



複合式理想曲面對高度不確定性潛勢區域之崩塌破壞與量體估算之可行性探討

成果報告書

113
年

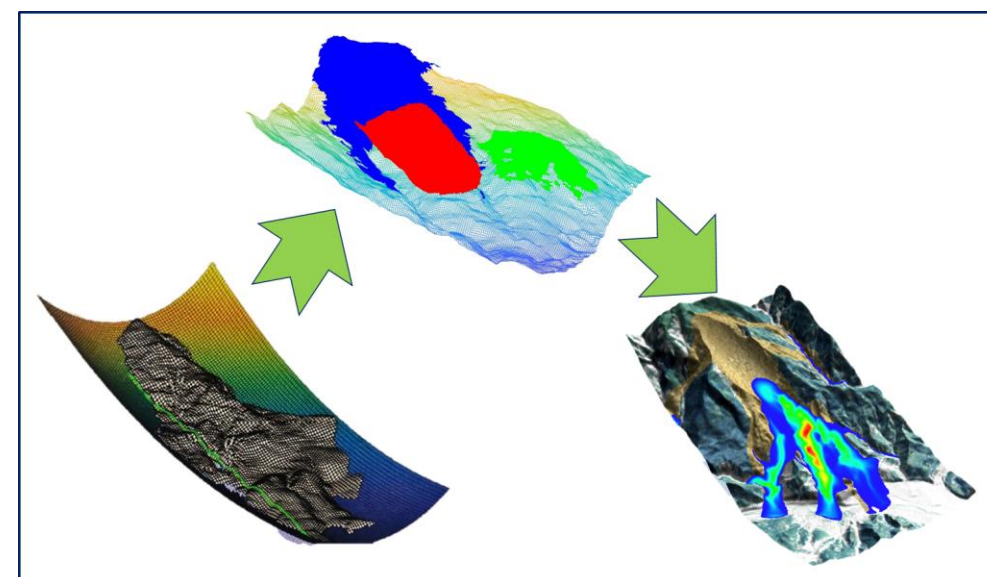
農業部農村發展及水土保持署

113 年度創新研究計畫

複合式理想曲面對 高度不確定性潛勢區域之 崩塌破壞與量體估算之可行性探討 成果報告書

農業部農村發展及水土保持署

與您一起打拼



農業部農村發展及水土保持署
540206南投市中興新村光華路6號
<https://www.ardswc.gov.tw>

農業部農村發展及水土保持署 編印
中華民國 113 年 12 月

計畫編號：ARDSWC-113-067

**複合式理想曲面對高度不確定性潛勢區域
之崩塌破壞與量體估算之可行性探討**
**Investigating the Applicability of
Composite Idealized Curved Surfaces for
Estimating Landslide Rupture and
Volumes in Landslide-prone Area of
Large-scale and High Uncertainty**
成果報告書

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：戴義欽 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

複合式理想曲面對高度不確定性潛勢區域之崩塌破壞 與量體估算之可行性探討

摘要

崩塌土砂造成之可能影響範圍的推估對於大規模崩塌的災害規模評估以及防減災規劃作業是一項關鍵的重要議題。然而一般大規模崩塌發生時，崩塌破壞面的坡趾處易往往遭覆土層所掩埋，導致推估崩塌破壞面所在、崩塌量體體積以及後續影響範圍存在高度不確定性。尤其在尚未進行災後詳細調查或鑽探前，若無法確定實際崩塌破壞面所在高程，僅基於災害前後期數值地形資料之差異進行崩塌體積的初步估算將出現低估的狀況。此外，大規模崩塌事件的發生，一般伴隨多處塊滑動塊體且其啟動發生的時間具有時序的情形，導致若以單一滑動塊體來描述其土砂運移狀況之情境會與實際發生狀況有所出入。因此，本研究探討一可推估崩塌邊坡坡趾處被掩埋之破壞面以及可描述數塊滑動塊體且不同釋放時間點組合之土砂運移數值模式。延伸應用本團隊發展之基因演算-參考橢圓-理想曲面法 (GA-ER-ICS, Wang et al., 2022)，搭配整合 GPU 加速之二相流土砂運移數值模式(MoSES_2PDF, Ko et al., 2021)作為快速評估可能崩塌土砂量體以及推估後續影響範圍之工具，其推估結果將可提供後續現場災害調查或是防減災規劃作業之參考。簡言之，本案旨在探討一缺乏現場調查資料或在鑽探前先行快速評估數塊可能崩塌破壞面所在以及其後續影響範圍之方法，作為防災規劃作業之參考依據。

關鍵詞：高度不確定性、複合式崩塌滑動塊體、滑動塊體運移釋放時間點、土砂影響範圍、評估指標

Investigating the Applicability of Composite Idealized Curved Surfaces for Estimating Landslide Rupture and Volumes in Landslide-prone Area of Large-scale and High Uncertainty

Abstract

Estimating the potential endanger area by moving mass is a crucial issue for disaster assessment and mitigation planning for large-scale landslides. This estimation often relies on in-situ investigations and the predicted landslide volume. However, when large-scale landslides occur, the toe of the landslide scarp is often buried by displaced material, leading to significant uncertainty in estimating the actual landslide scarp, subsequent landslide volume, and endanger area. This uncertainty is especially pronounced before detailed post-disaster investigations or on-site drilling have been conducted. Using only pre- and post-event digital elevation model (DEM) to estimate landslide volumes may result in considerable underestimation when the actual rupture of surface distribution unknown. Additionally, large-scale landslides often involve multiple moving mass with delayed start slide time, making it difficult to accurately describe the debris movement using a single moving mass scenario. Therefore, it is highly requested to develop a tool that can estimate the buried landslide scarp at the toe and describe the movement of debris from multiple moving mass with different start slide times is essential. Based on the work of Wang et al. (2022), in which the Genetic Algorithm Ellipse-Referenced Idealized Curved Surface (GA-ER-ICS) method is proposed, and integrating it with a GPU-accelerated two-phase debris flow model (MoSES_2PDF) developed by Ko et al. (2021) to quickly estimate potential landslide debris volume and subsequent endanger area. The results from these estimations will provide valuable references for subsequent in-situ investigations and disaster mitigation planning.

Keywords: High uncertainty, Composite moving mass, Release timing of multiple moving mass, Landslide endanger area, Accuracy assessment

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VII
第一章 緒論.....	1-1
第一節 計畫緣起與擬解決問題	1-1
第二節 計畫工作項目	1-4
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 計畫工作架構與流程	2-1
第二節 崩塌事件整體狀況推估	2-3
第三節 評估指標	2-12
第三章 研究區域簡介	3-1
第一節 地文	3-2
第二節 評估指標資料處理	3-3
第四章 複合式崩塌破壞面建置	4-1
第一節 破壞面建置方法	4-1
第二節 破壞面建置結果	4-4
第五章 土砂影響範圍推估	5-1
第一節 土砂影響範圍風險地圖推估	5-2
第二節 地形資料解析度之影響	5-4
第三節 搜尋最合適崩塌量體推估之最終土砂堆積分佈	5-5
第六章 滑動塊體釋放時間間隔之影響	6-1
第七章 結論.....	7-1

第一節 結論	7-1
第二節 建議與未來展望	7-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 計畫書審查意見暨回覆辦理情形	附-1
附錄二 期中審查意見暨回覆辦理情形	附-5
附錄三 期末審查意見暨回覆辦理情形	附-8
附錄四 各風險地圖之評估指標數據一覽表	附-10

表次

表 4.1 推估之複合式滑動塊體體積一欄表.....	4-9
表 5.1 同步釋放複合式崩塌滑動塊體之評估指標比較一覽表	5-8
表 6.1 複合式組合 2 不同釋放時間之評估指標比較一覽表	6-4
表 7.1 本案之工作項目與各期進度表	7-3
附表 1 複合式組合 1、0.5 倍、同步釋放評估指標數據一覽表 .	附-11
附表 1 (續).....	附-12
附表 2 複合式組合 1、1.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表 .	附-13
附表 2 (續)	附-14
附表 3 複合式組合 1、2.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表 .	附-15
附表 3 (續)	附-16
附表 4 複合式組合 2、0.5 倍、同步釋放評估指標數據一覽表 .	附-17
附表 4 (續)	附-18
附表 5 複合式組合 2、1.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表 .	附-19
附表 5 (續)	附-20
附表 6 複合式組合 2、2.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表 .	附-21
附表 6 (續)	附-22
附表 7 複合式組合 2、0.5 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表	附-23
附表 7 (續).....	附-24
附表 8 複合式組合 2、1.0 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表	附-25
附表 8 (續).....	附-26
附表 9 複合式組合 2、2.0 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表	附-27

附表 9 (續).....	附-28
附表 10 複合式組合 2、0.5 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表	附-29
附表 10 (續).....	附-30
附表 11 複合式組合 2、1.0 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表	附-31
附表 11 (續).....	附-32
附表 12 複合式組合 2、2.0 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表	附-33
附表 12 (續).....	附-34

圖次

圖 2.1 計畫作業流程圖	2-2
圖 2.2 理想崩塌破壞曲面之幾何特性.....	2-5
圖 2.3 軸向與側向並不會在同一平面，針對一深度 d ，會對應出軸向的深度 $d1$ 與側向的深度 $d2$	2-5
圖 2.4 理想崩塌破壞曲面示意圖	2-5
圖 2.5 參考橢圓位移方式：(A)平移、(B)旋轉、(C)偏轉.....	2-6
圖 2.6 崩塌破壞面剖面示意圖.....	2-7
圖 2.7 第一階段破壞面推估.....	2-7
圖 2.8 第一階段土砂運移推估.....	2-7
圖 2.9 第二階段破壞面推估.....	2-8
圖 2.10 第二階段土砂運移推估.....	2-8
圖 2.11 僅透過災害前後期取得之崩塌土砂量體分佈	2-8
圖 2.12 複合式崩塌破壞面對應之崩塌土砂量體分佈	2-8
圖 2.6 地形座標系統轉換(示意圖).....	2-10
圖 2.8 MoSES_2PDF 開啓界面.....	2-11
圖 3.1 鵠鵠崙崩塌事件後災後現場崩塌狀況照片	3-1
圖 3.2 鵠鵠崙崩塌潛勢區域 2014 LiDAR 地形圖	3-2
圖 3.3 鵠鵠崙崩塌潛勢區域災後 UAV 產製 DSM 地形圖	3-3
圖 3.4 鵠鵠崙崩塌潛勢區域災後快速轉換之 DEM 地形圖	3-4
圖 4.1 複合式 GA-ER-ICS 起始搜尋點分佈圖.....	4-1
圖 4.2 GA-ER-ICS 可搜尋範圍之放大縮小參考橢圓示意圖	4-2
圖 4.3 GA-ER-ICS 可搜尋範圍之平移參考橢圓示意圖.....	4-3
圖 4.4 GA-ER-ICS 可搜尋範圍之旋轉參考橢圓示意圖.....	4-3
圖 4.5 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖	4-5

圖 4.6 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖	4-6
圖 4.7 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖	4-7
圖 4.8 GA-ER-ICS 推估 2.5 倍之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖	4-8
圖 4.9 GA-ER-ICS 推估 3.0 倍之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖	4-8
圖 4.9 GA-ER-ICS 推估 3.5 倍之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖	4-9
圖 5.1 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍之風險地圖	5-2
圖 5.2 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍之風險地圖	5-2
圖 5.3 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍之風險地圖	5-3
圖 5.4 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍之風險地圖	5-3
圖 5.5 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍之風險地圖	5-3
圖 5.6 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍之風險地圖	5-3
圖 5.7 0.5 M 解析度之風險地圖	5-4
圖 5.8 1.0 M 解析度之風險地圖	5-4
圖 5.9 5.0 M 解析度之風險地圖	5-5
圖 5.10 10.0 M 解析度之風險地圖	5-5
圖 5.11 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍之最終土砂偏差分佈	5-6
圖 5.12 GA-ER-ICS 推估 2.5 倍之最終土砂偏差分佈	5-6
圖 5.13 GA-ER-ICS 推估 3.0 倍之最終土砂偏差分佈	5-6
圖 5.14 GA-ER-ICS 推估 3.5 倍之最終土砂偏差分佈	5-6
圖 5.15 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍之路徑覆蓋範圍圖	5-7
圖 5.16 GA-ER-ICS 推估 2.5 倍之路徑覆蓋範圍圖	5-7
圖 5.17 GA-ER-ICS 推估 3.0 倍之路徑覆蓋範圍圖	5-7
圖 5.18 GA-ER-ICS 推估 3.5 倍之路徑覆蓋範圍圖	5-7
圖 6.1 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍之風險地圖	6-2
圖 6.2 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍之風險地圖	6-2

圖 6.3 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍之風險地圖	6-3
圖 6.4 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍之風險地圖	6-3
圖 6.5 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍之風險地圖	6-3
圖 6.6 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍之風險地圖	6-3
圖 7.1 與 BIGGIS 開發團隊進行可行性討論	7-2

第一章 緒論

第一節 計畫緣起與擬解決問題

台灣位於環太平洋地震帶的活躍板塊交界處，擁有複雜多變的地質結構和陡峭的山坡地形，這些因素共同導致台灣山區容易發生大規模崩塌。首先，台灣的地質結構非常複雜，存在多樣的岩層和斷層。長時間的推擠和地震活動使這些岩層變形和斷裂，導致山區的許多邊坡變得不穩定。其次，陡峭的山坡地形在颱風豪雨期間，高强度的短延時降雨常常是引發大規模崩塌的重要因素。此外，長期的人為開發、土地利用不當、過度砍伐植被等也加劇了山坡的不穩定性，進一步增加了崩塌的風險。

崩塌、堰塞湖和土石流等自然災害對下游居民的生命財產安全構成嚴重威脅。自 2009 年小林村大規模崩塌事件後，水土保持署加強了對大規模崩塌潛勢區域的現地調查、降雨警戒值的定訂、現場即時監測與預警系統的設置等工作。並於 2018 年發行《大規模崩塌之調查與觀測技術手冊》將大規模崩塌定義為崩塌範圍大於 10 公頃、土方量達 10 萬立方公尺或崩塌深度大於 10 公尺的事件。研究表明，崩塌土砂量對土石流影響範圍的推估至關重要。Tai et al. (2020)、Jaboyedoff et al. (2020)和 Tang et al. (2020)都強調了這一點。因此，在崩塌發生前，先行依據有限資料估算提供可能的崩塌破壞面和其影響範圍，提供詳細現場調查以及建置監測系統之可能重點位置，有效提升防災應變和防減災規劃的效率和可靠性。

Tang et al. (2020) 提到一般可透過 3 種方法得到可能崩塌量體：(一) 應用災害前後數值地形差異：通過比較災害前後的數值地形資料差異計算崩塌量體；(二) 透過崩塌面積-體積迴歸式：利用已有的崩塌面積和體積之間的迴歸關係來估算崩塌體積；(三) 現場調查：直

接進行現場調查，通過鑽井、挖掘崩塌土砂或其他地質探測方法，瞭解地下地質岩層的走向等資料。在方法一和方法二中，如果崩塌坡趾處受到掩埋或崩塌土體未完全滑動離開崩塌破壞面（depletion zone），估算結果可能會存在高度的不確定性。現場調查雖然能提供詳細的地下地質資料，但其主要缺點是需要大量人力和經費。此外，鑽探或地電阻量測等方法所得到的點或面資料，在描述三維空間分佈時仍需依賴許多假設，並且在不同區域和時間下會存在高度的不確定性。

針對大規模崩塌潛勢範圍之劃定，現階段主要可分為兩種，(一) 現場調查：為目前最常實施之方法，其必須透過地質相關專家學者針對潛勢區域進行細部調查，瞭解其張力裂隙分佈、地質走向、微地形等特徵，最終依據調查結果研判可能崩塌與後續影響範圍，此方法的缺點為必須耗費大量的人力和時間；(二) 衛星影像判識：為目前最節省人力和時間之方法，隨著遙測技術和無人機的快速發展，高解析度、高精度的航拍照片和產製的地形資料可以幫助推估崩塌潛勢範圍。然而，若崩塌尚未發生或崩塌土體未完全滑動，這些資料在估算後續影響範圍時仍存在高度不確定性。Tang et al. (2020) 中也有提到若崩塌土砂未完全滑動離開破壞面，只應用災害前後期數值地形相減所得到之崩塌量體具有高度不確定性，因此亟需發展一可藉助遙測資料進一步推估被掩埋之崩塌破壞面工具。

雖然許多只需要應用數值地形資料推估崩塌破壞面之方法與模式也陸續被發展與應用，如 Scoops3D (Reid et al., 2015)；SLIPFITTER (Tang et al., 2020)、Smoth Minimal Surface (Kuo et al., 2020)；Sloping Local Base Level (Jaboyedoff et al., 2004 and Jaboyedoff et al., 2009) 與本團隊開發之理想曲面法 ICS (Tai et al., 2020; Ko et al.,

2021; Wang et al., 2022)。上述方法，都可以實現在現場資料不充分的條件或未進行災後現場調查前推估可能之崩塌破壞面分佈。

而大家最重視的議題是如果崩塌發生了，是否會對下游保全對象造成威脅？由後續的土砂運移行為模式發展數量就可得知其重要性，如美國陸軍兵工團水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center, HEC) 發展了河川分析系統 (HEC-RAS)、日本京都大學開發的 Hyper Kanako 土石流模擬、瑞士森林及雪崩研究所 (WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF) 開發之 RAMMS (RAPid Mass Movement System) 土石流模擬軟體，與本團隊發展之 GPU 加速土砂運移行為模式 (MoSES_2PDF, Ko et al., 2021)，而上述模式都必須先具備可能崩塌量體方可進行下一步之影響範圍推估。

Tai et al. (2020) 應用理想崩塌曲面 (ICS) 推估 2009 年小林村大規模崩塌事件，所需輸入資料包含災害前後期數值地形資料與現場調查資料。在具備崩塌範圍、崩塌土砂量體、後續土砂影響範圍等資料情況下，理想曲面方式可建置近似實際之平滑崩塌破壞面，將搜所推估之崩塌土砂分佈與實際土砂分佈經土砂運移模式推估之後續影響範圍與實際最終土砂路徑僅有 9.54% 之差異，此數據對於大多數之土石流模式而言已非常具備參考價值。而 ICS 之評估方法最大優勢在於未具備現場詳細地質鑽探資料前仍可快速推估一可能崩塌破壞面對應之土砂量體，作為後續土砂運移行為模式之起始條件。

綜合上述議題，本案擬解決問題為如何在發生崩塌後，應用即有資料 (如 LiDAR-based DEM、災後正攝影像以及產製之 DSM 等) 提前推估可能崩塌破壞面與影響範圍，為防災應變決策者或防減災人員提供具備一定參考價值的資訊 (如 崩塌量體、土砂運移行為 等)。

因此，本案延續應用本團隊發展之 GA-ER-ICS (Wang et al., 2022)

推估理想崩塌曲面，所推估之崩塌土砂分佈將搭配本團隊發展之 MoSES_2PDF (Ko et al., 2021) 二相流土砂運移模式推估其後續影響範圍以及最終土砂堆積分佈。因本案另一關注議題為複合式崩塌滑動塊體造成之影響範圍，因此在土砂運移數值模式中，本案新增了不同滑動塊體塊體啟動時間探討其影響，為本案之核心工作。

第二節 計畫工作項目

針對上述議題，本研究計畫於本年度規劃“事件崩塌破壞面建構”、“滑動塊體啟動時間篩選”、“土砂影響範圍推估”等三個工作項目，說明如下：

一、崩塌破壞面建構

本案針對崩塌未完全滑動(崩塌破壞面坡趾處被掩埋)之案例，若透過災害前後期數值地形取得之崩塌土砂分佈可發現，其崩塌破壞面趾部覆土層高程較原邊坡高程高，堆積現象造成。因此本案擬透過本團隊發展之 GA-ER-ICS，於崩塌破壞面趾部以及呈現堆積範圍中設置 GA-ER-ICS 起始搜尋點，推估可能之理想崩塌曲面。並將所對應之崩塌土砂分佈與災害前後期數值地形資料取得之崩塌土砂分佈組合成崩塌事件整體土砂分佈。

二、土砂影響範圍推估

當具備工作項目一所推估之複合式崩塌滑動土砂分佈，可透過本團隊發展之可描述冲刷堆積機制之二相流土砂運移行為模式 (Wong et al., 2024) 搭配 Ma et al., (2022) 迴歸之間隙流體粘滯性與模式參數組之建議值設計不同土砂組成成分之情境，同步釋放

整體複合式崩塌土砂，最終透過繪製風險地圖方式呈現。

三、滑動塊體釋放時間間隔之影響

透過工作項目一所組合之複合式崩塌滑動土砂分佈，本案依據 GA-ER-ICS 建置之數塊崩塌滑動塊體，依序自原邊坡坡趾破壞面開始釋放緊接上游破壞面，再透過設計不同時間間距之釋放時間點，探討其對後續土砂影響範圍之影響。此多元情境設計將可作為後續防災應變或是防減災規劃之參考依據。

第二章 工作執行方法與步驟

因崩塌土砂量體對於災害規模影響範圍之評估占有非常重要的角色，但面對崩塌破壞面趾部被掩埋之崩塌事件，其崩塌量體之推估存在高度不確定性。另目前仍缺乏可同調整數塊崩塌滑動塊體啟動時間之土砂運移數值模式。

因此本研究除了應用上述的災害前後期數值地形取得崩塌土砂分佈外，於可能被掩埋之崩塌破壞面趾部應用本團隊發展 GA-ER-ICS 快速建構一崩塌破壞面曲面，所推估之崩塌土砂分佈與災害前後期數值地形取得之崩塌土砂分佈合并成整體崩塌事件之可能崩塌土砂分佈，後續透過本團隊發展之二相流土砂運移模式調整不同組成成分以及不同時間間距之滑動塊體釋放時間點，最終應該風險地圖方式呈現可能之土砂影響範圍。使用數值模式推估崩塌量體以及後續影響範圍之優勢，主要可於未進行詳細地質調查以及建置現場監測系統前，供防減災規劃與設計作為參考依據。

經規劃後本案之主要工作項目為：(a) 崩塌破壞面建構；(b) 滑動塊體釋放時間點與 (c) 土砂影響範圍推估。

第一節 計畫工作架構與流程

本案工作內容包含三大項目，整體作業流程如下列流程說明與圖 2.1 所示：

步驟一、取得崩塌災害前後期數值地形資料 (DEM)

步驟二、製作崩塌事件之崩塌以及堆積土砂分佈之數值地形差異資料 (Difference of DEMs, DoD)

