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
南投市中興新村光華路6號
https://www.swcb.gov.tw

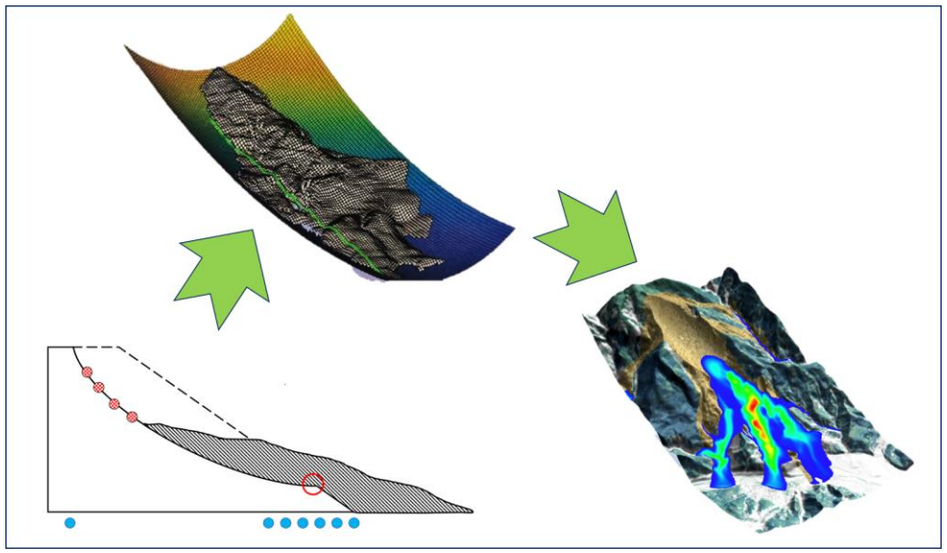
高度不確定性潛勢區域之崩塌破壞曲面與量體估算之研究 成果報告書 112年度 農業部農村發展及水土保持署

ARDSWC-112-048

112 年度創新研究計畫

高度不確定性潛勢區域之崩塌破壞曲面與量體估算之研究

成果報告書



農業部農村發展及水土保持署　編印

中華民國 112 年 12月

計畫編號：**ARDSWC-112-048**

高度不確定性潛勢區域之崩塌破壞曲面與量體估算之研究

The estimation of the plausible failure surface and the associated released volume for the large-scale landslide area of 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： 112 年 02 月 08 日至 112 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 112 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）

高度不確定性潛勢區域之崩塌破壞曲面與量體估算之研究

摘要

崩塌土砂可能影響範圍的估算對於大規模崩塌的災害評估與防減災規畫作業是一項關鍵的重要議題，而該可能影響範圍的推估往往必須仰賴現場調查後研判並搭配所預測的崩塌體積。然而，大規模崩塌發生時，崩塌破壞面的坡趾處易被崩塌土體(或稱覆土層)所掩埋，這導致對實際的崩塌破壞面、後續崩塌體積和影響範圍的推估存在著高度的不確定性。尤其在尚未進行災後詳細調查或建置現場量測設施前提下，若無法確定實際崩塌破壞面高程，僅基於災害前後期數值地形資料進行崩塌體積的推估將存在高度的誤差。因此，開發一個操作簡單且能夠快速評估實際的崩塌破壞面的工具至為重要。基於上述背景，本案延續應用 Wang et al. (2022) 提出的“基因演算-參考橢圓-理想曲面法 (GA-ER-ICS)”，此方法只需應用災前數值地形資料 (如 LiDAR-derived DEM) 研判可能崩塌範圍、冠部與原邊坡趾處，通過設計不同 GA-ER-ICS 起始搜尋點，並應用本案設計之評估指標選取最合適之理想曲面法(ICS)作為後續現場調查或是防減災規畫作業之參考依據。簡言之，本案旨在提供一種現場調查缺乏或崩塌破壞面資料前快速評估可能崩塌破壞面與其影響範圍之方法，作為防災規畫作業之參考依據。本案以新竹縣-尖石鄉-T001 (2021 年秀巒崩塌事件) 與新北市-汐止區-D003 (2022 年鵠鵠崙崩塌事件) 作為研究區域，探討其崩塌事件以及後續潛勢崩崖，可能之崩塌破壞面與後續土砂影響範圍。

關鍵詞：高度不確定性、可能崩塌破壞面推估、土砂影響範圍、評估指標

The estimation of the plausible failure surface and the associated released volume for the large-scale landslide area of high uncertainty

Abstract

The estimation of the potential endangered area by the moving mass is one of the most crucial issues by hazard assessment or disaster mitigation planning against large-scale landslides. The estimation of potentially impacted areas often relies on in-situ investigations combined with predicting the landslide volume. However, in many historical large-scale landslide events, the toe of the failure surface is often buried by the released landslide material, which leads to a high level of uncertainty in estimating the actual failure surface, as well as the subsequent flow paths of moving mass and its endangered areas. This uncertainty is particularly significant when detailed post-disaster surveys or on-site drilling investigations have not yet been conducted. Without precise information of the elevation of the actual landslide failure surface, the estimation of the landslide volume solely based on the pre- and post-event DEMs will result in a high degree of uncertainty. Therefore, it is highly requested to develop a simple and efficient tool that can quickly assess and approximate the landslide failure surface. The proposed method aims to improve the reliability of subsequent impact range analysis by applying the remote-sensing-techniques-produced DEM and the corresponding orthophotos to approximate the plausible failure surface and the associated landslide volume. Based on the Genetic Algorithm Ellipse-Referenced Idealized Curved Surface (GA-ER-ICS) method (Wang et al., 2022), we utilize the pre- and post-event digital terrain data (such as LiDAR-derived DEM) to determine the ICS for estimating the potential landslide area, crown and the plausible toe of failure surface. Through the assigned initial searching points, the most suitable ICS is selected for the subsequent on-site investigations or as reference for evaluating countermeasures of disaster management. Two case studies are applied in the present study: The Xiu-Luan T001 (occurred on 13th September 2021) and Gu-Gu-Lun D003 (occurred on 17th October 2022) landslide events.

Keywords: High uncertainty, Plausible failure surface construction, Landslide endanger area, Accuracy assessment

目次

摘要 ..... **I**

Abstract ..... **II**

目次 ..... **III**

表次 ..... **V**

圖次 ..... **VI**

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 崩塌破壞曲面之估算 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 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域 3-1

第二節 新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域 3-7

第四章 崩塌破壞面推估 **4-1**

第一節 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域 4-1

第二節 新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域 4-6

第五章 土砂影響範圍推估 **5-1**

第一節 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域 5-1

第二節 新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域 5-9

第三節 調整影響範圍繪製基準 5-13

第六章 篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS) **6-1**

第一節 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域 6-1

第二節　新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域..... 6-5
第七章 災害後續崩崖影響範圍評估 7-1
第一節　新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域 7-1
第二節　新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域..... 7-11
第三節　與水保署公開資料比較 7-18
第八章 結論與建議 8-1
第一節　結論 8-1
第二節　建議與未來展望 8-3
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-4
附錄三 期末審查意見暨回覆辦理情形 附-5
附錄四 各情境最終土砂堆積分佈圖 附-7

表次

表 2.1 崩塌破壞面推估方法比較一覽表 2-11
表 4.1 秀巒崩塌 GA-ER-ICS 各情境推估結果一覽表..... 4-5
表 4.2 鵠鵠崙崩塌 GA-ER-ICS 各情境推估結果一覽表 4-10
表 6.1 秀巒崩塌評估指標數據一覽表 6-3
表 6.2 鵠鵠崙崩塌評估指標數據一覽表 6-7
表 8.1　本案之工作項目與各期進度表 8-4

圖次

圖 2.1 計畫作業流程圖 2-2

圖 2.2 SMS 崩塌破壞面建置示意圖 2-4

圖 2.3 崩塌破壞面推估參考點..... 2-5

圖 2.4 理想崩塌破壞曲面之幾何特性..... 2-8

圖 2.5 理想崩塌破壞曲面之深度分佈示意圖 2-8

圖 2.6 理想崩塌破壞曲面示意圖 2-8

圖 2.7 參考橢圓位移方式 2-9

圖 2.8 情境設計概念圖..... 2-10

圖 3.1 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域地形..... 3-2

圖 3.2 秀巒崩塌事件各情境起始搜尋點分佈圖 3-3

圖 3.3 秀巒崩塌推估崩塌破壞面之參考範圍與點分佈圖 3-5

圖 3.4 秀巒崩塌崩塌災害前後期數值崩塌深度分佈圖 3-5

圖 3.5 秀巒崩塌崩塌災害前後土砂堆積深度分佈圖 3-6

圖 3.6 鵠鵠崙崩塌潛勢區域 2014 LIDAR 地形圖 3-8

圖 3.7 鵠鵠崙崩塌事件各情境起始搜尋點分佈圖 3-9

圖 3.8 鵠鵠崙崩塌推估崩塌破壞面之參考範圍與點分佈圖 3-11

圖 3.9 鵠鵠崙崩塌崩塌災害前後期數值崩塌深度分佈圖 3-11

圖 3.10 鵠鵠崙崩塌崩塌災害前後土砂堆積深度分佈圖 3-12

圖 4.1 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 1)..... 4-2

圖 4.2 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 2)..... 4-2

圖 4.3 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 3)..... 4-2

圖 4.4 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 4)..... 4-2

圖 4.5 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 5)..... 4-3

圖 4.6 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 6)..... 4-3

圖 4.7 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 7)..... 4-3
圖 4.8 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 8)..... 4-3
圖 4.9 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 9)..... 4-3
圖 4.10 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 10)..... 4-3
圖 4.11 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 11) 4-4
圖 4.12 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 12)..... 4-4
圖 4.13 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 13)..... 4-4
圖 4.14 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 14)..... 4-4
圖 4.15 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 15)..... 4-4
圖 4.16 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 16)..... 4-4
圖 4.17 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 17)..... 4-5
圖 4.18 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 18)..... 4-5
圖 4.19 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 19)..... 4-5
圖 4.20 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(秀巒情境 20)..... 4-5
圖 4.21 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 1)..... 4-7
圖 4.22 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 2)..... 4-7
圖 4.23 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 3)..... 4-7
圖 4.24 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 4)..... 4-7
圖 4.25 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 5)..... 4-8
圖 4.26 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 6)..... 4-8
圖 4.27 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 7)..... 4-8
圖 4.28 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 8)..... 4-8
圖 4.29 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 9)..... 4-8
圖 4.30 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 10)..... 4-8
圖 4.31 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 11)..... 4-9

圖 4.32 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 12)..... 4-9
圖 4.33 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 13)..... 4-9
圖 4.34 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 14)..... 4-9
圖 4.35 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 15)..... 4-9
圖 4.36 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 16)..... 4-9
圖 4.37 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 17)..... 4-10
圖 4.38 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖(鵠鵠崙情境 18)..... 4-10
圖 5.1 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 1)..... 5-2
圖 5.2 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 2)..... 5-2
圖 5.3 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 3)..... 5-2
圖 5.4 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 4)..... 5-2
圖 5.5 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 5)..... 5-3
圖 5.6 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 6)..... 5-3
圖 5.7 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 7)..... 5-3
圖 5.8 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 8)..... 5-3
圖 5.9 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 9)..... 5-3
圖 5.10 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 10)..... 5-3
圖 5.11 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 11) 5-4
圖 5.12 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 12)..... 5-4
圖 5.13 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 13)..... 5-4
圖 5.14 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 14)..... 5-4
圖 5.15 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 15)..... 5-4
圖 5.16 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 16)..... 5-4
圖 5.17 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 17)..... 5-5
圖 5.18 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 18)..... 5-5

圖 5.19 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 19) 5-5
圖 5.20 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 20) 5-5
圖 5.21 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 1) 5-6
圖 5.22 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 2) 5-6
圖 5.23 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 3) 5-7
圖 5.24 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 4) 5-7
圖 5.25 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 5) 5-7
圖 5.26 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 6) 5-7
圖 5.27 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 7) 5-7
圖 5.28 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 8) 5-7
圖 5.29 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 9) 5-8
圖 5.30 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 10) 5-8
圖 5.31 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 11) 5-8
圖 5.32 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 12) 5-8
圖 5.33 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 13) 5-8
圖 5.34 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 14) 5-8
圖 5.35 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 15) 5-9
圖 5.36 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 16) 5-9
圖 5.37 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 17) 5-9
圖 5.38 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 18) 5-9
圖 5.39 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 19) 5-9
圖 5.40 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 20) 5-9
圖 5.41 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 1) 5-11
圖 5.42 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 2) 5-11
圖 5.43 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 3) 5-11

圖 5.44 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 4)..... 5-11
圖 5.45 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 5)..... 5-11
圖 5.46 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 6)..... 5-11
圖 5.47 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 7)..... 5-12
圖 5.48 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 8)..... 5-12
圖 5.49 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 9)..... 5-12
圖 5.50 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 10)..... 5-12
圖 5.51 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 11)..... 5-12
圖 5.52 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 12)..... 5-12
圖 5.53 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 13)..... 5-13
圖 5.54 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 14)..... 5-13
圖 5.55 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 15)..... 5-13
圖 5.56 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 16)..... 5-13
圖 5.57 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 17)..... 5-13
圖 5.58 影響範圍推估(鵲鵲崙情境 18)..... 5-13
圖 5.59 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 1)..... 5-14
圖 5.60 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 2)..... 5-14
圖 5.61 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 3)..... 5-14
圖 5.62 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 4)..... 5-14
圖 5.63 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 5)..... 5-15
圖 5.64 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 6)..... 5-15
圖 5.65 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 7)..... 5-15
圖 5.66 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 8)..... 5-15
圖 5.67 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 9)..... 5-15
圖 5.68 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 10)..... 5-15

圖 5.69 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 11) 5-16
圖 5.70 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 12) 5-16
圖 5.71 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 13) 5-16
圖 5.72 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 14) 5-16
圖 5.73 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 15) 5-16
圖 5.74 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 16) 5-16
圖 5.75 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 17) 5-17
圖 5.76 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 18) 5-17
圖 5.77 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 19) 5-17
圖 5.78 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 20) 5-17
圖 5.79 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 1) 5-18
圖 5.80 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 2) 5-18
圖 5.81 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 3) 5-18
圖 5.82 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 4) 5-18
圖 5.83 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 5) 5-18
圖 5.84 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 6) 5-18
圖 5.85 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 7) 5-19
圖 5.86 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 8) 5-19
圖 5.87 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 9) 5-19
圖 5.88 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 10) 5-19
圖 5.89 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 11) 5-19
圖 5.90 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 12) 5-19
圖 5.91 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 13) 5-20
圖 5.92 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 14) 5-20
圖 5.93 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 15) 5-20

圖 5.94 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 16)..... 5-20
圖 5.95 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 17)..... 5-20
圖 5.96 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 18)..... 5-20
圖 6.1 秀巒崩塌事件評估指標結果 6-2
圖 6.2 秀巒崩塌最合適崩塌曲面之崩塌土體分佈 (情境 14)..... 6-4
圖 6.3 秀巒崩塌最合適崩塌曲面之影響範圍 (情境 14)..... 6-4
圖 6.4 秀巒崩塌最合適崩塌曲面之土砂運移行為最終堆積分佈 (情境 14)..... 6-5
圖 6.5 鵠鵠崙崩塌事件評估指標結果 6-6
圖 6.6 鵠鵠崙崩塌最合適崩塌曲面之崩塌土體分佈(情境 8)..... 6-8
圖 6.7 鵠鵠崙崩塌最合適崩塌曲面之土砂影響範圍圖(情境 8)..... 6-8
圖 6.8 鵠鵠崙崩塌最合適崩塌曲面之土砂運移行為最終堆積分佈(情境 8)..... 6-9
圖 7.1 秀巒崩塌之崩崖分佈..... 7-2
圖 7.2 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸一情境設定圖. 7-3
圖 7.3 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸二情境設定圖. 7-4
圖 7.4 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 A 及 0.5 倍)之風險地圖 7-5
圖 7.5 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 A 及 1.0 倍)之風險地圖 7-6
圖 7.6 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 A 及 2.0 倍)之風險地圖 7-6
圖 7.7 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 A 及 0.5 倍)之風險地圖 7-7
圖 7.8 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 A 及 1.0 倍)之風險地圖 7-7
圖 7.9 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 A 及 2.0 倍)之風險地圖 7-8
圖 7.10 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 B 及 0.5 倍)之風險地圖 7-8
圖 7.11 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 B 及 1.0 倍)之風險地圖 7-9
圖 7.12 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 B 及 2.0 倍)之風險地圖 7-9

圖 7.13 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 B 及 0.5 倍)之風險地圖 7-10
圖 7.14 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 B 及 1.0 倍)之風險地圖 7-10
圖 7.15 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 B 及 2.0 倍)之風險地圖 7-11
圖 7.16 鵠鵠崙崩塌之崩崖分佈..... 7-12
圖 7.17 鵠鵠崙 D003 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸一情境設定圖 7-13
圖 7.18 鵠鵠崙 D003 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸二情境設定圖 7-14
圖 7.19 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一(0.5 倍)之風險地圖 7-15
圖 7.20 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一(1.0 倍)之風險地圖 7-15
圖 7.21 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一(2.0 倍)之風險地圖 7-16
圖 7.22 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二(0.5 倍)之風險地圖 7-16
圖 7.23 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二(1.0 倍)之風險地圖 7-17
圖 7.24 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二(2.0 倍)之風險地圖 7-17
圖 7.25 秀巒崩塌後續崩崖一全部情境之土砂運移風險地圖 7-18
圖 7.26 秀巒崩塌後續崩崖二全部情境之土砂運移風險地圖 7-19
圖 7.27 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一全部情境之土砂運移風險地圖 ... 7-19
圖 7.28 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二全部情境之土砂運移風險地圖 ... 7-20

第一章 緒論

第一節 計畫緣起與擬解決問題

因台灣位於環太平洋地震帶上，地處於活躍的板塊交界處，使得台灣擁有複雜多變的地質結構和陡峭的山坡地形，這些因素共同導致了台灣山區易發生大規模崩塌的危險性。首先，台灣的地質結構非常複雜，存在著多樣的岩層和斷層。這些岩層在長時間的推擠和地震活動下產生變形和斷裂，導致山區許多邊坡變得不穩定。其次，陡峭山坡地形加上颱風豪雨期間，高強度短延時往往也是造成大規模崩塌發生的重要因素。此外，長期的人為開發、土地利用不當、過度砍伐植被等因素也加劇了山坡的不穩定性，使得崩塌的風險進一步增加。

無論是崩塌、堰塞湖與土石流，其衝擊將嚴重影響下游居民(保全對象)的財務與性命安全。自 2009 年小林村大規模崩塌事件後，水土保持局大力推動大規模崩塌潛勢區域之現地調查、定訂降雨警戒值、設置現場即時監測與預警系統 等。並於 2018 年發行之「大規模崩塌之調查與及觀測技術手冊」將大規模崩塌定義為崩塌範圍大於 10 公頃或土方量達 10 萬立方公尺或崩塌深度大於 10 公尺以上之崩塌事件。其中 Tai et al. (2020)、Jaboyedoff et al. (2020) 與 Tang et al. (2020)都曾提及崩塌土砂量體對於土砂運移影響範圍推估扮演最主要的角色。因此在發生崩塌後，**是否可以在未進行詳細現場調查前提供可能崩塌破壞面和其可能影響範圍**，對於防災應變和防減災規畫具有一定的急迫性和重要性。

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相減；(二) 透過崩塌面積-體積迴歸式；(三) 現場調查。若是崩塌坡趾處受到掩埋或是崩塌土體未完全滑動

離開崩塌破壞面 (depletion zone)，在應用方法一與二仍然存在高度之不確定性。而現場調查因可透過鑽井、挖掘崩塌土體或是其他地質探測方法，進而瞭解地下地質岩層走向等資料，但其主要缺點為需耗費大量人力與經費、所得到的點 (鑽探或地下水位監測井) 或面資料 (地電阻量測) 等對於描述三維空間分佈也仍然存在許多的假設，卻將因應不同區域不同時間其也存在高度的不確定性變化。

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，因目前遙測技術和無人機的高速發展，許多高解析度高精度航拍照和產製之地形資料可協助推估崩塌潛勢範圍之劃定，而其缺點為若針對未發生崩塌或崩塌土體未完全滑動其後續影響範圍推估仍存在高度不確定性。Tang et al. (2020) 中也有提到若崩塌土體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，因此極需發展一只透過遙測產製資料推估被掩埋之崩塌破壞面之工具。

因此，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，透過災害前後期數值地形資料與現場調查資料。當具備崩塌範圍、崩塌土砂量體、後續土砂影響範圍等資料，應用理想曲面方式近似實際崩塌破壞面，發現所推估之崩塌土砂後續影響範圍與實際土砂路徑差異不大。例如在起始階段，土砂運移路徑偏差存在 26.82%差異，但隨者時間推移，達到最終堆積階段時可發現其差異值降低至 9.54%，此數據對於大多數之土石流或是土砂運移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、災後正射影像 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 Wang et al. (2022)、Ko et al. (2021)與 Tai et al. (2020) 提出之 GA-ER-ICS 推估理想崩塌曲面之方法，搭配災前數

值地形資料設計不同情境(起始搜尋點)，推估一系列之崩塌破壞曲面進行後續影響範圍推估，最終選取最合適之理想崩塌曲面和土砂運移參數組作為該案例之參考依據，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畫 “崩塌破壞面推估”、“土砂影響範圍推估”、“篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS)” 等三個工作項目，說明如下：

一、崩塌破壞面推估

本案針對崩塌未完全滑動(崩塌破壞面坡趾處被掩埋)的案例，透過數值地形資料研判地形特徵(災害前坡趾處、崩塌冠部和裂縫等)，延伸應用 Wang et al. (2022) 發展之 GA-ER-ICS，並透過微地形特徵規畫系列情境(起始搜尋點)，進行推估可能之理想崩塌曲面。

二、土砂影響範圍推估：

當具備由 GA-ER-ICS 推估之崩塌破壞面對應之崩塌土體分佈，可以藉助本團隊發展之土砂運移行為模式 (Tai et al., 2019)，搭配適合之參數組 (參考 Tai et al., 2019 與 Ma et al., 2022)，即可得到由工作項目一推估之崩塌理想破壞面後續影響範圍。

三、篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS)：

透過上述工作項目一與二推估結果，與實際災後調查資料量繪製之災害規模與影響範圍，即可探討由候選 GA-ER-ICS 與土砂運移行為模式搭配各情境所推估之各項物理量(如 崩塌深度分佈、最終土砂堆積分佈 等)探討其偏差，經過彙整後即可選取最合適之 GA-ER-ICS 推估之可能崩塌破壞面作為後續防災應變或是防減災規畫之參考依據。

第二章 工作執行方法與步驟

針對崩塌破壞面範圍高度不確定性 (如 崩塌破壞面趾部被掩埋) 之案例，本研究提出應用 GA-ER-ICS 搭配災害前後期地形資料，可快速評估一可能崩塌破壞面。使用電腦或模式推估崩塌量體的優勢，主要可提早瞭解其可能造成之土砂影響範圍，供防減災規畫與設計作為參考依據。

因此本案延伸應用 Wang et al. (2022) 發展之 GA-ER-ICS 搭配由災害前後數值地形研判之微地形特徵，設計各式不同情境進行推估可能之崩塌量體與再應用本團隊發展之土砂運移行為模式推估其可能影響範圍。經規畫後本案之主要工作項目為：(a) 崩塌破壞面推估；(b) 土砂影響範圍推估與 (c) 選定最合適理想崩塌曲面。

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、研判原邊坡之微地形特徵 (如 崩塌冠部、側向裂隙、災害前坡趾 等)

步驟三、研判崩塌潛勢區域

步驟四、評估指標基準資料前處理

步驟五、GA-ER-ICS 情境設計 (起始搜尋點)

步驟六、崩塌破壞面推估

步驟七、土砂影響範圍推估

步驟八、篩選(或決定)最合適之 GA-ER-ICS

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鑽探前，應用既有之災前 LiDAR-based DEM 與災後 UAV 產製 DSM 地形資料進行崩塌土砂量體與後續影響範圍之推估，作為災後調查與防減災規畫行動前之參考依據。

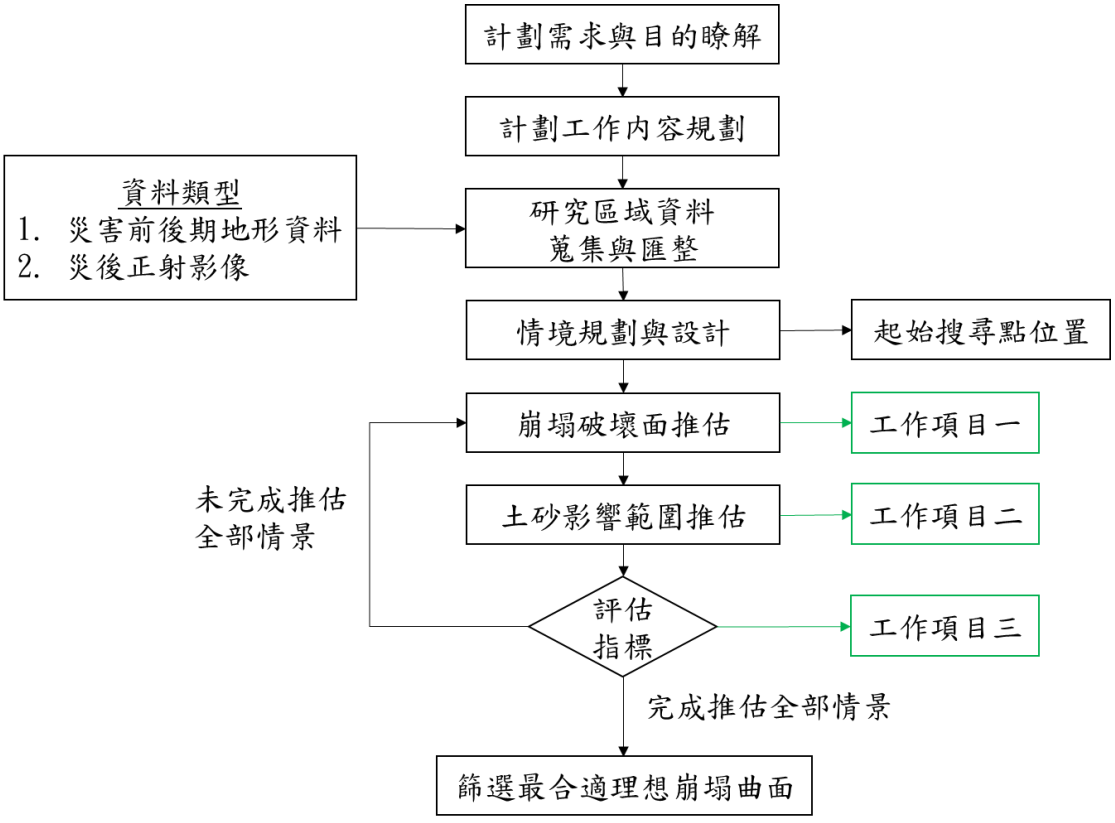


圖 2.1 計畫作業流程圖

第二節 崩塌破壞曲面之估算

本案以 Wang et al. (2022)、Ko et al. (2021) 與 Tai et al. (2020) 發展之 GA-ER-ICS 為基礎，搭配災害前後期數值地形資料與所研判之微地形特徵 (如 崩崖、側面裂隙、原始坡趾 等)，推估可能之崩塌量體與後續土砂影響範圍。以下為簡要說明其他應用理想破壞曲面近似實際崩塌破壞面之方法。

對於崩塌土石流防減災議題，大家最關心莫過於其影響範圍。一般災害發生後可透過遙測技術產製之正射影像沿着地表裸露範圍圈繪，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土體未完全滑動離開崩塌破壞面之案例，因崩塌範圍不易確定其範圍造成後續推估崩塌量體存在高度不確定性。因此 Tai et al. (2020)、Kuo et al. (2020)、Tang et al. (2020) 發展一近似崩塌破壞面且操作簡單之方法推估可能之崩塌土體分佈，當具備可能崩塌土體分佈後我們方可推估後續其可能影響範圍，供防減災規畫與現場調查作為參考依據。本章節將簡述 3 種已被發展之崩塌破壞面推估方法。

一、 最小平滑曲面法 (Smooth Minimal Surface, SMS)

Kuo et al. (2020) 在發展最小平滑曲面法(SMS)之初衷為尋求一個近似物理、具適性、操作簡單具備整合性之崩塌破壞面分析相關工具，將大幅提升規畫階段之成本效益，其破壞面推估示意圖如圖 2.2 所示。因臺灣超過了 9,000 以上之潛勢崩塌區域並逐年增加，若每一處潛勢區域都需要依靠人力進行現場細部調查，必須耗費大量的經費與時間。隨着遙測技術不斷精進，高精度與高解析度之 LiDAR-based DEM 資料可以協助研判潛勢崩塌範圍，再搭配一工具可以推估近似物理操作簡單的崩塌破壞面推估工具，即可再未發生崩塌前

評估其可能崩塌規模。其中，Kuo et al. (2020) 於文章內有提到此該工具旨在以較簡單操作方式提供可接受的準確度預測崩塌破壞面，但不一定具有高精度。

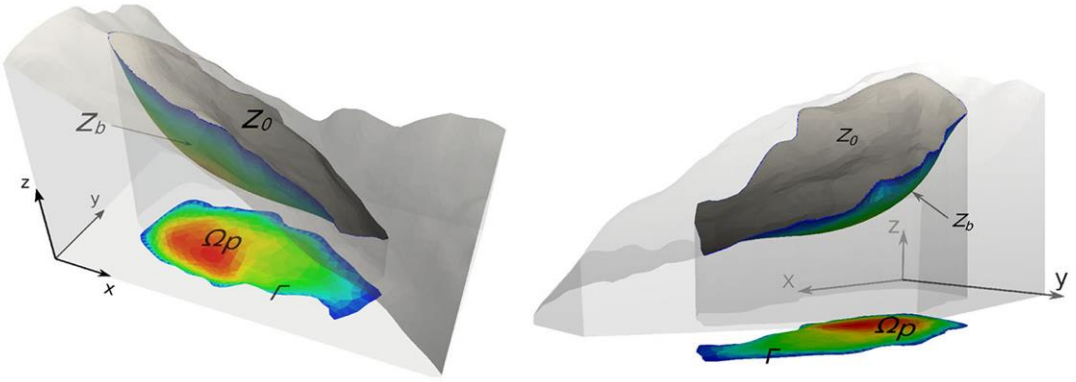


圖 2.2 SMS 崩塌破壞面建置示意圖
(圖資料來源： Kuo et al., 2020)

與許多崩塌破壞面推估工具一樣，SMS 需要先提供一可能崩塌量體作為搜尋破壞面依據。並藉助由遙測產製之正射影像與現場細部調查後研判之崩塌範圍作為依據，再透過不斷於此範圍內往下建置不同深度的理想崩塌破壞面，直到所推估之崩塌量體與輸入之崩塌量體一致後結束運算。並依據所設計之評估指標(如 最大與平均深度方均根)作為推估之崩塌破壞面品質管控，應用此推估方法最優勢的地方為所推估之崩塌範圍一定與所圈繪的範圍一致，此方法在圈繪崩塌範圍時必須更加謹慎方可得到比較符合實際之崩塌破壞面。

其中 Kuo et al. (2020)應用最小平滑曲面法於 2009 年莫拉克颱風造成旗山溪流域之 24 處崩塌事件作為研究對象發現其偏差座落於 45 ±10%，而對於細長或相對圓形的陡坡可以得到更好的預測結果。

二、 多項式曲面擬合法 (Polynomial Surface Fitting)

Tang et al. (2020) 提出之應用高階多項式曲面(High order polynomial) 近似崩塌破壞面，只需應用遙測技術產製之數值地形資料進行推估崩塌破壞面，但缺點為無法推估崩塌土體未完全滑動或是崩塌破壞面之坡趾受到掩埋之案例。現階段其團隊已開發 MATLAB 的模組 (SLIPFITTER)，並在文章內提到未來規畫建置 GIS 相關工具箱來協助建置參考點和與實際案例崩塌量體之比較。

其中在參考點之建置情境 (參閱圖 2.3)，Tang et al. (2020) 有比較了不同建置方法對於推估崩塌破壞面之影響，建置情境包含了(1)均勻分佈；(2)不設置參考點；(3)沿着坡向由坡趾往冠部設置；(4)單一參考點；與(5)沿着坡趾，如圖所示。除了參考點情境(5)應用災前數值地形資料，其他參考點(1~4)應用災後數值地形作為崩塌破壞面之高程依據。

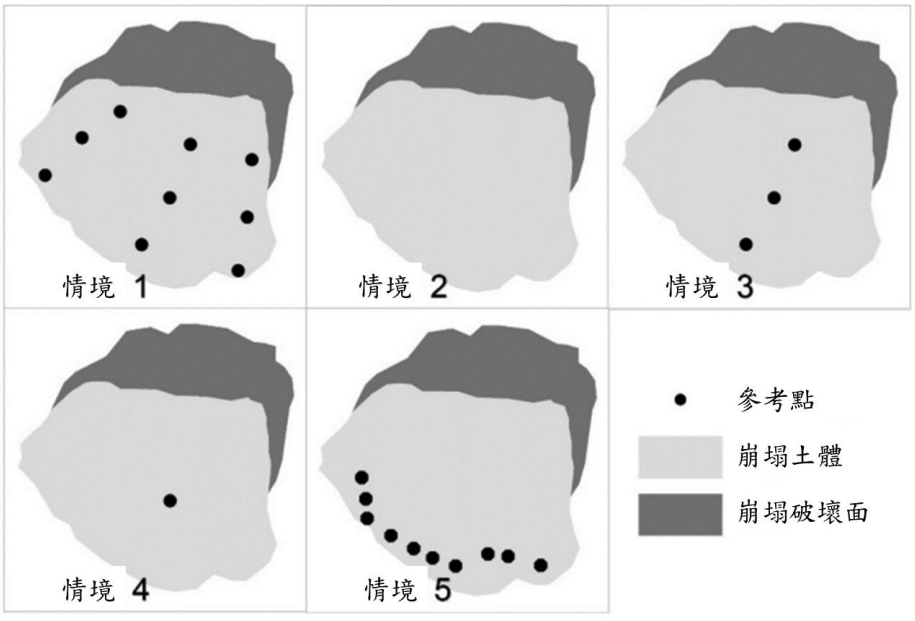


圖 2.3 崩塌破壞面推估參考點
(本案重繪 Tang et al., 2020 之 Fig 7)

Tang et al. (2020) 經過比較後發現應用高階曲面 (2 階以上)方式搭配參考點建置情境 (1 與 5) 所推估之崩塌破壞面偏差較小，因參考點建置方法(1)均勻分佈和方法(5)透過災害前後期數值地形即可得到明確之高程。綜合上述描述，其優勢為“SLIPFITTER”只需應用遙測技術產製之災前數值地形作為模式輸入資料，而限制為在發生崩塌後崩塌土體必須脫離破壞面滑動面方可使用。

三、 基因演算-參考橢圓-理想破壞曲面 (GA-ER-ICS)

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，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。

理想破壞曲面為在三維環境下之平滑曲面，其幾何特性主要由軸向 (down-slope 方向) 曲率與側向 (transverse 方向) 的曲率來決定。若破壞面的主要坡向在 x 方向，側向則是 y 方向，c 為所在位置的斜率 (坡向) ，可使用

$$k_{xz} = c_x^3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad \& \quad k_{yz} = c_y^3 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \tag{2.1}$$

決定理想曲面，其中 k_{xz} 與 k_{yz} 分別為軸向 (down-slope 方向) 與側向

(transverse 方向) 之曲率，c_x 與 c_y 分別為軸向與側向之斜率 。因為切線斜率會隨位置而變化，顯見縱使在 x-z 平面標描繪曲率 k_{xz} 為定值的二維曲線也是一非線性的關係式。

如圖 2.6 所示，假設 $\overline{p_1p_2}$ 長度為 L_1，曲率半徑 R_1 與 L_1 關係式可寫成

$$L_1 = 2R_1 \sin\theta_{\text{arc}} \tag{2.2}$$

$$R_1 - d_1 \cos\theta_1 = R_1 \cos\theta_{\text{arc}} \tag{2.3}$$

然而若要依據式(2.2)與(2.3) 計算出一理想破壞面所需五個未知參數$(L_1, R_1, d_1, \theta_{\text{arc}}, \theta_1)$。為了可得到全部的解，先依據上下點位邊界得到$(L_1, \theta_1)$，只要給定崩塌深度 (d_1) 即可繪製出理想破壞曲面，相同的方式我們也可以直接套用至側向軸(transverse direction)。

如圖 2.4 示，理想崩塌曲面應用數值地形資料(DEM)必須透過下列幾何參數$(R, L, \theta, \theta_{arc})$決定理想曲面破壞面對應之崩塌體積，$R$ 為曲率半徑，而圖 2.5 之 L 為圖 2.7 之$\left(\overline{p_1p_2}\right)$ 或 $\left(\overline{p_3p_4}\right)$ 距離，θ 為邊坡傾斜角，θ_{arc} 為$\left(\overline{p_1p_2}\right)$ 或 $\left(\overline{p_3p_4}\right)$與理想崩塌破壞曲面之夾角。如圖 2.6 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_D，紅線為其側向軸 L_T，最終主軸與側向軸方向搭配不同曲率即可繪製一曲面，故此曲面成為理想崩塌曲面。

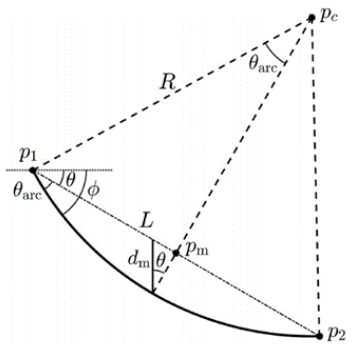


圖 2.4 理想崩塌破壞曲面之幾何特性
(圖資料來源：Tai et al., 2020)

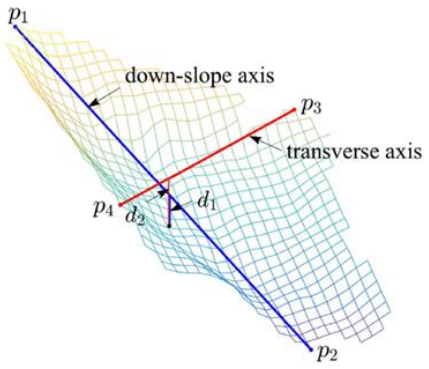


圖 2.5 軸向與側向並不會在同一平面，針對一深度 d，會對應出軸向的深度d_1 與側向的深度 d_2
(圖資料來源：Tai et al., 2020)

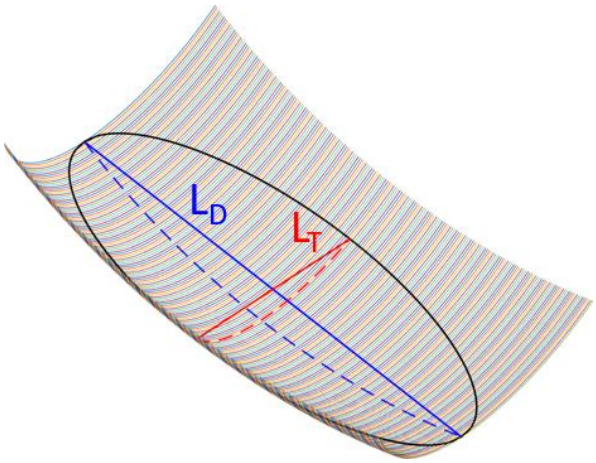


圖 2.6 理想崩塌破壞曲面示意圖

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對應的理想破壞曲面，過程中須將“參考橢圓”平移、旋轉或是偏轉，以搜尋出估算之破壞範圍與規畫崩塌潛勢區域面積差異最小的理想破壞曲面。圖 2.7 為參考橢圓位移方式，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。

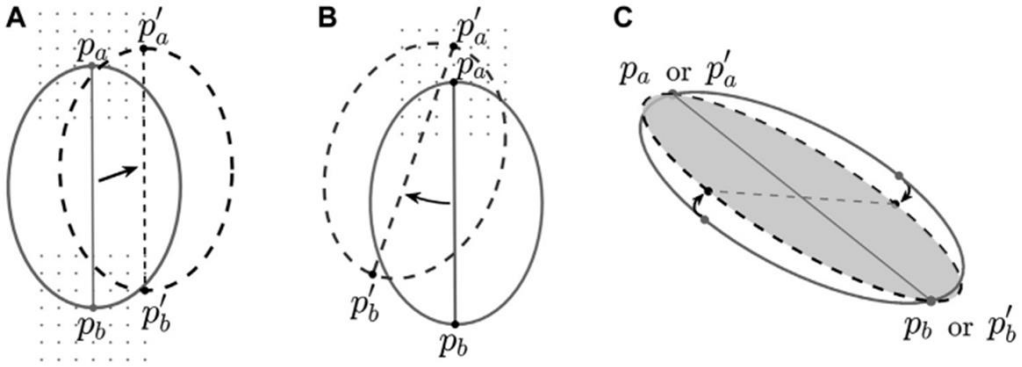


圖 2.7 參考橢圓位移方式： (A)平移、(B) 旋轉、(C)偏轉
(圖資料來源：Ko et al., 2021)

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

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}, \quad (2.4)$$

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

$$V_L = 0.1405 \times A_L^{1.3923}, \quad (2.5)$$

與 (2.4) 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(2.4)估算值的 0.5 ~ 2 倍值進行探討。此方式於前期計畫 (110 年) 應用於推估光華崩塌之

崩塌深度與實際傾斜儀(K18-1BW、K18-2BW 與 K19-1BW)可得偏差在±3 公尺以內。

本案主要工作為推估崩塌趾部被掩埋或是崩塌破壞面不明確之狀況，雖然 Wang et al. (2022)所發展之 GA-ER-ICS 已具備旋轉與放大縮小之搜尋方法，但是為了避免遺漏確切之崩塌趾部，故本案規畫應用原邊坡趾部或是原河岸作為 GA-ER-ICS 之起始下邊界搜尋點，往崩塌冠部或崩崖方向設計一系列之搜尋情境。如圖 2.8 所示，為崩塌前後地形剖面示意圖，現階段所設計之情境數由崩塌冠部至原邊坡坡趾之三分之一距離(D/3)為起始搜尋點之設計水平長度，而情境之間隔距離目前則可視所使用之 DEM 地形資料解析度以及實際地形狀況進行調整，因此暫定 5 或 10 m 為情境之間距。

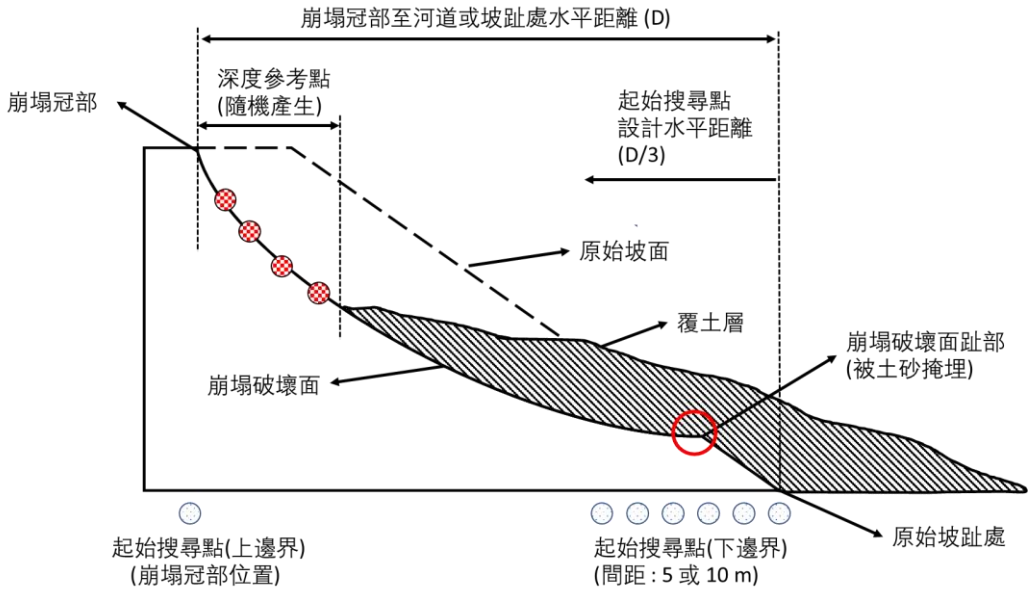


圖 2.8 情境設計概念圖

表 2.1 崩塌破壞面推估方法比較一覽表

方法	**最小平滑曲面法** (Kuo et al., 2020)	**多項式曲面擬合法** (Tang et al., 2020)	**基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法** (Tai et al., 2020)
輸入資料	災前數值地形、崩塌範圍與量體	災前數值地形、崩塌範圍與量體	災前數值地形、崩塌範圍與量體、起始搜尋點
所推估破壞面特性	不考慮長短軸曲率	高階曲面	長短軸不同曲率
破壞面建置條件	崩塌量體與範圍	崩塌量體、參考點與範圍	崩塌量體、參考點與範圍
優勢	無需現場地下相關資料(如 地下水位、岩層分佈 等)、操作簡單		
限制	必須具備明確之崩塌範圍資料	崩塌土體必須全部脫離破壞面	只能推估單一崩塌破壞面

第三節 評估指標

因 ICS 發展初衷為在缺乏現場資料下，也可推估一可能崩塌量體並探討其後續可能影響範圍。而本案在具備災前 LiDAR-based DEM、災後 DSM 與正射影像之前提下，提出由一系列情境之 GA-ER-ICS 中篩選最適合之崩塌破壞面，因此本案規畫提出不同評估指標因子作為參考依據，包含深度偏差(點資料)、覆蓋率(面資料)與邊坡穩定性分析 等。擬由候選情境中選出評估指標表現優良作為最合適之 GA-ER-ICS。有關本案提出之評估指標詳細說明如下：

一、 崩塌破壞面

參考深度偏差(RMS_{ICS})

其參考點建置依據為參考災後 UAV 產製 DSM 與正射影像，先行研判裸露崩塌破壞面分佈，並由此範圍內隨機產生間距 20 公尺之參考點，最終將參考點對應之災害前後期高程差異作為參考點參考崩塌深度依據。因參考點將隨著研判之裸露崩塌破壞面積有所差異，因此本案應用方均跟方式作為崩塌破壞面之評估因子之一，如可使用

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

式中 $d_{X,Y}^{ref}$ 與 $d_{X,Y}^{ICS}$ 代表實際與 GA-ER-ICS 推估之崩塌深度、n 為分析之總數量。參考深度偏差(RMS_{ICS})趨近於 0 代表所推估之崩塌破壞面越符合實際崩塌破壞面之分佈。

覆蓋率($1-\Lambda_{ICS}^{path}$)

除了應該點資料資料方式，本案也提出應用災前數值地形依據微地形特徵與地文方式研判可能之崩塌潛勢範圍作為基準，如可透過評估覆蓋面積偏差方式計算覆蓋率

$$1-\Lambda_{ICS}^{path}=1-\frac{\left|A_{sim}^{path}-A_{sim\cap ref}^{path}\right|-\left|A_{ref}^{path}-A_{sim\cap ref}^{path}\right|}{A_{ref}^{path}}, \qquad (2.7)$$

式中A_{ref}^{path}由災害前後期數值地形研判之崩塌潛勢範圍、A_{sim}^{path}代表本案GA-ER-ICS 推估之崩塌破壞面範圍、$A_{sim\cap ref}^{path}$為本案推估與實際崩塌破壞之交集範圍。當覆蓋率($1-\Lambda_{ICS}^{path}$)趨近於1代表所推估之崩塌破壞面越符合實際崩塌破壞面之狀況。

邊坡穩定性分析(FS)

本案基於創新研究計畫 (2021 年) 應用之"邊坡安全係數估算法"，理想破壞曲面在軸向與側向的力矩計算，可參酌柯奇均等人 (2020) ，其中在軸向邊坡安全係數(FS)表示式如

$$FS=\frac{\sum_{i=1}^{n}W^{i}\cos\alpha^{i}R\tan\phi_{b}}{\sum_{i=1}^{n}W^{i}\sin\alpha^{i}R^{*}} \quad , \qquad R^{*}=R-\frac{h^{i}}{2}\cos\alpha^{i} \qquad (2.8)$$

