計畫編號：**SWCB-108-235**

智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為之精進研究

Advanced study on the algorithm for plausibly estimating the amount of landslide mass and its traveling path

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：108 年 02 月 20 日至 108 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：戴義欽 副教授

共同主持人 ：詹錢登 特聘教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 108 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）

智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為之精進研究

摘要

本計畫規劃精進以理想曲面來初步評估「滑動型 sliding type」崩塌破壞曲面的方法，承襲前期所獲致破壞曲面幾何關聯性的成果，透過近年發展之高精度數位地形資料所判識的崩塌範圍以及所估算之崩塌深度便可決定其對應的理想破壞曲面，可大幅簡化估算崩塌曲面的複雜度。本計畫針對如何有效率估算可能崩塌深度的方法進行探討，以解決崩塌潛勢區域現地監控資料對於(滑動型)崩塌破壞的曲面以及量體不易即時估算之侷限，並作為後續數值模擬情境探討的依據。本計畫也針對現有案例檢討應用所發展之方法可能造成誤差之成因，透過分析選定之區內現有坡面崩塌破壞曲面幾何特性，藉以提昇並確保其與崩塌破壞曲面技術所需參數間之關連性。此外，透過網頁技術發展三維可視化圖形展示平台，以網頁模式在網頁瀏覽器(如 Chrome)上以立體多視角的方式呈現運算成果，使用者可直接檢視上述工作項目所估算的理想破壞曲面，探討不同規模可能發生的情境模擬成果。

關鍵詞：崩塌破壞曲面、土沙運移行為、情境模擬、三維圖形展示

Advanced study on the algorithm for plausibly estimating the amount of landslide mass and its traveling

Abstract

In the present project we developed an advanced algorithm of constructing a smooth curved surface for mimicking the surface of slope failure of sliding type, so that one can plausibly estimate the flow paths. With the achievement of the previous project, the geometrical relationship enables the construction of the idealized curved failure surface by a given failure depth, when the area of the failure is given. One of the goals of the present project is the improvement of the algorithm of estimating the failure surface (for the slope failure of slide type) for improving the process by assessing the amount of moving mass at the potential area of slope failure. More efforts would be focused on the cases, in which large deviations are identified. The plausible failure surfaces can be estimated regarding variant scenarios. With the employment of the numerical model (Debris Flow Model for General Topography, DFMfGT), the consequent flow paths are simulated for estimating the impact area. All the result would be able to be displayed in the form of animated 3D computer graphics in a web browser (such as Chrome) through internet or WiFi, so that it could serve as a remote investigating tool for hazard management/ assessment at the first moment.

Keywords: Slope failure surface, sediment transport, scenario simulation, 3D graphical display

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　前期成果 1-2

第三節　計畫工作項目 1-6

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 2-2

第二節　精進快速初步評估崩塌破壞曲面之技術 2-4

第三節　理想討崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討 2-11

第四節　三維可視化圖形多視角立體呈現成果 2-13

第三章　精進快速初步評估崩塌破壞曲面之技術 **3-1**

第一節　潛勢崩塌範圍與崩塌量體以及理想破壞曲面 3-4

第二節　理想破壞曲面與數值模式 DFMGT 整合 3-8

第四章　理想崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討 **4-1**

第一節　擴大探討案例數量 4-1

第二節　誤差探討 4-22

第三節　幾何特性探討 4-27

第五章　三維可視化圖形多視角立體呈現成果 **5-1**

第一節　三維立體地形顯示之網頁模式 5-1

第六章　結論及建議 6-1

依本計畫案工作執行計畫書擬定之工作預定期程，依研擬之預定工作期程確實執行並完成。工作及內容簡述如下： 6-1

理想化曲面與崩塌破壞範圍與破壞深度之整合 6-1

理想討崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討探討 6-1

三維可視化圖形多視角立體呈現成果 6-2

參考文獻..... 參-1

附錄..... 附錄-1

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附錄-1

附錄二、期中審查會議意見紀錄暨回覆辦理情形 附錄-6

附錄三、期末審查會議意見紀錄暨回覆辦理情形 附錄-8

附錄四、 附錄-9

附錄五、 附錄-16

附錄六、 附錄-30

表次

表 3.1　高屏溪 13 處潛勢區域面積、平均坡度以及長寬大小 3-3
表 3.2　高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之崩塌量體 3-5
表 3.3　高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之對應深度 3-6
表 3.4　高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之對應角度 3-6
表 3.5　高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之對應曲率半徑 3-7
表 3.6　DFMGT 數值模擬採用之參數一覽表 (崩塌量體與固體顆粒摩擦角δ 請參見表 3.7) 3-9
表 3.7　數值模擬之崩塌量體與採用之固體顆粒摩擦角δ 3-9
表 4.1　高屏溪 24 處大規模崩塌區域面積、最高點高程以及平均坡度 4-2
表 4.2　高屏溪 24 處(28 個區塊)大規模崩塌區域所建構的理想破壞參數值 (PART I).....4-18
表 4.3　高屏溪 24 處(28 個區塊)大規模崩塌區域所建構的理想破壞參數 (PART II) 4-20
表 4.4　崩塌編號 09 在不同崩塌深度範圍建構理想曲面，其所對應的體積誤差、主軸曲率以及側向軸曲率 4-24
表 4.5　崩塌編號 28 在不同崩塌深度範圍建構理想曲面，其所對應的體積誤差、主軸曲率以及側向軸曲率 4-25
表 4.6　崩塌編號 42 區域在不同崩塌深度範圍建構理想曲面，其所對應的體積誤差、主軸曲率以及側向軸曲率 4-26
表 6.1　本計畫之工作進度與完成度 6-3

圖次

圖 1.1 小林村崩塌案例的最終土砂堆積高度。(A)採用災後破壞曲面 (TAI ET AL. 2019)；(B)採用理想破壞曲面；(C)災後堆積土體量測值 ((C)FROM KUO ET AL. 2011)。 1-4
圖 1.2 小林村崩塌案例模擬的初始土體厚度分布。(A) 採用災後破壞曲面；(B) 採用理想破壞曲面。 1-5
圖 1.3 小林村的崩塌案例的模擬結果..... 1-5
圖 2.1 計畫作業流程圖..... 2-3
圖 2.2 曲面(棕色)上的任一位置之不同曲率(紅色虛線)..... 2-5
圖 2.3 軸向(X 方向)曲率(曲率半徑大)與側向(Y 方向)曲率(曲率半徑小)所決定之理想化曲面..... 2-6
圖 2.4 最大深度與曲率半徑之關係示意圖..... 2-7
圖 2.5 崩塌深度、曲率半徑與軸長之間的幾何關係式 (17 個案例) 2-8
圖 2.6 軸向軸與側向軸並不會在同一平面，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 2.7 採用崩塌量體與崩塌面積對應之經驗公式的流程圖 2-11
圖 2.8 左圖：破壞曲面(上)與理想化曲面(下)； 右圖：兩者存在差異 2-12
圖 2.9 大規模崩塌分布圖 (林慶偉 2013)..... 2-13
圖 3.1 針對 D056 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上).. 3-7
圖 3.2 針對 D080 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上).... 3-8
圖 3.3 TOP：理想破壞曲面與地形結合。BOTTOM：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF038)..... 3-10

圖 3.6 TOP：理想破壞曲面與地形結合。BOTTOM：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF043)..... 3-11
圖 3.7 TOP：理想破壞曲面與地形結合。BOTTOM：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF053)..... 3-12
圖 3.8 TOP：理想破壞曲面與地形結合。BOTTOM：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (D056)..... 3-13
圖 3.9 TOP：理想破壞曲面與地形結合。BOTTOM：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF080)..... 3-14
圖 3.10 TOP：理想破壞曲面與地形結合。BOTTOM：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF205)..... 3-15
圖 4.1 崩塌編號 05 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-3
圖 4.2 崩塌編號 06 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-4
圖 4.3 崩塌編號 08 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-4
圖 4.4 崩塌編號 09 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-5
圖 4.5 崩塌編號 10 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-5
圖 4.6 崩塌編號 11 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-6
圖 4.7 崩塌編號 13 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-6
圖 4.8 崩塌編號 19 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-7
圖 4.9 崩塌編號 23 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺). 4-7
圖 4.10 崩塌編號 25 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-8
圖 4.11 崩塌編號 27 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-8
圖 4.12. 崩塌編號 28 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-9

圖 4.13 崩塌編號 33 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-9
圖 4.14 崩塌編號 34 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-10
圖 4.15 崩塌編號 35 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-10
圖 4.16. 崩塌編號 37 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-11
圖 4.17. 崩塌編號 41 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-11
圖 4.18 崩塌編號 42 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-12
圖 4.19 崩塌編號 44 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-12
圖 4.20 崩塌編號 45 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-13
圖 4.21 崩塌編號 46 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-13
圖 4.22 崩塌編號 47 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-14
圖 4.23 崩塌編號 48 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-14
圖 4.24 崩塌編號 50 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺) 4-15
圖 4.25 崩塌編號 09 之崩塌深度大於 0 公尺之等高線圖(左)；崩塌編號 09 之崩塌深度大於 0.5 公尺之等高線圖(右) 4-23

圖 4.26 將崩塌編號 09 圈選特定小範圍(>10 M)進行更進一步分析 4-23
圖 4.27 崩塌編號 28 之崩塌深度大於 0 公尺之等高線圖(左)；崩塌編號 28 之崩塌深度大於 0.5 公尺之等高線圖(右) 4-25
圖 4.28 崩塌編號 42 區域之崩塌深度大於 0 公尺之等高線圖(左)；崩塌編號 42 之崩塌深度大於 0.5 公尺時則區分為 A、B 兩個區塊(右).....4-26
圖 4.29 綜合 45 個案例，在軸方向，其崩塌深度、曲率半徑 與主軸長之間的幾何關係式 4-28
圖 4.30 綜合 45 個案例，在側向軸方向，崩塌深度、曲率半徑 與軸長之間的幾何關係式 4-29
圖 4.31 綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(D1/L1) 與傾角(θ_{bgn})的關聯 4-29
圖 4.32 綜合 45 個案例，在側方向，長度深度比值(D2/L2) 與傾角(θ_{bgn})的關聯崩 4-30
圖 4.33 綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(D1/L1) 與傾角(θ_1)的關聯 4-30
圖 4.34 綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(D2/L2) 與傾角(θ_2)的關聯 4-31
圖 4.35 綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(D1/L1) 與破壞面頂部傾角(ϕ)的關聯 4-31
圖 5.1 三維立體可視化圖形網頁之首頁 5-1
圖 5.2 啟動土石流土體動態模擬數值模式(紅色圈)並進行參數的設定.....5-2

圖 5.3 地形資料 DEM 可直接由滑鼠選取 5-2
圖 5.4 數值模式開始運算前會先顯示地形(例如 理想破壞面以及周遭地形)以及所輸入的相關參數值以供確認 5-3
圖 5.5 地形確認後會先顯示初始的崩塌量體以供確認 5-3
圖 5.6 以灰影地形模式顯示計算前的初始崩塌量體 (D056) 5-4
圖 5.7 以灰階光影地形模式顯示所計算的崩塌量體於 $t = 00.00\,\mathrm{s}$ 時的土體厚度分佈狀態 (D056) 5-5
圖 5.8 以灰影地形模式顯示所計算的崩塌量體於 $t = 27.27\,\mathrm{s}$ 時的土體厚度分佈狀態 (D056) 5-5
圖 5.9 也可以以正攝影像搭配地形呈現運算的成果 $t = 00.00\,\mathrm{s}$ 5-6
圖 5.10 以正攝影像搭配地形呈現運算的成果 $t = 51.52\,\mathrm{s}$ 5-6
圖 5.11 以草地地形模式顯示所計算的崩塌量體於 $t = 60.61\,\mathrm{s}$ 時 的土體速度分佈狀態 (D080) 5-7
圖 5.12 相對應於圖 5.11，計算的崩塌量體於 $t = 60.61\,\mathrm{s}$ 時 的土體厚度分佈狀態 (D080) 5-7

第一章　緒論

第一節　計畫緣起與擬解決問題

因地球暖化的影響導致全球氣候變遷造成極端化的現象，近年來台灣地區降雨的分布在時間上已及空間上均呈現比往常更加不平均的狀態，降雨集中且強度增加。這種極端型降雨事件極易在集水區上游地區誘發大規模土砂災害，並導致下游地區的洪水災害事件。近 10 年來臺灣地區亦陸續出現對集水區影響較大，由極端型降雨所誘發造成的大小規模崩塌、土石流，甚至堰塞湖潰壩等複合型天然土砂災害事件。這些土砂災害事件不僅威脅區內的保全對象，也對集水區的地形地貌或是生態環境造成產生極大的衝擊。2009 年莫拉克風災小林村大規模崩塌事件之後，政府相關部門針對全台進行大規模崩塌潛勢地區及高坡地災害潛勢地區的調查。例如中央地質調查所在「莫拉克與非莫拉克國土保育之地質敏感區調查分析計畫」及「強化坡地環境地質與防災應用」等計畫中，利用光達（LiDAR）掃描獲致之數值地形資料、輔以航照衛星影像，並整合既有地質圖之地層、構造、地形坡向等資料進行綜合判釋，將全台區分莫拉克災區（中部、南部及東部）及非莫拉克災區（新北市、桃園市、花蓮縣、基隆市、新竹縣、苗栗縣及宜蘭縣）兩個部分，篩選出受潛在大規模崩塌影響的地區計 864 處，其中會對聚落安全產生威脅的有 94 處，目前列管 186 處大規模崩塌潛勢區域。自 107 年起，農委會水土保持局建置一整合數位地形資料的資訊系統「巨量空間資訊系統 BigGIS」，提供如斷層地質敏感區地圖、地質圖、土石流潛勢溪流以及影響範圍，以及衛星影像、航空、空拍影像 等，也提供各災害事件衛星影像的相關判識成果。

因此，如何有效運用政府相關部門所獲致之數值地形資料，以及探勘相關判識成果，並賦予有效的加值效果為本計畫之初衷。

目前中央地質調查所已設置 19 處觀測站，針對具有大規模潛在坡面崩塌並對聚落造成威脅的地區進行即時活動性的觀(監)測；也建立由豪雨引致坡面崩塌之即時動態警戒模式，依雨量率定坡面崩塌的警戒門檻。然而由於坡面崩塌產生的土砂量體對於事件的致災性以及災害的規模為主要因素，且對於集水區的環境變遷情形也具深遠影響，崩塌土砂量體的估算甚為關鍵。然而崩塌之發生與坡地之地形坡向、地質、水文條件息息相關，造成崩塌破壞面所在以及土砂量體的估算以及後續土砂運移行為具高度的不確定性，且不容易在短時間估算出來。在善用上述的判釋資料與監測資料並整合警戒門檻之餘，如何掌握坡面崩塌土砂量體及其後續的運移行為則為在防災與減災地工作中扮演關鍵且不可或缺的腳色。因此，「如何以有限的現地資訊快速初步評估崩塌破壞曲面以及可能產生之土砂量體並評估其後續的運移行為」並輔以不同規模可能發生的「情境模擬探討」就成為現階段坡地崩塌防災的尚未完成的拼圖缺角。

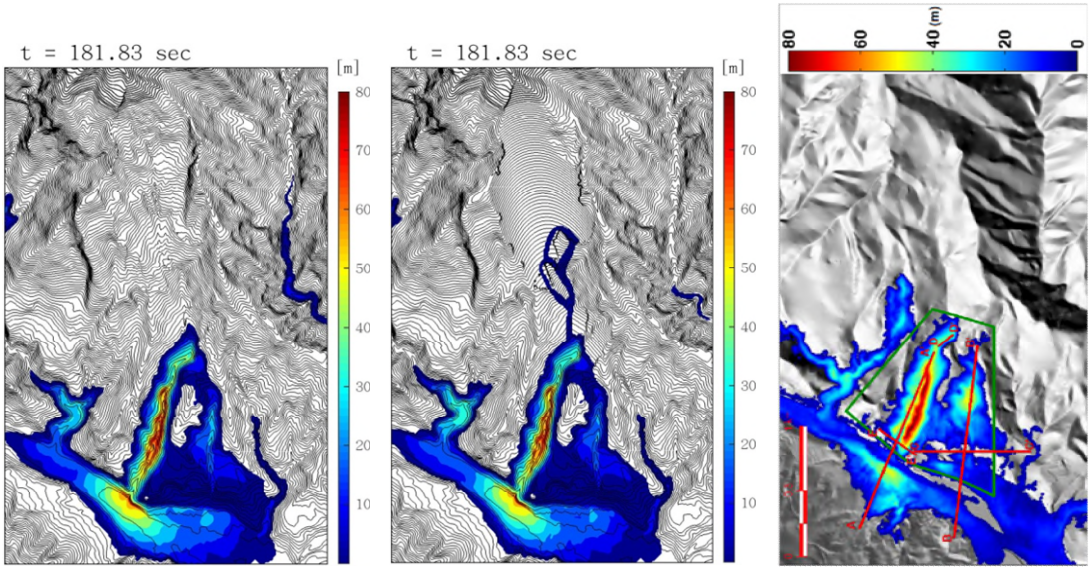
第二節　前期成果

由於坡面崩塌之發生與坡地之地形坡向、地質、水文條件息息相關，崩塌破壞面往往崎嶇不平整，不易歸納出其破壞面的幾何特性。本研究團隊已於前期(107 年)創研計畫中提出一理想破壞曲面的方法來估算崩塌破壞面，也因此得以分析探討崩塌破壞面的幾何特性。在選定的三個不同流域 16 個崩塌案例進行理想曲面的估算中，雖然這些崩塌案例涵蓋數個不同的地質條件(地質、岩性 等)，其利

用理想曲面所估算地崩塌量體誤差大多可在 30%的範圍內。在眾多數據中可歸納一關聯規律性，亦即曲率與軸長以及深度與軸長的比例(R/L、d/L)的值在軸向與側向方面均呈現一對數關係的關聯，顯示本案所提出的理想破壞曲面其幾何特性有其一致的關聯性。此關聯將大幅簡化估算理想崩塌破壞曲面所需的參數數量，對於推估崩塌潛勢區初步評估可能的崩塌破壞曲面(理想曲面)有極大的幫助。

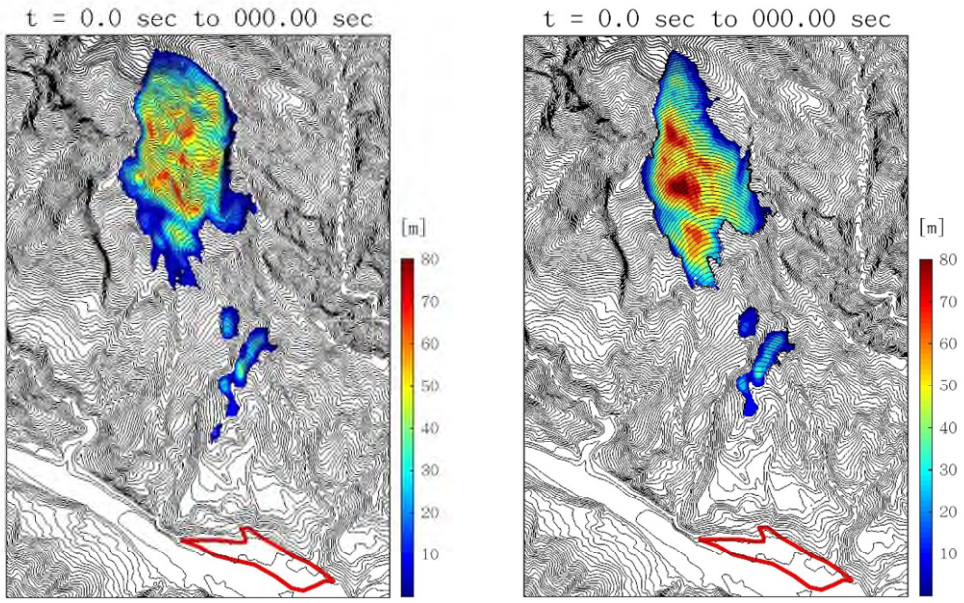
利用曲率與軸長以及深度與軸長的比例(*R/L*、*d/L*)的值在軸向與側向方面的對數關係，可迅速初步評估崩塌破壞的理想曲面。在崩塌範圍判識圈畫完成的前提下，針對一特定深度可對應估算出一理想破壞曲面。將所估算之理想破壞曲面與本研究團隊所發展之山崩土石流數值模式整合，便可用來評估採用理想化曲面取代實際發生崩塌破壞之曲面所造成後續土砂的運移行為。雖然理想化曲面相較於實際的崩塌曲面平滑，但結果顯示在小規模的崩塌(DF081、DF054區域)，或是大尺度(小林村)的崩塌案例中，在流體深度、土石濃度分布或是速度場的分布差異不大，土砂流動的範圍也與現地觀察量測所得的數據相當。如圖 1 所示，圖 1.1　小林村崩塌案例的最終土砂堆積高度。(a)採用災後破壞曲面(Tai et al. 2019)；所示，小林村崩塌案例的最終土砂堆積高度分佈與現地量測值，除了在河床上的土砂已被洪水沖刷帶走的部分，其餘的土砂堆積分佈均相當符合。圖 1.2 顯示數值模擬小林村崩塌案例中，採用災後破壞面與理想破壞曲面的初始土體厚度分布，雖然崩塌量體體積相當(約 3%誤差)，其土體厚初始度分布的差異相當明顯。圖 1.3 則顯示小林村的崩塌案例的模擬結果，其中酪黃色陰影代表土沙運移過程中土體深度大於 1 公分深度之範圍(圖 a 與圖 b)，色階表示土沙最終堆積深度。圖

1.3a 為採用災後破壞曲面模擬的結果，圖 1.3 b 為採用理想曲面取代破壞曲面模擬的結果，兩者顯示其最終土沙堆積深度分布的差異並不明顯；圖 1.3c 為圖 1.3b(理想曲面)之結果但將土沙運移過程中土體深度大於 30 公分的範圍標示衛星影像上，其覆蓋的範圍與衛星影像上所呈現的裸露範圍相當符合；數值模擬所採用參數的值均與文獻 Tai et al. (2019)相同。此成果顯示利用本案所提出理想破壞曲面之方法，對於評估崩塌潛勢區破壞發生後土沙的運移行為具備一定的參考價值。也據以規劃精進上述之方法。



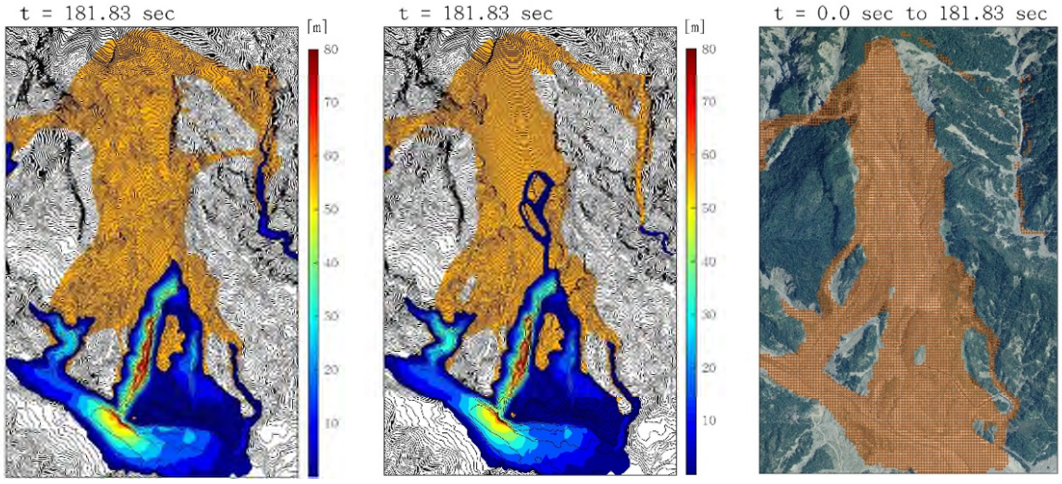
(a) (b) (c)

圖 1.1 小林村崩塌案例的最終土砂堆積高度。(a)採用災後破壞曲面(Tai et al. 2019)；(b)採用理想破壞曲面；(c)災後堆積土體量測值((c)from Kuo et al. 2011)。



(a) (b)

圖 1.2 小林村崩塌案例模擬的初始土體厚度分布。(a) 採用災後破壞曲面；(b) 採用理想破壞曲面。



(a) (b) (c)

圖 1.3 小林村的崩塌案例的模擬結果(酪黃色陰影代表流動深度大於 1 公分深度之範圍，色階表示最終堆積深度)。(a) 採用災後破壞曲面模擬的結果；(b) 為採用理想曲面取代破壞曲面模擬的結果；(c) 為圖 1.1b 之結果並將土體深度大於 30 公分的流動範圍標示於衛星影像上。

第三節　計畫工作項目

針對上述議題，本研究計畫於本年度規畫”精進快速初步評估崩塌破壞曲面之技術”、”理想崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討”以及”三維可視化圖形多視角立體呈現成果”等三個工作項目，說明如下：

一、精進快速初步評估崩塌破壞曲面之技術

延續上年度已發展之簡易迅速初步評估崩塌破壞理想曲面的成果，進一步探討估算可能崩塌深度的方法，以有限的資訊快速評估崩塌破壞理想曲面，解決崩塌潛勢區域現地監控資料對於崩塌量體不易即時估算之侷限，精進快速評估崩塌破壞曲面之技術以估算崩塌量體。

二、理想崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討

擴大探討崩塌破壞曲面案例與集水區之數量，分析選定之區內現有坡面崩塌破壞曲面幾何特性。尤其針對造成高誤差之案例進行幾何特性分析探討，藉以提昇並確保其與崩塌破壞曲面技術所需參數間之關連性，透過大數據歸納分析來提升評估破壞曲面技術與估算崩塌量體之合理性與可靠度。

三、三維可視化圖形多視角立體呈現成果

發展三維可視化圖形展示平台，使用者可直接檢視上述工作項目所估算的理想破壞曲面，並得以將不同規模可能發生的情境模擬成果進行探討。以三維可視化圖形多視角立體呈現，展示崩塌後土沙在不同的時間點的運移行為。

第二章　工作執行方法與步驟

集水區大型致災性坡面崩塌的主因可區分為地震與降雨引致土壤飽和含水或是地下水的水位變動兩種，其中地震有其不可預測性，而降雨引致之邊坡破壞崩塌具有一定之延時與前期徵兆。國內外對於邊坡破壞崩塌之預警研究與系統建立均著重於降雨引致之邊坡破壞，因其較為可行且易發揮成效。對於降雨引致地下水的水位變動所引發崩塌之評估方法可概分為經驗法與解析法種。經驗法為統計歷史崩塌紀錄配合崩塌的內在因素(如 地形、水文特性、地質條件等)與外在誘因(如 降雨強度、延時、累積雨量 等)，進行相關性之統計迴歸與彙整等，歸納出簡單的關係式作為崩塌潛勢評估與預測之依據，在深層崩塌高潛勢區域更會搭配地下水位觀測井或是地表變動量(如 傾斜儀、GPS 定位 等)之監測來提升可靠度。解析法則以嚴謹的力學分析為基礎來探討崩塌機制，探討地形、水文特性、地質構造及土砂材料對於邊坡穩定的力學行為。在充分的現地調查與有效的監測資料下，經驗法較易提供即時的評估與預測之依據；解析法則具有其通用與客觀的特性，但是需仰賴詳細的現地調查與地質土(岩)層資料。然而不論是經驗法或是解析法，現階段均不容易明確指出崩塌破壞面的所在位置或是對於估算崩塌破壞量體提供充分之資訊，使得現有的監測預警系統仍有許多不足之處。

本研究在前期工作階段已完成發展一簡易迅速初步描述評估崩塌破壞曲面(理想崩塌破壞曲面)的方法。在探討 16 個崩塌案例所估算的理想曲面過程中，發現曲率與軸長比(R/L、d/L)的值在軸向與側向方面均呈現一對數關係的關聯。善用此關聯將可大幅簡化估算理想

崩塌破壞曲面所需的參數數量。例如 在取得潛勢崩塌區域所在之數位地形地圖(DEM)以及崩塌範圍估算圈畫完成的前提下，其軸向與側向方面長度(軸長)即可明確推算出來；因此若是曲率或是崩塌深度兩個變數中任一個變數的值能夠給定，便可決定其所對應的理想崩塌曲面。由於理想破壞曲面為一明確之曲面，可據以推算在該理想破壞曲面情形下之崩塌量體與崩塌面積，因此便可參酌利用如 Guzzetti et al. (2009) 探討 677 個崩塌案例所回歸之體積與面積的經驗公式，透過遞迴運算找出最符合崩塌量體與崩塌面積對應的崩塌深度，完成理想崩塌破壞曲面之估算。另一方面，也可針對不同崩塌深度所計算出的理想崩塌曲面，透過切片法(slice method)找到最小安全係數所在，作為最可能的崩塌深度以及對應的崩塌理想曲面。這兩種方法都將在本計畫中進行探討。

換言之，本研究之主要工作在於：(a) 精進簡易迅速初步評估崩塌破壞曲面的方法；(b) 理想崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討；(c) 並採用三維可視化圖形網頁技術進行多視角立體呈現成果，使得現有現地調查與監測預警系統所提供之資訊可充分發揮。

第一節　計畫工作架構與流程

本計畫工作內容包含三大項目，整體作業流程如圖 2.1 所示：透過計畫需求與目地瞭解，進行計畫工作內容規畫；利用於現地地形座標系統描述建立曲面之技術，於 GIS 地理資訊系統數位地圖(DEM)上建構理想曲坡面來模擬評估可能的破壞曲面。承前期計畫成果，針對選定之集水區內現有坡面崩塌案例所推估之理想曲坡面，發現其幾何特性與崩塌破壞曲面技術所需參數之間具備一定之關連性，用此理想

曲坡面以推估未知之可能的破壞曲面。

搭配現地調查與監測資料所提供之可能崩塌範圍，推估可能崩塌量體，透過智慧運算粗估出可能的破壞的深度崩與可能塌破壞曲面所在。同時，擴大選定之集水區內現有坡面崩塌破壞案例數量，尤其針對高誤差的案例進行探討，分析其幾何特性與理想曲面之關連，藉以精進評估崩塌破壞曲面所需之技術。換句話說，本計畫可將點的資料(現地調查與監測資料)拓展為面的資料(可能的崩塌破壞曲面與土砂量體)，並搭配電腦數值模式模擬，透過不同的情境探討組成動態三維時空資訊呈現，作為相關災害評估管理或是防災作為啟動之參考。

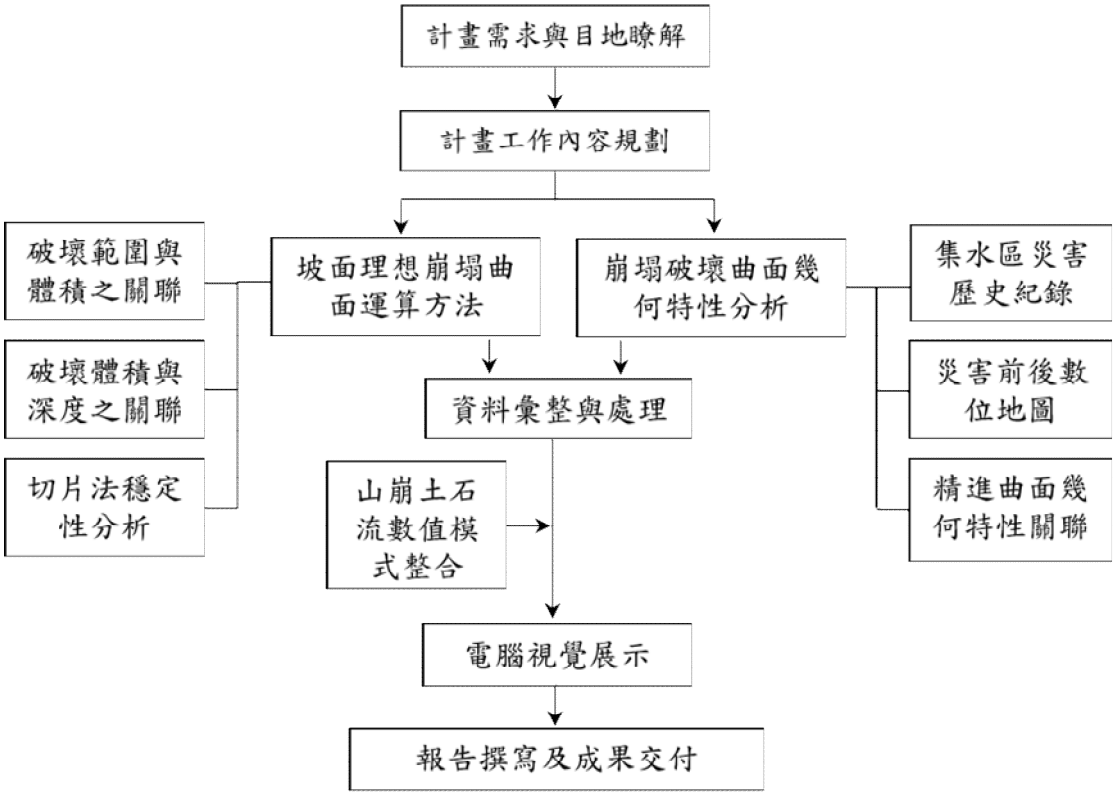


圖 2.1 計畫作業流程圖

第二節　精進快速初步評估崩塌破壞曲面之技術

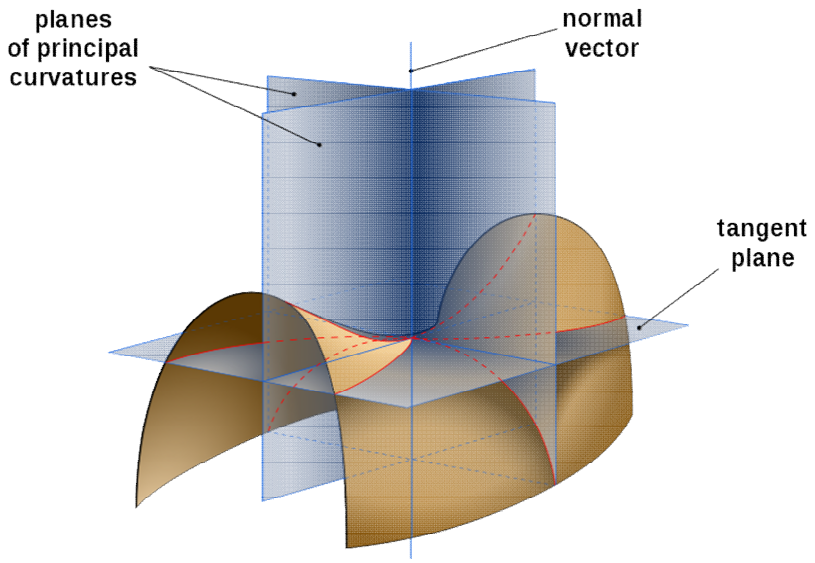
整合現地監控資料以及經驗法與解析法所提供之資訊，以一理想化曲面來初步近似評估崩塌破壞的曲面並據以估算量體，作為後續電腦數值動態模擬之依據。所建立崩塌破壞的曲面**不需要非常精確**，但是需簡單迅速提供合理的可能崩塌破壞曲面所在以及其對應的崩塌量體。主要的工作可分為：”理想化曲面之建立”以及”崩塌破壞範圍與破壞深度之整合”等兩個部分。分別敘述如下：

理想化曲面之建立

由於在地理資訊系統(GIS)中數位地圖(DEM)多半建立於水平垂直的卡式座標系上，而要在這三維空間卡式座標系上建立一特定曲面有其複雜性，因為曲面上的任一位置其曲率會因為不同的方向而有所差異(參考圖 2.2)。在微分幾何中，因一曲面的曲率與所選曲的切面方向相關，因此往往以張量的型態呈現(如 黎曼曲率張量 Riemann curvature tensor)，但是這張量的型態也就增加了在卡式座標上描述曲面的複雜度。此複雜性在二維的情況就會單純許多，例如在二維 *x*-*z* 平面上曲率為K_{xz}的曲線可用函式表示為

$$K_{xz} = c_x^3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad , \tag{2.1}$$

其中 c_x 為所在位置的切線斜率(坡向)。因為切線斜率會隨位置而改變，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。



(圖資料來源：https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_curvature)

圖 2.2 曲面(棕色)上的任一位置之不同曲率(紅色虛線)

計畫主持人近年所發展之現地地形座標系統 (Luca et al., 2016) 可協助簡化在卡式座標系上建立一特定曲面的複雜度。例如在三維中我們可建立一理想化曲面，其幾何特性主要由分別為定值之軸向(down-slope 方向)曲率與側向(transverse 方向)的曲率來決定。換句話說，若是破壞面的主要坡向在 x 方向，側方向則是 y 方向，c 為所在位置的斜率(坡向)，我們將可使用

$$K_{xz} = c_x^3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad \text{與} \quad K_{yz} = c_y^3 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, \tag{2.2}$$

來決定理想化曲面，其中 K_{xz} 與 K_{yz} 分別為軸向(down-slope 方向)曲率與側向(transverse 方向)的曲率，c_x 與 c_y 為各位置分別在軸向與側向的斜率。圖 2.3 顯示此方法所建立之理想化曲面，其中軸向曲率較小(曲率半徑大)，而側向曲率較大(曲率半徑小)。

