372.401	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
18	屏東縣	霧台鄉	大武村	1.67	224422.686	2517624.579	-	-	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積(ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
19	屏東縣	三地門鄉	大社村	0.11	219078.291	2524463.643	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
20	屏東縣	三地門鄉	大社村	0.39	219019.262	2524549.202	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
21	屏東縣	霧台鄉	佳暮村	1.13	223539.916	2518372.401	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
22	屏東縣	霧台鄉	佳暮村	0.25	223714.987	2518614.081	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
23	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.18	226076.605	2516747.774	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
24	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.14	226146.765	2516678.2	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
25	屏東縣	霧台鄉	大武村	1.67	224422.686	2517624.579	-	-	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
26	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.27	225543.785	2516904.259	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
27	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.17	226086.964	2516588.212	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
28	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.61	226292.133	2516475.625	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
29	屏東縣	霧台鄉	阿禮村	0.28	230487.063	2517314.263	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
30	屏東縣	霧台鄉	阿禮村	0.11	232191.827	2516984.748	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
31	屏東縣	霧台鄉	大武村	0.17	232211.49	2519772.387	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
32	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	200.70	280375.593	2622776.067	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
33	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.21	268121.834	2585268.82	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
34	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.59	266064.892	2585389.347	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
35	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.16	269706.488	2584140.36	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
36	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.49	267333.669	2586278.723	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積(ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
37	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.95	266880.447	2586344.949	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
38	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.43	267467.821	2586208.345	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
39	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.13	267802.441	2585711.913	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
40	花蓮縣	卓溪鄉	卓清村	0.11	267846.431	2585677.859	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
41	花蓮縣	萬榮鄉	明利村	19.17	280123.356	2621752.097	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
42	高雄市	桃源區	復興里	0.45	229804.565	2569421.296	-	山坡地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
43	高雄市	桃源區	寶山里	0.22	233684.732	2559699.408	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
44	高雄市	桃源區	寶山里	0.22	233622.236	2559683.726	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
45	高雄市	桃源區	寶山里	0.18	222726.563	2547055.031	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
46	高雄市	桃源區	寶山里	0.20	221397.416	2548155.84	-	山坡地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
47	高雄市	桃源區	寶山里	0.18	229885.822	2545470.554	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
48	高雄市	桃源區	桃源里	13.86	227323.022	2559338.772	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
49	高雄市	茂林區	多納里	1.36	220962.068	2537886.991	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
50	高雄市	茂林區	多納里	1.45	221233.436	2538352.444	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
51	高雄市	茂林區	多納里	1.60	220549.937	2535886.423	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
52	高雄市	茂林區	萬山里	1.71	218201.854	2533737.95	-	山坡地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
53	高雄市	六龜區	荖濃里	0.20	214220.139	2555215.929	高市 DF073	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
54	高雄市	甲仙區	東安里	0.49	213602.241	2554991.926	高市 DF020	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
55	高雄市	桃源區	寶山里	0.42	226378.385	2547240.07	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
56	高雄市	桃源區	寶山里	0.17	226315.508	2547108.337	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積(ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
57	高雄市	桃源區	寶山里	0.59	226184.888	2546855.048	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
58	高雄市	桃源區	寶山里	0.31	224485.654	2543413.732	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
59	高雄市	桃源區	寶山里	0.19	224401.966	2543252.904	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
60	高雄市	桃源區	寶山里	0.44	224334.981	2543206.982	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
61	高雄市	桃源區	寶山里	0.31	225548.604	2546452.945	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
62	高雄市	桃源區	寶山里	0.47	225615.639	2546541.582	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
63	高雄市	茂林區	多納里	0.83	223938.303	2539268.768	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
64	高雄市	茂林區	多納里	0.13	222643.028	2538838.418	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
65	高雄市	茂林區	多納里	0.36	220604.674	2539223.645	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
66	高雄市	桃源區	寶山里	0.29	224196.407	2543012.106	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
67	高雄市	桃源區	寶山里	0.24	223974.065	2542857.419	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
68	高雄市	茂林區	多納里	0.19	223712.855	2542415.67	-	-	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
69	高雄市	茂林區	多納里	0.11	223590.052	2542164.832	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
70	高雄市	茂林區	多納里	0.18	224781.387	2536748.449	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
71	高雄市	茂林區	多納里	1.36	220962.068	2537886.991	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
72	高雄市	茂林區	多納里	0.15	224645.737	2537582.262	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
73	高雄市	茂林區	多納里	0.75	220436.478	2537702.624	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
74	高雄市	茂林區	多納里	0.17	229901.054	2534455.87	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801
75	高雄市	茂林區	多納里	1.60	220549.937	2535886.423	-	林班地	Sentinel-1	20250720	Sentinel-1	20250801

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積(ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
76	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	0.25	219832.517	2569805.62	高市 DF069	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
77	高雄市	那瑪夏區	達卡努瓦里	0.36	224715.753	2578882.481	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
78	高雄市	六龜區	新發里	0.23	213165.034	2547372.725	高市 DF098	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
79	高雄市	美濃區	廣林里	0.15	211142.103	2540567.034	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
80	高雄市	六龜區	寶來里	0.18	222770.745	2557411.042	-	山坡地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
81	高雄市	那瑪夏區	達卡努瓦里	0.53	224968.464	2579148.526	-	保安林	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
82	高雄市	茂林區	多納里	1.11	221180.81	2535263.155	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
83	高雄市	桃源區	桃源里	7.11	227277.077	2559350.265	-	-	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
84	高雄市	甲仙區	東安里	1.70	213776.578	2555066.595	高市 DF020	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
85	高雄市	茂林區	多納里	0.17	220814.25	2537773.525	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
86	高雄市	茂林區	多納里	0.15	220908.026	2538295.028	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
87	高雄市	茂林區	多納里	0.22	221051.475	2539234.777	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
88	高雄市	茂林區	多納里	0.22	221210.99	2538949.314	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
89	高雄市	茂林區	多納里	1.11	221180.81	2535263.155	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
90	高雄市	茂林區	多納里	0.60	223463.531	2538421.846	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
91	高雄市	茂林區	多納里	0.36	222727.234	2539360.201	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
92	高雄市	茂林區	多納里	0.25	223819.229	2532277.653	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803

編號	縣市	鄉鎮區	村里	面積(ha)	x	y	土石流潛勢溪流	類別	前期影像	前期日期	後期影像	後期日期
93	高雄市	茂林區	多納里	0.15	224680.581	2532107.22	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
94	高雄市	茂林區	多納里	0.11	223829.887	2538029.382	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
95	高雄市	茂林區	多納里	0.33	225115.364	2530909.927	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
96	高雄市	茂林區	多納里	0.10	225502.554	2531743.808	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
97	高雄市	桃源區	寶山里	0.90	225763.522	2546636.54	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
98	高雄市	桃源區	寶山里	0.63	225967.458	2546933.472	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
99	高雄市	桃源區	寶山里	0.13	225893.318	2546781.99	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
100	高雄市	桃源區	寶山里	0.14	226109.526	2547173.857	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
101	高雄市	桃源區	寶山里	0.11	227107.874	2545452.23	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803
102	高雄市	桃源區	寶山里	0.18	227140.844	2545434.938	-	林班地	Sentinel-1	20250722	Sentinel-1	20250803

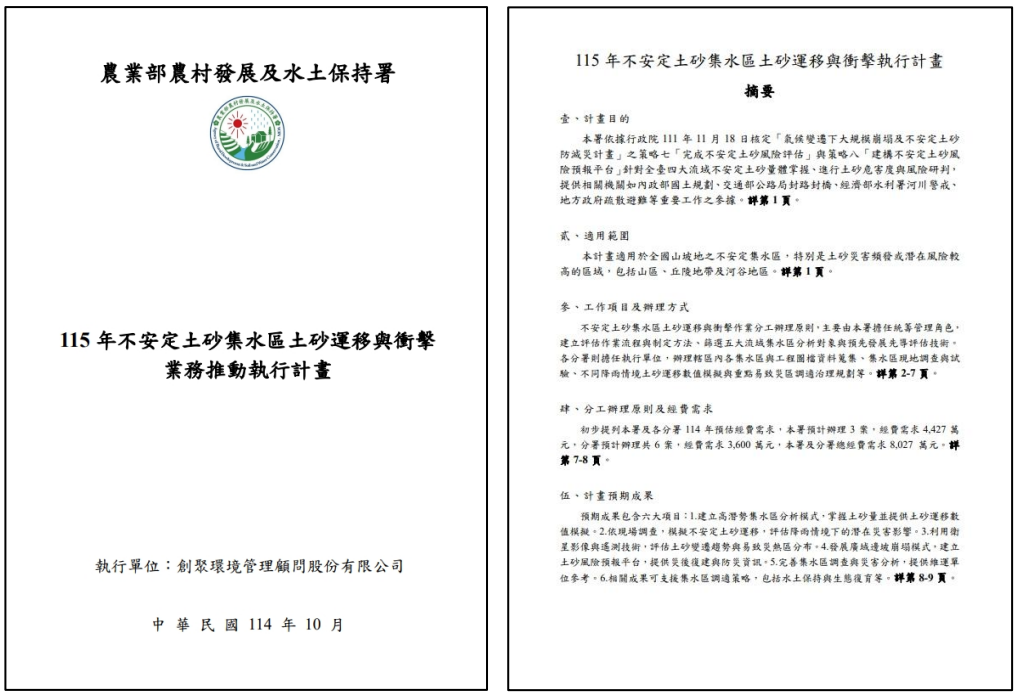
第五章　協助研提不安定土砂執行計畫

本計畫協助貴署研提 115 年度「不安定土砂集水區土砂運移與衝擊」執行計畫，同時檢討更新「不安定土砂運移與衝擊評估作業方法」，其執行構成果明如后。

第一節 更新不安定土砂集水區土砂運移與衝擊執行計畫

創聚團隊已於於 113 年度計畫協助貴署研提各分署執行全臺四大流域「不安定土砂集水區土砂運移與衝擊」委辦計畫所需應用模式、考量情境、作業流程及作業方法，期末階段則新增花蓮縣與台東縣不安定土砂集水區篩選，並協助本署研提「不安定土砂集水區土砂運移與衝擊」執行計畫，本(114)年度本署著重於土砂災害基礎調查判釋與速報產製、不安定土砂危害圖之產製流程之精進、長期與短期遙測技術評估及(圖 5-1) ，詳細內容請參見附錄五。如圖 5-2、圖 5-3、圖 5-4所示，為承前所述，本計畫擬依農村水保署需求，研擬 115 年度不安定土砂集水區土砂運移與衝擊執行計畫，經參考農村水保署當前不安定土砂業務重點需求下，所研擬之計畫內容將包含 (1)計畫目的、(2)適用範圍、(3)計畫工作項目及辦理方式、(4)分工辦理原則及經費需求、(5)計畫預期成果等五大項進行草擬。其中，不安定土砂集水區土砂運移與衝擊作業分工辦理原則(圖 5-2)，主要由農村水保署擔任統籌角色，建立評估作業流程與制定方法、篩選五大流域集水區分析對象與預先發展先導評估技術。並於 113 年開始制定：(1).建立風

險指標；(2).標定土砂動態；(3).推估多元情境之三大方針。分別產製不安定土砂集水區潛勢圖(1 幅/年)、不安定土砂動態圖(1 幅/年或1 幅/重大災後)、不安定土砂危害圖(1 幅/年；依不同累積降雨量)。各分署則擔任協力單位，協助轄區內各集水區與工程圖檔資料倉儲、不安定土砂潛勢區水土保持管理工作與重點易致災區調適治理規劃，並蒐整回饋集水區各項災害資訊，以利農村水保署評估執行臺灣各大流域不安定土砂運移與衝擊計畫區優先排序。



農業部農村發展及水土保持署

115 年不安定土砂集水區土砂運移與衝擊
業務推動執行計畫

執行單位：創聚環境管理顧問股份有限公司

中 華 民 國 114 年 10 月

115 年不安定土砂集水區土砂運移與衝擊執行計畫

摘要

壹、計畫目的

本署依據行政院 111 年 11 月 18 日核定「氣候變遷下大規模崩塌及不安定土砂防減災計畫」之策略七「完成不安定土砂風險評估」與策略八「建構不安定土砂風險預報平台」，針對全臺四大流域不安定土砂量體掌握、進行土砂危害度與風險研判，提供相關機關如內政部國土規劃、交通部公路局封路封橋、經濟部水利署河川警戒、地方政府疏散避難等重要工作之參據。**詳第 1 頁**。

貳、適用範圍

本計畫適用於全國山坡地之不安定集水區，特別是土砂災害頻發或潛在風險較高的區域，包括山區、丘陵地帶及河谷地區。**詳第 1 頁**。

參、工作項目及辦理方式

不安定土砂集水區土砂運移與衝擊作業分工辦理原則，主要由本署擔任統籌管理角色，建立評估作業流程與制定方法、篩選五大流域集水區分析對象與預先發展先導評估技術。各分署則擔任執行單位，辦理轄區內各集水區與工程圖檔資料蒐集、集水區現地調查與試驗、不同降雨情境土砂運移數值模擬與重點易致災區調適治理規劃等。**詳第 2-7 頁**。

肆、分工辦理原則及經費需求

初步提列本署及各分署 114 年預估經費需求，本署預計辦理 3 案，經費需求 4,427 萬元，分署預計辦理共 6 案，經費需求 3,600 萬元，本署及分署總經費需求 8,027 萬元。**詳第 7-8 頁**。

伍、計畫預期成果

預期成果包含六大項目：1.建立高潛勢集水區分析模式，掌握土砂量並提供土砂運移數值模擬。2.依現場調查，模擬不安定土砂運移，評估降雨情境下的潛在災害影響。3.利用衛星影像與遙測技術，評估土砂變遷趨勢與易致災熱區分布。4.發展廣域遭坡崩塌模式，建立土砂風險預報平台，提供災後復建與防災資訊。5.完善集水區調查與災害分析，提供維運單位參考。6.相關成果可支援集水區調適策略，包括水土保持與生態復育等。**詳第 8-9 頁**。

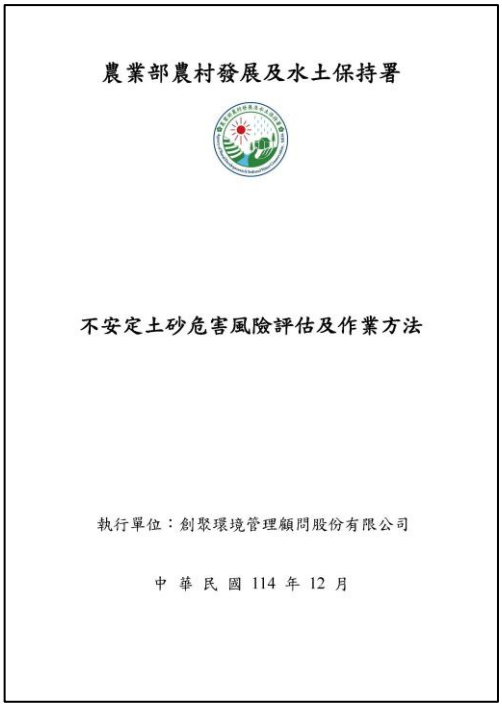
圖 5-1 不安定土砂集水區土砂運移與衝擊執行計畫



圖 5-2 不安定土砂業務推動分工

第二節 不安定土砂執行更新作業方法更新

在「不安定土砂運移與衝擊評估作業方法」手冊部分，創聚團隊於 113 年度完成不安定土砂危害風險評估及作業方法初版。114 年度計畫持續配合 5-2 節「精進不安定土砂衝擊分析模式及模擬分析」中所提出評估流程精進作為，特別針對集水區塊體土砂料源釋放類型(如塊體釋放法與流量歷線法)、分析流程更新(如模擬參數擬定與底床沖淤深度評估)、土砂模擬情境設定及不安定土砂危害度圖呈現方式列為重點更新項目，如圖 5-3 所示；詳見附錄六。

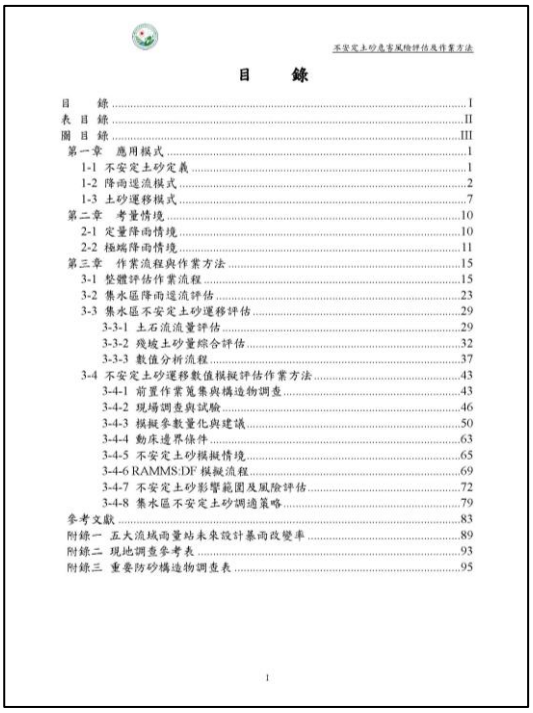


農業部農村發展及水土保持署

不安定土砂危害風險評估及作業方法

執行單位：創聚環境管理顧問股份有限公司

中 華 民 國 114 年 12 月



不安定土砂危害風險評估及作業方法

目　錄

目　錄 I
表目錄 II
圖目錄 III
第一章　應用模式 1
1-1 不安定土砂定義 1
1-2 降雨逕流模式 2
1-3 土砂運移模式 7
第二章　考量情境 10
2-1 定量降雨情境 10
2-2 極端降雨情境 11
第三章　作業流程與作業方法 15
3-1 整體評估作業流程 15
3-2 集水區降雨逕流評估 23
3-3 集水區不安定土砂運移評估 29
3-3-1 土石流流量評估 29
3-3-2 殘坡土砂量綜合評估 32
3-3-3 數值分析流程 37
3-4 不安定土砂運移數值模擬評估作業方法 43
3-4-1 前置作業蒐集與構造物調查 43
3-4-2 現場調查與試驗 46
3-4-3 模擬參數量化與建議 50
3-4-4 動床邊界條件 63
3-4-5 不安定土砂模擬情境 65
3-4-6 RAMMS:DF 模擬流程 69
3-4-7 不安定土砂影響範圍及風險評估 72
3-4-8 集水區不安定土砂調適策略 79
參考文獻 83
附錄一 五大流域雨量站未來設計暴雨改變率 89
附錄二 現地調查參考表 93
附錄三 重要防砂構造物調查表 95

I

圖 5-3 不安定土砂危害風險評估及作業方法(更新版)

第六章 不安定土砂集水區流量率定觀測儀器租用與資料檢核

本章工作由農村水保署選定 17 處集水區，租用水位計至現場佈設，電源備源系統採太陽能儲電。可應用於防砂壩、護岸、溝渠等人工構造物，即時遠端監控河川水位變化，並即時傳輸資料至雲端，透過遠端網路可即時掌握水情依時變。觀測水位資料需經檢核分析，提供「114 年全臺集水區分布式降雨逕流模式與平台建置」計畫模演算驗證之用。

第一節 水位計規格與集水區觀測布署

本節依招標文件需求，針對本工作項目辦理不安定土砂集水區流量率定觀測儀器開發、測試與全臺集水區遴建議選，並經農村水保署同意後進場 17 處集水區安裝 (已於 2025/6/30 前全數完成)，茲分段敘述如后。

一、觀測儀器規格與資料檢核

(一)觀測設備規格

本計畫應用於流量觀測之水位計電源備源系統採用太陽能儲電；設備結構可達防水抗潮，適合應用於防砂壩、護岸、溝渠等人工構造物，即時遠端監控集水區野溪或河川水位變化，並即時傳輸資料至雲端，透過遠端網路可即時掌握水情依時。本計畫新增租用之水位流速觀測設備，為團隊自行開發之雷達波水位計，曾獲得 2020 年智慧城市創新應用獎肯定，亦通過水利署水資源物聯規範，已於農村水保署、農田水利署、水利署、宜蘭縣

政府、高雄市政府等機關轄區廣泛佈設觀測。雷達波水位設備詳細規格如圖 6-1 所示，由 106 年迄今已於臺灣各場域安裝約 400 處，其中農村水保署山區野溪及水庫集水區約 120 餘處，採用 NB-IoT(M1)傳輸模組(或 4G)、藍芽模組雙通道即時傳輸觀測，設備穩定度及觀測品質深獲肯定。本水位計具備 IP68 防塵防水認證可因應山區氣候，設備僅 800 公克重，可配合觀測需求及山區野溪變動因素搭配防鏽金屬支架快速佈建。水位觀測設備於計畫執行期間，如遇颱風豪雨期間造成損壞或資料無法回傳等情事，將派員前往安裝處所檢修更換，以維護觀測功能直至計畫期程結束。

規格參數	說明
資料傳輸	雙通道NB-IoT/ Blue Tooth (備援)
精準度	1 mm(量測距離1~2m) 1 c m (量測距離2~40m)
工作溫度範圍	攝氏 -20 ~ 85度
防水防塵	IP68
資料儲存(Flash)	6個月((可循環、自動補遺功能)
資料傳輸頻率	可設定最小每5分鐘(遠端調控)
外觀尺寸	200 x 150 x 100 (mm)，800g
電源設備	電池可持續供電達一年以上



安裝場域



圖 6-1 水位監測設表格備規格及安裝場域

(二)水位觀測設備出廠前校核

固定量測距離檢測為水位計精度調校之重點，團隊於計畫執行期之出廠前均辦理定期性室內檢測。測試採用可調節式三腳架，可固定量測距離

以達遮斷作用，量測設備至地面距離，藉以檢測水位感測精度適合合規(圖6-2)，確認量測精度無虞後，再交付外業人員至現場佈署安裝。



圖 6-2 水位計出廠前量測精度檢核測試

(三)部署集水區遴選

水位觀測設備佈設區位原則，經考量歷史災害及治理工程、既有水砂監測設備、設備安裝現地環境適宜性、不安定土砂集水區出流口潛勢以及集水區境內土砂變動性等條件。觀測設備佈設一般性原則(圖 6-3)，分述說明如後：