步驟三、評估指標基準資料前處理

步驟四、GA-ER-ICS 情境設計 (起始搜尋點)

步驟五、崩塌破壞面以及土砂分佈推估

步驟六、組合崩塌事件整體土砂分佈以及劃分滑動塊體

步驟七、調整滑動塊體啟動時間

步驟八、土砂影響範圍推估

由於 GA-ER-ICS 所推估之崩塌破壞面為一快速評估之理想崩塌曲面，因此在所設計之評估指標表現上並不一定非常精確。本案關注的另一議題為後續影響範圍之推估，若所推估之可能崩塌破壞面對應之崩塌土體與後續影響範圍差異不大，就非常具有參考價值。

本案預期之主要貢獻：在未進行災後現場調查或建置現場監測系統前，應用既有之災前 LiDAR-based DEM 與災後 UAV 產製 DSM 地形資料進行崩塌事件整體土砂分佈與後續影響範圍之推估，作為災後調查與防減災規劃行動前之參考依據。

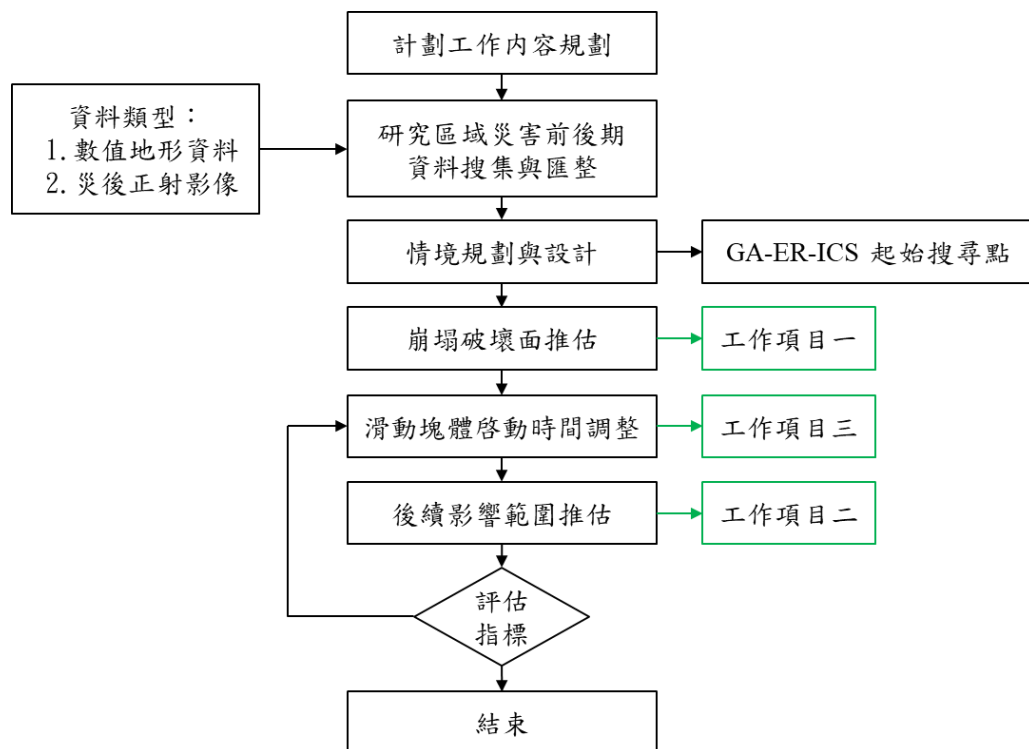


圖 2.1 計畫作業流程圖

第二節 崩塌事件整體狀況推估

對於土石流防減災議題，大家最關心莫過於崩塌發生後其土砂造成之影響範圍。因遙測技術的蓬勃發展，無人載具可協助拍攝災後正攝影像可協助評估其影響範圍以及製作災後數值地形資料。若需在崩塌發生前透過數值或模式方式取得，其最重要的輸入條件即是崩塌量體。對於未發生崩塌或崩塌趾部被覆土層掩埋之案例，因崩塌範圍不易確定且被覆土層掩埋之趾部崩塌破壞面不明確前提下推估崩塌量體存在高度不確定性。因此發展一可整合崩塌破壞面推估以及後續土砂影響範圍模擬之數值模式為現階段不可或缺的目標。

最終本案決定延伸應用 Tai et al. (2020) 發展之理想崩塌曲面(ICS)應用建置理想曲面近似崩塌破壞面且操作簡單之方法推估可能之崩塌土砂分佈。當具備土砂分佈後，再透過土砂運移數值模式推估後續影響範圍，供防減災規劃與現場調查作為參考依據。本章節將簡述本案所使用之崩塌破壞面建置方法以及土砂運移數值模式方法。

一、崩塌破壞面建置

本案延伸應用由 Tai et al. (2020)、Ko et al. (2021)以及 Wang et al. (2022) 提出基因演算-參考橢圓-理想破壞曲面法(GA-ER-ICS)，其主要優勢為只需應用數值地形資料 (如 LiDAR-based DEM) 搭配可能之崩塌潛勢區域與起始搜尋點，透過輸入可能崩塌量體 (如 Guzzetti et al., (2009) 之“崩塌面積-體積”迴歸式或現場調查後推估之可能崩塌量體)，建構破壞曲面以及對應之可能崩塌範圍。其假設條件為土體性質屬於均勻分佈，且較適合應用於滑動型之崩塌類型。因理想破壞曲面之理念構想是在未進行詳細現地調查或建置監測設施的前提下進行簡單快速的估算，故其建置所需之條件越單純越好，僅只

需要數值地形模型與崩塌潛勢範圍即可。

理想曲面為在三維環境下建置一平滑曲面近似實際崩壞破壞面，如圖 2.1 所示以主軸方向進行說明，必須先給定上邊界點 p_1 以及下邊界點 p_2 ，其兩點直線距離為 L ，因此舉主軸方向為例之理想曲面所需之曲率半徑 R_1 與 L_1 關係式分別為

$$L_1 = 2R \sin \theta_1, \quad (2.1)$$

$$R_1 - d_1 \cos \theta = R_1 \cos \theta_1, \quad (2.2)$$

式中 θ 為邊坡傾角、 θ_1 為理想曲面原點 p_c 與建置之理想曲面之夾角。然而若要依據式(2.1)與(2.2)計算出一理想曲面所需五個未知參數($L_1, R_1, d_1, \theta_1, \theta$)。為了可得到全部的解，必須先具備上邊界點 p_1 以及下邊界點 p_2 點並計算兩點之間的直線距離為 L 以及傾角 θ ，後給定一崩塌深度(d)即可推估由單一曲率半徑 R 下對應之理想曲面。

因此如圖 2.2 所示，為了可建置三維理想曲面於數值地形資料上，將式(2.1)與(2.2)應用至主軸以及側向軸，必須先決定上邊界點 p_1 、下邊界點 p_2 、左邊界點 p_3 以及右邊界點 p_4 位置。即可由 $\overline{p_1p_2}$ 以及 $\overline{p_3p_4}$ 得到主軸方向直線距離 L_1 、傾角 θ_1 以及側向軸方向直線距離 L_2 、傾角 θ_2 ，後給定崩塌深度(d_1 及 d_2)建置理想曲面。最終如圖 2.3 所示，黑線為參考橢圓-理想崩塌曲面之橢圓，藍線為其主軸 L_1 ，紅線為其側向軸 L_2 ，最終主軸與側向軸方向搭配曲率即可建置三維曲面，故此曲面成為理想崩塌曲面。

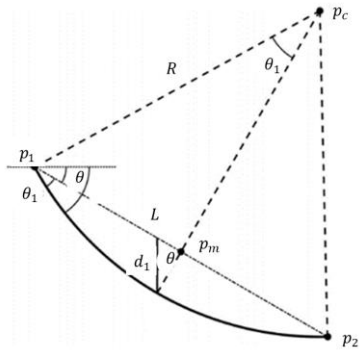


圖 2.2 理想崩塌破壞曲面之幾何特性
(本案重繪：Tai et al., 2020)

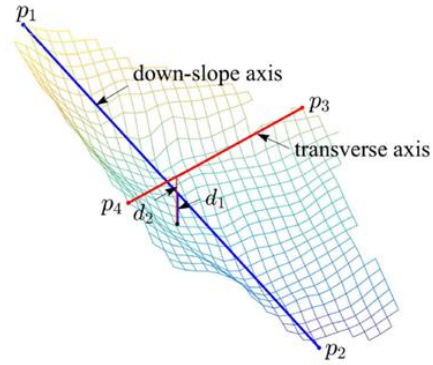


圖 2.3 軸向與側向並不會在同一平面，針對一深度 d ，會對應出軸向的深度 d_1 與側向的深度 d_2
(圖資料來源：Tai et al., 2020)

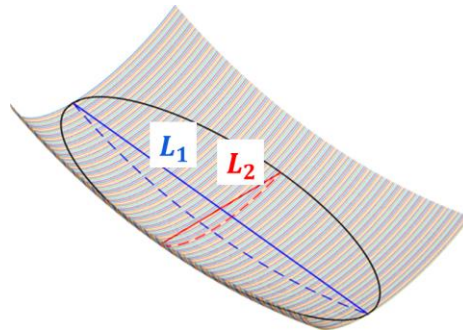


圖 2.4 理想崩塌破壞曲面示意圖

面對崩塌潛勢區域範圍圈畫的高度不確定性，本案以本團隊所提出之”參考橢圓”方式 (Ko et al., 2021) 搜尋最佳理想曲面。將參考橢圓套疊(mapping)崩塌潛勢範圍並建構各種候選理想曲面，過程中將”參考橢圓”進行平移、旋轉或是偏轉，最終由候選理想曲面中選取面積差異最小者作為最適之理想曲面。圖 2.5 為 Ko et al. (2021) 將”參考橢圓”位移方式，其中實線 $(\overline{p_a p_b})$ 為起始參考橢圓位置，虛線 $(\overline{p'_a p'_b})$ 為位移後參考橢圓位置。

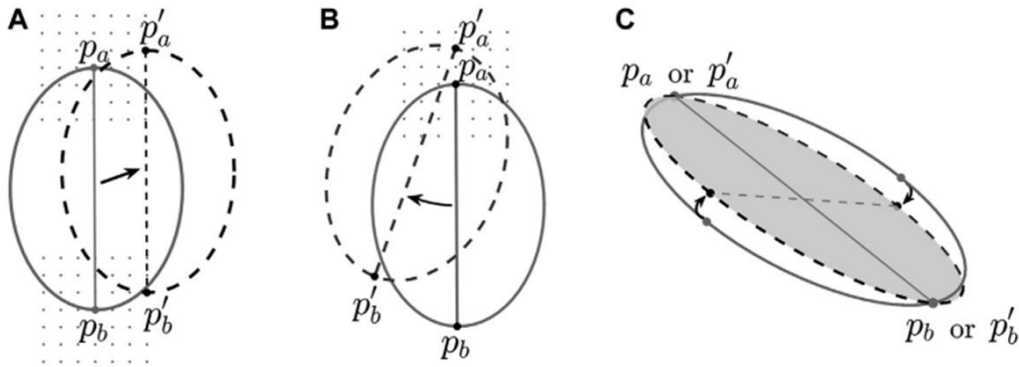


圖 2.5 參考橢圓位移方式：(A)平移、(B)旋轉、(C)偏轉

(圖資料來源：Ko et al., 2021)

在最終決定最佳理想破壞曲面時，其結果必須近似 Guzzetti et al., (2009) 利用 677 場義大利崩塌事件所迴歸之崩塌面積與崩塌量體之間關係

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}, \quad (2.3)$$

式中 V_L 為崩塌量體(立方公尺)、 A_L 為崩塌表面積(平方公尺)，其優點為簡單易操作。針對已發生崩塌事件者，可透過衛星影像或航照影像搭配災害前期 DEM 即可快速得到崩塌面積對應之可能崩塌量體；若是針對未發生崩塌者，亦可由現場調查或不同遙測成果研判之崩塌潛勢區域作為判斷依據。但須留意上述迴歸式(2.4)並未考量崩塌發生之相關發生機制、地文與水文條件(如地下水分佈、地質條件、地表地形等)。此外，Guzzetti et al., (2009) 迴歸式(2.4)在 95%信賴區間所允許的體積差異高達 7 倍，範圍太廣。Tai et al., (2020) 分析 45 處已發生崩塌區域，雖然迴歸崩塌面積與崩塌量體之間關係式

$$V_L = 0.1405 \times A_L^{1.3923}, \quad (2.4)$$

與 (2.3) 相近，但是其量體誤差則介於為 0.5 ~ 2 倍之間。因此，本案在情境探討中所估算的崩塌量體，在必要時將以(2.3)估算值的 0.5 ~ 2 倍值進行探討。

二、 複合式崩塌破壞面建置

針對本案探討之複合式破壞面建置構想，其主要源自於僅透過災害前後期數值地形資料，往往發現崩塌量體與後續土砂堆積量體存在差異，而此差異可能源自於部分破壞面被掩埋，導致不易研判實際崩塌量體。如圖 2.6 所示，虛線為原邊坡之地形分佈而實線為滑動後最終之土砂分佈剖面圖，若直接應用災害前後期數值地形資料相減所取得之崩塌土體僅有高程遞減處，此往往會出現崩塌土砂量體較堆積土砂量體小之狀況。

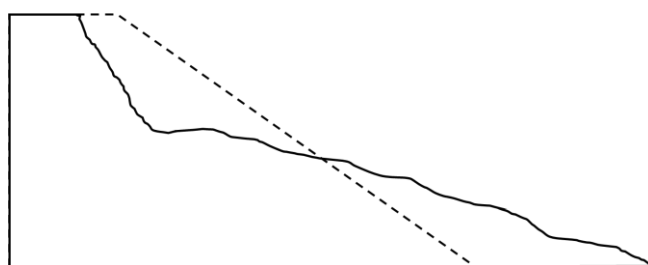


圖 2.6 崩塌破壞面剖面示意圖

因此本案透過系列構想示意圖(圖 2.7 至 2.10)描述本案建置複合式破壞面以及其土砂運移之構想。圖 2.7 之網格範圍為應用理想曲面建置被掩埋之可能破壞面，所推估之崩塌土體將透過土砂運移數值模式推估第一階段之土砂分佈，如圖 2.8 之斜線填充範圍。

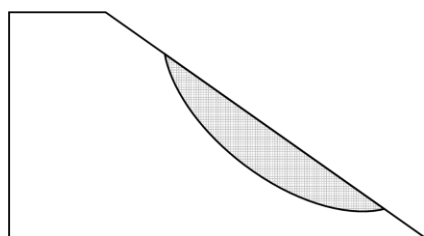


圖 2.7 第一階段破壞面推估

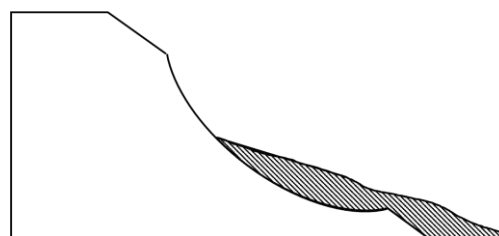


圖 2.8 第一階段土砂運移推估

下一步為第二階段之崩塌破壞面推估(圖 2.9)以及其後續土砂運移推估(圖 2.10 之橫線填充範圍)。由圖 2.10 可發現，第二階段之堆積土砂(圖 2.10 之橫線填充範圍)將掩埋第一階段之堆積土砂(圖 2.10 之斜線填充範圍)以及第一階段之破壞面(圖 2.10 之紅線)。

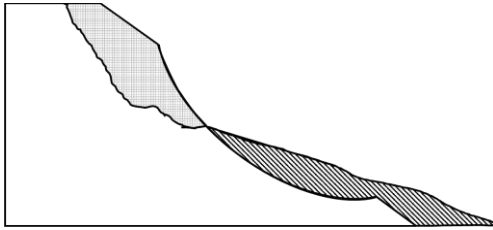


圖 2.9 第二階段破壞面推估

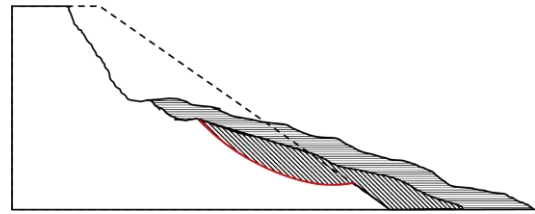


圖 2.10 第二階段土砂運移推估

透過本案提出之複合式滑動破壞面建置方法，可減少崩塌土體被低估之狀況，如圖 2.11 之 A 範圍為僅透過災害前後期數值地形得到之崩塌土砂量體，若透過本案複合式滑動破壞面建置方法，所得到之崩塌土砂量體為圖 2.12 之 B 範圍，相較與 2.11 之 A 範圍其土砂量體將較貼切實際之堆積土砂量體。其中 Tai et al. (2019)有提到當所推估之崩塌量體與實際狀況差異不大，其後續推估土砂影響範圍以及最終土砂分佈將更加符合實際狀況。

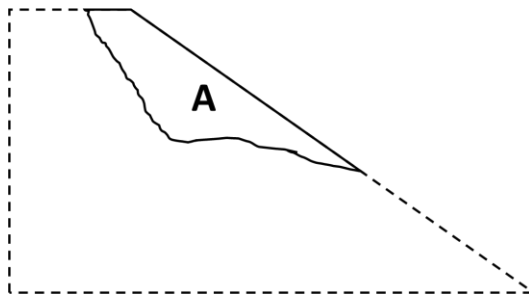


圖 2.11 僅透過災害前後期取得之崩塌土砂量體分佈

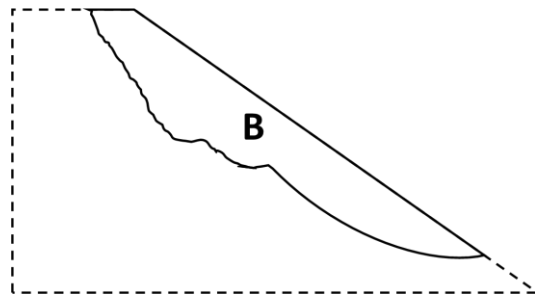
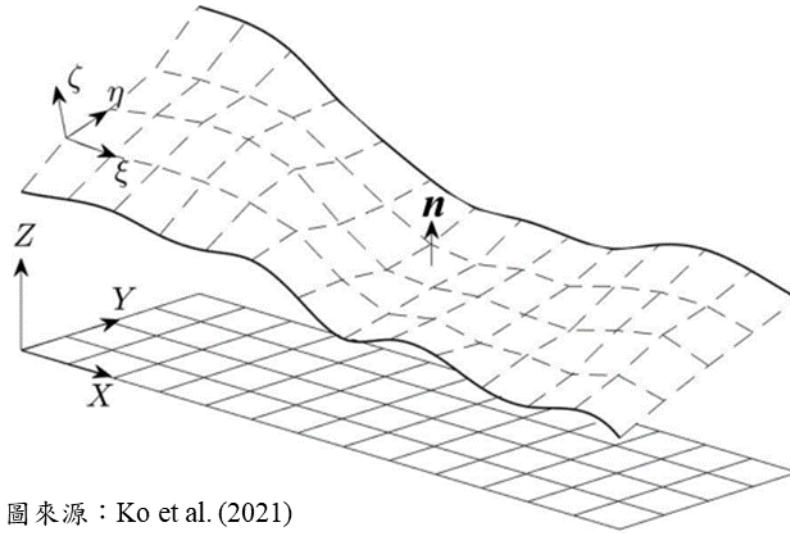


圖 2.12 複合式崩塌破壞面對應之崩塌土砂量體分佈

三、 土砂動態運移模式

本案延伸應用由 Wong et al. (2024) 發展之 GPU 加速之冲刷堆積二相流土砂運移數值模式，其主要運算原理基於 Tai et al. (2019) 發展之固-液相流土砂運移並整合現階段討論度極高的 GPU 高速平行運算模組。由 MoSES_2PDF (Ko et al., 2021) 中有提到應用相同模擬尺度下，應用 RTX-2080Ti 顯示卡與傳統單核心運算所節省之運算耗時可縮短 120 倍以上。因此對於評估土砂災害規模需求下，本團隊所發展之 GPU-CUDA 高效率運算模式可於有限的時間內模擬更多的情境作為實施防災應變工作考慮依據。

本團隊發展之 MoSES_2PDF 屬於固-液兩相之連續體，並搭配由 Tai et al. (2012) 提出之地形座標系統 (圖 2.6) 所整合的土砂動態模擬數值模式。雖然 MoSES_2PDF 與 FLO-2D 同樣為深度積分的理論模型且僅考慮連續方程式與通量方程式，但 MoSES_2PDF 數值模式針對固體相與液體相的守恒方程式分別考慮，所以一共包含六個方程式(FLO-2D 僅有三個方程式)。而 MoSES_2PDF 數值模式採用 Non-Oscillation Central Scheme (NOC) 有限體積演算法 (Kurganov and Tadmor, 2000; Kurganov and Miller, 2014)，因此此數值模式可模擬震波 (Shock Wave) 與水躍 (Hydraulic Jumps) 現象，不像 FLO-2D 或是 HyperKANAKO 數值模式需要額外的 artificial diffusion 項。此外，MoSES_2PDF 可分別計算固體相與液體相各自的守恒方程式，因此可描述土砂運移中固液相分離的現象，也可描述不同土砂濃度的土石流匯聚時的現象。



圖來源：Ko et al. (2021)

圖 2.6 地形座標系統轉換(示意圖)

後續採用本團隊已發展 MoSES_2PDF 之參數設定界面提高使用者之便利性，其中圖 2.8 為開啓界面，其中包含 7 個功能，A 與 B 之選項為可應用 ASC 與非 ASC 格式之數值地形檔進行二相流土砂運移模式模擬；C 選項為將模擬結果轉換成 GIS 系統可讀取之 ASC 格式檔案；D 選項為匯入正射影像作為本團隊開發之三維互動式地形呈現模式；E 與 F 之選項為本團隊發展之三維互動式地形呈現模式，其主要功能為將所推估之土砂運移分佈以及路徑應用三維使用者互動式之方式提供使用快速預覽，如圖 2.9 所示，此優勢為可更加直觀探索檢視土砂影響範圍。

