

計畫編號：SWCB-110-037

**大規模崩塌與地形特性以及地下水分佈
關聯之研究**
**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：110 年 01 月 27 日至 110 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 110 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研究

摘要

本計畫以水土保持局創新研究計畫 (107 與 108 年)與 Tai et al. (2020)所提出之理想曲面方法為基礎，採用 Ko et al. (2021)所提出之橢圓-理想曲面法，應用於大規模崩塌潛勢區域探討其與地形特性以及與地下水分佈之關聯，並探討後續可能的土沙運移行為與路徑。搭配高精度數值地形資料 (Digital Elevation Model, DEM)所呈現之地形特性(如 崩崖、裂隙、蝕溝 等)以及已圈畫之大規模崩塌潛勢區域，進行初步估算可能之崩塌滑動面、範圍、崩塌量體以及對應之邊坡安全係數。透過理想曲面法之高度彈性，本計畫將可整合水土保持局長年設置邊坡穩定相關現場監測系統所蒐集之資料，如地下水監測井之水位、傾斜儀滑動深度紀錄、GPS 地表位移 等，作為各式可能情境之依據。透過地下水位計所紀錄之水位估算可能之地下水分佈，並以理想崩塌破壞曲面為依據，進行含有地下水位之邊坡安全係數分析。本計畫以台東延平鄉大規模崩塌潛勢區域 (T003)與復興區光華大規模崩塌區域(T002)作為探討對象，採用範圍內所蒐集之地下水水位變化、傾斜儀數據並搭配現場調查所研判之崩崖裂隙位置探討可能情境。評估現行大規模崩塌潛勢區域圈畫範圍內可能的崩塌範圍、量體、邊坡安全係數以及後續土砂可能的影響範圍，作為防災減災規劃及應變時之參酌資訊。

關鍵詞： 崩塌、理想曲面、地下水分佈、邊坡安全係數分析、土砂運移路徑

Impacts of the terrain characteristics and groundwater distribution on the plausible large-scale landslides

Abstract

Following the projects (2018 & 2019) and Tai et al., (2020), the present project aims at applying an advanced algorithm (i.e., the “Ellipse-reference-ICS” method, Ko et al., 2021) of constructing a smooth curved surface (ICS) to mimicking the plausible surface of slope failure of sliding type. In this proposal, the impacts of the terrain characteristics (cracks, scarps, erosion gullies) and the groundwater distribution are taken into account for constructing the ICSs. Hence, the field data can be well employed by a high efficient method of constructing the ICS for analyzing the associated safety factors. That is, although the terrain characteristics and monitoring records of groundwater distribution are generally very limited, the proposed method is proved to be an efficient tool. The developed method is applied to two large-scale landslide areas of potential, i.e., the T003 at Yanping Township and the T002 at Fuxing District, where the monitoring data (detection well and inclinometer) is available. The detected failure depths at the two sites can be well captured by the constructed ICSs. Together with the two-phase simulation tool, it can serve as a powerful tool for hazard assessment in the landslide-prone areas.

Keywords: Landslide, idealize curved surface (ICS), groundwater level, safety factor, 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 理想崩塌破壞曲面之估算	2-3
第三節 加值應用現有地下水監測資料	2-10
第四節 理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析	2-13
第三章 研究區域介紹	3-1
第一節 臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域	3-1
第二節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域	3-11
第四章 理想崩塌破壞曲面之估算	4-1
第一節 簡化理想破壞曲面建置條件	4-1
第二節 邊坡安全係數前置資料處理	4-33
第五章 加值應用現有地下水監測資料以及邊坡安全係數分析	5-1
第一節 臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域	5-1
第二節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域	5-6
第六章 理想崩塌破壞曲面土體之土砂運移行為	6-1
第一節 土砂運移行為模擬	6-1

第七章 結論.....	7-1
第一節 結論	7-1
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 工作執行計畫書審查意見暨回覆辦理情形	附-5
附錄 三 期中報告書審查意見暨回覆辦理情形	附-10
附錄 四 期末報告書審查意見暨回覆辦理情形	附-13

表次

表 4.1 理想崩塌破壞曲面建置方法	4-2
表 4.2 延平鄉 T003 情境一情境探討成果表	4-5
表 4.3 延平鄉 T003 情境二情境探討成果表	4-8
表 4.4 延平鄉 T003 情境三情境探討成果表	4-11
表 4.5 延平鄉 T003 情境四情境探討成果表	4-14
表 4.6 延平鄉 T003 情境五情境探討成果表	4-17
表 4.7 延平鄉 T003 情境一與情境六成果表	4-18
表 4.8 光華 T002 情境一、情境二與情境三崩塌量體與深度成果比較 表	4-21
表 4.9 光華 T002 情境四與情境五崩塌量體與深度成果比較表...	4-22
表 4.10 延平鄉 T003 理想破壞參數值	4-30
表 4.11 光華 T002 理想破壞參數值	4-32
表 4.12 延平鄉-T003 理想崩塌破壞曲面推估之可能崩塌深度與現場 傾斜儀量測之滑動破壞深度比較表	4-41
表 4.13 光華 T002 理想崩塌破壞曲面推估之可能崩塌深度與現場傾 斜儀量測之滑動破壞深度比較表.....	4-42
表 5.1 邊坡安全係數採用之參數與結果一覽表	5-17
表 6.1 光華 T002 土砂運移行為採用之參數一覽表(括弧內之值為 TAI ET AL. (2019)採用之值).....	6-2
表 6.2 光華 T002 土砂運移行為最靠近建物採用之參數一覽表.....	6-5
表 7.1 本計畫之工作進度與完成度	7-3

圖次

圖 2.1 計畫作業流程圖	2-3
圖 2.2 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 $d2$	2-4
圖 2.3 理想崩塌破壞曲面之幾何特性.....	2-4
圖 2.4 崩塌潛勢區域與可能的理想曲面對應的橢圓位置圖	2-6
圖 2.5 理想破壞曲面之集合參數特性圖(示意圖).....	2-6
圖 2.6 崩塌面積-體積關聯圖	2-9
圖 2.7 理想地下水分佈圖(示意圖).....	2-11
圖 2.8 理想地下水分佈建置圖(示意圖).....	2-12
圖 2.9 理想破壞曲面與地下水分佈關係圖(示意圖).....	2-13
圖 2.10 切片法曲率半徑 R 與有效力臂 R^* 示意圖.....	2-15
圖 2.11 切片法考慮地下水之示意圖	2-15
圖 2.12 理想破壞曲面與實際崩塌區域位置差異分佈圖 (模擬土砂運移之初始條件差異)	2-18
圖 2.13 使用理想破壞曲面與使用實際崩塌區域在 60.61 秒時土砂運移位置差異分佈圖 (區域顏色的意涵如同圖 2.12).....	2-18
圖 2.14 使用理想破壞曲面與使用實際崩塌區域在 121.22 秒時土砂運移位置差異分佈圖 (區域顏色的意涵如同圖 2.12).....	2-19
圖 2.15 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 (區域顏色的意涵如同圖 2.12).....	2-19
圖 3.1 延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域地形圖	3-2
圖 3.2 延平鄉 T003 大規模崩塌區域坡度圖	3-2
圖 3.3 延平鄉 T003 大規模崩塌地形特徵判釋成果(光達數值地形產製之赤色地圖(CHIBA ET AL., 2008))	3-3

圖 3.4 延平鄉 T003 監測井位置圖	3-4
圖 3.5 延平鄉 T003 監測井 W19BW1 傾斜儀監測資料	3-6
圖 3.6 延平鄉 T003 監測井 W19BW1 地下水位歷線圖	3-6
圖 3.7 延平鄉 T003 監測井 W19BW2 傾斜儀監測資料	3-7
圖 3.8 延平鄉 T003 監測井 W19BW2 地下水位歷線圖	3-7
圖 3.9 延平鄉 T003 監測井 W20BW3 傾斜儀監測資料	3-8
圖 3.10 延平鄉 T003 監測井 W20BW3 地下水位歷線圖	3-8
圖 3.11 延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域(黃線)以及不同組合情境 圖(紅線為理想崩塌分析範圍之參考橢圓).....	3-10
圖 3.12 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域地形圖	3-12
圖 3.13 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域坡度圖	3-12
圖 3.14 光華 T002 大規模崩塌 LiDAR 資料判釋潛在崩塌範圍....	3-13
圖 3.15 光華 T002 監測井位置圖	3-14
圖 3.16 光華 T002 監測井 K18-1BW 傾斜儀監測資料.....	3-16
圖 3.17 光華 T002 監測井 K18-1BW 地下水位監測資料.....	3-16
圖 3.18 光華 T002 監測井 K18-2BW 傾斜儀監測資料.....	3-17
圖 3.19 光華 T002 監測井 K18-2BW 地下水位監測資料.....	3-17
圖 3.20 光華 T002 監測井 K19-1BW 傾斜儀監測資料.....	3-18
圖 3.21 光華 T002 監測井 K19-1BW 地下水位監測資料.....	3-18
圖 3.22 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域 UAV 產製地形之 2005 年、 2021 年 3 月與 8 月研判滑動範圍位置圖	3-19
圖 4.1 延平鄉 T003 情境一方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲 面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-3
圖 4.2 延平鄉 T003 情境一方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲 面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-3

圖 4.3 延平鄉 T003 情境一方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-4
圖 4.4 延平鄉 T003 情境一方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-4
圖 4.5 延平鄉 T003 情境二方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-6
圖 4.6 延平鄉 T003 情境二方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-6
圖 4.7 延平鄉 T003 情境二方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-7
圖 4.8 延平鄉 T003 情境二方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-7
圖 4.9 延平鄉 T003 情境三方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-9
圖 4.10 延平鄉 T003 情境三方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-9
圖 4.11 延平鄉 T003 情境三方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-10
圖 4.12 延平鄉 T003 情境三方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-10
圖 4.13 延平鄉 T003 情境四方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-12
圖 4.14 延平鄉 T003 情境四方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-12

圖 4.15 延平鄉 T003 情境四方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞 曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-13
圖 4.16 延平鄉 T003 情境四方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞 曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-13
圖 4.17 延平鄉 T003 情境五方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞 曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-15
圖 4.18 延平鄉 T003 情境五方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞 曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-15
圖 4.19 延平鄉 T003 情境五方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞 曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-16
圖 4.20 延平鄉 T003 情境五方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞 曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-16
圖 4.21 延平鄉 T003 情境一(左)與情境六(右)之參考橢圓比較圖	4-19
圖 4.22 延平鄉 T003 情境一(左)與情境六(右)理想崩塌破壞曲面推估 之崩塌深度圖	4-19
圖 4.23 光華 T002 情境一方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲 面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-23
圖 4.24 光華 T002 情境二方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲 面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-24
圖 4.25 光華 T002 情境三方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲 面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-25
圖 4.26 光華 T002 2021 年 03 月情境四-A 參考橢圓(左)與理想崩塌破 壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-26

圖 4.27 光華 T002 2021 年 03 月情境四-B 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-27
圖 4.28 光華 T002 2021 年 03 月情境四-C 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-27
圖 4.29 光華 T002 2021 年 08 月情境五-A 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-28
圖 4.30 光華 T002 2021 年 08 月情境五-B 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-29
圖 4.31 光華 T002 2021 年 08 月情境五-C 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖	4-29
圖 4.32 延平鄉 T003 情境六之理想崩塌曲面深度與剖面線位置圖	4-34
圖 4.33 延平鄉 T003 情境六之 A-A'剖面之地形與理想崩塌滑動深度圖	4-34
圖 4.34 光華 T002 情境二之理想崩塌曲面深度與剖面線圖	4-37
圖 4.35 光華 T002 情境二之 A-A'剖面之地形與理想崩塌滑動高程圖	4-37
圖 4.36 光華 T002 情境三之理想崩塌曲面深度與剖面線圖	4-38
圖 4.37 光華 T002 情境三之 A-A'剖面之地形與理想崩塌滑動高程圖	4-38
圖 4.38 光華 T002 之情境四理想崩塌曲面分析剖面線位置圖	4-39
圖 4.39 光華 T002 情境四數值地形邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面剖面圖	4-39
圖 4.40 光華 T002 情境五理想崩塌曲面分析剖面線位置圖	4-40
圖 4.41 光華 T002 情境五數值地形邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面剖面圖	4-40

圖 4.42 崩塌面積與長軸深度 D_1 之關係圖	4-43
圖 5.1 延平鄉 T003 監測井、地下水位參考點與剖面線位置圖	5-2
圖 5.2 延平鄉 T003 A-A'剖面線之二維曲線地下水位高程圖	5-2
圖 5.3 延平鄉 T003 大規模崩塌邊坡安全係數分析之地形、地下水位 與崩塌破壞理想曲面高程剖面圖.....	5-3
圖 5.4 延平鄉 T003 之崩塌表面、理想崩塌延伸曲面與地下水位三維 高程圖.....	5-5
圖 5.5 延平鄉 T003 之理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖.	5-5
圖 5.6 延平鄉 T003 之崩塌表面與地下水位三維高程圖	5-5
圖 5.7 光華 T002 前期計畫地形、滑動破壞面與地下水位高程圖(圖 資料來源：水土保持局臺北分局，2020).....	5-6
圖 5.8 水土保持局臺北分局(2020)計畫之地下水位分佈與光華 T002 情境一崩塌破壞曲面分佈圖.....	5-7
圖 5.9 光華 T002 情境二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.....	5-9
圖 5.10 光華 T002 情境二之崩塌表面、理想崩塌延伸曲面與地下水 位三維高程圖.....	10
圖 5.11 光華 T002 情境二之理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程 圖	5-10
圖 5.12 光華 T002 情境二之崩塌表面與地下水位三維高程圖.....	5-10
圖 5.13 光華 T002 情境三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.....	5-11
圖 5.14 光華 T002 情境三之崩塌表面、理想崩塌延伸曲面與地下水 位三維高程圖.....	5-12

圖 5.15 光華 T002 情境三之理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖	5-13
圖 5.16 光華 T002 情境三之崩塌表面與地下水位三維高程圖	5-13
圖 5.17 光華 T002 監測井、地下水位參考點與剖面線位置圖	5-14
圖 5.18 光華 T002 A-A'剖面線之地下水位分佈高程圖	5-14
圖 5.19 光華 T002 情境二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	5-15
圖 5.20 光華 T002 情境三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	5-16
圖 6.1 光華 T002 情境三 82 組隨機參數之土砂流動深度大於 1 公分之路徑重疊圖	6-3
圖 6.2 光華 T002 情境三 82 組隨機參數之土砂流動深度大於 1 公分之路徑重疊局部放大圖	6-3
圖 6.3 光華 T002 情境二 82 組隨機參數之土砂流流動深度大於 30 公分之路徑重疊圖	6-4
圖 6.4 光華 T002 情境二 82 組隨機參數之土砂流流動深度大於 30 公分之路徑重疊局部放大圖	6-4
圖 6.5 $T = 0.00$ s 時之流體深度分佈圖	6-6
圖 6.6 $T = 10.00$ s 時之流體深度分佈圖	6-6
圖 6.7 $T = 20.00$ s 時之流體深度分佈圖	6-6
圖 6.8 $T = 25.00$ s 時之流體深度分佈圖	6-7
圖 6.9 $T = 30.00$ s 時之流體深度分佈圖	6-7
圖 6.10 $T = 40.00$ s 時之流體深度分佈圖	6-7

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，地形陡峻、降雨急驟、河短流急的不利條件下，每逢颱風汛期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。至 2009 年小林村大規模崩塌起，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、設置現場既是監測系統等，於 2018 年所發行之「大規模崩塌之調查與及觀測技術手冊」中也將「大規模崩塌」暫時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。由於崩塌量體龐大，在山區易造成堰塞湖，當發生潰壩時將對下游保全對象造成衝擊規模嚴重的二次災害。

近年許多對於大規模崩塌之發生機制研究(如 李威霖，2020、Kuo et al., 2018、陳振宇，2014)，不論是經驗統計或使用數值模式進行探討，均將降雨或地下水造成孔隙水壓變化納入考量。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>)也闡述多數大規模崩塌發生時該區域之累積降雨量往往都大於 1000 mm。因此為了瞭解大規模崩塌潛勢區域特性，水土保持局針對大規模崩塌區域進行現場調查並設置了許多即時監測系統，蒐集調查環境地形地質並長期監測地表位移監測、地表伸縮計及雨量站(請參閱行政院農業委員會水土保持局，104、106 與 107)。

除了應用數值模式，因應遙測技術(如 光達數值地形(LiDAR derived DEM)，合成孔徑干涉雷達 (InSAR) 等)不斷的提升並搭配

UAV 的普及，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，提供訂定警戒值以及數值情境探討之重要參考依據。

崩塌預警模式方面可分為統計法與解析法，統計法主要透過崩塌發生條件(如地形分佈、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。解析法主要藉由客觀和通用的力學與地質學角度，可以以定量的方式的估算崩塌土體及後續發生土石流可能影響範圍等時間變化；但缺點為現地組成複雜地質條件多變，物理參數取得困難。雖然兩者都可以在缺乏詳細現場監測系統下執行，然而明確之崩塌量體鳩有助於提供動態與定量之資訊，如 崩塌規模與後續的運移行為等 (參閱創新研究計畫，108； Tai et al., 2020)，對於防災與減災規劃幫助甚大。

掌握坡面崩塌土砂量體及後續的運移行為對於防災與減災規劃工作中扮演關鍵且不可或缺的腳色，尤其透過各式情境的探討，可以有效協助決策之判斷。近年因電腦運算效率的提升、遙測技術的進展與普及化可產生高解析度的地形資訊，現場監測系統即時高頻率資料，已逐漸實現可針對偶發事件進行第一時間的情境探討，將崩塌預警技術帶入另一個新紀元。本案應用理想破壞曲面法，除了針對地形特性(如 崩崖、裂隙 等)研判可能的崩塌範圍，並能夠考量地下水分佈狀態，推估所探討的邊坡在整合現地監測資訊後，可能的崩塌範圍、土體體積、以及後續可能的土砂運移影響範圍，妥善掌握可能的衝擊程度。

本計畫將應用 Tai et al. (2020) 與創新研究計畫 (107 與 108 年) 所

提出之理想曲面技術快速評估崩塌量體。由於估算方法主要目的為在現地資料缺乏的情況下仍可在第一時間快速推估崩塌體積作為後續土石流動態模擬之初始條件，因此所估算之理想破壞曲面與實際的破壞曲面會有所差距(深度的誤差、體積誤差)。但依據 Tai et al. (2020) 應用理想曲面方式推估回溯模擬 2009 年小林村大規模崩塌事件，發現使用理想曲面以及災後崩塌的實際破壞面，在土石流動態模擬中其運移路徑差異不大。其在開始階段土石流運移路徑存在差異(面積偏差 26.82%)，但隨土石流往下游運移其路徑差異性逐漸縮小，在最終堆積階段只剩有小部分的邊緣處存在差異(面積偏差 9.54%)。由於此理想曲面具備高度的彈性(範圍選取或是深度可因現地地形特徵或是監測資料做合理調整)，此成果顯示以理想曲面估算崩塌破壞面的實用性。本案將善用理想曲面技術之高度彈性，依據範圍內所蒐集之地下水水位變化、傾斜儀數據搭配現場調查所研判之崩崖裂隙位置，評估現行大規模崩塌潛勢區域圈畫範圍內可能的崩塌範圍、量體以及後續土砂可能的影響範圍等各式可能情境，作為防災減災規劃參酌之資訊。

針對本計畫本團隊提出「加值應用現有地下水位資料快速評估可能崩塌深度與量體」，並透過「情境設定」的方式探討研究區域內致災範圍與程度，作為本計畫之核心工作。

第二節 計畫工作項目

針對上述議題，本研究計畫於本年度規劃「理想崩塌破壞曲面之估算」、「加值應用現有地下水監測資料」以及「理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析」等三個工作項目，說明如下：

一、理想崩塌破壞曲面之估算：

本團隊已在 107 年及 108 年以理想崩塌破壞曲面探討 45 個歷史情境。由於理想崩塌破壞曲面之建構基於主軸方向與側向軸方向不同的固定曲率，得以以參考橢圓搭配最大破壞深度之方式代表理想崩塌破壞曲面。Taylor et al., (2018)探討超過 2 萬個崩塌情境，歸納指出超過 82%的崩塌區域搭可以以橢圓概略描述其崩塌面積的形狀，由於場調查所判識之崩塌潛勢區域具高度的不確定性或是在崩塌潛勢區域資料的不足，本計畫延伸應用本團隊發展之“橢圓-理想曲面法”(Ellipse-Referenced ICS method, Ko et al., 2021)套疊(mapping)現地地形特徵進行彈性圈畫，建構對應的理想崩塌曲面，並得以與現地監測資料驗證，或是依此成果進行安全係數分析使用。

二、加值應用現有地下水監測資料：

本計畫利用水土保持局長期監測多處邊坡地下水水位以及邊坡滑動監測之資料建構可能之理想崩塌曲面。以崩塌潛勢區域地下水位計所提供之監測資料為參考基準與工作項目一之截取之地形高程為依據，建構可能之地下水位分佈，提供後續在理想崩塌破壞曲面含有地下水位之邊坡安全係數分析用。

三、理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析：

承繼工作項目一與工作項目二所提供之地形、崩塌破壞曲面高程與地下水位曲線高程剖面資料，進行邊坡安全係數探討。本工作項目之邊坡安全係數分析(analysis of safety factor)建置於有限邊坡條件下以力矩的概念估算，作為判斷邊坡是否呈現穩定

狀態。除此，也將應用工作項目一所估算之理想崩塌曲面與量體進行透過 DFMfGT 數值模式模擬崩塌後可能的土砂運移行為。

第二章 工作執行方法與步驟

本研究在前期工作階段已發展一簡易迅速評估崩塌破壞面(理想破壞曲面)的方法，並應用其估算結果(如可能崩塌體積與面積)作為後續土砂運移動態模擬數值模式(DFMfGT)之初始條件，探討該情境下崩塌產生土體之運移行為。因本方法為以一理想曲面來近似評估崩塌曲面並據以估算體積，作為坡面穩定性分析以及後續土砂運移行為動態模擬之依據。

本案之主要工作在於：(a) 精進應用理想崩塌破壞曲面之估算；(b) 加值應用現有地下水監測資料；以及(c) 理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析。此外，也透過數值模式探討理想崩塌破壞曲面下之土砂運移行為。

第一節 計畫工作架構與流程

本計畫工作之內容，整體作業流程如圖 2.1 所示，下列流程說明與：

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，圈畫可能之範圍，作為建構理想崩塌破壞曲面之依據

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

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無地下水或含有地下水位高程之安全係數(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、數值模式以及成果呈現

由於理想破壞曲面的方法並未將地質條件或地質走向，降雨強度、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下對應的邊坡安全係數之變化，以及崩塌後可能的土砂運移行為。

本案之主要貢獻：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，估算其可能的破壞曲面、崩塌量體規模以及可能災害衝擊範圍，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。

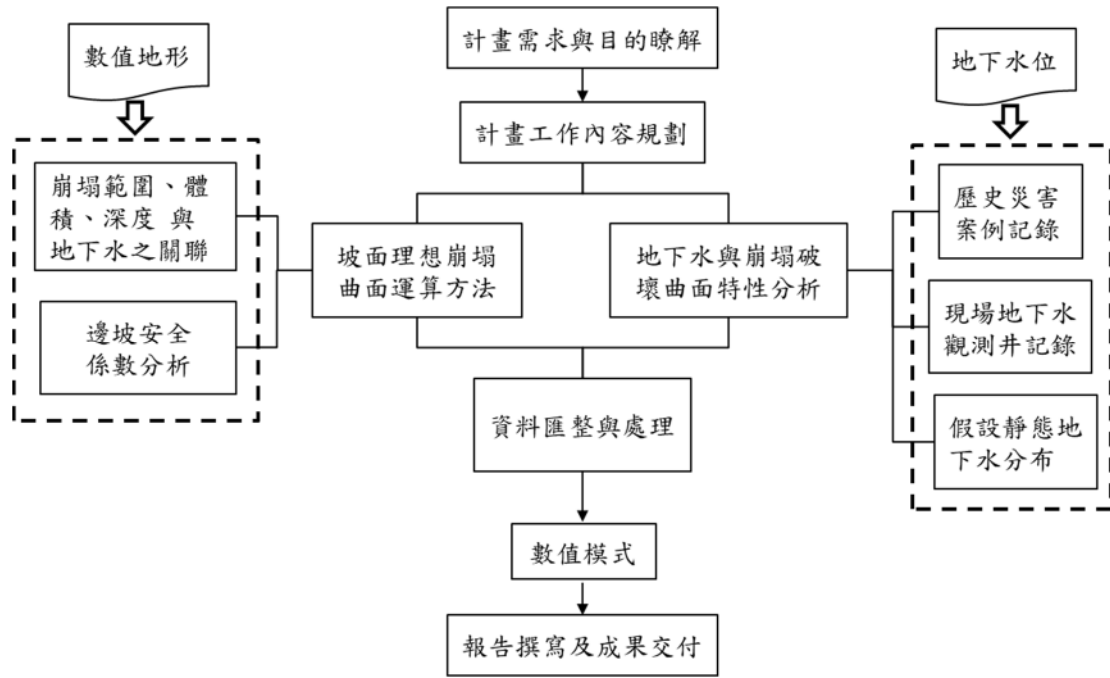


圖 2.1 計畫作業流程圖

第二節 理想崩塌破壞曲面之估算

本計畫採用 Tai et al. (2020)與創新研究計畫(107、108 年)所提出之理想破壞曲面搭配 Ko et al. (2021)所提之參考橢圓方法，透過已判識之可能崩塌範圍，推估可能對應的崩塌深度與量體。

理想破壞曲面之建置

在三維環境下建立一理想曲面，其幾何特性主要由軸向 (down-slope 方向) 曲率與側向 (transverse 方向) 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

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

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 2.2 所示，理想破壞曲面估算出軸向及側向崩塌最大深度(d_1 或 d_2)。如圖 2.3 所示，理想崩塌曲面整合數值地形資料(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， L 為圖 2.2 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。

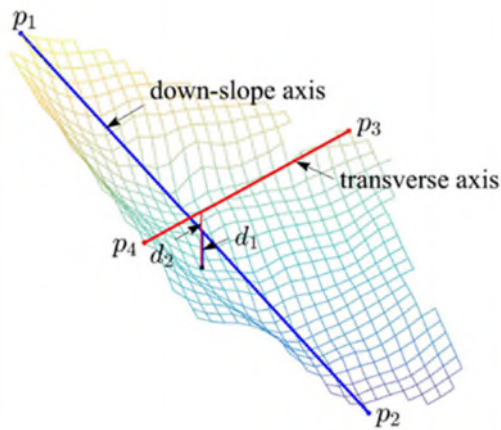


圖 2.2 軸向與側向並不會在同一平面，針對一深度 d ，會對應出軸向的深度 d_1 與側向的深度 d_2
(圖資料來源：Tai et al., 2020)

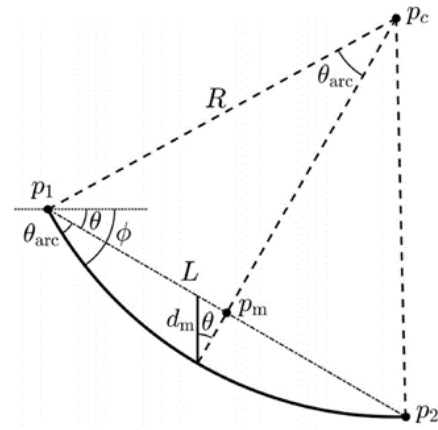


圖 2.3 理想崩塌破壞曲面之幾何特性
(圖資料來源：Tai et al., 2020)

簡化理想破壞曲面建置之方法

近年來遙測技術(如光達數值地形(LiDAR derived DEM)、合成孔徑干涉雷達(InSAR)等)可產生高解析度高精度的數值地形資料(DEM)，並透過研判微地形特徵或紅立體色地圖來確定冠部崩崖、坡趾隆起、側邊裂隙等地形特徵位置。但在未發生崩塌前，其三者之關聯往往不夠明確，造成圈畫可能滑動塊體範圍的高度不確定性與誤差。

在前期創新研究計畫(107 與 108 年)已應用理想破壞曲面推估 45 處已發生崩塌區域，發現理想破壞曲面所估算體積偏差大於 30 % 者主要為邊坡破壞表面的形狀均極為破碎零散，甚至有多個深度局部峰值的情形，推估極有可能由數塊滑動塊體發生崩塌所組成。由於在上述計畫中均將表面破碎的區域視為一體，以單一理想破壞曲面進行估算，造成誤差。

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)來進行理想曲面的估算。其中長軸與橢圓中心深度對應出長軸方向的曲率，橢圓之短軸與橢圓中心深度對應出側軸方向的曲率。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，以估算出理想破壞曲面衍生的崩塌範圍。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 2.4 為崩塌潛勢區域(黃色線範圍)與本案規劃之初步執行以理想破壞曲面對應的參考橢圓(橘紅色面範圍)示意圖。

此方法可理解為依據現場研判之地形特徵，初步劃定理想崩塌破壞曲面分析範圍，如圖 2.5 所示，將上下邊界點位假設為 p_1 與 p_2 並連成 $\overline{p_1p_2}$ (軸向或 x 軸)，並假設左右邊界點位 p_3 與 p_4 並連 $\overline{p_3p_4}$ (側向或 y 軸)，其中 $\overline{p_1p_2}$ 必須垂直於 $\overline{p_3p_4}$ 。

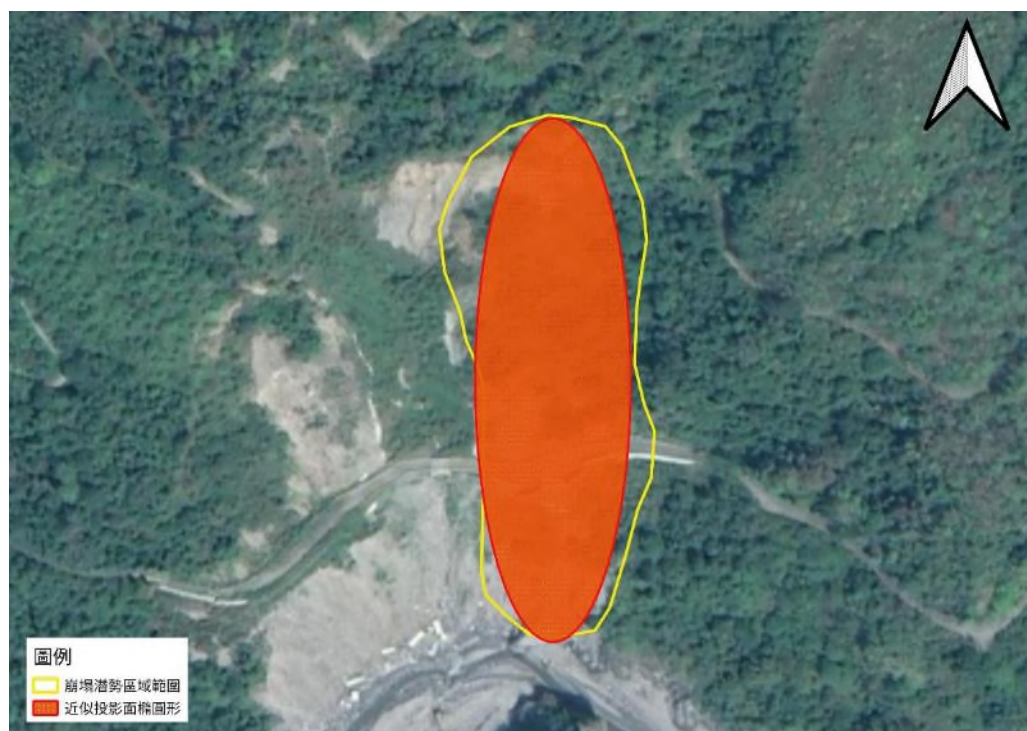


圖 2.4 崩塌潛勢區域與可能的理想曲面對應的橢圓位置圖(示意圖)

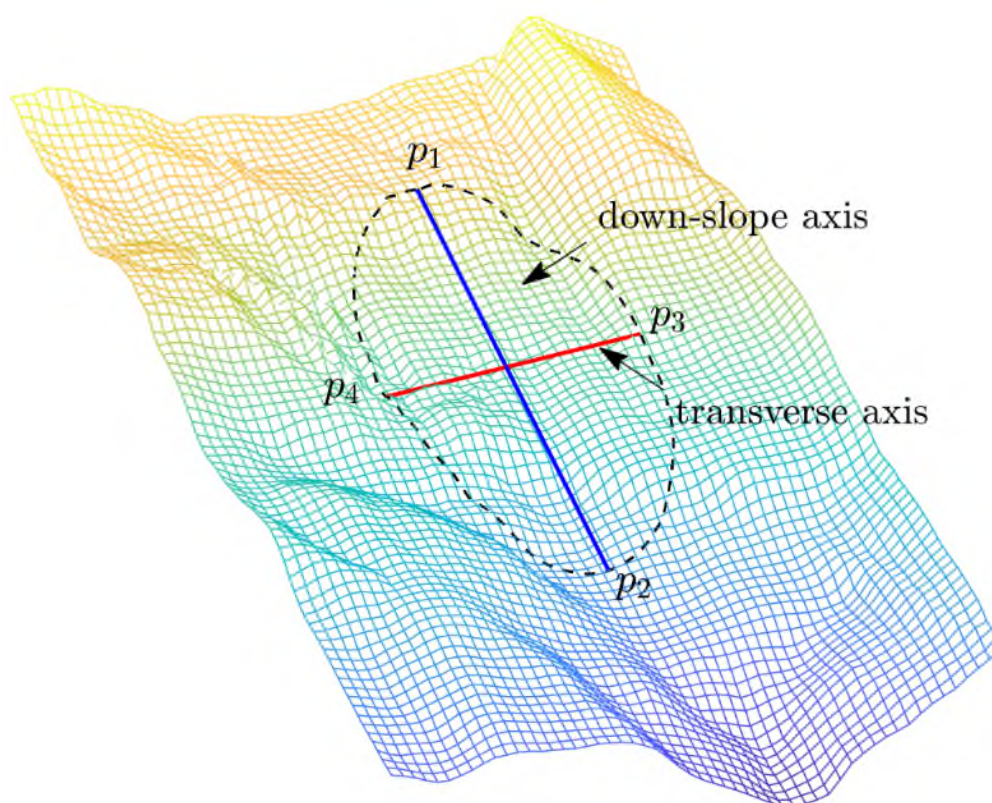


圖 2.5 理想破壞曲面之集合參數特性圖(示意圖)

假設 $\overline{p_1 p_2}$ 長度為 L_1 ，曲率半徑 R_1 與 L_1 關係式可寫成

$$L_1 = 2R_1 \sin \theta_{b1} \quad (2.2)$$

$$R_1 - d_1 \cos \theta_1 = R_1 \cos \theta_{b1} \quad (2.3)$$

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 ($L_1, R, d_1, \theta_{b1}, \theta_1$)，可參閱圖 2.3。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)，曲率半徑 (R_2) 與 (L_2) 關係式可寫成

$$L_2 = 2R_2 \sin \theta_{b2} \quad (2.4)$$

$$R_2 - d_2 \cos \theta_2 = R_2 \cos \theta_{b2} \quad (2.5)$$

然而軸向($\overline{p_1 p_2}$)與側向($\overline{p_3 p_4}$)往往不在同一平面上，可透過運算搜尋與 p_1, p_2, p_3, p_4 四個點距離均方差最小之橢圓做為代表橢圓，再提供一深度(d)即可決定一理想曲面，搭配數值地形資料(DEM)即可推估可能的崩塌範圍以及對應的崩塌量體。

本計畫主要是依據地形特性(特徵)以一可能的參考橢圓，透過套疊以及不同的崩塌深度，搜尋最佳理想破壞曲面以估算對應之可能崩塌的範圍與量體，可大幅提升理想破壞曲面之彈性與適用性，其應用在情境探討的部分可參閱本報告書第四章第一節之情境六。

後續為了比較理想崩塌破壞曲面所推估之崩塌範圍與水保局(或是地質調查所)所劃定之大規模崩塌潛勢區域差異，本計畫採用 Ko et al.(2021)所提出之兩種偏差來量化面積偏差(λ_s)與位置偏差

(Λ_s)。其中面積偏差(λ_s)代表崩塌曲面推估之崩塌面積與圈畫潛勢區域面積之差異，其定義如下：

$$\lambda_s = \frac{|A_{ICS} - A_{sa}|}{A_{sa}} \quad (2.6)$$

在搜尋過程中(透過不同的崩塌深度)，必須盡量維持 $\lambda_s = 0$ 。而位置偏差(Λ_s)表示式如下：

$$\Lambda_s = \frac{|A_{ICS} - A_{ICS \cap sa}| + |A_{sa} - A_{ICS \cap sa}|}{A_{sa}} \quad (2.7)$$

式中 A_{ICS} 為理想崩塌曲面所推估之崩塌範圍， A_{sa} 為所圈畫之大規模崩塌潛勢區域範圍， $A_{ICS \cap sa}$ 為理想崩塌曲面推估之崩塌範圍與圈畫之大規模崩塌潛勢區域範圍之交集。當 $\lambda_s = 0$ 時，僅代表兩者所估算之面積相等；當 $\Lambda_s = 0$ 時，才代表兩者所估算之區域範圍完全吻合。