其中R為理想崩塌破壞(主軸)曲面之曲率半徑、α^{i}為各區塊底部所在切面與水平之夾角、W^{i}為各塊體重量、ϕ_{b}為土壤內摩擦角、h^{i}為各分析塊體之高度、n為所切分地塊體總數量。在重力造成的力矩上，由於地形的分佈，其等效的力臂(R^{*})會因為土體不同的高度而改變，因此式(2.8)可將破壞面上的地形分佈對於安全係數的影響納入考量。當$R\gg h^{i}$時，式(2.8)簡化為傳統無限邊坡之安全係

數的計算(參閱 Briaud, 2013)。

雖然邊坡穩定性分析必須提供土壤內摩擦角方可進行推估，因本案著重於從系列 ICS 候選情境中篩選穩定性較差之情境，因此本案只需要提供一個參數值即可，所推估之邊坡穩定性數值大小只能作為初略之參考值，後續若進行現場鑽探與土壤物性實驗後將可替換成實際之土壤內摩擦角。

體積比(Λ_{vol})

因 Tai et al. (2019) 有提到在回推小林村大規模崩塌事件發現，崩塌量體對於後續之土砂運移路徑具有明顯之影響，因此本案也將所推估之崩塌量體與實際調查後推估之崩塌量體比值作為評估指標

$$\Lambda_{vol} = \frac{V_{sim}}{V_{ref}}, \tag{2.9}$$

式中 V_{sim} 代表 GA-ER-ICS 推估崩塌破壞曲面對應可能崩塌量體、與 V_{ref} 為調查後推估之崩塌量體。當體積比(Λ_{vol})等於 1 代表所推估之崩塌量體與輸入之參考崩塌量體一致。

二、 土砂影響範圍

參考深度偏差(RMS_{fp})

除了評估崩塌破壞面，本案也設計評估最終土砂深度偏差，其則是應用災害前後期於堆積區域地形高程變化大於 0.1 m 者作為基準資料，其計算式與式 2.6 類似

$$RMS_{fp} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}(d_{X,Y}^{ref} - d_{X,Y}^{fp})^2}, \tag{2.10}$$

式中 $d_{X,Y}^{ref}$ 與 $d_{X,Y}^{fp}$ 為模擬與實際土砂堆積深度、及 n 為分析之總數量。

參考深度偏差趨近於 0 時，代表所推估之最終土砂堆積分佈與應用災害前後期地形資料得知堆積分佈一致。

路徑偏差(Λ_{fp}^{path})

影響範圍可透過災後 UAV 拍攝之正射影像，研判地表裸露之範圍作為基準資料。本案依據 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 0.4 m 與流速大於 0.4 m/s 範圍標記起來，最終繪製成土砂影響範圍圖。在設定土砂運移模式之停止時間，RAMMS 手冊 (2017) 應用動量比(平均動量/最大動量)之方式，建議可設定 1%~10% 作為模式停止依據。而最終評估土砂影響範圍則依據 Hürlimann et al. (2008) 與 Rickenmann (2005) 提出之條件(流動深度大於 0.40 m 與流速大於 0.4 m/s)為依據。因此土砂運移路徑偏差計算式可透過

$$\Lambda_{fp}^{path} = \frac{\left|A_{fp}^{path} - A_{fp\cap ref}^{path}\right| - \left|A_{ref}^{path} - A_{fp\cap ref}^{path}\right|}{A_{ref}^{path}}, \qquad (2.11)$$

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 產製之正射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。其中路徑偏差(Λ_{fp}^{path})趨近於 0 代表所推估之結果與災後正射影像研判之地表裸露區域之吻合度逐漸增加。

最終本案應用上述六項評估指標所篩選之最合適理想崩塌曲面將可供防減災規畫設計之參考依據。後續於本期中報告書之第七章將應用上述所提到之評估指標作為篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS)。

第三章 研究區域簡介

本案除了延伸應用前一年度計畫 (創新研究計畫，2022) 之新竹縣-尖石鄉-T001 (2021 年秀巒崩塌事件) 研究區域，與承辦單位商討後規畫新增新北市-汐止區-D003 (2022 年鵠鵠崙崩塌事件) 作為本年度第二研究區域。本章節為彙整水保局臺北分局 (2021) 之秀巒崩塌區域與水保局技研小組(地質年會，2023)之鵠鵠崙崩塌事件之環境與災害規模簡介。

第一節　新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域

2021 年秀巒崩塌位於新竹縣尖石鄉 T001 大規模崩塌潛勢區域，於 2021 年 09 月 13 日上午 10:10 左右發生崩塌事件，並崩塌發生後土體堵塞下游白石溪三分之一寬度，因河道通水斷面縮小加上白石溪上游不斷有入流，最終發生溢流導致秀巒產業道路被洪水淹沒，所幸無人員傷亡。

本案向內政部申請並取得 2016 年內政部國土測繪中心製作之 2016 年 LiDAR-based DEM 作為本案模擬秀巒崩塌事件之(災前)地形。除了災前(災害發生時間：2021 年 09 月 13 日 上午 10:10 左右)地形資料，本案也向水土保持局多元遙測影像申請模組申請災後 UAV 產製之 DSM 與正射影像作為本案後續評估指標之依據。

一、　地文

本案工作流程因包含崩塌破壞面與其土砂後續影響範圍推估，於崩塌破壞面推估階段需要使用到數值地形資料 (災前)、參考資料 (可能崩塌範圍與裸露崩塌破壞面高程)、崩塌量體 (參考計劃書)；而影

響範圍推估需要數值地形資料 (已扣除崩塌土體分佈)、起始土砂條件 (崩塌土體)、參數組 (參考 Tai et al., 2019; Tai et al., 2020；Ma et al., 2022) 。因此在本案主要使用到的資料包含了災害前後期數值地形 (災前 2016 年內政部 LiDAR-based DEM；災後 31 天之 2021 年 10 月 22 日 UAV 產製 DSM) 與災後正射影像 (2021 年 10 月 14 日 UAV 拍攝) 作為基本資料。

如圖 3.1 所示，彩色變化為 2016 年 LiDAR-based DEM 之高程數據，其解析度為 1m；紅色框為本案應用災前 2016 年 LiDAR-based DEM 由秀巒崩塌發生之邊坡圈繪其集水區範圍作為本案推估 GA-ER-ICS 時之參考面積依據；黃色框則應用災後 UAV 正射影像(影像拍攝時間：2021 年 10 月 22 日)，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。

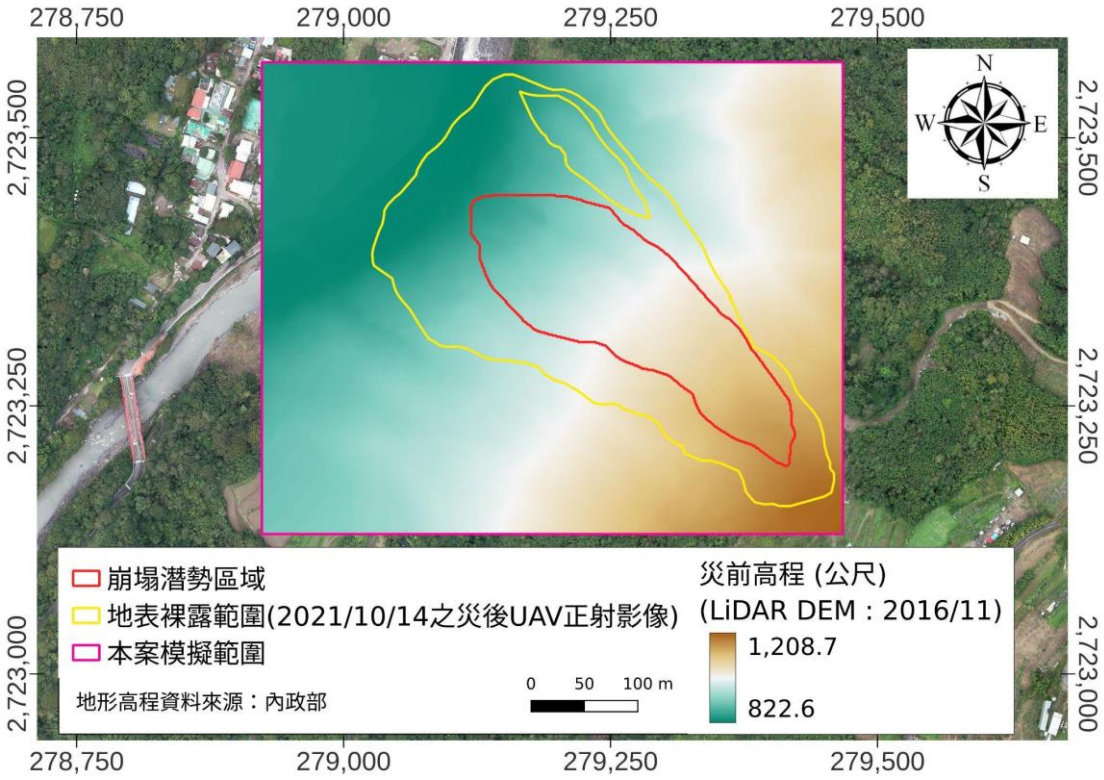


圖 3.1 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域地形
(地形資料來源：內政部國土測繪中心，2016)

二、 情境設定(GA-ER-ICS 起始搜尋點)

當具備基本資料後，於規畫 GA-ER-ICS 之起始搜尋點 (一組為 4 個，上下左右邊界點) 時，必須由災前原河道或坡趾處往崩塌冠部方向部設下邊界點，而左右起始搜尋點之建置條件則是沿着嶺線部設，上邊界起始搜尋點為崩塌冠部位置。如圖 3.2 所示，各個點代表 GA-ER-ICS 推估之起始搜尋點，其中粉紅色點為上邊界起始搜尋點、由藍色至紅色變化代表不同情境之下左右起始搜尋點。當具備上下左右起始搜尋點後，本案即可透過 GA-ER-ICS 依據參考資料(如 可能崩塌範圍、裸露崩塌破壞面高程、可能崩塌量體)所推估之 ICS，評估各個 ICS 之偏差值大小並不斷經過演化後搜尋至每個情境之最佳解。為了可以方便後續其他研究使用，本案現階段規畫起始搜尋點之距離為可能崩塌範圍之三分之一作為建置條件。

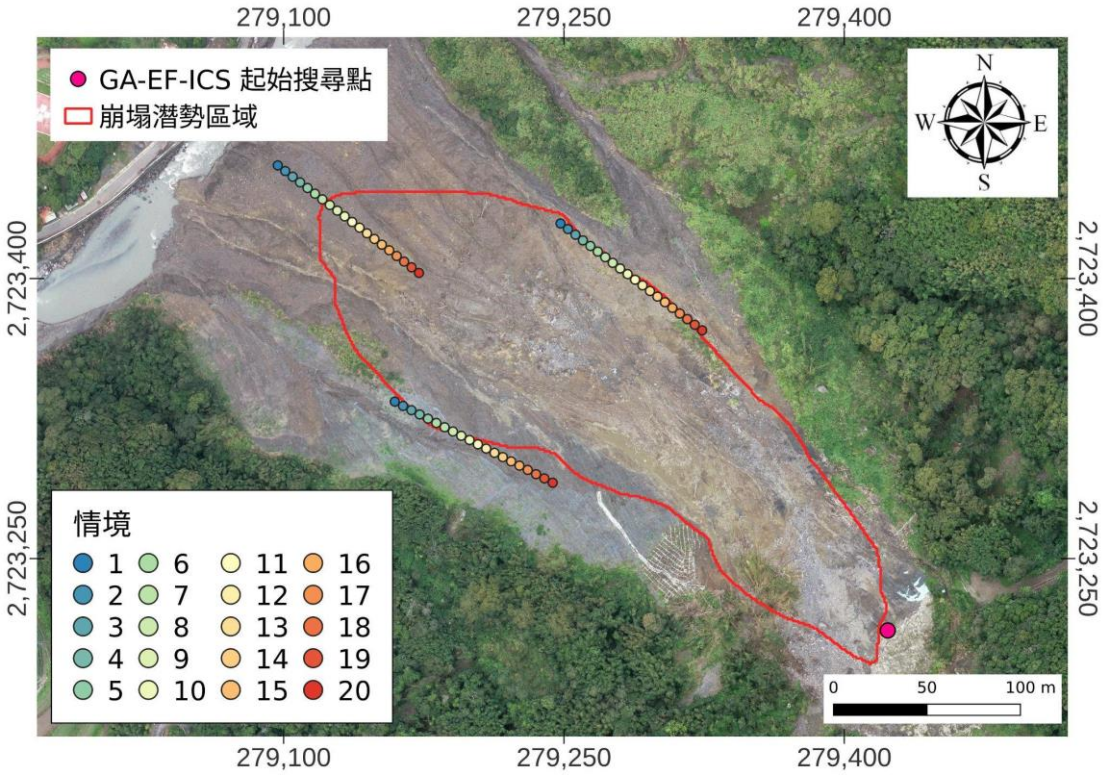


圖 3.2 秀巒崩塌事件各情境起始搜尋點分佈圖

三、 評估指標資料處理

因工作項目三(篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS))必須從眾多情境中挑選出最合適理想崩塌曲面，因此本案規畫設計出 6 種評估指標，分別為崩塌破壞面，包含崩塌破壞面深度偏差(方均根)、崩塌破壞面之覆蓋率、邊坡穩定性分析、崩塌量體比值；另為土砂影響範圍部分，則是依據最終土砂堆積深度偏差(方均根)與路徑偏差率。下列將簡述各個評估指標基準資料之建置流程與結果。

崩塌破壞面深度偏差(方均根)，依據本案所着重之議題(崩塌坡趾被掩埋)，在設計參考點時本案必須先應用災後 UAV 產製 DSM 與正射影像，研判裸露崩塌破壞面範圍(圖 3.3 紫色框)，並於此範圍內隨機產生 20 m 間距之參考點(圖 3.3 黃點)，最終各參考點將應用災後 DSM 高程變化值(如圖 3.4 所示)作為推估 ICS 時之參考深度。

崩塌破壞面之覆蓋率部分，因崩塌坡趾處被掩埋，造成在未進行現場詳細調查前不易研判其確切範圍，因此本案規畫應用發生崩塌之邊坡集水區作為推估 ICS 時之崩塌參考範圍(圖 3.4 紅框)。使用此資料存在之風險為所推估之各情境最佳 ICS 之覆蓋率不一定會表現得很好，主要是為了避免在推估 ICS 時崩塌破壞面有過度偏移之狀況。

現階段邊坡穩定性分析因必須具備崩塌破壞面方可計算，因此當各情境推估到最佳解後本案由所推估之 ICS 長軸位置取得其崩塌破壞面與災前數值地形高程進行邊坡穩定性分析。崩塌量體比值部分，本案現階段參考水保局臺北分局 (2021) 所提供之崩塌量體 (=170,000 m^3)作為基準，探討本案做推估之各情境最佳 ICS 之比值作為評估指標。

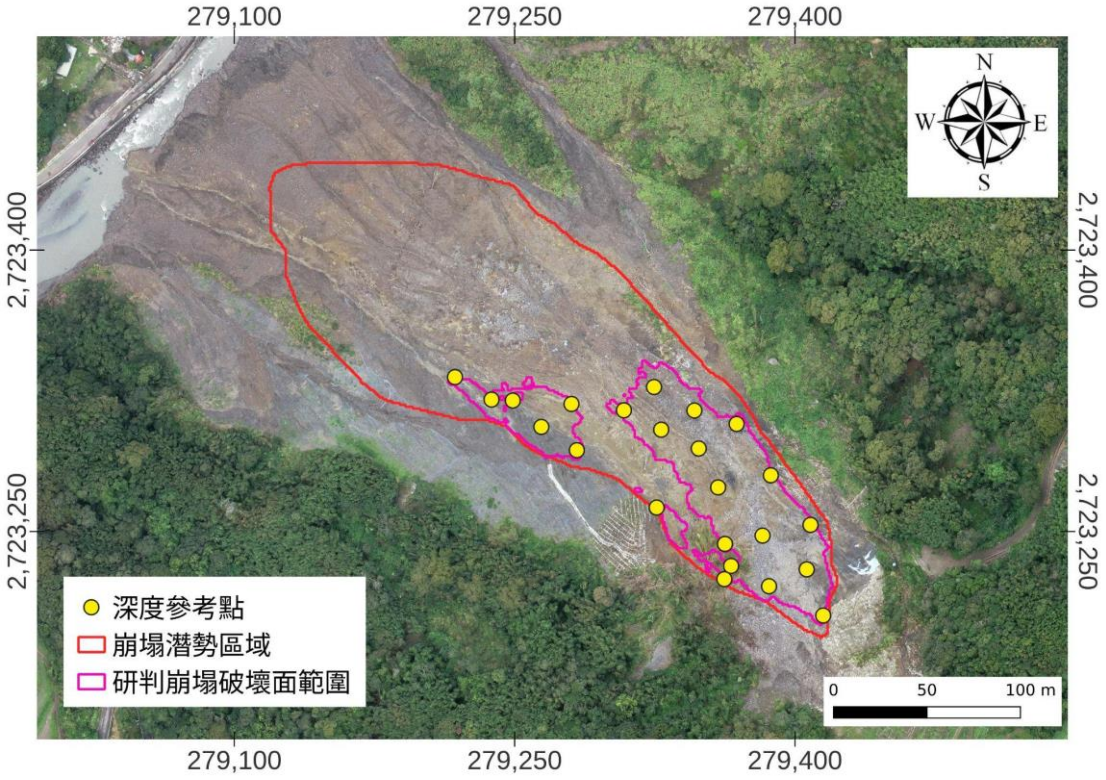


圖 3.3 秀巒崩塌推估崩塌破壞面之參考範圍與點分佈圖

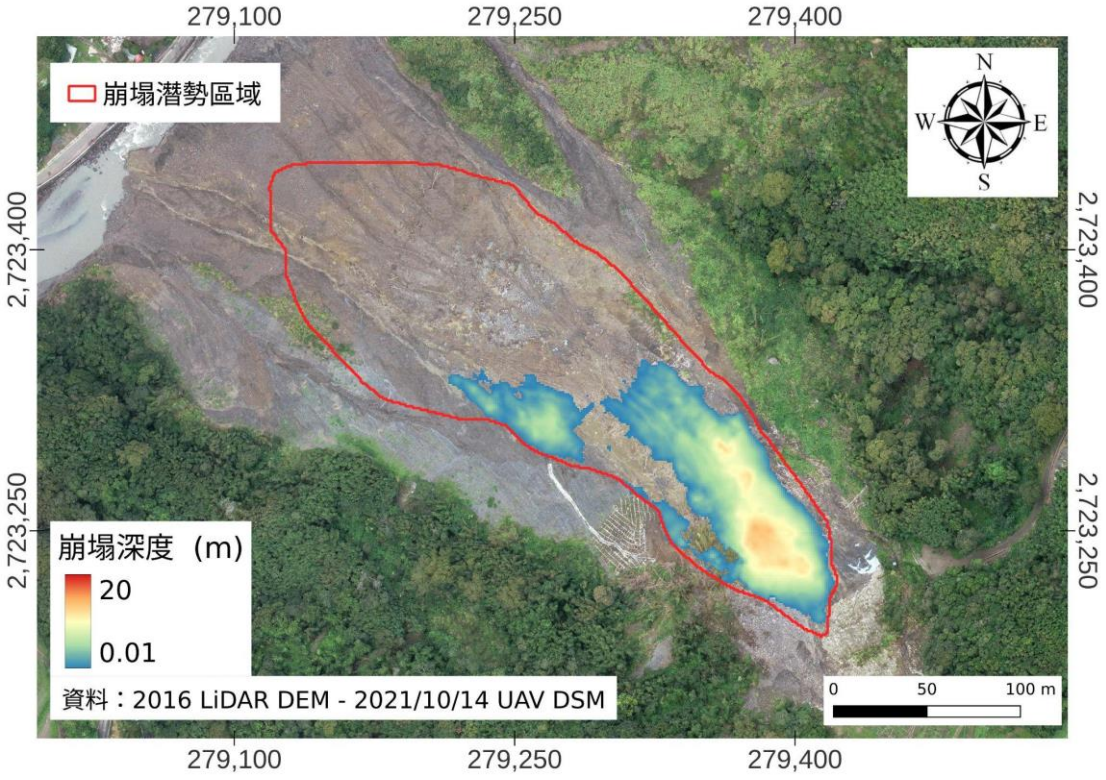


圖 3.4 秀巒崩塌崩塌災害前後期數值崩塌深度分佈圖

本案除了推估崩塌破壞面設計了 4 種評估指標，於土砂運移行為模擬中最終土砂堆積深度偏差(方均根)則是應用在土砂堆積範圍內之災害前後期數值地形高程差作為依據，如圖 3.5 所示，彩色變化為應用災害前後期 (2016 年 LiDAR-based DEM 與 2021 年 10 月 14 日 UAV 產製 DSM 相減) 土砂堆積深度分佈作為評估模擬之土砂堆積深度基準值。而最終之土砂路徑偏差率部分，本案應用災害後 UAV 拍攝之正射影像地表裸露區域(如圖 3.5 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。

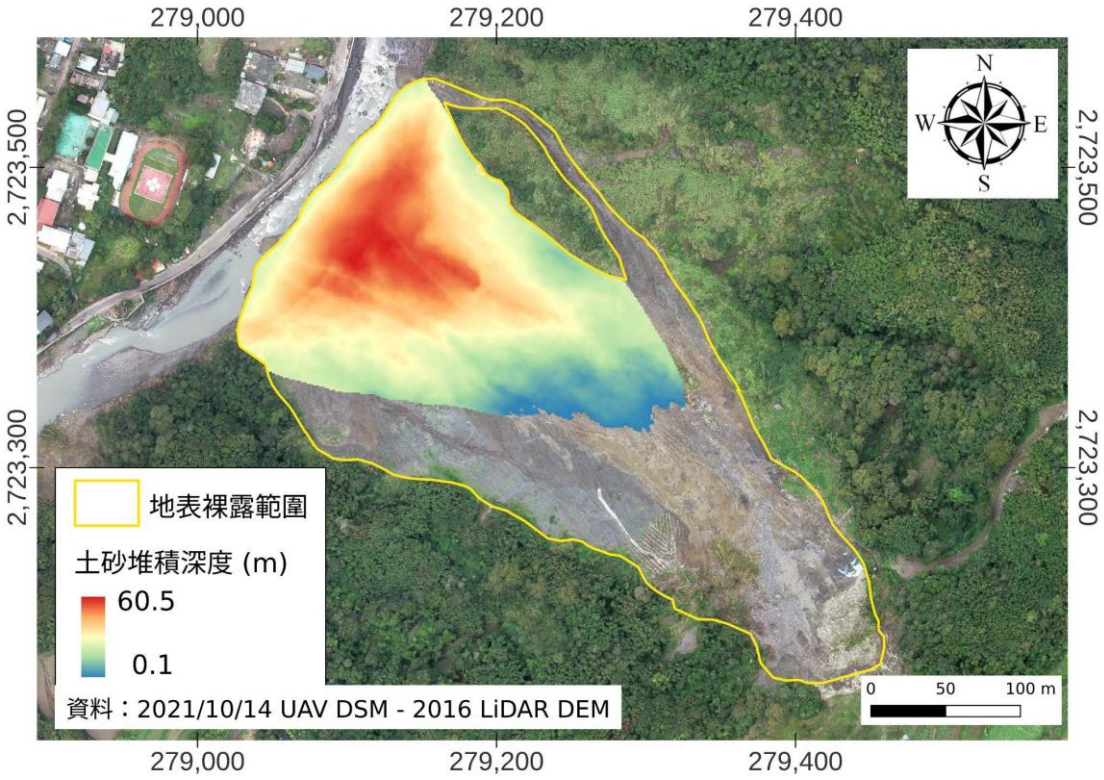


圖 3.5 秀巒崩塌崩塌災害前後土砂堆積深度分佈圖

第二節　新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域

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)。也因為崩塌土體現階段堵塞於下游河道上，造成崩塌邊坡上殘留了覆土層，進而當推估其可能崩塌量體時存在高度之不確定性。雖然在災後有進行 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，則存在高度之不確定性。

本案向內政部申請並取得 2014 年內政部國土測繪中心繪製之 2014 年 LiDAR-based DEM 作為本案模擬秀巒崩塌事件之(災前)地形。除了災前地形資料，本案也向水土保持局多元遙測影像申請模組申請災後 UAV 產製之 DSM 與正射影像作為本案後續評估指標之依據。

一、 地文

本案工作流程因包含崩塌破壞面推估與其土砂後續影響範圍推估，於崩塌破壞面推估階段需要使用到數值地形資料(災前)、參考資料(可能崩塌範圍與裸露崩塌破壞面高程)、崩塌量體(參考計劃書)；而影響範圍推估需要數值地形資料(已扣除崩塌土體分佈)、起始土砂條件(崩塌土體)、參數組(參考 Tai et al., 2019; Tai et al., 2020；Ma et al., 2022)。因此在本階段主要使用到的資料包含了災害前後期數值地形(災前：2014 年內政部 LiDAR-based DEM；災後：2022 年 10 月 20 日 UAV 產製 DSM)與災後正射影像(2022 年 10 月 20 日 UAV 拍攝)作為基本資料。

如圖 3.6 所示，彩色變化為 2014 年 LiDAR-based DEM 之高程

數據，其解析度為 1m；紅色框為本案應用災前 2014 年 LiDAR-based DEM 由鵠鵠崙崩塌發生之邊坡圈繪其集水區範圍作為本案推估 GA-ER-ICS 時之參考面積依據；黃色框則應用災後 UAV 正射影像(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。

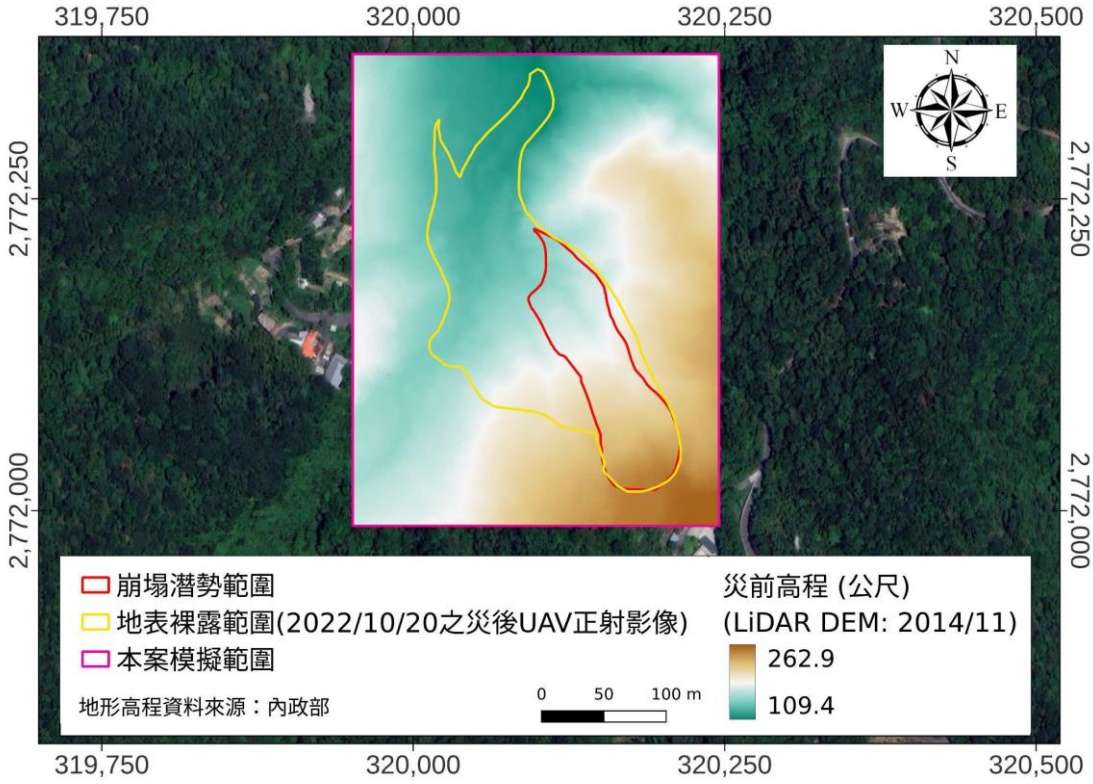


圖 3.6 鵠鵠崙崩塌潛勢區域 2014 LiDAR 地形圖

二、 情境設定(GA-ER-ICS 起始搜尋點)

當具備基本資料後，本案應用災前數值地形資料(2014 年 LiDAR-based DEM)作為設計本案情境之依據，因本案主要探討崩塌破壞面趾部被掩埋之情況，因此在規畫 GA-ER-ICS 之起始搜尋點(一組為 4 個，上下左右邊界點)時，必須由災前原河道或坡趾處往崩塌冠部方

向部設下邊界點，而左右起始搜尋點之建置條件則是沿着嶺線部設，上邊界起始搜尋點為崩塌冠部位置。如圖 3.7 所示，各個點代表 GA-ER-ICS 推估之起始搜尋點，其中粉紅色點為上邊界起始搜尋點、由藍色至紅色變化代表不同情境之下左右起始搜尋點。當具備上下左右起始搜尋點後，本案即可透過 GA-ER-ICS 依據參考資料(如 可能崩塌範圍、裸露崩塌破壞面高程、可能崩塌量體)所推估之理想崩塌破壞曲面，依據其偏差值大小並不斷經過演化後搜尋至每個情境之最佳解。為了可以方便後續其他研究使用，本案現階段規畫起始搜尋點之距離為可能崩塌範圍之三分之一作為建置條件。

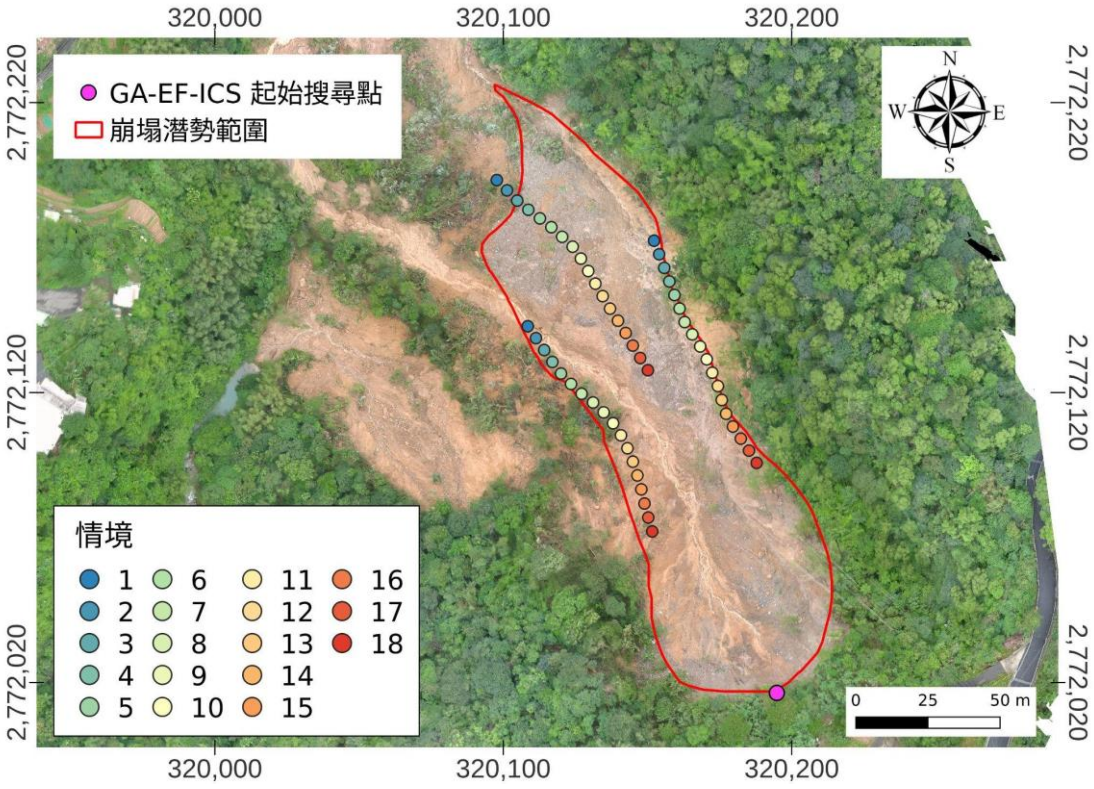


圖 3.7 鵠鵠崙崩塌事件各情境起始搜尋點分佈圖

三、 評估指標資料處理

依據工作項目三(篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS))須從衆多情境中挑選出最合適理想崩塌曲面，因此本案規畫設計出 6 種評估指標，

分別為崩塌破壞面，包含崩塌破壞面深度偏差(方均根)、崩塌破壞面之覆蓋率、邊坡穩定性分析、崩塌量體比值；另為土砂影響範圍部分，則是依據最終土砂堆積深度偏差(方均根)與路徑偏差率。下列將簡述各個評估指標基準資料之建置流程與結果。

崩塌破壞面深度偏差(方均根)，依據本案所着重之議題(崩塌坡趾被掩埋)，在設計參考點時本案必須先應用災後 UAV 產製 DSM 與正射影像，研判裸露崩塌破壞面範圍(圖 3.8 紫色框)，並於此範圍內隨機產生 20 m 間距之參考點(圖 3.8 黃點)，最終各參考點將應用災後 DSM 高程變化值(如圖 3.9 所示)作為推估 ICS 時之參考深度。

崩塌破壞面之覆蓋率部分，因崩塌坡趾處被掩埋，造成在未進行現場詳細調查前不易研判其確切範圍，因此本案規畫應用發生崩塌之邊坡集水區作為推估 ICS 時之崩塌參考範圍(圖 3.9 紅框)。使用此資料存在之風險為所推估之各情境最佳 ICS 之覆蓋率不一定會表現得很好，主要是為了避免在推估 ICS 時崩塌破壞面有過度偏移之狀況。

現階段邊坡穩定性分析因必須具備崩塌破壞面方可計算，因此當各情境推估到最佳解後本案由所推估之 ICS 長軸位置取得其崩塌破壞面與災前數值地形高程進行邊坡穩定性分析。崩塌量體比值部分，本案現階段參考水保局技研小組(地質年會, 2023)所提供之崩塌量體(103,800 m^3)作為基準，探討本案做推估之各情境最佳 ICS 之比值作為評估指標。

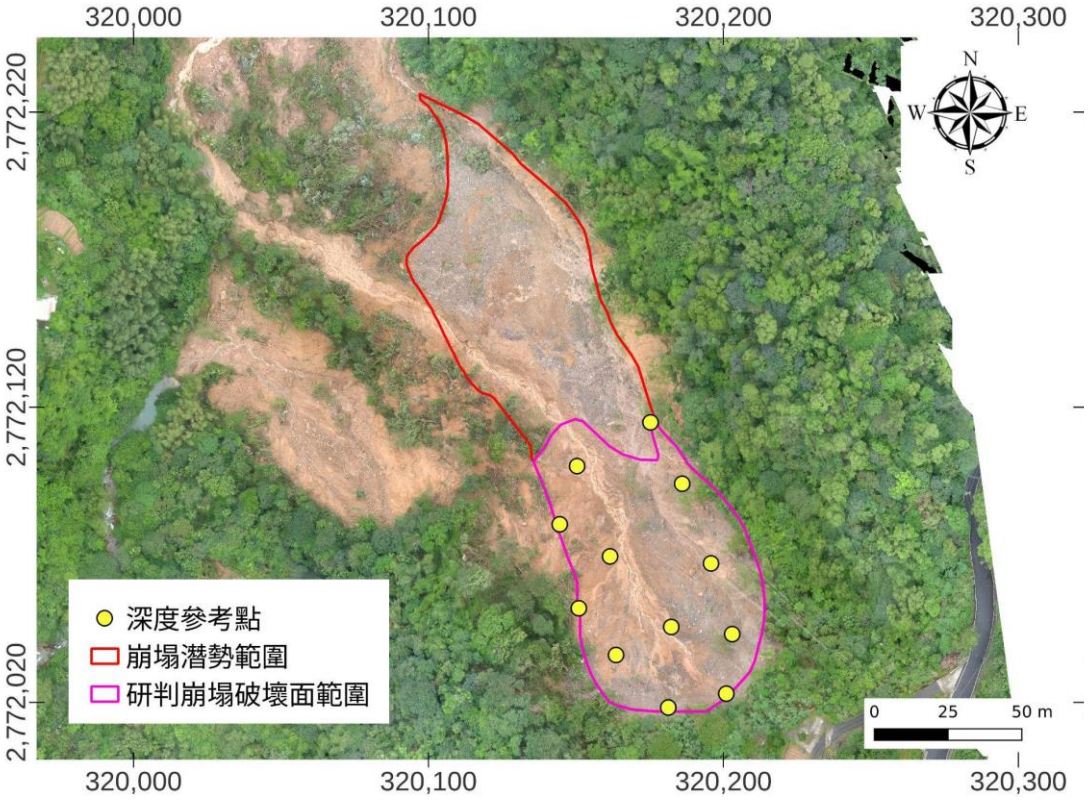


圖 3.8 鵠鵠崙崩塌推估崩塌破壞面之參考範圍與點分佈圖

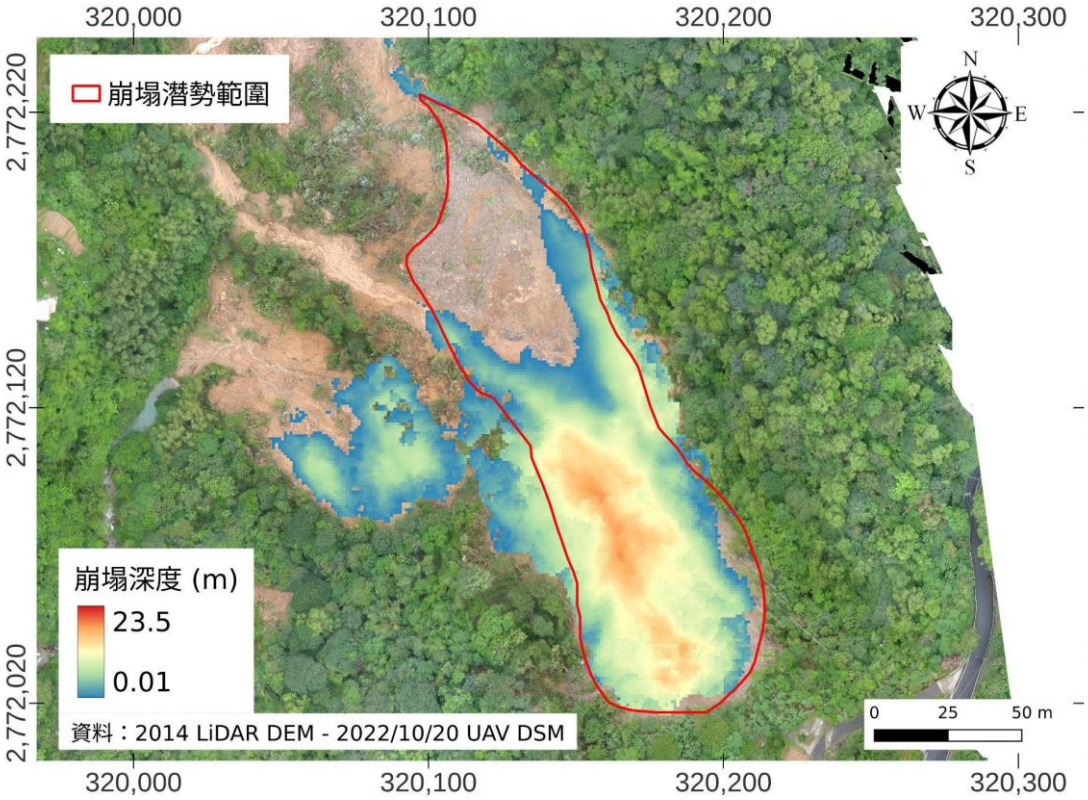


圖 3.9 鵠鵠崙崩塌崩塌災害前後期數值崩塌深度分佈圖

本案除了推估崩塌破壞面設計了 4 種評估指標，於土砂運移行為模擬中最終土砂堆積深度偏差 (方均根) 則是應用在土砂堆積範圍內之災害前後期數值地形高程差作為依據，如圖 3.10 所示，彩色變化為應用災害前後期 (2014 年 LiDAR-based DEM 與 2022 年 10 月 20 日 UAV 產製 DSM 相減) 土砂堆積深度分佈作為評估模擬之土砂堆積深度基準值。而最終之土砂路徑偏差率部分，本案應用災害後 UAV 拍攝之正射影像地表裸露區域 (如圖 3.10 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。

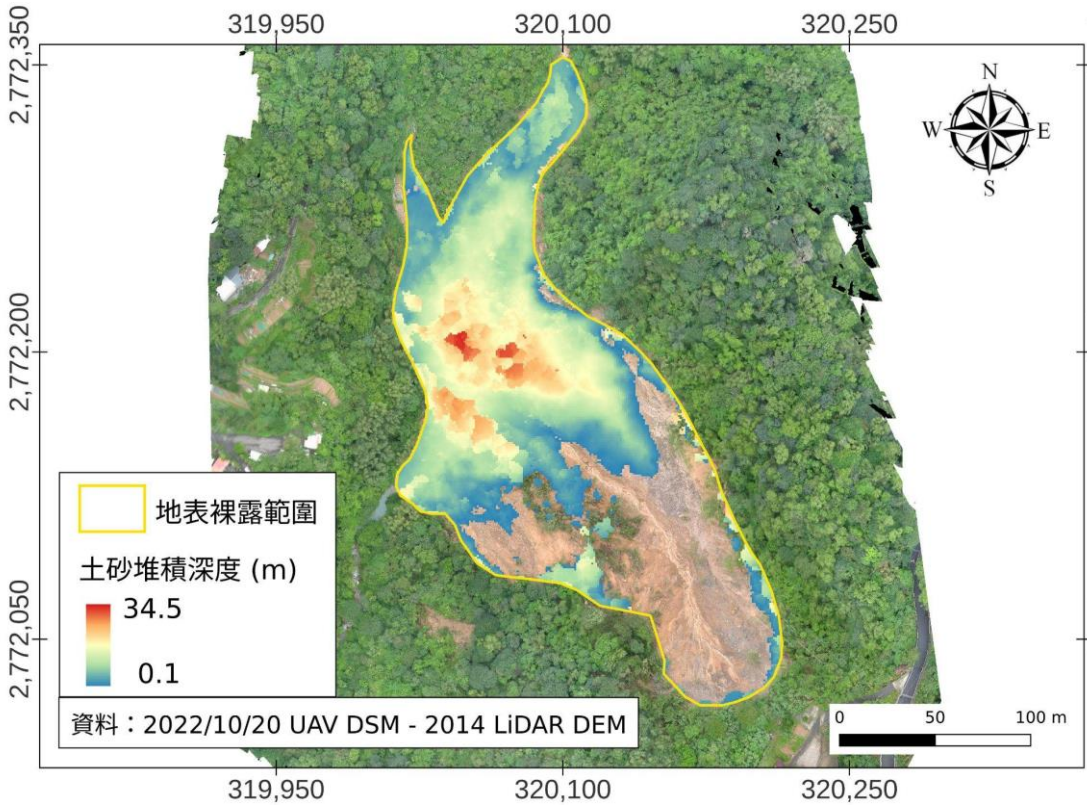


圖 3.10 鵠鵠崙崩塌崩塌災害前後土砂堆積深度分佈圖

第四章 崩塌破壞面推估

本案延伸應用 Wang et al. (2022) 所提出之 GA-ER-ICS 估算崩塌破壞面方法，透過災害前後期數值地形資料研判崩塌潛勢範圍，規畫 GA-ER-ICS 所需要之起始搜尋點推估一可能崩塌破壞面。

本案因着重於崩塌破壞面趾部被掩埋之狀況，造成崩塌範圍不易辨識。因針對此高度不確定崩塌範圍之案例，一般推估崩塌量體之方法存在一定的假設，使得劃定其影響範圍存在更加不確定性。綜合上述的考量，本案提出由原坡趾處往崩塌冠部等間距部設 GA-ER-ICS 起始搜尋點，所推估之崩塌土砂作為後續土砂運移行為模擬之起始條件，並由災後正射影像作為基準進行整體評估後篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS)。

第一節　新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域

針對秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域，經過參閱水保局臺北分局 (2021) 後發現 2021 年 09 月 13 日發生之崩塌事件，其崩塌土體土體未完全滑落，造成不易辨識其確切崩塌範圍。因此本案由水保局臺北分局(2021)年現場調查後提到秀巒崩塌最大深度約為 20 m，其崩塌量體約 170,000 m^3，因此本案也將各情境最佳解之推估最大深度與量體羅列於表 4.1 內供參考。

初步由各情境之崩塌破壞面推估之崩塌土體可見，所推估之崩塌最大深度介於 17.34~27.29 公尺，除了情境 1 與 3 有比較大的偏差 (4.43 m 與 7.30 m)，其他情境所推估之最大崩塌深度與實際調查結果之 20.0 m 之差了 2.0 m 內；以及參考點深度方均根也只有 9.77±1.53 m。此偏差對於只應用遙測產製之數值地形資料而言，已經有很不錯的表現了。另對於邊坡穩定性分析中，本案延伸應用前期計畫(創

新研究計畫，2021)使用之土壤內摩擦角度 = 39°，可發現當起始搜尋點比較靠原坡趾處之 ICS 推估破壞面其安全係數相較各情境高了 0.1 (平均值為 0.62)，當起始搜尋點往冠部遞進時出現了降低的趨勢，最小之安全係數 = 0.526 落在情境 8。此結果本案將於工作項目三 (本報告書第七章)中進行比較時一併作為參考依據。

圖 4.1 至圖 4.20 為各情境所 ICS 所推估崩塌破壞面對應之崩塌深度分佈圖，其中彩色變化為依據圖 3.4 設定之崩塌土體深度級距作為參考值。

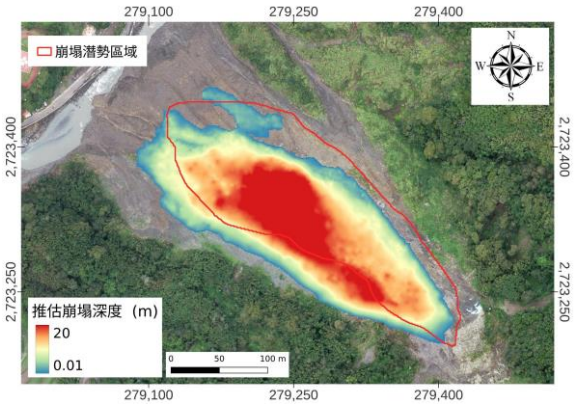


圖 4.1 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 1)

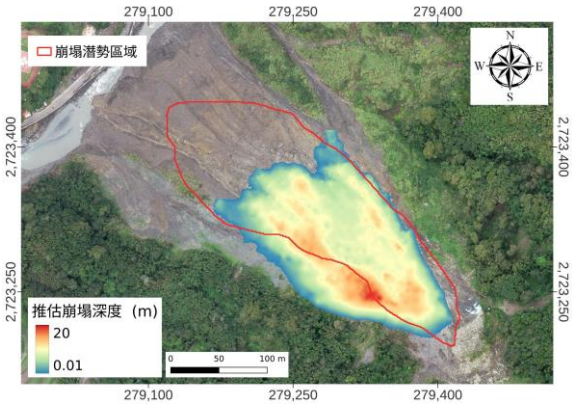


圖 4.2 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 2)

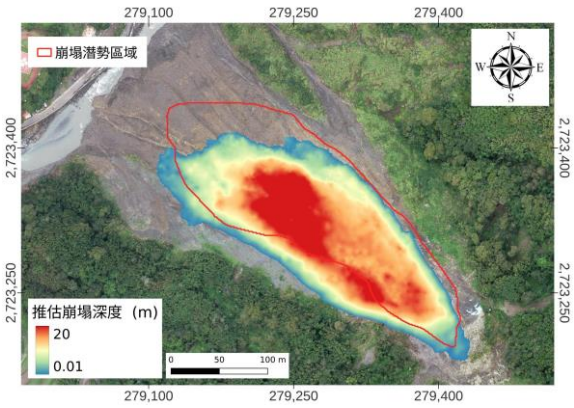


圖 4.3 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 3)