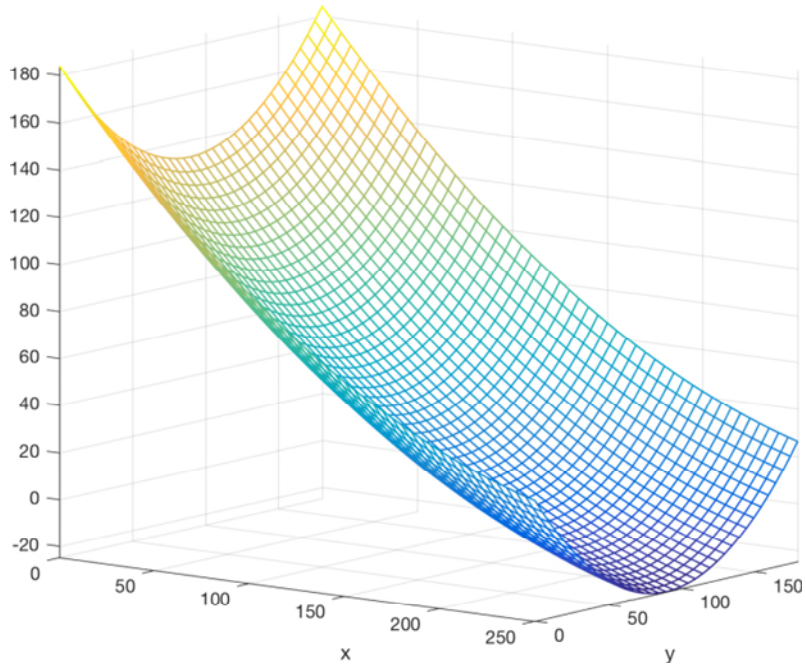


圖 2.3 軸向(*x* 方向)曲率(曲率半徑大)與側向(*y* 方向)曲率(曲率半徑小)所決定之理想化曲面

建立此理想化曲面除了需要估算軸向與側向曲率的值，尚須許多其他參數(例如 整體曲面的傾角或是最大破壞深度的位置)才能建立理想曲面。如圖 2.4 所示，假設最大深度發生在軸向中間點位置，則可透過幾何關係計算出軸向的曲率半徑。側向的曲率半徑則可採用相似之方法計算得出。此方法總共包含多個待決定參數 (破壞面的長、寬、軸向曲率、側向曲率、軸向與側向的初始傾角、水平旋轉角度、水平垂直平移距離)，相當繁複。在本研究前期工作階段，已發展完成一簡易迅速初步描述評估崩塌破壞曲面(理想崩塌破壞曲面)的方法，可減少所需的參數數量，因此可大幅簡化繁複的計算量。透過此前期的成果，在軸向與側向軸的位置座標已確認的前提下，只需要再提供軸向長度中央位置的最大破壞深度(或是某一特定位置的深度)，便可定義出一理想曲面。本計畫也因此以此方法為基礎，規劃精進評估崩塌破壞曲面之方法。

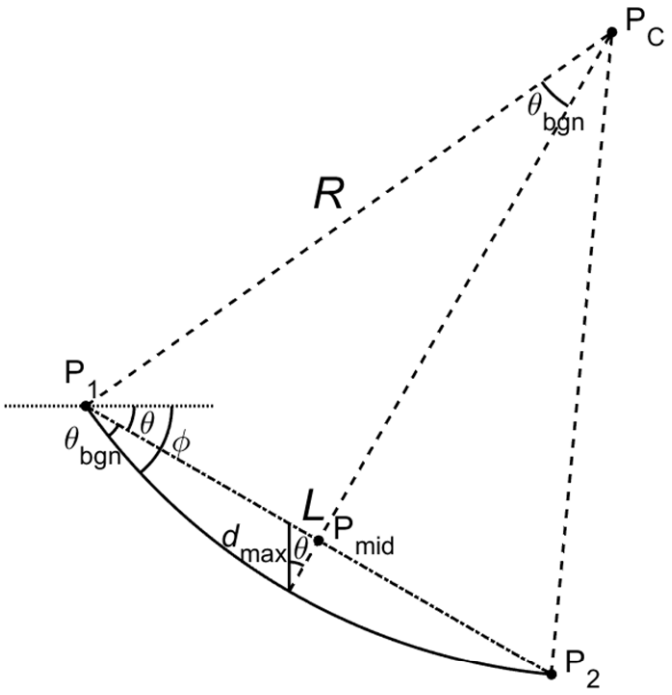


圖 2.4　最大深度與曲率半徑之關係示意圖

瑞士洛桑大學曾提出 Sloping Local Base Level (SLBL)的曲坡面估算法(Jaboyedoff et al. 2004)，廣泛受到阿爾卑斯山區域的災害評估使用，也拓展至 DAN3D 數值模式的使用。然而，SLBL 的曲坡面估算法僅在卡氏座標中的特定方向上考慮固定值之二階導數，並非真正固定的曲率值，因此在二維的情形得到一拋物線曲線而非圓弧。相較於 SLBL 估算法，2015 年美國地質調查所(USGS)亦發佈 Scoops3D 軟體 (Reid et al. 2015)，以球形滑動面的方式估算潛在的崩塌破壞面、面積以及量體。因 Scoops3D 原發展與火山錐體崩塌之情形，因此以球形滑動面為考量，不論是在軸方向或是側向軸方向皆為單一曲率值，局限了所能描述的滑動面的幾何形狀，也不太適用於台灣山區崎嶇地形。本案所提出之方法則可視為 SLBL 以及 Scoops3D 的進階方法，在軸方向與側向軸方向分別選取不同的曲率值。依據本案針對實際崩塌案例探討的研究成果，亦顯示在軸方向與側向軸方向的曲率值明顯

不同，也顯示本方法分別選取不同的曲率值的必要性，也是本案所提出之理想曲坡面相較於 SLBL 或是 Scoops3D 方法優越之處。

與崩塌破壞範圍以及破壞深度之整合

由上可知，描述一理想化曲面需要為軸向曲率與側向曲率的值(K_{xz} 與 K_{yz} 的值)，以及各位置分別在軸向曲率與側向的斜率大小(c_x 與 c_y 的值)。由於在前期計畫探討 16 個崩塌案例發現這軸向與側向曲率的值與曲率與軸長比(R/L、d/L)的值在軸向與側向方面呈現對數關係的關聯(參閱圖 2.5)，

$$\text{軸向}: y = -0.94x - 0.75, \text{ with } x = \log(d_1 / L_1),\ y = \log(R_1 / L_1) \quad (2.3a)$$

$$\text{側向}: y = -0.89x - 0.74, \text{ with } x = \log(d_2 / L_2),\ y = \log(R_2 / L_2) \quad (2.3b)$$

因此，若是在軸向(L_1, d_1, R_1)或側向的變數(L_2, d_2, R_2)三者知其二，便可依此關係式來計算決定另一未知變數之值。惟須留意，因為軸向軸與側向軸並不會在同一平面，因此針對某一特定深度的位置所在，會對應出兩個深度，分別為軸向的 d_1 與側向的 d_2(參見圖 2.6)。

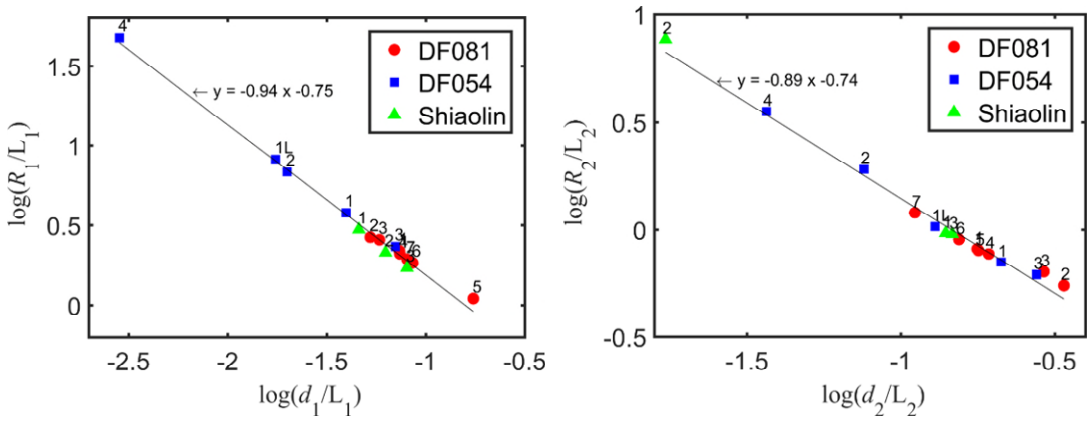


圖 2.5 崩塌深度、曲率半徑與軸長之間的幾何關係式 (17 個案例)

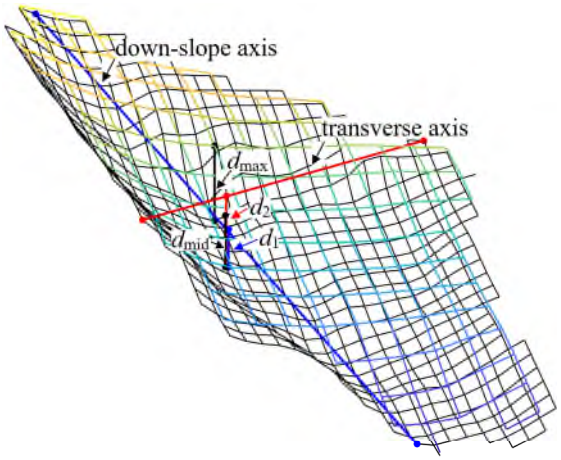


圖 2.6 軸向軸與側向軸並不會在同一平面，針對一深度 d，會對應出軸向的深度 d_1 與側向的深度 d_2。

透過近年發展之空載或是無人載具(UAV)遠距量測技術產生之數位地形地圖(如 LiDAR hillshade 影像)或是搭配現地調查量測與監測之資料，可初步估算圈化可能的崩塌面積範圍；再透過關係式(2.3ab)可對於一已知之崩塌範圍，其一個崩塌特定的深度將對應定一特定的曲面曲率(軸向與側向)，也決定出一特定的曲面，再依據崩塌區域所在之數位地圖(DEM)來計算可能的崩塌量體體積。換句話說，崩塌深度所在位置為決定理想崩塌破壞曲面的關鍵參數。

假若能夠圈畫出可能的崩塌範圍，且某一特定位置的深度或是某些特定位置的深度能夠透過鑽探資料判定，就可透過上述方法進行大量對應不同的深度的理想曲面的計算，而可將其中與鑽探資料最接近(例如 最小均方差)之理想曲面便視為初步估算之破壞曲面。

另一方面，假若只有可能的崩塌範圍已知，但是毫無崩塌深度的資料或是不確定性很高，崩塌的深度原規劃透過下列兩種方法來做初步估算：(一) 崩塌量體與崩塌面積對應的回歸經驗公式；以及(二) 穩

定性安全係數分析。然而依據本案期中報告之結果顯示，依據權重切片法最小安全係數所在的深度來建構理想崩塌曲面的方法，看似合理，但是在與實際案例的應用探討時卻有極大的差距。如期中報告第四章第二節的成果顯示，在最小安全係數的條件下，理想曲面均造成 75%~214%的誤差，顯見此方法現階段尚有很大的改善空間。因此本計畫後續將採用崩塌量體與崩塌面積對應的回歸經驗公式進行崩塌深度的估算，藉以建構理想崩塌曲面。方法如下：

以崩塌量體與崩塌面積對應的經驗公式估算崩塌深度

Guzzetti et al. (2009) 曾針對滑動形態的崩塌探討 677 個案例，並回歸得到一崩塌體積 V_L 與面積 A_L 的經驗公式，

$$V_L = 0.074? A_L^{1.450} 。 \quad (2.4)$$

因此，假若可能的崩塌範圍已知(A_L 已知)，便可計算出崩塌的面積並利用(2.4)式計算得到對應的可能崩塌量體 V_L。透過不同的崩塌深度計算出不同的理想破壞曲面，對應這些不同的理想破壞曲面將出不同的崩塌量體。透過遞迴運算出最符合崩塌量體與崩塌面積對應的理想曲面與崩塌深度。其流程圖可參閱圖 2.7 。此外，(2.4)式亦可採用水保局台中分局 陳勝全副分局長之博士論文(以空間內插法分析崩塌地崩塌量體之研究，2013)中所歸納之體積面積關係式

$$V_L = 0.004? A_L^{1.7244} 。 \quad (2.5)$$

進行估算。如本案期中報告所述，發現兩者差異並不大。惟 Guzzetti et al. (2009)的關係式(2.4)對於大規模崩塌的案例 (小林村案例)其對應的關係較為符合，因此本案後續崩塌量體 V_L 之估算將以(2.4)式進行。

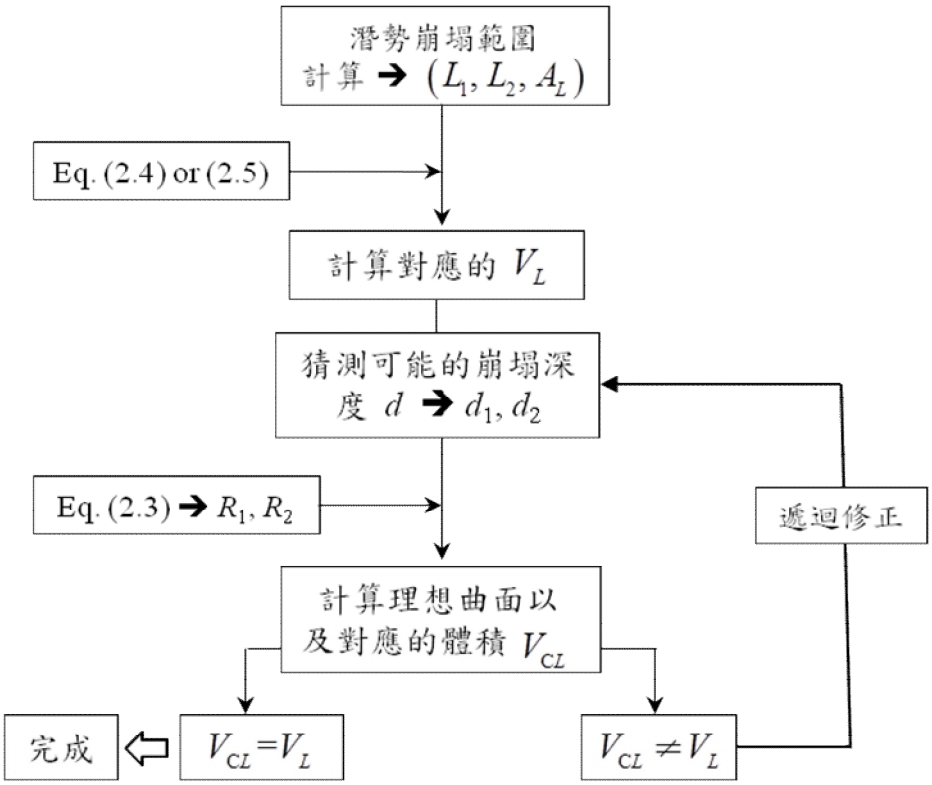


圖 2.7 採用崩塌量體與崩塌面積對應之經驗公式的流程圖

第三節 理想討崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討

由於實際的崩塌受到現地地形、水文特性、地質、坡向等等條件所影響，其崩塌破壞面是崎嶇不平整(參閱圖 2.8)，不易歸納出特定的幾何特性。本研究計畫在前期工作中已提出透過理想崩塌曲面來呈現崩塌破壞曲面的構想，因此得以分析其幾何特性，並歸納相關的關連性，以達到僅需部分的參數數量就能繪製出理想崩塌曲面，並得據以估算崩塌量體。

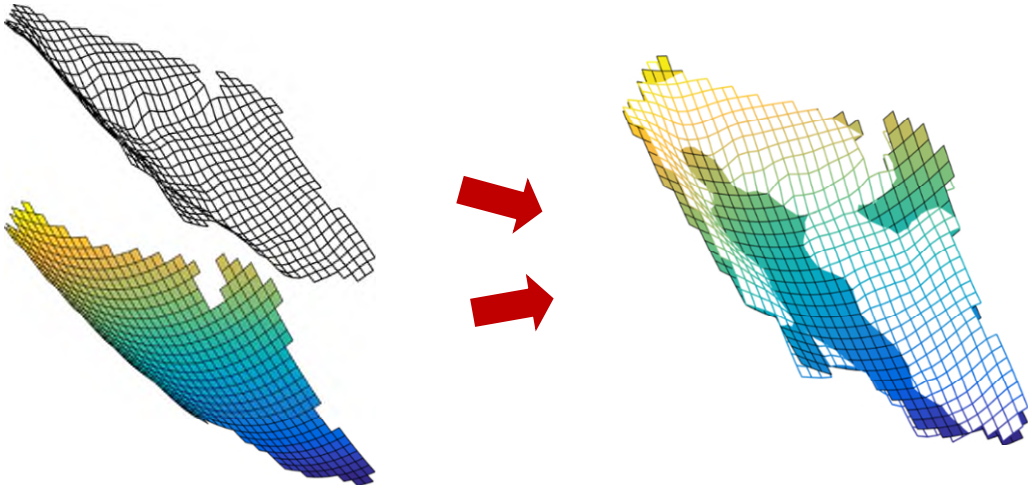


圖 2.8　左圖：破壞曲面(上)與理想化曲面(下)；
右圖：兩者存在差異

此外，本計畫所依據之幾何特性的關連性，(2.3ab)式，乃依據 16 個崩塌案例，以最崩塌量體最接近為評判基準所估算的理想曲面的幾何特性所歸納得知。因其幾何特性關連性可實質簡化評估理想破壞曲面的複雜度，扮演關鍵的角色。然而(2.3ab)式僅為 16 個崩塌案例數量所歸納出來的幾何關聯性，其通用性稍嫌不足，因此本計畫目前已透過水保局協助旗山溪流域於莫拉克前後期地形資料進行分析相關案例，以強化所歸納出來的幾何關聯性，並探討可能誤差來源。

因此本計畫透過林慶偉教授等人於 102 年所執行行政院農業委員會水土保持局所之計畫「102 年高屏溪山坡地大規模崩塌致災潛勢調查評估」，其利用莫拉克颱風後之航照影像所判釋得知執行近期發生之大規模崩塌共 53 處(類型 A)，其總面積為 1,644.96 公頃為依據來進行分析。

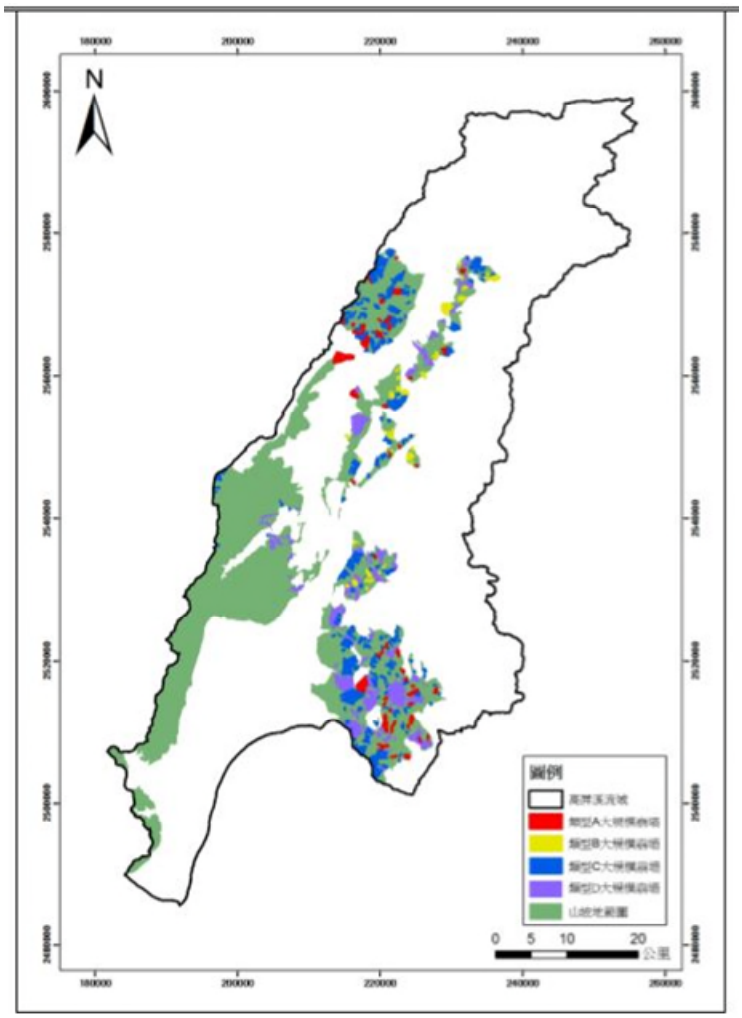


圖 2.9 大規模崩塌分布圖 (林慶偉 2013)

第四節 三維可視化圖形多視角立體呈現成果

本計畫採用網頁模式在網頁瀏覽器(如 Chrome)上展示運算成果，其優點為跨平台瀏覽(PC windows、Linux、MacOS、平板、智慧手機均可使用)，使用者只要在有網路通訊 (WiFi、internet 或是行動數據連線) 的環境下，便可在運算完成後即時檢視運算成果，不受時間與地點的限制。

另透過與土石流土體動態模擬數值模式 (Debris Flow Model for General Topography，DFMfGT) 的整合，即可探討不同情境下崩塌破壞的土砂量以及後續土砂的運移行為。土石流土體動態模擬數值模式

(DFMfGT)為本團隊自行研發在現地地形座標上之土石流土體動態模擬數值模式，可進行情境模擬深入探討土石流之土砂分布型態與影響範圍。DFMfGT 數值模式乃依據固體-液體兩相流模式之土石流理論，搭配現地地形座標系統所整合的土石流土體動態模擬數值模式，相關文獻可參酌 Tai et al. (2019)。與 FLO-2D 相同，DFMfGT 數值模式之基本方程式包含連續方程式與動量方程式，但分別考慮固體相與液體相的守恆方程式，所以一共包含六個方程式。而 DFMfGT 採用 Non-Oscillation Central Scheme (NOC)有限體積演算法(Kurganov and Tadmor, 2000; Kurganov and Miller, 2014)，因此此數值模式可模擬震波(Shock Wave)與水躍(Hydraulic Jumps)現象，不需要額外的 artificial diffusion 項。

相對於普遍廣泛使用的 FLO-2D 的單相流模式，FLO-2D 所需的 7 個參數(material parameters：土砂比重、曼寧粗糙係數、層流阻滯係數、屈服應力×2、黏滯係數×2)。雖然 DFMfGT 數值模式使用採用固體-液體兩相流模式的基礎理論，但是 DFMfGT 數值模式僅需 5 個參數：

(a)土砂比重：$\rho_s/\rho_w = 1/\gamma$

(b)固體顆粒摩擦角：δ

(c)交互作用力係數(與固體液體相對速度成正比)：C_d

(d)液相阻尼係數：ϑ

(e)液相等效黏滯係數：μ_{eff}

在應用上不會造成額外的負擔。將運算所得之理想化曲面整合於數位地形地圖(DEM)，利用崩塌前 DEM 和理想崩塌 DEM 的高程差可得初始滑動體積，進行模擬運算。

針對 DFMfGT 所運算的成果，本計畫採用 Three.js 的電腦圖形

技術來呈現檢視運算成果，Three.js 是一個跨瀏覽器腳本(script) 函數庫，使用 JavaScript 函數庫或應用編程介面(application programming interface，API)來在網頁瀏覽器中創建和展示動畫的三維計算機圖形。由於 Three.js 符合 WebGL 的規範，採用 Three.js 所製作之網頁在所有支持 WebGL 1.0 的瀏覽器皆可運行無礙。透過與成大電機系張天豪教授的研究團隊的合作，本計畫規劃之網頁介面為完全自行開發之三維可視化圖形工具，可因應需求搭配不同格式之資料庫系統，不會受限於特定的資料格式，具高度的彈性與調整空間。

除了三維立體地形的顯示並與航空衛星影像的整合，本案所規畫之網頁模式工具亦可呈現土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT)所運算的結果，透過三維立體呈現的型態探討不同情境下崩塌破壞的土砂量以及後續土砂的運移行為。本三維立體地形顯示之網頁模式具備下列功能：

- 具備跨平台顯示的特性 (PC windows、Linux、MacOS、平板、智慧手機 均可讀取顯示)；
- 三維立體地形表面可選取不同的材質(如 草地或 hillshade 等)；
- 三維立體地形均可依需求放大、縮小、旋轉，前後左右平移，以方便進行不同角度的檢視。
- 光線投射角度須可依需求調整，以方便檢視可能崩塌潛勢區域的地型特徵；
- 可與航空衛星影像(正攝影像)整合，將影像以三維立體型態呈現；
- 呈現土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT) 所運算的結果，以方便檢視不同情境下的模擬結果。

第三章　精進快速初步評估崩塌破壞曲面之技術

本案選定林慶偉教授等人於 102 年所執行行政院農業委員會水土保持局所之計畫「102 年高屏溪山坡地大規模崩塌致災潛勢調查評估」中所判釋的 13 處潛在大規模崩塌區域進行理想化曲面與崩塌破壞範圍以及破壞深度之整合應用估算。各潛勢崩塌區域地形幾何資料(面積、平均坡度以及長寬大小)簡述如下 (並彙整於表 3.1)：

1. 高雄市-杉林區-D021

潛在崩塌面積約 10.3 公頃、平均坡度約為 23.8 度，潛在崩塌區位最高點高程為 420 公尺，最低點標高為 220 公尺，最大寬度 250 公尺，最大長度約 520 公尺。

2. 屏東縣-山地門鄉-D042

潛在崩塌面積約 23.1 公頃、平均坡度約為 25.5 度，潛在崩塌區位最高點高程為 578 公尺，最低點標高為 211 公尺，最大寬度約 520 公尺，最大長度約 780 公尺。

3. 高雄市-桃源區-D205

崩塌面積約為 31.42 公頃、平均坡度約為 39.9 度，潛在崩塌區位最高點 953 公尺，最低點標高 217 公尺，最大長度約 926 公尺，最大寬度約 578 公尺。

4. 屏東縣-三地門鄉-D080

崩塌面積約為 273.41 公頃、平均坡度約為 25.3 度，潛在崩塌區位最高點 890 公尺，最低點標高 160 公尺，最大長度約 2,421 公尺，最大寬度約 1,461 公尺。

5. 屏東縣-瑪家鄉-D008

崩塌面積約為 35.36 公頃、平均坡度約為 26.6 度，潛在崩塌區位最高點 860 公尺，最低點標高 480 公尺，最大長度約 881 公尺，最大寬度約 478 公尺。

6. 高雄市-桃源區-D273

崩塌面積約為 25.46 公頃、平均坡度約為 26.3 度，潛在崩塌區位最高點標高 1,200 公尺，最低點標高 880 公尺，最大長度約 700 公尺，最大寬度約 450 公尺。

7. 高雄市-桃源區-D275

崩塌面積約為 21.72 公頃、平均坡度約為 30.1 度，崩塌潛勢區最高處標高 1,340 公尺，最低處 940 公尺。依該計畫成果報告書的航照影像顯示，崩塌地編號高雄市-桃源區-D275 坡趾為現生崩塌，面積約 3.2 公頃，崩塌體堆積在主河道，河道現寬約 7 公尺。

8. 高雄市-茂林區-D056

潛在崩塌面積約 110.9 公頃、平均坡度約為 30.8 度，潛在崩塌區位最高點高程為 880 公尺，最低點標高為 193 公尺，最大寬度約 1,120 公尺，最大長度約 1,215 公尺。

9. 屏東縣-三地門鄉-D078

崩塌面積約為 15.46 公頃、平均坡度約為 32.7 度，潛在崩塌區位最高點 1,015 公尺，最低點標高 680 公尺，最大長度約 600 公尺，最大寬度約 340 公尺。

10. 高雄市-茂林區-D053

崩塌面積約為 20.69 公頃、平均坡度約為 35.8 度，潛在崩塌區

位最高點 710 公尺，最低點標高 217 公尺，最大長度約 769 公尺，最大寬度約 330 公尺。

11. 高雄市-六龜區-D038

潛在崩塌面積約 49.1 公頃、平均坡度約為 32.8 度，潛在崩塌區位最高點標高為 909 公尺，最低點標高為 338 公尺，最大寬度約 742 公尺，最大長度約 903 公尺。

12. 高雄市-六龜區-D043

潛在崩塌面積約 38.7 公頃、平均坡度約為 27.9 度，潛在崩塌區位最高點標高為 1,021 公尺，最低點標高為 500 公尺，最大寬度約 660 公尺，最大長度約 1,040 公尺。

13. 高雄市-六龜區-D047

潛在崩塌面積約 38.8 公頃、平均坡度約為 26.9 度，潛在崩塌區位最高點標高為 882 公尺，最低點標高為 337 公尺，最大寬度約 447 公尺，最大長度約 1,035 公尺。

表 3.1 高屏溪 13 處潛勢區域面積、平均坡度以及長寬大小

編號	面積(公頃)	平均坡度(度)	最大長度(m)	最大寬度(m)
D008	35.36	26.6	881	478
D021	10.3	23.8	520	250
D038	49.1	32.8	903	742
D042	23.1	25.5	780	520
D043	38.7	27.9	1040	660
D047	38.8	26.9	1035	447
D053	20.69	35.8	769	330
D056	110.9	30.8	1215	1120
D078	15.46	32.7	600	340
D080	273.41	25.3	2421	1461
D205	31.42	39.9	926	578
D273	25.46	26.3	700	450
D275	21.72	30.1	798	347

第一節 潛勢崩塌範圍與崩塌量體以及理想破壞曲面

以理想曲面針對上述計畫成果中所所判釋的 13 處大規模崩塌潛勢區域進行理想崩塌破壞面之估算。運算的過程可分為三個步驟 (流程可參閱圖 2.7)：

步驟一：

透過在潛勢區域於數值地形(DEM)資料中所圈畫的範圍計算其潛在崩塌面積 A_L，再利用崩塌量體與崩塌面積關係式(2.4)來計算得對應的可能崩塌量體 V_L。

步驟二：

以高程的最高 P_H 與最低點 P_L 為主軸所在軸長 L_1，以主(長)軸為基準，其中點位置的寬度作為 L_2，如此便可。針對一可能的深度 d，透過主軸側向軸計算其對應的深度 d_1 與 d_2 (請參考圖 2.6)，再透過(2.3ab)式找出在該深度下對應的曲率半徑 R_1 及 R_2。

步驟三：

利用上述步驟求得的 $(P_1, P_2, L_1, L_2, R_1, R_2, d_1, d_2)$，以 P_1 為出發點，透過 (2.2_1)式作數值積分抵達 P_2 點便可建構出理想破壞曲面的主軸曲線。再以此主軸曲線為基準，向兩側積分建構出理想破壞曲面以及對應的數位地形資料，其與原地形資料 DEM 的差異便是對應該深度下的潛在崩塌量體 V_{LC}。若是 V_{LC} 與 V_L 的差異過大便可更動深度 d 的值，透過遞迴運算出最符合崩塌量體與崩塌面積對應的崩塌深度，完成理想崩塌破壞曲面之估算。

表 3.2 至 3.5 呈現以上 13 個潛勢區域所估算的成果。所估算出的理想崩塌破壞曲面其所對應的崩塌體積 V_{cal}、與經驗式體積 V_{fml} 間的差異 V_{dif}、以及 L_1、L_2 分別彙整於表 3.2。而所估算出的理想曲

面的相關參數，如對應於軸向與側方向的深度(d_1，d_2)、平均深度 d_{avg}、最大深度 d_{max} 等請參閱表 3.3；相關對應的角度請參閱表 3.4 以及圖 2.4，崩塌前在軸向以及側向軸方向的曲率半徑(R_{1pre}, R_{2pre})以及崩塌後的曲率半徑(R_1, R_2)則彙整於表 3.5。

圖 3.與圖 3.2 分別為針對 D056 以及 D080 所製作的理想曲面(彩色網格)以及原地形(黑色網格)，存在兩者間的空間則是潛在的崩塌量體。圖的右側則將理想曲面(彩色網格)以及原地形(黑色網格)分離檢視，相對於圓弧平滑的理想曲面，原地形則呈現崎嶇不規則表面。針對其餘 11 處區域 (D008、D021、D038、D042、D043、D047、D053、D078、D205、D273、D275) 所製作的理想曲面(彩色網格)以及原地形(黑色網格)之對照圖，請參閱附錄三。

表 3.2　高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之崩塌量體

參數 / 編號	A (m^2)	V_{fml} (m^3)	V_{cal} (m^3)	V_{dif} (%)	L_1 (m)	L_2 (m)
D008	325,979	7,300,561	7,300,559	-2.55×10^{-5}	976.32	388.20
D021	149,046	2,347,188	2,347,186	-7.76×10^{-5}	531.46	314.28
D038	531,030	14,813,368	14,813,354	-9.80×10^{-5}	995.01	542.32
D042	296,087	6,350,219	6,350,219	-6.79×10^{-6}	726.24	375.14
D043	392,612	9,560,452	9,560,441	-1.2×10^{-4}	843.10	520.86
D047	531,310	14,824,709	14,824,707	-1.58×10^{-5}	1,022.08	588.69
D053	230,093	4,405,466	4,405,460	-1.4×10^{-4}	785.67	286.79
D056	1,213,995	49,129,946	49,129,951	9.06×10^{-6}	1,400.63	797.48
D078	226,222	4,298,415	4,298,415	-4.35×10^{-6}	593.64	394.99
D080	2,722,211	158,441,250	158,441,250	3.38×10^{-7}	1,905.33	1,404.45
D205	373,593	8,896,326	9,469,871	6.45	995.57	455.21
D273	328,975	7,398,047	7,773,642	5.08	822.45	453.80
D275	185,607	3,226,214	3,226,214	1.10×10^{-6}	794.37	242.12

表 3.3 高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之對應深度

參數 / 編號	d_{avg} (ideal)	d_{max} (ideal)	d_0 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)
D008	28.12	59.17	47.08	33.58	54.62
D021	21.26	44.14	30.72	47.72	45.80
D038	46.94	88.97	84.97	87.47	58.32
D042	31.13	63.83	50.67	43.17	94.91
D043	33.43	68.83	63.14	38.64	88.68
D047	39.55	83.56	65.94	76.94	100.65
D053	31.83	65.59	66.82	75.32	90.44
D056	61.69	123.38	83.05	96.05	89.41
D078	25.59	64.18	22.66	24.16	67.18
D080	80.94	178.49	122.65	158.65	233.11
D205	43.76	118.27	29.16	82.66	58.31
D273	31.91	64.50	24.00	0.0001	24.47
D275	25.69	45.62	30.64	57.14	63.97

表 3.4 高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之對應角度

參數 / 編號	θ_{pre}	θ_{pos}	θ_1	θ_2
D008	23.39	24.02	24.12	8.17
D021	20.51	21.17	21.29	4.23
D038	29.45	24.03	29.77	10.34
D042	20.79	20.26	20.56	4.22
D043	24.52	25.17	25.65	3.30
D047	27.05	25.39	28.26	6.64
D053	30.43	28.39	31.37	3.62
D056	26.67	23.60	27.28	11.61
D078	26.07	29.76	30.58	4.67
D080	16.51	11.18	14.93	5.69
D205	34.14	29.13	29.29	26.67
D273	22.65	21.71	21.69	4.75
D275	25.16	25.82	25.74	4.12

表 3.5　高屏溪 13 處潛勢區域以理想曲面估算之對應曲率半徑

參數 / 編號	R_{1pre}	R_{2pre}	R_1	R_2
D008	-12,486.19	1,157.73	3,902.71	375.46
D021	1,759.08	1,262.46	816.27	293.13
D038	5,225.43	-4,520.71	1,667.93	669.52
D042	-1,871.89	613.40	1,651.15	233.18
D043	9,320.46	828.24	2,568.42	427.33
D047	75,718.33	2,554.93	1,960.92	483.31
D053	2,756.36	343.87	1,231.99	159.03
D056	3,770.12	13,107.22	2,915.25	951.48
D078	-10,437.50	1,389.26	2,127.97	324.74
D080	103,040.96	2,340.44	3,037.00	1,178.93
D205	-18,567.59	5,021.69	1,754.61	523.13
D273	-2,549.29	-1,056.60	724,006,470	1,067.60
D275	-248,771.44	1,331.02	1,558.35	146.75

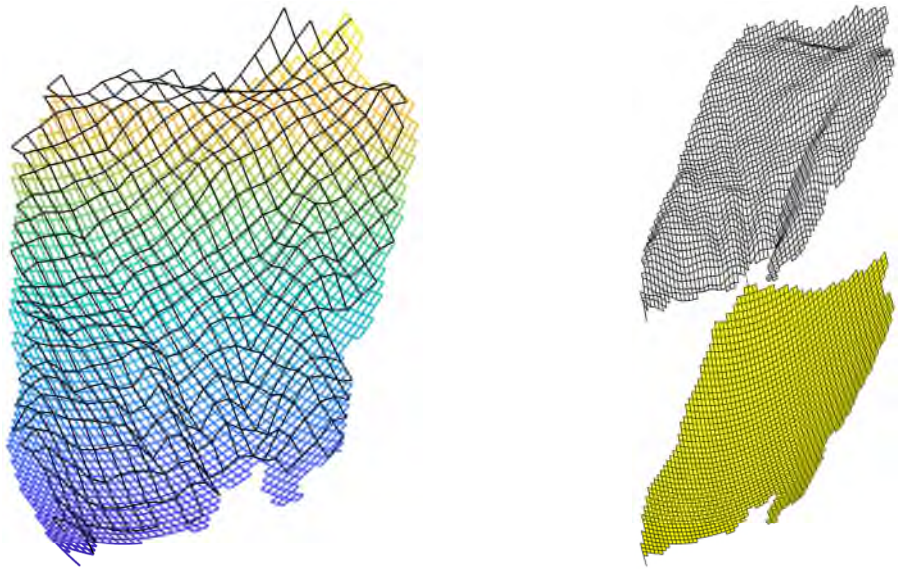


圖 3.1　針對 D056 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)

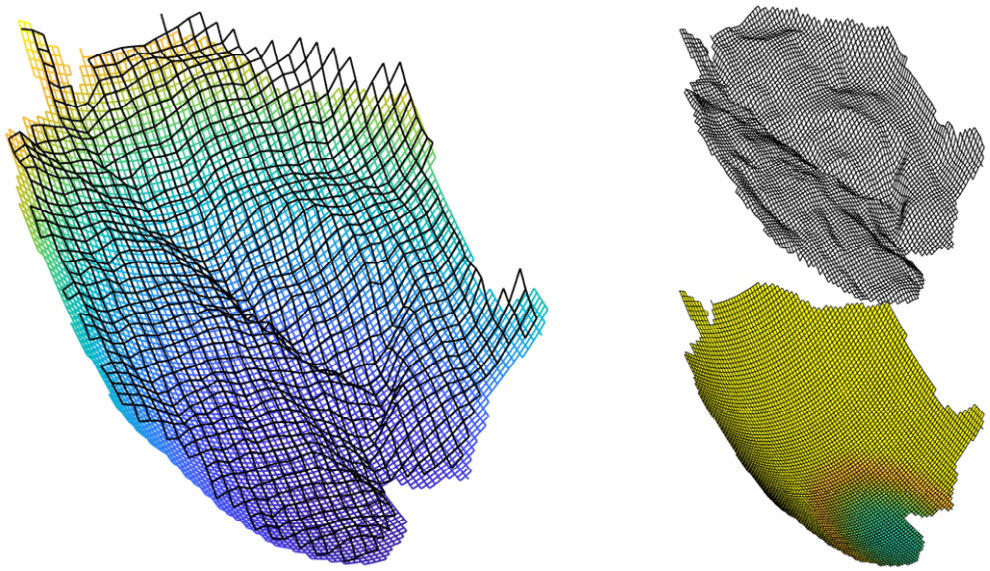


圖 3.2 針對 D080 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)

