
簡易土石流模式之精進與圖形化介面開發
Development of Simplified Debris-flow
Model (SDF-model) and its GUI interface
期末報告

執行單位：國立彰化師範大學

執行期間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳毅青 副教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 11 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）

簡易土石流模式之精進與圖形化介面開發

摘要

土石流數值模擬分析為土石流災害防災與應變的關鍵。簡易土石流模式因簡化水文與土石流力學機制，且所需參數簡單、模擬速度快的特性，能夠快速評估土石流動態變化與影響範圍。但該無法改變隨時間與空間變化參數其參數，且無法模擬堆積土砂隨著時間與降雨、和水混合的效應，且因該模式缺乏單機版圖形化介面，使得操作便利性較為受限。

本計畫目標改進簡易土石流模式的土砂動態模擬的過程，包括整合降雨逕流模式、地表逕流模擬、與體積濃度、降伏應力、黏滯係數計算模組，能夠模擬擬降雨逕流的動態變化外，也可計算土石流的體積濃度、降伏應力、運動黏滯係數的動態變化，進而模擬土石流的運動和影響範圍。再者，本計畫完成三處土石流災害事件的模式分析與驗證。最後，本計畫將開發模式單機版圖形化介面，包括：模式參數輸入、模擬演算成果展示介面、模擬成果匯出介面。

關鍵詞：簡易土石流模式、降雨逕流、體積濃度、圖形化介面

Development of Simplified Debris-flow Model (SDF-model) and its GUI interface

Abstract

Numerical model of debris flow is crucial tool for disaster prevention and response. The simplified debris flow model (SDF-model), has the advantages of simple parameters requirements and fast simulation, provides a useful tool for simulating the dynamic changes and affected areas of debris flows. However, because SDF-model can only input constant parameters temporally and incapable of simulating the rainfall-run-off, sediment-water mixing, and dynamic change of sediment concentration over time. Additionally, the lack of a graphical user interface (GUI) in the model limits its applicability.

In this project, we aim to integrate the SDF-model with a rainfall-infiltration model for improving dynamic of debris-flow. This integrated model involves incorporating rainfall-runoff modeling, surface runoff simulation, and modules for calculating volume concentration, yield stress, and viscosity coefficient. By using this integrated model, we can simulate the dynamic changes in rainfall-runoff and sediment concentration, yield stress, and viscosity coefficient. Furthermore, we have demonstrated the capability of SDFmodel from three events of debris flow disaster as the basis for model calibration and verification. Finally, we developed a standalone GUI for SDF-model, including interfaces for parameter input, simulation result display, and result export.

Keywords: simplified debris flow model, rainfall-runoff, sediment concentration, GUI

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VI
第一章 緒論	1
第二章 工作執行方法與步驟	1
第一節 改善 SDF-model 模擬.....	1
第二節 模擬結果之驗證與分析	9
第三節 圖形化介面開發	10
第三章 工作進度與交付項目	1
第一節 改善 SDF-model 模擬.....	1
第二節 模擬結果之驗證與分析	17
第三節 單機版 SDF-model 圖形化介面開發	33
第四章 結論及建議	38
第一節 結論	38
第二節 期末報告進度	39
參考文獻.....	40
附錄一 國土利用調查之土地利用類別對應逕流曲線法的 CN 值	1
附錄二 期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	3
附錄二 期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	6

表次

表 2-1 現地料源的型態對應運動黏滯係數	4
表 3-1 日本各地質區的筒狀模式參數與計算公式.....	2
表 4-1 本計畫計畫預定進度與執行狀況.....	39
表 附錄-1 國土利用調查之土地利用類別對應逕流曲線法的 CN 值..	1

圖次

圖 1-1 應用 SDF-MODEL 模擬高雄市新發里土石流事件.....	3
圖 1-2 水土保持局 BIGGIS 展示碧颱風玉穗溪集水區土石流模擬	4
圖 2-1 HUNT'S MODEL 土石流的流速剖面	1
圖 2-2 比較 DSM 和 DEM 資料對於土石流模擬的影響	3
圖 2-3 土石流模擬穩定條件和演算時距	5
圖 2-4 崩塌和土石流運動型態與體積濃度的關係	6
圖 2-5 SDF-MODEL 與水文模式結合之示意圖	9
圖 2-6 WD2D 與 IRIS 模式的圖形化介面	11
圖 2-7 以 APP DESIGNER 設計 SDF-MODEL 單機介面示意圖	11
圖 3-1 筒狀模式的計算概念圖	2
圖 3-2 筒狀模式與 SCS 曲線法混合模式的概念圖	4
圖 3-3 三種降雨逕流模式測試結果.....	5
圖 3-4 測試研究區的航照正射影像和數值地形模型.....	7
圖 3-5 測試研究區的地表逕流的水深動態變化.....	8
圖 3-6 體積濃度對應降伏應力和運動黏滯係數之間的關係.....	11
圖 3-7 測試區的地表逕流和土砂料源的水深和範圍動態變化	13
圖 3-8 測試區的土石流深度的動態變化.....	14
圖 3-9 最大土砂料源的體積濃度與黏滯係數變化歷線	15
圖 3-10 莫拉克颱風於高雄新發里土石流災害.....	18
圖 3-11 莫拉克颱風於高雄新發里土石流災害照片	18
圖 3-12 高雄新發里土石流災害模擬結果	19
圖 3-13 高雄新發里土石流災害驗證結果	20
圖 3-14 盧碧颱風於玉穗溪土石流的土砂變化量.....	21
圖 3-15 盧碧颱風於玉穗溪土石流災害照片	21

圖 3-16 原始 SDFMODEL 盧碧颱風於玉穗溪土石流模擬結果	23
圖 3-17 降雨-逕流 SDFMODEL 盧碧颱風於玉穗溪土石流模擬結果.	24
圖 3-18 玉穗溪下游沖積扇的土石流模擬與觀測結果	25
圖 3-19 玉穗溪上游的土石流模擬與觀測結果	26
圖 3-20 汐止鵠鵠崙土石流事件現地照片	28
圖 3-21 汐止鵠鵠崙土石流事件崩塌深度與堆積體積.....	28
圖 3-22 原始 SDF 於汐止鵠鵠崙土石流模擬結果	30
圖 3-23 動態參數 SDF 於汐止鵠鵠崙土石流模擬結果	31
圖 3-24 汐止鵠鵠崙土石流模擬與觀測結果.....	32
圖 3-25 單機版 SDF-MODEL 介面	34
圖 3-26 單機版 SDFMODEL 增加防砂壩與沈砂池修改 DEM.....	35
圖 3-27 單機版 SDFMODEL 讀取崩塌土砂介面	36
圖 3-28 單機版 SDFMODEL 設定模式參數.....	36
圖 3-29 單機版 SDFMODEL 模擬展示介面.....	37
圖 3-30 單機版 SDFMODEL 模擬輸出介面.....	37

第一章 緒論

台灣山區地形陡峭且地質破碎，每當颱風豪雨帶來的強降雨，不僅會使河川流驟增，在邊坡也會產生崩塌與土壤沖蝕等現象，當邊坡的泥砂與水混合後，順著重力向下游運動，形成土石流，進而威脅野溪下游的保全對象。台灣的崩塌及土石流運移速度快，災害應變時間相當有限。對於管理單位來說，如何在短暫的時間內，透過數值模擬分析，快速地瞭解土石流的動態運移過程、可能的影響範圍，為土石流災害防災與應變的關鍵。

近數十年來，國內外學者已發展出許多土石流數值模式，以模擬土石流運動和災害影響範圍。各個模式可根據其原理和控制方程式，大致可分為牛頓流體、非牛頓流體、或顆粒流模式 (Han et al., 2015; Iverson and Denlinger, 2001)。牛頓流體、非牛頓流體模式假設邊坡或河道中的土砂與水混合形成特殊的流體，經重力牽引往往下游移動的過程 (Liu et al., 2013; Tsai et al., 2011)。其中，非牛頓流體模式考量應力和應變為非線性的關係，物理機制較為複雜，優點是較能完整考量土石流複雜的運動機制，模擬成果通常較佳，國內外常見的模式如 FLO-2D (O'brien et al., 1993)、RAMMS、Derbis-2D (Liu and Huang, 2006) 等，且已有許多成功模擬的案例。非牛頓流體的土石流模式計算較為複雜，數值模擬計算量大，模擬速度通常較慢，雖然可用於精確度高的預案情境模擬，如防砂壩攔阻土砂效益、土石流對保全對象之衝擊等，較無法應用於土石流災害後之快速模擬與評估。

顆粒流模式將土石流視為許多剛體，模擬各個顆粒運動行為，或顆粒與顆粒之間的相互碰撞 (謝嘉聲等人, 2015)，其優點為物理機制

簡單，容易模擬。缺點為參數不易取得，且通常不考慮土砂的水文條件，通常較適用於崩塌模擬，未必適用於鬆散土石和水之混合之土石流流體的模擬，且顆粒流模式所需要計算資源較高，亦難以應用於土石流災後快速評估。

此外，近年學者亦使用牛頓流體模式發展土石流模式，例如 Hunt (1994) 根據 Navier-Stokes 方程式與連續方程式，將土石流在三維方向之非穩態方程式進行簡化，假設流體為穩定發展層流 (steady and fully developed laminar flow) 的流體型態，推導土石流運動之流通量。由於 Hunt's 模式假設土石流水分與泥砂均勻混合的流體，故可應用於暴雨誘發之淺層崩塌而肇生之土石流，而在此假設下，模式可用較少的參數進而簡化模式，計算速度較快，故模擬集水區尺度的土石流模擬 (Chiang et al., 2012)，例如 Chiang et al. (2012) 跟據 Hunt's 土石流模式與邊坡穩定模式，發展邊坡穩定計算以及土石流動態模擬，簡稱為 ISOLAD (Integrated SOil wetness-LAndslide-Debris flow model; Chiang, 2010)，並應用於高雄市花果山集水區流域的土石流模擬。

Chen et al. (2018) 參考 Hunt (1994) 和 Chiang (2010) 的土石流模式，發展出簡易土石流模式 (Simplified Debris-Flow model，簡稱 SDF-model)，特點為假設條件簡易，簡化土石流的運動機制，僅需輸入簡易參數，包括：地形、土石料源與深度、運動黏滯係數、土石流土濃度的參數，即可快速模擬土石流動態運移過程和影響範圍。SDF-model 曾經應用在 2009 年莫拉克颱風在高雄市新發里的土石流災害 (圖 1-1)、2021 年盧碧颱風於玉穗溪流域的土石流，以及石門水庫集水區的泥砂傳輸 (Chen et al., 2018) 等案例，SDF-model 土石流的模擬結果與觀測吻合，且能夠在數分鐘至數十分鐘內模擬土石流動態變

化歷程，可提供土石流災害即時應變初步參考。目前 SDF-model 已經介接至水土保持局的 BigGIS 系統上，提供局內人員於線上即時分析土石流變化 (圖 1-2)。

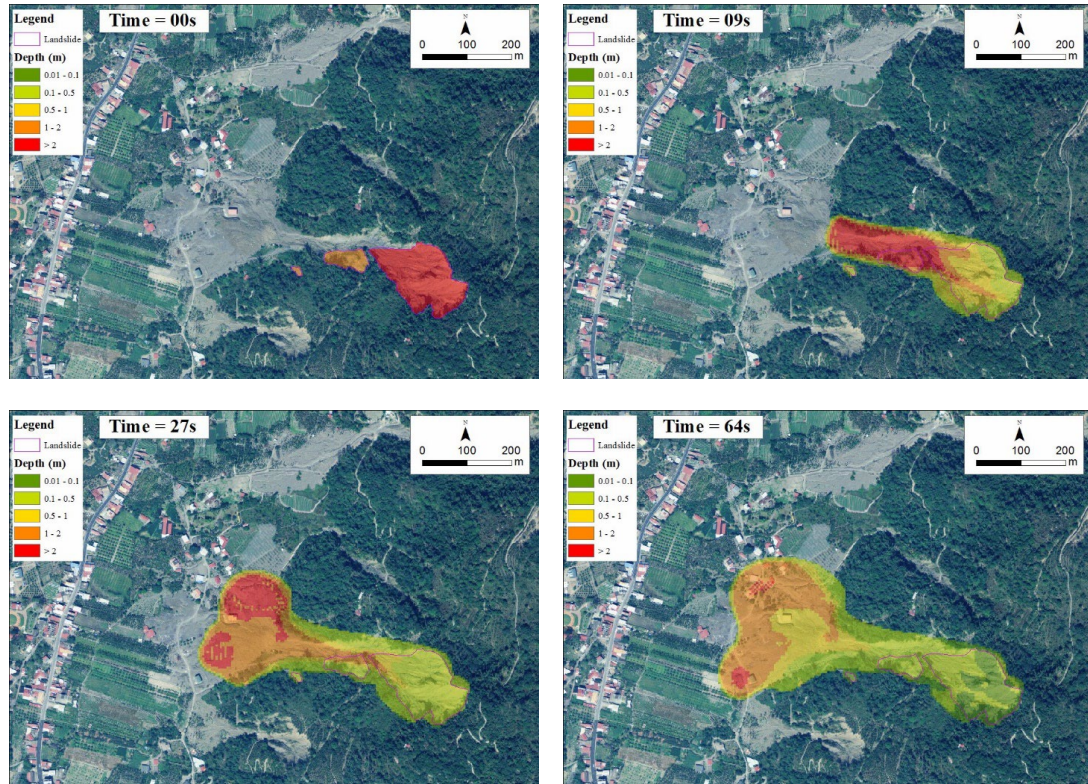
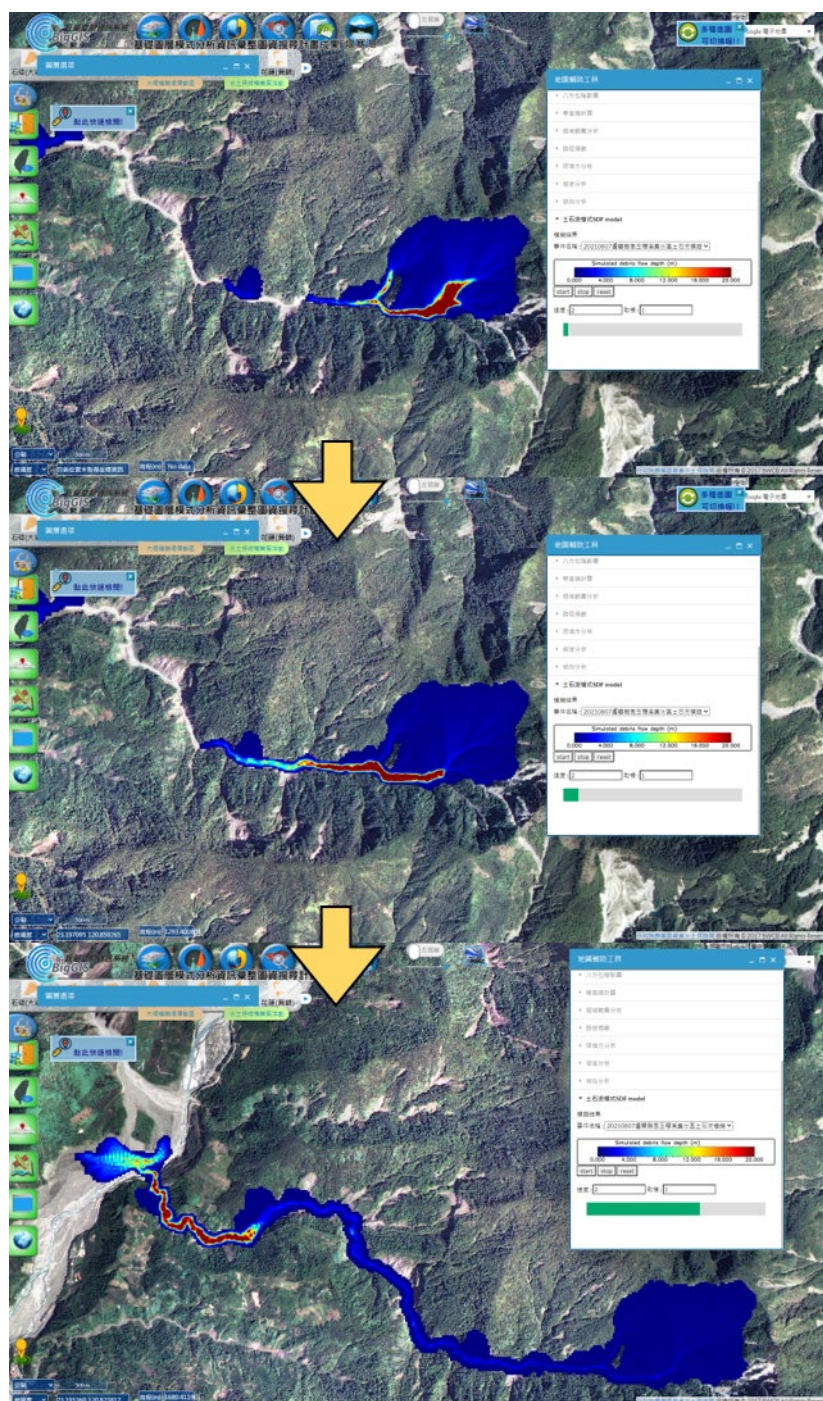


圖 1-1 應用 SDF-model 模擬高雄市新發里土石流事件

雖然，SDF-model 在土石流防災上具有相當之潛力，但因為 SDF-model 簡化許多水文與土石流力學機制，在實際應用上仍有許多限制與缺點。例如：台灣許多土石流來自於邊坡崩塌土砂，當崩塌土砂堆積在野溪或河道上，土砂受降雨入滲和野溪溝渠浸潤，土砂和水逐漸混合形成土石流的流體，故土砂材料的含水量和型態可能隨者其水文條件而變化，然而，目前 SDF-model 無法改變隨時間與空間變化參數其參數，且無法模擬堆積土砂隨著時間與降雨、和水混合的效應，如圖 2 顯示玉穗溪上游大規模崩塌的土砂部分堆積在坡腳，但 SDF-model 無法模擬此效應。再者，目前 SDF-model 目前尚未有友善、圖

形化、單機版的使用者介面，導致操作上較為繁瑣，限制模式的實用性與推廣性。



圖片來源：水土保持局 BigGIS

圖 1-2 水土保持局 BigGIS 展示碧颱風玉穗溪集水區土石流模擬

緣此，本研究計畫的目的擬增進 SDF-model 參數隨時間動態變化的功能，將加入水文模式模擬土砂與水混合的效應，並且發展 SDF-model 圖形化的使用者介面，以解決簡易土石流模式模擬的限制與操作不易的問題。

本計畫目標為精進簡易土石流模式與開發圖形化介面，整合水文分析模擬、改善演算流程，以及開發使用者友善的圖形化介面，使 SDF-model 能夠成為本土化的土石流模式。重點項目包含：

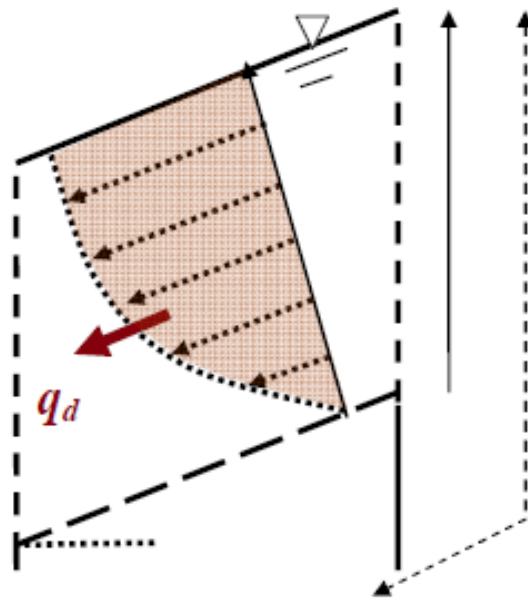
1. 改進 SDF-model 的演算流程，並結合水文入滲模式，改進土砂動態模擬的過程。
2. 蒐集三處土石流事件資料，並以 SDF-model 模擬分析與驗證。
3. 開發 SDF-model 單機版圖形化介面，包括：模式參數輸入、模擬演算成果展示介面、模擬成果出介面。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 改善 SDF-model 模擬

一、SDF-model 模式概述

本計畫將基於 SDF-model 既有基礎進行改進，以下將回顧 SDF-model 的理論。SDF-model 的開發主要參考 Chiang et al. (2012) 的 ISOLAD 模式與 Hunt (1994) 發展的完全發展層流 (fully developed laminar flow) 的基礎，假設土石流水分與泥砂均勻混合的流體，發展出深度平均的二維模式，用以模擬土石流的運動。因為颱風期間，當坡面土石含水量達到飽和時，而土石流開始啟動，水分與泥砂較為均勻混合，經常發生於山區溪溝內之土石流移動。在此假設下，模式可用較少的參數進而簡化模式運算，得到較有效率的模擬 (姜壽浩，2010)。當假設流體為穩定發展時 (steady and fully developed)，土石流的流速剖面如圖 2-1 所示，流體單位時間內通量以公式 2-1 表示。



圖片來源：Hunt (1994)；姜壽浩 (2010)

圖 2-1 Hunt's model 土石流的流速剖面

$$q_d = \int_0^{h_d} u_d dz = \frac{gh_d^3}{3\nu} \sin \theta \quad \text{公式 2-1}$$

其中， q_d 為單位時間內通量 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]； h_d 為土砂深度 [m]； u_d 為土石流平均流速 [m/s]； g 為重力加速度 [m/s^2]； ν 為運動黏滯係數 (kinematic viscosity) [m^2/s]； θ 為地形坡度 [$^\circ$]。