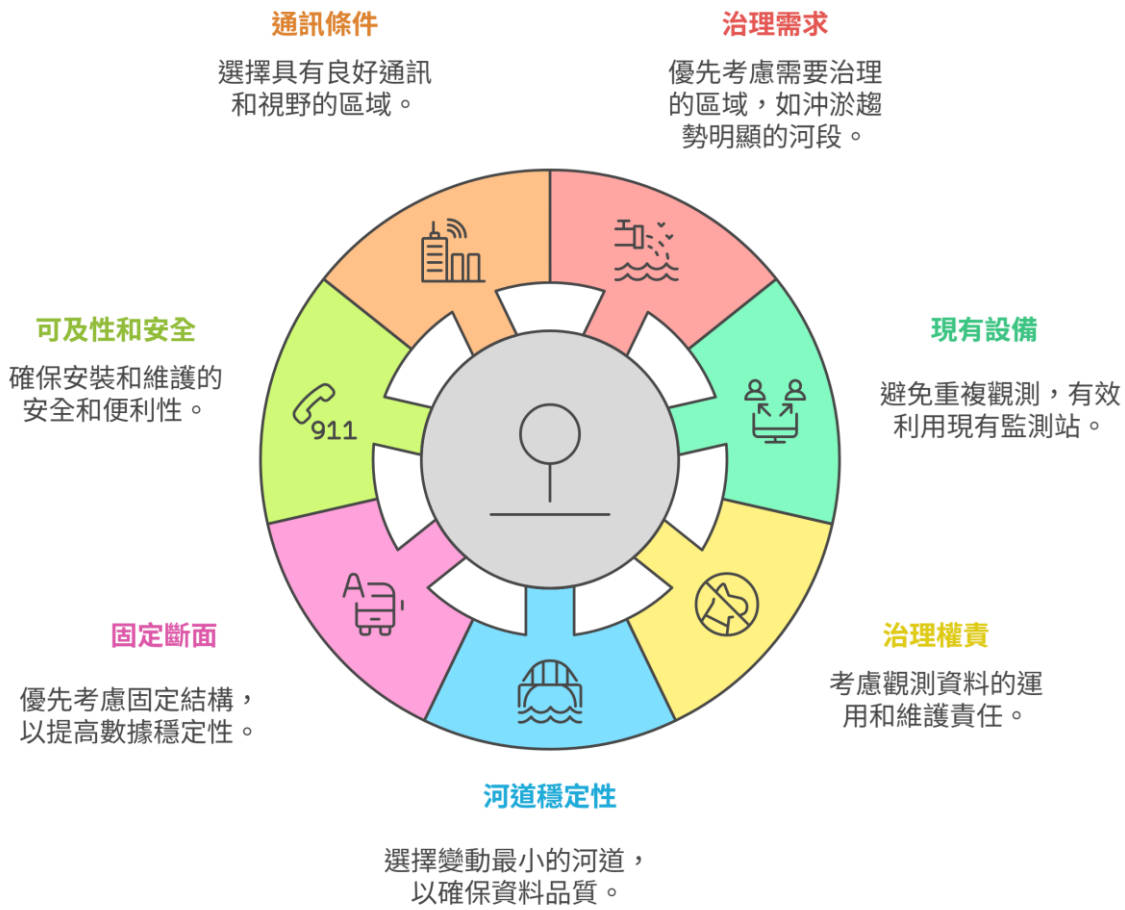


圖 6-3 部署水位計遴選原則

(1) 治理需求及土砂分析代表性河段：屬於沖淤趨勢明顯河段，或上游明顯存在崩塌與淤積土砂，另需考量歷年高度土砂變動區或土砂災害區，以及保育治理工程投入情形。

(2) 既有水砂觀測設備：蒐集農村水保署歷年投入水砂觀測設備(含土石流觀測站)，盤點營運中設備分布及監測項目，避免重複區位項目觀測，有效利用資源。

(3) 上下游治理權責界點：考量觀測資料運用及後續維管權責，於集水區內套匯林班地、山坡地及野溪界點圖層，以鄰近治理界點處(林業保育

署、水利署)為優先考量，亦能評估各治理分工介面間水砂運移量體關係。

(4) 河道環境變動較小：通水斷面變動較小或觀測區屬固定斷面(如防砂壩溢洪口、橋梁處設置固床工)為優先考量條件，且須不受迴水影響。不設於河岸有明顯崩塌處、河道分歧、沙洲、渦流、落差、構造物、水位變化不規則處，避免影響觀測資料品質。佈設區位若非常流水，亦可反應該溪流峰枯期流量及土砂量變化，掌握溪流特性，建立基礎水文環境背景資訊。

(5) 架設位置為固定斷面(構造物)：為提升觀測數據穩定性及準確度，水位計設備架設位置以防砂構造物壩翼(感測溢洪口水位)、橋梁等固定控制斷面，或野溪整流工程中的規則斷面為原則；濁度計為接觸式感測元件，架設位置以溪床兩岸固定構造物，如護岸、防砂壩壩翼、橋台等可固定點為原則，確保設備安裝穩固及觀測資料準確性，以利後續分析使用。

(6) 交動便利及架設安全評估：須考慮交通便利、道路通行安全且人機便於安裝為原則，確保架設可行性及安全性。同時確保後續維護人員可及性。

(7) 通訊條件且日照透空度良好區域：以無訊號屏蔽、環境通透區域較佳且具 4G 以上訊號(至少達兩格)為原則，若採用無線傳遞方式，觀測站址與中繼站址間必須有遼闊視野，避免電波干擾現象發生。

綜合上述安裝區位原則，經盤點截至民國 114 年 3 月農村水保署已建置且維護中之水位觀測站，如圖 6-4。圖中顯示共計 144 站與本計畫建置之 17 站水位觀測站空間分布圖。表6-1 則為考量不安定土砂集水區面積、不安定土砂集水區潛勢、近年土砂致災歷史、集水區內是否存在大規模崩塌與土石流潛勢溪流、既有水砂觀測設備等條件，再輔以考量(1).上一年度(2024 年)發生災害次數、(2).上一年度(2024 年)災害距今時間較短者及3.不安定土砂出流口潛勢等級條件排序，依序篩選 25 處後供業主核定 17 處水位計安裝場址清單(如圖 6-5至圖 6-10)。另根據 114 年 2 月 14 日工作會議紀錄(農保監字第 1142669545 號)決議，本工作將於實地現勘後，於 114 年 4 月底前先完成至少 7 站租用水位計佈設，雖期間雖有兩站觀測站(花蓮石公溪與吉安溪)因通訊不佳與遭治理工程毀損設備影響，經回報業主同意更換場域後，本計畫 17 站水位計已於 114 年 6 月 30 日前完成布署與觀測資料回傳工作。

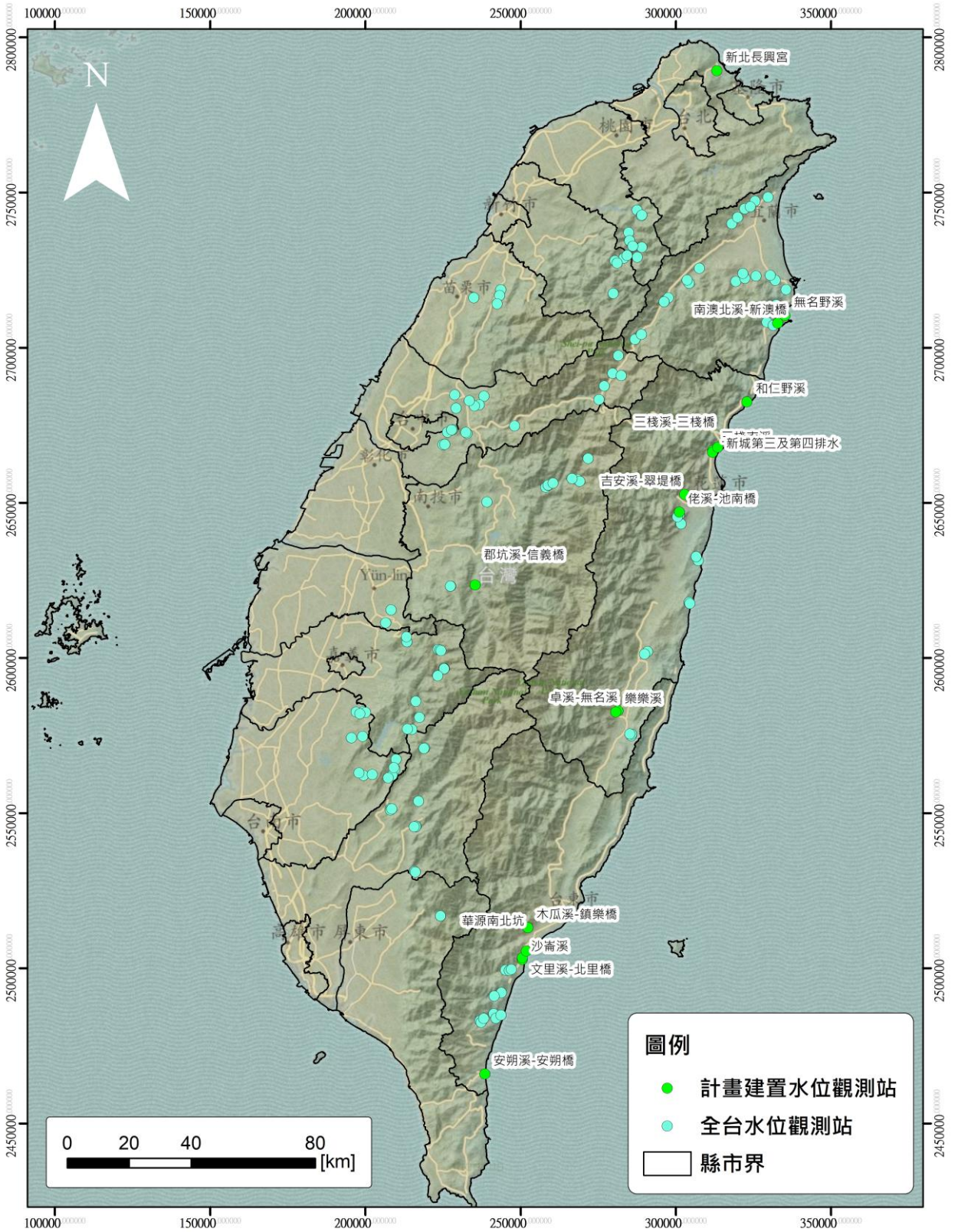


圖 6-4 本計畫建置之水位觀測站分布圖

表 6-1 水位觀測站安裝佈設場址(2025/6/30 更新)

編號	溪流/集水區名稱(縣市)	不安定土砂潛勢	2024 年土砂肇災歷史	大崩、土石流潛勢溪流	其他觀測設備	經度	緯度
1	三棧南溪(花蓮縣)	-	0403 地震、凱米颱風、康芮颱風	花縣 DF174	CCTV	121.60875	24.10574
2	和仁野溪(花蓮縣)	-	0403 地震、凱米颱風、康芮颱風	花縣 DF025	CCTV	121.71813	24.247026
3	三棧溪-三棧橋(花蓮縣)	-	0403 地震、凱米颱風、康芮颱風	花縣 DF019	-	121.60844	24.10221
4	郡坑溪-信義橋[1](南投縣)	-	凱米颱風	投縣 DF185	-	120.85623	23.715641
5	佗溪-池南橋(花蓮縣)	中	0403 地震	花縣 DF006	-	121.50573	23.939005
6	卓溪-無名溪[2](花蓮縣)	-	凱米颱風	花縣 DF048	-	121.30730	23.34911
7	樂樂溪(花蓮縣)	中	康芮颱風	花縣 DF039	-	121.29556	23.346437
8	新城第三及第四排水(花蓮縣)	-	山陀兒颱風	花縣 DF020 花縣 DF021	-	121.62451	24.11504
9	南澳北溪-新澳橋(宜蘭縣)	-	凱米颱風	宜縣 DF146	-	121.77762	24.48788
10	粉鳥林野溪(宜蘭縣)	-	凱米颱風	宜縣 DF148	-	121.84088	24.497444
11	沙崙溪-沙崙溪橋(臺東縣)	中高	山陀兒颱風	東縣 DF111	-	121.00509	22.625111
12	木瓜溪-鎮樂橋(台東縣)	-	山陀兒颱風	東縣 DF059	-	121.03382	22.703286
13	安朔溪-安朔橋(台東縣)	中、低	-	東縣 DF090	-	120.88844	22.292044
14	文里溪-北里橋(臺東縣)	中高	山陀兒颱風	東縣 DF076	-	121.00548	22.63037
15	吉安溪-翠堤橋(花蓮縣)	-	0403 地震	花縣 DF153	-	121.54702	23.986014
16	金包里溪-長興宮(新北市)	中	山陀兒颱風	新北 DF236	-	121.62768	25.211343
17	華源南北坑(台東縣)	-	山陀兒颱風	東縣 DF124	-	121.02032	22.649401

備註：

[1] 原編號 4：花蓮縣石公溪下游涵洞水位計(2025/04/23 建置)，因受 2025/5 災害治理工程影響，設備遭受破壞，該工程施工期長達 6 個月-12 個月，經回報業主同意，於 2025/6/27 更改至南投縣郡坑溪(投縣 DF185)集水區觀測。

[2] 原編號 6：花蓮縣吉安溪水位計(翠堤橋；2025/04/25 建置)，因受限於 LoRa 通訊訊號不佳，經更換 4G 通訊模組與它家廠牌測試後已改善，2025/8/7 經回報業主同意，將高雄市六津橋土砂沖毀測站移至該處進行集水區觀測。




(a) 三棧南溪(花縣 DF174)-防砂壩右翼(25025/4/24)




(b) 和仁野溪(花縣 DF025)-台 9 丁線涵洞橋上游側(25025/4/23)




(c) 三棧溪(花縣 DF019)-三棧橋上游側(25025/4/24)

圖 6-5 本計畫建置水位觀測站竣工圖(1)





(d) 郡坑溪(投縣 DF185)-信義橋上游側(25025/6/27)





(e) 佗溪(花縣 DF006)-池南橋上游側(25025/4/22)





(f) 卓溪野溪(花縣 DF048)-無名橋上游側(25025/6/30)

圖 6-6 本計畫建置水位觀測站竣工圖(2)





(g) 樂樂溪(花縣 DF039)-無名橋下游側(25025/4/22)





(h) 新城第三及第四排水(花縣 DF020、花縣 DF021)-涵洞橋上游側(25025/4/23)





(i) 南澳北溪(宜縣 DF146)-新澳橋上游側(25025/4/22)

圖 6-7 本計畫建置水位觀測站竣工圖(3)




(j) 粉鳥林野溪(宜縣 DF148)-無名橋上游側(25025/4/22)




(k) 沙崙溪(東縣 DF111)-沙崙溪橋上游側(25025/4/29)




(l) 木瓜溪(東縣 DF059)-鎮樂橋上游側(25025/4/29)

圖 6-8 本計畫建置水位觀測站竣工圖(4)




(m) 安朔溪(東縣 DF090)-安朔橋上游側(25025/5/29)




(n) 文里溪(東縣 DF076)-北里橋上游側(25025/5/29)




(o) 吉安溪(花縣 DF153)-翠堤橋上游側(25025/8/7)

圖 6-9 本計畫建置水位觀測站竣工圖(5)




(p) 金包里溪(新北 DF236)- 長興宮無名橋上游側(25025/4/28)




(q) 華源南北坑(東縣 DF124)-防砂壩右翼(25025/5/29)

圖 6-10 本計畫建置水位觀測站竣工圖(6)

(四)觀測設備維護

本計畫觀測期間遭遇設備無資訊回傳或資料異常，應辦理觀測設備檢視，排除狀況、資料補遺維持觀測作業。為避免設備產生異常現象，定期辦理設備維護(圖 6-11)，包含觀測資料、觀測環境、硬體設備、資料品質等項目，以固定量測距離檢測水位計觀測值，其中環境整理作業包含：觀測區域周圍環境整理、清除攀附於設備外構上之蟻窩、蜂窩等附著物、表面青苔及針對因水氣而造成鏽蝕之模組元件進行更換。另如圖 6-12，當資料產

生異常時(如產生高低離散值)，可能代表溪床斷面變動或迴水影響、無常流水(斷流或伏流)、通訊品質差或維護道路中斷等情事發生，應至現場執行裝設位置之更換。其中通訊品質及道路中斷非經常性事件，屬不定期維護，若設備安裝後受周圍環境干擾通訊不佳影響資料上傳品質，將更換傳輸設備，若仍無收訊則評估遷移測站；若道路中斷時間過長影響設備維護作業，亦評估遷移測站。當資料發生無訊號回傳時，可能代表設備電池異常、通訊模組異常、雷達模組異常等發生，應至現場進行設備更換。

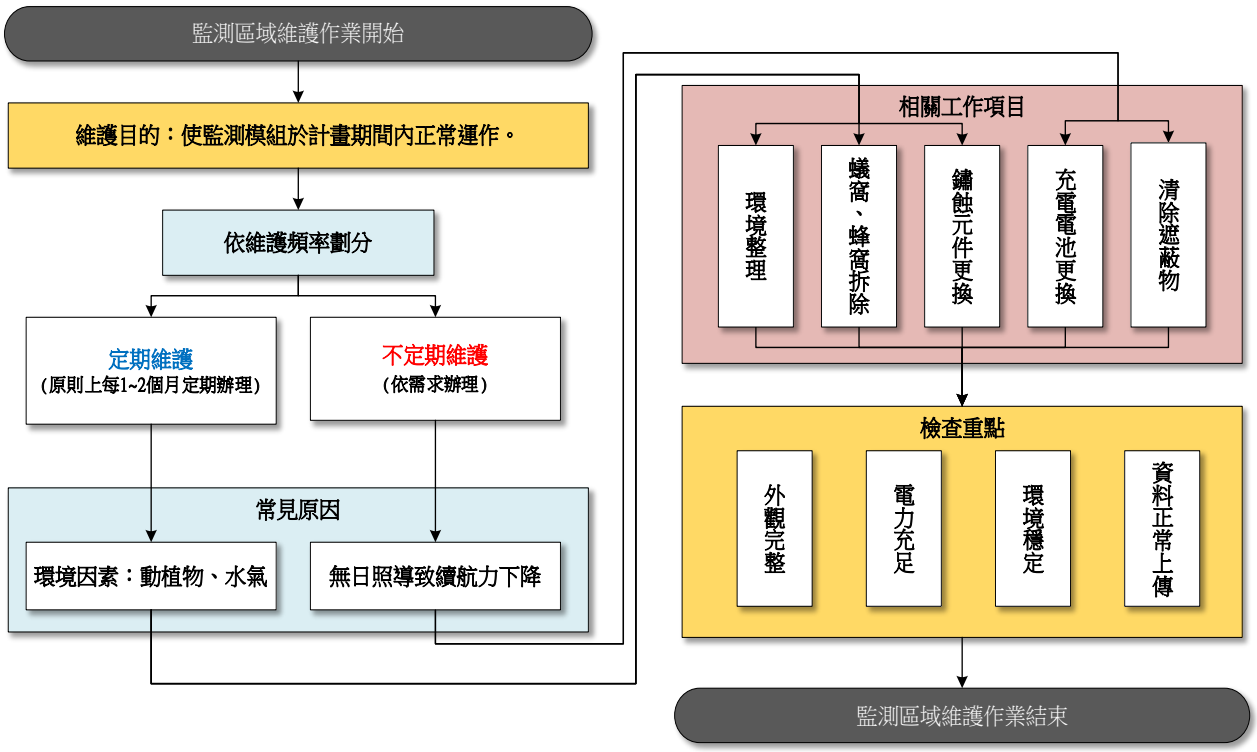


圖 6-11 觀測區域維護作業流程圖

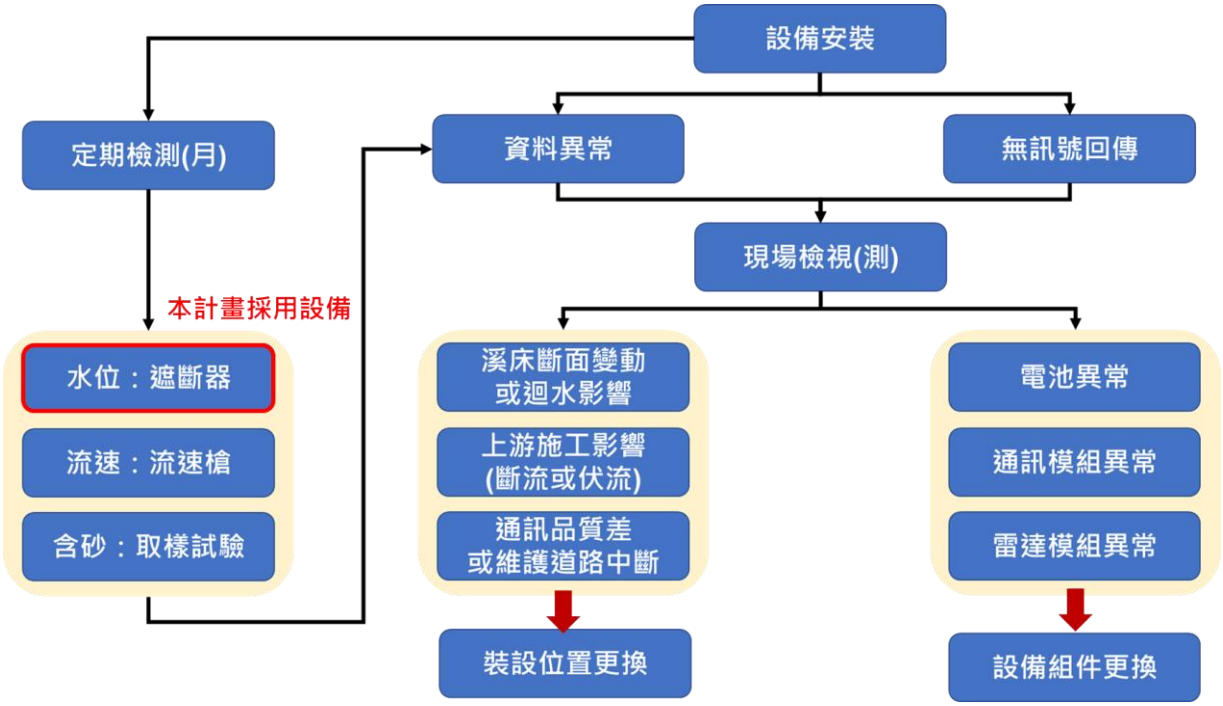


圖 6-12 水砂觀測設備維護檢測流程圖

第二節 水砂觀測檢核與平台介接

本計畫針對觀測期間物理量進行資料解析，以提供貴署相關計畫瞭解野溪水砂運移特性及模式驗證，茲就「觀測資料處理與檢核」及「觀測資料介接與展示」分述如下。

(一)觀測資料處理與檢核

觀測資料處理係針對水位高程變動時序型資料進行初步分析，使其可作為後續野溪水位與流量計算之基礎；以電子化感測器佈設於野外進行監測，常會受到現場環境不可抗拒因素影響，如空氣溫度、空氣濕度、風力、以及河道中之生物、藻類、底床質等環境因素，造成資料雜訊、及不穩定跳動等不利於資料分析之情況發生，造成觀測部份資料些許呈現波動，屬正常現象。故透過本計畫水砂觀測設備回傳計讀數值，皆須進行資料前處理

作業，先過濾不具意義之雜訊或環境背景值、除歧異點、及利用統計之移動平均法進行監測資料之處理，始可進行相關分析，獲得能代表河道流量及濁度變化之時序資料，如圖 6-13 所示(係為原始資料濾除歧異點示意圖)，故原始監測資料需經過一連串資料濾除步驟，始可應用與分析。經由資料檢核所獲得之水位高程變化曲線，可提供貴署不安定土砂相關計畫率定集水區流量值使用。如圖 6-14 所示。農村水保署(2022)「111 年度坡地水砂觀測作業推動計畫」初步擬定觀測資料檢核機制，包含資料檢核流程、資料檢核類型、資料檢核標準及資料修正方式。在水位觀測資料方面，應滿足下列需求：