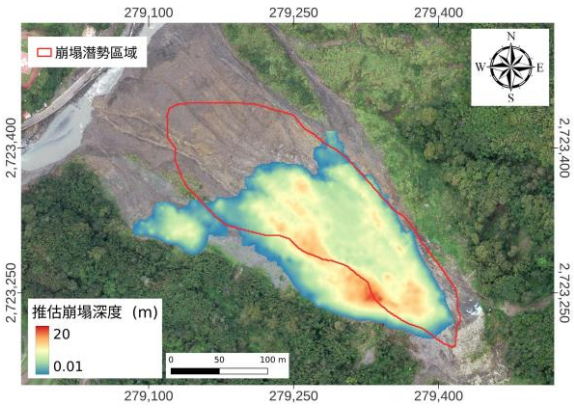


圖 4.4 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 4)

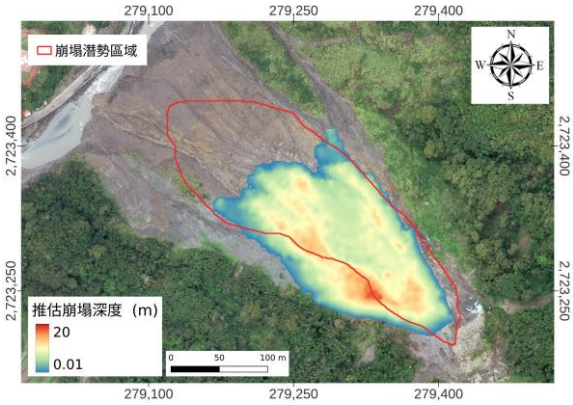


圖 4.5 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 5)

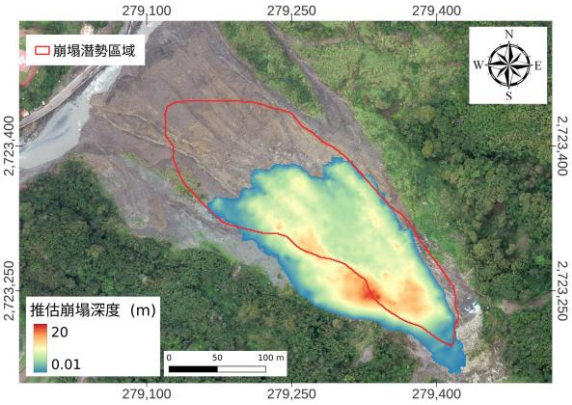


圖 4.6 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 6)

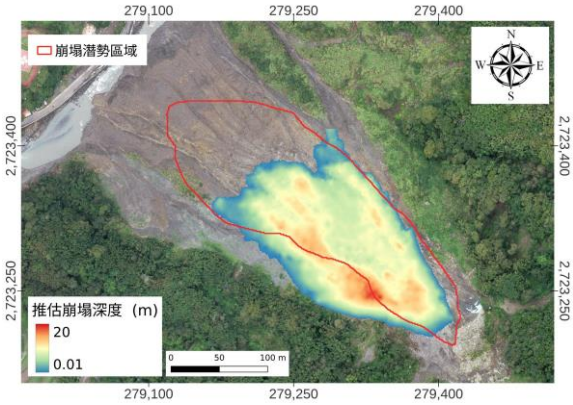


圖 4.7 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 7)

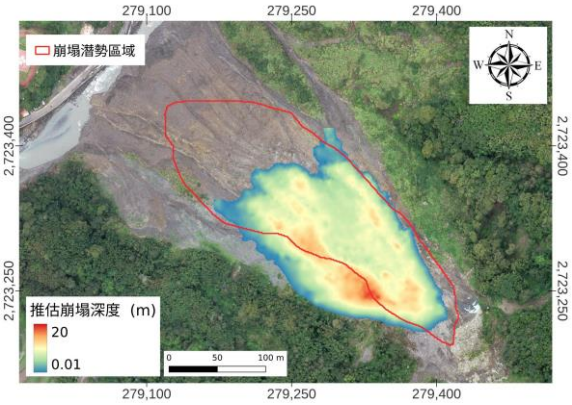


圖 4.8 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 8)

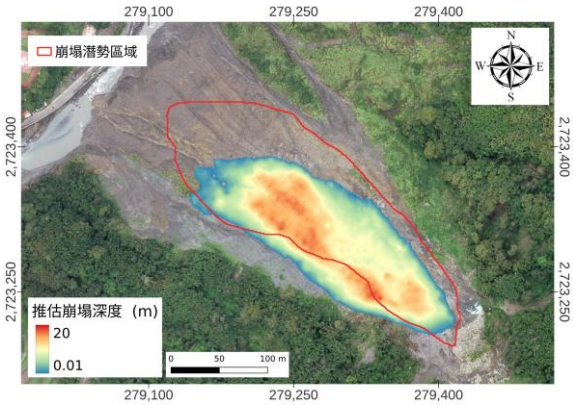


圖 4.9 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 9)

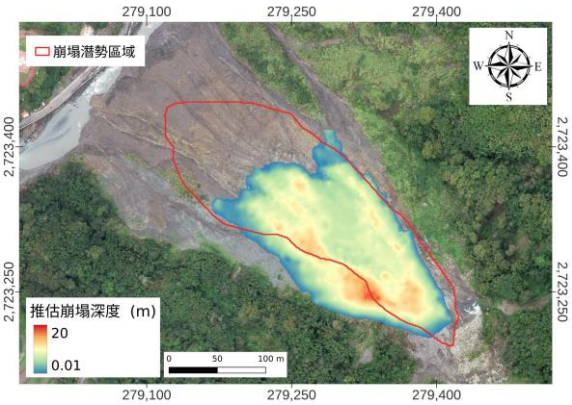


圖 4.10 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 10)

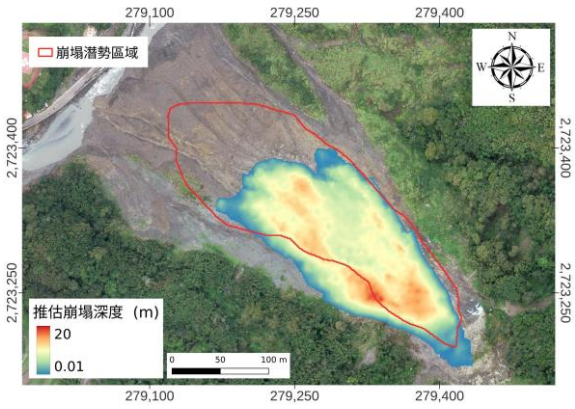


圖 4.11 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 11)

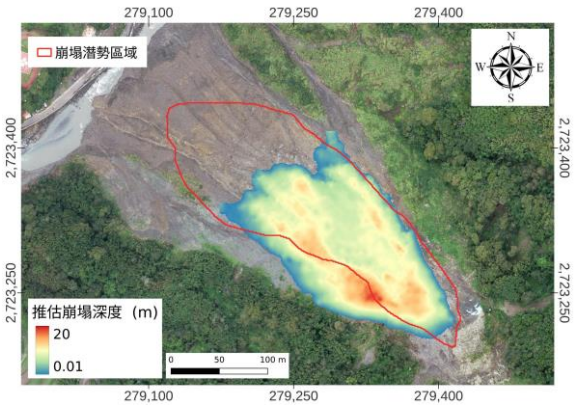


圖 4.12 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 12)

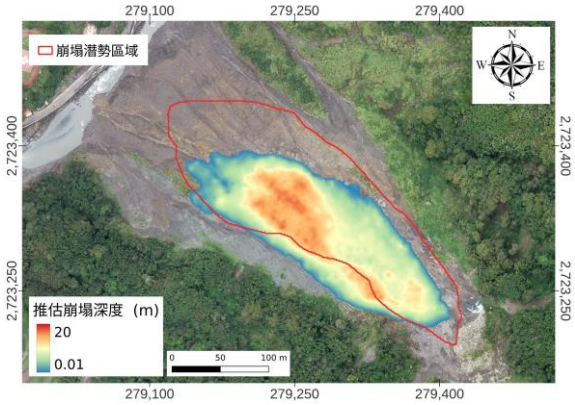


圖 4.13 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 13)

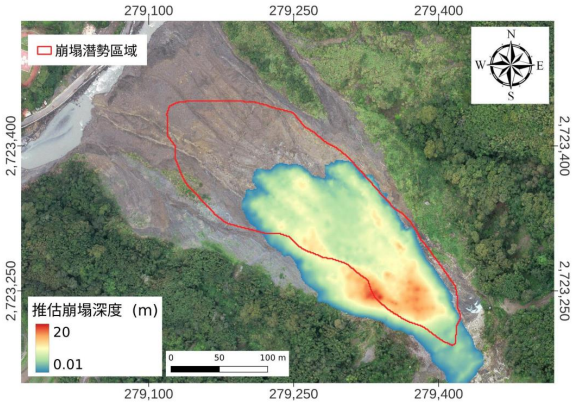


圖 4.14 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 14)

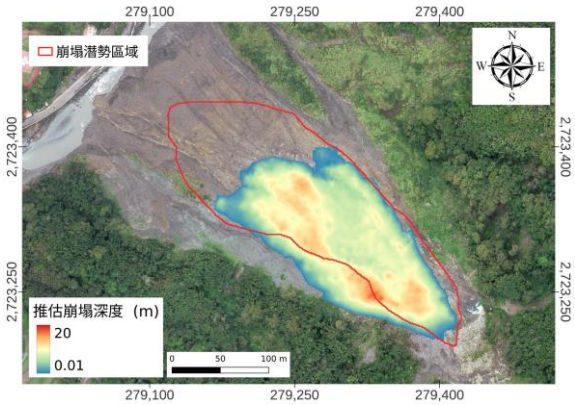


圖 4.15 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 15)

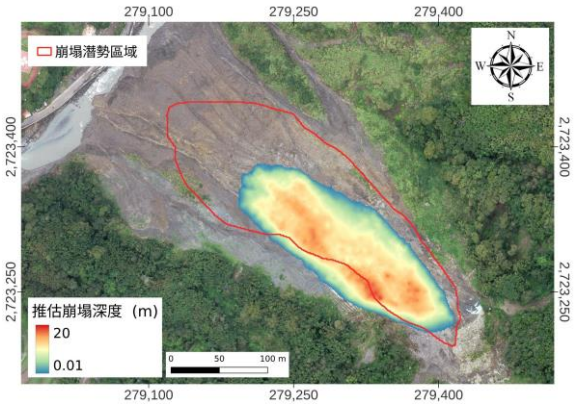


圖 4.16 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 16)

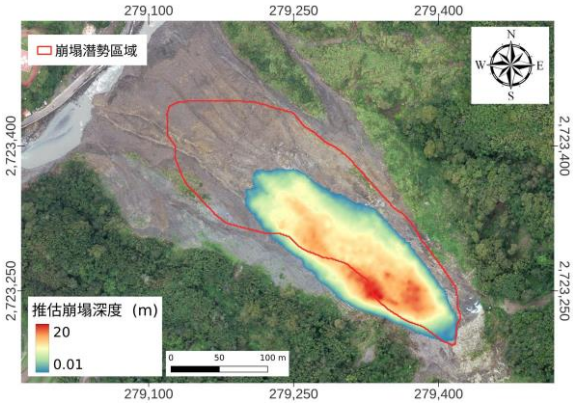


圖 4.17 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 17)

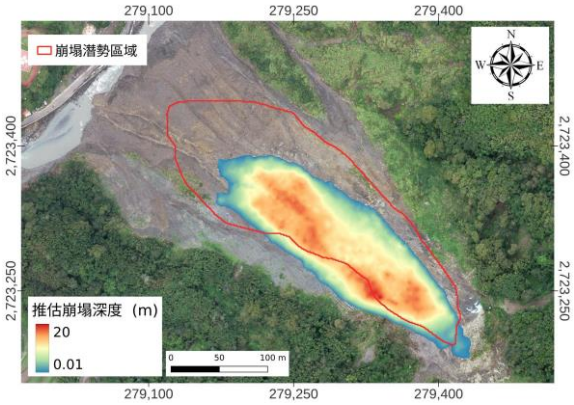


圖 4.18 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 18)

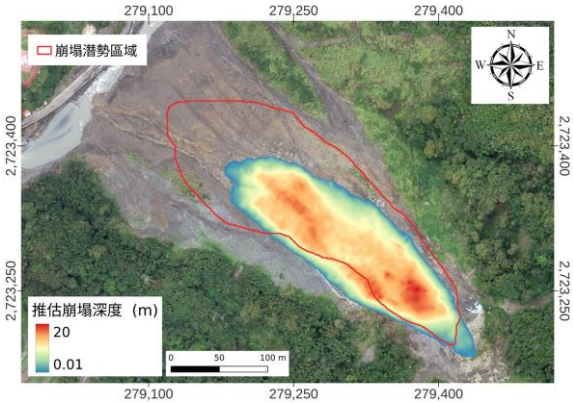


圖 4.19 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 19)

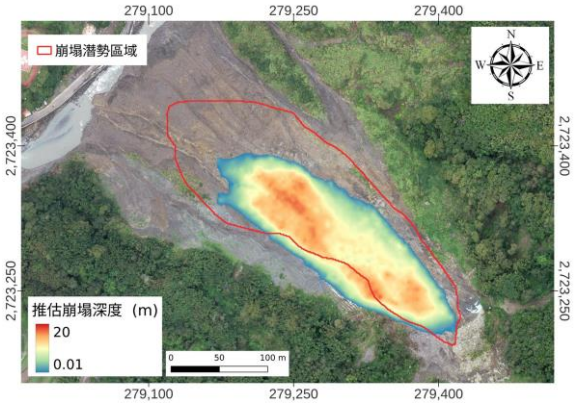


圖 4.20 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (秀巒情境 20)

表 4.1 秀巒崩塌 GA-ER-ICS 各情境推估結果一覽表

情境	推估最大深度 (m)	推估崩塌量體 (m^3)	情境	推估最大深度 (m)	推估崩塌量體 (m^3)
1	27.30	432,360	11	18.71	199,825
2	19.39	206,068	12	18.88	195,468
3	24.43	391,116	13	17.34	190,824
4	18.48	204,655	14	19.18	182,893
5	18.38	189,547	15	17.62	185,602

情境	推估最大深度 (m)	推估崩塌量體 (m^3)	情境	推估最大深度 (m)	推估崩塌量體 (m^3)
6	19.05	180,474	16	18.45	170,001
7	18.83	199,454	17	20.84	170,000
8	18.48	188,863	18	19.82	202,300
9	18.20	204,607	19	19.98	209,069
10	18.08	181,721	20	17.43	184,844

第二節　新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域

針對鵲鵲崙 D003 大規模崩塌潛勢區域，經過參閱水保局技研小組於水保局技研發小組 (地質年會，2023) 發佈之海報中模擬 2022 年 10 月 17 日發生之崩塌事件，因崩塌土體未完全滑落，造成不易辨識其確切崩塌範圍。因此本案由水保局技研發小組 (地質年會，2023) 現場調查後提到鵲鵲崙崩塌最大深度約為 21.5 m，其崩塌量體約 103,800 m^3，因此本案也將各情境最佳解之推估最大深度與量體羅列於表 4.2 內供參考。

初步由各情境之崩塌破壞面推估之崩塌土體可見，所推估之崩塌最大深度介於 22.36~33.67 公尺，除了情境 10、11 與 15 有比較大的偏差(12.17、11.25 與 12.14 m)，其他情境所推估之最大崩塌深度與實際調查結果之 21.5 m 之差了 5.0 m 內；以及參考點深度方均根也只有 7.08±0.99 m。此偏差對於只應用遙測產製之數值地形資料而言，已經有很不錯的表現了。另對於邊坡穩定性分析中，本案統一假設土壤內摩擦角度為 36° 作為參考值，可發現當起始搜尋點比較靠原坡趾處(情境 1 至 9) 之 ICS 推估破壞面其安全係數相較各情境高了 0.1

(平均值為 1.246)，當起始搜尋點往冠部遞進時出現了降低的趨勢，最小之安全係數為情境 10 之 0.813。此結果本案將於工作項目三(本報告書第七章)中進行比較時一併作為參考依據。

圖 4.21 至圖 4.38 為各情境所 ICS 所推估崩塌破壞面對應之崩塌深度分佈圖，其中彩色變化為依據圖 3.9 設定之土體深度級距作為參考值。

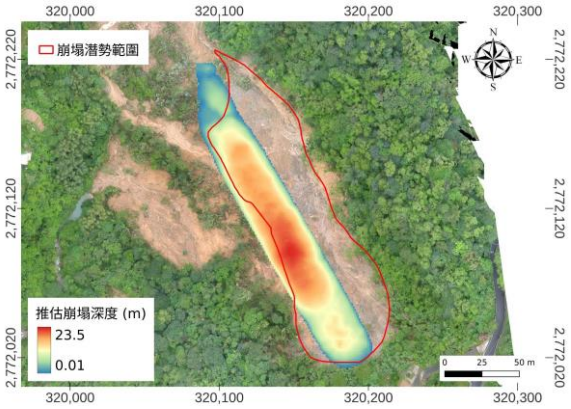


圖 4.21 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 1)

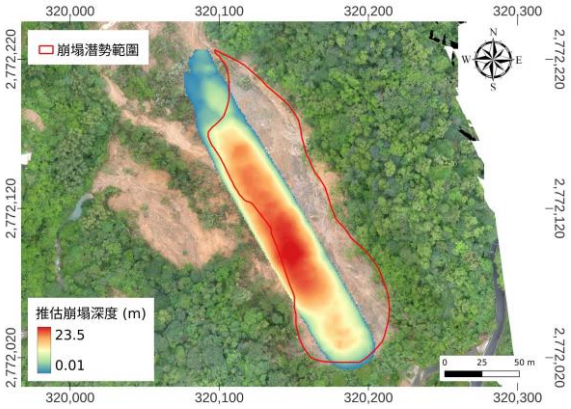


圖 4.22 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 2)

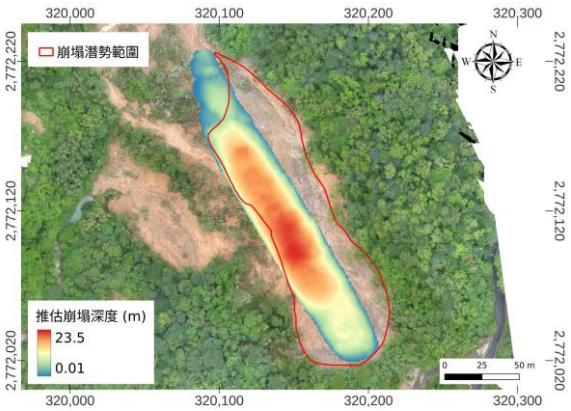


圖 4.23 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 3)

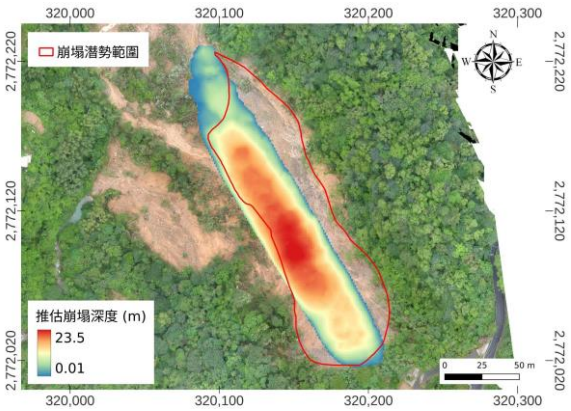


圖 4.24 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 4)

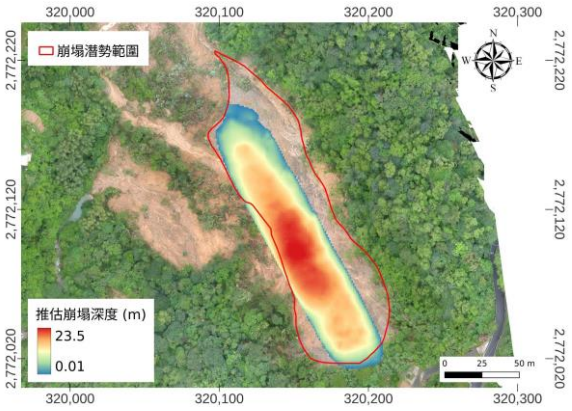


圖 4.25 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 5)

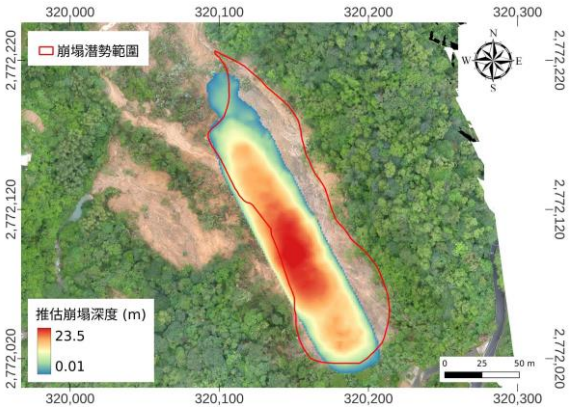


圖 4.26 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 6)

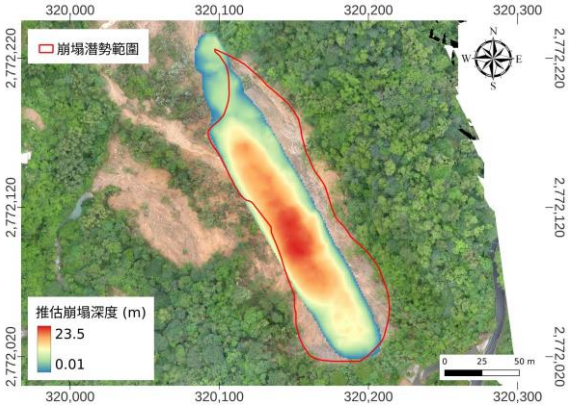


圖 4.27 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 7)

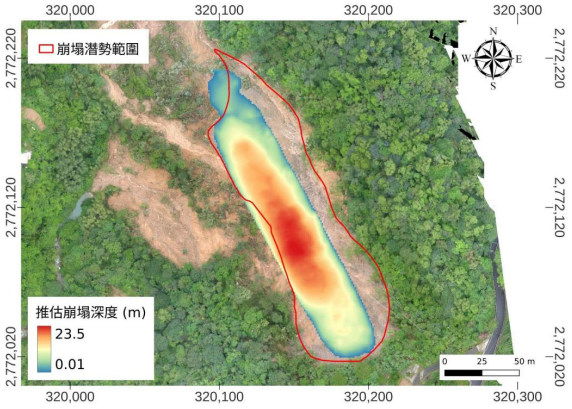


圖 4.28 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 8)

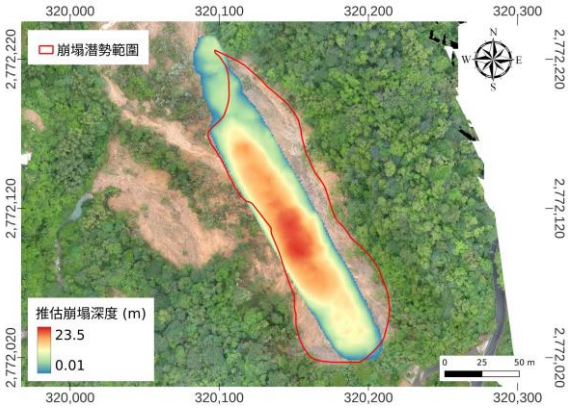


圖 4.29 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 9)

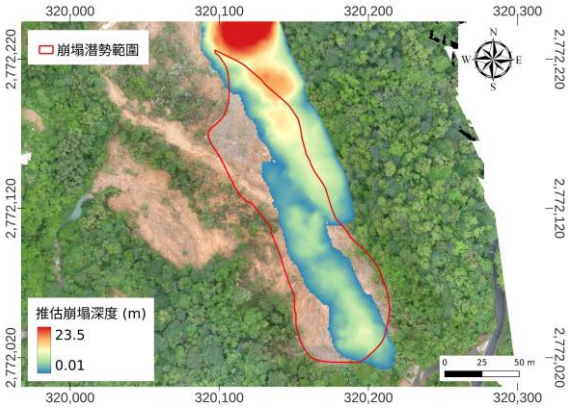


圖 4.30 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 10)

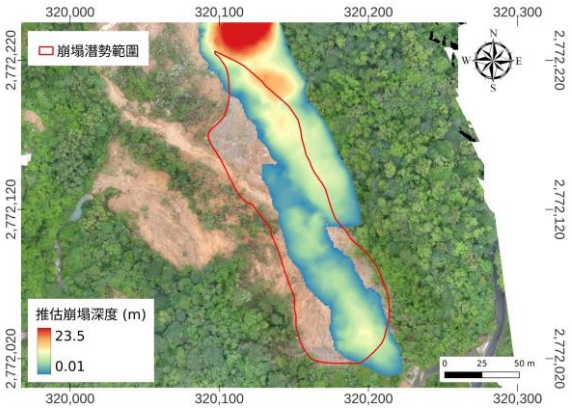


圖 4.31 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 11)

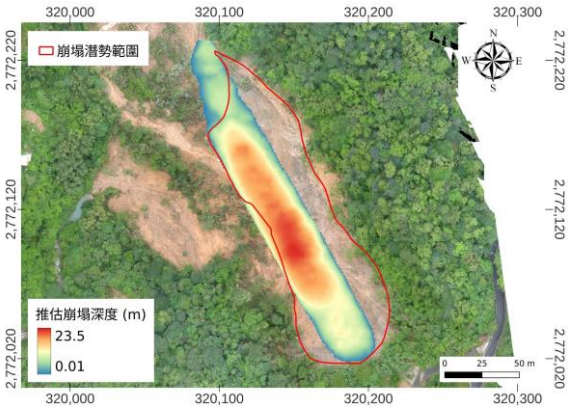


圖 4.32 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 12)

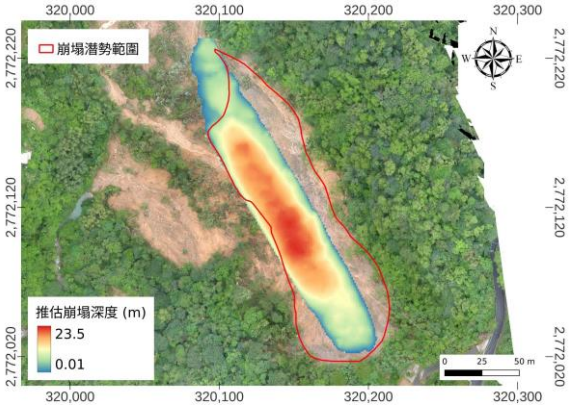


圖 4.33 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 13)

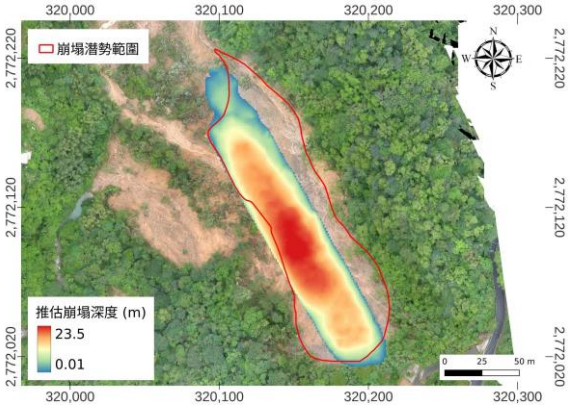


圖 4.34 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 14)

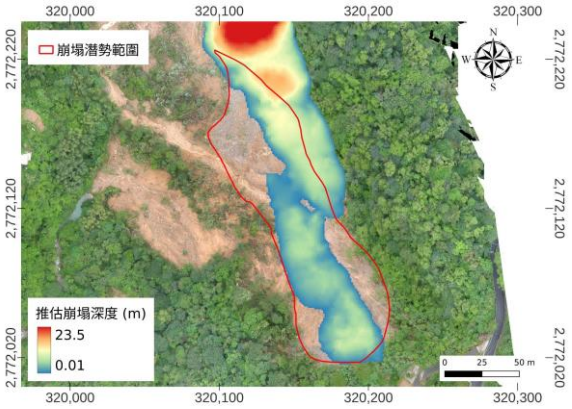


圖 4.35 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 15)

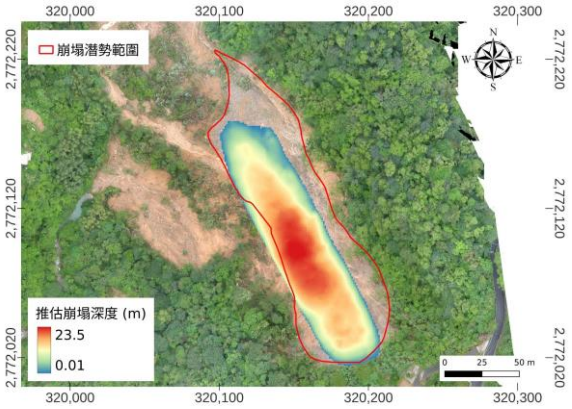


圖 4.36 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 16)

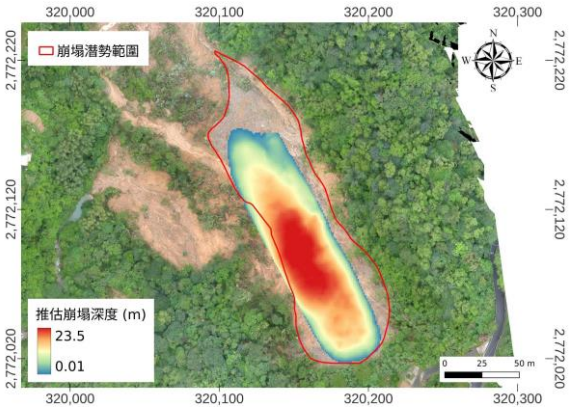


圖 4.37 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 17)

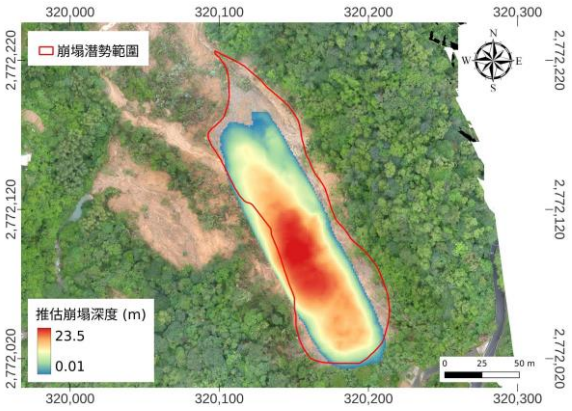


圖 4.38 GA-ER-ICS 推估崩塌土體深度圖 (鵠鵠崙情境 18)

表 4.2 鵠鵠崙崩塌 GA-ER-ICS 各情境推估結果一覽表

情境	推估最大深度 (m)	推估崩塌量體 (m^3)	情境	推估最大深度 (m)	推估崩塌量體 (m^3)
1	22.89	80,167	10	33.67	103,800
2	24.74	96,749	11	32.75	103,800
3	22.92	84,997	12	22.82	84,244
4	24.53	103,800	13	22.65	86,673
5	24.58	89,179	14	25.24	100,520
6	25.21	103,800	15	33.64	103,800
7	23.12	92,858	16	24.58	87,678
8	23.98	85,607	17	26.55	95,123
9	22.36	87,467	18	25.25	103,800

第五章 土砂影響範圍推估

當具備 GA-ER-ICS 推估崩塌破壞面對應之崩塌土體後，工作項目二為延伸應用 Tai et al. (2019) 發展之土砂運移行為模式進行崩塌土砂後續影響範圍之推估。針對後續影響範圍之劃定本案依據 Rickenmann (2005) 與 Hürlimann et al. (2008)提出之土石流風險地圖分級概念，選取最低等級之流動深度大於 0.4 m 與流速大於 0.4 m/s 者標記起來，最終繪製影響範圍。對於如何判斷該次土砂運移之終結時間，本案參考 RAMMS (2017) 使用手冊建議之動量比 (平均動量/最大動量) 作為模擬停止條件，其建議設定大小介於 1%~10%，而本案將設定所建議之動量比平均值 (= 5%) 作為停止條件，探討其影響範圍。

第一節　新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域

針對秀巒崩塌事件，當具備工作項目一(崩塌破壞面推估)之對應崩塌土體分佈，本案延伸應用 Tai et al. (2019)發展之土砂運移行為模式並參考 Tai et al. (2019)與 Ma et al. (2022)針對實際崩塌事件設計之參數組合調整適合本次影響範圍之參數組合。經過合理的調整參數組，最終本案所使用之參數組為起始固相體積濃度 = 0.55；起始液相體積濃度 = 0.45；密度比 = 0.56 (其中液相密度 = 1,464 kg/m^3，固相密度 = 2,600 kg/m^3)；交互作用係數 = 8.0； 液相阻尼係數 = 5.8；類雷諾數 = 178.0；與參考 Scheidegger (1973) 提出之“崩塌土砂量體-固相摩擦角”，搭配水保局臺北分局 (2021) 提到之可能崩塌土砂量體 = 170,000 m^3 為依據，所推估之建議固相摩擦角介於 24.43°至 41.79°，而本案經過調整後應用 39°作為參數。

透過應用上述之參數組合搭配工作項目一所推估各情境之崩塌土體，經過土砂運移行為模式推估其崩塌土體影響範圍。最終搭配 RAMMS (2017) 使用手冊中之模擬停止條件、Rickenmann (2005) 與 Hürlimann et al. (2008)建議之基準值 (流動深度大於 0.40 m 與流速大於 0.4 m/s) 繪製本案各情境影響範圍。如圖 5.1 至圖 5.20 所示，為本案推估 2021 年秀巒崩塌事件之土砂影響範圍，黃框代表有災後 UAV 正射影響研判之地表裸露區；黑色虛線為崩塌土體範圍(起始條件)；紅色範圍為土砂影響範圍。

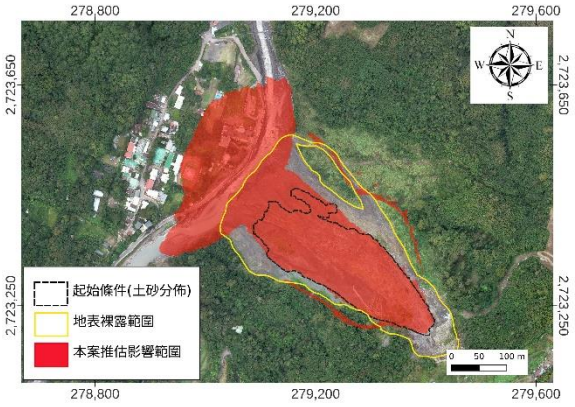


圖 5.1 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 1)

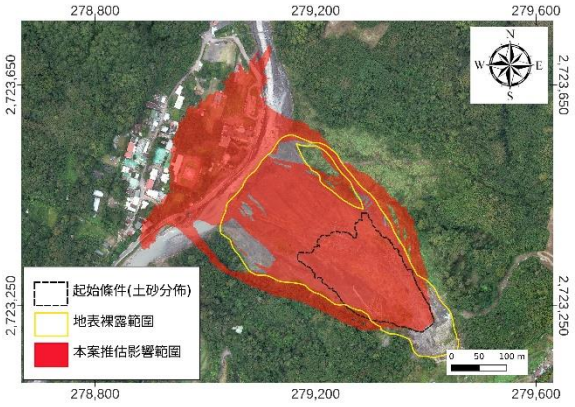


圖 5.2 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 2)

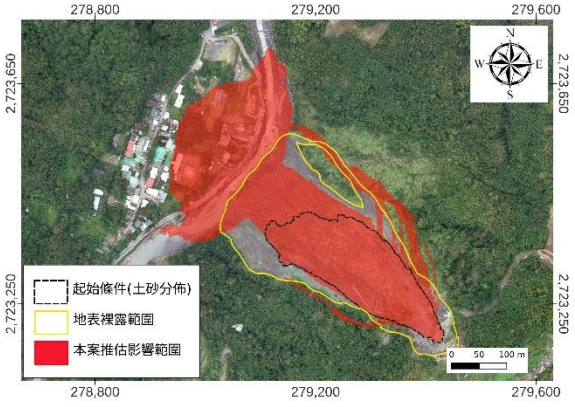


圖 5.3 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 3)

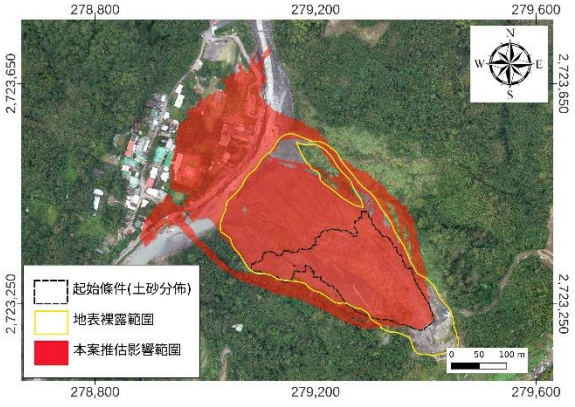


圖 5.4 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 4)

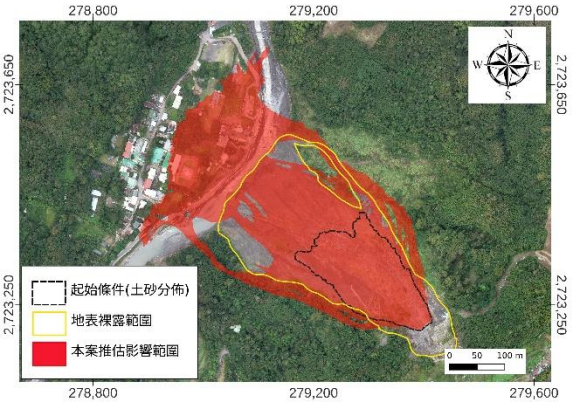


圖 5.5 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 5)

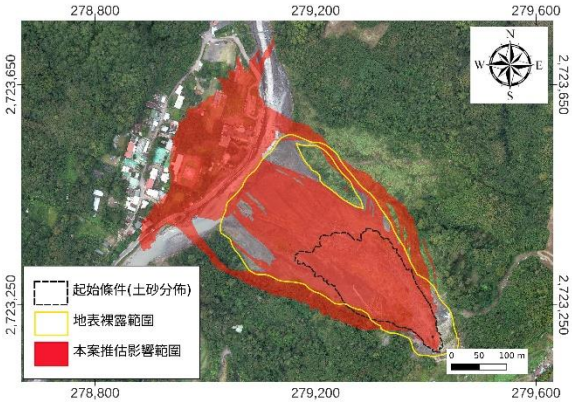


圖 5.6 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 6)

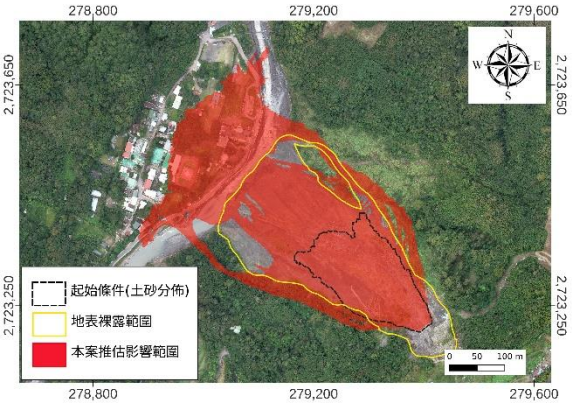


圖 5.7 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 7)

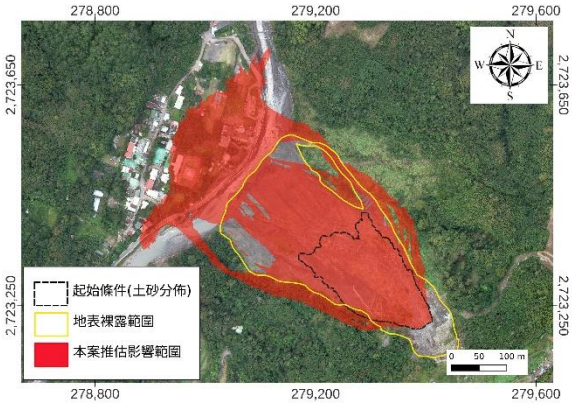


圖 5.8 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 8)

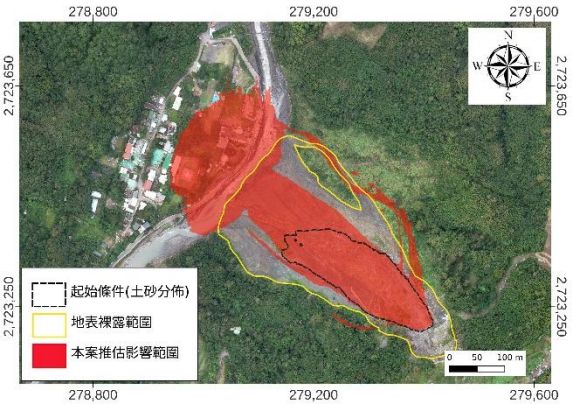


圖 5.9 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 9)

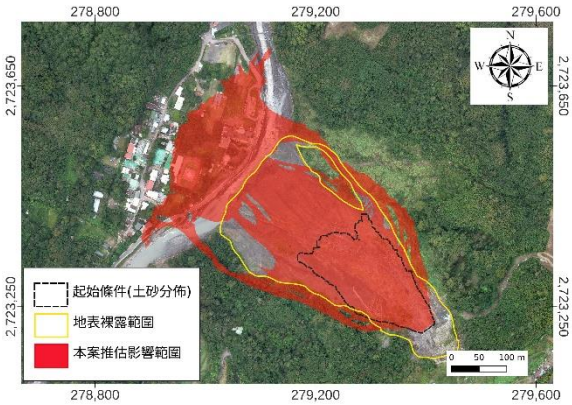


圖 5.10 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 10)

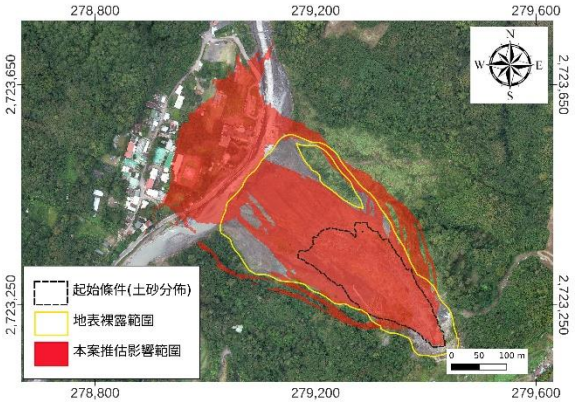


圖 5.11 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 11)

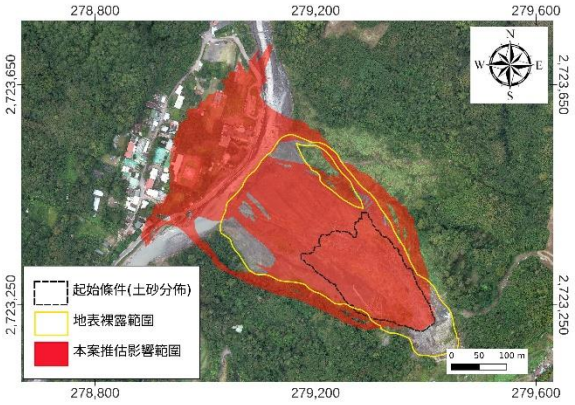


圖 5.12 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 12)

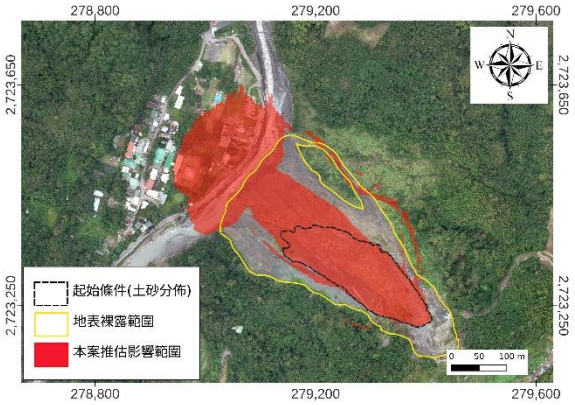


圖 5.13 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 13)

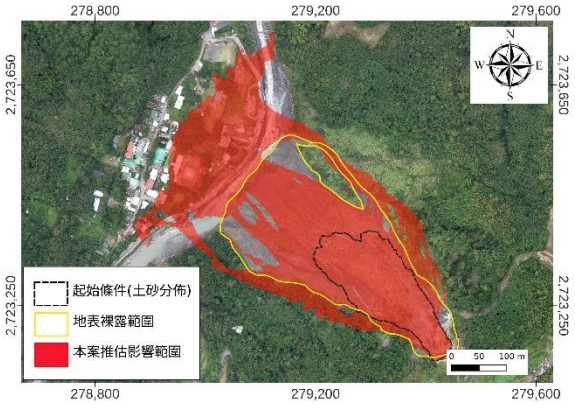


圖 5.14 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 14)

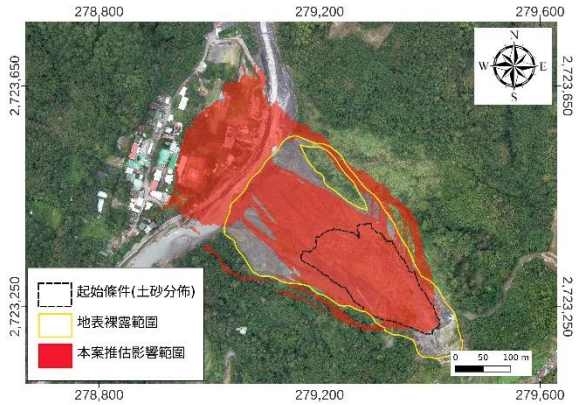


圖 5.15 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 15)

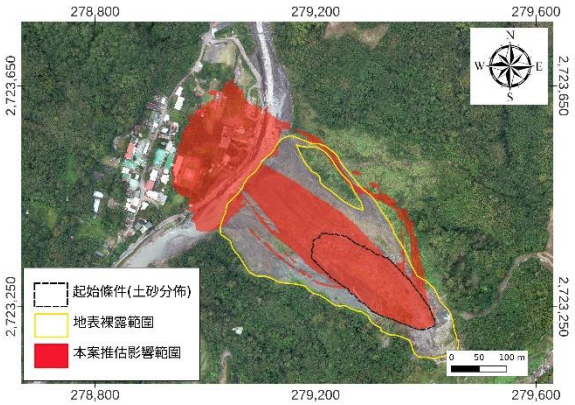


圖 5.16 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 16)

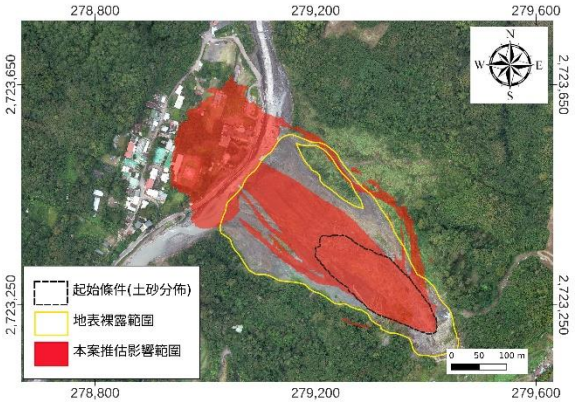


圖 5.17 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 17)

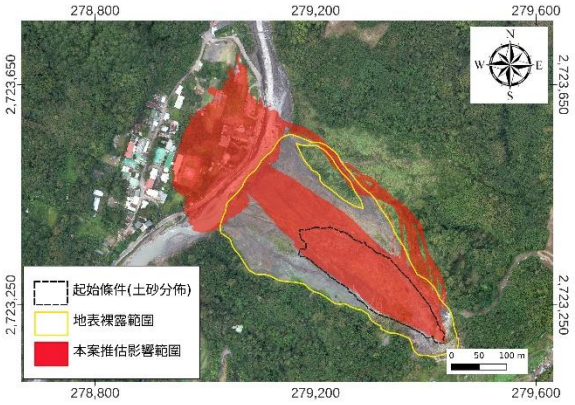


圖 5.18 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 18)

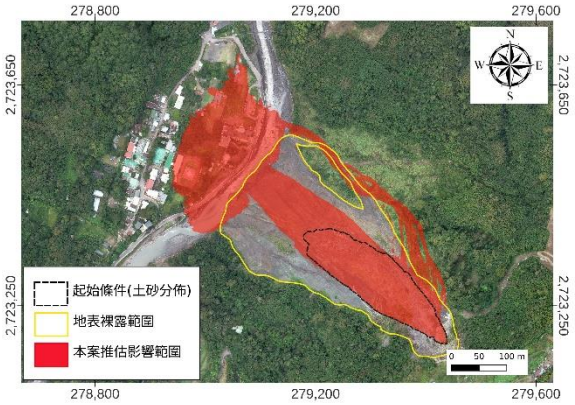


圖 5.19 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 19)

