SWCB-107-267

智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為

An 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：107 年 02 月 09 日至 107 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：戴義欽 副教授

共同主持人 ：詹錢登 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 107 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

摘要

本計畫擬發展一簡易迅速初步評估崩塌破壞曲面的方法，其得以整合現有現地調查量測與即時監測之資料(如 崩塌面積範圍)以及經驗法與解析法所提供之資訊(如 崩塌深度)，以有限的資訊在短時間內初步評估崩塌破壞曲面所在，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。對於所估算之崩塌破壞曲面與土砂量體，將可與地理資訊系統整合，並透過與電腦模擬模式來探討崩塌發生後的土沙運移行為。以不同的情境模擬來分析評估可能發生的災害狀況，精進現有災害管理與預警技術。此外，為探討估算崩塌破壞曲面技術所需參數間之關連性，也選定適合之集水區一處來分析區內現有坡面崩塌破壞曲面幾何特性，透過大數據歸納分析來提升評估破壞曲面與量體估算之可靠度。

關鍵詞：崩塌破壞面、土沙運移、情境模擬、幾何特性

An algorithm for plausibly estimating the amount of landslide mass and its traveling

Abstract

In the present project we proposed and developed an algorithm for plausibly estimating the amount of landslide mass and its traveling distance. With the help of the field data (e.g. the failure area of potential) and theoretical analysis (e.g. the estimated failure depth), this algorithm is able to provide the information about the possible location and geometry of the failure surface in short time, in order to improve the process by assessing the amount of moving mass at the potential area of slope area. Once the plausible failure surface is identified, one may employ the numerical model (Debris Flow Model for General Topography, DFMfGT) to describe the consequent flowing path. The proposed algorithm may provide variant scenarios, so that it could serve as a powerful tool for hazard management/ assessment or disaster mitigation. In addition, to improve the accuracy and reliability, the investigation of the geometrical properties, relating the suggested failure surface(s) and the existing ones, is going to be performed, for which one water catchment with significant topography variation is chosen.

Keywords: Slope failure surface, sediment transport, scenario simulation, geometrical property

目次

摘要.....I

Abstract..... II

目次.....III

表次.....VI

圖次.....VII

第一章　前言 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 2-1

第一節 計畫工作架構與流程 2-2

第二節 坡面理想崩塌曲面運算方法 2-3

第三節 理想化崩塌破壞曲面與數值模擬模式之整合 2-9

第四節 坡面崩塌破壞曲面幾何特性探討 2-11

第三章　坡面理想崩塌曲面運算 3-1

第一節 荖濃溪集水區(土石流潛勢溪流高市 DF081 萬山部落)

..... 3-1

第二節 曾文水庫集水區(土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪)

..... 3-6

第三節 小林村(大規模崩塌事件)..... 3-10

第四節 來義地區 3-13

第四章 坡面理想崩塌曲面與數值模擬模式整合 4-1

第一節 土石流潛勢溪流區高市 DF081 萬山部落 4-1

第二節 土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪 4-9

第三節 小林村崩塌案例情境模擬 4-19

第五章 坡面崩塌曲面幾何特性探討 5-1

第一節 土石流潛勢溪流區高市 DF081 萬山部落 5-2

第二節 土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪 5-5

第三節 小林村大型崩塌事件 5-8

第四節 綜合討論 5-10

第六章 結論 6-1

參考文獻 參-1

附錄一 期初審查委員意見回覆及辦理情形 ..... 附 1-1

附錄二 期中審查委員意見回覆及辦理情形 ..... 附 2-1

附錄三 期末審查意見回覆及辦理情形 ..... 附 3-1

附錄四 理想曲面組合運算結果資料 ..... 附 4-1

附錄五 計畫成果投稿研討會 ..... 附 5-1

表次

表 3.1　DF081 各崩塌區塊最佳曲面幾何參數以及其平均值 3-5
表 3.2　DF054 各崩塌區塊最佳曲面幾何參數以及其平均值 3-9
表 3.3 小林村(大規模崩塌事件) 各崩塌區塊最佳曲面幾何參數及其平均值 3-13
表 3.4　(來義) 各預估崩塌區塊最佳曲面幾何參數及其平均值 .. 3-16

表 4.1　數值模擬採用之參數一覽表 (DF081) 4-2
表 4.2　數值模擬採用之參數一覽表 (DF054) 4-10
表 4.3　數值模擬採用之參數一覽表 (小林村崩塌案例) 4-20

表 5.1　DF081 之 DEM 資料與破壞面參數表 5-3
表 5.2　DF054 之 DEM 資料與破壞面參數表 5-5
表 5.3　小林村之 DEM 資料與破壞面參數表 5-8

圖次

圖 1.1　大規模崩塌災害即時監測站分佈圖 1-2

圖 2.1　計畫作業流程圖 2-2
圖 2.2　曲面(棕色)上的任一位置之不同曲率(紅色虛線)..... 2-4
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 2-5
圖 2.4　曲面最大深度與曲率半徑之關係示意圖 2-6
圖 2.5　崩塌前(彩色網格)與崩塌後(黑色網格)地形高程重疊下，三種不同深度之示意圖 2-7
圖 2.6　災後崩塌範圍最高與最低各 10 點之 100 種組合 2-8
圖 2.7　理想破壞面與原地形 DEM 示意圖 2-11
圖 2.8　曲率計算時之切面示意圖：左圖為主軸向; 右圖為側向軸方向 2-13
圖 2.9　上圖為龍蛟溪子集水區之衛星影像圖；下圖為該區域於莫拉克颱風之後的地形變異情形(資料來源：水保局歷史圖資活化與變遷分析研究)..... 2-14
圖 2.10　曾文水庫附近之地質圖，其中紅色圈選範圍為 DF054 範圍(資料來源：中央地調所) 2-15
圖 2.11　DF081 潛勢溪流之衛星影像(左；資料來源:水保局計畫”歷史圖資活化變遷分析研究”)與高屏溪流域地質(右；資料來源:經濟部中央地質調查所)..... 2-16
圖 2.12　DF081 潛勢溪流所在之地層資料(左)與岩性資料(右) (資料

來源:經濟部中央地質調查所)..... 2-16
圖 2. 13　小林村於莫拉克風災前的衛星影像圖 2-17
圖 2. 14　小林村於莫拉克風災後的衛星影像圖 2-18
圖 2. 15　小林村地質圖(資料來源:經濟部中央地質調查所) 2-18

圖 3. 1　DF081 潛勢溪流的 7 個崩塌區塊 3-2
圖 3. 2　理想破壞曲面(Area 1)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF081) 3-2
圖 3. 3　理想破壞曲面(Area 2)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF081) 3-3
圖 3. 4　理想破壞曲面(Area 3)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF081) 3-3
圖 3. 5　理想破壞曲面(Area 4)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF081) 3-3
圖 3. 6　理想破壞曲面(Area 5)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF081) 3-4
圖 3. 7　理想破壞曲面(Area 6)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF081) 3-4
圖 3. 8　理想破壞曲面(Area 7)與災後 DEM 破壞面之比較圖.....
(DF081) 3-4
圖 3. 9　DF054 潛勢溪流的災後崩塌 5 個區塊(Area)分佈情形 3-7
圖 3. 10　理想破壞曲面(Area 1)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF054) 3-7
圖 3. 11　理想破壞曲面(Area 1_L)與災後 DEM 破壞面之比較圖

(DF054) 3-8
圖 3. 12　理想破壞曲面(Area 2)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF054) 3-8
圖 3. 13　理想破壞曲面(Area 3)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF054) 3-8
圖 3. 14　理想破壞曲面(Area 4)與災後 DEM 破壞面之比較圖
(DF054) 3-9
圖 3. 15　小林村災後崩塌區域以及 4 個區塊(Area)分佈情形..... 3-11
圖 3. 16　理想破壞曲面 (Area 1)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)
..... 3-11
圖 3. 17　理想破壞曲面 (Area 2)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)
..... 3-12
圖 3. 18　理想破壞曲面 (Area 3)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)
..... 3-12
圖 3. 19　理想破壞曲面 (Area 4)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)
..... 3-12
圖 3. 20　來義地區預估崩塌範圍之衛星影像 3-14
圖 3. 21　3 種預估崩塌情形 3-15
圖 3. 22　理想破壞曲面與災後 DEM 破壞面(Area 1)..... 3-15
圖 3. 23　理想破壞曲面與災後 DEM 破壞面(Area 2)..... 3-15
圖 3. 24　理想破壞曲面與災後 DEM 破壞面(Area 3)..... 3-16

圖 4. 1　(DF081) (a)崩塌後地形；(b)理想破壞曲面整合地形；(c)崩
塌區塊所在 4-2

圖 4. 2　t = 0.00 s 時之流體深度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-3
圖 4. 3　t = 60.61 s 時之流體深度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-3
圖 4. 4　t = 121.22 s 時之流體深度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-4
圖 4. 5　t = 181.83 s 時之流體深度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-4
圖 4. 6　t = 0.00 s 時之流體濃度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-5
圖 4. 7　t = 60.61 s 時之流體濃度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-5
圖 4. 8　t = 121.22 s 時之流體濃度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-6
圖 4. 9　t = 181.83 s 時之流體濃度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-6
圖 4. 10　t = 0.00 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-7
圖 4. 11　t = 60.61 s 時之流體速度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-7
圖 4. 12　t = 121.22 s 時之流體速度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-8
圖 4. 13　t = 181.83 s 時之流體速度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-8

圖 4. 14　(DF054) (a)崩塌後地形；(b)理想破壞曲面整合地形；(c)崩塌區塊所在 4-10
圖 4. 15 t = 0.00 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-11
圖 4. 16 t = 30.30 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-12
圖 4. 17 t = 60.61 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-12
圖 4. 18 t = 90.91 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-13
圖 4. 19 t = 0.00 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-14
圖 4. 20 t = 30.30 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-14
圖 4. 21 t = 60.61 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-15
圖 4. 22 t = 90.91 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-16
圖 4. 23 t = 0.00 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-16
圖 4. 24 t = 30.30 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-17
圖 4. 25 t = 60.61 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-18

圖 4. 26 t = 90.91 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-18
圖 4. 27 (小林崩塌案例) (a)崩塌後地形；(b)理想破壞曲面整合地形；(c)崩塌區塊所在區塊所在位置圖)..... 4-20
圖 4. 28 t = 0.00 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-21
圖 4. 29 t = 60.61 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-21
圖 4. 30 t = 121.22 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-22
圖 4. 31 t = 181.83 s 時之流體深度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-22
圖 4. 32 t = 0.00 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-23
圖 4. 33 t = 60.61 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-23
圖 4. 34 t = 121.22 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-24
圖 4. 35 t = 181.83 s 時之流體濃度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-24
圖 4. 36 t = 0.00 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-25
圖 4. 37 t = 60.61 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面)..... 4-25

圖 4. 38 t = 121.22 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-26
圖 4. 39 t = 181.83 s 時之流體速度分佈，圖(a) (災後 DEM)；圖(b) (理想破壞面) 4-26

圖 5. 1 DF081：圖(a)為 R_1(軸向曲率半徑)、R_2(側向曲率半徑)、A_1 之比較圖； 圖(b)為崩塌量體與曲面軸向最大深度(V_1- d_{dem} 以及 V_2- d_1)之比較圖 5-4
圖 5. 2 DF081：圖(a)為崩塌體積與崩塌深度；圖(b)為曲面最大崩塌深度、軸長及曲率半徑之關係圖 5-5
圖 5. 3 DF054：圖(a)為 R_1(軸向曲率半徑)、R_2(側向曲率半徑)、A_1 之關係；圖(b)為崩塌量體與曲面軸向最大深度(V_1- d_{dem} 以及 V_2- d_1)之比較圖 5-7
圖 5. 4 DF054：圖(a)為崩塌量體與崩塌深度之關係；圖(b)為曲面最大崩塌深度、軸長及曲率半徑之關係 5-7
圖 5. 5 小林村案例：圖(a)為之 R_1(軸向曲率半徑)、R_2(側向曲率半徑)、A_1 之比較圖；圖(a)為崩塌量體與曲面軸向最大深度(V_1- d_{dem} 以及 V_2- d_1)之關係圖 5-9
圖 5. 6 小林村案例：圖(a)為崩塌體積與崩塌深度；圖(b)為曲面最大崩塌深度、軸長及曲率半徑之關係圖 5-10
圖 5. 7 綜合 15 個 Case 之 R_1、d_1 關係圖；左：線性圖；右：對數圖 5-11
圖 5. 8 綜合 15 個 Case 之 R_2、d_2 之關係圖；左：線性圖；右：對數圖 5-12

圖 5. 9　綜合 15 個 Case 之 R_1、A_1 之比較圖；右圖為部分放大圖 5-12
圖 5. 10　綜合 15 個 Case 之 R_2、A_1 之比較圖；右圖為部分放大圖 5-12
圖 5. 11　左：現地崩塌體積與現地最大崩塌深度之關係；右：理想崩塌體積 V_2 與曲面最大深度 d_1 之關係 5-13
圖 5. 12　理想崩塌體積 V_2 與 d_{dem}、d_1、d_2 之關係圖 5-13

第一章　前言

第一節　計畫緣起與擬解決問題

因地球暖化導致全球氣候變遷，近年來在台灣的降雨分布呈現更加不平均的狀態，降雨集中且強度增加。其極端型降雨事件在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。臺灣地區近 10 年來亦陸續出現對集水區影響較大，由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。不僅對集水區產生極大的衝擊，也威脅區內的保全對象。在 2009 年莫拉克風災小林村搭規模崩塌事件引起政府相關部門高度重視，也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。

目前中央地質調查所設置 15 處觀測站，針對具有大規模潛在山崩之聚落地區進行即時活動性的觀(監)測，如圖 1.1 所示；也建立由豪雨引致山崩之即時動態警戒模式，依雨量率定山崩的警戒門檻。然而由於山崩產生的土砂量體對於事件的致災性以及災害的規模具有關鍵性影響，且對於集水區的變遷情形也具深遠影響。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，造成崩塌土砂量體的估算具高度的不確定性，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，掌握坡面崩塌土砂量體及其後續的運移行為是在防災與減災地工作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「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，也是本計畫的核心工作。當然，也期待其成果後續能夠作為土砂災害之沙盤推演工具。



圖 1.1　大規模崩塌災害即時監測站分佈圖 (圖資料來源：科技部-災害管理資訊研發應用平台 http://dmip.tw/Lone//realtime/station.aspx)

第二節　計畫工作項目

針對上述議題，本研究計畫於本年度規畫”崩塌破壞曲面估算運算方法”、”數值模式土沙運移行為探討”以及”崩塌破壞曲面的幾何特性探討” 等三個工作項目，分別說明如下：

第一項 崩塌破壞曲面估算運算方法

發展一簡易迅速初步評估崩塌破壞曲面的方法，其得以整合現有現地調查量測與即時監測之資料(如 崩塌面積範圍)以及經驗法與解析法所提供之資訊(如 崩塌深度)，以有限的資訊快速初步評估崩塌破壞曲面，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。

第二項 數值模式土沙運移行為探討

對於前一工作項目所估算之崩塌破壞曲面與土砂量體，與 GIS 地理資訊系統整合，並透過與電腦模擬模式來探討崩塌發生後的土沙運移行為。以不同的情境模擬來分析評估可能發生的災害狀況，精進現有災害管理與預警技術，可充分發揮現有現地調查與監測預警系統所提供之資訊，達到即時預警減緩可能造成之災情之目的。

第三項 崩塌破壞曲面的幾何特性探討

選定適合之集水區一處，分析選定之集水區內現有坡面崩塌破壞曲面幾何特性，藉以探討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與量體估算之可靠度。

第二章　工作執行方法

集水區大型致災性的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兩種。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其不足之處。因此，本研究擬發展一簡易迅速初步評估崩塌破壞曲面的方法，得以整合現地監控資料以及經驗法與解析法所提供之資訊，即時建立可能的崩塌破壞曲面進行崩塌量體的初步估算並以電腦數值模擬模式進行土沙運移的情境推演，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)上搭配現地調查與監測資料所提供之可能崩塌範圍與可能破壞的深度，透過智慧運算粗估出可能的崩塌破壞曲面所在，推估可能崩塌量體。同時，針對選定之集水區內現有坡面崩塌破壞曲面分析其幾何特性，藉以探討其與崩塌破壞曲面技術所需參數間之關連性。換句話說，本計畫擬將點的資料(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，組成動態三維時空資訊，作為相關災害管理或是防災作為啟動之參考。

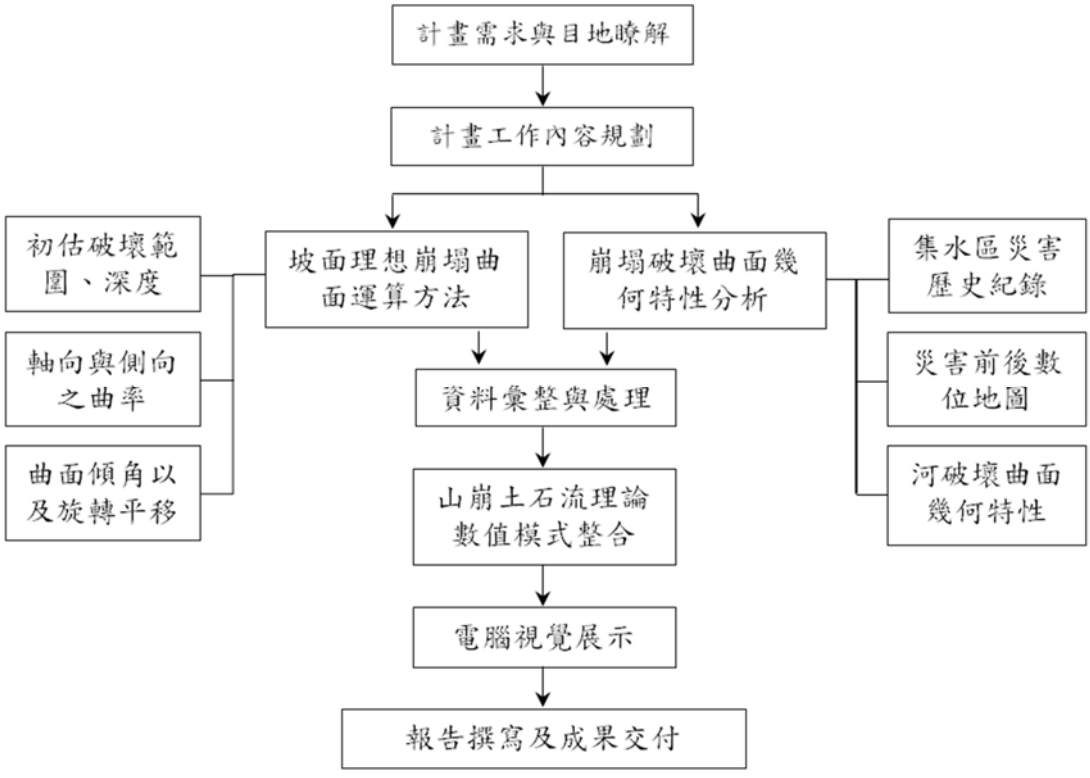


圖 2.1　計畫作業流程圖

第二節　坡面理想崩塌曲面運算方法

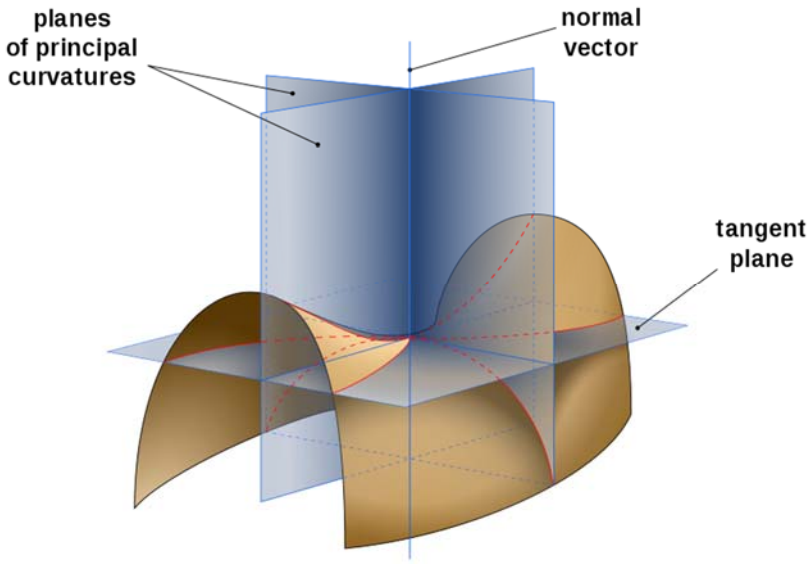
整合現地監控資料以及經驗法與解析法所提供之資訊，以一理想化曲面來初步近似評估崩塌破壞的曲面並據以估算量體，作為後續電腦數值動態模擬之依據。所建立崩塌破壞的曲面不求非常精確，但是需簡單迅速提供合理的可能崩塌破壞曲面所在以及其幾何形狀。主要的工作包含：”理想化曲面之建立”與”理想化崩塌破壞曲面之運算步驟”等兩個部分。分別敘述如下：

第一項 理想化曲面之建立

本計畫將崩塌破壞曲面透過一以現地地形座標系統所繪製的理想化曲面來作近似。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考慮的切面方向相關因此可以以張量的型態呈現(如 黎曼曲率張量 Riemann curvature tensor)，但是這張量的型態也增加了用卡式座標描述曲面的複雜度。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

$$K_{xz} = c^3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$$ ，其中 c 為所在位置的斜率(坡向)

顯見，縱使在 *x-z* 平面標畫曲率 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)

本計畫利用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，故將使用

$$K_{xz} = c_x^3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad 與 \quad K_{yz} = c_y^3 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \ , \tag{2. 1}$$

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 為所在位置沿軸向(down-slope 方向)與側向(transverse 方向)的的斜率(坡向)。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)。在本計畫執行中，這軸向與側向曲率的值則需透過整合現有現地調查量測與即時監測之資料(如 崩塌面積範圍)以

及經驗法與解析法所提供之資訊(如 崩塌深度)來決定。由於軸向曲率以及側向曲率與崩塌面積範圍或是崩塌深度並無一定的(數學)關係式，只能透過電腦程式作智慧式運算找到最符合上述條件的理想化曲面。

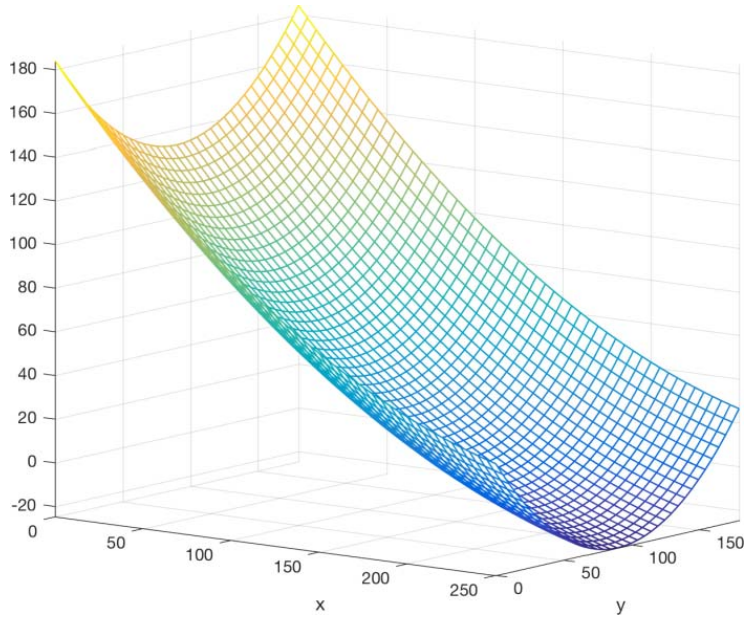


圖 2.3 軸向(x 方向)曲率(曲率半徑大)與側向(y 方向)曲率(曲率半徑小)所決定之理想化曲面

第二項 理想化崩塌破壞曲面之運算步驟

在給定崩塌地表範圍以及最大破壞深度的之條件下，可推求出理想崩塌破壞曲面，其計算方式可分為四個步驟：

步驟一：評估崩塌範圍之最高點、最低點以及側向兩點，據以決定軸向軸與側向軸所在。

步驟二：參考最大破壞深度所在換算曲面的深度 d_{max} (如圖 2.4 中對 d_{max} 之定義)，並利用幾何關係如圖 2.4 找出軸向垂直切面與側向垂直切面的圓心位置及相對的曲率半徑。

基本上以上兩步驟便可決定出理想化曲面，若要探討已發生破壞面的幾何特性則須進行下列兩步驟。

步驟三：為驗證上述方法製作理想曲面的可行性，於本案中將利用災後崩塌地表範圍及 d_{max}，更進一步來優化尋找曲面之方法。

步驟四：利用已知破壞面所在，選取多個點位來計算，找出最佳軸向曲率，並以軸向垂直切面中點向兩旁延伸，找出側向軸，並利用側向之最大崩塌深度，得到最佳側向曲率。

分別說明如下：

步驟一：

如圖 2.4，令崩塌範圍之最高點為 $\mathrm{P}_1(x_1, y_1, z_1)$，最低點為 $\mathrm{P}_2(x_2, y_2, z_2)$，$\overline{\mathrm{P_1P_2}}$ 線段長為中點為 $\mathrm{P}_{\mathrm{mid}}(x_{\mathrm{m}}, y_{\mathrm{m}}, z_{\mathrm{m}})$，假想圓心為 $\mathrm{P}_{\mathrm{c}}(x_{\mathrm{c}}, y_{\mathrm{c}}, z_{\mathrm{c}})$，$\mathrm{P}_1$ 與 P_2 之向量為 $\overrightarrow{\mathrm{P_1P_2}}(n_x, n_y, n_z)$，$\mathrm{P}_{\mathrm{c}}$ 與 $\mathrm{P}_{\mathrm{mid}}$ 之向量為 $\overrightarrow{\mathrm{P_cP_{mid}}}$，曲率半徑為 R，坡面角度為 θ。

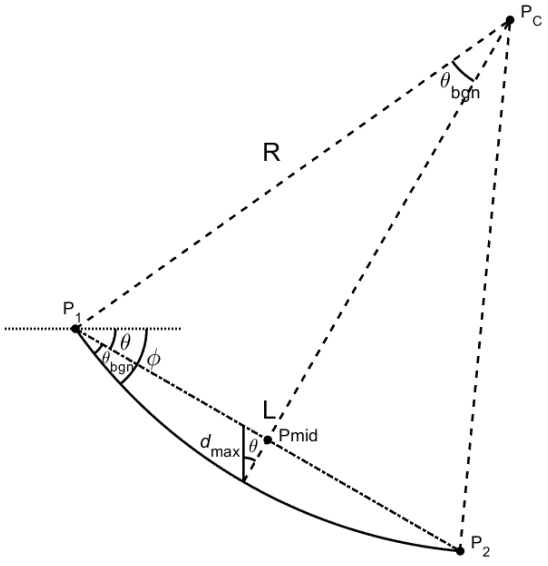


圖 2.4　曲面最大深度與曲率半徑之關係示意圖

步驟二：

如圖 2.4 所示，透過P_1、P_2、P_c、R、θ及d_{max}之間的幾何關係，其方程式如下：

$$(x_c - x_1)^2 + (y_c - y_1)^2 + (z_c - z_1)^2 = R^2 \qquad (2.2)$$

$$(x_c - x_2)^2 + (y_c - y_2)^2 + (z_c - z_2)^2 = R^2 \qquad (2.3)$$

此二個方程式分別為描述空間中立體球的方程式，兩者聯立其解為一平面。假設其法向量為$\vec{v}$，加入後其解簡化為一直線

$$\overrightarrow{P_c P_{mid}} \cdot \vec{v} = 0 \quad \text{with} \quad \vec{v} = (-n_y, n_x, 0) \qquad (2.4)$$

因此可得d_{max}、R、θ之關係式如下

$$d_{max} = \frac{(R - \overline{P_c P_{mid}})}{\cos\theta} \qquad (2.5)$$

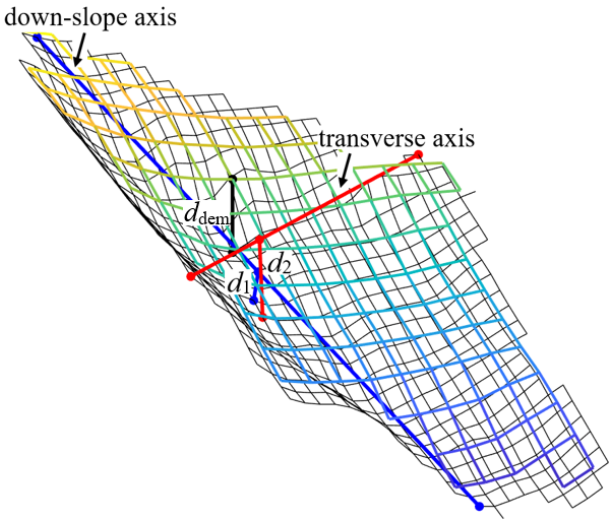


圖 2.5　崩塌前(彩色網格)與崩塌後(黑色網格)地形高程重疊下，三種不同深度之示意圖

步驟三：

步驟二中的d_{max}在計算上共有三種不同深度，分別為最大崩

塌深度d_{dem}、軸向最大深度d_1以及側向最大深度d_2。如圖 2.5 所示，d_{dem}為該區塊崩塌發生前後相差最大之深度，d_1為該區塊軸向中點垂直向下至崩塌後位置之距離，d_2則為該區塊側向中點垂直向下至崩塌後位置之距離，d_1、d_2即分別為軸向及側向之d_{max}。

此外，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，因此本計畫採取多個點位的計算，選擇災後崩塌範圍中最高與最低的點位各 10 個，其中每兩點所形成的線作為軸向，共有 100 種組合，如圖 2.6 所示。由於各組合所對應的中點位置不同造成深度也不同，為了更加客觀的評估，以上述 100 種組合條線的中點之平均點位向下所獲得的曲面最大深度作為平均曲面最大深度。雖然從圖 2.4 上來看此距離並非真正的d_{max}，但若是在軸長相對極大的情況下，此距離可近似d_{max}。之後將在後續探討這 100 種組合所計算理想曲面的相關性與差異。

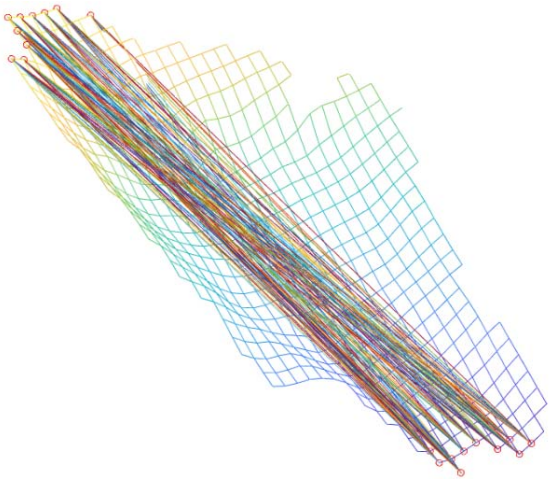


圖 2.6　災後崩塌範圍最高與最低各 10 點之 100 種組合

步驟四：

將軸向中點投影至災後崩塌範圍內得到曲面最大深度，以得到軸向曲率半徑R_1。在側向曲率方面，於軸向中點向兩旁延伸至邊緣，得到左右各一點作為側向軸，而側向曲面最大深度則是軸向與側向軸交點與實際崩塌範圍之間的投影距離，以得到側向曲率半徑R_2。

透過整合現有現地調查量測與影像資料(LiDAR、InSAR)的判讀得知可能的崩塌範圍，配合即時監測之資料(如 水位變化、傾斜觀測管等)以及經驗法與解析法所提供之可能崩塌深度，便可估算軸向與側向曲率的值以及整體曲面的傾角來建立理想曲面。此方法所得之結果將與既有已發生崩塌之破壞曲面進行差異性比較，來驗證其可用性。

第三節　理想化崩塌破壞曲面與數值模擬模式之整合

本計畫中所估算之理想化曲面可依據不同的調查分析資料與現地監控數據(如可能崩塌的範圍與可能深度)來進行即時調整或是情境的設定，據此估算出崩塌土石量體。再搭配本團隊於水土保持局計畫案(歷史圖資活化與變遷分析研究)中所採用的土石流土體動態模擬數值模式(Debris Flow Model for General Topography, DFMfGT)，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(Debris Flow Model for General Topography, DFMfGT)，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 Meng and Wang (2016, Acta Geotechnica)或是 Tai et al. (2018, Journal of Geophysical Research -- Earth Surface)。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。因為 DFMfGT 採用 Non-Oscillation Central Scheme (NOC)有限體積演算法(Kurganov and Tadmor, 2000; Kurganov and Miller, 2014)，此數值模式可模擬震波(Shock Wave)與水躍(Hydraulic Jumps)現象。此外，由於在 DFMfGT 數值模式中固體與液體有各自的速度，可描述水砂分離以及土石流土體濃度的演變或是不同濃度的土石流相互混合的現象，可對於運動中的土石流土體的濃度演化過程進行動態模擬。

由於 DFMfGT 數值模式所使用的基礎理論採用固體-液體兩相流模式且方程式以無因次的方式呈現，無法與普遍廣泛使用的 FLO-2D 的單相流模式作一比一的相互校驗。但是相對於 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x2、黏滯係數x2)，DFMfGT 數值模式僅需 5 個參數(土砂比重、固體顆粒摩擦角、交互作用力係數、液相阻尼係數、等效黏滯係數)，羅列如下：

(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}

此外，將運算所得之理想化曲面整合於數位地形地圖(DEM)的過程中，發現理想化曲面在崩塌範圍的邊緣可能高於原地形所在(如圖 2. 7a 所示)，造成錯誤估算崩塌量體。因此採用下列方法避免此誤差

$$z_b^c = \begin{cases} z_b^{\text{before}} & ,\text{if} \quad z_b^{\text{computed}} > z_b^{\text{before}} \\ z_b^{\text{computed}} & ,\text{if} \quad z_b^{\text{computed}} < z_b^{\text{before}} \end{cases}$$

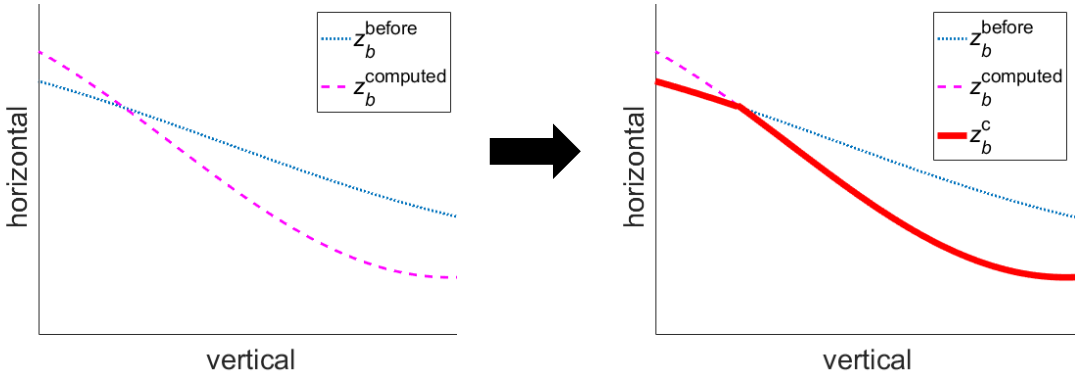
其中，

z_b^{before} 為 崩塌前高程

z_b^{computed} 為 理想化曲面高程

z_b^c 為 整合後理想崩塌面高程

來取代破壞面時設定當理想化曲面高程高於崩塌前原地形之高程，這樣即可得到理想崩塌 DEM。而初始滑動體積則是利用崩塌前 DEM 和理想崩塌 DEM 的高程差得到，如圖 2. 7 b 粗紅線所示。



