報告編號：swcb-107-144

極端氣候下太麻里溪流域複合式土砂災害模擬與災害風險評估

Compound Sediment-Related Disasters Simulation and Management of Taimali River Watershed under Climate Change

執行單位：國立臺北教育大學

執行期間：107 年 02 月 09 日至 107 年 12 月 31 日

計畫主持人：蔡元芳 教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 107 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

極端氣候下太麻里溪流域
複合式土砂災害模擬與災害風險評估

摘要

有鑑於氣候變遷下極端氣候事件頻傳，屢屢造成國人生命財產重大損失，本研究之目的在於透過全流域範圍的研究尺度，調查分析莫拉克風災後太麻里溪流域的河床沖淤變化，並預測流域內各聚落將面臨的複合式土砂災害。以莫拉克風災受創嚴重之嘉蘭村為例，使用無人飛行載具 UAV (Unmanned Aircraft System)拍攝高解析度影像並建置數值地形模型；並且模擬複合式災害情境，完成莫拉克颱風降雨事件下之災情模擬與驗證。

為了預測未來氣候變遷下太麻里溪流域聚落可能面臨的各種土砂災害，本研究以 TCCIP (Taiwan Climate Change projection and adaption Information Platform)未來颱風降雨資料庫，分析並推估太麻里溪全流域於未來極端颱風降雨事件下流域河床沖淤變化與嘉蘭村之關係，再以 FlO-2D 進行模擬分析，進一步探討複合式災害影響範圍，並結合數值模式成果進行 3D 成果展示，以達到災害預警與減災的目的，以供相關防災單位參考以進行決策。

關鍵字：複合式土砂災害、數值模擬、極端氣候、3D 虛擬實境

Compound Sediment-Related Disasters Simulation and Management of Taimali River Watershed under Climate Change

Abstract

In view of a lot of extreme weather events causing the public to lose their life and property, the purpose of the study is to investigate and analyze the erosion and deposition of the riverbed in the Taimali River Basin, and to predict the potential of compound sediment-related disaster after the typhoon Morakot. Firstly, the JiaLan village was taken as an example to establish Digital Terrain Model (DTM) of JiaLan. The Unmanned Aircraft System (UAV) simulated scenarios of compound sediment-related disasters certificating the simulation of typhoon Morakot rainfall events.

In order to predict the variously potential compound sediment-related disasters of the villages in Taimali River Basin in the future, the study intends to analyze and estimate the damage of Taimali riverbed and the JiaLan village, with the future typhoon rainfall data base from Taiwan Climate Change projection and adaption Information Platform (TCCIP). Moreover, the numerical simulation was adopted to analyze the compound sediment-related disaster's influence and display with 3D Virtual Reality. The study not only achieved the goal of disaster prevention and response but also provided more information as decision reference for correlate departments.

Keywords：Combined Sediment-Related Disasters, Numerical Simulation, Extreme Climate, 3D Virtual Reality

目次

摘要.....I

Abstract..... II

目次.....IV

表次.....VIII

圖次.....X

第一章 緒論.....1

第一節 研究緣起 1-1

第二節 研究目標 1-3

一、全程目標 1-3

二、本年度目標 1-4

第三節 研究區概述 1-6

一、研究範圍 1-6

二、地勢 1-7

三、地質 1-10

四、土壤 1-12

五、雨量 1-13

六、氣候 1-14

七、土地利用 1-15

第二章 文獻回顧 2-1

第一節 土砂產量評估 2-1

一、沖蝕產砂評估 2-1

二、崩塌產砂評估 2-4

第二節 流域土砂變動分析 2-11
第三節 災害數值模擬 2-14
第四節 複合式災害 2-17
第五節 無人飛行載具(UAV) 2-20
一、無人飛行載具(UAV) 2-20
二、UAV 於防災之應用 2-20
三、3D 建模 2-21
第三章 研究方法 3-1
第一節 研究流程 3-1
第二節 研究區災情資料蒐集 3-3
一、莫拉克災害事件 3-3
二、子集水區分析 3-8
第三節 流域土砂生產計算 3-10
三、土砂沖蝕量 3-10
四、土砂崩塌量 3-11
第四節 土砂收支分析 3-28
第五節 現地調查及 UAV 航拍 3-33
一、嘉蘭村之現地調查 3-33
二、無人飛行載具(UAV) 3-35
三、航拍前置作業 3-38
四、UAV 航線規劃 3-39
第六節 TCCIP 未來颱風降雨事件分析 3-41
第七節 複合式土砂災害評估 3-45
一、洪澇災害數值模擬 3-45

二、複合式災害情境設計 3-47
第八節 模擬境況之 3D 虛擬實境呈現 3-50
第四章 研究結果 4-1
第一節 莫拉克事件全流域土砂生產計算結果 4-1
一、沖蝕模擬 4-1
二、崩塌模擬 4-4
第二節 莫拉克事件土砂收支分析結果 4-14
一、土砂運移探討 4-14
二、土砂收支探討與比較 4-16
第三節 未來颱風降雨事件全流域土砂生產結果 4-23
一、沖蝕模擬 4-25
二、崩塌模擬 4-26
第四節 未來颱風降雨事件土砂收支分析結果 4-30
一、土砂運移探討 4-30
二、土砂收支探討 4-31
第五節 複合式土砂災害評估：FLO-2D 模擬及呈現 4-35
一、莫拉克事件主河道之清水流洪澇模擬 4-39
二、莫拉克事件主河道地形抬升後之高含砂水流模擬 .. 4-40
三、未來颱風降雨事件主河道之清水流洪澇模擬 43
四、未來颱風降雨事件主河道地形抬升後之高含砂水流模擬 4-44
五、未來颱風降雨事件支流發生土石流及主河道地形 抬升之高含砂水流模擬 4-46

第五章 結論與建議 5-1

第一節 結論與建議 5-1

第二節 預期效益 5-4

參考文獻 參-1

附錄 附錄-1

表次

表 1-1　太麻里溪地形高程統計表 1-7
表 1-2　太麻里溪地形坡度統計表 1-8
表 1-3　太麻里溪地形坡向統計表 1-9
表 1-4　太麻里溪雨量監測相關資料表 1-13
表 1-5　太麻里溪氣候相關資料表 1-15
表 1-6　太麻里溪土地利用型態資料表 1-16

表 2-1　通用土壤流失公式比較 2-3
表 2-2　崩塌量估算方式比較 2-6
表 2-3　淺層崩塌模式比較 2-8

表 3-1　各集水區基本資料表 3-9
表 3-2　坡度深度對應表 3-23
表 3-3　坡度－覆土深度對應表 3-23
表 3-4　Phantom 4 Pro V2.0 無人飛行載具基本資料 3-37
表 3-5　TCCIP 近未來颱風降雨事件 3-43
表 3-6　TCCIP 世紀末颱風降雨事件 3-44

表 4-1　莫拉克事件太麻里溪集水區土砂沖蝕產量 4-4
表 4-2　太麻里溪集水區土壤性質參數統計資料彙整表 4-5
表 4-3　土壤水力參數之研究整理 4-7
表 4-4　土壤參數敏感度分析基準值 4-8
表 4-5　各地質參數設置表 4-9
表 4-6　莫拉克事件太麻里溪子集水區崩塌產量 4-13
表 4-7　莫拉克事件太麻里溪子集水區土砂搬運能力 4-15
表 4-8　太麻里溪集水區土砂收支結果 4-17
表 4-9　莫拉克事件太麻里溪流域土砂收支 TRIGRS 模式模擬結果 4-20
表 4-10　崩塌量與崩塌面積比較表 4-23
表 4-11　未來颱風降雨事件太麻里溪集水區土砂沖蝕產量 4-26
表 4-12　莫拉克事件太麻里溪子集水區崩塌產量 4-29
表 4-13　未來颱風降雨事件太麻里溪子集水區土砂搬運能力 4-31

表 4-14　未來颱風降雨事件太麻里溪流域土砂收支 TRIGRS 模式模擬結果 4-32
表 4-15　不同泥砂體積含量之含砂水體運動形態 4-36
表 4-16　層流阻滯係數建議值列表(節錄) 4-37
表 4-17　曼寧係數建議值列表(節錄) 4-37
表 4-18　土石流流變參數實驗研究 4-38
表 4-19　DF079 土石流流量 4-46

圖次

圖 1-1　複合式災害連鎖反應概念圖 1-3
圖 1-2　研究範圍 1-6
圖 1-3　太麻里溪地形圖 1-8
圖 1-4　太麻里溪坡度圖 1-9
圖 1-5　太麻里溪坡向圖 1-10
圖 1-6　太麻里溪地質圖 1-12
圖 1-7　太麻里溪土壤圖 1-13
圖 1-8　太麻里溪雨量站分布圖 1-14
圖 1-9　太麻里溪土地利用圖 1-16

圖 2-1　複合式災害風險分析流程圖 2-18
圖 2-2　三維建模流程 2-21
圖 2-3　三角網格化示意圖 2-23
圖 2-4　三維紋理貼圖 2-24

圖 3-1　研究流程圖 3-1
圖 3-2　莫拉克事件太麻里溪流域時雨量圖 3-3
圖 3-3　太麻里溪莫拉克颱風累積雨量圖 3-4
圖 3-4　太麻里溪堰塞湖與崩塌地分佈 3-5
圖 3-5　太麻里溪中游受災情形 3-6
圖 3-6　太麻里溪下游受災情形 3-7
圖 3-7　太麻里溪流域集水區分區圖 3-8
圖 3-8　土砂產量估算流程 3-10
圖 3-9　TRIGRS 座標系統示意圖 3-13
圖 3-10　TRIGRS 模式對 Z 軸之定義 3-14
圖 3-11　方程式下邊界示意圖 (A)無限深度 (B)有限深度 3-15
圖 3-12　太麻里溪集水區高程圖 3-21
圖 3-13　集水區坡度圖 3-22
圖 3-14　集水區流向圖 3-24
圖 3-15　Rosenblueth 點估法示意圖 3-27
圖 3-16　集水區產砂概念圖 3-29
圖 3-17　土砂收支分析流程圖 3-30
圖 3-18　子集水區與河系串聯示意圖 3-30

圖 3-19　平衡濃度公式－坡度與濃度之關係 3-33
圖 3-20　嘉蘭村位置圖 3-34
圖 3-21　嘉蘭村現況圖 3-35
圖 3-22　Phantom 4 Pro V2.0 無人飛行載具外觀 3-37
圖 3-23　UAV 作業範圍與限航區範圍 3-39
圖 3-24　UAV 航線規劃軟體示意圖 3-40
圖 3-25　FLO-2D 主程式介面圖 3-45
圖 3-26　FLO-2D GDS 圖 3-46
圖 3-27　FLO-2D Mapper 圖 3-47
圖 3-28　初始化處理 3-50
圖 3-29　正射鑲嵌圖 3-51
圖 3-30　數值地表模型 3-51

圖 4-1　莫拉克事件太麻里溪集水區沖蝕量分佈 4-3
圖 4-2　土壤參數敏感度分析圖 4-9
圖 4-3　莫拉克事件太麻里溪流域崩塌地分布 TRIGRS 模式模擬結果 4-10
圖 4-4　莫拉克事件太麻里溪流域崩塌產量 TRIGRS 模式模擬結果 4-12
圖 4-5　太麻里溪流域集水區主河道段分群圖 4-16
圖 4-6　莫拉克風災後太麻里溪主河道沖淤變化 4-18
圖 4-7　莫拉克事件太麻里溪流域土砂收支圖 4-19
圖 4-8　莫拉克事件太麻里溪 TRIGRS 模式模擬主河道沖淤變化 .. 4-21
圖 4-9　莫拉克事件太麻里溪流域 TRIGRS 模式模擬土砂收支圖 .. 4-22
圖 4-10　未來颱風降雨事件降雨歷線圖 4-24
圖 4-11　未來颱風降雨事件降雨分布圖 4-24
圖 4-12　未來颱風降雨事件太麻里溪集水區沖蝕量分佈 4-25
圖 4-13　未來颱風降雨事件太麻里溪流域崩塌地分布 TRIGRS 模式模擬結果 4-27
圖 4-14　未來降雨事件事件太麻里溪流域崩塌產量 TRIGRS 模式模擬結果 4-28
圖 4-15　未來颱風降雨事件太麻里溪主河道沖淤變化 4-33
圖 4-16　莫拉克事件太麻里溪流域土砂收支圖 4-34
圖 4-17　模擬事件之清水流入流點位置 4-35

圖 4-18　莫拉克事件主河道之清水流最大流動深模擬結果..... 4-39
圖 4-19　莫拉克事件主河道之清水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現..... 4-40
圖 4-20　莫拉克事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果..... 4-41
圖 4-21　莫拉克事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現 4-41
圖 4-22　太麻里溪中游嘉蘭村災害區位平面圖 4-42
圖 4-23　未來颱風降雨事件主河道清水流最大流動深模擬結果.. 4-43
圖 4-24　未來颱風降雨事件主河道清水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現..... 4-44
圖 4-25　未來颱風降雨事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果 4-45
圖 4-26　未來颱風降雨事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現 4-45
圖 4-27　未來颱風降雨事件多利溪土石流模擬結果..... 4-47
圖 4-28　未來颱風降雨事件支流發生土石流及主河道抬升後高含砂水流最大流動深模擬結果 4-48
圖 4-29　未來颱風降雨事件支流發生土石流及主河道抬升後高含砂水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現 4-48

第一章 緒論

第一節 研究緣起

臺灣地理環境特殊，屬亞熱帶地區，每年的颱風、梅雨等氣候現象所帶來之集中性豪雨，常為臺灣帶來不同程度的災害，2009 年 8 月 6 日至 8 月 10 日，莫拉克颱風挾著強風豪雨肆虐，造成臺灣地區相當慘重之災情。根據內政部消防署之統計，莫拉克颱風共造成全臺 675 人死亡、24 人失蹤及 34 人受傷等慘重傷亡；另外也造成房屋全倒 472 棟、半倒 128 棟，以及金額高達 164 億 6863 萬的農業損失。強烈的土石流與土砂災害更造成太麻里溪流域多數民房被土石掩埋、河堤護岸沖毀、農田房舍淹沒、道路崩塌、鐵道路橋樑毀損等嚴重災情。這些慘痛的教訓，無一不是在警告臺灣山坡地土砂災害的嚴重性，並已逐漸造成民眾生活的恐懼與不安。尤其近年來隨著全球氣候環境變遷趨勢加劇，導致各地區極端氣候事件頻傳，其所造成之災害規模與範圍已超乎我們之預測，聯合國國際減災策略組織 ISDR（International Strategy for Disaster Reduction）既表示 2009 年中全球有五千五百萬人受到極端氣候事件之影響，而亞洲地區更有四千八百萬人受到氣候事件引起之颱風和水患災害威脅。而臺灣氣候變遷報告（2011）亦提及莫拉克風災後大量的崩塌等土砂災害造成河道的淤積與抬升，將導致更為嚴重的水土複合型災害，從上游的崩塌水庫淤積，河道淤積衍生河水漫流、土砂沖刷與二次災害，到海岸受到砂源補助侵淤的問題，將會持續對臺灣造成國土利用的衝擊，由此可知，未來極端氣候事件頻傳下，受極端氣候事件誘發之天然災害會變得更難以預測，因此，如何全面性地針對災區聚落進行通盤的、長遠的防減災政策評估與規

劃遂為目前當務之急。

在因應與瞭解極端降雨事件致災影響力上，歷往研究多針對單類型災害探討，然極端降雨將造成環境地形於短時間內產生巨量變化，各類複合式危害(Multi-hazard)具連鎖性，促成複合式災害(Compound Disaster)發生。如民國 98 年莫拉克颱風之小林村事件，前後發生崩塌、堰塞湖與洪澇災害，其災因非單一災害造成，而為多種災害產生連鎖效應導致。此外該次事件不僅小林村具災害風險，近期研究指出莫拉克颱風期間約有 168 個村里肇生多重危害，意指這些村里範圍內同時發生兩種以上危害如山崩、土石流與淹水等現象。其中更有 41 個村里內同時發生兩種以上災情如聯外道路中斷、房屋毀損、人員傷亡與橋樑斷裂等情形(蔡元芳與林祺岳，2010)。而民國 104 年蘇迪勒與杜鵑颱風更重創臺北烏來山區地帶，南勢溪流域因極端降雨導致大量崩塌與邊坡坍方事件，導致烏來聚落對外道路中斷，而下游方面則是大量土方量淤積，使臺北河濱公園遭受到毀損。

由以上案例本研究可歸類以下現象，(1)極端降雨造成災害危及聚落生命安全：複合式災害造成交通道路與橋樑中斷，導致救難資源因為交通阻斷，無法即時投入救災；(2)未知災害導致原防救災規劃失效：目前防災風險評估與規劃上多針對單一類形災害，如水保局小林社區土石流避難處所為小林國小，但因缺乏考量山崩潛勢對當地之危害影響，而造成原規劃措施失效，此外各災害可能具有連鎖反應特性，將導致災害之未知情況發生；(3)極端降雨下災害規模超出專家預期：如民國 98 年莫拉克事件使獻肚山深層崩塌以及太麻里溪流域河道拓寬嚴重，而 104 年蘇迪勒與杜鵑則重創南勢溪流域，颱風造成巨量降雨造成未知規模之災害，此三案歷慘重情況皆為複合式災害現象所造

成。因此防救災領域上，如何透過理論與災害數值模式針對事件進行模擬，並建置複合式災害時空資訊並依結果規劃策略與措施，如**圖 1-1**，期望能在災前瞭解災害潛勢分布並籌備以應對極端降雨事件引起之災害，以讓相關權益關係人能夠做好對複合式災害之調適工作。

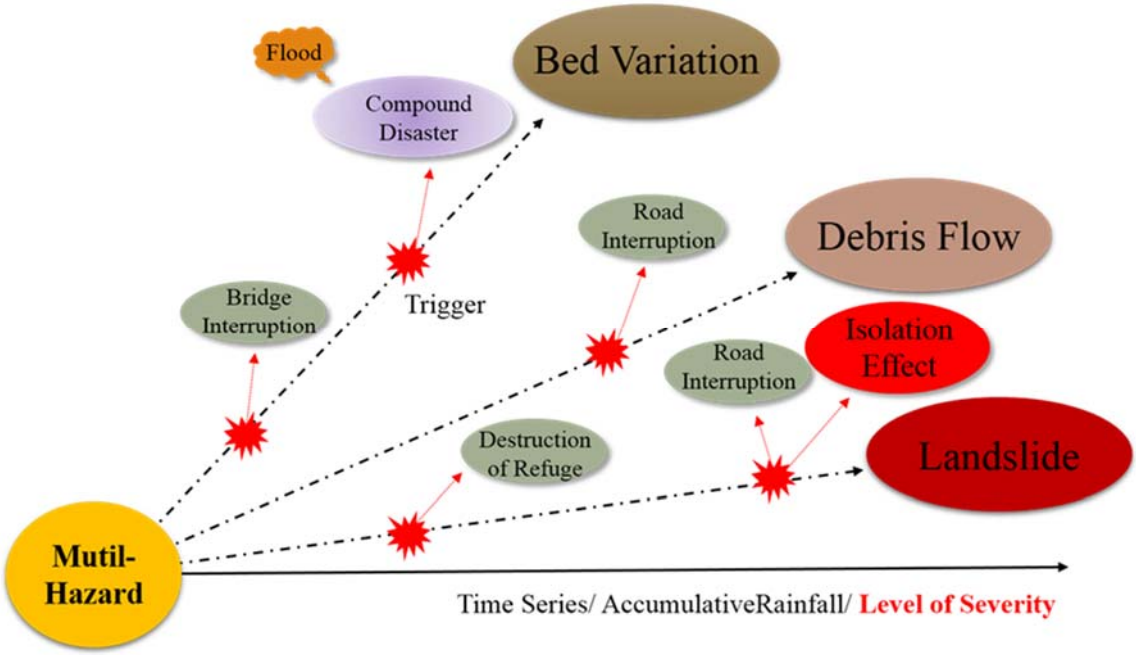


圖 1-1　複合式災害連鎖反應概念圖

第二節 研究目標

一、　全程目標

(一)第一年(107)：研究區資料庫建置及高潛勢複合式土砂災害村落調查與評估模式建立

第一年度計畫主要目標為針對研究範圍太麻里溪流域進行資料的蒐集與資料庫建置，基本資料包含流域的雨量、流量、水位、泥砂濃度及輸砂量等水文資料，以及土地利用等人文資料。於進階資料部分則包含流域土砂生產及河道沖淤之變遷調查，以及針對流域內之高潛勢複合式土砂災害範圍與影響村落進行調查與評估模式建立。

(二)第二年(108)：極端氣候下複合式土砂災害模擬與衝擊損失之評估

結合第一年建置之資料蒐集與災害發生區位探討進行災害模擬區位選定;模擬氣候變遷下太麻里溪流域土砂災害境況與災害損失評估。以流域整體之觀念，結合第一年流域土砂生產及河道沖淤變遷調查資料，搭配不同極端氣候降雨頻率及雨量，利用不同數值模擬方式進行流域內土砂災害之模擬，並延伸其結果進行防治工程成效結果模擬，最後，利用前述之成果繪製土砂災害影響範圍及災害損失之評估。

(三)第三年(109)：極端氣候下太麻里溪流域災害風險評估

根據數值模擬軟體模擬各種不同極端氣候降雨頻率及最大降雨量，進行土砂災害防治與防汛工法組合設置，進一步找尋具有減災效益之工程配置，透過計算各工法建造成本、保全對象災損重建成本等資訊進行成本總額評估，其評估結果可做為當地最適宜之土砂災害工程整治建議或者居民遷村等最適方案產出。此方案評估方式可提供政府與工程單位於計畫前之決策參考，使其工程投入資金與工程改善成效達到最大效益，並進一步規劃提出流域內聚落於未來面對複合式災害時的短、中、長程因應計畫。

二、 本年度目標

目前災害模擬與防災規劃上多針對單一災害類型評估，本研究以具有複合式災害驗證太麻里溪流域的聚落做為研究範圍，首先以複合式土砂危害為主軸，當中包括評估土砂生產(崩塌、沖蝕)與運移、土石流危害範圍劃定，以及分析土砂堆積作用對主河道地形的變化。當累積雨量增加崩塌規模逐漸變大，在土材與流量皆足夠的情況下，野

溪因而發生土石流災害，大量的土方量移至下游溢流口而後與主流處匯合，主流在流量大的情況開始搬運這些土方量至下游地帶，甚至水流與粒徑較小一同往下游流動，而形成高含砂水流。然在大量土方運移作用的情況下，至下游較平緩處由於河床坡度較小，土砂搬運濃度降低的情況，導致部分土砂於平緩的河床上產生淤積，且特別為曲流特性的凸岸，因而使河床地形抬升。故溪河段河床地形高程隨土砂不斷的搬運與堆積而逐步抬升，易造成單場事件短時間內造成河床高度變化的情況，故導致洪澇危害有擴張的情形，且土砂導致河床地形抬升，故亦使河段洪澇水位提升而洪澇範圍擴張，造成原本未預警會發生災害的聚落而受到災害，故此本研究希望藉由複合式災害的土砂數值推估模擬的方式來進行災害潛勢範圍的劃定與參考。詳細研究目標分述如下：

(一)研究區資料蒐集與資料庫建置，包含雨量、流量、水位、泥砂濃度及輸砂量等水文資料，以及土地利用及權屬等人文資料。

(二)現地調查，包含崩塌地分布、土石流危險溪流及現有水土保持設施等調查。

(三)流域土砂生產及河道沖淤變遷調查與分析。

(四)探討流域內聚落之土砂災害潛勢範圍與評估模式建立。

第三節 研究區概述

一、 研究範圍

太麻里溪流域位於臺東縣境內，流域範圍涵蓋臺東縣金峰鄉及太麻里鄉。主流源自於中央山脈南段主峰北大武山、南大武山的東側斜坡，長約 35 公里、集水面積達 226.3 平方公里，流向由西向東流注入太平洋，從上游至下游流經可魯、介達、庫濃溪及太麻里溪四個主要子集水區（**圖 1-2**），流域境內西高東低，高低落差相當大，起伏量達 3000 公尺，平均高度約為 800 公尺。河川特性為流路短、溪床陡峻、上游多深谷、向源侵蝕顯著，中下游兩岸多有河階地形與沖積扇之發育，出口處為人口聚集之太麻里溪沖積扇。

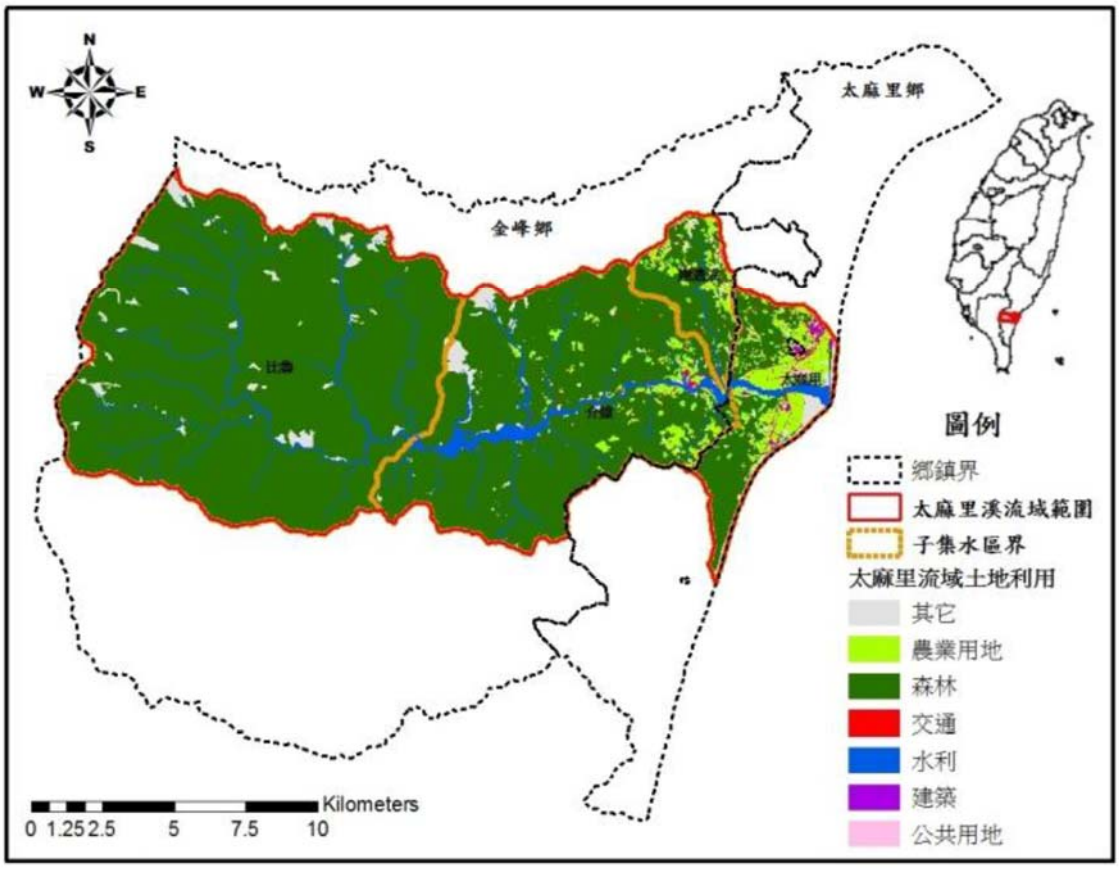


圖 1-2 研究範圍

二、 地勢

太麻里溪高程分布從出海口開始包含 0-3,000 公尺，主要高程以 500-1,000 公尺為主，共佔集水區內 40%以上如表 1-1、圖 1-3。

表 1-1 太麻里溪地形高程統計表

高程(公尺)	所佔百分比(%)
0-100	5.24
100-250	5.36
250-500	15.95
500-750	21.55
750-1,000	20.49
1,000-1,250	11.91
1,250-1,500	6.98
1,500-2,000	7.45
2,000-2,500	3.91
2,500-3,000	1.16
3,000 以上	0.01
合計	100.00

資料來源：賴文基等人，2016

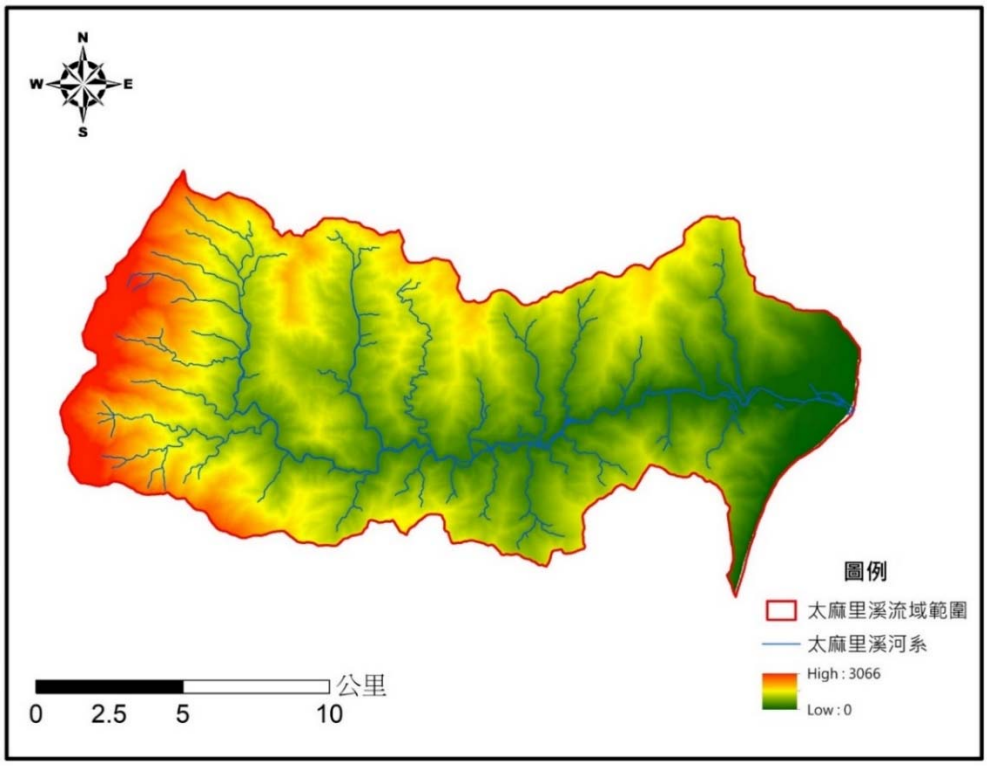


圖 1-3　太麻里溪地形圖

計畫區坡度以 30-40 度為主，集水區內多以坡地及林班地為主，如表 1-2 及圖 1-4 所示。

表 1-2　太麻里溪地形坡度統計表

坡度(%)	所佔百分比(%)
0-5	3.74
5-15	3.25
15-30	5.69
30-40	7.15
40-55	16.87
55-100	49.43
100 以上	13.87
合計	100.00

參考資料：賴文基等人，2016

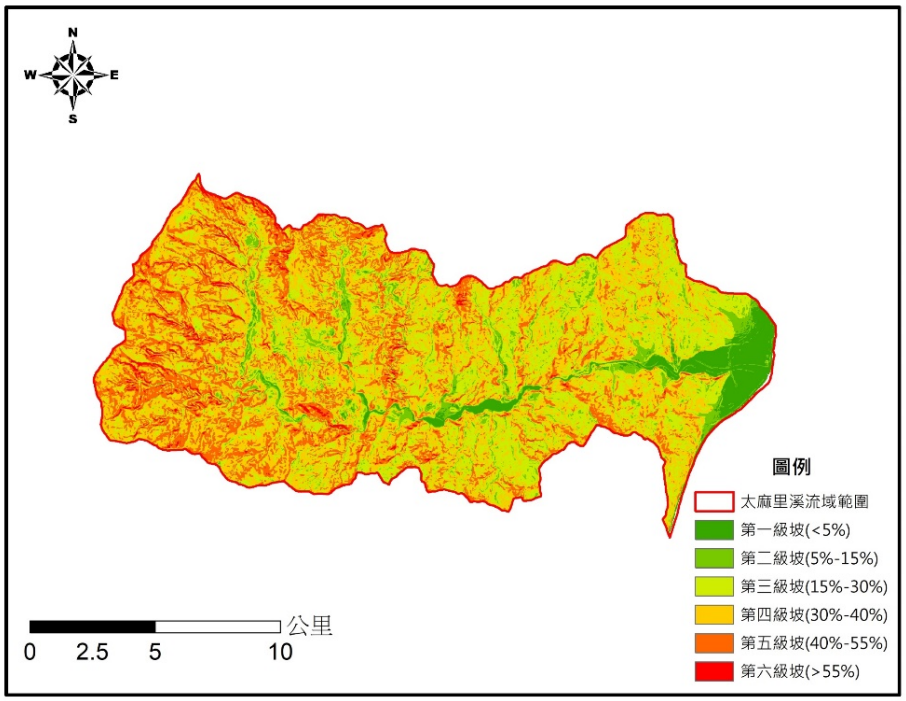


圖 1-4　太麻里溪坡度圖

坡向部分，集水區內以東坡為主，約佔 18%，其他坡向多在 10%左右，如表 1-3 及圖 1-5 所示。

表 1-3　太麻里溪地形坡向統計表

坡向	所佔百分比(%)
北	9.41
東北	14.08
東	18.52
東南	15.44
南	12.77
西南	11.32
西	10.26
西北	8.21
合計	100.00

參考資料：賴文基等人，2016

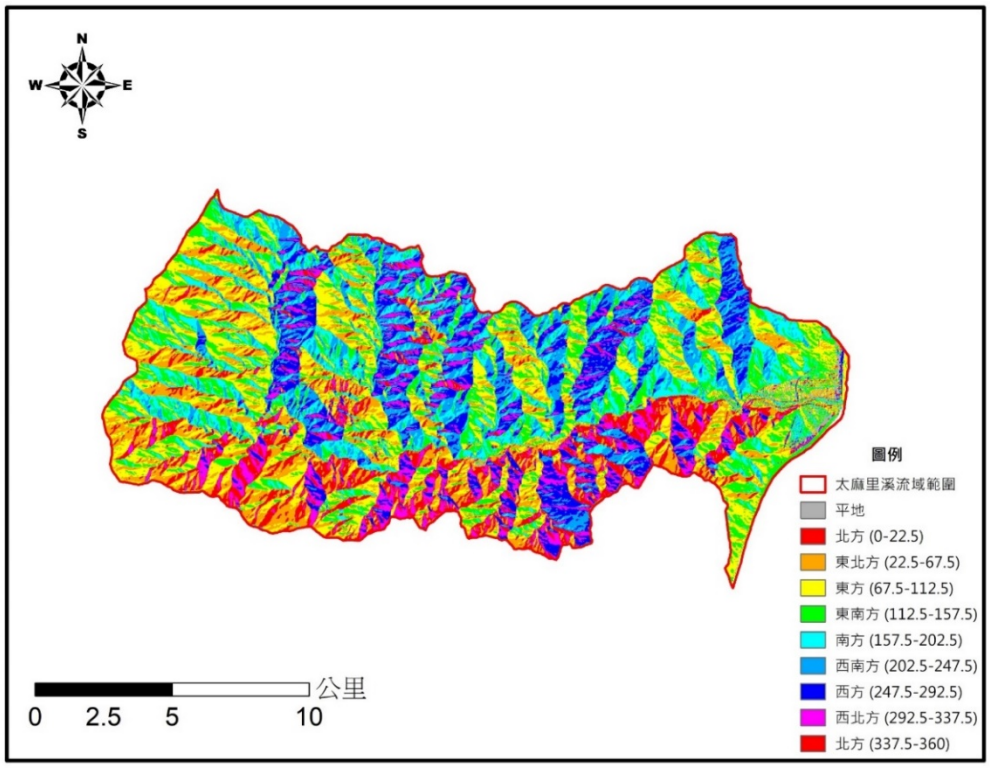


圖 1-5　太麻里溪坡向圖

三、　地質

將太麻里溪流域與臺東縣區內地質分布圖套疊後，可知計畫範圍內之地質分布為：大南澳片岩、廬山層、畢祿山層，詳細說明如下。

(一)大南澳片岩：

大南澳片岩又名大南澳變質雜岩，屬於大陸地殼的一部分，原來的沉積岩堆積時代為古生代二疊紀到中生代，至今受到至少兩次主要的地殼變動。第一次是發生於中生代晚期的「南澳運動」，與古太平洋板塊向西的隱沒作用有關，形成兩個變質帶，分別為太魯閣帶及玉里帶。太魯閣帶是由各類片岩、片麻岩、大理岩、角閃岩，和少量基性火成岩塊組成，有酸性入侵岩，為高溫低壓的環境；玉里帶(本區之大南澳片岩屬於此種變質帶)則為岩性單調的泥質片岩，夾有海洋地殼的岩塊，但缺少大理岩及酸性火成

岩，為低溫高壓的環境。本區出露之大南澳片岩為黑色片岩、綠色片岩及大理岩所組成。

(二)廬山層：

廬山曾分布於中央山脈的脊樑山脈帶內，主要由黑色到深灰色的硬頁岩、板岩及千枚岩和深灰色的硬砂岩互層組成，含有零星散布的泥灰岩團塊，全部厚度估計在數千公尺左右。臺灣東部相當廬山層的地層出露於臺東縣知本和大武間西側的山區，岩性和標準地點所見者有相當大的差別，因為其中含砂岩特多，被命名為知本層 (李春生、張寶堂，1984)，可以分為六個岩段，全厚度至少在五千公尺以上。其中三個岩段由灰色、淡灰色、或深灰色的細粒變質砂岩組成。在知本、金崙一帶，部分變質砂岩已具有片理狀，中間夾有灰黑色板岩，砂岩中含無數不規則的石英脈。另外三個岩段以板劈理至為發達的深灰色至灰黑色硬頁岩、板岩或千枚岩為主。

(三)畢祿山層：

在東邊的脊樑山脈帶內，根據其中所含的化石(以有孔蟲為主)，再參考其岩性，大略只能分出二個主要地層單位：中新世的廬山層和始新世的畢祿山層，已見前述。畢祿山層也是以板岩和千枚岩為主，但是下部多板岩和石英砂岩的互層，它分布在中央山脈的南部和脊樑山脈帶的主要部分，其中曾發現確定是始新世的大型有孔蟲化石。

(四)雖臺東縣境內有三條重要斷層經過，分別為池上、鹿野、利吉活動斷層，但都未經過本計畫範圍。

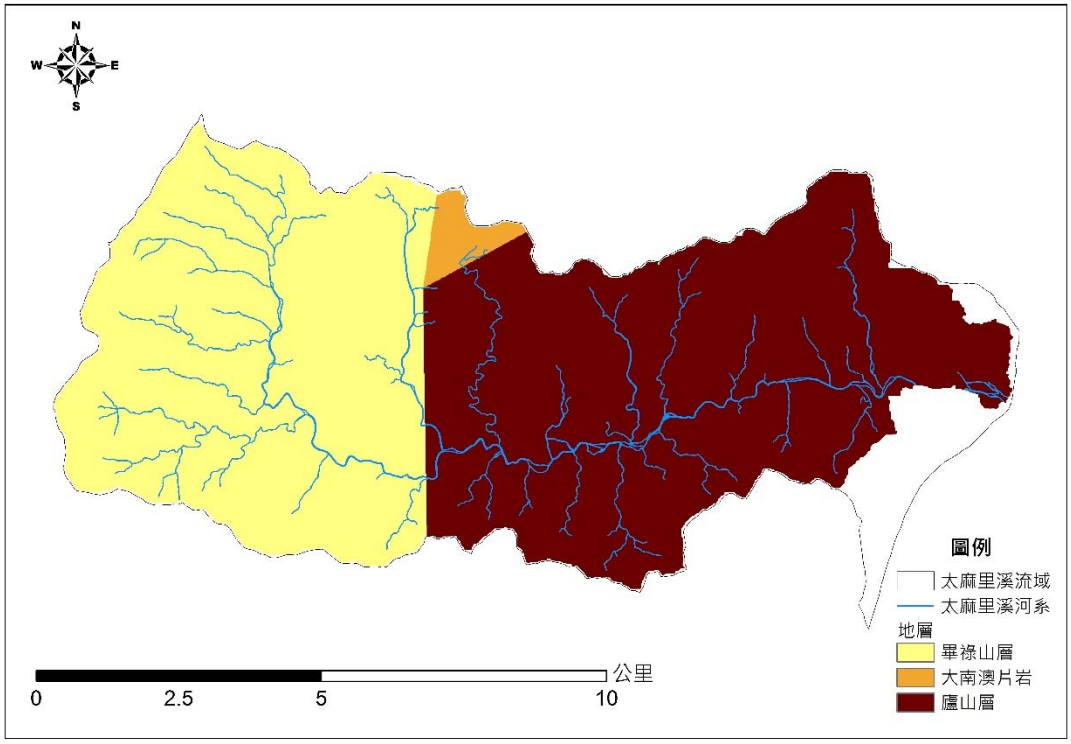


圖 1-6　太麻里溪地質圖

四、　土壤

天然植被及土壤分類與農、林業資源分布以及土砂災害問題息息相關，計畫範圍內土壤分布圖如圖 1-7 所示。主要屬於中央山脈土壤區之石質土區，多分布於 700 公尺以下山勢低緩、平坦地，較適農耕使用，有 30-50 公分之紅棕色、中酸性坋質壤土，土質佳，若輔以適當水土保持處理措施，尚可種植長期性作物(賴文基等人，2016)。另外，由於上游部分缺乏土壤資料，因此後續土壤沖蝕計算係依水利署水利規劃試驗所高含砂水流河道沖淤模式及試驗研究報告資料推估。

