
崩塌發生與流出整合型模式應用於坡面
變形分析-以甲仙崩坪坑為例

**Application of the integrated model of
landslide initiation and movement to slope
deformation analysis.
(成果報告)**

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

執行期間：110 年 01 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：蔡元融 博士

計畫參與：李威霖 博士

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

崩塌發生與流出整合型模式應用於坡面變形分析-以甲仙 崩坪坑為例

摘要

極端降雨事件引致大規模土砂運移與大規模崩塌災害不容忽視。高雄甲仙區崩坪坑集水區曾發生過大規模土砂運移事件，且集水區內仍存在有四塊大規模崩塌潛勢區域，是故擇為本年度研究之區域。集水區內的大規模崩塌潛勢區域缺乏細部調查資料，因此不易進行影響範圍劃定和崩塌預警分析等量化工作，是故本研究提出坡面不安定分析、坡面破壞型態分析和整合型崩塌發生和流出模式等三種創新研究方法，所提之方法適用於細部調查資料出來之前的替代方案，但並非取代方案，其主旨系提供局內於細部調查前一份可用的參考數據。

透過坡面不安定分析，可以尋找出研究區域內不安定的坡面，此外亦可反推估區域的代表材料參數，例如凝聚力、摩擦角，並可作為後續整合型崩塌發生和流出模式的參數給定依據，本研究將其應用到崩坪坑和光華地區皆有可接受的成果。本年度的坡面破壞型態分析為新提的創新研究，相關概念及推導以敘明於本年度報告中，亦透過地質調查所和水保局的案例得到統計迴歸的結果。整合型崩塌發生與流出模式，於本年度中進行更詳細的模式操作和參數給定原則說明，並透過日本大規模土坡實驗來說明模式對於降雨效應的模擬能力，相關成果已經發表於國際期刊中；此外，亦完成崩坪坑集水區內 D037 和 D039 大規模崩塌的模擬，及探討地下水和降雨對崩塌發生和流出行為的影響。

關鍵詞：邊坡穩定分析、崩塌破壞型態、材料質點法

Abstract

The incidence of extreme rainfall resulting in massive (large-scale) sediment transport and large-scale landslide disasters merit sustained attention. The catchment area in Bengpingkeng watershed, Jiasian District, Kaohsiung, has suffered massive sediment incidents, and the catchment area remains subject to incipient large-scale landslide areas. The catchment area incipient massive landslide zone lacks detailed survey data, impeding easy conduct of quantitative work including delimitation of the impact area and collapse warning analysis. Thus, this study proposes slope instability analysis and slope failure type analysis and integrated numerical method for the occurrence mechanism and post-failure behavior of the landslide. The proposed methods are applicable to alternative plans prior to release of the detailed investigation data but are not a replacement plan. The main purpose is to provide reference data for use before the detailed investigation.

Slope instability analysis elucidates the unstable slope surface in the study area, allowing inverse estimation of area representative material geologic material parameters including cohesion and angle of friction, and may be used as the basis for parameters of subsequent integrated collapse occurrence and outflow models. This study applies these methods to the Bengpingkeng and Guanghua areas with acceptable results attained. This year's slope failure type analysis represents new and innovative research, with the related concepts and derivations described in this year's reporting. The results of statistical regression are also obtained for cases of the (Taiwan) Geological Survey and the Water Conservation Bureau. For the integrated collapse occurrence and outflow model, more detailed model

operational and parameter setting principles were explained this year, with the model's ability for rainfall effects simulations demonstrated through large-scale soil slope experiments in Japan. The results have also been published in (an) international journal(s). Also, simulations have been completed for Bengpingkeng catchment zone D037 and D039 large-scale landslides, along with discussion of the influences of groundwater and rainfall on occurrence and outflow behavior in collapses.

Keywords: Stability analysis, landslide mechanism, Material point method

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	IX
第一章 緒論	1-1
第一節 計畫緣起與目的.....	1-1
第二節 計畫工作項目與內容.....	1-2
第三節 計畫工作項目與執行架構	1-4
第二章 研究方法建立	2-1
第一節 坡面不安定分析方法.....	2-1
第二節 坡面破壞型態分析方法.....	2-10
第三節 整合型崩塌發生與流出模式	2-26
第三章 研究方法應用	3-1
第一節 研究區域基本資料.....	3-1
第二節 不安定坡面分析.....	3-6
第三節 整合型崩塌發生和流出模式分析	3-11

第四章 結論與建議	4-1
參考文獻	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、計畫書審查意見暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、期初審查意見暨回覆辦理情形	附錄-5
附錄三、期中審查意見暨回覆辦理情形	附錄-10
附錄四、期末審查意見暨回覆辦理情形	附錄-14
附錄五、光華地區案例分析.....	附錄-15

表次

表 1-1 計畫重要檢核點管制表.....	1-5
表 2-1 各種材料的摩擦角(Angle of Repose).....	2-6
表 2-2 全台崩塌案例基本資料表	2-14
表 2-3 高屏溪 24 處大規模崩塌區基本資料表	2-24
表 2-4 各種材料的彈性模數(Young's modulus).....	2-36
表 2-5 各種材料的柏松比(Poisson's ratio).....	2-36
表 2-6 各種材料的土壤保水曲線參數和水力傳導係數	2-37
表 3-1 D037 模擬使用材料參數表.....	3-13
表 3-2 D039 模擬使用材料參數表.....	3-13

圖次

圖 1-1 崩坪坑集水區 2010-2014 年河道土砂沖淤變化圖	1-1
圖 1-2 多尺度檢測技術在坡面變形及河道土沙運移之整合應用計畫與本計畫之關聯圖	1-3
圖 1-3 計畫執行架構圖	1-4
圖 2-1 邊坡穩定分析示意圖	2-2
圖 2-2 坡面正切角度 $\tan\beta$ 和坡面高度 H 關係圖	2-3
圖 2-3 坡面不安定區域分析流程	2-4
圖 2-4 坡面不安定區域分析剖面給定範例圖	2-5
圖 2-5 坡面不安定分析材料參數透過數值地形反推概念圖	2-6
圖 2-6 荖濃溪右岸坡面不穩定分析採用之數值地形資料與切取剖面圖 ...	2-7
圖 2-7 坡面編號 III(左)和編號 I(右)的不安定分析成果	2-7
圖 2-8 高雄市桃源區寶來里之荖濃溪右岸坡面不穩定分析結果圖	2-8
圖 2-9 臨界坡高公式參數敏感度分析	2-9
圖 2-10 平面型破壞(左)和圓弧形破壞(右)示意圖	2-10
圖 2-11 坡面理想圓形破壞面示意圖	2-10
圖 2-12 崩塌案例 D/R 計算成果	2-25
圖 2-13 連續體力學以固液汽三相表示未飽和土壤之示意圖	2-26
圖 2-14 崩塌發生階段(pre-failure)和流出階段(post-failure)示意圖	2-30
圖 2-15 材料質點法計算概念圖	2-31
圖 2-16 材料質點法執行位移邊界、接觸邊界和降雨邊界的概念圖	2-33
圖 2-17 整合型崩塌發生與流出數值模擬及後續應用流程圖	2-34
圖 2-18 香港翡翠路崩塌發生前後地形比較圖 (knill 1996)	2-35
圖 2-19 Anura 建置香港翡翠路崩塌事件模型圖	2-35

圖 2-20 靜態條件下土壤孔隙水壓分布概念圖(Siemens 2018).....	2-38
圖 2-21 香港翡翠路崩塌事件降雨歷線圖	2-39
圖 2-22 日本大型土坡實驗圖(Moriwaki et al. 2004)	2-40
圖 2-23 日本大型土坡實驗配置圖(Moriwaki et al. 2004).....	2-40
圖 2-24 日本大型土坡實驗模擬網格與邊界條件配置圖	2-41
圖 2-25 實驗 G-5 處孔隙水壓變化實測與模擬結果比較圖	2-42
圖 2-26 實驗 D-5 處地表位移實測與模擬結果比較圖	2-42
圖 2-27 日本大型土坡實驗與模擬結果比較圖(邊坡位移分布圖).....	2-43
圖 2-28 降雨效應(i/k)與地下水上升特性(v_w/k)比較圖	2-44
圖 2-29 降雨效應(i/k)與地下水位開始上升時間和崩塌發生時間比較圖	2-45
圖 2-30 降雨效應(i/k)與累積地表位移特性比較圖	2-46
圖 2-31 降雨效應(i/k)與地表位移速度特性比較圖	2-46
圖 3-1 崩坪坑集水區地理位置圖	3-1
圖 3-2 崩坪坑集水區兩萬五千分之一地形圖	3-2
圖 3-3 崩坪坑集水區高程分布圖	3-3
圖 3-4 崩坪坑集水區之地質概況	3-3
圖 3-5 崩坪坑集水區歷年之崩塌空間分布變化	3-4
圖 3-6 崩坪坑集水區歷年崩塌面積變化統計	3-4
圖 3-7 崩坪坑集水區 2010~2014 年之土砂沖淤分布	3-5
圖 3-8 崩坪坑集水區 2014~2017 年之土砂沖淤分布	3-5
圖 3-9 崩坪坑不安定坡面分析剖面位置圖	3-6
圖 3-10 崩坪坑大規模崩塌潛勢區內歷史崩塌位置圖	3-7
圖 3-11 017 坡面不安定分析參數反推圖	3-7
圖 3-12 005 坡面不安定分析參數反推圖	3-8

圖 3-13 012 坡面不安定分析參數反推圖	3-8
圖 3-14 029 坡面不安定分析參數反推圖	3-9
圖 3-15 008 坡面不安定分析參數反推圖	3-9
圖 3-16 集水區內部安定點位分布情形	3-10
圖 3-17 崩坪坑集水區 2006 年和 2011 年兩期衛星影像比對圖	3-11
圖 3-18 整合型崩塌發生和流出模式分析對象位置圖	3-12
圖 3-19 D037 大規模崩塌潛勢區前後兩期地形縱剖面比較圖	3-12
圖 3-20 D039 大規模崩塌潛勢區前後兩期地形縱剖面比較圖	3-12
圖 3-21 D037 大規模崩塌潛勢區模式建置結果圖	3-14
圖 3-22 D037 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境假設圖	3-14
圖 3-23 D037 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境模擬結果圖	3-16
圖 3-24 D037 大規模崩塌潛勢區 GW-III 地下水搭配強降雨情境模擬圖-剪 應變分布	3-17
圖 3-25 D039 大規模崩塌潛勢區模式建置結果圖	3-18
圖 3-26 D039 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境假設圖	3-18
圖 3-27 D039 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境模擬結果圖	3-20
圖 3-28 D039 大規模崩塌潛勢區 GW-III 地下水搭配強降雨情境模擬圖-剪 應變分布	3-21

第一章 緒論

第一節 計畫緣起與目的

從 2009 年莫拉克颱風極端降雨事件學習可知，大規模崩塌與河道大規模土砂運移等極端土砂災害為台灣刻不容緩的議題。舉例來說，以台灣南部旗山溪流域的甲仙崩坪坑集水區，2010 年至 2014 年間調查集水區內最大塊的裸露地面積可達 40 公頃，其所生產運移至河道的土砂量將近 150 萬立方公尺，並造成局部河床抬升超過 10m，如圖 1-1。透過高精度之光達地形調查顯示，集水區內目前仍有四個大規模崩塌潛勢區域，倘若未來再有類似極端降雨事件，極端土砂相關災害仍有再度發生之可能性。

然則，大規模崩塌災害量化分析相當仰賴區域細部調查資料，例如地質鑽探、地物探測、現場監測等等，其相關工作量大且所費不貲。於政府有限的執行預算和時間下，本研究提出適用於區域細部調查資料出來之前的評估方法，相關方法包括不安定坡面分析、破壞型態分析和崩塌發生與流出整合型模式等，上述方法得以分別評估潛勢區域內崩塌發生的可能位置、可能破壞型態及其生產土砂可能運移至河道的過程，相關產出將能做為未來防災相關工作推動之參考依據。

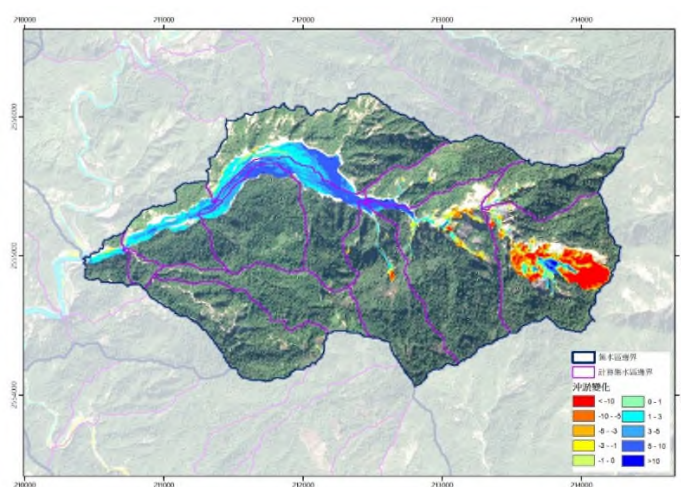


圖 1-1 崩坪坑集水區 2010-2014 年河道土砂沖淤變化圖(水土保持局台南分局, 2017)

第二節 計畫工作項目與內容

一. 坡面不安定分析方法建立

延續前期創研計畫，持續精進 Yoshino 和 Uchida (2019)的邊坡穩定分析方法，以及其於潛在大規模崩塌區域內坡面穩定性評估的運用。同樣係使用單期數值地形(DEM)來取得潛在大規模崩塌區域內坡面的幾何參數，然後據以找出潛在大規模崩塌區域內不穩定的坡面。本年將進一步探討幾何參數擷取方法和參數給定對分析結果的影響，並作為研究方法改善之依據。

二. 坡面破壞型態分析方法建立

根據坡面破壞型態與坡面幾何形狀之間的相關性，依據破壞面深度(D)和滑動面曲率半徑 R 的比值來建立指標，以做為坡面平面型破壞和圓弧型破壞等兩種型態的鑑別指標。本研究以已發生崩塌之區域做為樣本來驗證所提出之方法，然後再應用至研究區域。

三. 整合型崩塌發生與流出模式

延續前期創研計畫，持續採用以材料質點法為基礎發展之整合型崩塌發生與流出數值模式(Anura)。然後，配合本年度坡面不安定分析和坡面破壞型態分析的結果，進行研究區域內大規模崩塌潛勢區的模擬。

四. 研究案例分析

以旗山溪甲仙崩坪坑集水區內四塊大規模崩塌潛勢區為對象，進行坡面不安定分析、坡面破壞型態分析和以整合型崩塌發生與流出模式進行模擬。另針對光華潛勢區進行分析。

水保局於 2020 年辦理之創新研究計畫「高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究」，為本計畫相關的前期計畫。於前期計畫中，其坡面不安定分析和整合型崩塌發生與流出模式之整合使用已具備雛型，且提出相關示範案例。是故，本年度計畫以前期計畫為基礎，提出本年度計畫的創新做為如下：

- 持續精進坡面不安定分析方法，包括剖面線選取和劃定原則、分析參數選用原則等等，以及透過案例說明精進成果。
- 新提出坡面破壞型態分析方法，包括分析方法建立、分析參數率定、和示範案例測試等等。
- 持續精進整合型崩塌發生與流出模式，包括分析參數選用原則、降雨效應對崩塌運動行為探討等等，並選用更多現場案例來說明模式的效能。

本年度計畫為整合型計畫「多尺度檢測技術在坡面變形及河道土沙運移之整合應用」下的子計畫三，其他計畫於本年度的執行過程中，將整合多時序和多元高精度地形資料庫，並應用 DInSAR 分析技術與密集點雲整合技術來產製最新一期研究區域的數值地形，而本計畫則將基於上述其他計畫的成果來執行坡面不安定分析、坡面破壞型態分析和整合型崩塌發生與流出模擬等工作。

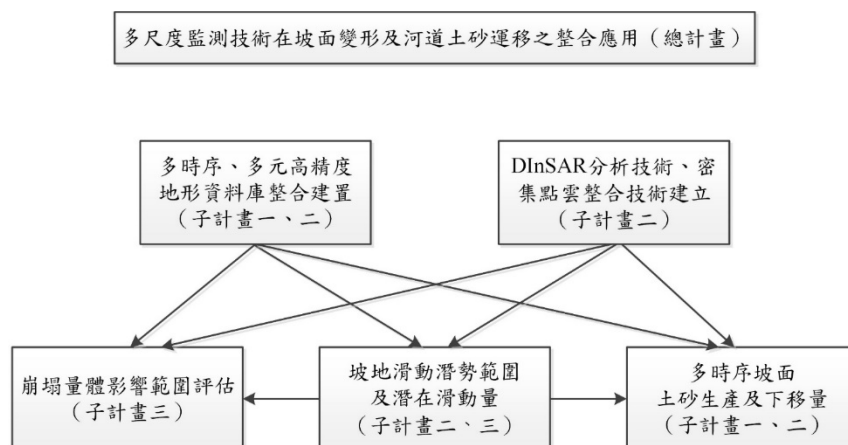
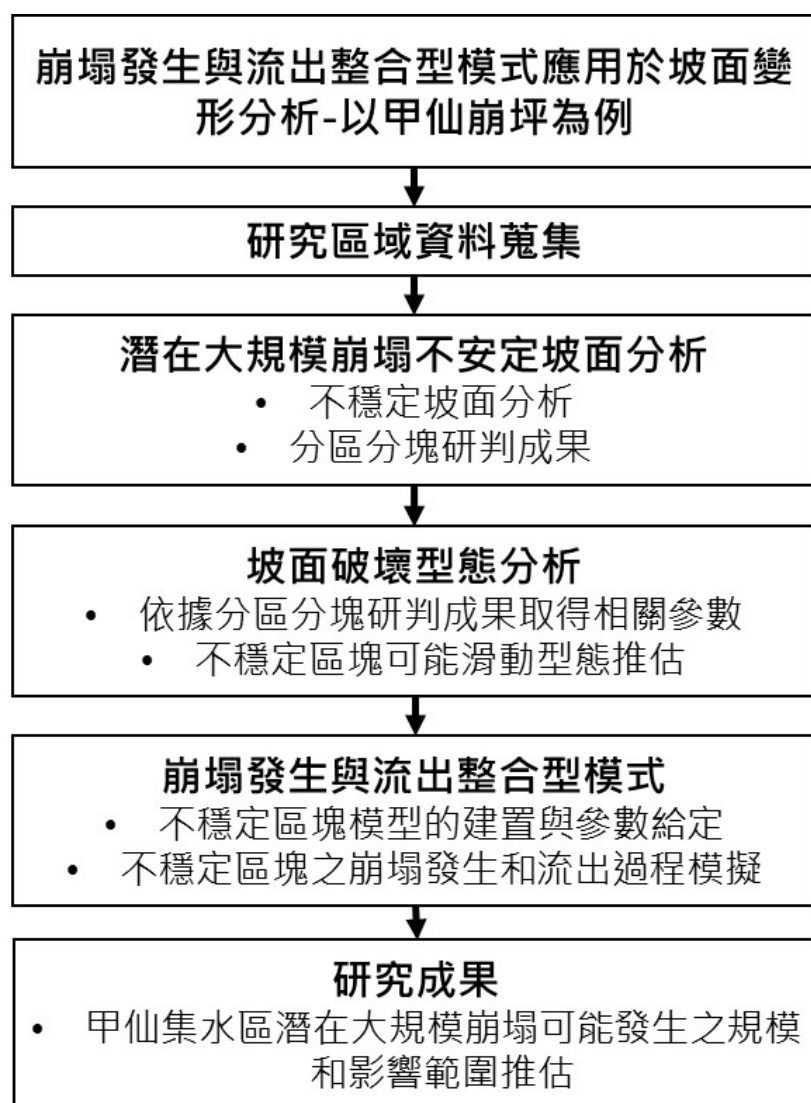


圖 1-2 多尺度檢測技術在坡面變形及河道土沙運移之整合應用計畫與本計畫之關聯圖

第三節 計畫工作項目與執行架構

本計畫將依據所提出之坡面不安定分析、坡面破壞型態分析和崩塌發生與流出整合型模式等方法，選定旗山溪流域的甲仙崩坪坑集水區做為研究區域，並探討區域內四塊大規模崩塌潛勢區坡面不安定位置、坡面破壞型態和其土砂流出之行為。計畫執行架構如圖 1-3 所示。



資料來源：本計畫

圖 1-3 計畫執行架構圖

本計畫執行將依水土保持局創研計畫相關規定辦理，計畫執行期程自110年1月27日起至110年12月31日止。已於110年4月11日繳交期初工作執行計畫書，110年7月18日繳交期中報告書，110年11月14日繳交期末報告書，110年12月23日繳交成果報告書，執行情形如表1-1。

表 1-1 計畫重要檢核點管制表

檢核點	完成日期	交付項目	數量
期初	4 月 11 日	期初報告書	正本 10 份
期中	7 月 18 日	期中報告書	正本 5 份
期末	11 月 14 日	期末報告書	正本 5 份
成果報告	12 月 23 日	成果報告書	正本 5 份

資料來源：本計畫

第二章 研究方法建立

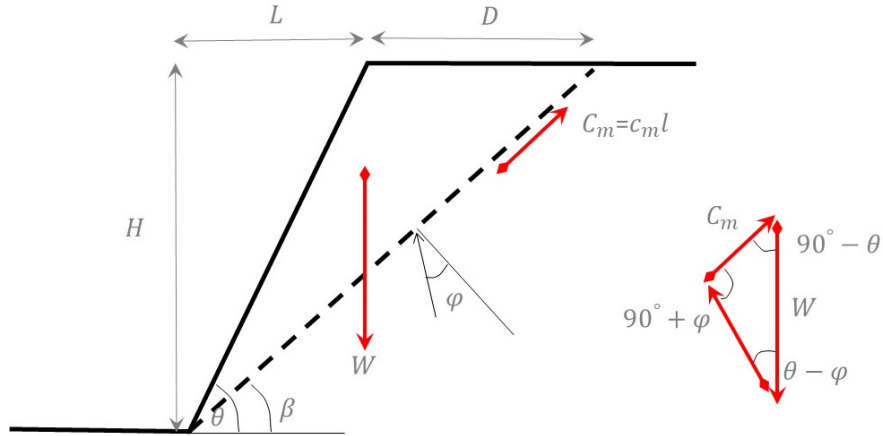
第一節 坡面不安定分析方法

一. 坡面不安定分析方法

本方法係假設大規模崩塌潛勢區域尚未進入細部調查工作之前，即區域內沒有地質鑽探、地球物理探測或現場監測等相關工作成果，且分析區域僅有多期數值地形資料的時候。是故，本研究方法將基於數值地形資料來做解析，分析過程中需要用到地質材料等相關參數，例如凝聚力、摩擦角等，由於前提假設下係現場沒有地質鑽探資料，因此本研究議提出一套地質材料參數的評估原則和反算方法。儘管大規模崩塌潛勢區域的涵蓋範圍大，且地層材料的組成複雜，在缺乏細部調查資料下，本研究假設區域材料性質均勻化，即可透過單一參數來平均化現場複雜組成的材料。接續，說明本研究所提之坡面不安定分析方法與執行過程。

Yoshino 和 Uchida (2019)透過坡面幾何和材料參數等數據，以極限平衡法來判斷潛勢區域內不安定的剖面。圖 2-1 為邊坡塊體之示意圖，其中邊坡高程差為 H ，不穩定塊體底寬為 D ，坡面投影長度為 L ，塊體之受力包含重力 W ，塊體滑動面長度為 l ，驅動力及摩擦力，原坡面角度為 θ ，滑動面角度為 β ，塊體摩擦角(抗剪角度)為 φ 。據此塊體的受力狀況說明如下：

- 重力為 $W = HD\gamma/2$ ， γ 為材料單位重
- 驅動力為 $W\sin\beta$
- 摩擦力為 $C_m + (W\cos\beta - U)\tan\varphi$ ， C_m 為凝聚力總和， U 為塊體受孔隙水壓總和
- 凝聚力總和為 $C_m = c_m l$ ， $l = \sqrt{(L + D)^2 + H^2}$
- 坡面角度與坡面幾何的關係為 $\tan\beta = H/(L + D)$



資料來源：Yoshino & Uchida，2019，本計畫重新繪製

圖 2-1 邊坡穩定分析示意圖

從塊體的靜力平衡關係，其塊體之穩定可透過安全係數(FS)進行評估，公式如下

$$FS = \frac{C_m + (W \cos \beta - U) \tan \phi}{W \sin \beta} \quad (1)$$

當塊體達臨界條件時($FS = 1$)，Culmann(1875)從正弦定理和力平衡條件可以知道凝聚力與重力作用的平衡須符合以下關係

$$\frac{C_m}{W} = \frac{\sin(\theta - \phi)}{\sin(90^\circ + \phi)} \quad (2)$$

$$\frac{C_m}{W} = \frac{c_m l}{0.5 \gamma l (H / \sin \theta) \sin(\theta - \beta)} \quad (3)$$

從(2)和(3)可得

$$\frac{C_m}{\gamma H} = \frac{\sin(\beta - \phi) \sin(\theta - \beta)}{2 \cos \phi \sin \theta} \quad (4)$$

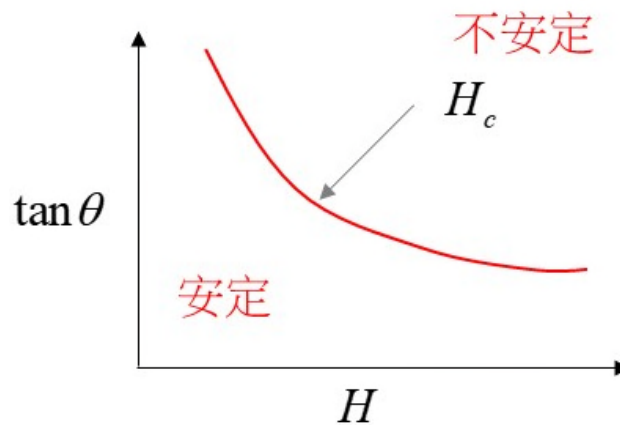
將(4)對 β 進行微分

$$\frac{d(C_m/\gamma H)}{d\beta} = \frac{\sin(\theta + \varphi - 2\beta)}{2\cos\varphi\sin\beta} \quad (5)$$

當(5)為零時可得滑動面的臨界角度(β_c)， $\beta_c = (\theta + \varphi)/2$ 。將此結果帶回(4)，可得到臨界坡高(H_c)如下

$$H_c = \frac{4C_m}{\gamma} \frac{\sin\theta\cos\varphi}{[1 - \cos(\theta - \varphi)]} \quad (6)$$

從臨界坡高方程式(6)可知坡面正切角度($\tan\beta$)和坡面高度(H)的關係(圖 2-2)。當任意坡面的高度(H)超過其坡面角度對應出的坡面臨界高度(H_c)時，即可判定此坡面處於不穩定的狀態，反之則應處於穩定狀態。

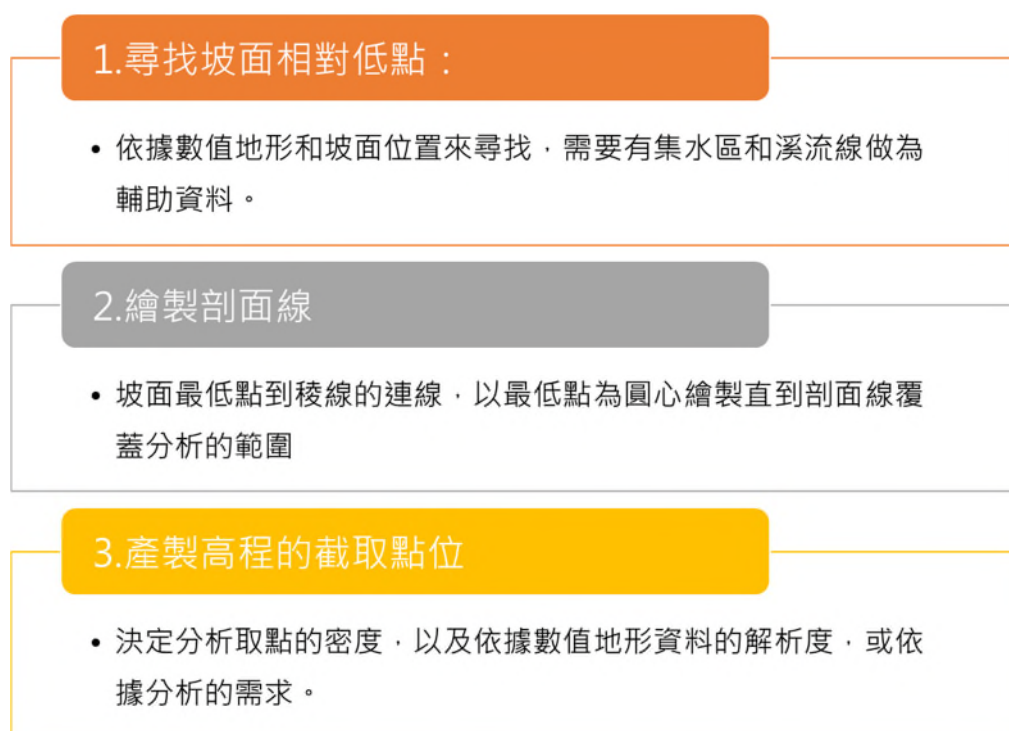


資料來源：Yoshino & Uchida，2019，本計畫重新繪製

圖 2-2 坡面正切角度($\tan\beta$)和坡面高度(H)關係圖

二. 坡面不安定區域分析流程

坡面不安定分析適用於現場地質構造模型不確定情況下，因大規模崩塌潛勢區域相關業務推動需求，例如影響範圍模評估、滑動體體積、滑動深度等，於僅有數值地形資料時，所進行的一個暫代方法。未來有更進一步資料取得時，例如完成現場細部調查和鑽井等，仍建議使用其他方法來得到業務所需的數據。因為本計畫所提之方法僅須透過數值高程來取得大量剖面，其流程說明如圖 2-3。



資料來源：本計畫

圖 2-3 坡面不安定區域分析流程

- 當上述資料皆無法取得時，基於地形的表徵來自於材料特性的事實，舉例來說摩擦角大的坡面安定角度大，本研究可透過多期數值地形資料來反推估現場的代表性材料參數，其概念如圖 2-5。

表 2-1 各種材料的摩擦角(Angle of Repose)

Material (condition)	Angle of repose
Clay (dry lump)	25–40°
Gravel (crushed stone)	45°
Gravel (natural w/ sand)	25–30°
Sand (dry)	34°
Sand (water filled)	15–30°
Sand (wet)	45°

*Al-Hashemi, H. M. B., & Al-Amoudi, O. S. B. (2018). A review on the angle of repose of granular materials. Powder Technology, 330, 397-417.

