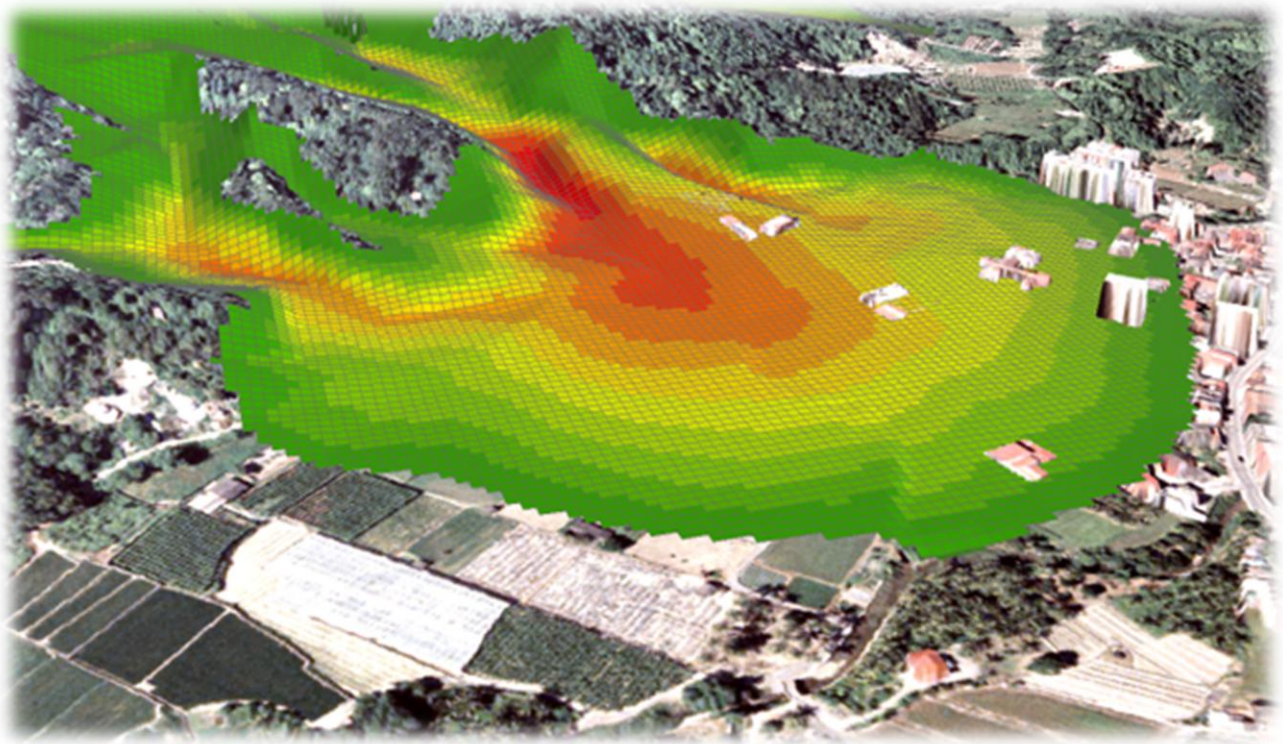


不安定土砂危害風險評估 及作業方法



農業部農村發展及水土保持署

中華民國 114 年 12 月



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



表 目 錄

表 1-2-1 WFlow 模式 SBM 模組設定檔架構	5
表 1-2-2 WFlow 模式專案檔案內容	6
表 3-1-1 大清水溪不安定土砂運移模擬成果與危害評估表	21
表 3-2-1 高屏河流域美濃雨量站 Horner 公式迴歸係數	24
表 3-3-1 不同溪床坡度之土石流泥砂體積濃度(水土保持手冊，2017)	31
表 3-3-2 不同溪床材料之土石流泥砂體積濃度(水土保持手冊，2017)	32
表 3-3-3 崩塌面積與土方冪次經驗式(Chen et al.,(2013))	37
表 3-4-1 不安定土砂現場調查建議表	47
表 3-4-2 現地採樣室內試驗項目說明	49
表 3-4-3 土石流類型判別參考表	49
表 3-4-4 大清水溪之摩擦係數率定表	52
表 3-4-5 大清水溪各降雨情境下之摩擦係數選定表	53
表 3-4-5 RAMMS 模式與其他文獻紊流黏滯摩擦係數建議值	57
表 3-4-6 RAMMS:DF 底床侵蝕參數建議表	60
表 3-4-6 集水區不安定土砂調適策略一覽表	81



圖 目 錄

圖 1-1-1 集水區不安定土砂示意圖	2
圖 1-1-2 本作業方法內容與流程指引	2
圖 1-2-1 WFlow 模式應用國家分布	3
圖 1-2-2 WFlow 模式 SBM 模組降雨逕流示意圖	4
圖 1-2-3 WFlow 模式 SBM 模組輸入輸出示意圖	4
圖 1-2-4 模式專案建置流程	5
圖 1-3-1 RAMMS:DF 模擬成果圖(Christen, 2012)	9
圖 2-1-1 定量降雨情境設定	10
圖 2-2-1 臺灣北中南東四區未來降雨量改變率(%)推估圖：濕季	13
圖 2-2-2 極端降雨下新生崩塌情境評估流程圖	14
圖 2-2-3 BigGIS 平台查詢集水區內雨量站	14
圖 2-2-4 梅山雨量站 50%所對應之未來設計暴雨改變率	14
圖 3-1-1 不安定土砂評估模式評估流程概念圖	16
圖 3-1-2 不安定土砂評估模式-土砂釋放點示意圖	17
圖 3-1-3 不安定土砂評估模式評估流程概念圖	19
圖 3-1-4 殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係(塊體釋放法)	20
圖 3-1-5 殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係(塊體釋放法)	21
圖 3-1-6 不安定土砂危害圖	22
圖 3-2-1 設計雨型計算方法流程示意圖	25
圖 3-2-2 降雨度與降雨雨型分布計算成果	26
圖 3-2-3 徐昇多邊對應範圍的降雨組體圖	26
圖 3-2-4 徐昇多邊形邊界對應時間序列空間分布	27
圖 3-2-5 定量降雨評估資料處理流程	27
圖 3-2-6 徐昇多邊形降雨量轉換為 QPESUMS 網格降雨量示意圖	28



圖 3-3-1 土石流尖峰流量與體積關係圖(Rickenmann(1999)	30
圖 3-3-2 殘坡不安定土砂量綜合評估資料來源.....	33
圖 3-3-3 殘坡不安定土砂來源綜合評估流程.....	35
圖 3-3-4 不安定土砂運移評估模擬流程圖(流量歷線法).....	39
圖 3-3-5 不安定土砂運移評估模擬流程圖(塊體釋放法).....	42
圖 3-4-1 不安定土砂空間圖資蒐集與前處理.....	43
圖 3-4-2 高精度數值地表模型-DoD 分析-堆積區(以玉穗溪為例)	45
圖 3-4-3 DS-InSAR 配合 ADA 潛移熱區偵測(以玉穗溪為例).....	46
圖 3-4-4 溪流採樣點河床質調查.....	48
圖 3-4-5 2025 年 0518 豪雨事件造成大清水溪(花縣 DF024)淤積土砂量.....	52
圖 3-4-6 RAMMS 庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區災害事件擬合).....	54
圖 3-4-7 各定量降雨情境之 RAMMS 庫倫摩擦係數選定流程圖.....	54
圖 3-4-8 RAMMS 庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區無災害事件).....	55
圖 3-4-9 等價摩擦係數與土砂量體關係圖(Lucas, 2014)	55
圖 3-4-10 RAMMS 紊流黏滯摩擦係數評估流程圖	57
圖 3-4-11 RAMMS 紊流黏滯摩擦係數(Deubelbeiss, 2012).....	58
圖 3-4-12 正射影像套疊 5m 等高線-以大清水溪為例	62
圖 3-4-13 坡度圖-以大清水溪為例.....	62
圖 3-4-14 QGIS 工具箱 Terrain Profile	63
圖 3-4-15 V 型判釋法-以木瓜溪(東縣 DF059)為例.....	63
圖 3-4-16 溪流線圖層(來源: BigGIS 圖台).....	64
圖 3-4-17 高精度 DEM 產製之集水區圖資(以玉穗溪為例).....	65
圖 3-4-18 常見之不安定土砂模擬情境示意圖(一).....	66
圖 3-4-19 集水區溪流中游段釋放點示意圖.....	67
圖 3-4-20 常見之不安定土砂模擬情境示意圖(二).....	68
圖 3-4-21 不安定土砂模擬情境評估流程圖.....	69



圖 3-4-22 RAMMS:DF 模擬流程圖	69
圖 3-4-23 RAMMS 模擬成果圖:最大流動速度與堆積深度圖(李等, 2017).	74
圖 3-4-24 RAMMS 模擬成果圖:土砂運移階段流動深度圖(李等, 2015).....	74
圖 3-4-25 RAMMS 模擬成果圖:土砂運移階段流動深度圖(Shiu, 2023)	75
圖 3-4-26 RAMMS 模擬堆積深度時序圖:(a)渠道;(b)沖積扇(李等, 2015)	75
圖 3-4-27 玉穗溪-不同降雨情境土砂堆積深度比較圖(中興社, 2023).....	75
圖 3-4-28 不安定土砂危害圖-出圖格式建議	76
圖 3-4-29 玉穗溪累積降雨 200mm 情境土砂堆積深度驗證(中興社, 2023)	76
圖 3-4-30 崩塌引致土石流危害矩陣評估及其危害度圖(李等, 2015).....	78
圖 3-4-31 桃園市合流部落數值模擬流速與實測速度對照圖(李等, 2017).	78
圖 3-4-32 自然解方導入集水區調適策略.....	80
圖 3-4-33 集水區調適策略導入可行性評估	80



第一章 應用模式

1-1 不安定土砂定義

依據農村及水保署之定義，「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，其土砂運移行為將造成中下游土砂災害。綜觀歷史颱風災情，大多為單一強降雨或長延時累積降雨事件而致災。故為探討經由單一降雨事件產生之新生崩塌，從而導致新生崩塌和殘坡等大量土砂移動，混合溪流內既存之堆積鬆散土砂，以土石流或高含砂水流形態，造成下游重要保全對象之毀損肇災(如圖 1-1-1)，此類土砂災害問題儼然已成為現今集水區內坡地安全之重大議題和交通基礎設施的威脅。本作業方法擬藉由基本資料蒐集、現地調查、遙測評估、情境設定與數值模擬等方式建立不安定土砂評估流程，並配合其降雨誘發坡面之崩塌演育進程及溪流土砂運移情境，進而評估不同降雨情境下之土砂災害影響範圍與堆積深度，提供下游保全對象之防災管理對策參考。未俾便使用者瞭解不安定土砂危害風險評估作業方法相關原理概念與使用流程，可參閱圖 1-1-2 之章節指引說明。





圖 1-1-1 集水區不安定土砂示意圖

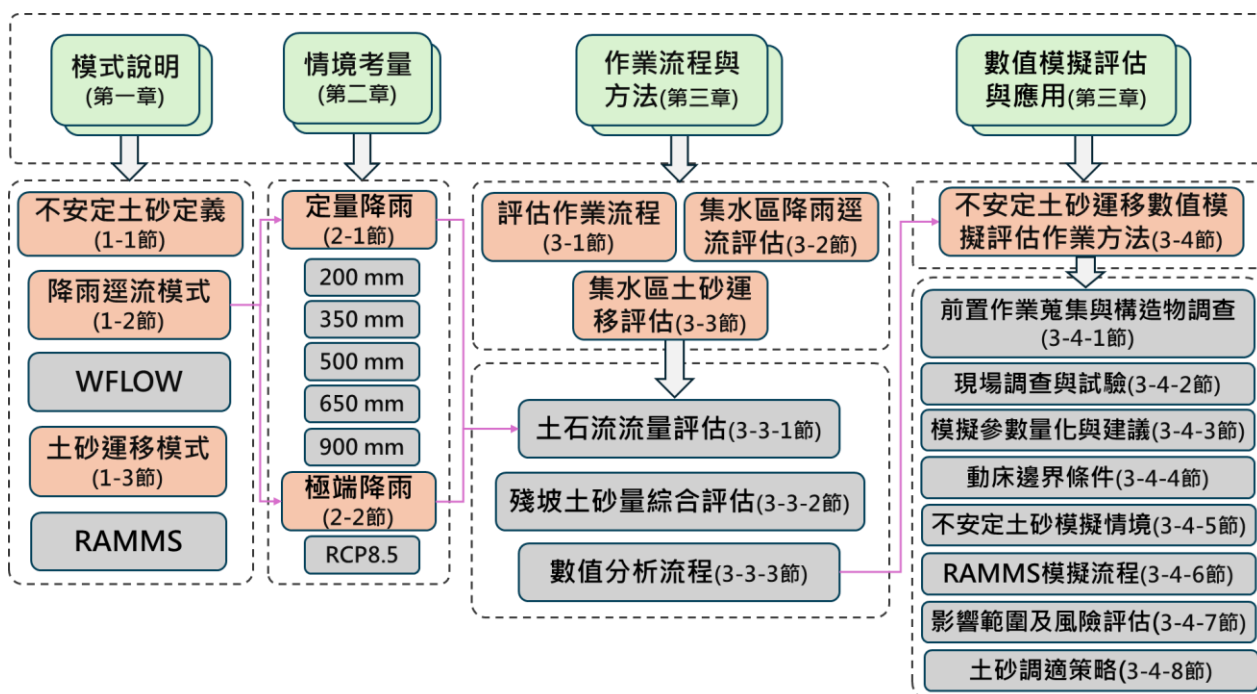


圖 1-1-2 本作業方法內容與流程指引

1-2 降雨逕流模式

為了有效提供不安定土砂集水區降雨量、流量時間與空間分布成果，本作業方法將使用開源分布式降雨逕流模式 WFlow 建立對應分布式降雨逕流成果，提供完整流量資訊，以便有效掌握流域集水區降雨量與流量空間分布成果。WFlow 模式為荷蘭國家水文研究院(Deltares)所開發的分布式降雨逕流模式，在 2021 年模式將使用的程式語言轉換成為 Julia 程式語言，同時程式碼也調整為使用 MIT 授權機制的開源軟體。WFlow 模式可考量降水、截流、蒸發散、土壤、地表水和地下水等對於流量



之影響，目前已在亞洲、歐洲、美洲、非洲等不同國家使用，並且應用於分析洪水災害，乾旱，氣候變化影響和土地利用變化，截至 2021 年底世界各國應用 WFlow 模式專案位置分布如圖 1-2-1 所示。

在計畫中分布式降雨逕流模式為 WFlow_sbm 模組(Simple bucket model)，此模組是由 Topog_SBM (Vertessy and Elsenbeer 1999)的概念衍生，可應用於不同土地利用特性與不同與集水區水庫操作等應用。WFlow_sbm 模組其運作概念，如所示圖 1-2-2。整體模式採用網格式(Raster)資料型態方式進行建置，而在整體模式建置資料中將使用集水區數值高程地形模型、土地利用、土壤種類等資訊，同時搭配向量資料的集水區範圍、河川路網進行模式基礎資料建置，以確保模式資料與成果完整性。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，如圖 1-2-3 所示為模式的輸入輸出概念。如圖 1-2-4 為模式設定專案架構。表 1-2-1 與表 1-2-2 為模式相關參數資料設定內容與模式專案資料夾之對應資訊。預計 WFlow 模式於 113 年將完成全台五大流域的歷史降雨事件驗證，待應用日趨成熟後可逐步朝雲端運算版進行定量降水與設計雨量的逕流推估。



圖1-2-1 WFlow模式應用國家分布

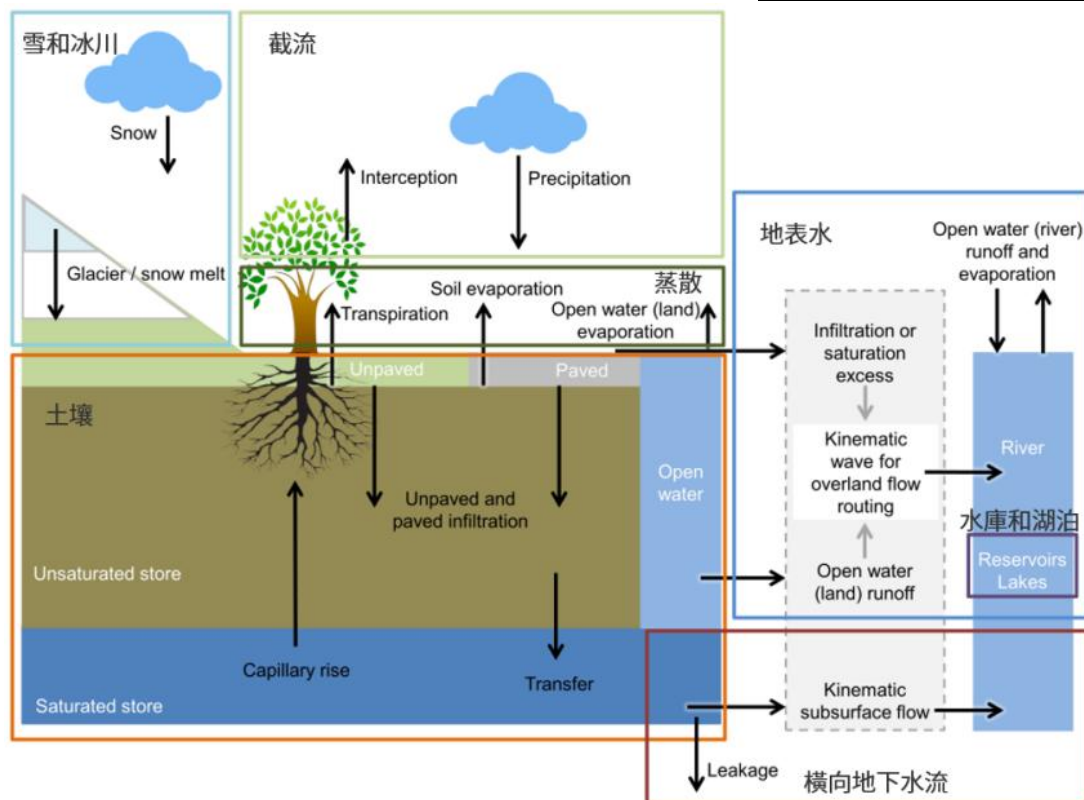


圖1-2-2 WFlow 模式SBM模組降雨逕流示意圖

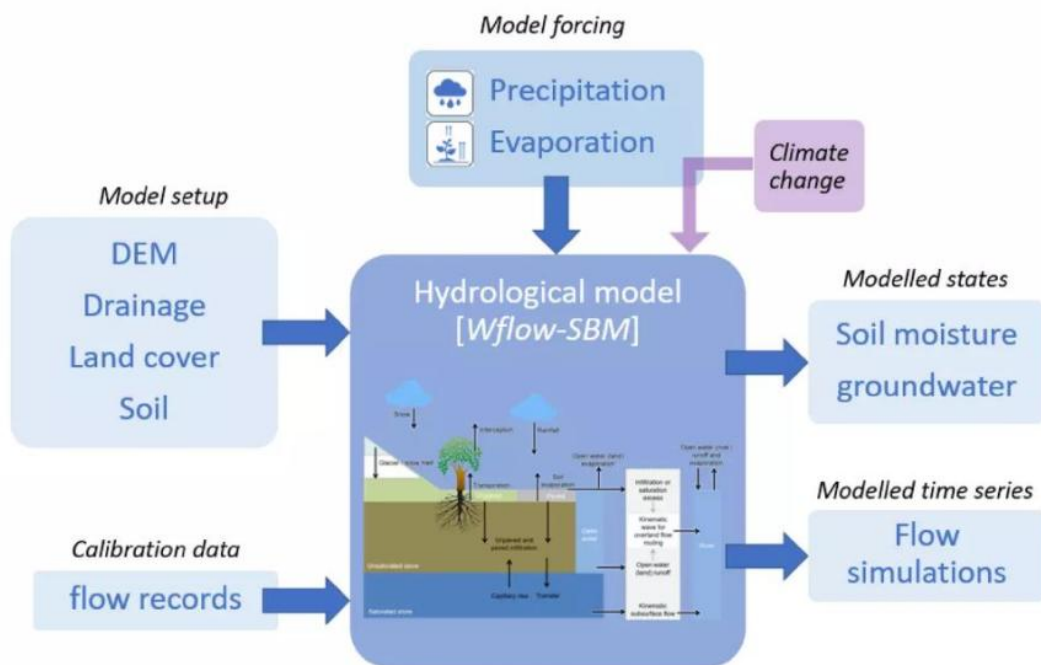


圖1-2-3 WFlow 模式SBM模組輸入輸出示意圖

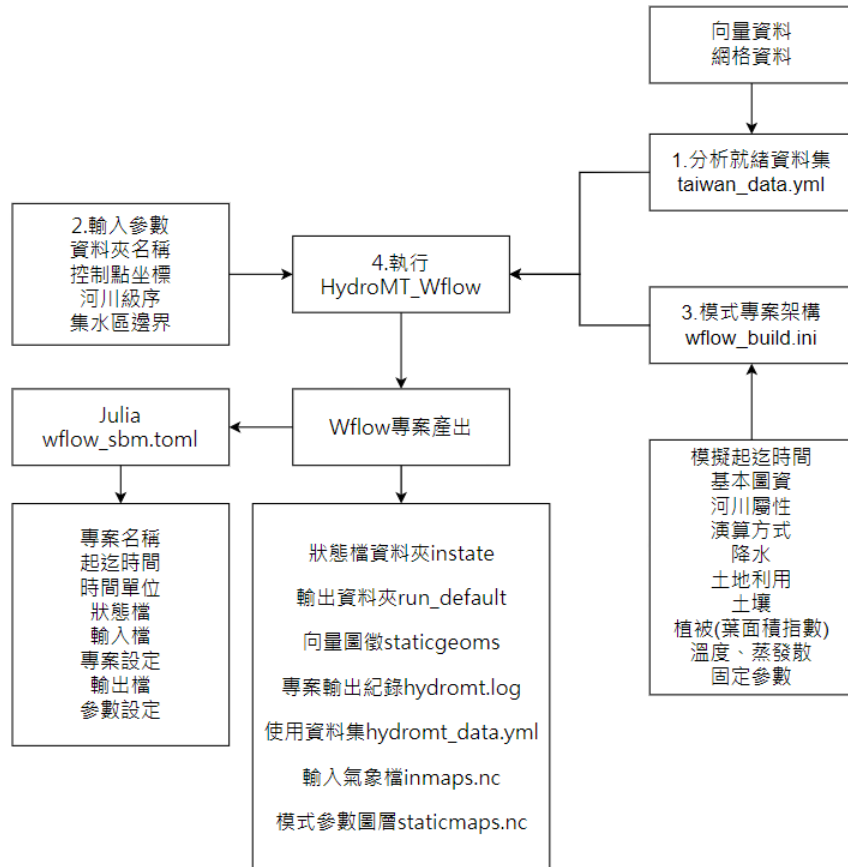


圖1-2-4 模式專案建置流程

表1-2-1 WFlow 模式 SBM 模組設定檔架構

方法	說明
setup_config()	更新設定檔
setup_basemaps()	設定研究區域範圍（單位_度）
setup_rivers()	設定河川參數地圖
setup_lakes()	設定湖泊面積匯留點參數包含面積深度流量
setup_reservoirs()	設定水庫面積與放流點參數，包含面積、需求、最小和最大目標存儲容量和排放容量值的參數
setup_glaciers()	設定冰川面積與體積參數 包含溫度警戒 轉換參數
setup_lulcmaps()	設定土地利用或土地覆蓋圖資
setup_laimaps()	設定每月設葉面積指數 (LAI) 氣候圖資
setup_soilmaps()	設定土壤參數
setup_hydrodem()	設定河流和/或地表水文高程圖資
setup_gauges()	設定測站位置資訊
setup_areamap()	從向量資料設置區域地圖以保存特定區域的 wflow 輸出
setup_precip_forcing()	設定降雨資料
setup_temp_pet_forcing()	設定溫度資料
setup_constant_pars()	設定網格通用參數



表1-2-2 WFlow 模式專案檔案內容

模式元件	wflow 檔案描述	
config	wflow_sbm.toml	模式設定檔
staticmaps	staticmaps.nc	靜態圖資
staticgeoms	geometries from the staticgeoms folder (basins.geojson, rivers.geojson etc.)	靜態向量圖資
forcing	inmaps.nc	輸入邊界條件
states	instates.nc	狀態檔
results	output.nc, output_scalar.nc, output.csv	模式輸出檔案



1-3 土砂運移模式

RAMMS(Rapid Mass Movement Simulation)數值模擬程式為瑞士聯邦森林、雪與景觀研究所(WSL, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research)所開發。其前身為 1998-2000 年所發展之 Aval-1D 與 Aval-2D 模式，並於 2005 年整合各模組成為 RAMMS 數值模擬軟體。模式目前包含雪崩(avalanche model, AV, 2010)與本作業方法所採用之土石流(debris flow model, DF, 2011)模組(目前已更新至 1.8.27 版；2024 年 7 月)，RAMMS-DF model 採用 Voellmy-Salm 連續體模式作為理論基礎(Salm, 1993；Voellmy, 1955)，模式中 x 與 y 分別為塊體沿地形表面移動之平面坐標，其任意點對應法線方向之高程為 $z(x, y)$ 。三維之重力加速度向量與時間項定義為 $g=(g_x, g_y, g_z)$ 與 t 。運動塊體於非穩態(unsteady)與非均勻(non-uniform)流況下以流動深度 $H(x, y, t)$ 及平均速度 $U(x, y, t)$ 作為計算特徵值。上游料源區之初始堆積深度與範圍可由 GIS 軟體圈繪圖資輸入，Voellmy-Salm 模式之質量守恆方程式(mass balance equation)描述如下(Christen et al., 2010；Hussin et al., 2012)：

$$\partial_t H + \partial_x (HU_x) + \partial_y (HU_y) = Q(x, y, t) \quad (1-1)$$

式(1-1)中， U_x 與 U_y 分別為 x, y 軸上之速度； $Q(x, y, t)$ [m/s] 為質量來源，或稱為捲增率(entrainment rate； $Q > 0$ ，表示侵蝕)或堆積率(deposition rate； $Q < 0$ ，表示堆積)。另 x, y 方向之深度平均動量守恆方程式(depth-averaged momentum balance equation)可表示為

$$\partial_t (HU_x) + \partial_x (c_x HU_x^2 + g_z k_{a/p} H^2 / 2) + \partial_y (HU_x U_y) = S_{gx} - S_{fx} \quad (1-2)$$

$$\partial_t (HU_y) + \partial_y (c_y HU_y^2 + g_z k_{a/p} H^2 / 2) + \partial_x (HU_x U_y) = S_{gy} - S_{fy} \quad (1-3)$$

式(1-2), (1-3)中， c_x 與 c_y 為取決於地形 DEM 的形狀因子； $k_{a/p}$ 為土壓力係數。上兩式中 x 與 y 方向的重力加速度項如

$$S_{gx} = g_x H \quad (1-4)$$



$$S_{gy}=g_yH \quad (1-5)$$

另 x 與 y 方向之摩擦項為

$$S_{fx}=nU_x[\mu g_z H+(g\|U\|^2)\zeta] \quad (1-6)$$

$$S_{fy}=nU_y[\mu g_z H+(g\|U\|^2)\zeta] \quad (1-7)$$

式(1-6), (1-7)中, nU_x 與 nU_y 為 x 與 y 方向速度單位向量。Voellmy-Salm 模式之總體摩擦阻力(total basal friction coefficient)可分為與速度無關之乾燥庫倫摩擦係數(μ , dry-Coulomb friction coefficient; 底床摩擦係數)與速度相依之紊流摩擦係數(ζ , turbulent friction coefficient or Chezy coefficient; 類似水利工程常用之柯西係數)。前者主控崩滑土體之滑動距離(runout distance), 後者則影響崩滑運動歷程時間。RAMMS 模式可針對特定位置之歷史土石流流量紀錄建立集水區之水文特性關係, 其模擬區域亦可從微地形判釋所圈繪之邊界, 合理地調整計算範圍以加速模擬運算時程。由於 RAMMS:DF 軟體為連續體組成率模式, 旨在整合實務應用上可獲得之材料參數, 以二相流(two-phase flow)模擬土石流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), 採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)。