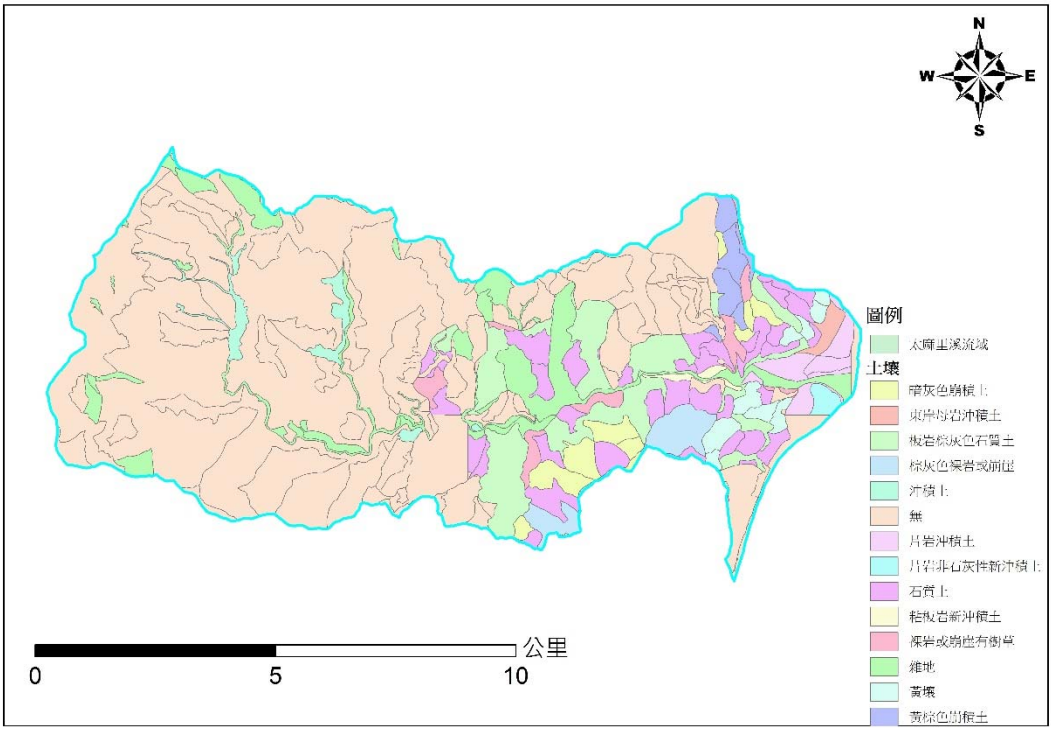


圖 1-7　太麻里溪土壤圖

五、　雨量

氣象局雨量站網已建立即時雨量觀測系統，降雨事件時較易取得即時資訊以進行防災應變之作業，因此水文分析比對乃以氣象局雨量資料為主，資料主要用以分析流域降雨事件特性。流域內主要兩個雨量測站，分別為金鋒測站與太麻里測站。水文資料蒐集情形如表 1-4 所列，分布圖如圖 1-8 所列。

表 1-4　太麻里溪雨量監測相關資料表

類型	站名	資料時間	備註
雨量	金峰	93/6～至今	中央氣象局測站
雨量	太麻里	86/7～至今	中央氣象局測站

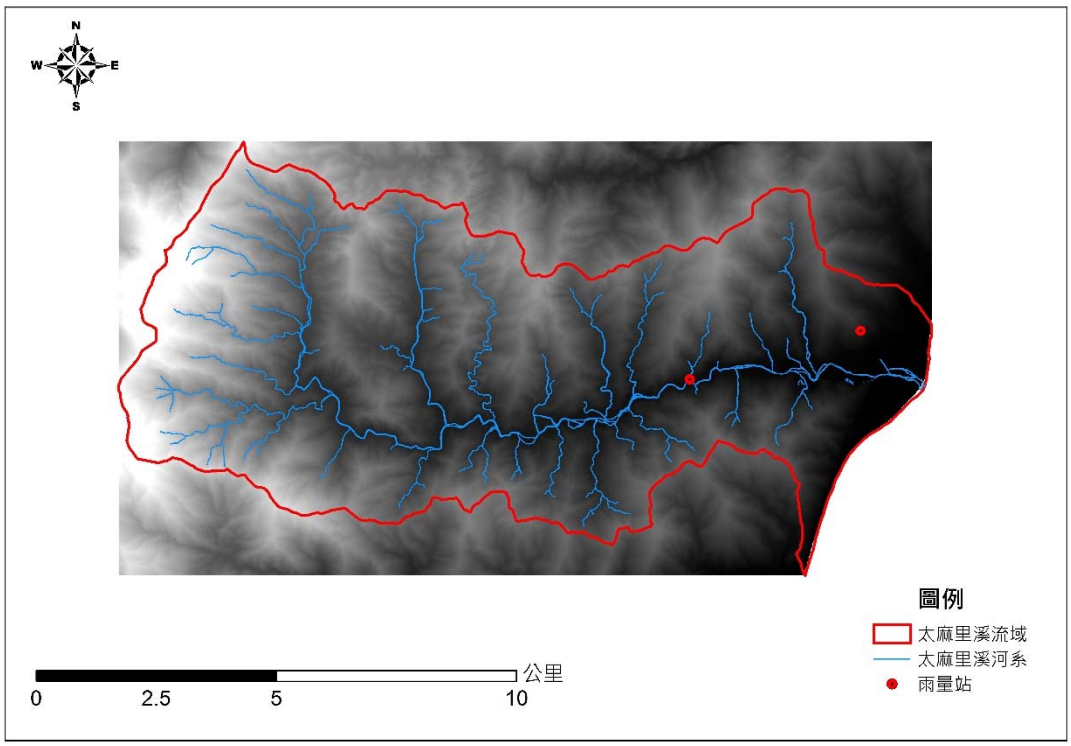


圖 1-8　太麻里溪雨量站分布圖

六、　氣候

本計畫區除區域內之高山屬於高地氣候外，大致屬於熱帶氣候。根據中央氣象局氣象資訊得知本計畫區周邊有兩處氣象站，分別為臺東站及大武站。根據氣候資料顯示，臺東縣年平均氣溫約為攝氏 19.2 至 28.7 度左右，氣溫最低為一月，氣溫最高為七月，平均氣溫約在 24 至 25 度之間；相對濕度約在 70.5%至 79.4%之間，夏季時(5-7 月)相對濕度較高，冬季時(11-1 月)較低，大武站月平均相對濕度約為 75.6%，臺東站亦為 75.6%；月平均日照時約為 82.5 至 242 小時之間，最短日照為二月，最長日照為七月，大武站月平均日照時數為 158.3 小時，臺東站月平均日照時數為 144.3 小時；大武站平均風速約 2.9 公尺/秒，臺東站平均風速約 2.1 公尺/秒。氣候資料彙整於表 1-5。

表 1-5　太麻里溪氣候相關資料表

項目	測站	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
氣溫	台東	19.2	19.6	21.7	24	26	27.7	28.7	28.4	27.3	25.6	23	20.4	24.3
	大武	20.1	20.6	22.6	24.7	26.5	28	28.6	28.1	27.2	26	23.7	21.3	24.8
相對濕度	台東	72.7	74.8	75.4	76.5	78.6	79.4	77	77.5	77.4	74.3	72.3	70.9	75.6
	大武	72.4	73.7	74.8	76.2	79	79	77.8	79.5	78.8	74.4	71.6	70.5	75.6
日照時數	台東	101	82.5	107	122	142	187	242	212	172	151	114	100	144.3
	大武	112	100	134	150	161	196	242	208	183	165	132	118	158.3
風速	台東	2.3	2.2	2.1	2	1.8	1.8	1.9	1.9	2	2.4	2.5	2.3	2.1
	大武	3.4	3.1	2.9	2.6	2.3	2.2	2.3	2.2	2.5	3.6	4	3.7	2.9

七、　土地利用

太麻里溪之土地利用型態分布如圖 1-9 所示，因天然環境及交通易達性低的限制，主要為農業及森林使用土地。各使用狀況之面積及比例整理如**表 1-6**。

太麻里溪集水區土地利用主要以林地為主，約佔總面積的 90%，而農業用地 3%、交通用地 0.4%，水利用地 3.2%，其他用地則以舊有崩塌地為主，共佔 3.5% (賴文基等人，2016)。

表 1-6　太麻里溪土地利用型態資料表

土地利用型態	面積(公頃)	所占百分比(%)
農業用地	638	3.0%
森林用地	18,943	89.8%
交通用地	77	0.4%
水利用地	675	3.2%
建築用地	22	0.1%
公共設施用地	2	0.0%
遊憩用地	0	0.0%
其他用地	743	3.5%
總計	21,100	100%

參考資料：賴文基等人，2016

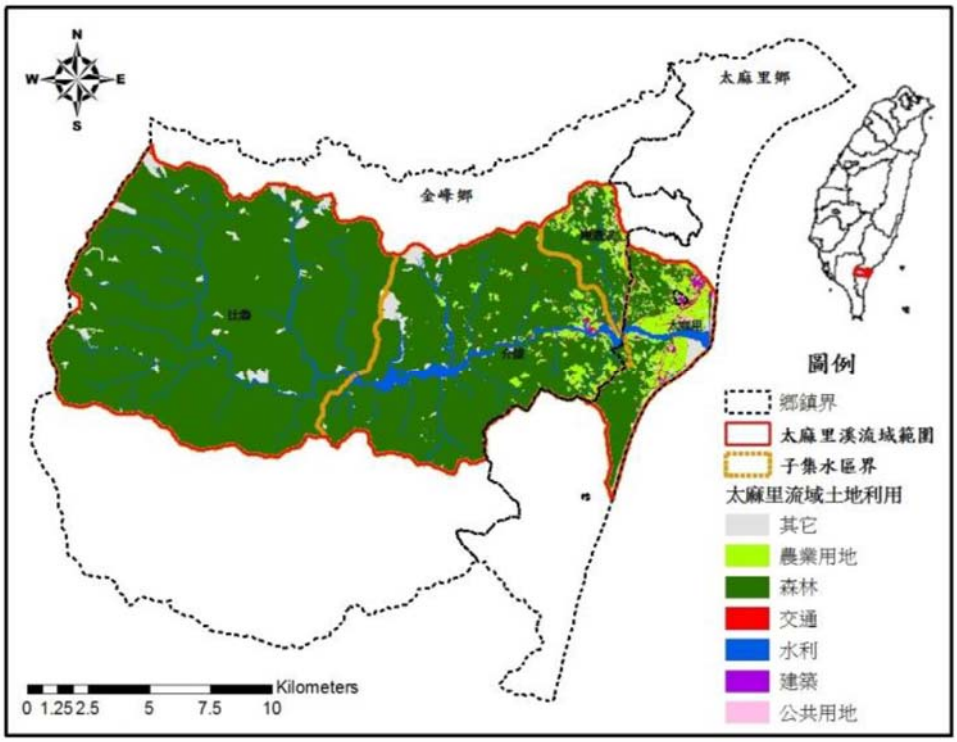


圖 1-9　太麻里溪土地利用圖

第二章 文獻回顧

第一節 土砂產量評估

土砂生產部分具有兩大產砂來源，(1)沖蝕產砂：這類型產砂量較少但發生門檻較低；(2)淺層崩塌產砂：這類型事件產生之土方量多但發生門檻值高，通常需要有高強度降雨才能促成崩塌事件發展。然目前臺灣極端降雨事件頻繁，在於崩塌土方量之計算為目前土砂產量推估之關鍵，同時亦為土砂災害主要災因。而流域土砂之生產方式可依照上述之分類，歸納成點源式及非點源式之來源，非點源式為土壤表土一般降雨事件之沖蝕，較無特定發生地點。而點源式則為受到強度較高之降雨事件，導致河岸邊坡區塊崩塌而產生之土方量(江陽聖等，2007)。

一、 沖蝕產砂評估

極端降雨事件頻繁之前，沖蝕量計算目的為用來推估流域長期土方量，最常應用之公式為美國土壤保持局所開發之通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation，USLE)(式 2.1)。國內亦有許多學者應用此公式進行沖蝕量之計算(林俐玲等，2008；王子豪，2009；徐碧治等，2009)，然 USLE 並非適用於各地區域，因此不斷修正其公式而推演出 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)，國內亦有學者進行引進與應用(林俐玲，2002；林俐玲等，2010)。然近年來受到極端降雨事件之影響，使得流域土砂輸送運算趨向以單場降雨事件為基礎進行運算，因此在沖蝕量計算上面，亦須評估單場降雨事件所造成之沖蝕量。為因應此狀況採用修正型通用土壤流失公式(Modified Universal Soil Loss Equation，MUSLE)(式 2.2)可推估單場降雨事件所產之沖蝕

量(Williams and Berndt，1977)。而臺灣近期以颱風降雨事件為時距之土砂研究，亦大多採納此公式推估單場降雨事件之沖蝕量(梁惠儀等，2010；許振崑等，2011；羅楷傑，2013)。

$$A_m = R_m \cdot K_m \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{……式 2.1}$$

$$V_s = 11.8(V_{eff} \cdot Q_p)^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot L \cdot S_a \quad \text{……式 2.2}$$

而 USLE 與 MUSLE 兩公式之差異在於推估事件之時間單位，以及降雨沖蝕因子計算方式不同。USLE 使用情況為長期觀察下流域之沖蝕量推估，其中因子之時距單位為「時」與「年」，且計算上結合土砂遞移率(Sediment Delivery Ratio，SDR)，推估流域沖蝕土砂運移至河道之土方量，但單場事件降雨下之沖蝕量搭配土砂遞移率將會造成估算錯誤。因此如欲計算單場降雨事件之沖蝕量，使用 MUSLE 公式為最佳之公式應用，其設計考量即針對單場降雨事件，在其公式因子中之時距單位為「時」與「秒」，且當中採用逕流量與尖峰流量取代降雨沖蝕指數，較能反映出單場降雨事件之沖蝕特性(林庚翰，2016)，相關研究上 MUSLE 應用層面相當廣泛，整理通用土壤流失公式比較如**表 2-1** 所示。

表 2-1 通用土壤流失公式比較

種類	特性	缺點	相關研究使用案例
USLE	推估流域長期產生之沖蝕量，使用最為廣泛	並非適用於各地，故常見以其公式為基礎進行修正	林俐玲，2008；王子豪，2009；徐碧治，2009。
RUSLE	同上，修正 USLE 之坡長、坡度與覆蓋因子	以降雨沖蝕指數為因子，而非有效降雨	林俐玲，2002；林俐玲，2010。
MUSLE	推估單場降雨事件之沖蝕量，利用逕流量及尖峰流量間接反映出降雨的特性來推估泥砂量的產生，不需另外估算泥砂遞移因子	尖峰逕流量較難估算	梁惠儀，2010；許振崑，2011；羅楷傑，2013。

資料來源：整理自各相關研究

二、 崩塌產砂評估

綜合目前相關資料與文獻，已經可得知極端氣候下，強降雨造成集水區崩塌事件大規模發生，故評估邊坡穩定度以估算崩塌產量為河道變遷的關鍵要點。

目前在崩塌量推估方式上可分類成三種方式(表 2-2)，一般可運用衛星遙測或航照影像技術，以災害發生前後作為時間點，比較其影響差異判釋，推估出降雨所導致之新增崩塌地範圍面積，而後與崩塌地深度經驗公式相乘，以得到新崩塌地所產之土方量(鄭錦桐，2010；張昆宗，2010；劉治中，2010)。此外亦可使用較先進科技儀器，如遙測空載雷射測距技術(Light Detection and Ranging，LiDAR)，使用飛行載具直接對崩塌地進行量測以獲得地表高程資料，如 DEM(Digital Elevation Model)與 DSM(Digital Surface Model) (蕭國鑫等，2010)。然上述所提及之方法雖準確但耗費成本昂貴，資料亦不易取得且僅能針對案例事件。

而崩塌物理基礎法則運用物理情境概念，假設降雨對土壤之影響，而後透過試驗與實驗建立與解釋兩者之關聯式。此種方法雖較能說明兩者之關聯且具物理上之意義，推估上之準確與擬真性較高，但其運算過程與因子過於複雜，在相關因子取得上須透過現地調查等過程獲得，因此所耗費之成本較高。此方法大多以水文模式結合無限邊坡理論而成，假定山坡為無線延伸之平面滑動，並以極限平衡法計算邊坡之安全係數。其優點為分析模式具物理意義及客觀，能使用於降雨誘發山崩之研究，分析之過程與結果較具可靠性，較能反映實際的物理狀況。缺點為地文及地下水位資料不易取得，仰賴分析前之參數率定及評估工作。常見模式如 TRIGRS(Transit Rainfall Infiltration and Grid-

Based Regional Slope-Stability Model) 、 SINMAP(Stability Index MAPing)、SHALSTAB(Shallow Landslide Stability)。

成本較低且較容易估崩塌量之方法為經驗法，藉由已知的崩塌區域針對其地文因子進行統計分析，建構邊坡崩塌可能性與潛在因素間之關係，率定相關參數後可快速估算可能的崩塌量。但缺點在於此法需有一定量的觀測資料才具有代表性，且地區適用性之限制及無法瞭解崩塌發生機制和時間點，亦為一大缺陷。常見的方式有打荻氏(打荻株男，1971)、power law 式及降雨崩塌門檻值公式(threshold)等。

於崩塌災害分析方法之選用中，考量到臺灣山區廣大，隨研究區域擴大，區域差異性也隨之提高，且無法瞭解崩塌發生之機制和時間點，對於山崩災害之預警來說為一大缺陷，故將經驗法排除；而物理基礎模式法能同時將地文因子，如土壤凝聚力、摩擦角及土壤厚度等參數，以及水文因子納入考量，模擬之結果兼具物理及空間意義，有助於探討降雨誘發之淺層崩塌，故決定採用此法作為本研究之使用。

表 2-2　崩塌量估算方式比較

種類	方法及特性	相關研究使用案例
遙測	運用災害時間點前後之 DEM 變化狀況，進行地形差異分析。	鄭錦桐，2010； 張昆宗，2010； 劉治中，2010。
物理基礎法	運用物理概念假設降雨對土壤之影響，可有效評估降雨誘發之崩塌，較能反映影響因子特性，使模擬結果兼具物理及空間意義， 但所需之地文及水文參數取得不易，且其對模擬結果之精確度影響大。	吳佳郡，2006； 王姵兮，2007； 張胤隆，2012； 陳弘恩，2014。
經驗公式	運用實例事件統計並建立關係式推估，資料取得與建立方式較為簡單。 但可能有地區之限制。	趙倬群，2004； 辜炳寰，2009； 潘晨綱，2010； 水規所，2011； 侯統昭，2012； 張胤隆，2012。

資料來源：整理自各相關研究

而物理基礎模式法又因是否考慮降雨入滲之歷程，分為穩態水文模式(steady-state model)及暫態水文模式(transient model)兩類。

1、穩態水文模式(steady-state model)

假設水文狀態不隨時間而變動，根據降雨強度與水力傳導度之間的關係進行邊坡穩定評估，不考慮降雨入滲所致孔隙水壓之變化，其最大的優點在於模式的操作較為簡單，易於顯現出邊坡的相對穩定性，常見有 SINMAP、SHALSTAB 等方法。國內使用此模式之學者有陳啟天(2008)、鍾欣翰(2008)等。

2、暫態水文模式(transient model)

考慮隨著時間變動的水文狀態，根據降雨入滲導致孔隙水壓上升速率的不同進行邊坡穩定評估，其操作過程中須考慮較多項參數，但其模擬結果較接近真實狀況，以 USGS 根據 Iverson(2000)拓展里查方程式(Richards equations)之線性解，於 2002 年所提出之 TRIGRS 模式作為代表。國內發展至今已逐漸成熟，且有許多學者應用此模式進行崩塌摸擬(王姵兮，2007；鍾欣翰，2008；陳則佑，2011；施虹如，2013；陳弘恩，2014；施虹如等人，2015)。本研究依照上述提到的三項淺層崩塌模式，整理模式特點如表 2-3。

表 2-3　淺層崩塌模式比較

模式	特點	分級方式
SHALSTAB	1. 穩態水文模式，在操作及參數輸入上較為方便快速 2. 考量各項參數之空間變異性 3. 僅考量單一降雨降度下之坡地穩定性，無法獲知崩塌隨累積雨量及降雨延時之關聯性	分為四種類型： 1. 無條件不穩定 2. 不穩定 3. 穩定 4. 無條件穩定
SINMAP	1. 穩態水文模式，與 SHALSTAB 基本原理相同，在操作及參數輸入上較為方便快速 2. 連結無限邊坡穩定性與降雨量，可估計某場降雨量廣域邊坡的安全性，也可預估引致無限邊坡坍滑之臨界降雨量。 3. 部分力學參數結果以內建之反算程序獲得 4. 僅考慮水文因子及地形因子之貢獻而未考量力學參數與水文地質參數在空間上之變異性	以安全係數判斷邊坡穩定狀態
TRIGRS	1. 暫態水文模式，可考量降雨延時及累積雨量對區域崩塌潛勢變化之影響 2. 充分考量各項因子，如地形、地文、水文及降雨之空間及時間分布 3. 可獲得安全係數於降雨事件中之歷時變化	以安全係數判斷邊坡穩定狀態

資料來源：整理自各相關研究

(一)邊坡穩定度模式-TRIGRS

過往學者應用 TRIGRS 進行淺層崩塌模擬，可將其原因大致分為以下所述。前人研究降雨誘發山崩時，僅能得知經過若干強度之降雨時，邊坡因而發生崩壞，而無法得知降雨期間邊坡穩定及孔隙水壓發展之情形，於分析時段上僅有「破壞發生前(開始降雨之前)」及「破壞發生後(降雨結束之後)」之邊坡穩定性，且降雨結束後之地下水位高度僅是以假設之角度進行估算，其正確性可議(吳佳郡，2006)；TRIGRS 可將時間加以分割，模擬不同時間點之降雨入滲情形，及其所導致孔隙水壓上升之變化(施虹如，2013；陳則佑，2011)；在常見之淺層崩塌模式中，僅此模式考量時間這項因子，且能夠針對降雨所引致的崩塌作暫態分析，充分考量地形、降雨入滲、暫態地下水壓力、風化層厚度、風化層力學與水文地質特性及降雨在空間與時間之分佈變異，能有效描述因降雨入滲所引致之淺層崩塌(尹立中等，2013)。又此模式能夠直接匯入雨量資料，可從降雨程度與崩塌潛勢之關係，探討崩塌潛勢較低之時間點(施虹如等，2015)。

近年來之研究亦可見結合穩態及暫態兩種模式進行崩塌災害之模擬，如鍾欣翰(2008)利用 SHALSTAB 及 TRIGRS 兩種模式針對匹亞溪集水區進行降雨誘發淺層崩塌之模擬分析，套疊 2004 年之艾利颱風降雨紀錄進行模擬，結果顯示兩模式之分析結果差異不大，皆能有效解釋崩塌地之分布，而 TRIGRS 之總體正確率較高，山崩正確率則相對較低。然 TRIGRS 模式雖需要考慮許多參數，但能夠針對不同降雨型態與降雨歷程分析崩塌潛勢，進而瞭解整個降雨事件中崩塌潛勢隨降雨量之變化情形，

SHALSTAB 模式僅能就最大降雨強度進行分析，過程較為簡化。

綜合上述考量，於常見之淺層崩塌模式中，僅 TRIGRS 模式能模擬不同時間點之降雨入滲情形，能夠針對降雨引致淺層崩塌進行暫態分析，此外，此模式亦充分考量到地形、地文、水文及降雨之時間與空間分布，對於因降雨入滲引致淺層崩塌能夠有效做出解釋，故本研究選擇此模式作為分析使用之工具。

然過去應用 TRIGRS 模式之研究，大多僅止於模擬可能崩塌地之區位(吳佳郡，2006，鍾欣翰，2008，陳嬉璇等，2011，李浩瑋，2011，施虹如，2013，王藝潔，2016)，即網格安全係數小於 1 之不穩定區塊，且多數研究直接將安全係數小於 1 之網格視為崩塌區域後再以崩塌地圖層或航照圖進行判釋，導致正確率評估時之山崩正確率較低。故本研究參考同樣使用此模式之陳則佑(2011)，其提出以羅森布魯斯點估法(Rosenblueth point estimation method)考量參數之不確定性，作為評估可能崩塌地之方式。此法能夠簡易並快速進行計算，有助於解決在真實環境中受地質、水文或區域特性所影響之參數不確定性。

(二)參數不確定性分析

在真實環境中，土壤受地質特性、開發程度及水文狀態等因素影響，因此在執行邊坡穩定模擬時，須考量土壤參數之不確定性，使其較符合真實環境之狀態。常見解決參數不確定之方法，如蒙地卡羅分析法及近似法。近似法如一階二次矩法、Rosenblueth's 點估法及 Li's 點估法等。

蒙地卡羅分析法是一種運用機率密度函數、累積分布函數及統計量數來解決具有已知或機率分布的隨機變數問題。在模擬前

取得各參數之機率密度函數，透過多次重覆模擬特定隨機變數值，取得大量對應安全係數之樣本，結果可視為具有統計性質，藉以降低參數不確定性之影響，此法雖簡單，但考量需多次進行模擬，相當無效率(吳佳郡，2006。陳則佑，2011。劉緁玲，2012)。

近似法假設安全係數值呈常態分佈，將輸入變數之機率密度函數簡化為較簡單之型態，考量期望值、標準偏差和變異數來表示一隨機變數的機率密度函數。一階二次矩法適用於處理常態分佈參數，但在計算時因忽略高次項，可能產生較大誤差。Rosenblueth's 點估法以數個參數之平均值與正負標準差計算其機率密度函數，計算快速且簡單。Li's 點估法與 Rosenblueth's 點估法類似，計算上較有效率，但須了解參數之期望值、變異數、偏態係數與峰態係數，於資料收集上較為不易(劉緁玲，2012)。

根據劉緁玲(2012)針對坡地淺層崩塌模式所研究之數種不確定性分析方法之結論，考量數種方法之差異與優缺點後，本研究使用 Rosenblueth's 點估法進行參數不確定性分析，使 TRIGRS 模擬之淺層崩塌結果較貼近實際崩塌事件。

第二節 流域土砂變動分析

土砂於流域內分佈的過與不及都會造成不利的影響，若流域產砂量過大，則泥砂將發生淤積，使得河工結構物壽命縮短及功能損壞，河道淤積主流改道，造成河性難以掌握，不僅造成洪水溢堤，防洪工事亦必須不斷加強，影響經濟效益及治理成效甚鉅。而含砂水流入海後即成為維持海岸線不可或缺的泥砂補充來源，遏止海岸線侵蝕，但過多的泥砂亦會造成港口淤積；反之，若集水區產砂量減少或人為不當採砂，造成泥砂供應量不足，則具挾砂能力之水流將沿程掏刷床砂，

河槽加深雖有利疏洪，但河道的不穩定以及堤防、護岸、堰堨及橋樑等基礎的掏空毀損，更是河道整治、結構物經濟效益及交通安全上的困擾，所以，對於河川流域整體之規劃與治理必須從土砂生產與輸送等分析計算著手（謝正倫等，2009；蔡元融，2005；林昭遠等，2006）。

因此，為達到本研究之目的：氣候變遷下臺東太麻里溪流域複合式土砂災害模擬與規劃管理，必須對流域內之河道沖淤變化進行長期追蹤與未來趨勢演變分析，謝正倫和陳俞旭(2010)之研究即表示，莫拉克風災後災區的重建與治理，必須考量到土砂災害的二次災害，因流域內之土砂運動尚處於高峰期，其災害可能隨著時間逐漸往下游傳遞，或衍伸成不同形式的災害類型，所以於重建方案的擬定，必須考量到河道土砂運移與堆積之時空演變。

流域土砂變遷為複雜且具備多種機制的過程，其包含了降雨逕流、土砂生產及土砂輸送等，故需將流域之水文、地質、地文與土砂等相關變數納入考慮，才足以反映真實的物理運移現況。而土砂收支分析(Sediment Budget Analysis)為以土砂量守恆之觀念，透過估算各集水區土砂來源量與土砂輸送量之差額，亦即上游集水區出砂量為下游集水區入砂量，來描述土砂收支之情形。國內應用此分析進行土砂變動估算之學者眾多。

在河道輸砂方面，主要是利用建立率定曲線關係推估集水區泥砂輸出量，或是以實際觀測資料率定集水區之輸砂模式。包括：

(一)經驗公式法

如 Takahashi (1981)提出之土石流平衡濃度公式。林羿貝(2014)應用模型概念描述泥砂收支模式，量化高屏溪流域子集水區中土砂運動情形，進行泥砂收支分析。沈哲緯等(2016)根據土

砂收支平衡原理，透過崩塌體積-面積關係式推估崩塌土砂生產量，基於 HEC-HMS 建立降雨-逕流模式，輔以流量-輸砂量率定曲線推估流出土砂量，推求莫拉克颱風前後(2008~2012 年間)全臺流域尺度之集水區殘留土砂量。陳啟天(2008)應用 IDRISI 程式求得土壤沖蝕量，再採用崩塌潛勢模式並考量坡地崩塌量崩塌土砂運移率及河道泥砂遞移率推估崩塌地泥砂生產量，推估石門水庫集水區之泥砂生產量。林昭遠等(2006)以濁水溪流域陳有蘭集區為對象，分析賀伯颱風、921 地震、桃芝颱風、72 水災等事件之土砂產量；其中，土壤沖蝕量藉由通用流失公式(Universal Soil Loss Equation，USLE)推估、崩塌地土方量則使用 SPOT 衛星影像，判別出崩塌地以推算崩塌土砂產量，最後將沖蝕及崩塌量配合遞移率觀念，估算流入河道之土砂產量。

(二)集水區輸砂模式法：

羅楷傑(2013)以土砂收支分析結合二維動床輸砂模式分析楠梓溪流域之極端事件(莫拉克風災)與常流水情境加以探討，分析楠梓溪流域土砂變動趨勢。林建宏(2010)透過 BASIN 模式之 HSPF 模組參數率定驗證後，模擬 2004-2008 年石門水庫個子集水區之泥砂輸出量。黃宏信等(2009)及王仁傑(2009)利用流域土砂管理模式，針對烏石坑溪流域之土砂現況、土砂來源分析及流量歷線推進，配合土砂管理收支應用，探討 921 地震後烏石坑溪流域之土砂生產、輸送過程及其變遷趨勢，並與測量縱斷面成果進行比較和驗證。李鎮鍵等(2008)採用遙測、現調、自動監測、室內實驗及境況模擬等先進技術，建置濁水溪流域侵蝕及堆積評估模式依據結果進行分析土砂沖淤變化並以土砂管理模式，整合

現地調查測量及分析成果，進行趨勢分析。

因降雨為河道輸砂以及誘發淺層崩塌的主要因子，且考量臺灣河川流量-輸砂量的率定曲線於統計上易有低估之現象，故將採 Takahashi 建議使用土石流平衡輸砂濃度公式推估集水區流出土砂量。最後基於流域土砂收支平衡原理，計算泥砂產出與運移。

第三節 災害數值模擬

極端降雨所致之洪澇災害，其影響範圍可能不限於河道氾濫區，當洪澇規模超過防洪設施負載，將使鄰近河道之河階地、平原地區形成氾濫區，危害聚落住民、建物及交通設施等。為評估洪澇災害風險，需先建立淹水災害潛勢圖，國內目前主要的淹水災害潛勢圖由兩個研究團隊建立，分別為 2001 年 NCDR(National Science and Technology Center for Disaster Reduction)建立之全臺灣 22 縣市之淹水災害潛勢，及 2008 年水利署輔導成功大學防災中心執行淹水潛勢調查。NCDR 建立之淹水災害潛勢圖為網格資料，發表於第一期防災國家型科技計畫(1999~2001)，並於網路平台建置淹水潛勢圖。水利署之淹水潛勢調查發表格式為向量資料，額外加入不同降雨強度與重現期距之淹水潛勢分布，並開放潛勢圖層供相關單位及民眾使用。

雖臺灣平原地區淹水潛勢已由相關單位建立完成，然其淹水潛勢評估僅納入單一災害因子，近期相關災害顯示洪澇影響範圍可能因上游土砂變動導致更嚴重的災情，如 2015 年蘇迪勒颱風重創臺北河濱公園，造成河道淤積，河道水位接近堤防高度。此外，目前公開之淹水潛勢圖空間尺度較大，且無法調整相關參數做進一步分析，不利評估小尺度區域洪澇災害風險。

綜上所述，若僅分析單一災害因子將導致風險評估失準，然

NCDR 與水利署提供之資料具有使用上之限制，因此本研究將使用洪澇數值程式進行模擬，後續部分將分析洪澇數值模擬相關程式，評估最適用於本研究之程式。

現今常用於模擬洪澇之數值程式有 FLO-2D、HEC-RAS、SOBEK 等，其中 FLO-2D 與 HEC-RAS 為獲美國聯邦災害管理署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)認可之淹水模擬程式。

FLO-2D 為 O'Brien 和 Julian(1988)開發之二維洪澇數值模擬程式，具備細顆粒輸砂計算與建構定床，支援流變方程式與土砂資料，因此除了清水流外，亦可模擬高含砂水流，適用於都市淹水、河道潰堤、不規則形河道及土石流等，模擬流體流動之速度(Velocity)、深度(Flow Depth)及範圍，可作為相關單位評估災害影響之工具，許多研究單位使用此模式進行清水流、挾砂水流與土石流模擬(蔡元芳, 2012；林庚翰, 2016；黃淳茂, 2016)。廖于慧(2008)以 FLO-2D 模擬臺東縣境內利嘉溪流域子集水區 200 年重現期單日降雨量之影響範圍及淹水深度，文中提到增加網格解析度將能增加局部淹水之精確度，然亦會增加模擬所需時間。

HEC-RAS(Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)為美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineers)發展之數值模擬程式，在 ArcGIS 具有功能擴充模組，該模組可將 HEC-RAS 模擬之淹水範圍與深度展現於 GIS 工具。謝平城等人(2008)應用 HEC-RAS 針對南湖溪清淤工程前後及不同重現期進行演算，並以 HEC-GeoRAS 模擬淹水情形，結果呈現清淤工程可減少 10%～15%淹水範圍。吳瑞賢等人(2006)結合 HEC-RAS 與河川棲地二維模式(River 2D)計算河道水位並評估河川魚類生態棲地。

SOBEK 為整合河川、都市排水系統與流域管理的模式套件，包含降雨逕流、河道演算、水質模式、輸砂計算、鹽分入侵及即時控制等模組，可應用於河川、都市下水道系統的水理計算及模擬都市區域淹水 (謝平城等，2008)。江明晃(2006)以 SOBEK 模式進行臺中市西屯區與南屯區淹水模擬，結果顯示以較高解析度 DTM 模擬，將使最大淹水深度及淹水範圍小幅增加，較能精確呈現出局部低窪區域淹水情況。

本研究模擬區域共分兩部分，分別為多利溪與太麻里溪。多利溪為土石流潛勢溪流，具流動長度較短、流動範圍小與流動坡度差異大之特性；太麻里溪則具流動長度較長、流動範圍大且模擬區塊坡度差異小之特性。

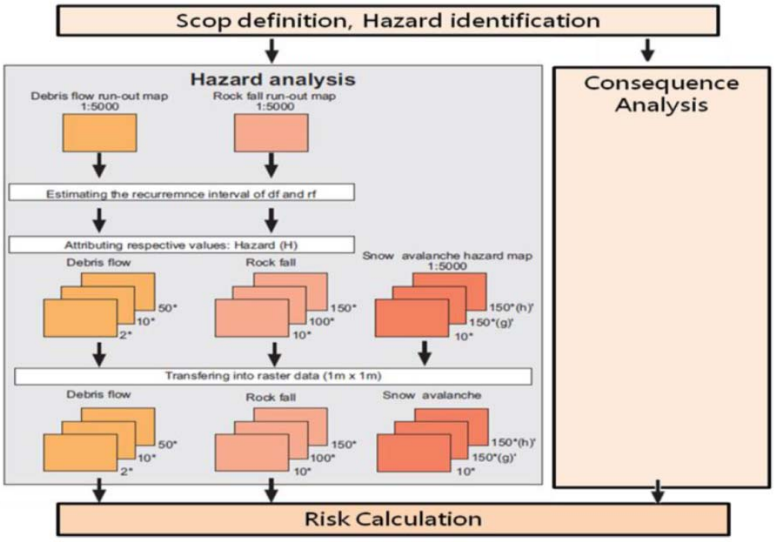
綜合以上相關研究，FLO-2D 適用於模擬坡度變化較大之地形，然其模擬範圍不宜過大，但可用於模擬土石流災害。湯嘉芸等人(2007)比較 FLO-2D 與 HEC-RAS 用於敏督利颱風苗栗縣南湖溪之淹水情形模擬，其結果提到 FLO-2D 較適用於模擬山坡地區及單場暴雨。本研究探討區域為鄰近土石流潛勢溪流之聚落，因此採用 FLO-2D 作為洪澇數值模擬程式。

第四節 複合式災害

複合式危害(multi-hazard)很早即被運用於各級行政區界的災害風險評估領域中，針對當地地區特性中的各式危害，包括地震(earthquake)、洪水(flood)、颱風(typhoon)、落石(rock fall)、崩塌(landslide)、土石流(debris flow)、堰塞湖(landslide lake)、雪崩(snow avalanches)、龍捲風(cyclone)等天然危害等等(Granger et al.，1999；Bell andGlade，2004)。美國聯邦災害管理署(Federal Emergency Management Agency，FEMA，1997)於『Multi-HazardIdentification and Risk Assessment ─ The Cornerstone ofthe National Mitigation Strategy』報告中，將美國境內容易發生之各式危害進行羅列並分類，其中天然危害包括五大類：氣象危害(Atmospheric Hazards)、地質危害(GeologicHazards)、水文危害(Hydrologic Hazards)、地震危害(Seismic Hazards)及其他類。報告認為複合危害辨識與風險評估為國家減災策略(Natinal Mitigation Srategy)的基石，並將國家減災策略之成功因素分為五個層面：危害識別與風險評估、應用研究與技術轉移、公眾識覺、訓練與教育、刺激與資源和領導與協調等。報告中提到，危害識別與風險評估(hazard identification and risk assessment)可以幫助我們了解各種危害對生命財產影響，並且協助相關人員進行減災策略的規劃。

吳杰穎(2007)於《災害管理學辭典》提出複合式災害(compound disaster)通常指一個災害發生後也引發其他類型災害，致使災害成因與損失無法區分因果，且其損害相對於單一災害顯得相當複雜。水土保持局依照災害類型將複合式危害之特性分為五類：空間性、時間性、連鎖性、累積性和複雜性等。陳禹銘等(2009)則認為複合式災害

(compound disaster)與複合式危害(multi-hazard)在災害風險管理中有其不同的意義，複合式危害(multi-hazard)、複合脆弱度(compound vulnerability)、複合式災害(compound disaster)乃延伸自危害(hazard)、脆弱度(vulnerability)與災害(disaster)，在災害風險管理領域中，災害風險是脆弱度與危害之乘積，因此複合式災害風險即為複合式危害與複合脆弱度之乘積。綜合上述文獻可發現，複合式災害與複合式危害不盡相同，危害的發生不一定會引起災害，唯當危害發生於人類居住區或設施上時，方才會造成災害。Ritchey(2006)以型態分析進行複合危害(multi-hazard)減災策略的規劃；而從 Bell and Glade(2004)所提出的複合式災害風險分析流程如**圖 2-1** 中可以發現，危害分析在風險分析中扮演不可或缺的角色，且可借助網格式資料進行風險統計運算。



改繪自 Bell and Glade(2004)

圖 2-1　複合式災害風險分析流程圖

從上述文獻分析中可以發現，在國外複合式危害分析(hazard analysis)已大量用於災害風險管理中，而在國內複合式災害卻是在莫拉克颱風造成極為重大的災害後才開始受到大家的重視。由於臺灣人口密度極高、地質環境脆弱，再加上氣候變遷與人口成長對颱洪災害

發生頻率、災害風險造成一定程度的影響，種種原因導致莫拉克颱風重創臺灣各流域，崩塌、淹水、土石流和堰塞湖等災害引起流域內複合式災害的發生(Shieh et al.，2009；鄭錦桐等，2009)。莫拉克風災後，由於各流域內的土砂運動之頻率與規模尚處於高峰期，很可能因為再一次的降雨引發一連串之災害，因此，針對莫拉克風災後各流域內的土砂沖淤進行調查，及其引起的複合式災害探討將是災區聚落重建及集水區治理的重要基礎工作。

依照上述文獻分析，將這些概念套用在複合式災害案例中，村落之災因可能為各式災害連鎖與累加(如崩塌、堰塞湖、土石流與淹水)所引起，導致村落在撤離、避難與防治上遇到極高不確定性。本研究冀望能透過土砂收支分析法驗證太麻里溪之莫拉克事件之土砂運移狀況，以及可能影響主流流動情況，因此在洪澇危害評估分析上不容忽視土砂災害所造成的影響，否則將會低估洪澇危害風險，模擬氣候變遷下太麻里溪流域土砂災害境況與災害損失評估，進而提出在極端氣候事件下複合式災害的風險評估模式，以上提到的不同災害的連鎖性影響，即為複合式災害的概念，故防災單位在進行潛勢災害範圍的劃設時，較不可以單一災害思維來劃定，反而需考量其它災害可能影響的不確定因素。

第五節 無人飛行載具(UAV)

衛星影像與傳統飛行器航空攝影照片提供地表特徵、地物分布但其解析度也僅能達到 50 ~ 70 公分左右，由於拍攝角度所造成之量測誤差，亦多超過數公尺以上。近年來無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在民用領域發展快速，應用領域從空間資訊廣至海岸防衛、環境監測、農漁業、交通控制、防救災、危險任務等，UAV 除具有機動性高、操作與維護成本相對低廉等特性，且可在低空雲下作業，相較傳統航遙測載具所受天候及雲遮影響程度小，可輔助傳統航拍與衛星遙測快速取得特定區域影像。

一、 無人飛行載具(UAV)

無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）一詞出現於 1917 年，早期 UAV 應用範圍主要在軍事用途，作為戰場上偵查、連絡之用。隨科技進步，無人飛行載具操作自動化、性能提高、成本降低，且具機動性，應用層面也日益廣泛，從海岸防衛、環境監測、農漁業、交通控制、災後影像取得至廣告、休閒娛樂。

無人飛行載具大致可分為定翼機及旋翼機兩大類。定翼機通常機體較大，可搭載較多儀器與燃料，其載重較大且飛行時間較長，適合大面積航拍任務，然因需要跑道進行起降，在茂密的山林間受空間限制；旋翼機體積較小，具有機動性且可垂直起降並定點懸停拍攝。但載重較輕且飛行時間較短，因此適合針對面積較小範圍進行細部拍攝。

二、 UAV 於防災之應用

由於近年受極端氣候影響，災害日益頻繁且極端降雨造成環境地形於短時間內產生巨大變化，災害規模擴大災情複雜化，造成複合型災害發生。因此在防災應用上，各種遙測資料工具的整合應用也格重

