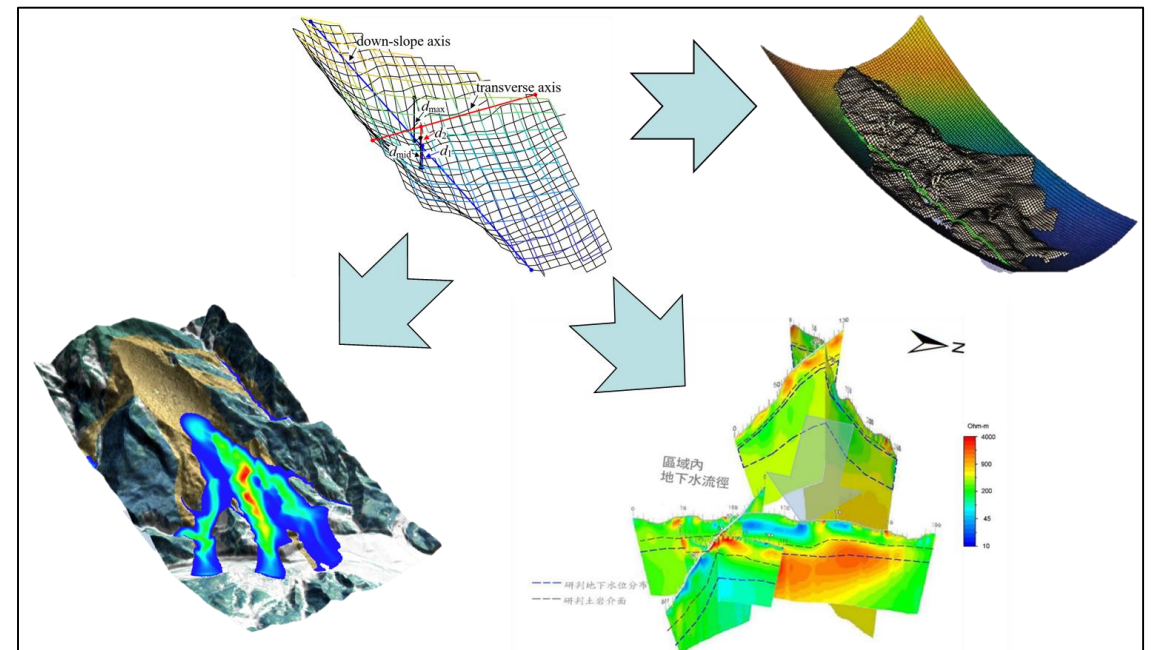


大規模崩塌與地形特性以及地下水分布關聯之精進研究

成果報告書

行政院農業委員會水土保持局
與您一起打拼



111
年度

行政院農業委員會水土保持局



行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 年 12 月



行政院農業委員會水土保持局
54044 南投市中興新村光華路 6 號
<http://www.swcb.gov.tw>

計畫編號：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**

**Advanced study on the impacts of the
terrain characteristics and groundwater
distribution on the plausible large-scale
landslides
(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：111 年 01 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：戴義欽 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 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)

大規模崩塌與地形特性以及地下水分佈 關聯之精進研究

摘要

本案以 Wang et al. (2022) 所提出之“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法(GA-ER-ICS)”搭配基因演算法為基礎、並延續應用 Ko et al. (2021)、Tai et al. (2020) 與水保局創新研究計畫 (107、108 與 110 年)，將理想曲面法應用於大規模崩塌勢區域探討其地形特徵以及地下水位分佈之邊坡穩定性，並估算其土砂量體以及可能影響之範圍。雖然“參考橢圓-理想曲面法”具備高度彈性搜尋的特性，卻須從大量的候選曲面篩選出最合適的曲面，原使用 Ko et al. (2021)的窮舉法需耗費 20 多小時，透過 Wang et al. (2022) 精進之基因演算法，即使搜尋範圍增加 49 倍亦可在 15 分鐘內完成，運算效率提升 200 ~ 400 倍以上。然而在建置理想崩塌曲面時，需要具備數值地形資料 (Digital Elevation Model, DEM)以及現場調查研判之地形特徵(裂隙、崩崖、侵蝕溝 等) 作為邊界點之設定依據，最後搭配傾斜儀提供之破壞深度、地下水水位資料與地電阻量測後判識之剖面地下水位與土壤分層資料，可迅速初步估算可能之破壞滑動面與以及所對應之崩塌量體與邊坡穩定性。雖然是以理想曲面近似可能之破壞滑動面，此方法於未進行細部地質調查和鑽井作業前，依舊可估算可能的崩塌土砂量體與其後續影響之重要資訊。針對加值應用現有現地資料，本案也整合地電阻量測後推估之地下水位與土壤分層高程資料，探討理想崩塌曲面下邊坡穩定性。

關鍵詞：崩塌、參考橢圓-理想曲面法、地電阻量測、地下水分佈、邊坡穩定性分析、土砂運移路徑

Advanced study on the impacts of the terrain characteristics and groundwater distribution on the plausible large-scale landslides

Abstract

Based on the “Genetic-Algorithm-Ellipse-Referenced-Idealized-Curved-Surface (GA-ER-ICS)” method (Wang et al., 2022), the present project is devoted to extending the approach of ER-ICS (Ko et al., 2021), ICS (Tai et al., 2020) and SWCB-projects (2018 ,2019 & 2021) for mimicking the plausible surface of slope failure in plausible large-scale landslides areas. In this project, terrain characteristics (flaws, cracks, cliffs, trough, etc.) and in-situ monitoring records are taken into account for evaluating the slope stability with respect to the plausible failure surface suggested by the ICS. That is, the detected failure depth(s), the recorded groundwater level, the data obtained by the electrical resistivity survey (distributions of groundwater level and soil stratification) are included in the analysis of slope stability. Various scenarios will be suggested based on the in-situ data (gaging well, inclinometer, electrical resistivity survey) supported by the SWCB for hazard assessment and management of disaster mitigation. In addition to the large-scale landslide-prone area, the T002 (光華) at Fuxing District, the potential area T001 (秀巒) at Jianshi Township will be investigated in the present project.

Keywords: Landslide, GA-ER-ICS, Electrical Resistivity Survey, Groundwater Level, Slope Stability Analysis, Flow Paths

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	1-3
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 加值應用現地監測資料	2-13
第四節 精進邊坡穩定分析方法	2-16
第三章 研究區域簡介	3-1
第一節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域	3-1
第二節 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域	3-9
第四章 理想破壞曲面之估算	4-1
第一節 桃園市-復興區-光華 T002 大規模崩塌潛勢區域	4-2
第二節 新竹縣-尖石鄉-秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域	4-5
第三節 邊坡穩定性分析前置資料處理	4-13
第五章 加值應用現地監測與量測資料	5-1
第一節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域	5-1
第二節 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域	5-3

第三節 土砂運移路徑分析	5-6
第六章 結論與建議	6-1
第一節 結論	6-1
第二節 建議與未來展望	6-3
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 期初審查意見暨回覆辦理情形	附-5
附錄三 期中審查意見暨回覆辦理情形	附-10
附錄四 實地查核意見暨回覆辦理情形	附-13
附件五 期末暨成果發表會回覆辦理情形	附-18

表次

表 2.1 崩塌地穩地分析工具比較表	2-12
表 4.1 秀巒 T001 情境一滑動深度比較一覽表	4-10
表 4.2 理想崩塌曲面破壞參數值一覽表	4-12
表 4.3 光華 T002 之地下水監測井與地電阻量測時間表	4-13
表 5.1 邊坡穩定性分析一覽表	5-5
表 5.2 土砂運移行為採用之參考一覽表	5-7
表 6.1 本案之工作項目與各期進度表	6-4

圖次

圖 2.1 計畫作業流程圖	2-3
圖 2.2 GEOSTUDIO 崩塌破壞面建置方法示意圖	2-5
圖 2.3 GEOSTUDIO 方法 D 崩塌破壞面成果示意圖	2-5
圖 2.4 (左) SCOOPS3D 搜尋可能滑動面之球形參考原點 (右) 可視化的 安全係數分析結果	2-7
圖 2.5 SCOOPS3D 建置多處滑動破壞面示意圖	2-7
圖 2.6 理想崩塌破壞曲面之幾何特性	2-9
圖 2.7 軸向與側向並不會在同一平面，針對一深度 d ，會對應出軸 向的深度 $d1$ 與側向的深度 $d2$	2-9
圖 2.8 理想崩塌破壞曲面示意圖	2-10
圖 2.9 參考橢圓位移方式：(A) 平移、(B) 旋轉、(C) 偏轉	2-10
圖 2.10 地電組影像剖面量測方法示意圖	2-14
圖 2.11 地電阻影像剖面法探測電極排序方法示意圖	2-15
圖 2.12 地電阻量測結果剖面圖	2-15
圖 2.13 切片法曲率半徑 R 與有效力臂 R^* 示意圖	2-17
圖 2.14 切片法考慮地下水之示意圖	2-17
圖 2.15 分層土壤性質與邊坡安全係數估算關聯示意圖	2-19
圖 2.16 使用理想破壞曲面與使用實際崩塌區域在 181.83 秒時土砂 運移位置差異分佈圖	2-21
圖 2.17 光華 T002 情境三 142 組隨機參數之土砂流動深度大於 1 CM (30 CM 紫紅線) 之路徑重疊局部放大圖	2-21
圖 3.1 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域地形	3-2
圖 3.2 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域相關資料分佈圖	3-3
圖 3.3 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域傾斜儀位置圖	3-5

圖 3.4 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域傾斜儀量測資料.....	3-5
圖 3.5 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域地下水位量測資料.....	3-6
圖 3.6 彙整傾斜儀與地下水監測井研判資料	3-7
圖 3.7 地電阻量測分佈圖.....	3-8
圖 3.8 光華崩塌地電阻量測與研判成果圖	3-8
圖 3.9 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域 2016 LiDAR 地形圖.....	3-10
圖 3.10 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域 2021 年 06 月 24 日 UAV DSM 地形圖	3-11
圖 3.11 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域 2021 年 10 月 14 日 UAV DSM 地形圖	3-11
圖 3.12 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域相關資料分佈圖	3-12
圖 3.13 秀巒 T001 之 2016 年 LiDAR DEM 與 2021 年 10 月 14 日 UAV DSM 地形差異處(確定發生崩塌範圍).....	3-13
圖 3.14 秀巒 T001 可能崩塌範圍推估圖	3-14
圖 3.15 現場監測井位置圖.....	3-15
圖 3.16 秀巒及泰崗地區地質鑽探、地電阻探測及相關儀器配置平面 圖	3-16
圖 3.17 秀巒及泰崗地區藉由地電阻探測成果，大致掌握地質材料及 可能含水層分布	3-16
圖 3.18 秀巒 T001 潛勢區域地電阻量測成果相互比對圖	3-17
圖 3.19 秀巒 T001 可能地下水流向分佈圖	3-18
圖 3.20 秀巒 T001 潛勢範圍 A-A'剖面線之對應可能地下水位分布與 土壤分層圖	3-18
圖 4.1 光華 T002 理想崩塌曲面起始搜尋點圖	4-2

圖 4.2 光華 T002 理想崩塌曲面之參考橢圓(虛線)與最終可能崩塌範圍(實線)分佈圖	4-3
圖 4.3 光華 T002 理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度分佈圖	4-4
圖 4.4 理想崩塌曲面推估可能崩塌深度與現場傾斜儀位置圖	4-5
圖 4.5 秀巒 T001 情境一模擬範圍(等高色階圖圈畫範圍)分佈圖 ..	4-6
圖 4.6 秀巒 T001 理想崩塌深度分佈圖	4-7
圖 4.7 秀巒 T001 情境二模擬起始條件圖	4-8
圖 4.8 秀巒 T001 理想崩塌深度分佈圖	4-9
圖 4.9 光華 T002 理想崩塌曲面之參考橢圓(虛線)與最終可能崩塌範圍(實線)分佈圖	4-14
圖 4.10 光華 K-L1 地電阻量測與推估之地下水位與土壤分層剖面圖	4-15
圖 4.11 光華 K-L2 地電阻量測與推估之地下水位與土壤分層剖面圖	4-15
圖 4.12 光華 T002 地下水位監測井與地電阻量測並推估之地下水位分佈圖	4-16
圖 4.13 光華 T002 地電阻量測並推估之土壤分層分佈圖	4-16
圖 4.14 光華 T002 理想破壞曲面深度(顏色分佈)與 A~A'剖面線 (螢光綠線)分佈圖	4-17
圖 4.15 秀巒 T001 情境一理想破壞曲面深度(顏色分佈)與剖面線 (螢光綠線)分佈圖	4-18
圖 4.16 秀巒 T001 情境二理想破壞曲面深度(顏色分佈)與剖面線 (螢光綠線)分佈圖	4-19
圖 5.1 光華 T002 情境一邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面與地下水位剖面圖	5-2

圖 5.2 秀巒 T001 情境一邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面 與地下水位剖面圖	5-4
圖 5.3 光華 T002 土砂運移行為模擬結果圖	5-8
圖 5.4 光華 T002 土砂影響範圍圖	5-9
圖 5.5 秀巒 T001 情境一土砂運移行為模擬結果圖	5-11
圖 5.6 秀巒 T001 情境一土砂影響範圍圖	5-12
圖 5.7 秀巒 T002 情境二土砂運移行為模擬結果圖	5-13
圖 5.8 秀巒 T001 情境二土砂影響範圍圖	5-14
圖 5.9 秀巒 T002 情境三土砂運移行為模擬結果圖	5-15
圖 5.10 秀巒 T001 情境三土砂影響範圍圖	5-16

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火山地震帶與亞熱帶區域颱風侵擾頻繁，在山區地形陡峻、河短流急的不利條件下，若發生極端異常降雨事件，易在山區發生崩塌、地滑或土石流等自然災害。自 2009 年小林村大規模崩塌事件後，水土保持局開始著手推動全台大規模崩塌潛勢區域現場調查、訂定警戒值、設置現場即時監測系統等，於 2018 年所發行之「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 公尺以上的崩塌事件。因崩塌量體龐大，在山區易造成堰塞湖，並對下游保全對象造成更大規模的二次災害。

因大規模崩塌屬於崩塌深度大於 10 公尺之深層崩塌，部分學者認為破壞面在此深度下除了土體本身重量、地質條件或是岩向造成邊坡不穩定以外，地下水所造成孔隙水壓變化也扮演重要關鍵因素。依據行政院農業委員會全國資訊網站 (<https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=2503956&print=Y>) 所示，多數大規模崩塌發生之累積降雨量大於 1000 mm。近年許多對於大規模崩塌之發生機制關聯研究(如 李威霖，2020、Kuo et al., 2018、陳振宇，2014)，不論是開發或使用數值模式進行探討，均將降雨或地下水納入考量。

此外，由於近年遙測技術快速進展(如 光達數值地形(LiDAR derived DEM)，合成孔徑干涉雷達 (InSAR) 等)以及搭配 UAV 高效率多角度的三維掃描，使得高解析度高精度之現場數值地形資料 (DEM) 不再昂貴不可及，逐漸可成為訂定警戒值與提供數值模式起始或邊界條件之重要參考依據。為了擬定對策以及減緩大規模崩塌潛勢區域發生災害時之衝擊，水土保持局長年以來進行了許多現場

調查並設置即時監測系統(如 傾斜儀、地下水位井、雨量站 等)。

崩塌預警模式方面可分為統計法與解析法，前者主要透過崩塌發生條件(如 地形特徵分佈、降雨條件、地質條件 等)歸納出該區域之警戒值，其優勢為快速、直觀、易操作使用、使用範圍廣泛，但缺點為存在地區特性的差異或是因地形變化後必須重新校正警戒值或是迴歸相關參數；後者主要藉由客觀和通用的力學與地質學角度，可以更有效的估算崩塌土體及後續土砂運移行為可能影響範圍等時間變化。雖然兩者都可以在缺乏詳細現場監測系統下執行，但後者可以提供動態與定量之資訊，如 規模與運移行為 等(參閱 創新研究計畫，2019 與 2021； Tai et al., 2020)。

掌握坡面崩塌土砂量體以及後續的運移行為是在防災與減災工作扮演關鍵且不可或缺的角色。故本案以理想曲面法為基礎提出整合快速評估崩塌破壞曲面與地下水分佈狀況的概念，評估在含有地下水層狀況下，推估坡面可能崩塌量體與臨界條件，並以數值模式探討土砂運移行為對於下游可能的影響範圍與衝擊程度。

Tai et al., (2020) 應用理想曲面推估模擬回溯 2009 年小林村大規模崩塌事件，評估使用理想曲面與災後崩塌的實際破壞面間之差異，發現土石運移的動態模擬中其運移路徑差異不大。在開始階段，土體運移路徑存在差異(土體涵蓋面積差異 26.82%)，但隨著土體往下游運移其路徑差異性逐漸縮小，在最終堆積階段只剩部分堆積範圍的邊緣處存在差異(土體涵蓋面積差異 9.54%)。因採用理想曲面之估算方法其最大特色在於缺乏詳細現地資料的情況下仍可在第一時間快速推估崩塌體積作為提供後續土砂動態行為之模擬初始條件。本案將延續精進 Tai et al., (2020) 與創新研究計畫(2018 與 2019 年)之成果，除了延伸應用前期計畫(創新研究計畫，2021 年)所提出之整合

地下水位分佈與邊坡安全係數概念至理想曲面之技術，更進一步提出加值應用現場地電阻量測後研判之地下水位分佈與土壤分層界限分佈資料，可同時探討不同地下水位分佈與土壤性質情境下邊坡穩定性，為本案之核心工作。

第二節 計畫工作項目

針對上述議題，本年度規劃“延伸應用基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”、“加值應用現有現場監測之傾斜儀與地下水位計量測資料”以及“精進邊坡穩定性分析方法”等三個工作項目，說明如下：

一、延伸應用“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”：

本團隊於 2018 與 2019 年已完成發展“理想崩塌曲面法”，且於本年度 Wang et al., (2022)提出之“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”具備高度彈性與快速求解的特性，可大幅簡化推估大規模崩塌潛勢區域之可能崩塌量體。故本案延續應用“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”推估桃園市復興區光華 T002 與新竹縣尖石鄉秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域之可能崩塌量體。

二、加值應用現有現場監測之傾斜儀與地下水位計量測資料：

於前期計畫(2021 年)中本團隊已應用地下水位監測井(點資料)進行邊坡穩定性分析，其結果與水保局臺北分局(2020)所推估之邊坡安全係數相近。但上述方式並無考慮分層土壤性質之影響，故本案規劃加值應用現場地電阻量測並研判之剖面地下水位分佈，並探討其差異性。

三、精進邊坡穩定性分析方法：

前期計畫(2021 年)所完成之“邊坡安全係數估算法”僅考慮單一土壤性質，因此本案將納入地電阻量測與推估之土壤分層深度，評估其對於邊坡穩定性之可能影響。

第二章 工作執行方法與步驟

本案為前期計畫(2021 年)之精進研究計畫，其中本年度本團隊整合理想崩塌曲面法與基因演算法(Wang et al., 2022)，提出之“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”，相較於 Ko et al. (2021)之所使用之窮舉法，其模式效率可提升 200~400 倍，進而為迅速評估崩塌破壞面的目標往上提升一大步，最終所估算之可能崩塌土砂量體將作為土砂動態模擬數值模式(DFMfGT)之初始條件，探討該情境下崩塌土體之運移行為。因本技術為一理想曲面來近似評估崩塌曲面並據以估算體積，作為後續土砂運移行為模擬之依據，依據 Tai et al. (2020)之分析成果，所建立崩塌破壞曲面不需要非常精確之現地量測資料，即可應用於後續土砂運移之路徑估算。本年度除了延伸上述已發展模組，將於邊坡穩定性分析中增加考慮不同土壤性質之關聯研究。其先決條件則為需簡單迅速提供可能崩塌曲面所在以及對應的崩塌量體。

本案之主要工作項目為：(a) 延伸應用“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”；(b) 加值應用現有現場監測之傾斜儀與地下水位計量測資料；以及(c) 精進邊坡穩定性分析方法。

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、取得崩塌潛勢區域所在之數值地形資料(DEM)

步驟二、選擇已判識之崩塌潛勢區域、滑動塊體或依據現場調查後研判之崩崖位置，圈畫可能之崩塌範圍，作為建構“基因演算-

參考橢圓-理想破壞曲面”之邊界點參考依據

步驟三、以參考橢圓之方式搜尋圈選範圍的軸向與側向軸所在以及其三維座標，作為建構理想崩塌破壞曲面之依據

步驟四、透過破壞深度探討可能的理想破壞曲面所在之各式情境，其破壞面積以及對應的崩塌土砂量體，探討其與所圈畫之範圍的差異(取差異最小的理想破壞曲面為後續探討對象)

步驟五、利用監測井所記錄之地下水水位，推估理想崩塌破壞曲面分析範圍內可能之地下水位分佈或加值應用現場地電阻量測與研判之地下水位分佈

步驟六、以理想崩塌曲面長軸方向為基準，取出其剖面地形與理想崩塌破壞曲面高程，探討此邊坡在理想破壞曲面下在**有無地下水位高程與單一或分層土壤性質之安全係數(safety factor)**

步驟七、各式情境下之可能的理想破壞曲面以及所對應的安全係數(重複步驟三到步驟六)

步驟八、應用所上述推估之可能崩塌量體為基礎，進行土砂運移行為模式推估流經路徑以及成果呈現

由於理想破壞曲面的方法並未將降雨強度與累積雨量等外在觸發條件列入考量，因此本估算方法現階段尚無法進行崩塌破壞時間點的預測，但可探討不同地下水分佈以及單一或是分層土壤性質情境下邊坡穩定性之變化。

本案主要貢獻為：在缺乏充分的現地地質調查與監測預警系統所提供之資訊的前提下，依舊能夠在第一時間針對可能發生崩塌區域，估算其可能的崩塌破壞曲面、崩塌量體規模以及影響範圍，作為災前規劃或是後續災害應變調度或採取相關行動之參考。

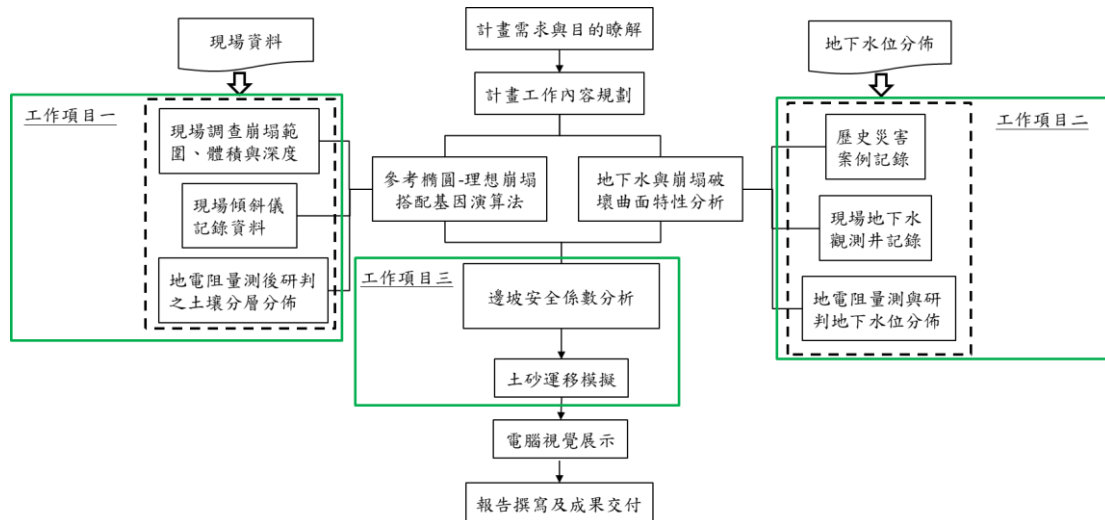


圖 2.1 計畫作業流程圖

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)所提出之“基因演算-參考橢圓-理想曲面法”為基礎，並搭配現場調查後判識之可能崩塌範圍與微地形特徵(如 崩崖、側面侵蝕溝 等)，推估可能的崩塌深度與量體。以下為簡要說明常見之商用軟體 GeoStudio 以及自由軟體 Scoops3D，與本團隊發展之理想崩塌曲面法建置崩塌破壞面方法。

一、 商用軟體 GeoStudio

GeoStudio 為 GEO-SLOPE International. Ltd 所研發之二維邊坡穩定性分析軟體，此軟體內部具有八種不同分析功能之模組，包含 SLOPE/W(邊坡穩定性分析)、SEEP/W(地下水滲透分析)、SIGMA/W(岩土應力變形分析)、QUAKE/W(地震分析)、AIR/W(空氣流動分析)與 VADOSE(地表滲流蒸發分析)。因 GeoStudio 不同模組之間可相互交換計算成果，使得可以模擬不同地質(單一或分層土壤性質)、地下水位(自定或透過 SEEP/W 模組推估)情境以及結構物對於邊坡穩定性之影響。

由於 GeoStudio 之 SLOPE/W 模組只能建置二維破壞面，故在建置模擬之前必須由人工方式於數值地形資料(DEM)中判斷可能之崩塌走向作為依據。SLOPE/W 模組在分析邊坡安全係數前，必須先假設一崩塌破壞面。於 GeoStudio 中具有 4 種崩塌破壞面建置方法：

- (A)網格-半徑法 (Grid and Radius Method)；
- (B)複合性破壞面 (Composite Slip Surface)；
- (C)指定破壞面 (Fully Specific Slip Surfaces)；
- (D)指定起始與結束崩塌位置 (Entry and Exit Specification)。

其四種崩塌破壞面之建置示意方法如圖 2.2(A,B,C,D)所示。

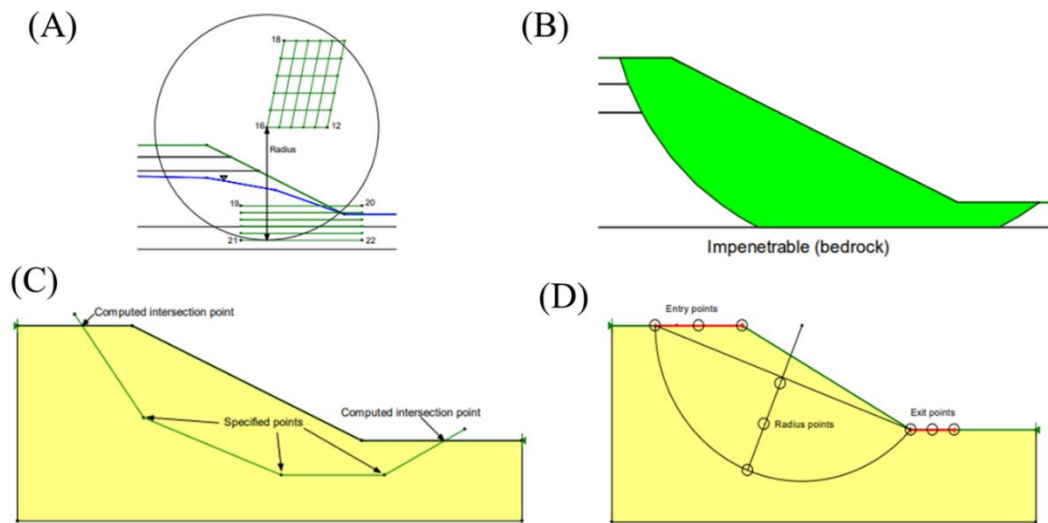


圖 2.2 GeoStudio 崩塌破壞面建置方法示意圖

(圖資料來源：GeoStudio, 2012)

其中較常被應用於為搜尋崩塌破壞面方法 D，其主要優勢為操作簡單，只需輸入三種條件：(1)搜尋起始範圍(如 崩崖或是冠部裂隙處)、(2)搜尋結束範圍(坡趾或河岸)、(3)搜尋半徑大小視使用者需求調整數量即可。故建置之崩塌破壞面將應用於後續之邊坡安全係數分析，並找出臨界(FS=1)之崩塌破壞面。如圖 2.3 所示，GeoStudio 方法 D 所假設之不同崩塌破壞面為灰線，其破壞面起始與結束位置為使用者給定區域(地表紅線區域)。

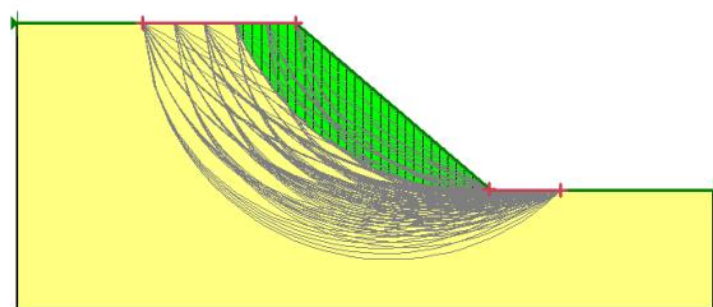


圖 2.3 GeoStudio 方法 D 崩塌破壞面成果示意圖

(圖資料來源：GeoStudio, 2012)

二、 自由軟體 Scoops3D

Scoops3D 為美國地質調查局 (United States Geological Survey , USGS) 於 2015 年發表的三維邊坡穩定分析軟體，以土壤物理特性及三維的力學理論評估數值高程模型的邊坡穩定。相較二維的分析軟體僅能了解單一剖面的邊坡狀況，Scoops3D 加入三維的水文與土壤分層，更全面的呈現真實的分析結果。

Scoops3D 將破壞滑動面假設為球形曲面(單一曲率)，

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (2.1)$$

式中 R 為破壞面搜尋半徑， x, y, z 為卡式座標系統之三軸資料。將數值高程模型中的底部座標 x, y, z 相對於球形參考原點(Center of Sphere)推求搜尋半徑 R ，以此方法搜索各個參考原點對應之破壞面。此外，程式提供粗略到精細(Coarse-to-fine Search)的演算法，可提升將近 90 %的運算效能。

為了達到整體的通用性，Scoops3D 將破壞滑動面(Trial Surface)簡化為一的球形曲面。如圖 2.4(左)所示，由程式自動搜索近百萬個參考點所形成的滑動面，個別計算每個數值網格中的應力分佈及安全係數，以評估整體的邊坡穩定性。如圖 2.4(右)所示，不同於其他分析軟體需事先給定預測的滑動位置作為參考依據，使用者僅需透過指定的滑動面積與量體即可自動找出最可能的破壞滑動面，提供視覺化的分析結果，可輸出的資料包括面積、體積與安全係數等。

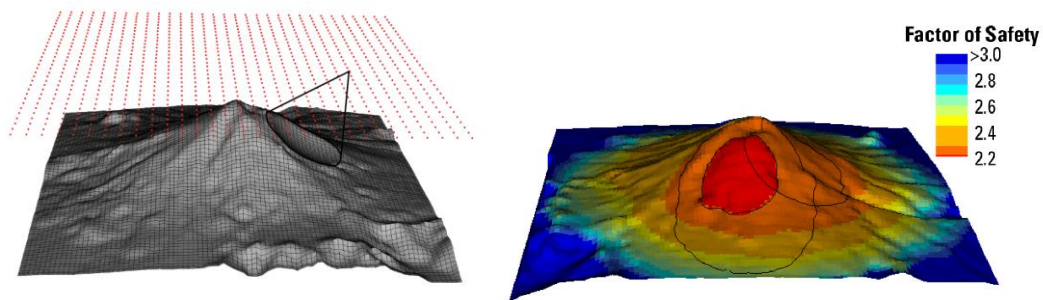


圖 2.4 (左) Scoops3D 搜尋可能滑動面之球形參考原點 (右) 可視化的安全係數分析結果

(圖資料來源：Reid et al., 2015)