(a) (b)

圖 2. 7 理想破壞面與原地形 DEM 示意圖

第四節 坡面崩塌破壞曲面幾何特性探討

本計畫分析選定之 2 個集水區內土石流潛勢溪流既有破壞坡面，

以及小林村事件中的崩塌破壞曲面的幾何特性，擬透過大數據歸納分析來提升評估破壞曲面與量體估算之可靠度。對於已發生崩塌之破壞曲面，理論上可藉由上述之方法建立理想曲面來探討崩塌破壞範圍之幾何特性(如 主軸側向軸之曲率、長度、最大深度、平均深度、傾角等)，藉以探討其與崩塌破壞曲面技術所需參數間之關連性。因此，針對已發生崩塌之破壞曲面，可利用前述方法建立理想曲面，也可直接利用數值高程地圖 DEM 推估幾何參數。因此在探討其幾何特性會產生兩組參數：

(a) 理想曲面之參數

(b) 真實破壞曲面之參數(直接由數值高程地圖計算)

由於真實破壞曲面並非平滑曲面，為評估探討理想崩塌破壞面的曲率與實際崩塌破壞面的曲率之差異，本研究提出一個以質量權重的方法來進行實際曲率的估算。若一破壞曲面之主軸方向已知，其中 R_{r1} 代表主軸方向的曲率半徑，R_{r2} 表示側向軸的曲率半徑，可沿平行主軸方將崩塌破壞面切分成數多個垂直切面，並依(2. 1)式計算每條切面上的曲率。如之前所述，因破壞面邊緣較為平緩(曲率較小)，故以切面長度來加權平均計算取得實際曲率。同樣之方法亦應用於計算側向的實際曲率。

在實際的操作運算上，由於因崩塌破壞面的主軸往往無法恰好與 GIS 之座標軸相平行，因此必須先對崩塌破壞面進行座標軸旋轉，將破壞面的軸向轉至平行於 x 軸或是 y 軸，接著計算每條切線上各點的一階導數、二階導數，代入(2. 1)式描述曲率的方程式計算，便可得到線上每點的曲率。圖 2. 8 為現旋轉後沿平行主軸(及側向軸方向)將崩塌破壞面切分成數多個垂直切面之示意圖。

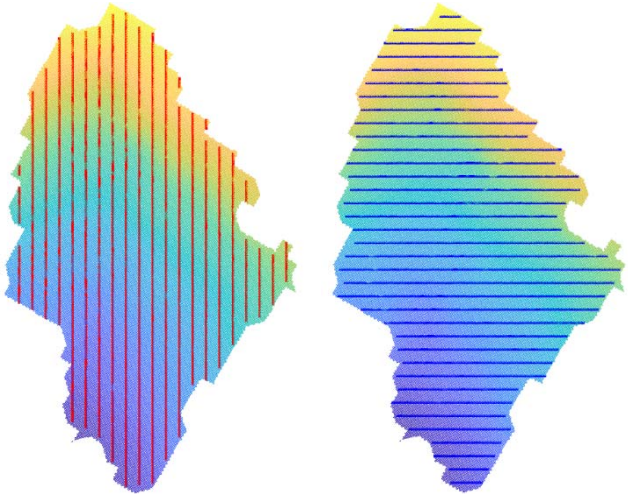


圖 2.8　曲率計算時之切面示意圖：左圖為主軸向; 右圖為側向軸方向

本計畫分析選定之 2 個集水區以及小林村事件區域分述如下：

一、曾文水庫集水區(土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪)

綜觀近 20 年來曾文水庫集水區發生較多崩塌、土石流或土砂過度淤積導致洪水等坡地土砂災害的紀錄，多發生於為龍蛟溪(土石流潛勢溪流嘉縣 DF054)、山美野溪(土石流潛勢溪流嘉縣 DF057)、新美野溪(土石流潛勢溪流嘉縣 DF078)等 3 個土石流潛勢溪流集水區。依目前所收集的資料，龍蛟溪之坡地環境在莫拉克颱風前(2008 年)與颱風後(2009 年)的衛星影像以及數位地形資料顯示該地區坡地環境改變較顯著；因此，本案選取龍蛟溪集水區作為進行坡面崩塌破壞曲面的幾何特性探討的區域，其區域衛星影像與莫拉克颱風之後的地形變異情形如圖 2.9 所示。曾文水庫附近之地質圖可參閱圖 2.10。

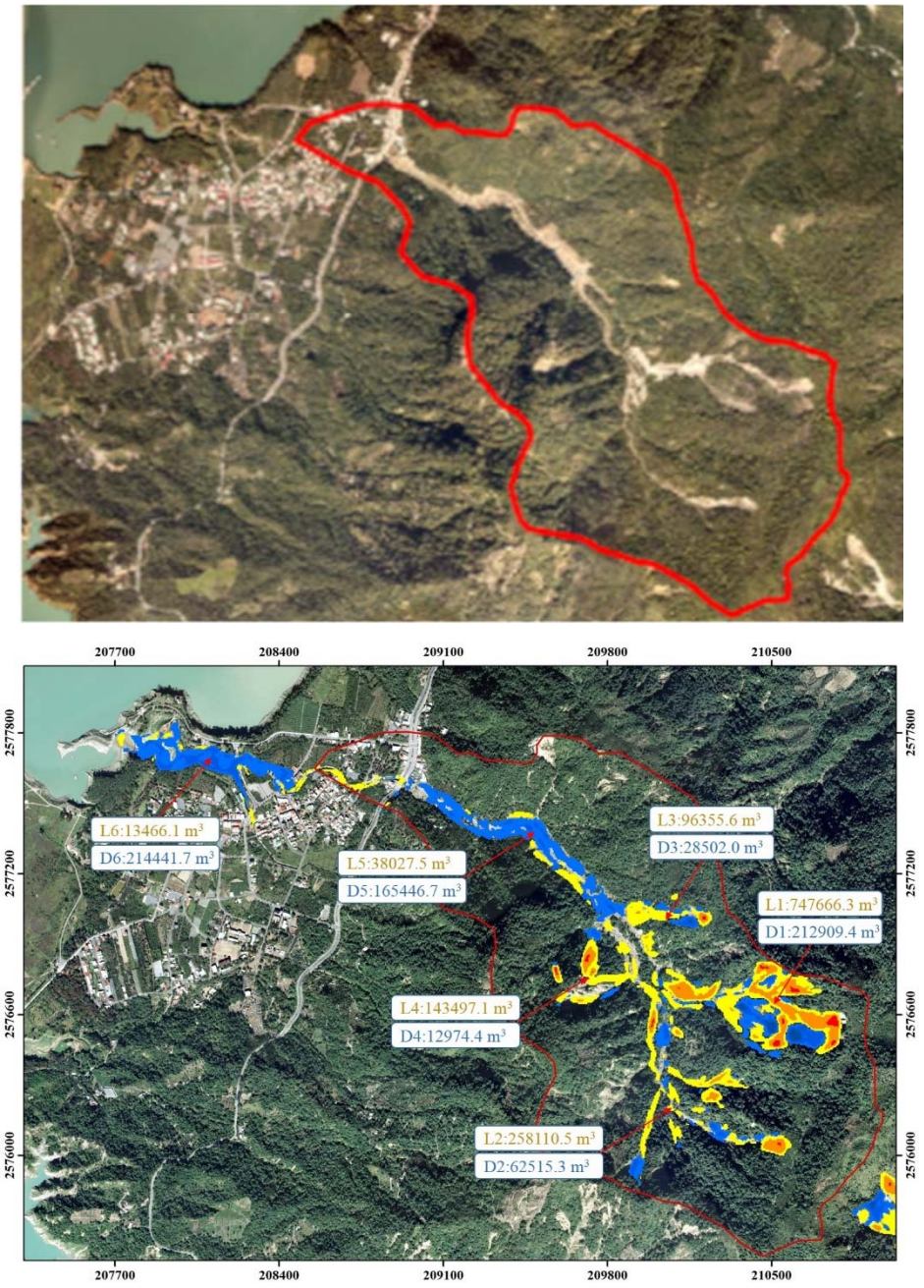


圖 2.9 上圖為龍蛟溪子集水區之衛星影像圖；下圖為該區域於莫拉克颱風之後的地形變異情形(資料來源：水保局歷史圖資活化與變遷分析研究)

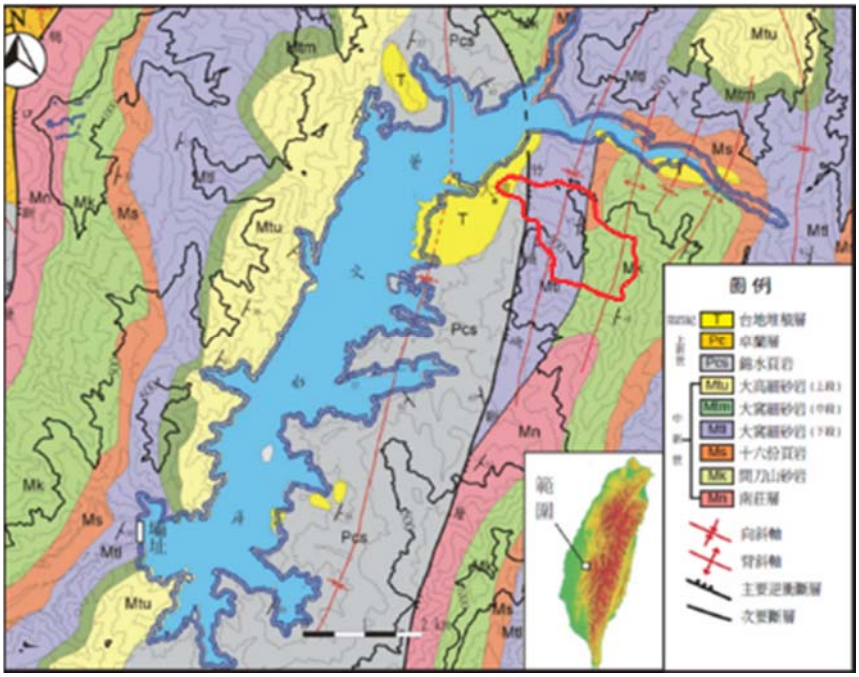


圖 2. 10　曾文水庫附近之地質圖，其中紅色圈選範圍為 DF054 範圍
(資料來源：中央地調所)

二、茖濃溪集水區(土石流潛勢溪流區高市 DF081 萬山部落)

對於茖濃溪集水區近 20 年來發生較多崩塌、土石流或土砂過度淤積導致洪水等坡地土砂災害紀錄的土石流潛勢溪流集水區計有 8 個，分別為土石流潛勢溪流高市 DF046、土石流潛勢溪流高市 DF047、土石流潛勢溪流高市 DF054、土石流潛勢溪流高市 DF055、土石流潛勢溪流高市 DF058、土石流潛勢溪流高市 DF064、土石流潛勢溪流高市 DF078、土石流潛勢溪流高市 DF081(大規模崩塌潛勢區 DS43)。依目前所收集有關這些區域災害歷史(災前災後)的數位地形資料，以聖帕颱風(2007)、卡玫基颱風(2008)與莫拉克颱風(2009)事件前後的資料較為完整。而本案考量土石流潛勢溪流高市 DF081 位於高雄市茂林區萬山里，亦屬於大規模崩塌潛勢區 DS43，且鄰近地區有萬山部落社區等重要保全聚落，因此相關分析探討內容可協助延伸思考大規模崩塌潛勢區的可能影響，因此選擇土石流潛勢溪流高市 DF081 集

水區作為進行坡面崩塌破壞曲面的幾何特性探討的區域。圖 2. 11 所示為高市 DF081 集水區之衛星影像(左)以及高屏溪流域地質圖(右)；其地層與岩性資料則可參閱圖 2. 12。

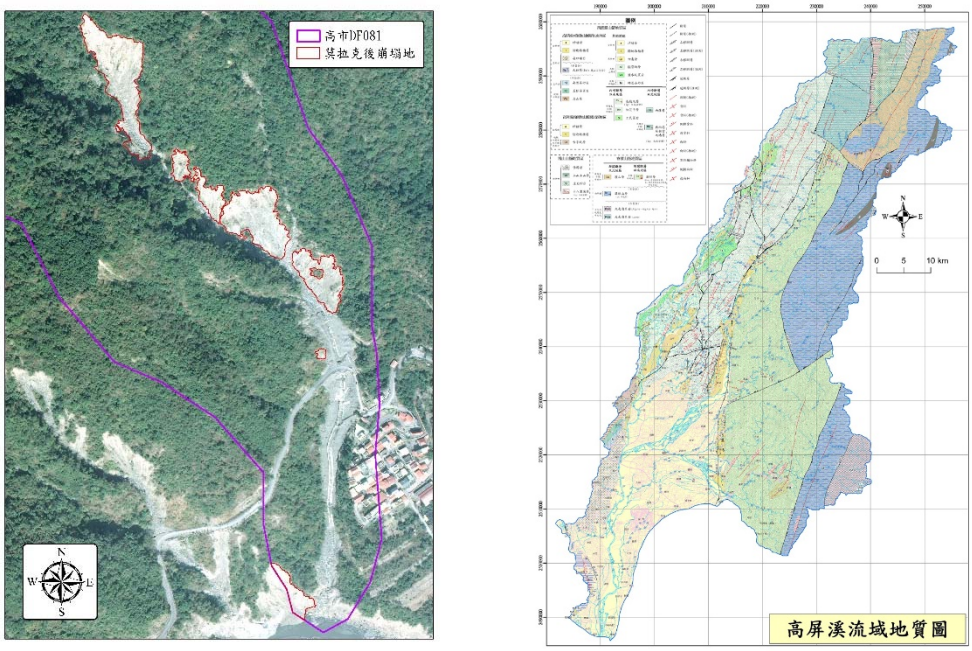


圖 2. 11　DF081 潛勢溪流之衛星影像(左；資料來源:水保局計畫"歷史圖資活化變遷分析研究")與高屏溪流域地質(右；資料來源:經濟部中央地質調查所)

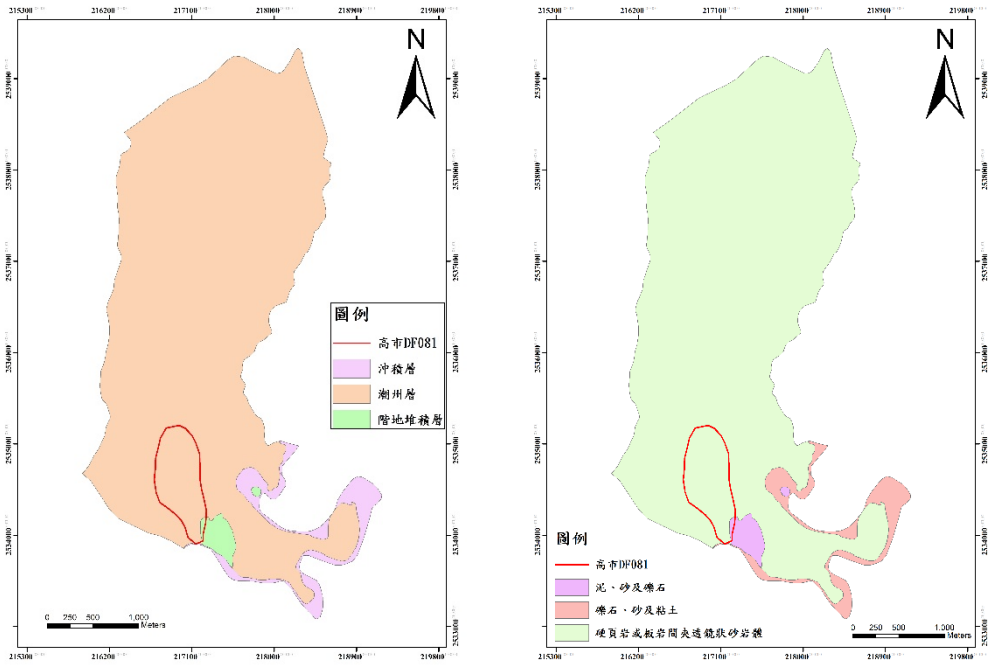


圖 2. 12　DF081 潛勢溪流所在之地層資料(左)與岩性資料(右)
(資料來源:經濟部中央地質調查所)

三、小林村大規模崩塌事件

而為了收集更多數據並驗證比計畫所提之理想曲面方法應用於大規模深層崩塌的可行性，首選為 2009 年發生於小林村的大規模崩塌事件。此大規模深層崩塌發生於 2009 年莫拉克颱風期間，其挾帶的大量豪雨誘發獻肚山崩塌導致小林村滅村事件，造成超過 450 位村民遭到洪水及土石流掩埋。小林村位於楠梓仙溪之低位河階上，此附近山區，有三條野溪存在，較北部有楠峰大橋北側野溪；中間有穿越小林村之 DF006 土石潛勢溪流，在南部一些則有通過小林村南側之 DF007 土石潛勢溪流，三條野溪流向大致平行，都呈西稍偏北向。因此深層崩塌事件之規模甚大且深具代表性，經常成為探討分析之對象。也因此該地擁有完整的地質、水文資料，故本案選取此崩塌案例作為進行坡面崩塌破壞曲面的幾何特性探討的區域。圖 2.13 與圖 2.14 分別為小林村於莫拉克颱風災前與災後的衛星影像圖；其地質資料可參閱圖 2.15。



圖 2.13　小林村於莫拉克風災前的衛星影像圖



圖 2. 14　小林村於莫拉克風災後的衛星影像圖

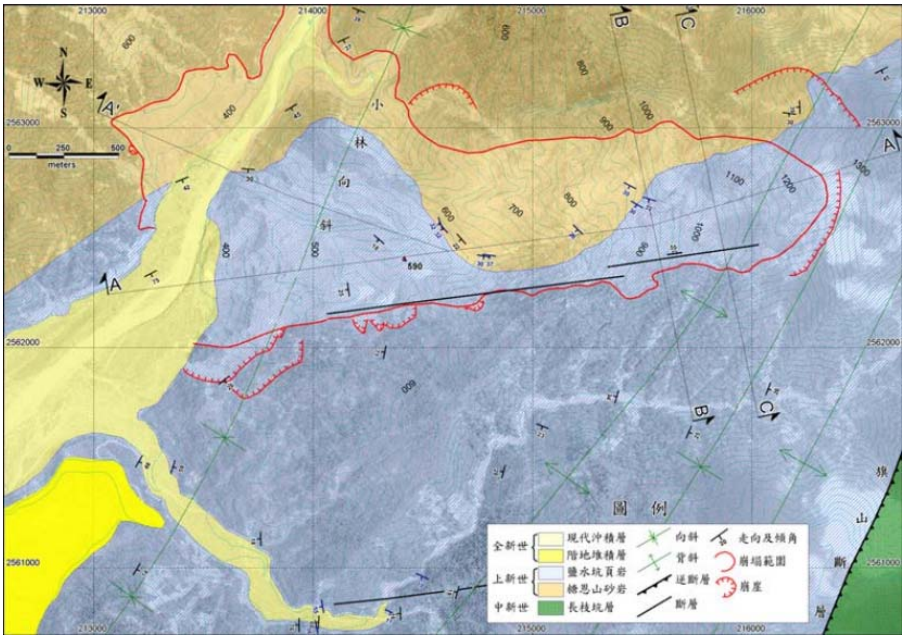


圖 2. 15　小林村地質圖(資料來源:經濟部中央地質調查所)

第三章　坡面理想崩塌曲面運算

針對既有坡面崩塌破壞曲面，利用第二章第二節所述之四個步驟推估其理想破壞曲面，比較兩者之差異據以評估驗證此方法之可行性與可靠度。考量崩塌災前災後可獲得資料的完整性，本案於荖濃溪集水區、曾文水庫集水區各挑選一處地貌顯著變異區域以及依期初審查委員意見增列小林村大規模崩塌事件來進行分析與探討，分別為”土石流潛勢溪流區高市 DF081 萬山部落”、”土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪”以及”小林村大規模崩塌事件”。總共分析 16 個崩塌區塊(其中 DF081 萬山部落 7 個、DF054 龍蛟溪 5 個以及小林村大規模崩塌區 4 個)。

此方法在初期執行時曾發現曲率低估的情況。在分別檢視災前與災後的數位高層地圖(DEM)時，可觀察到破壞面的邊緣多為平緩，推估其可能原因在於破壞發生後降雨的侵蝕，造成與第一時間破壞面的差異，也是造成估算的理想曲面諸多誤差的來源。經過多次反覆嘗試檢測，發現若將崩塌邊緣深度小於 0.5 m 之崩塌範圍剃除，運算所得之理想破壞曲面與 DEM 顯示的破壞面趨於一致。所以本案在計算方面，將以崩塌深度大於 0.5 m 之崩塌範圍進行理想破壞曲面之計算。以下針對上述三個區域分別敘述所運算的成果：

第一節　荖濃溪集水區(土石流潛勢溪流高市 DF081 萬山部落)

本計畫將 DF081 潛勢溪流及西側野溪災前災後 DEM 所判釋出來的崩塌區域分成 7 個區塊(Area)來進行理想化曲面的運算(如圖 3.1 所示)，並進而與在前災後的 DEM 所判釋的崩塌破壞曲面進行分析比對。而其中針對每個所選取的區塊(Area)均考慮 100 組線條組合，以

確認得到的與災後地形誤差最小的(最佳)理想化曲面，並得以探討不同組合對於誤差的敏感性。由於計算所得資料甚多(7 個區塊×100 組線條組合=700 組資料數據)，此處僅列出崩塌體積誤差最小(最佳)的理想化曲面(圖 3.2 至圖 3.8)以及其相關幾何資料(表 3.1)，而將詳細的資料數據收錄於附錄三。

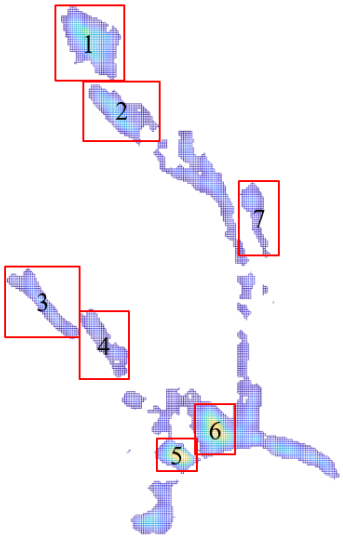


圖 3.1　DF081 潛勢溪流的 7 個崩塌區塊

圖 3.2 至圖 3.8 為運算所得的(崩塌體積差異)誤差最小(最佳)的理想化曲面與災後 DEM 所呈現的破壞曲面，其中黃色曲面代表運算所得之理想化曲面；左圖為兩個曲面相疊合以顯示其差異；中間圖則分別呈現的兩個曲面，以了解其間的差異；右圖顯示其所在位置。

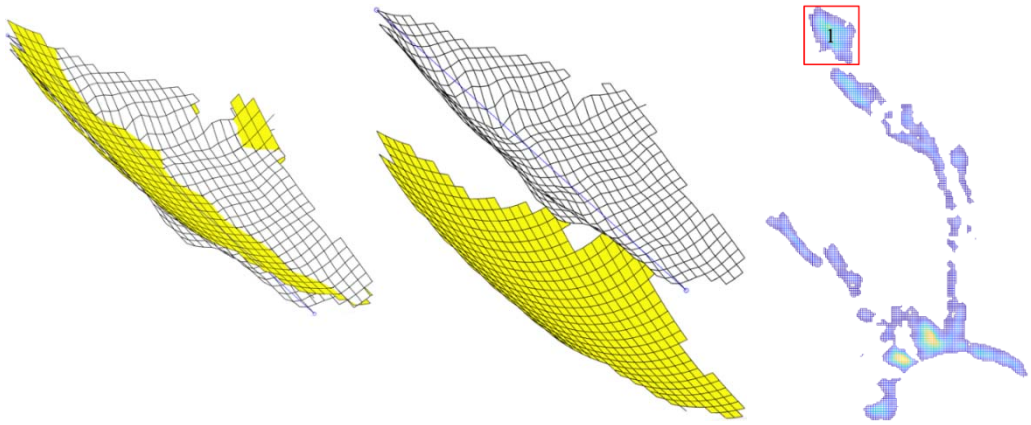


圖 3.2　理想破壞曲面(Area 1)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF081)

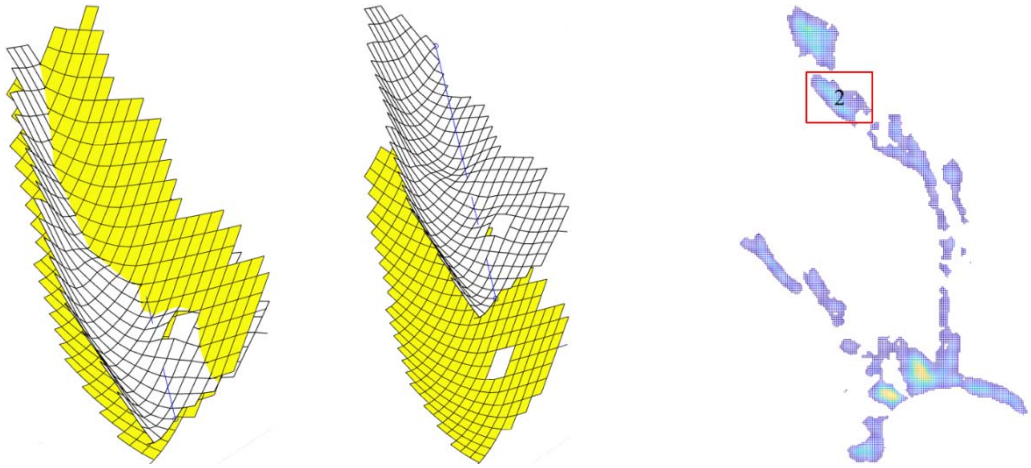


圖 3. 3　理想破壞曲面(Area 2)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF081)

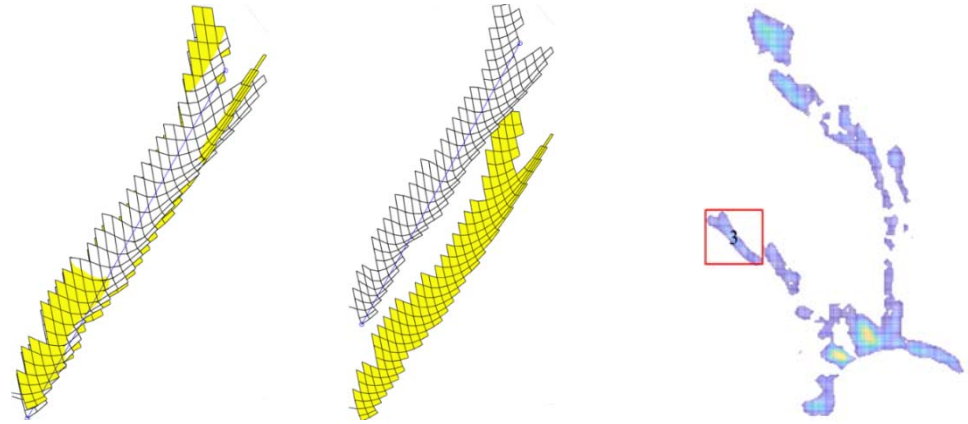


圖 3. 4　理想破壞曲面(Area 3)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF081)

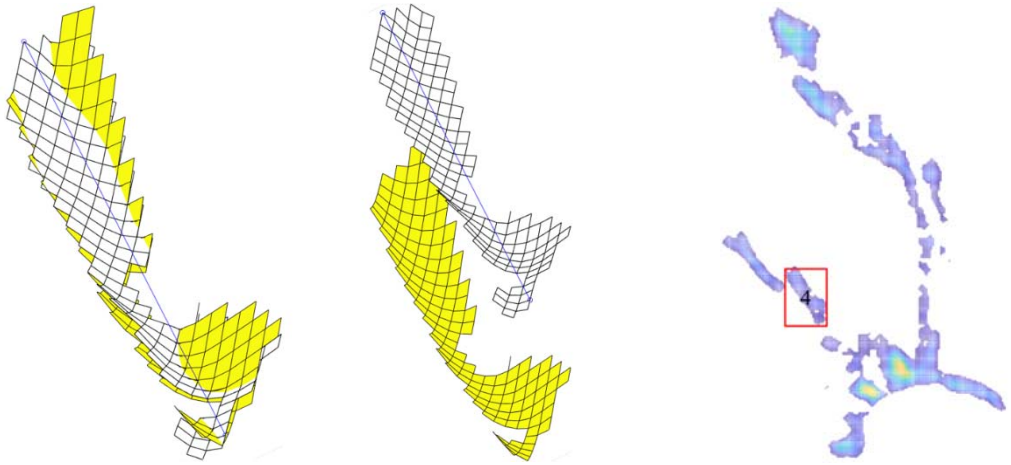


圖 3. 5　理想破壞曲面(Area 4)與災後 DEM 破壞面之比較圖(DF081)

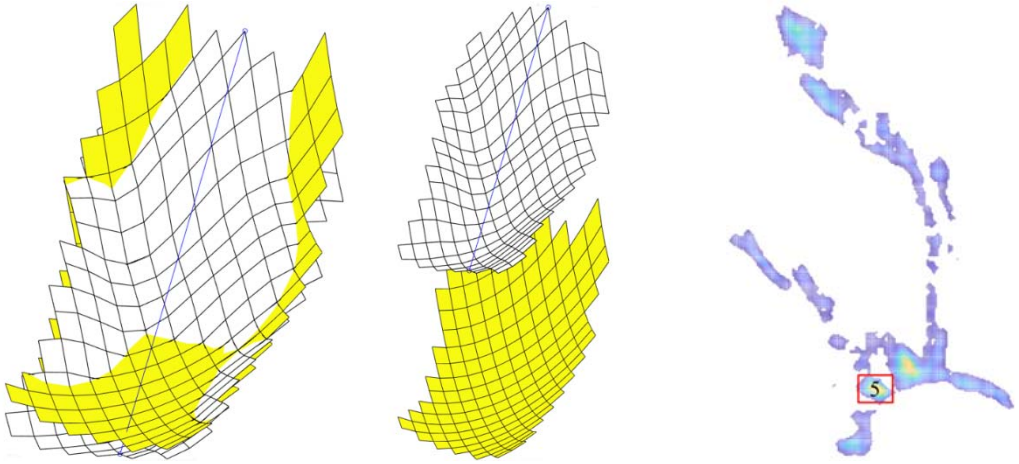


圖 3. 6　理想破壞曲面(Area 5)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF081)

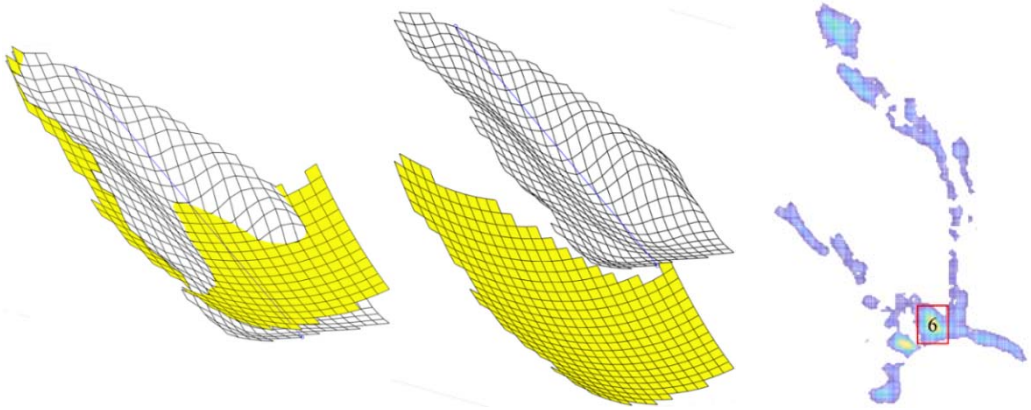


圖 3. 7　理想破壞曲面(Area 6)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF081)

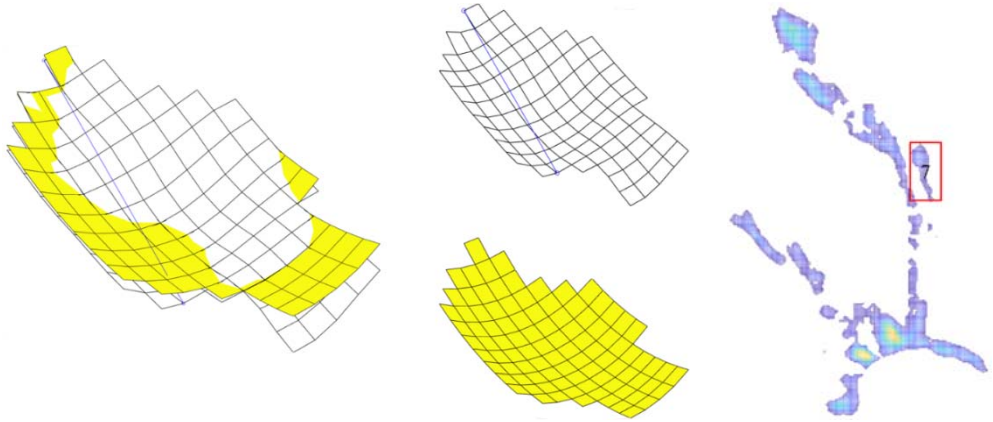


圖 3. 8　理想破壞曲面(Area 7)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF081)

表 3.1 羅列針對各崩塌區塊運算所得的(崩塌體積差異)誤差最小(最佳)理想化曲面的幾何參數，其中所表示的參數說明如下：

r_v ： 與災前災後 DEM 所判讀之崩塌體差異

θ ： 理想曲面之主軸傾角

R_1 ： 理想曲面之主軸曲率半徑

R_2 ： 理想曲面之側向軸曲率半徑

表 3.1　DF081 各崩塌區塊最佳曲面幾何參數以及其平均值

	體積誤差 r_v [%]	主軸傾角 θ [°]	主軸曲率半徑 R_1 [m]	側向軸曲率半徑 R_2 [m]
Area 1				
最佳	4.23	37.47	479.41	89.39
平均值	4.86	38.02	428.62	89.17
Area 2				
最佳	4.67	23.63	396.62	29.90
平均值	13.79	24.83	441.91	30.21
Area 3				
最佳	20.63	32.19	592.27	15.89
平均值	25.93	32.15	561.41	16.96
Area 4				
最佳	32.43	34.84	394.67	16.75
平均值	41.67	35.02	389.83	15.05
Area 5				
最佳	5.31	47.92	134.61	46.98
平均值	5.84	46.26	128.67	45.96
Area 6				
最佳	7.99	36.41	279.43	106.82
平均值	9.46	36.15	299.33	81.49
Area 7				
最佳	5.87	35.74	140.54	55.74
平均值	11.94	35.09	126.71	57.08

由表 3.1 可知，在此 DF081 土石流潛勢溪流流域的 7 個崩塌區塊

(Area)，本計畫所推估之理想化曲面與災後的 DEM 相比較，僅 Area 3 與 Area 4 存在較大的誤差(>20%)，其餘最佳的估算均在 8%以內。Area 3 與 Area 4 均位於 DF081 土石流潛勢溪流流域的西側野溪，其共同點為深度小於 0.5 m 的範圍均占破壞面面積較高的比例(分別為 30%與 37%，請參閱表 5. 1)。