要。

在災害發生或土砂運動發生的第一時間，UAV 可在交通不便無法抵達的情況下，確保安全取得最即時的資料，拍攝災害現場的影像並迅速建置模型，以掌握災害規模及現場狀況，輔助後續災損評估及救災資源的調度作業，並且進行後續復原重建之規劃。

三、 3D 建模

三維建模流程為利用多視立體視覺三維重建技術依序完成稠密點雲匹配、點雲疏化、三維表面建構，最後完成模型表面紋理貼附(圖 2-2)。相關作業流程說明如下：



圖 2-2 三維建模流程

資料來源：經緯航太科技股份有限公司

(一)稠密點雲匹配

利用傾斜攝影與運動回復結構(structure from motion，SfM)技術經初步影像密匹配後先快速取得稀疏點雲資訊，在檢視影相匹配結果後，位使圖面完整性更高，需進行近一步的稠密點雲計算。而取得稠密點雲方法分為兩種，一種是從物體的剪影(Silhouette)重建物體的大致輪廓(Shape From Silhouette)。另一種是從目標所在區域的成像屬性出發，利用光度一致性約束(Photometric Consistency Constraint, PMCC)曲面重建，採用的方法為基於面片多視圖重建(Patched-Based Multi-View Stereo, PMVS)，該演算法簡單、準確、高效，且能夠自動檢測和忽略外部點和障礙點，輸出具有方向的小矩形面片密集集合。這些面片獲得於像素級別的對應，並覆蓋於被觀察物體的表面且此方法對紋理覆蓋不足、凹陷和高曲率的區域也有較好的重建效果。

(二)點雲疏化

透過稠密點雲計算產製高密度之點雲資訊，但過度高稠密點雲資訊進行三維重建，可能導致表面估算過於複雜，因此取得稠密點雲資料後，需再進行點雲疏化作業，透過保留點雲邊緣方法進行點雲疏化，能在保留足夠特徵點且確保在特徵訊息不失真的情況下剔除過多的點雲資料。

(三)三維表面建構

在點雲疏化後，須先進行三維表面建構後再進行紋理貼圖，由於點雲資料無法直接進行表面建構，因此需先使用八叉樹進行空間點分類。八叉樹利用 8 個節點創建三維網格，將查詢到的鄰近點包含在網格中，使用深度分層的概念，對空間進行細度劃分，

當深度的提高，分辨率也隨之提高，在空間點劃分後，於空間點位中尋找連接點串聯成新三角面直到完成所有面片重建，產出三角網格化模型如圖 2-3。

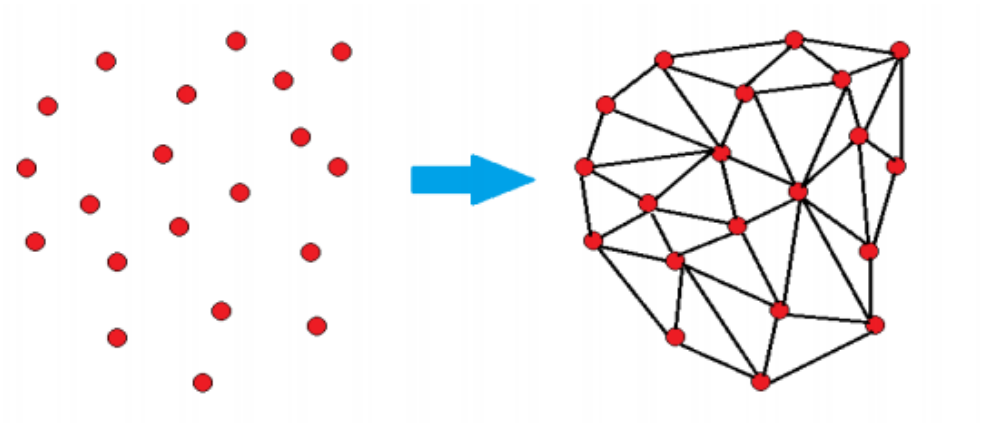


圖 2-3　三角網格化示意圖

資料來源：經緯航太科技股份有限公司

(四)紋理貼附

完成產製三角網格化模型後即進行紋理貼附，利用拍攝所取得之影像，透過投影方法映射於網格化後的模型上(**圖 2-4**)，使模型更加貼近現實，同時提高視覺效果，並且還原場景樣貌以供參考。紋理貼附是透過傾斜攝影的原理，藉此取得豐富的側面資訊，在視覺化中可增加模型細緻度及美觀；而資訊傳達方面來說，使用模型加上空間三維資料能夠量測出距離、面積以利使用者後續各項應用參考。

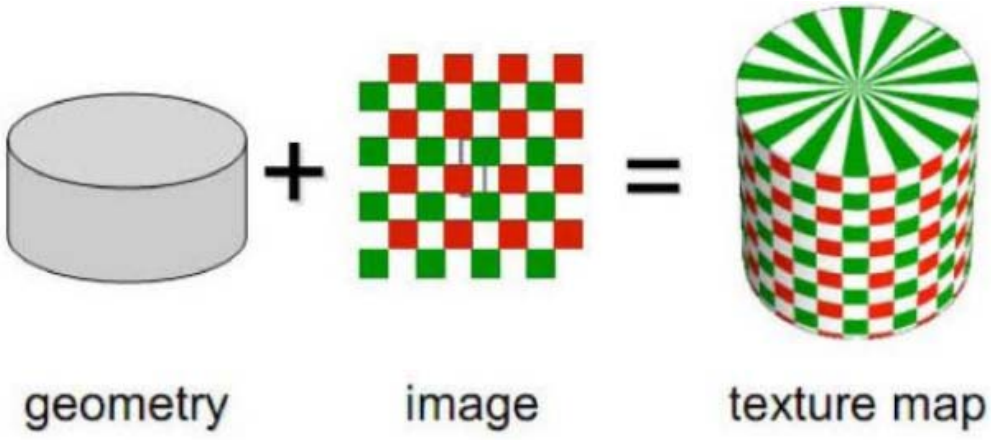


圖 2-4　三維紋理貼圖

資料來源：經緯航太科技股份有限公司

第三章 研究方法

第一節 研究流程

本研究依各階段之目的大致可區分為兩大部分(圖 3-1)，分述如下：

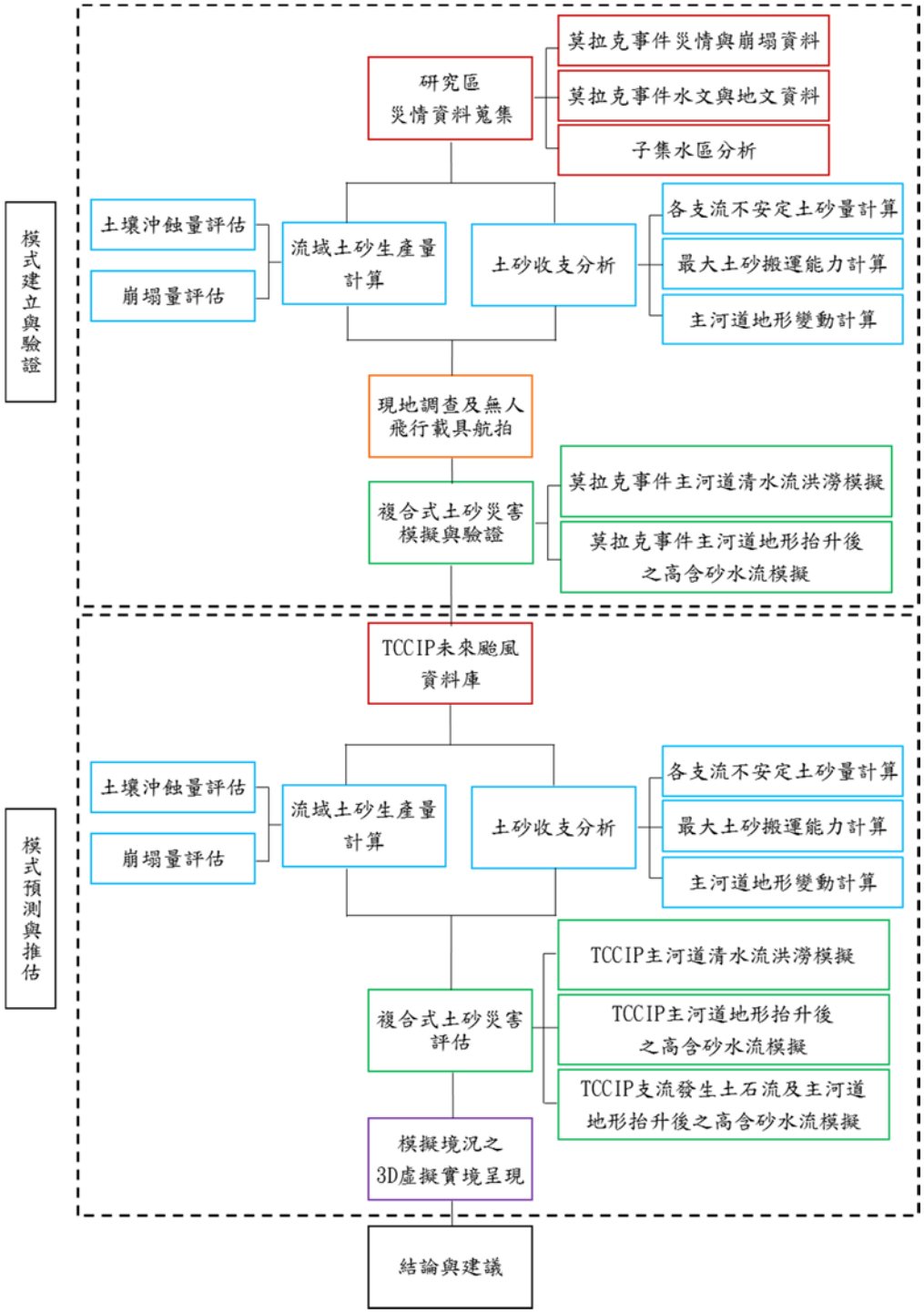


圖 3-1　研究流程圖

本計畫以太麻里溪流域為對象，為了解於極端氣候下之複合式土砂災害影響範圍，首先蒐集基本資料與現地調查，建置完整的流域之水文、地文資料庫，包含流域的雨量、流量、水位、泥砂濃度及輸砂量等基本資料，蒐集莫拉克颱風降雨事件之災情資料(崩塌地分布與崩塌量等實際資料)，再計算太麻里溪流域土砂生產、河道沖淤之變遷；接著，以於莫拉克風災受創嚴重之嘉蘭村為例，使用無人飛行載具 UAV 拍攝高解析度影像並建置數值地形模型；並且模擬複合式災害情境，完成莫拉克颱風降雨事件下之災情模擬與驗證。

上述研究事項目的在於瞭解本研究分析結果之相關誤差與準確性(包括土砂生產計算、土砂收支結果與災害情境模擬等)，並進行歷往事件之驗證與模式修正。而本研究為了解未來流域之土砂變遷及複合式災害可能造成之情況，採用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫(TCCIP)所推估之未來颱風降雨事件資料進行模式之推估與模擬；藉由分析流域河床沖淤變化與嘉蘭村之關係，進一步探討複合式災害影響範圍，並結合數值模式成果進行 3D 成果展示，以達到災害預警與減災的目的，與供相關防災單位參考以進行決策。

第二節 研究區災情資料蒐集

本研究蒐集資料中，數值地形模型為當中最重要之先備資料，本研究採用內政部 20 公尺網格數值地形模型（DTM），以供後續數值模式所用。莫拉克事件雨量資料(如**圖 3-2** 所示)、溪流與集水區圖層可用來輔佐入流點、與崩塌模式等參數設定，而災情報告中之災情照片以判定相關參數，且亦可作為驗證對象。

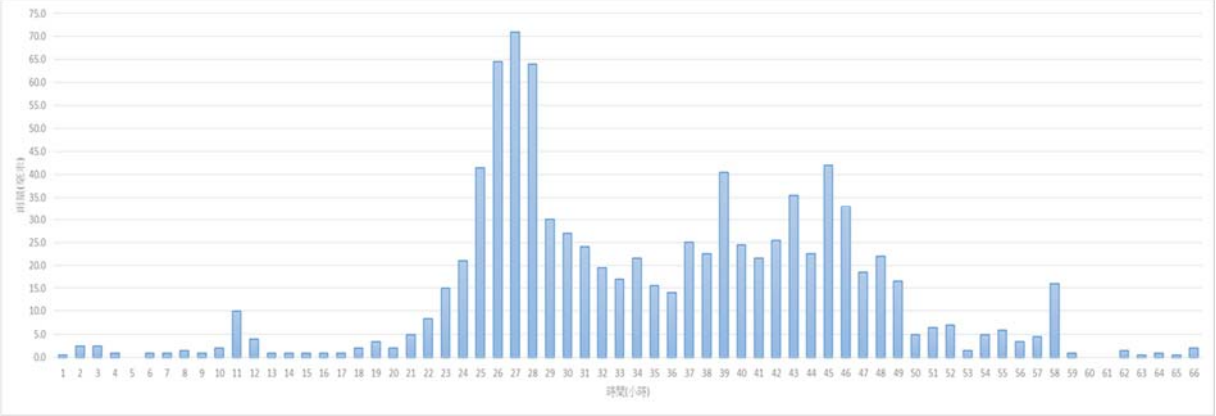


圖 3-2　莫拉克事件太麻里溪流域時雨量圖

一、　莫拉克災害事件

太麻里溪流域為莫拉克風災臺東縣受災最嚴重之地區，在雨量資料蒐集方面，本研究主要選取太麻里溪流域鄰近的氣象局雨量測站資料分析自得(如**圖 3-3** 所示)。

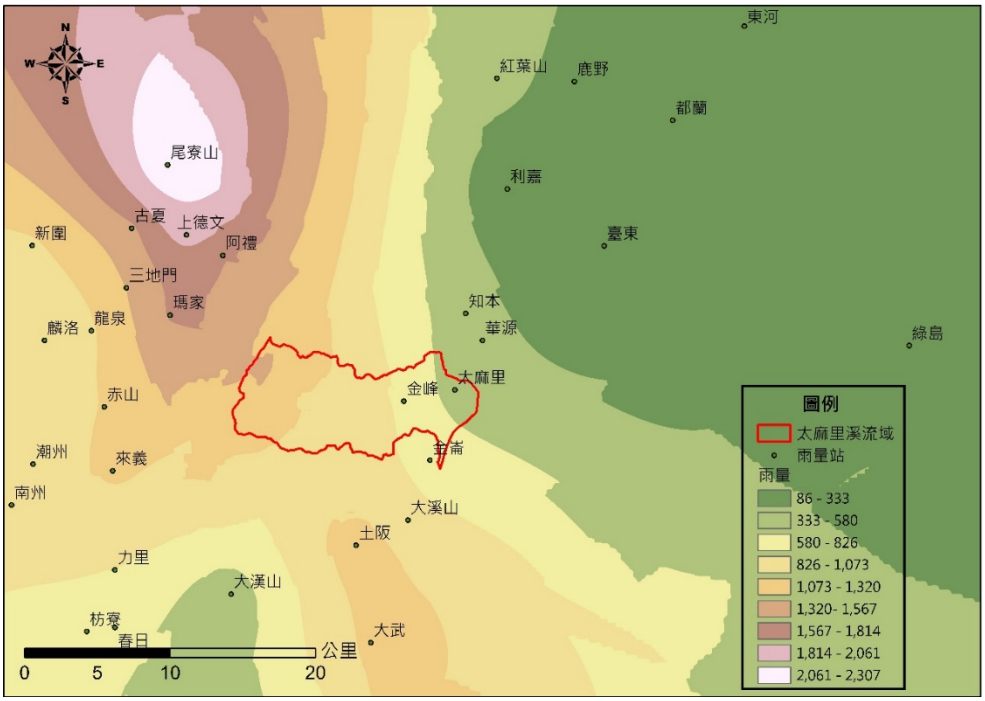


圖 3-3　太麻里溪莫拉克颱風累積雨量圖

莫拉克期間太麻里溪流域受極端豪雨所影響，流域內大範圍崩塌與大量土石流發生，造成流域上游產生堰塞湖、中游主流河道側蝕嚴重甚至下游因主流河道淤積使得洪水潰堤氾濫等災情。概述流域內各類型災害如下：

(一)上游區域

大範圍崩塌產生於天然林地內，大量土石造成土砂運動現象明顯，崩塌、土石流影響面積極廣。此外，包盛社附近右岸邊坡因降雨誘發大規模崩塌，崩塌土體阻塞河道並形成天然堰塞湖，名為包盛社堰塞湖（**圖 3-4**），距離嘉蘭村約 19 公里，水深最深約為 10 公尺，蓄水面積達 70 公頃，蓄水量約為 533 萬立方公

尺，因其下游堆積土石壩體材料較粗，由地形評估已發生三次潰決，潰決後之土石散落於河床及流至下游地區(陳樹群和許中立，2009)。因在 12 月份之溢洪口挖降後，現最大水深僅存 6 公尺，蓄水量也從原先的 533 萬立方公尺減少為 280 萬方，從蓄水量與壩體堆積厚度研判，突然潰決造成破壞之可能性較小。民國 99 年歷經凡那比颱風之影響，此堰塞湖之壩體已遭明顯侵蝕，目前已無蓄積水體，故發生潰壩等二次災害風險已明確降低許多（財團法人成大研究發展基金會，2011）。

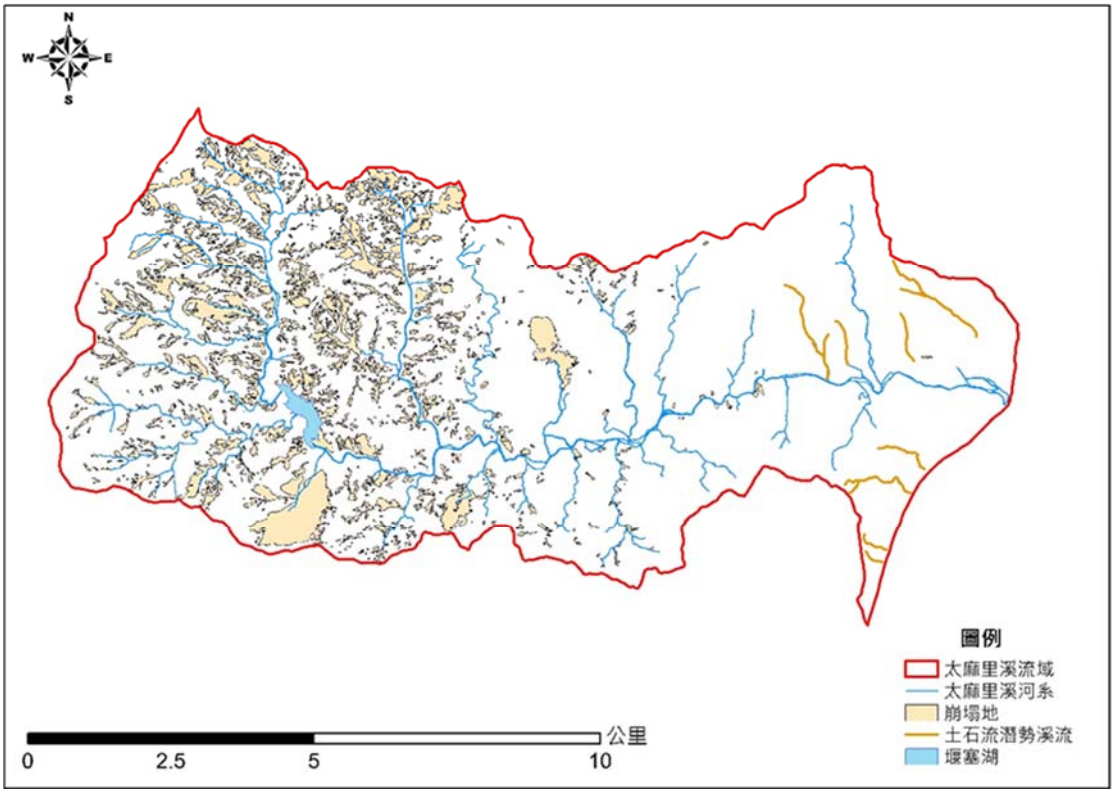


圖 3-4　太麻里溪堰塞湖與崩塌地分佈

(二)流域中游

大規模土石進到太麻里溪主流後，因河道狹小，使得高含砂水流配合高流速與高水位造成河道兩側人造物如拉灣橋與嘉蘭橋之毀損。中下游嘉蘭村位於古土石流堆積扇之未固結上，其受河道側蝕嚴重，約 66 戶民房地基遭掏空沖毀（**圖 3-5**）。

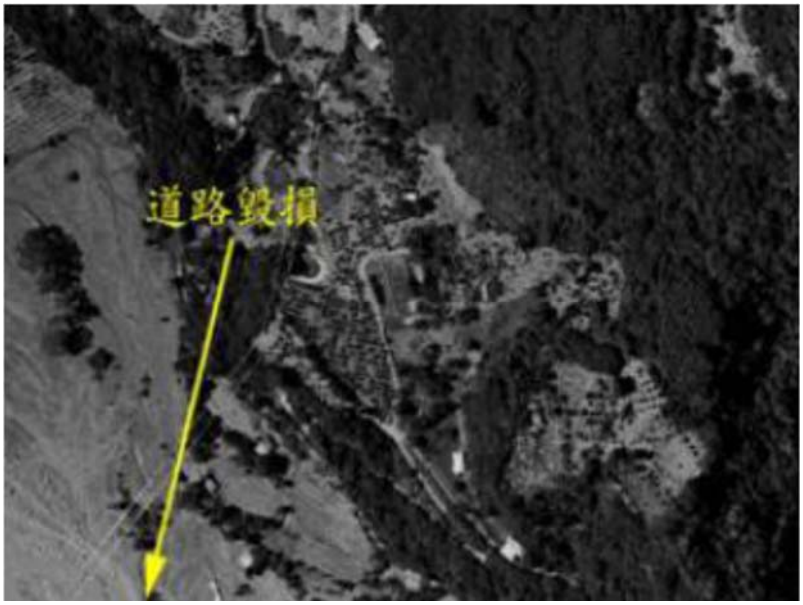


圖 3-5　太麻里溪中游受災情形

資料來源：行政院災害防救委員會

(三)流域下游三角洲沖積扇

此區域原為河川行水區，但因人為開發與農業活動限縮了河道原本的流域，與河爭地等現象隨處可見，雖然早在明國 62 年娜拉颱風及民國 94 年海棠颱風既因河道改變、堤岸沖毀、河床抬升等造成嚴重之傷害，但人類似乎未記取教訓，隨著時間的流逝，太麻里溪河床上的人為產物越來越多，以致莫拉克風災時造

成相當嚴重之災情。當時上游土石崩落使得太麻里溪主流洪水挾帶大量土石宣洩而下，原河道因堤防施作、人為活動使得通水斷面不足。洪水與土石衝擊兩岸使左岸堤防破堤，洪水直接衝擊此區之鐵公路等交通設施，而大範圍聚落農田亦遭到土石淤埋，影響範圍超過 3 平方公里（**圖 3-6**）。



圖 3-6　太麻里溪下游受災情形

資料來源：行政院災害防救委員會

二、　子集水區分析

本研究範圍為太麻里溪流域集水區，分析其數值地形模型，以利後續流域土砂生產量計算，將各子集水區編號，劃分為個 26 子集水區，再疊合福衛判釋崩塌地圖層，得到個子集水區之崩塌地面積，如**表 3-1** 所示，而集水區分區及崩塌地分布情形則如**圖 3-7** 所示。

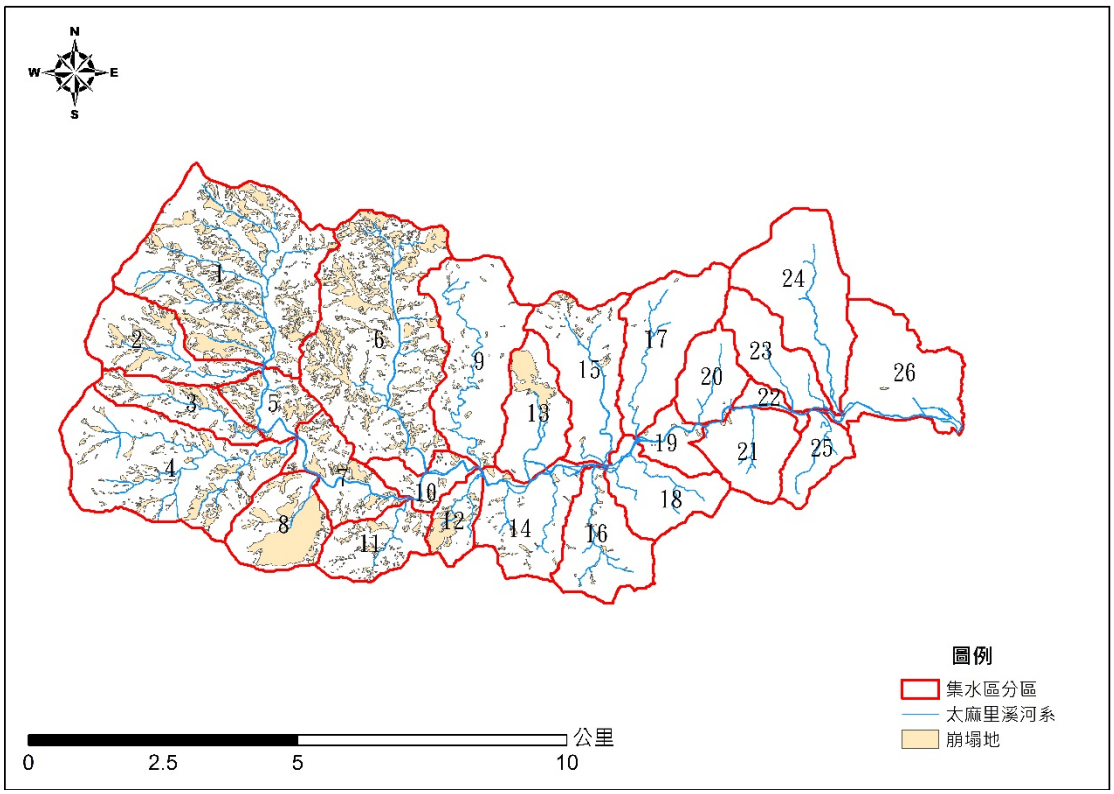


圖 3-7　太麻里溪流域集水區分區圖

表 3-1 各集水區基本資料表

集水區編號	集水區面積(m^3)	崩塌地面積(m^3)
1	25,346,117.00	33,899,457.22
2	7,029.04	7,464,025.18
3	4,983,777.46	4,492,678.11
4	18,033,698.38	11,036,897.03
5	4,059,485.06	3,461,346.81
6	25,348,410.83	32,150,355.84
7	5,758,100.38	6,451,224.72
8	6,768,764.87	17,326,874.76
9	13,289,077.87	1,624,758.40
10	2,996,544.06	681,446.02
11	5,268,255.50	3,206,263.70
12	2,987,690.94	3,996,077.15
13	6,668,557.49	4,122,686.70
14	8,100,188.86	1,352,110.92
15	9,631,992.84	1,280,149.84
16	7,410,226.58	599,461.23
17	9,819,645.37	73,378.17
18	6,263,417.02	13,016.01
19	2,856,869.61	196,184.28
20	4,533,568.40	89,276.30
21	5,902,651.58	214,272.01
22	1,195,674.71	0.00
23	5,651,174.70	0.00
24	11,612,626.48	0.00
25	3,469,262.11	0.00
26	10,042,855.98	19,228.83
總計	208,005,663.11	133,751,169.24

第三節 流域土砂生產計算

本研究主要參考集水區整體調查規劃參考手冊所介紹的土砂收支分析法進行莫拉克風災後，太麻里溪流域土砂產量之估算。茲就相關分析方法與步驟簡介(**圖 3-8**)。

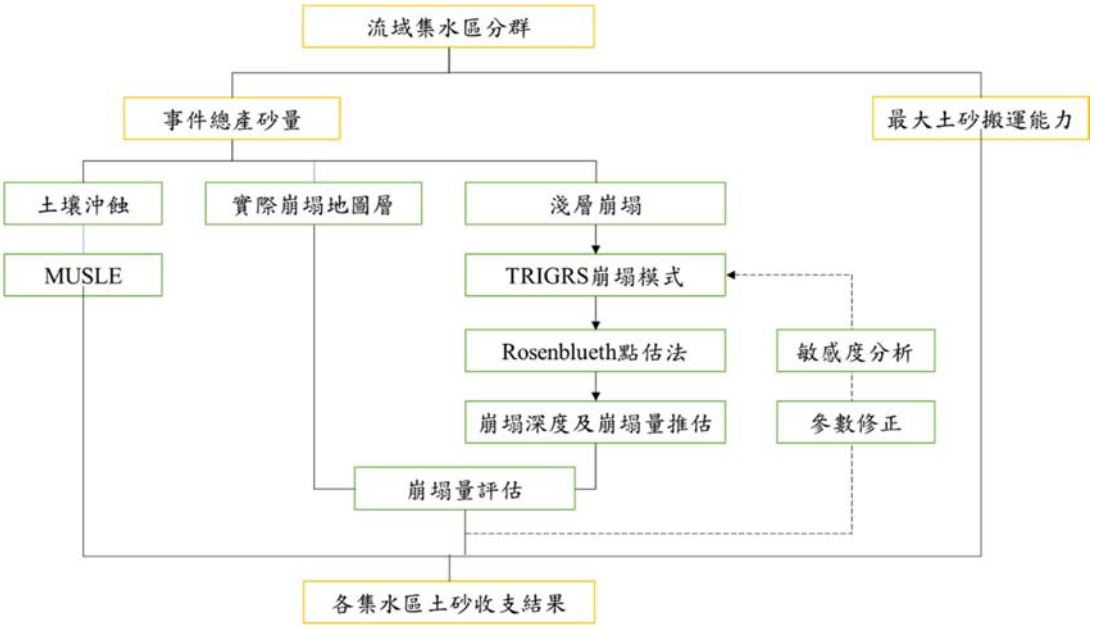


圖 3-8　土砂產量估算流程

三、　土砂沖蝕量

在土砂沖蝕量假設方面，運用文獻回顧所分析之公式與方法進行推估，研究主要引用 Williams and Berndt 於 1977 年所提出的修正型通用土壤流失公式(Modified Universal Soil Loss Equation，MUSLE)，進行單場暴雨土壤沖蝕量模擬；MUSLE 之主要優點有二：1.不需再另行估算泥砂遞移因子(Soil Delivery Ratio，SDR)。2.可用於估算單場暴雨事件的泥砂產量。由於研究主要想了解莫拉克風災後，太麻里溪

流域之沖蝕量，因此選用此法作為流域沖蝕之估算依據。如式 3.1 所示：

$$V_s=11.8(V_{eff}\cdot Q_p)^{0.56}\cdot K_m\cdot C\cdot P\cdot L\cdot S \quad \text{…式 3.1}$$

式中 V_s：單場暴雨所產生之土砂沖蝕量(ton)；V_{eff}：有效降雨量(Effecttive Rainfull)，(m^3)；Q_p：洪峰流量(Peak Flow Discharge)，(m^3/sec)；K_m：土壤沖蝕指數(Soil Erodibility Factor)；C：覆蓋及管理因子(Cover-Management Factor)；P：水土保持因子(Support Practice Factor)；L：坡長因子(Slope Length Factor)；S：坡度因子(Slope Steepness Factor)。透過此式即可計算單場暴雨事件下河道土砂沖蝕量。

四、 土砂崩塌量

在土砂崩塌量假設方面，運用文獻回顧所分析之模式進行推估，研究主要採用 TRIGRS 模式(Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model)分析淺層崩塌情況之邊坡穩定度。

(一)邊坡穩定度模式－TRIGRS

TRIGRS 模式(Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model)為分析淺層崩塌情況之邊坡穩定分析模式，包含入滲模組、入滲與逕流演算模組及邊坡穩定分析模組，由 Baum et al.(2002)根據 Iverson(2000)拓展理查方程式(Richards equations)之線性解，以 FORTRAN 程式撰寫而成。透

過將研究區域劃分為大量正方形網格，計算每個網格之安全係數來評估邊坡穩定度，故須配合地理資訊系統(Geographic Information System)及其水文模組(Hydrologic Analysis)截取其所需輸入之參數資料。並再根據不同研究區域之土壤及水文特性給予相關參數，如土壤單位重、有效凝聚力、土壤抗剪摩擦角、坡度、土壤厚度、地下水位深度、降雨強度、水力傳導度和水力擴散率等，可模擬不同時段之降雨入滲導致孔隙水壓上升之變化，進而推算出其安全係數，以判斷該格網之邊坡穩定性。

TRIGRS 模擬之結果可匯入 ArcGIS 軟體呈現。根據研究之不同目的，藉由調整不同時段之降雨強度資料及每個網格之不同特性(水力傳導度、水力擴散率、土壤厚度及有效凝聚力等)，可觀察到在不同降雨歷程中，研究區域內各土層深度孔隙水壓與安全係數之變化，以及網格特性影響其破壞時間之差異，能夠更清楚了解邊坡破壞之過程及機制。

1、入滲模組

TRIGRS 入滲模式源自於 Iverson(2000)對理查方程式之線性解，由 USGS 之 Baum et al.(2000)延伸其方程式而成。Iverson 之線性解包含穩態項及暫態項兩部分；穩態項為根據研究區域之土壤穩定入滲率和坡度決定水流之方向，並分

析研究區域孔隙水壓受地形、地質、氣候等影響，長期下邊坡孔隙水壓潛在的崩塌位置；而暫態則為用來了解短時間內高強度降雨造成孔隙水壓快速上升之變化情形，可以預測在任意強度和時間的降雨下，垂直於坡面的孔隙水壓之反映情況。

TRIGRS 於入滲演算模式中所定義之直角座標系為X軸正交於坡面之等高線、Y軸與坡面等高線平行，Z軸則與X－Y平面向下正交，α 為水平方向與X軸之角度，**圖 3-9** 為其座標系統之示意圖。

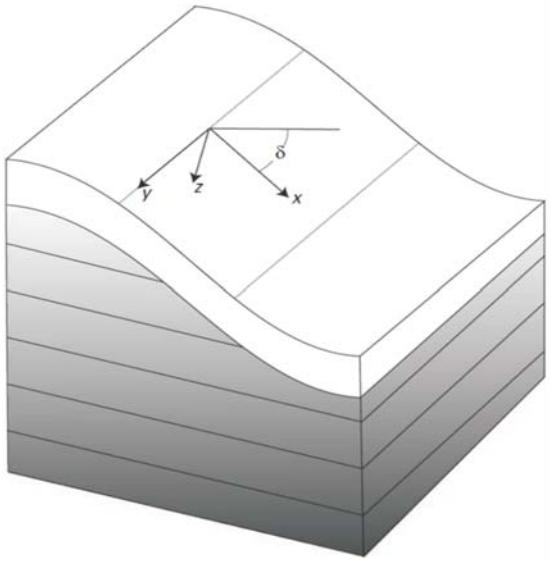


圖 3-9 TRIGRS 座標系統示意圖

(Baum et al.，2002)

針對座標軸Z，TRIGRS 將其定義為 Z＝Z (x，z)＝xsinδ+zcosδ，如**圖 3-10** 所示。

而地下水流動之模擬，則是以上述穩態及暫態模擬成果為架構。穩態為長期地下水位之情況，由地下水層之起始深度及穩定入滲率決定其穩態滲流之模擬，藉由入滲率、飽和滲透係數及邊坡坡度，TRIGRS 模式即可算出穩態水流之方向。暫態則假設為一維垂直向下流動，孔隙水壓強度之改變取決於降雨及入滲時間之推進。

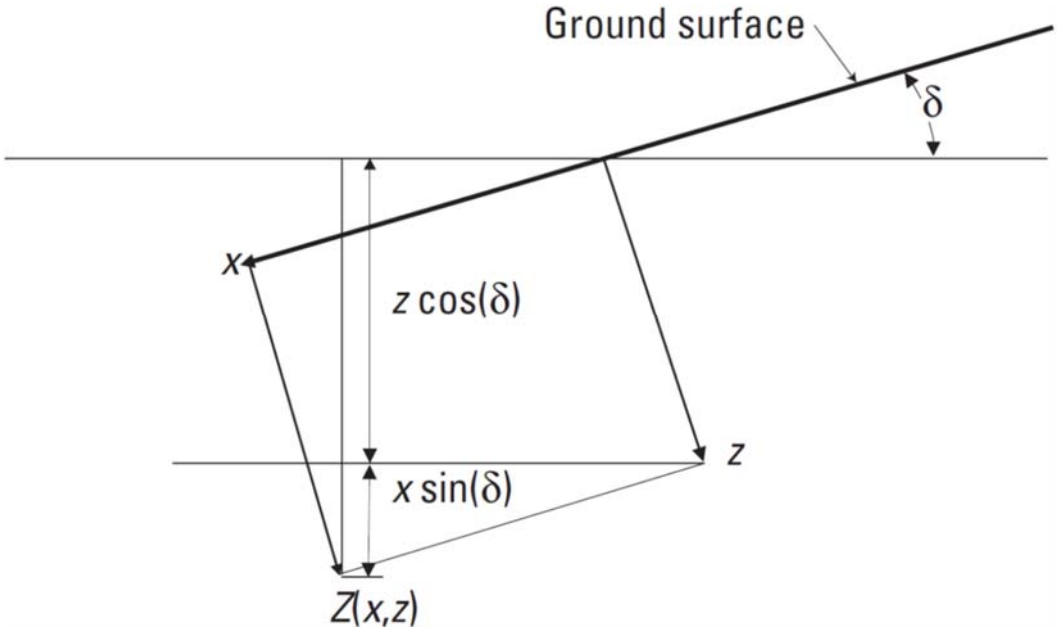


圖 3-10　TRIGRS 模式對 Z 軸之定義

(Baum et al.，2002)

模式中計算孔隙水壓 Ψ(Z，t)之方式有兩種，由方程式中對於下邊界(可能滑動深度與岩盤交界處)之定義決定，如**圖 3-11** (A)所示，整體邊坡有均勻之滲透率，故入滲之水流不斷往下方入滲，即下邊界為無窮深；而**圖 3-11** (B)則是於

可能滑動面上有明顯高低滲透率之分，故其下邊界位於可能滑動深度與岩盤交界之處。

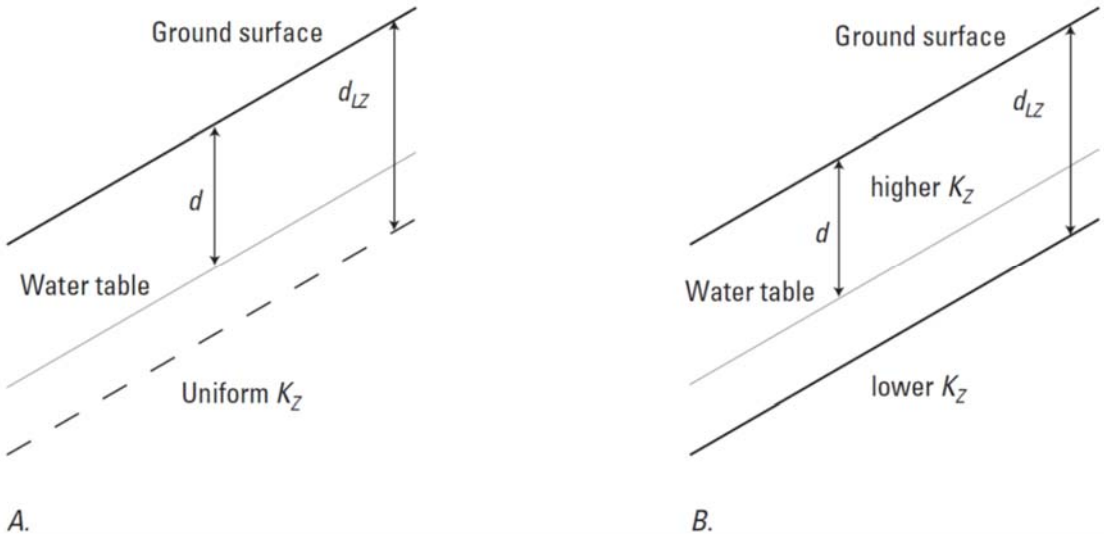


圖 3-11　方程式下邊界示意圖 (A)無限深度 (B)有限深度

(Baum et al.，2002)

當滑動深度為無窮深時，Baum et al. (2002)根據 Iverson (2000)之解析解推求入滲後之孔隙水壓與深度隨時間變化之情況如下**式 3.2**：

$$\psi(Z,t)=[Z-d]\beta+2\sum_{n-1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_z}\left\{H(t-t_n)[D_1(t-t_n)]^{1/2}\,ierfc\left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_n)]^{1/2}}\right]\right\}$$
$$-2\sum_{n-1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_z}\left\{H(t-t_{n+1})[D_1(t-t_{n+1})]^{1/2}\,ierfc\left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{1/2}}\right]\right\} \quad \text{…式 3.2}$$

其中，Ψ(Z，t)為地下水之壓力水頭，t 為時間(s)，Z=z/cosδ，Z 為垂直地平線之方向，而 z 為垂直邊坡之方向，θ 為坡度，d 為由 z 方向所量測之地下水位穩態深度，ß=λcosδ，而

$\lambda=\cos\delta-[I_z/K_z]_{LT}$，下標 LT 為長期時間（long term），$K_z$ 為 Z 方向之水力傳導係數，I_z 為穩態之地表初始入滲量，I_{nZ} 為在第 n 個模擬時間之降雨所導致的地表入滲速率，$D_1=D_0\cos^2\delta$，D0 為飽和水力擴散速率，N 為降雨之時間間距，$H(t-t_n)$則代表 Heavyside 步進函數。*ierfc* 可以表示為**式 3.3**，而 erfc(η)代表互補誤差函數(complementary error function)。

$$ierfc(\eta)=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\exp(-\eta^2)-erfc(\eta) \quad \text{…式 3.3}$$

而為解決邊坡地表下有限深度範圍內可能出現不透水層之邊界問題，TRIGRS 模式將該特定有限深度不透水層邊界之解，以**式 3.4** 表示:

$$\begin{aligned}&\psi(Z,t)=[Z-d]\beta+\\&2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_Z}\mathrm{H}(t-t_n)\sqrt{\mathrm{D}_1(t-t_n)}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}-(d_{LZ}-Z)}{2\sqrt{D_1(t-t_n)}}\right]+ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}+(d_{LZ}-Z)}{2\sqrt{D_1(t-t_n)}}\right]\right\}-\\&2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_Z}\mathrm{H}(t-t_{n+1})\sqrt{\mathrm{D}_1(t-t_{n+1})}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}-(d_{LZ}-Z)}{2\sqrt{D_1(t-t_{n+1})}}\right]+ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}+(d_{LZ}-Z)}{2\sqrt{D_1(t-t_{n+1})}}\right]\right\}\end{aligned} \quad \text{…式 3.4}$$