RAMMS:DF 模式之核心是採顆粒流的深度平均運動方程式(淺水波方程式)的高效二階數值解, 流動深度和速度乃根據三維數值地形模型來加以計算。特點為使用 GIS 平台的繪圖工具來指定單一或多個區塊釋放(啟動)區域; 或者使用輸入過程線來指定流量隨時間的變化歷程。如圖 1-3-1, RAMMS 模式最後提供使用者輸入與土砂運移模擬後的相關空間資訊, 例如釋放面積(平均坡度、總土砂體積)、流動行為(最大流速和深度)。GIS 圖資和遙測影像亦可疊加在 RAMMS 地形模型上, 輔助輸入條件或使用歷史事件資料來校準模型參數(Christen et al., 2012)。



RAMMS:DF 數值模型使用二參數 Voellmy 關係式來描述土砂運移的摩擦消能行為(李璟芳等(2015), (2017)、吳俊毅等(2021)、Shiu et al., (2023))，相關文獻已證明此關係適於模擬土石流和岩屑崩滑(淺層崩塌)評估(Christen et al., 2010；Hussin et al., 2012)。為了校準 RAMMS Voellmy 模型，使用者通常需先參考評估集水區內的歷史事件，並研擬可用於後續分析的最佳擬合參數資料。RAMMS 其他功能則包括將結果匯出 GIS 檔案格式及編修地形的能力，以包括先前建模的堆積物地貌或包括工程整治設施(例如防砂壩等)，從而允許使用者分別評估對先前的土石流流量，或調適措施對未來土石流的潛在影響進行重新評估。

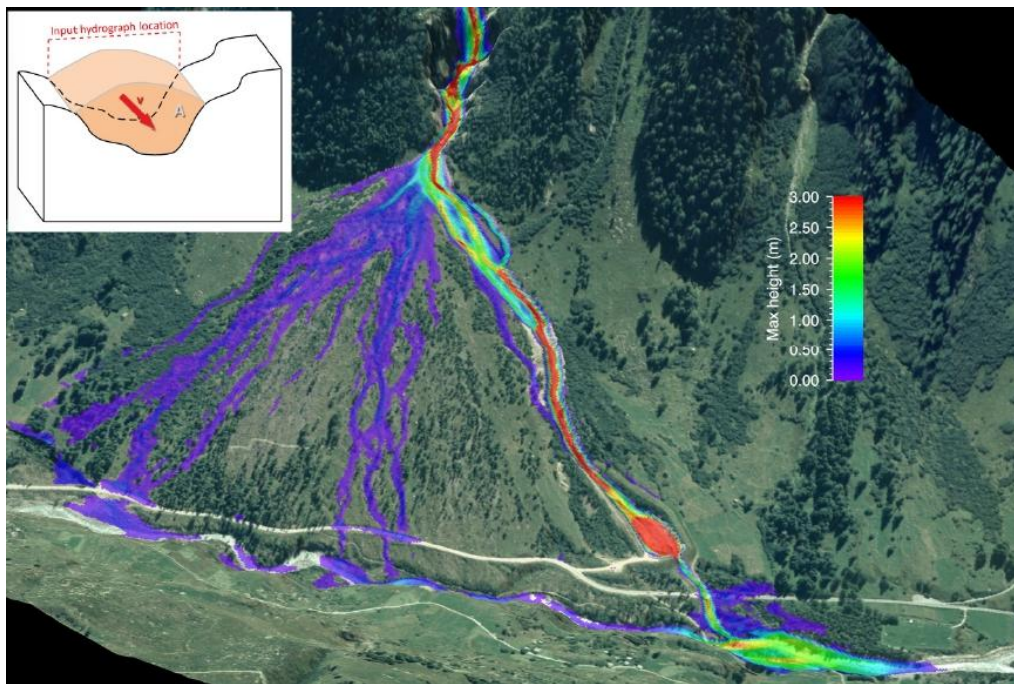


圖1-3-1 RAMMS:DF模擬成果圖(Christen, 2012)



第二章 考量情境

本作業方法所提之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。

2-1 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)、農村及水保署公開之 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 2-1-1)。設定上以 24hr 累積降雨值為定量分析情境，同時兼顧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。經綜合考量後，擬以中央氣象署發布之豪雨(200 mm)為定量降雨起始值，並以間隔 150 mm 為區間，逐步往上遞加，以涵蓋土石流與 98%大規模崩塌之警戒雨量值，而最大情境雨量值則以大規模崩塌次高警戒雨量值為上限(如 900 mm；114 年公開之大規模崩塌 65 處僅一處警戒雨量值為 1,500 mm)。承上，定量降雨情境設定為 24hr 累積雨量達 200 mm(豪雨)、350 mm(大豪雨)、500 mm(超大豪雨)、650 mm 及 900 mm(極端情境)等五種情境。

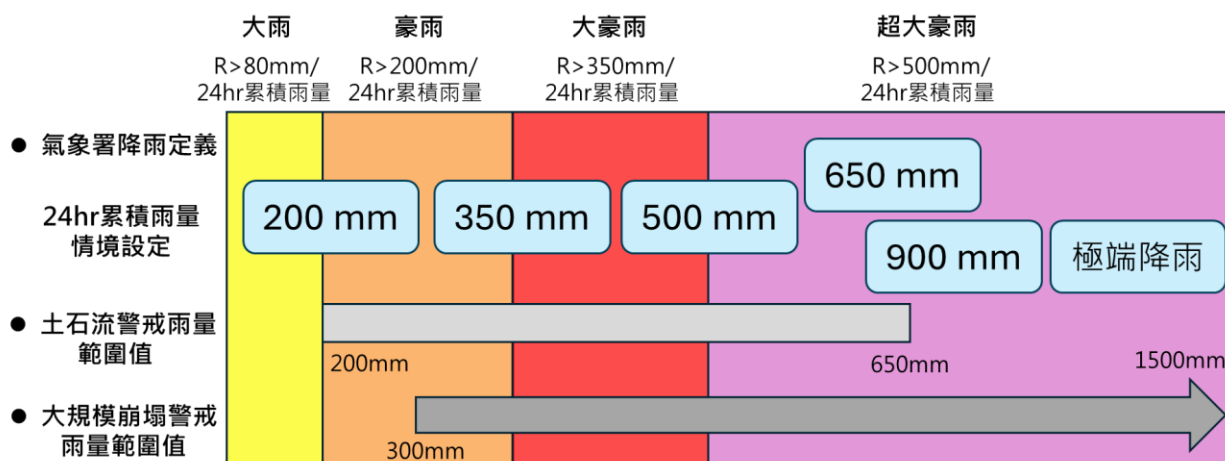


圖2-1-1 定量降雨情境設定



2-2 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。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 RCP4.5 情境的預測，臺灣的氣溫可能上升攝氏 1.3 到 1.8 度；在 RCP6.0 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 RCP4.5 與 RCP8.5 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 2-2-1)，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 2-2-2)說明如下：



一、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。

二、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)。

三、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 2-2-3)，在 TCCIP 網站平台上(<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/>)選擇集水區內代表性的雨量站，例如，梅山雨量站為代表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(資料紀錄年代愈長者佳)。

四、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 RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5)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 RCP4.5 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，則建議採用 RCP8.5 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)。

五、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。五大流域、



花蓮與台東地區雨量站之一日降雨改變率可查閱附錄一之附表 1(附表 1-附表 7)。

六、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。以唯金溪集水區為例，其坐落於高屏溪流域內，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。因唯金溪下游有台 20 線(南橫公路)與梅山聯絡道路通過主流，屬於交通設施之重要保全對象。對於 RCP 情境遴選，建議選用 RCP8.5 情境採取保守估計。如圖 2-2-4，經查詢 1 日(對應定量降雨 24hr 累積雨量)50%的未來設計暴雨改變率為 21.2%。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(以梅山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：唯金溪之 200 年重現期之極端降雨值： $965.5 \text{ (mm)} \cdot (1+0.25) = 1206.3 \text{ (mm)}$

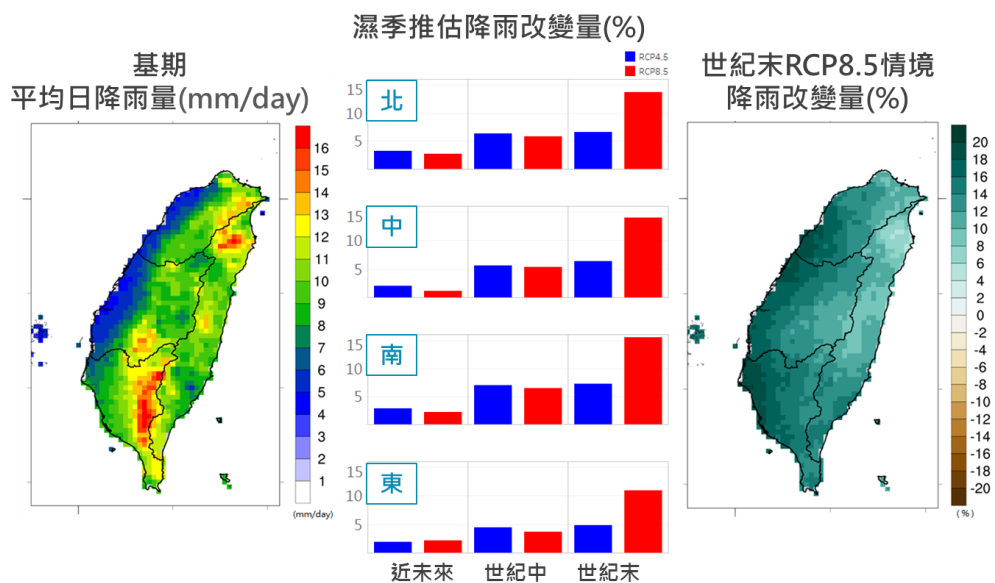


圖2-2-1 臺灣北中南東四區未來降雨量改變率(%)推估圖：濕季

(來源：<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/>)

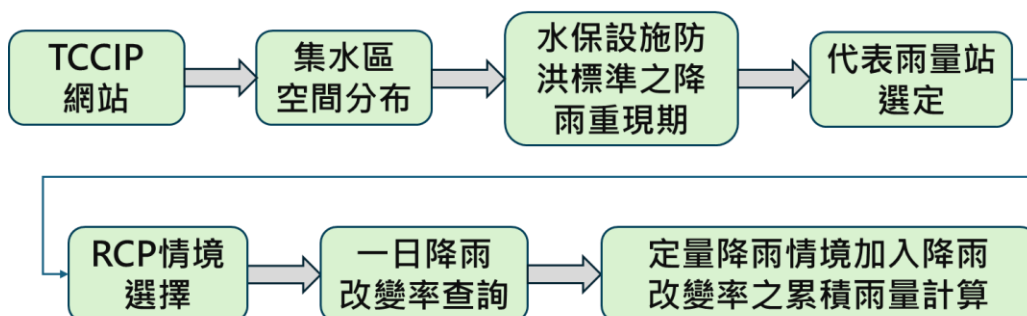


圖2-2-2 極端降雨下新生崩塌情境評估流程圖



圖2-2-3 BigGIS平台查詢集水區內雨量站

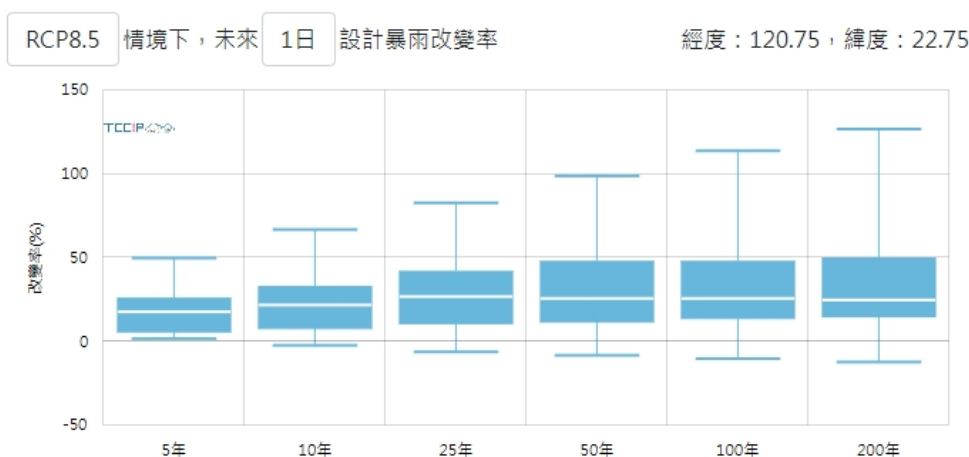


圖2-2-4 梅山雨量站50%所對應之未來設計暴雨改變率

(來源：<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/>)



第三章 作業流程與作業方法

3-1 整體評估作業流程

在前兩章釐清不安定土砂定義與降雨情境設定後，本章將闡述不安定土砂評估應用模式之作業流程與方法，其目的在於化繁為簡，以具學理且可操作之方法串聯氣象降雨至集水區逕流與崩塌量關係，乃至土砂運移至下游影響範圍評估流程，並兼顧模式客觀性與可重複性模擬之需求，瞭解野溪集水區內之土砂災害影響範圍，提供防災整備與整治規劃之決策。整體評估作業流程分別以 RAMMS 流量歷線法以及塊體釋放法分別說明如下：

一、流量歷線法

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重要關鍵課題。如圖 3-1-1 所示，首先，在河道產砂量的部分，由於全臺當前絕大多數集水區不若荖濃溪流域存在完整的多期 DoD 地表變遷圖資(鑑別侵蝕區與堆積區)。本分析流程將導入即時氣象資訊(或預報雨量)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。該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(沈志全(2019)、張哲豪(2021))。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(C_v)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(Takahashi(1991)、賴承農等(2011)、黃添進等(2012))，至此可估算集水區河道內的潛在不安定土砂量體。

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，必須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))，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，最後再定義適當的溢流點(Nakatani et al.,(2016)；如圖 3-1-2)，如溪流與主流的匯流點、土石流潛勢溪流溢流點或重要橋梁設施的交會點。其情境(1)所稱之高風險為依據殘坡分布與否或集水區不安定土砂潛勢而定，情境(2)無風險者則代表暫無前述狀況者。爾後輸入 RAMMS 數值模式中執行運算，獲得最終的土砂運移影響範圍(沖積扇)與堆積深度，並協助擬定完整標準作業程序，供山區集水區減緩土砂災害使用。詳細之 RAMMS 數值模擬將於 3-4 節中詳述。

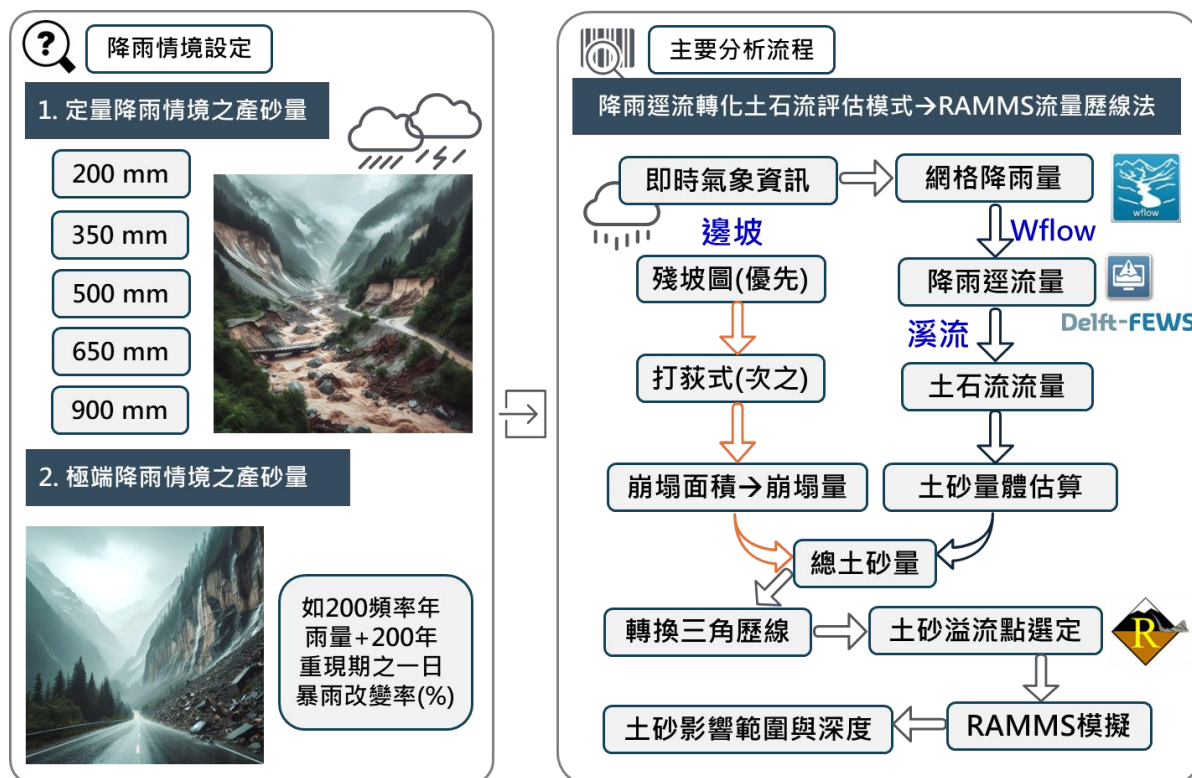


圖3-1-1 不安定土砂評估模式評估流程概念圖

土砂釋放點

情境(1)-崩塌地與溪流交會點：

適於高風險崩塌地，評估崩塌土砂之影響

情境(2)-溪流中點：

集水區內無高風險或潛在大規模崩塌地者

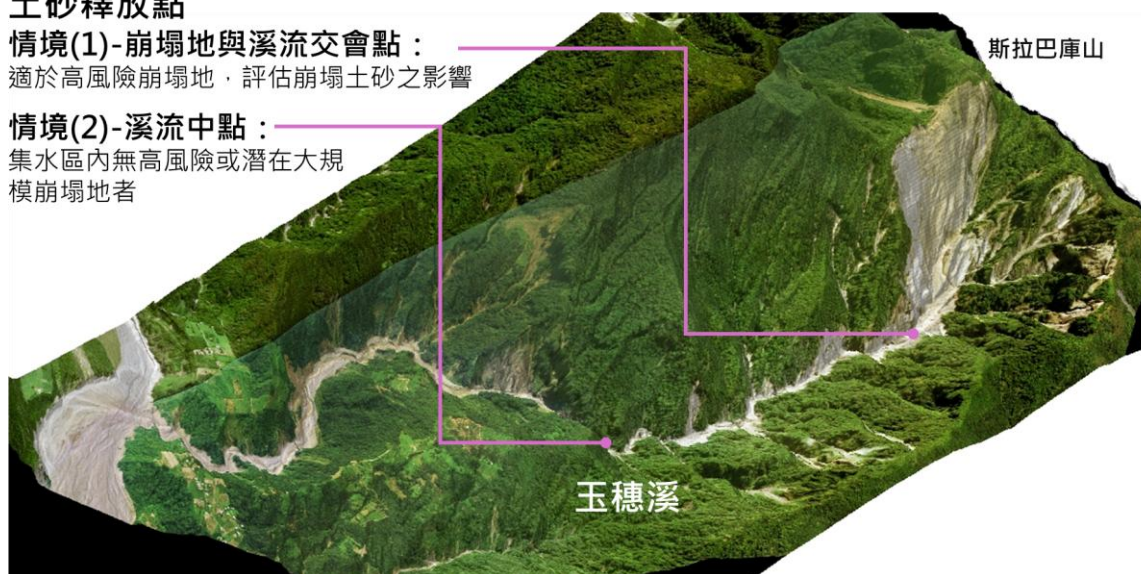


圖3-1-2 不安定土砂評估模式-土砂釋放點示意圖

二、塊體釋放法

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(24hr 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 3-1-3 與圖 3-1-4 所示，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。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：

(一)、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 900mm/24hr 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 $0.9 \cdot (900/1258) = 0.64$ (土砂流出比為原量體的 64%)。相同降雨情境下 (900mm/24hr)，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 $(0.4)^2 \cdot (900/1258) = 0.11$ (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。

$$V = 0.1025 \cdot A^{1.401}$$

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)。

經取得個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 3-1-5 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 3-1-1 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)。

不安定土砂危害度圖之土砂堆積深度為 7 級距指標(圖 3-1-6)。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)、6m(二層樓高度)、10 m、15 m、20m 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。

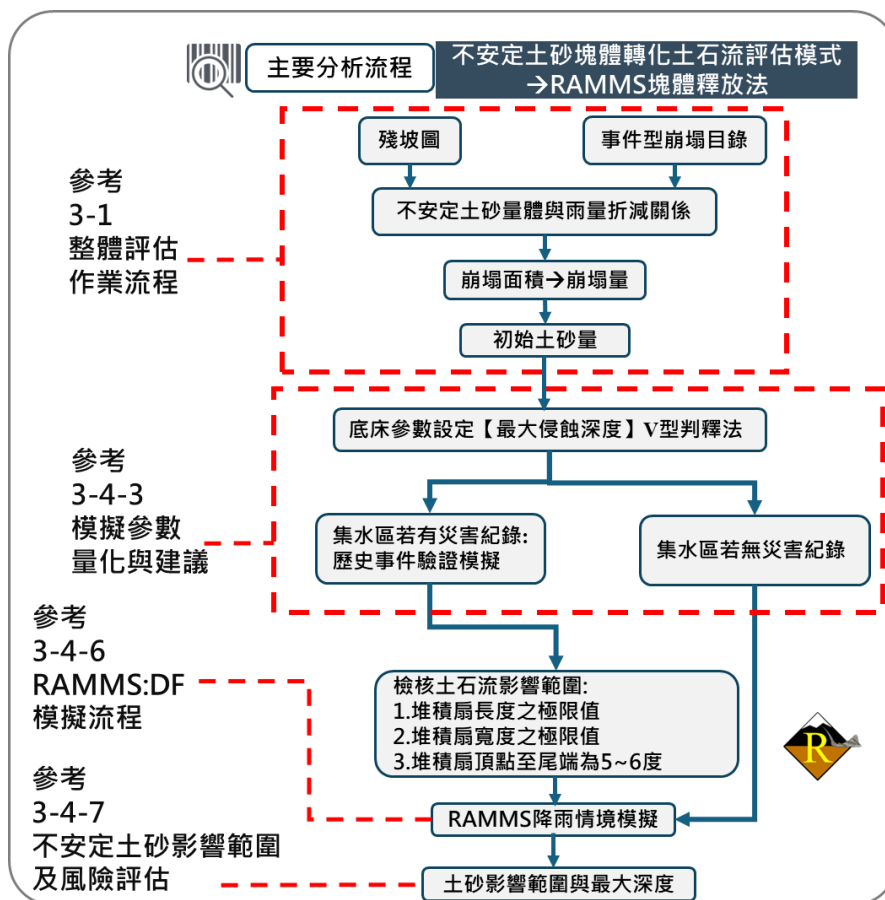


圖3-1-3 不安定土砂評估模式評估流程概念圖



殘坡量體折減係數

殘坡活動性	殘坡遷移率	降雨折減比值
高	0.9	$R_{200}(\text{極端})/R_{200}900\text{mm}/R_{200}650\text{mm}/R_{200}500\text{mm}/R_{200}350\text{mm}/R_{200}200\text{mm}$
中	0.4	
低	0.2	

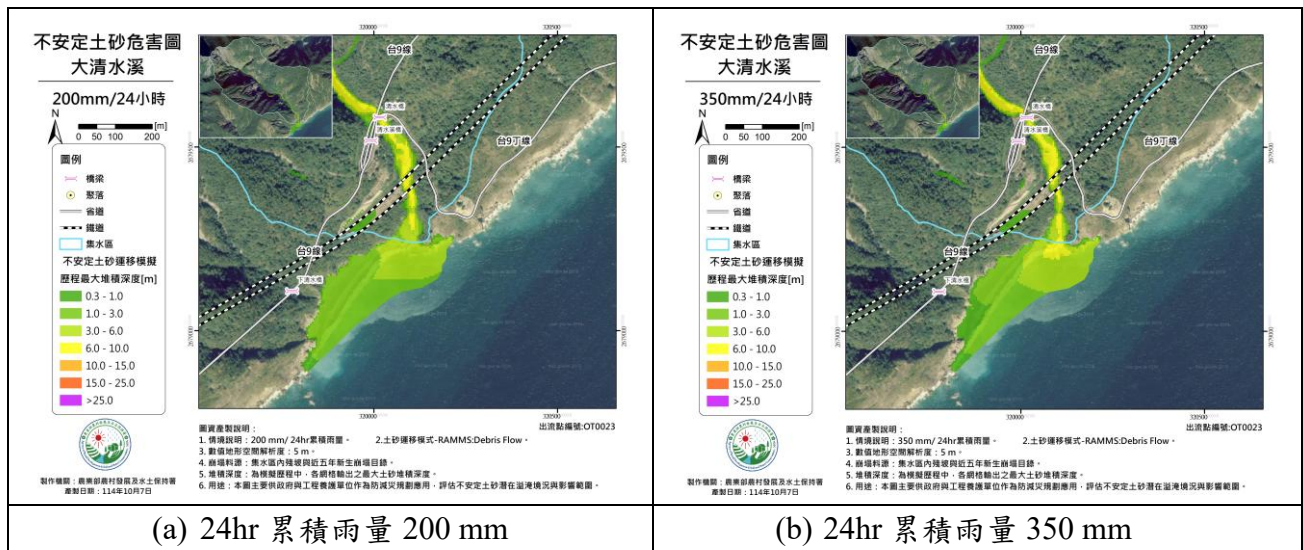
新生崩塌量體折減參數

新生崩塌坡面角度	年度折減係數對照
小於30	0.7
30~40	0.6
40~60	0.4
大於60	0.3

新生崩塌圖層今年(2025年)	年度折減係數	降雨折減比值
2024年(前1年)	依新生崩塌坡面角度對應年度折減係數 ¹	$R_{200}(\text{極端})/R_{200}900\text{mm}/R_{200}650\text{mm}/R_{200}500\text{mm}/R_{200}350\text{mm}/R_{200}200\text{mm}$
2023年(前2年)	依新生崩塌坡面角度對應年度折減係數 ²	
2022年(前3年)	依新生崩塌坡面角度對應年度折減係數 ³	
2021年(前4年)	依新生崩塌坡面角度對應年度折減係數 ⁴	
2020年(前5年)	依新生崩塌坡面角度對應年度折減係數 ⁵	



圖3-1-4 殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係(塊體釋放法)





不安定土砂危害風險評估及作業方法

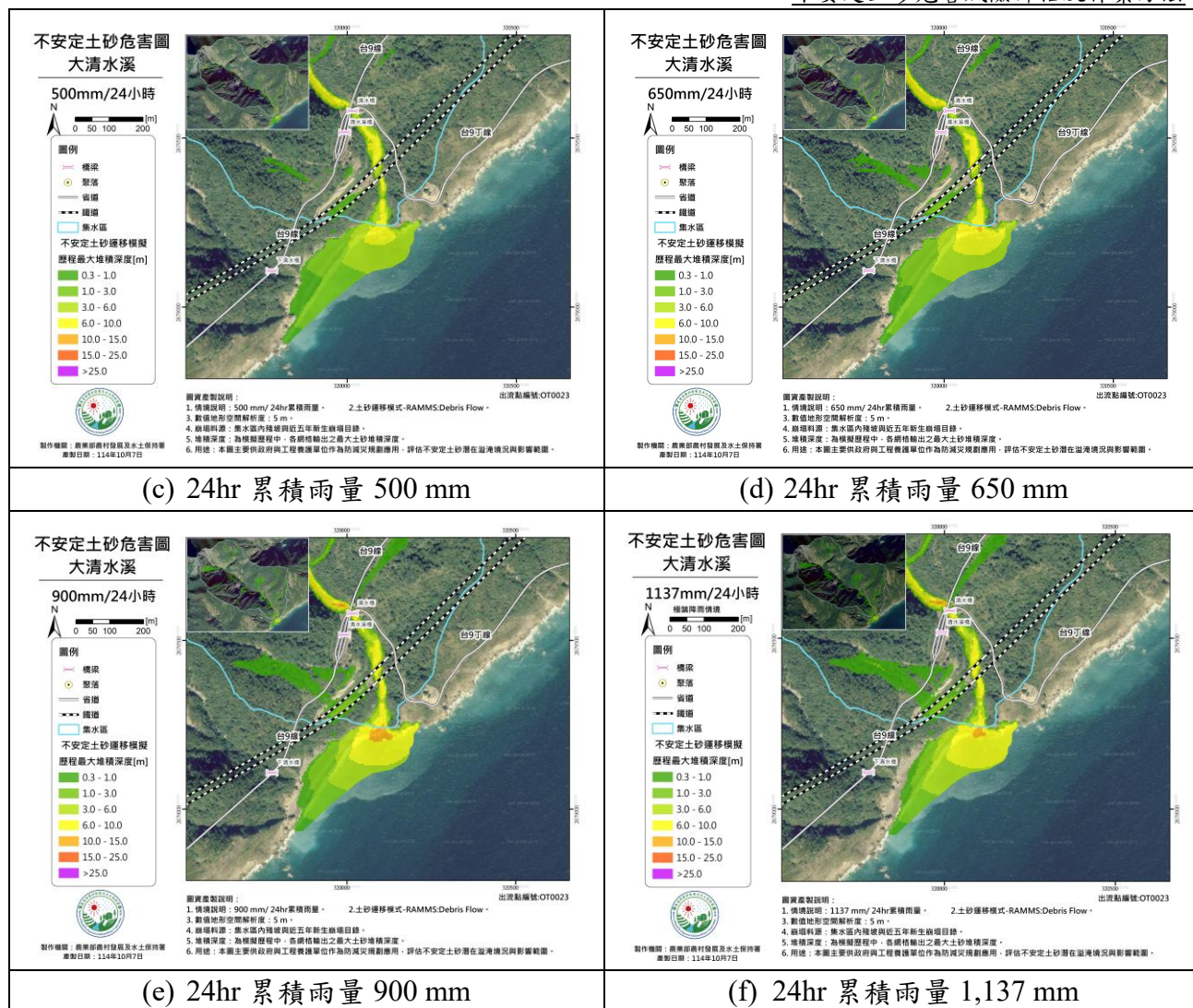


圖3-1-5 殘坡與崩塌目錄土砂量體與雨量折減關係(塊體釋放法)