(1) 水深觀測值超出儀器本身觀測範圍限制(40 公尺) 。

(2) 觀測數據不應超過量測地點之水深臨界條件，亦即物理上的限制。如橋梁處水深觀測站所量測到的水深不應超過護岸高度，或水位不應超過橋梁之梁底高度或設備架設高度。

(3) 水深觀測數據為負值。

(4) 水深觀測數據為缺值。

(5) 單位時間(10 分鐘)內水深觀測數據差異大於±30 公分。

水深觀測資料經檢核標準自動檢出後，觀測平台系統將通知權責機關；資料處理人員可依照流域特性、現場環境條件及設備維護紀錄，判斷異常值是否為颱洪暴雨水文事件、放流口或取水口影響，或是設備故障等，進行人工判釋及資料處理(濾除、編修、補遺)。

本計畫建置水位計觀測資料，依循農村水保署-112 年度坡地水砂觀測作業推動計畫架構，除於雲端資料庫將保留原始資料，並介接至農村水保署-水砂觀測平台外，亦於提供逐月檢核後之水位觀測資料電子檔(csv檔案)，以利「全臺集水區分布式降雨逕流模式與平台建置」計畫銜接。

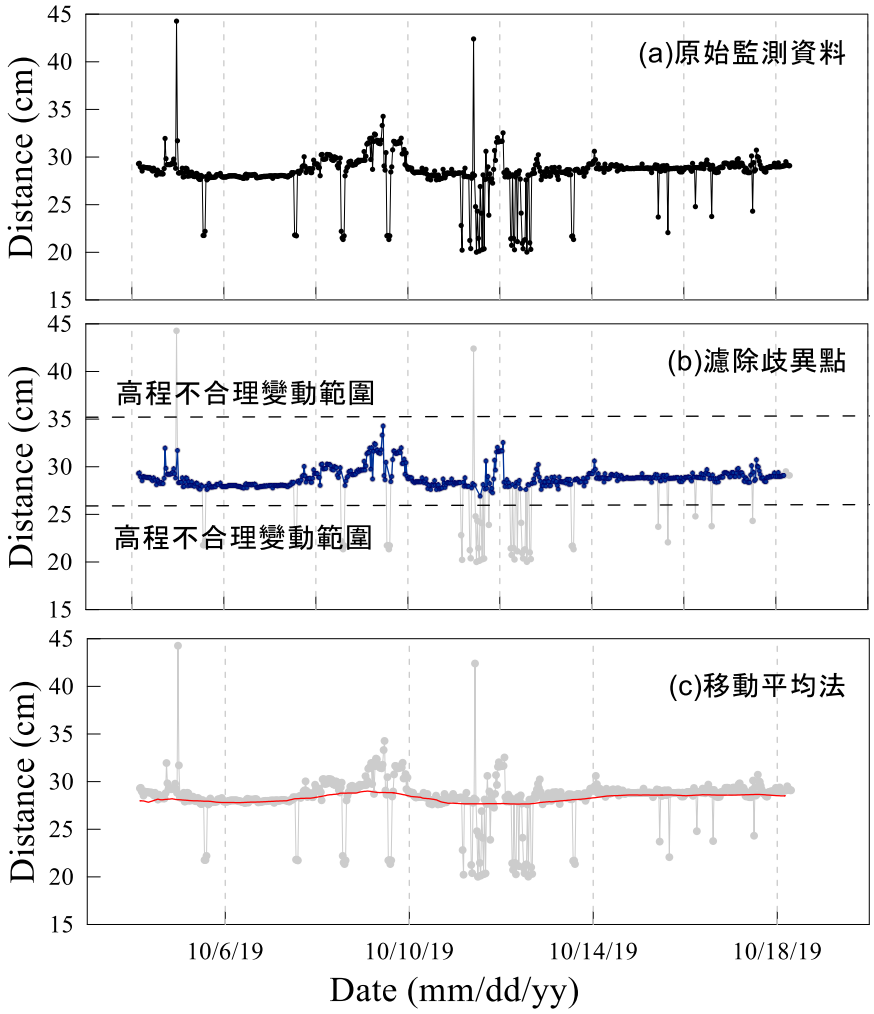
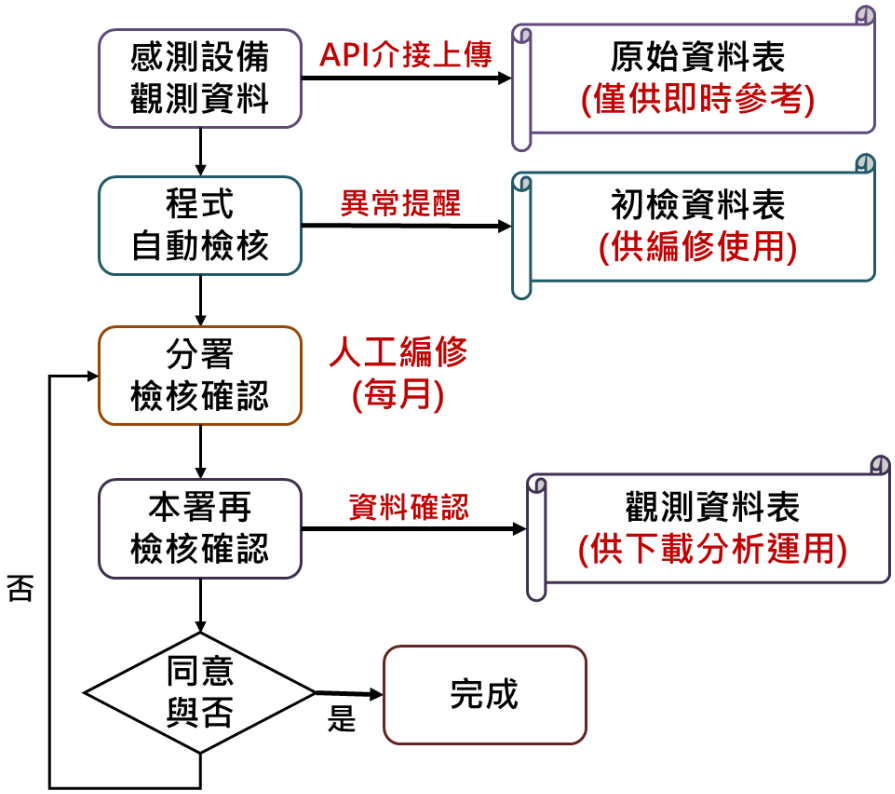


圖 6-13 原始資料濾除歧異點示意圖

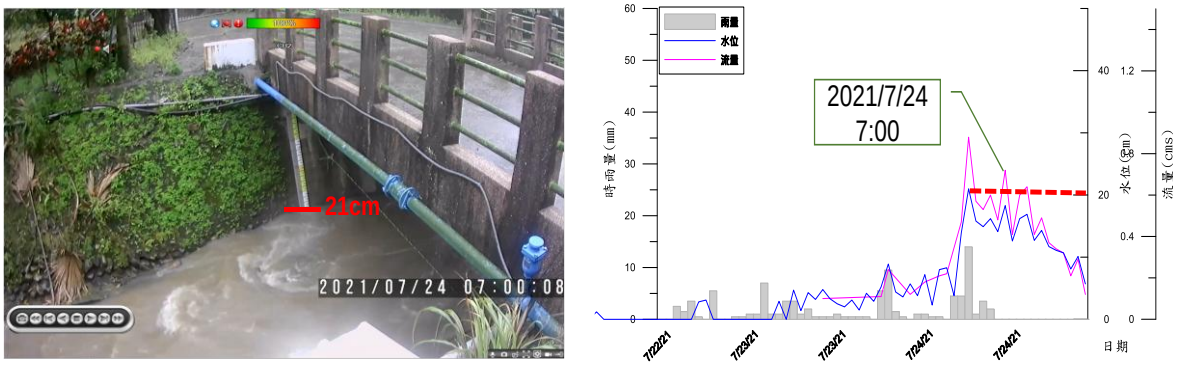


資料來源：農村水保署(2023)，112 年度坡地水砂觀測作業推動計畫

圖 6-14 資料檢核機制及對應產出資料架構

野溪水位-流量觀測乃測量單位時間內通過渠道控制斷面之水量，為水文調查之重要工作，通常可分為經常水位-流量觀測及洪水水位-流量觀測二部份，就觀測技術而言，於平時低流量觀測應無太大困難，但當洪水時期、天候條件或量測環境惡劣時，將增加實測工作之不確定性，在資料檢核上，一般採用人工方式進行觀測值檢核或以鄰近 CCTV 影像或傳統水位站覆核觀測資料。若水砂觀測設備周遭有設置 CCTV 監視系統及水尺，可透過即時影像瞭解颱風豪雨期間水位變化情形，作為設備水位率定方法之一，CCTV 影像配合水尺檢核水位情形如圖 6-15 所示。本計畫於三棧南溪(花縣 DF174)與和仁野溪(花縣 DF025)另有花蓮分署建置之定時拍攝 CCTV，可於重要降雨事件發生後(如圖 6-16)，協助確認溪底河床與水位觀測值其

相關性是否合理。



(a) CCTV 影像　　(b) 水位觀測

圖 6-15 CCTV 影像配合水尺檢核水位案例



(a)2025/04/23　　(b) 2025/05/20

圖 6-16 和仁野溪(花縣 DF025)水位計安裝前後底床淤積變化

(二)觀測資料介接與展示

本計畫已填寫農村水保署-水砂觀測設備建置管理表(如表 6-2)，完成既有及新增測站設備觀測數據介接至水砂觀測平台，針對新增測站及設備需建立詮釋資料及設備綁定，如圖 6-17及圖 6-18所示，並依據農村水保署規定格式，即時上傳原始觀測資料(每10分鐘1筆)至農村水保署「水砂觀測平台」，設備即時物理量上傳與本計畫建置測站清單如圖 6-19、圖 6-20所

示，並依據原始觀測資料辦理資料檢核，提供後續水位-流量分析作業使用。此外，為俾便防災相關人員查閱水位觀測資料，計畫團隊同時開發了行動裝置 LINE 查詢功能(圖 6-21)，將本計畫 17 處集水區水位計觀測資料推播至查詢機器人(IFEM 資料查詢)，使用者可以點擊感興趣之測站查看當前水位計錄資料，同時，本系統亦歸納建置水位站最鄰近雨量站(或挑選集水區內代表性之自動測計雨量站)之 10 分鐘雨量(mm/10 min)，提供鄰近雨量值與水位計之關聯性對比。本計畫自2025/4/23至2025/6/30已完成所有雨量計建置與資料上傳作業，其各觀測站之特定歷時觀測資料區間如圖 6-22 至圖 6-38 所示，顯示其設備觀測、通訊回傳、電力維持及資料介接均已正常運作。在流量水位的觀測紀錄中，得知三棧溪、郡坑溪、金包里溪(長興宮)、華源南北坑、六津橋野溪均屬常流水溪流。其餘 12 處集水區，多為旱溪，若無降雨事影響件通常為零水位或間歇性水位。

表 6-2 水砂觀測設備建置管理表

水砂觀測設備建置管理表

計畫名稱： 114 年集水區不安定土砂運移模式精進與衝擊評估
調查單位： 創聚環境管理顧問股份有限公司　　填表日期： 民國 114 年 5 月 9 日
安裝人員： 武華、李旻

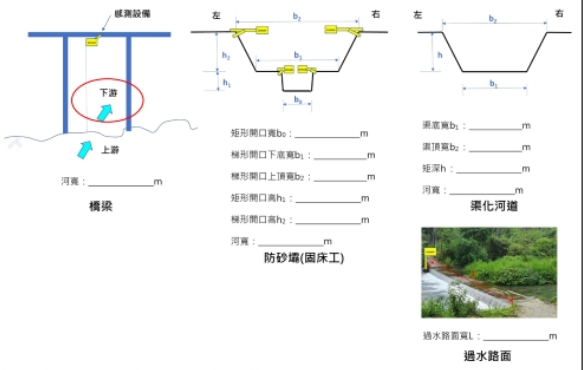
一、測站基本資料

測站代碼	M2450001	測站名稱	三棧南溪_防砂壩		
流域	三棧溪	集水區	三棧溪	溪流	三棧南溪
測站位置	防砂壩	X_TWD97	311885	Y_TWD97	2666868
縣市	花蓮縣	鄉鎮	秀林鄉	村里	景美村
所屬單位	農村水保署				

二、設備基本資料

設備代碼	SRM_W0001	設備名稱	雷達波水位計	觀測項目	水深
設備廠牌	奧創	安裝位置	防砂壩右壩翼	安裝日期	114/04/24
X_TWD97	311885	Y_TWD97	2666868		

設備安裝示意圖 (依設備實際安裝情形繪製，若為下列安裝區位需填寫相關尺寸)



1. 橋梁：標示安裝位置，圈選流向(上下游)。
2. 防砂壩：圈選安裝位置(左右翼、複式斷面)。
3. 渠化河道、防砂壩、過水路面相關尺寸，以現場測量為主。

三、測站位置圖



四、設備安裝照片



三棧南溪_防砂壩右壩翼水位計安裝-1　　三棧南溪_防砂壩右壩翼水位計安裝-2

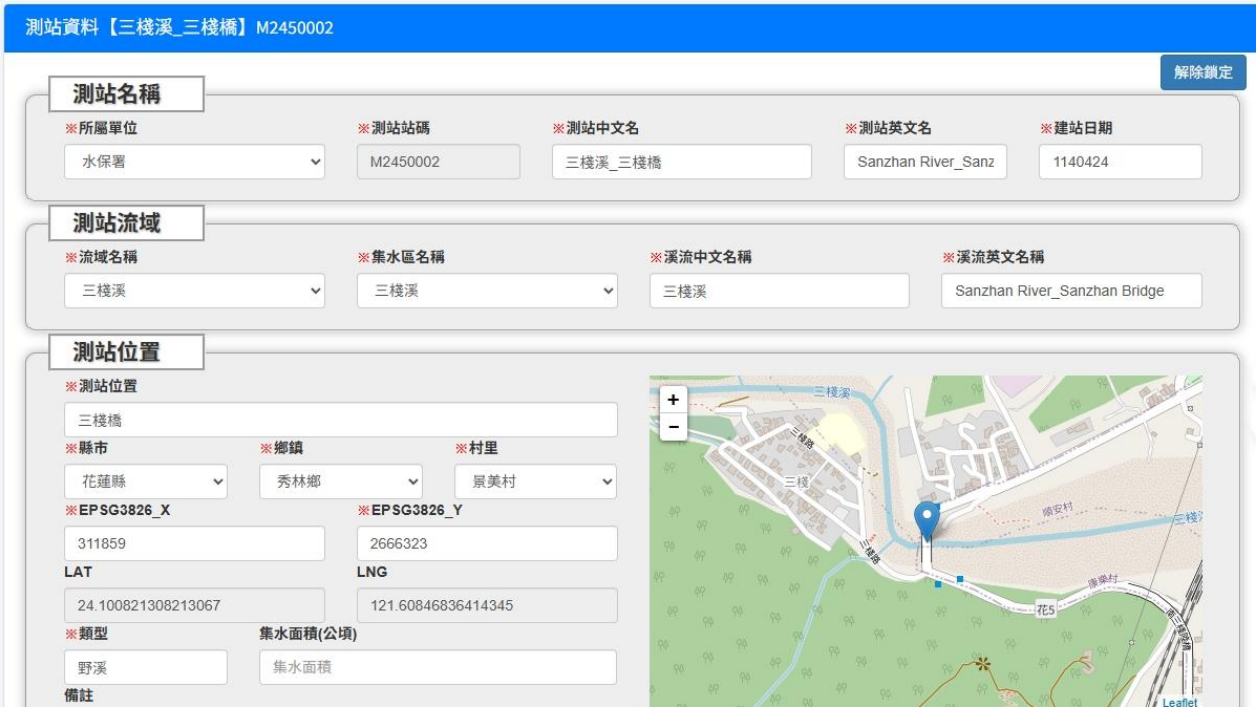


圖 6-17 新增測站建立至觀測平台(以三棧溪-三棧橋測站為例)

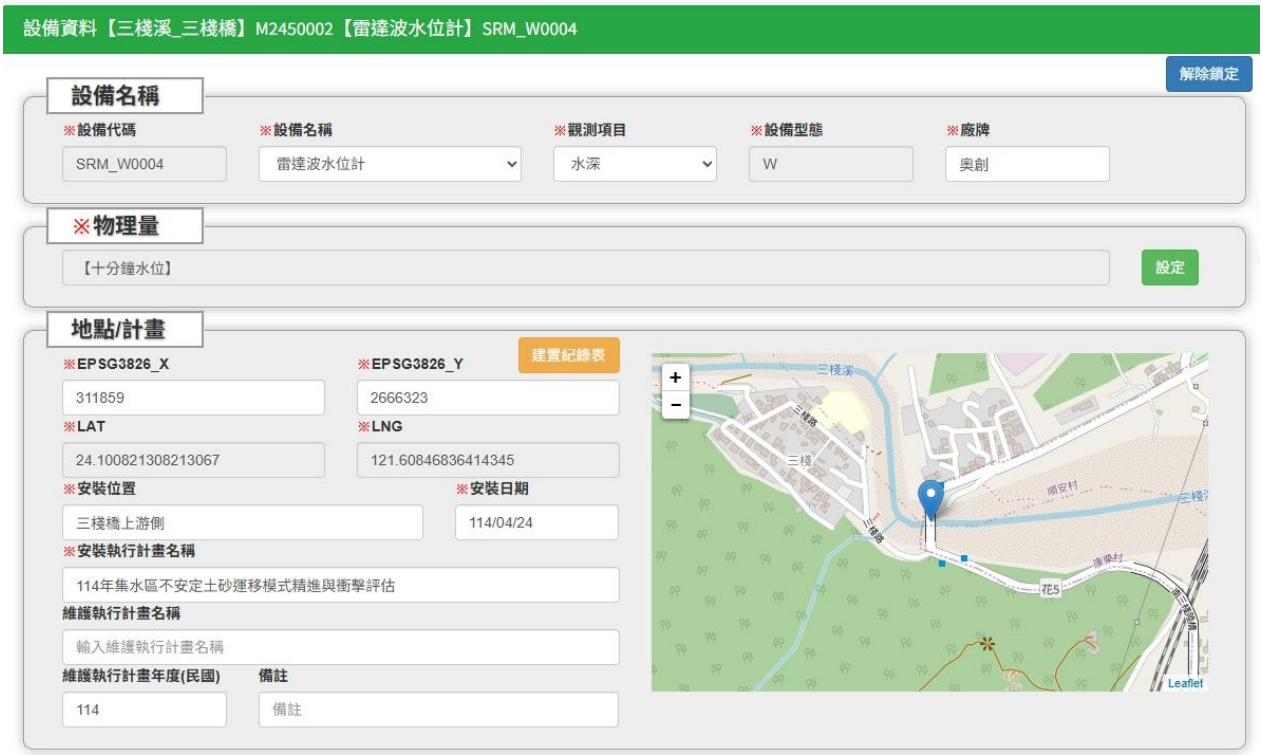
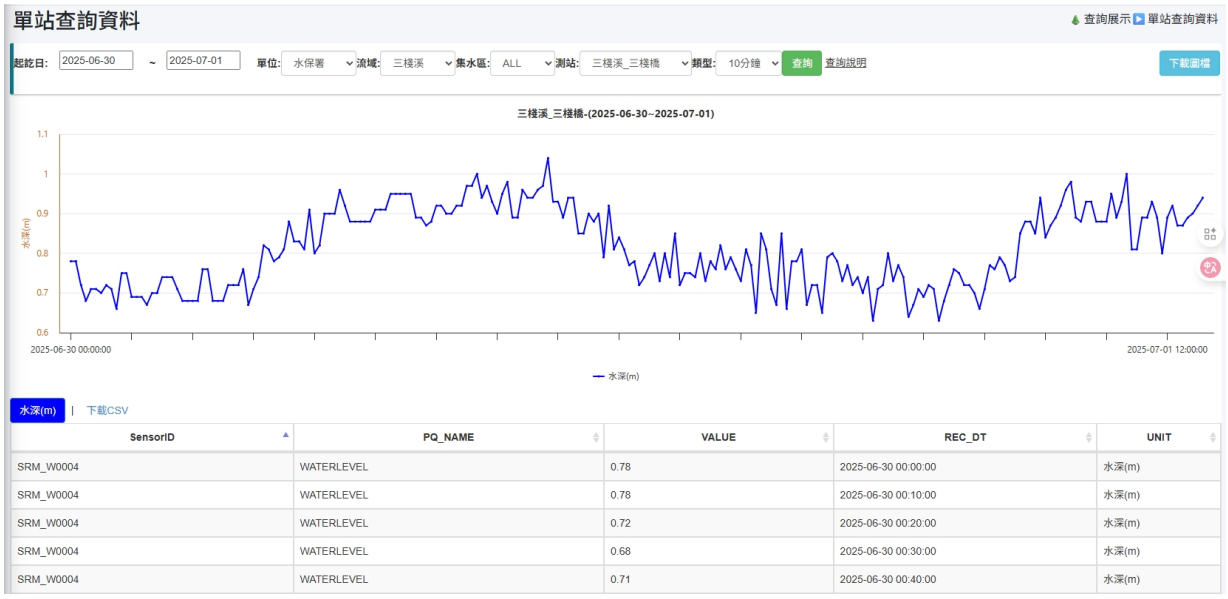


圖 6-18 新增設備並完成介接(以三棧溪-三棧橋測站為例))



SensorID	PQ_NAME	VALUE	REC_DT	UNIT
SRM_W0004	WATERLEVEL	0.78	2025-06-30 00:00:00	水深(m)
SRM_W0004	WATERLEVEL	0.78	2025-06-30 00:10:00	水深(m)
SRM_W0004	WATERLEVEL	0.72	2025-06-30 00:20:00	水深(m)
SRM_W0004	WATERLEVEL	0.68	2025-06-30 00:30:00	水深(m)
SRM_W0004	WATERLEVEL	0.71	2025-06-30 00:40:00	水深(m)

圖 6-19 新增設備並完成介接(以三棧溪-三棧橋測站為例)

