



106年度大規模土砂災害防災對策先期研究 成果報告書

106
年度大規模土砂災害防災對策先期研究

成果報告書



106
年度

行政院農業委員會水土保持局



行政院農業委員會水土保持局
與您一起打拼



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

行政院農業委員會水土保持局 編印
中華民國106年12月

**106 年度大規模土砂災害
防災對策先期研究**

**The Preparatory Study of Prevention
Strategy for Large-scale Sediment Disaster**

執行單位：財團法人農業科技研究院

研究主持人：翁瑋蓮 組長

研究人員：黃奉琦、劉維則、吳軒蘋、吳宜青、李苡宣

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 106 年 12 月

106 年度大規模土砂災害防災對策先期研究

摘要

本研究為三年期(105-107 年)之連續型計畫案，本期計畫完成工作項目包含：收集國內外土砂最新研究與技術文獻、盤點水土保持局歷年已完成之土砂防災技術研究成果、土砂災害模擬相關模式測試與分析及研擬 土砂防災研究發展議題等四大項，其中，國內外土砂最新研究與技術文獻項目共收集 145 冊相關文獻，並於 7 月出版「國內外水土保持技術與研究發展趨勢」報告一冊。歷年已完成之土砂防災技術研究成果則以彙整 97 年度至 105 年度水土保持局相關之委辦與研究計畫成果報告計 1369 冊，並以此為依據執行可延續性及成效分析，評估各項技術與研究加值應用之可行性。土砂災害模擬相關模式測試與分析之工作項目，分別以三個實際案例建立數值模型評估分析模式的適用性與模式的限制。另外，土砂防災研究發展議題研擬項目則邀請水土保持局各業務單位同仁進行 3 次「水土保持相關研究與技術發展」工作會議凝聚共識，並彙整會議結果，研擬土砂防災研究未來發展議題。

關鍵字：水土保持技術與研究發展趨勢、歷年成果盤點、土砂災害模擬、土砂防災研究發展

The Preparatory Study of Prevention Strategy for Large-scale Sediment Disaster

Abstract

This report is a three-period continuous program. This period report has completed the following project. First, collection of literature in the research and technology documents of sediment disaster prevention. Second, the research program results inventory of sediment disaster strategy. Third, simulation and analysis of flood and sediment disaster in the watershed were explored. Fourth, develops the future issues of sediment disaster prevention research and development strategy. In addition, 「SWCB and ATRI (2016), Trends for Research and Technology Development of Soil and Water Conservation」, this report contains a total of 145 research reports and national disaster prevention strategies. The research program results inventory of sediment disaster strategy, which is total 1369 projects from 2008 to 2016. The simulation analysis of watershed flood disaster was implemented numerical modeling and analysis are performed on three examples, explore the applicability of the analysis model and the limitations of the model. A total of three numerical models are 「RocFall」, 「CCHE2D」, 「IRIS」. The soil and water conservation related research and technological development project to convene three meetings to reach consensus, completed the future issues of sediment disaster prevention research and development strategy planning issues.

Keyword: Trends for Research and Technology Development of Soil and Water Conservation, past program results inventory of sediment disaster strategy, sediment

disaster numerical analysis, strategy and system of sediment disaster.

目次

摘要	I
Abstract	III
目次	V
表次	X
圖次	XII
第一章 緒論	1-1
第一節 研究背景	1-1
第二節 研究目標	1-1
第三節 本研究報告架構	1-2
第二章 國內外水土保持技術研究發展趨勢	2-1
第一節 報告架構	2-1
第二節 報告內容概述	2-2
一、 工程技術發展	2-3
二、 軟體防災對策	2-5
三、 管理與法規研析	2-7
四、 基礎調查	2-11
五、 基礎研究	2-13
六、 新興科技應用	2-15

第三節 應用案例	2-15
一、 日本 i-construction 之推動情形	2-15
二、 日本綜合性土砂災害對策報告	2-19
三、 以廣島土砂災害探討日本土砂災害防止法制定背景與影響	2-21
四、 日本深層崩塌對策基本技術事項	2-23
五、 衛星遙測土壤含水量.....	2-26
六、 荷蘭治水桌遊.....	2-28
第四節 小結	2-29
第三章 歷年完成之防災技術與研究成果盤點	3-1
第一節 盤點工作範圍	3-1
一、 97-105 本局及分局委辦及研究計畫成果	3-1
二、 委辦計畫成果盤點工作項目說明	3-4
第二節 盤點成果分析	3-6
一、 盤點結果.....	3-6
二、 評估歷年成果延續發展之可行性	3-9
第三節 小結	3-10
第四章 土砂災害模擬相關模式測試與分析	4-1
第一節 案例一、台東紅葉崩塌土砂量評估及落石安全評估	4-1

一、基本資料.....	4-1
二、研究程序說明.....	4-10
三、分析方法測試說明.....	4-15
四、分析成果.....	4-20
五、小結.....	4-22
第二節 案例二、南投縣中寮鄉粗坑吊橋上游開口壩之防砂效益 評估	4-24
一、概述.....	4-24
二、基本資料.....	4-26
三、模式說明.....	4-35
四、分析方法測試.....	4-41
五、分析成果.....	4-42
六、小結.....	4-51
第三節 案例三、台東紅葉崩塌地滑動規模與發生時間預測模式	4-53
一、基本資料.....	4-53
二、模式說明.....	4-62
三、分析方法測試.....	4-67
四、分析成果.....	4-74

五、 小結.....	4-82
第五章 土砂防災研究發展議題研擬	5-1
一、 綜合企劃組.....	5-2
二、 監測管理組.....	5-5
三、 土石流防災中心.....	5-8
四、 保育治理組.....	5-9
第六章 結論與建議	6-1
第一節 結論	6-1
一、 國內外水土保持技術與研究發展趨勢報告	6-1
二、 歷年完成之防災技術與研究成果盤點	6-1
三、 土砂災害模擬相關模式測試與分析	6-3
第二節 106 年度對外發表成果	6-6
第三節 建議	6-7
一、 持續針對國內外技術研究發展趨勢進行研析	6-7
二、 歷年委辦案件成果可延性建議	6-10
參考文獻	參-1
附錄	附錄-1
附錄一、106 年度對外發表成果	附錄-1

表次

表 2-1 地球物理探測技術特性彙整表	2-13
表 3-1 97-105 年度委辦及研究計畫數量統計	3-2
表 3-2 委辦計畫成果盤點工作項目說明彙整表	3-4
表 3-3 細部盤點項目與統計數量	3-8
表 4-1 研究區集水區坡度分析彙整表	4-2
表 4-2 研究區集水坡向分析彙整表	4-2
表 4-3 土壤特性及分布地區一覽表	4-8
表 4-4 崩塌範圍土砂量估算彙整表	4-14
表 4-5 RocFall 程式回復係數輸入參考值彙整表	4-17
表 4-6 Field estimates of rock mass properties for Marinos and Hoek,2000	4-19
表 4-7 基礎掏刷對落石的穩定分析成果彙整表	4-21
表 4-8 地震影響對落石的穩定分析	4-22
表 4-9 常見的動床模式之功能比較	4-25
表 4-10 模擬範圍模式參數表	4-30
表 4-11 曼寧粗糙係數對照表	4-34
表 4-12 粗坑溪分析斷面樁號表	4-48
表 4-13 粗坑溪不同斷面治理前後最大底床變化一覽表	4-49

表 4-14 粗坑溪治理前後土砂變化量一覽表	4-50
表 4-15 實驗室試驗結果彙整表	4-56
表 4-16 試體編號表	4-58
表 4-17 表層土壤相關參數	4-59
表 4-18 淺層土壤相關參數	4-59
表 4-19 破壞面相關參數	4-59
表 4-20 壓力鍋試驗-各階壓力下之含水量	4-60
表 4-21 輸入模式之不飽和土壤力學參數	4-72
表 4-22 土壤參數測試結果	4-75
表 5-1 水土保持相關研究與技術發展工作會議歷程表	5-2

圖次

圖 2-1 國內外相關研究單位分布圖	2-3
圖 2-2 i-construction 現場工程新技術導入示意圖	2-5
圖 2-3 堰塞湖類型硬體對策配置示意圖	2-6
圖 2-4 土石流類型硬體對策配置示意圖	2-6
圖 2-5 國土功能分區及其分類圖	2-8
圖 2-6 土砂災害警戒區域及特別警戒區域之劃定方式示意圖	2-9
圖 2-7 奧地利公告危險區分區劃定示意圖	2-11
圖 2-8 不同 PH 值下植物生長狀態圖	2-14
圖 2-9 推動 i-construction 觀點示意圖	2-17
圖 2-10 同步工程技術(Concurrent engineering)進度前移模式示意圖	2-17
圖 2-11 推隊綜合性土砂災害對策措施報告之摘要	2-20
圖 2-12 發布避難準備情報、避難勸告、避難指示的流程	2-21
圖 2-13 土砂災害防止法與砂防三法之區別	2-22
圖 2-14 大規模崩塌推測頻率地圖	2-24
圖 2-15 大規模崩塌遺跡密度地圖	2-25
圖 2-16 2008 年各月蒸發散量成果	2-27
圖 2-17 土壤含水量計算結果	2-27

圖 2-18 工程與環境模擬之數值模式及實體桌遊卡片	2-28
圖 3-1 歷年委辦計畫數量統計	3-3
圖 3-2 97-105 年間各組室(中心、分局)委辦計畫數量統計	3-3
圖 4-1 研究區集水區坡度分析圖	4-3
圖 4-2 研究區集水區坡向分析圖	4-4
圖 4-3 研究區域環境地質分布示意圖	4-6
圖 4-4 土壤分佈圖	4-9
圖 4-5 無人飛行載具任務航線規劃示意圖	4-11
圖 4-6 地面控制點分佈示意圖	4-11
圖 4-7 災後崩塌區正射影像	4-13
圖 4-8 2016、2017 年兩期崩塌區變化示意圖	4-13
圖 4-9 崩塌後地表高程變化示意圖	4-14
圖 4-10 落石情境模擬模式之流程圖	4-16
圖 4-11 Relationship between ratio of cohesive strength to uniaxial compressive strength of intact rock(c / σ_{ci})and GSI for different (m_i)values	4-18
圖 4-12 Friction angle ϕ for different GSI and m_i values	4-19
圖 4-13 預測落石運動軌跡示意圖	4-20
圖 4-14 粗坑溪集水區區位圖	4-26

圖 4-15 工程構造物位置圖	4-27
圖 4-16 粗坑吊橋上游模擬河段之斷面里程範圍	4-28
圖 4-17 CCHE 操作流程圖	4-29
圖 4-18 CCHE 參數輸入流程圖	4-29
圖 4-19 模擬範圍網格	4-32
圖 4-20 粗坑溪 50 年重現期距流量歷線	4-32
圖 4-21 水保構造物設置位置	4-42
圖 4-22 粗坑溪河段治理前後河道流速分布圖	4-44
圖 4-23 粗坑溪河段治理前後河道水深變化圖	4-46
圖 4-24 粗坑溪河段治理前後河道底床高程變化圖	4-47
圖 4-25 粗坑溪 section 1 治理前後底床剖面比較圖	4-48
圖 4-26 粗坑溪 section 2 治理前後底床剖面比較圖	4-49
圖 4-27 粗坑溪 section 3 治理前後底床剖面比較圖	4-49
圖 4-28 紅葉村災害示意圖	4-53
圖 4-29 鹿野雨量站 2016/09/14 至 2016/09/16 雨量資料	4-54
圖 4-30 紅葉村崩塌地地質鑽探位置與地層剖面圖示意圖	4-56
圖 4-31 取樣位置示意圖	4-58
圖 4-32 土壤水分特性曲線	4-61
圖 4-33 (a)動態規劃法應用於臨界滑動面求解之路徑節點示意圖 (b)	

相關符號示意圖	4-66
圖 4-34 剖面位置圖	4-69
圖 4-35 簡化邊坡模型	4-69
圖 4-36 研究流程圖	4-72
圖 4-37 土壤參數測試流程圖	4-73
圖 4-38 已崩塌組數之崩塌發生時間	4-77
圖 4-39 高度透水性下不同土壤強度之崩塌滑動面	4-78
圖 4-40 中度透水性下不同土壤強度之崩塌滑動面	4-79
圖 4-41 崩塌模擬時間與實際發生時間($k_1C_3\phi_4$)	4-80
圖 5-1 綜合企劃組年度業務規劃網絡圖	5-4
圖 5-2 監測管理組年度業務規劃網絡圖	5-7
圖 5-3 土石流防災中心年度業務規劃網絡圖	5-9
圖 5-4 保育治理組年度業務規劃網絡圖	5-10
圖 5-5 水土保持技術與研究發展網絡圖	5-11

第一章 緒論

第一節 研究背景

水土保持局於 106 年訂定大規模崩塌相關議題為年度重大政策，期望透過區域盤查以及問題分析，預先規劃大規模崩塌災害處理調適工作，以強化氣候變遷影響之因應能力，利用分年分期之各項調適策略步驟，達成「建構科技、創新、智慧的坡地防災」、「維護安全、生態、多樣的水土環境」、「營造保育、利用、永續的國土資源」之目標，並朝最終達成「建構智慧防災的坡地環境」之願景邁進。

第二節 研究目標

本研究為全程共三期之延續型計畫案，第二期執行期程為 106 年 01 月 01 日至 12 月 31 日，於本期計畫完成工作項目包含：收集國內外土砂最新研究與技術文獻、盤點水土保持局歷年已完成之土砂防災技術研究成果、土砂災害模擬相關模式測試與分析，以及研擬土砂防災研究發展議題等四大類，其中，國內外土砂最新研究與技術文獻項目共收集 145 冊相關文獻，並於 9 月出版「國內外水土保持技術與研究發展趨勢」報告一冊。歷年已完成之土砂防災技術研究成果則以彙整 97 年度至 105 年度工程類相關之委辦計畫計 1369 冊，並以此為依據，執行可延續性及成效分析，評估各項技術或研究持續發展之可行

性。土砂災害模擬相關模式測試與分析之工作項目，分別以三個實際案例建立數值模型評估分析模式的適用性與模式的限制探討。另外，土砂防災研究發展議題研擬項目則以邀集局內業務單位同仁進行「水土保持相關研究與技術發展」工作會議方式進行，以凝聚共識，並彙整會議討論結果，研擬土砂防災研究未來發展議題。

第三節 本研究報告架構

第一章，緒論，說明研究背景、目標及研究架構。

第二章，國內外水土保持技術研究發展趨勢，計收集美、日、港、台、中及歐洲等 10 個相關研究單位之研究成果與國土防災策略報告共計 145 冊，其中，法規政策類 55 冊、研究趨勢及成果 47 冊、科技技術應用類 19 冊、基礎調查報告 6 冊、其他及網路訊息類計 18 冊。本章節以上述文獻為研析依據，內容計規劃為工程技術發展 軟體防災對策、管理與法規研析、基礎調查、基礎研究及新興科技應用等六大類。

第三章，透過盤點過往之委辦案件執行成果，檢視重大政策推動情形，探討其發展歷程與分析其持續投入相關研究的必要性。本期盤點工作內容為擴大收集包括 97 年度至 105 年度，共計 1369 件委辦及研究計畫執行成果報告進行統計，期望提出委辦及研究案件成果後續

加值應用方向之建議。

第四章，土砂災害模擬相關模式測試與分析，旨在探討國內重要集水區在極端降雨事件後，邊坡崩塌造成土砂災害的危害程度，並評估其破壞發生機制，本章節分別以台東紅葉崩塌土砂量評估及落石安全評估、台東紅葉崩塌地滑動規模與發生時間預測模式測試，以及南投縣中寮鄉粗坑溪吊橋上游開口壩之防砂效益評估等，三個實地案例進行數值模型測試，並評估模式的適用性與其限制。

第五章，土砂防災研究發展議題研擬，綜整本年度已完成之相關文獻歸納分析未來可能發展之技術領域、研究趨勢，又分析比較各國於自然環境保護政策、法規之沿革，從中探求其訂定策略之經驗，同時，本項工作亦藉由邀集局內同仁以工作會議的方式凝聚共識，共同規劃水土保持局未來可能發展之議題。

第六章，結論與建議，依據本年度執行之工作項目，研提「提昇國家土砂防災能力之策略」之相關建議，內容包含「營建自動化」、「工程維護管理及延壽」、「跨領域技術應用於水土保持」、「新型態技術的應用」及「防減災對策」等面向之建議。同時，依據歷年已完成之防災技術與研究成果的盤點，提出委辦案件成果後續加值應用方向之建議。

第二章 國內外水土保持技術研究發展趨勢

第一節 報告架構

「國內外水土保持技術研究發展趨勢」是水土保持局為擘劃前瞻策略、推動跨域技術整合、強化技術支援能力、建立研究發展能量，以因應氣候變遷可能帶來的衝擊所編撰國內外技術研究發展趨勢分析報告，報告內容主要分為五大章節，第一章闡述報告目標及研究架構；第二章旨在說明歐、美、日、中、港、臺地區相關研究單位之組織架構及其未來技術發展與研究方向，並收集各單位研究成果，從中擷取創新型研究方向、跨領域應用之技術，以及水土保持領域相關策略等議題，俾做為水土保持未來可能發展方向之技術與研究規劃的多方指南及策略清單；第三章則以重點摘錄的方式說明國內外已具實際執行成果或尚未引進國內之相關研究、技術、防災軟硬體與管理制度等；第四章為應用案例說明，主要針對第三章「工程技術發展」、「軟體防災對策」、「管理與法規研析」、「基礎調查」、「基礎研究」與「新興科技應用」等六個小節，各擇一具體應用案例為撰寫主軸，做詳細的介紹及說明；第五章為報告的結論與建議，綜整相關文獻歸納分析未來可能之技術發展趨勢，並比較各國家於自然環境保護政策、法規之沿革，從中探求其訂定策略之經驗，同時，審視現階段國內因應自

然災害的內、外部挑戰與機會，藉此提出未來土砂防災研究發展議題與策略之參考。本「國內外水土保持技術研究發展趨勢」(以下簡稱本趨勢報告)已於本(106)年7月完成編撰並分送水土保持局各業務組(中心)與分局，同時全文公開於水土保持局技術研究發展小組網站。

第二節 報告內容概述

本年度撰寫本趨勢報告時係先鎖定國內、外與水土保持相關技術發展有關之單位，了瞭解各單位組織架構、相關研究發展方向與氣候變遷調適對策等相關文獻，對象包含美國地質調查所(USGS)、日本國土技術政策綜合研究所(NILIM)、日本國立研究開發法人土木研究所(PWRI)、香港土木工程拓展署(GEDD)、義大利地質水文保護研究所、奧地利聯邦野溪及雪崩防治局、中國大陸水利部成都山地災害與環境研究所、經濟部中央地質調查所、經濟部水利署以及國家災害防救科技中心等 10 個單位(如圖 2-1)，從中篩選與氣候變遷調適、國土保育政策及坡地防災治理等相關議題，並有系統的整理分類為「工程技術發展」、「軟體防災對策」、「管理與法規研析」、「基礎調查」、「基礎研究」與「新興科技應用」等六大領域，作為本年度撰寫之主軸，以下針對上述各領域之內容進行簡要闡述，詳細內容請參考 106 年 7 月出版之本趨勢報告。



圖 2-1 國內外相關研究單位分布圖

一、工程技術發展

工程技術發展領域主要收集建築資訊模型(BIM)、營建管理自動化、工程本質安全、工程維護管理與延壽，以及與日本營造現場的生產力革命 i-construction 等議題，整體而言，目前的發展趨勢正朝向「提昇溝通協調效能、降低勞力依賴性、縮短工期與降低成本、重視職業安全與工程維護管理及延壽」等脈絡進行。在職業安全管理方面，透過工程人員執業安全衛生訓練強化職業安全的觀念；在管理制度與營建自動化方面，藉由研析國內外相關案例，如建築資訊模型於水利工程與大地工程之應用、營建管理自動化資訊平台、公共工程生命週期管理與日本因應勞動力不足而推動的 i-construction 革命制度，以期整合不同領域的相關研究與管理制度，評估未來導入水土保持工程之

可行性。

日本為因應未來 10 年將面臨勞動人力退職潮，再加上營造產業擔負著國家防減災設施、基礎建設維持管理與更新(延壽)等重要角色，為降低勞動力不足帶來的衝擊，故擬採用先進 ICT(Information Construction Technology) 技術，推動營建生產力的技術革新，透過整合衛星遙測技術、ICT、IoT(Internet of Things)等科技，推動設計、放樣、施工、檢核等營造過程無縫化，並建置高效率的供應鏈管理技術，期將營造工程變成最先進的工廠，靈活地將快速進化的新技術導入工程現場，提昇營造現場之效率及安全性。如圖 2-2 所示，從調查、測量、設計、施工、檢查到維護管理，全面更新的所有營造生產流程，完整引進 3D 技術，活用 ICT、IoT 等新技術，並引進「同步工程技術」(concurrent engineering)，由設計部門、製造部門之技術人員於生產製造程序中進行生產方式的編修，達到改善工程多元化之需求及創造力。

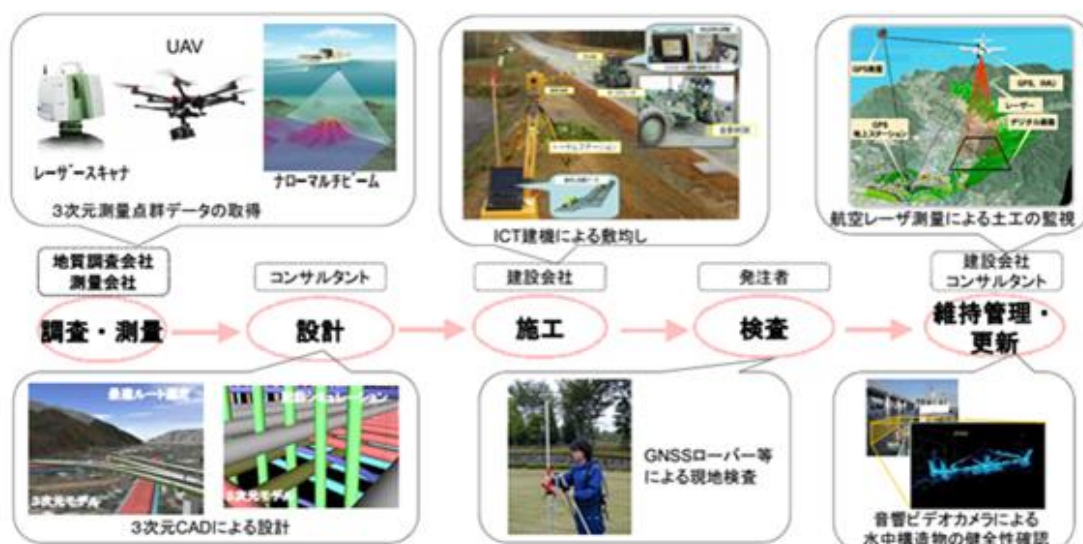


圖 2-2 i-construction 現場工程新技術導入示意圖

二、軟體防災對策

軟體防災對策領域則針對防災策略與體系、災害潛勢調查與評估、土砂災害預警模式相關的改善措施進行研析，期能作為後續提昇台灣坡地防災能量的重要參據。由於台灣同時暴露於三種以上天然災害的土地面積與人口高達 73%，而面臨二種以上天然災害者更高達 99%，因此，強化事前的防減災措施，係為政府及民眾必須共同面對與及參與的重要工作。例如在防減災對策方面，聯合國於第三屆世界減災會議發表的仙台減災綱領，將可作為國內後續擬訂防減災政策之具體目標；至於大規模崩塌災害潛勢調查與評估及硬體對策，則參考日本國土技術政策綜合研究所於 2014 年發佈之「大規模崩塌對策之基本技術事項(手冊)」，分別摘錄堰塞湖類型硬體對策配置、土石流類型硬體對策配置，如圖 2-3、圖 2-4。

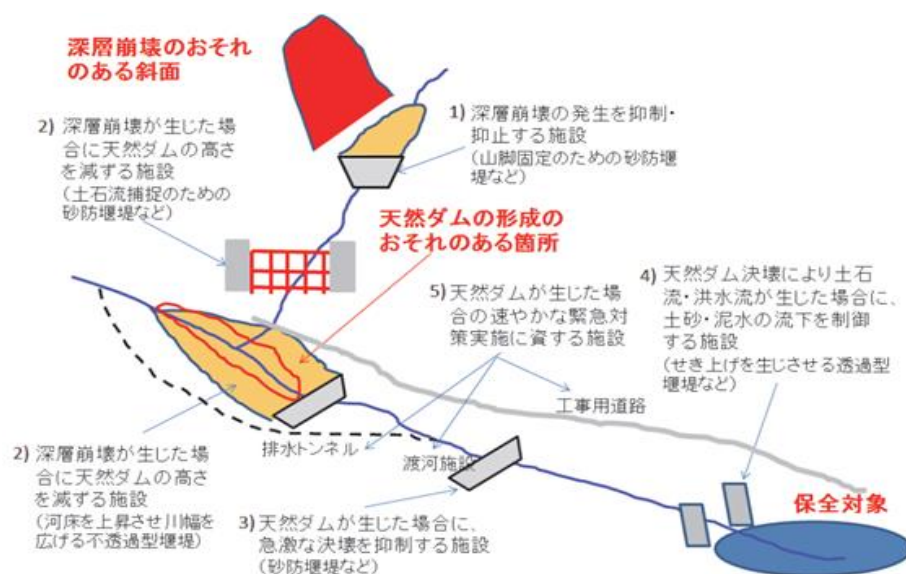


圖 2-3 堰塞湖類型硬體對策配置示意圖(國總研，2014)

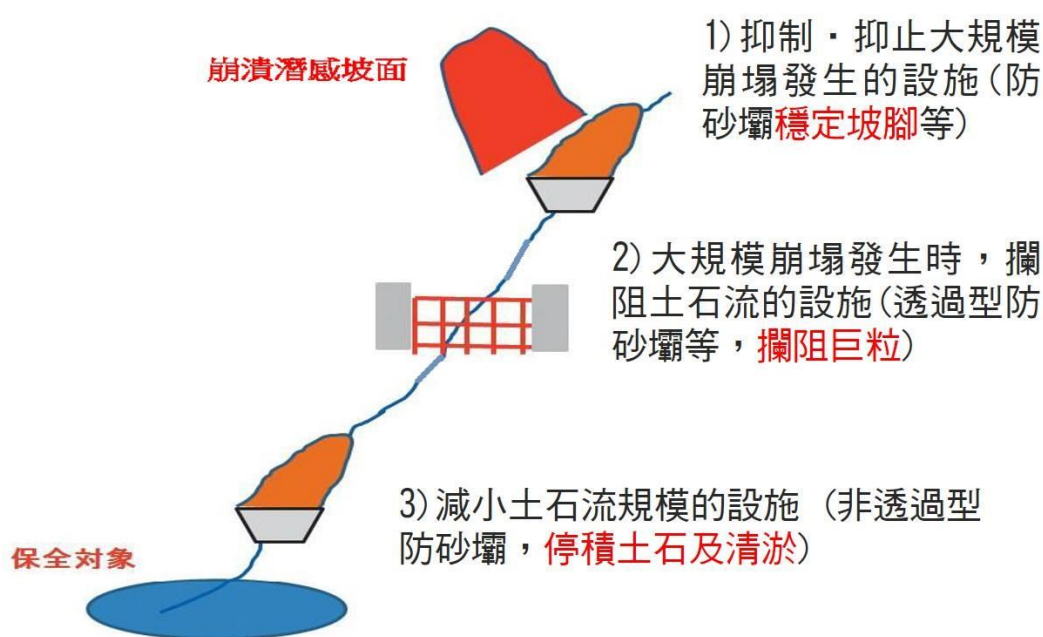


圖 2-4 土石流類型硬體對策配置示意圖(國總研，2014)

對於土砂災害預警模式，日本現行警戒模式係採用網格式之雷達降水資料搭配地圖方式呈現，並利用預測未來 1 至 3 小時最大可能降雨地區及強度等氣象資訊，輔以顏色區分警戒區的危險等級，做為疏

散避難決策人員及警戒區民眾於避難決策及行動時之參考。

此外，由於災害潛勢調查與評估方式，亦為土砂防減災工作等重要基礎工作，本報告亦針對國內外近期之研究成果與技術推廣應用之成功案例，持續收集與關注，俾利作為改進現行機制不足處之觀摩對象。

三、管理與法規研析

管理與法規研析領域，研析了國內外有關環境敏感地區之管理及劃訂方式，其中國內部分包含特定水土保持區、水庫集水區、土石流潛勢溪流、山坡地、地質敏感區等，並整理國內目前使用遙測方式進行國土利用監測的現況。國外方面，則分別介紹日本及奧地利針對土砂災害潛勢區之劃設及管理方式，藉由研析國內外法令與制度面設計之異同，將有助於未來國土計畫法之實施與推動，以下針對國內外相關法規進行說明之。

臺灣非都市土地使用管制與國土保育之沿革，最早起源於土地法，然「國土計畫法」於 1993 年開始草擬，經過 23 年推動，終於 2015 年 12 月 18 日完成三讀程序，其中基於保育利用及管理之需求，未來國土規劃係依據環境資源特性，將目前非都市土地按現況劃設的 11 種使用分區及 19 種使用地，改為依據自然環境條件、糧食自給率目標及城鄉發展願景等，劃設為「國土保育地區」、「海洋資源地區」、

「農業發展地區」及「城鄉發展地區」等功能分區及其分類(如圖 2-5)，期以計畫引導土地使用，並明定國土應以保育及保安為最高指導原則。



圖 2-5 國土功能分區及其分類圖(營建署，2015)

而在日本方面，日本之危險區劃定與管理主要依據主管業務的不同，分別由農林水產省(簡稱農林省)下轄的林野廳及國土交通省(簡稱國土省，前身為建設省)下轄的水管理國土保全局負責執行。農林省負責「森林法」中有關治山工作；國土省負責「砂防法」、「陡坡地崩塌防止法」、「地滑防治法」和「土砂災害防止法」中有關砂防的工作，其中，依據土砂災害防止法及其施行令規定，土砂災害警戒區(黃區)及特別警戒區域(紅區)的指定基準，可分為陡坡崩塌、土石流與地滑等三大類，如圖 2-6 所示。土砂災害防止法自 2001 年實施後，由 47 個都道府縣開始進行土砂災害基礎調查，預定調查數量高達 666,414 處，並依據調查結果推動土砂災害警戒區域指(劃)定，至 2016

年底，共有 26 個府縣完成 487,899 處基礎調查及土砂災害警戒區域指(劃)定，21 都縣道預定於未來 3 年才能完成相關調查及劃定。

土砂災害の種類

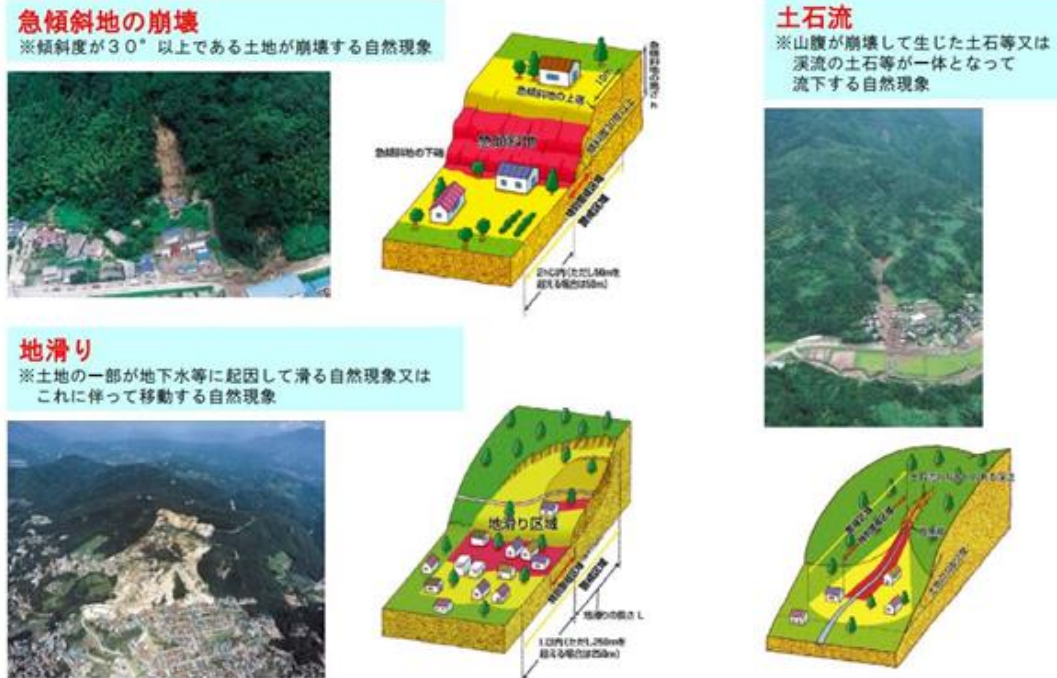


圖 2-6 土砂災害警戒區域及特別警戒區域之劃定方式示意圖

在奧地利之危險區劃定與管理方面，其自 150 年前即開始發展野溪治理 (torrent control)、雪崩防治 (avalanche control) 以及土石流防治 (debris flow control) 等技術，其工程技術及經驗在世界上佔有極重要的領先地位。於 60 年代，奧地利開始對山崩、地滑、雪崩以及土石流等地區，予以劃設危險區地圖 (hazard map)，以作為天然災害治理及管理之參考，1975 年奧地利聯邦政府將危險地區地圖劃設工作正式列入「森林法」，並規定必須實施整體治理計畫，此為奧地利實施風險管理法制化之開始，也逐漸發展出結合土地管理及治理工程

之整體防災策略。根據奧地利聯邦災害危險區劃定準則第五條規定，危險區劃定工作雖以集水區為單元分析，但僅針對下游土地使用計畫區域標示危險區分區。至於中上游森林區域，不屬於開發利用之區域，其土地使用計畫由奧地利各級國土計畫進行管理。所謂危險區分區包含紅色危險區、黃色危險區、藍色保留區、棕色參考區及紫色參考區，如圖 2-7。

諸如上述，面對全球氣候變遷影響下所造成大規模崩塌等複合型災害越來越顯著情形下，歐、美、日等先進國家於過去十多年開始進行大規模崩塌及氣候變遷相關調適研究工作，如藉由硬體施作和軟體防災對策的聯合運用，持續進行警戒避難體制整備、土地利用限制、保育治理工程設置及教育推廣等措施，並透過不斷研究發展，持續精進與強化相關調適工作藉由瞭解及分析國內外法令與制度面設計之異同，並參酌分析其國情與特色將有助於未來國內在國土規劃與防災對策擬定之工作。

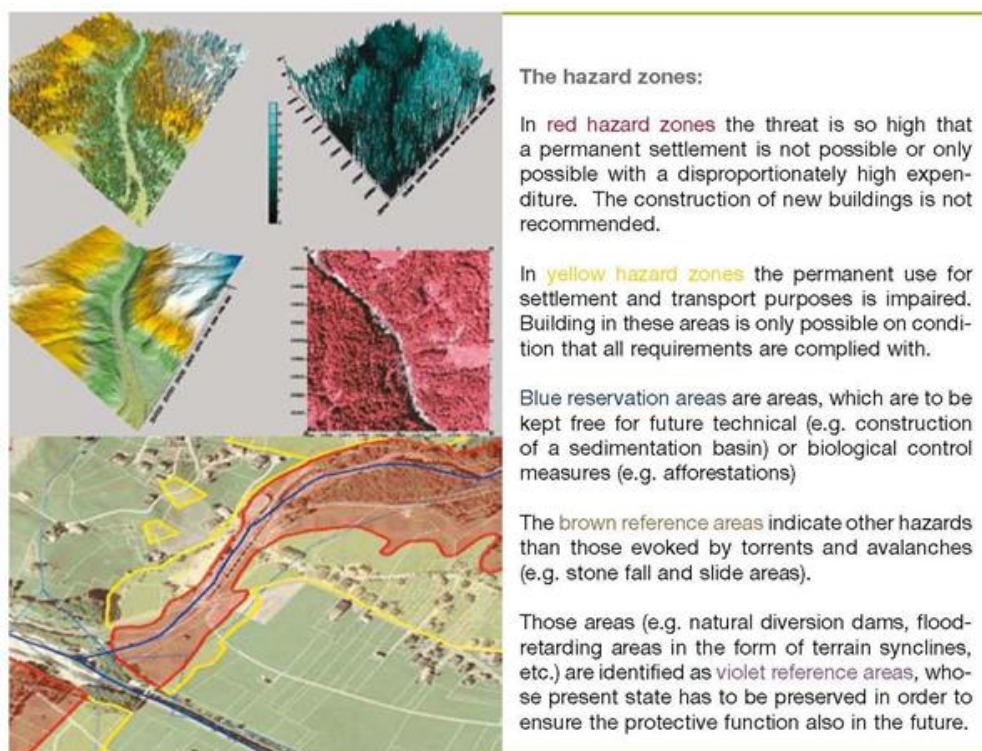


圖 2-7 奧地利公告危險區分區劃定示意圖(WLV，2007)

四、基礎調查

基礎調查領域係針對水土保持各類基礎資料進行收集，其分布面向極廣，且由於防減災與保土蓄水之措施往往必須因地制宜，透過完整收集與建置集水區基本資料，有助於釐清災害類型並擬訂適當之解決方案。

針對基礎調查研析，依調查方式可分為遙測技術、地表演算與地下地質等，涵蓋從空中至地底之調查型態。其中，遙測技術包含應用無人飛行載具(UAV)、干涉合成孔徑雷達(SAR)、光學雷達(LiDAR)及空中地球物理探測等。而地表演算主要針對水理模式進行收集，可擬分為一維水理演算與二維水理演算；其中舉凡河道變遷過程、河道沖

淤分佈等情境模擬分析，可使用包含套裝軟體與研究單位自行研發之程式，模擬已發生之現象，並用來預測未來可能發生的情境。另外地球物理探測則彙整包含地電阻影像探測法、透地雷達探測法、電磁探測法等方法之原理及應用特性，如表 2-1。至於地表下調查技術則收集地質鑽探孔內技術、孔內攝影與地下水流速測量等方法簡言之，我們可透過遙測影像技術、地下地質調查技術獲得巨觀影像(如地形特徵)與微觀參數(如地質條件與力學參數)，再依據上述調查所得結果，針對保全對象、地形起伏、地質條件、植生覆蓋率與土壤沖蝕、崩塌率及土石流潛勢溪流等因子，評估水土保持處理及維護的優先順序。然而，目前調查工具及評估方法眾多，其背後的理論基礎與目的均不相同，該如何選定合適的工具，是值得進一步探討的課題。另一方面，如何導入新興科技以提昇現有調查技術與工具之效能，並由不同之物理量及不同之分析理論應用，亦為後續應持續精進之目標。

表 2-1 地球物理探測技術特性彙整表

地球物理探測技術	量測資料	所得物理性質	所得物理模型
地電阻影像探測法	人造電流造成之電位差	電阻率	電阻率 2 維深度剖面或 3 維深度剖面
自然電位法	地中自然電位差	自然電位差	電位差 2 維平面分布
感應極化法	人造電壓消散速度	電容性	電阻率 2 維深度剖面
透地雷達探測法	電磁波之反射歷時及振幅	電學性質不連續面	反射層之 2 維深度或 3 維深度剖面
電磁探測法	感應電位	電阻率	電阻率 2 維平面剖面或 3 維深度剖面
微重力探測法	重力值	重力值	重力 2 維平面分布
彈性波層析成像法	壓縮波之初達波走時	壓縮波速	壓縮波速 2 維剖面
多頻道表面波震測法	彈性波歷時振幅	剪力波速	剪力波速 1 維深度剖面
反射震測法	彈性波之反射歷時及振幅	力學性質不連續面	反射層之 2 維深度或 3 維深度剖面

五、基礎研究

基礎研究為各學門推進的重要環節，對於水土保持工作而言最主要在於防止土壤沖蝕，並抑制土砂災害發生。常見的水土保持工作會透過植栽方式配合植生方法將裸露地予以覆蓋，或透過排、導水工程方法降低蝕溝沖蝕，以達到確保坡地安全之目的。然而，不論對於土砂生產、流出、運移及處理，各項評估及處置方案均需透過長期的基礎研究來增進對於問題之掌握程度，並從實驗及觀察的過程，逐步建立相關理論，同時尋找解決問題的可能性。因此，重視和支持基礎研究，係提昇水土保持相關理論與技術的不二法門。本趨勢報告收集相關研究資料並進行說明之項目包含，植生技術、土砂收支、崩塌深度與體積推估公式、土砂資源活化再利用、使用資源衛星評估土壤含水

量等近期之研究。惟水土保持相關基礎研究領域範圍甚廣，且許多基礎研究費時甚久，後續宜建立完整之發展架構，逐年分階段進行並予以長期支持。

例如關於植物生長的研究，本趨勢報告摘錄日本環境部病理昆蟲研究室的研究成果，依據研究結果大多數的土壤 pH 值介於 4.0-8.0 之間，當 PH 值為 6.5 時，最適於植物生長，日本環境部病理昆蟲研究室針對土壤 PH 值對植物的生長效果進行研究，如圖 2-8，透過土壤酸鹼度的改良，增快植物根系生長速度與生產量，並減少部分病害發生，達到良好坡面植生復育之效果，使栽植事半功倍並節省肥料使用量，減少對環境的衝擊。

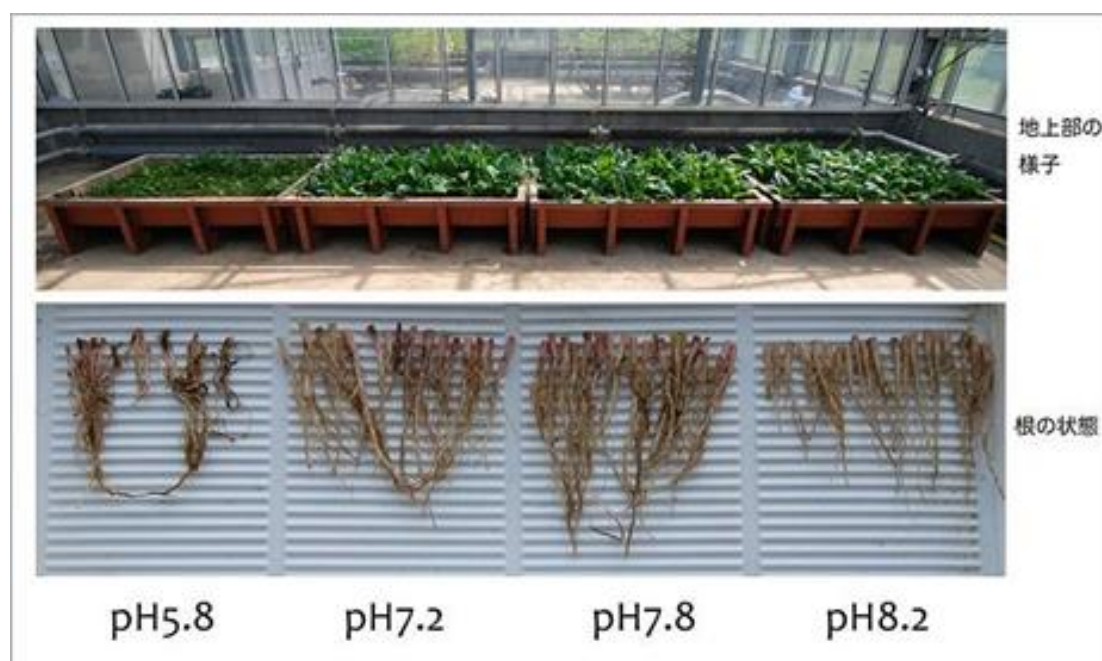


圖 2-8 不同 PH 值下植物生長狀態圖(日本環境部病理昆蟲研究室)

六、新興科技應用

新興科技應用類別則是對於不易分類之主題亦或是較特殊之案例進行資料收集與分享，從地圖流覽到三維地球展示，進而到多媒體的虛擬實境互動與模擬體驗，以及資料管理雲端化或是資訊物連網等應用技術等，可發現各領域科技發展均具有相當多的突破點，如何能將跨領域的思維模式及應用技術與水土保持相關領域連接成線，即是現階段可以努力連結之方向。

第三節 應用案例

本年度針對國內外許多應用案例進行資料彙整及說明，包含日本 i-construction 之推動情形、日本綜合性土砂災害對策報告、以廣島土砂災害探討日本土砂災害防止法制定背景與影響、日本深層崩塌對策基本技術事項、衛星遙測土壤含水量與荷蘭治水桌遊等六大類，以下將依序摘要進行說明。

一、日本 i-construction 之推動情形

(一)推動 i-construction 觀點

營造業現場因為具備「一件訂單即刻投產」、「現地屋外生產」、「勞工密集型生產」等特性，很難導入如製造業「工作檯生產方式」與「自動化・機器人」作業方式。惟為改變如此情況，必須將 IoT

(Internet of Things) 導入營造業工作現場，以實現如同製造業般可提昇生產力工作架構。

日本針對推動 i-Construction，提出三個觀點（圖 2-9）

- 1.將營造工程變成最先進的工廠。
- 2.把最先進的「供應鏈管理」導入營造工程現場。
- 3.打破營造業工程現場二種常規，持續改善工程方法。

此外，亦須同時考量以下事項：

- 1.提昇營造現場工程安全性。
- 2.靈活地將快速進化的新技術導入工程現場工程技術。
- 3.以進軍海外為目標，考慮實施國際標準化與工程技術套裝化。
- 4.若要實現同步工程技術（Concurrent engineering）進度前移模（front loading）（圖 2-10），須檢討投標契約方式。

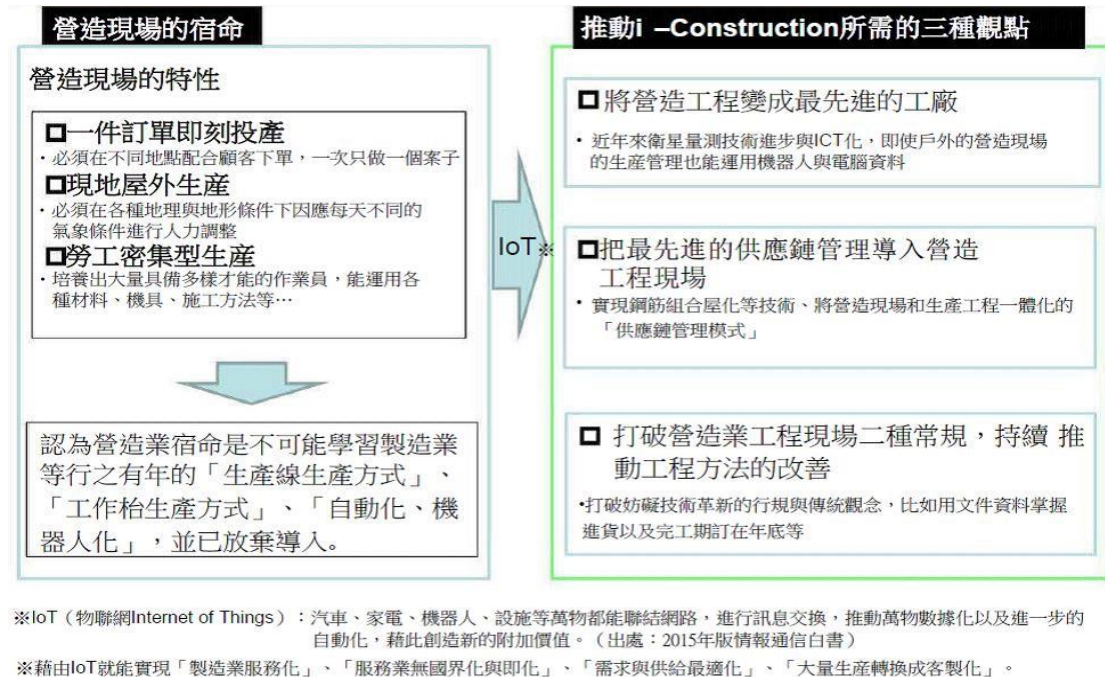


圖 2-9 推動 i-construction 觀點示意圖(翻譯自日本國土交通省，2016)

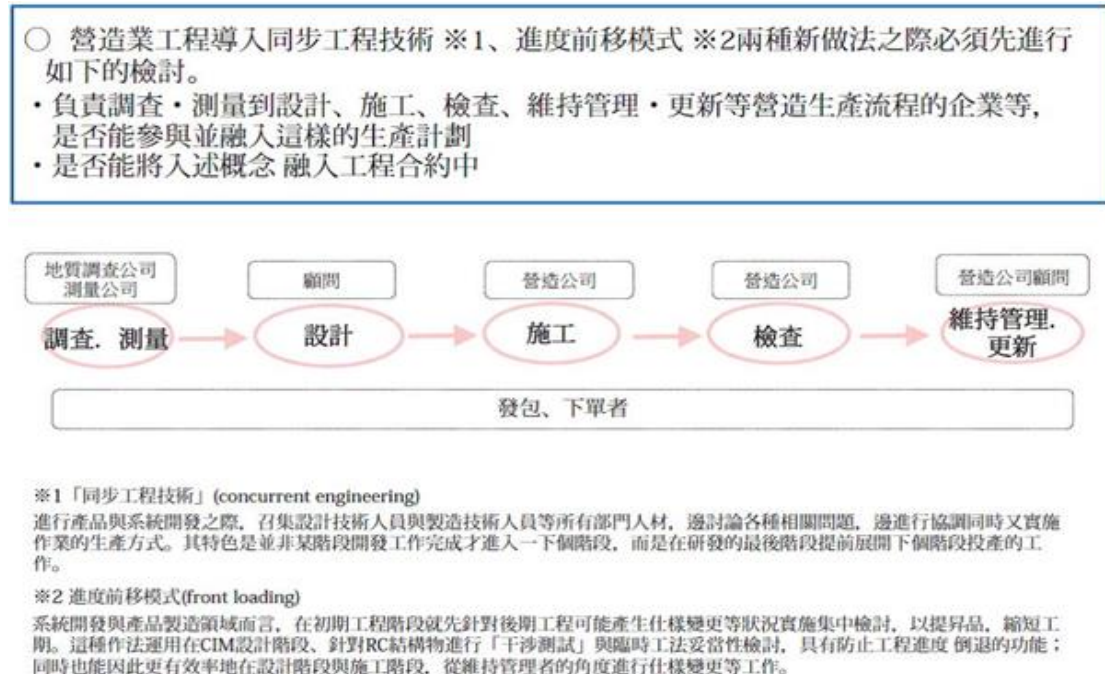


圖 2-10 同步工程技術(Concurrent engineering)進度前移模式示意

圖(翻譯自國土交通省，2016)

(二)i-construction 願景目標

1.提升生產效率：

全面活用 ICT 之後，未來生產效率可提昇約 2 倍，若搭配
工期容許跨年度等措施，生產效率還可再提高 5 成。

2.轉換成更有創造力的業務

藉由 ICT 化提昇效率，可協助技術性勞工建立更有創造力
的業務，培養可達成多樣性需求。

3.提升薪資水準

提昇生產效率讓工作量穩定且平均，即可改善企業經營環
境，進而實現提高薪資水平、工作量平均而穩定的目標。

4.讓勞工有充分的休假

營造工程效率提昇、工期平均化後，員工就能取得更穩定的
休假。

5.提高安全性

減少重機械周邊作業與高處作業，提昇員工安全保障。

6.多樣的人才活用

實現能讓女性與高齡者等更活躍參與勞動的社會。

7.對於活化地方的貢獻

提昇地區營造產業生產效率，可讓營造業的工作更具吸引力，重建地區活力。

8.實現能帶來新希望的新型態營造現場

可實現「加薪、員工充分休假、帶來希望」的新型態營造現場。

9.宣傳策略

導入 i-Construction 後，讓營造現場與營造工作變得更有吸引力，有必要廣為周知。

二、日本綜合性土砂災害對策報告

2013 年 10 月日本伊豆半島大規模土砂災害，造成 39 人死亡或失蹤，以及 2014 年 8 月的廣島市土砂災害更造成 74 人死亡的嚴重災情，讓日本政府重新檢視土砂防災策略，特別是發生於夜間的短延時強降雨之防災對策。自 2014 年底起，全面調查近年來全國各地豪雨發生狀況，之後，不僅從推動國土強韌化、土地創生的角度進行深入檢討，更需瞭解各地土砂災害耐受能力，綜整後提出綜合性對策，因此中央防災會議「防災對策實行會議」之下成立「綜合性土砂災害對策檢討工作小組」，進行各級政府一體性的土砂災害對策檢討。其中，此工作小組所擬訂之「推動綜合性土砂災害對策措施報告」之概

要，如圖 2-11。此小組亦建議訂立各項重要措施及方案，例如，活用網格情報於發布避難準備情報、避難勸告、避難指示的流程等，圖 2-12。



圖 2-11 推隊綜合性土砂災害對策措施報告之摘要

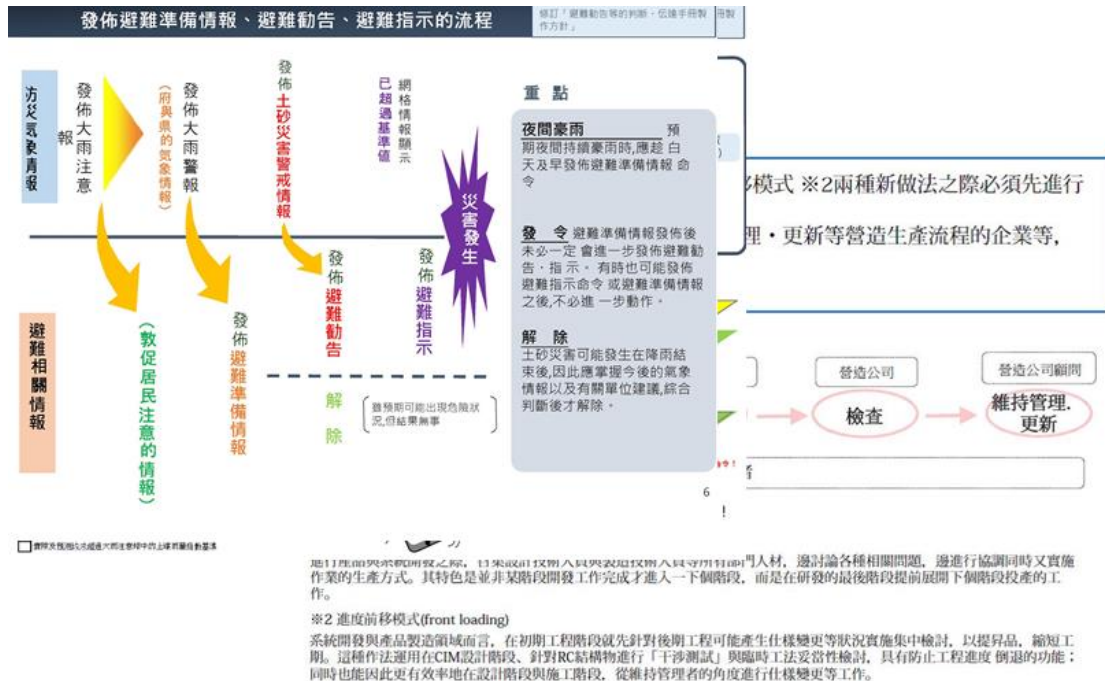


圖 2-12 發布避難準備情報、避難勸告、避難指示的流程

三、以廣島土砂災害探討日本土砂災害防止法制定背景與影響

自 1999 年廣島市土砂災害後，考量到土砂災害高潛勢區的警戒以及開發管制等問題，促使日本土砂災害防止法的制定。而該法條的訂立，也確保了除了工程手段之外，其他必要的非工程減災手段亦為防災上之重要工作，(如圖 2-13)，亦確立日本土砂防災之三大對策——軟體、硬體、管理。土砂災害防止法規定，針對容易發生土砂災害地區必須進行基礎調查，以確認是否需劃為「災害警戒區域」以及「特別警戒區域」；對於已經確認必須劃為警戒區域者，市町村政府有責任告知其相關資訊予區域內之居民，如警戒區域範圍之告知、防災地圖的發放、疏散避難相關事項等，而這些事項必須列在市町村的防災

