

利用 GIS 空間分析之水文/水理模式評估土石流與崩坍之風險

吳呈懋¹ 陳本源^{2*} 陳錦嬌³

¹ 國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心

² 國立嘉義大學景觀學系

³ 國立嘉義大學土木與水資源工程學系

摘 要

本文建立以地理資訊系統(GIS)為基礎分析邏輯及架構，利用數值高程模型、航照圖、衛星影像、水文和地文等資料，以 GIS 空間分析劃定各危險溪流的集水面積、溪流上游之崩塌面積、淤積面積之範圍，然後以 GIS 為基礎的水文及水理模式進行系統化的水文、水理分析及土砂收支分析並根據結果評估發生土石流之風險。研究區域之分析結果顯示河道的輸砂能力比土砂生產量來得高，該處河道不會有土砂堆積之虞。本文所建立的系統架構和分析流程，有助於提升土石流危險溪流的辨識分區效率及精確度，對土石流與崩坍風險評估、工程規劃及保全對象之決策有參考價值。

關鍵字：地理資訊系統，空間分析，土石流，崩坍，數值高程模型

Debris flow and landslide risk assessment using hydrological and hydraulic models with GIS analysis

Cheng-Mau Wu¹, Pen-Yuan Chen^{2*}, and Ginn-Yein Chen³

¹ *Research Center for Soil & Water Resources and Natural Disaster Prevention, National Yunlin University of Science and Technology*

² *Department of Landscape Architecture, National Chiayi University*

³ *Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University*

ABSTRACT

This article set up a GIS-based automatic analysis framework. The digital elevation model (DEM), photogrammetric and satellite images, soil and land-use maps were pre-analyzed by GIS. With the GIS based Hydrological model and Hydraulic model, hydraulic simulation and sediment balance calculation, were created. Accordingly, the effective catchment area, the fault length passing through the catchment, the landslide area and its scope, and deposition size and its scope were then demarcated. Results show that the transportation ability of the stream is higher than the yield of earth deposition. The proposed analysis framework in this article is promising in upgrading the efficiency and accuracy of identifying districts with potential debris-flow streams.

Keywords: GIS, spatial analysis, debris-flow, landslide landscape, DEM

一、前言

台灣地狹人稠，由於位處造山運動活躍的板塊帶，造就出地形陡峻、地質脆弱、河川湍急之自然環境特性，山地面積占全島總面積的三分之二以上，再加上位處西太平洋之颱風形成地區，颱風豪雨頻繁，雨量分佈集中，因此每年的梅雨季及颱風季節，自然災害發生頻仍。近年來人口及產業漸漸由不敷使用之平地地區移往山坡地，使得原本就有崩塌、地滑、土石流發生之山坡地，因為人口之遷入而有人命或財產損失之災害發生。2001年桃芝颱風侵襲台灣造成花蓮縣與南投縣的山區各河流產生全面性的土石流，並造成重大的災害。桃芝颱風在中部山區的降雨量約為700-800公釐，雖未超過1996年賀伯颱風的降雨量，但卻在陳有蘭溪沿岸、南投縣竹山的木屐寮以及花蓮縣光復的大興村形成如此大規模的土石流，造成重大的災害及損失。根據農委會1996年在陳有蘭溪依溪床坡度與有效集水面積等兩項指標，所調查公佈全台土石流潛在危險溪流共計485條，若欲全面進行硬體工程整治，無論在人力及財力上皆屬極大負擔，且耗時甚久，故需以一套有效率的方法先進行土石流危險度的區分，以作為工程整治順序的依據。地理資訊系統 (GIS) 在水文及水資源之管理應用已是相當普遍且成熟的技術[1]，GIS結合水文模式及水理模式之模擬與分析[2]，也逐漸在發展中。然而GIS在災害管理之應用上，目前僅侷限於圖形辨識和範圍界定，2000年Lin等[3]以南投縣陳有蘭溪流域的土石流潛勢溪流為分析對象，結合GIS之圖資處理與分析功能，並引進Gupta, B.P. 和 Joshi, B.C.於1990年[4]所提出之危險因子(risk factor)概念，將不同單位及量測範圍之各影響因子合併計算，以進行危險度評估。

本文針對花蓮縣豐濱鄉的加塍溪集水區，利用DEM資料、航照圖及衛星影像等資料，以GIS進行空間分析建立集水區之空間資訊，然後以GIS為基礎的水文模式(Hec-Hms)及水理模式(Hec-Ras)進行一系統化的水文分析、水理分析以及土砂分析，此整合性系統化分析能確保判釋過程之客觀性、一致性及土石量推估的精確性[5]，最後進行土石流與崩坍景觀風險評估作為工程整治之建議。

二、研究區域概述

本文之研究區域選定於花蓮縣豐濱鄉，該鄉位於花蓮縣東南方，約在北緯23度35分45秒，東經121度31分5秒之間，東臨太平洋，西倚海岸山脈，東西窄小，南北狹長約47公里，研究區域之集水區位置圖如圖1所示。



圖1. 研究區域集水區位置圖

該區域年平均溫度約24度，月平均溫度以一月最低，約17.7度，七月最高約30.3度。年平均雨量2,910毫米，雨量多集中在5-10月，2月最少。集水區西起於海岸山脈，東臨太平洋，地勢由西向東傾斜，山嶺地帶坡度陡峭，開發受限制，海岸地帶主要為斷層海岸地形，海岸侵蝕嚴重。集水區內的道路包括復興產業道路沿著加塍溪以及接近集水區出口處的花東海岸公路橫貫期間。該區於1998年瑞伯颱風及2001年桃芝颱風曾傳出災情，但詳細災因不明。區域內有一條水土保持局所劃定的土石流潛勢溪流DF099，土石流的警戒基準值為24小時累積雨量400 mm。

三、研究方法

本文建立GIS空間分析為架構的水文及水理模式用來評估土石流與崩坍之風險，整個研究分析架構如圖2所示。架構中以數值高程模型(DEM)資料、航照圖及衛星影像等資料作為GIS為模式空間分析的資料，建立集水區之空間資料庫。

研究分析架構中所採用數值演算模式主要包括：(A) 雨量資料分析模式、(B) 水文地形模式和水文模式、(C) 水理地形模式和水理模式以及(D) 土砂分析模式等四部分(如圖2中(A)~(D))。