式中除了 d_{LZ} 代表不透水層於 Z 軸方向的深度，其餘各項與式 3.2 各參數的定義相同。

2、入滲與逕流演算模組

TRIGRS 模式將超滲降雨產生之地表逕流由一網格流至鄰近之網格。當地表逕流流至新網格時，可依該網格當時之含水量，選擇向地表下入滲或繼續向下游網格前進。模式

假設當降雨量加上來自鄰近網格的地表逕流量之總和超過該網格的入滲容量時，該網格隨即發生地表逕流。

模式為避免降雨產生之地表逕流於運算之網格中消失，故具備地表逕流演算(runoff routing)之功能，藉以在入滲率極低之區域也能進行模擬。網格之入滲量計算如**式 3.5**。

$$I = P + R_u, if \quad P + R_u \le K_s \quad \text{...式 3.5}$$

其中，I=土壤入滲率，[L/T]

P=單位時間降雨量，[L/T]

R_u=來自於上游相鄰網格的單位時間地表逕流深度，[L/T]

K_s=土壤飽和水力傳導度，[L/T]

當網格入滲量大於該網格之飽和水力傳導度時，超過的量將被視為地表逕流量 R_d，可表示為**式 3.6**。

$$R_d = P + R_u - K_s, if \quad P + R_u - K_s \ge 0 \quad \text{...式 3.6}$$

R_d 為送往下游相鄰網格之單位時間地表逕流深度，[L/T]

模式假設當地表逕流發生時，相鄰網格將同時發生地表逕流，故使用者在進行模擬時，使用之降雨事件延時需達到能讓地表逕流順利流到鄰近網格之長度。當進行運算時，模式將強制讓每一個運算時間間距之運算域內達到質量守恆，

故無法在時間間距內入滲之降雨，將以地表逕流的方式流往運算域之邊界或是運算域內任一低窪區中。然各時間間距 t_i 所計算之地表逕流量不會帶往下一時間間距 t_{i+1}，TRIGRS 模式也不會追蹤每一時間間距內流入運算區內之排放流量。故於某一計算時間間距 t_i 自某一網格離開之地表逕流，必須在同一個計算時間間距內自另一個網格入滲至地表下或是到達運算區的邊界。

3、邊坡穩定分析模組

TRIGRS 模式採用無限邊坡理論進行各網格之安全係數計算，無限邊坡理論以莫耳庫倫為基礎，採用抵抗力與驅動力之比值計算某深度於某時間點所構成之安全係數 F_s。由於模式僅計算每一網格土體自地表上邊界(upper boundary)至地表下邊界(lower boundary)於降雨延時鐘之安全係數，而未考量來自上邊坡與左右相鄰土體網格之作用力，故每一網格土體於 TRIGRS 模式之環境下為獨立自由體(isolated free body)。

於模式分析中，由於邊坡被切分為許多網格，當所計算之獨立自由網格之安全係數小於臨界安全係數 1.0 時，並非表示整塊邊坡會發生破壞，但仍能夠針對較危險區域之坡體

所在地提出警訊。

TRIGRS 用於計算網格安全係數之公式如**式 3.7**。

$$F_s = \frac{\tan\phi'}{\tan\delta} + \frac{c' - \psi(Z,t)\gamma_w \tan\phi'}{\gamma_s Z \sin\delta\cos\delta} \quad \text{...式 3.7}$$

其中，c'為土壤凝聚力、ϕ'為摩擦角、γ_w為水的單位重、γ_s為土壤單位重、$\psi(Z,t)$為孔隙水壓、δ為坡度、Z 為垂直深度、F_s為安全係數。由式 3.9 中可見，當F_s<1 時，驅動力大於土壤抵抗力，為不穩定狀態，當$F_s \geq 1$ 時則可視為穩定狀態。

4、TRIGRS 模式之限制

根據王姵兮(2007)、鐘欣翰(2008)及施虹如(2013)研究整理之模式限制如下:

(1)模式假設邊坡處於飽和或近飽和狀態，構成邊坡之土壤屬同質等向性壤。不適用於非同質、異向性或乾涸之土壤條件。

(2)模式對於參數之起始條件設定相當敏感，建議研究者最好能取得起始之地下水位深度、水力擴散速率及水力傳導係數之實測數據。

(3)模式於計算中如遇降雨強度大於土壤之水力傳導係數時，會將無法入滲之雨水沿邊坡表面逕流而下，但未考慮逕流之蒸發量。

(4)模式允許網格間有不同水力傳導係數及水力擴散速率，故網格間可能會因相異之水文特性，導致位於鄰近邊界之位置產生不均衡之側向力及非平面之破壞。

(5)模式不建議使用於模擬之區域坡度大於 60°之邊坡上，由於陡坡之參數如凝聚力、抗剪摩擦角等參數較不易確定，可能使結果有誤。

(二)參數設定

本研究選定太麻里溪流域集水區作為研究區域，以 TRIGRS 淺層崩塌模式探討莫拉克颱風事件於太麻里溪造成之崩塌情形。

參考尹立中等(2013)使用不同數值高程模型(DEM)解析度，探討計算之安全係數差異及效率，根據此研究得知，40 公尺及 5 公尺之模擬結果相當接近，但 5 公尺之運算時間較長，效率較差。

本研究考量研究區域範圍廣大，參考前人研究後，選用解析度 20 公尺之 DEM，以 ArcMap 製作模式所需之參數圖層。

本研究使用太麻里溪集水區解析度 20 公尺之 DEM，在執行 TRIGRS 前，需先使用 ArcMap 水文分析模組之 Fill 工具，將 DEM

之窪地填充，以去除 DEM 本身之單點凹陷(one cell depressions)，**圖 3-12** 為 Fill 後之集水區高程圖。

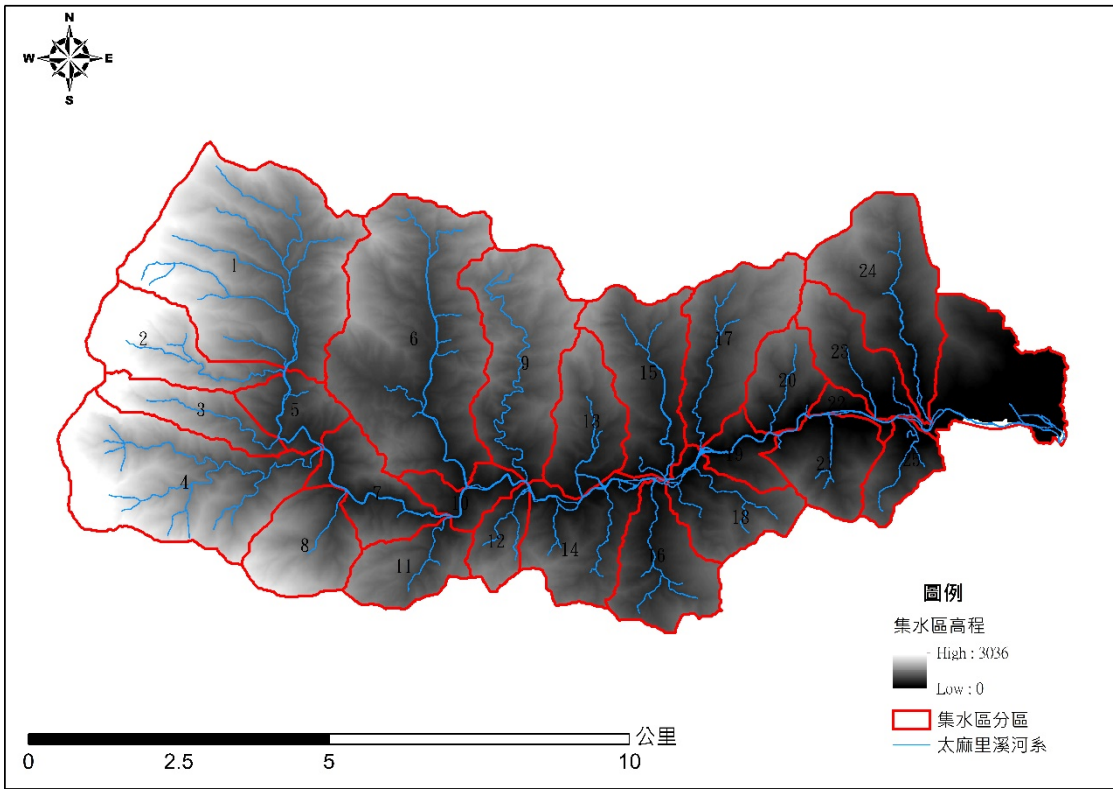


圖 3-12　太麻里溪集水區高程圖

1、土壤坡度與土壤厚度

本研究利用 ArcMap 之空間分析工具，藉由 DEM 本身之高程資料，轉換為平均坡度，如圖 3-13 所示。此外，由於要取得廣域面積之土壤厚度資料非常困難，學者多使用經驗公式，如 Khazai and Sitar(2000)提出以經驗法則進行淺層崩塌地之土壤厚度評估，並提出各坡度區間所對應之深度表，

如**表 3-2** 所示。除根據前人研究之經驗式外，亦有學者至現地進行土壤鑽探並以統計迴歸方式推估該區之土壤厚度。

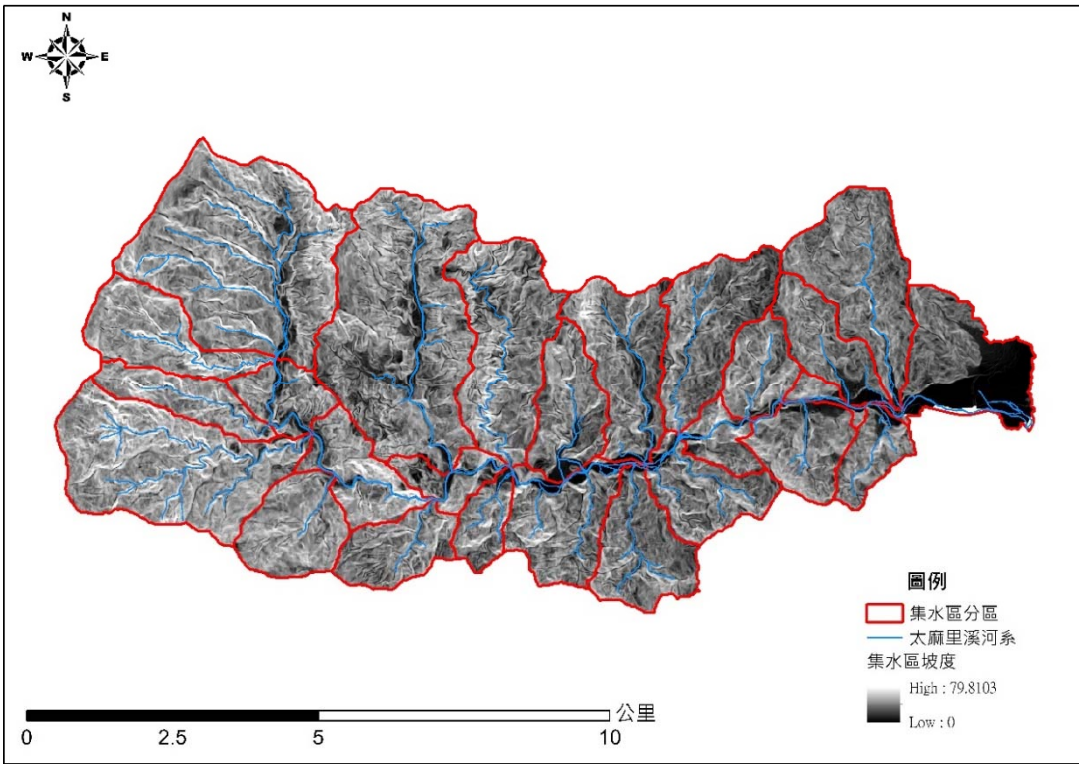


圖 3-13　集水區坡度圖

本研究採用 NCDR(2012)所提出之坡度-覆土深度法作為土壤厚度之換算使用，此法為 NCDR 將陳樹群等(2010)針對石門水庫集水區及大甲溪集水區所提出之各坡度級距對應之深度表進行整數化後所提出，如**表 3-3**。

表 3-2 坡度深度對應表

坡度(˚)	平均深度(m)
<30	**2.0**
30~40	**1.5**
40~60	**1.0**
>60	**0.5**

(Khazai and Sitar，2000)

表 3-3 坡度－覆土深度對應表

坡度(˚)	**平均深度(m)**
<20	1.5
20~30	3.5
30~40	4.5
40~50	2.5
>50	1.0

(NCDR)

2、地表流向

TRIGRS 模式於計算時需要該研究地區之流向，本研究利用 ArcMap 之空間分析工具，使用水文分析模組將 DEM 匯入後即可獲得研究區域之地表流向資料。**圖 3-14** 即為研究地區之地表流向圖。

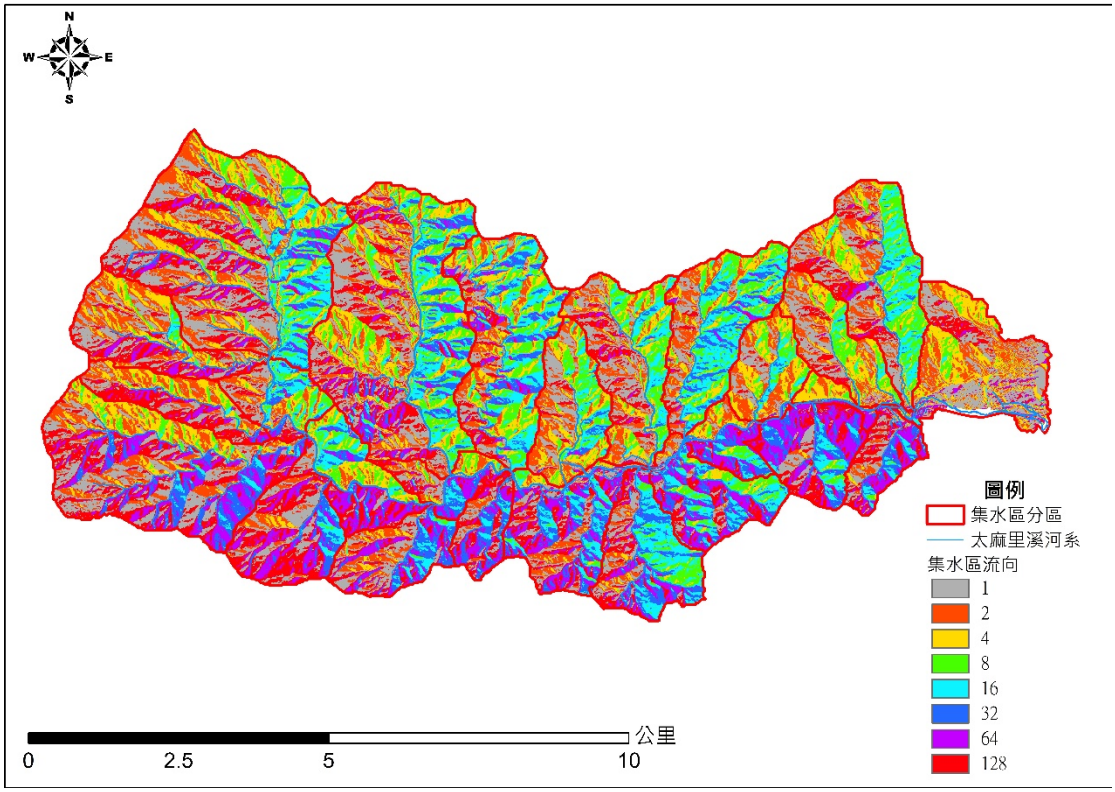


圖 3-14　集水區流向圖

3、初始地下水位深度

地下水位深度資料因取得不易，常見假設為與土壤厚度相同(鍾欣翰，2008；陳則佑，2011；NCDR，2012；施虹如，2013)，或以實際鑽探資料進行地下水位的推估(黃翔瑋，2012)。

因山區地表覆蓋之土壤多為崩積層，當暴雨發生時大量雨水入滲，使地下水位快速上升，最終造成邊坡土壤因不穩定而產生下滑，即淺層崩塌。本研究參考前人研究，並考量岩盤入滲率極低，入滲之雨水由表層土壤與岩盤交界處開始

累積，將初始地下水位深度視為與土壤厚度相同進行本研究之模擬。

4、土壤參數處理

本研究使用之 TRIGRS 淺層崩塌模式，其所需之土壤參數有土壤凝聚力、摩擦角、土體單位重、水力傳導度、水力擴散度及初始入滲率(Iz)，而初始入滲率(Iz)為某地區之長期平均入滲速率，決定土壤處於乾燥或濕潤之情況，考量研究區在莫拉克颱風來臨前有零星降雨，故本研究假設初始入滲率 Iz=10-8(鍾欣翰，2008)。本研究參考中央地質調查所之「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置－98 年度總報告」根據上述參考資料，決定各地層分區之平均土壤參數設定。後續再經由參數率定獲得較符合實際情形之土壤參數組合。

(三)Rosenblueth's 點估法

為解決參數不確定性對模擬結果之影響，本研究參考陳則佑(2011)，以 Rosenblueth's 點估法作為解決辦法。因地層參數變異程度明顯大於水力參數，且在地層參數變異性中，土壤單位重變異性較小。故將採用凝聚力與摩擦角進行模擬。

點估法主要由期望值與正標準偏差及負標準偏差共兩個點

來表示一隨機變數的機率密度函數(Probability density function)。若將點估法應用於雙隨機變數之邊坡安全係數計算時可寫為**式 3.8**。

$$F= g(X，Y)\ldots\textbf{式 3.8}$$

式中，F 為安全係數；變數 X 和 Y 則代表土壤凝聚力和內摩擦角。考量正負標準差之四種組合(F_{++} ， F_{-+} ， F_{--} ， F_{+-})，以平均值 $\overline{X}$ 和 $\overline{Y}$ 以及標準偏差 σ_X 和 σ_Y 將式 3.10 改寫為**式 3.9** 至**式 3.12**。

$$F_{++}=g(\overline{X}+\sigma_X ，\overline{Y}+\sigma_Y)\ldots\textbf{式 3.9}$$

$$F_{-+} = g(\overline{X}-\sigma_X ，\overline{Y}+\sigma_Y)\ldots\textbf{式 3.10}$$

$$F_{--} = g(\overline{X}-\sigma_X ，\overline{Y}-\sigma_Y)\ldots\textbf{式 3.11}$$

$$F_{+-} = g(\overline{X}+\sigma_X ，\overline{Y}-\sigma_Y)\ldots\textbf{式 3.12}$$

考量到雙變數之相關性，將正負標準差 4 個組合分別乘上 P_{++} ， P_{-+} ， P_{--} ， P_{+-}，之後將結果相加即可得到安全係數之期望值 E(**式 3.13**)。

根據陳則佑(2011)所整理之相關文獻資料顯示，雖然地層參數(土壤凝聚力和內摩擦角)與地下水位有關，但在缺乏地層參數之相關性資料下，參數可視為互相獨立。故 P_{++} ， P_{-+} ， P_{--} ，

P_{+-}之值均為 1/4。

$$E[F]= P_{++} F_{++} + P_{-+} F_{-+} + P_{--} F_{--} + P_{+-} F_{+-} \ldots \text{式 3.13}$$

經由將 4 個安全係數組合平方後所獲得的期望值 $E[F^2]$減去安全係數期望值的平方$(E[F])^2$，即可得到安全係數期望值之變異數(**式 3.14**)

$$Var[F]= E[F^2]- (E[F])^2 \ldots \text{式 3.14}$$

最後將變異數開根號後即可得到安全係數期望值之標準偏差 。藉由安全係數期望值與標準偏差，即可用來去除落於估計範圍外之不穩定網格。示意圖如**圖 3-15**。

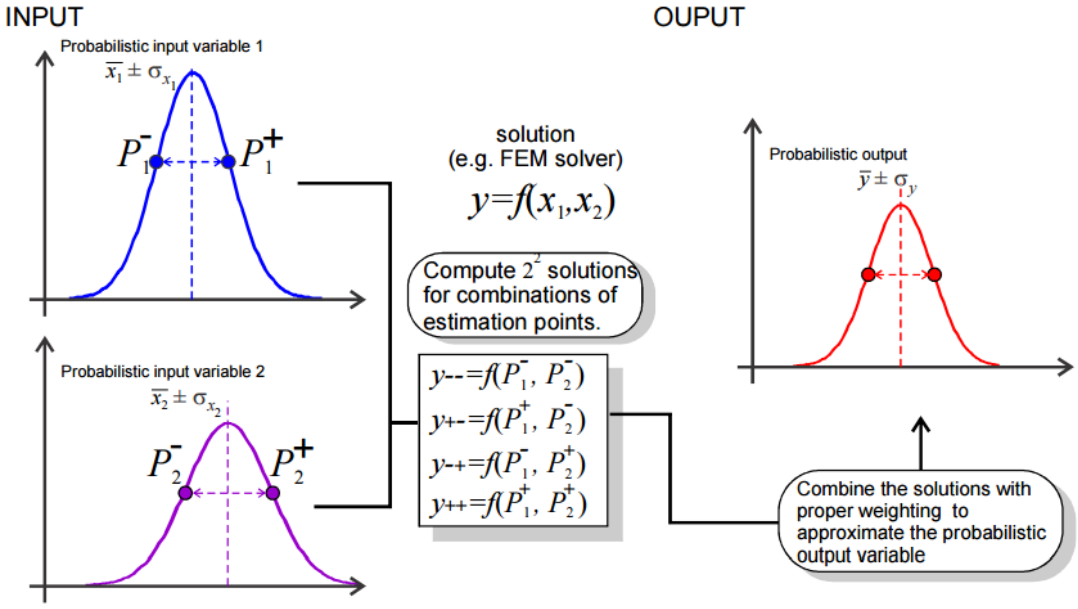


圖 3-15　Rosenblueth 點估法示意圖

第四節 土砂收支分析

流域內之土砂運動為連續且守恆的過程，從土砂生產開始經由降雨逕流的連結，自上游往下輸送。因此，上游集水區的出砂量即為下之入砂量，研究所運用之土砂收支分析，就是以土砂量守恆的觀念，估算各集水區土砂來源量與土砂輸送量之差額，故土砂變遷量可由下式表示:

土砂變遷量 = 上游土砂來量 + 流域土砂生產量 - 土砂輸送量

因此，在進行土砂收支分析時，必須先將流域中水文、地文等性質相同的區域，劃成同一集水區，以進行後續降雨逕流、土砂生產及輸送之計算。最後依各集水區之計算成果，自上游依序演算至下游，以完成流域之土砂運動過程推估。故在研究中，基本單元為一子集水區，其主要土砂量來源為集水區內之砂生產量與自上游搬運來之土砂。而各子集水區，從上游匯流點到下出口間，其原有之地形，將予以簡化為兩平面斜坡及中央河道；降雨落入集水區後，地表逕流引起表土沖蝕向河道匯集，而集水區內之崩塌土方，亦會流入河道形成土砂來源。其中，在土砂收支分析，計算過程裡，主要將流域分成坡面、支流河道與主流河道，計算完坡面土砂生產量後，與暴雨搬運能力(河道輸砂或土石流)進行比較，兩者取小值，得出坡面流入支土砂量；再將坡面流入支土砂量與河道土砂堆積量(河道殘土)相加，得出支流不安

定土方。

重覆與暴雨土砂搬運能力(支流逕量)進行比較並取小值，是為支流入主流土砂量。將集水區內所有土砂原料與逕流，依序自上游集水區，帶入的水砂，往下輸送至集水區出口點，進入下游集水區之匯流點；這些程序構成了流域土砂運動之機制。由上述可知，流域內之土砂運移，可簡化為降雨逕流、土砂生產及輸送此三部分所構成。

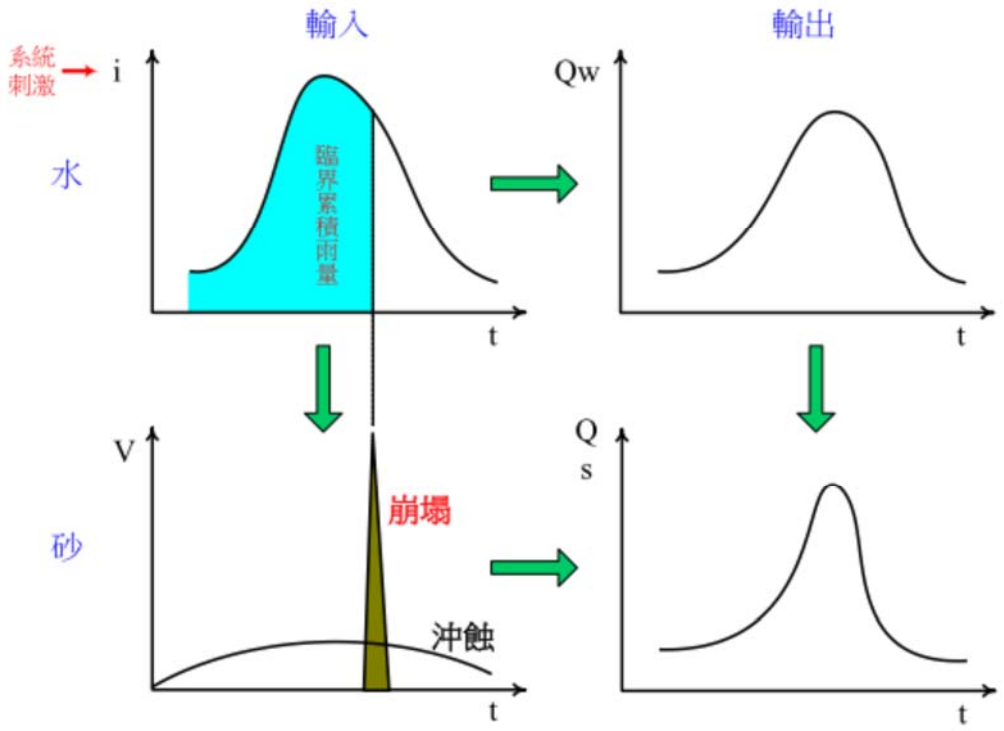


圖 3-16　集水區產砂概念圖

資料來源：謝正倫等，2001

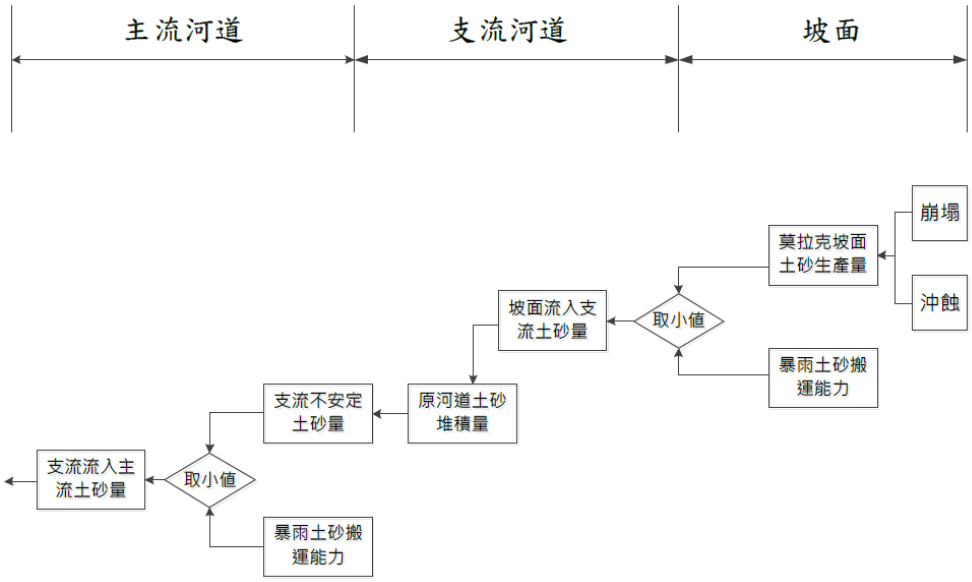


圖 3-17　土砂收支分析流程圖

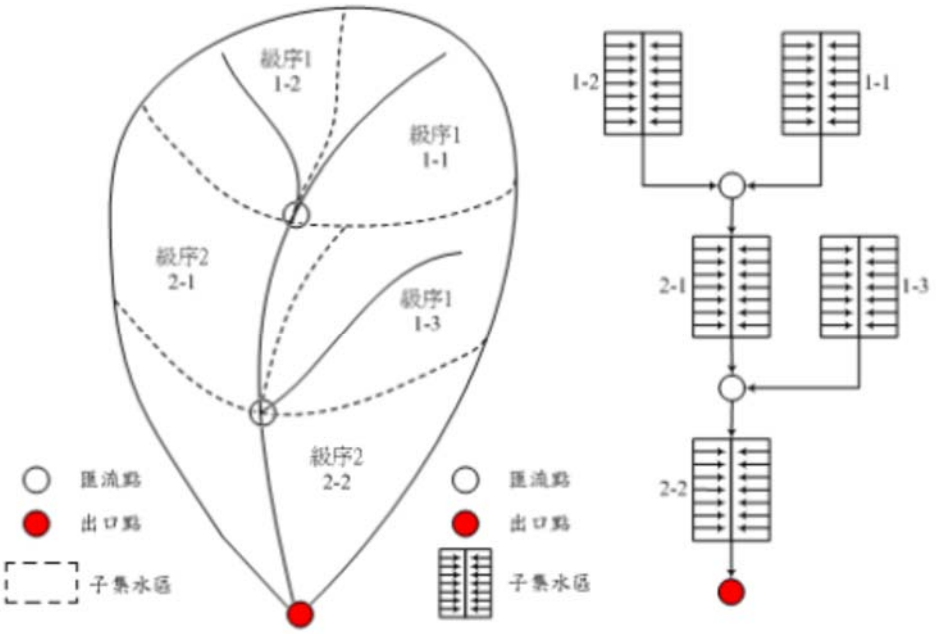


圖 3-18　子集水區與河系串聯示意圖

資料來源：謝正倫等，2001

在計算上，首先土砂產出將根據針對單場暴雨所設計之 MUSLE 土壤沖蝕公式(Williams and Berndt，1977)進行推估，因此採用可估算

山區溪流輸砂能力之平衡濃度公式。最後綜合 TRIGRS 與 MUSLE 計算之產砂量，若子集水區內之土砂產量大於其搬運能力，則取小值(即該子集水區之搬運能力)作為計算，反之則取該子集水區之土砂產量，用以推估最終之土砂入庫量。

在本研究土砂運移假設方面，因模擬事件特性為颱風降雨，降雨延時與強度較強，事件產砂量比起一般降雨事件多，且河道逕流量大亦促進邊坡與渠道土砂搬運能力。為擬真上述描述之情況，將假設開始崩塌後之運動型態為挾砂水流，因此土砂運輸將參考因應渠道砂量比例高時所設計之方程式。此部分擬運用日本學者 Takahashi 針對地形陡峭渠流設計之平衡濃度公式，雖臺灣地形特色與日本相近，但在環境參數與係數上謝正倫(1998)將其公式進行修正(**式 3.15**)，使其方程式更能應用在臺灣山區集水區上，此方程式受到河道坡度影響而改變渠流流量中之含砂量濃度。而後將進行渠道流量之修正，土砂比例高之流量情況，如僅以水理方式推估流量數據將導致流量低估，因此將運用蔡元芳等人(1993)參考日本學者 Takahashi，所推導設計之土石流尖峰流量公式修正暴雨流量數據，如**圖 3-19** 所示，此迴歸曲線適用於於山區上游集水區內，土砂輸送量之估算(**式 3.16**)。

$$C_{d\infty} = \exp(1.73\ln\theta - 5.83) \quad \text{…式 3.15}$$

式中 $C_{d\infty}$為該河段土石流流動層最大濃度；θ 為此河段河床坡度

(Degree)，透過此式求得不同河床坡度之輸砂平衡濃度，再將流量乘上此體積濃度，即可獲得該河段之輸砂量。

$$Q_d = \frac{C_*}{C_* - C_d} \cdot \frac{CIA}{360} \quad \text{…式 3.16}$$

式中 Q_d 為土石流(挾砂水流、泥流)流量；C^* 為土石流堆積層濃度；C_d 為土石流流動層濃度；C 為逕流係數；I 為降雨強度；A 為集水區面積，透過此式及平衡濃度公式作為土石流與河道輸送能力之估算依據，即可進行流域土砂運移之評估。

而平衡濃度公式之限制為，集水區坡度需低於 25 度，C*(堆積層濃度)最高為 0.7，而 Cd∞(該河段土石流流動層最大濃度)為 0.63，故當子集水區之坡度大於 25 度時，則子集水區挾砂水流濃度視為 0.63 進行計算。

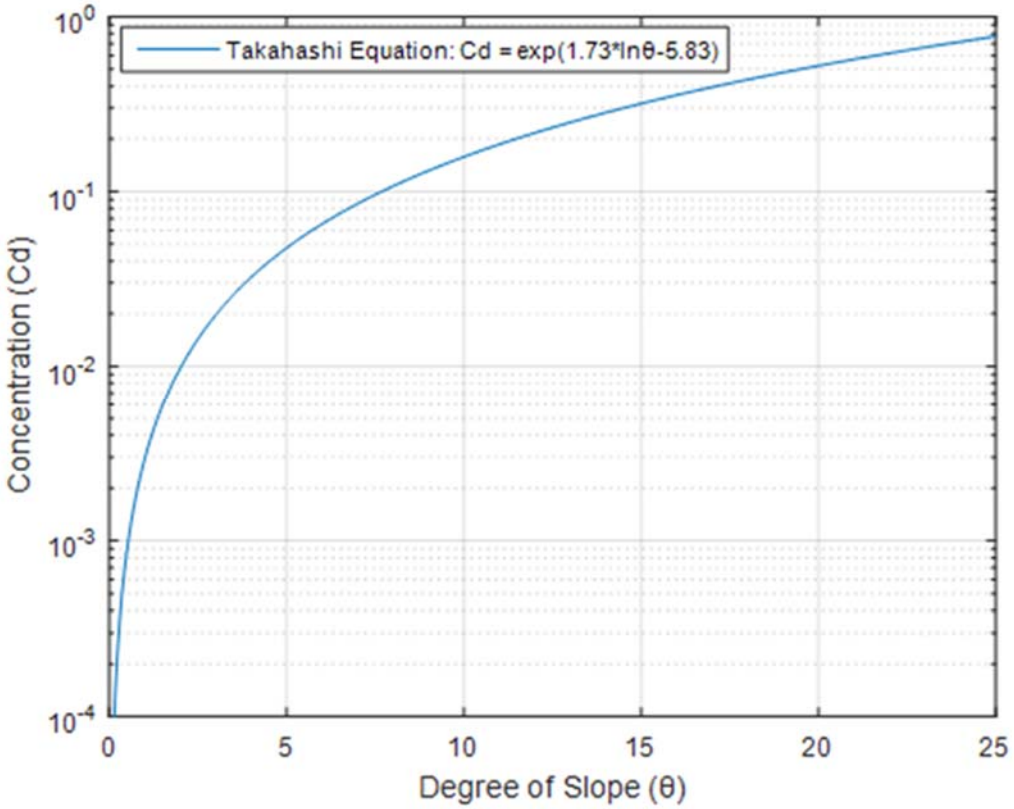


圖 3-19　平衡濃度公式－坡度與濃度之關係

資料來源:蔡元芳等人，1998

第五節 現地調查及 UAV 航拍

一、　嘉蘭村之現地調查

太麻里溪流域範圍涵蓋臺東縣金峰鄉及太麻里鄉，其中金峰鄉包含嘉蘭村、正興村、歷坵村、賓茂村、新興村，而太麻里鄉則包含香蘭村、泰和村以及大王村，共計八個村里。而嘉蘭村人口數為 1,535 人，是金峰鄉人口數最多的村。

嘉蘭村位於太麻里溪中下游處溪流北岸支流的沖積平原上。金峰鄉之地方政治暨行政及教育等單位如金峰鄉公所、金峰鄉民代表會、

太麻里戶政事務所、金峰鄉辦公室、臺東縣警局大武分局金鋒分駐所、嘉蘭國小等都在該村內。另設有有基督教長老教會、天主堂、安息日會、及浸信會等。

而嘉蘭村東西兩側由兩條土石流潛勢溪流包夾，西鄰東縣 DF079(多利溪)，東接東縣 DF078，且此處主河道束縮(如圖 3-20 所示)；因莫拉克颱風災害造成河道兩側人造物如拉灣橋與嘉蘭橋之毀損，河道側蝕嚴重，約 66 戶民房地基遭掏空沖毀，雖未有土石流之發生，但因西側之土石流潛勢溪流(DF079)位於較上游處，在極端氣候影響及複合型災害衝擊下，可能危害保全對象，因此本年度計畫選定嘉蘭村為例，進行後續之洪澇災害數值模擬與複合式災害評估模式建置。

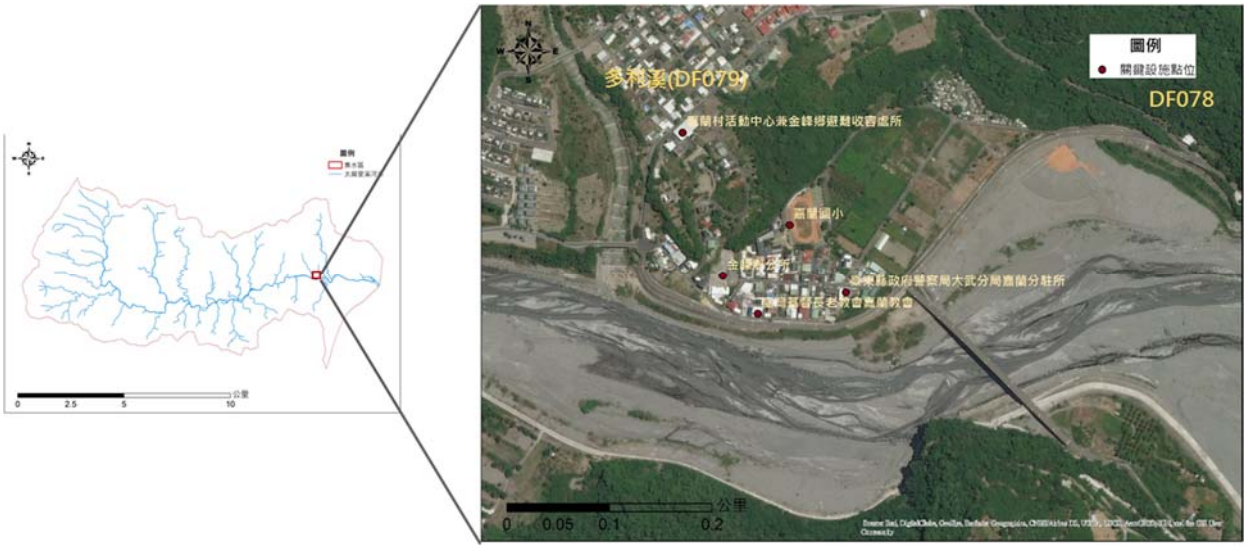


圖 3-20　嘉蘭村位置圖



圖 3-21　嘉蘭村現況圖

二、　無人飛行載具(UAV)

無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)或稱無人飛機系統(Unmanned Aircraft System, UAS)，最早是運用於軍事用途上，近年來也逐漸推廣到民間或政府的相關研究上，舉凡土地開發利用探勘、農漁牧之調查、環保監測、坡地防災監測、水土災害與海岸偵防之監控、災前監測與災後調查等。UAV 具機動性，可快速反應，可於低空雲下作業，彌補了衛星遙測受限於雲遮影響且無法快速取得影像資料的缺點。且在災害發生現場複雜狀況下能確保生命安全取得即時資料並建置模型，達到監測與防災之效益。

2009 年 8 月莫拉克颱風之降雨型態為高強度且長沿時及高累積降雨量，龐大的降雨量重創中南部及東部地區，山坡地發生多起坡地災害事件，根據國家災害防救科技中心的莫拉克颱風之災情勘查與分析報告，颱風雨水的沖蝕引發山坡地崩塌、道路陡峭與地質脆弱使路基掏空，造成多處省道與縣道中斷，而降雨的集中也引發洪水夾帶土石流。本計畫研究之太麻里溪流域亦於莫拉克事件下產生大量土砂運移以及堆積大量土方。更於嘉蘭村造成嚴重災情，沖毀 66 戶民宅，導致災民居無定所。因此本計畫以太麻里溪於莫拉克風災受創嚴重之嘉蘭村使用無人飛行載具 UAV 拍攝高解析度影像並建置數值地形模型，分析流域河床沖淤變化與村落之間關係，並結合數值模式成果進行 3D 成果展示

近年來使用於非軍事用途的無人飛行載具可分為定翼型、單旋翼型與多旋翼型。定翼型 UAV 優勢在於航程長、抗風能力強、酬載能力高，因此適合用於長距離越野拍攝。旋翼型具備有自主停懸、速率控制及導航飛行的功能。操作的範圍也由目視距離拓展到視距外控制。適合小範圍拍攝，不須起降跑道，使用上較為靈活。

本計畫拍攝主要為於嘉蘭村與河道之間，飛行範圍較小，且考慮起降地點限制因此選擇不需跑道可垂直起降之旋翼型四軸無人飛行載具 Phantom 4 Pro V2.0(如圖 3-22)，搭載 2000 萬畫素鏡頭，表

3-4 為 Phantom 4 Pro V2.0 載具相關資料。



圖 3-22　Phantom 4 Pro V2.0 無人飛行載具外觀

表 3-4　Phantom 4 Pro V2.0 無人飛行載具基本資料

機身尺寸	35cm
起飛重量	1375g
飛行時間	30 分鐘
飛行速度	72 km/h
工作海拔	6000m

三、 航拍前置作業

本計畫需進行 UAV 繪測之地點為太麻里溪下游嘉蘭村，於實際至現場作業前除須確認地點外，更應針對地點進行測繪順序規劃，以確保計畫執行期限內如期完成測繪工作。

無人飛機行拍規劃流程有幾點須進行考量。首先應先確認作業範圍及飛行空域，由於太麻里溪流域下游位於 RCR41 日夜限航區內，在執行飛行任務前須先申請的空域範圍與申請之核准時間、空域內的飛機起降場、欲拍攝目標點的位置與坐標、目標點與起降場的距離等(如圖 3-23 所示)。申請空域核准後須確認執行期間及天氣確認。並與其他空域重疊單位進行空域協調，以及連路人員進駐相關單位，使得執行 UAV 飛行任務。