計畫之中。另外，對於「特別警戒區域」有更嚴謹的規定，主要是針對開發行為予以規範，包括土地買賣、社福設施的建設、建物強度規範等。

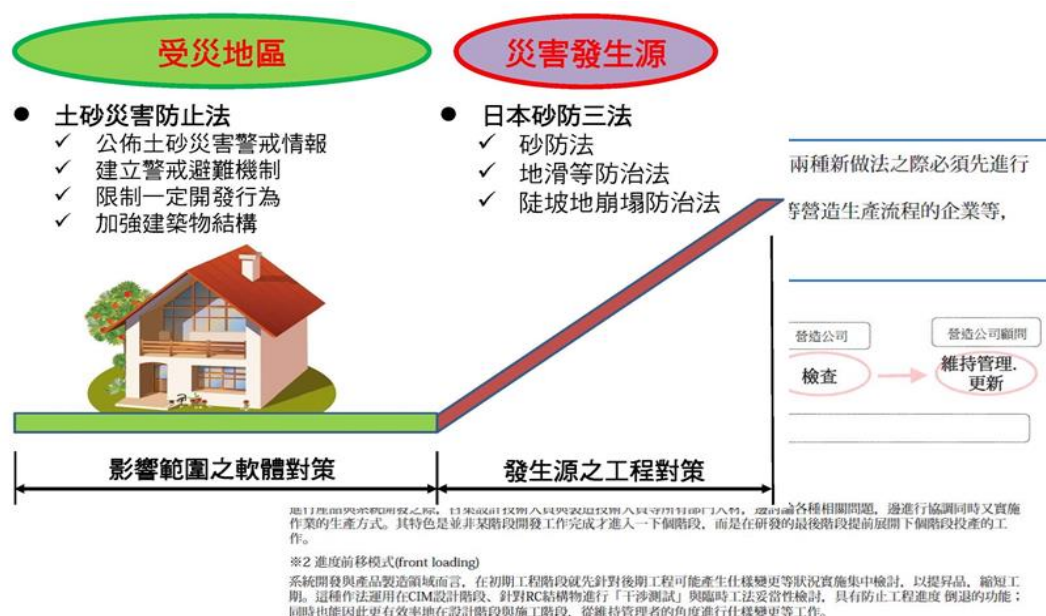


圖 2-13 土砂災害防止法與砂防三法之區別

廣島市的土砂災害潛勢相較於日本其他地區明顯較高，由於近年人口增加、都市發展擴張顯示，民眾居住朝山坡地發展，在未即時管制開發情況下，山坡地住宅社區已成事實，增加了土砂災害的風險，藉由廣島土石流災害的經驗，日本政府醒思山坡地建築開發管制必須重新思考設計標準與限制，包括坡度的限制、建物退縮距離的提高、以及地質敏感度與災害潛勢分析等，避免將居住環境暴露於高災害潛勢範圍內，以降低災害風險。對於現況環境已位於高災害潛勢範圍內，也要與民眾溝通、研擬逐步改善災害風險的調適對策。

四、日本深層崩塌對策基本技術事項

2014 年 9 月，日本國土技術政策總合研究所(NILIM)出版「深層崩壊対策技術に関する基本的事項」手冊，彙整日本近期所提出之相關對策。簡要摘錄如下：

(一)大規模崩塌引起之土砂災害類型

依土石流動機制及型態可約略分為堰塞湖類型、土石流類型、重力堆積類型等三類。

(二)大規模崩塌之成因

- 1.因地下水位急遽上昇所產生之大規模崩塌
- 2.因地盤晃動產生之大規模崩塌
- 3.因重力變形作用產生之大規模崩塌

(三)大規模崩塌可能發生之區域

1.大規模崩塌推測頻率地圖

參照國土交通省水管理・國土保全局砂防部(2010)大規模崩塌推測頻率地圖，如圖 2-14。

2.大規模崩塌遺跡密度地圖

參照國土交通省 水管理・國土保全局砂防部(2012)大規

模崩塌遺跡密度地圖，如圖 2-15。

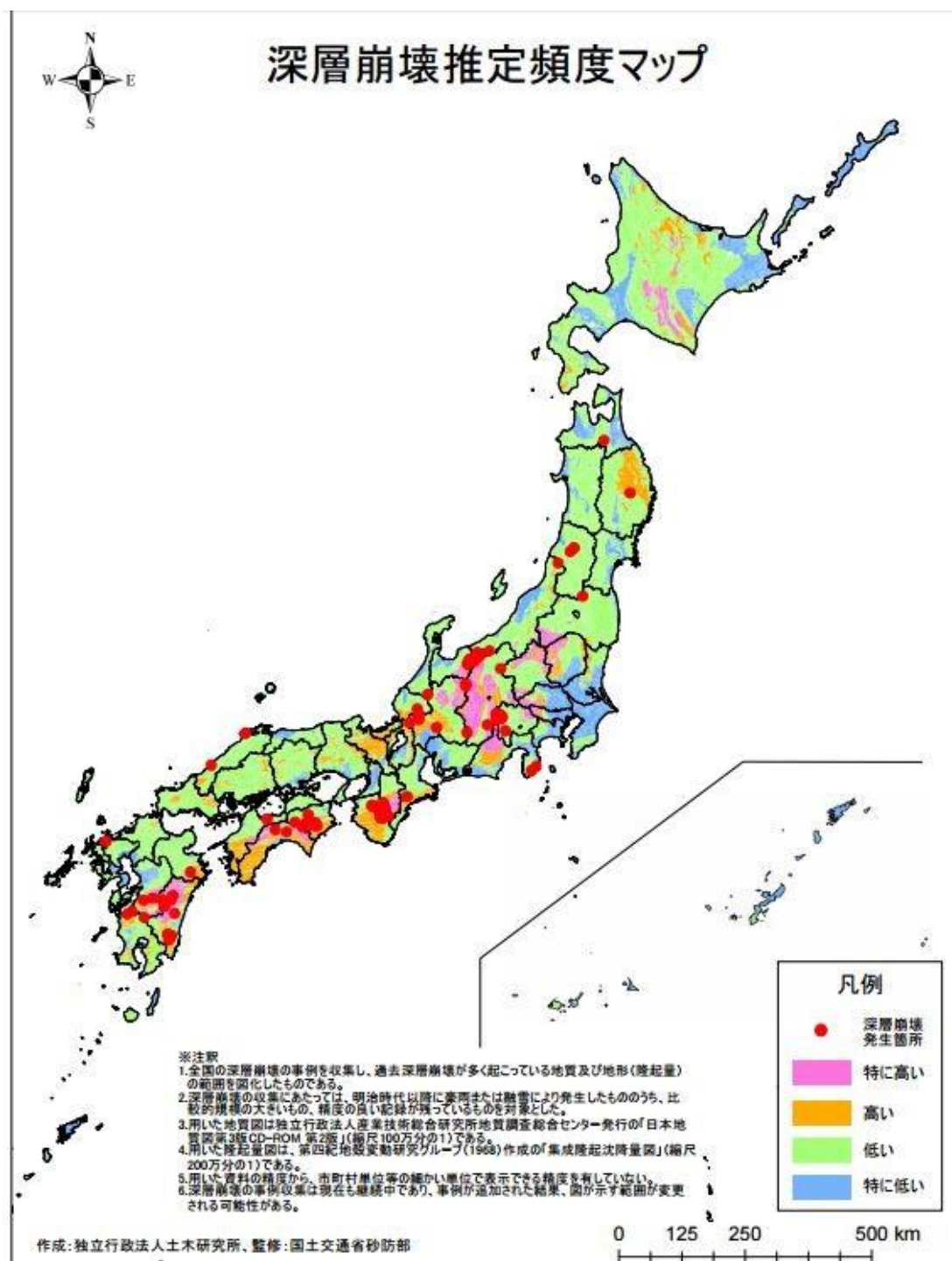


圖 2-14 大規模崩塌推測頻率地圖

<http://www.mlit.go.jp/common/000121614.pdf>

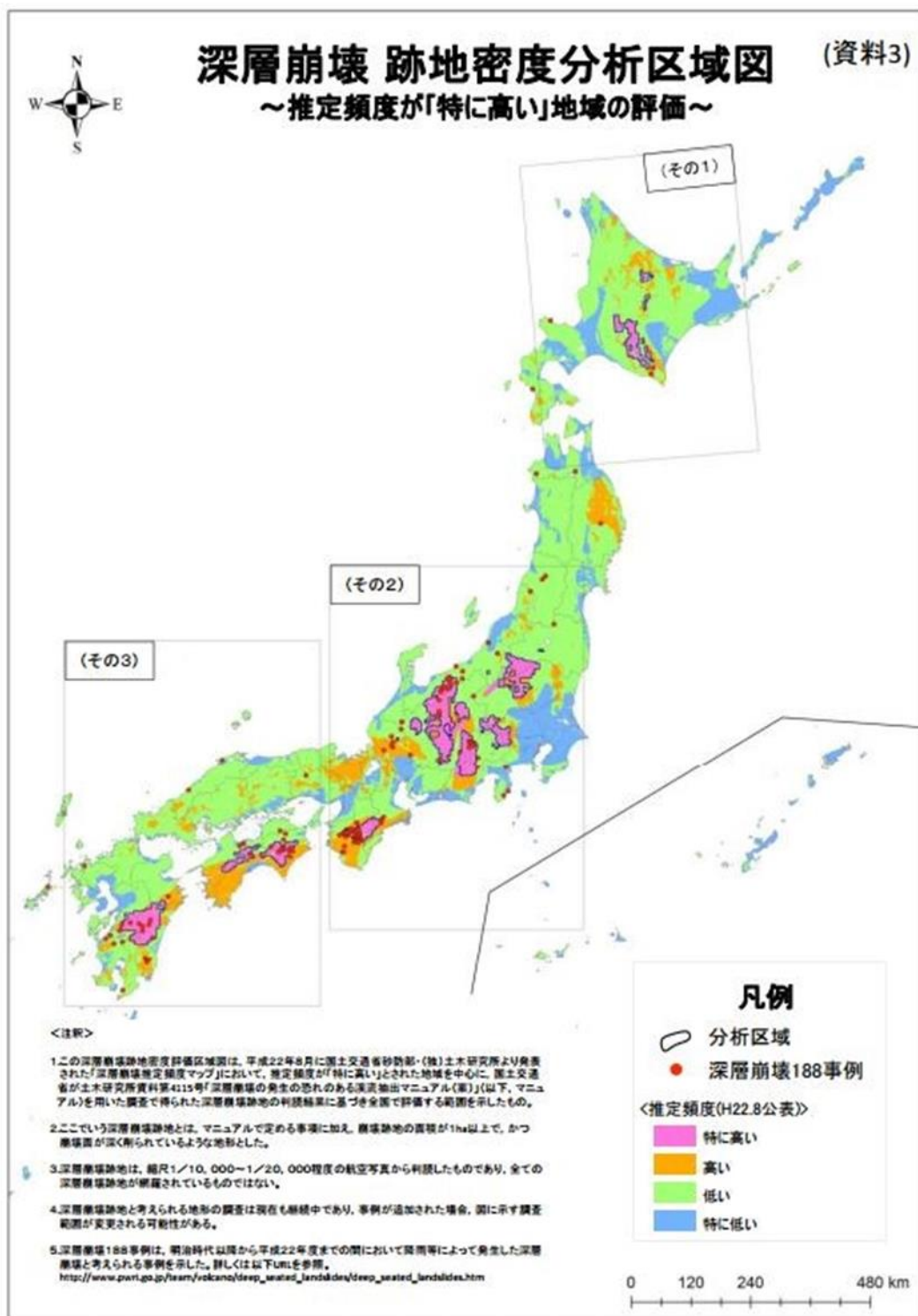


圖 2-15 大規模崩塌遺跡密度地圖

<http://www.mlit.go.jp/common/000223656.pdf>

(四)硬體對策

1.堰塞湖類型崩塌案例對策，如圖 2-3。

2.土石流類型崩塌案例對策，如圖 2-4。

五、衛星遙測土壤含水量

遙測技術可大量而廣泛的獲得地表土壤含水量資訊，並進行長時期的地表含水量監測。近期許多研究透過使用 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 衛星影像產生乾旱指數 (Drought Index)，用以評估土壤溼度的方法已被證實可行。土壤含水量的計算大多採用微波方式反演，應用光學感測器計算土壤含水量則相對較少。除此之外，利用光學感測器計算土壤含水量，大多以計算出蒸發散量後，再根據蒸發散量與土壤含水量間之關係推演而得，亦可利用考慮土壤因子與未考慮土壤因子之植生指標反演而得。其中，搭載於美國 Aqua 與 Terra 兩顆地球資源觀測衛星上的 MODIS 擁有 36 個光譜波段，對於地表光譜變化相當敏感。MODIS 的單日過境可達四次，其原始設計用途即為監測地表生物、物理現象，並用以建立長期觀測資料庫，以供各領域分析研究之用。

圖 2-16、圖 2-17 為目前具體透過衛星遙測土壤含水量應用情形，土壤含水量反應地面水份狀況，其控制降雨逕流、入滲及土壤內根系

的水分吸收，進而影響植生蒸散作用，透過與數值地形模型的套疊分析，能呈現不同海拔高度的土壤水份狀況，國內已成功透過 MODIS 資料及全台地面降雨觀測資料反演每日全台土壤含水量之作業化程式，並用以反演產生每日全台土壤含水量。

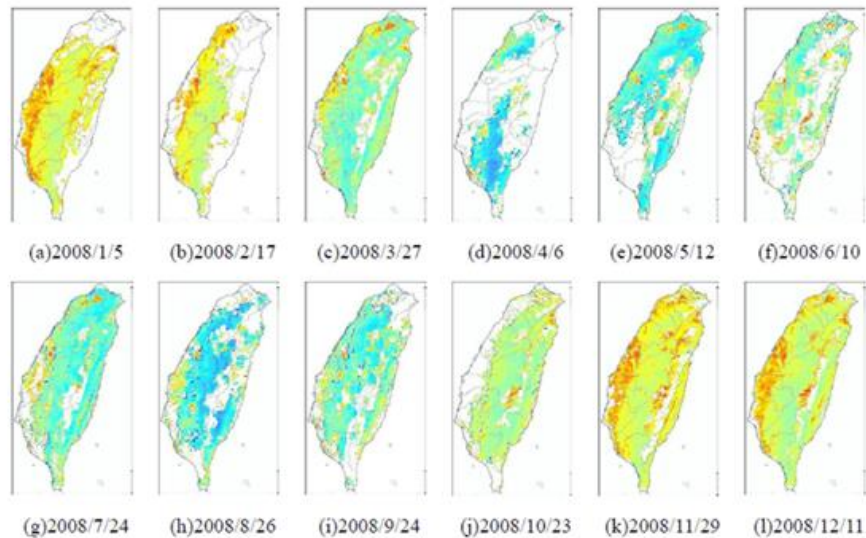


圖 2-16 2008 年各月蒸發散量成果(陳錕山，2009)

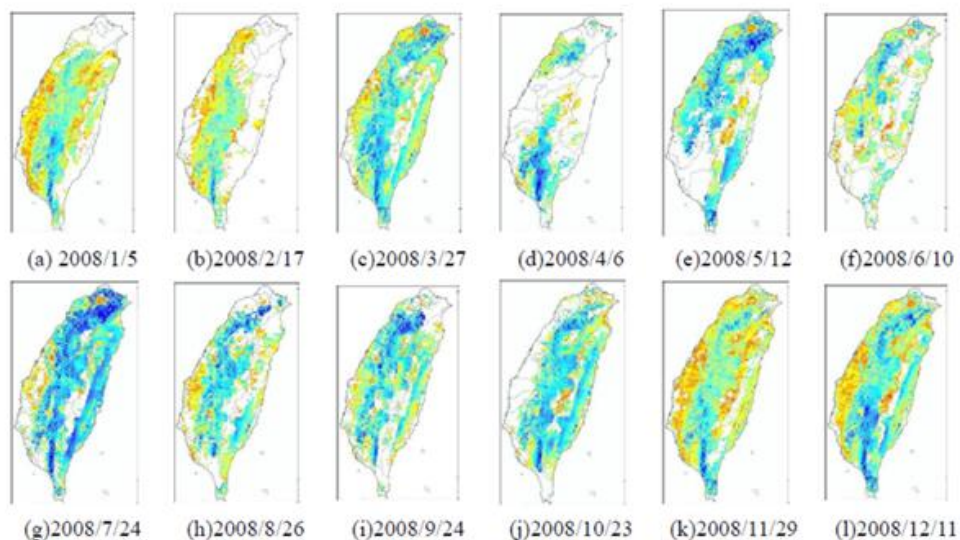


圖 2-17 土壤含水量計算結果(陳錕山，2009)

六、荷蘭治水桌遊

隨著資訊傳播速度愈來愈快、資訊交易與取得之門檻愈來愈低，任何政策推動之順利與否，不僅要靠更精準的模式建構與推估，更必須與政策相關之社區、民眾、政府及相關之利害關係人進行充份的對談與溝通以取得共識，因此荷蘭 Deltares 國際水利工程顧問公司，發展了一套永續水資源管理桌遊(Sustainable Delta Game)，如圖 2-18 所示。本桌遊係以模擬遊戲方式探索開發政策，讓專家學者、政府官員和民眾透過此治水桌遊，瞭解環境及治水相關的保護措施，並藉由即時回饋的機制，讓參與者進行溝通、談判並討論各種可能方案以做出更明智的決策。



圖 2-18 工程與環境模擬之數值模式及實體桌遊卡片(圖片來源：

<http://www.delta-alliance.org/toolboxoverview/sustainabledeletagame>)

國內目前在水環境等相關基礎建設規劃上，一直面臨安全與環境等相關議題折衝等之問題，也許可透過借鏡荷蘭永續水資源管理遊戲的邏輯、共同溝通的方式與討論平台，讓類似的遊戲變成刺激溝通和

發想的管道，爾後可運用於台灣的治水或防災政策規劃前期溝通階段。

第四節 小結

台灣因環境地質特殊加上氣候等因素，往往面臨單一或多種天然災害同時之衝擊，其中，又包含難以預期之複合型土砂災害，以及大規模崩塌可能帶來的災害。水土保持局可善用於科技智慧的工業生產方式，透過物聯網、大數據、雲端系統、互聯網、智慧機械等新型態科技為基礎，利用數據匯流串接各個產業間每一個關鍵環節，打破產業間的界線與過去不易完成之任務，透過資料盤點、資訊收集了瞭解目前國內所面臨之困境及國內外可應用之新技術或新型態工具，並參考國內外相關技術、法規、政策等文獻進行研析，了解鄰近國家因應氣候變遷等全球趨勢所訂定之對策，希望能依循此脈絡做為提升土砂防災能力之策略。

第三章 歷年完成之防災技術與研究成果盤點

水土保持局歷年來致力於山坡地保育治理、土石流防災，並推動農村再生計畫，使居民免於山坡地土石災害之威脅與恐懼，進而強化水土保持教育宣導及落實山坡地監督管理以維護山坡地安全環境，並實踐整體性治山防災之策略，以達成建構社區安全的土石流防災體系等重要目標。

然而，面對極端氣候變遷及難以預測之複合型災害的衝擊，組織內部應隨時審視、檢核、重整業務執行步驟，以保持各部門間之協調性與競爭力，故本研究嘗試透過盤點過往之委辦案件執行成果，檢視重大政策推動情形，探討其發展歷程及其成果後續加值應用之可能方向。本期盤點工作內容為擴大收集包括 97 年度至 105 年度水土保持局各業務組（中心）及分局執行之委託辦理及研究案共計 1929 件，其中初步篩選可能包含常用基礎資料與後續加值應用之計數案件，共計 1369 件委辦計畫行成果報告，並依據各業務單位較常使用之參考資料進行較詳細的成果盤點。

第一節 盤點工作範圍

一、97-105 本局及分局委辦及研究計畫成果

本研究收集民國 97 年至 105 年水土保持局電子圖書管理系統所

有委辦及研究計畫，並依照水土保持局各組室、中心與分局統計其歷年委辦計畫數量，如表 3-1 所示，在民國 97 年至 105 年間水土保持局共完成 1929 件委辦計畫，每年平均完成約 210 件委辦計畫，其中南投分局在民國 98 年完成 44 件委辦計畫，為統計資料中單一年度完成最多委辦計畫之紀錄。

表 3-1 97-105 年度委辦及研究計畫數量統計

年度 各組室(分局)	97	98	99	100	101	102	103	104	105	個別 加總
綜合企劃組	8	26	24	15	26	25	23	23	18	188
保育治理組	24	16	15	16	13	13	21	23	36	177
農村建設組	17	21	22	27	26	21	23	21	23	201
監測管理組	15	12	12	11	11	9	11	7	9	97
土石流防災中心	14	43	35	29	27	20	29	24	19	240
台北分局	11	28	19	10	15	14	17	18	21	153
台中分局	14	34	21	18	20	20	20	22	20	189
南投分局	16	44	21	22	26	21	24	23	21	218
台南分局	23	40	11	13	23	23	21	18	16	188
花蓮分局	9	24	14	15	17	18	19	14	13	143
台東分局	7	23	20	12	14	16	17	14	12	135
年度加總	158	311	214	188	218	200	225	207	208	總計 1929

水土保持局歷年委辦計畫數量變化如圖 3-1 所示，其中於民國 98 年水保局執行整體性治山防災、振興經濟擴大公共建設投資計畫、建立富麗新農村等重大施政與莫拉克災後重建影響，增加了許多相關委辦計畫，共完成 311 件委辦計畫，而後續在 99 至 105 年間水土保持局每年完成約 200 件委辦計畫。

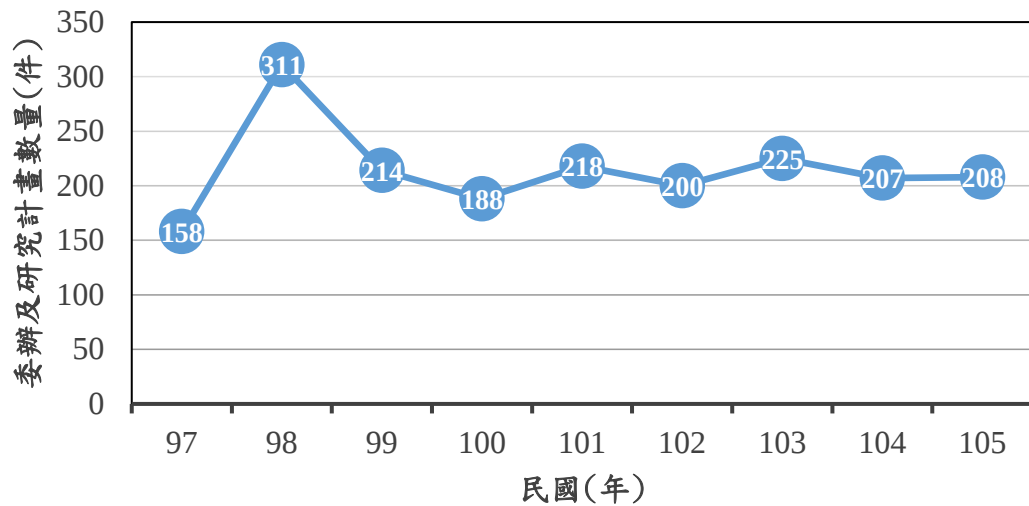


圖 3-1 歷年委辦計畫數量統計

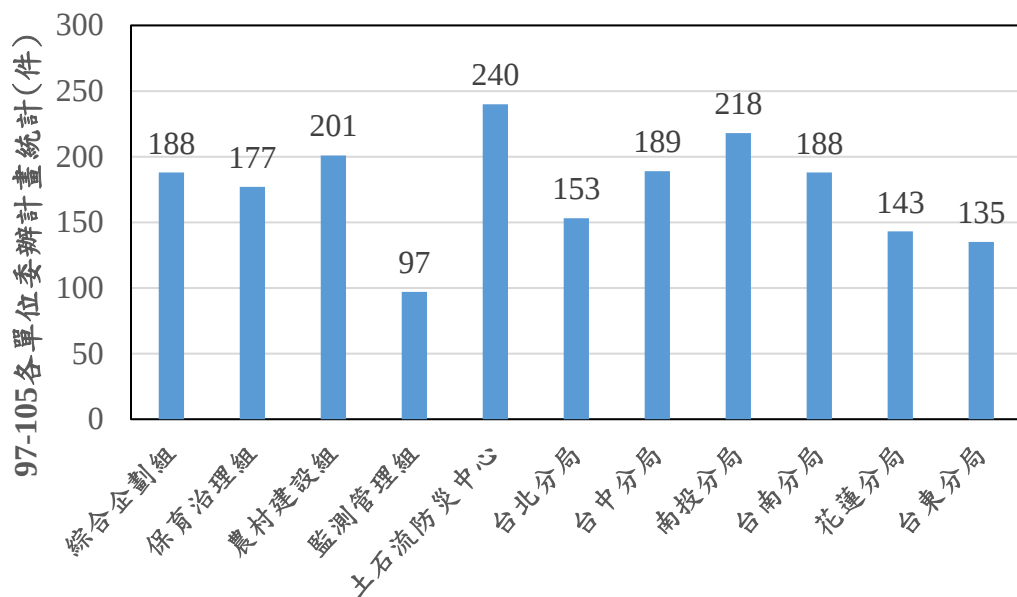


圖 3-2 97-105 年間各組室(中心、分局)委辦計畫數量統計

針對水土保持局各組室、中心與各地分局統計其民國 97 年至 105 年間完成委辦計畫數量，如圖 3-2 所示，其中在水土保持局內綜合企劃組、保育治理組、農村建設組、監測管理組與土石流防災中心分別

完成 188、177、201、97、240 件委辦計畫，而在台北分局、台中分局、南投分局、台南分局、花蓮分局、台東分局，各別完成 153、189、218、188、143、135 件委辦計畫，在六個分局當中，南投分局完成的委辦計畫數量最多。

二、委辦計畫成果盤點工作項目說明

本項工作預計完成歷年委辦計畫產出成果盤點，並檢視水土保持局電子圖書管理中心所收錄之成果報告其正確性與完整度，針對計畫項目羅列 30 項檢核內容，相關的內容的說明如表 3-2，希望透過初步的統計，瞭解水土保持局歷年委辦計畫具體成果並予以彙整，試著從中探討其成果後續加值應用之可行性，以回饋給業務單位持續相關研究。同時，本次盤點亦針對成果報告書繳交項目、格式及檢核提出建議，以提高計畫成果之完整度。

表 3-2 委辦計畫成果盤點工作項目說明彙整表

編號	盤點項目(單位)	內容說明
1	報告書格式之正確性	報告書是否符合水保局格式、是否完整單一檔案、能下載查看等等
2	檢核電子書是否完整與報告書相同	在線上是否能使用，並與報告書內容是否一致
3	UAV 拍攝(處)	斜拍、正射 DSM、影片、環景、3D 建模
4	是否申請遙測相關圖資	光學衛星、航空正射、雷達衛星、資源衛星

5	是否運用光達產製 DEM	是否有產製 DEM 或者是紅色地圖相關研究
6	斷面樁設置數量(支)	報告書中提及斷面樁設置並有詳細描述資料
7	斷面量測(km ²)	報告書中針對河道斷面量測的範圍統計
8	河床質調查數量(處)	報告書中針對河床質調查有幾處，是否有完整實驗成果資料
9	是否有土壤力學參數參考	產出相關土壤力學參數，如 C、 ϕ 、K _h 等
10	是否有年平均雨量資料	針對研究區域蒐集平均雨量相關資料
11	是否有重現期雨量資料	針對研究區域蒐集或計算其重現期雨量
12	是否有重現期洪峰流量資料	針對研究區域蒐集或計算其重現期洪峰流量
13	是否有土砂產量推估計算	運用土砂量計算公式或是模式推估集水區土砂產量
14	是否有運用數值模式	如一維、二維相關水文水理模式、邊坡穩定模式、降雨入滲模式、土石流模擬模式、警戒模式
15	監測站相關資料(處)	針對災害潛勢區設置土石流、淺層崩塌、大規模崩塌、流量、土砂相關監測站
16	是否有沖蝕針運用相關資料	紀錄沖蝕針相關量測資料
17	是否有崩塌儀器量測資料	如雨量筒、鑽探報告、地下水監測站、孔內傾斜儀、伸縮計、GPS 變位計、地表位移樁等等
18	是否有地球物理探測相關資料	如地電阻、孔內電測(自然電位、電阻率、射線等)、孔內攝影
19	是否有相關平台建置、維護	與水土保持局業務相關之平台建置與維護並記錄其名稱
20	是否有運用崩塌判釋技術	如地質地表調查或是衛星影像判釋
21	災害案例或工程案例相關	有相關災害與工程的詳細調查研究報告
22	是否有產出回歸公式	產出回歸公式並記錄其屬性

23	是否有災害照片紀錄	蒐集災害相關照片
24	是否有構造物調查	紀錄構造物調查並統計件數
25	虛擬實境、擴增實境相關	是否將水土保持局業務結合最新科技
26	是否有生態檢核相關	如生態敏感區位、重要物種棲地、環境改善建議
27	是否有教育訓練	統計報告書中教育訓練項目與其類型
28	是否有產出相關出版品	如專書、摺頁、海報、影片、微電影
29	值得進入倉儲系統的圖資	研究是否有產出新的 GIS 圖資，可以給後續計畫進行參考
30	是否有包含特殊技術分析	其他有特別可以紀錄的內容或是技術

第二節 盤點成果分析

一、盤點結果

本研究擬探討歷年委辦計劃與研究補助案中，值得被保留的資料或是可持續發展的技術，故根據各單位經常使用之資料、調查成果、監測資料、特殊技術及圖資等，羅列約 30 項盤點項目，如表 3-3 所示。根據統計結果，1369 冊報告書中有 979 冊符合規定格式，電子圖書則為 919 冊符合，其餘不符合規定之主要的樣態包含：未上傳單一完整檔案、報告書內容格式有誤、報告書為無須上傳驗收報告書等，皆列為不符合項目。

至於無人飛行載具(UAV)影像與遙測相關圖資，可協助進行基礎資料調查與多期影像比對，其中，正射影像佔了大多數，其次則為斜

拍影像，而近年來也使用 UAV 建置 DSM 模型、環景照片與 3D 數位模型在數量上則有 173 本成果報告書涉及 UAV 拍攝，拍攝總數高達 348 處，而有使用光達產製 DEM 之報告亦有 45 本。在河道參數與水文資料項目，包含斷面樁設置、斷面量測、河床質調查，已完成調查區位及數量盤點，建議未來可將其相關調查位置與數值加上空間座標以建立成 GIS 圖資，以掌握歷年調查成果之時間及空間分布情形，有利於資源整合應用，亦可加速蒐集基礎資料，同時在建置河道數值模式上也能作為驗證輸入參數，例如河床質調查 88 處、重現雨量與洪峰流量超過 150 筆資料。此外，由於監測站的設置與相關監測儀器佈設，對於災害的預警具有相對的幫助，且水保局已設置土石流監測站、淺層崩塌測站、大規模崩塌測站與土砂量監測站，均在各個相關計劃中進行設置與長期維護，經統計委辦計畫對於崩塌監測中含有最多資料的為地下水監測站，其次為孔內傾斜管。對於計畫所產出之出版品盤點中，包含專書、摺頁、海報、影片及微電影，其中，專書所佔比例最高，大多為操作使用手冊，其次為宣傳海報。

未來規劃將會針對此 30 個項目，做進一步的資料校正，並將已彙整之資料與圖資建立使用索引方便查詢，並建立成果報告書基本檢核項目，能夠在彙整時快速校正其正確性，供未來成果統計時搜尋、參考。

表 3-3 細部盤點項目與統計數量

編號	盤點項目(單位)	統計數量
1	報告書格式是否正確	979 符合
2	電子書是否完整與報告書相同	919 符合
3	UAV 拍攝(處)	348
4	是否申請遙測相關圖資	133
5	是否運用光達產製 DEM	45
6	斷面樁設置數量(支)	22
7	斷面量測(km ²)	47
8	河床質調查數量(處)	88
9	是否有土壤力學參數參考	42
10	是否有年平均雨量資料	202
11	是否有重現期雨量資料	170
12	是否有重現期洪峰流量資料	165
13	是否有土砂產量推估計算	196
14	是否有運用數值模式	234
15	監測站相關資料(處)	105
16	是否有沖蝕針運用相關資料	7
17	是否有崩塌儀器量測資料	276
18	是否有地球物理探測相關資料	64
19	是否有相關平台建置、維護	166
20	是否有運用崩塌判釋技術	203
21	災害案例或工程案例相關	112
22	是否有產出回歸公式	26
23	是否有災害照片紀錄	121
24	是否有構造物調查	192
25	虛擬實境、擴增實境相關	4
26	是否有生態檢核相關	139
27	是否有教育訓練	334
28	是否有產出相關出版品	591
29	值得進入倉儲系統的圖資	107
30	是否有包含特殊技術分析	179

二、評估歷年成果延續發展之可行性

本期的計畫擴大盤點的內容與涵蓋的時間範圍，初步將完整的報告與其相關成果產出做了一份紀錄，發現若能將每年超過百本的委辦及研究補助計畫之資料進行管理，除了將能夠讓每本報告的價值延續，並可使水土保持局內部各項資料蒐集平台能夠更有效率的使用。歷年成果中值得重新整理及加值的項目，如 UAV 的拍攝資料、光達產製的資料及遙測相關的圖資。在集水區資料調查之相關項目，如斷面樁設置資料、河道斷面量測、河床質調查、土壤力學實驗、鑽探相關資料，以及雨量、流量之重現期等水文資料或 GIS 圖資等紀錄如能有效整理及儲存，將可避免重複施作、浪費資源。至於，各項監測站之調查資料若能整合至目前監測站查詢平台，除單純的點位資料外，也應將不同時期之資料收錄其中，所以當進行災害相關調查時，將能更快找到過去的監測資料及資料變化歷程。此外，建議未來亦應將分佈在不同報告所進行的構造物調查、生態檢核表等成果納入工程管考系統或是治山防災集思網中，以有效管理與應用。另外針對特殊技術與值得進入倉儲系統的圖資，針對其應用性、發展性來探討是否能在未來結合與使用。

本次盤點工作成果重點歸類如下，各類盤點項目後續需進一步檢核其資料的正確性，各個執行計畫針對同一調查項目要求程度不均，

建議未來應該與各項業務單位討論相關資料產出之統一規範與格式，希望能有案件執行之標準化依循與成果產出之統一規格與資料格式化。

第三節 小結

本研究共收集自 97 年度至 105 年度共 1369 件委辦案件成果，為有效找出各類後續有增值應用可能的資料，本研究設計 30 項細部關鍵項目，依據其盤點結果提出下列建議：

(一)設計成果產出檢核紀錄表，並於提交成果時填寫、校對。

透過盤點發現，歷年來的計畫有豐富的成果產出，並具備延續性可供未來參考使用，但是，類似的內容如鑽探資料、調查資料、監測資料等，因不同委辦廠商，所以成果展示的格式不統一，建議可以針對水土保持局常見業務內容或圖資，規劃統一的資料產出格式，並設計相關基本成果資料紀錄表，於每個計劃結案時能夠確實填寫，並於每年度進行統整，讓每一本計畫書都能保有其價值，隨時能快速搜尋到相關資料。

(二)定期檢視成果資料統整，發掘計畫成果可增值用途

建議透過滾動式檢討，調整水土保持局中、長期規劃，並藉由歷年計畫成果盤點能發掘其新的議題與重要參考資料，如監測資料與調

查資料的大數據分析，特殊技術重新檢視及發展，定期的盤點與檢討的過程，將可使歷來的成果與產出，轉化為有效的資料，進而形成知識，並透過更多的討論與加值形成機關與單位的智慧。

第四章 土砂災害模擬相關模式測試與分析

第一節 案例一、台東紅葉崩塌土砂量評估及落石安全評估

台東縣延平鄉行政區面積 819.3 公頃，於民國 105 年 7 月受尼伯特颱風強風侵襲後，接續於 9 月莫蘭蒂颱風在紅葉地區累積降雨量達 652mm，且 48 小時連續降雨 633mm，導致 9 月 15 日清晨紅葉部落後方邊坡大面積崩塌，不穩定土砂因持續降雨而運移，造成紅葉村 1 鄰及 2 鄰民宅約 29 戶以及紅葉國小、派出所、社區道路等設施均遭土石淤埋。

本研究針對紅葉聚落崩塌二次災害風險評估進行深入探討，透過崩塌地調查及崩塌土砂量推估評估其危害度，且運用災前既有數值地形及災後調查之數值地形進行比對，同時以衛星影像判釋，並參考歷史災害紀錄及地質條件進行致災因子分析。

一、基本資料

(一)地形特徵

研究區之集水區地形標高介於 168~1,576m 之間，平均標高 699.4 公尺。集水區地勢由西北向東南遞減，其中高程最大值位於北側紅葉山嶺線，標高 1,576 公尺，最低高程則位於北絲蘭溪下游匯入

鹿野溪處。以 5m DEM 網格進行集水區坡度分析，5 級坡以上之集水區面積 15.2%，如表 4-1、圖 4-1 所示。致於坡向分析則主要以朝東、東南、東北及南，分佔研究區面積之 85.9%，如表 4-2、圖 4-2 所示。

表 4-1 研究區集水區坡度分析彙整表

坡度分級 (坡度範圍)	計畫集水區	
	面積(ha)	百分比(%)
一級坡 ($S \leq 5\%$)	17.0	2.1
二級坡 ($5\% < S \leq 15\%$)	72.3	8.8
三級坡 ($15\% < S \leq 30\%$)	334.1	40.8
四級坡 ($30\% < S \leq 40\%$)	271.1	33.1
五級坡 ($40\% < S \leq 55\%$)	116.3	14.2
六級坡 ($55\% < S \leq 100\%$)	8.4	1.0
七級坡 ($S > 100\%$)	-	-
合計	819.3	100.0

表 4-2 研究區集水坡向分析彙整表

坡向	計畫集水區	
	面積(ha)	百分比(%)
平地	7.0	0.9

北	37.6	4.6
東北	144.3	17.6
東	237.0	28.9
東南	185.6	22.7
南	136.6	16.7
西南	47.5	5.8
西	15.3	1.9
西北	8.5	1.0
合計	819.3	100.0

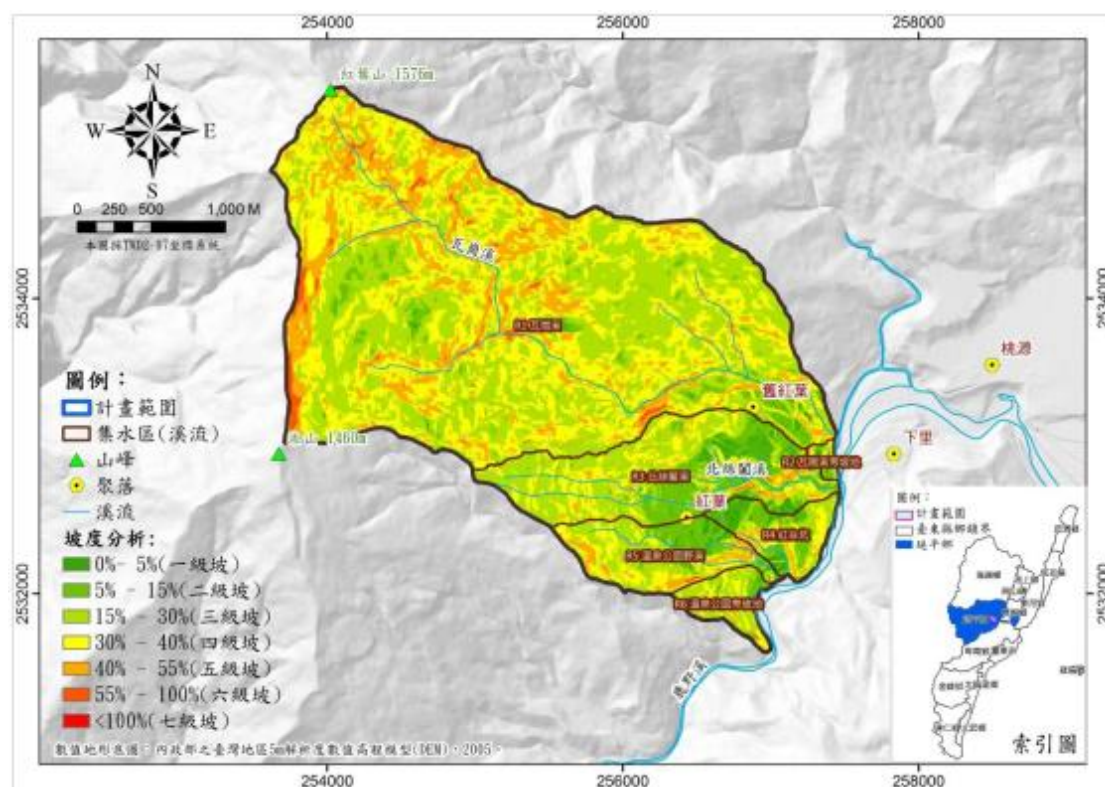


圖 4-1 研究區集水區坡度分析圖

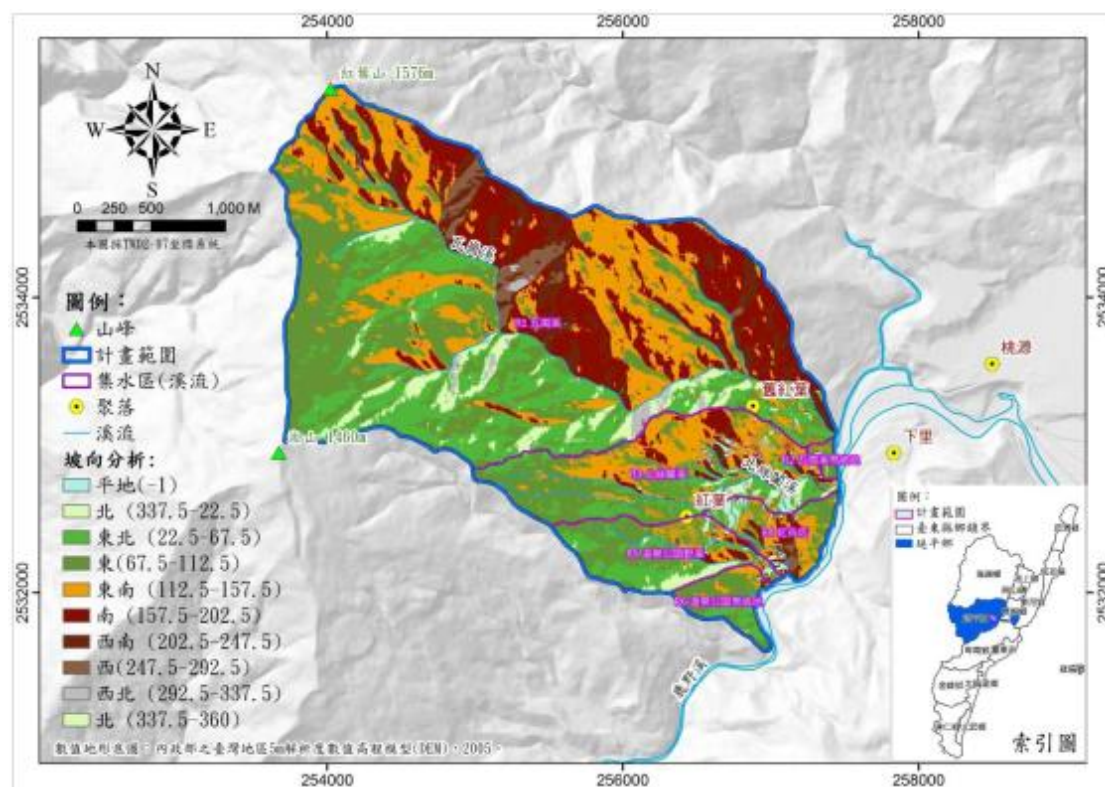


圖 4-2 研究區集水區坡向分析圖

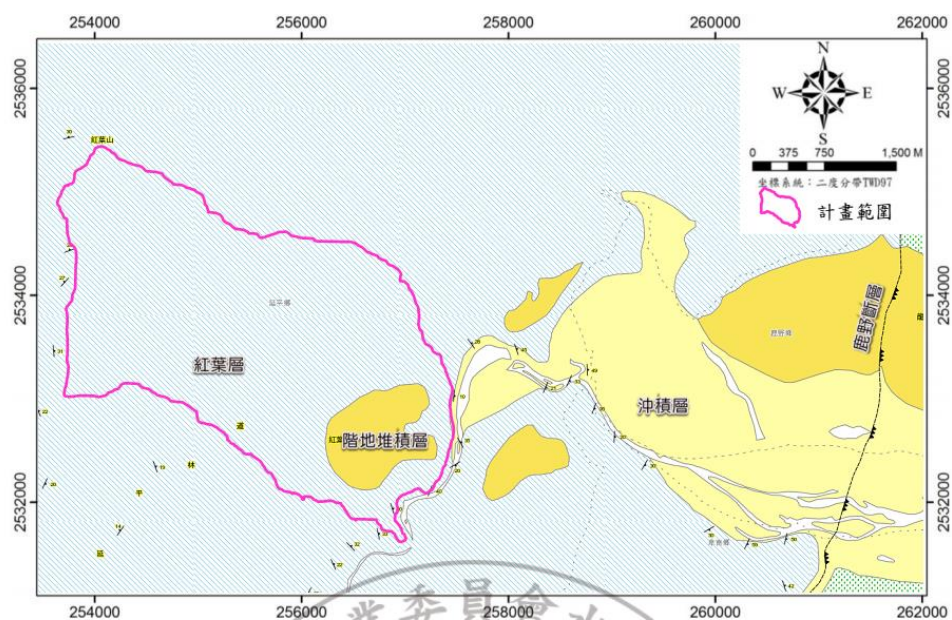
(二)地質及地質構造

整合經濟部中央地質調查所二十五萬分之一臺灣地質圖 (1974)、十萬分之一海岸地質圖 (1993)、五萬分之一臺灣區域地質圖 臺東、知本圖幅及說明書(2008)等資訊，研究區之地質由老至新分別為：(1)分布於計畫區坡地嶺線區域，屬中央山脈東側坡地之古第三紀始新世或更早之紅葉層變質岩，為板岩及片岩所構成；(2)紅葉部落所在之緩坡平臺區，分布更新世晚期至全新世之階地堆積層，以礫石、砂、粉砂及粘土組成。(3)各野溪出口、鹿野溪及兩岸，分布全新世沖積層，亦以礫石、砂、粉砂和粘土組成。影響該區之主要地質構造為花

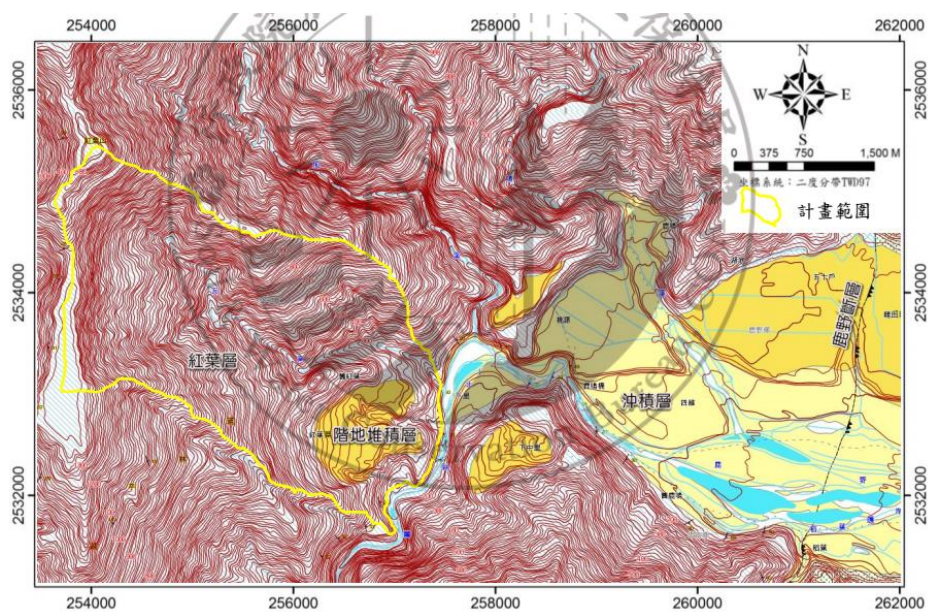
東縱谷斷層群之鹿野斷層，圖 4-3。地質構造與地質特性分述如下。

- 1.始新世或更早之紅葉層變質岩：此地層由葉理發達的深灰色板岩和千枚岩質板岩所構成，夾有暗灰色、中粗粒、堅硬的石英砂岩互層，尤其常見於地層較深層之部分。紅葉層變質岩岩性以黑色板岩間夾紋狀砂岩為主，偶有數公尺變質砂岩出現，而延平林道沿線岩性則以黑色板岩為主。
- 2.更新世至全新世之階地堆積層：區域內的河階成因源自於河流由中央山脈或海岸山脈流入縱谷形成的沖積扇，臨近中央山脈的河階集中分布在鹿野溪下游紅葉附近，砂礫組成主要為片岩和板岩。
- 3.全新世之沖積層：沉積物形成年代較晚，多未膠結，主要分布於現今的河床與溪岸，其成因來自風化、雨蝕及溪流搬運作用所攜帶的泥、砂、粉砂及礫石所堆積而成。
- 4.鹿野斷層：花東縱谷斷層群鄰近研究區之斷層線為鹿野斷層，其屬第二類活動斷層呈南北走向之逆移斷層，北起上鹿寮，經馬背、龍田、稻葉、初鹿，往南沿著卑南臺地西側延伸，由 2005 年至 2006 年的水準與全球定位系統測量結果顯示，鹿野斷層上盤的相對抬升量為每年 2.5 公分，水平

方向變形壓縮量為每年 15 公釐，左移量約 0.2 公分顯示此斷層仍十分活躍。



(a) 地質圖



(b) 地質圖套疊經建版地形圖

圖 4-3 研究區域環境地質分布示意圖

(三)土壤特性

參考行政院農業委員會之臺灣土壤(1989)、臺灣土壤分布圖臺東圖幅及水土保持局土壤電腦數化資料(2005)彙整計畫區土壤分布成果，該集水區坡地土壤分布與地形、地質有密切的關係，一般土壤酸鹼性反應近於酸性至弱酸性，其風化土壤深度受地質岩性與降雨的影響，地勢陡峭或高程較高之陡坡，土壤多為變質岩類石質土(Lm)、適潤性棕色森林土(WF)及偏乾性棕色森林土(DF)，此土層淺、肥力低，缺乏農業利用價值，且地形較不穩定，經擾動易導致崩塌，區域內之崩積坡地區呈變質岩暗色崩積土(Dm)分布，而紅葉聚落所在之臺地，除變質岩暗色崩積土(Dm)外，亦分佈於崖地或裸岩地形區(Lv)等，如表 4-3、圖 4-4 所示。

表 4-3 土壤特性及分布地區一覽表

編號	代號	土質名稱	土質特性	分布地區
1	Dm	變質岩暗色崩積土	本類別暗色崩積土乃指由中央山脈東、西二翼地質區裡之板岩或片岩之風化物質夥同石塊經崩積而堆積成的土壤。 1. 土壤都淺，通常多至30至50公分間厚；排水良好或尚良好。 2. 底土顏色多屬暗棕、暗橄欖棕、以迄黑等色。 3. 底土質地多屬中、細質地；土壤剖面中常含25至50%量之石塊或半風化之母岩碎片。 4. 土壤屬無構造或弱度發之屑粒狀或小鈍角塊狀構造；結構鬆脆。 5. 土壤多呈中或強酸性反應；pH值常在4.5至5.5間。	計畫區中央山脈東翼地質區之板岩或片岩風化堆積區域。
2	Lm	變質岩類石質土	為由中央山脈之東翼地質區裡之板岩或片岩的石塊、半風化物與細粒物質等，經崩積而雜摻堆積成的土壤。 1. 土層不深厚，通常多在30至80公分間厚，排水良好或尚良好。 2. 底土顏色多屬淡棕色~黑棕色。 3. 底土質地多為砂質壤土~粉質粘壤土者；剖面中常含55~90%之石礫。 4. 土壤或無構造或只弱度發育之屑粒狀構造；結構鬆脆。 5. 土壤呈中至極強酸性反應，pH值多在4.0至6.0間。	計畫區中央山脈東翼地質區之板岩或片岩山區
3	Lv	崖地裸岩	岩石裸露地區、臺地崖坡地形和土層深度不足10公分之坡地等。	計畫區中上游坡地及嶺線
4	ML	雜地	「雜地」，在原田間調查中係指「非農業用地」而言；舉凡村落或市集等建地、機場、軍事要地、水庫、魚池、魚塢、鹽田、河床、河川、沙丘、墳場等都屬於雜地所指範圍。	計畫區下游鄰鹿野溪河灘地