第二節 理想破壞曲面與數值模式 DFMGT 整合

利用本團隊自行研發之土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT)搭配第四章計畫成果中所判釋的 13 處大規模崩塌潛勢區域的理想曲面，可進行情境模擬深入探討土石流之土砂分布型態與影響範圍。對於 DFMfGT 數值模式所需 5 個參數，其中以固體顆粒摩擦角δ對於崩塌量體最為敏感，因此採用 Scheidegger (1973)針對崩塌量體的經驗公式決定其值，

$$\log_{10} f = -0.15666 \log_{10} V + 0.62419 \text{，} \qquad (3.1)$$

其中$f = \tan d$為摩擦係數、V為崩塌量體。其餘參數則以本團隊針對小林村案例所律定之參數值進行情境模擬。本案已針對所圈選的 13 處大規模崩塌潛勢區域，完成理想破壞曲面的建構並利用數值模式(DFMfGT)進行情境模擬。其中所採用的參數值原則上參考 Tai et al. (2019)針對小林村案例模擬所使用的參數值 (表 3.6)，對於其中固體顆粒摩擦角δ，由於其值對於崩塌量體較為敏感，則採用(3.1)式進行

估算，其值請參閱表 3.7。

表 3.6 DFMGT 數值模擬採用之參數一覽表 (崩塌量體與固體顆粒摩擦角δ 請參見表 3.7)

C_d	$\widetilde{N_R}$	ρ^f/ρ^s	ϑ
6	268	1.42/2.60	5

表 3.7 數值模擬之崩塌量體與採用之固體顆粒摩擦角δ

參數 / 編號	崩塌量體 [$\times 10^6$ m^3]	δ [°]
D008	7.300559	16.0
D021	2.347186	22.9
D038	14.813354	17.5
D042	6.350219	19.9
D043	9.560441	18.7
D047	14.824707	17.5
D053	4.405460	20.0
D056	49.129951	14.7
D078	4.298415	21.0
D080	158.44125	12.3
D205	9.469871	18.7
D273	7.773642	16.0
D275	3.226214	21.9

圖 3.5 至 3.10 為 D038、D043、D053、D056、D080、D205 等六處依據本案所建構的理想破壞曲面進行之情境模擬結果，圖的頂部上圖顯示理想破壞曲面(平滑處)與地形結合之地形立體圖，圖的

下半部分則為移動土石深度之動態分佈圖。其中可發現絕大部分的土砂在 70 秒左右已經完成最大移動距離抵達堆積位置，後續僅依地形做些微的移動調整。

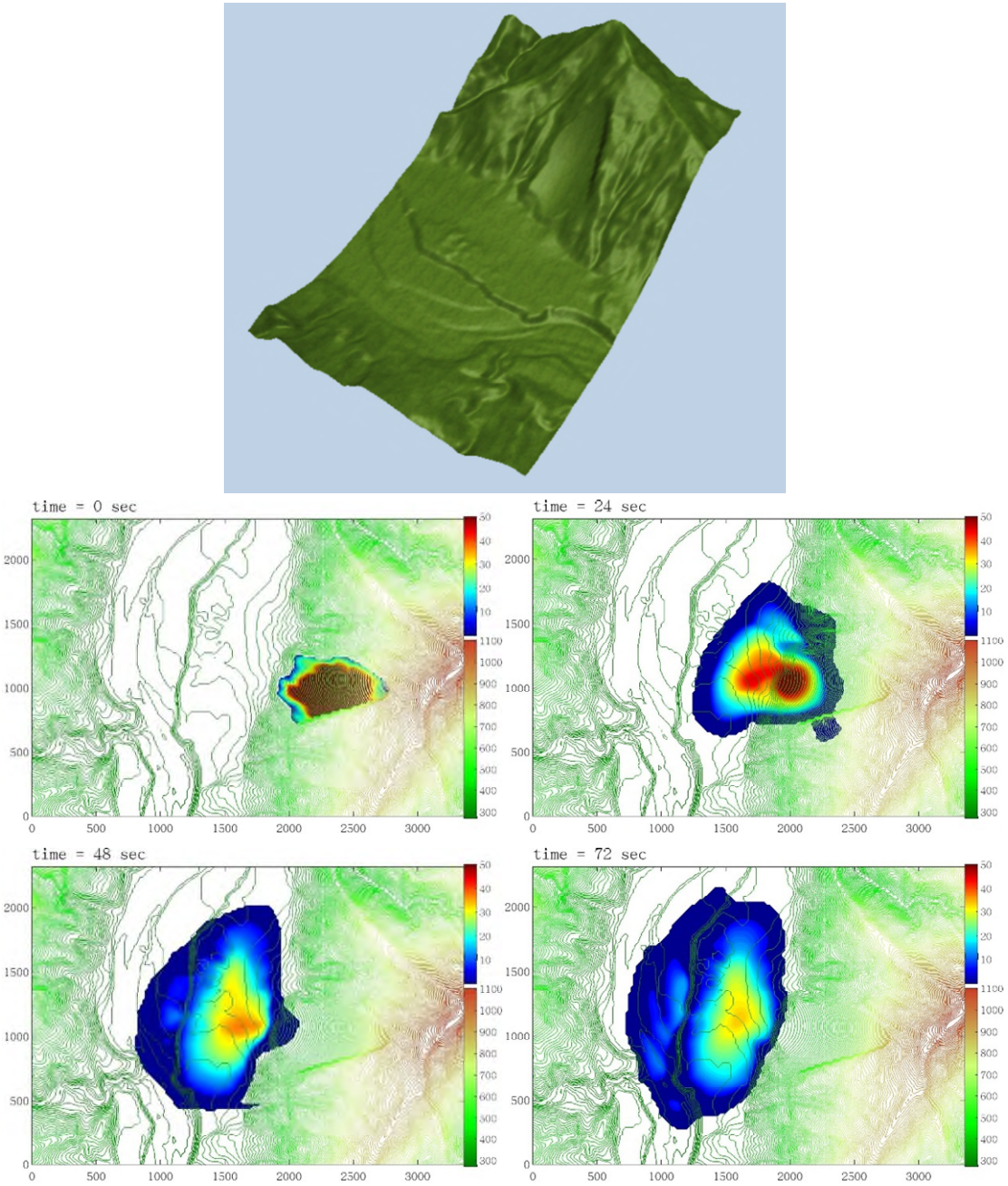


圖 3.3 Top：理想破壞曲面與地形結合。Bottom：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF038)

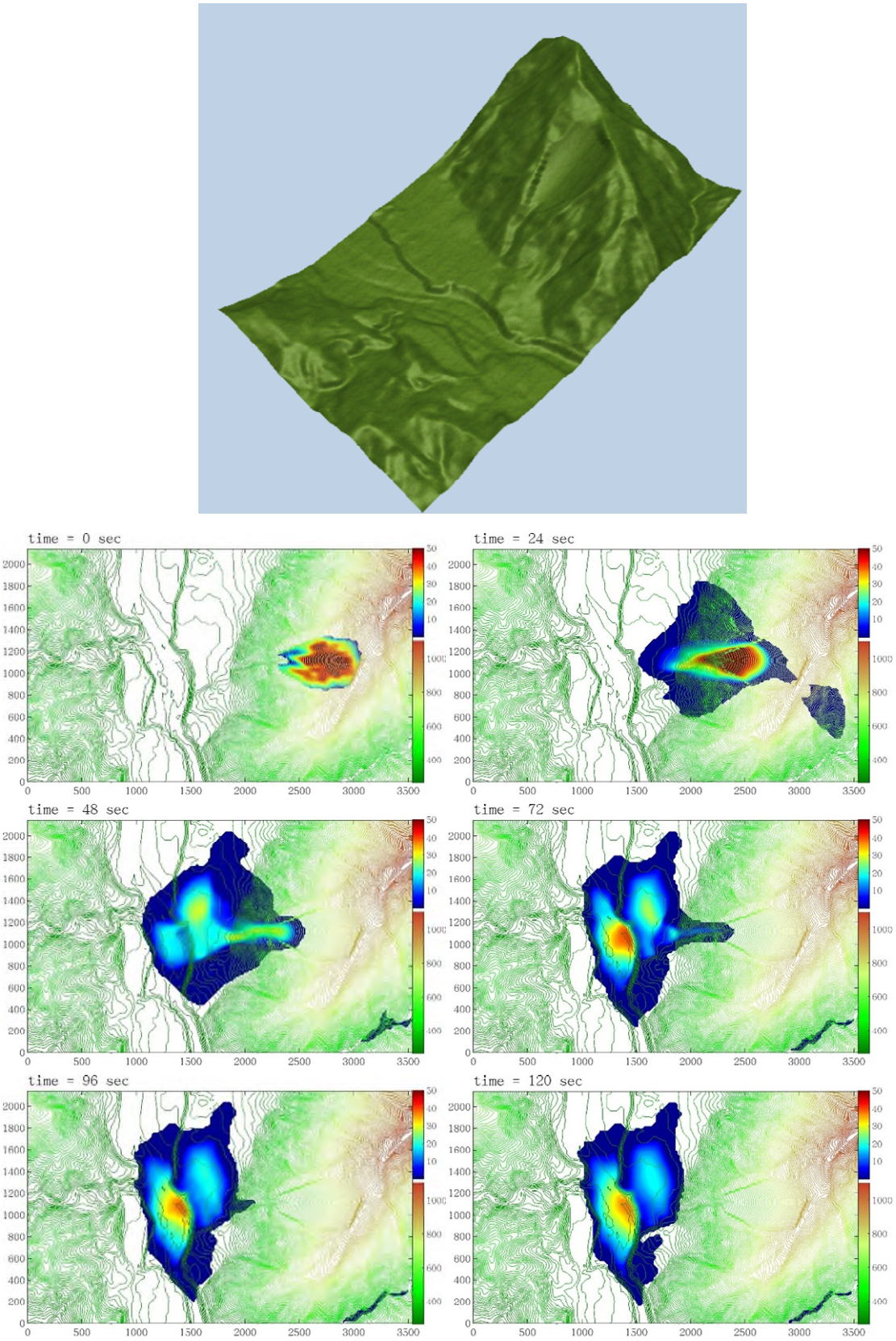


圖 3.6 Top：理想破壞曲面與地形結合。Bottom：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF043)

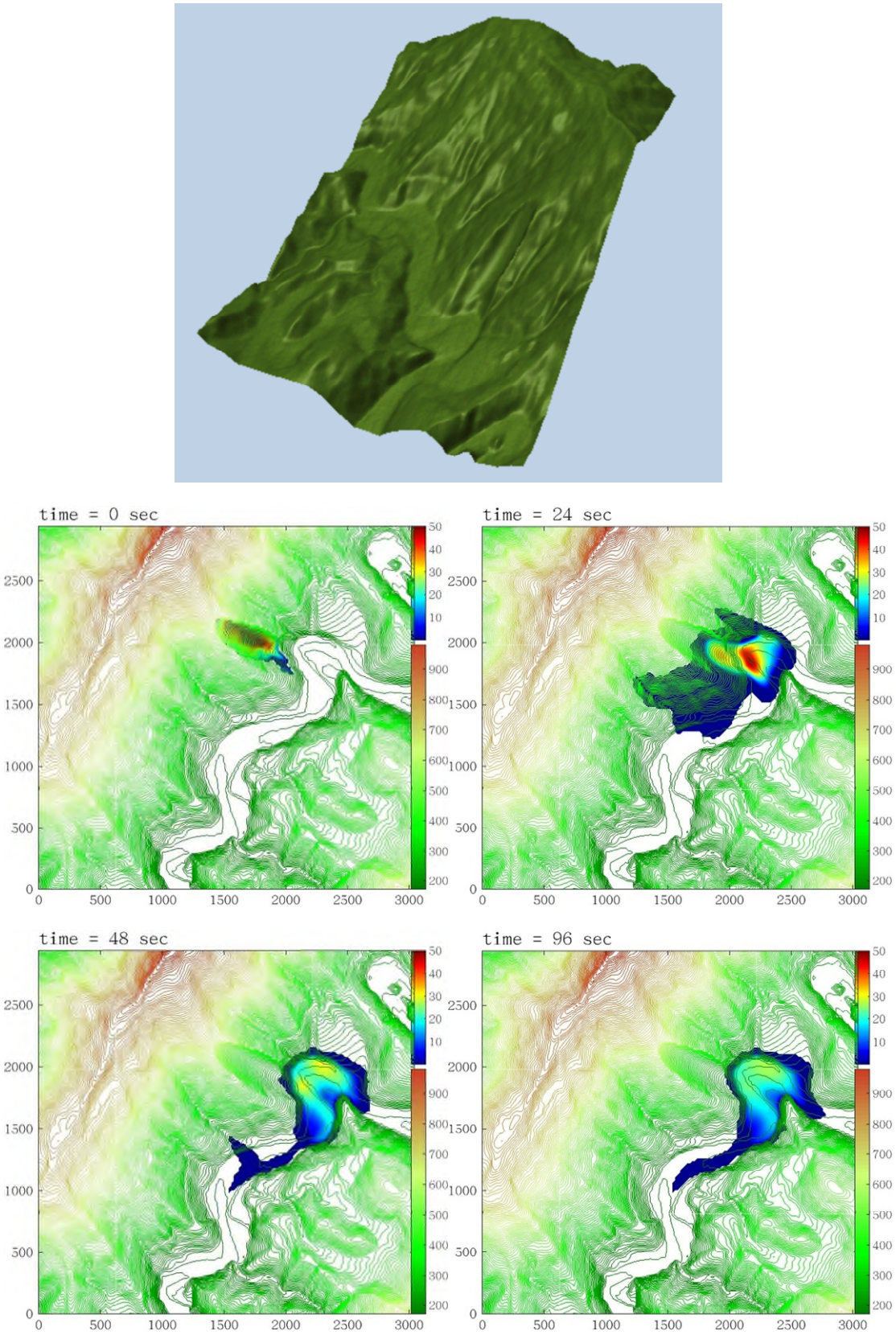


圖 3.7 Top：理想破壞曲面與地形結合。Bottom：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF053)

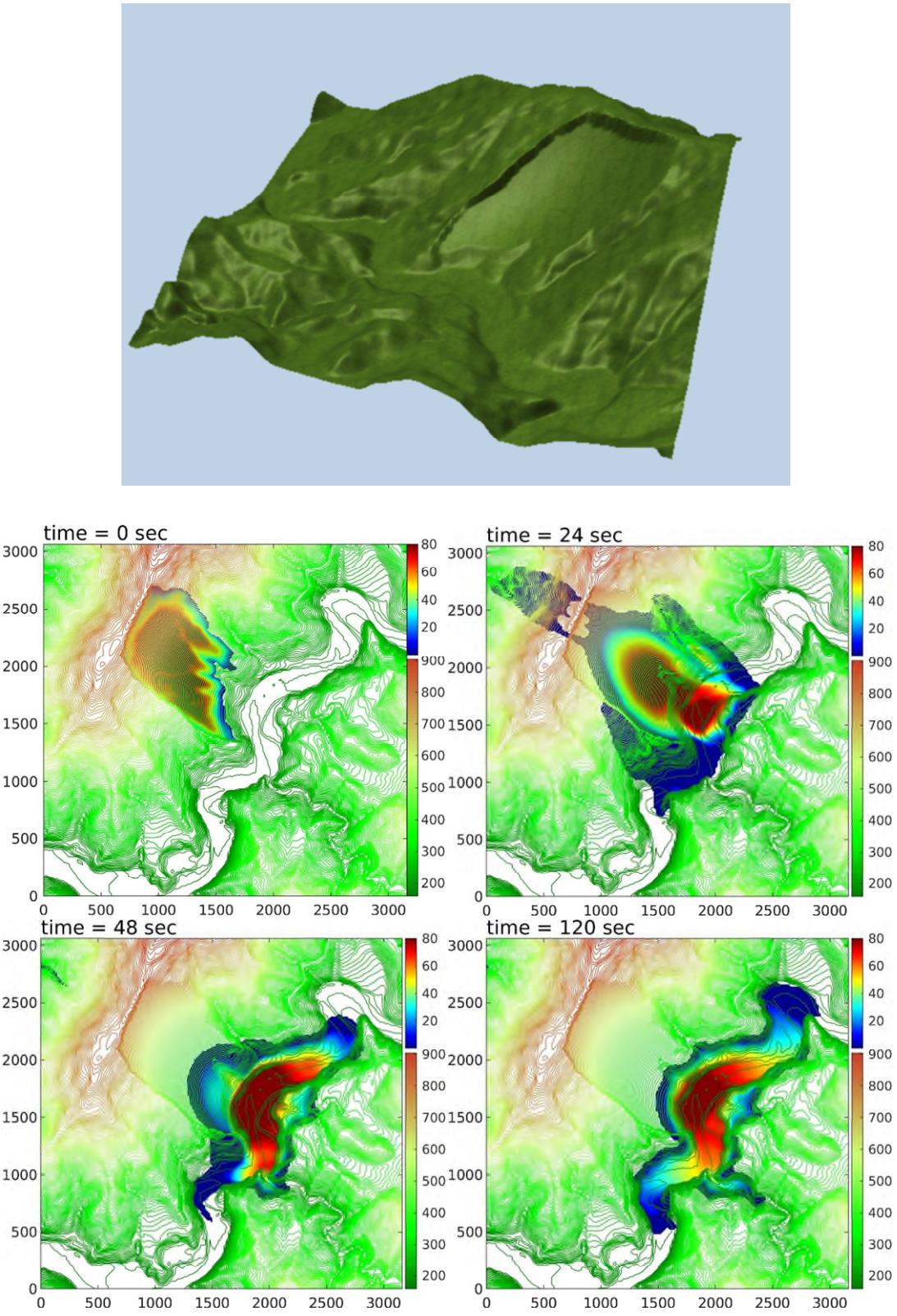


圖 3.8　Top：理想破壞曲面與地形結合。Bottom：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (D056)

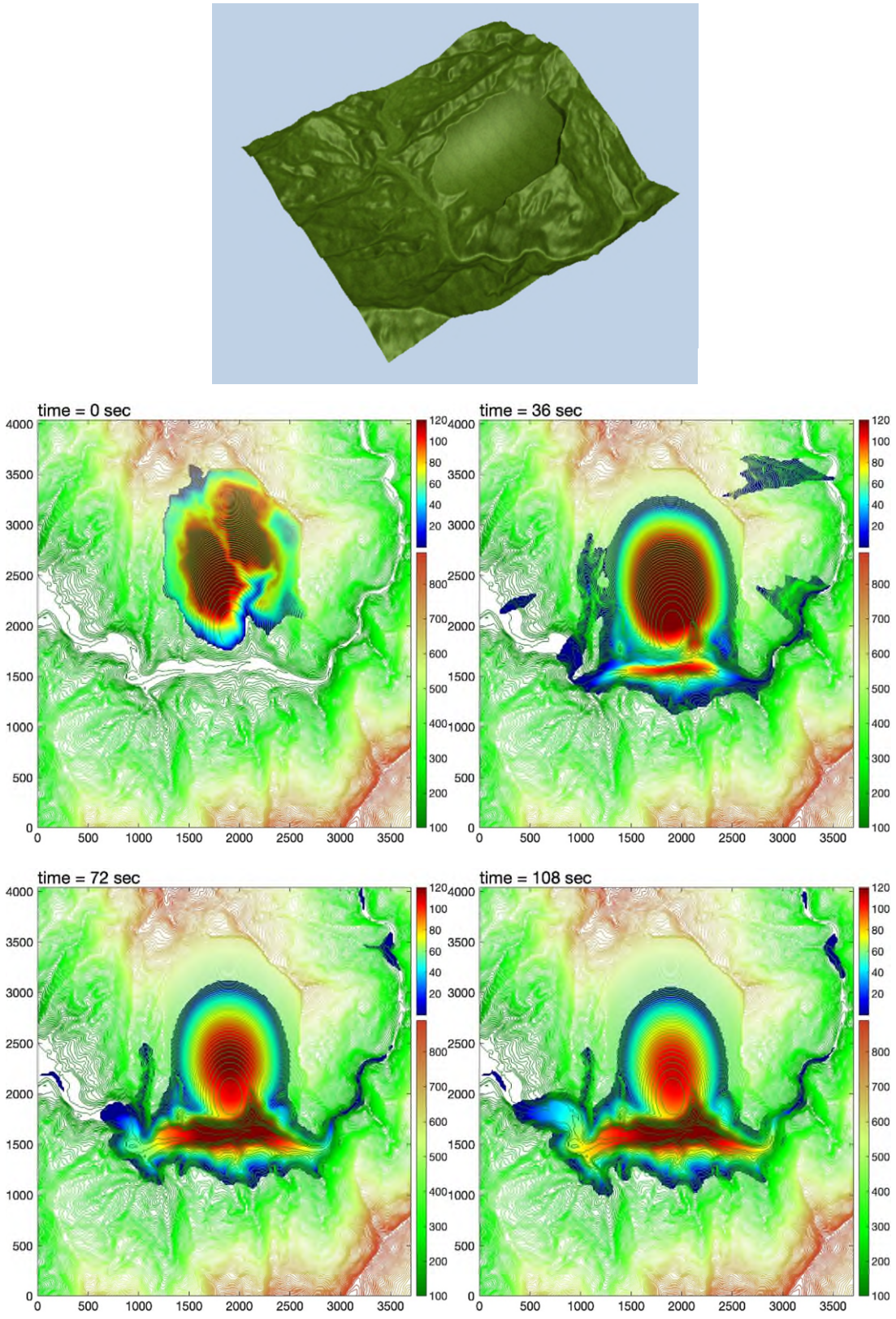


圖 3.9 Top：理想破壞曲面與地形結合。Bottom：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF080)

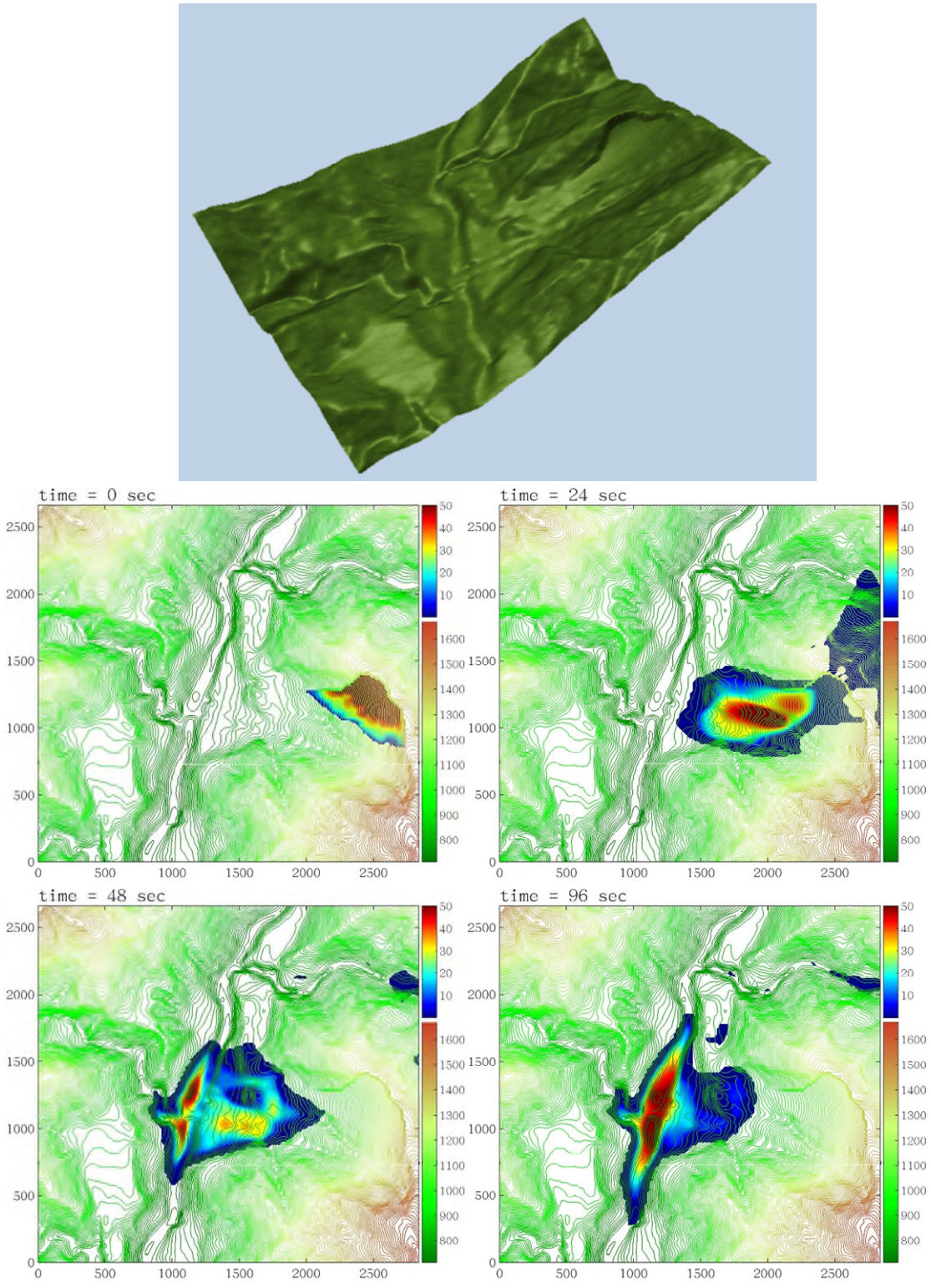


圖 3.10　Top：理想破壞曲面與地形結合。Bottom：數值模擬移動土石的深度隨時間之變化 (DF205)

第四章　理想崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討

第一節　擴大探討案例數量

本案利用林慶偉教授等人所執行行政院農業委員會水土保持局所之計畫「102 年高屏溪山坡地大規模崩塌致災潛勢調查評估」中，其計畫利用莫拉克颱風後之航照影像所判釋得知近期發生之大規模崩塌共 53 處(類型 A)，其總面積為 1,644.96 公頃為依據來進行分析。計畫中所圈畫高屏溪流域山坡在莫拉克颱風後所發生之大規模崩塌共 53 處中，由於所使用之崩塌前 DEM 資料並非第一時間所量測，其資料可能會因侵蝕、風化等原因導致其與真實崩塌情形有出入。本案以下方式來挑選出 24 處共 28 個資料位置進行理想崩塌曲面幾何特性的分析:

- 選取崩塌深度大於 0.5 m 之崩塌範圍進行分析，以避免破壞面邊緣導致分析結果之誤差。
- 破壞面的幾何形狀崎嶇破碎之區域切分成多個較完整之破壞面進行分析，並以破壞面積達一公頃以上且破壞面完整作為切分條件。
- 在選擇破壞面範圍時，應沿著崩塌深度等高線進行圈繪，保持其破壞面之完整性。

其 24 處編號、崩塌面積、最高點位的高程以及平均坡度彙整如表 4.1。針對已發生的崩塌事件，由於災後崩塌範圍其最高點的點位不一定位於理想破壞曲面上軸向的最高點，因此比照上期計畫之作法，採取多個點位的計算，亦即選擇災後崩塌範圍中最高與最低的點位各 10 個，其中每高低兩個點所形成的線作為軸向，因此每個資料位置各有 100 種組合進行運算。以軸方向的中點位置所在的深度(100 個點的平均值)作為參考崩塌深度來進行理想曲面的建構以及對應的崩塌量體估算。

依據所建構的理想破壞曲面所估算出來的崩塌量體為基準，將體積與真實的崩塌量體誤差最少的前 10%的理想坡面在軸向與側方向的各參數$\left(L_{1,2},d_{1,2},R_{1,2},\theta_{1,2},\phi_{1,2},d_{1,2}\right)$列入紀錄，其平均值將作為後續幾何特性探討基準。

表 4.1　高屏溪 24 處大規模崩塌區域面積、最高點高程以及平均坡度

崩塌編號	崩塌面積（公頃）	最高點位高程（公尺）	平均坡度（%）
05 (高雄市-甲仙區-A005)	40.648	1,338	29.71
06 (高雄市-那瑪夏區-A016)	15.837	908	22.04
08 (高雄市-那瑪夏區-A024)	18.1	1,420	32.66
09 (高雄市-那瑪夏區-A022)	11.147	1,282	43.44
10 高雄市-(那瑪夏區-A021)	19.171	1,694	33.14
11 (高雄市-那瑪夏區-A019)	26.77	1,120	26.45
13 (高雄市-那瑪夏區-A009)	11.934	955	36.5
19 (屏東縣-霧臺鄉-A037)	13.299	1,579	45.32
23 (屏東縣-霧臺鄉-A023)	11.009	1,237	29.4
25 (屏東縣-霧臺鄉-A028)	15.096	671	31.03
27 (屏東縣-霧臺鄉-A035)	15.32	936	33.59
28 (屏東縣-霧臺鄉-A031)	16.397	859	39.2
33 (屏東縣-瑪家鄉-A001)	45.397	1,080	29.61
34 (屏東縣-霧臺鄉-A041)	27.718	1,249	37.29
35 (屏東縣-三地門鄉-A006)	11.928	831	27.44
37 (屏東縣-瑪家鄉-A002)	10.447	1,075	31.62
41 (高雄市-桃源區-A146)	13.131	1,227	35.95
42 (高雄市-桃源區-A142)	10.518	1,200	35.58
44 (高雄市-六龜區-A005)	19.277	650	29.68
45(高雄市-桃源區-A102)	15.192	756	41.97
46 (高雄市-桃源區-A087)	11.782	1,171	32.38
47 (高雄市-桃源區-A053)	31.694	1,220	34.19

48 (高雄市-桃源區-A083)	28.014	1,095	26.59
50 (高雄市-桃源區-A111)	42.177	1,308	28.9

由於部分依據 DEM 所製作的崩塌區域相當破碎崎嶇且部分區域非常淺薄，無法建構合理的理想破壞曲面(誤差太大)。因此本研究將崩塌區域做適度的切割，使所應用的理想曲面能夠適用。圖 4.1 至 4.24 顯示所挑選之 24 處之崩塌深度大於 0.5 公尺範圍內之崩塌深度等高線圖以及切割的編號(共計 28 個資料點)。此外，在分析的過程中發現部分區域的地形資料 DEM 可能存在誤差，若使用原本災害前後之 DEM 來進行計算，崩塌邊緣處會產生明顯的數值誤差，因此本團隊以原始大規模崩塌區會發生數值誤差的區域為基準，向外延伸圈繪出較大的範圍，以避免計算時所發生在崩塌邊緣的數值誤差。對於經過這樣修正的地形資料，特別以紅色橫線範圍標示「102 年高屏溪山坡地大規模崩塌致災潛勢調查評估」報告中所圈繪之大規模崩塌區(如圖 4.8、圖 4.10、圖 4.11、圖 4.13、圖 4.14、圖 4.16、圖 4.17、圖 4.22)，而其所製作的 28 個理想曲面以及對應的原崩塌破壞面地形則收錄於附錄四。