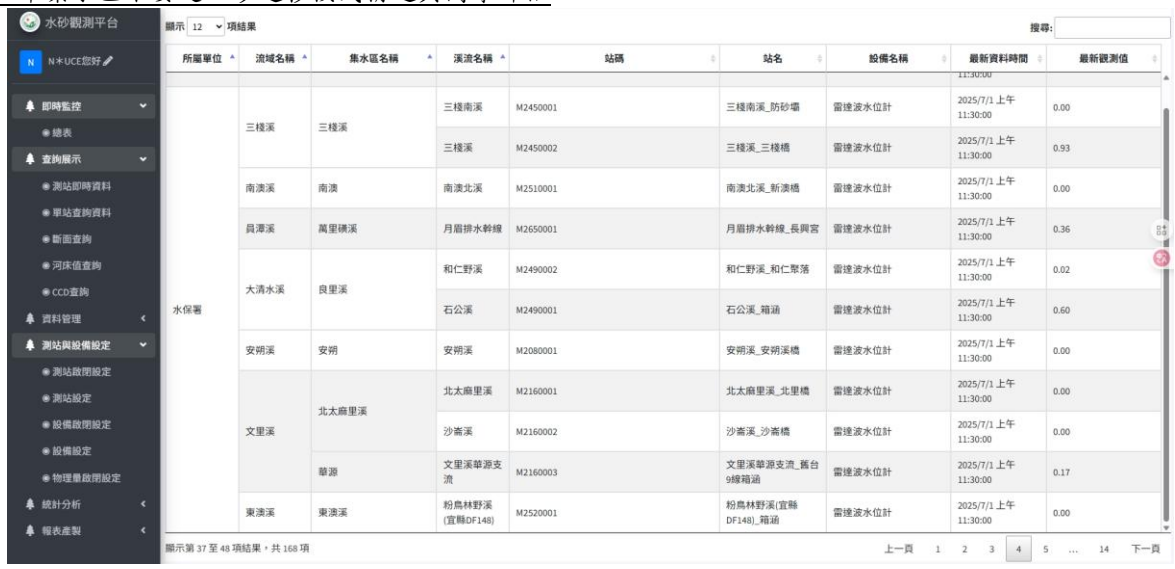


圖 6-20 本計畫建置水位觀測站清單頁面(水砂觀測平台)