因 Scoops3D 為三維邊坡穩定分析軟體，故在假設崩塌破壞面時相較於 GeoStudio 必須多提供搜尋崩塌面積與量體，避免搜尋之結果與實際事件相差深遠。除此之外，也可指定同一假設跑崩塌破壞面最多可搜尋可能滑動塊體數量，如圖 2.5 所示，球型為透過式(2.5)所建置之結果，紅色區域為推估之可能滑動塊體。

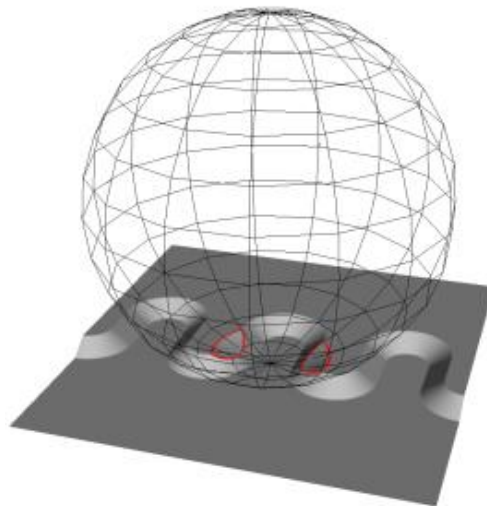


圖 2.5 Scoops3D 建置多處滑動破壞面示意圖

(圖資料來源：Reid et al., 2015)

三、 理想破壞曲面

Tai et al. (2020)以及 Ko et al. (2021)提出理想破壞曲面法，只需應用數值地形資料(DEM)搭配潛勢區域對應之參考橢圓，透過面積體積經驗式推估其崩塌量體以及對應之最大崩塌深度，建構破壞曲面法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現地資料不足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。為了降低人為點選邊界點的偏差並加速得到最佳理想崩塌曲面，本年度 Wang et al. (2022)提出“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法(GA-ER-ICS)”，相較與原使用 Ko et al. (2021)的窮舉法需耗費 20 多小時從眾多候選結果中挑選最佳理想崩塌曲面，Wang et al. (2022)精進之理想崩塌曲面法，因基因演算法具備快速求解之特性，即使搜尋範圍增加 49 倍亦可於 15 分鐘內完成推估一最佳理想破壞曲面，運算效率可提升 200 ~ 400 倍以上。

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

$$k_{xz} = c_x^3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad \& \quad k_{yz} = c_y^3 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \quad (2.2)$$

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

$$L_1 = 2R_1 \sin \theta_{\text{arc}} \quad (2.3)$$

$$R_1 - d_1 \cos \theta_1 = R_1 \cos \theta_{\text{arc}} \quad (2.4)$$

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, θ_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 2.7 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($R, L, \theta, \theta_{\text{arc}}$)決定理想曲面破壞面對應之崩塌體積， R 為曲率半徑，而圖 2.6 之 L 為圖 2.7 之 $(\overline{p_1p_2})$ 或 $(\overline{p_3p_4})$ 距離， θ 為邊坡傾斜角， θ_{arc} 為 $(\overline{p_1p_2})$ 或 $(\overline{p_3p_4})$ 與理想崩塌破壞曲面之夾角。如圖 2.8 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。

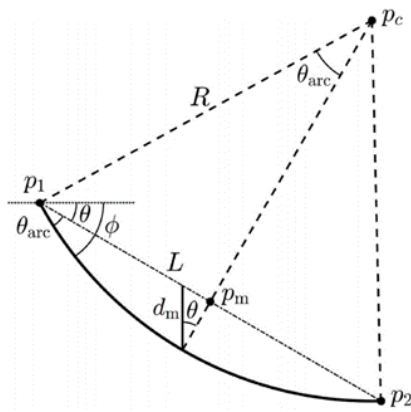


圖 2.6 理想崩塌破壞曲面之幾何特性

(圖資料來源：Tai et al., 2020)

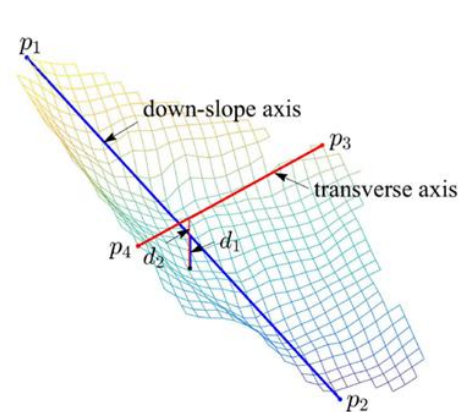


圖 2.7 軸向與側向並不會在同一平面，針對一深度 d ，會對應出軸向的深度 d_1 與側向的深度 d_2

(圖資料來源：Tai et al., 2020)

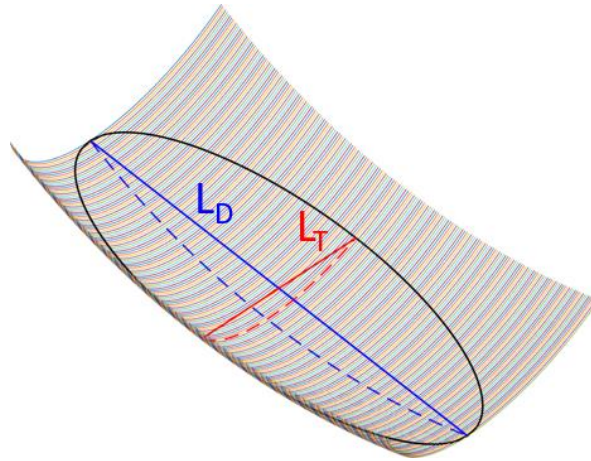


圖 2.8 理想崩塌破壞曲面示意圖

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“基因演算-參考橢圓-理想曲面法” (Wang et al., 2022 、 Ko et al., 2021 與 Tai et al., 2020) 搜尋最佳理想曲面方式。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劃崩塌潛勢區域面積差異最小的理想破壞曲面。圖 2.9 為參考橢圓位移方式，其中實線($\overline{AB}$)為起始參考橢圓位置，虛線($\overline{A'B'}$)為位移後參考橢圓位置。

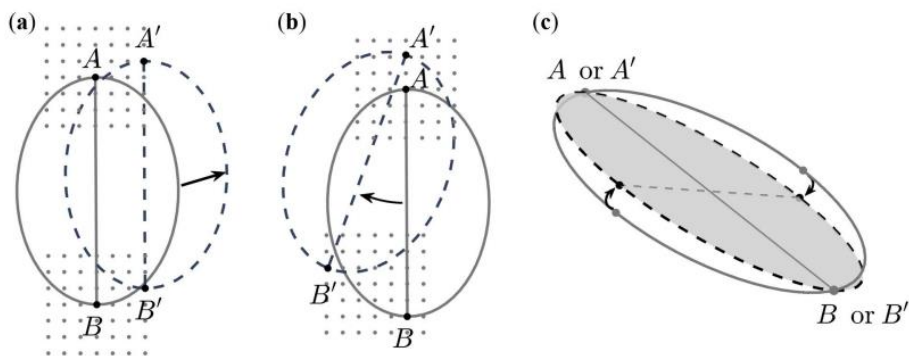


圖 2.9 參考橢圓位移方式：(A)平移、(B)旋轉、(C)偏轉
(圖資料來源：Wang et al., 2022)

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

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}, \quad (2.5)$$

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(2.5)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(2.5)在 95%信賴區間所允許的體積差異高達 7 倍，範圍太大。而 Tai et al., (2020) 分析高屏河流域 45 處大規模崩塌潛勢區域之崩塌面積體積資料，雖然迴歸崩塌面積與崩塌量體之間關係式

$$V_L = 0.1405 \times A_L^{1.3923}, \quad (2.6)$$

與(2.5)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(2.5)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。

表 2.1 崩塌地穩地分析工具比較表

名稱	理想崩塌曲面法	Slope/W	Scoops3D
開發團隊	成大水利系 戴義欽教授團隊	加拿大 GEO-SLOPE International. Ltd	美國地質調查局 (USGS)
計算維度	滑動破壞面:3D 安全係數:2D	滑動破壞面:2D 安全係數:2D	滑動破壞面:3D 安全係數:3D
破壞面 特性	長短軸不同曲率	長軸方向拋物線截面	單一曲率
邊坡穩定 性分析 (極限 平衡法)	切片法 ● Bishop's simplified method 計算時須納入崩塌面 積-體積關係評估(如 Guzzetti et al., 2009、 Tai et al., 2020、或是 Kuo et al., 2020)	切片法 ● Ordinary method ● Bishop's simplified method ● Janbu's simplified method ● Spencer's method ● Morgenstern and Price's method 等	切片法 ● Ordinary method ● Bishop's simplified method 需提供可能崩塌面積 或體積
參數	● 土體單位重 ● 土壤凝聚力 ● 土壤內摩擦角 ● 靜水壓分佈		
地下水位 分佈 情境設定	● 可直接輸入地下 水位分佈	● 可直接輸入地下水位 分佈 ● 可與降雨入滲模式 (SEEP/W)整合	● 可直接輸入地下 水位分佈
優勢 (現階段)	操作簡單、快速、三 維地形立體互動式呈 現	可推估入滲現象、可考慮 土壤分層	免費、可考慮分層土 壤
使用權限	成大戴義欽教授團隊 開發	付費商用軟體	免費軟體

第三節 加值應用現地監測資料

一、 地下水位分佈

行政院農業委員會水土保持局(2018)「潛在大規模崩塌影響範圍調查劃設及堰塞湖災害潛勢技術評估」與經濟部中央地質調查所(2018)「潛在大規模崩塌之調查與觀測技術手冊」都提到大規模崩塌的發生機制與降雨造成地下水位變化關係密不可分。行政院農業委員會全球資訊網 (<https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=2503956&print=Y>)也提到大規模崩塌多數發生於累積降雨量大於 1000 mm、降雨延時 30 小時以上、降雨強度大於每小時 8 mm 的雨量條件之下，這些降雨基準就可以作為制定大規模崩塌的警戒標準之基礎。

針對崩塌與地下水位變化之關聯研究，Kuo et al. (2018) 曾應用地動訊號迴歸出 62 處崩塌區域之降雨強度 (Rainfall Intensity)、降雨延時 (Duration) 及有效降雨量 (Effective Rainfall) 關聯研究並統計出三者臨界值。Moriwaki et al. (2004) 進行室內大型試驗搭配降雨模擬器，探討淺層崩塌對於含有地下水層與降雨條件下崩塌的發生及運移機制。Bandara et al. (2016) 應用物質點法 (Material Point Method) 對含有地下水分佈之二維邊坡探討破壞與運移行為。

地下水位計監測井

除了善用水土保持局長期建置並監測之地下水井監測站之地下水水位資料，搭配前期計畫(創新研究計畫，110)所舉例之地下水位分佈建置方法。因建置一監測站耗時耗費，維護不易，地下水水位資料點有限，本案僅能夠以有限的水位資料點進行迴歸建置地下水位可能的分佈狀態，並假設地下水位以下之土壤為全飽和狀態。以二維地下水位分佈為例，其水位高程呈現近似拋物線形狀分佈(cf. Viessmann and Lewis, 1995)。

地電阻量測

除了應用現場地下水位監測井(點資料)搭配迴歸式(2.6)繪製地下水位分佈，本案預計應用現場地電阻量測以及研判之地下水位分佈進行後續邊坡穩定性分析。

如圖 2.10 所示，為地電阻儀器鋪設示意圖，主要由一對探測孔(電流極)將直流電通入地下，造成人工電場。並於一對探測孔之間鋪設等間距接收段(電位極)量測此電場之電位差，此差值因地層之導電性及探測點間異常物質之不同而有異常不均之分布。如圖 2.11 所示，以 Wenner 電極排列方式為例，每次選取等間距的四根電極棒作為電流極 C1、C2 與電位極 P1、P2 量測一筆資料(下方之黑點)，藉由移動上述四根電極棒獲取擬似電阻率剖面(Pseudo-Section)。如圖 2.12 所示，最後應用上述擬似電阻率剖面，經由反算分析獲取真實地電阻影像剖面 (Loke, 2003 與 尤仁弘, 2006)。

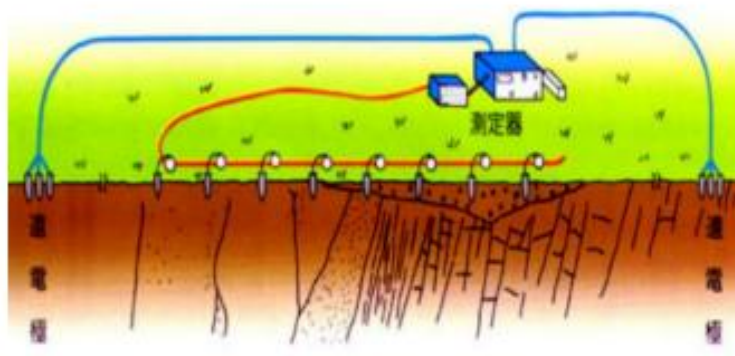


圖 2.10 地電阻影像剖面量測方法示意圖

(圖資料來源：尤仁弘, 2006)

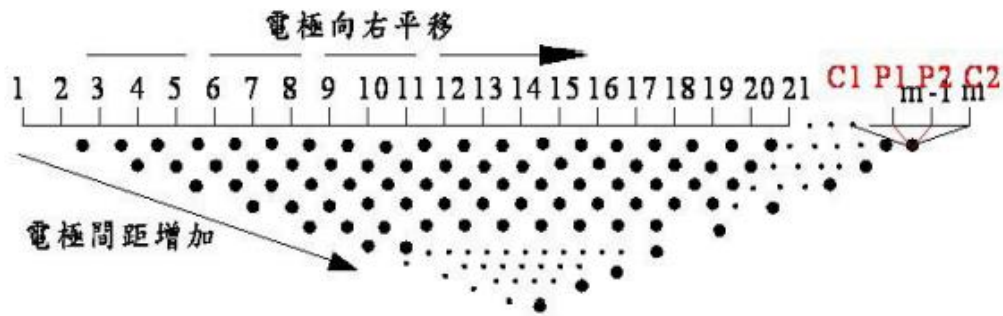


圖 2.11 地電阻影像剖面法探測電極排序方法示意圖

(圖資料來源：尤仁弘, 2006)

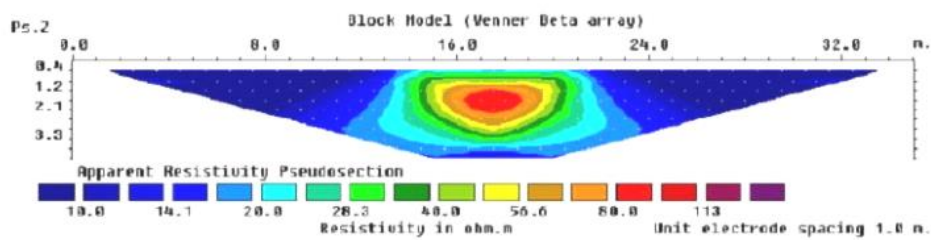


圖 2.12 地電阻量測結果剖面圖

(圖資料來源：Loke, 2003)

本案已針對光華 T002 與秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域搜集水保局臺北分局(2020, 2021)所記錄之地下水位分佈、地電阻量測並推估之地下水位與土壤分層分佈資料，現階段已完成加值應用地電阻量測並研判之地下水位分佈進行後續邊坡穩定性分析情境設定(請參酌五章一與二節)。

第四節 精進邊坡穩定分析方法

本案基於創新研究計畫(2021 年)應用之“邊坡安全係數估算法”，本案提出加值應用現場地電阻量測與研判之地下水位與土壤分層分佈資料，本小節將簡要說明如何整合地下水位分佈與土壤分層於邊坡穩定性分析：

一、 邊坡穩定性分析

邊坡穩定分析係考慮可能破壞的區塊所受到的剪應力 (τ_D) 與抗剪應力 (τ_R) 比，此比值 (ratio value) 稱作安全係數(Safety Factor, FS)

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_D} \quad (2.7)$$

當安全係數小於 1 則代表土塊呈現不穩定狀況，反之比值大於 1 代表土塊處於穩定狀況。Briaud (2013) 書中有提到邊坡穩定分析方法大致上可分為無限邊坡理論(Infinite Slope)、有限邊坡理論(Finite Slope)以及採用有限元素法(Finite Element Method)進行的力學應力分析(如套裝軟體 FLAC3D)。其中有限邊坡理論則以切片法(Method of Slice)為常見之方法，但需要一先決的破壞面方可進行分析。本案所估算之理想破壞曲面則可提供此先決的破壞面作為分析之依據。此外，因理想破壞曲面在軸向與側向均為固定的曲率，非常適合以力矩平衡的方式進行穩定性分析。

當估算一理想破壞曲面以及可能崩塌深度後，本案透過切片法以力矩平衡的方式進行邊坡穩定性分析。如同 Bishop (1955) 所提出之切片法的做法，針對預先假設之崩塌破壞面將二維邊坡切割成數塊垂直土體 (如 套裝軟體 GeoStudio)。三維的分析，則可考慮如同 Huang and Tsai (2000) 或是 Scoops3D 的作法，將土體切割成柱狀土體，因理想破壞曲面在軸向與側向均為固定的曲率，可在這兩個方

向分別計算其力矩(作用力與對應的力臂)，透過向量相加進行邊坡安全係數的分析。

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

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

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(2.7)可將破壞面上的地形分佈對於安全係數的影響納入考量，其各物理量示意圖為圖 2.13。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)。

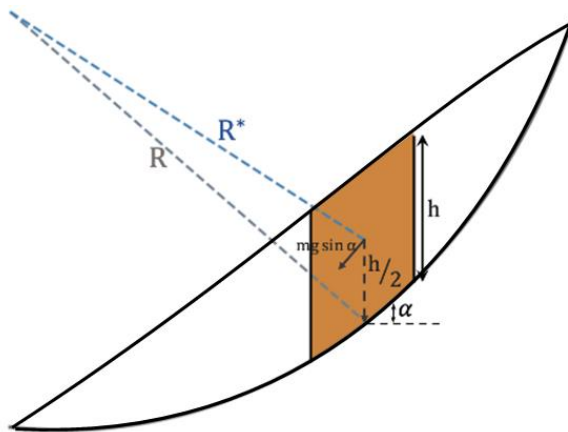


圖 2.13 切片法曲率半徑 R 與有效力臂 R^* 示意圖

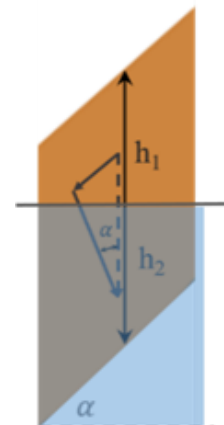


圖 2.14 切片法考慮地下水之示意圖

當考量監測井所量測之地下水位高於破壞面時，其對應之邊坡安全係數須考量土體高度以及地下水位，計算如下

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{eff}}^i \cos \alpha^i R \tan \phi_b}{\sum_{i=1}^n (W_1^i R_1^i + W_2^i R_2^i) \sin \alpha^i} \quad (2.9)$$

依據前述應用理想破壞曲面所推估之 R 為破壞半徑，其中上層不含水之土體高度為 h_1^i (如圖 2.14 所示)，其重力對應之力臂為 $R_1^i = R - (0.5h_1^i + h_2^i) \cos \alpha^i$ ，下層飽和土體高度為 h_2^i (如圖 2.14 所示)，其重力對應之力臂 $R_2^i = R - 0.5h_2^i \cos \alpha^i$ 、 n 為分析塊體總數量、塊體底部因含水其有效正向應力為 $W_{\text{eff}}^i = (\tilde{\rho}_s \phi_s h_1^i + \tilde{\rho}_w \phi_w h_2^i) g \Delta A$ ；其中上層不含水之土體重量為 $W_1^i = \tilde{\rho}_s \phi_s h_1^i g \Delta A$ 、下層飽和含水土體重量則表示為 $W_2^i = (\tilde{\rho}_s \phi_s + \tilde{\rho}_w \phi_w) h_2^i g \Delta A$ ， α_i 為各區塊底部所在切面與水平之夾角、 ϕ_b 為土壤內摩擦角。透過式 (2.8) 與式 (2.9) 可計算出該剖面理想破壞曲面之全乾燥與含地下水位之邊坡安全係數，並篩選出安全係數最小者作為可能發生崩塌之理想破壞曲面。

除了考慮地下水位分佈與邊坡安全係數之關聯，本案增加考慮不同土壤分層對於邊坡穩定性之影響，現階段主要考慮因子包含密度與內摩擦角(ϕ_{b1}, ϕ_{b2})，計算如下

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{eff}}^i \cos \alpha^i R \tan \phi_b^i}{\sum_{i=1}^n (W_{s1}^i + W_{s2}^i) R \sin \alpha^i} \quad (2.10)$$

當分析 i 塊體之穩定性時，若與推估滑動破壞面接觸上層土壤時，其內摩擦角 $\phi_b^i = \phi_{b1}$ ；若與推估滑動破壞面接觸下層土壤時，其內摩擦

角 $\phi_b^i = \phi_{b2}$ ，塊體底部之有效正向應力為 $W_{\text{eff}}^i = (\tilde{\rho}_{s1}\phi_{s1}h_{s1}^i + \tilde{\rho}_{s2}\phi_{s2}h_{s2}^i)g\Delta A$ ；其中上層土體重量為 $W_{s1}^i = \tilde{\rho}_{s1}\phi_{s1}h_{s1}^i g\Delta A$ ；其中下層土體重量為 $W_{s2}^i = \tilde{\rho}_{s2}\phi_{s2}h_{s2}^i g\Delta A$ 。本案應用圖 2.15 進行說明，黑色虛線為土壤分層高程線，若所推估理想破壞曲面接觸面為高於土壤分層線時，其土壤特性則參考下標 b1；當所推估理想破壞曲面接觸面為低於土壤分層線時，其土壤特性則參考下標 b2。

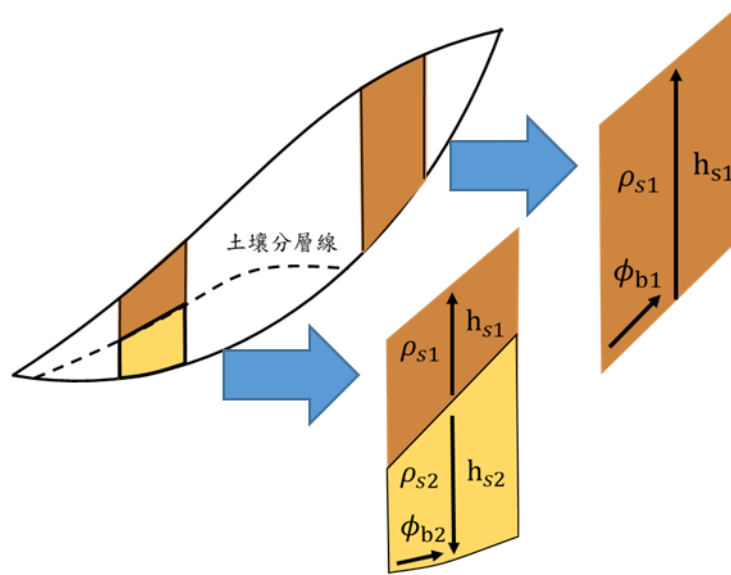


圖 2.15 分層土壤性質與邊坡安全係數估算關聯示意圖

二、土砂運移行為數值模擬

經過上述步驟，我們將得到地下水水位影響之理想破壞曲面所推估之可能崩塌位置與量體，可延用使用本團隊所開發之土砂體動態模擬數值模式(DFMfGT)瞭解該情境下土砂運移行為。

DFMfGT 數值模式為深度積分之固體-液體兩相流模式，搭配現地地形座標系統所整合的土砂土體動態模擬數值模式，相關文獻可參考 Tai et al., (2012, 2019, 2020, 2021)。也因為 DFMfGT 數值模式分別考量計算固體相與液體相各自的守恆方程式，所以可確實描述固

液相分離的現象與不同土砂濃度之土體匯流混合時之現象。

Tai et al., (2020) 應用理想破壞曲面搭配 DFMfGT 模式模擬 2009 年小林村大規模崩塌事件。最後當時間來到 181 秒，如圖 2.16 所示，螢光綠區域為理想崩塌曲面與實際崩塌破壞面重疊之位置，黃色區域為理想崩塌曲面所推估之崩塌量體位置(實際崩塌面並未涵蓋之區域)，深藍色則為實際崩塌區域位置但是並未由理想曲面所涵蓋。土砂開始堆積於楠梓仙溪上時，兩者之間的位置差異之剩下約 9.54%，可證明應用理想破壞曲面所推估之崩塌量體對於土砂隨時間推移後其差異不大，加上理想破壞曲面的建置條件只考慮地形影響之幾何特性，可大幅簡化崩塌破壞面推估之操作。

如圖 2.17 所示，為前期計畫(創新研究，2021)所製作之 142 組隨機參數所模擬之土砂運移行為，其中以土砂流動深度大於 1 cm 之路徑重疊圖形式呈現(其中紫色虛線為 142 組模擬結果之土砂流動深度大於 30 cm 可能造成人員傷亡之邊界)。(左上)紅色矩形範圍代表數值模式模擬的範圍，黃色區塊為光華 T002 之滑動塊體初始範圍。重疊路徑次數之顏色由紅(代表重疊次數多)往藍色(代表重疊次數少)遞減，紅色代表全部 142 組(100%)模擬結果土砂都通過此位置，也表示是比較危險之區域。藍色代表少於 5 組模擬結果土砂運移會通過此位置，也表示是危險性相對較低之區域。

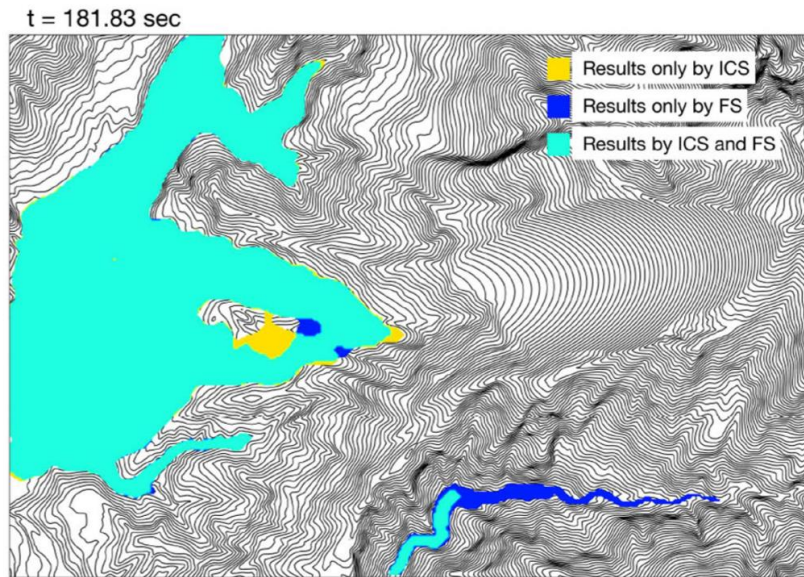


圖 2.16 使用理想破壞曲面與使用實際崩塌區域在 181.83 秒時土砂運移位置差異分佈圖

(圖資料來源：Tai et al., 2020)

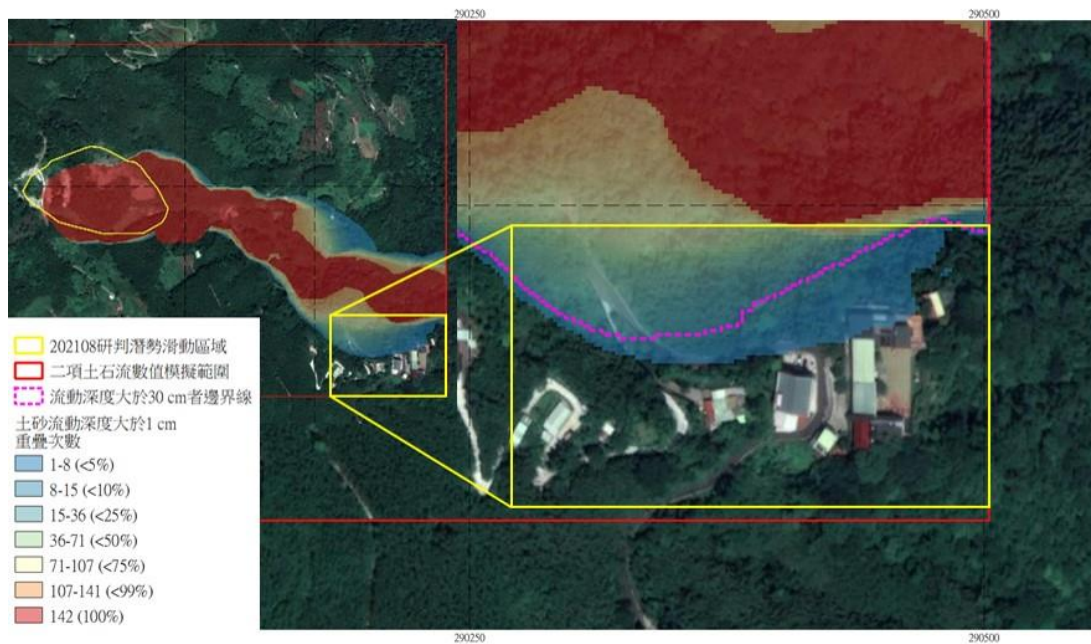


圖 2.17 光華 T002 情境三 142 組隨機參數之土砂流動深度大於 1 cm (30 cm 紫紅線)之路徑重疊局部放大圖

(圖資料來源：創新研究計畫, 2021)

第三章 研究區域簡介

本案除了延伸應用前期計畫(創新研究計畫，2021)之桃園市-復興區-T002(光華崩塌)研究區域，與承辦單位商討後預計增加新竹縣-尖石鄉-T001(秀巒崩塌)研究區域。本章節為彙整水保局臺北分局(2019，2020)之光華崩塌區域與水保局臺北分局(2021)之秀巒崩塌區域環境與現況簡介。

第一節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域 (光華-T002)

本區域之現場監測系統由行政院農業委員會水保局臺北分局於2020年委託「青山工程顧問股份有限公司」進行監測系統之建立與維護。本案將引用水保局臺北分局(2020)計畫中所記錄之資料，如(一)監測系統包含傾斜儀與地下水位計資料；(二)現場調查資料包含了大規模潛勢區域內各個滑動塊體位置，崩崖位置及相關災後調查資料作為本案理想崩塌破壞曲面之驗證資料。

一、 位置

光華地區位於桃園市復興區華陵里，復興區 T002 光華大規模崩塌潛勢區域面積為 20 公頃。主要道路為光華農路，為當地居民通往果園之唯一道路，惟道路路況不佳，已有多次邊坡下滑而造成道路中斷之情形。光華地區北側及南側各有一條蝕溝通過，於下邊坡匯流成同一條蝕溝，匯流至三光溪、並向大漢溪匯流。