表3-1-1 大清水溪不安定土砂運移模擬成果與危害評估表

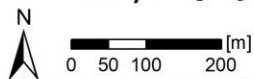
輸入參數	數值					
累積雨量情境 (mm)	200	350	500	650	900	1,137
流出土砂量體 (m³)	191,103	238,783	240,021	311,723	372,225	428,760
潛在影響鐵路橋	西大清水溪橋	西大清水溪橋	西大清水溪橋	東大清水溪橋、西大清水溪橋	東大清水溪橋、西大清水溪橋	東大清水溪橋、西大清水溪橋



潛在影響公路橋	無	無	無	無	台9丁線 清水橋	台9丁 線清水 橋
---------	---	---	---	---	-------------	-----------------

不安定土砂危害圖 大清水溪

650mm/24小時

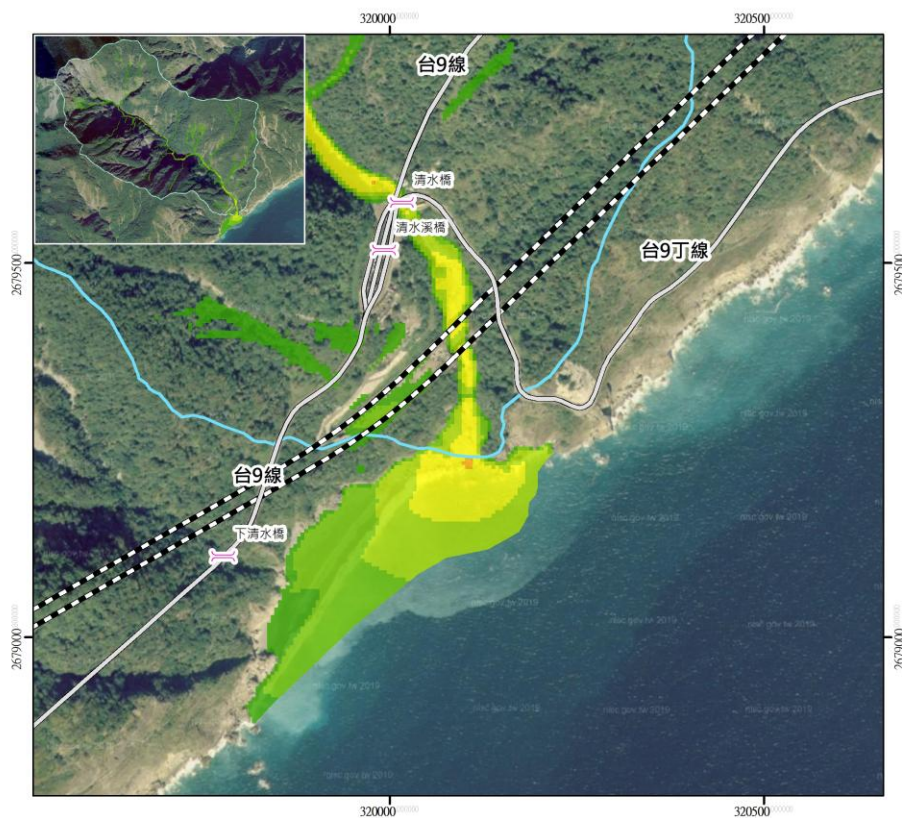


圖例

- 橋梁
- 聚落
- 省道
- 鐵道
- 集水區
- 不安定土砂運移模擬
歷程最大堆積深度[m]
- 0.3 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 6.0
- 6.0 - 10.0
- 10.0 - 15.0
- 15.0 - 25.0
- >25.0



製作機關：農業部農村發展及水土保持署
產製日期：114年10月7日



圖資產製說明：

1. 情境說明：650 mm/ 24hr累積雨量。
2. 土砂運移模式-RAMMS:Debris Flow。
3. 數值地形空間解析度：5 m。
4. 崩塌料源：集水區內殘坡與近五年新生崩塌目錄。
5. 堆積深度：為模擬歷程中，各網格輸出之最大土砂堆積深度。
6. 用途：本圖主要供政府與工程養護單位作為防減災規劃應用，評估不安定土砂潛在溢淹境況與影響範圍。

出流點編號:OT0023

圖3-1-6 不安定土砂危害圖



3-2 集水區降雨逕流評估

在集水區降雨逕流的評估過程中，透過設計頻率年降雨及歷史事件降雨量成果供給模式進行集水區降雨量網格流量的產出。以下說明定量降雨量評估與極端降雨事件評估雨量與逕流產製方式。

為了有效針對不安定土砂集水區進行模擬。參考中央氣象署於 109 年 3 月公布的雨量分級定義豪雨 24 小時 200 mm 以上、大豪雨 24 小時 350 mm、超大豪雨 24 小時 350 mm 與極端事件可能性，選用 24 小時 200 mm、350 mm、500 mm、650 mm、900 mm 與極端降雨情境等定量降雨提供模式進行分析。以下說明 24 小時定量降雨產製流程。

一、資料蒐集與盤點

蒐集近年來流域集水區內的歷史致災降雨事件資料，這些資料包括事件發生的日期、累積雨量、降雨分布以及相關的災害影響。這些歷史資料將成為後續情境模擬與驗證重要參考資料。同時，必須蒐集至少近 20 年的雨量站紀錄資料，或者至少近 15 年的雷達降雨網格資料。雨量站紀錄資料能提供準確的降雨量數據，而雷達降雨網格資料則能提供更精細的空間降雨分布資訊。這些資料將用於頻率分析和設計雨型。

二、定量降雨條件

1. 定量降雨延時及設計雨型：

本作業方法設計雨型的降雨延時設定為 24 小時，參考經濟部水利署的淹水潛勢圖製作手冊與出流管制技術手冊，使用 Horner 公式 $I=a/(t+b)^c$ 進行產製，輸出時間解析度使用 1 小時為單位進行產製。I 為重現期距 T 年，降雨延時 t 分鐘之降雨強度 (mm/小時)，t 為降雨延時(分鐘)、a、b、c 為回歸係數。

2. Horner 公式參數與機率分布函數引用：

在進行設計雨型模擬時，所需的 Horner 公式參數資料引用水利署頒布的最新雨量測站降雨強度-延時 Horner 公式參數資料。如表 3-2-1 為高屏河流域美濃雨量站 Horner 公式參數資訊。而定量降雨情境可採用二參數對數常態分布、三參數對數常態分布、極端值 I 型分布、皮爾遜 III 型分布、對數皮爾遜 III 型分布。



表3-2-1高屏溪流域美濃雨量站Horner公式迴歸係數

重現期距	理論分佈	a	b	c
20 年	二參數對數常態	800.137	7.156	0.491
	三參數對數常態	828.798	7.630	0.497
	皮爾遜三型	829.170	7.536	0.497
	對數皮爾遜三型	812.245	7.767	0.492
	極端值一型	821.614	7.314	0.495
25 年	二參數對數常態	797.659	6.898	0.485
	三參數對數常態	835.922	7.468	0.494
	皮爾遜三型	835.870	7.358	0.493
	對數皮爾遜三型	819.265	7.717	0.488
	極端值一型	828.396	7.140	0.490
50 年	二參數對數常態	790.143	6.133	0.467
	三參數對數常態	858.051	6.984	0.483
	皮爾遜三型	856.017	6.827	0.483
	對數皮爾遜三型	844.326	7.648	0.478
	極端值一型	851.040	6.631	0.478
100 年	二參數對數常態	783.151	5.419	0.452
	三參數對數常態	878.769	6.474	0.474
	皮爾遜三型	874.502	6.289	0.474
	對數皮爾遜三型	873.929	7.693	0.470
	極端值一型	876.189	6.201	0.468

3.限制及適用情況：

- (1).空間推估：將各雨量站的頻率分析結果進行空間推估，從而求得區域降雨的空間分布。
- (2).統計量修正：計算樣本統計量（如標準偏差及偏態係數）時，需採用不偏估計量公式修正，以避免樣本數影響結果的準確性。
- (3).分布合理性檢驗：若觀測事件超過分布上限值或重現期距受上限值影響而低估，則需避免使用該分布函數。

若採高屏溪流域美濃雨量站為例，以台灣地區各雨量測站降雨強度-延時 Horner 公式進行降雨量推估，取重現期 100 年，選擇對數皮爾遜三型 Horner 參數 $a=611.372$ ； $b=19.135$ ； $c=0.340$ 。如表 3-2-1 所示。在計算過程中參考水利署出流管制技術手冊，如圖 3-2-1 利用 Horner 參數計算對應總降雨量及降雨強度計算，並且針對各延時進行降雨量推估完成降雨量增量計算、最大降雨量置中並且依序排序完成雨型設計步驟。推估之最大時雨量達到 138.3 mm 佔整體事件 11.22%，如圖 3-2-2 所示(第一列



為降雨增量計算成果，第二列為依照雨型配置的降雨量，第三列為對應雨型的降雨百分比分布情況)。將推估測站的時間序列與徐昇多邊形對應邊界進行結合，如圖 3-2-3 所示。資料使用水利署經濟部水利署水利規劃分署全台雨量站降雨強度延時公式推導成果 (2024)。應用歷史資料和統計分析產製之降雨強度-延時-頻率 (Intensity-Duration-Frequency) 成果，其資料內容使用包含水利署與氣象署超過 20 年共有 372 站進行分析。在某些極端的氣象條件下，IDF 曲線的高重現期結果可能會接近 PMP 值，惟在大多數情況下，PMP 依然比 IDF 曲線的值高。後續依序將各測站對應重現期與時間序列資料進行更新，完成範圍相關徐昇多邊形降雨量對應如圖 3-2-4 所示。而將徐昇多邊形範圍降雨量依照時間與空間進行內插，可轉換成為網格型態的降雨量，輸出為 netcdf 檔案格式供相關模式使用。

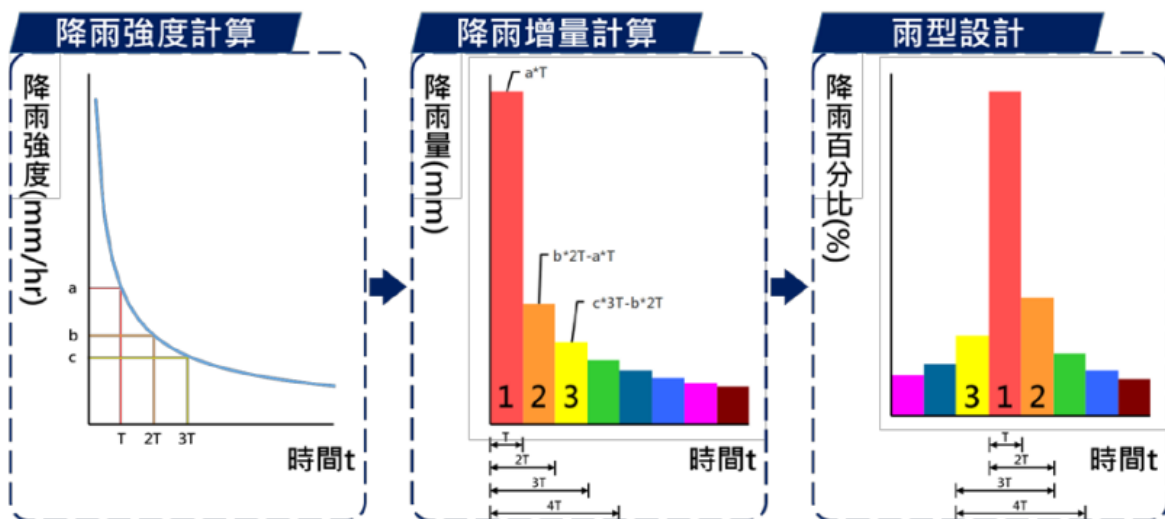


圖3-2-1 設計雨型計算方法流程示意圖

(來源 :水利署出流管制技術手冊)



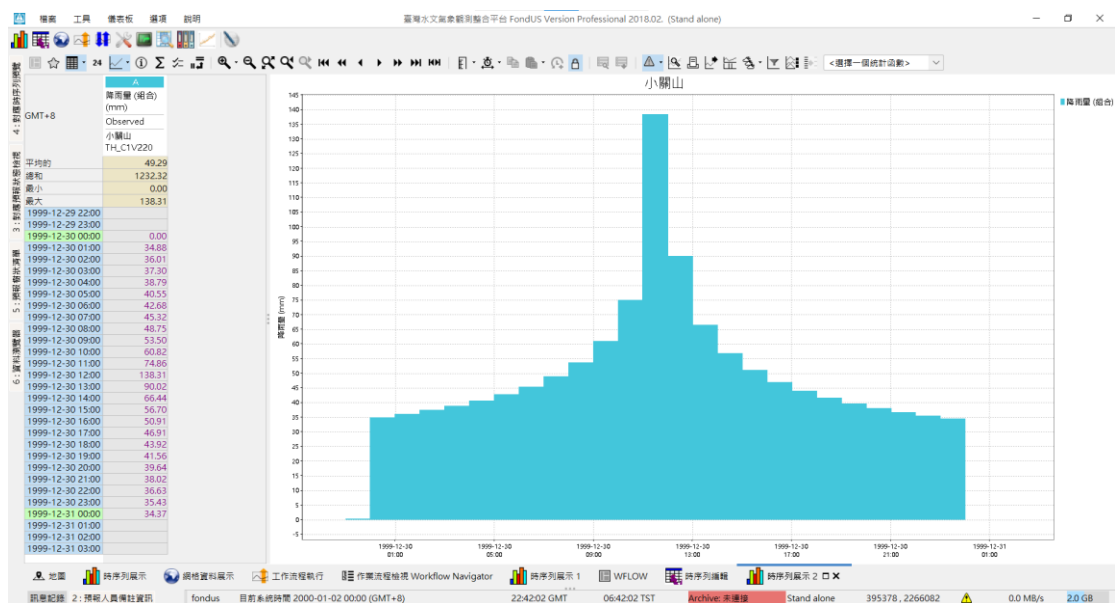
Miniforge Prompt

```
(geo) C:\TC>python raind3.py
```

小時	修正降雨強度 (mm/h)	重新排序後降雨強度 (mm/h)	比例
1	138.31	0.00	0.00%
2	90.02	34.88	2.83%
3	74.86	36.01	2.92%
4	66.44	37.30	3.03%
5	60.82	38.79	3.15%
6	56.70	40.55	3.29%
7	53.50	42.68	3.46%
8	50.91	45.32	3.68%
9	48.75	48.75	3.96%
10	46.91	53.50	4.34%
11	45.32	60.82	4.94%
12	43.92	74.86	6.07%
13	42.68	138.31	11.22%
14	41.56	90.02	7.30%
15	40.55	66.44	5.39%
16	39.64	56.70	4.60%
17	38.79	50.91	4.13%
18	38.02	46.91	3.81%
19	37.30	43.92	3.56%
20	36.63	41.56	3.37%
21	36.01	39.64	3.22%
22	35.43	38.02	3.09%
23	34.88	36.63	2.97%
24	34.37	35.43	2.87%
25	0.00	34.37	2.79%

(geo) C:\TC>

圖3-2-2 降雨度與降雨雨型分布計算成果



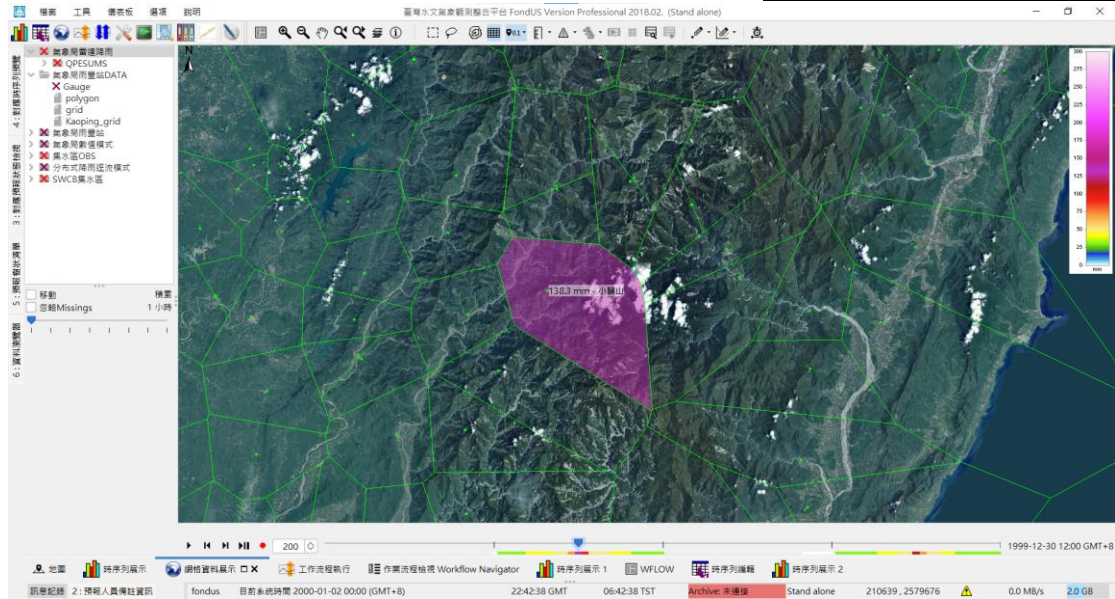


圖3-2-4 徐昇多邊形邊界對應時間序列空間分布

三、定量降雨成果應用

將前述定量降雨分析的雨量站建立對應的集水區徐昇多邊形，並將各定量降雨量分析成果依照徐昇多邊形建立降雨時間序列資料。利用這些多邊形區域範圍的降雨資料，按照 QPESUMS 網格位置進行空間與時間序列內插，產生 QPESUMS 網格時間序列降雨量。接著，將網格化的降雨資料內插至 WFlow 模式的網格解析度，並進行 WFlow 模式模擬。在模擬過程中，WFlow 模式利用網格化的降雨資料進行每個網格單元內的流量推估，並將各單元的逕流量匯總成整個集水區的流量。最後，根據推估得到的流量資訊，對特定點位進行流量供應，上述流程如圖 3-2-5 所示。如圖 3-2-6 為徐昇多邊形降雨量轉換為雷達降雨網格成果示意圖。

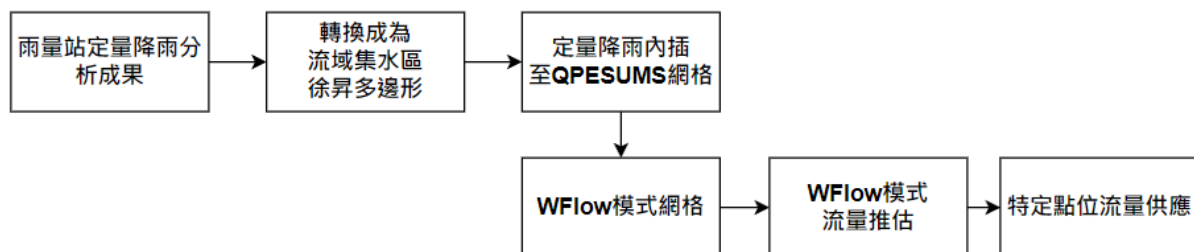


圖3-2-5 定量降雨評估資料處理流程

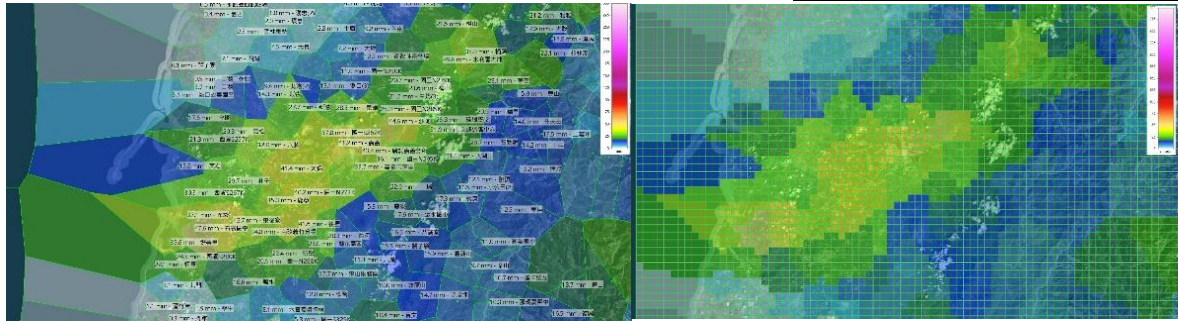


圖3-2-6 徐昇多邊形降雨量轉換為QPESUMS網格降雨量示意圖



3-3 集水區不安定土砂運移評估

集水區內不安定土砂產生來源依空間區位可分為二類，其一為殘坡或崩塌所產生的崩積土砂，崩塌後若量體規模與邊坡坡度不大，其可能暫時停駐於坡面、野溪或蝕溝內，待爾後降雨逕流才逐漸運移至主河道內；其二為集水區內溪流上的鬆散堆積物，其產生原因包含河岸側壁的崩塌(如坡腳侵蝕)、土石流運移之土砂、高含砂水流消退後的沉積物等。前述兩者皆為集水區提供了不安定土砂的來源，並可能在降雨情境下對溪流下游造成土砂溢淹現象，以下茲就此兩類型之土砂流量評估方式分節闡述。

3-3-1 土石流流量評估

土石流是一種由泥、砂、礫和巨石等物質與水混合而成的流動體，通常在陡峭的地形中發生。土石流的運動方式可以分為發生區、流動區和堆積區三個區域。在土石流溪谷的平緩區域通常為土石流停淤狀態，因此許多研究者以坡度與土石流出量體為主要因子而建立關係式。從潛在危險評估的角度來看，土石流體積是最重要的參數之一。一般來說，溪流內不安定土砂轉化為土石流體積將以不同的機率和形式產生。因而在規劃任何保護工程或交通設施時，通常必須定義可接受的重現週期及回顧歷史相關事件的致災規模。文獻研究中對於土石流體積的近似值評估，多以峰值流量(Q_p)、總運移距離(L)以及沖積扇上徑向距離(L_F)之間的關係來進行回歸分析(Mizuyama et al., 1992; Schilling and Iverson, 1997)。

於3-2節降雨逕流評估後，可得到各集水區內在不同降雨情境下與不同位置之溪流逕流量，經參考RAMMS手冊(SLF, 2002)、Takahashi(1991)、Rickenmann(1999)、蔡元芳(1999)等文獻。其評估的方法整理如下：

一、經驗回歸法：

RAMMS手冊建議若集水區溪流內無任何歷史災害資料可供分析，針對無特別分類的土石流類型，初步可參考Rickenmann(1999)研究中針對世界各國土石流案例



所回歸而得之半理論經驗式來估算(圖3-3-1)。

$$Q_p = 0.1M^{0.833} \quad (3-1)$$

上式中， Q_p 為土石流尖峰流量[m³/s]； M 為土石流體積[m³]；其回歸式使用的現地案例(118筆)，其土石流體積資料涵蓋範圍為20-70,000,000 m³。該文獻也提及採用類似經驗式可能會高估土石流洪峰流量，但著眼於防災力求保守的立場，可視為允許較大寬容度的評估結果。

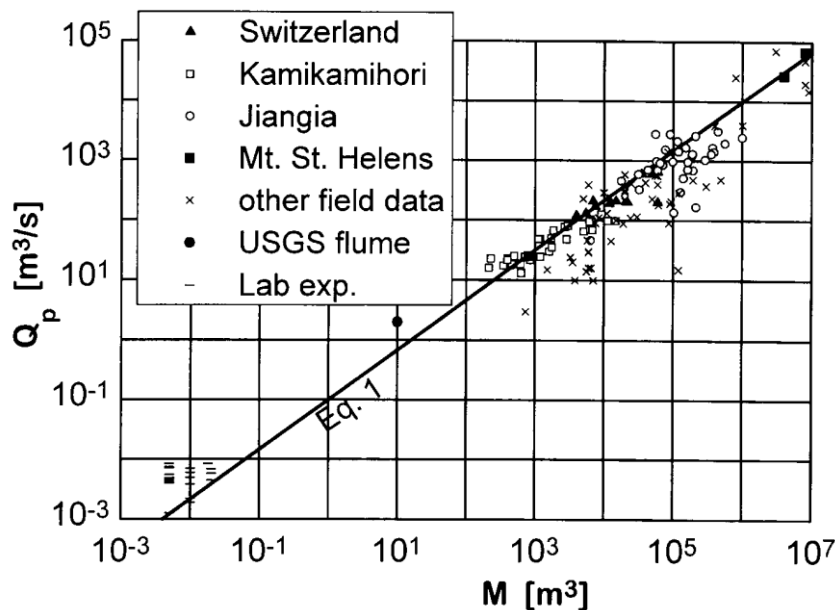


圖3-3-1 土石流尖峰流量與體積關係圖(Rickenmann(1999))

另Mizuyama et al., (1992)也針對日本境內數十至上百筆的礫石型(granular debris flows)與泥流型(muddy debris flows)土石流調查資料，得到下列洪峰流量與土石流體積量的經驗回歸式：

$$\text{礫石型土石流: } Q_p = 0.135M^{0.780} \quad (3-2)$$

$$\text{泥流型土石流: } Q_p = 0.019M^{0.790} \quad (3-3)$$

從式(3-2)與式(3-3)中，可得知在相同的土石流量體下，礫石土石流的洪峰流量會高於泥流型。

二、土石流流量推估：

土石流水理演算主要包括土砂體積濃度、流量、流速、流深及設計粒徑等(水土



保持手冊，2017)。目前最常用於推估土石流泥砂體積濃度，係以Takahashi(1978)建立之土石流先端部平衡泥砂體積濃度公式，可表示為

$$C_d = \frac{\gamma \tan \theta}{(\gamma_s - \gamma)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (3-4)$$

式(3-4)中， $\tan \theta$ =溪床平均坡度； θ =溪床傾角； $\tan \phi$ =靜摩擦係數，約介於 $26^\circ \sim 48^\circ$ 之間。上式適用於溪床坡度介於 $10 \sim 20^\circ$ 之間。土石流平衡體積濃度 C_d 合理範圍介於 $0.3 \sim 0.9c^*$ (c^* 為溪床堆積土體之泥砂體積濃度，介於 $0.6 \sim 0.75$)。表3-3-1為參照水保手冊(2017)建議參考不同坡度下之土石流體積濃度。

表3-3-1 不同溪床坡度之土石流泥砂體積濃度(水土保持手冊，2017)

溪床坡度	5°	10°	15°	20°	25°
體積濃度	0.172	0.205-0.391	0.376-0.539	0.602-0.657	0.633

Takahashi(1991)假定土石流以連續流方式行進時，其流量可以由平均流量表達：

$$Q_p = \frac{C_m}{C_m - C_d} Q \quad (3-5)$$

式(3-5)中， Q_p =土石流洪峰流量； Q =清水流洪峰流量；可由Wflow模式評估提供或由合理化公式推求。另上式 C^* 亦可參酌水土保持手冊(2017)中表土1-2-2自然狀態下各類土壤孔隙率與 C_m 值參考表(表3-3-2)。當清水流量為固定時，土石流的平均流量將與土石流泥砂體積濃度有關，而土石流泥砂體積濃度又與溪流的輸砂能力及固體物質的補給能力有關(水土保持手冊，2017)。此小節評估而得知土石流流量可作為數值模擬時，集水區主流不安定土砂流量歷線輸入基礎，並依下3-3-2節邊坡殘坡土砂量之貢獻量納入加總，綜合模擬主流與邊坡土砂運移作用下，評估對下游保全對象之潛在影響。



