

陸、堰塞湖演變趨勢評估

6-1 堰塞湖天然壩壩面邊坡穩定性分析

本節針對 2006 年堰塞湖形成初期、2009 年未進行上邊坡修坡前(圖 6-1.1 中綠線)以及今年度(99 年度)進行上邊坡修整後之壩面邊坡穩定性進行分析(圖 6-1.1 中紅線),另針對歷年縱斷面之變化進行壩體穩定性分析,包括 95 年度未挖降前、98 年度整坡工程完工後及 99 年河道整理工程完工後之狀況(圖 6-1.2)。

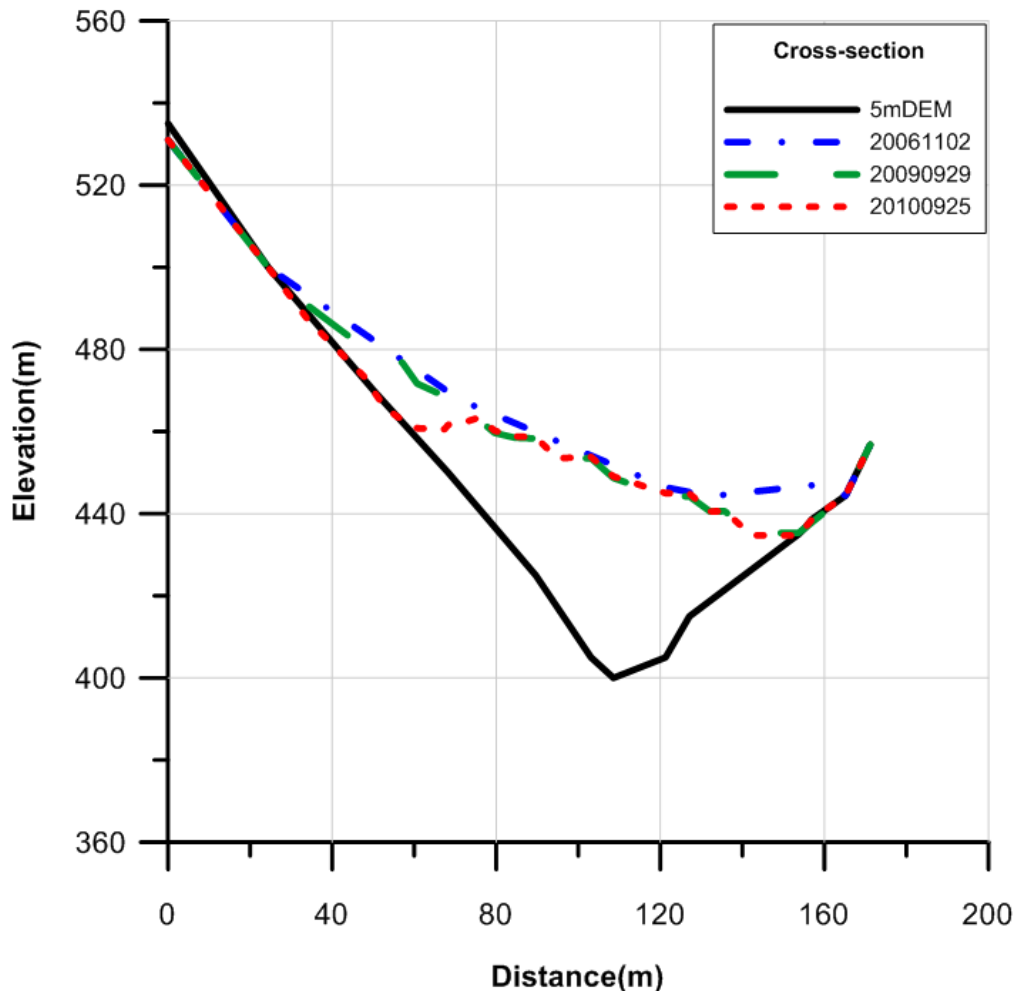


圖 6-1.1 龍泉溪堰塞湖天然壩壩面穩定性分析之橫斷面

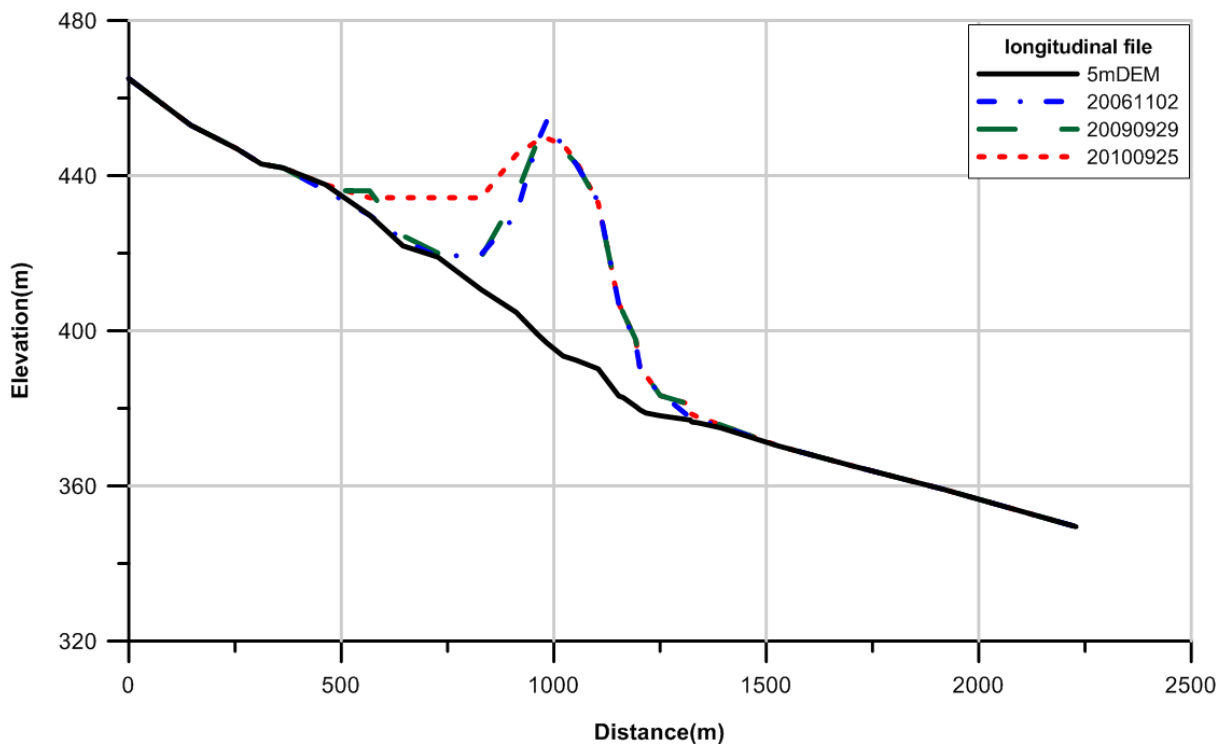


圖 6-1.2 龍泉溪堰塞湖天然壩壩面穩定性分析之縱斷面

龍泉溪堰塞湖天然壩邊坡穩定分析採用有限元素軟體 PLAXIS 進行分析；以 PLAXIS 有限元素軟體進行邊坡穩定性分析時，並不需自行假定破壞面，此與傳統切片法之邊坡穩定性分析不同。PLAXIS 有限元素軟體以模型內各元素之內摩擦強度 $\tan\phi$ 及凝聚力 C 進行折減，直至邊破發生破壞。破壞時之安全係數 ΣMsf 定義為

$$\Sigma Msf = \frac{\tan\phi_{input}}{\tan\phi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}} \dots\dots\dots (1)$$