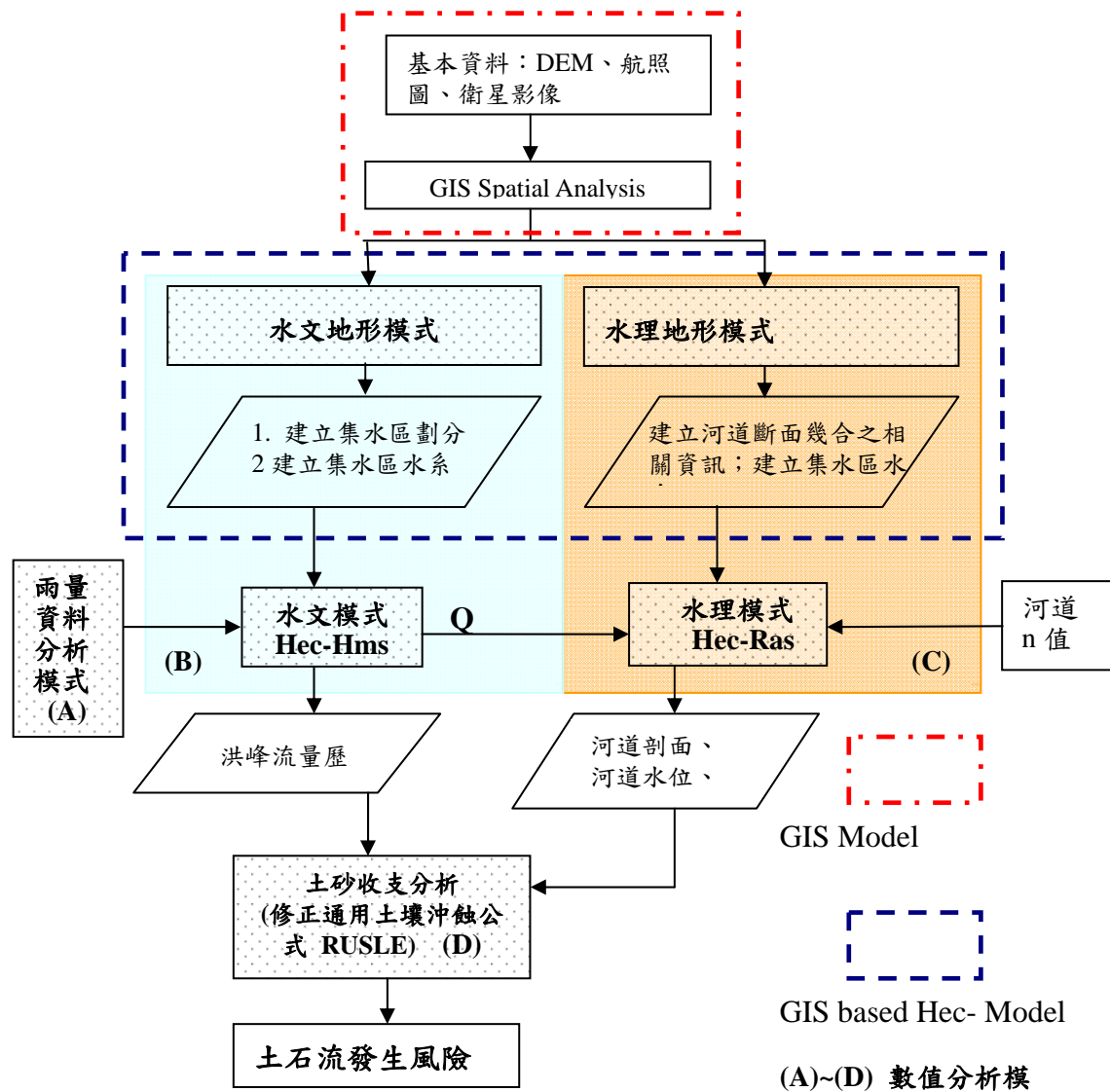


圖 2. 研究分析架構

- A. 以雨量資料分析模式進行流域暴雨量統計分析、頻率分析以及降雨型態設計等，作為水文及水理分析模式的輸入檔。
- B. 先以Hec-GeoHms水文地形模式，進行數值高程模型(DEM)資料分析並建立集水區分區和水系網絡。然後利用Hec-Hms水文分析模式配合雨量及流量資料進行水文分析模式之降雨逕流模擬。
- C. 利用Hec-GeoRas水理地形模式，進行DEM資料分析，建立河道幾何及斷面相關資訊，作為Hec-Ras水理分析模式的輸入檔，然後以Hec-Ras水理模式進行主河道水面線演算，計算流速、水位等水理數據。
- D. 土砂收支分析模式，用來推估集水區內土砂產生量，此量包括崩塌量及表土沖蝕量，崩塌量以面積法[6, 7]估計；而沖蝕量

以修正通用土壤流失公式 (RUSLE) 估算。配合水理模式的分析結果來推估土砂輸送量。最後根據河道輸砂能力與土砂產生量的恆定關係。

依據研究分析架構 (圖2) 的邏輯進行研究分析，以下各節詳述各部分的作法。

3.1 GIS 空間分析及場址調查

1. 空間資訊之處理分析

GIS空間分析之進行首先須要地文及水文資料整理與輸入，地文資料包括涵蓋整個研究區域的高程數值模型(DEM)資料、1/25000彩色地形圖、農林航測所2003年及2009年航照圖、衛星影像、土壤資料、土地利用狀況，場址調查的崩塌區域的分佈資料等。其中，衛星影像和航照圖是用來進行植生覆蓋區位分析

及崩塌區位的判釋和現場調查資料的比對；而DEM資料則是用來進行坡度、坡向分析，集水區劃分以及水系網絡的萃取，亦作為水文水理分析之用。

2. 崩塌區位的判釋

影響土石流發生的因子很多，最主要為需具備三大原因：(1)有豐富的土石材料如崩塌面積、崩塌面積占有效集水區面積之比例等；(2)充分的水量如集水區面積、有效集水區面積、溪流長度等；(3)陡峭坡度如形狀係數、溪床坡度等[8]。這些因子特別是具代表性且重要因子，若能以一個系統化的方法萃取出來，並配合有效率的分析邏輯，則有助於提升眾多土石流危險溪流的辨識分區效率及精確度，而以GIS為基礎的分析架構剛好能滿足此需求。以GIS進行崩塌地調查與判釋方法分兩部分進行：首先在室內以衛星影像及航照圖進行高空(圖3)及低空初步判釋(圖4)，同時以不同時期的航照圖進行比對(圖5)。另外，亦

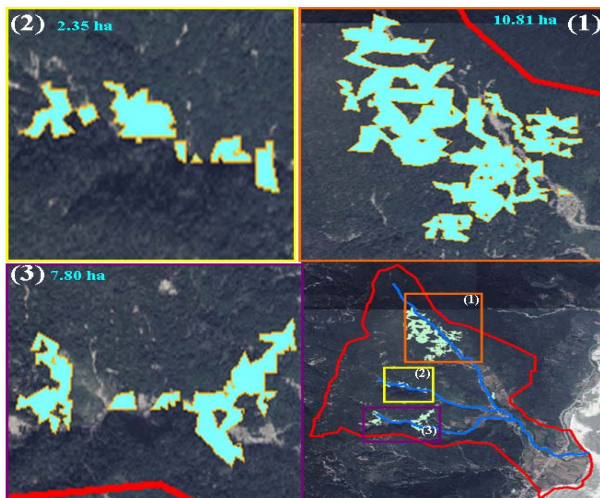


圖3. 衛星影像照圖判釋崩塌區



圖4. 低空照片圖比對與判釋



航照圖 2003 年 航照圖 2009 年

圖5. 航照圖比對初步判釋崩塌區位

可利用地形圖上，等高線由凸趨於平緩再轉凹的位置，初步判定可能發生崩塌的位置。最後，進行現地勘查確認之工作，以確認初步判釋之結果正確無誤。河道部分根據土石流潛勢溪流之劃分條件為：崩塌地坡度 >45 度，崖錐坡度約 35 度，流動區坡度 $30\sim 35$ 度，淤積區坡度 $6\sim 8$ 度 [9]。利用空間分析技術，將加塹溪，大不岸溪和新溪三條野溪的河道縱剖面予以數化後即可成為有效資訊如圖6所示，以此來判斷各段河道可能發生土石流潛勢。