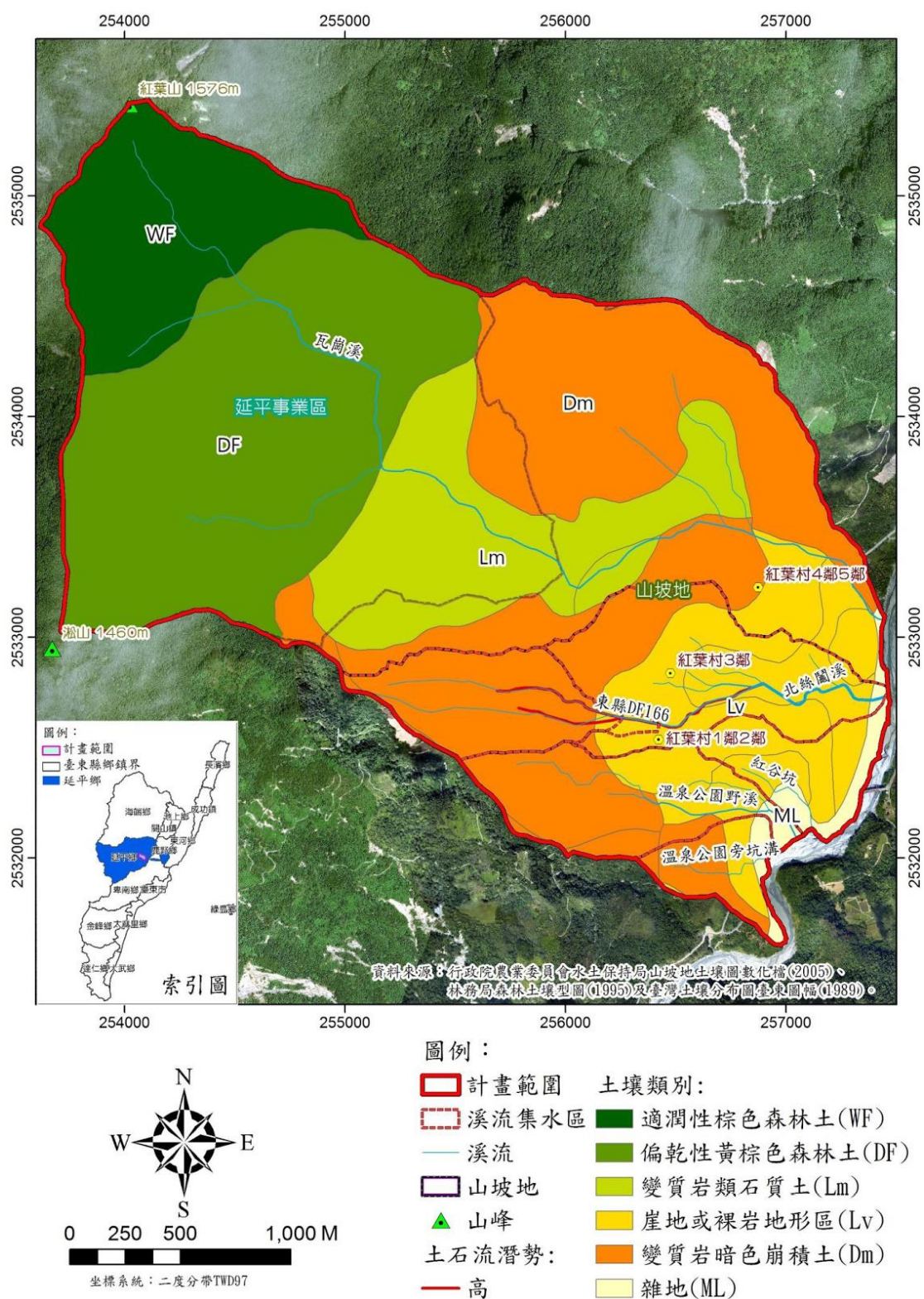


圖 4-4 土壤分佈圖

二、研究程序說明

(一) 災後數值地形

本研究利用搭載數位相機及 GPS 之無人載具 Phantom 3 Professional，取得 2016 年 9 月 16 日和 2017 年 3 月 24 日兩個時期之崩塌地上方空拍照片。然 2016 年為緊急拍攝記錄影像，飛行任務以同一飛行高程拍攝崩塌地全區，所拍攝影像解析度介於 0.042m 至 0.37m，且未佈設地面控制點，於 2017 年飛行任務中，採不同高程之航線規劃，以提升影像解析度，如圖 4-5 所示，將崩塌區劃分為四組飛行高程執行拍攝，其拍攝結果之解析度介於 0.036m 至 0.19m 之間。同時，在崩塌區周圍設置 10 個地面控制點，將控制點平均佈置於量測區之四周以及地表不動之特徵點，以校正量測高程，如圖 4-6 所示。最後再利用 Bentley 公司之影像套裝軟體 Context Capture version 4.0，進行空中三角測量解算特徵點並產製三維模型，得到 2016 年及 2017 年兩期之崩塌區域正射影像及地表數值模型(DSM)。

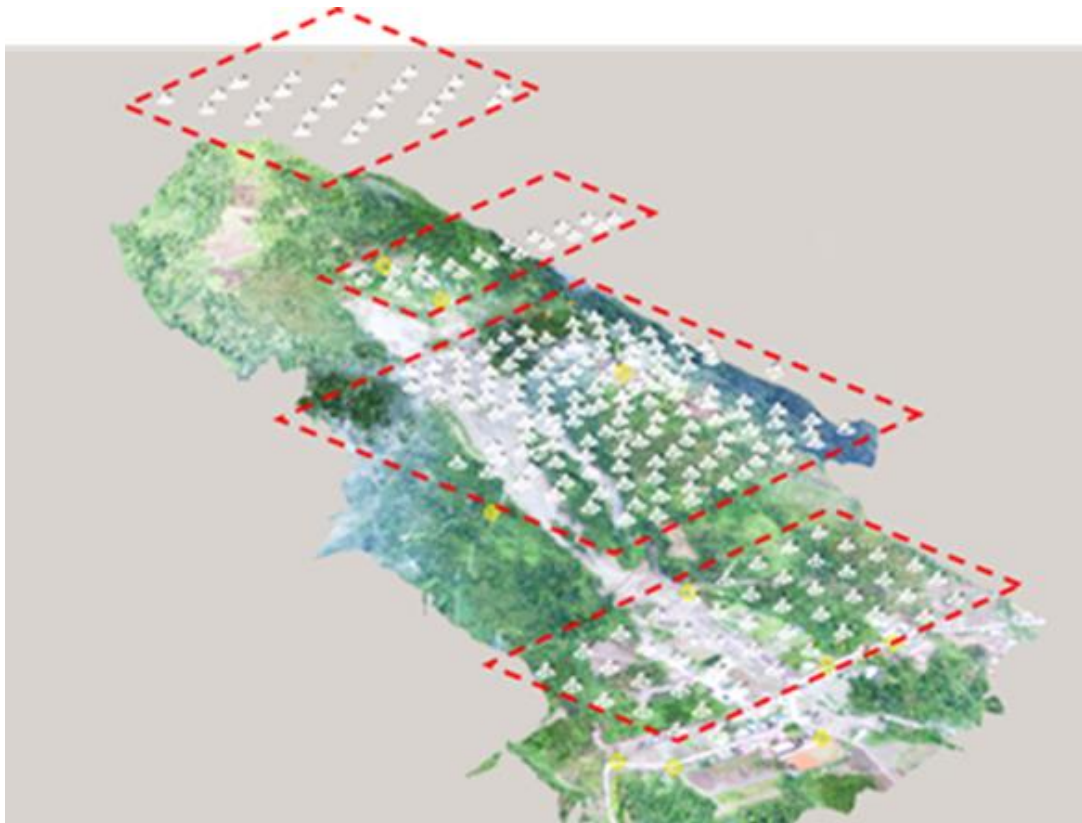


圖 4-5 無人飛行載具任務航線規劃示意圖



圖 4-6 地面控制點分佈示意圖

(二)地形變化追蹤與量體評估

本研究利用災後空拍照片所產製之正射影像，如圖 4-7，圈繪崩塌裸露範圍，並於隔年再次現地拍攝，追蹤災後崩塌裸露地擴張的變化。同時，判別兩幅正射影像裸露區域及植生或建物區之變化，其結果可發現於兩年的調查期間，2017 年的崩塌地範圍相較於 2016 年有縮小之趨勢，研判崩塌區域有部分植生已回復，但是，原崩塌範圍的上緣有擴大之趨勢，並可隱約發現上方有新生的張力裂縫，如圖 4-8。

以災後裸露地範圍之地表數值模型(DSM)與災前數值地表(DEM)進行比較，可以得到崩塌後地形高程變化量，並評估因崩塌而產生的土砂體積量。由研究結果所示，推估崩塌面積為 $56,200\text{m}^2$ ，平均陷落高程差約為 2.7m，最大崩塌陷落深度為 13.48m，最大堆積高度為 21.25m，如圖 4-9 所示，藍色區域為堆積區、黃色區域為刷深區，而顏色越深則表示該區域數值越大。對於不穩定土砂量的推估，則以崩塌範圍包含堆積區，共劃分 56,194 個面積 1m^2 網格，其中堆積區佔 $14,609\text{m}^2$ 、陷落區佔 $41,585\text{m}^2$ ，依據崩塌深度分為五級距，如表 4-4，經統計此崩塌陷落範圍所產生之土砂量為 $211,466\text{m}^3$ 。

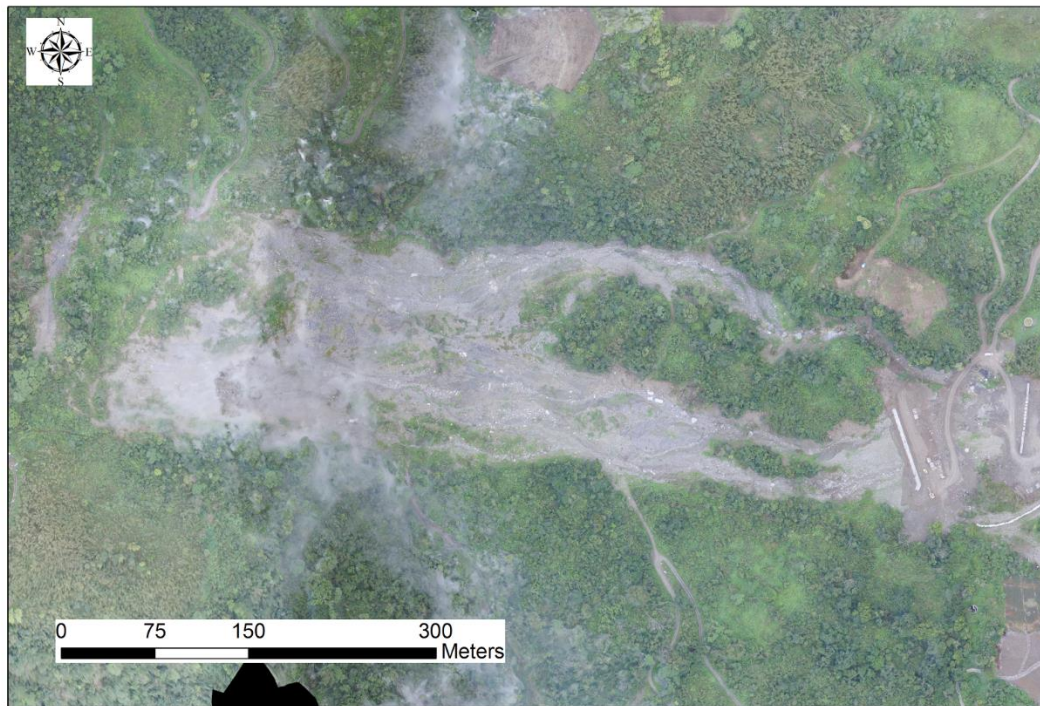


圖 4-7 災後崩塌區正射影像

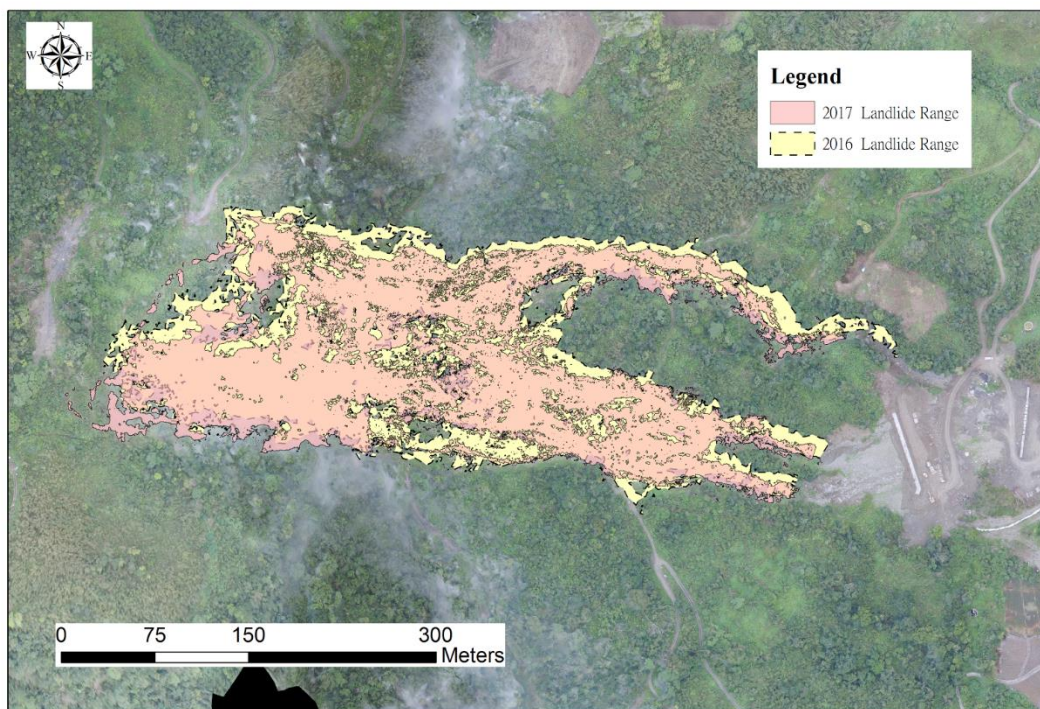


圖 4-8 2016、2017 年兩期崩塌區變化示意圖

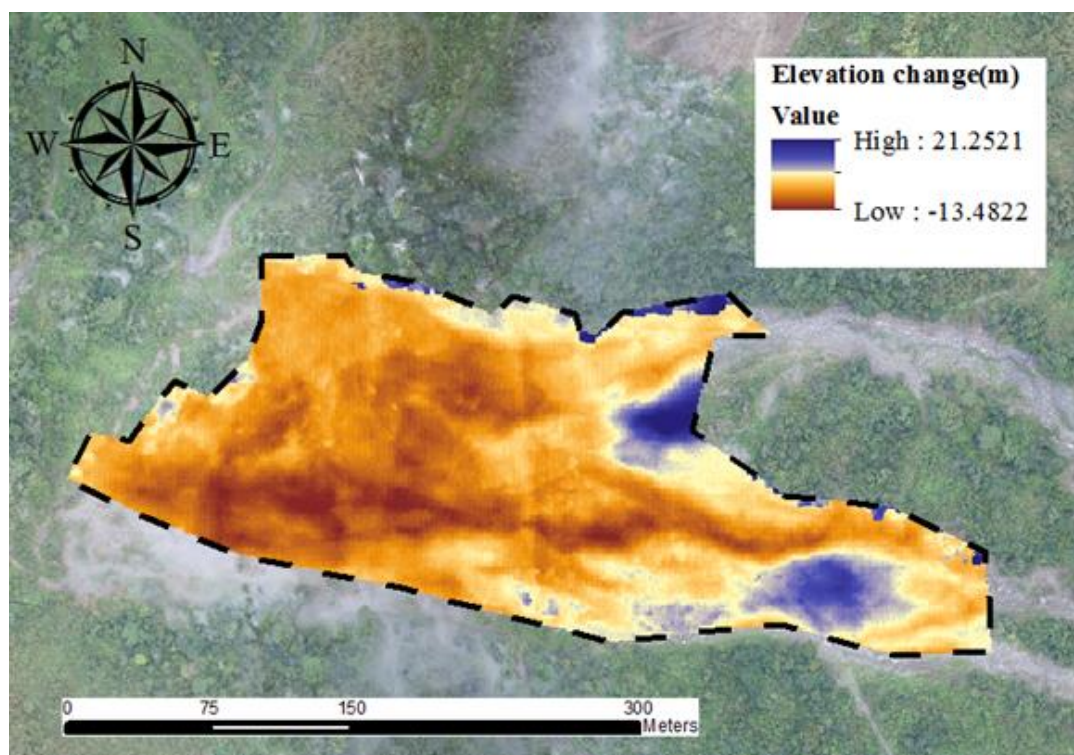


圖 4-9 崩塌後地表高程變化示意圖

表 4-4 崩塌範圍土砂量估算彙整表

深度(m)	網格數量/面積(m ²)
0~2.5	9415
2.5~5.0	12175
5.0~7.5	10715
7.5~10	7316
10~13.48	1964

(三)坡面危石崩落安全性評估

崩塌地上方處之危石經空拍後利用影像測量，推估其長度 9.2m、寬度 5.7m、高度 3.6m，體積約為 65.22m^3 ，經現場調查判斷該巨石為塊狀砂岩，單位重為 $2.7(\text{t}/\text{m}^3)$ ，故巨石質量約為 176,094kg，屬較緻密堅硬岩石，若發生地震或其他外力作用下可能滾落，對下方聚落可能造成潛在的危險，故本研究針對其穩定性及危害性進行探討。

三、分析方法測試說明

(一)數值模擬分析程式

本研究於落石境況模擬部分，採用 Rocscience 公司開發的 RocFall 程式進行分析。該程式適用於分析邊坡破壞導致落石風險提高之統計分析，並可獲得落石最終墜落位置及剖面中不同落石位置的能量、速度及跳躍高度等；同時 RocFall 亦可修正邊坡後再做分析，並設定柵欄與其位置及落石撞擊的容許容量。以下為應用 RocFall 程式在邊坡落石風險分析之操作步驟及本研究應用該程式模擬落石模式及獲得風險危害度之流程，如圖 4-10。

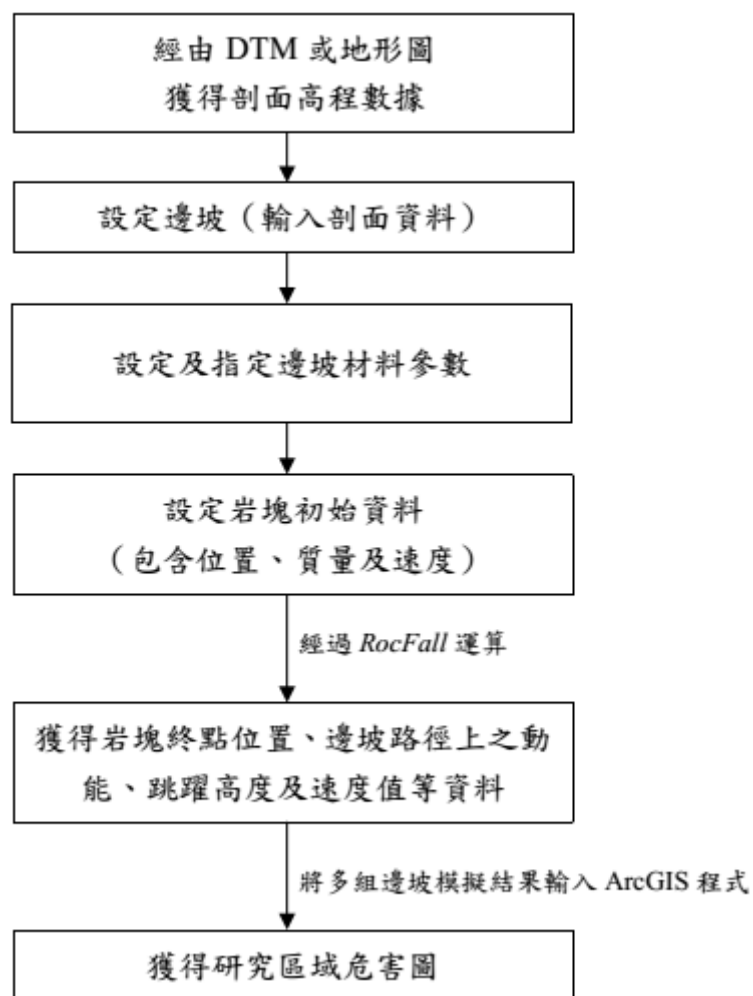


圖 4-10 落石情境模擬模式之流程圖

(二)落石模擬所需參數

落石境況模擬中，所需使用的參數包括落石塊大小、落石起始位置及速度、邊坡性質等，對於落石的幾何尺寸如前所述為長度 9.2m、寬度 5.7m、高度 3.6m，體積約為 65.22m^3 ，單位重為 2.7t/m^3 ，故巨石質量約為 176,094kg。

由於落石塊體碰撞為非完全彈性碰撞，所以會有能量與速度之折減。回復係數通常以正向回復係數(R_n)與切向回復係數(R_t)表示，而 R_n

和 R_t 可用來改變折減落石回彈後之速度分量，其中正向為垂直坡面者，切向為平行坡面者。本研究針對岩塊裸露及植被處分別指定正向回復係數(R_n)為 0.53 ± 0.04 、 0.30 ± 0.04 ，切向回復係數(R_t)為 0.99 ± 0.04 、 0.80 ± 0.04 ，摩擦角(ϕ)為 21 ± 2 度。該參數之建議參考值，如表 4-5 所示。其中，岩塊裸露部分使用「乾淨之硬岩表面」(Clean hard bedrock)材料，植被部分使用「有植生之土壤表面」(Soil with vegetation)材料。

表 4-5 RocFall 程式回復係數輸入參考值彙整表

種類	R_n	R_t	落石邊坡表面之材料種類
1	0.40 ± 0.04	0.90 ± 0.04	瀝青柏油表面
2	0.35 ± 0.04	0.85 ± 0.04	基岩出露表面
3	0.53 ± 0.04	0.99 ± 0.04	乾淨之硬岩表面
4	0.30 ± 0.04	0.80 ± 0.04	有植生之土壤表面
5	0.32 ± 0.04	0.82 ± 0.04	碎石附蓋表面
6	0.32 ± 0.04	0.80 ± 0.04	有植生碎石表面

對於邊坡性質則參考(Marinos and Hoek, 2000)提出一套能夠快速而簡單估計岩體工程參數的方法，此方法主要考量三個參數如下： (σ_{ci}) 代表岩石的單壓強度、 (m_i) 反應岩石的摩擦特性、地質強度參數(GSI)反應岩體的地質節理狀況，其中 (σ_{ci}) 值以及 (m_i) 值可由試驗室試驗獲得，但是，當沒有試驗數據時也可利用推估兩者之值，再依據推估值以圖 4-11、圖 4-12，求得岩坡各項工程參數包含凝聚力(c)、摩擦角

(φ)。本研究以坡面狀態，推估上述相對應之參數值，如表 4-6 所示。

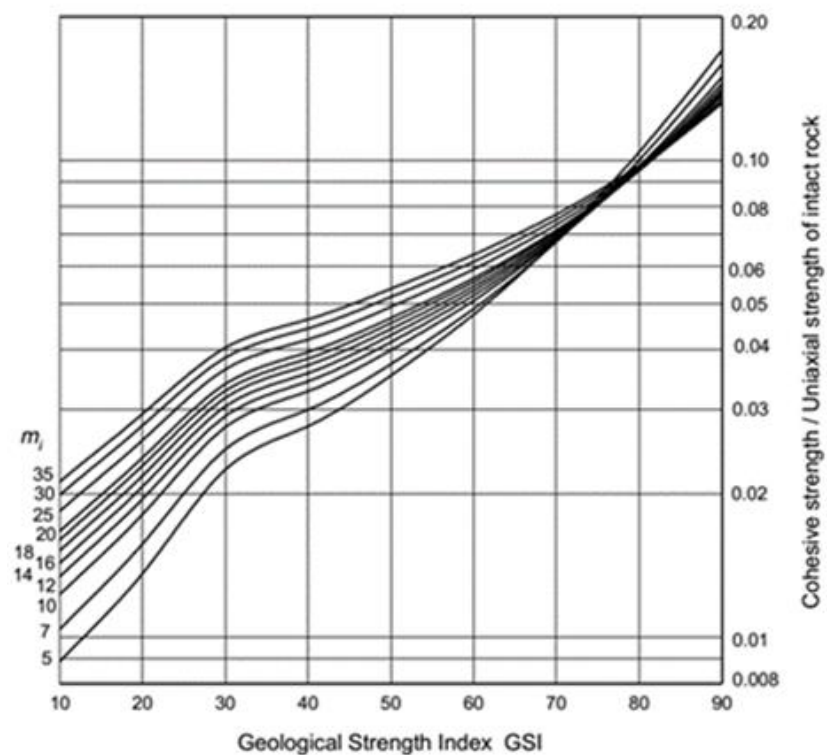


圖 4-11 Relationship between ratio of cohesive strength to uniaxial compressive strength of intact rock(c/σ_{ci})and GSI for different (m_i) values

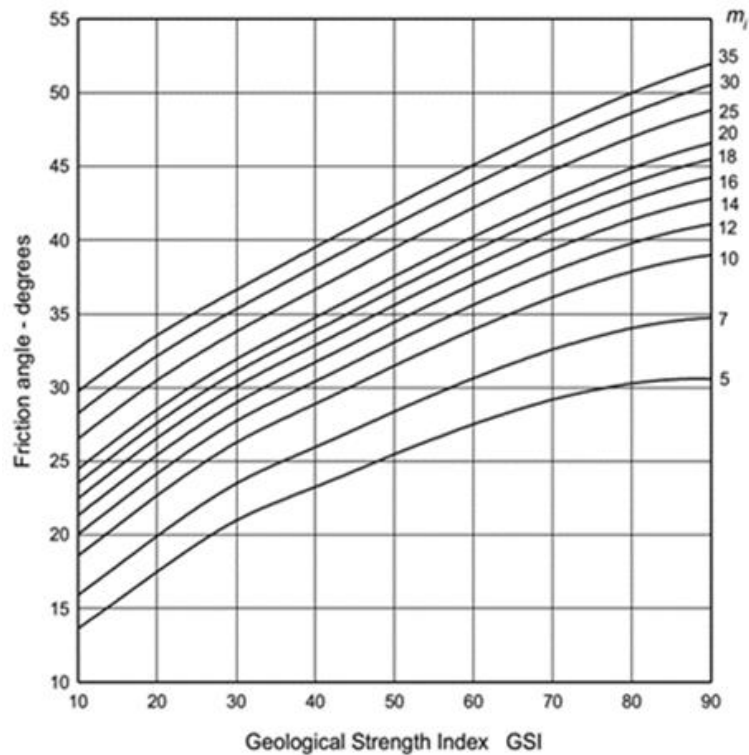


圖 4-12 Friction angle ϕ for different GSI and m_i values

表 4-6 Field estimates of rock mass properties for Marinos and
Hoek,2000

Grade	Uniaxial Comp. Strength (σ_{ci}) MPa	Values of the constant (m_i)	Geological strength index (GSI)	Cohesive strength / Uniaxial strength of intact rock (c / σ_{ci})	Cohesive strength (C) KPa	Friction angle (ϕ°)
R1	1-5	7-11	10-15	0.011-0.015	11-15	17-21

(三)落石模擬情境分析

本研究依據地形坡度及陰影圖，將崩塌區範圍劃分 4 條可能之運動路徑，如圖 4-13，其各路徑之交會點為落石的位置，並分別假設地表基礎未掏刷及掏刷兩類基礎損失因素，其中，掏刷深度則假設巨石

的高度 3.6m 及崩塌事件最大掏刷深度 13.48m 進行分析，同時，亦考量地震加速度 400gal 的加重影響。每一運動路徑之單一情境各運算分析 100 次，並統計最終停止位置及發生機率。

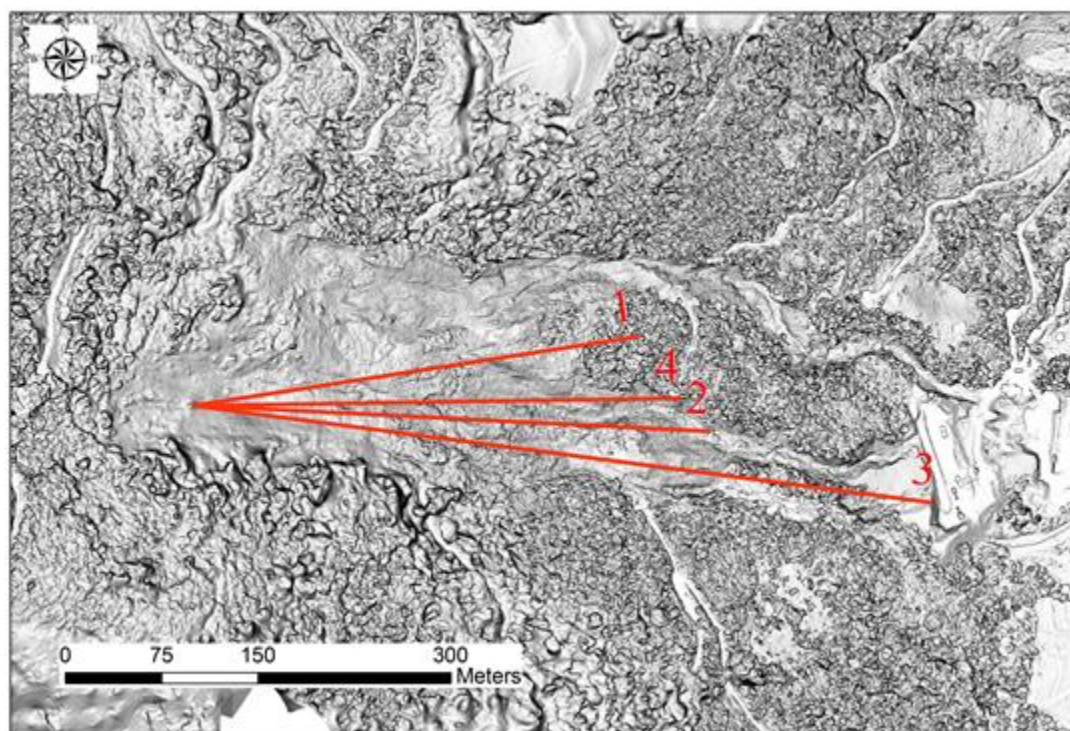


圖 4-13 預測落石運動軌跡示意圖

四、分析成果

依研究結果顯示，僅地表基礎掏刷而無地震作用的情況下，落石失去基礎支撐造成墜落及滑動的行為預測，如表 4-7 所示。其中表 4-7 之左側為 4 條運動路徑分別探討掏刷深度對於最大位移距離之發生的機率，表 4-7 之右側則為最大發生機率其所對應之位移距離。當掏刷深度為 3.6m 時，4 條運動路徑的分析結果，最大位移距離與最

大發生機率的預測值均相同。至於，當掏刷深度為 13.48m 時，除軌跡 4 之最大位移距離與最大發生機率之位移預測值均為 51.1m，其他軌跡的位移落點不盡相同。如考量地震加速度的加重影響如表 4-8，掏刷深度為 0.0m 代表僅考慮地震力的影響，依據分析結果，各個運動軌跡之最大位移距離與最大發生機率之位移預測值一致。若同時考慮基礎掏刷及地震力的影響，各掏刷深度的最大位移距離與最大發生機率位移預測值不盡相同，其中，軌跡 2 的位移量均大於其他運動軌跡，最大值發生於基礎掏刷深度 13.48m 且伴隨 400gal 的地震加速度，其預測位移距離達 336.3m，由地形及落石運動軌跡研判，其運動歷程發生彈跳運動，使落石位移並未終止於地形平緩處而繼續移動，在此一情境下，相對於其他運動軌跡，此為風險度較高之運動路徑。

表 4-7 基礎掏刷對落石的穩定分析成果彙整表

Track	Distance VS Percentage 最大位移距離之發生機率					Percentage VS Distance 最大發生機率之位移距離	
	Erosion depth (m)	Max Displacement (m)	Percentage (%)	Min Displacement (m)	Percentage (%)	Percentage (%)	Highest probability displacement (m)
1	3.6	47.09	100	-	-	100	47.09
	13.48	110.49	1	47.09	87	87	47.09
2	3.6	54.52	100	-	-	100	54.52
	13.48	81.78	1	54.52	96	96	54.52
3	3.6	58.53	83	45.91	17	83	58.53
	13.48	109.02	1	45.91	21	74	58.53

4	3.6	51.08	100	-	-	100	51.08
	13.48	51.08	100	-	-	100	51.08

表 4-8 地震影響對落石的穩定分析

Track	Distance VS Percentage 最大位移距離之發生機率					Percentage VS Distance 最大發生機率之位移距離	
	Erosion Depth (m)	Max Displacement (m)	Percentage (%)	Min Displacement (m)	Percentage (%)	Percentage (%)	Highest probability displacement (m)
1	0	47.09	100	-	-	100	47.09
	3.6	82.31	1	47.09	93	93	47.09
	13.48	138.66	1	47.09	86	86	47.09
2	0	54.52	100	-	-	100	54.52
	3.6	209.02	1	54.52	98	98	54.52
	13.48	336.26	1	54.52	72	72	54.52
3	0	58.532	85	15	45.91	85	58.532
	3.6	109.02	1	45.912	17	75	58.532
	13.48	109.02	5	45.912	12	33	58.532
4	0	51.0	100	-	-	100	51.08
	3.6	68.29	1	51.08	95	95	51.08
	13.48	68.29	2	51.08	95	95	51.08

五、小結

(一)利用無人飛行載具進行大範圍的影像追蹤紀錄，並以地面控制點提高測量精度，將可使崩塌區域的細部變化能更精確呈現。例如本研究之追蹤調查發現原崩塌區上方產生新的張力裂縫，故可推論此崩塌範圍有擴大或持續發展的趨勢。

(二)利用正射影像圈繪崩塌發生區域之範圍，並以此為依據進行崩塌前、後地表高程差的比較，兩者之差異值即為該區域崩塌量。此演算概念為，當崩塌發生時此區域的地表已裸露且無植被存在，此時崩塌區域的數值地表模型(DSM)等同於數值高程模型(DEM)，此時為直接呈現災後地形高程，因此，可利用崩塌範圍之災前(DEM)與災後(DSM)進行高程比較即為所求。

(三)本研究利用數值分析程式 RocFall 進行落石運動軌跡分析，依據邊坡地形坡度預測 4 個可能之運動路徑，並假設失去基礎支撐及地震作用的影響兩項因素，進行落石穩定分析，評估各路徑的墜落終點及發生機率，同時，推測最大發生機率與損害程度最大之運動軌跡，以評估各軌跡的危害度發生情境及受災容忍度，此分析流程及手法對於實務上落石風險評估及分析將有莫大幫助。

第二節 案例二、南投縣中寮鄉粗坑吊橋上游開口壩之防砂效益評估

一、概述

野溪地貌及特性是來自於野溪水流在重力作用下，從高處往低處流動的過程，不斷地將其勢能轉換成動能，並持續對溪床及兩側臨水河岸進行沖刷，造成河道侵蝕和土砂流失的現象。水土保持工程常利用防砂壩(sabo dam； check dam)來攔蓄河道泥砂、調節泥砂輸送、抑止土石流，藉由穩定河床流心，以減緩兩岸崩塌、侵蝕。故防砂壩這種構築高度五公尺以上之橫向構造物，可視為野溪控制土砂流失與生產的最主要工法之一。

在土石流或土砂流量較高之溪流，為減少大量土砂流出致災，影響下游保全對象，而將防砂壩壩體加以改良設計成單一矩形或倒梯形切口型態者，謂之開口壩(open-type dam)。開口壩屬透過型壩(screen dam)，在一般山地洪流時，水流及土砂得以穿越壩體，使壩體上游可以維持適當之貯砂空間，以備土石流或高含砂流通過時，可適時發揮攔阻和延遲土砂流出時間之效果。

本研究藉由二維水理數模之模擬成果，評估開口壩於野溪河段之攔砂效益。目前常見之二維動床模式選擇性越來越高，常見的動床模式之功能比較可參考表 4-9。考量 CCHE 模式無論是定量或變量流、

各式臨界流況(亞臨界、超臨界及混合流)、均勻或不均勻的沉積物，土砂變遷情況、二次流效應之輸砂狀態，均可模擬預測並且經過檢定驗證程序，且使用者可藉由模式介面之設定，變更各項混和複雜網格布置，並利用調適長度(mixing length model)可特徵化泥砂由非平衡到平衡之間距，適合模擬小範圍輸砂變化，促使模擬驗證更符合現況，因此本計畫採用 CCHE2D 進行以下研究。

表 4-9 常見的動床模式之功能比較

模式		CCHE-2D	SRH-2D	FLO-2D
數值方法		有效元素法 (efficient element method)	有限體積法 (finite volume method)	中央有限差分法 (central finite difference scheme)
水 理	超、亞、混合流	○	○	○
	定量流、變量流	○	○	○
	乾濕點處理	○	○	○
	紊流模式	1、parabolic eddy viscosity model 2、mixing length model 3、k-ε model	1、parabolic eddy viscosity model 2、k-ε model	k-ε model
輸 砂	懸浮載、推移載分離	○	○	○
	床質級配	○	○	○
	護甲作用	○	○	○
	非均勻沉澱	○	○	○
	非平衡輸砂	○	○	○
	凝聚性沉澱	○	○	×
	軟岩沖刷	○	○	×
	軟岩沖刷機制	1、泥砂磨蝕 2、流功門檻	1、泥砂磨蝕 2、流功門檻 3、剪力門檻	無
	岸壁沖刷	○	○	×
幾 何	主支合流	○	○	○
	格網挖空與河中島	○	○	×
	變形格網	○	○	×
程式取得		免費下載	免費下載	http://www.flo-2d.com/

二、基本資料

粗坑溪集水區地處南投縣中寮鄉福盛村內，為平林溪支流之一，其主流發源於標高 1,174 公尺之九份二山西南側，集水區面積約 3,779.23 公頃，如圖 4-14。根據現地調查中可得知，粗坑溪易淹水處多為中游主流與野溪交會口，且依據水土保持局土石流防災中心揭示資訊，此處面臨兩條土石流潛勢溪流（投縣 DF122、投縣 DF123）之威脅，為保全周遭居民及農業行為，水土保持局南投分局於 103 年進行『粗坑吊橋上游野溪整治工程』施作，故本研究係依據此工程施作成果，進行開口壩防砂效益評估，以提供給相關單位參考。



圖 4-14 粗坑溪集水區區位圖

(一)模擬區域工程介紹

依據『粗坑吊橋上游野溪整治工程』之基本資料，工程範圍內共設有開口壩 1 座（壩高 5m、開口寬度 3m），水墊 18.5M 及尾檻，並於河道兩側設有護岸，以防止岸壁遭沖刷而崩落之情形發生，開口壩工程以東經 120.8216°，北緯 23.8824°(TWD97 座標:231833,2642011)為中心點，各工程構造物相對位置如圖 4-15 所示。

(二)模擬範圍

粗坑溪之模擬範圍係以開口壩上游 45 公尺處，亦即區段河道即將轉彎處（0K+096）為入流起點，出流終點處則選定為粗坑吊橋為準向上游 140 公尺，區段河道開始收縮處（0K+000），總模擬長度為 96m，平均河道寬度約為 48m，平均坡度約 0.05154，詳細模擬範圍如圖 4-16 所示。



圖 4-15 工程構造物位置圖

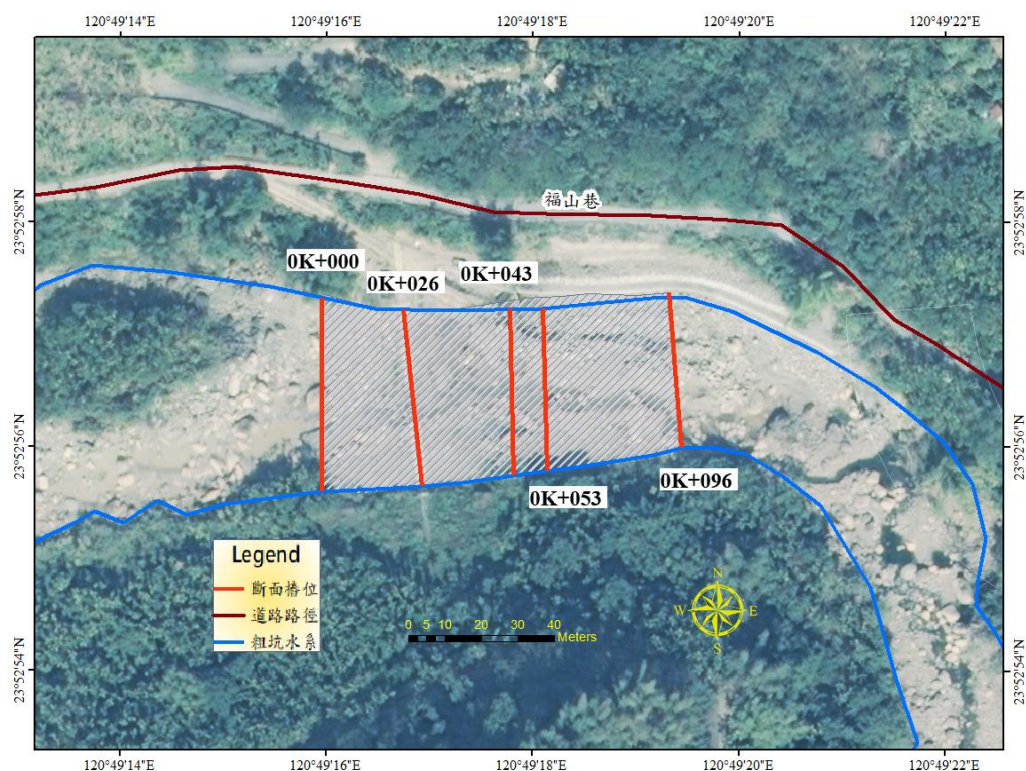


圖 4-16 粗坑吊橋上游模擬河段之斷面里程範圍

(三)模式操作流程

由美國國家計算水科學及工程中心（National Center for Computational Hydroscience and Engineering，NCCHE）所開發之 CCHE2D-GUI 是一套以 CCHE2D 模式為模擬演算核心的圖形化操作介面軟體。此 GUI 為 CCHE2D 系統的一部分，該系統包括三個部分：CCHE2D 數值模式、CCHE2D 格網產生器和 CCHE2D-GUI。網格產生器提供網格(mesh)給 GUI 與數值模式，GUI 提供圖形化操作介面以處理輸入至數值模式的資料，以及將數值模式模擬結果視像化(visualization)輸出，操作流程及編輯需求、產出資料如圖 4-17、圖 4-18 所示。

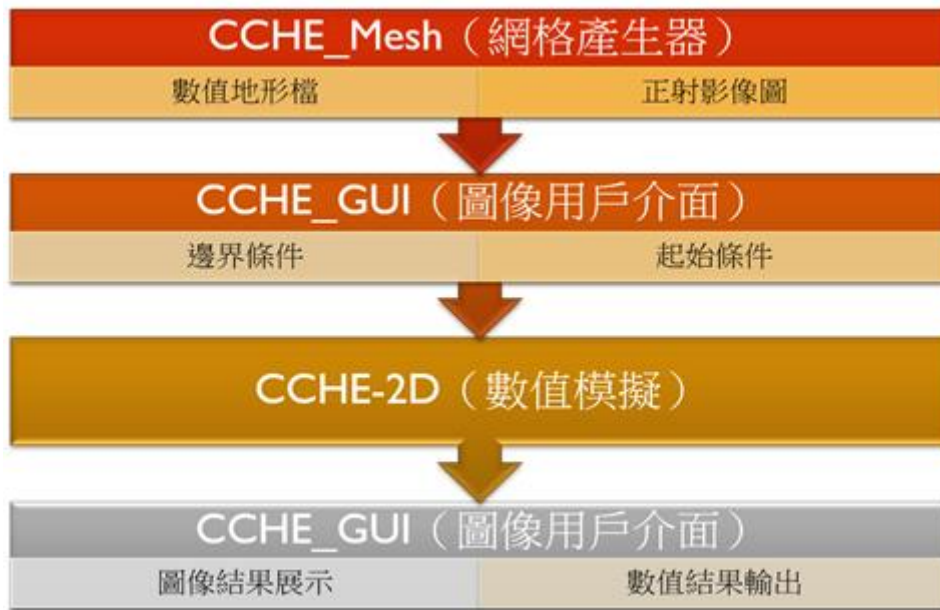


圖 4-17 CCHE 操作流程圖

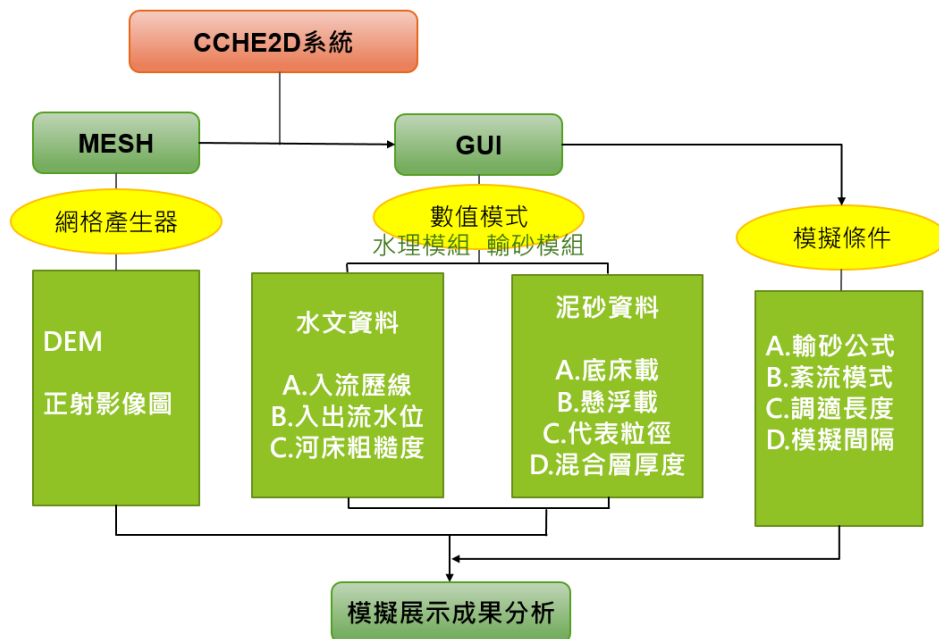


圖 4-18 CCHE 參數輸入流程圖

(四) 模擬參數介紹

模式模擬採用參數如表 4-10 所示，其各項說明如下：

表 4-10 模擬範圍模式參數表

模式採用參數	採用值
流量入流歷線	50 年重現期距流量歷線， $Q_p=299.18\text{cms}$
泥砂入流歷線	按技術規範以 Schoklitsch (1950) 推移載運移公式計算
出流條件	Open Boundary Condition
代表粒徑	參考「野溪工程構造物效能提升計畫-以投嘉地區為例」報告書中現地採樣值 $D_{50}=0.02\text{m}$
混合層厚度	依據模式手冊建議為兩倍代表粒徑 $=0.04\text{m}$
曼寧 n 值	依據現地條件採 $n=0.015\sim0.035$
輸砂公式	Wu et al. formula
紊流模式	Mixing Length Model
調適長度	80m

1. 網格及初始地形

模式網格設置採用雙向拉伸功能 (two-direction stretching function) 生成代數網格 (Algebraic Mesh)，並根據欲模擬區域之河段長度及寬度設置適切之網格數量，由於結構物附近之沖淤型態較為複雜且多樣，故網格設置較為密集，可提高模式之模擬穩定性，使其計算期間較不

易發散；初始地形部分則以 2011 年之地表數值地形之座標及高程值建置 XYZ 檔後匯入網格編輯器(CCHE2D_MESH3.0)進行地形建置。

為求網格長寬接近相同，本計畫設定垂直水流之橫向網格為 50 格($I=50$)，平行水流之縱向網格則為 100 格($J=100$)，總數為 5,000 格，模擬網格長寬約 0.8 公尺，模擬網格如圖 4-19 所示。

2.流量入流歷線

由水土保持局南投分局「野溪工程構造物效能提升計畫-以投嘉地區為例」報告可知，本模擬範圍之三角形單位歷線各項參數為： $T_p=3.25\text{hr}$ 、 $T_b=7.05\text{hr}$ 、 $Q_p=299.18\text{cms}$ ，如圖 4-20 所示。

3.入流輸砂歷線

在較靠近山區之野溪，河床質載多屬粒徑較大之卵礫石，懸浮之細小泥砂含量較少，故懸浮載輸砂量相較於推移載之輸砂量體相當微小，可將此忽略計算，因此在入流輸砂量估算係根據水土保持技術規範中 Schoklitsch (1950)推移載運移量公式進行估算，即可計算出單位河寬之推移載運移量。

4.出流條件

考量模擬範圍之河道平均坡度約 5%~8%，多屬山區陡坡河道，故設定為自由開放之出流型態，因此，將下游出流水位條件設置為自

由出流邊界條件(Open Boundary Condition)。

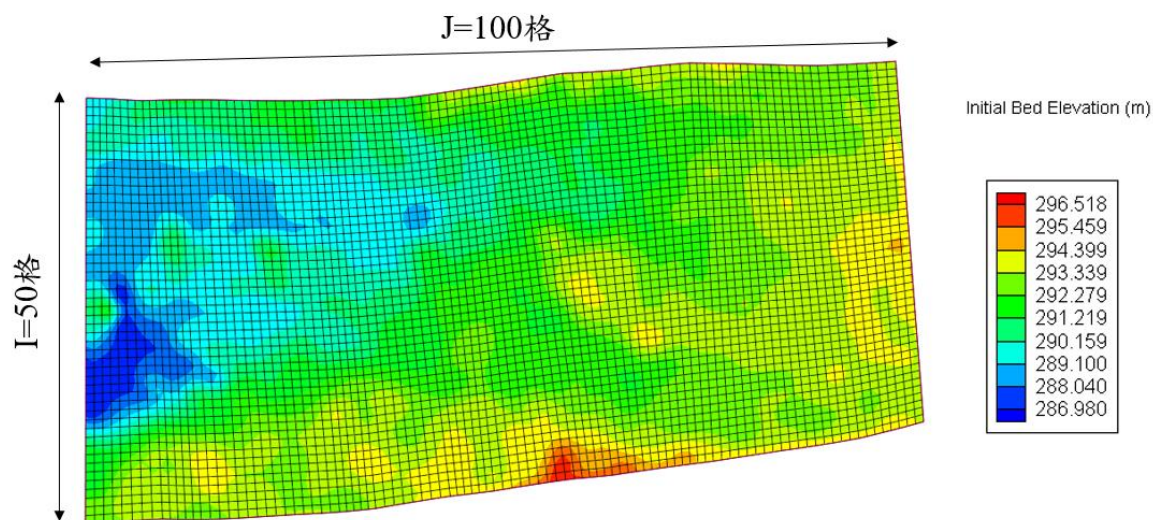


圖 4-19 模擬範圍網格

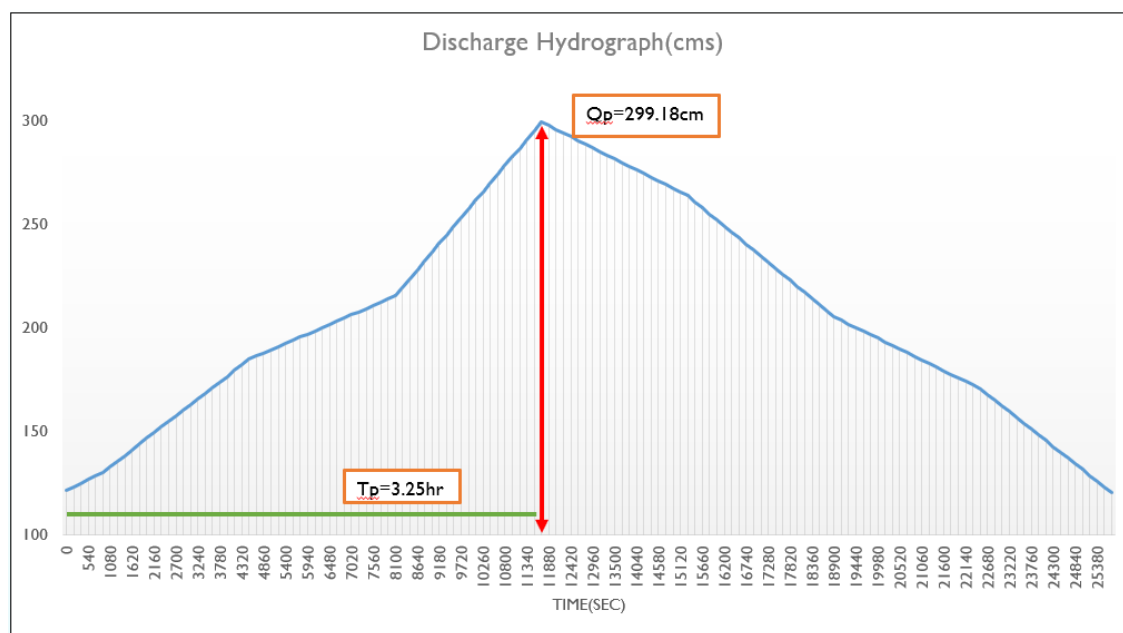


圖 4-20 粗坑溪 50 年重現期距流量歷線

資料來源：野溪工程構造物效能提升計畫-以投嘉地區為例，(水土保持局，2016)

5.泥砂粒徑

本計畫模擬河道之泥砂粒徑參考 2016 年「野溪工程構造物效能提升計畫-以投嘉地區為例」中現地採樣值，所得之 $D_{50}=0.02$ 公尺為模式輸入之代表粒徑大小。

6.混合層厚度(Mixing layer Thickness)

為考慮河床載之垂直方向的分層關係，河床載通常會分為數層，最上層通常為懸浮載、最下層為推移載、兩層中間則為懸浮載與推移載之交換區域，此區域即為混合層。根據 CCHE-2D User Manual，Wu and Vieira (2002)曾建議混合層厚度約為砂丘高度之半或兩倍河床質之 D_{50} ，本計畫將混合層厚度以 2 倍之 D_{50} 進行設置，亦即採用之混合層厚度為 0.04 公尺。

7.底床粗糙度(曼寧 n 值)

以曼寧粗糙係數(n)判斷及底床粗糙度係參考余濬(2014)矩形與 U 型溝之水理計算研究，將模擬範圍內鋪設消能石均設為 $n=0.035$ ，天然渠底為 $n=0.030$ ，混凝土開口壩為 $n=0.015$ ，曼寧粗糙係數之判斷依據如表 4-11 所示。

8.輸砂公式

CCHE2D 模式提供 4 種輸砂公式 Wu et al. formula, Modified

Ackers and White formula, Modified Engelund and Hansen formula, SEDTRA module，就本研究泥砂粒徑與輸送特性而言，Wu et al. formula 輸砂公式較適合本分析河段之泥砂運移特性，故選用本輸砂公式進行分析。

表 4-11 曼寧粗糙係數對照表

材 質 狀 況	曼寧粗糙係數 n
平整混凝土面	0.014~0.016
未粉飾混凝土面	0.017~0.020
噴漿面	0.020~0.025
混凝土砌卵石側牆(混凝土打底)	0.025~0.030
混凝土砌卵石側牆(天然渠底)	0.027~0.030
乾砌卵石	0.030~0.035
乾砌塊石	0.032~0.035
水泥砂漿砌磚	0.015~0.018
平滑瀝青面	0.014~0.015
粗糙瀝青面	0.017~0.018
清潔土渠	0.020~0.025
短草土渠	0.027~0.033
密生水草高及水面土渠	0.080~0.120
密生灌木高及水面土渠	0.100~0.140
均勻岩面	0.030~0.040
不規則岩石面	0.040~0.050
內面光滑混凝土管	0.013~0.014
排水瓦管	0.017~0.018

資料來源：「公路排水設計規範」，2009

9.調適長度(Mixing layer Thickness)

調適長度為河床上游非平衡至平衡輸砂過程之特徵長度，但調適長度並非為移動之絕對距離。調適長度通常與現地之推移載輸砂過程相關，調適長度之尺度大小取決於泥沙輸送過程至落淤成床形(bed

forms)之距離。根據 CCHE-2D 2.1 Sediment Transport Manual 提出之調適長度理論，當河床多由砂紋(sand ripples)所構成，調適長度可為泥砂平均跳躍長度或砂漣長度；若河床多由砂丘(sand dunes)所構成，調適長度可為 5~10 倍之水深；若河床多由交替砂洲(alternate bars)所構成，調適長度可為交替砂洲長度或 6.3 倍之河道寬度；若研究河段為蜿蜒變遷型河道，調適長度可為蜿蜒波長或 12 倍河道寬度；若調適長度小於網格大小，則可能產生極大計算誤差。本模擬範圍之調適長度採用 80 公尺。