二、 地文

本案向內政部申請並取得 2016 年內政部國土測繪中心繪製之 2016 年 LiDAR DEM 作為本案模擬光華 T002 大規模崩塌潛勢區域之

應用(災前)地形。如圖 3.1 所示，紫框範圍為本案模擬光華 T002 大規模崩塌潛勢區域之範圍，面積達 147.59 公頃；紅框範圍為水保局臺北分局(2020 與 2021)經過現場調查後繪製之崩塌潛勢區域；彩色變化為 2016 年 LiDAR DEM 之高程數據，其解析度為 1 m×1 m。

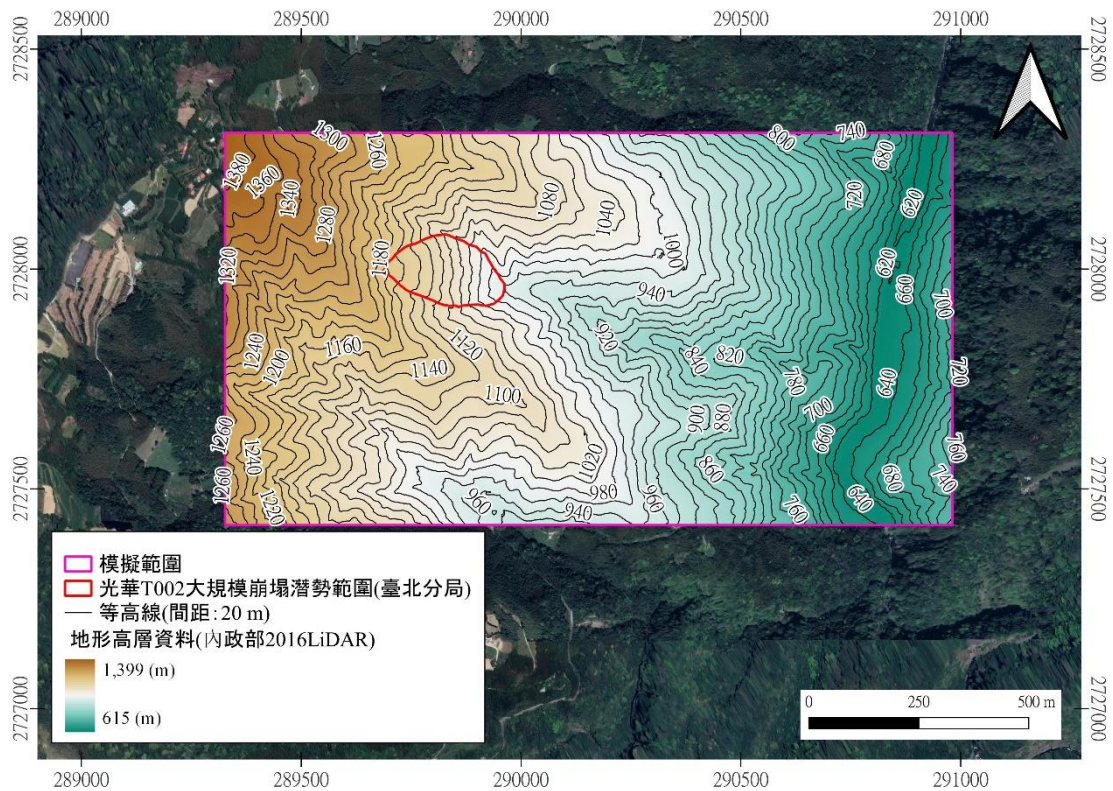


圖 3.1 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域地形
(地形資料來源：內政部國土測繪中心，2016)

三、 潛勢範圍資料

針對光華 T002 大規模崩塌潛勢區域相關影響範圍資料蒐集，本案分別由水保局臺北分局(2020 與 2021)瞭解其崩塌潛勢範圍(圖 3.2 之紅框範圍)；並透過水保局 BigGIS 公佈之影響範圍(圖 3.2 之藍框範圍)。後續，本案將應用上述兩種範圍資料作為建置理想崩塌曲面與土砂運移行為之重要參考基準。

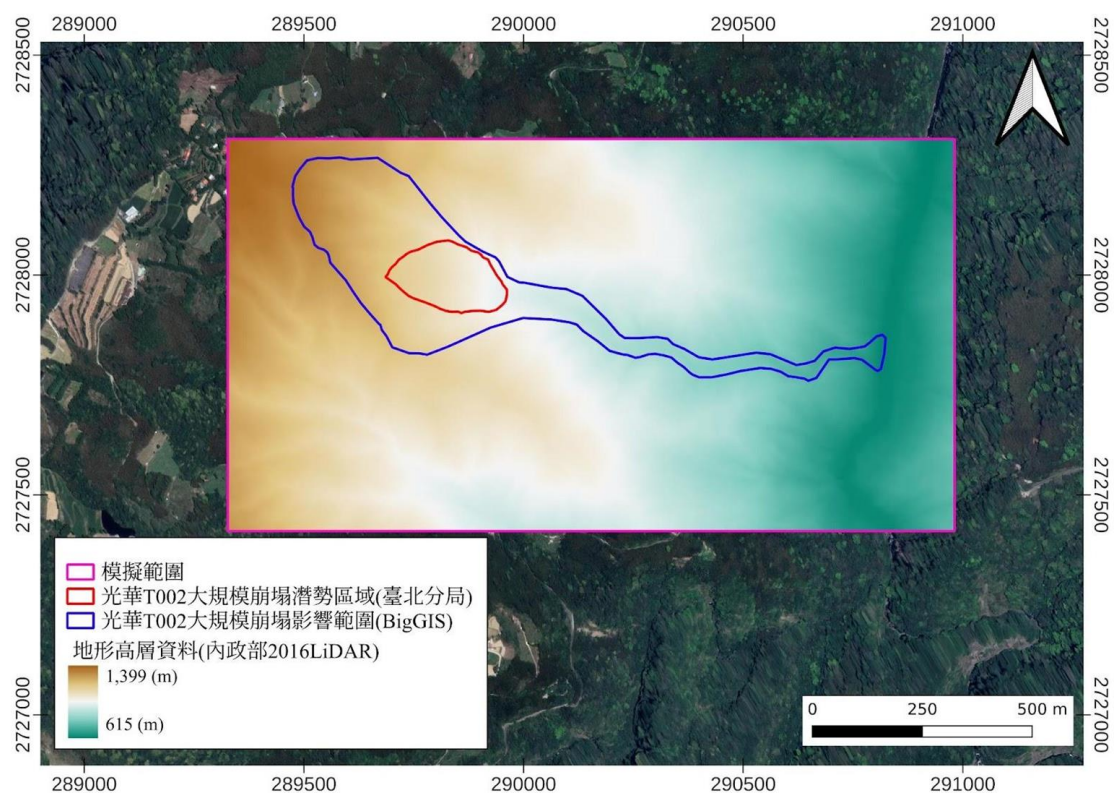


圖 3.2 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域相關資料分佈圖
(地形資料來源：內政部國土測繪中心，2016)

四、 現場監測資料彙整

針對現場監測資料蒐集，本案應用水保局臺北分局(2020)所建置與整理之監測資料，將其分為兩個部分進行討論，一為傾斜儀量測之滑動深度；二為地下水監測井與地電阻量測資料。

有關傾斜儀監測資料，本案將其位置標示於圖 3.3 中，其中紅框範圍為光華 T002 大規模崩塌滑動範圍；因本案考慮到傾斜儀有跨年度建置和潛勢區域有陸續發生滑動之狀況，故後續進行理想崩塌曲面之建置與邊坡穩定性分析必須考慮監測資料之記錄時間。加上現場地電阻量測時間為 2018 年 04 月 03 日，最終本案選取 2018 年所建置之 K18-2BW 與 K18-1BW 傾斜儀作為後續建置理想崩塌曲面之參考依據，其相關簡述如下。

K18-1BW 位於滑動範圍坡腹上游之光華農路旁(圖 3.3 之紅框內偏中心之紅星)，其鑽孔深度為 80 m，經三次現場量測(2018 年 05 月 07 日、05 月 15 日與 05 月 31 日)後因位移過大導致傾斜管斷裂，故研判 K18-1BW 於地表下 25 m 左右為滑動破壞面，參閱圖 3.4(左)。

K18-2BW 位於滑動範圍崩崖邊緣處(圖 3.3 之紅框內偏上緣之紅星)，其鑽孔深度為 40 m，經三次現場量測(2018 年 05 月 15 日與 05 月 31 日)後因位移過大導致傾斜管斷裂，故研判 K18-1BW 於地表下 5 m 左右為滑動破壞面，參閱圖 3.4(右)。

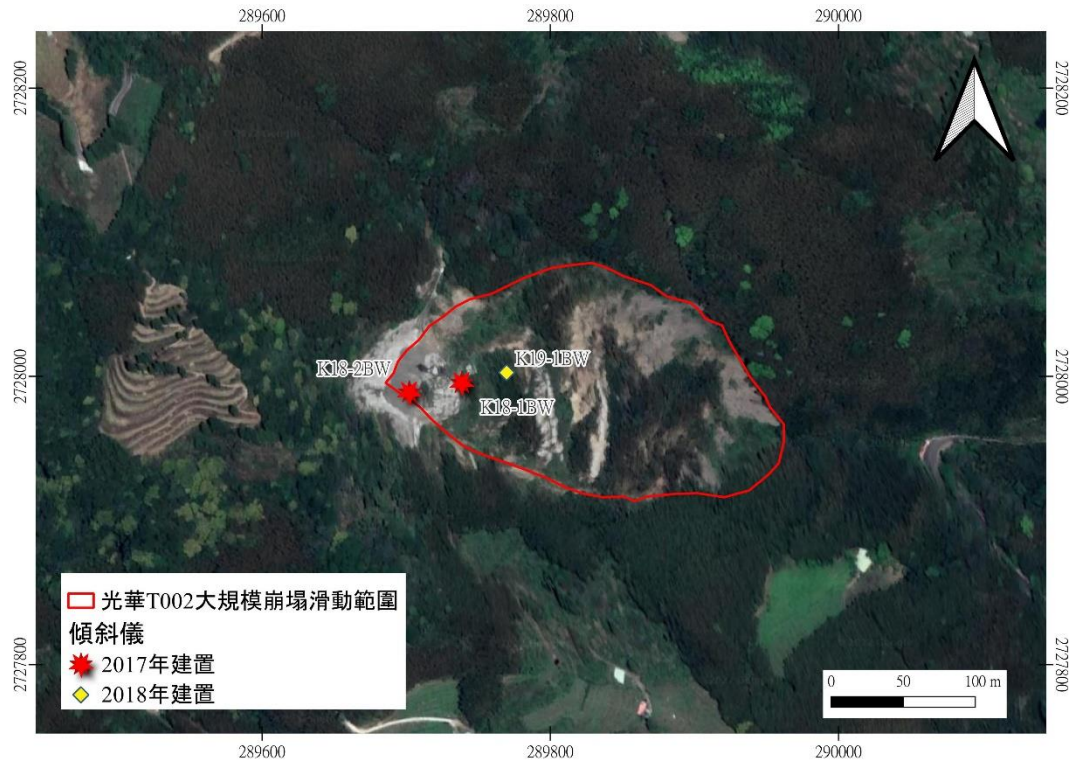


圖 3.3 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域傾斜儀位置圖

(資料來源：水保局臺北分局，2020)

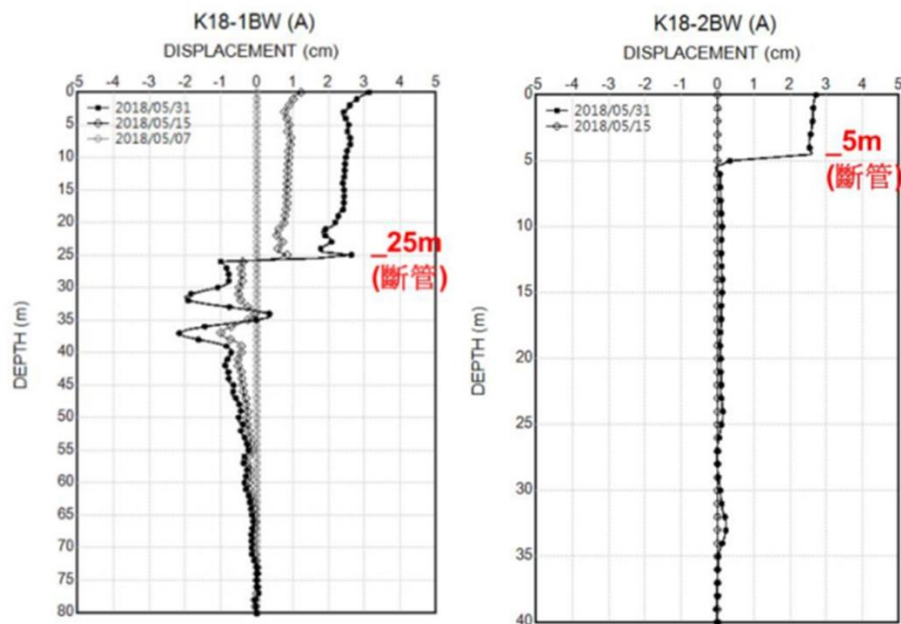


圖 3.4 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域傾斜儀量測資料

(資料來源：水保局臺北分局，2020)

有關地下水監測井資料，因地下水位與滑動深度之量測都共用一鑽探井，故其位置皆標示於圖 3.3 中。為了整合地下水監測井資料與

2018 年 04 月 03 日所進行之地電阻量測，本案選取 K18-2BW 與 K18-1BW 所記錄地下水常水位作為參考依據，其相關簡述如下。

K18-1BW 位於滑動範圍坡腹上游之光華農路旁(圖 3.3 之紅框內偏中心之紅星)，其可測量最大深度為 80 m，分別由水壓計連續記錄(圖 3.5 上之藍線)和手動量測(圖 3.5 上之紅點)，最終因位移過大導致無法將安置儀器而終止，經所記錄之資料最終研判 K18-1BW 地下水常水位於地表下 70 m 左右。

K18-2BW 位於滑動範圍崩崖邊緣處(圖 3.3 之紅框內偏上緣之紅星)，其可測量最大深度為 40 m，此地下水位量測主要依靠手動量測，經三次現場量測(圖 3.5 下之紅點)，最終因位移過大導致無法將安置儀器而終止，經所記錄之資料最終研判 K18-1BW 地下水常水位於地表下 30 至 40 m 左右。

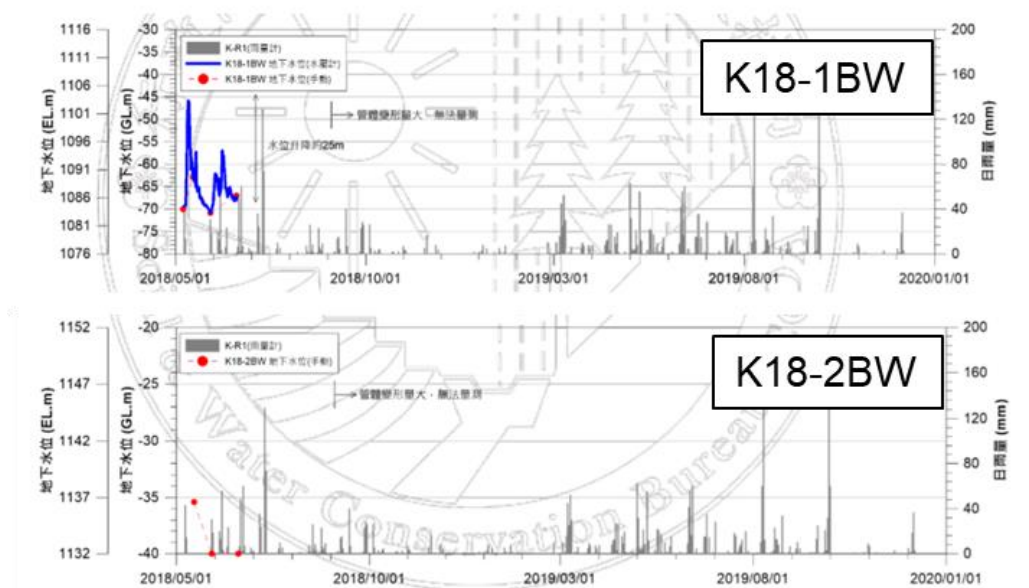


圖 3.5 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域地下水位量測資料
(資料來源：水保局臺北分局，2020)

為了方便閱讀，本案將上述所提到之常地下水位與傾斜儀所量測之滑動深度，整合於圖 3.6 上。其中紅字為傾斜儀研判之滑動深度；藍字為研判之常時地下水位；黑線為傾斜儀每一次量測所記錄之位

移與深度之變化。

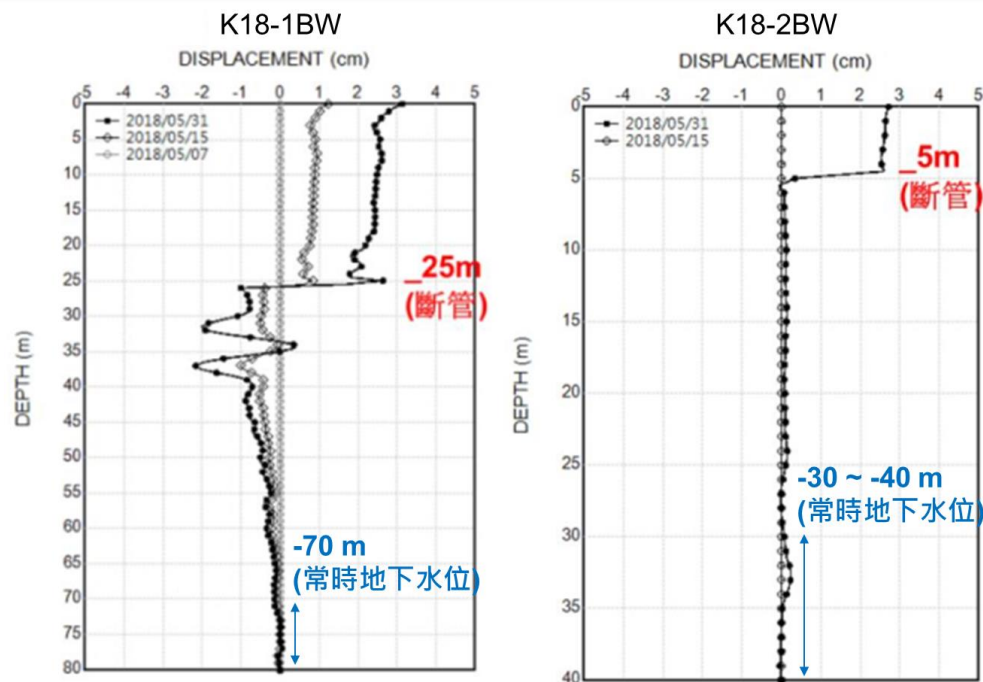


圖 3.6 彙整傾斜儀與地下水監測井研判資料
(資料來源：水保局臺北分局，2020)

有關現場地電阻量測部分，本案由水保局臺北分局(2020)中得知光華 T002 大規模崩塌潛勢區域內共進行 5 處量測(參閱圖 3.7)，其中量測時間分別為 2018 年 4 月 3 日進行 K-L1(距離：150 m)與 K-L2(距離：300 m);2019 年 2 月 1 日進行 K-L3(距離：115 m);2019 年 3 月 13 日進行 K-L4(距離：130 m)與 K-L5(距離：260 m)。因地下水監測資料所記錄之時間介於 2018 年 5 月 1 日至 2018 年 7 月之間，加上本案為了整合地電阻量測後研判之剖面地下水位分佈與地下水位監測井資料，故後續之加值應用部分只會應用 K-L1 與 K-L2(圖 3.7 之橘線)剖面高程資料。

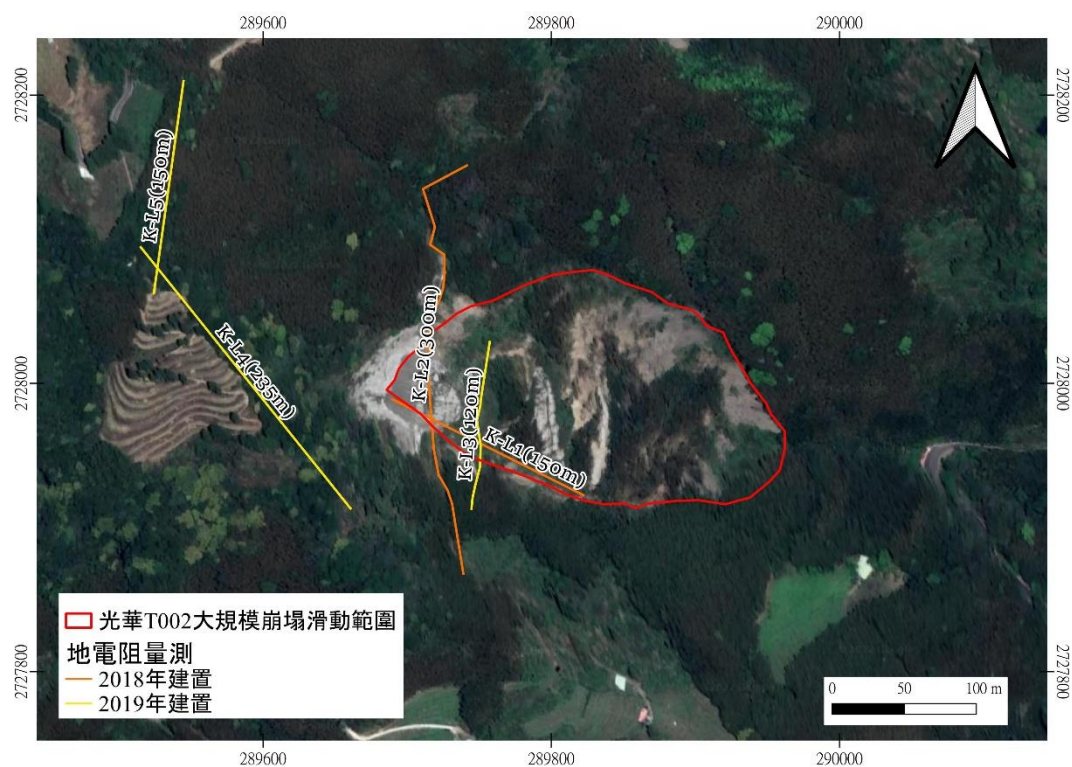


圖 3.7 地電阻量測分佈圖
(資料來源：水保局臺北分局，2020)

如圖 3.8 所示，為水保局臺北分局(2020)記錄光華崩塌潛勢區域之 5 條地電阻量測後研判之地下水位分佈(藍色虛線)以及土壤分層之高程分佈。針對本案有使用之地電阻量測資料，將於第四章第三節之邊坡穩定性分析前置資料處理中進行說明。

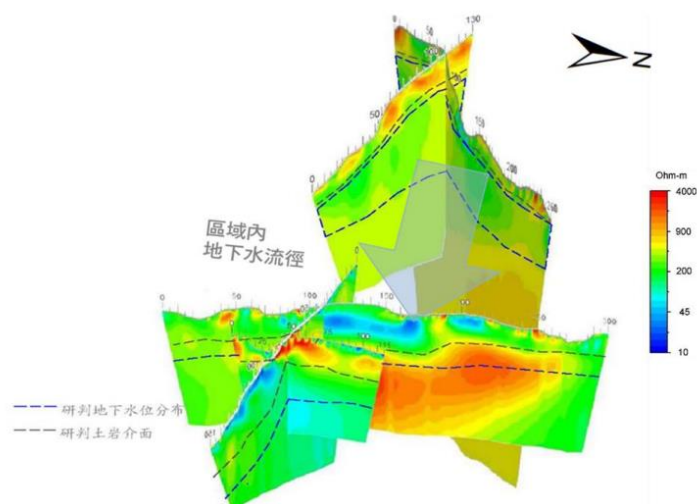


圖 3.8 光華崩塌地電阻量測與研判成果圖
(圖資料來源：水保局臺北分局，2020)

第二節 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域 (秀巒-T001)

本區域之現場監測系統由行政院農業委員會水保局臺北分局於 2021 年委託「青山工程顧問股份有限公司」進行監測系統之建立與維護。本案將引用水保局臺北分局(2021)計畫中所記錄之資料，如(一)監測系統包含傾斜儀與地下水位計資料；(二)現場調查資料包含了大規模潛勢區域內各個滑動塊體位置，崩崖位置及相關災後調查資料作為本案建置理想崩塌破壞曲面之依據。

一、 位置

秀巒地區位於新竹縣尖石鄉，目前秀巒 T001 現有崩塌面積為 8.64 公頃。主要道路為泰岡道路和秀巒道路(竹 60)，為當地居民通往泰岡部落的唯一道路，惟道路路況不佳，已有多次邊坡下滑而造成道路中斷之情形。秀巒 T001 崩塌潛勢區域上邊坡坡度較緩，而坡腹至下邊坡之坡度較陡。

二、 地文

本案向內政部申請並取得 2016 年內政部國土測繪中心繪製之 2016 年 LiDAR DEM 作為本案模擬光華 T002 大規模崩塌潛勢區域之應用(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，本案也向水保局臺北分局申請並取得 2021 年 06 月 24 日(災前)與 10 月 14 日(災後)應用無人機繪製之 DSM。

如圖 3.9 所示，紫框範圍為本案模擬光華 T002 大規模崩塌潛勢區域之範圍，面積達 147.59 公頃；紅框範圍為水保局臺北分局(2020 與 2021)經過現場調查後繪製之崩塌潛勢區域；彩色變化為 2016 年 LiDAR DEM 之高程數據，其解析度為 1 m×1 m。由圖 3.9 至 3.11 可見，秀巒 T001 潛勢區域高程由東南往西南遞減至白石溪，而 2021 年

6月24日與2021年10月14日製作之UAV DSM，其地表裸露範圍之等高線較為平順，代表邊坡上植生覆蓋較少，主要為實際地表高程。因此，可應用2021年10月14日製作之(災害發生時間：2022/09/13)與2016年Lidar DEM相減得到實際崩塌深度，作為後續建置理想崩塌曲面之依據。

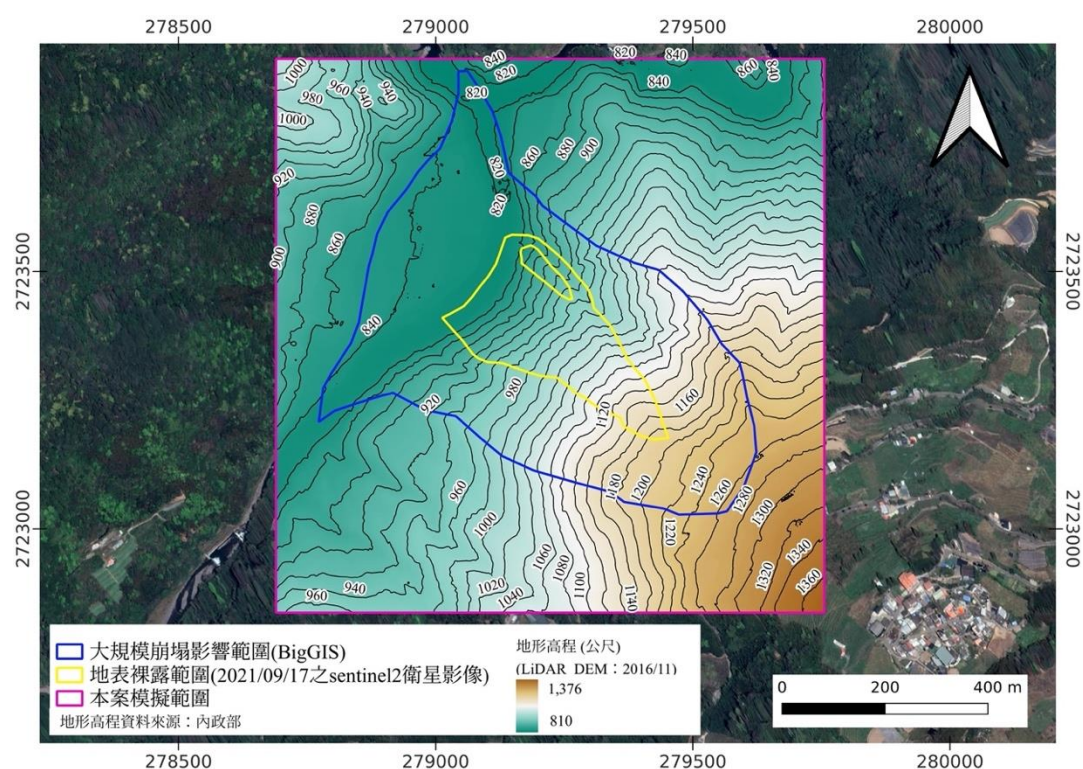


圖 3.9 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域 2016 LiDAR 地形圖

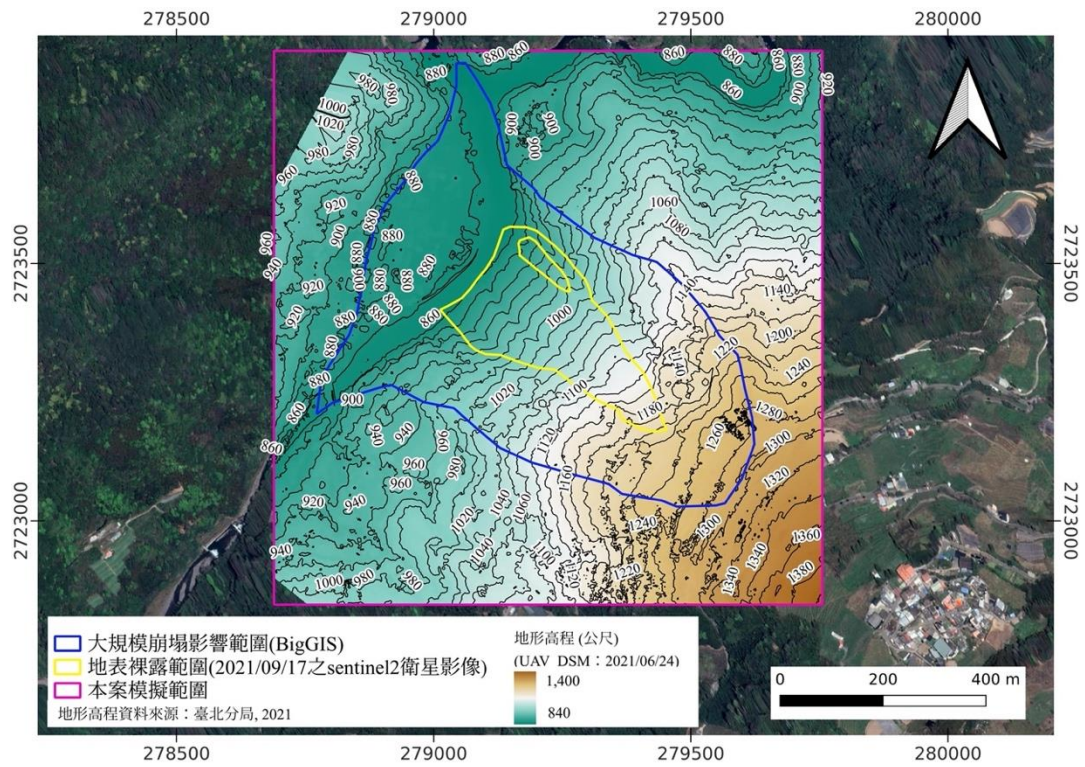


圖 3.10 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域 2021 年 06 月 24 日 UAV DSM 地形圖