理想破壞曲面推估崩塌量體

理想崩塌破壞曲面之候選曲面產生後，可經由數值地形資料(DEM)估算出對應的崩塌面積與體積。為了可以客觀的評估崩塌量體是否合乎實際狀況，將搭配 Guzzetti et al. (2009)主要蒐集意大利 677 場滑動性崩塌事件之現場調查成果，迴歸崩塌面積與崩塌量體之間關係

$$V_L = 0.0774 \times A_L^{1.450} \quad (2.8)$$

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，只需透過衛星影像或航照影像搭配災害前後期 DEM 即可估算崩塌面積大小並得出崩塌量體。但須留意上述迴歸式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(2.8)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與(2.8)相近，但是最大量體誤差則為2倍。因此，本案在情境探討中所估算的崩塌量體，在必要時將以(2.8)估算值的2倍值進行探討。如圖 2.6 所示，為本案重新彙整之崩塌面積-體積關聯圖，其中黑色點為 Tai et al. (2020)所整理臺灣 45 處崩塌事件之崩塌面積-體積，黑線為 Guzzetti et al. (2009) 迴歸之崩塌面積-體積經驗公式(式(2.8))，藍線為 Tai et al. (2020) 迴歸之崩塌面積-體積經驗公式，紅色實線為式(2.8)之 2 倍最大量體偏差涵蓋範圍，紅色虛線為式(2.8)之 7 倍最大量體偏差涵蓋範圍，同時也是式(2.8)經驗公式之 95%信賴區間涵蓋範圍。

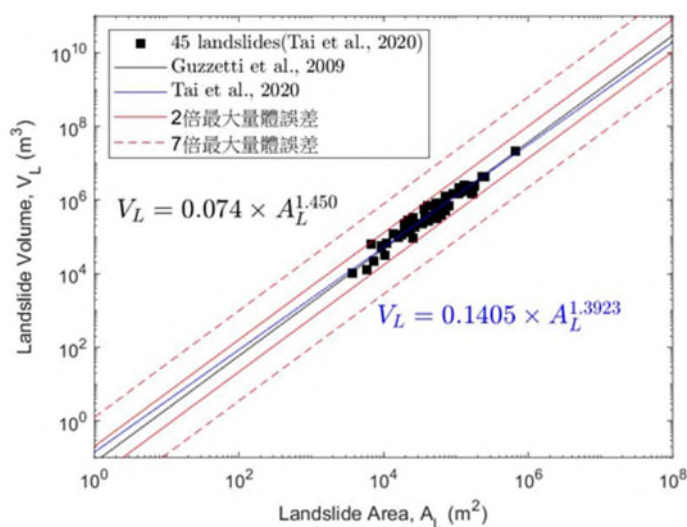


圖 2.6 崩塌面積-體積關聯圖

(本案重新彙整 Guzzetti et al., 2009 與 Tai et al., 2020 之崩塌面積-體積圖)

水保局所劃定之大規模崩塌潛勢區域可透過式(2.8)估算可能的崩塌量體(V_L)，在決定理想破壞曲面的崩塌深度時也以此量體為基準。換句話說，理想破壞曲面所推估之可能崩塌量體(V_{ICS})將以水保局所劃定之大規模崩塌潛勢區域透過式(2.8)得到之可能崩塌量體(V_L)

作為搜尋標的。換句話說，其體積偏差(ε_s)

$$\varepsilon_s = \frac{|V_{ICS} - V_L|}{V_L} \quad (2.9)$$

在搜尋最佳參考橢圓以及運算崩塌深度時將儘可能趨近 0。

承襲前期研究(Ko et al., 2021；Tai et al., 2020；李坤錠，2019)與創新研究計畫(107 與 108 年)成果，本計畫延伸應用理想破壞曲面在缺乏崩塌潛勢區域狀況下，透過假設不同理想曲面的代表橢圓進行初步運算，並使用迴歸式(2.8)來決定可能的崩塌體積並篩選出面積偏差最小者作為可能理想崩塌破壞曲面，提升此方法之應用性。

第三節 加值應用現有地下水監測資料

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。這些降雨基準可以作為制定大規模崩塌的警戒標準之基礎，然而這些警戒的基準數據對於邊坡的穩定與降雨造成地下水位間的關係並不容易建立具體定量的描述。

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。

本計畫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。由於設監測站耗時耗費，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，其水位高程可近似為 (cf. Viessmann and Lewis, 1995)

$$w = w_0 \left[1 - \left(\frac{r}{L_x} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

式中 w 為不同位置之地下水位高程、 w_0 為某位置地下水位高程、 r 為與 w_0 之水平距離、 L_x 為水平距離。

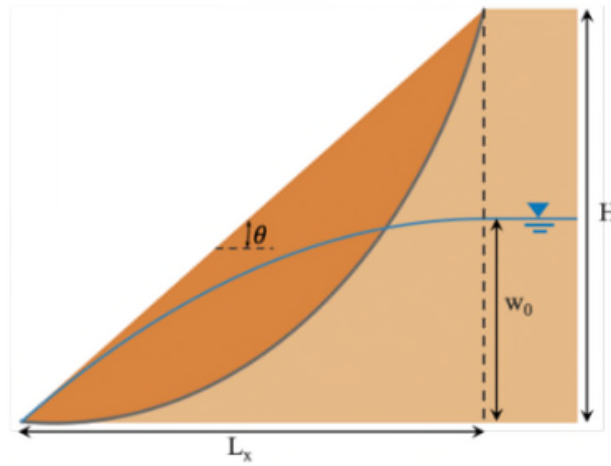


圖 2.7 理想地下水分佈圖(示意圖)

應用式(2.10)所近似估算之地下水位深度在監測井(地下水位計)位置 (x 軸)上深度偏差必須小於 50 cm。其地下水位偏差(ε_w)

$$\varepsilon_w = w_{\text{sensor}} - w \quad (2.11)$$

式中 w_{sensor} 為監測井(地下水位計)量測之地下水位深度。

三維地形則更為複雜，且需要更多的點位資料，僅舉例說明概要。可參考如圖 2.8 所示，黑色網格為地形資料、圓弧形為理想破壞曲面、於理想破壞曲面下方有部分藍色網格為本計畫估算之三維地下水分佈，綠色線為剖面圖(圖 2.9)之位置。於圖 2.9 中，黑色線為地形高程，藍色線為地下水位高程，綠色線為理想破壞曲面所在。於坡腹處(約 42 m 至 88 m 之間)的地下水水位高於理想破壞曲面，此時此切片(slice)對應的安全係數須將此地下水分佈的影響納入對於穩定的影響分析(請參閱第二章第四節)。另一方面，依據 Briaud (2013)所述，由於三維地形所計算之安全係數往往比以二維切片法所得之安全係數來得大一些，因此也可考慮各個二維切片所得之安全係數並取其最小值作為評估基準。

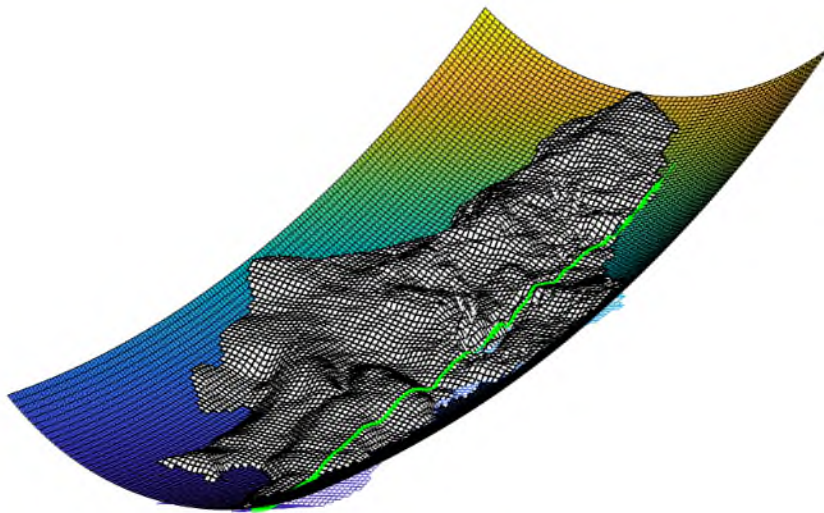


圖 2.8 理想地下水分佈建置圖(示意圖)

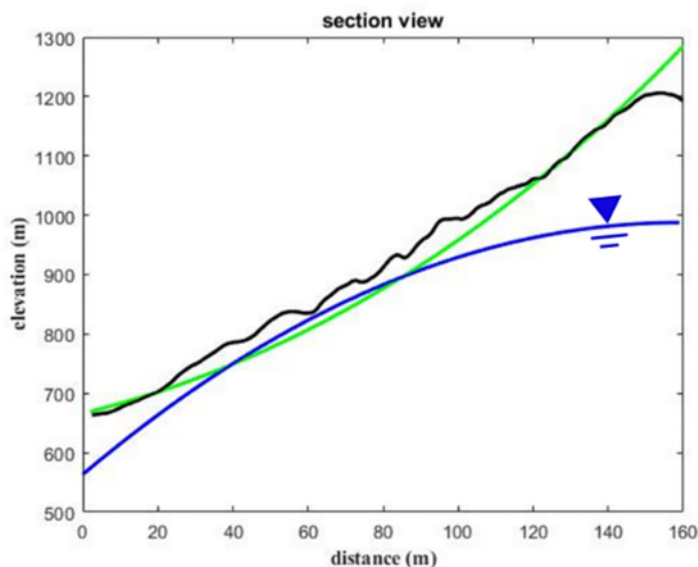


圖 2.9 理想破壞曲面與地下水分佈關係圖(示意圖)

本計畫除了探討不同假設之地下水水位分佈對於邊坡安全係數之影響(參閱第二章第四節)，也會針對實際觀測資料(如 傾斜儀量測之地下滑動變化量、地下水井量測之地下水位變化 等)進行可能的理想破壞曲面估算。

第四節 理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析

安全係數之估算

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)

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_D} \quad (2.12)$$

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)。無限邊坡理論考慮無限長的平面邊坡比較無法應用於實際的現地地形，而有限元素需要邊坡組成物的諸多物理參數，仰賴詳盡的現地鑽探資料。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與對應的範圍之後，透過切片法以力矩平衡的方式計算邊坡安全係數。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, 2002)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) 在軸向截取地形剖面高程計算安全係數(FS)的方法(參考圖 2.10)

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i R \tan \phi_b}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i R^*}, \quad R^* = R - \frac{h_i}{2} \cos \alpha_i \quad (2.13)$$

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(2.13)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 $R \gg h$ 時，(2.13)簡化為傳統無限邊坡之安全係數的計算(參閱 Briaud, 2013)。

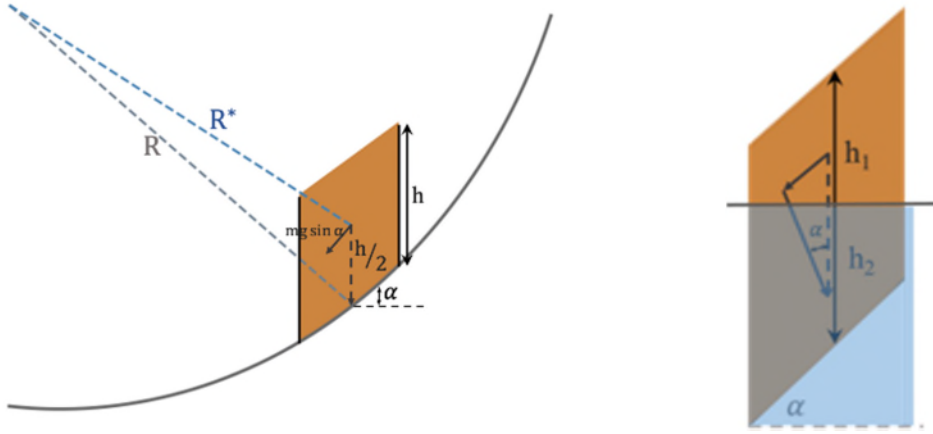


圖 2.10 切片法曲率半徑 R 與有效力臂 R^* 示意圖 圖 2.11 切片法考慮地下水之示意圖

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水位所在位置，計算如下

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{eff}}^i \cos \alpha_i R \tan \phi_b}{\sum_{i=1}^n (W_1^i R_1^i + W_2^i R_2^i) \sin \alpha_i} \quad (2.14)$$

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 2.11 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 2.11 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 $W_{\text{eff}}^i = (\rho_s \phi_s h_1^i - \rho_w \phi_s h_2^i) g \Delta A$ ；其中上層不含水之土體重量為 $W_1^i = \rho_s \phi_s h_1^i g \Delta A$ 、下層飽和含水土體重量則表示為

$W_2^i = \left[\rho_s \phi_s + \rho_w \phi_w \right] h_2^i g \Delta A$ ， 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 (2.13) 與式 (2.14) 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。承襲安全係數所得到之理想破壞曲面，只需搭配數值地形資料 (DEM) 即可得知崩塌量體，供後續土石流數值模擬之初始條件參考依據。

土砂運移行為數值模擬

在得到地下水水位影響之下所推估的理想破壞曲面所在以及可能的崩塌範圍與量體之後，就可採用本團隊所開發之土體動態模擬數值模式 (DFMfGT) 探討該情境下的土砂運移行為。

DFMfGT 數值模式為深度積分之固體-液體兩相流模式之理論，搭配現地地形座標系統所整合的土體動態模擬數值模式，相關文獻可參考 Tai et al. (2019, 2020)。DFMfGT 數值模式採用 Non-Oscillation Central Scheme (NOC) 有限體積演算法 (Kurganov and Tadmor, 2000; Kurganov and Miller, 2014)，因此此數值模式可模擬震波 (Shock Wave) 與水躍 (Hydraulic Jumps) 現象。近期，本研究團隊也完成該數值模式 CUDA-GPU 的高效率模組 (Ko et al., 2021)，並應用於後續的情境探討中 (參閱 第六章第一節)。

DFMfGT 數值模式整合理想曲面之結果可以 2009 年小林村大規模崩塌事件的模擬來說明。圖 2.11 呈現 2009 年小林村大規模崩塌事件之破壞曲面，其中以小林村發生大規模崩塌前後期數值地形資料 (DEM) 相減辨識得到之崩塌區域位置得到實際崩塌破壞面位置，並與理想曲面法所得之理想破壞曲面比較。其差異由圖 2.11 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。理想破壞曲面所推估之崩塌區域與實際位置兩者間的面積存在差異約 26.82%。

圖 2.13 至圖 2.15 為 Tai et al. (2020)採用實際崩塌破壞面以及理想破壞曲面搭配 DFMfGT 模式模擬之結果，區域顏色的意涵如同圖 2.12。圖 2.13 顯示時間在 60.61 秒時兩者模擬結果土砂運移位置的偏差，採用理想破壞曲面之土砂運移較採用實際崩塌破壞面的結果稍快。在時間為 121.22 秒時(圖 2.14)，大部分的土砂已經抵達楠梓仙溪並開始堆積，此時兩個模擬解果的差異已經大幅縮小。圖 2.15 顯示時間為 181.83 秒時的土砂分佈與差異，此時大部分的土砂已經堆積停止運動，兩者之間的位置差異剩下約 9.54%。由圖 2.13 至圖 2.15 間的差異大幅減少的現象，可說明應用理想破壞曲面所推估之崩塌範圍雖會與實際發生的範圍有所差異。但是之後的土砂運移行為的差異會隨著時間的推移而減緩。由於理想破壞曲面的建置條件相對單純，不需要大量的現地鑽探資料，只考慮地形影響之幾何特性，可大幅簡化推估崩塌破壞面以及後續土砂運移行為之複雜度。

本計畫後續將針對理想破壞曲面之選取，除了考量面積體積之關聯，也將所計算之崩塌深度與實際傾斜儀所記錄之滑動深度納入考量，並針對不同的滑動深度與地下水位分佈擬定不同的崩塌情境，並推估可能的崩塌量體，作為後續數值模式情境探討，土砂的運移行為的基礎。

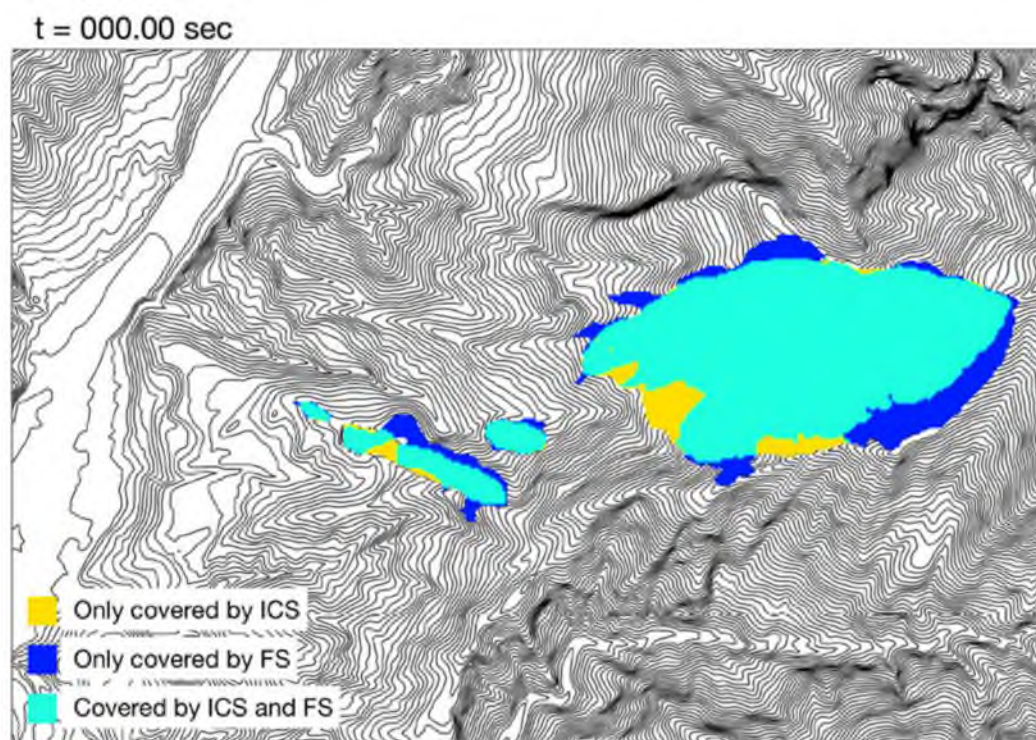


圖 2.12 理想破壞曲面與實際崩塌區域位置差異分佈圖 (模擬土砂運移之初始條件差異)

(圖資料來源：Tai et al., 2020)

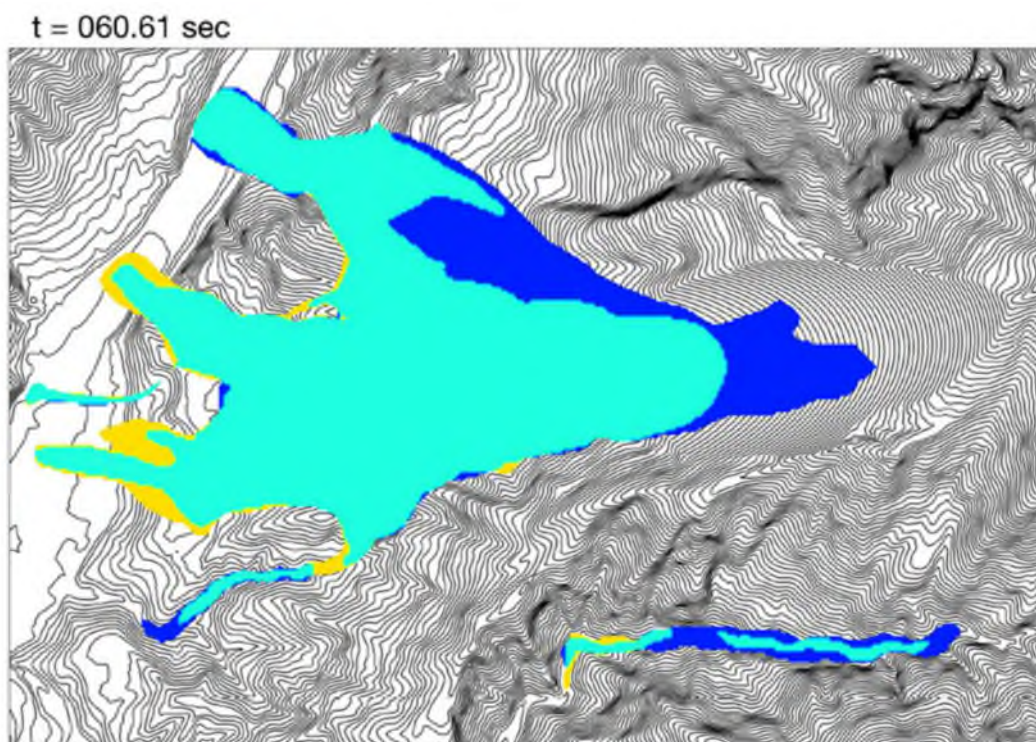


圖 2.13 使用理想破壞曲面與使用實際崩塌區域在 60.61 秒時土砂運移位置差異分佈圖 (區域顏色的意涵如同圖 2.12)

(圖資料來源：Tai et al., 2020)

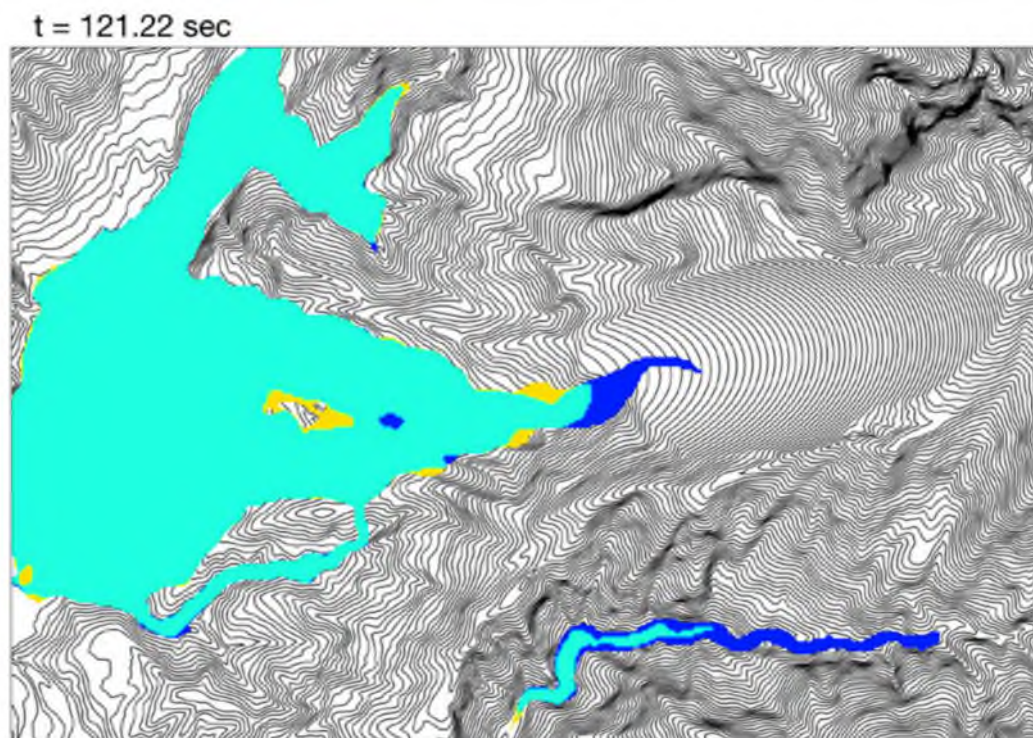


圖 2.14 使用理想破壞曲面與使用實際崩塌區域在 121.22 秒時土砂運移位置差異分佈圖 (區域顏色的意涵如同圖 2.12)

(圖資料來源：Tai et al., 2020)

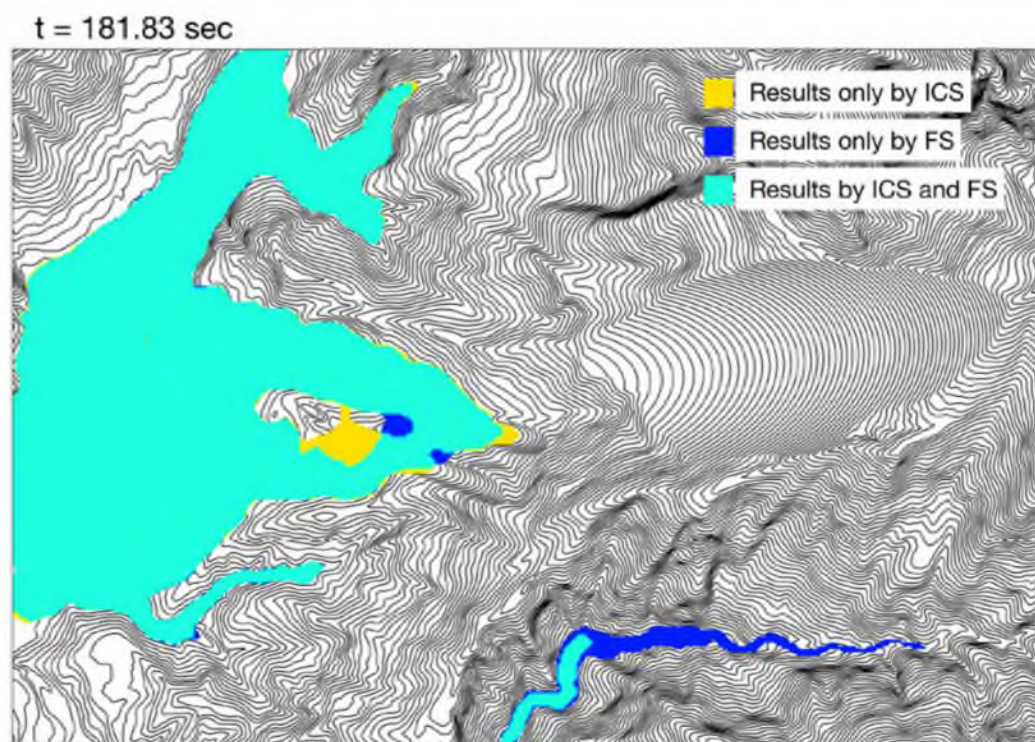


圖 2.15 使用理想破壞曲面與使用實際崩塌區域在 181.83 秒時土砂運移位置差異分佈圖 (區域顏色的意涵如同圖 2.12)

(圖資料來源：Tai et al., 2020)

第三章 研究區域介紹

本研究計畫提出之方法將應用實際兩處大規模崩塌潛勢區域監測資料(傾斜儀與地下水位計)。第一處考量的崩塌潛勢區域，本計畫將引用水土保持局臺東分局(2020)計畫之臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域所記錄之現場監測資料評估本計畫理想崩塌破壞曲面之可行性。第二處考量的大規模崩塌潛勢區域為水土保持局臺北分局(2020)計畫之桃園市-復興區-T002(光華崩塌)作為本案之探討情境。

第一節 臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域

本區域之現場監測系統由行政院農業委員會水土保持局臺東分局於 2018 年委託「立邦工程技術顧問有限公司」進行監測系統之建立與維護。本計畫將引用水土保持局臺東分局(2020)計畫中所記錄之資料，包含傾斜儀與地下水位計資料；以及現場調查資料(如大規模潛勢區域內各個滑動塊體位置，崩崖位置 等)及相關災後調查資料，作為本計畫理想崩塌破壞曲面之驗證資料。

位置

延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域位於臺東縣延平鄉武陵村，其集水區屬於卑南溪流域的鹿寮溪子集水區，其中 T003 大規模崩塌潛勢區域面積為 51.94 公頃，主要對外交通為東 33 鄉道，附近有舊武陵橋與武陵橋都位於大規模崩塌潛勢區域中下游處。

地文

延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢屬於河岸崩塌，高程介於 255.6 至 795.79 m 並高程走向由西北之往東南之鹿寮溪遞減(圖 3.1)。潛勢區內之坡度介於 5 至 60 度之間，其中平均坡度為 30.48 度(圖 3.2)。

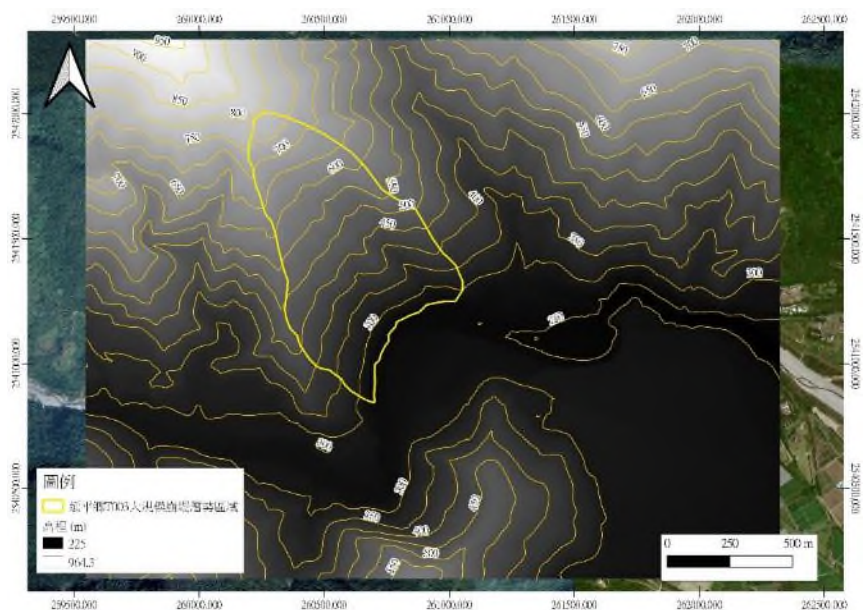


圖 3.1 延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域地形圖

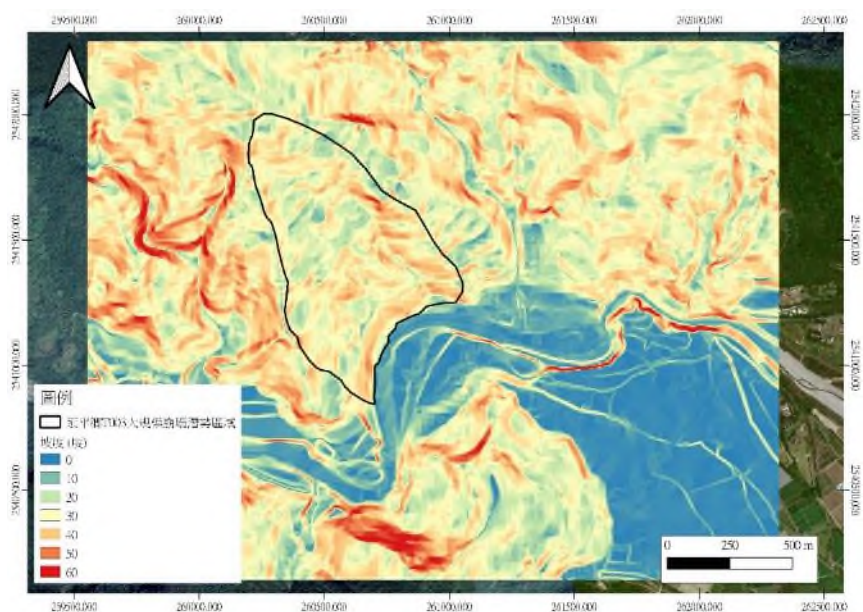


圖 3.2 延平鄉 T003 大規模崩塌區域坡度圖

現場調査成果

如圖 3.3 所示，由水土保持局臺東分局(2020)計畫所進行的現場調查搭配應用 Chiba et al. (2008)繪製之赤色地圖，研判發現西側左邊坡為一順向坡，上游坡面有明顯三角面指示岩層向東南方向傾斜，不過三角面之順向坡特徵為舊崩塌形成，從正射影像可見植被茂密，部分平坦面則是人為開發所致。其中崩崖集中於西側左邊坡之順向坡上 (W-1 及 W-3 滑動塊體周遭)，因坡面上部份的人為開發以及過度的道路開發，使得風化岩屑層易受擾動，造成坡面上形成多處重力變形導致之崩崖，導致沿線道路破壞多處，且因處於鹿寮溪攻擊坡，坡岸為一現生淺層崩塌，沿著坡趾坡岸之沿線道路也有多處破壞。本計畫將引用上述提到之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域及三處滑動塊體作為本案建構理想破壞曲面之情境探討區域。

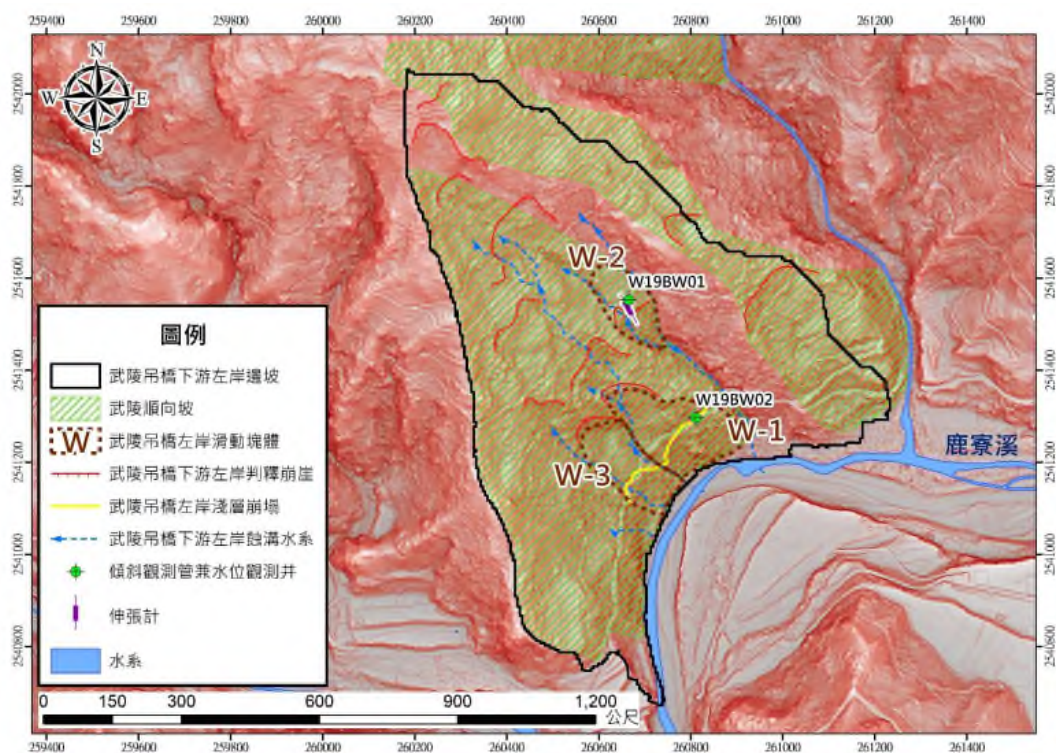


圖 3.3 延平鄉 T003 大規模崩塌地形特徵判釋成果(光達數值地形產製之赤色地圖(Chiba et al., 2008))

(圖資料來源：水土保持局臺東分局，2020)

現場監測井資料(傾斜儀與地下水位計)

延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域內已建置三個監測井同時可量測地下水位與地中變位，其分佈坐標為 W20BW3(TWD97_ X: 260452.10, TWD97_Y: 2541629.29)、W19BW1(TWD97_ X: 260662.3, TWD97_Y: 2541550.4) 與 W19BW2(TWD97_ X: 260806.2, TWD97_Y: 2541296.7)。其中延平鄉-T003於2019年8月24日白鹿颱風事件後，監測井 W20BW3、W19BW1 及 W19BW2 都記錄到明顯的地下水位變化與滑動深度。本研究目前參考應用的資料監測時間從2019年7月8日至2020年10月7日。下列將說明監測井所量測之地下水位與滑動變化狀況。



圖 3.4 延平鄉 T003 監測井位置圖

W19BW1 位於 T003 坡腹崩崖上緣，為地表下 40 m 鑽探孔。如圖 3.5 所示，2019 年 8 月 24 日白鹿颱風時間前(2019 年 7 月 8 日及 2019 年 8 月 7 日兩次量測結果)與白鹿颱風時間後(2019 年 8 月 27 日量測結果)發現潛在滑動深度位於地表下 24 m 至 25 m 之間，變位量略顯著，活動性為緩慢運動中，屬於[準確定變動]類型。地下水位方面，如圖 3.6 所示，於白鹿颱風事件期間最大地下水位變化從高程 460 m 提升至 466 m，經過判斷常水位為距離地表 17.8 m 以下。與處理 W19BW1 相似，本團隊將應用此數據做為後續迴歸地下水水位分佈之依據。

W19BW2 位於 T003 坡趾，為地表下 40 m 鑽探孔(圖 3.7)。如圖 3.7 所示，2019 年 8 月 24 日白鹿颱風時間前三次量測(2019 年 6 月 12 日、2019 年 7 月 8 日及 2019 年 8 月 7 日)與白鹿颱風時間後(2019 年 8 月 27 日量測結果)發現潛在滑動深度位於地表下 16 m 至 17 m 之間，變位量略顯著，活動性為緩慢運動中，屬於[準確定變動]類型。地下水位方面，如圖 3.8 所示，於白鹿颱風事件期間最大地下水位變化從高程 305 m 提升至 321 m，經過判斷常水位為距離地表 26.8 m 以下，本團隊將應用此數據做為後續迴歸地下水水位分佈之依據。