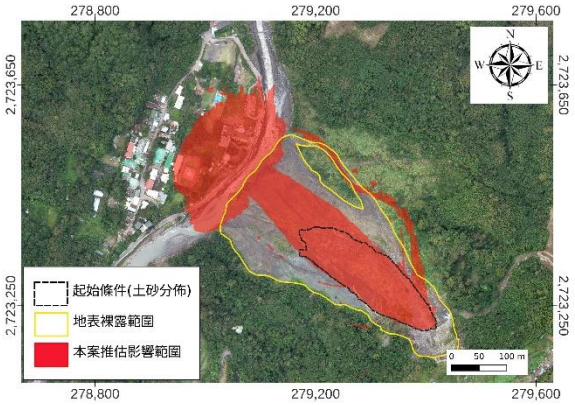


圖 5.20 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 20)

由圖 5.1 至圖 5.20 可見，全部 18 組情境之推估影響範圍都涵蓋秀巒部落，而水保局臺北分局 (2021) 中顯示多數崩塌土體仍然堆積於崩塌之邊坡趾部與邊坡上。

因此於期末簡報後，本案重新依據 Tai et al. (2019) 與 Ma et al. (2022)檢視適合秀巒崩塌事件之參數組，最終所調整後之參數組(後續以秀巒參數組 B 代表)如：起始固相體積濃度 = 0.6；起始液相體積濃度 = 0.4；密度比 = 0.6 (其中液相密度 = 1,560 kg/m3，固相密度 = 2,600 kg/m3)；交互作用係數 = 15.0； 液相阻尼係數 = 7.5； 類雷諾數 = 77.0；與參考 Scheidegger (1973) 提出之“崩塌土砂量體-固相摩擦角”，搭配水保局臺北分局 (2021) 提到之可能崩塌土砂量體= 170,000 m^3 為依據，所推估之建議固相摩擦角介於 24.43°至 41.79°，而本案

經過調整後應用 39°作為參數。

透過應用上述之參數組合搭配工作項目一所推估各情境之崩塌土體，經過土砂運移行為模式推估其崩塌土體影響範圍。最終搭配 RAMMS (2017) 使用手冊中之模擬停止條件、Rickenmann (2005) 與 Hürlimann et al. (2008)之土石流風險分級概念中等級最小之條件 (流動深度大於 0.40 m 與流速大於 0.4 m/s)繪製本案各情境崩塌土體之影響範圍。如圖 5.21 至圖 5.40 所示，為本案所推估之土砂影響範圍，黃框代表有災後 UAV 正射影響研判之地表裸露區；黑色虛線為崩塌土體範圍(起始條件)；紅色範圍為土砂影響範圍。可發現本案後續修正之參數組合，所推估之影響範圍大部分的崩塌土體都堆積於秀巒潛勢邊坡之趾部，而只有少數的前端土砂溢提並堆積於秀巒部落之道路上，更加符合現場狀況。其最終土砂分佈可參閱附件 圖附 4-21 至附圖 4-40。後續工作項目三(篩選最具備合適理想崩塌曲面) 將羅列(參閱第六章之表 6.1)由土砂運移行為模式推估之影響範圍與最終土砂堆積深度作為評估指標。

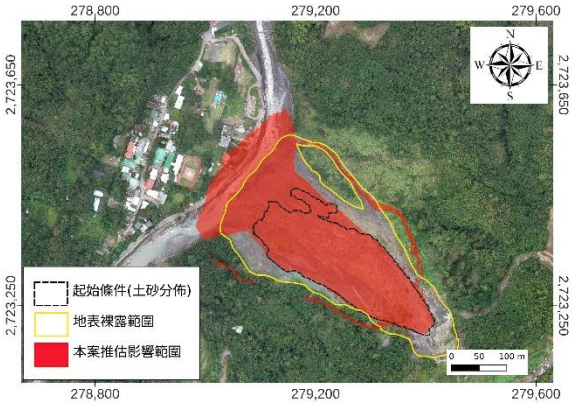


圖 5.21 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 1)

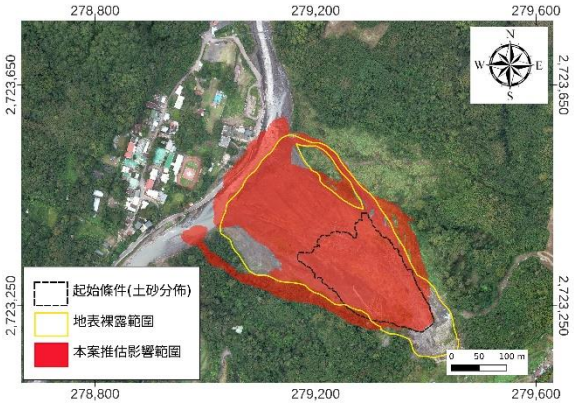


圖 5.22 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 2)

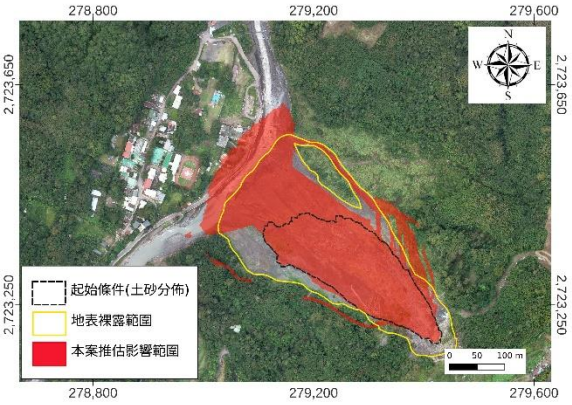


圖 5.23 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 3)

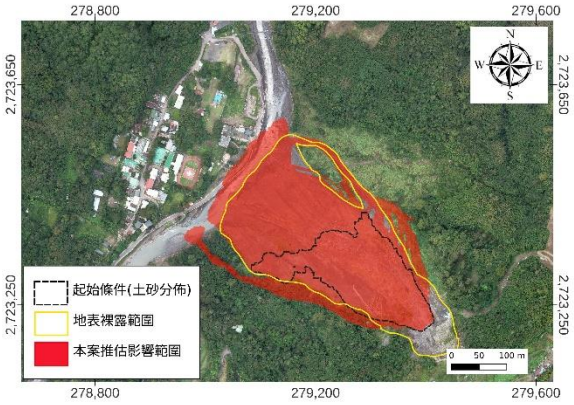


圖 5.24 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 4)

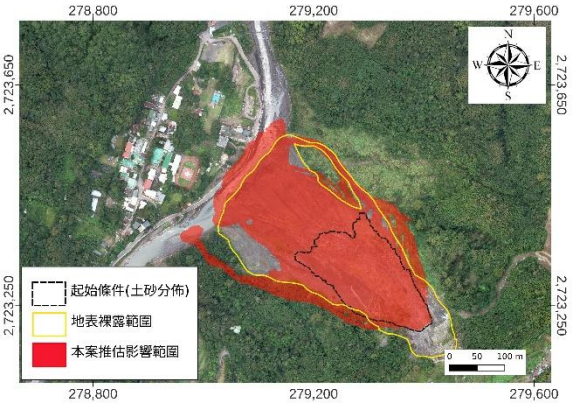


圖 5.25 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 5)

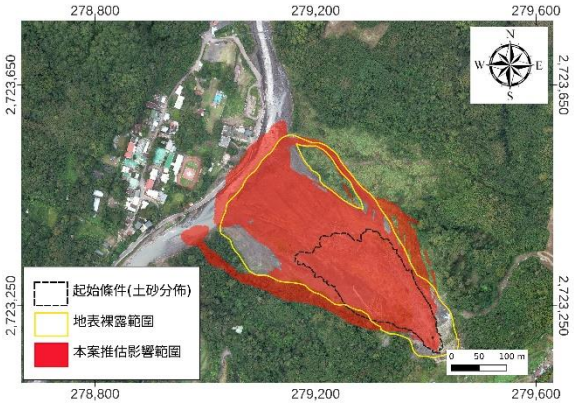


圖 5.26 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 6)

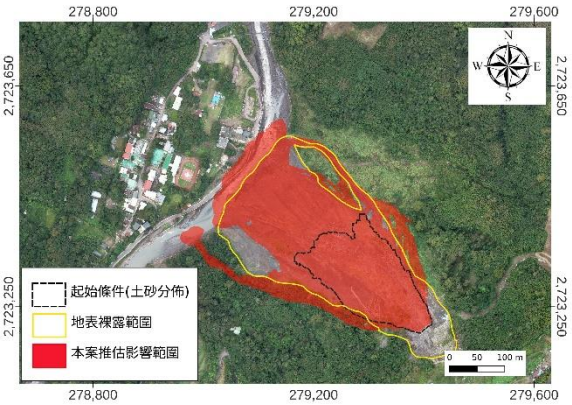


圖 5.27 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 7)

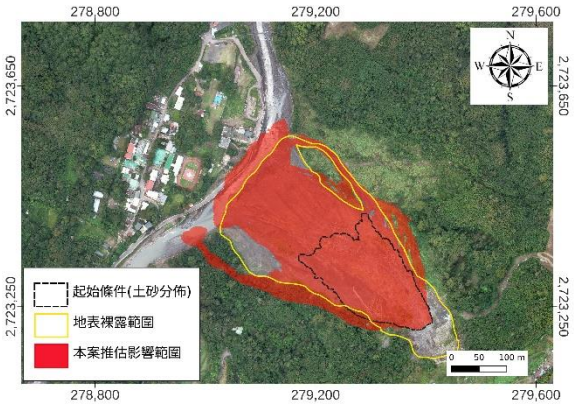


圖 5.28 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 8)

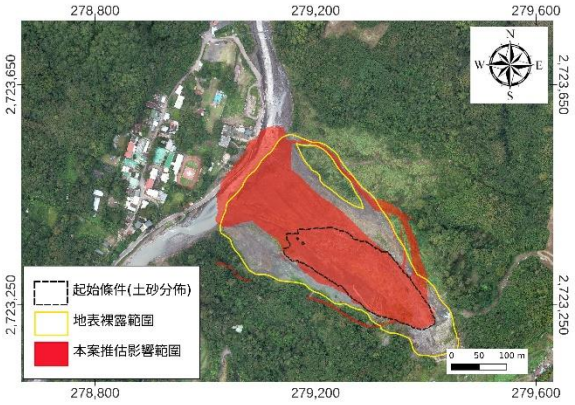


圖 5.29 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 9)

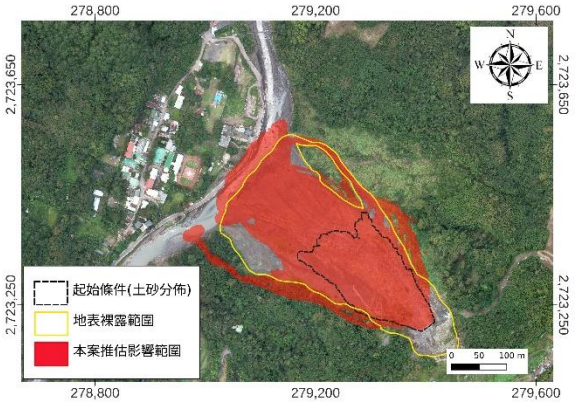


圖 5.30 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 10)

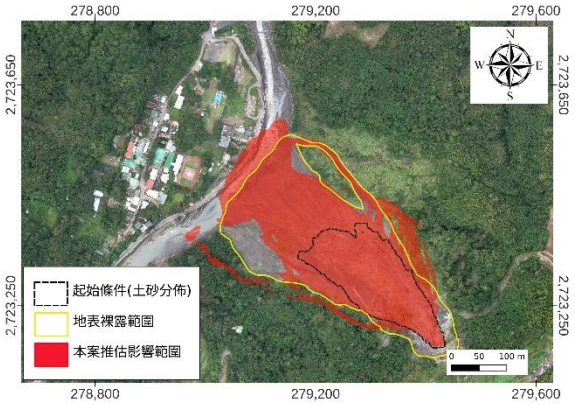


圖 5.31 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 11)

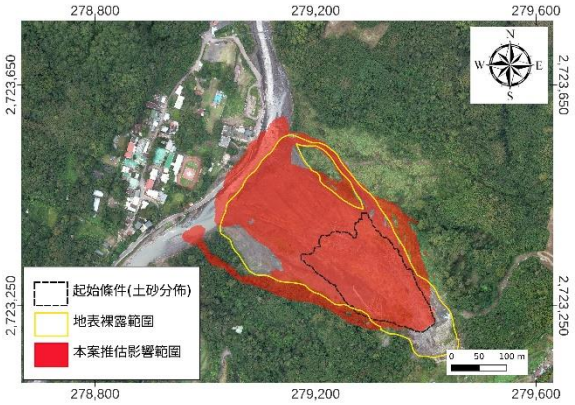


圖 5.32 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 12)

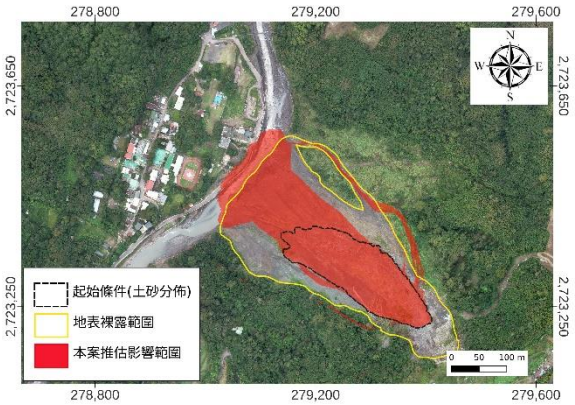


圖 5.33 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 13)

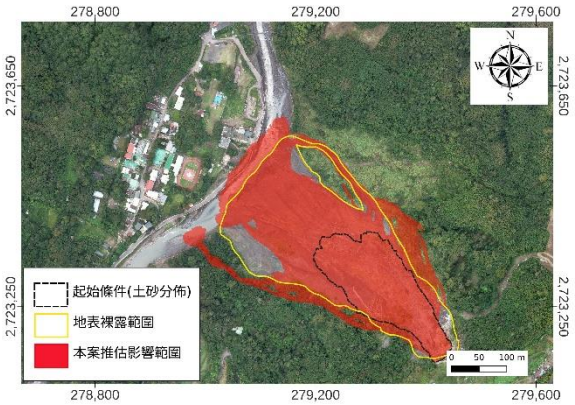


圖 5.34 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 14)

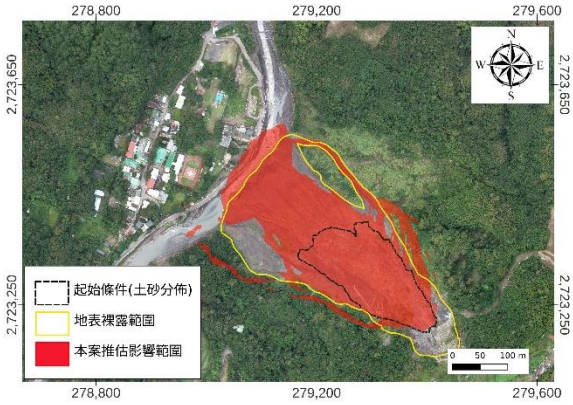


圖 5.35 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 15)

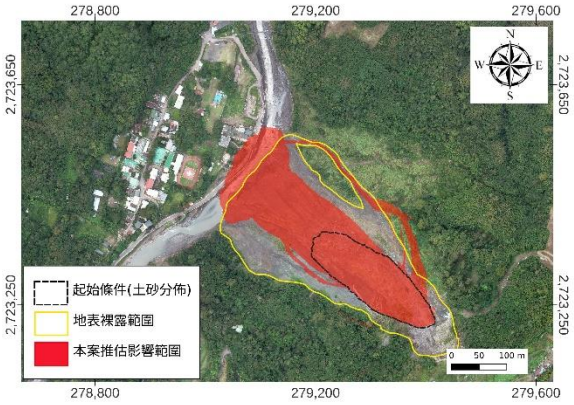


圖 5.36 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 16)

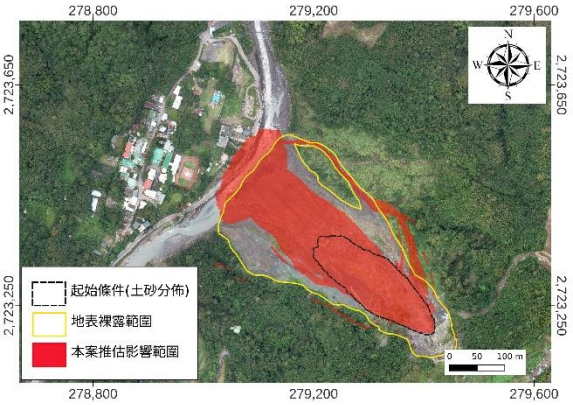


圖 5.37 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 17)

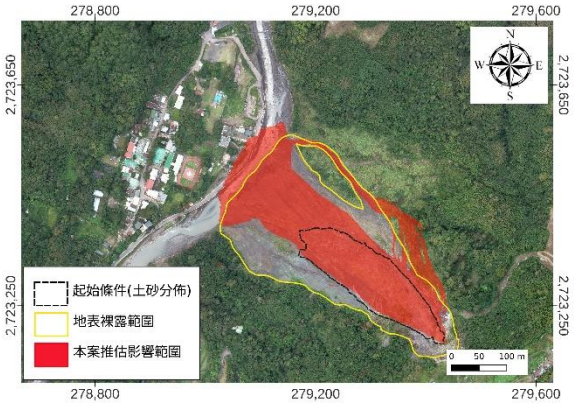


圖 5.38 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 18)

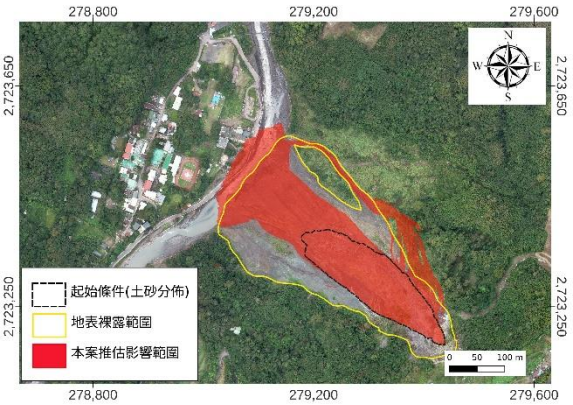


圖 5.39 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 19)

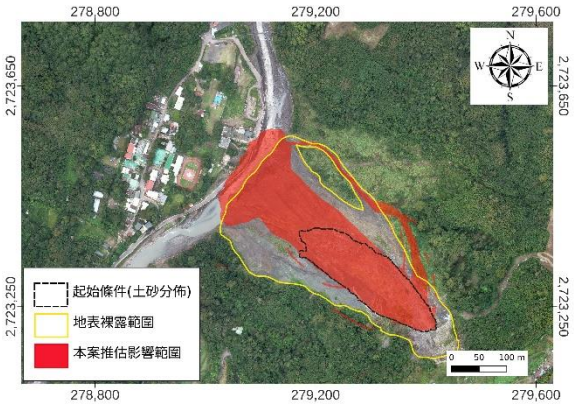


圖 5.40 秀巒參數組 B 影響範圍推估(秀巒情境 20)

第二節　新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域

針對鵠鵠崙崩塌事件，當具備工作項目一 (崩塌破壞面推估) 之對應崩塌土體分佈，本案延伸應用 Tai et al. (2019) 發展之二相流土砂運移行為模式並參考 Tai et al. (2019)與 Ma et al. (2022) 針對實際崩塌

事件設計之參數組合調整適合本次影響範圍之參數組合。經過合理的調整參數組，最終本案所使用之參數組為起始固相體積濃度 = 0.55；起始液相體積濃度 = 0.45；濃度比 = 0.56 (其中液相 = 1,464 kg/m^3，固相 = 2,600 kg/m^3)；交互作用係數 = 8.0； 液相阻尼係數 = 5.8； 類雷諾數 = 178.0；與參考 Scheidegger (1973) 提出之“崩塌土砂量體-固相摩擦角”，參考水保局技研小組 (地質年會，2023) 提到之可能崩塌土砂量體 = 103,800 m^3 為依據，所推估之建議固相摩擦角介於 26.13° 至 43.99° ，而本案應用其平均值 = 35° 作為參數。

透過應用上述之參數組合搭配工作項目一所推估各情境之崩塌土體，經過 MoSES_2PDF 模式模擬其土砂運移行為。最終搭配 RAMMS (2017) 使用手冊中建議之動量比作為模擬停止條件、Rickenmann (2005) 與 Hürlimann et al. (2008)之土石流風險分級概念中等級最小之條件 (流動深度大於 0.40 m 與流速大於 0.4 m/s)繪製本案各情境崩塌土體之影響範圍。如圖 5.41 至圖 5.58 所示，為本案所推估之土砂影響範圍，黃框代表有災後 UAV 正射影響研判之地表裸露區；黑色虛線為崩塌土體範圍(起始條件)；紅色範圍為土砂影響範圍。初步可見，大部分情境之土砂影響範圍都着落於研判之地表裸區內，除了情境 10、11 與 15 因推估之崩塌土體範圍與實際崩塌範圍差異較大(表 6.2 中顯示其覆蓋率只有 3.92%、1.17% 與 0.89%)。後續工作項目三(篩選最具備代表性之 ICS)將羅列由 MoSES_2PDF 模式模擬之影響範圍與最終土砂堆積深度作為評估指標。

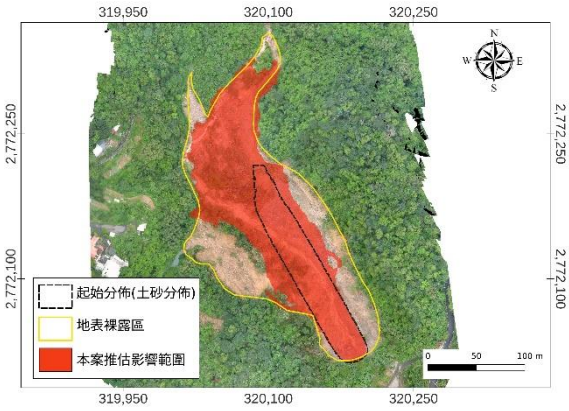


圖 5.41 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 1)

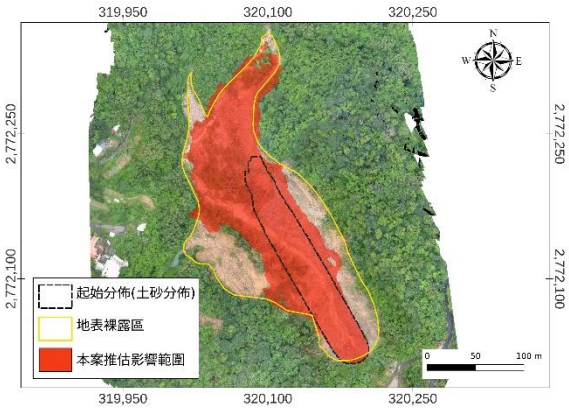


圖 5.42 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 2)

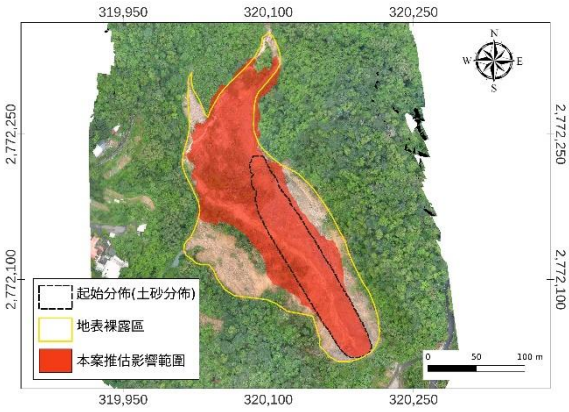


圖 5.43 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 3)

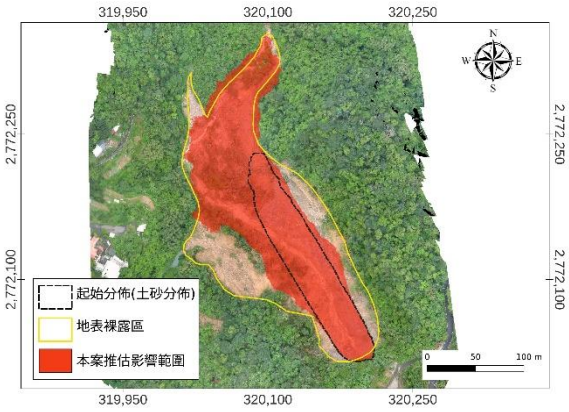


圖 5.44 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 4)

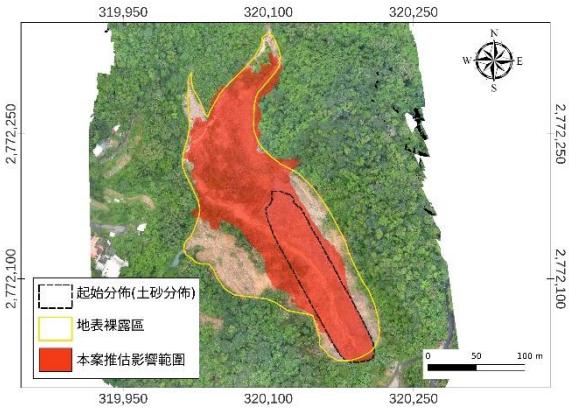


圖 5.45 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 5)

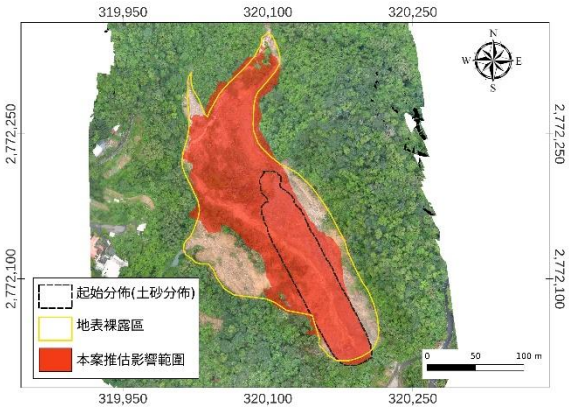


圖 5.46 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 6)

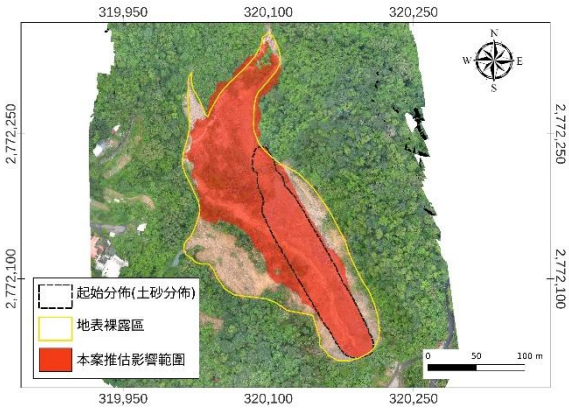


圖 5.47 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 7)

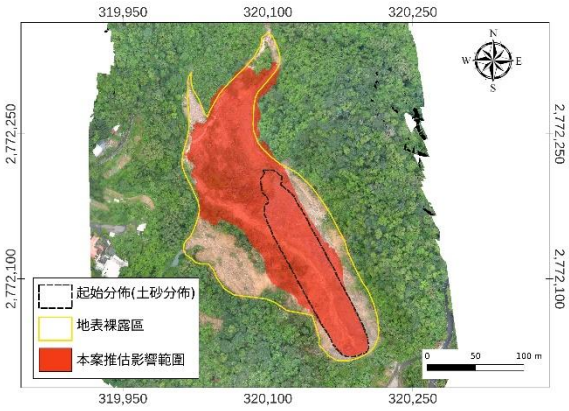


圖 5.48 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 8)

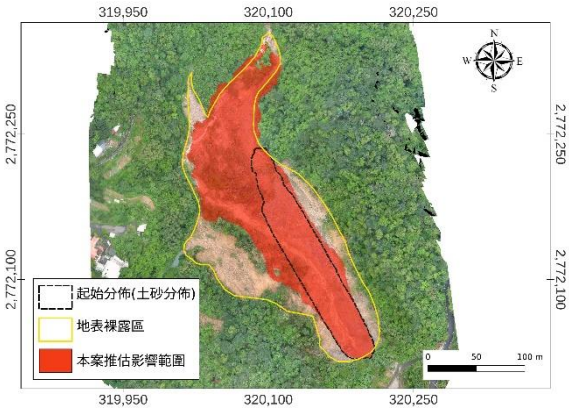


圖 5.49 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 9)

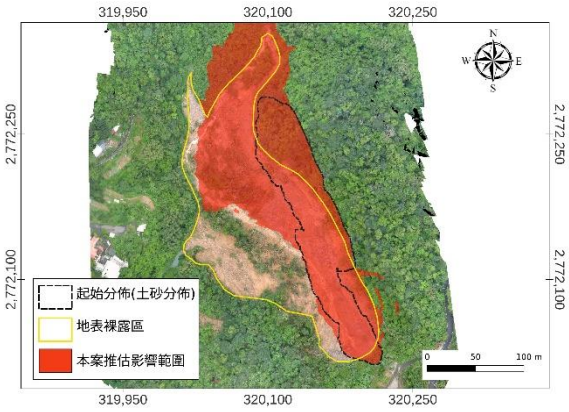


圖 5.50 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 10)

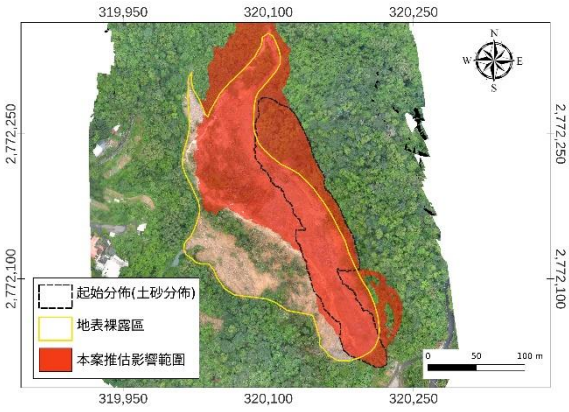


圖 5.51 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 11)

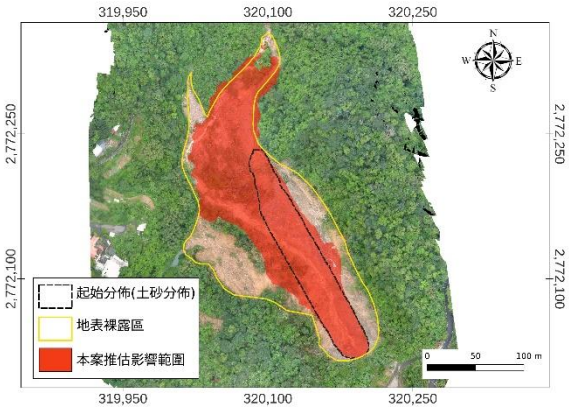


圖 5.52 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 12)

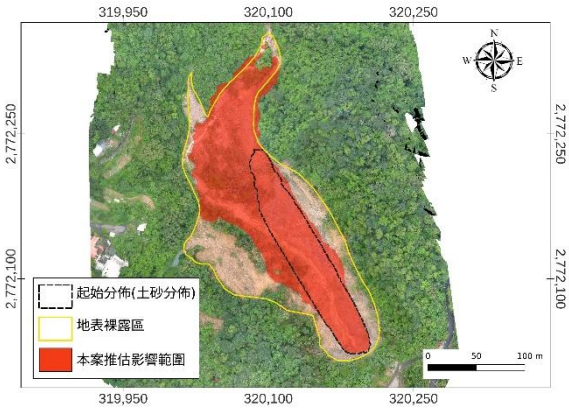


圖 5.53 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 13)

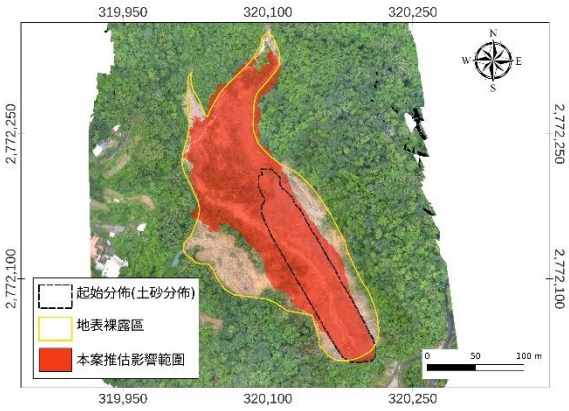


圖 5.54 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 14)

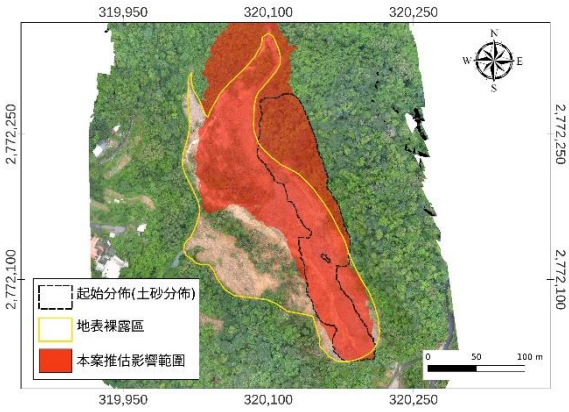


圖 5.55 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 15)

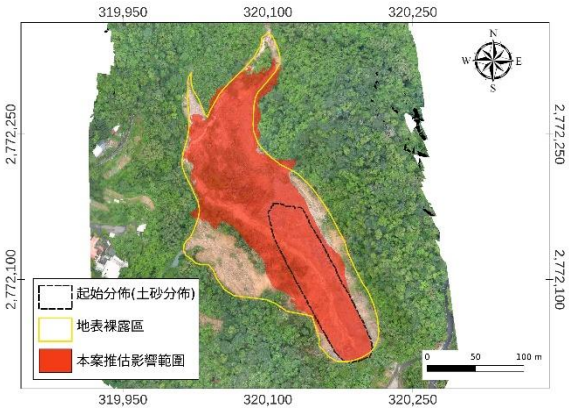


圖 5.56 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 16)

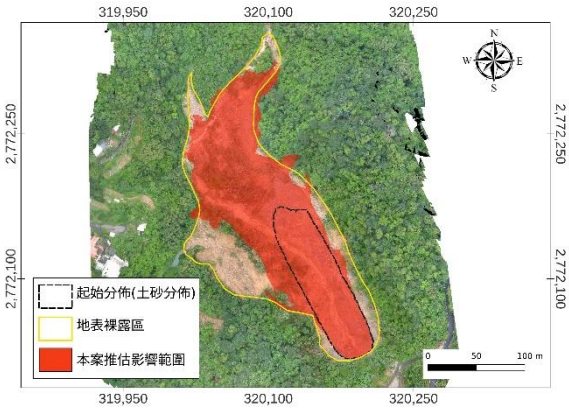


圖 5.57 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 17)

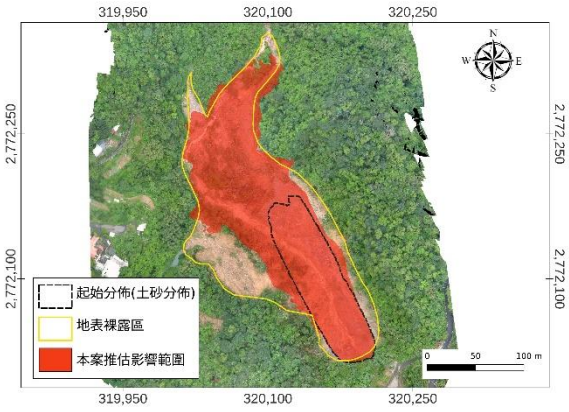


圖 5.58 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 18)

第三節　調整影響範圍繪製基準

針對期末審查意見五所提及之推估秀巒影響範圍下邊坡出現空洞疑慮，本案將影響範圍繪製基準從流動深 0.4 m 調整至 0.1 m，且

流速從 0.4 m/s 調整至 0.1 m/s。如圖 5.59 至圖 5.78 所示，為本案透過新繪製基準所推估之秀巒土砂影響範圍，黃框代表由災後 UAV 正射影響研判之地表裸露區；黑色虛線為崩塌土體範圍(起始條件)；紅色範圍為本案推估之影響範圍。相較於應用 Rickenmann (2005) 與 Hürlimann et al. (2008) 所建議之基準值，調整後之基準值 (流動深度大於 0.1 m 與速度大於 0.1 m/s) 所推估之影響範圍，已將空洞處填滿，研判原空洞處由流動深介於 0.1 ~ 0.4 m 且流速介於 0.1 ~ 0.4 m/s 之土砂運移路徑。

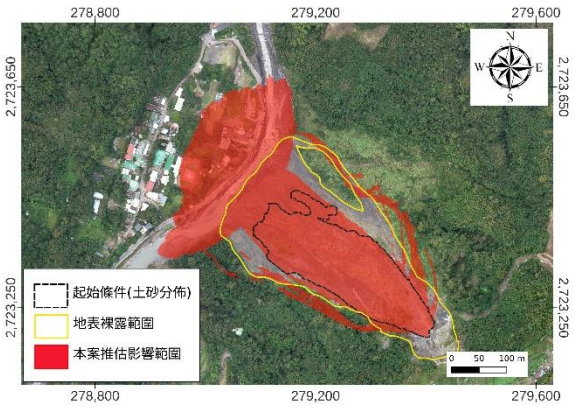


圖 5.59 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 1)

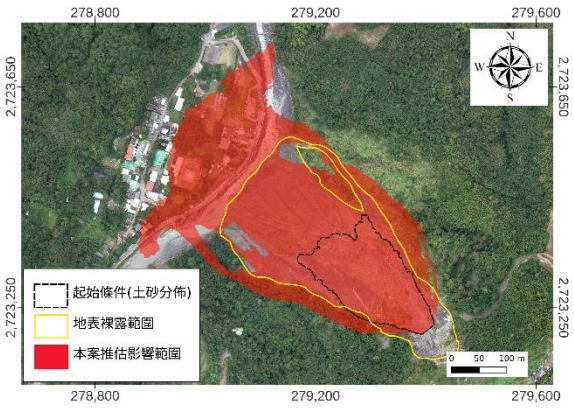


圖 5.60 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 2)

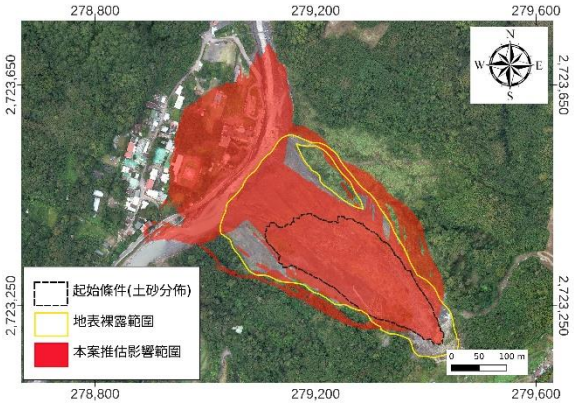


圖 5.61 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 3)

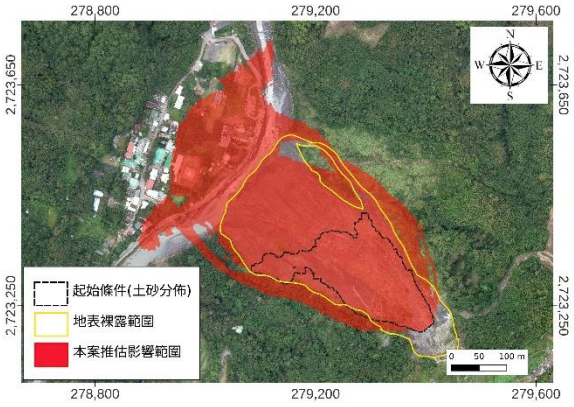


圖 5.62 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 4)

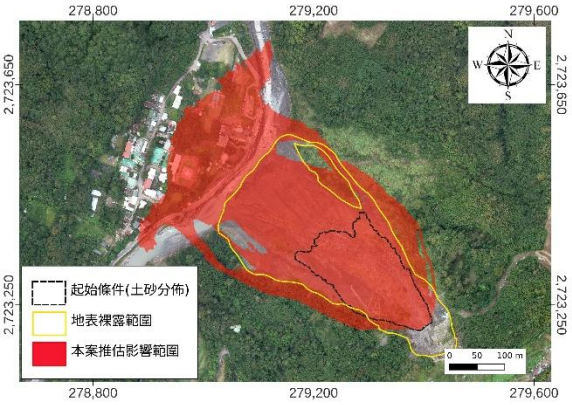


圖 5.63 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 5)

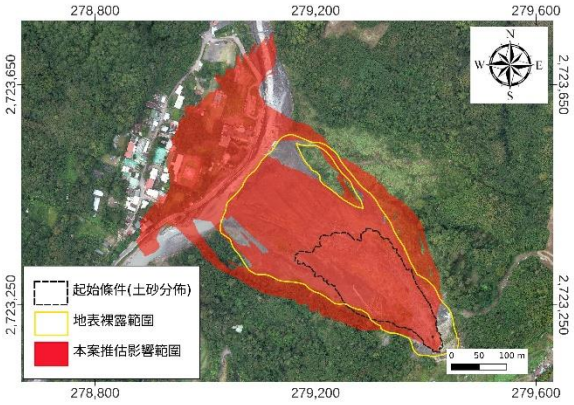


圖 5.64 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 6)

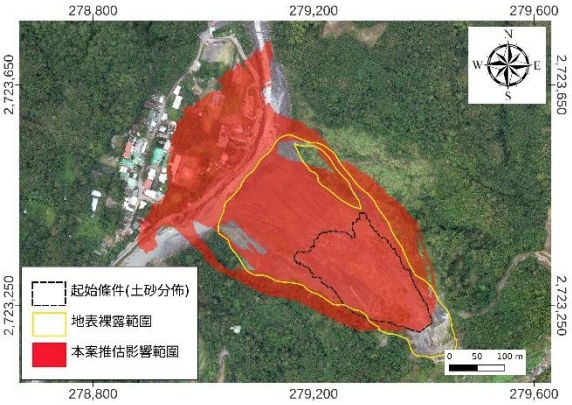


圖 5.65 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 7)

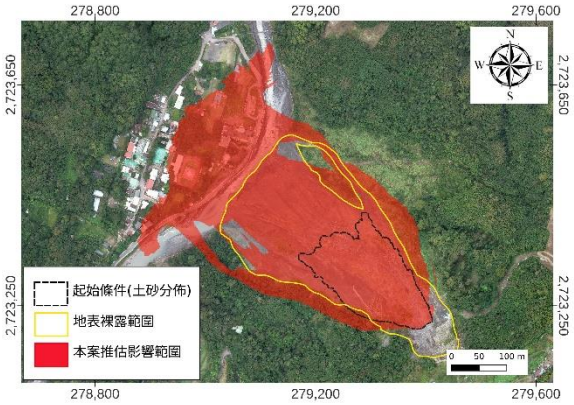


圖 5.66 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 8)

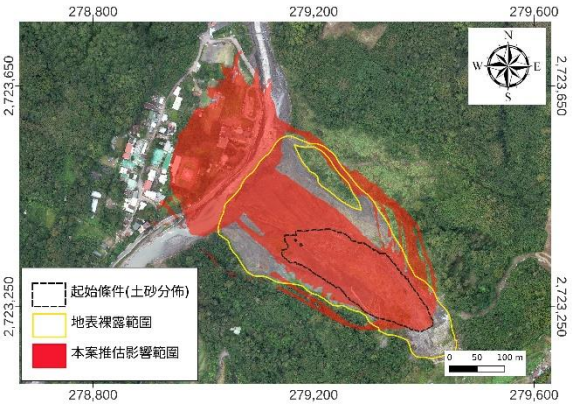


圖 5.67 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 9)

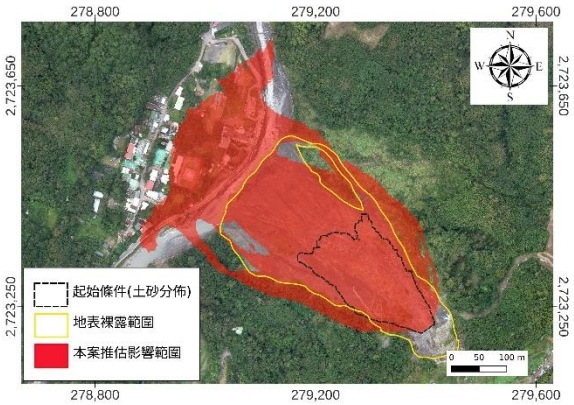


圖 5.68 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 10)

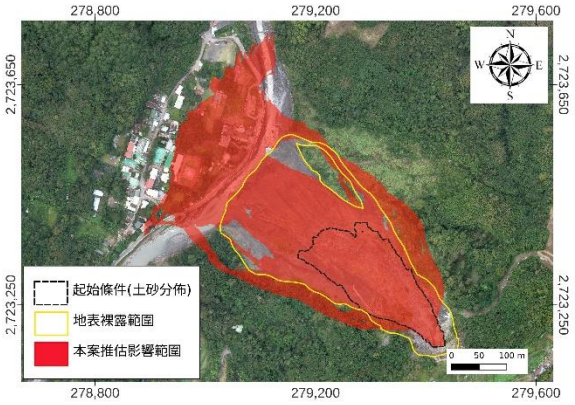


圖 5.69 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 11)

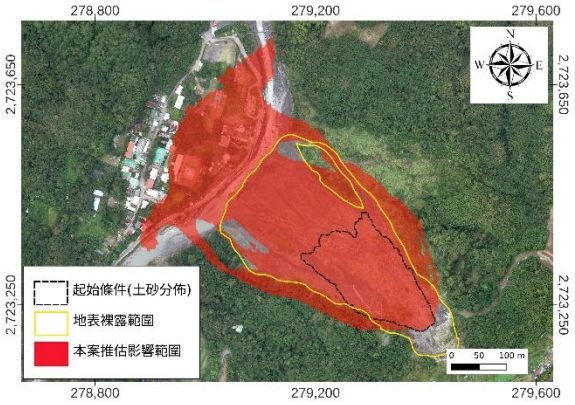


圖 5.70 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 12)

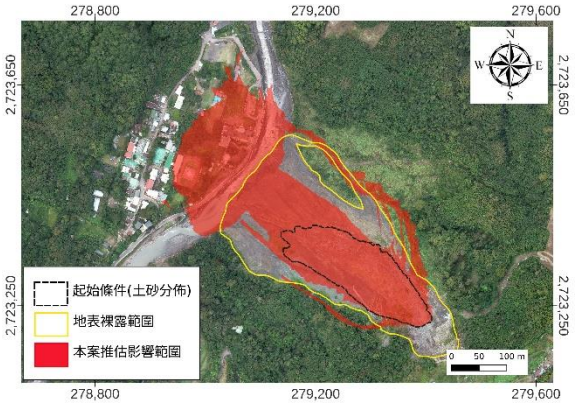


圖 5.71 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 13)

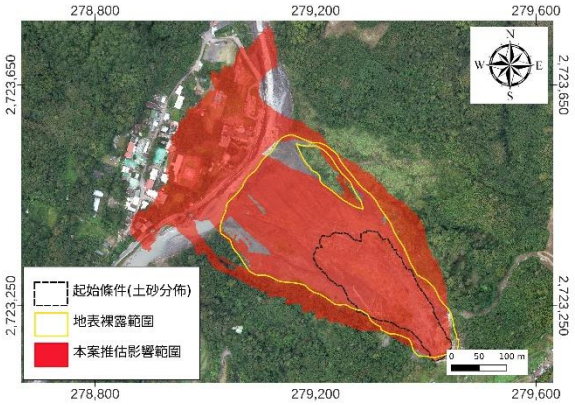


圖 5.72 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 14)