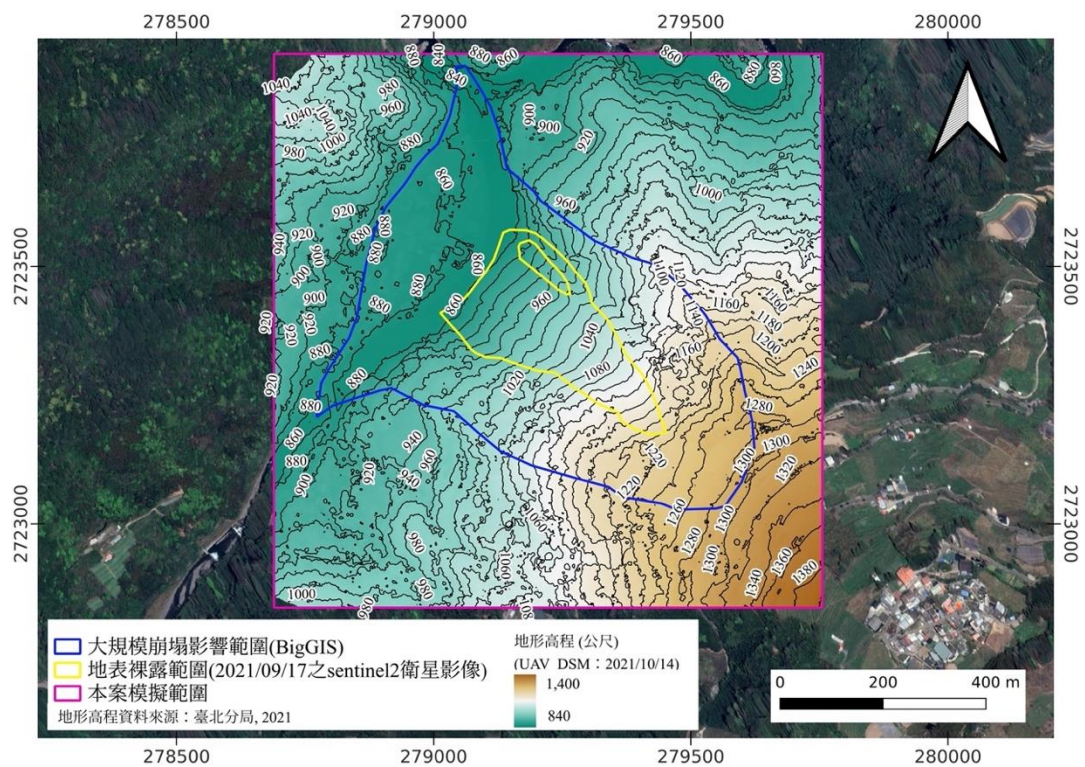


圖 3.11 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域 2021 年 10 月 14 日 UAV DSM 地形圖

三、 潛勢範圍資料

針對秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域相關影響範圍資料蒐集，本案透過水保局 BigGIS 公佈之影響範圍(圖 3.12 之藍框範圍)。其中因秀巒 T001 於 2021 年 9 月 13 日發生崩塌未被明確標示其可能崩塌範圍，如本案現階段透過 BigGIS 之災後 3 日(2021 年 09 月 17 日)sentinel 2 衛星照片，圈繪出地表裸露區域(圖 3.12 之黃框範圍)作為後續土砂運移行為之重要參考依據。

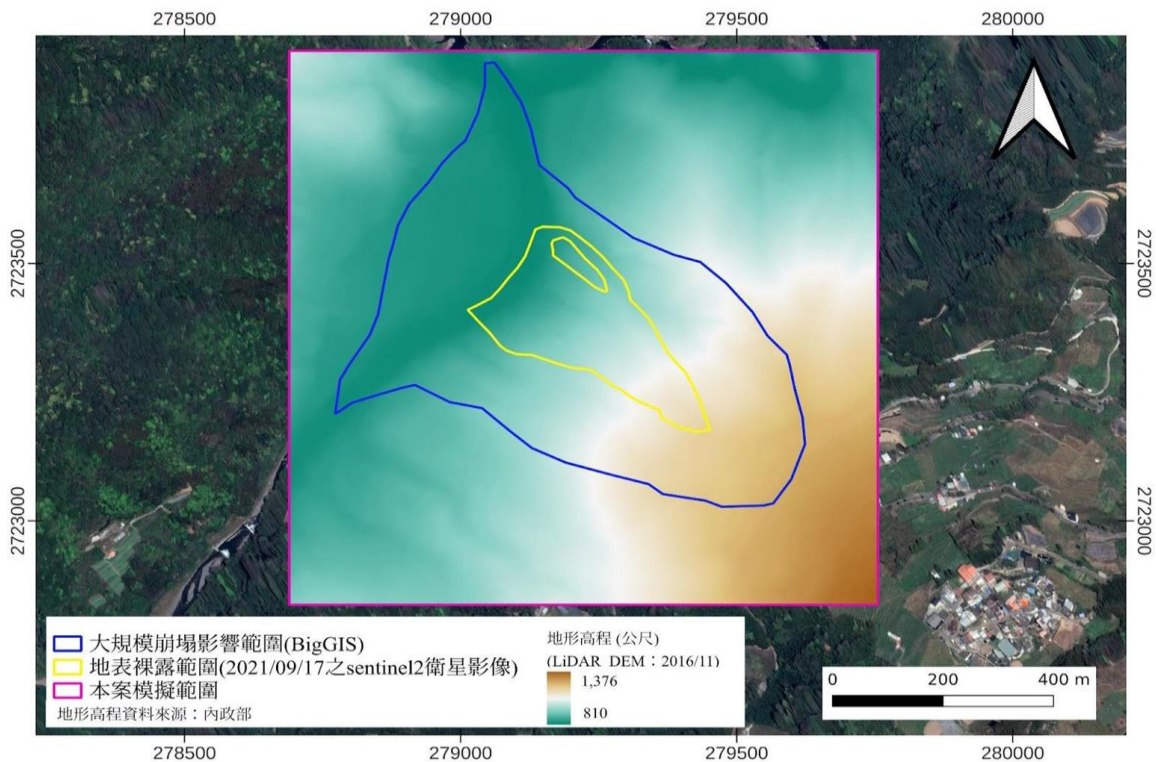


圖 3.12 秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域相關資料分佈圖

最終本案選取 2016 年內政部國土測繪中心繪製之 LiDAR DEM(圖 3.12)與水保局臺北分局(2021)繪製之 2021 年 10 月 14 日繪製之 UAV DSM(圖 2.26)瞭解其可能崩塌範圍。因 LiDAR 地形資料屬於 DEM 而 UAV 地形資料屬於 DSM，所以本案在相減兩期地形後只取圈繪崩塌深度大於 1m 處且位置坐落於地表裸露處(圖 3.13 之黃框範圍內色階)，

當作崩塌確定發生之範圍。由圖 3.13 中可發現，最大崩塌深度為 31.77 m，而大部分崩塌土砂都淤積於河岸和坡趾處，故加劇了圈繪秀巒 T001 可能崩塌範圍的難度。

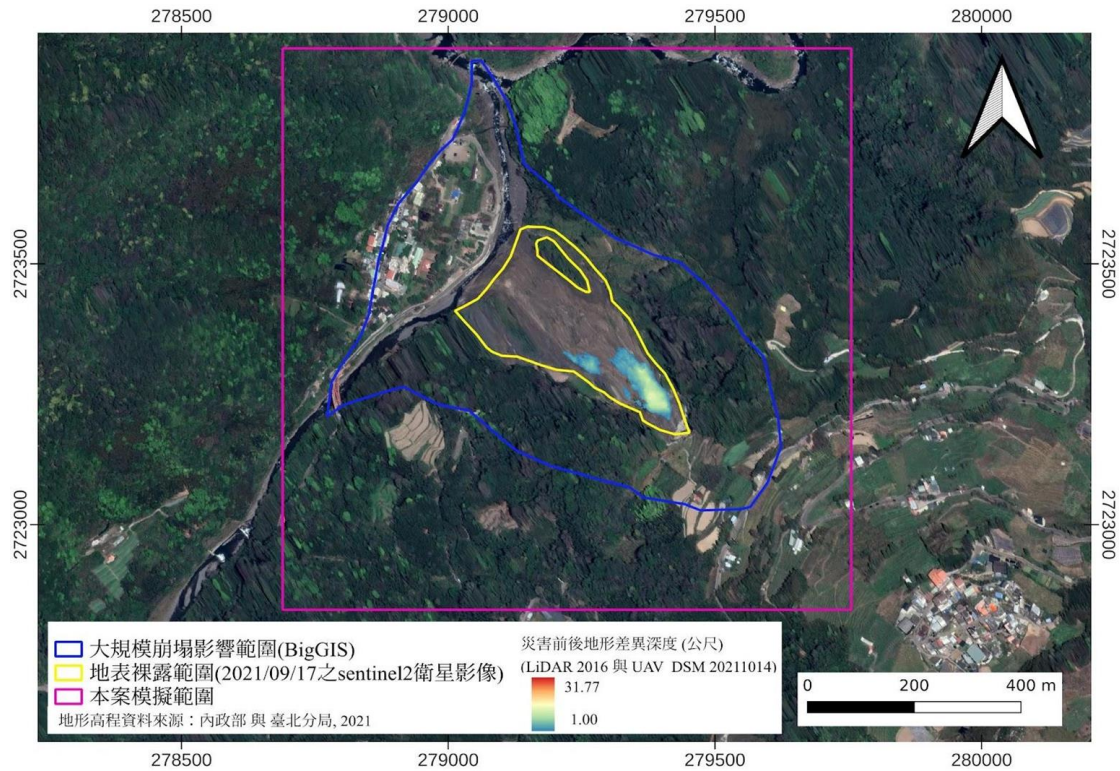


圖 3.13 秀巒 T001 之 2016 年 LiDAR DEM 與 2021 年 10 月 14 日 UAV DSM 地形差異處(確定發生崩塌範圍)

因建置理想崩塌曲面時，必須提供可能崩塌範圍資料，如圖 3.14 所示，本案應用圖 3.13 中確定發生崩塌範圍以紅色標示，搭配 2016 年 LiDAR DEM 資料往下游處沿着當時地勢較高處(鎖定局部嶺線)並結束於河岸處，最終圈繪處可能之崩塌範圍以紫框標示，作為後續建置理想崩塌曲面之參考依據。

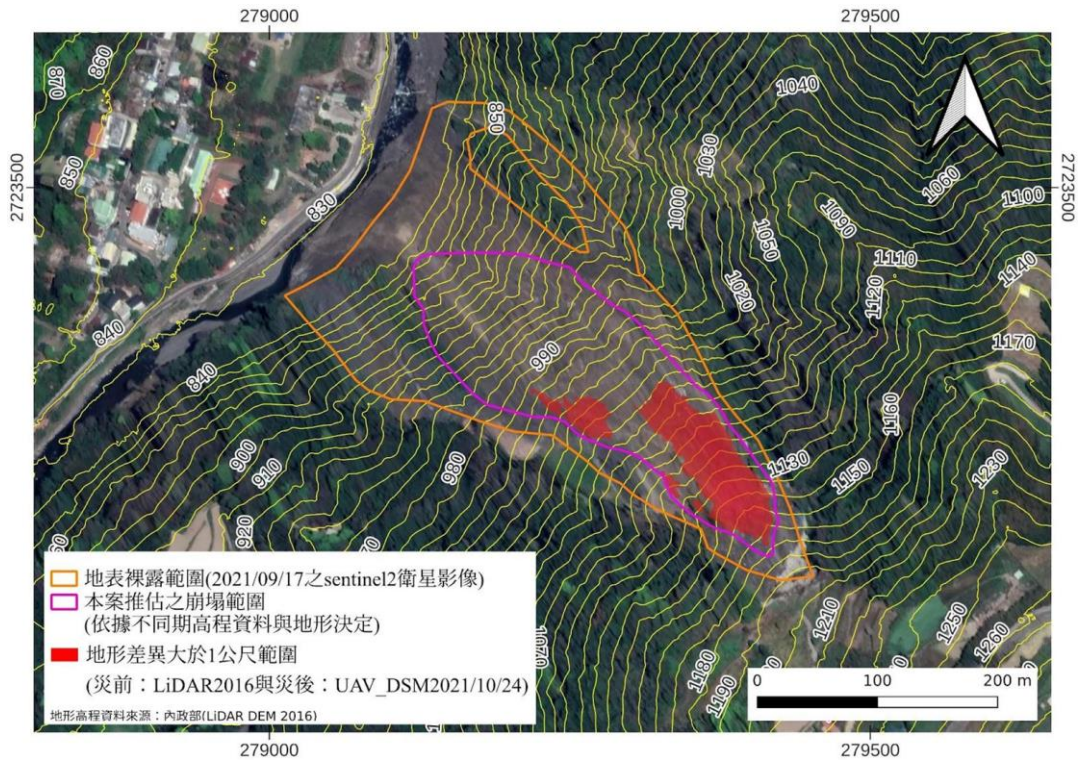


圖 3.14 秀巒 T001 可能崩塌範圍推估圖

四、 現場監測資料彙整

針對現場監測資料蒐集，本案應用水保局臺北分局(2021)所建置與整理之監測資料。其中已建置之傾斜儀共 9 處 (編號：17-1BW、17-1W、17-2B、17-2W、17-3BW、17-4BW、18-1BW、18-2BW 與 19-1BW)及 6 處地下水位監測井(編號：17-1W、17-3W、18-1P、19-1W 與 19-2W)。由圖 3.15 可見，全部地下水監測井(圖 3.15 之藍點與黃點)與傾斜儀(圖 3.15 之紅點與黃點)都建置於地表裸露範圍之上游，因此不易於應用其量測滑動深度與地下水位分佈進行邊坡穩定性分析。但是若未來需要分析更上游的邊坡穩定性，此資料即可派上用場。

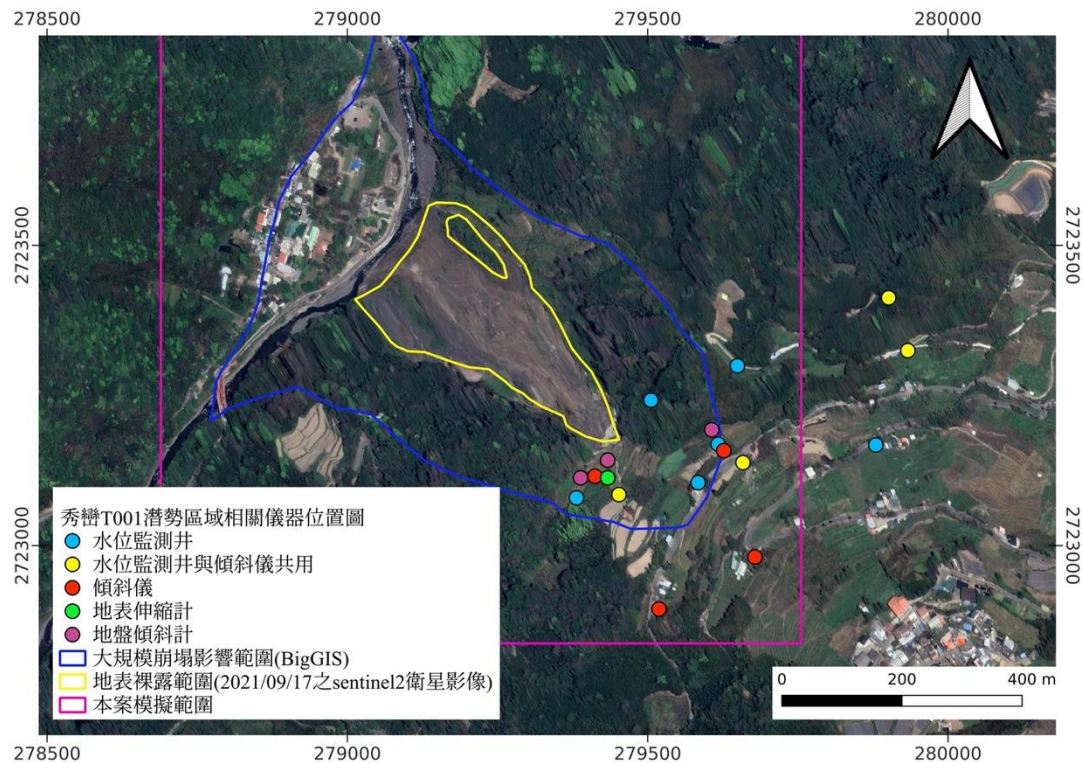


圖 3.15 現場監測井位置圖

(資料來源：水保局臺北分局，2021)

而地電阻量測部分，由水保局臺北分局(2021)計畫書中記錄2017年進行7次量測，編號L1至L7；而2018年進行6次量測，編號L8至L13，共進行13條地電阻量測。如圖3.16所示，由2017年至2018年10月8日完成之地電阻量測以藍線標示(L1至L10)以及2018年10月8日後再進行2處量測以橘線標示(L12與L13)。如圖4.18所示，其中於2017年4月23日至26日所進行地電阻量測(編號L2)，沿着現有秀巒崩塌上邊坡進行量測，故可瞭解秀巒現有崩塌上邊坡之地下水位分佈。最終水保局台北分局(2021)整合13處地電阻量測成果於圖3.17與圖3.18並搭配現場調查確認，即可大致了解秀巒T001潛勢區域之地下水流經路徑與其地下常水位分佈。

第三章 研究區域介紹

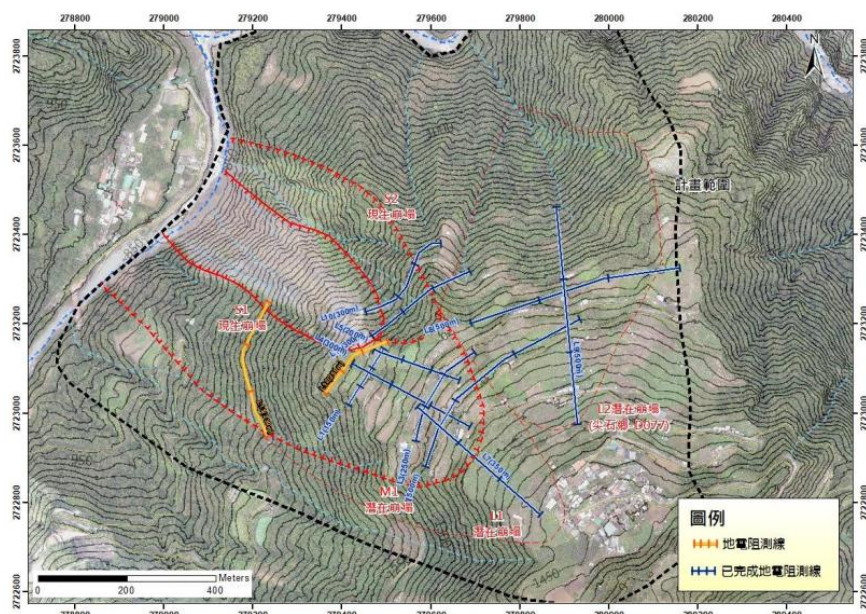


圖 3.16 秀巒及泰崗地區地質鑽探、地電阻探測及相關儀器配置平面圖
(圖資料來源：水保局臺北分局，2021)

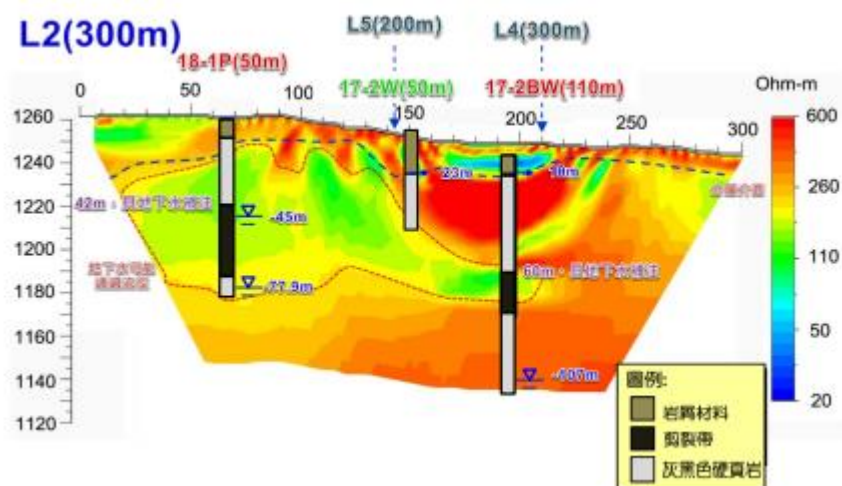


圖 3.17 秀巒及泰崗地區藉由地電阻探測成果，大致掌握地質材料及可能含水層分布
(圖資料來源：水保局臺北分局，2021)

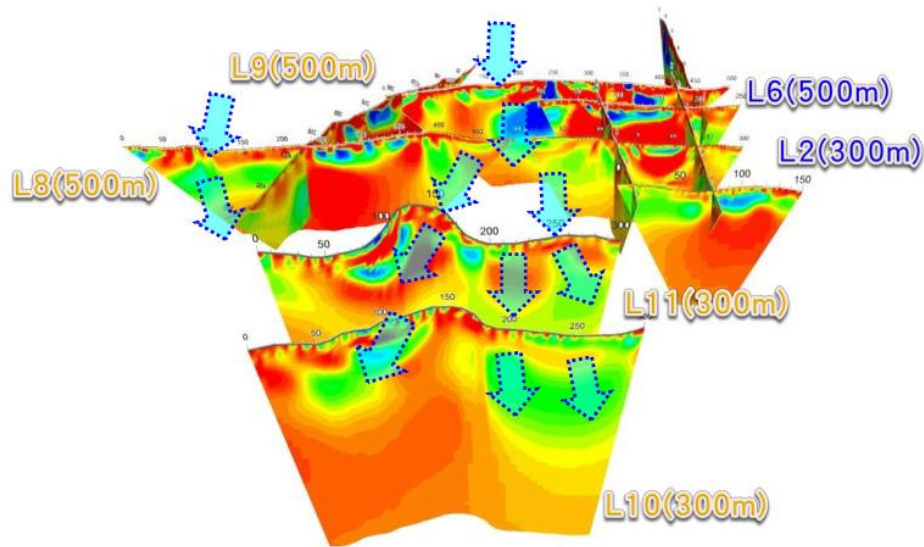


圖 3.18 秀巒 T001 潛勢區域地電阻量測成果相互比對圖
(圖資料來源：水保局臺北分局，2021)

針對現場資料蒐集與彙整，發現到秀巒 T001 潛勢區域之地下水監測井與傾斜儀建置位置因考慮施工難易度，主要建置位置都偏上游保全對象附近，因此水保局台北分局(2021)彙整 13 處地電阻量測資料(圖 3.19 所示)搭配現場地表滲流位置，繪製 2021/09/13 發生崩塌之坡面可能之地下水位與土壤分層剖面圖(圖 3.19 之 A-A'線)。如圖 3.19 所示，橘線為秀巒兩處潛勢區域範圍；黑線搭配綠、橘與水藍色之邊框為地電阻量測位置；A-A'線為水保局台北分局(2021)針對 2021 年發生崩塌之坡面剖面線，其對應可能地下水位與土壤分層資料(參閱圖 3.20)。如圖 3.20 所示，黑線為地形高程；紅線為可能之淺層崩塌破壞面；橘線為可能之深層崩塌破壞面；藍色虛線為可能之地下水位高程。因此本案將應用水保局台北分局(2021)提供之邊坡剖面地下水位與土壤分層高程資料(圖 3.20)，將作為本案後續邊坡穩定性分析之地下水位與土壤分層高程之參考依據資料。

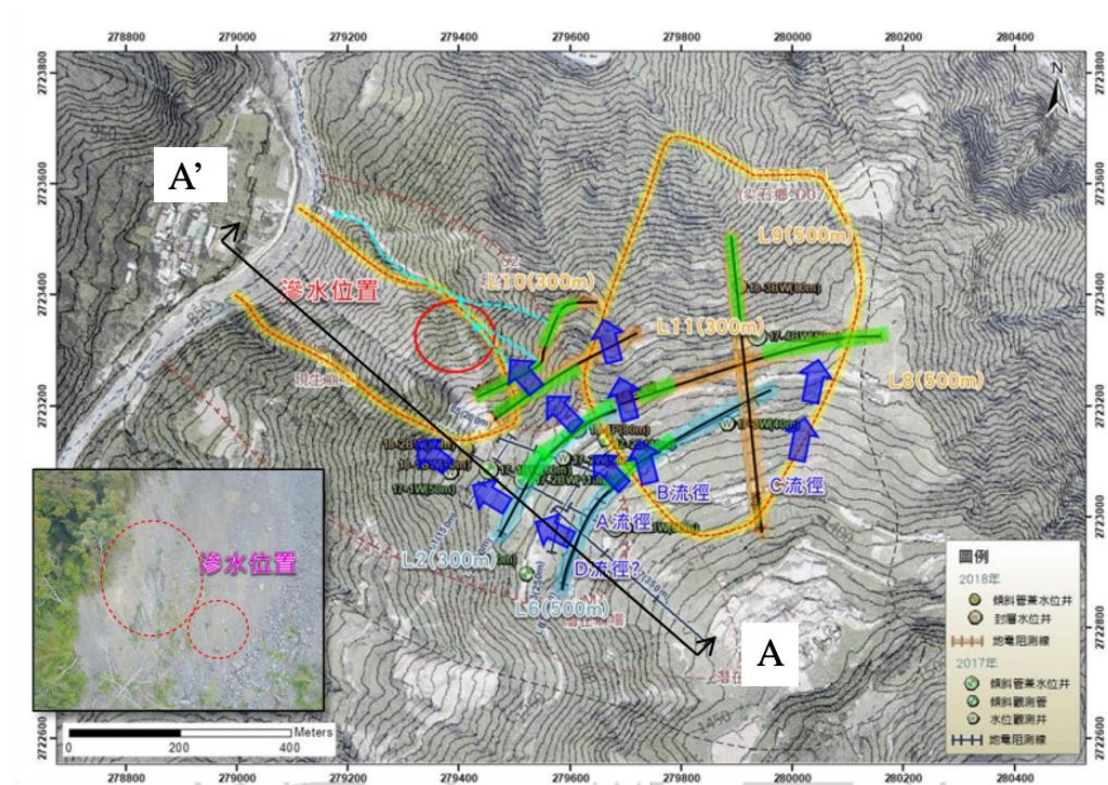


圖 3.19 秀巒 T001 可能地下水流向分佈圖

(圖資料來源：水保局臺北分局，2021)

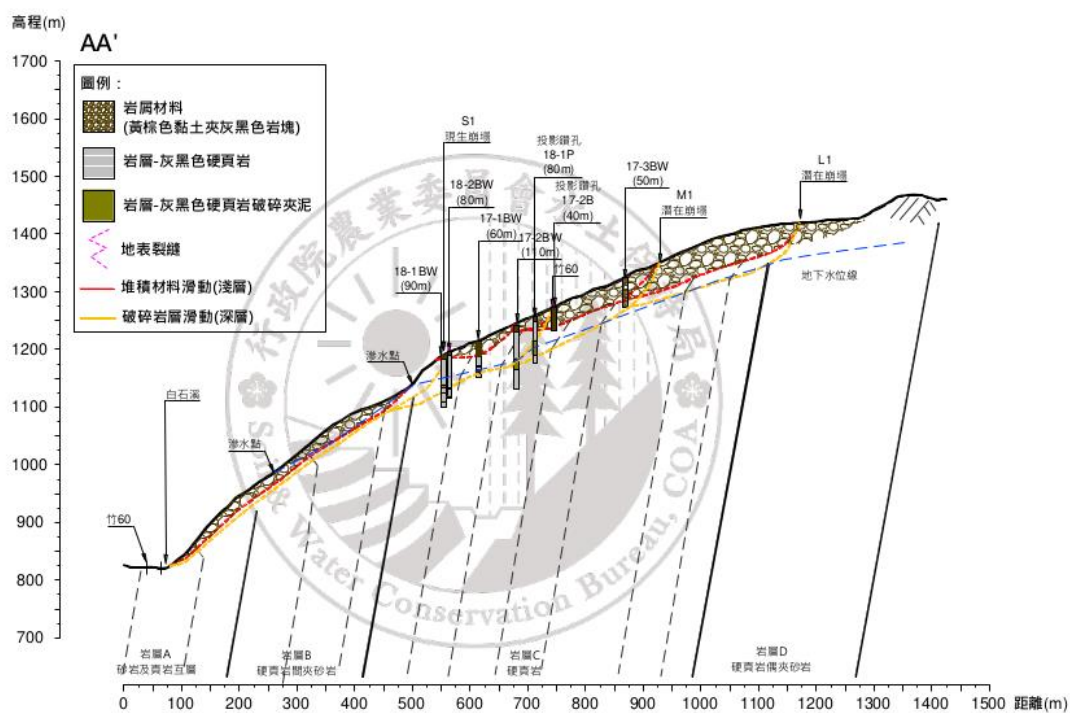


圖 3.20 秀巒 T001 潛勢範圍 A-A'剖面線之對應可能地下水位分佈與土壤分層圖

(圖資料來源：水保局臺北分局，2021)

第四章 理想破壞曲面之估算

本案延伸應用 Wang et al. (2022)所提出之“基因演算-參考橢圓-理想破壞曲面”估算方法，透過參考橢圓搭配數值地形資料即可推估一可能崩塌範圍與量體。

比較理想破壞曲面所推估之可能崩塌範圍與水保局圈畫之崩塌潛勢範圍差異，故採用 Ko et al. (2021)所提出位置偏差(Λ_s)計算方式進行量化其差異性，其定義如下

$$\Lambda_s = \frac{|A_{ICS} - A_{ICS \cap sa}| + |A_{sa} - A_{ICS \cap sa}|}{A_{sa}} \quad (4.1)$$

式中 A_{ICS} 為理想破壞曲面所推估之崩塌範圍面積， A_{sa} 為水保局圈畫之可能崩塌範圍面積， $A_{ICS \cap sa}$ 為理想破壞曲面推估之範圍與水保局圈畫之崩塌潛勢範圍交集之面積。故當 Λ_s 等於 0 時，代表理想破壞曲面所推估之崩塌位置與圈畫範圍完全重疊。

除了比較位置差異，本案也應用 Ko et al. (2021)所提出之體積偏差(ε_s)搜尋最佳理想破壞曲面，其定義如下

$$\varepsilon_s = \frac{|V_{ICS} - V_L|}{V_L} \quad (4.2)$$

式中 V_L 為水土保持局圈畫之崩塌潛勢範圍透過式(2.5)估算之可能崩塌量體， V_{ICS} 為理想破壞曲面推估之崩塌量體。換句話說，理想破壞曲面之建置將已式(4.1)與(4.2)作為建置標的，透過假設各種不同位置與大小之理想破壞曲面，最終選取最佳解理想破壞曲面所推估之可能崩塌範圍與量體，進行後續邊坡穩定性分析與土砂運移路徑探討。