W20BW3 位於 T003 坡腹上方，為地表下 40 m 鑽探孔(圖 3.9)。如圖 3.9 所示，在白鹿颱風事件發生前後，量測結果傾斜變化尚小，故本研究將不會引用 W20BW3 作為模式率定驗證數據。如圖 3.10 所示，經過判斷常水位為距離地表 26.5 m 以下，本團隊將應用此數據做為後續迴歸地下水水位分佈之依據。

除了現階段的分析探討，此延平鄉 T003 區域傾斜儀與地下水位監測井目前持續進行監測中，希望未來通過長時間的監測資料確認其變動特性。

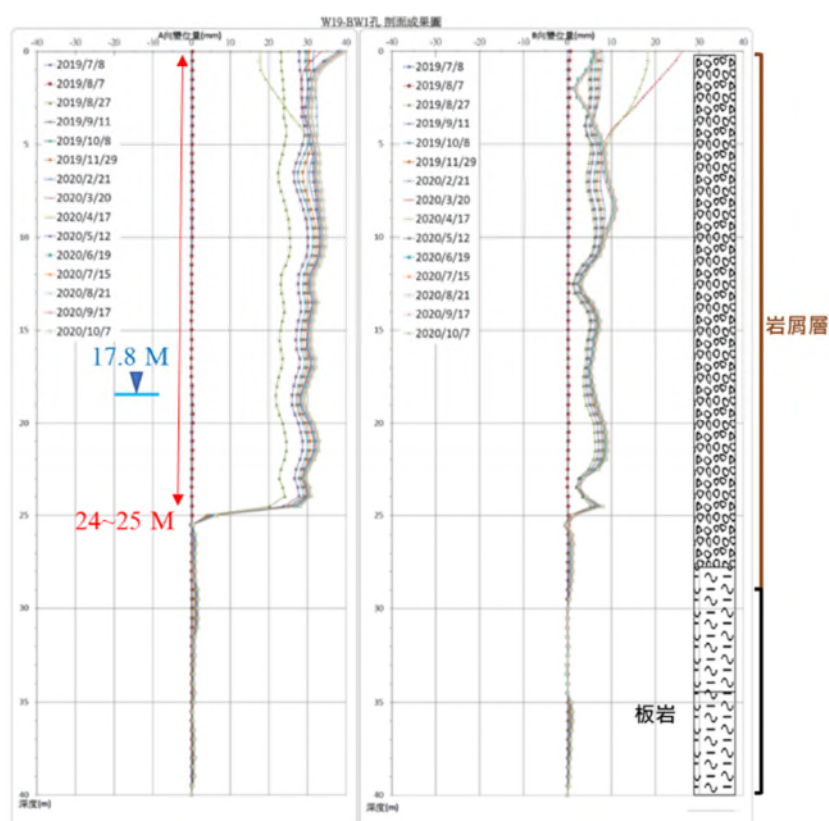


圖 3.5 延平鄉 T003 監測井 W19BW1 傾斜儀監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺東分局，2020)

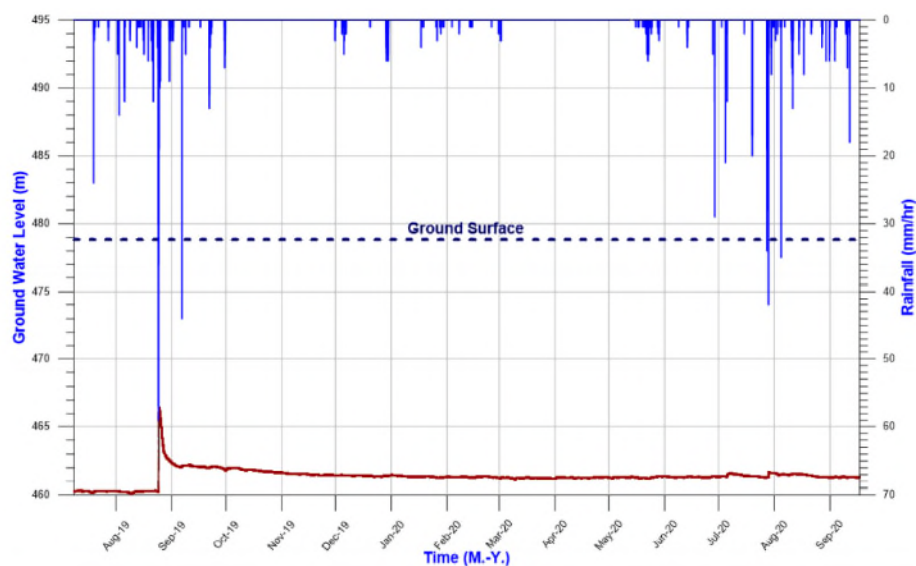


圖 3.6 延平鄉 T003 監測井 W19BW1 地下水位歷線圖
(圖資料來源：水土保持局臺東分局，2020)

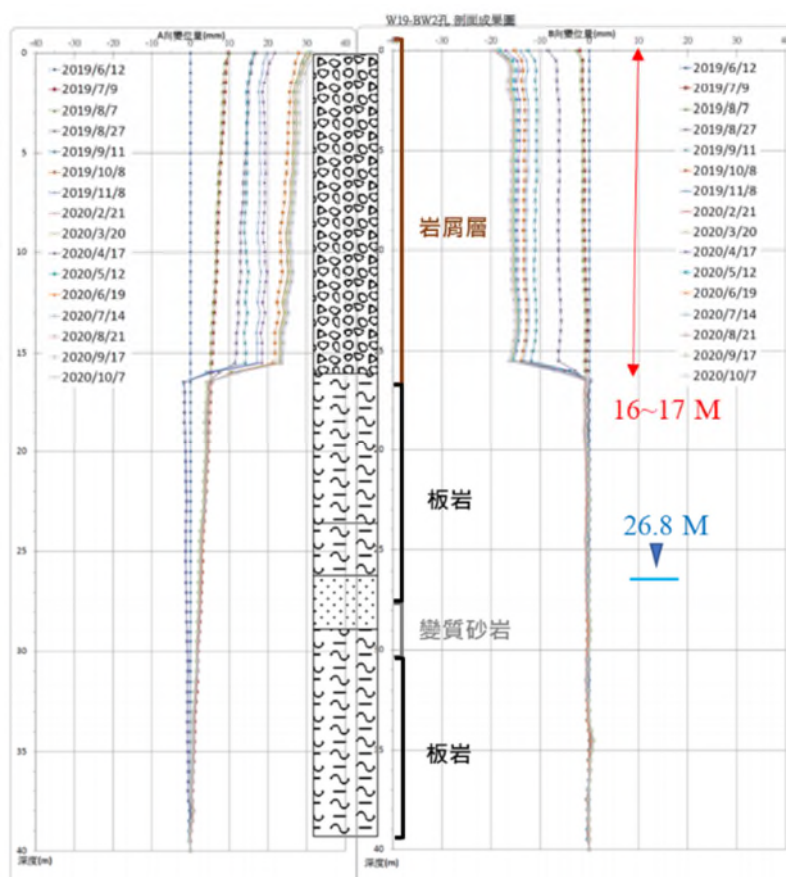


圖 3.7 延平鄉 T003 監測井 W19BW2 傾斜儀監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺東分局，2020)

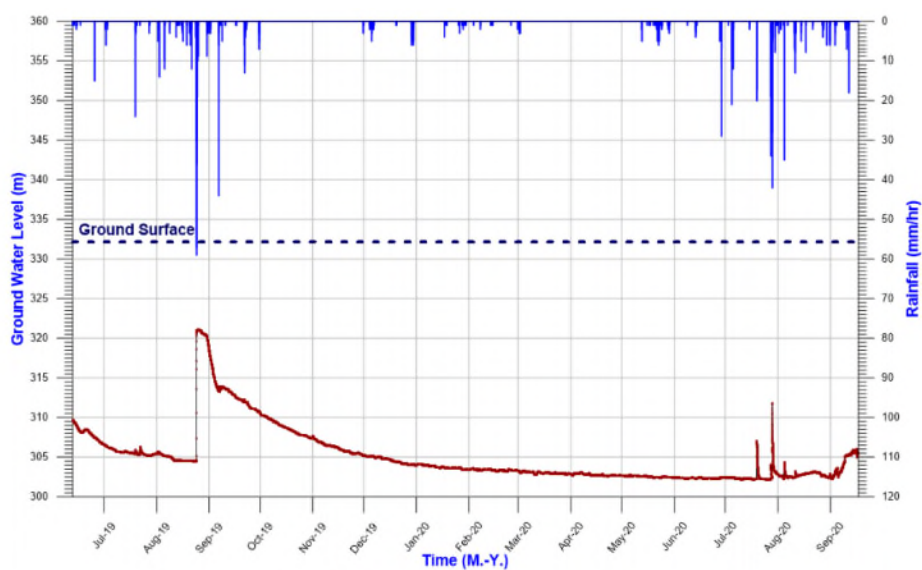


圖 3.8 延平鄉 T003 監測井 W19BW2 地下水位歷線圖
(圖資料來源：水土保持局臺東分局，2020)

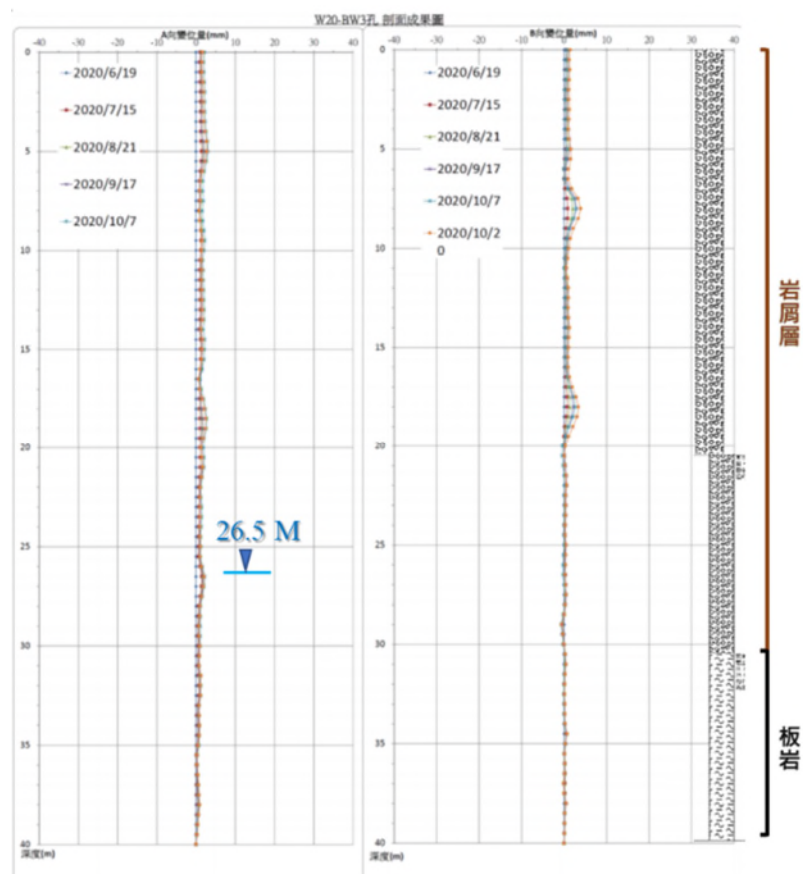


圖 3.9 延平鄉 T003 監測井 W20BW3 傾斜儀監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺東分局，2020)

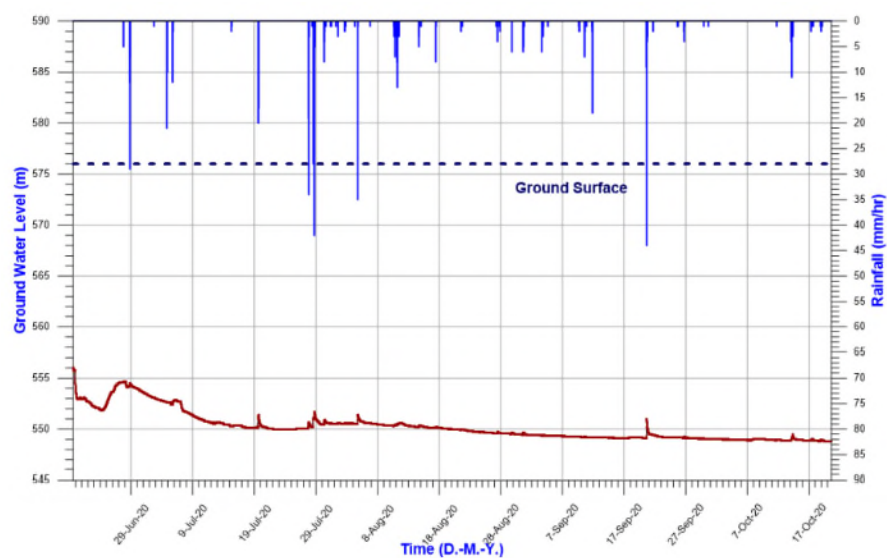


圖 3.10 延平鄉 T003 監測井 W20BW3 地下水位歷線圖
(圖資料來源：水土保持局臺東分局，2020)

情境探討

本計畫依據水土保持局所劃定之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域與水土保持局臺東分局(2020) 計畫進行之現場調查後研判之可能滑動塊體，提出五種不同情境進行本案理想破壞曲面之情境探討。如圖 3.11 所示，A)為水土保持局劃定之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域(黃線)及水土保持局臺東分局，2020 通過現場調查研判之可能滑動塊體(橘線)，其中本計畫將透過不同情景探討理想崩塌破壞曲面之應用；B)為情境一，將全部大規模崩塌潛勢區域當作理想崩塌曲面分析範圍；C)為情境二，將滑動塊體 W1 當作理想崩塌曲面分析範圍；D)為情境三，將滑動塊體 W2 當作理想崩塌曲面分析範圍；E)為情境四，將滑動塊體 W3 當作理想崩塌曲面分析範圍；F)為情境五，將滑動塊體 W1 與 W3 結合一滑動塊體當作理想崩塌曲面分析範圍；G)由於前述五個情境無法妥善回應傾斜儀所記錄之滑動深度，本案利用參考橢圓方法重新建置情境六，將水土保持局臺東分局(2020)計畫中所辨識之諸多崩崖納入考量，並搜尋與傾斜儀 BW-I 與 BW-II 處所紀錄之滑動破壞深度相近之理想崩塌破壞曲面。

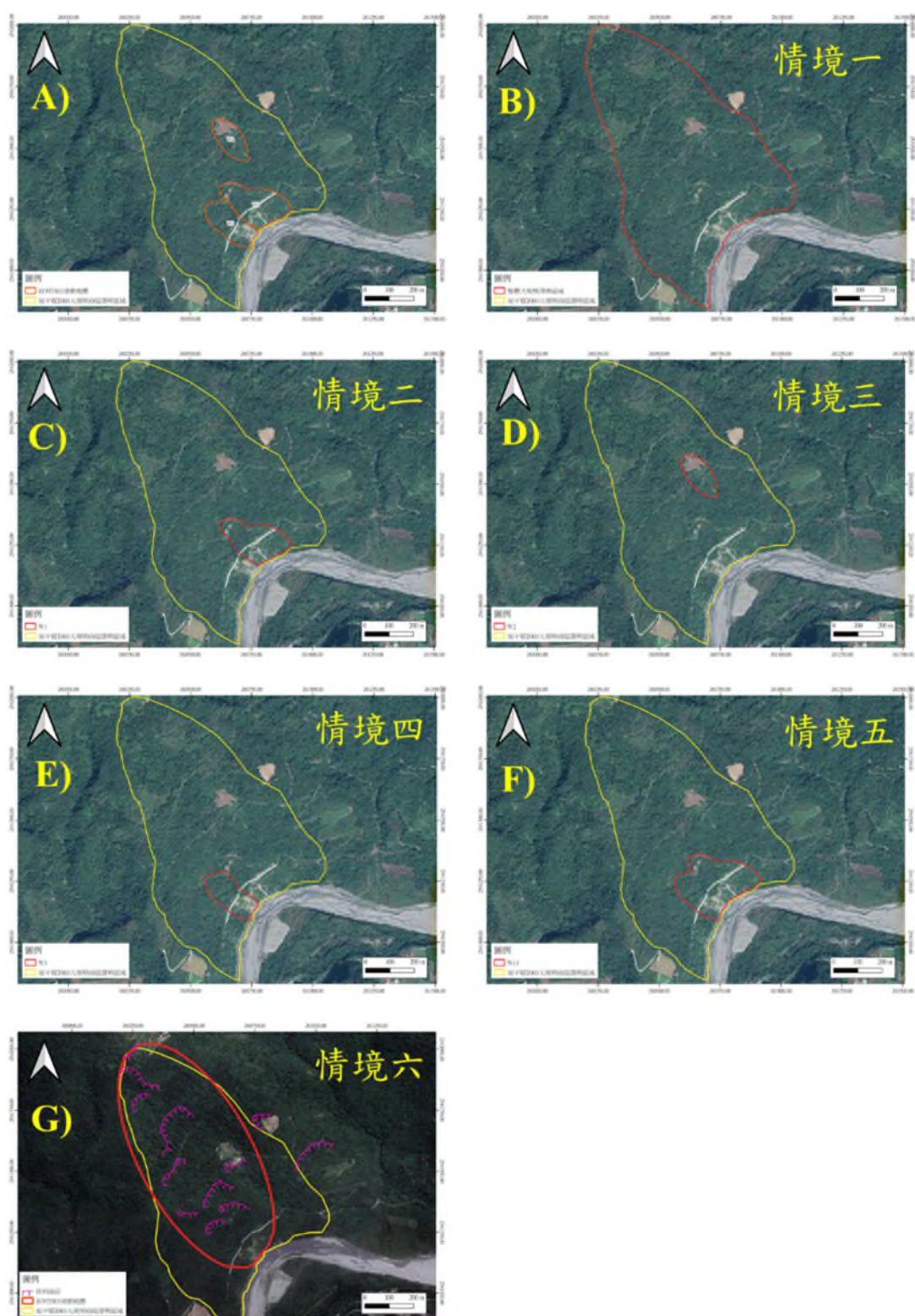


圖 3.11 延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域(黃線)以及不同組合情境圖(紅線為理想崩塌分析範圍之參考橢圓)

第二節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域

本區域之現場監測系統由行政院農業委員會水土保持局臺北分局於 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。本計畫將引用水土保持局臺北分局(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計畫理想崩塌破壞曲面之驗證資料。

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。

地文

光華地區附近地勢高點為西側之無名山(海拔 1,320 m)。如圖 3.12 所示，T002 光華大規模崩塌區域高程介於 1,075.5 m 至 1,194 m 之間，高程走向由西往東遞減至三光溪。如圖 3.13 所示，潛勢區域內坡度介於 23.61 至 56.02 度，平均坡度為 36.26 度。

第三章 研究區域介紹

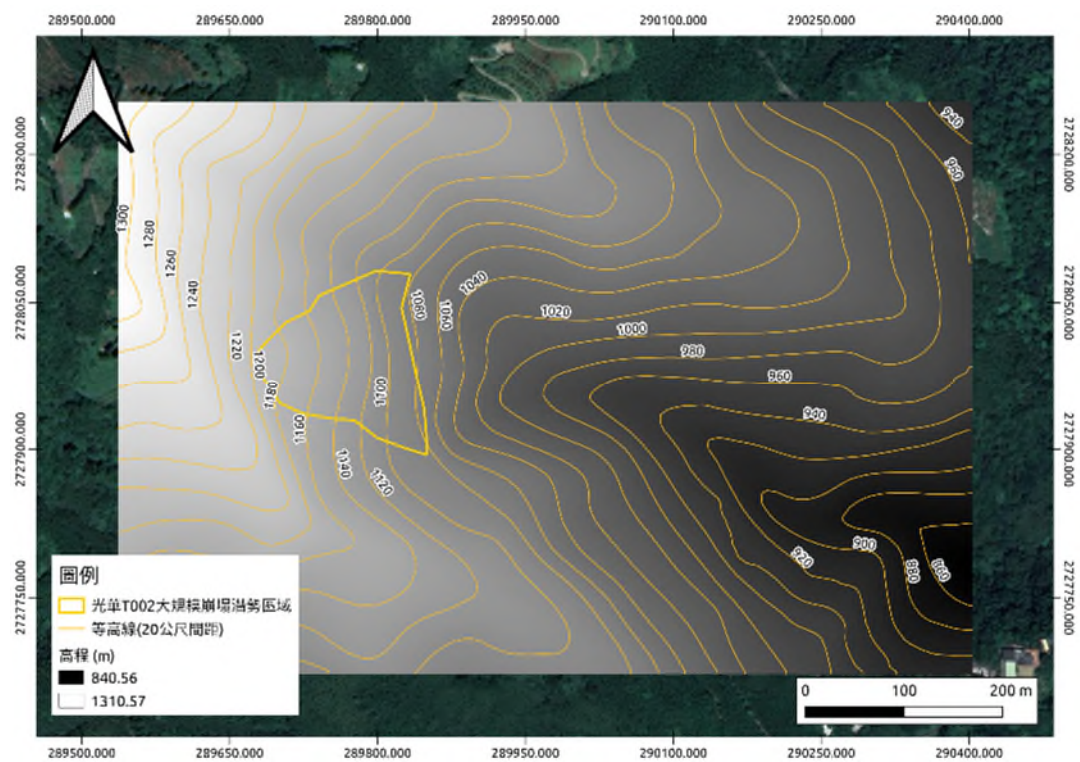


圖 3.12 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域地形圖

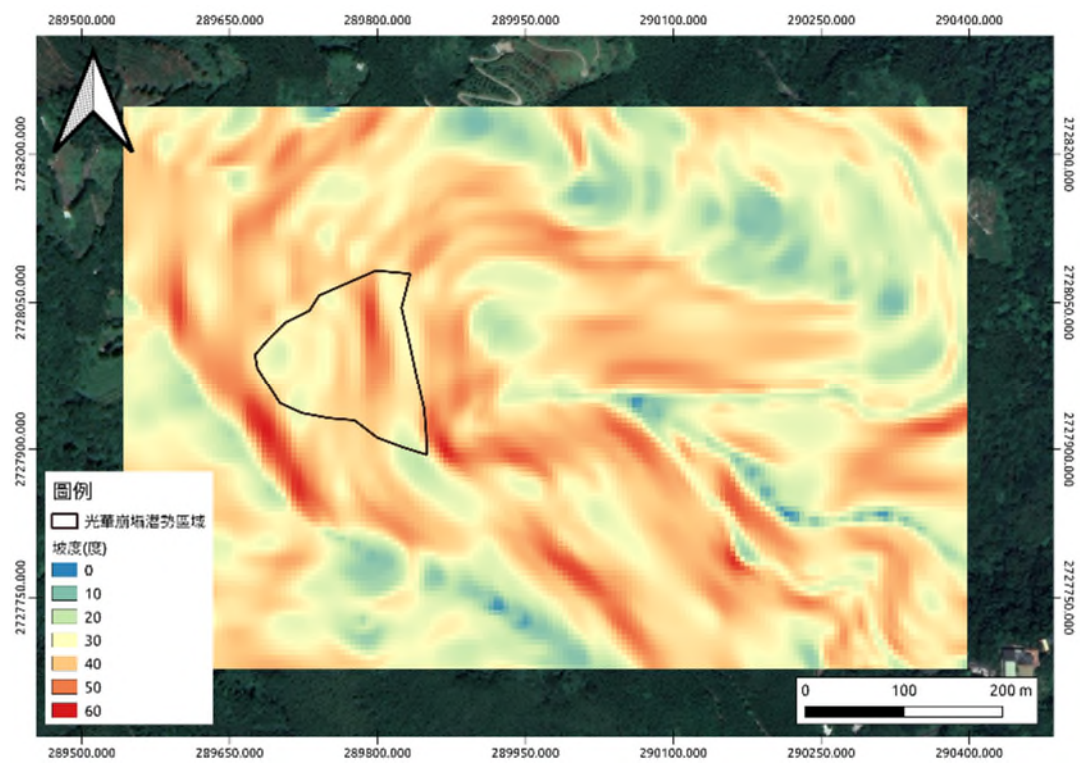


圖 3.13 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域坡度圖

現場調查成果

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」，曾利用空載雷射掃描技術(LiDAR)進行高解析度數值地形製作，因為具備高解析數值地形資料經過前後期相減後易發現差異處。如圖 3.14 所示，再經由水土保持局臺北分局(2020)計畫之現場調查即可確認滑動塊體位置(紅色虛線)。本計畫將引用上述所提到之滑動塊體作為理想崩塌破壞曲面模式建立之分析範圍。

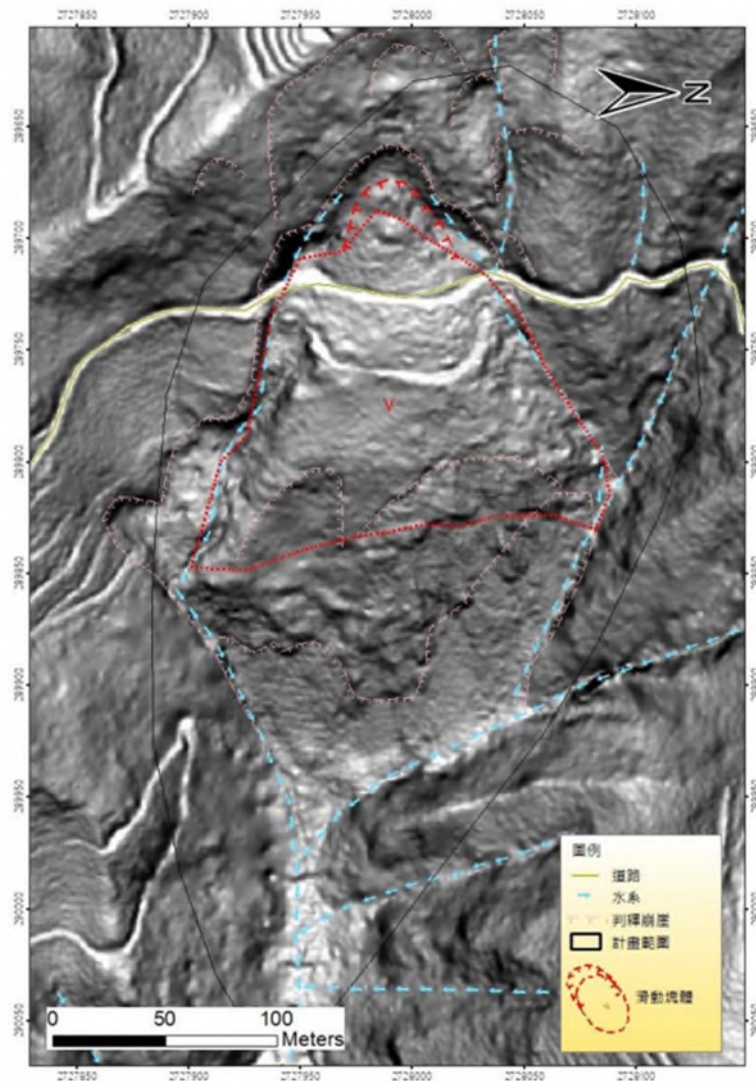


圖 3.14 光華 T002 大規模崩塌 LiDar 資料判釋潛在崩塌範圍
(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

現場監測井資料整理(傾斜儀與地下水位計)

本案應用水土保持局臺北分局(2020)計畫在桃園復興光華地區之三個監測井所量測之地下水位與傾斜滑動深度資料(圖 3.15)，其編號與位置坐標為 K18-1BW (TWD97_X: 289738.6, TWD97_Y: 2727995.4)、K18-2BW (TWD97_X: 289702.2, TWD97_Y: 2727988.8) 與 K19-1BW (TWD97_X: 289769.7, TWD97_Y: 2728002.6)。其中復興區-T002 光華大規模崩塌潛勢區域因滑動狀況劇烈，使得許多監測井因管壁變形嚴重及斷管而造成無法將水位計及傾斜儀投入進行量測，所以許多的地下水位及滑動面深度資料只有區區數筆可參考，包含了 K18-1BW 與 K18-2BW，唯獨 K19-1BW 位於滑動塊體上方可持續量測。下列說明為彙整水土保持局臺北分局(2020)計畫中所紀錄之地下水位與滑動破壞深度。



圖 3.15 光華 T002 監測井位置圖

K18-1BW 位於 T002 滑動塊體坡腹上游之光華農路旁(圖 3.15)，其鑽孔深度為 80 m，如圖 3.16 所示，傾斜儀記錄顯示於地表下約 25 m 處有明顯位移變形(滑動)，故可研判滑動破壞面深度位於地表下約 25 m 處。地下水位方面，常時水位約地表下 70 m。如圖 3.17 所示，藍線為時序列記錄之地下水位 (m)，紅點為手動記錄之地下水位 (m)，灰色矩形為日降雨量 (mm)，降雨期間地下水位最高可上升達約 25 m，地下水位起伏變化幅度甚大。但 K18-1BW 於 2018 年 6 月 19 日後因變形處管體受大地位移擠壓變形過大，傾斜儀無法放入，無法繼續進行量測作業。

K18-2BW 位於 T002 滑動塊體坡腹崩崖上緣處(圖 3.15)，其鑽孔深度為 40 m，如圖 3.18 所示，由傾斜儀記錄發現滑動深度於地表下約 5 m 處有明顯變形，故研判此深度為滑動破壞面深度。如圖 3.19 所示，紅點為手動記錄之地下水位 (m)，灰色矩形為日降雨量 (mm)，可發現地下水位之常水位低於監測井，故無法量測到地下水位。但 K18-2BW 於 2018 年 6 月 19 日後因變形處管體受大地位移擠壓變形過大，測傾儀無法放入，無法繼續量測作業。

K19-1BW 位於 T002 滑動塊體坡腹中游(圖 3.15)，其鑽孔深度為 80 m，如圖 3.20 所示，由傾斜儀記錄發現滑動深度於地表下約 27 m 處有明顯變形，故研判此深度為滑動破壞面深度。地下水位方面，常時水位約地表下 59.6 m。如圖 3.21 所示，藍線為時序列記錄之地下水位 (m)，紅點為手動記錄之地下水位 (m)，灰色矩形為日降雨量 (mm)，降雨期間地下水位可上升約 0.62 m，地下水位上升幅度不明顯。但 K19-1BW 於 2019 年 6 月 6 日後因變形處管體受大地位移擠壓變形過大，測傾儀無法放入，無法繼續量測作業。

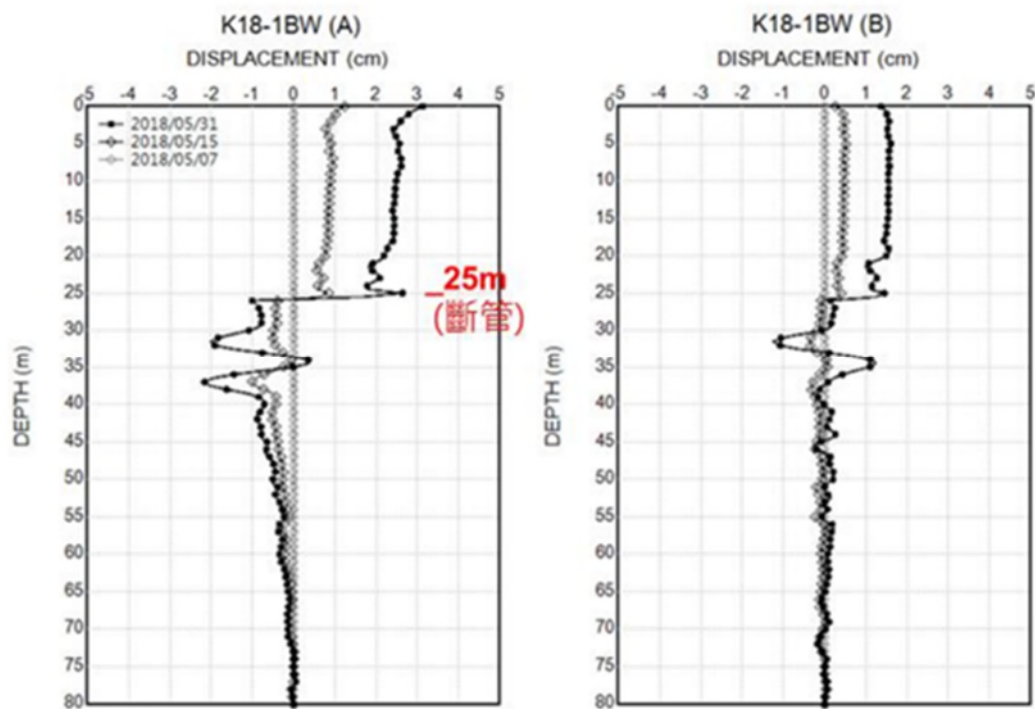


圖 3.16 光華 T002 監測井 K18-1BW 傾斜儀監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

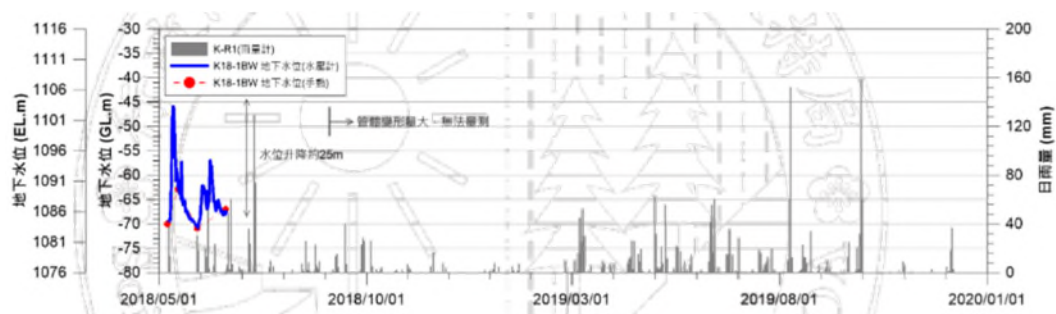


圖 3.17 光華 T002 監測井 K18-1BW 地下水位監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

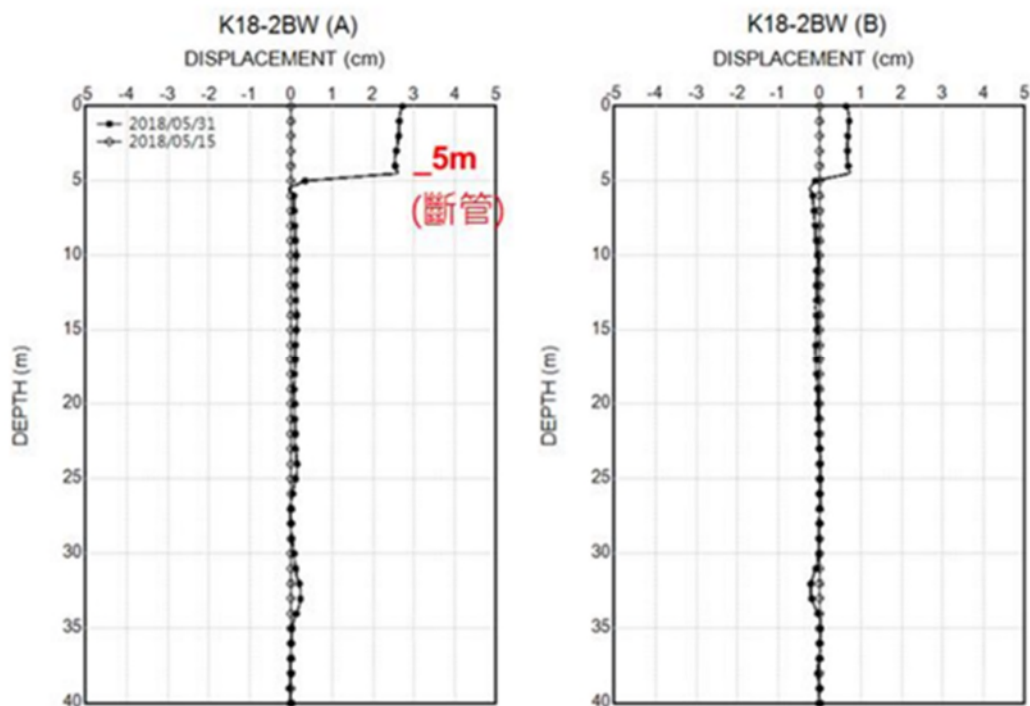


圖 3.18 光華 T002 監測井 K18-2BW 傾斜儀監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

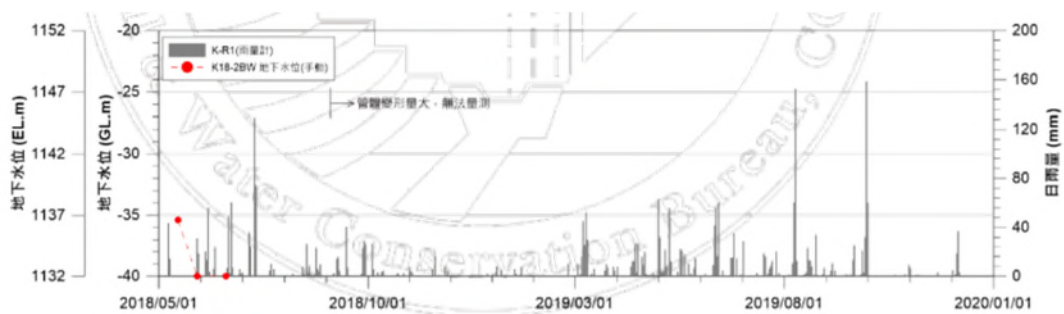


圖 3.19 光華 T002 監測井 K18-2BW 地下水位監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