三、模式說明

CCHE-2D 模式採用隱式時間推進有效元素法(efficient element method)，水理模組採用交錯格網求解連續方程式之水位，特別之速度校正法來求解系統方程式；變量流模擬採用隱式時間推進法求解，乾濕點問題之處理採用移動邊界法；紊流模式部分，除了兩種零方程渦黏滯模式，另有 $k-\varepsilon$ 紊流模式；懸浮載傳輸為求解對流傳輸方程式，河床載傳輸採用非平衡輸砂方程式，且考慮底床坡度與彎道二次流效應。

明渠流多為淺水波問題，垂直方向之運動通常可忽略，水深積分之二維控制方程式通常可合理及有效地被採用。在卡式座標下水深積分之動量方程式可表示如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Car} v \quad \text{式 (4.1)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Car} u \quad \text{式 (4.2)}$$

式中， u 與 v 為 x 與 y 方向水深積分後之速度分量， t 為時間， g 為重力加速度， η 為水面高程， ρ 為水之密度， h 為局部水深， f_{Car} 為科氏力參數， τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 為水深積分之雷諾剪應力， τ_{bx} 、 τ_{by} 為底床剪應力，由於不考慮風力，因此忽略水表面之剪應力，自由水面之高程藉由求解水深積分之連續方程式，假設 η 為水面高程， ζ 為底床高程，連續方程式可表示如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad \text{式 (4.3)}$$

此方程式廣泛被應用在計算二維模式之自由表面高程，當底床高程受到沖淤影響急速改變時， $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ 項不為零且應考慮之。

式 (4.1)、式 (4.2) 中之雷諾剪應力取決於 Bousinesq 之假設，與水深積分流場之渦黏滯係數有關：

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \text{式 (4.4)}$$

渦黏滯係數為流體之函數，且與流體性質有關，在 CCHE2D 中採用兩種方法計算渦黏滯係數，一為使用水深積分拋物線渦黏滯係數公式：

$$\nu_t = A_{xy} C_s \kappa u_* h \quad \text{式 (4.5)}$$

式中 u_* 為剪力速度， κ 為馮卡門係數 (0.41)， h 為水深， A_{xy} 為渦黏滯係數之校正係數，預設值為 1 且其值介於 1-10 間。另一為採用深度積分之混合長度模式計算渦黏滯係數：

$$\nu_t = l^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad \text{式 (4.6)}$$

$$\bar{l} = \frac{1}{h} \int \kappa z \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h} \right)} dz = \kappa h \int_0^1 \zeta \sqrt{(1 - \zeta)} d\zeta \approx 0.267 \kappa h \quad \text{式 (4.7)}$$

沿著垂直方向之水深積分速度梯度可解釋為底床表面之紊流效應，式 (4.6) 中決定之渦黏滯係數在均勻流況下可忽略為零，在缺乏其他項之情況下，渦黏滯係數可視為與均勻流相同，假設流速沿著水深方向為對數分佈，其垂直梯度可表示為：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa z} \quad \text{式 (4.8)}$$

將式 (4.8) 積分，可得水深垂直梯度之積分，可表為：

$$\overline{\frac{\partial U}{\partial z}} = \frac{1}{h} \int \frac{\partial U}{\partial z} dz = \frac{u_*}{h\kappa} \int_{z_0}^{\eta} \frac{1}{z} dz = C_m \frac{u_*}{h\kappa} \quad \text{式 (4.9)}$$

式中 U 為總速度， C_m 為係數， C_m 不直接計算，此係數可以某種方式給定，模式中給定為 2.34375，使得在所有均勻流之水平方向速度梯度計算中，可採用式 (4.6) 取代式 (4.5)。除了上述兩種零方程渦黏滯

模式，另可考慮採用 k-ε 紊流模式：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) = P - \varepsilon + P_{kV} \quad \text{式 (4.10)}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + P_{\varepsilon V} \quad \text{式 (4.11)}$$

$$P = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad \text{式 (4.12)}$$

$$P_{kV} = C_k \frac{U_*^3}{h}, P_{\varepsilon V} = C_\varepsilon \frac{U_*^4}{h^2} \quad \text{式 (4.13)}$$

$$U_* = \sqrt{c_f(u^2 + v^2)}, C_k = \frac{1}{\sqrt{c_f}}, C_\varepsilon = 3.6 \frac{c_{2\varepsilon}}{c_f^{3/4}} \sqrt{c_\mu} \quad \text{式 (4.14)}$$

式中 $c_\mu=0.09$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $c_{\varepsilon 1}=1.44$ 、 $c_{\varepsilon 2}=1.92$ ，渦黏滯係數可由

下式計算：

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{式 (4.15)}$$

P_{kV} 、 $P_{\varepsilon V}$ 增列於二維模式中，用來模擬由於底床摩擦所造成之紊流能量與消散。

總載對輸砂模式來講，通常可分離為河床載與懸浮載，或依泥砂來源，可區分為河床質載與沖洗載。因此，CCHE2D 模式使用兩種概念計算總載，其一為分離河床載與懸浮載，其二合併為河床質載（一般地形變遷動床模式模擬時忽略沖洗載對床形影響），前者之控制方程式如下所示。

懸浮載之對流傳輸方程式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(\varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial x} + D_{sxk} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(\varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial y} + D_{syk} \right) \right] + \alpha_d w_{sk} (C_{*k} - C_k) \end{aligned} \quad \text{式 (4.16)}$$

式中， C_k 為某一粒徑 k 懸浮載之水深平均濃度； C_{*k} 為某一粒徑 k 平衡條件下懸浮載之水深平均濃度， ε_s 為泥砂之擴散係數； α_d 為懸浮附載之延散係數； D_{sxk} 、 D_{syk} 為水深方向非均勻流速與泥砂濃度所造成之消散通量； w_{sk} 為泥砂粒徑 k 之沈降速度。

非平衡河床載輸砂方程式可表示如下：

$$\frac{\partial(\delta \overline{c_{bk}})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{bx} q_{bk})}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_{by} q_{bk})}{\partial y} + \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b* k}) = 0 \quad \text{式 (4.17)}$$

式中， δ 為河床載區域之厚度； $\overline{c_{bk}}$ 為河床載區域之平均濃度； α_{bx} 、 α_{by} 為河床載運動之餘弦函數，通常假設沿著底床剪應力方向，但當考慮彎道二次流效應與陡坡之重力影響時需做調整； q_{bk} 為某一粒徑 k 河床載之實際輸砂率； $q_{b* k}$ 為粒徑 k 河床載輸砂能力； L 為泥砂非平衡調適長度。

調適長度 L 可特徵化泥砂由非平衡到平衡之間距，對推移載而言，調適長度 L_b 為相對於床形之維度；對懸浮載而言，調適長度 $L_s = uh / \alpha w_{sk}$ ，式中 α 為調適係數，由 Armanini and deSilvio's (1988) 提出之方法計算，當嚴重淤積時， α 可採 0.25，嚴重沖刷時， α 採 1.0，輕

微淤積與冲刷時， α 採 0.5， U 為水流平均流速， h 為水深， w_{sk} 為泥砂沈降速度；對河床質載而言，調適長度可給定為 L_s 與 L_b 之最大值；對冲洗載而言，由於忽略其與底床間之交換，因此調適長度 L 可視為無限大。底床改變可由下式計算：

$$(1 - P'_m) \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = \alpha w_{sk} (C_k - C_{*k}) + \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b*k}) \quad \text{式 (4.18)}$$

式中， P'_m 為河床質孔隙率； $\left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k$ 為某一粒徑 k 之底床改變率。

CCHE2D 模式中有四種輸砂公式可計算 C_{*k} 與 C_k 。此四種輸砂公式之挑選，乃由數十個經由實驗與現場資料檢定驗證而得 (Wu and Wang, 2003)，可考慮非均勻輸砂之各種效應，此四種輸砂公式又可寫成以下一般化形式：

$$C_{*k} = P_{bk} C_k^*, \quad q_{b*k} = P_{bk} q_{bk}^* \quad \text{式 (4.19)}$$

式中， P_{bk} 為混合層之床質粒徑分佈， q_{bk}^* 與 C_k^* 分別為某一粒徑 k 之潛勢河床載、懸浮載輸砂量。

床質粒徑分佈通常沿著垂直方向變化，因此不冲刷層以上之河床可再分為數層，最上層定義為混合層，此層與移動之泥砂直接參與交換，在混合層中之粒徑分佈可以下式計算：

$$\frac{\partial (\delta_m P_{bk})}{\partial t} = \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k + p_{bk}^* \left(\frac{\partial \delta_m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t} \right) \quad \text{式 (4.20)}$$

式中， δ_m 為混合層厚度， $\frac{\partial z_b}{\partial t}$ 為底床總變形率，由 $\frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k$ 累加計算， N 為代表粒徑總數；當 $\frac{\partial \delta_m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t} > 0$ ，式中 P_{bk}^* 可由混合層之床質分佈 P_{bk} 替代之，反之當 $\frac{\partial \delta_m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t} \leq 0$ ， p_{bk}^* 為混合層下層粒徑 k 所佔之百分比。

此外，CCHE2D 模式可模擬凝聚性沈澱(Wu and Wang, 2004b)，可考慮植生影響之水流與輸砂作用(Wu et al., 2005)，考慮彎道之二次流效應輸砂(Wu and Wang, 2004a)，並且能模擬岸壁基腳沖刷與破壞過程，該模式詳細之水理與輸砂理論可參考國家計算水科學及工程中心(National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE)之相關出版刊物。

四、分析方法測試

依據前述「粗坑吊橋上游野溪整治工程」，進行開口壩及消能設施之施工前後水砂模擬分析，並且分析工程之攔砂效益。本研究採用CCHE2D 二維輸砂模式，可有效分析河道設有結構物如：開口壩及消能設施之水流與泥砂運動特性，詳細治理後水保結構物位置及如圖4-15、圖 4-21 所示。

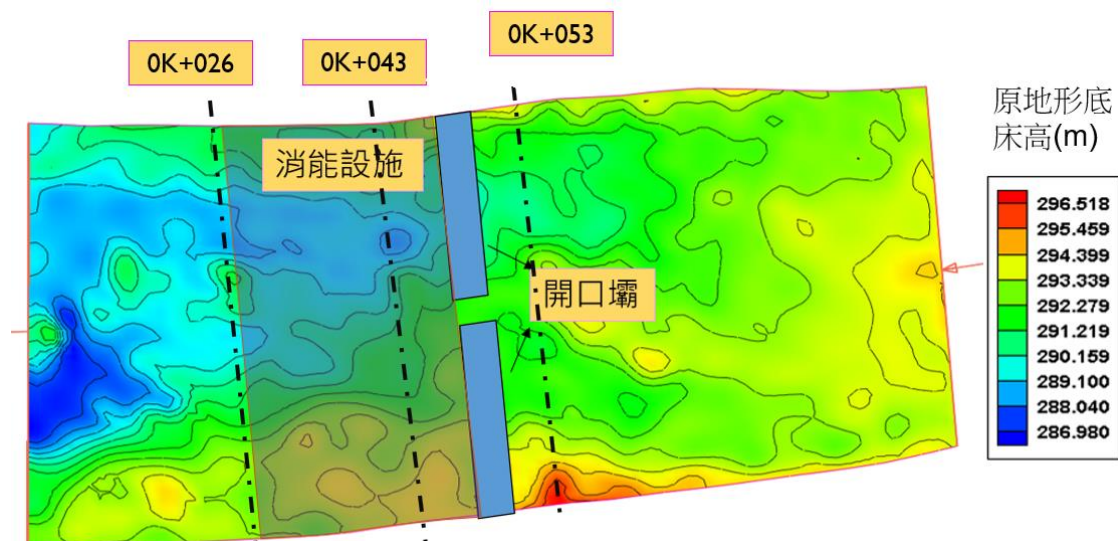


圖 4-21 水保構造物設置位置

研究著重於開口壩於水土保持工程中的攔砂效益，利用治理前後河道流速、水深及底床改變情形，並藉由分析主深槽縱斷面及橫斷面底床變化情形，推估治理前後土砂沖淤狀態，並分析該河段整體土砂量之增減，以評估工程效益。

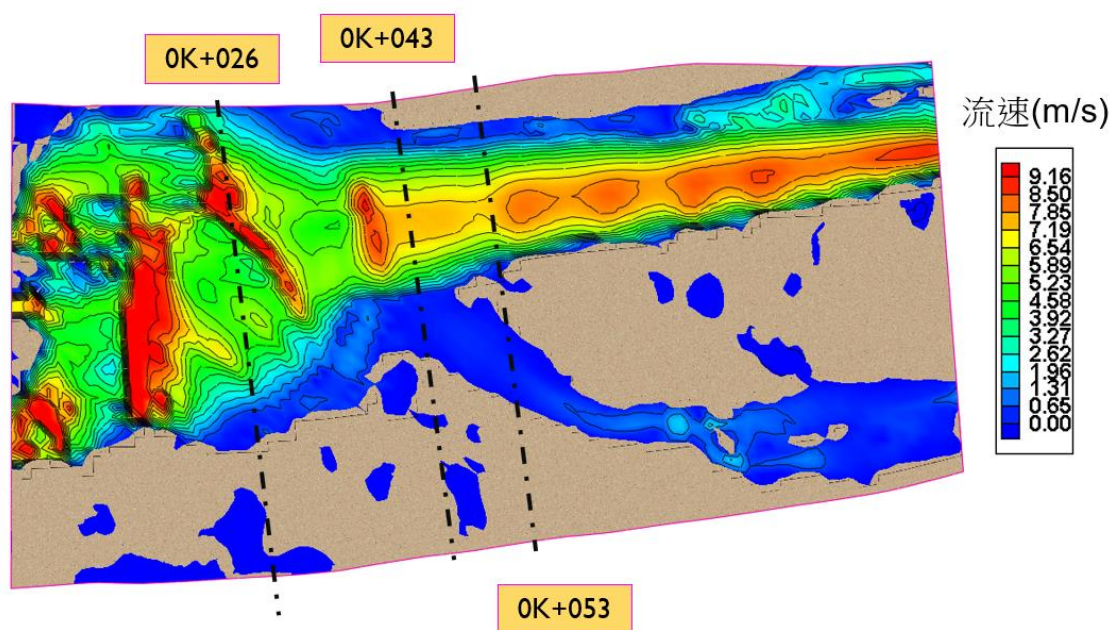
五、分析成果

針對粗坑溪集水區開口壩設置前後之最大流速分布、最大水深分布以及整體底床變化量，其相關結果分述說明如下：

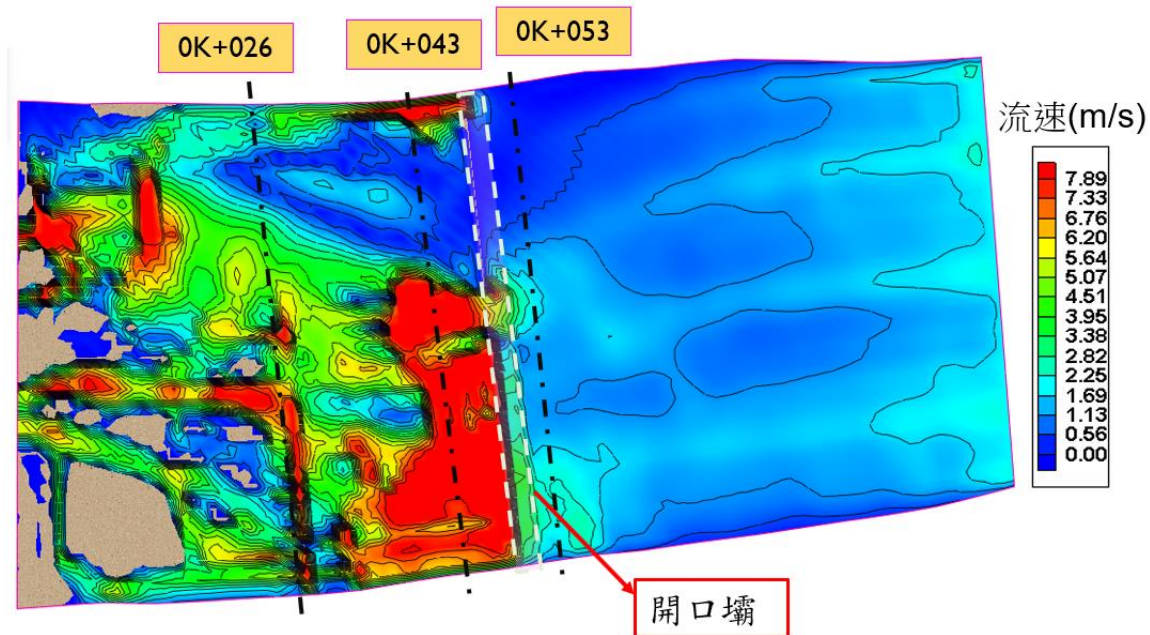
(一)最大流速分布

模擬河段範圍為河道轉彎處，曲率約 0.0255，治理前由於彎道之超高現象造成流況向右岸偏移集中，經過模擬最大流速約為 9.2m/s，流況紊亂容易促使超臨界流發生，形成河道刷深且側向侵蝕造成堤岸

崩塌的現象。治理後最大流速約比治理前減少 1~2 m/s，仍有超臨界流之現象產生，但主要發生於消能設施的區位，經由消能作用及開口壩下游之水墊，可有效的減緩底床刷深的狀況。除尾檻處造成短暫的流速驟變外，模擬河段因開口壩的調節使行水區內的流速得以調整，如圖 4-22。



(a) 治理前



(b) 治理後

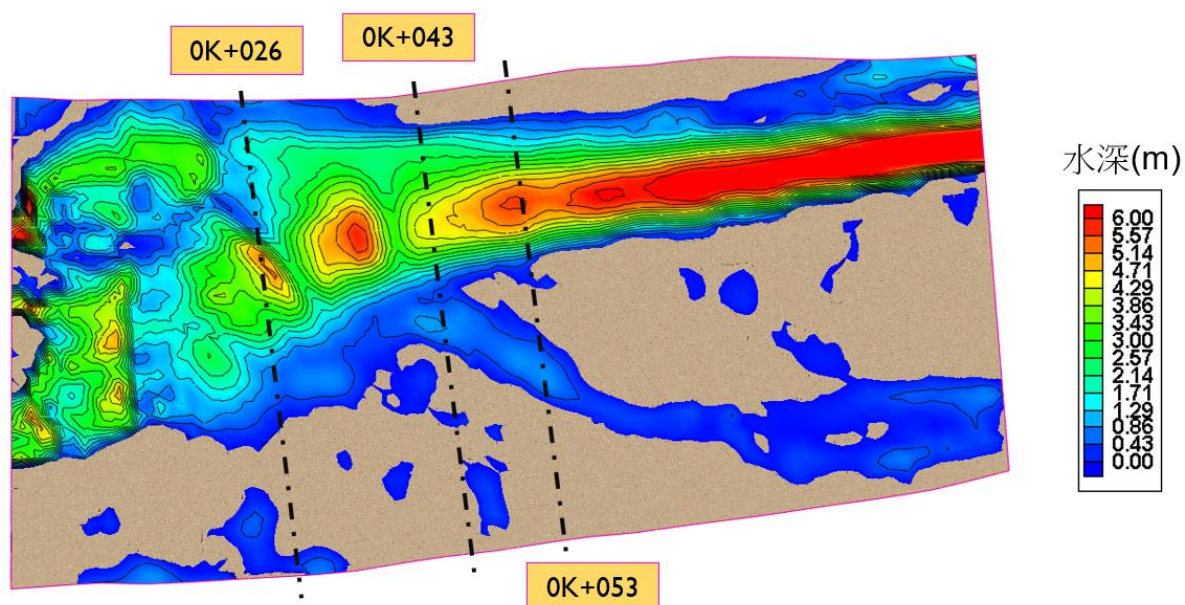
圖 4-22 粗坑溪河段治理前後河道流速分布圖

(二)最大水深分布

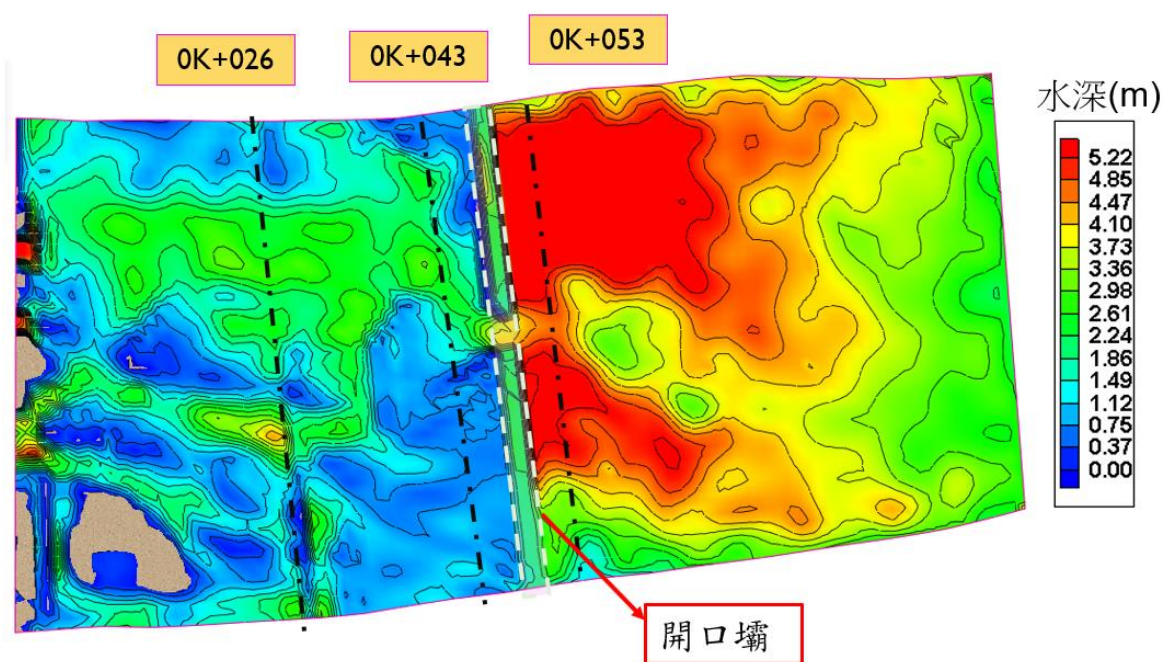
由治理前最大流速分布可知，模擬河段轉彎處，水深向右岸偏移集中壅高，使起始段水位抬升顯著，其最大水深約為 6.38 公尺，治理後開口壩上游流速已然降低，且水深蓄積於壩上游處（0K+053），因設置開口壩可遲滯驟入壩體下游之水量，避免底床掏刷過度之現象，雖有漫淹過壩頂現象，但已達到降低洪峰的目標，壩體下游最大水深治理前後降低約 1~2 公尺左右，如圖 4-23。

(三)整體底床變化量

模擬河段治理前後底床變化量如圖 4-24 所示。治理後開口壩上游由於水位抬升，致使上游產生落淤現象，故治理前後底床高程變化量達到 8.35 公尺，此乃因為開口壩攔住約 40%的入流砂量，行水區沖刷尺度不論其範圍與深度均有縮減，惟尾檻下游處（0K+026）仍處於刷深的狀態，此表示 50 年洪峰流量無法在消能設施內達到完全消能之效果，然相較於治理前，開口壩及消能設施已明顯降低流入下游土砂減量及因掏刷致使母岩出露的壓力。

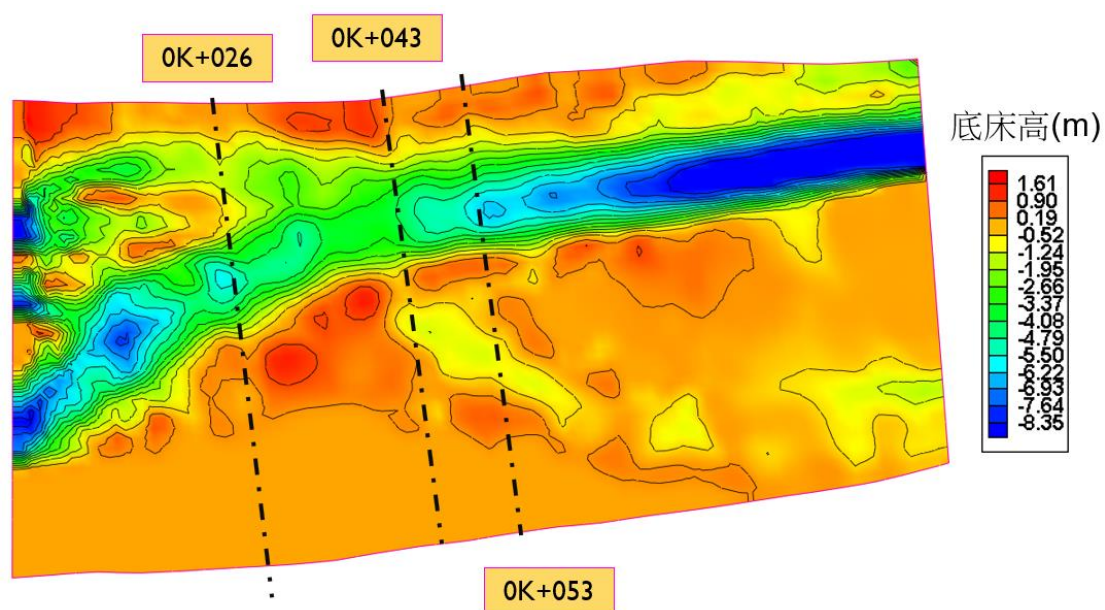


(a) 治理前

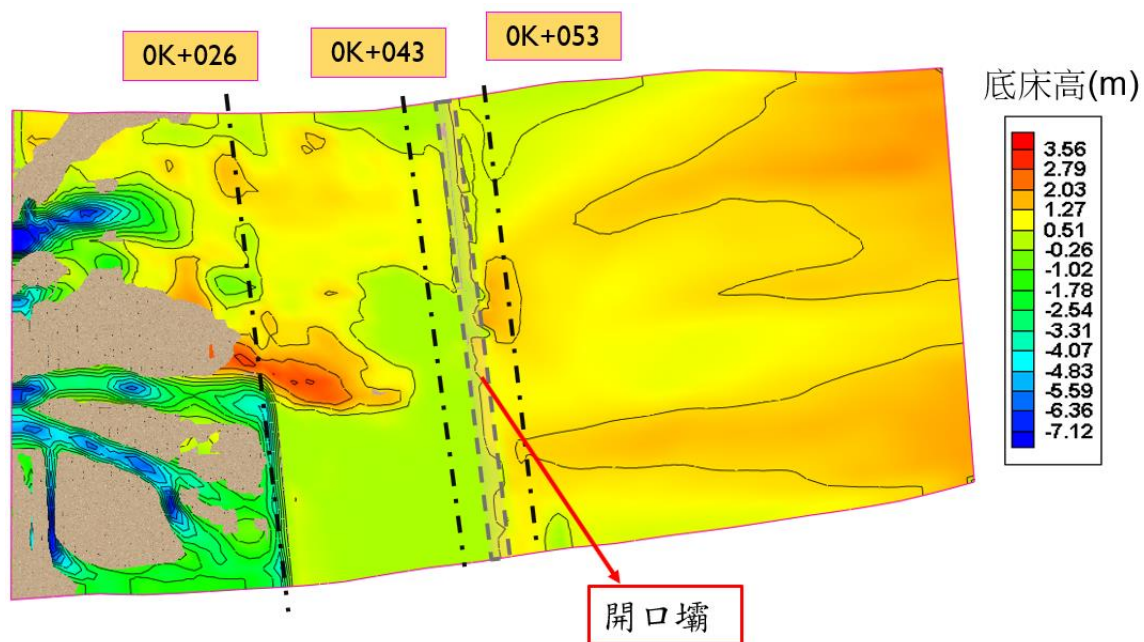


(b) 治理後

圖 4-23 粗坑溪河段治理前後河道水深變化圖



(a) 治理前



(b) 治理後

圖 4-24 粗坑溪河段治理前後河道底床高程變化圖

(四)重要斷面分析

分析橫斷面區位係選取 3 處治理前後沖刷變化最顯著者，其樁號分別為 0K+053、0K+043 及 0K+026，如表 4-12。將不同斷面之治理前後底床變化量與土砂總變化量體分別整理如圖 4-25、圖 4-26、圖 4-27 及表 4-12、表 4-13、表 4-14 所示。

表 4-12 粗坑溪分析斷面樁號表

斷面名稱	樁號
Cross Section1	0K+053
Cross Section2	0K+043
Cross Section3	0K+026

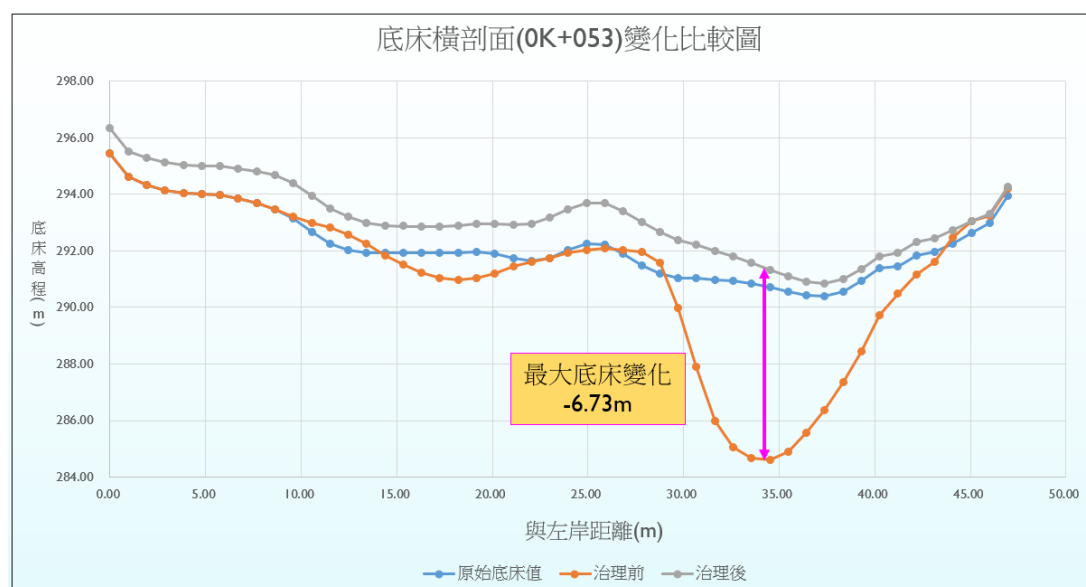


圖 4-25 粗坑溪 section 1 治理前後底床剖面比較圖

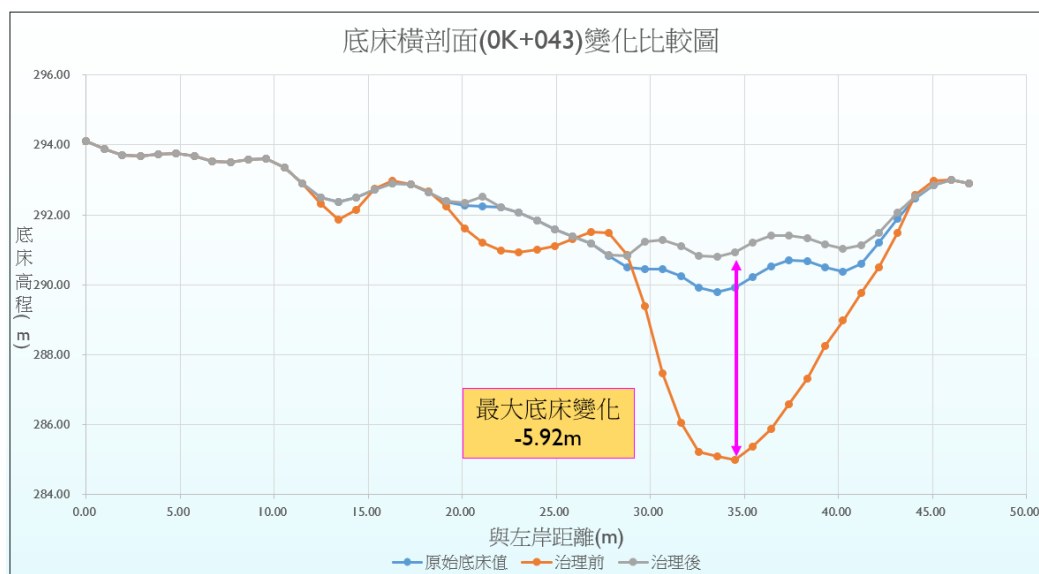


圖 4-26 粗坑溪 section 2 治理前後底床剖面比較圖

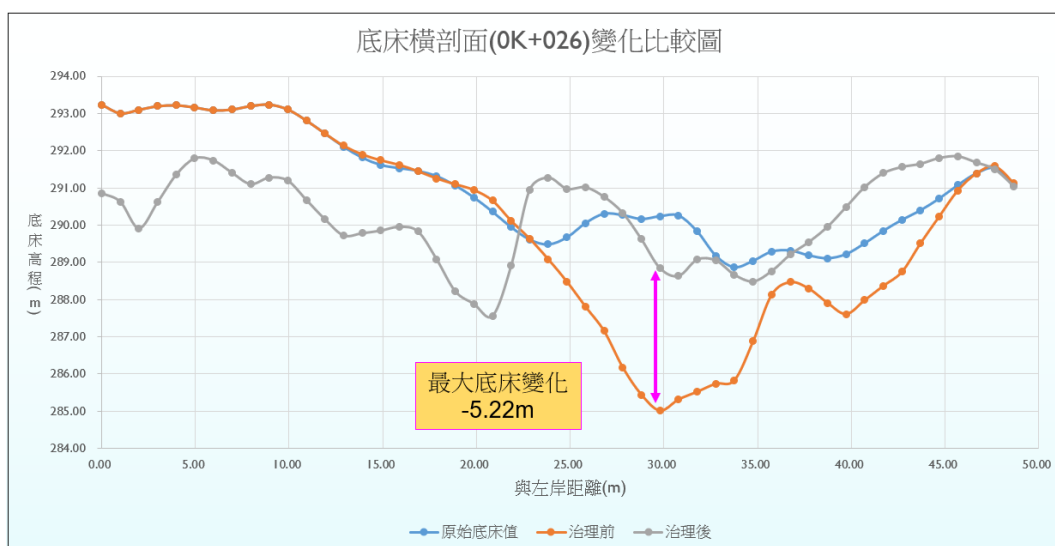


圖 4-27 粗坑溪 section 3 治理前後底床剖面比較圖

表 4-13 粗坑溪不同斷面治理前後最大底床變化一覽表

斷面名稱	治理前最大底床變化(m)	治理後最大底床變化(m)
Section 1	-6.16	1.53 (+124.84%)
Section 2	-4.92	1.03 (+120.93%)
Section 3	-5.22	-2.86 (+45.21%)
註：正值表示淤積，負值表示沖刷。		

表 4-14 粗坑溪治理前後土砂變化量一覽表

	治理前	治理後	變化量
總淤積量體 (m ³)	4197.78	36235.05	763.20%
總沖刷量體 (m ³)	-48720.52	-15952.55	-67.26%
總變化量體 (m ³)	-44522.74	20282.50	145.56%
註：正值表示淤積，負值表示沖刷。			

Cross Section 1 位於壩體上游，治理前後的橫斷面型態如圖 4-25 所示，開口壩使河道蓄積入流量，達到儲存入流泥砂量的目的，使底床高程由(-6.16m)轉化為(+1.53m)，治理前後沖刷量減少 124.84%，顯示開口壩上游落淤效果顯著。

Cross Section 2 位於壩體下游，治理前後的橫斷面型態如圖 4-26 所示，治理前流向維持單一且小範圍的沖刷，最大沖刷深度約 4.92m，當設置開口壩及消能設施後，河床變化型態近乎於原始河道，顯示消能設施使治理前後沖刷量降低約 120.93%。

Cross Section 3 位於消能設施的下游，治理前後橫斷面變化如圖 4-27 所示，治理前主流路偏向右岸其最大沖刷深度約 5.22m，而治理後主河道逐漸分為兩股流路，此顯示消能效果使流向變化不再劇烈，但其最大刷深量亦約有 2.86m，可見雖設置開口壩導流其效果仍具有改善空間。

六、小結

野溪由於河流挾砂能力、上游來砂量以及河道抗沖性交相作用，而產生河寬變化及沖淤互現的現象，本研究運用粗坑吊橋上游開口壩之模擬成果顯示：

(一)由於河道轉彎造成右岸集中侵蝕刷深之狀況，可藉由開口壩調整流況避免河岸因掏刷而崩塌、降低河床掏刷危害、穩定河床流心等成效。

(二)經過 CCHE 模擬，此河段設置開口壩可使最大流速下降約 22.28%，且有效抑止紊亂的流況避免超臨界流的現象發生。同時，開口壩可調節泥沙輸送的能力在此得以展示。

(三)模擬河段治理前土砂侵蝕量達到 48,720.52 立方公尺，遠大於沉積量，當發生 50 年洪峰流量之洪水事件時，預估產生 44,522.74 立方公尺土砂侵蝕量，若以河段之平均河寬及模擬長度討論，此沖刷量可能造成平均刷深 6.54 公尺。但治理後利用開口壩攔蓄泥砂的能力，使河道內土砂運移由侵蝕轉淤積，整體淤積量約為 20,282.5 立方公尺，其主要攔砂功能集中在壩體上游，且壩體下游於治理前之侵蝕量大於沉積量約 6355.14 立方公尺，但治理後整體河道輸砂現象已呈現淤積

趨勢。

(四)利用 CCHE2D 模式，可模擬河道內之水深、流速與底床沖淤變化之分佈，並且進一步評估攔砂效益以做為未來相關單位之參考。期望未來利用不同水保構造物之工程佈設效益分析，提升工程施作的品質藉以降低風險。

第三節 案例三、台東紅葉崩塌地滑動規模與發生時間預測模式

一、基本資料

2016 年 9 月 12 日莫蘭蒂颱風期間，台東縣延平鄉紅葉村於 9 月 14 日發布土石流黃色警戒，並在 15 日 4 時上方邊坡發生大面積崩塌事件，土砂堆積於北絲蘭溪溪床與坡面、局部土砂流入各戶民宅，造成 29 戶民宅遭土砂堆積、道路掩埋約 200 公尺以及農地受損約 0.5 公頃，災害情形如圖 4-28 所示。本次事件參考附近雨量站一鹿野 (C0S710)之降雨資料，顯示降雨延時長達 34 小時，災害發生時刻之累積降雨量 514.5mm，最大降雨強度 62.5mm/h，圖 4-29。

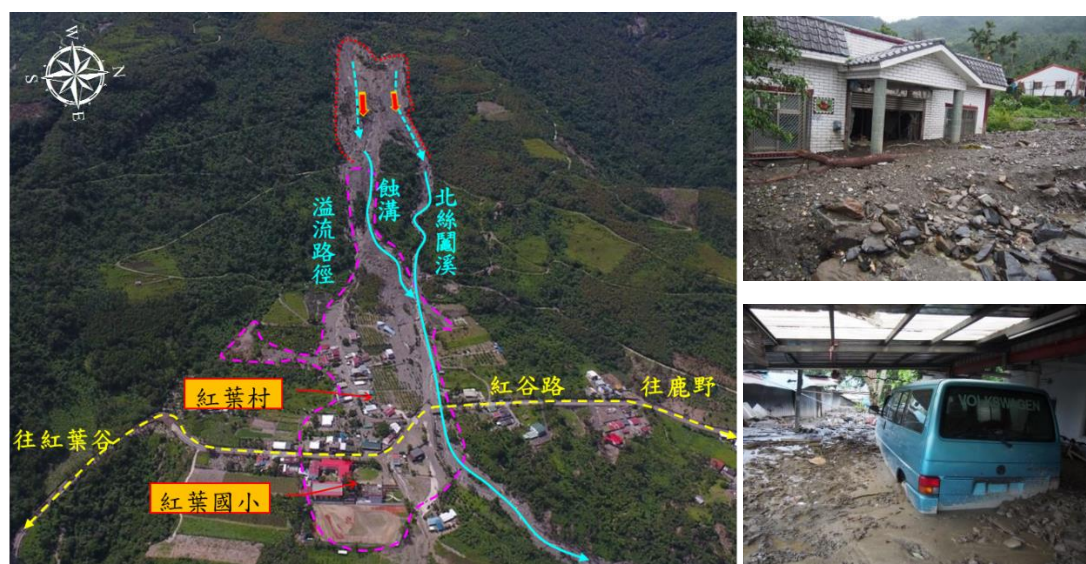


圖 4-28 紅葉村災害示意圖 (資料來源：水土保持局台東分局，2016)

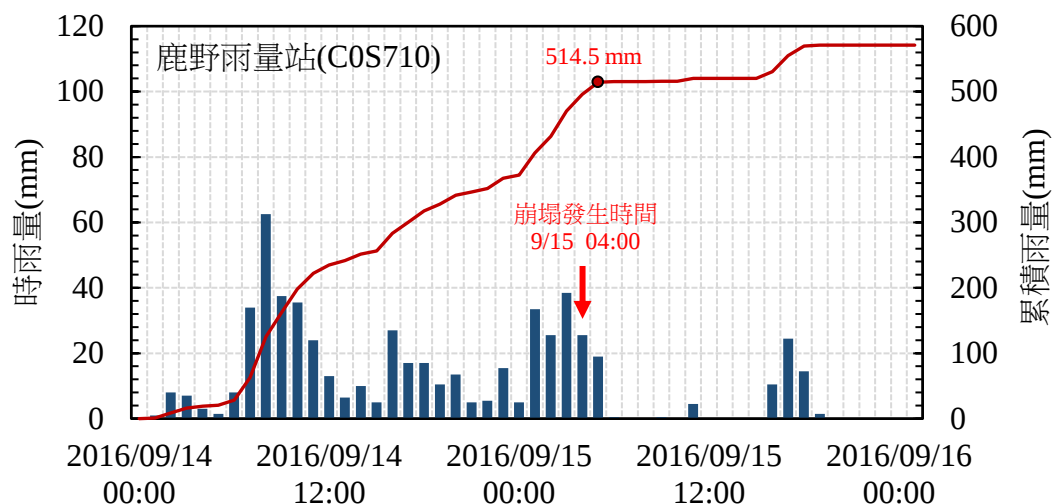


圖 4-29 鹿野雨量站 2016/09/14 至 2016/09/16 雨量資料

本研究參考水土保持局台東分局之現地調查結果「台東縣延平鄉紅葉村崩塌地災後治理調查規劃期中報告(2016)」與水土保持局土石流防災中心發佈的「重大土砂災害土壤參數資料建置成果報告(2016)」，並使用現場調查資料建立模型與測試，以下茲就相關資料進行說明。

(一) 水土保持局台東分局之現地調查結果

該計畫辦理地表地質調查及地形地貌分析，並進行地質鑽探調查、室內土壤與岩石試驗、地電阻探測及監測儀器裝設與量測工作，其中，鑽孔位置與地電阻佈設詳圖 4-30 (a)所述，地電阻影像剖面探測計佈設 2 條地電阻探測測線，R1 測線佈設於 B-1 至 B-2 之間，R2 測線平均跨越 B-4 鑽孔二側，R1 及 R2 測線長度分別為 385m 及 275m，總

計 660m。

依調查需求共佈設 5 處鑽探調查孔，由於鑽探編號 B-3、B-4 與 B-5 只針對岩體部分進行試驗，所得之岩石單壓強度並非模式的輸入參數，因此表 4-15 僅列出為 B-1 與 B-2 之土壤試驗結果，依據試驗項目不同，取樣及試驗深度為土壤表層至地下 5 公尺處左右。由現地崩積層取樣後，於實驗室重模土樣再分別進行三軸壓密排水試驗與直接剪力試驗所得土壤強度參數，其凝聚力為 20.6 至 37.3 kPa 之間，摩擦角為 30.7° 至 32.3° 之間。滲透係數則由現地定水頭透水試驗與三軸透水試驗所得。

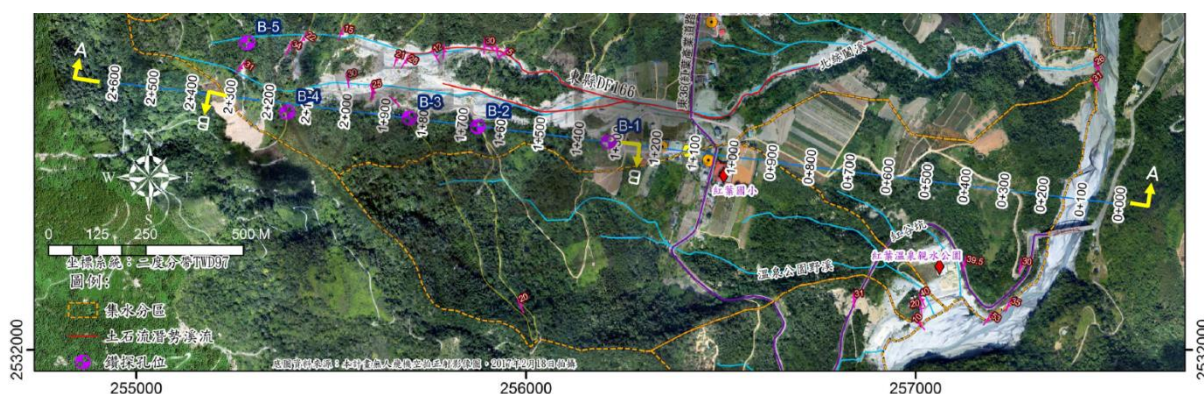
綜合鑽探資料、試驗結果與地電阻探測成果可劃分為三層主要地層。表層為崩積土，其厚度約 4 公尺至 27 公尺由板岩、砂岩岩屑及風化土壤所組成，土壤單位重約 20.1 kN/m^3 至 20.6 kN/m^3 ，孔隙比約 0.42 至 0.46，自然含水量約 9.2%至 11.9%，屬中等緊密土層；第二層為板岩且裂隙多節理發達，由灰黑色至黑色板岩，夾灰色至灰黃色變質砂岩，偶夾石英所組成；第三層為板岩且裂隙少，由灰黑色至黑色板岩夾變質砂岩組成。

表 4-15 實驗室試驗結果彙整表 (資料來源：水土保持局台東分局)

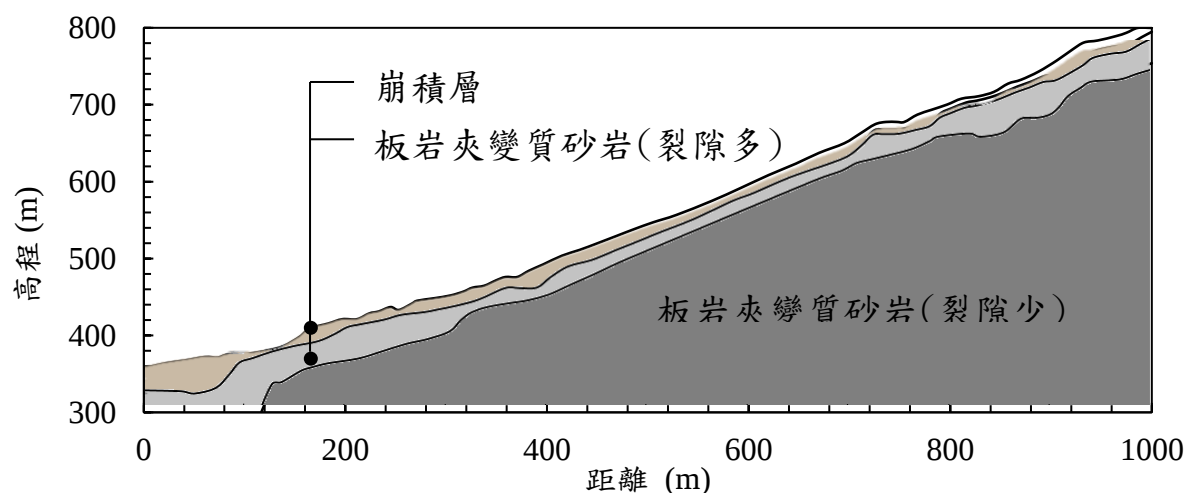
鑽孔 編號	試驗 編號	取樣及試驗 深度(m)	樣品 類別	試驗 項目	c (kPa)	ϕ (度)	k (cm/s)
B-1	RS-1	地表	重模土	CD	37.3	30.7	-
	RS-2	地表	重模土	DS	21.6	32.3	-
	PT-1	5.0~5.2	崩積層	PT	-	-	0.0196
B-2	RS-1	地表	重模土	CD	32.4	30.1	-
	RS-2	地表	重模土	DS	20.6	31.8	-
	LPT-1	地表	重模土	LPT	-	-	2.15E-06
	PT-2	3.0~3.5	崩積層	PT	-	-	0.0204

備註：CD：三軸壓密排水試驗；DS：直接剪力試驗；PT：現地定水頭透水試驗；

LPT：三軸透水試驗



(a) 鑽探位置 (資料來源：水土保持局台東分局，2016)

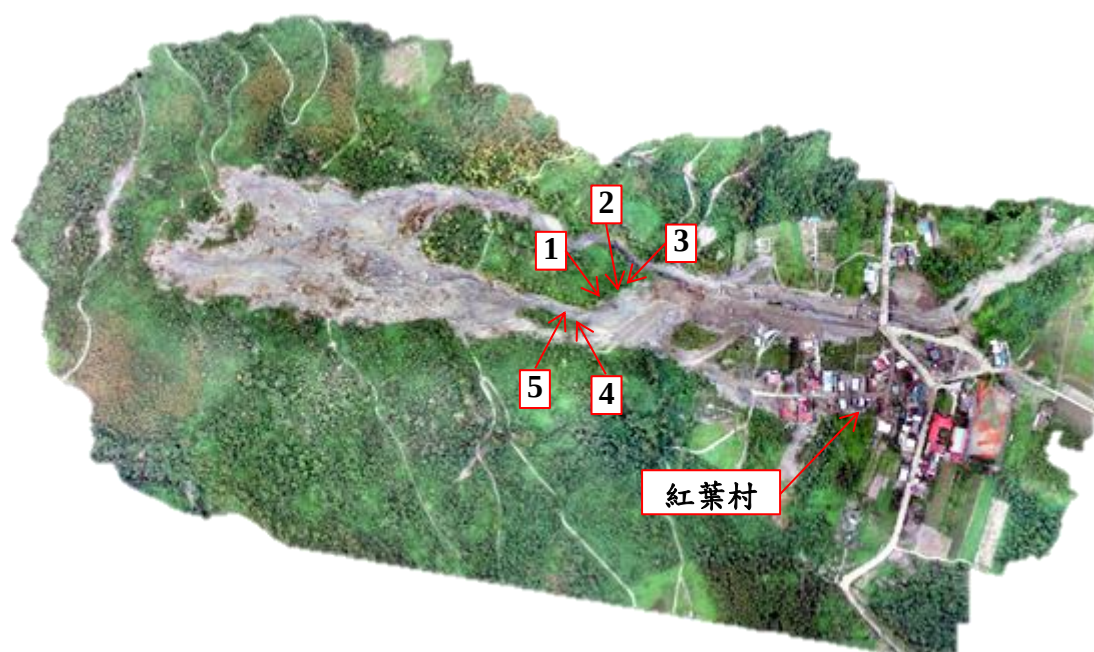


(b) B-B 斷面地質剖面圖 (改繪自水土保持局台東分局，2016)

圖 4-30 紅葉村崩塌地地質鑽探位置與地層剖面圖示意圖

(二)水土保持局土石流防災中心之現地調查結果

該計畫取樣方式分成兩種，第一種為薄管取樣，取得樣品供一般物理性試驗使用；另一種取樣方式為直接以鏟子挖取土壤，並以重模方式進行土壤物理性試驗、滲透性試驗與土壤水分特性曲線之試驗。取樣位置分為表層、淺層及破壞面三種層次，表層土壤係於清除地表植生及雜物後直接取樣，淺層土壤則在相同取樣點之深度 20cm 處取樣，破壞面係選擇於崩塌區露出之崩崖面，未遭到崩積土石掩蓋之部分或滑動塊體頭部附近，滑動面露出之區域等，如圖 4-31。



(a) 紅葉村災害全景圖



圖 4-31 取樣位置示意圖 (資料來源：水土保持局，2016)

上述三種地層，各取 3 份試驗土樣，共取得 9 份試驗土樣。計畫進行四種試驗，分別為一般物理性試驗、直接剪力試驗、變水頭透水性試驗與壓力鍋試驗，故需執行 36 組室內試驗其試體編號如表 4-16 所示，相關試驗所得之土壤參數如表 4-17 至表 4-20 所示。

表 4-16 試體編號表 (資料來源：水土保持局)

試驗種類 取樣位置	一般 物理性試驗	直剪 試驗	變水頭 試驗	壓力鍋 試驗
取樣點 1-表層	1-g-1	1-g-2	1-g-3	1-g-4
取樣點 1-淺層	1-s-1	1-s-2	1-s-3	1-s-4
取樣點 2-表層	2-g-1	2-g-2	2-g-3	2-g-4

取樣點 2-淺層	2-s-1	2-s-2	2-s-3	2-s-4
取樣點 3-表層	3-g-1	3-g-2	3-g-3	3-g-4
取樣點 3-淺層	3-s-1	3-s-2	3-s-3	3-s-4
取樣點 4-破壞面	4-f-1	4-f-2	4-f-3	4-f-4
取樣點 5-破壞面	5-f-1	5-f-2	5-f-3	5-f-4

表 4-17 表層土壤相關參數 (資料來源：水土保持局，2016)

編號	USCS	濕單位重 (kN/m ³)	含水量 (%)	比重	孔隙比	c' (kPa)	φ' (度)	k (cm/s)
1	GP-GM	18.34	23.1	2.66	0.75	33	46.9	0.000191
2	GM	17.36	34.4	2.66	1.02	32	40.3	0.00171
3	SW-SM	16.97	8.7	2.65	0.67	61	38.8	0.000216
平均	-	17.9	28.8	2.66	0.885	32.5	43.6	0.000951

表 4-18 淺層土壤相關參數 (資料來源：水土保持局，2016)

編號	USCS	濕單位重 (kN/m ³)	含水量 (%)	比重	孔隙比	c' (kPa)	φ' (度)	k (cm/s)
1	GP-GM	17.85	24	2.66	0.81	43	35.9	0.000247
2	GM	16.28	25	2.66	1	48	30	0.00122
3	GM	15.21	28.8	2.66	1.21	39	34.8	0.000542
平均	-	16.4	25.9	2.66	1.01	43.3	33.6	0.000670

表 4-19 破壞面相關參數 (資料來源：水土保持局，2016)

編號	USCS	濕單位重 (kN/m ³)	含水量 (%)	比重	孔隙比	c' (kPa)	φ' (度)	k (cm/s)
----	------	------------------------------	------------	----	-----	-------------	-----------	-------------