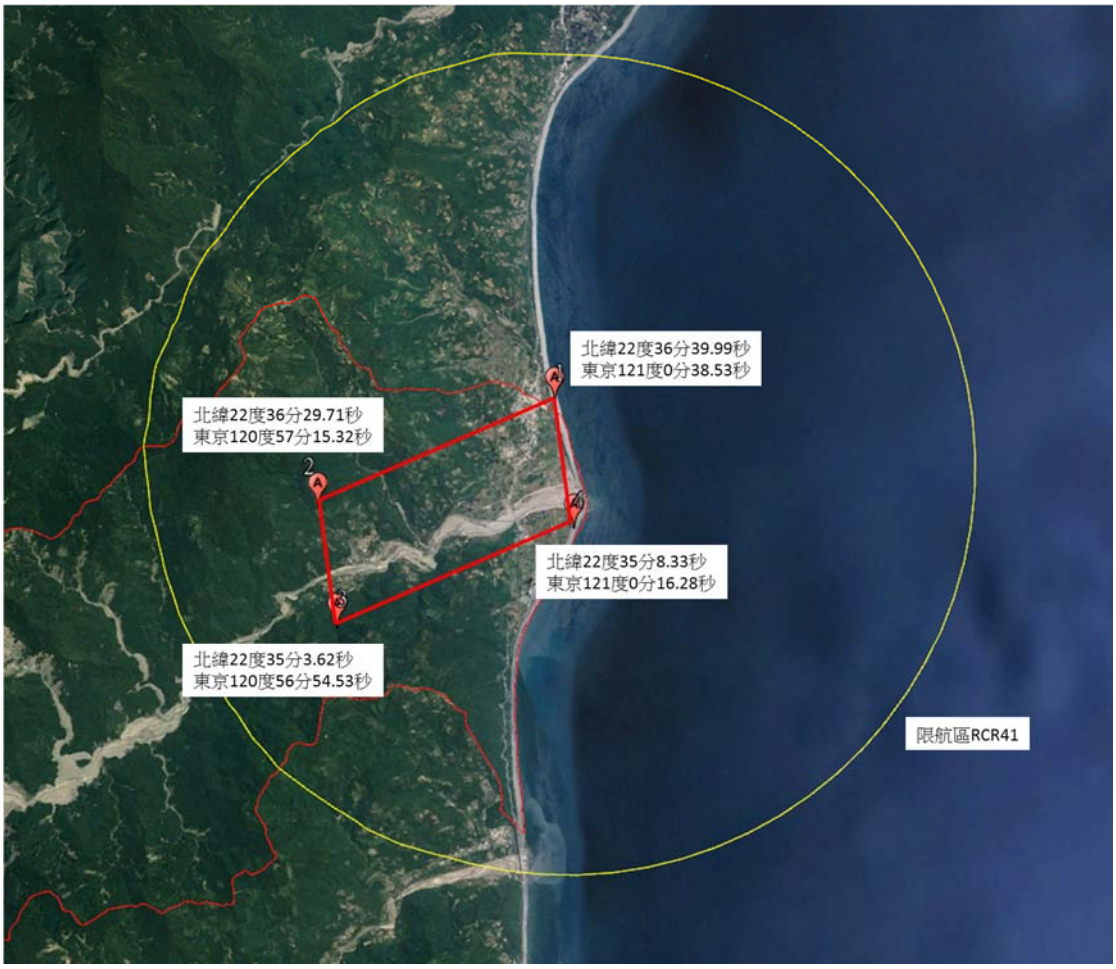


圖 3-23　UAV 作業範圍與限航區範圍

四、　UAV 航線規劃

本計畫使用 DJI GS PRO 航線規劃軟體(如圖 3-24 所示)，設計拍攝範圍並生成航線，可調整影像前後左右重疊度、飛行高度與速度、相機拍照間隔等，亦設置 GPS 收訊遺失、緊急返行、自動降落、懸停等緊急狀況應對處理方式。但在自動飛行模式執行飛行任務時應注意 UAV 飛行狀態及周遭地形變化以便於緊急狀況時轉為手動控制，避免 UAV 受損影響資料內容取得。

航線規劃設計之要點為目標區域地形，地形高程影響無人飛行

載具飛行航高，航線過高又會造成像片品質不佳。因此實際至現場執行 UAV 飛行任務前，將事先透過 Google map 等衛星影像，優先確認測繪目標之類型與範圍尺度，並且確認所有飛行高度以確保飛行安全。

此外對於正攝影像及三維建模的航線規劃，可規劃不同俯瞰角度和高度並使用井字型航線規劃以填補模型空洞，以提升建模效果與品質。

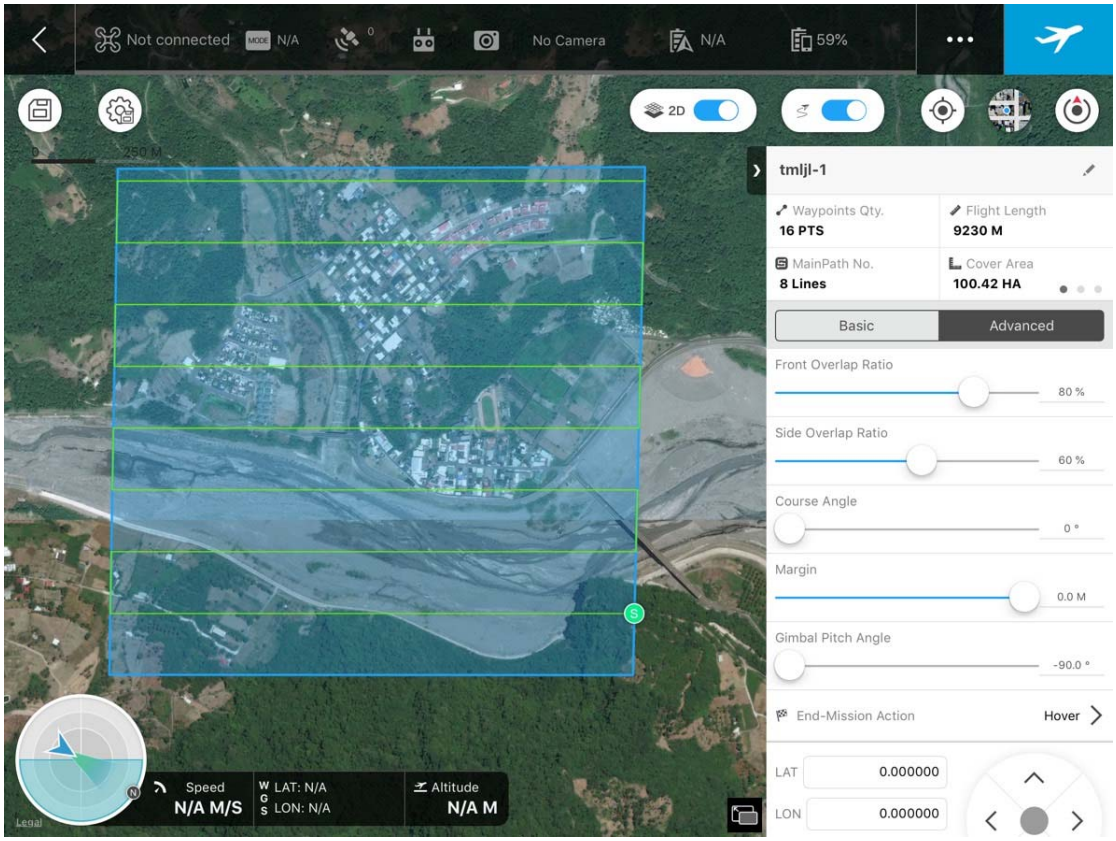


圖 3-24　UAV 航線規劃軟體示意圖

第六節 TCCIP 未來颱風降雨事件分析

本研究為推估太麻里溪流域嘉蘭村之災害潛勢，擬利用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project, TCCIP)所推估的未來颱風資料來做為模擬輸入。TCCIP 以 RCP(Representative Concentration Pathways)情境與多氣候模式來進行未來氣候與水文資料的模擬，RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 為不同暖化程度的情境，分析時距分為基期(1979 年-2003 年)、近未來(2015 年-2039 年)與世紀末(2075 年-2099 年)，解析度為 5 公里。依照其目前分析結果臺灣極端降雨事件強度可能提高，而部分地區之年平均雨量可能減少，此外降雨集中趨向於濕季，這代表著可能臺灣夏季降雨事件(對流雨、颱風雨)之強度可能增強。上述氣候資料是將全球氣候模式(General Circulation Model, GCM)的結果降尺度，降尺度的方式分為兩種，一是統計降尺度(Statistical Downscaling)，此方法為較長期的變化趨勢，但缺乏極端事件的推估資訊，另一是動力降尺度(Dynamical Downscaling)，其較能掌握劇烈天氣(如颱風、梅雨等)中極端值變化強度量，較具模擬極端事件的能力(TCCIP, 2018)。

因本研究擬探討太麻里溪流域之極端降雨事件，故將採用動力降尺度所堆估之高強度颱風事件時雨量。首先將颱風降雨事件依其發生

時間做排序，再分析近未來(2015 年-2039 年)之 20 場颱風降雨事件(如表 3-5 所示)與世紀末(2075 年-2099 年)之 20 場颱風降雨事件(如表 3-6 所示)，共計 40 場颱風降雨事件；考量極端氣候日益加劇，因此選定累積降雨量最大且降雨集中於太麻里溪流域之颱風降雨事件作為推估模擬之案例;接著分析流域土砂變動與進一步分析嘉蘭村之災害潛勢影響範圍。

表 3-5 TCCIP 近未來颱風降雨事件

事件場次	發生時間(年月日時)	歷時(小時)
1	2015092906~2015093018	37
2	2017070800~2017071118	91
3	2017071800~2017072112	85
4	2018072418~2018072812	91
5	2021091300~2021091606	79
6	2023100300~2023100418	43
7	2024081600~2024081712	37
8	2024091812~2024092112	73
9	2030071612~2030071718	31
10	2030090818~2030091006	37
11	2030100900~2030101118	67
12	2031062212~2031062506	37
13	2032091018~2032091700	151
14	2032093000~2032100300	73
15	2032110112~2032110318	55
16	2033062906~2033070100	43
17	2033072400~2033072518	43
18	2034092800~2034093018	67
19	2035072018~2035072218	49
20	2036081112~2036081500	85

表 3-6　TCCIP 世紀末颱風降雨事件

事件場次	發生時間(年月日時)	歷時(小時)
1	2075082018~2075082206	37
2	2077082112~2077082312	49
3	2078072112~2078072312	49
4	2083062006~2083062300	67
5	2083092918~2083100118	49
6	2083100718~2083101006	61
7	2085072418~2085072700	55
8	2085080812~2085081118	79
9	2086091112~2086091518	103
10	2088071312~2088071506	43
11	2088080700~2088081212	133
12	2090061712~2090062006	67
13	2090062906~2090070106	49
14	2090070806~2090070912	31
15	2090071418~2090071712	67
16	2092101212~2092101318	31
17	2093090306~2093090606	73
18	2095081100~2095081300	49
19	2096072012~2096072200	37
20	2099101900~2099102206	79

第七節 複合式土砂災害評估

一、 洪澇災害數值模擬

FLO-2D 數值模式中主要包含三大部分，依序為主程式介面、GDS(Grid Developer System)與成果展示平台 Mapper，模式操作使用上並不複雜，以下針對模式中三大結構進行具體說明：

主程式介面：用來調控模擬情況資料輸入之介面，如雨量、土砂參數、土砂濃度、入流量與出流量資料等，為安排模擬參數與事件之核心架構(圖 3-25)。

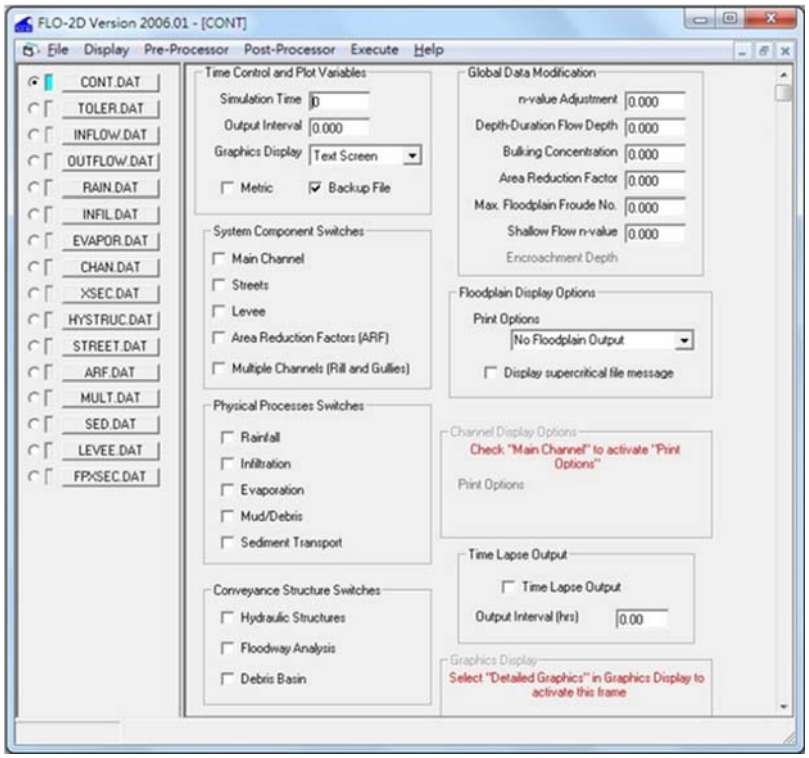


圖 3-25 FLO-2D 主程式介面圖

GDS：為模擬事件之基礎與初步設定步驟，用來建立模擬範圍之地形資料，其可輸入地形資料點位(pts)作為基礎，且程式內可產生網

格資料，並設定模擬事件之計算邊界，而後每一網格可設定其編號並輸入高程值與曼寧係數等地文資訊(圖 3-26)。

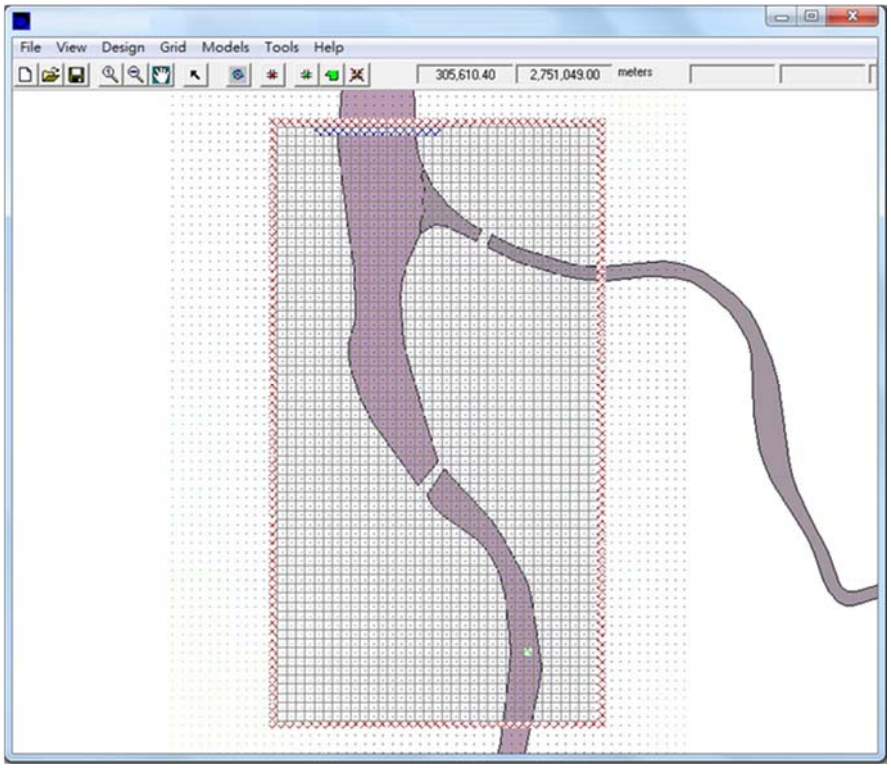


圖 3-26　FLO-2D GDS 圖

(1) Mapper：為模擬結果之展示平台，可瞭解模擬分析結果(如高程、流動深度、流動速度與影響範圍等)，亦可透過模擬設定得出模擬時序變化情況，另外可套疊遙測影像照片以比較模擬與真實災情，或輸出 ESRI Shapefile 檔案格式以作為更多應用(圖 3-27)。

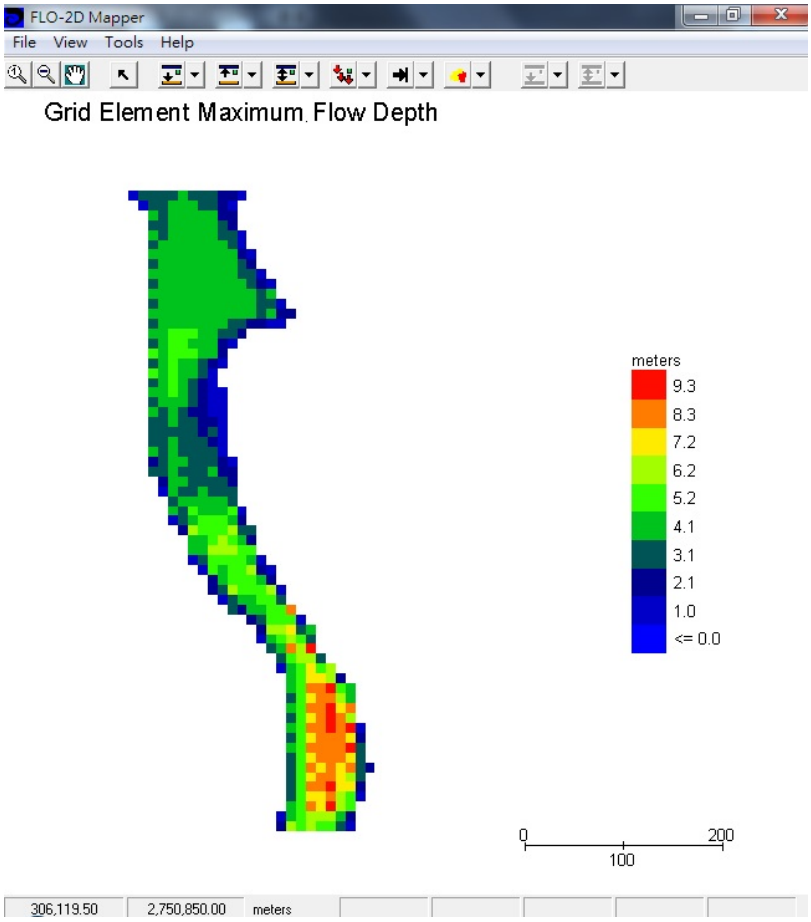


圖 3-27 FLO-2D Mapper 圖

二、 複合式災害情境設計

極端降雨事件使河川上游產生大量崩塌地，因此本研究認為以清水流觀點進行模擬分析，將與實際災情產生落差，必須考量上游土砂進入河道後對洪澇範圍及深度之影響，以複合式災害概念將地形抬升、高濃度含砂水流及土石流因素納入模擬情境，方能使模擬結果更貼近實際災情，以利防災與減災之規劃。

本研究分為兩部分進行，第一部分為莫拉克事件之洪澇模擬，設計兩種情境：(1)主河道清水流(2)主河道地形抬升後之高含砂水流，並

比對模擬結果與實際災情符合度，以驗證土砂對洪澇範圍及深度之影響。第二部分為未來颱風降雨事件之洪澇模擬，設計三種情境：(1)主河道清水流洪澇(2)主河道地形抬升後之高含砂水流(3)支流發生土石流及主河道地形抬升後之高含砂水流，以評估未來降雨事件對聚落之潛在危害。

以下說明三種模擬情境之參數設定：

(1)清水流情境：

流體運動型態為不含土砂之清水，為目前災害風險評估研究常用之流體型態。

(2) 地形抬升後之高含砂水流情境：

極端降雨使坡地大量崩塌及河川流量提升，單場事件的土砂運移量將增加，令坡地地形與河床地形在短時間內(單場降雨事件)劇烈變化，河床高程改變將使洪澇影響範圍及深度異於清水流情境。蔡元芳(2012, 2014)分析旗山溪於莫拉克颱風事件之土砂運移狀況，研究結果顯示各河段高程皆呈現抬升情形，且抬升高度最高處達 21 公尺。土砂崩塌進入河道後，堆積於河床使地形抬升，將大幅改變洪澇影響範圍。本研究利用土砂收支法計算上游土砂運移情形，並將嘉蘭村區段河道根據土砂收支結果進行抬升。

土砂崩塌進入河道後，除使河床高程抬升外，因主河道之流量較大且通水截面積較寬，致使崩塌土方與河道中清水混合形成高含砂水流，此時水中泥砂含量介於 0 至 27% (詹錢登, 2004)。本研究參照詹錢登界定之不同泥砂體積濃度含量之含砂水體運動型態設定高含砂水流之濃度。

(3) 支流土石流：

極端降雨引發河川上游坡地土石流，沿支流進入主河道後，將在河床形成沖積扇，使河道地形與河川濃度產生更劇烈的變化。多利溪為土石流低潛勢溪流(DF079)，本研究利用地理資訊系統計算多利溪坡度，再利用平衡濃度公式放大流量，並依據相關學者之研究訂定流變參數。

第八節 模擬境況之 3D 虛擬實境呈現

完成現地 UAV 航拍工作後，即可透過 Pix4Dmapper 進行影像的縫合與拼接，將具備座標和高程等資訊影像透過系統進行影像拼接，或透過影像三角測量方法產出調查範圍之數值地形模型/數值地表模型、正射影像以及三維模型等。

將航拍影像資料匯入 Pix4Dmapper 後，選取控制點進行快速檢測並且完成目標成果設定最後生成正射影像鑲嵌圖及數值地表模型。Pix4Dmapper 處理分為三階段處理，第一階段為初始化處理(圖 3-28)，進行空間三角測量平差計算；第二階段為點雲與網格模型，產生基本點雲；第三階段產製精密的正射鑲嵌圖(圖 3-29)及數值地表模型(圖 3-30)。

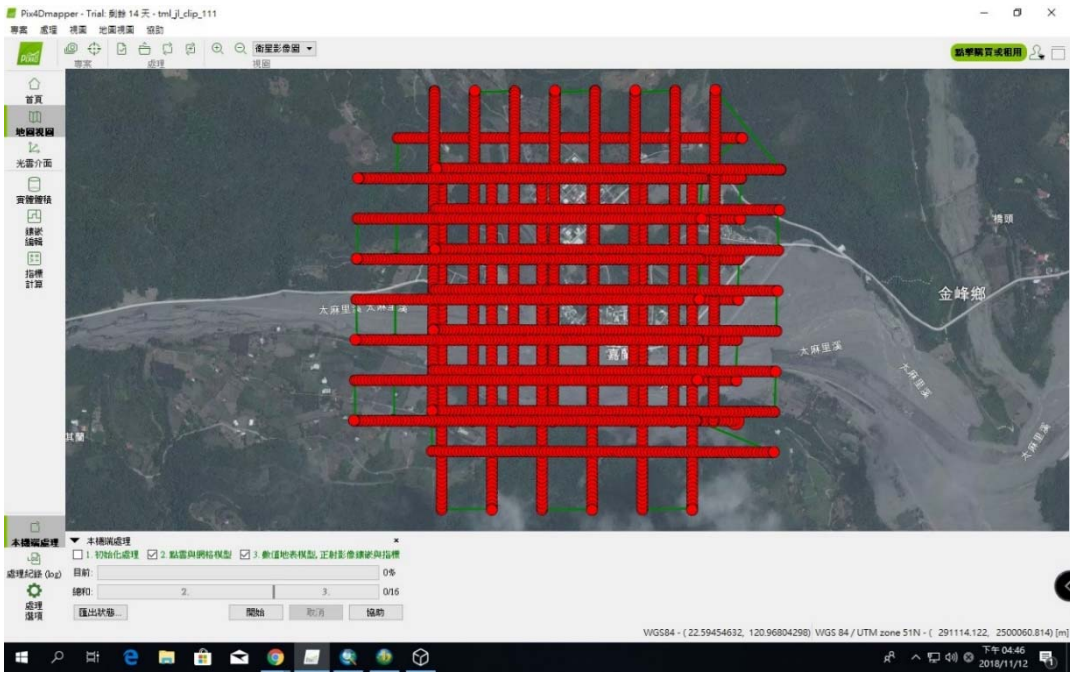


圖 3-28　初始化處理

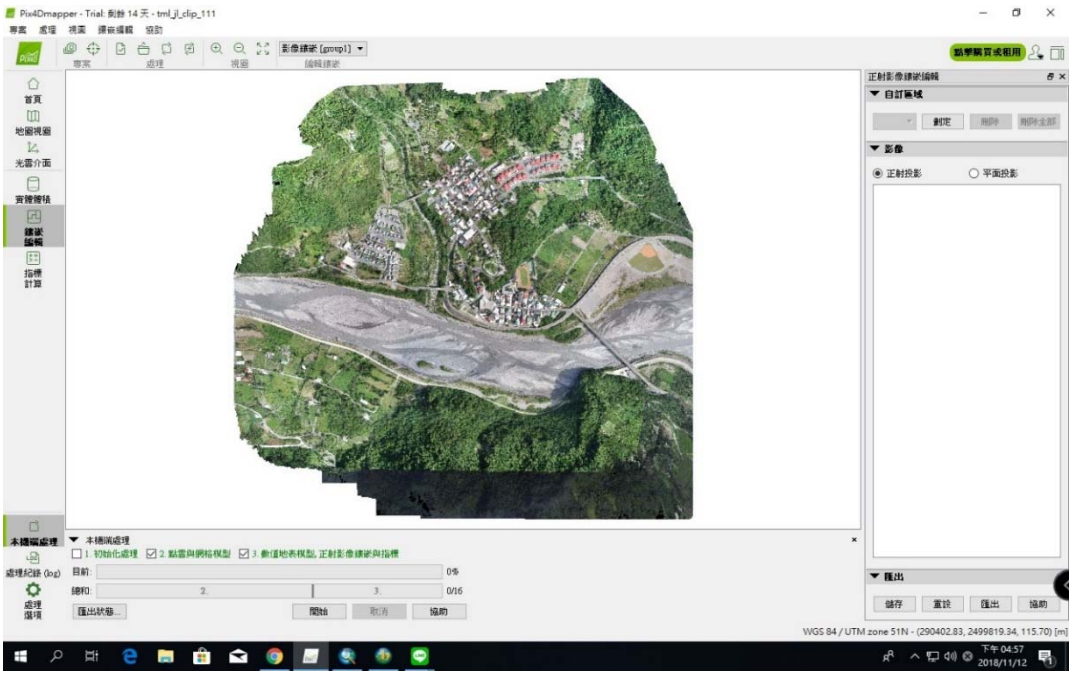


圖 3-29　正射鑲嵌圖

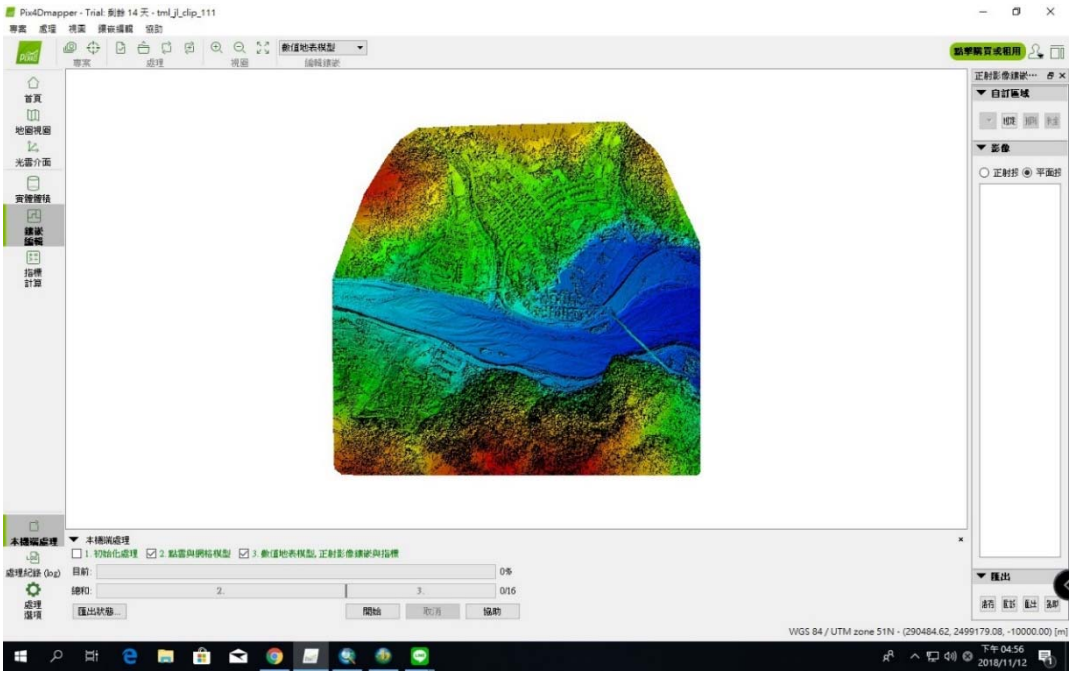


圖 3-30　數值地表模型

第四章 研究結果

第一節 莫拉克事件全流域土砂生產計算結果

一、 沖蝕模擬

此部分評估莫拉克颱風事件下，太麻里溪流域集水區之產砂量，而此結果再與莫拉克颱風事件下研究區域實際產砂量做比對，以驗證其準確性。在土砂沖蝕量假設方面，運用針對單場暴雨所設計之MUSLE 土壤沖蝕公式(Williams and Berndt, 1977)，如**式 4.1**。

$$V_s=11.8(V_{eff}\cdot Q_p)^{0.56}\cdot K_m\cdot C\cdot P\cdot L\cdot S \quad \text{…式 4.1}$$

V_s：單場暴雨所產生之土砂沖蝕量(ton)。

V_{eff}：有效降雨量(Effecttive Rainfull)，(m^3)。

有效降雨量為降雨損失之外的直接逕流量，將時序降雨量(如**圖 3-2** 所示)透過合理化公式轉化成時序流量，再進行加總得到整場降雨事件有效降雨量。

Q_p：洪峰流量(Peak Flow Discharge)，(m^3/sec)。

同樣透過利用合理化公式分析整場降雨事件中最大降雨強度，以得到本降雨事件中的洪峰流量：71m^3/sec。

K_m：土壤沖蝕指數(Soil Erodibility Factor)。

為集水區抵抗土壤沖蝕作用力高低之指標，在本研究中，主

要採臺東縣金鋒測站之數據，再根據水土保持手冊查表可知土壤沖蝕指數為 0.0263。

C：覆蓋及管理因子(Cover-Management Factor)。

依研究範圍坡面上不同表層對於土壤沖蝕之影響，視其植生、生育狀況、季節、覆蓋程度而定，而本研究根據土壤流失量估算手冊，設地表植披狀況為林地，經查表可知其值為 0.01。

P：水土保持因子(Support Practice Factor)。

水土保持因子表示坡面上因工程效益所帶來的沖蝕量變化，水土保持手冊指出，對無任何水土保持處理場、棄土場或路砂及農地砂石開採處，其 P 值設定為 1.0。

L：坡長因子(Slope Length Factor)。

坡長因子為集水區河道之坡度特性，研究大多採用 Wischmeier 與 Smith(1965)所提出之計算式(**式 4.2**)，I 為集水區流長，m 值為參數值，而 Wischmeier 與 Smith(1978)提到 m 值須隨坡度之不同做出變化。本研究區塊中集水區坡度皆高於 5%，因此 m 值採用 0.5。

$$L = (\frac{I}{22.13})^{m} \quad \text{…式 4.2}$$

S：坡度因子(Slope Steepness Factor)。

坡度因子為集水區坡度之特性，利用 ArcMap 得到太麻里溪流域集水區平均坡度(θ)，代入 Wischmeier and Smith(1978)提出之坡度因子公式(**式 4.3**)。

$$S = 65.41sin^2\theta + 4.56sin\theta + 0.065 \qquad \textbf{式 4.3}$$

利用 MUSLE 土壤沖蝕公式所得之莫拉克颱風降雨事件之太麻里溪流域總沖蝕量約為 377 萬立方公尺(**表 4-1**)，各子集水區沖蝕量分布如圖 4-1 所示。

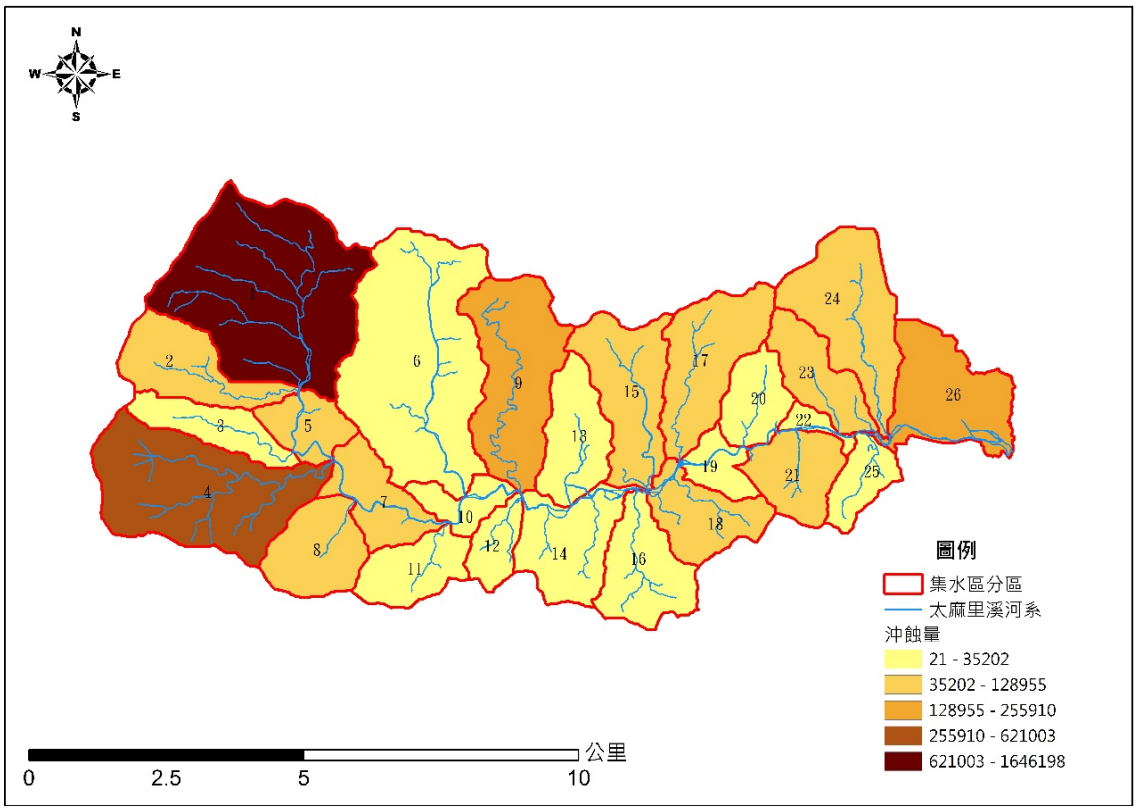


圖 4-1　莫拉克事件太麻里溪集水區沖蝕量分佈

表 4-1　莫拉克事件太麻里溪集水區土砂沖蝕產量

集水區編號	總量(m^3)	集水區編號	總量(m^3)
1	1,646,198.24	14	27,153.62
2	128,955.86	15	91,495.90
3	8,223.35	16	821.45
4	621,003.23	17	97,736.36
5	63,062.73	18	67,776.78
6	17,579.55	19	30,783.17
7	104,504.08	20	21.33
8	57,666.65	21	59,134.48
9	255,910.15	22	795.44
10	8,491.66	23	82,238.31
11	35,202.70	24	99,879.39
12	26,550.89	25	14,812.43
13	16,111.39	26	209,481.57
		總計	3,771,590.72

二、　崩塌模擬

(一)TRIGRS 參數敏感度分析

透過參數敏感度分析，了解不同的參數對於邊坡穩定所造成的影響，本研究以單一網格探討參數的變動對於安全係數之影響，作為淺層崩塌模擬時之參數調整指標。

首先參考水利署水利規劃試驗所之高含砂水流河道沖淤模擬及試驗研究(3/3)統計之太麻里溪集水區土壤性質參數統計資料彙整表(**表 4-2**)及陳本康(2005)整理大漢溪流域各地層分區之材料參數作為參數基準值之設定。

表 4-2　太麻里溪集水區土壤性質參數統計資料彙整表

土壤凝聚力(KN/m^2)	期望值	8.2
	標準差	4.8
摩擦力(角度)	期望值	26.5
	標準差	5.5
水力傳導度(m/s)	期望值	$2.65*10^{-5}$
	標準差	$4.0*10^{-6}$
飽和土壤單位重(N/m^3) (中央地質調查所)		18500.0

資料來源：水利署

在土壤厚度之輸入時，因無現地調查之資料，故使用坡度-覆土深度法(NCDR,2012)進行。考量坡度為不可變之因子，且土壤厚度會因坡度不同而改變，此外，初始地下水位深度亦假設與土壤厚度相同，故上述三項因子將不納入參數敏感度分析。

土壤水力參數包含水力傳導度(Kz)、水力擴散度(D_0)及初始

入滲率(I_z)，為影響孔隙水壓變化之因子。

土壤的透水性是否良好，可由其水力傳導度判定，小於 10^{-6} m/s 之土壤可視為低滲透性土壤，而大於 10^{-6} m/s 則為高滲透性土壤(吳佳郡,2006,鍾欣翰,2008,陳則佑,2011)。**表 4-3** 為本研究整理全臺各研究之水文參數，可發現水力傳導度多介於 10^{-4} ~ 10^{-5} 之間，另考量臺灣山區因受風化、侵蝕等影響，地表覆蓋之土壤多為風化岩層及崩積層，因此將水力傳導度(Kz)合理假設為 10^{-4} m/s 用以進行分析。

達西定率中用來描述土壤水分傳輸性質的飽和水力傳導度，在計算不飽和土體時非常數，而是其基質吸附力函數，可用水力擴散度替代(鍾欣翰,2008)。據**表 4-3** 之整理，水力擴散度(D_0)範圍約為水力傳導度(Kz)的 10~300 倍。

表 4-3　土壤水力參數之研究整理

研究文獻	Kz(m/s)	$D_0(m^2/s)$	岩層種類
Iverson(2000)	$1x10^{-4}$	$1x10^{-3}$	reconstituted loamy sand
吳佳郡(2006)	$1x10^{-4}$	$2x10^{-2}$	板岩
鍾欣翰(2008)	$9x10^{-4}$	$1.8x10^{-2}$	頁岩與砂岩
尹立中(2014)	$3x10^{-5}$~$7x10^{-5}$	$1.0x10^{-2}$	沈積岩
王藝潔(2016)	$3.8x10^{-5}$~$5x10^{-5}$	$1x10^{-2}$	大桶山層、水長流層等十種(頁岩、砂岩、變質岩等)

資料來源:整理自各相關研究

分析流程如下:

1、設置 TRIGRS 參數基準值，執行後得到安全係數。

2、改變其中一個參數，保持其他參數不變，執行後得到安全係數。

3、重複步驟 2 至所有變動參數皆產生相對應之安全係數。

4、比較不同參數種類之變化與安全係數變化程度。

參數設定基準值如**表 4-4** 所示，**圖 4-2** 為單一網格敏感度分

析圖。根據**圖 4-2** 可知，土壤凝聚力和內摩擦角對於安全係數之變化為正向關係，當此兩者參數設置提高時，土體安全係數值將會上升；而土體單位重對於安全係數之變化則為負向關係，當此參數設置提高時，將使土體安全係數值下降。本研究根據上述之結果，以參考資料為基礎，進行參數之微調與修正。

表 4-4　土壤參數敏感度分析基準值

參數種類	單位	參數基準值	變動範圍
土壤凝聚力	(kpa)	20,000	±50%
內摩擦角	(°)	30	±50%
土體單位重	(kN/m^3)	20,000	±50%
坡度	(°)	35	定值
土壤厚度	(m)	4.5	定值
初始地下水位深度	(m)	4.5	同土壤厚度
水力傳導度	(m/s)	2.00E-03	定值
水力擴散度	(m/s)	1.00E-04	定值
模擬時間		36000s	
降雨強度		2.7778E-06m/s	

資料來源：整理自各相關研究

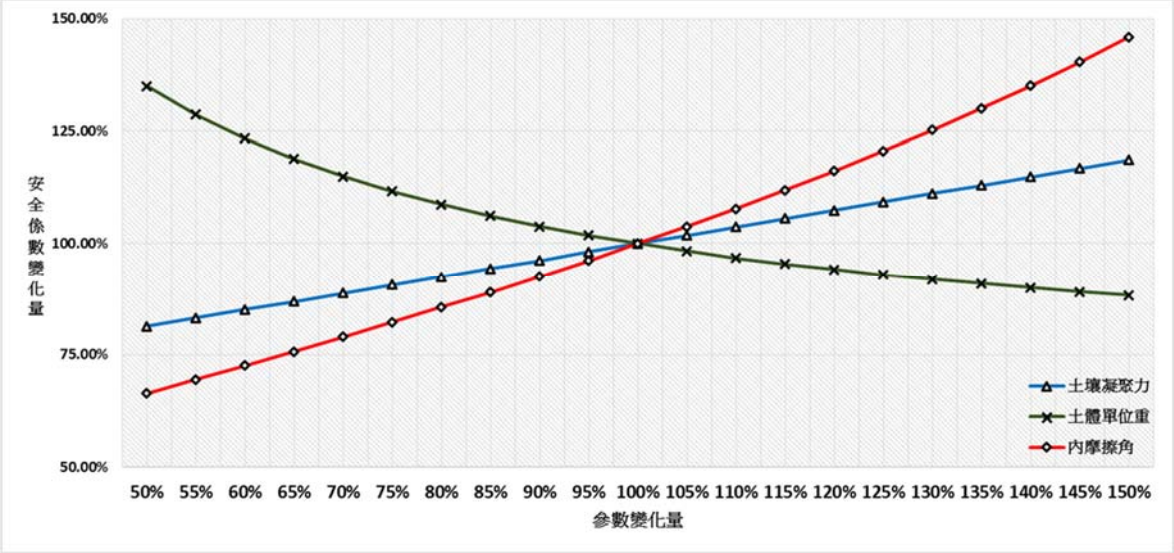


圖 4-2　土壤參數敏感度分析圖

(二)崩塌產砂模擬

崩塌產砂運用 TRIGRS 淺層崩塌模式進行，藉由上一小節之參數敏感度分析進行參數調整，使模擬情形較符合實際狀況。各地層分區參數設置如**表 4-5** 所示。

表 4-5　各地質參數設置表

zone	Cohesion 土壤凝聚力	Phi 內摩擦角	Uws 土體單位重	D 水力擴散度	K 水力傳導度	坡度(˚)	土壤厚度(m)	初始地下水位深度(m)
1	18,000	24	18,600	1.00E-03	5.00E-05	0~79.81	1~4.5	1~4.5
2	16,200	31	20,000	9.81E-04	4.90E-05			
3	16,500	31.5	20,900	3.50E-05	4.30E-06			