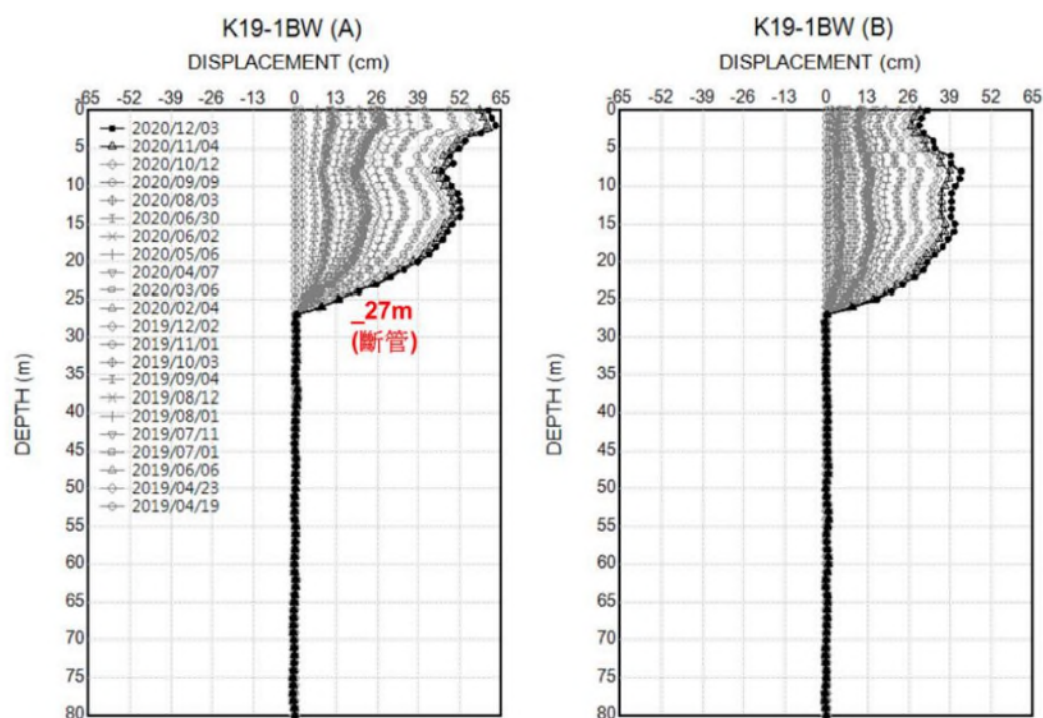


圖 3.20 光華 T002 監測井 K19-1BW 傾斜儀監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

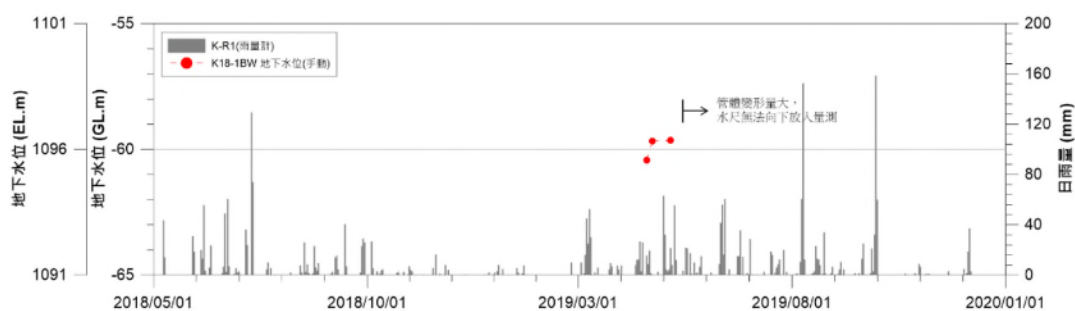


圖 3.21 光華 T002 監測井 K19-1BW 地下水位監測資料
(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

針對水土保持局於 2021 年 3 月與 8 月針對光華 T002 大規模崩塌潛勢區域進行 UAV 航拍並後置數值地形資料(DEM)，本案增加情境四(應用 2021 年 3 月 UAV 產製數值地形資料)與情境五(應用 2021 年 8 月 UAV 產製數值地形資料)，透過其前後期數值地形比較取得滑動範圍位置。並透過“參考橢圓”進行理想崩塌破壞曲面估算(第四章)與後續之邊坡安全係數分析(第五章)。

由圖 3.22 所示，為本案後續分析 2021 年 3 月與 8 月兩期數值地形之參考範圍，紅色範圍為 2005 年與 2021 年 03 月數值地形資料比較後劃定之變動範圍，黃色範圍為 2021 年 03 月與 2021 年 08 月數值地形資料比較後劃定之變動範圍。



圖 3.22 光華 T002 大規模崩塌潛勢區域 UAV 產製地形之 2005 年、2021 年 3 月與 8 月研判滑動範圍位置圖

第四章 理想崩塌破壞曲面之估算

本計畫應用 Tai et al. (2020)與創新研究計畫(107、108 年)提出之理想破壞曲面，在假設土體為均勻分佈材料前提下，透過已判識的可能崩塌範圍，推估可能崩塌深度與量體。因前期理想崩塌破壞曲面主要依據水土保持局所劃定之大規模崩塌潛勢區域或現場調查研判之可能崩塌塊體進行分析，而本章節簡化理想破壞曲面建置條件，提出一簡易的理想崩塌破壞曲面建置方法，透過光達數值地形資料(Lidar derived DEM)所發現之微地形特徵(如 崩崖、裂隙、蝕溝 等)，將上述的微地形特徵包含在理想崩塌破壞曲面分析範圍內，透過面積體積關係經驗式即可估算出可能崩塌量體及深度。

本章所呈現建置理想崩塌破壞曲面之結果須同時滿足面積偏差及量體差異並取其最小者。在第一節主要描述與崩塌面積有關成果，而第二節主要描述與崩塌量體有關成果。

第一節 簡化理想破壞曲面建置條件

應用“橢圓-理想曲面法”中之參考橢圓劃定理想崩塌破壞曲面分析範圍，並透過水土保持局劃定大規模崩塌潛勢區域或是現場調查後研判之可能滑動塊體得到可能崩塌面積 A_L 比較差異，取偏差異最小者當作最終理想崩塌破壞曲面。

如同 Ko et al., (2021)，本計畫採用四種建置方法簡述如下(並匯整於表 4.1)：

- A) 固定參考橢圓長軸(L_1)與短軸(L_2)的長度以及面積，側向軸不傾斜；
- B) 固定參考橢圓長軸(L_1)與短軸(L_2)的長度以及面積，側向軸

可傾斜；

C) 固定參考橢圓長軸的長度(L_1)，短軸(L_2)與面積可變動，側向軸不傾斜；

D) 僅固定參考橢圓的面積，長軸(L_1)與短軸(L_2)的長度均可變動，不傾斜側向軸。

表 4.1 理想崩塌破壞曲面建置方法

方法	固定 L_1 長度	固定 L_2 長度	固定參考橢圓面積	傾斜側向軸
A	✓	✓	✓	✗
B	✓	✓	✓	✓
C	✓	✗	✗	✗
D	✗	✗	✓	✗

臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域

各情境之說明請參閱本報告第三章第 1 節 (第 3-8 頁以及圖 3.9)。

延平鄉 T003 情境一：

本情境應用水土保持局所劃定之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域全部納入理想崩塌破壞曲面之分析範圍。圖 4.1 至圖 4.4 顯示採用上述 A、B、C、D 四個方法所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。

如圖 4.1 所示，方法 A 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 17.68% 而位置偏差為 30.86%。如圖 4.2 所示，方法 B 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 17.89% 而位置偏差為 30.96%。如圖

4.3 所示，方法 C 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 18.96% 而位置偏差為 29.27%。如圖 4.4 所示，方法 D 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 17.41% 而位置偏差為 28.38%。上述方法 A 至 D 之面積偏差與位置偏差數據彙整至表 4.2 中，可發現方法 D 所建構之理想破壞曲面其位置偏差與面積偏差均為最小。換句話說方法 D 所建構之理想破壞曲面為本情境所建構之理想破壞曲面。

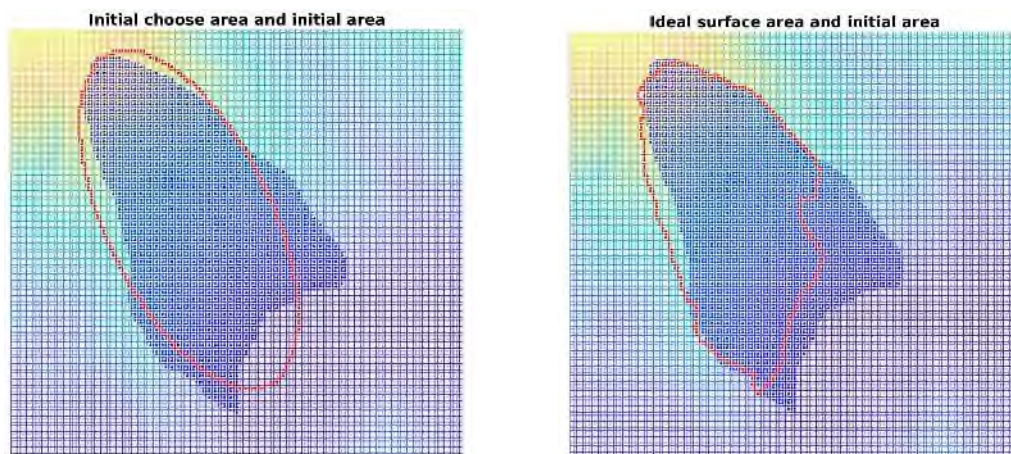


圖 4.1 延平鄉 T003 情境一方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

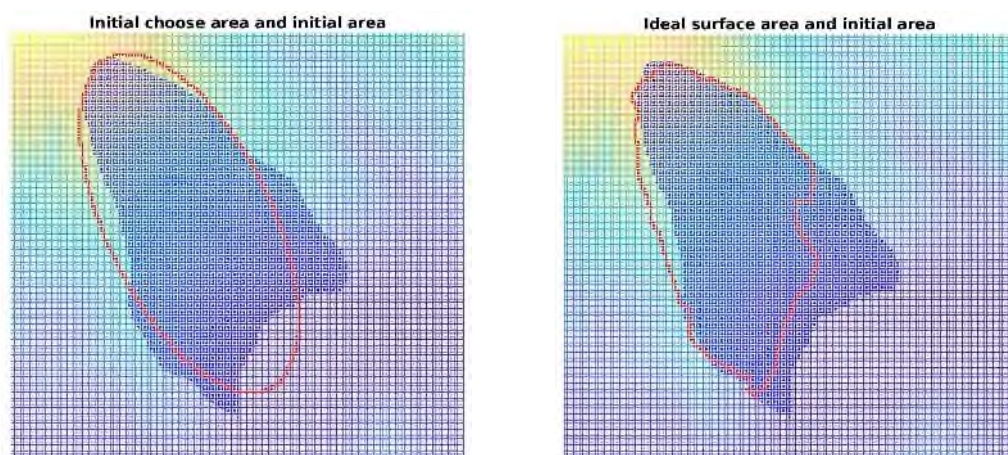


圖 4.2 延平鄉 T003 情境一方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

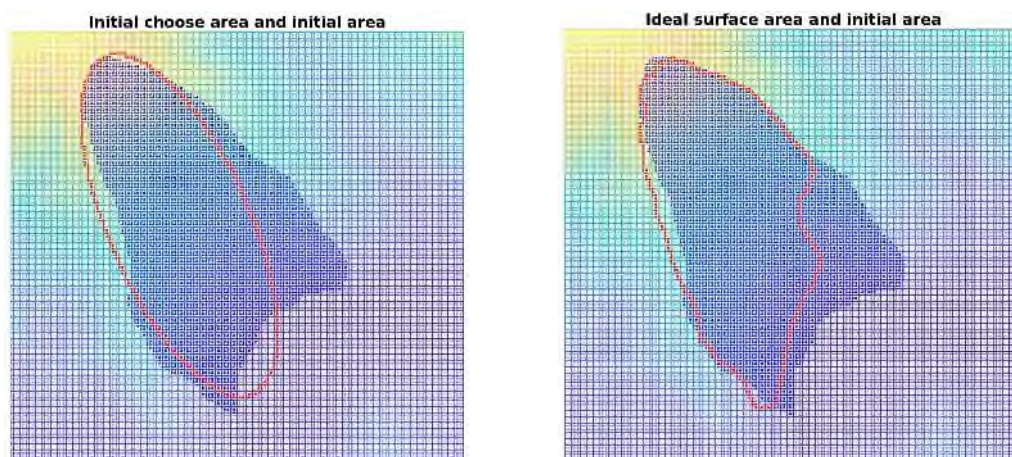


圖 4.3 延平鄉 T003 情境一方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

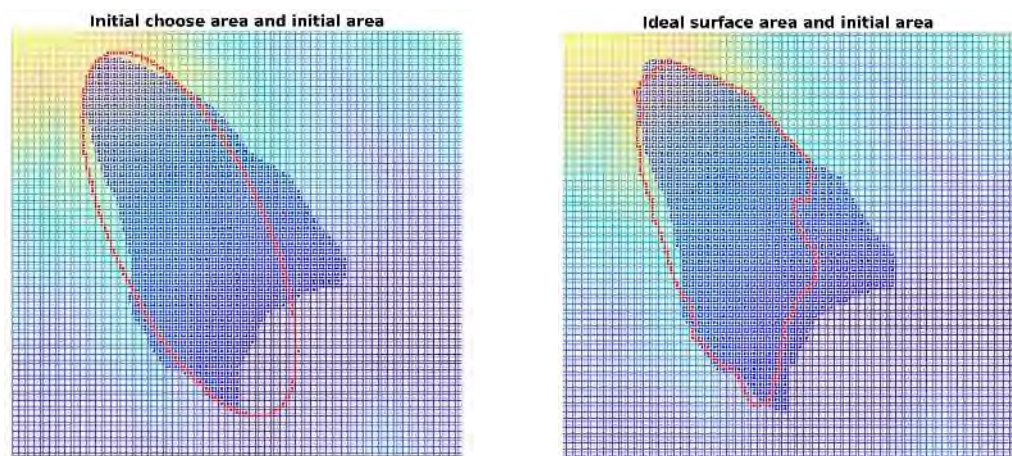


圖 4.4 延平鄉 T003 情境一方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

另外，體積偏差為搜尋理想曲面深度的條件，由表 4.2 可知，在搜尋過程中方法 A 至 D 都已確認崩塌量體與指定之值的偏差均為 0.01 % 以下。(PS 有關位置偏差(λ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

表 4.2 延平鄉 T003 情境一情境探討成果表

方法 \ 項目	面積偏差 λ_s	位置偏差 Λ_s	體積偏差 ε_s
A	17.68%	30.86%	< 0.01%
B	17.89%	30.96%	< 0.01%
C	18.96%	29.27%	< 0.01%
D	17.41%	28.38%	< 0.01%

延平鄉 T003 情境二：

本情境引用水土保持局臺東分局(2020)計畫所研判之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域內滑動塊體 W-1 編號納入理想崩塌破壞曲面之分析範圍。圖 4.5 至圖 4.8 顯示採用上述 A、B、C、D 四個方法所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。

如圖 4.5 所示，方法 A 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 9.19% 而位置偏差為 40.43%。如圖 4.6 所示，方法 B 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 17.76% 而位置偏差為 41.19%。如圖 4.7 所示，方法 C 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 13.32% 而位置偏差為 40.12%。如圖 4.8 所示，方法 D 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 13.32% 而位置偏差為 40.12%。上述方法 A 至

D 之面積偏差與位置偏差數據彙整至表 4.3 中，可發現方法 C 所建構之理想破壞曲面其位置偏差與面積偏差均為最小。換句話說方法 C 所建構之理想破壞曲面為本情境所建構之理想破壞曲面。

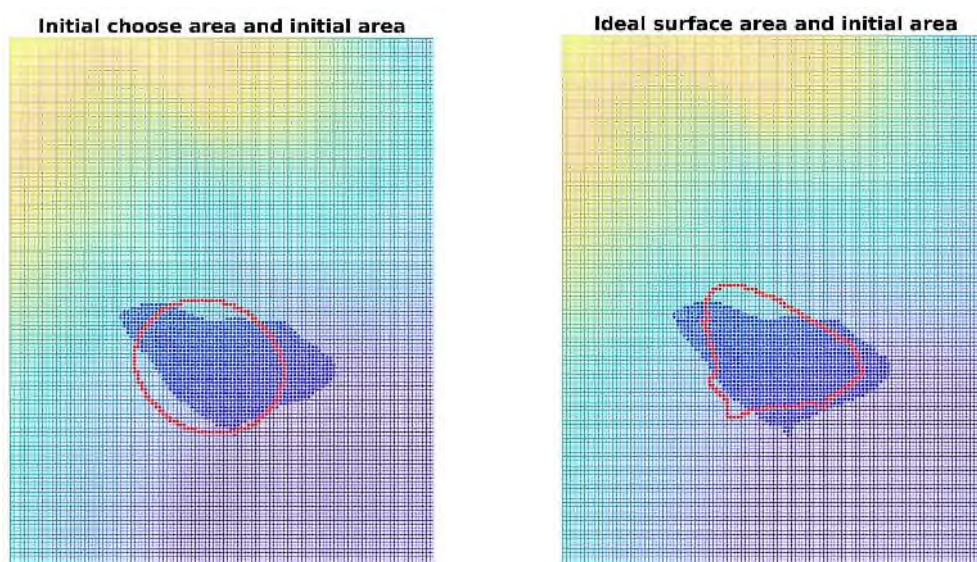


圖 4.5 延平鄉 T003 情境二方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

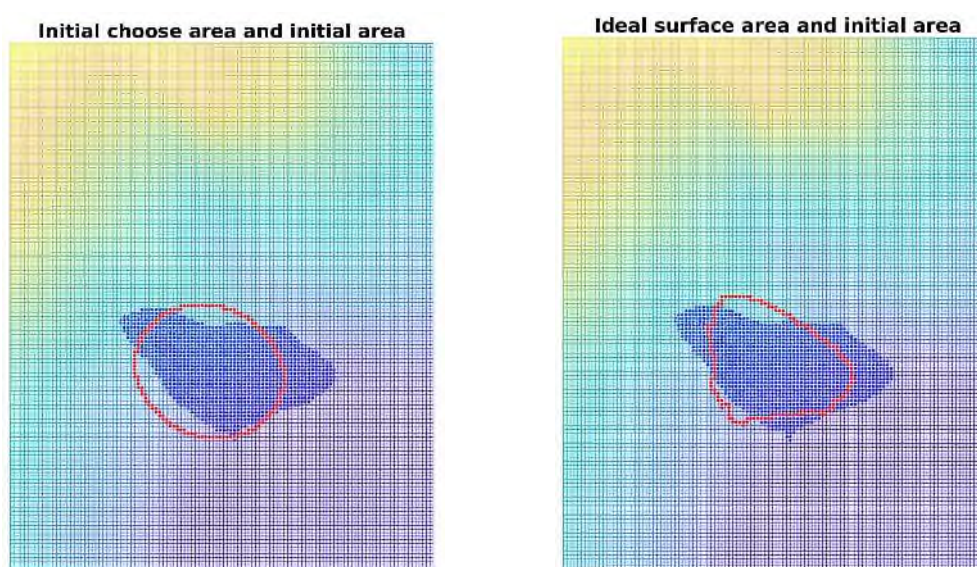


圖 4.6 延平鄉 T003 情境二方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

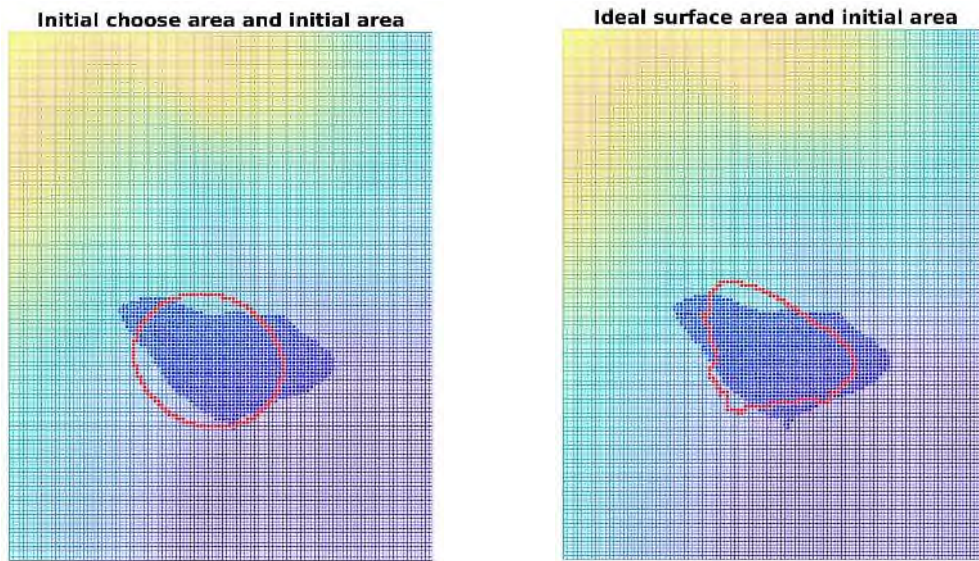


圖 4.7 延平鄉 T003 情境二方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

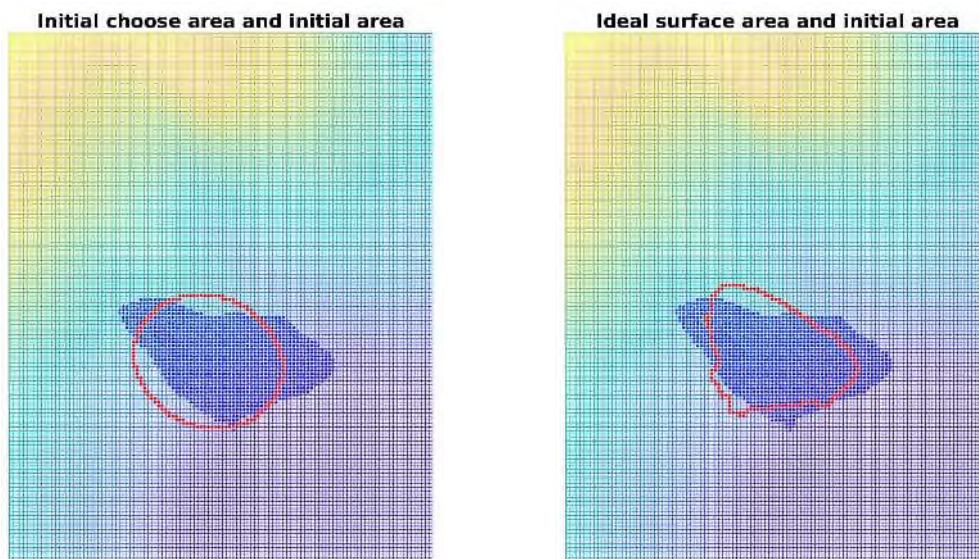


圖 4.8 延平鄉 T003 情境二方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

另外，體積偏差為搜尋理想曲面深度的條件，由表 4.3 可知，在搜尋過程中方法 A 至 D，只有方法 A 與 B 之確認崩塌量體與指定之值的偏差均為 0.01 % 以下。(PS 有關位置偏差(λ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之

崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

表 4.3 延平鄉 T003 情境二情境探討成果表

項目 方法	面積偏差 λ_s	位置偏差 Λ_s	體積偏差 ε_s
A	9.19%	40.43%	< 0.01%
B	17.76%	41.19%	< 0.01%
C	13.32%	40.12%	0.80%
D	13.32%	40.12%	0.82%

延平鄉 T003 情境三：

本情境引用水土保持局臺東分局(2020)計畫所研判之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域內滑動塊體 W-2 編號納入理想崩塌破壞曲面之分析範圍。圖 4.9 至圖 4.12 顯示採用上述 A、B、C、D 四個方法所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。

如圖 4-9 所示，方法 A 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 22.36% 而位置偏差為 48.13%。如圖 4.10 所示，方法 B 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 22.52% 而位置偏差為 48.29%。如圖 4.11 所示，方法 C 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 29.81% 而位置偏差為

34.78%。如圖 4.12 所示，方法 D 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 25.00% 而位置偏差為 50.16%。上述方法 A 至 D 之面積偏差與位置偏差數據彙整至表 4.4 中，可發現方法 C 所建構之理想破壞曲面其位置偏差與面積偏差均為最小。換句話說方法 C 所建構之理想破壞曲面為本情境所建構之理想破壞曲面。

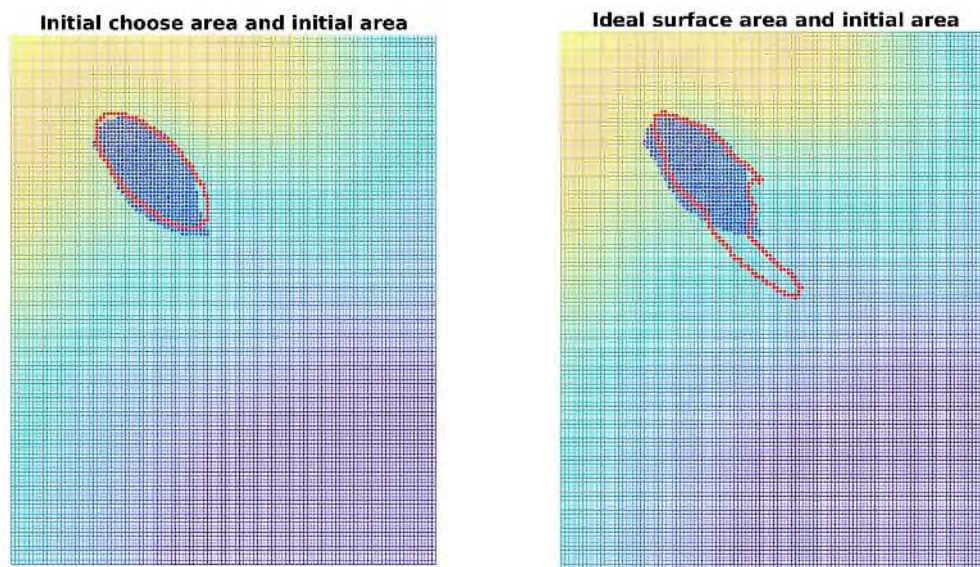


圖 4.9 延平鄉 T003 情境三方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

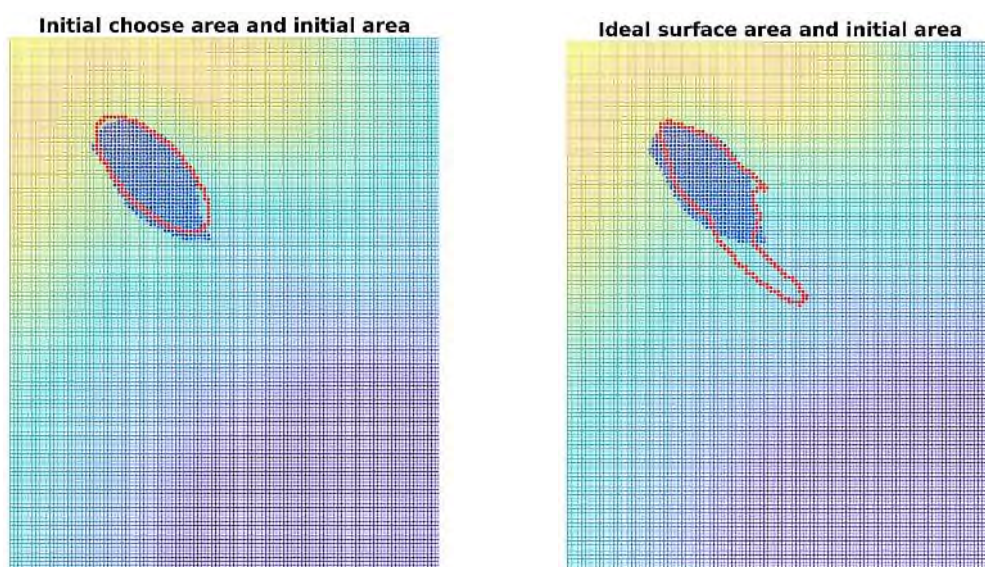


圖 4.10 延平鄉 T003 情境三方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

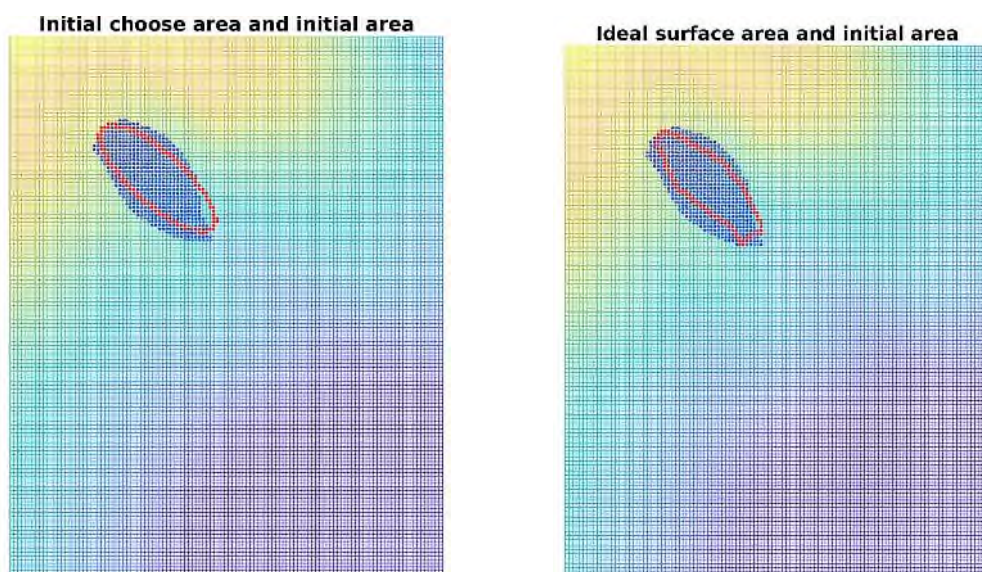


圖 4.11 延平鄉 T003 情境三方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

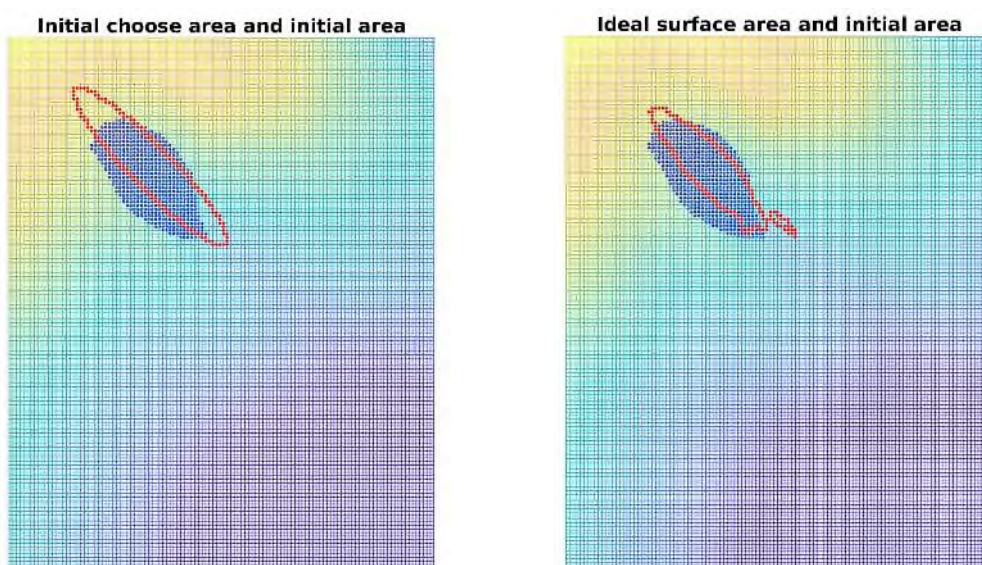


圖 4.12 延平鄉 T003 情境三方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

另外，體積偏差為搜尋理想曲面深度的條件，由表 4.4 可知，在搜尋過程中方法 A 至 D，只有方法 C 之確認崩塌量體與指定之值的偏差均為 0.01 % 以下。(PS 有關位置偏差(Δ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌

量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

表 4.4 延平鄉 T003 情境三情境探討成果表

方法 \ 項目	面積偏差 λ_s	位置偏差 Λ_s	體積偏差 ε_s
A	22.36%	48.13%	42.79%
B	22.52%	48.29%	42.79%
C	29.81%	34.78%	< 0.01%
D	25.00%	50.16%	0.36%

延平鄉 T003 情境四：

本情境引用水土保持局臺東分局(2020)計畫所研判之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域內滑動塊體 W-3 編號納入理想崩塌破壞曲面之分析範圍。圖 4.13 至圖 4.16 顯示採用上述 A、B、C、D 四個方法所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。

如圖 4.13 所示，方法 A 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 27.38% 而位置偏差為 39.58%。如圖 4.14 所示，方法 B 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 27.38% 而位置偏差為 39.58%。如圖 4.15 所示，方法 C 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 29.60% 而位置偏差為 35.81%。如圖 4.16 所示，方法 D 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 28.51% 而位置偏差為

34.48%。上述方法 A 至 D 之面積偏差與位置偏差數據彙整至表 4.5 中，可發現方法 C 與 D 所建構之理想破壞曲面其位置偏差與面積偏差均為最小。換句話說方法 C 與 D 所建構之理想破壞曲面為本情境所建構之理想破壞曲面。