圖 6-21 本計畫建置水位觀測站清單頁面

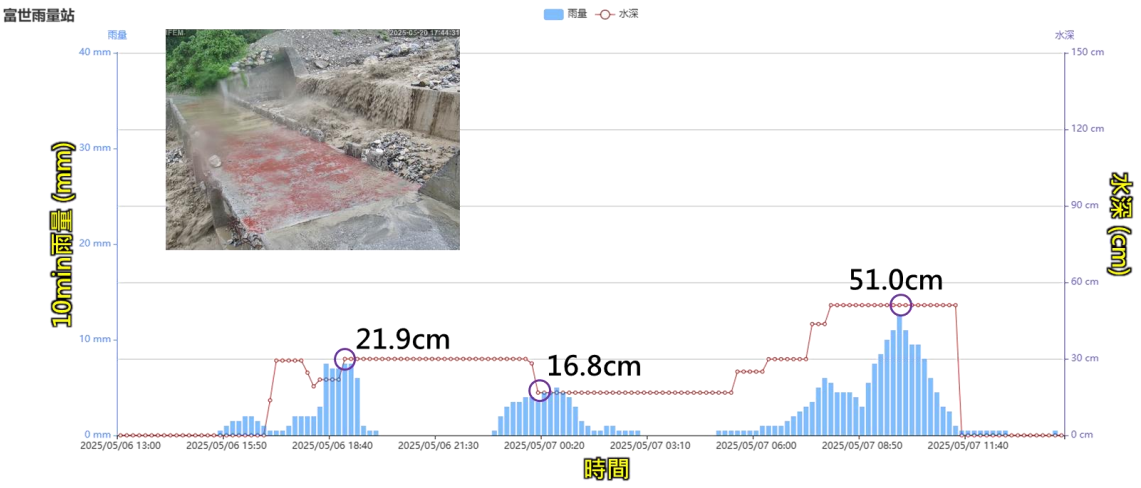


圖 6-22 花蓮縣-三棧南溪測站資料

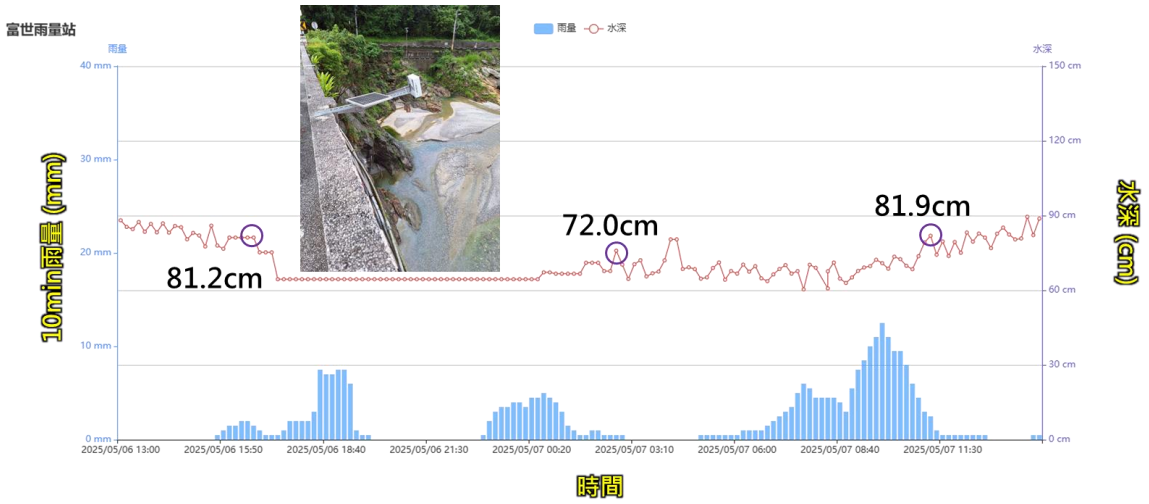


圖 6-23 花蓮縣-三棧溪-三棧橋測站資料

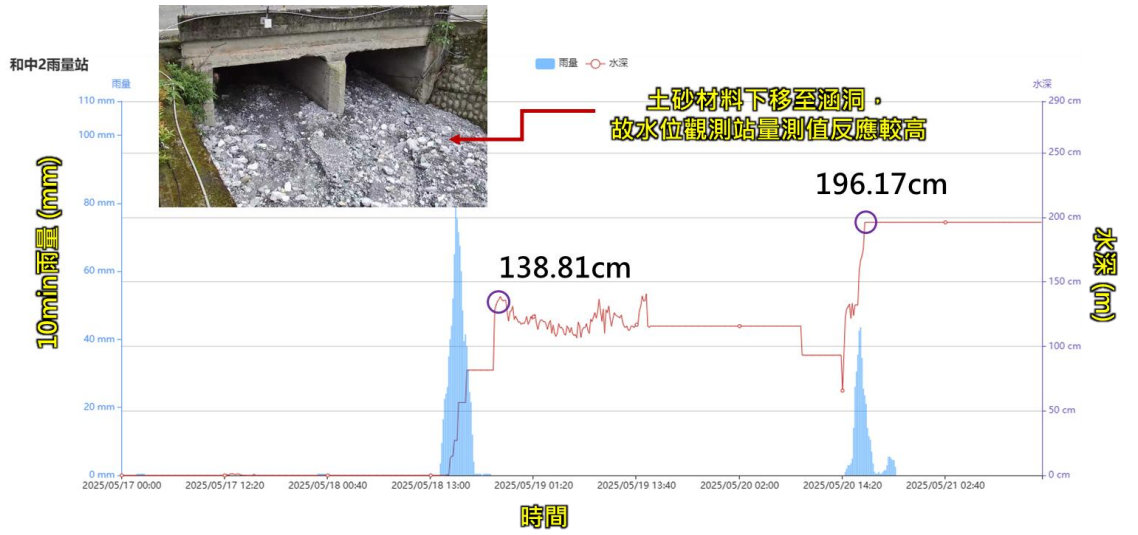


圖 6-24 花蓮縣-和仁野溪測站資料

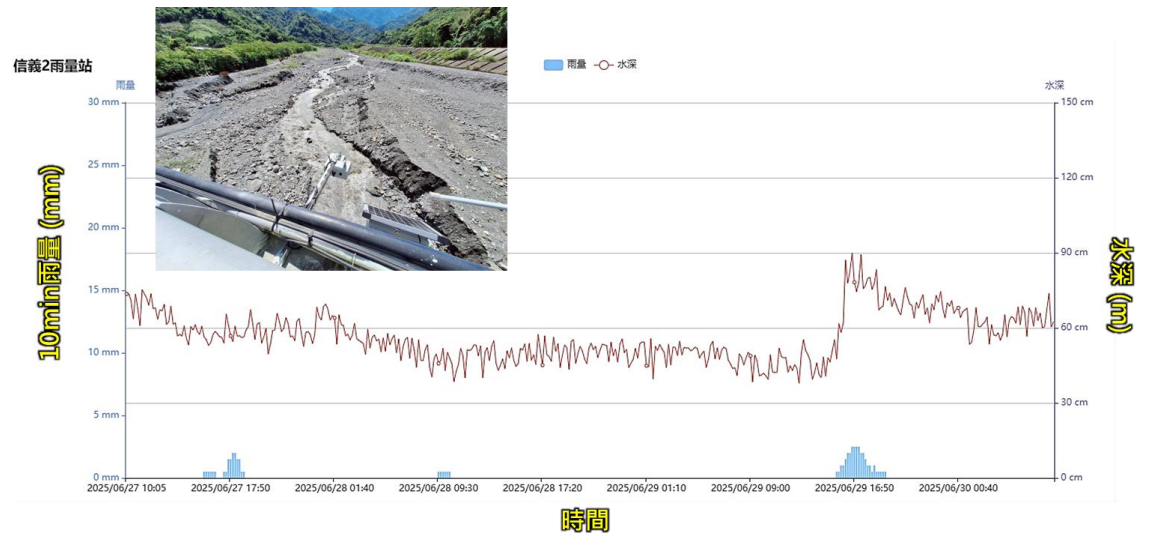


圖 6-25 南投縣-郡坑溪-信義橋測站資料

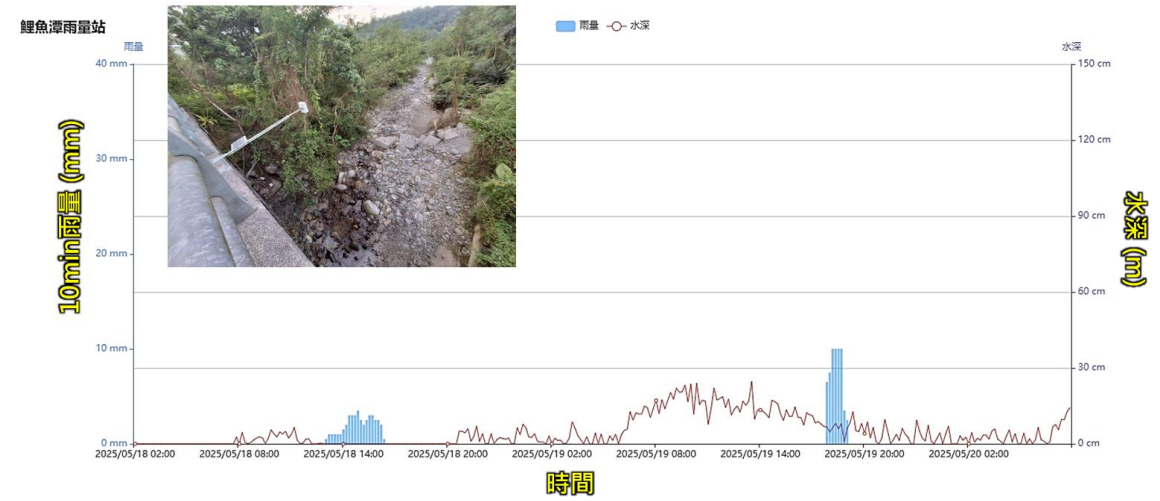


圖 6-26 花蓮縣-佧溪-池南橋測站資料



圖 6-27 花蓮縣-卓溪-無名溪測站資料

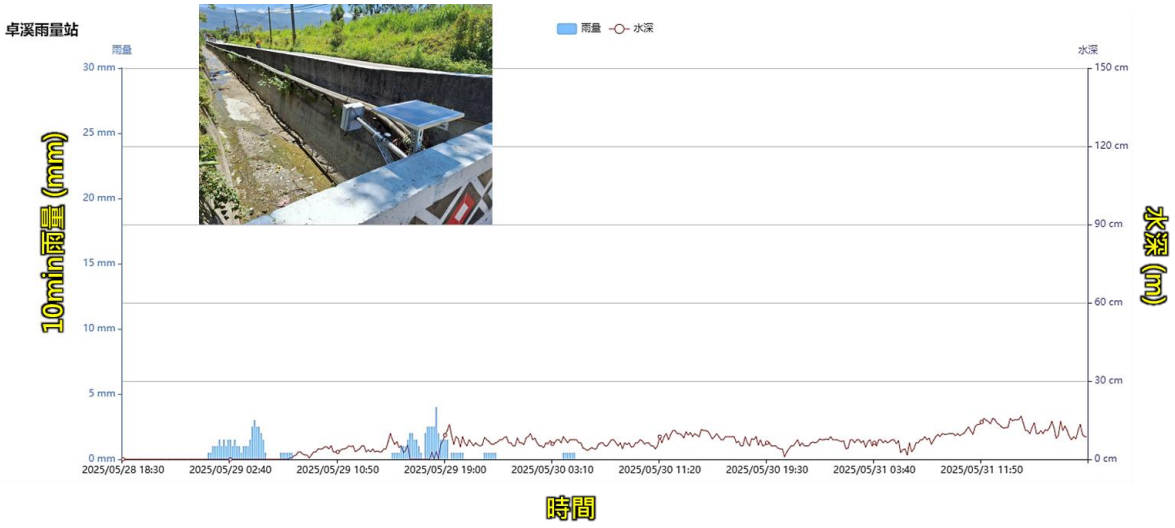


圖 6-28 花蓮縣-樂樂溪測站資料

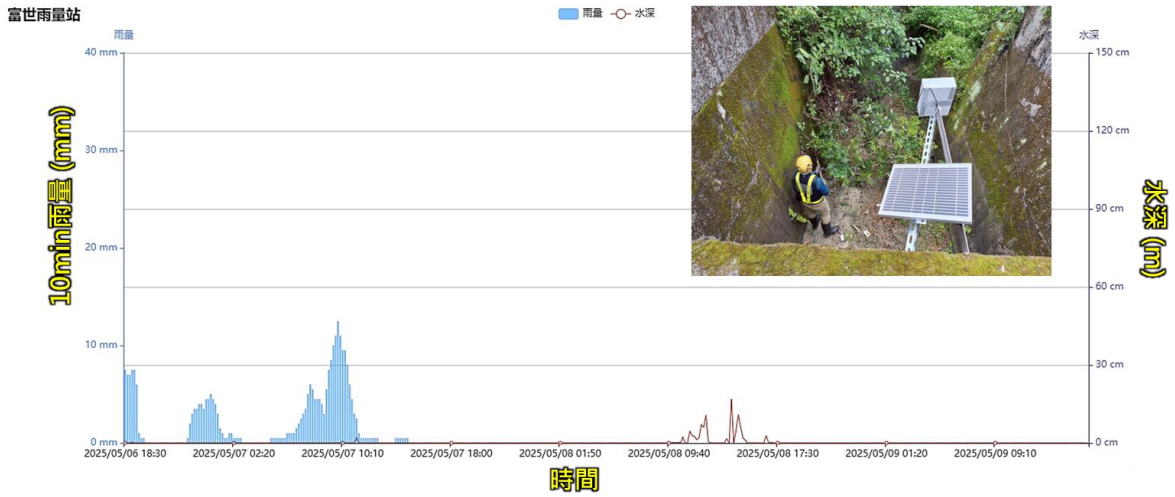


圖 6-29 花蓮縣-新城第三及第四排水測站資料

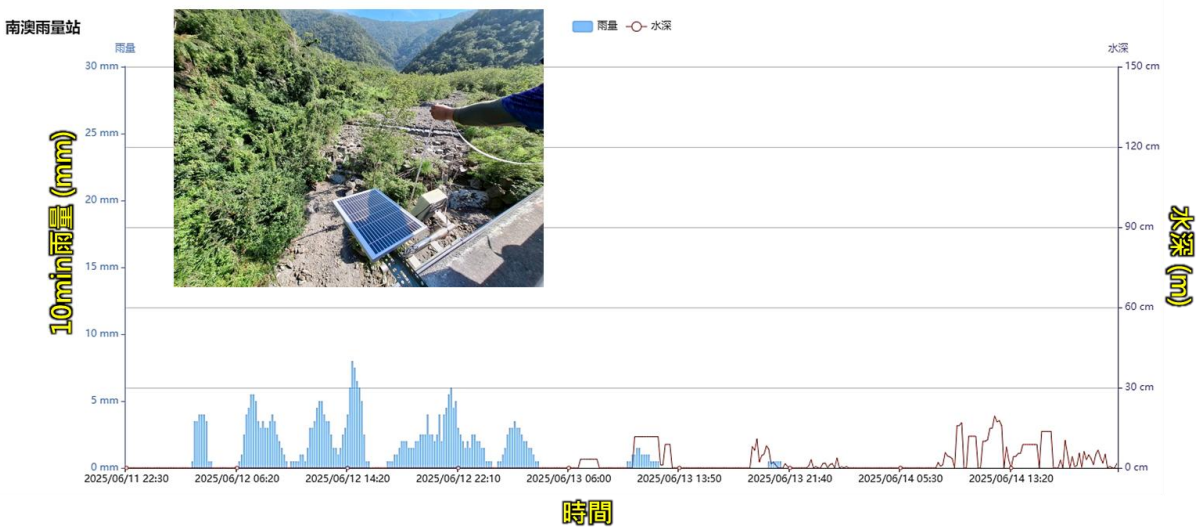


圖 6-30 宜蘭縣-南澳北溪-新澳橋測站資料

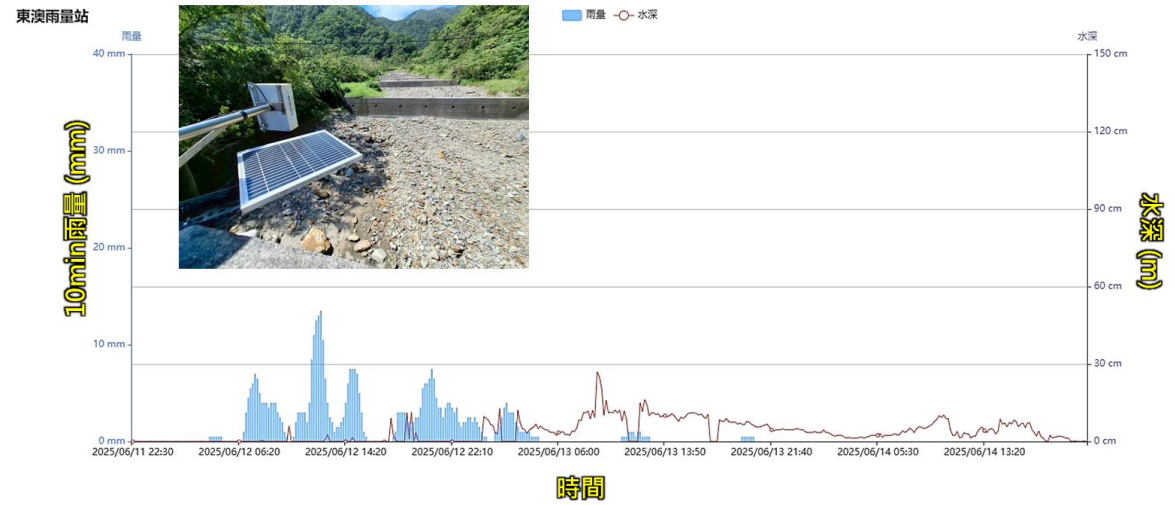


圖 6-31 宜蘭縣-粉鳥林野溪測站資料

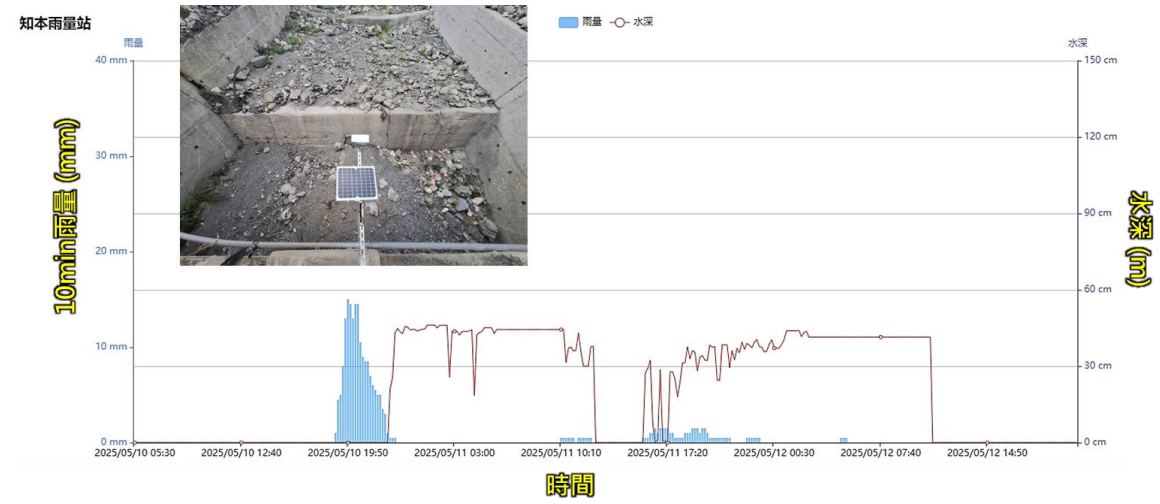


圖 6-32 台東縣-沙崙溪-沙崙溪橋測站資料

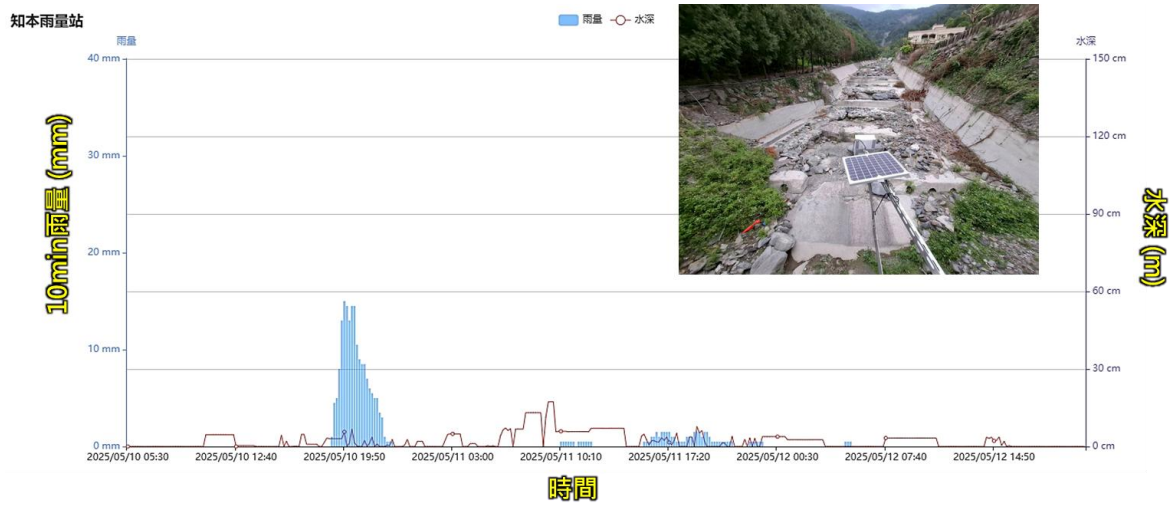


圖 6-33 台東縣-木瓜溪-鎮樂橋測站資料

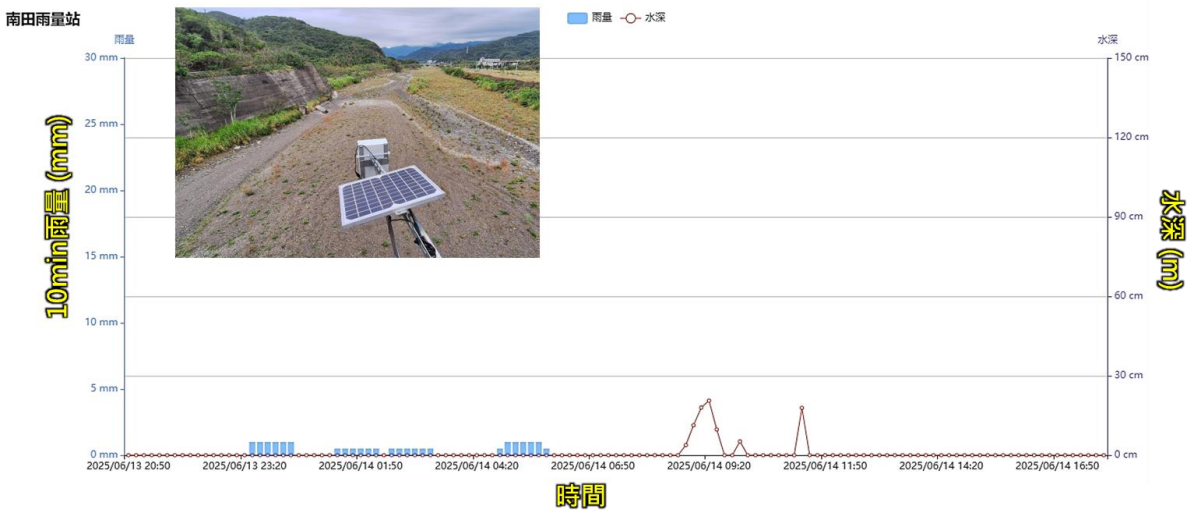


圖 6-34 台東縣-安朔溪-安朔橋測站資料

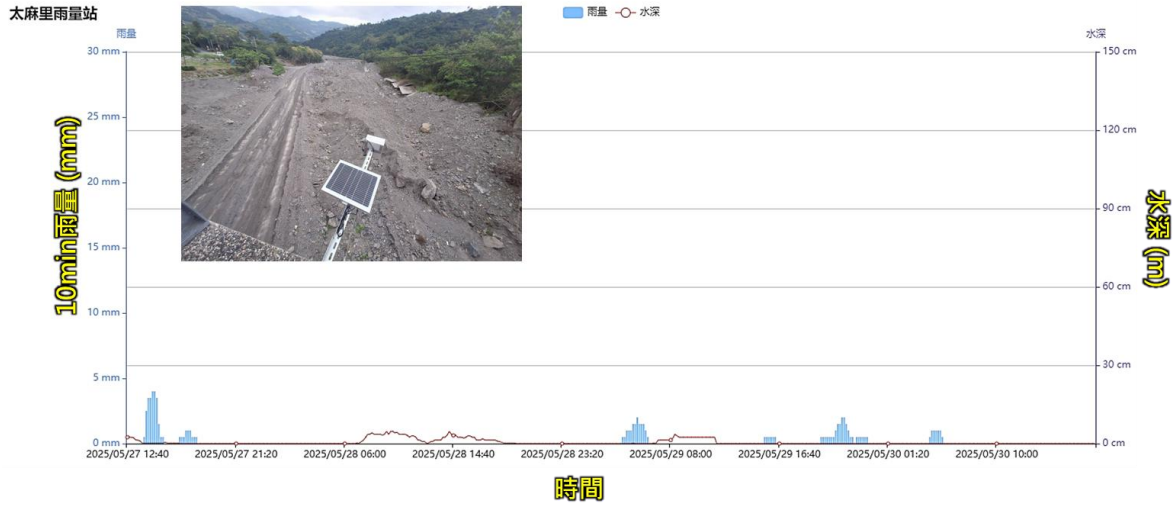


圖 6-35 台東縣-文里溪-北里橋測站資料



圖 6-36 花蓮縣-吉安溪-翠堤橋測站資料

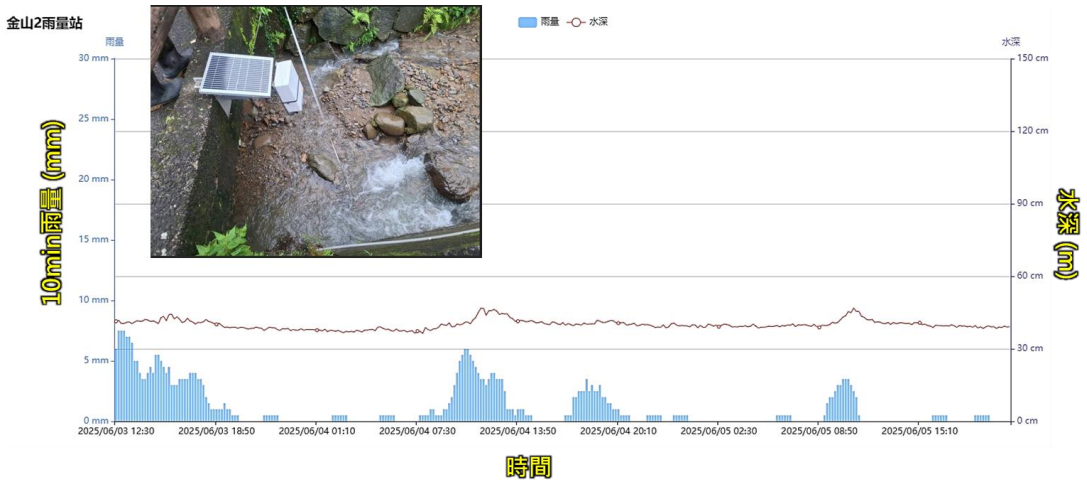


圖 6-37 新北市-金包里溪-長興宮測站資料



圖 6-38 台東縣-華源南北坑測站資料

第三節 河道觀測斷面測量

前兩節所提之集水區水位觀測設備與系統介接，當集水區內已設置水位觀測儀器(如超音波水位計或雷達水位計)後，若欲進一步評估河道在不同水位下的流量(discharge)變化，需搭配河道斷面測量與建立水位-流量關係曲線(H-Q 曲線)或稱水位流量推估公式(rating curve)。為俾便「全臺集水區分布式降雨逕流模式與平台建置」計畫推估流量基礎資訊，本計畫加值回饋觀測斷面測量工作，目前已完成 17 處安裝水位計場域之斷面測量(花蓮縣-石公溪與吉安溪集水區因收訊不良與施工毀損更換其它集水區，待補測)，工作成果說明如下：

一、 斷面測量佈設原則：本計畫主要針對第 1 點之觀測斷面。

1. 既有觀測斷面：針對既有水位觀測區位辦理斷面測量，俾利與前期調查資料比對，探討沖淤趨勢及水砂環境資料整合。本計畫持續辦理測量。

2. 補充觀測斷面：追蹤觀測斷面穩定性，並可輔助覆核觀測資料正確性，若觀測區位於橋梁處，可藉由斷面測量成果及水位觀測成果，進而推估流量。本計畫針對需搭配斷面測量推估流量之區位辦理測量。

3. 溪床具沖淤潛勢河段：如河道轉彎段、曾發生土砂災害等具沖刷潛勢河段，觀察溪床沖淤變化，評估治理效益及後續治理需求。

二、斷面測量佈設原則：

1. 於測區附近選定三點(含)以上之已知三角點，其等級為三等點(含)以上，檢測已知三角點，採用國土測繪中心 E-GNSS 施測(如圖 6-39)。檢測邊長與已知坐標反算邊長之較差小於1/ 10,000，或平面位置較差 3 公分以內者視為合格，作為本計畫引用之平面控制點。

2. 河道斷面高程控制系統與水準測量系統一致，斷面控制點坐標系統採用 TWD97。

3. 河道橫斷面測量，採用全站式經緯儀以三次元數值法自動記錄方式施測，高程誤差固定構造物不超過 10 公分，其他不超過 25 公分。

4. 河道斷面測量與堤防或水流流向成垂直，以左樁為起點，往左方面為負數，右方面為正數，施測渠床變化點，符合實際斷面起伏變化，不得遺漏或簡化；且經左、右樁坐標反算距離，與實測距離之較差不得超過 1/5000。各溪流斷面之測量現況，

5. 以 AutoCAD 程式繪製斷面成果，並建置 DWG 圖檔資料。



(a)斷面測量作業(防砂壩)



(b) 斷面測量作業(溪床)



(c) 斷面測量作業(河道)

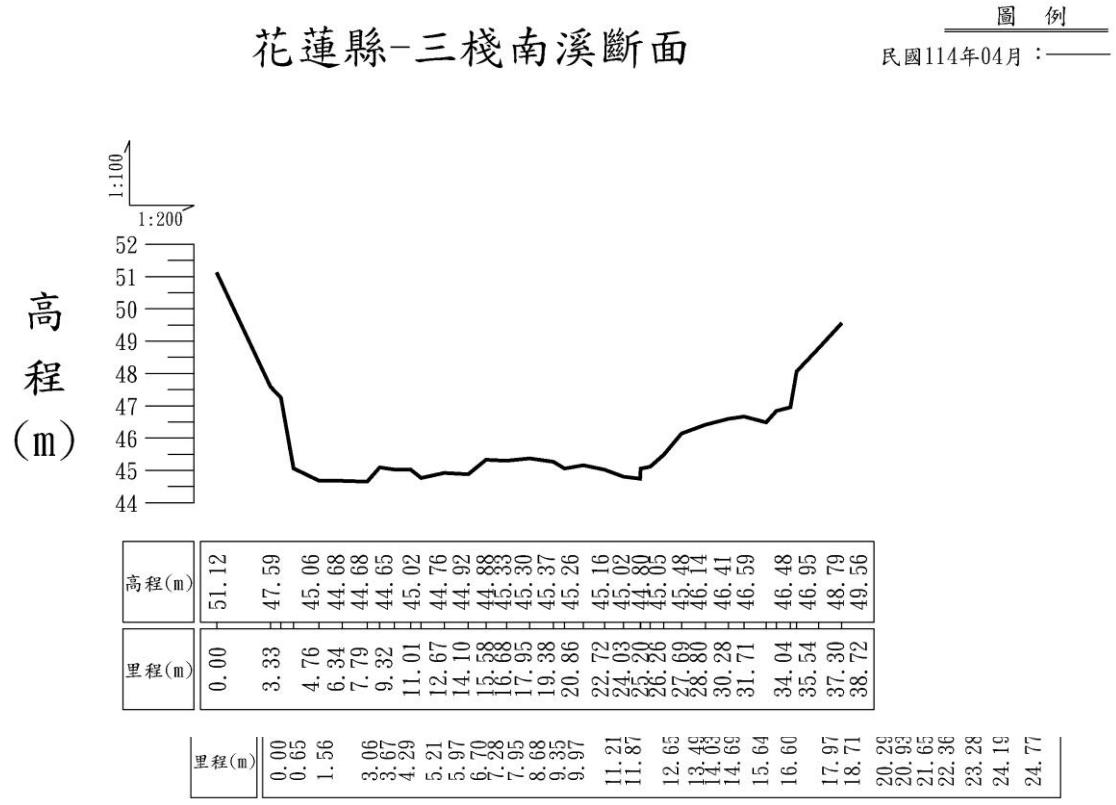


(d) 斷面測量作業(灘地)