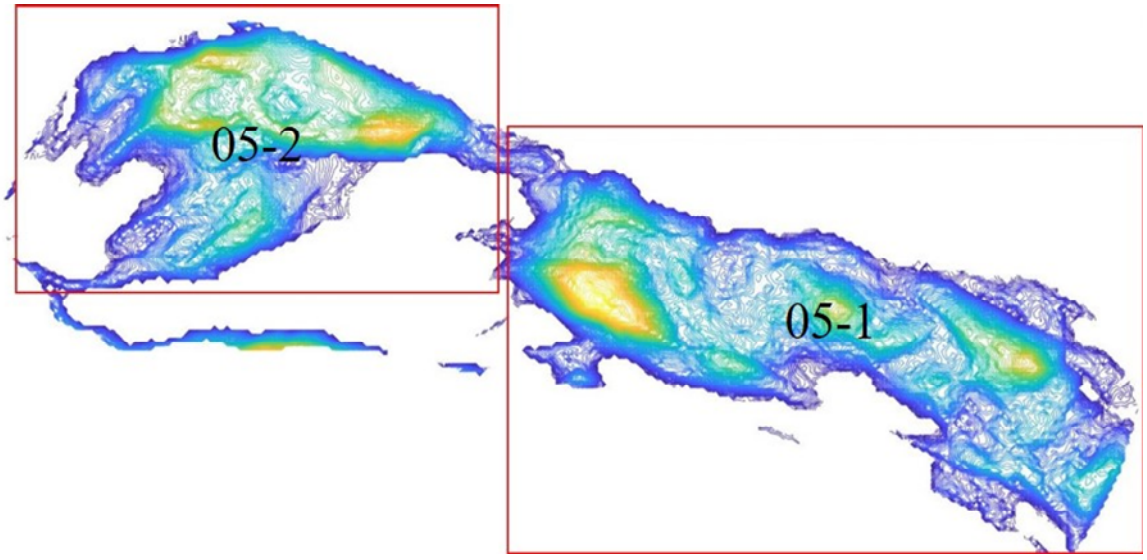


圖 4.1 崩塌編號 05 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

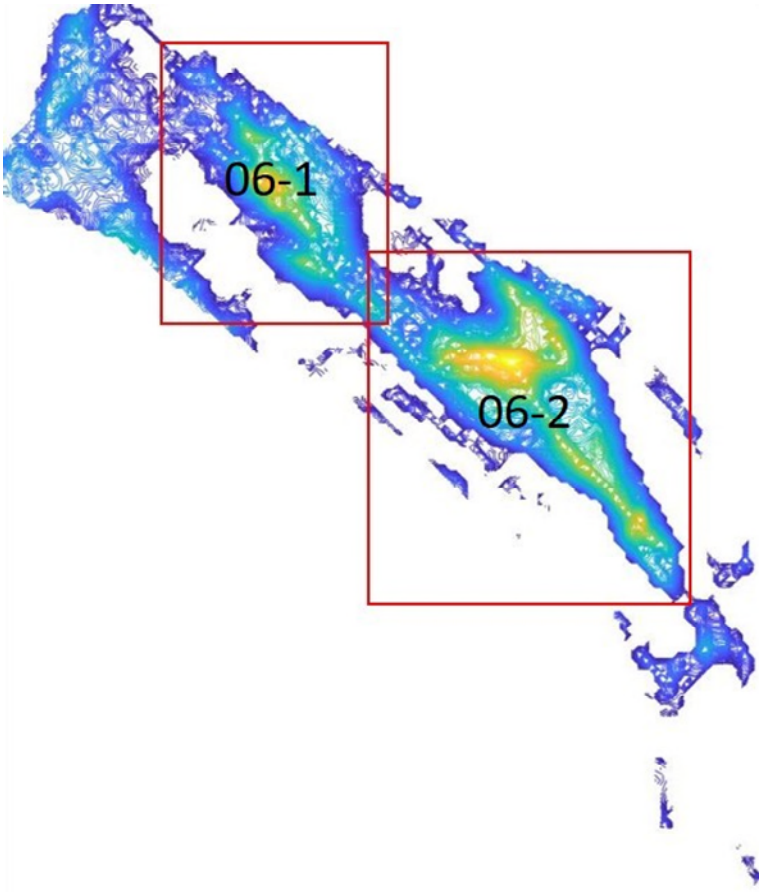


圖 4.2 崩塌編號 06 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

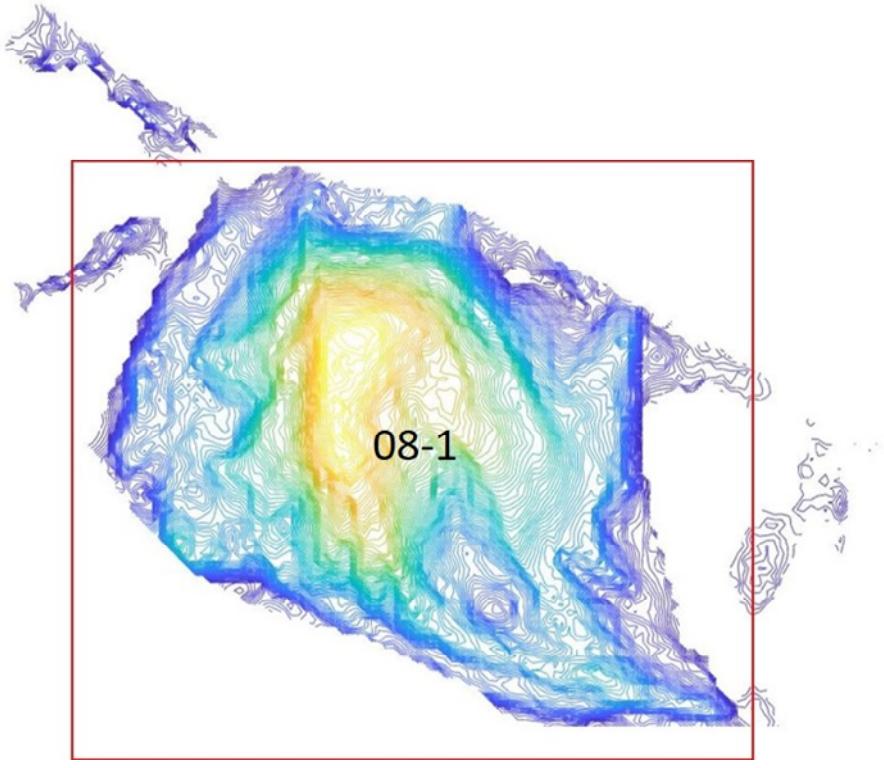


圖 4.3 崩塌編號 08 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

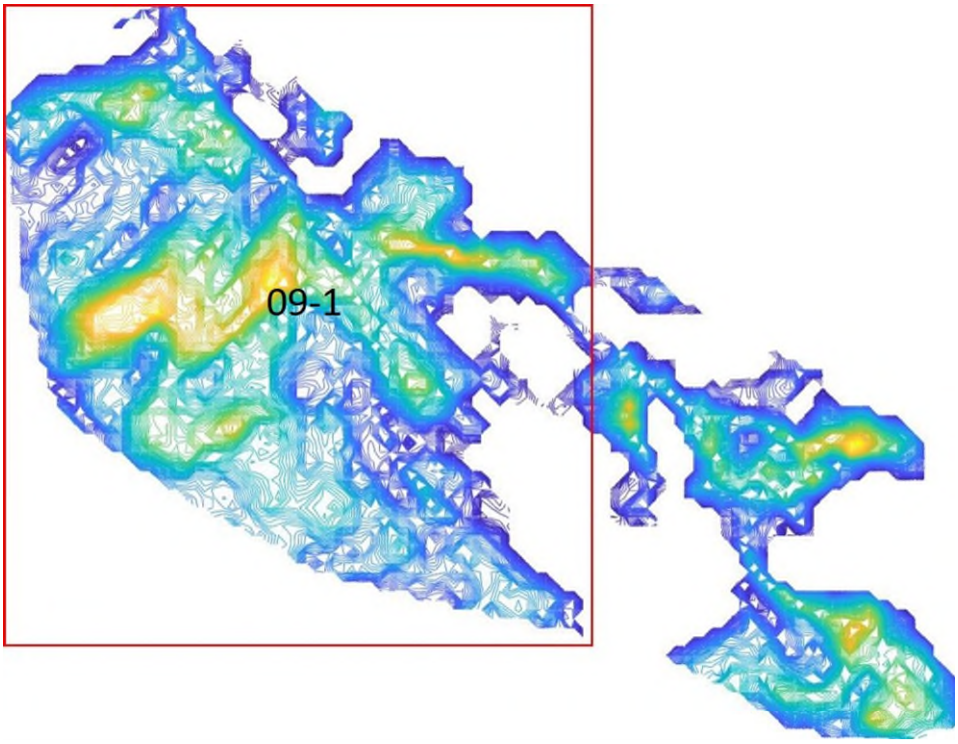


圖 4.4 崩塌編號 09 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

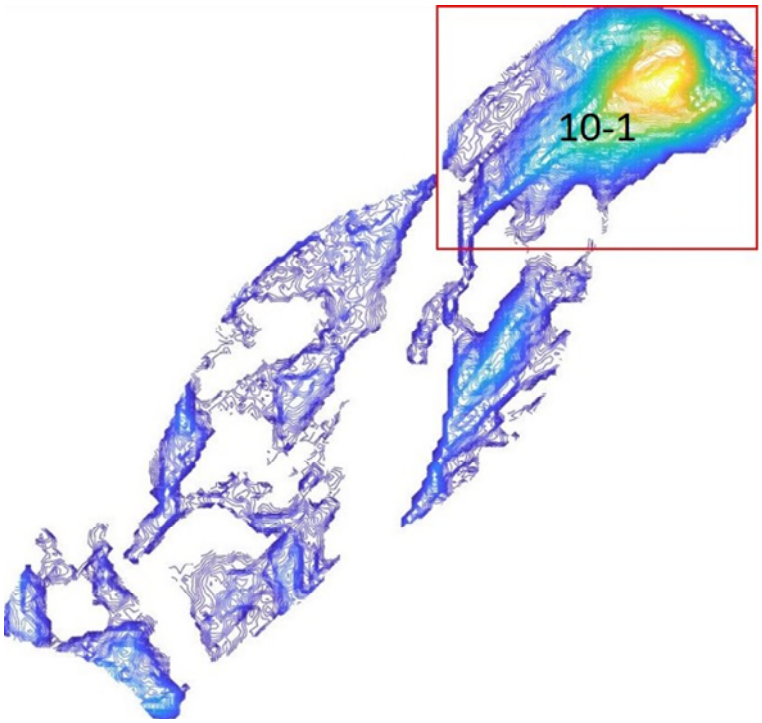


圖 4.5 崩塌編號 10 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

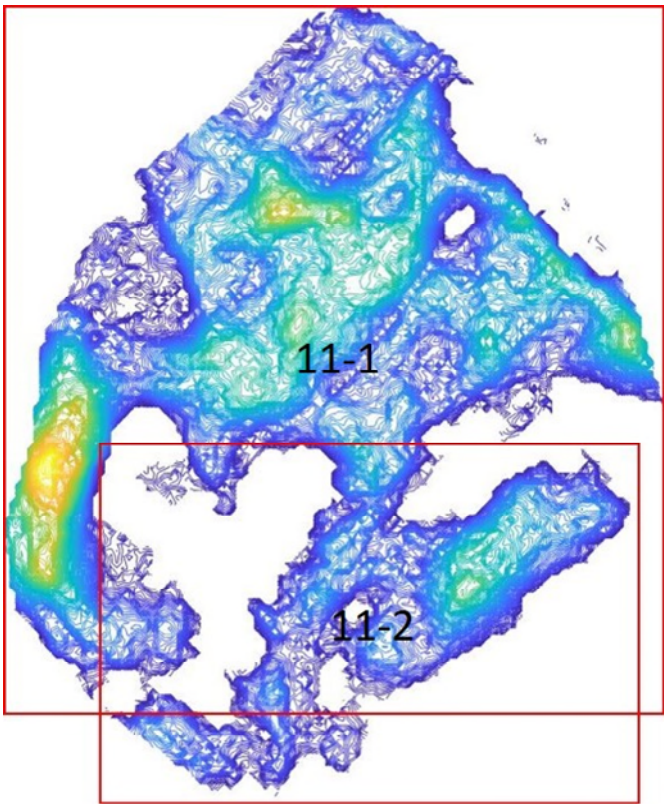


圖 4.6 崩塌編號 11 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

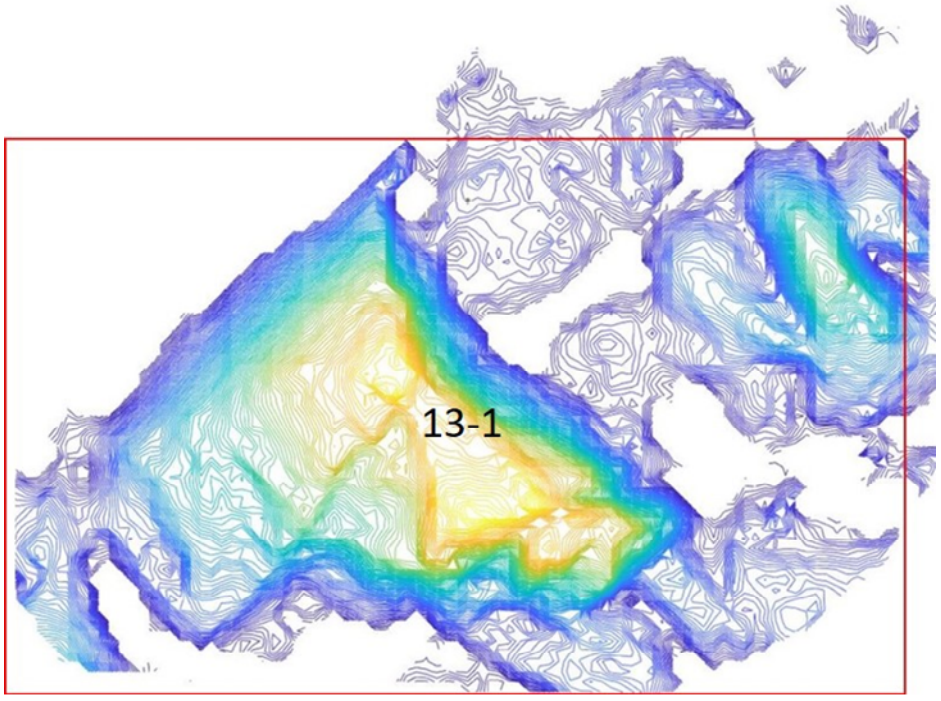


圖 4.7 崩塌編號 13 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

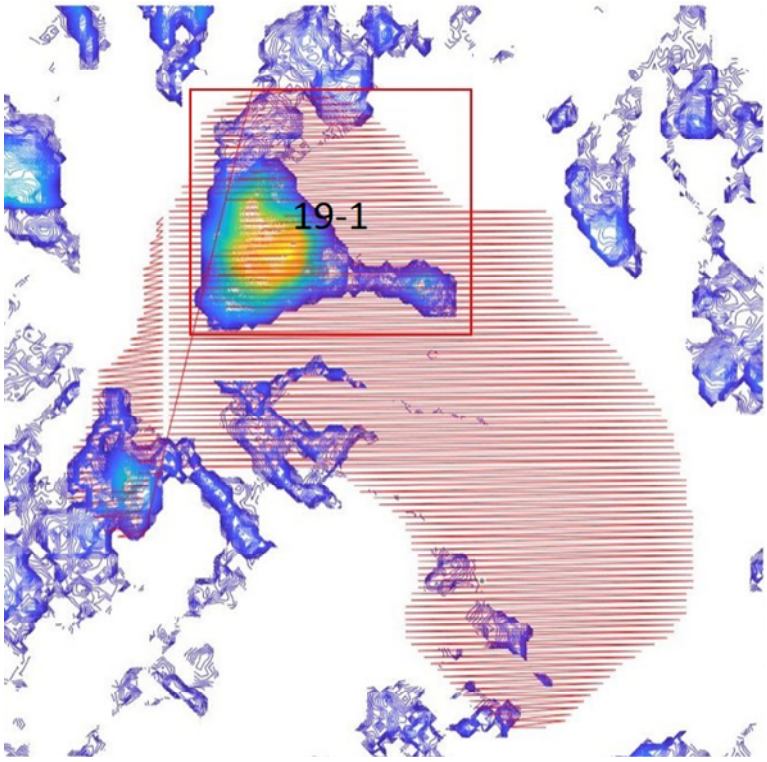


圖 4.8 崩塌編號 19 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

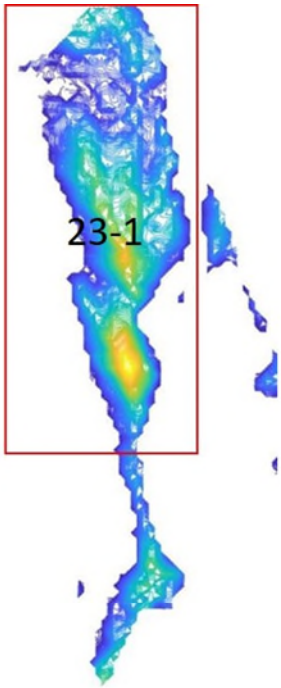


圖 4.9 崩塌編號 23 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

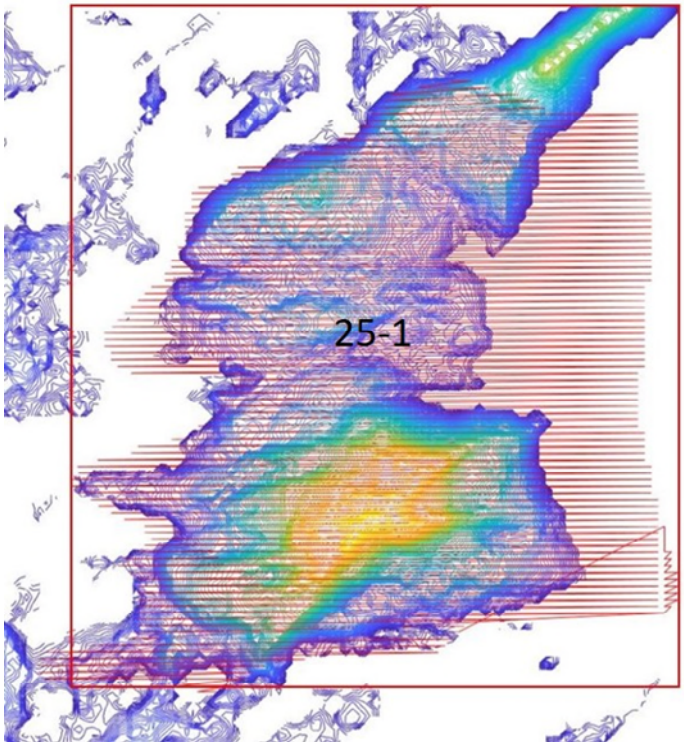


圖 4.10 崩塌編號 25 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

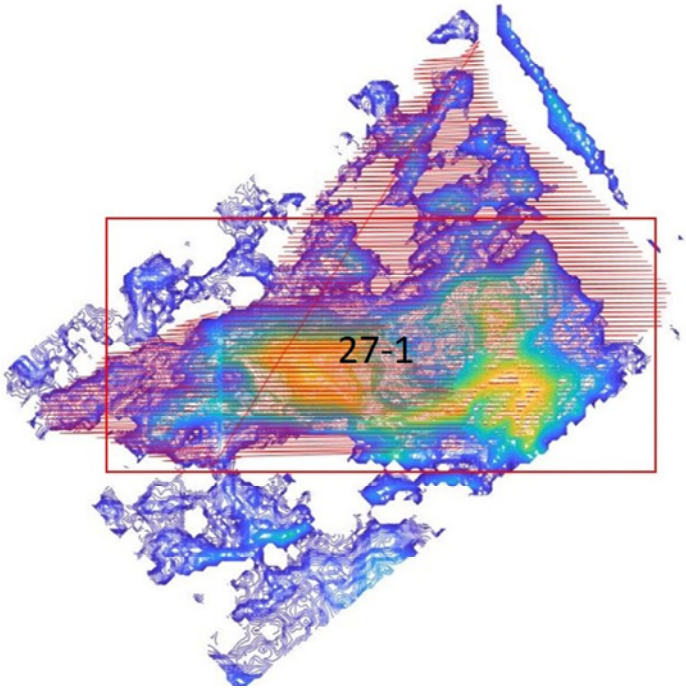


圖 4.11 崩塌編號 27 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

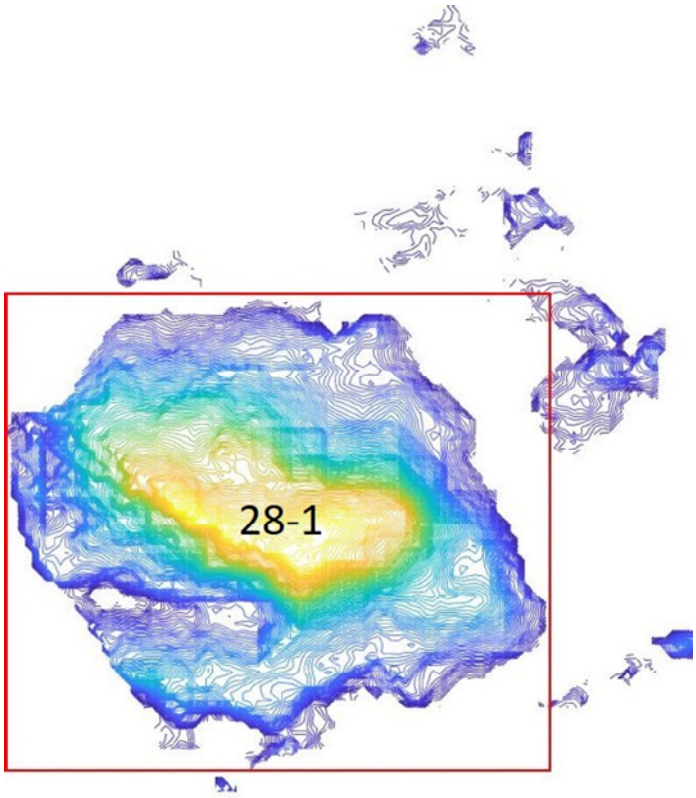


圖 4.12. 崩塌編號 28 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

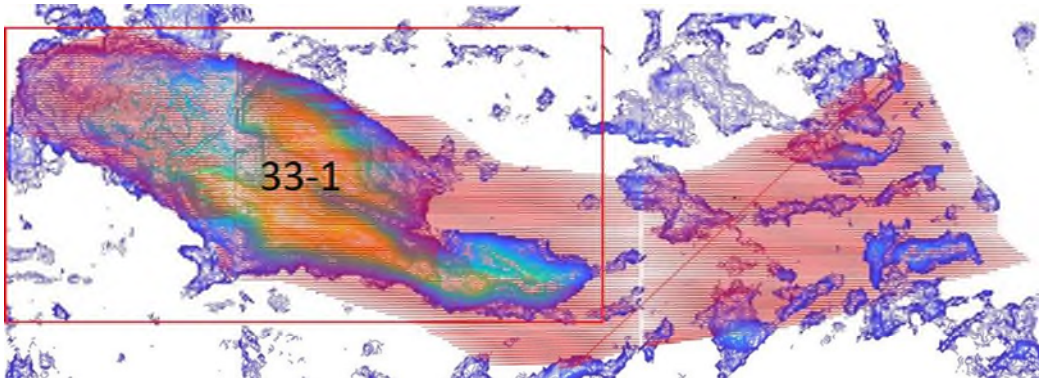


圖 4.13 崩塌編號 33 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

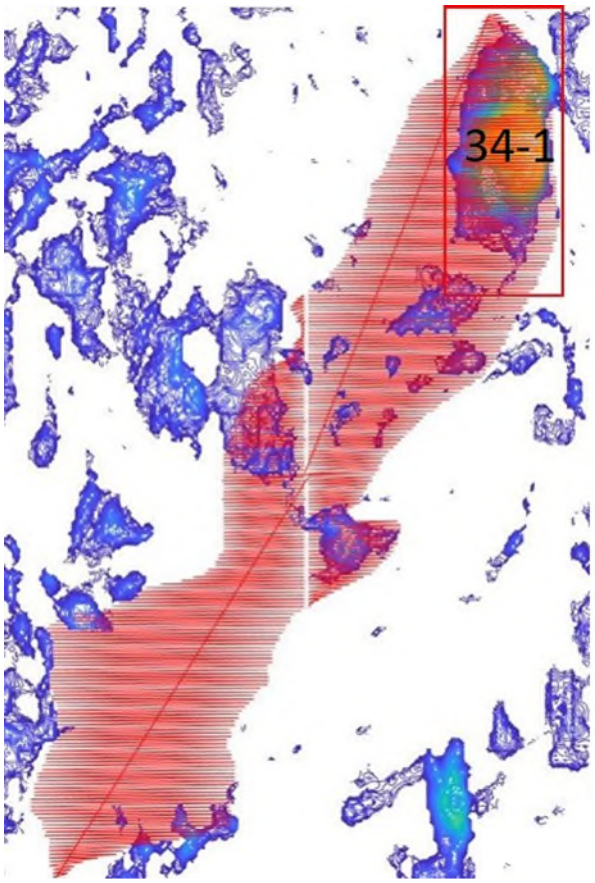


圖 4.14 崩塌編號 34 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

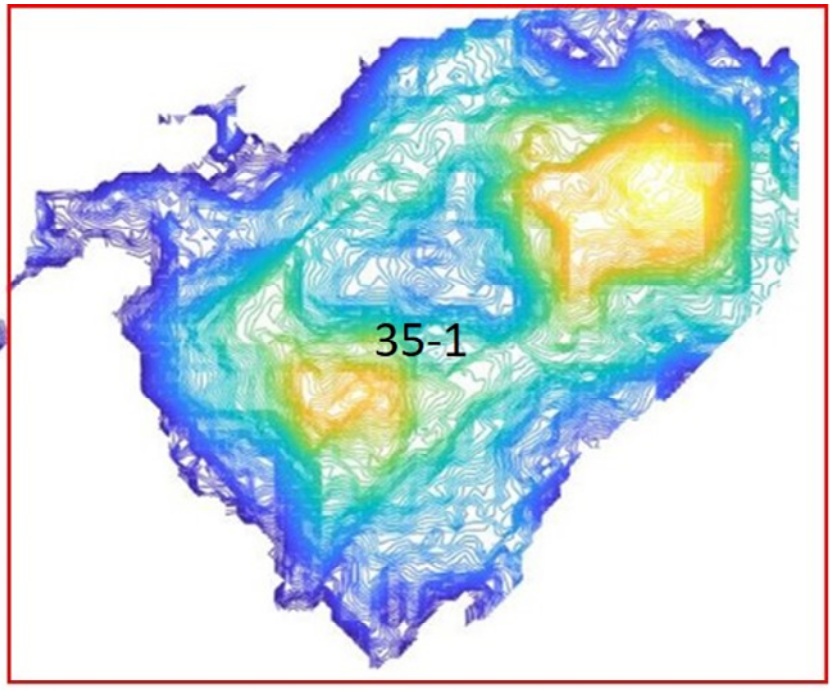


圖 4.15 崩塌編號 35 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

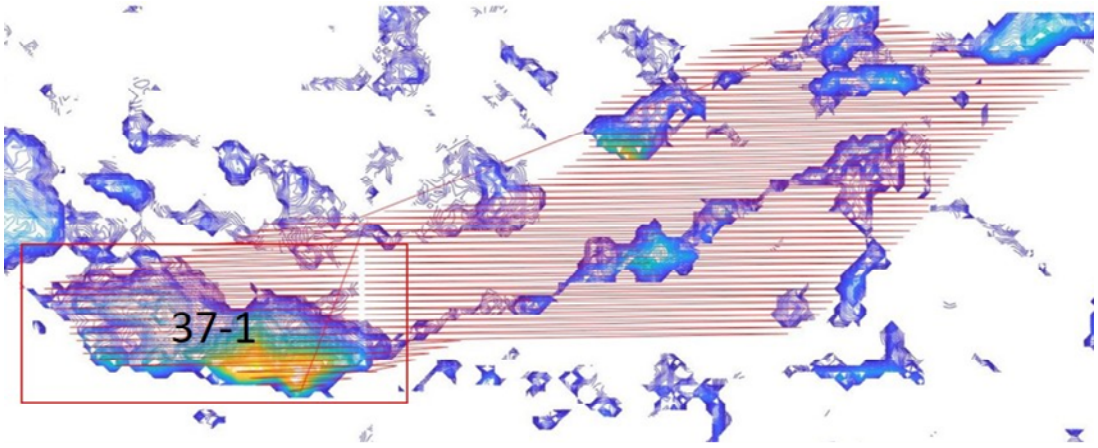


圖 4.16. 崩塌編號 37 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

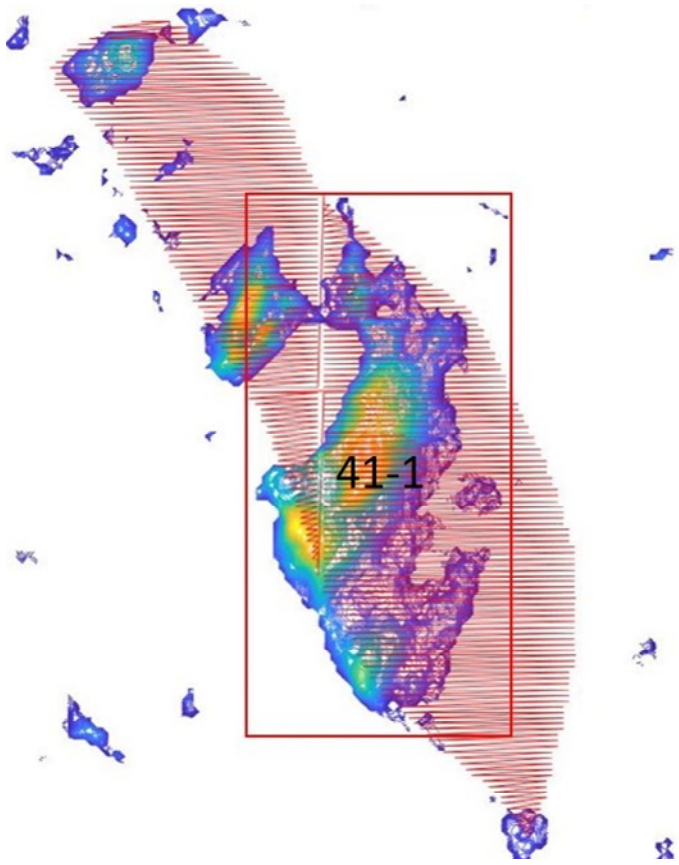


圖 4.17. 崩塌編號 41 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

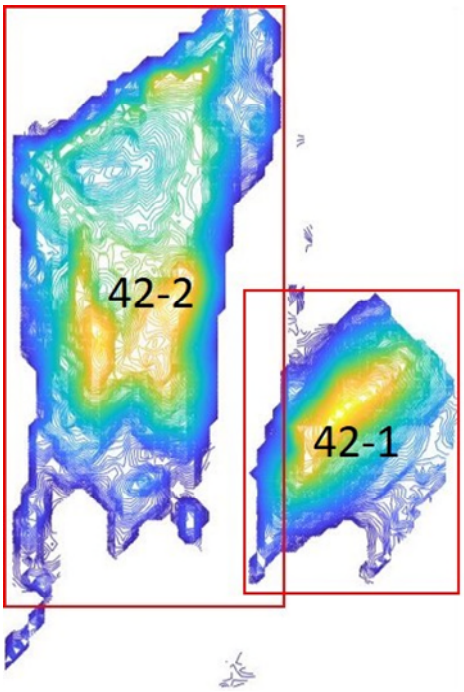


圖 4.18 崩塌編號 42 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

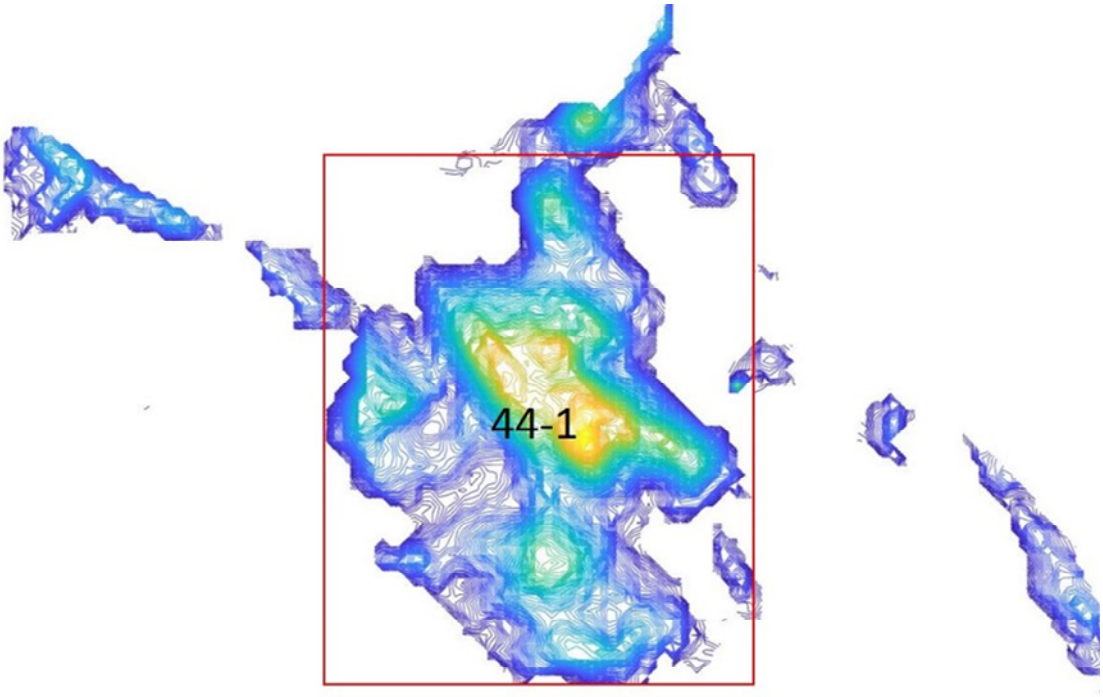


圖 4.19 崩塌編號 44 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

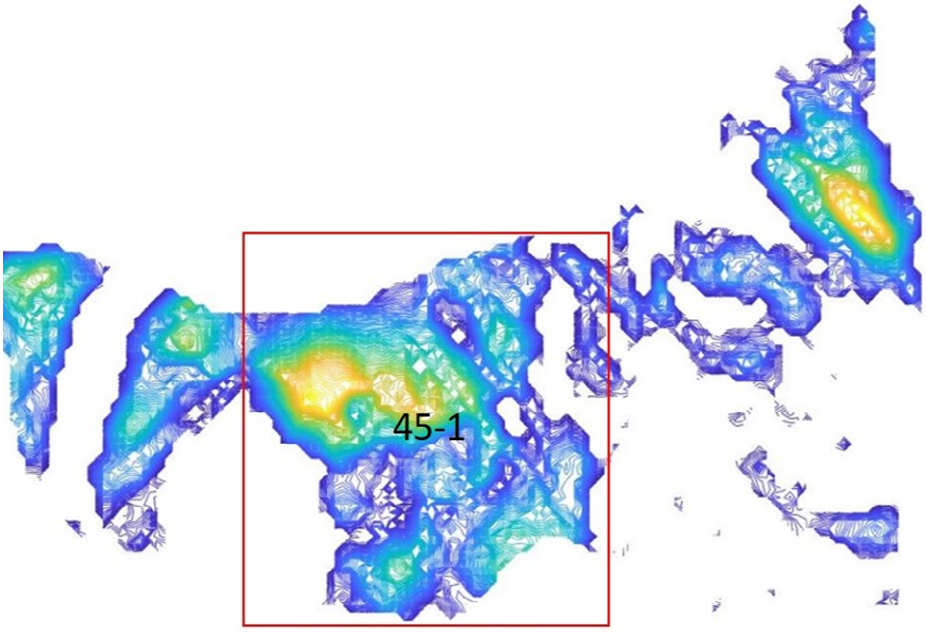


圖 4.20 崩塌編號 45 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)



圖 4.21 崩塌編號 46 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

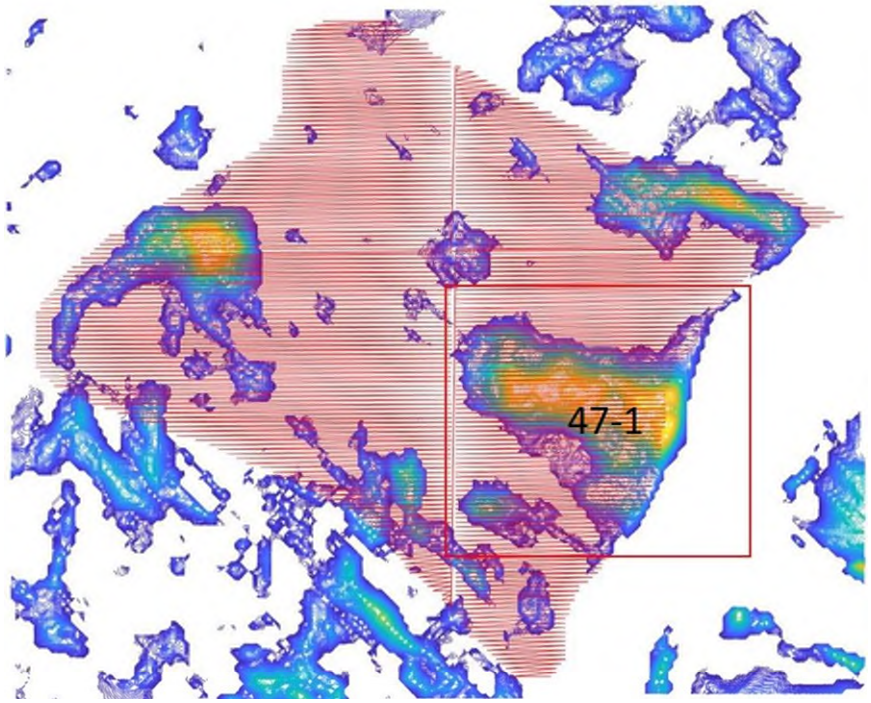


圖 4.22 崩塌編號 47 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

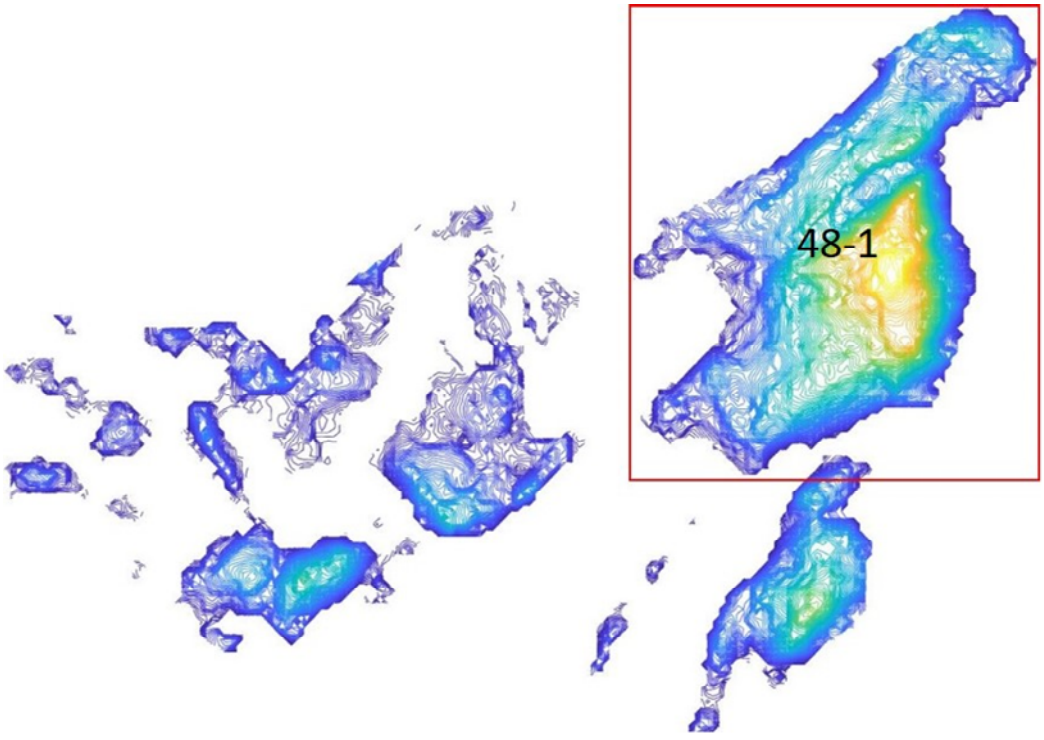


圖 4.23 崩塌編號 48 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

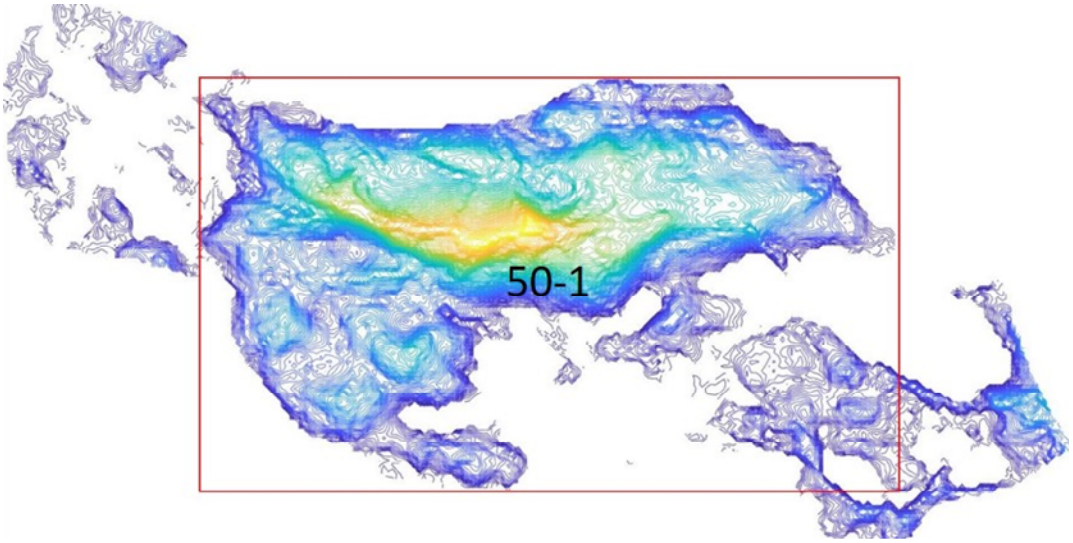


圖 4.24 崩塌編號 50 之崩塌深度等高線圖(崩塌深度大於 0.5 公尺)

表 4.2 與 4.3 羅列針對各崩塌區塊(28 個區塊)運算所得(崩塌體積差異)誤差最小前 10 組數據的平均值(幾何參數)，相關的編號可參閱圖 4.1 至 4.24。表 4.2 與 4.3 中所表示的參數說明如下：

A_d：各區塊崩塌深度大於 0.5 m 範圍內之崩塌面積。

V_d：各區塊崩塌深度大於 0.5 m 範圍內之崩塌體積。

V_{cal}：由理想崩塌破壞曲面估算之崩塌體積。

r_v：與崩塌體積(V_d)差異最小的前 10 組體積差異百分比的平均。

L_1：各區塊之軸向軸長度。

L_2：各區塊之側向軸長度。

d_{avg}：各區塊之平均崩塌深度。

d_{max}：各區塊崩塌發生前後相差最大之深度。

Abs：理想曲面與崩塌後 DEM 高程之誤差絕對值，

$$\text{Abs} = \frac{\left| Z_{\text{ideal}} - Z_{\text{post_event}} \right|}{N_Z} \text{。}$$

Z_{ideal}：理想曲面之 DEM 高程。

Z_{post_event}：崩塌後之 DEM 高程。

N_Z：崩塌範圍內高程點位之數量。

SD：為理想曲面與崩塌後 DEM 高程之標準差，

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\left(Z_{\text{ideal}} - Z_{\text{post_event}} \right)^2}{N_Z}} \text{。}$$

d_1：各區塊軸向軸中點至崩塌後 DEM 之垂直距離，即軸向最大深度。

d_2：各區塊軸向中點投影至側向軸的點位，該點位至崩塌後 DEM 之垂直距離，即側向最大深度。

R_1：各區塊理想曲面之軸向曲率半徑。

R_2：各區塊理想曲面之側向曲率半徑。

θ_1：各區塊軸向軸之傾角。

θ_2：各區塊側向軸之傾角。

θ_{bgn}：各區塊理想曲面之起始下傾角。

f ：各區塊軸向軸傾角與理想曲面起始下傾角之角度和，

$f = \theta_1 + q_{bgn}$。

L_1/L_2： 理想曲面之真圓度。

$CurvX_b$ ：各區塊崩塌前軸向軸之曲率。

$CurvY_b$ ：各區塊崩塌前側向軸之曲率。

rms_X ：與崩塌體積(V_d)差異最小的前 10 組崩塌前軸向軸曲率的方均根。

rms_Y ：與崩塌體積(V_d)差異最小的前 10 組崩塌前側向軸曲率之方均根。

rms 之計算方式： $rms = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{10}(Curv_b)^2}{n}}$

表 4.2　高屏溪 24 處(28 個區塊)大規模崩塌區域所建構的理想破壞參數值 (part I)

參數 / 編號	A_d (m^2)	V_d (m^3)	V_{cal} (m^3)	r_v (%)	L_1 (m)	L_2 (m)	d_{avg} (m)	d_{max} (m)	Abs (m)	SD (m)	d_1 (m)	d_2 (m)
05-1	164,850	2,427,722	2,845,645	17.21	896.16	215.75	14.72	45.18	6.7	12.6	45.89	6.6
05-2	102,425	1,665,283	1,752,243	5.22	634.45	240.89	16.26	40.42	5.2	8.04	21.51	0.34
06-1	25,225	180,422	207,819	15.18	292.15	115.26	7.15	21.43	2.28	4.77	12.4	16.55
06-2	35,475	342,127	360,895	5.49	375.62	135.49	9.64	24.27	2.95	4.97	7.1	5.12
08-1	115,425	2,547,237	2,771,554	8.81	557.64	323.73	22.07	55.67	6.97	11.62	32.77	9.29
09-1	64,650	712,707	822,519	15.41	520.48	245.06	11.02	27.44	5.68	10.07	49.6	48.14
10-1	46,300	810,747	831,692	2.58	415.61	157.61	17.51	49.19	5.16	9.2	21.59	15.43
11-1	150,950	1,453,342	1,501,442	3.31	436.42	440.87	9.63	31.3	2.39	4	12.79	13.73
11-2	49,100	307,430	715,350	132.69	170.65	268.34	6.26	19.96	10.77	15.63	1.15	0.81
13-1	60,175	1,246,874	1,440,354	15.52	445.38	166.85	20.72	53.34	7.81	15.08	41.75	28.71
19-1	19,075	331,761	354,422	6.83	294.59	70.27	17.39	54.96	5.59	9.78	4.43	3.87
23-1	30,525	231,002	254,423	10.14	407.31	96.28	7.57	21.41	2.17	4.39	7.98	18.58
25-1	125,775	1,751,296	2,328,802	32.98	717.62	412.34	13.92	43.54	9.58	17.87	77.55	23.86
27-1	96,900	1,480,282	1,639,188	10.73	619.99	181.24	15.28	37.88	4.59	9.73	25.9	25.52
28-1	89,650	2,190,756	2,552,609	16.52	480.22	336.72	24.44	65.89	10.88	17.03	42.09	56.91
33-1	226,025	4,277,095	4,476,584	4.66	1067.17	306.68	18.92	52.87	4.45	7.66	31.64	33.3
34-1	35,525	701,206	772,282	10.14	369.84	135.44	19.74	46.35	4.89	9.74	16.04	24.03
35-1	85,200	1,483,192	1,573,989	6.12	478.57	258.57	17.41	40.41	4.67	8.22	31.49	7.7