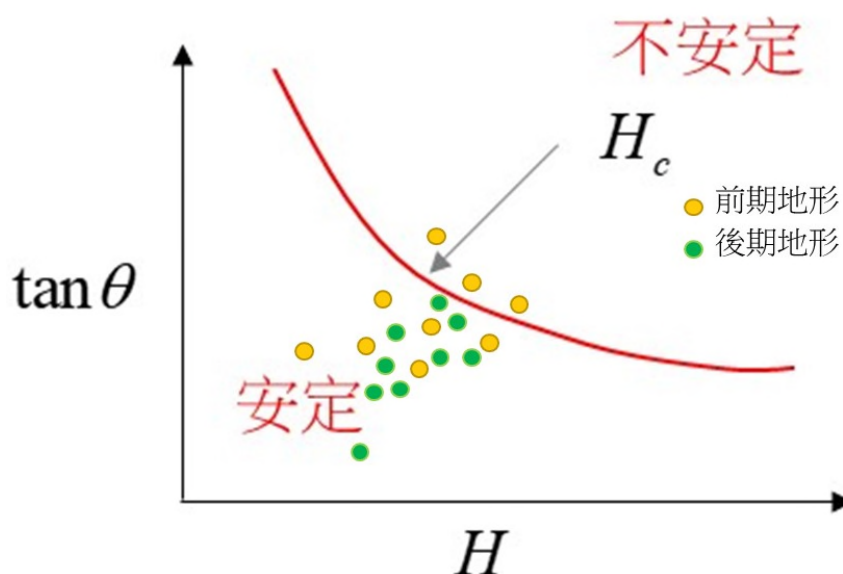
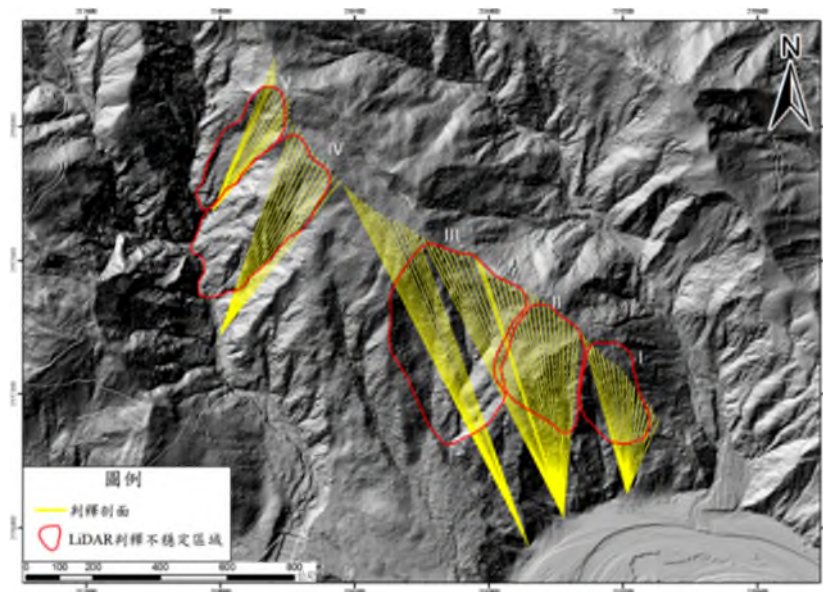


圖 2-5 坡面不安定分析材料參數透過數值地形反推概念圖

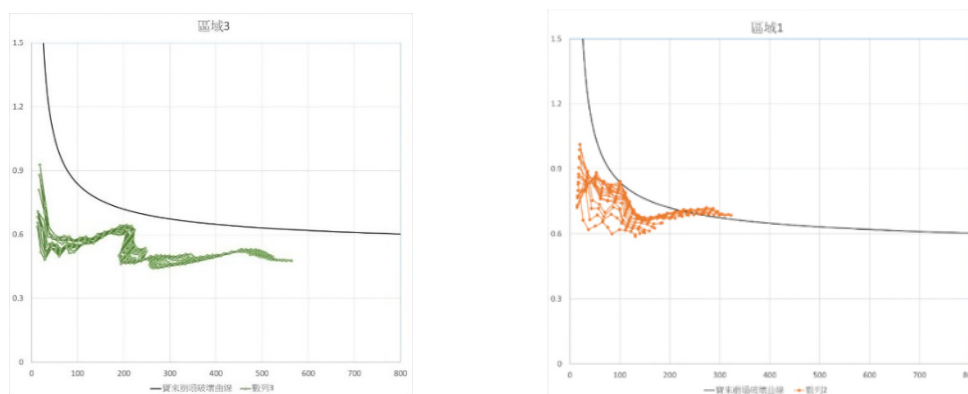
三. 不安定分析案例驗證

於 109 年水土保持局的創新研究計畫之"高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究"，曾以荖濃溪右岸之坡面為研究區域，其坡面不安定分析採用之數值地形資料與切取剖面如圖 2-6。以坡面編號 III 為例，如圖 2-7(左)，當坡面不安定分析結果為安定時，坡面任意高程坡度皆將小於破壞之臨界坡度，反之，當坡面有局部區域為不安定時，不安定之坡面的高程坡度將會大於破壞之臨界坡度，例如坡面編號 I，如圖 2-7(右)。



資料來源：水土保持局，109 年

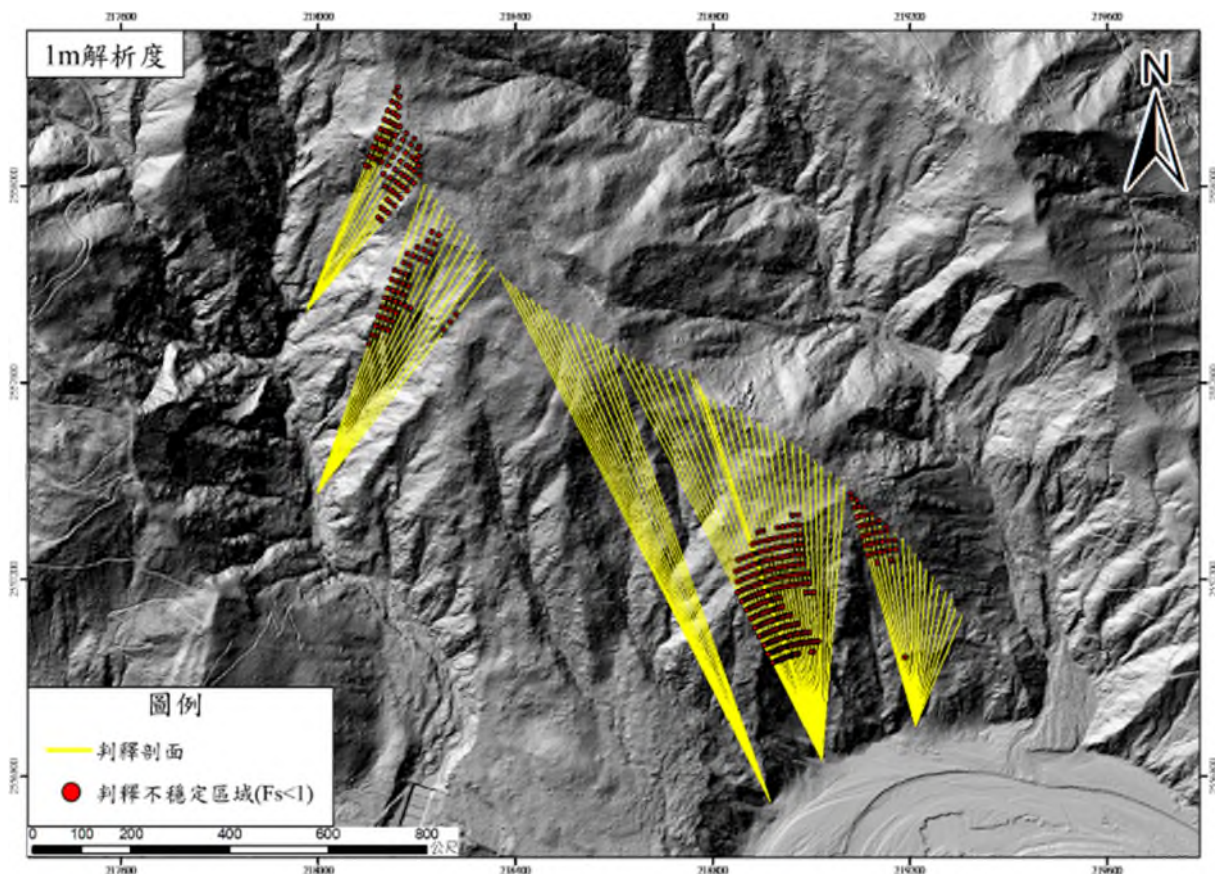
圖 2-6 荖濃溪右岸坡面不穩定分析採用之數值地形資料與切取剖面圖



資料來源：水土保持局，109 年

圖 2-7 坡面編號 III(左)和編號 I(右)的不安定分析成果

利用此方法僅需單期數值地形資料便可快速完成分析，荖濃溪右岸之坡面不安定分析結果如圖 2-8，透過此方法找出目標對象後，在執行鑽探資料分析和長期位移監測資料分析，便可大幅度降低經費和時間上的成本，若由多期數值地形，更可用來評估不穩定塊體的發育情形。



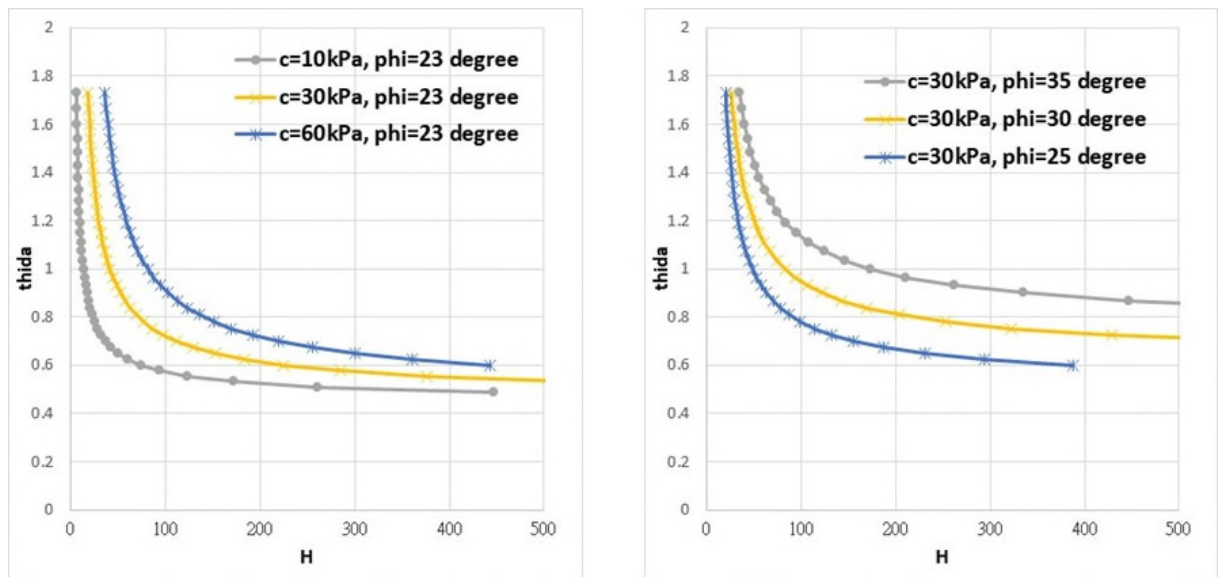
資料來源：水土保持局，109 年

圖 2-8 高雄市桃源區寶來里之荖濃溪右岸坡面不穩定分析結果圖

四. 參數敏感度測試

針對本方法使用參數進行敏感度分析，以評估個參數對於評估。圖 2-9 中左側係用來探討摩擦角固定下，凝聚力變動對崩塌發生門檻條件的影響，從結果可以知道，凝聚力越大時，容許存在的坡面高度越高，此點與現場經驗相吻合。

圖 2-9 中右側係用來探討凝聚力固定下，摩擦角變動對崩塌發生門檻條件的影響，從結果可以知道，摩擦角越大時，容許存在的坡面高度越高，此點亦與現場經驗相吻合。透過上述公式的參數變化分析，說明本計畫所提之臨界坡高公式於邊坡不安定分析的適用情況。



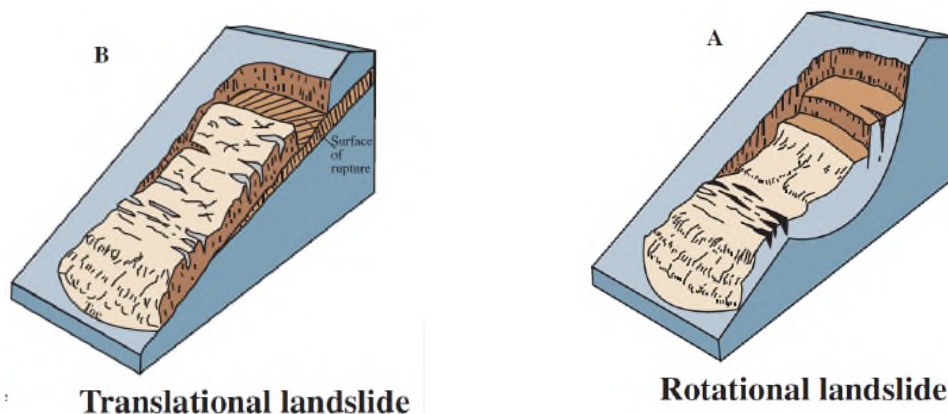
資料來源：本計畫

圖 2-9 臨界坡高公式參數敏感度分析

第二節 坡面破壞型態分析方法

一.基本方程式

本方法同樣係係假設大規模崩塌潛勢區域尚未進入細部調查工作之前，即區域內沒有地質鑽探、地球物理探測或現場監測等相關工作成果，且分析區域僅有多期數值地形資料的時候。本研究假設坡面破壞之型態與坡面幾何形狀有高度的相關性。以平面型破壞類型的崩塌為例，如圖 2-10(左)，當以理想圓形破壞面來考慮其形狀時，如圖 2-11，其坡面的長度($\bar{L}$)遠大破壞面深度($\bar{D}$)，並使得破壞面深度和曲率半徑(R)的比值($\bar{D}/R$)相對來得小。反之，當崩塌屬於圓弧形破壞類型時，如圖 2-10(右)，因著坡面長度並未遠大於破壞面深度，因此破壞面深度和曲率半徑的比值($\bar{D}/R$)相對來得大。其圖 2-11 中的 θ 為坡面角度。



資料來源 Jan Novotný 2013)

圖 2-10 平面型破壞(左)和圓弧形破壞(右)示意圖

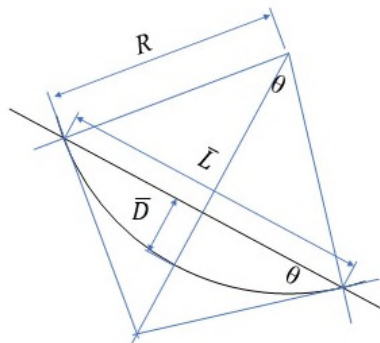


圖 2-11 坡面理想圓形破壞面示意圖

由此可以，若能透過坡面的航遙測資料來取得已知參數，例如坡面破壞面積(A)、坡面破壞深度($\bar{D}$)、坡面破壞長度(L)、坡面破壞寬度(B)、坡面破壞體積(V)等，當可透過上述參數來推估($\bar{D}/R$)值時，將有助於坡面破壞型態之判讀。

從體積(m^3)、面積(m^2)和深度(m)之間的因次關係可以知道，坡面破壞面積(A)和坡面破壞體積(V)的關係式(7)，以及坡面破壞面積(A)、坡面破壞深度($\bar{D}$)和坡面破壞體積(V)的關係式(8)，透過式(7)和(8)將可得到坡面破壞深度和坡面破壞面積之關係式(9)。

$$V = KA^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

$$V = \alpha A \bar{D} \quad (8)$$

$$\bar{D} = \frac{K}{\alpha} A^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

從圖 2-11 之坡面理想圓形破壞面可知， R 、 $\bar{D}$ 和 θ 三者之間關係如式(10)，以及 $\bar{L}$ 、 R 和 θ 三者之間關係如式(11)，透過三角函數之關係，從式(10)和(11)可推導得到式(12)，所以可以知道 R 為 $\bar{D}$ 和 $\bar{L}$ 等函數，如關係式(13)。對關係式(13)進行移項，可將式(13)改寫為式(14)，可以知道 $\bar{D}/R$ 其實為 $\bar{D}/\bar{L}$ 的函數。

$$R - \bar{D} = R \cos \theta \quad (10)$$

$$\bar{L}/2 = R \sin \theta \quad (11)$$

$$[(R - \bar{D})/R]^2 + (\bar{L}/2R)^2 = 1 \quad (12)$$

$$R = \frac{4\bar{D}^2 + \bar{L}^2}{8\bar{D}} \quad (13)$$

$$\frac{\bar{D}}{R} = \frac{8\left(\frac{\bar{D}}{\bar{L}}\right)^2}{1 + 4\left(\frac{\bar{D}}{\bar{L}}\right)^2} \quad (14)$$

接著，因為已知坡面破壞面積 A 為坡面破壞長度 $\bar{L}$ 和坡面破壞寬度 B 等函數，如式(15)，以及坡面破壞長度 $\bar{L}$ 為坡面破壞寬度 B 等函數，如式(16)，透過式(15)和(16)，坡面長度 $\bar{L}$ 可簡化為單純與坡面破壞面積 A 之函數，如式(17)。然後將式(17)帶回到式(14)中，可以發現 $\bar{D}/R$ 其實是 $\bar{D}$ 平方除以 A 之函數，如式(18)。

$$A = \beta \bar{L} B \quad (15)$$

$$B = \gamma \bar{L} \quad (16)$$

$$\bar{L} = \left(\frac{A}{\beta \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$\frac{\bar{D}}{R} = \frac{8\beta\gamma \frac{\bar{D}^2}{A}}{1 + 4\beta\gamma \frac{\bar{D}^2}{A}} \quad (18)$$

從式(9)可知道 $\bar{D}$ 平方除以 A 的結果如式(19)。將式(19)帶回到式(18)後，可以發現 $\bar{D}/R$ 其實與坡面幾何特性有相當之關係，如式(20)。因為坡面幾何特性可以快速透過單期數值地形資料，透過此方法來評估坡面破壞型態的話，便可大幅度降低經費和時間上的成本。

$$\frac{\bar{D}^2}{A} = \left(\frac{K}{\alpha} \right)^2 \quad (19)$$

$$\frac{\bar{D}}{R} = \frac{8\beta\gamma \left(\frac{K}{\alpha} \right)^2}{1 + 4\beta\gamma \left(\frac{K}{\alpha} \right)^2} \quad (20)$$

得到關係式後，後續將利用實際崩塌案例調查成果，分別帶入關係式中各參數，嘗試建立崩塌類型判別式，用來判斷潛勢區可能破壞形式。

二.崩塌案例蒐集

(一)地質調查所

地質調查所於 94 年開始進行易淹水地區上游集水區地質調查及資料建置計畫，其中子計畫「集水區侵蝕及堆積之調查與評估計畫」中，利用現場調查方式，收集台灣各流域共 301 筆崩塌資料，紀錄內容包含崩塌型態、崩塌面積、崩塌長度、崩塌寬度、崩塌深度等資料(表 2-2)。

(二)水土保持局

戴義欽於 108 年執行創新研究計畫「智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為之精進研究」，曾依據林慶偉教授等人「102 年高屏溪山坡地大規模崩塌致災潛勢調查評估」計畫判釋得知莫拉克颱風後發生之大規模崩塌，進行高屏溪流域內歷史崩塌地的幾何參數分析(表 2-3)。

本計畫以這些資料為基礎做為本項工作的分析樣本，透過樣本迴歸分析來得到用來鑑別破壞型態的 $\bar{D}/R$ 關係式。

表 2-2 全台崩塌案例基本資料表

資料來源：地質調查所，集水區侵蝕及堆積之調查與評估計畫

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
1	圓弧	21.0	33.4	2.1	751	1,576
2	平面	60.0	40.0	3.5	2,320	8,120
3	平面	21.8	42.0	1.0	2,661	2,661
4	平面	104.0	33.0	1.6	3,542	5,667
5	平面	79.6	61.0	8.0	4,370	34,960
6	楔型	114.0	182.0	10.2	16,217	165,413
7	圓弧	104.0	141.0	22.0	10,120	222,640
8	楔型	105.0	82.0	12.0	6,153	73,836
9	平面	193.0	70.0	18.5	19,456	359,936
10	圓弧	178.0	60.0	8.0	13,358	106,864
11	圓弧	70.9	80.0	3.6	3,927	14,137
12	平面	19.1	27.0	1.4	320	448
13	圓弧	106.0	84.5	7.8	9,281	72,392
14	圓弧	35.0	27.0	5.6	838	4,693
15	圓弧	81.0	82.0	8.0	3,977	31,816
16	傾翻	67.0	34.0	11.6	2,647	30,705
17	平面	80.0	63.0	7.8	3,770	29,406
18	平面	20.0	39.0	8.5	594	5,049
19	圓弧	22.0	28.0	3.1	488	1,513
20	圓弧	83.0	57.0	6.5	4,234	27,521
21	圓弧	181.0	60.0	4.1	17,566	72,021
22	圓弧	132.5	60.0	4.3	7,463	32,091
23	圓弧	126.0	106.0	4.6	10,718	49,303
24	平面	176.0	91.0	21.0	14,030	294,630
25	楔型	61.0	46.0	19.3	2,322	44,815
26	圓弧	60.0	57.0	19.0	3,274	62,206
27	圓弧	62.0	94.0	9.1	8,972	81,645
28	楔型	26.0	27.0	3.0	386	1,158
29	圓弧	49.0	26.0	3.2	2,794	8,941
30	圓弧	28.0	28.0	2.1	1,929	4,051
31	圓弧	122.0	46.0	5.2	2,088	10,858

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
32	平面	128.0	45.0	24.0	4,596	110,304
33	圓弧	208.0	105.0	15.0	15,531	232,965
34	圓弧	155.8	45.9	12.4	17,263	213,197
35	圓弧	142.4	98.1	3.5	16,773	59,208
36	圓弧	39.7	17.1	1.8	3,912	6,924
37	崩落	259.1	157.7	8.9	75,565	673,287
38	圓弧	54.2	80.7	4.7	2,269	10,596
39	圓弧	19.1	20.0	3.5	5,629	19,870
40	圓弧	120.9	125.2	14.2	1,197	17,045
41	圓弧	11.0	14.0	2.3	2,809	6,320
42	圓弧	584.2	528.4	24.3	91,200	2,217,072
43	崩落	181.0	33.9	2.6	8,283	21,867
44	圓弧	7.8	10.8	4.7	871	4,120
45	圓弧	16.1	8.7	3.1	1,815	5,663
46	圓弧	107.0	40.0	23.0	8,566	197,024
47	圓弧	64.0	94.0	24.0	6,261	150,270
48	圓弧	112.0	35.0	23.0	4,840	111,309
49	圓弧	39.0	50.0	12.0	1,533	18,394
50	圓弧	66.0	79.5	11.0	4,845	53,293
51	圓弧	75.0	87.0	16.0	3,775	60,393
52	崩落	50.0	29.0	13.0	1,439	18,704
53	圓弧	65.7	44.6	7.5	3,775	28,313
54	圓弧	27.3	55.0	11.0	1,129	12,416
55	圓弧	137.0	58.0	8.5	9,048	76,911
56	崩落	39.0	146.0	10.9	5,378	58,618
57	圓弧	131.0	67.0	26.0	12,110	314,855
58	崩落	128.0	216.0	14.0	21,410	299,744
59	圓弧	156.0	30.0	17.0	14,396	244,730
60	崩落	296.0	892.0	15.0	48,864	732,959
61	圓弧	286.0	144.0	14.0	35,749	500,483
62	崩落	316.0	427.0	15.0	67,541	1,013,109
63	崩落	57.0	152.0	15.0	12,417	186,251
64	崩落	57.0	227.0	12.0	12,628	151,538

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
65	崩落	38.0	145.0	10.0	1,321	13,205
66	崩落	41.0	153.0	6.0	4,979	29,872
67	圓弧	124.0	137.0	10.0	18,014	180,144
68	崩落	150.0	313.0	4.4	15,800	69,518
69	圓弧	106.0	160.0	8.0	11,400	91,200
70	崩落	116.0	383.0	15.0	29,025	435,381
71	崩落	22.0	61.2	2.0	1,156	2,311
72	圓弧	17.0	27.9	4.2	504	2,117
73	圓弧	25.0	20.8	4.2	528	2,217
74	崩落	50.2	43.0	8.7	2,787	24,243
75	圓弧	86.0	178.0	11.0	19,044	209,479
76	崩落	60.0	107.0	8.0	3,800	30,396
77	平面	108.0	45.0	2.9	8,138	23,601
78	圓弧	3.9	20.1	2.3	180	414
79	圓弧	16.0	24.0	3.0	420	1,260
80	圓弧	118.0	50.0	5.6	2,059	11,531
81	崩落	74.0	132.0	11.0	6,305	69,356
82	崩落	50.7	64.0	5.6	3,745	20,970
83	圓弧	210.0	59.0	23.0	5,416	124,574
84	圓弧	55.0	103.0	6.0	6,147	36,883
85	圓弧	187.0	316.0	26.0	41,283	1,073,353
86	圓弧	121.0	304.0	21.0	17,660	370,852
87	圓弧	73.0	53.2	5.9	4,635	27,348
88	崩落	93.0	80.0	11.0	7,482	82,301
89	崩落	108.0	157.0	8.0	16,895	135,157
90	圓弧	208.0	243.0	6.0	27,484	164,905
91	圓弧	67.0	25.0	4.9	1,739	8,522
92	圓弧	145.0	31.0	6.0	2,004	12,025
93	圓弧	195.0	157.0	16.0	25,634	410,142
94	圓弧	158.0	88.0	7.0	18,869	132,085
95	圓弧	239.0	56.0	8.0	13,363	106,903
96	圓弧	172.0	55.0	8.0	4,867	38,932
97	圓弧	41.0	27.0	4.0	3,901	15,605

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
98	圓弧	140.0	32.0	4.0	6,907	27,627
99	圓弧	610.0	103.0	52.0	111,122	5,778,344
100	圓弧	134.0	141.0	12.0	6,856	82,271
101	楔型	162.0	20.0	7.0	3,217	22,515
102	楔型	210.0	63.0	13.0	14,347	186,511
103	圓弧	431.0	83.0	7.0	8,234	57,635
104	崩落	45.6	91.0	3.0	1,525	4,576
105	崩落	13.3	16.1	0.7	245	172
106	圓弧	675.0	113.0	16.0	106,170	1,698,720
107	圓弧	180.0	32.7	4.5	6,726	30,267
108	圓弧	94.0	36.0	6.0	6,977	41,860
109	圓弧	131.9	16.2	8.0	3,182	25,452
110	崩落	115.0	98.0	2.0	7,707	15,414
111	圓弧	40.0	24.0	3.0	924	2,771
112	圓弧	73.0	30.0	3.0	5,452	16,355
113	崩落	357.0	50.3	4.0	19,739	78,956
114	圓弧	19.0	11.0	0.8	207	166
115	圓弧	393.0	38.0	12.0	9,966	119,592
116	圓弧	215.0	49.0	6.0	13,006	78,038
117	崩落	133.0	31.7	4.0	2,082	8,327
118	圓弧	211.0	73.9	6.0	17,139	102,832
119	圓弧	448.0	80.0	8.0	20,750	165,998
120	崩落	209.0	68.3	5.0	27,422	137,111
121	崩落	20.3	19.9	1.4	430	603
122	圓弧	14.4	7.7	1.0	125	125
123	圓弧	65.0	23.0	4.0	2,317	9,268
124	崩落	63.0	30.0	3.0	2,581	7,742
125	平面	6.0	12.0	1.0	140	140
126	圓弧	132.0	45.6	2.5	8,399	20,998
127	圓弧	37.0	20.0	1.2	922	1,107
128	圓弧	48.0	26.0	2.0	1,373	2,746
129	圓弧	10.0	12.9	1.0	234	234
130	崩落	15.6	7.0	0.5	83	41