在計算土砂分配到鄰近八個網格的土砂入流量，則根據公式 2-2 進行分配。

$$Q_{md} = \frac{q_d}{\sum_{d=1}^8 q_d} \times \max(q_{d=1 \sim 8}) \quad \text{公式 2-2}$$

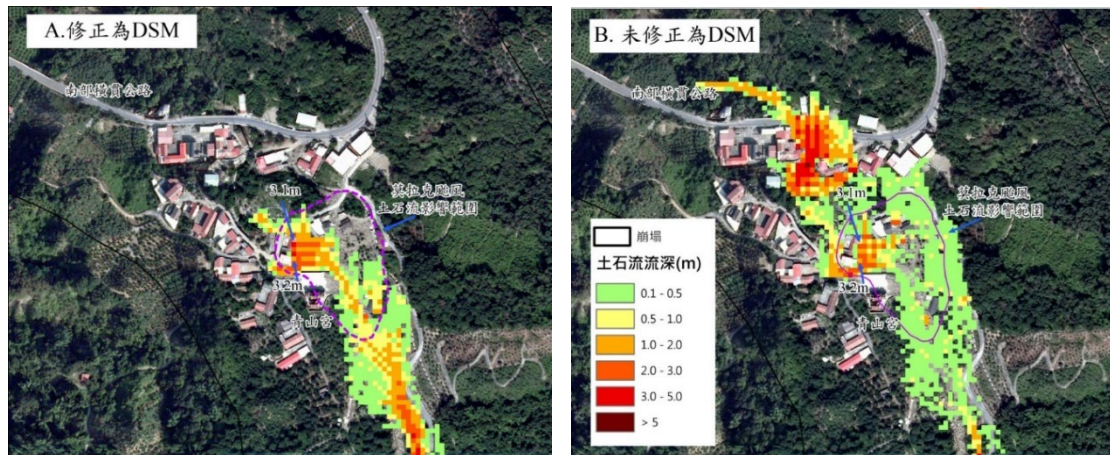
其中， Q_{md} 流向 d 的土砂流量， q_d 為公式 2-1 所計算的土石流流通量。

基於上述 Hunt 模式之基礎，SDF-model 以 Matlab 程式語言為基礎，撰寫成一套土石流模式，並編譯成可執行檔。因其簡化複雜的土石流運動機制，且執行效率佳。

SDF-model 所需要的初始條件分別為 (1) 地形、(2) 土砂料源、(3) 運動黏滯係數、(4) 土石流體積濃度與 (5) 演算時距，各個初始條件的說明如下：

(1) 地形：須輸入正規網格的數值地形模型 (Digital Terrain Model, DTM)，模式演算過程皆將地形視為不變之剛體，不考慮土石流侵蝕河而產生的捲增效應，因此，在輸入數值地形模型時，需要根據使用者模擬需求，或土石流對地面物的衝擊程度，修正數值高程模型。例如水泥建築物不易被土石流沖毀，此處則給設定為含有地面物體高度的數值表面模型 (Digital Surface Model, DSM)；若樹木、農作

物易被土石流沖毀，此處則給設定為不含地面物體高度的數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。圖 2-2 比較 DSM 和 DEM 資料對於土石流模擬的影響，在使用 DSM 的情況下（左圖），建物阻擋土石流的流動，最終土石流堆積範圍與實際觀測結果接近；在使用 DEM 的情況下，土石流未受阻擋，溢流至下游的路面，模擬結果會大於實際觀測結果（右圖）。



資料來源：陳毅青等 (2013)

圖 2-2 比較 DSM 和 DEM 資料對於土石流模擬的影響

(2) 土砂料源：土砂料源的量體和空間分布是影響土石流運動最重要之因素 (Chen et al., 2012)。一般來說，土砂料源量體越大，土石流最終堆積範圍和深度通常越大；土砂料源越集中，土石流流動的範圍也就越遠。土石流的土砂料源可來自於崩塌、土壤沖蝕、或人工棄土等，其中崩塌為臺灣山區土石流最主要的土砂來源 (Chen et al., 2018)。崩塌的土砂量可藉由野外調查、數值地形模型相減、或崩塌體積和地形之間的經驗式進行推估，其中，較為被國、內外學者採用的方法為崩塌體積面積關係式(volume-area relation)，例如 Guzzetti et al. (2009) 建立義大利中部的 Umbria 地區之關係式為 $V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}$ ；Chen et al. (2013) 提出之適用於臺灣南部山區的關係式為 $V_L = 0.202$

$\times A_L^{1.268}$ ，藉由各地區發展的崩塌體積面積關係式和觀測崩塌面積，便可推估崩塌體積。

(3) 運動黏滯係數：是指流體在受到剪應力後流動的難易程度，泥流型土石流（mud flow）的運動機制主要為砂石則懸浮於泥水之中，流動性較佳；礫石型（granular flow）的運動機制以碰撞和滾動為主，泥水主要扮演潤滑角色，流動性較差。故在模擬土石流的流動性時，可根據土石流現地料源的型態予以給定，表 2-1 為 SDF-model 建議之現地料源的型態對應運動黏滯係數。

表 2-1 現地料源的型態對應運動黏滯係數

現地料源型態	運動黏滯係數 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
礫石型態料源	2.00–5.35
砂質壤土含礫石料源	1.00–2.00
砂質壤土含泥質型態料源	0.50–1.00
泥質型態料源	0.23–0.50

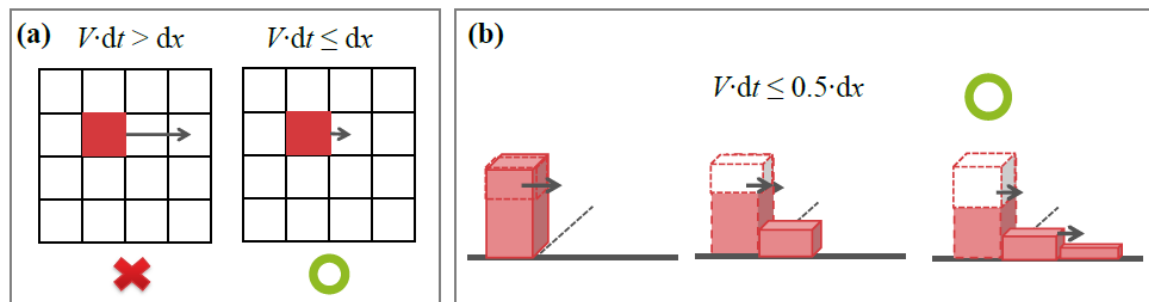
(4) 平衡濃度：平衡濃度 (equilibrium concentration, C_d) 是指土石流材料在流動中混合達到完全發展狀態時，即堆積層不產生侵蝕與堆積，則土石之濃度會趨於平衡狀態，此時泥砂在土石流體中所佔據的比例稱為土石流平衡濃度。Takahashi (1981) 根據實驗結果，發現當坡度大於 17.6 度的河谷，理論體積濃度最大值為 0.603。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)}, C_d \leq 0.603 \quad \text{公式 2-3}$$

其中， C_d 為土石流中泥砂的體積平衡濃度； ρ 為水的密度 1000 kg/m^3 ； σ 為土砂的密度，約取 2650 kg/m^3 ； ϕ 為砂礫的內摩擦角約為 37 度；

θ 為溪床的平均坡度，體積濃度最大為 0.603。在一般情況下，強降雨所誘發的土石流，大多屬於土砂與水充分混合的流體，故在 SDF-model 模式中建議值設定 0.603 之平衡濃度。

(5) 演算時距：指模式在演算一個步驟對應真實時間 (dt)，演算時距的概念可類比於 Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) 的穩定條件，為避免土石流在一個步驟的移距離超過其鄰近八個網格，土石流移動距離（流速乘以演算時距）必須要小於網格大小（圖 2-3a），方能達到穩定。根據模擬的經驗，當演算時距小於 0.5 個網格大小，其模式較為穩定（圖 2-3b），若土石流最大流速 (V) 為 20 m/s，若使用 20 m $\times$ 20 m 的數值地形模型，則建議的演算時距需 ≤ 0.5 秒。



資料來源：Chen et al. (2018)

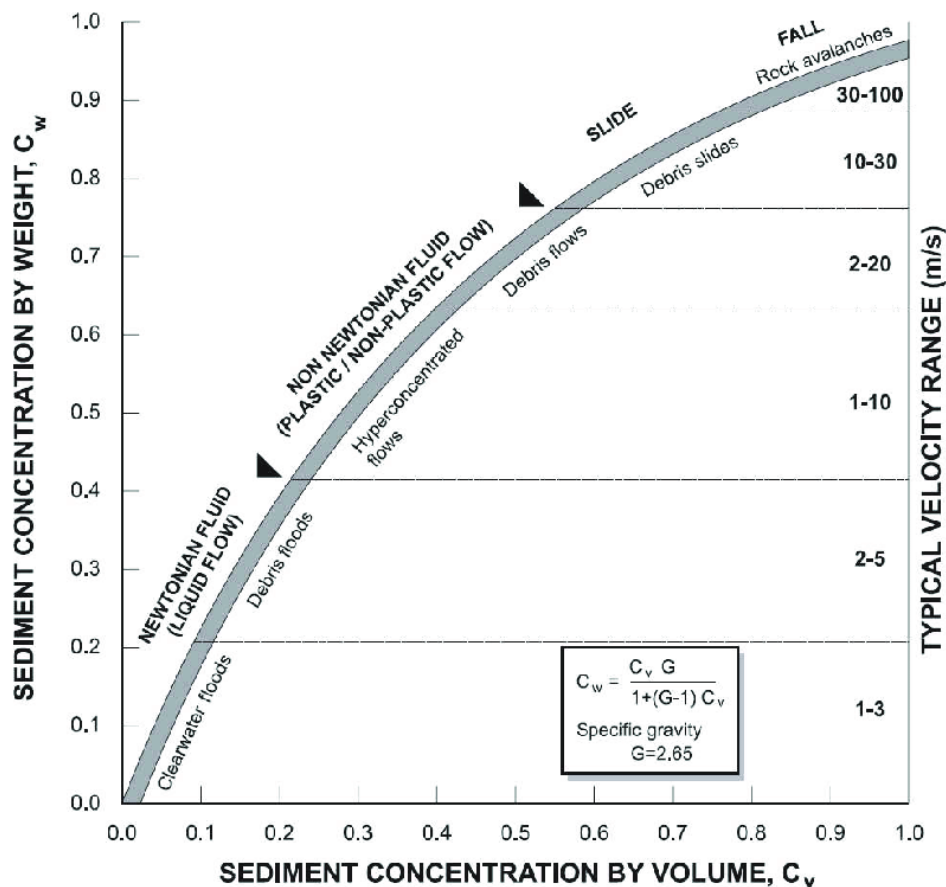
圖 2-3 土石流模擬穩定條件和演算時距

二、土石流體積濃度對土石流運動的影響

Takahashi (1981) 將土石流的類型可以分為三種，分別為崩塌轉變成為土石流、蝕溝中殘留的土砂或崩塌壩轉變成為土石流、和強降雨的表面水流流動而轉變成為土石流，其中，第三種類型最為常見。

土石流的啟動機制受到水分的供給狀況，土石流的運動機制異於崩塌與挾砂水流最主要參數在於體積濃度 (Takahashi 1981; 陳偉強, 2008)。

土石流體積濃度會影響土砂的運動型態，如圖 2-4 所示，圖的縱軸和橫軸分別為泥砂的重量與體積濃度，右側縱軸為運動速度。當泥砂或岩石含水量極低時，屬於崩塌的運動類型，包括泥砂體積濃度大於 0.8 時，運動型態屬於墜落 (fall)；當泥砂體積濃度介於 0.6-0.8 時，運動型態屬於土石滑動 (debris slide)。當泥砂或岩石的體積濃度介於 0.2-0.6 之間，運動型態屬於非頓流體的塑性變形，才屬於土石流的範疇；當體積濃度小於 0.2 時，運動型態屬於牛頓流體，即為高含砂水流。因此，體積濃度的變化為影響土石流運動機制的關鍵，如何計算體積濃度的動態變化，為土石流模擬的重要關鍵。



原圖修改自 Jakob and Jordan (2001), Hungr (2000) and Pierson and Costa (1987)；圖取自於

Theule J. (2012)

圖 2-4 崩塌和土石流運動型態與體積濃度的關係

許多學者根據土壤力學理論，推導土石流體積濃度的計算公式，如 Takahashi (1977) 依據堆積層之剪力理論與 Terzaghi 所提出之土壤抗剪強度的公式，且在忽略土壤凝聚力的情況下，推導出土石流泥砂體積濃度 (C_d) 之估算式 (公式 2-3)，成為土石流體積濃度計算的經典公式。然而，此公式 2-3 的計算的數值範圍過大，需要對於 C_d 值的數值範圍限制，例如 C_d 大於 0.6 時，則屬於崩塌運動型態的範圍；當 C_d 小於 0.2 時，屬於高含砂水流的運動型態，通常會將 C_d 限制於 0.2 至 0.6 之間。

此外，錢寧 (1984) 認為，泥砂體積濃度可由 Takahashi (1977) 的公式計算外，也應該考慮野溪河道中運動的土砂、河床的沖刷和邊坡土體崩落，以及其他的物質補充來源，這些物質的補充流入會使土石流的體積濃度會隨著運動過程而加大，說明土石流體積濃度會隨著土砂供應與水含量而產生動態變化。

國內的研究方面，如連惠邦 (1997) 根據理論值推導土石流之最小泥砂體積公式 (公式 2-4)，其中， γ_w 為水的比重，為 1.00 (KN/m³)； γ_s 為砂礫的比重，為 2.65 (KN/m³)，計算的 C_{Dmin} 約為 0.274。

$$C_{Dmin} \geq \frac{\gamma_w}{\gamma_s + \gamma_w} \quad \text{公式 2-4}$$

關於泥砂體積濃度變化對於土石流模擬的相關研究，近年來，許多學者利用 Flo-2D 模擬土石流與地表水混合的運動機制變化，會採用體積濃度作為控制因素，推估土石流流體的降伏應力 (yield stress) 與黏滯係數 (viscosity) 的變化。例如：Quan Luna (2011) 以 Flo-2D 模式模擬義大利北部阿爾卑斯山麓的土石流，採用指數方程式去描述體積濃度與降伏應力和動力黏滯係數 (dynamic viscosity) 的關係，關係

式如公式 2-5 和公式 2-6。

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 * C_v} \quad \text{公式 2-5}$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 * C_v} \quad \text{公式 2-6}$$

其中， τ_y 為降伏應力 [Pa]； η 為動力黏滯係數 [Pa]； α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 可藉由實驗室試驗結果獲得迴歸係數， C_v 為細顆粒泥砂（粉砂與黏土）的體積濃度 (FLO-2D, 2009)。因此，本計畫將參考 Quan Luna (2011) 的方法，採用上述體積濃度與降伏應力和動態黏滯係數，分析土石流雨水混合後的動態變化。

三、SDF-model 結合水文入滲模式

根據上述 SDF-model 特性梳理與文獻回顧，土石流運動型態深受含水量的影響，因此，本計畫將 SDF-model 與水文入滲模式整合，改進土砂動態模擬的過程，模式架構如圖 2-5 所示。SDF-model 以數值地形模型的正規網格為基礎，第一步驟，使用者輸入降雨資料至 (1) 降雨-逕流模式 (rainfall infiltration) 以計算網格入滲量與地表逕流深度。第二步驟，計算的地表逕流深度透過 (2) 地表逕流模式 (runoff simulation)，模擬地表逕流的流動和分佈。第三步驟透過 (3) 體積濃度公式 (sediment concentration) 模組，假設崩塌土砂能夠吸收來自於降雨和上游集水區地表逕流量，改變土砂的含水量與體積濃度，同時根據向下游排出逕流，計算土砂料源的體積濃度、運動黏滯係數、與降伏應力，第四步驟將上述的土石流的水文和力學參數輸入至既有的 SDF-model 中的 (4) 土石流演算模組 (debris flow)，藉以計算土砂料源的含水量狀況、體積濃度或運動黏滯係數成為動態變化的參數，以

模擬土砂與水分充分混合後形成土石流流體的運動型態。

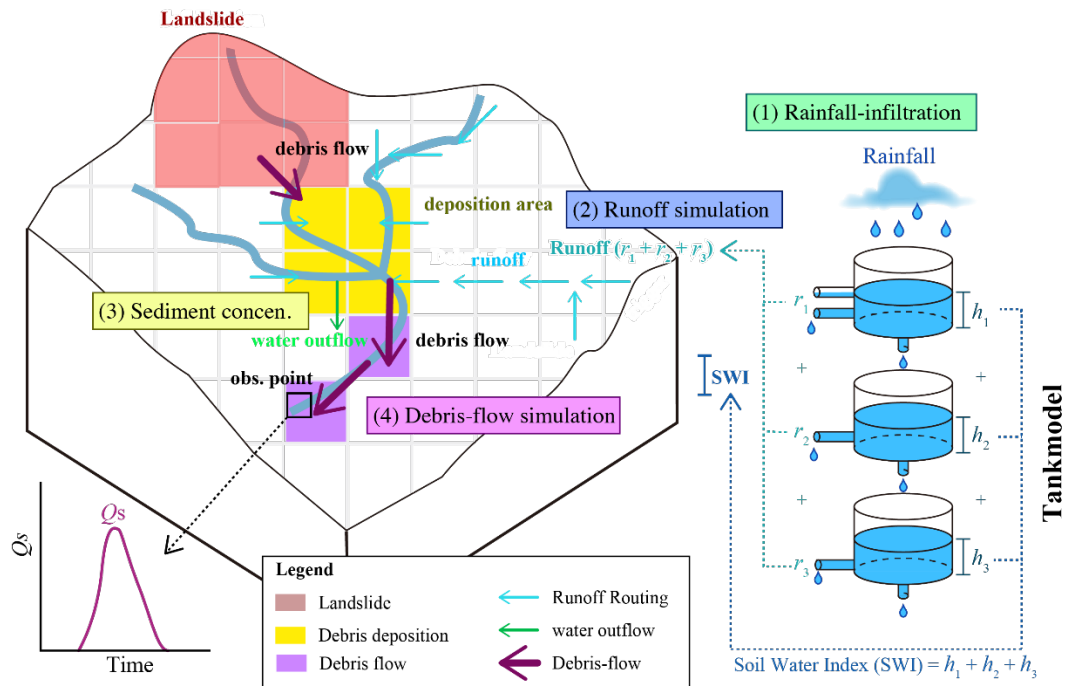


圖 2-5 SDF-model 與水文模式結合之示意圖

第二節 模擬結果之驗證與分析

本計畫將搜集國內相關重要的崩塌引致土石流災害事件的相關資料進行模式的驗證，土石流事件需要滿足以下需求：

(1) 具有詳細的崩塌位置與量體資料：由於崩塌土砂量是 SDF-model 最敏感的參數，故崩塌位置與量體對於土石流影響範圍影響甚鉅，故將搜集水保局既有重大土砂災害事件中，具有航照或衛星影像產製的事件前、後期高解析度數值地表模型的事件，藉由多時期數值地表模型相減取得崩塌土砂量，作為模式的輸入參數；

(2) 具有完整土石流堆積區域：土石流沖積扇堆積於平坦的山麓交界平原、河階、平坦寬廣的河道上，或土砂堆積於野溪河道上而未流入主要河流上，從航遙測影像可以觀測土石流堆積的範圍，而尚未

被河川水流侵蝕或被人工移除的土石流堆積扇。

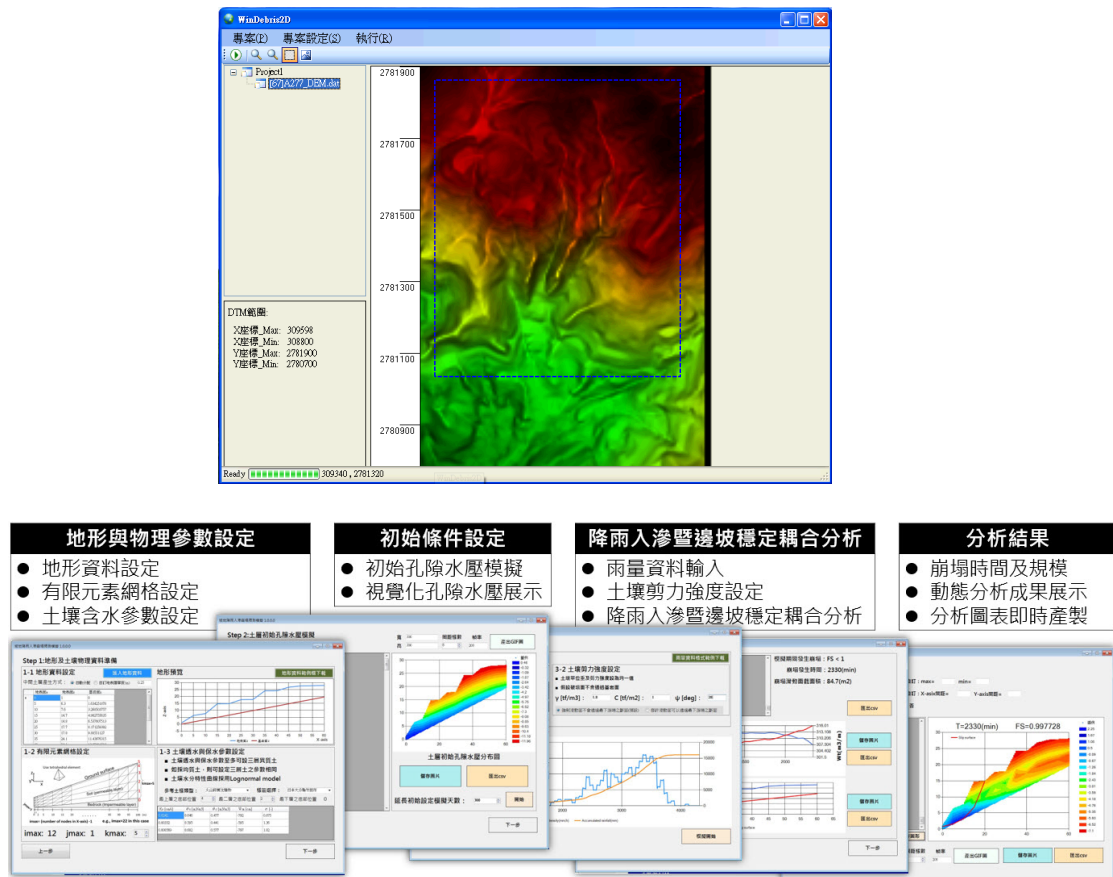
根據上述的條件，本計畫以(1) 98 年莫拉克颱風於高雄新發里土石流事件；(2) 110 年盧碧颱風於玉穗溪土石流事件；(3) 112 年尼莎颱風於汐止鵠鵠崙土石流，以這三處土石流的驗證與分析模擬成果。故需要蒐集這三場土石流事件的地形、土方量、土石流影響範圍等參數。