參數 / 編號	A_d (m^2)	V_d (m^3)	V_{cal} (m^3)	r_v (%)	L_1 (m)	L_2 (m)	d_{avg} (m)	d_{max} (m)	Abs (m)	SD (m)	d_1 (m)	d_2 (m)
37-1	20,200	164,992	172,285	4.42	306.84	82.22	8.17	25.49	2.4	4.43	13.88	8.25
41-1	51,225	388,659	543,825	39.92	572.36	183.89	7.59	24.4	6.82	12.87	24.75	2.95
42-1	16,975	226,311	230,438	1.82	218.53	121.95	13.33	33.34	2.59	4.15	15.83	24.5
42-2	43,900	605,431	676,019	11.66	494.36	134.1	13.79	30.73	4.08	7.97	28.16	30.41
44-1	53,400	543,108	606,568	11.68	358.28	195.52	10.17	31.19	3.34	6.05	13.71	8.05
45-1	37,850	336,763	505,195	50.01	304.24	205.02	8.9	25.27	8.2	15.47	18.17	16.99
46-1	16,325	134,270	142,993	6.5	177.16	120.97	8.22	19.38	3.43	5.17	13.41	2.31
47-1	37,175	366,310	464,530	26.81	309.62	137.69	9.85	22.01	4.83	9.56	8.46	6.11
48-1	64,425	759,293	767,203	1.04	475.14	209.81	11.79	30.28	2.53	3.96	19.26	10.5
50-1	212,000	4,185,647	4,537,040	8.4	910.38	429.3	19.74	64.24	6.2	10.51	61.81	40.15

表 4.3　高屏溪 24 處(28 個區塊)大規模崩塌區域所建構的理想破壞參數 (part II)

參數 / 編號	R_1 (m)	R_2 (m)	θ_1	θ_2	θ_{bgn}	f	L_1/L_2	$CurvX_b$	$CurvY_b$	rms_X	rms_Y
05-1	2408.55	897.22	23.61	9.67	10.72	34.33	4.15	-2.67×10^{-4}	-1.68×10^{-3}	2.89×10^{-4}	1.69×10^{-3}
05-2	2704.78	21130.34	29.77	2.84	6.74	36.5	2.63	-1.24?10^{-3}	-4.28×10^{-3}	1.24×10^{-3}	4.28×10^{-3}
06-1	919.69	108.78	19.59	2.21	9.15	28.75	2.53	-1.74×10^{-4}	4.93×10^{-3}	3.09×10^{-4}	4.96×10^{-3}
06-2	2611.66	457.12	17.73	9.21	4.13	21.86	2.77	-7.67×10^{-4}	-4.29×10^{-3}	9.71×10^{-4}	4.32×10^{-3}
08-1	1368.82	1441.24	28.83	10.98	11.76	40.59	1.72	-9.16×10^{-4}	-2.27×10^{-3}	9.26×10^{-4}	2.27×10^{-3}
09-1	940.75	181.61	42.24	8.77	16.06	58.31	2.12	1.19×10^{-3}	2.03×10^{-3}	1.20×10^{-3}	2.05×10^{-3}
10-1	1195.7	209.12	32.55	1.54	10.01	42.56	2.64	-8.08×10^{-4}	-1.11×10^{-3}	8.14×10^{-4}	1.13×10^{-3}
11-1	2098.76	1778.77	27.17	2.67	5.97	33.13	0.99	-7.29×10^{-4}	-4.86×10^{-4}	7.47×10^{-4}	5.06×10^{-4}
11-2	3903.76	11191.19	35.75	4.83	1.26	37.01	0.64	-6.65×10^{-4}	-6.75×10^{-4}	6.73×10^{-4}	6.86×10^{-4}
13-1	734.86	143.39	34.14	21.12	17.64	51.77	2.67	5.68×10^{-4}	-2.52×10^{-3}	5.71×10^{-4}	2.53×10^{-3}
19-1	3490.29	164.83	45.46	4.54	2.42	47.88	4.19	-2.84×10^{-3}	-7.58×10^{-3}	2.87×10^{-3}	7.62×10^{-3}
23-1	2943.4	72.77	27.84	11.4	3.97	31.81	4.23	-1.16×10^{-3}	2.14×10^{-3}	1.36×10^{-3}	2.48×10^{-3}
25-1	940.5	931.11	23.45	14.36	22.43	45.88	1.74	3.18×10^{-4}	-2.27×10^{-3}	4.18×10^{-4}	2.30×10^{-3}
27-1	2130.02	174.32	28.85	4.38	8.37	37.22	3.42	-1.07×10^{-4}	9.74×10^{-4}	1.57×10^{-4}	9.76×10^{-4}
28-1	855.31	289.89	35.18	18.42	16.31	51.49	1.43	-1.27×10^{-3}	-1.08×10^{-4}	1.28×10^{-3}	2.52×10^{-4}

參數 / 編號	R_1 (m)	R_2 (m)	θ_1	θ_2	θ_{bgn}	f	L_1/L_2	$CurvX_b$	$CurvY_b$	rms_X	rms_Y
33-1	4952	369.79	24.31	0.81	6.19	30.49	3.48	-6.23×10^{-4}	-5.33×10^{-4}	6.32×10^{-4}	5.48×10^{-4}
34-1	1240.33	114.01	30.03	20.92	8.6	38.63	2.73	-7.97×10^{-4}	-1.14×10^{-3}	1.23×10^{-3}	1.40×10^{-3}
35-1	1,005.39	1,091.63	23.41	2.94	13.78	37.19	1.85	-1.97×10^{-4}	-1.08×10^{-3}	2.09×10^{-4}	1.08×10^{-3}
37-1	976.09	113.07	28.7	18.65	9.11	37.81	3.73	2.77×10^{-4}	8.55×10^{-3}	2.81×10^{-4}	8.60×10^{-3}
41-1	2029.04	1510.62	34.96	18.27	8.11	43.07	3.11	-6.48×10^{-3}	-4.01×10^{-3}	6.55×10^{-3}	4.31×10^{-3}
42-1	442.36	90.43	29.95	15.09	14.32	44.27	1.79	-1.69×10^{-4}	-1.74×10^{-3}	1.86×10^{-4}	1.75×10^{-3}
42-2	1285.33	90.61	31.53	12.67	11.1	42.62	3.69	-7.12×10^{-4}	1.83×10^{-4}	7.29×10^{-4}	2.15×10^{-4}
44-1	1315.22	599.02	26.63	1.71	7.83	34.46	1.83	-3.21×10^{-4}	-1.25×10^{-3}	3.27×10^{-4}	1.26×10^{-3}
45-1	878.43	338.14	43.05	17.31	9.97	53.02	1.48	-2.32×10^{-3}	-1.81×10^{-3}	2.32×10^{-3}	1.82×10^{-3}
46-1	380.26	823.46	38.66	15.28	13.49	52.15	1.46	-4.34×10^{-4}	2.73×10^{-4}	7.15×10^{-4}	1.17×10^{-3}
47-1	1754.88	404.83	35.98	15.08	5.06	41.04	2.25	1.73×10^{-3}	1.28×10^{-3}	1.74×10^{-3}	1.30×10^{-3}
48-1	1581.53	533.44	21.3	7.22	8.64	29.94	2.26	-5.05×10^{-4}	-2.84×10^{-3}	5.26×10^{-4}	2.85×10^{-3}
50-1	1841.48	601.17	22.38	9.24	14.31	36.7	2.13	-2.56×10^{-4}	-1.91×10^{-3}	3.16×10^{-4}	1.93×10^{-3}

第二節　誤差探討

在林慶偉教授等人於 102 年所執行之計畫所圈畫高屏溪流域山坡在莫拉克颱風後所發生之 53 處大規模崩塌，其形狀崎嶇不規則，造成不易使用理想曲面來近似破壞面(誤差過大)。如表 4.2 所示，體積誤差大於 30%的區域分別為：編號 11-2 (132.69%)、編號 25-1 (32.98%)、編號 41-1 (39.92%)以及編號 45-1 (50.01%)。編號 11-2、編號 41-1 與編號 45-1 三個區域(圖 4.6、圖 4.17 與圖 4.20)其破壞面的幾何形狀均極為崎嶇破碎，極有可能為數個小規模的破壞所組程，造成使用單一理想曲面來近似模擬的困難。而編號 25-1(圖 4.10) 的幾何形狀則可約略區分為上半部與下半部分。針對誤差大的案例，可發現其共同特性為：

- 深度小於 0.5 m 的範圍均占整體破壞面面積較高的比例(亦即「淺薄型」的破壞)；
- 破壞面的幾何形狀呈現狹長形狀或是形狀崎嶇破碎；
- 破壞的土體深度分佈具備多個局部峰值。

對於「淺薄型」的破壞，其崩塌行為應較接近「侵蝕」而非本案所討論的「滑動型 sliding type」崩塌，應可適度將其排除。狹長形狀的破壞面則很有可能與崩塌前的地形相關，如地表特別凸出造成近似 over-topping 的崩塌模式。對於破壞面幾何形狀崎嶇破碎或是具備多個局部峰值的案例，則可能是多個崩塌連結在一起，可考慮將崎嶇破碎的破壞面區分成數個破壞面進行探討，這也是本計畫列入主要探討的一部分。

以崩塌編號 09 區域為例，圖 4.25(左)顯示整個崩塌區塊的深度分布圖，若僅考慮深度大於 0.5 m 的範圍則得到右圖。以整體崩塌區塊(圖 4.25 左)進行理想曲面建構，其所對應的體積誤差為 90.25%；

若僅考慮深度大於 0.5 m 的範圍(圖 4.25 右)進行理想曲面建構，其所對應的體積誤差則降至為 15.41%；若考慮一極端情形(僅考慮崩塌深度大於 10 m)的範圍(圖 4.26 右)作更進一步理想曲面建構，其所對應的體積誤差則下降至 0.1%以下。表 4.4 羅列其在不同崩塌深度範圍建構理想曲面其所對應的體積誤差、主軸曲率以及側向軸曲率，可發現不論是主軸或是側向軸方向的曲率半徑都隨著考慮的崩塌深度加大(範圍縮小)而變小。

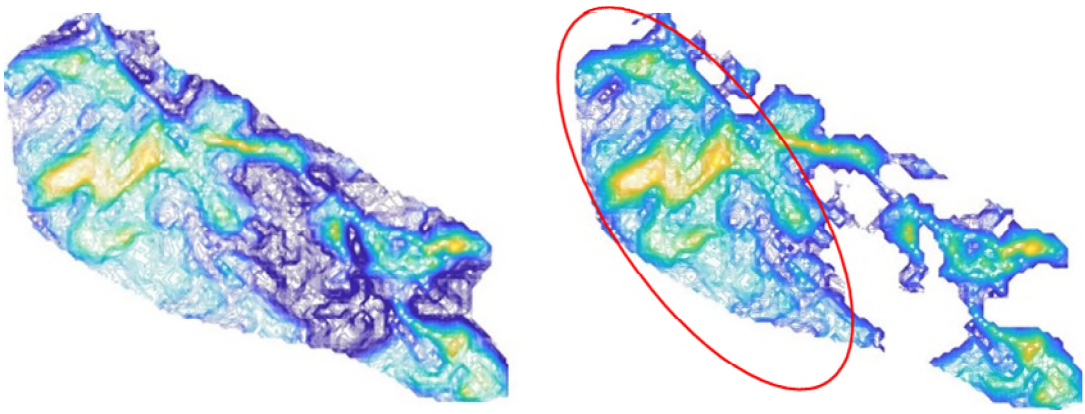


圖 4.25　崩塌編號 09 之崩塌深度大於 0 公尺之等高線圖(左)；崩塌編號 09 之崩塌深度大於 0.5 公尺之等高線圖(右)

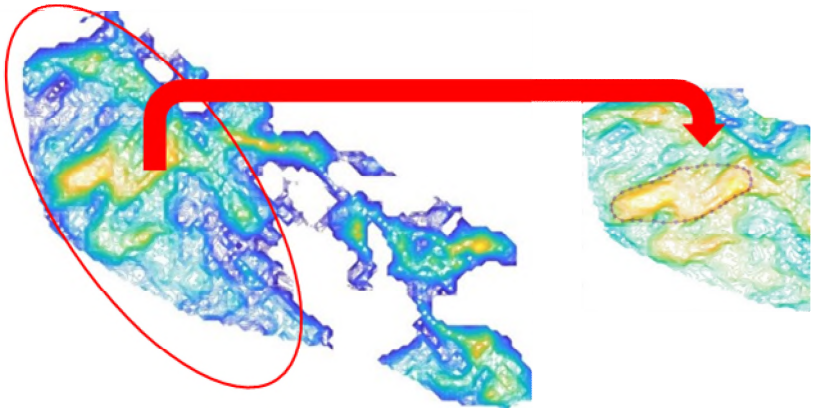


圖 4.26　將崩塌編號 09 圈選特定小範圍(>10 m)進行更進一步分析

表 4.4　崩塌編號 09 在不同崩塌深度範圍建構理想曲面，
其所對應的體積誤差、主軸曲率以及側向軸曲率

	面積[m^2]	體積誤差 [%]	主軸曲率 半徑[m]	側向軸曲率 半徑[m]
崩塌深度大於 0 m	111,500	90.25	4,769.4	443.34
崩塌深度大於 0.5 m	64,675	15.41	940.75	181.16
圈選處 (>10 m)	6,775	0.1	790.04	156.08

本案也針對崩塌編號 28 (圖 4.27) 與編號 42 (圖 4.28)之區域進行比較完整崩塌區域與崩塌深度 0.5 m 區域所建構理想曲面其所對應的體積誤差變動情形。參考圖 4.27 與表 4.5 可發現崩塌編號 28 其崩塌深度 0.5 m 的區域佔了全體約 45%的面積，其體積誤差也由 114.6% 下降至 16.5%。崩塌編號 42 (圖 4.28)的量體分布情形則更為複雜，其包含兩個峰值，透過深度 0.5 m 的篩選將其切分為 A、B 兩個區塊。參考圖 4.28 與表 4.6 可發現其體積誤差也由 85.19%下降至 11.7%左右。因此本案所選取之 24 處崩塌範圍，將因崩塌深度大於 0.5 公尺範圍的設定產生共計 28 個崩塌區塊(資料點)，作為建構理想曲面的基準。

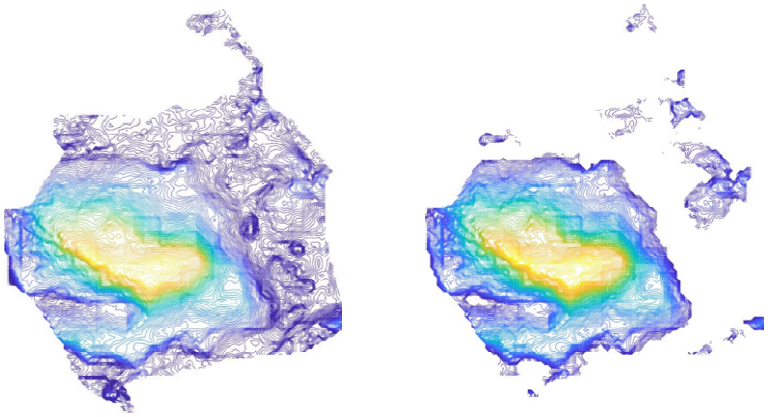


圖 4.27　崩塌編號 28 之崩塌深度大於 0 公尺之等高線圖(左)；崩塌編號 28 之崩塌深度大於 0.5 公尺之等高線圖(右)

表 4.5　崩塌編號 28 在不同崩塌深度範圍建構理想曲面，其所對應的體積誤差、主軸曲率以及側向軸曲率

	面積[m^2]	體積誤差 [%]	主軸曲率 半徑[m]	側向軸曲率 半徑[m]
崩塌深度大於 0 m	163,975	114.6	1318.5	589.06
崩塌深度大於 0.5 m	89,675	16.52	855.31	289.89

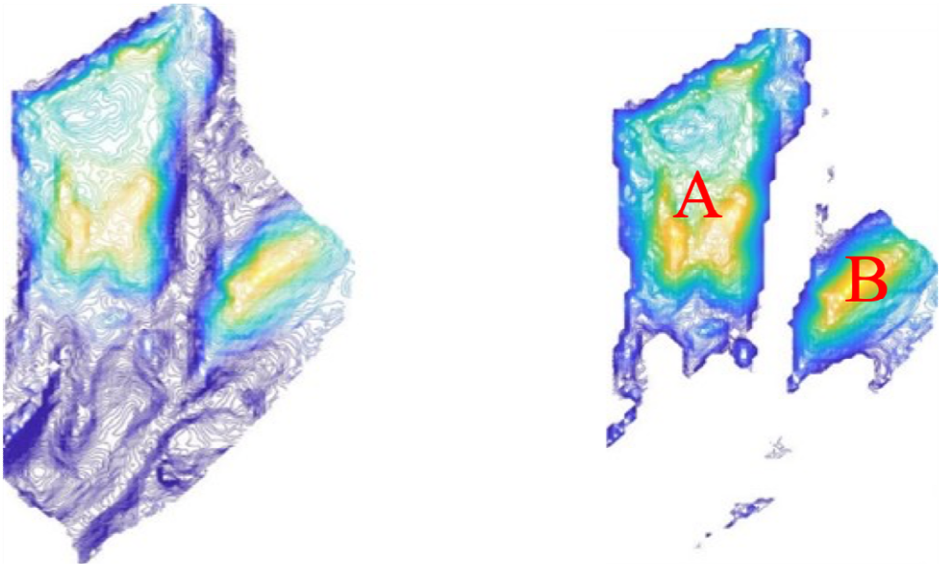


圖 4.28　崩塌編號 42 區域之崩塌深度大於 0 公尺之等高線圖(左)；崩塌編號 42 之崩塌深度大於 0.5 公尺時則區分為 A、B 兩個區塊(右)

表 4.6　崩塌編號 42 區域在不同崩塌深度範圍建構理想曲面，其所對應的體積誤差、主軸曲率以及側向軸曲率

	面積[m^2]	體積誤差[%]	主軸曲率半徑[m]	側向軸曲率半徑[m]
崩塌深度大於 0 m	104,900	85.19	1346.1	322.31
崩塌深度大於 0.5 m (A)	43,900	11.68	1285.33	90.61
崩塌深度大於 0.5 m (B)	17,000	11.66	442.36	90.43

第三節　幾何特性探討

考慮前期計畫崩塌案例 17 個資料點及本案新增列之 24 處共 28 個資料，總計 45 個資料點進行分析探討。承上年度的成果，為簡化理想曲面建構的程序，本案著重探討 45 個案例的所獲致理想曲面的幾何特性，分以下 5 項來討論：

(1) 軸向長度(L_1)、曲率半徑(R_1)與深度(d_1)的關聯；

(2) 側向軸方向長度(L_2)、曲率半徑(R_2)與深度(d_2)的關聯；

(3) 軸向長度深度比值(d_1/L_1)與傾角(θ_{bgn}、θ)的關聯 (請參閱圖 2.4)；

(4) 側向軸方向長度深度比值(d_2/L_2)與側向軸方向的傾角(θ_{bgn}、θ)的關聯；

(5) 軸向長度深度比值(d_1/L_1)與破壞面頂部傾角(ϕ)的關聯(請參閱圖 2.4)。

圖 4.29 顯示在軸方向長度(L_1)、曲率半徑(R_1)與深度(d_1)的特殊關聯，經迴歸分析可得一關聯趨勢：

$$\text{軸向}:\log\frac{\text{對應}R_1\text{之無因次量}}{\text{崩塌}L_1\text{之無因次量}} - 0.956\log\frac{\text{對應}d_1}{\text{崩塌}L_1} - 0.7688 \qquad (4.1)$$

類似的關聯趨勢亦可在側向軸方向發現，圖 4.30 顯示所分析的 45 個案例其迴歸關係式為

$$\text{側向軸方向}:\log\frac{\text{對應}R_2\text{之無因次量}}{\text{崩塌}L_2\text{之無因次量}} - 0.942\log\frac{\text{對應}d_2}{\text{崩塌}L_2} - 0.794 \qquad (4.2)$$

若上述的關係式若能普遍採用，往後不論在軸向或是在側向軸方向，軸長(L)、曲率半徑(R)以及崩塌深度(d)三者中只要 2 者已知(或給定)便可求出第 3 個變數值。善用(4.1)與(4.2)式便能夠大幅簡化對於理想破壞曲面估算的複雜度。

另一個幾何關聯發生於軸向長度深度比值(d_1/L_1)與傾角(θ_{bgn})的關聯；由圖 4.31 中可發現長度深度比值(d_1/L_1)與傾角(θ_{bgn})呈現線性的關聯。此一幾何關聯性僅發生於軸方向，在側方向則未發現類似的關聯性(參閱圖 4.32)。其餘如軸長深度比值(d_1/L_1,d_2/L_2)與(θ)以及(d_1/L_1)與破壞面頂部傾角(ϕ)則未發現特殊的關聯性(參閱圖 4.33、圖 4.34 與圖 4.35)。

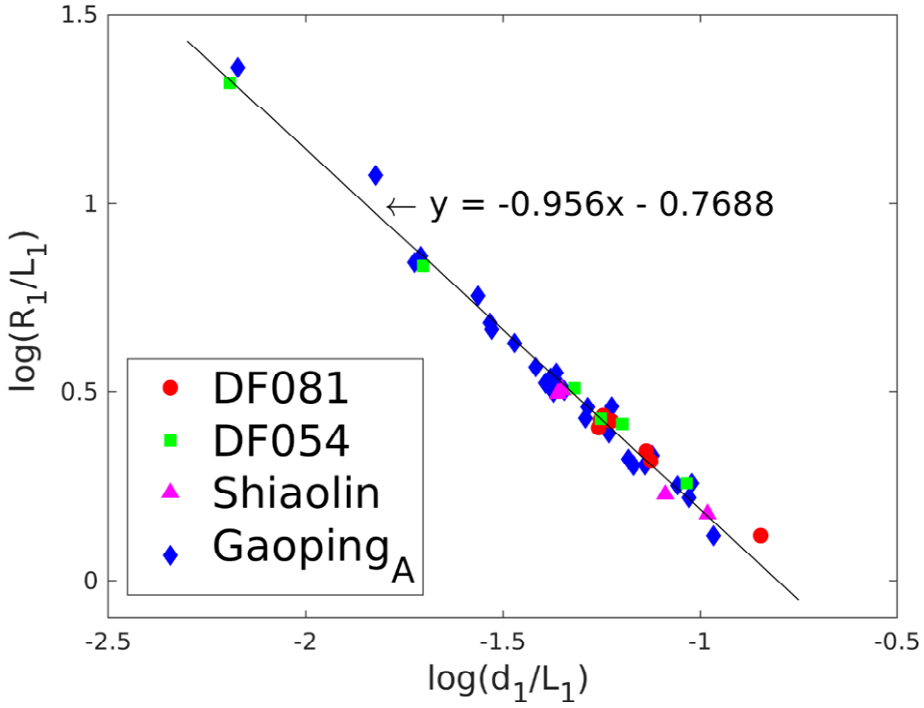


圖 4.29　綜合 45 個案例，在軸方向，其崩塌深度、曲率半徑與主軸長之間的幾何關係式

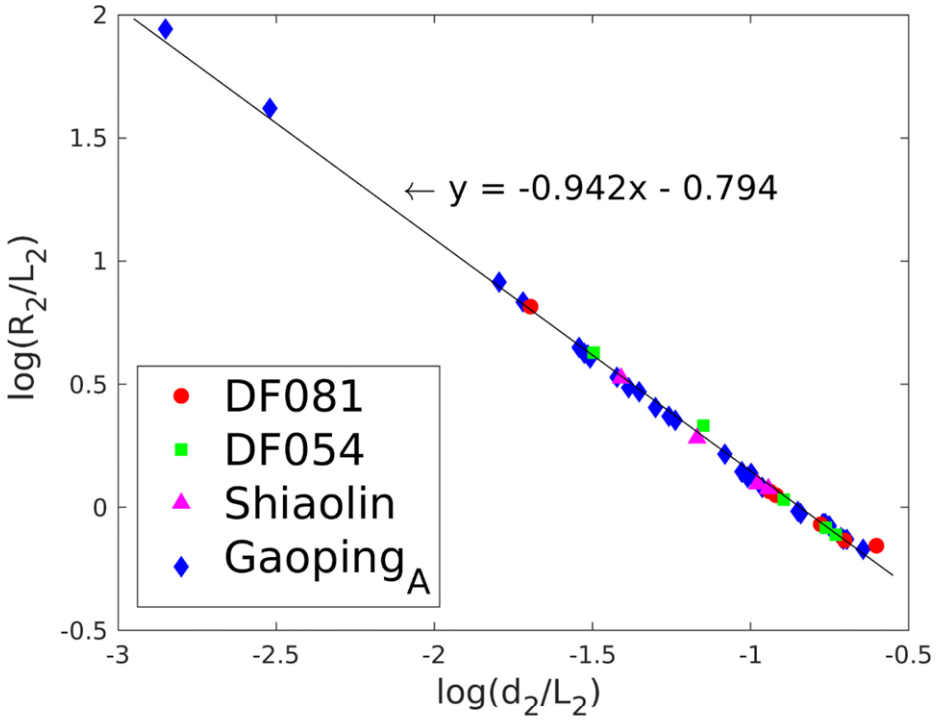


圖 4.30　綜合 45 個案例，在側向軸方向，崩塌深度、曲率半徑與軸長之間的幾何關係式

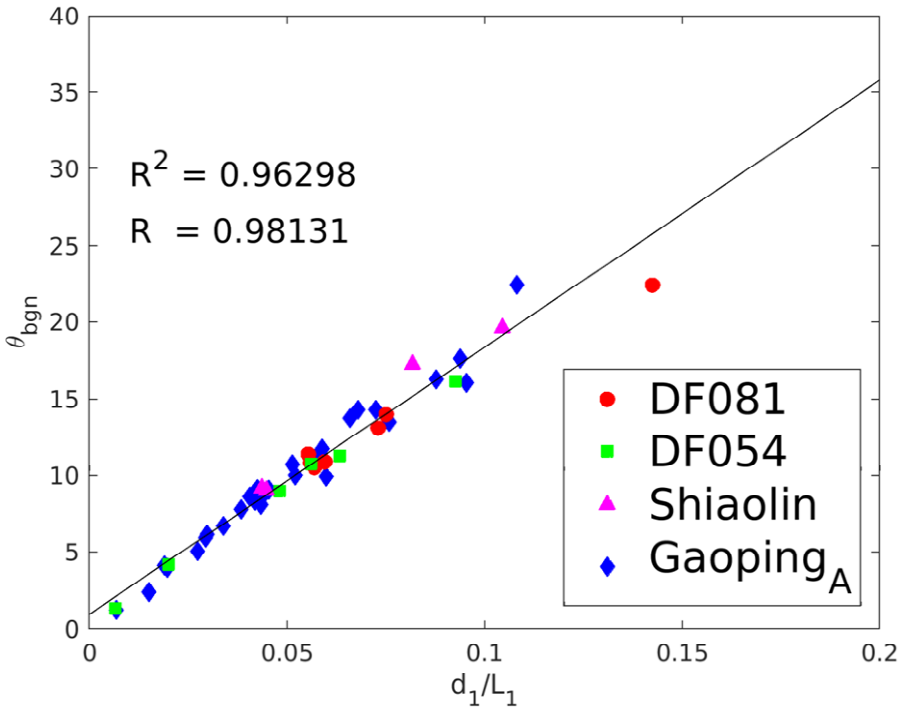


圖 4.31　綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(d_1/L_1)與傾角(θ_{bgn})的關聯

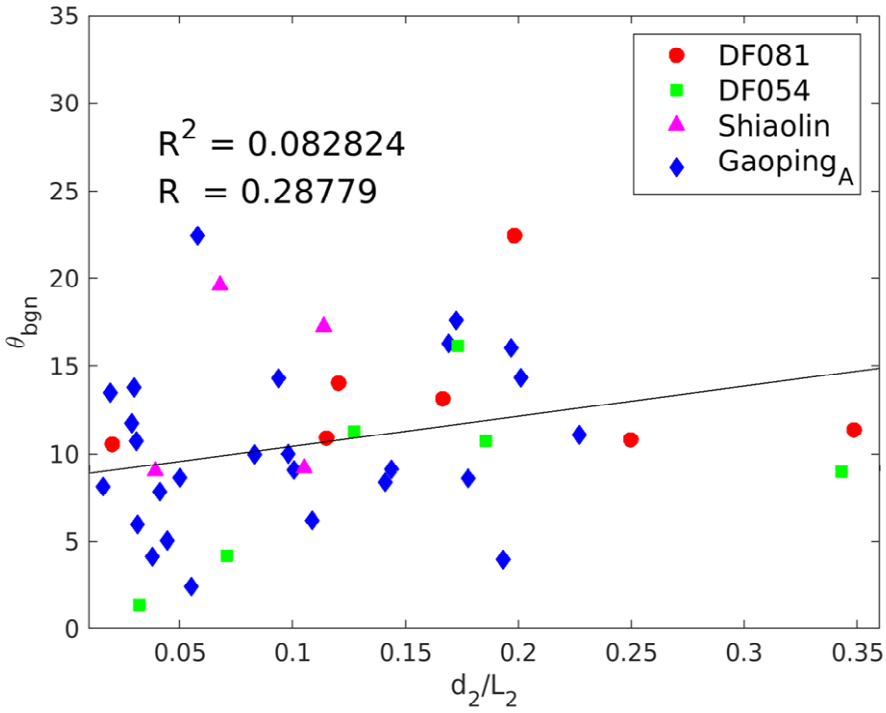


圖 4.32　綜合 45 個案例，在側方向，長度深度比值(d_2/L_2)與傾角(θ_{bgn})的關聯崩

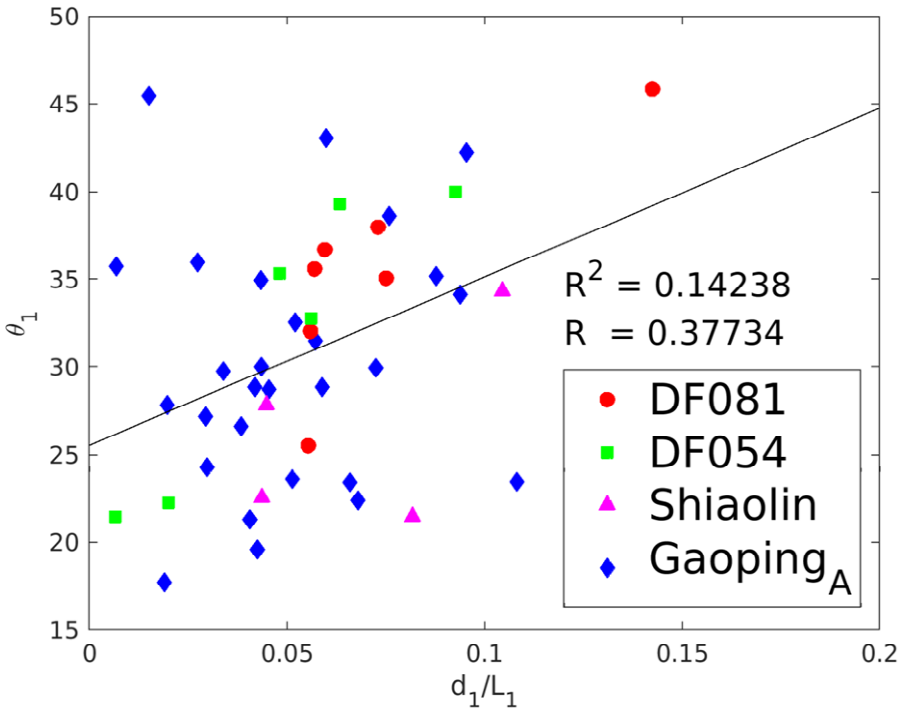


圖 4.33　綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(d_1/L_1)與傾角(θ_1)的關聯

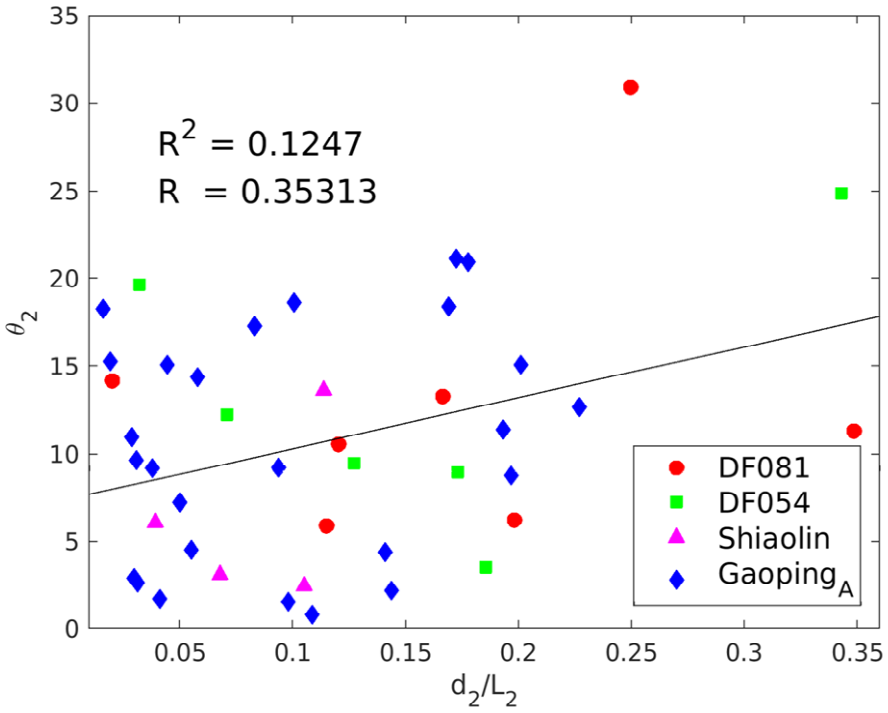


圖 4.34　綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(d_2/L_2)與傾角(θ_2)的關聯

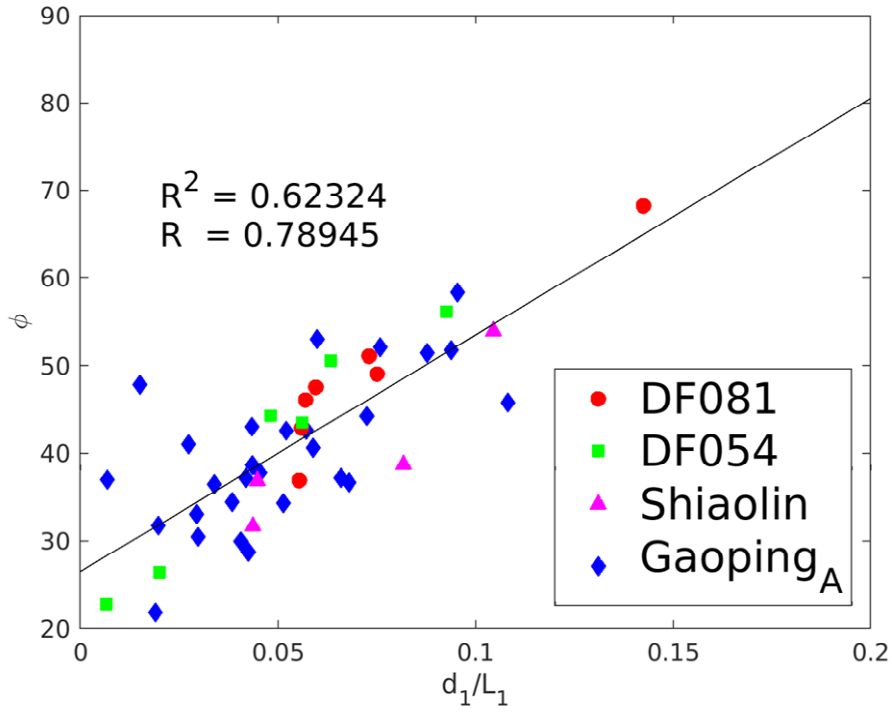


圖 4.35　綜合 45 個案例，在軸方向，長度深度比值(d_1/L_1)與破壞面頂部傾角(ϕ)的關聯

第五章　三維可視化圖形多視角立體呈現成果

第一節　三維立體地形顯示之網頁模式

如第三章第二節所示，本案已完成將土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT)整合所估算之理想曲面進行情境模擬，並得以將模式計算所得的成果以網頁模式進行三維立體呈現。圖 5.1 為此三維立體可視化圖形網頁之首頁，左側功能鍵視窗中提供功能鍵可控制中央圖形進行(任意)放大、縮小、旋轉，以及前後左右平移等功能，以方便進行不同視覺角度的檢視。