表3-3-2 不同溪床材料之土石流泥砂體積濃度(水土保持手冊，2017)

土壤種類	孔隙率	C_m
疏鬆均勻砂	0.44	0.56
緊密均勻砂	0.31	0.69
疏鬆之稜角狀粉土質砂	0.39	0.61
緊密之稜角狀粉土質砂	0.29	0.71
硬粘土	0.38	0.63
軟粘土	0.47-0.58	0.53-0.42
黃土	0.47	0.53
軟弱有機質土	0.71-0.76	0.29-0.24

3-3-2 殘坡土砂量綜合評估

殘坡土砂量泛指集水區內支流側壁與主流兩側的崩塌、崖錐堆積或崩積層鬆散土砂材料等，易受外力誘因(如降雨或地震)而崩落進入溪流主河道，由於其崩塌行為通常與岩性、地質構造或風化程度有關，崩塌量體不易量化且空間分布更為分散。在評估前，本作業方法整理了攸關評估殘坡土砂量的可能方法與評估流程，如圖3-3-2所示。實務操作上可依集水區邊坡地區可取得的既有資料，包含光學影像法評估(如DoD分析、殘坡圖、殘坡塊體PIV滑移分析)、雷達影像InSAR評估與打荻式回歸經驗式等來進行面積與量體評估。此節所稱之淺層崩塌，如農村及水保署每年產製之崩塌目錄；而深層崩塌則泛指大規模崩塌目錄，其資料來源與應用方式分述說明如下。

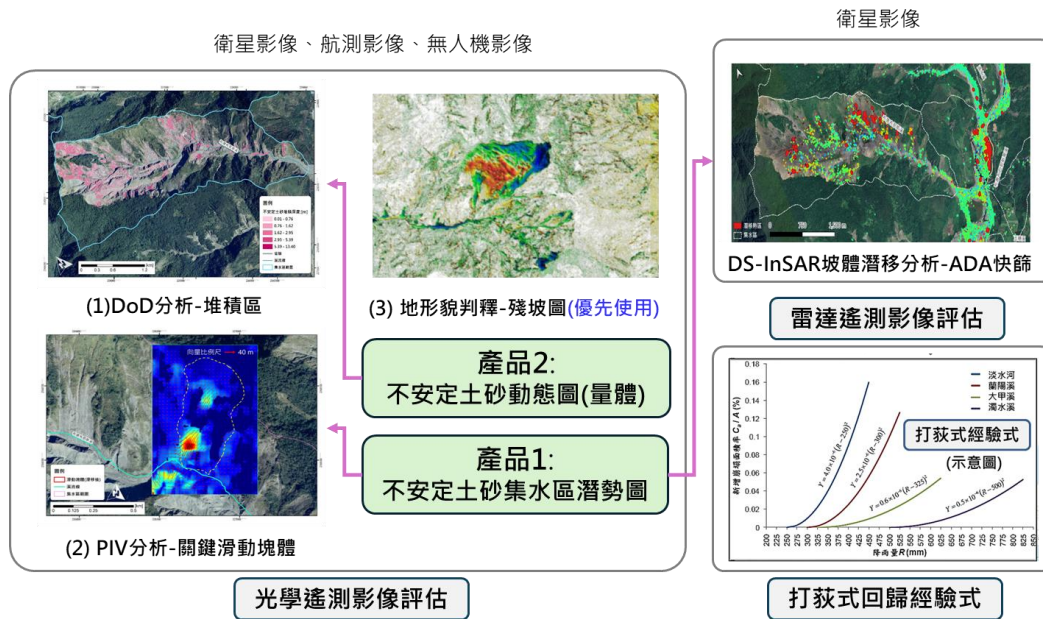


圖3-3-2 殘坡不安定土砂量綜合評估資料來源

一、光學遙測影像-DoD 分析：

此指透過非正射光學遙測影像(如法國Pleiades衛星)所產製之多期數值地表模型(DSM)，經由DoD法(DEM of Difference)進行地形變化分析。如農村發展及水保署每年產製一幅之不安定土砂動態圖，其DoD圖資為兩期高精度DSM相減後所得之三維模型，俱備高程差異變化，可大範圍地鑑別堆積區與侵蝕區空間分布，此法近年來已逐漸成為探討地形演育、集水區土砂生產與崩塌地致災前後的常見分析方式。惟本法需視評估集水區是否已建置相關圖資可供使用(如高屏溪、大甲溪、濁水溪、曾文溪與高屏河流域等五大流域)，另不同光學衛星的拍攝角度限制，使用產製資料時須注意在溪流上游段的深谷狹隘地形處，亦可能受到衛星視域限制較不易產製DSM。

二、光學遙測影像-PIV 分析：

光學遙測影像之次像素位移追蹤PIV(particle image velocimetry technology)分析經常用於冰川位移與山崩地滑潛移速率評估(羅佳明等，2009)，評估條件為至少需兩期影像，影像具備良好幾何控制點，同時被偵測標的物於變動前後之樣態需維持形態相關性(如邊坡崩塌滑動後，其塊體不能完全潰散)。相對於InSAR評估法，光學遙



測影像PIV評估可分析較快之邊(殘)坡崩滑速率(可達公尺等級)，如年滑動速率大於42cm者。集水區內的高活動性邊坡，可提供鑑別高危險區殘坡之空間分布與塊體面積概估。

三、殘坡圖：

殘坡(Residual Slope, RS)係指邊坡因自然崩塌現象或人為開採等行為，邊坡岩石裸露或殘餘土砂堆積的現象。其特徵包含了張力裂隙、崩塌陷落崖、雙溝同源、地形錯位、崖錐堆積等地形貌，殘坡的存在容易造成後續土砂災害的復發。殘坡圖分析產製後可透過綜整歷年影像、H.O.S.T地圖、DoD圖，來檢視對應指標，判斷活動性與風險程度，提供數值模擬納入邊坡不安定土砂料源的來源之一。農村水保署已於113年度陸續產製大甲溪、濁水溪、曾文溪與高屏溪以及114年度陸續產製淡水溪流域殘坡圖圖資，建議優先納入集水區邊坡潛在不安定土砂來源。

四、雷達遙測影像-InSAR 坡體潛移分析：

雷達衛星影像配合多時序差分干涉技術(InSAR)評估地表形變量(如適合山區之DS-InSAR, MT-InSAR, SBAS等方法)，近年來已成熟地應用於大規模崩塌和地滑(或稱岩體滑動)潛移觀測，以當前Sentinel-1雷達衛星於臺灣每12天一幅影像之重返頻率，對於每年滑動量低於42 cm之潛移邊坡是為良好的觀測手段。InSAR技術於坡體地表形變的評估結果可配合管理基準值率定，導入活動性變形區(active deformation area; ADA)自動化篩選，預先釐清集水區內的邊坡易致災危險熱區。若再結合高精度DEM的山崩微地形判釋工作，可進一步劃設中等規模以上(面積介於1-10公頃)高風險崩塌區位所在與面積估算，或者套疊已知崩塌或大規模崩塌目錄，瞭解重點關注邊坡的近期活動性(如崩塌再復發)，提供後續納入殘坡不安定土砂崩塌量體的料源估算。

五、打荻式回歸經驗式：

如集水區內可蒐集之歷史遙測影像與數值地形建置資料較為欠缺者，對於進行廣域崩塌量的初步評估，如具備事件型崩塌目錄與致災雨量等基礎資料，可朝建立促崩雨量與新增崩塌率的關係來獲得，打荻式經驗法評估(打荻珠男，1971)式如下：

$$Y=C_a/A=K \cdot 10^{-6}(R-r)^2 \quad R \geq r \quad (3-6)$$



式(3-6)中， Y 為新增崩塌面積率(%)或稱崩壞比，意即集水區內新增崩塌地面積總和與集水區面積的比值； C_a 為新增崩塌面積(km^2)； A 為集水區面積(km^2)； K 為地文係數； R 為暴雨降雨量(mm)； r 為崩塌臨界降雨量(mm)。該分析方法為蒐集不同年度颱風豪雨引致之崩塌災害事件，首先產製崩塌前後之山崩區位進行事件型崩塌目錄，再蒐集或計算各崩塌目錄之促崩事件累積雨量，進而求得各集水區之打荻式經驗式。

為落實應用上的可操作目標，如考量上述資料取得可及性、崩塌災害類型與現行頒布之警戒雨量促崩條件，集水區尺度的殘坡土砂量分析可參照流程圖如圖3-3-3。圖中將本小節所提五種的殘坡土砂量評估法，依據其適合應用的崩塌類型、土石流與大規模崩塌警戒雨量上下限值進行歸納。例如探討24hr累積雨量 $<300\text{mm}$ (豪雨)的殘坡不安定土砂生產情境，由於尚未達到大規模崩塌的促崩雨量下限值，主要的崩塌應以淺層崩塌為主(或稱岩屑崩滑)。可優先考慮將集水區DoD分析成果(不安定土砂動態圖)納入評估；若集水區內無此圖資，則可改用集水區判釋之殘坡圖、或根據InSAR(潛移慢速滑動)與PIV法推估的高潛勢滑動塊體，評估其可能產生破壞之面積。如集水區均無前述圖資可供參考，則建議使用打荻釋經驗式來評估集水區內的崩塌新生率，進而評估可能的崩塌量體。

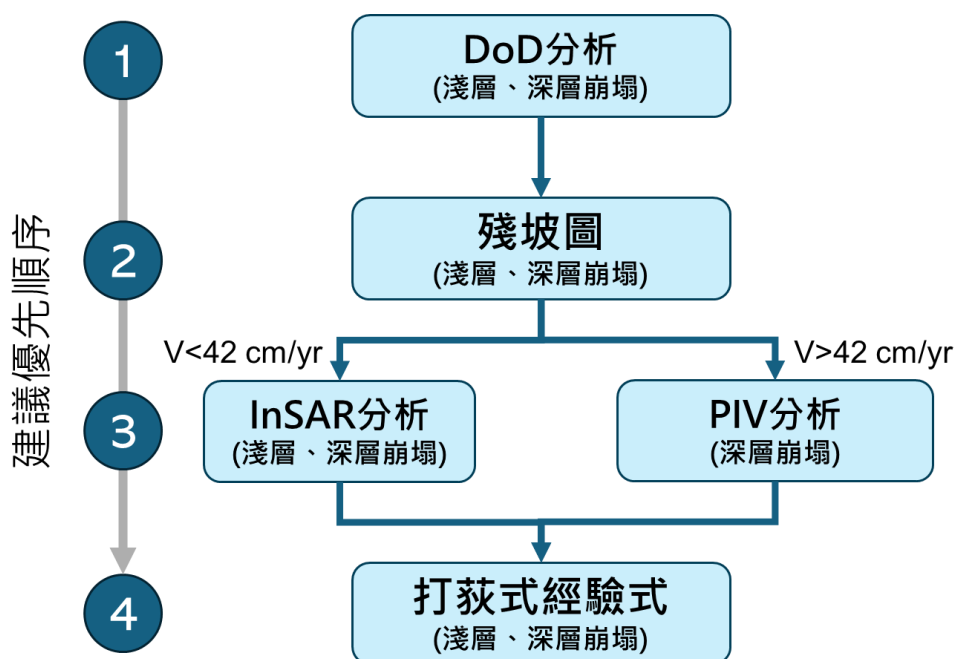


圖3-3-3 殘坡不安定土砂來源綜合評估流程



而在單一集水區內使用不同評估方法所得之殘坡崩塌面積不盡相同，使用上建議可先區分淺層崩塌(崩塌目錄)與深層崩塌(大規模崩塌目錄)類型，若能同時取得兩種以上殘坡熱區評估結果，建議若同時位處同一區位之崩塌地，為保守起見，應取評估面積或規模較大者納入不安定土砂的料源。

最後，前述五種方法雖可提供集水區內殘坡不安定土砂區域的評估方法，惟僅有第一項DoD法可直接評估量體值(volume)，其他方法則僅能給予高潛勢邊坡或不安定土砂區位的面積資訊，因此仍須搭配廣域崩塌面積-體積關係的關聯性。國內外目前對於不同崩塌誘發原因之土壤或崩積層厚度經驗式多有研究(打荻珠男(1971)、上野將司(2001)、陳毅青(2012)、地質調查所(2008-2010)、詹勳全(2015)、陳天健(2022))，表3-3-3則為在特定崩塌面積適用條件下的臺灣本島崩塌體積幕次經驗式(Chen et al.,(2013))。另可參考農村水保署(2023)於大規模崩塌潛勢區影響範圍劃設作業流程與方法所建議的崩塌體積-面積關係式，如

$$V = 0.1025A^{1.401} \quad (3-7)$$

式(3-7)中，V為崩塌體積，A為崩塌面積；適用崩塌面積為小於10 ha以下。

由於廣域崩塌所指對象多針對淺層之岩屑崩滑，即降雨造成之地表逕流或沖刷引致的崩塌現象，因此深層崩塌之岩體滑動通常不在討論之列。雖各家學者之研究區域皆不盡相同，在缺乏參考資訊的集水區內，仍可適度遴選適合全臺灣或地質條件相近之集水區分析成果，進行初步的崩塌面積-體積量估算，並於國內外相關研究逐步完備後再行逐步更新評估方法。另在定量降雨情境中，由於降雨和崩塌面積的關係式，長久以來受限於多數集水區缺乏詳細資料，而不易進行細緻化率定分析。對於不同累積降雨量下殘坡土砂量體的設定，初步可參酌打荻式的新增崩塌面積率作為初步設定值。農村水保署於【113年集水區不安定土砂運移模式建立與衝擊評估】中將全臺各流域集水區之打荻式經驗式，提供使用者進行殘量土砂量評估之參考，詳表3-3-4。



表3-3-3 崩塌面積與土方冪次經驗式(Chen et al.,(2013))

編號	分區	公式
1	中央山脈西翼地區、雪山山脈	$V = 0.238 * A^{1.188}$
2	中央山脈東翼地區	$V = 0.351 * A^{1.132}$
3	東部縱谷地區(板塊縫合帶)	$V = 0.337 * A^{1.147}$
4	海岸山脈地區(新第三紀火山岩)	$V = 0.337 * A^{1.147}$
5	西部麓山地區(新第三紀碎屑岩)	$V = 0.099 * A^{1.356}$
6	中央山脈西翼地區_脊梁山脈帶	$V = 0.607 * A^{1.074}$
7	西部濱海平原	$V = 0.099 * A^{1.356}$
8	曾文高屏	$V = 0.202 * A^{1.268}$

3-3-3 數值分析流程

一、流量歷線法

關於不安定土砂運移數值模擬分析，採用1-3節介紹之RAMMS: Debris Flow數值模擬模式，其中土石流模組乃應用Voellmy-Salm連續體模式為基本理論基礎(Hussin et al., 2012; RAMMS, 2022)，尤其土石流模組模擬之堆積深度尚可反應土石流停淤及捲增現象，並經瑞士學者以Illgraben野溪土石流歷史紀錄事件比對與驗證證明其模式之適用性，過去亦已應用於台灣多場土石流災害模擬驗證(李璟芳等(2015), (2017)、蕭靖平(2019)、吳俊毅等(2021)、Shiu et al.,(2022))，並於農村水保署諸多土砂災害調查評估計畫中廣泛採用。Hürlimann et al.(2008)曾以Voellmy-Salm模式針對1982年La Guingueta土石流事件輸入之流變參數進行敏感度分析，分析結果顯示乾燥庫倫摩擦係數(μ , Dry-Coulomb Friction coefficient；底床摩擦係數)對土石流流出長度有較大之影響，紊流流動係數(C, Turbulent Friction Coefficient)主要影響土石流流速。不安定土砂的RAMMS模擬評估將蒐集現場調查、數值地形變異、航遙測基本圖與採樣試驗結果(Zimmermann et al., 2020)，獲得河床上堆積土砂材料之基本特性外(土石流可能類型)，另作為溪流底床潛在沖刷深度(potential erosion depth)與侵蝕率(erosion rate)提供推估的參考資料。透過對比現場情境調整後的土壤性質，可推估土砂運移動床模擬之所需相關分級參數設定(如可侵蝕材料密度)，並適度參考地文分析方法(如Melton ratio)及國內外研究文獻，釐清各集水區內可能發生之災害類別(如土石流或高



含砂水流)。

不安定土砂運移數值模擬結合RAMMS評估分析流程可參照圖3-3-4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 km²(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5 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。接著在土砂釋放點的選定上，RAMMS使用手冊建議釋放點應以具有流量觀測之溪流特定位置為優選點位(RAMMS, 2022)。惟臺灣多數集水區溪流段並無水文觀測點可供直接使用。經參考文獻對於土石流流量歷線釋放點於防災應用案例，可參照圖3-1-2；若集水區內無顯著潛在大規模崩塌地，建議採用溪流中點為釋放點(Liu et al., 2013, Nakatani et al., 2016)。反之，集水區內若存在潛在大規模崩塌地或重要關注土砂肇災區，考量其崩塌土砂料源可能為主導不安定土砂運移之要角，可將釋放點訂為崩塌地趾部與溪流之交點。

後續則如 3-3-1 節-溪流不安定土砂小節所闡述之內容，先以定量降雨情境及極端降雨下之新生崩塌情境，分別導入 Wflow 分布式降雨逕流模式，求得集水區內釋放點的流量時序歷線資料(Q)，並估算其溪流內產生的土石流流量(Q_p)。而殘坡土砂量(Q_s)則依 3-3-2 節所述之方式進行推估。並將兩者土砂量加總獲致不安定土砂總量(Q_p+Q_s)。接著在模擬參數調校部分，則綜整現地採樣試驗、RAMMS 手冊建議與歷史遙測圖資之地貌特徵判讀，進行合理之參數調整。最後將所需所有資料輸入 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。

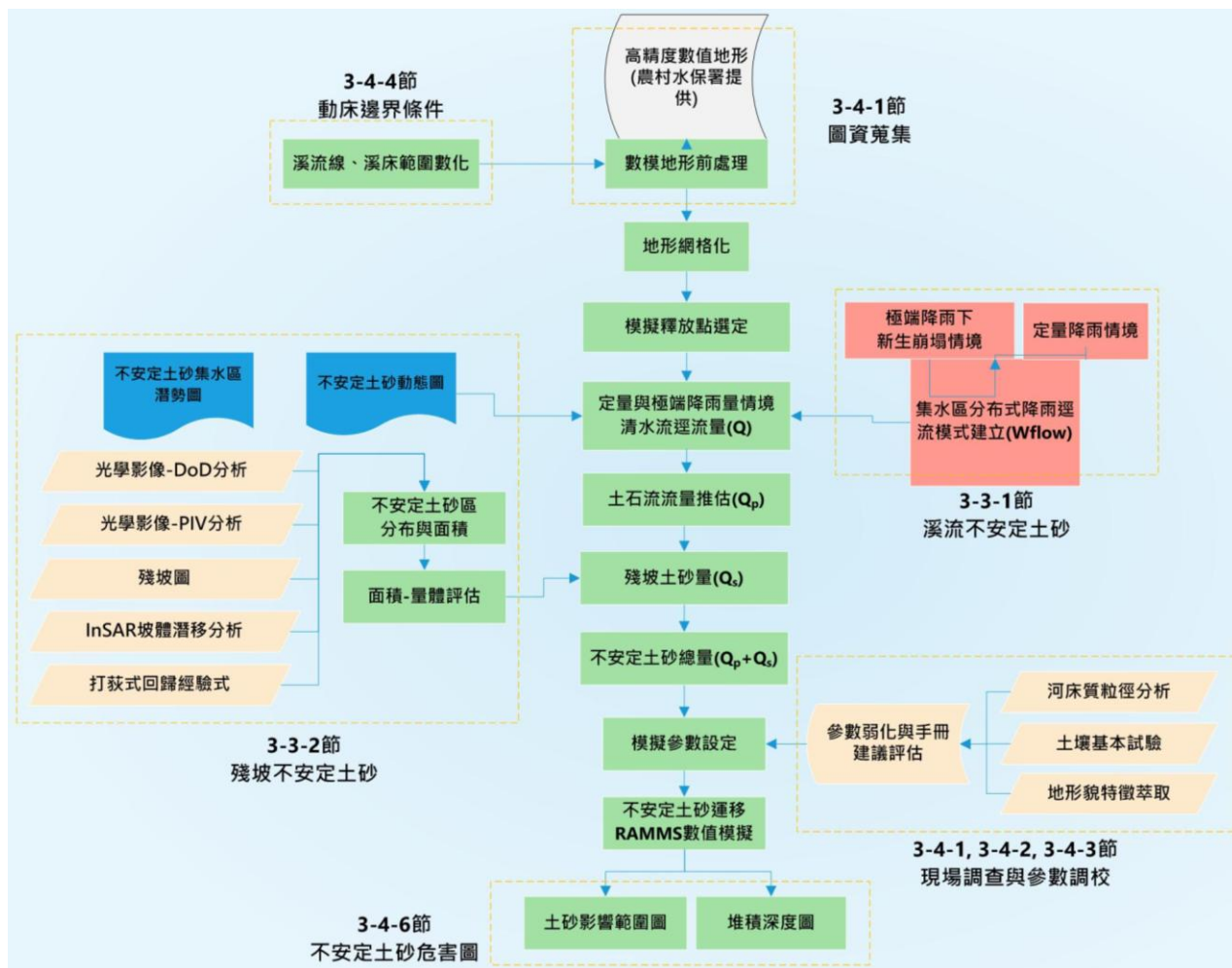


圖3-3-4 不安定土砂運移評估模擬流程圖(流量歷線法)



二、塊體釋放法

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地圖及崩塌目錄置入 RAMMS 數值地形模型之介面中作為塊體釋放區。接續依據第3-1節建立之「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。

(一)有效塊體面積作為選用土砂體積經驗式之依據：

- A.當有效塊體面積大於10公頃時，採用大規模崩塌之面積一體積回歸式；
- B.當有效塊體面積小於10公頃時，則採用地礦中心所提出經驗法則。

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3-4-3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。

(二)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，依據謝正倫老師之研究顯示，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。

因此如何判斷模擬的結果已經到達第二階段的終點，是本計畫其中很重要的關鍵。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。

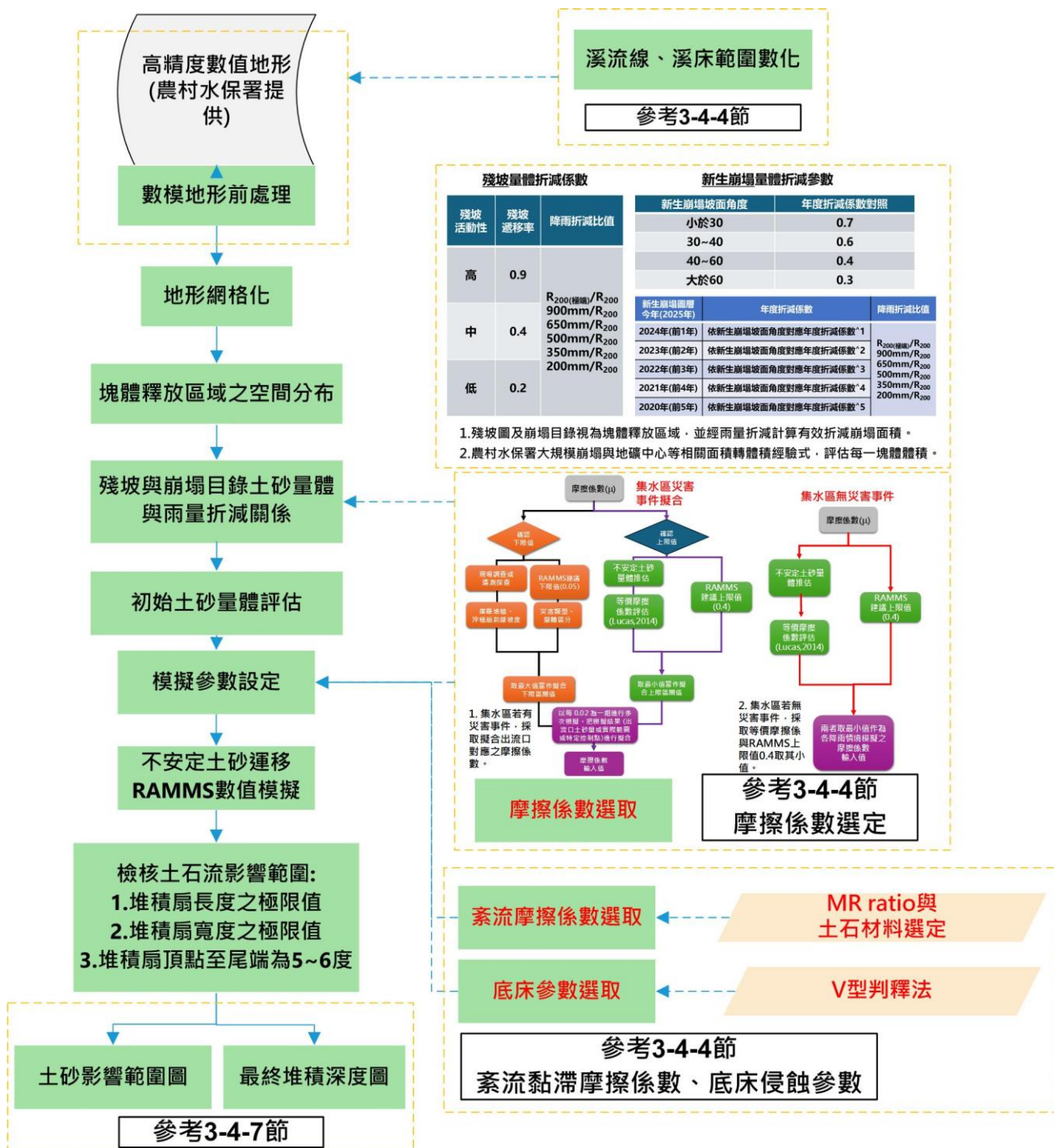


圖3-3-5不安定土砂運移評估模擬流程圖(塊體釋放法)



3-4 不安定土砂運移數值模擬評估作業方法

不安定土砂評估作業方法將採用 RAMMS 為評估模式，本節將就不安定土砂運移模擬所需使用之前端圖資處理、不安定土砂空間分布、RAMMS 模擬參數輸入、RAMMS 模擬流程與土砂影響範圍及應用分節說明如後，俾利產製不安定土砂危害圖。

3-4-1 前置作業蒐集與構造物調查

進行土砂災害模擬評估程序中，廣泛地蒐集整集水區的前期圖資是重要的第一步，圖3-4-1歸納了各種遙測影像、GIS圖資與高精度數值地形的蒐集建議，以下茲說明其應用方法：

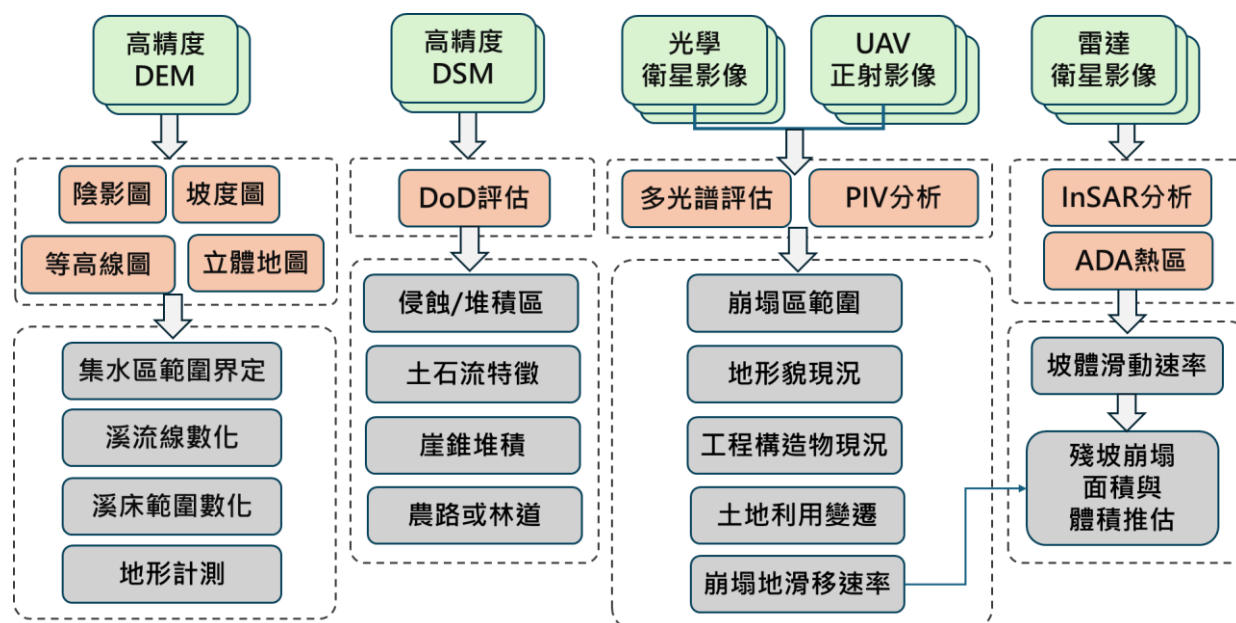


圖3-4-1 不安定土砂空間圖資蒐集與前處理

一、高精度數值高程模型(DEM)：

高精度DEM通常用來作為數值模擬時的地形建模基礎資料，為求模擬結果能貼近真實現況，應儘可能地採用最近期的DEM(重點災害事件後為佳)。取得DEM後，實務上可透過GIS軟體產製相關圖資，如八方位陰影圖、高程陰影圖、坡度圖、等高線圖或立體地形圖(如BigGIS圖台上之HOST/CS地圖或開闊度立體地圖)等。相關地形測計需求可下載開源之地形可視化工具箱程式(Relief Visualization Toolbox (RVT); <https://www.zrc-sazu.si/en/rvt>)，依需求來產製(Zakšek et al., 2011, Kokalj et al., 2019)。