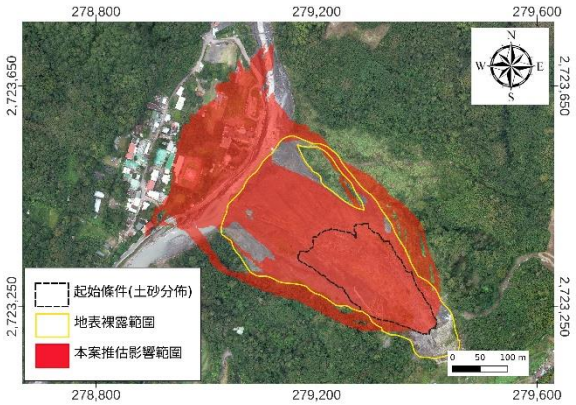


圖 5.73 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 15)

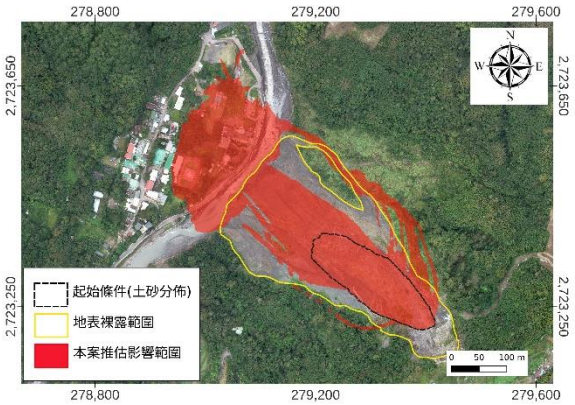


圖 5.74 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 16)

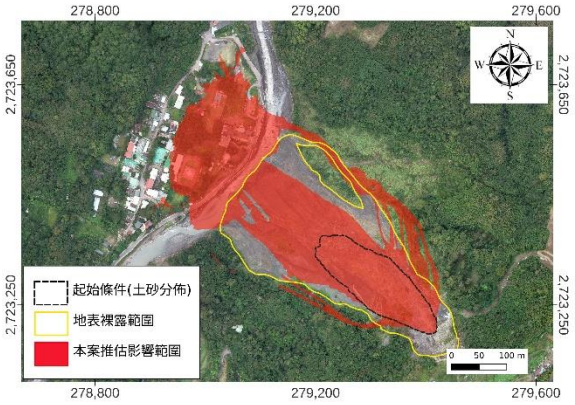


圖 5.75 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 17)

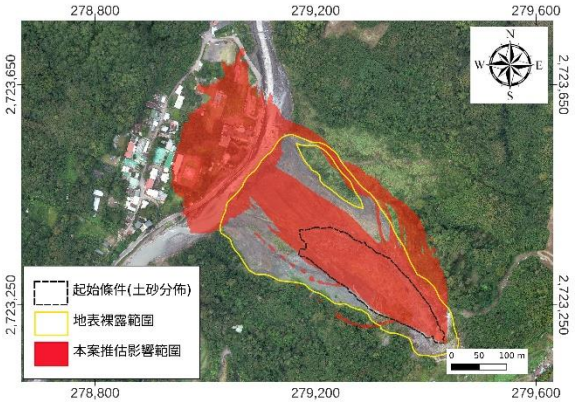


圖 5.76 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 18)

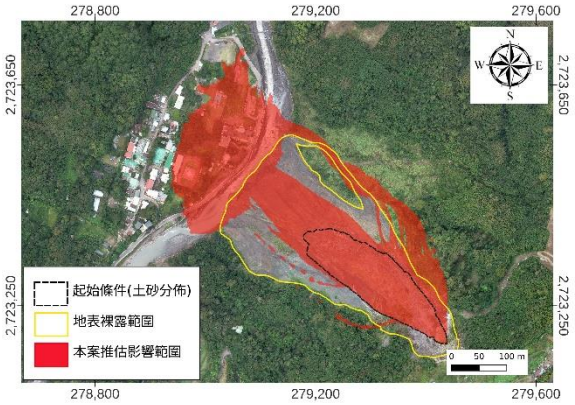


圖 5.77 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 19)

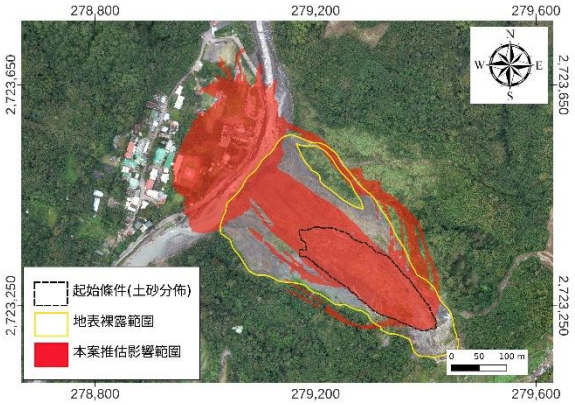


圖 5.78 秀巒參數組 A 影響範圍推估(秀巒情境 20)

針對鵠鵠崙崩塌事件，本案也應用新繪製基準(流動深大於 0.1 m 與流速大於 0.1 m/s)重新繪製影響範圍。如圖 5.79 至圖 5.96 所示，為本案透過新繪圖依據所推估之鵠鵠崙土砂影響範圍，黃框代表有災後 UAV 正射影響研判之地表裸露區；黑色虛線為崩塌土體範圍(起始條件)；紅色範圍為土砂影響範圍。相較於原本影響範圍繪製依據(流動深度大於 0.4 m 與速度大於 0.4 m/s)，鵠鵠崙崩塌事件之影響範圍差異不大，僅有 4%的差異，其中差異都坐落於土砂前端，主要原因為鵠鵠崙事件發生時其崩塌土體直接流入河谷內。

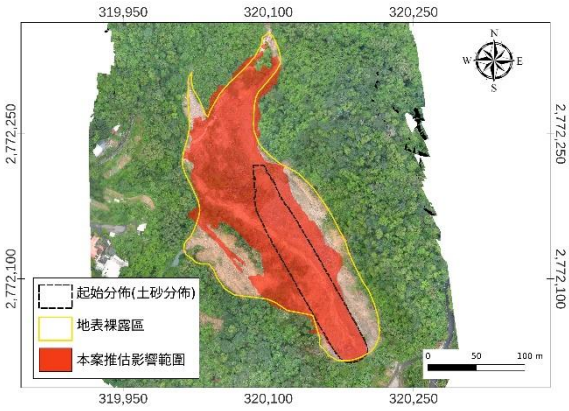


圖 5.79 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 1)

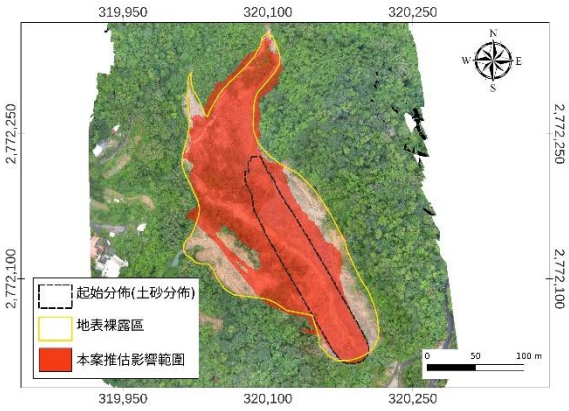


圖 5.80 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 2)

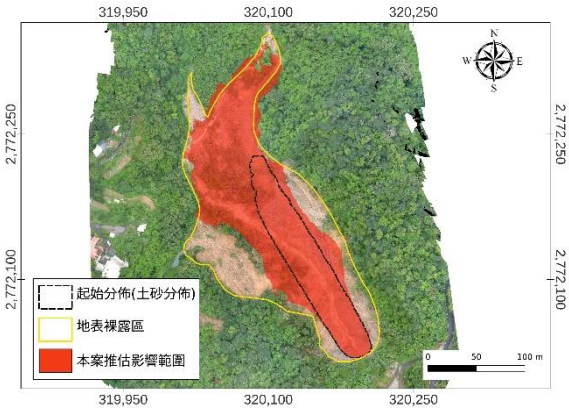


圖 5.81 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 3)

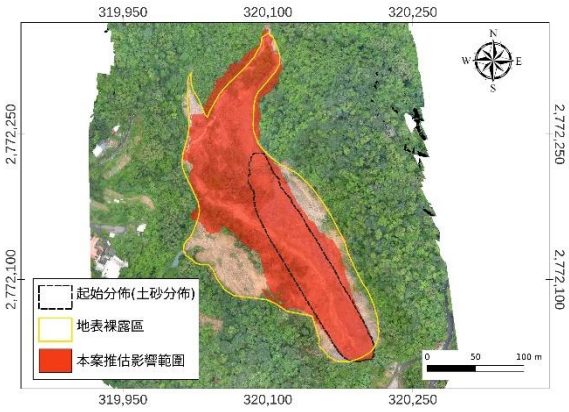


圖 5.82 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 4)

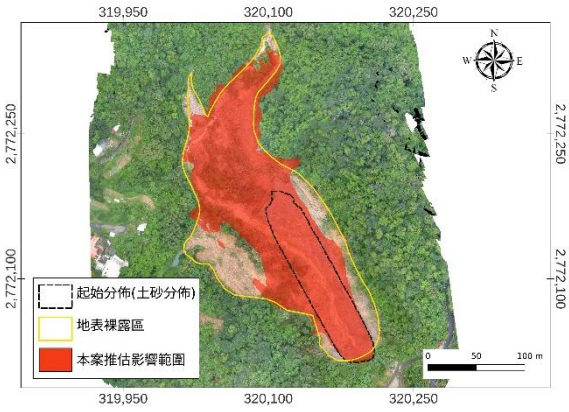


圖 5.83 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 5)

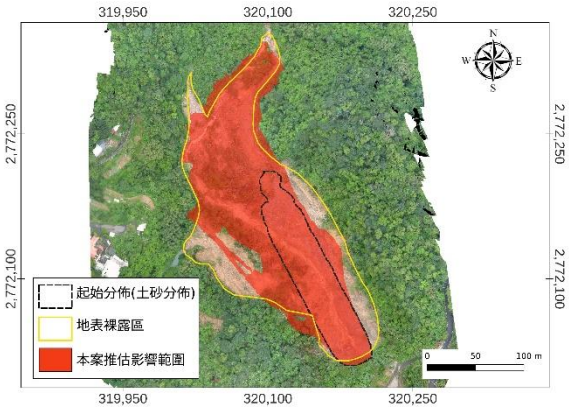


圖 5.84 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 6)

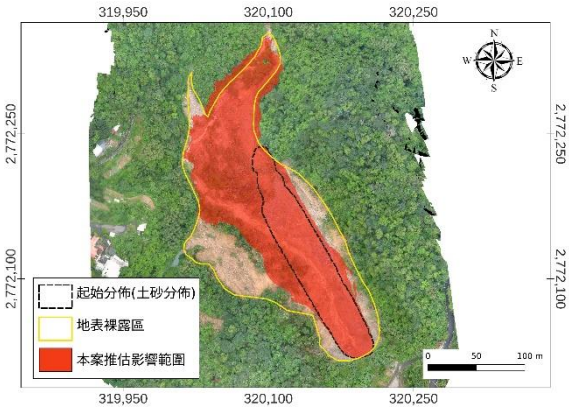


圖 5.85 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 7)

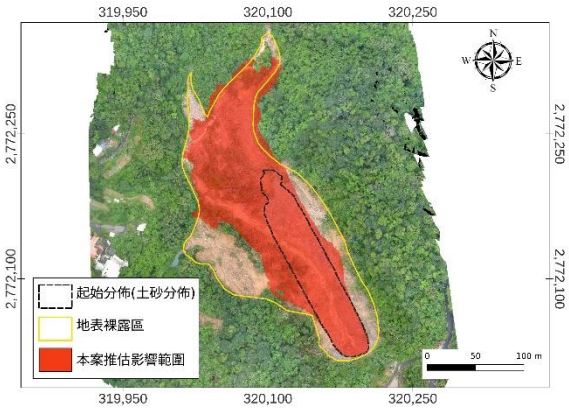


圖 5.86 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 8)

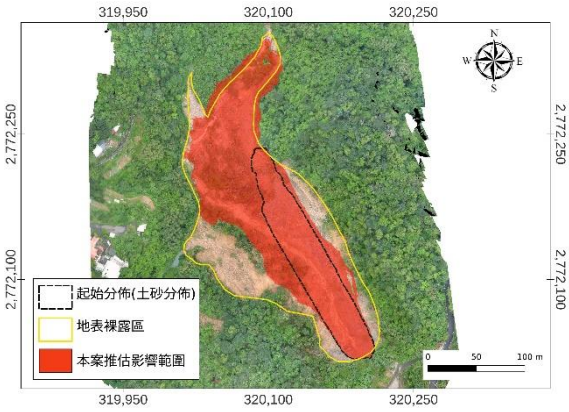


圖 5.87 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 9)

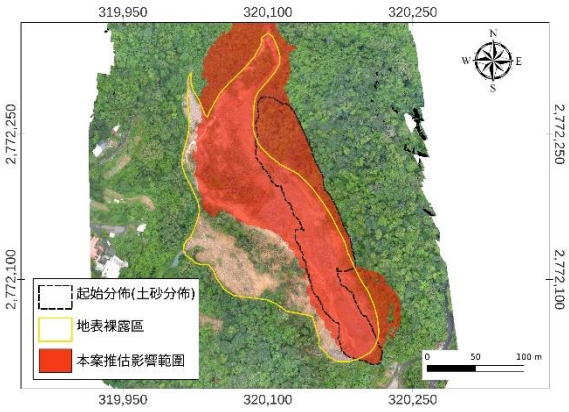


圖 5.88 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 10)

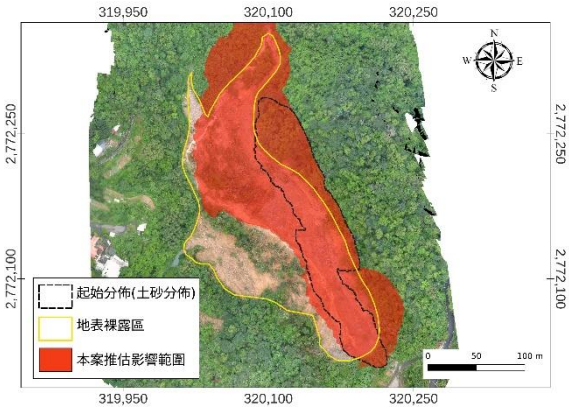


圖 5.89 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 11)

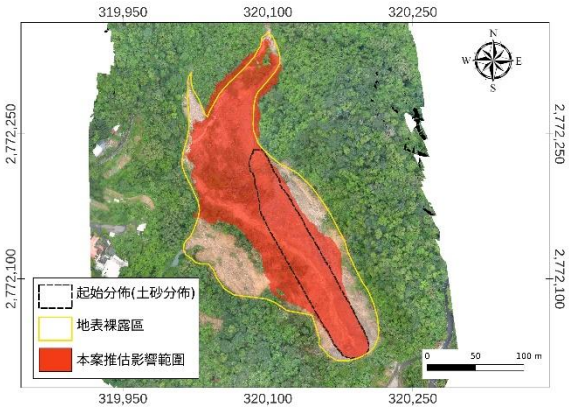


圖 5.90 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 12)

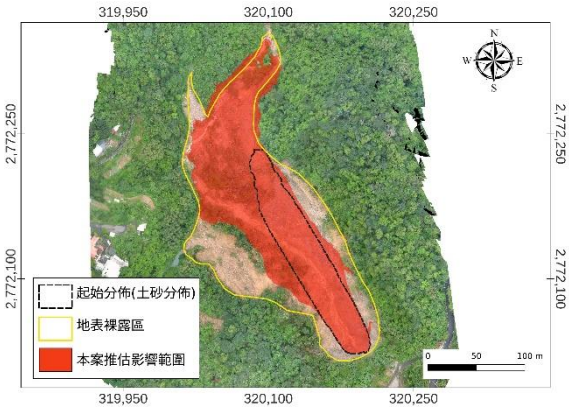


圖 5.91 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 13)

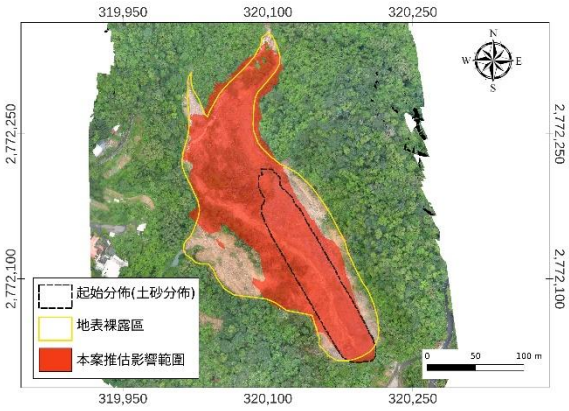


圖 5.92 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 14)

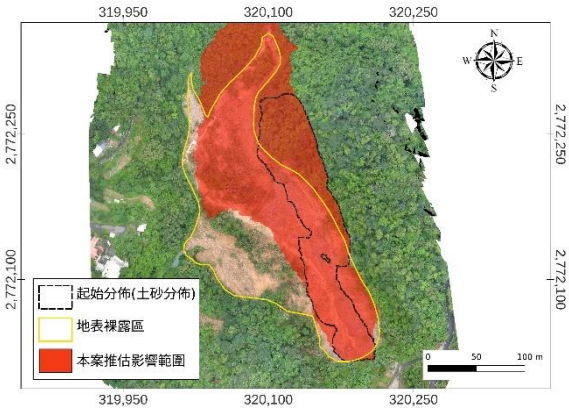


圖 5.93 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 15)

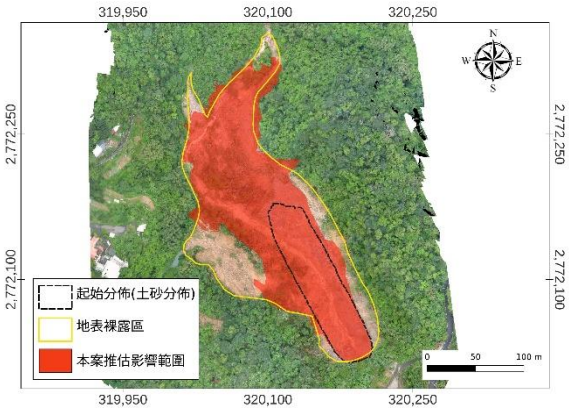


圖 5.94 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 16)

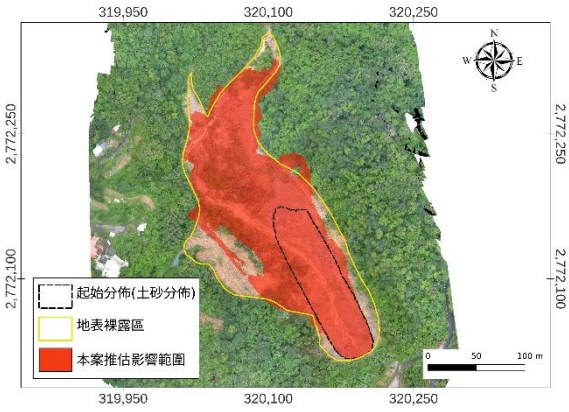


圖 5.95 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 17)

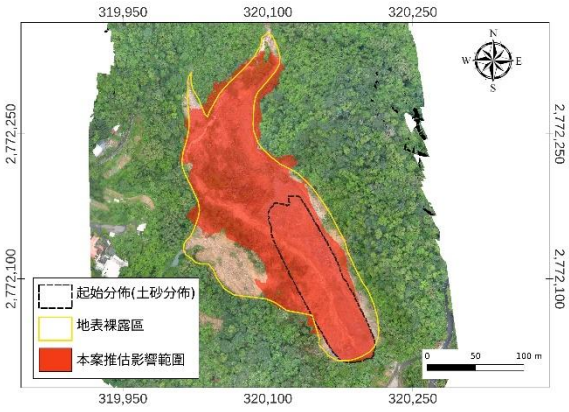


圖 5.96 影響範圍推估(鵠鵠崙情境 18)

第六章 篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS)

經過工作項目一(崩塌破壞面推估)與二(土砂影響範圍推估)後，工作項目三主要內容為依據本報告書第二章第三節所規畫之 6 項評估指標(崩塌破壞面推估共 4 種，土砂影響範圍推估共 2 種)作為篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS)，所需要使用的基本資料只需災害前後期數值地形資料與災後遙測或 UAV 正射影像。有關使用之基準資料包含了：(1)崩塌破壞面參考點：裸露崩塌破壞面高程；(2)崩塌破壞範圍推估：可能之崩塌潛勢範圍；(3)崩塌量體比：參閱水保局臺北分局(2021)與水保局技研小組(地質年會, 2023)所記錄之可能崩塌量體；(4)土砂堆積深度：災害前後期於堆積區域內之地形變化高程；(5)影響範圍：災後遙測或 UAV 正射影像研判地表裸露範圍。

現階段，本案將各情境之候選 GA-ER-ICS 所需要的資料進行彙整並搭配圖示後，可初步篩選出最合適之 GA-ER-ICS 供後續防減災規畫用。

第一節　新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域

經過工作項目一(崩塌破壞面推估)與二(土砂影響範圍推估)，於工作項目三中，本案透過彙整評估指標所需要之推估與模擬資料，最終將數據羅列於表 6.1 中並將其趨勢分佈繪製於圖 6.1 中。由整體趨勢所示，崩塌破壞面之深度偏差(9.78 ± 1.53 m)與覆蓋率(44.15 ± 11.56%)並沒有太明顯之變化，而邊坡穩定性分析中因本案主要關注在相同內摩擦角度=39°情況下之趨勢，因此所推估之邊坡安全係數只供參考用，並不追求其精確性，依據所推估之崩塌破壞曲面可見其平均值大約為 0.62 ± 0.10。其中比較激烈變化的土砂影響範圍之路

徑偏差，出現 2 種極端的狀況，一為土砂大部分都流動並堆積於秀巒部落，二為土砂大部分都停留於原邊坡與坡趾處，此狀況較符合水保局臺北分局(2021)中所調查之現象，因此本案即可直接忽略情境 1、3、9、13、16、19 與 20。但是對於本案所設定的目標其影響不大，因本案主軸為設定一系列可能之情境，並透過評估指標篩選最合適之推估崩塌破壞曲面，因此經過整體的評估後，現階段本案選擇了情境 14 作為最合適之理想崩塌曲面，其崩塌土體分佈、土砂影響範圍與最終土砂堆積分佈，可參閱圖 6.2 至圖 6.4。

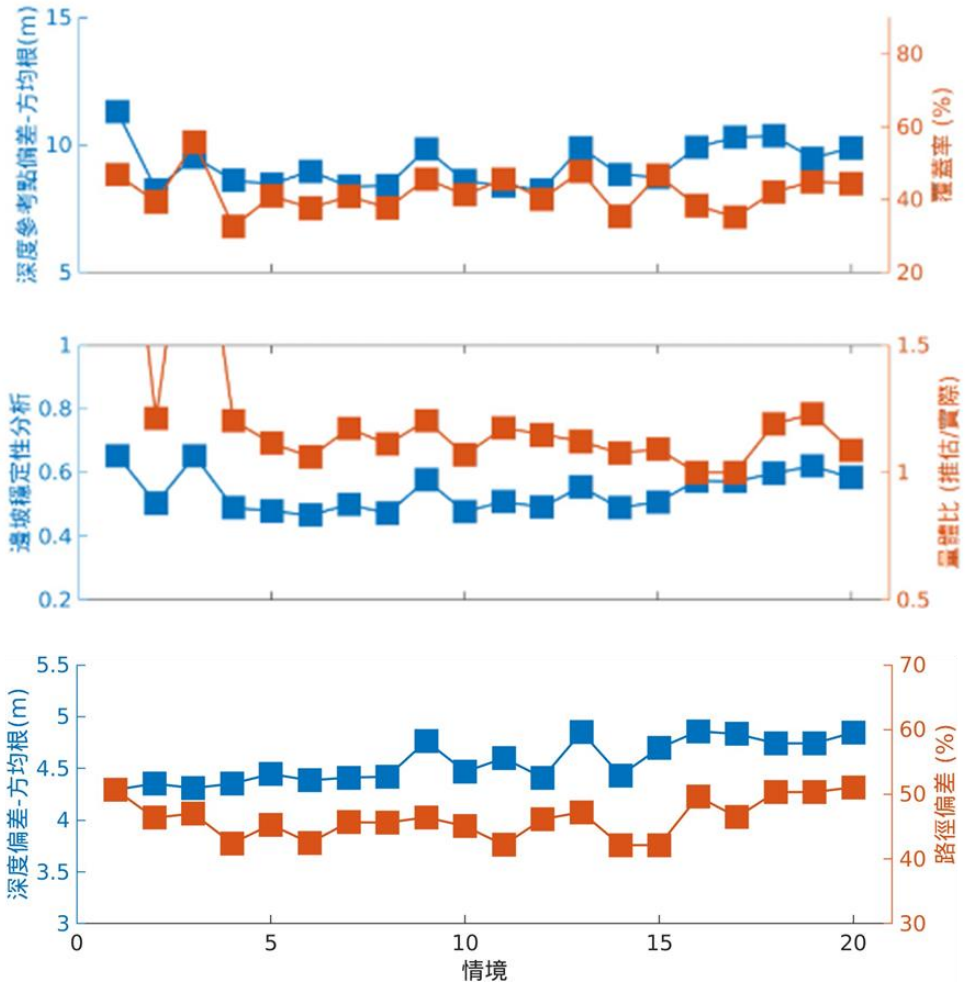


圖 6.1 秀巒崩塌事件評估指標結果

表 6.1 秀巒崩塌評估指標數據一覽表

情境	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	邊坡穩定性分析	量體比	堆積深度方均根 (m)	路徑偏差率 (%)
1	11.31	46.84	0.728	2.54	4.29	50.69
2	8.26	39.47	0.561	1.21	4.35	46.37
3	9.53	55.72	0.727	2.30	4.31	47.04
4	8.62	32.59	0.546	1.20	4.35	42.42
5	8.47	40.99	0.533	1.11	4.45	45.30
6	8.98	37.74	0.520	1.06	4.38	42.49
7	8.37	40.90	0.557	1.17	4.41	45.67
8	8.41	37.77	0.526	1.11	4.42	45.63
9	9.84	45.67	0.643	1.20	4.76	46.45
10	8.59	41.34	0.531	1.07	4.47	45.06
11	8.40	45.61	0.568	1.18	4.60	42.17
12	8.25	40.21	0.547	1.15	4.41	46.18
13	9.90	47.78	0.619	1.12	4.85	47.23
14	8.85	35.36	0.546	1.08	4.43	42.14
15	8.74	46.71	0.566	1.09	4.70	42.14
16	9.92	38.43	0.640	1.00	4.86	49.66
17	10.30	35.22	0.637	1.00	4.83	46.48
18	10.36	42.14	0.666	1.19	4.74	50.35
19	9.49	44.95	0.691	1.23	4.76	50.34
20	9.89	44.48	0.651	1.09	4.85	51.09

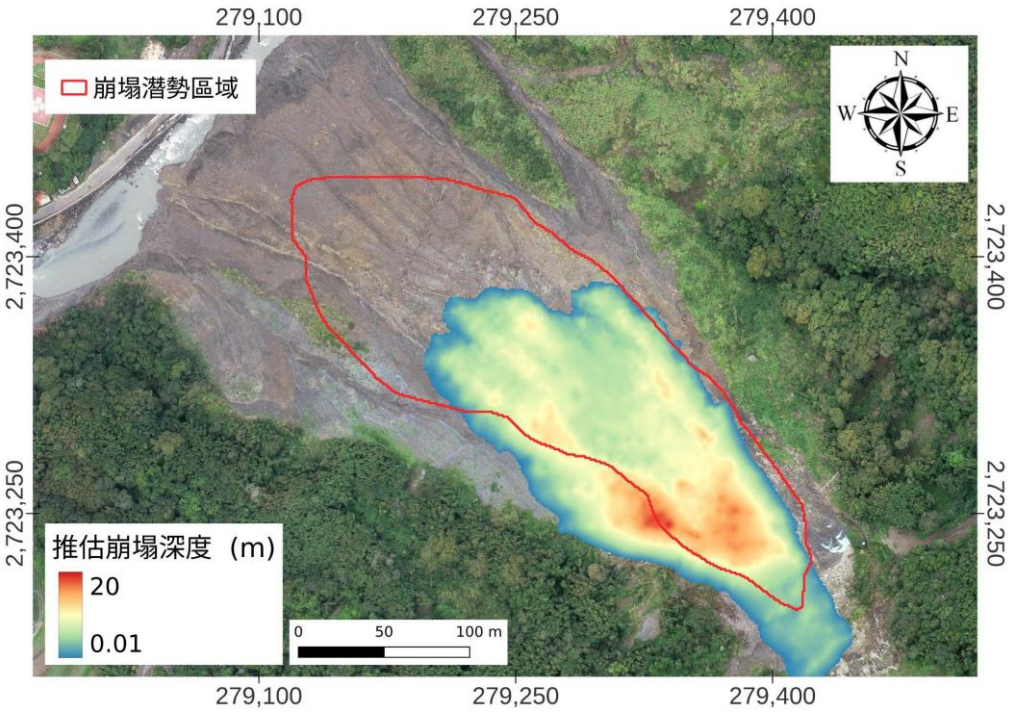


圖 6.2 秀巒崩塌最合適崩塌曲面之崩塌土體分佈 (情境 14)

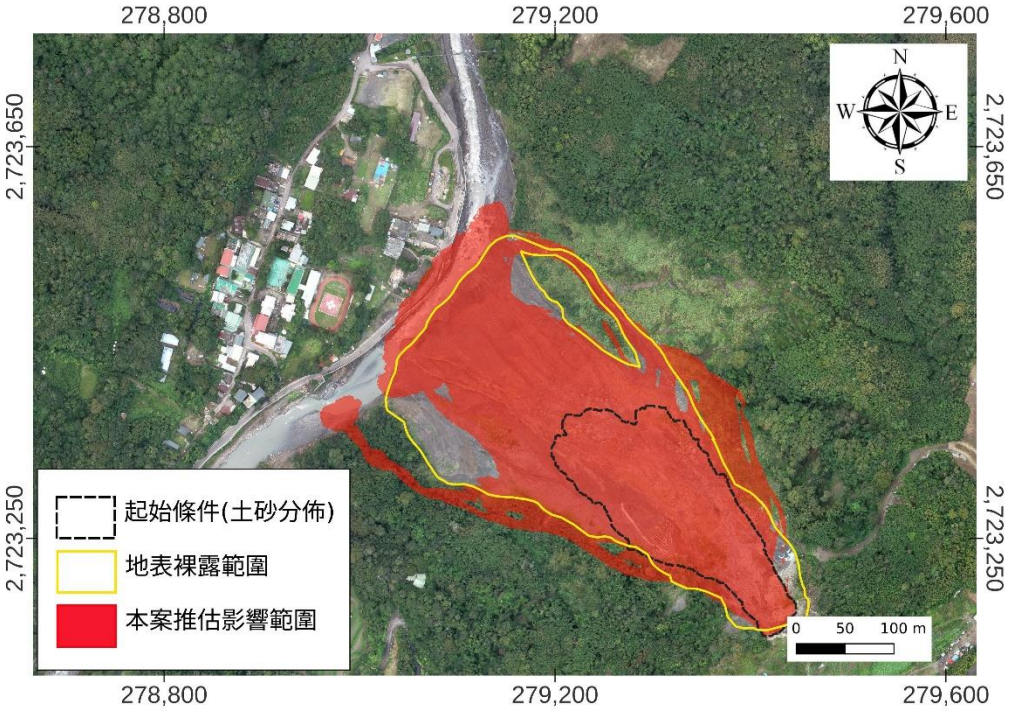


圖 6.3 秀巒崩塌最合適崩塌曲面之影響範圍 (情境 14)

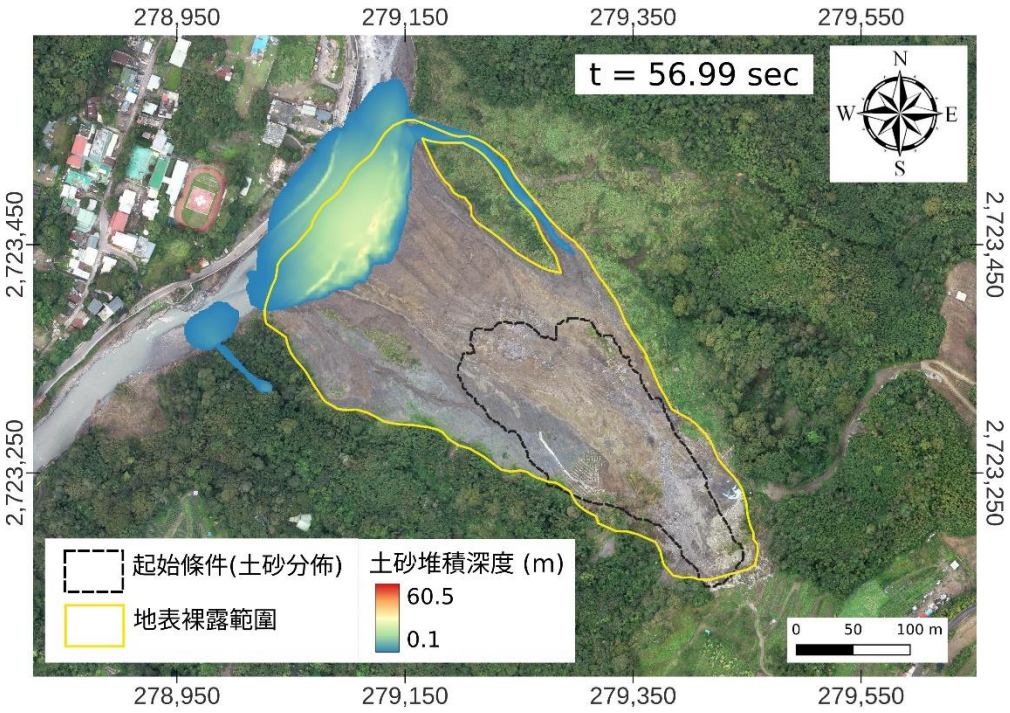


圖 6.4 秀巒崩塌最合適崩塌曲面之土砂運移行為最終堆積分佈 (情境 14)

第二節　新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域

經過工作項目一(崩塌破壞面推估)與二(土砂影響範圍推估)，於工作項目三中，本案透過彙整評估指標所需要之推估與模擬資料，最終將數據羅列於表 6.2 中並將其趨勢分佈繪製於圖 6.5 中。由整體趨勢所示，情境 1 至 4 除了崩塌破壞面推估之覆蓋率有逐漸提升的狀況，其他評估指標都維持在表現不錯的狀況；自情境 9 開始可發現崩塌破壞面覆蓋率出現大幅度變差的狀況，因此連帶後續之崩塌量體比和土砂影響範圍偏差率也出現變差的結果，其主要原因為可見第四章圖 4.30、4.31 與 4.35，因起始搜尋點的位置給定的不理想，到時應用 GA-ER-ICS 所推估之崩塌破壞面已偏離實際的崩塌破壞面範圍。但是對於本案所設定的目標其影響不大，因本案主軸為設定一系列可能之情境，並透過評估指標篩選最合適之推估崩塌破壞曲面，因此經過整體的評估後，現階段本案選擇了情境 6 作為最合適

之理想崩塌曲面，其崩塌土體分佈、土砂影響範圍與最終土砂堆積分佈，可參閱 圖 6.6 至圖 6.8。

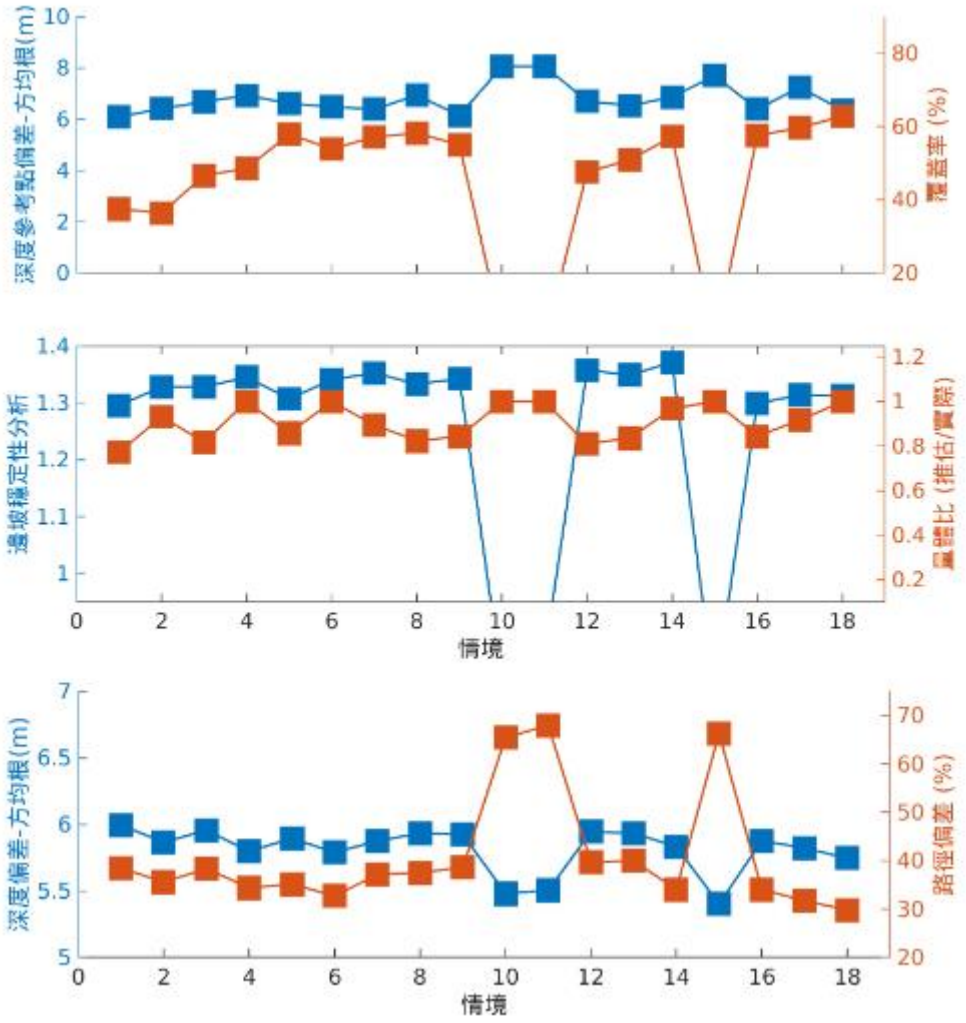


圖 6.5 鵠鵠崙崩塌事件評估指標結果

表 6.2 鵠鵠崙崩塌評估指標數據一覽表

情境	參考點深度方均根 (m)	覆蓋率 (%)	邊坡穩定性分析	量體比	堆積深度方均根 (m)	路徑偏差率 (%)
1	6.09	37.50	1.295	0.77	5.99	38.45
2	6.41	36.39	1.328	0.93	5.87	35.59
3	6.68	46.64	1.328	0.82	5.96	38.34
4	6.93	48.60	1.345	1.00	5.80	34.39
5	6.62	57.93	1.307	0.86	5.90	35.17
6	6.49	53.90	1.340	1.00	5.79	32.70
7	6.39	57.18	1.353	0.89	5.88	37.15
8	6.94	58.22	1.333	0.82	5.93	37.52
9	6.15	55.06	1.342	0.84	5.92	38.62
10	8.06	3.92	0.813	1.00	5.48	65.45
11	8.07	1.17	0.856	1.00	5.50	67.96
12	6.71	47.57	1.358	0.81	5.94	39.68
13	6.53	50.89	1.349	0.83	5.93	39.99
14	6.87	57.27	1.371	0.97	5.83	34.04
15	7.70	0.89	0.786	1.00	5.40	66.30
16	6.40	57.56	1.299	0.84	5.88	34.07
17	7.24	59.72	1.314	0.92	5.82	31.72
18	6.37	62.84	1.313	1.00	5.75	29.80

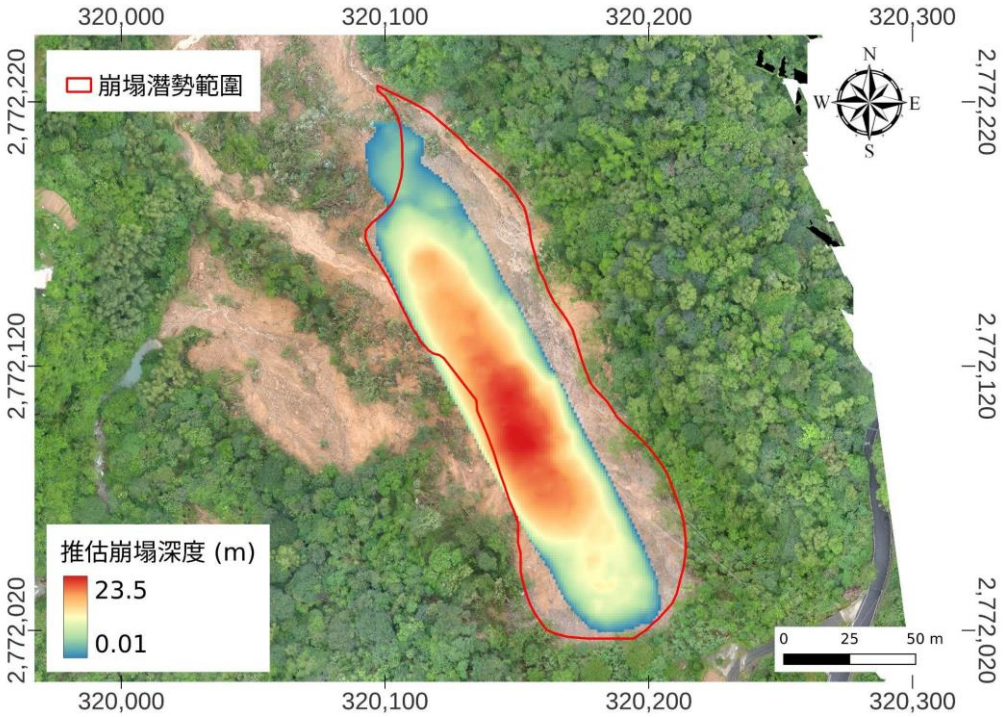


圖 6.6 鵠鵠崙崩塌最合適崩塌曲面之崩塌土體分佈(情境 8)

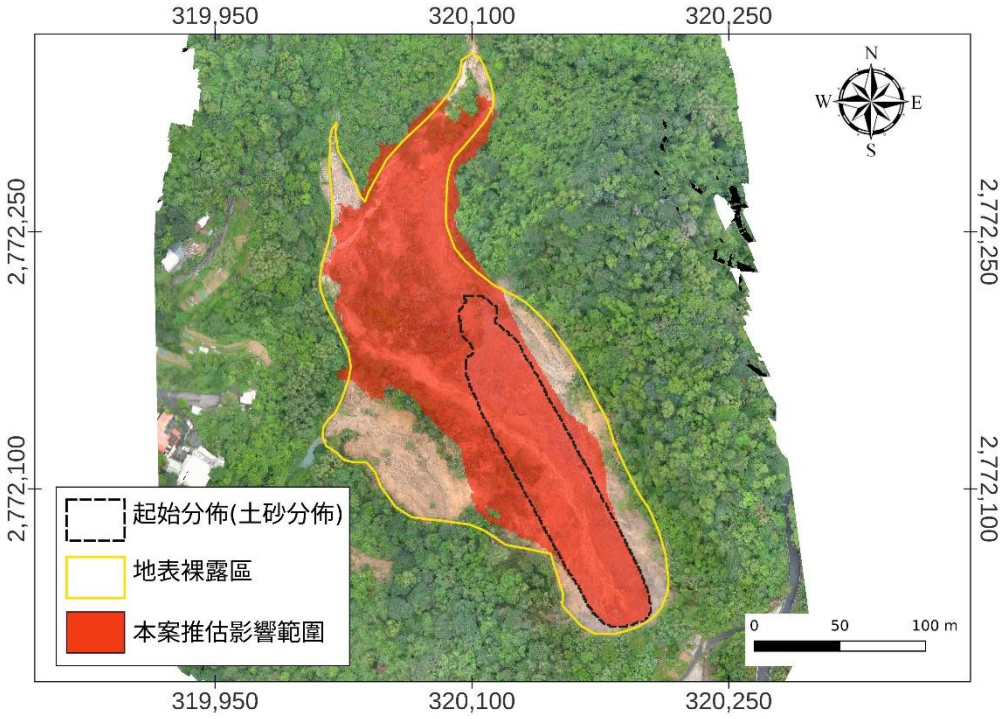


圖 6.7 鵠鵠崙崩塌最合適崩塌曲面之土砂影響範圍圖(情境 8)

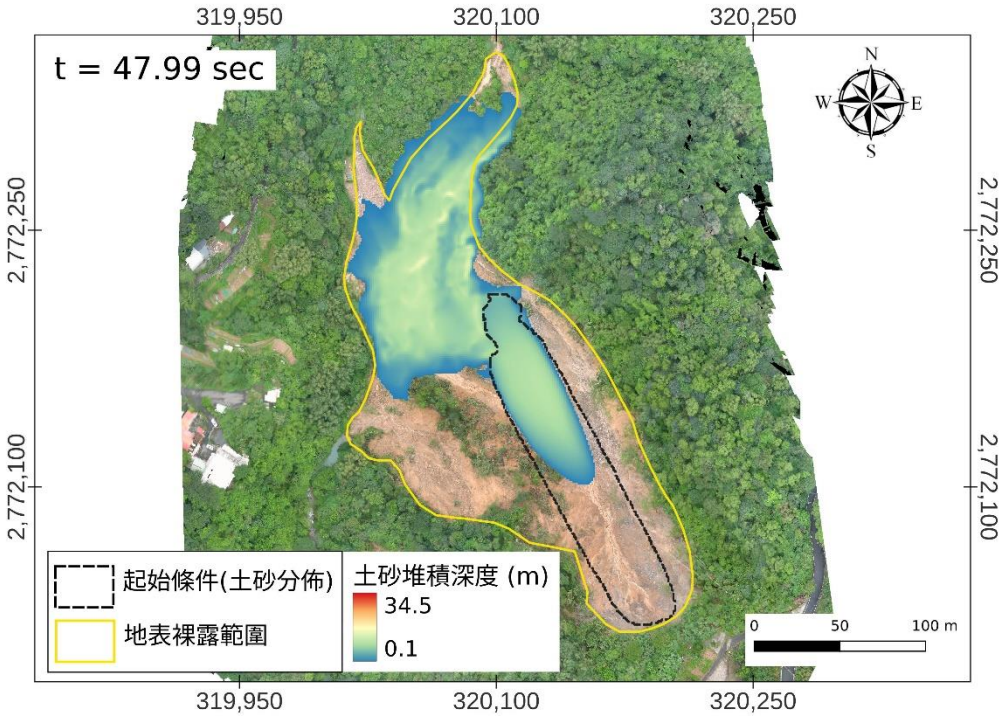


圖 6.8 鵠鵠崙崩塌最合適崩塌曲面之土砂運移行為最終堆積分佈(情境 8)

第七章 災害後續崩崖影響範圍評估

經期中報告審查意見，本團隊已應用研究區域之災後 UAV 產製 DSM 為地形資料以及水土保持局台北分局(2022)所進行現場調查後推估之崩崖分佈作我本案探討後續崩崖之可能影響範圍之基本資料。相較於第五章之“崩塌破壞面推估”因後續崩崖未有明確之崩塌量體，故本案設計應用不同倍數之 Guzzetti et al. (2009)所迴歸之崩塌面積-體積法作為推估崩塌量體之依據，其中本案將規模規模設計成 3 級：小規模(Guzzetti et al., 2009 之 0.5 倍)、一般規模(Guzzetti et al., 2009 之 1.0 倍)以及大規模(Guzzetti et al., 2009 之 2.0 倍)，並應用前述(第五與六章)相同之方法推估研究區域之災害後續影響範圍評估。

因應探討後續崩崖未實際發生滑動，故所應用理想崩塌曲面法推估之崩塌塊體不進行細部結果比較分析，包含推估崩塌深度之 RMS、覆蓋率 等。本章節主要重點為假設理想崩塌曲面法推估之崩塌土體發生滑動後，其土砂運移路徑以及最終堆積深度分佈，因篇幅關係將應用風險地圖方式呈現，其對應只各個情境模擬結果圖請參閱附件四。