本研究模擬太麻里溪流域集水區於莫拉克颱風時期所造成之淺層崩塌，模擬時間始於 2009 年 08 月 07 日 05：00 至 2009 年 08 月 09 日 22：00，共計 66 小時。並考量參數不確定性，使用 Rosenblueth’s點估法將低於安全係數期望值一個標準差之不穩定網格去除，所得之結果如**圖 4-3** 所示，平面總崩塌面積約為 2,170 萬平方公尺。

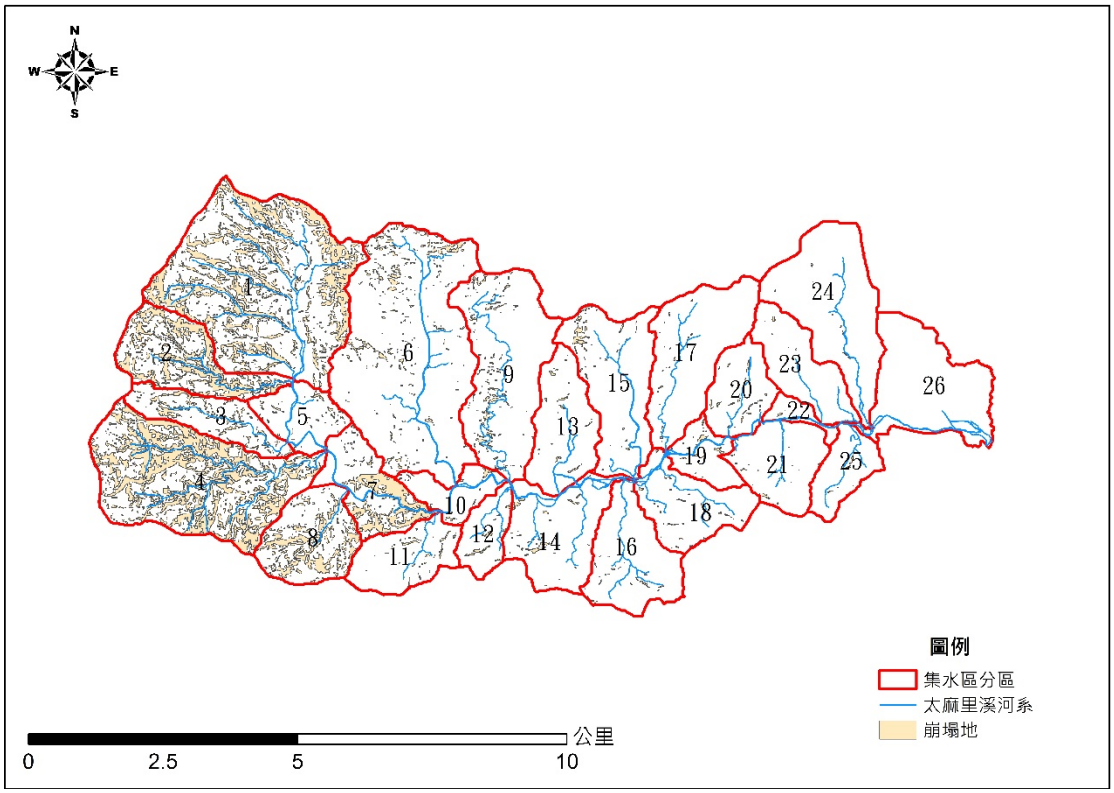


圖 4-3　莫拉克事件太麻里溪流域崩塌地分布 TRIGRS 模式模擬結果

另本研究使用福衛判釋崩塌地圖層，經計算後作為 TRIGRS 模式崩塌面積及崩塌量之驗證，TRIGRS 模式崩塌面積(約 2,170

萬平方公尺)與莫拉克颱風實際崩塌面積(約 2,518 萬立方公尺)相較，準確率約為 86.2%，但因研究區範圍缺乏部分地文參數，故在模擬時僅能就其崩塌面積及崩塌量進行驗證，無法顧及崩塌區位，造成實際與模擬仍有所落差。

而在崩塌量之計算上，因模式最後輸出之結果為網格(平面)，缺乏坡地(斜面)因素之考量，故須透過餘弦三角函數修正，以得到正確之崩塌地坡面面積(如式 4.4)。式中 V 為崩塌土砂量；a 為崩塌面積；θ 為集水區平均坡度；h 為崩塌深度。於崩塌深度上，使用 NCDR(2012)提出之坡度-覆土深度法。

$$V = a / \cos\theta \cdot h \cdots \text{式 4.4}$$

依集水區分群結果，計算各集水區之崩塌地總面積、平均坡度及 cos 值，所得坡面崩塌總面積約為 2,720 萬平方公尺，並根據式 4.4 求出各集水區之崩塌量，總崩塌量約為 12,142 萬立方公尺，各子集水區之崩塌產砂量如圖 4-4 所示，相關結果彙整如表 4-6 所示。研究另與王源程(2012)之概估崩塌量進行比較(約 13,848 萬立方公尺)，崩塌量大致相符。此 TRIGRS 模式模擬之結果，所設定之各項參數將作為後續推估未來事件時之參考與調整之依據。

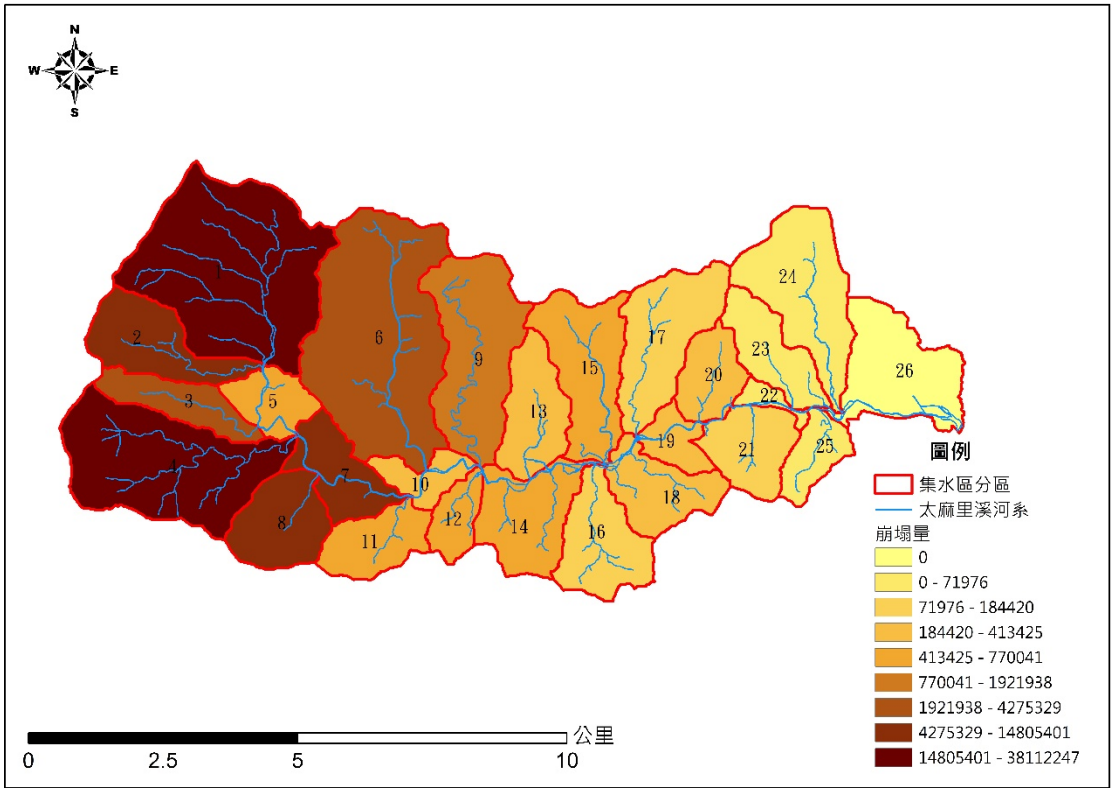


圖 4-4　莫拉克事件太麻里溪流域崩塌產量 TRIGRS 模式模擬結果

表 4-6　莫拉克事件太麻里溪子集水區崩塌產量

集水區編號	總量(m^3)	集水區編號	總量(m^3)
1	37,330,597.36	14	549,564.68
2	14,805,401.66	15	770,041.03
3	3,202,819.01	16	184,420.29
4	38,112,247.87	17	119,950.89
5	466,139.19	18	272,448.08
6	4,275,329.15	19	294,094.13
7	8,355,119.15	20	413,425.97
8	8,268,659.93	21	162,784.00
9	1,921,938.40	22	33,312.64
10	363,272.47	23	46,943.03
11	587,327.74	24	59,216.87
12	470,072.88	25	71,976.69
13	279,279.35	26	0
		總量	121,416,382.46

第二節 莫拉克事件土砂收支分析結果

一、 土砂運移探討

完成沖蝕及崩塌產砂計算後，依照本研究之集水區分群概念，將支流與主流分開進行土砂運移之計算。在支流部分將其水體運動型態視為土石流，考慮到子集水區平均坡度均大於 20 度，因此採用可估算山區溪流輸砂能力之平衡濃度公式(**式 4.5**)；主流部分則將其水體運動型態視為挾砂水流進行。另考量莫拉克颱風時，所挾帶之驚人土方量，對於流域土砂輸送之影響，不容忽略，而土石流之尖峰流量又較一般清水流高出許多，因此，本研究將平衡濃度公式所計算之土砂體積濃度代入土石流尖峰流量公式(**式 4.6**)，修正土石流之流量歷線後獲得該集水區之土石流流量。

$$C_{d\infty} = \exp(1.73\ln\theta - 5.83) \ldots \textbf{式 4.5}$$

式中，$C_{d\infty}$為土砂運動之體積濃度；ϑ為河道縱向坡度(Degree)。

$$Q_d = \frac{C_*}{C_* - C_d} \cdot \frac{CIA}{360} \quad \ldots \textbf{式 4.6}$$

式中 Q_d 為土石流(挾砂水流、泥流)流量；C*為土石流堆積層濃度；C_d 為土石流流動層濃度；C 為逕流係數；I 為降雨強度；A 為集水區面積。

本研究經計算後，彙整各子集水區之土砂搬運能力於**表 4-7**。將各子集水區沖蝕產砂量及崩塌產砂量加總後，根據土砂收支架構，若子集水區內之土砂產量大於其搬運能力，則取小值(即該子集水區之搬運能力)進行計算，反之則取該子集水區之土砂產量進行。

表 4-7　莫拉克事件太麻里溪子集水區土砂搬運能力

集水區編號	搬運能力(m^3)	集水區編號	搬運能力(m^3)
1	8,143,058.11	14	1,304,804.12
2	11,218.34	15	1,925,610.34
3	7,954,108.82	16	1,569,723.67
4	5,624,337.52	17	2,335,670.20
5	675,180.22	18	2,147,569.47
6	4,936,700.12	19	460,680.32
7	936,878.18	20	7,235,575.16
8	10,802,948.73	21	3,687,477.19
9	2,479,423.74	22	192,144.72
10	480,790.73	23	1,874,033.84
11	1,812,800.80	24	2,483,890.41
12	4,768,354.75	25	1,677,236.86
13	1,460,626.30	26	1,612,071.30
		總計	80,089,908.71

二、 土砂收支探討與比較

將各子集水區沖蝕產砂量及崩塌產砂量加總得到土砂產量後，根據土砂收支架構，若子集水區內之土砂產量大於其搬運能力，則取小值(即該子集水區之搬運能力)進行計算，反之則取該子集水區之土砂產量進行，再將各子集水區分為坡面、支流與主流河道段，進行分群後(如**圖 4-5** 所示)，重複與整場暴雨(即莫拉克颱風)之土砂搬運能力進行比較取小值，得到整個流域之土砂運動機制。

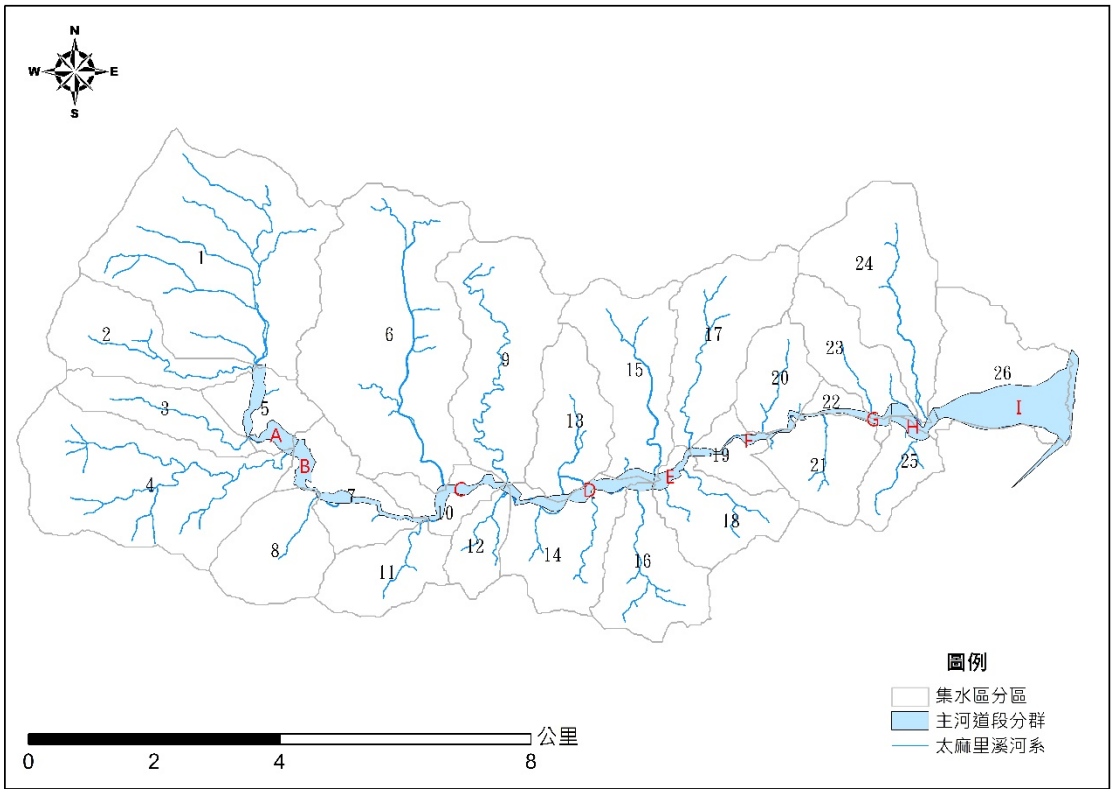


圖 4-5 太麻里溪流域集水區主河道段分群圖

首先，分別計算福衛判釋崩塌地圖層與 TRIGRS 模式模擬之模型之土砂收支結果，得到各主流河道之沖淤情形，再將此兩者進行比較與驗證，作為後續推估未來暴雨事件與複合式災害評估模式建置之參

考依據。

(一)莫拉克颱風土砂收支計算結果

此部分以福衛判釋崩塌地圖層之崩塌資料進行莫拉克颱風後太麻里溪流域土砂產量推估，得到主河道堆積與抬升之情形，計算結果如**表 4-8** 所示。

表 4-8　太麻里溪集水區土砂收支結果

集水區編號	主河道搬運(m^3)	土砂總量(m^3)	主河道堆積(m^3)	抬升(m)
A	545,658.48	8,154,276.45	7,608,617.98	7.87
B	444,313.90	11,346,077.67	10,901,763.77	11.43
C	190,697.38	13,996,941.60	13,806,244.22	25.83
D	363,523.43	7,488,856.80	7,125,333.37	5.72
E	690,096.18	7,751,864.57	7,061,768.39	21.99
F	190,959.83	2,313,649.24	2,122,689.41	6.37
G	585,713.40	476,441.73	-109,271.67	-0.34
H	555,022.97	859,915.32	304,892.35	0.47
I	477,462.29	652,073.71	174,611.41	0.04
J	532,947.49	806,052.09	273,104.60	0.03
總量	4,576,395.35	53,846,149.18	49,269,753.83	

將土砂收支計算圖(如**圖 4-7** 所示)進行分析，可清楚了解各集水區土砂分佈與運移次序；接著分析主河道各段之沖淤變化(如**圖 4-6** 所示)，主河道各段幾乎都是淤積之情形；觀察以上計

算與沖淤變化情形，可發現太麻里溪流域集水區主要土砂生產來源大多位於流域上游處，造成該河段大量土砂淤積，河床抬升明顯，最多甚至高達 21.99 公尺，此為數眾多的不安定土方未來將持續運移至中下游，使位於流域中下游之聚落、河工構造物、道路等可能為日後受到二次土砂影響的高風險地區。

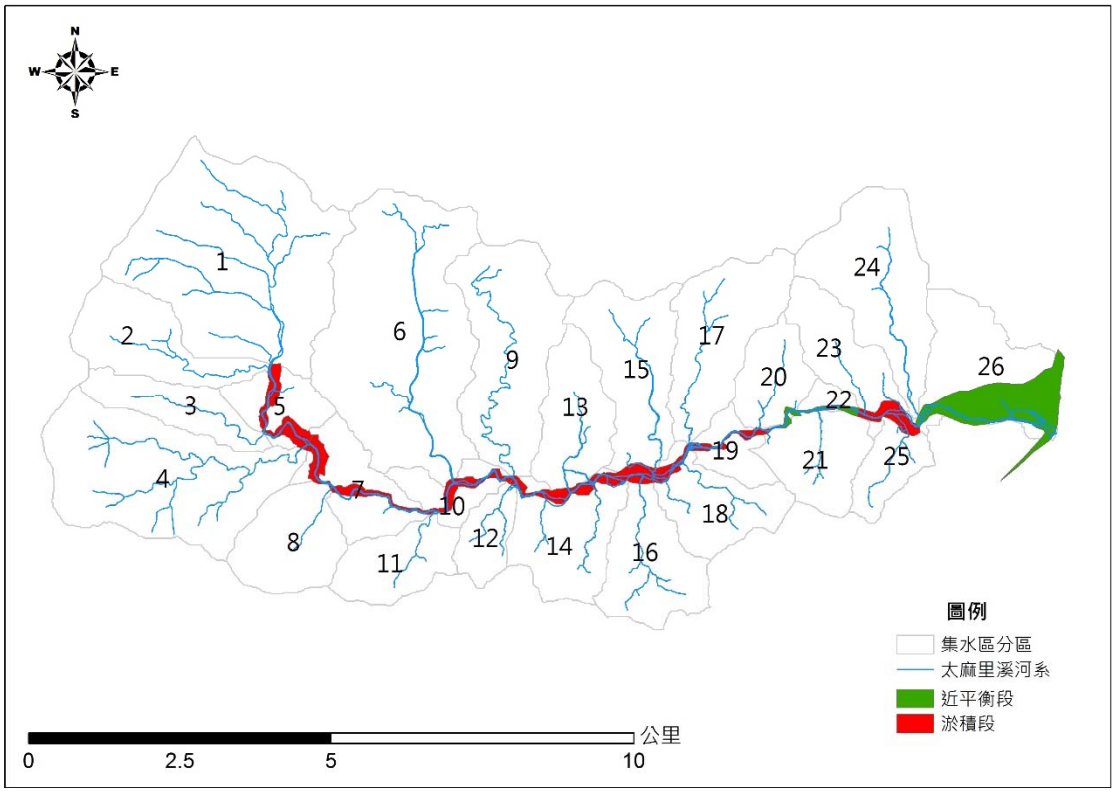


圖 4-6　莫拉克風災後太麻里溪主河道沖淤變化

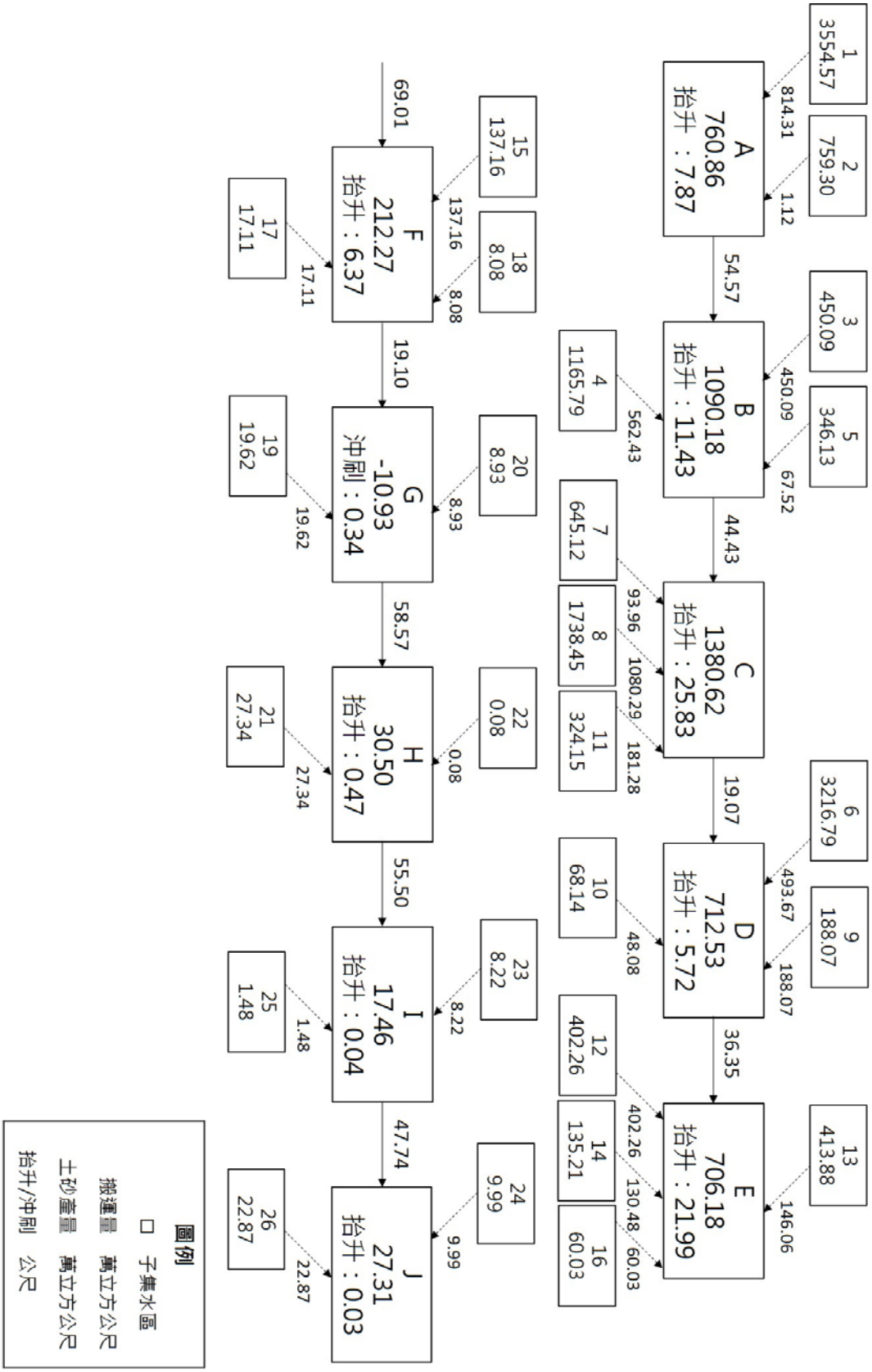


圖 4-7　莫拉克事件太麻里溪流域土砂收支圖

(二)TRIGRS 模式土砂收支模擬結果

為驗證本研究所建立之土砂收支模型準確度，依上一節所建立之 TRIGRS 模式崩塌產砂模擬結果進行土砂收支計算，並將所得結果整理如**表 4-9** 所示，得到主河道堆積與抬升之模擬情形，抬升高度最高為 18.97 公尺。

表 4-9　莫拉克事件太麻里溪流域土砂收支 TRIGRS 模式模擬結果

集水區編號	主河道搬運(m^3)	土砂總量(m^3)	主河道堆積(m^3)	抬升(m)
A	545,658.48	8,154,276.45	7,608,617.98	7.87
B	444,313.90	9,847,177.54	9,402,863.64	9.86
C	190,697.38	10,330,049.10	10,139,351.72	18.97
D	412,533.09	7,024,727.10	6,612,194.01	5.30
E	690,096.18	1,939,354.01	1,249,257.83	3.89
F	190,959.83	2,109,545.22	1,918,585.39	5.76
G	585,713.40	898,501.26	312,787.86	0.61
H	555,022.97	841,739.96	286,716.99	0.51
I	477,462.29	770,993.43	293,531.14	0.08
J	532,947.49	865,268.96	332,321.47	0.04
總計	4,625,405.01	42,781,633.03	38,156,228.02	

將土砂收支計算圖(如**圖 4-9** 所示)進行分析，可清楚了解各集水區土砂分佈與運移次序;接著分析主河道各段之沖淤變化(如圖 4-8 所示)，主河道各段幾乎都是淤積之情形，與實際沖淤變化推估結果相較，模擬之淤積段高度近似實際推估之沖淤變化。

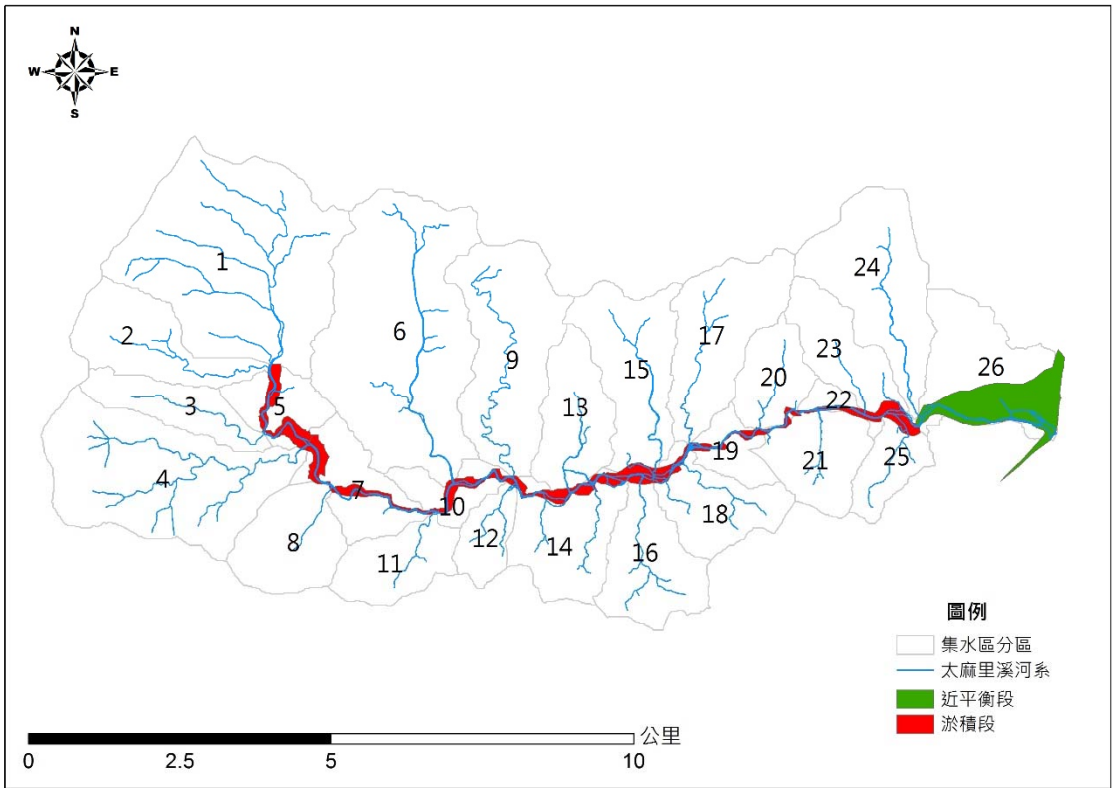


圖 4-8　莫拉克事件太麻里溪 TRIGRS 模式模擬主河道沖淤變化

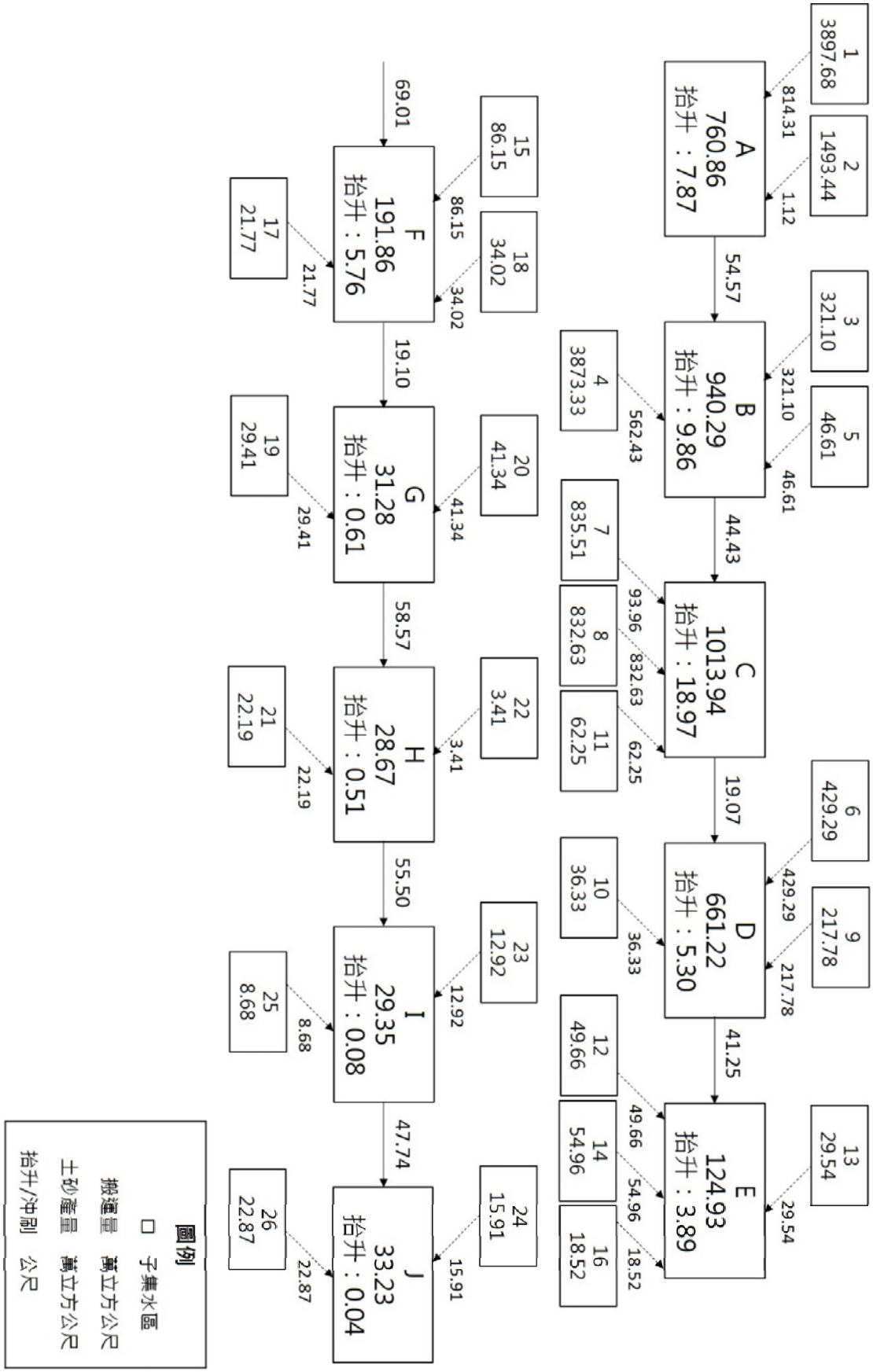


圖 4-9　莫拉克事件太麻里溪流域 TRIGRS 模式模擬土砂收支圖

(三)土砂收支結果比較

為驗證 TRIGRS 模式之準確度，本研究比較 TRIGRS 模式模擬之結果與太麻里溪流域集水區於莫拉克颱風期間之土砂收支結果，兩者進行結果比較。

以實際及模擬結果兩者之崩塌量與崩塌面積差異作為準確率之判斷，結果顯示土砂收支模型模擬之土砂崩塌面積小於實際結果約 348 萬立方公尺，準確率達約 86.2%，誤差為合理之範圍，並將此結果整理如**表 4-10** 所示。

表 4-10　崩塌量與崩塌面積比較表

	TRIGRS 模式	實際崩塌	準確率
崩塌面積(m^2)	2,170 萬	2,518 萬	86.2%
土砂總量(m^3)	5,541 萬	4,529 萬	

第三節 未來颱風降雨事件全流域土砂生產結果

此部分以 TCCIP 所推估的未來颱風資料來做為模擬輸入，分析近未來(2015 年-2039 年)與世紀末(2075 年-2099 年)兩種年份，共 40 場之颱風降雨時雨量，選定降雨集中於太麻里溪流域且累積降雨量最大的世紀末時序第 15 場之事件，發生時間自 2090 年 7 月 14 日 18 時始，至 2090 年 7 月 17 日 12 時止，降雨歷時為 67 小時，圖 4-10 即

為集水區降雨歷線圖，並將解析度 5 公里之網格透過克利金方式(kriging)內插為 20 公尺，所得平均降雨量約為 1222.93 毫米，降雨分布圖如圖 4-11 所示，呈現西北至東南逐漸減少之情形，而西北方之累積降雨量更是高達 2377.39 毫米。

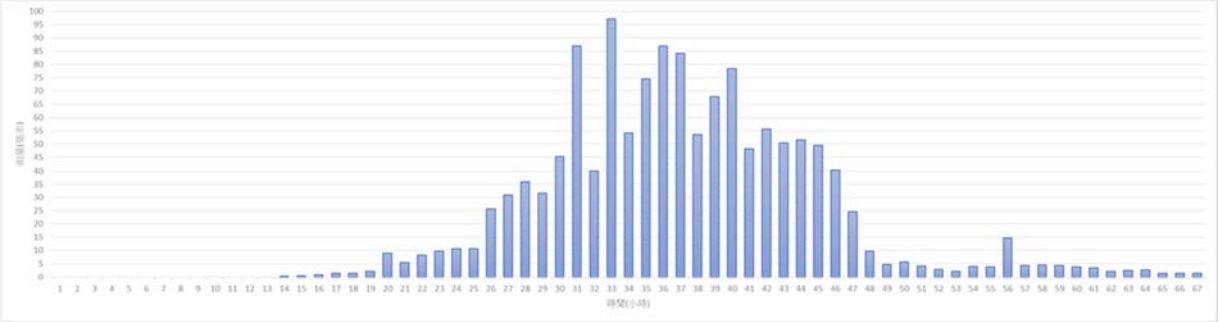


圖 4-10　未來颱風降雨事件降雨歷線圖

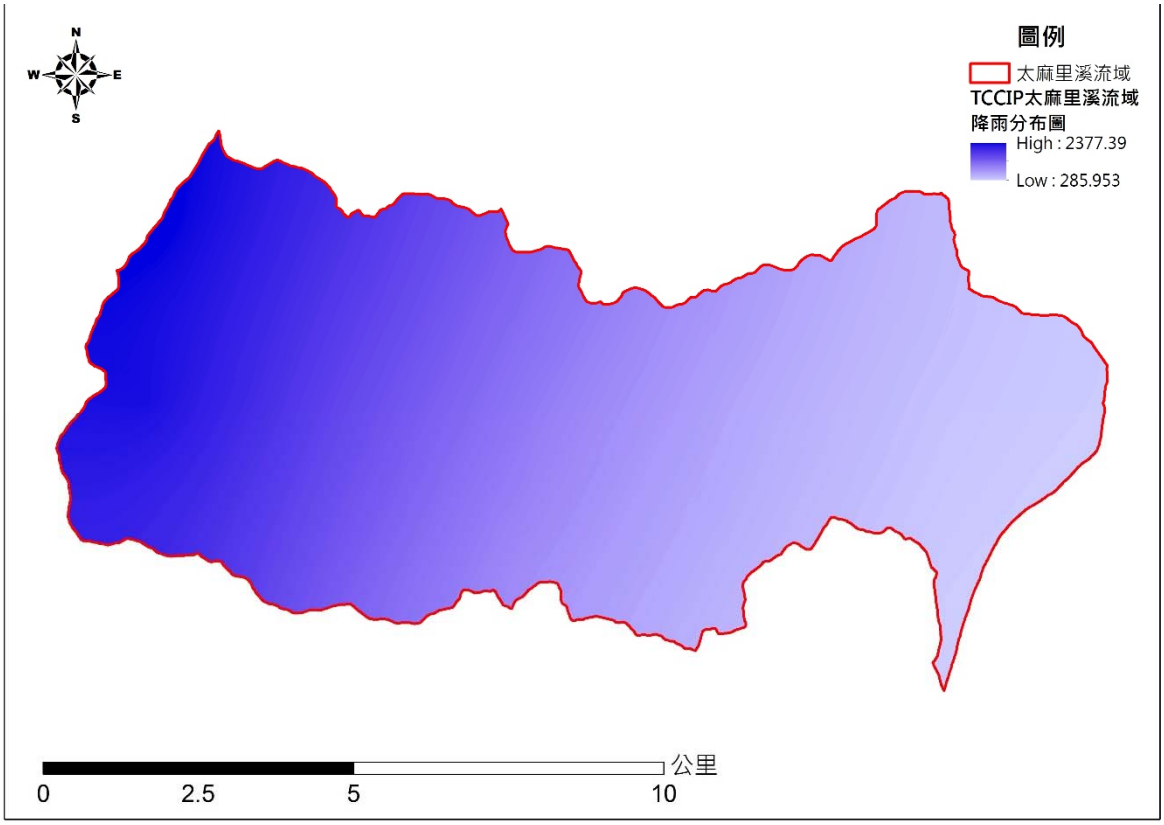


圖 4-11　未來颱風降雨事件降雨分布圖

一、 沖蝕模擬

接著運用莫拉克事件時驗證之參數，推估於極端颱風降雨事件下，太麻里溪流域集水區之產砂量。在土砂沖蝕量假設方面，運用針對單場暴雨所設計之 MUSLE 土壤沖蝕公式(Williams and Berndt, 1977)，所得之極端颱風降雨事件之太麻里溪流域總沖蝕量約為 531 萬立方公尺(表 4-11)，各子集水區沖蝕量分布如圖 4-12 所示。

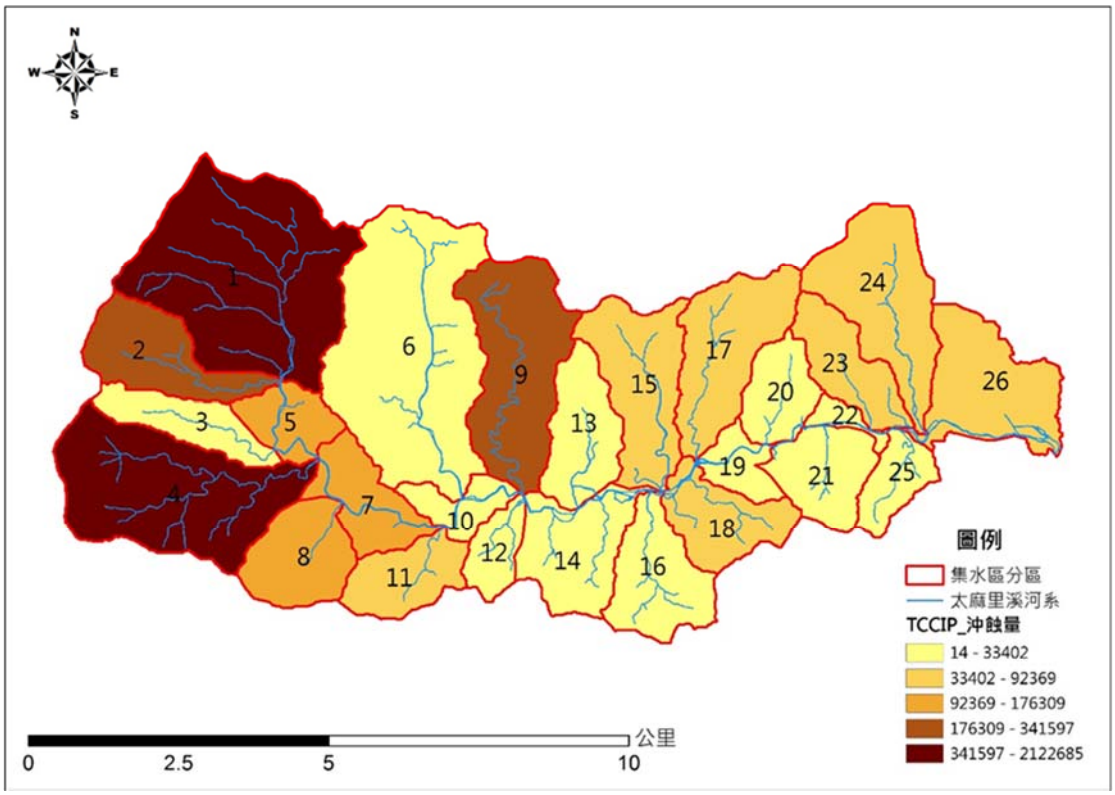


圖 4-12 未來颱風降雨事件太麻里溪集水區沖蝕量分佈

表 4-11　未來颱風降雨事件太麻里溪集水區土砂沖蝕產量

集水區編號	總量(m^3)	集水區編號	總量(m^3)
1	2,122,685.05	14	24,440.71
2	323,195.02	15	92,369.86
3	19,753.69	16	592.58
4	1,446,044.13	17	77,042.11
5	131,795.77	18	47,611.58
6	29,294.12	19	22,203.30
7	176,309.97	20	14.58
8	107,528.51	21	33,402.65
9	341,579.50	22	434.10
10	11,202.66	23	48,009.43
11	50,322.09	24	57,745.88
12	30,200.20	25	6,777.03
13	17,082.95	26	88,684.29
		總計	5,306,321.74