第一節 桃園市-復興區-光華 T002 大規模崩塌潛勢區域

針對光華 T002 崩塌潛勢區域(參閱圖 4.1)，承期中審查意見，本案參閱水保局臺北分局(2021)圈繪之崩塌發生範圍作為後續建置理想崩塌曲面之參考基準。數值地形資料部分，本案於 5 月 16 日成功申請由經濟部中央地質調查所(2013 至 2015 年)所執行之「非莫拉克災區之國土保育之地質敏感區調查分析計畫」，其利用空載雷射掃描技術(LiDAR)製作高解析度數值地形，後續以 2016 年 LiDAR DEM 稱此數值地形資料。如圖 4.1 所示，紅色為參考水保局台北分局(2021)繪製之可能崩塌範圍作為建置理想崩塌曲面之參考依據，螢光綠點為“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面”搭配基因演算法之起始搜尋點位置。

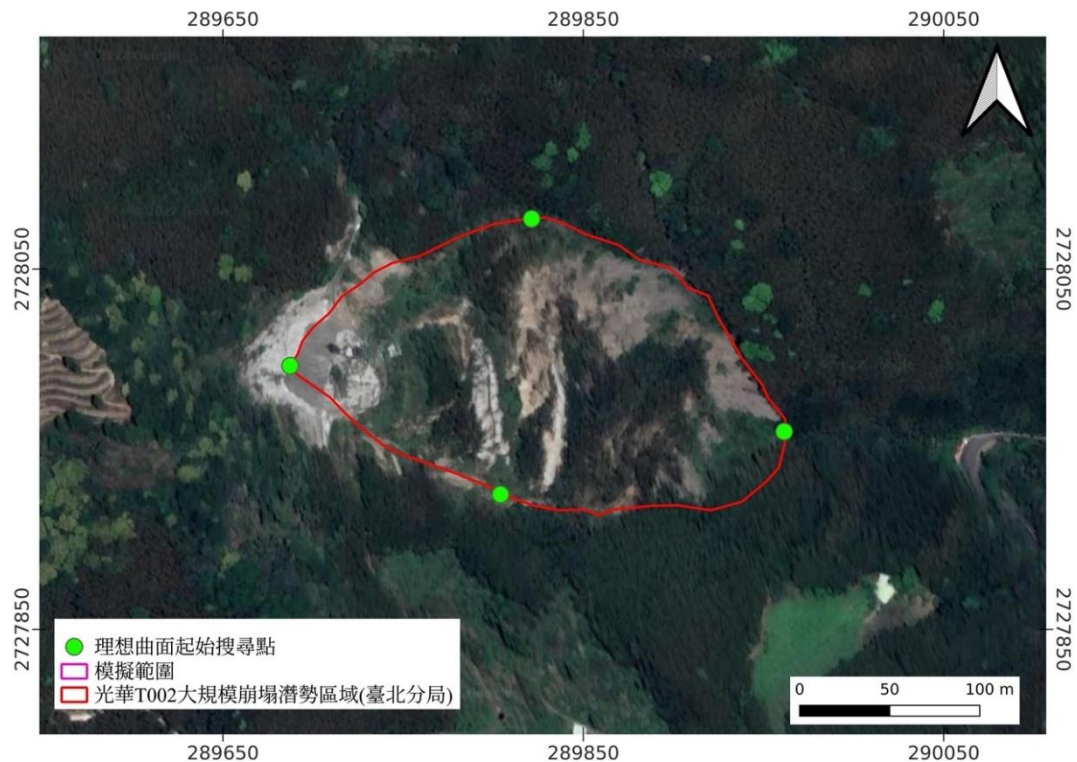


圖 4.1 光華 T002 理想崩塌曲面起始搜尋點圖

本案經過延伸應用 Wang et al. (2022)發展之“基因演算-參考橢圓-理想曲面法”，其主要優勢為可減少模擬次數，進而耗費更少的模擬資源即可推估最佳理想崩塌曲面。最終所推估可能崩塌範圍之結果如圖 4.2 所示，藍色範圍為臺北分局(2021)經現場調查後繪製之崩塌潛勢區域，紅色虛線為理想破壞曲面推估之最佳參考橢圓範圍，紅色實線為最終理想破壞曲面推估崩塌深度大於 0.5 m 之範圍。由評估最佳理想曲面中，其面積位置差異(Λ_s)為 23.36%，所使用之基準體積為 Guzzetti et al.(2009)之 1.5 倍。而推估之可能崩塌土體深度，如圖 4.3 所示，黃色實線為水保局臺北分局(2021)所圈繪之崩塌潛勢範圍，而彩色分佈為理想破壞曲面推估之可能崩塌深度。

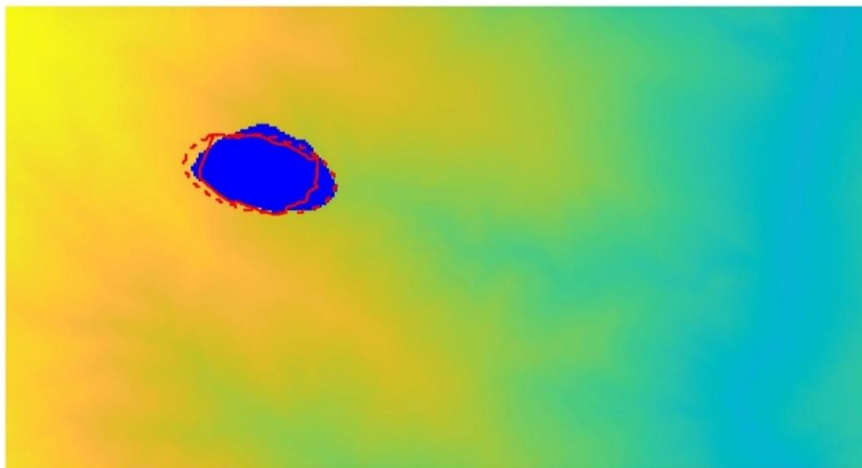


圖 4.2 光華 T002 理想崩塌曲面之參考橢圓(虛線)與最終可能崩塌範圍(實線)分佈圖

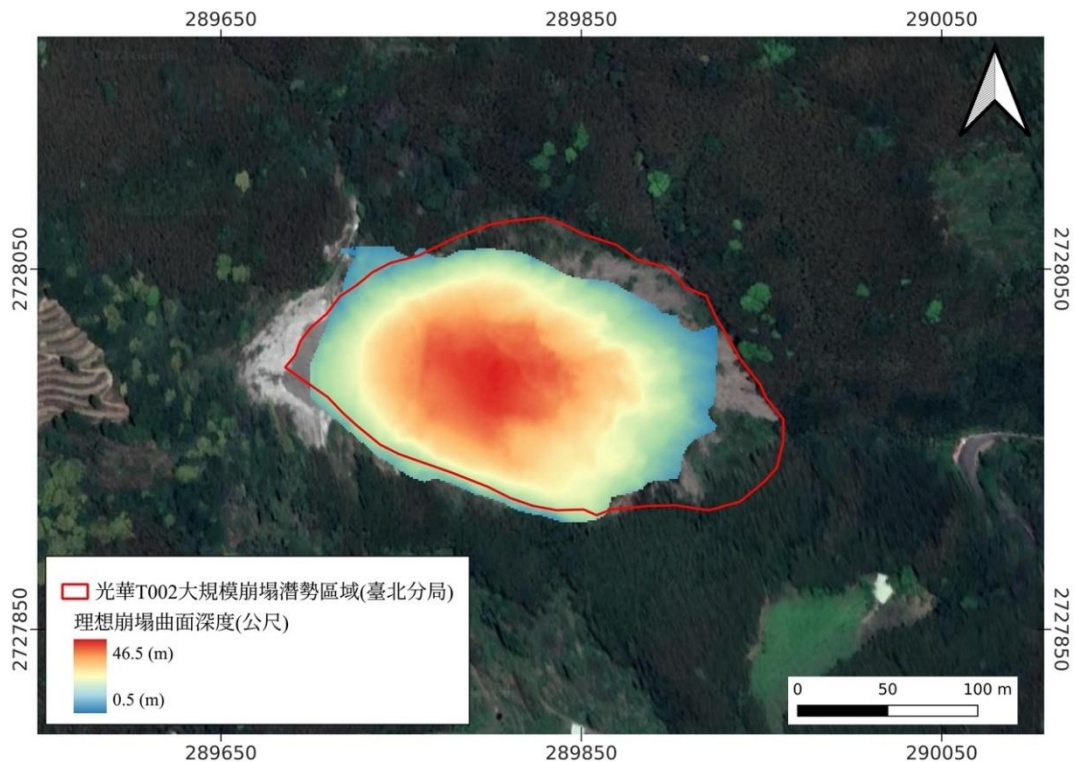


圖 4.3 光華 T002 理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度分佈圖

針對理想崩塌曲面估算之崩塌滑動深度是否符合實際狀況部分，本案由水保局台北分局(2020)所記錄之 K18-1BW(滑動深度：地面以下 25.0 m 左右)與 K18-2BW(滑動深度：地面以下 5.0 m 左右)作為驗證資料。如圖 4.4 所示，紅色範圍為水保局台北分局(2021)經現場調查後圈繪製可能崩塌範圍，螢光綠點為傾斜儀位置，色階分佈為理想崩塌曲面推估之可能滑動深度。其中將傾斜儀位置對應之推估崩塌深度，本案對應傾斜儀位置之推估滑動深度分別為 K18-1BW(滑動深度：地面以下 24.98 m)與 K18-2BW(滑動深度：地面以下 5.68 m)。由此結果可見，本案所估算度與現場量測之滑動深度其差異只有 0.02 與 0.68 m，此差異值對於推估崩塌深度已表現得相當不錯了。具備理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度後，即可進行後續邊坡穩定性分析(參閱第四章第三節與第五章第一節)與土砂運移行為模擬(參閱第五章第三節)。

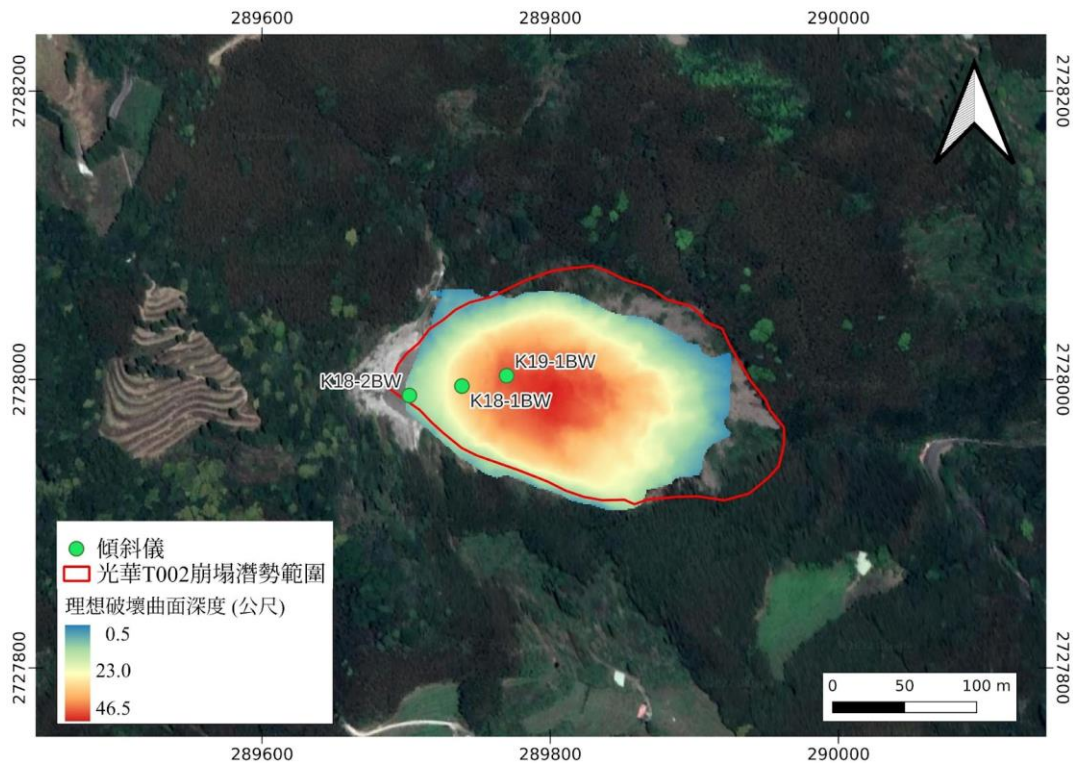


圖 4.4 理想崩塌曲面推估可能崩塌深度與現場傾斜儀位置圖

第二節 新竹縣-尖石鄉-秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域

針對秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域，經過參閱臺北分局(2021)後發現 2021/09/13 發生之邊坡滑動，其崩塌土體未完全滑落，造成不易圈繪可能崩塌滑動範圍。針對高度不確定崩塌範圍之案例，往往不易估算其崩塌土砂量體，使得劃定其影響範圍存更加不確定性。故本案分別應用兩種判斷條件，推估可能崩塌土砂量體，情境一為只考慮位置差異，本案應用災害前後數值地形資料(2016 年 LiDAR DEM 與 2021/11/04 UAV DSM)應用地形滑動深度大於 1 m 處(圖 3.14 紫框範圍)與推估之可能崩塌範圍比較，最終選取最佳之理想崩塌曲面推估之可能崩塌土砂量體；情境二則只考慮崩塌深度差異，本案應用災害前後期數值地形相剪後得到確定發生崩塌範圍，由此範圍內任意建立參考點與推估之理想崩塌對應深度比較，最終選取最佳之理想崩塌曲面推估之可能崩塌土砂量體。其理想崩塌曲面建置條

件與推估之可能崩塌深度於下列進行說明。

邊坡穩定性分析-秀巒 T001 情境一

針對情境一，本案延伸應用 Wang et al. (2022)發展之“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”推估可能崩塌範圍，其中判斷基準為本案圈繪之可能崩塌範圍。如圖 4.5 所示，藍框為水保局 BigGIS 公佈之影響範圍，紫框為本案推估之可能崩塌範圍，四個螢光綠點為“參考橢圓-理想崩塌曲面”之起始搜尋點位置。

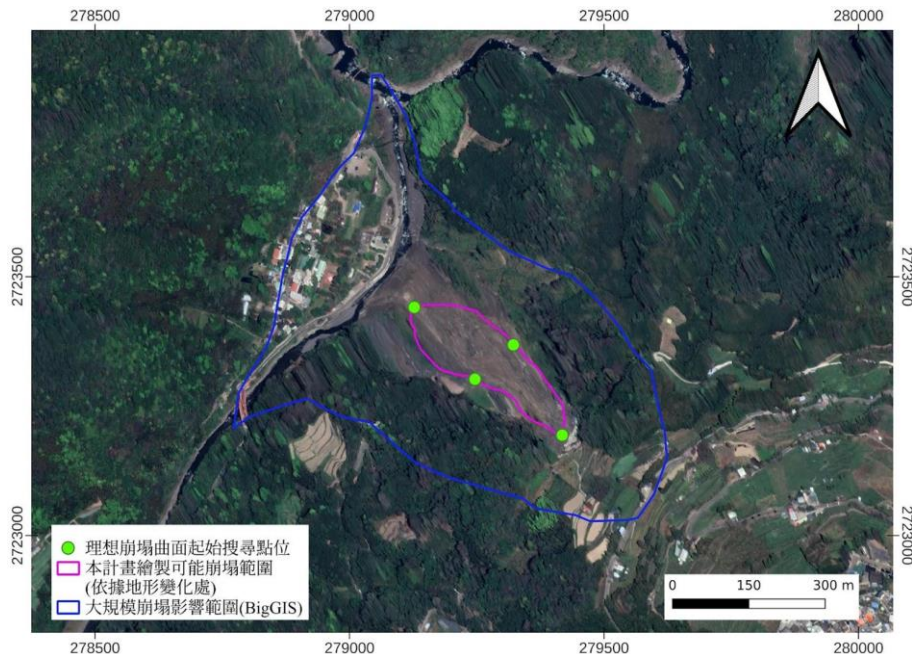


圖 4.5 秀巒 T001 情境一模擬範圍(等高色階圖圈畫範圍)分佈圖

針對理想破壞曲面推估之可能崩塌土體深度(參閱圖 4.6)，藍色實線為水保局臺北分局(2020)所圈繪之崩塌潛勢範圍，而彩色分佈為理想破壞曲面推估之可能崩塌深度。由評估最佳理想曲面中，其位置差異(Δ_s)為 51.66%，由此可發現針對崩塌範圍高度不確定之案例，若評估條件為只考慮劃設之可能崩塌範圍，其推估結果存在較高之差異。

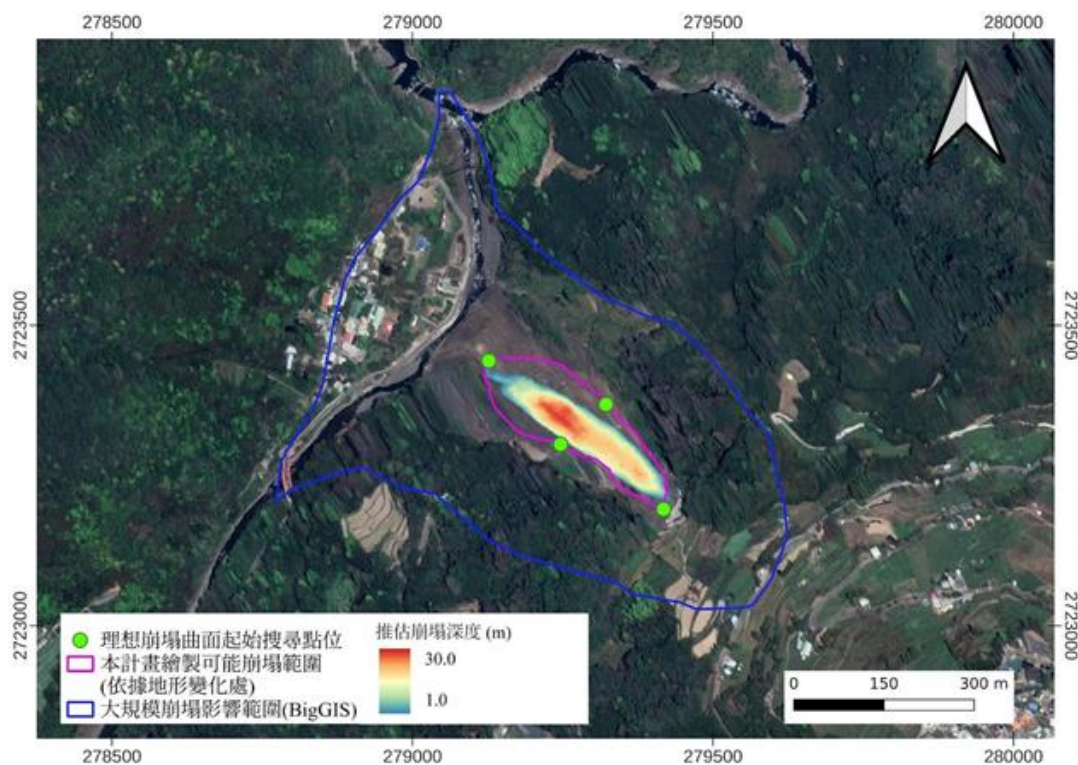


圖 4.6 秀巒 T001 理想崩塌深度分佈圖

邊坡穩定性分析-秀巒 T001 情境二

因秀巒 T001 未劃定明確之崩塌範圍，針對崩塌範圍高度不確定案例，故本案提出情境二，只應用災害前後數值地形差異確定發生崩塌範圍內之深度作為參考依據，延伸應用 Wang et al. (2022)發展之“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”推估可能崩塌範圍。其中判斷基準為本案圈繪應用 2016LiDAR 與 UAV DSM 相剪得到確定發生崩塌範圍(崩塌深度大於 1m)，由此範圍內隨機建立 26 個參考點(設計條件：點與點之間距離比較大於 20 m)。理想崩塌曲面推估之起始資料，如圖 4.7 所示，藍框為水保局 BigGIS 公佈之影響範圍，紫框為本案推估之可能崩塌範圍，四個螢光綠點為為參考橢圓-理想崩塌曲面之起始搜尋點位置。

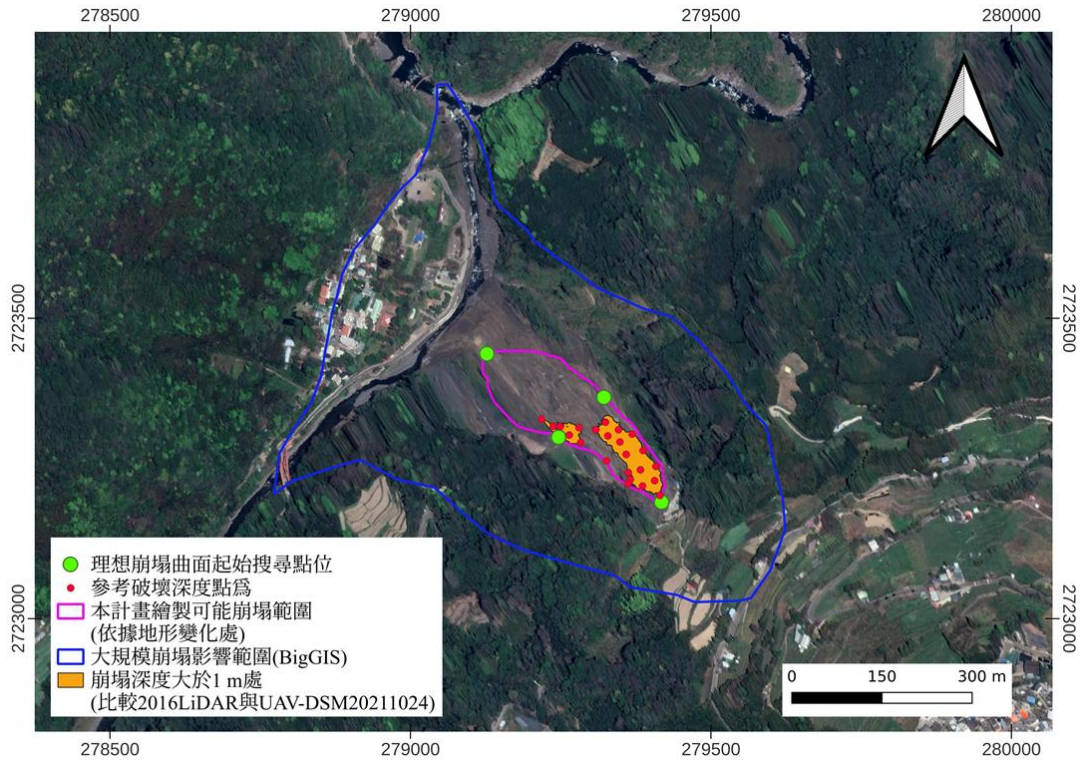


圖 4.7 秀巒 T001 情境二模擬起始條件圖

針對理想破壞曲面推估之可能崩塌土體深度，如圖 4.8 所示，藍色實線為水保局臺北分局(2020)所圈繪之影響範圍，而彩色分佈為理想破壞曲面推估之可能崩塌深度。其推估理想崩塌曲面深度與情境一及二參考點對應之滑動深度之深度羅列於表 4.1 中，其中情境一均方根為 2.00 與情境二均方根為 1.86，由此深度差異平均值可見本案應用之方法，在使用兩期數值地形得到確定崩塌深度作為建置基準可提升 0.93 m。具備理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度後，即可進行後續邊坡穩定性分析(參閱第四章第三節與第五章第二節)與土砂運移行為模擬(參閱第五章第三節)。

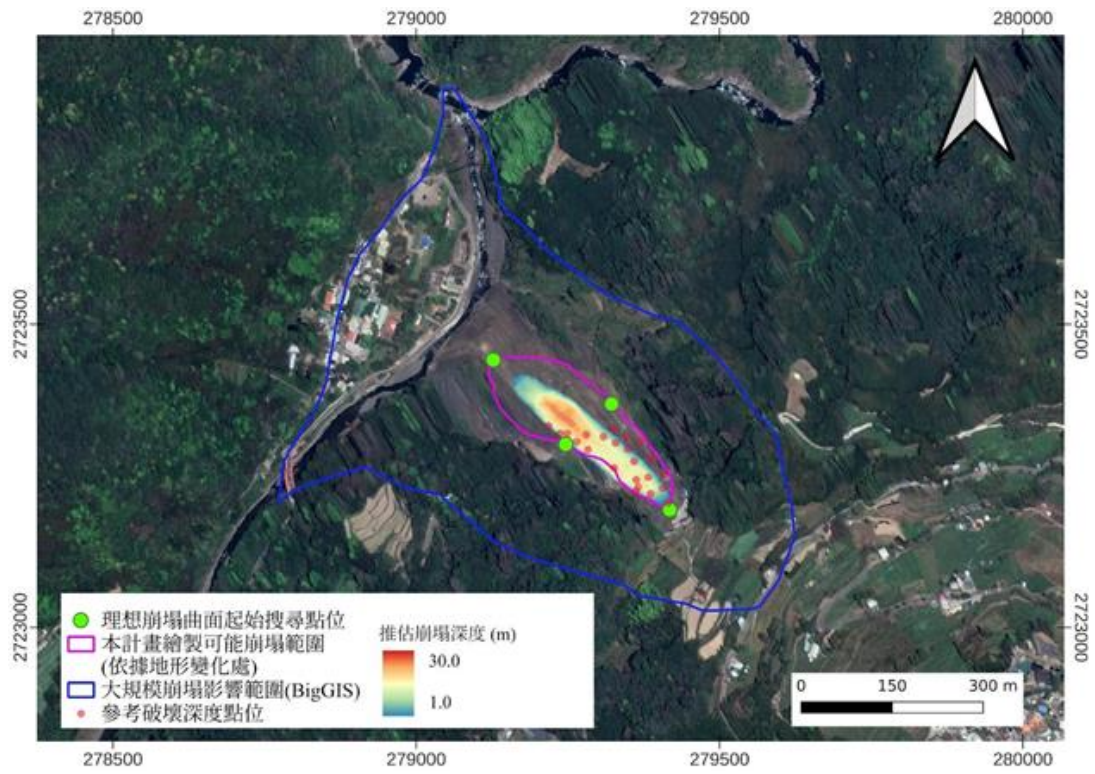


圖 4.8 秀巒 T001 理想崩塌深度分佈圖

表 4.1 秀巒 T001 情境一滑動深度比較一覽表

情境一				情境二			
編號	崩塌深度 (m)	ICS 深度 (m)	差異 (m)	編號	崩塌深度 (m)	ICS 深度 (m)	差異 (m)
1	6.01	8.59	-2.58	1	6.01	5.21	0.8
2	7.18	0.00	7.18	2	7.18	0.00	7.18
3	8.18	9.53	-1.35	3	8.18	7.58	0.6
4	7.43	0.00	7.43	4	7.43	0.00	7.43
5	10.9	6.93	3.97	5	10.9	4.98	5.92
6	2.21	24.19	-21.98	6	2.21	22.08	-19.87
7	1.48	18.77	-17.29	7	1.48	17.96	-16.48
8	3.76	2.20	1.56	8	3.76	2.33	1.43
9	2.23	0.00	2.23	9	2.23	0.00	2.23
10	4.32	16.81	-12.49	10	4.32	15.93	-11.61
11	3.76	12.82	-9.06	11	3.76	12.14	-8.38
12	8.9	11.88	-2.98	12	8.9	11.28	-2.38
13	1.95	10.33	-8.38	13	1.95	5.62	-3.67
14	4.71	5.73	-1.02	14	4.71	5.63	-0.92
15	4.38	11.37	-6.99	15	4.38	7.476	-3.096
16	3.22	0.00	3.22	16	3.22	0.00	3.22

表 4.1 秀巒 T001 情境一滑動深度比較一覽表(續)

情境一				情境二			
編號	崩塌深度 (m)	ICS 深度 (m)	差異 (m)	編號	崩塌深度 (m)	ICS 深度 (m)	差異 (m)
17	1.66	0.00	1.66	17	1.66	0.00	1.66
18	3.13	16.57	-13.44	18	3.13	15.86	-12.73
19	1.21	20.44	-19.23	19	1.21	18.06	-16.85
20	1.69	17.57	-15.88	20	1.69	16.56	-14.87
21	2.01	2.62	-0.61	21	2.01	2.35	-0.34
22	1.73	0.00	1.73	22	1.73	0.00	1.73
23	1.19	18.32	-17.13	23	1.19	16.26	-15.07
24	12.42	17.65	-5.23	24	12.42	17	-4.58
25	1.17	15.67	-14.5	25	1.17	14.03	-12.86
26	2.37	15.99	-13.62	26	2.37	14.83	-12.46
RMS			2.00	RMS			1.86

表 4.2 理想崩塌曲面破壞參數值一覽表

情境 相關參數	光華 T001	秀巒 T001 情境一	秀巒 T001 情境二
Λ_s	23.36%	51.66%	42.83%
ε_s	1.5	0.93	0.001
d1	21.79	22.34	13.16
d2	30.51	0.08	0.589
R1	497.42	441974.22	63246.76
R2	134.89	34.73	51.91
L1	291.25	528.62	545.49
L2	170.88	64.88	69.09
θ	32.09	35.40	34.45
d _{max}	43.16	27.57	24.61

第三節 邊坡穩定性分析前置資料處理

為了可進一步瞭解崩塌潛區域之邊坡穩定狀況，本案應用水保局臺北分局(2020，2021)所記錄之現地監測資料，本章節將說明如何處理地下水位監測井，地電阻量測所推估之地下水位與土壤分層高程資料，搭配理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度與數值地形資料，進行後續之邊坡穩定性分析。

一、光華 T002 崩塌潛勢區域

於光華 T002 崩塌潛勢區域內，水保局臺北分局(2020) 統計歷年建置之相關地下水監測井與地電阻量測，本案將上述資料彙整後列與表 4.3 中

表 4.3 光華 T002 潛勢區域之地下水監測井與地電阻(開始)量測時間表

項目	編號	(開始)量測時間
地下水監測井	K18-1BW	2018/05/01
	K18-2BW	2018/05/01
	K19-1BW	2019/07/01
地電阻量測	K-L1	2018/04/03
	K-L2	2018/04/03
	K-L3	2019/02/01
	K-L4	2019/03/13
	K-L5	2019/03/13

因本案應用 2016 年之 LiDAR DEM 數值地形資料，加上由表 4.3 可發現 2018 年地下水監測井開始量測時間和地電阻量測時間，其時間相差較小(一個月)。綜合上述考量，本案彙整 2018 年建置之地下水監測井與地電阻量測後推估之地下水位與土壤分層高程資料。如圖 4.9 所示，紅框範圍為水保局台北分局(2021)劃定光華 T002 之崩塌潛勢區域，其中地電阻量測分別為本案應用之 2018 年量測之 2 處(橘