第三節 圖形化介面開發

目前 SDF-model 操作可於 Window 系統執行，以命令提示字元(command) 輸入模式所需的輸入條件與參數，來進行土石流的模擬。但沒有土石流動態模擬的即使展示介面，也尚未有能夠將模擬成果輸出成為常見的 GIS 格式檔案或動態影片之功能。

本計畫的使用者介面的設計將參考國內、外相關崩塌或土石流模式的操作介面，如台大劉格非團隊所開發的 WD2D (Windows Debris-2D)、日本京都大學防災研究所堤大三等 (2007) 和陳振宇等 (2014) 所發展的降雨入滲崩塌預測模式 (Integrated Rainfall-Infiltration-Slope stability model, IRIS model) 等模式的介面設計 (圖 2-6)。

回顧相關模式的操作介面，以及操作將面與 SDF-model 整合的問題，本計畫以 Matlab App Designer 控制項來開發 SDF-model 單機版圖形化介面，本計畫初步規劃，圖形化介面的設計包括三大部分，如圖 2-7 所示：(1) 模式參數輸入、(2)模擬演算成果展示介面、(3) 模擬成果的輸出介面。



圖片來源：水土保持局(2022) <https://tech.swcb.gov.tw/Results/ResultsIRIS>

圖 2-6 WD2D 與 IRIS 模式的圖形化介面

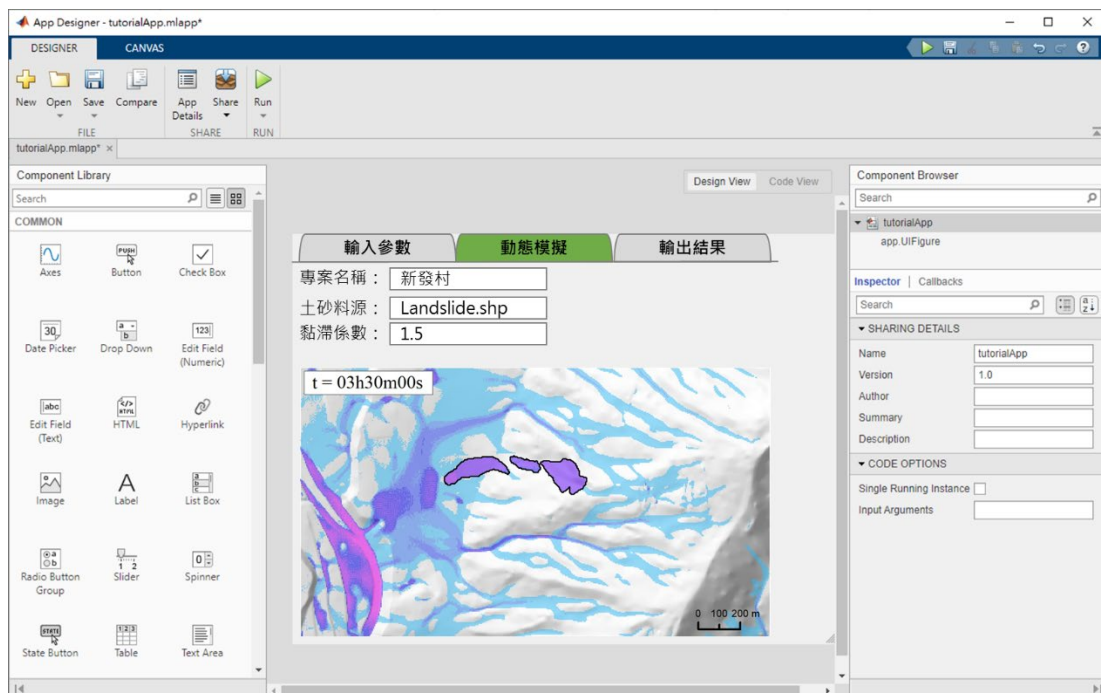


圖 2-7 以 App Designer 設計 SDF-model 單機介面示意圖

(1) 模式參數輸入：將根據 SDF-model 所需的模式參數設計介面，擬讓使用者匯入 GIS 格式檔案輸入參數，如數值地形模型、崩塌料源等，或透過手動圈繪方式給定參數，並將輸入的參數即時展示於圖形化介面上，且提供輸入的參數建議值，例如：將會提供相關研究的崩塌體積估算的建議值(土壤深度、崩塌體積-面積關係式)。

(2) 模擬演算成果展示介面：SDF-model 根據使用者給定參數模擬土石流動態變化過程，圖形化介面將即時展示土石流動態變化過程，並套疊使用者輸入的影像(衛星影像、航照、地形圖)或向量圖檔(崩塌範圍、道路、保全對象等)。

(3) 模擬成果的 GIS 格式與動畫匯出介面：匯出土石流模擬成果的图片與動畫。此外，也將設計資料繪出功能，讓使用者能將模擬成果匯出成為 GIS 常見的格式，提供 BigGIS 系統上展示使用。

第三章 工作進度與交付項目

第一節 改善 SDF-model 模擬

一、降雨-入滲與逕流模擬

SDF-model 的降雨-入滲與逕流的模擬將分別提供三種分法計算，分別為筒狀模式 (Tank model)、逕流曲線值 (Curve Number)、與混合模式，讓使用者自行選擇一種方法去地表逕流量。

(一) 筒狀模式

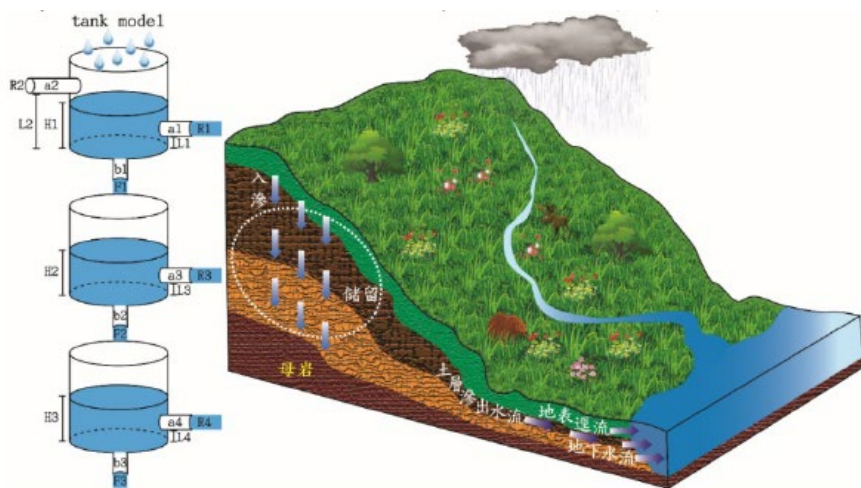
筒狀模式是日本學者菅原正巳 (1972) 提出，將土層分為數層水筒，以模擬地表逕流和地下滲流水的變化，分析降雨、流量歷線，將雨量資料輸入模式中快速預測河川流量。Ishihar and Kobatake (1979) 將菅原正巳的多筒層簡化為三筒模式，改善多筒層之筒狀模式運算複雜冗長的問題，並在日本抽取五個試驗區之地質種類，推求出筒狀模式中四種地質特性的參數值，日本筒狀模式各岩層參數如表 3-1 所示。SDF-model 將輸入降雨量輸入筒狀模式的第一層水桶，計算出流量 R_1 、 R_2 、 R_3 作為地表逕流量。

表 3-1 日本各地質區的筒狀模式參數與計算公式

岩層	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	b ₁	b ₂	b ₃
花崗岩	15	60	15	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.05	0.01
火山岩	30-40	60-75	15	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.08	0.01
古生代	30	75	5	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01
第四紀	15	40	5	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01

L ₁ : 第一筒第一層出流水深 (mm)	R ₁ : 第一筒第一層出流量 (mm)	$R_1 = (H_1 - L_1) \times a_1$
L ₂ : 第一筒第二層出流水深 (mm)	R ₂ : 第一筒第二層出流量 (mm)	$R_2 = (H_1 - L_2) \times a_2$
L ₃ : 第二筒出流水深 (mm)	R ₃ : 第二筒出流量 (mm)	$R_3 = (H_2 - L_3) \times a_3$
L ₄ : 第三筒出流水深 (mm)	R ₄ : 第三筒出流量 (mm)	$R_4 = (H_3 - L_4) \times a_4$
a ₁ : 第一筒第一層出流比	H ₁ : 第一筒水深 (mm)	$F_1 = H_1 \times b_1$
a ₂ : 第一筒第二層出流比	H ₂ : 第二筒水深 (mm)	$F_2 = H_2 \times b_2$
a ₃ : 第二筒出流比	H ₃ : 第三筒水深 (mm)	$F_3 = H_3 \times b_3$
a ₄ : 第三筒出流比	F ₁ : 第一筒入滲量 (mm)	$SWI = H_1 + H_2 + H_3$
b ₁ : 第一筒入滲比	F ₂ : 第二筒入滲量 (mm)	
b ₂ : 第二筒入滲比	F ₃ : 第三筒入滲量 (mm)	
b ₃ : 第三筒入滲比	SWI : 土壤雨量指數 (mm)	

資料來源：Ishihar and Kobatake (1979)



資料來源：岡田憲治(2002)

圖 3-1 筒狀模式的計算概念圖

(二) 逕流曲線值

逕流曲線法為美國土壤保持局 (The U.S. Soil Conservation Service, SCS) 所發展，用以模擬集水區降雨-逕流的過程，降雨落至地表時，經地表窪蓄地表滯留與植被截流等作用，然後入滲入土壤中，超滲逕流形成地表逕流 (李光敦，2002)，其方程式如

公式 3-1：

$$P = Q + I_a + P_e + F \quad \text{公式 3-1}$$

其中， Q 是地表逕深度 [mm]； P 是降雨總量 [mm]； Q 是累積逕流量 [mm]； I_a 是初始扣除總量 [mm]； F 是累積入滲量 [mm]。

根據美國土壤保持局分析水文記錄資料，得到初期降雨損失量與集水區最大蓄水量的經驗公式為：

$$I_a = 0.2S \quad \text{公式 3-2}$$

根據公式 3-1 與公式 3-2 的推導，可以得到逕流深可由公式計算 (Lee et al., 2023)：

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad \text{公式 3-3}$$

其中， S 是集水區最大儲水量 [mm]，可由公式 3-4 計算得到：

$$S = \frac{25400}{CN - 254} \quad \text{公式 3-4}$$

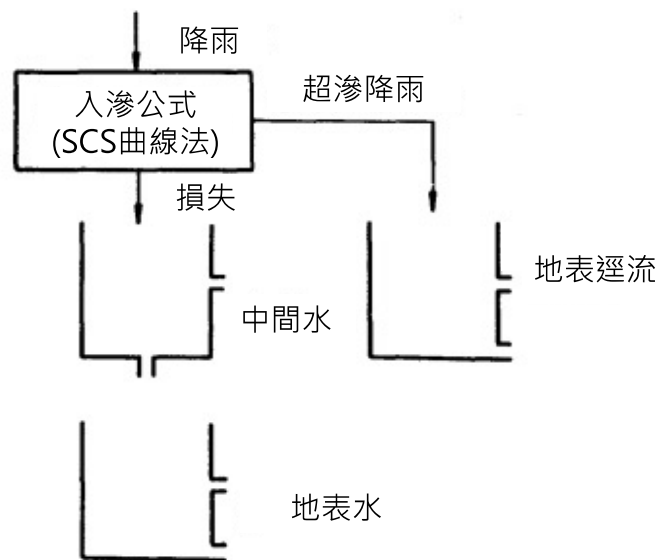
其中，CN 值稱為曲線值 (curve number)，為土壤類別、水文臨前狀況、土地利用狀況與水土保持工程等措施所影響。CN 可由土壤類型與地表覆蓋查詢決定。國土利用調查之土地利用類別對應逕流曲線法的 CN 值詳見表附錄-1。

(三) 混合模式

李光敦 (1993) 的研究指出，使用管原正己的直列式筒狀模式，高強度的降雨，初始入滲量較高，但入滲量降低至零的速度較慢；若對於低強度的降雨，入滲量降低至零的速度較快，其入滲量的時間分布與 Horton (1939) 所述的現象不同。提倡將直列

式的筒狀模式轉為一組並、串聯的線性水庫系統 (圖 3-2)，能夠使筒狀模式符合降雨逕流之機制，並且可以得到量的演算結果。

SDF-model 根據李光敦 (1993) 所提出的修正筒狀模式，將直列式的筒狀模式，改為並、串聯的線性水庫系統，並以 SCS 曲線法加入一層入滲層，以計算降雨-逕流量，因混合筒狀模式與 SCS 曲線法，簡稱之為「混合模式」。



資料來源：修改自李光敦 (1993)

圖 3-2 筒狀模式與 SCS 曲線法混合模式的概念圖

(四) 三種降雨逕流模式測試

以一場假定的降雨事件，降雨延時為 24 個小時，降雨強度皆為 70 mm，不考慮鄰前降雨 (antecedent precipitation) 狀況，分別以上述三種降雨逕流模式來模擬地表逕流深度的變化，筒狀模式採用日本第四紀參數 (表 3-1)；曲線法的 CN 值設定為 70，代表森林地的地表覆蓋型態，模擬分析三種降雨逕流的計算結果如圖 3-3 所示。其中，SCS 曲線法和 Tank-SCS CN 的混合模式的計算結果相近大約在第 7 個小時左右，入滲量以趨近於飽和，而

Tank model 曲線則緩面趨於平穩。

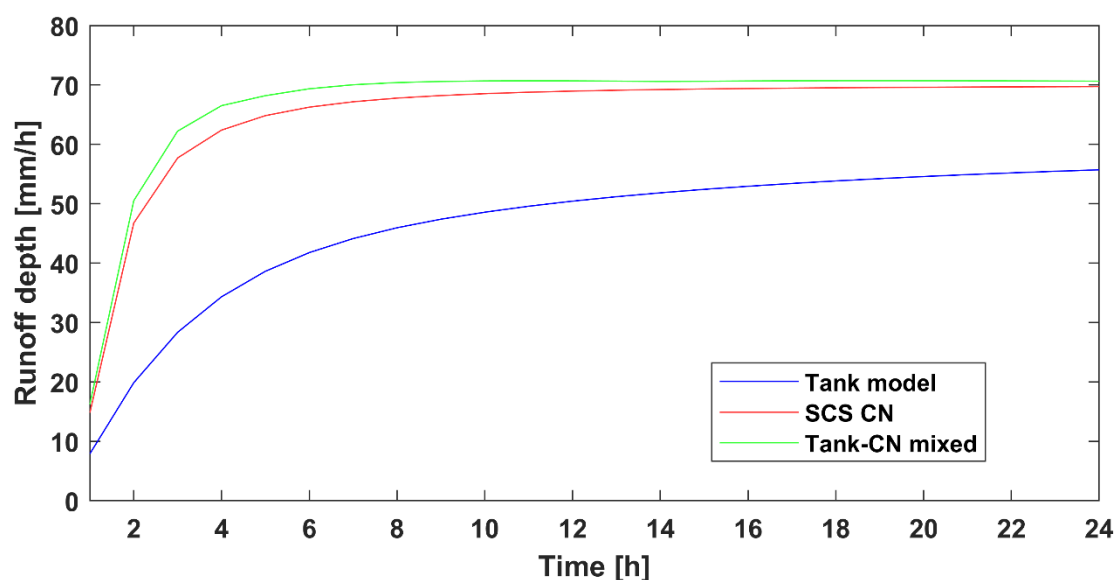


圖 3-3 三種降雨逕流模式測試結果

二、地表逕流模擬

降雨逕流模擬可得到降雨事件，每個網格所產生的逕流深度的歷線，接著，藉由地表逕流模擬去計算各個網格之間地表逕流流動。SDF-model 逕流模擬以數值地形模型的網格為基礎，模擬逕流的流動，首先，以集水面積 0.3 平方公里為閾值 (Huang et al., 2017)，將研究範圍的網格分為河道渠道流與邊坡漫地流兩個部分。

河道的渠道流假設無障礙物，故網格間水流的流動可視為理想渠流型態，假設矩形渠道斷面，其流量可由曼寧公式計算，如公式 3-5 所示：

$$Q_{(j,k)l} = \frac{BH_H}{n_{(j,k)}} \left[\frac{BH_H}{B + 2H_h} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{(Z_H - Z_L) + (H_H - H_L)}{\Delta X} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{公式 3-5}$$

其中， $Q_{(j,k)l}$ 為網格 j,k 在 i 方向流量 [m^3]； $n_{(j,k)}$ 為網格 j,k 曼寧粗糙係數，預設值 0.035； B 為相鄰網格之寬度 [m]； H_H 和 H_L 分別為兩相鄰網格中，水位高者和低者之水深 [m]； Z_H 和 Z_L 分別為兩相鄰網格中水位高者和低者之底床高度 [m]； ΔX 兩相鄰網格之間距 [m]。

網格集水面積小於 0.3 平方公里，則以坡面漫地流計算，方法與渠道流相似，但因漫地流的水深較淺，兩側能量損失可以忽略，其控制方程式可用公 3-6 計算之。

$$Q_{(j,k)l} = \frac{BH_H}{n_{(j,k)}} [H_H]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{(Z_H - Z_L) + (H_H - H_L)}{\Delta X} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{公式 3-6}$$

土砂水分出流量的計算將持續蒐集文獻，選擇計算較為簡便、所需參數較少、適用的出流量模式，目前初步根據地表下含水層之側向流通度 (transmissivity) 與飽和水位深度二成指數函數關係 (Beven and Kirkby, 1979；何瑞益，2011)。

最後，基於質量守恆方程式 (公式 3-7)，計算網格的出流量、入流量、與蓄水量的變化。

$$\Delta S / \Delta t = I - O \quad \text{公式 3-7}$$

其中， I 為流入量 [m^3/s]； O 為流出量 [m^3/s]； ΔS 為蓄水量的變化 [m^3]； Δt 為時間的間距 [sec]。

為測試上 SDF-model 的逕流模擬結果，本計畫先以高雄市新發里的邊坡為測試案例，測試區域的航照正射影像和數值地形模型如圖 3-4 所示，模擬範圍東西寬 2.25 公里，寬 1.25 公里，降雨延時 5 個小

時，降雨強度 110 mm/h，降雨逕流模式採用筒狀模式與 SCS 曲線法混合模式。土砂料源則根據航照影像數化三個崩塌地，土砂料源的深度計算根據 Chen et al. (2013) 提出之適用於臺灣南部山區的關係式為 $V_L = 0.202 \times A_L^{1.268}$ 計算，其他參數如上所述。