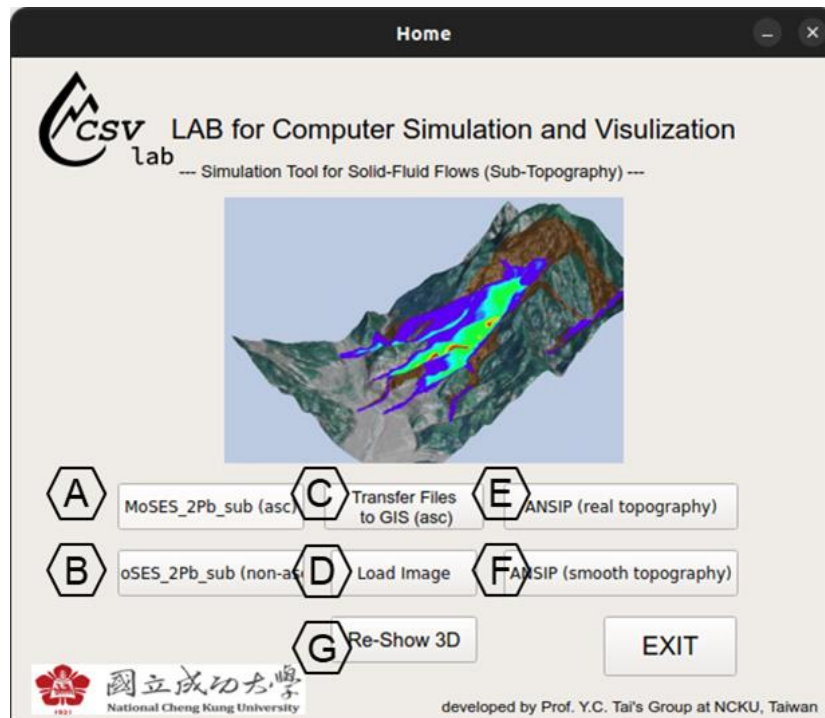
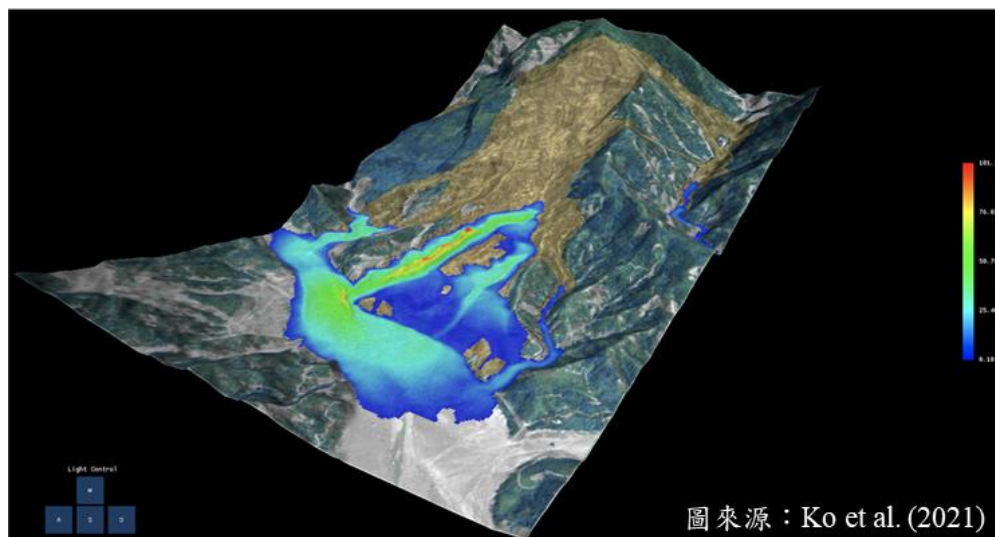


圖 2.8 MoSES_2PDF 開啓界面



圖來源：Ko et al. (2021)

圖 2.9 三維互動式地形呈現模式

第三節 評估指標

因本團隊發展之 GA-ER-ICS 以及二相流土砂運移模式，初衷為在缺乏詳細現場調查資料下，進行可能崩塌量體以及其後續可能影響範圍之推估。而本案在具備災前 LiDAR-based DEM、災後 DSM 與正攝影像之前提下，提出由 GA-ER-ICS 搭配二相流土砂運移模式，篩選最合適之組合以及滑動塊體釋放時間。因此本案應用 2 種指標因子作為評估不同組合情境下之推估結果，包含最終土砂深度方均根(點資料)、路徑覆蓋率(面資料)。由諸多預測結果中選出評估指標表現優良作為最合適之 GA-ER-ICS 以及滑動塊體啟動時間。有關本案提出之評估指標詳細說明如下：

深度方均根(RMS_{fp})

此評估指標為依據災害前後數值地形資料研判高程隆起處(土砂堆積區域)設置堆積參考點，將此位置上之高程變化值作為參考堆積深度 $d_{X,Y}^{ref}$ ，因此應用方均根方式計算其偏差，如可使用

$$RMS_{fp} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{X,Y}^{ref} - d_{X,Y}^{fp})^2}, \quad (2.6)$$

式中 $d_{X,Y}^{fp}$ 為土砂運移數值模式推估之最終土砂堆積深度、及 n 為堆積參考點總數量。當深度方均根趨近於 0 時，代表所推估之最終土砂堆積分佈與實際堆積分佈一致。

路徑覆蓋率(Λ_{fp}^{path})

本案數值模式中的終止條件則是參考 RAMMS 手冊 (2017) 應用動量比(平均動量/最大動量)之建議值，將動量比小於 1%~10% 作為模式終止條件。而土砂影響範圍則是參考 Hutlimann et al. (2008)與

Rickenmann (2005)提出之土石流風險地圖分級概念，將流動深度大於 0.1 m 與流速大於 0.11m/s 流經範圍標示為土砂影響範圍。將前述所推估之影響範圍與災後 UAV 拍攝之正射影像，將地表裸露或是可見之土砂混合體所覆蓋之範圍進行面積重疊計算，其計算式可透過

$$\Lambda_{fp}^{path} = 1.0 - \frac{|A_{fp}^{path} - A_{fp \cap ref}^{path}| - |A_{ref}^{path} - A_{fp \cap ref}^{path}|}{A_{ref}^{path}}, \quad (2.7)$$

式中 A_{fp}^{path} 代表由土砂運移行為模式推估之影響範圍、 A_{ref}^{path} 代表由災後 UAV 產製之正攝影像研判之地表裸露區域、與 $A_{fp \cap ref}^{path}$ 為模擬與實際土砂影響範圍之交集。其中路徑覆蓋率 Λ_{fp}^{path} 趨近於 1 代表所推估之結果與災後正攝影像研判之地表裸露區域之吻合度逐漸增加。

最終本案應用上述 2 種評估指標，篩選最合適之土砂組合以及不同滑動塊體釋放時間點為本案之核心工作項目。

第三章 研究區域簡介

經過評估近年台灣發生之大規模崩塌事件，本案決定選取新北市-汐止區-D003 (2022 年鵠鵠崙崩塌事件) 作為本案之研究區域。本章節為彙整水保署臺北分局 (2022) 之秀巒崩塌區域與李哲宇等人 (2023) 之鵠鵠崙崩塌事件之環境與災害規模簡介。

鵠鵠崙崩塌位於新北 DF197 土石流潛勢溪流之中游處，於 2022 年 10 月 17 日因尼莎颱風帶來大量降雨，造成 D003 鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區域發生崩塌，崩塌土體進一步沿着支流河道最終堵塞於主河道之土石流潛勢溪流(新北 DF197)。由圖 3.1 可見，因下游河谷狹隘，導致大量崩塌土砂堵塞於下游河谷處，進而造成原大規模崩塌潛勢區域之坡趾處堆積大量的覆土層，進而當推估其可能崩塌量體時存在高度之不確定性。



圖 3.1 鵠鵠崙崩塌事件後災後現場崩塌狀況照片
(圖來源：<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=l3AA6F2UZCU>)

雖然於災後有進行 UAV 產值地形資料(DSM)，但僅只能瞭解地表高程變化，若應用此高程變化作為崩塌量體的依據，則存在低估之狀況，如李哲宇等人 (2023) 中有提到經災害後現場調查並研判此事件之崩塌量體為 $83,538 \text{ m}^3$ 而土砂堆積量體則是 $131,308 \text{ m}^3$ 。

第一節 地文

如圖 3.2 所示，彩色變化為 2014 年 LiDAR-based DEM 之高程數據，其解析度為 1 m；紅色框為本案應用災害前後期數值地形資料相減後得知災害前後期高程降低範圍；黃色框則應用災後 UAV 正攝影像(影像拍攝時間：2022 年 10 月 20 日，災害發生後 3 天)，圈繪地表裸體露區域，包含崩塌發生區域至最終土砂堆積範圍，作為後續影響範圍評估其路徑偏差用。由地形高程可見，原本邊坡滑動塊體之崩崖處屬於陡峻狀況，而原邊坡坡趾處已發展明顯的向源侵蝕溝，導致滑動塊體處於不穩定的狀況。

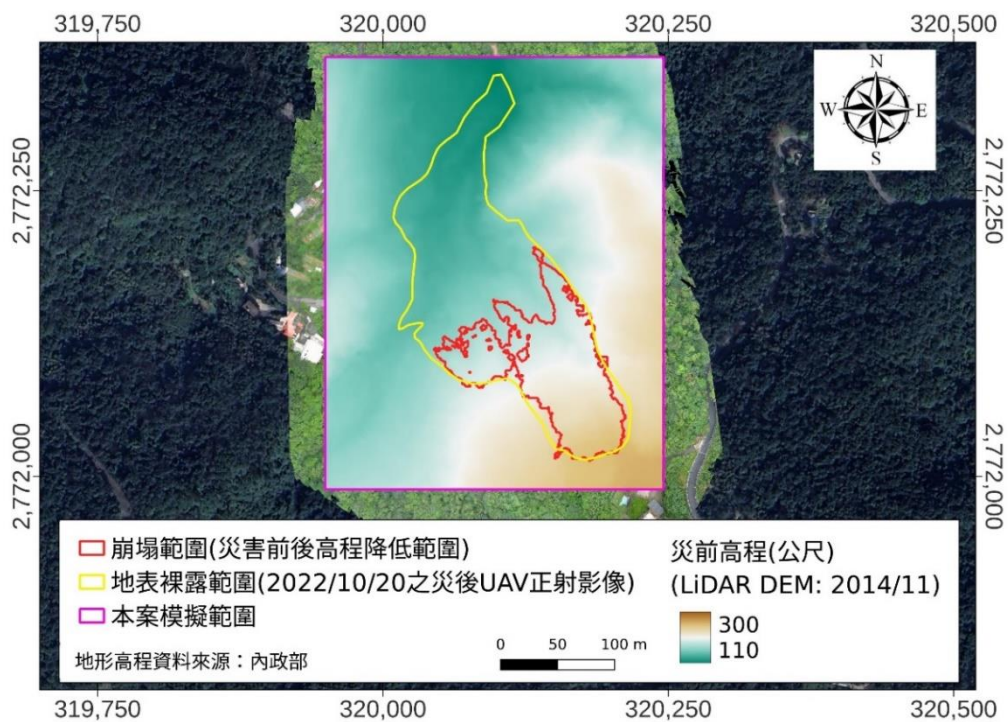


圖 3.2 鵠鵠崙崩塌潛勢區域 2014 LiDAR 地形圖

於 2022 年 10 月 20 日(災害發生後三天)，水保署立即派員進行現場調查以及進行 UAV 拍攝製作災後 DSM 地形資料。如圖 3.3 所示，彩色變化為災後 UAV 產製之 DSM 高程資料，其解析度為 1 m；相較與災前地形資料，可見崩塌塊體(紅框)面積為 14,424 m² 內平均高

程降低約為 7.0 m，而下游堆積區域最大堆積深度為 21.2 m，由災後調查後李哲宇等人 (2023) 研判崩塌劉量體為 $103,800 \text{ m}^3$ 以及土砂堆積量體為 $131,308 \text{ m}^3$ 。

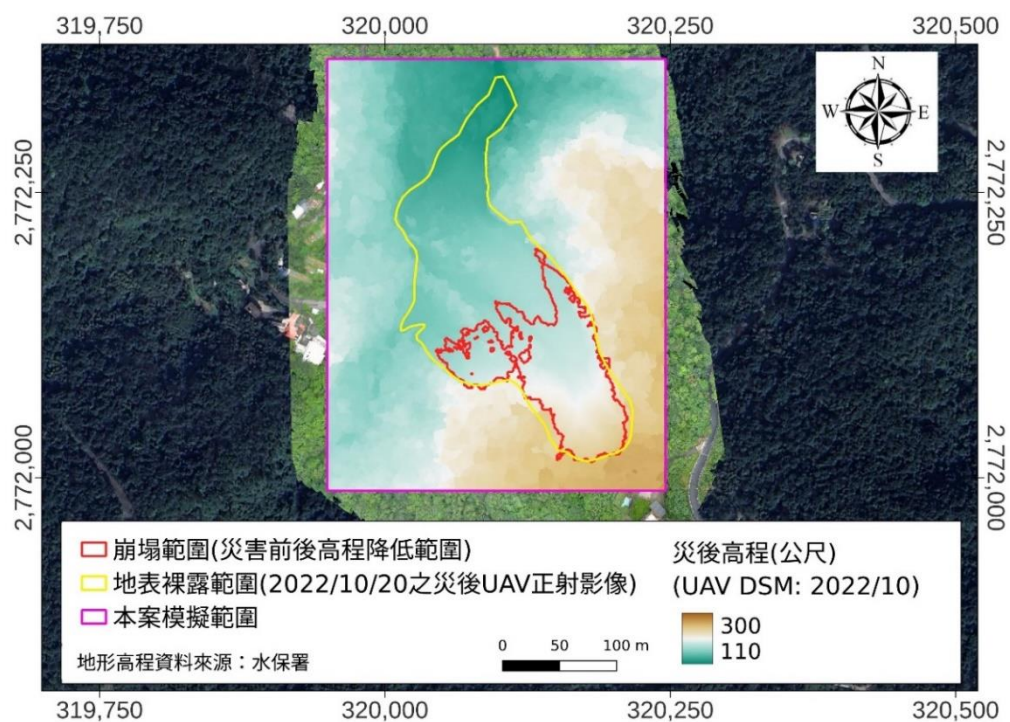


圖 3.3 鵠鵠崙崩塌潛勢區域災後 UAV 產製 DSM 地形圖

第二節 評估指標資料處理

本案主要透過建置複合式崩塌滑動塊體搭配情境設計方式，快速推估土砂可能影響範圍，最終應用風險地圖方式呈現。當具備災害後數值地形情況下，本案可應用其作為篩選最合適之參數組。因水保署所製作之災後地形資料屬於 DSM 高程資料，於堆積區域包含了傾斜之植被。因本案所使用之冲刷堆積二相土砂運移數值模式主要描述土砂造成之地表變化，因此本案基於 UAV 產製 DSM 高程資料於植被範圍進行平滑化處理，最終可快速將 DSM 高程資料轉換至 DEM 高程資料。如圖 3.4 所示，彩色變化為重新製作之 DEM 高程資料，相較於 DSM 高程資料，下游堆積處之植被範圍內之高程平均降

低 2.0 m，且較平滑分佈，此方式可應用既有之 UAV 產製 DSM 快速轉換至 DEM，對於不考慮植被運移行為之土砂運移數值模式結果比較將更加友善。

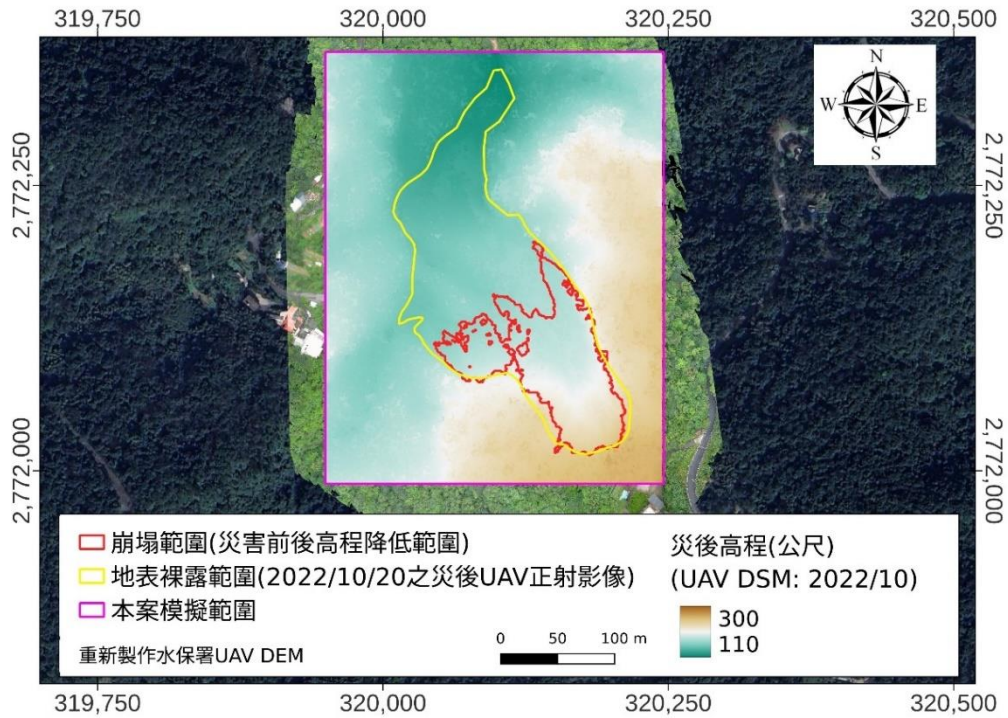


圖 3.4 鵠鵠崙崩塌潛勢區域災後快速轉換之 UAV 產製 DEM 地形圖

本案透過快速建置複合式崩塌滑動塊體搭配不同土砂組成成分之所推估之風險地圖，最終所推估之地表高程變化深度偏差(方均根)則是應用在土砂堆積範圍內之災後 DEM 高程資料為依據。而土砂路徑偏差率部分，本案應用災後 UAV 拍攝之正射影像地表裸露區域(如圖 3.4 黃框)作為基準範圍，與本案進行之土砂運移行為模擬推估之影像範圍比較。

第四章 複合式崩塌破壞面建置

第一節 破壞面建置方法

本案延伸應用本團隊發展之 GA-ER-ICS 推估崩塌事件之複合式崩塌滑動塊體之破壞面。如圖 4.1 所示，本案於大規模崩塌潛勢範圍內建置 3 組 GA-ER-ICS 之起始搜尋橢圓，其中以深藍色標示之“主 1”為原邊坡坡趾處，即此投影面長度為潛勢範圍之一半長度；以螢光綠標示之“主 2”為原邊坡整體範圍；以螢光藍標示之“側 1”為南側之另一崩塌滑動塊體。而 GA-ER-ICS 所需之起始搜尋點(點)，包含上邊界點(P1)設定於指定位置或崩塌潛勢範圍內；下邊界點(P2)於原潛勢邊坡之坡趾處或河岸上，左右邊界點(P3 與 P4)則是由原邊坡之分水嶺為界限。皆有上述 P1、P2、P3 及 P4 起始搜尋點即可透過 GA-ER-ICS 快速建置理想崩塌曲面，以及其對應之崩塌土砂分佈。

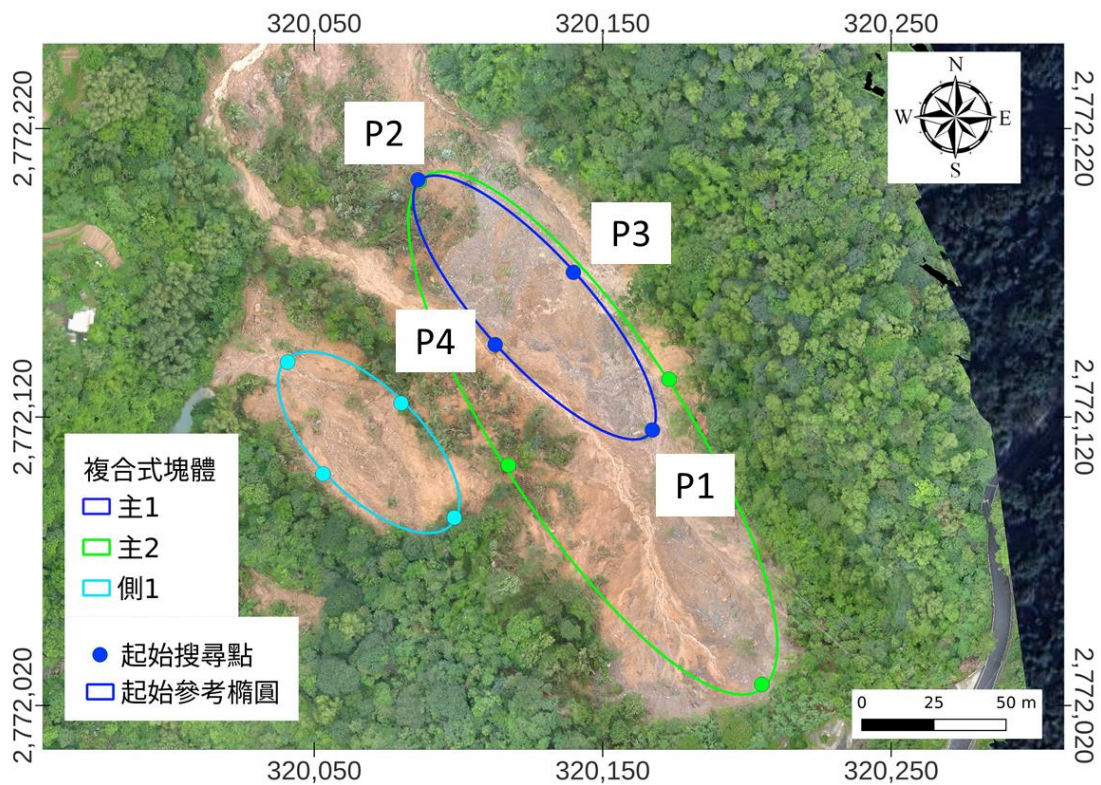


圖 4.1 複合式 GA-ER-ICS 起始搜尋點分佈圖

GA-ER-ICS 主要優勢為搜尋方式具備高彈性且無需現場詳細調查資料，因此在設定起始搜尋點時只需提供大約的位置，後續則可透過基因演算方式產生不同起始參考橢圓，並搜尋該參考橢圓內安全係數最小者之理想崩塌曲面，作為近似實際崩塌破壞面。如圖 4.2 所示，粉紅點為起始搜尋點、粉紅橢圓為起始參考橢圓、灰藍點為搜尋點可配置位置，螢光藍點則是 GA-ER-ICS 經過放大起始搜尋點後自動產製之參考橢圓(螢光藍橢圓)，除了放大以外 GA-ER-ICS 也具備縮小參考橢圓之能力。