線)與不應用之 2019 年量測之 3 處(黃線)；地下水位監測井也分別為本案應用 2018 年建置之 2 處(藍點)與不應用 2019 年間之 1 處(黃點)。當具備地下水位監測井與地電阻量測所推估之地下水位 xy 座標與高程分佈後，即可對應空間分佈之地下水位高程。如圖 4.10 與圖 4.11 為水保局臺北分局(2021)年彙整前期地電阻量測資料並推估之可能地下水位(藍線)與土壤分層(黑虛線)高程分佈。

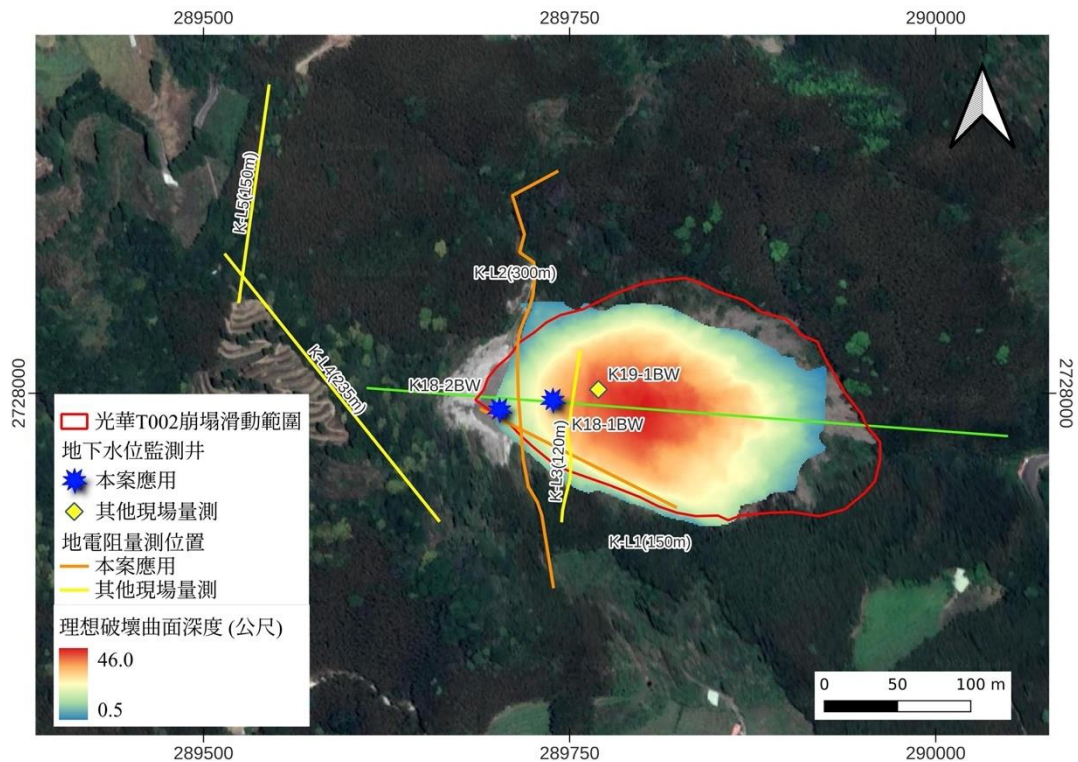


圖 4.9 光華 T002 理想崩塌曲面之參考橢圓(虛線)與最終可能崩塌範圍(實線)分佈圖

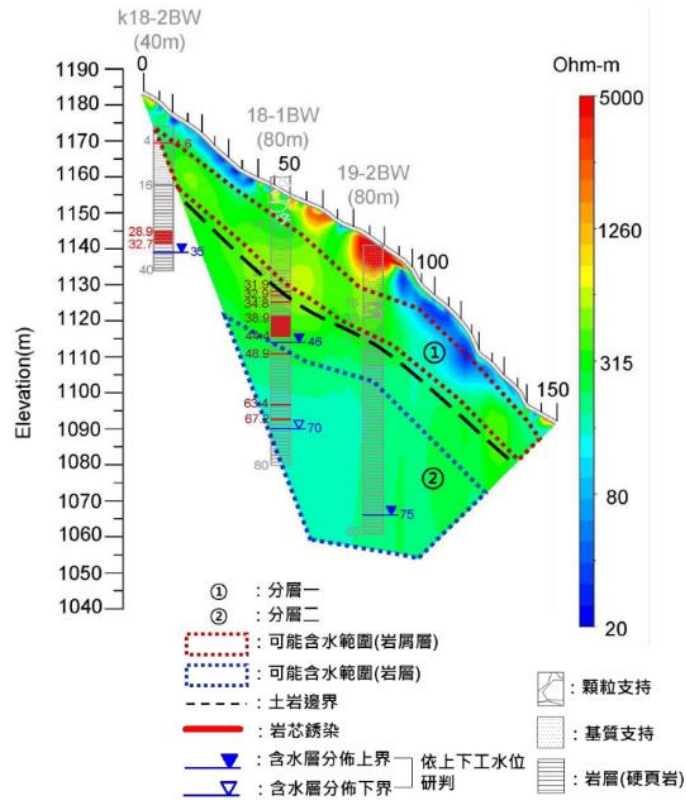


圖 4.10 光華 K-L1 地電阻量測與推估之地下水位與土壤分層剖面圖

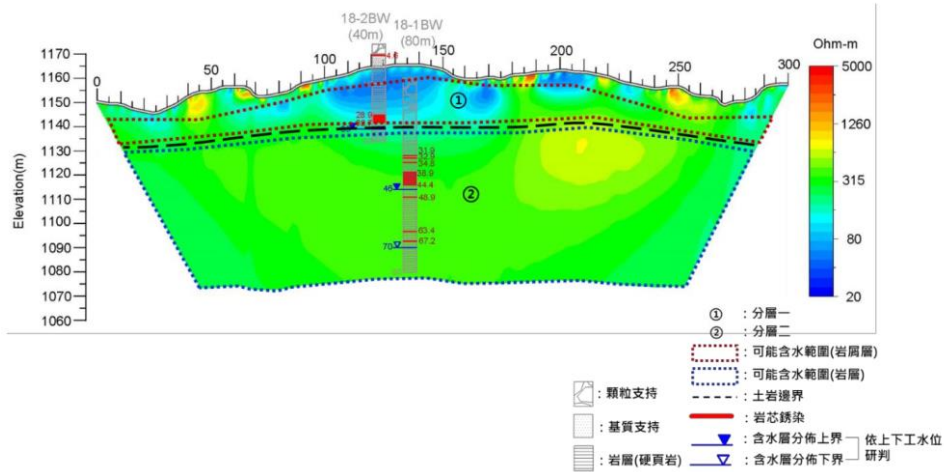


圖 4.11 光華 K-L2 地電阻量測與推估之地下水位與土壤分層剖面圖

如圖 4.12 所示，藍線(K-L1 與 K-L2)由圖 4.10 與 4.11 之藍色虛線(推估之剖面地下水位)對應至空間分佈上；藍點為 2 處地下水位監測井(K18-1BW 與 K18-2BW)對應之位置與高程；顏色分佈為彙整後空間分布之地下水位。如圖 4.13 所示，黑線(K-L1 與 K-L2)由圖 4.10

與 4.11 之黑色虛線(推估之剖面土壤分層高程)對應至空間分佈上；顏色分佈為彙整後空間分佈之土壤分層高程。

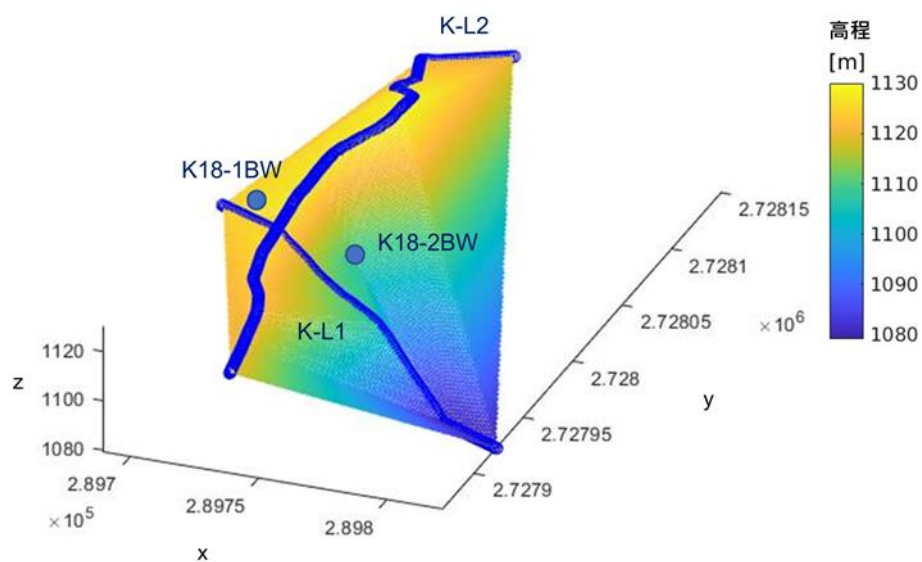


圖 4.12 光華 T002 地下水位監測井與地電阻量測並推估之地下水位分佈圖

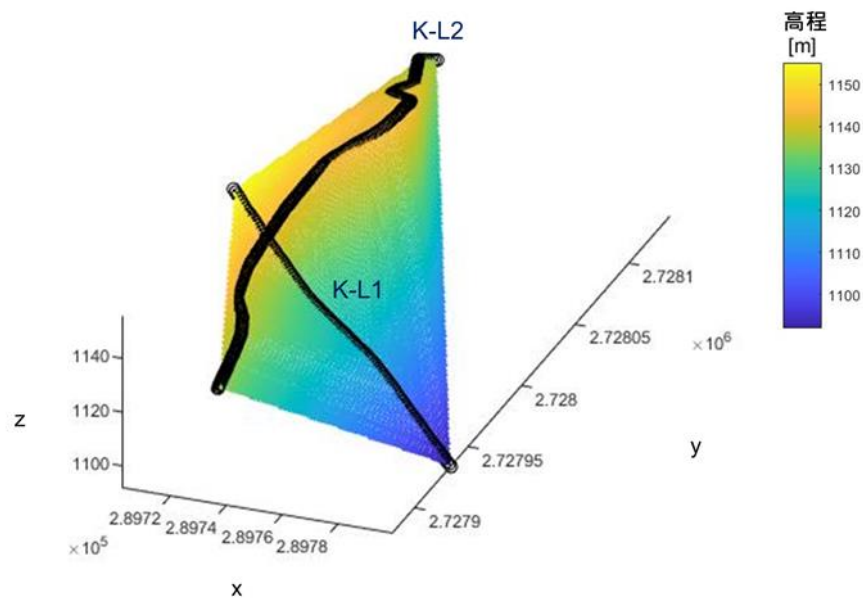


圖 4.13 光華 T002 地電阻量測並推估之土壤分層分佈圖

如圖 4.14 所示，顏階分佈為應用“基因演算-參考橢圓-理想破壞曲面”推估之可能崩塌深度，下一步為沿着理想破壞曲面主軸方向，建置 A-A’剖面線(螢光綠線)，最終將所推估之崩塌深度、數值地形(2016 年 LiDAR DEM)、地下水位(圖 4.12)與土壤分層高程(圖 4.13)彙整成圖 5.1，再進行後續邊坡穩定性分析，參閱第五章第一節。

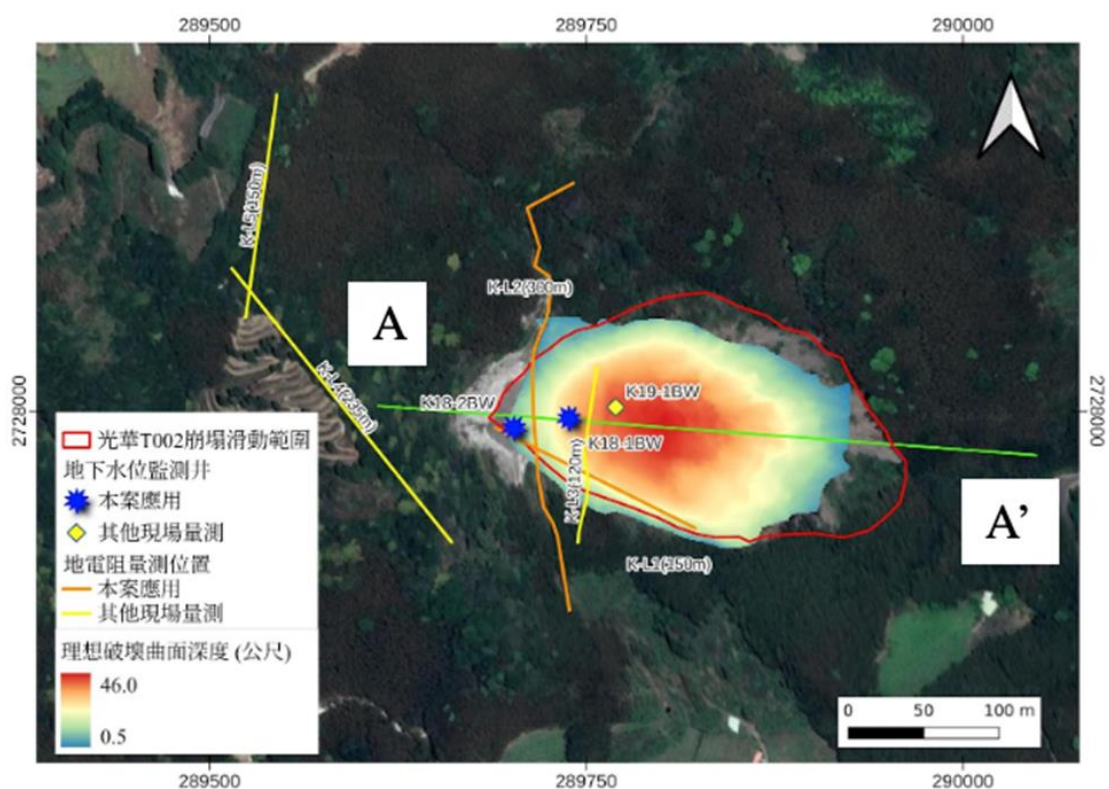


圖 4.14 光華 T002 理想破壞曲面深度(顏色分佈)與 A~A'剖面線(螢光綠線)分佈

秀巒 T001 崩塌潛勢區域

針對秀巒 T001 崩塌潛勢區域，因潛勢區域內之地下水監測井與地電阻量測都建置都建置於崩塌範圍以外，因此本案應用水保局臺北分局(2021)針對 2021 年 9 月 13 日發生崩塌之坡面彙整可能地下水位與土壤分層高程剖面資料(參閱圖 3.20)進行邊坡穩定性分析。如圖 4.15 與圖 4.16 所示，本案沿着秀巒 T001 情境一與二推估之理想崩塌曲面，其主軸方向之 A-A'剖面線(螢光綠線)，對應之地形資料(2016 年 LiDAR DEM)、搭配水保局台北分局(2021)之地下水位(圖 3.20 藍色虛線)與土壤分層高程(圖 3.20 紅線)資料將應用於後續邊坡穩定性分析，參閱第五章第二節。

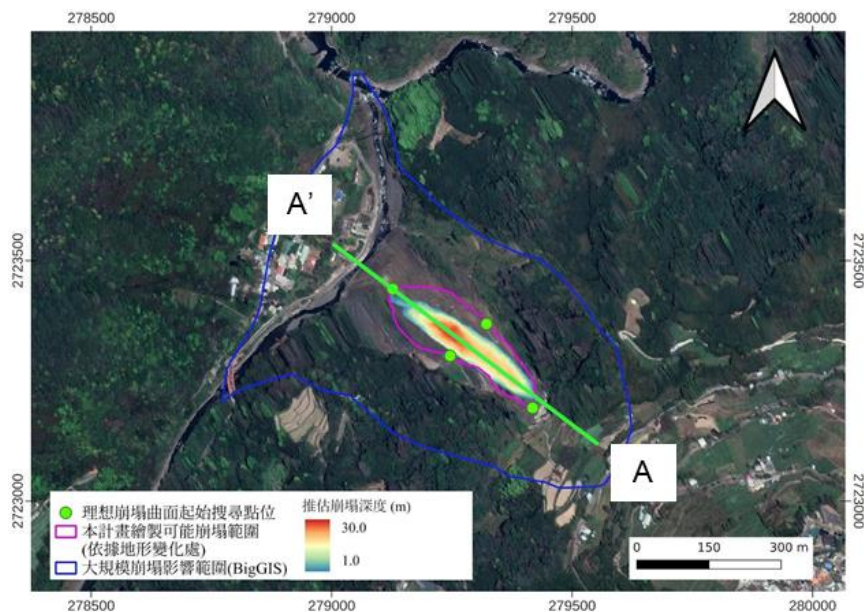


圖 4.15 秀巒 T001 情境一理想破壞曲面深度(顏色分佈)與剖面線(螢光綠線)分佈圖

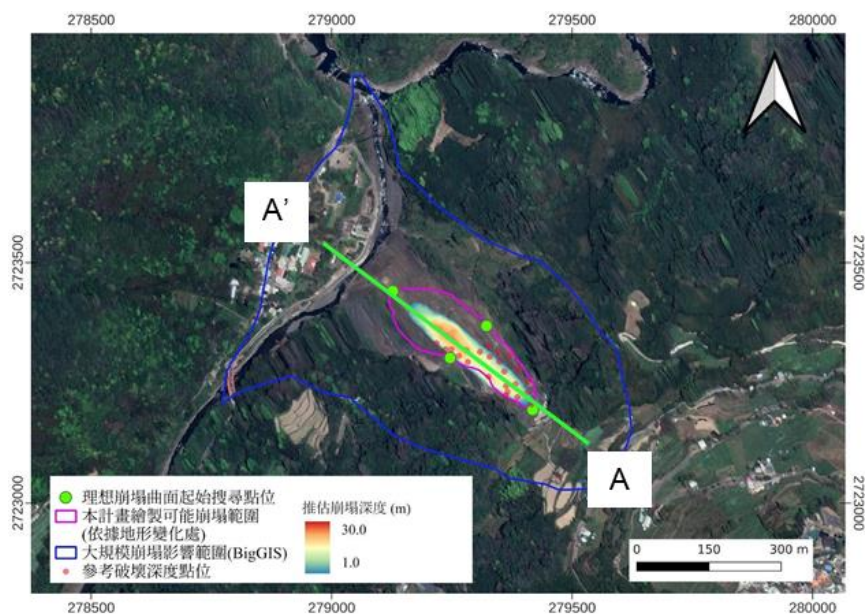


圖 4.16 秀巒 T001 情境二理想破壞曲面深度(顏色分佈)與剖面線(螢光綠線)分佈圖

第五章 加值應用現地監測與量測資料

本章節主要介紹如何應用理想崩塌曲面所推估之可能崩塌深度搭配現場地下水位井監測資料或地電阻量測並推估之地下水位資料，進行邊坡穩定性分析。其中光華 T002 崩塌潛勢區域之參考資料為水保局臺北分局(2020)與秀巒 T001 崩塌潛勢區域之參考資料為水保局臺北分局(2021)。針對地電阻量測所推估之地下水位與土壤分層之高程分佈，本案於第四章第三節中將量測之剖面資料對應至實際 xy 座標上，彙整成空間分佈之地下水位與土壤高程資料。具備上述空間資料後，只需透過理想崩塌曲面之主軸方向所在位置，即可得到對應之地下水位與土壤分層高程資料，即可進行本章節之邊坡穩定性分析。除了應用本案之式(2.9)與式(2.10)估算邊坡穩定性，也將建置相同情境之 GeoStudio 模型進行探討。

第一節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域

針對光華 T002 之剖面資料，如圖 5.1 所示，黑線為剖面線對應之 2016 年 LiDAR DEM 地形高程、紅色虛線為理想破壞曲面之高程、螢光藍線為透過地下水位監測井記錄之地下水位建置之地下水位分佈與深藍線為地電阻量測並推估之地下水位高程，而灰色虛線為地電阻量測並推估之土壤分層高程。應用上述資料，即可進行邊坡穩定性分析，其中採用之上層土壤內摩擦角 $\phi_{b1}=38^\circ$ ；而下層之土壤內摩擦角 $\phi_{b2}=39^\circ$ ，透過式(2.8 與 2.10)得到不考慮地下水位分佈時之邊坡安全係數為 1.105(屬於不穩定邊坡狀態)，透過式(2.9 與 2.10)可得到考慮地下水位之邊坡安全係數，其中應用地下水位監測井後迴歸之地下水位分佈對應之安全係數為 0.863、而應用地電阻量測並推估

之地下水位分佈所對應之安全係數為 0.690。完全相同參數與情境下，GeoStudio 模擬不考慮地下水位分佈之邊坡安全係數為 1.085，考慮地下水位分佈後，地下水位監測井迴歸之地下水位分佈對應之安全係數為 0.851 與地電阻量測並推估之地下水位分佈對應之邊坡安全係數為 0.618。由上述結果可見，若應用地電阻量測後推估之邊坡安全係數較低，其主要原因是在推估地下水位時依據導電度，而現階段其準確性還有待精進。

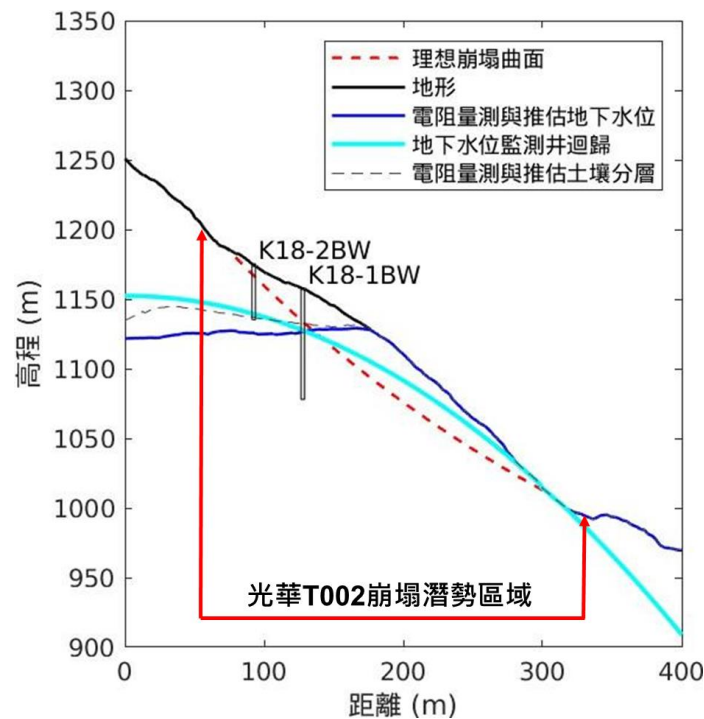


圖 5.1 光華 T002 情境一邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面與地下水位剖面圖

第二節 新竹縣-尖石鄉-T001 大規模崩塌潛勢區域

邊坡穩定性分析-秀巒 T001 情境一

本案應用水保局臺北分局(2021)所彙整之地下水流經分析資料進行邊坡穩定性分析。如圖 5.2 所示，應用秀巒 T001 之 A-A'剖面線(參閱圖 4.15)對應之 2016 年 LiDAR DEM 地形(黑線)、理想破壞曲面高程(紅色虛線)、地下水位(藍線)與土壤分層高程(灰虛線)。應用上述資料，即可進行邊坡穩定性分析，其中採用之上層土壤內摩擦角 $\phi_{b1}=38^\circ$ ；而底部之土壤內摩擦角 $\phi_{b2}=39^\circ$ ，透過式(2.8 與 2.10)得到不地下水位分佈時之邊坡安全係數為 0.951，若考慮地電阻量測並推估之地下水位分佈，可透過式(2.9 與 2.10)可得邊坡安全係數為 0.843。完全相同參數與情境下，GeoStudio 模擬無地下水位分佈之邊坡安全係數為 1.033，考慮兩種地下水位資料後其邊坡安全係數為 0.849。

邊坡穩定性分析-秀巒 T001 情境二

本案應用水保局臺北分局(2021)所彙整之地下水流經分析資料進行邊坡穩定性分析。如圖 5.2 所示，應用秀巒 T001 之 A-A'剖面線(參閱圖 4.16)對應之 2016 年 LiDAR DEM 地形(黑線)、理想破壞曲面高程(綠色虛線)、地下水位(藍線)與土壤分層高程(灰虛線)。應用上述資料，即可進行邊坡穩定性分析，其中採用之上層土壤內摩擦角 $\phi_{b1}=38^\circ$ ；而底部之土壤內摩擦角 $\phi_{b2}=39^\circ$ ，透過式(2.8 與 2.10)得到不地下水位分佈時之邊坡安全係數為 0.943，若考慮地電阻量測並推估之地下水位分佈，可透過式(2.9 與 2.10)可得邊坡安全係數為 0.845。完全相同參數與情境下，GeoStudio 模擬無地下水位分佈之邊坡安全係數為 1.004，考慮兩種地下水位資料後其邊坡安全係數為 0.776。

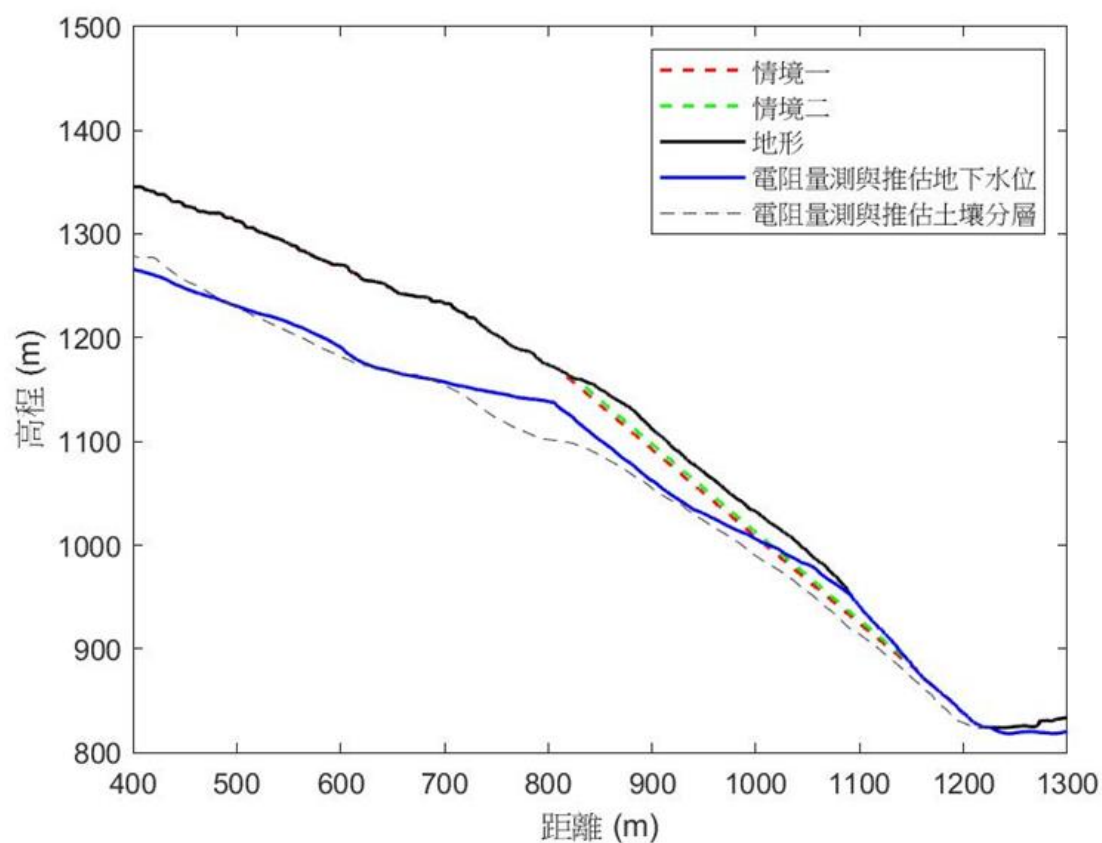


圖 5.2 秀巒 T001 情境一邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面與地下水位剖面圖

經由上述邊坡穩定性分析結果，可見秀巒 T001 無論是情境一或情境二在未考慮地下水影響時已呈現非常不穩定狀態($FS < 1.0$)。因此若是地下水位上升至破壞面以上時，其邊坡安全係數更是減低至 0.85 一下。

表 5.1 邊坡穩定性分析一覽表

崩塌潛勢區域	情境	是否考慮地下水位分佈	本案估算 安全係數	GeoStudio 分析結果
光華 T002		✕	1.105	1.085
		地下水位監測井	0.863	0.851
		地電阻推估	0.690	0.618
秀巒 T001	情境一	✕	0.951	1.033
		地電阻量測後推估	0.843	0.849
	情境二	✕	0.943	1.004
		地電阻量測後推估	0.845	0.776

第三節 土砂運移路徑分析

根據第四章第一與二節之理想破壞曲面推估之可能崩塌土砂量體，搭配本團隊開發之 DEMfGT 數值模式進行土砂運移行為之情境模擬。依據期中審查意見，針對光華 T002 本案應用應用水保局臺北分局(2021)所圈繪可能崩塌範圍作為建置理想崩塌曲面之依據，其推估之可能崩塌土砂量體作為土砂運移行為模擬之起始土砂深度分佈。針對秀巒 T001，本案除了應用情境一與二所推估之可能崩塌土砂量體，也將災害前後數值地形(內政部 2016 年 LiDAR DEM 與 2021/11/04 所製作之 UAV DSM 地形)得到崩塌深度大於 1m 之土砂量體進行土砂運移行為模擬，稱秀巒 T001 情境三。

針對模擬結果呈現部分，本案除了隨時間變化之深度分佈呈現土砂運移行外，本案也依據 Hürlimann 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 者標記起來，最終繪製成土砂影響範圍圖。針對土砂運移行為參數設定，本案以 Tai et al. (2018)模擬小林村崩塌事件採用之各個參數為基準，其中固相顆粒摩擦角則依據 Scheidegger (1973)所提出之“崩塌土砂量體-固相摩擦角”關係式估算，其他相同參數值對應之設定羅列於表 5.2，包含所使用之 DEM 解析度與產製時間、起始濃度以及土砂比重、交互作用係數、液相阻尼係數、等效粘滯係數等參數。

表 5.2 光華 T002，秀巒 T001 情境一、二與三土砂運移行為採用之參考一覽表

參數	值	參數	值
DEM 解析度	1 m × 1 m	DEM 產製時間	2016/11 之 LiDAR DEM
崩塌體起始固相與液相體積濃度	0.5, 0.5	土砂比重	1.45/2.65
交互作用係數	13.76	液相阻尼係數	6.93
液相阻尼係數	101.10		