第一節　新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域

針對新竹縣尖石鄉 T001 大規模崩塌潛勢區域，本章節應用 2021 年 10 月 14 日 UAV (災害發生日期：2021 年 09 月 13 日) 產製之 DSM 和水保局台北分局(2022)進行現場調查後研判之崩崖分佈作為本案推估後續崩崖造成之土砂影響範圍基本資料。如圖 7.1 所示，彩色變化為 2020 年 10 月 14 日(災害發生時間：2021 年 09 月 13 日)之 UAV 產製 DSM 之高程數據，其解析度為 1m；紫色框為本案模擬範圍；紅線為水保局台北分局(2022)研判之崩崖位置，作為後續設定理想崩塌

曲面起始上邊界點之參考依據；黃色框則應用災後 UAV 正射影像(影像拍攝時間：2021 年 10 月 22 日)，研判地表裸體露範圍，包含崩塌發生區域至最終土砂堆積範圍，作為後續製作土砂運移風險地圖之參考用。

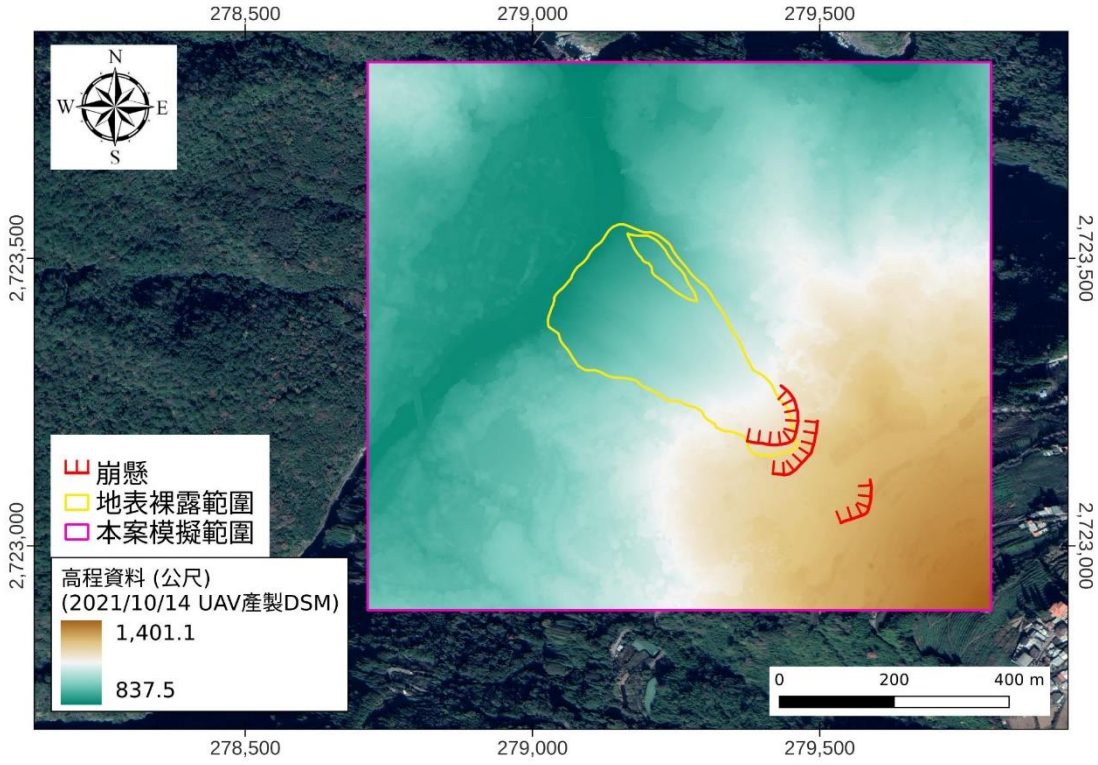


圖 7.1 秀巒崩塌之崩崖分佈

一、 情境設計

經台北分局(2022) 針對 T001 大規模崩塌潛勢區域進行現場調查並繪製崩崖共 3 處，其中後續仍有 2 處崩崖未發生明顯之滑動，因此本案透過前述(第五~六章)提出之崩塌破壞面搜尋方法以及土砂運移模式，推估 T001 大規模崩塌潛勢區域後續崩崖一與二之潛在影響範圍。為了避免遺漏分析，故本案將 GA-ER-ICS 之起始上邊界搜尋點設定於 2 處崩崖上，且其起始下邊界點搜尋點訂定於災前(由 2016 年內政部提供之 DEM)之原河岸處往崩崖方向每 10 公尺設定一組情境進行崩塌破壞面以及土砂影響範圍推估。

由圖 7.2 與 7.3 所示，紅線為 T001 大規模崩塌潛勢區域內之崩崖；各個點代表 GA-ER-ICS 推估之起始搜尋點，其中粉紅色點為上邊界起始搜尋點、由藍色至紅色變化代表不同情境之下左右起始搜尋點，黃框為 2021 年 10 月 14 日 UAV 拍攝之正射影像之地表裸露範圍。

其中後續崩懸一與二至災前原坡水平距離趾為 502 與 644 公尺，因此兩者情境數量為水平距離之 1/3 處於 10，分別為 18 ($\frac{502\text{ m}}{3} = 167.33\text{ m}$) 以及 23 ($\frac{644\text{ m}}{3} = 214.67\text{ m}$) 組。

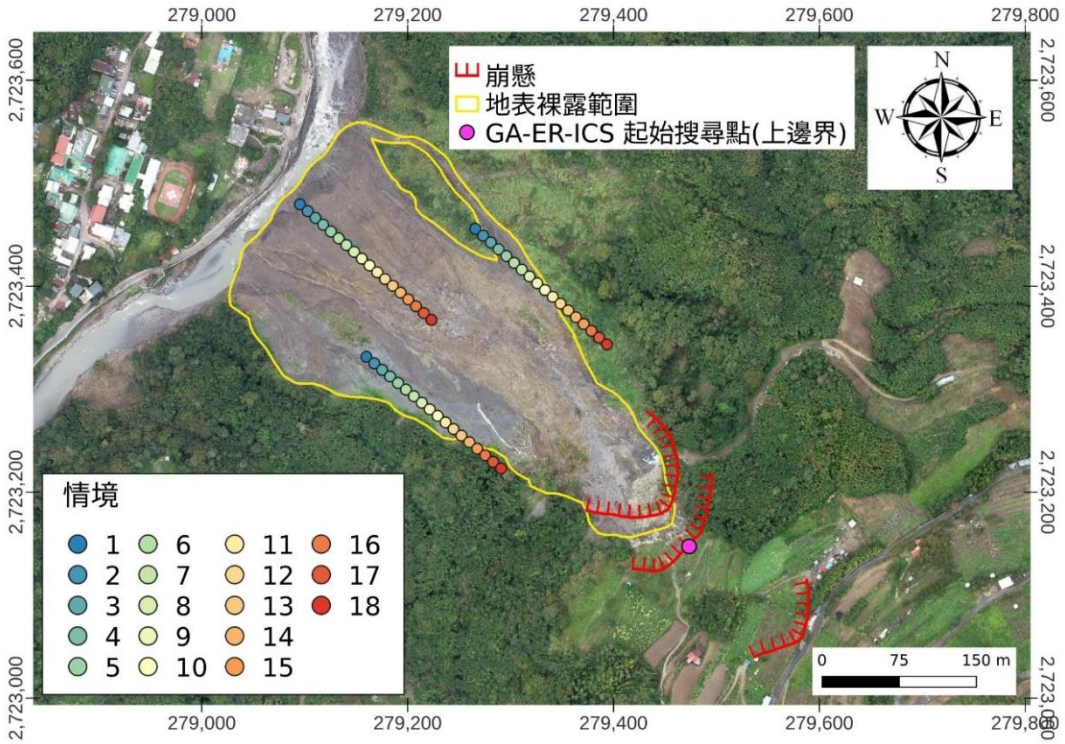


圖 7.2 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸一情境設定圖

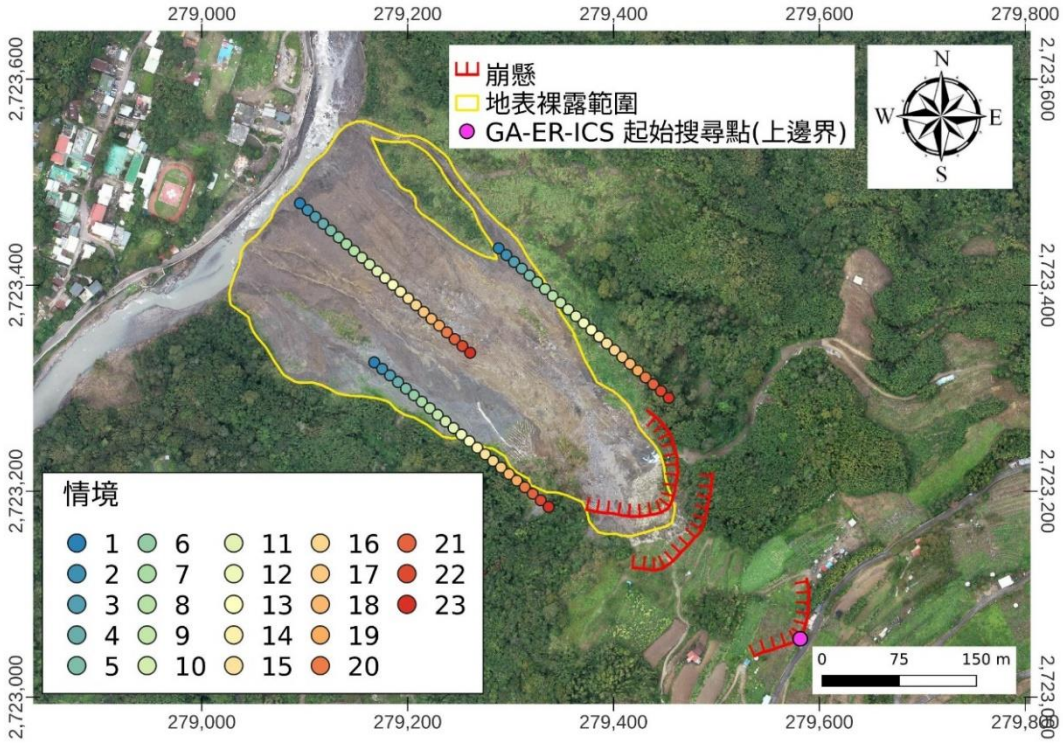


圖 7.3 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸二情境設定圖

二、 後續崩崖對應之影響範圍

本案所提之方法在於依據現場調查之崩崖分佈快速評估可能之崩塌範圍，因未發生明顯之滑動現象，造成評估崩塌量體存在高度的不確定性。最終本案透過 Guzzetti et al. (2009)提出之面積-體積回歸經驗式快速評估可能之崩塌量體，所設計之 3 種情境(如 0.5 倍代表小規模、1.0 倍代表一般規模以及 2.0 倍代表大規模)在於儘可能涵蓋其大部分的可能性，作為後續崩崖可能對應災害之參考。

經理想崩塌曲面法推估之可能崩塌土體將搭配第五章第一節中秀巒 T001 大規模崩塌所使用之原參數組(秀巒參數組 A)以及重新檢視並調整之參數組(秀巒參數組 B)，進行後續土砂影響範圍推估。如圖 7.4 至 7.9 為應用秀巒參數組 A 推估不同情境量體之後續崩崖可能造成之土砂影響範圍風險圖以及圖 7.10 至 7.15 為應用秀巒參數組 B

推估不同情境量體之後續崩崖可能造成之土砂影響範圍風險圖，經本案一系列之崩塌破壞面以及後續土砂影響範圍推估結果，最終將流動深大於 0.1 m 以及流速大於 0.1 m/s 定義為影響範圍，繪製本案所設計之不同規模尺度之崩塌土體造成之土砂運移路徑重疊風險地圖。

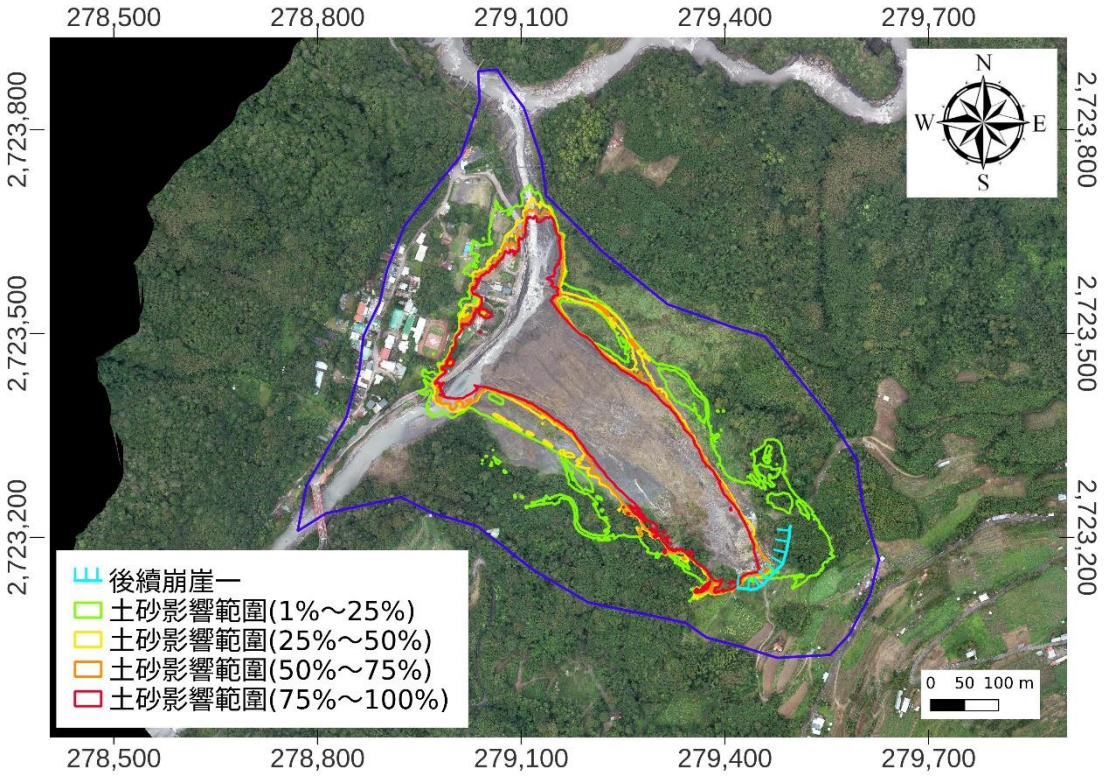


圖 7.4 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 A 及 0.5 倍)之風險地圖

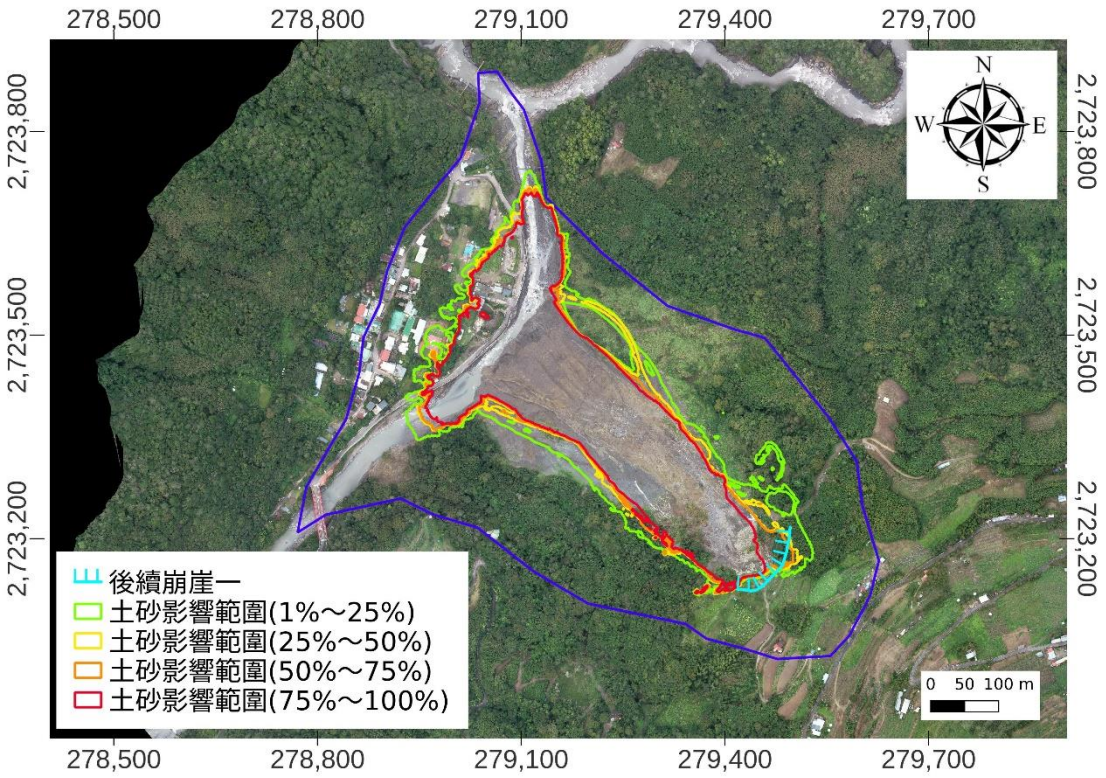


圖 7.5 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 A 及 1.0 倍)之風險地圖

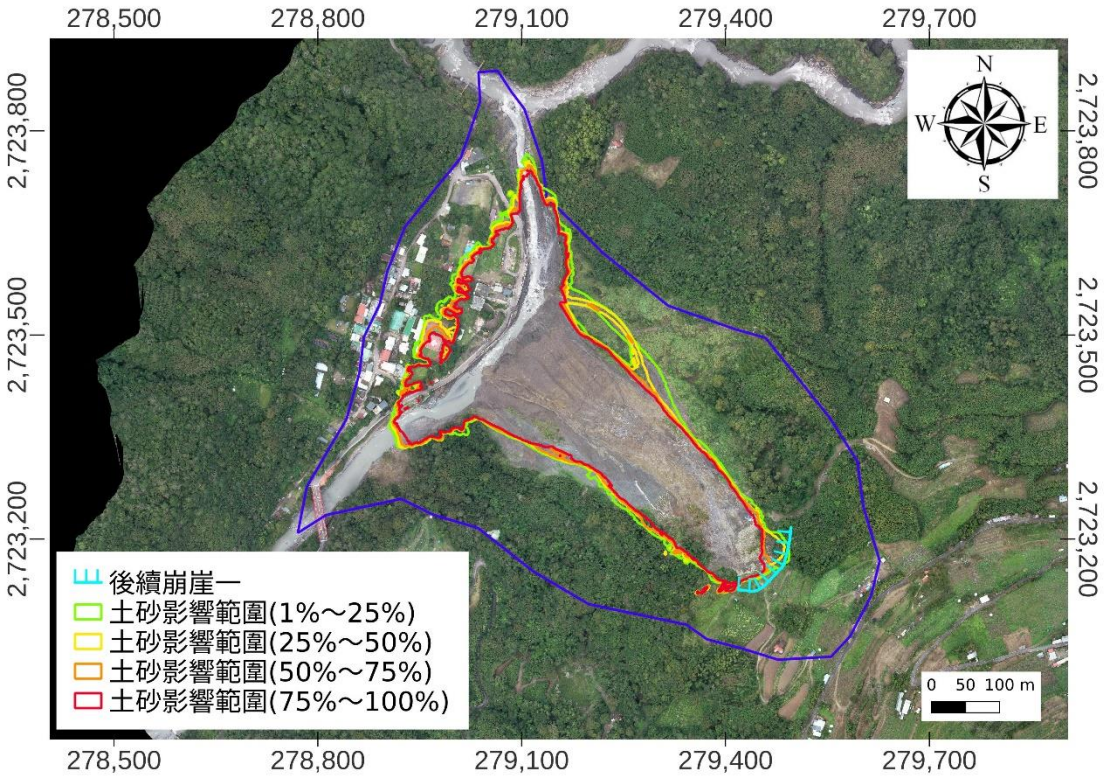


圖 7.6 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 A 及 2.0 倍)之風險地圖

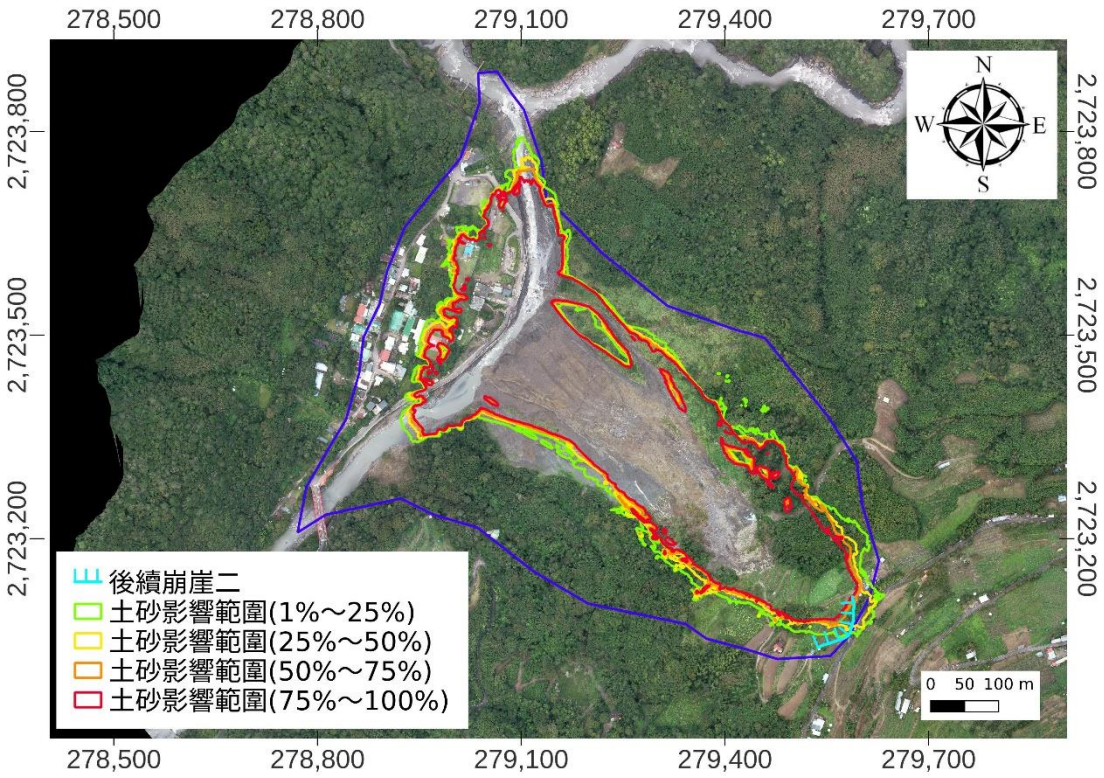


圖 7.7 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 A 及 0.5 倍)之風險地圖

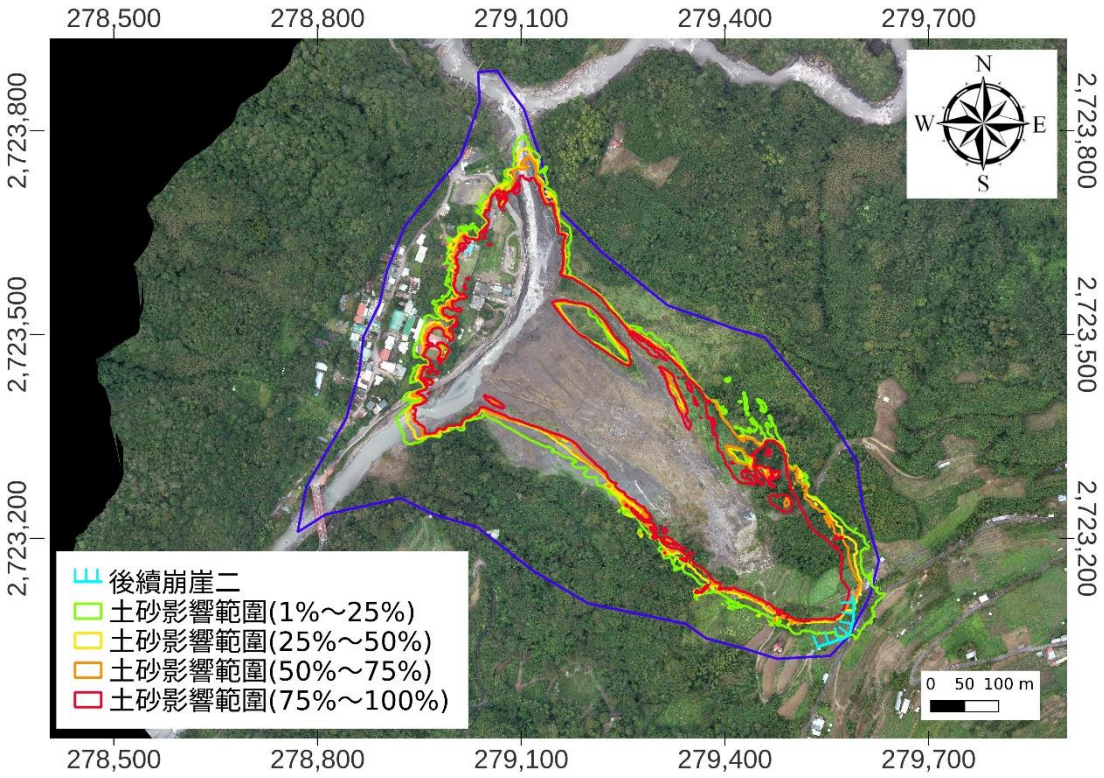


圖 7.8 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 A 及 1.0 倍)之風險地圖

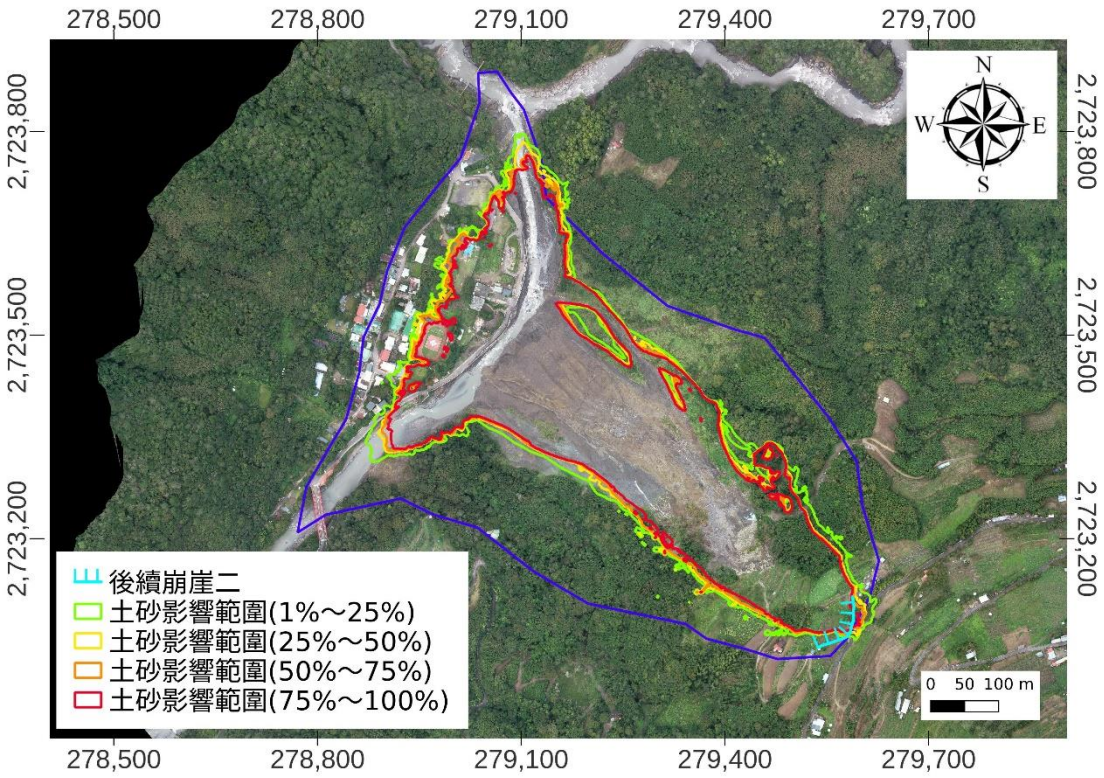


圖 7.9 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 A 及 2.0 倍)之風險地圖

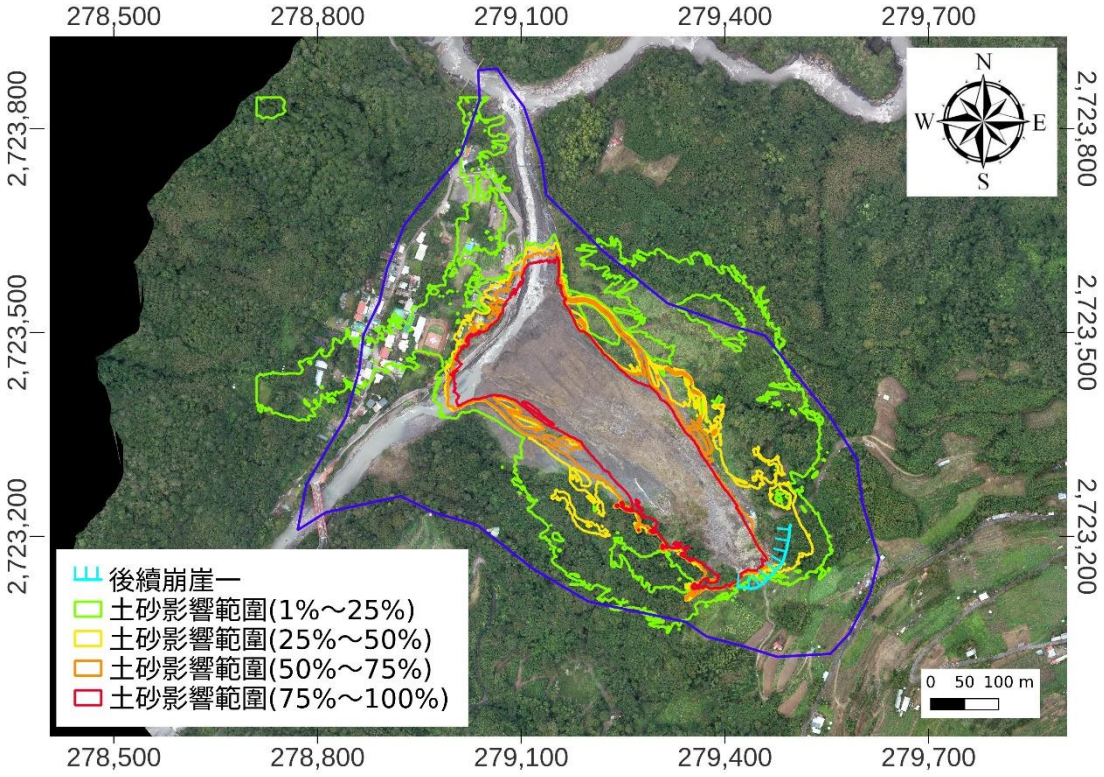


圖 7.10 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 B 及 0.5 倍)之風險地圖

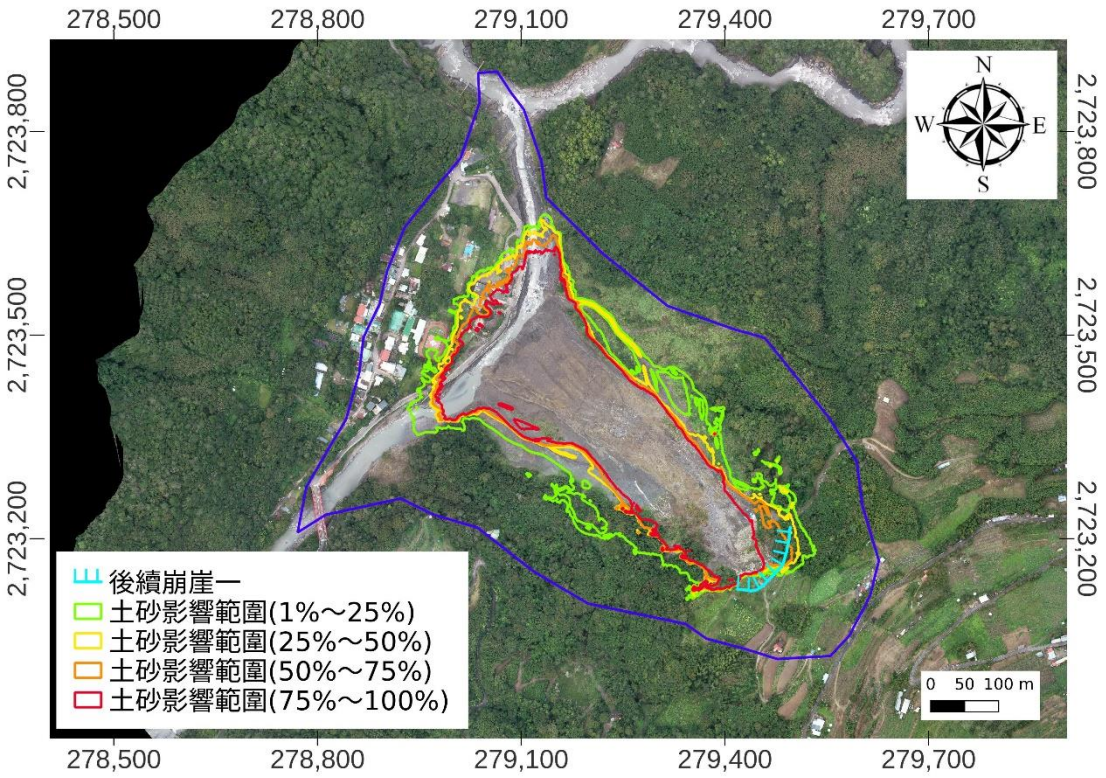


圖 7.11 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 B 及 1.0 倍)之風險地圖

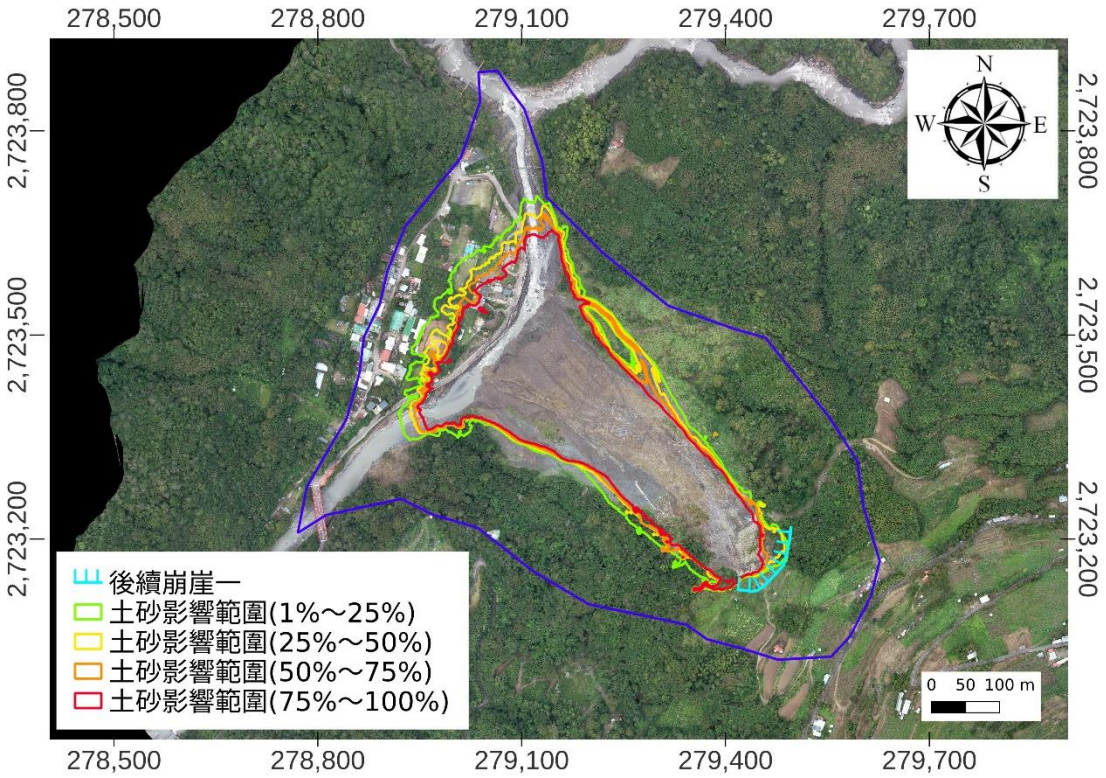


圖 7.12 秀巒後續崩崖一(秀巒參數組 B 及 2.0 倍)之風險地圖

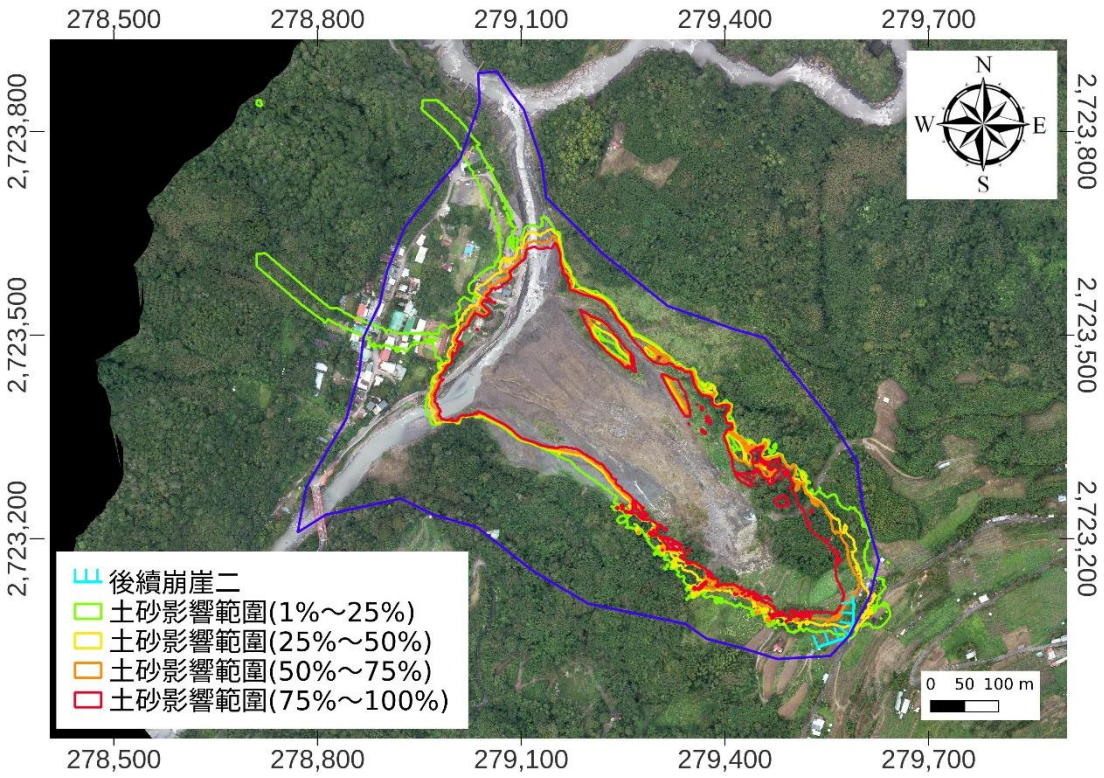


圖 7.13 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 B 及 0.5 倍)之風險地圖

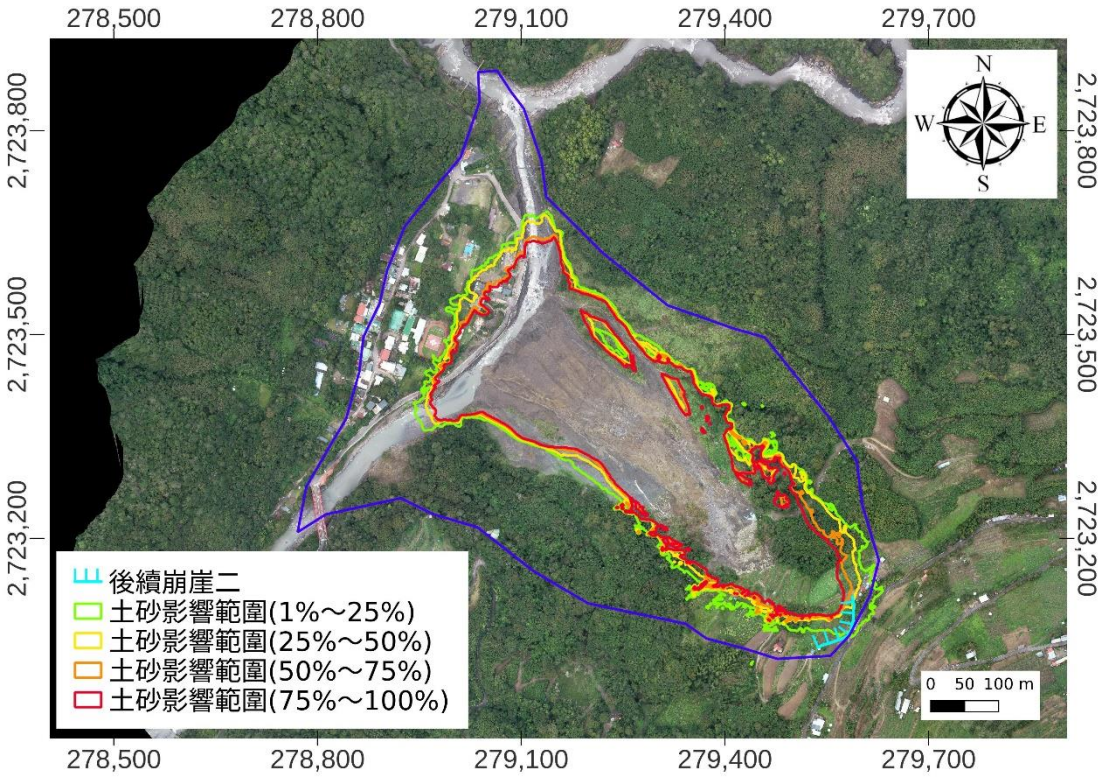


圖 7.14 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 B 及 1.0 倍)之風險地圖

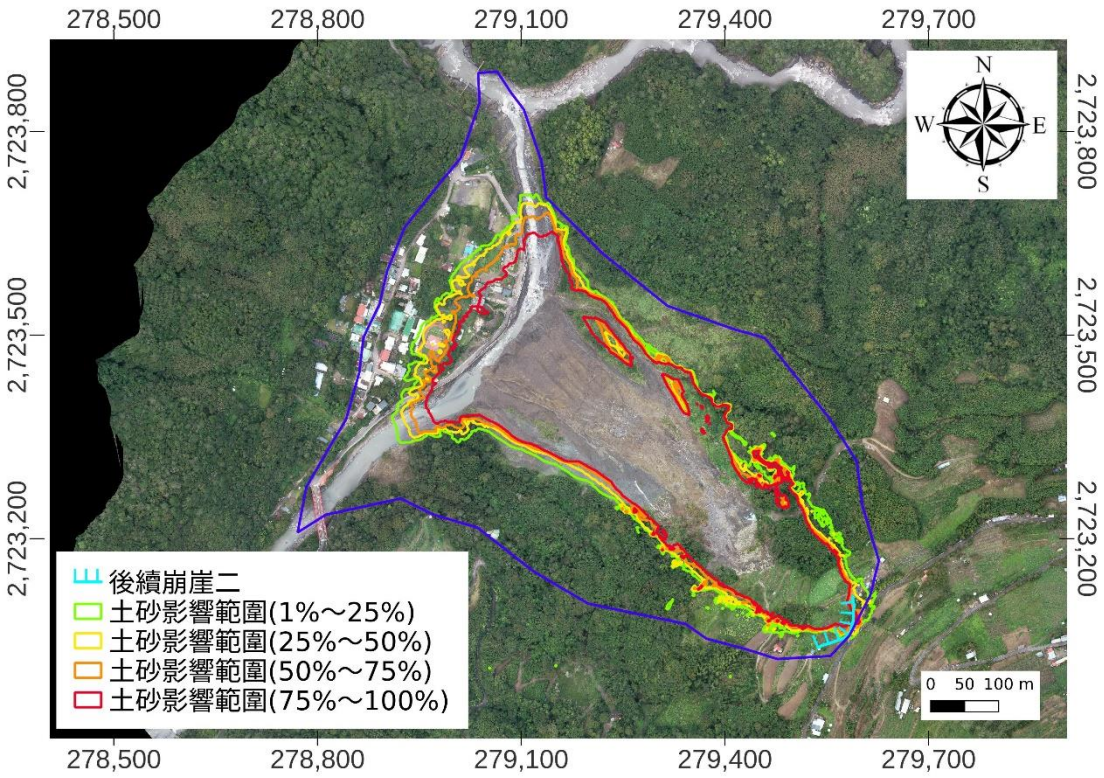


圖 7.15 秀巒後續崩崖二(秀巒參數組 B 及 2.0 倍)之風險地圖

第二節　新北市-汐止區-D003 大規模崩塌潛勢區域

針對新北市 D003 大規模崩塌潛勢區域，本章節應用 2022 年 10 月 20 日 UAV 產製之 DSM 和水保局台北分局(2022)進行現場調查後研判之崩崖分佈作為本案推估後續崩崖造成之土砂影響範圍基本資料。如圖 7.16 所示，彩色變化為 2022 年 10 月 20 日(災害發生時間：2022 年 10 月 17 日)之 UAV 產製 DSM 之高程數據，其解析度為 1m；紫色框為本案模擬範圍；紅線為水保局台北分局(2022)研判之崩崖位置，作為後續設定理想崩塌曲面起始上邊界點之參考依據；黃色框則應用災後 UAV 正射影像(影像拍攝時間：2021 年 10 月 22 日)，研判地表裸體露範圍，包含崩塌發生區域至最終土砂堆積範圍，作為後續製作土砂運移風險地圖之參考用。

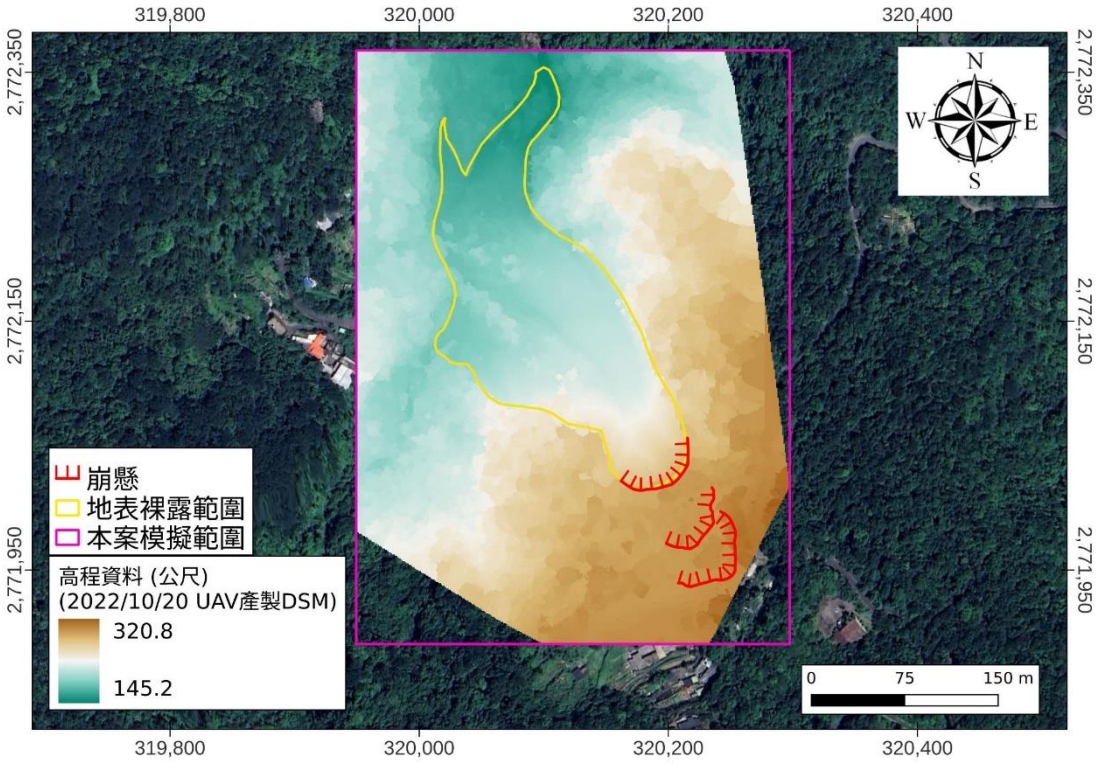


圖 7.16 鵠鵠崙崩塌之崩崖分佈

一、 情境設計

經台北分局(2022)針對 D003 大規模崩塌潛勢區域進行現場調查並繪製崩崖共 3 處，其中後續仍有 2 處崩崖未發生明顯之滑動，因此本案透過前述(第五~六章)提出之崩塌破壞面搜尋方法以及土砂運移模式，推估 D003 大規模崩塌潛勢區域後續崩崖一與二之潛在影響範圍。為了避免遺漏分析，故本案將 GA-ER-ICS 之起始上邊界搜尋點設定於 2 處崩崖上，且其起始下邊界點搜尋點訂定於災前(由 2014 年內政部提供之 DEM)之原河岸處往崩崖方向每 5 公尺設定一組情境進行崩塌破壞面以及土砂影響範圍推估，其中相較於秀巒情境間距設定之 10 公尺，此設計之差異主要來自 D003 大規模崩塌之河道較蜿蜒，故將情境間隔縮小一半進行推估。