圖 6-39 河道觀測斷面測量工作

三、斷面測量成果

本計畫加值回饋辦理 17 處水位計觀測斷面測量成果說明，詳細調查斷面圖與高程資料如圖 6-40 至圖 6-55，各水位計觀測站之現地測量工作況照詳見附錄七。



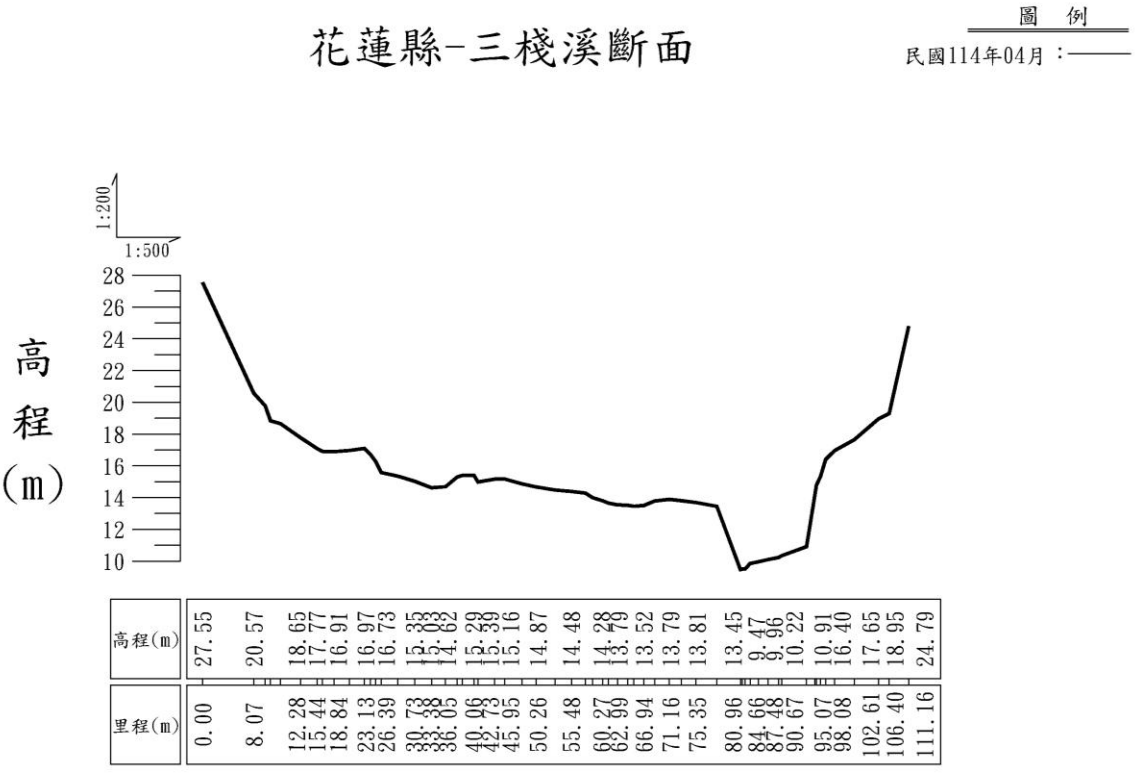


圖 6-40 三棧溪觀測斷面測量工作

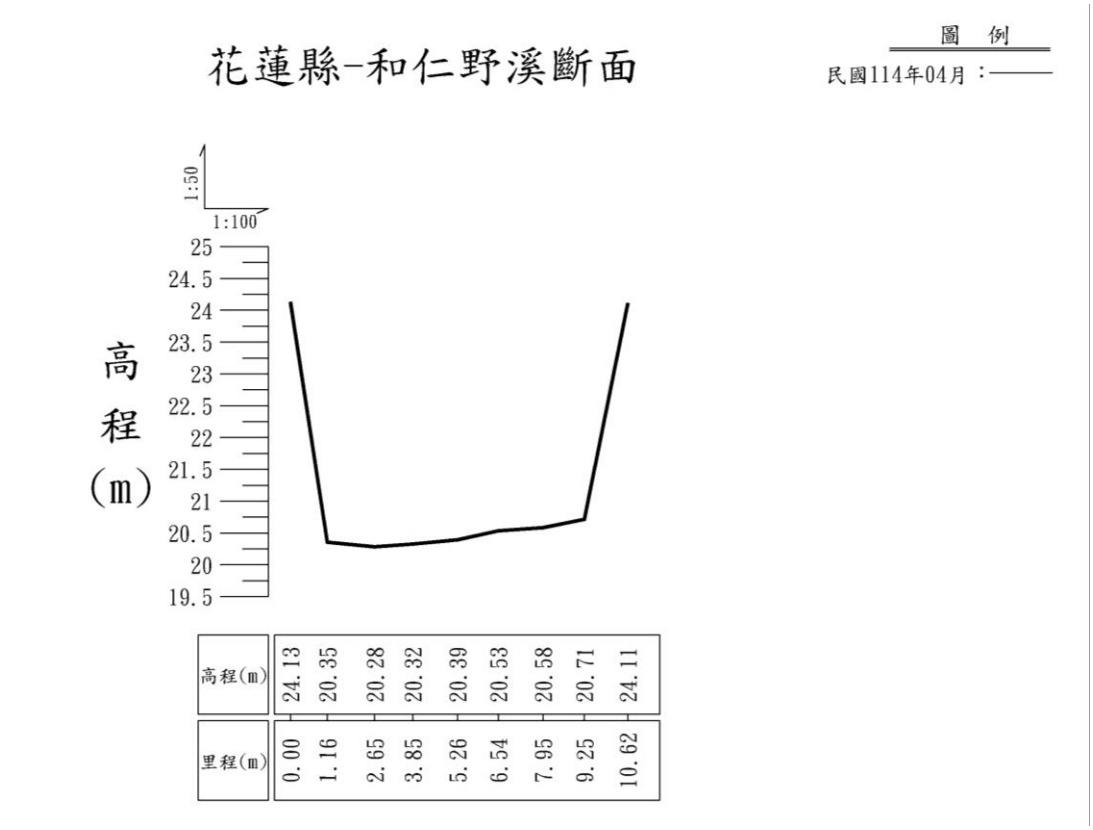


圖 6-41 和仁野溪觀測斷面測量工作

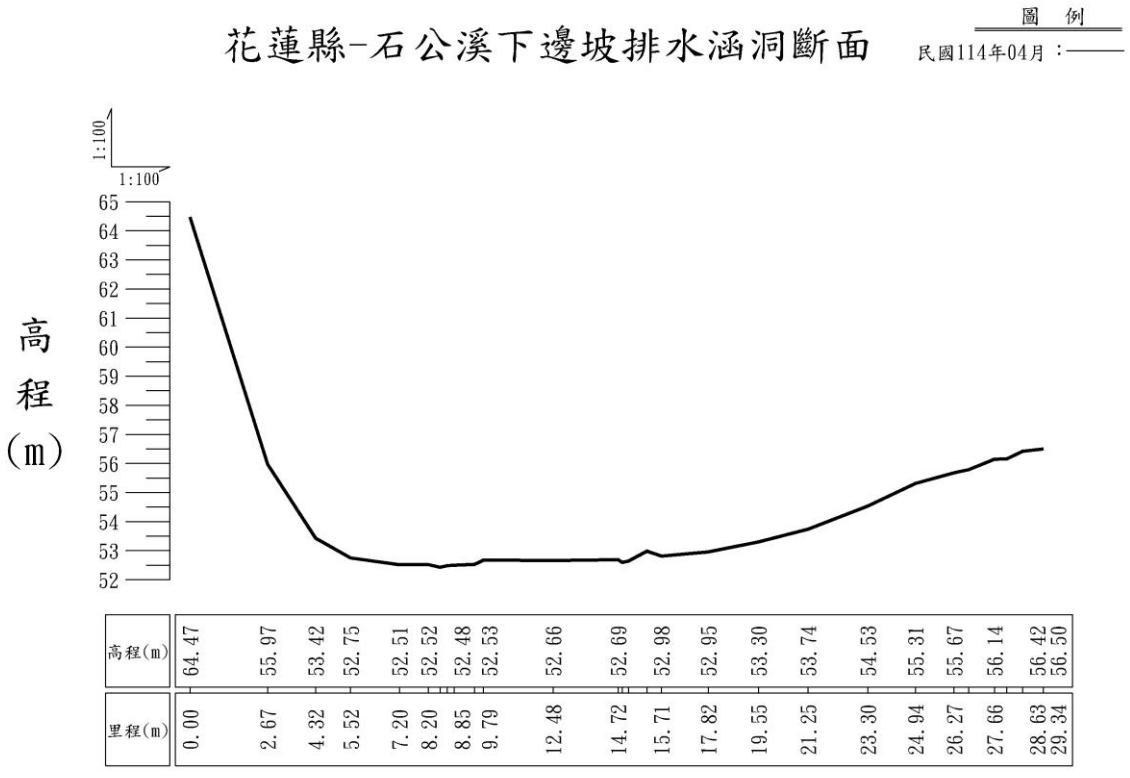


圖 6-42 石公溪觀測斷面測量工作

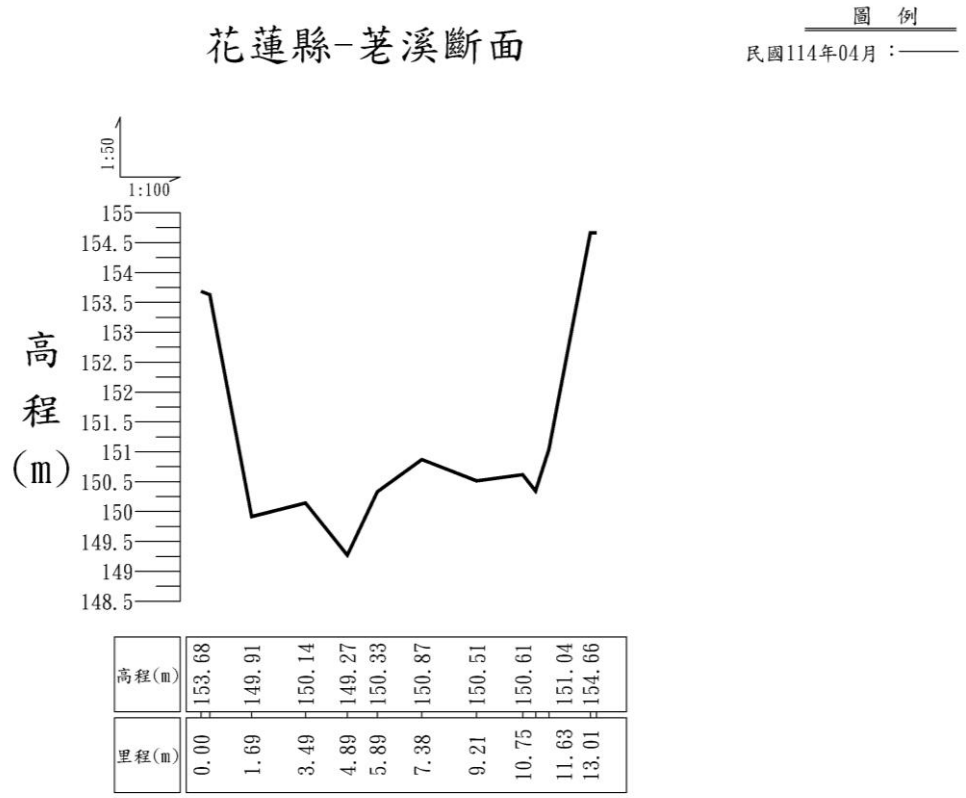


圖 6-43 茗溪(池南僑)觀測斷面測量工作

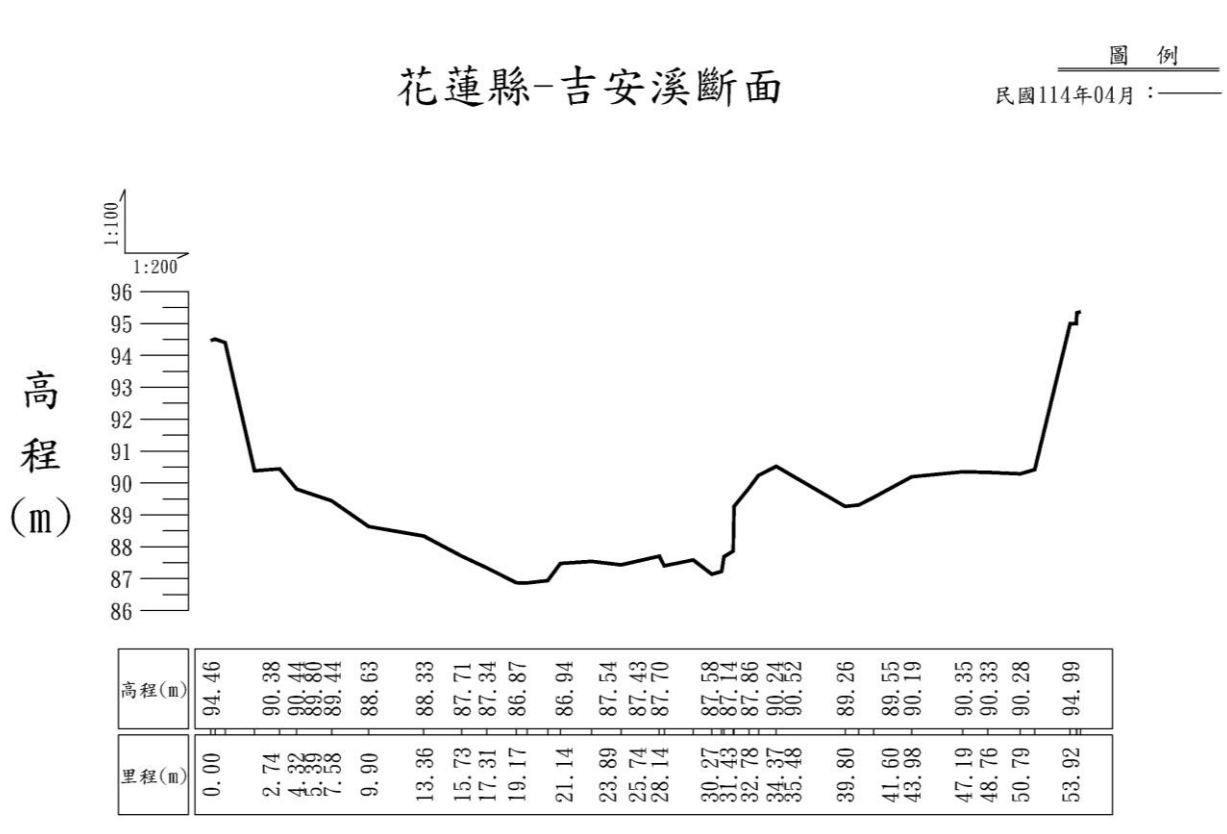


圖 6-44 吉安溪(翠堤橋)觀測斷面測量工作

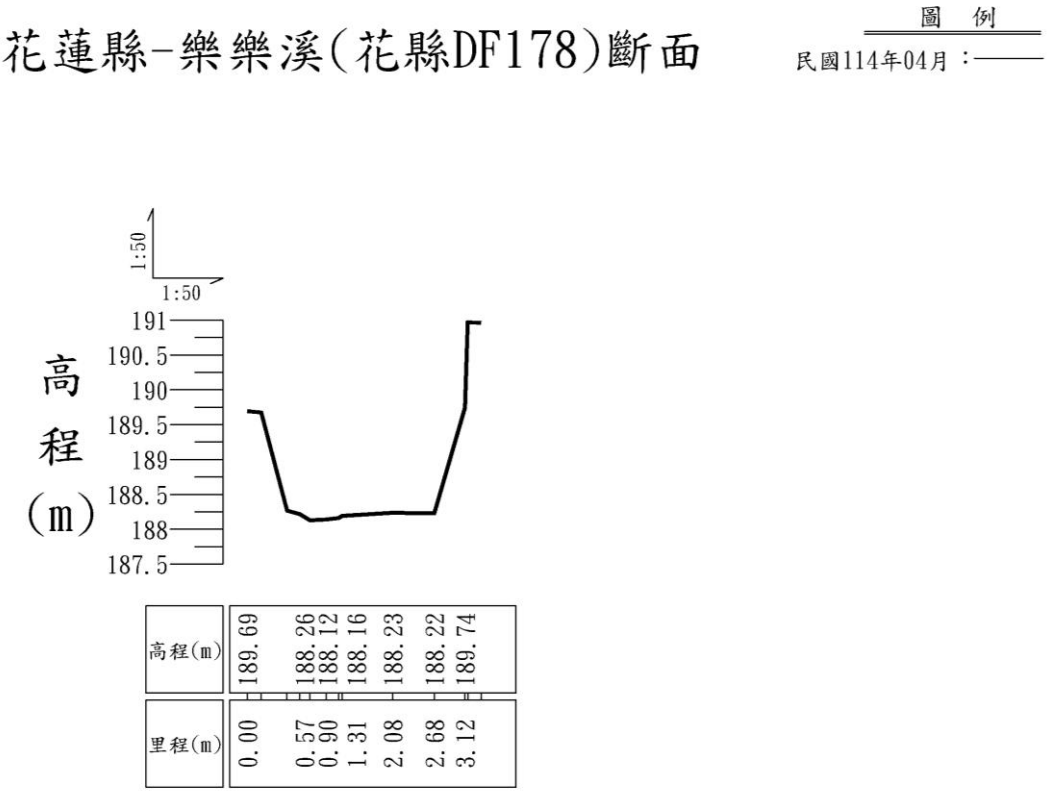


圖 6-45 樂樂溪觀測斷面測量工作

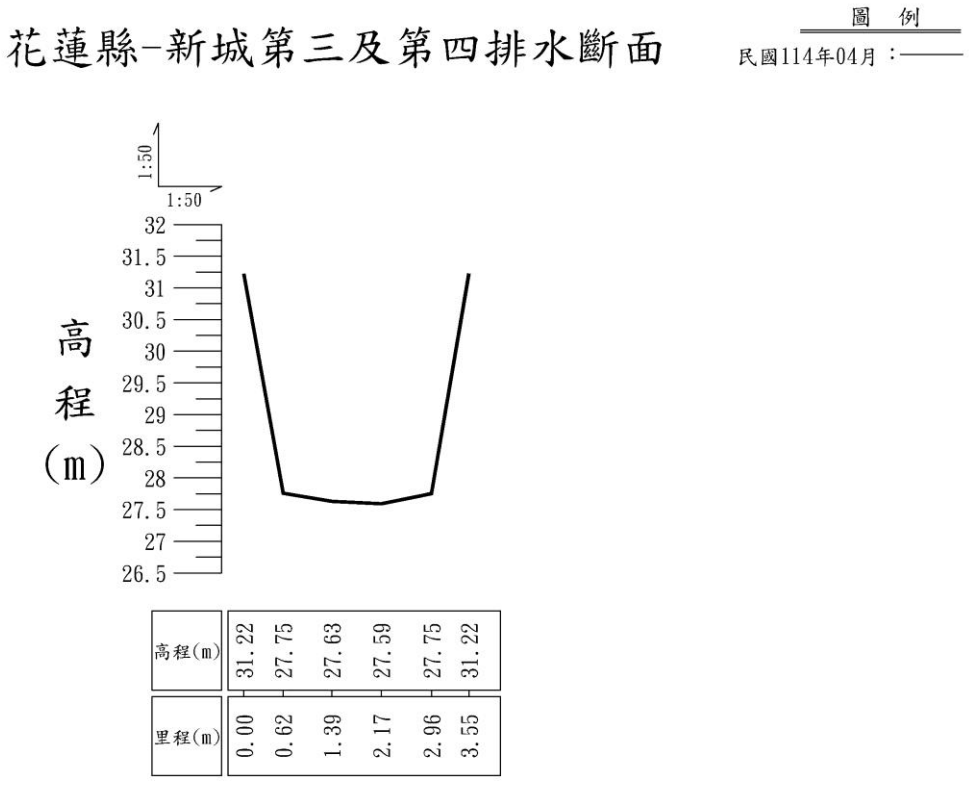


圖 6-46 新城第三及第四排水觀測斷面測量工作

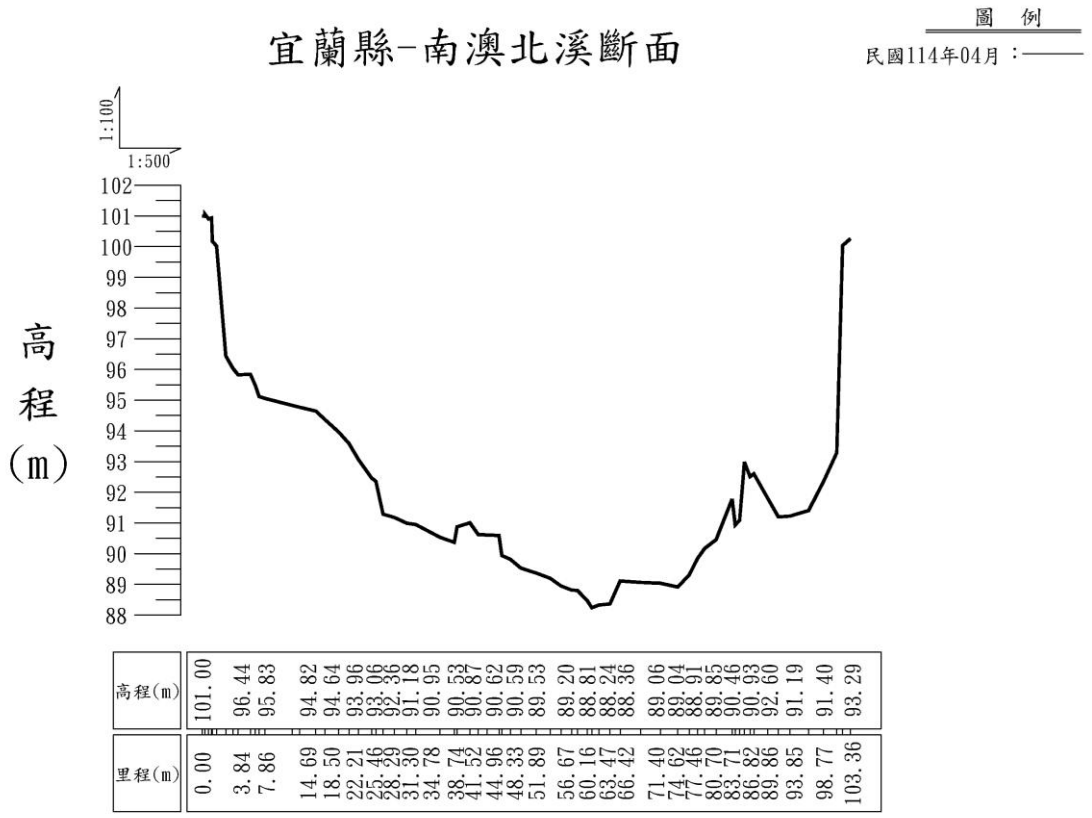


圖 6-47 南澳北溪(南澳橋)觀測斷面測量工作

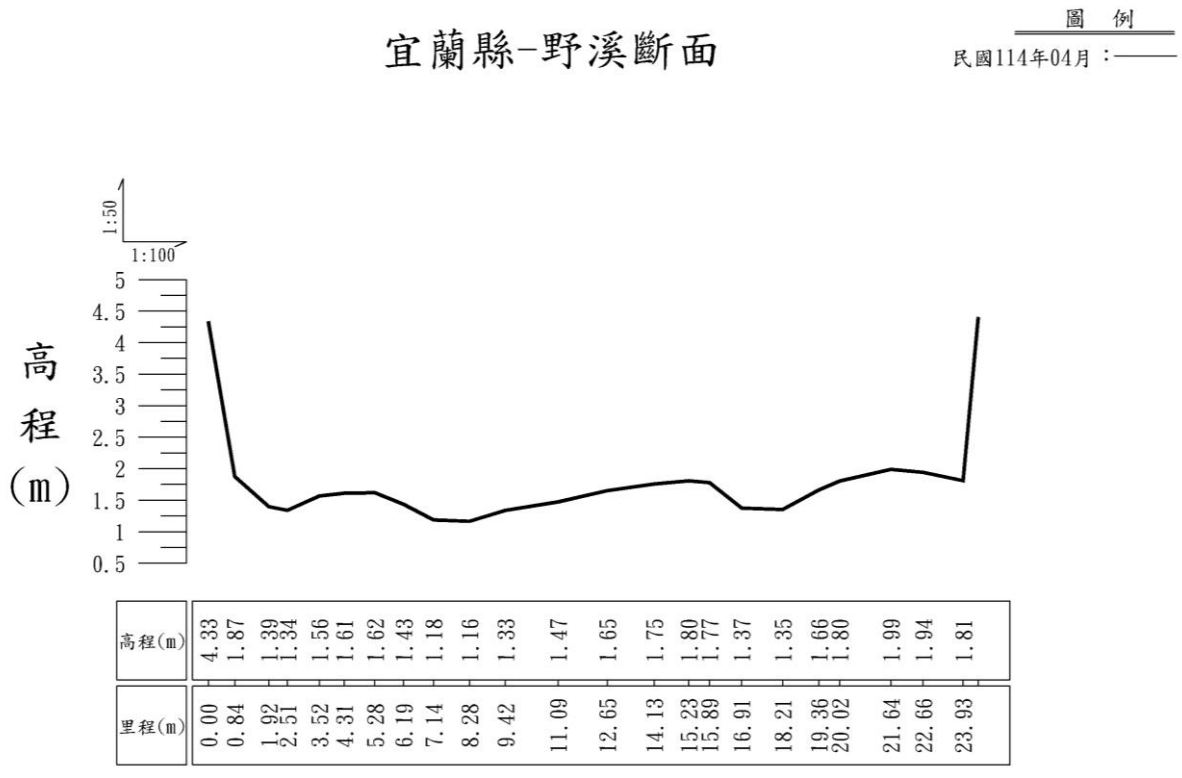


圖 6-48 粉鳥林野溪(宜縣 DF148)觀測斷面測量工作

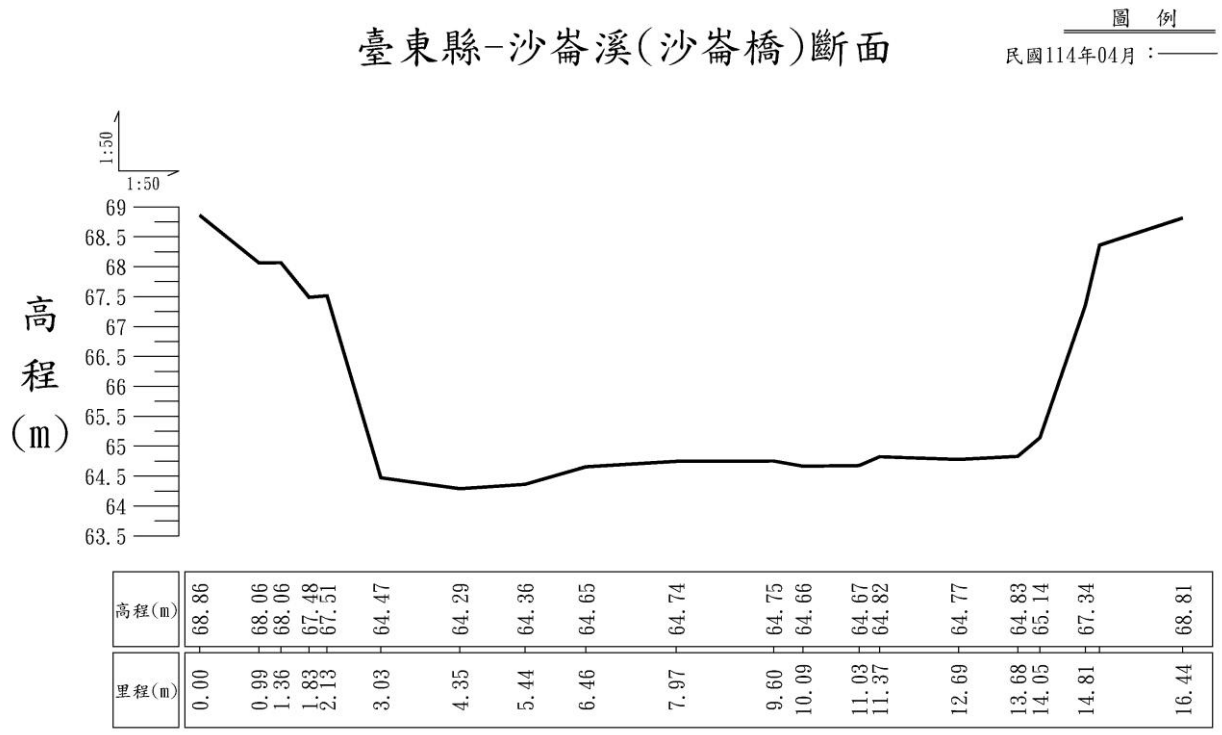


圖 6-49 沙崙溪(沙崙橋)觀測斷面測量工作

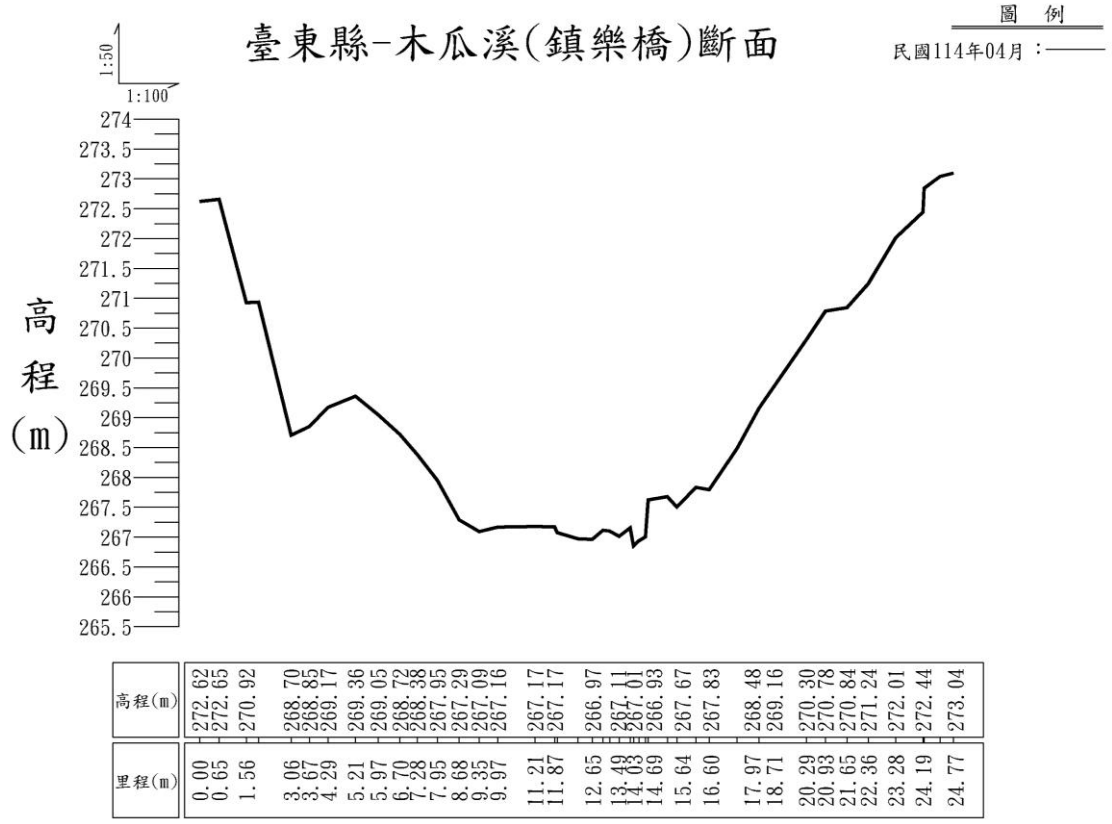


圖 6-50 木瓜溪(鎮樂橋)觀測斷面測量工作

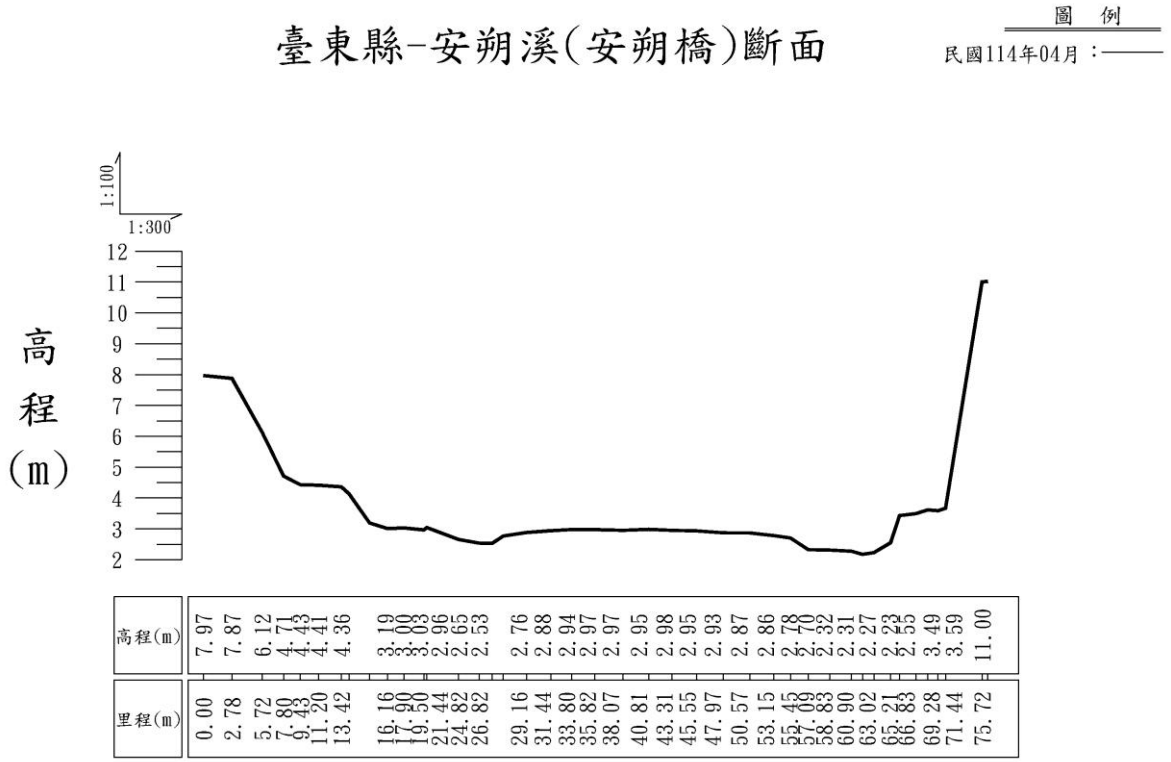


圖 6-51 安朔溪(安朔橋)觀測斷面測量工作

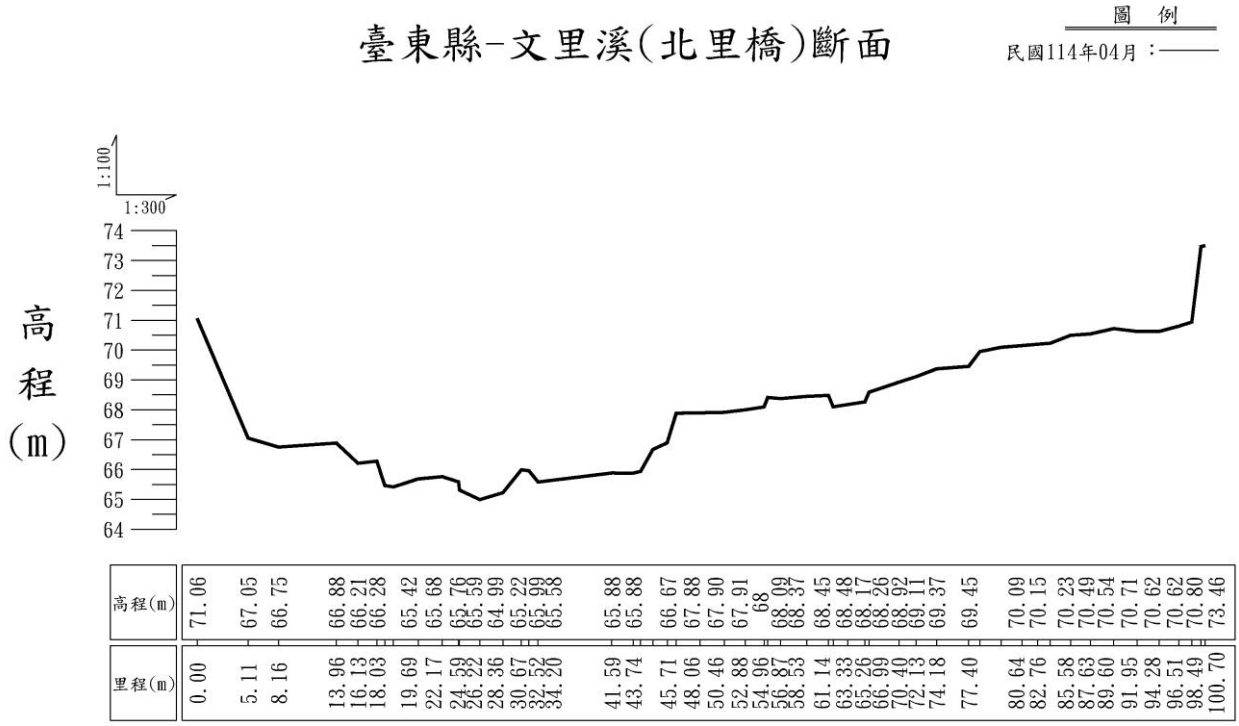


圖 6-52 文里溪(北里橋)觀測斷面測量工作

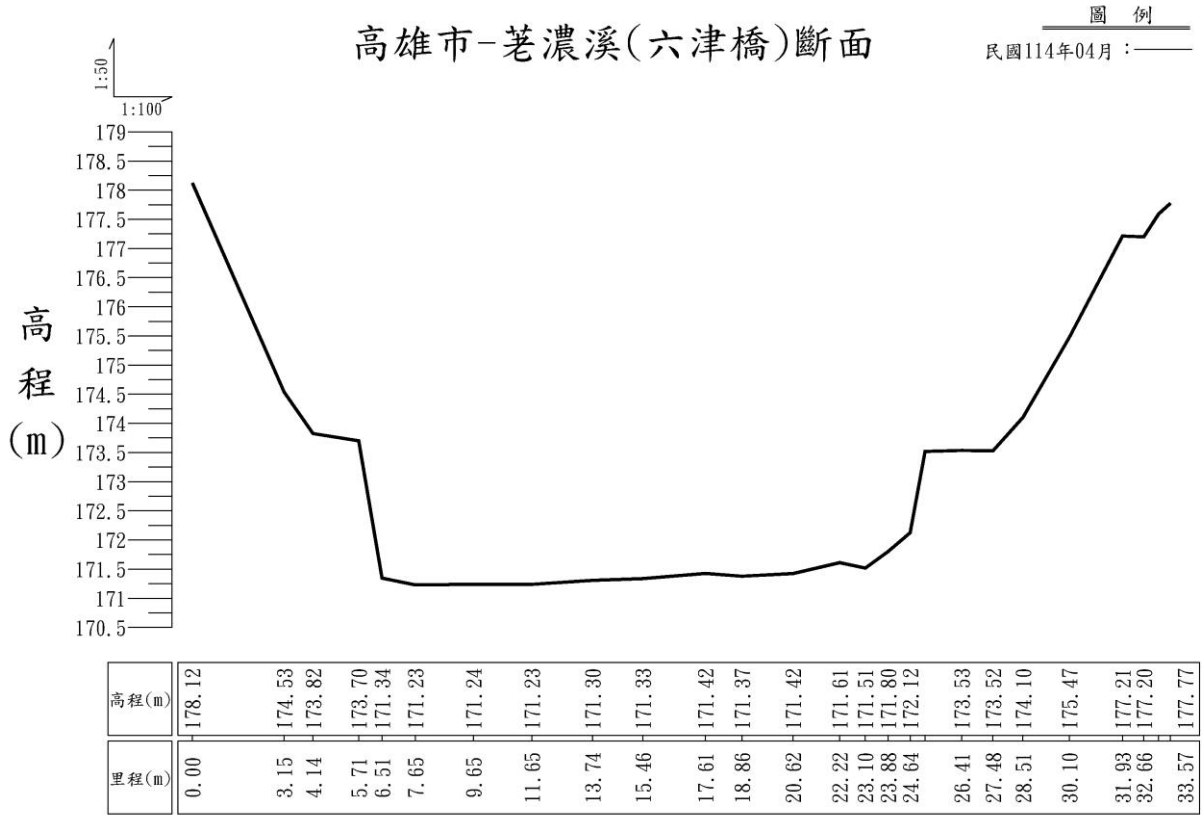


圖 6-53 無名野溪(六津橋)觀測斷面測量工作

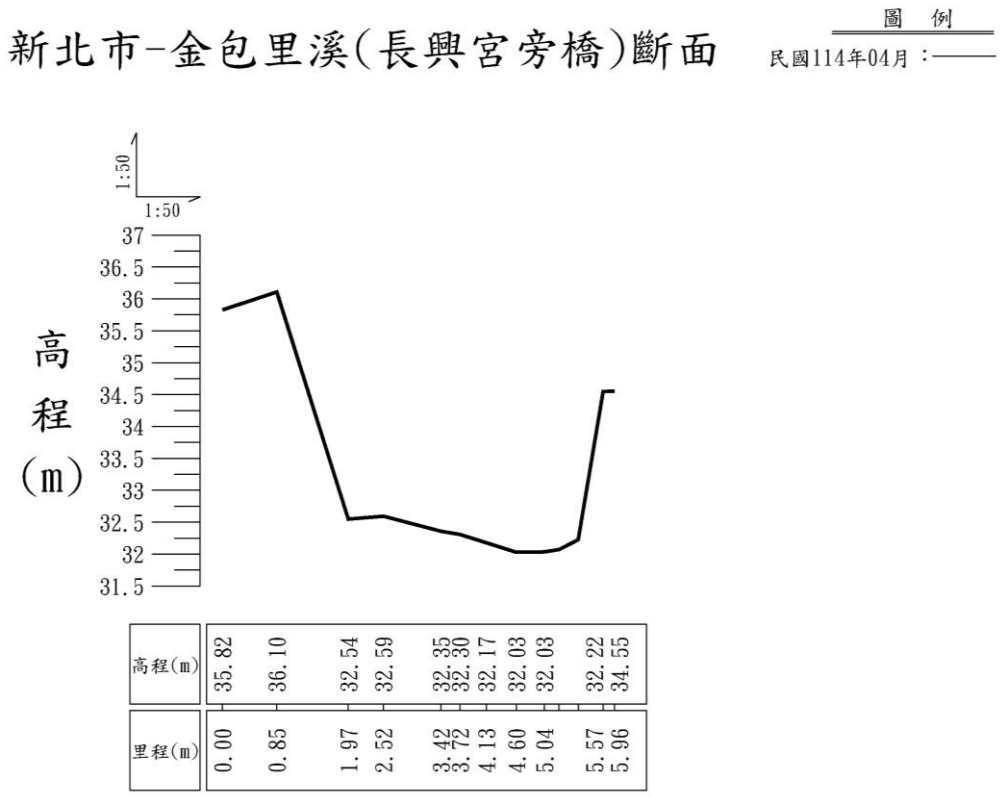


圖 6-54 金包里溪(長興宮)觀測斷面測量工作

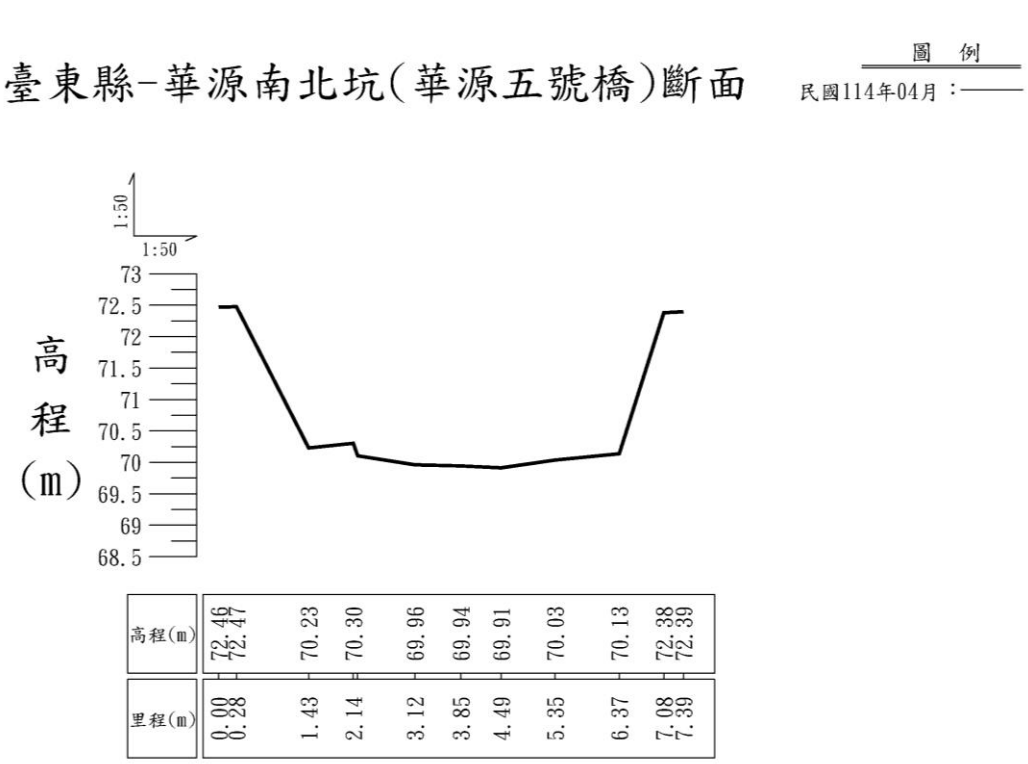


圖 6-55 華源南北坑(防砂壩)觀測斷面測量工作

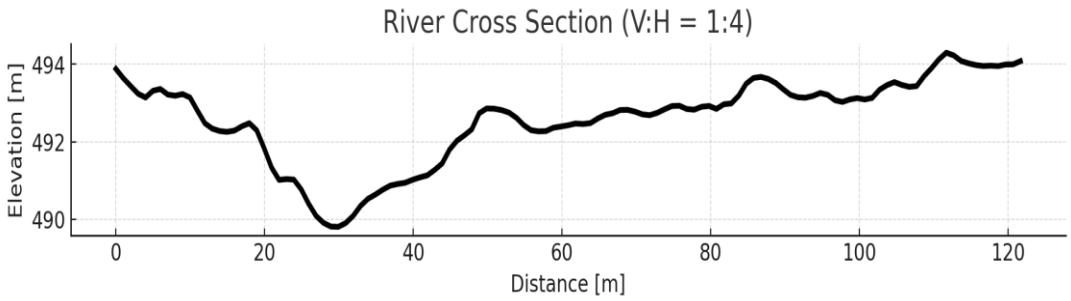


圖 6-56 郡坑溪(信義橋)觀測斷面測量工作

第七章 初步結論與建議

第一節 初步結論

1、在不安定土砂運移模式盤點中，本計畫共計評估七種可能的開源與商業軟體模式，如 r.avaflow、MassMov2D、DAN3D、DualSPHysics、FLO-2D、CAESAR-Lisflood 及 OpenLISEM 模式，旨在協助了解集水區內多點土砂來源釋放，與兼顧主流與支流土砂匯流行為的運移特性。經將 RAMMS 既有優勢功能列入考量後，以 OpenLISEM、CAESAR-Lisflood 與 r.avaflow(皆為開源模式)為後續計畫優先建議測試的不安定土砂數值模式。

2、在不安定土砂模擬區域，計畫選定影響衝擊評估的四處集水區包含和仁野溪、三棧南溪、大清水溪與木瓜溪等，及長期趨勢模擬的兩處集水區(如玉穗溪、文里溪)，為依據 112 年至 113 年間的卡努、凱米颱風及 0403 花蓮地震等重大災害事件與不安定土砂出流口潛勢綜合考慮所篩選。歷經 0403 地震後，和仁野溪、三棧南溪、大清水溪與木瓜溪集水區崩塌率分別為 2.1%、5.5%、5.9%及 6.3%；而文里溪則有多處老山崩與順向坡，地質條件不佳；玉穗溪源頭殘坡面積仍高達 34 公頃，不安定土砂極為活躍，於下游段台 20 線架高橋梁完成前，對下游台 20 線便道構成持續且嚴峻的威脅。

3、本次四處不安定土砂影響與衝擊評估係以農村水保署近五年新生崩塌

目錄為土砂來源，並於 RAMMS-DF 中採用「塊體釋放法」設定集水區上游崩塌塊體完全釋放，且考量河道動床捲增效應，以更貼近土石流實際運動行為。在上述前提下，分別於定量降雨(200、350、500、650、900 mm)及極端降雨情境進行模擬，其結果如下：

(1) 和仁野溪：於 900 mm 以上雨量情境下，台 9 線公路箱涵可能產生 7~8 公尺之土砂淤積而產生溢淹情形。

(2) 三棧南溪：在 1,137 mm 極端降雨情境中對三棧國小造成衝擊並局部產生土砂堆積約 0.5~0.7 公尺，但主要聯外橋梁（三棧橋）因淨高充足，整體受影響程度相對較低。

(3) 大清水溪：當 24 小時累積雨量達 900 mm 時，台 9 丁線 68.9K 清水橋即可能發生土砂堵塞及溢淹風險；鐵路西大清水溪橋於各雨量情境均遭受土砂流衝擊，顯示該段交通具高度中斷風險。

(4) 木瓜溪：鎮樂橋因橋下淨高不足，自 350mm 雨量情境即具致災風險；於 650 mm 以上雨量情境時，千歲橋亦可能面臨橋涵堵塞之危險。

4、長期土砂運移模擬以農村水保署新生崩塌目錄與殘坡為土砂來源，於 RAMMS-DF 中採用塊體釋放法，模擬集水區上游崩塌塊體完全釋放，並納入河道動床捲增效應，以反映土石流之實際運動行為。在上述假設條件下，配合 7 種情境(如無治理第 0 年、第 1 年、第 2 年及第 3 年 與已治理第 1 年、第 2 年及第 3 年)及 50 年重現期距降雨(考量野溪與坡地的水保設施之防洪標準)進行模擬，其分析結果顯示文里溪