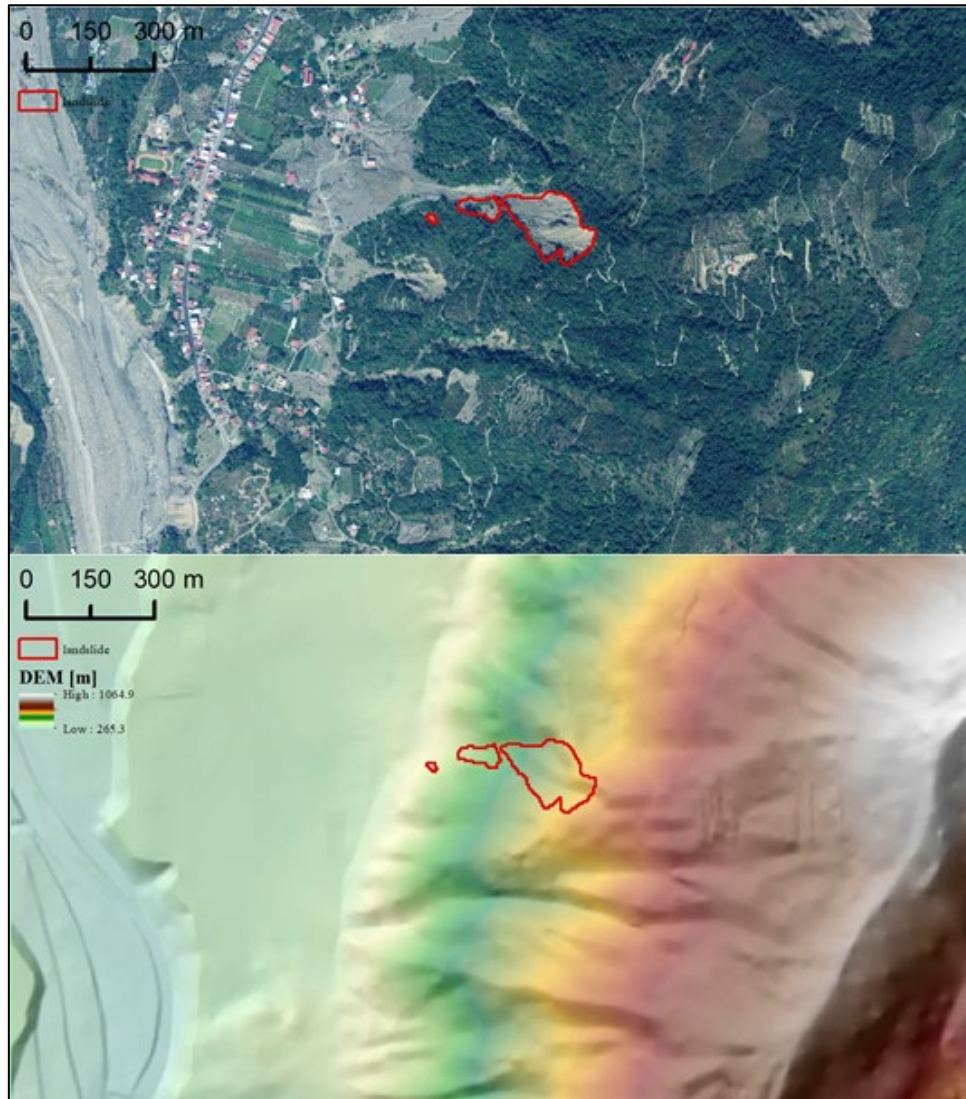


圖 3-4 測試研究區的航照正射影像和數值地形模型

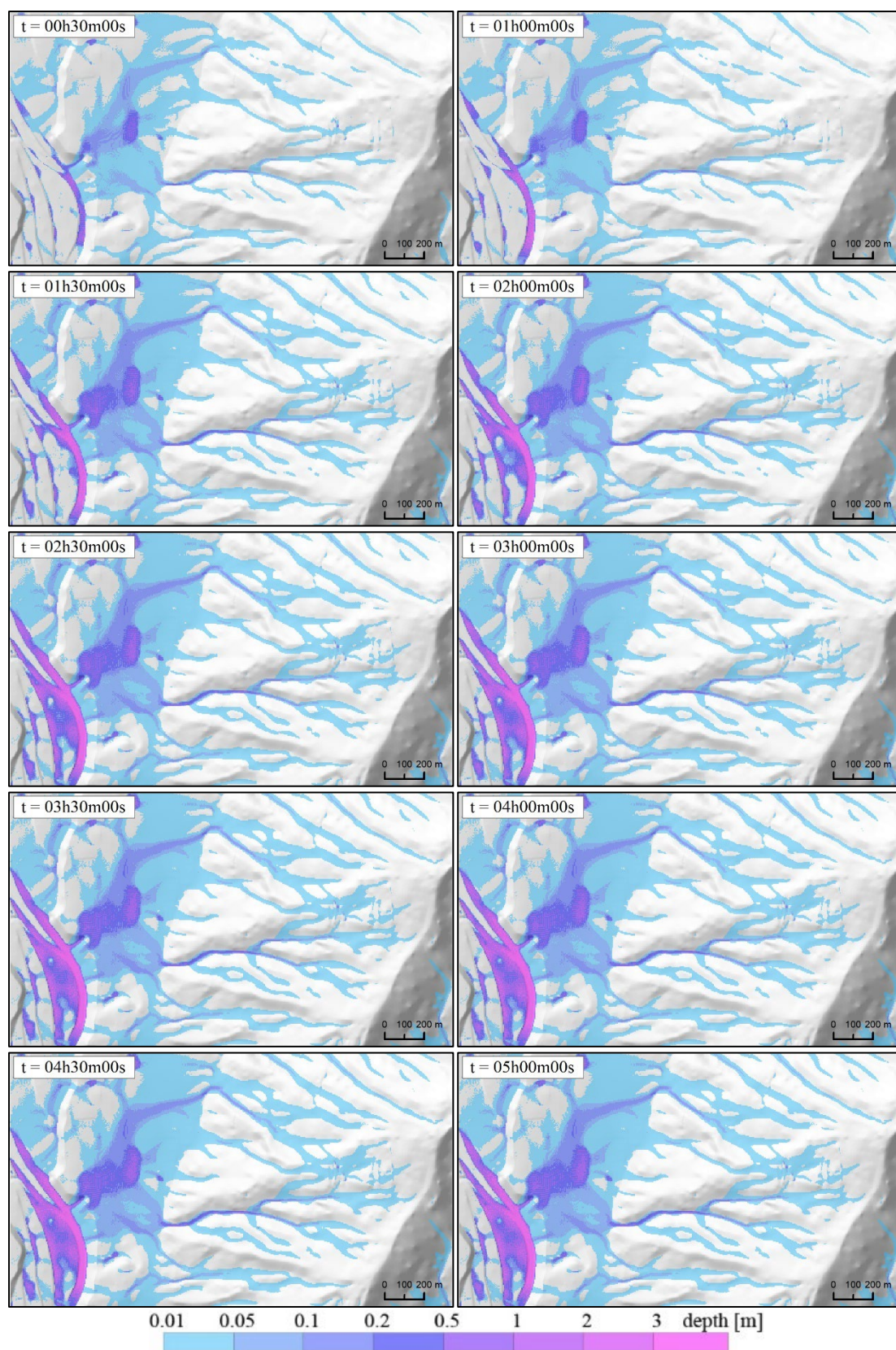


圖 3-5 測試研究區的地表逕流的水深動態變化

三、土石流體積濃度、降伏應力和黏滯係數的變化

SDF-model 在獲得地表逕流的水深動態分布後，便可計算地表逕流改變土石流土體的含水量，以及土石流體積濃度的變化，進而計算其降伏應力和黏滯係數的變化。

由於 SDF-model 的土石流模擬主要基於 Hunt's 模式，假設土石流水分與泥砂均勻混合的流體，故在處理土石流料源與水份接觸時，假設 (1) 土石流料源為鬆散土方，土體的入滲速度相當大，當地表逕流流入土石流料源時，便會吸附於該土石流料源中；(2) 地表逕流的水份吸附於該土石流料源中，水份平均分布在該土石流料源中，水份與土石流料源充分混合形成流體；(3) 當土石流料源的體積濃度低於臨界值 (如 $C_v < 0.25$)，則土石流料源將無法再吸附地表漫地流。

根據上述假設，配合使用者自行輸入的土石流料源深度與模擬的地表逕流深度，流入土石流料源網格 i 的含水量的計算如公式 3-8：

$$Mw_{t,i} = Mw_{t-1,i} + dw_{t,i} \quad \text{公式 3-8}$$

其中， $Mw_{t,i}$ 代表在某一個土石流料源在時間 t 、網格 i 的含水量深度 [m]， $dw_{t,i}$ 為流入某一個土石流體積的逕流深度 [m]。土石流體積濃度的計算如公式 3-9 所示：

$$C_{vt} = \frac{\sum Ms_{t,i}}{\sum Ms_{t,i} + \sum Mw_{t,i}} \quad \text{公式 3-9}$$

其中， C_{vt} 為某一個的土石流料源在時間 t 體積濃度； $Mw_{t,i}$ 代表某一個土石流料源在時間 t 、網格 i 的土砂深度 [m]。

上述的體積濃度計算前，會將沒有相連的土砂料源分開計算，如圖 3-6 測試模擬所示，初始條件共有三處土砂料源，隨著降雨產生地表逕流，地表逕流流動至土砂料源中，分別改變三處土砂料源的平均

含水量深度與體積濃度。

在獲得土砂料源的體積濃度後，SDF-model 採用 Quan Luna (2011) 的參數，得到體積濃度對應降伏應力 (τ_y) 和動力黏滯係數 (η) 之間的關係 (公式 3-9 和公式 3-10)，且運動黏滯係數 (ν) 為動力黏滯係數與流體密度的比值 (ρ)，如公式 3-12：

$$\tau_y = 0.0345_1 e^{20.1 * C_v} \quad \text{公式 3-10}$$

$$\eta = 0.00283_2 e^{23.0 * C_v} \quad \text{公式 3-11}$$

$$\nu = \eta / \rho \quad \text{公式 3-12}$$

根據上述公式，計算得到各個土砂料源或土石流的降伏應力和運動黏滯係數，如圖 3-6 所示，若設定土石流體積濃度介於 0.25 至 0.6 之間，其降伏應力介於 5.2 Pa 至 5962 Pa 之間；運動黏滯係數介於 $6.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 至 $1.4 \text{ m}^2/\text{s}$ 之間，其數值變化範圍高達 3 - 4 個級距，運動黏滯係數範圍小於 Hunt (1994) 所建議的 $0.23 \text{ m}^2/\text{s}$ 至 $5.3 \text{ m}^2/\text{s}$ 之間，因此，建議也可採用 Hunt (1994) 的建議的運動黏滯係與土石流體積濃度的建立迴歸關係，或根據現地材料試驗得到迴歸關係。

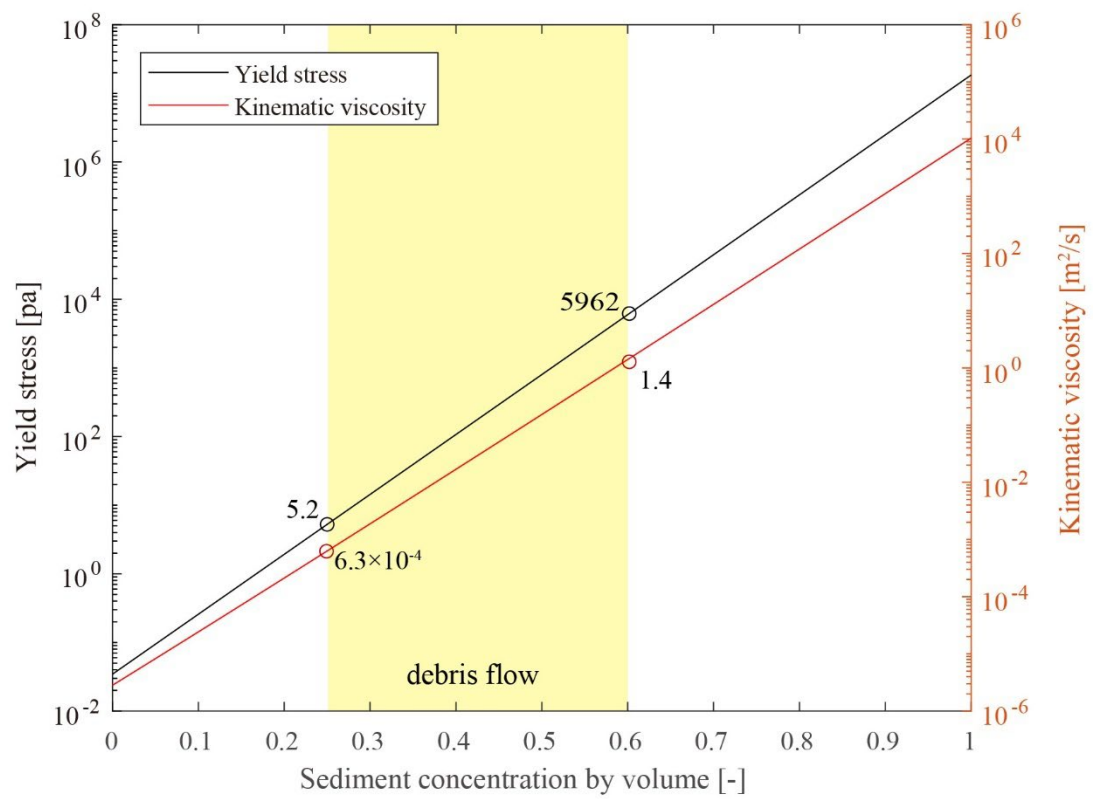


圖 3-6 體積濃度對應降伏應力和運動黏滯係數之間的關係

SDF-model 在計算土石流流動時，若土砂料源或土石流的剪應力小於降伏應力，則停止流動。將計算運動黏滯係數帶入公式 2-1，可計算土石流的流速與流量。

本計畫將計算流程寫入 SDF-model，輸入三處不同大小的土砂料源，料源深度分別為 0.92 公尺、1.81 公尺、和 2.92 公尺，模擬地表逕流與土砂料源的含水量水深和範圍動態變化 (圖 3-7)，以及土石流深度動態變化模擬結果 (圖 3-8)。

從圖 3-7 的土砂料源的含水量深度變化可以得知，面積較小的土砂料源，受到上游地表逕流提供水份，含水量深度增加速度較快；反之，面積較大的土砂料源，增加速度越慢。而且面積較小的土砂料源，其土砂深度通常較淺，其體積濃度下降速度也比較快，導致最小土砂料源因體積濃度、降伏應力、和運動黏滯係數的下降至臨界值，在 01h30m 發生流動，另外兩處面積較大的土砂料源，則分別在約 03h30m 和 04h30m 才發生流動。

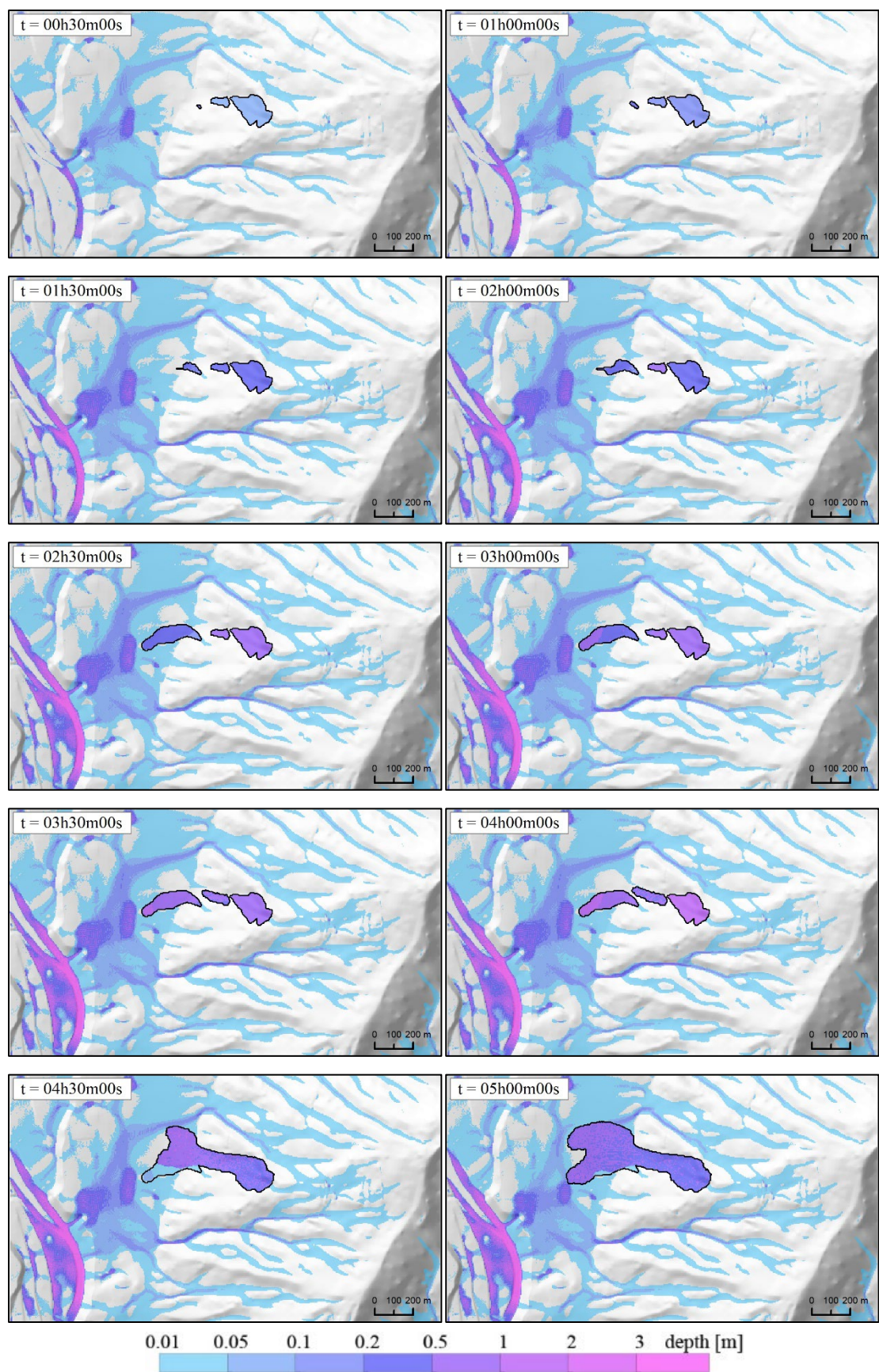


圖 3-7 測試區的地表逕流和土砂料源的水深和範圍動態變化

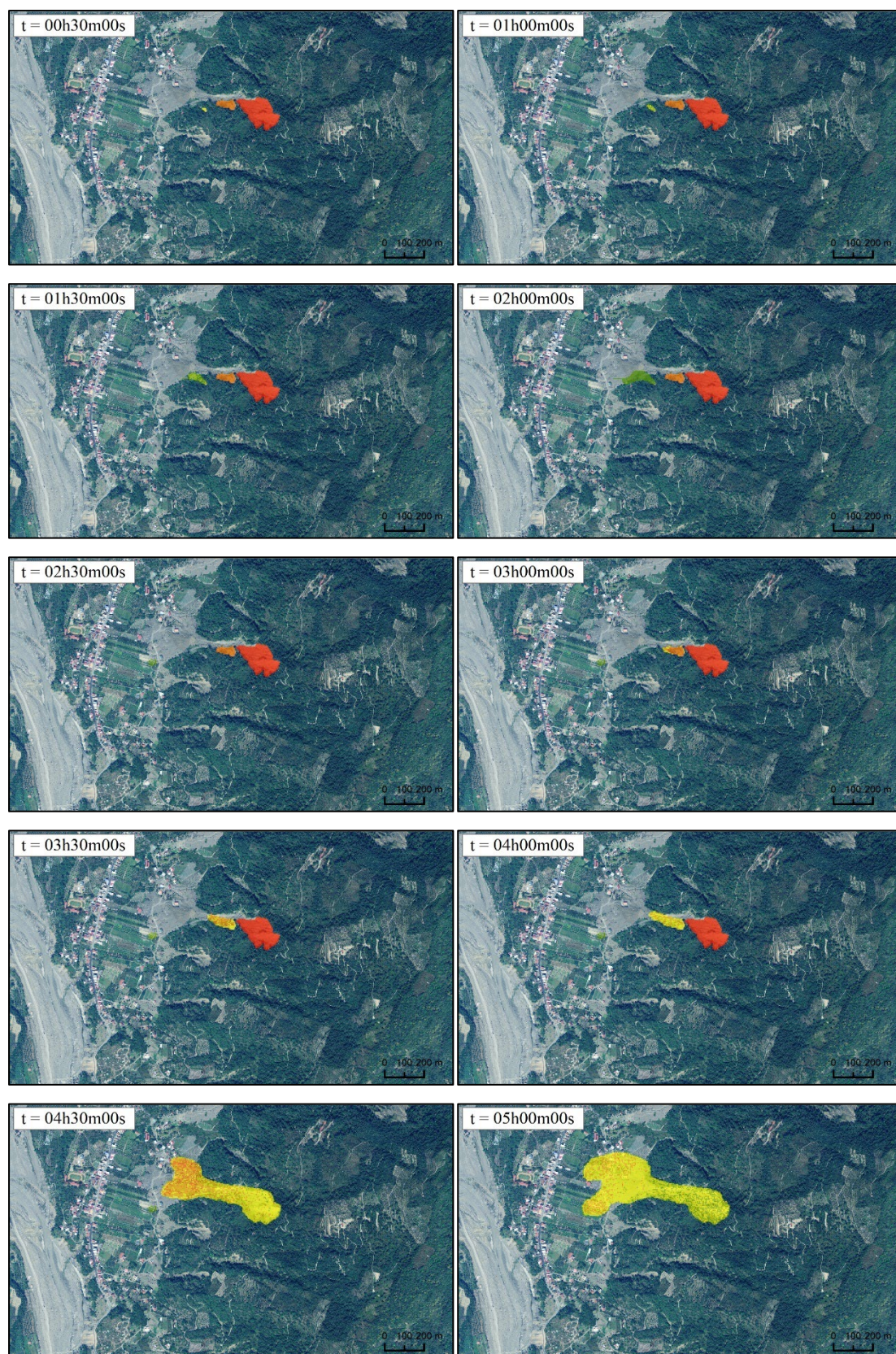


圖 3-8 測試區的土石流深度的動態變化

圖 3-9 為最大土砂料源的體積濃度與黏滯係數變化歷線，顯示體積濃度和運動黏滯係數隨著時間下降，在 04h14m 左右，體積濃度降至約 0.71，運動黏滯係數降至 $15.56 \text{ m}^2/\text{s}$ ，該土砂料源開始流動，在 04h19m 左右與下方土石流堆積混合，使得體積濃度和運動黏滯係數產生明顯變化，而最終土石流持續往下邊坡流動，堆積於平坦地形上。檢視土石流深度與影像範圍的模擬結果，與該場事件實際影像範圍相似。