由圖 7.17 與 7.18 所示，紅線為 T001 大規模崩塌潛勢區域內之崩崖；各個點代表 GA-ER-ICS 推估之起始搜尋點，其中粉紅色點為上

邊界起始搜尋點、由藍色至紅色變化代表不同情境之下左右起始搜尋點，黃框為 2022 年 10 月 20 日 UAV 拍攝之正射影像之地表裸露範圍。

其中後續崩懸一與二至災前原坡水平距離趾為 265 與 292 公尺，因此兩者情境數量為水平距離之 1/3 處於 5，分別為 18 ($\frac{265\ \mathrm{m}}{3} = 88.33\ \mathrm{m}$) 以及 21 ($\frac{292\ \mathrm{m}}{3} = 97.33\ \mathrm{m}$) 組。

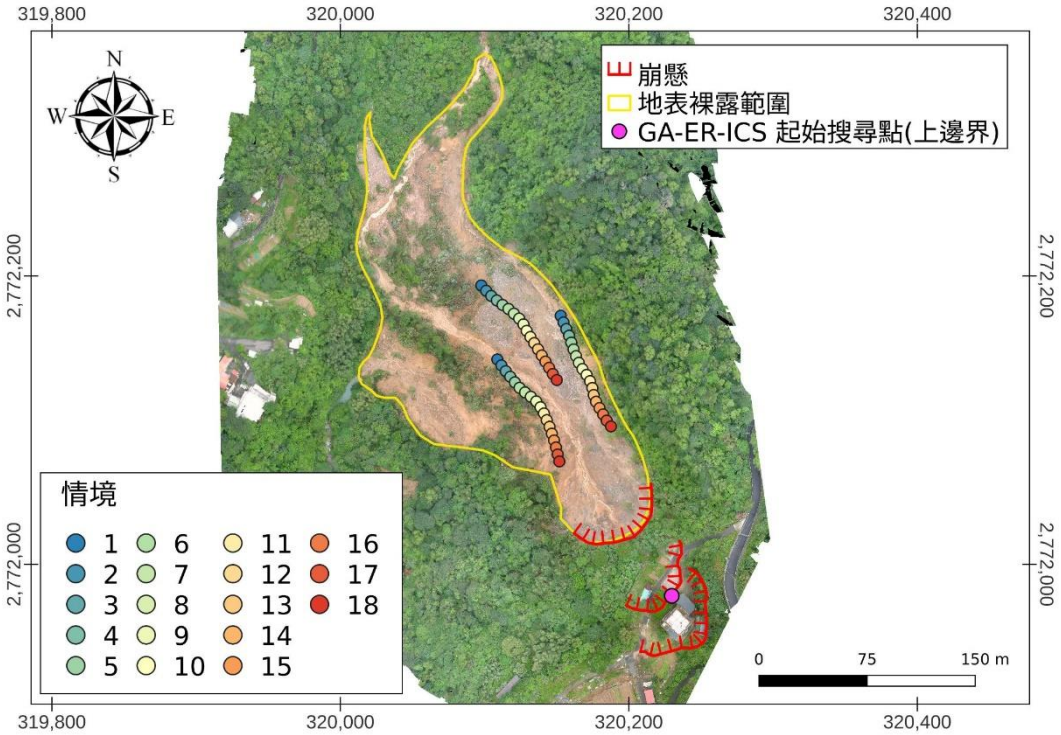


圖 7.17 鵠鵠崙 D003 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸一情境設定圖

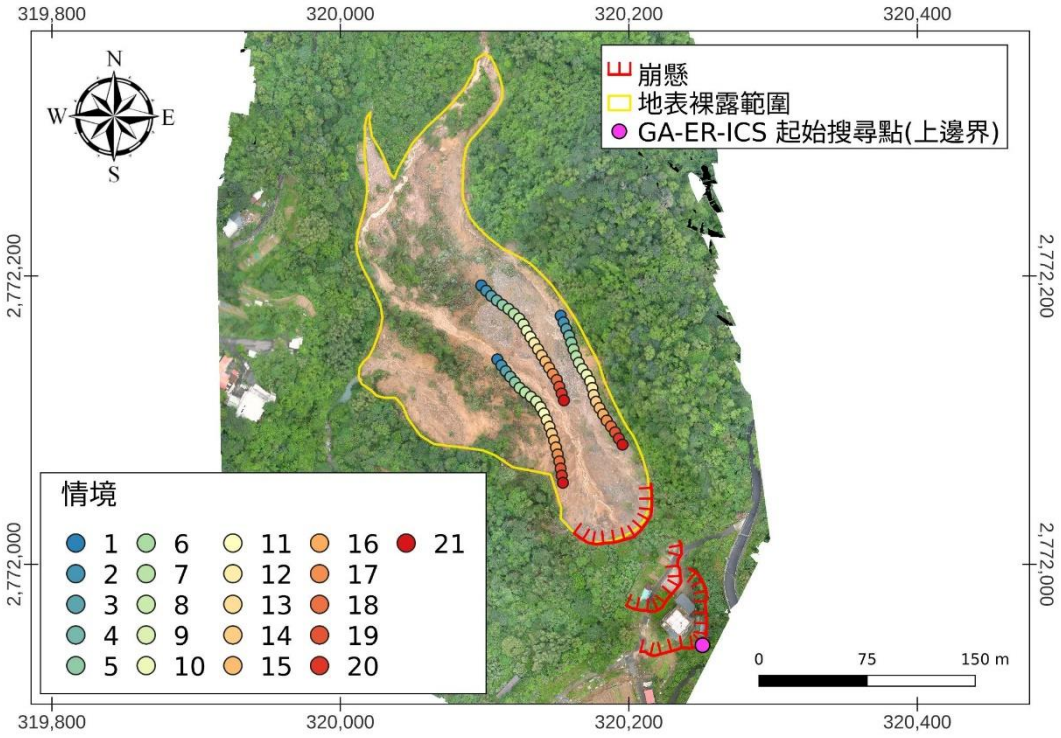


圖 7.18 鵠鵠崙 D003 大規模崩塌潛勢區域之後續崩懸二情境設定圖

二、 後續崩崖對應之影響範圍

因後續崩崖一與二未有明顯之滑動情況，而大家主要關切若發生滑動後其影響範圍。除此，本案依據 Guzzetti et al., 2009 迴歸之崩塌面積-體積法規劃 3 種情境等級，包含 0.5 倍代表小規模、1.0 倍代表一般規模以及 2.0 倍代表大規模作為理想崩塌曲面法推估之參考依據。經理想崩塌曲面法推估之可能崩塌土體搭配第五章第二節中鵠鵠崙 D003 大規模崩塌所使用之參數組，進行後續土砂影響範圍推估。

如圖 7.19 至 7.21 為後續崩崖一以及圖 7.22 至 7.24 為後續崩崖二之土砂運移風險圖，經本案一系列之崩塌破壞面以及後續土砂影響範圍推估結果，最終將流動深大於 0.1 m 以及流速大於 0.1 m/s 範圍定義為影響範圍，繪製本案所設計之不同規模尺度之崩塌土體造成之土砂運移流經路徑重疊風險地圖。

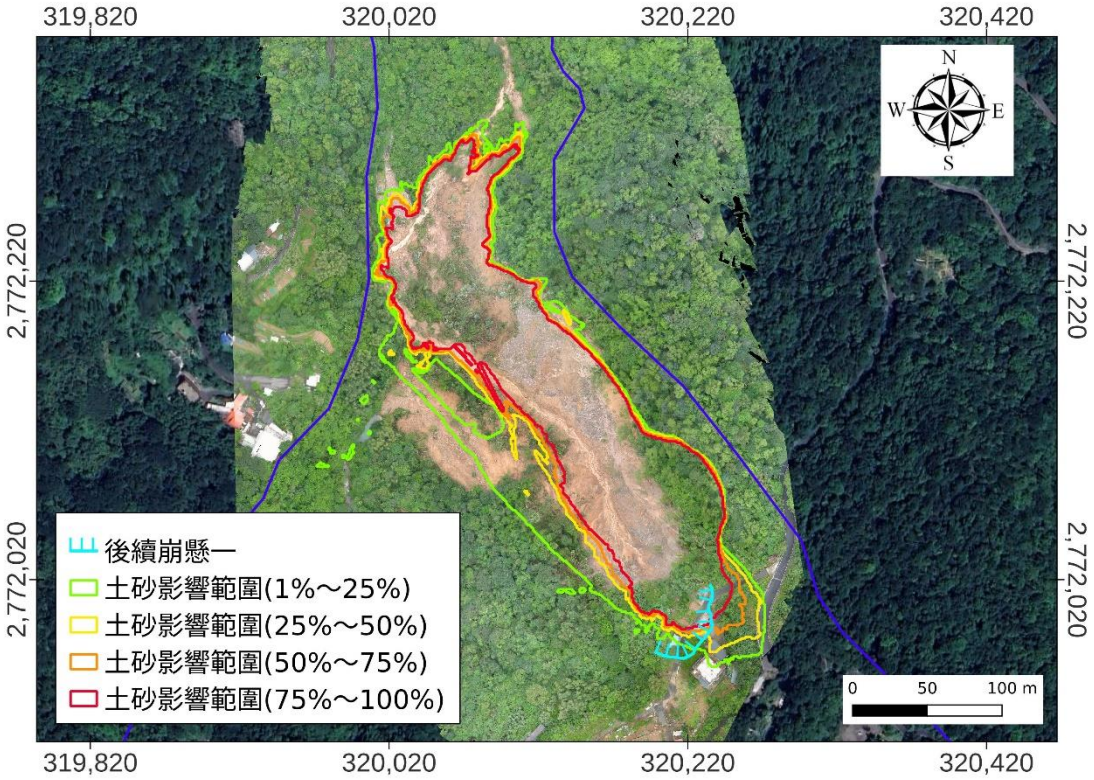


圖 7.19 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一(0.5 倍)之風險地圖

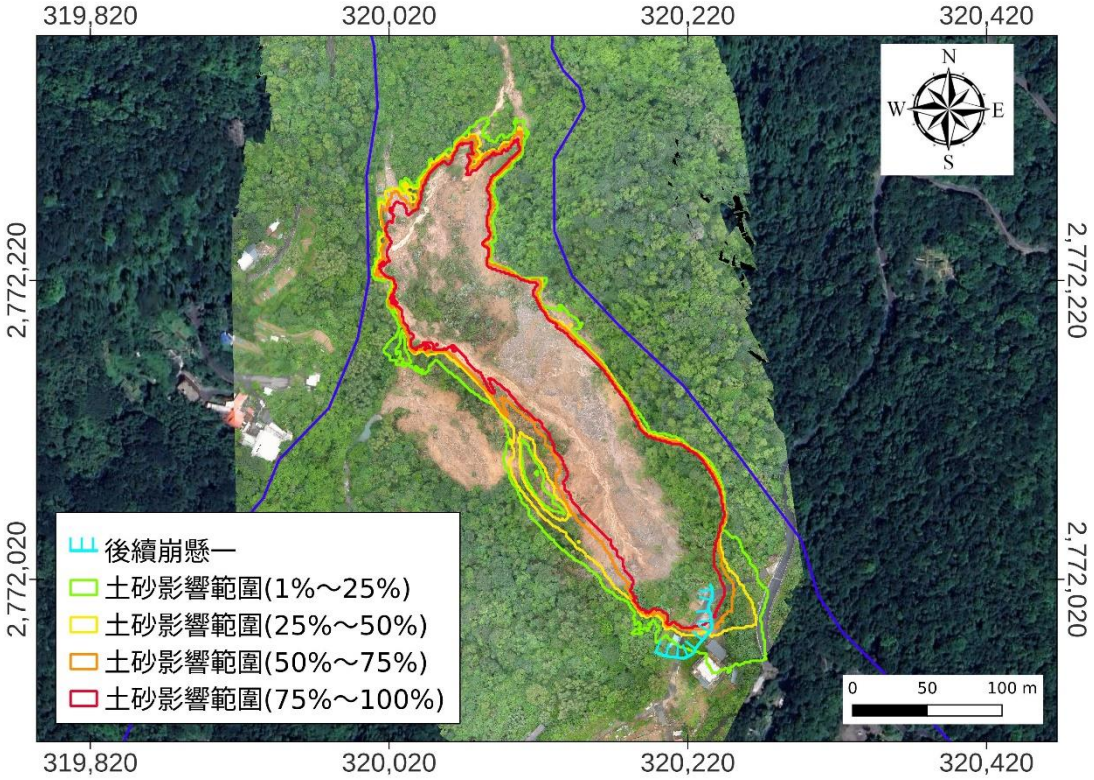


圖 7.20 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一(1.0 倍)之風險地圖

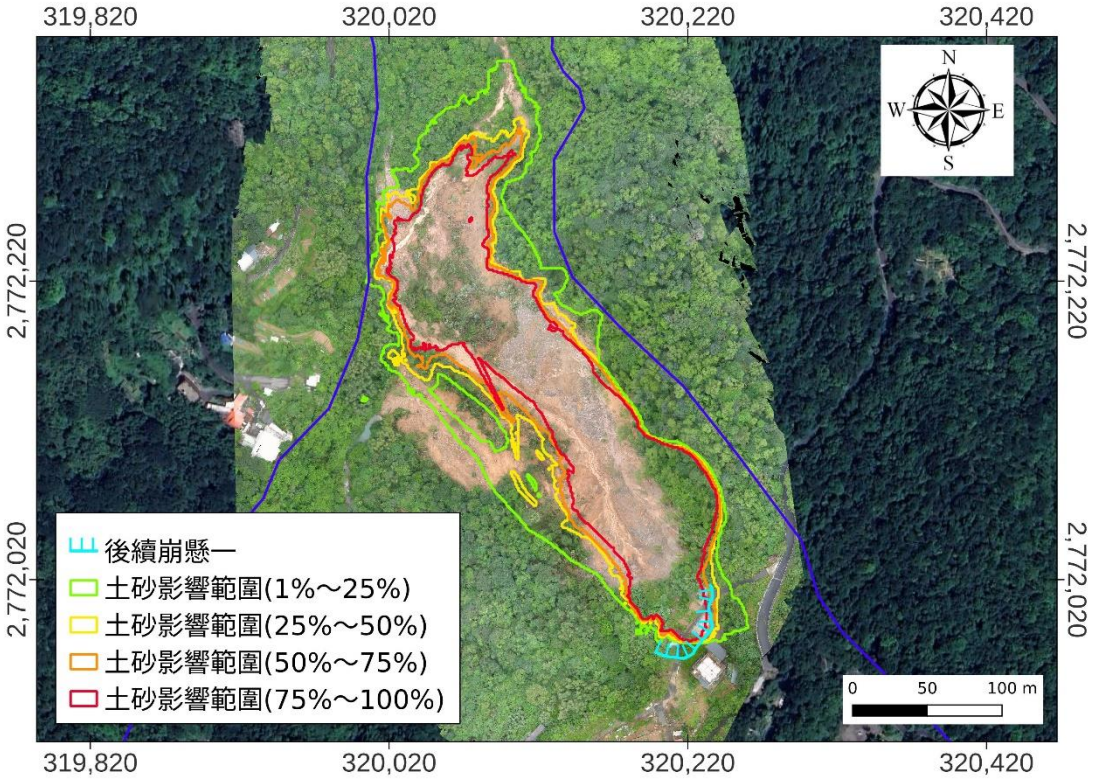


圖 7.21 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一(2.0 倍)之風險地圖

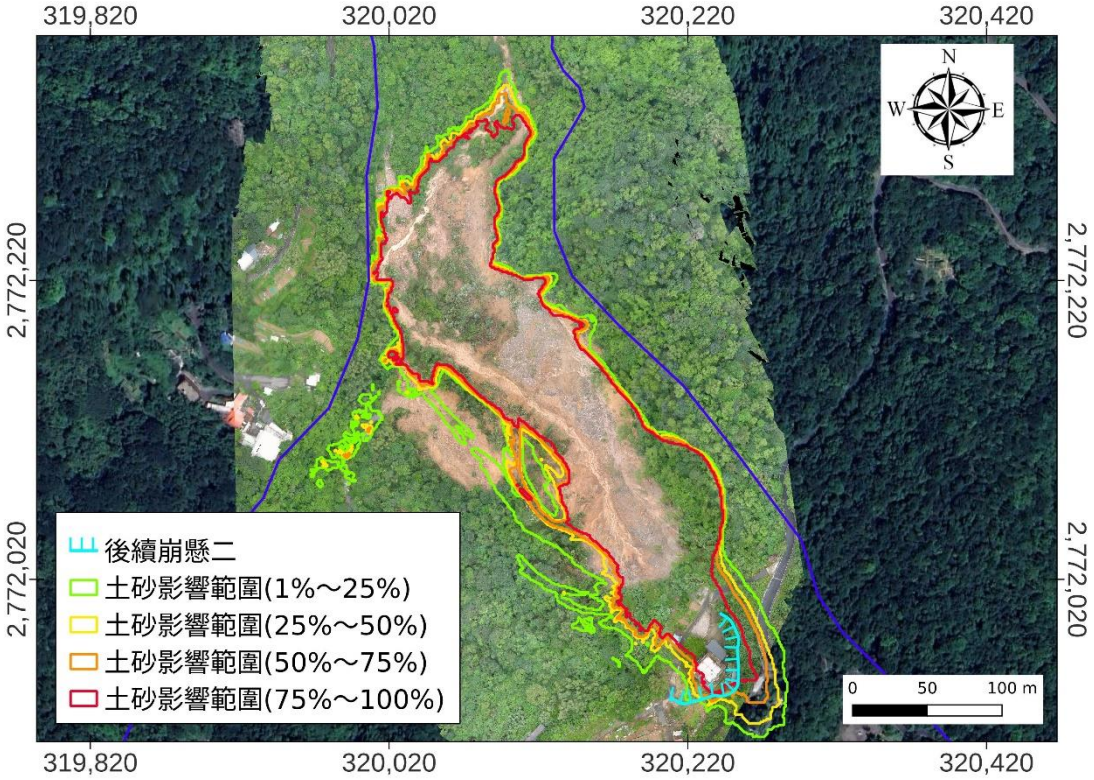


圖 7.22 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二(0.5 倍)之風險地圖

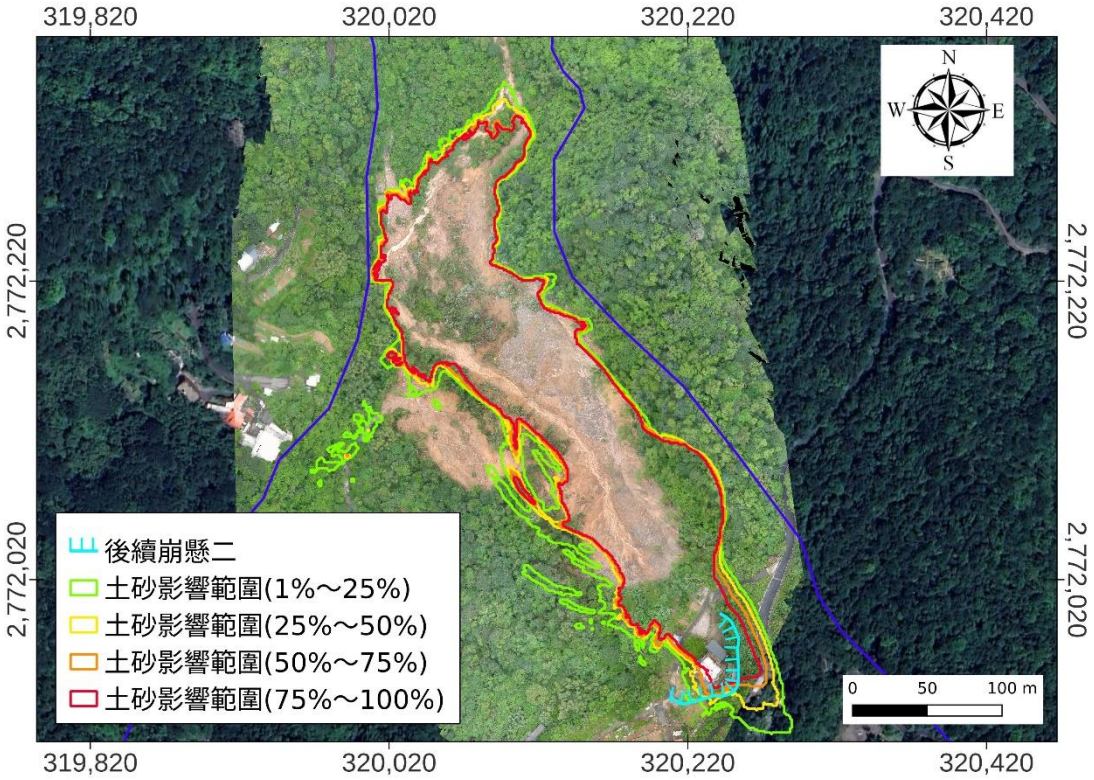


圖 7.23 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二(1.0 倍)之風險地圖

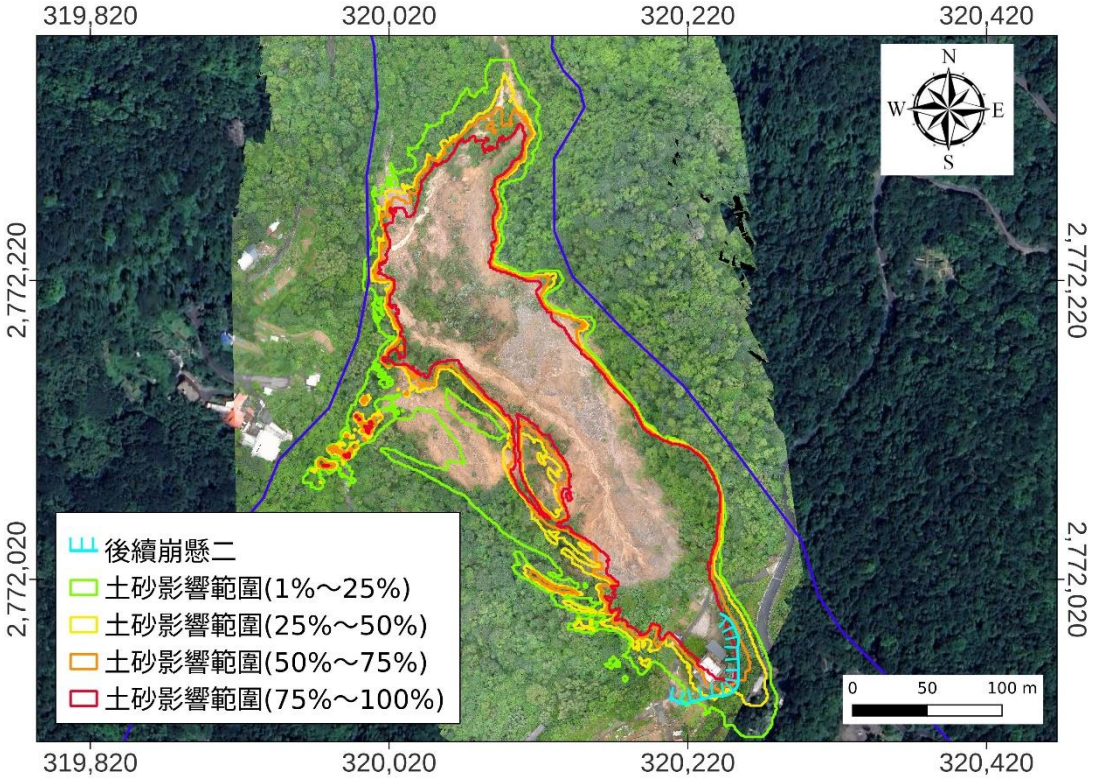


圖 7.24 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二(2.0 倍)之風險地圖

第三節　與水保署公開資料比較

除了依據不同尺度規模之崩塌土體繪製土砂運移影響範圍風險地圖外，本案也參考水保署 BigGIS 網頁上公開之大規模崩塌潛勢區域與匯整後之不同後續崩崖之土砂運移影響範圍風險地圖進行呈現。

圖 7.25 至 7.28 為本案匯整不同後續崩崖之全部情境所繪製之土砂運移風險地圖，其中藍框為水保署於 BigGIS 網頁公開之大規模崩塌潛勢區域範圍。目前經過本案推估後續崩崖之土砂運移影響範圍風險圖可見，大部分所之影響範圍都落在水保署研判之大規模崩塌潛勢範圍(藍框)內，除了秀巒之後續崩崖二(圖 7.20)因最短距離僅 2 m 左右，造成推估影響範圍時，1%~25%情境之推估土砂影響範圍邊界有超過潛勢區域最遠距離約 20 m 的狀況。

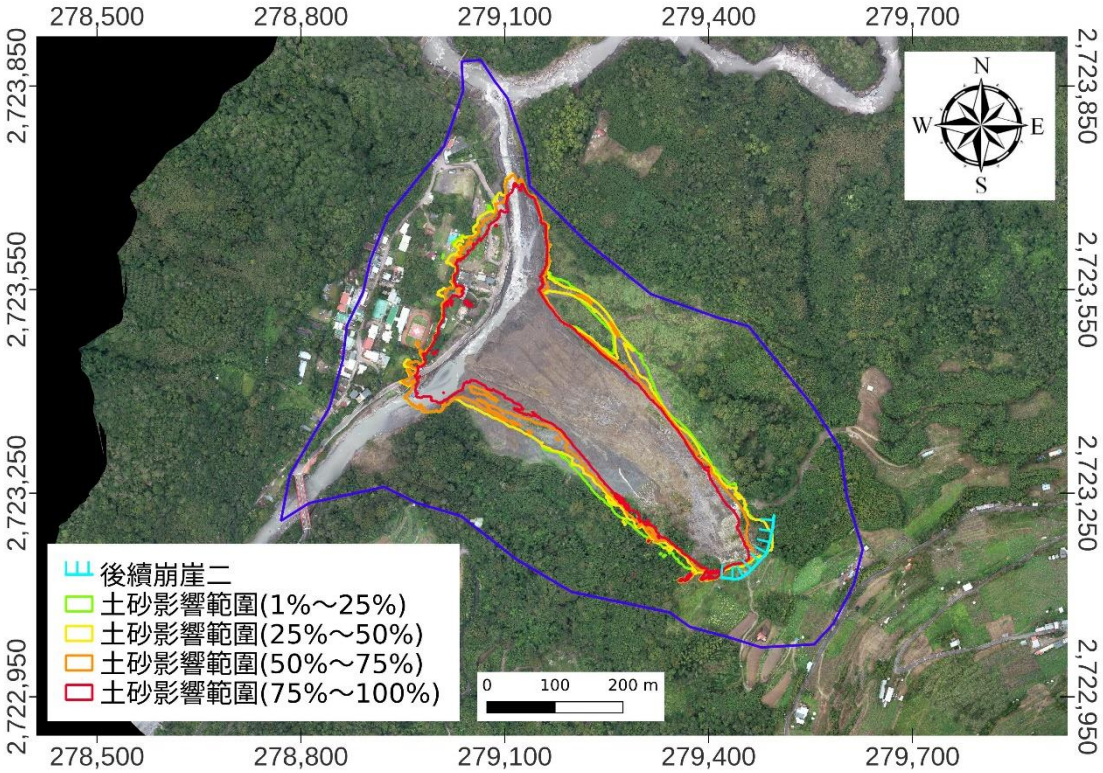


圖 7.25 秀巒崩塌後續崩崖一全部情境之土砂運移風險地圖

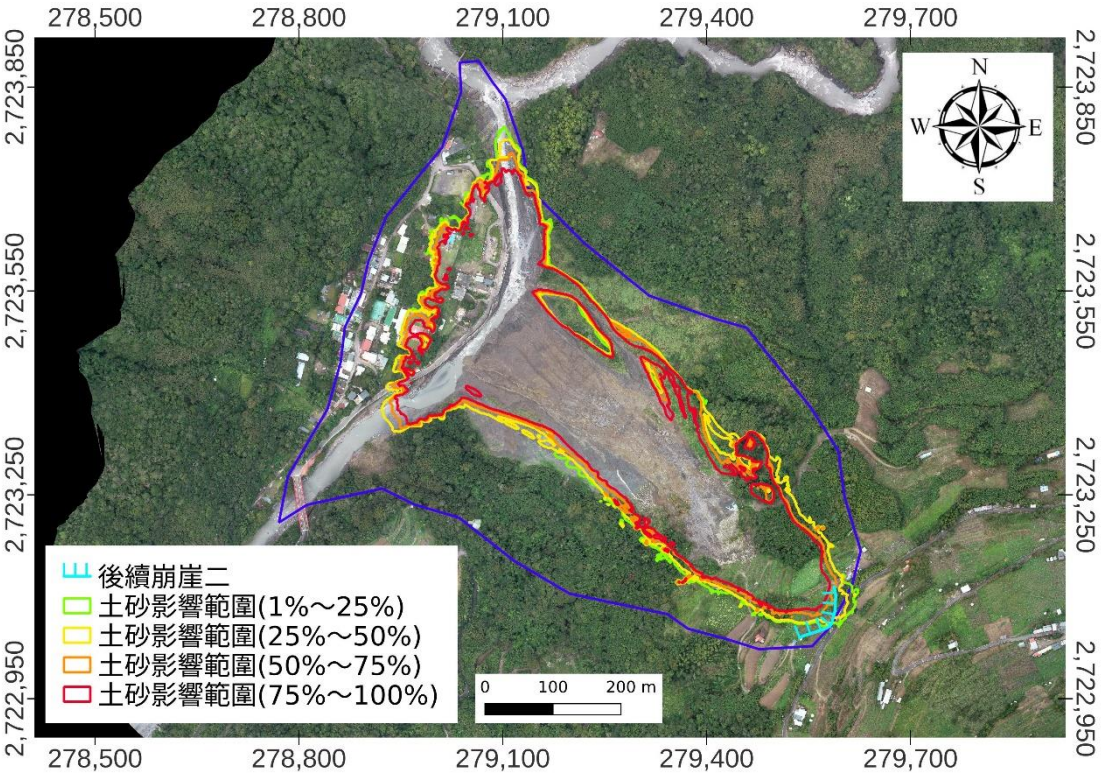


圖 7.26 秀巒崩塌後續崩崖二全部情境之土砂運移風險地圖

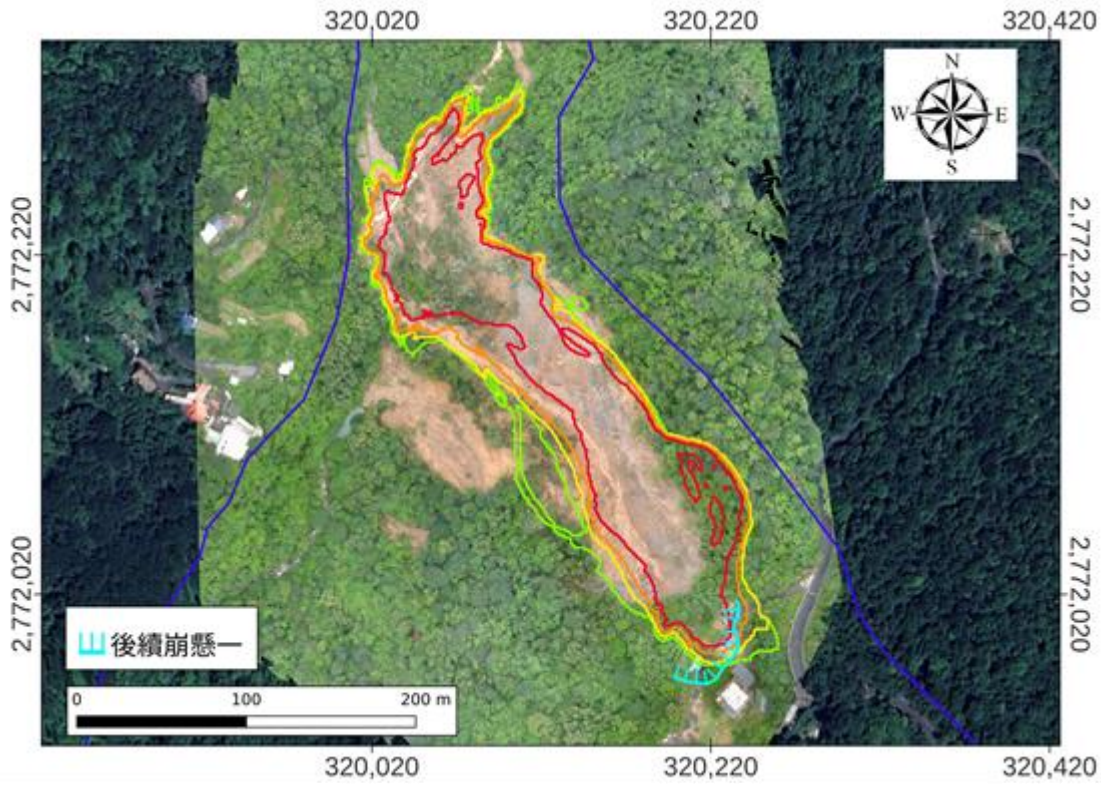


圖 7.27 鵠鵠崙崩塌後續崩崖一全部情境之土砂運移風險地圖

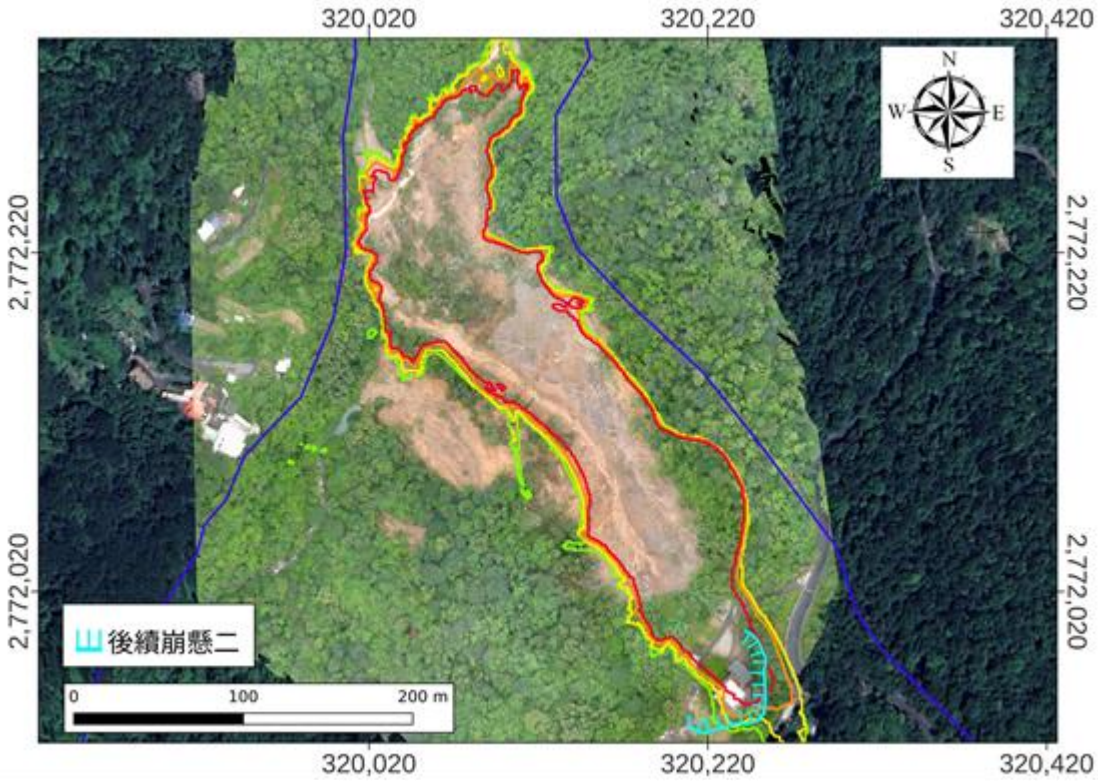


圖 7.28 鵠鵠崙崩塌後續崩崖二全部情境之土砂運移風險地圖

第八章 結論與建議

依本案初擬之工作預定期程，至繳交成果報告書階段皆依研擬之預訂期程確實執行。本案所使用災害前後期數值地形資料皆由內政部地政司提供之2014年鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區域與2016年秀巒大規模崩塌潛勢區域之 LiDAR-based DEM (災前)，與農業部農村發展及水土保持署發展之多元遙測影像申購模組提供之 2021 年 10 月 14 日秀巒大規模崩塌以及 2022 年 10 月 20 日鵠鵠崙大規模崩塌之災後 UAV 數值地形資料(DSM)與正射影像作為本案基本資料。本案已完成工作項目及內容，簡述如下：

第一節　結論

一、工作項目一(崩塌破壞面推估)：

- 已完成延伸應用 Wang et al. (2022) 發展之 GA-ER-ICS 搭配本案規畫之情境 (起始搜尋點) 建置 2021 年秀巒崩塌事件與 2022 年鵠鵠崙崩塌事件之可能崩塌破壞面，以及兩處研究區域之後續崩崖可能崩塌破壞面推估。
- 另推估未發生明確滑動之後續崩崖造成之影響範圍存在高度不確定性，因此透過面積−體積回歸經驗式快速評估可能之崩塌量體，所設計之 3 種情境(0.5 倍、1.0 倍以及 2.0 倍)在於儘可能涵蓋其大部分的可能性，作為後續崩崖可能對應災害之參考。

二、工作項目二(土砂影響範圍推估)：

- 已完成延伸應用 Tai et al. (2019) 發展之土砂運移行為模式，搭配參考 Tai et al. (2019) 與 Ma et al. (2022) 使用之參數組進

行調整後推估本案研究區域各情境土砂影響範圍。

- 本案依據 Rickenmann (2005) 與 Hürlimann et al. (2008) 建議之基準值 (流動深度大於 0.40 公尺與流速大於 0.4 m/s)，另也以流動深度大於 0.10 公尺與流速大於 0.1 m/s 之基準重新繪製影響範圍；而參考 RAMMS (2017) 使用之手冊建議，本案模式終止條件(動量比 1% ~ 10%)則是採用中值 (= 5%)。
- 針對 2021 年秀巒崩塌事件，經本案重新檢視參數組(秀巒參數組 B)後，所推估結果與現場狀況相符處(大部分崩塌土體仍然停留於原坡趾處，只有小部分的土砂覆蓋至秀巒道路上)；而 2022 年鵠鵠崙崩塌事件之影響範圍推估結果呈現大部分崩塌土體堆積於下游之土石流潛勢溪流上也與現地狀況相符。
- 針對推估後續崩崖之土砂影響範圍時，本案發現秀巒後續崩崖二之結果顯示當土砂影響範圍重疊率介於 1%~25%之情境有超過原水保署公開之潛勢大規模崩塌範圍最遠距離約 20 m 的狀況，其餘結果都落在水保署公告之潛勢範圍內。

三、 篩選最合適理想崩塌曲面法(ICS)：

- 針對實際崩塌事件，本案透過水土保持局臺北分局 (2021) 與水保局技研小組 (地質年會，2023) 之協助取得崩塌量體、災害後之地形差異值與範圍作為本案評估因子之參考依據。
- 諸多情境中，其所產製之理想崩塌破壞曲面以 2021 年秀巒崩塌事件之情境 14 以及 2022 年鵠鵠崙崩塌事件之情境 8，其後續所對應之土砂堆積狀況最為接近相符。

第二節　建議與未來展望

依據本案現階段之成果，其建議與展望分別說明如下：

一、　因理想崩塌曲面法乃依據 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，其與實際地表高程之差異易造成土砂運移行為模擬時之誤差。故未來當內政部 LiDAR-derived DEM 已更新鵠鵠崙 D003 大規模崩塌潛勢區域後，可再重複此處之土砂影響服務推估，進而取得更精確之推估結果。

二、　在分析 2021 年秀巒大規模崩塌事件之影響範圍時，發現所使用之災前(LiDAR-derived) DEM 並不包含秀巒道路旁的提防，易造成評估模擬時的誤差，建議未來可考慮將現場之保全工法(如堤防高程)納入評估模擬影響範圍之因素。

三、　經本案探討之 2022 年鵠鵠崙崩塌事件，發現其地表裸露或土砂影響範圍無法只以單一崩塌塊體進行推估。透過災害前後期數值地形資料分析比較，顯示地表變化分佈發現可能涉及兩塊或兩塊以上之滑動塊體所造成，因此未來可精進此方法，考量數塊崩塌塊體之理想破壞曲面法以及其後續影響範圍之評估方法。

表 8.1　本案之工作項目與各期進度表

工作項目 \ 月份	112 年											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
一、崩塌破壞面推估		■	■	■	■	■	■	■	■	■		
二、土砂影響範圍推估		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
三、篩選最佳理想崩塌曲面		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
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112年2月08日至112年12月31日 止
- 期中報告書完成工作:(一)初步建置與探討秀巒崩塌事件、(二)初步建置與探討鳴鵠崙崩塌事件
- 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，如委托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局 台北分局，110 年度鎮西堡、秀巒及泰崗地區潛在大規模崩塌調查監測計畫，2021。
2. 行政院農業委員會水土保持局 台北分局，111-112 年度鎮西堡、秀巒、泰崗及梅花地區潛在大規模崩塌調查監測計畫(1/2)，2022。
3. 行政院農業委員會水土保持局 台北分局，111 年度鵠鵠崙地區潛在大規模崩塌調查監測計畫，2022。
4. 行政院農業委員會水土保持局 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。
5. 行政院農業委員會水土保持局 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. J. L. Briaud,「Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils.」 *John Wiley & Sons*, 2013.
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. 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)
19. 「RAMMS: Debris Flow User Manual」, SLF/WSL: Zurich, Switzerland, 2017; pp. 18–116.
20. 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.
21. D. Rickenmann,「Hangmuren and Gefahrenbeurteilung — Kurzbericht für das Bundesamt für Wasser und Geologie.」 Unpublished report, Universität für Bodenkultur, Wien, und Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 18p, 2005.
22. A. E. Scheidegger,「On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides.」 *Rock mechanics*, 5(4), 231-236, 1973.
23. K. Schraml, B. Thomschitz, B. W. McArdell, C. Grafand R. Kaitna.「Modeling debris-flow runout patterns on two alpine fans with different dynamic simulation models.」 *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(7), 1483-1492, 2015.
24. Y.C. Tai, J. Heβ and Y. Wang,「Two-Phase Debris Flow over Rugged Topography: Modeling and Numerical Simulation.」*Journal of Geophysical Research -- Earth Surface*, 124, 305-333, 2019.
25. 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.

26. 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.
27. 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.