光華 T002

針對本案推估光華 T002 之可能崩塌土砂量體為 6.041×10^5 ，透過 Scheidegger (1973) 之關係式可得到固相顆粒摩擦角為 18.76° ，其他參數羅列於表 5.2 中，模擬時間長度為 181.83 秒，其中每 1.01 秒輸出一筆土砂深度分佈資料。如圖 5.3(a)至(f)所示為土砂流動深度分佈圖，其中藍框範圍為 BigGIS 公佈之光華 T002 大規模崩塌影響範圍，本案選取(a)0.00 秒：起始狀況、(b)40.40 秒：土砂受到地形影響而往河道擠壓狀況、(c)80.80 秒：土砂沿著河道流動狀況、(d)101.01 秒：土砂開始流出至三光溪(下游河道)、(e)151.52 秒：土砂於三光溪形成沖積扇與(f) 181.93 秒：模擬結束時間點。如圖 5.4 所示，因本案着重於評估所推估之可能崩塌土砂量體造成之影響範圍，故後續比較範圍將以黃框範圍內覆蓋範圍為基準，圖中紅色範圍依據 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)繪製土砂影響範圍，面積共 63,689 m²，其中 BigGIS 公佈之影響範圍與本案模擬之影響範圍位置偏差達 99.5% (31,840 m²/32,002 m²)，其主要偏差來自下游出口處，有可能造成的差異來之模式之參數設定部不同，而此部分於水保局台北分局(2021)未明確列出相關係數值。

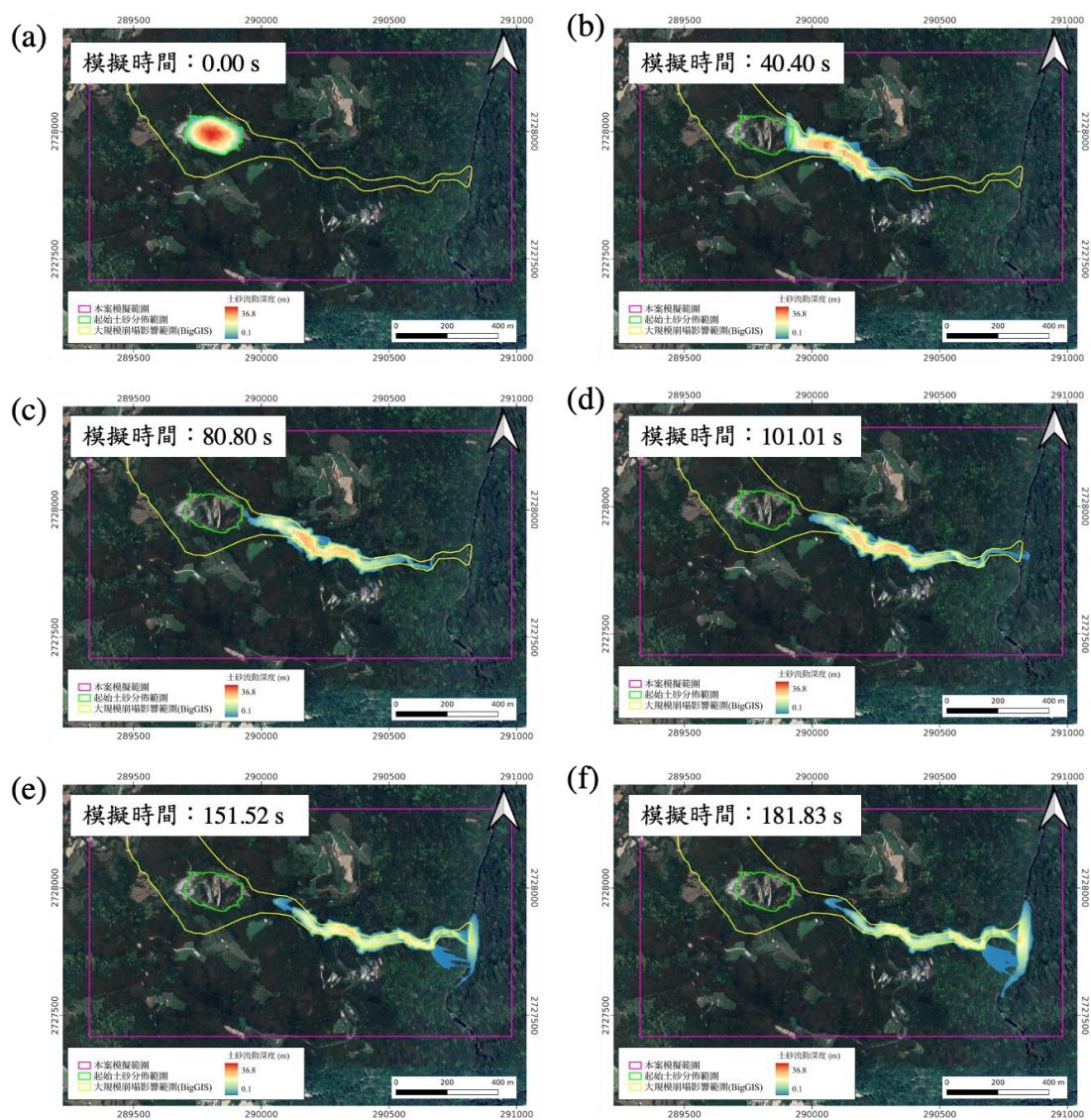


圖 5.3 光華 T002 土砂運移行為模擬結果圖

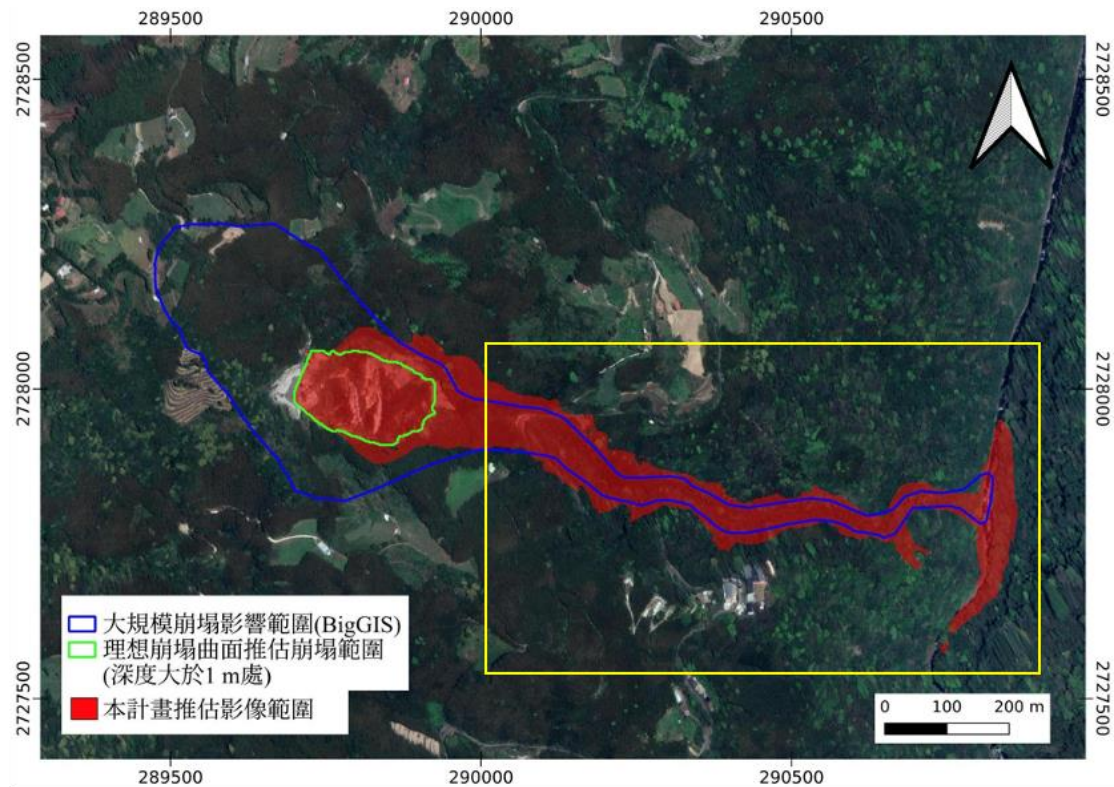


圖 5.4 光華 T002 土砂影響範圍圖

秀巒 T001 情境一

針對本案推估秀巒 T001 情境一之可能崩塌土砂量體為 $2.774 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，透過 Scheidegger (1973) 之關係式可得到固相顆粒摩擦角為 21.00° ，其他參數羅列於表 5.2 中，模擬時間長度為 101.01 秒，其中每 1.01 秒輸出一筆土砂深度分佈資料。本案應用秀巒 T001 情境一之可能崩塌量體搭配表 6.2 數進行土砂運移行為模擬。如圖 5.5 所示，其輸出時間點分別為(a)0.00 秒：起始狀況、(b)10.10 秒：土砂開始因地形影響而逐漸分為 2 堆土砂並沿着邊坡往薩克亞金溪運移狀況、(c)15.14 s：主要崩塌土砂開始從薩克亞金溪溢流至秀巒部落、(d)30.30 s 以及(e)50.50 s：土砂於秀巒部落與薩克亞金溪擴散狀況、與(f) 101.01 s：模擬結束時間。如圖 5.6 所示，因本案着重於評估所推估之可能崩塌土砂量體造成之影響範圍，故後續比較範圍將以黃

框範圍內覆蓋範圍為基準，圖中紅色範圍依據 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)繪製土砂影響範圍，面積共 78,338 m²，其中由 BigGIS 公佈之 2021/10/27 之 sentinel2 衛星影像其邊坡之地表裸露面積達 68,326 m²，若只比較衛星影像判釋之邊坡地表裸露範圍與本案於邊坡上之影響範圍的位置差異，其差異達 51.85%，其可能偏差來源為秀巒 T001 邊坡上之崩塌可能由多塊滑動塊體組成，而本案現階段主要只考慮一塊主要崩塌滑動塊體。由圖 5.5(a)至(f)可見，若推估之可能崩塌土體都滑動至下游處，以目前秀巒部落之堤防高程分佈狀況，大部分之土砂將溢流至部落內。

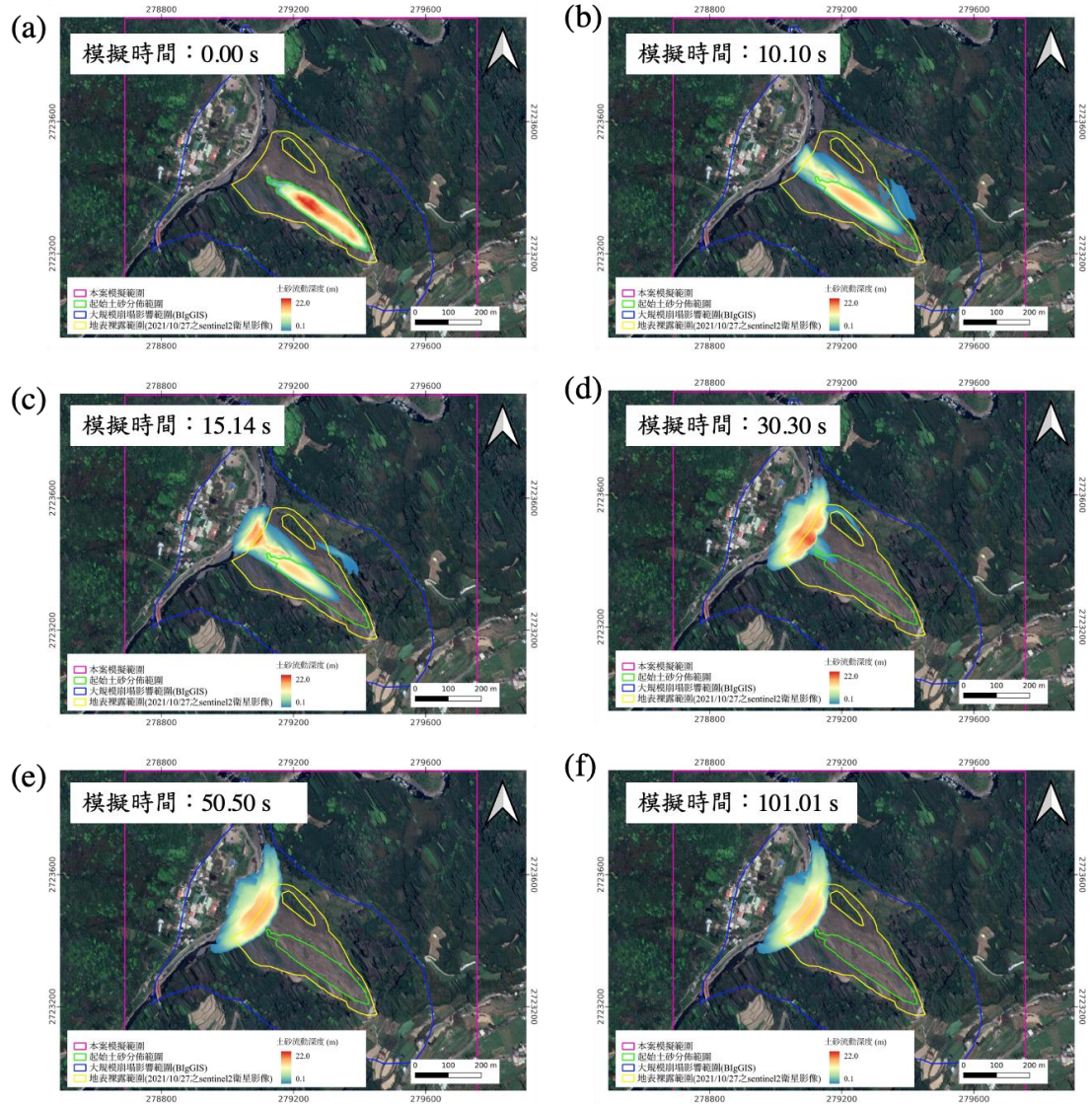


圖 5.5 秀巒 T001 情境一土砂運移行為模擬結果圖

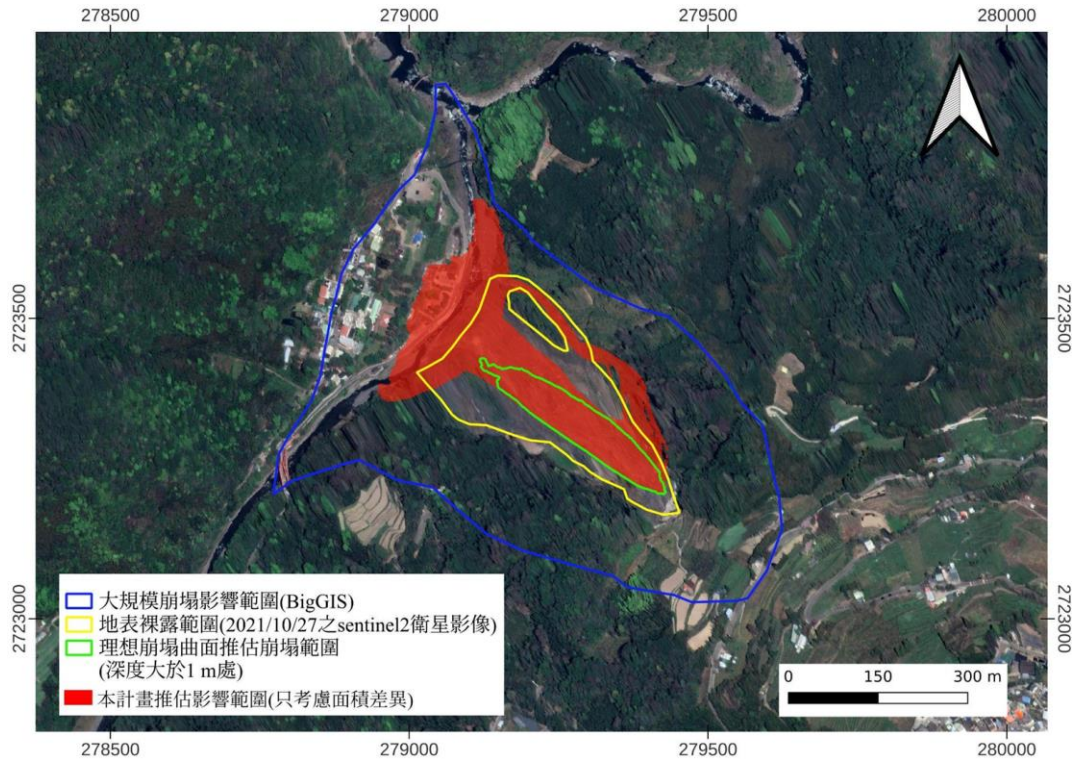


圖 5.6 秀巒 T001 情境一土砂影響範圍圖

秀巒 T001 情境二

針對本案推估秀巒 T001 情境二之可能崩塌土砂量體為 $2.108 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，透過 Scheidegger (1973) 之關係式可得到固相顆粒摩擦角為 21.83° ，其他參數羅列於表 5.2 中，模擬時間長度為 101.01 秒，其中每 1.01 秒輸出一筆土砂深度分佈資料。本案應用秀巒 T001 情境二之可能崩塌量體搭配表 6.2 數進行土砂運移行為模擬。如圖 5.7 所示，其輸出時間點分別為(a)0.00 秒：起始狀況、(b)10.10 秒：土砂開始沿着邊坡往薩克亞金溪運移狀況、(c)15.14 s：主要崩塌土砂開始從薩克亞金溪溢流至秀巒部落、(d)30.30 s 以及(e)50.50 s：土砂於秀巒部落與薩克亞金溪擴散狀況、與(f) 101.01 s：模擬結束時間。如圖 5.8 所示，因本案着重於評估所推估之可能崩塌土砂量體造成之影響範圍，故後續比較範圍將以黃框範圍內覆蓋範圍為基準，圖中紅色範圍依據 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)繪製土砂影響範圍，面積共

55,568 m²，其中由 BigGIS 公佈之 2021/10/27 之 sentinel2 衛星影像其邊坡之地表裸露面積達 68,326 m²，若只比較衛星影像判釋之邊坡地表裸露範圍與本案於邊坡上之影響範圍的位置差異，其差異達 48.02%，其可能偏差來源為秀巒 T001 邊坡上之崩塌可能由多塊滑動塊體組成，而本案現階段主要只考慮一塊主要崩塌滑動塊體。由圖 5.7(a)至(f)可見，若推估之可能崩塌土體都滑動至下游處，以目前秀巒部落之堤防高程分佈狀況，大部分之土砂將溢流至部落內。

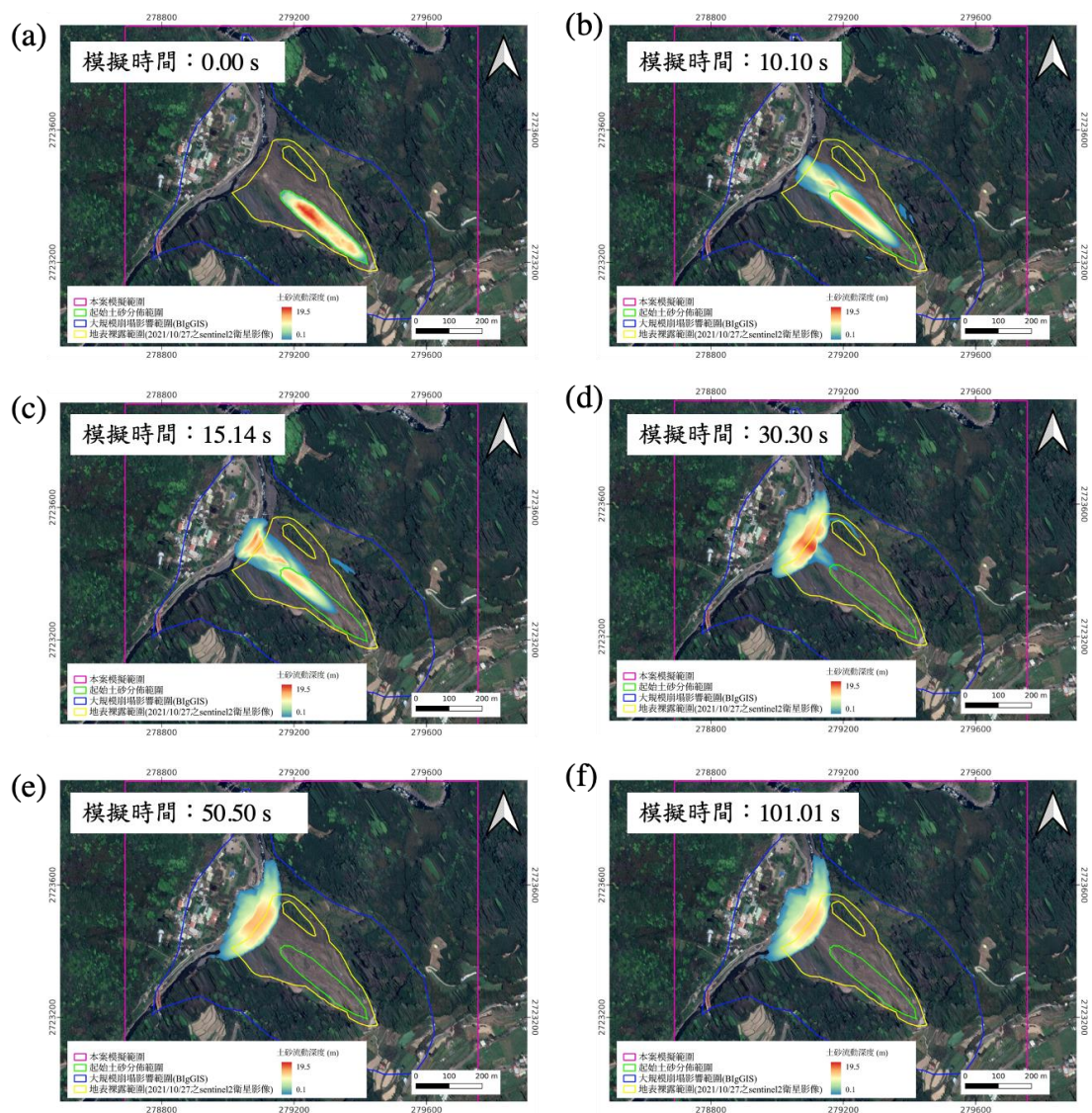


圖 5.7 秀巒 T002 情境二土砂運移行為模擬結果圖

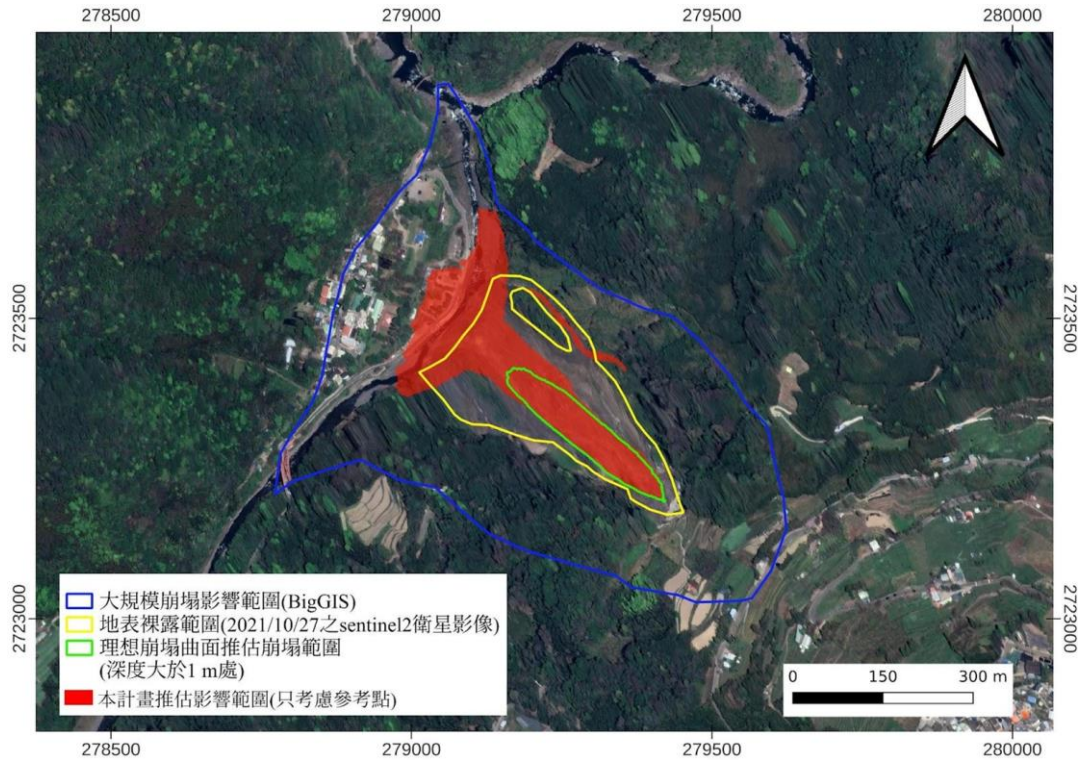


圖 5.8 秀巒 T001 情境二土砂影響範圍圖

秀巒 T001 情境三

針對本案推估秀巒 T001 情境三之可能崩塌土砂量體為 $0.431 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，透過 Scheidegger (1973) 之關係式可得到固相顆粒摩擦角為 27.20° ，其他參數羅列於表 5.2 中，模擬時間長度為 101.01 秒，其中每 1.01 秒輸出一筆土砂深度分佈資料。本案應用秀巒 T001 情境三之可能崩塌量體搭配表 6.2 數進行土砂運移行為模擬。如圖 5.9 所示，其輸出時間點分別為(a)0.00 秒：起始狀況、(b)10.10 秒：土砂因受到地形影響而逐漸分出 3 堆土砂沿着邊坡往薩克亞金溪運移狀況、(c)15.14 s：主要崩塌土砂開始流動至薩克亞金溪、(d)30.30 s：其他 2 堆土砂開始堆積至薩克亞金溪；(e)50.50 s：土砂於薩克亞金溪擴散狀況、與(f) 101.01 s：模擬結束時間。如圖 5.10 所示，因本案着重於評估所推估之可能崩塌土砂量體造成之影響範圍，故後續比較範圍將以黃框範圍內覆蓋範圍為基準，圖中紅色範圍依據 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)繪製土砂影響範圍，面積共 89,312 m²，其中由 BigGIS 公佈之 2021/10/27 之 sentinel2 衛星影像其邊坡之地表裸露面積達 68,326 m²，若只比較衛星影像判釋之邊坡地表裸露範圍與本案於邊坡上之影響範圍的位置差異，其差異達 62.87%，其可能偏差來源為使用之土砂量體，因情境三之土砂量體來自兩期數值地形相剪選取崩塌深度大於 1 m 範圍，故此情境將大幅低估可能崩塌量體。

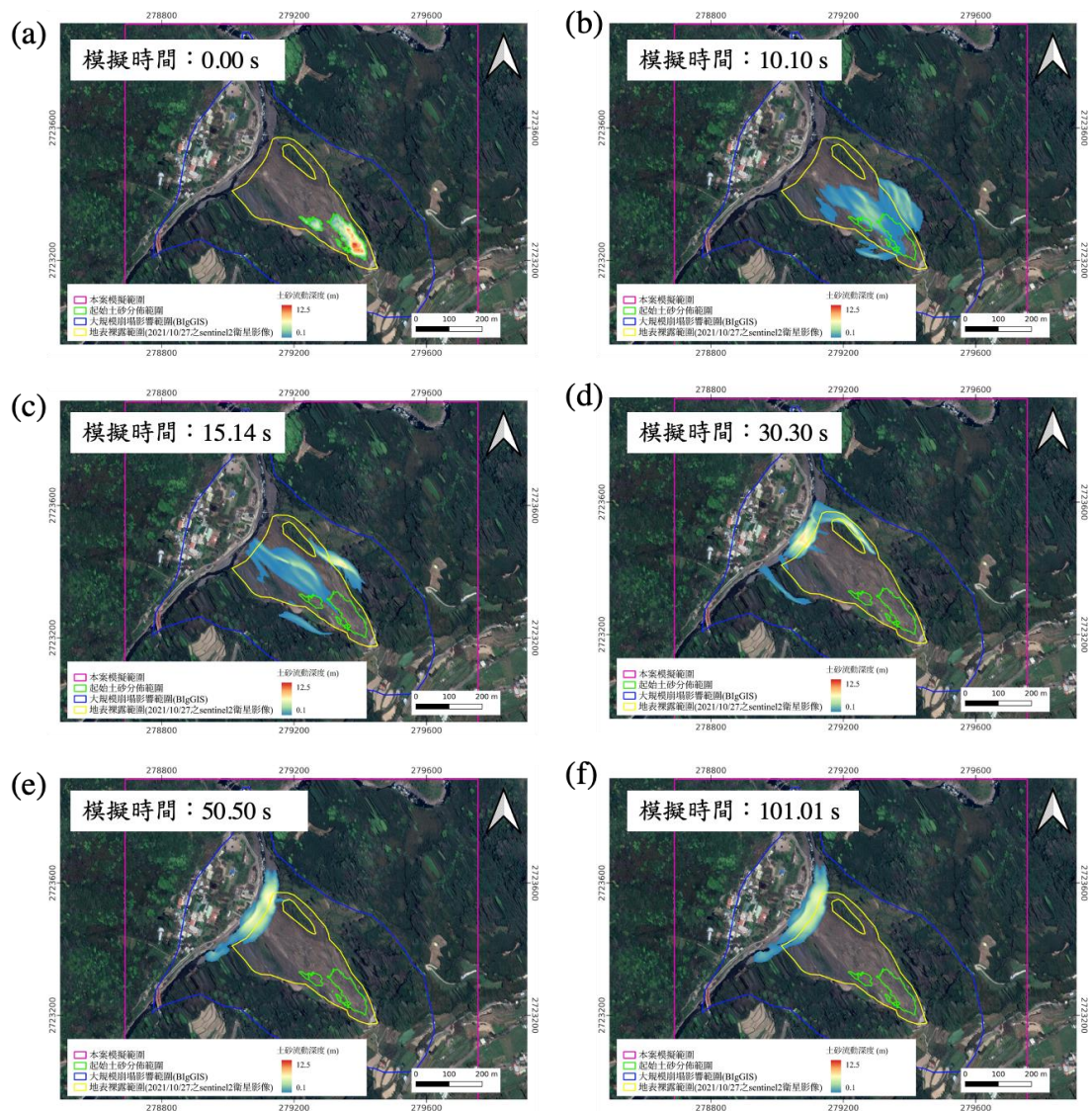


圖 5.9 秀巒 T002 情境三土砂運移行為模擬結果圖

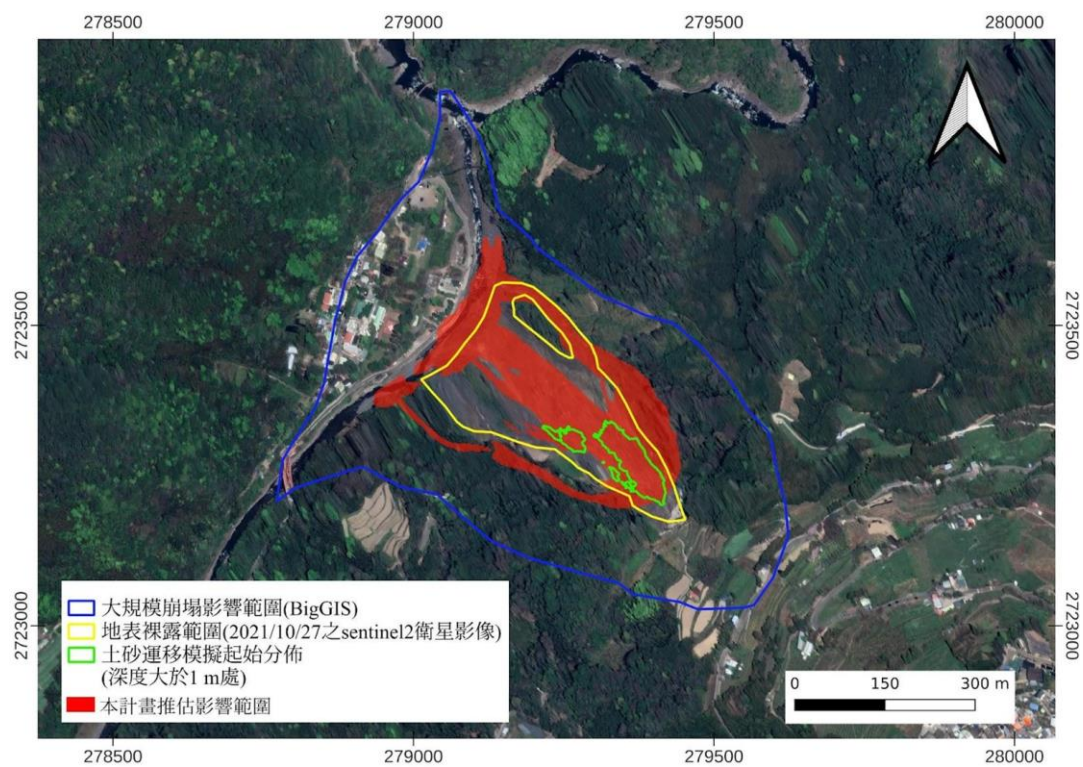


圖 5.10 秀巒 T001 情境三土砂影響範圍圖

第六章 結論與建議

依本案工作執行計畫書初擬之工作預訂期程，依研擬之預訂期程確實執行。現階段已完成工作及內容，簡述如下：

第一節 結論

一、 延伸應用“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”：

- 本團隊之 Wang 等人於 2022 年 07 月 25 日成功應用“參考橢圓-理想崩塌曲面法”搭配基因演算法刊登於國際 SCI 期刊 (Water)。
- 本案延伸應用 Wang 等人 (2022) 提出之“基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法”推估光華 T002、秀巒 T001 情境一與二，3 處之可能崩塌土砂量體。
- 針對高度不確定崩塌範圍或未明確劃定崩塌範圍(如 秀巒 T001 潛勢區域)，本案提出兩種方案：情境一為依據位置差異(依據本案推估可能崩塌範圍)，情境二為依據參考點深度(由災害前後地形資料得到崩塌深度大於 1 m 範圍內隨機產生參考點)。最終以相同參考點對應之崩塌深度比較這兩種情境，其均方根分別為 2.00 與 1.86、平均崩塌深度偏差分別為 9.98 與 6.81 m，最大崩塌深度偏差分別為 11.68 與 8.78 m，可見情境二建置之理想崩塌曲面應與實際狀況更為接近。針對未完全崩塌滑落或高度不確定崩塌範圍之案例，可以嘗試以此方法推估接近實況之理想崩塌曲面以及其對應之可能崩塌土砂量體。