流域於治理後第 3 年之攔截土砂量約 122,512 m³，與整治前相比，最終流出土砂量降低約 33.2%，顯示整治工程後文里溪流域可攔截 30%以上之土砂，已達成工程整治效益目標；玉穗溪於治理後第 1 年至第 3 年之最終出流土砂流出量體整體下降約 149,222 m³，符合實際集水區逐年復育現象，經工程效益評估計算，此清疏工程之益本比計算為 1.87，顯示大於 1 代表已達成工程整治效益目標。

5、在不安定土砂分析方法上，初步完成模擬核心技術的轉換。113 年採用「流量歷線法」，此方法雖能耦合降雨逕流(Wflow 模式)與土砂運移(RAMMS 模式)，但存在模擬耗時過長(單一情境需 3-14 天)且易過估下游土砂量體與堆積深度的問題。為此，114 年計畫改採「塊體釋放法」，此方法直接將殘坡與崩塌目錄的土砂量，經降雨情境折減後，以塊體形式在 RAMMS 中釋放。此法不僅大幅縮短模擬時間(單一情境約 1.5 天)，經與歷史災例比對，其模擬的堆積量與範圍仍可接近真實情況，進而避免模擬範圍與深度高估的狀況。

6、利用內政部國土測繪中心提供的全國 PS-InSAR 網格式地表變形分析成果進行加值應用，初步篩選並評估鄰近山區鐵路與公路的高活動性邊坡。在公路方面：於台 14 甲線清境路段，標定出一處年沉陷量達 5-8 毫米的顯著活動熱區。鐵路方面：阿里山森林鐵路沿線的觀測點較為稀疏，未發現明顯的沉陷區域。而在大規模崩塌綜合分析：將成果套疊 334 處鄰近鐵公路的大規模崩塌潛勢區，篩選出 19 處具有「緩慢地表變形」

(-2 至-10 mm/yr)潛在風險區，並將其列表供後續追蹤。惟 PS 形變點於山區分布較惟受限，建議大崩應用上延伸參考貴署大崩計畫之 L 波段影像 MT-InSAR 評估成果。

7、本計畫階段已於 114 年 6 月 30 日全數完成 17 處集水區流量率定觀測儀器安裝與資料介接工作。包含三棧南溪、和仁野溪、三棧溪-三棧橋、郡坑溪、佬溪、卓溪(無名溪)、樂樂溪、新城第三及第四排水、南澳北溪、粉鳥林野溪、沙崙溪、木瓜溪、安朔溪、文里溪、吉安溪、金包里溪與華源南北坑等集水區。初步觀測顯示，17 處集水區溪流中有 5 處為常流水，其餘 12 處多為旱溪，僅在降雨時有明顯水位反應。此外，本計畫額外回饋完成了所有觀測站的河道斷面測量與 LINE 資料查詢機器人開發工作，以利不安定土砂-水文模式計畫銜接使用。

8、本計畫利用 108 至 114 年(2019 至 2025 年)的 Planet 光學衛星影像，針對荖濃溪與旗山溪流域內的 202 處殘坡，進行了長期的變遷評估。本分析方法採用次像素位移追蹤法（Sub-pixel offset tracking, SPOT），此技術能精準量化年度公尺級的坡面水平位移，有效彌補 InSAR 技術在觀測快速滑動上的不足。計畫團隊已完成所有殘坡的時序影像分析，並計算出各殘坡近 7 年的年平均水平位移速度。評估成果將 202 處殘坡依活動性分為三級：其中 115 處為「低活動性」、80 處為「中活動性」，並成功識別出 4 處「高活動性」的重點殘坡。

9、本計畫利用 113 至 114 年 Sentinel-1 雷達影像進行 202 處殘坡進行

短期潛變評估，挑選各殘坡合適軌道進行分析，並將 LOS 方向轉換成下邊坡滑移方向後進行分級，其中 27 處無觀測點殘坡，97 處為「無明顯變形」、64 處為「緩慢變形」，並成功識別出 13 處「明顯變形」的重點殘坡，包含高市 RS059、RS060、RS114、RS115、RS116、RS120 等殘坡。

10、 利用內政部國土測繪中心提供的全國 PS-InSAR 網格式地表變形分析成果進行加值應用，初步篩選並評估鄰近山區鐵路與公路的高活動性邊坡。在公路方面：於台 14 甲線清境路段，標定出一處年沉陷量達 5-8 毫米的顯著活動熱區。鐵路方面：阿里山森林鐵路沿線的觀測點較為稀疏，未發現明顯的沉陷區域。而在大規模崩塌綜合分析：將成果套疊 334 處鄰近鐵公路的大規模崩塌潛勢區，篩選出 19 處具有「緩慢地表變形」(-2 至-10 mm/yr)潛在風險區，並將其列表供後續追蹤。惟 PS 形變點於山區分布較惟受限，建議大崩應用上延伸參考貴署大崩計畫之 L 波段影像 MT-InSAR 評估成果。

11、 本計畫進行兩次事件型雷達波變異偵測，針對 2025 年丹娜絲颱風、薇帕颱風及 0728 豪雨事件進行廣域地表變異快篩，成果顯示雷達變異分別成功偵測出雲林草嶺清水溪堰塞湖、花蓮馬鞍溪堰塞湖、高市 RS078 殘坡等主要變異區域，說明雷達變異分析能用於災害事件發生雲霧遮蔽時進行新生崩塌地的快篩。

12、 表 7-1 為本計畫契約履約檢核表，詳列各項『契約工作項目』並對照實

際『辦理情形』，以確認各階段分析與評估工作均已依約完成。

表 7-1 本計畫契約履約檢核表

契約工作項目			辦理情形
一	精進不安定土砂衝擊分析模式及模擬分析	➢ 集水區多重土砂來源之土砂及土石流運移模式盤點 ➢ 農村水保署4處集水區模擬不安定土砂運移衝擊影響範圍 ➢ 農村水保署 2 處集水區模擬，進行未來長期土砂運移趨勢之事件模擬	已完成 已完成 已完成
二	不安定土砂集水區殘坡長期變遷評估	➢ 荖濃溪與旗山溪流域共191處殘坡，進行次像素位移追蹤法(Sub-pixel offset tracking;SPOT)分析108~114年變位，並建立多時序累計變位成果	已完成
三	不安定土砂集水區殘坡短期潛變評估	➢ 分析近二年(113-114)荖濃溪與旗山溪之191處殘坡區位之歷史多時序地表形變，依評估結果研訂合適之殘坡活動性危害等級 ➢ 產製臺灣本島地表形變分析成果及加值分析山坡地的鐵公路之高位移活動區位 ➢ 運用 Sentinel-1 SAR 影像就114年度豪雨引致區域型崩塌災害事件，製作雷達波變異偵測產製地貌變遷圖及廣域快篩分析報告。	已完成 已完成 已完成
四	研提不安定土砂執行計畫與分署技術諮詢	➢ 協助農村水保署研提115年度「不安定土砂集水區土砂運移與衝擊」執行計畫，更新「不安定土砂運移與衝擊評估作業方法」。 ➢ 彙整不安定土砂危害圖成果供農村水保署上架至 BigGIS 系統。	已完成 已完成
五	不安定土砂集水區流量率定觀測儀器租用與資料檢核	➢ 選定 17 處集水區租用水位計至現場佈設，即時遠端監控河川水位變化。	已完成