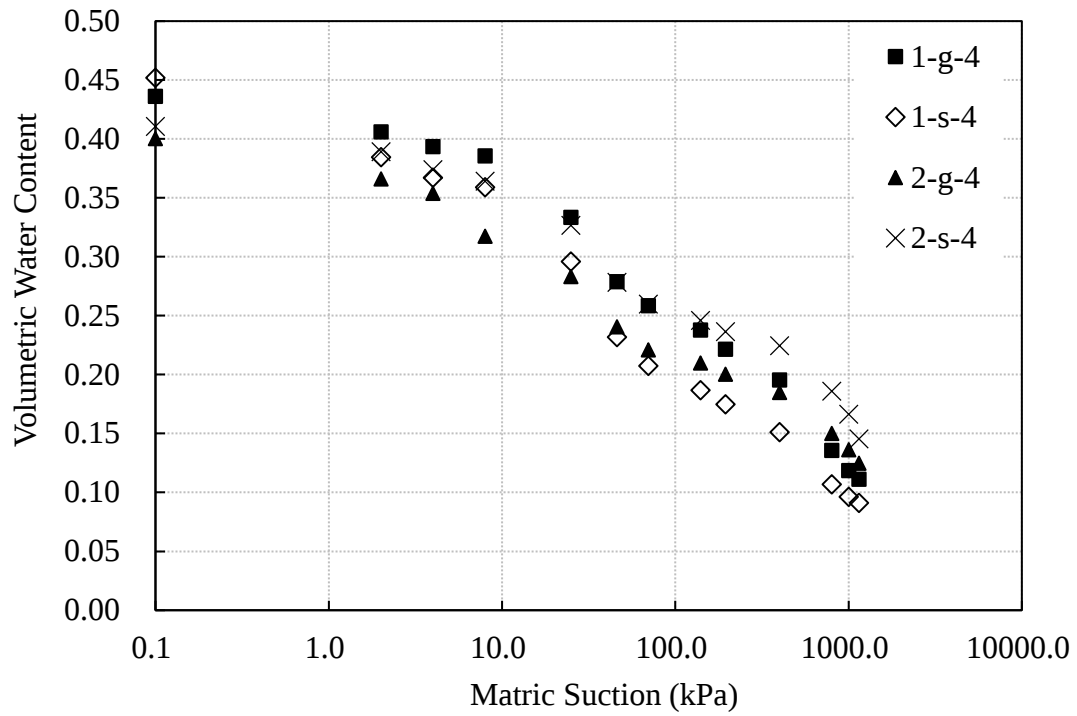
4	GP-GM	18.64	14.9	2.66	0.61	22	43	6.34E-07
5	GP-GM	17.95	12.6	2.65	0.63	31	44.4	5.35E-07
平均	-	18.3	13.8	2.66	0.62	26.5	43.7	5.85E-07

備註：1.表 4-17～表 4-19 所述凝聚力及摩擦角，均為有效應力之殘餘強度參數。

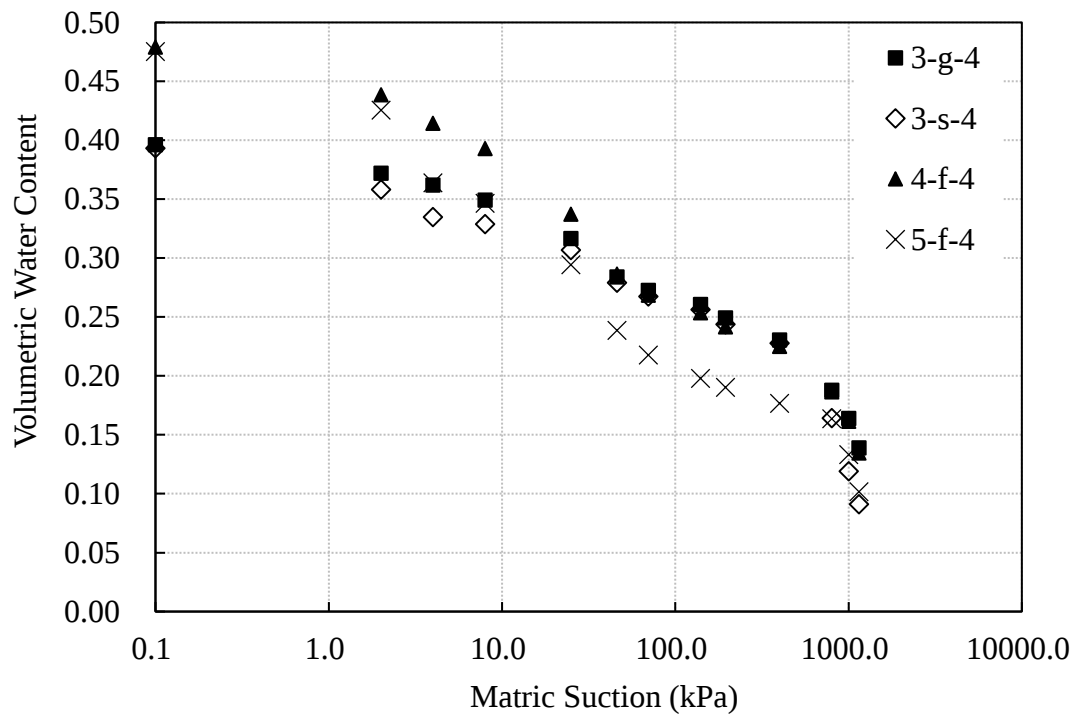
2. 凝聚力、摩擦角及滲透係數，係以重模土進行試驗，其餘參數係以原狀土進行試驗後求取。

表 4-20 壓力鍋試驗-各階壓力下之含水量 (資料來源：水土保持局，2016)

試體編號 壓力(kPa)	1-g-4	1-s-4	2-g-4	2-s-4	3-g-4	3-s-4	4-f-4	5-f-4
0.1	0.4363	0.4521	0.4004	0.4108	0.3964	0.3934	0.4791	0.4754
2	0.4060	0.3847	0.3660	0.3893	0.3720	0.3583	0.4388	0.4255
4	0.3935	0.3671	0.3540	0.3741	0.3621	0.3349	0.4144	0.3639
8	0.3857	0.3590	0.3174	0.3643	0.3492	0.3290	0.3929	0.3465
25	0.3334	0.2959	0.2833	0.3267	0.3166	0.3068	0.3373	0.2944
46	0.2790	0.2320	0.2405	0.2783	0.2841	0.2792	0.2866	0.2388
70	0.2585	0.2075	0.2211	0.2598	0.2727	0.2675	0.2686	0.2179
140	0.2380	0.1868	0.2098	0.2460	0.2606	0.2563	0.2536	0.1979
195	0.2216	0.1749	0.2005	0.2365	0.2494	0.2438	0.2416	0.1903
400	0.1954	0.1513	0.1849	0.2245	0.2305	0.2277	0.2250	0.1768
800	0.1358	0.1070	0.1500	0.1860	0.1880	0.1642	0.1864	0.1638
1000	0.1185	0.0962	0.1362	0.1665	0.1639	0.1191	0.1614	0.1332
1150	0.1112	0.0911	0.1249	0.1455	0.1391	0.0911	0.1347	0.1018



(a)



(b)

圖 4-32 土壤水分特性曲線 (資料來源：水土保持局，2016)

二、模式說明

本案例採用堤大三等人(2007)發展的 IRIS(Integrated Rainfall-Infiltration-Slope stability model, IRIS model)模式模擬降雨、入滲現象及邊坡穩定分析。IRIS 模式之計算流程分為三部分，首先使用三維 Richard's 方程式模擬土層中之含水量變化，並以有限元素法求解降雨-入滲過程，再以簡易 Janbu 切片法進行邊坡穩定分析，最後以動態規劃法結合變分法自動找出臨界滑動面。

(一)降雨-入滲模組

IRIS 模式採用三維 Richard's 方程式模擬土層中滲流的現象，其含水量的變化由下式表示：

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \{K(\psi)[\nabla(\psi + z)]\} \quad \text{式 (4.21)}$$

其中 $C(\psi)$ 為土層之水容量(water capacity)， $K(\psi)$ 為水力傳導度(hydraulic conductivity)，土壤水份特性曲線則採用 Kosugi (1996)提出的 LN 模式(lognormal distribution model)，係假設土壤孔隙半徑為對數常態分布，依此模式在不飽和土層中 ($\psi < 0$)，有效飽和度 S_e (effective saturation)、 $C(\psi)$ 與 $K(\psi)$ 可表示為：

$$S_e \left(\equiv \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = Q \left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right) \quad \text{式 (4.22)}$$

$$C(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\theta_s - \theta_r}{\sqrt{2\pi}\sigma(-\psi)} \exp\left\{-\frac{[\ln(\psi/\psi_m)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \text{式 (4.23)}$$

$$K(\psi) = K_s \left[Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma}\right) \right]^{1/2} \left[Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} + \sigma\right) \right]^2 \quad \text{式 (4.24)}$$

其中 $\theta_s[m^3/m^3]$ 為飽和水分含量(saturated soil water content)、 $\theta_r[m^3/m^3]$ 為殘餘水分含量(residual soil water content)、 $\psi_m[m]$ 為土壤孔隙半徑中位數(the median soil pore radius)所對應之壓力勢能(pressure potential)， σ 為描述土壤孔隙半徑分布範圍的無因次參數、 $K_s[m/s]$ 為飽和土壤之水力傳導係數、 $Q(x)$ 稱為餘正規分布函數(residual normal distribution)，並可表示為：

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad \text{式 (4.25)}$$

當土壤達飽和狀態時($\psi \geq 0$)，則令 $K(\psi) = K_s$ 且 $C(\psi) = 0$ 。由於式 (4.25) 為高度非線性方程式，不易獲得解析解，故採用有限元素法求解(Istok, 1989)。

(二) 邊坡穩定分析模組

上述由有限元素法求解的降雨入滲結果，用來定義土層中每個網格的孔隙水壓，再進行邊坡穩定分析之計算。此階段採用極限平衡法中的簡易 Janbu 法進行計算，係將滑動土體分割成垂直切片，對每一個切片進行應力平衡計算。此方法所採用之邊坡穩定安全係數 F_s 方

程式為：

$$F_s = \frac{\sum [c'_i l_i \cos a_i + (W_i - u_i l_i \cos a_i) \tan \varphi'_i] / m_a}{\sum \tan a_i} \quad \text{式 (4.26)}$$

$$= \frac{\sum A_i}{\sum B_i}$$

$$m_a = \cos^2 a_i \left(1 + \frac{\tan a_i \tan \varphi'_i}{F_s} \right) \quad \text{式 (4.27)}$$

其中 i 為滑動面上垂直切片的編號， c'_i 為土壤凝聚力， φ'_i 為土壤之內摩擦角， W_i 為滑動土體之垂直切片重量， a_i 為垂直切片之滑動面角度， l_i 為垂直切片之滑動面長度， u_i 為垂直切片滑動面上之孔隙水壓，即上一階段求解之降雨入滲結果。式 (4.26) 之 A_i 為抵抗力、 B_i 為驅動力。

(三) 求解臨界滑動面

由於前述簡易 Janbu 法或 Spencer 法等切片分析方法，需事先自行假設多個可能之滑動面，分別計算安全係數後，再取安全係數最小之滑動面為臨界滑動面；然而，此過程中缺少一客觀及標準程序，往往不易找到真正之臨界滑動面。為此，IRIS 模式採用動態規劃法 (Dynamic Programming method, DP) 結合變分法方式計算出安全係數最小之臨界滑動面 (Yamagami and Ueta, 1986; Baker, 1980)。然而，動態規劃法只能用於滿足加法性之函數 (additive functions)，而式 (4.26) 之型式並不符合此條件，故 Baker (1980) 參考古典變分理論之作法，定

義輔助函數 G 如式 (4.28)，並證明求解輔助函數 G 之最小值與式 (4.26) 安全係數 F_s 之最小值為等價(equivalent)。亦即如能解出輔助函數 G 之最小值路徑，該路徑代表此坡面安全係數最小之滑動面；如此時 F_s 小於 1 時，則此路徑即為坡面崩塌之臨界滑動面(critical slip surface)。

$$G = \sum_{i=1}^n (A_i - F_s \cdot B_i) \quad \text{式 (4.28)}$$

其中 n 為分析滑動面之切片數量， F_s 為安全係數；式 (4.28) 中的 A_i 、 B_i 及 F_s 均為未知數，故需以迭代方式計算，並先任意設定一初始值，例如 $F_s = 1$ 。

為將動態規劃法導入此求解臨界滑動面問題，須先將坡面適當分成 $n + 1$ 階(stage)，如圖 4-33 (a) 之垂直線。同時，每一階均可再適當分成若干層(state)，如圖 4-33 (a) 之圓點。如圖 4-33 (b)，若 (i, j) 及 $(i + 1, k)$ 為任二相鄰階的節點，則 $\overline{jk}$ 即可視為滑動面的其中一段，亦即四邊形 $abkj$ 即可視為該滑動面的其中一塊切片，並可依式 (4.26) 及式 (4.27) 計算其相應的 A_i 及 B_i 。因此，由 (i, j) 至 $(i + 1, k)$ 之 G 的變量 $DG_i(i, k)$ 可表示為：

$$DG_i(j, k) = A_i - F_s \cdot B_i \quad \text{式 (4.29)}$$

同時，若定義函數 $H_i(j)$ 為第一階至 (i, j) 之輔助函數 G 最小值，則可

表示為：

$$H_{i+1}(k) = \min_{j=1 \sim S_{n+1}} [H_i(j) + DG_i(j, k)]_{k=1 \sim n}^{i=1 \sim n} \quad \text{式 (4.30)}$$

在路徑起點處之邊界條件為：

$$H_1(j) = 0, j = 1 \sim S_1 \quad \text{式 (4.31)}$$

在路徑終點處之邊界條件為：

$$G_m = \min G = \min_{j=1 \sim S_{n+1}} [H_{n+1}(j)] \quad \text{式 (4.32)}$$

其中 S_i 為第 i 階的總層數。

藉由上述方式，即可逐步求出 F_s 最小之滑動面，在將此滑動面所對應之各段路徑 A_i 及 B_i 代回式 (4.26)，即可計算出該滑動面之 F_s 值。當 $F_s < 1$ 時表示坡面已崩塌，即為臨界滑動面。

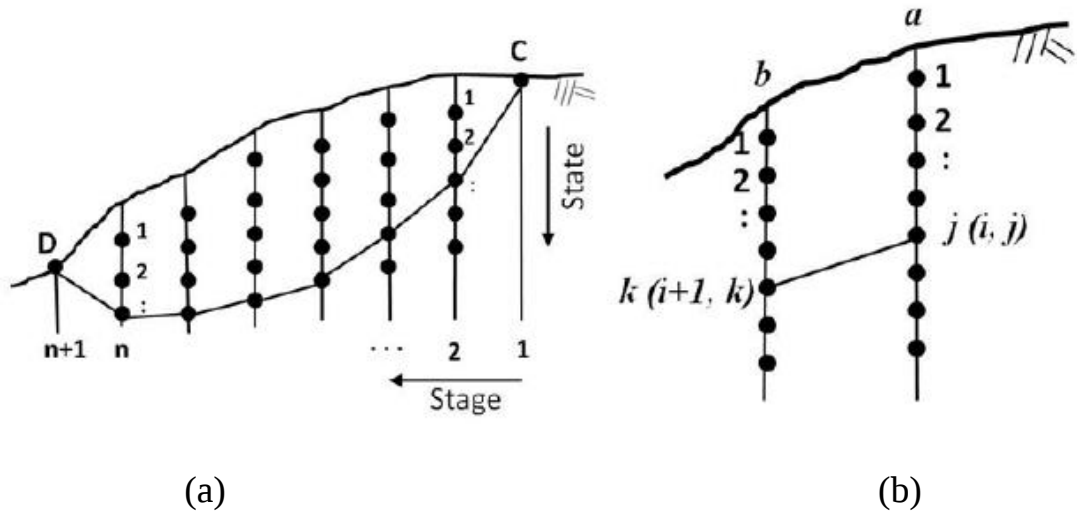


圖 4-33 (a)動態規劃法應用於臨界滑動面求解之路徑節點示意圖 (b)

相關符號示意圖 (陳振宇等人, 2014)

三、分析方法測試

本章節主要說明 IRIS 模式之研究流程(圖 4-36)，首先蒐集案例基本資料，再根據基本資料建立邊坡模型，並依模型幾何條件決定網格大小。模型建置完成後，輸入歷史雨量資料並進行降雨入滲分析，此步驟為決定模型之初始孔隙水壓條件，最後再執行莫蘭蒂颱風期間之邊坡穩定分析。以上 33 組不同參數組合下之分析結果將用來探討模式之適用性與限制性，各流程之項目詳列如下。

(一)蒐集基本資料

IRIS 降雨入滲邊坡穩定模式所需輸入參數包含地形剖面線、土壤力學參數、物理性質參數、不飽和土壤力學參數以及歷史雨量資料。地形剖面資料來源為 2012 年內政部拍攝之 1m 網格數值高程模型(DEM)，以及 2016 年水土保持局進行無人載具(Unmanned Aerial Vehicle)調查所得之數值地表模型(DSM)，其網格精度為 0.14m。土壤力學、物理性質與不飽和土壤力學參數則參考第 4 章第 3 節一、基本資料，水土保持局台東分局辦理之「台東縣延平鄉紅葉村崩塌地災後治理調查規劃期中報告」與水土保持局土石流防災中心發佈的「重大土砂災害土壤參數資料建置成果報告」，實驗所得之土壤性質資料如表 4-15 至表 4-20。歷史雨量資料來源為中央氣象局鹿野雨量站於 2016 年 7 月 1 日至 2016 年 9 月 15 日蒐集之雨量資料。

(二)建立邊坡幾何模型

邊坡模型之幾何條件主要決定於數值地形模型(DTM)，崩塌前之邊坡模型剖面線擷取自 2012 年內政部拍攝之數值高程模型(DEM)；崩塌後之剖面線則取自水土保持局於 2016 年 9 月 16 日以無人載具 Phantom 3 professional 進行現場調查後，由 Context Capture version 4.0 進行空中三角測量解算特徵點而產置之數值地表模型(DSM)。圖 4-34 為紅葉村崩塌後之坡向圖，本研究之邊坡模型主要係依據災後 DSM 之二相對坡向面找出具代表性的滑動面，如圖 4-34 所示之剖面線 1。

建置完畢之邊坡模型圖如圖 4-35 所示，原始地表線之資料來源為 DEM，以黑色線段表示，崩塌後地表量測值之資料來源為 DSM，以紅色圓點線段表示。為了簡化分析，基岩的位置以線性及參數 β 、 L 、 n_s 的方式定義，並參考由鑽探資料、試驗結果與地電阻探測成果綜合之 B-B 斷面地質剖面圖。如圖 4-30(b)所示，基岩位置定義為 x 方向 500 公尺至 790 公尺處之第二層板岩夾變質砂岩， $\beta = 25^\circ$ 、 $L = 290m$ 以及 $n_s = 4.7m$ 。IRIS 模式限制網格數量需小於 2000 格與 x 方向之節點數量需小於 200 個，且為了節省分析時間，所有網格在 x 方向之間距設定為 10 公尺，共 29 格，z 方向之網格數量共 5 格。

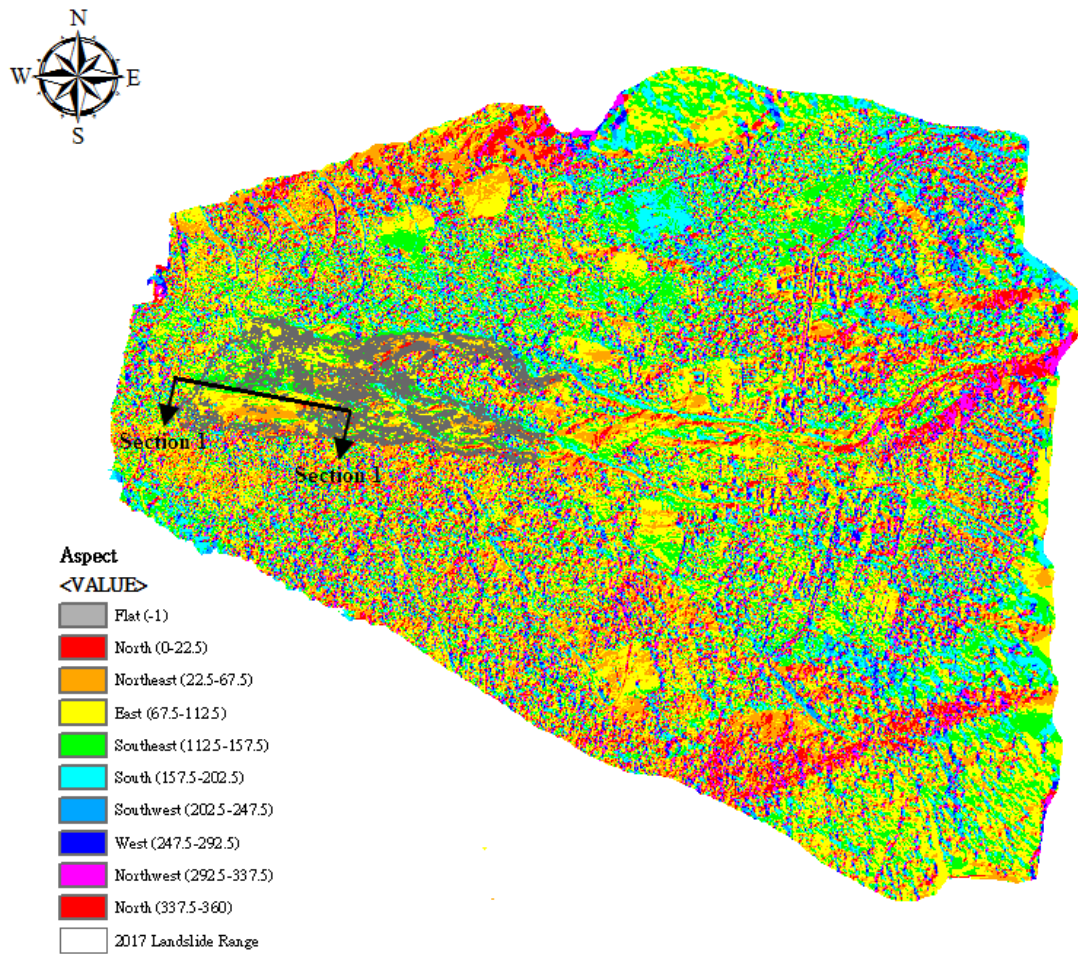


圖 4-34 剖面位置圖

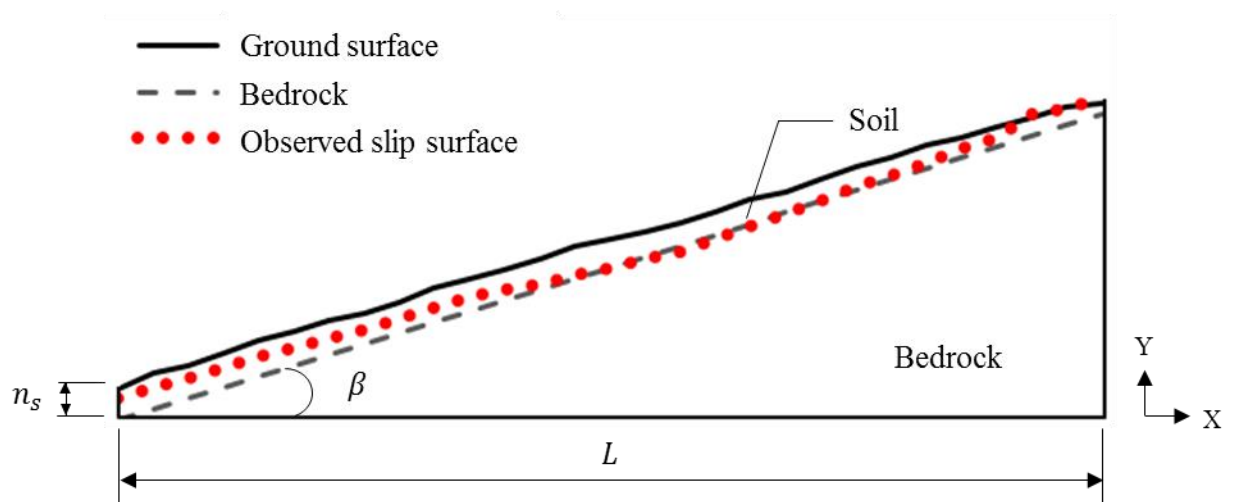


圖 4-35 簡化邊坡模型

(三)降雨入滲分析

為了模擬自然情況下，邊坡模型內土壤水份分布情形，並消除土體內不同起始孔隙水壓條件對後續模擬之影響，先設定所有坡面內土壤之初始壓力水頭為-0.01m，再給予強度 0.1mm/h 之固定降雨，持續進行模擬(陳振宇等，2014)。本研究在初始孔隙水壓條件設定階段，採用上述方式進行 300 天之固定降雨，再加上鹿野雨量站於莫蘭地颱風來臨前，2016 年 7 月 1 日 0 時至 9 月 13 日 23 時共 75 天之降雨資料，使土壤內之水份自然流動分布與排放，直至降雨入滲量與下游端自然排出之基流(base flow)流量大致相等，且土體總含水量維持定值，此時的孔隙水壓分布即為邊坡模型之初始孔隙水壓條件。

本模式需輸入之土壤力學性質分為兩部分，第一部份為一般土壤力學物理與工程性質；另一部分則是不飽和土壤物理性質。在降雨入滲分析階段，控制土體內孔隙水壓分布之主要因子為不飽和土壤力學性質，其參數則採用水土保持局土石流防災中心之現地調查報告，其土樣取自破壞面並進行壓力鍋試驗所得之結果，如圖 4-32(b) 4-f-4 與 5-f-4 之平均數。IRIS 模式採用 Kosugi(1996)提出以 LN 模式表示土壤水份特性曲線，為日本用以描述不飽和土壤的物理行為，與台灣常用的描述方式不同，經由換算後求得之輸入參數如表 4-21 所示。另一方面，控制流體通過土壤之難易程度係為滲透係數，由於分析範圍與

鑽孔孔位 B-2 較接近，故在表 4-15 中選取編號 LPT-1 重模土試驗與 PT-2 現地試驗所得之滲透係數，分別為 0.00000215 cm/s 與 0.0204 cm/s；另一個參數則選取自表 4-18 中淺層土壤之試驗結果，取樣深度為地表下 20cm 深，其平均滲透係數為 0.00067 cm/s，模式所需之土壤參數可參考圖 4-37。

(四)邊坡穩定分析

初始孔隙水壓條件設定完成後，下一階段為模擬莫蘭蒂颱風期間之邊坡穩定分析，此時輸入的歷史雨量為 2016 年 9 月 13 日 23 時至 2016 年 9 月 15 日 23 時，共 3 天之時雨量資料。另一方面，圖 4-37 彙整 33 組土壤參數組合，首先選擇現地調查結果中，土壤參數之最小值進行分析，即表 4-15 中 B-2 孔號。其土壤力學性質由三軸壓密排水試驗所得，土壤摩擦角 ϕ_1 與凝聚力 c_1 分別為 30.1° 與 32.4 kPa。第一組 $k_1 c_1 \phi_1$ 測試結果於降雨期間邊坡無發生崩塌現象，考量到土壤取樣點位置大多位於土石流堆積區，與本研究分析範圍位於土石流發生區並不一致，因此另外設定假設參數進行反算分析， c 為 20 kPa 與 10 kPa 以及 ϕ 為 28° 至 25° ，並進一步討論 IRIS 模式的適用性與限制性。

表 4-21 輸入模式之不飽和土壤力學參數

θ_s (m^3/m^3)	θ_r (m^3/m^3)	ψ_m (cm)	σ
0.477	0.168	-178.96	2.24

備註： θ_s 為飽和水分含量(m^3/m^3)， θ_r 為殘餘水分含量(m^3/m^3)， ψ_m 為土壤孔隙半徑中位數所對應之壓力勢能(m)， σ 為描述土壤孔隙半徑分布範圍的無因次參數。

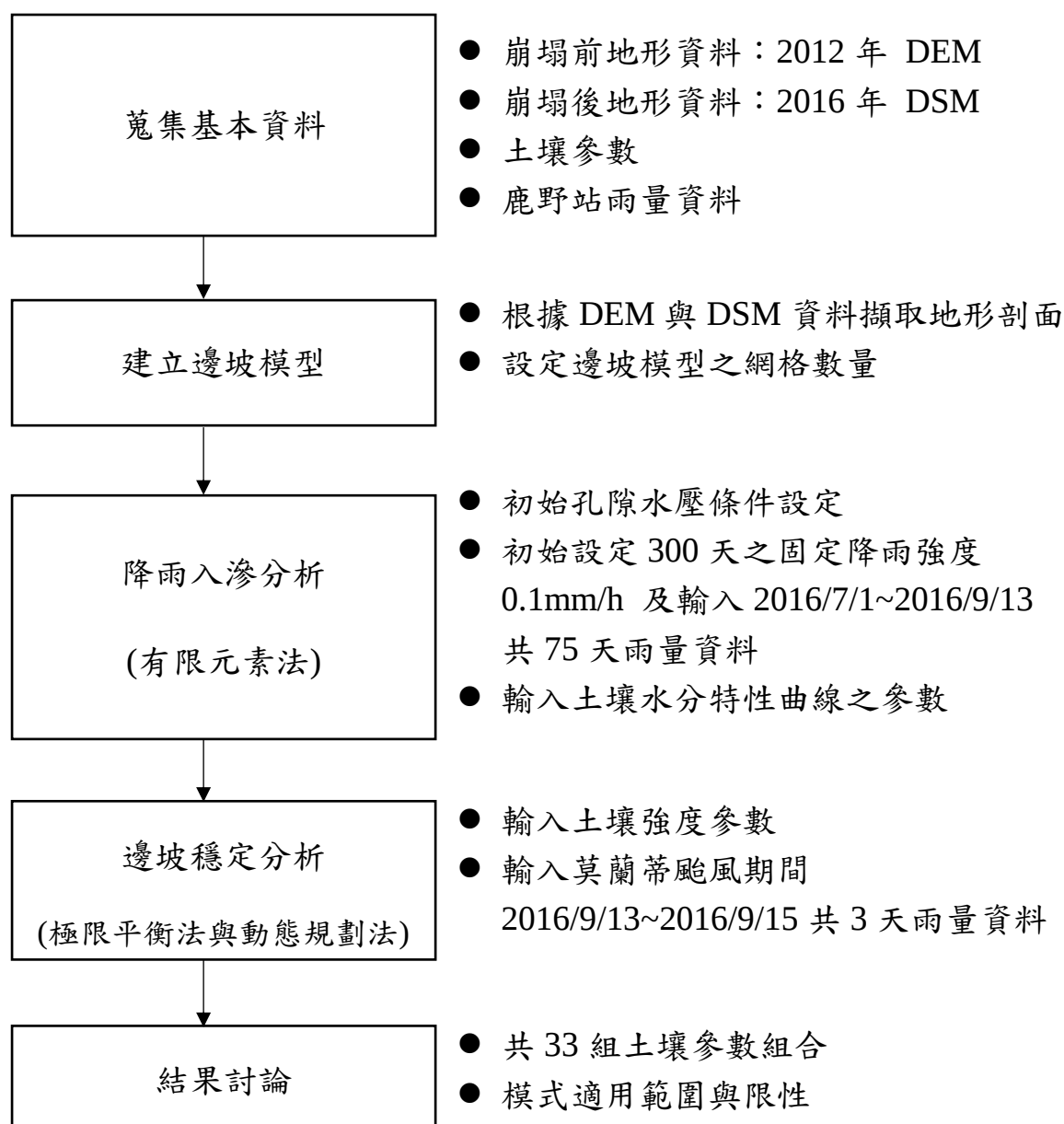


圖 4-36 研究流程圖

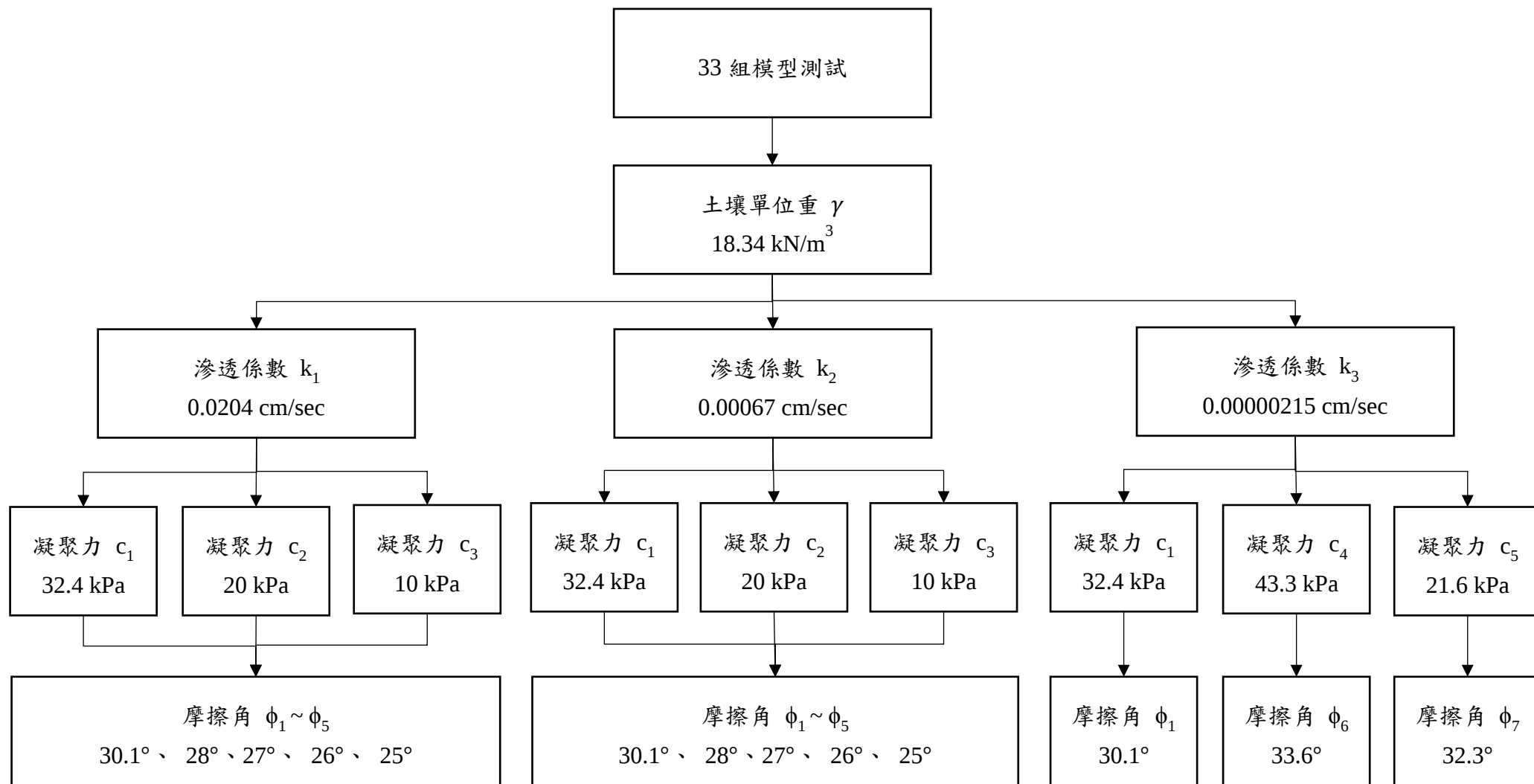


圖 4-37 土壤參數測試流程圖

四、分析成果

表 4-22 彙整 33 組土壤參數測試結果，其變數為 3 組滲透係數、5 組土壤凝聚力以及 7 組土壤摩擦角，而定數為基岩位置(如圖 4-35)與降雨資料。由於 IRIS 模式採用極限平衡法進行邊坡穩定分析，輸出的結果係為可能發生之滑動面，即最小安全係數發生位置，因此檢核崩塌與否的依據為安全係數小於 1。另一方面，IRIS 模式根據歷史雨量資料來模擬崩塌發生時間。雨量資料的起始點，即發生時間之基準值為 2016 年 9 月 13 日 23 時，此時的發生時間設定為 0 min；而實際崩塌發生時間為 15 日 4 時，此時發生時間為 1740 min；當程式模擬至雨量資料結束時，IRIS 模式將停止計算並回傳最小安全係數之可能滑動面。

滲透係數分成 3 組測試，分別為高度透水性($k_1=0.0204$ cm/s)、中度透水性($k_2=0.00067$ cm/s)與低度透水性($k_3=0.00000215$ cm/s)三種狀態。在 IRIS 模式的降雨入滲模擬初始孔隙水壓階段，僅 k_3 組無法收斂，導致後續的邊坡穩定分析階段無法執行，因此只探討高度透水性與中度透水性對於破壞面之影響性。 k_1 以及 k_2 群組下各有 15 種 c 、 ϕ 值組合，其中， k_1 群組中只有 6 種組合之安全係數小於 1， k_2 群組中有 7 種組合之安全係數小於 1，其物理意義在本模式中為發生崩塌現象。

表 4-22 土壤參數測試結果

編號	項目	k_s (cm/s)	c (kPa)	ϕ (Degree)	崩塌	發生 時間 (min)	安全 係數	水含量 (m^3/m^3)
1	$k_{1C1\phi_1}$	0.0204	32.4	30.1	N	-	1.269698	1669.123
2	$k_{1C1\phi_2}$			28	N	-	1.191982	1669.123
3	$k_{1C1\phi_3}$			27	N	-	1.156046	1669.123
4	$k_{1C1\phi_4}$			26	N	-	1.120746	1669.123
5	$k_{1C1\phi_5}$			25	N	-	1.086046	1669.123
6	$k_{1C2\phi_1}$		20	30.1	N	-	1.139362	1669.123
7	$k_{1C2\phi_2}$			28	N	-	1.061861	1669.123
8	$k_{1C2\phi_3}$			27	N	-	1.025918	1669.123
9	$k_{1C2\phi_4}$			26	Y	2830	0.998577	1670.981
10	$k_{1C2\phi_5}$			25	Y	2540	0.999402	1675.286
11	$k_{1C3\phi_1}$		10	30.1	N	-	1.038067	1669.123
12	$k_{1C3\phi_2}$			28	Y	2610	0.999001	1676
13	$k_{1C3\phi_3}$			27	Y	2240	0.999945	1664.818
14	$k_{1C3\phi_4}$			26	Y	1760	0.999594	1664.893
15	$k_{1C3\phi_5}$			25	Y	0	0.979508	1530.951
16	$k_{2C1\phi_1}$	0.00067	32.4	30.1	N	-	1.293139	1686.68
17	$k_{2C1\phi_2}$			28	N	-	1.222775	1686.68
18	$k_{2C1\phi_3}$			27	N	-	1.185549	1686.68
19	$k_{2C1\phi_4}$			26	N	-	1.148983	1686.68
20	$k_{2C1\phi_5}$			25	N	-	1.113038	1686.68
21	$k_{2C2\phi_1}$		20	30.1	N	-	1.097589	1686.68
22	$k_{2C2\phi_2}$			28	N	-	1.031696	1686.68
23	$k_{2C2\phi_3}$			27	N	-	1.001226	1686.68

24	$k_2C_2\phi_4$	0.00000215		26	Y	2230	0.999047	1685.295
25	$k_2C_2\phi_5$			25	Y	2490	0.999629	1682.056
26	$k_2C_3\phi_1$		10	30.1	Y	2320	0.998701	1682.003
27	$k_2C_3\phi_2$			28	Y	1810	0.999934	1681.055
28	$k_2C_3\phi_3$			27	Y	1560	0.999669	1675.314
29	$k_2C_3\phi_4$			26	Y	0	0.969451	1629.751
30	$k_2C_3\phi_5$			25	Y	0	0.931346	1629.751
31	$k_3C_1\phi_1$	0.00000215	32.4	30.1	Y	0	0.901598	1880.564
32	$k_3C_4\phi_6$		43.3	33.6	N	-	1.076773	1769.023
33	$k_3C_5\phi_7$		21.6	32.3	Y	0	0.830493	1880.564

(一)滲透係數之影響

由 33 組模型中挑選出安全係數小於 1，並濾除崩塌發生時間為 0 之組數，結果顯示於圖 4-38。在 k_1 高度透水性群組中，發生崩塌的組合為 $k_1C_2\phi_4$ ($c=20$ kPa, $\phi=26^\circ$)、 $k_1C_2\phi_5$ ($c=20$ kPa, $\phi=25^\circ$)、 $k_1C_3\phi_2$ ($c=10$ kPa, $\phi=28^\circ$)、 $k_1C_3\phi_3$ ($c=10$ kPa, $\phi=27^\circ$)、 $k_1C_3\phi_4$ ($c=10$ kPa, $\phi=26^\circ$)以及 $k_1C_3\phi_5$ ($c=10$ kPa, $\phi=25^\circ$)；在 k_2 中度透水性群組中，發生崩塌的組合為 $k_2C_2\phi_4$ 、 $k_2C_2\phi_5$ 、 $k_2C_3\phi_1$ 、 $k_2C_3\phi_2$ 、 $k_2C_3\phi_3$ 、 $k_2C_3\phi_4$ 以及 $k_2C_3\phi_5$ 。雖然 $k_1C_3\phi_5$ 、 $k_2C_3\phi_4$ 與 $k_2C_3\phi_5$ 發生崩塌，但基於崩塌發生時間為 0，即為在前期降雨入滲階段已經破壞，並非莫蘭蒂颱風期間造成的邊坡破壞，故將其視為失效之組合，不納入圖 4-38 崩塌發生時間之討論。由圖 4-38 中 k_1 與 k_2 之趨勢線顯示可知，在相同土壤凝聚力與摩擦力

組合但不同滲透係數之條件下， k_1 趨勢線均高於 k_2 趨勢線，且呈現方式近乎平行分佈，即高度透水性群組發生崩塌時機晚於中度透水性群組，故可推論滲透係數在 IRIS 模式中的主要影響性為崩塌發生時間。

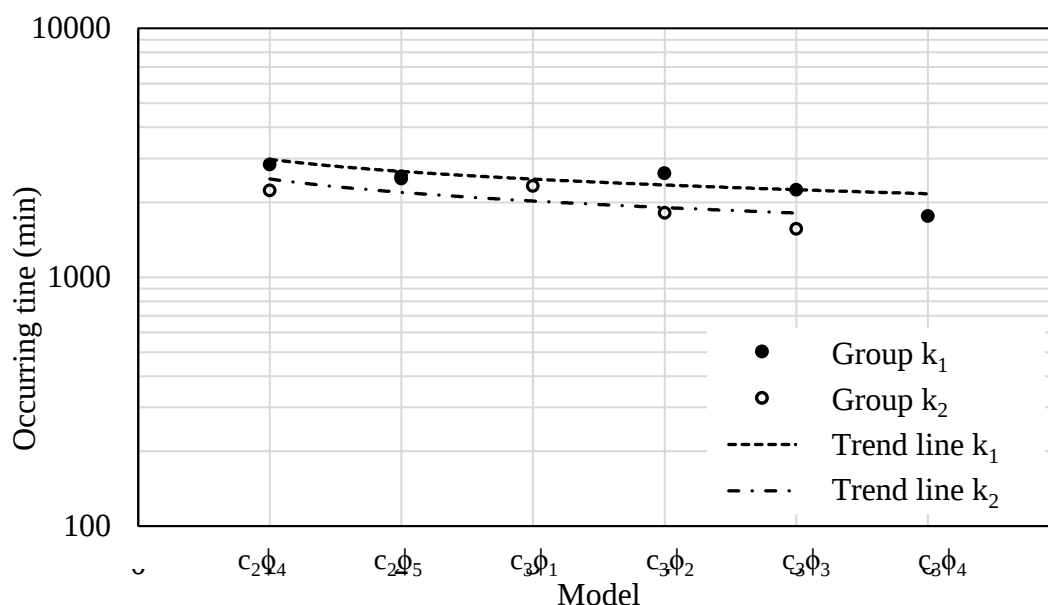
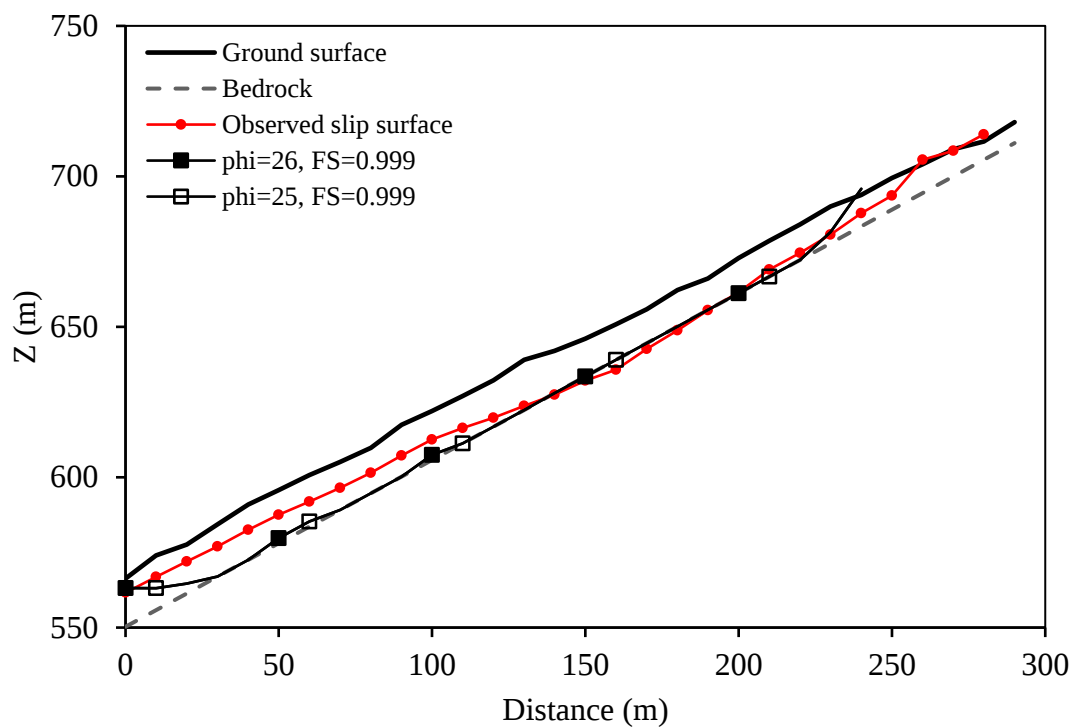


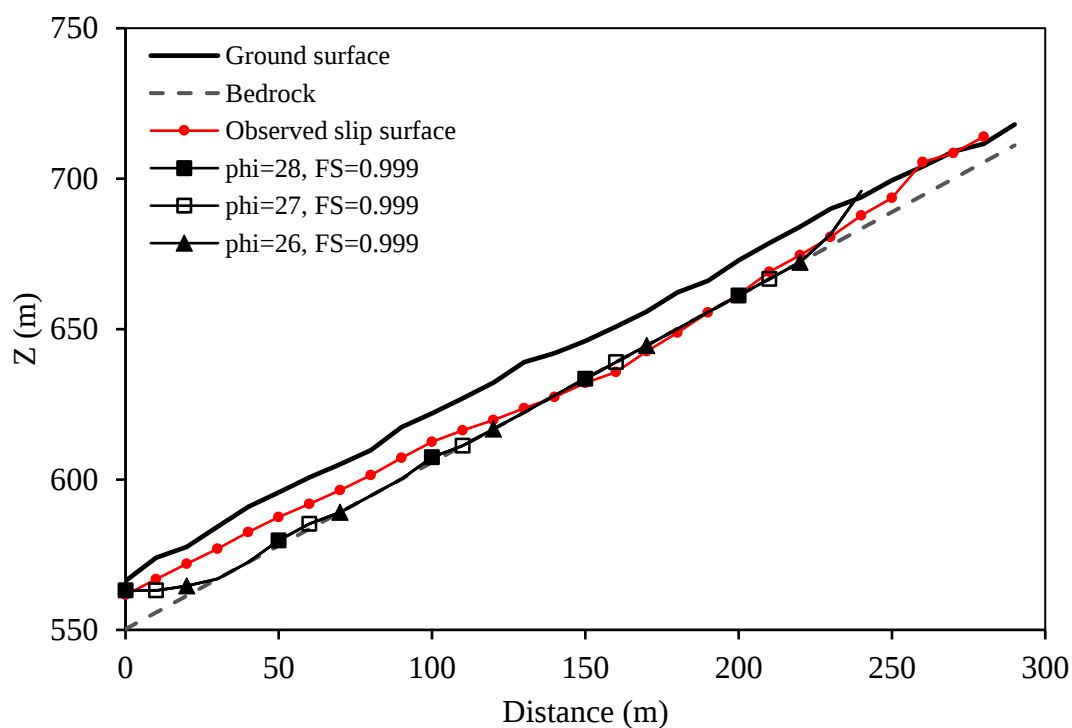
圖 4-38 已崩塌組數之崩塌發生時間

(二) 土壤強度之影響

圖 4-39 與圖 4-40 為高度透水性 k_1 與中度透水性 k_2 條件下不同土壤強度之崩塌滑動面。由模擬結果看出，無論土壤參數如何變化，高度透水性之坡面崩塌規模均呈現一致(如圖 4-39)。然而當透水性低時(如圖 4-40)，坡面開始出現小規模崩塌，且隨著土壤凝聚力與土壤摩擦角愈小時，崩塌規模逐漸愈大。圖 4-40 均顯示小規模崩塌發生在坡面上方，係因為上方崩積土層厚度較下方厚度薄，土體中的水份較容易積蓄，導致上方土層較早達成飽和狀態，進而發生崩塌現象。

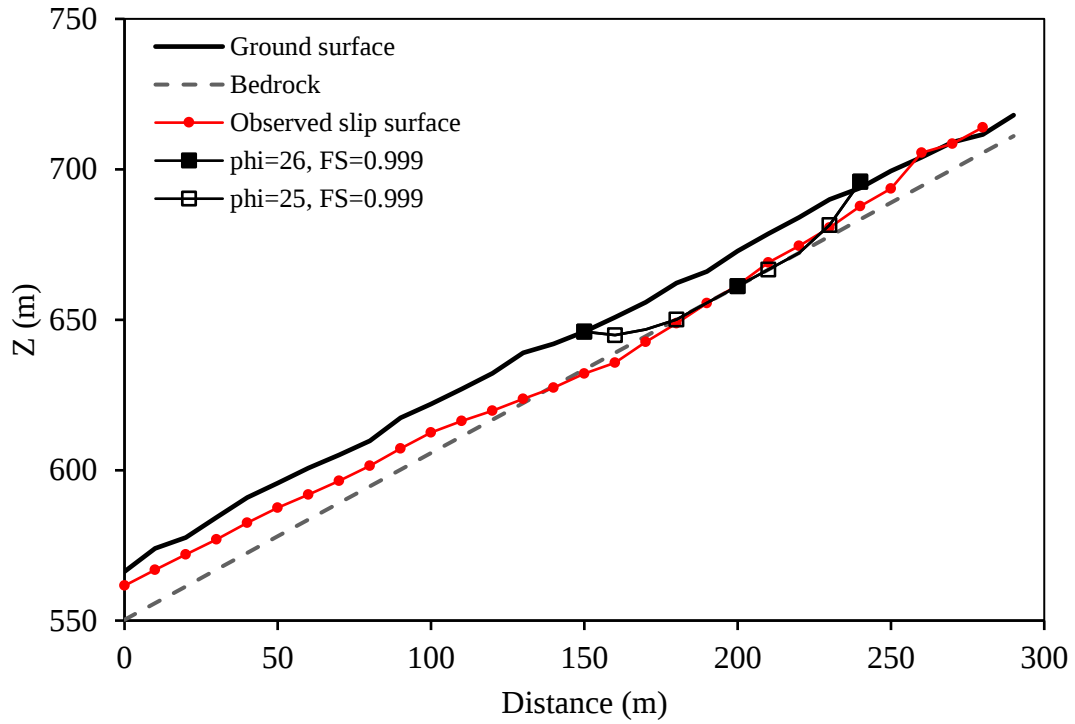


(a) $k_1=0.0204 \text{ cm/s}$, $c_2=20 \text{ kPa}$

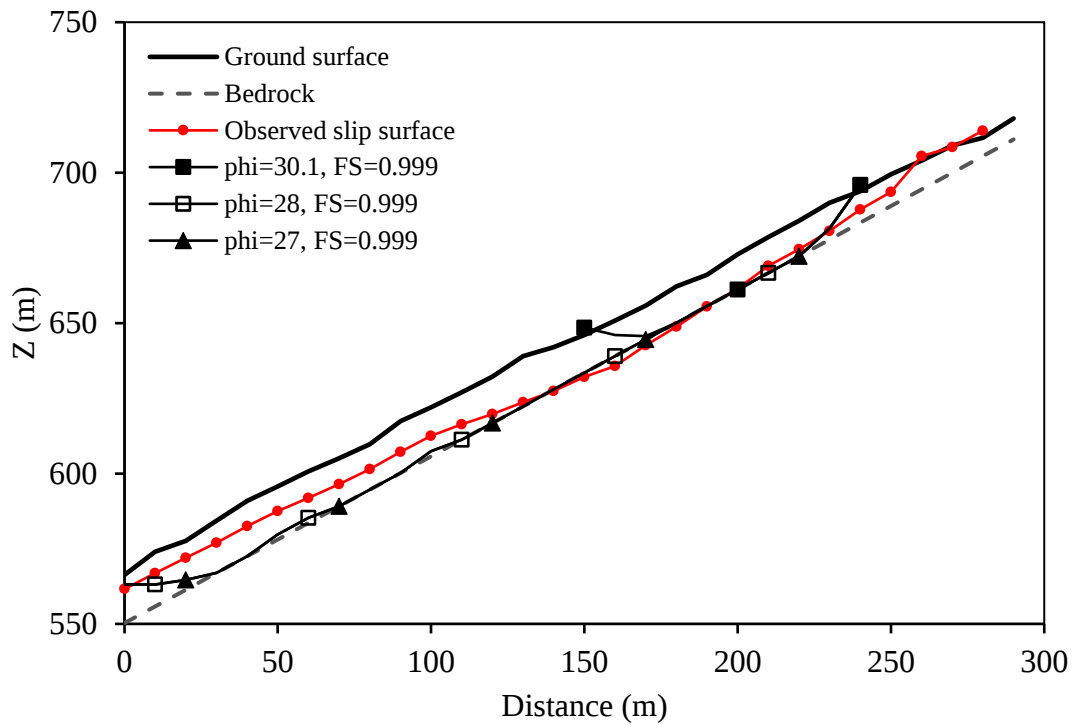


(b) $k_1=0.0204 \text{ cm/s}$, $c_3=10 \text{ kPa}$

圖 4-39 高度透水性下不同土壤強度之崩塌滑動面



(a) $k_2=0.00067$ cm/s, $c_2=20$ kPa



(b) $k_2=0.00067$ cm/s, $c_3=10$ kPa

圖 4-40 中度透水性下不同土壤強度之崩塌滑動面

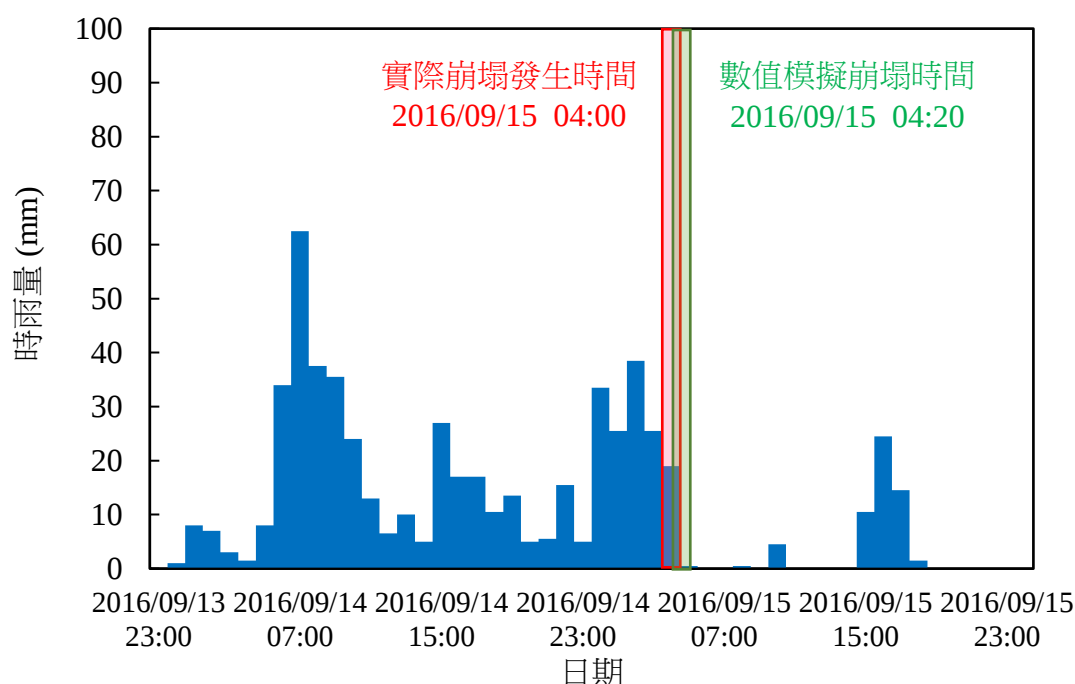


圖 4-41 崩塌模擬時間與實際發生時間($k_1c_3\phi_4$)