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

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	大規模崩塌量體的推估，國內外有許多不同的經驗公式，目前國內大規模崩塌潛勢區是用LIDAR圈繪，其滑動面深度絕大多數未知，突顯本研究課題重要。唯國內在莫拉克颱風事件中，真的有許多崩塌案例的崩塌量體是符合大規模崩塌量體定義的，因此如果能夠針對這些案例加以研判分析找出，作為本研究課題驗証的基礎，是值得努力的方向之一。	感謝！參考意見2建議，現階段本案執行秀巒與鵠鵠崙崩塌事件作為探討案例。後續若有其他合適之案例或地點，可一併列入作為研究對象。
二	2022/10/17~18尼莎颱風造成汐止鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區之崩滑案例，也建議用本研究已有的方法學或國內外的經驗公式進行校核驗証與評析。	感謝寶貴建議！本案於3月下旬發文提出申請，並於5月24日取得災前LiDAR-based DEM以及5月26日取得災後UAV產製DSM與其正射影像。
三	請加強實施方法與步驟之內容呈現。	已補充說明方法與步驟，請參閱期中報告第二章第一與二節。
四	請加強說明預期成果之實用性及方法之限制條件。	已補充說明，請參閱期中報告書第二章表2.1(限制條件)與第八章第一節(結論中說明其實用性)。
五	經過研究團隊近年努力，已成功發展崩塌理想曲面及其量體演算法，並可透過土砂運移行為模式評估崩塌土體可能之影響範圍，作為災害評估。本項研究課題對水保局未來業務推動甚為重要。	感謝！

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	本計畫預定探討之高度不確定性崩塌潛勢區域，其可能崩塌滑動面、土砂運移影響範圍，亦為現階段亟待開發之關鍵技術，將有助於未來更多災害情境分析、評估。	感謝！

附錄二 期中審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	本案積極回應審查意見，將2022/10/17~18 尼莎颱風造成汐止鵂鶹崙大規模崩塌潛勢區(新北市汐止區-D003)之崩滑案例，納入研究而且已經有具體成果，十分值得肯定。	感謝委員肯定！
二	對於未來情境模擬的部份，除了已經建置 2021 年秀巒與 2022 年鵂鶹崙崩塌事件之崩塌破壞面與其後續影響範圍推估的成果值得肯定外，根據現地調查此兩案例的冠部以上仍有張裂縫及小崖的存在，如能以這些張裂縫及小崖為界，進一步推估其後退漸進式滑動破壞的破壞面與其後續影響範圍推估，那就更具防災風險評估的實用意義了。	感謝建議！於期末報告初稿新增第七章“災害後續崩崖影響範圍評估”，應用災後 UAV 產製 DSM 地形資料作為地形資料，並參考水保局台北分局(2022)所研判之崩崖分佈，推估後續可能之崩塌破壞面與其後續影響範圍。最終應用風險地圖的方式呈現所設計情境之結果。
三	本計畫可加強研究結果與實務防災應用之鏈結，如何將研究成果以簡顯易懂方式呈現推估資訊，供在地基層村里長或自主防災組織判讀，亦是後續可努力方向。	感謝提議！本團隊將與水保署密切洽談可行方案。
四	本計畫研究結果可持續與本署公開之大規模崩塌潛勢區影響範圍圖資做比較，並提供後續影響範圍調查作業參考。	感謝建議！於期末報告第七章第三節增加與水保署公告之大規模崩塌潛勢區域的比較說明。
五	有關第五章、第六章、第七章所設定之情境為何種情境？請補充說明情境設定之相關概念。	感謝提醒！已於期末報告書初稿第二章 2-10 頁中補充圖 2.8 並說明。

附錄二 期中審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	為因應機關組織改造，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/)。	感謝提醒！已依據意見進行修正期末報告書之封面以及內文。

附錄三 期末審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	目前採用動量比 1～10%，是否可在細分為適用於大塊體崩塌或細粒料崩塌，再請說明。	依據 RAMMS (2017) 使用手冊，模式停止條件並無考量混合物之粒徑大小，然而 Schraml et al. (2015)曾以中值粒徑 80 mm 應用 RAMMS 重現奧地利 Reiselehnrinne 溪流之土石流事件，並發現當停止動量比為 10%時，其成果比較符合現地量測狀況。依據本團隊之經驗，大塊體崩塌或細粒料崩塌所衍生之議題應與模式中之參數較為相關，而與動量比(停止運算之時間點)無關。
二	體積法設計 3 種(災害規模)等級之情境，包含小量體(0.5 倍)、一般量體(1.0 倍)以及大量體(2.0 倍)，要如何決定選用何種等級之情境？	本案所提之方法在於依據現場調查之崩崖分佈快速評估可能之崩塌範圍，充滿高度的不確定性，因此透過面積−體積回歸經驗式快速評估可能之崩塌量體，所設計之 3 種情境在於儘可能涵蓋其大部分的可能性，作為後續崩崖可能對應災害之參考。
三	本案目前有流動深 0.4 及流速 0.4m/s 繪製影響範圍，因大規模崩塌深度為 10m 以上，是否較適用於淺層崩塌？再請補充說明。	以流動深 0.4 m 及流速 0.4 m/s 為基準繪製影響範圍主要源自 Rickenmann (2005)以及 Hürlimann et al. (2008) 針對土石流災害影響範圍的建議值。為使評估基準一致，本案亦沿用此基準。本團隊所使用之數值模式基本上並不受此限制，也將流動深 0.1 m 及流速 0.1 m/s 為基準所繪製影響範圍附加於第 5 章。(請參閱圖 5.59 至 5.96)

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	本計畫產出破壞曲面及量體，建議針對影響範圍內之保全工法，納入結論及建議，擴大研究。	感謝建議！已將此提議列入成果報告書之建議內，未來本案可嘗試將現場之保全工法(如堤防高程)納入影響範圍之推估，使得所推估結果可以更加符合現場狀況。
五	推估出秀巒影響範圍結果，其下邊坡處有空洞處出現，其原因為何？	本案是依據 Rickenmann (2005) 與 Hürlimann et al. (2008)之建議，以流動深 0.4 m 及流速 0.4 m/s 為基準繪製影響範圍，空洞處為代表該區域流動深度小於 0.4 m 或是與流動速度小於 0.4 m/s 範圍。為使分析更周延，本案亦提供以流動深 0.1 m 及流速 0.1 m/s 為基準繪製影響範圍(請參閱成果報告書第五章第三節)。
六	本研究方法適用地質及面積大小為何？	本案所採用之理想曲面法主要目的在現地資料不充足的前提下，快速評估可能崩塌量體，並搭配 Tai et al. (2019)土砂運移模式推估後續可能影響範圍。因此現階段不考慮地質條件或是地下水文條件。體積則借助 Guzzetti et al. (2009)之面積-體積回歸經驗式，其所考慮之崩塌面積涵蓋 2.1 m^2 至 7.0×10^7 m^2。依此推論，面積 20 m^2 至 1.0×10^7 m^2 況下均應屬適用範圍(PS 以 2009 年發生之小林村崩塌事件為例，其主崩塌土體面積約 6.25×10^5 m^2)。

附錄四 各情境最終土砂堆積分佈圖

2021 年秀巒崩塌案例

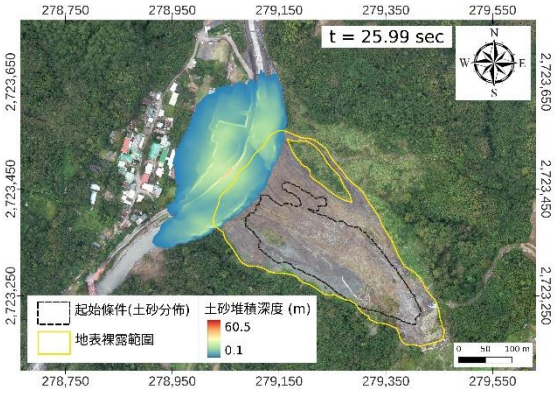


圖 附 4-1 最終土砂堆積分佈(情境 1)

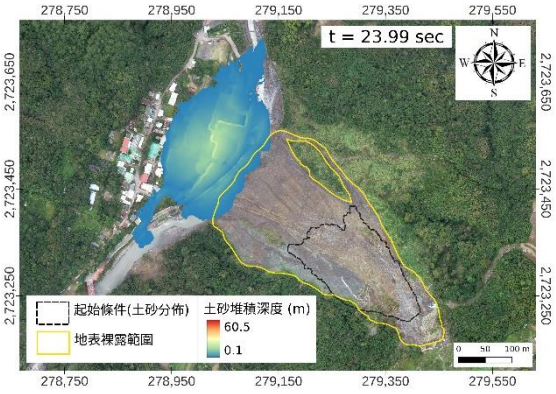


圖 附 4-2 最終土砂堆積分佈(情境 2)

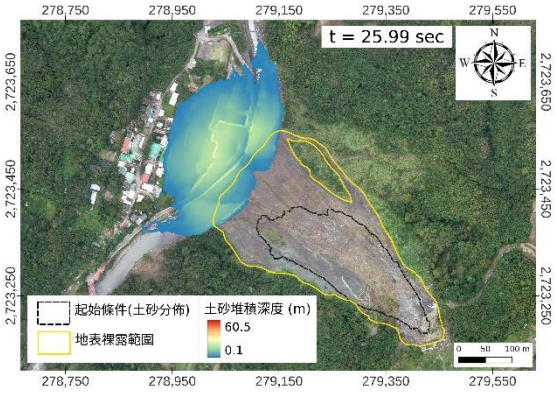


圖 附 4-3 最終土砂堆積分佈(情境 3)

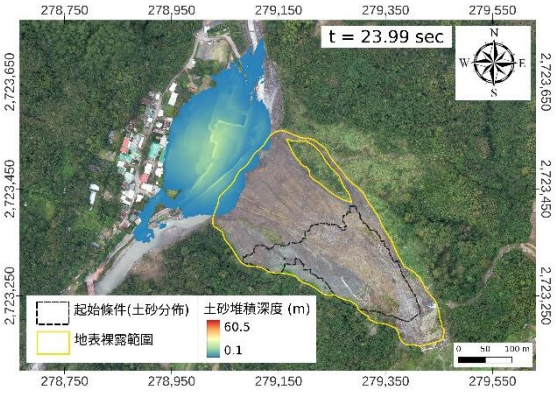


圖 附 4-4 最終土砂堆積分佈(情境 4)

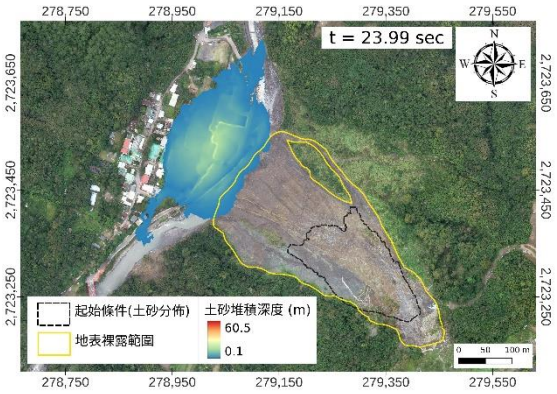


圖 附 4-5 最終土砂堆積分佈(情境 5)

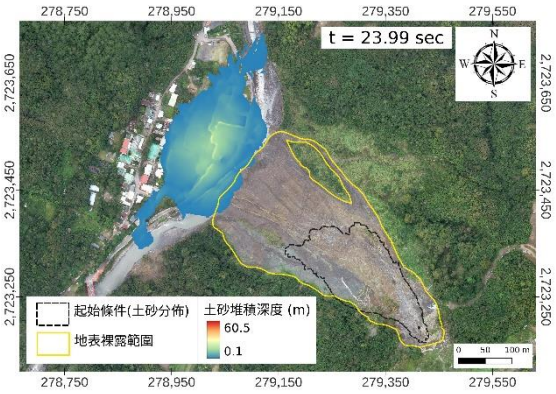


圖 附 4-6 最終土砂堆積分佈(情境 6)

附錄四 各情境最終土砂堆積分佈圖

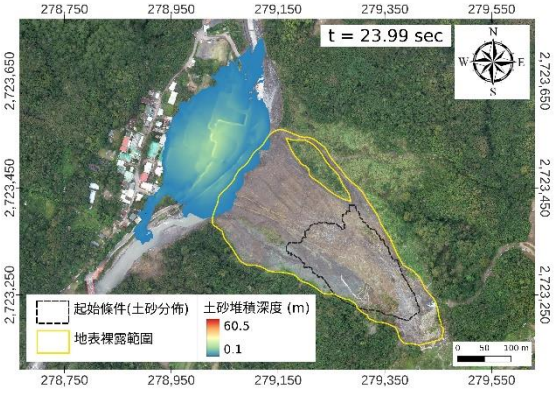


圖 附 4-7 最終土砂堆積分佈(情境 7)

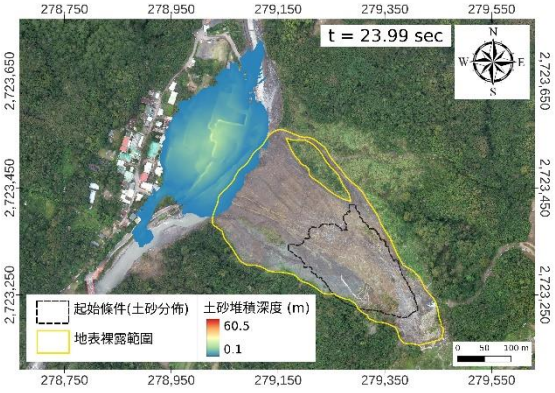


圖 附 4-8 最終土砂堆積分佈(情境 8)

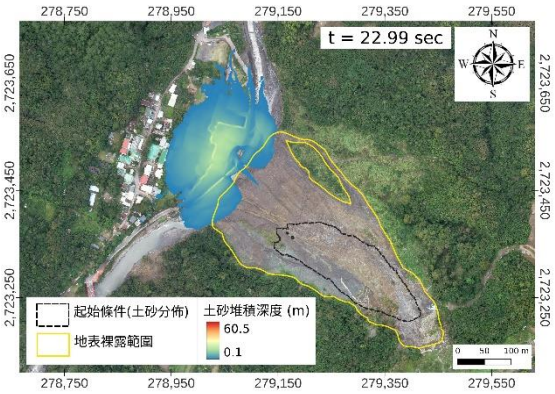


圖 附 4-9 最終土砂堆積分佈(情境 9)

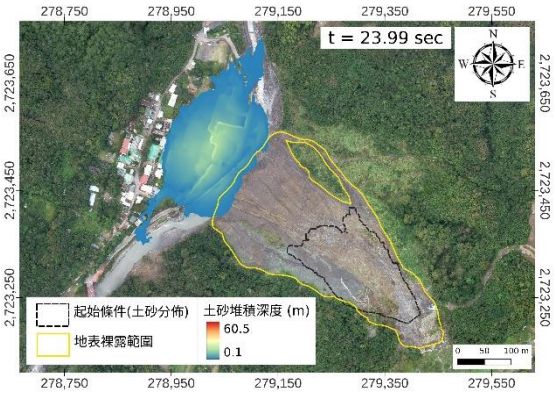


圖 附 4-10 最終土砂堆積分佈(情境 10)

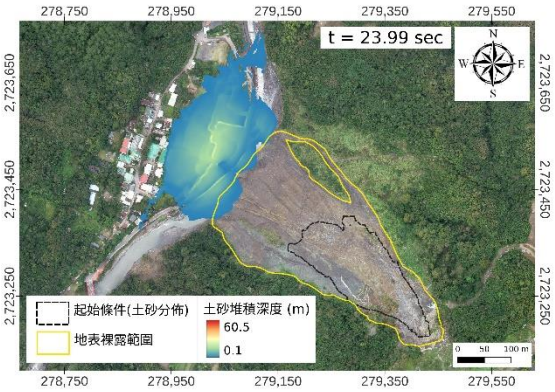


圖 附 4-11 最終土砂堆積分佈(情境 11)

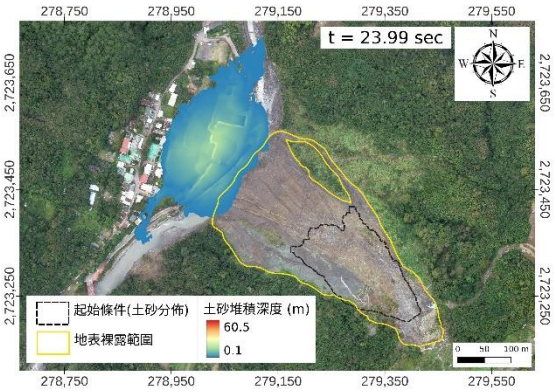


圖 附 4-12 最終土砂堆積分佈(情境 12)

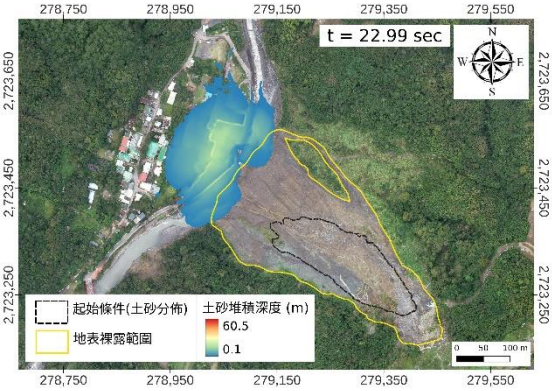


圖 附 4-13 最終土砂堆積分佈(情境 13)

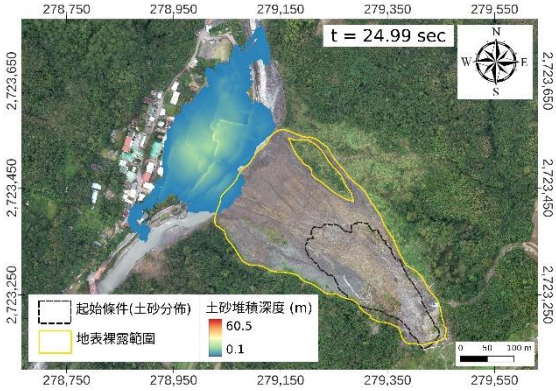


圖 附 4-14 最終土砂堆積分佈(情境 14)

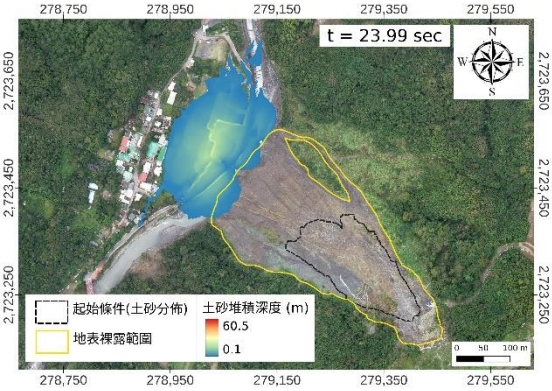


圖 附 4-15 最終土砂堆積分佈(情境 15)

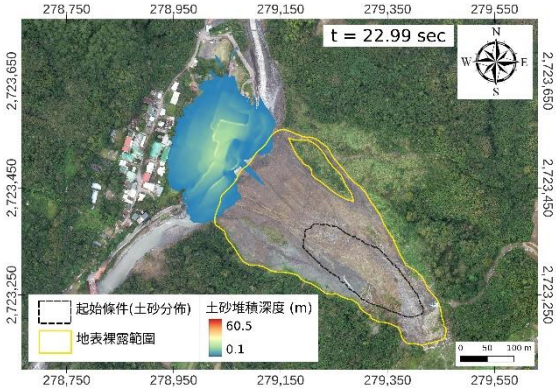


圖 附 4-16 最終土砂堆積分佈(情境 16)

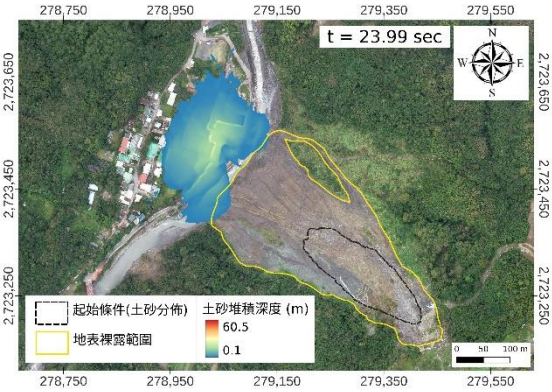


圖 附 4-17 最終土砂堆積分佈(情境 17)

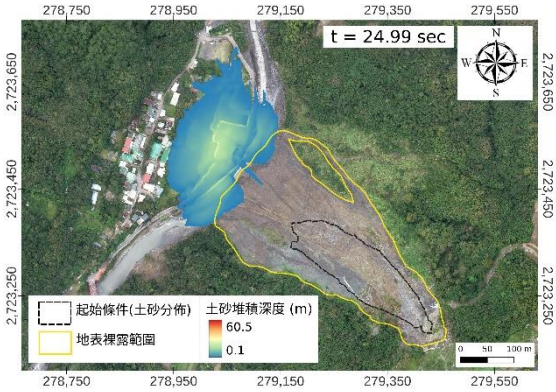


圖 附 4-18 最終土砂堆積分佈(情境 18)

附錄四 各情境最終土砂堆積分佈圖

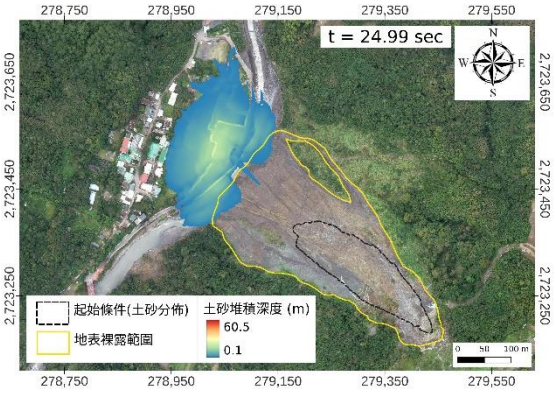


圖 附 4-19 最終土砂堆積分佈(情境 19)

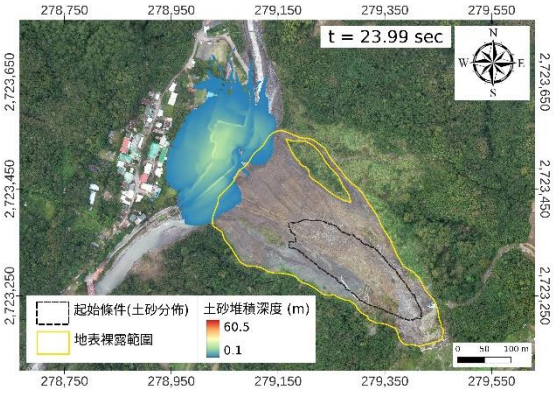


圖 附 4-20 最終土砂堆積分佈(情境 20)

2021 年秀巒崩塌案例(新參數組)

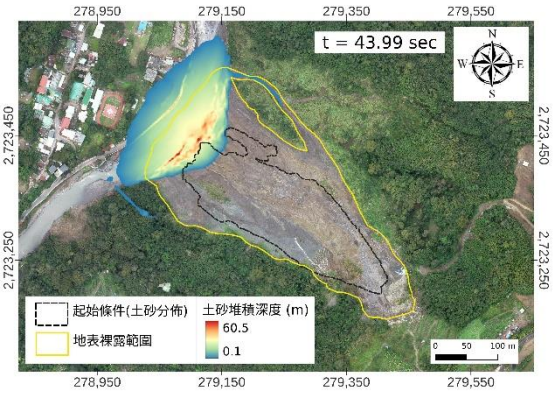


圖 附 4-21 最終土砂堆積分佈(情境 1)

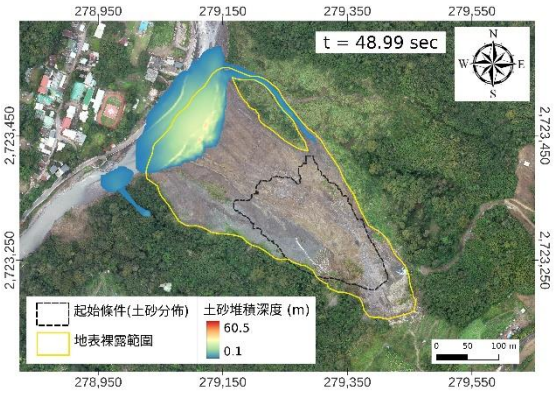


圖 附 4-22 最終土砂堆積分佈(情境 2)

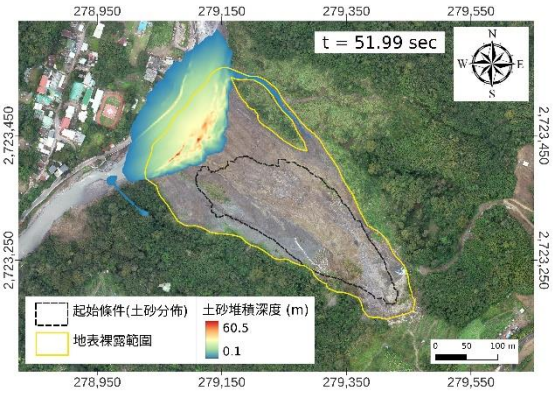


圖 附 4-23 最終土砂堆積分佈(情境 3)

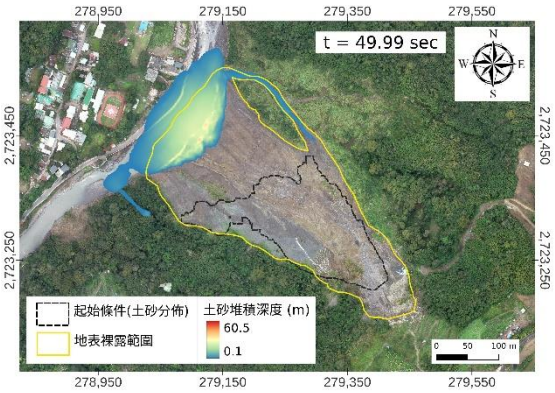


圖 附 4-24 最終土砂堆積分佈(情境 4)

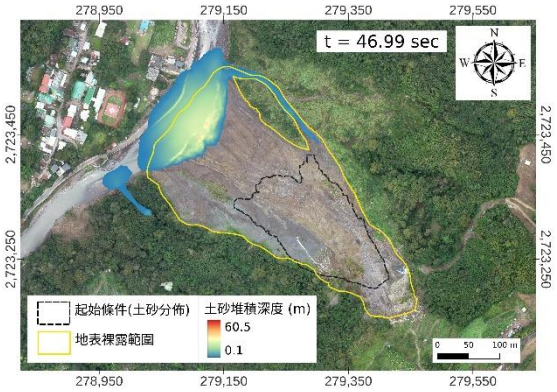


圖 附 4-25 最終土砂堆積分佈(情境 5)

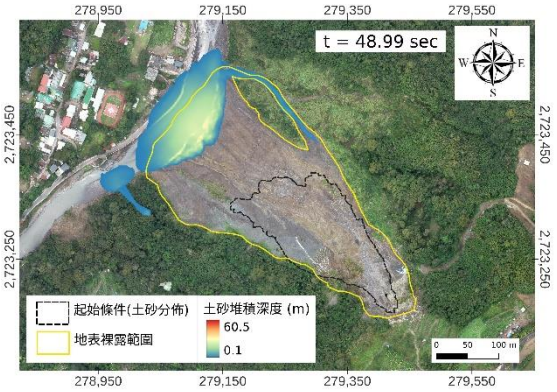


圖 附 4-26 最終土砂堆積分佈(情境 6)

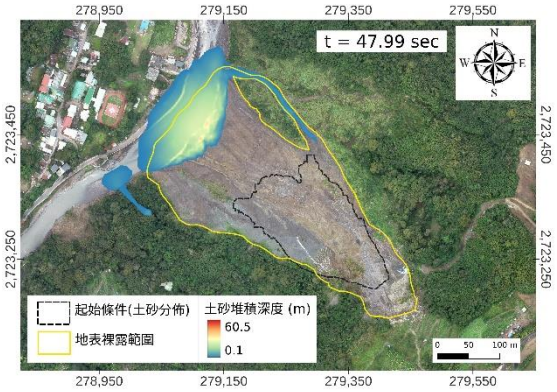


圖 附 4-27 最終土砂堆積分佈(情境 7)

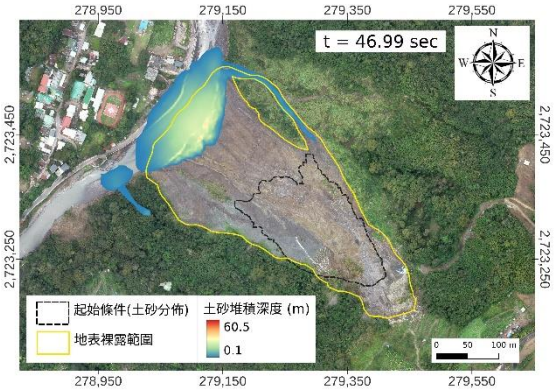


圖 附 4-28 最終土砂堆積分佈(情境 8)

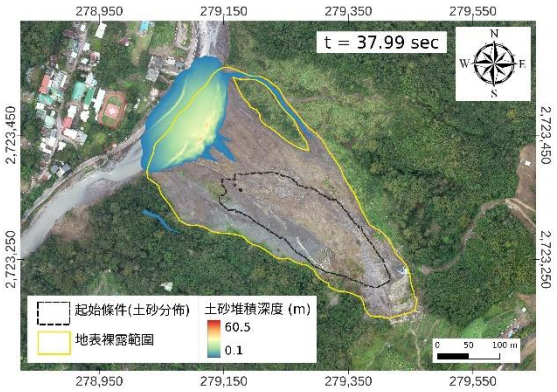


圖 附 4-29 最終土砂堆積分佈(情境 9)

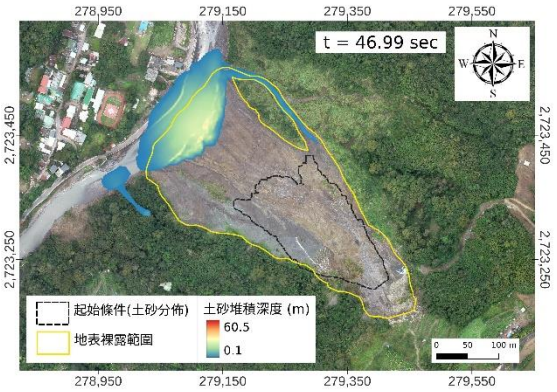


圖 附 4-30 最終土砂堆積分佈(情境 10)

附錄四 各情境最終土砂堆積分佈圖

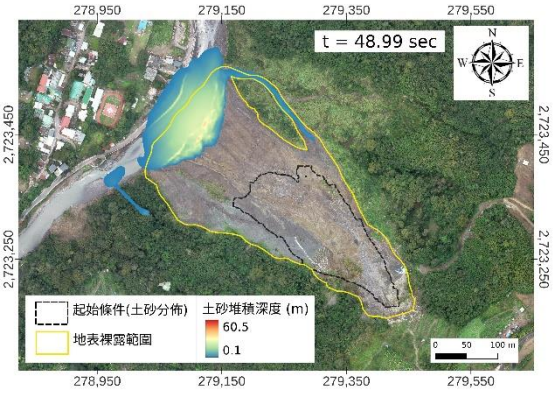


圖 附 4-31 最終土砂堆積分佈(情境 11)

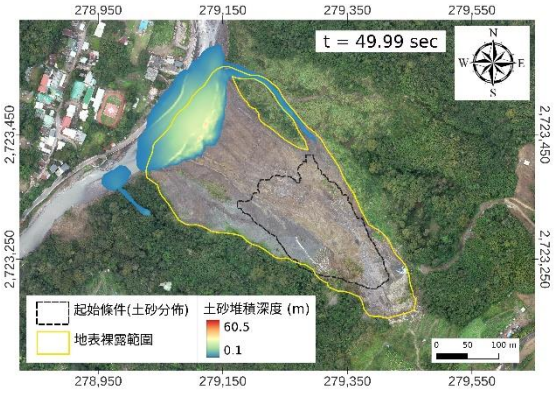


圖 附 4-32 最終土砂堆積分佈(情境 12)

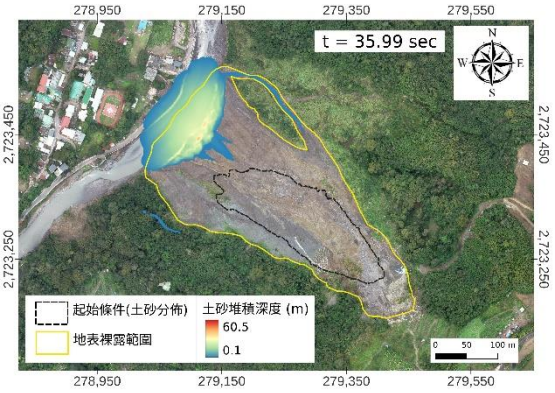


圖 附 4-33 最終土砂堆積分佈(情境 13)

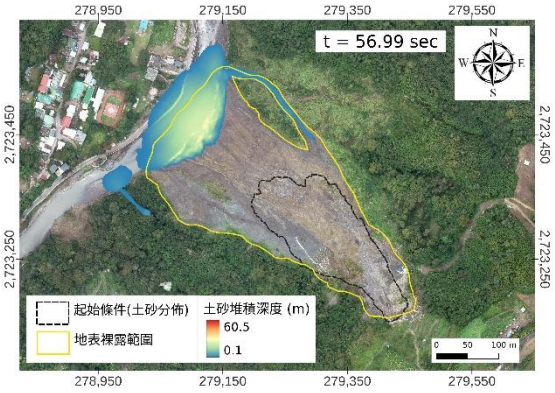


圖 附 4-34 最終土砂堆積分佈(情境 14)

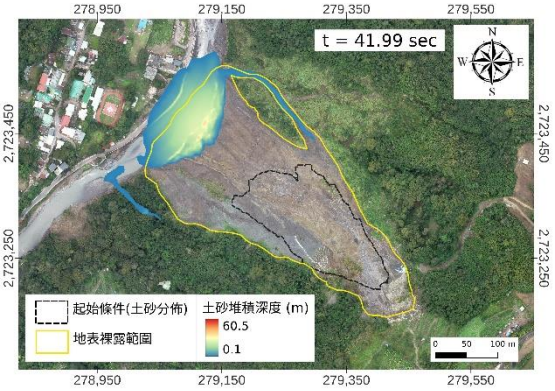


圖 附 4-35 最終土砂堆積分佈(情境 15)

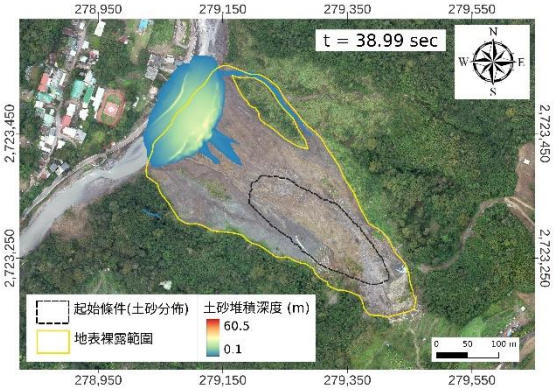


圖 附 4-36 最終土砂堆積分佈(情境 16)

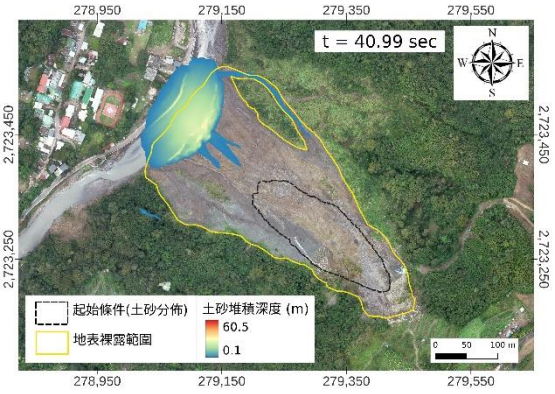


圖 附 4-37 最終土砂堆積分佈(情境 17)

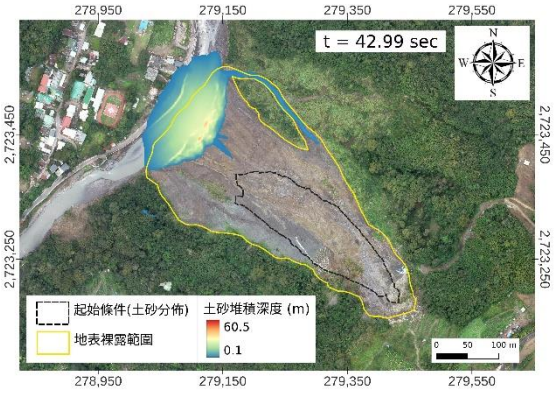


圖 附 4-38 最終土砂堆積分佈(情境 18)

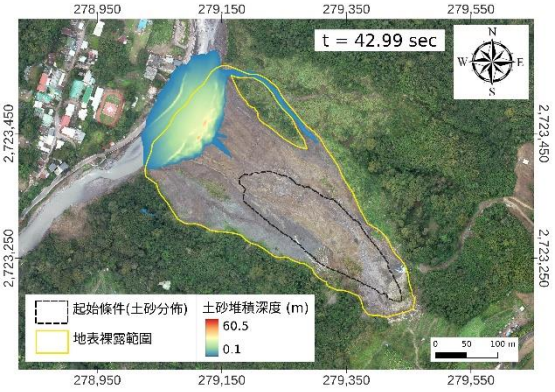


圖 附 4-39 最終土砂堆積分佈(情境 19)

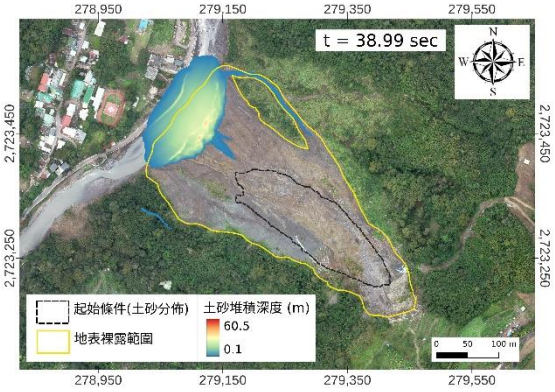


圖 附 4-40 最終土砂堆積分佈(情境 20)

2022 年鵠鵠崙崩塌案例

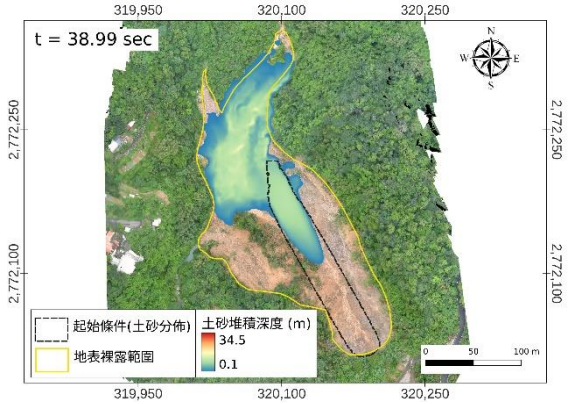


圖 附 4-41 最終土砂堆積分佈(情境 1)

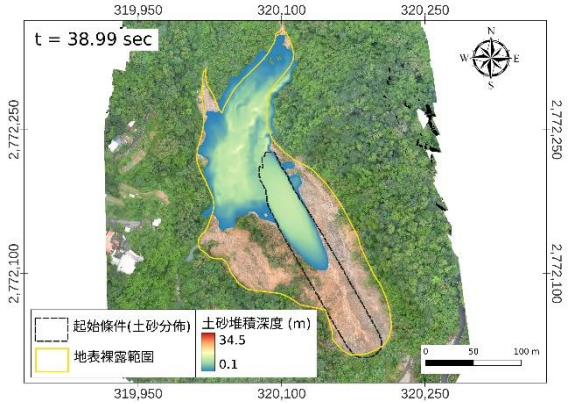


圖 附 4-42 最終土砂堆積分佈(情境 2)

附錄四 各情境最終土砂堆積分佈圖

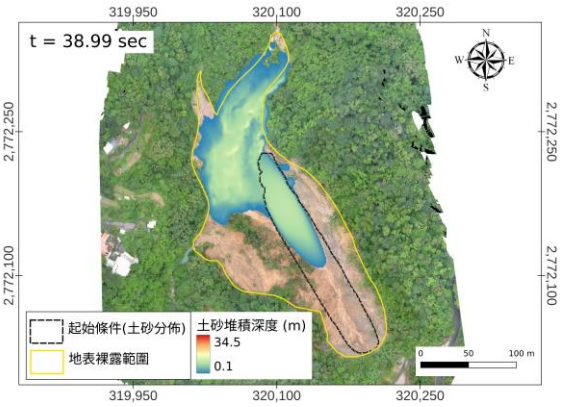


圖 附 4-43 最終土砂堆積分佈(情境 3)

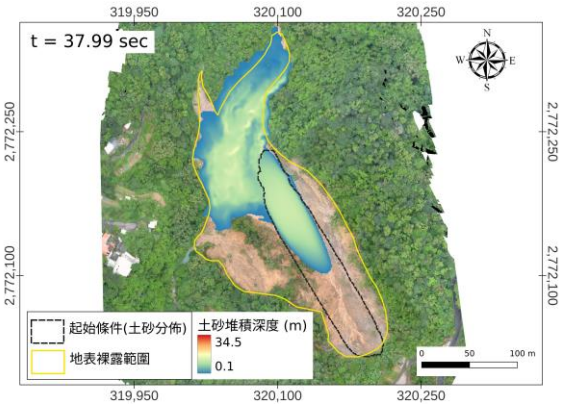


圖 附 4-44 最終土砂堆積分佈(情境 4)

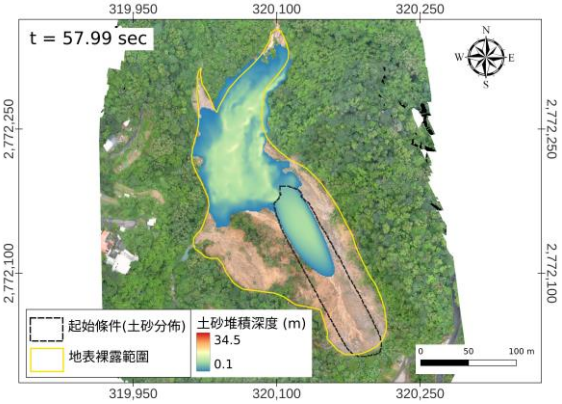


圖 附 4-45 最終土砂堆積分佈(情境 5)

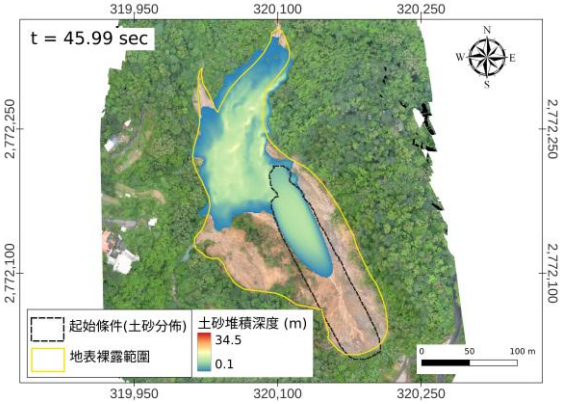


圖 附 4-46 最終土砂堆積分佈(情境 6)

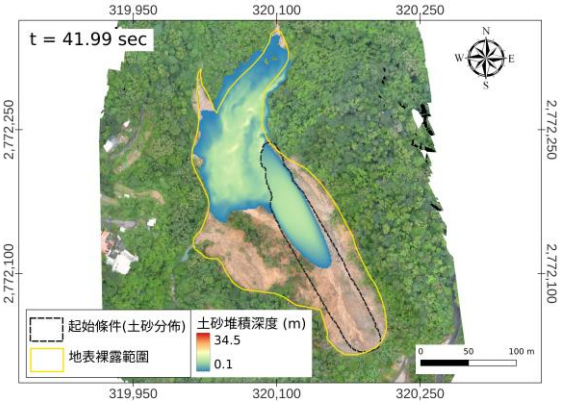


圖 附 4-47 最終土砂堆積分佈(情境 7)

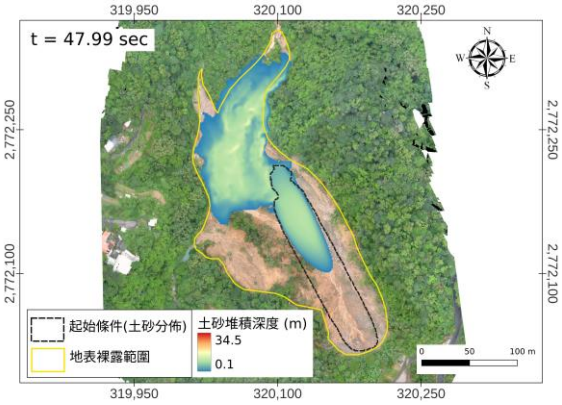


圖 附 4-48 最終土砂堆積分佈(情境 8)

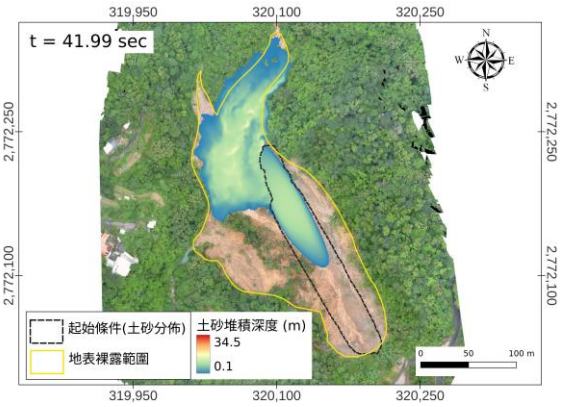


圖 附 4-49 最終土砂堆積分佈(情境 9)

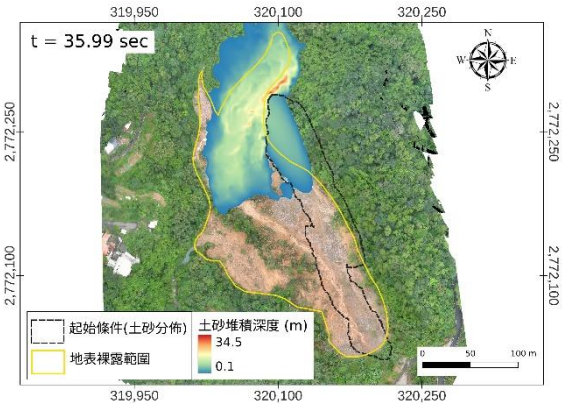


圖 附 4-50 最終土砂堆積分佈(情境 10)

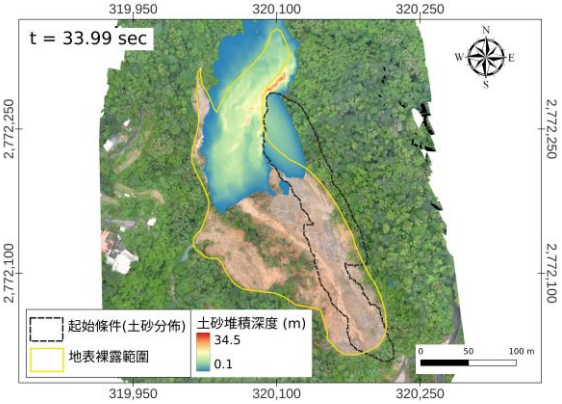


圖 附 4-51 最終土砂堆積分佈(情境 11)

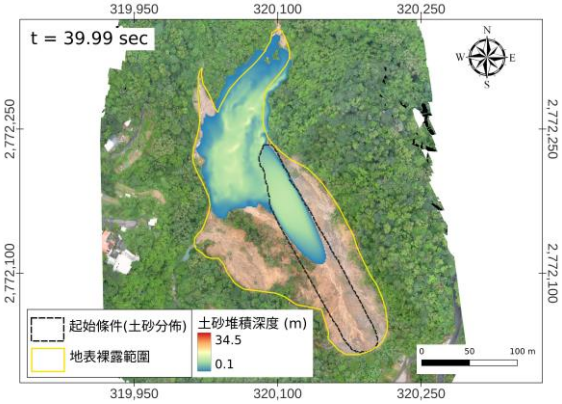


圖 附 4-52 最終土砂堆積分佈(情境 12)

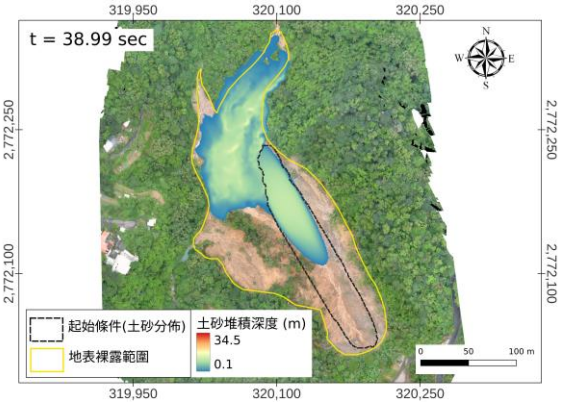


圖 附 4-53 最終土砂堆積分佈(情境 13)

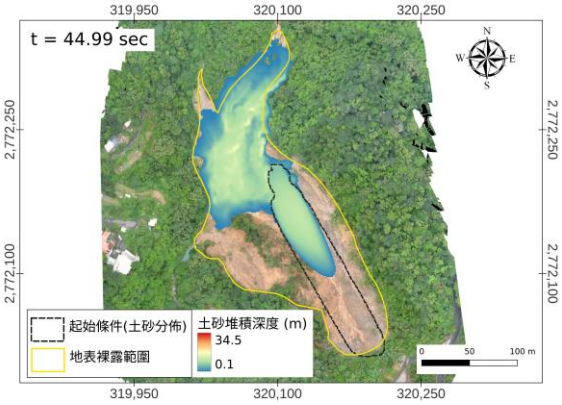


圖 附 4-54 最終土砂堆積分佈(情境 14)

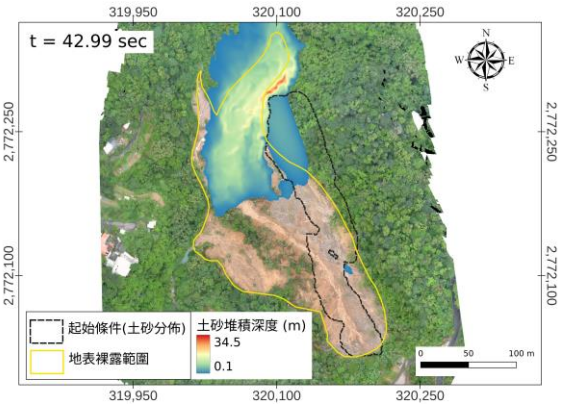


圖 附 4-55 最終土砂堆積分佈(情境 15)

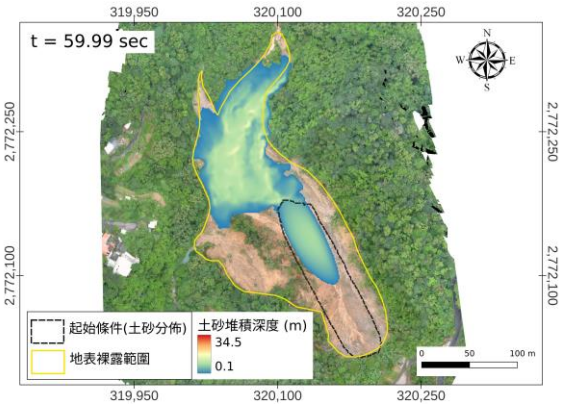


圖 附 4-56 最終土砂堆積分佈(情境 16)

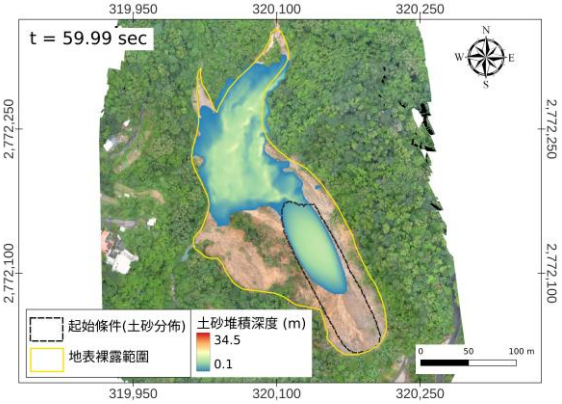


圖 附 4-57 最終土砂堆積分佈(情境 17)

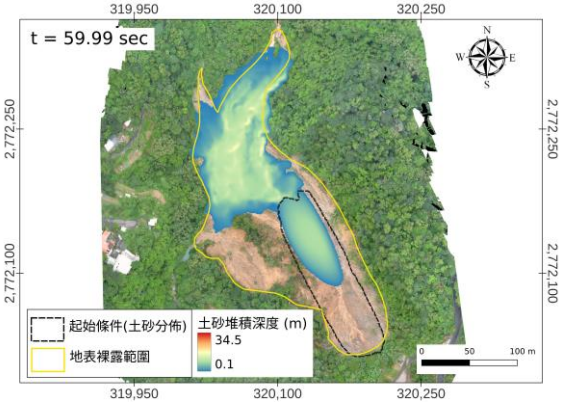


圖 附 4-58 最終土砂堆積分佈(情境 18)