待相關加值地圖產製後，如等高線圖與坡度圖套疊可用來數化集水區範圍(數值模擬邊界)、溪流線與溪床範圍(動床模式)，以利輸入RAMMS模式建構集水區網格式地形。

二、高精度數值地表模型(DSM)：

蒐集高精度DSM的目的為地貌變異評估所需，藉由多期DSM之地貌變異(DoD)計算，獲得集水區河道內之沖淤地形貌，掌握殘存土砂在河道中的位置分佈現況。其中土砂堆積區可作為殘坡上的不安定土砂供應來源(如圖3-4-2)。集水區溪流河道內的高精度DSM，除空載光達測繪技術外，亦可從無人機空拍影像來產製。建議針對重點關注集水區，可於汛期前後定期拍攝，提高圖資更新頻率。而對於土石流流動特徵、河階地與溪床高差、側壁崩塌後的崖錐堆積、既有農路和林道線型之地形貌等，亦可透過DSM來加以判釋，提供降雨或地震事件改變集水區的近期地表變遷資訊。前述之重點關注集水區，則可參照下列資料來源取交集後篩選排序較前者：

1. 歷史土砂災害事件好發區域：可下載或申請農村水保署(1)歷史災害影像平台(<https://photo.ardswc.gov.tw/Repository/Database>)與(2)重大災害事件(2006~2023年；<https://246.ardswc.gov.tw/Achievement/MajorDisasters>)之GIS空間資訊檔。使用時需注意歷史影像平台如位於同一區域，有重疊者需濾除，避免計數過高影響排序。
2. 歷年山崩目錄：可參考BigGIS圖資平台上之年度事件型山崩目錄(2008-2024年)。
3. 潛在大規模崩塌：集水區內若存在大規模崩塌地，對於不安定土砂評估需特別納入，圖資可參考BigGIS圖資平台上每年更新之潛在大規模崩塌區域(如114年公告79處)。
4. 不安定土砂集水區潛勢區：該圖資為農村水保署已評估率定後之不安定土砂災害潛勢集水區，可參考BigGIS圖資平台上該年度之圖層優先納入篩選。
5. 集水區殘坡圖層：為利用3-3-2節提及之方法所產製的殘坡圖相關圖徵，包含冠部崩崖、崩塌陷落崖、雙溪同源、地形錯位、崖錐堆積等特徵。由於該圖層屬於現生崩塌特徵，在關注集水區篩選時，建議套疊並依該圖層圖徵出現數量給予權重，以揚顯殘坡地貌特徵對集水區不安定土砂的後續影響。

除上述圖資外，如遇近期重大天災事件，尚未及時納入年度更新圖資者，建議



向主管機關申請調查或災害圖資先行納入篩選與評估重點關注集水區。

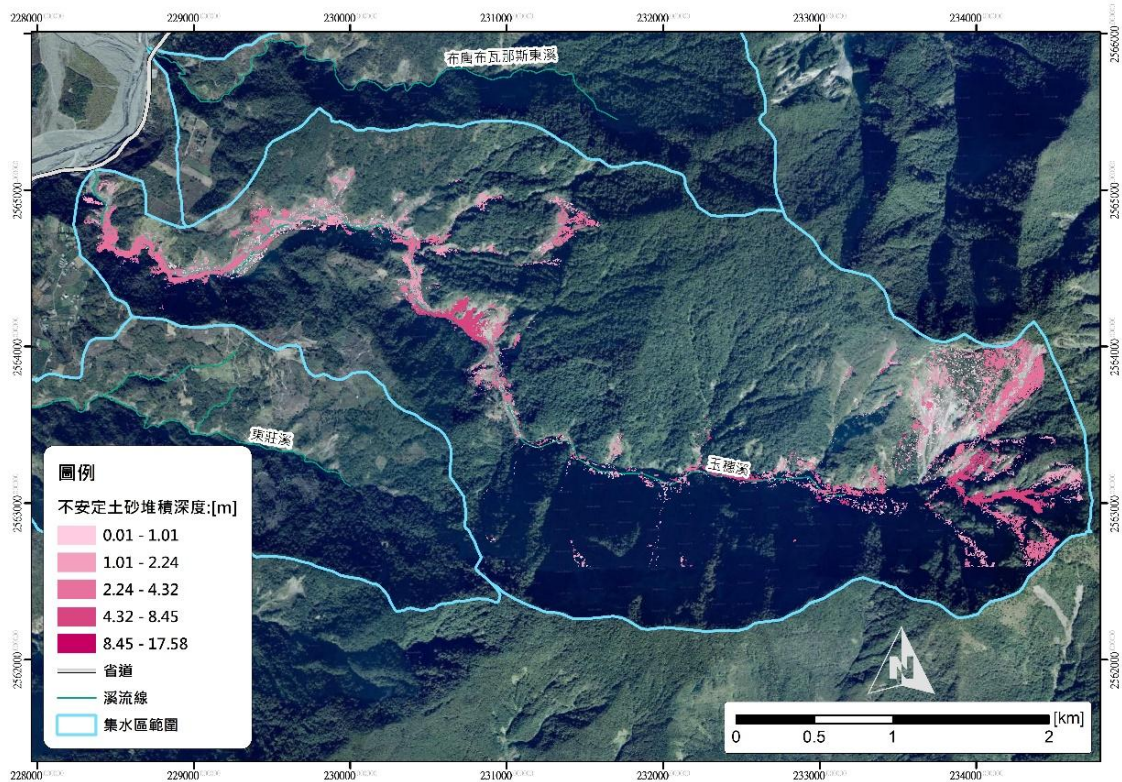


圖3-4-2 高精度數值地表模型-DoD分析-堆積區(以玉穗溪為例)

三、光學衛星影像與UAV正射影像：

開放的光學衛星影像(如Sentinel-2, SPOT5等)與UAV正射影像可提供集水區不同尺度的崩塌區範圍識別、地形貌演育、工程構造物現況、土地使用變遷等用途，協助瞭解不安定土砂的空間分布，並用於RAMMS模式展示之基本圖。另如為地理坐標對位良好之多時期影像，其可導入次像素追蹤法來評估集水區內大規模崩塌地或其不穩定塊體的滑動速率(3-2-2節)，提供權屬單位規劃適宜之整治手段與避難措施。

四、雷達衛星(SAR)影像：

雷達衛星影像有別於光源影像可於夜間以及有雲的時候進行拍攝，對於大範圍地表變形的偵測有其優勢。如3-3-2節所述，在集水區不安定土砂的評估上，InSAR可提供大範圍的邊坡坡滑移速率，特別是在裸露無植被覆蓋的邊坡，並配合適當的熱區篩選指標(圖3-4-3)，進行殘坡復發活動性(或危險度)的分級。受惠於雷達衛星的成像特性與特定偵測對象(緩慢潛移)，可與光學衛星的PIV分析結果互補，完善不同區



位土砂供應的多面向來源。最終配合崩塌面積與體積的關係式，求得殘坡區域的潛在不安定土砂量。

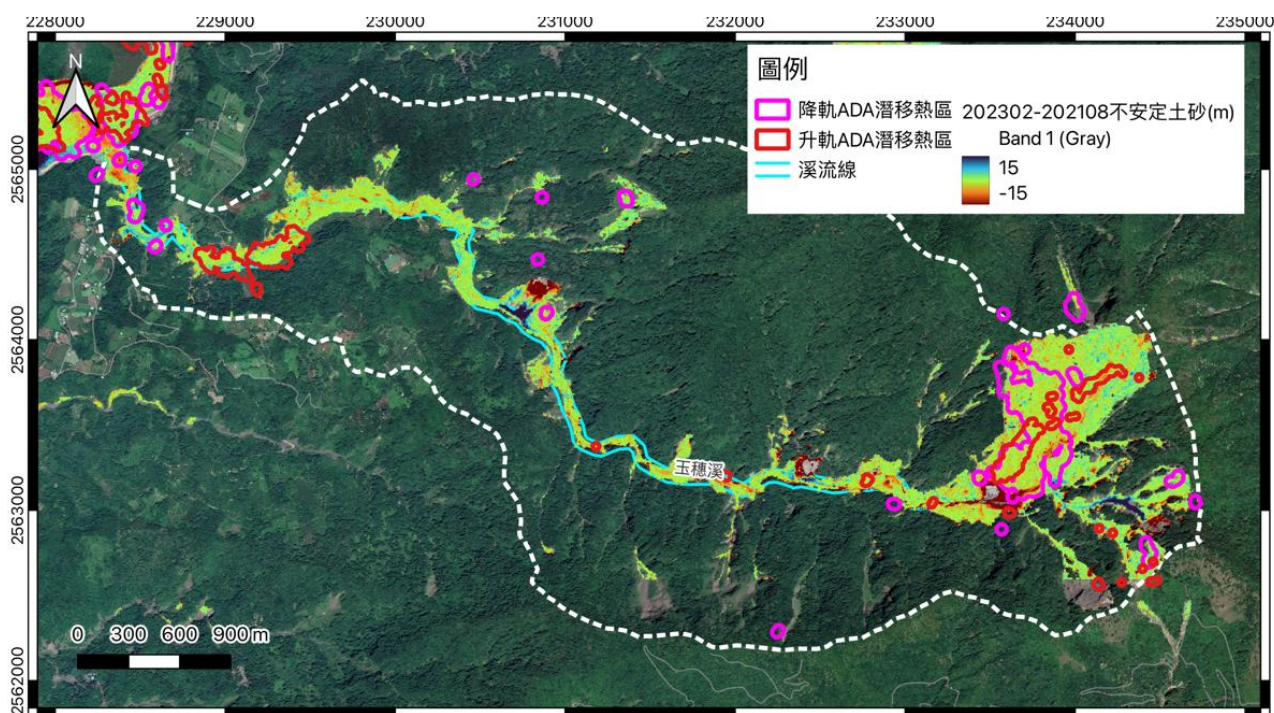


圖3-4-3 DS-InSAR配合ADA潛移熱區偵測(以玉穗溪為例)

3-4-2 現場調查與試驗

在完成為基本圖資蒐集後，不安定土砂調查與試驗工作可增進集水區溪流近況與崩塌材料特性之掌握，特別是近期曾發生土砂災害者。表 3-4-1 為針對不安定土砂運移評估所建議之調查項目。包含河床質調查、溪流現況、重要保全對象、防砂設施現況(含壩高 5m 與壩寬 5m 以上大型防砂設施結構尺寸調查)、堰塞湖及災因判釋與危險評估等調查，對於上游人車無法企及之重點崩塌或土砂堆積區域，則建議改以無人機航拍或遙測衛星影像(空間解析度至少達 3 m)輔助瞭解現況，建置數值模擬所需地文輸入參數資料。詳細之現地調查表請參閱附錄二或參閱水土保持手冊(基本資料調查與分析篇)。



表3-4-1 不安定土砂現場調查建議表

調查與試驗項目	調查或分析內容	調查成果應用
河床質調查	河床質粒徑分析、粒徑分析、細粒徑分析(詳參閱附錄二)	以人車可及之處，提供土石流類型研判與 RAMMS 模式 ζ 值參考
土壤調查	以採樣鏟進行分區採樣，評估，並攜回室內進行比重、含水量、等物理特性與粒徑分析(詳參閱水土保持手冊-調 2-3 節)	提供粒徑分布曲線與土石流類型研判(參閱水土保持手冊-調 2-3 節)
地質構造調查	斷層帶、褶皺、岩性、露頭	提供集水區地質條件良窳研判，並可回饋 InSAR 評估之高活動性熱區及廣域邊坡崩塌模式評估成果驗證
集水區溪流現況	溪床堆積、河階地高差、河道束縮點、河岸側壁刮痕	瞭解土砂空間分布與歷史事件之洪痕高度、回饋 RAMMS 模式評估歷史最大底床侵蝕深度與驗證
	土石流地形貌(如土石流波峰停駐點、覆瓦狀構造、側積堤、沖積扇堆積區、沖積扇前緣坡度)	瞭解集水區土石流特性及歷史土砂事件遺跡，回饋 RAMMS 模式 μ 值與 ζ 值研訂參考
	人工構造物(如防砂壩)	瞭解其功能性與現況，重要防砂構造物請參閱附錄三。
集水區崩塌地現況	崩塌地現況、岩性、節理位態、崖錐堆積現況(安息角)	提供邊坡破壞機制研判、崩塌模擬參數設定輔助資訊、InSAR 評估結果驗證
堰塞湖現況	位置、面積、溢流與否等現況	提供堰塞湖安全性評估與保全對象間距離評估
重要保全對象	公路橋梁(淨空)、涵洞(堵塞與否)、聚落位置或住戶位置(空間分布)、電塔(塔基現況)	提供保全對象現況與危害度圖標定、公路溢淹影響範圍
災因判釋與危險評估	依據現勘察覺之溪流內短期可能造成立即性之地貌變異與致災成因予以記錄，並輔以室內航照與數值地形圖資，初判危險評估之潛在影響範圍。如防砂構造物之毀損、土石流波峰停駐點等	1.提供權責單位進行短期整治或防災處置 2.考慮數值模擬中需特別關注之土砂運移隱患



圖3-4-4 溪流採樣點河床質調查

此外，為了獲得數值模擬之合適材料輸入參數，除蒐集溪流模擬所需之地文參數資料，仍有必要對於擬評估之集水區溪流進行必要現地取樣與室內試驗，建議室內試驗規劃表如表3-4-2所示，除每條溪流依照水土保持技術規範第37條-採樣孔粒徑調查分析方法之規定，建議採取2組河床質土壤樣本(中、下游土砂堆積區；如圖3-4-4)。取樣試驗之目的除獲得河床上堆積土砂材料之基本特性外(土石流組成可能類型)，對於難以獲得之河道底床潛在沖刷深度(potential erosion depth)，則輔以RAMMS操作



手冊建議、研究文獻、歷史遙測圖資(等高線地形圖)來協助歸納。透過土壤力學試驗性質可合理推估土砂運移模擬之所需相關分級參數設定(如可侵蝕材料)，並參考地文分析方法(如Melton Ratio)及國內外研究文獻，交互釐清各集水區內可能發生之災害類別(如洪水、土石流或高含砂水流；如表3-4-3)，或參考式3-1與式3-3評估土石流潛在流量。

表3-4-2 現地採樣室內試驗項目說明

試驗項目	組數	試驗產出成果	RAMMS 模式需求
土壤統一分類試驗	2 組/溪流	單位重	提供模擬土砂運移之材料單位重
		粒徑分佈	提供土石流類型判斷
		含水量	
		土壤分類	提供土石流類型判斷
土壤直接剪力試驗	2 組/溪流	最大剪應力	提供底床侵蝕資訊參考
		摩擦角(μ)	提供模擬土砂運移之材料單位重
		c 值	

表3-4-3 土石流類型判別參考表

土石流分類依據	類型與特性	參考文獻
依泥砂顆粒組成分類	泥流型土石流：粒徑 $d_s < 0.1\text{mm}$ 以下的細顆粒泥砂含量超過 50%，且粒徑 $d_s > 2.0\text{mm}$ 以上的粗顆粒泥砂含量少於 10%者	水保手冊(2017)
	一般型土石流：粒徑 $d_s < 0.1\text{mm}$ 的細顆粒泥砂含量介於 10%~50%，且粒徑 d_s 大於 2.0mm 的粗顆粒泥砂含量介於 50%~10%者	
	礫石型土石流：粒徑 $d_s < 0.1\text{mm}$ 的細顆粒泥砂含量小於 10%，且粒徑 $d_s > 2.0\text{mm}$ 的粗顆粒泥砂含量超過 50%者	
依流域險峻值(Melton Ratio, MR)	洪水：MR<0.3	周憲德(2020)，以台灣集水區為分析場域
	高含砂水流+土石流：0.3≤MR≤0.43(流域長度 L≤14km)；MR<0.43(7km≤流域長度 L≤14km)	
	土石流：MR<0.43(流域長度 L≤7km)	



3-4-3 模擬參數量化與建議

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)與豐富的研究文獻(Schraml(2015), Aaron & McDougall(2019), Zimmermann(2020), Mikoš and Bezak(2021))也提供了兩個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, ζ)、(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。

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3-4-5所示，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：

(一)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：

1. 區間上限值：採用 RAMMS 使用手冊建議值 0.4(ϕ 約為 22°)。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。
2. 區間下限值：採用 RAMMS 使用手冊建議值 0.05(ϕ 約為 2°)。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 $0.05(\varphi \text{ 約為 } 2^\circ)$ ，則以該值為下限。

(二)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。

(三)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 3-4-6)。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，做為風險情境評估。

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 release)模擬者，可配合文獻中大量土砂災害事件之回歸關係(如圖 3-4-8；Lucas et al., 2014)進行初估；如下式(3-8)：

$$\tan\varphi = H/\Delta L' = 1.200V^{-0.089} \quad (\text{Lucas et al., 2014}) \quad (3-8)$$

$$\text{適用範圍：} 10^2 < V < 10^{10} \text{ m}^3$$

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3-4-8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。

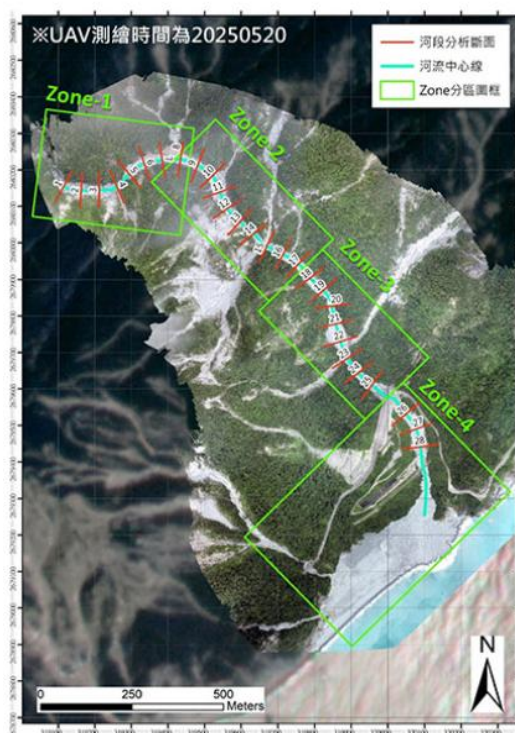
若集水區若有災例事件，如何透過【摩擦係數選定】之方法選定合適參數，先以大清水溪(花縣DF024)為例，相關步驟如下：

(一)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 60,875m³，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。



- (二)依據本研究建立之「摩擦係數選定流程圖（如圖 3-4-6 所示）」，經計算摩擦係數區間上限值為 0.4，摩擦係數區間下限值為 0.1，再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 3-4-4 所列）。
- (三)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 m³，與實際事件 ZONE-4 出流口模擬堆積量 60,875 m³ 最為接近，故選定摩擦係數 0.36 作為大清水溪基準參數。
- (四)基於上述擬合成果，後續針對不同定量降雨情境，透過圖 3-4-7 步驟，以線性內插方式推估其對應之摩擦係數值（如表 3-4-5 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。

UAV廣域攝影測量



資料來源:國科會災防科技方案-GeoPORT計畫，2025

圖3-4-5 2025年0518豪雨事件造成大清水溪(花縣DF024)淤積土砂量

表3-4-4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3-4-5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	1137
摩擦係數	0.36	0.33	0.30	0.26	0.22	0.16	0.1

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 3-4-7)。

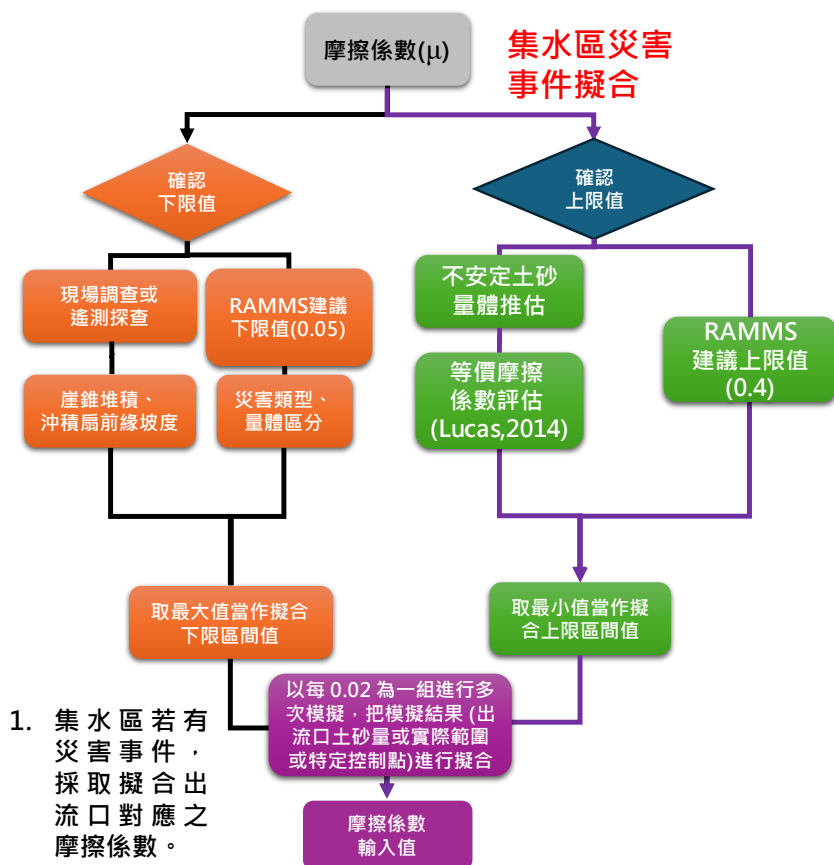


圖3-4-6 RAMMS庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區災害事件擬合)



圖3-4-7 各定量降雨情境之RAMMS庫倫摩擦係數選定流程圖



集水區無災害事件

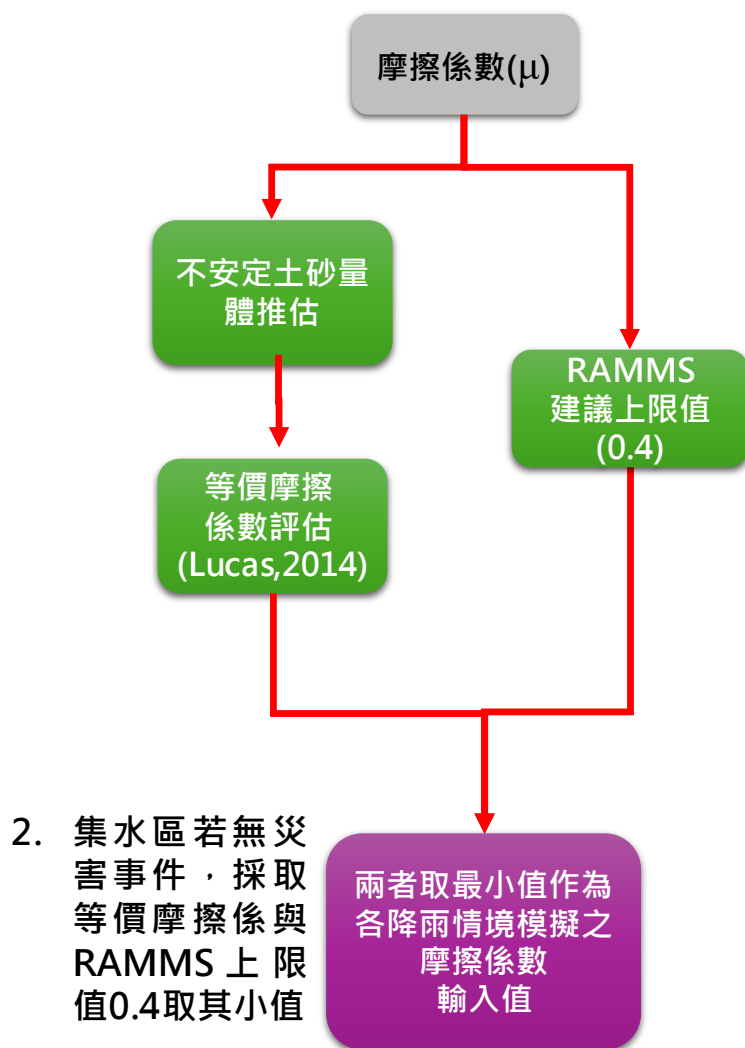


圖3-4-8 RAMMS庫倫摩擦係數評估流程圖(集水區無災害事件)

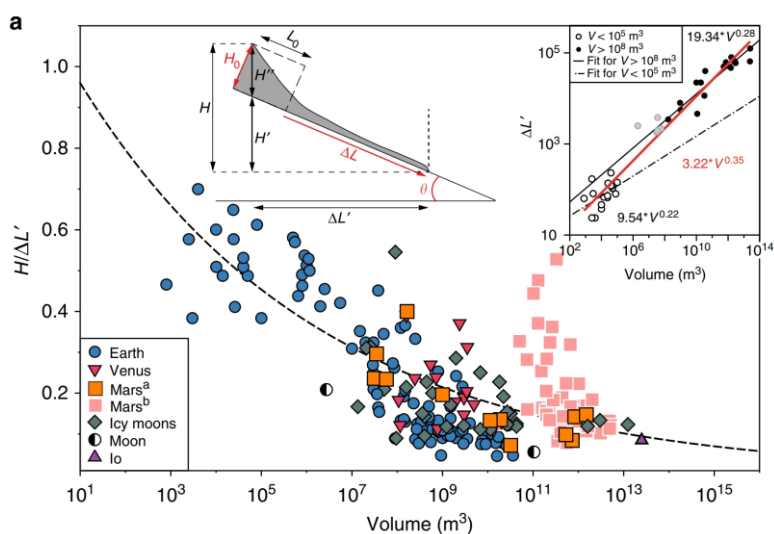


圖3-4-9 等價摩擦係數與土砂量體關係圖(Lucas, 2014)



二、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 km²)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3-4-9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：

$$MR = H/\sqrt{A} \quad (\text{周憲德, 2021}) \quad (3-4)$$

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3-4-4所示， 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3-4-10，若屬礫石型土石流， ξ 值可設定100-200 [m/s²]區間，若偏向泥流型土石流， ξ 值可設定於200-1,000 [m/s²]區間。

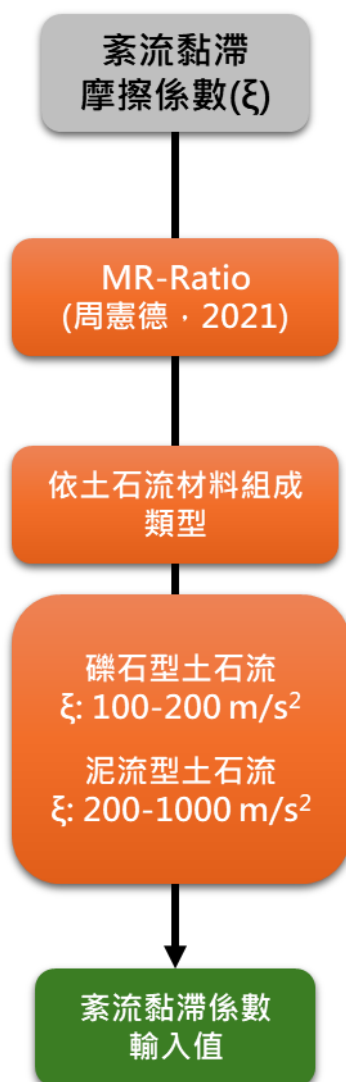


圖3-4-10 RAMMS紊流黏滯摩擦係數評估流程圖

表3-4-5 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/s ²]	流域險峻值	集水區土砂災害類型	流域長度
泥流型土石流	1000	MR<03	洪水	-
	500	0.3=<MR<=0.43	高含砂水流+土石流	L=<14km
礫石型土石流	200	0.43<MR	高含砂水流+土石流	7km-<L=<14km
	100	0.43<MR	土石流	L<7km