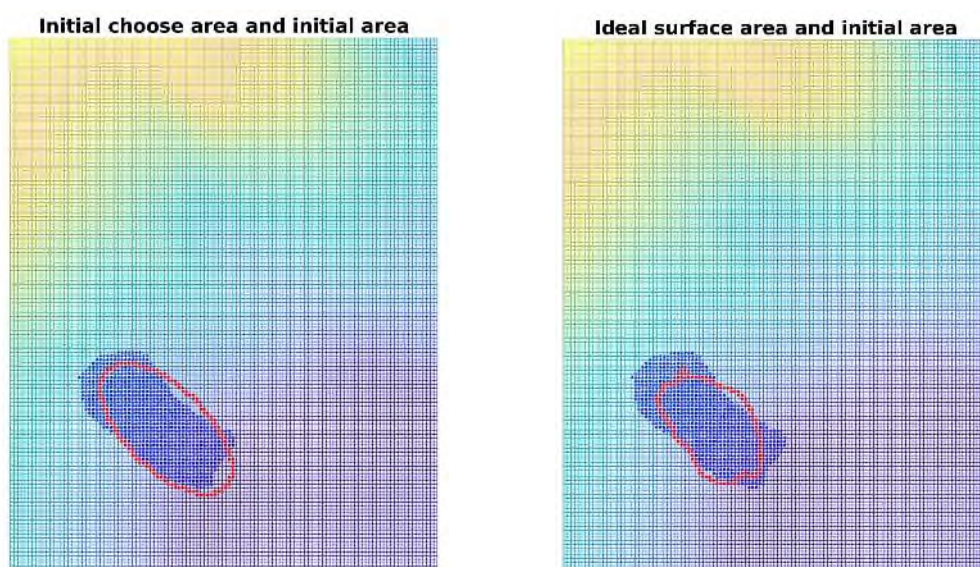


圖 4.13 延平鄉 T003 情境四方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

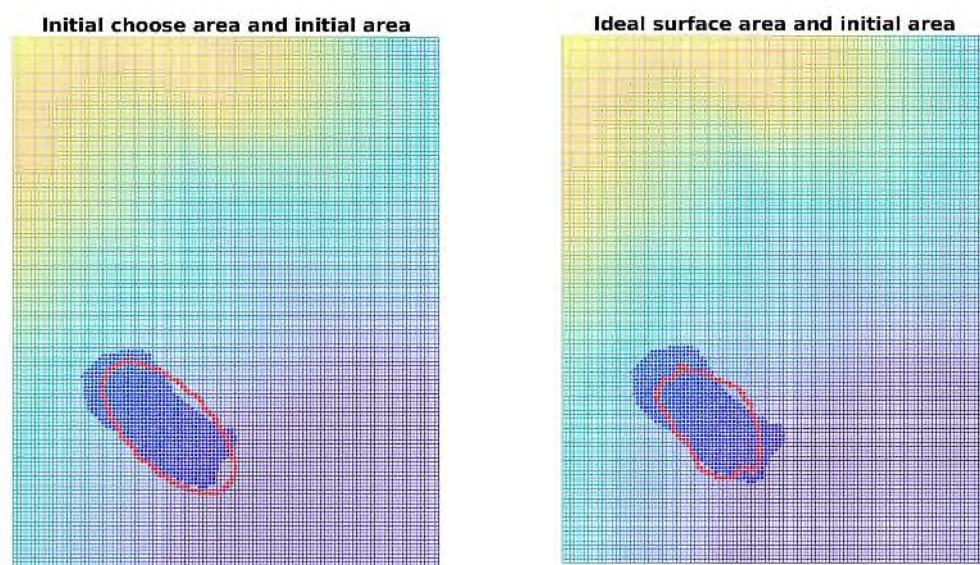


圖 4.14 延平鄉 T003 情境四方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

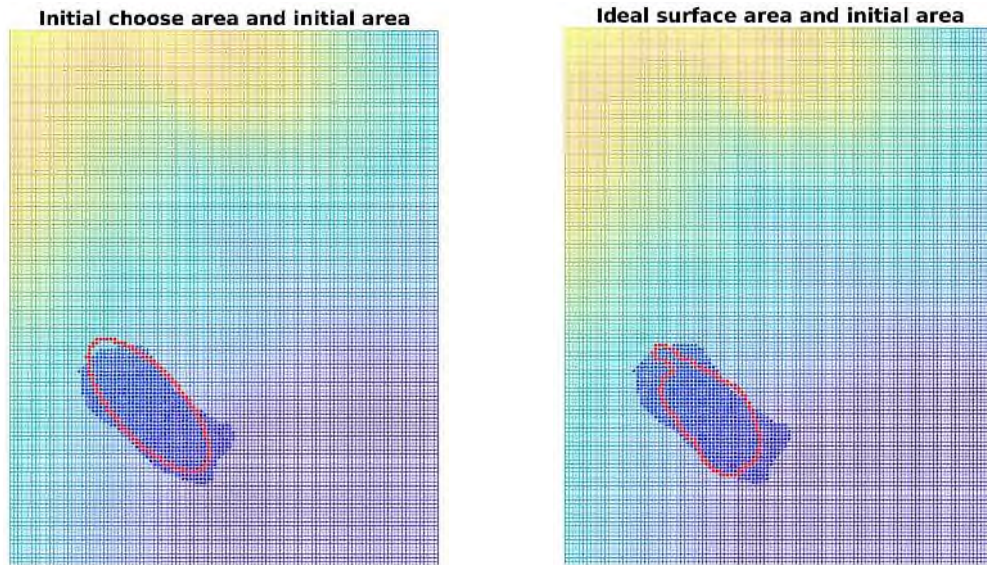


圖 4.15 延平鄉 T003 情境四方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

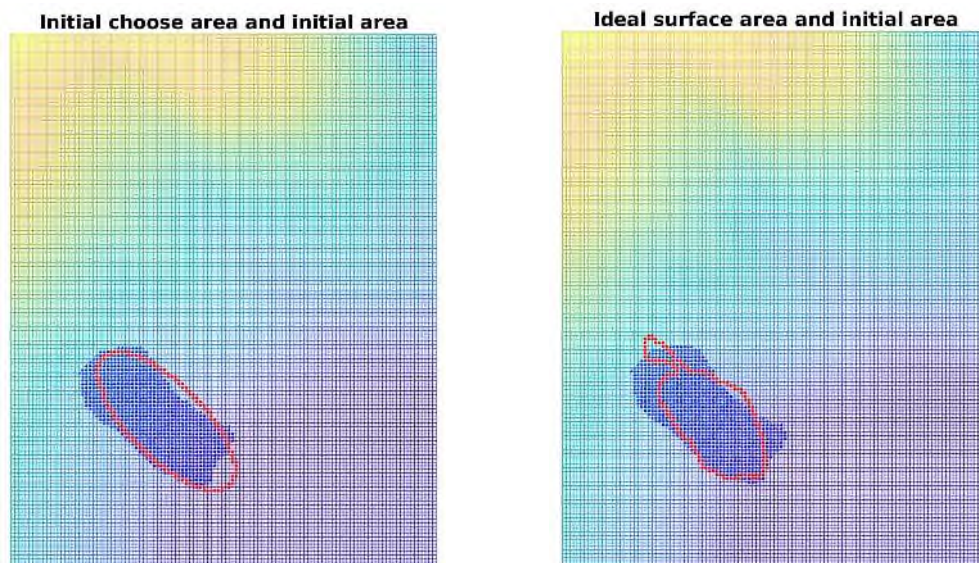


圖 4.16 延平鄉 T003 情境四方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

另外，體積偏差為搜尋理想曲面深度的條件，由表 4.5 可知，在搜尋過程中方法 A 至 D 都已確認崩塌量體與指定之值的偏差均為 0.01 % 以下。(PS 有關位置偏差(λ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

表 4.5 延平鄉 T003 情境四情境探討成果表

項目 方法	面積偏差 λ_s	位置偏差 Λ_s	體積偏差 ε_s
A	27.38%	39.58%	< 0.01%
B	27.38%	39.58%	< 0.01%
C	29.60%	35.81%	< 0.01%
D	28.51%	34.48%	< 0.01%

延平鄉 T003 情境五：

本情境引用水土保持局臺東分局(2020)計畫所研判之延平鄉 T003 大規模崩塌潛勢區域內滑動塊體 W-1 與 W-3 編號整合納入理想崩塌破壞曲面之分析範圍。圖 4.17 至圖 4.20 顯示採用上述 A、B、C、D 四個方法所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。

如圖 4.17 所示，方法 A 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 27.38% 而位置偏差為 39.58%。如圖 4.18 所示，方法 B 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 27.38% 而位置偏差為 39.58%。如圖 4.19 所示，方法 C 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 29.60% 而位置偏差為 35.81%。如圖 4.20 所示，方法 D 所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定之大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 28.51% 而位置偏差為

34.48%。上述方法 A 至 D 之面積偏差與位置偏差數據彙整至表 4.6 中，可發現方法 D 所建構之理想破壞曲面其位置偏差與面積偏差均為最小。換句話說方法 D 所建構之理想破壞曲面為本情境建構理想破壞曲面較佳之方法。

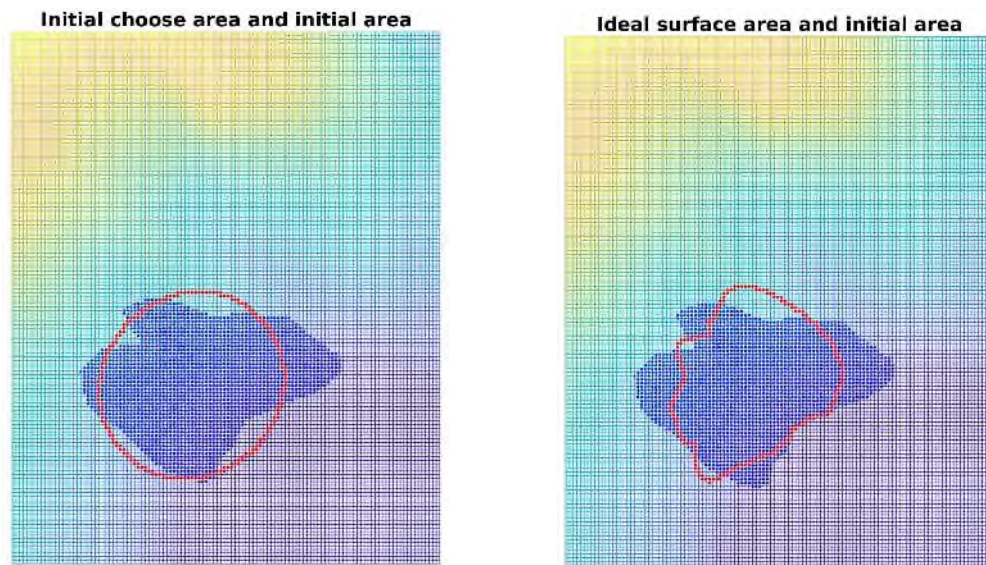


圖 4.17 延平鄉 T003 情境五方法 A 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

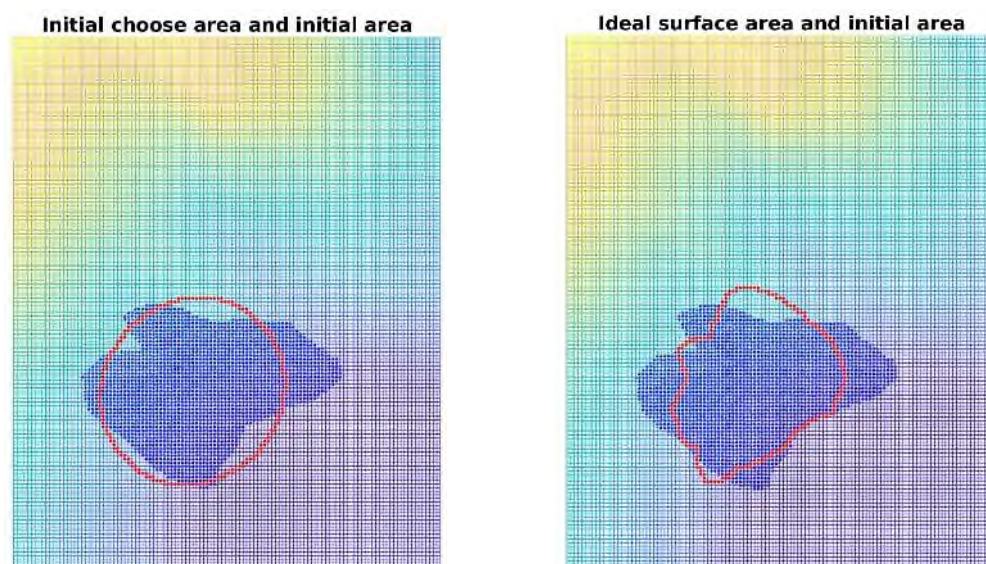


圖 4.18 延平鄉 T003 情境五方法 B 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

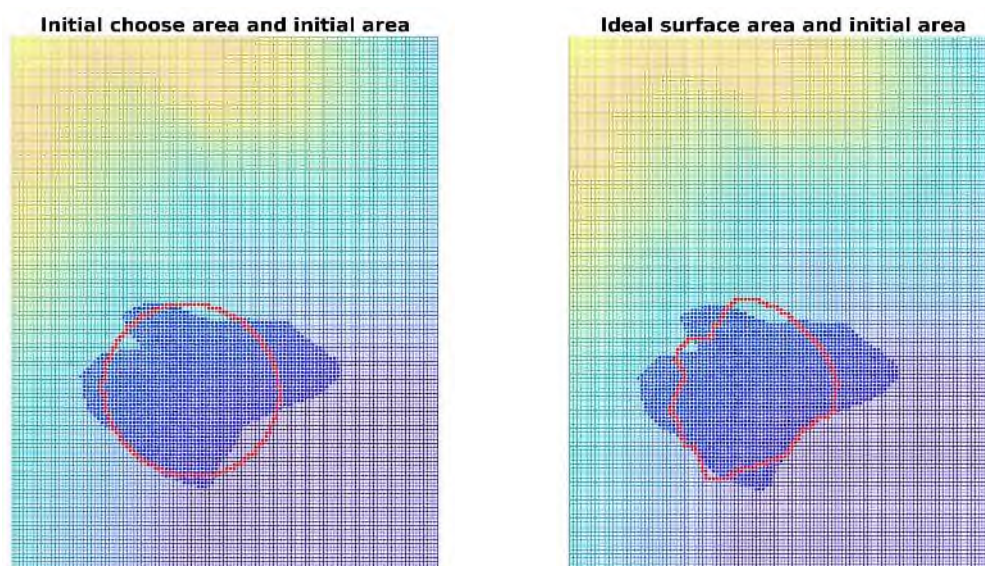


圖 4.19 延平鄉 T003 情境五方法 C 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

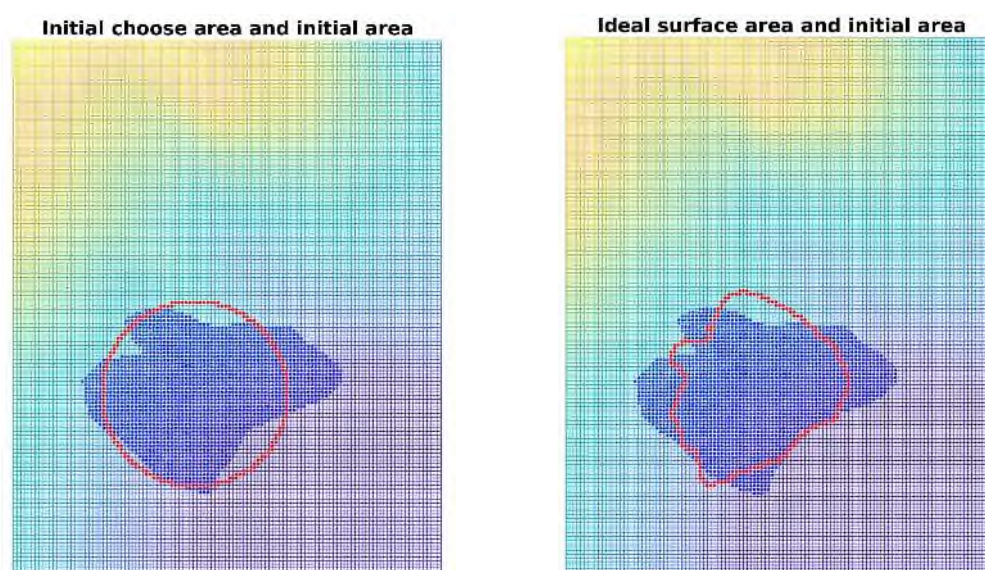


圖 4.20 延平鄉 T003 情境五方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

另外，體積偏差為搜尋理想曲面深度的條件，由表 4.6 可知，在搜尋過程中方法 A 至 D 都已確認崩塌量體與指定之值的偏差均為 0.01 % 以下。(PS 有關位置偏差(λ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

表 4.6 延平鄉 T003 情境五情境探討成果表

項目 方法	面積偏差 λ_s	位置偏差 Λ_s	體積偏差 ε_s
A	18.48%	36.05%	< 0.01%
B	19.25%	36.10%	< 0.01%
C	24.23%	34.83%	< 0.01%
D	17.44%	34.74%	< 0.01%

延平鄉 T003 情境六

針對情境一(考量整個大規模崩塌潛勢區域範圍)所估算之理想崩塌曲面，其估算深度在 W19BW01(本計畫以 BW-II 表示)傾斜儀所在之處與量測值(24~25 m)為深(34.72 m)；而其估算深度在 W19BW02(本計畫以 BW-I 表示)傾斜儀所在之處與量測值(16~17 m)為深(0.51 m)。換句話說，在 BW-II 傾斜儀處所估算之理想崩塌破壞曲面深度較量測之大 10.22 m；而 BW-I 傾斜儀處所估算之理想崩塌破壞曲面深度較量測之小 15.99 m，無法以整個大規模崩塌潛勢區域範圍進行理想崩塌曲面估算得到合理的結果。

因此本團隊重新考量可能之理想崩塌破壞曲面分析範圍(情境六)。依據水土保持局臺東分局(2020)計畫現場調查後研判之崩崖位置，作為重新考量理想崩塌破壞曲面以及崩塌範圍之基準。如表 4.7 所示，在參酌 Guzzetti et al. (2009)面積體積經驗式的條件下(搜尋崩塌量體差異至 0.01 %以下)，可發現情境六所估算之理想崩塌破壞曲面，其估算深度在 W19BW01(本計畫以 BW-II 表示)傾斜儀所在之處與量測值(24~25 m)為深(27.58 m)；而其估算深度在 W19BW02(本計畫以

BW-I 表示)傾斜儀所在之處與量測值(16~17 m)為深(14.48 m)，相較情境一更符合實際量測之崩塌深度。

表 4.7 延平鄉 T003 情境一與情境六成果表

項目 情境	面積偏差 λ_s	位置偏差 Λ_s	體積偏差 ε_s	於傾斜儀位置上之 理想崩塌曲面破壞深度/ 現場傾斜儀紀錄之深度	
				BW-II (量測深度: 24~25 m)	BW-I (量測深度: 16~17 m)
一	17.68%	30.86%	< 0.01%	34.72 m	0.51 m
六	14.49%	36.72%	< 0.01%	27.58 m	14.48 m

圖 4.21 顯示情境一與情境六建構理想崩塌破壞曲面所採用之參考橢圓(紅色)，藍色區域為延平鄉-T003 所圈畫之大規模崩塌潛勢區域。由於情境一所包含的範圍較大，使用 Guzzetti et al. (2009) 經驗式所估算值崩塌體積也較大，以至於所估算之理想曲面在傾斜儀位置的破壞深度均與量測記錄差異甚遠。在情境六中僅將潛勢區域中央的崩崖納入考量(以代表橢圓涵蓋中央區域的崩崖)，並以此進行理想破壞曲面的估算。

由圖 4.22 顯示情境一(左)與情境六(右)所估算出來的可能崩塌區域，其中色階代表崩塌深度，紅色點為現場傾斜儀位置。情境一(左)與情境六(右)之間最大差異處為崩塌面積與傾斜儀位置所對應之破壞深度，因理想崩塌破壞曲面主要依據崩塌面產生理想崩塌破壞曲面，若更大的崩塌面將導致推估之坡腹處(傾斜儀 BW-II 位置)可能崩塌深度越大。

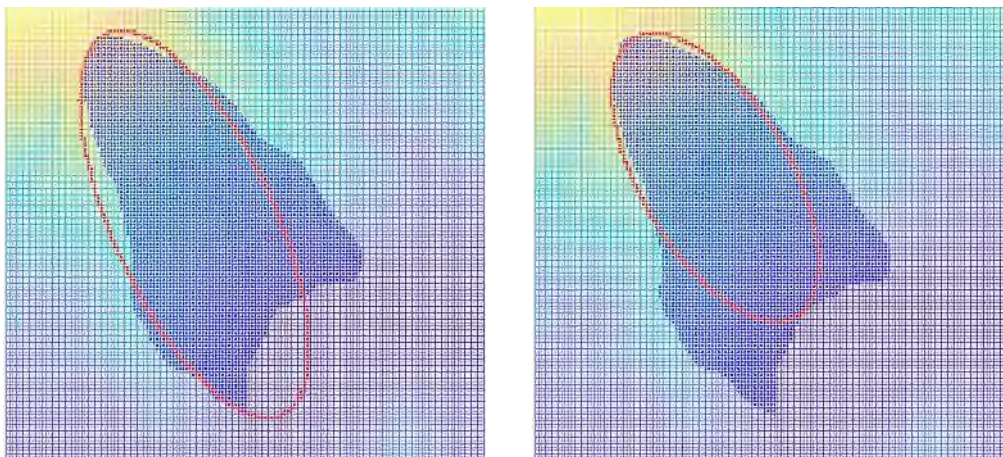


圖 4.21 延平鄉 T003 情境一(左)與情境六(右)之參考橢圓比較圖

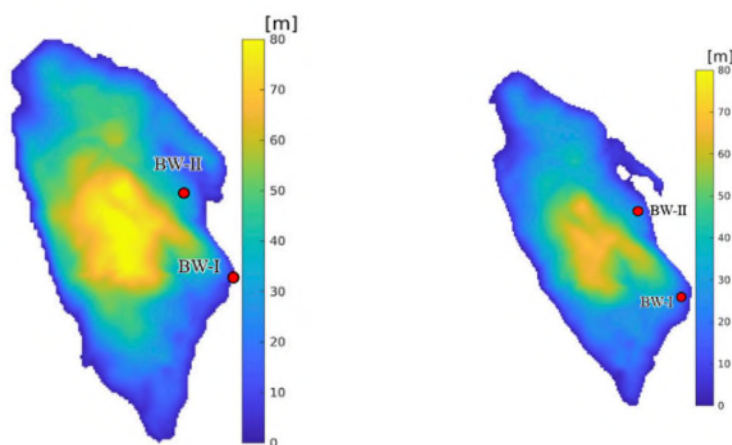


圖 4.22 延平鄉 T003 情境一(左)與情境六(右)理想崩塌破壞曲面推估之崩塌深度圖

由上述情境一至情境六之分析可發現，方法 D 可獲致較合理之理想崩塌曲面。因此以下針對復興區-光華 T002 大規模崩塌潛勢區域之分析將採用方法 D 進行相關的估算與探討。

桃園市-復興區-光華 T002 大規模崩塌潛勢區域

依據水土保持局臺北分局(2020)計畫所研判桃園市-復興區-光華 T002 大規模崩塌潛勢區域之滑動塊體，採用理想崩塌破壞曲面估算方法 D 進行估算該區域可能之崩塌量體與深度。並採納期中報告審查意見，除了考量目前劇烈滑動的上半段以外，下半段區域也納入分析範圍。

針對光華 T002 大規模崩塌區域本案共考量兩種不同的崩塌量體情境，情境一為引用水土保持局臺北分局(2020)計畫所劃定之滑動塊體納入理想崩塌破壞曲面之分析範圍。

由表 4.8 可見，光華 T002 情境一依據搜尋崩塌量體為式(2.8)時所估算之體積差異高達 46.82%，其估算深度在 K18-2BW 傾斜儀所在之處與量測值(5.0 m)為深(7.11 m)，而估算深度在 K18-1BW 傾斜儀所在之處與量測值(25.0 m)為深(22.71 m)，而估算深度在 K19-1BW 傾斜儀所在之處與量測值(27.0 m)為深(23.27 m)。

如第二章第 3 節所述，Guzzetti et al. (2009)面積體積經驗式(2.8)在 95%的信賴區間有高達 2 倍體積的偏差，而 Tai et al., (2020)所探討台灣地區崩塌情境雖然迴歸之關係式相近，但是體積的偏差大約 2.0 倍。因此，本案由調整參酌 Guzzetti et al. (2009)面積體積經驗式(2.8)之 1.5 倍以及 2.0 倍崩塌體積的條件下，分別規畫情境二與情境三進行理想崩塌破壞曲面之探討。結果如表 4.8 所示，當情境二依據搜尋崩塌量體為式(2.8)之 1.5 倍時所估算之體積差異自 46.82%下降至 34.92%，其估算深度在 K18-2BW 傾斜儀所在之處為 3.81 m (量測值為 5.0 m)，而估算深度在 K18-1BW 傾斜儀所在之處為 25.14 m (量測值為 25.0 m)，估算深度在 K19-1BW 傾斜儀所在之處為 27.52 m (量測值 27.0 m)，三處之估算值均與量測值接近。

由於情境二尚存在體積偏差，因此規劃依據搜尋崩塌量體為式(2.8)之 2.0 倍(情境三)。在情境三之估算可將體積差異小於 0.01%，其估算深度在 K18-2BW 傾斜儀所在之處為 11.06 m (量測值 5.0 m)，而估算深度在 K18-1BW 傾斜儀所在之處為 28.46 m(量測值 25.0 m)，而估算深度在 K19-1BW 傾斜儀所在之處為 28.85 m(量測值 27.0 m)。(PS 有關位置偏差(λ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

不論是情境二還是情境三，其估算值在 K18-2BW、K18-1BW 以及 K19-1BW 等三處傾斜儀之量測值均相當接近。因情境三因發較大之崩塌量體，本案後續之土砂運移行為探討將以情境三作為分析之依據。

表 4.8 光華 T002 情境一、情境二與情境三崩塌量體與深度成果比較表

項目 情境	搜尋崩塌量體 依據	體積 偏差 ε_s	於傾斜儀位置上之 理想崩塌曲面破壞深度/ 現場傾斜儀紀錄之深度		
			K18-2BW (量測深度: 5.0 m)	K18-1BW (量測深度: 25.0 m)	K19-1BW (量測深度: 27.0 m)
一	式(2.8) 之 1.0 倍	46.82%	7.11 m	22.71 m	23.27 m
二	式(2.8) 之 1.5 倍	34.92%	3.81 m	25.14 m	27.52 m
三	式(2.8) 之 2.0 倍	< 0.01%	11.06 m	28.46 m	28.85 m

針對 2021 年 3 月與 8 月 UAV 產製數值地形資料，依據水土保持局臺北分局(2020)計畫所記錄之傾斜儀數據截至 2019 年 10 月 13 日，故本案在後續分析假設原本傾斜儀位置上的滑動深度與 2019 年 10 月 13 日所量測之滑動深度不變的情況下，調整參酌 Guzzetti et al. (2009) 面積體積經驗式(2.8)之 1.0 倍、1.5 倍以及 2.0 倍崩塌體積的條件，分別規畫情境四-a、情境四-b、情境四-c、情境五-a、情境五-b 與情境五-c 進行理想崩塌破壞曲面之探討。由表 4.9 可見，

表 4.9 光華 T002 情境四與情境五崩塌量體與深度成果比較表

項目 情境	搜尋崩塌量體 依據	體積 偏差 ε_s	於傾斜儀位置上之 理想崩塌曲面破壞深度/ 現場傾斜儀紀錄之深度		
			K18-2BW (量測深度: 5.0 m)	K18-1BW (量測深度: 25.0 m)	K19-1BW (量測深度: 27.0 m)
四-a	式(2.8) 之 1.0 倍	98.74%	2.63 m	18.44 m	29.48 m
四-b	式(2.8) 之 1.5 倍	41.11%	2.41 m	17.45 m	28.31 m
四-c	式(2.8) 之 2.0 倍	5.39%	3.86 m	19.59 m	30.33 m
五-a	式(2.8) 之 1.0 倍	59.83%	n/a	0.377 m	12.08 m
五-b	式(2.8) 之 1.5 倍	<0.01%	n/a	n/a	12.23 m
五-c	式(2.8) 之 2.0 倍	<0.01%	n/a	4.43 m	19.65 m

光華 T002 情境一

圖 4.23 顯示採用方法 D 所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。其中光華 T002 情境一所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 36.08% 而位置偏差為 88.01%。

情境一所估算之崩塌理想破壞曲面對應之崩塌體積偏差為 46.82%。(PS 有關位置偏差(Δ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

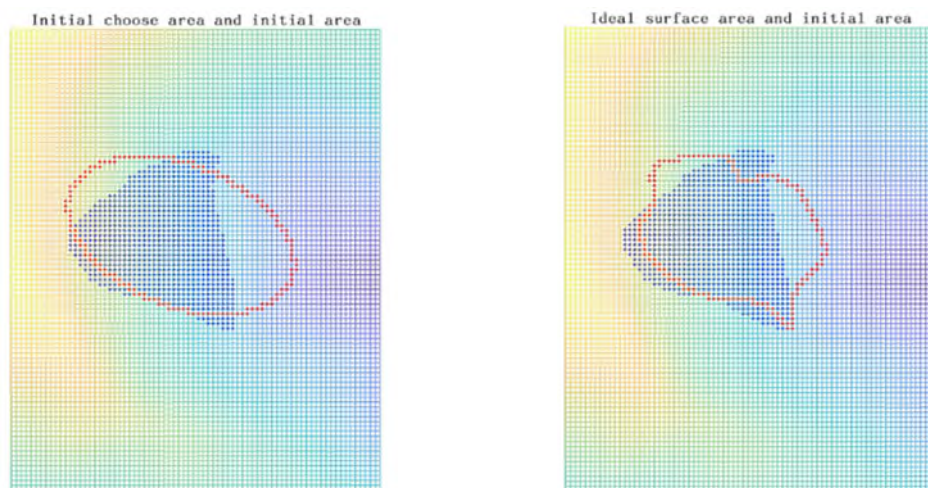


圖 4.23 光華 T002 情境一方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

光華 T002 情境二

圖 4.24 顯示採用方法 D 所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。其中光

華 T002 情境二所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 36.08% 而位置偏差為 88.01%。

情境二針對調整情境一之搜尋崩塌量體依據從 1 倍至 1.5 倍發現其體積偏差從 46.82% 下降至 34.92%。(PS 有關位置偏差(Λ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

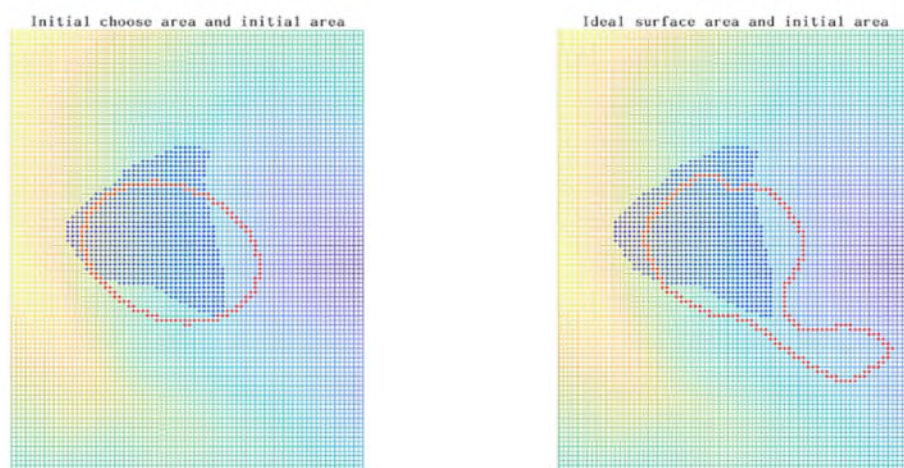


圖 4.24 光華 T002 情境二方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

光華 T002 情境三

為了解決光華 T002 體積偏差較大的問題，本案重新建置情境三並以式(2.8)估算值 2 倍進行探討。

圖 4.25 顯示採用方法 D 所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表崩塌潛勢區域，左圖的紅線為起始參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。

為光華 T002 情境三所推估出之最終理想崩塌破壞面積與劃定大規模崩塌潛勢區域之面積偏差為 21.47% 而位置偏差為 43.70%。相較

與光華 T002 情境二，情境三所搜尋崩塌量體差異至 0.01 %以下(參閱表 4.8)。(PS 有關位置偏差(Δ_s)以及面積偏差(λ_s)之定義請參閱式(2.6)與(2.7)於 2-7 頁，有關崩塌面積-體積法計算之崩塌量體(V_L)與體積偏差(ε_s)之定義請參閱式(2.8)與(2.9)於 2-8 頁)

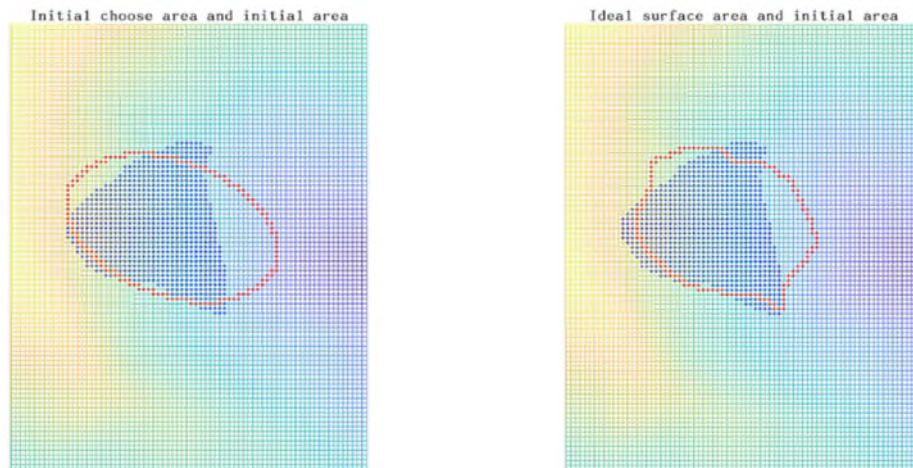


圖 4.25 光華 T002 情境三方法 D 之參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

由上述情境一至情境三分析可發現，光華 T002 之情境在調整參酌 Guzzetti et al. (2009)後所估算之體積差異自情境一(46.82%)下降至情境三(<0.01%)可獲取較合理之理想崩塌曲面。因次在後續的邊坡安全係數分析將應用情境二與情境三所估算之理想崩塌曲面進行探討。

光華 T002 情境四

應用 2021 年 3 月之 UAV 產製數值地形搭配與 2005 年數值地形比較後繪製之地形變化範圍(地形變化大於 0 位置)作為依據，進行搜尋最佳理想崩塌曲面估算可能崩塌範圍與量體。為了解決與前述情境一相同之問題(體積差異)，情境四也調整參酌 Guzzetti et al. (2009)所估算之 1.5 倍與 2.0 倍崩塌體積，共規劃 3 種情境(情境四-a、四-b

與四-c)。

圖 4.26 顯示採用方法 D 與 Guzzeti et al. (2009)之 1.0 倍所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表與前期(2005 年)比較後地形變化範圍，左圖的紅線為起始參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。最終理想崩塌破壞曲面推估可能崩塌量體(剔除藍色區塊以外之體積)與 Guzzeti et al. (2009)迴歸之量體差異為 17.80%。

圖 4.27 顯示採用方法 D 與 Guzzeti et al. (2009)之 1.5 倍所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表與前期(2005 年)比較後地形變化範圍，左圖的紅線為起始參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。最終理想崩塌破壞曲面推估可能崩塌量體(剔除藍色區塊以外之體積)與 Guzzeti et al. (2009)迴歸之量體差異為 20.72%。

圖 4.28 顯示採用方法 D 與 Guzzeti et al. (2009)之 2.0 倍所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表與前期(2005 年)比較後地形變化範圍，左圖的紅線為起始參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。最終理想崩塌破壞曲面推估可能崩塌量體(剔除藍色區塊以外之體積)與 Guzzeti et al. (2009)迴歸之量體差異為 18.86%。

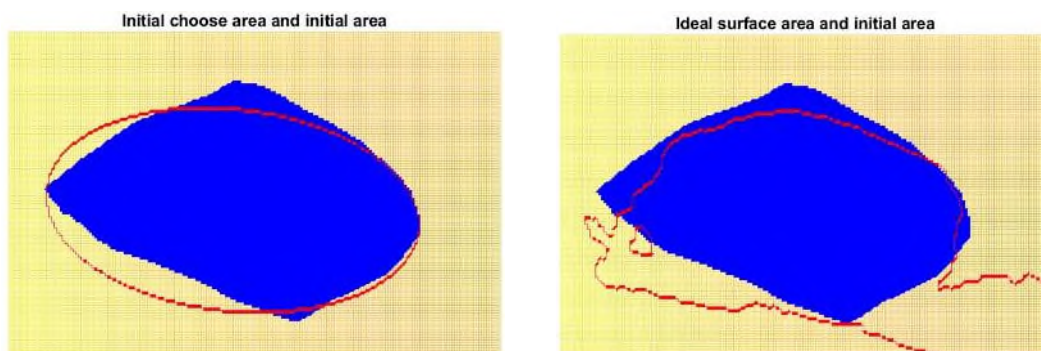


圖 4.26 光華 T002 2021 年 03 月情境四-a 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

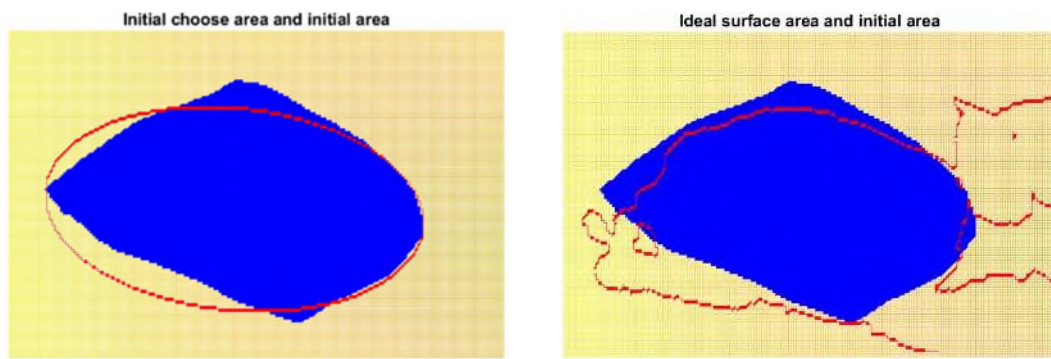


圖 4.27 光華 T002 2021 年 03 月情境四-b 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

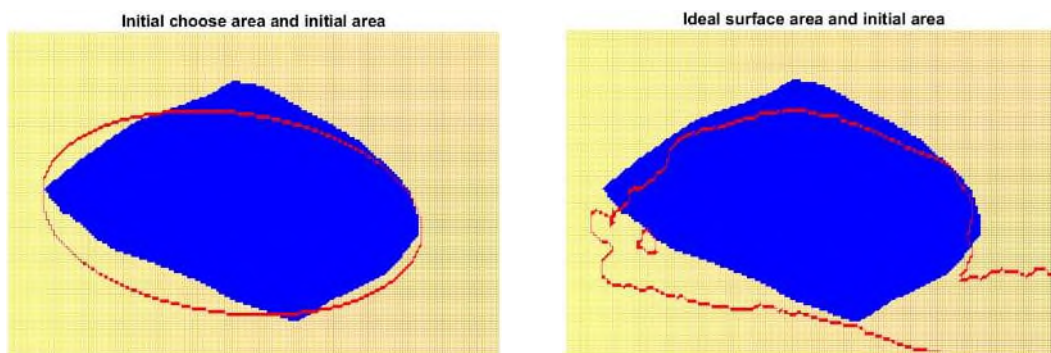


圖 4.28 光華 T002 2021 年 03 月情境四-c 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

光華 T002 情境五

應用 2021 年 8 月之 UAV 產製數值地形搭配與 2021 年 3 月數值地形比較後繪製之地形變化範圍(地形變化大於 0 位置)作為依據，進行搜尋最佳理想崩塌曲面估算可能崩塌範圍與量體。為了解決與前述情境一相同之問題(體積差異)，情境五也調整參酌 Guzzeti et al. (2009) 所估算之 1.5 倍與 2.0 倍崩塌體積，共規劃 3 種情境(情境五-a、五-b 與五-c)。