土壤取樣點分佈如圖 4-30 (a)與圖 4-31 (a)所示，其位置大多位於土石流堆積區，與本研究分析範圍位於土石流發生區並不一致，空間差異性可能導致 IRIS 模型產出的結果與現實狀況不同，因此本研究首先以試驗所得之土壤參數（即 $k_1c_1\phi_1$ 、 $k_2c_1\phi_1$ 、 $k_3c_1\phi_1$ 、 $k_3c_4\phi_6$ 與 $k_3c_5\phi_7$ ）為基準進行模擬，得出結果無發生崩塌現象，再經由反算分析得出最接近實際崩塌時間之土壤參數組合為 $k=0.0204 \text{ cm/s}$ ， $c=10 \text{ kPa}$ ， $\phi=26^\circ$ ，其崩塌滑動面如圖 4-39(b)，崩塌發生時間 $t=1760 \text{ min}$ 如圖 4-41 所示。除了上述原因之外，IRIS 模式之假設亦可能導致模擬結果與實際情形不一。IRIS 模式的限制與假設如下：

1.網格數量 <2000 ，x 方向的網格數 <200 個

運用在大範圍崩塌案例中，因網格數量的限制導致網格尺寸過大，雖然能降低分析時間，但在降雨入滲階段以及邊坡穩定階段之解算較不精細，導致分析結果與實際情形有所出入。

2.FS 小於 1 時停止計算，無法檢視滑動面是否繼續發展

如圖 4-40 中發生在坡面上方的小規模崩塌，無法檢視是否持續發展成大規模崩塌。

3.無法得知邊坡內部應力應變分佈狀態

IRIS 模式係採用極限平衡法進行邊坡穩定分析，相較於現有的分析軟體中，如有限元素法(Finite element method)與有限差分法(Finite-difference method)等，無法模擬隨時間推移過程中，邊坡的位移量變化，亦無法觀察土體內的應力變化。

4.假設基岩為不透水層

5.適用於淺層崩塌，且土壤層數限制三層

大規模崩塌或深層崩塌發生的原因，除了降雨入滲造成的影響外，亦與地質構造、節理、裂縫或岩體長期變形有關(Tsu et al, 2011)，惟 IRIS 模式僅探究降雨入滲造成土體崩塌，因此較適用於淺層崩塌。

6.採用日本常用的土壤水分特性曲線(SWCC)

7.DEM 與 DSM 間的時間差可能發生小規模崩塌事件

災害發生前與發生後的數值地表模型之時間間隔通常以年為單位，而這期間並無針對現地進行調查，故無法得知是否發生小規模崩塌事件。

除了上述的限制與假設之外，IRIS 模式亦有分析時間快速、自行研發而零成本之優點。惟限制與假設條件眾多，IRIS 模式應較適用於快速初步評估大規模崩塌潛勢之方式。另外，本章節僅針對土壤強度參數、滲透係數為變數進行探討，後續可再加入土壤水分特性參數、基岩位置、土壤層數、邊坡模型幾何條件等變數進一步討論。

五、小結

(一)IRIS 模式採用 2012 年內政部拍攝之 1m 網格數值高程模型 (DEM)建立邊坡幾何地形模型，並以 2016 年水土保持局進行無人載具(Unmanned Aerial Vehicle)調查所得之數值地表模型 (DSM)作為崩塌後之滑動面，再輸入歷史雨量資料進行降雨入滲邊坡穩定分析。驗證方法其一為預測最小安全係數之滑動面與災後 DSM 進行比較，其二為崩塌發生時間。

(二)由於本研究分析範圍與土壤取樣點位置不一致，其空間差異性可能導致 IRIS 模型產出的結果與現實狀況不同，因此以試

驗所得之土壤參數為基準進行模擬，共 33 組土壤參數組合，再經由反算分析得出最接近實際崩塌時間之土壤參數組合為 $k=0.0204 \text{ cm/s}$ ， $c=10 \text{ kPa}$ ， $\phi=26^\circ$ ，崩塌發生時間 $t=1760 \text{ min}$ 。

(三)由 33 組模型中挑選出安全係數小於 1，並濾除崩塌發生時間為 0 之組數進行參數分析，結果顯示滲透係數於 IRIS 模式為影響崩塌發生時機之關鍵，即高度透水性試驗群組發生崩塌時機較晚於中度透水性試驗群組。

(四)模擬結果指出崩塌規模之大小與土壤強度參數高度相關，在低度透水性之條件下，小規模崩塌發生在坡面上方，係因為上方崩積土層厚度較下方厚度薄，土體中的水份較容易積蓄，導致上方土層較早達成飽和狀態，且隨著土壤凝聚力愈小、土壤摩擦角愈小時，崩塌規模逐漸愈大。

第五章 土砂防災研究發展議題研擬

水土保持局為山坡地水土保持中央業務主管機關，負責全國水土保持相關政策之研擬與推動，歷年來對相關業務的技術與研究發展，投入大量的預算進行委託辦理及研究等業務，對於提昇國內水土保持領域產官學研的發展，扮演重要角色。當極端氣候導致天然災害頻繁，業務機關所面臨的災害影響範圍及複雜程度遠超過以往，同時，社會形態改變以及組織內部環境限制，僅憑藉著過去的技術與經驗已無法因應目前與未來的挑戰。

因此，研究團隊與水土保持局技術研究發展小組於 105 年 10 月提出「水土保持技術研究發展規劃與建議」中，針對因應災害科學研究發展進行深入的剖析，將發展趨勢劃分為策略與機制、工程技術、軟體防災對策、管理與法規、基礎調查與基礎研究等六個面向以及 24 個工作方針，歷經水土保持局內多次溝通與討論，為落實研究發展之建議與推展，於今年度邀請水土保局各業務單位同仁進行 3 次「水土保持相關研究與技術發展」工作會議凝聚共識，以研擬土砂防災研究未來發展議題，相關會議日期、參與人員及摘要，如表 5-1。本年度工作項目以各業務組之業務項目為撰寫主軸，以下依據會議結果彙整近期規劃發展的業務項目進行說明之。

表 5-1 水土保持相關研究與技術發展工作會議歷程表

日期	參與單位	參與人次	會議摘要
106 年 08 月 31 日	綜合企劃組 保育治理組 監測管理組 防災中心 技研小組	16	1.落實委辦計畫類別其程控管。 2.強化各業務組與分局間之合作與分工。 3.以工作圈的方式強化跨組協作。
106 年 09 月 18 日	綜合企劃組 保育治理組 監測管理組 防災中心 技研小組	18	1.定義水保局業務產出成果以分類方式管理，暫定為核心圖資及核心基本資料兩類。
106 年 10 月 05 日	綜合企劃組 保育治理組 監測管理組 防災中心 技研小組	18	1.初步取得各業務組針對業務執行相關研究與技術發展之共識。 2.依據會議結論進行整合為技術與研究發展網絡圖。

一、綜合企劃組

將未來業務執行分類為數位水保、系統平台、教育推廣與宣導及綜合企劃等四大業務主軸，如圖 5-1，其中，「數位水保」項目中以資料整合、標準化為主，收集高解析衛星影像及基礎圖資進行圖台整合，並藉由行動化數位服務提昇資料使用率。「系統平台」項目中，可分為圖資管理系統及行政輔助系統兩大類，圖資管理系統由多尺度影像整合平台、UAV 空拍檢核平台及大規模崩塌成果平台等三項展示平台所組成，至於行政輔助系統則包含全局所使用之行政管理、公務預

算及電子圖書知識庫等系統精進與維護計畫。「教育推廣與宣導」項目包含，媒體宣導、出版品、教育推廣及場域建置等既有之對外業務宣導規劃。「綜合企劃」項目中，對局外業務主要規劃水土保持國際交流與新南向政策推動兩項預訂之業務項目，對局內業務則規劃 KPI 及管考機制為近期執行之業務重點。同時，訂定「水土保持專業職能學習」以規劃專業訓練計畫提昇核心能力，「精進空間資訊資料庫」以建立單一窗口管理核心圖資平台，亦為年度業務執行亮點。

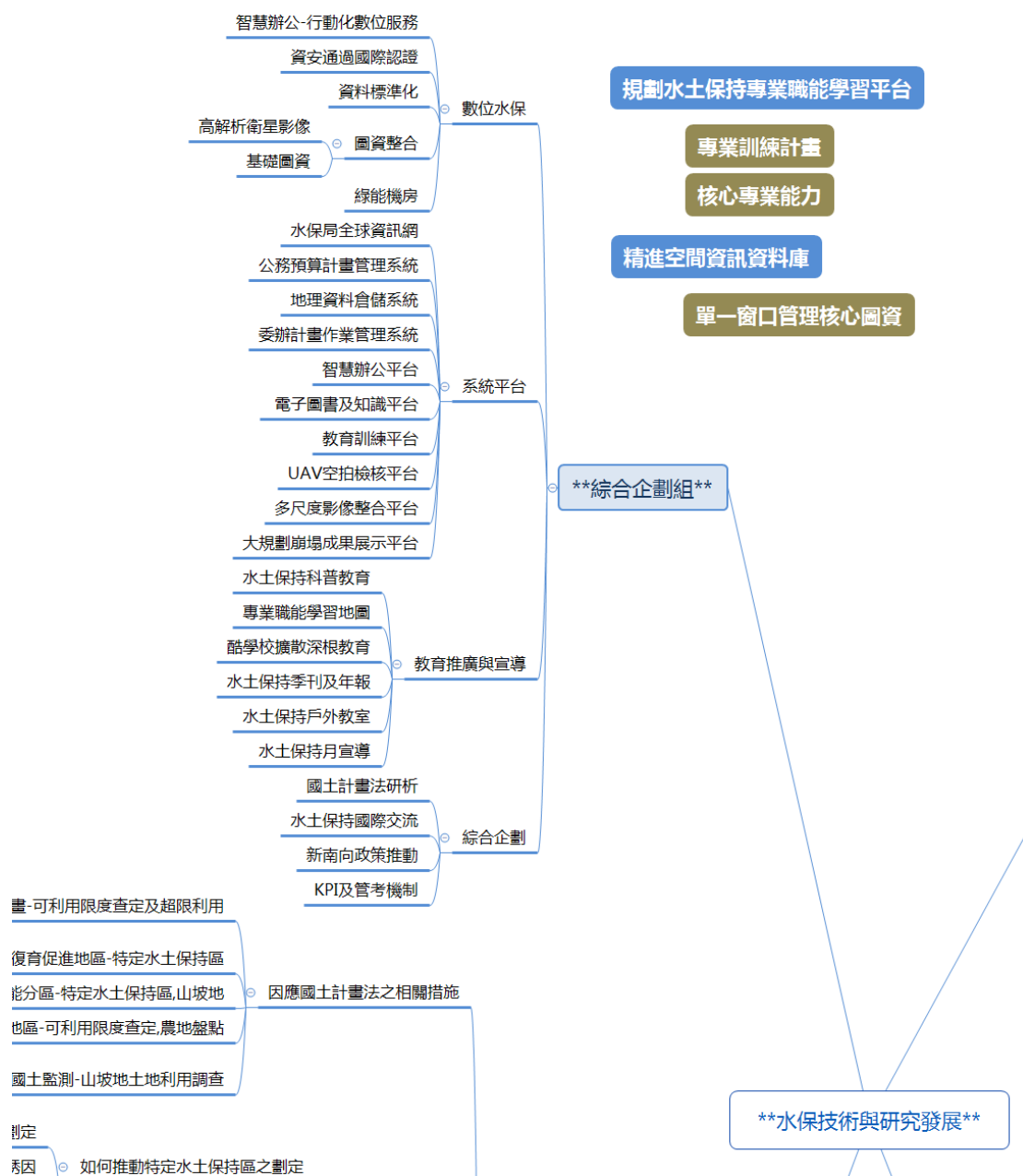


圖 5-1 綜合企劃組年度業務規劃網絡圖

二、監測管理組

將未來業務執行分類為因應國土計畫法之相關措施、特定水土保持區、山坡地土地可利用限度查定、山坡地範圍劃設、土地利用調查、水土保持技術規範法規研修、水土保持計畫監督管理、山坡地管理資訊系統、山坡地保育利用管理考核等，九大項業務類別，如圖 5-2。

其中，「因應國土計畫法之相關措施」包含針對特定區域計畫及農業發展地區進行可利用限度查定、超限利用與農地盤點等先期調查，以及相關因應措施規劃。「特定水土保持區」則以推動特定水土保持區之劃定為主軸，進行業務項目規劃，包含地籍圖資的更新、特定區劃定歷程系統建置以及踐行原基法之相關規定等因應措施。「山坡地土地可利用限度查定」則規劃資料庫的建置與精進更新等工作項目。「山坡地範圍劃設」則針對地籍圖、林地圖及山坡地範圍境界線之資料收集及更新，以做為山坡地範圍及檢討變更規定之研修。「土地利用調查」規劃利用航空照片、衛星影像及各目的事業主管機關之圖資等，相關基本資料建全土地利用分類標準化之目的。「水土保持技術規範法規研修」業務項目，則規劃水土保持設施調查評估方法、土壤沖蝕 RM、KM 值及設施透水性研究等研究計畫。「水土保持計畫監督管理」則透過施工中水土保持計畫實地訪查、專業訓練以及相關法令座談等工作完成此項業務。「山坡地管理資訊系統」針對水土保持法規解釋

系統、衛星影像變異查詢系統、查報取締系統等，進行更新及精進完成此項工作項目。「山坡地保育利用管理考核」則規劃利用行前說明會、各縣市實地考核評鑑及總考核會議完善本項業務，並利用考核績優機關頒獎提昇管理考核之績效。同時，提出「建置山坡地範圍劃定與查定管理系統及查定作業推動計畫」、「107 年度山坡地開發防災設計標準提昇及水土保持技術規範法規檢討」、「山坡地範圍境界線檢討及中部地區土地利用型態調查」、「特定水土保持區劃定及歷程查詢系統維運」、「大規模特定水土保持區調查規劃」等五大業務執行面向及亮點。

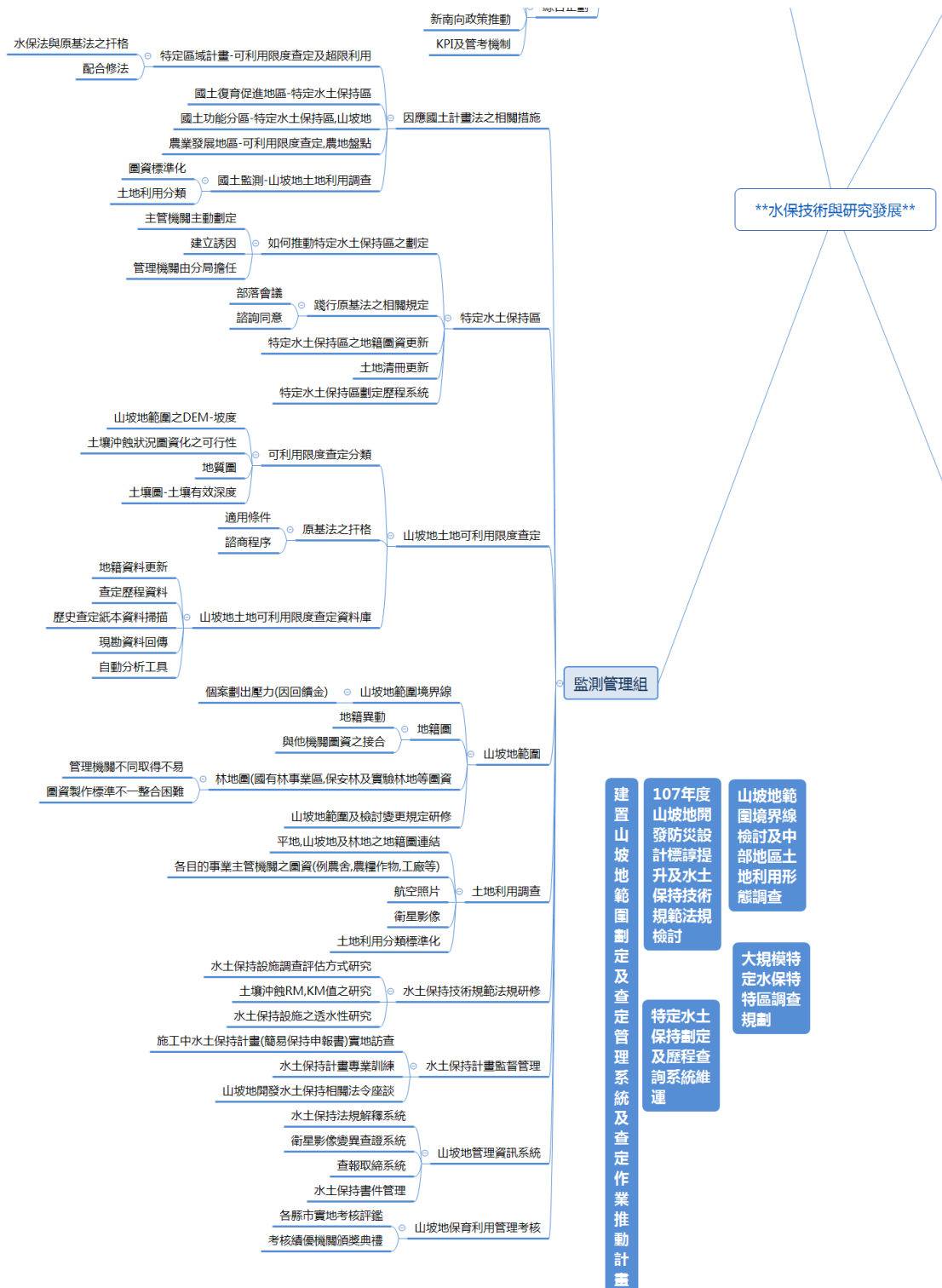


圖 5-2 監測管理組年度業務規劃網絡圖

三、土石流防災中心

將未來業務執行分類為土石流防災及大規模崩塌防災兩大類，其中，「土石流防災」業務項目主要包括土石流潛勢溪流調查、土石流防災整備、監測及預警等工作，如圖 5-3，其執行方式為，透過歷年及災害事件後影像、整備自主防災社區及疏散避難計畫，並利用全台土石流觀測站之監測成果及展示平台深化相關基礎研究，俾進一步提昇未來土石流警戒成效。「大規模崩塌防災」業務項目，則透過大規模崩塌潛勢區調查、大規模崩塌多元尺度監測、大規模崩塌防災應變及淺層崩塌等四大工作項目進行規劃及完善上述業務項目。同時，訂立年度業務執行亮點為「建立自主防災設趨之永續機制」、「健全土石流潛勢溪流管理」、「土石流觀測站功能提昇」、「提昇土石流警戒預報之準確性」、「大規模崩塌潛勢評估機制」以及「建構大規模崩塌多元監測平台」等六大業務目標。

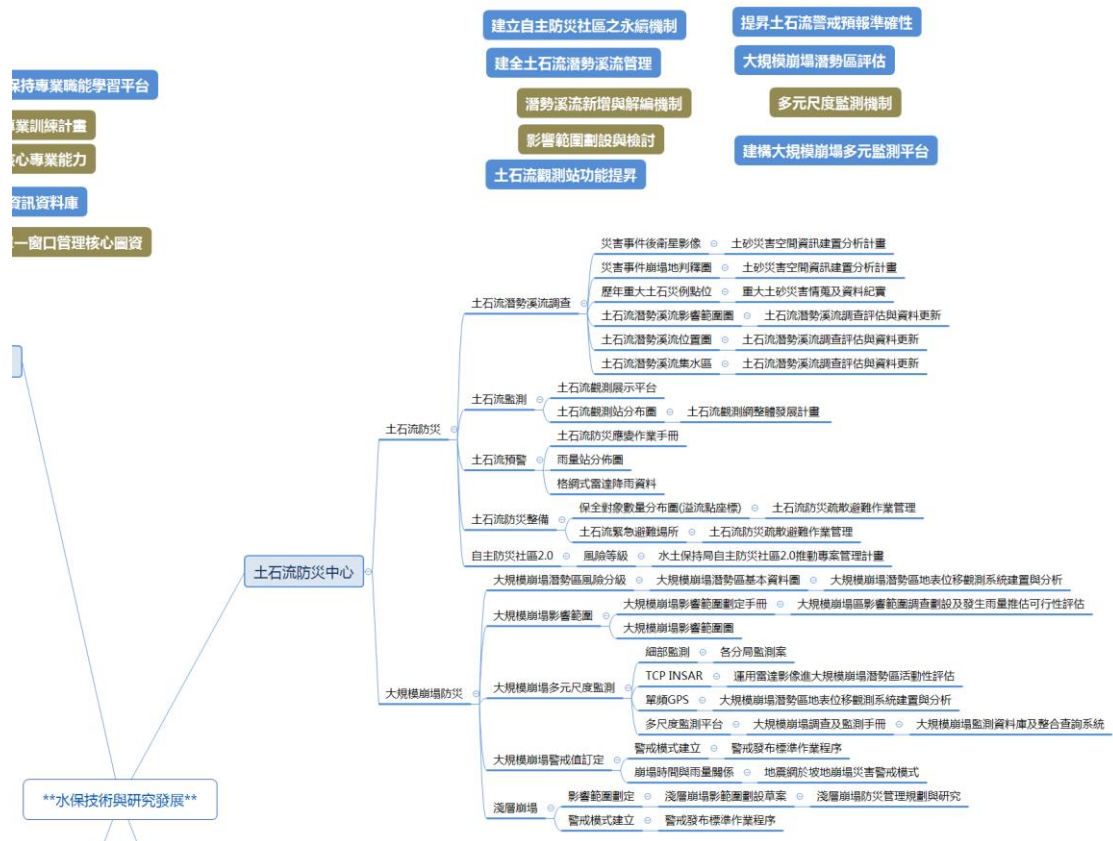


圖 5-3 土石流防災中心年度業務規劃網絡圖

四、保育治理組

將未來業務執行劃分為基礎資料建置、強化水庫集水區體質調查、建立土砂收支平衡管理模式健全集水區治理效益及工法改良等四大類，如圖 5-4。其中「基礎資料建置」針對構造物、環境及生態等變遷資料進行調查及更新，以作為後續相關計畫執行或研究分析之參酌。

「強化水庫集水區的體質調查」則針對崩塌地的變遷進行調查及分析，並進行集水區之崩塌耐受力與恢復力的評估。「建立土砂收支平衡管理模式健全集水區治理效益」則針對現行土砂運移推估模式，進行時間與空間尺度及構造物設置影響評估。至於，「工法改良」則以崩塌

地植生復育、可調控式防砂壩等工法，朝向減少對生態環境的衝擊並構築可供動植物棲息之生態多樣性空間為設計理念，進行工程設計、施工程序之研析與改良。同時，年度業務亮點為「全生命週期智慧化工程管理」、「保育治理工程暨生態資訊整合及民眾參與平台」以及「土砂平衡智慧管理」等三大業務執行目標。

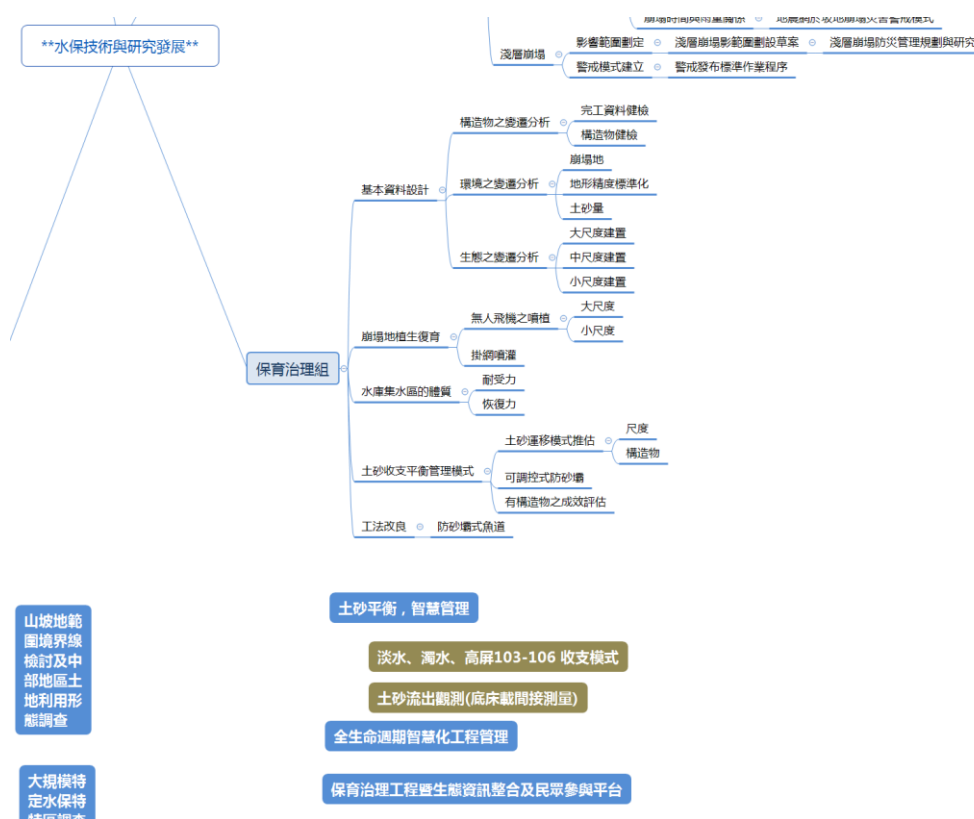


圖 5-4 保育治理組年度業務規劃網絡圖

上述各組之未來業務規劃及執行細部項目，綜整為水土保持技術與研究發展網絡圖，如圖 5-5 所示。

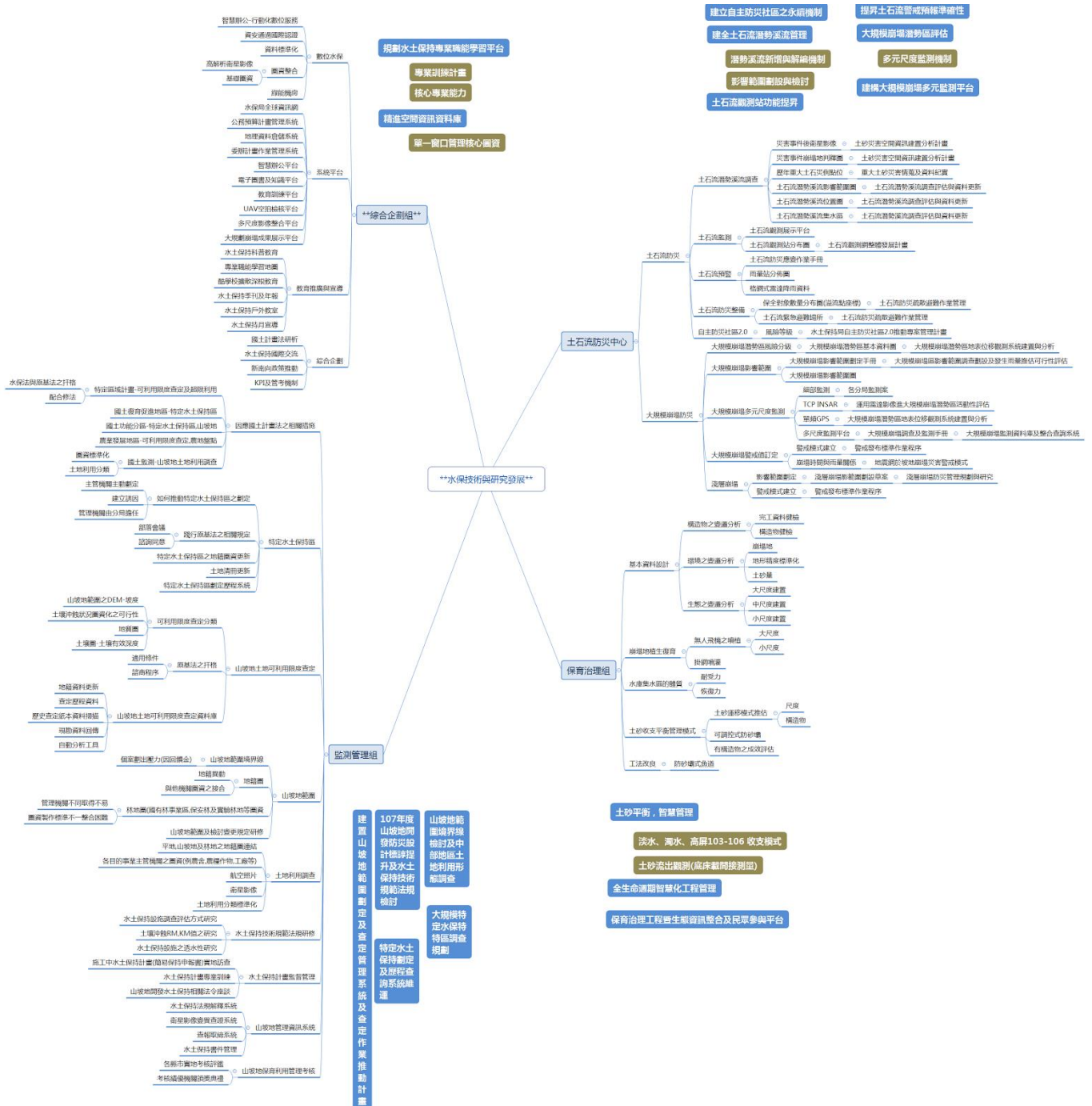


圖 5-5 水土保持技術與研究發展網絡圖

第六章 結論與建議

依據本年度工作計畫項目執行成果綜整如下：

第一節 結論

一、國內外水土保持技術與研究發展趨勢報告

台灣因環境地質特殊加上氣候等因素，往往面臨單一或多種天然災害同時之衝擊，其中，又包含大規模崩塌及其導致難以預期之複合型土砂災害。面臨這樣複雜且瞬息萬變的情境，水土保持局可嘗試導入智慧防災的元素透過物聯網、大數據、雲端系統、互聯網、智慧機械等新型態科技為基礎，利用數據匯流串接各個產業間每一個關鍵環節，打破產業間的界線與過去不易完成之任務。同時透過資料盤點、資訊收集了瞭解目前國內所面臨之困境及國內外可應用之新技術或新型態工具，並參考國內外相關技術、法規、政策等文獻進行研析，了解鄰近國家因應氣候變遷等全球趨勢所訂定之對策，希望能依循此脈絡做為提升土砂防災能力之策略。故針對「營建自動化技術」、「工程維護管理及延壽」、「跨領域技術應用於水土保持」、「新型態技術的應用」以及「防災對策」等各領域之技術發展與研究趨勢提出建議。

二、歷年完成之防災技術與研究成果盤點

本研究共收集自 97 年度至 105 年度共 1369 件委辦及研究案件

成果，為有效找出各類後續有增值應用可能的資料，本研究設計 30 項細部關鍵項目，依據其盤點結果提出下列建議：

(一)設計成果產出檢核紀錄表，並於提交成果時填寫、校對。

透過盤點發現，歷年來的計畫有豐富的成果產出，並具備延續性可供未來參考使用，但是，類似的內容如鑽探資料、調查資料、監測資料等，因不同委辦廠商，所以成果展示的格式不統一，建議可以針對水土保持局常見業務內容或圖資，規劃統一的資料產出格式，並設計相關基本成果資料紀錄表，於每個計劃結案時能夠確實填寫，並於每年度進行統整，讓每一本計畫書都能保有其價值，隨時能快速搜尋到相關資料。

(二)定期檢視成果資料統整，發掘計畫成果可增值用途

(三)建議透過滾動式檢討，調整水土保持局中、長期規劃，並藉由歷年計畫成果能發掘其新的議題與重要參考資料，如監測資料與調查資料的大數據分析，特殊技術重新檢視及發展，定期的盤點與檢討的過程，將可使力來的成果與產出，轉化為有效的資料，進而形成知識，並透過更多的討論與增值形成機關與單位的智慧。

三、土砂災害模擬相關模式測試與分析

(一)台東紅葉崩塌土砂量評估及落石安全評估

- 1.利用無人飛行載具進行大範圍的影像追蹤紀錄，並以地面控制點提高測量精度，使崩塌區域的細部變化能更精確呈現，如本研究之追蹤調查發現原崩塌區上方產生新的張力裂縫，此崩塌範圍有擴大或持續發展的趨勢。
- 2.利用正射影像圈繪崩塌發生區域之範圍，並以此為依據進行崩塌前、後地表高程差的比較，兩者之差異值即為該區域崩塌量。此演算概念為，當崩塌發生時此區域的地表已裸露且無植被存在，此時崩塌區域的數值地表模型(DSM)等同於數值高程模型(DEM)，此時為直接呈現災後地形高程，因此，可利用崩塌範圍之災前(DEM)與災後(DSM)進行高程比較即為所求。
- 3.利用數值分析程式 RocFall 進行落石運動軌跡分析，依據邊坡地形坡度預測 4 個可能之運動路徑，並假設失去基礎支撐及地震作用的影響兩項因素，進行落石穩定分析，評估各路徑的墜落終點及發生機率，同時，推測最大發生機率與損害程度最大之運動軌跡。

(二)南投縣中寮鄉粗坑吊橋上游開口壩之防砂效益評估

由於河流挾砂能力、上游來砂量，以及河道抗沖性互相作用，野溪帶面臨河道變化劇烈及沖淤互現的現象，本研究運用 CCHE2D 模式模擬粗坑吊橋上游開口壩之防砂效益，模擬結果顯示：

- 1.由於河道轉彎造成右岸集中侵蝕刷深之狀況，可藉由開口壩調整流況避免河岸因掏刷而崩塌、降低河床掏刷危害、穩定河床流心等成效。
- 2.經過 CCHE 模擬，此河段設置開口壩可使最大流速下降約 22.28%，且有效抑止紊亂的流況避免超臨界流的現象發生。同時，故開口壩可調節泥沙輸送的能力在此得以展示。
- 3.模擬河段治理前土砂侵蝕量達到 48,720.52 立方公尺，遠大於沉積量，當發生 50 年洪峰流量之洪水事件時，預估產生 44,522.74 立方公尺土砂侵蝕量，若以河段之平均河寬及模擬長度討論，此沖刷量可能造成平均刷深 6.54 公尺。但治理後利用開口壩攔蓄泥砂的能力，使河道內土砂運移由侵蝕轉淤積，整體淤積量約為 20,282.5 立方公尺，其主要攔砂功能集中在壩體上游，且壩體下游於治理前之侵蝕量大於沉積

量約 6355.14 立方公尺，但治理後整體河道輸砂現象已呈現淤積趨勢。

4.利用 CCHE2D 模式，可模擬河道內之水深、流速與底床沖淤變化之分佈，並且進一步評估攔砂效益以做為未來相關單位之參考。期望未來利用不同水保構造物之工程佈設效益分析，提升工程施作的品質藉以降低風險。

(三)台東紅葉崩塌地之滑動規模與發生時間預測模式

1.本研究使用 IRIS 降雨-入滲-崩塌模式進行分析，並採用 2012 年內政部拍攝之 1m 網格數值高程模型(DEM)建立邊坡幾何地形模型，同時以 2016 年水土保持局進行無人載具(Unmanned Aerial Vehicle)調查所得之數值地表模型(DSM)作為崩塌後之滑動面，再輸入歷史雨量資料進行降雨入滲邊坡穩定分析。驗證方法其一為預測最小安全係數之滑動面與災後 DSM 之崩塌地剖面進行比較，其二為模擬預測之崩塌發生時間是否與實際崩塌時間一致。

2.由於本研究分析範圍與土壤取樣點位置不一致，其空間差異性可能導致 IRIS 模型產出的結果與現實狀況不同，因此本研究以試驗所得之土壤參數為基準進行模擬，共 33 組土

壤參數組合，再經由反算分析得出最接近實際崩塌時間之土壤參數組合為 $k=0.0204$ cm/s， $c=10$ kPa， $\phi=26^\circ$ ，崩塌發生時間 $t=1760$ min，亦即 9 月 15 日 4 時 20 分。無論在滑動面之規模以及崩塌時間，IRIS 模擬之結果均與實際狀況相近。

3.由 33 組模型中挑選出安全係數小於 1，並濾除崩塌發生時間為 0 之組數進行參數分析，結果顯示滲透係數於 IRIS 模式中主要影響性為崩塌發生時間，即高度透水性群組發生崩塌時機晚於中度透水性群組。

4.模擬結果指出崩塌規模之大小與土壤強度參數高度相關，在低度透水性之條件下，小規模崩塌發生在坡面上方，係因為上方崩積土層厚度較下方厚度薄，土體中的水份較容易積蓄，導致上方土層較早達成飽和狀態，且隨著土壤凝聚力愈小、土壤摩擦角愈小時，崩塌規模逐漸愈大。

第二節 106 年度對外發表成果

本年度已完成兩篇期刊論文，分別為「Feng-Chi Huang, Yi-Hsuan Lee, Jiun-Ting Lin, Kuo-Wei Chen, Chen-Yu Chen, Kuo-Lung Wang, (2017). The Case Study for Evaluation of Landslides Volume and Moving Paths of Single Falling Rock. , Geotechnical Hazard Mitigations, 263-272」

以及「陳振宇、劉維則、許家祥 (2017)，使用 QPESUMS 雨量資料建立坡地災害降雨警戒模式，中華水土保持學報，48(1)，44-55」(本篇榮獲 106 年度論文獎)，另已完成 6 篇研討會論文，並發表於 106 年 12 月 2 日 2017 水土保持學術研討會暨論文宣讀會議，分別為：「應用無人載具進行崩塌地快速調查與土砂量推估-以國姓鄉武玄宮崩塌為例」、「土工織物應用於坡面抗沖蝕之效益評估」、「以 IRIS 模式模擬降雨入滲作用下之邊坡穩定分析-以紅葉村崩塌為例」、「HEC-RAS 於堰塞湖潰壩模擬之應用-以鹿谷小半天崩塌為例」、「改善多階加勁擋土結構受降雨入滲破壞之可行性分析」與「山區降雨災害熱區警戒模式初探」等 6 篇，如附錄一。

第三節 建議

一、持續針對國內外技術研究發展趨勢進行研析

隨著科技智慧製造時代的來臨，工業生產方式以物聯網、大數據、雲端系統、互聯網、智慧機械等新型態科技為基礎，利用數據匯流串接各個產業間的每一個關鍵環節，同時，強調跨領域及虛擬與真實場景的整合，並且打破公務部門與私人企業間的界限，產業間的疆界不再清晰，而是採用跨域、跨國合作與共享的方式，重新建構生產製造供需、分工價值。日本近期所提出的「i-Construction」此建設現場的

生產方式，正呼應了上述科技工業之發展趨勢。以下針對國內外技術及研究發展趨勢提出各項建議：

(一)「營建自動化」技術，成為國內外共同的趨勢。此項技術可提高施工效率及改善工程品質之設計、管理、工法、機具、材料等，其內容包括：建築資訊模型(BIM)、虛擬與擴充實境模擬(AR&VR)、機具自動化、工程材料智慧化、自動化監控系統、大數據分析、資訊科技創新應用、制定設施維護管理之制度與規範等。

(二)工程維護管理及延壽的定義在於以生命週期為導向（規劃、設計、施工到維護）之管理運作架構下，在各個階段獲得許多前置階段所傳遞之資訊，進而建立有效之管理策略，加強特定範圍之管理，以減少人力、物力、成本之花費。因此，對於工程延壽對策不單是技術上的提升，而是必須建構合理評估延壽需求方法，發展並健全延壽相關記錄。

(三)跨領域技術應用於水土保持之評估，例如大地測量所應用之遙測影像技術(InSAR、LiDAR、UAV、空中地球物理探測等)，而地質調查技術則包含：利用地球物理探測技術檢測物體之不同的物理量，再由變化量的差異間接推測工程可能面臨的

問題。另一具有發展性的技術為鑽探孔內探測技術，應用該項技術除了可檢視鑽孔品質外，主要可投入在水文地質調查、大地工程及環境工程評估或是地下資源探勘等。

(四)新型態技術的應用評估包含：3D 圖像應用於工程展示、教學及解說，另外透過視覺感官體驗技術(VR、AR、MR)，將能使資訊從二維展示推廣至三維體感互動，並在互動過程加強了環境資訊之印象，獲取比身處之空間更多的資訊，目前主要應用在區域體驗、各專業領域之教育宣導或訓練。其他相關之新型態技術如情境模擬互動遊戲、廣域通訊技術與疏散系統等。

(五)在防減災對策方面，針對國內外近期之防減災對策、災害潛勢之調查與評估方式，以及土砂災害之預警模式，分別進行精要的說明與剖析，期能作為後續提昇臺灣坡地防災能量的重要參據。此外，應持續並研析國內外有關環境敏感地區之管理及劃訂方式，其中國內以特定水土保持區、水庫集水區、土石流潛勢溪流、山坡地、地質敏感區等為主要探討對象，同時參酌日本及奧地利針對土砂災害潛勢區之劃設及管理方式。藉由了解及分析國內外法令與制度面設計之異同，將

有助於未來國土計畫法之實施與推動。

二、歷年委辦案件成果可延性建議

(一)本期的計畫擴大盤點的內容與涵蓋的時間範圍，初步將完整的報告與其相關成果產出做了一份紀錄，發現若能將每年超過百本的委辦及研究補助計畫之資料進行管理，除了將能夠讓每本報告的價值延續，並可使水土保持局內部各項資料蒐集平台能夠更有效率的使用。歷年成果中值得重新整理及加值的項目，如 UAV 的拍攝資料、光達產製的資料及遙測相關的圖資。在集水區資料調查之相關項目，如斷面樁設置資料、河道斷面量測、河床質調查、土壤力學實驗、鑽探相關資料，以及雨量、流量之重現期等水文資料或 GIS 圖資等紀錄如能有效整理及儲存，將可避免重複施作、浪費資源。至於，各項監測站之調查資料若能整合至目前監測站查詢平台，除單純的點位資料外，也應將不同時期之資料收錄其中，所以當進行災害相關調查時，將能更快找到過去的監測資料及資料變化歷程。此外，建議未來亦應將分佈在不同報告所進行的構造物調查、生態檢核表等成果納入工程管考系統或是治山防災集思網中，以有效管理與應用。另外針對特殊技術

與值得進入倉儲系統的圖資，針對其應用性、發展性來探討是否能在未來結合與使用。

本次盤點工作成果重點歸類如下，各類盤點項目後續需進一步檢核其資料的正確性，各個執行計畫針對同一調查項目要求程度不均，建議未來應該與各項業務單位討論相關資料產出之統一規範與格式，希望能有案件執行之標準化依循與成果產出之統一規格與資料格式化。

參考文獻

1. 中華民國交通部 (2009)。公路排水設計規範。臺北。
2. 林秉勳 (2016)。國土計畫法之推動與展望〔簡報〕。內政部營建署。
3. 內政部營建署 (2017)。國土計畫法重要工作辦理情形〔簡報〕。
4. 行政院農委會水土保持局 (2017)。國內外水土保持技術與研究發展趨勢。南投。
5. 行政院農委會水土保持局 (2016)。水土保持手冊 2017 年修訂版。南投。
6. 行政院農委會水土保持局 (2016)。野溪工程構造物效能提升計畫-以投嘉地區為例。南投。
7. 行政院農委會水土保持局 (2016)。重大土砂災害土壤參數資料建置成果報告。南投。
8. 行政院農委會水土保持局 (2016)。105 年度大規模土砂災害防災對策先期研究成果報告。南投。
9. 行政院農委會水土保持局臺東分局 (2016)。臺東縣延平鄉紅葉村崩塌地災後治理調查規劃期中報告。臺東。
10. 行政院農委會水土保持局 (2014)。水土保持技術規範。南投。

11. 行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
<https://246.swcb.gov.tw/>
12. 陳振宇、劉維則、許家祥 (2017)。使用 QPESUMS 雨量資料建立崩塌災害預警模式。中華水土保持學報，48 (1)，44-55。
13. 陳振宇、藤田正治、堤大三 (2014)。基岩位置及土層特性對降雨逕流與大規模崩塌之影響。中華水土保持學報，45 (4)，243-256。
14. 陳錕山 (2009)。衛星遙測台灣地區土壤含水量與降雨量之研究。中央氣象局。
15. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2007~2009)。美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究(1/3)~(3/3)。南投。
16. 經濟部 (2015)。活動斷層地質敏感區劃定計畫書-F0009 鹿野斷層。臺北。
17. 經濟部中央地質調查所 (2008)。五萬分之一臺灣區域地質圖臺東、知本圖幅及說明書。新北。
18. 經濟部中央地質調查所網頁 (2016)。地質資料整合資訊
<http://gis.moeacgs.gov.tw/>
19. 經濟部水利署水利規劃試驗所 <https://www.wrap.gov.tw/index.aspx>
20. 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2014)。深層崩壊対策技術に関する基本的事項。日本。

21. 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2014)。深層崩壊対策技術に関する基本的事項。日本。
22. 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 (2010)。大規模崩壊推測頻率地圖 <http://www.mlit.go.jp/common/000121614.pdf>
23. 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 (2010)。大規模崩壊遺跡密度地圖 <http://www.mlit.go.jp/common/000223656.pdf>
24. 岩手県農業研究センター環境部病理昆虫研究室
<http://www.jeinou.com/technology/2016/01/28/094000.html>
25. 堤大三、藤田正治、林雄二郎 (2007)。2005 年台風 14 号により大分県竹田市で発生した斜面崩壊に関する数値シミュレーション。水工学論文集, 51, 931-936。 (Tsutsumi, D., Fujita, M., and Hayashi, Y. (2007). "Numerical simulation on a landslide due to Typhoon 0514 in Taketa city, Oita prefecture." Proceedings of hydraulic engineering, 51. 931-936. (in Japanese))
26. 日本国土交通省 (2016)。i-Construction 營造現場の生産力革命。日本。
27. Baker, R. (1980). "Determination of the critical slip surface in slope stability computations." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 4(4), 333-359.
28. Feng-Chi Huang, Yi-Hsuan Lee, Jiun-Ting Lin, Kuo-Wei Chen, Chen-Yu Chen, Kuo-Lung Wang. (2017). "The Case Study for Evaluation of

- Landslides Volume and Moving Paths of Single Falling Rock.” 5th GEDMAR.
29. Istok, J. (1989). Groundwater Modeling by the Finite Element Method, Washington DC, American Geophysical Union.
30. Johanna Huang (2015)。荷蘭現代版紙上談兵：政策專家玩的治水桌遊 <http://www.seinsights.asia/article/3290/3271/3940>。
31. Kosugi, K.I. (1996). “Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties.” Water Resource Research, 32(9), 2697-2703.
32. Marinos, P and Hoek, E. (2000). “GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation.” Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne. 1422-1442.
33. Tsou, C.Y., Feng, Z.Y., and Chigira, M. (2011). “Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan.” Geomorphology, 127(3-4), 166-178.
34. Wu, W. (2001). CCHE2D sediment transport model (version 2.1). Technical Rep. of National Center for Computational Hydroscience and Engineering NCCHE-TR-2001-03, Univ. of Mississippi.
35. Wu, W. and Wang, S.S.Y. (2003). “Selection and evaluation of nonuniform sediment transport formulas for river modeling.” Proc. XXXth IAHR Congress, Thessaloniki, Greece.
36. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2004a). “Depth-averaged 2-D calculation of flow and sediment transport in curved channels,” Int. J. Sediment Res., 19(4), 241–257.

37. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2004b). "Depth-averaged 2-D calculation of tidal flow, salinity and cohesive sediment transport in estuaries," Intl. J. Sediment Res., 19(3), 172–190.
38. Wu, W., Shields, F. D., Jr., Bennett, S. J., and Wang, S. S. Y. (2005), "A depth-averaged 2-D model for flow, sediment transport and bed topography in curved channels with riparian vegetation, " Water Resources Research, AGU, 41, W03015.
39. Yamagami, T., and Ueta, Y. (1986). "Noncircular slip surface analysis of the stability of slopes-An application of dynamic programming to the Janbu method." Landslides, 22(4), 8-16.
40. Zhang, Y., & Jia, Y. (2009). CCHE-MESH 2D Structured Mesh Generator Users Manual--version 3. x. NCCHE-TR-2009-01, University of Mississippi.

附錄

附錄一、106 年度對外發表成果

The Case Study for Evaluation of Landslides Volume and Moving Paths of Single Falling Rock

5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (5th GEDMAR)

The Case Study for Evaluation of Landslides Volume and Moving Paths of Single Falling Rock

Feng-Chi Huang^a Yi-Hsuan Lee^a Jiun-Ting Lin^b Kuo-Wei Chen^a Chen-Yu Chen^a Kuo-Lung Wang^b

^a Research Technology Development Team, Soil and Water Conservation Bureau Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan (R.O.C)

^b Department of Civil Engineering, University of National Chi Nan, Taiwan (R.O.C)

E-mail: fcchuang@mail.swcb.gov.tw, limermaidvam@gmail.com, nokilin@gmail.com, ckw@mail.swcb.gov.tw, cychen59@gmail.com, kuolung@gmail.com

Abstract –

Landslides are natural evolution of topography. Since human behavior started reaching to mountain area, landslide disasters often occur and threaten people. The study uses the case of typhoon-Meranti-induced Hongye landslide in Taiwan on September 15th, 2016 to determine the landslide terrain feature, geological conditions, and disaster impact area by surveying the site for investigate and using the unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring. The UAV's aerial photos are used to build the 3D model, orthophoto and digital surface model (DSM). The landslide area can be drawn with the area orthophoto. Compare the digital terrain model before and after the landslide to evaluate the terrain change of slope and landslide volume. While surveying the site of Hongye landslide, we found there is a risk of rock fall. To assess the motion track and form of the rock on slope, this study uses RocScience Rocfall 5.0 to conduct stability analysis to analyze the potential path and risk of the rock.

Keywords –

UAV; DTM; Landslide volume evaluate; RocScience

1 Introduction

Landslides are important type of natural disaster worldwide, and can cause major hazard in mountain area, costing human casualties and economic losses. Landslides can be triggered by intense rainfall, earthquakes or human activities. Take rainfall-induced landslide as example, a landslide dam was formed in Taiwan by 0610 heavy rainfall event, and was just collapsed few hours later (Kuo-Lung Wang et al., 2016) ; In Brazil, heavy thunderstorms occurred and triggered thousands of landslides on steep slopes with trees and block rich debris materials converged into the river channels, hence avalanches down valley (André S.

Avelar et al., 2013). To avoid human casualties and economic losses, there is a mission not only to understand the landslide process but also the landslide-triggered mechanisms. Analysis of historical records of landslide and reliable monitoring methods seems important.

The use of remote-sensing technology for mapping and monitoring landslide has improved a lot since the last decade, including the (airborne or terrestrial) laser scanning or unmanned aerial vehicles (UAV). This paper focuses on the research of UAVs landslide monitor, analysis and application. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are an inexpensive, low- labor costs, effective, user-friendly and new remote sensing tool (Mark A. Fonstad et al., 2013; J. Travelletti et al., 2012; M.J. Westoby et al., 2012), which can acquire high resolution spatial data. (Darren Turner et al., 2012; Mark A. Fonstad et al., 2013). Development of UAV platforms requires broad technical skills covering platform development, data post-processing, and image analysis (Joshua Kelcey et al., 2012). Therefore, Structure from Motion (SfM) computer vision techniques were applied to derive ultra-high resolution 3D models from multi-view aerial photography (Arko Lucieira et al., 2014). SfM is a flexible approach to capturing complex topography (M.J. Westoby et al., 2012). Then, the imagery can be used to produce dense point clouds using multi-view stereopsis techniques (MVS) combining computer vision and photogrammetry (Steve Harwin et al., 2012). Therefore, UAV application is a capability of producing 3D model, orthophoto and digital terrain model (DTM). Furthermore, comparing a laser scanner survey of the same site, SfM-MVS produced comparable data and reduced data collection time by 80% (M. R. James et al., 2012).

UAVs are ideal tools to map and monitor features at the Earth surface. For instance, chalk sea cliffs in UK (John Barlow et al., 2017) ; Italy mapping discontinuities within a marble quarry (Riccardo Salvini

The Case Study for Evaluation of Landslides Volume and Moving Paths of Single Falling Rock

Feng-Chi Huang^a Yi-Hsuan Lee^a Jiun-Ting Lin^b Kuo-Wei Chen^a Chen-Yu Chen^a Kuo-Lung Wang^b

^a Research Technology Development Team, Soil and Water Conservation Bureau Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan (R.O.C)

^b Department of Civil Engineering, University of National Chi Nan, Taiwan (R.O.C)

E-mail: fchuang@mail.swcb.gov.tw, limermaidym@gmail.com, nokilin@gmail.com, ckw@mail.swcb.gov.tw, cychen59@gmail.com, kuolung@gmail.com

Abstract –

Landslides are natural evolution of topography. Since human behavior started reaching to mountain area, landslide disasters often occur and threaten people. The study uses the case of typhoon-Meranti-induced Hongye landslide in Taiwan on September 15th, 2016 to determine the landslide terrain feature, geological conditions, and disaster impact area by surveying the site for investigate and using the unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring. The UAV's aerial photos are used to build the 3D model, orthophoto and digital surface model (DSM). The landslide area can be drawn with the area orthophoto. Compare the digital terrain model before and after the landslide to evaluate the terrain change of slope and landslide volume. While surveying the site of Hongye landslide, we found there is a risk of rock fall. To assess the motion track and form of the rock on slope, this study uses RocScience Rocfall 5.0 to conduct stability analysis to analyze the potential path and risk of the rock.