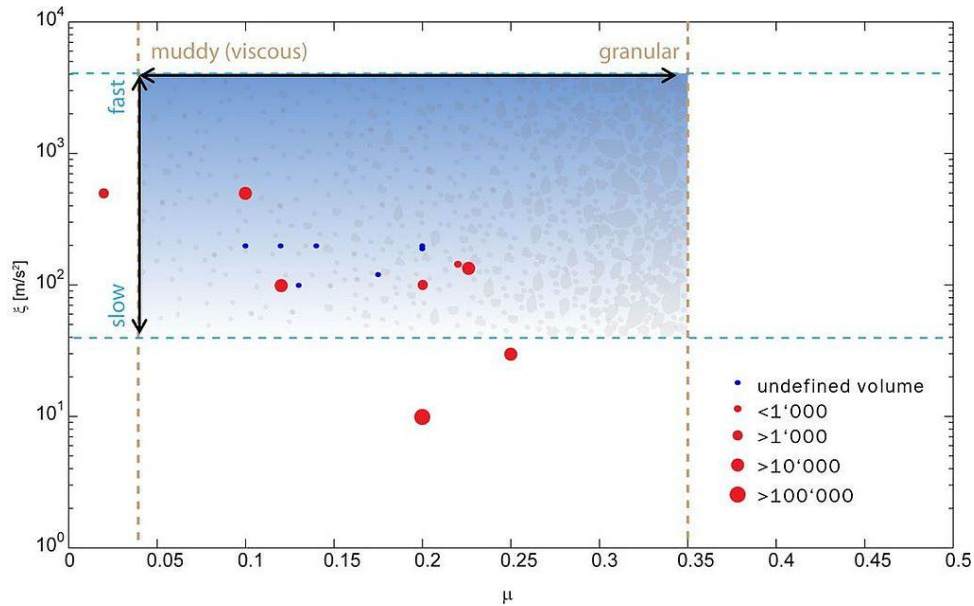


圖3-4-11 RAMMS紊流黏滯摩擦係數(Deubelbeiss, 2012)

三、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(eroded 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 τ_c 。侵蝕演算法預測最大潛在侵蝕深度 e_m ，作為每個網格單元中計算的基礎剪應力函數：

$$e_m=0 \quad \text{for} \quad \tau < \tau_c \quad (3-5)$$

$$e_m=\frac{dz}{d\tau} (\tau-\tau_c) \quad \text{for} \quad \tau \geq \tau_c \quad (3-6)$$

式(3-6)中，潛在侵蝕深度(每kPa) $dz/d\tau$ 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 e_m 時停止：

$$e_t \leq e_m, dz/dt = 0.025 \quad (3-7)$$

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 e_m 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3-4-6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3-4-6 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，導致河道流出出口之土砂量大於實際土砂量。故本署與國立成功大學謝正倫老師進行會議討論，討論結果建議以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 3-4-12)，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 3-4-4 小節。(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)：

- (1) 上游發生區：依據最新一期正射影像及 5m 等高線，於集水區上游河道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 3-4-11)。
- (2) 中游流動區：比照上游方式選取 3 個剖面。
- (3) 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：

- (1). 採用 QGIS 軟體中 Terrain 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 3-4-13 所示。Terrain Profile 工具箱簡單使用說明如下：
 - a. 於Qgis 介面，點選Plugins選單，搜尋Terrain Profile工具箱。
 - b. 進入Terrain Profile介面，選擇加入至Terrain Profile的數值地形資料 (DEM)，再點選Add Layer。
 - c. 點選Selected layer，選擇加入至Terrain 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。
- (2). 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。
- (3). 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」。
- (4). 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。(如圖



3-4-14 所示)

4. 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3-4-12正射影像套疊5m等高線-以大清水溪為例

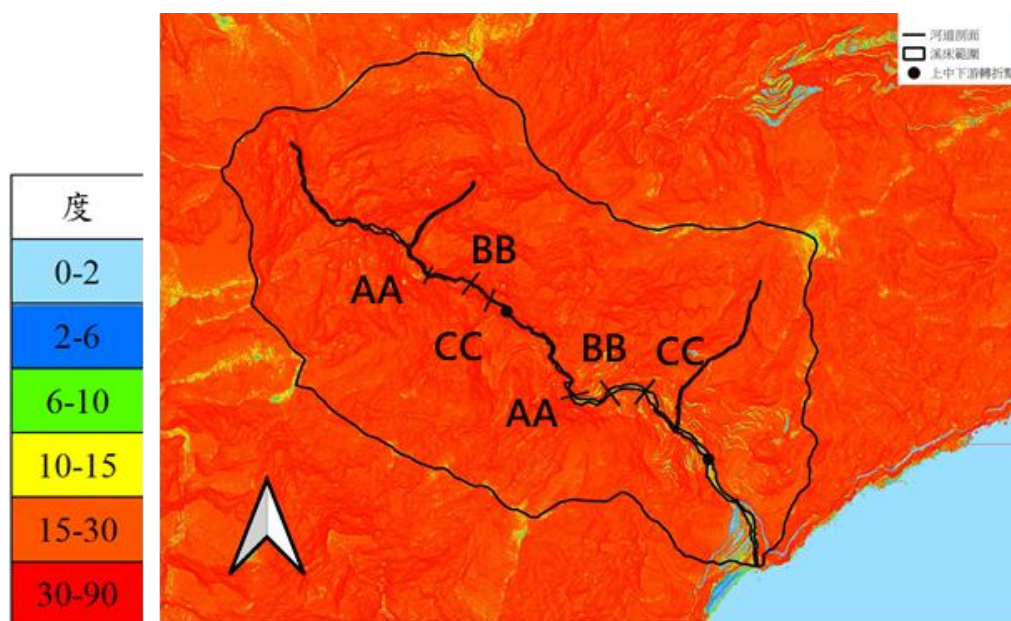


圖3-4-13坡度圖-以大清水溪為例

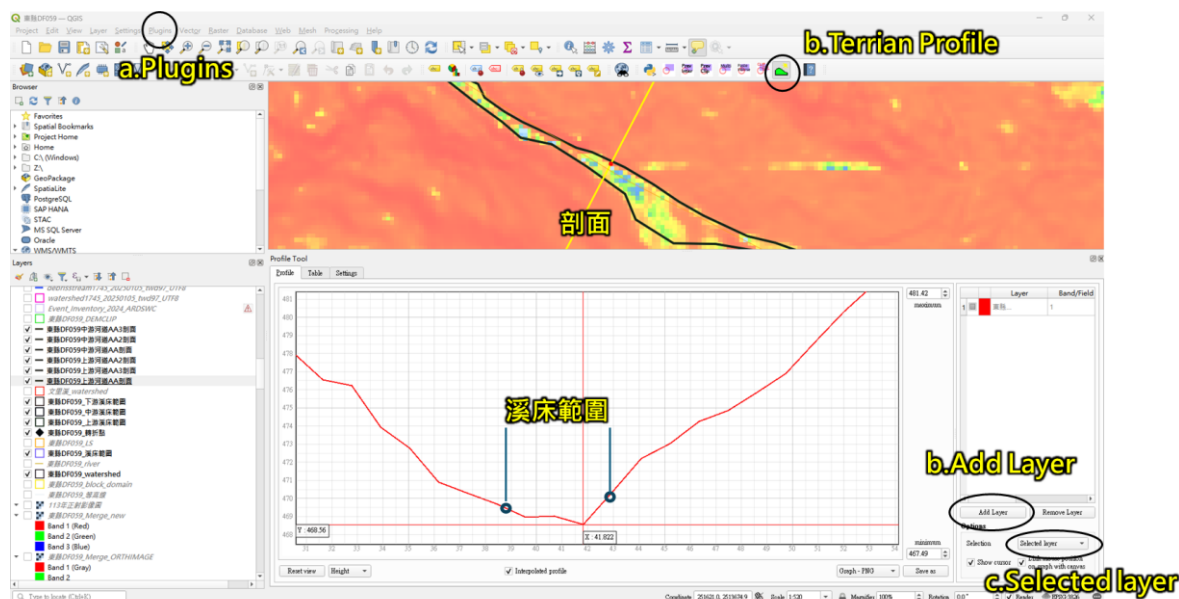
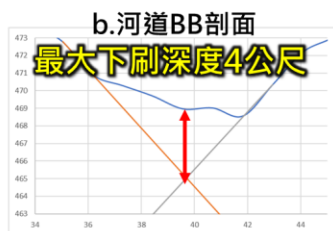
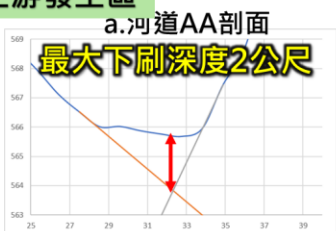


圖3-4-14 QGIS工具箱Terrain Profile

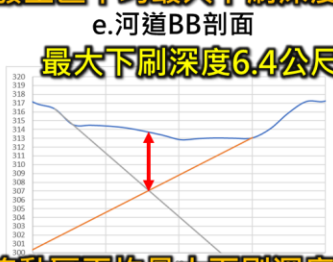
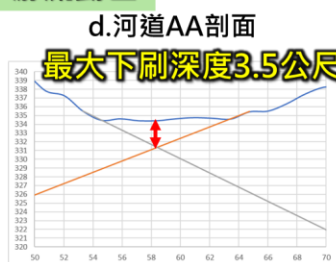
底床參數設定- V型判釋法以木瓜溪(東縣DF059)為例

上、中游河道橫剖面-計算平均最大侵蝕深度

上游發生區



中游流動區



- 上游發生區平均最大下刷深度約3.5公尺
- 中游流動區平均最大下刷深度約3.47公尺

圖3-4-15 V型判釋法-以木瓜溪(東縣DF059)為例

3-4-4 動床邊界條件

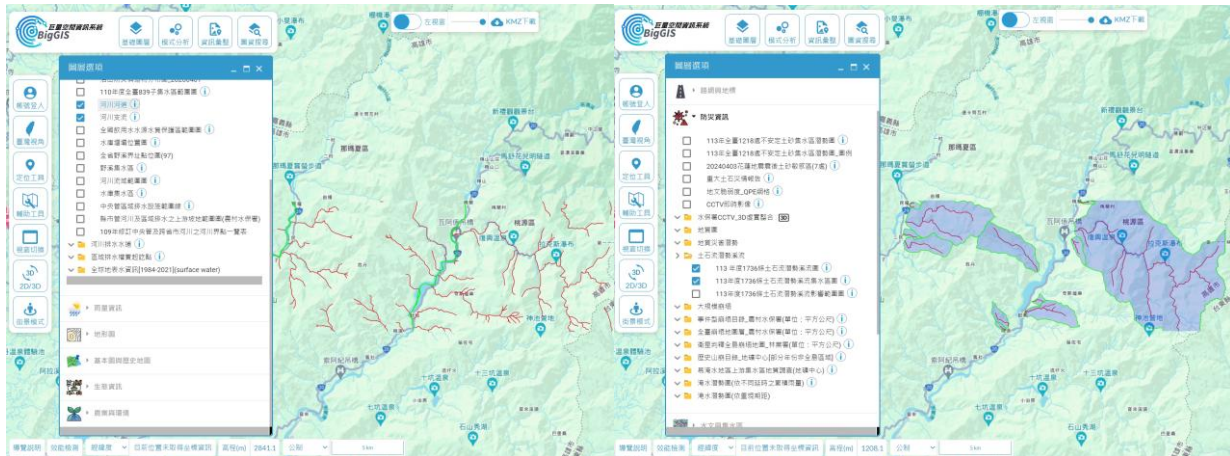
為了反映不安定土砂運移淘刷溪流底床之捲增現象，在數值模式中需先界定動床邊界條件，如集水區溪流線與溪床範圍線，以供代入數值模擬模式中使用。其建議使用圖資來源與劃設原則說明如下：

一、溪流線：

為求溪流線的劃設標準均有統一規則，如圖3-4-15所示，對於不同空間尺度集水



區之一般溪流線可參考農村及水保署(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,則建議參考農村及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1745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3-4-16 溪流線圖層(來源: BigGIS圖台)

二、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以下之無雲衛星或航拍正攝影像為優選考量,套合後以人工方式數化溪流邊界;如圖3-4-16。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。

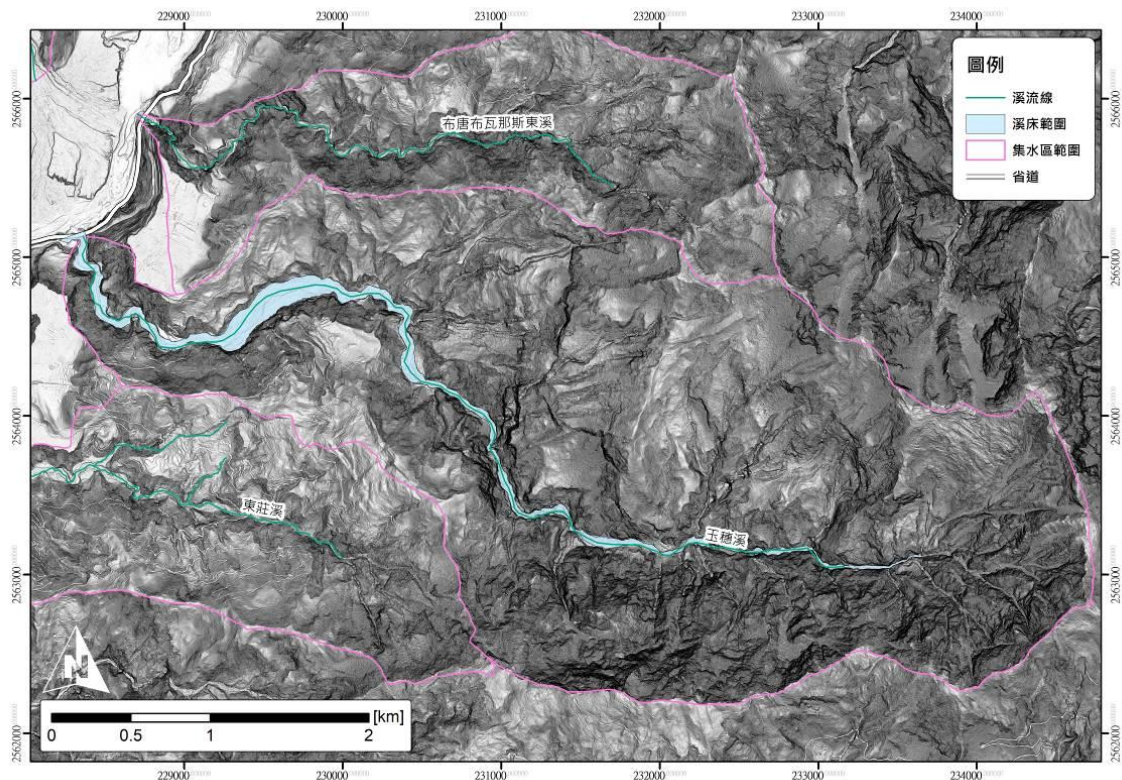


圖3-4-17 高精度DEM產製之集水區圖資(以玉穗溪為例)

3-4-5 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兩類情境(如圖3-4-13、圖3-4-14)，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「情境一：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。惟如集水區內上游區過去曾發生重大崩塌害者，其崩塌後土砂將對溪流造成阻斷或形成天然壩者，則建議參考「情境二：邊坡崩塌造成堰塞湖後潰壩形成土石流」執行模擬工作，以評估天然壩潰決後之瞬時水砂洪峰對下游之衝擊與影響。兩者情境之操作流程茲分述如下。

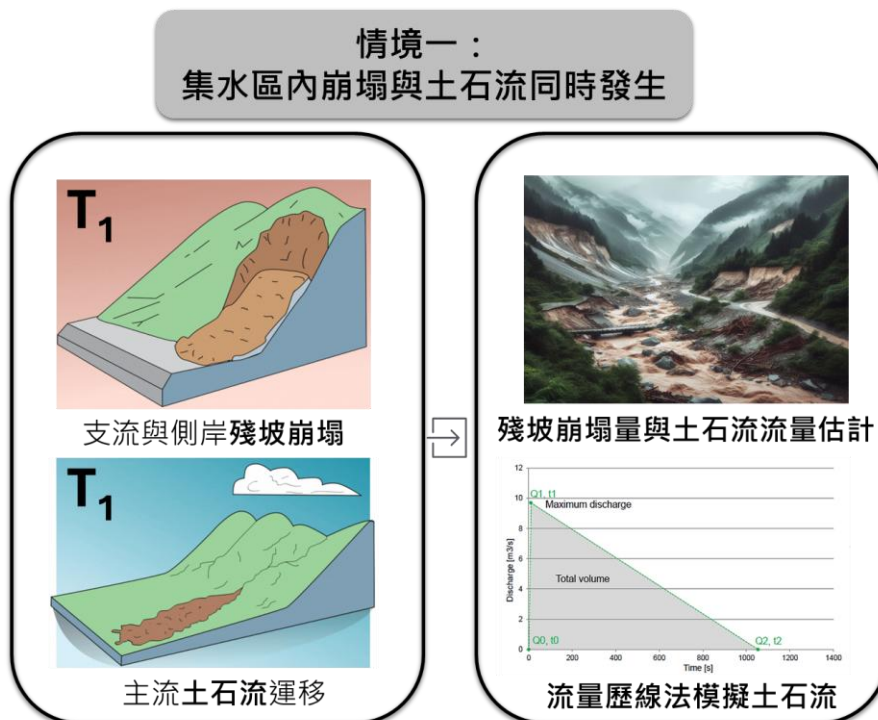
一、降雨造成殘坡與溪流同時誘發不安定土砂運移：

此為長延時(或高強度)降雨較常見之現象，如圖3-4-17；集水區內殘坡(裸露邊坡)開始崩塌、同時伴隨新生崩塌。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，對於溪流土石流流量與殘坡崩塌的土砂量可以3-3-1節與3-3-2小節之作法予以累計加總。而在RAMMS:DF的模擬過程中，若採用流量歷線法(適合溪谷與渠道化地形)，則需將集水區內不安定土砂量總量轉換為流量歷線，並配合Wflow降雨逕流模擬結果，擇定主流內的特定點位進行土砂流量釋放。操作上若上游無顯著大規模崩塌地，建議以集水區溪流之中游段為釋放點(如圖3-4-18；Liu et al., 2013, Nakatani et al., 2016)，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。

另採用塊體釋放法(適合崩塌)，則需將殘坡圖及崩塌目錄視為崩塌空間分布區位(塊體釋放區域)，並經雨量折減計算有效折減崩塌面積，再參考農村水保署大規模崩塌與地礦中心等相關面積轉體積經驗式(詳3-1節)，評估每一塊體體積，透過RAMMS中可解算塊體釋放區域位於數值地形DEM之地表斜面積，後續以塊體體積除以塊體釋放區域之地表斜面積，計算各塊體之塊體深度，藉此數值輸入至RAMMS介面。



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

圖3-4-18 常見之不安定土砂模擬情境示意圖(一)

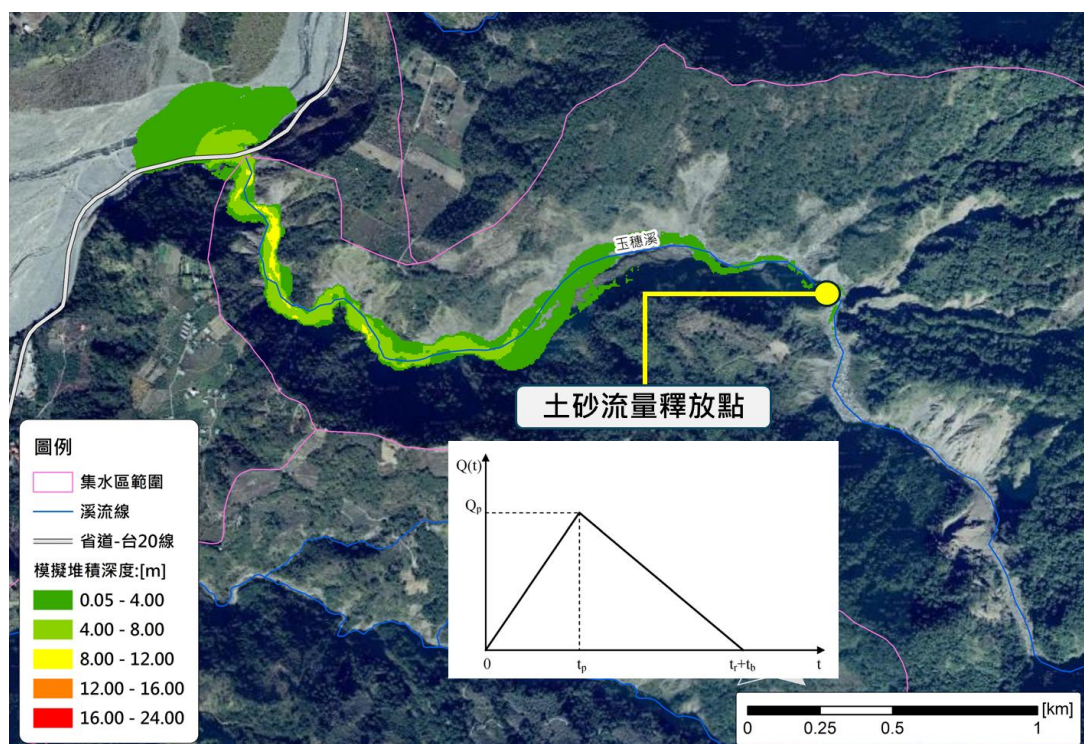


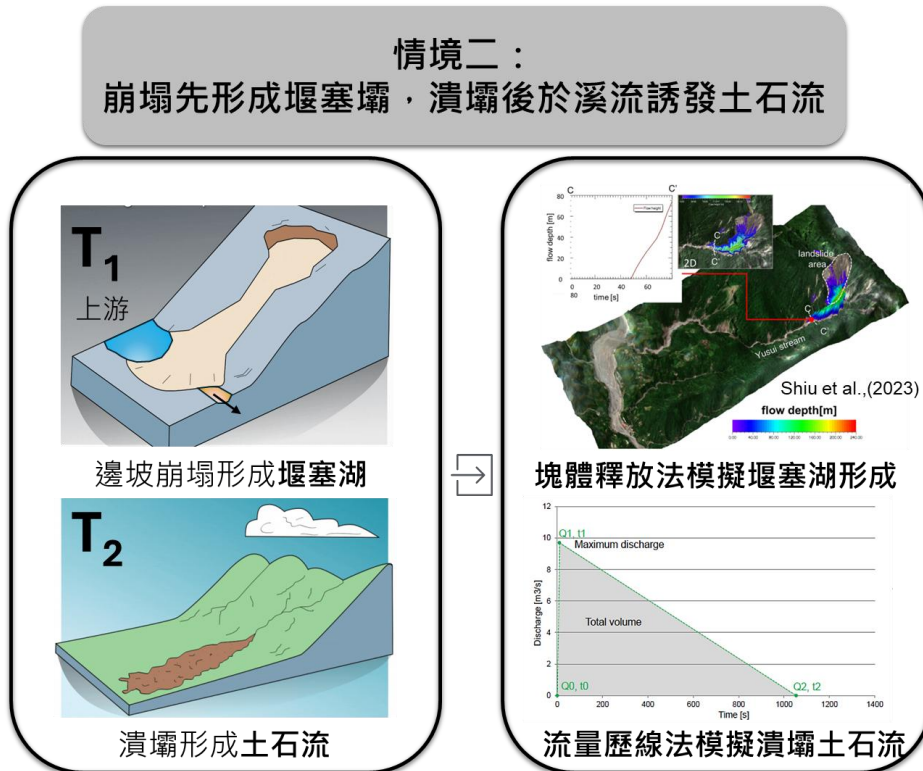
圖3-4-19 集水區溪流中游段釋放點示意圖

二、邊坡崩塌造成堰塞湖後潰壩形成土石流：

此情境多見於集水區內存在中等規模(崩塌面積:1-10 ha)或大規模崩塌地(崩塌面積:>10 ha)，受短延時高強度降雨侵襲下，如圖3-4-19；原殘存於裸露邊坡上之鬆散風化後崩積層大量崩滑(如2020/8/7玉穗溪土石流沖毀明霸克露橋事件)，並堆積於溪流河道內阻斷原有溪流，形成天然壩堰塞湖，而後因降雨持續，堰塞湖因溢流或滲流造成潰壩。大量的水砂混合物於溪流內形成土石流往下游遞移，影響下游交通設施之安全。在RAMMS:DF的模式應用上，可參考Shiu et al., (2023)之研究結果。首先採高精度DEM微地形判釋或既有崩塌目錄套繪崩塌地範圍，取得崩塌面積後，再以前期DoD分析成果、現地探查資料(如地質鑽探)或經驗回歸式，推估滑動深度進而獲取潛在崩塌體積。(1)第一階段先採塊體釋放法(block release)模擬崩塌形成堰塞壩之地形貌，輸出其數值地形，估算其崩後於溪床上的堆積土砂量。(2)第二階段則將前述暫存於溪床上的不安定土砂量體與降雨情境相關的土石流流量加總，轉換成流量歷線，並選擇堰塞壩之下緣處作為土砂釋放點，評估潰壩後土石流對集水區下游



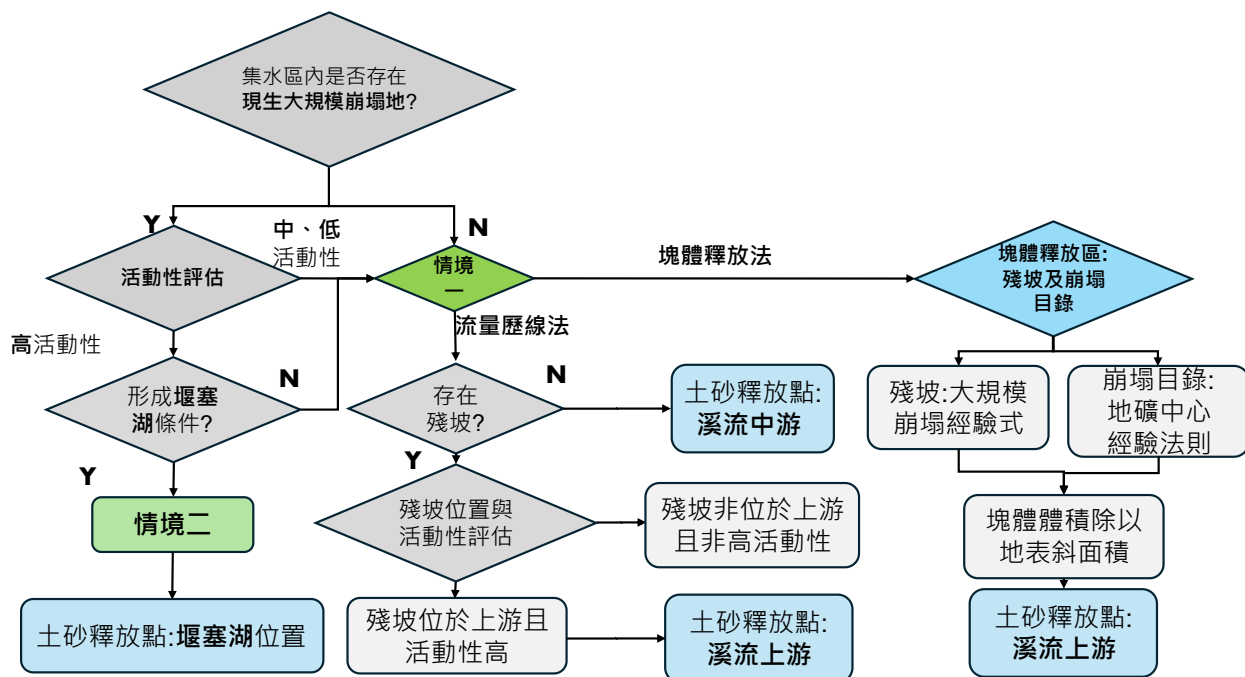
的影響與衝擊。另如探討大規模崩塌所衍生的不安定土砂量體為主導災害規模的要角時，流量歷線釋放點應以崩塌地坡趾為釋放點進行模擬(Liu et al., 2013, Nakatani et al., 2016)，以反映其主控土砂產量之運移過程。