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
131	崩落	14.2	39.5	3.8	734	2,790
132	圓弧	36.0	29.0	2.0	1,041	2,081
133	崩落	25.3	33.6	1.2	819	982
134	圓弧	14.4	5.1	0.5	135	68
135	崩落	34.8	25.0	2.4	550	1,320
136	圓弧	104.3	26.7	2.0	2,951	5,902
137	崩落	54.4	60.7	2.6	3,347	8,703
138	崩落	177.0	131.0	4.5	22,398	100,789
139	崩落	12.2	13.1	1.3	332	432
140	圓弧	65.0	48.0	1.5	4,613	6,920
141	圓弧	75.0	86.0	3.0	10,450	31,351
142	崩落	31.3	62.6	1.6	3,793	6,068
143	崩落	70.8	79.0	3.7	3,659	13,537
144	崩落	27.0	65.0	2.0	2,105	4,210
145	崩落	22.4	74.1	4.7	2,238	10,519
146	圓弧	53.2	37.4	3.9	2,581	10,064
147	圓弧	23.2	17.7	3.7	678	2,507
148	平面	100.5	98.9	4.0	9,893	39,573
149	圓弧	156.0	109.0	4.0	20,128	80,514
150	圓弧	157.0	116.0	6.0	14,263	85,575
151	圓弧	75.0	50.0	4.0	2,223	8,894
152	圓弧	59.0	106.0	5.0	14,983	74,917
153	圓弧	77.0	130.0	5.0	6,656	33,278
154	圓弧	132.0	91.0	8.0	15,518	124,140
155	圓弧	114.0	94.0	5.0	7,886	39,431
156	楔型	122.0	106.0	12.0	19,361	232,331
157	崩落	71.0	110.8	3.0	11,393	34,178
158	崩落	281.0	60.0	2.4	3,311	7,947
159	圓弧	136.0	43.0	9.0	8,957	80,611
160	崩落	8.8	30.4	0.6	174	104
161	崩落	11.4	10.8	0.7	137	96
162	崩落	24.4	20.1	0.6	1,503	902
163	崩落	61.0	41.0	2.0	1,438	2,876

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
164	崩落	63.0	44.0	4.0	3,362	13,447
165	崩落	65.9	63.2	2.9	3,597	10,431
166	崩落	26.0	29.5	2.8	593	1,660
167	圓弧	34.4	47.2	3.3	739	2,440
168	圓弧	192.0	126.0	8.0	17,612	140,898
169	崩落	62.6	62.8	4.3	4,645	19,971
170	圓弧	156.0	92.0	7.0	12,405	86,835
171	崩落	35.9	37.3	4.8	2,391	11,476
172	崩落	85.0	80.0	8.0	8,091	64,728
173	崩落	51.8	33.0	2.7	2,049	5,534
174	圓弧	53.8	51.3	5.8	4,974	28,851
175	圓弧	32.1	82.7	5.5	10,134	55,735
176	崩落	45.7	59.5	2.9	2,637	7,647
177	圓弧	146.0	69.4	8.0	14,744	117,948
178	圓弧	255.0	119.7	10.0	18,564	185,641
179	圓弧	312.0	128.0	10.0	24,624	246,235
180	崩落	43.9	37.2	1.5	1,683	2,525
181	崩落	115.5	26.3	3.0	2,824	8,472
182	崩落	15.0	13.5	0.5	179	90
183	崩落	77.3	92.9	4.5	7,379	33,207
184	崩落	106.0	29.2	2.5	3,430	8,574
185	崩落	67.3	52.7	3.0	2,978	8,933
186	崩落	41.5	95.7	1.5	2,731	4,096
187	平面	658.6	363.4	14.0	175,691	2,459,674
188	崩落	29.5	48.1	4.0	1,470	5,881
189	圓弧	137.5	88.3	7.0	11,374	79,620
190	崩落	41.4	32.7	2.0	1,113	2,225
191	崩落	138.2	70.2	7.0	9,563	66,937
192	崩落	70.1	25.0	5.0	1,815	9,074
193	崩落	41.2	21.8	1.0	898	898
194	崩落	55.5	58.7	4.0	5,682	22,729
195	崩落	193.5	91.5	7.5	15,700	117,752
196	圓弧	199.0	71.0	7.0	13,078	91,544

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
197	崩落	129.2	149.3	6.0	17,462	104,770
198	圓弧	245.3	96.1	10.0	18,118	181,175
199	崩落	144.9	86.8	7.0	9,127	63,887
200	崩落	114.6	127.1	4.0	12,975	51,900
201	崩落	124.8	134.2	5.0	14,212	71,062
202	崩落	18.2	49.8	2.0	896	1,792
203	圓弧	294.7	203.2	13.0	56,798	738,371
204	崩落	57.4	14.9	2.0	790	1,580
205	崩落	75.8	88.6	6.0	6,600	39,599
206	圓弧	316.7	107.7	8.0	27,837	222,693
207	圓弧	122.2	65.8	3.0	8,024	24,071
208	圓弧	247.8	87.8	4.0	20,424	81,696
209	崩落	162.5	121.4	8.0	17,604	140,834
210	平面	376.2	153.2	9.0	60,588	545,295
211	圓弧	76.0	67.0	3.0	3,330	9,989
212	崩落	5.3	11.8	1.1	99	109
213	楔型	19.0	76.6	2.5	1,328	3,320
214	崩落	20.4	23.0	3.1	681	2,111
215	圓弧	33.0	56.0	5.0	3,484	17,422
216	圓弧	110.9	81.4	5.2	6,047	31,445
217	崩落	73.4	47.0	1.3	1,061	1,379
218	崩落	28.0	37.0	2.0	505	1,010
219	楔型	13.8	25.4	3.1	779	2,414
220	圓弧	117.0	62.0	6.0	3,710	22,261
221	崩落	55.6	67.7	2.6	2,133	5,547
222	圓弧	102.0	41.0	5.0	2,938	14,690
223	崩落	21.3	15.1	2.1	254	533
224	圓弧	22.2	19.0	2.4	315	757
225	圓弧	62.0	34.0	5.0	1,890	9,450
226	圓弧	49.0	24.0	3.0	1,906	5,718
227	圓弧	28.0	38.0	4.0	1,229	4,914
228	圓弧	36.8	42.8	5.8	3,274	18,988
229	崩落	105.0	176.9	12.0	26,767	321,200

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
230	圓弧	47.0	64.0	7.0	3,913	27,389
231	崩落	18.0	34.0	4.0	617	2,468
232	圓弧	50.1	54.1	3.7	1,422	5,263
233	圓弧	113.0	74.0	5.0	7,520	37,602
234	崩落	34.0	23.0	3.0	1,195	3,584
235	崩落	61.0	140.0	5.0	6,675	33,375
236	圓弧	37.0	24.0	3.0	1,085	3,255
237	圓弧	42.0	44.0	3.0	1,986	5,958
238	崩落	12.3	24.6	1.5	159	238
239	平面	34.1	46.0	3.3	2,307	7,613
240	楔型	60.7	28.7	6.5	2,325	15,113
241	崩落	17.0	70.0	5.0	1,320	6,600
242	圓弧	30.3	41.0	3.5	1,442	5,045
243	圓弧	48.0	51.0	4.0	3,739	14,956
244	圓弧	25.0	60.0	3.0	1,265	3,796
245	崩落	38.7	60.5	3.8	2,337	8,881
246	崩落	56.0	103.9	2.2	3,013	6,628
247	圓弧	248.0	186.0	15.0	44,301	664,517
248	圓弧	25.0	27.0	4.0	746	2,982
249	圓弧	63.7	21.1	1.0	1,155	1,155
250	圓弧	16.0	65.0	1.0	812	812
251	楔型	21.0	53.0	1.0	857	857
252	圓弧	10.2	53.0	4.0	439	1,754
253	圓弧	36.0	15.0	2.0	1,308	2,615
254	圓弧	31.0	38.0	4.0	1,039	4,157
255	圓弧	147.4	64.9	7.0	13,078	91,544
256	崩落	78.4	50.2	4.0	4,571	18,282
257	崩落	9.7	24.9	1.0	398	398
258	楔型	92.1	98.9	6.0	6,911	41,463
259	圓弧	206.5	55.1	5.0	9,921	49,607
260	楔型	159.8	45.8	6.0	7,674	46,041
261	圓弧	182.3	67.5	7.0	11,018	77,127
262	崩落	42.7	89.4	3.0	3,844	11,531

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
263	圓弧	163.4	73.4	5.0	8,815	44,074
264	崩落	97.5	64.0	5.0	6,768	33,839
265	平面	491.0	415.0	30.0	215,005	6,450,150
266	圓弧	1556.0	911.6	70.0	1,015,490	71,084,300
267	圓弧	987.6	534.9	45.0	500,209	22,509,405
268	圓弧	49.6	53.5	4.7	3,940	18,518
269	崩落	5.3	16.8	0.4	175	70
270	圓弧	30.4	55.9	1.8	1,401	2,522
271	崩落	17.5	34.9	1.1	899	989
272	崩落	29.0	12.0	1.0	1,011	1,011
273	崩落	40.6	66.4	1.7	2,654	4,512
274	崩落	22.8	22.5	1.2	1,470	1,764
275	崩落	42.0	19.0	3.0	4,136	12,408
276	崩落	61.0	9.0	1.0	2,607	2,607
277	圓弧	24.9	13.5	1.9	1,372	2,607
278	圓弧	29.6	18.0	1.6	614	983
279	圓弧	132.0	47.0	4.0	5,056	20,223
280	圓弧	137.0	66.0	3.0	5,174	15,521
281	圓弧	83.0	41.0	2.0	1,456	2,912
282	圓弧	19.6	14.1	0.8	609	487
283	圓弧	31.2	14.8	1.0	571	571
284	圓弧	106.0	34.0	2.0	2,755	5,510
285	崩落	8.6	15.8	2.2	235	518
286	圓弧	49.8	84.0	6.3	3,418	21,536
287	崩落	29.0	114.0	4.7	2,762	12,982
288	圓弧	144.0	46.0	3.5	6,624	23,184
289	圓弧	81.0	35.0	7.2	4,236	30,496
290	圓弧	428.0	67.0	11.2	11,630	130,254
291	圓弧	34.0	38.0	3.8	1,292	4,910
292	圓弧	155.8	122.1	6.0	16,919	101,513
293	崩落	54.1	81.8	3.0	4,093	12,280
294	圓弧	152.8	66.2	7.0	8,351	58,459
295	崩落	139.6	126.2	10.0	17,845	178,454

編號	類型	長軸 (m)	短軸 (m)	深度 (m)	面積 (m ²)	體積(m ³)
296	崩落	44.1	44.2	2.0	2,047	4,094
297	圓弧	528.9	205.5	17.0	117,941	2,004,997
298	圓弧	410.0	184.5	12.0	59,834	718,004
299	崩落	70.9	112.7	2.0	6,879	13,758
300	圓弧	83.0	41.9	5.0	3,477	17,384
301	崩落	199.0	80.5	6.0	14,305	85,828

表 2-3 高屏溪 24 處大規模崩塌區基本資料表

資料來源：108 年智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為之精進研究

參數 編號	面積 (m ²)	體積 (m ³)	長軸 (m)	短軸 (m)	平均厚 度 (m)	最大厚 度(m)
05-1	164,850	2,427,722	896.16	215.75	14.72	45.18
05-2	102,425	1,665,283	634.45	240.89	16.26	40.42
06-1	25,225	180,422	292.15	115.26	7.15	21.43
06-2	35,475	342,127	375.62	135.49	9.64	24.27
08-1	115,425	2,547,237	557.64	323.73	22.07	55.67
09-1	64,650	712,707	520.48	245.06	11.02	27.44
10-1	46,300	810,747	415.61	157.61	17.51	49.19
11-1	150,950	1,453,342	436.42	440.87	9.63	31.3
11-2	49,100	307,430	170.65	268.34	6.26	19.96
13-1	60,175	1,246,874	445.38	166.85	20.72	53.34
19-1	19,075	331,761	294.59	70.27	17.39	54.96
23-1	30,525	231,002	407.31	96.28	7.57	21.41
25-1	125,775	1,751,296	717.62	412.34	13.92	43.54
27-1	96,900	1,480,282	619.99	181.24	15.28	37.88
28-1	89,650	2,190,756	480.22	336.72	24.44	65.89
33-1	226,025	4,277,095	1067.17	306.68	18.92	52.87
34-1	35,525	701,206	369.84	135.44	19.74	46.35
35-1	85,200	1,483,192	478.57	258.57	17.41	40.41
37-1	20,200	164,992	306.84	82.22	8.17	25.49
41-1	51,225	388,659	572.36	183.89	7.59	24.4
42-1	16,975	226,311	218.53	121.95	13.33	33.34
42-2	43,900	605,431	494.36	134.1	13.79	30.73
44-1	53,400	543,108	358.28	195.52	10.17	31.19
45-1	37,850	336,763	304.24	205.02	8.9	25.27
46-1	16,325	134,270	177.16	120.97	8.22	19.38
47-1	37,175	366,310	309.62	137.69	9.85	22.01
48-1	64,425	759,293	475.14	209.81	11.79	30.28
50-1	212,000	4,185,647	910.38	429.3	19.74	64.24

三.關係式建立

利用地質調查所與水土保持局蒐集案例之參數，針對體積超過 10 萬立方公尺之案例進行 $\bar{D}/R$ 之計算，成果如圖 2-12 所示，途中藍色圓點為崩塌體積小於 10 萬立方公尺之案例，橘色圓點為崩塌體積為 10 至 100 萬立方公尺之案例，灰色點為 100 萬立方公尺以上之案例，可以看到當體積越大時， $\bar{D}/R$ 越小，說明體積越大之案例其破壞形態越接近平面型破壞之形式。

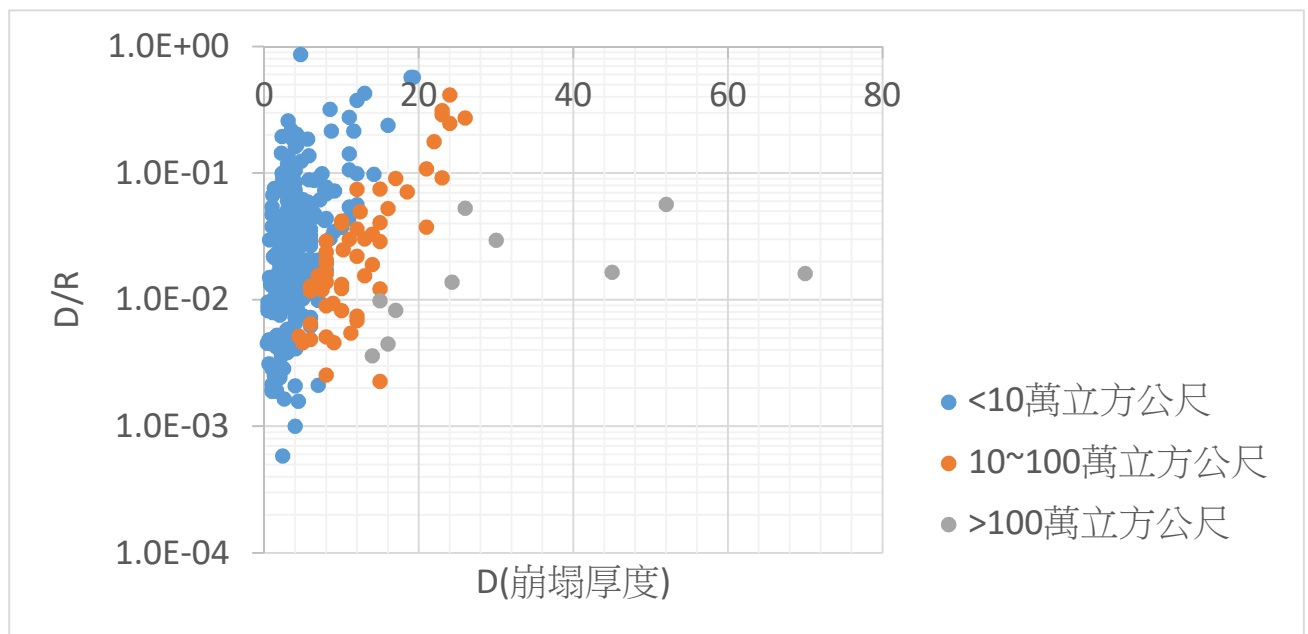


圖 2-12 崩塌案例 $\bar{D}/R$ 計算成果

第三節 整合型崩塌發生與流出模式

一. 崩塌發生與流出整合型模式

(一) 模式理論與假設條件

本研究所提適用於整合型大規模崩塌發生與流出階段之模式，係以流固耦合理論為基本方程式，然後以材料質點法(Material point method, MPM)為數值方法來開發的模式。模式之發展與應用，係成大防災研究中心自 2017 年開始與荷蘭三角洲研究機構於降雨促崩現象的研究成果(Lee et al. 2019a; Lee et al. 2019b; 李威霖 2020; Lee et al. 2021)。以連續體力學為基礎建置的力學模式，常從巨觀角度來假設材料係由均勻材質所組成，例如 GeoStudio、PLAXIS 等模式，本研究所提模式亦循此一假設。

假設未飽和土壤的構成如圖 2-13 所示，從降雨入滲到邊坡破壞後流出的過程中，模式理論為能考慮固液兩相交互作用的影響，後續方程式混合物、固相和液相的各物理量分別以下標 m 、 s 和 l 來表示。假設連續體的單元總體幾何(V)等於固相體積(V_s)加上孔隙體積(V_{void})，孔隙率(n)可表示為 V_{void}/V 。當液相體積表示為 V_l ，飽和度(S_l)等於 V_l/V_{void} 。所以，混合物密度(ρ_m)與固相密度(ρ_s)和液相密度(ρ_l)的關係為 $\rho_m = (1 - n)\rho_s + n\rho_l$ 。

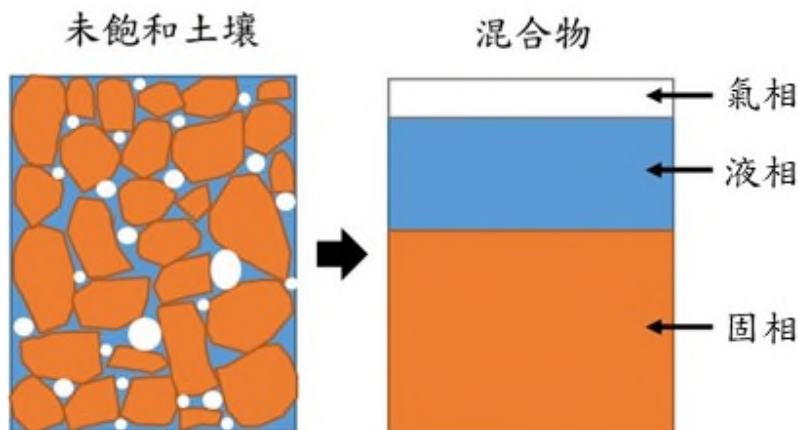


圖 2-13 連續體力學以固液汽三相表示未飽和土壤之示意圖

後續模式理論遵循以下幾點基本假設：

- 孔隙介質的溫度不隨時空改變(isothermal condition)
- 固液兩相間的質量不互相交換
- 孔隙介質的固相係由顆粒堆積而成，顆粒體積本身不可壓縮
- 孔隙介質中孔隙率空間導數(∇n)假設很小
- 孔隙介質中液相質量空間導數($\nabla n S_l \rho_l$)假設很小

理論模式中液相的動量方程式可表示為

$$\rho_l \mathbf{a}_l = \nabla p_l + \rho_l \mathbf{b} + \frac{n S_l \mu_l}{k_{rel} k_l} (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s), \quad (\text{A})$$

其中， $\mathbf{a}_l$ 為液相的加速度， p_l 為孔隙氣壓， $\mathbf{b}$ 則為物體力。方程式右邊的第三項係以達西律(Darcy law)來表示滲流對顆粒的拖曳力， μ_l 為液相的動黏滯係數， k_l 為固有滲透係數， $\mathbf{v}_s$ 和 $\mathbf{v}_l$ 分別為固相和液相的速度。由於滲透係數會受飽和度變化影響下改變，式中以 k_{rel} 表示為相對滲透係數。另外，式中 $n S_l (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s)$ 為液體在孔隙介質中的滲流速度($\mathbf{w}$)，又可被稱作為達西速度。

理論模式中混合物的動量方程式可表示為(2)。 $\mathbf{a}_m$ 和 $\mathbf{a}_s$ 分別為混合物和固相的加速度， $\boldsymbol{\sigma}$ 為混合物的總應力。透過(1)，固相加速度可透過(C)式來求得，式中 $\mathbf{I}$ 為單位應力向量。

$$\mathbf{a}_m = (1 - n) \rho_s \mathbf{a}_s + n S_l \rho_l \mathbf{a}_l = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho_m \mathbf{b}. \quad (\text{B})$$

$$(1 - n)\rho_s \mathbf{a}_s = \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} - nS_l p_l \mathbf{I}) + (\rho_m - nS_l \rho_l) \mathbf{b} + \frac{nS_l \mu_l}{k_{rel} k_l} nS_l (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s). \quad (C)$$

模式理論中，依循基本假設的第三和第四點，固相的連續方程式可以表示為

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (1 - n) \nabla \cdot \mathbf{v}_s. \quad (D)$$

於液相的連續方程式中，假設液相密度的時間導數($\partial \rho_l / \partial t$)和飽和度的時間導數($\partial S_l / \partial t$)皆為孔隙水壓時間導數($\partial p_l / \partial t$)的函數，且吸力(s)與孔隙水壓(p_l)和孔隙氣壓(p_a)的關係為 $s = p_a - p_l$ ，其液相的連續方程式可表示為

$$\frac{\partial p_l}{\partial t} = \frac{K_l}{\left(1 - \frac{K_l}{S_l} \frac{\partial S_l}{\partial s}\right)} \left[\frac{(1 - n)}{n} \nabla \cdot \mathbf{v}_s + \nabla \cdot \mathbf{v}_l \right], \quad (E)$$

其中， K_l 為液相的體積模數， $\partial S_l / \partial s$ 為比水分容量(specific moisture capacity, Zienkiewicz et al. 1990)

模式理論納入甘保式的土壤水分特性曲線(van Genuchten retention curve, Genuchten 1980)，其式可表示為

$$S_l = S_{min} + (S_{max} - S_{min}) \left[1 + \left(\frac{s}{p_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \text{ for } s \geq 0, \quad (F)$$

其中， p_0 為進氣壓(單位：kPa)， kPa 為實驗迴歸參數， S_{max} 和 S_{min} 分別為最大飽合度和殘餘飽合度。理論模式並未考慮未飽和土壤的遲滯效

應。由於相對滲透係數會隨飽合度變化而改變，Muallem(1976)的關係式被使用在模式之中

$$S_e = \frac{S_l - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \text{ for } s \geq 0, \quad (G)$$

$$k_{rel}(S_l) = (S_e)^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{\lambda}} \right)^\lambda \right]^2 \text{ for } s \geq 0, \quad (H)$$

其中， S_e 為有效飽合度。基於式(6)，比水分容量($\partial S_l / \partial s$)可以推倒得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_l}{\partial s} = & (S_{max} - S_{min}) \left(\frac{-\lambda}{1-\lambda} \right) \left(\frac{1}{p_0} \right) \left[\frac{|s|^{\left(\frac{\lambda}{1-\lambda}\right)}}{p_0} \right] \left[1 \right. \\ & \left. + \left(\frac{|s|^{\left(\frac{1}{1-\lambda}\right)}}{p_0} \right)^{(-\lambda-1)} \right] \text{ for } s \geq 0. \end{aligned} \quad (I)$$

模式理論中，採用 Bishop 的未飽合土壤有效應力(σ')，其關係式為 $\sigma - S_l p_l I$ 。其有效應力的增加量($d\sigma'$)與材料體積應變的增加量($d\varepsilon$)有關，假設邊坡於發生階段時(穩定狀態到崩塌發生前)遵循彈性應變原則，如圖 2-14，其構成法則可表示為 $d\sigma' = D d\varepsilon$ ，其中 D 為應變係數矩陣；假設邊坡於流出階段時(崩塌發生後)的運動近似流動，其有效應力的增加量應納入流動狀態(渦度, vorticity, $\mathbf{W}$)的考慮，此時的構成法則遵循耀曼應力率 (Jaumann stress rate)，其表示為 $d\sigma' = D d\varepsilon + \sigma' \mathbf{W}^T - \mathbf{W} \sigma'$ 。

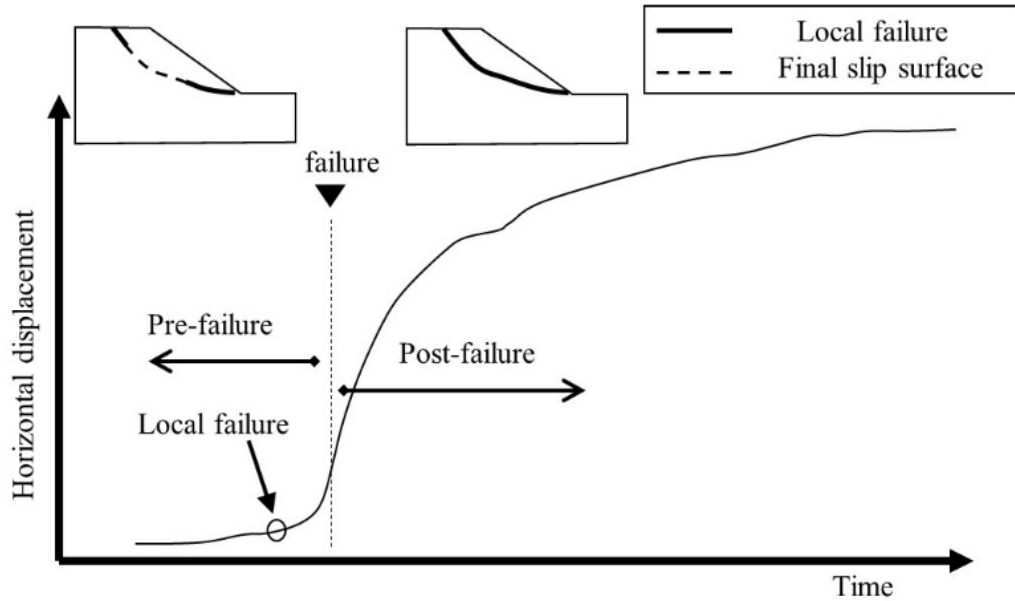


圖 2-14 崩塌發生階段(pre-failure)和流出階段(post-failure)示意圖

理論模式以摩爾庫倫破壞準則(Mohr-Coulomb failure criteria)作為崩塌發生階段和流出階段的判斷，其依據為主應力(σ'_1 , σ'_3 , $\sigma'_1 \geq \sigma'_3$)、摩擦角(φ)、剪脹角(ψ)、凝聚力(c)等參數，分別可以屈服函數(yield function, F)和塑性勢函數(plastic potential function, G)做表示

$$F = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\varphi + c\cos\varphi, \quad (J)$$

$$G = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\psi + C, \quad (K)$$

其中， C 為係數。

(二)數值方法

材料質點法的概念係於有限元素法的網格(mesh)中配置材料點(material points, MPs)，如圖 2-15。計算開始時，將連續體的資訊從材料點配置到網格節點(node)上，如圖 2-15 中的(A)，然後於節點上求解液體和混合物的動

量方程式，求解後可得到任一時刻的液體加速度和固體加速度，如圖 2-15 中的(B)。接著，以顯示歐拉法(Explicit Euler Method)推估下一個時刻的液固體速度。然後，將求解得到的液固體速度重新配置到材料點上，如 2-15 中的(C)。此時，將可於材料點上求解應力應變關係式、固體連續方程式和液體連續方程式，求解後得到下一個時刻的土壤有效應力、孔隙率和孔隙水壓，如 2-15 中的(D)。因為飽和度和相對水力傳導係數是孔隙水壓的函數，所以當下一個時刻的孔隙水壓得到時，可透過滲流構成法則來求得下一個時刻的飽和度和相對水力傳導係數。材料質點法解析的細部流程可參照蔡元融 109 年執行水保局創新研究計畫「高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究」。