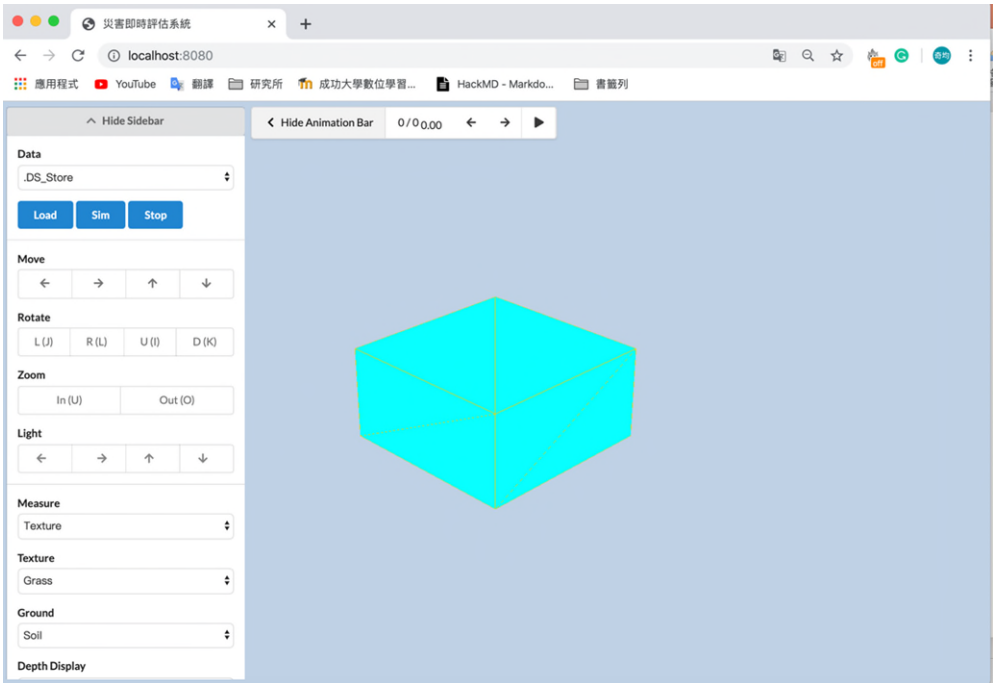


圖 5.1　三維立體可視化圖形網頁之首頁

如圖 5.所示，網頁左側中上方提供一按鍵 ”Sim” (紅色圈畫處)啟動土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT)並進行參數的設定，依可據欲評估的區域資料(DEM 網格數量、數值模式所需的參數 等)進行輸入，而最關鍵的數位地形資料(DEM)可直接由滑鼠點取圈選(圖 5.3)。

以 D056 潛勢區為例，一旦數位地形資料(DEM)讀取完成，數值模式開始運算前會先顯示地形(理想破壞面以及周遭地形)以及所輸入的相關參數值以供確認(圖 5.4)。地形與參數值確認後會先顯示初始的崩塌量體以確認設定崩塌量體分佈狀態(圖 5.5)。

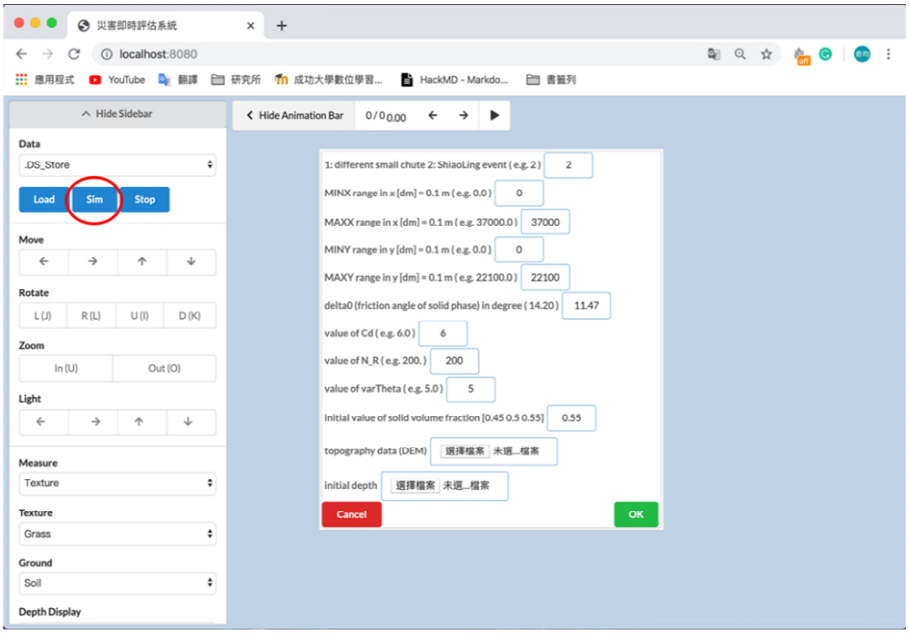


圖 5.2 啟動土石流土體動態模擬數值模式(紅色圈)並進行參數的設定

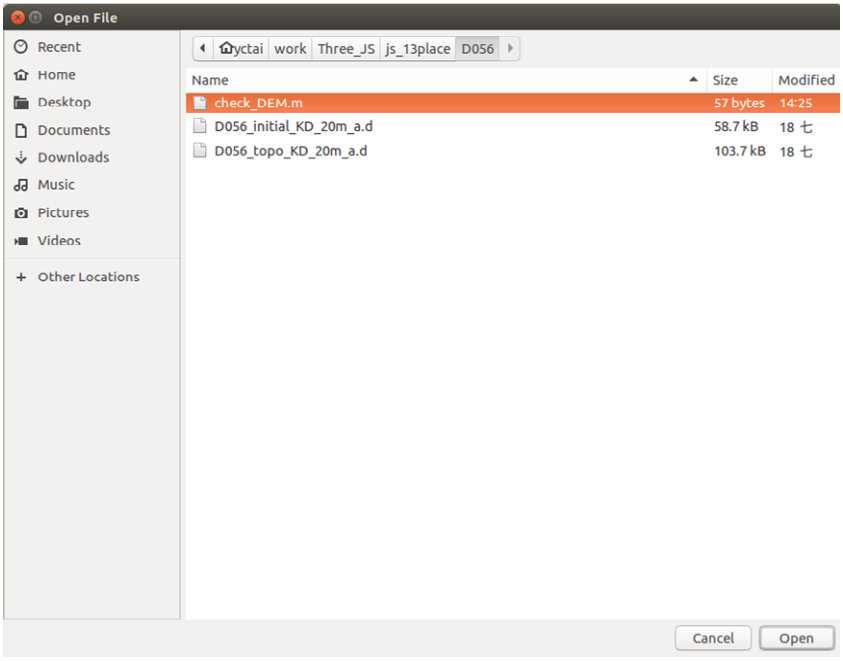


圖 5.3 地形資料 DEM 可直接由滑鼠選取

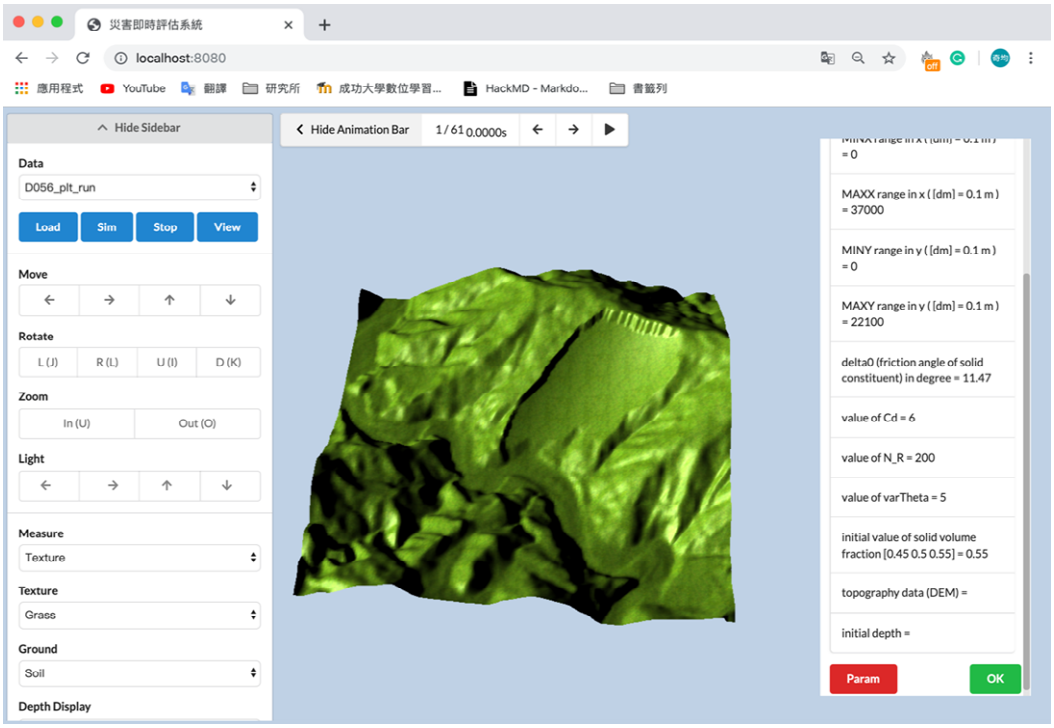


圖 5.4 數值模式開始運算前會先顯示地形(例如 理想破壞面以及周遭地形)以及所輸入的相關參數值以供確認

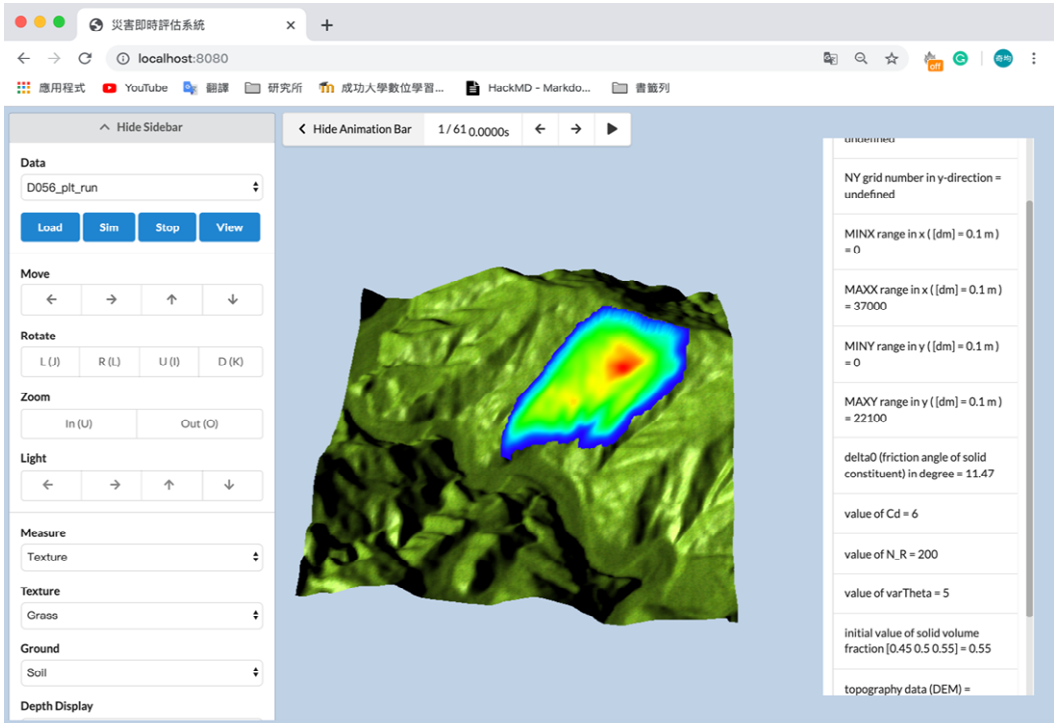


圖 5.5 地形確認後會先顯示初始的崩塌量體以供確認

在結果的呈現上有兩種模式，網頁左側中上方提供一按鍵”View”(參閱圖 5.6 紅色圈畫處)則可呈現載入之地形以及破壞面所在(深棕色範圍、可以是理想破壞曲面，或是災後量測獲得的臻時破壞曲面)；另一個選項”Load”則是載入運算的結果。以 D056 潛勢區域為例，圖 5.6 至圖 5.8 為以灰階光影地形(hillshade)模式顯示所計算的崩塌量體於不同時間點的土體厚度分佈狀態，而圖 5.9 至圖 5.10 則為影像模式，以正攝影像搭配地形呈現運算的成果。在圖 5.7 至圖 5.10 中，崩塌量體運在移過程中所經過的路徑、運動範圍均以深棕色明顯標示，對應於正攝影像可作為相關災害評估管理之參考。除了隨時間變化的土砂量體厚度的動態分佈，土砂量體的速度變化與分布狀態也可呈現；圖 5.11 與圖 5.12 分別為以草地地形模式顯示 D080 潛勢區域所計算的崩塌量體於 t = 60.61 s 時的速度分佈以及土體分布的狀態。

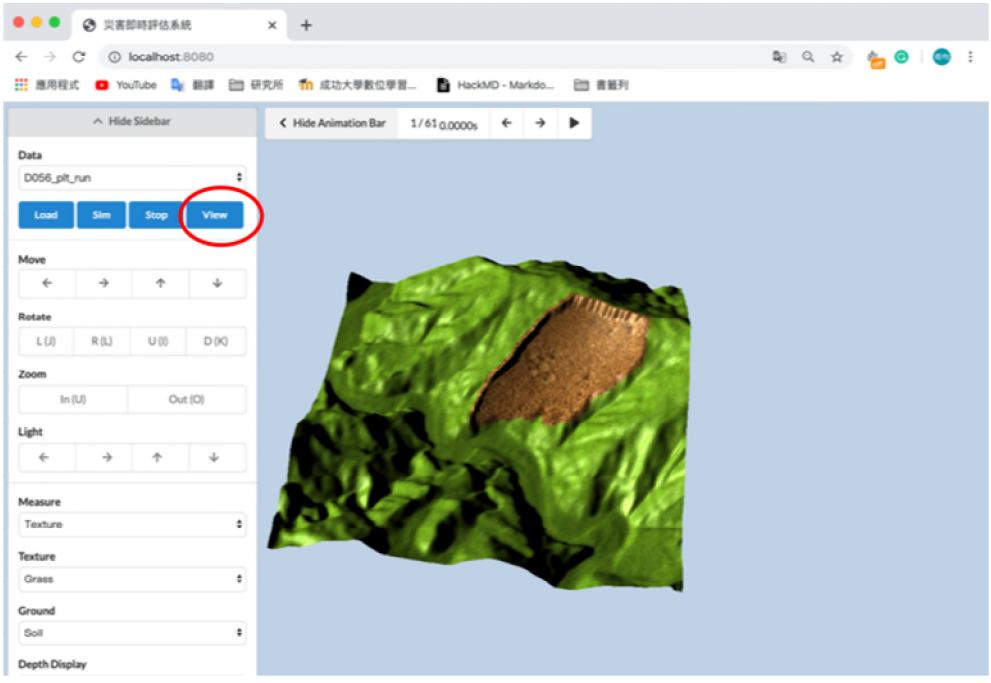


圖 5.6 以灰影地形模式顯示計算前的初始崩塌量體 (D056)

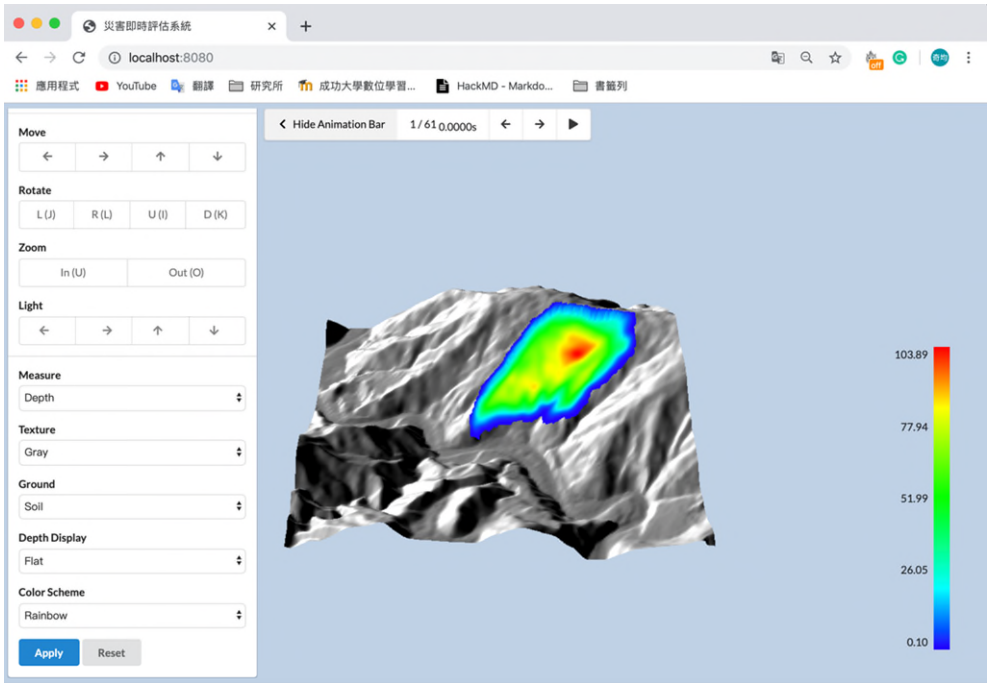


圖 5.7 以灰階光影地形模式顯示所計算的崩塌量體於$t = 00.00\,\mathrm{s}$ 時的土體厚度分佈狀態 (D056)

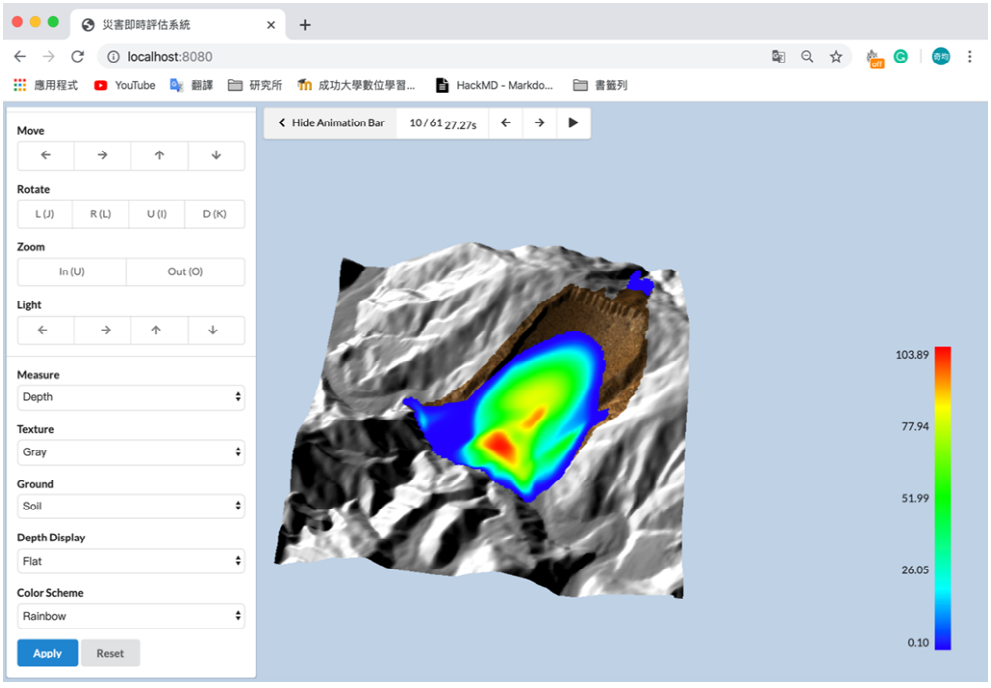


圖 5.8 以灰影地形模式顯示所計算的崩塌量體於$t = 27.27\,\mathrm{s}$ 時的土體厚度分佈狀態 (D056)

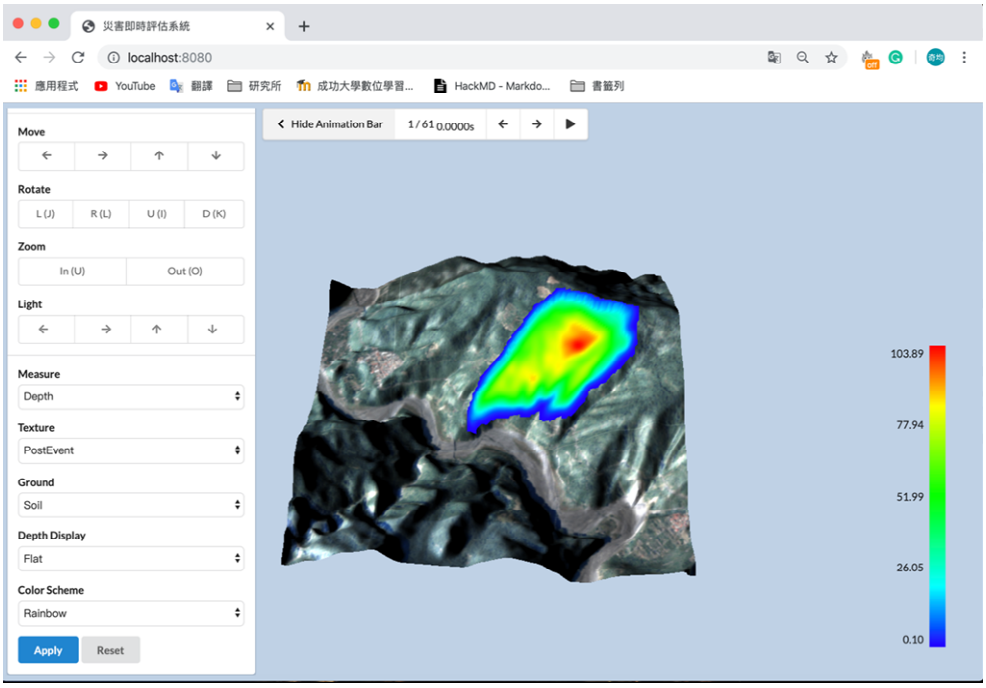


圖 5.9 也可以以正攝影像搭配地形呈現運算的成果 $t = 00.00\,\mathrm{s}$

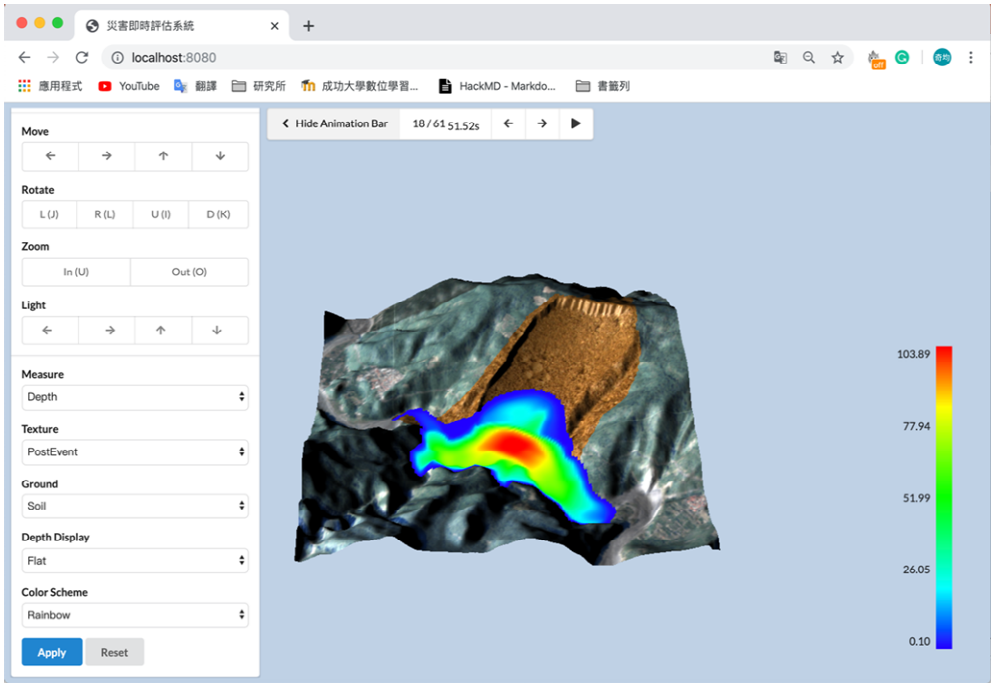


圖 5.10 以正攝影像搭配地形呈現運算的成果 $t = 51.52\,\mathrm{s}$

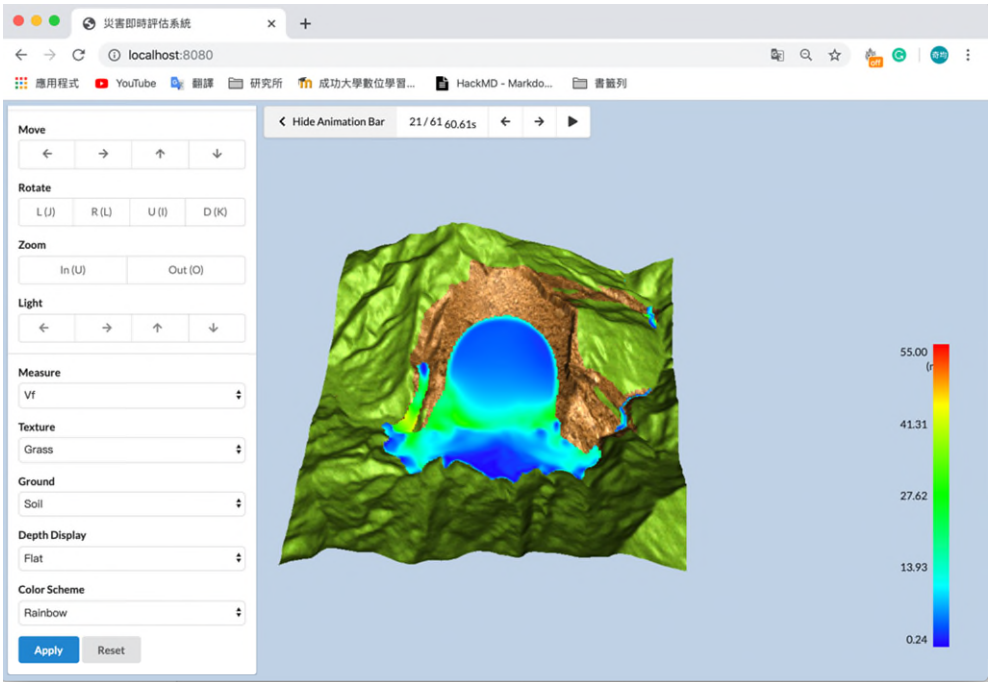


圖 5.11　以草地地形模式顯示所計算的崩塌量體於$t = 60.61\,\mathrm{s}$時的土體速度分佈狀態 (D080)

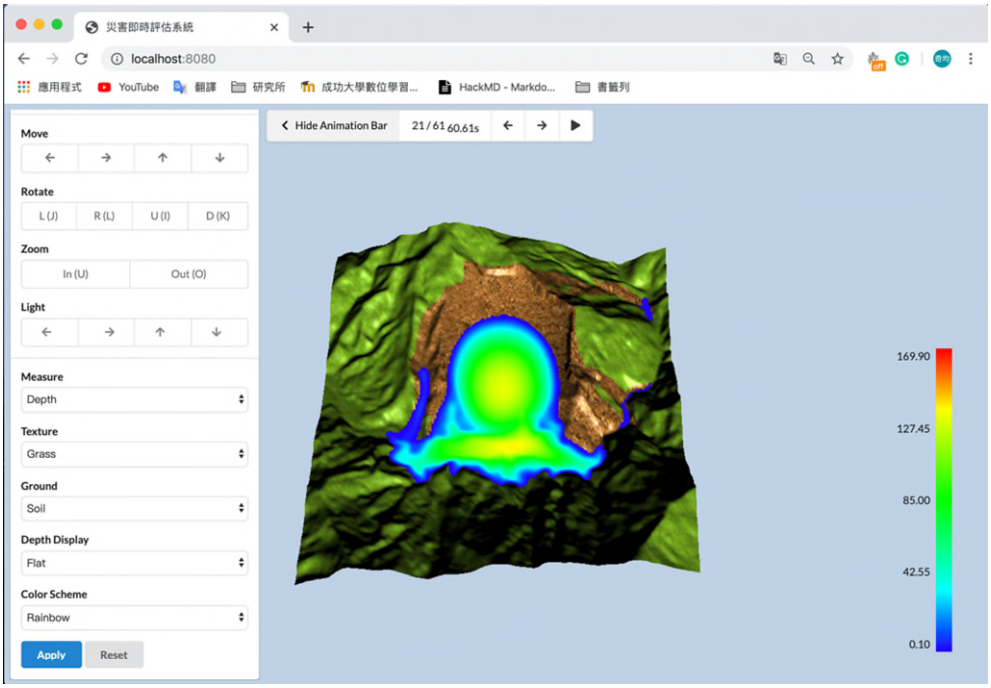


圖 5.12　相對應於圖 5.11，計算的崩塌量體於$t = 60.61\,\mathrm{s}$時的土體厚度分佈狀態 (D080)

第六章　結論及建議

依本計畫案工作執行計畫書擬定之工作預定期程，依研擬之預定工作期程確實執行並完成。工作及內容簡述如下：

理想化曲面與崩塌破壞範圍與破壞深度之整合

- 如期中報告中所述，透過切片法穩定性分析尋找最小安全係數所在的深度來建構理想崩塌曲面，看似合理，但是在與實際案例的應用探討時發現會有超過 1 倍的誤差量，因此本案後續的工作採用 Guzzetti et al. (2009)的面積體積經驗公式來估算理想化曲面的破壞深度。
- 針對林慶偉教授等人於 102 年所執水土保持局所之計畫，在高屏溪流域所判釋的 13 處潛在大規模崩塌區域為應用對象。
- 利用 Guzzetti et al. (2009)經驗公式針對上述 13 處潛在大規模崩塌區域進行破壞深度估算並建構相對應的理想化曲面。
- 將土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT)與所估算的理想破壞曲面(13 處)整合，進行情境模擬深入探討土石流之土砂分布型態與影響範圍。

理想討崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討探討

- 針對林慶偉教授等人於 102 年所執行之計畫所圈畫高屏溪流域山坡在莫拉克颱風後所發生之大規模崩塌共 53 處中挑選出 24 處共 28 個資料點進行理想崩塌曲面幾何特性的分析。
- 對於體積誤差大於 30%的區域，其破壞面的幾何形狀均極為崎嶇破碎，甚至有多個深度局部峰值的情形，極有可能為數個小規模的破壞所組程，造成使用單一理想曲面來近似模擬的困難。在經過切割成數個局部小規模區域，體積誤差則顯著縮小。

- 整合前期計畫 17 個案例以及本案 28 個資料點共 45 個區塊，在軸方向以及側向軸方向，其軸長度(L)、曲率半徑(R)與深度(d)具備特定的關聯性。善用此關聯性能夠大幅簡化對於理想破壞曲面估算的複雜度。
- 雖然軸向長度深度比值(d_1/L_1)與傾角(θ_{bgn})的已具備特定的關聯性，但是與坡面傾角(θ)以及破壞面頂部傾角(ϕ)則並未發現特定的關聯性。

三維可視化圖形多視角立體呈現成果

- 已將本團隊自行研發之土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT)與理想破壞曲面整合，並針對高屏溪流域林慶偉教授等人所判釋的 13 處大規模崩塌潛勢區域進行情境模擬，探討土石流之土砂分布型態與影響範圍。
- 可透過所建構的網頁輸入數值模式(DFMfGT)所需的相關參數、以及選取地形資料檔案。
- 可透過所建構的網頁瀏覽理想化破壞曲面，並進行後續情境模擬。
- 以網頁瀏覽器 Chrome 展示運算成果，可跨平台瀏覽(PC windows、Linux、MacOS、平板、智慧手機 均可使用)。
- 三維立體地形均可任意放大、縮小、旋轉，前後左右平移以及調控投射陽光的角度，以方便進行不同的檢視。
- 整合將航空或是衛星影像(正攝影像)，透過三維立體地形來擬真這些數位影像，使得情境探討具備更好的真實感。

表 6.1　本計畫之工作進度與完成度

時間 / 工作項目	108 年										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
精進快速初步評估崩塌破壞曲面之技術											
理想崩塌破壞曲面幾何特性之精進探討											
三維可視化圖形多視角立體呈現成果											
期初報告提交											
期中報告提交											
期末報告提交											
成果報告提交											
預定進度累計(%)	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	100

計畫執行期限：自 108 年 02 月 20 日　至　108 年 12 月 31 日　止

- 期初簡報時須完成工作：(一) 理想坡面與崩塌破壞範圍以及破壞深度整合之對策；(二) 三維可視化圖形多視角立體呈現成果之構想。
- 期中簡報時須完成工作：(一) 理想化曲面與崩塌破壞範圍與破壞深度之整合；(二) 誤差案例可能的成因以及解決方案；(三)山崩土石流數值模式之運算成果與三維立體圖形網頁工具之整合方法。
- 期末簡報時須完成所有工作。☑ (期末報告至契約完成期間，如委託機關發現問題稱需協助修正)

參考文獻

1. 大規模崩塌災害防治行動綱領，行政法人國家災害防救科技中心，2015。
2. 科技部災害管理資訊研發應用平台(http://dmip.tw/Lone//index.aspx)
3. 行政院農業委員會水土保持局 計畫結案報告(編號：SWCB-102-073)，102 年高屏溪山坡地大規模崩塌致災潛勢調查評估，2013。
4. 行政院農業委員會水土保持局 計畫結案報告(編號：SWCB-1060407015B)，歷史圖資活化與變遷分析研究，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. 陳勝全，“以空間內插法分析崩塌地崩塌量體之研究”，國立中興大學 水土保持學系 博士論文，2013。
7. 羅佳明, 馮正一, 鍾言鑫 & 董雅婷. “數值模擬與危害評估應用於潛在崩塌影響範圍之劃設.” 中華水土保持學報, 47(1), 13-23, 2016.
8. B.M. Das, “Fundamentals of geotechnical engineering.” BROOKS/COLE Pub., 2000.
9. F. Guzzetti, F. Ardizzone, M. Rossi, and D. Valigi, “Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy.” Earth and Planetary Science Letters. 279(3-4): 222-229, 2009.
10. Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Couture, R., Locat, J. and Locat, P. “Toward preliminary hazard assessment using DEM topographic analysis and simple mechanical modeling by means of sloping local base level.” Landslides evaluation and stabilization. Balkema, 199-205, 2004.
11. C.Y. Kuo, Y.C. Tai, C.C. Chen, K.J. Chang, A. Y. Siau, J.J. Dong, R.

Han and T. Shimamoto. “The landslide stage of the Shiaolin catastrophe: simulation and validation.” Journal of Geophysical Research -- Earth Surface, 116, F04007, doi:10.1029/2010JF001921, 2011.

12. X. Meng and Y. Wang, “Modelling and numerical simulation of two-phase debris flows.” Acta Geotechnica, 11(5), 1027-1045, 2016.
13. I. Luca, Y.C. Tai and C.Y. Kuo, “Shallow Geophysical Mass Flows down Arbitrary Topography.” Springer Verlag, ISBN: 978-3-319-02626-8, 2016.
14. P. Grinfeld, “Introduction to Tensor Analysis and the Calculus of Moving Surfaces.” Springer Verlag, ISBN: 1-4614-7866-9, 2014.
15. G. Groche, V. Ziegler, D. Ziegler and E. Zeidler, “Teubner-Taschenbuch der Mathematik, Teil II.” Teubner, Stuttgart, 1995.
16. M. Jaboyedoff, J. P. Dudt and V. Labiouse. “An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree.” Natural Hazards and Earth System Science, 5(5), 621-632, 2005.
17. A. Kurganov and E. Tadmor. "New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection–diffusion equations." Journal of Computational Physics 160.1 (2000): 241-282, 2000.
18. A. Kurganov and J. Miller, “Central-upwind scheme for Savage–Hutter type model of submarine landslides and generated tsunami waves.” Computational Methods in Applied Mathematics, 14(2), 177-201, 2014.
19. 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 14-A1, 218p, 2015.
20. A. E. Scheidegger, “On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides.” Rock Mechanics and Rock Engineering, 5(4), 231-236, 1973.

21. 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.

22. Y.C. Tai, J. Heβ and Y. Wang, “Two-Phase Debris Flow over Rugged Topography: Modeling and Numerical Simulation.” Journal of Geophysical Research -- Earth Surface, 124, 305-333, 2019.