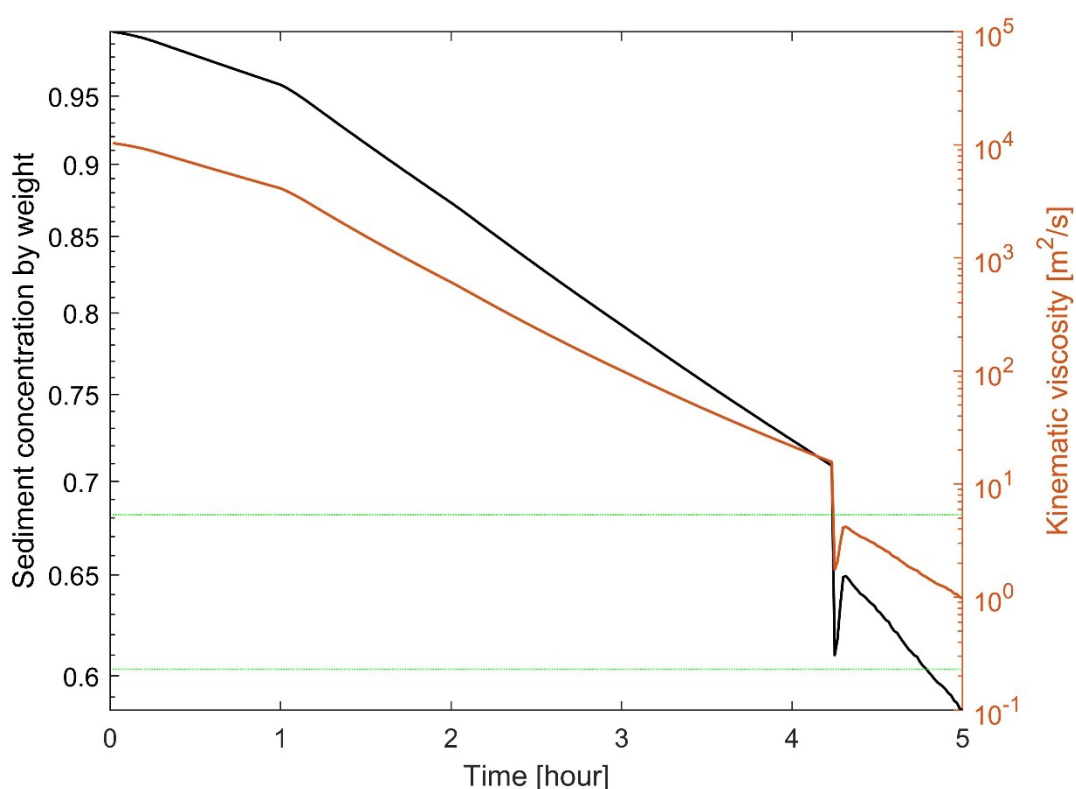


圖 3-9 最大土砂料源的體積濃度與黏滯係數變化歷線

根據上述模擬結果，本計畫已將降雨逕流模式，以及對應的體積濃度、運動黏滯係數、降伏應力的動態變化的公式納入 SDF-model 模式中，且能夠實際模擬出地表漫地流與土石流動態變化。藉由上述土石流動態變化也發許多有趣現象，例如：小型土砂料源會比大型土砂料源更早產生流動；不同崩塌轉換成為土石流流動具有相當大的時

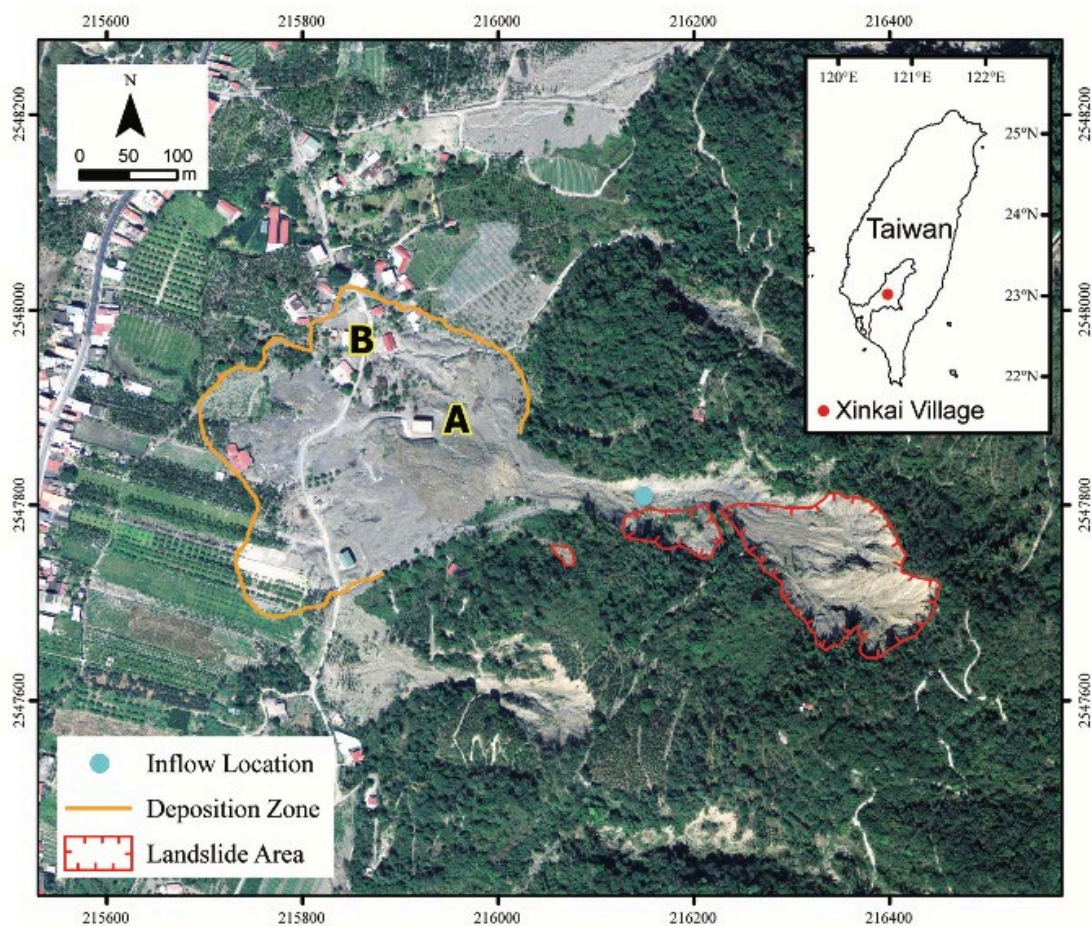
間差異；土石流的流動時間可能長達數十分鐘等。然而，SDF-model 和逕流模式將許多複雜物理機制加以簡化，且參數序有許多不確定性，所以模擬結果仍有許多不確定性，使用時需要特別小心謹慎。但也因為機制的簡化，使得 SDF-model 能夠快速得到模擬結果，以上述模擬 5 小個小時延時降雨，所需電腦計算時間約為 15 分鐘（備註：電腦配備的中心處理器 AMD R9 5950x，演算時距：1 秒）。

第二節 模擬結果之驗證與分析

本計畫將以 (一) 98 年莫拉克颱風於高雄新發里的土石流事件、(二) 110 年盧碧颱風於玉穗溪土石流事件、(三) 111 年尼莎颱風於汐止鵠鵠崙土石流，來進行模式分析和驗證。本計畫分別使用原始的 SDFmodel (SDFmodel original，簡稱為原始 SDF)，以及本計畫開發整合降雨-逕流和動態土砂參數的 SDFmodel 模式 (SDFmodel water，簡稱為動態參數 SDF)，分別模擬分析。關於上述三場土石流事件與蒐集資料說明如下：

一、莫拉克颱風於高雄新發里土石流

在 2009 年莫拉克颱風帶來破紀錄的雨量，鄰近雨量站所觀測的 5 日累積雨量達 2,398 mm，於 8 月 9 日上午 6 點左右，新發里東側邊坡發生土石流 (圖 3-10 和圖 3-11)，土石流扇掩埋河階上 5 棟房舍，造成 5 人死亡，6 人受傷，以及約 15 公頃的農田被毀 (水土保持局，2010)。根據衛星影像判釋結果，土石流的肇因為東側邊坡產生三處崩塌，面積分別為 21,183 m²、3,562 m²、與 285 m² (水土保持局，2010)，總土砂堆積量約為 13 萬立方公尺 (水土保持局，2010)，根據現場房舍被掩埋的高度，土石流扇堆積高度可達 6 公尺，土砂粒徑約為 20 公分。由於土石流材料與扇狀堆積皆保留於平坦的河階面上，未被河水侵蝕而破壞，適合用於驗證土石流模式。



圖片來源：Wu et al. (2013)

圖 3-10 莫拉克颱風於高雄新發里土石流災害



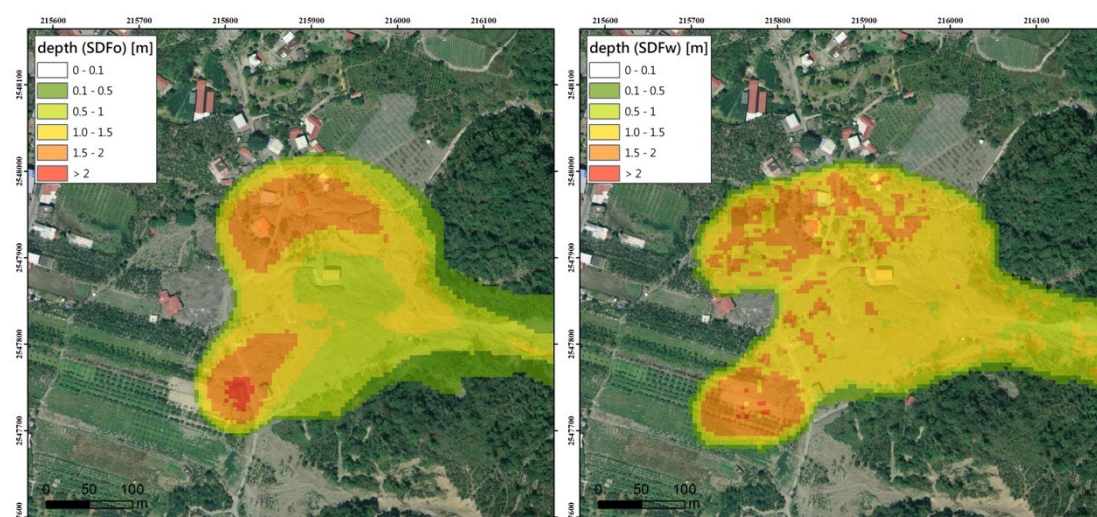
圖片來源：水土保持局重大土砂災害災例最速報 (2010)

圖 3-11 莫拉克颱風於高雄新發里土石流災害照片

兩種模式的模擬皆採用相同數值地形模擬，崩塌面積根據崩塌面積與體積公式 $Volume = 0.202 \times Area^{1.268}$ (Chen et al., 2013)，崩塌體積共計 6.7 萬立方公尺，原始 SDF 的運動黏滯係數 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ ，土石流體積濃度 0.603，動態參數 SDF 的降雨-逕流與土石動參數如第三章第一節所述。

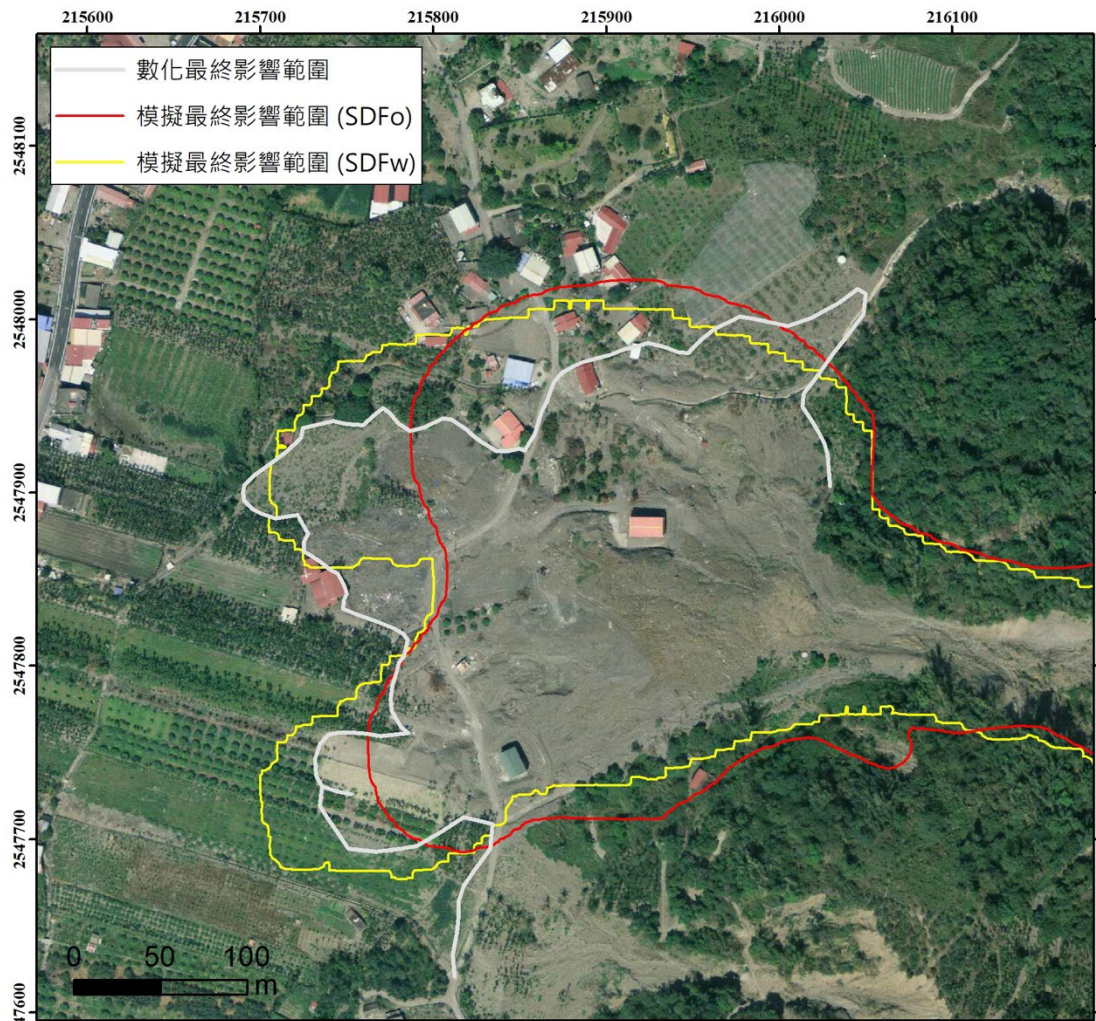
圖 3-12 為高雄新發里土石流災害模擬結果，左上為原始 SDF 終模擬土石流深度，總模擬延時為 76 秒；右上為動態參數 SDF 為終模擬土石流深度，總模擬延時為 5 個小時。此外，動態參數 SDF 模擬的影響範圍大於原始 SDF，且動態參數 SDF 模擬的土砂深度較為平均，而原始 SDF 的模擬的土砂深度集中於土石流的前端。

圖 3-12 為高雄新發里土石流災害驗證結果，原始 SDF 的模擬結果低估實際土石流的影响範圍，動態參數 SDF 的模擬結果只有在土石流堆積扇的北側和南側略有低估的現象，整體模擬結果與實際土石流影响範圍相近。



備註：左圖為原始 SDFmodel (original)的最終模擬土石流深度；右圖為動態參數 SDFmodel (water)的最終模擬土石流深度。

圖 3-12 高雄新發里土石流災害模擬結果



備註：影像中土石流模擬（紅色為原始 SDF，黃色線段為動態參數 SDF）和觀測（白色線段）的影響範圍。

圖 3-13 高雄新發里土石流災害驗證結果

二、盧碧颱風於玉穗溪土石流

110 年盧碧颱風為台灣南部帶來豪雨，該場降雨累積雨量高達 2,216mm，是該區自 98 年莫拉克颱風最大的降雨事件，重新驅動 (re-active) 玉穗溪上游的 98 年莫拉克颱風所殘留的舊崩塌，光是此大規模崩塌產生超過一千萬立方公尺的土砂量 (圖 3-12)，崩塌土砂與水混合成後形成土石流，土石流動到五公里外的玉穗溪下游出口處，堆積出 22 公尺厚的沖積扇 (水土保持局，2021；圖 3-13)，造成沖毀的

南部橫貫公路與明霸克露橋，以及高雄梅山等部落道路中斷，且仍有大量土砂堆積於大規模崩塌地的坡腳玉穗溪土石流事件的發生過程與土砂變化有較為完整的觀測資料，土砂在玉穗溪和荖濃溪匯流口處堆積完整的土石流扇，且上游大量土砂堆積在上邊坡，這些特性將有助於驗證土石流模式於上游野溪和下游河道的表現。

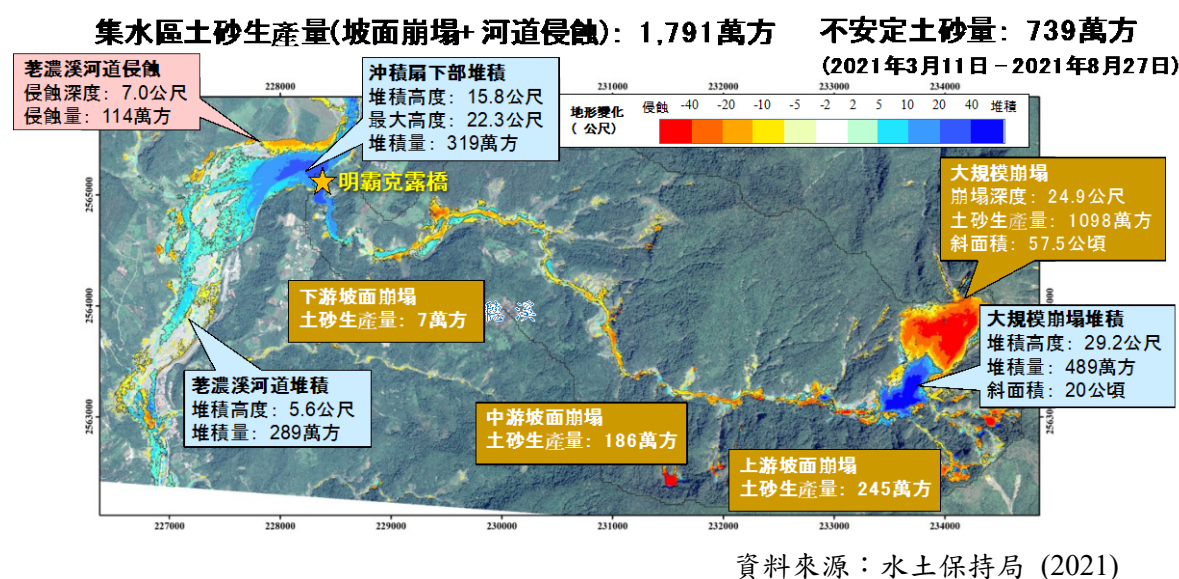


圖 3-14 盧碧颱風於玉穗溪土石流的土砂變化量



圖片來源: 水土保持局重大土砂災害災例最速報 (2021)

圖 3-15 盧碧颱風於玉穗溪土石流災害照片

圖 3-16 顯示原始 SDF 的動態模擬結果，模擬假設模擬範圍的崩塌土砂已經與水完全混合，故所有崩塌土砂一起往下游移動，在第 200 秒左右，下游崩塌土砂所形成的土石流已經抵達集水區出口；到 1200 秒左右，上游大規模崩塌的土砂才抵達集水區出口；到 1200 秒之後，上游大規模崩塌的土砂逐漸往下游處移動，導致玉穗溪下游河道淤積嚴重，集水區出口的沖積扇逐漸發育，部分土砂逐漸順著荖濃溪主流往下游移動。

動態參數的模擬根據降雨逕流計算的崩塌土砂含水量，進而計算土砂的運動黏滯係數和降伏應力，然而，由於無法獲得各崩塌土砂初始含水量，在此模擬皆假設初始土砂含水量為 15%，降雨量為每小時 110 毫米。圖 3-17 顯示動態參數 SDF 模擬結果，在第 30 分鐘左右，下游崩塌土砂已經開始移動，至第 1 小時左右，土砂已經運移到集水區出口，但位於上游的大規模崩塌僅有部分土砂往下移動，絕大多數的土砂仍位於邊坡上，至第 2 小時 40 分左右，因大規模崩塌土砂含水量上升，土石流開始流動，至第 4 小時左右，大規模崩塌土砂已經移動到集水區出口，堆積形成沖積扇。

圖 3-18 為下游沖積扇的土石流模擬與觀測比對結果，原始 SDF 和動態參數 SDF 的模擬結果和觀測結果相當接近，但是沖積扇的模擬結果範圍較觀測結果較大，往荖濃溪主流下游測流動的面積較大，且沖積扇的最大高度較觀測低。

圖 3-19 上游大規模崩塌的土石流模擬與觀測比對結果，原始 SDF 和動態參數 SDF 的模擬結果皆無法反映上游大規模崩塌土砂殘留的現象，模擬結果僅有少量的土砂堆積於大規模崩塌的坡腳與野溪。