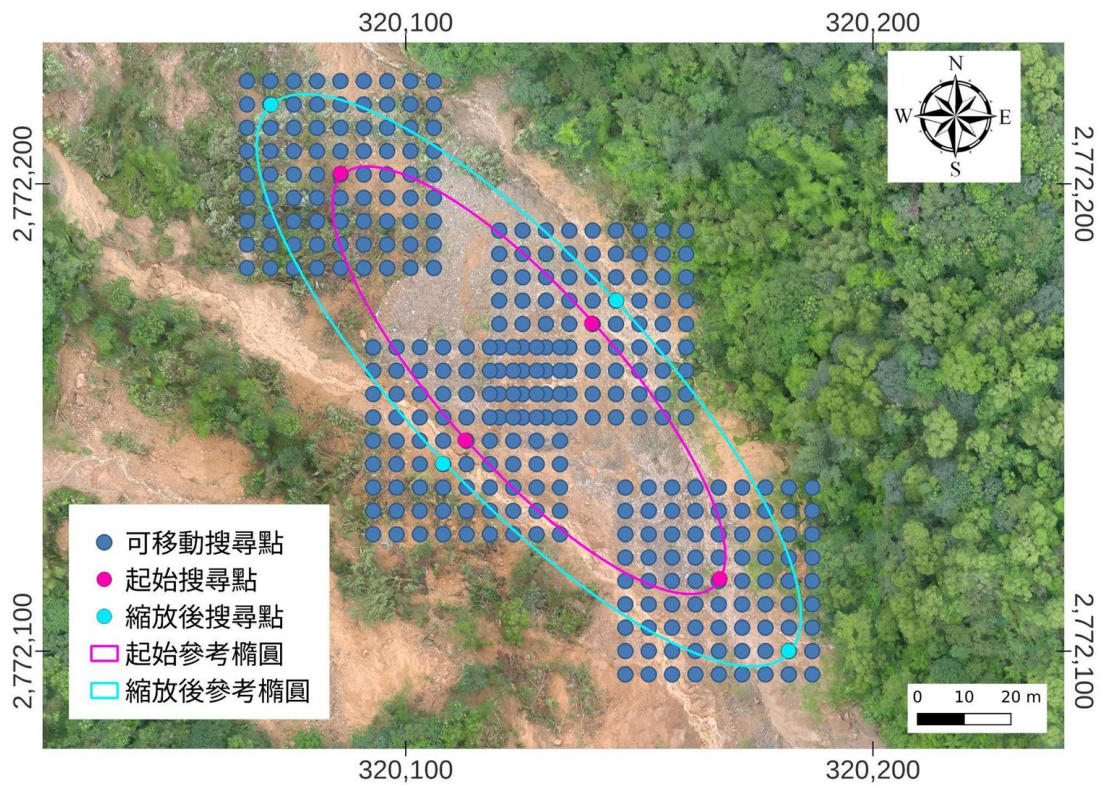


圖 4.2 GA-ER-ICS 可搜尋範圍之放大縮小參考橢圓示意圖

除此，GA-ER-ICS 也具備平移以及旋轉參考橢圓之功能。如圖 4.3 所示，黃點與黃橢圓為 GA-ER-ICS 經過平移後產生之新參考橢圓；圖 4.4 之螢光綠則是 GA-ER-ICS 經過旋轉後產生之參考橢圓。

此系列功能最大優勢為當不確定實際崩塌範圍時，無需透過人工方式決定可能崩塌範圍之邊界。

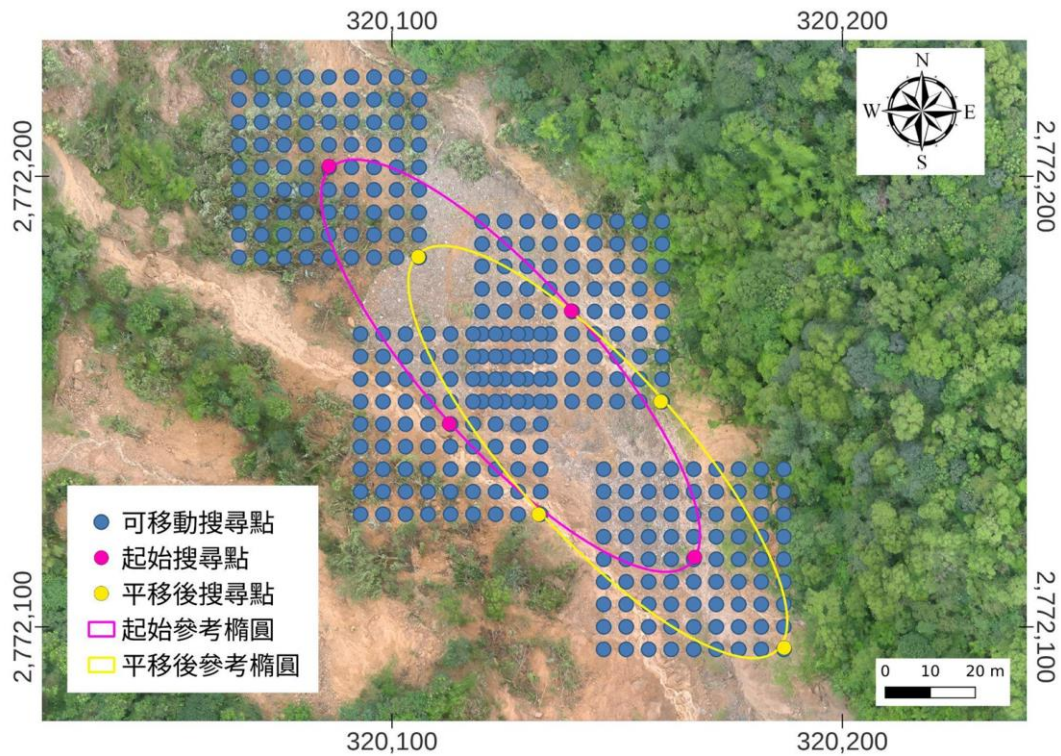


圖 4.3 GA-ER-ICS 可搜尋範圍之平移參考橢圓示意圖

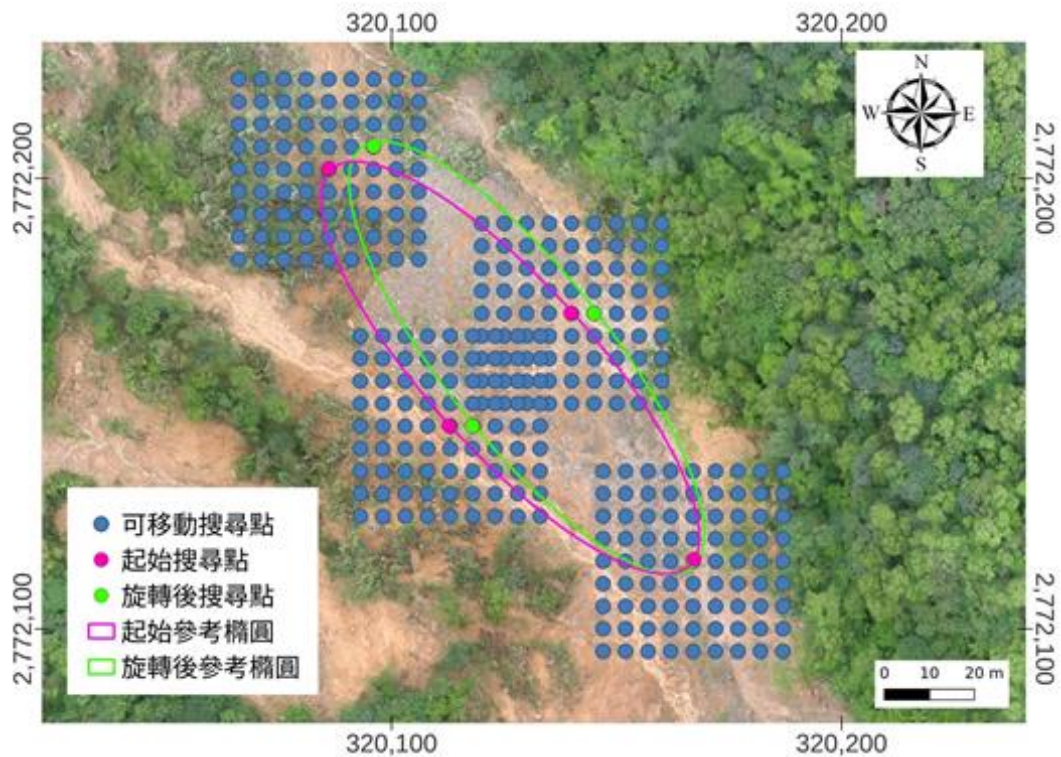


圖 4.4 GA-ER-ICS 可搜尋範圍之旋轉參考橢圓示意圖

其中李哲宇等人 (2023) 提及因崩塌滑動塊體未完全滑落，導致不易辨識其確切崩塌範圍。因此本案於未知崩塌範圍與量體前提下，建置 3 種規模等級之破壞面分別為 Guzzetti et al. (2009) 迴歸之崩塌面積-體積經驗公式 0.5、1.0 以及 2.0 倍數建置理想崩塌曲面，其中最終篩選之破壞面也即為候選者中安全係數最小者。

第二節 破壞面建置結果

本案着重於建置複合式崩塌破壞面之後續土砂影響範圍推估，現階段本案僅將主崩塌塊體分為 2 階段滑動，且第一階段之推估之崩塌破壞面水平投影距離為整體潛勢區域之一半長度，假設為整體崩塌事件之原邊坡趾部或被覆土層掩埋之破壞面；第二階段之崩塌滑動則是整體潛勢區域。基於此假設前提下，第一階段推估之破壞面高程將比第二階段之破壞面高程低，因此在兩者重疊處本案以破壞面高程作為分割崩塌土砂深度之依據。

圖 4.5、4.6、4.7、4.8、4.9 與 4.10 為 GA-ER-ICS 推估 0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 及 3.5 倍崩塌面積-體積之崩塌土砂分佈：(a)為位於原邊坡坡趾處之“主 1”崩塌土砂分佈；(b)為位於原邊坡坡腹之“主 2”崩塌土砂分佈；(c)為緊鄰主滑動塊體南側之另一集水區的滑動塊體“側 1”；(d)為複合式組合 1 由“主 2”與“側 1”之崩塌土砂分佈整合之複合式崩塌土砂分佈；(e)為複合式組合 2 則是將上述 3 處推估之崩塌土砂分佈整合之複合式崩塌土砂分佈，其複合式整體崩塌土砂量體羅列於表 4.1。

後續工作項目二及三將應用本團隊發展之冲刷堆積二相土砂運移數值模式，搭配 Ma et al. (2022)迴歸之參數組合建議值設計不同組成土砂成分下之影響範圍，且最終應用風險地圖方式呈現。

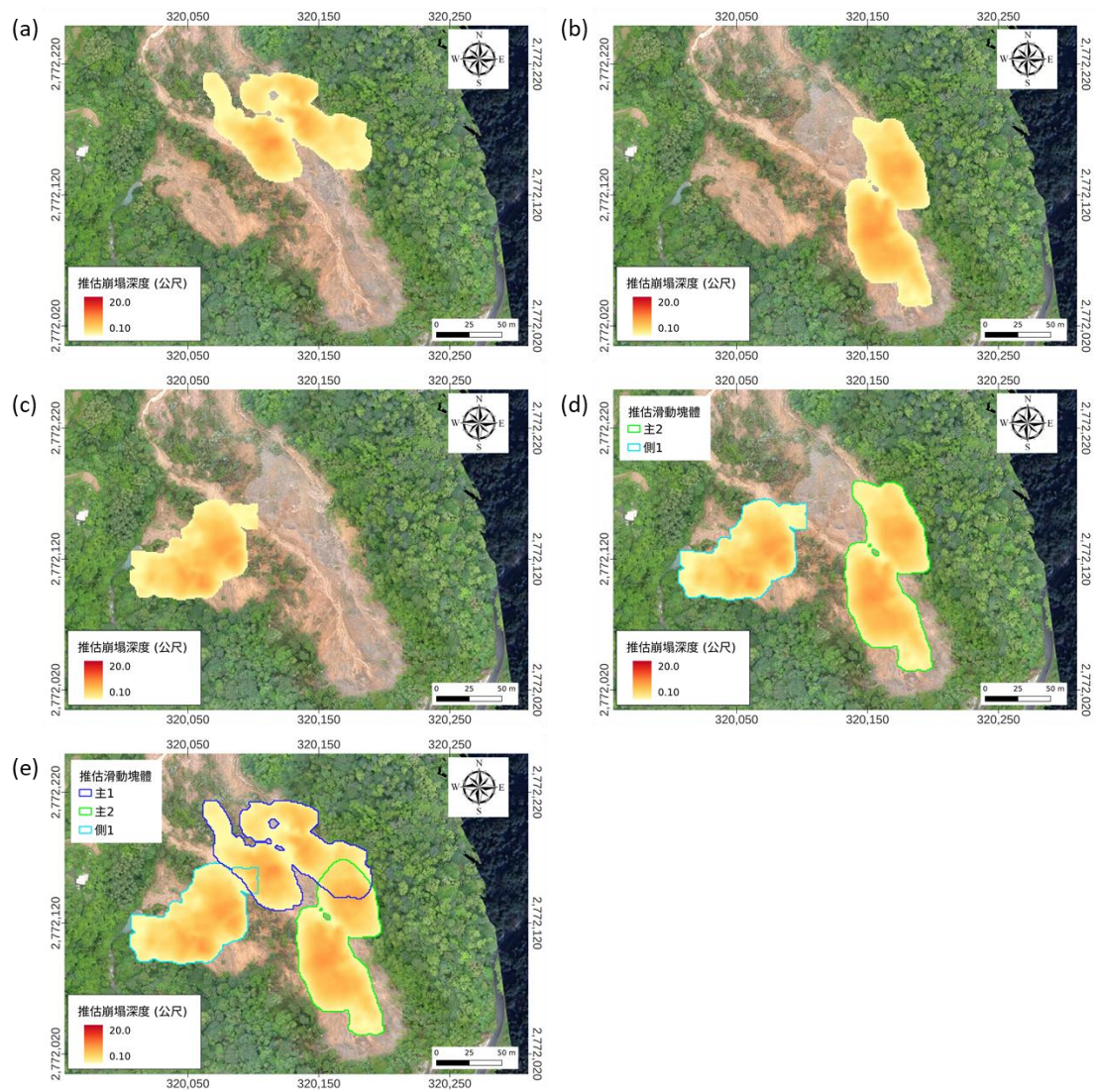


圖 4.5 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍崩塌面積-體積之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖 (a) 主 1；(2)主 2；(c)次 1；(d)複合式組合 1 及(e)複合式組合 2

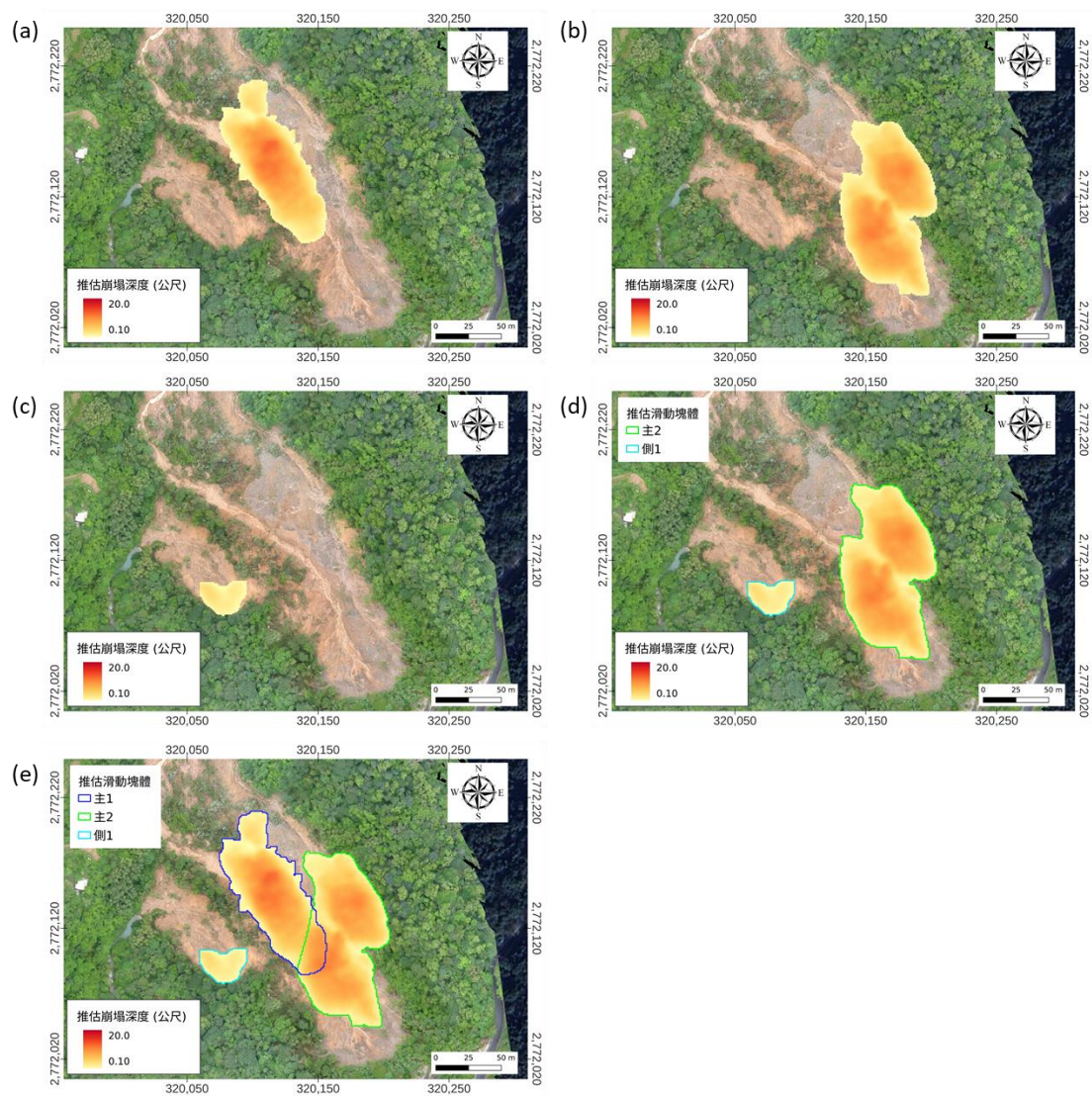


圖 4.6 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍崩塌面積-體積之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖 (a) 主 1；(b) 主 2；(c) 次 1；(d) 複合式組合 1 及 (e) 複合式組合 2

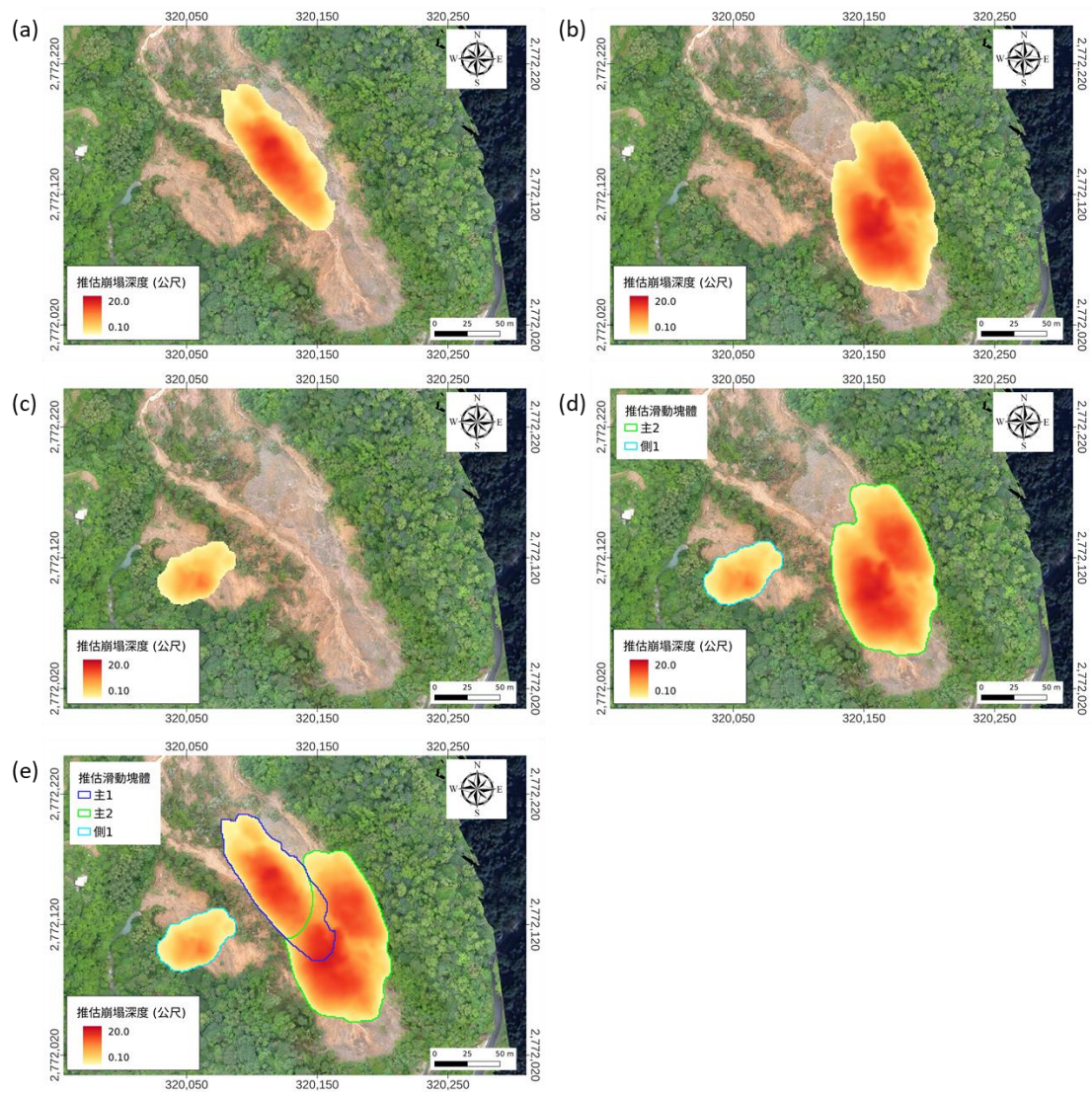


圖 4.7 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍崩塌面積-體積之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖 (a) 主 1；(2)主 2；(c)次 1；(d)複合式組合 1 及(e)複合式組合 2