第二節 建議

1、本年度計畫於花蓮地區-大清水、和仁與三棧南溪數值模擬集水區，考慮 113 年 0403 地震後，上游集水區地貌已產生巨大改變，惟內政部最近一期高精度 DEM 產製期間資為 040 3 地震前資料，建議待向內政部新版震後 DEM 上架後(地礦中心產製)，懇請貴署協助申請，以利 RAMMS 模擬建模使用。

2、本計畫申請低軌道 Planet 光學影像後續於下單時，建議將拍攝角度納入考慮，保持每年影像拍攝角度一致性，確保爾後進行長時序位移偵測之有效性，提升分析成果可靠度。

3、本計畫採用 Sentinel-1 SAR 衛星進行殘坡慢速位移分析，成果顯示對於殘坡上如植被覆蓋良好、且殘坡面積較小者，受限於其波段(C 波段)限制，較難解析完整地表潛移微變特徵，後續如美國太空總署與印度合作之 L 波段 NISAR 影像可取得且 InSAR 測試成功後，可以作為後續計畫殘坡短期潛變得影像來源。

參考文獻

1. Aaron, J., McDougall, S., Kowalski, J., Mitchell, A., & Nolde, N. (2022). Probabilistic prediction of rock avalanche runout using a numerical model. Landslides, 19, 2853–2869. https://doi.org/10.1007/s10346-022-01939-y
2. Ansari, H., De Zan, F., & Bamler, R. (2018). Efficient Phase Estimation for Interferogram Stacks. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(7), 4109–4125. https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2826045
3. Ansari, H., Zan, F. De, & Bamler, R. (2017). Sequential Estimator: Toward Efficient InSAR Time Series Analysis. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(10), 5637–5652. https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2711037
4. Baoling, Gui., Bhardwaj, Anshuman., Sam, Lydia. (2024). Revealing the evolution of spatiotemporal patterns of urban expansion using mathematical modelling and emerging hotspot analysis, Journal of Environmental Management, 364, 121477, ISSN 0301-4797.
5. Barros, C. A. P. de, Govers, G., Minella, J. P. G., & Ramon, R. (2021). How water flow components affect sediment dynamics modeling in a Brazilian catchment. Journal of Hydrology, 597, 126111. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126111
6. Barros, C. A. P. de, Minella, J. P. G., Dalbianco, L., & Ramon, R. (2014). Description of hydrological and erosion processes determined by applying the LISEM model in a rural catchment in southern Brazil. Journal of Soils and Sediments. https://doi.org/10.1007/s11368-014-0903-756
7. Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood

inundation modelling. Journal of Hydrology, 387, 33 – 45. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027

8. Beguería, S., Van Asch, T. W. J., Malet, J.-P., & Gröndahl, S. (2009). A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1897 – 1909.
9. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375 – 2383. https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792
10. Beyer, R. A., Alexandrov, O., & McMichael, S. (2018). The Ames Stereo Pipeline: NASA’s Open Source Software for Deriving and Processing Terrain Data. Earth and Space Science, 5(9), 537 – 548. https://doi.org/10.1029/2018EA000409
11. Bout, B., Lombardo, L., van Westen, C. J., & Jetten, V. G. (2018). Integration of two-phase solid fluid equations in a catchment model for flashfloods, debris flows and shallow slope failures. Environmental Modelling & Software, 105, 1 – 16. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.01789
12. Broxton, M. J., Nefian, A. V, Moratto, Z., Kim, T., Lundy, M., & Segal, A. V. (2009). 3D Lunar Terrain Reconstruction from Apollo Images. In G. Bebis, R. Boyle, B. Parvin, D. Koracin, Y. Kuno, J. Wang, J.-X. Wang, J. Wang, R. Pajarola, P. Lindstrom, A. Hinkenjann, M. L. Encarnação, C. T. Silva, & D. Coming (Eds.), Advances in Visual Computing (pp. 710 – 719). Springer Berlin Heidelberg.
13. Chen, H., Dadson, S., Chi, Y.G. (2006). Recent increase in sediment yield from the Taiwanese mountains: Evidence for event-driven bedrock landslides.

Geology, 34(3), 197–200.

14. Chen, H., Kuo, Y.M., Wu, J.H., Tseng, Y.H., & Chi, Y.G. (2017). Extreme sediment delivery from large landslides after the 2009 Typhoon Morakot in Taiwan. Earth Surface Processes and Landforms, 42(11), 1647–1658.
15. Cheon, E., Lee, S.-R., & Lee, D.-H. (2020). Hazard assessment based on the combination of DAN3D and machine learning method for planning closed-type barriers against debris-flow. Water, 12(1), 170. https://doi.org/10.3390/w12010170
16. Cherfils, J. M., Pinon, G., & Rivoalen. (2012). JOSEPHINE: A parallel SPH code for free-surface flows. Computer Physics Communications, 183(7), 1468–1480.2
17. Conlan, M., Aaron, J., Johnston, K., Gauthier, D., & McDougall, S. (2018). DAN3D model parameters for snow avalanche case studies in western Canada. In: Proceedings of the 2018 International Snow Science Workshop, Western Canada.
18. Coulthard, T. J., Neal, J. C., Bates, P. D., Ramirez, J., de Almeida, G. A. M., & Hancock, G. R. (2013). Integrating the LISFLOOD−FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution. Earth Surface Processes and Landforms, 38(15), 1897–1906. https://doi.org/10.1002/esp.347812
19. Crespo, A. J. C., Dominguez, J. M., Rogers, B. D., Gómez Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., Vacondio, R., Barreiro, A., & García Feal, O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). COMPUTER PHYSICS COMMUNICATIONS, 187, 204–216. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.10.0041

20. Crespo, A. J. C., Gómez-Gesteira, M., & Dalrymple, R. A. (2008). Modeling Dam Break Behavior over a Wet Bed by a SPH Technique. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 134(6), 313–320.
21. Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Lin, J.C., Hsu, M.L., Stark, C. P. (2004). Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. Geology, 32(8), 733–736.
22. Dalrymple, R. A., & Rogers, B. D. (2006). Numerical modeling of water waves with the SPH method. Coastal Engineering, 53, 141–147.
23. De Roo, A. P. J., & Offermans, R. J. E. (1995). LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model for basin-scale water and sediment management. In Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995) (IAHS Publ. no. 231, pp. 399–405). IAHS Press.12
24. De Vugt, L. C. (2018). Mapping and modelling of landslide and flood hazards on St. Eustatius with openLISEM (Master’s thesis, Utrecht University).
25. Ding, X. Y., Hu, W. J., Liu, F., & Yang, X. (2023). Risk assessment of debris flow disaster in mountainous area of northern Yunnan province based on FLO-2D under the influence of extreme rainfall. Front. Environ. Sci., 11, Article 1252206. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.125220612
26. Fan, J.C., & Lin, Y.H. (2014). Sediment disaster induced by catastrophic Typhoon Morakot in Taiwan. International Journal of Erosion Control Engineering, 7(1), 20–25.
27. Ferket, B., Van De Broek, M., Van Hoestenberghe, T., Degerickx, J., De Sutter, R., Govers, G., Dezillie, N., & Deproost, P. (2014). Erosion modelling towards, and sediment transport modelling in unnavigable watercourses in Flanders, Belgium. In Sediment Dynamics from the Summit to the Sea

(Proceedings of a symposium held in New Orleans, Louisiana, USA, 11 – 14 December 2014) (IAHS Publ. 367, pp. 349 – 356). IAHS Press.

28. Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(9), 3460 – 3470. https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465
29. Fornaro, G., Verde, S., Reale, D., & Pauciullo, A. (2015). CAESAR: An Approach Based on Covariance Matrix Decomposition to Improve Multibaseline – Multitemporal Interferometric SAR Processing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(4), 2050 – 2065. https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2352853
30. Gardezi, H., Bilal, M., Cheng, Q., Xing, A., Zhuang, Y., & Masood, T. (2021). A comparative analysis of Attabad landslide on January 4, 2010, using two numerical models. Natural Hazards. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04593-0
31. Gómez-Gesteira, M., & Dalrymple, R. (2004). Using a 3D SPH method for wave impact on a tall structure. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 130(2), 63 – 69.
32. Gómez-Gesteira, M., Crespo, A. J. C., Rogers, B. D., Dalrymple, R. A., Dom ínguez, J. M., & Barreiro, A. (2012). SPHysics - development of a free-surface fluid solver - Part 2: Efficiency and test cases. Computers & Geosciences, 48, 300 – 307.2
33. Gómez-Gesteira, M., Rogers, B. D., Crespo, A. J. C., Dalrymple, R. A., Narayanaswamy, M., & Domínguez, J. M. (2012). SPHysics - development of a free-surface fluid solver - Part 1: Theory and Formulations. Computers & Geosciences, 48, 289 – 299.2

34. Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J. C., Guerrero, J., Notti, D., Galve, J. P., Fernández-Merodo, J. A., & Cooksley, G. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees). Remote Sensing of Environment, 128, 31–43. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.020

35. Hsu, S. M., Chiou, L. B., Lin, G. F., Chao, C. H., Wen, H. Y., & Ku, C. Y. (2010). Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: A case study in Hualien County, Taiwan. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 535–545. https://doi.org/10.5194/nhess-10-535-2010

36. Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal, 32(4), 610–623. https://doi.org/10.1139/t95-063

37. Hungr, O., & McDougall, S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. Computers & Geosciences, 35(5), 978–992. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.12.003

38. Iannacone, J. P., Quan Luna, B., & Corsini, A. (2013). Forward simulation and sensitivity analysis of run-out scenarios using MassMov2D at the Trafoi rockslide (South Tyrol, Italy). Georisk, (2013), 3–10.

39. Jia, X., Lv, J., & Luo, Y. (2024). Simulation and Management Impact Evaluation of Debris Flow in Dashiling Gully Based on FLO-2D Modeling. Appl. Sci., 14(10), 1–19. https://doi.org/10.3390/app1410421634

40. Jung, J., & Yun, S. H. (2020). Evaluation of coherent and incoherent landslide detection methods based on synthetic aperture radar for rapid response: A case study for the 2018 Hokkaido landslides. Remote Sensing, 12(2). https://doi.org/10.3390/rs12020265

41. Kuo, Y.M., Chen, H., Dadson, S. (2017). Modeling the increased downstream sediment delivery caused by the 2009 Typhoon Morakot in Southern Taiwan. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122(5), 981–1000.
42. Lee, C.F., Lo, C.M., Chou, H.T., Chi, S.Y. (2016). Landscape evolution analysis of large scale landslides at Don-Ao Peak, Taiwan. Environ Earth Sci, 75:29.
43. Li, C., Wang, M., Chen, F., Coulthard, T. J., & Wang, L. (2023). Integrating the SLIDE model within CAESAR-Lisflood: Modeling the ‘rainfall-landslide-flash flood’ disaster chain mechanism under landscape evolution in a mountainous area. Catena, 227, 107124. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.1071243
44. Lin, P. S., Lee, J. H., & Chang, C. W. (2011). An Application of the FLO-2D Model to Debris-Flow Simulation - A Case Study of Song-Her District in Taiwan. 947–956.
45. Liu, C.Y., Lee, C.F., Huang, W.K., Yang, C.M., GeoPORT working group. (2023). Decades-long landform evolution and impact of the large-scale Silabaku landslide: A case study of Yusui stream in Taiwan. Japan Geoscience Union, Japan.
46. Liu, Z., Nepf, H. (2016). Effects of sediment on the growth of aquatic plants. Journal of Hydraulic Research, 54(2), 170-184.
47. Ma, S., Xu, C., Shao, X., Xu, X., & Liu, A. (2021). A Large Old Landslide in Sichuan Province, China: Surface Displacement Monitoring and Potential Instability Assessment. Remote Sens., 13, 2552. https://doi.org/10.3390/rs13132552
48. Mergili, M., Fischer, J.-T., Krenn, J., & Pudasaini, S. P. (2017). r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and

interaction of two-phase mass flows. Geoscientific Model Development, 10, 553–569. https://doi.org/10.5194/gmd-10-553-2017

49. Mergili, M., Frank, B., Fischer, J.-T., Huggel, C., & Pudasaini, S. P. (2018). Computational experiments on the 1962 and 1970 landslide events at Huascarán (Peru) with r.avaflow: Lessons learned for predictive mass flow simulations. Geomorphology, 322, 15–28. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.08.032
50. Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J.-T., Cochachin, A., & Frey, H. (2020). Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). Hydrology and Earth System Sciences, 24, 93–114. https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020
51. Mirzaee, S., Amelung, F., & Fattahi, H. (2023). Non-linear phase linking using joined distributed and persistent scatterers. Computers & Geosciences, 171, 105291. https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2022.105291
52. Molinari, M. E., Cannata, M., Begueria, S., & Ambrosi, C. (2012). GIS-based Calibration of MassMov2D. Transactions in GIS, 16(2), 215–231.
53. Mueting, A., & Bookhagen, B. (2024). Tracking slow-moving landslides with PlanetScope data: new perspectives on the satellite’s perspective. Earth Surface Dynamics, 12(5), 1121–1143. https://doi.org/10.5194/esurf-12-1121-2024
54. Nakatani, K., Kosugi, M., Satofuka, Y., Mizuyana, T. (2016), Debris Flow Flooding and Debris Deposition Considering the Effect of Houses: Disaster Verification and Numerical Simulation. International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 9, No. 4.
55. Neal, J., Villanueva, I., Wright, N., Willis, T., Fewtrell, T., & Bates, P. (2012). How much physical complexity is needed to model flood inundation?

Hydrological Processes, 26, 2264 – 2282. https://doi.org/10.1002/hyp.8339

56. Nefian, A. V, Husmann, K., Broxton, M., To, V., Lundy, M., & Hancher, M. D. (2009). A bayesian formulation for sub-pixel refinement in stereo orbital imagery. 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2361 – 2364. https://doi.org/10.1109/ICIP.2009.5413749
57. Notti, D., Herrera, G., Bianchini, S., Meisina, C., García-Davalillo, J. C., & Zucca, F. (2014). A methodology for improving landslide PSI data analysis. International Journal of Remote Sensing, 35(6), 2186 – 2214. https://doi.org/10.1080/01431161.2014.889864
58. O'Connor, J., & Rogers, B.D. (2021). A fluid – structure interaction model for free-surface flows and flexible structures using smoothed particle hydrodynamics on a GPU. Journal of Fluids and Structures, 104, 103312.
59. Oh, C., & Jun, K. (2023). Analysis of Debris Flow Damage Using High-Resolution Topographical Data. Water, 15(19), 1 – 15. https://doi.org/10.3390/w1519345478
60. Parizzi, A., & Brcic, R. (2011). Adaptive InSAR Stack Multilooking Exploiting Amplitude Statistics: A Comparison Between Different Techniques and Practical Results. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 8(3), 441 – 445. https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2083631
61. Pearson, E. G. (2020). Modelling the interactions between geomorphological processes and Natural Flood Management [Doctoral dissertation, University of Leeds].
62. Penna, I., Böhme, M., & Hermanns, R. (2017). Dynamic modelling with DAN3D of Stampa scenario 3A. Report no. 2017.018, Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), Trondheim, Norway.
63. Pérez-Peña, J. V., Al-Awabdeh, M. O. H. A. M. M. A. D., Azañón, J. M.,

Galve, J. P., Booth-Rea, G., & Notti, D. (2017). SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. Computers & Geosciences, 104, 135-150.

64. Pudasaini, S. P. (2012). A general two-phase debris flow model. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117(F3), F03010. https://doi.org/10.1029/2011JF002186
65. Qiu, C. (2024). Economic Risk Assessment of Debris Flows in Mountainous Areas by Machine Learning and Flo-2D Techniques (Doctor of Philosophy in Engineering thesis). University of Warwick, Coventry, UK.
66. Ramirez, J. A., Mertin, M., Peleg, N., Horton, P., Skinner, C., Zimmermann, M., & Keiler, M. (2022). Modelling the long-term geomorphic response to check dam failures in an Alpine channel with CAESAR-Lisflood. International Journal of Sediment Research, 37, 687 – 700. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.04.00556
67. Ramirez, J. A., Zischg, A. P., Schürmann, S., Zimmermann, M., Weingartner, R., Coulthard, T., & Keiler, M. (2020). Modeling the geomorphic response to early river engineering works using CAESAR-Lisflood. Anthropocene, 32, 100266. https://doi.org/10.1016/j.ancene. 2020.100266
68. RAMMS::Debrisflow User Manual, (2022). A numerical model for debris flows in research and practice. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, 2022.
69. Rickenmann D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows, Natural Hazards 19: 47-77.
70. Scaringi, G., Fan, X., Xu, Q., Liu, C., Ouyang, C., Domènech, G., Yang, F., & Dai, L. (2018). Some considerations on the use of numerical methods to simulate past landslides and possible new failures: the case of the recent

Xinmo landslide (Sichuan, China). Landslides, 15, 1359 – 1375. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0953-91213

71. Shiu, WJ., Lee, CF., Chiu, CC., Weng, MC., Yang, CM., Chao, WA., Liu, CY., Lin, CH., Huang, WK., GeoPORT Working Group. (2023). Analyzing landslide-induced debris flow and flow-bridge interaction by using a hybrid model of depth-averaged model and discrete element method,Landslides, 20, 331-349.
72. Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., Van Wyk de Vries, M., Mergili, M., Emmer, A., Deschamps-Berger, C., McDonnell, M., Bhambri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, M., Dunning, S. A., ... Westoby, M. J. (2021). A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. Science, 373(6552), 300 – 306. https://doi.org/10.1126/science.abh4455
73. Stolte, J., Liu, B., Ritsema, C. J., van den Elsen, H. G. M., & Hessel, R. (2003). Modelling water flow and sediment processes in a small gully system on the Loess Plateau in China. Catena, 54(1-2), 117 – 130. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00060-234.
74. van Natijne, A. L., Bogaard, T. A., van Leijen, F. J., Hanssen, R. F., & Lindenbergh, R. C. (2022). World-wide InSAR sensitivity index for landslide deformation tracking. In International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (Vol. 111). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102829
75. Wang, D., Wang, M., Liu, K., & Xie, J. (2023). An assessment of short – medium-term interventions using CAESAR-Lisflood in a post-earthquake mountainous area. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23(4), 1409 –

1423. https://doi.org/10.5194/nhess-23-1409-20237.

76. Wolstenholme, J., Skinner, C. J., Muhawenimana, V., Thomson, R. J., & Pender, D. (2024). Hydro-geomorphological modelling of leaky wooden dam interventions in a channelized reach. EGUsphere, 2024, 1 – 25. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-21328
77. Wu, J.H., Lin, G.W., & Chen, H. (2018). Mechanisms and processes of sediment yield following a catastrophic typhoon in a sediment-rich watershed, southwestern Taiwan. Earth Surface Processes and Landforms, 43(3), 702 – 715.
78. Wu, Y. H., Liu, K. F., & Chen, Y. C. (2013). Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the Application of Assessment of Granular Debris Flow Hazards with Case Study. J. Mt. Sci., 10(2), 293 – 304. https://doi.org/10.1007/s11629-013-2511-1
79. Xiao, Y. (2020). Analyzing the predictive capacity of a physically-based debris flow model: A case study for debris flow in the post-2008 Wenchuan earthquake area (Master’s thesis, University of Twente).
80. Xie, J., Coulthard, T. J., Cao, J., Wu, J., & Wang, M. (2024). How does landslide debris grain size control sediment transport and dynamics? Geomorphology, 451, 109050. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109050
81. Xue, F., Lv, X., Dou, F., & Yun, Y. (2020). A Review of Time-Series Interferometric SAR Techniques: A Tutorial for Surface Deformation Analysis. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 8(1), 22 – 42. https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2956165
82. Zheng, G., Mergili, M., Emmer, A., Allen, S., Bao, A., Guo, H., & Stoffel, M. (2021). The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: Causes,

impacts, and implications for hazard and risk assessment. The Cryosphere, 15, 3159–3180. https://doi.org/10.5194/tc-15-3159-2021

83. 內政部國土測繪圖資服務雲網站，網址：https://maps.nlsc.gov.tw/，查詢日期：2025.3.10。
84. 王慶雄，2008，台 20 線南橫公路勤和~復興中期道路提升施工紀實，臺灣公路工程，第 44 卷第 8 期。
85. 李璟芳、周憲德、曹鼎志、許志豪、黃郅軒、廖緯璿，2017，羅浮合流部落土石流案例之致災機制分析與數值模擬，中華水土保持學報，第 47-4 期，171-184 頁。
86. 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉潾、冀樹勇，2015，微地形判釋應用於土石流災害之三維數值模擬，中華水土保持學報，第 46 期，第 2 卷，96-105 頁。
87. 沈志全，2019，應用開源分布式降雨逕流模式 推估土石流潛勢溪流與農塘流量資訊，農委會水土保持局。
88. 林司秦、沈淑敏、游牧笛，2023，二萬五千分之一土砂災害地形特徵圖:桃源區-茗濃溪-001，國立台灣師範大學地理學系，農村發展及水土保持署。
89. 社團法人臺中市水土保持技師公會，2023，112 年重大土砂災害情蒐及資料紀實，農村發展及水土保持署。
90. 社團法人臺中市水土保持技師公會，2024，113 年重大土砂災害情蒐及資料紀實，農村發展及水土保持署。
91. 社團法人臺中市水土保持技師公會，2025，114 年重大土砂災害情蒐及資料紀實，農村發展及水土保持署。
92. 財團法人成大研究發展基金會，2023，大規模崩塌潛勢區影響範圍劃設作業流程與方法，農村發展及水土保持署。
93. 國立東華大學，2012，2012 年蘇拉颱風災害事件專刊，國立東華大學環

境學院防災研究中心。

94. 張哲豪，2021，應用開源分布式降雨逕流模式推估土石流潛勢溪流之流量以中港溪與後龍溪為例，農委會水土保持局。

95. 創聚環境管理顧問股份有限公司，2024，113 年集水區不安定土砂運移模式建立與衝擊評估，農村發展及水土保持署。

96. 經濟部地質調查及礦業管理中心，2008，易淹水地區上游集水區地質調查及資料建置第 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)。

97. 經濟部地質調查及礦業管理中心，2009，易淹水地區上游集水區地質調查及資料建置第 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)。

98. 經濟部地質調查及礦業管理中心，2010，易淹水地區上游集水區地質調查及資料建置第 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)。

99. 經濟部地質調查及礦業管理中心，2022，臺灣坡地環境地質圖集，經濟部地質調查及礦業管理中心出版。

100. 農業部農村發展及水土保持署，BigGIS 巨量空間資訊系統，網址: https://gis.ardswc.gov.tw/，查詢日期：2025.03.10

101. 農業部農村發展及水土保持署，土石流及大規模崩塌防災資訊網，網址: https://246.ardswc.gov.tw/，查詢日期：2025.07.07

102. 蔡元芳，1999，土石流扇狀地形狀特性之研究，國立成功大學水利及海洋工程系，博士論文。

103. 謝明昌，1994，水庫淤積體之研究，國立成功大學水利及海洋工程系，碩士論文。

104. 謝有忠（2016）。以多期數值地形資料評估山崩區及河道地形之變遷。〔博士論文。國立臺灣大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。

https://hdl.handle.net/11296/44922n。