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	理想崩塌破壞曲面之適用範圍，是否僅限圓弧崩塌或深層崩塌呢？本破壞曲面模擬法如何驗證？	● 本案所發展之理想崩塌破壞曲面主要考量圓弧型崩塌。 ● 主要以現有之案例透過所估算出的崩塌體積與真實崩塌體積差異之比較，以及崩塌土砂影響範圍(若資料可獲得的話)進行驗證。
二	本研究上有崩塌運移行為之課題等均未提及。以山崩安全係數判定破壞面，而以流體法算影響範圍是否合理？	● 有關崩塌運移行為為去年計畫成果，將於期中報告書補充相關說明。 ● 崩塌之安全係數判定往往不考慮後續的影響範圍。在判定崩塌之影響範圍大致可區分為： (I) 陰影角 (Rockfall shadow angle)法(如 Evans and Hungr, 1993)； (II) 動能法(如 Jaboyedoff et al., 2005)； (III) 離散元素法(如羅 等人, 2016 採用 PFC3D 商用套裝軟體)； (IV) 流體法 (如 Kuo et al. 2009) 等。各方法均有其優缺點，包含參數的律定

項次	審查意見	回覆辦理情形
		或是計算效率效能的特殊需求。本案採用流體法算影響範圍。
三	曲面與軸長比可以在軸間，側向均為對數關係？有無幾何意義呢？相對於破壞面之形成，是否遵循此等關係，宜有分析，以支持此論述之合理性。	● 此關係式即是利用已發生的崩塌破壞面資料建立理想曲面所分析歸納出，算是具有一些參考價值。而此對數關係應為深度與曲率半徑關係式之近似值(如 zero-order)，但可大幅簡化運算的複雜度。 ● 真實破壞面會因現地的地質、水文、斷層分布等環境條件不會完全遵循此等關係。但是若以理想曲面來估算，則可以由崩塌深度推估出曲率，進而建立出理想曲面。
四	本研究應列出其適用條件，如僅適用於曲面破壞的例子，並不能用於平面破壞(誤差成因)；此外，崩塌平面形狀相當不規則，如何訂定主軸與側向軸有實質困難。	● 目前所分析的崩塌區塊量較少，還無法清楚統整出適用條件，後續會增加分析案例，但根據目前分析結果，淺層破碎的崩塌破壞面確實有誤差較大的情況(註：這也是現階段的工作要點之一)。 ● 原則上以高程的最高與最低點為主軸所在；對於不規則形狀的破壞面，則應切分

項次	審查意見	回覆辦理情形
		為多個區塊(盡量為凸型多邊形)，可獲致較佳的結果。
五	大規模崩塌如有多個滑動塊時，是否能針對個別滑動塊去評估其破壞曲面及深度，以推估其崩塌量體？	可分別假設不同滑動塊崩塌情況，針對個別的崩塌範圍及深度來評估破壞曲面及其量體。
六	先前研究採用 16 個崩塌地，其各屬於何種崩塌(或滑動)類型？宜加說明。本研究 16 個案例與 Guzzetti et al. 公式極為符合，這樣只要應用這個公式不就很好了嗎？建議比對目前存在的一些方法的優缺點。	● 本案所分析的崩塌區塊大部分以滑動型崩塌為主(參閱 2-14 頁)；為避免誤導，另已於摘要中特別註明。 ● 本案之目的並不在於提出類似於 Guzzetti et al. 的公式，而是應用該公式估算理想破壞曲面，作為後續評估影響範圍所用。 ● 已將勝全副分局長之博士論文中所提出之崩塌面積與體積的關係式列入考量，其差距並不大。
七	坡地破壞類型均可用圓弧形切片法分析嗎？宜加說明。	本案所分析的崩塌區塊大部分以滑動型崩塌為主，若不考量現地地質、水文、斷層分布等環境條件，有限邊坡的穩定性分析多半以圓弧形破壞面進行。
八	建議增加分析案例，且應列出個案例的規模數量。	遵照辦理，已透過水保局協助發文內政部地政司，並於 7 月 29 日親赴水保局取得數值地

項次	審查意見	回覆辦理情形
		形模型資料。
九	以往有研究者(水保局)的博士論文亦有類似的研究，可供參考。旗山溪流域於莫拉克前後約有 50 處 Lidar 資料，建議可納入本案分析。	● 感謝提供資訊，所建議研究者陳勝全副分局長之博士論文(以空間內插法分析崩塌地崩塌量體之研究)中所建議之體積面積關係式將列入考量。 ● 有關旗山溪流域於莫拉克前後期 Lidar 資料，已透過水保局協助發文內政部地政司，並於 7 月 29 日親赴水保局取得數值地形模型資料，目前密集持續進行分析相關案例。
十	請問計算後是否改變數值高程呢？情境模擬的初始條件為何？	● 本案所採用之數值模擬尚未將侵蝕與堆積的機制納入考量，因此地形的高程並未改變。 ● 情境模擬的初始條件以所估算之理想曲面為破壞面，初始速度為零進行計算。
十一	網頁開發使用 Chrome 的理由？	Chrome 為廣泛普及使用的網頁瀏覽器，適用於各種作業系統 (PC Windows 、 Linux 、 MacOS、平板、智慧手機 等)，且其提供開發者模式，可有效提升本案網頁開發的效率。此外，雖然以 Chrome 作網頁瀏覽器開發的參考基準，亦可以

項次	審查意見	回覆辦理情形
		其他瀏覽器進行瀏覽，只是有可能偶而會發生否些功能無法正常運作。
十二	英文摘要各字母間距不變，應修正。大小寫字母存有亂碼，請一併修正。	感謝提醒指正，已修正辦理。

附錄二、期中審查會議意見紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	報告書內容編寫，宜精簡，前後重複之文字、段落太多	• 感謝指正，已遵照辦理精簡內文。
二	圖 2.14 之圖名說明對應圖號部分，應更正。(p2-19 及圖目錄)	• 第 2 個(圖 a)應為(圖 b)，感謝指正。
三	P4-12，凝聚力 c 何以有負值？p4-13 之圖 4.6 亦同。	• 負的凝聚力值可視為孔隙水壓上升時造成土壤間的摩擦力弱化。在此僅作分析探討，實際上凝聚力不會有負值。
四	理想破壞曲面一詞，宜斟酌文意，何以是“理想”？	• 實際的破壞面會因複雜的地質條件而崎嶇不平整，本案所提之曲面為固定曲率之平滑曲面，與土壤力學在均勻物質條件下的有限邊坡的破壞面相類似，在尚未有更好的名詞出現前，暫以理想破壞曲面稱呼。
五	P6-1，表 6.2 之參數符號宜說明代表何種參數？另內摩擦角之符號中有f、δ，宜一致。	• 表 6.2 中之δ為兩相理論模型中的固體顆粒摩擦角，應用於崩塌量體運動中滑動底床之底床摩擦角，與穩定性分析中討論的土體中的內摩擦角f扮演的角色不同，採用不同符號以避免混淆。
六	本文係以曲率與軸長比有對	• 感謝提醒，如文中所述，本

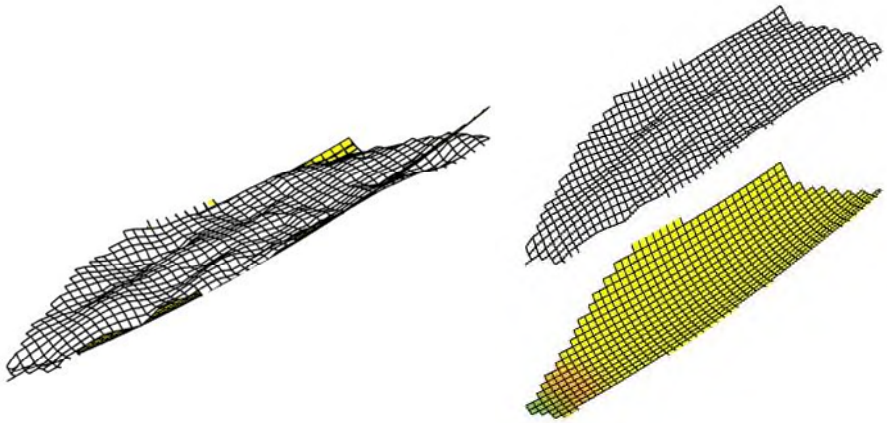
項次	審查意見	回覆辦理情形
	數關係為依據，惟對此等關係之崩塌條件特性宜有所界定，以避免無限延伸。	案所討論的方法以「滑動型 sliding type」崩塌為討論對相，亦已於摘要中註明。
七	表 4.5，何以 R_{1pre} 、R_{2pre} 有負值？又 D047、D078、D080、D205、D273、D275 等之曲率半徑是否合理？	• R_{1pre} 、R_{2pre} 為崩塌前地形的曲率半徑，負值代表凸起的地形。 • 大的曲率半徑代表破壞面非常接近平面或是非常淺薄的崩塌，例如 D273 的 d_1 值只有 0.0001 m，就對應非常大的的曲率半徑 (請參閱期末報告表 3.3 與表 3.5)。
八	研發之動態模擬模式及三維展示系統，因應計算機結構的演進，建議評估封裝成單一執行檔，或採用容器化 Docker 使系統能雲端佈署或單機部屬？	• 感謝寶貴意見，鑒於數值模是的運算對計算機的規格要求較高，將採取雲端佈署的方式進行。
九	後續模式精進及運用方式，建議參考土石流模擬程式 Kanako2D 等，設定溢流點(破壞面底點)後，藉由地形數值 dem 等，輸入崩塌量、崩塌深度及可能之即時監測資訊，即時或半即時回推可能崩塌面範圍，或崩塌機率等動態數值並呈現？	• 感謝寶貴意見，對於現階段使用的土石流土體動態模擬數值模式(DFMfGT)可於未來增加發展此功能，將於往後的計畫將此功能納入規劃。

附錄三、期末審查會議意見紀錄暨回覆辦理情形

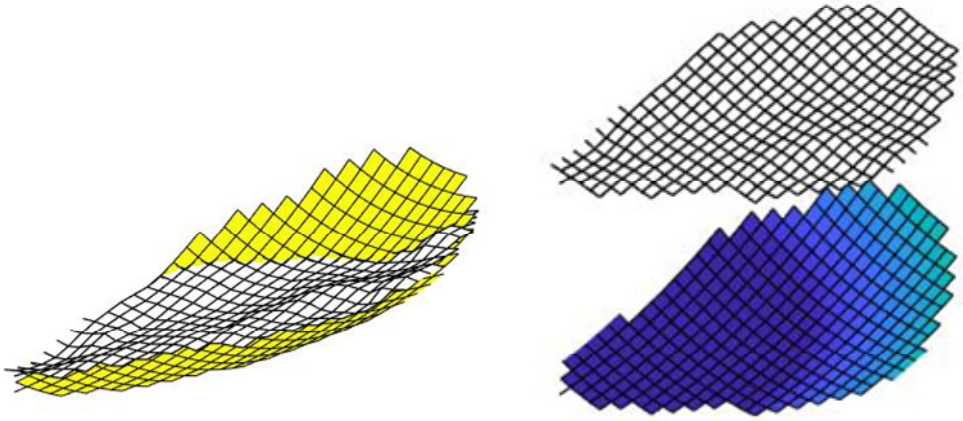
項次	審查意見	回覆辦理情形
一	崩塌深度較少時之誤差來源可能為何?請說明。	• 推估崩塌深度較小時的誤差可能為沖刷侵蝕所造成，而非本案所考慮的滑動型破壞(參閱 4-22 頁)。
二	崩塌體積誤差對於較深層之崩塌，其誤差仍較高，這部分似有改善空間。	• 對於較深層的崩塌案例，崩塌體積之誤差與崩塌深度並無直接關係；然而因採用的理想曲面為平滑曲面，尚無法描述實際崎嶇起伏的實際破壞面。
三	有關破壞曲面之決定是否參考實際發生之案例決定?請說明。	• 圖 4.29 至圖 4.35 所呈現之成果為考慮 45 個實際崩塌案例所決定的理想破壞曲面之幾何關係。
四	此研究所推導之運移行為研究，未來或可協助本局進行大規模崩塌潛勢區影響範圍劃設之研究。	• 感謝，期盼未來能有派上用場的機會。

附錄四、

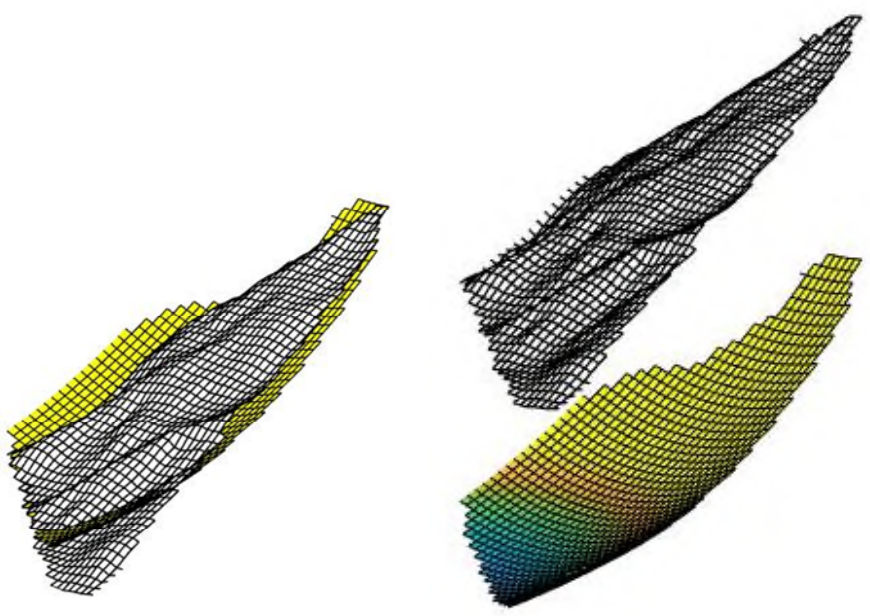
針對大規模崩塌潛勢區域 (D008、D021、D038、D042、D043、D047、D053、D078、D205、D273、D275) 所製作的理想曲面(彩色網格)以及原地形(黑色網格)之對照



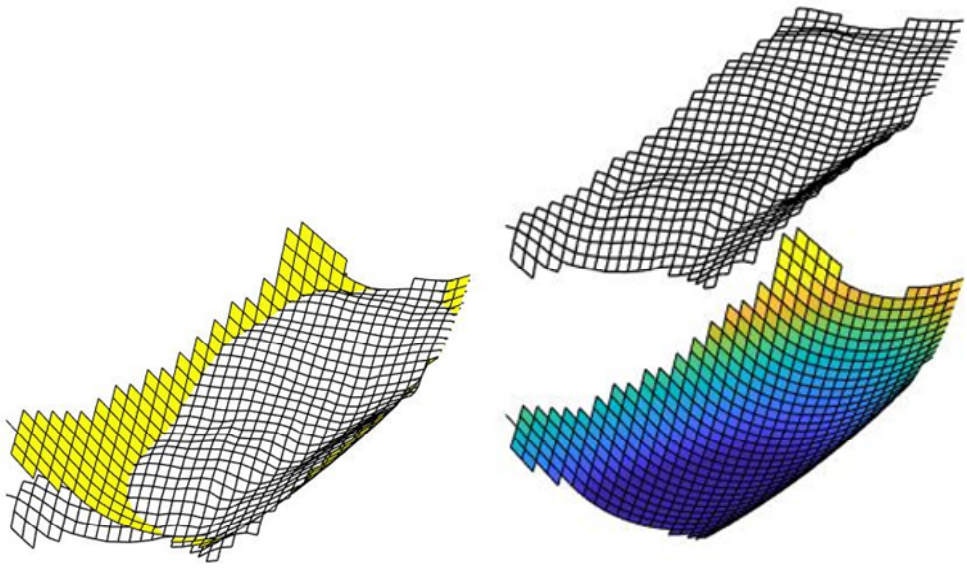
圖附 4.1　針對 D008 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



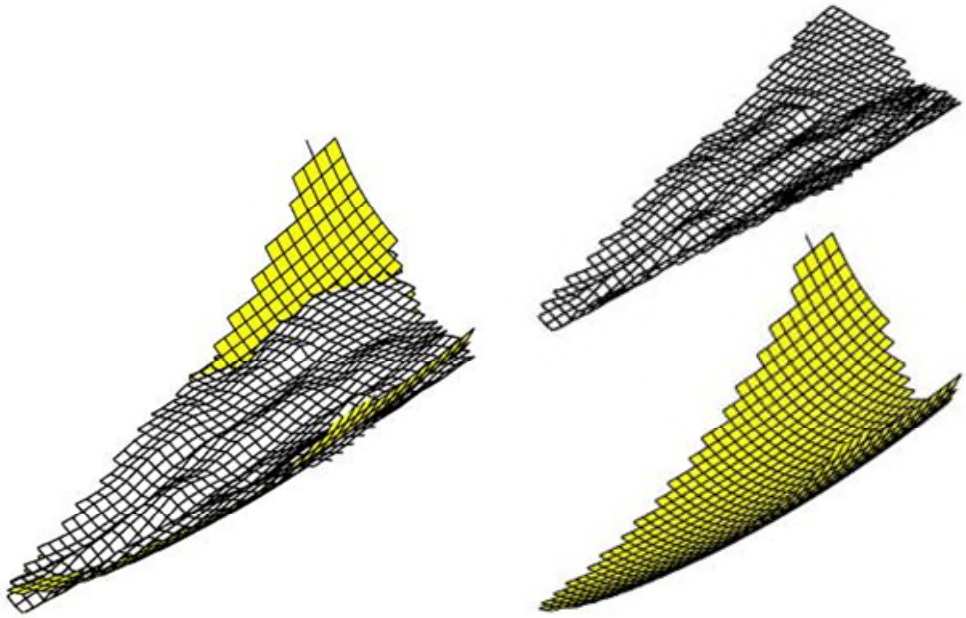
圖附 4.2　針對 D021 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



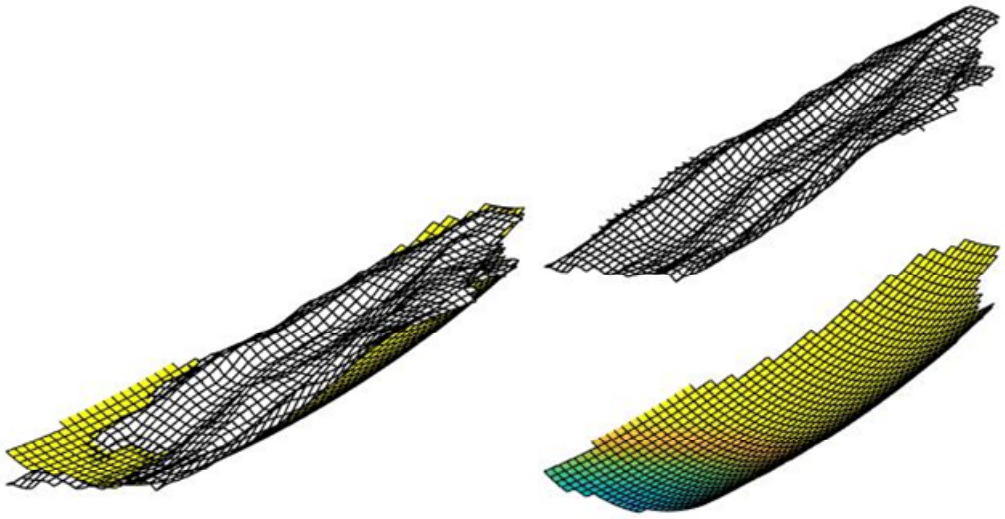
圖附 4.3　針對 D038 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



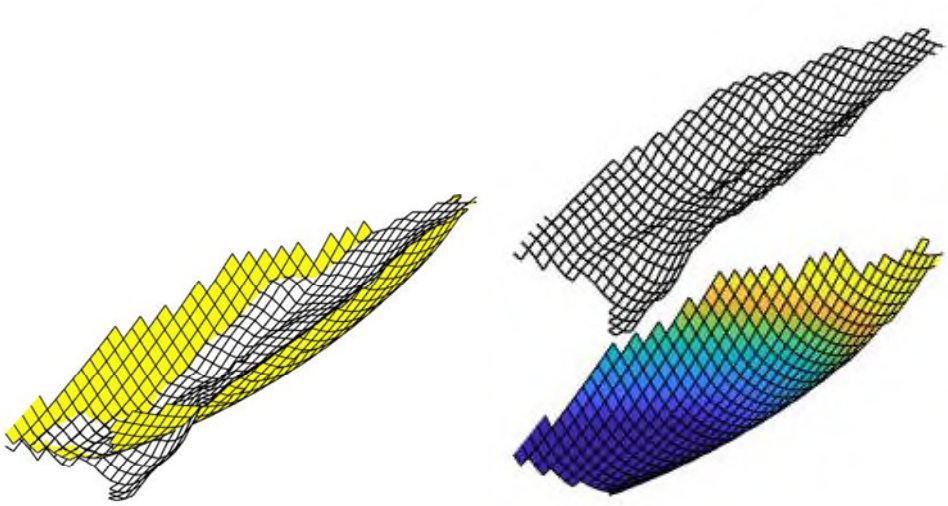
圖附 4.4　針對 D042 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



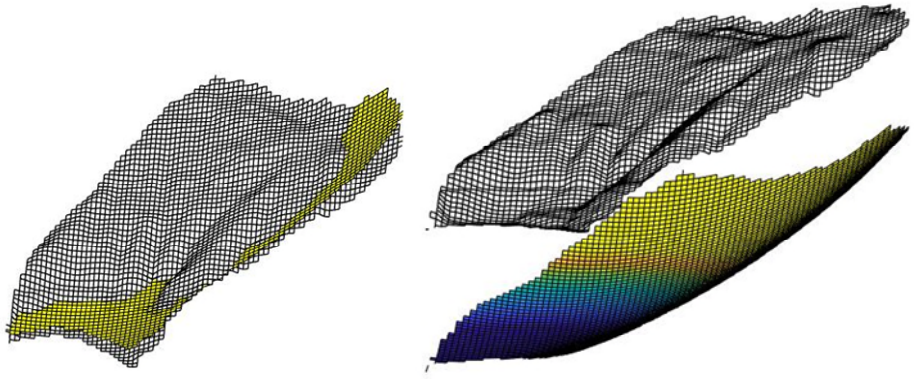
圖附 4.5　針對 D043 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



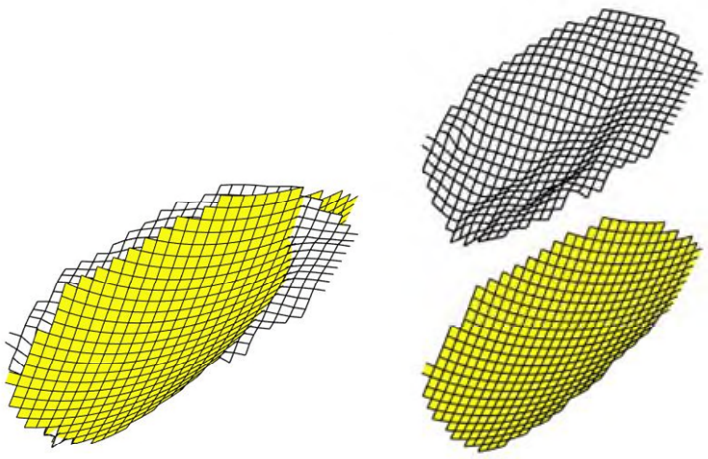
圖附 4.6　針對 D047 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



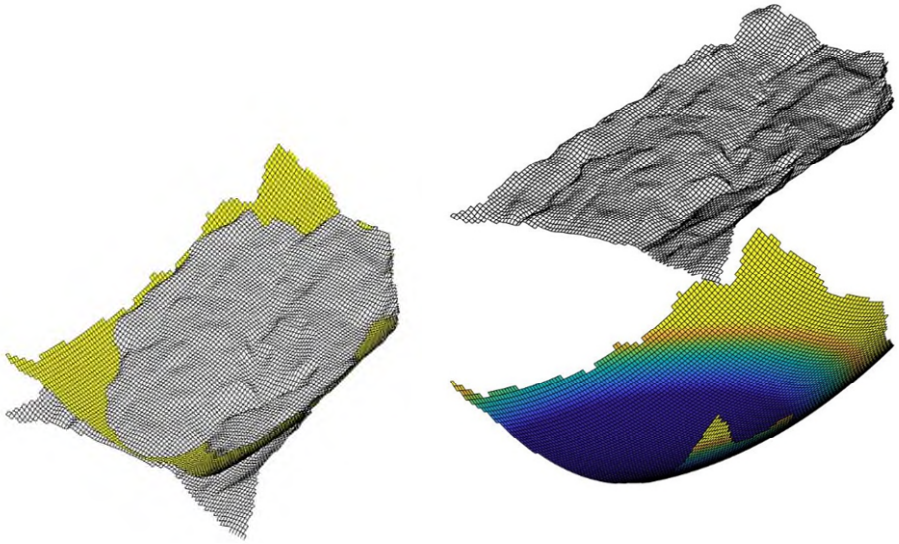
圖附 4.7　針對 D053 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



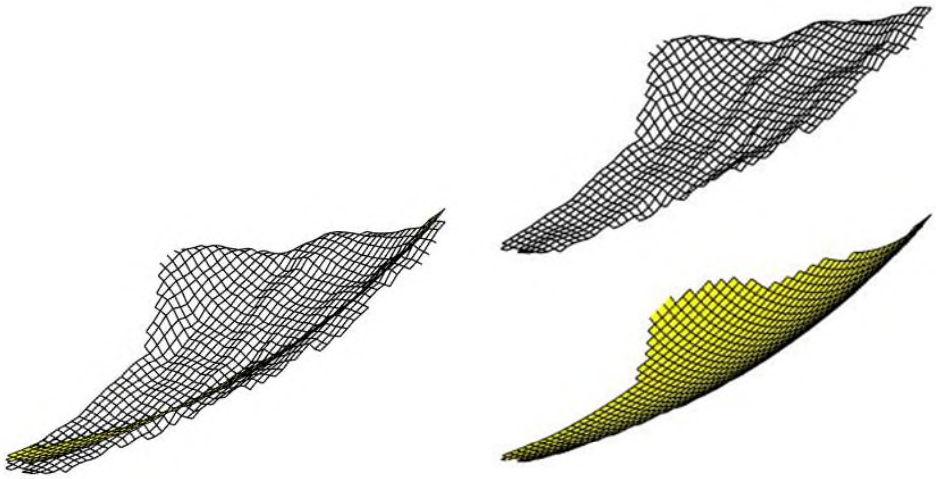
圖附 4.8　針對 D056 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



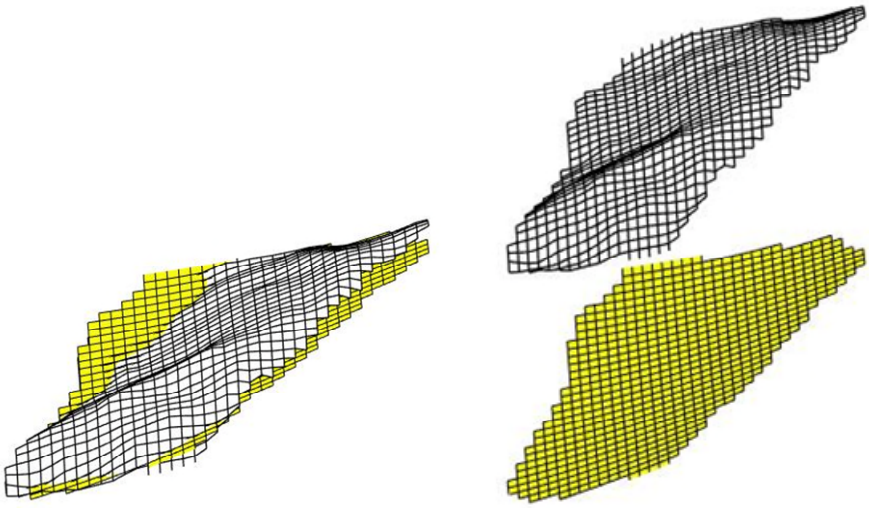
圖附 4.9　針對 D078 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



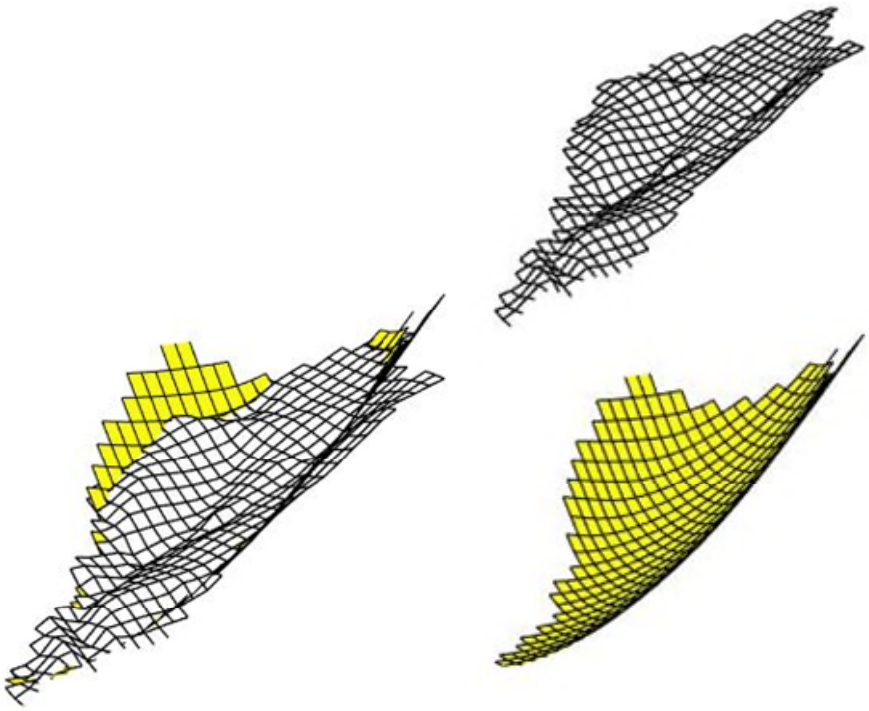
圖附 4.10　針對 D080 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



圖附 4.11　針對 D205 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



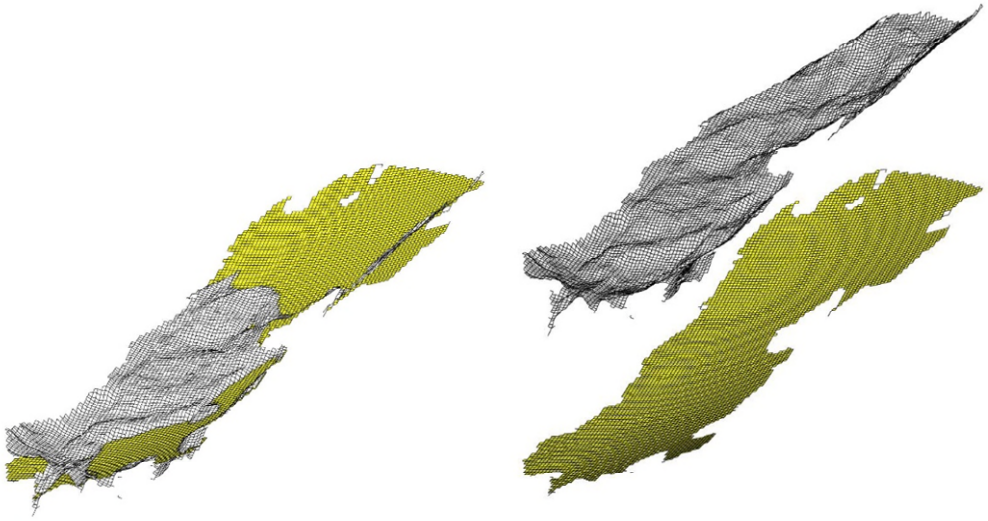
圖附 4.12　針對 D273 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)



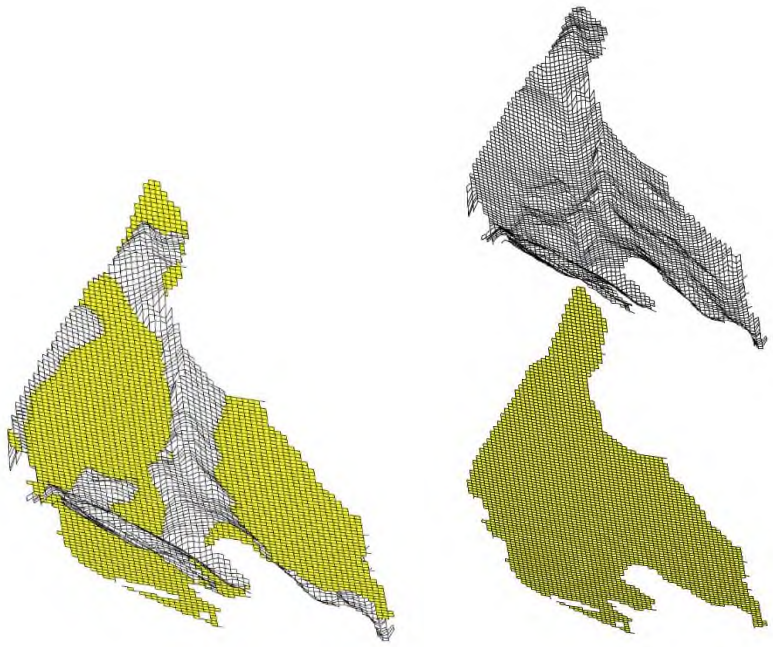
圖附 4.13　針對 D275 製作之理想破壞曲面(右下)以及原地形(右上)

附錄五、

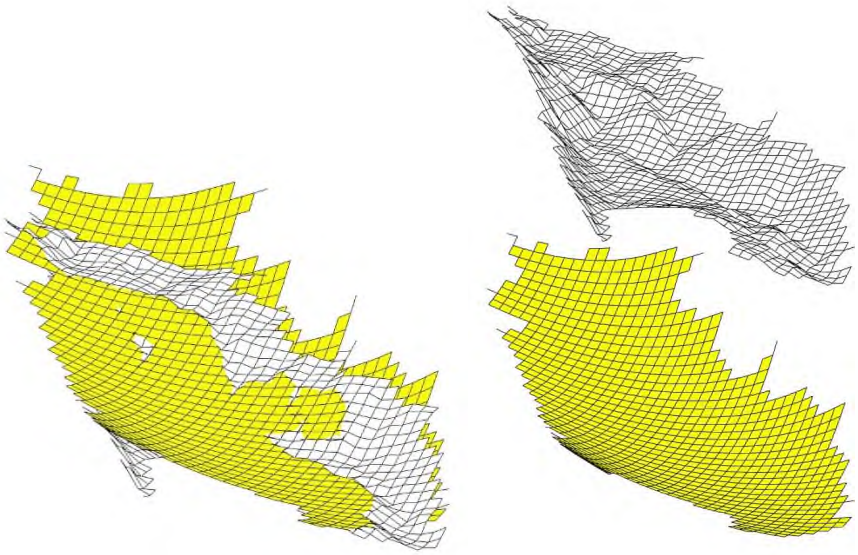
針對林慶偉教授等人於 102 年所執行之計畫所圈畫高屏溪流域山坡在莫拉克颱風後所發生之大規模崩塌共 53 處中挑選出 24 處共 28 個資料點所製作的理想曲面(彩色網格)以及原地形(黑色網格)之對照圖



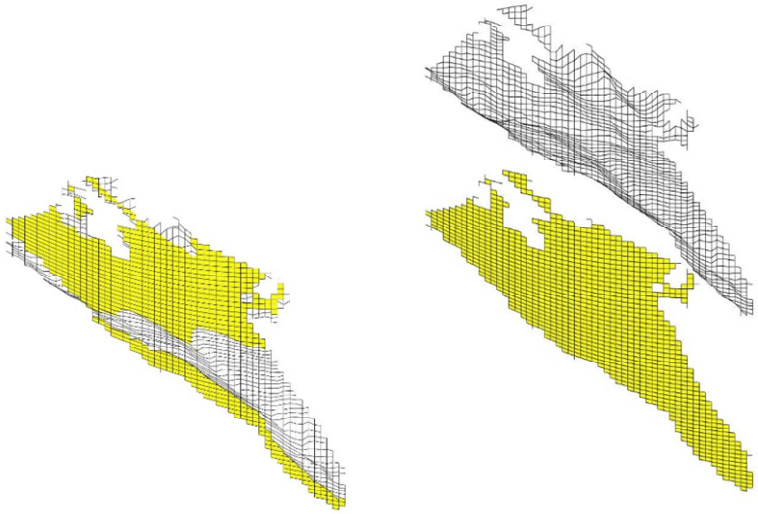
圖附 5.1 針對編號 05-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



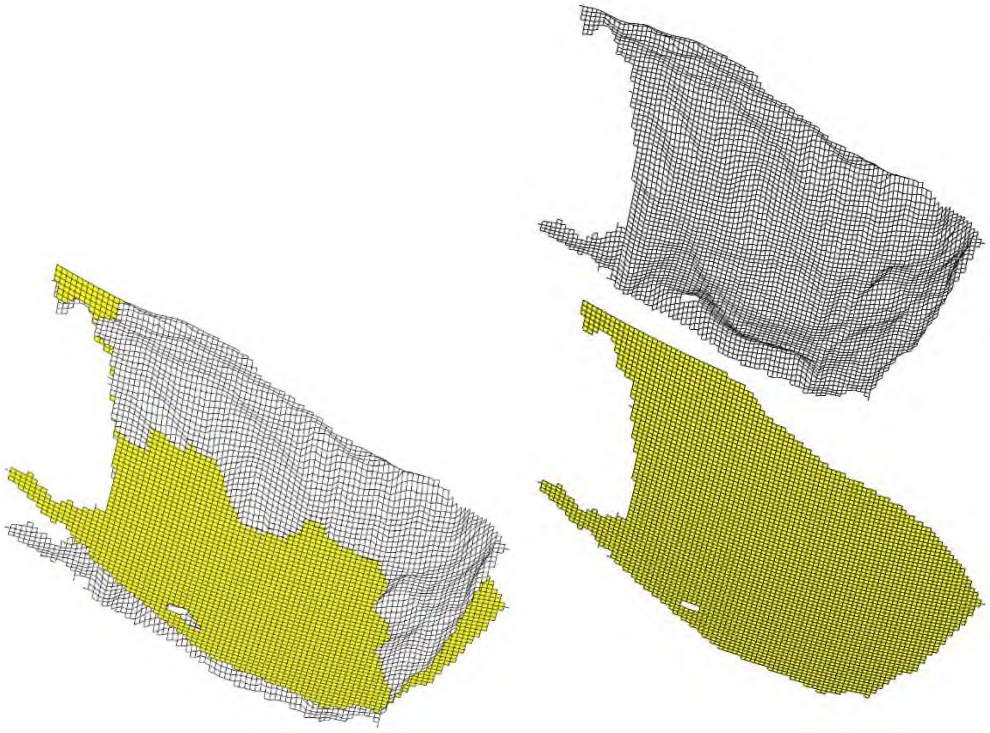
圖附 5.2 針對編號 05-2 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



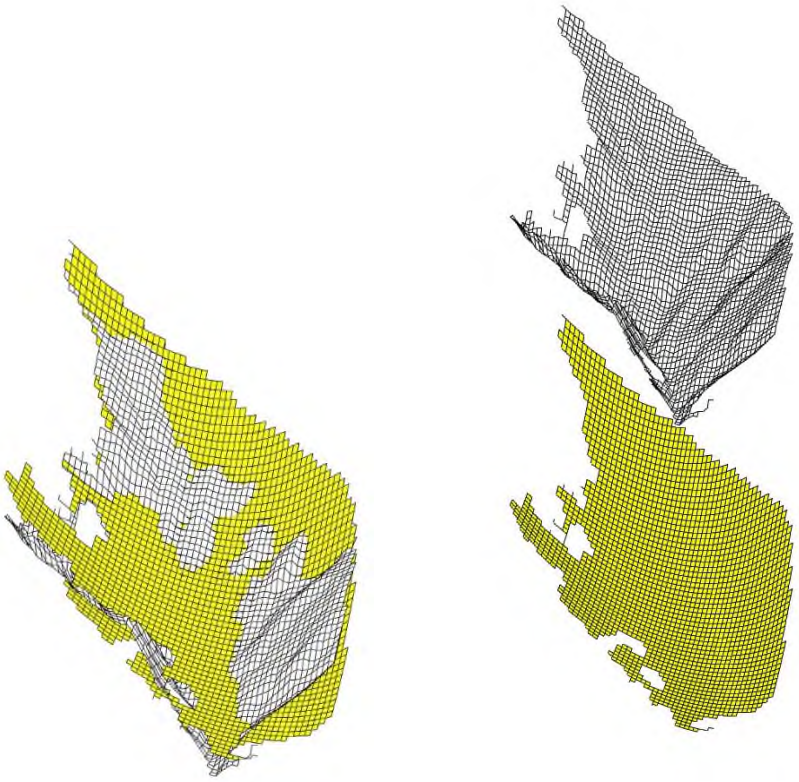
圖附 5.3 針對編號 06-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