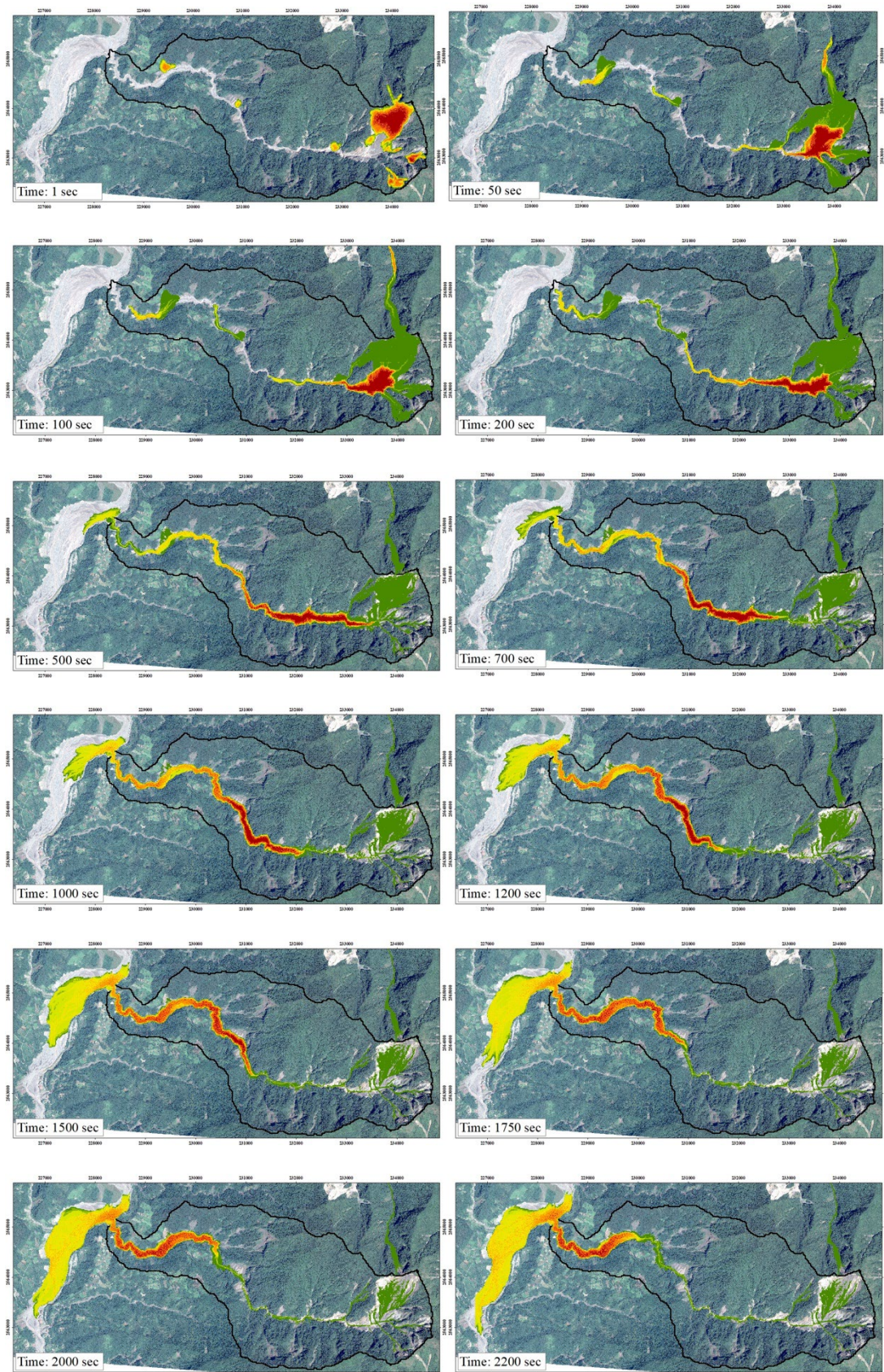


圖 3-16 原始 SDFmodel 盧碧颱風於玉穗溪土石流模擬結果

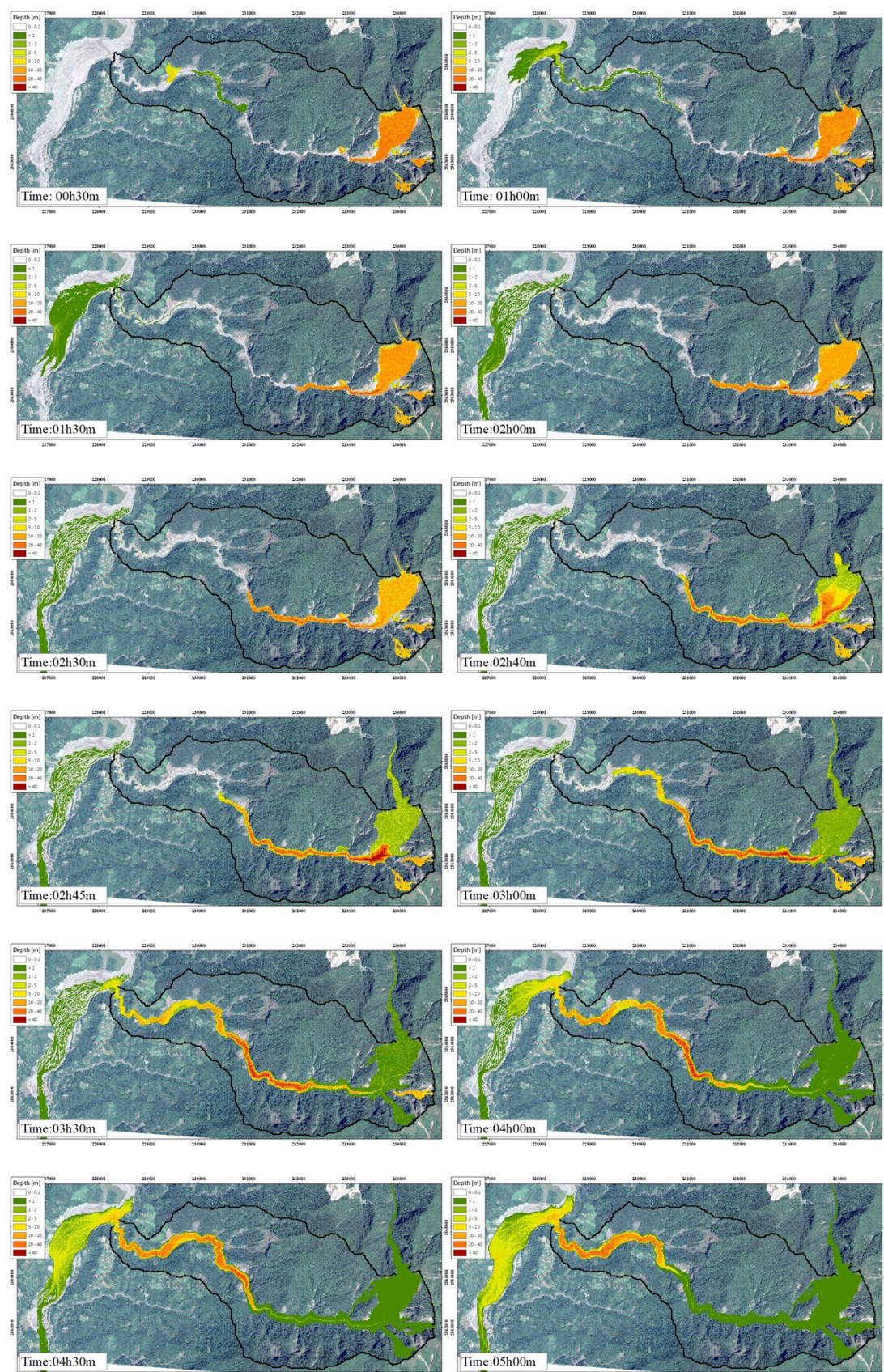
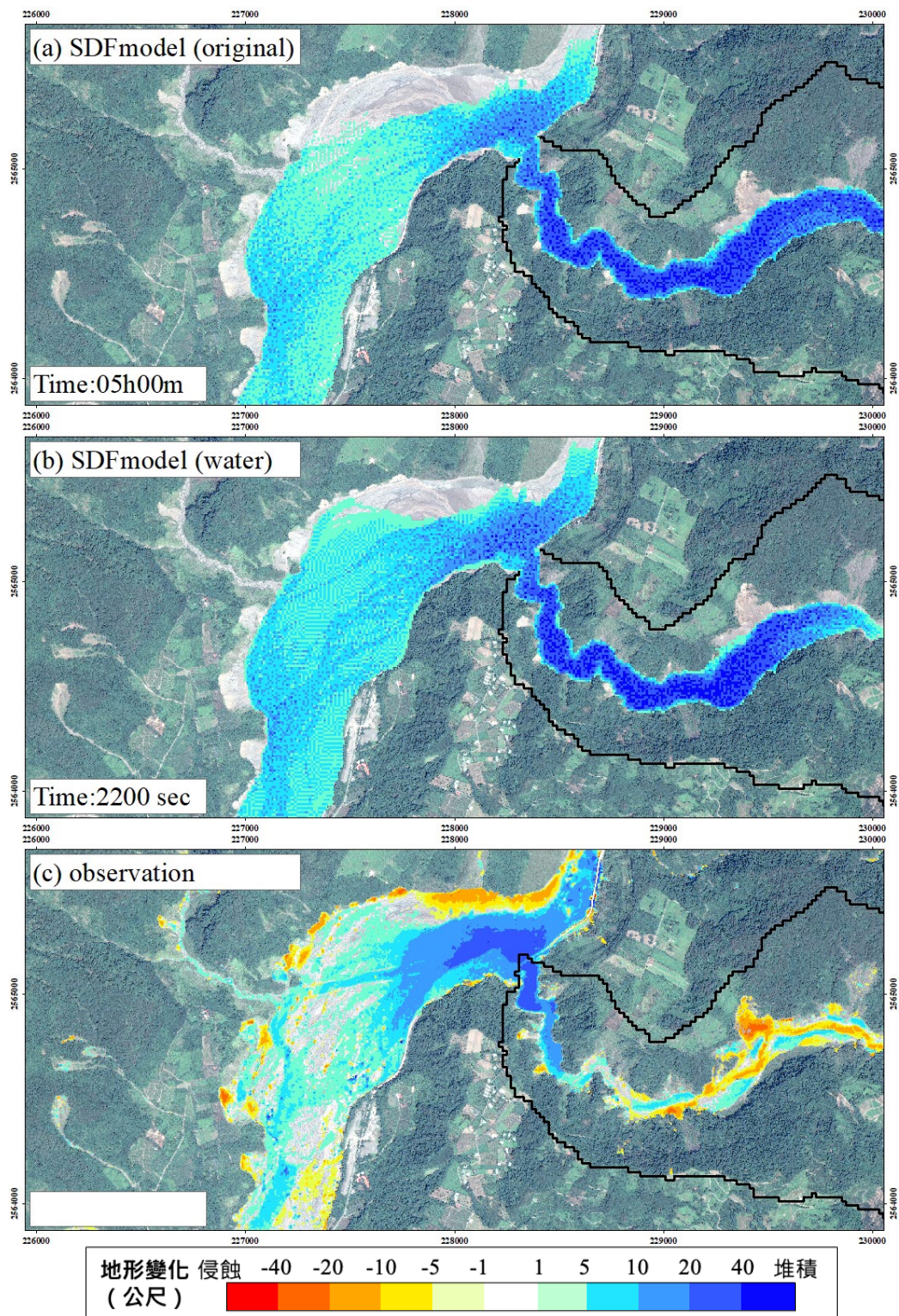
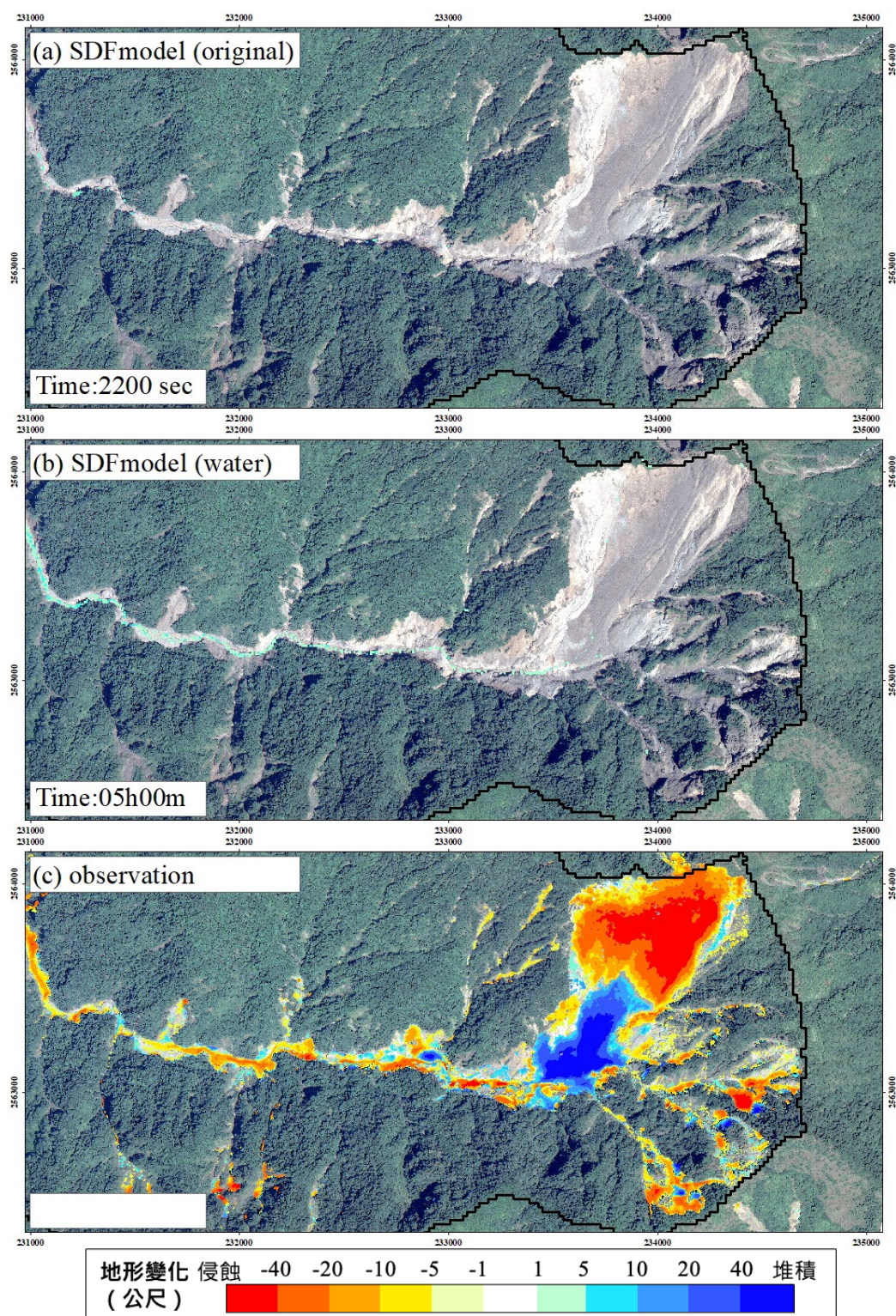


圖 3-17 降雨-逕流 SDFmodel 盧碧颱風於玉穗溪土石流模擬結果



備註：(a) SDFmodel (original)的最終模擬土石流深度；(b) SDFmodel (water)的最終模擬土石流深度；(c) 觀測土石流的侵蝕和堆積深度。

圖 3-18 玉穗溪下游沖積扇的土石流模擬與觀測結果



備註：(a) SDFmodel (original)的最終模擬土石流深度；(b) SDFmodel (water)的最終模擬土石流深度；(c) 觀測土石流的侵蝕和堆積深度。

圖 3-19 玉穗溪上游的土石流模擬與觀測結果

三、尼莎颱風於汐止鵠鵠崙土石流

111 年 10 月 15-16 日，中度尼莎颱風侵襲北台灣，因東北季風及尼莎颱風之共伴效應，挾帶之連日豪雨，在新北市汐止區山坡地產生許多的崩塌，特別是鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區，同時也是土石流潛勢溪流（新北市-汐止區-D003），於邊坡產生兩處崩塌（水土保持局，2023），現場土石流災害照片如圖 3-14 所示。

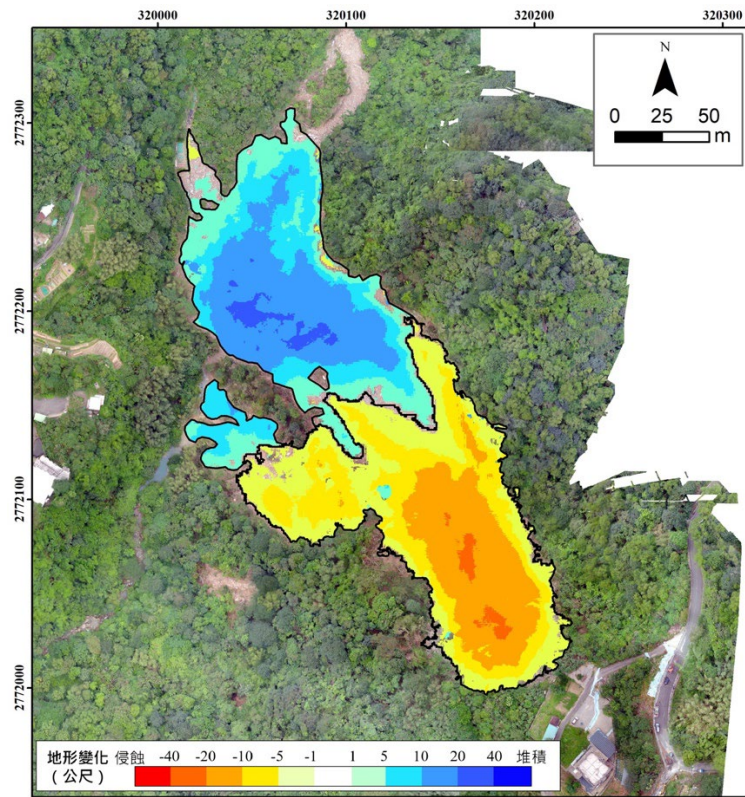
根據現地調查結果顯示，鵠鵠崙面積約 33,000 平方公尺，平均崩塌平均深度約 2.39 公尺，崩塌體積約 7.9 萬立方公尺；堆積範圍面積約 16,500 平方公尺，堆積平均高度約 4.79 公尺，體積為 7.9 萬立方公尺。

以利用 2010 年光達產製的數值地形模型 (DEM)，與水保局提供無人機攝影量的數值地表模型 (DSM) 相減，計算的崩塌的投影面積為 14,197 平方公尺，平均崩塌深度為 7.8 公尺，崩塌體積共計 11.1 萬立方公尺；堆積區域的投影面積為 12,876 平方公尺，平均崩塌深度為 8.7 公尺，崩塌體積共計 11.3 萬立方公尺。



圖片來源：水土保持局重大土砂災害災例最速報 (2022)

圖 3-20 汐止鵠鵠崙土石流事件現地照片



圖片來源：本計畫繪製

圖 3-21 汐止鵠鵠崙土石流事件崩塌深度與堆積體積

圖 3-22 顯示汐止鵠鵠崙土石流原始 SDF 的模擬結果，假設模擬範圍的崩塌土砂已經與水完全混合，故所有崩塌土砂一起往下游移動。至第 50 秒左右，崩塌土砂已經移動到下游坡腳處堆積，但土砂仍會持續緩慢往下移動，至第 200 秒左右，土砂往下游河道運移。

圖 3-23 為動態參數 SDF 模擬結果，在此模擬皆假設初始土砂含水量為 15%，降雨量為每小時 110 毫米。模擬結果顯示，在第 1 小 30 分鐘前，鵠鵠崙崩塌的含水量仍不足以驅動土石流移動，在第 1 小 30 分鐘至 36 分鐘，鵠鵠崙崩塌往下邊坡移動，之後隨著降雨增加含水量，土砂仍持續往下游河道移動。

圖 3-24 是汐止鵠鵠崙土石流模擬與觀測結果的對比，原始 SDF 模擬在第 50 秒和動態參數 SDF 的第 1 小時 35 分鐘，對比觀測結果最為接近，原始 SDF 模擬土砂分布較為集中，動態參數 SDF 的模擬土砂分布分散，已有部分的土砂移動到下游。