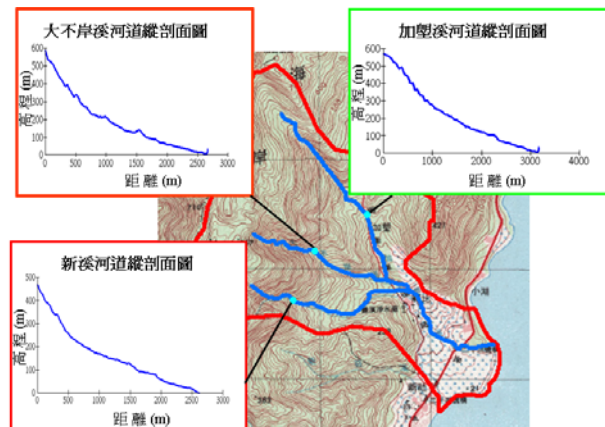


圖6. GIS分析河道坡度及縱剖面

3. 場址踏勘與野溪調查

場址踏勘主要目的是為將GIS判釋出來的崩塌區位進行現場比對及確認，並利用GPS將崩塌範圍標定下來(圖3)。經現場確認後，各集水區的崩塌面積如表1所示。

另外在崩塌場址進行採樣，以作為實驗室的物理性質分析。本研究在現場5個崩塌位置的樣本，經實驗分析結果孔隙率約在 0.521 至 0.679 之間。另外，現場沿野溪河床加塹溪(15個)，大不岸溪(14個)以及新溪(8個)共採集的37個樣本，帶回實驗室進行物理實驗和粒徑分析

後，結果顯示場址的土壤呈塊狀及粗顆粒狀，土質屬砂質粉土，粉土含量約 45%，砂含量 40%，且土壤滲透性極高；50% 過篩百分比粒徑 0.00029mm 至 0.20710 mm。

表 1. 崩塌區位判釋結果

集水區名稱	面積(ha)	崩塌面積(ha)	崩塌範圍平均坡度(°)	百分比(%)
(1)加盟溪	204	10.81*	61.37	5.29
(2)大不岸溪	51	2.35	63.92	4.61
(3)新溪	153	7.80	60.08	5.09

(註：* 對應於標示在圖 3 中(1)、(2)、(3) 的面積)

3.2 雨量資料分析

1. 流域暴雨量統計分析

暴雨量統計分析係根據豐濱站暴雨資料統計，從 1976 年到 1997 年共 22 年的時雨量記錄，分別統計該雨量站之一小時，二小時，一日暴雨，二日暴雨，三日暴雨及年平均雨量，並以擬合的方式求得降雨-延時-頻率曲線 (IDF curve)

$$I = \frac{a}{(t + b)^c} \quad (1)$$

式中，I 為降雨強度(mm/hr)，t 為延時(min.)；a, b, c 為待定係數，各係數以最小二乘法迴歸求得，其中一日暴雨的係數值分別為：a=2752.3, b=43.0, c=0.69514，此關係式在進行交替區塊法設計雨型時採用。

2. 降雨量資料之適合度檢定

本文中採用誤差指標 SE，當做是最佳統計分布對降雨序列於各所採用機率分布做檢定，誤差指標 SE 之定義為：

$$SE = \left[\frac{\sum (x_i - \hat{x}_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中 n 為觀測資料個數； x_i 為第 i 個觀測樣本資料； \hat{x}_i 是利用點繪公式計算第 i 個觀測樣本 x_i 累計機率，再由選用之理論統計分布，估計對應於該累積機率之水文量。表 2 為不同降雨延時雨量資料之適合度檢定分析結果。

3. 暴雨量頻率分析

雨量資料經整理及分析後，選取出各年之 24 小時及 48 小時延時最大值序列，利用經濟部水利署常用之 5 種頻率分析方法包括：二參數對數常態機率分布(LN2)、三參數對數常態機率分布(LN3)、皮爾遜 III 型機率分布

(PT3)、對數皮爾遜 III 型機率分布(LP3)以及極

表 2. 不同降雨延時雨量資料之適合度檢定分析結果

降雨延時	SE 值					極端值 I
	常態分佈	對數常態 II	對數常態 III	皮爾遜 III	對數皮爾遜 III	
1 小時	5.310	3.570	3.590	3.433	4.221	4.539
2 小時	12.03	6.318	6.531	6.33	6.340	9.744
1 日	14.12	34.7	219.75	14.03	13.35	35.66
2 日	15.16	42.86	301.51	15.45	17.68	44.97
3 日	27.73	36.18	22.73	22.76	44.21	39.83

端值 I 型機率分布(EV1)，5 種機率分布的誤差評估指標採用 SE 值最小者，做為是最佳統計分布，來推算本區域各重現期降雨量。從表 2 可發現 LP3 在各種延時情況，除了三日延時之外 SE 值普偏較小，尤其在土石流與崩塌風險評估上通常以一日延時為依據[8, 9]。因此，本文採用 LP3 為理論的分布來推求不同重現期的暴雨量。

4. 降雨型態設計及評估指標

降雨型態設計分別以同位序平均法、交替區塊法、級序平均法、無因次移動平均法、無因次平均法以及三角法等六種方法進行設計。以豐濱雨量站降雨資料所進行的六種設計雨型如圖 7，而其評估指標以下列方式來為之，