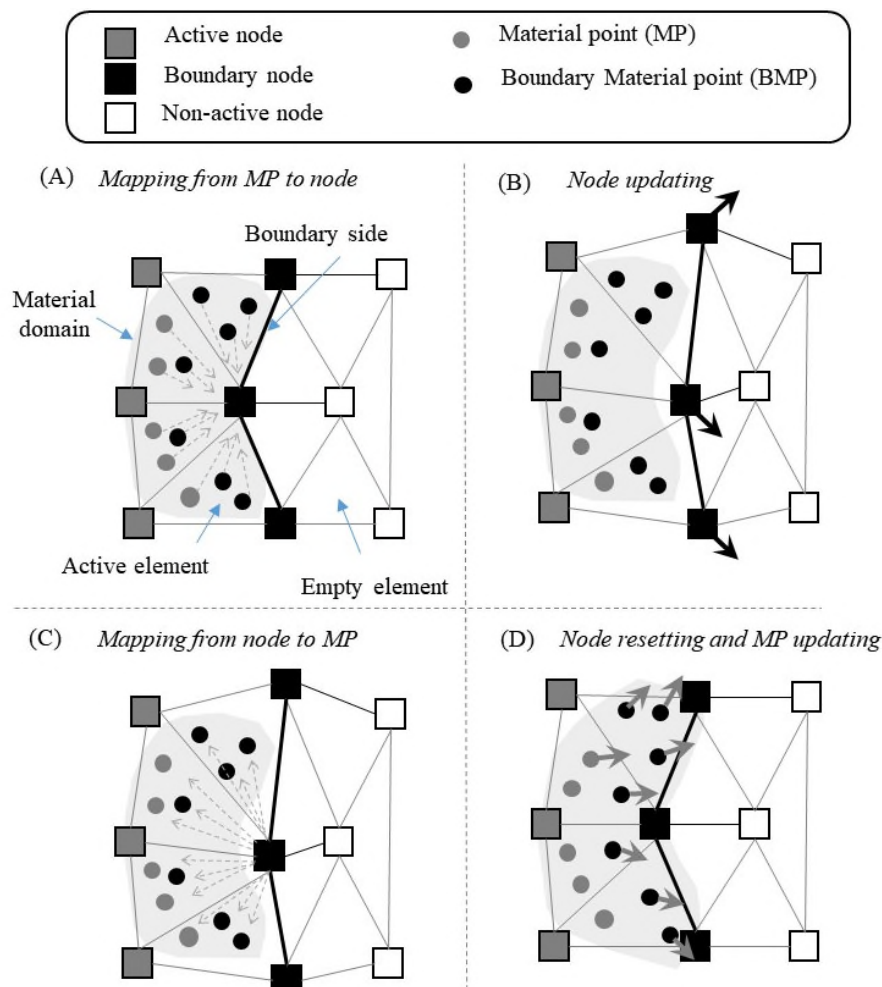


圖 2-15 材料質點法計算概念圖

模式邊界與初始條件的給定，如圖 2-16 所示。模式計算開始前，可依需求分別給定位移邊界、接觸邊界和降雨邊界。其中，位移邊界給定在邊坡主體(material phase)四周的節點(node)上，其給定為已知的固相速度和固相加速度(Bandara and Soga, 2015)。

當邊坡主體(material phase)與構造面(contact surface)之間的摩擦係數不一致時，例如室內實驗的材料堆落在鋼製器材上。接觸邊界給定在邊坡主體(material phase)與構造面(contact surface)交界的節點(node)上，其給定參數為摩擦係數，模式會依據材料接觸時固相加速度的法向量和摩擦係數來推估摩擦力，然後將其帶回至混合物的動量方程式中重新計算得到新的固相加速度，以此來反映接觸面摩擦係數不同對材料運動造成的影響(Bandara and Soga, 2015)。

最後為降雨邊界條件的處理，材料質點法中因為降雨條件係施加在邊坡主體(material phase)的表面，由於動態過程中，邊坡主體表面的空間位置一直在改變，因此邊界材料點(boundary material point)和節點(boundary node)的研判為材料質點法的挑戰。

此外，降雨邊界條件為已知的降雨強度(mm/hr)，其降雨強度可被視為達西速度(Darcy's velocity, $\mathbf{w}$)，於模式中需要有一套機制將其轉換為液相速度($\mathbf{v}_l$)，由於達西速度又是固相速度($\mathbf{v}_l$)的函數，其表示為 $\mathbf{w} = nS_l(\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s)$ ，動態過程中邊坡主體表面的固相速度也會隨時間和空間改變，如何去得到合理的液相速度($\mathbf{v}_l$) 為材料質點法的另外一個挑戰。

材料質點法處理降雨邊界條件的技術近年來才有新的突破(Martinelli et al. 2020, Ceccato et al. 2020)，這也是本計畫為何要選取此模式之原因。

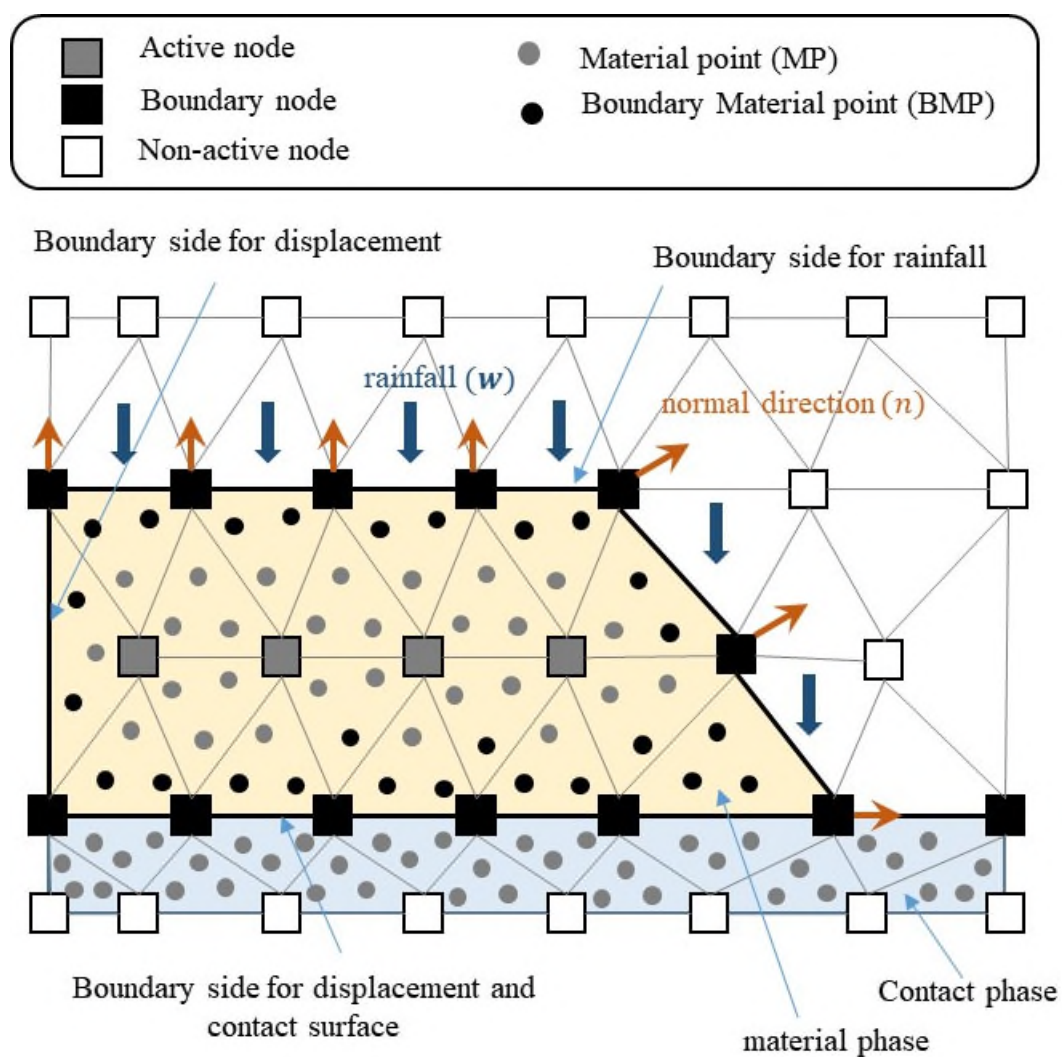


圖 2-16 材料質點法執行位移邊界、接觸邊界和降雨邊界的概念圖

二. 模式計算流程

本研究提出之模式的計算流程如圖 2-17 所示，首先須取得研究區域的幾何參數，並以此來做為建模依據。然後透過鄰近區域的地質調查報告來取得材料參數。降雨有關之邊界條件將依據鄰近雨量站的觀測資料來進行設計。最後初始條件係指地下水位位置的給定。當完成上述模式設定後即可進行模擬，模擬結果將與後期邊坡剖面進行比對與驗證。

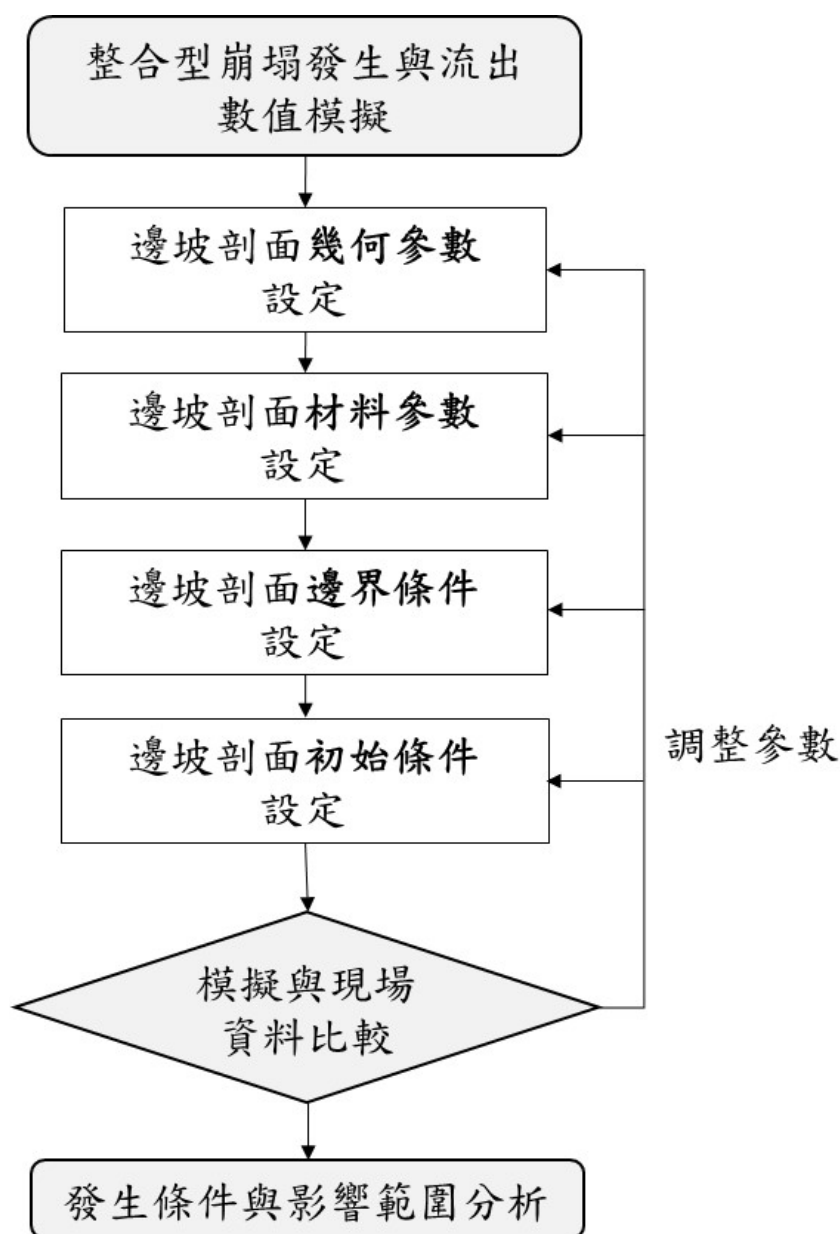


圖 2-17 整合型崩塌發生與流出數值模擬及後續應用流程圖

三. 模式設定

(一)地形資料

邊坡剖面參數的取得來自於地形測量或是數值地形資料，舉 1995 年香港柴灣翡翠路崩塌的模擬為例，如圖 2-18，剖面得依據主要的崩塌坡面走向來決定，若一個區域內有不同的坡面單元或是滑動坡向，則需要透過多條剖面來探討。此為二維剖面邊坡穩定分析模式或邊坡變形模式常用的方法，雖然忽略三維邊坡的效應，但其分析結果對後續的防救業務工作推動仍有相當參考價值。透過剖面取得垂直高程隨水平距離的變化資料後，即可做為模式的輸入參數，其剖面在模式中的建模結果如圖 2-19 所示。數值地形所需的經度是邊坡的規模而定，以香港柴灣翡翠路崩塌為例，其邊坡剖面長度大約 50 公尺，因此每 2-5 公尺一筆高程值已可適當反映邊坡的幾何特性。

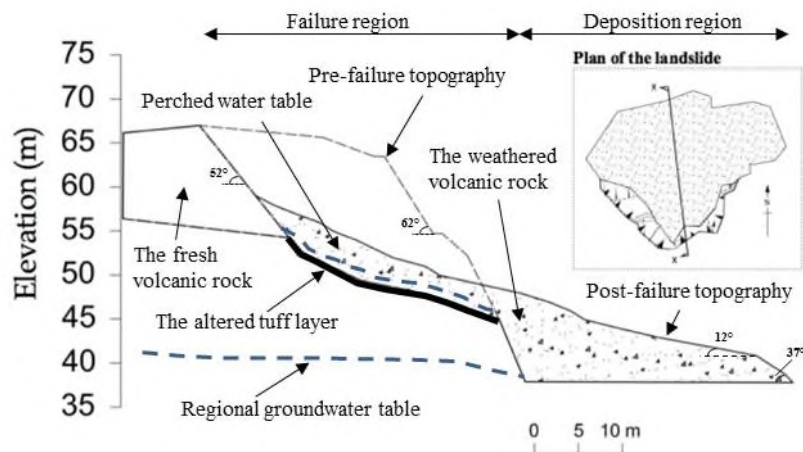


圖 2-18 香港翡翠路崩塌發生前後地形比較圖 (knill 1996)

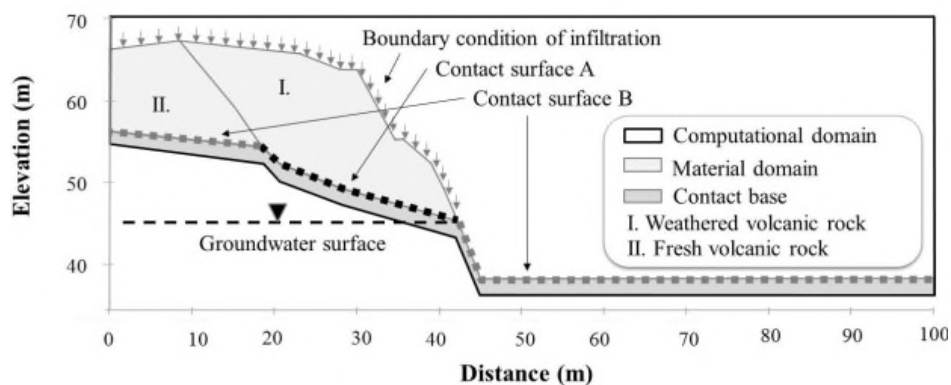


圖 2-19 Anura 建置香港翡翠路崩塌事件模型圖

(二)模式參數

有關模式的參數資料取得部分，主要來自研究區域基本資料的蒐集。以本研究為例，當研究區域的地質分區知道之後，若有細部調查和現場資料等報告，則以上述報告為參數選擇之標準。若無上述相關報告，則尋找國內相同地質分區的研究、論文、計畫和報告等資料，並參考上述資料來進行報告參數選擇之標準。上述等資料皆無時，則依照地質的材料組成，尋找國外近似材料的研究、論文、計畫和報告等資料，例如表 2-4、表 2-5 和表 2-6。

表 2-4 各種材料的彈性模數(Young's modulus)

Type of Soil		young's modulus (MPa)
Clay	Very soft	2–15
	Soft	5–25
	Medium	15–50
	Hard	50–100
Sand	Loose	10–24
	Dense	48–81
Silt		2–20

*Subramanian, N. (2008). Design of steel structures. Oxford University Press.

表 2-5 各種材料的柏松比(Poisson's ratio)

Type of Soil		Poisson's ratio
Clay	saturated	0.4 – 0.5
	unsaturated	0.1 – 0.3
Sand	dense	0.2 – 0.4
Silt		0.3 – 0.35

*Subramanian, N. (2008). Design of steel structures. Oxford University Press.

表 2-6 各種材料的土壤保水曲線參數和水力傳導係數

material	$S_{\min}$	$S_{\max}$	λ	P_0 (kPa)	k_1^{sat} (m / s)
sand	0.105	1	0.627	0.677	8.25×10^{-3}
loam	0.181	1	0.359	2.725	2.89×10^{-4}
silt	0.074	1	0.27	6.131	6.94×10^{-5}
clay	0.179	1	0.083	12.263	5.55×10^{-5}

*Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water resources research, 24(5), 755-769.

(三)計算條件

模式初始條件的給定上，包括初始應力條件和初始孔隙水壓條件等兩個部分。首先，初始材料應力的生成與坡面的幾何特性和材料參數有關，若模擬的邊坡存在不同材料組成的地層構造，模式可以據地質構造模型給定不同材料的空間分布，然後模式即可依據材料(material phase)的幾何形狀和材料單位重量來進行推估。然後，初始孔隙水壓條件的分布決定於地下水面的位置，假設初始孔隙水壓依循靜態分布原則(Siemens 2018)，模式於地下水面以下隨深度變化生成孔隙水壓，而於地下水面以上隨高度變化生成吸力，真實土壤的吸力存在一個上限值，若有相關資料得以佐證時，模式在初始吸力的生成可給定一個上限值。

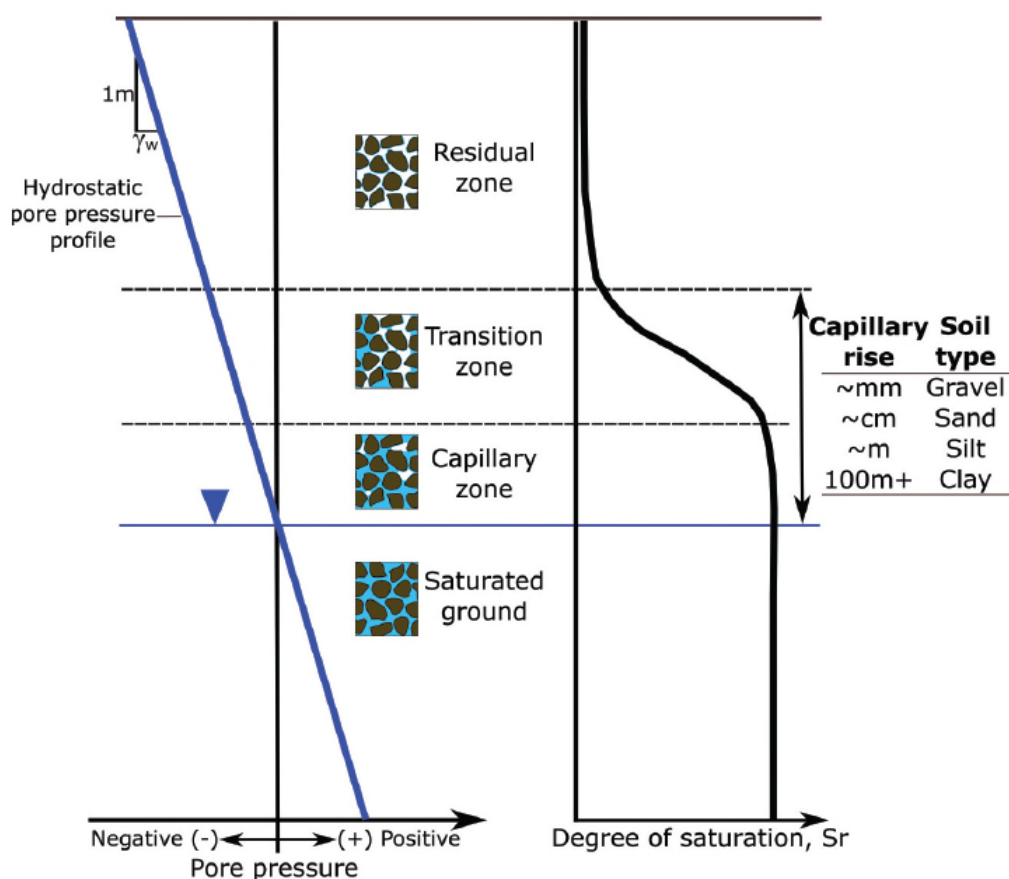


圖 2-20 靜態條件下土壤孔隙水壓分布概念圖(Siemens 2018)

邊界條件的給定上，主要有位移邊界、接觸邊界和降雨邊界。其位移邊界和接觸邊界的給定可參考圖 2-16 所示，邊坡主體(material)的表面常給定自由位移邊界條件，其目的是要反映材料的動態過程，由於邊坡的底部和坡頂側鮮見變形行為發生，常給定固定位移的邊界條件。若要考慮邊坡主體在一個構造面或固定面上滑動，例如地層的交界面、道路的鋪面等，則須在上述交界面處給定接觸邊界，模式得依著接觸面的摩擦係數多寡來反映破壞後的材料運動結果。最後，模式的降雨邊界條件則是給邊坡材料(material phase)的表面，其給定的依據則是事件雨量歷線，如圖 2-21 所示，透過降雨資料來分配每個時間距下對應的降雨強度，模式即可依據降雨的變化來反映入滲濕峰發展和地下水生成的過程。

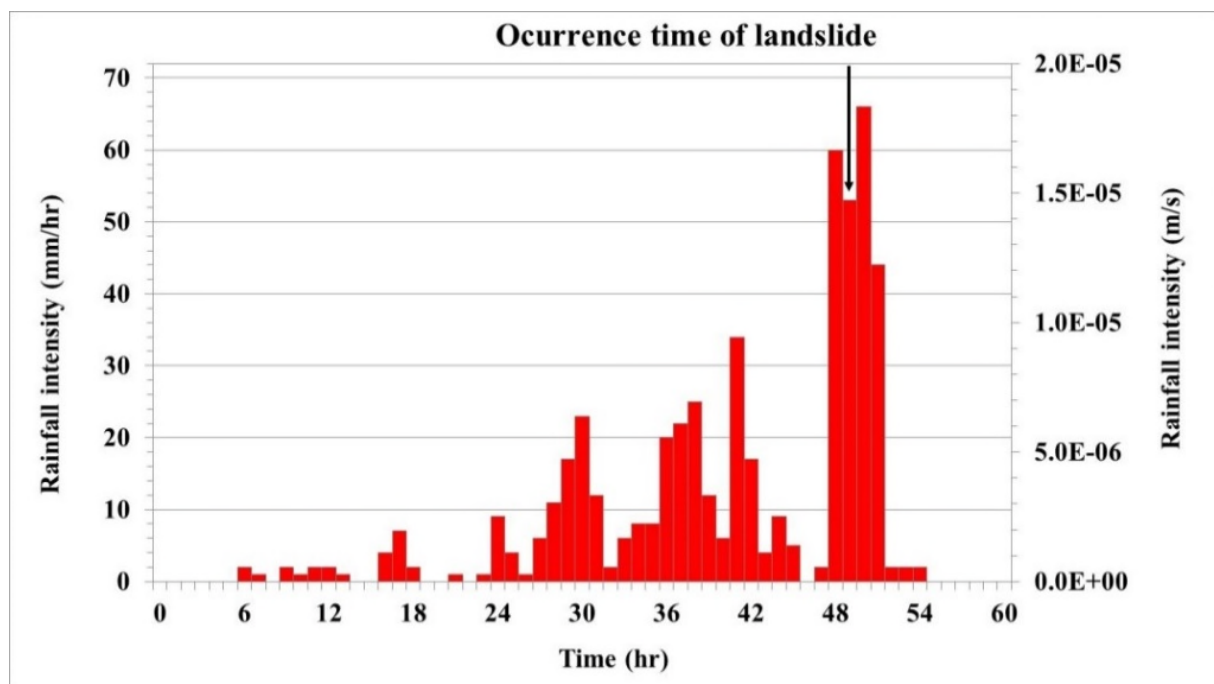


圖 2-21 香港翡翠路崩塌事件降雨歷線圖

四. 模式效能測試與驗證

本計畫擬透過日本大型土坡實驗(Moriwaki et al. 2004)來說明崩塌發生與流出整合型模式於降雨崩塌模擬的表現，實驗現場狀況如圖 2-22 所示。日本大型土坡實驗的設備配置如圖 2-23 所示，1.2 m 深的土層填入長 23m、高 7.8m、寬 3m 和槽深 1.6m 的鐵製渠槽中。渠底配置有 11 支孔隙水壓計(編號 G-0 至 G-11)，於 G-1、G-3、G-5、G-7 和 G-9 處，於土層深度 0.3m、0.6m 和 0.9m 處埋入共計 15 支孔隙水壓計(編號 kp-1 至 kp-15)。於地表位移的監測部分，設置在第三階坡度 30°和長度 10m 的坡面上，共計設置 5 支地表位移監測設備(編號 D-1 至 D-5)。依據 Moriwaki et al.(2004)提供的資料，

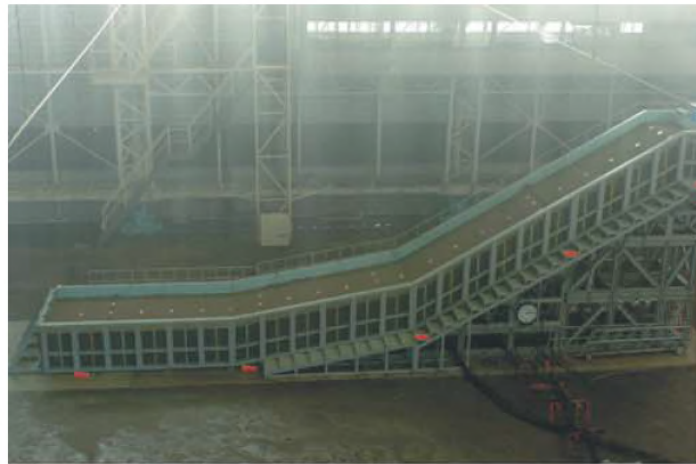


圖 2-22 日本大型土坡實驗圖(Moriwaki et al. 2004)

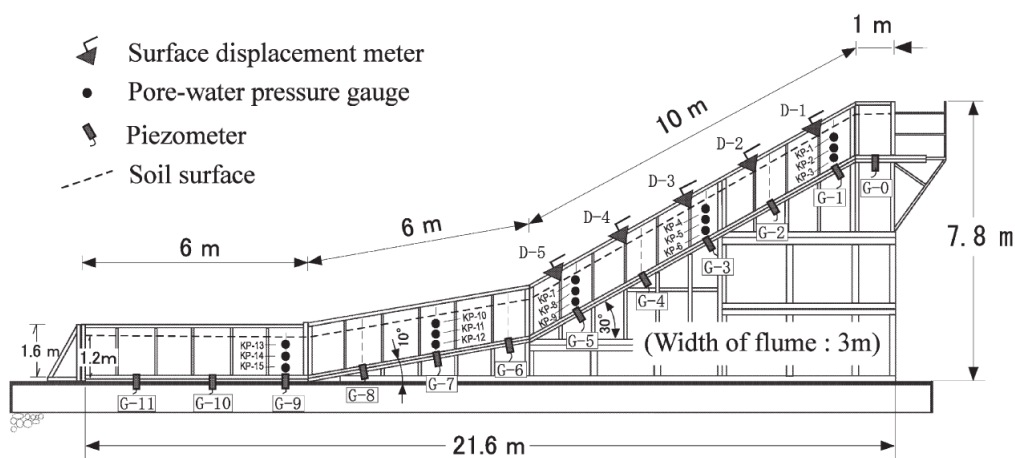


圖 2-23 日本大型土坡實驗配置圖(Moriwaki et al. 2004)

崩塌發生與流出整合型模式模擬日本大型土坡實驗的各項參數與條件給定結果如圖 2-24 所示。模擬土層(soil)座落在一個不透水且不會變形的接觸面(contact phase)上，土層允許於計算網格內變形，計算區域網格最大長度為 0.25m，各網格配置 8 個材料點(material points)，計算域內共計有 9925 個節點和 3226 個網格。材料參數之給定，係參考前人研究(Moriwaki et al. 2004, Ghasemi et al. 2019, Nguyen et al. 2021, Yang et al. 2021)，由於 Moriwaki et al.(2004)研究並未敘明材料的水力傳導係數、土壤保水曲線、土壤初始含水量等參數，而是由其他學者透過參數反演算(parameter back analysis)來建議合適的參數，因此本計畫參照其所建議之參數給定計算，相關材料參數的給定如圖 2-24 所示。