圖 4.29 顯示採用方法 D 與 Guzzeti et al. (2009) 之 1.0 倍所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表與前期(2021 年 3 月)比較後地形變化範圍，左圖的紅線為起始參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。最終理想崩塌

破壞曲面推估可能崩塌量體(剔除藍色區塊以外之體積)與 Guzzeti et al. (2009)迴歸之量體差異為 37.85%。

圖 4.30 顯示採用方法 D 與 Guzzeti et al. (2009)之 1.5 倍所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表與前期(2021 年 3 月)比較後地形變化範圍，左圖的紅線為起始參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。最終理想崩塌破壞曲面推估可能崩塌量體(剔除藍色區塊以外之體積)與 Guzzeti et al. (2009)迴歸之量體差異為 32.91%。

圖 4.31 顯示採用方法 D 與 Guzzeti et al. (2009)之 2.0 倍所搜尋最佳之理想崩塌破壞曲面，圖中的藍色區塊代表與前期(2021 年 3 月)比較後地形變化範圍，左圖的紅線為起始參考橢圓所在，而右圖代表經過理想崩塌破壞曲面估算出最終之可能崩塌範圍。最終理想崩塌破壞曲面推估可能崩塌量體(剔除藍色區塊以外之體積)與 Guzzeti et al. (2009)迴歸之量體差異為 2.08%。

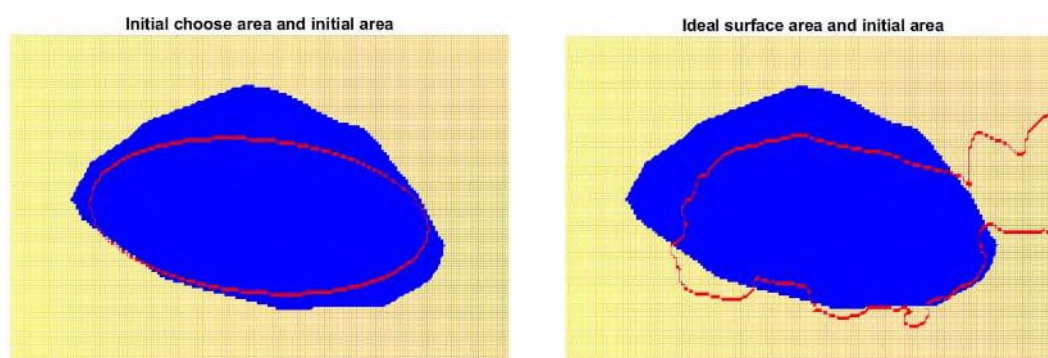


圖 4.29 光華 T002 2021 年 08 月情境五-a 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

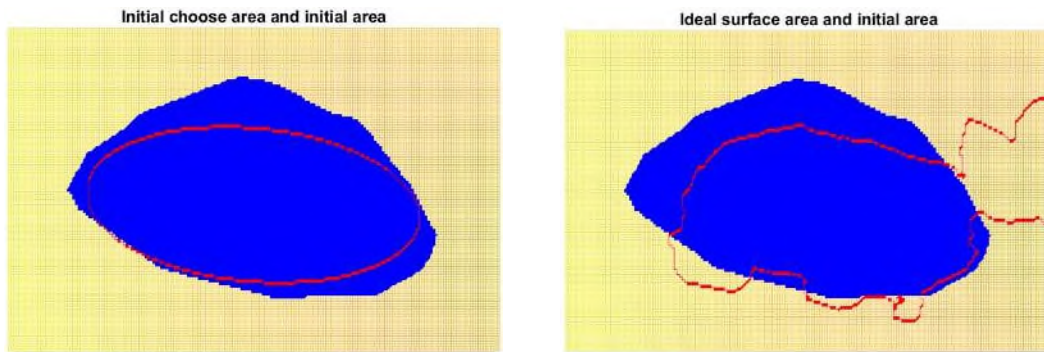


圖 4.30 光華 T002 2021 年 08 月情境五-b 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

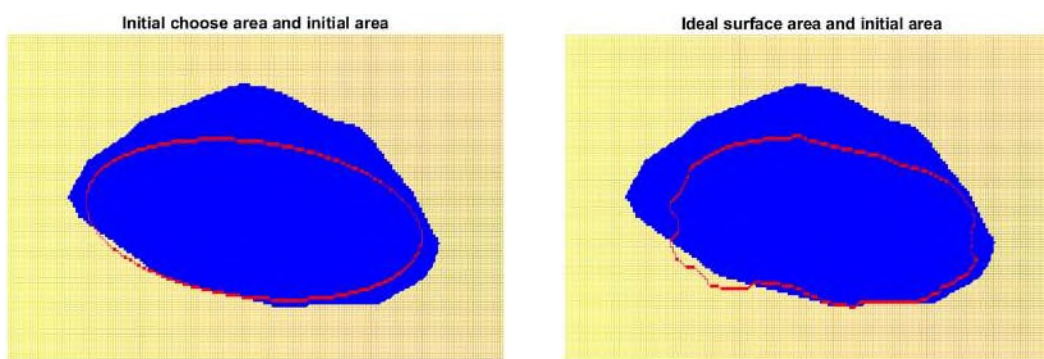


圖 4.31 光華 T002 2021 年 08 月情境五-c 參考橢圓(左)與理想崩塌破壞曲面估算出最終可能崩塌範圍(右)成果圖

表 4.9 延平鄉 T003 理想破壞參數值(Part 1)

情境	方法	d_1 (m)	d_2 (m)	R_1 (m)	R_2 (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	θ_1 (°)	$d_{\max}$ (m)
一	A	109.50	94.95	2,011.15	444.62	1,309.12	549.24	23.50	82.94
	B	109.93	94.38	2,003.61	443.02	1,309.12	549.24	23.50	83.12
	C	106.76	80.06	2,069.83	393.61	1,312.33	475.88	23.82	85.14
	D	117.69	88.74	2,111.16	416.33	1,390.05	513.86	21.31	83.57
二	A	7.42	22.97	988.62	227.71	241.86	199.35	24.94	21.19
	B	10.57	29.07	715.83	180.79	245.12	196.63	26.53	23.67
	C	8.30	26.80	908.81	193.77	245.12	196.66	26.53	22.70
	D	8.30	26.80	908.81	193.77	245.12	196.66	26.53	22.70
三	A	5.51	20.81	1,294.70	66.22	238.71	96.40	27.33	21.81
	B	5.51	20.81	1,294.71	66.22	238.71	96.40	27.33	21.81
	C	5.61	20.76	1,277.34	46.10	239.08	77.01	27.50	21.87
	D	4.76	19.01	2,816.76	38.75	327.43	66.69	19.46	22.10

表 4.9 延平鄉 T003 理想破壞參數值(Part 2)

情境	方法	d_1 (m)	d_2 (m)	R_1 (m)	R_2 (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	θ_1 (°)	$d_{\max}$ (m)
四	A	16.34	25.29	555.22	85.00	267.41	120.99	27.36	23.79
	B	16.37	25.31	554.31	84.93	267.41	120.99	27.36	23.80
	C	22.43	21.43	440.87	70.39	277.69	101.15	31.21	24.66
	D	16.77	22.67	628.91	79.16	288.50	110.90	26.18	23.95
五	A	23.77	45.32	463.52	234.92	293.05	277.40	29.52	29.48
	B	24.39	45.94	452.35	232.36	293.05	277.40	29.52	29.63
	C	27.08	44.93	409.99	194.51	293.05	248.66	29.52	30.40
	D	23.39	43.74	497.21	228.69	301.39	269.01	28.58	29.68
六	-	62.74	81.24	2391.06	323.93	1088.28	429.10	27.14	72.11

表 4.10 光華 T002 理想破壞參數值

情境	方法	d_1 (m)	d_2 (m)	R_1 (m)	R_2 (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	θ_1 (°)	$d_{\max}$ (m)
一	D	12.81	12.81	729.20	246.72	272.18	156.94	24.76	25.36
二	D	20.00	17.00	365.87	181.87	238.64	153.56	32.81	30.09
三	D	17.64	16.29	510.20	191.87	266.01	154.74	26.55	30.95
四-a	D	23.39	31.24	643.08	106.84	343.72	150.99	35.34	42.04
四-b	D	21.94	29.07	690.51	111.15	345.37	149.86	35.07	40.75
四-c	D	24.46	32.96	637.21	101.56	349.71	149.79	34.76	43.39
五-a	D	10.96	13.87	1225.54	128.44	327.08	116.10	32.20	21.68
五-b	D	9.47	16.66	1286.73	107.30	311.68	114.86	36.58	29.87
五-c	D	19.75	28.84	627.87	71.89	312.49	115.15	36.34	34.94

第二節 邊坡安全係數前置資料處理

因理想崩塌曲面所推估之可能滑動面與體積為三維資料，而本計畫在工作項目三進行之邊坡安全係數為二維，故此小節將說明如何從三維之地形與理想崩塌曲面滑動深度截取剖面資料。

前處理流程為：(1)將理想崩塌曲面深度資料匯入 QGIS、(2)沿着理想崩塌所估算的長軸方向繪製剖面線、(3)分別將此剖面線上之數值地形(DEM)與理想崩塌曲面估算之滑動深度截取，並將此資料提供後續之地下水位。

因臺東縣-延平鄉-T003 之情境六以及桃園光華-T002 之情境二與情境三與現地傾斜儀之量測值較為接近，本案邊坡安全係數僅考量此三個情境。

臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域

T003-情境六

綜合本章節之模擬結果，本計畫選取延平鄉 T003 由理想崩塌曲面估算之滑動破壞深度最靠近現場傾斜儀量測之情境六進行地下水位建與邊坡安全係數計算之前置處理。由圖 4.32 所示，紅框為延平鄉 T003 大規模崩塌區域之潛勢區域，彩色分佈為理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度，綠線(A-A'線)為後續地下水位與邊坡安全係數計算之剖面線位置。本計畫所使用之數值地形資料(DEM)為 2005 年產製之全台 5 公尺解析度地形資料，故截取之剖面資料如圖 4.33 所示，黑線為剖面線上之 DEM 高程資料，褐色虛線為理想崩塌曲面所推估之滑動面高程資料。

後續在工作項目二(地下水位建置)與工作項目三(邊坡安全係數)之計算將應用本小節所截取之數值地形資料(DEM)與理想崩塌曲面

估算之滑動面高程進行建置與計算。

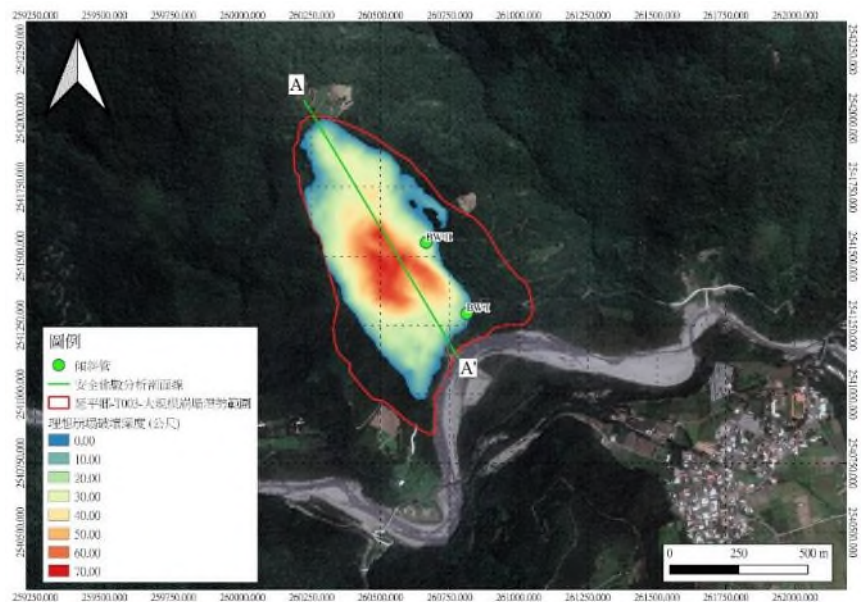


圖 4.32 延平鄉 T003 情境六之理想崩塌曲面深度與剖面線位置圖

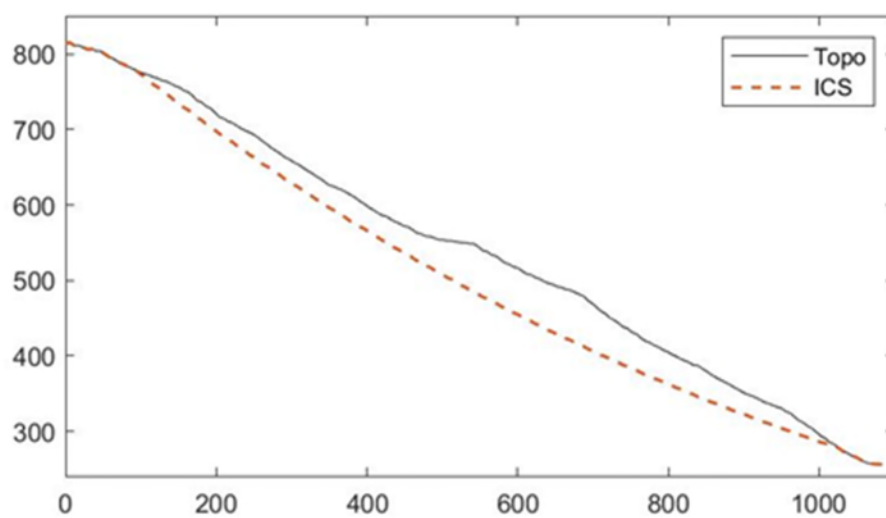


圖 4.33 延平鄉 T003 情境六之 A-A'剖面之地形與理想崩塌滑動深度圖

桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域

應用光華 T002 情境二與情境三進行地下水位建與邊坡安全係數計算之前置處理。

由圖 4.34 顯示情境二之可能崩塌土體深度分佈，紅線為光華 T002 大規模崩塌區域之滑動塊體，彩色分佈為理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度，綠線(A-A'線)為後續地下水位與邊坡安全係數計算之剖面線位置。本計畫所使用之數值地形資料(DEM)為 2005 年產製之全台 5 公尺解析度地形資料，故截取之剖面資料如圖 4.35 所示，黑線為剖面線上之 DEM 高程資料，褐色虛線為理想崩塌曲面所推估之滑動面高程資料。

由圖 4.36 顯示情境三之可能崩塌土體深度分佈，紅線為光華 T002 大規模崩塌區域之滑動塊體，彩色分佈為理想崩塌曲面推估之可能崩塌深度，綠線(A-A'線)為後續地下水位與邊坡安全係數計算之剖面線位置。本計畫所使用之數值地形資料(DEM)為 2005 年產製之全台 5 公尺解析度地形資料，故截取之剖面資料如圖 4.37 所示，黑線為剖面線上之 DEM 高程資料，褐色虛線為理想崩塌曲面所推估之滑動面高程資料。

由圖 4.38 所示，紅線為光華 T002 情境四之前後期數值地形研判之滑動範圍，綠線(A-A'線)為後續邊坡安全係數分析之剖面線位置。本計畫所使用之數值地形資料(DEM)為 2021 年 3 月 UAV 產製數值地形資料，故截取之剖面資料如圖 4.39 所示，黑線為剖面線上之 DEM 高程資料，紅色、綠色與藍色虛線分別代表情境四-a、情境四-b 與情境四-c 之理想崩塌曲面所推估之滑動面高程資料。

由圖 4.40 所示，紅線為光華 T002 情境五之前後期數值地形研判之滑動範圍，綠線(A-A'線)為後續邊坡安全係數分析之剖面線位置。

本計畫所使用之數值地形資料(DEM)為 2021 年 8 月 UAV 產製數值地形資料，故截取之剖面資料如圖 4.41 所示，黑線為剖面線上之 DEM 高程資料，紅色、綠色與藍色虛線分別代表情境五-a、情境五-b 與情境五-c 之理想崩塌曲面所推估之滑動面高程資料。

後續在地下水位建置 (第五章-工作項目二)與邊坡安全係數分析 (第五章-工作項目三)之計算將應用本小節所截取之數值地形資料 (DEM)與理想崩塌曲面估算之滑動面高程進行建置與計算。另光華 T002 情境四與五因地下水位計受到破壞而無法量測地下水位高程，故情境四與情境五之邊坡安全係數分析之會進行不考慮地下水位邊坡安全係數分析，其結果彙整於表 5.1 中。

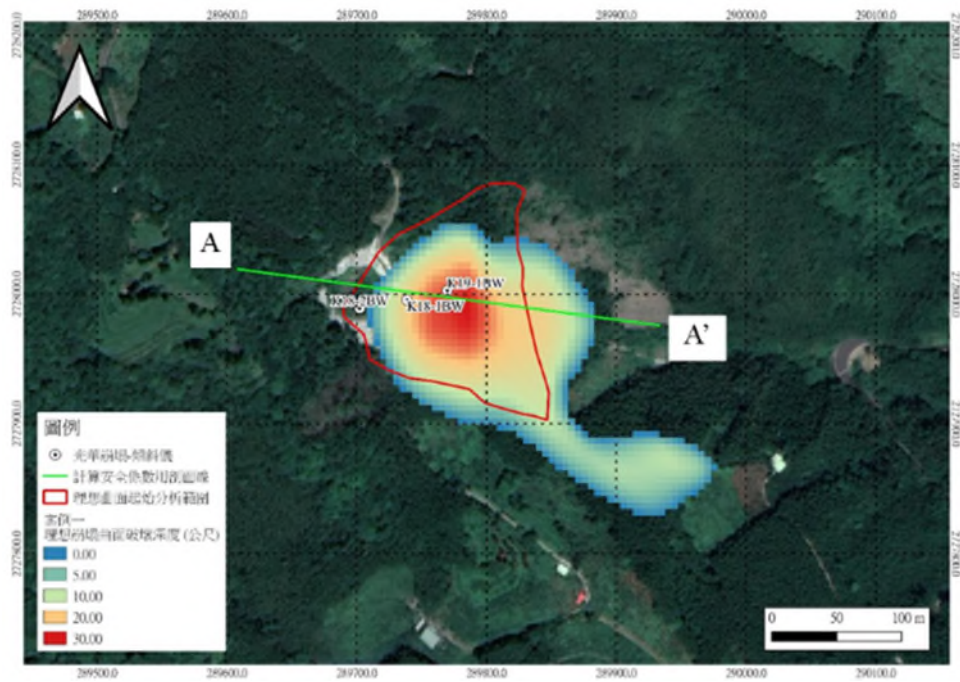


圖 4.34 光華 T002 情境二之理想崩塌曲面深度與剖面線圖

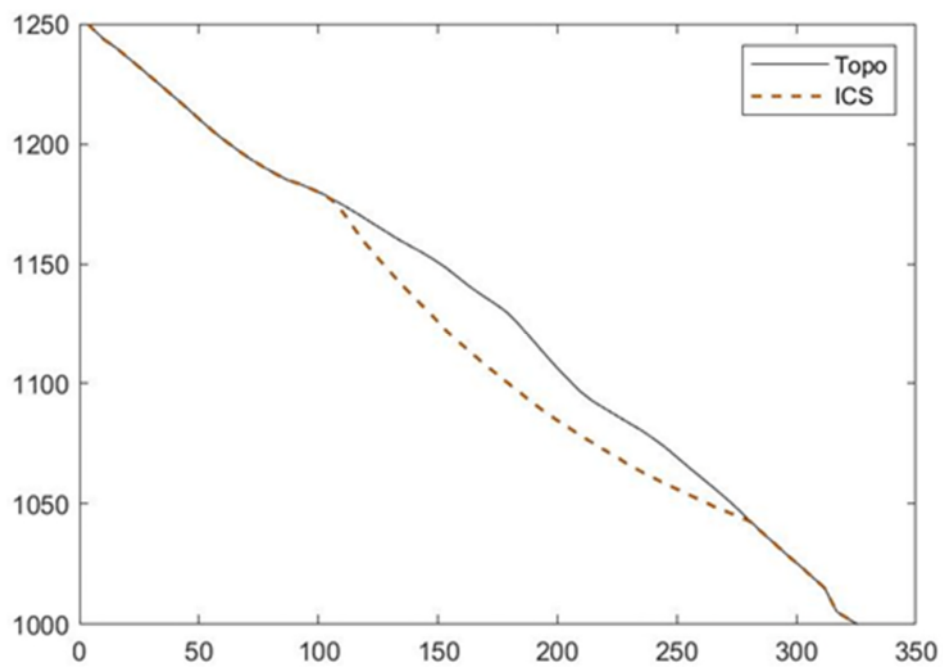


圖 4.35 光華 T002 情境二之 A-A'剖面之地形與理想崩塌滑動高程圖

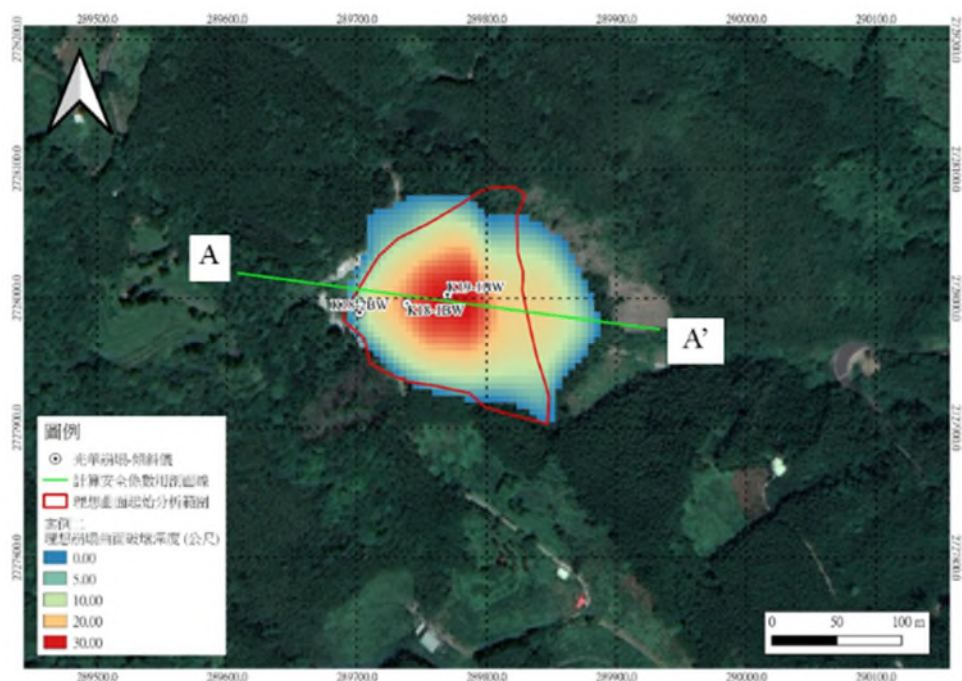


圖 4.36 光華 T002 情境三之理想崩塌曲面深度與剖面線圖

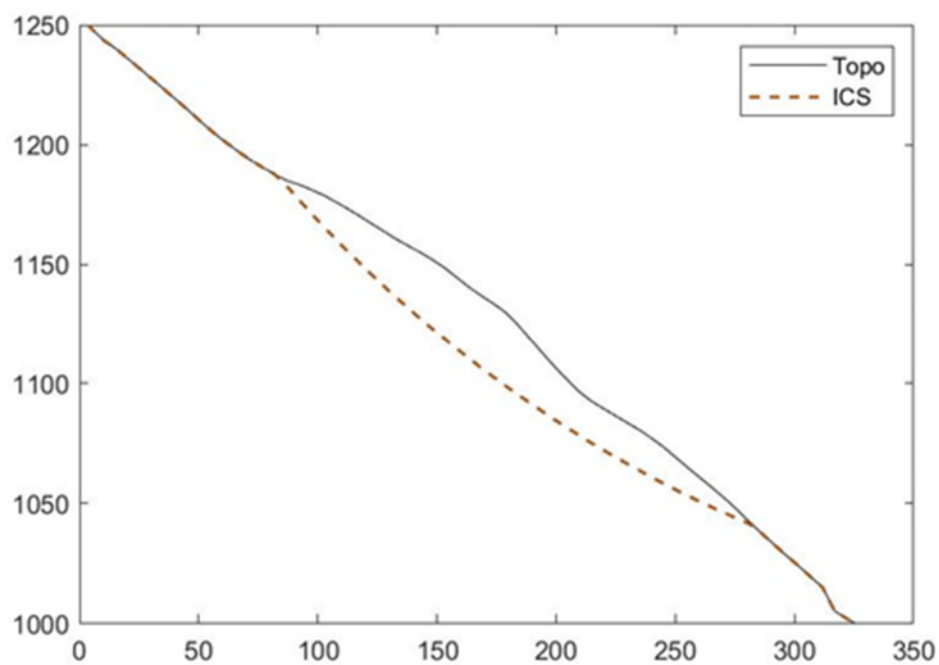


圖 4.37 光華 T002 情境三之 A-A'剖面之地形與理想崩塌滑動高程圖

光華 T002 情境四-a、情境四-b 與情境四-c



圖 4.38 光華 T002 之情境四理想崩塌曲面分析剖面線位置圖

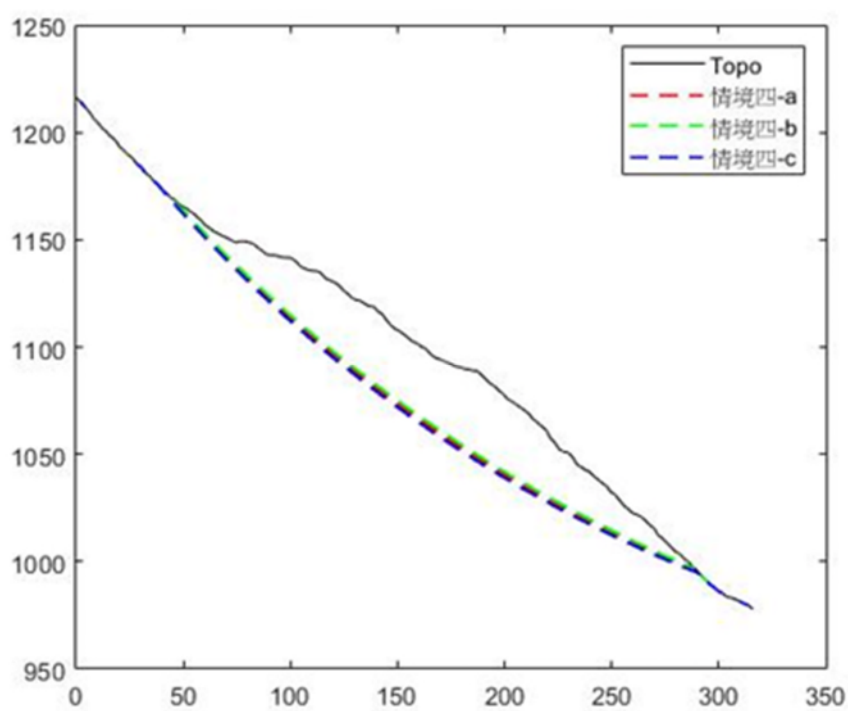


圖 4.39 光華 T002 情境四數值地形邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面剖面圖

光華 T002 情境五-a、情境五-b 與情境五-c



圖 4.40 光華 T002 情境五理想崩塌曲面分析剖面線位置圖

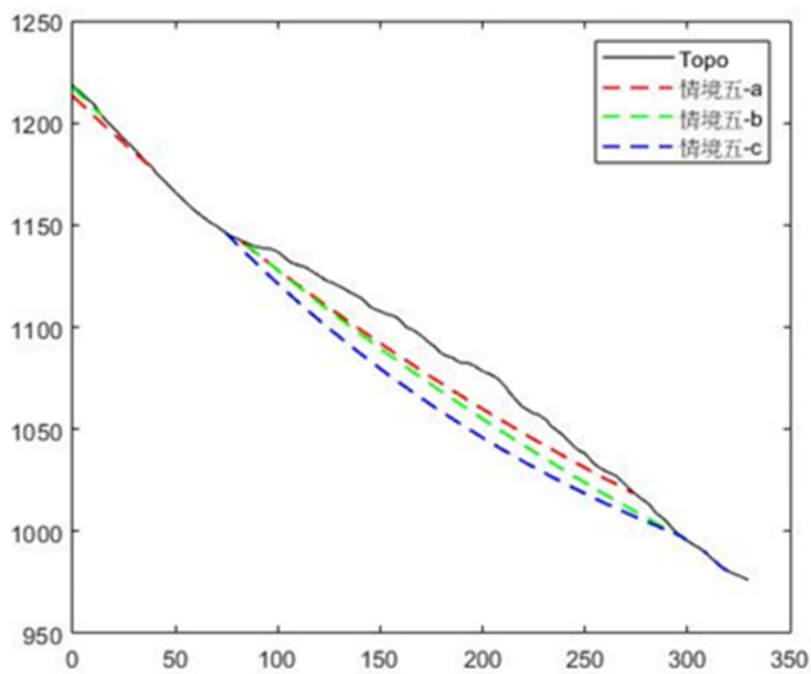


圖 4.41 光華 T002 情境五數值地形邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面剖面圖

小結

臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域

針對本章理想崩塌破壞曲面估算之理想崩塌量體與深度，與傾斜儀監測資料所記錄之滑動破壞面深度進行比較。由表 4.12 所示，為各個情境差異最小者其相關破壞參數，其中因不同情境分析範圍的差異，使得無法與現場傾斜儀進行比較者，以 n/a 表示。

為了解決傾斜儀有量測到滑動深度，但理想崩塌曲面無模擬到的問題。本團隊依據計畫(水土保持局臺東分局，2020)中所記錄之地形特徵資料，包含了崩崖分佈、順向坡分佈 等。新增情境六，重新透過理想崩塌曲面估算理想崩塌量體與深度，其中估算之破壞滑動面也必須靠近傾斜儀所在位置之滑動面深度。

表 4.12 延平鄉-T003 理想崩塌破壞曲面推估之可能崩塌深度與現場傾斜儀量測之滑動破壞深度比較表

情境	滑動塊體編號	崩塌面積(m ²)	BW-II		BW-I	
			量測滑動深度(m)	理想崩塌破壞曲面推估深度(m)	量測滑動深度(m)	理想崩塌破壞曲面推估深度(m)
一	大規模崩塌潛勢區域	515,900	24~25	34.72	16~17	0.51
二	W1	32,650		n/a		16.59
三	W2	16,100		3.16		n/a
四	W3	22,600		n/a		n/a
五	W1 & W3	55,200		n/a		19.50
六	依據地形特徵	367,150		27.58		14.48

桃園市-復興區-光華 T002 大規模崩塌潛勢區域

由表 4.13 所示，光華 T002 大規模崩塌區域經理想崩塌破壞曲面估算之理想崩塌量體與深度，與傾斜儀監測資料所記錄之滑動破壞面深度進行比較。

表 4.13 光華 T002 理想崩塌破壞曲面推估之可能崩塌深度與現場傾斜儀量測之滑動破壞深度比較表

情境	傾斜儀編號	K18-2BW		K18-1BW		K19-1BW	
	搜尋崩塌量體依據	量測滑動深度(m)	理想崩塌破壞曲面推估深度(m)	量測滑動深度(m)	理想崩塌破壞曲面推估深度(m)	量測滑動深度(m)	理想崩塌破壞曲面推估深度(m)
一	式(2.8) 之 1.0 倍 (體積誤差 46.82%)	5.0	7.11	25	22.71	27	23.27
二	式(2.8) 之 1.5 倍 (體積誤差 34.92%)		3.81		25.14		27.52
三	式(2.8) 之 2.0 倍 (體積誤差 <0.01%)		11.06		28.46		28.85
四-c	式(2.8) 之 2.0 倍 (體積誤差 18.86%)		3.86		19.59		30.3
五-c	式(2.8) 之 2.0 倍 (體積誤差 2.08%)		n/a		4.43		19.65

將應用上述延平鄉-T003 情境六(圖 4.33)、復興區-光華 T002 情境二、三、四與五(圖 4.35、圖 4.37、圖 4.39 與圖 4.41) 之剖面地形高程進行後續邊坡安全係數分析。

幾何特性探討(崩塌面積與深度之關係)

考慮前期創新研究計畫(107 年與 108 年)崩塌案例 44 處及本案新增之 2 處(延平鄉 T003 與光華 T002)總共 46 處，進行迴歸分析理想崩塌曲面所估算之崩塌面積與長軸上之深度 d_1 (參考圖 2.2)之幾何特性關係。圖 4.42 顯示在理想崩塌曲面估算之可能崩塌面積與長軸深度 d_1 的關聯，透過分析可迴歸約略得一關聯趨勢：

$$y = 0.128x^{0.46} \quad (4.1)$$

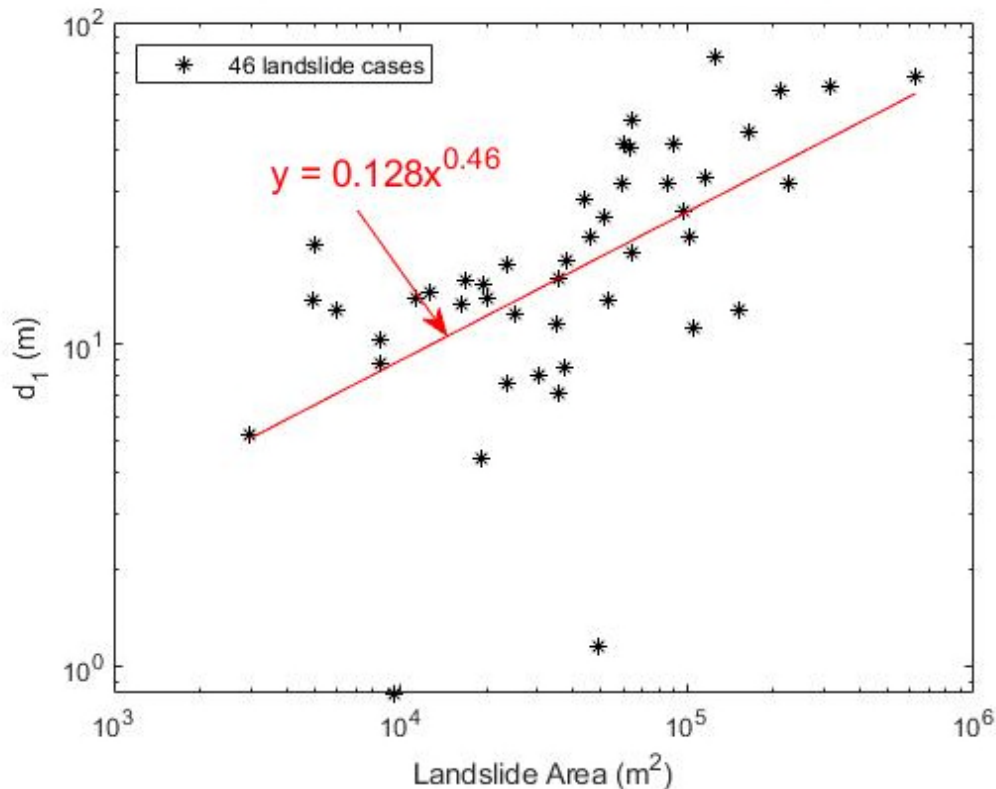


圖 4.42 崩塌面積與長軸深度 d_1 之關係圖

第五章 加值應用現有地下水監測資料以及邊坡安全係數分析

利用水土保持局長期監測多處邊坡地下水水位以及邊坡滑動之資料。透過整合現場地下水位計迴歸建置地下水位分佈，並以地下水水位以下之土壤為全飽和狀態之條件進行估算邊坡安全係數。本章節之邊坡安全係數計算除了考慮有地下水位分佈以外，也將不考慮地下水位分佈狀況下探討邊坡安全係數納入分析討論。