A. 降雨標準誤差 (E)

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (X_j - D_j)^2} \quad (3)$$

式中 X_j 為第 j 個觀測樣本資料，而 D_j 是利用上述六種方法所產生的第 j 個資料值。

B. 降雨尖峰時間誤差 (PTE)

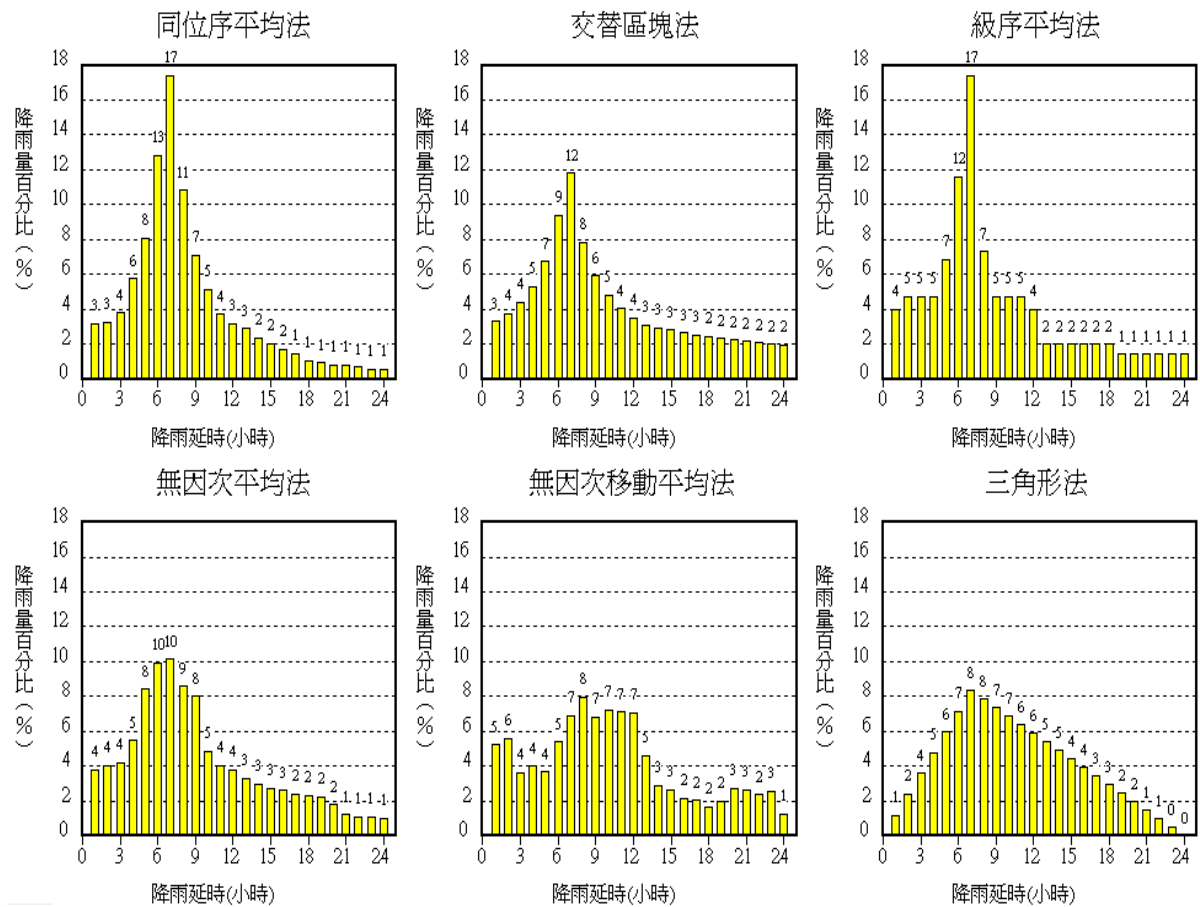


圖 7 豐濱雨量站降雨資料之六種雨型

表 3. 設計雨型評估結果

設計雨型評估			
雨型	降雨尖峰時間 誤差 PTE (%)	降雨尖峰 量 誤差 PE (%)	降雨標 準 誤差 E
同位序平 均法	36	22.9	4.323
交替區塊 法	36	13.2	2.550
級序平均 法	36	22.9	3.748
無因次平 均法	36	27.7	2.882
無因次移 動平均法	27	42.2	2.113
三角形法	36	42.2	2.476

$$PTE(\%) = \frac{1}{n}(PT_D - PT_A) \times 100 \quad (4)$$

式中 n 為觀測資料個數， PT_A 為觀測樣本資料尖峰雨量的時間，而 PT_D 是利用上述六種方法所產生之尖峰雨量的時間。

C. 降雨尖峰量誤差 (PE)

$$PE(\%) = \frac{X_{peak} - D_{peak}}{X_{peak}} \times 100 \quad (5)$$

式中 X_{peak} 為觀測樣本資料的尖峰雨量，而 D_{peak} 是利用上述六種方法所產生的尖峰雨量資料值。表 3 為六種設計雨型(圖 7)評估結果，由於平均估計誤差和尖峰雨量誤差皆是交替區塊法較好，而且在土石流與崩塌風險評估上以尖峰雨量誤差影響最大，故在本文中決定設計雨型採用交替區塊法。

3.3 水文模式分析

水文模式是美國陸軍工程兵團水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center, HEC)

以 HEC-1 軟體為基礎所開發視窗性水文逕流模式 HEC-HMS [10]。HEC-GeoHMS 主要是配合 GIS 將 DEM 直接預處理並建模成為 HEC-HMS 的輸入檔[11]。HEC-HMS 主要由三大模組構成，分別為流域模組、氣象模組和控制規格，其中流域模組及氣象模組須選定模式方法以及設定多項參數，模式演算所需的資料包括：值地形，地文資料，氣象資料，及河川觀測資料等。水文分析之目的是利用流域集水區雨量資料，推估河道控制點各重現期距洪峰流量[12]，以供主河道水理分析、評估通水斷面、構造物設計以及河道的輸砂量之估算之用。頻率分析所得之雨量經分配至設計兩型之後，即可獲致設計雨量，再配合降雨逕流模式 (HEC -HMS)即可計算得設計流量歷線，設計流量歷線之尖峰值即為設計流量。

3.4 水理模式分析

水理模式與水文模式相同，皆由美國陸軍工程兵團水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center, HEC)所發展出來，以 HEC-2軟體為基礎所開發視窗介面河川分析系統 (River Analysis System, HEC-RAS) [13, 14]，能夠計算於天然或人為之河川斷面與其支流的水面剖線，但只限於穩態 (steady)及緩變流 (gradually varied flow) 流況，且渠道之縱向曲率相當平緩；而水流流況可以為亞臨界流或是超臨界流況。該模式為目前被廣泛應用之迴水演算模式。而 HEC- GeoRAS 是 HEC-RAS的前處理程式，配合GIS 將DEM預先處理並建模成為HEC-RAS的輸入檔。然後以水理模式HEC-RAS進行主河道部分的水理分析[13, 14]，其模擬演算係利用能量方程式，利用流量歷線計算結果，以標準步驟推求各斷面之水位、流速等水理狀況，其計算結果用來進行土砂分析。

3.5 土砂收支分析

土砂之運動係以流域為單元，在流域內由上游往下游移動，無水流搬運之情況下，土砂會停留在原地，等待下一次洪水之搬運。土砂堆積量 S_V 根據下列公式來推求：

$$S_V = S_y - S_t \quad (6)$$

式中 S_y 為土砂生產量； S_t 為土砂輸送量。土砂生產量來源又包括崩塌和表面沖蝕；而土砂輸送

量與河道的流量和流量中的泥砂濃度有關，土砂生產量和土砂輸送量的推估說明如下。

1. 土砂生產量之推估

土砂生產量主要包括兩部分：崩塌造成的土砂量及表土沖蝕量產生的土砂量。

A. 崩塌生產量的推估

崩塌生產量的推估包括崩塌的位置判斷與體積估算，這其中受到地質條件、土壤條件、水文條件等因素的影響。推估崩塌地泥砂產出總量可以下式計算之[6]即：

$$V_i = A_i \times D_i \times n_i \quad (7)$$

式中 A_i 表崩塌面積； D_i 表崩塌厚度； n_i 為孔隙率。崩塌面積 A_i 的推估方式係根據3.1節中，崩塌區位判釋表1之結果，崩塌面積佔集水區面積百分比分別為 5.29%、4.6% 及 5.09%，平均約為5%，因此，為方便後續計算文中採用集水區面積乘以5%來估計崩塌土砂產生量。崩塌厚度 D_i ，除了可以通過現地調查方式決定外，亦可採用[6]的建議值估算之。本研究區域場址經判釋，崩塌範圍的平均坡度均大於60° (如表1所示)，若根據 Khazai and Sitar (2000) 的建議方式[6](表4)估計 D_i