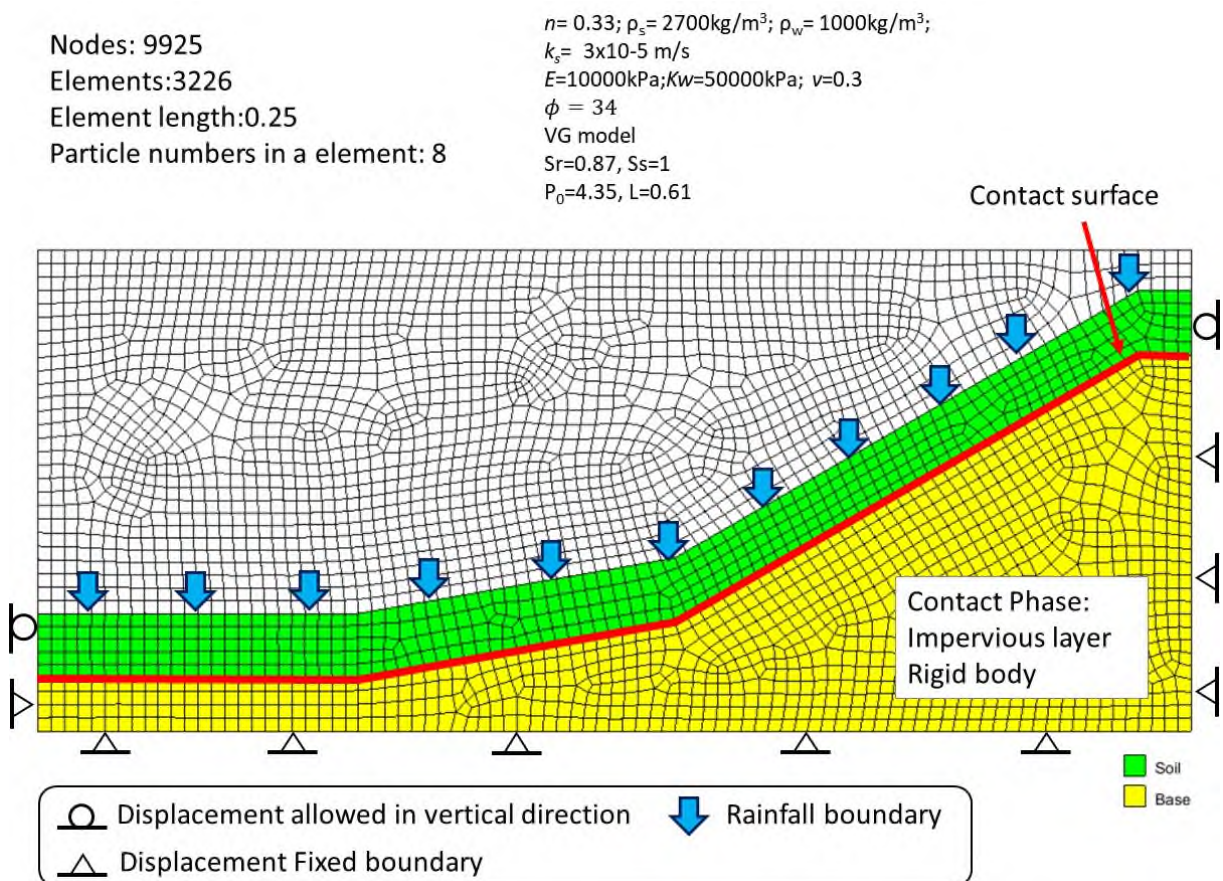


圖 2-24 日本大型土坡實驗模擬網格與邊界條件配置圖

崩塌發生與流出整合型模式在土層局部地下水位變化和局部地表位移變化得到趨勢近似的結果，如圖 2-25 和圖 2-26 所示。從 Moriwaki et al.(2004) 的實驗結果顯示，實驗崩塌發生時，其水平層和 10 度坡層底部皆發生近似軟化般的推移現象，突顯摩爾庫倫模型的構成法則未必適用於日本大型土坡實驗，使得模擬中發生位移的破壞深度小於實驗觀測結果，如圖 2-27。由於，目前本計畫發展的降雨入滲模擬功能尚未對軟化土壤模型(soil softening model)進行驗證，未來會將其規劃在研究的內容之中。

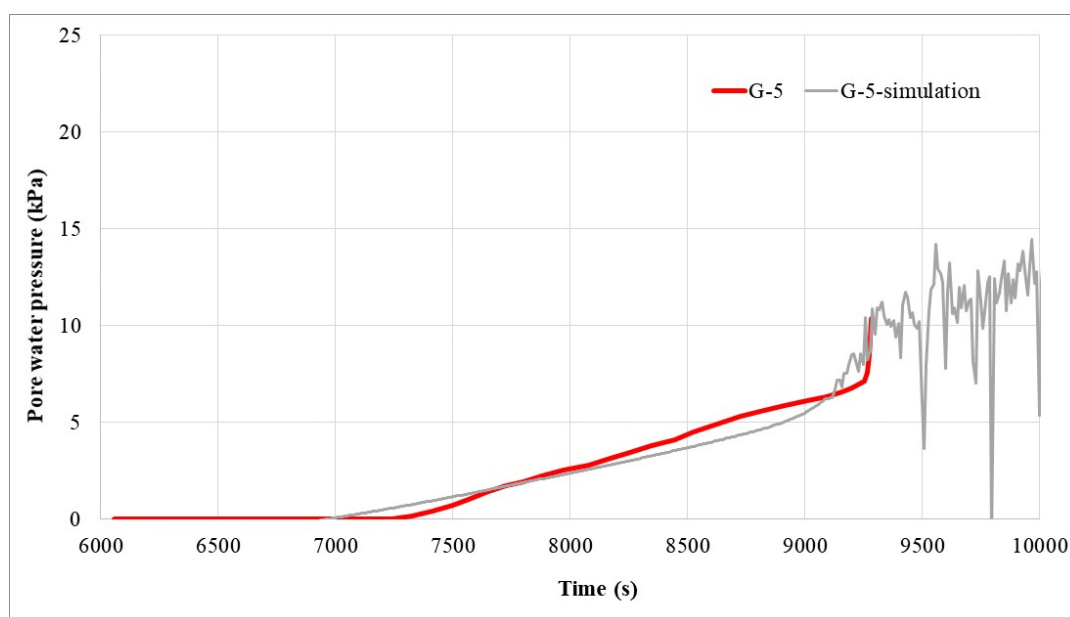


圖 2-25 實驗 G-5 處孔隙水壓變化實測與模擬結果比較圖

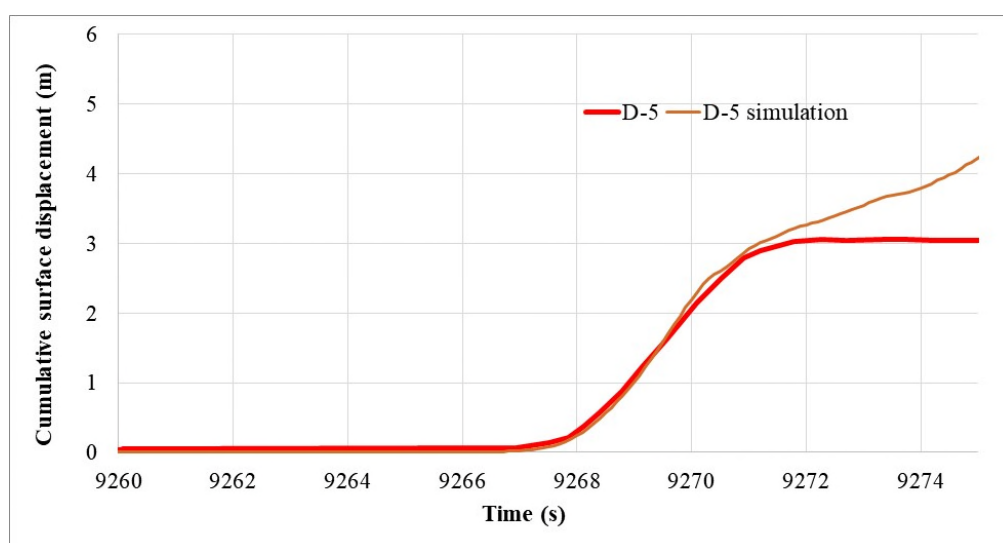


圖 2-26 實驗 D-5 處地表位移實測與模擬結果比較圖

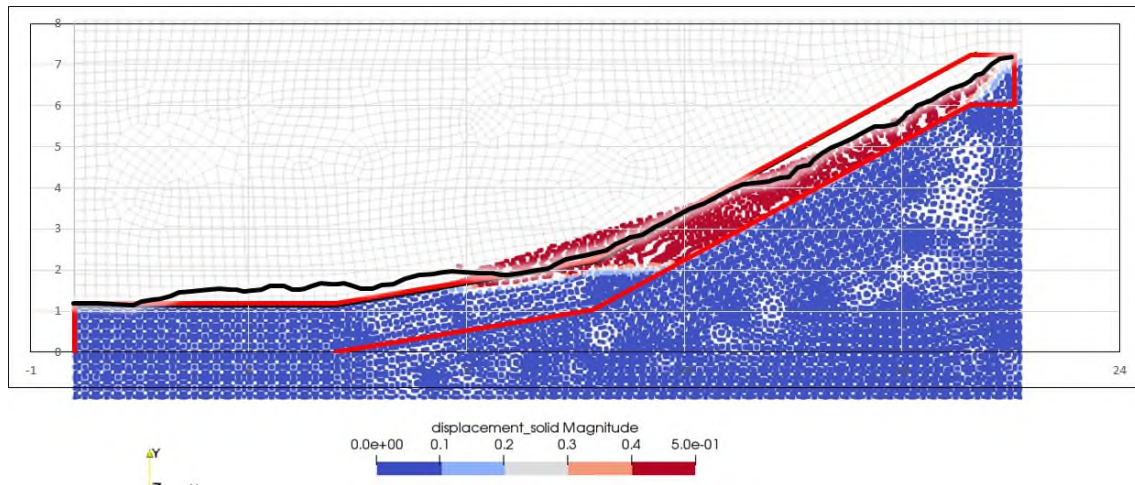


圖 2-27 日本大型土坡實驗與模擬結果比較圖(邊坡位移分布圖)

五. 降雨效應於崩塌流出上特性之探討

由於本計畫著重於降雨效應對於崩塌發生與流出的影響，為能探討降雨效應對崩塌行為的影響，參考 Yang et al. (2021)的研究，以降雨強度 (rainfall intensity, mm/hr, i) 和水力傳導係數 (conductivity, m/s, k) 的比值 0 到 1 做為降雨邊界條件的參數變動範圍，藉此來探討不同降雨效應下，土層地下水位變化、邊坡不穩定時間和邊坡位移距離變化等影響。

首先探討降雨效應(i/k)對地下水位上升速度的影響，地下水位上升速度 (v_w) 為單位時間內的水位上升量，其因次與速度相同 (MT^{-1})，參照降雨效應 (i/k) 的無因次處理方法，本計畫將地下水位上升速度除以水力傳導係數 (v_w/k)，然後將其與不同降雨效應(i/k)下的地下水位上升特性(v_w/k)進行比較，如圖 2-28。圖中分別為 G-5 和 G-9 處的地下水位變化結果，參照圖 2-22 可知，G-5 介於 30 度坡和 10 度坡土層之間(簡稱坡腹)，G-9 介於 10 度坡和水平土層之間(簡稱坡趾)。從比較結果可知，隨著降雨強度越大，其地下水位上升的速度越快，且其上升速度與降雨效應(i/k)強度成正比的關係，於 G-5 處和 G-9 處 i/k 可以產生將近 20 倍的 v_w/k 。由於地下水位上升的速度常作為降雨促崩預警地發布指標之一，透過本計畫，當現場降雨強度與土層的代表水力傳導係數可知時，此可做為一個地下水位上升速度推估的方法。

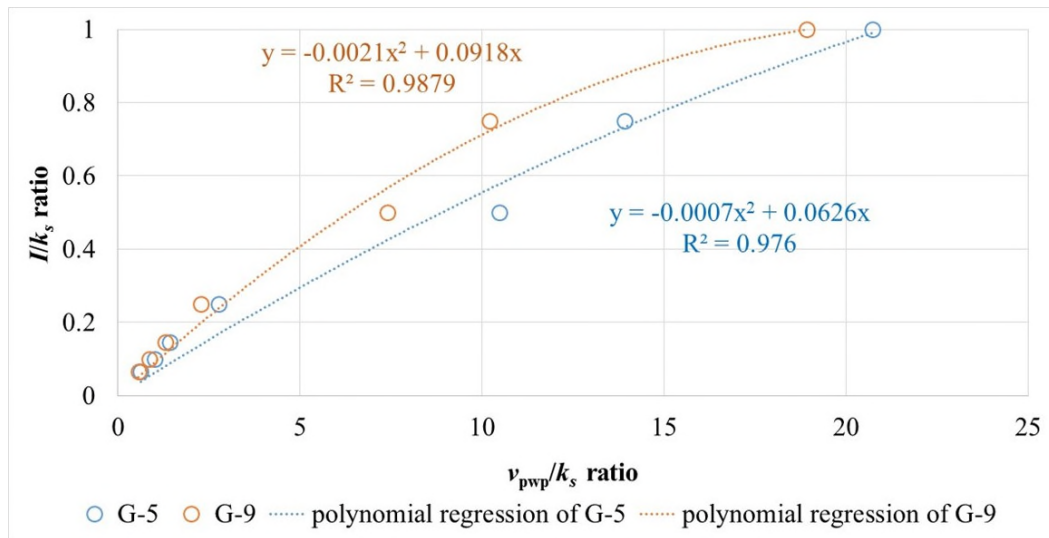


圖 2-28 降雨效應(i/k)與地下水上升特性(v_w/k)比較圖

接著，本計畫進一步去探討降雨效應(i/k)對於地下水位上升發生時間和崩塌發生時間的影響。由於模擬可得到不同位置地下水位上升的時間以及崩塌發生的時間。所以本計畫將 G-9 處地下水位開始上升、G-5 處地下水位開始上升和崩塌發生(sliding time)等時間與降雨效應(i/k)變化進行比對，結果如圖 2-29 所示。從圖中可知，當降雨效應(i/k)大於 0.5 時，崩塌發生時間與任意位置地下水位開始上升的時間幾乎一致，且邊坡任意位置的地下水位幾乎同時上升，此結果說明，當降雨效應(i/k)大於 0.5 時，此時的地下水位上升近似無限邊坡水位變化的假設，亦說明高強度降雨時可假設邊坡地下水位上升近似無限邊坡條件。然則，當降雨效應(i/k)小於 0.5 時，崩塌發生時間晚於地下水位開始上升的時間，且彼此之間的時間差距，隨著降雨效應(i/k)的變小呈非線性的增加，這反映出降雨時間和崩塌發生時間的延遲效應，當現場降雨強度小於土層代表水力傳導係數越小時，崩塌時間將與地下水位上升時間差的越遠。此外，亦可發現一件事，當降雨效應(i/k)小於 0.5 時，地下水位上升會先從 G-9(坡趾)處開始，然後才衍生到 G-5(坡腹)處，從此可知坡趾處地下水位監測的重要性，透過坡趾處的地下水位監測有助於提早推估崩塌可能發生的時間，如此的結果對於崩塌預警研究有著高度的參考價值。

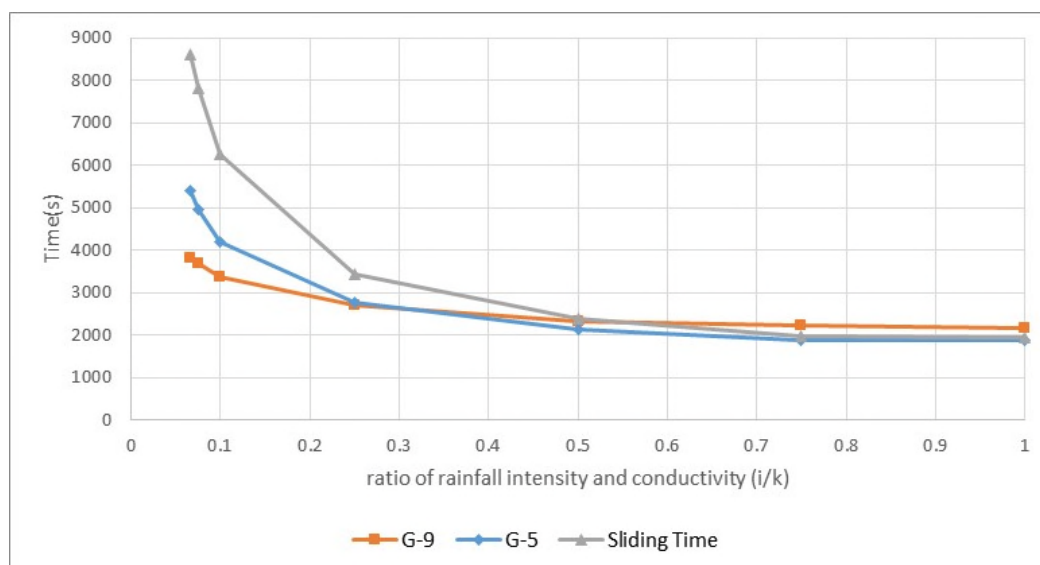


圖 2-29 降雨效應(i/k)與地下水位開始上升時間和崩塌發生時間比較圖

最後，本計畫欲討論降雨效應(i/k)對崩塌流出的影響。雖然本計畫採用的摩爾庫倫模式未必能適合呈現日本大型邊坡實驗結果，且現場土層的構成法則也未必符合摩爾庫倫模型，但本計畫仍就既有結果來做分析探討，唯其在未來應用上比須特別注意。從圖 2-26 可知土層表面位移隨時間的變化，本計畫以最後的累積地表位移(cumulative surface displacement)為結果，取 D-1、D-3 和 D-5 位置，將其與降雨效應(i/k)比對的結果繪製如圖 2-30。因為從圖 2-25，亦可推估 D-1、D-3 和 D-5 位置的地表位移速度，因此，將其與降雨效應(i/k)比對的結果繪製如圖 2-26。透過比較，本計畫歸納幾點特性供作參考，其一，當降雨效應(i/k)越大時 D-3 和 D-1 的材料位移距離越大，說明降雨效應(i/k)越大時材料的移動距離越遠；其二，降雨效應(i/k)變化在 0~0.5 之間時，隨著降雨效應(i/k)越大，材料的位移速度越大，這說明降雨也會影響崩塌移動速度，不過從模擬結果發現，當降雨效應(i/k)大於 0.5 時，土層表面會有沖蝕現象先發生，等到土層變薄後，邊坡才發生從接觸面開始的整體滑動，且降雨效應(i/k)越大，表面沖蝕厚度越多，使得材料的位移速度越小，由於這樣的結論未必與現場觀測經驗穩合，此點僅就本計畫模擬結果進行論述，不建議將其作為現場應用的依據。

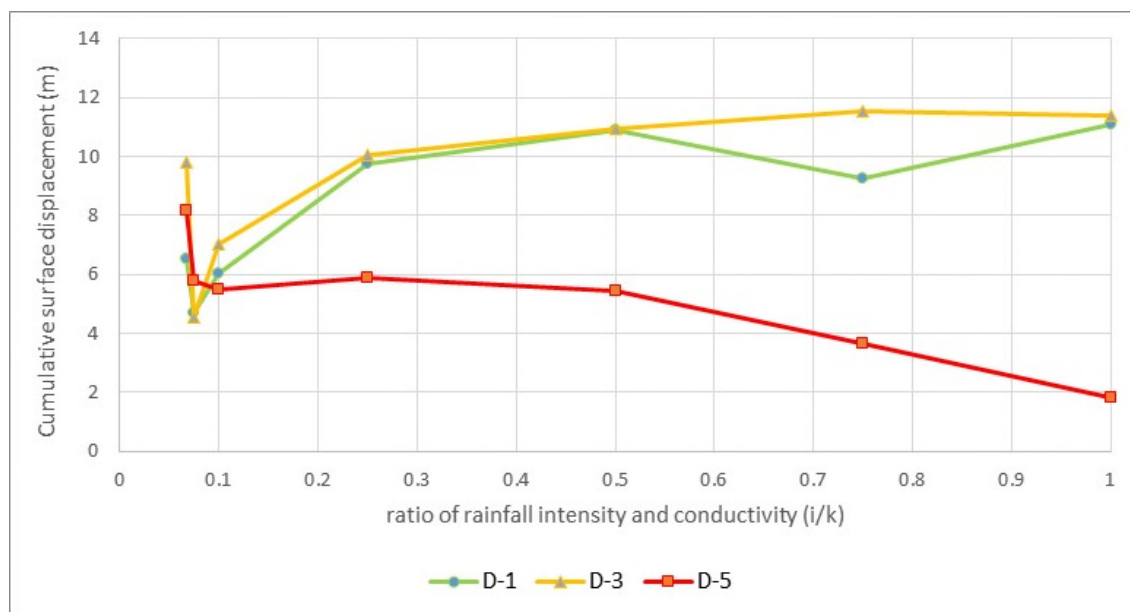


圖 2-30 降雨效應(i/k)與累積地表位移特性比較圖

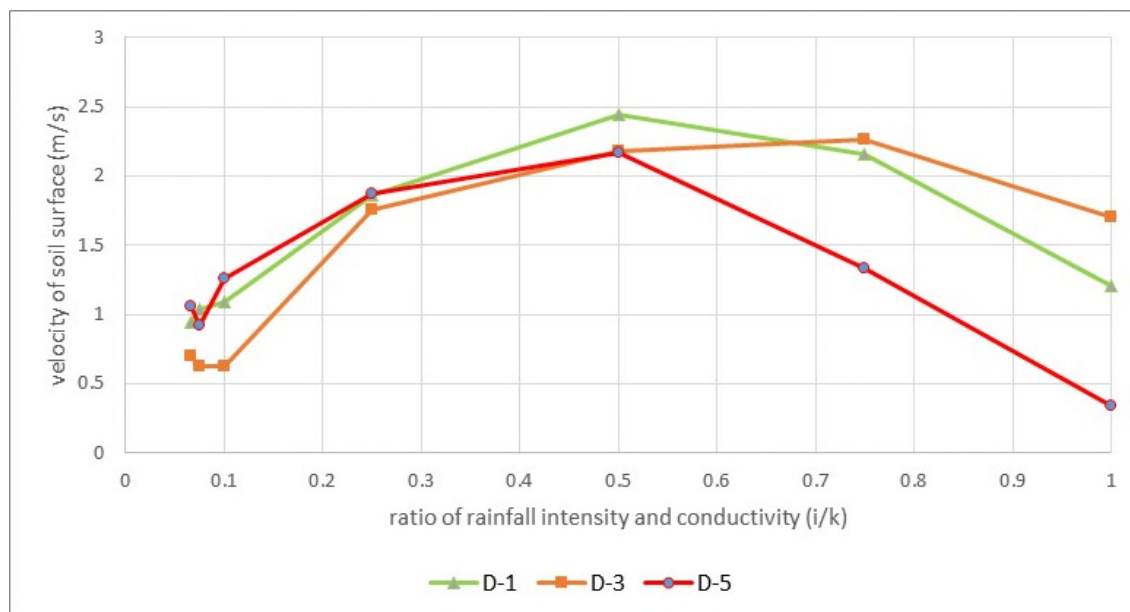
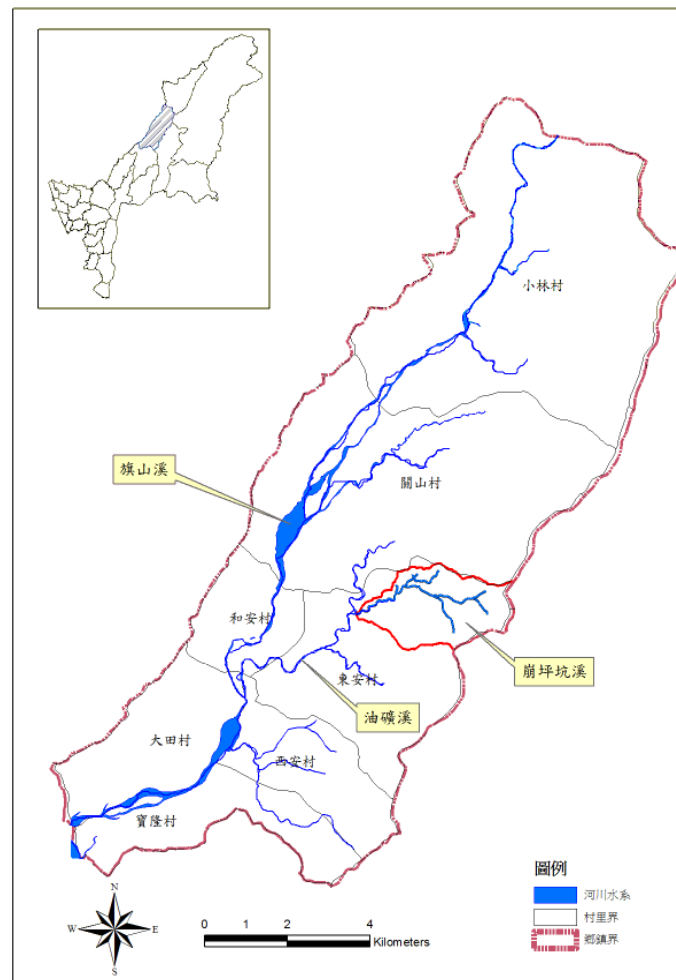


圖 2-31 降雨效應(i/k)與地表位移速度特性比較圖

第三章 研究方法應用

第一節 研究區域基本資料

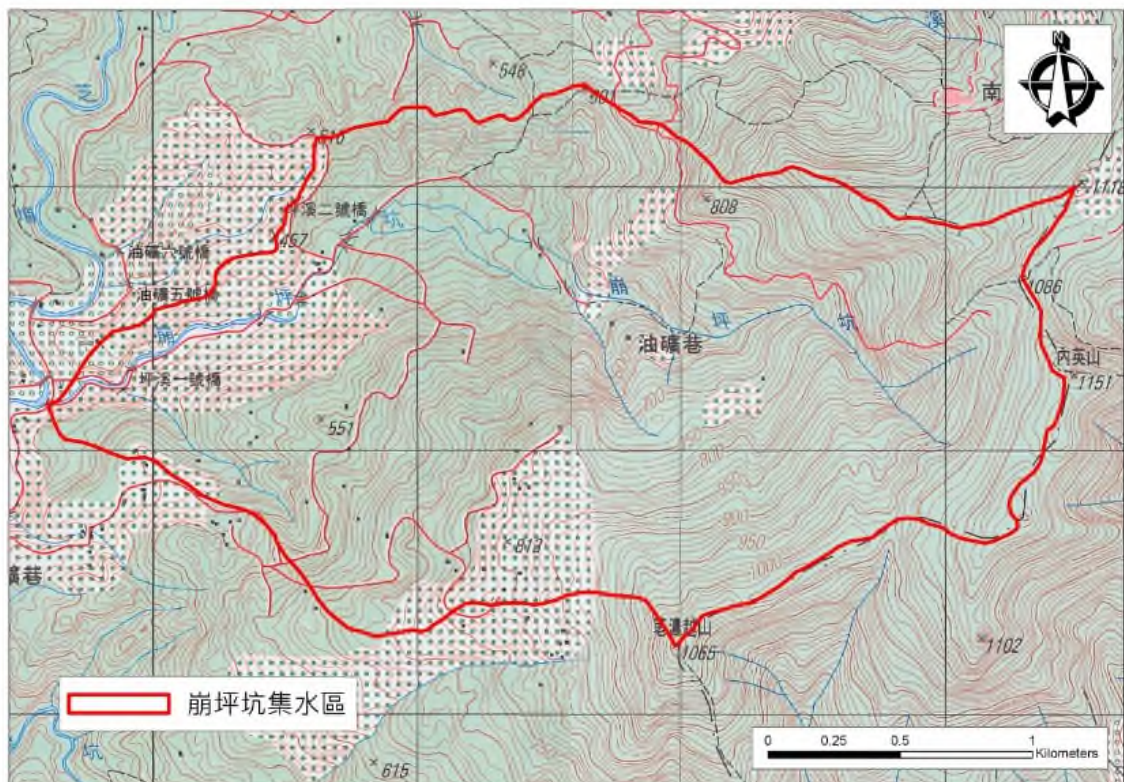
本整合計畫擬選取旗山溪支流油礦溪上游之崩坪坑集水區為研究區域(圖 3-1)，崩坪坑集水區為潛在大規模崩塌區亦為高市 DF020 土石流潛勢溪流集水區。崩坪坑集水區自 2008 年卡玫基颱風及 2009 年莫拉克颱風後迄今，坡面地表變位、崩塌、土石流及河道土砂運移等土砂現象仍然持續活躍，且崩坪坑集水區航遙測資料及雨量水文監測資料建置完整，符合本整合計畫裡各子計畫之研究需求。



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

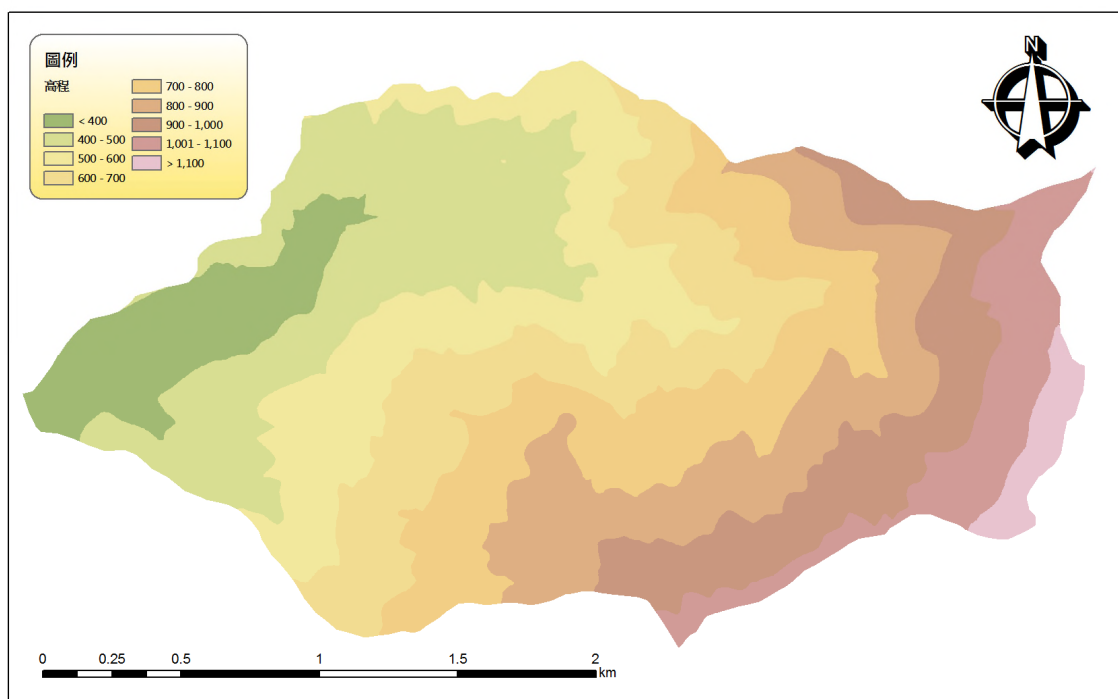
圖 3-1 崩坪坑集水區地理位置圖

崩坪坑集水區面積約 522 公頃，主流河道長度約 3,500 公尺，崩坪坑集水區之地形圖及高程分布如圖 3-2 及圖 3-3 所示，集水區內水系多呈東向西之流向，2 條主要支流於集水區中游處匯流成崩坪坑溪主流，並於下游之南邑慈恩 11 號橋處匯入油礦溪。本集水區最高處位於集水區東方之內英山，標高為海拔 1,151 公尺，集水區高程分佈在 313 公尺至 1,151 公尺間，其中又以 400 至 1,000 公尺為主，平均高程為 686 公尺。地質概況如圖 3-4 所示，集水區內主要分為現代沖積層、階地堆積層、長枝坑層、隘寮腳層、糖恩山砂岩及鹽水坑頁岩等。長枝坑層及隘寮腳層組成，主由砂岩、粉砂岩及頁岩組成；鹽水坑頁岩則是由塊狀頁岩組成；旗山溪附近屬於階地堆積層及現代沖積層，階地堆積層皆有高位及低位河階之分佈，主要岩性由泥、砂和礫石組成之河成堆積；現代沖積層主要岩性由礫土、砂土及黏土組合而成。