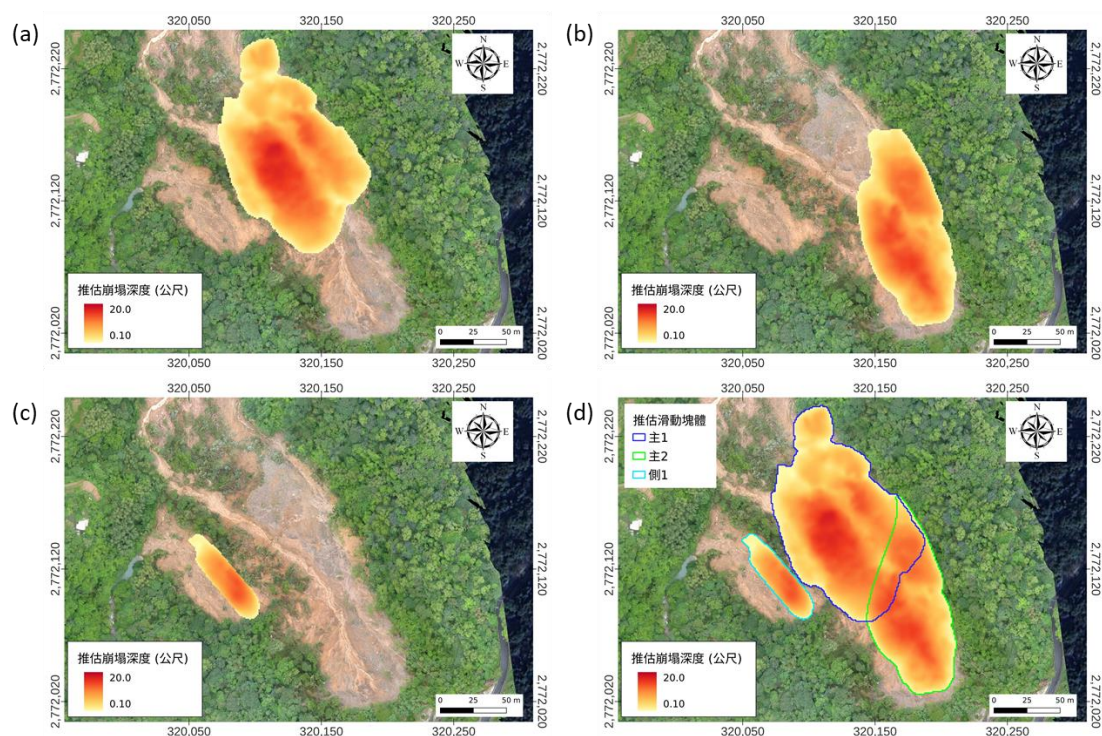


圖 4.8 GA-ER-ICS 推估 2.5 倍崩塌面積-體積之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖 (a) 主 1；(2)主 2；(c)次 1 及(d)複合式組合 2

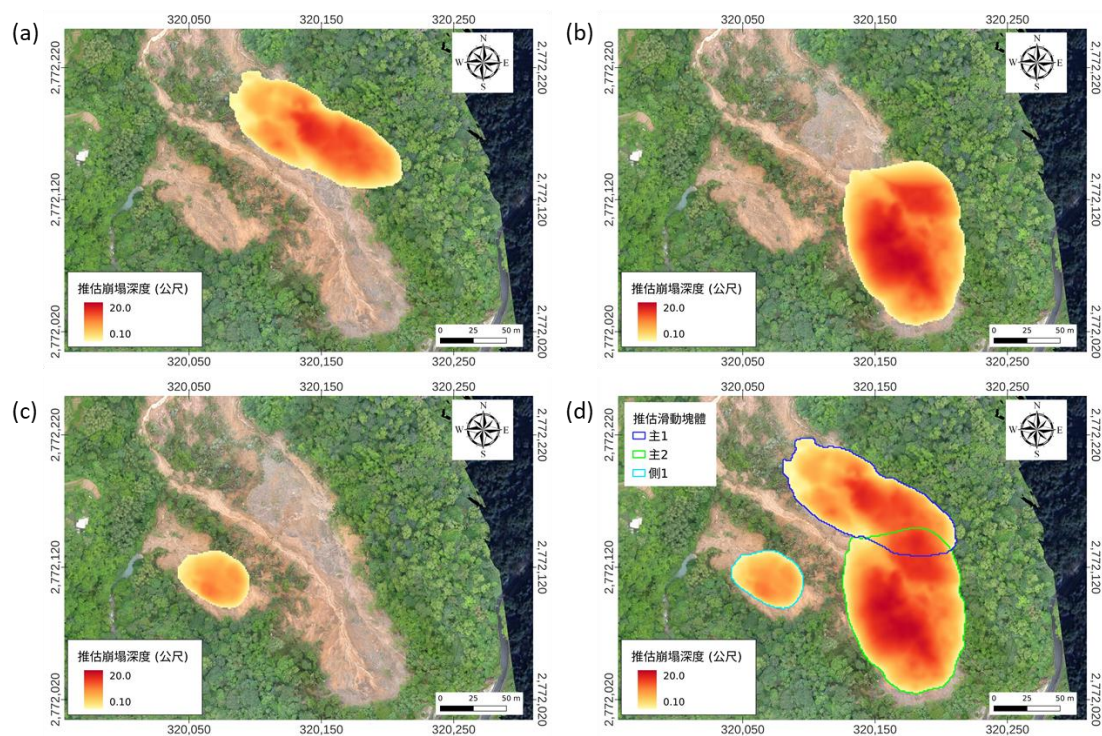


圖 4.9 GA-ER-ICS 推估 3.0 倍崩塌面積-體積之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖 (a) 主 1；(2)主 2；(c)次 1 及(d)複合式組合 2

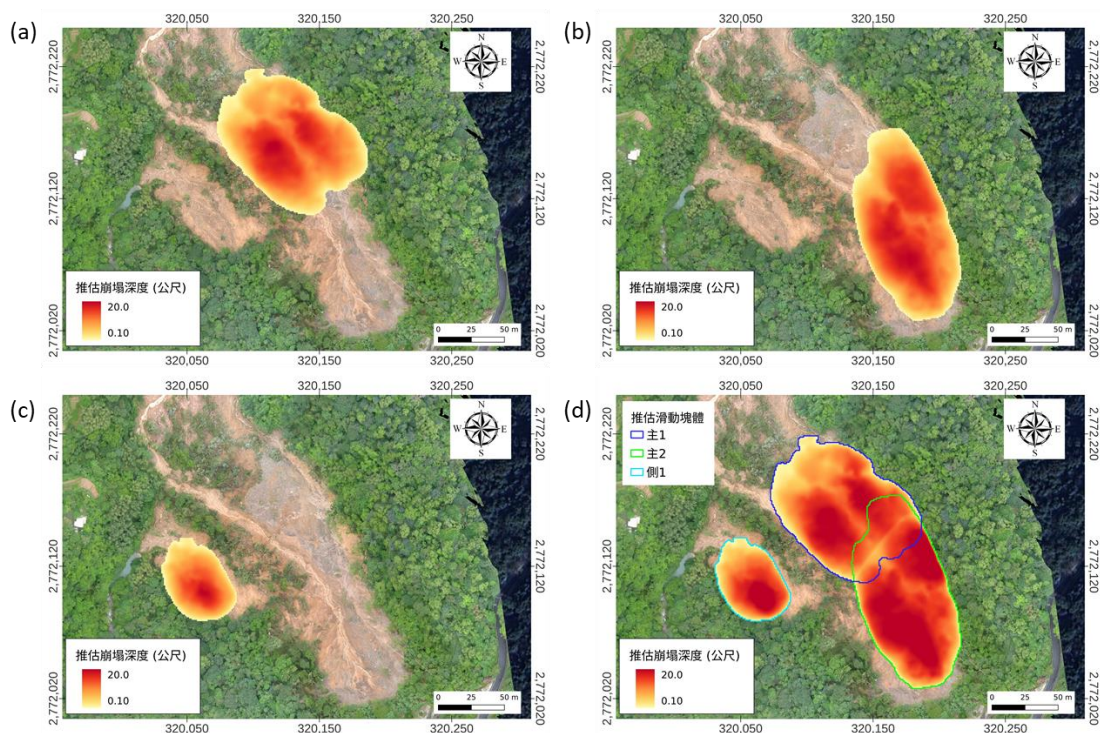


圖 4.10 GA-ER-ICS 推估 3.5 倍崩塌面積-體積之各滑動塊體崩塌土砂分佈圖 (a) 主 1；(b)主 2；(c)次 1 及(d)複合式組合 2

表 4.1 推估之複合式滑動塊體體積一欄表

複合式組合	崩塌面積-體積迴歸式倍數	複合式滑動塊體總體積 (m ³)
複合式組合 1 (“主 2” + “側 1”)	0.5	35,582
	1.0	41,067
	2.0	77,368
複合式組合 2 (“主 1” + “主 2” + “側 1”)	0.5	56,759
	1.0	56,839
	2.0	118,945
	2.5	131,419
	3.0	155,542
	3.5	171,082

第五章 土砂影響範圍推估

當具備工作項目一所推估之崩塌破壞面對應崩塌土砂分佈後，透過延伸應用 Wong et al. (2024) 基於 Tai et al. (2019) 發展之土砂運移行為模式及 Ko et al. (2021) 發展之 CUDA 加速模組，整合冲刷堆積機制，此模式優勢為可描述運移土砂對地表之侵蝕及堆積造成地貌變化的能力。

自防災風險評估角度下，本案所設計之情境主要參考 Tai et al. (2019) 與 Ma et al. (2022) 透過迴歸土砂組成成分與本案應用之土砂運移模式所需之參數組提出之建議值，其主要以間隙流體中不同體積濃度之懸浮細顆粒作為基準，調整參數包含：濃度比（液相/固相）、交互作用係數、液相阻尼係數及類雷諾數，本案將間隙流體自清水流至高含砂流中分為 31 等分，情境編號規則自清水(情境 1) 往高含砂流(情境 31) 遞增，盡可能考慮各可能之流況；而固相摩擦角則是參考 Scheidegger (1973) 提出之“崩塌土砂量體-固相摩擦角”迴歸式，參考李哲宇等人 (2023) 提及崩塌土砂量體 = $103,800 \text{ m}^3$ 為依據，其建議固相摩擦角為最小者(=24°)、最小者(=43°) 以及其中值(=34°)。工作項目二中，將應用工作項目一所推估之 6 種複合式崩塌滑動塊體組合，個別搭配 93 組參數組合進行土砂運移行為模擬，所推估之最終土砂影響範圍依據 Hürlimann et al. (2008) 與 Rickenmann (2005) 之土石流風險分級概念，以流動深度大於 0.10 m 與流速大於 0.1 m/s 為繪製複合式崩塌土砂之影響範圍風險地圖。

第一節 土砂影響範圍風險地圖推估

透過本團隊發展之土砂運移數值模式，針對各滑動塊體同步釋放運移之最終土砂分佈狀況，如圖 5.1 至 5.6 所示，黑虛線為起始崩塌土砂分佈、風險地圖分級方式為藍框為 1%~25% (1~22 筆土砂影響路徑重疊)、25%~50% (23~46 筆土砂影響路徑重疊)、50%~75% (47~69 筆土砂影響路徑重疊) 及 75%~100% (70~93 筆土砂影響路徑重疊)。由災後 UAV 正射影像與土砂影響範圍比較可見，因本案於工作項目一中所預測之崩塌破壞面崩崖位置與實際狀況有差異，導致結果略有表現不佳，但最佳結果之最終土砂堆積深度偏差也僅存在 1.84 m 及路徑覆蓋率為 90%。雖然路勁覆蓋率數據表現不佳，但可發現紅框範圍(75%~100%重疊率)與災後 UAV 正射影像地表裸露範圍一致。此結果對於未應用現場調查資料(崩塌範圍、崩崖分佈、傾斜儀 等)及未考慮地質條件前提下，已具備一定參考性之預測結果。

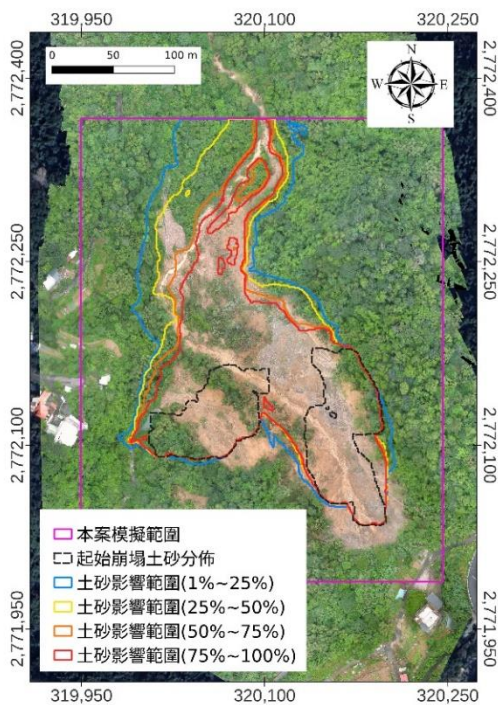


圖 5.1 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 1，同步釋放)

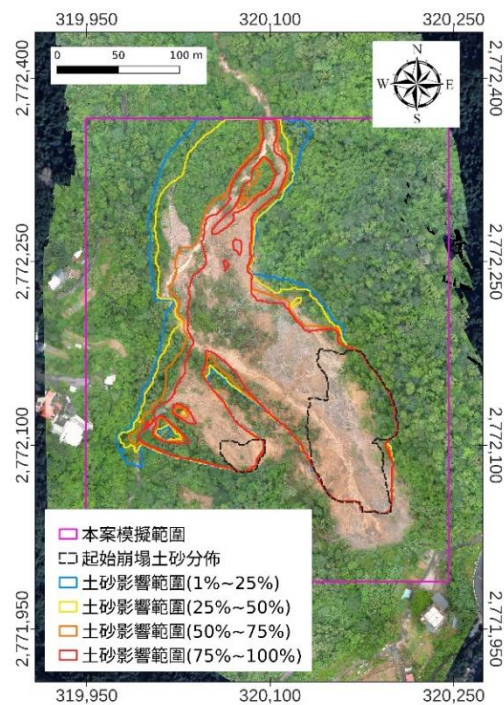


圖 5.2 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 1，同步釋放)

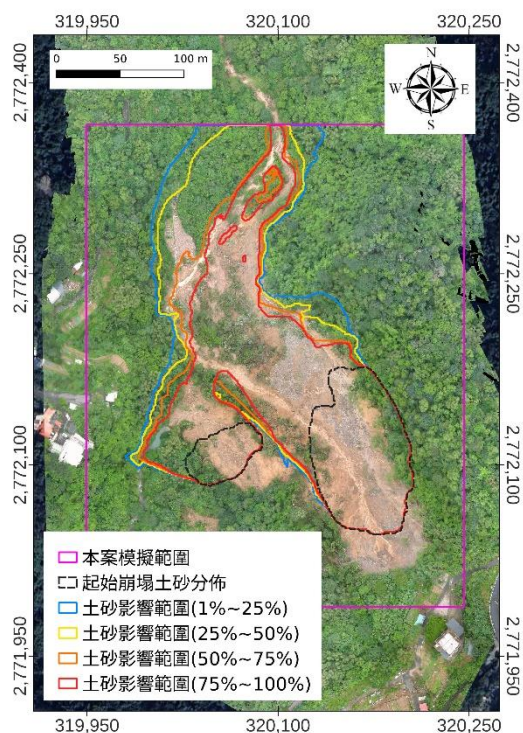


圖 5.3 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 1，同步釋放)

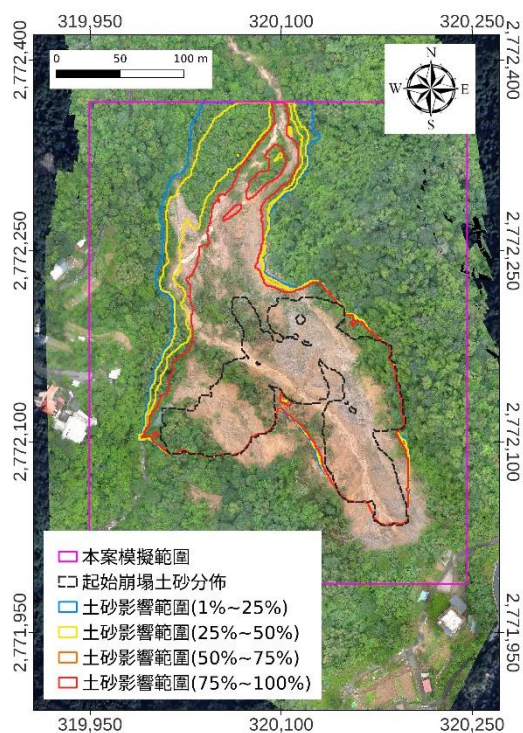


圖 5.4 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，同步釋放)

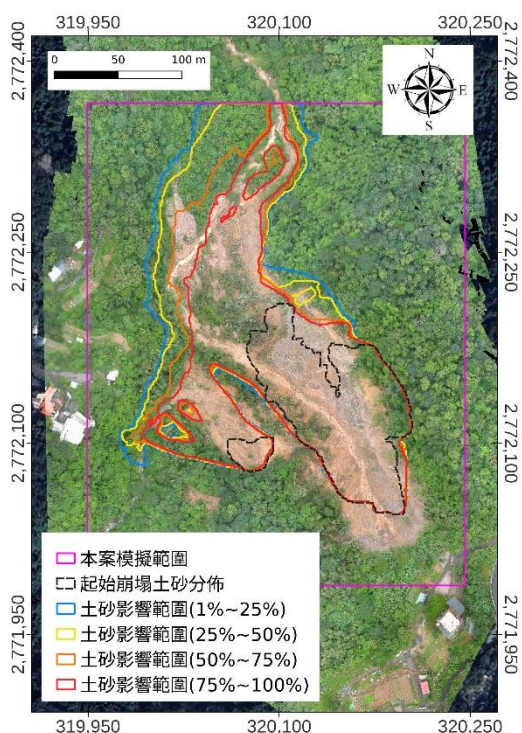


圖 5.5 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，同步釋放)

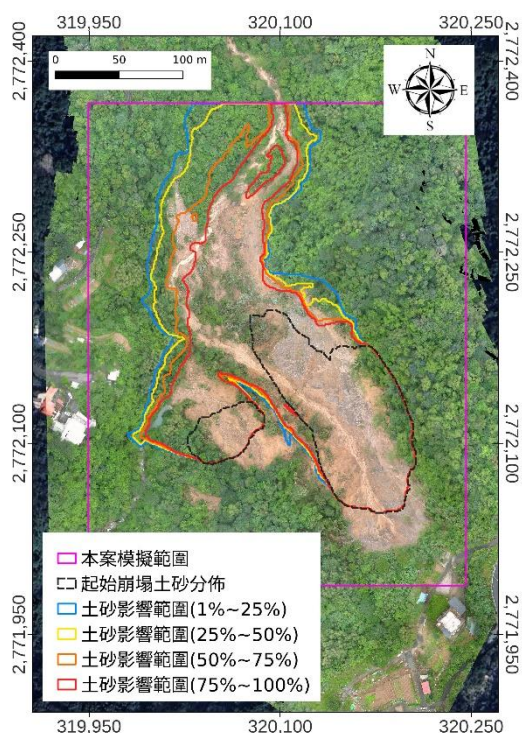


圖 5.6 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，同步釋放)

第二節 地形資料解析度之影響

此外，依據期初審查意見八，本案應用災害前後期得到之地形變化處以及地形資料比較不同解析度下，對於後續影響之影響。本案所比較之解析度包含 0.5、1.0、5.0 及 10.0 m。如圖 5.7 至 5.10 所示，黑虛線為起始崩塌土砂分佈、風險地圖分級方式為藍框為 1%~25% (1~22 筆土砂影響路徑重疊)、25%~50% (23~46 筆土砂影響路徑重疊)、50%~75% (47~69 筆土砂影響路徑重疊) 及 75%~100% (70~93 筆土砂影響路徑重疊)。由災後 UAV 正射影像與土砂影響範圍比較可見，可將細節呈現所需之解析度至少 1.0 m 以下，另解析度=0.5 m 路徑覆蓋狀況與 1.0 m 之解析度差異相同，但需要之計算耗時為 1.0 m 之 4.0 倍以上，因此最終應用地形資料為 1.0 m 解析度即可。