二、 加值應用現有現場監測之傾斜儀與地下水位計量測資料:

- 針對光華 T002 大規模崩塌潛勢區域，本案應用水保局臺北分局(2020)所記錄之 K-L1 與 K-L2 地電阻量測並推估之地下水位與土壤分層高程資料，進行彙整成空間分佈，做為後續邊坡穩定性分析之依據。
- 針對秀巒 T001 大規模崩塌潛勢區域，本案應用水保局臺北分局(2021)針對 2021 年 09 月 27 日發生之邊坡繪製之可能地下水位與土壤分層高程資料，做為後續邊坡穩定性分析之依據。

三、 精進邊坡穩定性分析方法:

- 本案已完成光華 T002、秀巒 T001 情境一與二之邊坡穩定性分析，其中本案分析之邊坡穩定性結果也與 GeoStudio 分析之結果差異介於 0.01 至 0.082，由此差異可見本案提出之邊坡穩定性分析方法具有一定之參考價值。
- 針對光華 T002 潛勢區域，當不考慮地下水之影響時，其邊坡安全係數為 1.105，屬於不穩定之狀態。而在考慮地下水位之影響後，無論時應用地下水位監測井或地電阻量測後推估之地下水位，其邊坡安全係數為 0.863 與 0.690，說明兩處崩塌潛勢區域極易受到地下水之擡升而發生崩塌。
- 針對秀巒 T001，當不考慮地下水之影響時，其邊坡安全係數為 0.951，已經呈現非常不穩定之狀態。若考慮地下水位之影響後，其邊坡安全係數降為 0.845 與 0.843，說明秀巒 T001 潛勢區域在未有明顯地下水位抬昇狀況下，已經呈現相當不穩定的狀態，這也部分說明 2022 年 9 月 27 日上午風和日麗時發生崩塌的可能原因。

- 針對土砂運移行為模擬部分，本案已完成光華 T002 與秀巒 T001 之情境一與情境二之土砂運移行為模擬。參酌 BigGIS 公告之影響範圍與 sentinel2 衛星影像地表裸露範圍，可發現本案繪製之影響範圍與公佈之影響範圍相近。

第二節 建議與未來展望

針對本案先階段之成果，有以下短期與長期之建議與展望，分別說明如下：

- **短期：**可利用本案所發展之”參考橢圓理想曲面法”以及本研究團隊開發之土砂運移模式，針對現有(98 處)大規模崩塌潛勢區域所選定之優先辦理區域(36 處)挑選較為急迫之場址，整合該處現有之現地調查與監測資料，研擬判識各式可能的災害情境，進行相關之災害風險評估並模擬其對應之後續土砂影響範圍。
- **長期：**以美國地質調查所(United States Geological Survey, USGS)開發之邊坡穩定套件 Scoops3D 與日本土石流模式 HyperKanakano 之使用者界面作為參考依據，開發「**台灣邊坡崩塌評估與土砂運移行為之整合模式**」，其具備之功能包含針對潛勢區域搜尋可能崩塌破壞曲面與範圍，土砂量體、邊坡穩定性分析與後續土砂影響範圍估算，且進一步整合使用者互動模式之三維呈現功能，可迅速檢視各式災害情境的評估與模擬結果，提供防災應變規劃或是災害管理的參考。

整合模式之優勢：

1. **多元情境：**透過參考橢圓-理想曲面法具備高度彈性搜尋的特性，可依據現調研判之地形特徵以及監測資料，

即時規劃各式不同之情境進行後續的分析。

2. 高效率運算：透過整合 GPU 加速的運算模式提升模擬效率，可於短時間內獲致結果，且可進行隨機參數運算，以機率的方式進行災害風險評估。
3. 模式理論(參數資料庫)彈性建置：現階段之土砂運移模式理論以 Tai et al. (2019) JGR 之理論為主，參數之律定主要依據台灣崩塌與土石流案例為基礎。未來亦可依需求增列其他模式理論。
4. 友善操作與維護：由圖形操作介面點選範圍或輸入相關參數，所有模式軟體皆由成大之團隊開發，維護無須假他人之手，且可依使用者之需求修改，或是因應未來理論模式之精進進行升級。
5. 整合使用者互動式三維呈現套件：透過 GPU 顯卡加速，運算結果可直接由使用者界面以三維互動方式即時呈現檢視，無需透過第三方軟體(如 Scoops 3D 需使用 Surfer, 透過 ArcGIS 之 ArcScene 套件進行展示)。

表 6.1 本案之工作項目與各期進度表

工作項目	111年											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
一、延伸應用“基因演算-參考機圖-理想崩塌曲面法”												
二、加值應用現有現場監測之傾斜儀與地下水位資料												
三、精進邊坡穩定性分析方法												
期初報告書提交												
期中報告書提交												
期末報告書提交												
成果報告書提交												
預定進度累計(%)	2	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	100
計畫執行期限：自111年01月18日至111年12月31日止 ▶ 期初簡報時須完成工作：(一)邊坡穩定性分析以及地電阻研判地下水位整合之對策；(二)邊坡穩定性分析以及地電阻研判土壤分層整合之對策； (三)開始蒐集秀巒T002崩塌潛勢區域相關資料； ▶ 期中簡報時須完成工作：(一)初步建置秀巒T002崩塌潛勢區域之理想崩塌曲面與邊坡穩定性分析；(二)初步完成秀巒T002土砂運移模擬； ▶ 期末報告時須完成所有工作。(期末報告至契約完成期間，如委託機關發現問題需修正)												

參考文獻

1. 尤仁弘，應用地電阻影像法於壩體潛在滲漏調查之研究，國立交通大學土木工程學系，碩士論文，2006。
2. 行政院農業委員會水土保持局，104 萬山潛在大規模崩塌地區監測系統維運與擴充計畫，2015。
3. 行政院農業委員會水土保持局，106 年大規模崩塌潛勢區地表位移觀測系統建置與分析，2017。
4. 行政院農業委員會水土保持局，108 年度萬山、寶山、來義等八處大規模崩塌地區監測計畫，2019。
5. 行政院農業委員會水土保持局，109 年度萬山、寶山、來義等八處大規模崩塌地區監測計畫，2020。
6. 行政院農業委員會水土保持局，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。
7. 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-107- 267)，智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為，2018。
8. 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-108- 01-06-001(41))，智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為之精進研究，2019。
9. 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。
10. 行政院農業委員會全球資訊網 (<https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=2503956&print=Y>)。
11. 李威霖，入滲過程中孔隙水壓變化及其對邊坡穩定影響之研究，

- 國立成功大學水利及海洋學系博士論文，2020。
12. 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 9 月 1 日-9 月 3 日，屏東，台灣。
 13. 陳振宇，堤大三，基岩位置及土層特性對降雨逕流與大規模崩塌之影響，中華水土保持學報，45(4)，243-256，2014。
 14. 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。
 15. A. W. Bishop, 「The use of the slip circle in the stability analysis of slopes.」 *Geotechnique*, 5(1), 7-17, 1955.
 16. J. L. Briaud, 「Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils.」 John Wiley & Sons, 2013.
 17. S. Bandara, A. Ferrari, and L. Laloui, 「Modelling landslides in unsaturated slopes subjected to rainfall infiltration using material point method.」 *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(9), 1358-1380, 2016.
 18. 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, 2019.
 19. GEO-SLOPE International, 「Stability Modeling with SLOPE/W」 July 2012 Edition. Calgary, Canada: GEOSLOPE.
 20. C. C. Huang and C. C. Tsai, 「New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis.」 *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(10), 917-927, 2000.
 21. 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.
22. H. L. Kuo, G. W. Lin, C. W. Chen, H. Saito, C. W. Lin, H. Chen, and W.A. Chao, 「Evaluating critical rainfall conditions for large-scale landslides by detecting event times from seismic records. 」 *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(11), 2877-2891, 2018.
23. 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.
24. M. H. Loke, I. Acworth and T. Dahlin, 「A Comparison of Smooth and Blocky Inversion Method in 2D Electrical Imaging Surveys. 」 *Exploration Geophysics*, Vol. 34, pp. 182-187, 2003.
25. H. Moriwaki, T. Inokuchi, T. Hattanji, K. Sassa, H. Ochiai, and G. Wang, 「Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator. 」 *Landslides*, 1(4), 277-288, 2014.
26. 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.
27. 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.
28. A. E. Scheidegger, 「On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. 」 *Rock mechanics*, 5(4), 231-236, 1973.
29. Y.C. Tai, C.Y. Kuo and W.H. Hui, 「An alternative depth- integrated formulation for granular avalanches over temporally varying

- topography with small curvature.」 *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 106(6), 596–629, 2012.
30. Y.C. Tai, J. Heß and Y. Wang, 「Two-Phase Debris Flow over Rugged Topography: Modeling and Numerical Simulation.」 *Journal of Geophysical Research -- Earth Surface*, 124, 305-333, 2019.
31. 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.
32. W. Viessmann, and G. L. Lewis, 「Introduction to hydrology.」 *Harper Collins College*, 1996.
33. 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、有關計畫書格式及經費審查部分：

審查意見	回覆辦理情形
1.經費整體預算審查及調整，本案請於補助經費 701,000 元內調整編列。	感謝。已於細部計畫說明書(第八章)預算細目中依規定編列。
2.執行期限修正為 111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日(11.2 個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 11.2 個月編列。年終獎金亦配合計畫期限比例調整	感謝提醒。已於修正。
3.六(七)預期效益請補充說明效益內容。	感謝提醒。已補充說明。
4.「23-00 按日按件計資酬金」，編列主持人費外，請補填附件一「薪俸、研究主持人費用明細表」主持人費。	感謝提醒。已補填。
5.「按日按件計資酬金」，應低於業務費之 35%。如超過需求者，流入金額不得超過原核定預算之 20%。	感謝提醒。未來本團隊將依規定辦理。
6.「26-10 雜支」：各階段報告書(彩色印刷)提交數量，期初執行計畫 10 冊、期中報告 5 冊、期末報告 5 冊、成果報告 5 冊。	感謝提醒。已於細部計畫說明書(第八章)預算細目中修正。

二、計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分

審查意見	回覆辦理情形
1.計畫主持人前期計畫都有良好成果與發表，值得肯定。如果能真正的整合理論模式與現地監測的傾斜儀資料及地下水資料比對，方得以將研究成果朝實用性發展。因此建議主持人研究團隊，對於目前水保局關注的大規模崩塌的地質、地形、活躍情形、調查現況、監測佈設與成果等，能夠進一步了解，選擇最合適研發模式的案例地點，開始嘗試模式驗證。	感謝。本團隊與承辦單位聯繫討論後，現階段將先規劃執行光華與秀巒大規模崩塌之區域作為研究場域。後續若有其他合適之案例地點，將一併列入作為研究區域。
2.計畫書未附參考文獻，難以了解前期計畫都有良好成果與本案的具體關聯。	前期計畫相關之成果計 2 篇 (SCI、rank 約 30%之 Q2 期刊)期刊論文(參閱意見三之回覆)以及多篇研討會論文： ● Chi-Jyun Ko, Chih-Ling Wang, Hock-Kiet Wong and Yih-Chin Tai (2021). “Idealized curved surface for mimicking slope failure: toward the sequential failure.” EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr. 2021, EGU21-10520, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10520. ● 馬晴元、柯奇均、戴義欽* (2021). 參數高度不確定性下以 CUDA 架構進行 GPU 演算之土石流危險災害評估. 第 25 屆水利工程研討會. 2021 年 9 月 9、10 日，台南。 ● 王織綾、柯奇均、呂濬瑋、戴義欽* (2021). 以參考橢圓為基礎之理想化破壞曲面最佳化搜尋. 第 25 屆水利工程研討會. 2021 年 9 月 9、10 日，台南。
3.請說明研究場域？能佐證本案之 DFMfGT Model 之適用性？	如審查意見一之回覆，本團隊與承辦單位聯繫討論後，現階段將先規劃執行光華與秀巒大規模崩

	塌之區域作為研究場域。崩塌與DFMFGT model 適用性之相關論文可參閱下列 3 篇 SCI 期刊論文(1 篇 Q1、2 篇 Q2 論文)，其中 Tai et al. (2019)之論文為 DFMfGT Model 之出處、另 2 篇論文與本案應用之理想崩塌曲面技術直接關： ● 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.」 <i>Frontiers in Earth Science</i>, 9, 862, 2021. ● 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.」 <i>Frontiers in Earth Science</i>, 8, 313, 2020. ● Y.C. Tai, J. Heß and Y. Wang, 「Two-Phase Debris Flow over Rugged Topography: Modeling and Numerical Simulation.」 <i>Journal of Geophysical Research -- Earth Surface</i>, 124, 305-333, 2019.
4.提出之計畫書難以佐證前期研究成果能支持本案之推動。	請參閱上述審查意見三之回覆。
5.請重新規劃研究細節。	感謝。本團隊已與承辦單位討論與重新規劃。

附錄二 期初審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	光華崩塌地目前評估應該是整體的的位移潛變，不是只有設置監測設備之上部邊坡有位移，下半部也是有位移。這樣的差異是否影響理想破壞曲面之設定？	感謝委員建議，於期中報告中，本團隊已針對光華 T002 設計兩種情境探討，其中情境一考慮只有設置監測設備之上部邊坡，而情境二為考慮整體邊坡。(請參閱期中報告書第四章第一節。)
二	有關光華崩塌地土砂運移推估，遠及光華國小位置。這結果與目前水保局定調的分析有明顯差異，建議說明理由與差異。	經多方詢查，水土保持局 BigGIS 光華崩塌影響範圍推估所示之土石流路徑光華國小位置有所差異，但其估算路徑時僅採用上部邊坡之體積，與本案推估路徑所採用之(整體)量體明顯差異，造成與定調的分析有明顯差異。為了避免誤解，期中報告書中將採用上部邊坡體積之情境設定為”情境一”，而整體崩塌量體設定為”情境二”，作為土砂運移路徑分析之探討，詳細成果請參閱圖 5.6 與圖 5.7。
三	秀巒崩塌地目前崩塌狀態是以表層岩屑掉落為主，是否適用理想破壞曲面？	現階段本案所使用之理想破壞曲面，假設土體為均勻材質，基本上僅適用於滑動型之崩塌。對於表層岩屑掉落之類型是屬於初次嘗試。
四	工作計畫書中提及 USGS Scoops 3D、GeoStudio 的分析，是否納入評估差異比較？	感謝委員建議！因 USGS 之 Scoops 3D 僅採用單一曲率推估崩塌破壞面，其推估之破壞面較適合應用於火山錐體崩塌。在本研究團隊先前之研究(Tai et al., 2020)顯示，Scoops 3D 並不適用於台灣山區起伏地形崩塌之特性(將造成推估崩塌寬度過大)，故本案不將 Scoops 3D

項次	審查意見	回覆辦理情形
		納入評估。另 GeoStudio 方面，其主要以二維的方式推估坡面的穩定性，故本案可採用理想破壞曲面之主軸方向的剖面進行邊坡穩定性分析並與 GeoStudio 進行探討。請參閱期中報告書第五章第一、二節。
五	大規模崩塌的滑動體，經常包括表土層與岩體，這種情況下，滑動體不是均質的，且岩體的滑動受既有弱面控制，破壞曲面可能不是近似橢圓曲面。因此運用本案的成果，請將此可能不適用的情形與限制加以說明。	感謝委員建議！現階段理想崩塌曲面適用之崩塌類型為滑動型，並未考慮不同土壤性質或弱面等因素之影響，已於第二章第二節(理想破壞曲面)明確說明此限制。
六	地電阻表示地層的電阻特性，要利用地電阻剖面，決定地下水位面，尚有許多學理與運用上的限制與未知，建議應小心謹慎，避免過度推論與樂觀。	感謝委員提醒！本案主要規劃應用水土保持局既有之量測資料進行後續分析，此外，本案也將同時應用地下水位監測井所記錄之地下水位。希望可透過不同來源之參考資料以及理想曲面之方便使用特性，將各式可能情境納入探討。
七	圖 2.16 土砂流動砂度大於 1 公分的用語，令人困惑，現有 DTM 精度，在垂直方向的精度，應該尚無法達 1 公分等級？	流動土砂厚度大於 1 公分是針對模式模擬之土體厚度而言，並非 DTM 之精度。以災害等級評估角度來看，Hürlimann et al. (2008) 曾參考 Ricknenmann (2005) 之簡短報告，針對土石流深度與速度進行分級，並將深度小於 0.4 m 以及速度小於 0.4 m/s 之土石流視為未能致災等級。以較為保守(對人員造成傷害)的角度來看，本案模

項次	審查意見	回覆辦理情形
		式模擬之土體厚度將以 0.30 m 作為分界進行呈現。
八	P3-2，宜敘明地電阻研判之土壤分層深度和邊坡穩定性關聯性之具體作為。	感謝建議與指正！本案將依據水保局臺北分局(2020 與 2021)之地電阻量測記錄以及研判之土壤分層高程進行分析，以推估之理想破壞曲面所涵蓋之分層土壤的性質進行邊坡穩定性分析。請參閱期中報告書第四章第一節。
九	降雨量和雨型對地下水位的影響，是否需納入考量？	感謝建議！針對水文相關影響，現階段不納入考慮，待理想曲面之相關技術成熟後，將對此方向進行補強。
十	理想破壞區面對大規模崩塌潛勢區之影響範圍推估甚為重要，建議考慮取得已發生大規模崩塌區其事件發生前相關資料進行推估，並將其結果以事件後地形進行比對，以驗證本案方法之可行性。	感謝！有關理想破壞曲面對大規模崩塌潛勢區之影響範圍推估之實際應用案例，可參閱本團隊之期刊發表如 Tai et al., (2020)以及 Ko et al. (2021)，其中災後之衛星影像中的裸露區塊與數值模擬之路徑高度吻合。若能經由貴單位提供更多的實際案例資料，將可進行更多的案例驗證。
十一	請具體說明應用理想破壞曲面推估前，其假設條件、起始、邊界條件之需求，如水文、地文及觀測資料等，以利後續水保局針對各大規模崩塌潛勢區相關資訊建置之規劃。	感謝委員提醒，請參閱本期中報告書第二章二節(理想破壞曲面)中補充說明。
十二	光華及秀巒均為有局部破壞場址，但破壞處無地下水監測數值，現場亦可看到有滲水狀況，如何驗證相關參數？	針對無地下水監測部分，擬透過 Viessmann and Lewis (1996)所提出之地下水位迴歸方式，搭配現場既有之地下水位監測井推估可能之地

附錄二 期初審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
		下水位分佈。若無鑽探資料則可能無法驗證相關參數。
十三	此計畫嘗試推估崩塌量體，建議可與本局劃設影響範圍研究之結果做比較。	感謝委員建議，於本案已初步完成由土砂運移行為模擬成果與 BigGIS 中公佈之影響範圍進行比較。若貴單位擬嘗試其他區域，我們亦樂意進行。

附錄三 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	圖 2.14，分層土壤與邊坡穩定安全係數示意圖，不是很容易理解空間意義，建議補充說明邊坡面、破壞面等更多資訊。	針對期中報告書初稿之圖 2.15 呈現方式，並於第二章第四節進行修正，其中下標 b1 與 b2 分別代表上層與下層土壤，並於式(2.10)說明其邊坡穩定性分析
二	P2-21，研究區簡介中的光華 T002 面積 20 公頃，請確認數據，且 P2-22 圖中地崩塌範圍不是 T002 範圍，根據最新的研究證據崩塌範圍也不是上半部，建議一併採用最新研究證據。	已參考水保局臺北分局(2021)之光華 T002 崩塌範圍資料，相關之圖層與數值於期末報告書書之第三章第一節說明。
三	P2-23，秀巒崩塌，2021 年 9 月崩塌面積 4.2 公頃，另一數據顯示目前崩塌面積 8.64 公頃，建議搭配地圖、範圍標示說明仔細。	感謝委員指正。經確認水保局臺北分局(2021)之計畫書，崩塌面積 4.2 公頃為 2021 年 9 月璨樹颱風所造成之崩塌範圍。而 8.64 公頃為誤植，須修正為 8.3 公頃，其範圍為秀巒 T001 之潛勢崩塌範圍面積。
四	光華崩塌地分析(P4-4、P4-5)，其中情境一 vs 情境二的崩塌深度分析分別為 23 m、46 m，差異不小，建議與鑽探的資料作為比較，釐清可能滑動深度，且檢驗滑動深度與崩塌面積-體積關係式，是否合理。	針對理想崩塌曲面推估之滑動深度，已於第四章第一節中列出與現場傾斜儀所量測之滑動深度差異。
五	秀巒崩塌範圍應該不只 P4-7、P4-8，情境一有植被的範圍，應該更大才對，該地區有不同期的地形資料，建議從收集地形差異變化資料，說明崩塌範圍。	由於災後之地形資料為 DSM (2021/10 由 UAV 拍攝製作)，與 2016 年內政部 LiDAR 之 DEM 為基準相比較，無法辨識出明確的崩塌範圍，僅能以崩塌深度大於 1 公尺範圍做為參考基準。
六	本案延伸應用參考橢圓-理想	感謝委員肯定。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	崩塌曲面法，應用於去年發生滑動或崩塌之光華 T002 及秀巒 T001，結合現地之數值地形經濟地下水位及位移等相關監測數據進行邊坡穩定分析，了解地下水位對邊坡穩定之安全係數，值得參考。	
七	建議針對本案發展的理想崩塌曲面法，說明利用此數值方法時，如何應用現場其他相關監測資料，以作為數值模擬時之起始及邊界條件，讓模擬的結果更精確。	已於期末報告初稿中第四與五章說明資料前處理、參數設定、與傾斜儀的量測深度比較。
八	水土保持局在宜蘭太平山之蘭台大規模崩塌觀測站中，有建置完整的現地觀測系統，包含門型的地電阻觀測地下水位分佈隨時間的變化，因此建議本案可考慮針對蘭台大規模崩塌潛勢區進行數值模擬，同時和現場地表下監測資料進行比對確認，以了解模擬結果的精確度。	已聯繫其計畫之承辦單位，並於9月26日得到回覆。其中因該(蘭台)計畫現階段處於資料蒐集與彙整階段，尚無法提供所需資料，故需等該計畫告一段落後才有可能提供相關後資料。若未來有機會，本團隊非常樂意執行相關案例之分析。
九	本案發展之理想崩塌曲面法，可否用以模擬不同的崩塌形式，如平面滑動、圓弧滑動、順向坡滑動等。	感謝！這是非常重要的後續發展方向。現階段理想崩塌曲面法僅適合應用於圓弧滑動。對於平面滑動與順向坡滑動類型須適度修正，待理想曲面法之相關技術成熟後，將納入後續發展之方向。

附錄四 實地查核意見暨回覆辦理情形

檔 號：
保存年限：

行政院農業委員會水土保持局 函

地址：54044南投縣南投市光華路6號
承辦人：高百毅
電話：049-2347534
傳真：
電子信箱：baiyi96@mail.swcb.gov.tw

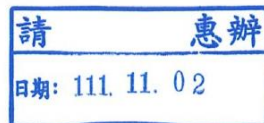
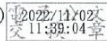
受文者：財團法人成大研究發展基金會(戴義欽教授)

發文日期：中華民國111年11月2日
發文字號：水保技字第1111858749號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：如主旨(簽到1111028-成大.pdf、111年-實地查核會議紀錄-成大基金_v2.pdf)

主旨：檢送本局111年10月28日111年度創新研究計畫「大規模崩塌與地形特性以及地下水分布關聯之精進研究」實地查核會議紀錄，請查照。

正本：財團法人成大研究發展基金會(戴義欽教授)、陳主任秘書重光、吳委員玉華、劉委員詩蓉、許委員玉兒

副本：本局政風室、本局主計室、本局土石流防災中心、本局技術研究發展小組(均含附件)



成大研發基金會收文



行政院農業委員會水土保持局
111 年度創新研究計畫「大規模崩塌與地形特性以及地下
水分布關聯之精進研究」實地查核會議紀錄

壹、時間：111 年 10 月 28 日(星期五) 下午 1 時 30 分

貳、地點：成大研究發展基金會(運璿綠建築研究大樓 3 樓會議
室)

參、主持人：陳主任秘書重光(兼任領隊) 紀錄：高百毅

肆、出(列)席者：(詳簽到簿)

伍、討論事項：

案由一：111 年度創新研究計畫-「大規模崩塌與地形特性以
及地下水分布關聯之精進研究」實地查核案，提請討
論。

決 議：

一、經查核委員檢視計畫經費支用符合相關規定，無落後及
違約等情事。

二、針對委員之報告內容建議，請成大研究發展基金會納入
計畫參考辦理。

三、有關委員之報告內容建議如下：

(一)大規模崩塌為本局推動之重點業務，本計畫研究成果
可協助邊坡穩定分析、大規模崩塌量體及影響範圍之
評估等工作，進而提升防災預警工作成效。

(二)研究開發之數值模擬分析程式，建議思考與本局實務
應用合作之方式，並於報告書內提供建議。

陸、臨時動議：無。

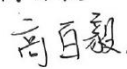
柒、散會。(下午 2 時 50 分)

SWCB(103.07 月版)

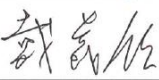
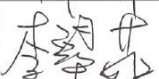
行政院農業委員會水土保持局
111 年度創新研究計畫實地查核會議
簽到單

壹、開會時間：111 年 10 月 28 日(星期五) 下午 2 時

貳、開會地點：成大研究發展基金會(運璿綠建築研究大樓 3 樓會議室)

參、主 持 人：陳主任秘書重光(兼任領隊)  紀錄：高百毅 

肆、出 (列) 席單位及人員：

出席委員			簽 名 處	
單位(機關)	職稱	姓名	職 稱	姓 名
水土保持局	委員	吳玉華	委員	
水土保持局	委員	劉詩蓉	委員	
水土保持局	委員	許玉兒	委員	
列席單位及人員	簽 名 處			
	職 稱	姓 名	職 稱	姓 名
水土保持局 (土石流防災中心)				
成大研究發展基金會				
		王福杰		
				白佩慈

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	大規模崩塌為本局推動之重點業務，本計畫研究成果可協助邊坡穩定分析、大規模崩塌量體及影響範圍之評估等工作，進而提升防災預警工作成效。	感謝！
二	研究開發之數值模擬分析程式，建議思考與本局實務應用合作之方式，並於報告書內提供建議。	感謝！ 請參閱本報告第六章第二節之建議與未來展望。

附件五 期末暨成果發表會回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	崩塌地形特性有初步成果，後續可提供應用，惟地下水的敘述較少，未來可持續研議。	感謝！有關地下水部分，因本案現階段主要為匯整現場地下水位監測井(點資料)與地電阻量測後推估之地下水位分佈(剖面資料)，作為探討地下水位分佈資料對於邊坡穩定性之影響用。未來可以此資料為基礎，規劃設計不同地下水位情境，探討其對邊坡穩定之影響。
二	請問此研究準確性為何？ 未來突破方向為何？	理想崩塌曲面法主要為在不需非常精確之現地量測資料的前提下，即能迅速評估崩塌破壞面，並作為於後續土砂運移之路徑估算的依據。如 Tai et al. (2020) 以及 Ko et al. (2021) 之研究成果顯示，土砂運移路徑主要受地形影響，崩塌曲面的誤差影響有限，因此容許一定的誤差。以光華 T002 為例，所推估之理想崩塌曲面與水保局台北分局(2020)經現場調查後之崩塌範圍位置偏差 23.36%。而秀巒 T001 因未有明確之崩塌範圍資料，本案應用災害前後期數值地形資料差異大於 1 m 處(假設崩塌範圍)且與推估之理想崩塌曲面重疊處，其平均崩塌深度偏差分別為 9.98 m (情境一) 與 6.81 m (情境二)，最大崩塌深度偏差分別為 11.68 m (情境一) 與 8.78 m (情境二)，其偏差來源為理想崩塌曲面法推估之崩塌破壞面為平滑之曲面，並無法描述實際崩塌崎嶇狀況。 秀巒 T001 之案例亦為本案未來突破之方向，由於破壞面趾部被崩塌土砂覆蓋而不易辨識其確切崩塌範圍，使得崩塌土砂量體推估存在高度不確定。因此針對崩塌範圍高度不確定案例，本案建議未來推估可能崩塌滑動塊體時可透過本案之方法進行估算。
三	成果良好，也達成預期目標。	感謝！