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

圖 3-2 崩坪坑集水區兩萬五千分之一地形圖



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

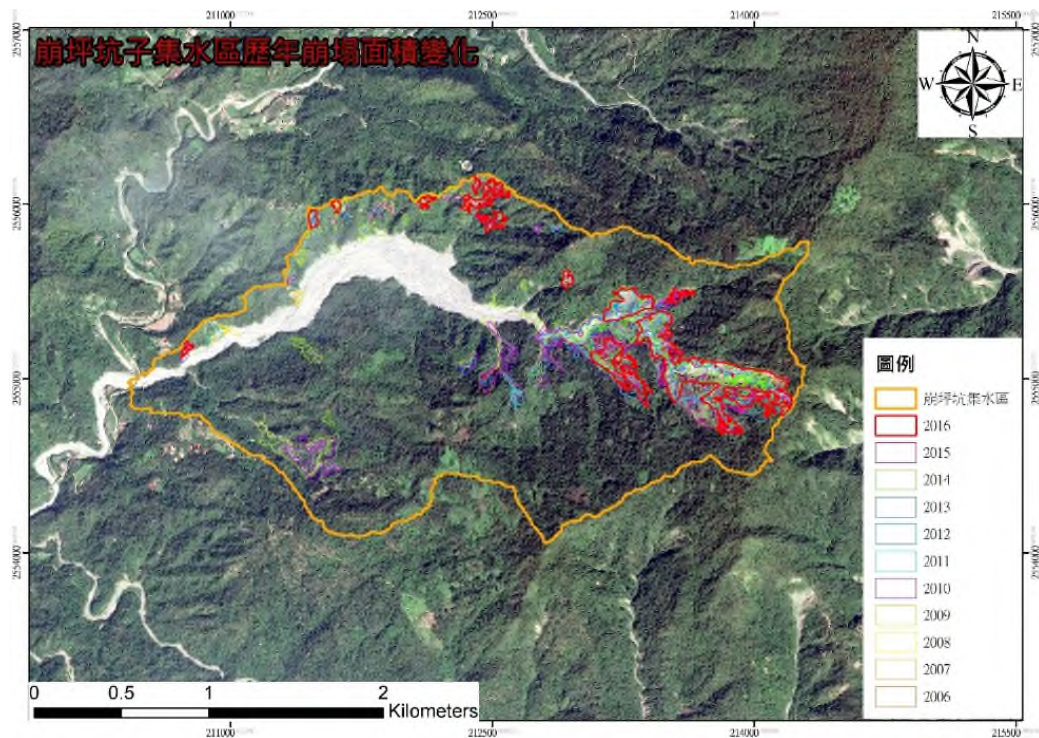
圖 3-3 崩坪坑集水區高程分布圖



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

圖 3-4 崩坪坑集水區之地質概況

崩坪坑集水區近年(2006~2016)之崩塌地分布及面積統計彙整如圖 3-5 及圖 3-6，崩塌地主要集中於崩坪坑溪主流上游源頭，莫拉克颱風後集水區崩塌地面積將近 40 公頃，而後植生逐年恢復，崩塌地面積逐年下降至 2013 年僅約 5 公頃，在 2013 年康芮(KONG-REY)颱風後，崩塌地面積再次逐漸升高至 2016 年約近 30 公頃。



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

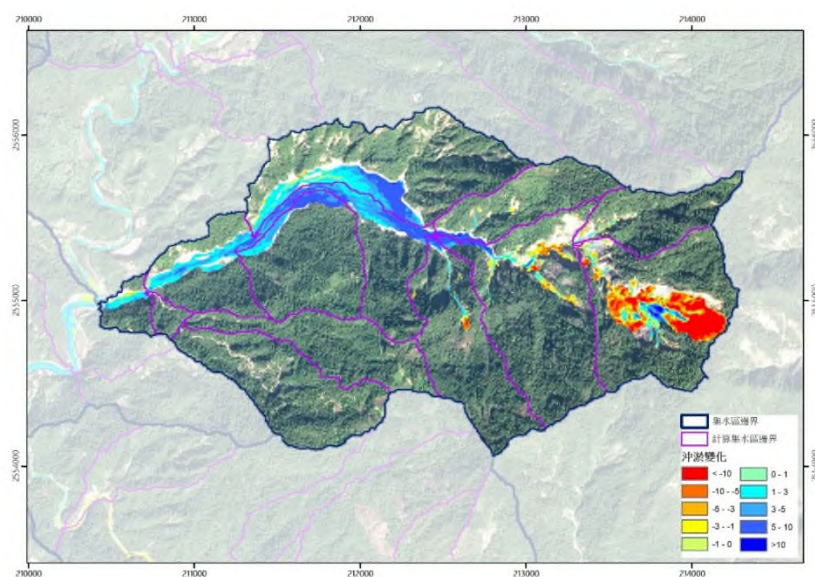
圖 3-5 崩坪坑集水區歷年之崩塌空間分布變化



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

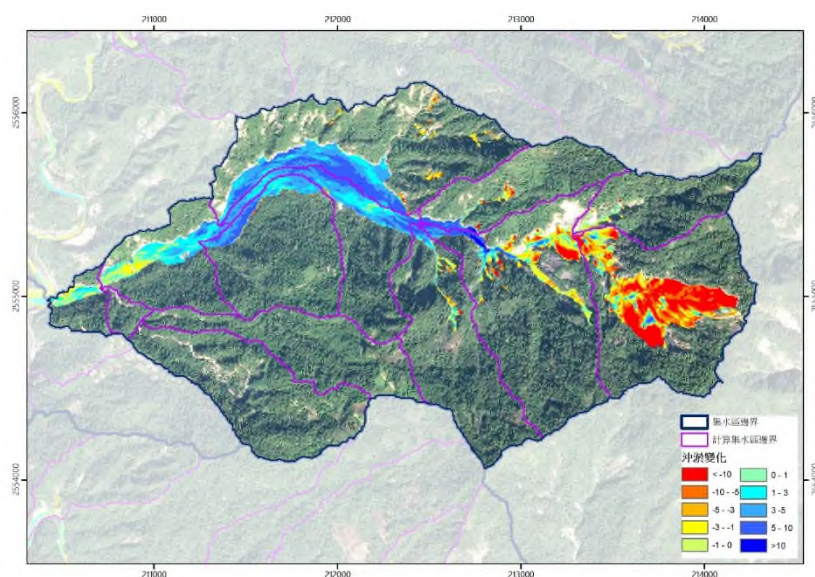
圖 3-6 崩坪坑集水區歷年崩塌面積變化統計

在集水區土砂變異方面，圖 3-7 及圖 3-8 分別呈現莫拉克颱風後 2010～2014 年及 2014～2017 年崩坪坑集水區之土砂沖淤空間分布，圖中顯示莫拉克颱風後崩坪坑溪上游崩塌地仍有明顯崩塌發育，下接主河道河床則出現大量土砂堆積，總計 2010～2017 年崩坪坑集水區崩塌土砂生產量高達 388.17 萬立方公尺。



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

圖 3-7 崩坪坑集水區 2010～2014 年之土砂沖淤分布



資料來源：水土保持局臺南分局，2017 年。

圖 3-8 崩坪坑集水區 2014～2017 年之土砂沖淤分布

第二節 不安定坡面分析

本計畫研究區域不安定剖面分析的剖面選取位置如圖 3-9 所示。誠如坡面不安定分析的流程，本計畫先透過數值地形分析崩坪坑集水區內各子集水區的位置，並作為坡面單元的判斷依據，然後依據潛勢區域的劃設範圍找出區域內的最低點，然後再從最低點和稜線位置進行連線，取得坡面不安定分析所需要的大量剖面。本研究挑選編號 005、008、012、017 和 029 等坡面來呈現分析結果，其所挑選的坡面涵蓋大規模崩塌潛勢區(D037、D039 和 D042)及淺層崩塌等發生區位。



圖 3-9 崩坪坑不安定坡面分析剖面位置圖

透過前後期衛星影像，潛勢區域內的歷史崩塌區域可以被判釋，如圖 3-10 所示。根據分析材料參數的選取原則，由於現場缺乏有效的材料參數作為分析使用，因此從歷史崩塌資料和事件前後期地形來反推。透過崩塌發生前後的地形變化來取得臨界坡高公式(6)的臨界線，當參數給定凝聚力 10 kPa 和摩擦角 24 度時，有最好的結果，後續將利用此參數評估計畫區域潛勢區。

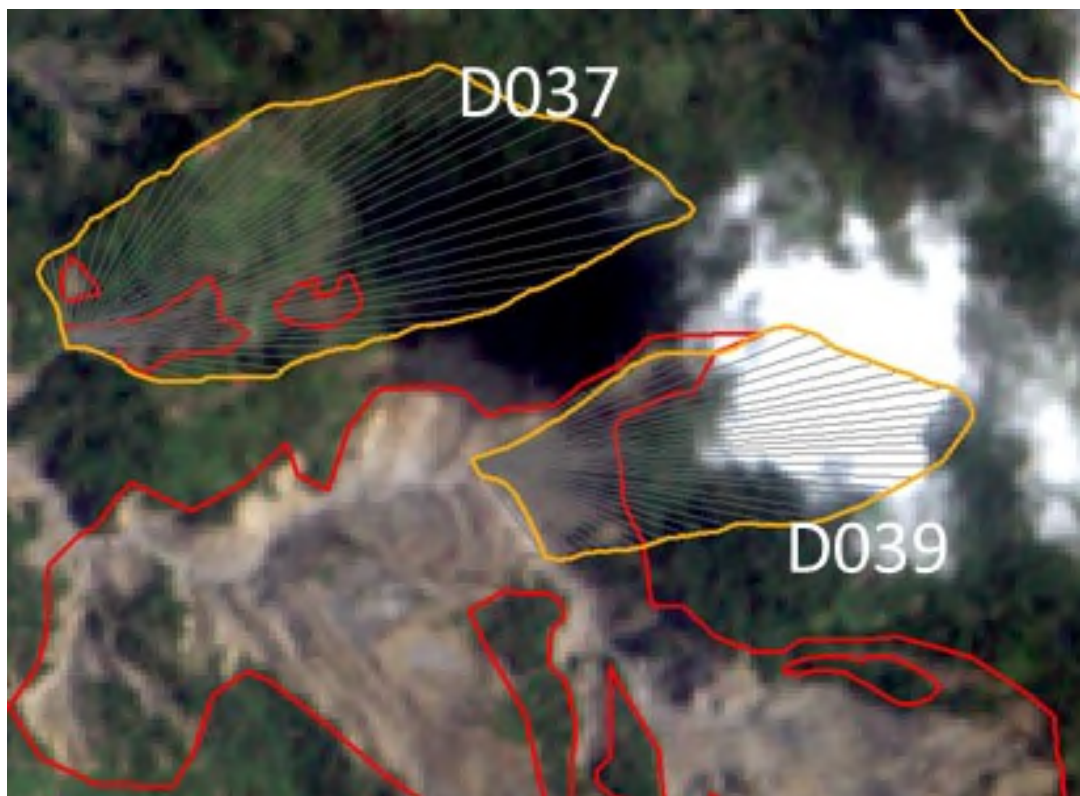


圖 3-10 崩坪坑大規模崩塌潛勢區內歷史崩塌位置圖

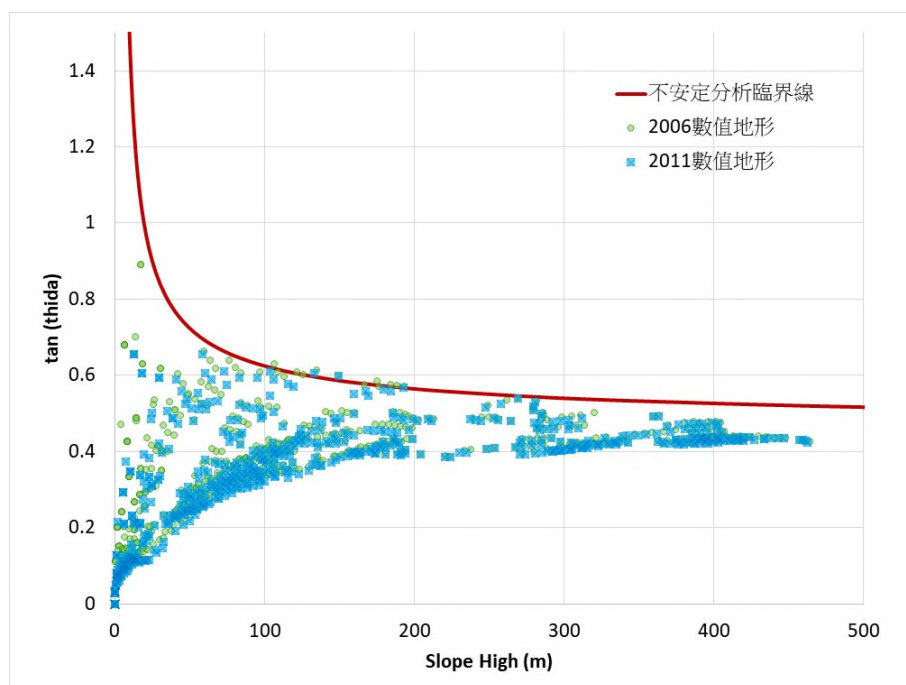


圖 3-11 017 坡面不安定分析參數反推圖

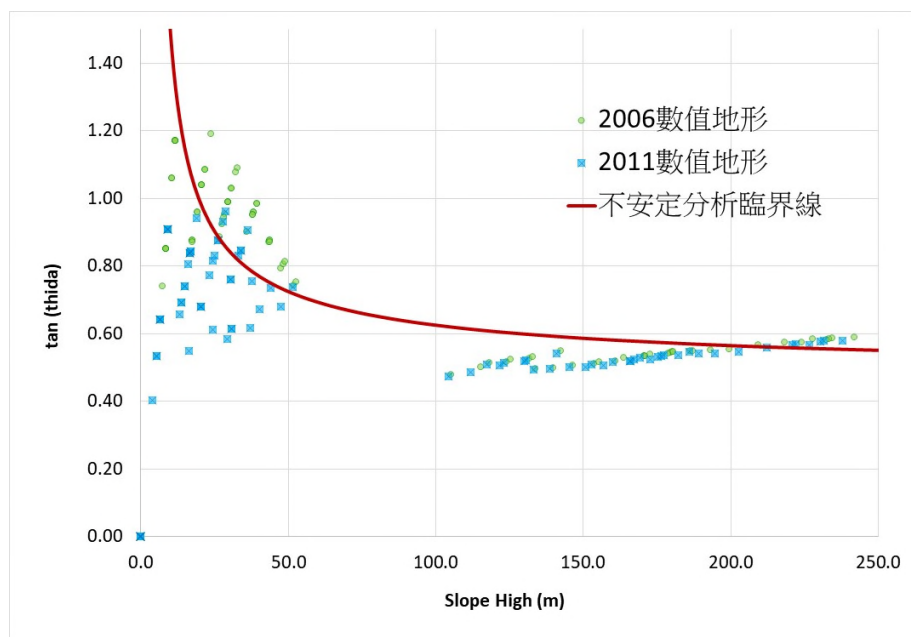


圖 3-12 005 坡面不安定分析參數反推圖

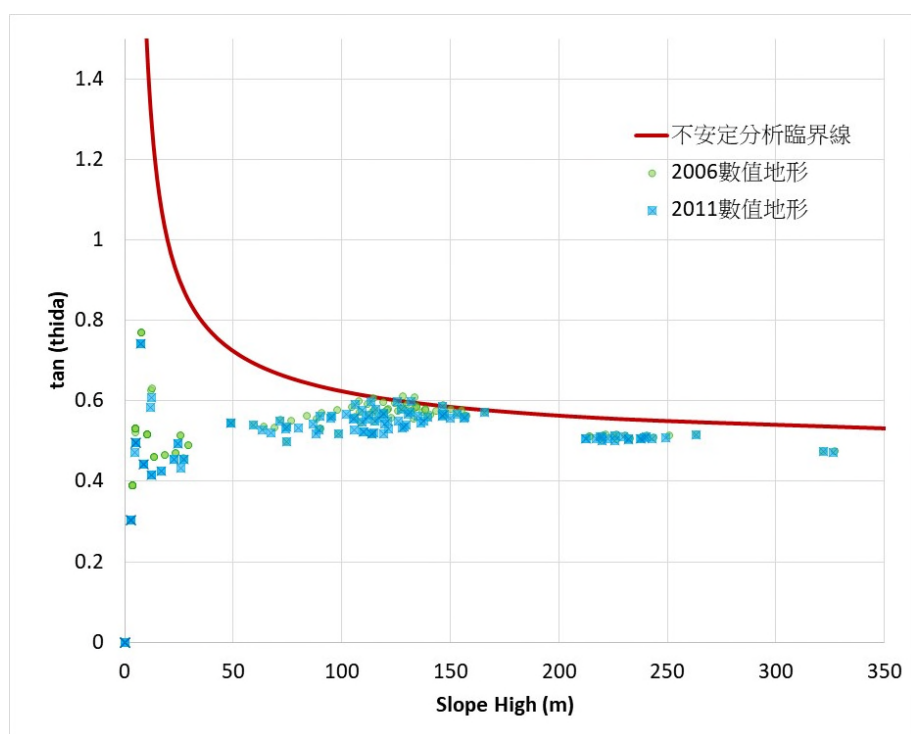


圖 3-13 012 坡面不安定分析參數反推圖

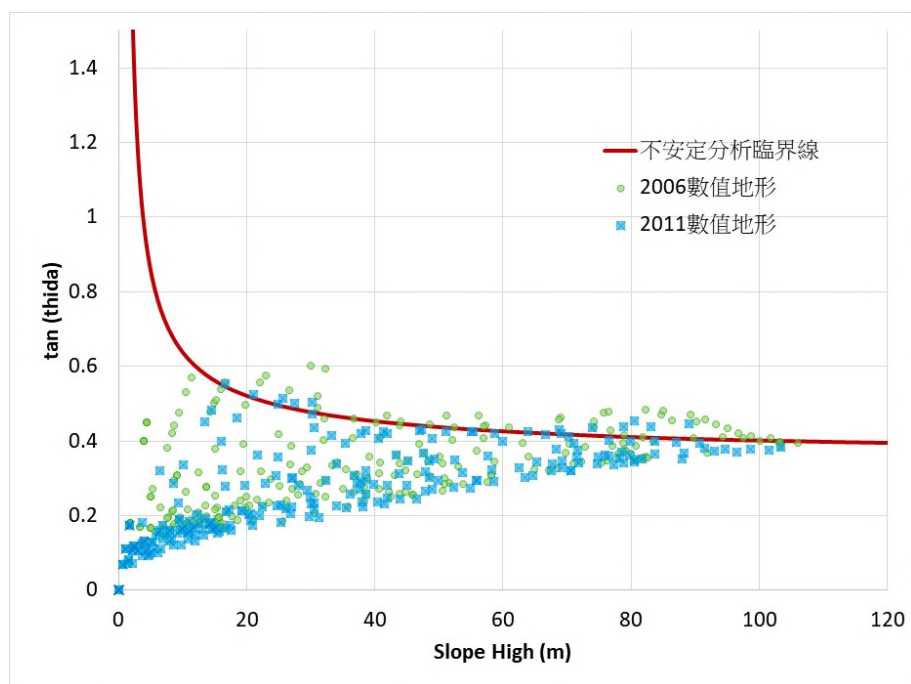


圖 3-14 029 坡面不安定分析參數反推圖

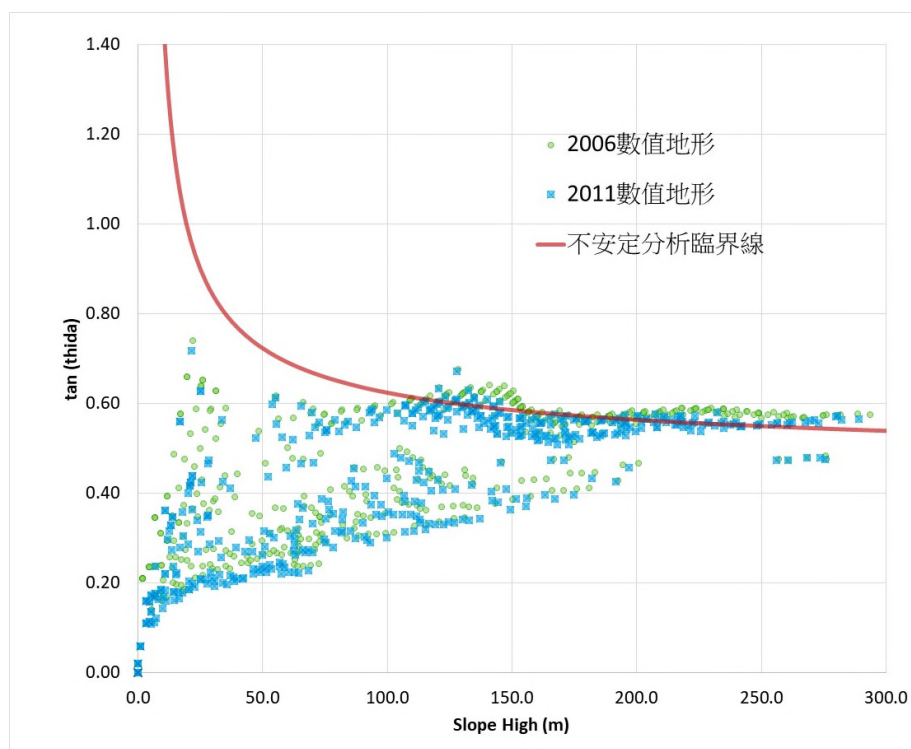


圖 3-15 008 坡面不安定分析參數反推圖

將分析後不安定點位(2006 年地形分析成果)點繪於 2011 衛星影像上，可以看到點位確實於崩塌發生區域，說明本方法對於坡面不安定區位之判釋，確實有足夠之評估能力。

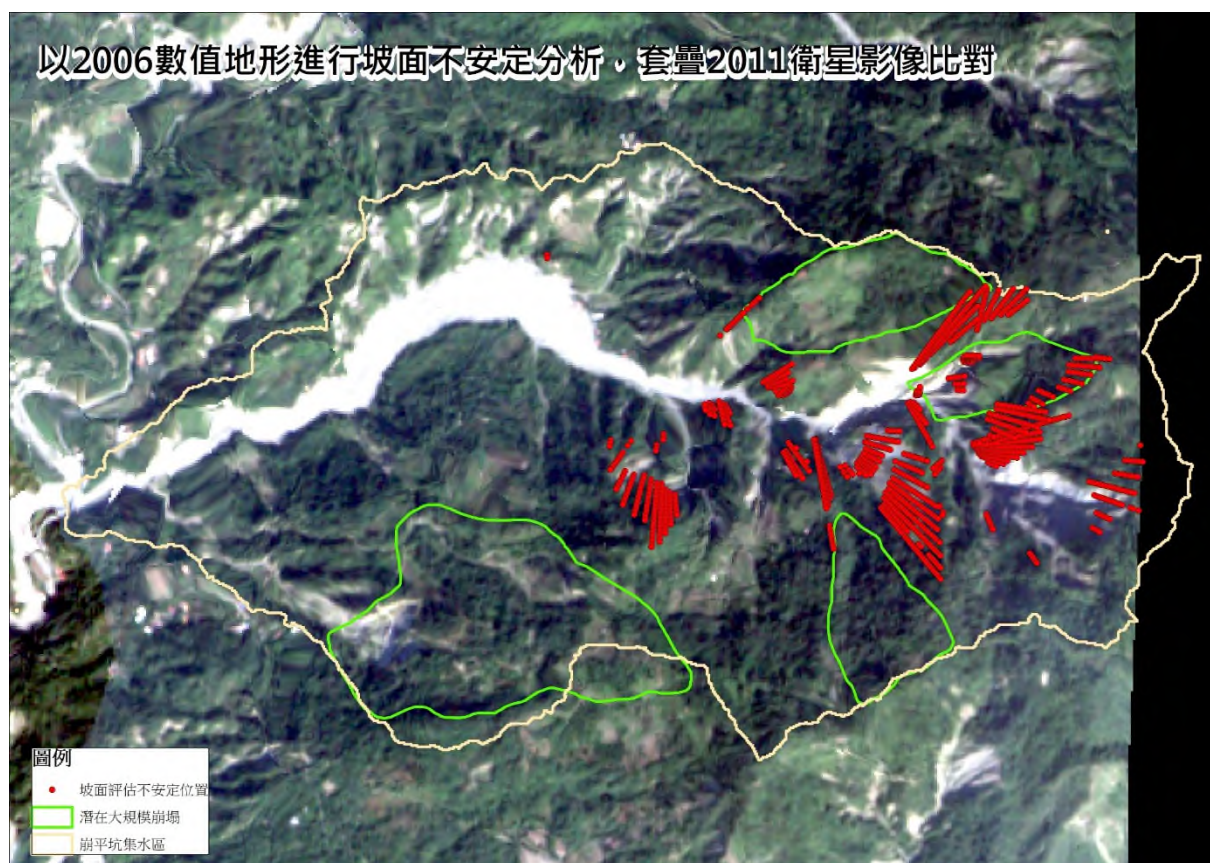


圖 3-16 集水區內部安定點位分布情形

第三節 整合型崩塌發生和流出模式分析

從 2006 年和 2011 年衛星影像比對可知，如圖 3-17，其編號 D037 大規模崩塌潛勢區所處之子集水有發生部分崩塌，以及編號 D039 大規模崩塌潛勢區所處之坡面趾部有發生顯著崩塌。是故，本研究擇定此兩處目標來進行整合型崩塌發生和流出的現象模擬。

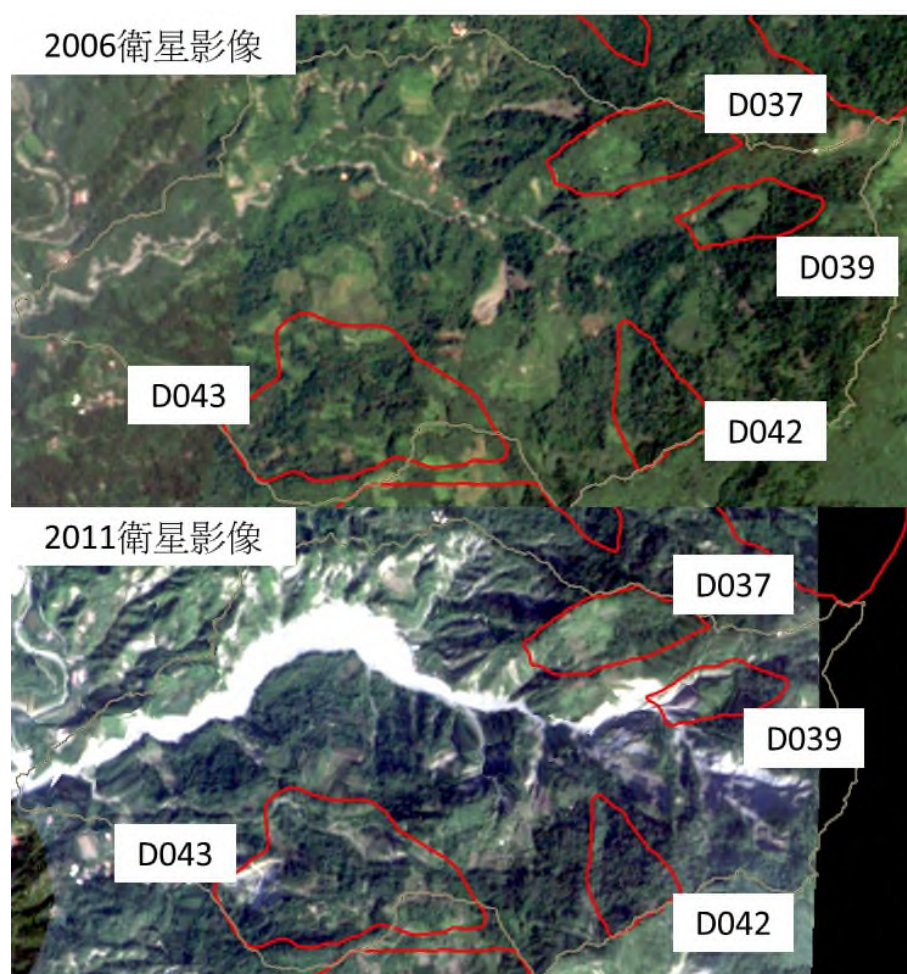


圖 3-17 崩坪坑集水區 2006 年和 2011 年兩期衛星影像比對圖

依據本研究選定之分析對象，崩坪坑集水區範圍內編號 D037 和 D039 大規模崩塌潛勢區域，如圖 3-18，分析剖面的選取位置如圖中紅色實線，比對 2006 年和 2011 年數值地形，其分析對象之綜剖面比較如圖 3-19 和 3-20。其 2006 年的地形剖面將用於數值模型建置使用。