第二節　曾文水庫集水區(土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪)

如圖 3. 9 所示，本計畫將 DF054 潛勢溪流災前災後 DEM 所判釋出來的崩塌區域挑選 5 個區塊(Area)來進行理想化曲面的運算，並與 DEM 判釋的崩塌破壞曲面進行分析比對。其中由於 Area 1 所在的崩塌範圍較為複雜，故將區分為 Area 1 與 Area 1_L 分別計算。其中針對每個所選取的區塊(Area)均考慮 100 組線條組合，以確認得到的與災後地形誤差最小的(最佳)理想化曲面，並得以探討不同組合對於誤差的敏感性。由於計算所得資料甚多(5 個區塊×100 組線條組合=500 組資料數據)，此處僅列出誤差最小的(最佳)理想化曲面(圖 3. 10 至圖 3. 14)以及其相關幾何資料(表 3. 2)，而將詳細的幾何資料數據收錄於附錄三。

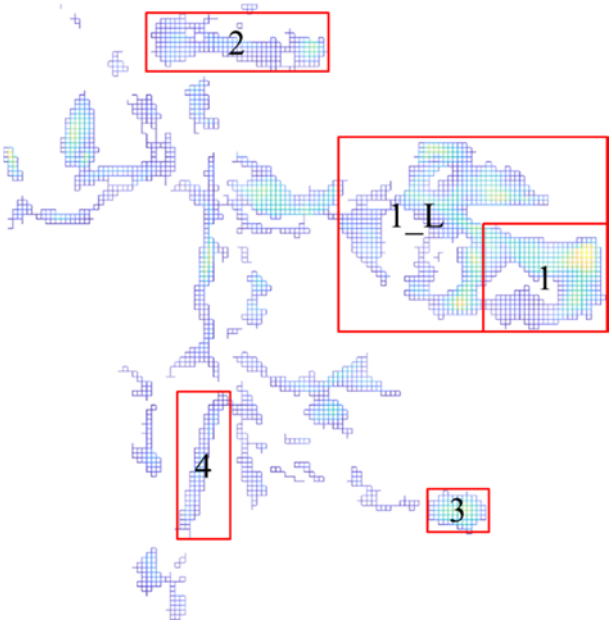


圖 3. 9　DF054 潛勢溪流的災後崩塌 5 個區塊(Area)分佈情形

圖 3. 10 至圖 3. 14 為運算所得的(崩塌體積差異)誤差最小(最佳)的理想化曲面與災後 DEM 所呈現的破壞曲面，其中黃色曲面代表運算所得之理想化曲面；左圖為兩個曲面相疊合以顯示其差異；中間圖則分別呈現的兩個曲面，以了解其間的差異；右圖顯示其所在位置。

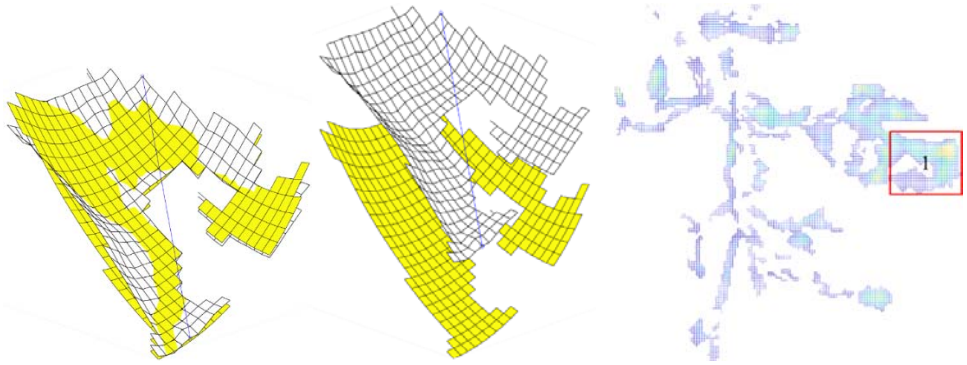


圖 3. 10　理想破壞曲面(Area 1)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF054)

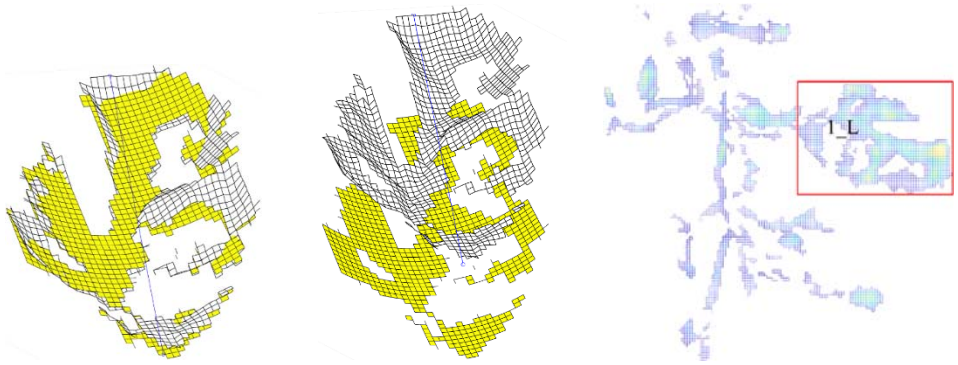


圖 3. 11　理想破壞曲面(Area 1_L)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF054)

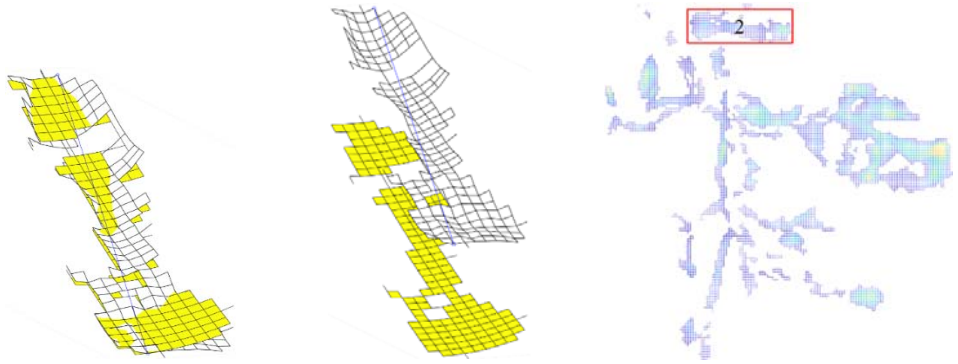


圖 3. 12　理想破壞曲面(Area 2)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF054)

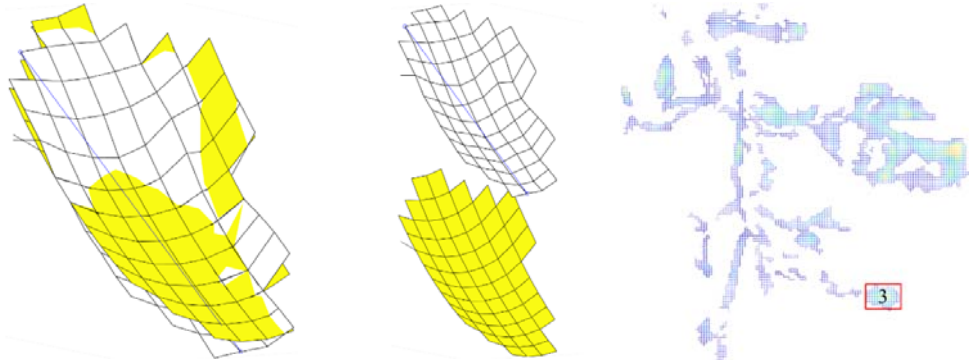


圖 3. 13　理想破壞曲面(Area 3)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF054)

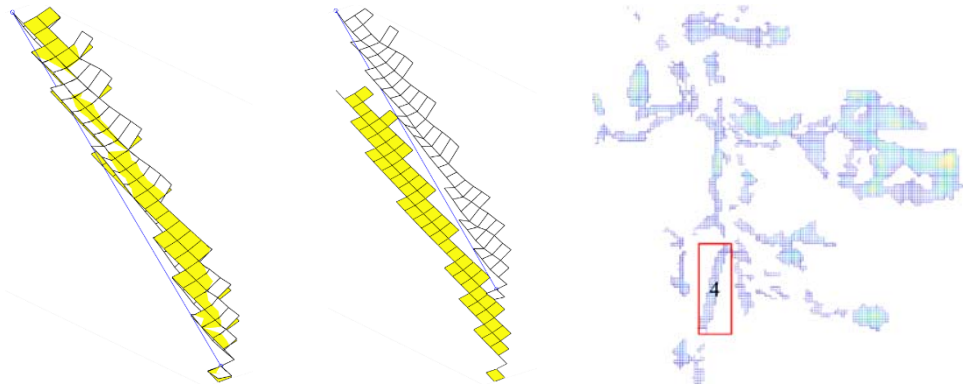


圖 3. 14　理想破壞曲面(Area 4)與災後 DEM 破壞面之比較圖 (DF054)

表 3.2 羅列針對 DF054 各崩塌區塊運算所得的(崩塌體積差異)誤差最小(最佳)理想化曲面的幾何參數，其中所表示的參數說明如下：

r_v ： 與災前災後 DEM 所判讀之崩塌體差異

θ ： 理想曲面之主軸傾角

R_1 ： 理想曲面之主軸曲率半徑

R_2 ： 理想曲面之側向軸曲率半徑

表 3. 2　DF054 各崩塌區塊最佳曲面幾何參數以及其平均值

	體積誤差 r_v [%]	主軸傾角 θ [°]	主軸曲率半徑 R_1 [m]	側向軸曲率半徑 R_2 [m]
Area 1				
最佳	9.00	32.63	1,081.91	142.66
平均值	20.26	32.97	1,107.87	137.87
Area 1_L				
最佳	20.13	29.02	5,381.89	323.55
平均值	22.07	28.98	5,275.39	329.57
Area 2				
最佳	21.98	22.02	2,606.62	259.71
平均值	66.73	22.40	2,582.90	107.47
Area 3				
最佳	2.21	38.50	318.69	54.19
平均值	9.43	39.09	341.67	45.28

Area 4				
最佳	1.97	21.61	15,611.96	79.67
平均值	3.87	21.53	13,820.10	80.45

由表 3.2 可知，在此 DF054 土石流潛勢溪流流域的 5 個崩塌區塊(Area)，本計畫所推估之理想化曲面與災後的 DEM 相比較，Area 1_L 與 Area 2 存在較大的誤差(>20%)，其餘最佳的估算均在 9%以內。對於 Area 2 區塊而言，其深度小於 0.5 m 的範圍占破壞面面積的比例高達 52%(請參閱表 5. 2)；而雖然 Area 1_L 區塊深度小於 0.5 m 的範圍占破壞面面積的比例並不高，但是其形狀崎嶇破碎，對於本案所提之方法的適用性有所限制。

第三節　小林村(大規模崩塌事件)

相較於上述兩個集水區潛勢溪流崩塌曲面的運算，本計畫同時也考量評估此運算方法應用於大型深層崩塌的可行性，因此將小林村大規模崩塌事件之崩塌破壞曲面一併列入考量。如圖 3. 15 所示，本案採用 Kuo et al. (2011)所判識的崩塌區塊(3 個區塊)以及小林村於楠梓仙溪對岸的一個蝴蝶狀崩塌區塊(總共 4 個區塊)來進行理想化曲面的運算，並與 DEM 判釋的崩塌破壞曲面進行分析比對。其中 Area 1 所在的崩塌範圍與量體最大。其中針對每個所選取的區塊(Area)均考慮 100 組線條組合，以確認得到的與災後地形誤差最小的(最佳)理想化曲面，並得以探討不同組合對於誤差的敏感性。由於計算所得資料數據(4 個區塊×100 組線條組合)多達 400 組，此處僅列出誤差最小的(最佳)理想化曲面(圖 3. 16 至圖 3. 19)以及其相關幾何資料(表 3. 3)，而將詳細的資料數據收錄於附錄三。

圖 3. 16 至圖 3. 19 為運算所得的(崩塌體積差異)誤差最小(最佳)的理想化曲面與災後 DEM 所呈現的破壞曲面，其中黃色曲面代表運算所得之理想化曲面；左圖為兩個曲面相疊合以顯示其差異；中間圖則分別呈現的兩個曲面，以了解其間的差異；右圖顯示其所在位置。

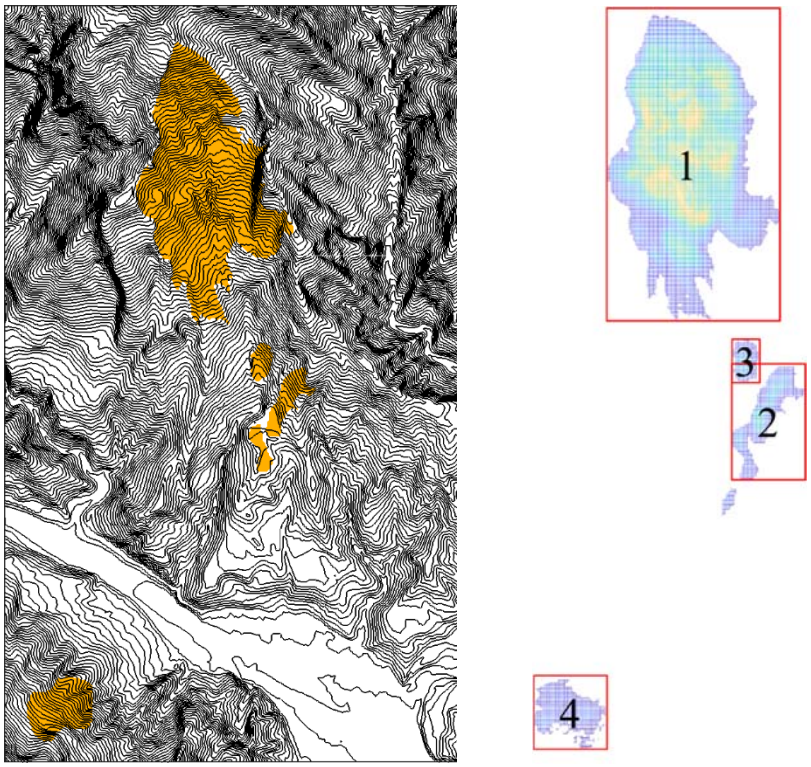


圖 3. 15　小林村災後崩塌區域以及 4 個區塊(Area)分佈情形

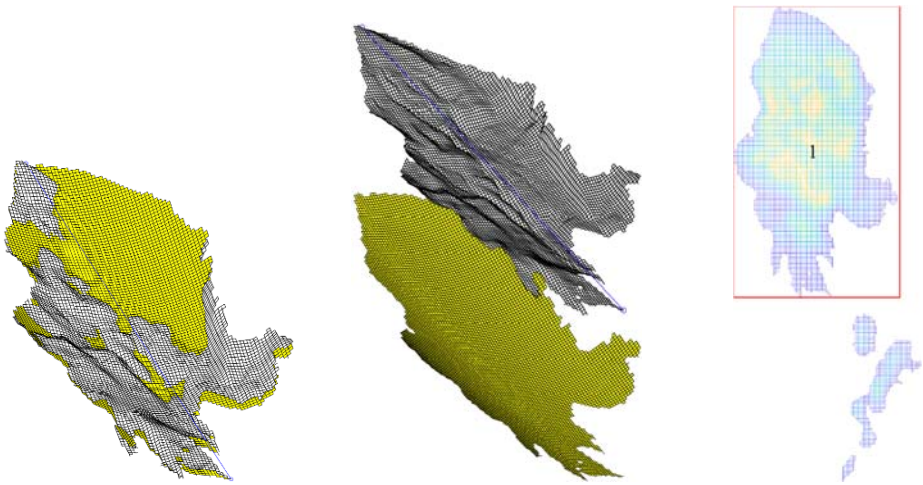


圖 3. 16　理想破壞曲面(Area 1)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)

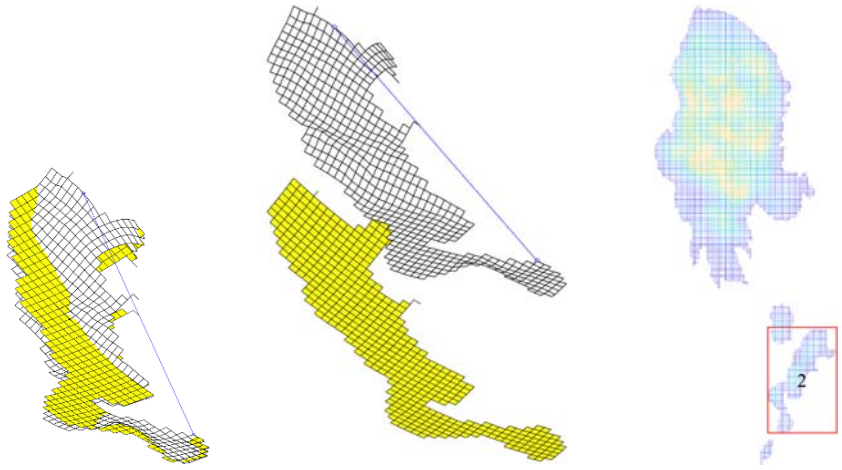


圖 3. 17　理想破壞曲面(Area 2)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)

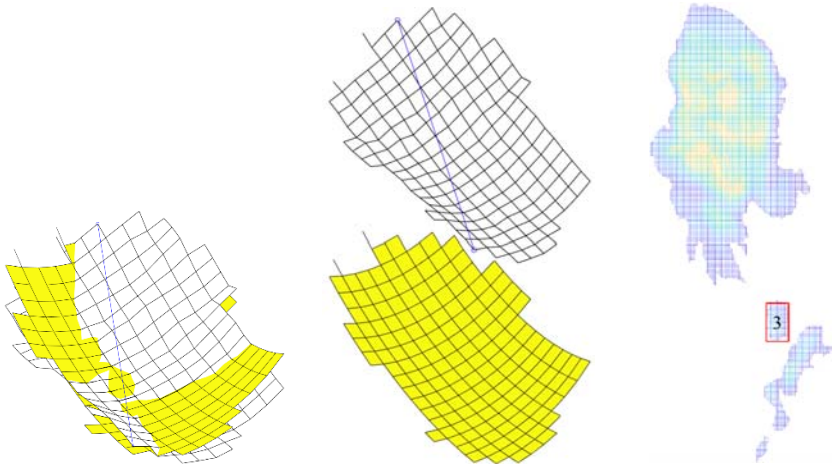


圖 3. 18　理想破壞曲面(Area 3)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)



圖 3. 19　理想破壞曲面(Area 4)與災後 DEM 破壞面 (小林村案例)

表 3.3 小林村(大規模崩塌事件) 各崩塌區塊最佳曲面幾何參數以及其平均值

	體積誤差 r_v [%]	主軸傾角 θ [°]	主軸曲率半徑 R_1 [m]	側向軸曲率半徑 R_2 [m]
Area 1				
最佳	7.04	22.66	4,476.95	605.86
平均值	7.29	22.57	4,397.90	607.30
Area 2				
最佳	5.09	19.40	851.01	798.91
平均值	6.13	17.48	1,077.45	738.50
Area 3				
最佳	6.00	21.38	335.31	108.69
平均值	6.91	21.39	325.55	99.17
Area 4				
最佳	0.94	33.21	648.59	247.28
平均值	-2.84	33.21	658.06	357.15

由表 3.3 可知，在此小林村案例中的 4 個崩塌區塊(Area)，本計畫所推估之理想化曲面與災後的 DEM 相比較，其誤差均在 8%以內。雖然 Area 4 區塊為蝴蝶狀，但是形狀並不零碎，於本案所提之方法的仍然適用。

第四節　來義地區

屏東縣來義地區屬於林邊溪流域內，位於來社溪旁。每逢豪大雨，來社溪極易暴漲，使得該地區長期受洪水、土石流災害侵襲。此附近地區有諸多土石流潛勢溪流，如來社溪支流 DF069 潛勢溪流、義林溪 DF025 潛勢溪流以及 DF029 潛勢溪流，也是大規模深層崩塌的潛勢區域(DS32)。上游集水區及來社溪沿岸於民國 98 年莫拉克颱風時發生多處崩塌，土石嚴重淤積河道。民國 99 年凡那比颱風時崩塌擴

大，土砂運移至堆積區。臨時土堤更因此而潰決，洪水挾帶土石溢流至部落民宅，並造成道路與橋樑的毀損。

將所提出之理想曲面方法應用於來義村東部落對岸大規模深層崩塌的潛勢區域(DS32)可能發生深層崩塌地區，進行 3 個不同情境的探討，進行初步的崩塌曲面評估以及量體分析。圖 3.20 為崩塌潛勢範圍之衛星影像，圖 3.21 則為列入考慮的 3 種不同量體的情境(3 種區塊的組合)，其中 Area 1 為整個塊體體 Area 1 與 Area 2 則分別為上半部與下半部塊體。至圖 3.22 至圖 3.243 個情境下的所預估的理想破壞曲面，表 3.4 則為曲面的相關參數資料。

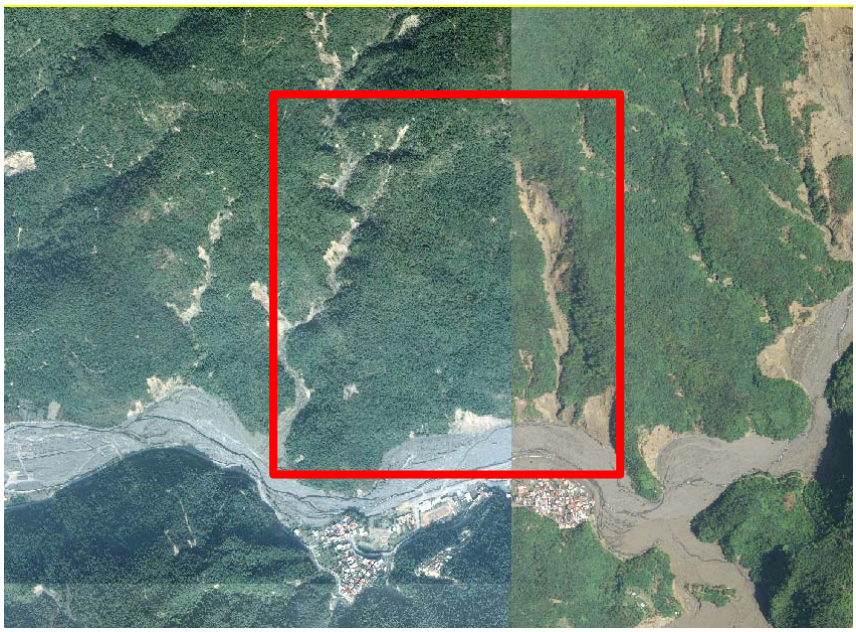


圖 3. 20　來義地區預估崩塌範圍之衛星影像

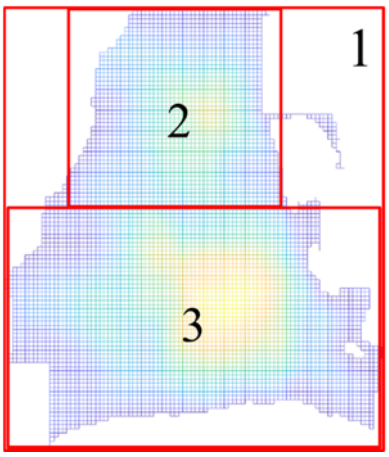


圖 3. 21　3 種預估崩塌情形

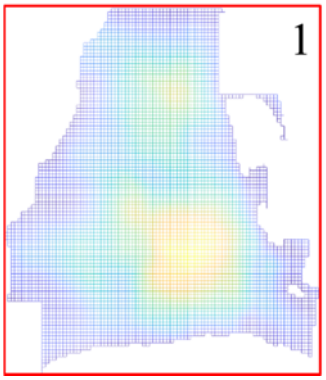


圖 3. 22　理想破壞曲面與災後 DEM 破壞面(Area 1)

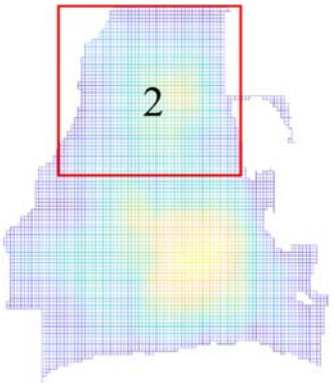


圖 3. 23　理想破壞曲面與災後 DEM 破壞面(Area 2)

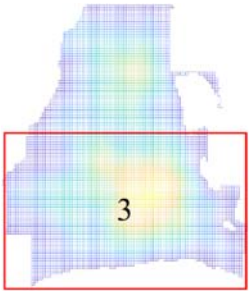


圖 3. 24　理想破壞曲面與災後 DEM 破壞面(Area 3)

表 3. 4　(來義) 各預估崩塌區塊最佳曲面幾何參數以及其平均值

	主軸傾角 θ [°]	軸向深度 d_1 [m]	側向深度 d_2 [m]	主軸曲率半徑 R_1 [m]	側向軸曲率半徑 R_2 [m]
Area 1					
平均值	26.70	28.73	28.73	5705.07	1844.84
Area 2					
平均值	29.26	34.95	34.95	1193.16	724.34
Area 3					
平均值	25.81	57.60	67.60	892.96	1463.12

第四章　坡面理想崩塌曲面與數值模擬模式整合

本計畫已完成山崩土石流數值模式(DFMfGT)與理想坡面崩塌曲面之整合，得以用來探討採用理想化曲面取代已發生崩塌破壞之曲面所造成後續土砂的運移行為。為評估採用理想化曲面取代已發生崩塌破壞之曲面來進行數值模擬的可行性，本案透過兩種情境之模擬結果比較：

(a) 採用災前災後數值地形之崩塌曲面進行模擬

(b) 採用理想化曲面進行模擬

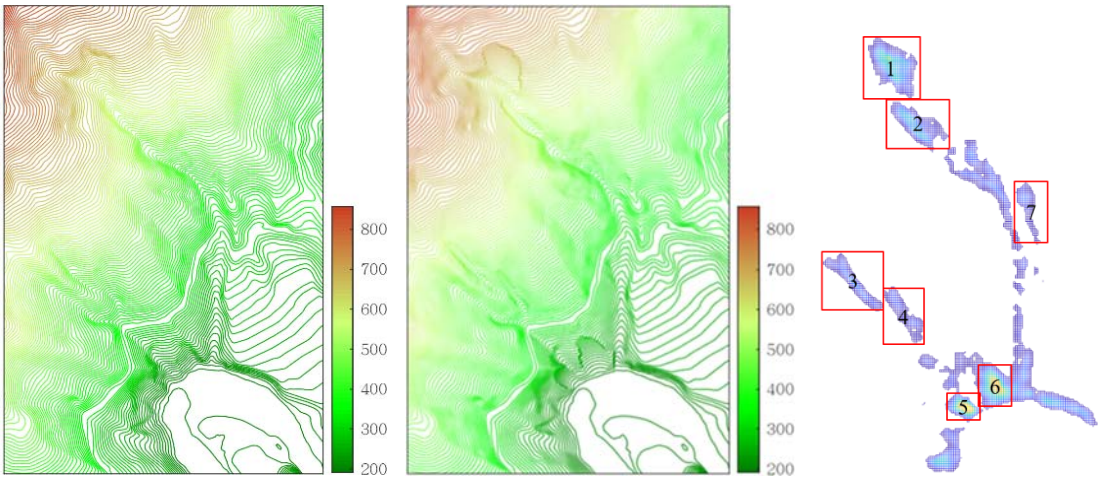
模擬運算之結果可以動態呈現三種物理量，包括運動中的流體(1)流動深度、(2)濃度以及(3)速度(速率) 等三個物理量隨時間地的分佈情形。如此，可探討評估採用理想化曲面來評估未來可能發生崩塌的各式情境，以及所造成後續土砂的運移行為。

第一節　土石流潛勢溪流區高市 DF081 萬山部落

將前述(圖 3. 1)所標示的 7 個區塊所估算的理想曲面取代災後的災後數值地形之崩塌曲面，整合周遭地形進行運算。圖 4.1 顯示與理想破壞曲面整合後之地形，其中(a)為崩塌後的 DEM 地形；(b)為以理想破壞曲面取代崩塌地區之地形並與周遭地形整合後之地形；(c)為各理想曲面的所在。因為此區域的範圍以及各崩塌區塊的面積規模並不大，所以其差異在圖 4.1 中並不明顯。

對於 DF081 區域 DFMfGT 數值模式模擬所採用之參數羅列於表 4.1，包含所使用的 DEM 精度、初始濃度以及土砂比重、固體顆粒摩擦角、交互作用力係數、液相阻尼係數、等效黏滯係數 等 5 個材料

參數。運算之結果以 4 個時間點來呈現(分別為 0.00 sec、60.61 sec、121.22 sec、181.83 sec)，呈現的物理量包括：流動深度(圖 4.2 至圖 4.5)、濃度(圖 4.6 至圖 4.9)以及速度(圖 4.10 至圖 4.13)。為方便評估探討，在上述圖 4.2 至圖 4.13 中，每個圖中之(a)小圖為採用災前災後數位地形地圖所運算的結果，(b)小圖則為採用災前數位地形地圖以及本案運算所得理想曲面所整合的地形來運算的結果。

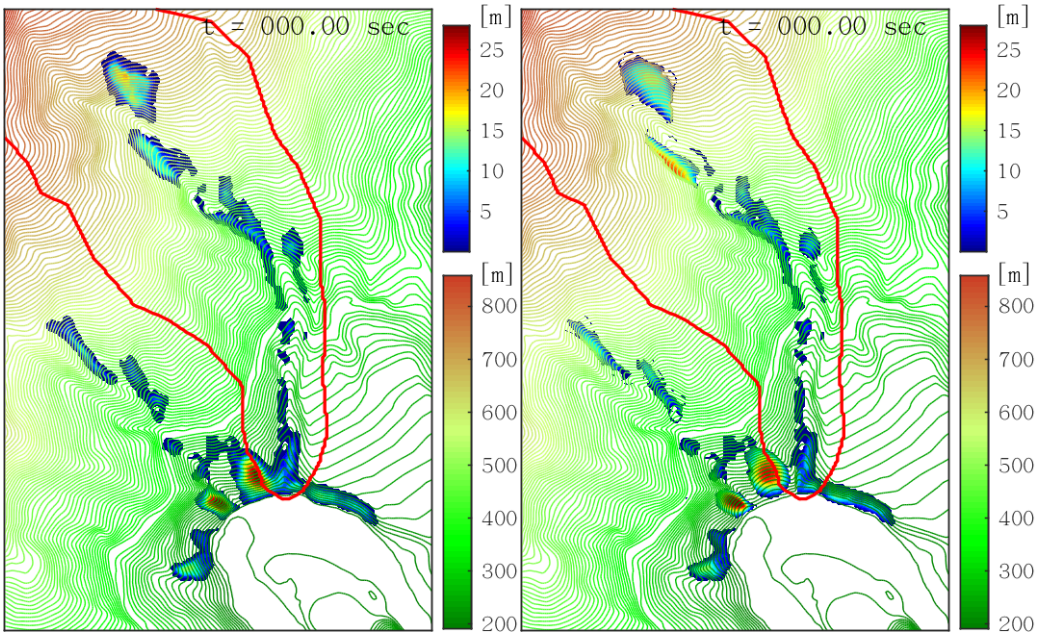


(a)　(b)　(c)

圖 4.1　(DF081) (a)崩塌後地形；(b)理想破壞曲面整合地形；(c)崩塌區塊所在

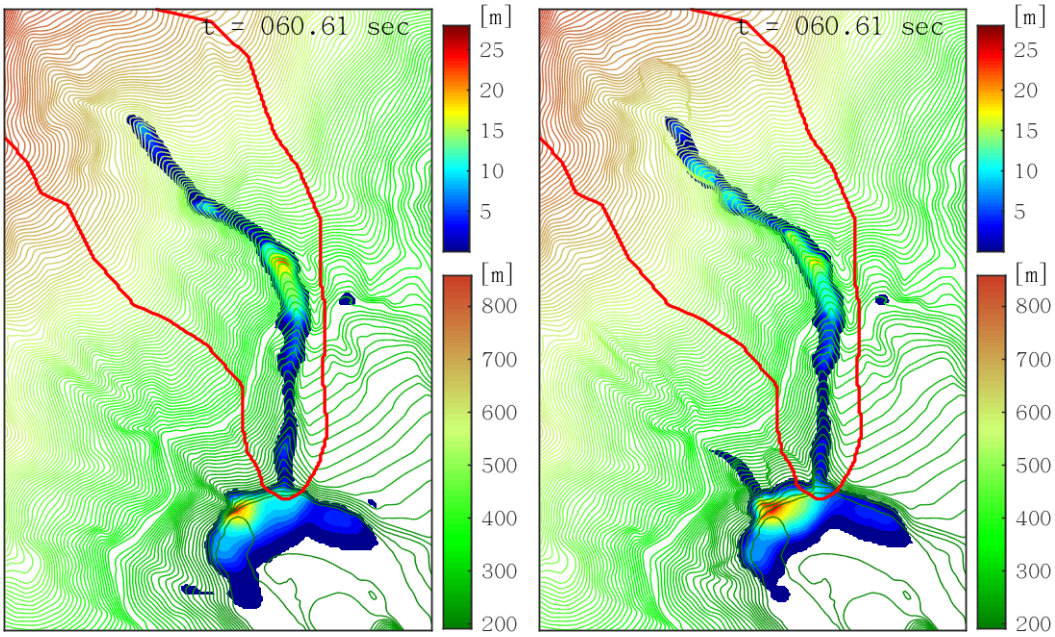
表 4.1　數值模擬採用之參數一覽表 (DF081)

網格精度	5 m × 5 m	土石流初始體積濃度	50%
土砂比重 ρ_f/ρ_s	1.06/2.65	固體顆粒摩擦角	$\delta = 36°$
交互作用力係數	$C_d = 6.0$	液相阻尼係數	$\vartheta = 6.0$
等效黏滯係數	$\mu_{eff} = 0.5$ [Pa·s]		



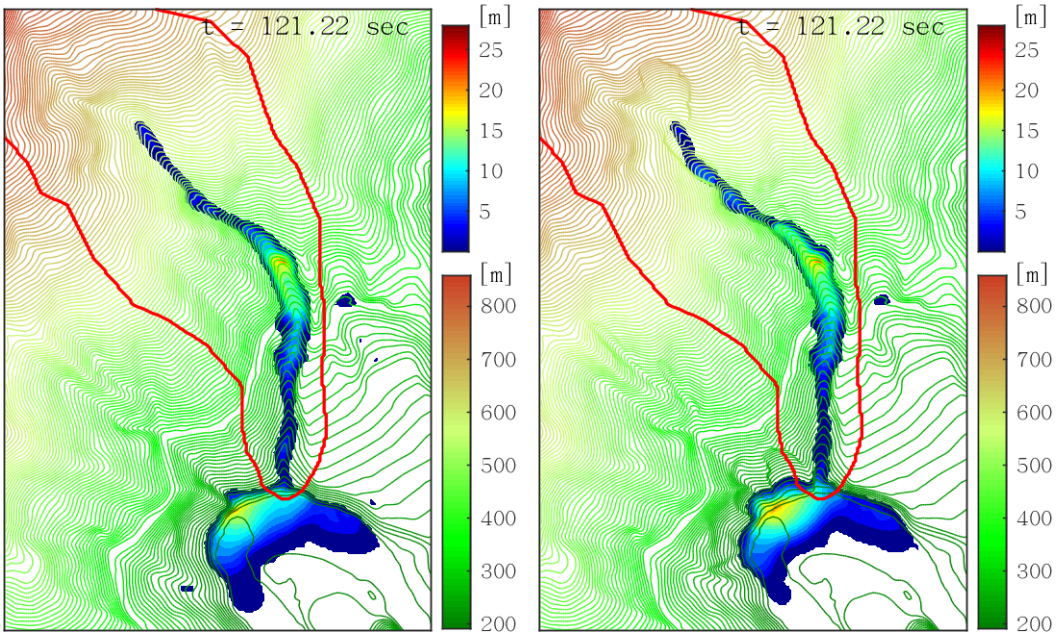
(a)　　(b)