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

圖3-4-20 常見之不安定土砂模擬情境示意圖(二)

如圖3-4-20評估流程圖，為集水區之不安定土砂運移數值模擬情境設定說明，其判斷上共參考大崩分布範圍、殘坡圖分布與兩種遙測評估成果，包含多時序InSAR地表形變與PIV崩塌地位移評估來進行考量。由於目前六處集水區內並無活動性較高之大規模崩塌地，故情境設定上均採用情境一，意即同時考慮邊坡潛在土砂產量與溪流土石流流量之不安定土砂運移情境。其上游土砂釋放點為挑選高活動性殘坡與集水區主流的匯流點(如荖濃溪流域之唯金溪、拉克斯溪與寶來溪寶來溪與玉穗溪)；而中游土砂釋放點則以溪流長度約1/2長位置進行設定(如荖濃溪流域之塔羅留溪、桃源溪)，雖其模擬過程之動床淘刷形成的捲增效應影響不若上游土砂釋放點顯著，但該位置所得之降雨逕流量大於上游釋放點，其較大之土石流流量所帶來的運移動量，仍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。



不安定土砂運移評估情境選定流程圖

圖3-4-21 不安定土砂模擬情境評估流程圖

3-4-6 RAMMS:DF模擬流程

根據設定雨量情境、不安定土砂模擬情境與模式所需參數完成研訂後，即可逐步導入RAMMS:DF模式進行土砂運移模擬。RAMMS的模擬流程如圖3-4-21；綜整其分析單元，可區分為輸入參數模組、數值模擬模組與輸出圖資展示模組等三大區塊功能。以下為使用RAMMS進行不安定土砂運移數值模擬的操作流程：

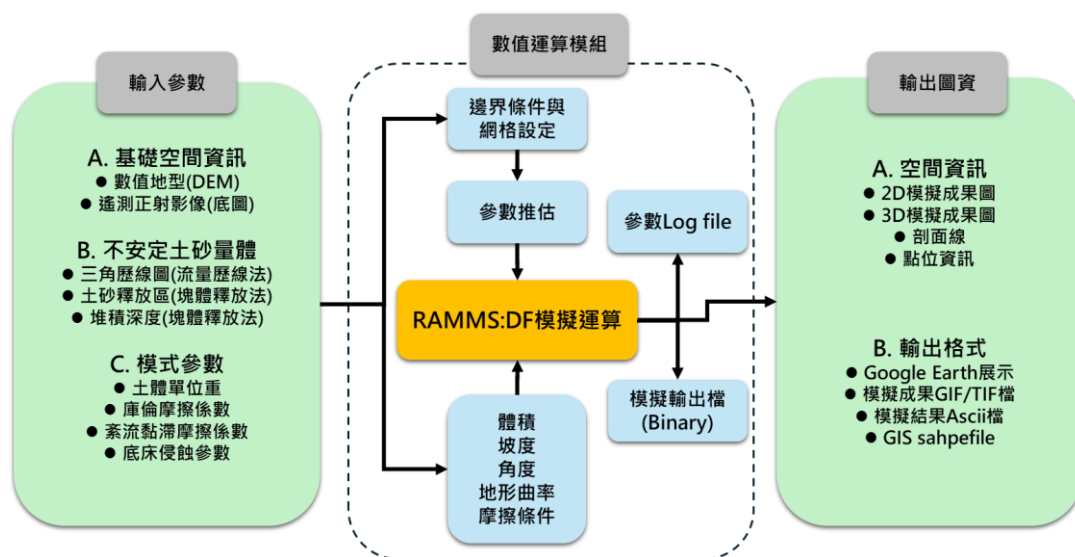


圖3-4-22 RAMMS:DF模擬流程圖



一、資料蒐集和前處理：

1. 收集地形數據(如DEM、遙測影像底圖)。
2. 收集不安定土砂相關的地文和水文資訊，包括土砂材料特性、降雨量、土砂空間分布等。
3. 確定土石流的來源區和影響範圍概估(模擬邊界設定)。

二、軟體安裝和設置：

1. 於Windows作業系統上，安裝RAMMS軟體與所需的套件(IDL虛擬機器)，線上更新至最新版本。
2. 線上申請使用許可執照(license)。
3. 探索並設置RAMMS的工作環境和基本參數。

三、模型建立：

1. 將DEM數據導入RAMMS，選擇數值模擬網格空間解析度。
2. 定義不安定土砂的料源區，這通常包括料源區的位置、面積、初始體積和土砂材料物質特性。
3. 設定模式輸入參數，如土體單位重、庫倫摩擦係數、紊流黏滯摩擦係數、底床參數等，各參數如何設定可參考3-4-3節。

四、邊界條件和初始條件設定：

1. 設定模擬邊界條件，包括土砂料源區邊界與欲模擬集水區之最大邊界。
2. 設定模擬初始條件，包括初始崩塌區塊體深度、體積和空間分佈(塊體釋放法)及輸入三角歷線與定義土砂流量釋放點(流量歷線法)。

五、數值模擬運算：

1. 執行模擬運行，此步驟可能需要大量的計算資源，並根據輸入集水區的面積、地形複雜度和電腦計算資源需要一定運算時間。
2. 模擬過程中，建議定時監控模擬進程，確保沒有錯誤或異常發生。

六、分析結果輸出：

1. 分析模擬結果輸出，包括流動路徑、流動速度、流動深度和影響範圍等。



2.透過比對模擬結果與實際觀測數據（如控制點土砂堆積高度、出流口土砂量體），以驗證集水區模型參數之合理性與可靠度。多位學者專家之敏感性分析亦指出，庫侖摩擦係數為影響流動範圍與運移距離的重要致災性參數。若集水區具災例事件，則以該事件期間之控制點土砂堆積高度與出流口土砂量為擬合依據，以校準該事件之摩擦係數。其後，再利用線性內插法推估不同降雨情境對應的摩擦係數，並據以執行各降雨情境之 RAMMS 模擬分析，相關程序詳述於第 3-4-3 節。

七、報告和應用：

- 1.根據模擬結果，產製危害圖與定義風險等級，支援防災決策。
- 2.在防災規劃和風險評估中應用模擬結果研擬避災與減災措施，提升防災成效。

八、模式與參數調整和優化：

- 1.根據分析結果和實務應用回饋，調整模型參數以優化集水區長期模擬成效。
- 2.依據時序演育與地形變遷，改進模型準確性與提升可靠度。

以上為RAMMS:DF模式基本的操作流程，具體步驟可能因探討對象和實務需求可略作調整。藉由正確地使用RAMMS模式，可有效地模擬和預測集水區不安定土砂運移的行為，為防災減災工作提供科學量化依據。



3-4-7 不安定土砂影響範圍及風險評估

集水區內的不安定土砂災害對下游的風險與衝擊主要以洪水、高含砂水流及土石流型態出現，其於河道內的堆積除了影響溪流的正常流動，且過量土砂進入河道，將對原生的溪流生態造成影響。對基礎設施而言，強震後與降雨的加乘作用，亦可能對集水區內的水利設施(如水壩和堤防等設施)與下游的橋梁道路，受土砂堆積和洪水衝擊而受損。部分災例的不安定土甚至在溢淹出河道後，間接淹沒農田影響農作物生長與收成。關於不安定土砂災害的風險評估判斷標準，可從以下幾個方面來進行評估：

一、地形與地質條件：

- 1.坡度：坡度超過55%的陡坡區域，較易發生崩塌。山區野溪因具有較大的溪床坡降，受重力影響下的土砂運移能力相對較高。
- 2.地質災害好發區：如岩屑崩滑、岩體滑動、落石及順向坡等地貌特徵。

二、降雨量條件：

- 1.高累積降雨量：長延時的降雨型態，增加集水區內匯聚的地表逕流，提高溪流的輸砂能力。
- 2.短期強降雨：短時間內的強降雨，有助於地表沖刷，增加土砂災害的風險。

三、植被覆蓋：

集水區內植被覆蓋稀少或過度開發的區域，更容易發生土砂災害。

四、歷史災害記錄：

歷史上曾頻繁發生過土砂災害的集水區邊坡或老崩塌地，因其邊坡體質較差，遭遇外部營力時較易復發而再次崩塌破壞，需特別關注。

五、人為活動：

不當的土地利用、過度開發與人為活動皆會增加誘發土砂災害的風險。

RAMMS模式已被廣泛應用於全球多個地區的土石流風險評估。例如在瑞士阿爾卑斯山區、日本的多雨地區及台灣的山區土石流潛勢溪流，均有成功應用的案



例，顯示了其於不同地形和氣候條件下的適用性。如圖3-4-22所示，RAMMS模式於不安定土砂運移模擬完成後，可輸出(1).土砂堆積影響範圍圖、(2)土砂堆積深度圖、(3)土砂運移過程最大深度圖、(4)土砂運移流速圖(圖3-4-23)、(5)土砂運移過程最大流速度圖、(6)土砂運移底床侵蝕深度圖(圖3-4-24)等GIS圖資。若進一步運用RAMMS的視覺化展示模組功能，可將模擬範圍內任何位置(如溪流渠道或河口堆積扇)之剖面線進行時序分析結果輸出(圖3-4-21)，瞭解土砂運移過程的堆積動態變化。另配合3-2節不安定土砂集水區於不同雨量情境之土砂流出模擬成果，可得到不同降雨頻率年-累積降雨條件下的集水區整體土砂影響範圍(如圖3-4-22)，即農村及水保署每年產製之集水區「不安定土砂危害圖」。出圖格式建議影像解析度以300 ppi(像素/英吋)以上，圖幅長寬像素為4500 x 3000像素以上，以利大集水區出圖時仍能保有良好解析度，其地圖配置元素建議如圖3-4-23所示，採橫幅配置。圖面應以北面朝上，圖框內應儘可能包含整個集水區下游段，基本圖例需包含圖框坐標、圖例、指北針、比例尺等。圖例部分建議納入集水區範圍、溪流線、重要交通道路(如省道或鐵道)、與RAMMS模擬後之堆積深度[單位: m]與範圍等基本要素，若有其他重要圖例則可依需求增列。另於RAMMS模擬後之重要地理位置，如溪流與道路(或橋梁)交界處與最下游堆積扇影響範圍處，可依需求輸出土砂運移模擬過程中之堆積深度歷程剖面圖。其有助於設施權責管養單位預先評估下游段公路橋梁下淨空是否足夠(時序土砂堆積深度變化；如圖3-4-24)，或溪流匯流口形成之沖積扇地形是否阻斷主流(情境模擬後之堆積地形貌)，進而影響下游聚落安全(量測溪流溢流點外之最遠土砂堆積距離)，並根據RAMMS動床模擬所得之最終捲增土砂增加量體，提供公路維運單位土砂溢淹對於橫跨公路上的影響里程樁號範圍與深度，掌握集水區內的潛在產砂量與致災可能性。

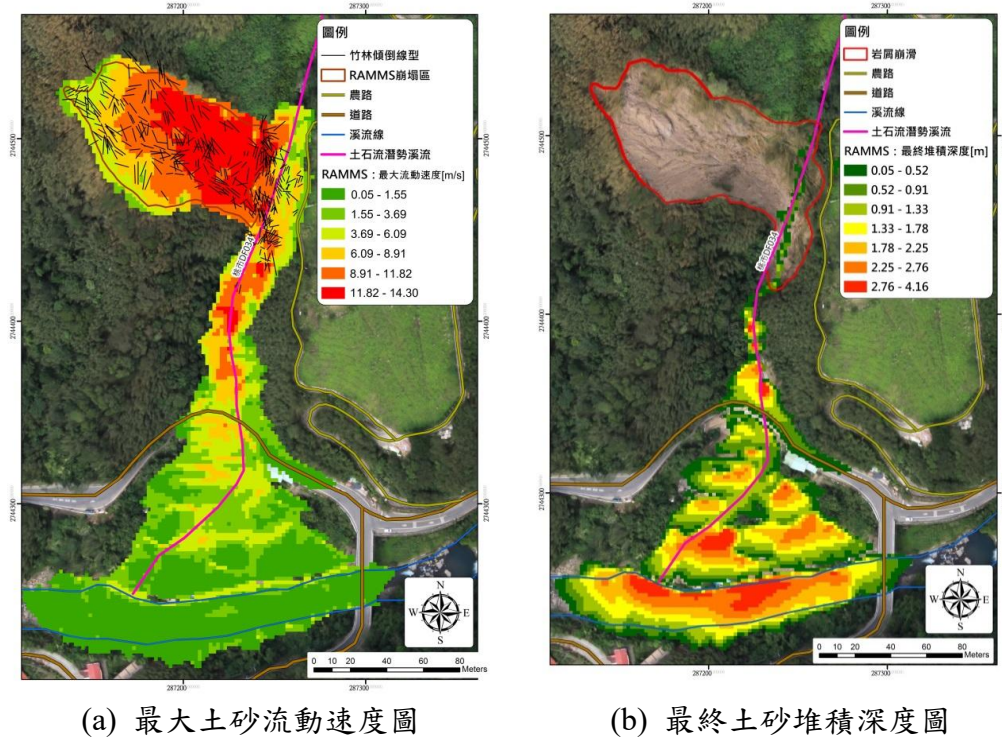


圖3-4-23 RAMMS模擬成果圖：最大流動速度與堆積深度圖(李等，2017)

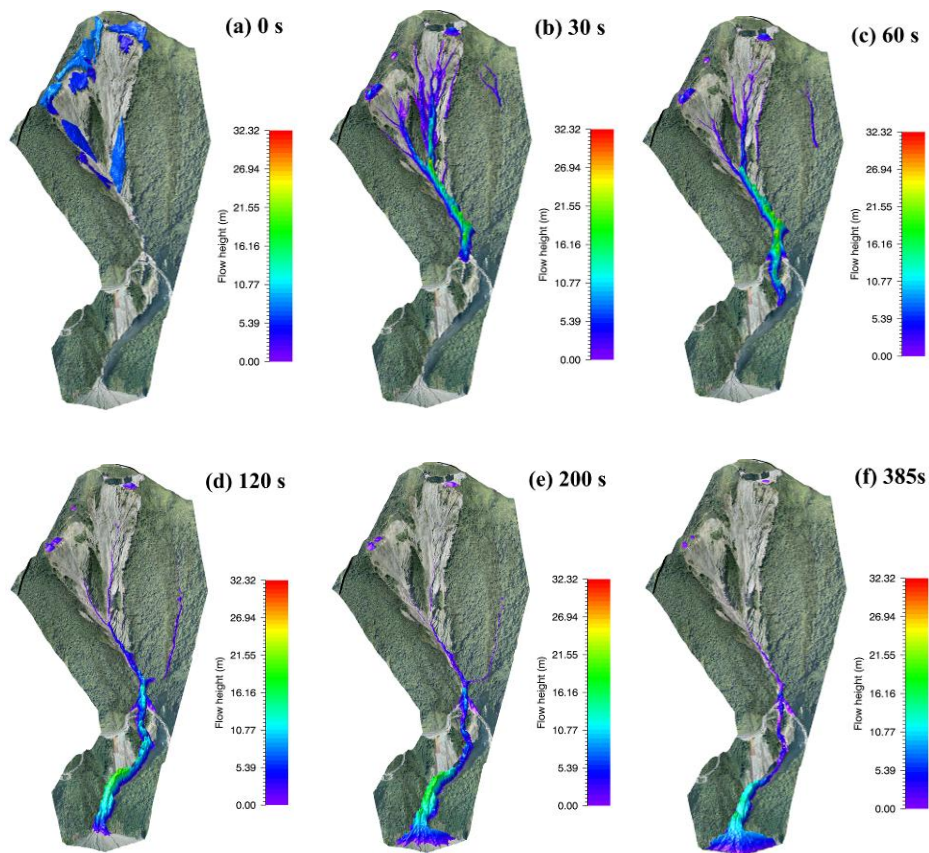


圖3-4-24 RAMMS模擬成果圖：土砂運移階段流動深度圖(李等，2015)

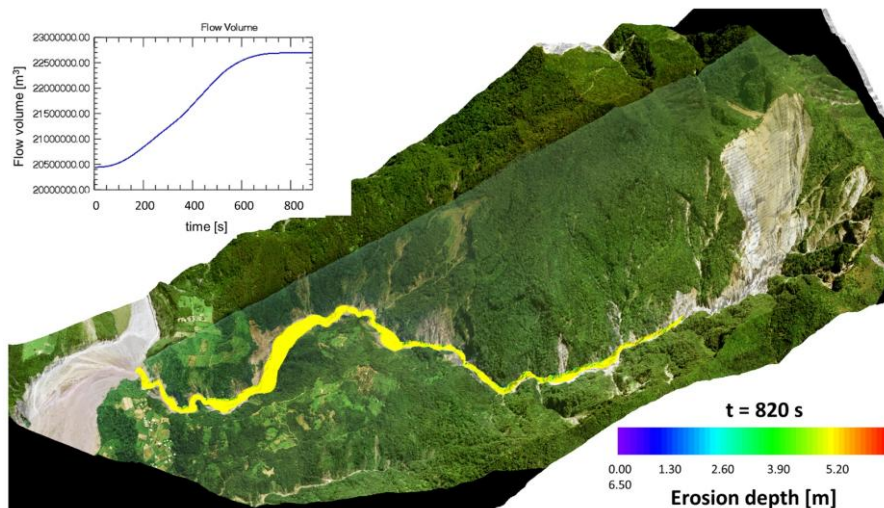


圖3-4-25 RAMMS模擬成果圖：土砂運移階段流動深度圖(Shiu, 2023)

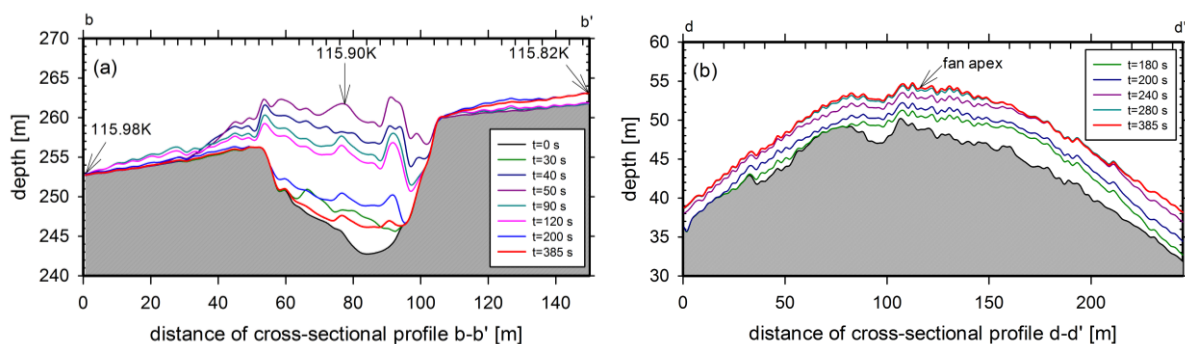


圖3-4-26 RAMMS模擬堆積深度時序圖：(a)渠道；(b)沖積扇(李等，2015)

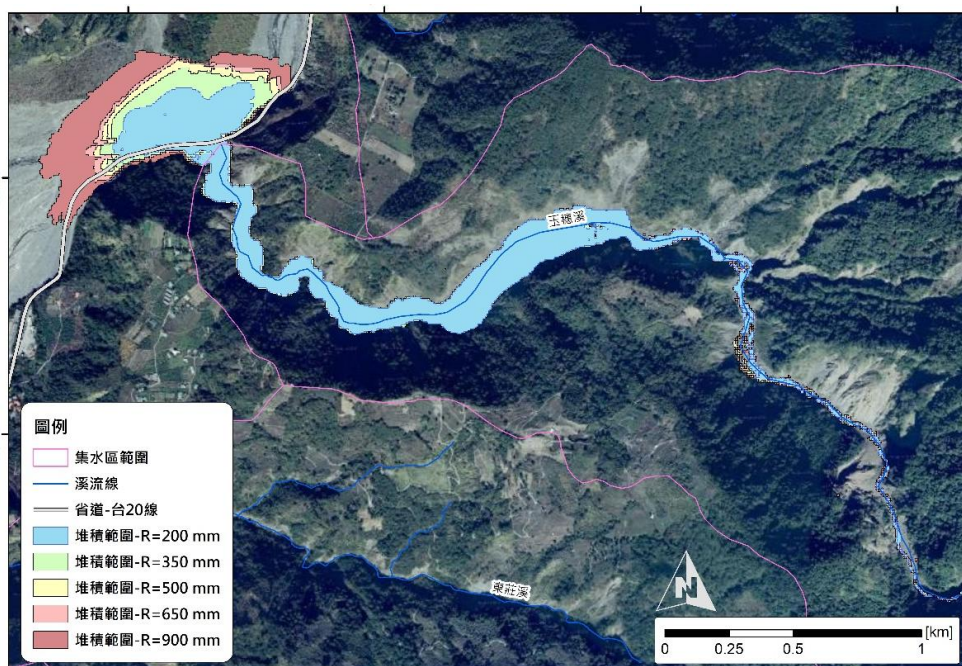


圖3-4-27 玉穗溪-不同降雨情境土砂堆積深度比較圖(中興社，2023)

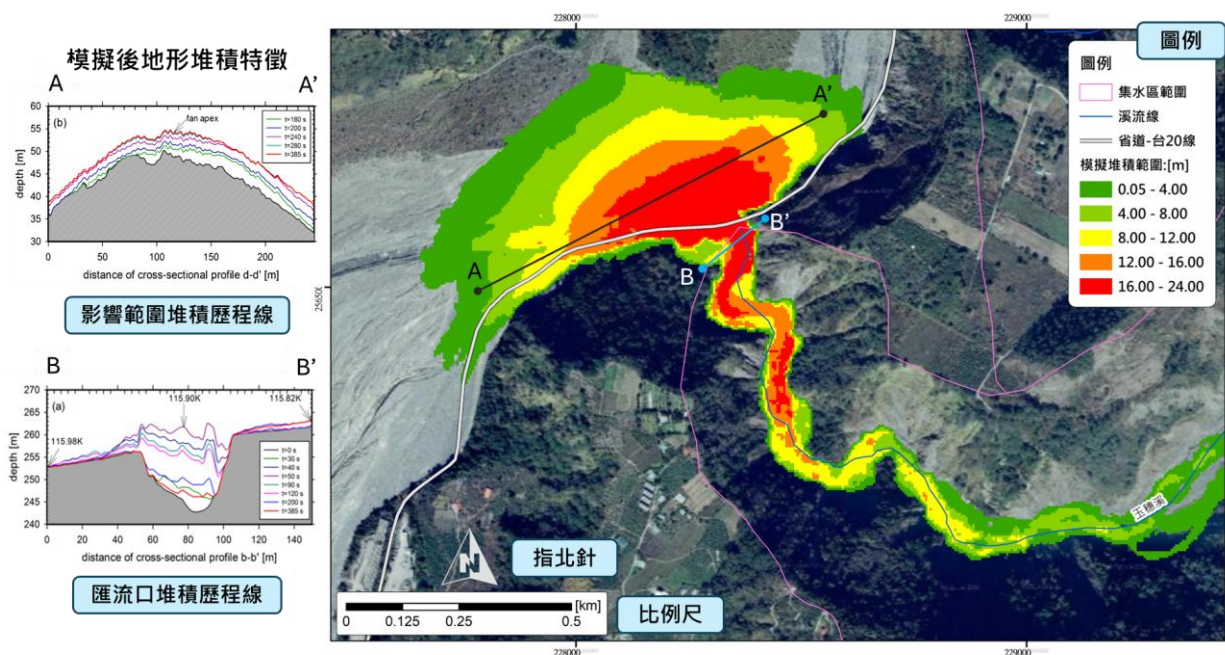
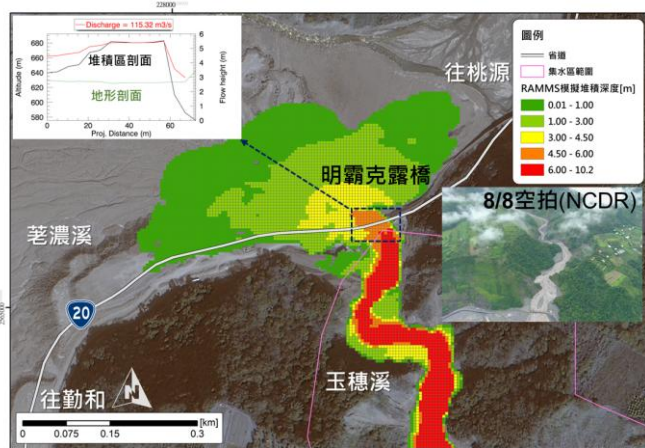
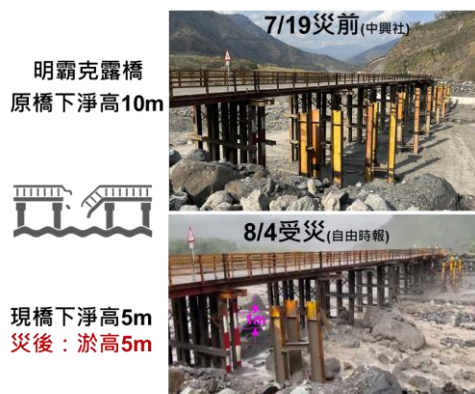


圖3-4-28 不安定土砂危害圖-出圖格式建議

0803土砂災害事件



玉穗溪土砂運移模擬-土砂深度變化圖

圖3-4-29 玉穗溪累積降雨200mm情境土砂堆積深度驗證(中興社，2023)

RAMMS作為一種土砂災害的泛用型數值模擬工具，雖多用於評估探討災害現象和預測潛在土砂危害度。其應用在不安定土砂運移風險評估中仍有多方優勢，以下是其延伸應用和特點：

一、災害風險評估管理：

災害風險管理首重危險區域劃分，導入適切的數值地形於RAMMS模式，可模擬不安定土砂的運移路徑，預測其影響範圍，從而協助劃分危險區域(如圖3-4-29)。對於制定防災計劃和緊急疏散方案至關重要。而在土砂影響範圍評估觀點上，該模式



能夠預測土砂災害事件發生階段的流動速度、深度和動能，進而評估其對建築物、基礎設施和人員的潛在影響。

對於不安定土砂危害圖所包含的土砂影響範圍與堆積深度資訊，其所對應之危害程度分級，可初步參考以下方式(Jakob et al.,(2005), Crosta et al.,(2006))。

(一)、土砂影響範圍：根據土砂災害可能波及保全對象的空間範圍來劃分。

1.直接影響區(high impact zone)：指災害發生後，關注之保全對象首當其衝的區域，通常位於山崩發生點的溪流下游處或坡腳(趾)，可能會遭受最嚴重的破壞，受影響程度最高。

2.間接影響區(moderate impact zone)：泛指位於直接影響區的外圍區域，可能受到次生災害(如土石流或土砂流)的影響，破壞程度屬中等。

3.潛在影響區(low impact zone)：指可能受到間接或潛在影響區域，如洪水或道路阻塞等，相對風險較低，影響程度較低。

(二)、土砂堆積深度：指災害對區域或結構造成的損壞程度。

1.淺層影響(shallow impact)：土砂堆積深度較淺，通常小於1m，對建築物和基礎設施的破壞較小。

2.中等深度影響(moderate depth impact)：土砂堆積深度在1-3 m之間，對基礎設施可能造成中等程度的破壞。

3.深層影響(deep impact)：土砂堆積深度超過3m，對區域內的結構和基礎設施可能造成較嚴重破壞。

二、整治工程設計規劃：

透過模擬不同條件下的土砂運動行為，不安定土砂數值模擬可輔助設計和優化各類防護工程措施設計，如防砂壩、護床工等，有效減少土石流災害的致災風險。而在方案優選上，RAMMS亦能夠導入設計工程方案的數值地形，協助研擬最佳化解決方案。

三、災後重建評估與事件回溯分析：

著眼於災後評估面向，如圖3-4-30，在土砂災發生後，RAMMS模式可用於回溯



模擬災害發展過程，協助識別關鍵受災區域空間分布，為災後重建提供科學依據。而在未來風險預測上，基於災後現地調查資料，不安定土砂數值模擬能夠評估未來類似事件的風險，協助擬定後續防災軟硬體措施與作為。