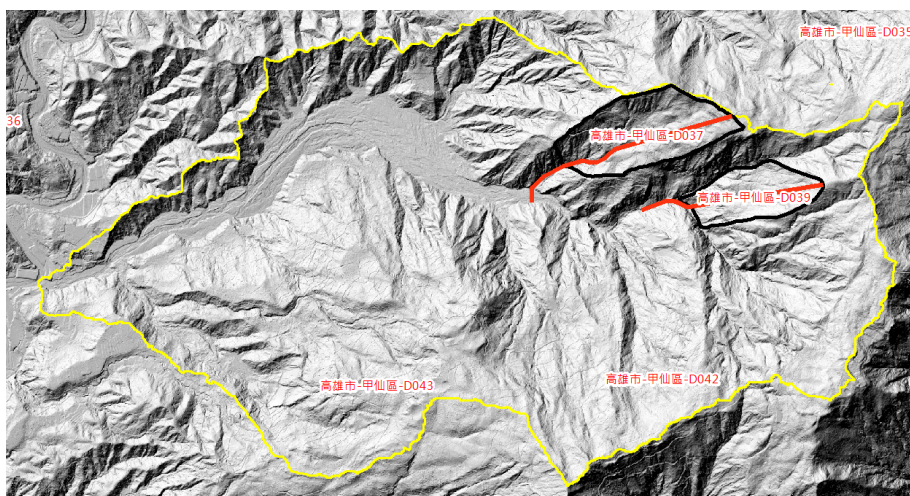


圖 3-18 整合型崩塌發生和流出模式分析對象位置圖

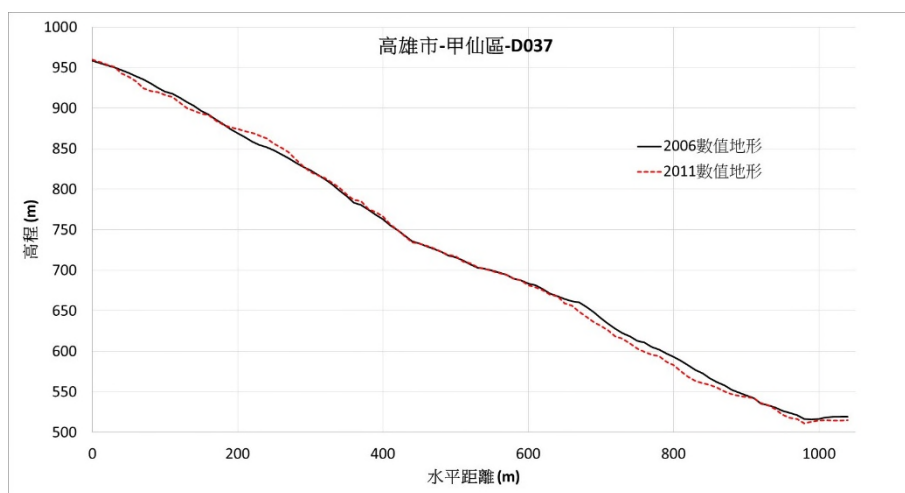


圖 3-19 D037 大規模崩塌潛勢區前後兩期地形縱剖面比較圖

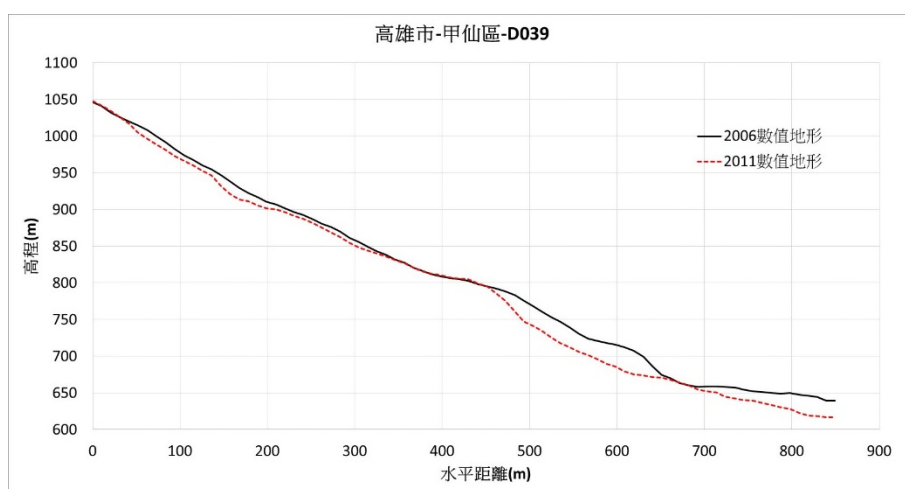


圖 3-20 D039 大規模崩塌潛勢區前後兩期地形縱剖面比較圖

表 3-1 D037 模擬使用材料參數表

材料參數			
殘餘飽和度 $S_{\min}$ (m^3/m^3)	0	孔隙率 n	0.45
全飽和飽和度 $S_{\max}$ (m^3/m^3)	1	比重 ρ_s/ρ_w	2.65
進氣壓 P_0 (kPa)	100.0	楊氏模數 E (kPa)	25000
實驗迴歸參數 λ	0.47	柏松比 ν	0.35
飽和水力傳導係數 k_l^{sat} (m/s)	2×10^{-4}	凝聚力 c (kPa)	10
水彈性模數 (kPa)	50000	摩擦角 ϕ	24

表 3-2 D039 模擬使用材料參數表

材料參數			
殘餘飽和度 $S_{\min}$ (m^3/m^3)	0	孔隙率 n	0.33
全飽和飽和度 $S_{\max}$ (m^3/m^3)	1	比重 ρ_s/ρ_w	2.7
進氣壓 P_0 (kPa)	100.0	楊氏模數 E (kPa)	25000
實驗迴歸參數 λ	0.47	柏松比 ν	0.35
飽和水力傳導係數 k_l^{sat} (m/s)	2×10^{-4}	凝聚力 c (kPa)	10
水彈性模數 (kPa)	50000	摩擦角 ϕ	24

一. D037大規模崩塌潛勢區分析

依據編號 D037 大規模崩塌潛勢區 2006 年數值地形剖面建置數值模型如圖 3-21 所示，儘管本研究區域沒有任何的細部調查成果，且整個坡面不可能皆為可滑動之土體，是故，本研究假設可滑動土體(Soil)的深度至少 200 公尺以上。由於模式具有可重複執行不同情境模擬之優點，因此再現像探討上，可透過情境假設後來求證假設條件的合理性。基於以上假設，滑動土體座落於岩盤(Base)之上。其滑動土體給定自由位移邊界條件，以及其岩盤給定固定位移邊界條件。

本年度研究著眼於地下水條件對於崩塌發生及流出現象的影響，是故假設 D037 大規模崩塌潛勢區域存在有三種不同的地下水位情境。GW-I 係假設坡面地存在一個極高的地下水位，其地下水可達海拔高程 750m；GW-II 假設坡面存在一個相對低的地下水位，其地下水可達海拔高程 600m；最後則是地下水位與溪流出口水平，即地下水的海拔高程僅達 515.6m。

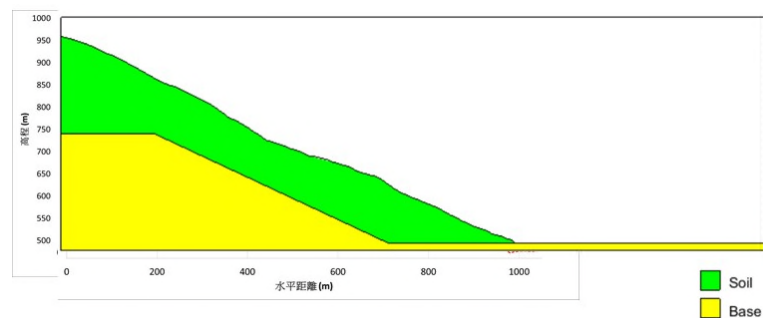


圖 3-21 D037 大規模崩塌潛勢區模式建置結果圖

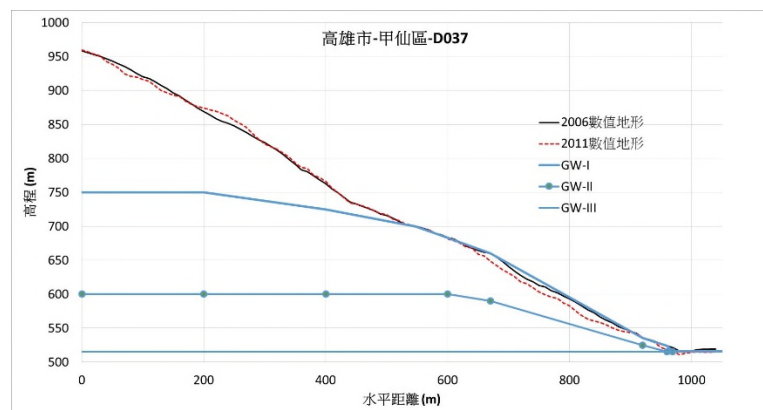


圖 3-22 D037 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境假設圖

滑動土體的材料參數則是依據不安定坡面分析得到的結果，假設凝聚力 10 kPa 和摩擦角 24 度，其模擬結果如圖 3-23 所示。透過結果顯示可知，當坡面地下水位極低時，如情境 GW-III，坡面的變形僅受重力變形下，潛變(creeping)發生於坡面海拔高程 950m 到 750m 之間，其海拔高程 950m 處崩崖出現陷落，而在海拔高程 750m 處發生隆起，其結果與圖 3-18 的兩期地形比對圖近似；當坡面地下水位較高時，如情境 GW-II，華動土體的潛變區域擴大，從海拔高程 950m 到 500m 之間，但於此條件下，滑動土體仍可安定於坡面上，並沒有發生大規模流出之現象；直到地下水位上升到如情境 GW-1 時，即最高地下水位達海拔高程 750m 處時，D037 區域發生大規模流出的現象，透過模擬可知滑動距離將近 500m。

本研究進一步探討降雨對崩塌發生的影響。從地下水情境分析可知，GW-III 坡面僅有海拔高程 950m 到 750m 處發生潛變，且與圖 3-18 的兩期地形比對圖近似，是故延續 GW-III 的情境假設。針對降雨現象，假設坡面經歷一場持續性強降雨，且降雨入滲已經達到地表下 30m 處，如圖 3-23 的飽和度分布圖。其模擬結果顯示，如圖 3-23 的剪應變分布，強降雨入滲僅對地表發生侵蝕現象，其發生位至於海拔高程 950m 到 750m 之間，以及海拔高程 650m 到 550m 之間，且侵蝕厚度大約 15m。從圖 3-18 的兩期地形圖比對可知，確實強降雨會於海拔高程 650m 到 550m 之間發生侵蝕現象，且侵蝕厚度亦大約 10m。

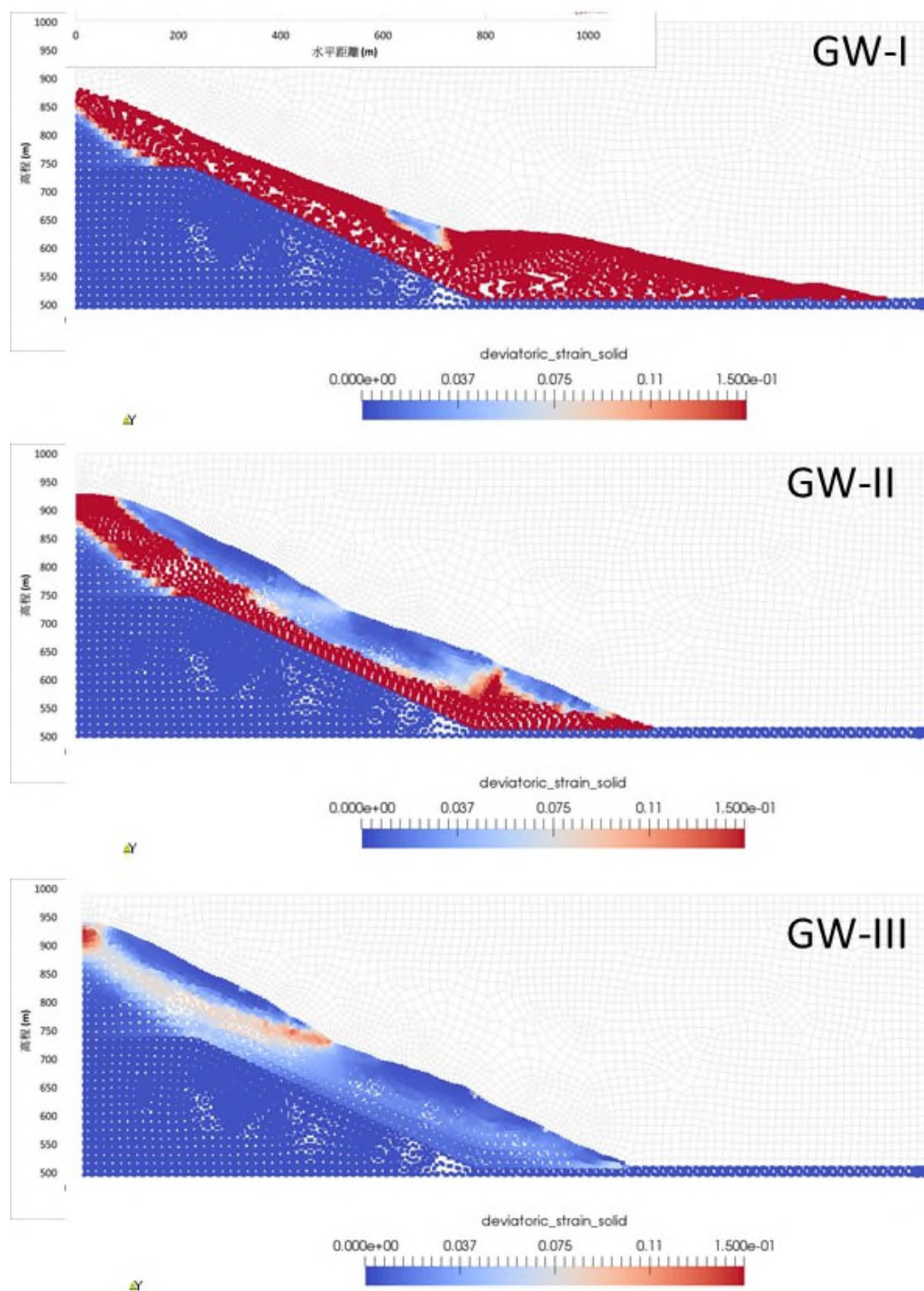
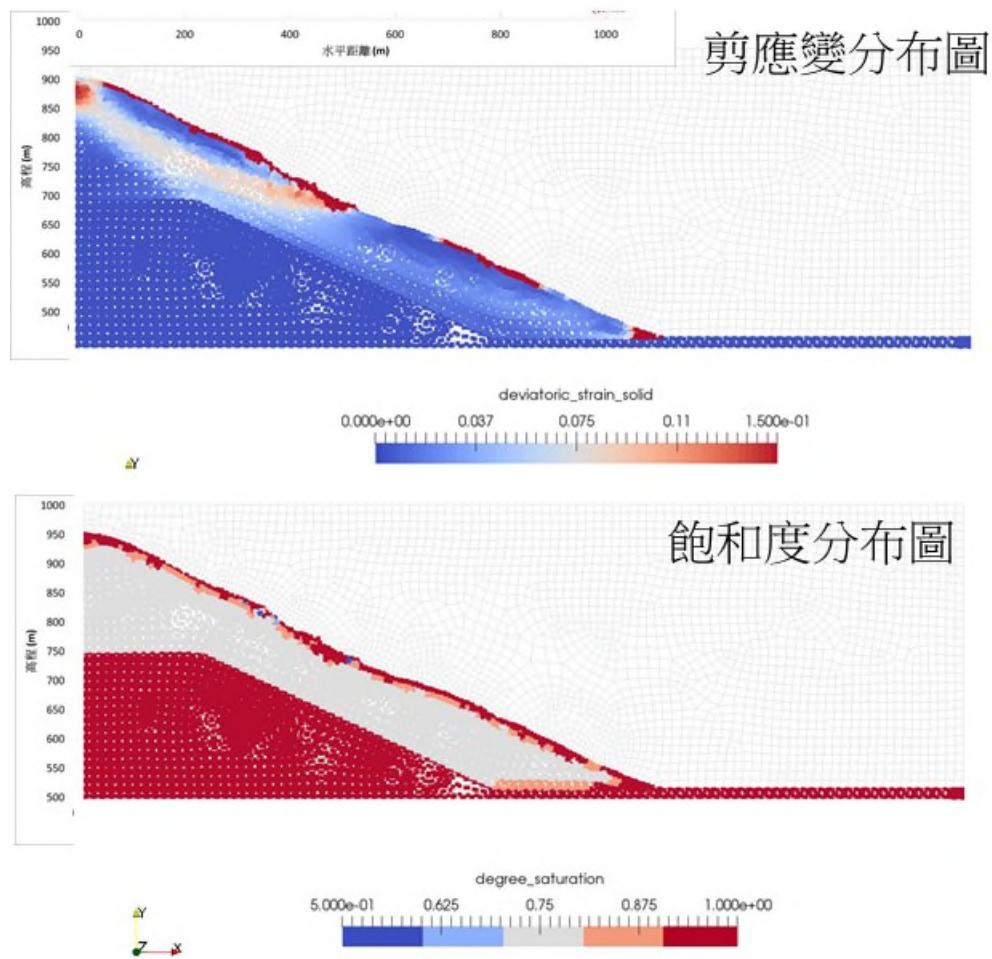


圖 3-23 D037 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境模擬結果圖-剪應變分布



GW-III
強降雨入滲地表下達30m處時

圖 3-24 D037 大規模崩塌潛勢區 GW-III 地下水搭配強降雨情境模擬圖-剪應變分布

二. D039大規模崩塌潛勢區分析

依據編號 D039 大規模崩塌潛勢區 2006 年數值地形剖面建置數值模型如圖 3-25 所示，儘管本研究區域沒有任何的細部調查成果，且整個坡面不可能皆為可滑動之土體，是故，本研究假設可滑動土體(Soil)的深度至少 200 公尺以上。由於模式具有可重複執行不同情境模擬之優點，因此再現像探討上，可透過情境假設後來求證假設條件的合理性。基於以上假設，滑動土體座落於岩盤(Base)之上。其滑動土體給定自由位移邊界條件，以及其岩盤給定固定位移邊界條件。

本年度研究著眼於地下水條件對於崩塌發生及流出現象的影響，是故假設 D039 大規模崩塌潛勢區域存在有三種不同的地下水位情境。GW-I 係假設坡面地存在一個極高的地下水位，其地下水可達海拔高程 750m；GW-II 假設坡面存在一個相對低的地下水位，其地下水可達海拔高程 700m；最後則是地下水位與溪流出口水平，即地下水的海拔高程僅達 639.5m。

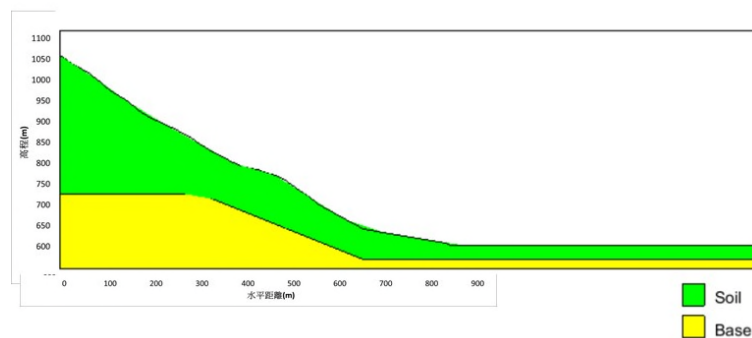


圖 3-25 D039 大規模崩塌潛勢區模式建置結果圖

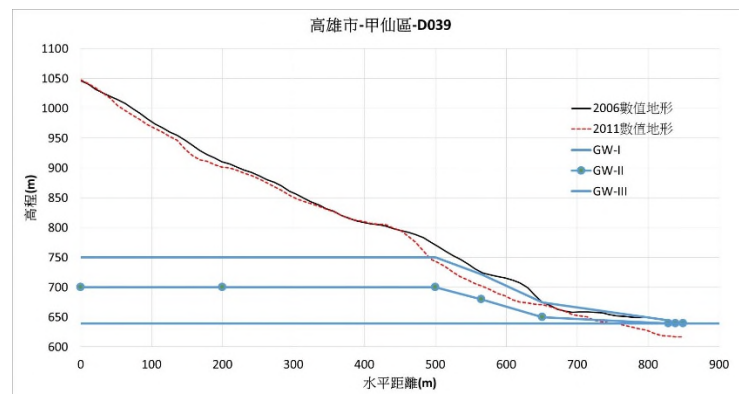


圖 3-26 D039 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境假設圖

滑動土體的材料參數則是依據不安定坡面分析得到的結果，假設凝聚力 10 kPa 和摩擦角 24 度，其模擬結果如圖 3-26 所示。透過結果顯示可知，透過結果顯示可知，當坡面地下水位極低時，如情境 GW-III，坡面變形區域集中於海拔高程 700m，然後滑動面從此發育往上到海拔高程 1000m 處，且海拔高程 1000m 處崩崖出現陷落，此時坡面仍處於安定沒有流出的狀態；當坡面地下水位較高時，如情境 GW-II，滑動面發育位置變深，改從海拔高程 600m 到海拔高程 1000m 處，且海拔高程 1000m 處崩崖陷落深度加大，此時海拔高程 750m 到 600m 處已經有明顯隆起；直到地下水位上升到如情境 GW-1 時，滑動土體明顯往前推移，但向前滑移的距離僅有 200 公尺左右。比對圖 3-19 顯示，本研究模擬結果，於海拔高程 1000m 到 800m 處看到的陷落是有近似的結果，然則海拔高程 800m 到 600m 處出現的侵蝕現象未見於模式中，尚待進一步的探討。

本研究進一步探討降雨對崩塌發生的影響。同樣係延續 GW-III 的情境假設，然後針對降雨現象，假設坡面經歷一場持續性強降雨，且降雨入滲已經達到地表下 30m 處，如圖 3-28 的飽和度分布圖。其模擬結果顯示，如圖 3-27 的剪應變分布，強降雨對邊坡的變形並未見顯著之改變，說明圖 3-19 中海拔高程 800m 到 600m 處的侵蝕現象並非單純由降雨現象所導致，從圖 3-17 可知，D039 趾部係由兩條子集水區溪流的交匯處，不排除圖 3-19 中海拔高程 800m 到 600m 處的侵蝕現象係由溪流沖蝕所主控。

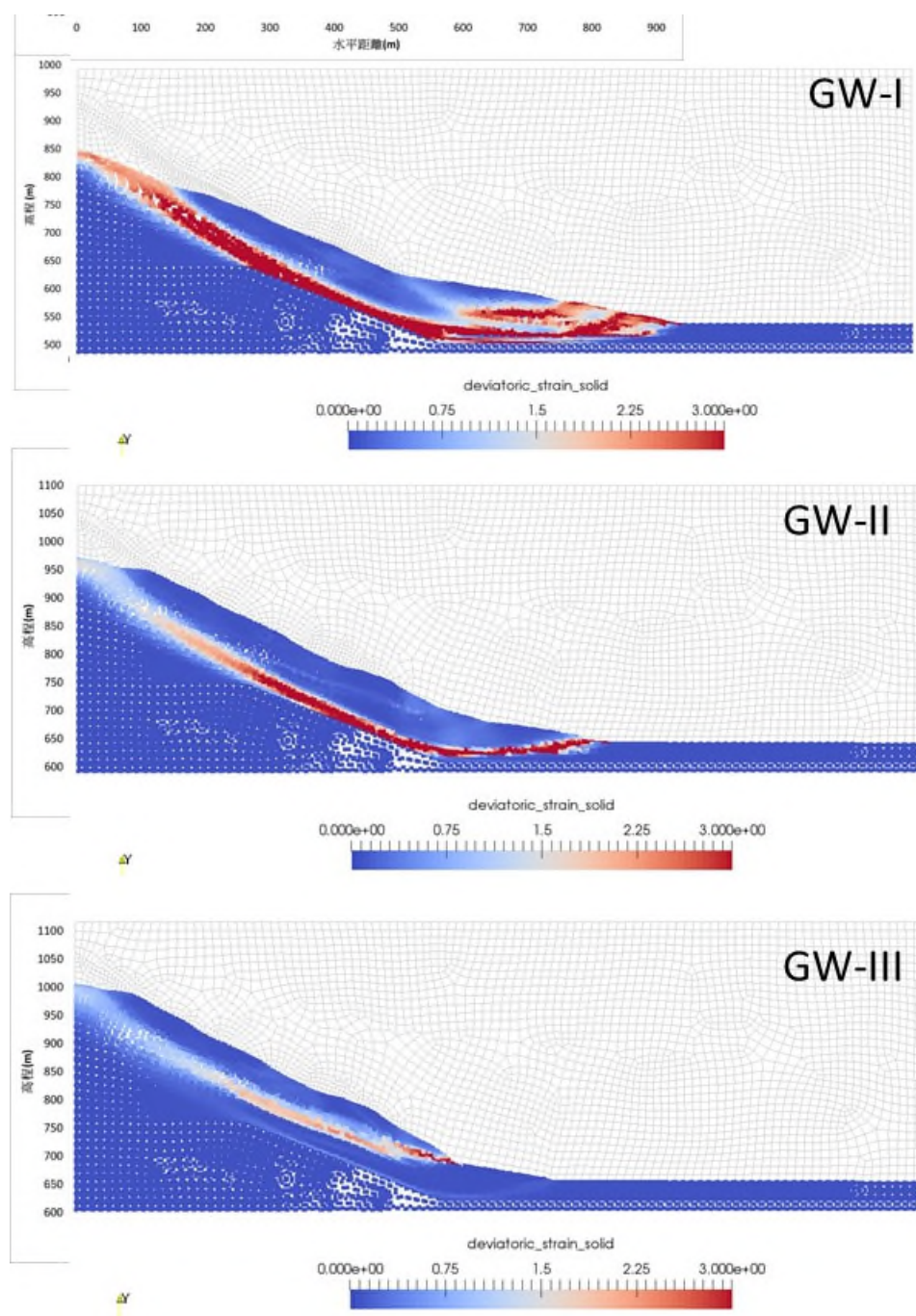


圖 3-27 D039 大規模崩塌潛勢區三種地下水情境模擬結果圖-剪應變分布

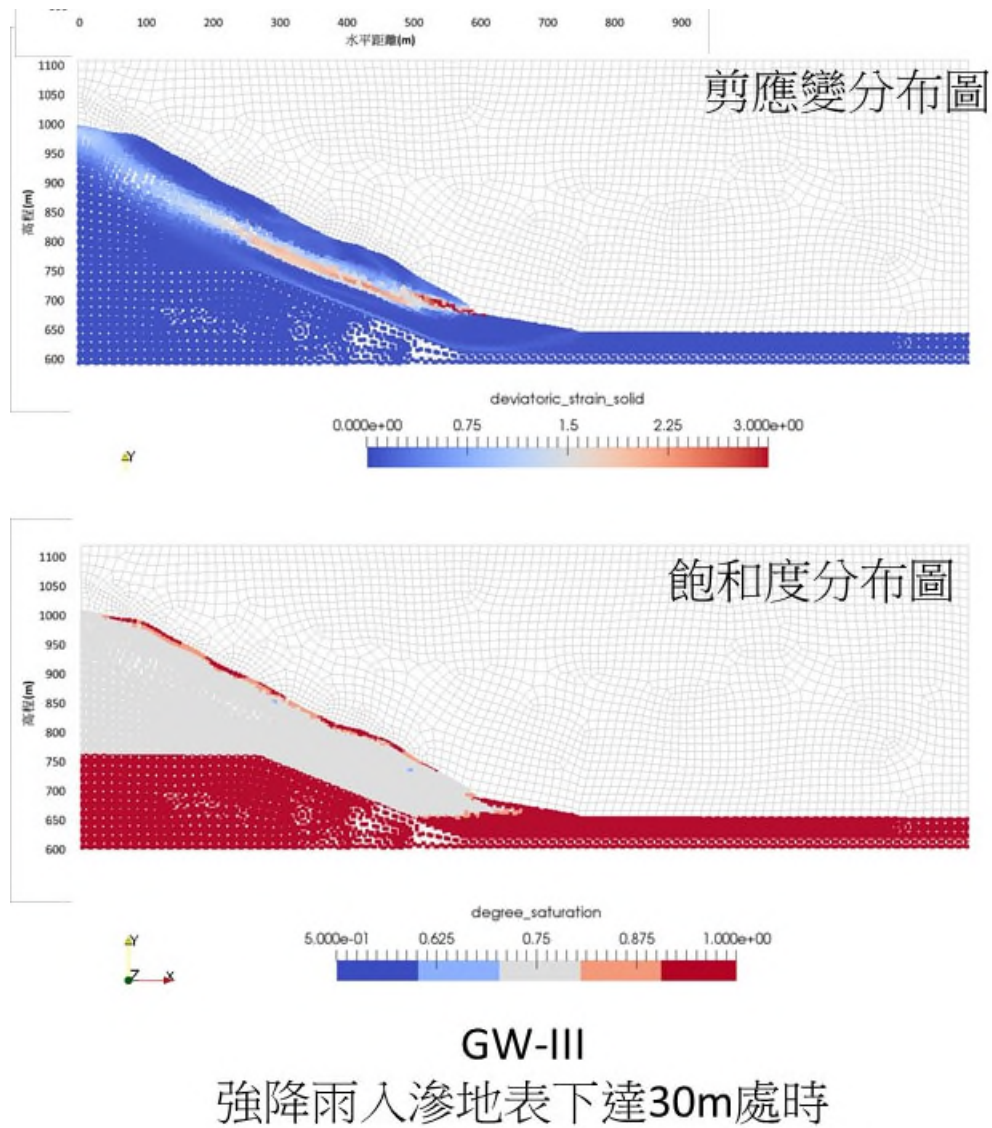


圖 3-28 D039 大規模崩塌潛勢區 GW-III 地下水搭配強降雨情境模擬圖-剪應變分布

第四章 結論與建議

本年度提出的創新研究方法主要有三個部分，分別為坡面不安定分析方法、坡面破壞型態分析方法和整合型崩塌發生與流出模式。其中，坡面不安定分析方法和整合型崩塌發生與流出模式為持續精進之研究項目，而坡面破壞型態分析方法則為本年度新提出的概念。所提之方法，皆係針對大規模崩塌潛勢區域細部調查推動受限的前提下進行創新研究，所提之方法係在地質鑽探資料、地物探測、現地物性實驗資料出來之前的替代方案，並非取代方案。而在應用方面，本年度將所提之創新研究應用於高雄甲仙崩坪坑集水區，其集水區內面臨大規模土砂運移的災害課題，且區域內有四處大規模崩塌潛勢區域，為未來潛在的大規模土砂來源，其區域內的大規模崩塌潛勢區域皆尚未進行細部調查工作，是故將其作為創研方法的研究對象。雖然光華地區並非本研究所規劃之研究區域，配合局內需求，將部分方法亦應用用到光華地區。