表 4. 崩塌深度估計參考值 (Khazai and Sitar, 2000)

坡面坡度 (°)	崩塌代表深度 (m)
<30	2
30~40	1.5
40~60	1
>60	0.5

為0.5 m。另根據Lida and Okunishi, 1983 [7]的研究，當平均坡度超過45°時，崩塌土層厚度與平均坡度的關係曲線會逼近土層厚度0.5m的水平線。而孔隙率 n_i 係由現場5個崩塌位置的樣本，經實驗分析結果孔隙率約在0.520至0.679之間，因此採用平均值0.6作為崩塌土砂產生量之估計。

B. 表土沖蝕量的推估

表土沖蝕量的推估方式，乃利用修正通用土壤流失公式 (RUSLE) 來推估 [15, 16, 17,18]，即：

$$A = R_m \times K_m \times L \times S \times C \times P \quad (8)$$

式中, A 為土壤流失量(公噸/公頃-年); 體積以每立方公尺1.4公噸計之; R_m 為降雨沖蝕指數(百萬焦耳-公釐/公頃-小時-年); K_m 為土壤沖蝕指數(公噸-公頃-年/公頃-百萬焦耳-公釐); L 為坡長因子; S 為坡度因子; C 為覆蓋與管理因子; P 為水土保持處理因子。在(8)中各參數的決定係根據2000年吳嘉俊等[19]的建議方式。

2. 土砂輸送量之推估

Takahashi [20, 21]以極限平衡的觀念, 推導固定坡度狀況下, 水體所能挾帶的平衡土砂濃度, 當土砂濃度大於平衡濃度則淤積, 小於平衡濃度則沖刷為能合理的描述過程中土石之濃度變化, 謝正倫和蔡元芳1998年[22]歸納了蘆田和男、高橋保和水山高久[23, 24]之各種輸砂形態實驗結果, 迴歸出土石輸送在各種坡度下應有之平衡濃度公式 $C_{d\infty}$

$$C_{d\infty} = \exp(1.73 \cdot \ln \theta - 5.83) \quad (9)$$

式中 θ 為底床坡度, 此迴歸曲線與實驗點之相關係數高達97%如圖8所示, 圖中藍色數據點

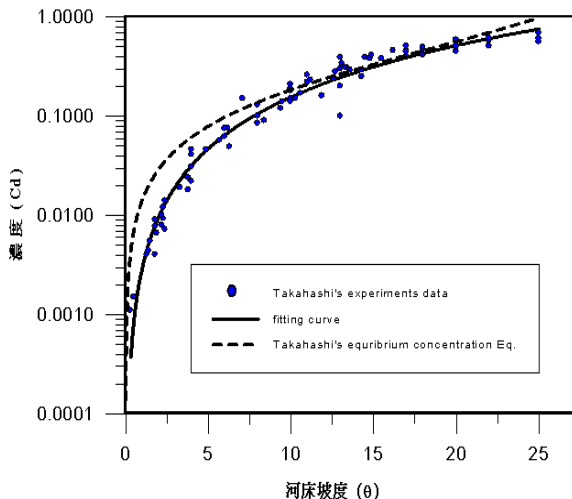


圖8. 河道濃度與坡度關係圖 (Takahashi, 1981)

是Takahashi (1981) 實驗資料[20, 21], 黑色實線為數據點擬合資料[22], 而黑色虛線是利用Takahashi 平衡濃度公式所估算出來的結果。土砂輸送量之推估係先利用HEC-HMS計算各頻率年於各河段的流量 Q , 其次利用(9)式求出平衡濃度值, 最後各頻率年的土砂輸送量 Q_s 為:

$$Q_s = Q \times C_{d\infty} \quad (10)$$

四、模擬分析結果與討論

4.1 GIS 判釋結果

在 3.1 節中 GIS 空間分析及場址調查, 除了確定崩塌地位置、範圍之外, 藉由場址踏勘與採樣也得到地文和地質之特性資料。圖 9

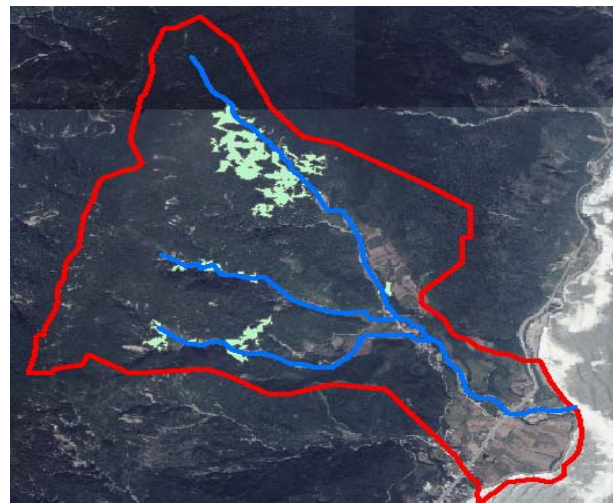


圖 9. 土石流潛勢溪流航照圖與 GIS 圖層套疊

為土石流潛勢溪流航照圖與 GIS 圖層套疊, 圖中顯示此集水區崩塌地大部分沿加塑溪, 大不岸溪以及新溪三條野溪的上游分布, 尤其以加塑溪上游的崩塌地範圍最大。圖 10 為土石流

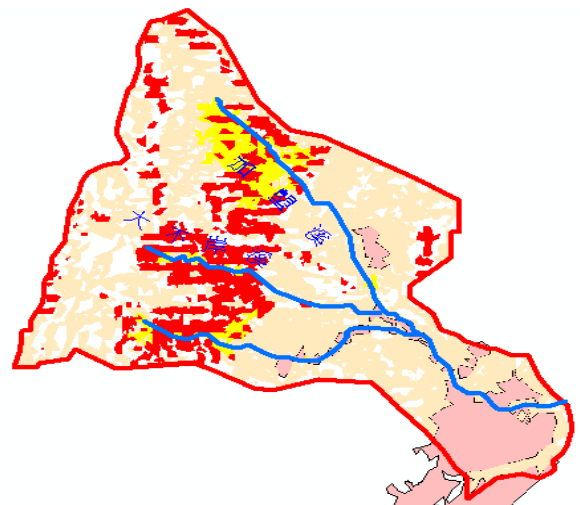


圖 10. 土石流潛勢溪流之劃分

潛勢溪流之劃分, 崖錐區主要分佈在加塑溪上游處; 少數在新溪中游和上游。而淤積區主要分布在整個集水區的主河道出口處。從圖 9 和

圖 10 兩張圖比對可發現，土石流潛勢區主要分布在加塹溪上游，少部分分佈在新溪上游。

4.2 GIS 數值地形與水系模型建構

集水區水系之實際狀況主要透過比對集水區之航照圖 (圖 11) 和 DEM 資料，進行子集水區劃分。然後再將 DEM 資料藉由 HEC-GeoHMS 模式來建構花蓮豐濱集水區之潛勢溪流之數值地形圖 (如圖 12 所示)，此與傳統 HEC-1 的模擬方式，集塊式集水區範圍是利用人工從地形圖數畫而得不同，圖 13 為集水區坡度利用 GIS 分類之結果。透過 HEC-GeoHMS 模式的集水區分析可由數值地形圖將集水區範圍劃定出來，並建模成為 HEC-HMS 模式的數值模型如圖 14 所示，其中包含 3 個子集水區、一個雨量觀測站 (豐濱站) 及七個匯流點。