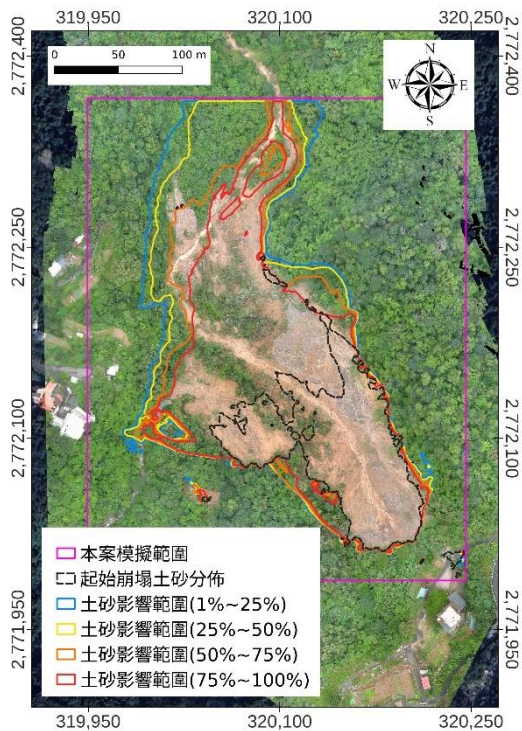


圖 5.7 0.5 m 解析度之風險地圖

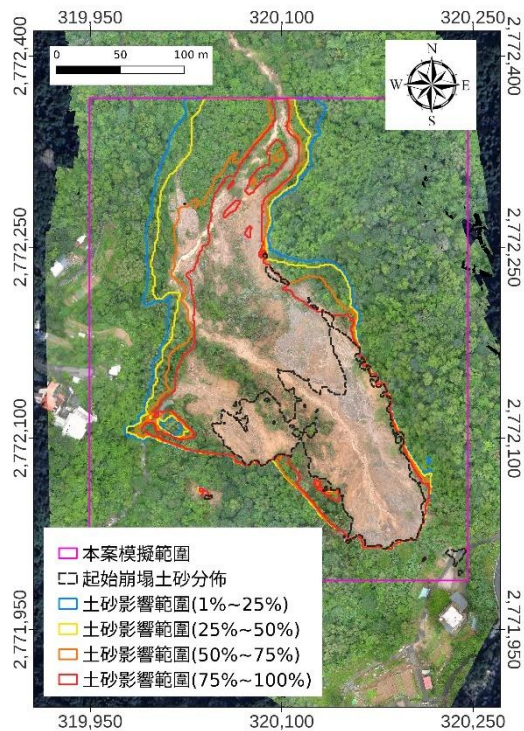


圖 5.8 1.0 m 解析度之風險地圖

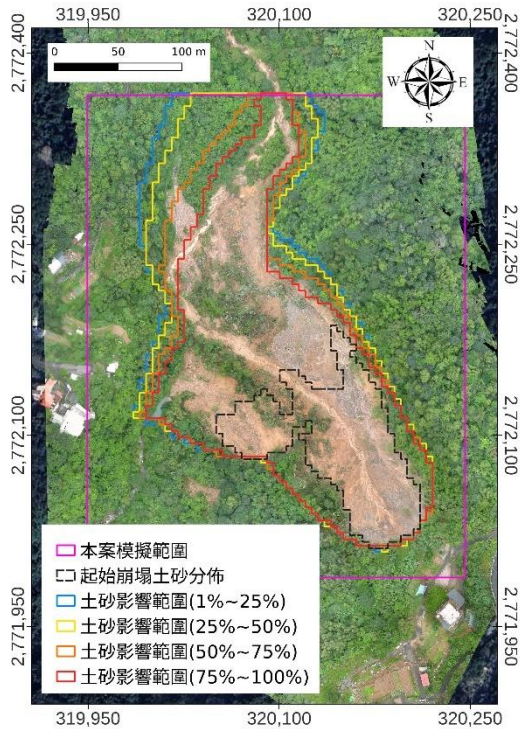


圖 5.9 5.0 m 解析度之風險地圖

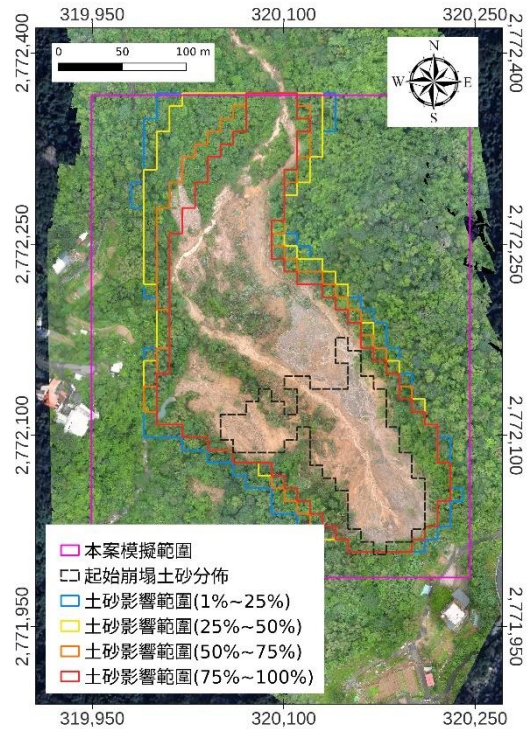


圖 5.10 10.0 m 解析度之風險地圖

第三節 搜尋最合適崩塌量體推估之最終土砂堆積分佈

透過上述風險地圖，本案為了搜尋最合適之崩塌量體對應之破壞面，進一步以增加 0.5 倍為間距方式搭配由前述推估影響範圍中最佳之參數組合：濃度比 (液相/固相)= 0.55/0.45、固相摩擦角=34°、交互作用係數=3.15、液相阻尼係數=2.67、類雷諾數=2,406 及代表土砂粒徑=0.2 m，應用 Wong et al. (2024)之具侵蝕堆積機制之二相流數值模式推估最終土砂堆積分佈。

圖 5.11、5.12、5.13 與 5.14 中，黑虛線為起始崩塌土砂分佈，黃線為應用災後 UAV 拍攝正射影像研判之地表裸露範圍作為計算最終土砂分佈深度偏差之範圍依據。由 2.0、2.5、3.0 與 3.5 倍經驗式所推估之整體土砂分佈均方根為 1.80、1.27、0.89 與 1.48 m，可見 3.0 倍表現最佳，其對應之複合式崩塌量體為 155,542 m³。

第五章 土砂影響範圍推估

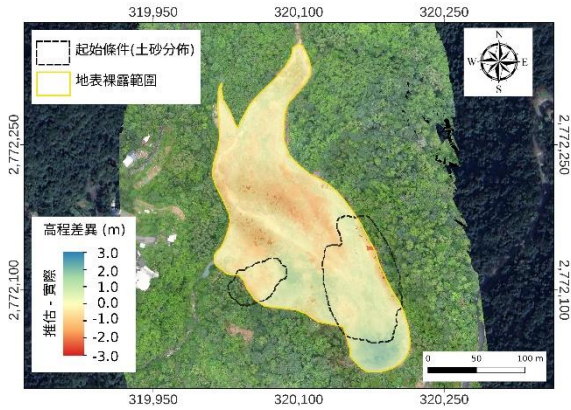


圖 5.11 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍崩塌面積-體積之最終土砂偏差分佈

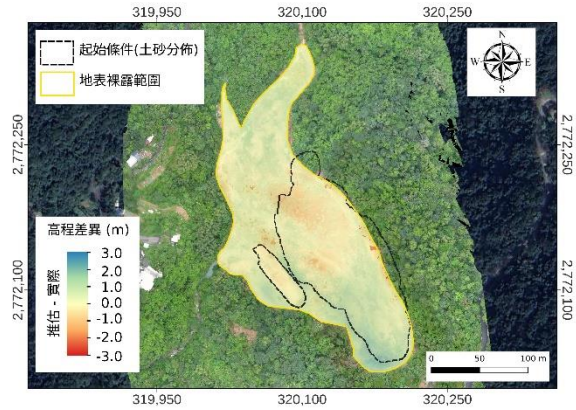


圖 5.12 GA-ER-ICS 推估 2.5 倍崩塌面積-體積之最終土砂偏差分佈

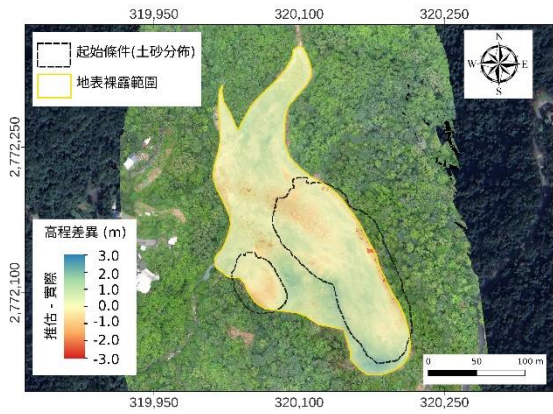


圖 5.13 GA-ER-ICS 推估 3.0 倍崩塌面積-體積之最終土砂偏差分佈

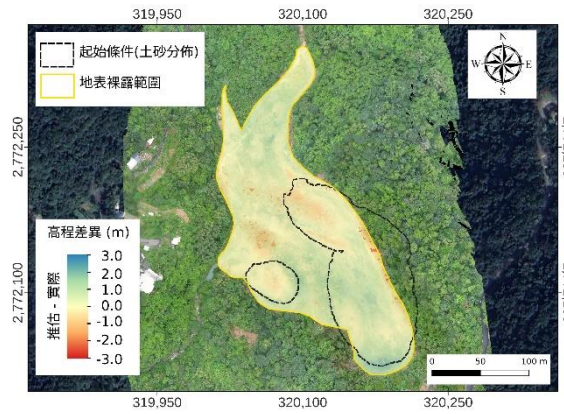


圖 5.14 GA-ER-ICS 推估 3.5 倍崩塌面積-體積之最終土砂偏差分佈

除了應用整體土砂分佈均方根作為評估指標，本案也透過路徑覆蓋範圍進行評估。圖 5.15、5.16、5.17 與 5.18 為所推估之路徑比較圖，黑虛線為起始崩塌土砂分佈，黃線為應用災後 UAV 拍攝正射影像研判之地表裸露範圍作為計算最終土砂分佈深度偏差之範圍依據、紅色範圍為所推估之土砂運移路徑。

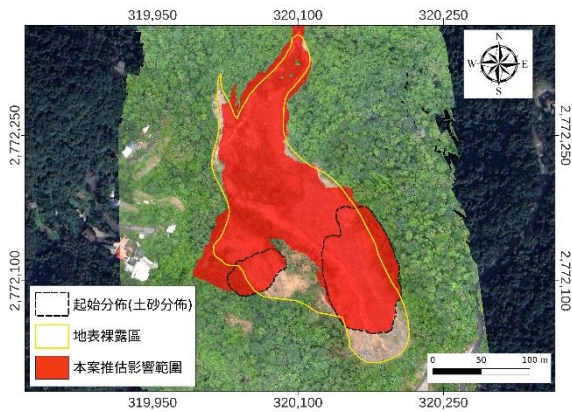


圖 5.15 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍崩塌面積-體積之路徑覆蓋範圍圖

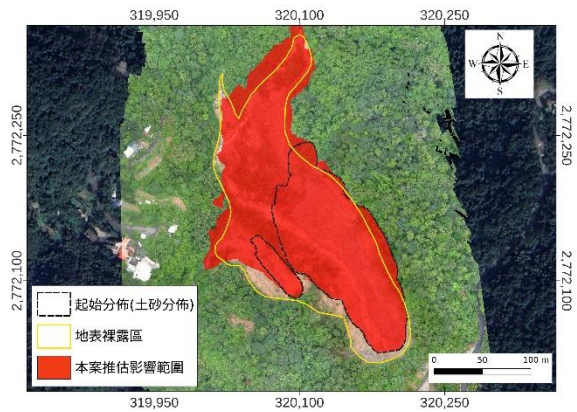


圖 5.16 GA-ER-ICS 推估 2.5 倍崩塌面積-體積之路徑覆蓋範圍圖

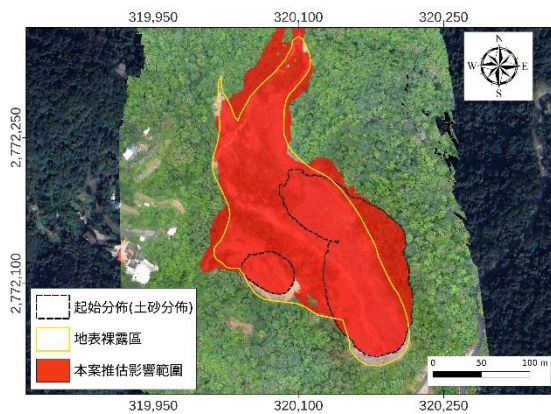


圖 5.17 GA-ER-ICS 推估 3.0 倍崩塌面積-體積之路徑覆蓋範圍圖

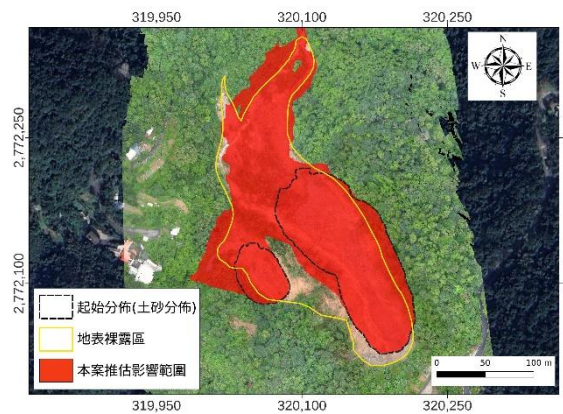


圖 5.18 GA-ER-ICS 推估 3.5 倍崩塌面積-體積之路徑覆蓋範圍圖

小結：

已完成推估同時釋放整體滑動塊體之土砂運移模擬，包含(1)由“主 2”與“側 1”組合之複合式組合 1 及(2)由“主 1”、“主 2”與“側 1”組合之複合式組合 2。經本案推估結果顯示，複合式組合 2 之 3.0 倍崩塌面積-體積迴歸式倍數，其最終土砂堆積深度偏差明顯由 3.53 m 降低至 0.89 m，說明增加考慮原邊坡趾部之崩塌破壞面有其必要性，但 D003 鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區域之下游處之地形崎嶇造成路徑覆蓋率差異僅有 $\pm 5\%$ 。

表 5.1 同步釋放複合式崩塌滑動塊體之評估指標比較一覽表

複合式組合	崩塌面積-體積迴 歸式倍數	最佳情境土砂堆積 深度偏差(m)	最佳情境 路徑覆蓋率 (%)
複合式組合 1 (“主 2” + “側 1”)	0.5	3.53	84
	1.0	3.42	81
	2.0	2.51	86
複合式組合 2 (“主 1” + “主 2” + “側 1”)	0.5	3.24	88
	1.0	2.90	91
	2.0	1.80	87
	2.5	1.27	87
	3.0	0.89	81
	3.5	1.48	83

第六章 滑動塊體釋放時間間隔之影響

工作項目二為複合式崩塌滑動塊體同時釋放之風險地圖繪製，而工作項目三則是透過設計各滑動塊等間距體釋放時間點，包含(a)同步釋放、(b)5 秒秒以及(c)10 秒。

與工作項目二相同，本案所設計之情境主要參考 Tai et al. (2019) 與 Ma et al. (2022) 透過迴歸土砂組成成分與本案應用之土砂運移模式所需之參數組提出之建議值，其主要以間隙流體中不同體積濃度之懸浮細顆粒作為基準，調整參數包含：濃度比 (液相/固相)、交互作用係數、液相阻尼係數及類雷諾數，本案將間隙流體自清水流至高含砂流中分為 31 等分，情境編號規則自清水(情境 1)往高含砂流(情境 31)遞增，盡可能考慮各可能之流況；而固相摩擦角則是參考 Scheidegger (1973) 提出之“崩塌土砂量體-固相摩擦角”迴歸式，參考李哲宇等人 (2023) 提及崩塌土砂量體 = $103,800 \text{ m}^3$ 為依據，其建議固相摩擦角為最小者 ($=24^\circ$)、最小者 ($=43^\circ$) 以及其中值 ($=35^\circ$)。工作項目二中，將應用工作項目一所推估之 6 種複合式崩塌滑動塊體組合，個別搭配 93 組參數組合進行土砂運移行為模擬，所推估之最終土砂影響範圍依據 Hürlimann et al. (2008) 與 Rickenmann (2005) 之土石流風險分級概念，以流動深度大於 0.10 m 與流速大於 0.1 m/s 為繪製複合式崩塌土砂之影響範圍風險地圖。

如圖 6.1 至 6.6 所示，為本案透過複合式組合 2 (包含“主 1”、“主 2”及“側 1”滑動塊體) 所推估之土砂影響範圍則依據 Hürlimann et al. (2008) 與 Rickenmann (2005) 之土石流風險分級概念，以流動深度大於 0.10 m 與流速大於 0.1 m/s 為繪製不同 Guzzetti et al. (2019) 迴歸式下建置之各複合式崩塌土砂之影響範圍風險地圖。

透過本團隊發展之土砂運移數值模式，針對各滑動塊體同步釋放運移之最終土砂分佈狀況，如圖 6.1 至 6.6 所示，黑虛線為起始崩塌土砂分佈、風險地圖分級方式為藍框為 1%~25% (1~22 筆土砂影響路徑重疊)、25%~50% (23~46 筆土砂影響路徑重疊)、50%~75% (47~69 筆土砂影響路徑重疊) 及 75%~100% (70~93 筆土砂影響路徑重疊)。由災後 UAV 正射影像與土砂影響範圍比較可見，因本案於工作項目一中所預測之崩塌破壞面崩崖位置與實際狀況有差異，導致結果略有表現不佳，但最佳結果之最終土砂堆積深度偏差也僅存在 1.88 m 及路徑覆蓋率為 90%。雖然路勁覆蓋率數據表現不佳，但可發現紅框範圍(75%~100%重疊率)與災後 UAV 正射影像地表裸露範圍一致。此結果對於未應用現場調查資料(崩塌範圍、崩崖分佈、傾斜儀 等)及未考慮地質條件前提下，已具備一定參考性之預測結果。

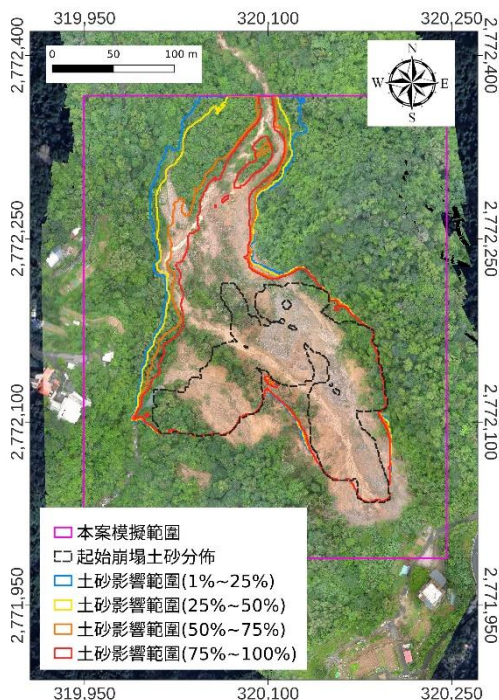


圖 6.1 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，間隔 5 秒釋放)

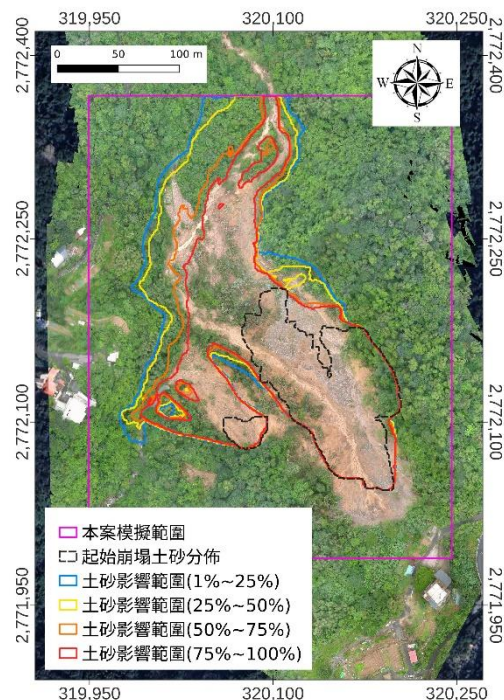


圖 6.2 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，間隔 5 秒釋放)

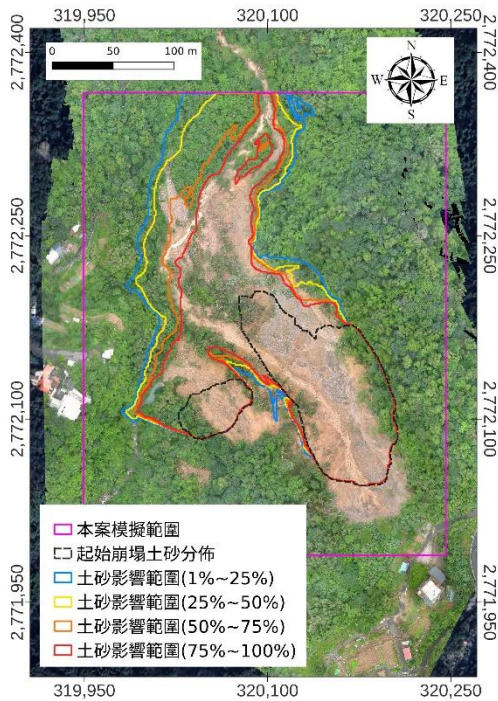


圖 6.3 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，間隔 5 秒釋放)

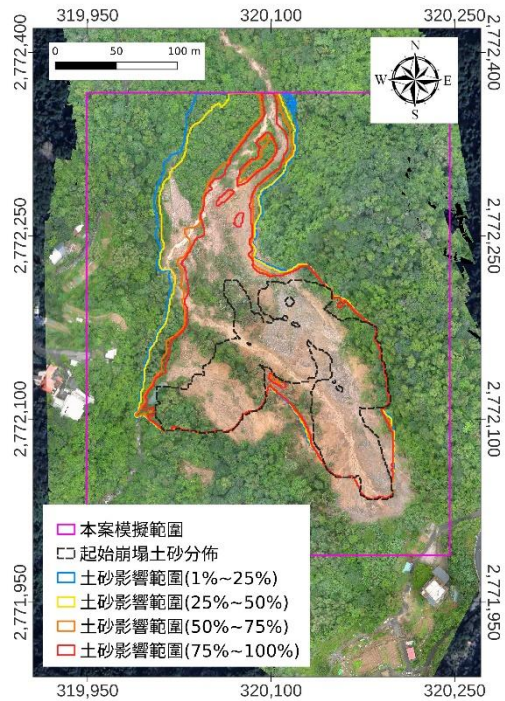


圖 6.4 GA-ER-ICS 推估 0.5 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，間隔 10 秒釋放)

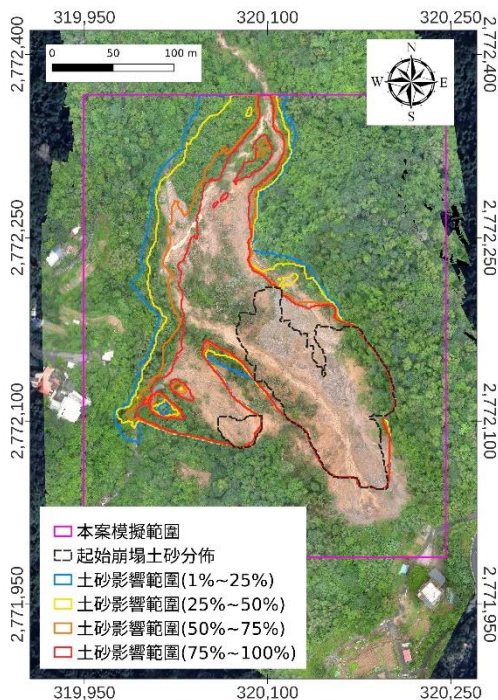


圖 6.5 GA-ER-ICS 推估 1.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，間隔 10 秒釋放)

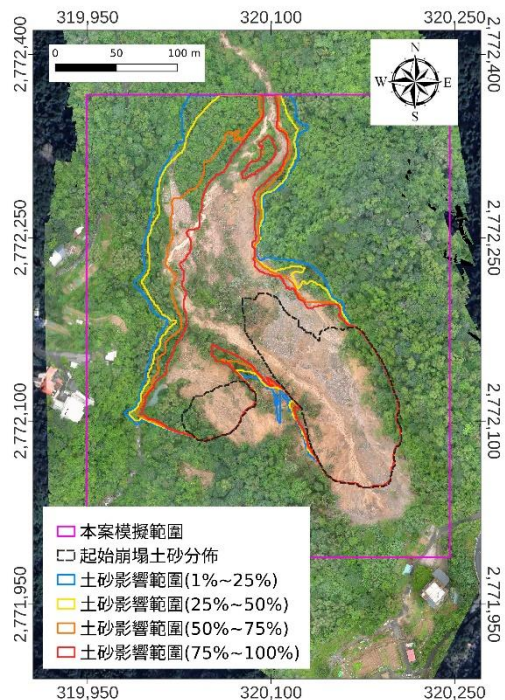


圖 6.6 GA-ER-ICS 推估 2.0 倍崩塌面積-體積之風險地圖(複合式組合 2，間隔 10 秒釋放)