二、　崩塌模擬

本研究模擬太麻里溪流域集水區於未來颱風降雨時期所造成之淺層崩塌，模擬時間始於 2090 年 7 月 14 日 18 時 2090 年 7 月 17 日 12 時，共計 67 小時。並考量參數不確定性，使用 Rosenblueth’s 點估法將低於安全係數期望值一個標準差之不穩定網格去除，所得之結果如圖 4-13 所示，平面總崩塌面積約為 5,591 萬平方公尺。

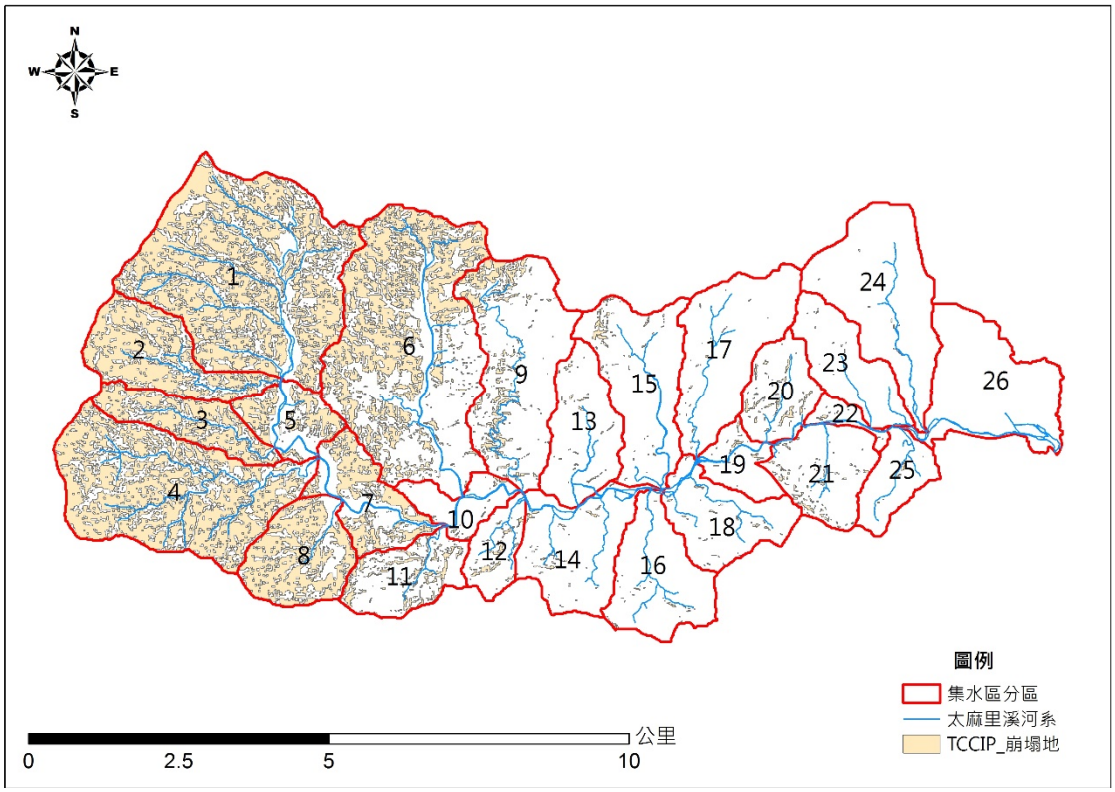


圖 4-13　未來颱風降雨事件太麻里溪流域崩塌地分布 TRIGRS 模式模擬結果

在崩塌量之計算上，因模式最後輸出之結果為網格(平面)，缺乏坡地(斜面)因素之考量，故須透過餘弦三角函數修正，以得到正確之崩塌地坡面面積，各集水區總崩塌總量約為 30,974 萬立方公尺，各子集水區之崩塌產砂量如圖 4-14 所示，相關結果彙整如表 4-12 所示。

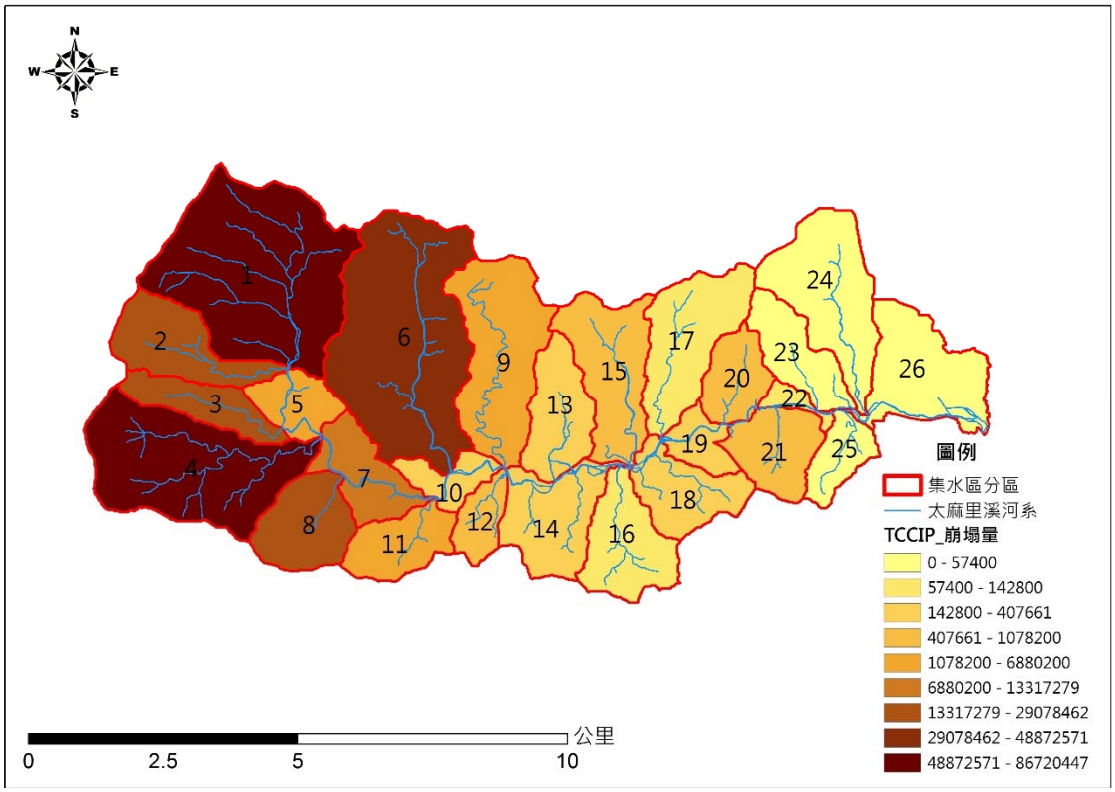


圖 4-14　未來降雨事件事件太麻里溪流域崩塌產量 TRIGRS 模式模擬結果

表 4-12　莫拉克事件太麻里溪子集水區崩塌產量

集水區編號	總量(m^3)	集水區編號	總量(m^3)
1	86,720,447.39	14	407,661.71
2	29,078,462.27	15	638,020.78
3	18,575,940.40	16	142,800.00
4	69,034,553.07	17	102,200.00
5	5,538,611.54	18	228,200.00
6	48,872,571.12	19	222,480.31
7	13,317,279.97	20	1,078,200.00
8	23,032,501.24	21	873,153.89
9	6,880,200.66	22	72,800.00
10	218,436.68	23	36,400.00
11	3,482,270.93	24	49,000.00
12	830,326.98	25	57,400.00
13	257,600.00	26	0.00
		總量	309,747,518.94

第四節 未來颱風降雨事件土砂收支分析結果

一、 土砂運移探討

完成沖蝕及崩塌產砂計算後，將支流與主流分開進行土砂運移之計算。在支流部分將其水體運動型態視為土石流；主流部分則將其水體運動型態視為挾砂水流進行。另考量未來颱風降雨事件時，所挾帶之土方量，對流域土砂輸送之影響不容忽略，因此，結合平衡濃度公式所計算之土砂體積濃度，修正土石流之流量歷線後獲得該集水區之土石流流量。

經計算後，彙整各子集水區之土砂搬運能力於表 4-13。將各子集水區沖蝕產砂量及崩塌產砂量加總後，根據土砂收支架構，若子集水區內之土砂產量大於其搬運能力，則取小值(即該子集水區之搬運能力)進行計算，反之則取該子集水區之土砂產量進行。

表 4-13　未來颱風降雨事件太麻里溪子集水區土砂搬運能力

集水區編號	搬運能力(m^3)	集水區編號	搬運能力(m^3)
1	79,608,313.34	14	1,696,363.40
2	31,883.32	15	3,101,470.85
3	14,188,370.29	16	1,617,791.73
4	33,872,470.81	17	2,866,452.61
5	922,115.51	18	1,696,392.28
6	36,739,060.58	19	161,348.22
7	1,497,218.77	20	3,471,214.27
8	21,217,166.51	21	2,009,662.91
9	7,575,300.78	22	19,103.63
10	328,438.69	23	1,123,872.16
11	2,249,306.56	24	3,318,361.56
12	2,808,173.42	25	416,631.37
13	1,839,666.12	26	1,299,512.09
		總計	225,675,661.77

二、　土砂收支探討

計算出各子集水區土砂產量後，根據土砂收支架構，將各子集水區分為坡面、支流與主流河道段，並依圖 4-5 之主河道段分群圖，重複與整場暴雨(即未來颱風降雨事件)之土砂搬運能力進行比較取小值，得到整個流域之土砂運動機制。

此部分以 TCCIP 之雨量資料進行未來颱風降雨事件後太麻里溪流域土砂產量推估，得到主河道堆積與抬升之情形，計算結果如表 4-14 所示，抬升高度最高高達 81.11 公尺。

表 4-14　未來颱風降雨事件太麻里溪流域土砂收支 TRIGRS 模式模擬結果

集水區編號	主河道搬運(m^3)	土砂總量(m^3)	主河道堆積(m^3)	抬升(m)
A	1,270,067.35	79,640,196.66	78,370,129.31	81.11
B	975,038.18	50,253,023.96	49,277,985.79	51.67
C	292,875.12	25,938,730.01	25,645,854.90	47.98
D	609,351.51	44,472,152.53	43,862,801.02	35.19
E	599,287.26	2,295,615.93	1,696,328.66	5.28
F	149,364.39	1,784,731.59	1,635,367.20	4.91
G	370,116.77	1,388,927.19	1,018,810.42	3.16
H	284,883.31	1,295,776.94	1,010,893.63	1.55
I	238,794.14	433,469.77	194,675.63	0.05
J	248,999.86	434,224.31	185,224.45	0.02
總量	5,038,777.90	207,936,848.90	202,898,071.00	

將土砂收支計算圖(如圖 4-16 所示)進行分析，可清楚了解各集水區土砂分佈與運移次序；接著分析主河道各段之沖淤變化(如圖 4-15 所示)，主河道各段均為淤積之情形。

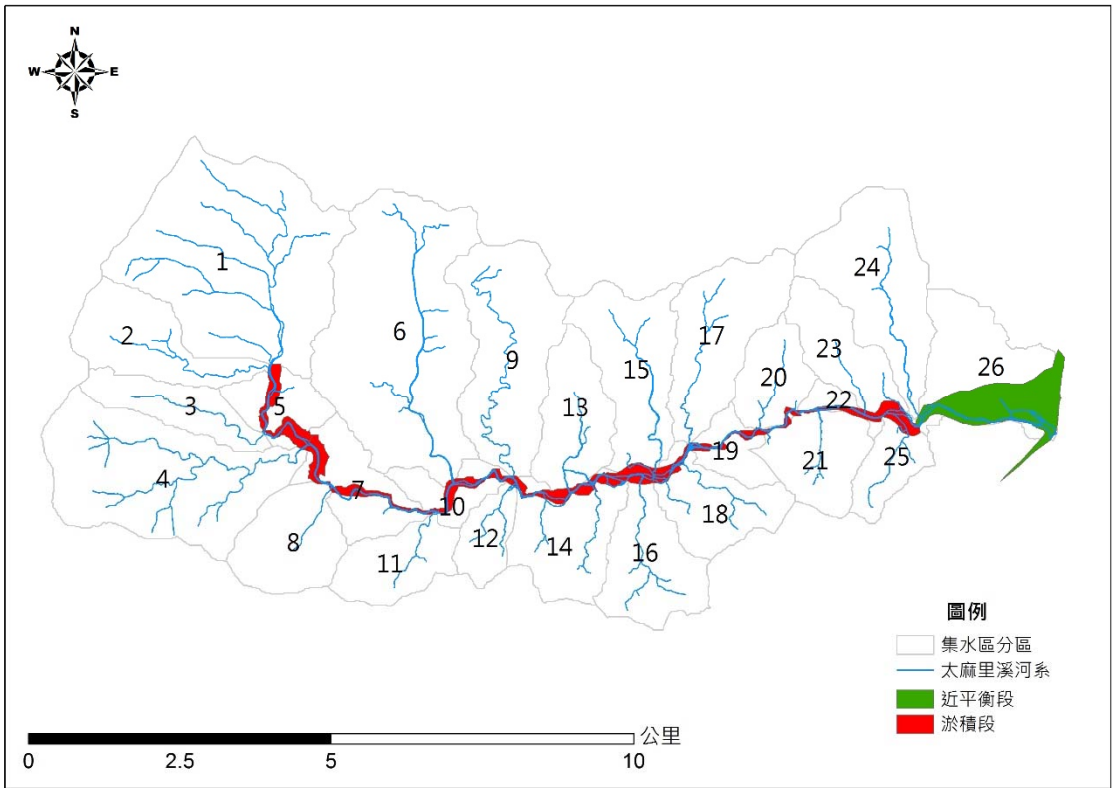


圖 4-15　未來颱風降雨事件太麻里溪主河道沖淤變化

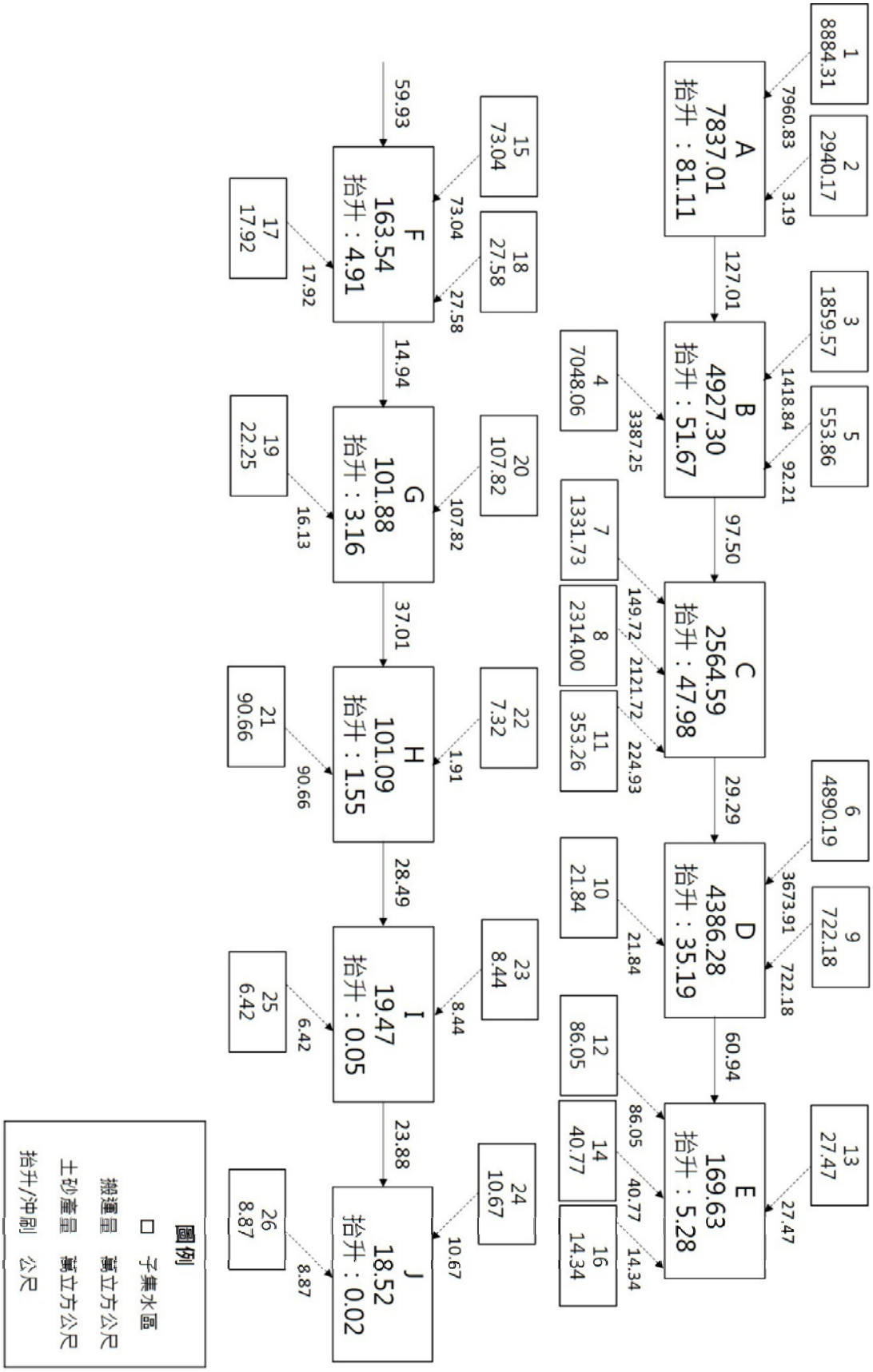


圖 4-16　莫拉克事件太麻里溪流域土砂收支圖

第五節 複合式土砂災害評估：FLO-2D 模擬及呈現

本研究係以 FLO-2D 進行複合式土砂災害模擬，進行清水流或高含砂水流之數值模擬。入流點選用於嘉蘭村上游處，如圖 4-17 紅圈標示處進行清水流或高含砂水流之數值模擬。



圖 4-17　模擬事件之清水流入流點位置

(一)主河道一般清水流或高含砂水流之參數率定

流量設定以變量流(實際雨量歷線轉換流量)形式模擬一般清水流或高含砂水流流動情況。此外，採用詹錢登(2000)對土石流界定之泥砂體積濃度(表 4-15)，依照本研究假設之清水流，其濃度為 0%；高濃度含砂水流，設其濃度為 27%。

表 4-15　不同泥砂體積含量之含砂水體運動形態

體積濃度(%)	運動形態
0～3	挾砂水流
3～27	高含砂水流
27～75	土石流
75～100	地滑

資料來源：詹錢登, 2000

而逕流係數(C)參考行政院水土保持局之「水土保持手冊」，其中對無開發之山嶺計畫區的逕流係數建議值在 75%～85%，因此，本研究取中間值(80%)作為輸入值。

集水區面積(A)經 GIS 地理資訊系統計算後，將太麻里溪流域分為 26 個子集水區，因探討區域為河川下游嘉蘭村聚落，故僅採計嘉蘭村上游 22 個子集水區，並運用地理資訊系統進行統計，得出 22 個子集水區之面積總和為 18480.1 公頃。

在土砂參數設定，層流阻滯係數與曼寧係數選擇上可參考 FLO-2D 使用手冊(**表 4-16** 與**表 4-17**，本研究依據災前航照圖以及相關單位記錄之現地照片，再加上模擬建置之便利性，因此假設模擬網格屬性為稀疏植被，層流阻滯係數給予 4000，曼寧係數則根據太麻里溪治理規劃斷面 11(庫濃溪匯流口下游)至嘉蘭橋

為 0.042。土砂比重上，根據參考施國欽(1999)針對沉積岩進行土砂比重統計分析，歸類沉積岩比重介於 2.01～2.78 間，故給定模擬之土砂比重值為 2.7。

表 4-16　層流阻滯係數建議值列表(節錄)

地面覆蓋狀況	層流阻滯係數值域
混凝土或瀝青	24 ~ 108
裸露土砂	30 ~ 120
稀疏植被	1000 ~ 4000
低矮草原	3000 ~ 10000

資料來源：FLO-2D User Manual, 2009

表 4-17　曼寧係數建議值列表(節錄)

地面覆蓋狀況	曼寧係數值域
Sparse rangeland with debris	0.05 ~ 0.34
Open ground, no debris	0.04 ~ 0.10
Asphalt or concrete	0.02 ~ 0.05

資料來源：FLO-2D User Manual, 2009

(二)支流土石流之流變參數設定

在土石流之流變參數之決定上，國內外學者依據現地調查、實驗分析與模式敏感度分析，可得知賓漢流體中降伏應力與黏滯係數之係數值(表 4-18)。趙啟宏(2004)則透過參數敏感度分析，

利用 FLO-2D 進行實際案例模擬，得到最符合實際狀況之流變參數，其針對陳有蘭溪與豐山地區之土石流潛勢溪流案例，從其最佳結果之降伏應力來看，降伏應力高則反映土石流材料特性具巨石與大石塊性質。因此本研究認為趙啟宏(2004)之建議值較適於多利溪之土石流特性(降伏應力較大者)；高含砂水流部分則使用林暘壹(2013)針對旗山溪流域中之角埔溪進行實驗，發現角埔溪土石流特性為細泥漿體(粒徑小)，故體積濃度在 60～70%分布時之降伏應力有 14.9～64.7 Pa，並與本研究區塊因上游土石流入河道後混合成含砂水流之粒徑，極為相似，故以此研究為依據，將高含砂水流模擬之降伏應力及黏滯係數訂為此。

表 4-18　土石流流變參數實驗研究

相關學者	降伏應力		黏滯係數	
	α_1	β_1	α_2	β_2
Dai et al.(1980)	2.6	17.48	0.0075	13.39
Kang & Zhang(1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
詹錢登(1997)	0.811	13.72	0.00462	8.29
趙啟宏(2004)	0.01	21.988	0.01	11.24
林暘壹(2013)	0.0022	14.7	0.00001	18.6

一、 莫拉克事件主河道之清水流洪澇模擬

將流動結果套入衛星雲圖比對，在此部分從模擬結果來看，因無土石堆積且流動範圍不廣可判斷，清水流並不會造成嘉蘭村洪澇災情。如圖 4-18 所示。3D 虛擬實境呈現如圖 4-19 所示。

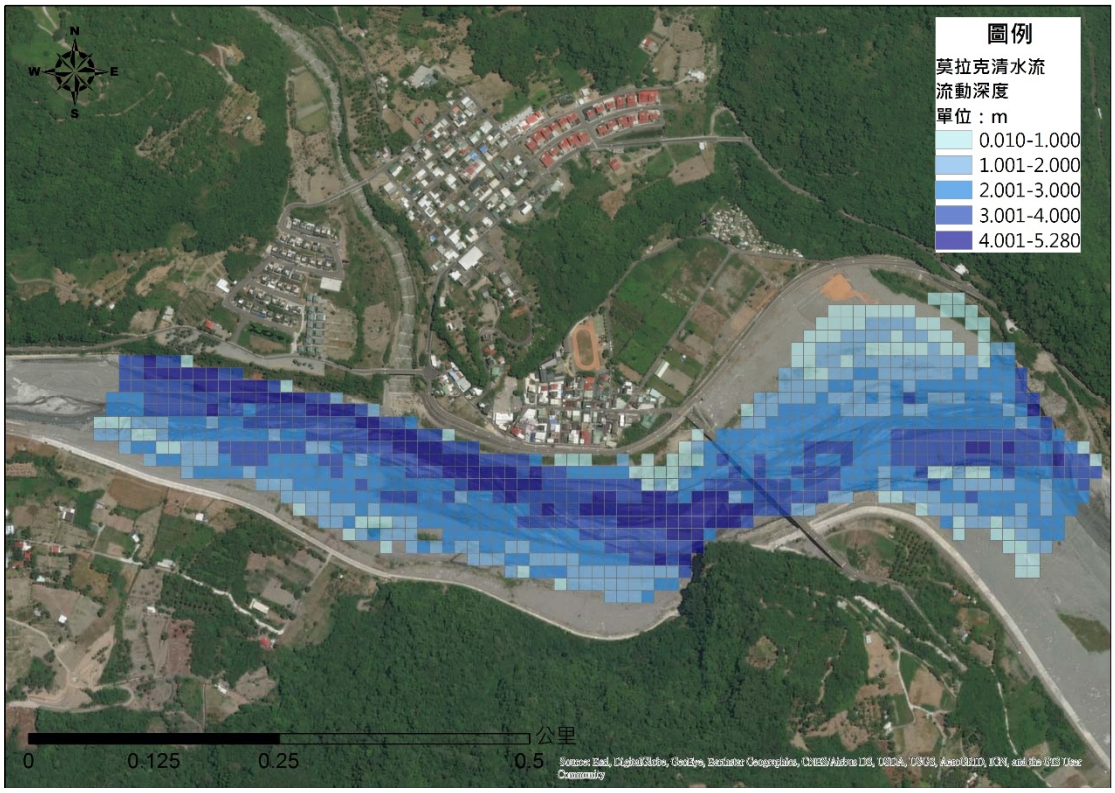


圖 4-18 莫拉克事件主河道之清水流最大流動深模擬結果



圖 4-19　莫拉克事件主河道之清水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現

二、　莫拉克事件主河道地形抬升後之高含砂水流模擬

(一)模擬結果

此部分設定為颱風事件影響下，河床因堆積而有抬升情況，並利用高含砂水流模擬之。從此分析結果可知此模擬於河床抬升情境下行水範圍較寬，已溢堤至河道外，造成嘉蘭村 28,800 平方公尺淹水，民宅部分最深淹至 0.16 公尺，將造成 65 戶民宅淹水。如圖 4-20 所示。3D 虛擬實境呈現如圖 4-21 所示。

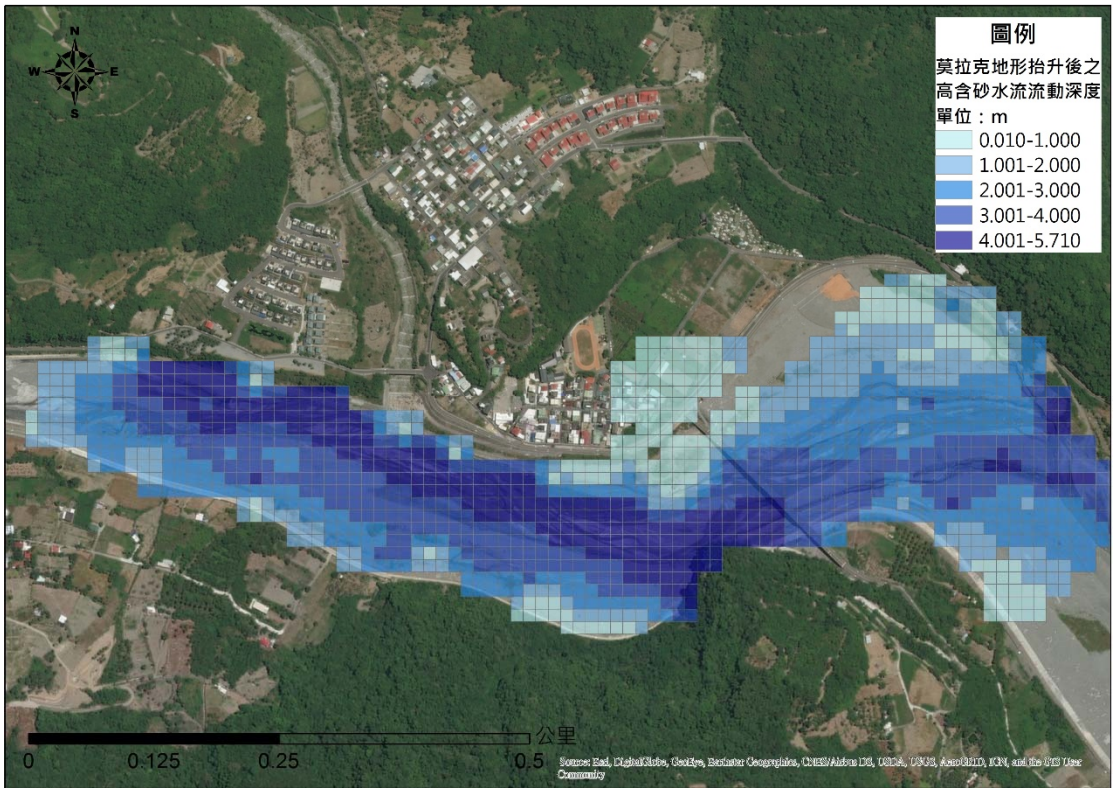


圖 4-20　莫拉克事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果

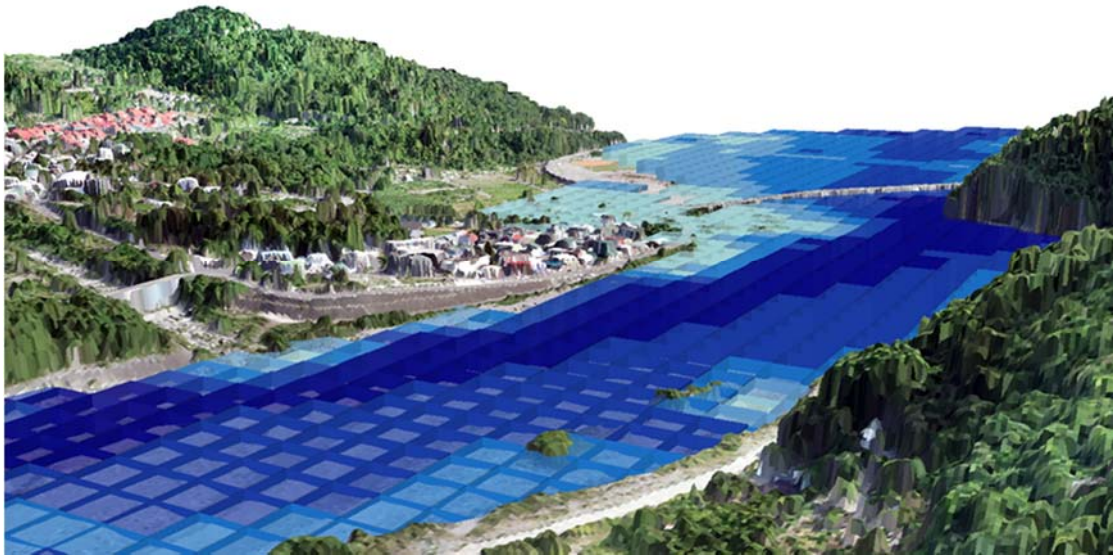


圖 4-21　莫拉克事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現

(二)現場結果驗證

莫拉克颱風臺東地區流域複合型地工災害探討(鄭錦桐、邵國士、冀樹勇、邱俊翔，2009)對太麻里溪中游嘉蘭村災害區位現地調查，金峰鄉嘉蘭村近太麻里溪中游段河道左側三排民房(約51 戶)遭洪水沖走(圖 4-22)。本研究模擬莫拉克主河道地形抬升後之高含砂水流，其模擬結果之影響範圍，與嘉蘭村整體受災平面圖大致相符。



圖 4-22　太麻里溪中游嘉蘭村災害區位平面圖

三、 未來颱風降雨事件主河道之清水流洪澇模擬

未來颱風降雨事件清水流流動結果套入衛星雲圖比對，因雨量較莫拉克颱風事件大，河道溢堤，在嘉蘭村民房部分達最高0.42公尺淹水，淹沒範圍達14,800平方公尺，約有35戶民宅將受淹水影響，如圖4-23所示，3D虛擬實境呈現如圖4-24所示。

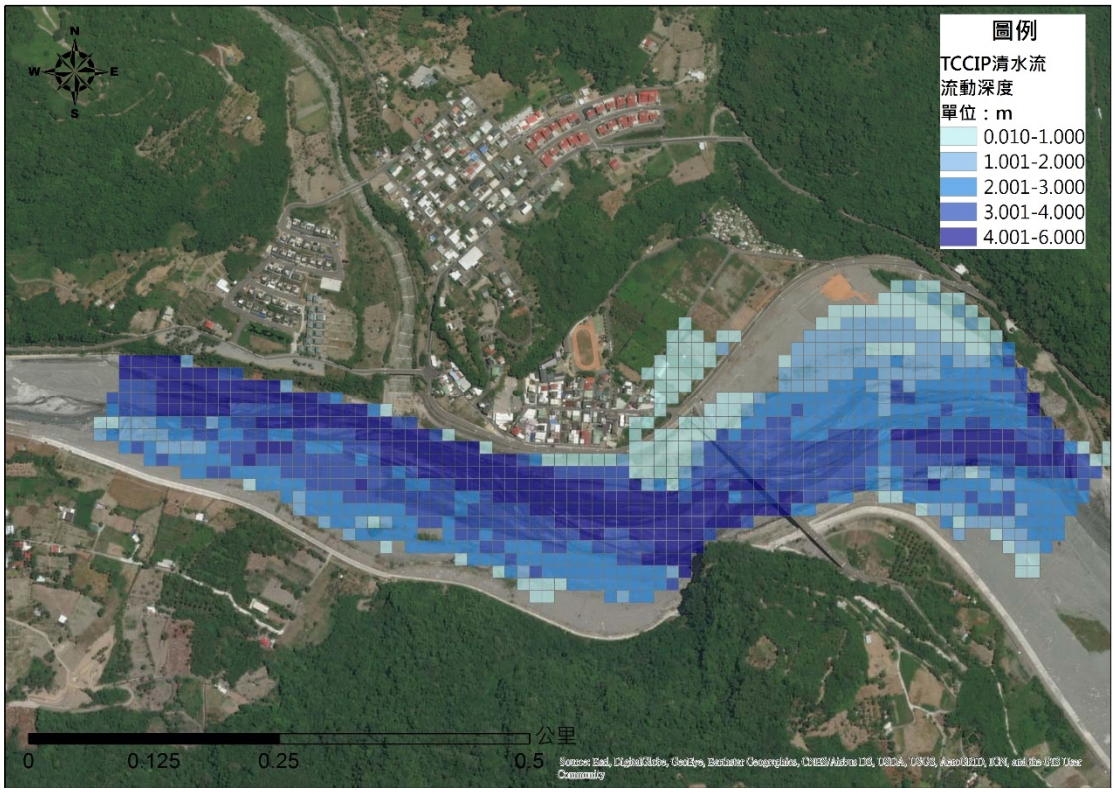


圖 4-23 未來颱風降雨事件主河道清水流最大流動深模擬結果



圖 4-24　未來颱風降雨事件主河道清水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現

四、　未來颱風降雨事件主河道地形抬升後之高含砂水流模擬

此部分設定為未來颱風事件影響下，河床因堆積而有抬升情況，並利用高含砂水流模擬之。此模擬結果分析可知此在河床抬升情境下，將造成嘉蘭村 83,600 平方公尺淹水，最高深度達 1.1 公尺。約有 110 戶受到淹水影響，並造成臺東縣政府警察局大武分局嘉蘭分駐所淹水達 0.88 公尺，如圖 4-25 所示。3D 虛擬實境呈現如圖 4-26 所示。

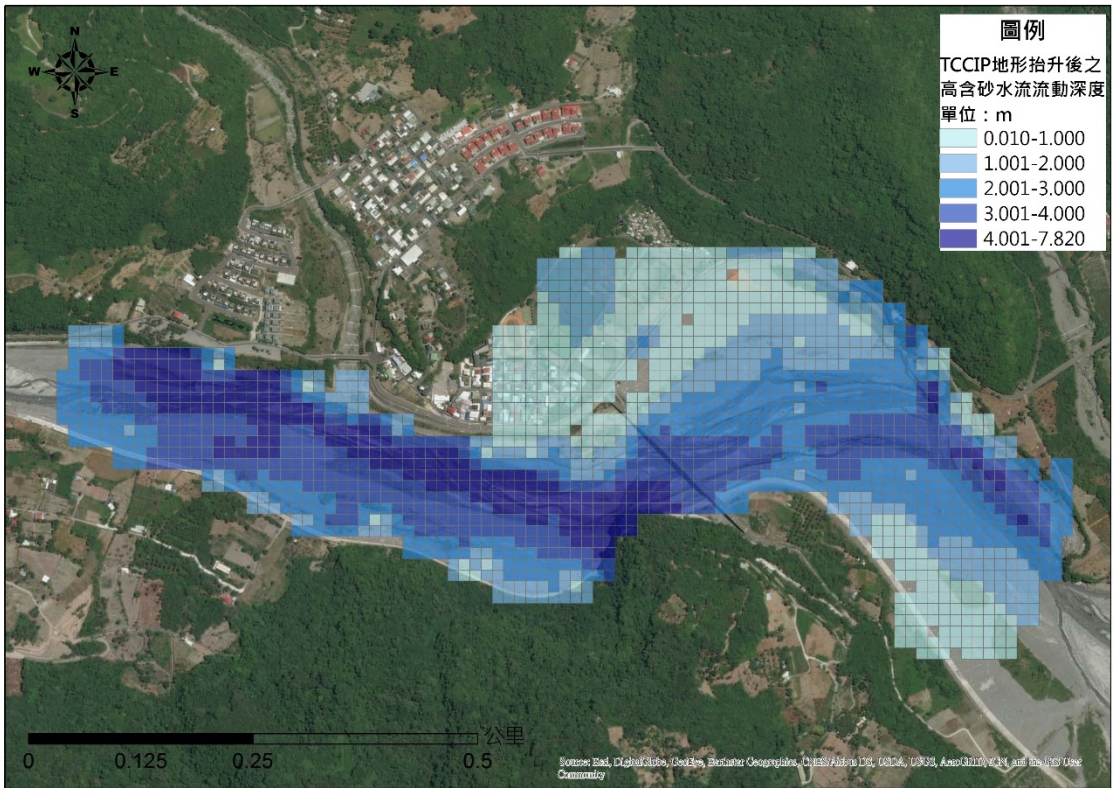


圖 4-25　未來颱風降雨事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果

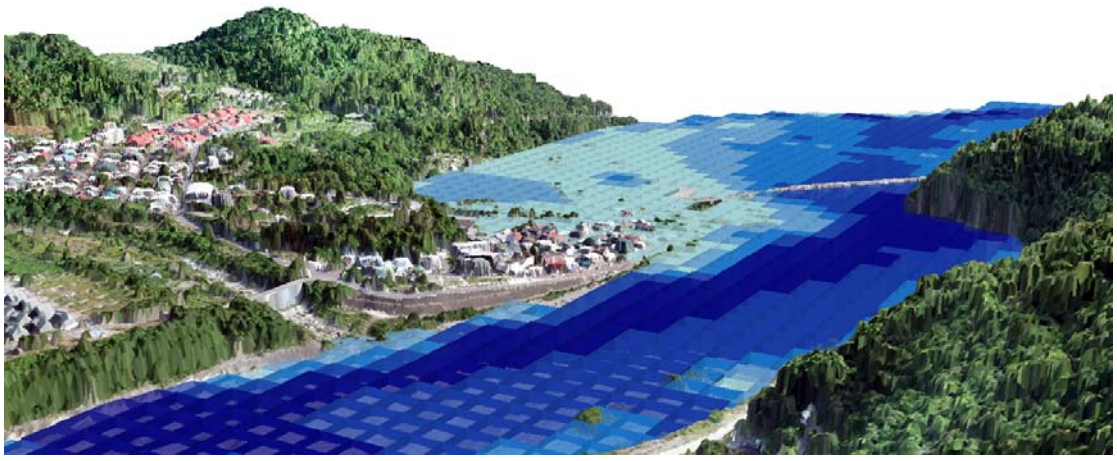


圖 4-26　未來颱風降雨事件主河道地形抬升後之高含砂水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現

五、 未來颱風降雨事件支流發生土石流及主河道地形抬升之高含砂水流模擬

此部分假設未來颱風事件造成太麻里溪支流—多利溪(DF079)發生土石流，及主河道地形抬升後之高含砂水流模擬。

逕流係數(C)參考行政院水土保持局之「水土保持手冊」，取中間值(80%)作為輸入值。集水區面積(A)則運用地理資訊系統進行計算，多利溪(DF079)集水區面積為 392.484 公頃，最後降雨強度與模擬時數上，本研究參考池谷浩(1980)與謝正倫(1993)之模擬方法，而林德貴等人(2008)應用 FLO-2D 亦應用此法，假設暴雨事件之最大時雨量為土石流入流事件發生，則以此時間點後一個小時降雨作為土石流流動結束時間點(流動時間共兩小時)，土石流具發生與流動快速之特性，因此本研究參考此法，挑選最大時雨量時間點 97.11mm)為土石流開始時機，並以變量流(實際雨量歷線轉換流量)形式模擬土石流 2 小時流動情況。土石流之流量計算及設定依式 4.6 計算而得，如表 4-19 所示。

表 4-19 DF079 土石流流量

時間	時雨量(mm)	DF079 流量 (CMS)
2090/7/1602 時	97.11	228.6847
2090/7/1603 時	54.06	127.3061

在多利溪發生土石流的情況下，嘉蘭村受影響範圍為 7,200 平方

公尺，最高堆積深度為 5.22 公尺。而關鍵設施之堆積深度方面，臺東縣政府警察局大武分局嘉蘭分駐所堆積高達 3.84 公尺；基督長老教會則堆積 2.68 公尺。且約有 33 戶受土石流影響，如圖 4-27 所示。