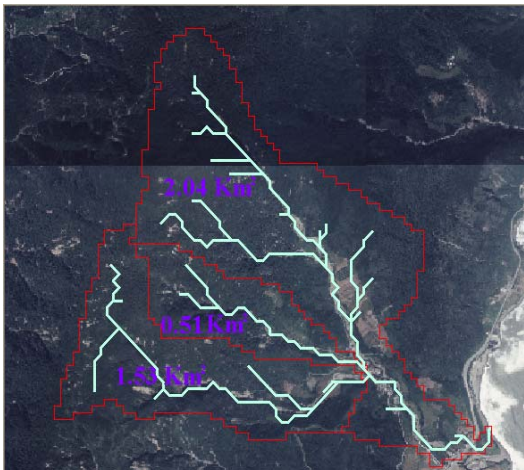


圖 11. 集水區之航照圖

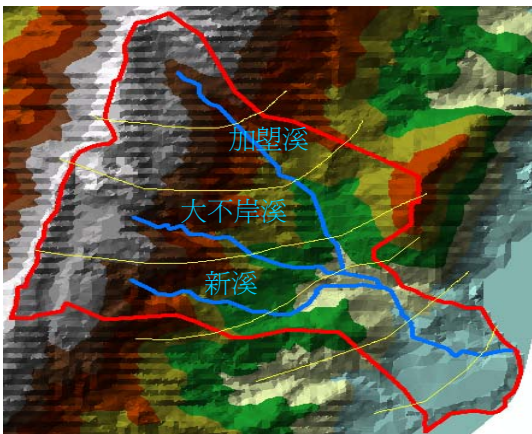


圖 12. 集水區之數值地形圖

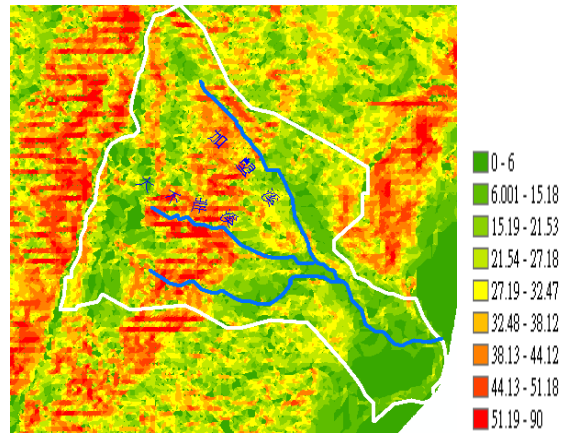


圖 13. 集水區坡度分類圖

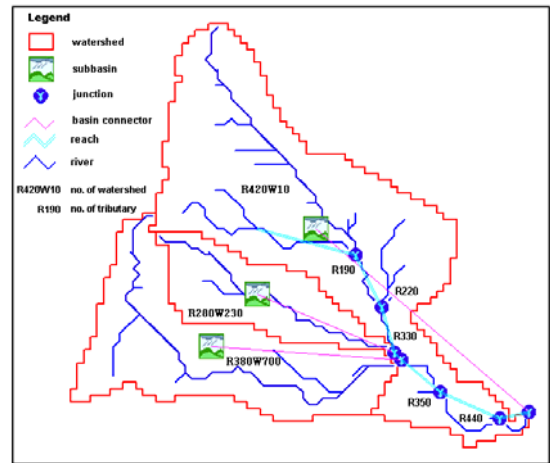


圖 14. HecHms 建模之集水區數值模型

4.3 水文模式分析結果

水文分析係先以 HEC-GeoHMS 模式將 DEM 資料直接預處理為 HEC-HMS 的輸入檔。圖 14 是由數值地形 DEM 建構而成的 HEC-HMS 模式的數值模型，從圖中可發現，整個集水區劃分成三個子集水區，其中，主要河川為加塹溪其集水面積為 2.04 Km² (R420W10)，次要河川包括：大不岸溪其集水區面積為 0.51 Km² (R280W230) 和新溪 1.53 Km² (R380W700)，集水區面積總共為 3.603 Km² 約 360.3 公頃。集水區中參數之設定採用 SCS 法，此為美國農業部自然資源保護局 (NRCS) 所發展出來，且已普遍被採用的一種方法，將降雨深度藉由逕流曲線編號 (runoff curve number, CN) 轉換成為單位降雨深度的逕流量；而 CN 值則是係根據土壤類型、土地利用及地表植被等情況由 GIS 分析求得。圖 15 Hec-Hms 之降雨降流模擬結果，圖 15 中上

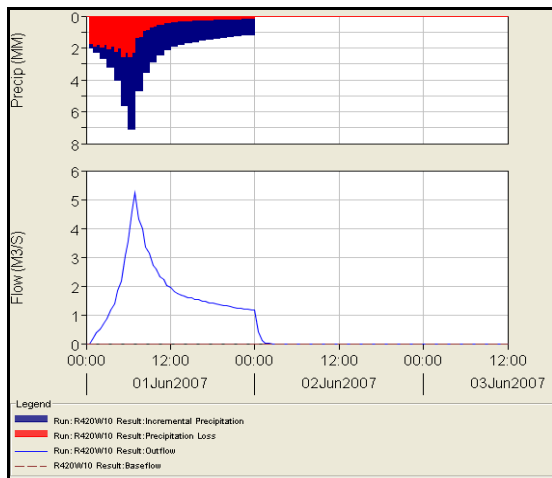


圖 15. HecHms 之降雨降流模擬結果

圖藍色柱狀圖為降雨組體圖，紅色柱狀圖為降雨損失；下圖為逕流歷線，可發現逕流歷線與降雨歷線型態幾乎一樣，而且逕流歷線的洪峰與降雨歷線尖峰的時間非常短，只有幾分鐘時間。