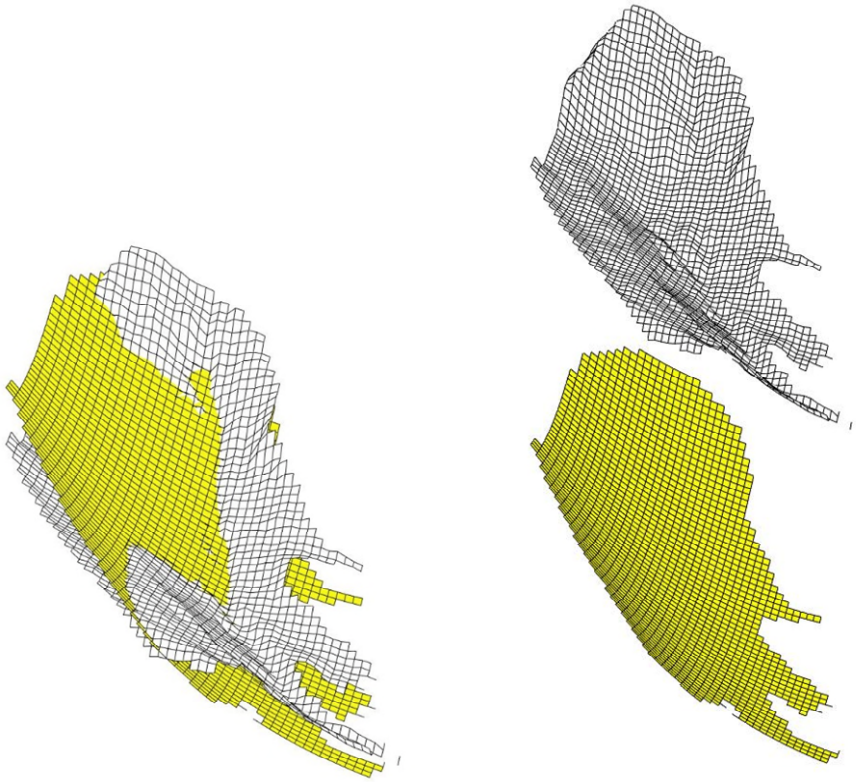
圖附 5.4 針對編號 06-2 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



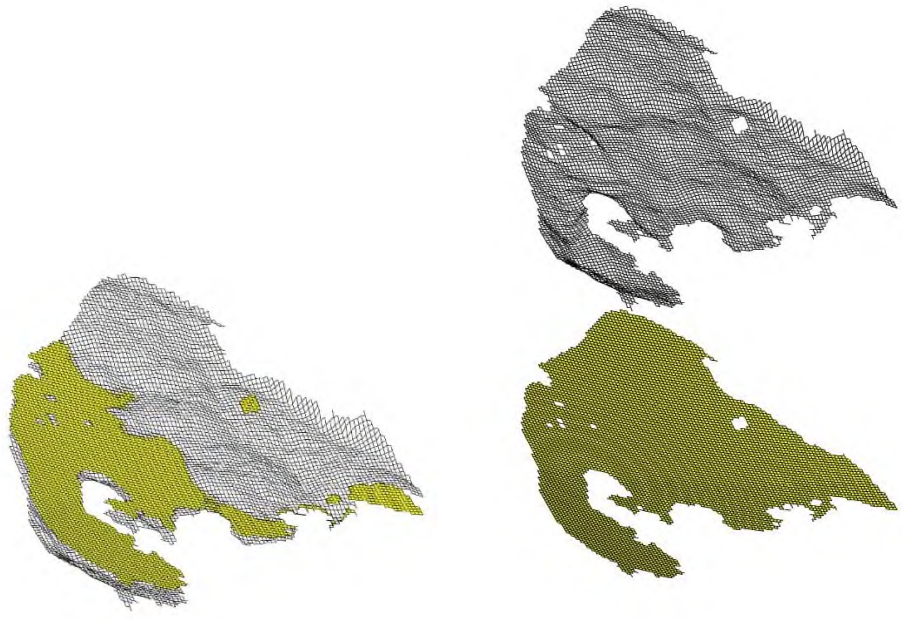
圖附 5.5 針對編號 08-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



圖附 5.6 針對編號 09-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



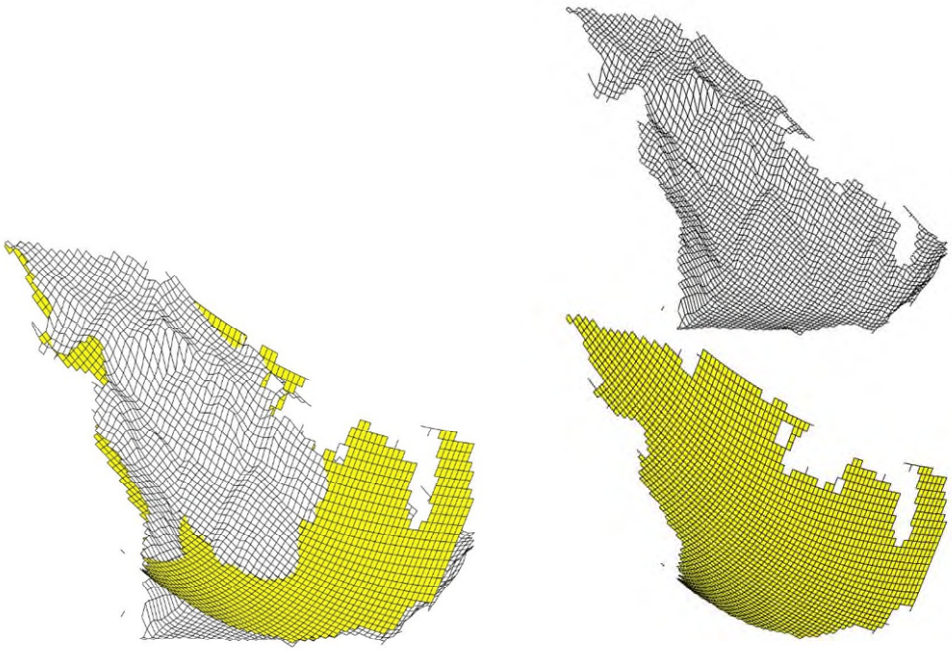
圖附 5.7 針對編號 10-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



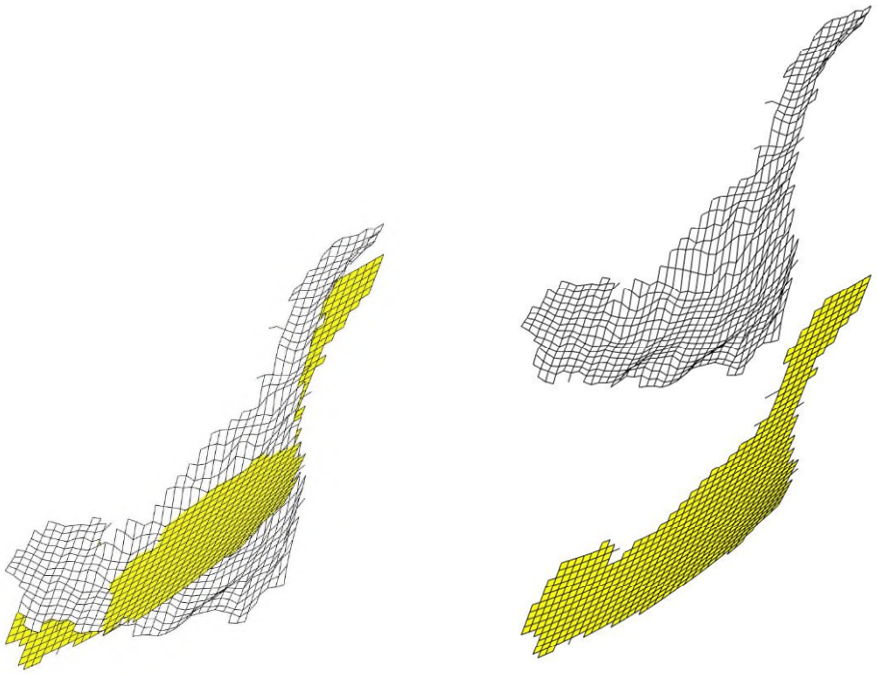
圖附 5.8 針對編號 11-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



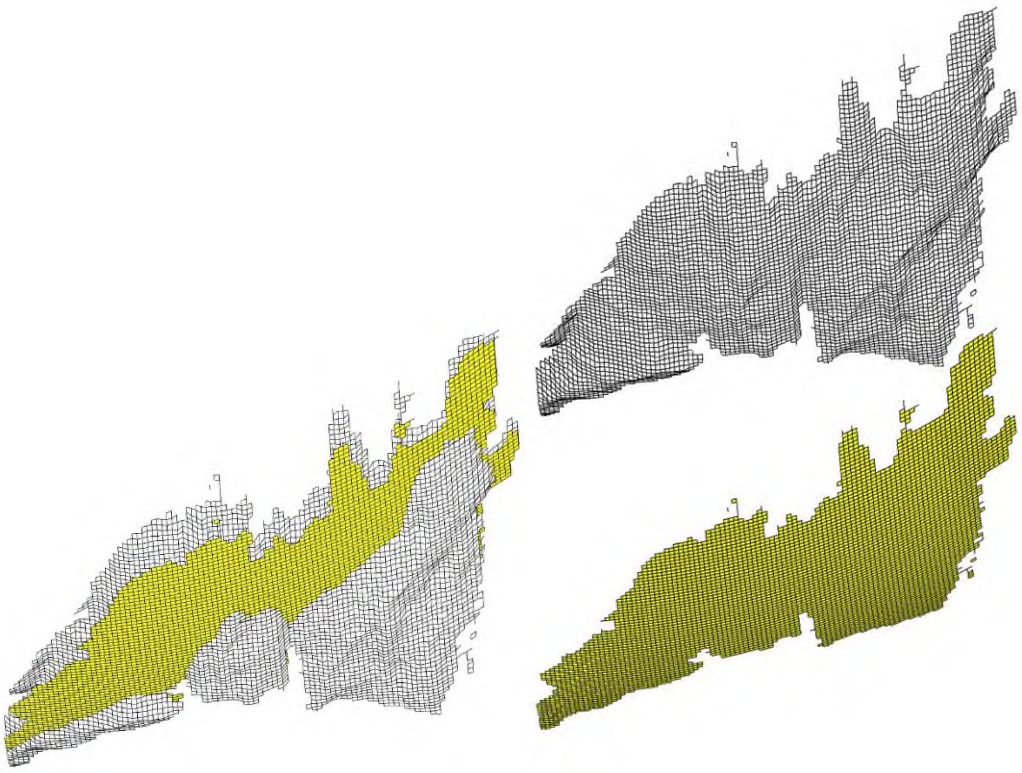
圖附 5.9 針對編號 11-2 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



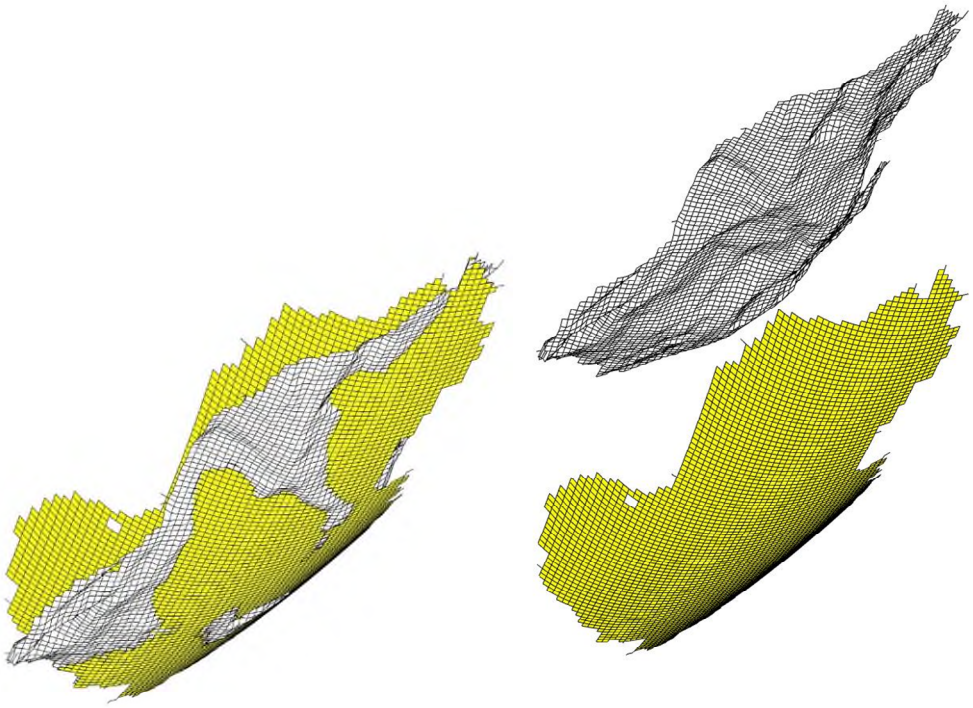
圖附 5.10 針對編號 13-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



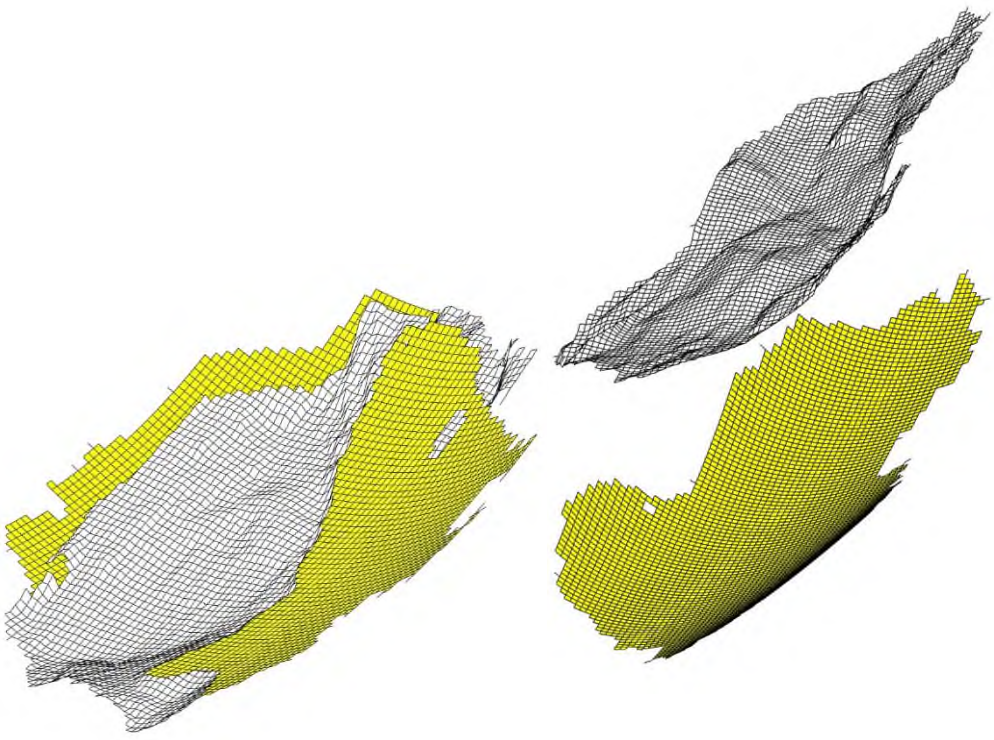
圖附 5.11 針對編號 19-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



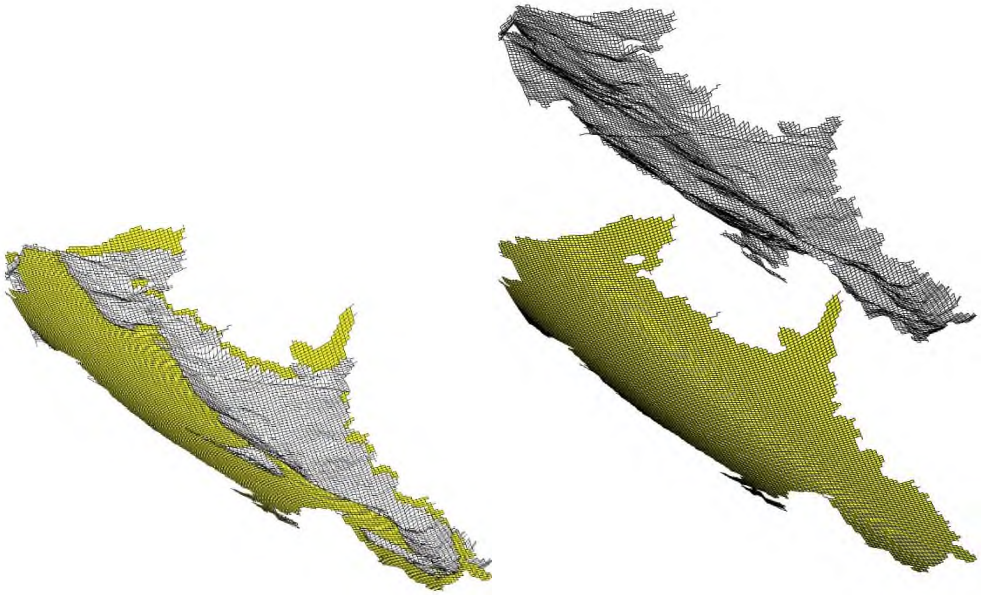
圖附 5.12 針對編號 25-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



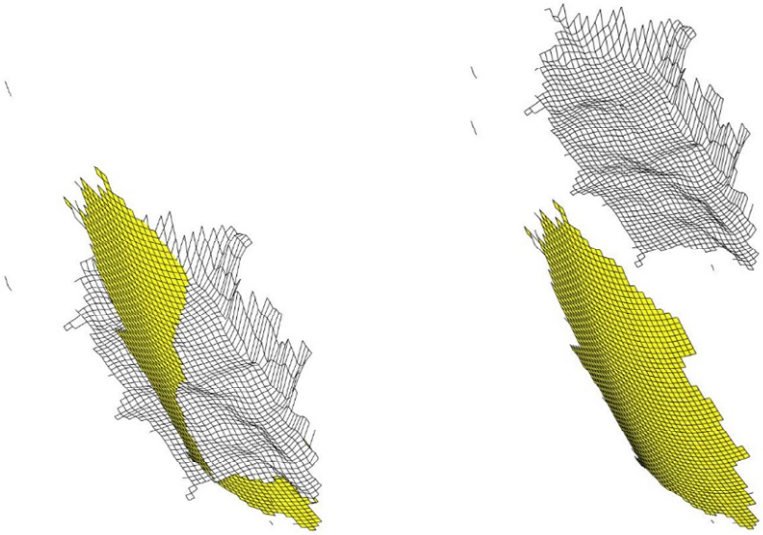
圖附 5.13 針對編號 27-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



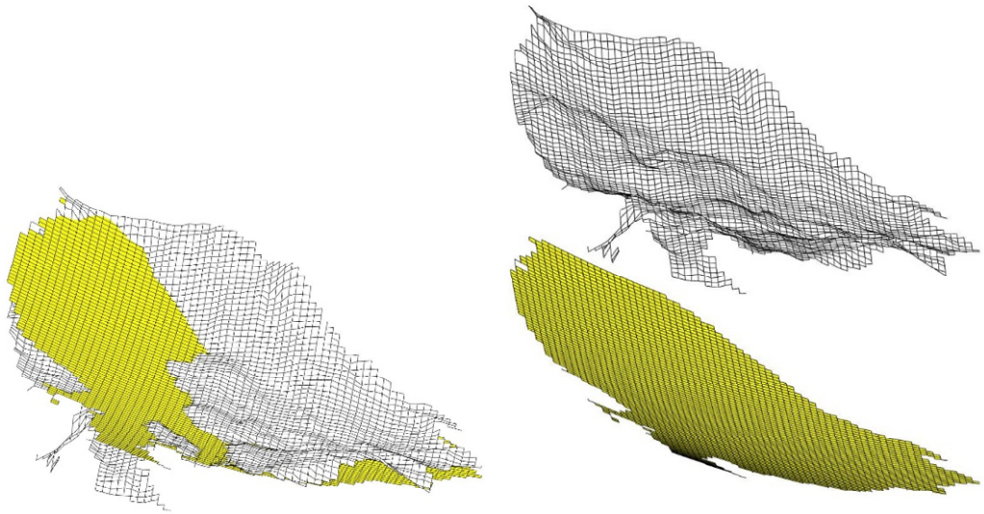
圖附 5.14 針對編號 28-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



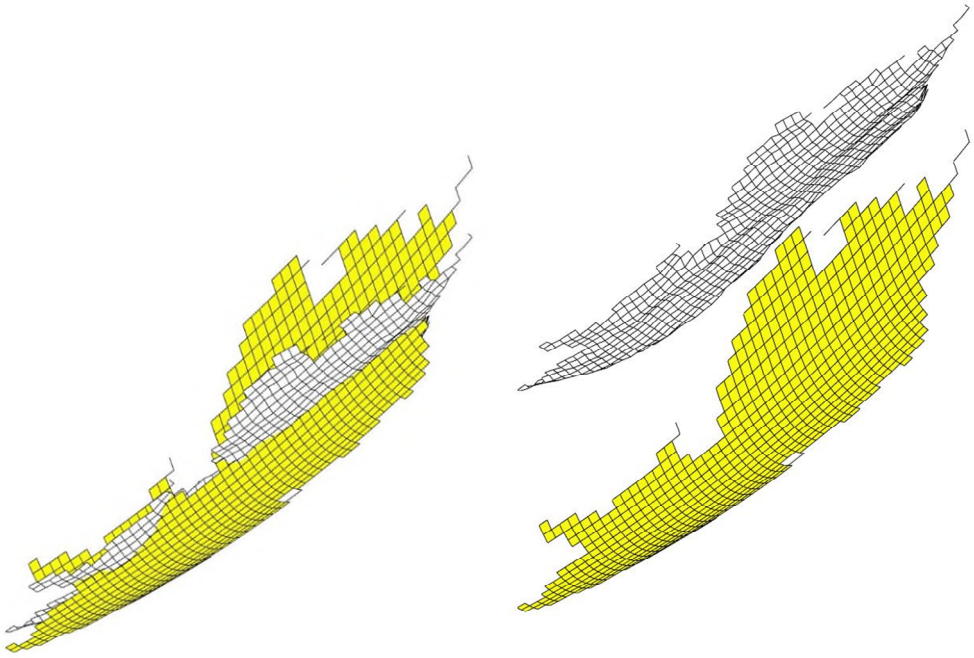
圖附 5.15 針對編號 33-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



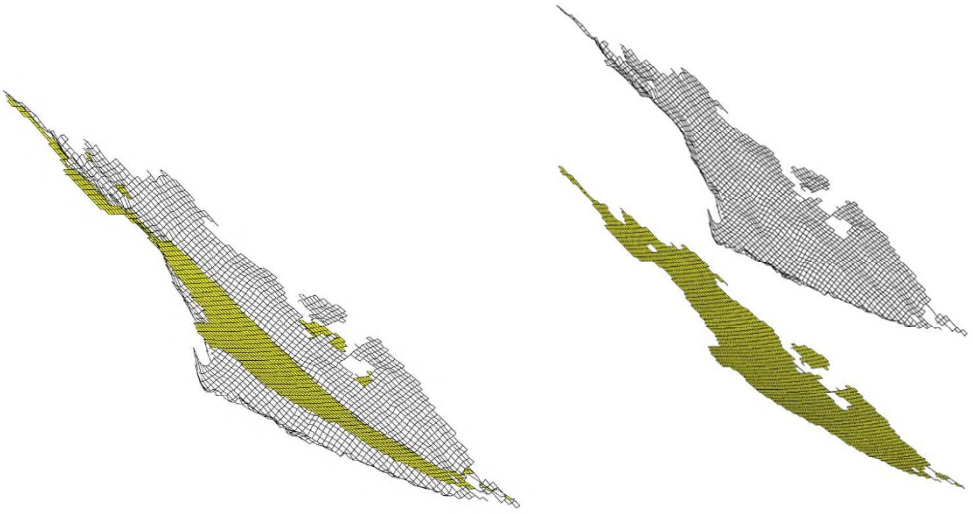
圖附 5.16 針對編號 34-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



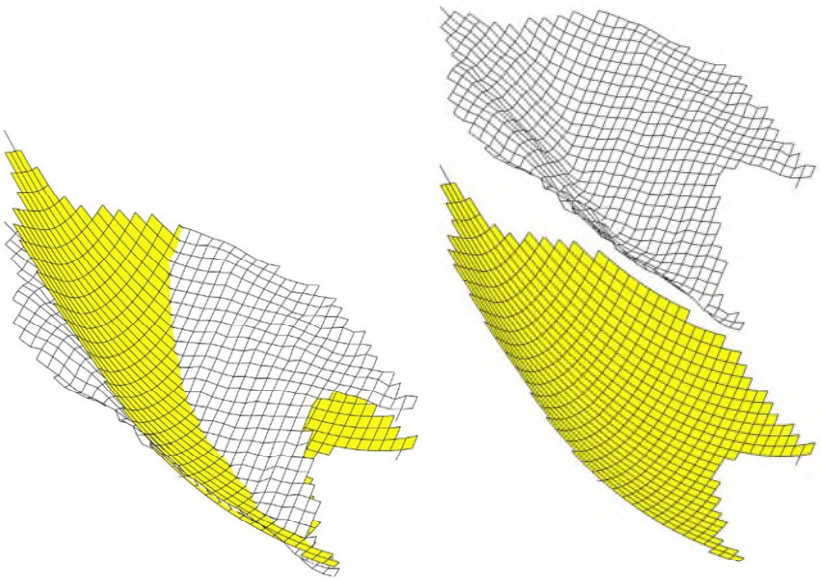
圖附 5.17 針對編號 35-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



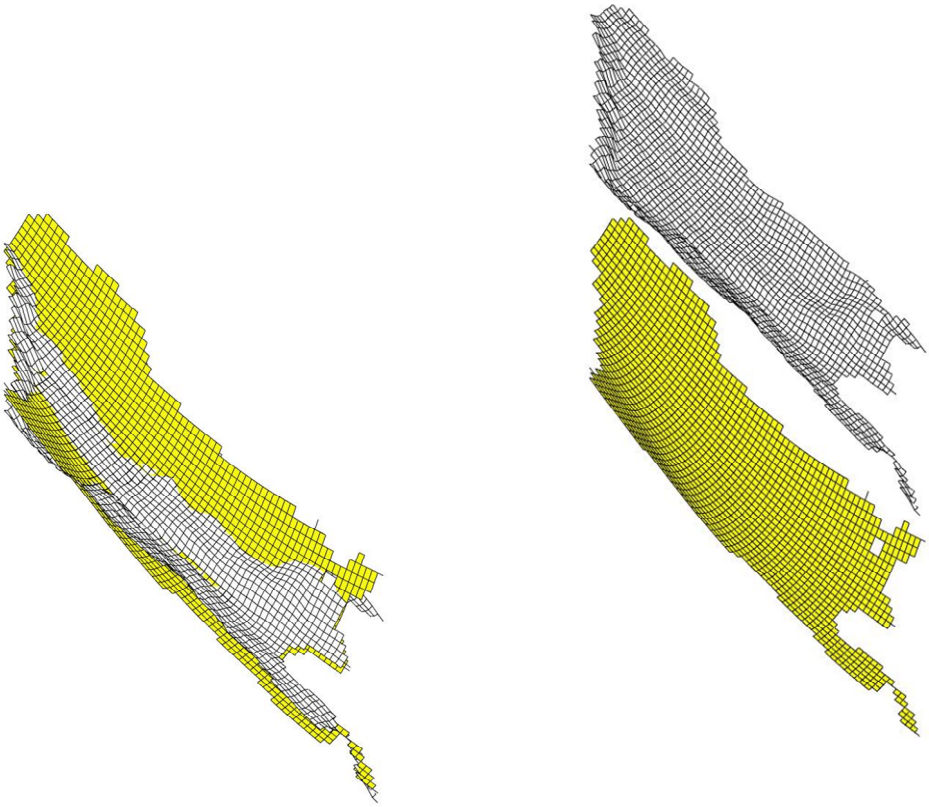
圖附 5.18 針對編號 37-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



圖附 5.19 針對編號 41-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



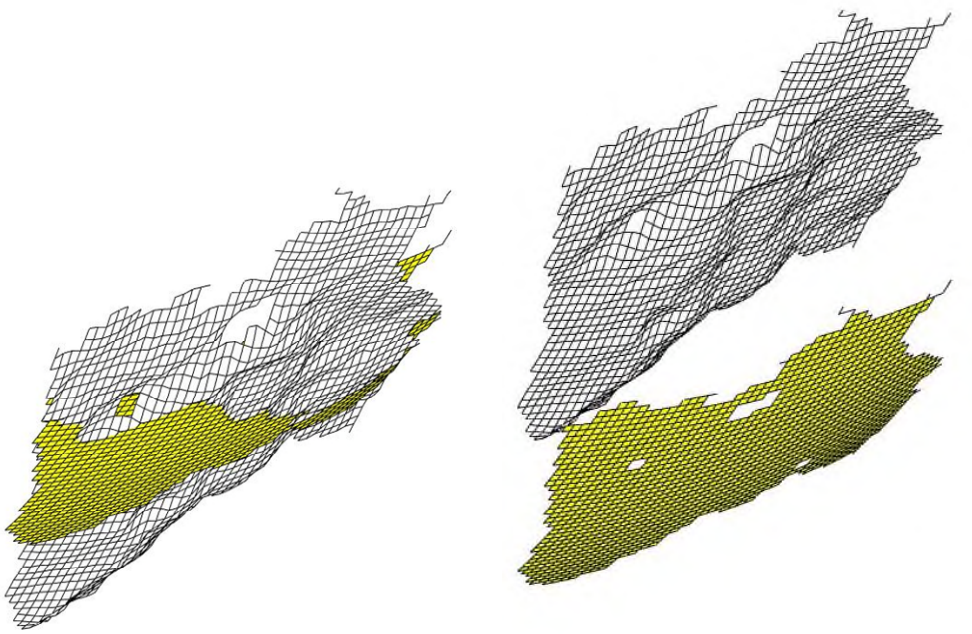
圖附 5.20 針對編號 42-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



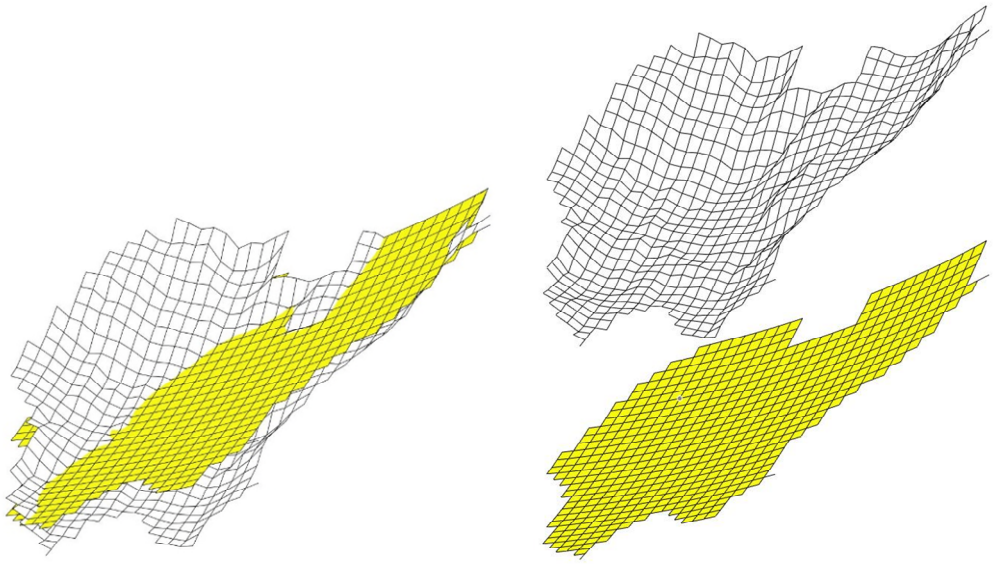
圖附 5.21 針對編號 42-2 作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



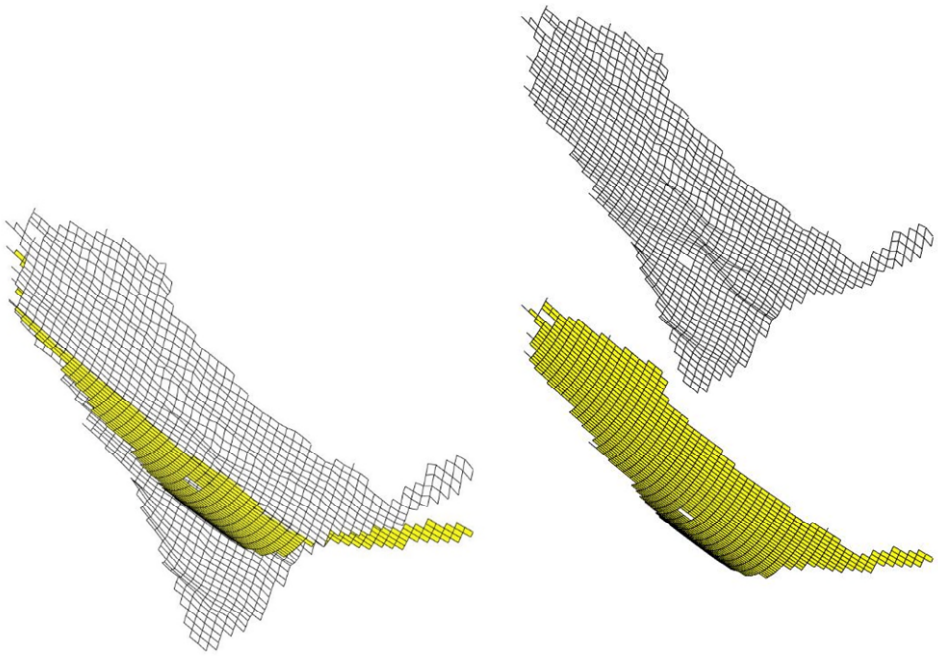
圖附 5.22 針對編號 44-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



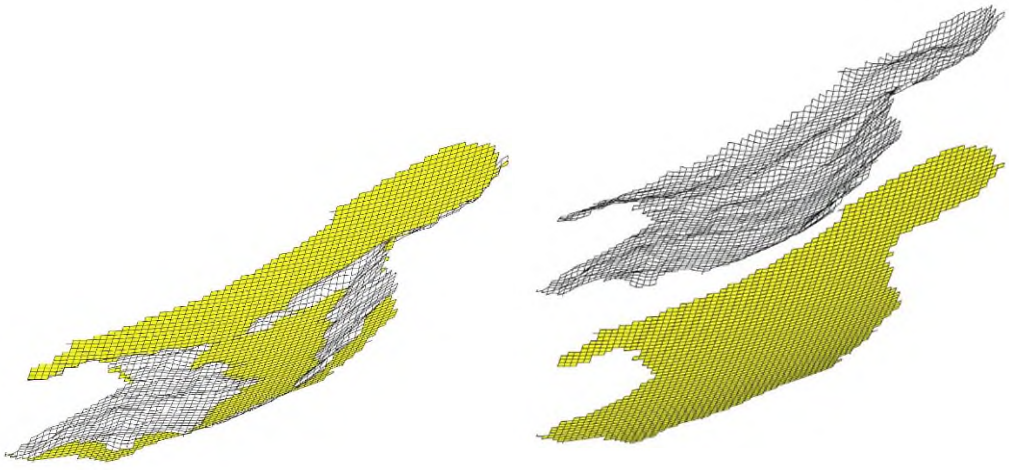
圖附 5.23 針對編號 45-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



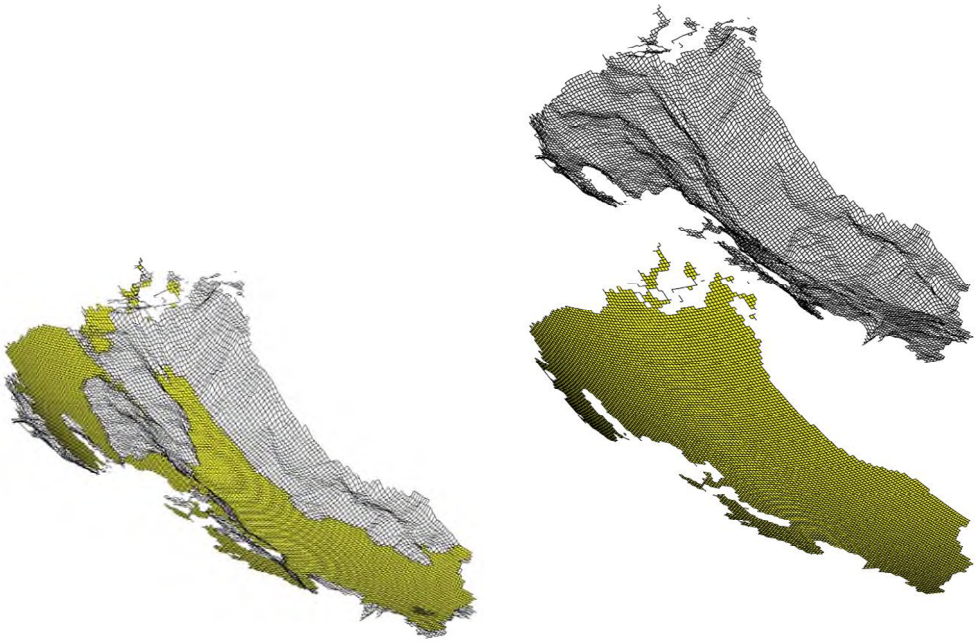
圖附 5.24 針對編號 46-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



圖附 5.25 針對編號 47-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



圖附 5.26 針對編號 48-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)



圖附 5.27 針對編號 50-1 製作之理想破壞面(右下)以及原地形(右上)

附錄六、

本計畫之成果於國際研討會以及國內研討會發表之結果

- 國際研討會(EGU Assembly 2019, Vienna, Austria, 7-15 Apr. 2019)

How well can we approximate the failure surface and estimate the amount of landslide mass? — *An idealized failure surface for predicting its traveling path*

Yih-Chin Tai[1*], Kun-Ding Li[1], Yu-Chen Wu[1], Chih-Yu Kuo[2], Rou-Fei Chen[3] & Ching-Wei Lin[3]
[1] Dept. Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, 701 Tainan, Taiwan
[2] Research Center for Applied Science, Academia Sinica, 105 Taipei, Taiwan [3] Department of Geology, Chinese Culture University, 111 Taipei, Taiwan
[4] Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, 701 Tainan, Taiwan

EGU General Assembly 2019
Vienna, Austria, 7-15 April, 2019
NH3.16/ GM7.7/ HS11.42
EGU2019-7364 X3.139

- 國際研討會 (The 9th International Workshop on Multimodal Sediment Disasters, Mie University, Tsu, Mie Japan, 17-19 Oct. 2019)

An Idealized Curved Surface for Landslide Failure and its Impacts on the Flow Paths

Chi-Jyun KO, Kun-Ding LI, Yu-Chen WU and Yih-Chin TAI*
Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan
E-mail: yctai@mail.ncku.edu.tw

A Web-based Hazard-mapping Demonstrating System

Yih-Chin TAI*[1], Chi-Ting NI[2], Sia-Haut TAN[2] and Darby Tien-Hao CHANG[3]
*[1] Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan
E-mail: yctai@mail.ncku.edu.tw
[2] Department of Computer Science and Information Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan
[3] Department of Electrical Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

- 第 43 屆全國力學會議 (2019 年 11 月 29 - 30 日，逢甲大學)