Keywords –

UAV; DTM; Landslide volume evaluate; RocScience

1 Introduction

Landslides are important type of natural disaster worldwide, and can cause major hazard in mountain area, costing human casualties and economic losses. Landslides can be triggered by intense rainfall, earthquakes or human activities. Take rainfall-induced landslide as example, a landslide dam was formed in Taiwan by 0610 heavy rainfall event, and was just collapsed few hours later (Kuo-Lung Wang et al., 2016) ; In Brazil, heavy thunderstorms occurred and triggered thousands of landslides on steep slopes with trees and block rich debris materials converged into the river channels, hence avalanches down valley (André S.

Avelar et al., 2013). To avoid human casualties and economic losses, there is a mission not only to understand the landslide process but also the landslide-triggered mechanisms. Analysis of historical records of landslide and reliable monitoring methods seems important.

The use of remote-sensing technology for mapping and monitoring landslide has improved a lot since the last decade, including the (airborne or terrestrial) laser scanning or unmanned aerial vehicles (UAV). This paper focuses on the research of UAVs landslide monitor, analysis and application. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are an inexpensive, low- labor costs, effective, user-friendly and new remote sensing tool (Mark A. Fonstad et al.,2013; J. Travelletti et al.,2012; M.J. Westoby et al.,2012), which can acquire high resolution spatial data. (Darren Turner et al., 2012; Mark A. Fonstad et al., 2013). Development of UAV platforms requires broad technical skills covering platform development, data post-processing, and image analysis (Joshua Kelcey et al., 2012). Therefore, Structure from Motion (SfM) computer vision techniques were applied to derive ultra-high resolution 3D models from multi-view aerial photography (Arko Lucieera et al., 2014). SfM is a flexible approach to capturing complex topography (M.J. Westoby et al., 2012). Then, the imagery can be used to produce dense point clouds using multi-view stereopsis techniques (MVS) combining computer vision and photogrammetry (Steve Harwin et al., 2012). Therefore, UAV application is a capability of producing 3D model, orthophoto and digital terrain model (DTM). Furthermore, comparing a laser scanner survey of the same site, SfM-MVS produced comparable data and reduced data collection time by 80% (M. R. James et al., 2012).

UAVs are ideal tools to map and monitor features at the Earth surface. For instance, chalk sea cliffs in UK (John Barlow et al., 2017) ; Italy mapping discontinuities within a marble quarry (Riccardo Salvini

et al., 2016) ; changing snow and polar vegetation of Antarctic moss beds (Arko Lucieera et al., 2014), etc. Now, UAVs have been used to monitor landslides (Kuo-Lung Wang et al., 2016; U. Niethammer et al., 2012; Arko Lucieera et al., 2014). UAV's aerial photos can be used to produce a high-resolution orthomosaic of the entire landslide, 3D models and digital terrain models (DTMs) of several regions, that more geological formation can be discovered from (Kuo-Lung Wang et al., 2016; U. Niethammer et al., 2012; Mariella Danzi et al., 2012). An environmental remote sensing application using a UAV is specifically aimed to reducing the data gap between field scale and satellite scale in soil erosion monitoring (Sebastian and Oleire-Oltmanns et al., 2012).

High resolution digital terrain models produced by UAV's collected data should be based on the real-world and accuracy coordinate system in order to measure distance, observe elevation changing or analysis slope. However, Khairul has evaluated the accuracy of slope mapping results from different altitudes at semi-undulated area and undulated area and found altitudes did have an influence on the slope accuracy (Khairul Nizam Tahar, 2015). Therefore, during the process producing digital terrain models, the point clouds are in an arbitrary coordinate system and need to be georeferenced. The point clouds are transformed into a real-world coordinate system using either a direct georeferencing technique that uses estimated camera positions (the UAV's log file) or via a Ground Control Point (GCP) technique that uses automatically identified GCPs within the point cloud (Sebastian and Oleire-Oltmanns et al., 2012; Darren Turner et al., 2012; Mark A. Fonstad et al., 2013; Steve Harwin et al., 2012). The models fitted the ground control network are able to be within a standard error with horizontal and vertical precision in the centimeter range (John Barlow et al., 2016; Mark A. Fonstad et al., 2013).

The UAV has demonstrated its capability for producing valuable landslide data, imaging fissures and displacements on the landslide surface (U. Niethammer et al., 2012). Also, UAV can evaluate landslide failure volume through volumetric analysis, a comparison of sequential models (John Barlow et al., 2016).

Data capture through UAV photogrammetry can provide useful terrain information, including slope condition, discontinuities, slope geometry or unattainable measurements, for slope numerical modeling of stability or kinematic analysis (Riccardo Salvini et al., 2016; John Barlow et al., 2017; Mariella Danzi et al., 2012; Kuo-Lung Wang et al., 2016). Cross sections and joint system data were obtained from DTM and used as input parameters for

the slope stability analyses (Ákos Török et al., 2017). For instance, John Barlow used the method to analyze over sea cliffs and coast (John Barlow et al., 2017); Ákos Török modelled the rocky slope by 2D FEM (Finite Element Method) software and identified potential hazards such as planar failure, wedge failure and toppling (Ákos Török et al., 2017). By geological analysis and correlation between soil properties and geotechnical behavior can explain the catastrophic slope movement mechanisms and processes (André S. Avelar et al., 2013).

2 Research Preparation

2.1 Geological setting

The landslide located only 4.3 km away from the Luye fault, which is a north-south directional reverse fault. The region geological, aged about Eocene or earlier, is Pilushan Formation (Ep). The main lithology is Slate and Phyllite, but in the layer there is the thicker Meta-Sandstone layer, including Calcareous, Arkose (Figure 1). On September 15th, 2016, typhoon Meranti occurred, with the rainfall of 513.5mm accumulated rain and 19mm/hr rainfall intensity, inducing the first landslide that ranged about 5.62 hectares.

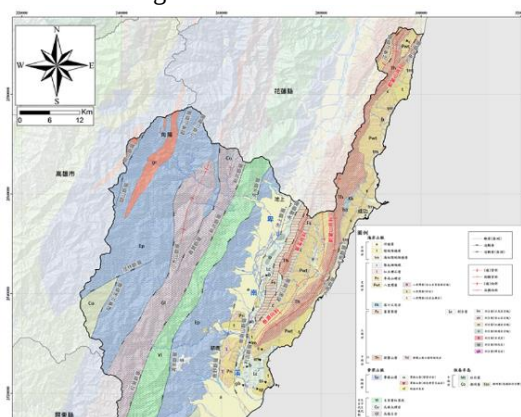


Figure 1. The regional geological map in the research case

2.2 Numerical Model Analysis

2.2.1 Soil material

Marinos presents a quick and easy method to estimate the engineering parameters of rock mass (Marinos and Hoek, 2000). This method considers three main parameters as follows: the uniaxial compressive strength (σ_{ci}), a material constant (m_i) related to the frictional properties of the rock, and the Geological Strength Index (GSI) that response to the geological joint condition of rock. The two constant, (σ_{ci}) and (m_i), can be obtained from laboratory test, but both of the

value still can be estimated if there is no test data. Then, the engineering parameters of rock, including friction angle (ϕ) and cohesive strength (c) can be determined with Figure 2 and Figure 3 according to the estimated value. This study assesses the corresponding parameters of the above description, shown in Table 1.

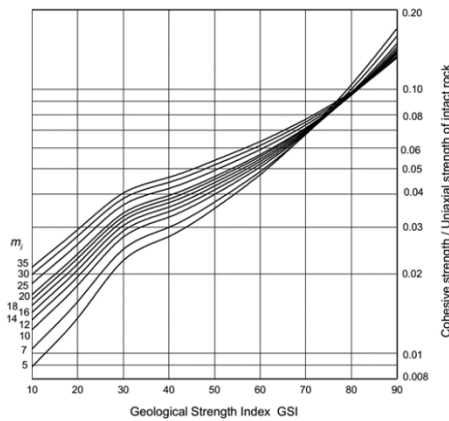


Figure2 Relationship between ratio of cohesive strength to uniaxial compressive strength of intact rock (c/σ_{ci}) and GSI for different (m_i) values (Marinos and Hoek,2000)

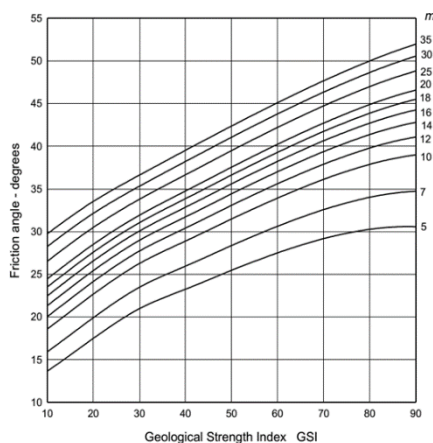


Figure3 Friction angle ϕ for different GSI and m_i values (Marinos and Hoek,2000)

Table1 Field estimates of rock mass properties by Marinos and Hoek,2000

Grade	Uniaxial Comp. Strength (σ_{ci}) MPa	Values of the constant (m_i)	Geological strength index (GSI)	Cohesive strength / Uniaxial strength of intact rock (c/σ_{ci})	Cohesive strength (C) KPa	Friction angle (ϕ°)
R1	1-5	7-11	10-15	0.011-0.015	11-15	17-21

2.2.2 Rockfall Model

This study adopts the rockfall analysis in RocScience Rocfall 5.0. This statistical analysis program can assess the energy, velocity, bounce-height and location of rock endpoints of the process of motion rock over the slope, and uses the Monte Carlo techniques to do the risk level statistics. This program needs to be defined with the slope and the rock geometry and material properties, including dynamic friction, rolling friction coefficient, rock density, rock mass and the slope terrain elevation and so on.

3 Research procedures

3.1 Landslide terrain change and volume evaluate

3.1.1 Aerial survey mission and 3D model

This study uses remote-controlled UAV Phantom 3 Professional equipped with digital camera and GPS to acquire airborne digital photographs on September 16, 2016 and March 24, 2017. The images recorded in 2016 is in emergency mission, the image resolution ranges between 0.042m to 0.370m, and did not set the ground control point. UAV mission in 2017 took different elevation as Aerial survey route (Figure 4) to raise the image resolution which ranges between 0.036m to 0.190m, and 10 ground control points were set around the landslide area to calibrate the elevation (Figure 5).

This study uses Bentley Context Capture version 4.0 to feature the points of the aerial photos by aerotriangulation and produce the three-dimensional model. The 2016 and 2017 orthophoto and the digital surface model (DSM) were also obtained. The DSM grid size is 0.140m of 2016 and 0.093m of 2017.

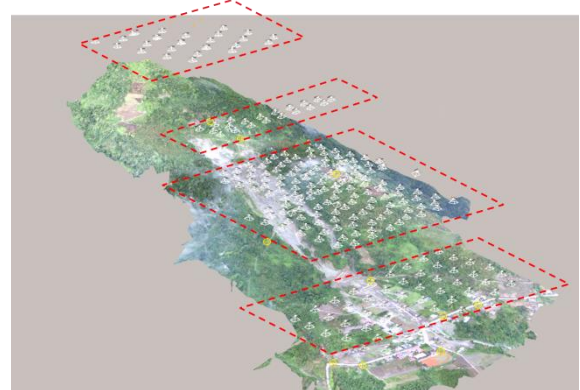


Figure 4 UAV aerial survey route



Figure 5 Ground control points

3.1.2 Terrain change tracking and volume evaluation

This study uses the orthophotos made from aerial images after the landslide to plot the range of the exposed and landslide area. Aerial survey had done again in the following year to track the changes of the landslide area. Comparing orthophotos between 2016 and 2017 can find that the part of the vegetation in the landslide area has been recovered, but the upper edge of the landslide seems to be expanded, and the new tension cracks can be discovered (Figure 6).

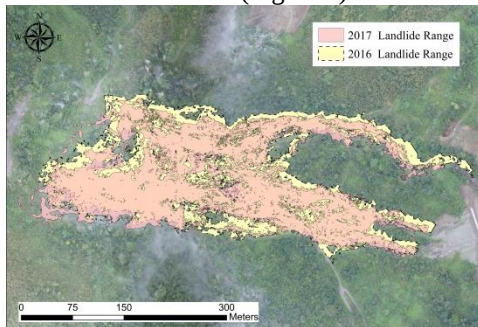


Figure 6 Orthophotos comparison between 2016 and 2017

This study compares the DSM before and after the landslide, determines the elevation difference after landslide and evaluates the landslide volume. The results show that the landslide area is about 56,194 m², and the mean elevation difference of the landslide area is 2.70 m, including the deepest erosion of 13.48 m and the highest accumulation of 21.25m (Figure 7). The landslide area is divided 56,194 grids of single 1m², including 14,609m² of the accumulation area, 41,585m² of the erosion area that defined as five levels according to the erosion depth (Table 2). After the statistics of the landslide erosion area, the landslide volume 211,466 m³ is evaluated.

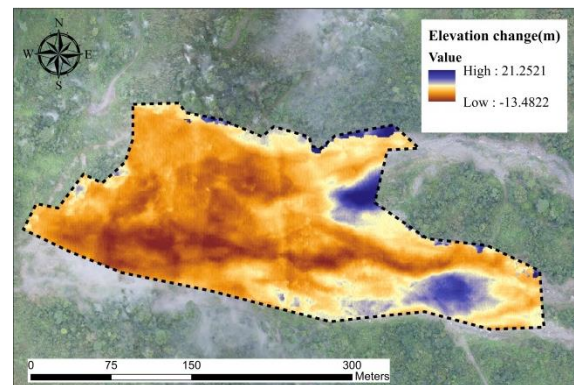


Figure 7 Terrain change after landslide

Table 2 Landslide area for five levels according to erosion depth

Depth(m)	Number of Grid (m ²)
0~2.5	9415
2.5~5.0	12175
5.0~7.5	10715
7.5~10	7316
10~13.48	1964

3.2 Numerical Analysis of Rockfall

3.2.1 Material parameters and analysis assumptions

According to the surface model of 2017, the risk of dangerous rock of the landslide is estimated. The length, width and height of the rock is 9.20m, 5.70m and 3.60m respectively. The rock volume is about 65.22m³. Through the investigation, the rock is considered as the sandstone with unit weight of 2.70 (T / m³), and the rock is about 176,094 kg. In addition, the surface of the slope after the landslide is extremely weathering erosion, assessed the friction angle of the slope is 21 °. This study assumes the rock is moved by the influence of the foundation loss and earthquake.

According to the terrain slope and the shadow map, the four tracks of the motion rock are decided (Fig. 8), and the rock is located on intersection points of each path. Two erosion depth : 3.60m (rock height) and 13.48 m (maximum erosion depth) were analyzed and also the seismic acceleration 400 gal. Considered the possible aggravation, every condition of the analysis tests 100 times, and statistics of the end location and the probability of occurrence.

Table 3 Surface-erosion impact rock stability analysis

track	Rock displacement and occurrence probability					Highest probability and Rock displacement	
	Erosion Depth	Max Displacement(m) (A)	Percentage (%)	Min Displacement (m)	Percentage (%)	Percentage (%)	Highest probability displacement (m) (B)
1	3.6	47.09	100	-	-	100	47.09
	13.48	110.49	1	47.09	87	87	47.09
2	3.6	54.52	100	-	-	100	54.52
	13.48	81.78	1	54.52	96	96	54.52
3	3.6	58.53	83	45.91	17	83	58.53
	13.48	109.02	1	45.91	21	74	58.53
4	3.6	51.08	100	-	-	100	51.08
	13.48	51.08	100	-	-	100	51.08

Table 4 The earthquake-acceleration impact rock stability analysis

track	Rock displacement and occurrence probability					Highest probability and Rock displacement	
	Erosion Depth	Max Displacement(m) (C)	Percentage (%)	Min Displacement (m)	Percentage (%)	Percentage (%)	Highest probability displacement (m) (D)
1	0	47.09	100	-	-	100	47.09
	3.6	82.31	1	47.09	93	93	47.09
	13.48	138.66	1	47.09	86	86	47.09
2	0	54.52	100	-	-	100	54.52
	3.6	209.02	1	54.52	98	98	54.52
	13.48	336.26	1	54.52	72	72	54.52
3	0	58.53	85	15	45.91	85	58.53
	3.6	109.02	1	45.91	17	75	58.53
	13.48	109.02	5	45.91	12	33	58.53
4	0	51.0	100	-	-	100	51.0
	3.6	68.29	1	51.08	95	95	51.08
	13.48	68.29	2	51.08	95	95	51.08

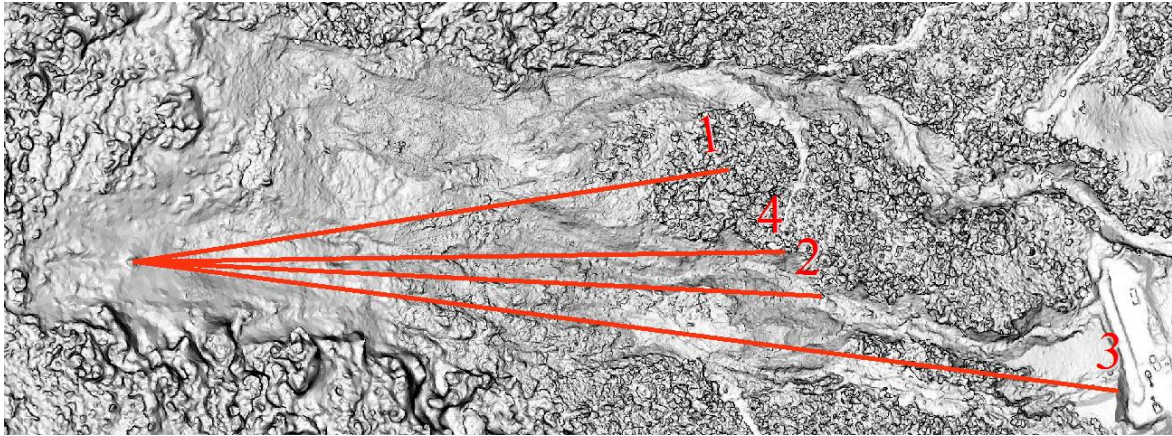


Figure 8 Moving paths of single falling rock

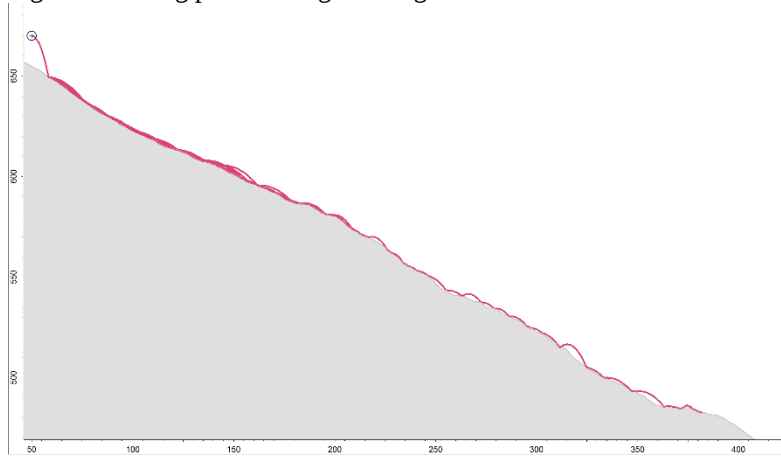


Figure 9 Moving path of track 2

3.2.2 Results and discussion

According to the results, this study shows that with only the terrain erosion without earthquake impact; the rock lost support would fall and slide (Table 3). Erosion of depth 3.60m, the motion of the displacement the value A and B seems the same. Erosion of depth 13.48m, the motion paths are almost the same except for track 4, which the maximum probability of occurrence and the maximum displacement distance is not the same. Considering the acceleration of earthquake, the value C and D are the same of the nonerosion slope.

In addition, when the slope occurs erosion, the probability of maximum displacement and the highest occurrence for each erosion depth are different (Table 4). The path 2 in the erosion depth of 13.48m, the displacement of the rock is 336.26m, which is the maximum displacement of all paths. The track of path 2 may have the factors of terrain that leads the rock to the bounce, nonstop at the gentle area and keeps moving on. So, this path is the highest risky path of all (Figure 9).

4 Conclusions

1. Using UAV to record images for a wide-range area tracking and ground control points improves the measurement accuracy. The details of the landslide region can be presented more accurate, such as this study survey investigate found that above the original landslide exists the tension cracks, and scope of the landslide tend to be expanded.

2. Using the orthophoto to plot the range of landslide which is considered as a basis for the terrain surface elevation difference comparison of before and after the landslide, the surface elevation difference is the landslide volume. The concept of this calculus is that when the landslide happens, the surface of the area is exposed without vegetation, so the digital surface model elevation of the area is equal to the digital terrain model, therefore, it presents the exact terrain elevation, and the comparison between the pre-disaster (DEM) and after-disaster (DSM) of the landslide area elevation is determined.

3. This study uses the numerical analysis program RocFall to conduct the rock motion track analysis.

According to the gradient of the slope, 4 possible motion paths are predicted and of which two factors of the loss of the foundation support and the earthquake effect are assumed. The rockfall stability analysis is carried out to evaluate the fall end of each path and the probability of occurrence and to presume the most possible occurrence and damage possible rock motion path.

5 References

- [1] Ákos Török, Árpád Barsi, Gyula Bögöly, Tamás Lovas, Árpád Somogyi and Péter Görög. Slope stability and rock fall hazard assessment of volcanic tuffs using RPAS and TLS with 2D FEM slope modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences* :56-85, 2017.
- [2] Avelar AS, Coelho Netto AL, Lacerda WA, et al. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: Margottini C, Canuti P, and Sassa K (eds) *Landslide Science and Practice. Volume 4: Global Environmental Change*. Berlin: Springer, 265–270, 2013.
- [3] d'Oleire-Oltmanns S, Marzolff I, Peter K, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing* 4: 3390–3416, 2012.
- [4] Fonstad MA, Dietrich JT, Courville BC, et al. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(4): 421–430, 2013.
- [5] Guzzetti F, Mondini AC, Cardinali M, et al. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews* 112: 42–66, 2012.
- [6] Harwin S and Lucieer A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery *Remote Sensing* 4: 1573–1599, 2012.
- [7] James MR and Robson S. Straightforward reconstruction of 3d surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research* 117: F03017, 2012.
- [8] John Barlow and Jamie Gilham. Stability analysis of chalk sea cliffs using UAV photogrammetry. 19th EGU General Assembly, 2017.
- [9] John Barlow, Jamie Gilham & Ignacio Ibarra Cofrá. Kinematic analysis of sea cliff stability using UAV photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 38:2464–2479, 2017.
- [10] Kelcey J and Lucieer A. Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. *Remote Sensing* 4: 1462–1493, 2012.
- [11] Khairul Nizam Tahar. Multi rotor UAV at different altitudes for slope mapping studies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W4, 2015.
- [12] Kuo-Lung Wang and Zhi-Jie Huang. Discover failure mechanism of a landslide dam using UAV. *Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2016)*. MOST 103-2625-M-260-001, 2016.
- [13] Lucieer A, Turner D, King DH, et al. Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture microtopography of Antarctic moss beds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 27 (Part A): 53–62, 2014.
- [14] Marinos, P. and Hoek, E. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation: *Proceedings, GeoEng 2000*, Melbourne, Australia, 2000.
- [15] Mariella Danzi, Giuseppe Di Crescenzo, Massimo Ramondini & Antonio Santo. Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for photogrammetric surveys in rockfall instability studies. *Società Geologica Italiana*, 2012.
- [16] Niethammer U, James MR, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology* 128: 2–11, 2012.
- [17] Riccardo Salvini, Giovanni Mastroiocco, Marcello Seddaiu, Damiano Rossi and Claudio Vanneschi. The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry Carrara Italy photogrammetry and discrete fracture network modelling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016.
- [18] Travelletti J, Delacourt C, Allemand P, et al. Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 70: 39–55, 2012.
- [19] Turner D, Lucieer A and Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing* 4: 1392–1410, 2012.
- [20] Westoby M, Brasington J, Glasser N, et al. 'structure- from-motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300–314, 2012.

社團法人中華水土保持學會 106 年度年會議程



社團法人中華水土保持學會 106 年度年會議程

時間：106 年 12 月 2 日(星期六)

地點：國立中興大學水土保持學系一館階梯教室

主辦單位：社團法人中華水土保持學會

協辦單位：行政院農業委員會水土保持局、臺北市政府工務局大地工程處、經濟部中央地質調查所、國立中興大學水土保持學系、國立屏東科技大學水土保持系、國立台灣大學生物環境系統工程學系、逢甲大學地理資訊系統研究中心、逢甲大學營建及防災研究中心、臺灣省水土保持技師公會、臺北市水土保持技師公會、中華民國水土保持技師公會全國聯合會、新北市水土保持技師公會、臺中市水土保持技師公會、高雄市水土保持技師公會、中興工程顧問社

時間	議題	主講人	主持人		
09:00-09:30	報到及分發資料				
09:30-09:40	開幕	社團法人中華水土保持學會段理事長錦浩			
09:40-10:10	106 年度褒獎活動頒獎	段理事長錦浩			
10:10-10:20	會務報告與討論	周常務監事天穎			
10:20-10:40	茶敘/交流				
10:40-11:30	學者專家經驗交流	逢甲大學地理資訊系統 研究中心 周天穎主任	行政院農業委員會 水土保持局 李鎮洋局長		
11:30-12:00	學術獎專題報告	國立屏東科技大學水土 保持系 李錦育教授	黃常務理事宏斌		
12:10-13:20	午餐				
13:20-14:50	水土保持研討會(含 106 年度論文獎宣讀)				
	論文宣讀(一) 水土保持學系 一館一樓 階梯教室	論文宣讀(二) 水土保持學系 二館一樓 大二教室	論文宣讀(三) 水土保持學系 二館一樓 大三教室	論文宣讀(四) 水土保持學系 土石流防災中 心	學生論文競賽 水土保持學系 二館一樓 大四教室
	中興大學水土 保持學系 林昭遠 教授	台灣省水土保 持技師公會 陳智誠理事長	台中市水土保 持技師公會 李國正理事長	台北市水土保 持技師公會 魏適雄理事長	張光宗 主任 許中立 教授 陳建元 主任 林德貴 教授 詹勳全秘書長
14:50-15:10	茶敘/交流				
15:10-16:40	論文宣讀(一) 水土保持學系 一館一樓 階梯教室	論文宣讀(二) 水土保持學系 二館一樓 大二教室	論文宣讀(三) 水土保持學系 二館一樓 大三教室	論文宣讀(四) 水土保持學系 土石流防災中 心	
	逢甲大學水利 工程與資源保 育學系 連惠邦 教授	中華民國水土 保持技師公會 全國聯合會 黃志彰理事長	嘉義大學土木 及水資源工程 學系 陳建元 主任	屏東科技大學 水土保持系 許中立 教授	
16:40-16:50	摸彩			王監事德鏞、黃技師志彰	
16:50-17:00	閉幕式			周常務監事天穎	

使用 QPESUMS 雨量資料建立坡地災害降雨警戒模式

44

中華水土保持學報, 48(1): 44-55 (2017)
Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 48 (1): 44-55 (2017)

使用 QPESUMS 雨量資料建立崩塌災害預警模式

陳振宇^{[1]*} 劉維則^{[1][2]} 許家祥^[3]

摘 要 台灣自 2005 年起採用 RTI 模式設定各鄉鎮雨量警戒值，並建立土石流紅黃警戒發布機制，已有效降低民眾傷亡。惟 RTI 模式之有效累積雨量係以逐日折減方式納入前七日之降雨，在某些特殊型態雨場常導致警戒誤報率偏高。為此，本研究提出以逐時折減之有效累積雨量修正公式，並建立以 QPESUMS 網格為警戒發布單元之坡地災害預警模式；以 2015 年蘇迪勒颱風重創之烏來山區為例，本模式可有效預測災害發生之時間及區域，並以視覺化方式呈現降雨致災熱區，有助於各級政府應變中心之災情預判與決策分析。

關鍵詞：崩塌、土石流、預警系統、QPESUMS、有效累積雨量。

A Rainfall-based Warning Model for Predicting Landslides Using QPESUMS Rainfall Data

Chen-Yu Chen^{[1]*} Wei-Ze Liou^{[1][2]} Chia-Hsiang Hsu^[3]

ABSTRACT The Rainfall Triggering Index (RTI) model is adopted to set up the critical rainfall for each township since 2005 in Taiwan, and the debris-flow warning system based on the RTI model is successful in reducing casualties. However, the antecedent rainfall calculation using the deduction coefficient of "4" days in the RTI model leads to a false alert rate higher under some rainfall patterns (e.g., long-term duration and lower rainfall intensity). This study suggests a modified method to calculate the antecedent rainfall and effective accumulated rainfall to solve the above-mentioned problems. We also establish a new warning model, which uses the QPESUM data for the past decade, the identified results of remote-sensing image, and the disaster records, to predict landslides. In the case study of the Wulai District during Typhoon Soudelor in 2015, the new warning model offers good prediction of the times and locations of landslides. This study also proposes a new platform which displays the rainfall-induced disaster hot zones. These findings can help government officials to make appropriate decisions during emergency response.

Key Words: Landslide, debris flow, warning system, QPESUMS, effective accumulated rainfall.

一、前 言

儘管造成坡地災害的主要誘因包含降雨、地震、風化、火山爆發、融雪、人為擾動等，限於監測預警後的反應時間及實務操作的可行性，目前國內外多僅針對降雨驅動的坡地災害進行相關預警，並使用雨量作為主要警戒指標（陳振宇，2013；Osanai et al., 2010；Wieczorek and Glade, 2005）。事實上，建立以雨量為基礎之警戒模式，其關鍵在於如何選用適當的雨量指標，以及如何建立警戒臨界值（CL, Critical line）（國土交通省河川局砂防部等，2005；國土交通省國土技術政策綜合研究所，2001；Caine, N., 1980）。例如，日本自 2005 年起採用的徑向基底函數網路（Radial Basis Function Network, RBFN）模式，係使用 60 分鐘累積雨量及土壤雨量指數等二項雨量指標建立警戒模式（Osanai et al., 2010）；相對而言，歐美地區的警戒模

式，則較常使用降雨強度及降雨延時作為雨量指標（Baum and Godt, 2010；Aleotti, 2004；Keefer et al., 1987）。

台灣自 2005 年起正式改以 60 分鐘累積雨量及考慮前七天降雨效應之有效累積雨量組合而成的降雨驅動指標（Rainfall Triggering Index, RTI）模式，據以設定各鄉鎮之土石流警戒基準值，並建立土石流紅、黃警戒發布機制，歷經十多年來的實際應用，已有效降低土石流災害造成民眾之傷亡數目（陳振宇，2008；詹錢登、李明熹，2004）。其計算及警戒值設定方式簡述如下：

$$RTI = I \times R_t \quad (1)$$

$$R_t = \sum_{i=0}^{t-1} \alpha^i R_i \quad (2)$$

其中 I 為 60 分鐘累積雨量； R_t 稱為有效累積雨量， R_i 為前 i 日的 24 小時累積雨量（例如 R_0 即為目前時間之前的 24 小時累積雨量）， α^i 為前 i 日的折減係數； α 原先採用 0.8，經

[1] 行政院農業委員會水土保持局技術研發小組
Research and Technology Development Team, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, R.O.C.
[2] 財團法人農業科技研究院
Agricultural Technology Research Institute, Taiwan, R.O.C.
[3] 逢甲大學地理資訊系統研究中心
GIS Research Center, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.
*Corresponding Author. E-mail: cychen59@gmail.com

使用 QPESUMS 雨量資料建立崩塌災害預警模式

陳振宇^{[1]*} 劉維則^{[1][2]} 許家祥^[3]

摘 要 台灣自 2005 年起採用 RTI 模式設定各鄉鎮雨量警戒值，並建立土石流紅黃警戒發布機制，已有效降低民眾傷亡。惟 RTI 模式之有效累積雨量係以逐日折減方式納入前七日之降雨，在某些特殊型態雨場常導致警戒誤報率偏高。為此，本研究提出以逐時折減之有效累積雨量修正公式，並建立以 QPESUMS 網格為警戒發布單元之坡地災害預警模式；以 2015 年蘇迪勒颱風重創之烏來山區為例，本模式可有效預測災害發生之時間及區域，並以視覺化方式呈現降雨致災熱區，有助於各級政府應變中心之災情預判與決策分析。

關鍵詞：崩塌、土石流、預警系統、QPESUMS、有效累積雨量。

A Rainfall-based Warning Model for Predicting Landslides Using QPESUMS Rainfall Data

Chen-Yu Chen^{[1]*} Wei-Ze Liou^{[1][2]} Chia-Hsiang Hsu^[3]

ABSTRACT The Rainfall Triggering Index (RTI) model is adopted to set up the critical rainfall for each township since 2005 in Taiwan, and the debris-flow warning system based on the RTI model is successful in reducing casualties. However, the antecedent rainfall calculation using the deduction coefficient of "t" days in the RTI model leads to a false alert rate higher under some rainfall patterns (e.g., long-term duration and lower rainfall intensity). This study suggests a modified method to calculate the antecedent rainfall and effective accumulated rainfall to solve the above-mentioned problems. We also establish a new warning model, which uses the QPESUM data for the past decade, the identified results of remote-sensing image, and the disaster records, to predict landslides. In the case study of the Wulai District during Typhon Soudelor in 2015, the new warning model offers good prediction of the times and locations of landslides. This study also proposes a new platform which displays the rainfall-induced disaster hot zones. These findings can help government officials to make appropriate decisions during emergency response.

Key Words: Landslide, debris flow, warning system, QPESUMS, effective accumulated rainfall.

一、前 言

儘管造成坡地災害的主要誘因包含降雨、地震、風化、火山爆發、融雪、人為擾動等，限於監測預警後的反應時間及實務操作的可行性，目前國內外多僅針對降雨驅動的坡地災害進行相關預警，並使用雨量作為主要警戒指標（陳振宇，2013；Osanai et al, 2010；Wieczorek and Glade, 2005）。事實上，建立以雨量為基礎之警戒模式，其關鍵在於如何選用適當的雨量指標，以及如何建立警戒臨界值（CL, Critical line）（國土交通省河川局砂防部等，2005；國土交通省國土技術政策綜合研究所，2001；Caine, N., 1980）。例如，日本自 2005 年起採用的徑向基底函數網路（Radial Basis Function Network, RBFN）模式，係使用 60 分鐘累積雨量及土壤雨量指數等二項雨量指標建立警戒模式（Osanai et al, 2010）；相對而言，歐美地區的警戒模

式，則較常使用降雨強度及降雨延時作為雨量指標（Baum and Godt, 2010；Aleotti, 2004；Keefer et al., 1987）。

台灣自 2005 年起正式改以 60 分鐘累積雨量及考慮前七天降雨效應之有效累積雨量組合而成的降雨驅動指標（Rainfall Triggering Index, RTI）模式，據以設定各鄉鎮之土石流警戒基準值，並建立土石流紅、黃警戒發布機制，歷經十多年來的實際應用，已有效降低土石流災害造成民眾之傷亡數目（陳振宇，2008；詹錢登、李明熹，2004）。其計算及警戒值設定方式簡述如下：

$$RTI = I \times R_t \quad (1)$$

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \quad (2)$$

其中 I 為 60 分鐘累積雨量； R_t 稱為有效累積雨量， R_i 為前 i 日的 24 小時累積雨量（例如 R_0 即為目前時間之前的 24 小時累積雨量）， α^i 為前 i 日的折減係數； α 原先採用 0.8，經

[1] 行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組

Research and Technology Development Team, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, R.O.C.

[2] 財團法人農業科技研究院

Agricultural Technology Research Institute, Taiwan, R.O.C.

[3] 逢甲大學地理資訊系統研究中心

GIS Research Center, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

*Corresponding Author. E-mail: cychen59@gmail.com

多年實務應用檢討後,於 2014 年起已調整為 0.7(水土保持局, 2016)。而在訂定各鄉鎮警戒基準值時,須先蒐集該鄉鎮內參考雨量站之歷年降雨資料進行雨場分割,再將每一個雨場以一個雨量強度 I 及一個有效累積雨量值 R_t 代表之,並據以計算該雨場之 RTI 值。其中,如該雨場為已發生土石流災害之雨場事件,則其代表之雨量強度及有效累積雨量採用土石流發生時刻之值;反之,如該雨場期間未發生土石流災害或有發生但不知明確發生時間,則其代表之雨量強度及有效累積雨量採用該雨場最大雨量強度發生時刻之值。

早期 RTI 模式在設定警戒值時,需仰賴明確的災例資料,以設定合適之警戒值。惟因多數地區之災例蒐集不易,近年來 RTI 模式已改為「以雨場發生機率為主,災例資料為輔」之警戒值設定方式。其具體作法為:完成該鄉鎮參考雨量站歷年降雨資料之雨場分割、設定代表值並計算各雨場之 RTI 值後,再將歷年雨場之 RTI 值依照大小排列,並以韋伯法計算出歷年雨場 RTI 值較小的 10%,設為 RTI_{10} (記為下警戒值,表示僅有 10%的 RTI 值小於此值),以及 RTI_{90} (記為上警戒值,表示有 90%的 RTI 值小於此值)。最後將上下警戒值(RTI_{10} 與 RTI_{90})以式(3)進行線性內插,即可求出其它的 RTI 特定值,例如: RTI_{50} 或 RTI_{70} 等。

$$RTI_M = RTI_{10} + \left(\frac{M-10}{80}\right)(RTI_{90} - RTI_{10}) \quad (3)$$

此外,為便於一般民眾理解及實務操作之便利性,水土保持局以鄉鎮為單元,將各地區之 RTI 值轉換為以有效累積雨量為單一指標之土石流警戒基準值(R_c),目前採用 RTI_{70} 除以降雨強度 10 mm/hr,並取 50 mm 為一個級距,訂出各鄉鎮之土石流警戒基準值。現行台灣 159 個轄區內有土石流潛勢溪流的鄉鎮,其土石流警戒基準值之範圍為 200 至 600 mm 共 9 個級距,例如南投縣信義鄉為 250 mm、苗栗縣泰安鄉為 400 mm、花蓮縣玉里鎮為 600 mm(土石流防災資訊網, 2016)。台灣歷年土石流警戒基準值使用範圍之沿革如表 1。

依據聯合國國際減災策略組織(UNISDR)之定義:「預警系統係能及時發布及傳遞有意義的警戒資訊,使民眾、社區及組織能感受災害之威脅,俾能在時間充份的情況下採取適當的準備與行動,以降低受災的可能性」(UNISDR, 2009)。同時, Thiebes(2012)亦指出一個好的預警系統必須能辨識及估計出災害風險,並提供明確易懂的警戒訊息,以促使民眾作出主動避難的反應。因此,一個完整的預警系統必須同時包含精確的警戒模式及明確易懂的發布機制(陳振宇, 2013)。以日本為例,其自 2005 年起警戒模式統一採用 RBFN 模式,而在警戒發布機制方面,各都道府縣除使用傳統之表單方式通知所屬市町村外,亦於網站上以 1~5 km 之網格並採 4 個警戒等級方式呈現各地區之淺層崩塌及土石流等坡地災害風險,如圖 1(Osanai et al, 2010);此外,日本氣象廳亦自 2013 年起,開始於其官網上即時提供空間尺度為 5 km,分為 5 個警戒等級,每 10 分鐘更

新一次的全日本「土砂災害警戒等級網格資訊(土砂災害警戒判定メッシュ情報)」(日本氣象廳, 2016),疊合各地平時已調查完成包含崩塌、地滑、土石流等的坡地災害潛勢資料(稱為土砂災害警戒區域),即可完整呈現各災害潛勢地區之致災風險等級,並配合其建議之因應作為進行相關防災工作,如圖 2(日本內閣府, 2015)。相對而言,台灣目前採用之警戒發布方式僅針對個別之土石流潛勢溪流發布黃色及紅色警戒,尚未納入淺層崩塌之警戒資訊,亦未提供可即時呈現全台各地區坡地災害風險等級之圖形化或網格化之整體資訊。

綜上,儘管台灣現行的土石流警戒系統對於颱風豪雨導致之土石流災害,在事前預警上已有顯著成效,但在警戒值設定過程及警戒發布之實務運作上,仍有一些問題待解決。包含:

1. 目前警戒值之設定及警戒發布,仍完全仰賴地面自動雨量站。儘管近年來中央氣象局及水土保持局等相關單位已大幅提昇山區自動雨量站之設置密度(截至 2106 年止,依據水土保持局統計,全台 85%土石流潛勢溪流距離參考雨量站均在 3 km 以內),但由於台灣山區地形變化大,且雨量站設置時常遷就於電力及施工與維護之便利性,多位於土石流潛勢溪流下游臨近聚落處,單純使用地面雨量站資料未必能真實反應上游致災之降雨情形。
2. 現行 RTI 模式對於前期降雨之處理,係採用「逐日折減」方式,即便是降雨延時僅 1 小時的降雨,在 24 小時內其對於土壤飽和度變化之影響均視為相同。因此,對於間歇性之降雨(例如雲林古坑華山雨量站, 2016/6/18~ 6/21 每日下午固定之短延時降雨),其有效累積雨量便會產生較突兀之階梯式下降的情形,如圖 3。此外,由於逐日折減之折減速度較慢,對於長延時連續降雨,則常易發生動輒即逾警戒值之情形。如圖 4。同理,逐日折減也易造成颱風豪雨結束逾 24 小時以上,但有效累積雨量仍居高不下之情況,對於土石流警戒解除時機之判讀上,也常造成困擾。
3. 目前 RTI 模式在設定各地區警戒基準值時,必須先將該地區之參考雨量站的歷年雨量資料作適當的雨場分割;惟不同的雨場分割方式,將造成統計時使用之雨場數目及降雨指標代表值差異甚大(詹錢登等, 2003),進而影響 RTI 模式之統計結果及土石流警戒基準值。
4. 現行之警戒模式僅針對土石流災害提供預警,但對於常見的淺層崩塌則尚未提供警戒資訊;且現行以土石流潛勢溪流為標的之紅黃警戒發布模式,無法提供各地區整體的坡地災害風險等級警示,不利於各級政府防災單位全面掌握狀況。

為此,本研究將針對前揭國內現行土石流警戒系統所面臨的問題,提出相應之改進方案,並嘗試建立一可適合用於崩塌及土石流預警,且具視覺化之網格式警戒模式。同時,本研究將以 2015 年蘇迪勒颱風期間受災嚴重之烏來山區為例,進行本警戒模式於空間域及時間域預測精度之驗證。

表 1 台灣歷年土石流警戒基準值(R_c)使用範圍

Table 1 The critical accumulated rainfall (R_c) for debris flow in Taiwan

年度	2005	2006	2007~2008	2009	2010~2012	2013~2016
土石流警戒基準值 (mm)	200~350	200~450	250~550	250~600	200~600	250~600

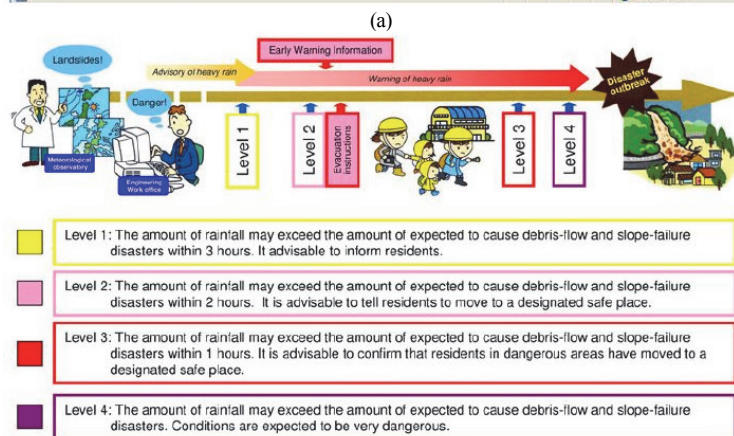
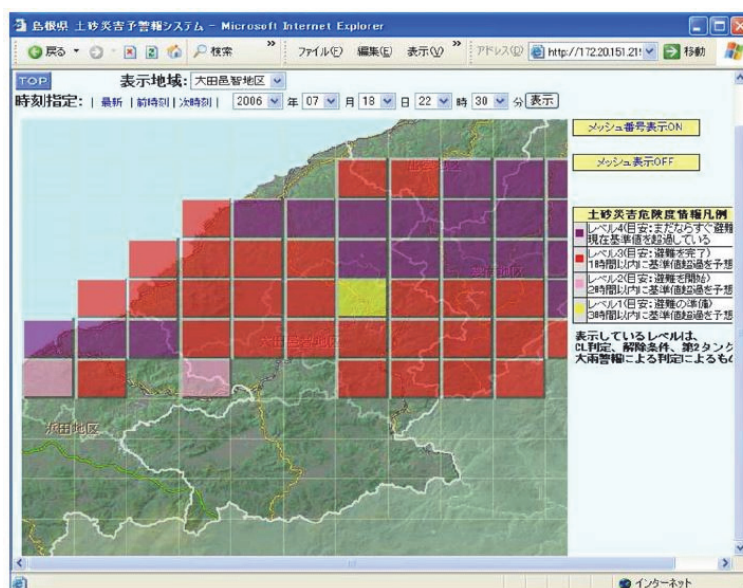


圖 1 (a) 日本土砂災害警戒發布及呈現方式 (b) 不同顏色之警戒等級及其建議之應變作為 (Osanai et al, 2010)

Fig.1 (a) The format in which early-warning information is disseminated from local government. (b) The colors are coded to show the condition indicated by the danger level, and the action that is recommended be taken. (Osanai et al, 2010)

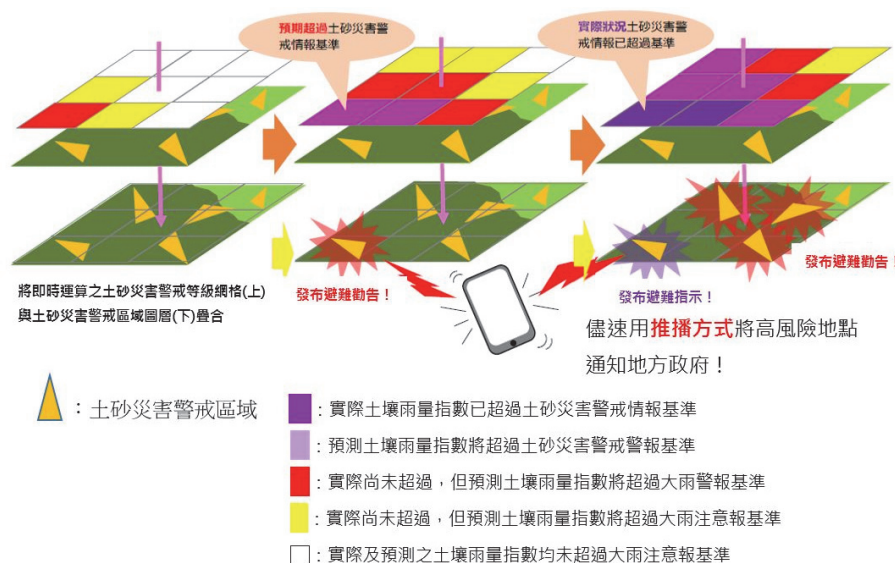


圖 2 將土砂災害警戒等級網格與土砂災害警戒區域疊合結果，以推播方式即時通知地方政府示意圖 (日本內閣府，2015)

Fig.2 The concept of Pushing the warning information which superimposed the sediment disaster potential area and risk level meshes to the local government (Cabinet Office, Government of Japan, 2015)

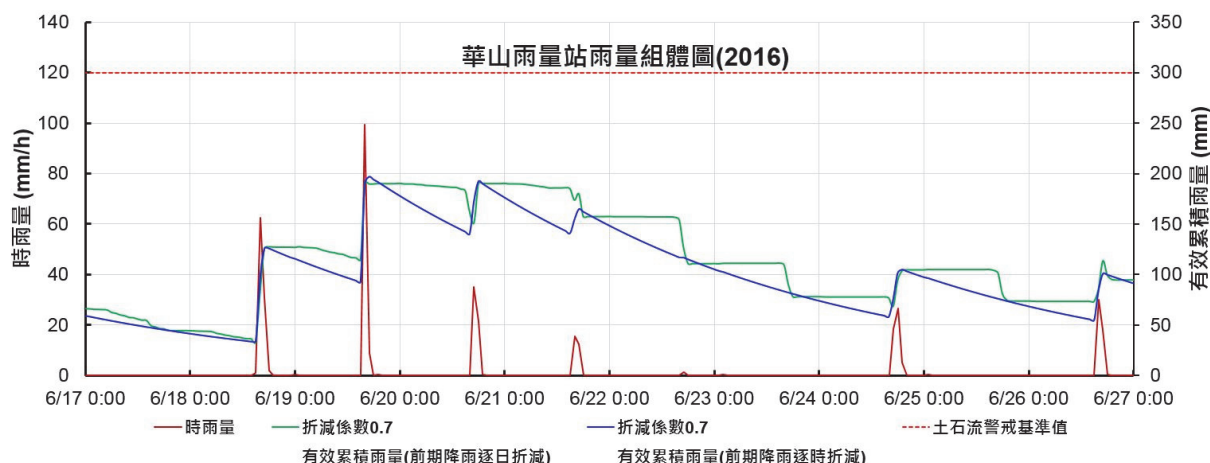


圖 3 間歇性短延時強降雨於不同有效累積雨量計算方式下之差異

Fig.3 The difference of different formula for effective accumulated rainfall during intermittent short-duration heavy rainfall

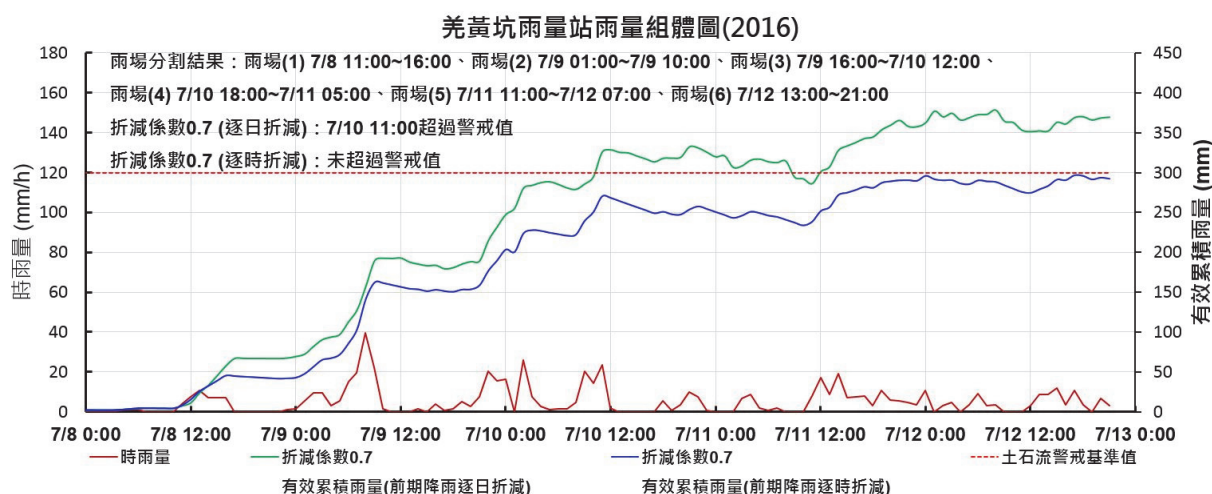


圖 4 長延時連續降雨於不同有效累積雨量計算方式下之差異

Fig.4 The difference of different formula for effective accumulated rainfall during intermittent long-duration heavy rainfall

二、材料及方法

為提昇雨量資料之空間解析度，本研究將採用建立已逾 10 年，空間解析度較高的 QPESUMS 網格式雷達降雨資料取代地面自動雨量站，並直接以 QPESUMS 網格作為警戒發布單元；同時，為解決現行 RTI 模式對於前期雨量處理方式之疑義，本研究將提出全新且計算快速的逐時折減之有效累積雨量計算公式。此外，不同於現行 RTI 模式在設定各地區警戒基準值時必須先進行雨場分割，本研究提出之警戒雨量設定及調整機制毋需此一步驟。同時，藉由林務局每年發布之航遙測影像崩塌地判識成果，與本研究建立之崩塌預警模式預測結果進行比較，以驗證本崩塌預警模式之可行性。研究流程如圖 5，以下分別說明：

1. 逐時折減之有效累積雨量計算方式

現行 RTI 模式所使用之有效累積雨量係考量前七日之前期降雨，且以 24 小時為折減周期，折減係數採 0.7 之方式，

以幕級數方式逐日折減，例如前一日之雨量折減 0.7，前二日之雨量折減 $(0.7)^2$ ，餘類推，如式 (2)。惟此種折減方式在間歇性的短延時降雨、長延時降雨以及颱風豪雨過後之警戒解除時機判斷上，均有其不足之處。為此，在折減周期與折減係數維持不變之前提下，本研究提出以「逐時折減」為概念之有效累積雨量修正公式，如式 (4)。

$$R_t = I_t + R_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}} \quad (4)$$

其中 I_t 為目前的時雨量， R_{t-1} 為 1 小時前的有效累積雨量。以式 (4) 之修正公式重新計算間歇性的短延時降雨以及長延時降雨之效果，如圖 3、圖 4。另對於颱風豪雨過後之警戒解除時機判斷之效果，如圖 6。綜上，本研究所提出之有效累積雨量修正公式已能初步解決前述問題，且相較於式 (2) 每次運算均需分別計算前七日之 24 小時累積雨量並乘上折減係數後再累加，式 (4) 之計算僅有一次折減及一次累加，其計算量大幅減少，有利於後續大量網格運算時使用。

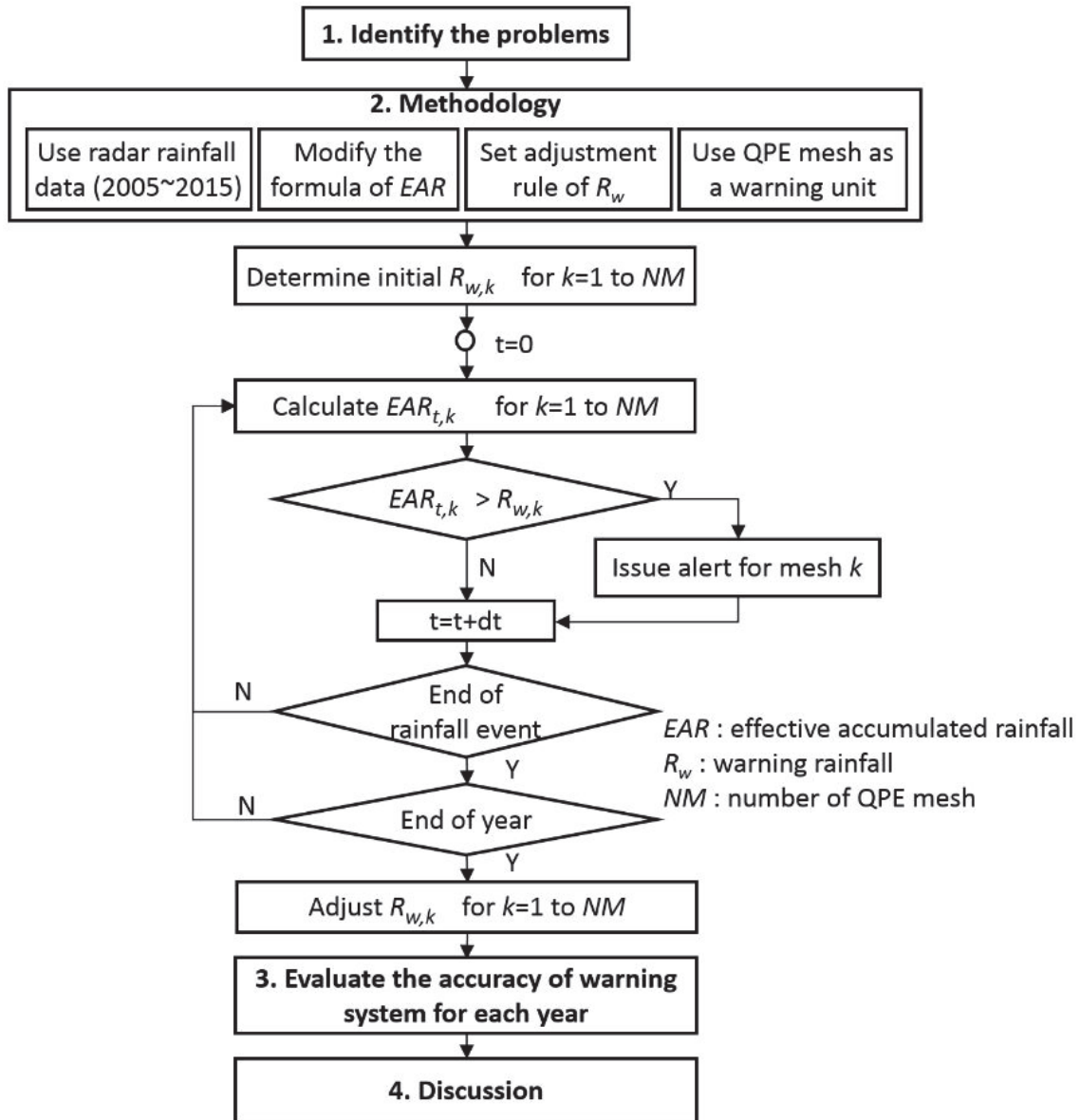


圖 5 研究流程圖

Fig.5 Flow chart of the study process.