4.4 水理模式分析結果

水理分析係先以 HEC-GeoRAS 模式將 DEM 資料直接預處理為 HEC-RAS 的輸入檔。圖 16 為 HEC-GeoRAS 建模之渠道網絡及

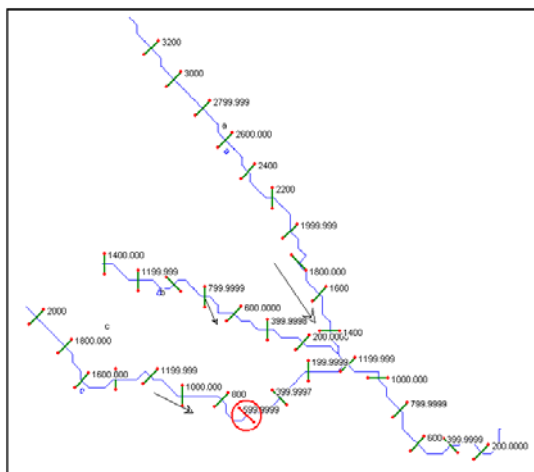


圖 16. HecGeoRAS 建模之渠道網絡及斷面位置

斷面位置，其中主河川為加墾溪，次要河川為大不岸溪其和新溪。圖 17 為 HEC-GeoRAS

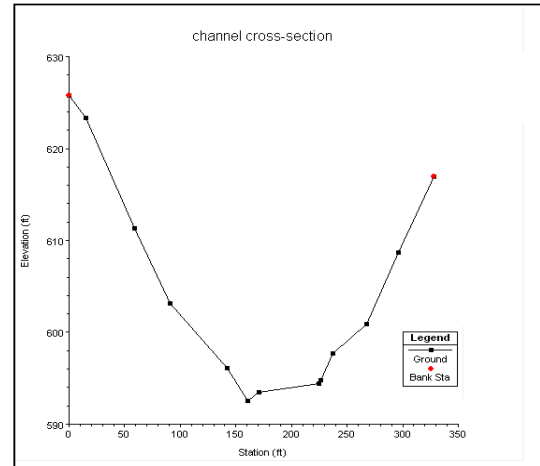


圖 17. HecGeoRAS 建模之渠道斷面圖

建模之渠道斷面圖，河川糙度係數 n ，係根據 3.1 節中現地觀測之 D_{50} 粒徑範圍約在 0.00029mm 至 0.20710 mm 之間，將此資料利用 [25] 建議的經驗公式，估計 n 值範圍約在 0.01002 到 0.029953 之間。另外，現場踏勘發現河道屬天然野溪河床裸露，大部分區域是風化後破碎粒石覆蓋，局部區域有矮短的雜草覆蓋，依據 [23] 中河道狀況之建議， n 值範圍為 0.020 至 0.030 之間。因此，本文中採用的 n 值為 0.015 到 0.03 之間，利用 HEC-RAS 模式進行模擬推求各斷面之水位、流速等水理狀況作為土砂分析及渠道斷面整治之依據，表 5 是各頻率年於各河段的流量體積。

4.5 土砂收支分析結果

集水區的土砂產生量包括兩部分，包括崩塌土方量和表土沖蝕量的總和。

1. 崩塌土砂量

崩塌土砂生產量根據 3.5 節所估計的參數利用 (7) 式計算，使用衛星影像初估並配合現地勘查確認裸露地面積，其計算結果為目前集水區

表 5. 各頻率年於各河段的流量體積 Q (m^3)

河段編號	1.11	2	5	10	25	50	100	200
R190	23580	59472	87012	99900	111060	116676	120780	123588
R220	84924	214164	313236	359460	399780	419904	434664	444780
R330	57672	145872	213372	245088	272340	286200	296208	303084
R350	60480	152676	223092	256140	284832	299088	309852	316764
R440	688500	350892	513288	589140	655128	688500	712728	728964

地表殘存土方量。表 6 為崩塌土砂產生量估計結果，其中在集水區 NO.1 (R420W10) 為 30600 立方公尺/年；集水區 NO.2 (R280W230) 為 7650 立方公尺/年；集水區 NO.2 (R380W700) 為 22950 立方公尺/年，因此崩塌土方總量為 61,200 立方公尺/年。

表 6. 崩塌土砂生產量

編號	崩塌面積 (m ²)	平均崩塌厚度 (m)	平均孔隙率	土砂生產量 (m ³)
R420W10 (集水區 NO.1)	102,000	0.5	0.6	30,600
R280W230 (集水區 NO.2)	25,500	0.5	0.6	7,650
R380W700 (集水區 NO.3)	76,500	0.5	0.6	22,950
合計				61,200

2. 表土沖蝕量

沖蝕量估計採用 RUSLE 公式為之，公式中之參數決定根據 3.5 節中之建議。表 7 為土沖蝕量，係利用 RUSLE 推估而得，而各子集

表 7. 表土沖蝕量 (利用 RUSLE 公式)

編號	Rm	Km	S	L	C	P	面積 (ha)	土壤流失量 (ton/ha-yr)	流失土方量 (m ³ /yr)
R420W10 (集水區 NO.1)			7.36	10.47			204	323.32	47,112
R280W230 (集水區 NO.2)	9000	0.0518	3.38	12.98	0.01	0.9	51	184.08	6,706
R380W700 (集水區 NO.3)			5.30	7.67			153	170.56	18,640
合計									72,458

水區參數採用值如表 7 所列，推估的沖蝕量於各子集水區分別是集水區 NO.1 (R420W10) 為 47112 立方公尺/年；集水區 NO.2 (R280W230) 為 6706 立方公尺/年；集水區 NO.2 (R380W700)

為 18640 立方公尺/年，故集水區的總沖蝕量為 72,458 立方公尺/年。因此集水區的土砂產生量總共為 133,658 立方公尺/年。

3. 河道土砂輸送量

河道輸送採用謝正倫和蔡元芳(1998)[22] 所建議的平衡濃度回歸式(9)，計算單位年平均輸送量。先由 GIS 分析 DEM 資料配合 HEC-GeoHMS 模式求得各河段的坡度，然後將此坡度代到(9)式，求得各河段的平衡濃度如表 8 所示。其次利用水理模式所求得的各洪水頻率年於各河段的流量體積如表 5 所示。結合表 5 及表 8 計算求得各洪水頻率年之河道輸

表 8. 利用平衡濃度求得的 C_d 值

河段編號	距離(m)	高程差(m)	坡降	坡度(°)	C _d
R190	1323	352	0.266	14.90	0.31
R220	385	62	0.161	9.15	0.14
R330	330	31	0.094	5.37	0.05
R350	343	49	0.143	8.13	0.11
R440	719	70	0.097	5.56	0.06

砂量 Q_s (表 9)。最後，以機率加權法求得年平均土砂生產及輸送量，表 10 為河道各河段和集水區的年平均土砂生產及輸送量，其中在集水區 NO.1 的河段(R190+R220+R330) 輸砂量為 37941 立方公尺/年；集水區 NO.2 的河段 (R350+R440) 輸砂量為 186046 立方公尺/年。

4. 土砂產生與輸送量綜合評估

土砂產生與輸送量綜合評估方面，從表 10 中顯示總土砂產生量為 133,658 立方公尺/年；而河道的總輸砂量為 223,987 立方公尺/年，此結果顯示河道的輸砂能力比土砂生產量來的高。圖 18 為土砂收支示意圖。從圖 18 及表 10 中亦可看出集水區之河道中各河段的

表 9 各頻率年的土砂輸送量 Q_s (m³)