小結：

經工作項目一比較複合式組合 1 與 2 之最終土砂堆積深度偏差與路勁覆蓋率後，本工作項目二將只應用複合式組合 2 進行探討滑動塊體之不同釋放時間造成之影響，其中設計之時間間距為 5 與 10 秒。經本案推估結果顯示，與工作項目一相同處為複合式組合 2、2.0 倍倍數、同時釋放為最佳結果，但釋放時間間距為 5 與 10 秒之最終土砂堆積深度偏差與同時釋放者僅有 0.02 至 0.05 m 之差異。說明增加考慮時序列釋放滑動塊體對最終土砂堆積分佈有所差異，但 D003 鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區域之下游處之地形崎嶇造成其差異甚小。

表 6.1 複合式組合 2 不同釋放時間之評估指標比較一覽表

釋放時間	崩塌面積-體積迴歸式倍數	最佳情境土砂堆積深度偏差(m)	最佳情境路徑覆蓋率 (%)
同步釋放	0.5	3.24	88
	1.0	2.90	91
	2.0	1.84	90
間隔 5 秒	0.5	3.22	89
	1.0	2.90	92
	2.0	1.88	90
間隔 10 秒	0.5	3.22	89
	1.0	2.91	92
	2.0	1.89	90

第七章 結論

依本案初擬之工作預定期程，至繳交期末報告書階段依研擬之預訂期程確實執行。本案已完成工作項目及內容，簡述如下：

第一節 結論

一、崩塌破壞面建構：

- 已完成延伸應用 Wang et al. (2022) 所發展之 GA-ER-ICS 搭配本案規劃之情境(起始搜尋點)快速建置鵠鵠崙 D003 大規模崩塌潛勢區域之“主 1”、“主 2”及“側 1”共計 3 處崩塌破壞面；
- 針對未知整體崩塌量體以及範圍前提，本案應用 Guzzetti et al. (2019)提出之崩塌面積-體積迴歸式之 0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 與 3.5 倍建置可能崩塌破壞面；
- 工作項目共計建置 9 種崩塌破壞面，並將其組合成 6 種複合式崩塌滑動塊體情境。

二、土砂影響範圍推估：

- 針對工作項目一所建置之 6 種複合式滑動塊體組合，搭配 93 組參數組合，所推估之影響範圍則依據土砂運移過程中，流動深度大於 0.10 公尺與流速大於 0.1 m/s 之範圍；
- 經比較是否考慮原邊坡趾部崩塌破壞面之複合式組合滑動塊體，於同步釋放土砂運移狀況下，考慮趾部破壞面之最終土砂均方根明顯由 3.53 m 降低至 0.89 m，進而說明本案提及之方法具有可行性。

三、滑動塊體釋放時間間距之影響：

- 透過設計 5 秒及 10 秒等間距釋放時間點，對於風險地圖覆蓋率之影響差異甚小，主要因為鵠鵠崙 D003 大規模崩塌下游處屬於非常陡峻之河谷所導致，若未來可針對下游處屬於開闊平坦之堆積區，本案所提及之複合式且不同釋放時間點之概念將有更佳可行性。

此外，依據期初審查意見五，有關”加強應用於本署實務業務，或嵌入現有之 BigGIS 或大崩監測平臺”，本團隊成員於 113 年 5 月 13 日出席由大崩監測平臺開發團隊於逢甲大學主辦之”大規模崩塌監測整合系統操作暨情資研判”教育訓練，由於大崩監測平臺主要以匯整現場監測資料為主，經評估後並不適合與本團隊開發之理想崩塌曲面數值模式進行整合。同時，本團隊亦與 BigGIS 的開發團隊聯繫，並於 113 年 6 月 6 日進行初步整合可行性的討論，出席人員包含柯明勳博士、以及其他成員柯杜維欽、陳晏欣以及鍾曉緯，後續本團隊也將持續與該團隊保持聯繫與討論。



圖 7.1 與 BigGIS 開發團隊進行可行性討論

第二節 建議與未來展望

針對本案先階段之成果，有以下短期與長期之建議與展望，分別說明如下：

- 一、因理想崩塌曲面法較適合應用 DEM 之數值地形資料進行崩塌破壞面之推估，而現階段推估後續崩崖之土砂影響範圍所使用之地形資料為 UAV 產製之 DSM，造成必須自行將其進行初步轉換成 DEM 作為評估指標應用。故建議未來進行災後調查時可同時製作 DEM 數值地形資料，其將對於數值模式以及估算土砂崩塌與堆積量體估算都。
- 二、經本案探討之 2022 年鵠鵠崙崩塌事件，發現潛勢區域因下游處屬於陡峻地形之河谷，導致本案提及之複合式且不同釋放滑動塊體時間之概念其推估影響範圍差異甚小，未來可針對下游處堆積區域屬於開闊平坦之大規模崩塌潛勢區域作為未來精進方向。

表 7.1 本案之工作項目與各期進度表

工作項目 \ 月份	113 年											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
一、崩塌破壞面建構												
二、土砂影響範圍推估												
三、滑動塊體啟動時間調整												
期中本報告書提交												
期末本報告書提交												
成果本報告書提交												
預定進度累計 (%)	2	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	100
計劃執行期限：自 113 年 2 月 07 日至 113 年 12 月 31 日止 ➤ 期中報告書完成工作：初步完成(一)崩塌破壞面建構、(二)滑動塊體非同步啟動釋放與間隔時間的篩選、(三)土砂分佈與影響範圍推估 ➤ 期末報告書完成工作：搜尋最適之(一)崩塌破壞面組合、(二)土砂分佈與影響範圍及(三)滑動塊體釋放時間點 ➤ 期末簡報時需完成所有工作項目(期末報告至契約結束期間，如委託機關發現問題仍需協助修正)。												

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持署 創新研究計畫結案報告(編號：SWCB-110-037)，大規模崩塌與地形特性以及地下水分布關聯之研究，2021。
2. 行政院農業委員會水土保持署 創新研究計畫結案報告(編號：SWCB-111-035)，大規模崩塌與地形特性以及地下水分布關聯之精進研究，2022。
3. 李哲宇、陳振宇、高百毅、戴義欽，應用橢圓-理想曲面法與簡易土石流模式於大規模崩塌之快速評估-以大規模崩塌潛勢區域(新北市-汐止區-D003)為例，中華民國地質學會 112 年暨學術研討會，112 年 05 月 17 日-05 月 18 日，桃園，台灣。
4. 柯其均、王福杰、王子睿、戴義欽，沙堆的週期性顆粒崩塌與坡面穩定性分析，第 18 屆大地工程學術研究研究討論會(Geotech2020)，109 年 09 月 01 日-09 月 03 日，屏東，台灣。
5. 經濟部中央地質調查所，潛在大規模崩塌之調查與觀測技術手冊，2018。
6. F. Guzzetti, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Rossi, and D. Valigi, “Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy.” *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4), 222-229, 2009.
7. M. Hürlimann, D. Rickenmann, V. Medina and A. Bateman, “Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment,” *Engineering Geology*, 102(3-4), 152-163, 2008.
8. M. Jaboyedoff, F. Baillifard, R. Couture, J. Locat, and P. Locat, “Toward preliminary hazard assessment using DEM topographic

- analysis and simple mechanical modeling by means of sloping local base level,” *Landslides evaluation and stabilization*. Balkema, 199-205, 2004.
9. M. Jaboyedoff, R. Couture, and P. Locat, “Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: toward a progressive failure,” *Geomorphology*, 103(1), 5-16, 2009.
 10. M. Jaboyedoff, D. Carrea, M. H. Derron, T. Oppikofer, I. M. Penna, and B. Rudaz, “A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes.” *Engineering Geology*, 267, 105478, 2020.
 11. C. Y. Kuo, Y. C. Tai, C. C. Chen, K. J. Chang, A. Y. Siau, J. J. Dong, and C. T. Lee, “The landslide stage of the Hsiaolin catastrophe: simulation and validation,” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4), 2011.
 12. C. J. Ko, C. L. Wang, H. K. Wong, W. C. Lai, C. Y. Kuo and Y. C. Tai, “Landslide Scarp Assessments by Means of an Ellipse-Referenced Idealized Curved Surface.” *Frontiers in Earth Science*, 9, 862, 2021.
 13. C. J. Ko, P. C. Chen, H. K. Wong, and Y. C. Tai, “MoSES_2PDF: A GIS-Compatible GPU-accelerated High-Performance Simulation Tool for Grain-Fluid Shallow Flows.” *arXiv preprint arXiv:2104.06784*, 2021.
 14. C.Y. Ma, C.J. Ko, H.K. Wong, and Y.C. Tai, “Modeling three-phase debris flows in terrain-following coordinate system and its GPU computation with CUDA structure.” *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 34(7), 2022. (in Chinese)
 15. M. E. Reid, S. B. Christian, D. L. Brien and S. Henderson,

- “Scoops3D—software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape,” *US Geological Survey Techniques and Methods*, 2015.
16. D. Rickenmann, “Hangmuren und Gefahrenbeurteilung — Kurzbericht für das Bundesamt für Wasser und Geologie. ” Unpublished report, Universität für Bodenkultur, Wien, und Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 18p, 2005.
 17. A. E. Scheidegger, “On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides.” *Rock mechanics*, 5(4), 231-236, 1973.
 18. Y.C. Tai, J. Heß and Y. Wang, “Two-Phase Debris Flow over Rugged Topography: Modeling and Numerical Simulation. ” *Journal of Geophysical Research -- Earth Surface*, 124, 305-333, 2019.
 19. Y. C. Tai, C. J. Ko, K. D. Li, Y. C. Wu, C. Y. Kuo, R. F. Chen and C. W. Lin, “An idealized landslide failure surface and its impacts on the traveling paths.” *Frontiers in Earth Science*, 8, 313, 2020.
 20. C. Tang, J. Tang, C. J. van Westen, J. Han, O. Mavrouli, and C. Tang, “Modeling landslide failure surfaces by polynomial surface fitting.” *Geomorphology*, 368, 107358, 2020.
 21. C. L. Wang, C. J. Ko, H. K. Wong, P. H. Pai, and Y. C. Tai, “An Approach for Preliminary Landslide Scarp Assessment with Genetic Algorithm (GA).” *Water*, 14(15), 2400, 2022.
 22. Wong, H. K., Tai, Y. C., Tsunetaka, H., & Hotta, N. (2024). “Two-phase approach to modeling the grain-fluid flows with deposition and entrainment over rugged topography. ” *Advances in Water Resources*, 188, 104691.

附錄 一 計畫書審查意見暨回覆辦理情形

一、計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分

審查意見	回覆辦理情形
1.本計畫以進行崩塌範圍及量體推估，惟並無具體說明如何解決複合式崩塌事件之問題，以及如何進行對果驗證。	本案擬透過歷年多期 LiDAR-derived DEM 地形資料及農村水保署所建置之現場調查資料與監測系統，搜集並設計各種可能發生之崩塌情境探討其後續之影響範圍與土砂分佈狀況；針對推估結果驗證部分，本案僅能針對已發生崩塌事件並有產製即時災後數值地形資料者，因透過災害前後數值地形資料，本團隊可得知其崩塌破壞面與最終土砂堆積之高程。
2.本計畫並無針對可能遭遇地形資料無法銜接之問題提出解決方法。	因本案主要為應用既有之災害前後期地形資料，針對災害前地形資料，主要資料來源為內政部產製之全臺 LiDAR-derived DEM，因此較不會有銜接問題；而災害後針對崩塌發生區域所產製之局部 DEM 或 DSM 之邊界可能與災前有所出入，此問題可能造成本案在進行土砂運移行為數值模式運算時出現偏差，因此現階段若遭遇此問題，將於災後產製數值地形邊界處進行平滑化，盡可能避免局部地形變化劇烈。
3.本團隊近年皆獲創新計畫補助，然多年研究成果績效尚未在學術或實務應用上有明顯闡述。	針對此意見，本團隊羅列近三年發表之相關國際期刊、參與之研討會、以及與農村水保署之相關合作事項如下： 國際期刊 1. Wang, C. L., Ko, C. J., Wong, H. K., Pai, P. H., & Tai, Y. C. (2022). An Approach for Preliminary Landslide Scarp Assessment with Genetic Algorithm (GA). <i>Water</i> , 14(15), 2400. 2. Ko, C. J., Wang, C. L., Wong, H. K., Lai, W. C., Kuo, C. Y., & Tai, Y. C. (2021). Landslide Scarp Assessments by Means of an Ellipse-Referenced Idealized Curved Surface. <i>Frontiers in Earth Science</i> , 9, 733413. 研討會 1. Y.C. Tai, H.K. Wong, C.L. Wang, and P.C. Chen (2023). "ANSIP_ICS: a 3D scenario illustration platform for

	preliminary landslide scarp assessment” 6th World Landslide Forum(WLF6), Nov. 14-17, 2023, Florence, Italy. (oral) 2. H.K. Wong, Y.C. Tai and C.L. Wang (2023). “An approach of approximating the landslide scarp whose toe is buried” 6th World Landslide Forum(WLF6), Nov. 14-17, 2023, Florence, Italy. (oral) 3. H. K. Wong, C. L. Wang, Y. C. Tai (2023). “Toward the Identification/Estimation of Landslide Scarp in High Degree of Uncertainty.” International Workshop on Multimodel Sediment Disaster (eMSD 2022), Jan. 5-7, 2023 at National Cheng Kung University (NCKU), Taiwan. (oral) 4. H. K. Wong, C. L. Wang, C. Y. Ma, & Y. C. Tai (2022). “Integration of the Terrain Characteristics and Data of Gaging Station for Mimicking the Plausible Surface of Slope Failures.” EGU General Assembly 2022, online, May 23-27, 2022, EGU22-10918, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10918. (online vPICO presentation) 5. C. J. Ko, C. L. Wang, H. K. Wong and Y. C. Tai (2021). “Idealized curved surface for mimicking slope failure: toward the sequential failure.” EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr. 2021, EGU21-10520, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10520. (online vPICO presentation) 與水保署共同參與之國內研討會 1. 李哲宇、陳振宇、高百毅、戴義欽，應用橢圓-理想曲面法與簡易土石流模式於鵠鵠崙大規模崩塌土體運動型態之探討，2023 森林集水區經營及環境監測研討會，112 年 7 月 26 日，臺北市，台灣。 2. 李哲宇、陳振宇、高百毅、戴義欽，應用橢圓-理想曲面法與簡易
--	--

	土石流模式於大規模崩塌之快速評估-以大規模崩塌潛勢區域(新北市-汐止區-D003)為例，中華民國地質學會 112 年暨學術研討會，112 年 05 月 17 日- 05 月 18 日，桃園，台灣。 此外，本團隊亦曾於 112 年 09 月 15 日至農村水保署提供教育訓練(主題：崩塌發生與運動及數值分析專題講座)，介紹本團隊開發之“理想崩塌曲面數值模式”。
4.搭配基因演算法之優缺點及架構設計為本案主軸，但並未描述。	已於計畫說明書之“(四)實施方法與步驟”進行補充說明。
5.本計畫已接續辦理多年，宜加強如何應用於本署實務業務，或嵌入現有之 BigGIS 或大崩監測平臺。	感謝委員建議。本團隊初期於 113 年 2 月 23 日，致電聯繫承辦人員(許政堯)。也曾於 5 月 13 日參與於逢甲大學主辦之”大規模崩塌監測整合系統操作暨情資研判”的教育訓練；6 月 6 日更與 BigGIS 開發團隊進行可行性的討論。
6.鵠鵠崙之案例係以災後實際崩塌位置區分出 4 個滑動塊體，然針對尚未崩塌之潛勢區，分區分塊之原則為何？	針對尚未發生崩塌之潛勢區，本團隊規劃將透過內政部申請該潛勢區歷年 LiDAR-derived DEM 搭配農村水保署既有執行之現場調查及監測系統計畫之成果，針對所搜集潛勢邊坡之崩崖、裂隙、側向侵蝕溝等分佈作為本案建置理想崩塌曲面之依據。
7.建議詳細說明如何在非單一分析塊體下確認坡面走向及其他相關地形特徵。	請參閱上述審查意見六之回覆。
8.建議提出本案欲探討之情境假設，以作為研究預期產出之成果合理性。	感謝委員提醒，已於補充至計畫說明書之(四)實施方法與步驟。

附錄二 期中審查意見暨回覆辦理情形

一、計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分

審查意見	回覆辦理情形
1.P.2-4.3 行之“如圖 2.1 所示”，該圖號是否有誤？另，倒第 5 行~倒第 4 行，何以兩條不同軸線之傾角均相同為 $\theta 1$ 。另，圖 2.2 或圖 2.3 均未見 $\theta 1$ 之標示。	感謝！圖號確認有誤，應修正成圖 2.2。另 L2 所對應之 $\theta 1$ 應修正為 $\theta 2$ 。已於期末報告書中修正。
2.P.2-6，倒第 9 行，“...上述迴歸式 (2.4)”之編號是否有誤？(應是(2.3))？	感謝指正！期末報告書已修正成“迴歸式(2.3)”。
3.P.2-6.前期計畫應用式 2.4 推估光華崩塌之深度偏差達 ± 3 公尺，就大規模崩塌深度 10 公尺而言，精準度只有 70%，是否可信賴？	針對上述描述，本案後續於 111 年創新研究計畫透過整合地下水位與邊坡穩定性分析後。與水保署建置之傾斜儀 K18-1BW(滑動深度：地面以下 25.0 m 左右)與 K18-2BW(滑動深度：地面以下 5.0 m 左右)，當年度計畫所推估之崩塌深度分別為 K18-1BW(滑動深度：地面以下 24.98 m)與 K18-2BW(滑動深度：地面以下 5.68 m)，其偏差僅有 0.02 與 0.68 m。已於期末報告書中補充上述說明。
4.文中有多處撰寫“相關文獻可參酌....”之寫法不妥，文中要呈現何等內容即應明確，若引用他人文獻或自己發表之文獻，僅需加以註記即可？！(注意論文之寫法；參考文獻之編排亦應符合論文規範！)	感謝指正！已於期末報告書中避免相關描述方式。
5.本研究一再強調崩塌破壞面趾部被掩埋之判釋，惟該等區位透過災害前後之地形圖資即可判釋，何以需以建構理想崩塌曲面予以推估之？	雖災害前後之數值地形資料可協助研判可能滑動範圍，但其整體崩塌深度以及所對應之崩塌量體於未進行災後詳細調查與建置傾斜儀前提下不易推估。若崩塌滑動塊體未完全滑落遠離原邊坡，其整體破壞面高程分佈仍屬於未知之狀況，因此本案提出透過理想崩塌曲面快速建置可能之破壞面與其對應之崩塌量體，回推該崩塌事件土砂影響範圍。
6.計畫引用之參考文獻中所提之崩塌量體為 83,538m ³ (P4-1)式，103,800 m ³ (P5-5)？所引用之數據精確度是否合理判釋？另以不具公信力與否之數據作為依歸，以之進行方法驗證，亦需確定其合理性？	感謝指正！經確認李哲宇等人(地質年會，2023)參考文獻後，P4-1 中提及之崩塌量體應為 103,800 m ³ ，已於期末報告書中統一修正。

7.本研究引用 Tan 等人於 2020 年模擬小林村崩塌事件的數據，指出以 ICS 評估土砂影響範圍與實際土砂範圍僅有 9.54%的差異，不過在模擬的起始階段差異達到 26%，請問這三分鐘的模擬與實際的差異如何在後續以 MoSES_2PDF 模擬不同樣區土砂影響範圍時作為參數調整的參考依據？	”Tan 等人於 2020 年...”為誤植，已於期末報告書中修正為”Tai et al. (2020) 年...””，其主要比較 2009 年小林村大規模崩塌事件之實際崩塌分佈與應用 ICS 所推估之後續土砂運移範圍偏差。因 ICS 應用理想曲面近似實際崩塌破壞面，使得其所推估之崩塌破壞面與實際崎嶇崩塌破壞面有所差異，因此在“起始階段”其範圍偏差達 26%。但兩者經 Tai et al. (2019)發展之土砂動態運移行為模式所推估之土砂運移路徑，當模擬時間經過三分鐘後運移土砂受到地形影響並達最終堆積階段時，其兩者之運移路徑偏差遞減至 9.54%。 針對模擬不同樣區土砂影響範圍時，本案透過 Ma et al. (2022)年迴歸運移土砂之組成成份與參數組之建議值進行參數調整，並已於期末報告書內補充說明。
8.是否比較過不同解析度的 DEM 對土砂量體的與土砂影響範圍的推估結果？	感謝建議，已於期末報告書初稿第五章第二節比較不同解析度之 DEM 比較所推估之崩塌量體以及土砂影響範圍之差異。
9.多處字樣缺漏、許多公式顯示不完全，4-3 的圖標號應為 4-2，請再檢視後修正。	感謝指正！已於期末報告書中統一修正。

附錄三 期末審查意見暨回覆辦理情形

一、計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分

審查意見	回覆辦理情形
1. 無。	感謝委員們的肯定！

附錄四 各風險地圖之評估指標數據一覽表

附表 1 複合式組合 1、0.5 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	83	3.81	75	3.76	51	4.83
2	83	3.82	76	3.73	53	4.80
3	83	3.83	76	3.72	53	4.76
4	82	3.84	77	3.70	56	4.71
5	82	3.85	78	3.67	57	4.67
6	81	3.87	78	3.65	60	4.62
7	80	3.88	79	3.63	61	4.58
8	79	3.90	79	3.62	64	4.52
9	79	3.91	81	3.60	62	4.47
10	78	3.92	81	3.58	64	4.42
11	77	3.94	80	3.56	65	4.37
12	77	3.95	81	3.55	66	4.32
13	76	3.97	82	3.54	65	4.27
14	75	3.98	82	3.53	67	4.22
15	75	4.00	82	3.53	67	4.16
16	74	4.01	82	3.53	67	4.11
17	74	4.02	83	3.53	67	4.08
18	73	4.03	82	3.53	68	4.03