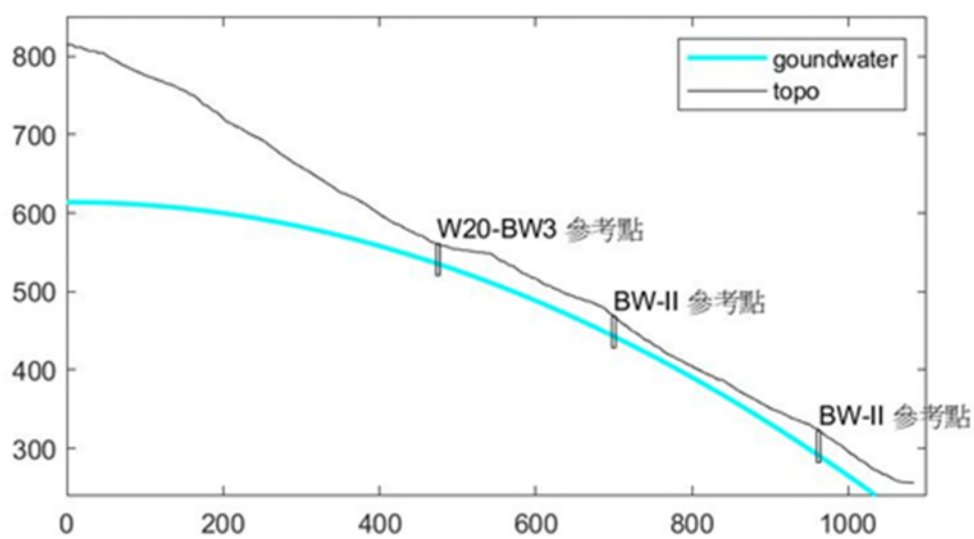
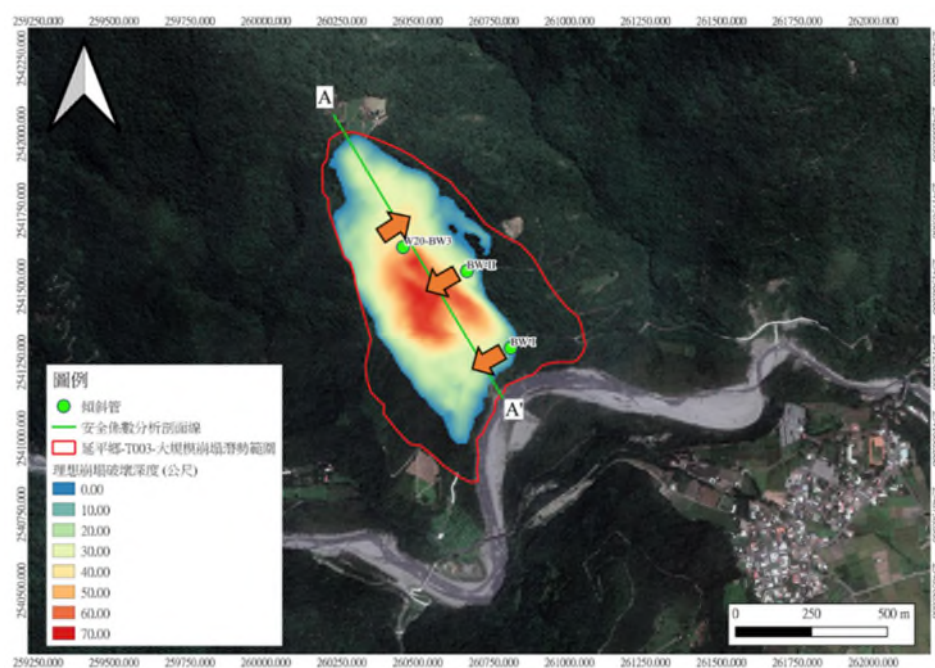
因臺東縣-延平鄉-T003 之情境六以及桃園光華-T002 之情境二與情境三與現地傾斜儀之量測值較為接近，本案邊坡安全係數僅考量此三個情境。現階段本計畫已完成延平鄉 T003 與光華 T002 大規模崩塌潛勢區域之地下水位分佈與邊坡安全係數分析，各相關資料與結果簡述如下：

第一節 臺東縣-延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域

本小節主要工作項目為，應用現有地下水位計所收集之點資料迴歸產生理想曲面主軸剖面之二維分佈地下水位，以下將簡要敘述建置流程：

步驟一：先取得地下水位計之位置(x, y 坐標)和其對應之地形高程，並在剖面線上找尋高程一樣或最靠近之位置，作為地下水位之參考位置與高程，如圖 5.1 所示，橘色箭頭為將地下水位計(螢光綠點)投影至剖面線(螢光綠線)上當作地下水位參考點；

步驟二：如圖 5.2 所示，應用式(2.10)迴歸建置可能地下水位分佈，其中地下水位與參考點之偏差必須控制在 50 cm 以內。



其中 W20-BW3 所量測之地下水位為地表下 26.5 m，迴歸後得知參考點之地下水位為地表下 26.494 m (高了 0.006 m)；BW-I 所量測之地下水位為地表下 26.8 m，迴歸後得知參考點之地下水位高程為 26.333 m (高了 0.467 m)；BW-II 所量測之地下水位為地表下 17.8 m，迴歸後得知參考點之地下水位為地表下 17.784 m (高了 0.016 m)。

延平鄉 T003 情境六

如圖 5.3 所示，其地形與理想崩塌破壞曲面高程來自工作項目一(圖 4.34)，地下水位高程資料來自工作項目二(圖 5.2)，將應用於延平鄉-T003 之情境六含有地下水位之邊坡安全係數分析。

分析邊坡安全係數所採用之土壤內摩擦角為 34° ，透過式(2.13)得到無地下水分佈時之邊坡安全係數為 1.319。若將地下水位高程資料(圖 5.3)納入考量，依(2.14)可得知在考慮地下水分佈時，其邊坡安全係數將降為 1.0436，接近不穩定的狀態。採用完全相同參數與情境下，使用 GeoStudio 模擬在無地下水佈邊坡情況下之安全係數為 1.390；若考慮相同地下水位高程分佈時其邊坡安全係數為 1.048。可發現本案在邊坡安全係數的分析結果，與商用軟體 GeoStudio 相當。

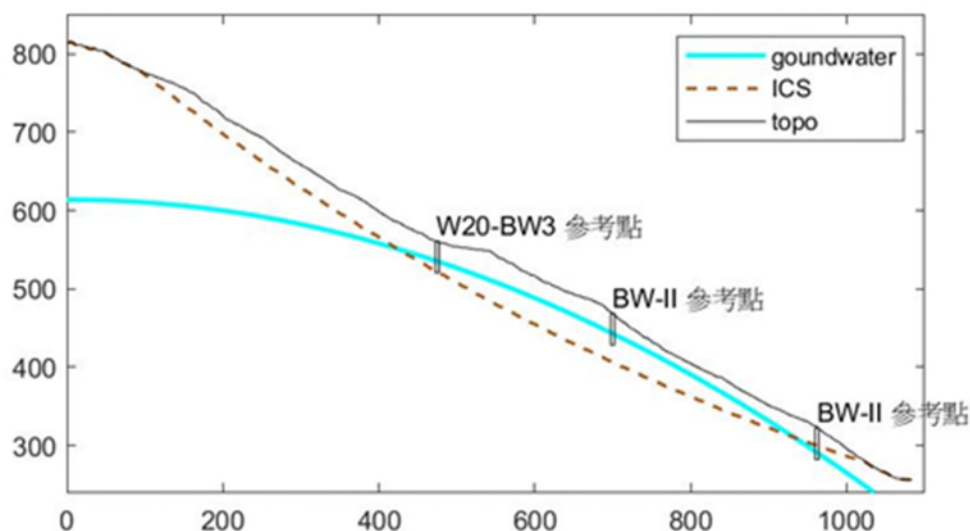


圖 5.3 延平鄉 T003 大規模崩塌邊坡安全係數分析之地形、地下水位與崩塌破壞理想曲面高程剖面圖

圖 5.4 至圖 5.6 彙整工作項目一(理想崩塌量體及理想崩塌延伸曲面)與工作項目二(地下水位分佈)，應用 Matlab 所繪製之三維高程分佈高程立體圖，並標識出具有相互重疊之區域。其中需留意三維地下水位之分佈為利用有限的水位監測資料所建構，與實際現場地下水位分佈會有所誤差。

由圖 5.4 所示，為三種資料(理想崩塌之量體、曲面以及地下水位分佈)之高程立體圖，其中包含了碗狀之理想崩塌延伸曲面高程、黑白網格為估算之理想崩塌量體表面高程與最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位三維曲面。

圖 5.5 所示，為理想崩塌延伸曲面與地下水位重疊立體圖，其中包含了碗狀之理想崩塌延伸曲面高程、最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位分佈，藍色矩形為地下水位高於理想崩塌延伸曲面高程之範圍。

圖 5.6 所示，為理想崩塌量體表面高程與地下水位重疊立體圖，其中包含了黑白網格為估算之理想崩塌量體表面高程、最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位分佈，藍色矩形為地下水位接觸理想崩塌量體表面高程之範圍。

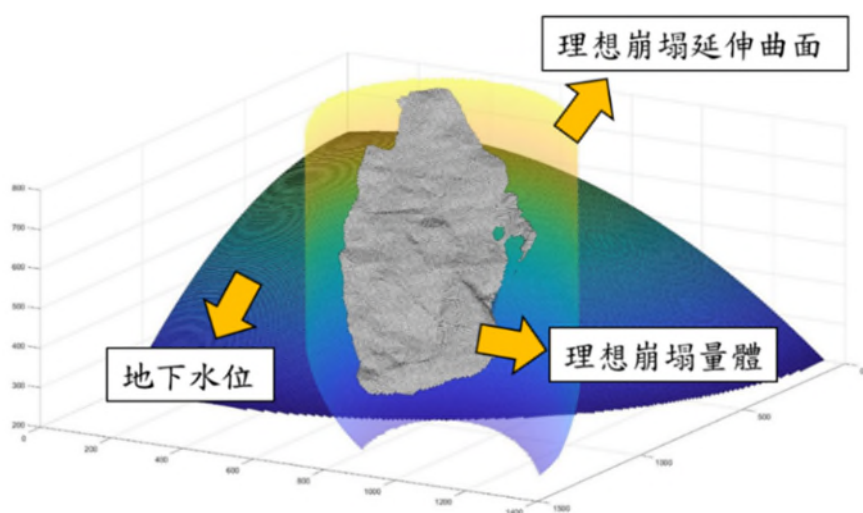


圖 5.4 延平鄉 T003 之崩塌表面、理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖

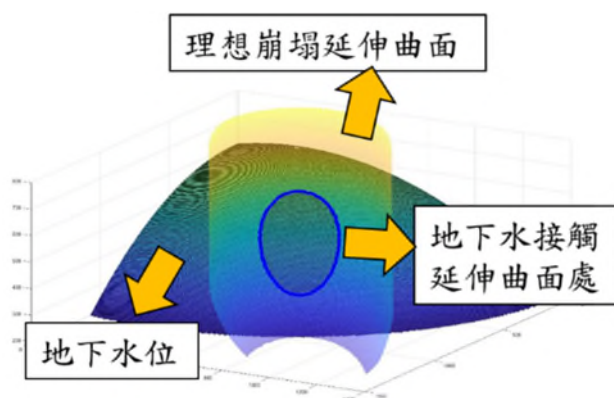


圖 5.5 延平鄉 T003 之理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖

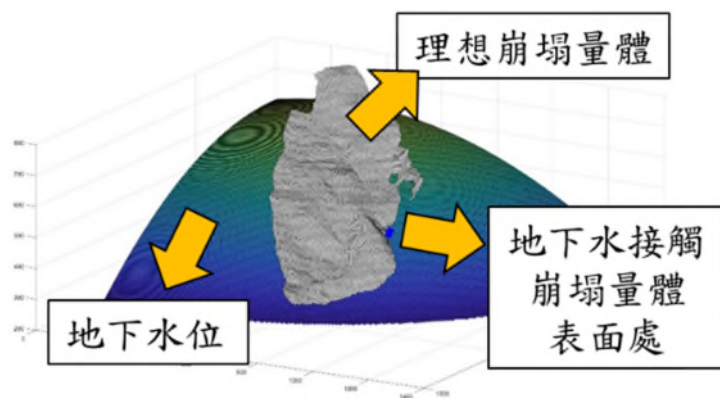


圖 5.6 延平鄉 T003 之崩塌表面與地下水位三維高程圖

第二節 桃園市-復興區-T002 大規模崩塌潛勢區域

水土保持局臺北分局(2020) 考量地下水位之 GeoStudio 分析

針對復興區-光華 T002 大規模崩塌區域，除了參考地下水位計所記錄之地下水位深度(點資料)迴歸地下水位分佈，本計畫也參考水土保持局臺北分局(2020)計畫中應用於 GeoStudio 計算邊坡安全係數之地下水位分佈狀況。圖 5.7 為水土保持局臺北分局(2020)計畫中之地形、破壞面與地下水位分佈圖，其中黃色與綠色區域為 GeoStudio 中設定不同岩層屬性之呈現畫面，最高綠色實線為地表高程，第二條藍色虛線為地下水位高程，在地下水位分佈下方為前期計畫劃設之可能破壞滑動高程線。

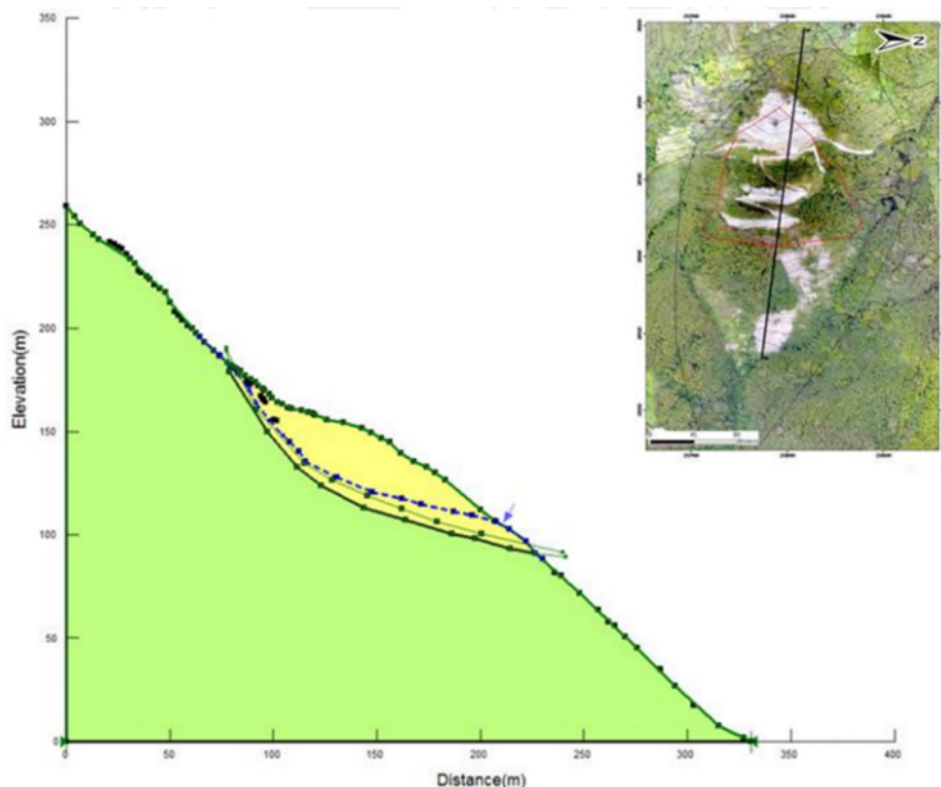
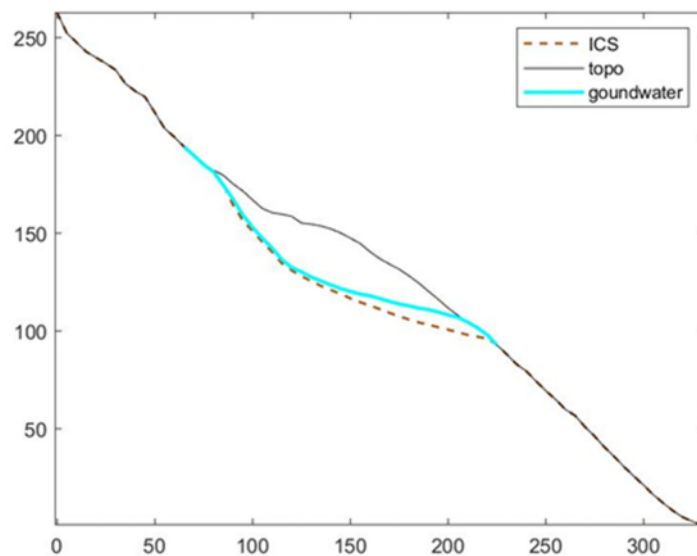


圖 5.7 光華 T002 前期計畫地形、滑動破壞面與地下水位高程圖(圖資料來源：水土保持局臺北分局，2020)

圖 5.8 為本案重新繪製水土保持局臺北分局(2020)計畫報告書中之地形、滑動破壞面與地下水位高程剖面圖，將應用於光華 T002 之含有地下水位之邊坡安全係數計算。

為了測試本案邊坡安全係數分析(2.14)可行性，故引用水土保持局臺北分局(2020)計畫中 GeoStudio 邊坡安全係數分析之土壤參數，包含內摩擦角為 27.7° ，凝聚力為 0 之條件下，與本案邊坡安全係數分析之結果進行比較。

於水土保持局臺北分局(2020)計畫中 GeoStudio 所計算之邊坡安全係數為 0.99，本案情境透過式(2.14)可得知邊坡安全係數為 0.9611，兩者數據非常接近(只差 0.0289)並且都低於 1.0，均顯示在此地下水位分佈的狀況下，該邊坡處於相當不穩定的狀態。若依(2.13)得到不考慮地下水水位分佈之邊坡安全係數為 1.1056，但水土保持局臺北分局(2020)計畫中僅考慮含有地下水分佈邊坡的情境，故無法比較。



本計畫重繪製計畫(水土保持局臺北分局, 2020)之地形、地下水與滑動破壞面之剖面圖

圖 5.8 水土保持局臺北分局 (2020) 計畫之地下水位分佈與光華 T002 情境一崩塌破壞曲面分佈圖

光華 T002 情境二

如圖 5.9 所示，其地形與理想崩塌破壞曲面高程來自工作項目一(圖 4.29)，地下水位高程資料來自工作項目二(圖 5.8)，將應用於光華 T002 之情境二含有地下水位之邊坡安全係數分析。

後續之邊坡安全係數分析將採用土壤內摩擦角為 38° 與凝聚力為 0 之條件下進行情境探討，情境二之地形與理想崩塌破壞高程來自工作項目一(參閱圖 4.30)。因水土保持局臺北分局(2020)計畫所使用之數值地形為發生滑動後至現場進行 UAV 光達掃描繪製之 DEM，而本計畫使用之數值地形資料(DEM)為 2005 年產製之 5 公尺解析度資料，故情境二參考水土保持局臺北分局(2020)計畫中之地下水位分佈形態重新繪製，並進行邊坡安全係數分析。

透過式(2.13)得知無地下水分佈時邊坡安全係數為 1.1014。若整合地下水位高程資料(圖 5.9)，透過式(2.14)可得知有地下水位分佈時之邊坡安全係數為 0.7756。採用相同參數與情境條件下，GeoStudio 模擬無地下水分佈邊坡安全係數為 1.107，若考慮相同地下水位高程分佈之邊坡安全係數為 0.674。針對光華 T002 情境二，無論在無地下水分佈時($FS=1.1364 < 1.25$)，或有考慮地下水位分佈($FS=0.7756 < 1.25$)，顯示此區域應處於極度不穩定的狀態。

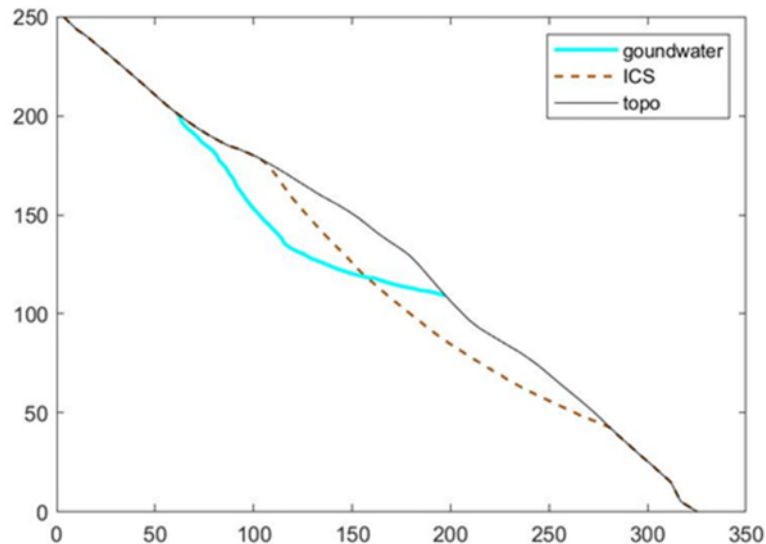


圖 5.9 光華 T002 情境二邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面與地下水位剖面圖

圖 5.10 至圖 5.12 彙整工作項目一(理想崩塌量體及理想崩塌延伸曲面)與工作項目二(地下水位分佈)，應用 Matlab 所繪製之三維高程分佈高程立體圖，並標識出具有相互重疊之區域。其中需留意三維地下水位之分佈為利用有限的水位監測資料所建構，與實際現場地下水位分佈會有所誤差。

圖 5.10 展示三種資料(理想崩塌之量體、曲面以及地下水位分佈)之高程立體圖，其中包含了碗狀之理想崩塌延伸曲面高程、黑白網格為估算之理想崩塌量體表面高程與最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位三維曲面。

如圖 5.11 所示，為理想崩塌延伸曲面與地下水位重疊立體圖，其中包含了碗狀之理想崩塌延伸曲面高程、最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位分佈，藍色矩形為地下水位高於理想崩塌延伸曲面高程之範圍。

圖 5.12 所示，為理想崩塌量體表面高程與地下水位重疊立體圖，其中包含了黑白網格為估算之理想崩塌量體表面高程、最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位分佈，藍色矩形為地下水位接觸

理想崩塌量體表面高程之範圍。

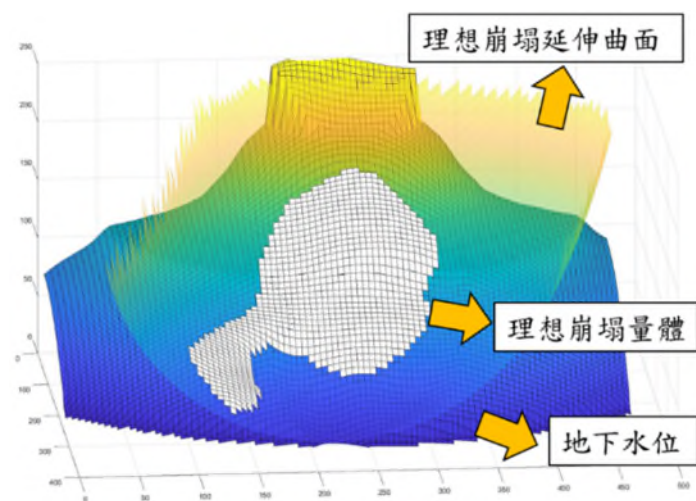


圖 5.10 光華 T002 情境二之崩塌表面、理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖

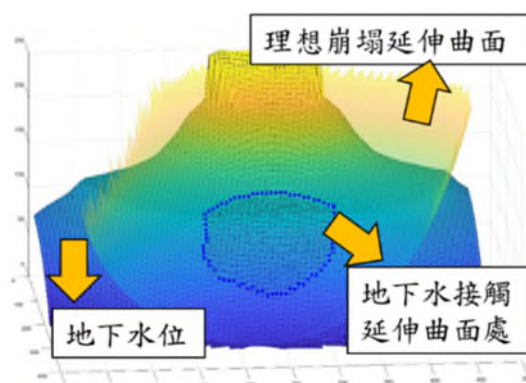


圖 5.11 光華 T002 情境二之理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖

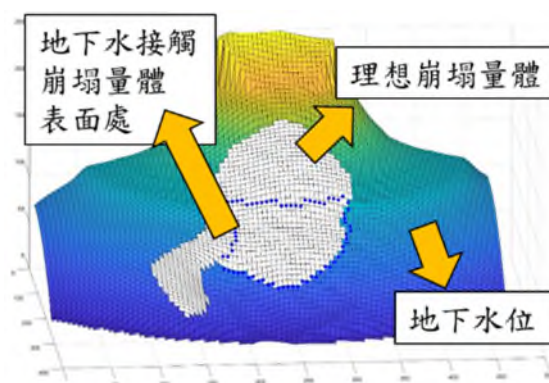


圖 5.12 光華 T002 情境二之崩塌表面與地下水位三維高程圖

光華 T002 情境三

如圖 5.13 所示，光華 T002 情境三之地形與理想崩塌破壞曲面高程來自工作項目一(圖 4.31)，地下水位高程資料來自工作項目二(圖 5.8)，將應用於本情境三含有地下水位之邊坡安全係數分析。

透過式(2.13)得無地下水分佈時邊坡安全係數為 1.1364。若整合地下水位高程資料(圖 5.13)，透過式(2.14)可得有地下水位分佈時之邊坡安全係數為 0.8410。完全相同參數與情境下，GeoStudio 模擬無地下水分佈邊坡安全係數為 1.129，若考慮相同地下水位高程分佈之邊坡安全係數為 0.726。光華 T002 情境三，無論在不考慮地下水分佈時($FS=1.1364 < 1.25$)，或考慮地下水位高程分佈時($FS=0.8410 < 1.25$)，由顯示邊坡安全係數分析得知，此區域應處於極度不穩定的狀態。

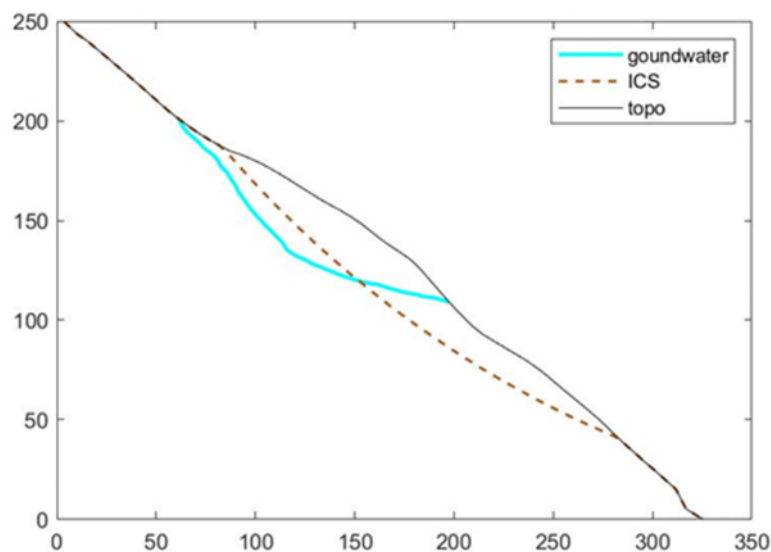


圖 5.13 光華 T002 情境三邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面與地下水位剖面圖

圖 5.14 至圖 5.16 彙整工作項目一(理想崩塌量體及理想崩塌延伸曲面)與工作項目二(地下水位分佈)，應用 Matlab 所繪製之三維高程分佈高程立體圖，並標識出具有相互重疊之區域。其中需留意三維地下水位之分佈為利用有限的水位監測資料所建構，與實際現場地下水位分佈會有所誤差。

由圖 5.14 所示，為三種資料(理想崩塌之量體、曲面以及地下水位分佈)之高程立體圖，其中包含了碗狀之理想崩塌延伸曲面高程、黑白網格為估算之理想崩塌量體表面高程與最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位三維曲面。

圖 5.15 所示，為理想崩塌延伸曲面與地下水位重疊立體圖，其中包含了碗狀之理想崩塌延伸曲面高程、最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位分佈，藍色矩形為地下水位高於理想崩塌延伸曲面高程之範圍。

圖 5.16 所示，為理想崩塌量體表面高程與地下水位重疊立體圖，其中包含了黑白網格為估算之理想崩塌量體表面高程、最底下之藍色往黃色遞增之高程代表地下水位分佈，藍色矩形為地下水位接觸理想崩塌量體表面高程之範圍。

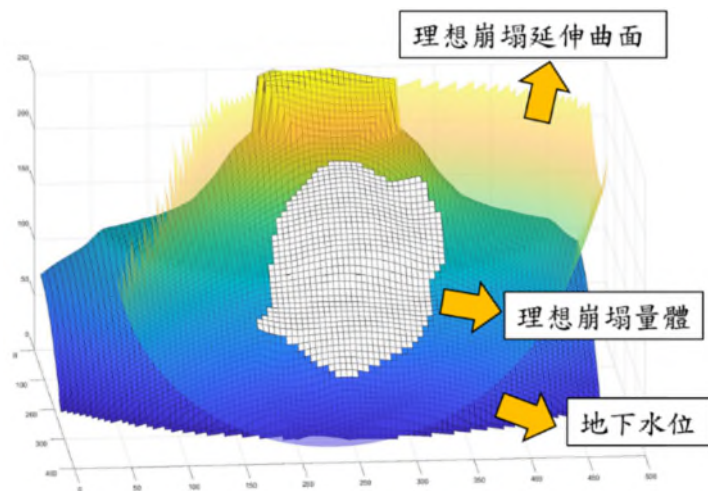


圖 5.14 光華 T002 情境三之崩塌表面、理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖

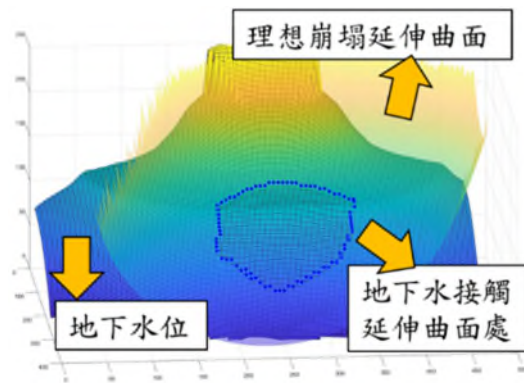


圖 5.15 光華 T002 情境三之理想崩塌延伸曲面與地下水位三維高程圖

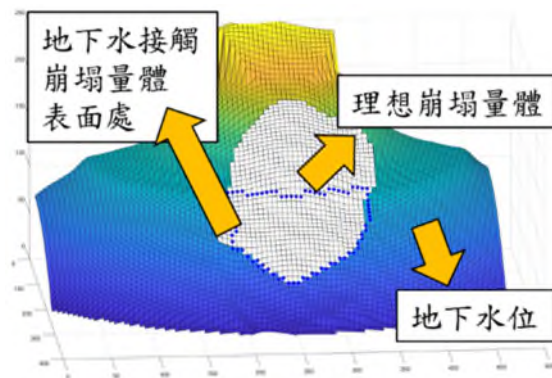


圖 5.16 光華 T002 情境三之崩塌表面與地下水位三維高程圖

參考水土保持局臺北分局(2020)計畫中地下水位計之量測資料

本小節主要工作項目為，應用現有地下水位計所收集之點資料迴歸產生理想曲面主軸剖面之地下水位分佈，以下簡要敘述流程：

步驟一：先取得地下水位計之位置(x, y 坐標)和其對應之地形高程，並在剖面線上找尋高程一樣或最靠近之位置，作為地下水位之參考位置與高程，如圖 5.17 所示，橘色箭頭為將地下水位計(螢光綠點)投影至剖面線(螢光綠線)上當作地下水位參考點；

步驟二：如圖 5.18 所示，應用式(2.10)迴歸建置可能地下水位分佈，其中地下水位與參考點之偏差必須控制在 50 cm 以內。

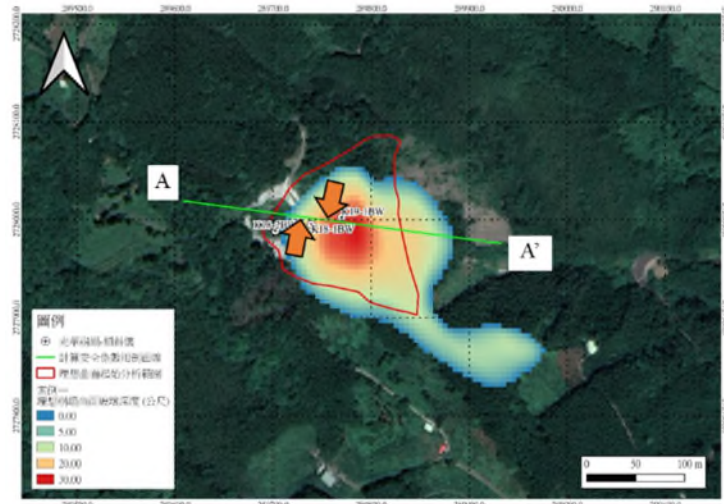


圖 5.17 光華 T002 監測井、地下水位參考點與剖面線位置圖

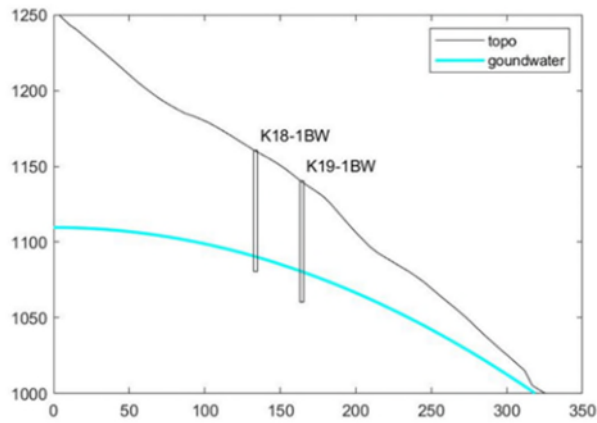


圖 5.18 光華 T002 A-A'剖面線之地下水位分佈高程圖

其中 K18-1BW 所量測之地下水位為地表下 70.0 m，但迴歸後得知參考點之地下水位高程為 69.999 m (低了 0.001 m)；K19-1BW 所量測之地下水位為地表下 59.6 m，但迴歸後得知參考點之地下水位高程為 59.685 m (高了 0.085 m)。

光華 T002 情境二

如圖 5.19 所示，其地形與理想崩塌破壞高程來自工作項目一(圖 4.28)，地下水位高程資料來自工作項目二(圖 5.18)，將應用於光華 T002 之情境二含有地下水位之邊坡安全係數計算。

由圖 5.19 可見，地下水位分佈都沒有高於理想崩塌曲面所估算之崩塌曲面。故此情況下，崩塌破壞曲面之邊坡安全係數不受到地下水影響，只需透過式(2.13)得知無地下水位分佈之邊坡安全係數為 1.1014。採用完全相同參數與情境條件下，GeoStudio 模擬無地下水位分佈之邊坡安全係數為 1.107。

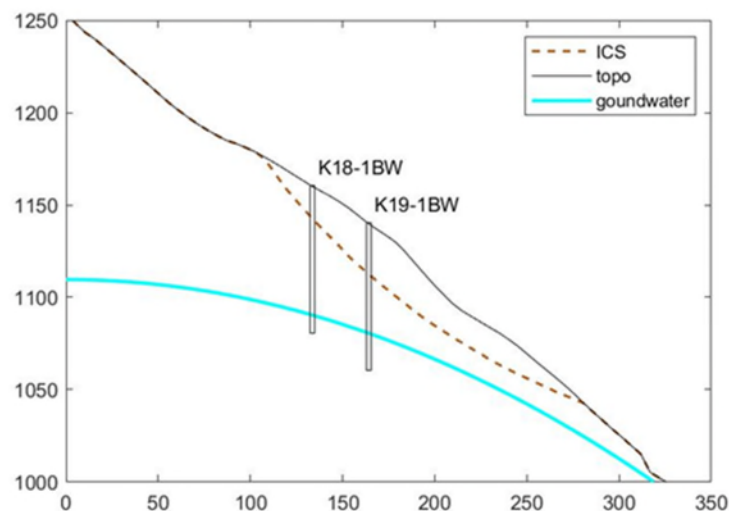


圖 5.19 光華 T002 情境二邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面與地下水位剖面圖

光華 T002 情境三

如圖 5.20 所示，其地形與理想崩塌破壞高程來自工作項目一(圖 4.28)，地下水位高程資料來自工作項目二(圖 5.18)，將應用於光華 T002 之情境三含有地下水位之邊坡安全係數計算。

由圖 5.20 可見，地下水位高程都沒有高於理想崩塌曲面所估算之崩塌破壞面。故此情況下，崩塌破壞面之邊坡安全係數不受到地下水影響，只需透過式(2.13)得到無地下水分佈之邊坡安全係數為 1.1364。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 1.129。

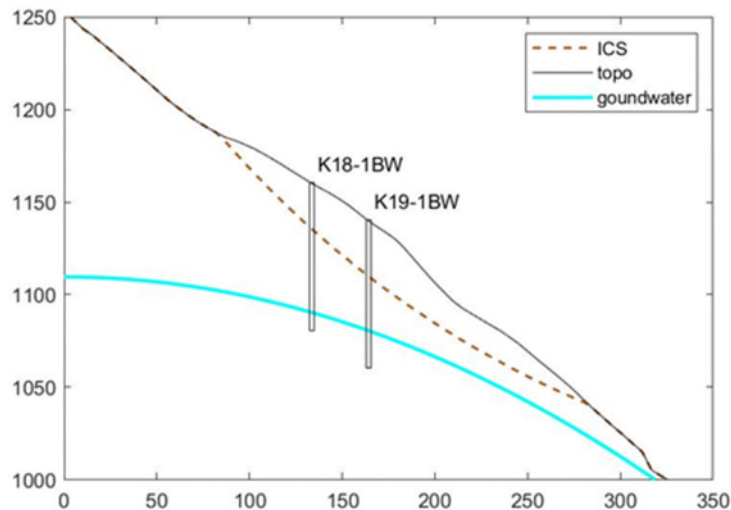


圖 5.20 光華 T002 情境三邊坡安全係數計算之地形、理想崩塌破壞面與地下水位剖面圖

小結

表 5.1 顯示本章節進行邊坡安全係數分析採用之參數、情境與邊坡安全係數分析結果。其中光華 T002 採用水土保持局臺北分局(2020)計畫中所紀錄之地下水位資料，發現地下水位分佈無論在情境二或情境三都低於理想崩塌曲面，故所估算之邊坡安全係數與無地下水位分佈之邊坡安全係數相同。