圖 4. 2　t = 0.00 s 時之流體深度分佈：圖(a) (災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



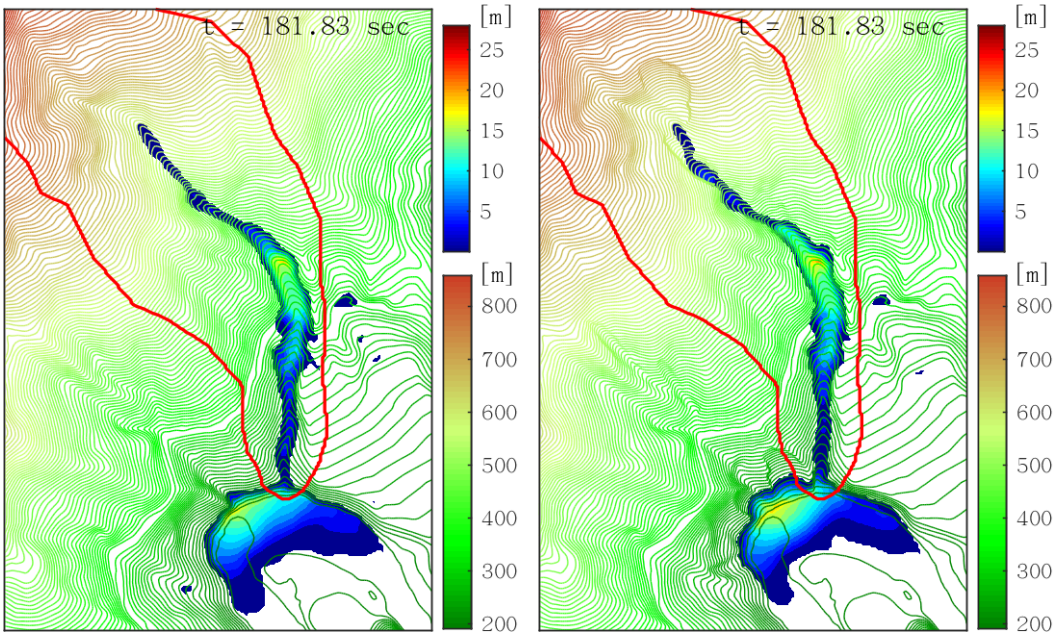
(a)　　(b)

圖 4. 3　t = 60.61 s 時之流體深度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



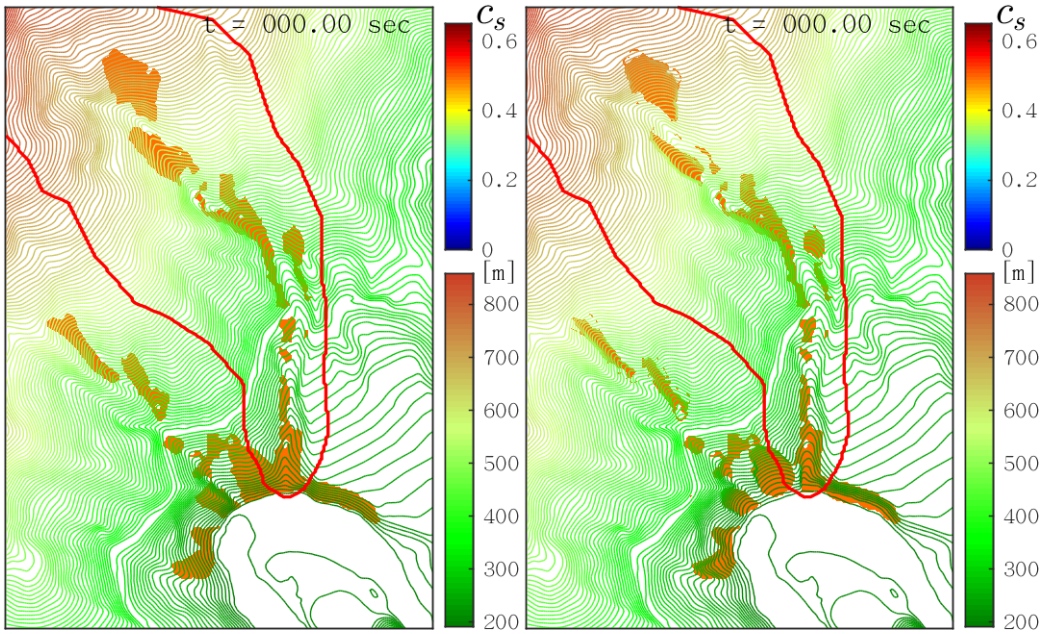
(a)　　(b)

圖 4. 4　t = 121.22 s 時之流體深度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



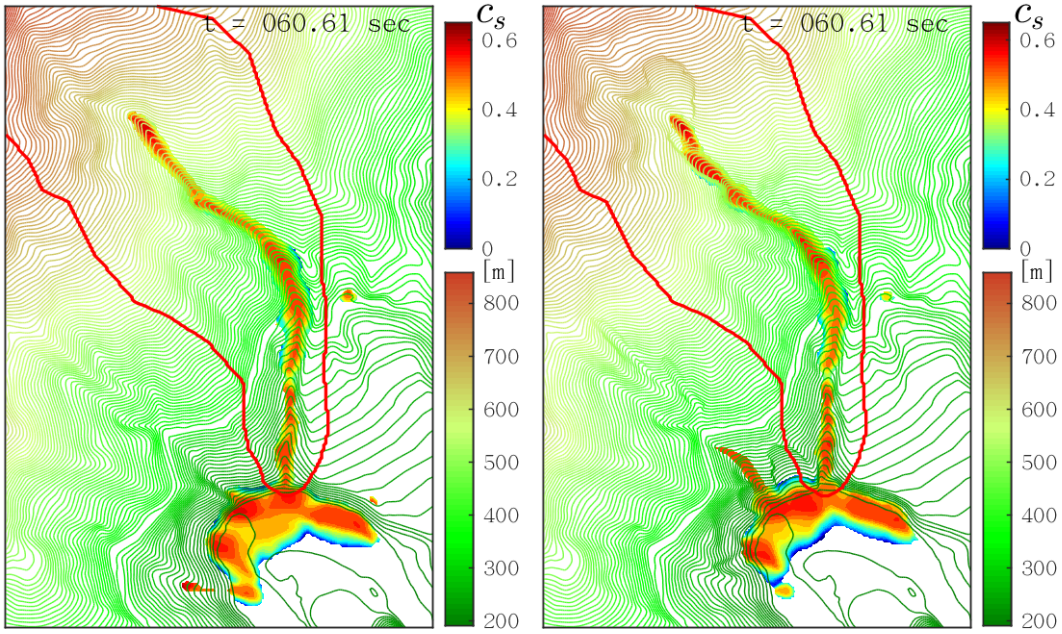
(a)　　(b)

圖 4. 5　t = 181.83 s 時之流體深度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



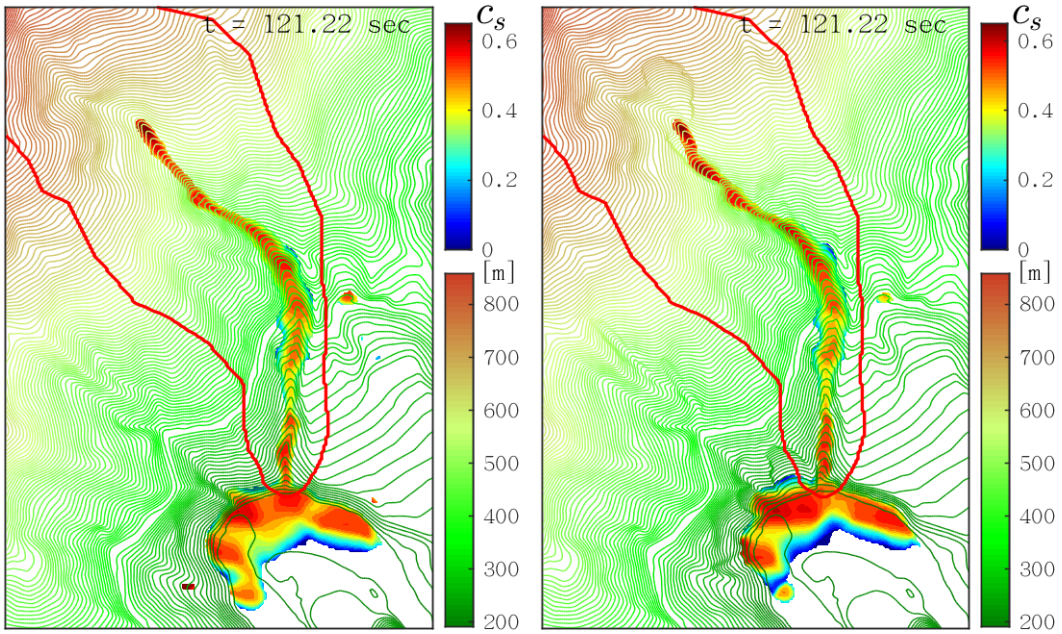
(a)　　(b)

圖 4. 6　t = 0.00 s 時之流體濃度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



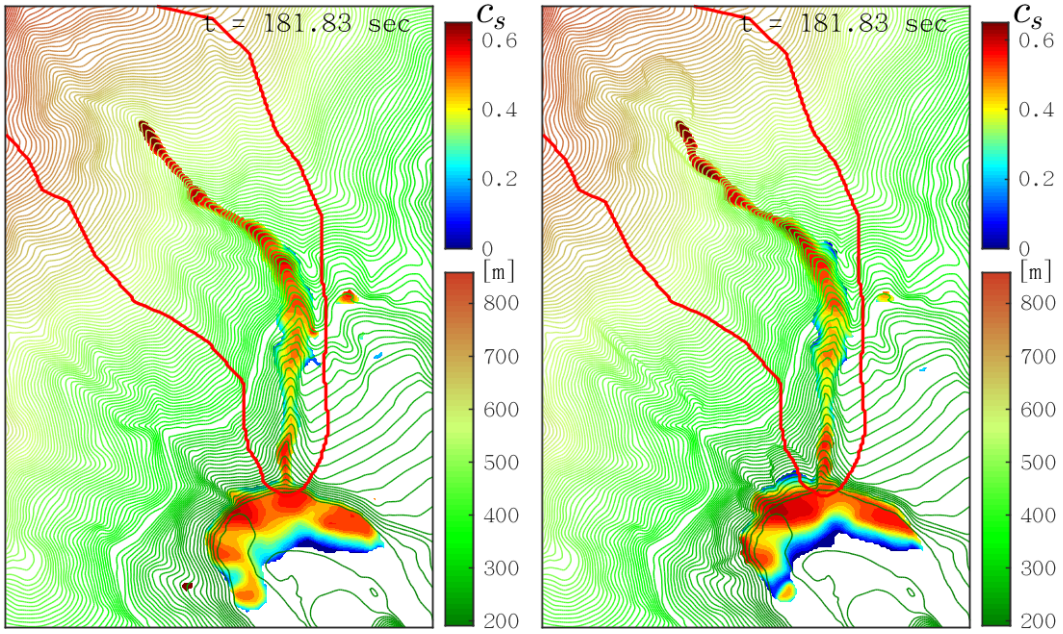
(a)　　(b)

圖 4. 7　t = 60.61 s 時之流體濃度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



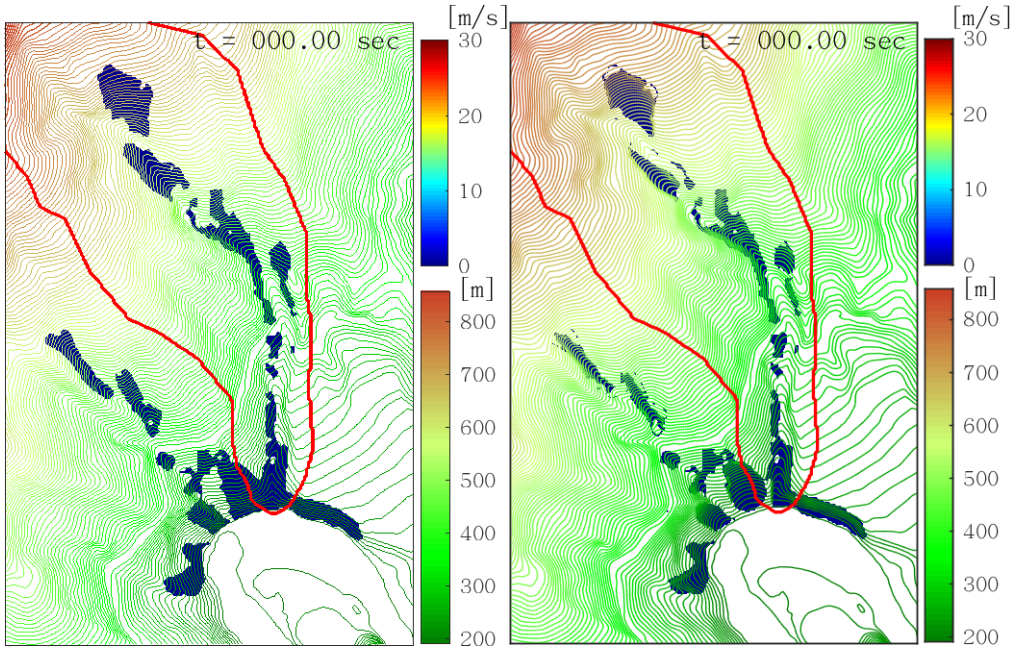
(a)　　(b)

圖 4. 8　t＝121.22 s 時之流體濃度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



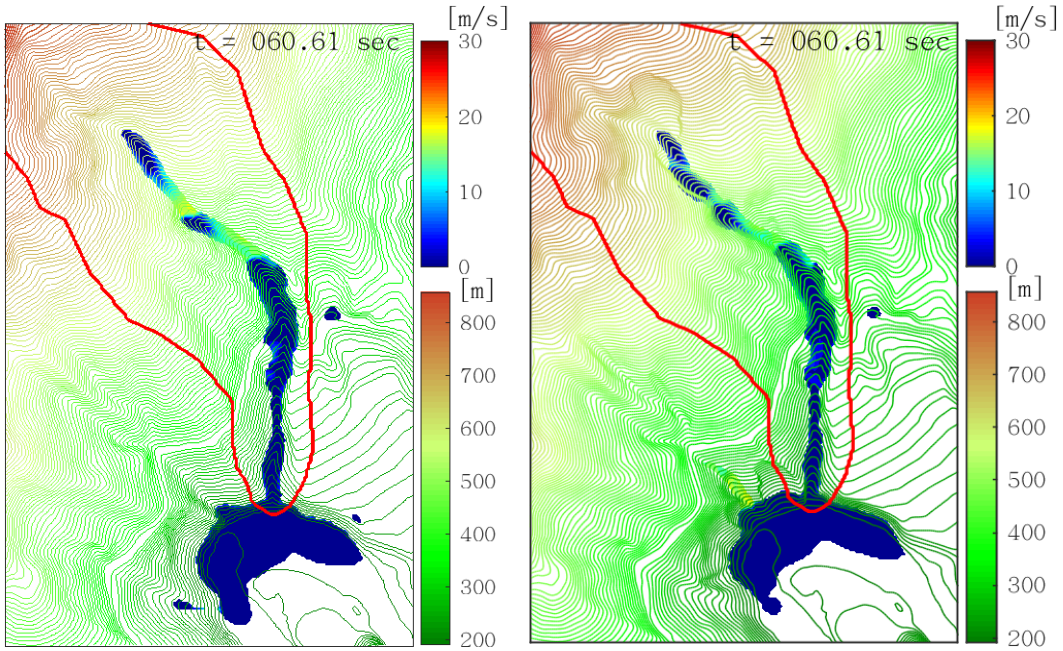
(a)　　(b)

圖 4. 9　t＝181.83 s 時之流體濃度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



(a)　　(b)

圖 4. 10　t = 0.00 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



(a)　　(b)

圖 4. 11　t = 60.61 s 時之流體速度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

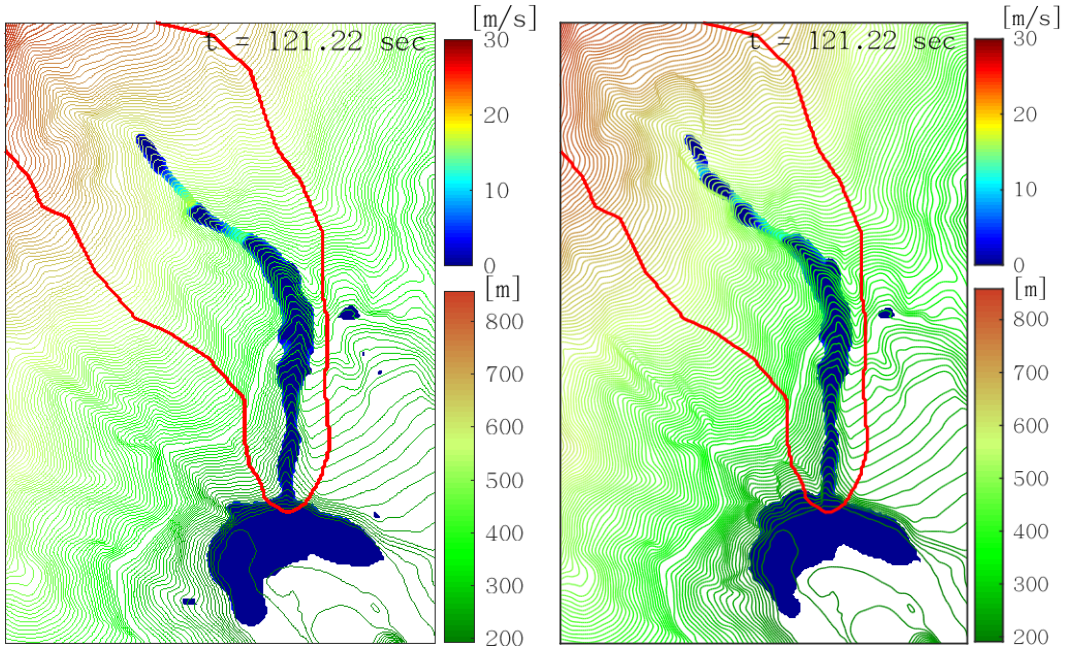


圖 4. 12　t = 121.22 s 時之流體速度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

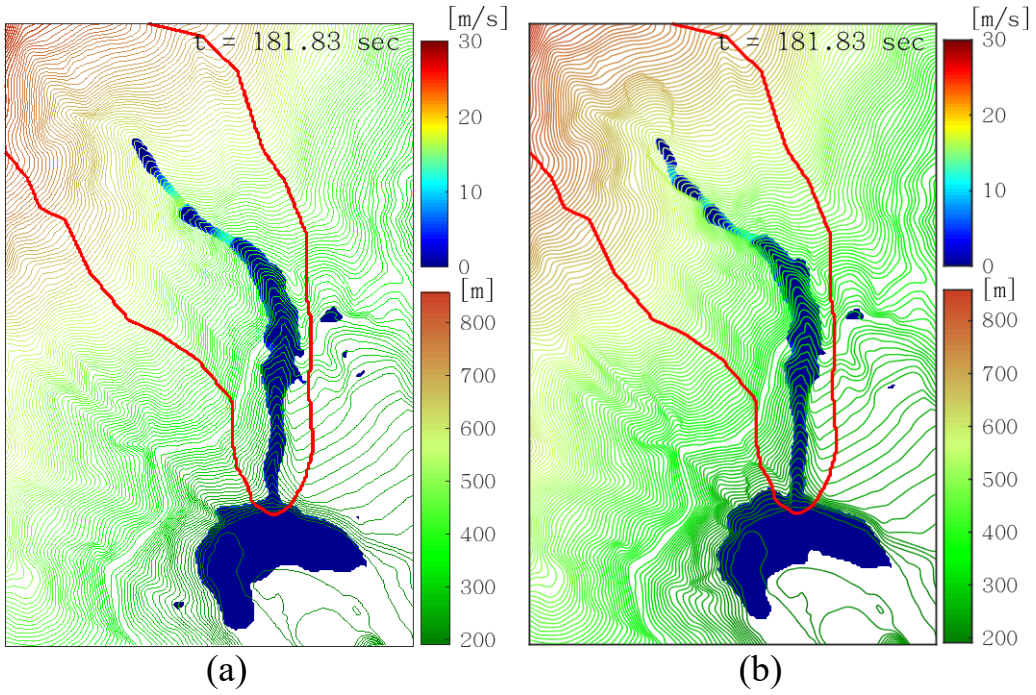


圖 4. 13　t = 181.83 s 時之流體速度分佈：圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

由圖 4.2 至圖 4.13 所顯示之模擬結果可知，在此 DF081 區域主要的 7 個崩塌區域雖然已由理想曲面所取代，但是比較其模擬的結

果，不論是流體深度、土石濃度分布或是速度場的分布，其與採用災前災後數位地形地圖所運算的結果差異並不大。顯示利用本案所提出計算理想破壞曲面之方法在此區域對於評估崩塌後土沙的運移行為具備一定的代表性。

第二節　土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪

將前述(圖 3. 9)所標示的 5 個區塊所估算的理想曲面取代災後的災後數值地形之崩塌曲面，整合周遭地形進行運算。圖 4. 14 顯示與理想破壞曲面整合後之地形，其中(a)為崩塌後的地形；(b)為以理想破壞曲面取代崩塌地區之地形並與周遭地形整合後之地形；(c)為各理想曲面的所在。因為此區域的範圍以及各崩塌區塊的面積規模並不大，所以其差異在圖 4. 14 中並不明顯。

對於 DF054 區域 DFMfGT 數值模式模擬所採用之參數羅列於表 4. 1，包含所使用的 DEM 精度、初始濃度以及土砂比重、固體顆粒摩擦角、交互作用力係數、液相阻尼係數、等效黏滯係數 等 5 個材料參數。運算之結果以 3 個時間點來呈現(分別為 0.00 sec、60.61 sec、90.91 sec)，呈現的物理量包括：流動深度(圖 4. 15 至圖 4. 18)、濃度(圖 4. 19 至圖 4. 22)以及速度(圖 4. 23 至圖 4. 26)。為方便評估探討，在上述圖 4. 15 至圖 4. 26 中，每個圖中之(a)小圖為採用災前災後數位地形地圖所運算的結果，(b)小圖則為採用災前數位地形地圖以及本案運算所得理想曲面所整合的地形來運算的結果。

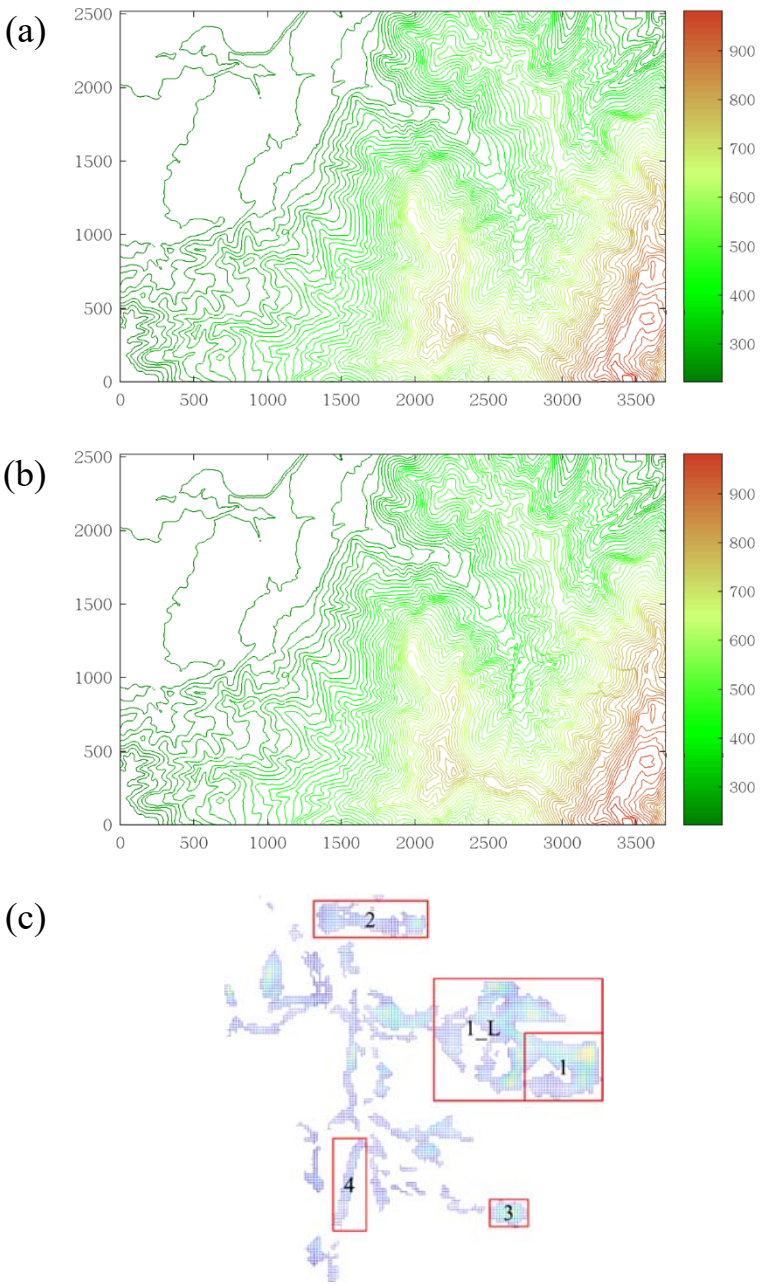


圖 4. 14　(DF054) (a)崩塌後地形；(b)理想破壞曲面整合地形；(c)崩塌區塊所在

表 4. 2　數值模擬採用之參數一覽表 (DF054)

網格精度	10 m × 10 m	土石流初始體積濃度	40%
土砂比重 ρ_f/ρ_s	1.06/2.65	固體顆粒摩擦角	$\delta = 36°$
交互作用力係數	$C_d = 6.0$	液相阻尼係數	$\vartheta = 3.0$
等效黏滯係數	$\mu_{\text{eff}} = 0.5$ [Pa·s]		

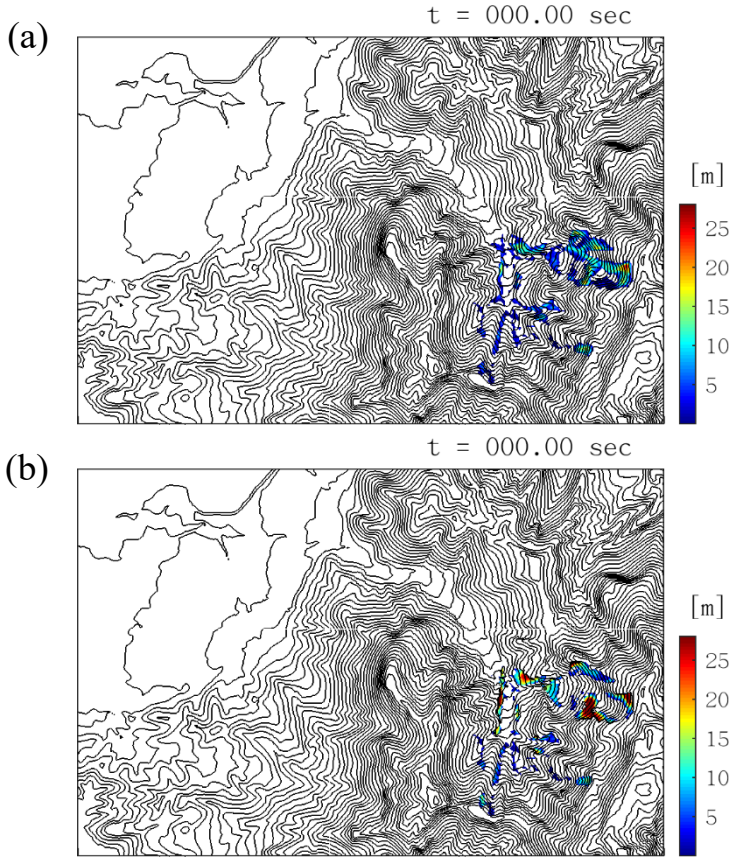
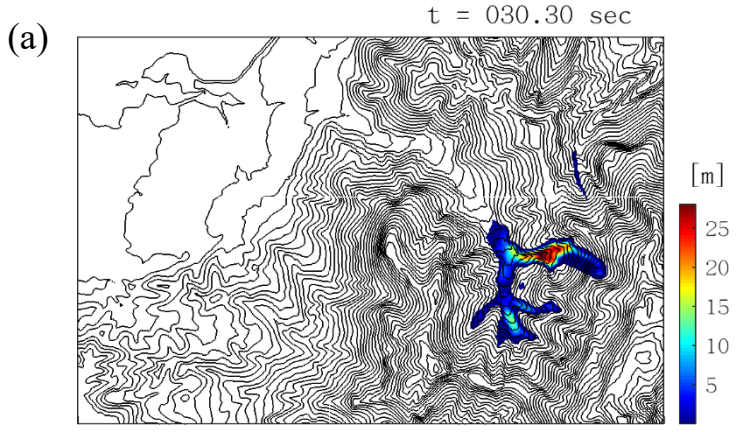


圖 4. 15　t = 0.00 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



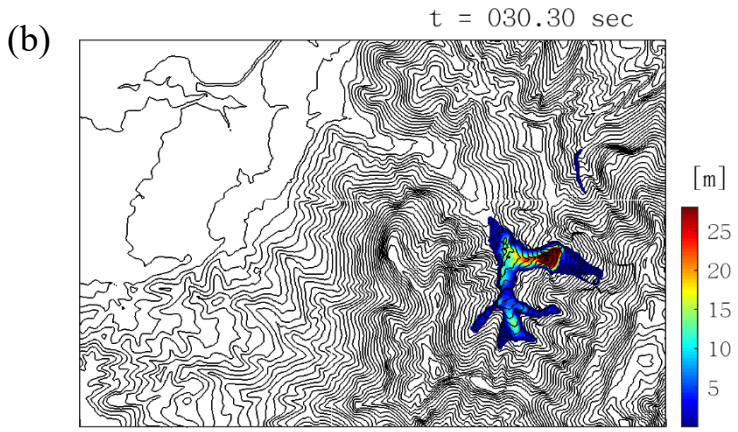


圖 4. 16　t = 30.30 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

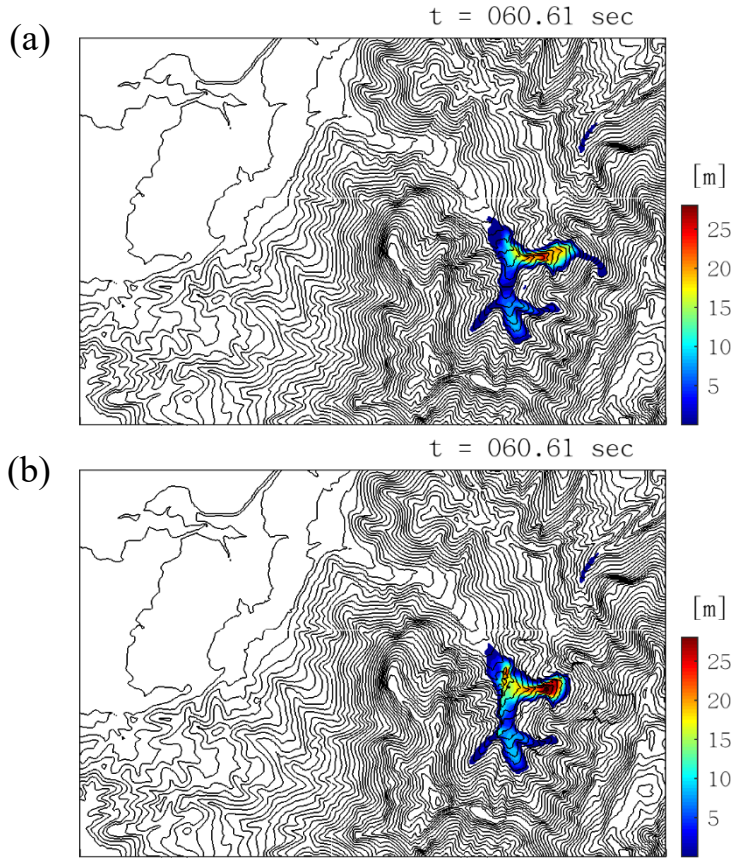


圖 4. 17　t = 60.61 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

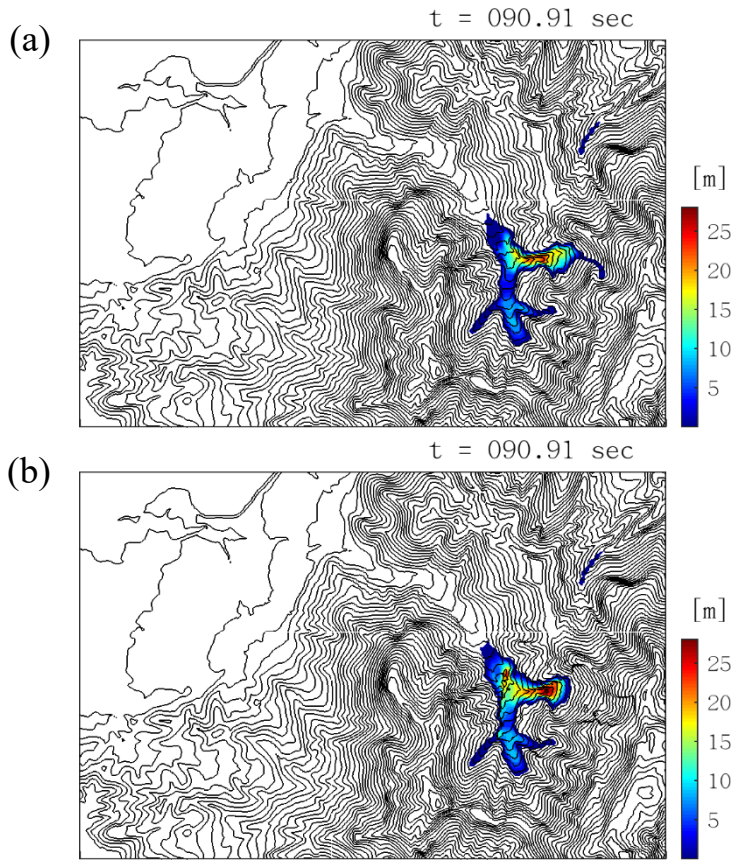
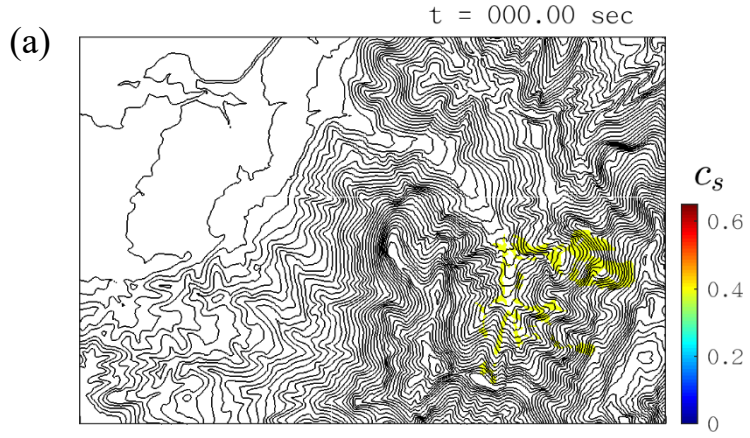