河段編號	1.11	2	5	10	25	50	100	200
R190	1415	3568	5221	5994	6664	7001	7247	7415
R220	9342	23558	34456	39541	43976	46189	47813	48926
R330	2884	7294	10669	12254	13617	14310	14810	15154
R350	8467	21375	31233	35860	39876	41872	43379	44347
R440	213435	108777	159119	182633	203090	213435	220946	225979

特性，例如，在 No.1 集水區上游河段，也就是加塑溪上游河段由於土砂產生較多屬於於積段；而大不岸溪以及新溪權和段產生的土砂較少，均屬於沖蝕段。總體而言河道的輸砂能力比土砂生產量高，因此不會有土砂堆積的情況。

表 10. 年平均土砂生產及輸送量

河道/集水區 編號	土砂生產(m ³) S_y		土砂輸砂量 (m ³) S_t	河段 特性 描述
	崩塌土 砂量	表土沖 蝕量		
R190+ R220+ R330 (NO.1 集水區)	30,600	47,112	37,941	淤積 段
R350+ R440 (NO.2 集水區)	7,650	6,706	186,046	沖蝕 段
	22,950	18,640		
(NO.3 集水區)				
合計	61,200	72,458	223,987	
	133,658		223,987	

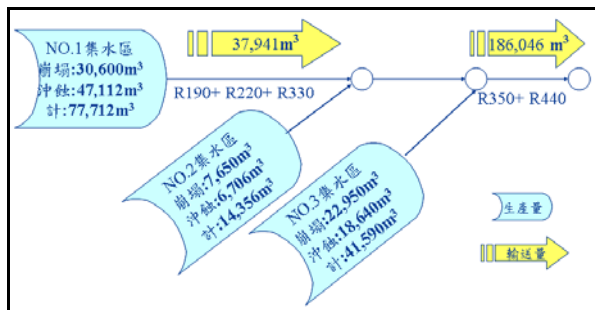


圖 18. 土砂收支示意圖

五、結論

本研究建立一套以地理資訊系統為基礎分析邏輯及架構，利用空間資訊技術和水文及水理模式進行系統化的水文分析、水理分析以及土砂分析，以劃定各危險溪流的集水面積、溪流上游之崩塌面積、淤積面積及範圍。從本文的模擬分析之結果與討論得到以下結論：

(1) 從實際研究區域的分析發現，研究區域集水區表土沖蝕量加崩塌土方量共計 133,658 立方公尺/年，而河道的年平均土砂輸送量共計 223,987 立方公尺/年。數據顯示河道的輸砂能力比土砂生產量來得高，因此河道應不會有土砂堆積之虞。

(2) 土石流潛勢區主要分佈在加塑溪、大不岸溪及新溪之上游，這些地方的河道，大部分屬於土石流潛勢溪流劃分之崖錐區(坡度約 35 度)，相較於其他區段其發生土石流的機率相對較小。

(3) 文中的整個系統架構的分析流程：從 DEM 數值地形、航照圖、衛星影像、土壤資料、土地利用狀況，舊有的崩塌區域的分佈等 GIS 空間資訊，以及水系模型建構，雨量資料分析、水文分析、水理分析以至於土砂分析等步驟，形成一套完整的分析架構和邏輯，以作為判定發生土石流的可能性之流程。日後若能將此分析架構標準化，則有助於提升眾多土石流危險溪流的辨識分區效率及精確度，在防災的應用與決策上有其價值性。

誌謝

誠摯的感謝國科會計畫 99-111-M-415-001 的經費補助。

參考文獻

- [1] Bruce, A. D. and Arlen D. F., "Review of GIS Applications in Hydrologic Modeling," Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 119, pp. 246-261, 1993.
- [2] Pistocchi, A. and Mazzoli P., "Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrological management," IEMSs 2002, pp.305 -310, 2002.
- [3] Lin, P. S., Hung, J.C., Lin, J.Y., and Yang, M.D., "Risk assessment of potential debris-flow using GIS", Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment., A.A. Balkema, Rotterdam., 2000.
- [4] Gupta, B.P., and Joshi, B.C., "Landslide hazard zoning using the GIS approach - a case study from Ramganga Catchment, Himalayas", Engineering Geology, Vol.28, pp.119- 131, 1990.
- [5] Chen, G.Y., "Integration of GIS, Remote Sensing and Hydrological Model for Runoff Simulation," AIT Thesis No. WM-95-1, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand, 1995.

- [6] Khazai, B. and Sitar, N. (2000), "Assessment of Seismic Slope Stability Using GIS Modeling", *Geographic Information Sciences*, 6(2), 121-128.
- [7] Lida T. and Okunishi K., "Development of Hillslopes due to Landslides, *Geomorphology*, 46, 67-77, 1983.
- [8] 詹錢登，以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定，行政院農委會水土保持局委託計畫成果報告，2003。
- [9] Jan, C.D., Lee M.H., and Huang T.H., "Effect of Rainfall on Debris Flows in Taiwan", *International Conference on slope Engineering*, Hong Kong, Vol.2 pp.741-751., 2003.
- [10] Scharffenberg, W.A. and Fleming M. J., "Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual," US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2006.
- [11] Doan, J.H. and Thamos, E., "HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension," US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2003.
- [12] Chen, G.Y., Chen P.Y., and Cheng-MauWu, "Computational Discretization and Physical Parameter Effect on a GIS based Hydrological Simulation Model," *The 2nd World Congress on Computer Science and Information Engineering (CSIE 2011)*, June 2011, Changchun, China
- [13] Ackerman, C. T., "HECGeoRAS- An Extension for support of HEC-RAS Using GIS," US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2005.
- [14] Brunner, G. W., "HEC-RAS River Analysis System, User's Manual," US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2006.
- [15] 林俐玲，通用土壤流失公式(USLE)之應用與誤用，*水保技術*, 5(2):119-121 (2010).
- [16] 林俐玲、陳品岡，修正版通用土壤流失公式(RUSLE)之簡介，*水保技術*, 5(4):251-257 (2010).
- [17] Wischmeier, W.H., Smith D.D., and Uhland, R.E., "Evaluation of factors in the soil loss equation", *Agricultural Engineering*, 39:458-462, 474, 1985.
- [18] Renard, K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., and Yoder D. C., "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook No. 703*, pp.404, 1997.
- [19] 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲，*土壤流失量估算手冊*，行政院農委會水土保持局，pp185-192，1996.
- [20] Takahashi, T., "Debris flow," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 13, pp. 57-77, 1981.
- [21] Takahashi, T., "Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster," *Journal of Natural Disaster Science*, vol. 3, Volume 3, Number 1, pp. 57-89, 1981.
- [22] 謝正倫、蔡元芳，*土石流扇狀地之研究*，國立成功大學水利及海洋工程研究所，1998.
- [23] 蘆田和男、高橋保，*土石流の調節制御に関する研究：立體格子型砂防堰堤の水利機能*，京都大學防災研究所年報，第23號B-2，頁433-441，1980.
- [24] 水山高久，*土石流に関する実験的研究*，*地形*，第9卷第4期，頁269-277，1988.
- [25] 經濟部水利署水利規劃研究所，*河川治理及環境營造規劃參考手冊*，p. 47-49，2006。