坡面不安定分析方法部分，本年度持續精進分析坡面的選定原則，讓使用者更容易透過 GIS 軟體來操作進行分析。經過本年度研究可知，地形特徵可反映區域的材料參數特性，例如高摩擦角的材料可容許較透的坡面出現於現地。基於如此前提下，本年度亦提出一套分析過程中材料參數的選定原則，以及材料參數的反推估方法。透過本研究所提出的材料反推估方法，本研究可推估高雄甲仙區崩坪坑集水區的參考材料參數，凝聚力為 10kPa 和摩擦角 24 度，將其結果代入整合型崩塌發生和流出模式也可得到合理的結果。此外，本研究亦將此方法應用到光華地區，透過參數反推估方法，可反算光華地區其他不安定坡面，具有參考價值。

坡面破壞型態分析方法，係基於參數因次特性推導得到的概念方法，相關的推導過程已於本年度研究中完整列出。本年度研究挑選地質調查所與水土保持局蒐集案例之參數，針對體積超過 10 萬立方公

尺之案例進行 $\bar{D}/R$ 之計算，可以看到當體積越大時， $\bar{D}/R$ 越小，說明體積越大之案例其破壞形態越接近平面型破壞之形式。

整合型崩塌發生與流出模式部分，本年度研究針對於模式操作和參數給定原則等內容進行更細部的說明，並以香港翡翠路崩塌案例作為模式的說明範例，香港翡翠路崩塌是經典的整合型崩塌發生與流出模式分析案例，除成功大學防災研究中心進行過相關研究發表外，義大利薩萊諾大學、中國武漢大學和香港城市大學皆有相關的研究發表，是故選用其作為代表案例。此外，本年度針對降雨對於崩塌發生及流出行為的特性做出進一步的探討，為能探討相關特性，本研究選用日本國立研究開發法人防災科學技術研究所於 2004 年進行的大型土坡實驗資料為案例，透過整合崩塌發生與流出模式可知，降雨強度改變，不僅會誘發快速地下水上升現象，且會導致崩塌流出的型態改變，當降雨強度較小時，破壞型態會進行圓弧形破壞，反之，則接近平面型破壞，此結果說明破壞型態不僅受到地層構造條件控制，也會受到降雨強度條件所控制，此結果可供降雨預警研究做為參考，相關結果亦已經發表於國際期刊。而於高雄甲仙崩坪坑集水區的應用研究部分，本研究針對編號 D037 和 D039 的大規模崩塌潛勢區域進行模擬，本年度針對不同地下水位情境和降雨入滲情境進行探討，可知 D037 和 D039 受到不同地下水和降雨條件下出現不同破壞型態。當 D037 區域內的地下水上升極高時，得以發生近似平面型破壞的流出現象，滑動距離將近 500 公尺，而 D039 則近似圓弧形破壞，於高地下水位時，滑動距離將近 200 公尺。此外，降雨效應於 D037 坡面較為顯著，降雨得造成 D037 顯著侵蝕現象，反之，D039 的侵蝕現象則較不顯著。

參考文獻

1. 水土保持局臺南分局，2017，甲仙集水區(和南巷大規模崩塌地區)土砂收支模式及觀測站評估
2. Jan Novotný, 2013, VARNES LANDSLIDE CLASSIFICATION. Addis Ababa University, Ethiopia
3. Culmann, C., 1875, Die Graphische Statik, Meyer and Zeller, Zurich, Switzerland.
4. 水土保持局，2020，高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究
5. 水土保持局，2019，智慧式合理估算坡面崩塌量體及其運移行為之精進研究
6. Subramanian, N., 2008, Design of steel structures. Oxford University Press.
7. Al-Hashemi, H. M. B., & Al-Amoudi, O. S. B., 2018, A review on the angle of repose of granular materials. Powder Technology, 330, 397-417.
8. Carsel, R. F., & Parrish, R. S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water resources research, 24(5), 755-769.
9. Yang, K. H., Nguyen, T. S., Rahardjo, H., & Lin, D. G., 2021, Deformation characteristics of unstable shallow slopes triggered by rainfall infiltration. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(1), 317-344.
10. Knill, S. J., "Report on the Fei Tsui road landslide of 13 August 1995.", Government Printer, South Africa, 1996.
11. Lee, W. L., Martinelli, M., & Shieh, C. L., 2019a, "Modelling rainfall-induced landslides with the material point method: the Fei Tsui Road case." In XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iceland.
12. Lee, W. L., Martinelli, M., & Shieh, C. L., 2019b, "Numerical Analysis of the Shiaolin Landslide Using Material Point Method.", 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk 2019, Taiwan.

13. Mualem, Y., "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water resources research*, 12(3), 513p-522p, 1976.
14. Van Genuchten, M. T., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.", *Soil science society of America journal*, 44(5), 892p-898p, 1980.
15. Yoshino, K., & Uchida, T., 2019, "Estimating mechanical slope stability to predict the regions and ranges of deep-seated catastrophic landslides.", *The 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Golden, Colorado, USA, 2019.
16. Siemens, G. A. (2018). Thirty-Ninth Canadian Geotechnical Colloquium: Unsaturated soil mechanics—bridging the gap between research and practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(7), 909-927.
17. Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., & Wang, G. (2004). Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator. *Landslides*, 1(4), 277-288.
18. Yang, K. H., Nguyen, T. S., Rahardjo, H., & Lin, D. G. (2021). Deformation characteristics of unstable shallow slopes triggered by rainfall infiltration. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(1), 317-344.
19. Nguyen, T. S., Yang, K. H., Ho, C. C., & Huang, F. C. (2021). Postfailure Characterization of Shallow Landslides Using the Material Point Method. *Geofluids*, 2021.
20. Ghasemi, P., Cuomo, S., Di Perna, A., Martinelli, M., & Calvello, M. (2019). MPM-analysis of landslide propagation observed in flume test. In *Proc. of II International Conference on the Material Point Method for modelling soil – water – structure interaction*. 8 – 10 January 2019, University of Cambridge, UK.
21. Lee, W. L., Martinelli, M., & Shieh, C. L. An investigation of rainfall-induced landslides from the pre-failure stage to the post-failure stage using the material point method. *Frontiers in Earth Science*, 1049.

附錄

附錄一、計畫書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	計畫極限平衡法所得分區分塊滑動深度和其他子計畫(王國隆教授)所得結果異同如何進行分析與解釋?	滑動深度的評估方法可概分為以下幾種方法 (1)經驗法：透過歷史案例來建立崩塌面積與體積之間的關係，當關係式建立後，即可透過崩塌潛勢區域面積來推估可能崩塌體積及其對應深度。 優點：此為快速評估方法，當崩塌潛勢區域已知時，即可透過簡單計算來推估崩塌機制及其對應深度 缺點：i.歷史崩塌案例的多寡及分類方法影響關係式的結果 ii.崩塌潛勢區域的面積和分區必須為已知條件，現行大規模崩塌潛勢區的面積為單一區塊，因此無法進行分區分塊推估 iii.崩塌體積及其深度的推估誤差相對較大 (2)極限平衡法：依照不同滑動面的特性(弧形、楔形)進行假設，透過靜力平衡條件即可推估崩塌潛勢區域及其對應深度 優點：此為快速評估方法，當地形剖面特性與材料參數已知時，即可透過簡單計算來推估崩塌潛勢區域及其對

項次	審查意見	回覆辦理情形
		應深度 缺點：i.需要單期地形資料 ii.不同滑動面特性假設和不同材料參數會得到不同結果 iii.崩塌體積及其深度的推估誤差相對較大 (3)多期航遙測影像比較法：透過不同時間影像產製數值地形，然後再透過兩期數值地形比較可即得到崩塌體積及其深度 優點：雖須仰賴影像處理工具與操作技術，當影像解析度越高時，崩塌體積及其深度的評估便較精準 缺點：無法做為預測崩塌潛勢區域破壞體積及其深度的方法 (4)數值模式法：透過物理模型來預測坡面的變形趨勢，並藉此來評估崩塌潛勢區域及其對應深度 優點：當地形和材料參數已知時，即可透過數值模式來進行崩塌潛勢區域及其對應深度的預測，推估結果的合理性相較於經驗法和極限平衡法來得高 缺點：i.計算過程耗時 ii.地形和材料參數的取得和率定不易 (5)地表位移推估法：依據地表位移觀測紀錄，依據連續

項次	審查意見	回覆辦理情形
		體體積守恆概念，反推滑動面發生位置 優點：僅需地表位移觀測紀錄和數值地形資料即可推估滑動面發生位置 缺點：i.計算需求高於經驗法和極限平衡法，但又低於數值模式法 ii.相當仰賴地表位移觀測資料的完整性 本研究採用的方法為上述之極限平衡法和數值模式法，王國隆教授主持之子計畫主要採用多期航遙測比較法和數值模式法。
二	DR 指標主要針對圓弧型滑動為主，如何確該目標區滑動型態皆符合 DR 指標之假設條件？	由於滑動面具有不同特性，例如圓弧型滑動、平面型滑動，DR 指標係用來評估滑動面特性的方法，本研究提出 DR 值越小其滑動面特性屬於平面型滑動，反之 DR 值越大其滑動面特性屬於圓弧型滑動。用來鑑別滑動面特性的 DR 門檻值則需透過歷史崩塌案例來建立，為本年度研究的主要工作事項。
三	請說明崩坪坑溪的滑動破壞模式是土石崩移，還是順層滑動，就計畫書中所均為土石崩移的模型，如何評估？計畫內未詳細說明。	崩塌坑溪過去僅有對歷史崩塌發生區域和崩塌潛勢區域進行過調查，但缺乏對其進行崩塌破壞特形的評估。因此，本研究提出極限平衡法來評估崩塌潛勢區域內的分區分塊結果、提出 DR 指標來評估滑動面特性、和提出

項次	審查意見	回覆辦理情形
		數值模式法來預測崩塌的發生及流出過程。
四	請補充說明於計畫說明書中，相關技術、工具作法之詳細說明。	計畫書已增補相關詳細說明，例如工具操作流程。
五	請於說明書中加入研究區域的相關描述以及與過去研究之異同。	研究區域基本資料已新增於計畫書附錄資料，崩坪坑集水區過去的研究主要係針對河道大規模土砂運移之現象和特性進行研究，缺少對坡面崩塌現象及特性的相關研究，本計畫即是針對後者來進行。

附錄二、期初審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	整合型模式需要輸入，輸入是由衛星影像評估，但其解析度能提供資料的精度有限，建議先詳加討論，並評估若衛星影像產品之輸入不敷使用，可以用的備案為何？	整合型模式所需輸入的參數包括邊坡剖面、材料參數、初始條件、和邊界條件等。其中，邊坡剖面的給定，依據係來自於數值地形。近年來分析區域的數值地形可以透過不同的管道取得，包括衛星影像、航照相片、無人載具影像、或現場測量等。當衛星影像無法提供整合型模式所需的邊坡剖面時，本計畫將透過上述不同的資料來源來取得整合型模式所需的邊坡剖面。
二	無限邊坡的基本假設是二維，另一維為無限長，但目前崩平坑四處切剖面，切得很密會不會偏離假設？要如何修正。	無限邊坡的基本假設中，係假設塊體的滑動沿著坡面的方向。基於此假設下，分析剖面的選取必須順著坡面的走向來做擷取，此也是本計畫切剖面的原則。
三	期初簡報主要是介紹模式，沒有說明如何把衛星推算的地形與模式關聯。	當透過衛星影像推得數值地形後，將透過地理資訊系統工具來切取分析所需要的剖面。剖面資料為水平距離(X)和其對應高程變化(Z)的數列，整合型模式僅須將此數列輸入後即可運算。相關說明以補充說明於期中報告中。
四	坡面破壞型態(平面或圓弧滑	由於潛勢區的地層構造及地

項次	審查意見	回覆辦理情形
	動)主要和地層構造及地質材料有關聯，本計畫模式中似無法反應出現場地質條件之特性？	質材料等條件需要仰賴細部調查和鑽探等工作來得知。當上述細部調查等工作尚未推動時，則必須透過更簡化的方法來進行坡面破壞型態的推估。本計畫係基於上述動機下所提的快速且簡易評估方法，這是一個適用於潛勢區地層構造及地質材料等條件不明確時的方法，當未來上述潛勢區的細部調查完成後，最後的坡面破壞型仍須與地層構造及地質材料進行關聯分析。
五	計畫模式中起始及邊界條件應完整陳述，尤其是如何選取崩塌深度及範圍，另請說明現場地質調查(或鑽探資料)如何決定模式之相關 IC 及 BC。	謝謝建議，已於期中報告中補充說明起始及邊界條件的給定方法，以及如何依據地質調查(或鑽探資料)來決定模式之相關 IC 及 BC。崩塌深度及範圍為整合型模式的計算結果，並非模式的輸入條件，相關說明以補充於期中報告中。
六	請說明模式中降雨及地下水效應中如何分析。	整合型模式的理論納入未飽合滲流理論，透過降雨邊界條件和地下水位初始條件的給定，即可透過數值求解降雨及地下水的效應。相關理論的說明已補充於期中報告中。
七	P2-3 坡面不定分析範例中寶來里及光華大崩案例分析所	參數選用的原則，當有細部調查資料(鑽井、物性試驗

項次	審查意見	回覆辦理情形
	使用之參數如 C 、 ϕ 值，應註明於報告書中，並說明此參數選用之原則。	等)，則依據資料給定，如範例中寶來里；若無，亦可參照地質相關 GIS 圖資，依區域所在的地層或岩性等資料來假設；亦或是從歷史崩塌資料和事件前後期地形來反推，如光華大崩。相關說明已新增於期中。
八	P2-7 式(7)、(8)之參考文獻為何?請補充。	式(7)為崩塌體積和面積於相同因次下的關係式，式(8)為崩塌體積與面積和深度於相同因次下的關係式，上述兩式皆為本計畫提出的關係式。
九	P2-11 整合型崩塌發生與流出模式係為二維單一坡面分析，但第 3 章所提之崩坪坑集水區案例涉及大量坡面，本研究分析的標的為單一坡面或整個集水區之大量坡面，宜說明之。	崩坪坑集水區內共計有劃定有四處大規模崩塌潛勢區域。透過本計畫所提之不安定分析方法，將對每一處潛勢區選定一條代表剖面。然後，使用整合型崩塌發生與流出模式來模擬此代表剖面下可能的崩塌發生與流出過程。
十	承上，選定分析之剖面尺度否有一合適標準。	整合型崩塌發生與流出模式的剖面選定原則與不安定分析一致。當潛勢區範圍確定之後，將先分析範圍內的集水區範圍和坡面單元，原則上剖面的選取將會是集水區範圍或剖面單位內最低點和嶺線沿著坡面走向的連線。相關說明亦已補充於期中報告之中。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十一	崩塌誘發之外力是雨量、流量或地震宜有說明。	於頗面不安定分析方法中，僅考慮重力影響下的崩塌現象。而於整合型崩塌發生與流出模式則能考慮降雨影響和重力影響下的崩塌現象。相關說明已補充於期中報告中。
十二	坡面坡度(θ)之計算單元如何界定，宜有集水區或河道(水系)網之門檻值加以界定。	誠如委員建議，針對本計畫選定之潛勢區域，於剖面選定之前，必先分析範圍內的集水區範圍和坡面單元，然後才依據集水區和坡面等特性來劃定剖面，然後再來計算分析所需之坡度等參數。相關已補充於期中報告中。
十三	崩塌發生可能是以重力(土壤力學)或潰壩(流體力學)進行數值模擬，若以 MPM(結合上述兩者)來模擬之理由宜有說明。	崩塌於發生階段(材料從靜止條件達破壞條件之間)的力學特性遵循土壤力學，當崩塌進入到流出階段(破壞後塊體以近似流體運動)的力學特性遵循流體力學，過去數值方法長將崩塌兩階段過程透過不同數值模式來進行模擬，其缺點就是兩階段模式之間參數的不一致性。若要更完整探討崩塌從發生到流出的連續過程，透過 MPM 模式來整合崩塌發生與流出階段的模擬，將能提高對崩塌現象研究的準確性。相關說明已補充於期中報告中。
十四	崩塌機制宜有明確說明。	謝謝委員建議，本計畫所提

項次	審查意見	回覆辦理情形
		方法適合探討的崩塌機制說明已補充於期中報告中。
十五	模型內容需要數項參數，多數參數在真實環境下屬動態及空間上有極大變異值，未來應用上需加以考慮。	謝謝委員建議，模式的假設、參數的選用建議等已補充於期中報告中。
十六	建議或許可考慮實驗範圍直接採用目前桃園復興光華大崩塌地區，與水保局之整治及資料蒐集皆能較有關係，且對局實質貢獻較高。	謝謝委員建議，計畫之執行原則上依循既定之規劃項目辦理。當項目辦理符合既定計畫需求時，積極配合局內執行計畫項目外的推廣應用。

附錄三、期中審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	期中報告書摘要內容與報告書第一章第一節內容完全雷同。建議未來摘要敘述僅列出重要研究方法及目前重要成果。	謝謝委員指正。期末報告的摘要已經重新撰寫。
二	坡面不安定分析方法中使用之極限平衡法應可再考量其適用性，因為大部分集水區內土壤及地質皆非均勻，且地表植生狀態亦有顯著差異，坡度變化更高，較難以純數值方法解算複雜之崩塌行為及斷定坡面之安定或不安定。	謝謝委員建議。本研究係針對大規模崩塌潛勢區域尚未進行細部調查前提下所提的創新研究方法，即現場缺乏地質鑽探、物性探測或現地實驗等資料的情況。因此，假設條件較多亦較難完整反映現場條件。但是，卻可在細部調查完成前提供局內一份參考評估的資料。由於台灣大規模崩塌潛勢區域數量龐多，細部調查受限於人力、預算和時間等執行不易，所以才提出相關之替代方案，並非取代方案。
三	計畫中蒐集之全台崩塌案例基本資料表(表 2-1)中雖列出三百多案例，然各案例屬崩落、圓弧、平面、楔型、傾翻等類型有極大差異，建議分析中亦能再更細化分類且分開分析方式，因其差異性極高。	謝謝委員建議。由於統計資料的細分、資料查證和資料修正所需時間較多，本年度研究尚未能見顯著之差異性，未來將持續進行相關研究。
四	報告書中第二章之模式設定之地形資料突以香港翡翠路崩塌資料分析之原因為何?同	本研究係以香港翡翠路崩塌作為模式操作和參數給定原則的說明案例，香港翡翠路

項次	審查意見	回覆辦理情形
	章內模式驗證突以日本大型土坡實驗解釋之原因為何?建議皆應加以詳述其與本計畫擬分析實驗地點可參考內容之相關。	崩塌為整合型崩塌發生和流出模式研究發展上的經典案例，成大防災研究中心、香港城市大學、義大利薩萊諾大學、中國武漢大學等皆有相關發表，是故選用。 為能說明本研究所提模式於降雨效應對於崩塌發生和流出模擬的表現，是故選用室內實驗資料做為說明案例，此實驗為日本國立研究開發法人防災科學技術研究完成的大型土坡實驗，國際研究上具有代表性，本年度相關研究成果亦已經被國際期刊接受。
五	需確認本計畫將以旗山溪流域分析及是否亦將光華地區資訊亦進行分析?	已針對光華地區進行坡面不安定分析。
六	第五章之後續工作規畫內容敘述過少，建議應明列。	謝謝委員指正，結論已於期末報告中修正。
七	P2-9 式(7)~(9)請標註來源，而非僅說明為先前研究。	謝謝委員指正，本研究所提之方法係基於參數因次分析之結果，文中勘誤已經修正。
八	P2-11 說明崩塌資料有 323 筆，惟表 2-1 僅有 301 筆，請確認。	謝謝委員指正，文中勘誤已經修正。
九	圖 2-7 如以黑白印製時，不同資料區間請使用不同符號以利辨識。	依委員意見修正，謝謝。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十	第二章第二節主要在分析坡面為圓弧型或是平面型破壞，但 P2-23 結論是「體積愈大之案例期破壞形態越接近一次驟然破壞之型式」，建議前後用語邏輯應一致，依次驟然破壞之型式是指何者？	依委員意見修正語意邏輯不一致的部分，謝謝。
十一	承上，分析坡面為圓弧型或是平面型破壞，對於本研究而言，係用圖 2-12 流程圖中的哪一部分？	坡面破壞型態分析係提供整合型崩塌發生和流出模式模擬一個交互比對的依據。整合型崩塌發生和流出模式本身亦具有破壞型態分析的功能。
十二	不安定坡面分析法所使用之 C、 ϕ 值之選用，有無建議之範圍，還是只能使用試誤法不斷測試？	不安定坡面分析法的參數選用原則已經重新撰寫於期末報告中。試誤法是一個細部調查資料不完整前提下的反推估方法，是選擇性的方法。
十三	今年度於研究方法等與去年計畫有何不同？或是只有研究區域不同的差異？且與另二個子計畫之關連性於報告書中完全看不出來，請補充。	本年度研究與前期相關計畫，以及與整合型計畫的關聯性，已經於期末報告中重新撰寫。
十四	建議具體說明本研究中坡面不安定區域分析方式之精確性為何？因大規模崩塌和地質條件有密切關係，請說明本研究方式中如何納入地質相關條件進行安定分析？	坡面不安定分析的假設條件與前提已經重新撰寫於期末報告。
十五	請詳細說明本研究崩塌發生之模擬過程中，如何決定崩	崩塌深度及崩塌土方量係模式的模擬結果，可透過模擬

項次	審查意見	回覆辦理情形
	塌深度及崩塌土方量。	結果來得到。
十六	建議補充光華地區試作相關資料，同時與歷年調查鑽探資料進行比對，進行本研究發展之數值模式適用性評估。	謝謝委員建議，相關工作仍在持續進行中。
十七	報告書封面計畫編號請修正為 SWCB-110-052。	謝謝委員指正，已經修改。
十八	建議詳細說明此方法之限制及適用條件。	依委員建議於期末報告中強化相關內容之撰寫。

附錄四、期末審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	MPM 模式有考量地下水，其係如何決定？	依據水文學，溪流或坡面的出水位即為地下水的坡面位置。其坡面的出水位置可透過現地調查、航遙測影像和高精度數值地形判斷得知。而坡面內的地下水可透過鑽探來直接量測，或是透過經驗法或數模法來進行反推。由於本研究區域的坡面內地下水位未知，因此透過不同地下水位的假設來判斷邊坡位移可能發生的型態，再透過前後期地形變化來比對。
二	計畫模式測試區域案例，建議補充使用與測試的參數與專案等資料，作為後續案例之累積，以利水保局持續應用與推廣。	測試區域案例採用的參數已經補充說明於表 3-1 和表 3-2。後續配合水保局的推廣製作相關模擬影片，以供使用。
三	第三章前三節皆為崩坪坑之案例，而在第四節轉為光華崩塌地，建議請重新整合或編排內容。	由於光華崩塌地非本計畫原規劃分析對象，依意見將其改置於附錄五，以免讀者混淆。
四	圖 2-12 中含 10 萬立方公尺以下之案例，建議修正圖名。	謝謝指正，圖 2-12 的說明已經修正。

附錄五、光華地區案例分析

本年度亦將其應用到桃園市-復興區-T002(光華)大規模崩塌潛勢區。其大規模崩塌潛勢區範圍如圖 A-1，選定區域內最低點和陵線之間的連線來切取剖面資料，由於2月曾發生邊坡塊體滑動，邊坡塊體滑動的區域如圖中橘色圈繪範圍，邊坡上半部實際裸露之範圍如圖中紅點。

據此數據來透過式(6)進行分析，可得不安定分析結果如圖 A-2，圖中紅色為實際邊坡上半部裸露之位置，圖中黃色為推估邊坡不穩定之位置，將其反推知結果套繪到圖 A-1，可知光華地區其他潛在不安定坡面的位置如圖中黃色點位。

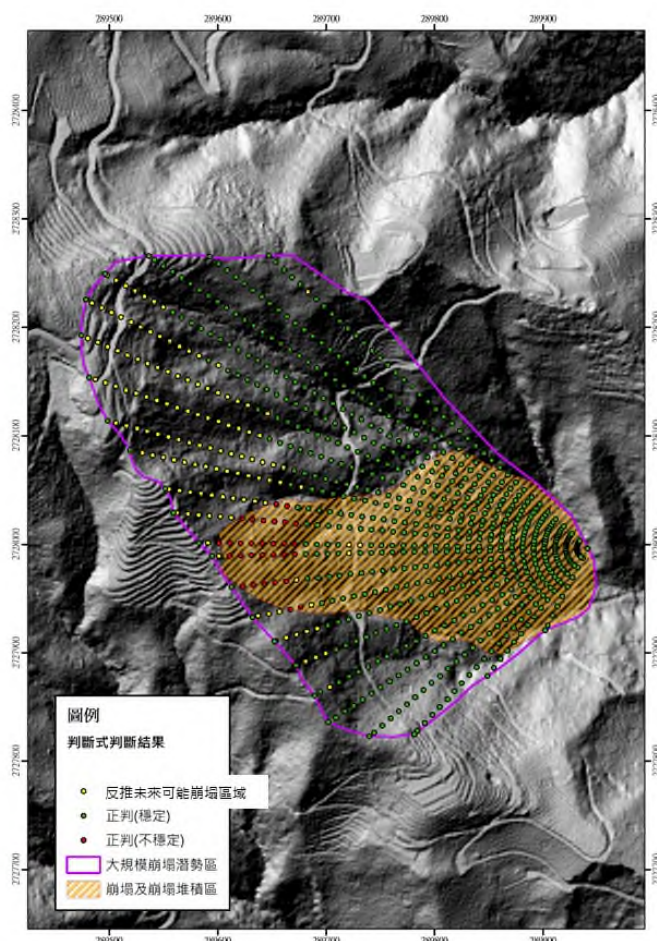


圖 A-1 桃園市-復興區-T002(光華)大規模崩塌潛勢區分析圖

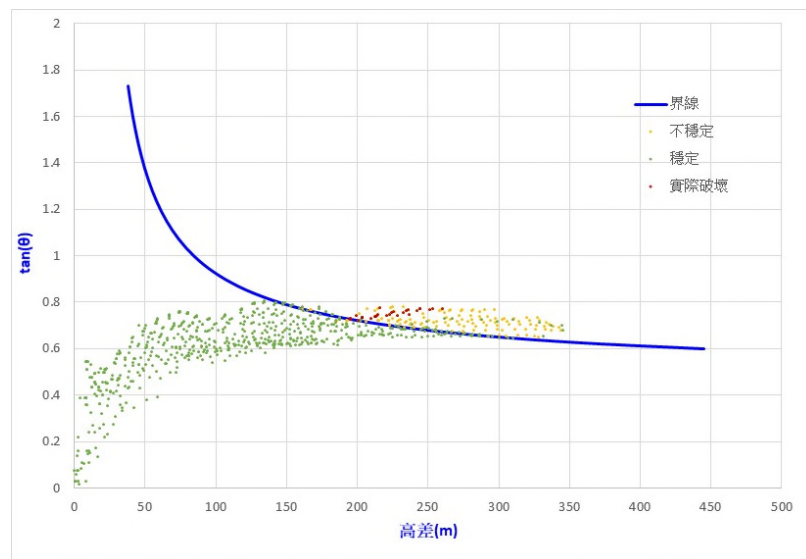


圖 A-2 光華潛勢區不安定分析成果圖