圖 4. 18　t = 90.91 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



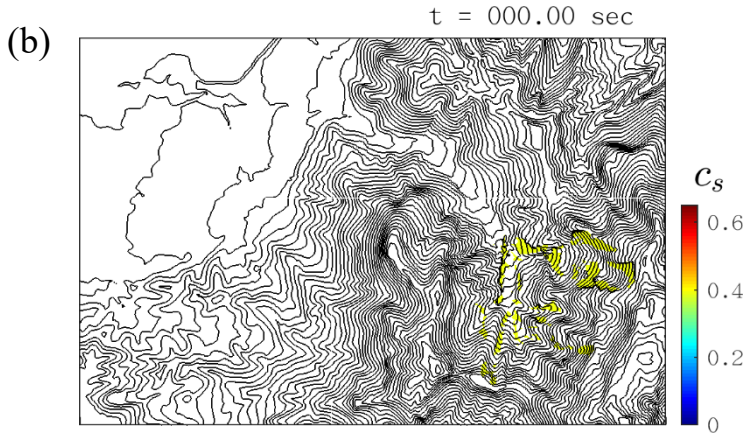


圖 4. 19　t = 0.00 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

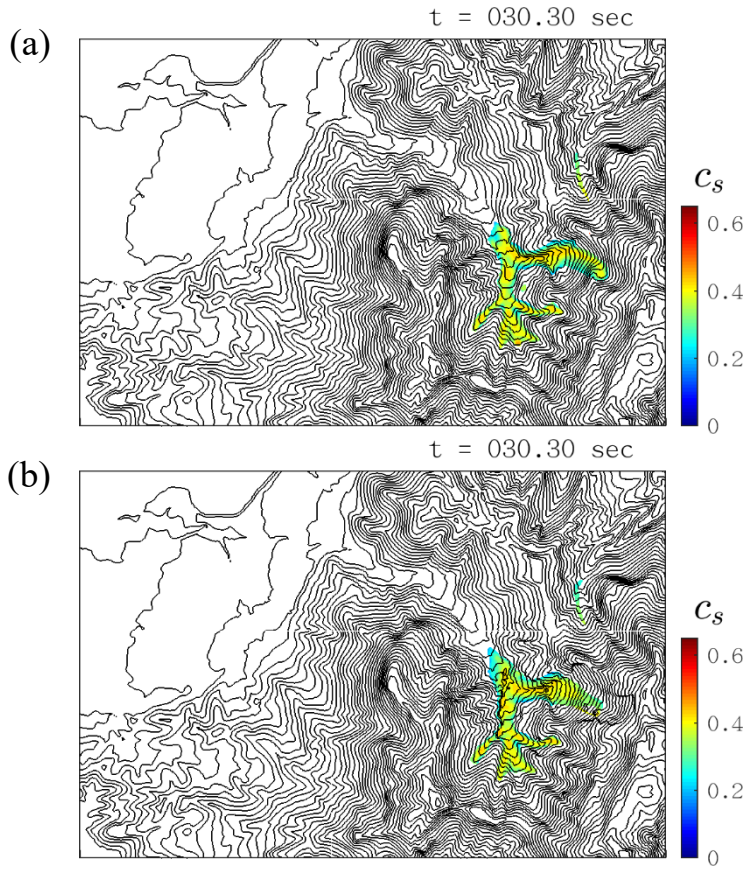


圖 4. 20　t = 30.30 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

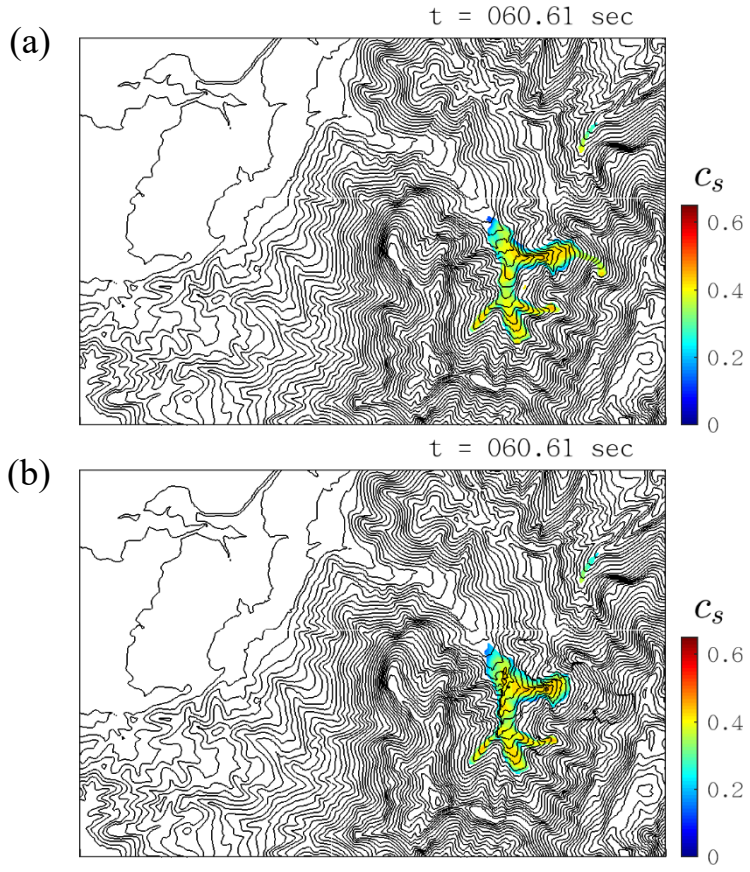
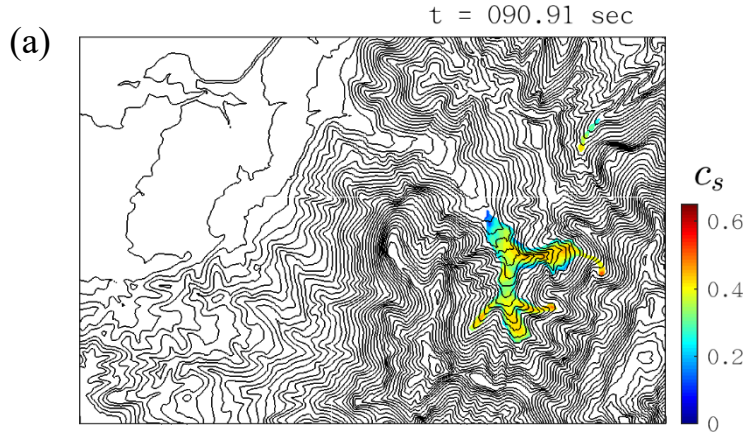


圖 4. 21　t = 60.61 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



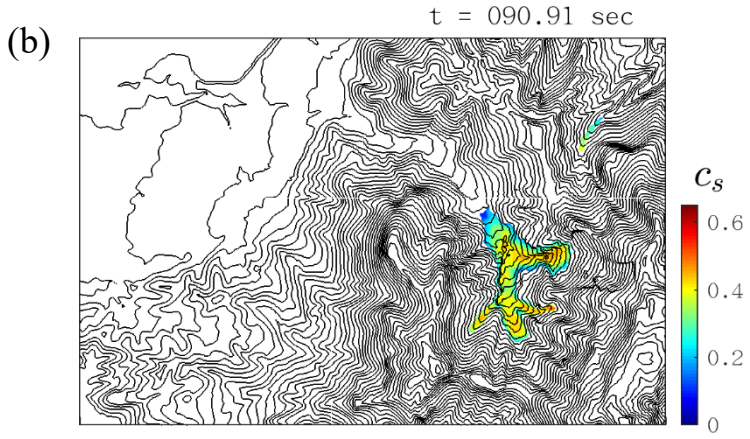


圖 4. 22　t = 90.91 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

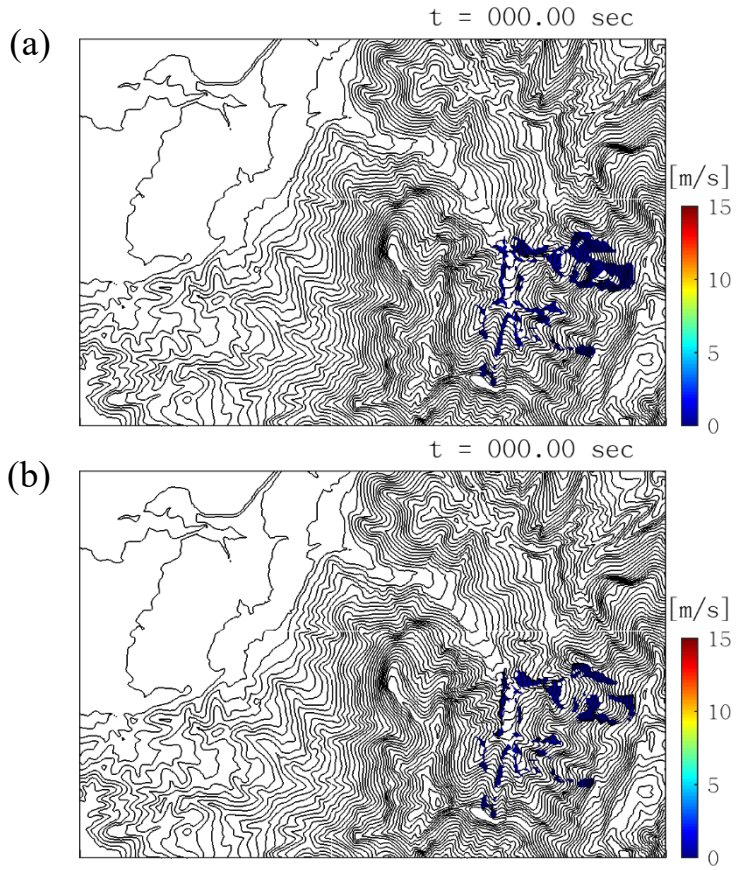


圖 4. 23　t = 0.00 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

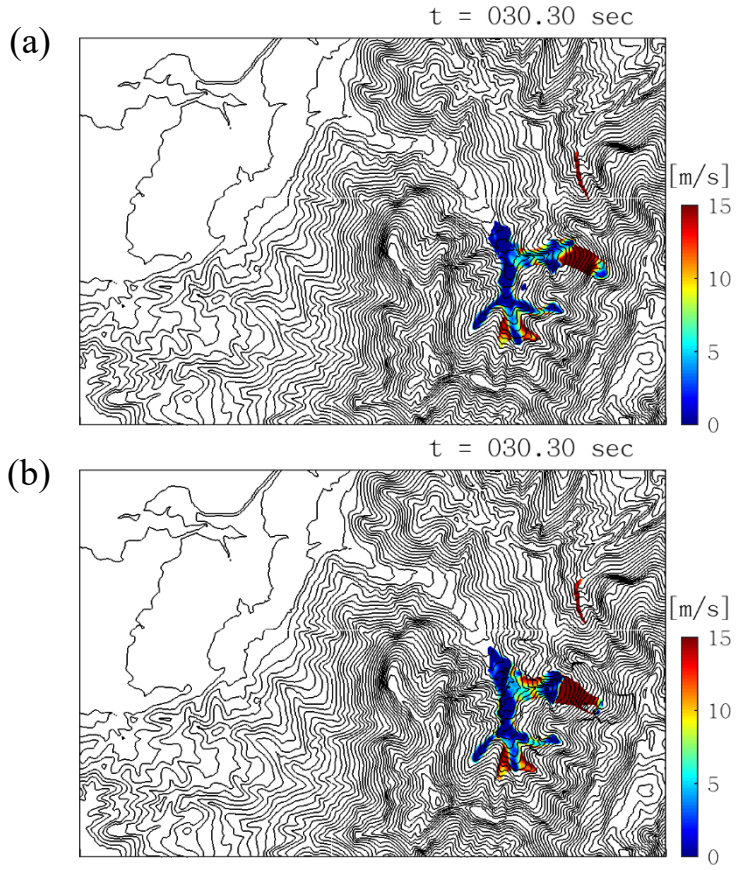
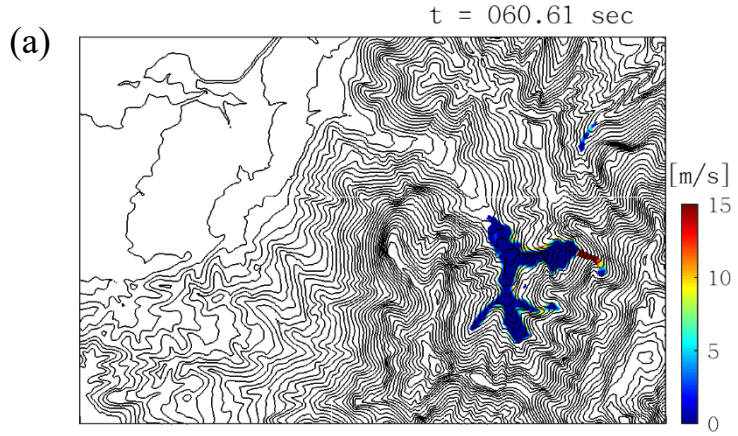


圖 4. 24　t＝30.30 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



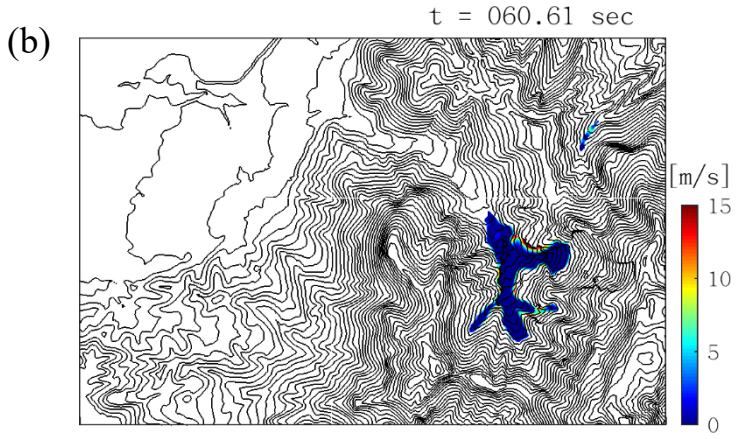


圖 4. 25　t＝60.61 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

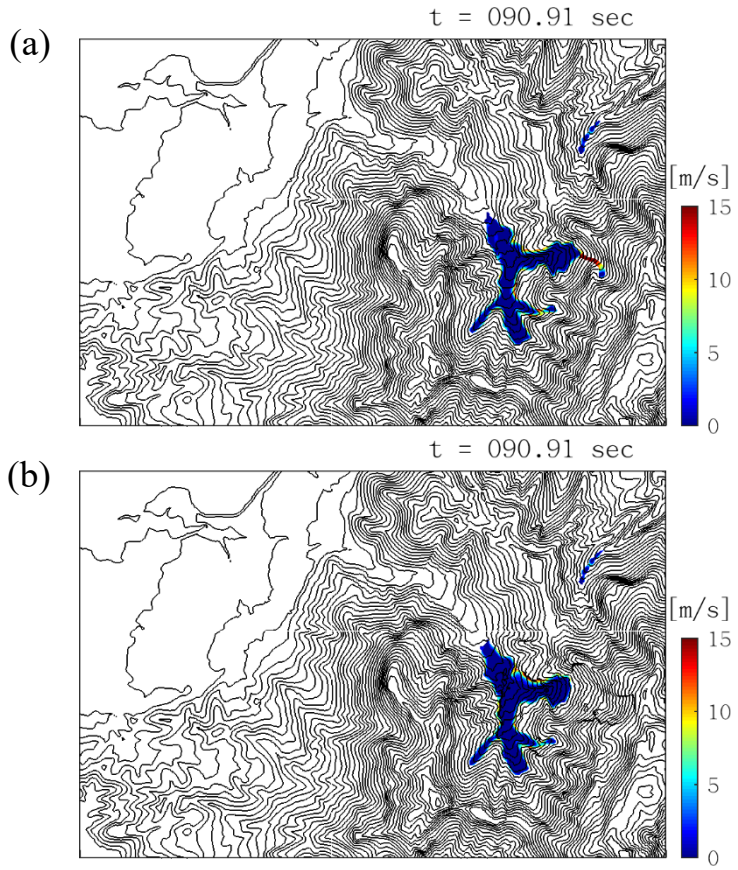


圖 4. 26　t＝90.91 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

相較於 DF081 區域，此區域(DF054)所計算所得之理想破壞曲面雖然造成比較大的誤差。但是由圖 4. 15 至圖 4. 26 所顯示之模擬結果可知，在 5 個崩塌區域由理想曲面所取代的前提下，其模擬的結果不論是流體深度、土石濃度分布或是速度場的分布，其與採用

災前災後數位地形地圖所運算的結果差異並不大。顯示利用本案所提出計算理想破壞曲面之方法在此區域(DF054)對於評估崩塌後土沙的運移行為具備一定的代表性。

第三節　小林村崩塌案例情境模擬

對於小林村案例的模擬，本案考慮小林村上方 3 個主要崩塌區塊(圖 3. 15 所標示的區塊編號 1、2、3)，將所估算的 3 個理想曲面取代災後的災後數值地形之崩塌曲面，整合周遭地形進行運算。圖 4. 27 顯示與理想破壞曲面整合後之地形，其中(a)為崩塌後的地形；(b)為以理想破壞曲面取代崩塌地區之地形並與周遭地形整合後之地形；(c)為各理想曲面的所在。因為此區域的範圍以及各崩塌區塊的面積規模較大，所以其差異在圖 4. 27 中可明顯辨識。

對於小林村案例 DFMfGT 數值模式模擬所採用之參數選用參考 Tai et al. (2018)之值並羅列於表 4. 3，包含所使用的 DEM 精度、初始濃度以及土砂比重、固體顆粒摩擦角、交互作用力係數、液相阻尼係數、等效黏滯係數 等 5 個材料參數。運算之結果以 4 個時間點來呈現(分別為 0.00 sec、60.61 sec、121.22 sec、181.83 sec)，呈現的物理量包括：流動深度(圖 4. 28 至圖 4. 31)、濃度(圖 4. 32 至圖 4. 35 所示)以及速度(圖 4. 36 至圖 4. 39)。為方便評估探討，在上述圖 4. 28 至圖 4. 39 中，每個圖中之(a)小圖為採用災前災後數位地形地圖所運算的結果，(b)小圖則為採用災前數位地形地圖以及本案運算所得理想曲面所整合的地形來運算的結果。

此外，於流動土砂深度圖(圖 4. 28 至圖 4. 31)之中，除了以色階表示流動土砂的深度，於該時段土砂所經過的路徑另以褐色陰影標示

出來。如此可進一步了解該崩塌所可能造成影響的範圍，也可適度評估採用數值地形之崩塌曲面與採用理想破壞曲面取代崩塌地區地形之間的差異。

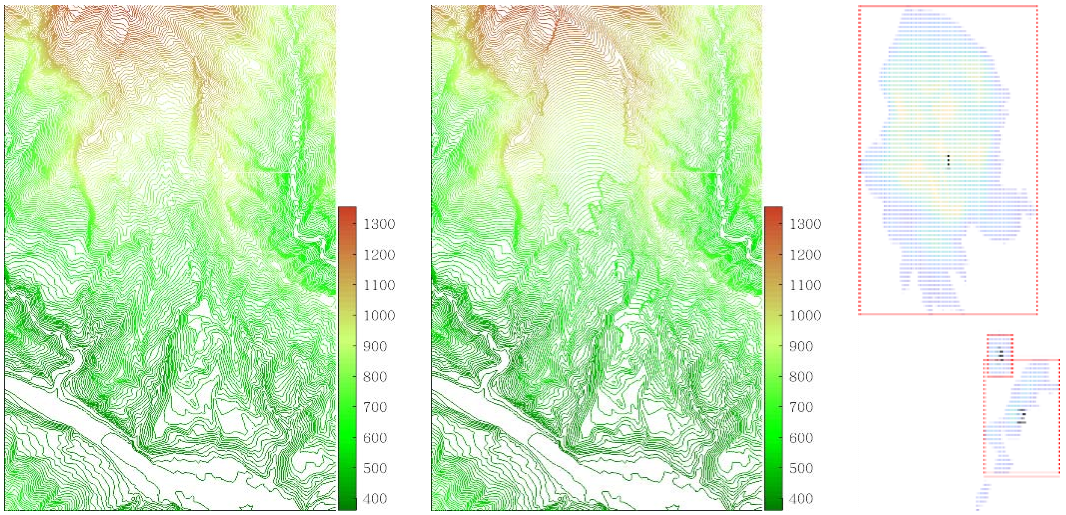


圖 4. 27　(小林崩塌案例) (a)崩塌後地形；(b)理想破壞曲面整合地形；(c)崩塌區塊所在區塊所在位置圖)

表 4. 3 數值模擬採用之參數一覽表 (小林村崩塌案例)

網格精度	10 m × 10 m	土石流初始體積濃度	50%
土砂比重 ρ_f/ρ_s	1.42/2.60	固體顆粒摩擦角	$\delta = 16°$
交互作用力係數	$C_d = 6.0$	液相阻尼係數	$\vartheta = 5.0$
等效黏滯係數	$\mu_{eff} = 0.5$ [Pa·s]		

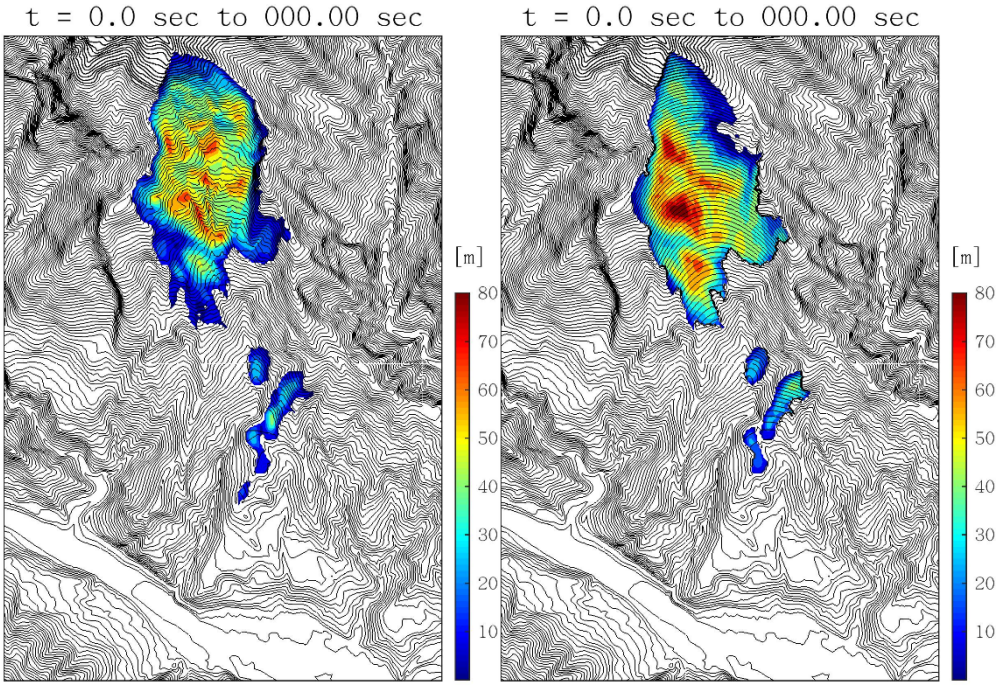


圖 4. 28　t = 0.00 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

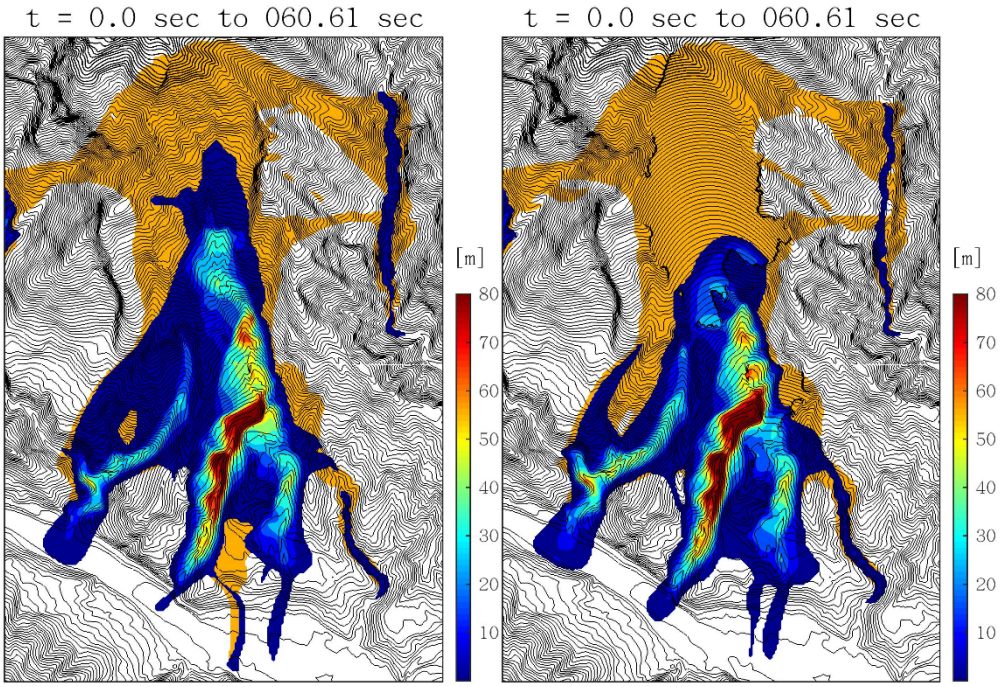
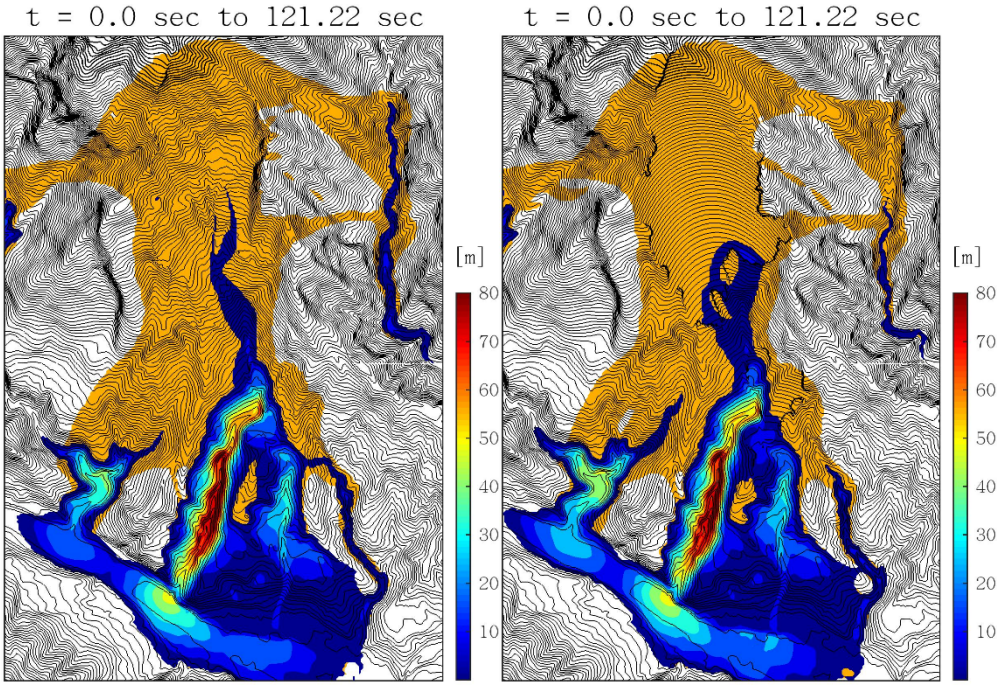
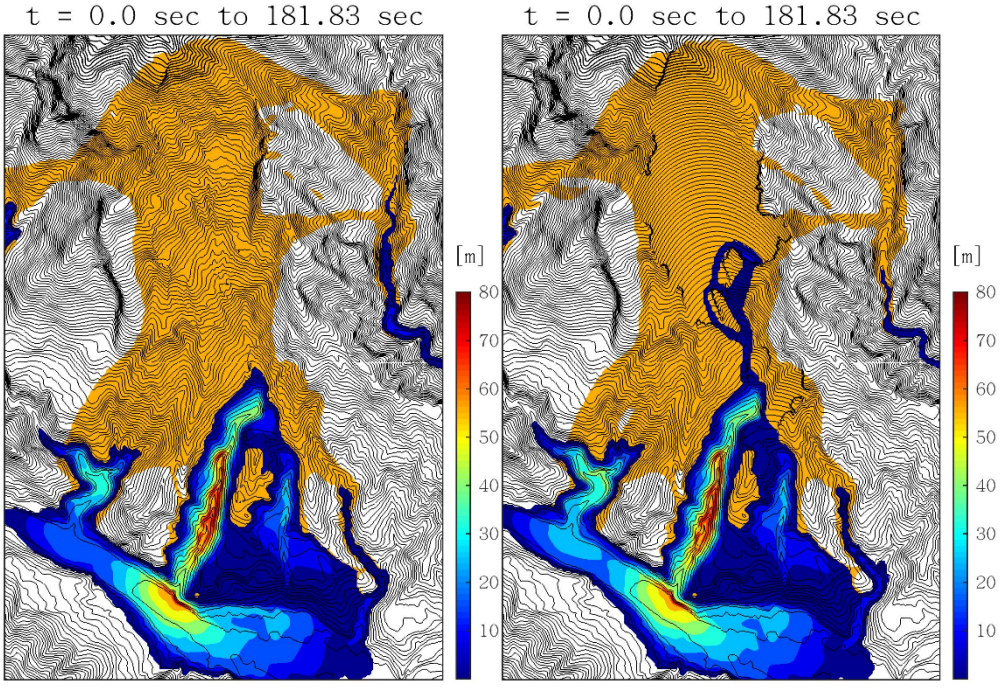


圖 4. 29　t = 60.61 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



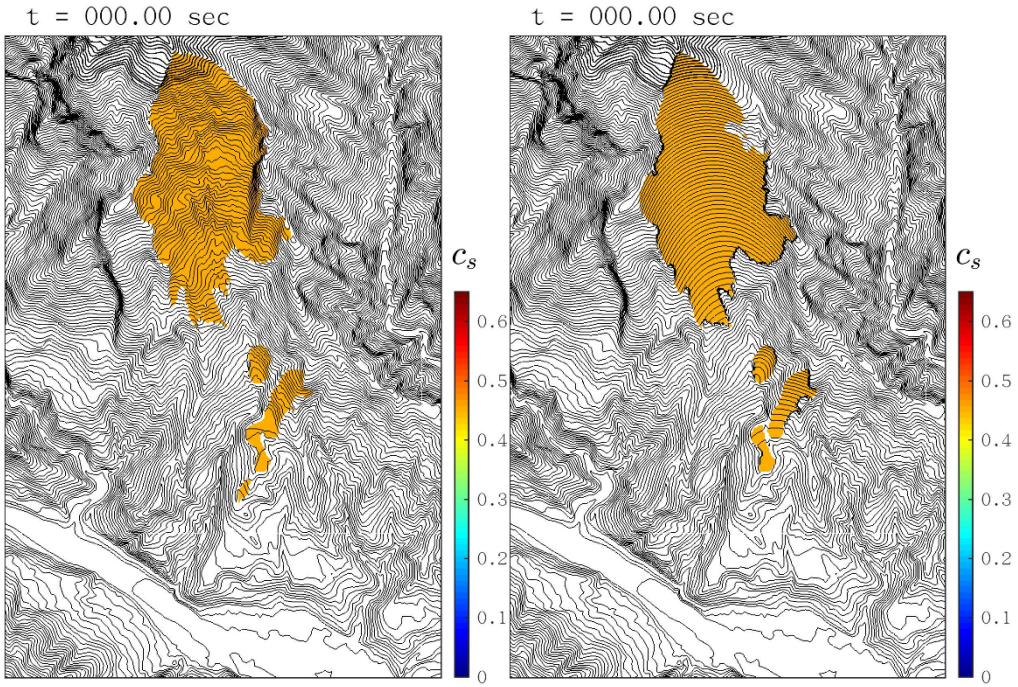
(a)　　(b)

圖 4. 30　t＝121.22 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



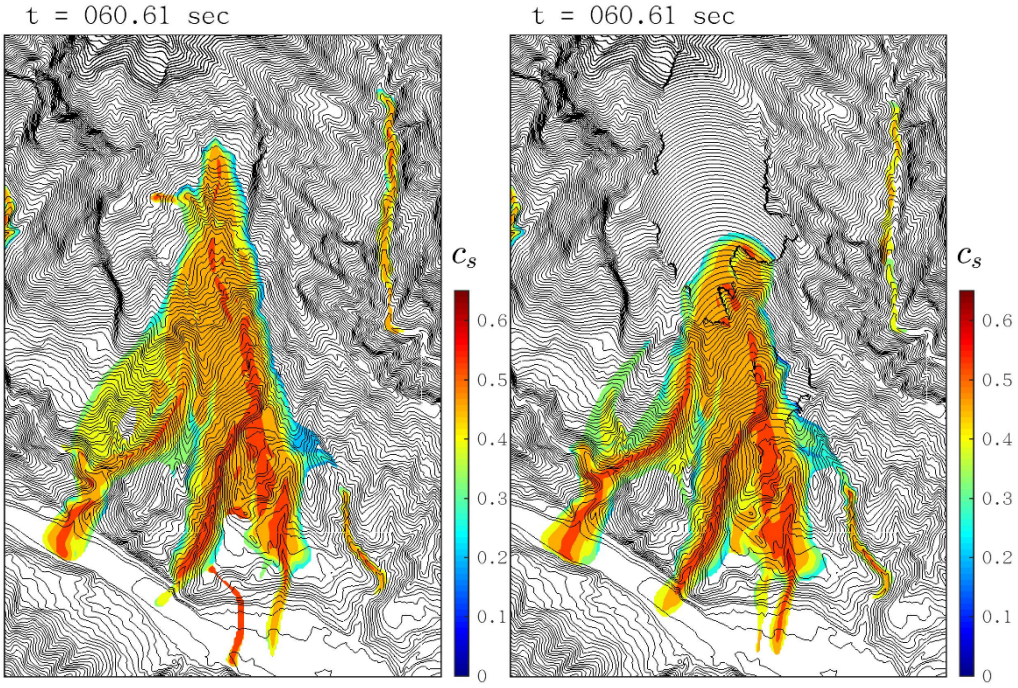
(a)　　(b)