附表 1 (續) 複合式組合 1、0.5 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)
19	73	4.04	83	3.54	69	3.98
20	73	4.05	83	3.55	69	3.95
21	72	4.06	83	3.55	71	3.93
22	72	4.07	83	3.56	71	3.89
23	72	4.07	83	3.56	71	3.85
24	72	4.07	84	3.57	71	3.83
25	72	4.07	83	3.58	71	3.79
26	72	4.07	82	3.59	72	3.76
27	73	4.06	82	3.59	72	3.73
28	74	4.04	83	3.59	72	3.69
29	75	4.02	82	3.58	73	3.66
30	78	3.98	82	3.57	73	3.64
31	80	3.94	81	3.56	73	3.62

附表 2 複合式組合 1、1.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	74	3.69	62	3.81	37	4.97
2	73	3.71	63	3.77	35	4.94
3	72	3.73	62	3.74	34	4.90
4	72	3.74	63	3.70	31	4.86
5	71	3.75	63	3.67	33	4.81
6	71	3.77	64	3.65	37	4.76
7	70	3.78	65	3.62	39	4.72
8	69	3.80	66	3.59	43	4.67
9	68	3.81	68	3.57	43	4.62
10	68	3.83	68	3.55	45	4.56
11	68	3.84	69	3.53	47	4.52
12	67	3.86	70	3.51	47	4.47
13	66	3.88	71	3.49	49	4.41
14	66	3.90	71	3.48	49	4.36
15	65	3.92	73	3.47	50	4.31
16	64	3.94	74	3.46	54	4.25
17	63	3.95	76	3.46	53	4.20
18	62	3.97	77	3.45	53	4.14

附表 2 (續) 複合式組合 1、1.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
19	62	3.99	77	3.45	54	4.11
20	61	4.00	78	3.46	57	4.05
21	61	4.02	79	3.46	54	4.01
22	60	4.03	80	3.46	53	3.96
23	60	4.03	81	3.45	55	3.93
24	60	4.04	81	3.45	54	3.87
25	60	4.04	81	3.45	55	3.84
26	61	4.03	81	3.45	56	3.79
27	62	4.01	80	3.44	58	3.75
28	63	3.98	80	3.44	59	3.71
29	66	3.94	80	3.43	60	3.67
30	67	3.90	79	3.42	60	3.64
31	69	3.85	77	3.42	60	3.61

附表 3 複合式組合 1、2.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	80	2.71	71	3.38	31	4.81
2	78	2.72	71	3.31	34	4.77
3	77	2.73	70	3.25	39	4.75
4	77	2.75	72	3.18	42	4.71
5	76	2.77	74	3.11	45	4.67
6	75	2.80	74	3.06	45	4.64
7	75	2.83	74	3.01	49	4.59
8	74	2.87	75	2.95	51	4.53
9	73	2.90	76	2.90	54	4.48
10	72	2.94	78	2.85	57	4.43
11	71	2.97	77	2.80	58	4.37
12	70	3.00	79	2.77	61	4.29
13	70	3.03	78	2.72	62	4.22
14	69	3.05	79	2.69	63	4.14
15	69	3.07	80	2.65	64	4.06
16	68	3.09	81	2.62	65	3.99
17	67	3.10	81	2.59	66	3.94
18	66	3.12	82	2.57	66	3.85

附表 3 (續) 複合式組合 1、2.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
19	66	3.14	83	2.55	65	3.79
20	65	3.15	84	2.54	67	3.73
21	65	3.17	84	2.54	67	3.65
22	64	3.18	85	2.53	66	3.56
23	64	3.19	85	2.51	67	3.48
24	64	3.20	86	2.52	67	3.40
25	64	3.21	86	2.51	68	3.33
26	65	3.21	86	2.51	68	3.26
27	65	3.21	86	2.51	69	3.17
28	67	3.19	86	2.51	71	3.11
29	68	3.15	86	2.52	71	3.03
30	70	3.11	85	2.51	71	2.95
31	72	3.08	83	2.51	71	2.86

附表 4 複合式組合 2、0.5 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	80.22	4.03	87.44	3.43	88.33	4.60
2	79.71	4.04	87.40	3.43	88.25	4.55
3	79.21	4.05	87.11	3.43	88.19	4.50
4	78.92	4.06	87.08	3.45	88.15	4.45
5	78.55	4.07	86.85	3.46	88.14	4.39
6	78.33	4.08	86.82	3.48	88.25	4.33
7	77.96	4.09	86.67	3.49	88.22	4.27
8	77.60	4.10	86.43	3.51	87.77	4.21
9	77.26	4.11	86.38	3.53	87.87	4.14
10	77.19	4.11	86.44	3.56	88.13	4.07
11	76.90	4.12	86.33	3.59	88.15	4.00
12	76.74	4.13	86.14	3.63	88.58	3.93
13	76.51	4.14	85.61	3.65	88.60	3.87
14	76.32	4.15	84.77	3.68	88.61	3.80
15	76.15	4.16	85.14	3.70	88.40	3.74
16	75.96	4.17	84.45	3.72	88.33	3.68
17	75.82	4.18	84.46	3.74	88.25	3.63
18	75.71	4.19	84.40	3.75	88.30	3.57

附表 4 (續) 複合式組合 2、0.5 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)
19	75.46	4.19	84.20	3.75	88.35	3.53
20	75.33	4.20	84.22	3.76	88.23	3.48
21	75.26	4.20	84.26	3.76	88.26	3.45
22	75.16	4.21	84.38	3.77	88.33	3.42
23	75.13	4.21	84.55	3.77	88.22	3.38
24	75.12	4.22	84.73	3.77	88.26	3.36
25	75.19	4.22	84.95	3.77	88.27	3.34
26	75.42	4.21	85.05	3.77	88.27	3.31
27	75.83	4.20	85.23	3.76	88.21	3.29
28	76.30	4.18	85.37	3.74	88.26	3.27
29	76.89	4.16	85.65	3.71	88.35	3.25
30	77.67	4.12	85.69	3.67	88.38	3.24
31	78.78	4.08	85.93	3.60	88.38	3.24

附表 5 複合式組合 2、1.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	79.15	3.79	90.35	3.15	91.37	4.71
2	78.78	3.81	90.25	3.14	91.50	4.65
3	78.42	3.82	90.13	3.14	91.37	4.59
4	78.10	3.84	89.92	3.14	91.31	4.51
5	77.70	3.86	89.80	3.15	91.31	4.44
6	77.39	3.88	89.56	3.16	91.15	4.37
7	76.93	3.90	89.29	3.18	91.27	4.29
8	76.44	3.92	88.83	3.20	91.24	4.20
9	75.94	3.94	88.60	3.23	91.28	4.12
10	75.42	3.96	88.50	3.25	91.23	4.02
11	75.10	3.98	88.27	3.28	91.50	3.94
12	74.83	4.00	87.95	3.30	91.48	3.84
13	74.53	4.02	87.71	3.33	91.51	3.76
14	74.20	4.04	87.31	3.37	91.53	3.68
15	73.90	4.06	87.00	3.38	91.41	3.61
16	73.63	4.08	86.69	3.42	91.35	3.54
17	73.37	4.10	86.57	3.44	91.31	3.46
18	73.12	4.12	86.82	3.47	91.08	3.40

附表 5 (續) 複合式組合 2、1.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
19	72.92	4.13	86.85	3.47	91.11	3.33
20	72.70	4.15	86.69	3.44	91.02	3.28
21	72.50	4.16	86.62	3.44	90.97	3.23
22	72.38	4.17	86.40	3.44	90.97	3.19
23	72.31	4.17	86.17	3.45	90.94	3.14
24	72.29	4.17	85.97	3.45	90.93	3.11
25	72.39	4.17	85.84	3.45	90.89	3.07
26	72.62	4.15	85.77	3.45	90.84	3.02
27	72.99	4.13	85.83	3.43	90.79	2.99
28	73.60	4.10	86.11	3.41	90.70	2.95
29	74.43	4.05	86.48	3.37	90.72	2.93
30	75.54	4.01	86.95	3.33	90.65	2.91
31	76.98	3.95	87.56	3.28	90.56	2.90

附表 6 複合式組合 2、2.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	78.31	2.81	88.80	2.14	89.62	4.28
2	77.81	2.89	88.84	2.10	89.61	4.20
3	77.49	2.98	88.72	2.07	89.61	4.12
4	77.06	3.07	88.68	2.04	89.30	4.04
5	76.83	3.15	88.24	2.01	89.24	3.96
6	76.47	3.23	87.83	1.99	89.28	3.86
7	76.07	3.30	87.49	1.98	89.73	3.77
8	75.57	3.39	87.39	1.97	89.59	3.68
9	74.85	3.45	86.95	1.97	89.55	3.59
10	74.29	3.49	86.50	1.96	89.76	3.50
11	73.88	3.55	86.37	1.96	90.10	3.41
12	73.53	3.59	85.86	1.96	90.01	3.31
13	73.27	3.62	85.85	1.95	89.93	3.21
14	73.03	3.66	85.68	1.93	89.96	3.11
15	72.81	3.69	85.63	1.93	89.90	2.99
16	72.62	3.72	85.35	1.93	89.77	2.88
17	72.44	3.75	85.18	1.94	89.74	2.78
18	72.34	3.77	85.19	1.95	89.65	2.68

附表 6 (續) 複合式組合 2、2.0 倍、同步釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
19	72.25	3.79	84.94	1.97	89.64	2.59
20	72.14	3.80	85.19	1.98	89.75	2.49
21	72.07	3.81	85.00	2.01	89.64	2.40
22	72.06	3.82	84.79	2.05	89.71	2.31
23	72.03	3.82	84.82	2.07	89.68	2.24
24	72.12	3.81	84.68	2.09	89.79	2.17
25	72.26	3.79	84.74	2.11	89.81	2.09
26	72.48	3.77	84.78	2.13	89.70	2.04
27	72.77	3.72	84.78	2.13	89.55	1.98
28	73.14	3.66	85.02	2.14	89.46	1.93
29	73.68	3.58	85.25	2.14	89.49	1.90
30	74.65	3.48	85.34	2.15	89.49	1.86
31	76.43	3.38	85.61	2.18	89.51	1.84

附表 7 複合式組合 2、0.5 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	81.74	3.95	87.30	3.45	87.87	4.57
2	81.50	3.96	87.37	3.45	88.09	4.51
3	81.02	3.97	88.01	4.47	88.01	4.47
4	80.53	3.98	88.04	4.40	88.04	4.40
5	80.08	3.99	86.58	3.48	88.10	4.34
6	79.71	4.00	88.01	4.29	88.01	4.29
7	79.33	4.02	79.33	4.02	87.88	4.22
8	78.91	4.03	87.99	4.16	87.99	4.16
9	78.51	4.05	87.79	4.10	87.79	4.10
10	78.17	4.06	88.50	4.03	88.50	4.03
11	77.90	4.07	77.90	4.07	88.06	3.95
12	77.65	4.09	88.06	3.89	88.06	3.89
13	77.39	4.10	88.18	3.84	88.18	3.84
14	77.13	4.11	88.59	3.77	88.59	3.77
15	76.90	4.13	76.90	4.13	88.53	3.72
16	76.73	4.14	88.40	3.67	88.40	3.67
17	76.50	4.15	88.39	3.62	88.39	3.62
18	76.28	4.16	88.32	3.57	88.32	3.57

附表 7 (續) 複合式組合 2、0.5 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)
19	76.12	4.18	88.38	3.53	88.38	3.53
20	75.97	4.19	75.97	4.19	88.26	3.49
21	75.88	4.20	88.30	3.46	88.30	3.46
22	75.74	4.21	88.19	3.42	88.19	3.42
23	75.67	4.21	88.20	3.39	88.20	3.39
24	75.61	4.22	88.15	3.36	88.15	3.36
25	75.67	4.22	88.21	3.34	88.21	3.34
26	75.92	4.21	75.92	4.21	88.19	3.31
27	76.31	4.20	88.20	3.29	88.20	3.29
28	76.84	4.17	88.30	3.27	88.30	3.27
29	77.49	4.14	88.36	3.25	88.36	3.25
30	78.63	4.10	88.41	3.23	88.41	3.23
31	80.26	4.05	88.39	3.22	88.39	3.22

附表 8 複合式組合 2、1.0 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	82.85	3.76	90.58	3.08	91.55	4.64
2	82.12	3.77	90.33	3.08	91.36	4.58
3	81.48	3.79	90.09	3.09	91.38	4.50
4	80.95	3.80	89.94	3.10	91.34	4.43
5	80.21	3.83	89.87	3.12	91.22	4.37
6	79.69	3.85	89.61	3.13	91.26	4.30
7	78.84	3.87	89.16	3.14	91.08	4.22
8	78.17	3.89	88.88	3.17	91.07	4.15
9	77.58	3.91	88.69	3.19	91.02	4.06
10	76.99	3.93	89.23	3.20	91.43	3.98
11	76.55	3.96	89.01	3.23	91.48	3.90
12	76.20	3.98	89.01	3.25	91.34	3.82
13	75.81	4.00	88.74	3.28	91.53	3.74
14	75.49	4.02	88.55	3.30	91.55	3.65
15	75.16	4.05	88.47	3.33	91.42	3.59
16	74.85	4.07	88.16	3.36	91.41	3.50
17	74.60	4.10	88.17	3.39	91.26	3.43
18	74.35	4.12	88.10	3.38	91.19	3.36

附表 8 (續) 複合式組合 2、1.0 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)
19	74.11	4.14	88.05	3.39	91.12	3.30
20	73.86	4.16	87.87	3.38	91.05	3.24
21	73.69	4.18	88.01	3.36	91.08	3.19
22	73.52	4.19	87.84	3.37	91.03	3.14
23	73.40	4.20	87.58	3.39	90.97	3.10
24	73.33	4.21	87.34	3.40	90.94	3.06
25	73.38	4.21	87.18	3.42	90.93	3.02
26	73.61	4.20	87.04	3.43	90.88	2.99
27	74.04	4.17	86.93	3.43	90.88	2.96
28	74.63	4.13	86.88	3.43	90.88	2.94
29	75.43	4.08	87.00	3.40	90.81	2.91
30	76.73	4.02	87.18	3.36	90.77	2.90
31	78.43	3.96	87.53	3.29	90.79	2.99

附表 9 複合式組合 2、2.0 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	77.85	3.02	89.33	2.22	89.42	4.19
2	77.54	3.10	89.03	2.17	89.38	4.11
3	77.36	3.17	88.97	2.13	89.22	4.05
4	77.02	3.24	88.79	2.09	88.97	3.96
5	76.64	3.32	88.80	2.06	88.94	3.90
6	76.37	3.40	88.61	2.03	89.85	3.77
7	76.10	3.45	88.39	2.00	90.00	3.69
8	75.72	3.51	88.42	1.96	89.92	3.59
9	75.24	3.57	88.20	1.94	89.90	3.51
10	74.82	3.62	87.81	1.92	90.10	3.41
11	74.43	3.67	87.51	1.89	89.73	3.30
12	74.17	3.70	87.36	1.88	90.01	3.20
13	73.97	3.74	87.13	1.89	90.00	3.10
14	73.69	3.77	86.89	1.91	89.89	3.00
15	73.42	3.79	86.65	1.92	89.51	2.90
16	73.18	3.81	86.56	1.94	89.69	2.80
17	73.04	3.83	86.27	1.97	89.86	2.70
18	72.89	3.84	85.89	2.01	89.67	2.61

附表 9 (續) 複合式組合 2、2.0 倍、間隔 5 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
19	72.78	3.85	85.56	2.04	89.76	2.53
20	72.69	3.86	85.38	2.06	89.83	2.45
21	72.64	3.87	85.18	2.10	89.87	2.40
22	72.59	3.87	84.93	2.14	89.83	2.35
23	72.56	3.87	84.91	2.17	89.77	2.30
24	72.58	3.87	84.88	2.19	89.72	2.24
25	72.66	3.85	84.92	2.19	89.74	2.18
26	72.81	3.83	84.96	2.19	89.79	2.12
27	73.02	3.79	85.12	2.17	89.83	2.08
28	73.38	3.73	85.25	2.17	89.68	2.03
29	74.09	3.65	85.40	2.15	89.61	1.99
30	75.16	3.54	85.56	2.13	89.58	1.95
31	76.68	3.43	85.64	2.15	89.58	1.91

附表 10 複合式組合 2、0.5 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	80.72	3.99	87.40	3.42	88.12	4.57
2	80.62	4.00	87.07	3.44	88.22	4.53
3	79.42	4.01	86.78	3.45	88.05	4.48
4	78.16	4.02	87.06	3.46	88.02	4.42
5	78.22	4.03	86.55	3.48	88.30	4.36
6	78.28	4.04	86.60	3.50	88.25	4.31
7	77.35	4.05	86.74	3.53	87.58	4.24
8	77.02	4.06	86.56	3.56	87.80	4.18
9	76.84	4.07	86.31	3.58	88.39	4.13
10	76.78	4.08	85.97	3.61	88.40	4.06
11	76.74	4.09	86.08	3.64	88.47	3.99
12	76.57	4.10	85.55	3.65	88.60	3.92
13	76.32	4.12	84.55	3.67	88.52	3.85
14	76.31	4.13	85.77	3.69	88.56	3.80
15	76.26	4.14	85.55	3.71	88.51	3.74
16	76.06	4.15	85.55	3.72	88.52	3.68
17	75.92	4.16	85.65	3.74	88.42	3.62
18	75.75	4.17	85.31	3.74	88.37	3.57

附表 10 (續) 複合式組合 2、0.5 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點 深度方 均根 (m)
19	75.62	4.17	84.88	3.75	88.32	3.52
20	75.49	4.18	85.05	3.75	88.17	3.48
21	75.37	4.19	84.92	3.76	88.21	3.44
22	75.31	4.19	84.94	3.77	88.18	3.41
23	75.27	4.20	84.96	3.78	88.13	3.38
24	75.27	4.20	84.82	3.78	88.22	3.35
25	75.33	4.20	84.97	3.78	88.19	3.32
26	75.63	4.20	84.99	3.78	88.19	3.30
27	76.00	4.19	84.93	3.78	88.18	3.28
28	76.48	4.17	85.19	3.77	88.24	3.26
29	77.11	4.14	85.36	3.74	88.30	3.25
30	77.98	4.10	85.69	3.70	88.38	3.23
31	79.46	4.06	85.94	3.65	88.37	3.22

附表 11 複合式組合 2、1.0 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	80.27	3.78	90.39	3.11	91.68	4.65
2	79.66	3.80	90.37	3.11	91.22	4.59
3	79.15	3.82	90.29	3.11	90.94	4.53
4	78.66	3.84	90.23	3.12	90.91	4.46
5	78.16	3.86	90.04	3.14	91.06	4.41
6	77.57	3.88	90.03	3.16	90.86	4.34
7	77.04	3.90	89.77	3.18	91.29	4.27
8	76.64	3.93	89.58	3.21	91.15	4.19
9	76.13	3.95	89.13	3.23	90.77	4.12
10	75.64	3.98	88.42	3.25	91.13	4.03
11	75.33	4.00	87.57	3.29	91.57	3.94
12	75.09	4.03	88.04	3.32	91.52	3.85
13	74.80	4.05	88.47	3.35	91.49	3.79
14	74.54	4.07	88.49	3.37	91.42	3.69
15	74.26	4.09	88.37	3.39	91.44	3.62
16	74.02	4.11	88.06	3.42	91.40	3.53
17	73.79	4.13	87.86	3.44	91.31	3.45
18	73.58	4.15	87.64	3.45	91.29	3.38

附表 11 (續) 複合式組合 2、1.0 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
19	73.39	4.17	87.53	3.46	91.17	3.32
20	73.19	4.18	87.30	3.45	91.03	3.26
21	73.04	4.19	87.14	3.44	90.96	3.22
22	72.93	4.20	87.05	3.44	90.95	3.16
23	72.88	4.21	86.86	3.46	90.94	3.12
24	72.84	4.21	86.80	3.46	90.94	3.08
25	72.90	4.20	86.75	3.47	90.92	3.05
26	73.10	4.20	86.75	3.46	90.86	3.02
27	73.44	4.16	86.79	3.45	90.79	2.98
28	73.89	4.13	86.97	3.42	90.77	2.95
29	74.58	4.08	87.23	3.39	90.74	2.93
30	75.72	4.02	87.49	3.34	90.66	2.92
31	77.59	3.96	87.84	3.28	90.56	2.91

附表 12 複合式組合 2、2.0 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
1	78.23	2.99	88.65	2.20	89.49	4.25
2	77.66	3.08	88.91	2.16	89.55	4.17
3	77.31	3.16	88.85	2.12	89.46	4.12
4	76.91	3.25	88.71	2.09	89.21	4.02
5	76.63	3.35	88.62	2.06	89.83	3.95
6	76.24	3.44	88.69	2.03	89.92	3.82
7	75.96	3.50	88.56	2.01	89.65	3.74
8	75.57	3.56	88.31	2.00	90.30	3.66
9	75.02	3.62	87.91	2.00	90.28	3.56
10	74.46	3.67	87.79	1.99	90.17	3.46
11	73.98	3.71	87.63	1.96	89.08	3.35
12	73.50	3.74	87.38	1.94	90.18	3.25
13	73.18	3.77	87.25	1.92	90.00	3.15
14	72.85	3.80	87.41	1.91	90.00	3.06
15	72.52	3.82	86.76	1.89	89.80	2.96
16	72.29	3.85	86.38	1.91	89.80	2.89
17	72.09	3.86	86.24	1.94	89.61	2.79
18	71.89	3.88	86.05	1.95	89.58	2.70

附表 12 (續) 複合式組合 2、2.0 倍、間隔 10 秒釋放評估指標數據一覽表

情境	內摩擦角=24°		內摩擦角=34°		內摩擦角=43°	
	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	參考點深度方均根 (m)
19	71.72	3.89	85.53	1.98	89.58	2.62
20	71.50	3.90	85.47	2.00	89.83	2.52
21	71.37	3.91	85.28	2.03	89.78	2.44
22	71.30	3.91	85.35	2.07	89.83	2.37
23	71.28	3.91	84.80	2.10	89.83	2.30
24	71.36	3.90	84.97	2.13	89.76	2.25
25	71.60	3.88	85.12	2.14	89.74	2.18
26	72.02	3.86	85.09	2.15	89.56	2.12
27	72.47	3.81	85.10	2.14	89.52	2.06
28	72.96	3.74	85.27	2.14	89.49	2.02
29	73.70	3.65	85.31	2.13	89.53	1.98
30	74.72	3.55	85.38	2.14	89.59	1.93
31	76.51	3.42	85.68	2.16	89.59	1.90