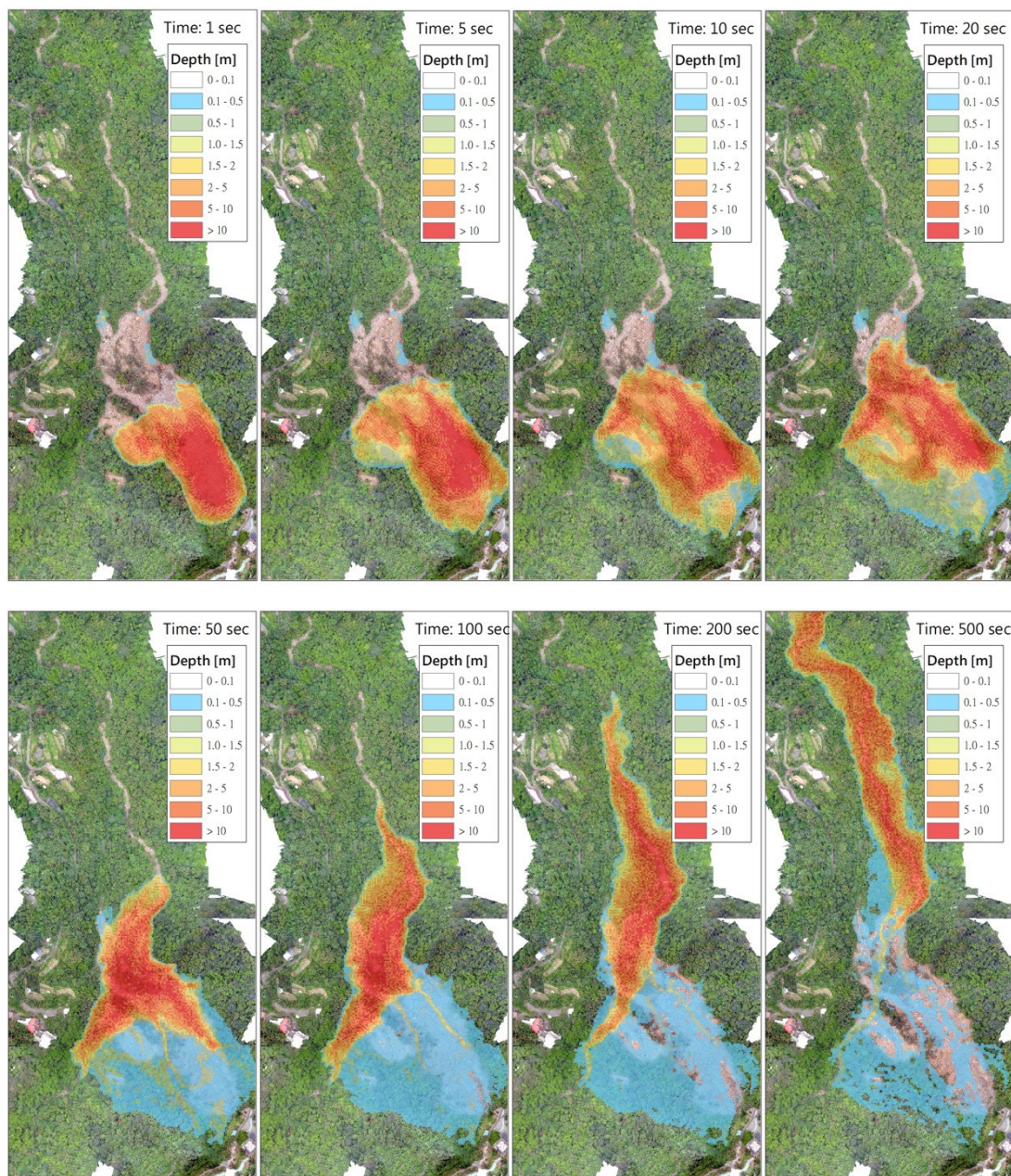


圖 3-22 原始 SDF 於汐止鵠鵠崙土石流模擬結果

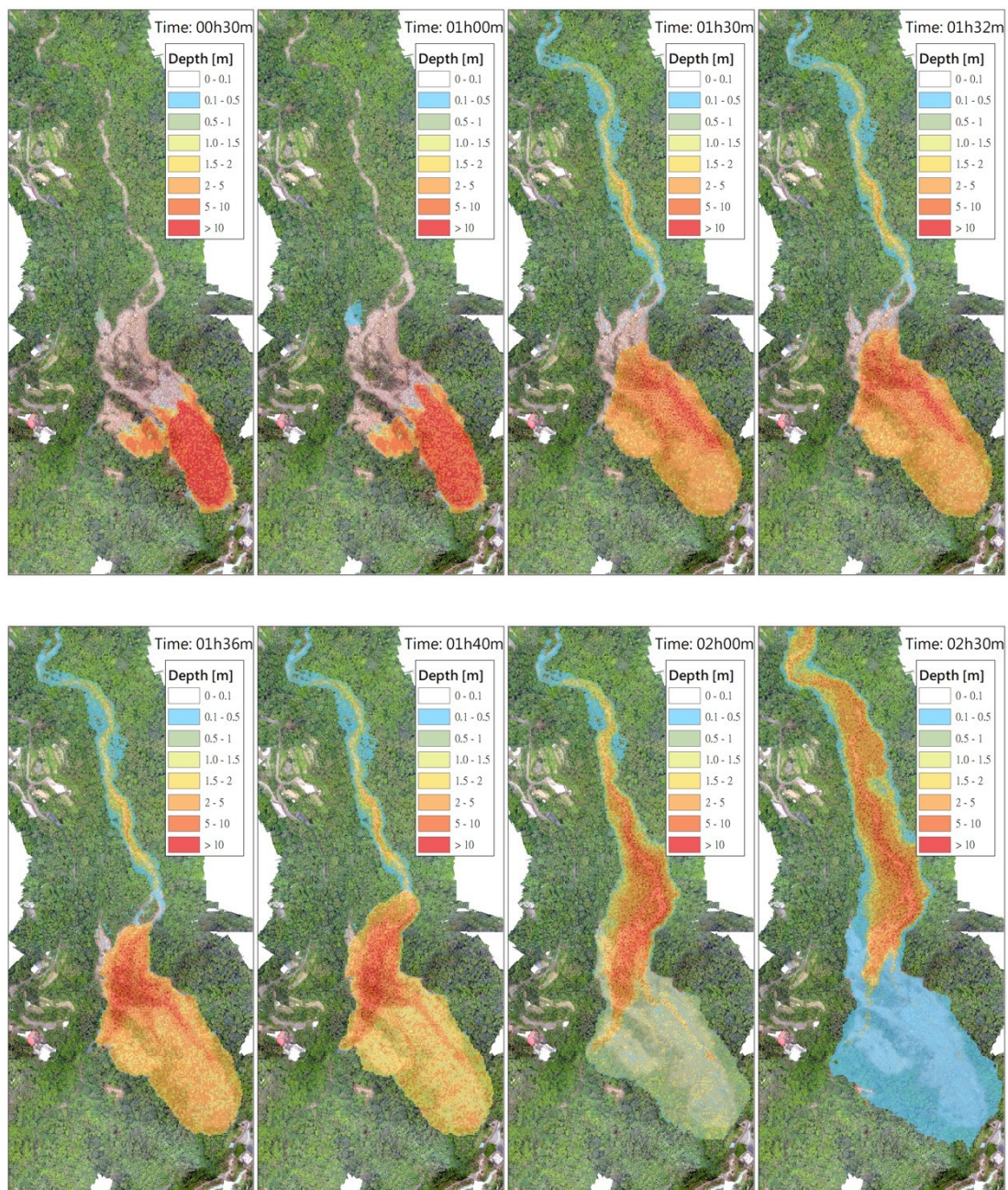
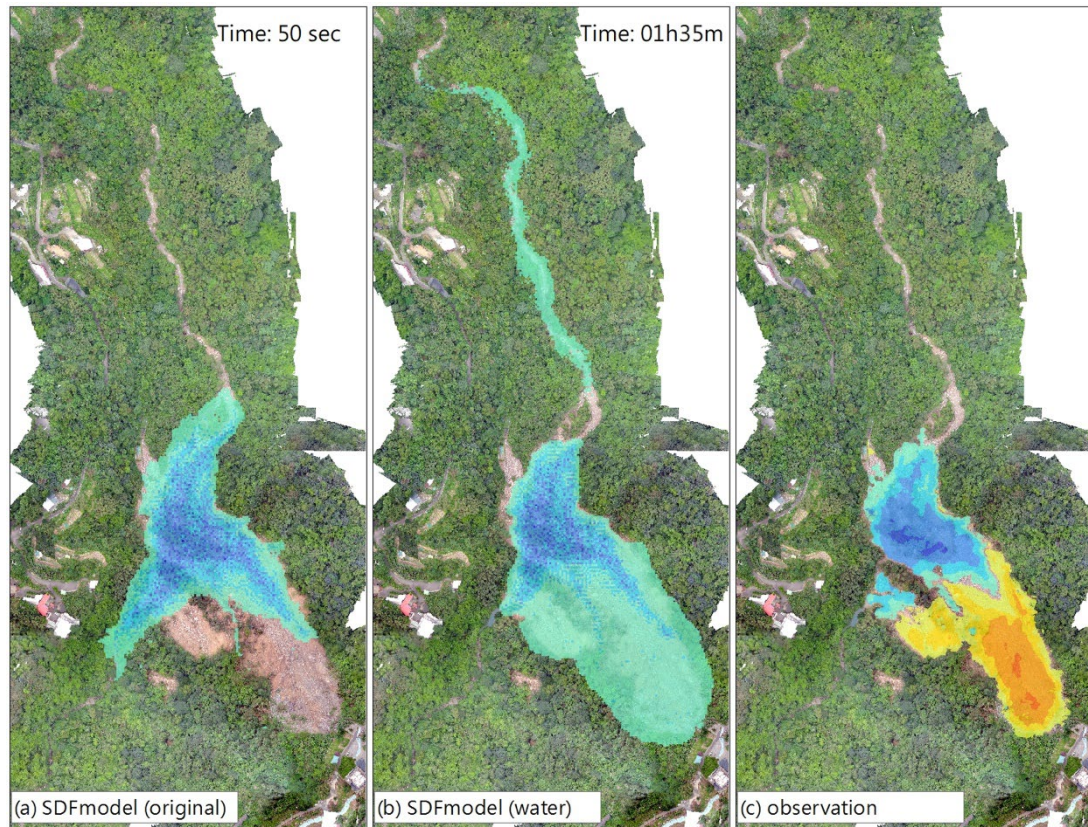


圖 3-23 動態參數 SDF 於汐止鵠鵠崙土石流模擬結果



備註：(a) 原始 SDFmodel (original) 的第 50 秒土石流深度；(b) 動態參數 SDFmodel (water) 的 01h40m 的土石流深度；(c) 觀測土石流的侵蝕和堆積深度。

圖 3-24 汐止鵠鵠崙土石流模擬與觀測結果

綜合上述的模擬與驗證結果，本計畫所開發的動態參數 SDF 模式，能夠模擬土砂與水混合的土石流參數變化，進而推測土石流開始運移的時間，而非崩塌土砂在同一個時間全部往下游移動，且模擬結果能夠反映出土砂運移的過程。然而，由於崩塌土砂的土砂土壤力學和含水量條件，以及土砂與水混合後轉變成為土石流的動態變化過程，其作用過程仍然相當複雜，模擬過程必然有許多的不確定性。

由於 SDF 模擬需要符合數值穩定條件（類似於 Courant–Friedrichs–Lewy condition），時間解析度與空間解析度是相依。因為 DEM 解析度與最小演算時距（delta-T）成正比，如 20 公尺 DEM 的演算時距需小於 0.5 秒，5 公尺 DEM 演算時距需小於 0.125 秒。因此，在相同地理範圍下，若 DEM 解析度加密 2 倍，則所需的計算時

間必須增加 8 倍（DEM 網格增加 2x2 倍，演算次數增加 2 倍）。

以上述玉穗溪流域的模擬，使用 10 公尺解析度的數值地表模型，演算時距為 0.2 秒時，模擬時間共 5 個小時。一般的桌上型電腦所需總共計算的時間約為 55 分鐘。因此，動態參數 SDF 模式的模擬時距較長，通常為數小時到數十小時的降雨歷程，所需的模擬時間較長，用於土石流災害即時模擬可能較為受限。故建議使用者應該根據模擬與分析目的與情境，選用適當空間解析度的 DEM 和模擬方法。

第三節 單機版 SDF-model 圖形化介面開發

本計畫利用 Matlab App Designer 設計與開發單機版 SDFmodel 的圖形化介面（如圖 3-25 所示），共分為五個主要的頁籤，分別為：

- (1) DEM：用於讀取與編修數值地形模型，如於 DEM 增加防治工程等；
- (2) Mssrc：用於讀取與編修崩塌土砂量；
- (3) Parameters：用於設定模式參數；
- (4) Simulation：展示模擬動態變化過程；
- (5) Output：輸出 GIS 或 Google Earth kml 格式。

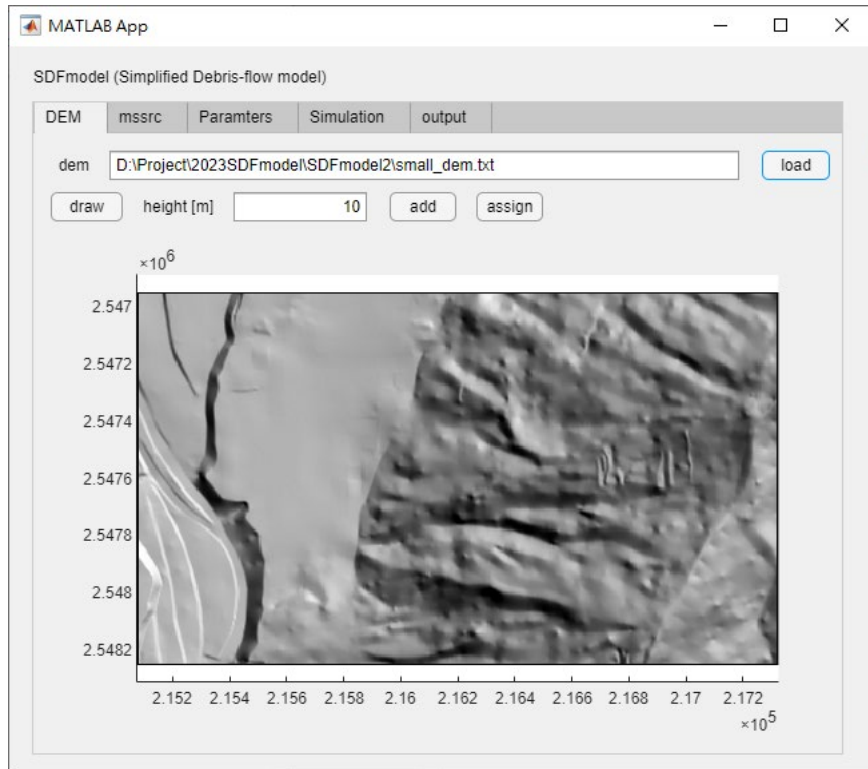
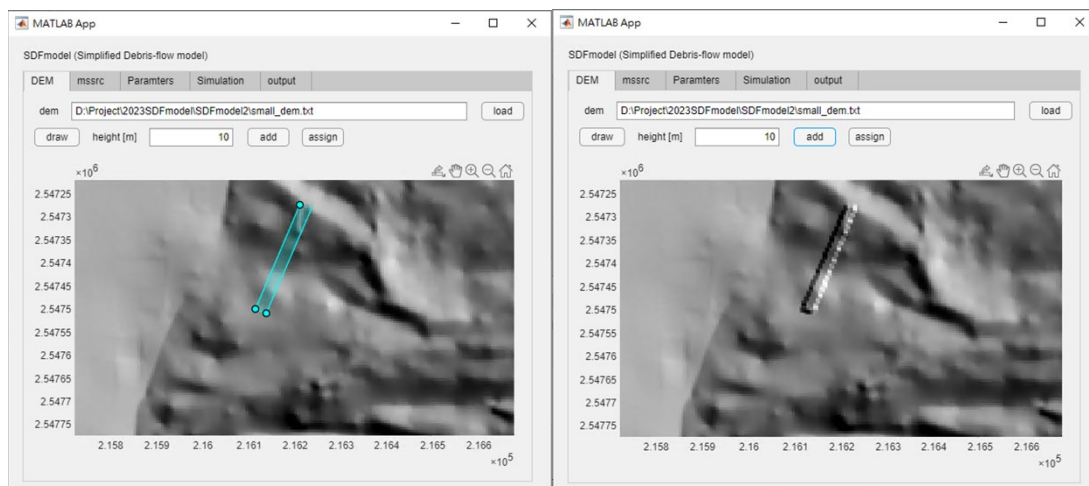


圖 3-25 單機版 SDF-model 介面

圖 3-26 展示 DEM 的編修過程，若要分別在野溪上增加一個 10 公尺的防砂壩，並且在下游堆積處增加一處深 10 公尺的沉砂池，點選 draw 繪製防治工程的位置，必且設定該設施的高度，即可修改與編修數值地形模型，能夠初步、簡易地模擬防治工程對於土石流的效益。



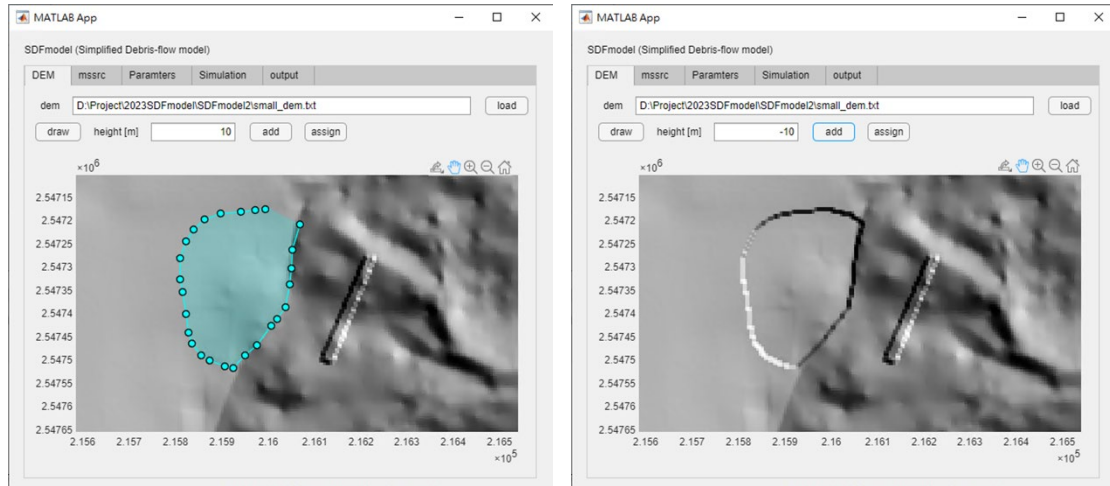


圖 3-26 單機版 SDFmodel 增加防砂壩與沈砂池修改 DEM

圖 3-27 展示為讀取崩塌土砂資料的介面，使用者可以讀取既有的崩塌土砂量，可以顯示邊修後的 DEM 與崩塌土砂的位置，使用者可以在 DEM 上自行圈繪崩塌土砂並設定土砂深度。

圖 3-28 展示為設定模式參數的介面，使用者選擇使用原始 SDF（original）或動態參數 SDF（with water and dynamic viscosity），當使用者選擇不同的 SDF 模式，下方的參數列表會根據使用者選擇而改變。

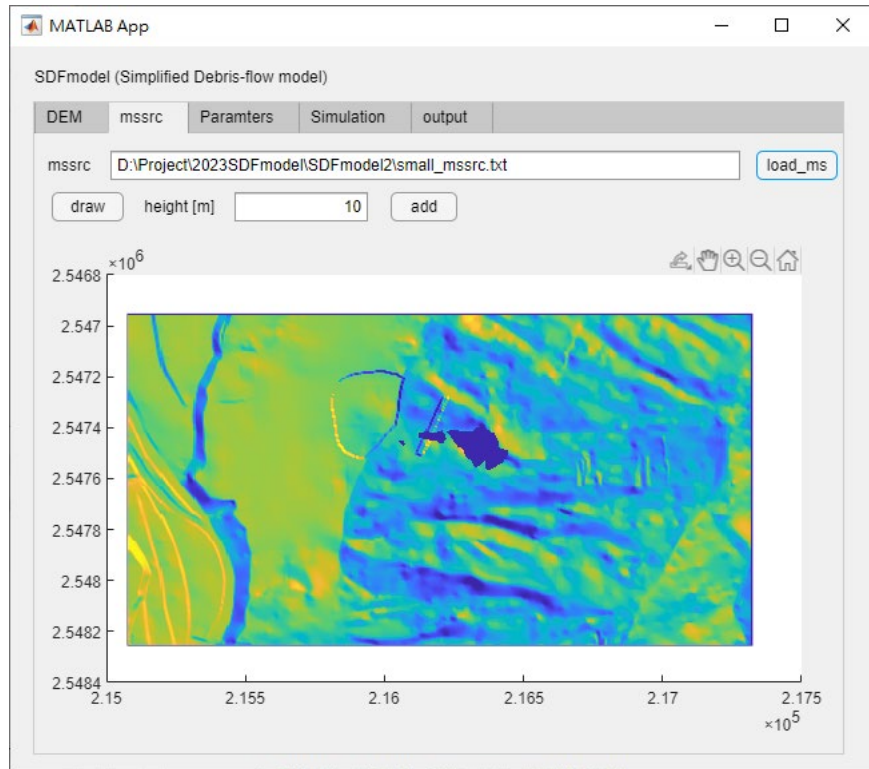


圖 3-27 單機版 SDFmodel 讀取崩塌土砂介面

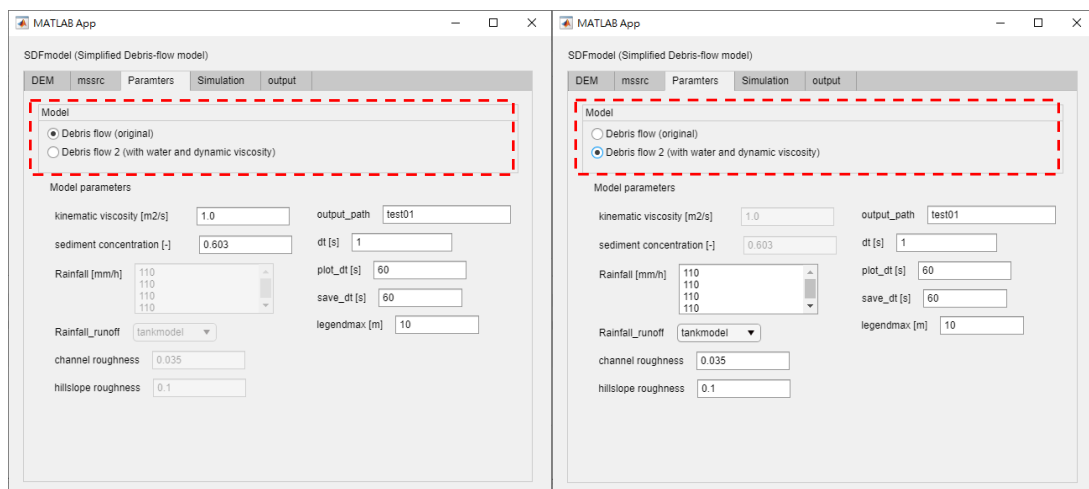


圖 3-28 單機版 SDFmodel 設定模式參數

當使用者設定好 DEM、土砂料源、和模式參數，圖 3-29 展示土石流動態變化模擬結果，在模擬過程中或結束，使用者可以切換到輸出介面，選擇模擬結果的資料，輸出為 GIS 常用的 Tif 格式或 Google Earth 的 kml 格式。