圖 4. 31　t＝181.83 s 時之流體深度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



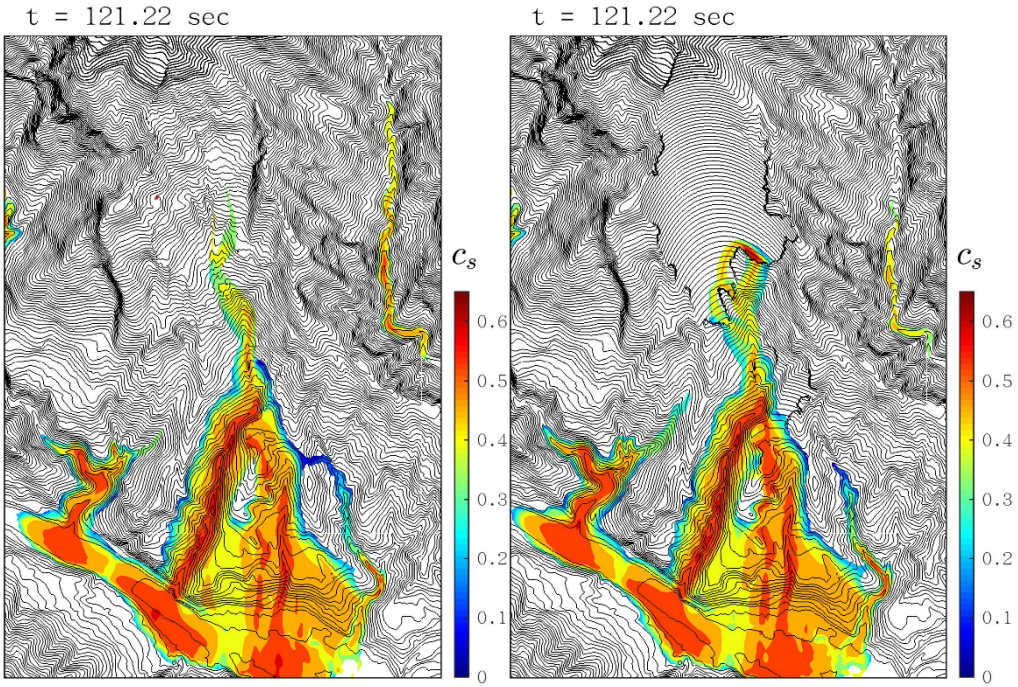
(a)　　(b)

圖 4. 32　t＝0.00 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



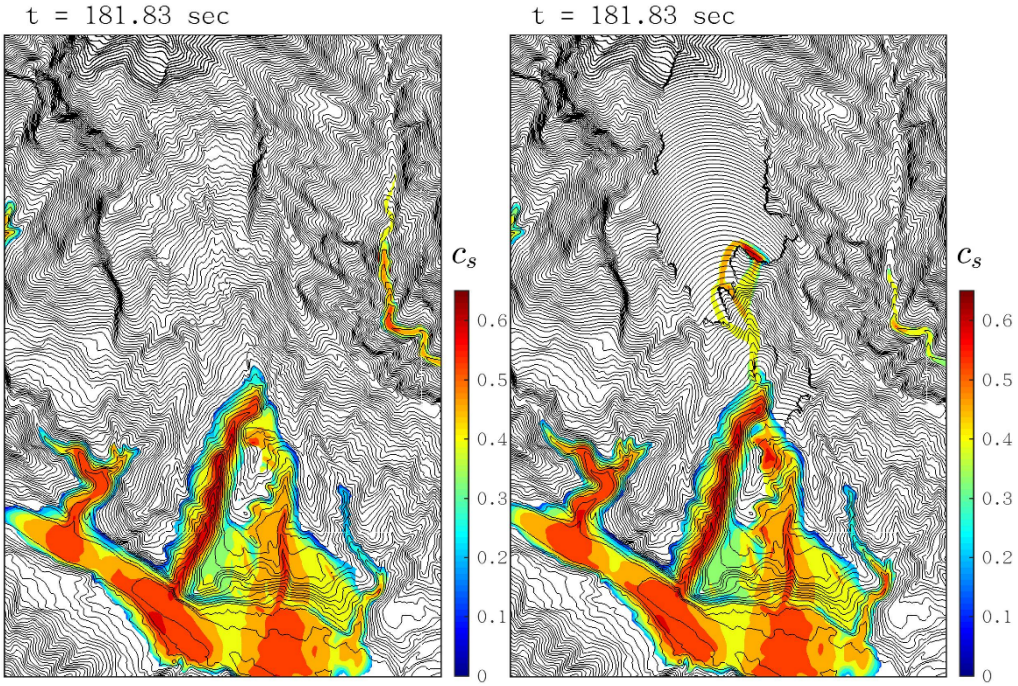
(a)　　(b)

圖 4. 33　t＝60.61 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



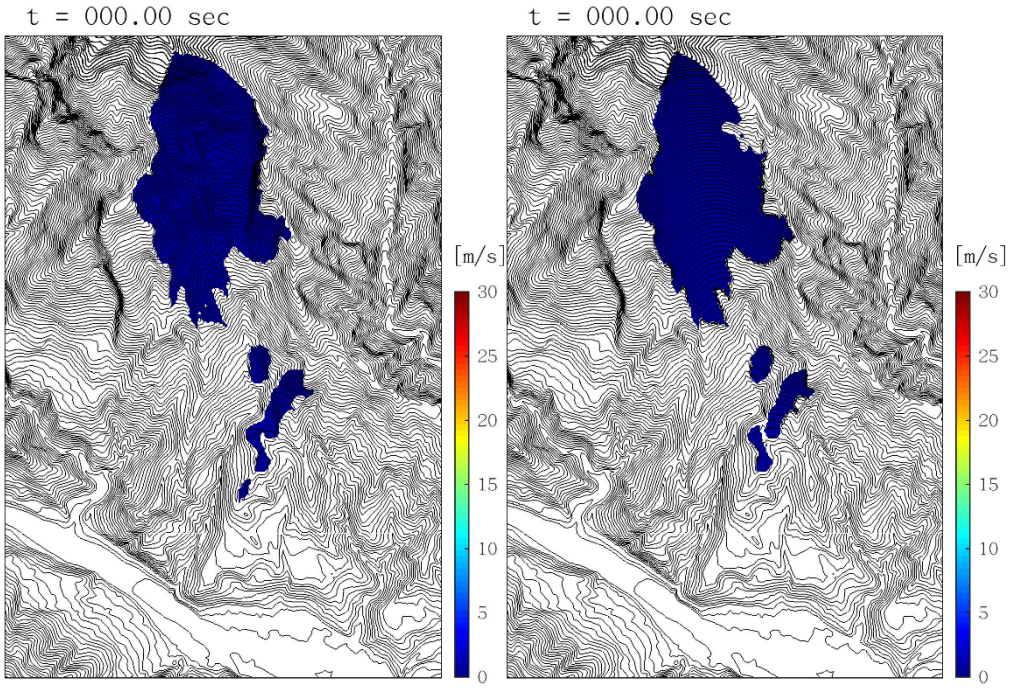
(a)　　(b)

圖 4. 34　t＝121.22 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



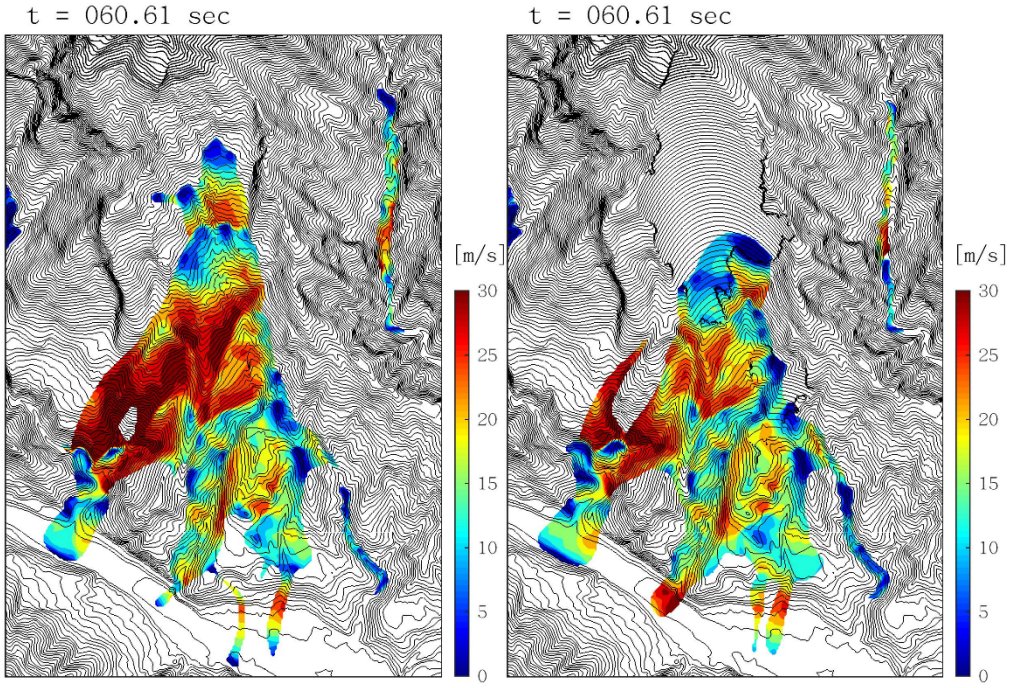
(a)　　(b)

圖 4. 35　t＝181.83 s 時之流體濃度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



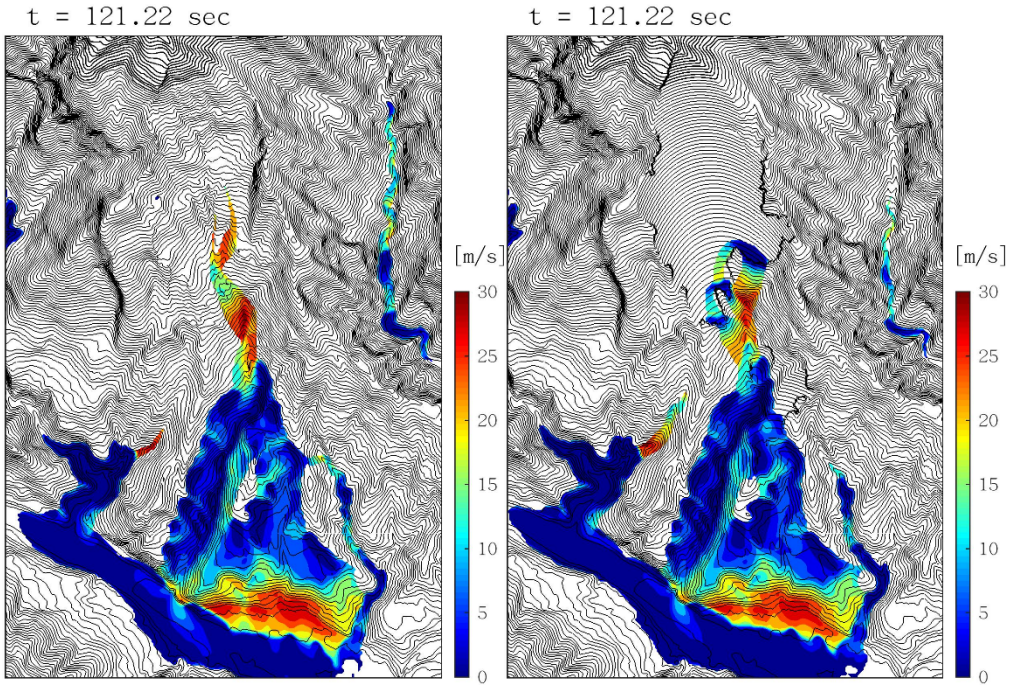
(a)　　(b)

圖 4. 36　t＝0.00 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



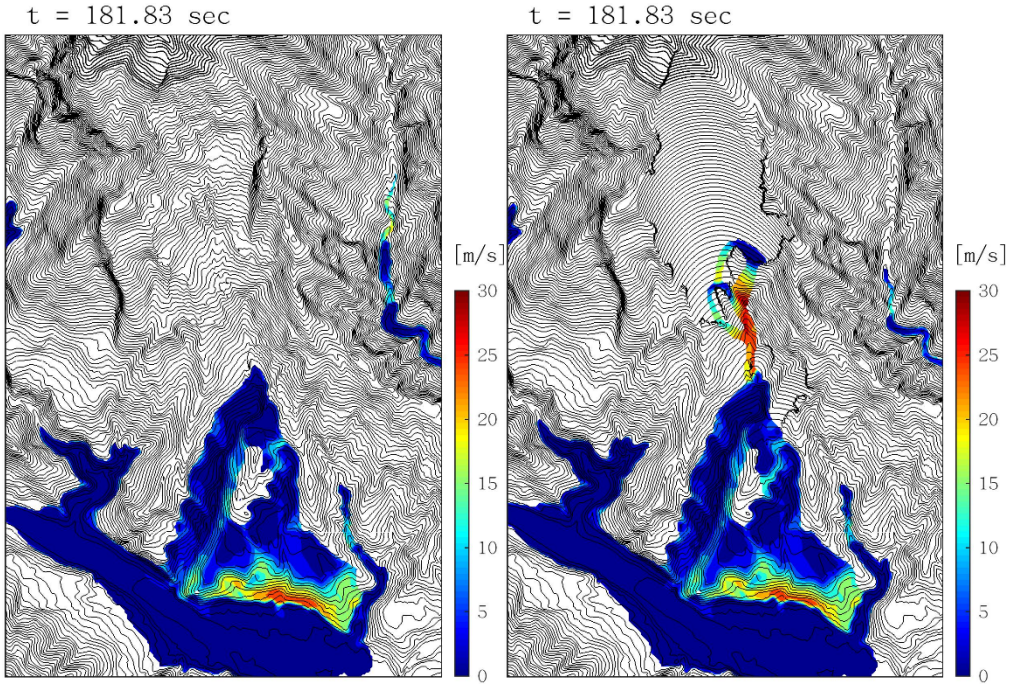
(a)　　(b)

圖 4. 37　t＝60.61 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



(a)　　(b)

圖 4. 38　t＝121.22 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)



(a)　　(b)

圖 4. 39　t＝181.83 s 時之流體速度分佈，圖(a)(災後 DEM)；圖(b)(理想破壞面)

小林村的崩塌案例中的崩塌量體遠大於 DF081 或是 DF054 兩個區域，此案例中)所計算所得之理想破壞曲面的誤差介於 5.1%到 7.3%之間。圖 4.28 至圖 4.39 所顯示之模擬結果可知，在 3 個崩塌區域由理想曲面所取代的前提下，其模擬的結果不僅在流體深度分布、土石濃度分布或是速度場的分布，其與採用災前災後數位地形地圖所運算的結果差異不大，兩者土砂流動的範圍也相當。顯示利用本案所提出計算理想破壞曲面之方法在小林村案例的規模尺度下，對於評估崩塌後土沙的運移行為具備一定的參考價值。

第五章　坡面崩塌曲面幾何特性探討

由於現地的地形、水文特性、地質構造及土砂材料組成複雜，造成量測(航照、LiDAR、SAR 影像等)既有坡面崩塌破壞曲面的幾何特性雜訊過多，不易過濾出主要的幾何特性。針對已發生崩塌之破壞曲面，可利用前述方法建立理想曲面，也可直接利用數值高程地圖 DEM 推估幾何參數。因此在探討其幾何特性會產生兩組參數：

(a) 理想曲面之參數

(b) 真實破壞曲面之參數(直接由數值高程地圖計算)

然而，探討既有坡面崩塌破壞曲面的幾何特性需要依據崩塌災前災後的地形資料確定出破壞曲面的所在以及三維空間中的幾何形狀。除了崩塌面積的估算以外，也可計算該破壞曲面的平均坡面傾角角度(斜率)，再依此坡面傾角，便得以計算該破壞曲面的軸向曲率以及側向曲率，也可估算崩塌深度(最大深度以及平均深度)。依據第三章所估算之理想曲面，著實可據以探討其幾何特性。在 DF081、DF054 龍蛟溪以及小林村這 3 個案例一共羅列了 16 個崩塌案例，並著手將分別探討這 3 個案例比較曲面幾何特性(面積、體積、曲率半徑、崩塌深度、長度與寬度 等)與各個參數之間的關係。其中所使用探討的參數羅列如下：

- 面積部分：

  A_{dem} ： 實際崩塌面積。

  A_1 ： 崩塌深度大於 0.5m 所包含的崩塌面積。

- 體積部分：

  V_{dem} ： 實際崩塌體積。

  V_1 ： 崩塌深度大於 0.5m 所包含的崩塌體積。

V_2 ： 理想化曲面所計算出的崩塌體積。

r_v ： V_2 與 V_1 的相差百分比。

- 曲率半徑

R_1 ： 軸向曲率半徑(理想崩塌曲面)。

R_2 ： 側向曲率半徑(理想崩塌曲面)。

R_{r1} ： 破壞曲面之平均軸向曲率半徑(直接由數值高程地圖計算)。

R_{r2} ： 破壞曲面之平均側向曲率半徑(直接由數值高程地圖計算)。

- 坡面角度

θ_{inc}： 坡面傾角。

θ ： 軸向傾角。

- 崩塌深度與長度與寬度

d_{dem} ： 實際最大崩塌深度。

d_1 ： 軸向最大深度。

d_2 ： 側向最大深度。

L_1 ： 軸向長度。

L_2 ： 側向軸長度(寬度)。

本計畫已完成 DF081 萬山部落、DF054 龍蛟溪以及小林村共 16 個案例的參數擷取，分別敘述如下。

第一節 土石流潛勢溪流區高市 DF081 萬山部落

延續第 3 章的成果，將 DF081 潛勢溪流災前災後 DEM 所判釋出來的崩塌區域分成 7 個區塊(Area)，分別進行理想化曲面的運算。以體積誤差最小的理想化曲面前 10 組數據為參考數據，取其平均值

作為討論幾何特性的基準。所得的各參數平均值羅列於表 5.1。

表 5.1　DF081 之 DEM 資料與破壞面參數表

參數 \ Area	1	2	3	4	5	6	7
A_{dem} [m^2]	15,550	8,525	8,675	7,875	5,350	12,400	3,700
A_1 [m^2]	12,725	8,525	6,000	4,925	5,050	11,250	2,975
V_{dem} [m^3]	96,789	50,430	22,726	13,227	63,477	119,229	10,359
V_1 [m^3]	92,761	44,318	18,391	9,650	60,039	109,120	9,350
V_2 [m^3]	97,268	50,430	23,161	13,671	63,543	119,441	10,466
r_v [%]	4.86	13.79	25.93	41.67	5.84	9.46	11.94
R_{r1} [m]	406.81	470.17	615.57	244.01	167.83	392.43	161.02
R_{r2} [m]	96.72	31.70	11.97	24.80	81.40	105.40	72.86
R_1 [m]	428.62	441.91	561.41	389.83	128.67	299.33	126.71
R_2 [m]	89.17	30.21	16.96	15.05	45.96	81.49	57.08
θ_{inc} [°]	37.75	25.48	34.42	34.10	41.97	35.59	36.28
θ [°]	38.02	24.83	32.15	35.02	46.26	36.15	35.09
d_{dem} [m]	21.14	14.05	10.75	6.31	33.79	29.87	8.15
d_1 [m]	14.46	8.75	12.81	13.79	20.31	14.01	5.28
d_2 [m]	19.46	18.75	7.81	3.79	10.31	14.01	5.28
L_1 [m]	196.28	166.52	219.39	186.17	116.83	162.95	65.49
L_2 [m]	109.84	55.31	26.78	19.60	57.63	90.66	47.48

由於真實破壞曲面並非平滑曲面，為評估探討理想崩塌破壞面的曲率與實際崩塌破壞面的曲率之差異所定義的平均曲率半徑(R_{r1} 與 R_{r2})，其與理想破壞曲面的曲率半徑之間的差異則顯示該破壞曲面的

平滑程度。除了實際崩塌破壞面的平滑程度會影響本案所估算的理想曲面的代表性以外，探討本案運算所得之理想化曲面其各參數間的關聯性，分以下 4 項來討論：

(1) 軸向曲率半徑(R_1)與側向曲率半徑(R_2)相對應於崩塌面積(A_1)的關聯；

(2) 崩塌量體(V_1、V_2)與曲面軸向最大深度(d_{dem}、d_1)的關聯；

(3) 崩塌量體(V_2)與各定義之崩塌深度(d_{dem}、d_1、d_2)的關聯；

(4) 曲面最大崩塌深度(d_1、d_2)、軸長(L_1、L_2)及曲率半徑(R_1、R_2)之關聯。

圖 5. 1(a)為軸向曲率半徑(R_1)與側向曲率半徑(R_2)相對應於崩塌面積(A_1)的關係圖。圖 5. 1(b)彙整崩塌量體(V_1、V_2)與曲面軸向最大深度(d_{dem}、d_1)的關係。圖 5. 2(a)為崩塌量體(V_2)與各定義之崩塌深度(d_{dem}、d_1、d_2)的關係圖。圖 5. 2(b)則為曲面最大崩塌深度(d_1、d_2)、軸長(L_1、L_2)及曲率半徑(R_1、R_2)之關係圖。

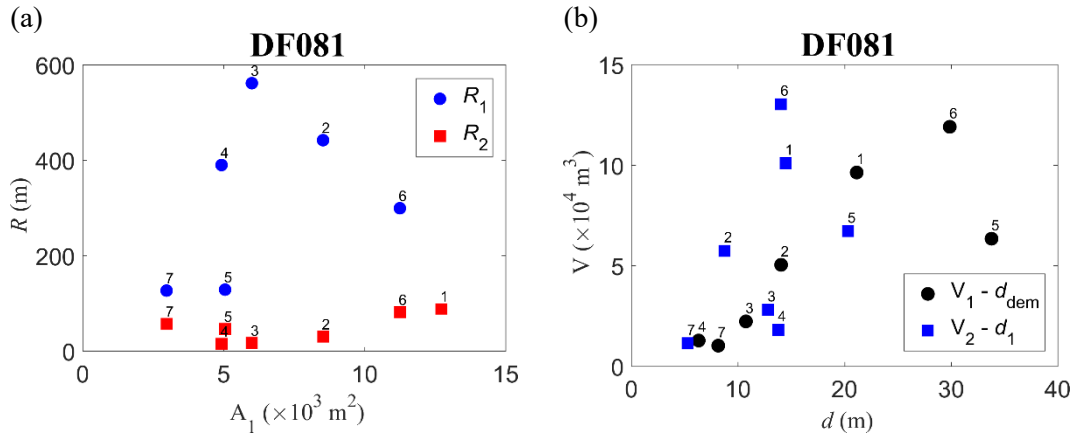


圖 5. 1　DF081：圖(a)為 R_1(軸向曲率半徑)、R_2(側向曲率半徑)、A_1 之比較圖；圖(b)為崩塌量體與曲面軸向最大深度(V_1- d_{dem} 以及 V_2- d_1)之比較圖

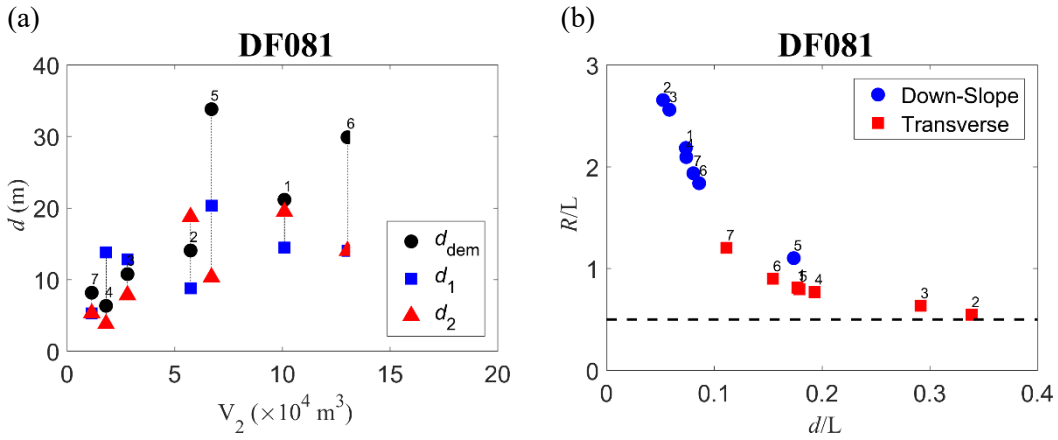


圖 5.2　DF081：圖(a)為崩塌體積與崩塌深度；圖(b)為曲面最大崩塌深度、軸長及曲率半徑之關係圖

第二節　土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪

延續第 3 章的成果，將潛勢溪流 DF054 龍蛟溪流域災前災後 DEM 所判釋出來的崩塌區域分成 5 個區塊(Area)，分別進行理想化曲面的運算。以體積誤差最小的理想化曲面前 10 組數據為參考數據，取其平均值作為討論幾何特性的基準。所得的各參數平均值羅列於表 5.2。

表 5.2　DF054 之 DEM 資料與破壞面參數表

參數 \ Area	1	1_L	2	3	4
A_{dem} [m^2]	52,800	113,700	49,400	13,000	12,300
A_1 [m^2]	35,300	105,800	23,500	8,500	9,500
V_{dem} [m^3]	272,622	719,753	91,001	68,854	32,331
V_1 [m^3]	227,180	591,090	55,058	63,068	31,735
V_2 [m^3]	273,205	721,519	91,795	69,016	32,964
r_v [%]	20.26	22.07	66.73	9.43	3.87

R_{r1} [m]	428.18	1867.62	401.18	818.21	1547.37
R_{r2} [m]	116.84	125.48	43.37	61.86	12.97
R_1 [m]	1,107.87	5,275.39	2,582.90	341.67	13,820.10
R_2 [m]	137.87	329.57	107.47	45.28	80.45
θ_{inc} [°]	31.94	27.97	22.17	39.04	24.51
θ [°]	32.97	28.98	22.40	39.09	21.53
d_{dem} [m]	25.20	25.20	15.90	17.23	9.47
d_1 [m]	11.58	11.25	7.60	10.36	0.83
d_2 [m]	41.58	41.25	4.27	20.36	0.83
L_1 [m]	292.66	644.03	380.73	147.18	291.60
L_2 [m]	196.34	319.08	56.21	73.66	22.65

由於真實破壞曲面並非平滑曲面，實際崩塌破壞面所定義的平均曲率半徑(R_{r1} 與 R_{r2})與理想破壞曲面的曲率半徑(R_1 與 R_2)之間的差異將顯示該破壞曲面的平滑程度，可發現此 DF054 區域的破壞面其平滑程度相當不理想，換句話說就是"非常崎嶇"。除了實際崩塌破壞面的平滑程度以外，探討本案運算所得之理想化曲面其各參數間的關聯性，分以下 4 項來討論：

(1) 軸向曲率半徑(R_1)與側向曲率半徑(R_2)相對應於崩塌面積(A_1)的關聯；

(2) 崩塌量體(V_1、V_2)與曲面軸向最大深度(d_{dem}、d_1)的關聯；

(3) 崩塌量體(V_2)與各定義之崩塌深度(d_{dem}、d_1、d_2)的關聯；

(4) 曲面最大崩塌深度(d_1、d_2)、軸長(L_1、L_2)及曲率半徑(R_1、R_2)之關聯。

圖 5. 3(a)為軸向曲率半徑(R_1)與側向曲率半徑(R_2)相對應於崩塌面積

(A1)的關係;圖 5.3(b)彙整崩塌量體(V1、V2)與曲面軸向最大深度(d_{dem}、d_1)的關係；圖 5.4(a)為崩塌量體(V2)與各定義之崩塌深度(d_{dem}、d_1、d_2)的關係圖；圖 5.4(b)則為曲面最大崩塌深度(d_1、d_2)、軸長(L1、L2)及曲率半徑(R_1、R_2)之關係圖。

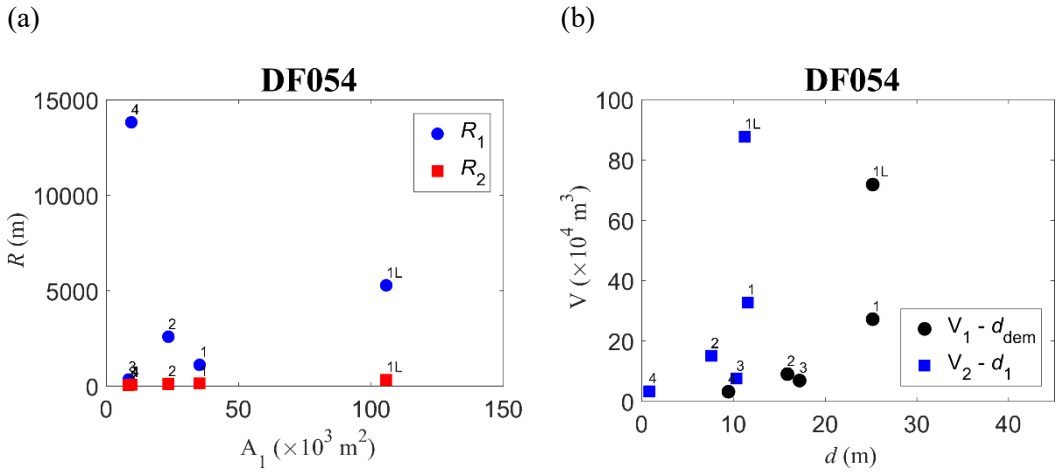


圖 5.3 DF054：圖(a)為 R_1(軸向曲率半徑)、R_2(側向曲率半徑)、A1 之關係；圖(b)為崩塌量體與曲面軸向最大深度(V1- d_{dem} 以及 V2- d_1)之比較圖

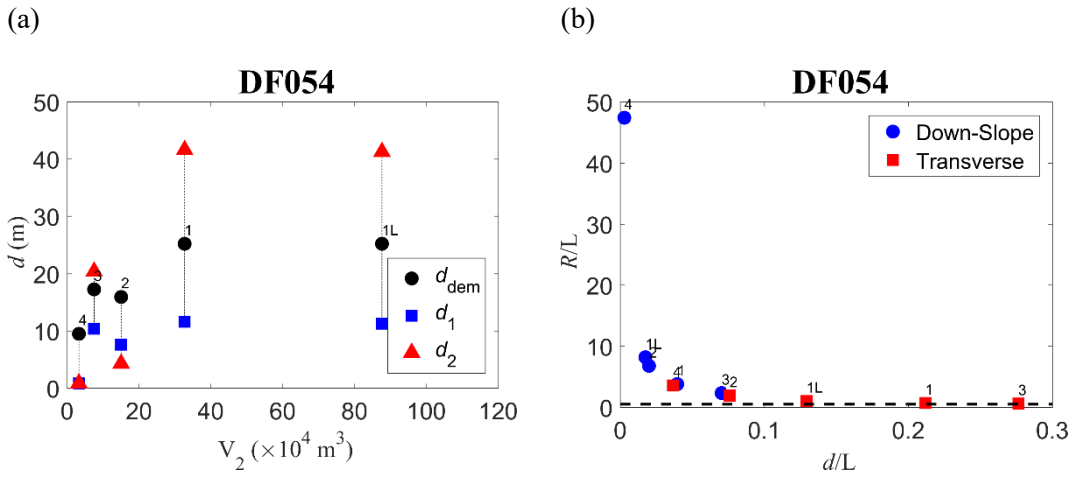


圖 5.4 DF054：圖(a)為崩塌量體與崩塌深度之關係；圖(b)為曲面最大崩塌深度、軸長及曲率半徑之關係

第三節　小林村大型崩塌事件

延續第 3 章的成果，將小林村大規模崩塌事件的 4 個崩塌區塊(Area)，分別進行理想化曲面的運算。以體積誤差最小的理想化曲面前 10 組數據為參考數據，取其平均值作為討論幾何特性的基準。所得的各參數平均值羅列於表 5.3。

表 5.3　小林村之 DEM 資料與破壞面參數表

Area / 參數	1	2	3	4
A_{dem} [m^2]	624,900	59,700	19,500	63,000
A_1 [m^2]	624,900	59,700	19,500	63,000
V_{dem} [m^3]	21,180,535	963,328	288,510	514,900
V_1 [m^3]	21,180,535	963,328	288,510	514,900
V_2 [m^3]	22,725,607	1,022,419	308,459	500,283
r_v [%]	7.29	6.13	6.91	-2.84
R_{r1} [m]	3,601.07	465.99	556.95	713.84
R_{r2} [m]	525.32	477.13	117.23	507.55
R_1 [m]	4,397.90	1,077.45	325.55	658.06
R_2 [m]	607.30	738.50	99.17	357.15
θ_{inc} [°]	20.50	17.01	24.66	29.08
θ [°]	22.57	17.48	21.39	33.21
d_{dem} [m]	80.74	44.88	30.87	25.00
d_1 [m]	68.25	31.66	15.33	41.00
d_2 [m]	88.25	1.66	15.33	21.00
L_1 [m]	1,483.73	505.04	190.61	419.16
L_2 [m]	630.53	96.35	104.24	239.48

由於實際崩塌破壞面所定義的平均曲率半徑(R_{r1} 與 R_{r2})與理想破壞曲面的曲率半徑(R_1 與 R_2)之間的差異將顯示該破壞曲面的平滑程度，可發現此小林 Area 2 區域的破壞面在軸向與側向軸方向其平滑程度均"非常崎嶇"。透過 Area 2 區域 L_1 與 L_2 的值也可了解其形狀非常狹長。除了實際崩塌破壞面的平滑程度以及幾何形狀以外，本案針對小林村案例運算所得之理想化曲面其各參數間的關聯性，分以下 4 項來討論：

(1) 軸向曲率半徑(R_1)與側向曲率半徑(R_2)相對應於崩塌面積(A_1)的關聯；

(2) 崩塌量體(V_1、V_2)與曲面軸向最大深度(d_{dem}、d_1)的關聯；

(3) 崩塌量體(V_2)與各定義之崩塌深度(d_{dem}、d_1、d_2)的關聯；

(4) 曲面最大崩塌深度(d_1、d_2)、軸長(L_1、L_2)及曲率半徑(R_1、R_2)之關聯。

圖 5. 5(a)為軸向曲率半徑(R_1)與側向曲率半徑(R_2)相對應於崩塌面積(A_1)的關係圖。圖 5. 5(b)彙整崩塌量體(V_1、V_2)與曲面軸向最大深度(d_{dem}、d_1)的關係。圖 5. 6(a)為崩塌量體(V_2)與各定義之崩塌深度(d_{dem}、d_1、d_2)的關係圖。圖 5. 6(b)為曲面最大崩塌深度(d_1、d_2)、軸長(L_1、L_2)及曲率半徑(R_1、R_2)之關係圖。