表 5.1 邊坡安全係數採用之參數與結果一覽表

研究區域	情境	迴歸地下水位分佈基準	是否考量地下水位分佈	採用土壤內摩擦角	本案估算邊坡安全係數	應用 GeoStudio 模擬結果
延平鄉 T003	六	--	✖	34°	1.319	1.390
		地下水位計	✓	34°	0.958	0.959
光華 T002	比較水土保持臺北分局(2020)	採用水土保持局臺北分局(2020)計畫應用於 GeoStudio 分析安全係數之地下水位分佈	✓	27.7°	0.961	0.99(數值來之水土保持臺北分局(2020))
	✖		38°	1.101	1.059	
	✓		38°	0.775	0.701	
	✖		38°	1.136	1.082	
	✓		38°	0.841	0.754	
	二	地下水位計	✓	38°	1.101	1.059
	三	地下水位計	✓	38°	1.136	1.082

表 5.1 邊坡安全係數採用之參數與結果一覽表(續)

研究區域	情境	迴歸地下水位 分佈基準	是否考量地下 水位分佈	採用土壤 內摩擦角	本案估算 邊坡安全係數	應用 GeoStudio 模擬結果
光華 T002	四-a	於 2021 年 01 月發生激烈滑 動後，造成本 區域之地下水 位計受到破壞 而無法量測， 故本情境以不 考慮地下水位 分佈的條件下 進行邊坡安全 係數分析	✕	38°	1.1771	1.167
	四-b		✕	38°	1.1702	1.160
	四-c		✕	38°	1.1775	1.167
	五-a		✕	38°	1.2207	1.217
	五-b		✕	38°	1.1666	1.165
	五-c		✕	38°	1.2178	1.209

第六章 理想崩塌破壞曲面土體之土砂運移行為

依據期中審查意見，應用第四章(工作項目一)中所估算的理想崩塌破壞曲面以及對應的可能崩塌量體，以本團隊開發之 DFMfGT 數值模式進行土砂運移行為之情境模擬，探討桃園市-復興區-光華 T002 大規模崩塌區可能的土砂運移之影響範圍。而由第四章針對光華 T002 大規模崩塌區域之分析可得知，僅情境二與情境三與現地傾斜儀之量測值較為接近，又情境三所估算之崩塌量體較大，因以採情境三所估算的理想崩塌破壞曲面以及對應的可能崩塌量體進行土砂運移行為之情境探討。

第一節 土砂運移行為模擬

桃園市-復興區-光華 T002 大規模崩塌區

數值模式中之各參數以 Tai et al. (2018)模擬小林村崩塌事件所採用之參數為基準，規畫應用 82 組隨機參數，其值的範圍羅列於表 6.1，包含所使用之 DEM 解析度與產製年份、起始濃度以及土砂比重、固體顆粒摩擦角(隨機參數 82 組)、交互作用力係數(隨機參數 82 組)、液相阻尼係數(隨機參數 82 組)、等效粘滯係數(隨機參數 82 組) 等材料參數。

表 6.1 光華 T002 土砂運移行為採用之參數一覽表(括弧內之值為 Tai et al. (2019) 採用之值)

參數	值	參數	值
DEM 解析度	5 m × 5 m	DEM 產製時間	2005 年
交互作用力係數 c_d	3.0~18.0(6.0)	固體顆粒摩擦角 δ (°)	11.0~24.0(16.0)
粘滯係數 N_R	124~824(268)	液相阻尼係數與粘滯係數比 η_b^f / N_R	0.01~0.04 (0.0187)

針對 82 組隨機參數所模擬之土砂運移行為，本計畫以土砂運移的路徑重疊圖之形式呈現。此外，也將土砂運移的路徑區分為流動過程中深度大於 1 cm (圖 6.1 與圖 6.2)的路徑，以及流動過程中土砂深度大於 30 cm 的範圍(圖 6.3 與圖 6.4)分別呈現。圖 6.1 與圖 6.3 分別呈現土砂深度大於 1 cm 與 30 cm 涵蓋的範圍，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 82 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 6.2 與圖 6.4 分別呈現局部接近下游村落保全對象土砂深度大於 1 cm 與 30 cm 涵蓋範圍的放大圖。

由土砂流動深度大於 1 cm (圖 6.2)與大於 30 cm(圖 6.4)流經路徑重疊的局部放大圖可見，光華 T002 大規模崩塌下游處之光華派出所一帶在 82 組隨機參數中，有 1 至 4 組(小於 5%機率) 土砂深度介於 1 至 30 cm 將接觸此區域建物之邊界。

情境二 (土砂流動深度大於 1 cm)

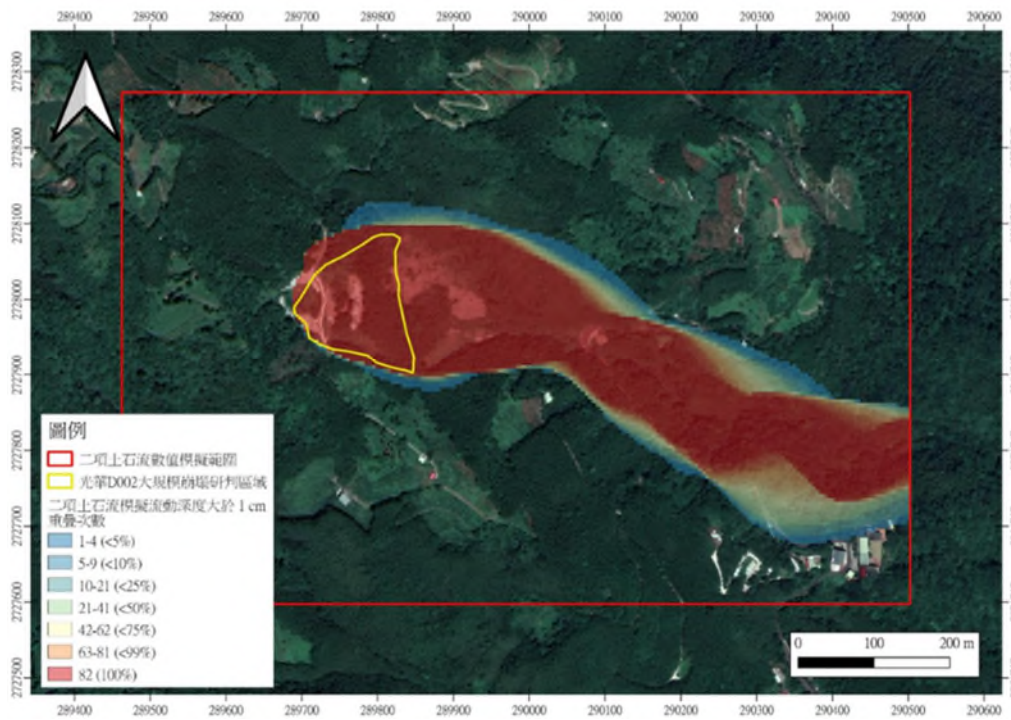


圖 6.1 光華 T002 情境三 82 組隨機參數之土砂流動深度大於 1 公分之路徑重疊圖

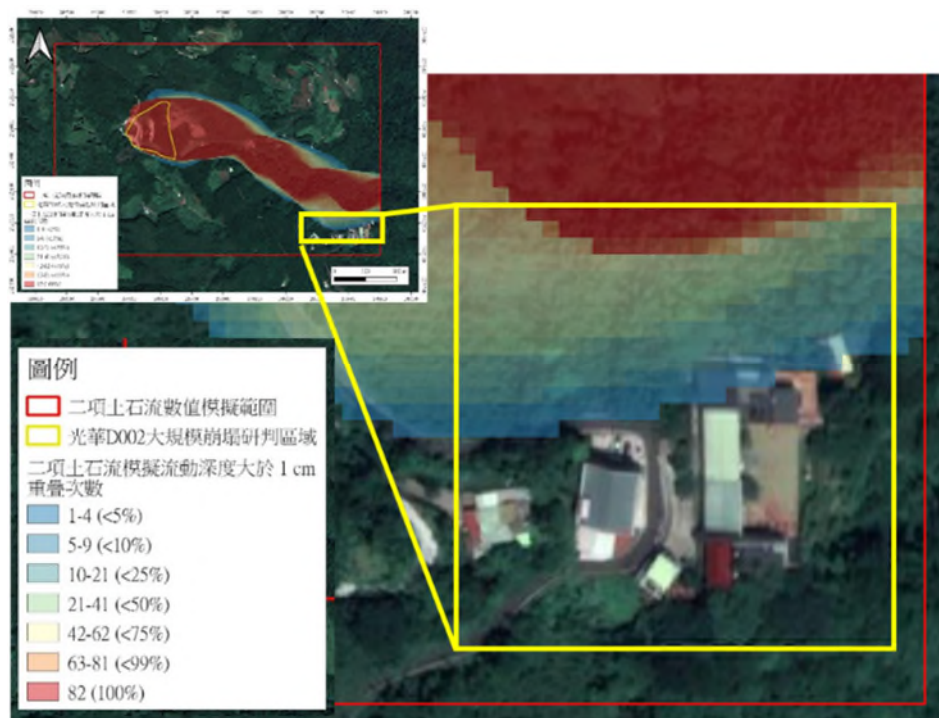


圖 6.2 光華 T002 情境三 82 組隨機參數之土砂流動深度大於 1 公分之路徑重疊局部放大圖

情境二 (土砂流動深度大於 30 cm)

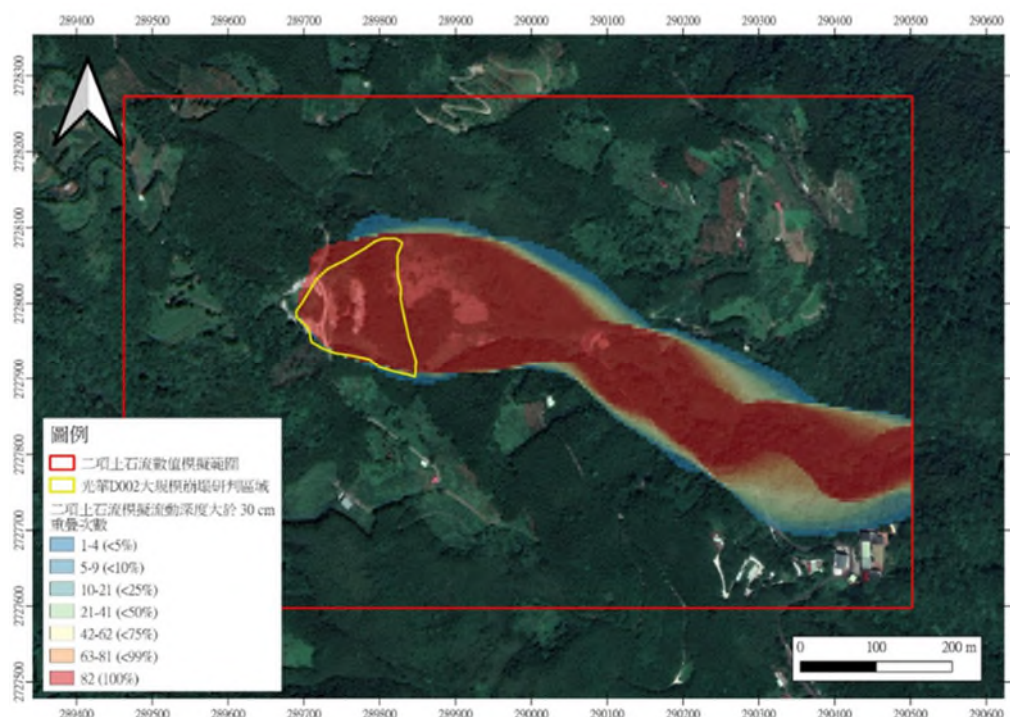


圖 6.3 光華 T002 情境二 82 組隨機參數之土砂流流動深度大於 30 公分之路徑重疊圖



圖 6.4 光華 T002 情境二 82 組隨機參數之土砂流流動深度大於 30 公分之路徑重疊局部放大圖

針對 82 組隨機參數中，其流動路徑最靠近下游建物處之組別可視為可能造成災害之參數組合，其所採用之參數值羅列於表 6.2。其隨時間序列之土砂深度分佈圖可參閱圖 6.5 至圖 6.10。

表 6.2 光華 T002 土砂運移行為最靠近建物採用之參數一覽表

參數	值	參數	值
交互作用力係數 c_D	11.0	固體顆粒摩擦角 δ	22.0
粘滯係數 N_R	740.0	液相阻尼係數 g_b^f	14.8

圖 6.5 至圖 6.10 為上述參數之土砂運移隨時間序列(分別為 0.0 s、10.0 s、25 s、30 s、40 s)之模擬結果，且為流動深度大於 1 cm 之土砂深度分佈圖。由圖 6.6 ($t = 10.0$ s) 所示，崩塌量體開始流入中游段之河道內。時間為 20.0 s 時(圖 6.7)，模擬的土砂前端開始接觸下游建物一帶。當時間為 25.0 s 時(圖 6.8)，為光華 T002 崩塌量體之土砂距離下游建物最靠近之時間點。當時間為 30.0 s 時(圖 6.9)，模擬的土砂開始離開下游建物之時間點。圖 6.10 所示，模擬時間為 40 s 時大部分的土砂均已流經村落，剩下尾端部分，不再對建物有所影響。



圖 6.5 $t = 0.00$ s 時之流體深度分佈圖

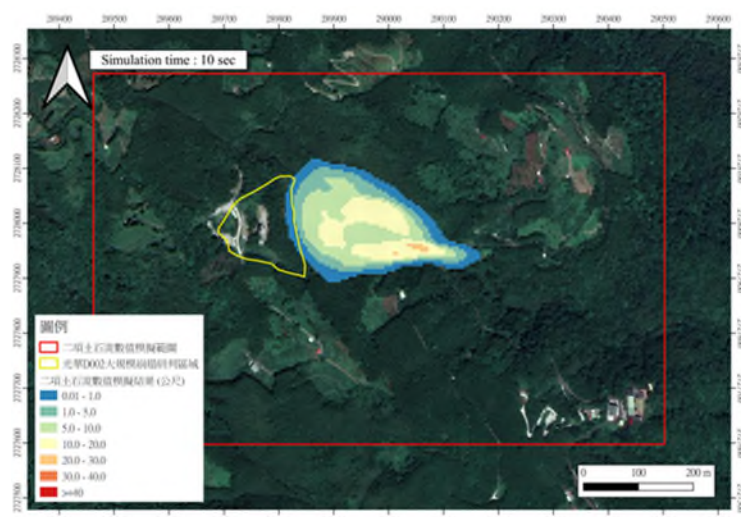


圖 6.6 $t = 10.00$ s 時之流體深度分佈圖

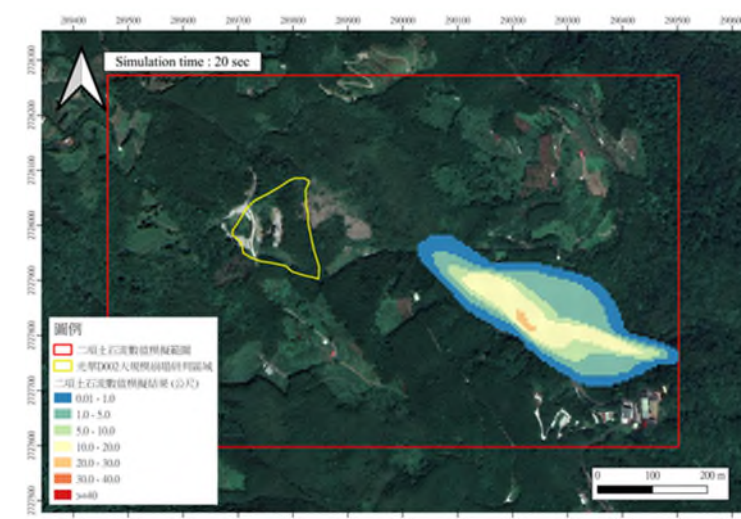


圖 6.7 $t = 20.00$ s 時之流體深度分佈圖



圖 6.8 $t = 25.00$ s 時之流體深度分佈圖



圖 6.9 $t = 30.00$ s 時之流體深度分佈圖



圖 6.10 $t = 40.00$ s 時之流體深度分佈圖

第七章 結論

已依計畫工作執行計畫書擬定之工作預定期程確實執行，現階段已完成工作及內容，簡述如下：

第一節 結論

一、理想崩塌破壞曲面之估算：

- (一)已完成延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域之 5 種情境(依據大規模崩塌潛勢區域及滑動塊體)與 4 種理想崩塌破壞曲面建置方法，共 20 種情景探討理想崩塌破壞曲面建置方法適用性。
- (二)回應期中審查委員意見，解決斜儀有量測到滑動深度位置但理想崩塌破壞曲面可能無法推估之問題。透過參考橢圓法，(本團隊於期末報告書初稿中新增情境六解決此問題)，依據水土保持局臺東分局(2020) 報告書中所記錄之地形特徵(崩崖位置)，重新規劃理想崩塌破壞曲面分析的範圍，可建構接近傾斜儀量測之滑動深度之理想崩塌破壞曲面(請參閱第四章台東-延平鄉 T003 之情境六)。
- (三)完成復興區-光華 T002 大規模崩塌之 9 種情境(參考崩塌量體差異)之探討，其中情境二與情境三所建構之理想崩塌破壞曲面深度可與現場傾斜儀紀錄之滑動破壞深度相近。其中情境二與三在經過後處理產製剖面資料供後續邊坡穩定性安全係數分析使用(工作項目三)。
- (四)針對上述以建立之理想崩塌破壞曲面，建置 9 處(台東-延平鄉 T003 之情境六以及復興區-光華 T002 之情境二、情境三、情境四-a、情境四-b、情境四-c、情境五-a、情境五

-b 與情境五-c)地形與理想崩塌破壞曲面之剖面資料，供後續邊坡穩定性安全係數分析使用(工作項目三)。

二、 加值應用現有地下水監測資料:

- (一)完成匯整延平鄉-T003 大規模崩塌潛勢區域內之 2 處水位監測與復興區-光華 T002 大規模崩塌潛勢區域內之 2 處地下水位計資料。並迴歸建置該區域地下水位高程分佈資料，包含 1 筆延平鄉-T003 與 1 筆復興區-光華 T002。
- (二)參酌水土保持局臺北分局(2020) 之計畫於復興區-光華 T002 大規模崩塌應用 Geostudio 計算邊坡安全係數之地下水位高程剖面資料，並與上述建構之水位高程分佈資料比較，作為穩定性分析之依據。
- (三)已完成建置穩定性分析所需之地下水位高程剖面資料，供後續分析(工作項目三)使用。

三、 理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析:

- (一)以本計畫所建構之理想崩塌曲面分析其對應之邊坡安全係數，並與 GeoStudio 估算之結果比較。
- (二)完成延平鄉-T003 之情境六、復興區-光華 T002 之情境二與情境三之邊坡安全係數，包含在無地下水分佈時之狀態以及考慮及含有地下水分佈之影響。
- (三)因 2021 年 3 月與 8 月時復興區-光華 T002 使用 UAV 產製數值地形期間，此區域之地下水位計被破壞而無法量測，故情境四與情境五之進行無下水位之邊坡安全係數分析。
- (四)本計畫之兩處大規模崩塌區域之在不考慮地下水分佈時之邊坡安全係數都大於 1.0，但若將地下水位分佈列入考量時，

其邊坡安全係數都同時小於 1.0，呈現不穩定的狀態。此成果與現有採用 GeoStudio 模式之估算成果一致。

上述為本計畫於繳交期末報告書初稿時完成之各項工作項目與後期預定執行之工作項目，實際工作進度日後亦可配合主辦單位機關需求，適當調整；本案研擬之預定各工作項目之執行期程與各期報告書提交時間如表 7.1 所示；

表 7.1 本計畫之工作進度與完成度

工作項目	時間	110年											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
一、理想崩塌破壞曲面之估算													
二、加值應用現有地下水監測資料													
三、理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析													
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10年01月27日至110年12月31日止 ➤ 期初簡報時須完成工作：(一)理想破壞曲面、崩塌範圍及深度與地下水分布整合之對策；(二)理想破壞曲面評估方法與邊坡安全係數整合之對策； ➤ 期中簡報時需完成工作：(一)理想破壞曲面、崩塌範圍及深度與地下水分布整合之初步成果；(二)所估算之崩塌土體與土石流土體動態數值模式(DFmGT)之初步成果探討； ➤ 期末報告時需完成所有工作。(期末報告至契約完成期間，如委託機關發現問題稱需協助修正)													

參考文獻

1. 行政院農委會水土保持局，104 萬山潛在大規模崩塌地區監測系統維運與擴充計畫，2015。
2. 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。
3. 行政院農委會水土保持局，107 年度萬山、寶山、來義等八處大規模崩塌地區監測計畫，2018。
4. 行政院農業委員會水土保持局，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，2018。
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-107- 267)，智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為，2018。
6. 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。
7. 行政院農業委員會水土保持局臺北分局，109 年度雪霧鬧及光華地區潛在大規模崩塌調查監測計畫，2020。
8. 行政院農業委員會水土保持局臺東分局，109 年臺東縣大規模崩塌地區監測維運計畫，2020。
9. 行政院農業委員會全球資訊網 (<https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=2503956&print=Y>)。
10. 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。
11. 李坤錠，以理想曲面評估滑動崩塌破壞曲面之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，2019。

12. 柯奇均、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 日至 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. 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.
20. 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.
21. 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.

22. 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.
23. 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." *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 106(6), 596–629, 2012.
24. 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.
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. F. E. Taylor, B. D. Malamud, A. Witt, and F. Guzzetti, 「 Landslide shape, ellipticity and length-to-width ratios. 」 *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(15), 3164-3189, 2018.
27. W. Viessman, and G.L. Lewis, 「 Introduction to hydrology. 」 Harper Collins., 1995.

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，本計畫請於補助經費 743,000 元內調整編列。	補助經費已修正為 743,000 元。
2.執行期限修正為 110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日(11.1 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 11.1 個月編列。年終獎金亦配合計畫期限比例調整	執行期限已修正為自 110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日(11.1 個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，依計畫執行期限 11.1 個月內編列。(PS 無年終獎金編列)
3.為利未來業務應用及呈現本計畫效益，請評估、查填其他政策效益或不可量化效益。	已填列其他政策效益或不可量化效益。
4.六(五)重要工作項目請補填「實施地點」。	已補列六（五）重要工作項目「實施地點」。
5.「計畫兼任助理人員」，以 2 人為限；不補助(不編列)博士後研究人員薪俸。	「計畫兼任助理人員」，僅編列 2 人；且未編列博士後研究人員。
6.「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%。	「按日按件計資酬金」已低於業務費 35%。
7.「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。	「26-10 雜支」：各階段報告書(彩色印刷)提交數量已依規定編列(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。)

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.前期整合 QGIS 與數值模型，開發降雨逕流模式，提供運用再坡地崩塌及土砂運移之模擬，具創新性。	感謝委員肯定。
2.本年度擬針對不同地形地貌與地下水分佈評估邊坡穩定及可能崩塌量體之方法，亦具創新性。惟其研究結果之驗證不易，則本研究不足之處，能否以室內模型實驗驗證之，宜加以斟酌。	感謝委員意見。理想曲面之應用已於 SCI 期刊接受發表(Tai et al. 2020, Frontiers in Earth Science)，本案為其後續考量地下水影響之發展應用。另一方面，本計畫擬建立的崩塌破壞曲面及量體之估算方法不求非常精確，但是需能夠簡單迅速提供合理的可能崩塌破壞曲面所在以及其崩塌量體。鑒於計畫經費之限制以及現地與實驗尺度效應之差異，本案將暫時不進行室內模型實驗，但將參考相關文獻實驗數據或是現地情境資料進行驗證探討。
3.本研究探討大規模崩塌與地形及地下水分佈的關聯性，命題正確，值得投入研究。	感謝委員肯定。
4.惟計畫書內宜再加強才能評估計畫是否可行。	感謝委員意見。理想曲面之應用已於 SCI 期刊接受發表(Tai et al. 2020)，本案為其後續考量地下水影響之發展應用。也將於期初工作執行計畫書中再加強。
5.在現場資料有限之情形下，本研究有助於快速評估崩塌可能之範圍。	感謝委員肯定。
6.在地下水水位資料欠缺之情形下，可有其他替代方式，作為評估之參考？	感謝委員意見。本案之主要目的在於發展初步快速評估邊坡穩定性及可能崩塌量體之方法。輔助監測與預警系統不足之處，尤其在缺乏充足現地資料的前提下，

	仍可進行評估。在地下水水位資料欠缺之情形下，本計畫將假設各式可能的地下水位分佈狀況進行分析探討。必要時，透過實際情境的探討來回溯崩塌破壞時可能的水位分佈狀態。
7.本研究因應本主題所開發之軟體，可否無償提供水保局、分局相關應用？	本研究將以本團隊累積多年已研發完成之軟體技術為基礎，建構因應本研究課題所需之擴充工具。本團隊也樂意於計畫結束後提供相關執行檔供水保局、分局進行相關測試應用。

附錄二 工作執行計畫書審查意見暨回覆辦理情形

工作執行計畫書審查意見回復情況

審查意見	回覆辦理情形
1. 圖 2-6 中，地下水之下游點 ($r=0$)之位置，如何決定？是否有現地情境可供驗證此假設 (或 2-10)之合理性？	感謝委員意見。圖 2-6 為本研究對於地下水分佈設計的示意圖，實際的分佈將以地下水水位監測記錄為基準。
2. 如圖 2-8，地下水在 $x=60-90$ m 處已達地面，此區域之滲流應最強，故理想破壞曲面在考慮地下水時應修正，即地下水位與破壞面之關聯性應進一步分析。	感謝委員意見。此圖為示意圖，現階段尚未考慮滲流力應之影響，若地下水達地面將會留意滲流力應之影響。(圖 2-8 已稍作修正以避免誤解)
3. 小林村崩塌應為順向坡滑動，滑動面為不同土層界面與理想破壞曲面是否相合？請補充說明。	感謝委員意見。因本計畫採用之方法主要在缺乏參考資料的條件下，透過現有的數值地形模型 (DEM)或某位置之(前期/可能)地下水位的情況，進行初步估算可能的崩塌量體。主要因為地質分佈條件之現場調查需要花費大量的經費，希望可以在資料缺乏的條件下，先行評估，讓有限的經費能夠有效規劃運用。
4. 建議考慮以桃園復興區光華潛勢區為本計畫理想崩塌破壞曲面下之邊坡穩定分析。	感謝委員提醒。因現地調查資料得來不易，本團隊已於 06 月 11 日與承辦單位洽詢並取得初步的傾斜儀與地下水水位資料 (匯整於第 5 章第 2 節)。
5. 執行團隊於 107 年及 108 年應用理想曲面的方法判釋崩塌潛勢區域，結果因為未將地質坡向、地質條件或地質走向納入 (如 P. 2-2)，轉而探討不同地下水分佈下邊坡安全係數之變化，可以去嘗試。然而 P2-10 又導入更多的假設，理想化的地下水分佈，而分析的方法以	感謝委員意見。考量台灣將近 9,848 個大規模崩塌潛勢區域，政府經費有限無法逐一進行現調。本計畫採用之方法主要是在缺乏現地資料的條件下仍可進行估算。理想化的地下水分佈，也是在沒有資料或是資訊有限的前提下進行的情境假設。若有充足地現地資料(地質坡向、地質條

審查意見	回覆辦理情形
傳統的土壤力學方式去推動，是否偏離大規模崩塌之現場的狀況？宜再評估。	件或地下水位監測資料)，則可採用現行許多的邊坡穩定分析軟體。
6. 建議可考慮選擇大規模崩塌之現場數處，搭配監測中的地下水位數據，以利未來研究之進行。	感謝委員意見。這正是本案進行的核心工作之一，本團隊也將與承辦單位保持聯繫以取得相關資料。
7. 本計畫延續已開發之理想曲面法，搭配數值高程模型資料，透過地形特徵判釋可能的崩塌範圍，再整合地下水位、傾斜儀、GPS 地表位移等資訊，探討其對於崩塌破壞深度與量體之影響。立意良好，也頗有創意。	感謝委員肯定。
8. 謹提出幾點建議：目前規劃了八個步驟，最後以三維互動式網頁的方式呈現結果。但其實都已經使用了實際的地形和各種監測資料，實在是可以再加上一個「驗證」的步驟，選取該地區過去實際的事件，將模式模擬發生崩塌的區域，和該事件實際發生崩塌的區域相比較，做為驗證，可以增加本計畫說服力。	感謝委員意見。若能順利取得災前災後的數值地形以及正射影像，將可進行「驗證」的步驟，感謝建議。
9. 另一種驗證的方式是透過與其他模型在同一地區模擬的成果互相比較。水保局 BigGIS 已經建置了一個簡單的土石流動態模型，可以讓使用者自由選取材料區和集水區範圍，直接在 BigGIS 上模擬運算，並展	感謝委員意見。本團隊於 06 月 11 日與聯繫 BigGIS 開發承辦人員，因目前 BigGIS 土石流簡易動態模型為 110 年度執行中的計畫，尚未開放至 BigGIS 系統上，後續本團隊還是會與

審查意見	回覆辦理情形
示動態的成果，雖然該模式做了許多簡化和假設，但仍不失為本計畫比較的另一個資料來源。	BigGIS 開發承辦人員保持聯繫了解模式的開發狀況。
10. 請思考本計畫成果未來是否也可以在 BigGIS 上，讓使用者自由選取材料區和集水區範圍，給定相關參數後，直接在 BigGIS 上模擬運算，並展示動態的成果？	感謝委員意見。本團隊樂意於計畫結束後提供相關執行檔與 BigGIS 開發團隊共同進行相關測試應用。
11. 本研究關鍵在於理想崩塌破壞面之估算，其中又以 d(深度)是最關鍵的估算，如何決定 d 值，建議可以由式 2.8，式 2.9 回推最佳 d 的關聯式。	感謝委員意見。正如委員所述，本案所採用之方法，其深度 d 是由(2.8)或是(2.9)透過遞迴方式決定。
12. 文中有多處「高層」，誤植為「高程」，請更正。	感謝委員提醒，已於期中報告書修正。
13. 從圖 2.11~2.14 未能容易理解「理想崩塌破壞曲面」為何？而且該曲面應該不會隨着時間變動？	感謝委員意見。圖 2.11~2.14 為土沙運移行為之模擬結果，而非破壞曲面，很抱歉說明不夠清楚，造成誤解，已作修正(見第 2 章第 4 節)。
14. 「理想崩塌破壞曲面」基本假設為均質材料分佈，建議相關分析情境多採用符合基本假設的條件。有關岩體節理、順向坡等非均質分佈材料，現階段應避免擴大解釋。	感謝委員提醒。本團隊提出之理想崩塌破壞曲面主要目的為資料缺乏的條件下，快速評估判識可能的崩塌量體。如同委員所述，是在假設為均質材料分佈前提下進行。若已有足夠的相關現地地質調查成果，即可應用現有軟體如 GeoStudio、FLAC3D 等進行分層細部模擬。
15. P2-12 理想破壞曲面法所得者為三維曲面，但邊坡穩定分析使用二維切片法，二者如何整合，請補充說明。	感謝委員提醒，本案所採用之理想曲面在主軸與側向軸方向曲率為定值，相當適合以力矩進行穩定性分析。二維切片沿主軸方

審查意見	回覆辦理情形
	向，與側向軸方向分析結果可以以向量相加之方式完成。另外，依據 Briaud (2013) 所述，三維穩定性分析之安全係數往往較二維分析之安全係數大一些。因此，可考慮各個不同的二維切片，取其最小安全係數做為參考基準。
16. 前期計畫之理想破壞曲面法係以地表地形特徵來預估可能之崩塌深度及滑動面，一旦地表地形資料確認後，理想破壞曲面即已確定；但本期計畫如以切片法來找出最小 FS 者作為可能崩塌之理想破壞曲面，二者基本假設已完全不同，是否仍有關聯性？	感謝委員提醒，委員之考量非常合理且可能發生。依據現階段分析的經驗，此情況最可能發生在階段性(或稱為序列式 sequential)破壞的情形，也是後續理想破壞曲面法未來將繼續拓展的方向。
17. 承上，如以切片法(極限平衡法)計算 FS 時，必須先決定滑動面，本研究如何選定不同滑動面以測試不同之 FS？	感謝委員提醒，理想破壞曲面法正好可提供計算 FS 的破壞面依據。因為在理想破壞曲面法中，不同的破壞面對應不同的深度與量體，可以體積面積法的公式(如 (2.8)式)容許一定的偏差量來決定不同的滑動面。
18. 承上，本研究以切片法找出最小 FS 者作為可能崩塌之理想破壞曲面，是否已考慮土岩介面或是弱面等地質因素？	感謝委員提醒，本研究所使用的切片法主要假設為均質材料進行安全係數的分析，尚未考慮土岩介面或是弱面等地質因素。

附錄 三 期中報告書審查意見暨回覆辦理情形

期中報告書審查意見回復情況

審查意見	回覆辦理情形
1. 由台東延平鄉 T003 實例中，有三處監測井，如何驗證本模式地下水(式 2-10)之可行性，請補充說明。	感謝委員提醒。由於第三處監測井(W20-BW3)尚未監測到破壞面深度，因此並未列入建構理想崩塌曲面之考量條件。然而，監測井(W20-BW3)之水位紀錄將有助於式(2.10)之地下水位分布之估算，已列入考量(可參閱圖 5.2)。
2. 請補充延平鄉崩塌地之滑動面及與模擬破壞之剖面。	感謝委員提醒。已於期末報告書第四章第 2 節中補充延平鄉 T003 所估算崩塌範圍與剖面線位置圖(圖 4.26)以及其剖面(圖 4.27)。
3. 請補充說明表 5-1 中理想破壞面無法推估破壞深度(NAN)各情境之原因，以及如何改善之方法。	感謝委員提醒。NAN 為 n/a 之誤植，代表該處不在理想破壞曲面所估算的崩塌範圍內，無數據可供比較。
4. 圖 6.6 中地下水分佈中，參考點(BW-II、BW-I)並非(式 2-10)之參考點位置(即 $r=0$ 、 $w=w_0$)，而是 A 點，請檢核並加以說明。	感謝委員指正。(2-10)為地下水位分佈之迴歸式，其描述之水位與參考點之地下水位高程容許偏差為正負 50 公分。
5. 土石流動態模擬應列出不同時間之運移範圍，以供防災參考。	感謝委員提醒。已於期末報告書初稿第六章第 1 節補充光華 T002 情境三之 6 個不同時間點之土砂流動深度圖，參閱圖 6.5 至 6.10。
6. 有關光華大規模崩塌研究區，本局於 110 年 3 月已進行 1 次 UAV 光達掃描，預計 8 月份再進行一次 UAV 光達掃描。產製 DEM 可提供本計劃分析、研究。	感謝委員建議。本團隊已於 110 年 11 月 2 日取得 UAV 光達掃描產製之 DEM 資料。因時間不足部分資料先以 2005 年之 DEM 進行分析。針對新的分析成果將於後續補充說明。
7. 有關光華大規模崩塌，目前檢測的滑動範圍，除了上半	感謝委員建議。已將光華大規模崩塌之下半段納入考量(請參閱

審查意見	回覆辦理情形
段(頭部)外，下半段亦同時滑動，分析時建議予以考量。	期末報告書之第四章第 1 節與第五章第 2 節)。
8. 因光華大規模崩塌，今年已滑動超過 10 公尺，若發生大規模崩塌災害，影響部落進出交通甚巨，目前地方機關及中央防災單位持續關注。建議本區模擬成果(崩塌量體、影響範圍等)，先提供本局防災中心參考，俾納入相關防災應變行為。	感謝委員提醒，本團隊於 110 年 10 月 27 日將光華 T002 大規模崩塌之理想崩塌曲面估算之崩塌量體，應用 DFMfGT 土砂運移數值模式，以 82 組隨機參數探討土砂運移行為，整合一路徑重疊圖(圖 6.1 至圖 6.4)供承辦單位參考。
9. 有關理想崩塌破壞面估算大規模崩塌之方式，建議可整合至 BigGIS 平台，建置為線上分析功能。	感謝委員意見。本案理想崩塌破壞面估算方式，在經過此計畫之精進後已日趨成熟，非常樂意於適當時機與 BigGIS 平台開發團隊討論整合事宜。
10. 第五章之情境，建議增加其二維地下水分佈圖。	感謝委員提醒，本團隊已於期末報告書第五章第 1 節與第 2 節，增列延平鄉-T003(圖 5.2)與光華 T002(圖 5.8 與圖 5.19)之地下水位分佈圖。

附錄 四 期末報告書審查意見暨回覆辦理情形

期末報告書審查意見回復情況

審查意見	回覆辦理情形
1. 本計畫研發深層地滑面積以理想曲面推估滑動深度，成果優良。成果是否可進一步綜整成面積與深度關係式。	感謝委員建議。已依建議分析歸納面積與深度之關係，請參閱第四章圖 4.42 與式(4.1)，其中一共迴歸 46 筆透過理想崩塌曲面分析之可能崩塌面積與長軸深度 d_1 之關係圖與關係式。
2. 崩塌體積可以採 uav 航拍立製或者以近景攝影測量，或影像陰影法較為精確的推估。提高破壞模式評估的準確性。	感謝委員建議，未來將納入分析理想崩塌曲面分析範圍劃設之考慮基準。
3. 計畫成果可參考。	感謝委員肯定。
4. 理想破壞曲面是否受崩塌類型影響其所推估之崩塌量體？	感謝委員意見。理想曲面法之基本假設為均勻土體搭以及滑動式崩塌，因此採用配圓弧型破壞形式。對於不同之崩塌類型將影響所推估之崩塌量體。