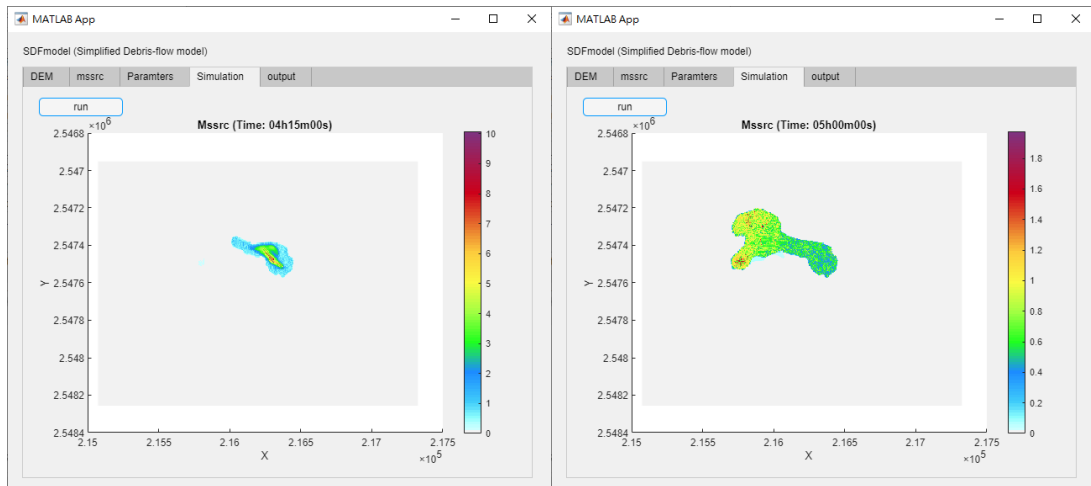


圖 3-29 單機版 SDFmodel 模擬展示介面

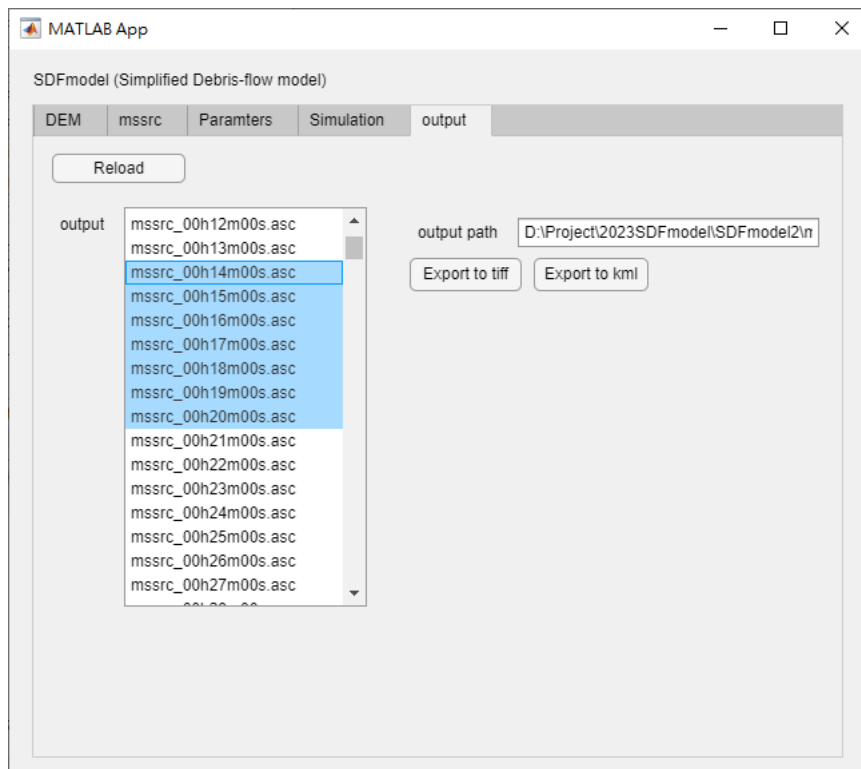


圖 3-30 單機版 SDFmodel 模擬輸出介面

第四章 結論及建議

第一節 結論

本計畫期末報告階段的結論針對主要的三項工作項目進度，說明如下：

一、改善SDF-model模擬：

本計畫已經透過 SDF-model 與土石流體積濃度相關文獻梳理，指出土石流運動型態深受含水量的影響，本計畫整合SDF-model水文入滲模式，增加 (1) 降雨-逕流模式、(2) 地表逕流模式、(3) 體積濃度公式、與 (4) 土石流演算模組。藉由試驗區域模擬結果顯示，SDF-model和逕流模式整合後，能夠模擬降雨逕流的動態變化外，也可計算土石流的體積濃度、降伏應力、運動黏滯係數的動態變化，進而模擬土石流的運動和影響範圍，檢視土石流深度與影像範圍的模擬結果，與該場事件實際影像範圍相似。

二、模擬結果之驗證與分析

本計畫以98年莫拉克颱風於高雄新發里的土石流事件、110年盧碧颱風於玉穗溪土石流事件、111年尼莎颱風於汐止鵠鵠崙土石流，來進行模式分析和驗證。本計畫已蒐集與整理上述三場土石流事件的所需資料和參數，包括數值地形模型、崩塌量體、土石流影像範圍的所需資訊，並且分別使用原始和動態參數的SDFmodel模擬。模擬與驗證結果，本計畫所開發的動態參數SDF模式，能夠模擬土砂與水混合的土石流參數變化，進而推測土石流開始運移的時間。然而，土石流參數不確定性，將導致土石流啟動時間有所誤差，且模擬時間較長，用於土石流災害即時模擬可能較為受限。

三、圖形化介面開發

本計畫以 Matlab App Designer 控制項來開發 SDFmodel 單機版圖形化介面，並規劃圖形化介面的設計包含：(1) DEM 用於讀取與編修數值地形模型，如於DEM增加防治工程等；(2) Mssrc用於讀取與編修崩塌土砂量；(3) Parameters 用於設定模式參數；(4) Simulation：展示模擬動態變化過程；(5) Output 輸出模擬結果。提供使用者共容易的操作、使用、輸出SDFmodel的模擬結果。

第二節 期末報告進度

本計畫期末報告階段的預定進度與執行狀況詳表 4-1 所示。

表 4-1 本計畫計畫預定進度與執行狀況

重要工作項目	工作比重 %	預定進度執行狀況	112 年				備註
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月	
簡易土石流模式精進，以及水文模式整合	35	工作量或內容	水文模式資料彙整	模式撰寫	模式驗證	撰寫報告書	
		累計百分比	30	70	85	100	
		執行狀況	已完成	已完成	已完成	已完成	
模擬結果之驗證與分析	30	工作量或內容	土石流災害資料蒐集	土石流災害資料蒐集	模式驗證	撰寫報告書	
		累計百分比	20	30	80	100	
		執行狀況	已完成	已完成	已完成	已完成	
圖形化介面開發	35	工作量或內容	蒐集圖形介面開發工具	圖形介面設計和初步開發	圖形界面開發	操作說明書撰寫	
		累計百分比	20	50	90	100	
		執行狀況	已完成	已完成	已完成	已完成	
累計總進度	百分比		23	51	85	100	

參考文獻

1. Beven, K. J., & Kirkby, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modele a base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69, 1979.
2. Chen, Y.-C., Chang, K.-t., Chiu, Y.-J., Lau, S.-M., Lee, H.-Y. Quantifying rainfall controls on catchment-scale landslide erosion in Taiwan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 372-382, 2013.
3. Chen, Y.-C., Wu, Y.-H., Shen, C.-W., Chiu, Y.-J. Dynamic Modeling of Sediment Budget in Shihmen Reservoir Watershed in Taiwan. *Water*, 10(12), 1808, 2018.
4. Chen, YC. Chiu, YJ Wu, YH. Lee, HY. Shen, CW. Combination of landslide volumes estimation and debris flow simulation in the Xinkai village, southern Taiwan. *EGU General Assembly 2012*. Vol. 14, EGU2012-4043, Vienna, Austria, 2012.
5. Chiang, S.-H. Modeling Multi-Hazard: Landslide Initiation and Debris Flow. Ph. D dissertation. Department of Geography, National Taiwan University, 2010.
6. Chiang, S.-H., Chang, K.-T., Mondini, A.C., Tsai, B.-W., Chen, C.-Y., Simulation of event-based landslides and debris flows at watershed level. *Geomorphology*, 138(1), 306-318, 2012.
7. Han, Z., Chen, G., Li, Y., He, Y. Assessing entrainment of bed material in a debris-flow event: a theoretical approach incorporating Monte Carlo method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(14), 1877-1890, 2015.
8. Horton, R. E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. *Eos, Transactions American Geophysical*

Union, 20(4), 693-711, 1939.

9. Huang, J.-C., Milliman, J. D., Lee, T.-Y., Chen, Y.-C., Lee, J.-F., Liu, C.-C., Lin, J.-C., & Kao, S.-J. Terrain attributes of earthquake- and rainstorm-induced landslides in orogenic mountain Belt, Taiwan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(10), 1549-1559, 2017.
10. Hungr, O. Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 25(5), 483-495, 2000.
11. Hunt, B. Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(12), 1350-1363, 1994.
12. Ishihara, Y and Kobatake, S. Runoff Model for Flood Forecasting, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, 29(1): 27-43, 1979.
13. Iverson, R.M., Denlinger, R.P., 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B1), 537-552.
14. Jakob, M., & Jordan, P. Design flood estimates in mountain streams the need for a geomorphic approach. *Canadian Journal of civil engineering*, 28(3), 425-439, 2001.
15. Lee, K.K.F. Ling, L. Yusop, Z. The revised curve number rainfall-runoff methodology for an improved runoff prediction. *Water*, 15, 491, 2023.
16. Liu, K.-F., Huang, M.C., 2006. Numerical simulation of debris flow with application on hazard area mapping. *Computational Geosciences*, 10(2), 221-240.

17. Liu, K.-F., Wu, Y.-H., Chen, Y.-C., Chiu, Y.-J., Shih, S.-S. Large-scale simulation of watershed mass transport: a case study of Tsengwen reservoir watershed, southwest Taiwan. *Natural hazards*, 67(2), 855-867, 2013.
18. MacCormack, R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering. *Am. Inst. Aeronaut. and Astronaut.*, NY. 69-354, 1969.
19. O'brien, J., Julien, P., Fullerton, W. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 244-261, 1993.
20. Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S. and Noro, T. Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network, *Landslides*, 7(3): 325-338, 2010.
21. Pierson, T. C., Costa, J. E., & Vancouver, W. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, *Geological Society of America*, 7, 1-12, 1987.
22. Takahashi, T. Debris flow. *Annual review of fluid mechanics*, 13(1), 57-77, 1981.
23. Theule, J. Geomorphic study of sediment dynamics in active debris-flow catchments (French Alps) (Doctoral dissertation, Doctorat de l'université de Grenoble, Spécialité: Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement), 2012.
24. Tsai, M.P., Hsu, Y.C., Li, H.C., Shu, H.M., Liu, K.F. Application of simulation technique on debris flow hazard zone delineation: a case study in the Daniao tribe, Eastern Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(11), 3053-3062, 2011.
25. 水土保持局，土石流潛勢溪流的脆弱度與風險分析，行政院農委會水土保持局，2010。

26. 水土保持局，盧碧颱風玉穗溪土砂災害摘要，取自於 <https://www.facebook.com/SWCBGOV/posts/1169550123524356/>，2021。
27. 何瑞益，淺層地滑即時預警模式之研究，國立臺灣海洋大學河海工程學系博士論文，2011。
28. 李光敦，水筒模式與降雨-逕流模擬，農業工程學報，第 39 卷，第 2 期，第 20-28 頁，1993。
29. 李光敦，水文學，五南圖書出版股份有限公司，共 385 頁，2002。
30. 岡田憲治，土壤雨量指數，測候時報，69（5）：第 67-100 頁，2002。
31. 姜壽浩，多重災害模擬-崩塌誘發及土石流，國立臺灣大學地理環境資源學研究所博士論文，2010。
32. 連惠邦，土石流之定量判別指標，中華水土保持學報，28（2）：第 129-136 頁，1997。
33. 陳振宇、藤田正治、堤大三，基岩位置及土層特性對降雨逕流與大規模崩塌之影響，中華水土保持學報，45（4），第 243-256 頁，2014。
34. 陳偉強（2008）土石流泥砂體積濃度之研究，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士論文。
35. 謝嘉聲、蕭達鴻、唐昭榮、胡植慶，利用顆粒體離散元素法模擬莫拉克颱風所引致之新開崩塌，中華水土保持學報，46（1）：第 29-37 頁，2015。

附錄一 國土利用調查之土地利用類別對應逕流曲線法的 CN 值

表 附錄-2 國土利用調查之土地利用類別對應逕流曲線法的 CN 值

Land use type	Land use code	CN				Landuse1	Landuse2
		A	B	C	D		
農作	101	59	70	78	81	small grain	Contoured
水產養殖	102	99	99	99	99	Water	
畜牧	103	30	58	71	78	meadow	
農業附帶設施	104	59	74	82	86	Farmsteads	
天然林	201	36	60	73	79	Wood	Fair
人工林	202	36	60	73	79	Wood	Fair
其他森林使用地	203	36	60	73	79	Wood	Fair
機場	301	98	98	98	98	Driveway	
鐵路	302	98	98	98	98	Driveway	
道路	303	98	98	98	98	Driveway	
港口	304	98	98	98	98	Driveway	
河道	401	98	98	98	98	Paved with cubes & storm	
溝渠	402	98	98	98	98	Paved with cubes & storm	
蓄水池	403	98	98	98	98	-	
水道沙洲灘地	404	72	82	87	89	Dirt	
水力構造物	405	98	98	98	98	Roofs	
防汛道路	406	98	98	98	98	Driveway	
海面	407	-	-	-	-	-	
商業	501	89	92	94	95	Urban	Commercial & business area
住宅	502	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
工業	503	81	88	91	93	Urban	Industrial
其他建築用地	504	68	79	86	89	Urban	Residential
政府機關	601	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
學校	602	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
醫療保健	603	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
社會福利設施	604	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
公用設備	605	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
環保設施	606	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
文化設施	701	68	79	86	89	Urban	Poor condition 1/4 acre
休閒設施	702	39	61	74	80	Urban	Good condition

簡易土石流模式之精進與圖形化介面開發

礦業	801	76	85	89	91	Gravel	
土石	802	76	85	89	91	Gravel	
鹽業	900	72	82	87	89	Dirt	
軍事設施	902	68	79	86	89	Urban-open spaces	Poor condition
濕地	903	44	65	76	82	Forestland	grass-Fair
草生地	904	32	85	72	79	Forestland	grass-Good
裸露地	905	72	82	87	89	Dirt	
灌木荒地	906	48	67	77	83	Bush	Poor
營建剩餘土石方	907	76	85	89	91	Gravel	
空置地	908	68	79	86	89	Urban	Poor condition

附錄二 期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	為配合本局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分：1. 圖形介面建議可增加讓使用者自行設定(增加)防砂壩等工程設施，以觀察設施施作前後之影響。 2. 計畫書中指出 SDF-model 目前無法改變隨時間與空間變化參數，且無法模擬堆積土砂隨著時間與降雨、和水混合的效應。雖然可以開發出人性化的介面，提供彈性的設定方式，但是要如何知道所設定的參數與時間空間變化的關係是正確的呢？ 3. 由於 SDF-model 已經在 BigGIS 上面提供服務，而發生災害後，各種觀測的資料也都會在 BigGIS 上面整合，建議開發一個最佳化的模式，讓系統自行決定參	謝謝委員意見，已完成以下之修正，詳如修正計畫書內容： 一、計畫內容： 1. 模式參數的輸入介面也讓使用者自行調整數值地形模型，如調整地形高度，以模擬防砂壩等工程設施的興建，藉以分析工程設施的施作前、後對於土石流的影響。 2. 由於土石流的參數隨著的時間與空間產生變化，模式具有一定的不確定性，因此，本研究也將開發 SDF-model 參數的最佳化模式，最佳化模式可根據輸入的土石流觀測結果，例如：土石流影響範圍或土石流事件前、後兩期的土砂變化量，模式會先根據建議的初始條件去模擬土石流，再去對邊坡和野溪

項次	審查意見	回覆辦理情形
	數與時間空間的關係，以模擬的結果和觀測的結果最吻合作為最佳化的條件。以這些參數再重新執行SDF-model，對於模擬的結果就更有信心，可以發揮模式的最大優勢。 4. 本年度規劃要使用 Visual Studio 開發人機介面，建議輸出的結果，以BigGIS格式為準，方便使用者可以直接將模擬的結果上傳到BigGIS，以便於後續的應用以及和其他圖資的套疊。	的觀測結果，檢查是否介於可接受的範圍閾值，若模擬結果產生高估與低估，則最佳化模式根據比對結果去調整參數，再重新進行模擬分析，上述的分析流程經迭代計算後，可以得到最佳化的模式參數，降低模式參數的不確定性，參數最佳化的分析流程如圖 4 所示。 3. 同回覆建議 2。 4. SDF-model 模擬的輸出格式將可符合水保局 BigGIS 的空間資料格式，以便後續使用者上傳到 BigGIS，能與 BigGIS 上豐富的圖資套疊與展示。
二	有關計畫書格式及經費審查部分： 1. 本計畫請以補助經費630仟元調整編列。 2. 本年度執行期限請修正為自112年2月8日至112年12月31日。(10.9個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研	二、有關計畫書格式及經費審查部分： 1. 已修正，詳如修正計畫書內容。 2. 已修正，詳如修正計畫書內容。 3. 已修正，詳如修正計畫書內容。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	究助理，請以計畫執行期限10.9個月內編列。年終獎金亦配合計畫期程。3.「按日按件計資酬金」應低於業務費之35%。其中之臨時工請補學歷。	

附錄二 期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	SDF 簡易土石流模式是已經在BigGIS 上提供線上操作的重要工具。根據過去應用的幾個實例，發現確有模式過於簡化和參數設定不當的問題。本計畫針對 SDF 簡易土石流模式提出幾項精進的做法和開發圖形化介面，完成後預期可以提升BigGIS 應用的層面。建議在期末結案前，能將開發成功的新版SDF 簡易土石流模式，以及相關的圖形化介面，都能在BigGIS 實現，讓農村水保署同仁可以實際操作，並提供回饋意見，以做為未來可以再精進的參考。以下提供兩點建議：	謝謝委員意見，本計畫主要目標為增加降雨-逕流模式之SDF 動態參數模擬，以及開發單機，以改進原始 SDF 的模擬能力。然而，目前 SDF 開發採用 matlab 程式語言，與BigGIS 的程式語言不同，故在目前階段尚無法將新版的整合至 BigGIS，本計畫團隊後續與 BigGIS 密切合作，持續更新 BigGIS 的線上版 SDFmodel。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	1. 空間解析度：農村水保署有各種不同來源的數值高程模型，但 SDF 簡易土石流模式若使用不同空間解析度的數值高程模型，所耗費的計算時間差異為何？結果是否有顯著差別？要正確模擬一個事件，選用空間解析度的依據為何？這些問題希望都能在這項計畫中得到具體的答案。對於使用 SDF 簡易土石流模式會很有幫助。 2. 時間解析度：SDF 簡易土石流模式可以設定不同的時步間隔，但同樣的問題也存在，若使用不同時間解析度，所耗費的計算時間差異為何？結果是否有顯著差別？要正確模擬一個事件，選用時間解析度的依據為何？這些問題也希望都能在這項計畫中得到具體的答案。對於使用 SDF 簡易土石	謝謝委員意見，SDF 能夠根據使用者需求，以不同解析度的數值地形模型模擬。 由於 SDF 模擬需要符合數值穩定條件（類似於 Courant - Friedrichs - Lewy condition），時間解析度與空間解析度是相依。因為 DEM 解析度與最小演算時距(Δt)成正比，如 20 公尺 DEM 的演算時距需小於 0.5 秒，5 公尺 DEM 演算時距需小於 0.125 秒。因此，在相同地理範圍下，若 DEM 解析度加密 2 倍，則所需的計算時間必須增加 8 倍（DEM 網格增加 2x2 倍，演算次數增加 2 倍）。 此外，本計畫將降雨逕流模式整合至 SDFmodel，模擬過程則需要考量颱風豪雨的歷程（數小時到數十小時），對於崩塌土砂含水量與土壤參數

項次	審查意見	回覆辦理情形
	流模式會很有幫助。	的影響，故模擬所需的時間將會增加。 因此，SDF 模擬應該要根據使用者需求與情境選用適當的模式和空間解析度。
二	程式建議可預載入全臺不同時期的20m DEM 資料，由使用者自行選用。	謝謝委員意見，將提供載入全臺不同時期的 20m DEM 與切割的選項。
三	輸入介面建議可載入Google map 或 OSM 或通用版電子地圖等底圖，或自行載入正射影像，以便準確劃定土砂料源位置。	謝謝委員意見，因 Google map 或 OSM 或通用版電子地圖等底圖為 WGS84 格式(單位：度分秒)，與土石流模式常用的 TWD97 規則網格(單位：公尺)不同，整合不同投影座標系統資料較為複雜。本計畫先提供使用者載入正射影像。
四	為模擬有構造物時，土石流的流動狀況，建議在讀入 DEM 資料後，可讓使用者任意加入防砂壩等構造物，並假設構造物不會毀損，亦即以調整DEM 資料的方式將構造物融入 DEM 資料內。	謝謝委員意見，已加入以功能，請見第三章第三節單機版 SDF-model 圖形化介面開發。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	為配合機關組織政造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載(https://elibrary.ardswc.gov.tw/) 。	