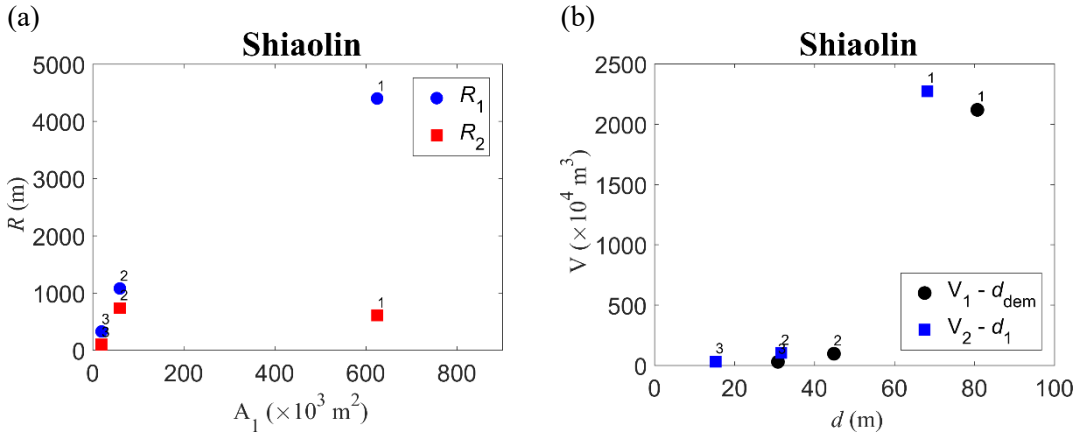


圖 5. 5　小林村案例：圖(a)為之 R_1(軸向曲率半徑)、R_2(側向曲率半徑)、A_1 之

比較圖；圖(a)為崩塌量體與曲面軸向最大深度(V_1- d_{dem} 以及 V_2- d_1)之關係圖

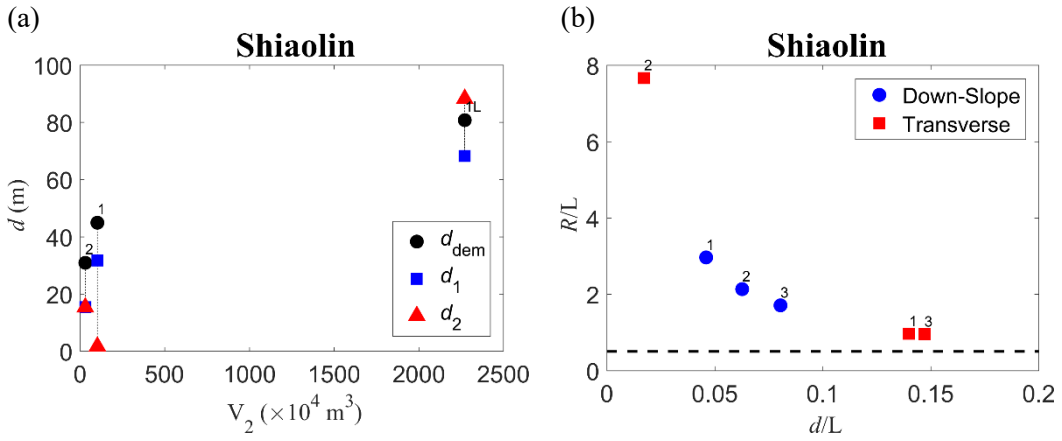


圖 5.6　小林村案例：圖(a)為崩塌體積與崩塌深度；圖(b)為曲面最大崩塌深度、軸長及曲率半徑之關係。

第四節　綜合討論

綜合以上 DF081、DF054 以及小林村 16 個崩塌案例，並羅列相關參數進行綜合整理。圖 5.7 中，綜合 15 個崩塌案例之軸向 R_1/L_1、d_1/L_1 關係圖。則圖 5.8 為綜合 15 個崩塌案例中之側向 R_2/L_2、d_2/L_2 關係圖。圖 5.9 與圖 5.10 為 R_1、R_2 與崩塌深度大於 0.5 m 所包含的崩塌面積(A_1)之比較圖。圖 5.11(左)為現地崩塌體積(V_{dem})與現地最大崩塌深度(d_{dem})之彙整。圖 5.11(右)為理想崩塌體積(V_2)與理想曲面軸向最大深度 d_1 之關係圖。圖 5.12 為理想崩塌體積(V_2)與 d_{dem}、d_1、d_2 之關係圖。

綜觀圖 5.7 與圖 5.8 可發現在 DF081、DF054 以及小林村三個不同流域 15 個崩塌案例中，R/L、d/L 在軸向與側向方面均呈現非常一致性的關聯趨勢，其餘的幾何特性則尚未發現其他相互關聯的趨勢(圖 5.9 至圖 5.12)。

在軸向方面，經過回歸分析 R/L 與 d/L 的相互關聯性可表示為

$$y = 5.92e^{-14.02x} + 67.03e^{-166.77x} \quad \text{，其中 } x = {d_1}/{L_1},\quad y = {R_1}/{L_1} \text{。}$$

若以對數來進行回歸分析，其關係式則為

$$y = -0.94x - 0.75 \text{ ，其中 } x = \ln\left({d_1}/{L_1}\right),\quad y = \ln\left({R_1}/{L_1}\right) \text{。}$$

在側向軸方面，經過回歸分析 R/L 與 d/L 的相互關聯性可表示為

$$y = 2.11e^{-4.97x} + 15.43e^{-57.76x} \text{ ，其中 } x = {d_2}/{L_2},\quad y = {R_2}/{L_2} \text{。}$$

以對數來進行回歸分析，其關係式可為

$$y = -0.89x - 0.74 \text{ ，其中 } x = \ln\left({d_2}/{L_2}\right),\quad y = \ln\left({R_2}/{L_2}\right) \text{。}$$

若上述的關係式能普遍採用，往後軸長(L)、曲率半徑(R)以及崩塌深度(d)三者中只要 2 者已知便可求出第 3 個變數值。能夠大幅簡化對於理想破壞曲面估算的複雜度。

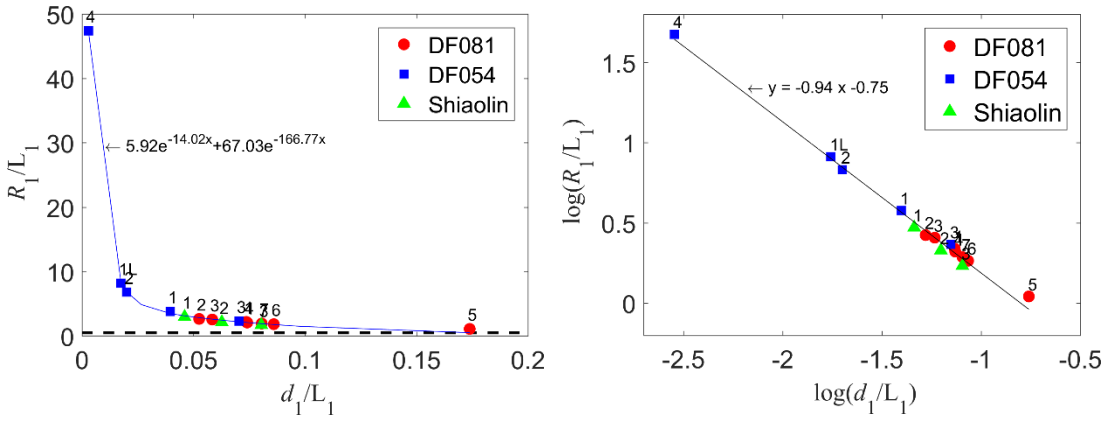


圖 5. 7　綜合 15 個 Case 之 R_1、d_1 關係圖；左：線性圖；右：對數圖

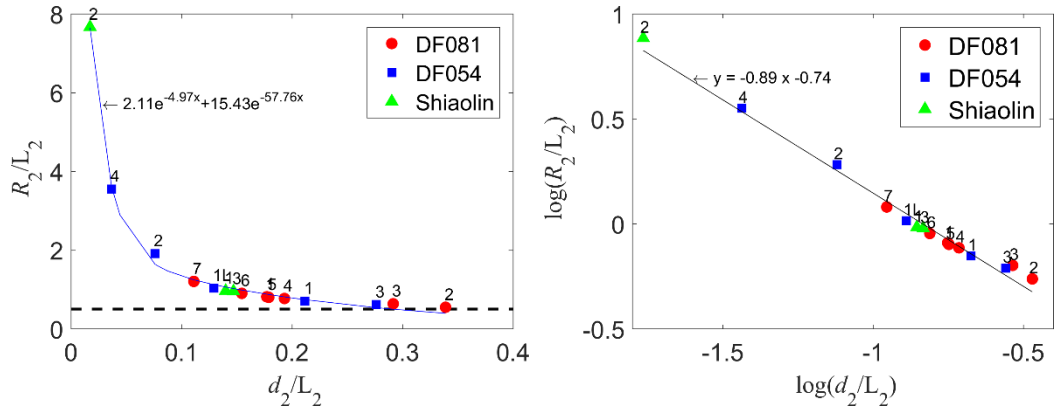


圖 5. 8　綜合 15 個 Case 之 R_2、d_2 之關係圖；左：線性圖；右：對數圖

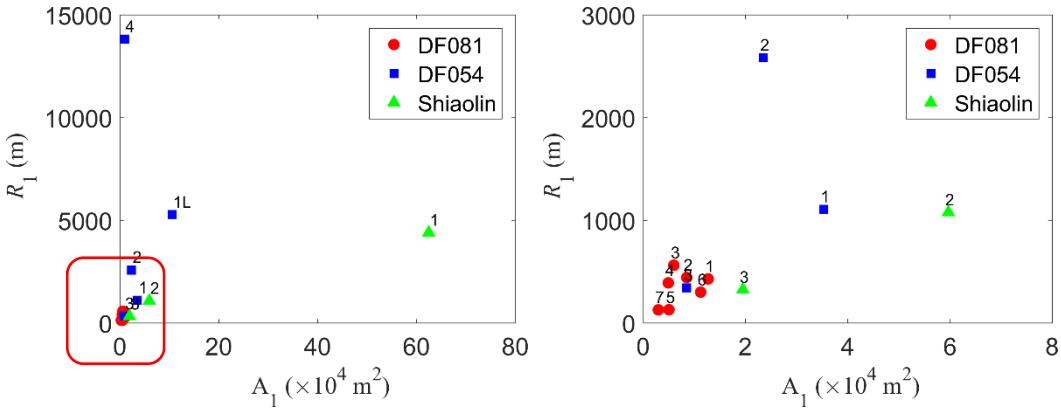


圖 5. 9　綜合 15 個 Case 之 R_1、A_1 之比較圖；右圖為部分放大圖

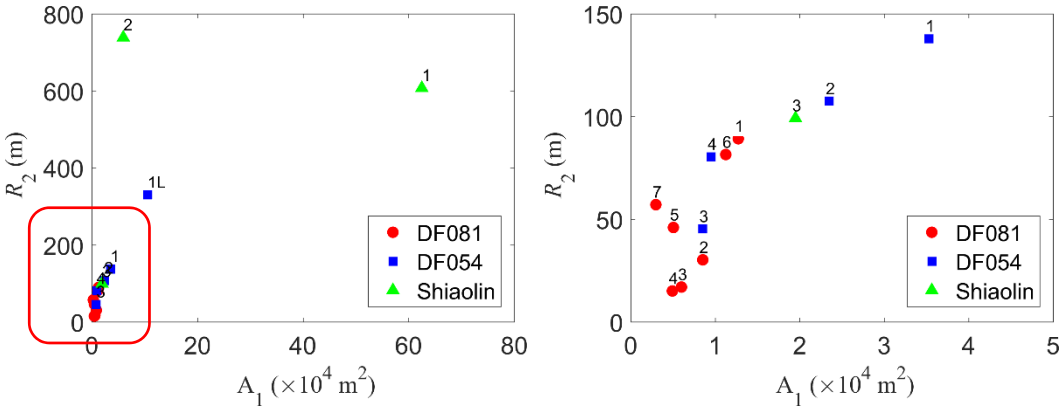


圖 5. 10　綜合 15 個 Case 之 R_2、A_1 之比較圖；右圖為部分放大圖

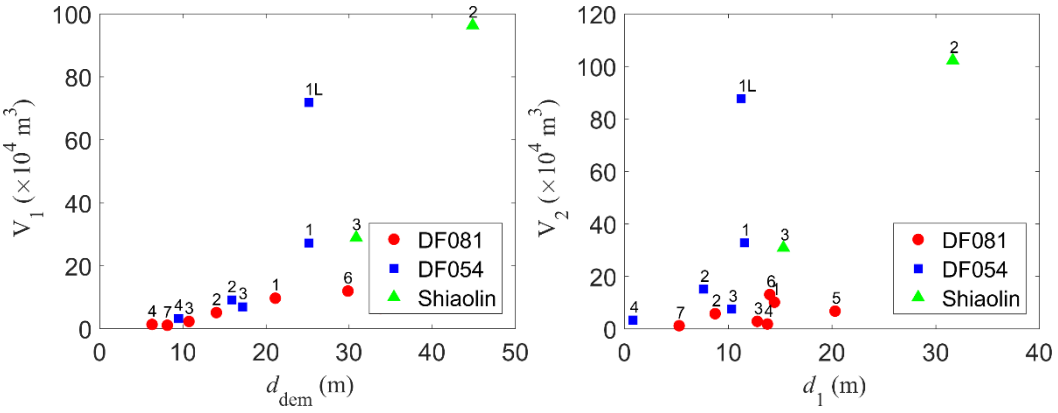


圖 5. 11　左：現地崩塌體積與現地最大崩塌深度之關係；右：理想崩塌體積 V_2 與曲面最大深度 d_1 之關係圖

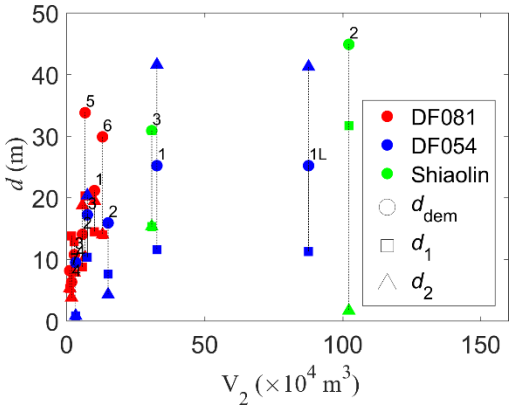


圖 5. 12　理想崩塌體積 V_2 與 d_{dem}、d_1、d_2 之關係圖

第六章　結論

本計畫提出一簡易迅速初步評估崩塌破壞曲面的方法，在崩塌範圍圈選源成的前提，在給定一特定深度後便可估算出一理想破壞曲面。透過”土石流潛勢溪流區高市 DF081 萬山部落”、”土石流潛勢溪流嘉縣 DF054 龍蛟溪”以及”小林村大規模崩塌事件”等三個區域 16 個崩塌區塊(其中 DF081 萬山部落 7 個、DF054 龍蛟溪 5 個以及小林村大規模崩塌區 4 個)的分析(總共 16 個區塊×100 組線條組合=1,600 組資料數據)，在剔除崩塌深度小於 0.5 m 區域的前提下，可得到崩塌體積誤差不大的結果。現階段此結果與地質或是地形的關聯尚待後續的研究禁行分析探討。

本案也已完成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(DFMfGT)的整合，並用來評估探討採用理想化曲面取代已發生崩塌破壞之曲面所造成後續土砂的運移行為。對於較小規模的崩塌(DF081、DF054 區域)，在主要崩塌區域由理想曲面所取代的前提下，其模擬的結果不論是流體深度、土石濃度分布或是速度場的分布，其與採用災前災後數位地形地圖所運算的結果差異並不大。對於大尺度的小林村的崩塌案例中，不僅在流體深度、土石濃度分布或是速度場的分布差異不大，兩者土砂流動的範圍也相當。雖然理想化曲面相較於實際的崩塌曲面平滑甚多，上述結果顯示利用本案所提出計算理想破壞曲面之方法，對於評估崩塌後土沙的運移行為具備一定的參考價值。

在選定的三個不同流域 15 個崩塌案例進行理想曲面的估算，總共產生數千組資料數據。雖然這些崩塌案例涵蓋數個不同的地質條件(地質、岩性 等)，於眾多數據中依舊約略可發現一些關聯規律性，例如 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

本案估算所得的理想破壞曲面其幾何特性有其一致的關聯性。未來若能夠針對此關聯性進行更多案例的驗證探討，確保該關聯性的可用性與可靠度，將可大幅簡化計算破壞曲面或是估算崩塌量體的流程。此外，搭配電腦模擬模式來探討不同情境的崩塌發生後的土沙運移行為，將可以用來分析評估可能發生的災害狀況，精進現有災害管理與預警技術。

表 6.1　本計畫之工作進度與完成度

時間 / 工作項目	107 年										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
崩塌破壞曲面估算運算方法											
數值模式土沙運移行為探討											
崩塌破壞曲面幾何特性探討											
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 107 年 02 月 09 日　至　107 年 12 月 31 日　止

- 期初簡報時須完成工作：(一) 提出理想坡面崩塌曲面呈現方法與幾何特性。(二) 規劃擬探討坡面崩塌破壞曲面的幾何特性的區域。
- 期中簡報時須完成工作：(一) 理想坡面崩塌曲面與現地調查監測資料（如 崩塌面積範圍、崩塌深度)之整合。(二) 山崩土石流數值模式與理想坡面崩塌曲面之整合。
- 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//realtime/station.aspx)
3. X. Meng and Y. Wang, “Modelling and numerical simulation of two-phase debris flows.” Acta Geotechnica, 11(5), 1027-1045, 2016.
4. 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.
5. P. Grinfeld, “Introduction to Tensor Analysis and the Calculus of Moving Surfaces.” Springer Verlag, ISBN: 1-4614-7866-9, 2014.
6. G. Groche, V. Ziegler, D. Ziegler and E. Zeidler, “Teubner-Taschenbuch der Mathematik, Teil II.” Teubner, Stuttgart, 1995.
7. 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.
8. Kuo, C. Y., Tai, Y. C., Chen, C. C., Chang, K. J., Siau, A. Y., Dong, J. J., ... & Lee, C. T. (2011). “The landslide stage of the Hsiaolin catastrophe: simulation and validation.” Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 116(F4).
9. 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.

10. 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. DOI:10.1080/03091929.2011.648630, 2012.

11. 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, MS#: 2018JF004671, minor revision).

附錄

附錄一　期初審查委員意見回覆及辦理情形

SWCB(103.07 月版)

行政院農業委員會水土保持局
「107 年度創新研究計畫期初審查會議」(第一場)案
期初審查會議紀錄

壹、時間：107 年 5 月 17 日(星期四)上午 9 時 30 分

貳、地點：本局第一會議室

參、主持人：林簡任正工程司代　　記錄：高百毅

肆、出(列)席單位人員：詳簽到簿。

伍、受委託單位簡報：略。

陸、審查意見：如后附件。

柒、結論：

一、本場次共審查「重大土砂災害集水區工程擴增實境管理系統建置」、「溪流防砂設施美學設計原則」、「智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為」、「無人機載具灑播植生粒劑之研究」、「因應氣候變遷下野溪多樣化環境設計指標開發」及「保育治理工程生態檢核培訓制度研究」等 6 案，各計畫執行單位所提期初工作執行計畫書，經審查原則可行，並請參考與會人員相關意見辦理，並於期中報告書回覆辦理情形。

二、請各執行單位於 107 年 8 月 7 日(二)前以公文提送期中報告 10 份，俾利後續審查作業推展。

捌、臨時動議：無

玖、散會：下午 12 時 40 分

期初審查會議紀錄	
委員意見	**回覆及辦理情形**
1. 崩塌破壞曲面既以破壞，何須在評估之?必要性何在，宜強調。	謝謝委員意見。本案重點在發展一簡易迅速初步評估崩塌破壞曲面的方法，其得以整合現有**已知**之**可能**崩塌面積(範圍)以及**可能**的崩塌深度，在短時間內初步評估**尚未發生**(或是剛發生，只有衛星影像或是航照而尚未完成數位地形圖時)的崩塌破壞曲面所在，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。 對於探討已破壞曲面的目的有二：第一個目的在於驗證此方法之可行性；第二個目的則是透過此方法可藉由找到具代表性的理想破壞曲面幾何特性，藉以提升評估破壞曲面的可靠度。
2. 數值土砂運移模擬係以何種方式為之?其有效尺度多大	謝謝委員意見。本案採用固體-液體兩相流模式搭配現地地形座標系統之土石流理論(Tai et al. 2018)來模擬運算土砂的運移行為。基本上其所採用的參數須因應模擬的土砂體積與規模的大小而有所調整。依目前模擬小林村崩塌事件的成果來看，只要合理選擇參數值，土砂規模在數公里的範圍內是可勝任的。

3.破壞曲面能否呈現地質條件之差異?其主要影響地形發育之遷移點?	謝謝委員意見。理論上地質條件必定會影響崩塌深度，為簡化問題的複雜度，現階段我們的理想化破壞曲面乃依據現地條件所判釋的可能崩塌範圍以及崩塌深度。這兩個資料數據(非本計畫範圍，需整合其他計畫取得相關資料數據)必然已經將地質條件列入考量。此外，本計畫的另一重點在於短時間內進行初步評估取得相關量體的數據，重點不在非常精準，因此我們允許一定程度的誤差。
4.理想化曲面在理論上，仍有檢討的空間。理論上曲面可以是圓弧型式或平面型等不同破壞機制，同時受到地質材料特性及地層結構而不同。	謝謝委員意見。所以我們透過檢視既有的破壞曲面來驗證方法的可行性。至於地質材料特性及地層結構，則期待在判釋可能崩塌範圍以及崩塌深度的階段時列入考量，並不在本計畫考量範圍。
5.破壞深度不易為已知。若有災害地圖，疊和前後期地圖可將土方量精確算出。	謝謝委員意見。因為尚未發生的破壞深度不易事先得知，所以破壞曲面的預測也更為挑戰。也因此更加顯示本方法的特點，亦即本方法可以針對可能的崩塌範圍與深度進行不同情境的預先探討。 對於已發生崩塌之區域，如本案

	進行驗證探討的區域，我們參考的土方量便是依委員的建議疊和前後期地圖將土方量算出。
6.已發展完成之估算方法應儘量加強更多的驗證。	謝謝委員意見，遵照辦理。我們已增加探討另一個大尺度的案例：小林村深層崩塌的案例。
7.坡面理想崩塌曲面建立後，同位置未來不同暴雨以致崩塌規模不同時，以建立之崩塌曲面如何應用或延續。	謝謝委員意見。本案之方法在於崩塌範圍與深度給定之後便可估算出可能的崩塌曲面，而非判定崩塌範圍與深度。因此不同程度的暴雨所引致崩塌規模是本方法的輸入條件，而非輸出結果。
8.崩塌地實例驗證，建議增加立地環境與崩塌機制之說明。崩積土之暴雨型崩塌是否適用?	謝謝委員意見。如同回覆 7，本案之方法在於崩塌範圍與深度給定之後進行估算可能的崩塌區面，並未將崩塌機制納入考慮。對於崩積土之暴雨型崩塌則取決於所判定的崩塌規模與深度，其為本方法的輸入條件而非輸出結果。我們也期待能有案例來進行本方法的驗證與探討。
9.現地地形(特別是崩塌頭部)幾何特性做為崩塌量體估算依據，有那些限制?崩塌體上方需為硬質、軟質岩面?	如同第 3 章第一節(Page 3-4)所述：我們檢視災前 DEM 分別與災後 DEM 發現破壞面的邊緣多為平緩，是諸多誤差的來源，且會造成曲率低估的情況。經推估

	其可能原因在於破壞發生後降雨所造成的侵蝕。經過多次反覆檢測，我們發現若將崩塌邊緣深度小於 0.5 m 之崩塌範圍剃除，運算所得之理想破壞曲面趨於一致。
10. 為推估理想化曲面，需要現地調查與及時監測資料，其資料包含哪些?未取得資料之區域，可否推估?	本案之方法在於崩塌範圍與深度給定之後便可估算出可能的崩塌曲面。崩塌範圍須與 GIS 系統 DEM 整合，深度則須提供位置座標，以利曲面的估算。 至於未取的資料之區域，需確認是否能夠於 DEM 上標繪出崩塌範圍(座標)以及所預估崩塌深度的所在座標，否則無法進行推估。
11. 圖 2.5，比較理想化曲面與實際破壞曲面顯示相當吻合，請問是否有比較其他案例?	遵照辦理並已執行。請參閱期中報告書第 3 章，總共探討 15 個崩塌案例。

附錄二　期中審查委員意見回覆及辦理情形

檔　　號：
保存年限：

行政院農業委員會水土保持局　函

地址：54044南投市中興新村光華路6號
承辦人：高百毅
電話：049-2394300分機7215
傳真：049-2394307
電子信箱：baiyi96@mail.swcb.gov.tw

受文者：財團法人成大研究發展基金會(戴義欽老師)

發文日期：中華民國107年8月31日
發文字號：水保治字第1071854578E號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：如主旨(審查意見.odt)

主旨：檢送107年創新研究計畫「智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為」期中審查意見1份，請查照。

說明：

一、請貴會參照審查意見(詳附件)辦理。

二、貴會所提期中報告書，經審查通過，同意撥付第二期款。如前期已撥經費已執行達60%以上，請檢送會計報告及製據函送本局辦理撥款。

正本：財團法人成大研究發展基金會(戴義欽老師)
副本：本局保育治理組 2018/09/03 08:06:56

請　惠辦
日期：107. 9. 03

成大研發基金會收文
1071031800

期中審查會議紀錄	
委員意見	**回覆及辦理情形**
1. 本案提出一試誤的方法，推估最佳化可能破壞曲面，並進一步模擬具破壞後的行為，合理可行，可提供做為防災應變之依據。建議應特別注意地形、地質之變異，影響破壞的可能形式，非理論數學解可規範。	謝謝委員意見，將收集探討區域的相關地質資料，依據計畫成果針對誤差較大的區域進行進一步的分析，探討地形、地質的影響。
2. 邊坡崩塌為個別行為，個案與通案可能差別很大，是否可歸納成經驗式，需要很多的累積，設定最大深度的曲面較偏向弧形滑動，一般用來描述均質材料可能的行為，建議在擴大驗証。	謝謝委員意見！額外考慮將小林村對岸坡面上的蝴蝶狀崩塌區塊列入娉估驗證。此外，也嘗試應用到屏東來義村東部落對岸的大型深層崩塌潛勢區。未來工作將持續分析其他地區之崩塌案例，並將各崩塌區塊之地質列入考量。
3. 報告書建議避免第一人稱，可用第三人稱較符合慣例。在期中報告中應有已完成事項及後續工作重點一章，以增加了解本案進行概況。	遵照辦理，謝謝委員意見。
4. P.5-3 等計算結果的圖表等應有近一步評定，如此的結果究竟是好、壞，可否接受，看不出其代表的意義，如崩塌體積與深度，似乎沒有相關性，分析作圖的目的為何，應有進一步的說	謝謝委員意見！將增列計畫成果之評定。在本案討論的案例中，R/L、d/L 在軸向與側向方面均呈現非常一致性的關聯趨勢，其餘的幾何特性則尚未發現其他相互關聯的趨勢。

明，建議期末應補充完整。	
5. 第三章坡面理想崩塌曲面計算，有關理想破壞曲面與災後 DEM 破壞面之比較圖，是否可以量化其相符程度，並歸納理想曲面適用之條件?	謝謝委員意見!差異程度將以估算量體百分比的形式羅列於表中。此外，本計畫所提出之理想曲面對於淺層崩塌(小於 0.5 m)佔整體崩塌面積較高的區塊、或是形狀崎嶇零碎的崩塌區塊較不適用。
6. 請補充計畫工作進度與完成度，以了解計畫執行狀況。	謝謝委員意見，遵照辦理。

附錄三　期末審查意見回覆及辦理情形

行政院農業委員會水土保持局

107年度創新研究計畫期末聯合審查會議紀錄

壹、時間：107年12月4日（星期二）上午9時15分

貳、地點：公務人力發展學院(南投院區）文教大樓6、7樓

參、主持人：林副局長長立(A場)、王副局長晉倫(B場)、連主任秘書榮吉(C場)、柯總工程司燦堂(D場)

肆、出(列)席單位人員：詳簽到簿　　紀錄:陳國威

伍、計畫主持人簡報：略

陸、評核結果：如后附件。

柒、結論：

一、通過評核之計畫，受補助單位請於107年12月20日(星期四)前繳交成果報告(5冊)及會計報告(非屬公私立學校之民間團體，尚需檢附原始憑證)，俾辦理結案作業。

二、計畫結束後有賸餘者，除實施校務基金之學校外，一併辦理繳還，繳還帳戶說明如下：

(一)計畫編號為107保發-11.1-保-01-06-001(X)者：

1、金融機關：中央銀行國庫局(代號：0000022)。

2、戶名：行政院農業委員會水土保持局。

3、帳號：24510302129004。

(二)計畫編號107農再-1.1.1-1.1-保-001(X)者：

1、金融機關：中央銀行國庫局(代號：0000022)。

2、戶名：農村再生基金-水土保持局。

3、帳號：24519201016011。

捌、臨時動議:無

玖、玖:散會：下午4時5分

期末審查會議紀錄	
審查意見	**回覆及辦理情形**
1. 崩塌土砂量體估算只有高度的不確定性，是否考慮以機率的型式表示最終預算的結果?	謝謝委員意見！現階段均採用歷史崩塌案例作驗證，將於後續計畫列入考量。
2. 模擬軟體所需之參數為何?線上模擬的平台未來可否由使用者直接來應用?	如內文所述，模擬軟體數值模式僅需 5 個參數(土砂比重、固體摩擦角、交互作用力係數、液相阻尼係數、等效黏滯係數)。視需求，可於未來計畫中規畫設置伺服器提供相關網頁服務，由使用者直接來應用。
3. 除推算崩塌量體外，可否結合其他誘發崩塌之因子(如降雨量、地形、水質等)，進一步達到崩塌預警的功能。	謝謝委員意見！未來將逐步將所述的因子列入考量。
4. 所採用之崩塌案例是否包含舊有崩塌擴大部分?或僅採取新生崩塌?再者，舊有崩塌擴大部分，係呈現該崩塌區為分區分次崩落狀況，此時崩塌理想曲面會如何繪製?	本案所採用之崩塌案例為 2009 莫拉克風災前後期地形所產製之崩塌區塊，僅由前後期地形判識，無法確認是否為新生崩塌地。本案之方法應無法區分分區分次崩落之狀況。
5. 崩塌估算方法後續如應用於未發生崩塌之潛勢區?是否有以歷史崩塌交互驗證?請說明	謝謝委員意見！本案之方法期盼未來能應用於未發生崩塌之潛勢區，現階段均採用歷史崩塌案例作驗證，僅在來義地區潛勢區的部分(第五章第四節)作初步評估。
6. 計算崩塌量是否需要更多的資料進行資料庫運算，因此建議後續進行建立資料庫系統俾利運	謝謝委員意見！將於後續計畫進行。

算與利用。	
7. 如果造成崩塌的因子不同，是否會影響結果。	本案之重點在於短時間內進行初步評估崩塌破壞曲面以估算崩塌量體。先階段尚未納入考量。
8. 理想破壞曲面，所律定之參數有哪些，可否有效應用於大規模崩塌滑動土砂量之推估	估算理想曲面，需要的參數為： ● 所在的數位地形地圖 DEM ● 破壞曲面的主軸與側向軸所在的位置座標 ● 深度所在位置 本案所採用之崩塌案例其中一例為小林村崩塌事件，所以可有效應用於大規模崩塌土砂量之推估。但是緩慢滑動之滑動土砂量尚未在本方法的考量之內。
9. 16 個崩塌案例除考量地質、地質、岩性是否尚考量地下水位及孔隙水壓。	本案之重點在於短時間內進行初步評估崩塌破壞曲面以估算崩塌量體。因地下水位及孔隙水壓之資料未必能夠及時取得，為能夠避免因為無上述資料而無法進行估算，此方法現階段並未考量地下水位及孔隙水壓。
10. 對於多次崩塌體發生的先後關係，是否有列入計算。	本案之方法並未考量多次崩塌之情形，均以一次性崩塌進行評估。
11. 適用於何種崩塌型態應加以說明。	感謝提醒!本案現階段考量的 16 個崩塌案例均為 2009 莫拉克風災之案例，後續將擴大收集其他時間點或是他國之案例進行探討。
12. 理想破壞曲面由一定深度值後圈化，該一定深度律定為何。	本案現階段所採用之方法必須由其他資料判估崩塌深度始能進行。

附錄四　理想曲面組合運算結果資料

崩塌區塊(Area 1)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF081)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	4.23	37.47	479.41	89.39
2	4.47	37.86	438.12	89.09
3	4.56	37.63	456.86	89.39
4	4.57	38.06	422.16	92.01
5	4.58	38.31	418.07	92.01
6	4.96	37.75	434.05	89.39
7	5.24	38.27	409.73	89.09
8	5.31	38.44	403.22	89.09
9	5.33	38.21	419.03	82.86
10	5.35	38.21	405.57	89.39
平均值	4.86	38.02	428.62	89.17

崩塌區塊(Area 2)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF081)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	4.67	23.63	396.62	29.90
2	5.39	24.65	446.15	29.90
3	6.66	27.05	471.78	29.46
4	7.42	24.11	401.00	29.90
5	4.50	22.68	413.41	35.09
6	5.58	28.37	447.02	24.08
7	7.97	28.49	469.05	28.95
8	20.08	22.28	471.64	32.08
9	21.85	25.61	499.54	24.35
10	23.79	21.45	402.94	38.42
平均值	13.79	24.83	441.91	30.21

崩塌區塊(Area 3)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF081)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	20.63	32.19	592.27	15.89
2	23.04	31.76	523.43	19.41
3	24.14	32.73	517.63	16.86
4	24.60	31.89	565.41	19.41
5	24.82	32.37	641.19	16.86
6	25.70	32.02	567.86	16.30
7	27.89	31.83	543.18	12.34
8	29.03	32.34	472.14	19.82
9	29.51	31.87	547.18	15.89
10	29.97	32.54	643.78	16.86
平均值	25.93	32.15	561.41	16.96

崩塌區塊(Area 4)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF081)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	32.43	34.84	394.67	16.75
2	33.82	34.60	371.49	16.75
3	36.09	36.43	375.51	17.08
4	36.62	34.25	352.81	16.75
5	37.43	36.38	384.31	18.82
6	45.37	35.03	412.34	16.75
7	46.64	34.45	403.89	12.00
8	48.71	35.01	418.16	12.00
9	49.65	34.08	357.15	16.75
10	49.97	35.17	428.02	6.89
平均值	41.67	35.02	389.83	15.05

崩塌區塊(Area 5)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF081)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	5.31	47.92	134.61	46.98
2	5.54	46.82	124.13	46.98
3	5.75	47.37	135.68	43.14
4	5.78	47.02	137.54	46.98
5	5.80	44.65	124.32	46.75
6	5.82	45.55	127.63	46.98
7	5.94	44.59	137.16	43.14
8	6.05	46.01	132.86	43.14
9	6.17	46.81	114.91	46.98
10	6.18	45.81	117.90	48.58
平均值	5.84	46.26	128.67	45.96

崩塌區塊(Area 6)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF081)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	7.99	36.41	279.43	106.82
2	8.89	36.43	313.93	73.02
3	9.10	36.06	320.08	73.02
4	9.26	35.39	335.41	72.08
5	9.49	37.02	272.83	82.45
6	9.71	36.73	276.34	106.82
7	9.83	36.64	286.15	75.40
8	9.90	34.76	303.39	77.77
9	9.99	34.97	323.81	72.08
10	10.40	37.09	281.93	75.40
平均值	9.46	36.15	299.33	81.49

崩塌區塊(Area 7)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF081)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	5.87	35.74	140.54	55.74
2	8.90	36.77	135.70	60.21
3	9.01	34.40	158.18	55.74
4	12.00	36.00	124.00	57.10
5	12.00	33.95	131.82	56.45
6	13.37	34.99	119.54	55.87
7	14.07	35.87	110.07	60.36
8	14.58	34.80	110.15	56.45
9	14.75	35.71	113.83	56.45
10	14.83	32.66	123.28	56.45
平均值	11.94	35.09	126.71	57.08

崩塌區塊(Area 1)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF054)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	9.00	32.63	1081.91	142.66
2	12.98	32.96	1071.97	123.09
3	14.20	32.62	1134.02	150.48
4	17.18	33.05	1047.82	120.79
5	19.66	32.78	1196.34	167.85
6	21.02	33.62	1029.35	120.08
7	24.82	33.08	1157.36	122.29
8	26.19	33.92	1011.55	120.08
9	28.76	33.00	1121.21	134.79
10	28.78	32.07	1227.16	176.61
平均值	20.26	32.97	1107.87	137.87