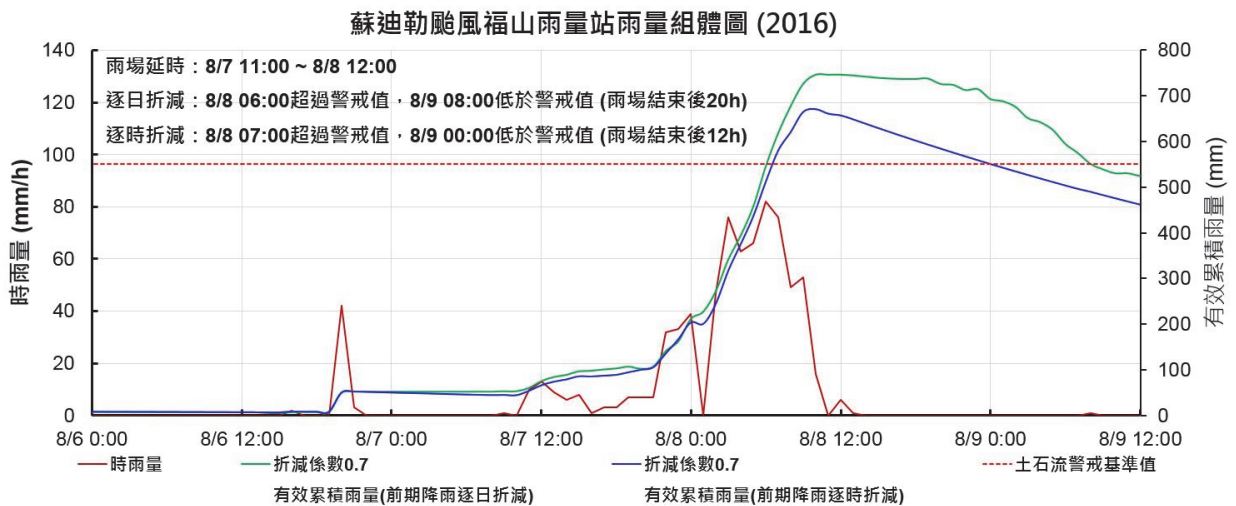


圖 6 不同有效累積雨量計算方式下警戒解除時機之差異

Fig.6 The difference of the time of lifting warning under different formula for effective accumulated rainfall

2. QPESUMS 網格雨量資料

劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors, QPESUMS) 係中央氣象局為加強對於颱風、梅雨、雷暴等災害性天氣的監測與極短期預報能力, 與農委會水土保持局、經濟部水利署及美國劇烈風暴實驗室自 2002 年起共同合作整合雷達、衛星、雨量與閃電觀測資料, 並結合地理資訊所發展的系統。其可提供每 10 分鐘更新一次之即時性劇烈天氣監測資訊、過去 72 小時內高解析度之定量降水估計、閃電分析及未來 0~1 小時定量降雨預報等產品, 亦提供圖表化的雨量站與氣象站觀測資訊顯示(張保亮, 2011)。本研究採用 QPESUMS 自 2005 年 7 月開始對外提供之 QPE(Quantitative Precipitation Estimation) 定量降雨估計資料, 其資料網格之空間解析度約為 1.3 km x 1.3 km; 同時本研究使用 2005/07/01~2015/12/31 雨量資料, 並採用式(4) 逐時折減方式計算出各網格自 2005/07/01 起每小時之有效累積雨量。為便於區隔與說明, 以下將用 EAR(Effective Accumulated Rainfall)來表示以逐時折減修正公式計算之有效累積雨量。

3. 研究區基本資料

本研究選用新北市烏來區作為研究區, 面積約為 321 km², 涵蓋 237 個 QPE 網格, 居民 6,177 人, 轄內目前計有 6 條水土保持局公布之土石流潛勢溪流。為標定研究區內每年坡面崩塌變化情形, 本研究使用 2005~2015 林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層, 同時, 個別崩塌及土石流災害事件之發生時間則參考 2006~2015 年水土保持局發布之重大土砂災例報告(土石流防災資訊網, 2016)。依據前揭資料顯示, 研究區內於 2015 年蘇迪勒颱風造成之坡地災害最為顯著, 如圖 7。

4. 警戒發布單元及崩塌事件判定原則

本研究採用 QPE 網格作為警戒發布單元, 且所建立之警戒模式僅針對颱風豪雨期間造成之群發型崩塌及土石流等坡地災害發布警戒, 不考慮地震造成之坡地災害事件, 亦不考慮局部地區於非降雨期間發生之零星崩塌事件。一般而言, 同一區域內淺層崩塌事件之發生時間, 大多早於土石流(李鎮洋等, 2011), 因此本研究建立之警戒發布時機仍以淺層崩塌為優先考慮對象; 其中對於各年度各 QPE 網格內是否發生崩塌事件之判定原則, 係使用林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層, 並以某網格內有新生(擴大)崩塌時, 則定義該網格發生崩塌事件。另, 對於崩塌事件發生時間之判定原則, 則採如有明確災害紀錄者, 從之; 如無, 則假設崩塌發生在該年度之最大 EAR 的發生時刻。

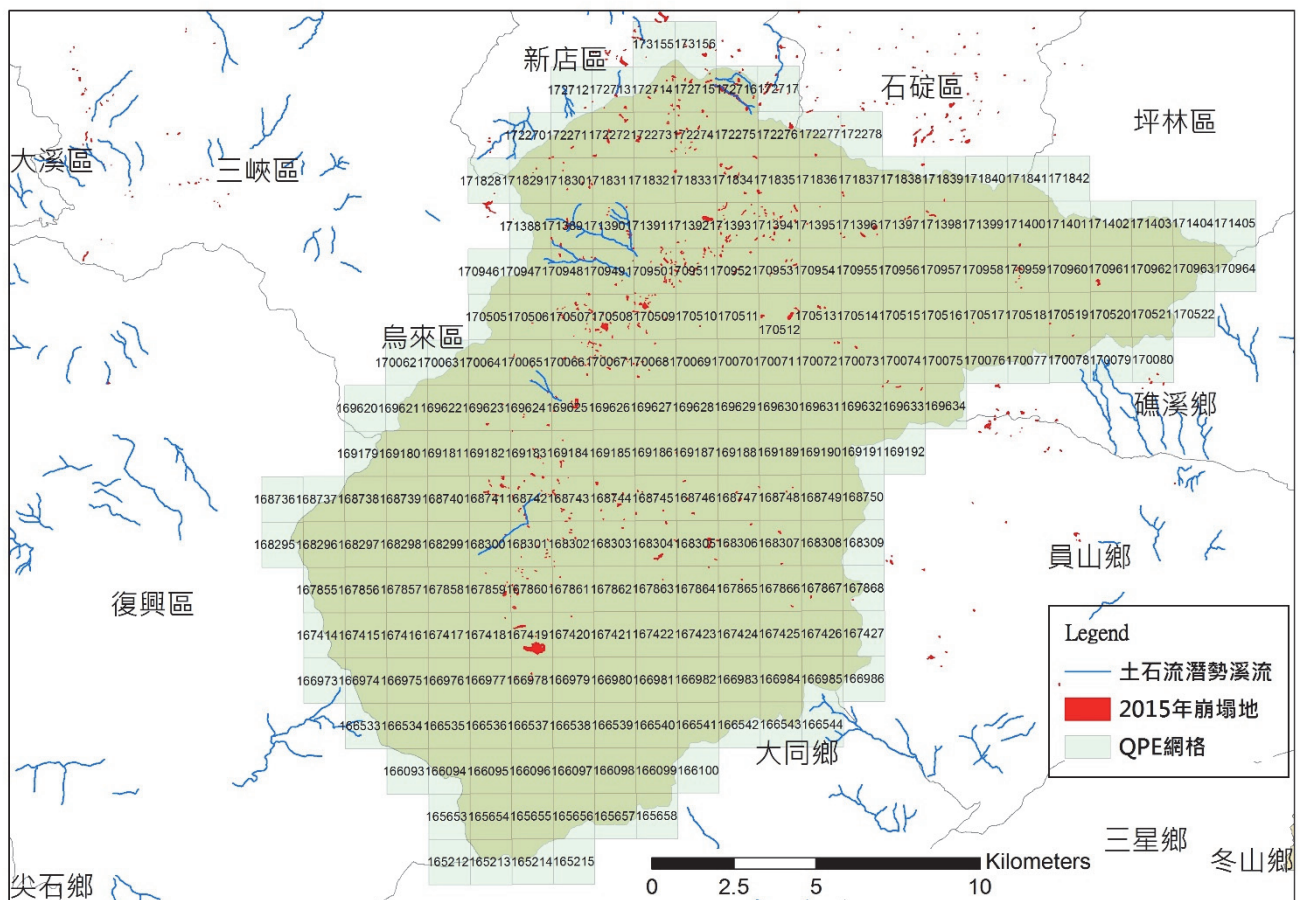


圖 7 新北市烏來區範圍內之 QPE 網格與 2015 年崩塌地分布情形

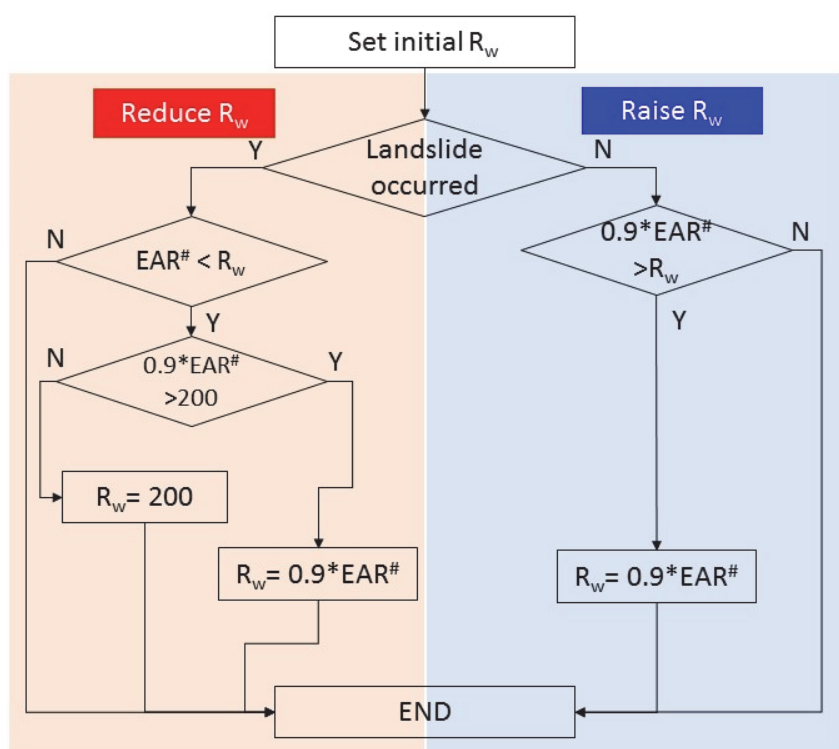
Fig.7 Distribution of QPE meshes and the landslides in 2015 in the Wulai District of Xinbei Municipality

5. 警戒雨量(R_w)之設定與調整機制

由於每一個 QPE 網格均為獨立的警戒單元，亦即每一個網格均有其獨立之警戒雨量 (R_w , warning rainfall)，在設定每一網格之初始警戒雨量 R_w 時，本研究係以 QPE 資料開始對外供應的第一年 (2005 年) 作初始設定之用。其中依 2005 年崩塌圖層判定其範圍內無崩塌事件之網格，即表在該年度最大降雨情況下該網格範圍內未發生崩塌，故以 2005 年該網格最大 EAR 為 R_w 之初始值；有崩塌網格，依前揭假設 (崩塌發生在最大 EAR 發生時刻) 並考慮警戒發布及疏散所需作業時間，以 2005 年該網格之最大 EAR 的 90% 作為 R_w 初始值。同時，由於林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層無法區別各崩塌地係為地震或降雨所觸發，為避免部份非降雨導致之崩塌可能過度

拉低該網格之警戒雨量，因此本研究設有最低警戒雨量，並參考現行土石流警戒基準值之下限，設定各網格之最小警戒雨量不得低於 200 mm。實際操作時，系統將即時運算各網格之 EAR，若某網格 $EAR > R_w$ 則發布該網格為警戒區。

此外，本研究設定每年年初時，即參考前一年度之林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層及全年度 EAR 之計算結果，自動調整每個網格之警戒雨量，其基本原則為：如前一年度某網格之最大 EAR 的 90% 已逾其警戒雨量 R_w ，但未發生崩塌，即表該網格可承受較大的雨場而不致發生崩塌，則調昇該網格之警戒雨量 R_w ；反之，如某網格在前一年度有發生崩塌，且發生時之 EAR 小於警戒雨量 R_w ，則必須調降其警戒雨量值。詳細之警戒雨量調整規則，詳如圖 8。



R_w : warning rainfall for each mesh

EAR : effective accumulated rainfall (R_t)

EAR[#] : if the occurring time of landslide is known, EAR[#] is the EAR at the occurring time, else EAR[#] is the max EAR during the rainfall event

$$R_t = I_t + R_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}}$$

圖 8 各 QPE 網格之坡地災害警戒雨量調整規則

Fig.8 Adjustment rules of slope disaster warning rainfall for each QPE mesh

三、結果與討論

依據前揭修正後之有效累積雨量計算公式與警戒值設定與調整規則，本研究將 2006-2015 年烏來區內各 QPE 網格資料進行警戒發布預報，並分別以空間域及時間域檢驗警戒預報成果：

1. 結果

(1) 空間域精度檢驗

為驗證本研究提出之警戒模式對於坡地災害發

生地點之預測能力，亦即空間域之精度檢驗，本研究以 QPE 之網格為單元，對照林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層，逐一檢視各年度各網格是否已達警戒發布標準 ($EAR > R_w$)，以及各網格內實際崩塌情形。為客觀評估本研究之預測結果，此處分別定義「正判率、誤判率及漏判率」等三項評估指標，詳如表 2。本研究以 2005 年之資料為初始值，並依圖 8 之警戒雨量調整規則，逐年檢視 2006~2015 年計 10 年之警戒發布成效詳如表 3。經統計，本警戒模式應用於新北市烏來區近 10 年之平均正

判率為 69.5%、誤判率為 24.1%、漏判率為 6.4%。

表 2 坡地災害預警模式成果評估指標－正判率、誤判率及漏判率之定義

Table 2 The definition of positive rate, false positive rate and missing rate for warning system of sediment disaster

	警戒Y	警戒N
崩塌Y	A	B
崩塌N	C	D
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
$(A+D)/(A+B+C+D)$	$C/(A+B+C+D)$	$B/(A+B+C+D)$

表 3 2006~2015 年警戒發布結果之正判率、誤判率及漏判率

Table 3 The results of positive rate, false positive rate and missing rate for warning system during 2006~2015

2006	警戒Y	警戒N	2007	警戒Y	警戒N
崩塌Y	0	35	崩塌Y	27	9
崩塌N	1	201	崩塌N	127	74
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
84.8	0.4	14.8	42.6	53.6	3.8
2008	警戒Y	警戒N	2009	警戒Y	警戒N
崩塌Y	35	5	崩塌Y	12	18
崩塌N	162	35	崩塌N	8	199
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
29.5	68.4	2.1	89.0	3.4	7.6
2010	警戒Y	警戒N	2011	警戒Y	警戒N
崩塌Y	15	7	崩塌Y	11	24
崩塌N	25	190	崩塌N	6	196
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
86.5	10.5	3.0	87.3	2.5	10.1
2012	警戒Y	警戒N	2013	警戒Y	警戒N
崩塌Y	21	3	崩塌Y	4	8
崩塌N	151	62	崩塌N	9	216
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
35.0	63.7	1.3	92.8	3.8	3.4
2014	警戒Y	警戒N	2015	警戒Y	警戒N
崩塌Y	2	20	崩塌Y	71	23
崩塌N	0	215	崩塌N	81	62
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
91.6	0.0	8.4	56.1	34.2	9.7

(2) 時間域精度檢驗

良好的預警系統不僅要能預測災害發生地點，尚須於災害發生前提出預警。由於歷年烏來地區之坡地災害有明確發生時間紀錄者，僅 2015 年蘇迪勒颱風時水土保持局建立之重大土砂災害資料（土石流防災資訊網，2016），本研究即以此資料進行時間域精度之驗證。以 8 月 8 日 6 時發生於烏來瀑布公園旁之崩塌災害為例（TWD97 X:305643 Y:2749295，崩塌面積約 33,000 平方公尺，造成民宅建物 2 棟，道路 110 公尺毀損），本研究建立之警戒模式於災害前 6 小時即針對此處所在之網格發布警戒，且同年度之杜鵑颱風時此網格範圍內並未新增災情，而本警戒模式亦未發布警戒，如圖 9。另一案例為 8 月 8 日 6 時發生於信賢里編號新北 DF103 之

土石流潛勢溪流災情，該處災害造成烏砂溪橋上游之大納度假農場多間木屋及餐廳等計 14 間房舍遭土石流毀損；本研究建立之警戒模式亦於災害前 6 小時即針對此地區之網格發布警戒，且同年度之杜鵑颱風此網格範圍內並未新增災情，而本警戒模式亦未發布警戒，如圖 10。

2. 討論

(1) 現行 RTI 模式雨場分割及有效累積雨量計算方式之合理性

現行國內使用之 RTI 模式在建立警戒基準值時，必須先分割雨場，且僅考量前七日之前期雨量。然而，雨場究竟應如何分割才合理，實難有一致性的共識，例如台灣與日本使用之雨場分割方式就差異甚大（水土保持局，2016；国土交通省国土技術政策総合研究所，2001）。此外，前期雨量只考量前七日是否足夠？如八日前，某雨場之日雨量曾達 200 mm，依現行 RTI 模式之計算方式，該筆日雨量對於目前的有效累積雨量之貢獻仍達 11.5 mm，如逕予忽略，似乎仍有討論空間。相較之下，本研究所提出之逐時折減的有效累積雨量修正公式，已將歷年所有前期雨量全部納入計算，毋需再考量取用幾天的前期雨量。同時，本研究建立之警戒雨量 R_w 設定方式（如圖 8），係直接使用每一個時刻的 EAR 與崩塌發生與否之關係，亦即在設定與調整各 QPE 網格之警戒雨量 R_w 時完全毋需涉及雨場分割的問題，因此更為簡便與客觀。

(2) 成效評估指標合宜性之探討

儘管表 2 之正判率計算方式為許多研究所採用（Chen and Fujita, 2014），但其結果之良窳實受當年度降雨多寡影響甚大。以本研究區烏來區為例，正判率逾 84% 之年度均為降雨明顯較小之年度。例如，2006、2009、2010、2011、2013、2014 年，這幾個年度於烏來區所有 QPE 網格之年度最大 EAR 平均值僅約 190~310 mm，遠小於該年全部網格之警戒雨量 R_w 平均值約 440~550 mm（如表 4），亦即大多數網格在降雨量很小的情況下不會發布警戒，而實際上也較少發生崩塌，使得這幾個年度之正判率相對較高。因此正判率似較適合用來評估預警系統是否有過度預測（亦即雨量不大且未致災，警戒卻一直發布）之情形，而本研究所建立之警戒模式依實證結果，10 年平均近 7 成之正判率，似已達成一定成效。

然而，本預警模式更重要的目標，應為在颱風豪雨期間能成功預測何處將發生坡地災害，並儘早提出預警；為此，本研究另訂一參考指標「捕捉率= $A/(A+B)$ 」，其中 A、B 之定義同表 2，各年度之捕捉率成果如表 4。明顯地，於烏來區降雨量比較大的 2007、2008、2012 及 2015 年，其捕捉率明顯較高，亦即表示該年度因降雨導致之崩塌，逾 75% 均能被本警戒模式準確預測到。反之，其餘降雨甚少之年度，由於其崩塌成因可能為地震或人為作用所致，故本警戒模式之捕捉率相對較低。

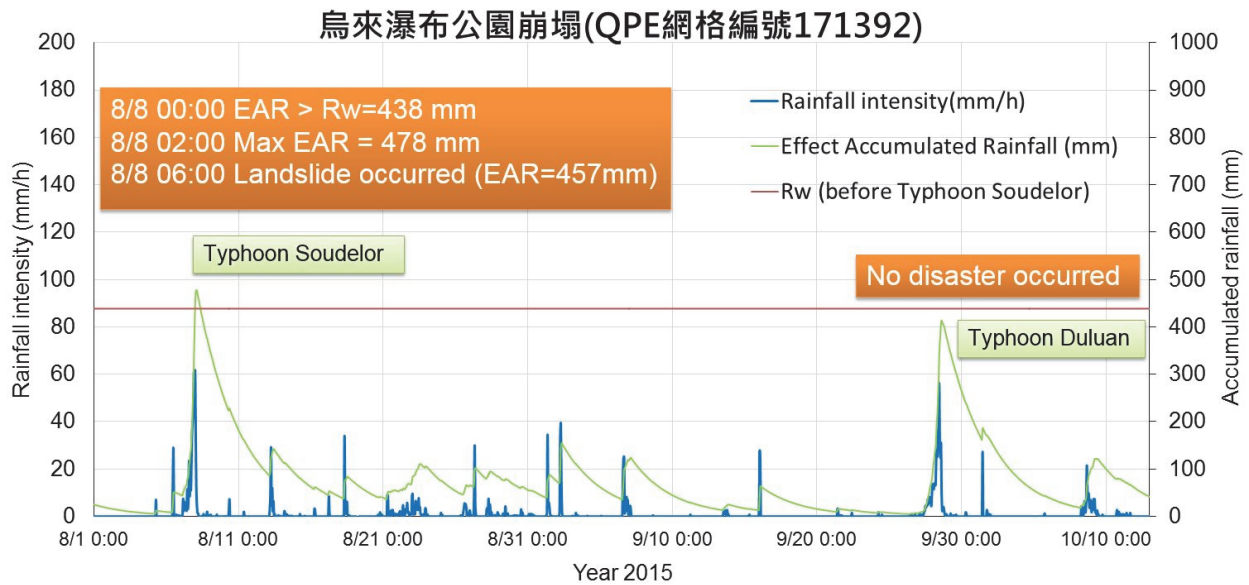


圖 9 烏來瀑布公園之崩塌發生時間與逐時有效累積雨量值變化情形

Fig.9 The occurring time of the landslide in Wulai Waterfall Park and the change of effective accumulated rainfall(EAR)

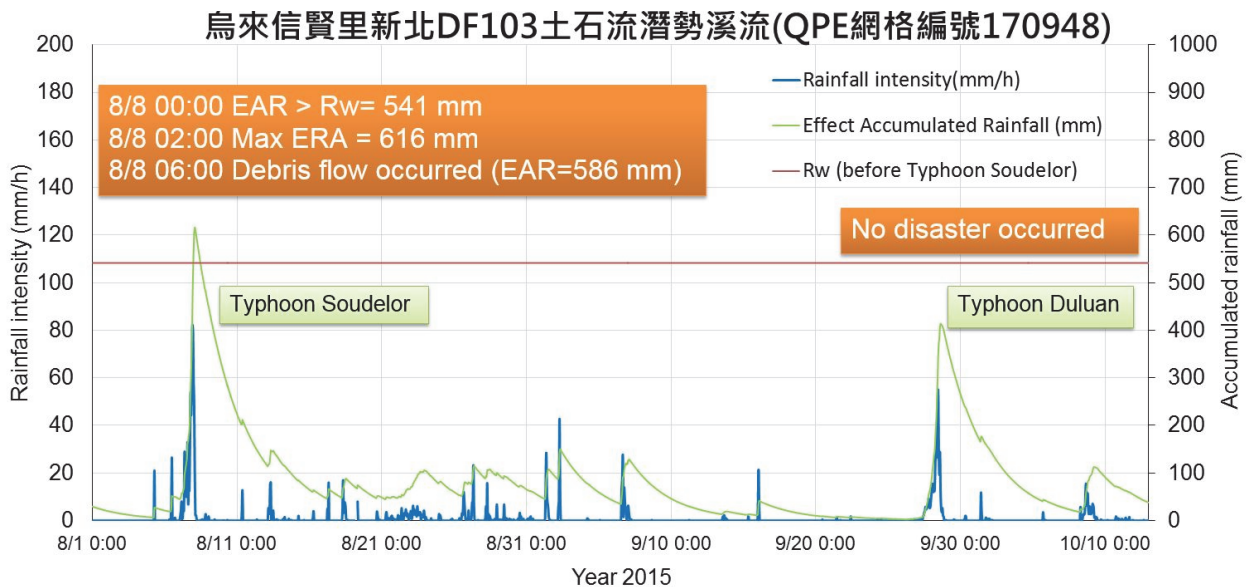


圖 10 烏來區信賢里土石流發生時間與逐時有效累積雨量值變化情形

Fig.10 The occurring time of the debris flow in Wulai District Xinxian Lane and the change of effective accumulated rainfall(EAR)

表 4 2006~2015 年各年度全部網格之平均警戒雨量 R_w 、最大 EAR 平均值及捕捉率

Table 4 The results of average warning rainfall, max EAR and warning hit rate

年度	崩塌網格數	全部網格之平均 R_w (mm)	全部網格之年度最大EAR平均值 (mm)	正判率(%)	捕捉率(%)
2006	35	441.8	195.8	84.8	0
2007	36	401.8	497.1	42.6	75.0
2008	40	463.8	577.7	29.5	87.5
2009	30	512.2	282.0	89.0	40
2010	22	492.7	303.9	86.5	68.2
2011	35	497.0	241.5	87.3	31.4
2012	24	477.3	569.4	35	87.5
2013	12	549.2	309.8	92.8	33.3
2014	22	544.1	192.0	91.6	9.1
2015	94	520.7	531.2	56.1	75.5
平均	37	490.1	377.8	69.5	50.8

註：2006 年之警戒雨量 R_w 係依據 2005 年資料所設之初始值；2007 年起之 R_w 係檢討前一年度警戒發布情形，依圖 8 之警戒雨量調整規則調整後之結果。

(3) 崩塌成因未分類造成之影響

由於本研究採用之林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層，無法區分該崩塌為降雨、地震或人為因素所造成，因此依圖 8 之警戒雨量調整規則，常會造成非降雨導致崩塌所在網格之次年度警戒雨量大幅下降。以 2006 年為例，當年度全部網格之年度最大 EAR 平均值僅 195.8 mm，但經判識有崩塌之網格卻達 35 格，其中警戒雨量 R_w 被強制調降到 200 mm 者高達 23 格，此結果亦造成 2007 年之誤判率暴增至 53.6%(即系統預測有崩塌，但實際未崩)。未來如能將崩塌圖層區分其致災原因，並事先排除非因降雨促崩部份，當能避免前揭問題，並進一步提昇預測精度。同時，由於本研究提出之警戒雨量調整規則簡單且易程式化，未來如能於每次颱風豪雨後儘速完成新增崩塌地之判識，即可快速反應及調整各網格之警戒值 R_w ，以大幅提昇防災預警之效能。此外，由表 4 之「全部網格之平均 R_w 」統計結果，2015 年烏來地區之全部網格之警戒雨量平均值約為 520 mm；此結果與當年度水土保持局所訂定之烏來區土石流警戒基準值 550 mm 相近，亦可證實本研究建立之警戒雨量調整規則之實用性。

(4) 降雨致災熱區之概念

日本近來對於各地區之土砂災害警戒指標，已由早期單純使用累積雨量逐步改用土壤雨量指數 (SWI, Soil Water Index)；例如日本氣象廳自 2013 年開始於官網提供之「土砂災害警戒等級網格資訊」，即是針對全日本每一個 5km 網格均設定不同的土壤雨量指數作為警戒值。但近期一些研究顯示，使用各網格目前之土壤雨量指數與其歷史最大土壤雨量指數之相對值作為預警指

標，效果更佳。例如，Saito and Matsuyama (2012) 使用此概念，定義 NSWI(Normalized Soil Water Index) 為目前某網格之土壤雨量指數除以過去 10 年該網格的最大歷史土壤雨量指數，並應用於 2011 年 Talas 颱風造成重大災情的紀伊半島地區，獲得比單純使用土壤雨量指數更好之預測結果。此概念係基於，如果某地區這次的降雨已逾過去 10 年的最大值，即表此地區將有較高的致災風險。沿用相同的概念，本研究嘗試將各網格之 EAR 正規化 (normalization)，並定義 N-EAR 為：

$$N-EAR = EAR / R_w \quad (5)$$

則 N-EAR 可視為該網格地區之致災風險，同時可定義不同顏色代表不同的風險等級，配合網路地圖平台之呈現，有利於地區整體災害風險之視覺化管理。圖 11 為 2016 年 9 月 15 日莫蘭蒂颱風期間台東地區 QPE 網格之 N-EAR 與坡地災害分布情形；其中地圖上呈現紫色之極高風險地區，即為莫蘭蒂颱風期間之降雨致災熱區。未來，如能將此以網格方式呈現之降雨致災熱區圖，疊合現有水土保持局已公開之土石流潛勢溪流，以及中央地質調查所已公告之山崩與地滑地質敏感區，將有助於地方政府於應變期間執行疏散避難等相關防災作為及決策研判。

(5) QPE 雨量估計值於山區之適用性

雖然近年來許多研究指出，由於山區地形遮蔽效應，QPESUMS 於山區降雨量之估計值有低估之趨勢 (周仲島等, 2015)，但由於目前 QPESUMS 已有累積 10 年以上之歷史雨量資料，且本研究所提出之方法係各 QPE 網格自行與其歷史資料比較，即便其降雨估計值低於地面雨量站實測資料，並不至於影響警戒預測之結果。

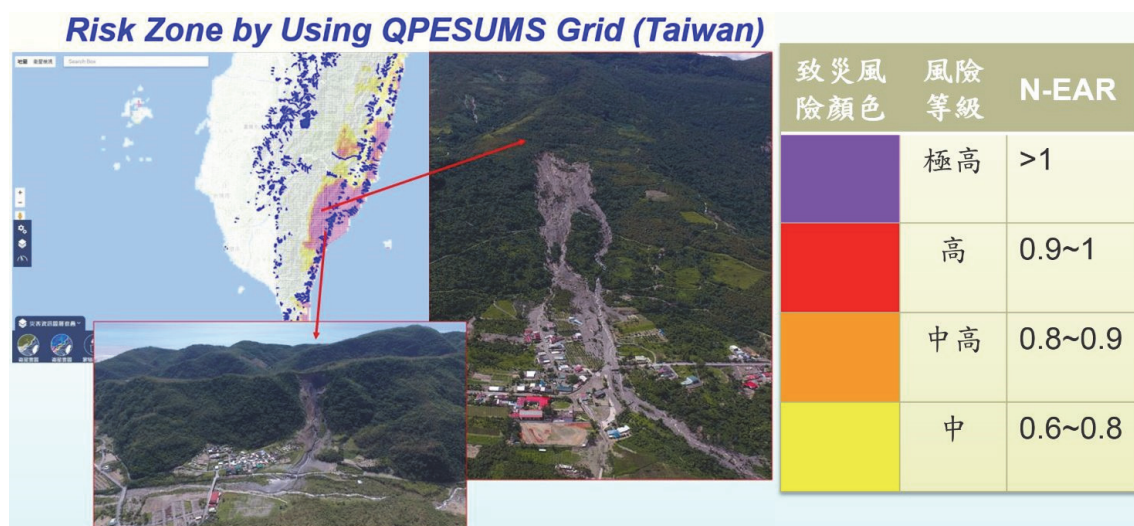


圖 11 2016 年莫蘭蒂颱風期間台東地區 QPE 網格之 N-EAR 與坡地災害分布情形

Fig.11 Distribution of N-EAR and slope land disaster on QPE meshes in Taitung Area During Typhoon Moranti in 2016

四、結 論

針對國內現行 RTI 模式使用之有效累積雨量計算方式所面臨的問題，本研究已提出有效累積雨量計算之改進方案 (逐

時折減法)，此修正公式不必考慮雨場之起、終點，且計算快速，非常適合大量之網格運算。同時，配合此有效累積雨量計算之修正公式，本研究提出一適合以網格為警戒單元的警戒值設定與調整規則，且由於此法在設定時毋須針對歷史雨量作雨

場分割，因此可避免因雨場定義不同導致警戒雨量設定值不一致之情形。

中央氣象局發展的 QPESUMS 系統正式上線已逾 10 年，藉由使用網格尺寸為 1.3km 之雷達降雨資料，可大幅提昇降雨資料之空間解析度。即便 QPESUMS 系統之降水估計值可能略少於地面雨量站之實測值，但經由同一地區長達 10 年實際的案例驗證，本研究提出之使用 QPESUMS 雷達降水資料建立崩塌災害預警模式，不論在預測崩塌事件發生地點之空間域精度上，以及在預測崩塌發生時間的時間域精度上，均有良好之表現。

國內目前僅針對颱風豪雨所導致的土石流災害建立預警機制，但坡地災害除土石流外，尚包括崩塌及地滑，且一般所謂的淺層崩塌發生之機率及範圍更高於土石流，因此如何比照土石流災害建立淺層崩塌之預警機制，係為未來國內坡地防災工作上必須加強之重點。本研究建立之警戒模式，可適用於因颱風豪雨所導致的群發型崩塌及土石流災害，其警戒值訂定方式簡單、客觀、可靠，且具一致性；同時，在警戒發布機制方面，本研究提出以網格為警戒發布單元，並以不同顏色呈現致災風險等級之視覺化管理方式，配合水土保持局已公開之土石流潛勢溪流，以及中央地質調查所已公告之山崩與地滑地質敏感區，將對於颱風豪雨期間各級政府之災害應變中心於災情研判與決策分析上有直接助益。

參考文獻

- [1] 水土保持局 (2016)，「105 年土石流警戒基準值檢討與更新」。(Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) (2016). *The modification and review of the debris-flow warning criteria in 2016*. (in Chinese))
- [2] 水土保持局土石流防災資訊網 (2016)，<http://246.swcb.gov.tw> (Debris Flow Disaster Information Website, <http://246.swcb.gov.tw> (in Chinese))
- [3] 李鎮洋、賴文基、陳振宇、黃效禹、郭力行 (2011)，「莫拉克颱風複合型災害發生歷程的時空重建—以小林村深層崩塌為例」，42(4)，313 - 324。(Lee, C.Y., Lai, W.C., Chen, C.Y., Huang, H.Y., and Kuo, L.H. (2011). "The Reconstruction of the Processes of Catastrophic Disasters Caused by the 2009 Typhoon Morakot." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(4), 313-324. (in Chinese))
- [4] 周仲島、鍾吉俊、修榮光 (2015)，「S 波段雙偏極化雷達在梅雨季豪大雨天氣系統定量降雨估計之應用」，大氣科學，43(2)，91-113。(Jou, J.D., Jung, C.J., and Hsiu, R.G. (2015). "Quantitative Precipitation Estimation Using S-Band Polarimetric Radars in Taiwan Meiyu Season." *Journal of Meteorological Society*, 43(2), 91-113. (in Chinese))
- [5] 陳振宇 (2008)，「國內土石流警戒發布機制沿革」，台灣水土保持季刊，63，1-7。(Chen, C.Y. (2008). "The evolution of debris flow warning system in Taiwan." *Soil and Water Conservation Quarterly*, 63, 1-7. (in Chinese))
- [6] 陳振宇 (2013)，「以雨量為基礎之土砂災害警戒系統成效評估—以台灣及日本為例」，中華水土保持學報，44(1)，50-64。(Chen, C.Y. (2013). "Evaluation of Rainfall-Based Sediment Disaster Warning Systems: Case Studies in Taiwan and Japan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44 (1), 50-64. (in Chinese))
- [7] 詹錢登、李明熹、黃婷卉 (2003)，「土石流發生降雨警戒值模式之研究」，九十一年度防救災專案計畫成果研討會。(Jan, C.D., Lee, M.H., and Huang, T. H. (2003). "Rainfall Threshold Criterion for Debris Flow Initiation." *Proceeding of disaster prevention project conference*. (in Chinese))
- [8] 詹錢登、李明熹 (2004)，「土石流發生降雨警戒模式」，中華水土保持學報，35(3)，275-285。(Jan, C.D., and Li, M.H. (2004). "A Debris-Flow Rainfall-Based Warning Model." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(3), 275-285. (in Chinese))
- [9] 張保亮 (2011)，「QPESUMS 產品應用介紹」，中央氣象局氣象衛星中心。(Chang, P.L. (2011). *Introduction of QPESUMS*, Central Weather Bureau (CWB). (in Chinese))
- [10] 日本氣象庁 (2016)，土砂災害警戒判定メッシュ情報。(Japan Meteorological Agency (2016). *Sediment disaster warning judgment mesh information*. (in Japanese)) (<http://www.jma.go.jp/jp/doshamesh>)
- [11] 日本內閣府 (2015)，「総合的な土砂災害対策の推進について」。(Cabinet Office, Government of Japan (2015). *Promotion of comprehensive sediment-related disaster counter-measures*. (in Japanese))
- [12] 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2001)，「土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法」。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), (2001). *Manual of setting sediment disasters warning criterion based on rainfall indices*. (in Japanese))
- [13] 国土交通省河川局砂防部、氣象庁予報部、国土交通省国土技術政策総合研究所 (2005)，「国土交通省河川局砂防部と氣象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC), Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and Japan Meteorological Agency (JMA) and National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Manual for the method of setting mass-movement disasters warning criterion based on rainfall indices (Draft)*. (in Japanese))
- [14] Aleotti, P. (2004). "A warning system for rainfall-induced shallow failures." *Eng Geo*, 173(3-4), 247-265.
- [15] Baum, Rex L., and Godt, Jonathan W. (2010). "Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA." *Landslides*, 7(3), 259-272.
- [16] Caine, N. (1980). "The Rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows." *Geografiska Annaler*, 62A, 23-27.
- [17] Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014). "A method for predicting landslides on a basin scale using water content indicator." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 70(4), I_13-I_18.
- [18] Keefer, David K., Wilson, Raymond C., Mark, Robert K., Brabb, Earl E., Brown III, William M., Ellen, Stephen D.,

- Harp, Edwin L., Wiczorek, Gerald F., Alger, Christopher S., and Zarkin, Robert S. (1987). "Real-time landslide warning during heavy rainfall." *Science*, 238(4829), 921-925.
- [19] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010). "Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network." *Landslides*, 7(3), 325-338
- [20] Saito, H., and Matsuyama, H. (2012). "Catastrophic landslide disasters triggered by record-breaking rainfall in Japan: Their accurate detection with Normalized Soil Water Index in the Kii Peninsula for the year 2011." *SOLA*, 8, 81-84.
- [21] Thiebes, B. (2012). *Landslide Analysis and Early Warning Systems: Local and Regional Case Study in the Swabian Alb, Germany*. Springer Berlin Heidelberg.
- [22] UNISDR (2009): Terminology on Disaster Risk Reduction. UN/ISDR. (http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf).
- [23] Wiczorek, G.F., and Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M, Hunger O (eds) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Praxis, Springer Berlin Heidelberg, 325-362.
-

2017 年 02 月 05 日 收稿

2017 年 03 月 08 日 修正

2017 年 03 月 23 日 接受

(本文開放討論至 2016 年 9 月 30 日)

土工織物應用於坡面抗沖蝕之效益評估

中華水土保持學報, NN(N): 000-000 (YYYY)

1

Journal of Chinese Soil and Water Conservation, NN (N):000-000 (YYYY)

土工織物應用於坡面抗沖蝕之效益評估

黃奉琦^{[1][2]} 陳國威^[2] 劉維則^{[1][2]} 嚴曉嘉^[2]

摘 要 降雨所形成之地表逕流除對土壤邊坡產生沖蝕外，亦可能因為沖蝕溝產生集流，導致入滲影響坡面整體穩定性。於工程實務上，為避免地表逕流所引至之土壤沖蝕，可在邊坡表面鋪設土工合成材料予以減緩。本研究探討不同結構型態之土工織物抑制坡面沖蝕之成效，利用人工降雨設備進行土壤沖蝕試驗，以表面粗糙度、結構型態、厚度等材料特性為分類依據，探討試驗類型之土工織物，於坡度及降雨強度均為試驗變化因子時，其坡面抗沖蝕之效果。同時，量化試驗所得之數據且明確定義各特徵數據所表示之功能特性，並且考量沖蝕力及材料結構型態因素得到最佳化之土工織物鋪設於坡面抗沖蝕組合。

關鍵詞：土工織物、地表逕流、抗沖蝕。

The Benefits of Geotextiles on Slope Resistance to Erosion.

Feng-Chi Huang^{[1][2]} Kuo-Wei Chen^[2] Wei-Ze Liou^{[1][2]} Hsiao-chia Yen^[2]

ABSTRACT Addition to erosion of soil slopes, surface runoff formed by rainfall may also erosion ditch and Infiltration, which affects the overall stability. In practice, order to avoid the soil erosion caused by runoff, geosynthetics can be laid on the surface of the slope for resistance to erosion. This study explores the effectiveness of geotextiles with different types in inhibiting soil erosion. Based on the material characteristics, such as material surface roughness, material production methods and thickness, soil erosion test was conducted by using artificial rainfall equipment to change the effect of slope and rainfall intensity test factors on the resistance to erosion of geotextiles. Quantify the data obtained from the experiment, the functional characteristics represented by each characteristic data are clearly defined, and the erosion resistance factor of geotextiles with optimized erosion factor is considered.

Keyword: Geotextiles、Runoff、Resistance to Erosion.

(1) 財團法人農業科技研究院

Research Assistant, Agricultural Technology Research Institute, Taiwan

(2) 行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組

Research and Technology Development Team, Soil & Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail: fchuang@mail.swcb.gov.tw.

應用無人載具進行崩塌地快速調查與土砂量推估
以國姓鄉武玄宮崩塌為例



崩塌為地形演育的自然現象，但是若因此造成人命傷亡、建築物、橋梁等公共建設損毀則屬於災害事件。因此藉由蒐集已發生之崩塌案例，分析其地質特性、降雨條件、崩塌土砂量及災害影響範圍等，可初步了解該崩塌事件所造成的影響範圍及可能之誘因。

本研究以106年0613豪雨南投縣國姓鄉武玄宮旁崩塌事件為例，於崩塌後利用UAV進行現場快速調查，並透過Acute3D建立崩塌區三維點雲模型進行分析，以降低人為操作或不同型態資料計算結果所產生之誤差，達到快速及可靠之崩塌事件土砂量估算成果。

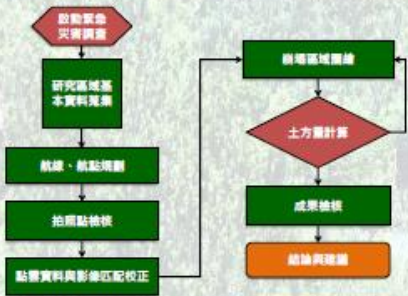


圖2、武玄宮旁崩塌地之範圍與土方計算

研究流程為利用無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）重建災後三維地形數值模型（圖1），利用災後空拍所產製之三維模型，圍繞武玄宮旁崩塌區之土方計算多邊形範圍（圖2）。

Acute 3D 演算概念為使用崩塌邊緣平均高程來計算多邊形內高程之掏刷或堆積深度，亦可使用固定高程來計算堆積土方量或掏刷土方量（圖3），並可針對崩塌區地形變化狀況調整網格尺寸，以達到更細緻之地表變化情況，得到可靠的崩塌事件土砂量估算成果（表1）。



圖3、多邊形土方量計算示意圖

表1、武玄宮旁崩塌地土方估算值

Method	Mean plane
Perimeter	489 m
Area	6,706 m ²
Cut volume	3,605 m ³
Fill volume	26,967 m ³
Sampling distance	2 m



圖1、災後產製之三維地形模型

經過災害現場快速調查，透過無人飛行載具(UAV)進行高解析照片之紀錄，再利用Acute3D將高解析照片生成三維點雲資料，透過高精度的點雲資料計算崩塌土方的變化情況（表1），圖中的崩塌面積約為6,706平方公尺，崩塌地掏刷區域約為26,967立方公尺，經過推估後可得平均深度約為4公尺。

HEC-RAS 於堰塞湖潰壩模擬之應用

以鹿谷小半天崩塌為例



1. 緒論

台灣地理條件特殊，每年地震、颱風事件頻繁，常導致山區發生崩塌、地滑、土石流等土砂災害；其中若發生位置及規模符合一定條件時，大量土石可能堵塞河道產生堰塞湖，一旦堰塞湖潰決，大量洪水伴隨土砂下移，可能形成二次災害，嚴重危及下游居民之安全。為快速評估堰塞湖潰決後，洪水對於下游保全對象影響程度，本研究採用HEC-RAS水理模式，以2017年6月鹿谷小半天崩塌形成堰塞湖事件為例，根據現勘報告與數值高程模型(DEM)資料，建立天然壩與潰壩之數值模型；並計算不同潰壩情境下，下游河道之流量與水位變化等模擬結果，據以推估可能淹水範圍。

2. 材料與方法

2.1 研究流程

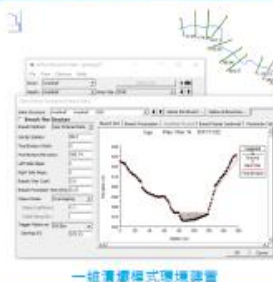
- 堰塞湖災害通報
- 初步評估、壩體尺寸測量
- 當地圖資、水文資料收集
- 建置河道數值模型
- 天然壩體相關參數
- 一維數值模擬計算
- 二維淹水範圍、深度計算
- 成果資料整理

2.2 鹿谷小半天崩塌事件



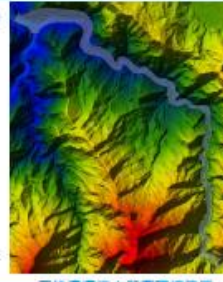
- 災害發生位置：南投縣鹿谷鄉小半天瀑布(東埔筋溪)
- 災害發生時間：2017/06/03
- 累積雨量：605mm
- 崩塌規模：崩塌面積2公頃(裸露0.5、潛在1.5)、平均崩塌深度3公尺、已崩塌土方量15,000立方公尺、潛在崩塌土方量45,000立方公尺
- 堰塞湖尺寸：壅水長度80公尺、寬度25公尺、平均水深7公尺，崩塌初期已發生溢流
- 天然壩高：目前壩高7公尺，若全部潛在崩塌面土方落入河端，壩高可能會增加至17公尺
- 資料來源：水土保持局土106年0601臺南重大土砂災害通報

2.3 HEC-RAS水理模式之潰壩模組



一維潰壩模型環境建置

- 模擬河道長度：3.5公里(27處河道断面)
- 平均坡度：6‰
- 曼寧粗糙係數：0.04~0.05(手冊建議)
- 開口坡度：45度(建議0~45度)
- 潰壩時間：0.25小時(建議0.1~1小時)
- 潰壩類型：溢頂破壞
- 潰壩情境：假設壩高7公尺與壩高17公尺時，潰壩比例25%、50%、75%、100%對下游流量、水位之增加情形
- 模擬流量：2年、50年、100年、200年洪峰流量



二維潰壩淹水範圍環境建置

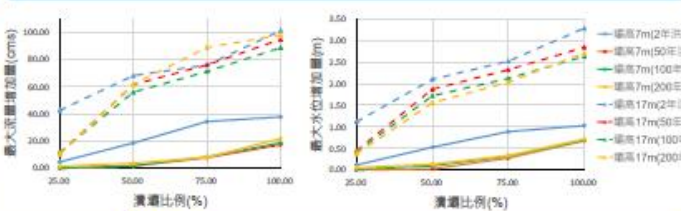
- 底圖：一公尺數值高程模型轉三角網格
- 網格數量：63,693個
- 平均網格大小：4.06平方公尺

3. 成果與討論

3.1 一維潰壩模擬成果

	壩高7公尺	壩高17公尺
Costa 潰壩流量推估	52.41cms	151.69cms
三角型單位歷線法	17.78cms	86.67cms
潰壩最大流量[HEC-RAS]	37.88cms	107.26cms
潰壩水位提升[HEC-RAS]	1.03m	3.28m
蓄水量推估	8230m ³	35794m ³

3.2 不同情境比較



3.3 二維淹水範圍推估



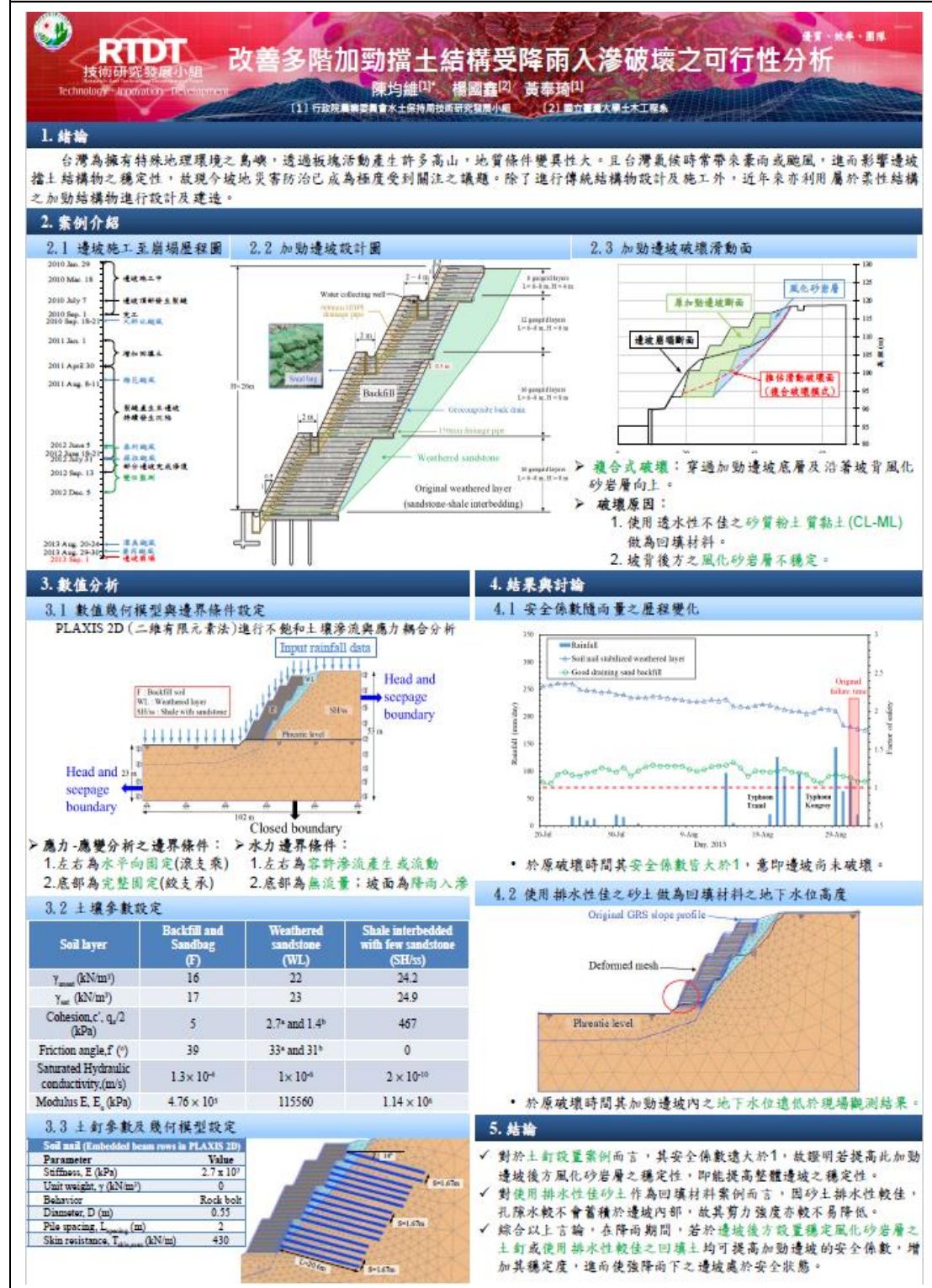
二維河道最大水深模擬圖

- 提供潰壩造成河道水深提高最多的位置
- 提供潰壩所影響的淹水範圍
- 提供動態潰壩模擬，追蹤不同時段洪水所到位置
- 與衛星影像比較，比對是否有影響到保全對象所在位置

4. 結論

- 本研究利用HEC-RAS快速建立一維、二維河道水理模型，在壩高7公尺並發生潰壩時，最多造成下游提升37.88cms的流量和1.03m水位抬升；在壩高17公尺時，最多造成下游提升107.26cms的流量和3.28m水位抬升。
- 模擬的結果呈現在不同經驗公式推估的範圍內，且能提供較單一經驗公式推估，更多位置與不同潰壩比例潰壩時流量、水位的變化。
- 在此案例環境下顯示，暴雨初期所導致的潰壩對流量與水位影響較明顯，而50年、100年、200年洪峰環境下，潰壩所造成下游流量、水位抬升量相似。
- 未來可以針對降雨型、地震型與有堰塞湖潛勢的崩塌案例建立更多模型，在未來遇到堰塞湖災害時能夠快速提出初步危害影響評估。

改善多階加勁擋土結構受降雨入滲破壞之可行性分析



附錄-9