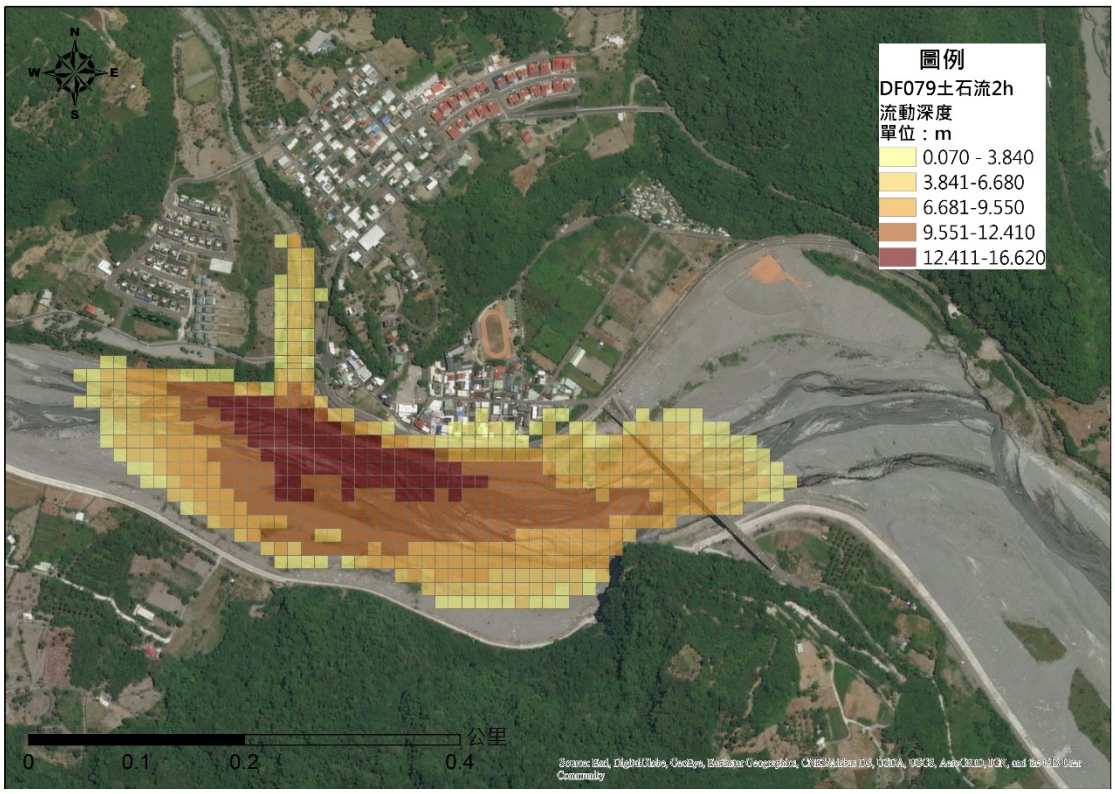


圖 4-27　未來颱風降雨事件多利溪土石流模擬結果

TCCIP 支流發生土石流及主河道地形抬升後高含砂水流模擬結果中，嘉蘭村受影響範圍為 173,600 平方公尺，由圖 4-28 可知靠近河道聚落幾乎受到影響。最嚴重淹水達 5.22 公尺；關鍵設施部分嘉蘭國小淹水 1.99 公尺；嘉蘭鄉公所為 1.84 公尺；基督教長老教會為 1.38 公尺；臺東縣政府警察局大武分局嘉蘭分駐所為 1.24 公尺。受影響戶數高達 185 戶。3D 虛擬實境呈現如圖 4-29 所示。

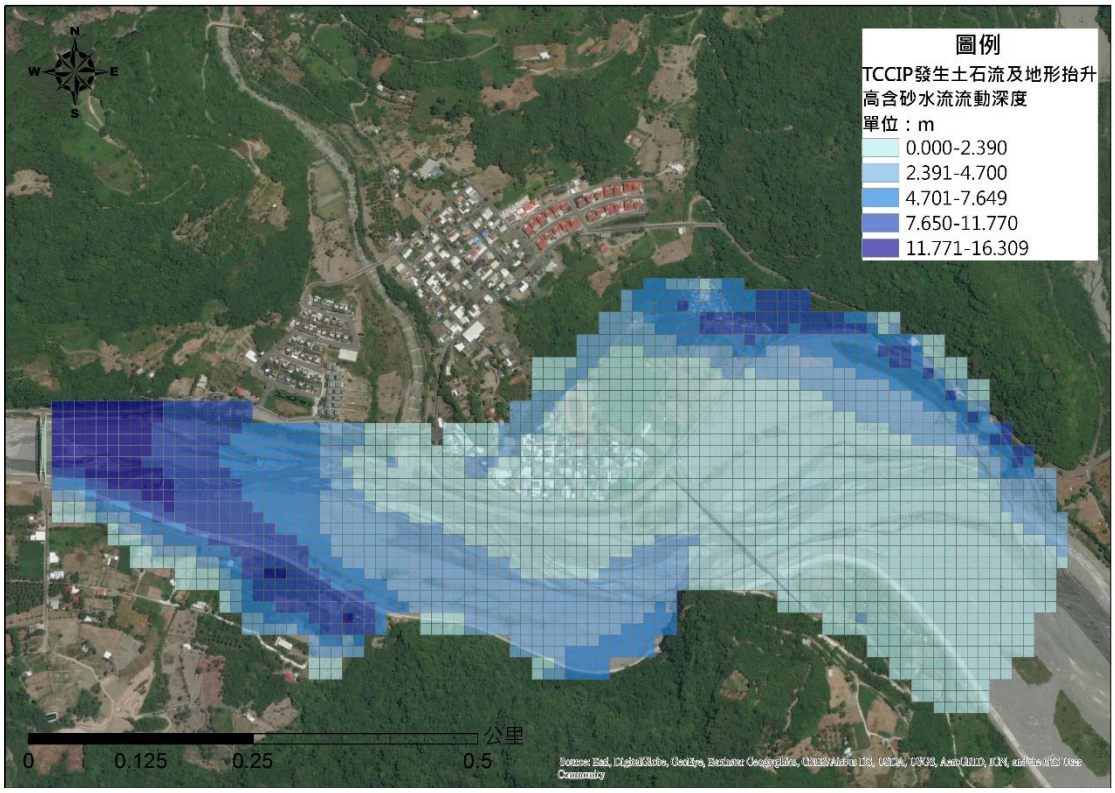


圖 4-28　未來颱風降雨事件支流發生土石流及主河道抬升後高含砂水流最大流動深模擬結果

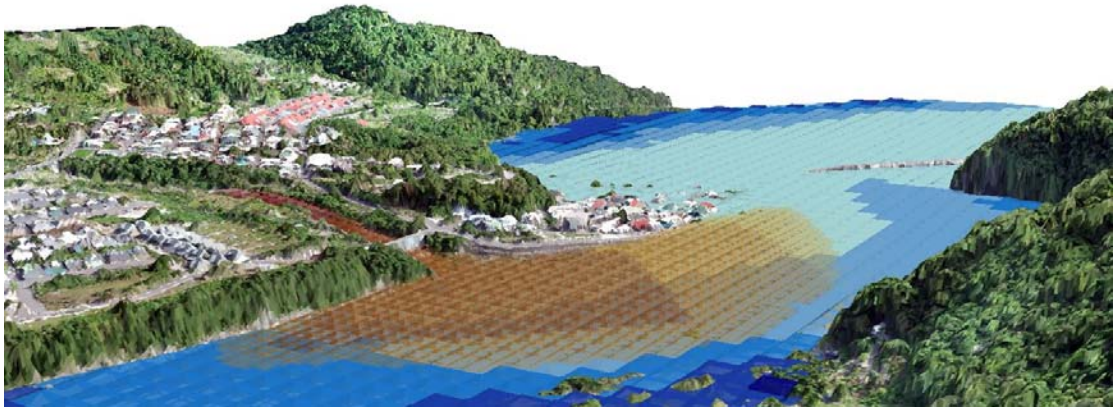


圖 4-29　未來颱風降雨事件支流發生土石流及主河道抬升後高含砂水流最大流動深模擬結果 3D 虛擬實境呈現

第五章 結論與建議

第一節 結論與建議

莫拉克風災時太麻里溪流域上游土砂大量增加導致河道沖淤急遽變化，同時伴隨崩塌及土石流等土砂災害事件，導致下游嘉蘭村等聚落遭受多項土砂災害侵襲，造成嚴重之傷亡與財產損失，有鑑於此，本研究歸納以下研究結論與建議：

一、集水區基本資料蒐集與彙整

蒐集莫拉克颱風所造成之災情與數據，以及太麻里溪流域之各項水文與地文參數，將莫拉克颱風期間各雨量站觀測資料分析，搭配地文參數(高程、坡度、流向、地質、土壤參數等)進行進一步分析，以利接下來流域土砂產量推估與驗證之進行。

二、流域土砂產量計算

透過地理資訊系統之整合，將所蒐集之資料分析後，得到太麻里溪流域土砂產量，分為沖蝕模擬及崩塌模擬；沖蝕模擬利用 MUSLE 土壤沖蝕公式推估總沖蝕量約為 377 萬立方公尺；崩塌模擬運用 TRIGRS 淺層崩塌模式推估平面總崩塌面積約為 2,170 萬平方公尺，坡面崩塌總面積約為 2,720 萬平方公尺，而總崩塌量約為 12,142 萬立方公尺。

再將所推估之值與福衛判釋崩塌地圖層與相關研究結果進行比對，在崩塌面積推估方面，準確率約為 86.2%。但因研究區缺乏部分地文參數，導致無法顧及崩塌區位，故建議後續可利用土壤鑽探、採樣並搭配內插法，以獲得更詳細之地文參數。

三、土砂收支模型探討

為了解太麻里溪全流域於莫拉克颱風期間土砂變動情形，首先運用流域土砂產量及分析各子集水區之搬運能力，建立太麻里溪流域之土砂收支模型，將 TRIGRS 淺層崩塌模式所得結果與福衛判釋崩塌地圖層所得結果土砂總量驗證比較，準確率達約 81.7%。接著以此土砂收支模型所得之結果，分析主流河段河道沖淤變遷情形，可發現河床抬升情況明顯，嚴重淤積段多位於上流流域，最高處達 18.97 公尺，眾多不安定土方量在未來將持續運移至中下游，使中下游河道兩側之聚落可能成為二次土砂影響的高風險地區，建議後續可利用所建立之土砂收支模型，持續觀察殘存於河道之不安定土方的變動情形。

四、未來颱風降雨事件推估

本研究藉由上述所建立之土砂收支模型，以 TCCIP 之未來颱風降雨資料庫，分析並推估太麻里溪全流域於未來之極端颱風降雨事件下，流域土砂生產與河道沖淤變遷之情形。推估出土砂生產量之總沖蝕量約為 531 萬立方公尺，總崩塌面積約為 5,591 萬平方公尺，總崩

塌量約為 30,974 萬立方公尺；再透過土砂收支計算可得知主河道各河道段之沖淤變化，主河道各河道均為淤積之情形，其中，抬升高度最高的河段更是高達 81.11 公尺。

五、複合式土砂災害評估模式

為解決複合式土砂危害之問題，本研究擬建立複合式土砂災害評估模式，首先藉由過往案例分析、現地調查、無人飛行載具航拍等方式，再結合上述所建立之土砂收支模型與無人飛行載具所建立之聚落模型，進行未來颱風降雨事件模擬，推估未來河道沖淤變動情形與聚落複合式土砂災害潛勢。分析未來颱風降雨事件下多利溪支流發生土石流及太麻里溪主河道地形抬升後高含砂水流模擬結果，嘉蘭村受影響範圍約為 173,600 平方公尺，且靠近河道聚落之民宅及關鍵設施幾乎受到影響。最嚴重淹水達 5.22 公尺；關鍵設施部分嘉蘭國小淹水 1.99 公尺；嘉蘭鄉公所為 1.84 公尺；基督教長老教會為 1.38 公尺；臺東縣政府警察局大武分局嘉蘭分駐所為 1.24 公尺。受影響戶數將高達 185 戶。本研究於評估複合式土砂災害之洪澇數值模擬於參數取得不易，，且受限於技術與時間，因此多參考相關實驗研究與資料，無法完全擬合當地環境因子，建議未來可透過實驗取得更加精確之環境因子。

本研究期望經由太麻里溪全流域範圍的研究尺度及長時間的土

砂變動探討，再進一步挑選出以村里為尺度之區域地形，進行較為精確的複合式災害模擬與衝擊分析，提供爾後治山防災及河道治理計畫研擬之參考。

第二節 預期效益

一、可量化效益

(一)於計畫執行期間於相關術研討會中發表一篇論文。

二、其他政策效益或不可量化效益

(一) 研究計畫建置之高潛勢複合式土砂災害評估模式可作為相關防災應變與規劃參考之依據。

(二) 資料庫建置可移轉氣象局、水利署、國家防救災科技中心等單位之研究團隊，據以分析在全球氣候暖化的背景下的區域變異。

參考文獻

1. 打荻珠男，1971，ひと雨による山腹崩壊に ついて。新砂防，通卷 79 号。
2. 丁聖峯，2012，運用災害風險概念探討臺東縣山坡地聚落易致災性。國立東華大學自然資源與環境學系碩士論文。
3. 內政部戶政司全球資訊網，2018。https://www.ris.gov.tw。
4. 尹立中，2014，應用定率法推估降雨引致淺層崩塌警戒值之研究-以高屏溪流域為例。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
5. 方思怡，2013，高風險災害潛勢土地分類之研究—以曾文水庫集水區為例。國立成功大學都市計劃學系碩士論文。
6. 水土保持局，2009，98 年莫拉克颱風重大土石災例速報。
7. 王仁傑，2009，烏石坑溪流域土砂觀測模式之建立與驗證分析。國立中興大學土木工程學系碩士論文。
8. 王姵兮，2007，應用 TRIGRS 模式評估降雨及入滲誘發池上山棕寮地滑。國立中正大學應用地球物理研究所碩士論文。
9. 王源程、陳文福，2012，“莫拉克颱風豪雨所致複合型災害分析及其改善方案探討-以臺東太麻里溪為例”。中華水土保持學會年會及學術研討會。
10. 王瑞瑄，2012，運用空間分析方法探討複合性災害之特性-以莫拉

克颱風為例。國立成功大學都市計畫研究所碩士論文。

11. 王藝潔，2016，應用不同參數分區及山崩重現率評估降雨引致淺層崩塌之研究。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
12. 江陽聖、陳錕山、梁隆鑫、王志添，2007，“以 SPOT 影像及數值地形模型推估集水區泥砂產量”。航測及遙測學刊，第 12 卷，第 4 期，第 447-456 頁。
13. 行政院農業委員會，2015。水土保持手冊，中華水土保持學會。
14. 吳佳郡，2006，降雨誘發山崩之潛感分析初探。國立暨南大學土木工程學系碩士論文。
15. 吳岳霖，2007，土壤沖蝕指標模式應用於石門水庫集水區土砂流失量推估之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
16. 吳杰穎、邵珮君、林文苑、柯于璋、洪鴻智、陳天健、陳亮全、黃智彥、詹士樑、薩支平，2007。災害管理學辭典，五南出版社。
17. 李自強，2012，社區自主防備災推動之探討-以高雄市茂林區萬山部落為例。高雄應用科技大學土木工程與防災科技碩士論文。
18. 李振裕，2004，集水區土砂生產及輸送之整合研究。國立成功大學水利暨海洋工程研究所碩士論文。
19. 李浩瑋，2011，結合 TRIGRS 與 TOPMODEL 預測淺層山崩。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

20. 沈哲緯、劉時宏、陳毅青、邱昱嘉、劉格非(2016)，“全臺流域集水區崩塌土砂收支研究與探討-以莫拉克颱風前後期間(2008-2012 年)”。農業工程學報，第 62 卷，第 3 期。

21. 林又青、林聖琪、張志新、劉怡君、曾敏惠，2014，社區坡地災害環境檢查手冊。臺北：行政院法人國家災害防救科技中心。

22. 林伯勳、許振崑、冀樹勇，2011。“集水區土壤厚度經驗式應用分析”。中興工程季刊，111，第 35-45 頁。

23. 林庚翰，2016，颱風降雨事件下山區聚落複合式災害風險評估－以高雄市南沙魯里為例。國立臺北教育大學社會與區域發展學系碩士論文。

24. 林建宏，2010，石門水庫集水區泥砂收支與遞移率之研究。國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。

25. 林羿貝，2014，集水區土砂收支行為分析探討。國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。

26. 林暘壹，2013，角埔溪土石流流動模擬研究。國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。

27. 林漢良、謝俊民，2008，建立易致災地區之安全建地劃設機制與準則(第一期)。內政部營建署城鄉發展分署。

28. 施邦築、宋裕祺、李有豐、陳怡智，1999，“土石流溪流橋樑規

劃設計之考量”。土木技術第 21 期，第 84-102 頁。

29. 施虹如，2013，地形及雨量特徵因子誘發老佛地區崩塌型土石流之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。

30. 施虹如、吳亭燁、蘇元風、劉哲欣、李欣輯、陳永明、張志新，2015，“極端降雨事件下淺層崩塌潛勢衝擊評估分析”。工程環境會刊，第 34 期，第 77-96 頁。

31. 科技部臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台，2018。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw。

32. 范正成、鄭克聲、童慶斌，2014，氣候變遷衝擊下坡地災害風險評估及調適能之研究。行政院農業委員會水土保持局委辦計畫，計畫編號：SWCB-103-082。

33. 財團法人成大研究發展基金會，2016，太麻里溪及金崙溪集水區土砂控制測量與監測計畫。行政院農業委員會水土保持局臺東分局。

34. 國家災害防救科技中心，2004，石門水庫土砂災害問題分析(精簡版)。

35. 國家災害防救科技中心，2012，100 年坡地土砂災害衝擊評估。國家災害防救科技中心技術報告。

36. 張崴、蕭宇伸、張榮傑，2017，“Uav 航拍技術應用於河道變遷

土砂監測和山區地形製圖之可行性分析”。中華水土保持學報，48(1)，第 1-13 頁。

37. 張學聖、廖晉賢，2014。“複合性災害評估架構研究：莫拉克風災為例”。都市與計劃期刊，第 41 卷，第 3 期。
38. 曹鼎志、許志豪、鍾佩蓉，2011，土石流風險分析與土地利用規劃之初探-以中崙風景特定區為例。中興工程顧問社。
39. 梁惠儀、林伯勳、冀樹勇、黃文洲、尹孝元，2010，“莫拉克颱風事件引致集水區崩塌後水庫淤積潛勢評估”。第十四屆海峽兩岸水利科技交流研討會，臺北。
40. 許民陽，2007，複合型災害。臺灣大百科全書網站。
41. 郭彥廉、蕭代基、林彥伶、謝雯惠、張銘城，2009，天然災害脆弱性與社經脆弱性因子之回顧。
42. 陳弘恩，2014，考量降雨及逕流影響之淺層坡地崩塌模擬分析。國立交通大學土木工程學系博士論文。
43. 陳本康，2005，石門水庫集水區崩塌特性及潛勢評估研究。國立中興大學水土保持學系研究所碩士論文。
44. 陳怡臻，2010，環境變遷對屏東沿海之脆弱性分析。國立臺北教育大學社會與區域發展學系學位論文。
45. 陳則佑，2011，應用點估法與 TRIGRS 程式分析奧萬大道路邊坡

之破壞機率。國立中興大學水土保持學系碩士論文。

46. 陳禹銘、許秋玲、樊國恕，2009，“我國複合災害風險系統架構之探討”。危機管理學刊，第 6 卷 2 期，臺灣，第 1-12 頁。

47. 陳振宇，2007，“風險管理應用於土石流災害管理之探討”。國際防災科技與防災教育學術研討會，雲林科技大學。

48. 陳啟天，2008，應用土壤沖蝕及崩塌潛勢模式推估集水區之泥砂生產量。國立中興大學水土保持學系碩士論文。

49. 陳嬉璇 ，2011，“不同廣域降雨促崩分析模式於山崩預警應用之探討”。14th Conference on Current Researches in Geotehchnical Engineering in Taiwan。

50. 辜炳寰、蕭震洋、林伯勳、梁惠儀、鄭錦桐，2009，“建立石門水庫集水區豪雨誘發淺層崩塌之土方量推估模式”。第十三屆大地工程研討會，宜蘭。

51. 黃全謚、鍾佩蓉、曹鼎志、鄭錦桐，2012，山區疏散避難路線規劃之研究。中興工程顧問社。

52. 黃宏信、劉希羿、蔡元融、王仁傑、陳正炎，2009，“烏石坑溪流域土砂變化探討與驗證”。中華水土保持學報，40(3)，第 297-309 頁。

53. 黃昱翔，2009，颱洪災害脆弱度評估指標之建立：以南投縣水里

鄉為例。銘傳大學建築與都市防災研究所碩士論文。

54. 黃淳茂，2016，“土地覆蓋變遷與地表逕流量變化之關係—以濁水溪流域為例”。2016 臺灣災害管理學會十週年年會。

55. 楊樹榮、施尊穎、黃春銘、鄭錦桐、黃文洲、陳振宇，2010，“莫拉克後老濃溪流域內聚落孤島效應評估”。2010 岩盤工程研討會。

56. 楊樹榮、施尊穎、黃春銘、鄭錦桐、黃文洲、陳振宇，2010，“莫拉克後旗山溪流域內聚落孤島效應評估”。第三屆水保技術研討會。

57. 經緯航太科技股份有限公司，2016，發展無人飛行載具系統測繪作業。內政部國土測繪中心。

58. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2011，高含砂水流河道沖淤模擬及試驗研究(3/3) ，附 7-7 p.221。行政院經濟部水利署。

59. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2011，深槽流量增加對河床沖刷與河道變遷之影響。行政院經濟部水利署。

60. 詹錢登，2000，土石流概論。科技圖書，臺北。

61. 詹錢登，2014，“土石流發生降雨警戒模式”。中華水土保持學報第 35 卷 3 期。

62. 鄒采芩，2005，土石流災害風險評估之研究—以臺南縣為例。國立成功大學都市計畫學系碩士論文。

63. 趙倬群，2004，石門水庫集水區崩塌土砂產量推估之研究。國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。

64. 劉緁玲，2012，數種不確定性分析方法於降雨引發坡地淺崩塌模式之比較研究。國立交通大學土木工程學系碩士論文。

65. 潘運行，2016，山區聚落孤島發生情形之探討。國立臺北教育大學社會與區域發展學系碩士論文。

66. 蔡元芳，2013，楠梓仙溪流域土石流監測與河流環境之影響研究-楠梓仙溪流域土砂生產量對河道地形變動之影響研究(3/3)。科技部研究報告，計畫編號：101-2627-M-152-001。

67. 蔡元芳、顏志瑋、鄭于綸，2012。“應用 FLO-2D 於土石流防治工程方案決策分析-以高雄市南沙魯里為例”。第十六屆海峽兩岸水利科技交流研討會。

68. 蔡元芳、羅楷傑、林祺岳、傅金城、蘇文瑞，2014。“楠梓仙溪流域土砂生產量對河道地形變動之影響”。TCCIP 氣候變遷資料使用經驗分享研討會。

69. 蔡宗賢，2005，水庫集水區暴雨時期崩塌土砂量推估之研究。國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。

70. 鄭錦桐、邵國士、冀樹勇、邱俊翔，2009，“莫拉克颱風臺東地區流域複合型地工災害探討”。地工技術，第 122 期，第 63-71

頁。

71. 謝平城、湯嘉芸與林俐玲，2007，“應用 HEC-GeoRAS 淹水模擬之研究-以南湖溪為例”。國立中興大學水土保持學報第 40 卷 4 期。

72. 謝正倫，1998，“土石流特定區水土保持區之劃定”。中日奧土石流危險區劃定研習會論文集。

73. 謝正倫、陳禮仁，1993，“土石流潛在溪流之危險度的評估方法”。中華水土保持學報，24(1)，第 13-19 頁。

74. 謝正倫、蔡元融、林彥均、陳俞旭、邱禎龍，2009，“應用動床演算於流域土砂收支模式之研究”。2009 流域地質與坡地災害研討會論文集。

75. 謝正倫、蔡元融、陳俞旭，2009，“集水區土砂生產及輸送模式之研究”。臺灣水利，57(4)，第 14-26 頁。

76. 鍾欣翰，2008，考慮水文模式的地形穩定分析－以匹亞溪集水區為例。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

77. 顏志瑋，2012，土石流防治工程方案決策分析-以高雄市南沙魯里為例。國立臺北教育大學社會與區域發展學系碩士論文。

78. 羅楷傑，2013，楠梓仙溪流域土砂運移分析。國立臺北教育大學社會與區域發展學系碩士論文。

79. 蘇文瑞，2013，無人飛機於災害防救之應用。國家災害防救科技中心。

80. 蘇文瑞、蔡元芳、林立偉、陳怡臻，2010，“國民小學天然災害風險評估之研究”。華岡地理學報，第 25 期，第 21-35 頁。

81. Baum, R.L., Savage, W.Z., and Godt, J.W., 2008. TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008-1159, 75 p.

82. Bell, R., and Glade, T. 2004. Multi-hazard analysis in natural risk assessment. In: Brebbia CA (ed) Risk analysis 4. WIT Press, Southampton, pp 197–206.

83. Chen Y. S., Kuo, Y. S., Lai W. C., Tsai, Y. J., Lee, S. P., Chen, K. T., and Shieh, C. L. 2011. Reflection of Typhoon Morakot–The Challenge of Compound Disaster Simulation. Journal of Mountain Science, 8: 571–581, DOI: 10.1007/s11629-011-2132-5.

84. Dietrich, W. E., and Seattle. T.D. 1978. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. Z. Geomorph. N. F. Suppl. Bd. 29:191-206.

85. Federal Emgency Management Agency,1997. FEMA's Multi-Hazard Identificationand Risk Assessment.

86. Garatwa, W., & Bollion, C. 2002. Disaster risk management: working concept. Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit.

87. Gareem, M. S., Bitner, D., and Silva, R. D. 2007. Gis integration in the sahana disaster management system. Proceedings ISCRAM2007,

pp.211-218.

88. Granger, K., Trevor J., Marion L., and Greg, S. 1999. Community risk in Cairns: a multi-hazard risk assessment. Australian Journal of Emergency Management.
89. Heinzelman, J., and Waters, C. 2010. Crowdsourcing Crisis Information in Disaster- Affected Haiti. United States Institute of Peace, Special Report 252:1-16.
90. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris.
91. Iverson, R.M. 2000, Landslide triggering by rain infiltration, Water Resources Research, Vol. 36,No. 7,pp. 1897-1910.
92. Kawata, Y., 2011. Downfall of Tokyo due to Devastating Compound Disaster, Journal of Disaster Research, Vol. 6, No.2, 176-184.
93. Khazai, B. and Sitar, N. 2000. Assessment of Seismic Slope Stability Using GIS Modeling, Geographic Information Sciences, 6(2), pp.121-128.
94. O'Brien, J. S., and Julien, P. Y. 1988. Laboratory analysis of mudflow properties. Journal of Hydraulic Engineering,, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp.877-887.
95. Shieh, C. L., Shieh, C. D., Lee S. Y., Chen J. C., and Lee, S. P. 2002. On the Study of an Integrated Sediment Evaluation Model for River Basins, The 15th AIT-TECRO Water Resources Program Annual Review Meeting, Taiwan.
96. Stewart, E. J., Jacobson, D., and Draper, D. 2008. Public Participation

Geographic Information Systems (PPGIS): Challenges of Implementation in Churchill, Manitoba. The Canadian Geographer, 52(3), pp.351-366.

97. Tsai, Y. F. , and Shieh, C. L. 1997, Experimental and Numerical Studies on the Morphological Similarity of Debris-Flow Fans, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 20(4), 629-642.
98. Tulloch, D. 2004. The Green Map Systems as a Means for PPGIS Education and Exploration. A paper present at 3nd Annual PPGIS Conference, Madison, WI, URISA.
99. Williams, J. R. and Berndt, H. D. 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology, Trans. of the ASAE, pp.1100-1104.

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	研究議題重要，值得探討。	感謝委員的肯定。
二	建議將現地調查之資料納入。	目前已經規劃現地調查之行程，也蒐集前人之研究之現地調查資料，做為未來之模式驗證。
三	建議在本研究中作模式驗證。	目前已完成莫拉克颱風的資料蒐集與驗證，未來仍會以該流域之多場颱風事件進行土砂收支的計算與驗證。
四	在此流域中有多少個雨量站，又位在何處？如何推估該流域之水文資料？	流域內有兩個，未來會以這兩個雨量測站(太麻里、金鋒)作為雨場分析的推估，將採用克利金的方式進行雨量的推估與驗證。
五	資料庫建立是否包括水文資料、是否可藉歷史資料分析太麻里溪流域之災害週期性為何?	資料庫有包含水文資料(雨量、流量等)，待資料蒐集完成後，會再針對歷史資料進行災害週期性之探討。
六	複合式災害如何認定，宜有一標準依據，以避免無限上綱。	已於期中報告書加強說明。

七	本年度之目標之資料建置與現地調查等能完成內容、數量、宜有明確量化。	資料建置、現地調查以現況為主，目前計畫重點乃針對流域內有複合式災害之村落作為主要之分析對象，至於過去歷史資料則參考各學者過去這方面研究的資料蒐集和現況分析為主。
八	太麻里溪的資本資料若完整則分析較沒問題，但遇到大洪水或有災害性洪水時，要如何取得資料就很重要了。	針對歷史性資料災害事件主要以前人研究資料為主，至於現況資料會以現地調查及 UAV 飛行航拍取得，期望獲得完整的資料
九	莫拉克風災之太麻里溪災害與其上游堰塞湖潰堤有關，是否為各子集水區造成影響應該再詳加考量。	有關堰塞湖問題對於各子集水區造成影響本研究會於後續年度之計畫中納入分析考量。
十	本計畫模擬時程會有多長(河段)？多久(時間)？太麻里溪因地形有瓶頸段問題，分析困難度頗高。	本年度計畫主要以颱風降雨事件分析為主，針對太麻里溪整個主河道土砂收支的計算，至於太麻里溪之地形瓶頸段的問題亦於後續年度進行數值模擬分析。
十一	崩塌或土石流數值模擬如何決定其起始條件，如土方量、降雨量，另河床動床變化如何模擬？	土方量會針對崩塌深度和面積配合 TRIGRS 進行崩塌地邊坡穩定度分析，至於土石流之降雨量會以各場降雨颱風事件之雨量利用克利金內插後進行分析，河床動床則將以本研究所開發出來的土石流沖淤模式進行模擬。

十二	如何驗證上述模式中推估土砂量之正確性，預計驗證的資料量有多少？	目前利用土砂收支平衡的方式，進行土砂量之估算，目前以莫拉克颱風作為推估、驗證，未來將針對以往颱風事件的土砂量估算的驗證。
書面意見		
一	本計畫於河道沖淤、土石流均有數值分析，宜針對使用模式及其適用條件說明	有關河道淤積以及土石流之數值模擬，目前規劃於第二年，將在第二年的計畫中針對使用模式及其適用條件詳細說明。
二	土砂災害之規模與降雨量息息相關，本計畫未來之預測是否由降雨多寡控制？若另發生地震後，此模式如何做反應及修正?	本研究主要是針對極端氣候下之降雨之崩塌為主，地震所造成之崩塌因為有其不確定和隨機性，因此本研究針對地震後之模式修正會於第三年之計畫中再進行探討。
三	本補助經費精神為「創新」，建議計畫報告中加強說明本案之創新性(方法論，新的嘗試、想法等)	本研究之目的在於透過全流域範圍的研究尺度，調查分析莫拉克風災後太麻里溪流域的河床沖淤變化，並預測流域內各聚落將面臨的複合式土砂災害。為了預測未來氣候變遷下太麻里溪流域聚落可能面臨的各種土砂災害，本研究擬建立一套複合式土砂災害數值模式進行模擬分析，此點已於期中報告書中加強說明。

四	數值軟體的研發(新工具)之應用，若為本案的創新，則需在報告中說明，此軟體與其他差異及優缺點	本計畫之重點是利用數值模式來進行複合式災害之土砂推估模擬，跟以往洪水演算模擬不同，至於數值模擬計畫為第二年重點，將於第二年計畫中說明軟體之差異及優缺點。

附錄二、期中審查意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
期中審查意見：		
一	所執行之計畫議題甚為重要，工作內容之份量亦甚多，值得肯定。	感謝委員的肯定。
二.1	所選用之土壤沖蝕、邊坡穩定度分析模式、土砂生產及運移模式中，許多參數無法確實取得，只能用推估，是本計畫執行上先天之限制。	目前計畫執行之參數取得主要以水土保持手冊、土壤流失量估算手冊及集水區河道之坡度特性查表得知。另外部分參數亦參考前人研究及現地調查資料，如成大太麻里溪及金崙溪集水區土砂控制測量與監測計畫及水利署水利規劃試驗所高含砂水流河道沖淤模式及試驗研究。
二.2	使用之模式所推估之結果與實際情形，往往無法比較，或者相距過大。在驗證方面，在未來應更加強。	由於莫拉克颱風所蒐集到的相關資料較為完整，因此目前本計畫主要以莫拉克颱風事件做為模式之

		驗證。未來則透過 TCCIP 提供之長時間尺度資料進行模擬。
二.3	複合式土砂災害模擬與災害風險評估是本計畫之核心工作，但到期中，這方面成果仍甚為有限，宜更努力。	期末報告已針對流域內之嘉蘭村進行複合式土砂災害模擬與災害風險評估。
二.4	在土砂崩塌量方面之模式分析，採用 TRIGRS。TRIGRS 是一種物理或力學分析模式，需要許多且大量之參數，不易取得；或者可以取得，但需大量的人力、經費及時間。因此，建議不妨採用統計分析之模式，其參數較易取得，且可相互比較。	本研究比較 SHALSTAB、SINMAP 及 TRIGRS 等模式後發現，TRIGRS 充分考量各項因子，如地形、地文、水文及降雨之空間及時間分布，考量較為全面，故採用 TRIGRS 分析土砂崩塌量。在 TRIGRS 參數部分亦參考多篇論文及報告書，如水利署水利規劃試驗所高含砂水流河道沖淤模式及試驗研究之太麻里溪集水區土壤性質參數統計資料彙整表，來完成其參數之設定。已於文中強加述明。
二.5	P.1-7 集水區地形相關資料是由什麼資料推算出來?是否為 P.3-5 所提及之數值地形模型?請說明其資料來源、產 製時間及解析度等相關資訊。另 P.3-5 使用為 30mx30m 解析度資料內插後產生之 20m 網	已依委員建議修正為 20m×20m 網格 DTM，並說明資料來源。另外在考量數值模式之計算時間，由於計算範圍較大，暫不考慮高解析度之 DTM。未來若有防災工程之細部規畫或設計再行考量。

	格資料，惟目前政府資料開放平臺已開放 20 m 網格 DTM 資料供自由下載，另相關單位亦產製更高解析度之 DTM，不使用之原因為何?請說明。	
二.6	P.1-11 之土壤圖資料來源及產製日期為何?由第 4 章之描述本資料與後續土壤沖蝕計算並未連結，其後續如何使用?	土壤圖資料來源已證明源自行政院農業委員會開放資料平台。由於該圖資缺乏上游土壤資料，因此後續土壤沖蝕計算係依水利署水利規劃試驗所高含砂水流河道沖淤模式及試驗研究報告資料推估。
二.7	P.1-12 中太麻里溪流域內雨量站除金峰、太麻里站外，亦有一站金峰鄉公所(81S92)，請說明為何未採納?	由於研究範圍為太麻里溪全流域(面積約為 226.3 平方公里)，金峰雨量站與金峰鄉公所皆位於流域下游，距離約 160 公尺，且金峰鄉公所資料取得不易，故目前僅採用金峰雨量站資料。未來將申請金峰鄉公所雨量站資料與其驗證。
二.8	P.1-15 土地利用型態資料來源為何?年份?其與現況是否有差異?請補充說明。	已依委員建議於期末報告書詳加敘述進行補充。
二.9	P.3-3 MUSLE 及 TRIGRS 兩種評估土砂量之方法所使用之範圍、標的、適用情形不儘相同。直接相加作為總產出土砂是否有重覆計算	本研究係利用 MUSLE 計算土壤沖蝕量，再利用 TRIGRS 計算單產降雨可能引發之崩塌量，應無重複計算之疑慮。其他相關之研究如成

	之疑慮?另其在學理上是否合理?請說明。	大集水區土砂生產及輸送模式之研究，亦以類似之方法進行土砂產量計算。
二.10	P.3 - 6 圖 3- 2 累積雨量之起始及終止時間為何?請補充。	P.3 - 6 圖 3- 2 為莫拉克累積雨量，起始時間為 8/5 5:00pm，終止時間為 8/9 10:00pm，已依委員建議進行文字說明之補充。
二.11	P.3 - 7 崩塌地資料來源為何?另本頁中引用 2011 年成大研究發展基金會之資料，文末參考文獻中似未列入，另後續圖 3- 4、圖 3-5 之資料來源、P.3-25 NCDR(2012) 及 Khazai and Sitar(2000)之文獻參考文獻也是貌似未列入?請確認。	已依委員建議進行文字補充。
二.12	P.3 - 10 子集水區為何分為 26 個?採用何種方式分割?其理由為何?請說明。	集水區依等高線地形圖，選定每個集水區的出口位置，並判定集水區邊界與河川網路，將集水區分為漫地流部分(Overland Area)與河川部分(Channel)，因本研究範圍是太麻里溪流域，由於流域範圍極大，在考量土壤崩塌量及沖蝕量計算與參數取得不易，故於尺度上將集水區劃分為 26 個。
二.13	由第 2 章提供資料可得知地形、土壤及土地使用在上游與下游有	已採用水利署報告水利規劃試驗所高含砂水流河道沖淤模式及試

	不小差異，但在第 4 章使用 MUSLE 時無論計算土壤沖蝕指數、覆蓋及管理因子、水土保持因子及坡長因子均視全集水區為均一分布，請說明為何不採用子集水區分開計算方式減少誤差?	驗研究報告資料推估為參數使用詳述於文中。
二.14	P.4-9 提及之福衛判釋崩塌地圖層資料來源為何?P.4-22 莫拉克颱風期間之土砂收支結果來源為何?是否有赴現場量測或調查相關資料，請說明。	已於期末報告註明福衛判釋崩塌地圖層資料來源為經濟部中央地質調查所集水區地形及地質資料庫成果查詢系統，歷年災害調查之莫拉克災後衛星影像與崩塌地分布圖。
二.15	請說明為何與福衛判釋崩塌地圖層及水土保持年會及學研討會論文(P.4-10，參考文獻為何?)概估資料比較後可作為本研究之準確率判斷?請說明其理由。	已依委員建議進行文字修改及參考文獻之補充說明。
二.16	複合式土砂災評估模式僅列有評估模式步驟，未有相關方法論述及後續應用之說明，內容太過簡略，請再補充。	已依委員建議於期末報告書詳加敘述進行補充。

附錄三、期末審查意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
期末審查意見：		
1	p1-14 災害數值模擬部分僅介紹 HEC-RAS/FLO-2D/SOBEK 也提及 SOBEK&HEC-RAS 僅能模擬清水流(p2-16)，似乎有疑宜再確認。	已依委員建議將各種災害數值模擬程式，如 HEC-RAS、FLO-2D、SOBEK 之介紹以及適用情境於文中加強補充說明，詳如 p.2-16。
2	建議可加入 DHE、SRH 之軟體應用並評估其於災害數值模擬之適宜性，FLO-2D 為災害造成之堰塞湖似乎較無法模擬。	本年度主要工作項目係以 FLO-2D 做為災害數值模擬之工具，模擬一般清水流、高含砂水流及土石流之境況模擬。未來擬針對大型崩塌地及堰塞湖等更複雜之複合式水土災害現象，進行適用之數值模擬軟體評估或甚至自行開發。
3	土壤沖蝕量及崩塌量評估，請問以何種方式評估？	本研究係以 MUSLE 計算土壤沖蝕量，再利用 TRIGRS 計算單場降雨可能引發之崩塌量，詳細說明請見 p.3-10 土砂生產計算。
4	支流土砂生產量流入主河道，其中是否考慮土砂遞移率？	本研究主要以 TRIGRS 與 MUSLE 計算各支流之土砂生產量與土砂搬運能力，再評估各支流之土砂量如何進入主河道，屬於土砂收支計算。未來亦會考慮增加土砂遞移率之計算與檢討。

5	在土砂災害模擬與災害風評估，是否可提供預警機制，作事前之預防。	本研究以 TCCIP 未來颱風降雨事件進行模擬推估，亦可代入其他事件預測雨量進行模擬預測，達到預警之功能。惟因模擬時間過長，目前暫時無法達成即時模擬及發布預警之功能。
6	本計畫中，應如何考量目標為域中可能產生得大規模崩塌災害及其引致之二次災害，如堰塞湖或土石流?	本年度主要工作項目係以FLO-2D做為災害數值模擬之工具，模擬一般清水流、高含砂水流及土石流之境況模擬。未來擬針對大型崩塌地及堰塞湖等更複雜之複合式水土災害現象，進行適用之數值模擬軟體評估或甚至自行開發。
7	本研究透過案例驗證，進行高風險區位的預測，若可在進行更多案例蒐集與驗證，將可為相當有力之預測工具。	本年度首先以嘉蘭村進行案例模擬與分析，未來將針對流域內之下游其他村落，進行更多之案例分析與檢討，以完成本模式之驗證。
8	本案以莫拉克颱風極端降雨模擬，是否有考量一般之颱風豪雨狀況做模擬？	本年度計畫主要以颱風極端降雨事件分析為主，針對太麻里溪在極端氣候下的複合式土砂災害進行風險評估，至於一般颱風豪雨狀況將於後續年度選取 TCCIP 對台東影響最大之雨量進行模擬分析。

9	本次模擬結案均為河道抬升，是否有考量一般狀況下河道可能有沖有淤之狀況及模擬。	本年度模擬以颱風極端降雨事件為主，未來考慮以其他模式如CCHE2D 模擬一般常流水河道沖淤變化。
10	本計畫進行土砂災害數據模式進行分析，其模式考量得參數如何率定或驗證?目前該模式的成熟度如何?未來可否推廣到其他區進行模擬分析災害影響範圍？	有關本研究災害數值模式參數設定，係參考相關研究如詹錢登(1997)、趙啟宏(2004)等，較缺乏相關現地實測資料，未來若能透過現地調查、室內實驗、或鑽探等地質調查，取得符合當地之地文參數資料，對模式之模擬則更佳。模式中之參數經率定及驗證後，選擇適用之地文參數即可應用於其他集水區進行模擬。
11	模試驗證的部分，僅針對崩塌面積及淹水面積做驗證，是否還有其他更多因子能提供模式的準確。(如積淹水地及退水時間等)	本研究以莫拉克颱風事件進行模擬驗證，由於當時未有精確災情資料，較難完整取得，故無法進行比對，僅能以崩塌面積及淹水面積進行驗證。未來將擬蒐集更多因子如淹水及退水時間等進行模式驗證。