崩塌區塊(Area 1_L)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF054)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	20.13	29.02	5,381.89	323.55
2	20.61	28.11	5,461.86	323.57
3	20.80	29.09	5360.75	320.90
4	21.48	29.20	5,042.53	342.67
5	21.95	28.97	5,159.34	321.39
6	22.69	29.27	5,021.42	342.67
7	22.87	29.12	4,999.11	342.67
8	23.31	28.66	5,220.89	336.44
9	23.41	29.23	5,543.57	320.90
10	23.41	29.17	5,562.57	320.90
平均值	22.07	28.98	5,275.39	329.57

崩塌區塊(Area 2)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF054)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	21.98	22.02	2,606.62	259.71
2	54.75	22.67	2,586.81	87.78
3	59.31	22.45	2,564.11	87.78
4	68.99	21.86	2,721.62	249.60
5	70.87	22.31	2,549.84	57.87
6	72.79	22.04	2,688.34	52.13
7	76.18	22.31	2,479.42	52.13
8	78.48	22.84	2,611.30	87.78
9	78.88	22.86	2,435.78	52.13
10	85.03	22.64	2,585.16	87.78
平均值	66.73	22.40	2,582.90	107.47

崩塌區塊(Area 3)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF054)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	2.21	38.50	318.69	54.19
2	3.35	39.22	380.22	43.22
3	5.68	39.57	325.37	41.98
4	10.35	39.48	392.33	33.02
5	10.48	37.63	319.83	54.19
6	11.38	41.40	281.23	55.45
7	11.67	39.46	331.74	32.92
8	11.94	39.34	382.15	43.22
9	13.62	38.49	318.61	47.27
10	13.63	37.83	366.56	47.34
平均值	9.43	39.09	341.67	45.28

崩塌區塊(Area 4)崩塌體積差異最小之前十個組合 (DF054)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	1.97	21.61	15,611.96	79.67
2	2.78	21.55	12,371.47	75.79
3	3.36	21.22	14,465.39	84.26
4	3.61	21.95	13,438.67	75.79
5	4.15	21.34	11,405.59	79.67
6	4.27	21.57	15,878.25	79.67
7	4.40	21.16	16,804.21	84.26
8	4.58	21.36	12,846.06	86.00
9	4.70	21.82	11,765.51	79.67
10	4.92	21.70	13,613.85	79.67
平均值	3.87	21.53	13,820.10	80.45

崩塌區塊(Area 1)崩塌體積差異最小之前十個組合 (小林村案例)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	7.04	22.66	4476.95	605.86
2	7.12	22.55	4391.84	602.91
3	7.16	22.65	4401.31	620.48
4	7.20	22.73	4420.06	602.88
5	7.22	22.46	4310.65	602.81
6	7.30	22.58	4458.16	605.86
7	7.34	22.51	4377.47	620.48
8	7.40	22.46	4372.87	602.91
9	7.55	22.44	4434.27	602.91
10	7.63	22.61	4335.42	605.86
平均值	7.29	22.57	4397.90	607.30

崩塌區塊(Area 2)崩塌體積差異最小之前十個組合 (小林村案例)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	5.09	19.40	851.01	798.91
2	5.82	15.00	1,330.03	624.25
3	6.07	15.56	1,358.73	676.24
4	6.12	16.77	1,110.06	783.47
5	6.20	18.66	929.65	676.24
6	6.27	19.28	886.20	680.17
7	6.33	16.48	1,147.61	798.91
8	6.35	17.99	1,047.61	822.74
9	6.52	19.49	927.76	725.19
10	6.58	16.19	1,185.88	798.91
平均值	6.13	17.48	1,077.45	738.50

崩塌區塊(Area 3)崩塌體積差異最小之前十個組合 (小林村案例)

	r_v [%]	θ [°]	R_1 [m]	R_2 [m]
1	6.00	21.38	335.31	108.69
2	6.13	22.07	328.77	104.22
3	6.24	20.67	338.71	86.60
4	6.42	20.35	343.55	86.60
5	6.54	19.89	315.14	104.22
6	6.76	22.29	321.02	113.86
7	6.99	20.53	309.96	86.60
8	7.54	23.50	345.38	122.41
9	8.16	21.48	324.86	89.27
10	8.36	21.70	292.80	89.27
平均值	6.91	21.39	325.55	99.17

附錄五　計畫成果投稿研討會

會議名稱：中華民國力學學會年會暨第 42 屆全國力學會議

（Conference on Theoretical and Applied Mechanics, CTAM 2018）

會議時間：11/23 (五) ~ 11/24 (六)

會議地點：國立臺北科技大學 宏裕科技大樓

會議介紹：

中華民國力學全國力學會議以促進力學之學術研究及應用為宗旨，自民國 66 年成立開始，至今已將是第 42 屆。會議主題包含地震工程、離岸風機、智慧及複合材料、能源管理、智慧車輛、結構健康監測、積層製造與 3D 列印、人工智慧及應用等，並辦理力學專題講座、論壇、學生論文競賽、口頭論文報告、壁報展示及競賽、廠商參展、晚宴等活動，期望能提供全國力學之交流平台，藉此分享研究成果，相互切磋觀摩，以達相輔相成之效。

本計畫之成果屬於此會議之天然災害防治主題，透過於會議中分享本計畫對於土石流之崩塌破壞面評估方法並互相參考，聽取各方專家的建議以精進本計畫提出之方法，若有地質工程之專家可以與我們一同討論或是給予具價值之建議，提供以地質結構為基礎來適當評估崩塌深度之方式，對於本計畫將會有非常大的助益。

本計畫共投稿論文兩篇，第一篇為標題為“以理想曲面快速評估崩塌破壞曲面之研究”，第二篇標題則為“兩相土石流動態模擬數值模式”，其中第一篇獲得海報論文佳作。以下分別為該兩篇論文全文。

以理想曲面快速評估崩塌破壞曲面之研究

李坤錠[1*]、戴義欽[1]、蘇郁文[2]

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

[2] 國立成功大學水土保持生態工程研究中心

*通訊作者 E-mail: solomondevil2014@gmail.com

水保局創新研究計畫編號：107 保發-11.1-保-01-06-001(12)

摘要

本研究主要發展一簡易迅速初步評估崩塌破壞曲面的方法，其得以整合現有現地調查與即時監測所得之資料以及經驗法與解析法所提供之評估，在短時間內初步估算崩塌破壞曲面所在。並可進一步估算土砂崩塌量體，以達到減災與土砂管理之目的。

我們藉由理想破壞曲面來近似評估崩塌破壞曲面，透過描述曲面所需參數來量化崩塌破壞曲面的幾何特性並探討其參數的關聯性。我們也選定一集水區來分析崩塌破壞曲面之幾何特性，驗證此方法的可靠度。

關鍵詞：崩塌破壞曲面、幾何特性。

1. 前言

因地球暖化導致全球氣候變遷，使得近年來台灣的降雨分布不均，降雨集中且強度增加。其極端型降雨事件在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。由於豪雨引致之山崩所產生的土砂量體對於事件的致災性以及災害規模具有關鍵性影響，然而崩塌發生機制極為複雜，其與坡地之地形樣貌、坡度、地質、水文條件等息息相關，造成崩塌土砂量體的估算具有高度的不確定性，且不易在短時間內評估出結果，因此，本研究希望能發展簡易快速評估出崩塌破壞曲面的方法，估算出崩塌量體，以精進現有的災害管理與預警技術。

2. 理想崩塌曲面計算

2.1 曲面特性

透過給定崩塌地表範圍以及最大崩塌深度 d_{max} 的條件，如圖 2 所示，令崩塌範圍之最高點為 $P_1(x_1,y_1,z_1)$，最低點為 $P_2(x_2,y_2,z_2)$，$\overline{P_1P_2}$ 線段之中點為 $P_{mid}(x_m,y_m,z_m)$，假想圓心為 $P_c(x_c,y_c,z_c)$，P_1 與 P_2 之向量為 $\overrightarrow{P_1P_2}(n_x,n_y,n_z)$，$P_c$ 與 P_{mid} 之向量為 $\overrightarrow{P_cP_{mid}}$，曲率半徑為 R，坡面角度為 θ。則利用上述參數之間的幾何關係，聯立解方程式(1)－(4)，藉此找出軸向垂直切面與側向垂直切面的圓心位置及相對的曲率半徑，進而推求出理想崩塌曲面。

$$(x_c-x_1)^2+(y_c-y_1)^2+(z_c-z_1)^2=R^2 \quad (1)$$

$$(x_c-x_2)^2+(y_c-y_2)^2+(z_c-z_2)^2=R^2 \quad (2)$$

$$\overrightarrow{P_cP_{mid}}\cdot\vec{v}=0 \quad \text{with } \vec{v}=(-n_y,n_x,0) \quad (3)$$

$$d_{max}=\frac{(R-\overline{P_cP_{mid}})}{\cos\theta} \quad (4)$$

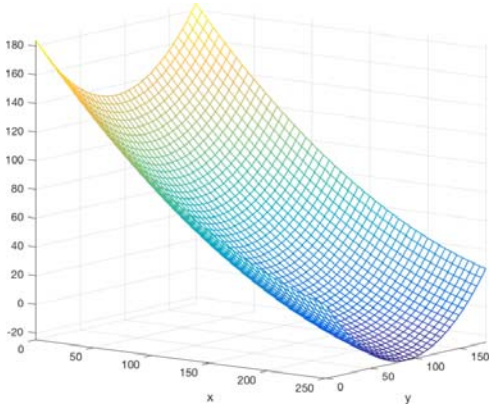


圖 1　軸向(x 方向)曲率(曲率半徑大)與側向(y 方向)曲率(曲率半徑小)所決定之理想化曲面

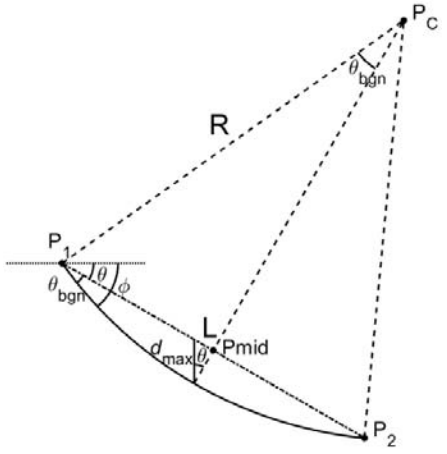


圖 2　曲面最大深度與曲率半徑之關係示意圖

2.3 曲面計算

為驗證上述方法製作理想曲面的可行性，對於土石流潛勢溪流高市 DF081 萬山部落區域已發生的崩塌案例進行分析，將案例細分成不同區塊，利用災後崩塌地表範圍及 d_{max}，因實際崩塌區塊的最高及最低點並非最佳軸向，故我們採取多個點位計算，選擇崩塌區塊中最高及最低點各 10 點，共有 100 種組合，如圖 3 所示。由於各組合所對應的中點位置不同造成深度也不同，為了更加客觀的評估，我們以上述的 100 條軸向中點的平均點位向下所獲得的距離作為計算的最大崩塌深度，來找出最佳軸向曲率。接著再從軸向垂直切面向兩旁延伸，找出側向軸，而側向的最大崩塌深度其計算方式與軸向同理，以得到最佳側向曲率，另外，在計算過程中，我們發現破壞面的邊緣多為平緩，會造成曲率低估的誤差，因此選擇以崩塌深度大於 0.5 m 之崩塌範圍進行估算，最後將還未發生崩塌的區塊點位的高程減去軸向及側向曲率所控制的曲面點位的高程，並乘上網格大小，便得到估算之崩塌量體，再與實際崩塌體積進行比較。

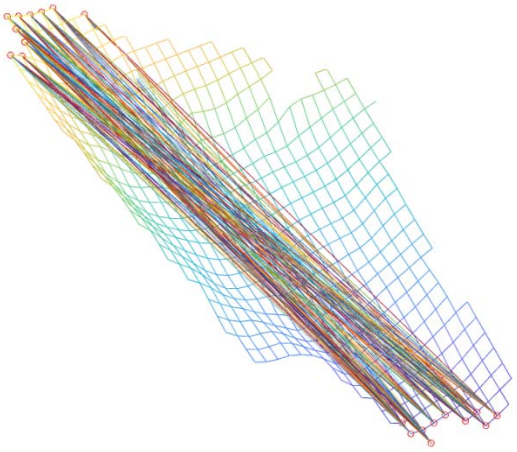
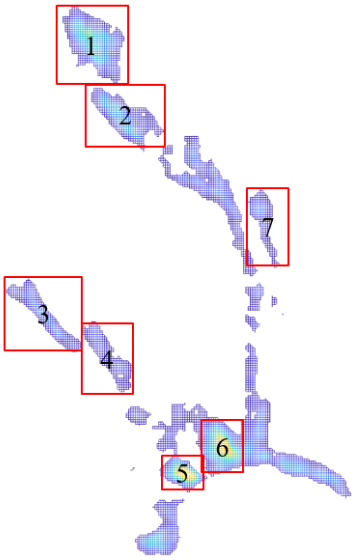


圖 3　災後崩塌範圍最高與最低各 10 點之 100 種組合



(資料來源：水保局 107 年計畫結案報告)

圖 4　DF081 潛勢溪流的 7 個崩塌區塊

表 1　各區塊之崩塌面積及崩塌體積差異

參數 / Area	$A_{ori}[m^2]$	A_1 $[m^2]$	V_1 $[m^3]$	r_v [%]
1	15,550	12,725	92,761	4.86
2	8,525	8,525	44,318	13.79
3	8,675	6,000	18,391	25.93
4	7,875	4,925	9,650	41.67
5	5,350	5,050	60,039	5.84
6	12,400	11,250	109,120	9.46
7	3,700	2,975	9,350	11.94

其中 rv 表估算崩塌體積與實際崩塌體積相差百分比

表 2　各區塊之最大崩塌深度

參數 / Area	d_{ori} [m]	d_1 [m]	d_2 [m]
1	21.14	14.46	19.46
2	14.05	8.75	18.75
3	10.75	12.81	7.81
4	6.31	13.79	3.79
5	33.79	20.31	10.31
6	29.87	14.01	14.01
7	8.15	5.28	5.28

3. 結果與討論

3.1 理想崩塌曲面與實際破壞面之比較

將 DF081 萬山部落此案例共分成 7 個崩塌區塊進行討論，考慮 100 種組合，並選擇崩塌體積誤差最小的前 10 個組合之平均結果與實際破壞面進行比較，呈列如表 1~表 3，從表 1 中可發現由理想崩塌曲面計算出的崩塌體積與實際的崩塌體積大約相差 10~25%，雖然最大差異達到 40%左右，但整體來看，此差異是屬於可接受範圍的，而在驗算過程中，因此利用此描述崩塌曲面之方法來近似實際崩塌曲面是可行的，但為了佐證此方法是否可普遍應用，必須分析更多案例。

其中 d_{ori} 表該區塊實際最大崩塌深度。
d_1 表該區塊軸向最大深度。
d_2 表該區塊側向最大深度。

表 3　各區塊之曲率半徑及軸長

參數 / Area	R_1 [m]	R_2 [m]	L_1 [m]	L_2 [m]
1	428.62	89.17	196.28	109.84
2	441.91	30.21	166.52	55.31
3	561.41	16.96	219.39	26.78
4	389.83	15.05	186.17	19.60
5	128.67	45.96	116.83	57.63
6	299.33	81.49	162.95	90.66
7	126.71	57.08	65.49	47.48

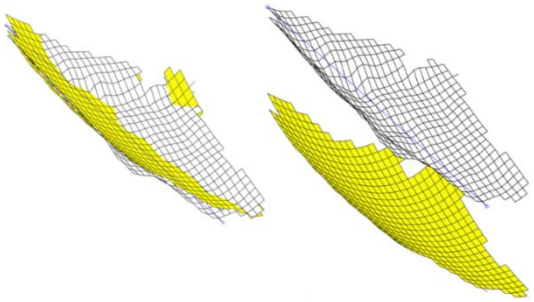


圖 5 崩塌區塊與實際崩塌破壞面(Area 1)

3.1 理想崩塌曲面幾何特性探討

為了能夠應用，我們探討曲面的幾何特性，分析崩塌面積、坡面傾角、最大崩塌深度、曲率半徑及軸長等參數之間的關聯性，圖 5 顯示軸向曲率變動極大，而側向曲率大致落在一定的範圍，並不受面積大小影響，另外，可明顯看到圖 6 中最大崩塌深度、軸長及曲率半徑之間呈現非常一致性的關聯趨勢，至於其他參數暫時無法找出明顯的關聯性，可能原因是數據資料還不夠多，因此未來的工作將繼續分析其他案例，以更加確定其關聯性。

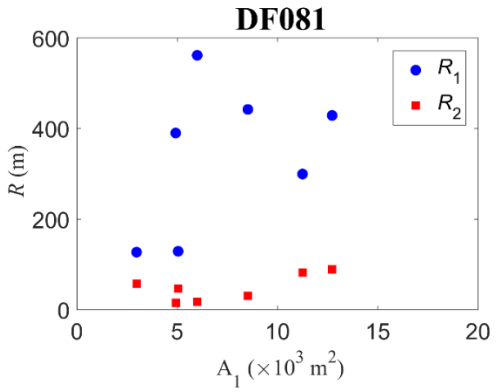


圖 5 軸向、側向曲率半徑與面積之比較圖

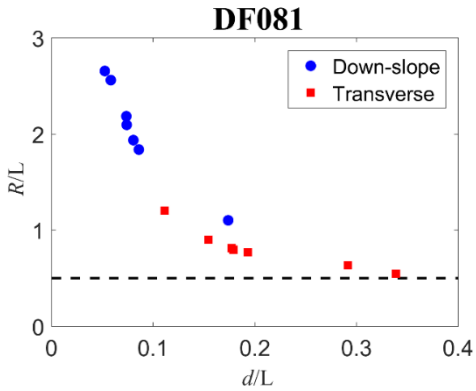


圖 6 最大崩塌深度、軸長及曲率半徑關係圖

4. 結論

雖然目前處於計算階段，但其結果還算良好，崩塌曲面各參數之關聯性也稍微可看出端倪，我們認為若是崩塌面積及最大崩塌深度預估準確，其所計算出的崩塌體積與實際必定差距不大，而本研究的目標在於透過給定一崩塌範圍及最大崩塌深度等數位高程資料，便能預估出崩塌曲面及崩塌體積，並配合(Tai and Kuo, 2016)所發展的兩相土石流動態數值模擬模式(DFMfGT)進行土砂管理及減災的工作，未來將持續蒐集更多數據，經大數據歸納分析，找出崩塌範圍與最大崩塌深度兩者之間的關係式。

5. 致謝

本研究感謝水保局「智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為」創新研究計劃(107 保發-11.1-保-01-06-001(12))支持。

6. 參考文獻

[1] 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.

[2] 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. DOI:10.1080/03091929.2011.648630, 2012.

[3] 行政院農業委員會水土保持局107年計畫(計畫編號:SWCB-107-016)結案報告。

[4] 水保局「智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為」創新研究計畫之期中報告書。

兩相土石流動態模擬數值模式

吳昱辰[1*]、戴義欽[1]、蘇郁文[2]

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

[2] 國立成功大學水土保持生態工程研究中心

*E-mail: dirtyboy866@gmail.com

水保局計畫編號 : 107 保發-11.1-保-01-06-001(12)

摘要

近年來氣候變遷加劇，極端降雨事件造成之大規模土砂災害頻率增加，也經常對於人民生命財產造成巨大之威脅。本研究應用現地地形座標系統之土石流土體動態模擬數值模式(Debris Flow Model for General Topography, DFMfGT) 來模擬描述土石流災害發生時土石流可能之移動過程。此模擬方法採用固體-液體兩相流模式，固體與液體有各自之速度，得以描述水砂分離之運動與土石流土體濃度動態演化過程。

本研究使用兩種情境來模擬土石流運移過程，分別是真實災後崩塌破壞面以及依崩塌面幾何特性進行運算之理想破壞面，分別進行模擬，最後把模擬結果相互比對，觀察真實破壞面與理想破壞面之模擬結果差異，以評估理想破壞面適用性。

關鍵詞：土石流模擬、兩相流、理想破壞面。

1. 前言

極端氣候造成土石流頻繁的發生，其對於人民財產和大量地區的公共建設皆極具破壞性，因此若能應用符合土石流動力行為之數值模擬方法來減少災害造成的損失，對於社會是具很大助益的。

先前有許多關於土石流體的研究，如 Bagnold (1954)將土石流視為單相非牛頓流體的物質，無法說明流體和顆粒兩相間複雜之相互作用、兩相的動力行為及土石流濃度的變化。George and Iverson (2011) 則使用準單相流模式，著重於孔隙流體壓力與持續變化之體積比的回饋作用，其假設兩相速度幾乎相等，無法完整描述兩相間於土石流運動時產生的交互作用力。本研究應用之 DFMfGT 模式則是參考 Meng and Wang (2016)改良的兩相流動模式，模式中之固相及液相分別滿足各自的控制方程式，並考慮流體黏滯性，再以兩相之速度差來對兩相間交互作用力進行更清楚的描述，此模式配合地形座標系統，並運用有限體積演算法(Non-Oscillation Central Scheme, NOC)進行運算，以模擬土石流災害發生時土石流運移過程。

土石流土體的崩塌破壞面於災害尚未發生前往往不易預測，故本研究配合智慧式理想破壞面估算方法進行崩塌破壞面之運算，將理想破壞面作為實際崩塌破壞面計算獲得初始土砂崩塌量，並以理想破壞面取代尚未崩塌之數值高程模型進行模擬，並與真實災後數值高程模型之模擬結果進行比對，觀察以理想破壞面之運算結果是否適當。

2. 模擬方法

2.1 研究區域與地文條件估算

本研究以高雄市土石流潛勢溪流編號 DF081 為研究區域，位於高雄市茂林區萬山里萬山部落，屬於荖濃溪集水區之大規模崩塌潛勢區(DS43)內，該區域於 2009 年莫拉克颱風期間發生約 10 公頃之大規模崩塌災害，圖 1 為 DF081 集水區於拉克災後地形變異情形；本研究以 DF081 集水區 2004 年 5×5m 之數值高程模型作為莫拉克颱風土石流破壞前之地形模擬情境，並使用兩種土石流破壞後情境來推估災後 DF081 集水區內可能之土砂運移量，並以此量體作為模擬之初始土石流體積，情境分別為

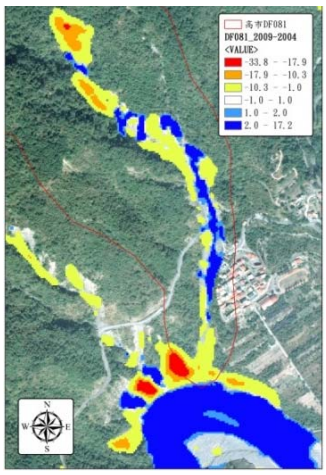
(1)2009 年 5×5m 數值高程模型;

(2)智慧式理想破壞面估算之數值高程模型;

情境(1)的部分是以 DF081 集水區 2004 年(莫拉克颱風前)與 2009 年(莫拉克颱風後)之數值高程模型進行區域內地形高程變化之計算，災前的高程理應比災後還要高，而其變化量即為土砂運移量，如圖 2 之(a)小圖，圖中紅色粗實線圈選範圍即為高市 DF081 土石流潛勢溪範圍，而藍色到紅色的連續顏色變化為初始土砂崩塌量由深度小到大的分布情況。

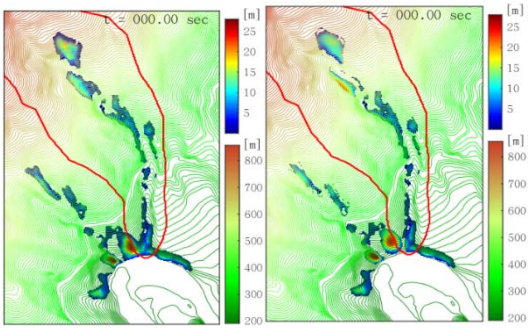
情境(2)則是以 DF081 集水區 2004 年(災前)之數值高程模型並給定崩塌範圍與最大破壞深度，再以崩塌面之幾何特性進行運算，獲得具軸向及側向曲率之理想崩塌破壞面，再將理想破壞面取代崩塌範圍內之災前破壞面即為災後的數值高程模型，進行高程差的計算，最終獲得推估之土砂運移量，如圖 2 之(b)小圖。

災前坡面及各破壞面之示意圖如圖 3，黑色面為災前坡面，紅色面為災後破壞面，為情境(1)所使用，藍色面則為理想破壞面，為情境(2)所使用。



(資料來源:水保局 107 年計畫結案報告)

圖 1 高市 DF081 集水區地形變異情形



(a) (b)

圖 2 t = 0 s 時之土石流體深度分布

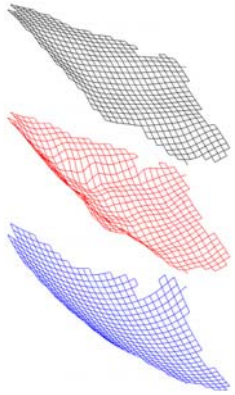


圖 3 災前坡面(黑色)，災後破壞面(紅色)及理想破壞面(藍色)

2.2 控制方程式與座標系統

DFMfGT 模式藉由質量與動量之守恆式分別描述土石流固相及液相的運動行為，於考慮了固液間交互作用項之後，可將質量和動量方程式表示如下

$$\frac{\partial \nu^s \rho^s}{\partial t} + \frac{\partial \nu^s \rho^s \upsilon_i^s}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \nu^f \rho^f}{\partial t} + \frac{\partial \nu^f \rho^f \upsilon_i^f}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \nu^s \rho^s \upsilon_i^s}{\partial t} + \frac{\partial \nu^s \rho^s \upsilon_i^s \upsilon_j^s}{\partial x_j} - \frac{\partial T_{ij}^s}{\partial x_j} - \rho^s \nu^s g_i + m_i^s = 0$$

$$\frac{\partial \nu^f \rho^f \upsilon_i^f}{\partial t} + \frac{\partial \nu^f \rho^f \upsilon_i^f \upsilon_j^f}{\partial x_j} - \frac{\partial T_{ij}^f}{\partial x_j} - \rho^f \nu^f g_i - m_i^s = 0$$

其中 $\nu^{s,f}$ 表示固相及液相的體積比，$\upsilon_i^{s,f}$ 為固相及液相的局部速度，$\rho^{s,f}$ 為密度，$T_{ij}^{s,f}$ 為應力張量，g_i 為重力加速度，m_i^s 為兩相交互作用項。交互作用力項 $m_i^s = f_i^d + f_i^b$，其中 f_i^d 為浮力項，f_i^b 為阻力項，$f_i^b = C_d \nu_s \nu_f (\upsilon_i^f - \upsilon_i^s)$，包含交互作用力係數 C_d、固相與液相體積比 $\nu^{s,f}$ 及兩項速度差 $(\upsilon_i^f - \upsilon_i^s)$。

如果將 x, y, z 三個方向的控制方程式均納入考慮、則會使數值計算變得相當複雜，所以現有的土石流理論大多將土石流扁平化假設(shallow assumption)，亦即長、寬之厚度均遠大於高的厚度，因此我們可依照淺水波理論將質量與動量方程式做深度積分，將方程式簡化，使運算更加快速簡潔。

進行計算時，以往常使用卡氏座標系統，當描述一個隨曲面變動的物理量，在曲面變動量不大時，深度積分所產生的誤差尚可以被接受，但土石流發生區域往往為地形變化劇烈之地形，因此可能產生較大之誤差，DFMfGT 模式應用地形座標系統(Unified Coordinate System , Tai et al. 2012, Luca et al. 2016) ，將地形正規化，使座標系統和底床貼合，可精準呈現隨底床變動之物理量。

2.3 參數介紹與設定

相較於常使用於土石流模擬之 FLO-2D 模式中之 7 個參數值，本研究應用之 DFMfGT 模式只需輸入 5 個參數值，包含大家熟悉的土砂比重ρ_s/ρ_f、液相黏滯係數 μ 及固體顆粒摩擦角δ，和本研究於方程式推導過程中產生的無因次參數，交互作用力係數 C_d 及液相阻尼係數ϑ。交互作用力係數 C_d 和固相液相間交互作用力有甚大之關係，C_d 上升導致混合體的液相受到顆粒相所給予的更大的阻力，從而產生更少兩相之間的分離及相對運動，混合體的行為便更像流動性較差的固體；液相阻尼係數ϑ則有關於納維爾滑移邊界條件(Navier's slip boundary condition)，且受流體性質及底床特性影響，當ϑ為 0 時表示完全滑移邊界條件，當ϑ接近 40 時已乎可視為無滑移邊界條件，本研

究所採用之參數可以參照表 1。

表 1　DFMfGT 土石流模擬應用參數表

(a)土砂比重	ρ_s/ρ_f=2.65
(b)液相黏滯係數	μ =0.5 [Pa·s]
(c)固體顆粒摩擦角	δ =36
(d)交互作用力係數	C_d=6.0
(e)液相阻尼係數	ϑ=3.0

2.4 數值方法

由於本研究模擬的情境為真實的土石流流況，常發生物理特性的急速變化與兩相間劇烈之交互作用，故本研究使用 Kurganov and Tadmor (2000) 所提出以中央差分有限差分法寫成之非震盪之數值方法(non-oscillating central，NOC)來求解淺水波模式之非線性雙曲線方程式，以減緩流體的劇烈變化，並且可以模擬震波及水躍現象。

3. 結果與討論

高市 DF081 土石流潛勢溪經 DFMfGT 之模擬結果呈現如土石流流動深度(圖 4)、土石流濃度分布(圖 5)、流動速度(圖 6)所示，其中每個圖中的小圖(a)均為使用情境(1)(DF081 潛勢溪 2009 年數值高程模型)之計算結果，而小圖(b)則為使用情境(2)(智慧式理想破壞面估算之數值高程模型)之計算結果，而每個圖(圖 4 - 圖 6)均為土石流開始發生兩分鐘後之模擬情境；由土石流流動深度之模擬結果(如圖 4)，可觀察到河道上游因坡度較陡，有較低的流深，而河道轉彎處有明顯較高的流深，在下游匯流口坡度趨緩，產生較高之流深；流動速度之模擬結果(如圖 5)，則於坡度較陡的上游有較快之流速，於河道轉彎及下游則流動較緩慢；由土石流濃度分布之模擬結果(如圖 6)，可知鄰近崩塌地之河段、河道轉彎處及下游坡度較緩的河段的土石流濃度較高，而坡度較陡流速較快的河段相對就具有較低的濃度。

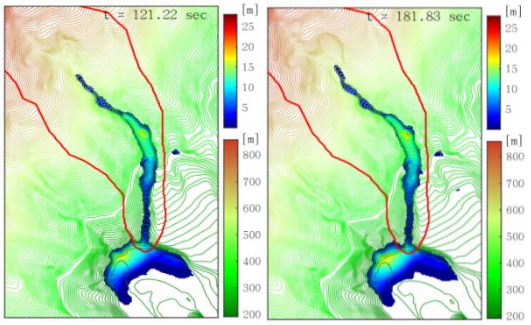


圖 4　t = 181.83 s 時之土石流流動深度

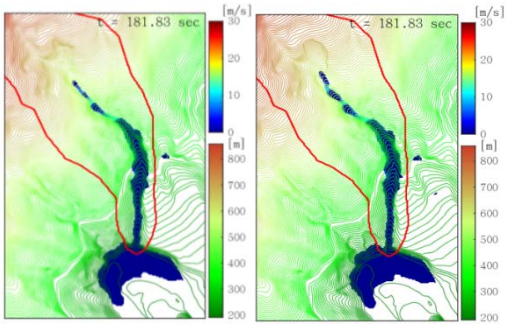


圖 5　t = 181.83 s 時之土石流流動速度

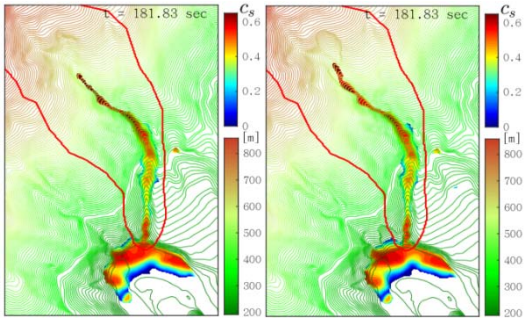


圖 6　t = 181.83 s 時之土石流濃度分布

比對圖 3 - 圖 6 中之(a)、(b)小圖可以比對情境(1)(DF081 潛勢溪 2009 年數值高程模型)及情境(2)(智慧式理想破壞面估算之數值高程模型)之模擬差異，由圖中呈現之結果可知雖然主要的崩塌區為已經被理想破壞面所取代，但不論是流體深度、土石流濃度分布或是速度場分布，其採用情境(1)整體而言和情境(2)所運算之結果差距並不大。

4. 結論

本研究應用之 DFMfGT 方法在模擬結果呈現上，土石流體於地形陡峭時有較高之流速、較低之流深，而在地形平緩時有較低之流速，較高之流深及較高之濃度，於集水區下游之匯流口其河道轉彎處均有明顯之濃度上升並可能產生土砂堆積的情況，將結果與災後之地形變異分析結果進行比較，可知不論於河道受影響範圍或

土石流流動型態均有相符合及良好的趨勢現象。

對於使用情境(1)或情境(2)顯示模擬的土石流運動行為十分相似，流深、流速及濃度都幾乎能吻合，表示應用理想破壞面之情境對於評估崩塌後土砂之運移行為具備一定之代表性。

運用 DFMfGT 數值運算方法並搭配智慧式理想破壞面之估算，可快速獲得足以描述土石流流動過程及運動行為之模擬結果，可於土石流之潛勢區發生土石流時提供一個可參考之土石流流動過程及土砂濃度分布型態。

5. 致謝

本研究感謝水土保持局創新研究計畫
(107 保發-11.1-保-01-06-001(12))支持。

6. 參考文獻

[1] 行政院農業委員會水土保持局107年計畫(計畫編
[2] 號:SWCB-107-016)結案報告
[3] George, D. L., & Iverson, R. M. (2011). “A two-phase debris-flow model that includes coupled evolution of volume fractions, granular dilatancy, and pore-fluid pressure.” Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 43, 415-424.
[4] Kurganov, A. and Tadmor, E. ,“New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection–diffusion equations.” Journal of Computational Physics 160.1(2000): 241-282, 2000.
[5] Kuo, C.Y., Tai, Y.C., Chen, C. C., Chang, K. J., Siau, A. Y., Dong, J. J., ... & Lee, C. T. (2011). “The landslide stage of the Hsiaolin catastrophe: simulation and validation”. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 116(F4).
[6] Luca , I., Tai, Y.C., Kuo, C.Y. et al. (2016), Shallow Geophysical Mass Flows down Arbitrary Topography ,Springer.
[7] Meng, X., & Wang, Y. (2016), “Modelling and numerical simulation of two-phase debris flows”. Acta Geotechnica, 11(5), 1027-1045.
[8] Tai, Y.C, Heβ, J. and Wang, Y., “Two-Phase Debris Flow over Rugged Topography: Modeling and Numerical Simulation”. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, (under revion)
[9] Tai, Y.C., Kuo, C.Y. and Hui, W.H., “An alternative depth-integrated formulation for granular avalanches over temporally varying topography with small curvature.” Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., 106(6), 596–629. DOI:10.1080/03091929.2011.648630, 2012.

李坤錠、戴義欽、蘇郁文

之論文

以理想曲面快速評估崩塌破壞曲面之研究

經甄選獲得中華民國力學學會
第 42 屆全國力學會議
海報競賽
佳作
特頒發獎狀以茲表揚

理事長 江國寧

中華民國 107 年 11 月 23 日