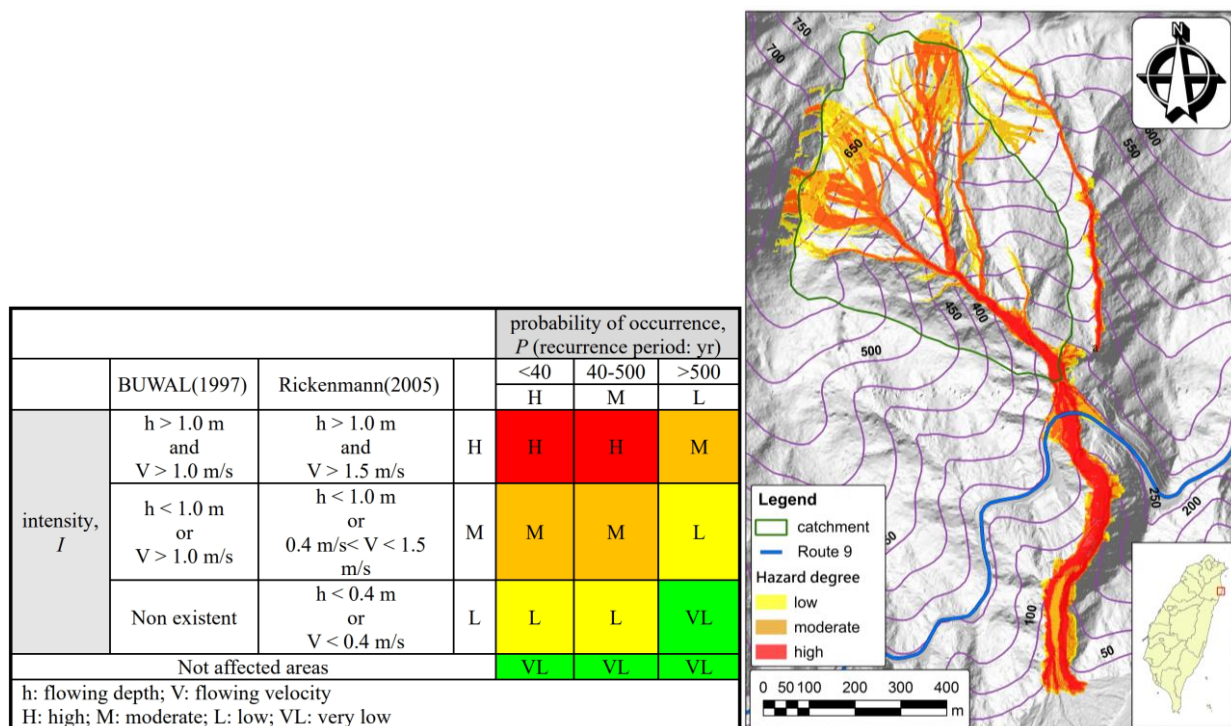


圖3-4-30 崩塌引致土石流危害矩陣評估及其危害度圖(李等，2015)

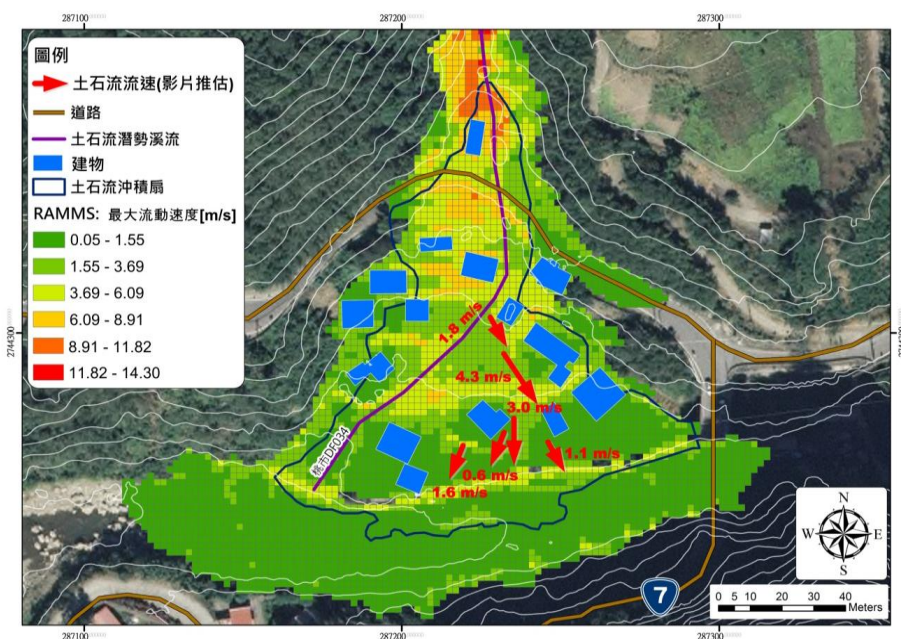


圖3-4-31 桃園市合流部落數值模擬流速與實測速度對照圖(李等，2017)



3-4-8 集水區不安定土砂調適策略

不安定土砂調適策略旨在設定短、中、長期持續可行的政策實施作為，確保集水區內土砂災害與自然共生的平衡。其調適目標與施行策略計畫如下列六點，並參酌國際自然保育聯盟(IUCN)所推行之自然解方概念(圖3-4-31)，結合本署應對氣候變遷之七大社會挑戰與四大主軸(圖3-4-32)：農地水土保持、水砂災害減輕(包含不安定土砂)、水土資源保育與棲地功能復育等，以工程及非工程手段混合措施進行集水區調適策略之推動。其詳細之調適策略之可參見表3-4-6所示(逢甲大學，2022)。

一、精進評估與監測技術：

- 1.多尺度監測：運用多種監測技術(如遙測、地表監測、地中監測)進行全面且精準的監測。
- 2.即時傳輸與預警：應用物聯網技術實現即時數據傳輸和預警系統，延長災害預警的時間，提升應變效能。

二、建立整備應變與自主防災體系：

- 1.自主防災社區：推動社區自主防災，增強居民的防災意識和應變能力。
- 2.防災教育訓練：定期開展防災教育和實地演練，強化居民和相關部門的應急與應變能力。

三、減輕災害誘發與影響：

- 1.水土保持措施：在高風險潛勢區內實施有效的水土保持措施，以減少土砂流失和崩塌風險。
- 2.基礎設施保護：加強對重要基礎設施的保護，降低災害對交通、農產、觀光、與民生供水等設施的影響。

四、提升防減災成效：

- 1.技術提升：不斷改進防減災技術，利用新技術和數據進行定期科技巡檢、災害風險評估和管理。
- 2.成效評估：定期評估和檢討減災措施的成效，確保策略的有效性和持續改進。

五、資訊公開及推廣交流：



1.防災資料共享：建立資料共享平台，公開監測數據和研究成果，促進各界之間的交流與合作。

2.國際合作與經驗汲取：積極與國際機構合作，學習先進的防災技術和經驗。

六、完成不安定土砂風險評估：

1.風險指標：制定與更新不安定土砂風險指標，進行全面性的風險評估。

2.預報平台：開發雲端預報平台，提供即時的風險預警和管理資訊。

自然解方導入集水區調適策略



圖3-4-32 自然解方導入集水區調適策略

各型態調適策略導入可行性評估



圖3-4-33 集水區調適策略導入可行性評估



表3-4-6 集水區不安定土砂調適策略一覽表

課題評析	改善與調適目標			改善調適策略
	短期(1-5年)	中期(5-10年)	長期(10-15年)	
強化集水區不安定土砂災害潛勢評估	(1)整體治山防災 (2)掌握土砂產量 (3)評估模式建置 (4)災害風險管控 (5)強化防災韌性 (6)提升科技防災	(1)土砂運移調適 (2)多元資訊整合 (3)智慧防災決策 (4)評估模式精進 (5)潛勢區監測 (6)風險地圖更新	(1)劃設國土復育促進區 (2)集水區保育 (3)土地利用與管制法規研擬 (4)多元高精度監測資料整合運用 (5)防災資訊系統整合	(1)強化集水區災害耐受能力，持續推動「氣候變遷下大規模崩塌及不安定土砂防減災計畫」 (2)強化集水區上游崩落地調查計畫執行工作 (3)建置廣域邊坡土砂災害預警模式平台 (4)子集水區重點崩落地治理與土砂穩定工作
兼顧集水區溪流河道穩定、生態保護與軟硬工程整治維護	(1)集水區保育 (2)崩落地處理 (3)野溪治理 (4)構造物巡檢 (5)導入自然解方 (6)水砂觀測建置 (7)土砂侵蝕與堆積調查與規劃	(1)河道自然排砂 (2)河道穩定工程 (3)土砂管理 (4)工程生命週期檢核 (5)工程設施科技化管理	(1)非自然力之土砂運移管制 (2)溪流棲地維持 (3)生態檢核與廊道保育 (4)親水環境友善 (5)即時智慧化防災系統維運	(1)辦理溪流輸砂減災工程，並導入NbS概念 (2)河道異常土砂之適地暫置規劃 (3)定期評估河道清疏治理成效 (4)智慧防災觀測系統建置 (5)部會橫向溝通



課題評析	改善與調適目標			改善調適策略
	短期(1-5年)	中期(5-10年)	長期(10-15年)	
				會議協處土砂災害
減緩集水區下游土砂運移之衝擊與風險	(1)保全對象清查 (2)土砂疏濬 (3)自主防災推動 (4)智慧監測系統 (5)跨部會合作與橫向應變整合	(1)聚落保全計畫 (2)跨單位合作與資訊傳遞 (3)強化基礎設施受災韌性 (4)低窪區避難疏散檢討 (5)防災志工培訓	(1)聚落安全地圖更新 (2)導入長期避災思惟之工程設計 (3)強化群眾災識與通報 (4)防災觀測資訊系統更新維運	(1)智慧化不安定土砂預警模式資訊平台建構 (2)非工程手段提升災害應變能力 (3)山區水土保持教育訓練之持續 (4)出口段流量輸砂量監測

以上調適目標與旨在透過精進技術、強化社區防災能力、實施有效的預防措施、提升防減災效果以及促進產官學研交流合作，綜合提升不安定土砂災害的應對能力，保障人民生命財產安全。



參考文獻

- (1) Aaron, J., McDougall S. (2019). Rock avalanche mobility: The role of path material. *Engineering Geology*, 257, 105126.
- (2) Chen, Y.C., Chang, K.T., Chiu, Y.J., Lau, S.M., Lee, H.Y. (2013). Quantifying rainfall controls on catchment-scale landslide erosion in Taiwan. 38(4), 372-382.
- (3) Christen, M., Kowalski, J., and Bartelt, P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 63:1-14.
- (4) Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., McArdell, B.W., Gerber, W., Deubelbeiss, Y., Feistl, T., Volkwein, A. (2012). Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool 'RAMMS' for gravitational natural hazards. 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 – Grenoble / France Conference Proceedings. 77-86.
- (5) Crosta, G. B., Chen, H., & Frattini, P. (2006). Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasures at large debris-flow dams. *Geomorphology*, 78(1-2), 90-113.
- (6) Frank, F., McArdell, B.W., Huggel, C., and Vieli, A. (2015). The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: examples from the Swiss Alps, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 2569-2583.
- (7) Frank, F., McArdell, B.W., Oggier, N., Baer, P., Christen, M., and Vieli, A. (2017). Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 801-815.
- (8) Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., and Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology*, 102:152-163.
- (9) Hussin, H.Y., Quan Luna, B., van Westen, C.J., Christen, M., Malet, J.P., and van Asch, Th.W.J. (2012). Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with



- entrainment: a case study of the Faucon catchment, Southern French Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12:3075-3090.
- (10) Jakob, M., & Hungr, O. (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer Praxis Books.
- (11) Keefer, D.K. (1994). The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions, *Geomorphology*, Vol.10, No.1-4, 265-284.
- (12) Kokalj, Ž., Somrak, M. (2019). Why not a single image? Combining visualizations to facilitate fieldwork and on-screen mapping. *Remote Sensing*, 11 (7): 747.
- (13) 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.
- (14) Liu, J., Nakatani, K., Mizuyama, T. (2013). Effect assessment of debris flow mitigation works based on numerical simulation by using Kanako 2D. *Landslides*, 10, 161-173.
- (15) Lucas, A., Mangeney, A., Ampuero, J. (2014). Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies. *Nat Commun* 5, 3417.
- (16) Mikos, M., Bezak, N. (2021). Debris flow modelling using RAMMS model in the alpine environment with focus on the model parameters and main characteristics. *Front. Earth Sci.* 8:605061.
- (17) Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge, *Proc. Int. Symp. Interpraevent*, Bern, Switzerland, Bd. 4, 99-108.
- (18) Nakatani, K., Kosugi, M., Satofuka, Y., Mizuyama, 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.
- (19) RAMMS::Debrisflow User Manual, (2022). A numerical model for debris flows in research and practice. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF.



- (20) Rickenmann, D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows, *Natural Hazards* 19: 47-77.
- (21) Salm, B. (1993). Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. *Ann. Glaciol.*, 18: 221-226.
- (22) Schilling, S.P., Iverson, R.M. (1997), Automated, reproducible delineation of zones at risk from inundation by large volcanic debris flows, *Proc. First Int. Conf. on Debris Flow Hazards Mitigation*, San Francisco, U.S.A., ASCE, 176-186.
- (23) Schraml, K., Thomschitz, B., McArdeell, B.W., Graf, C., Kaitna, R. (2015). Modeling debris-flow runout patterns on two alpine fans with different dynamic simulation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(7): 1483-1492.
- (24) 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.
- (25) Takahashi, T. (1978). Mechanical characteristics of debris flow, *J. of Hydr.*, ASCE, 104(HY8), pp.1153-1169.
- (26) Takahashi, T. (1991). *Debris Flow*, IAHR, Monograph, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- (27) Tseng, C.M., Lin, C.W., Stark, Colin P., Liu, J.K., Fei, L.Y., Hsieh, Y.C. (2013). Application of a multi-temporal, LiDAR-derived, digital terrain model in a landslide-volume estimation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(13), 1587-1601.
- (28) Voellmy, A. (1955). On the destructive force of avalanches. *SLF*, Davos, Switzerland.
- (29) Zakšek, K., Krištof, O., Žiga, K. (2011). Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing*, 3(2): 398-415.
- (30) Zhang, Z.L., Zeng, R.Q., Meng, X.M., Zhao, S.F., Meng, X.P., Yao, Y.Q., Wang, H., Guo, W.W., Chen, G., Zhang, Y. (2021). Estimating landslide sliding distance based on an improved Heim sled model, *CATENA*, Volume 204, 105401.



- (31) Zimmermann, F.; McArdeell, B.W.; Rickli, C.; Scheidl, C. (2020). 2D Runout Modelling of Hillslope Debris Flows, Based on Well-Documented Events in Switzerland. *Geosciences*, 10, 70.
- (32) 日本國土交通省，2007，砂防基本計畫策定指針，国土技術政策総合研究所資料。
- (32) 上野將司，2001，地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討，*Landslides-Journal of the Japan Landslide Society*. 38(2), 105-114.
- (33) 打萩珠男，1971，ひと雨による山腹崩壊について，新砂防。
- (34) 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。
- (35) 水土保持局，2017，水土保持手冊，行政院農委會水土保持局。
- (36) 李安歡，2022，利用圖像式深度學習開發滑坡大規模崩塌災害特徵辨識系統之研究，農業委員會水土保持局，研究成果報告。
- (37) 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉潁、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。
- (38) 李璟芳、周憲德、曹鼎志、許志豪、黃邕軒、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。
- (39) 吳俊毅、謝欣穎，2021，RAMMS 軟體參數對土石流災害風險分析之影響，*水土保持學報*，第51(2)期，2771-2788。
- (40) 周憲德，2020，堆積扇地貌特性與土砂災害類型之探討，行政院農業委員會水土保持局，研究成果報告(109保發-11.1-保-01-06-001(31))。
- (41) 財團法人中興工程顧問社，2022，降雨誘發山崩動態警戒模式與調查技術研發應用(3/4)，中央地質調查所，委託研究成果報告。
- (42) 財團法人中興工程顧問社，2023，112年土石流潛勢溪流調查評估與資料更新，農村發展及水土保持署。
- (43) 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。
- (44) 經濟部中央地質調查所，2008，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建



置第2期-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(1/3)。

- (45) 經濟部中央地質調查所，2009，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置第2期-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2/3)。
- (46) 經濟部中央地質調查所，2010，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置第2期-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(3/3)。
- (47) 陳天健，2022，集水區坡面表土及崩積土層之厚度與地形關係-基於工程地質探勘資料成果，行政院農業委員會水土保持局。
- (48) 陳振宇、陳均維、陳國威、林詠喬，2019，坡地降雨致災熱區警戒模式，中華水土保持學報, 50(1):1-10。
- (49) 陳樹群、吳俊銘、王雁平，2010，地震或降雨誘發崩塌之崩塌特性探討，中華水土保持學報，41(2)，147-158。
- (50) 陳毅青，2012，降雨誘發崩塌侵蝕之規模頻率即其控制因子，台灣大學土木工程學系，博士論文。
- (51) 逢甲大學，2022，高屏溪流域整體改善與調適規劃(2/2)，經濟部水利署第七河川局。
- (52) 黃添進、盧吉勇、蘇郁惠、呂育勳，2012，臺北市土石流潛勢溪流調查及災害模擬之探討，中華水土保持學會年會及學術研討會論文集。
- (53) 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。
- (54) 農業部農村發展及水土保持署，2023，土石流潛勢溪流劃設作業流程與方法，農業部農村發展及水土保持署。
- (55) 農業部農村發展及水土保持署，2023，大規模崩塌潛勢區影響範圍劃設作業流程與方法，農業部農村發展及水土保持署。
- (56) 羅佳明、林銘郎、董家鈞、張光宗、簡士堯、黃安斌，2009，應用地形分析、遙測影像判釋與PIV技術於紅葉坪地滑特徵及其分區之研究，中國土木水利工程學刊，第21-2期，113-128。
- (57) 劉哲欣、吳亭燁、陳聯光、林聖琪、林又青、陳樹群、周憲德，2011，臺灣地區重大岩體滑動案例之土方量分析，中華水土保持學報，42(2): 150-159。



- (58) 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生，2015，台灣山區淺層崩塌地特性調查與分析，中華水土保持學報, 46(1): 19-28。
- (59) 蕭靖平，2019，崩塌運移之連體與非連體模型數值模擬比較 - 以RAMMS與PFC3D為例，國立交通大學土木工程系所碩士論文。



附錄一 五大流域雨量站未來設計暴雨改變率

附表 1 淡水河流域 RCP8.5 情境 1 日設計暴雨不同重現期 50%改變率雨量彙整表

雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
石門	11%	15%	17%	17%	19%
十一份	11%	15%	17%	17%	19%
白石	19%	22%	25%	27%	28%
石門(3)	11%	15%	17%	17%	19%
鞍部	19%	27%	26%	26%	28%
秀巒	17%	20%	23%	27%	25%
鎮西堡	14%	18%	19%	21%	21%
長興	14%	15%	20%	25%	23%
玉峰	16%	25%	21%	25%	27%
三峽	13%	17%	14%	18%	22%
高義	14%	20%	21%	22%	22%
西丘斯山	9%	13%	16%	18%	21%
霞雲	12%	21%	21%	20%	18%
三光	16%	20%	23%	24%	25%
龍壽社區	15%	17%	20%	22%	25%
巴陵	13%	18%	19%	21%	25%
嘎拉賀	15%	17%	21%	25%	27%
大豹	11%	19%	23%	29%	34%
熊空山	11%	20%	22%	27%	32%
福山(3)	12%	18%	19%	22%	25%
中正橋	15%	15%	19%	23%	29%
竹子湖(2)	19%	20%	18%	16%	18%
屈尺堰	15%	19%	21%	28%	34%
覽勝橋	16%	21%	22%	29%	34%
大桶山	16%	21%	22%	29%	34%
福山植物園	17%	25%	21%	22%	26%
社后橋	16%	15%	19%	25%	30%
石碇(2)	20%	18%	23%	29%	34%
金瓜寮溪橋	20%	23%	24%	28%	31%
五堵	16%	15%	20%	25%	30%
大林橋	20%	23%	24%	28%	31%
坪林(4)	20%	23%	24%	28%	31%



雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
碧湖	17%	19%	20%	22%	24%
火燒寮	18%	25%	28%	27%	28%
思源橋	18%	25%	28%	27%	28%
三貂嶺	21%	22%	23%	26%	32%

附表 2 大甲溪流域 RCP8.5 情境 1 日設計暴雨 50 年重現期不同改變率彙整表

雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
石岡壩	19%	22%	24%	27%	30%
馬鞍後池	21%	33%	28%	31%	34%
白鹿	24%	30%	30%	29%	29%

附表 3 濁水溪流域 RCP8.5 情境 1 日設計暴雨 50 年重現期不同改變率彙整表

雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
西螺(2)	18%	24%	26%	27%	26%
桶頭(2)	25%	25%	25%	24%	26%
草嶺(2)	22%	25%	26%	25%	23%
外來吉	22%	23%	24%	24%	23%
豐山	22%	24%	27%	27%	26%
集集(2)	20%	25%	27%	29%	27%
內茅埔(2)	25%	25%	25%	22%	20%
龍神橋	24%	27%	27%	26%	25%
西巒	25%	27%	26%	23%	21%
望鄉	27%	25%	29%	28%	26%
東埔	24%	25%	25%	27%	29%



附表 4 曾文溪流域 RCP8.5 情境 1 日設計暴雨 50 年重現期不同改變率彙整表

雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
王爺宮	23%	27%	29%	31%	33%
南化(2)	23%	22%	25%	28%	28%
曾文新村	22%	27%	30%	33%	34%
大棟山	24%	25%	25%	24%	24%
大竹坑	22%	29%	32%	32%	36%
三角南山	24%	26%	27%	30%	32%
關山	22%	24%	27%	29%	32%
馬頭山	23%	25%	26%	27%	29%
龍美	22%	24%	24%	25%	25%
里佳	19%	22%	22%	23%	23%
樂野	23%	25%	23%	22%	20%
水山	22%	24%	24%	23%	24%

附表 5 高屏溪流域 RCP8.5 情境 1 日設計暴雨 50 年重現期不同改變率彙整表

雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
屏東(5)	17%	17%	19%	23%	24%
旗山(4)	20%	23%	29%	30%	31%
圓富國中	21%	24%	29%	32%	32%
溝坪	21%	22%	27%	30%	33%
美濃(2)	20%	22%	26%	26%	28%
甲仙(2)	21%	22%	24%	25%	27%
新豐(1)	19%	20%	22%	26%	27%
六龜(4)	15%	18%	23%	25%	28%
古夏	22%	24%	28%	30%	31%
三地門	22%	23%	23%	25%	27%
新瑪佳	22%	22%	24%	26%	29%
民權	20%	22%	24%	25%	27%
表湖	20%	22%	23%	24%	25%
高中(2)	19%	19%	20%	22%	23%
寶山	14%	19%	22%	23%	26%
多納(1)	18%	18%	20%	22%	24%
神山	22%	27%	26%	26%	25%
梅山(2)	18%	18%	21%	22%	24%
楠溪	21%	25%	26%	25%	26%
天池	21%	22%	23%	26%	26%



附表 6 花蓮地區 RCP8.5 情境 1 日設計暴雨 50 年重現期不同改變率彙整表

雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
馬太鞍	14%	18%	20%	21%	23%
新東礦	15%	18%	20%	21%	23%
西林	15%	18%	20%	21%	23%
東富	13%	18%	21%	21%	23%
花蓮	14%	20%	24%	26%	27%
卓清	18%	23%	26%	29%	31%
明里	18%	23%	25%	27%	29%
卓麓(4)	17%	23%	23%	24%	25%
卓清國小	17%	23%	23%	24%	25%
苗圃	16%	18%	21%	23%	25%
立山	17%	18%	21%	24%	27%
太平國小	17%	18%	21%	24%	27%
六十石山	18%	23%	25%	27%	28%
奇美國小	14%	16%	21%	23%	27%

附表 7 台東地區 RCP8.5 情境 1 日設計暴雨 50 年重現期不同改變率彙整表

雨量站	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
向陽(2)	20%	24%	26%	28%	29%
電光	19%	28%	31%	33%	37%
霧鹿	21%	26%	29%	32%	34%
上里	19%	26%	30%	33%	36%
鹿鳴橋	21%	27%	31%	34%	37%
武陵	20%	26%	30%	33%	36%
新武(3)	20%	26%	30%	33%	35%
利吉國小	22%	28%	32%	35%	37%
壽卡	21%	22%	24%	29%	35%
紹家	23%	27%	29%	31%	34%



附錄二 現地調查參考表

一、河床質調查表(含範例)

編號	縣市別	鄉鎮	村里	子集水區	調查類型
景山溪 A	苗栗縣	卓蘭鎮	坪林里	景山溪	樣孔粒徑
TWD97_X	TWD97_Y	計畫年度	執行單位	計畫名稱	取樣日期
237810	2691930	2014	臺中分署	景山溪集水區整體治理調查規劃	20140613
D10 (mm)	D16 (mm)	D20 (mm)	D30 (mm)	D40 (mm)	D50 (mm)
0.44	3.1	4.42	14.52	31.01	40.00
D65 (mm)	D75 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	D95 (mm)	Dmax (mm)
58.61	75.60	98	110.77	131	152.30
Dn (mm) 平均粒徑		備註			
51.42					
編號	縣市別	鄉鎮	村里	子集水區	調查類型
TWD97_X	TWD97_Y	計畫年度	執行單位	計畫名稱	取樣日期
D10 (mm)	D16 (mm)	D20 (mm)	D30 (mm)	D40 (mm)	D50 (mm)
D65 (mm)	D75 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	D95 (mm)	Dmax (mm)
Dn (mm) 平均粒徑		備註			

參考資料來源：<https://elibrary.ardswc.gov.tw/>



二、土壤力學參數表

Site_No	Year	Site	Elevation	EPSG3826_X	EPSG3826_Y
SUW 現場單位重 (γ)g/cm ³	DUW 乾燥單位重 (γ_d)g/cm ³	SAUW 飽和單位重 (γ_{sat})g/cm ³	Po_P 孔隙率(n) %	Po_R 孔隙比(e)	Po_gs 比重(Gs)
WC_P 含水量(ω) %	LL_P 液性限度 (LL)%	PL_P 塑性限度 (PL)%	PI_PGI 塑性指數 (PI)%	Sand_P 分組指數 (GI)	Gravel_P 礫石(%)
Sand_P 砂(%)	Silt_P 粉土(%)	Clay_P 粘土(%)	C 凝聚力 (c) kg/cm ²	IFA_D 內摩擦角(ϕ) deg	ShearM 正割模數 (kg/cm ²)

參考資料來源：<https://elibrary.ardswc.gov.tw/>

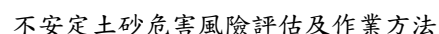


附錄三 重要防砂構造物調查表

調查人員				
調查日期				
工程編號			集水區__構造物 編號	
工程座標	(N,E) (TWD97)			
工程內容及 材質	管考資料	工程種類	規格尺寸	使用材質
環境現 況概述	溪岸： ☐ 植被良好； ☐ 植被稀疏； ☐ 崩塌裸露(面積約__m ²)； ☐ 殘土堆積溪床 坡面： ☐ 植被良好； ☐ 植被稀疏； ☐ 崩塌裸露(面積約__m ²)			保全對象(可複選)： ☐ 林班地 ☐ 公共設施 ☐ 聚落(__戶)
				工程重要性： ☐ 重要 ☐ 一般
工程 位置圖				
工程現況 照片				



上下游面 全景照片				
	構造物向上游面	照片重點說明：	下游面向下游面	照片重點說明：
構造物 功能性評斷	溪床： ☐ 常流水； ☐ 溪床掏刷； ☐ 溪床淤積 溪床坡度：上游面約____度，下游面約____度 下游面是否有新設構造物： ☐ 是； ☐ 否；			
生態檢核	魚梯： ☐ 無； ☐ 有 狀態： ☐ 良好 ☐ 阻塞 ☐ 磨蝕 ☐ 斷裂 ☐ 錯動變形 ☐ 淤積			
外觀檢視	☐ 良好 ☐ 裂縫 ☐ 磨蝕 ☐ 淘空 ☐ 傾倒 ☐ 沉陷 ☐ 錯動變形 ☐ 位移 ☐ 填土(石)流失 ☐ 腐朽 ☐ 火害 ☐ 外框斷裂 ☐ 植生覆蓋不良 ☐ 其他()			
構造物 全景影像				
	說明：構造物之全景圖或正面照			
構造物外觀 局部評斷 (註 1)				
	1. 構造物正面局部現況		2. 構造物正面局部現況	



參考資料來源：農村發展及水土保持署