其中 $\tan\phi_{input}$ 及 C_{input} 為模型中初始給定材料剪力強度參數， $\tan\phi_{reduced}$ 及 $C_{reduced}$ 為模型以強度折減計算邊坡穩定性時之材料強度參數。以有限元素數值模型分析邊坡穩定性時，安全係數 ΣMsf 由 1.0 開始計算，此時剪力強度參數尚未折減，給定之初始剪力強度參數與數值模型穩定性分析產生之剪力強度參數相同。當壩面發生邊坡破壞時，PLAXIS 將以不穩定元素（數

值無法收斂之元素) 的折減剪力強度參數計算安全係數，此時可將各不穩定元素所在位置視為邊坡破壞面。

數值模型中天然壩體之材料參數則以壩體縱斷面形成穩定為基礎，將天然壩堆積材料之有效內摩擦角 ϕ' 、不排水剪力強度 C_u 、濕土單位重 γ_m 及飽和單位重 γ_{sat} 列於表 6-1.1。由於缺乏現地實驗資料，平均有效粒徑 D_{50} 、水平滲透係數 k_x 、垂直滲透係數 k_y 、彈性係數 E 及柏松比 ν 等參數僅能以表 6-1.1 之現有資料推估。

經由現地勘查，壩體外視現況良好，從今年度 6 月底整坡完成至今無破壞跡象。若考慮降雨時之壩體邊坡臨界狀況，本分析採用不排水之剪力強度進行邊坡穩定性分析。依表 6-1.1 中建議參數資料，壩體材料凝聚性較高，因此數值模型中給定之水平及垂直滲透係數為 $k_x=k_y=10^{-8}$ m/s，單軸壓縮係數 $E_{oed}=3000$ kPa，柏松比 $\nu=0.3$ 。

表 6-1.1 龍泉堰塞湖邊坡穩定分析參數設定表

Condition	γ_m (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)	C_u (KPa)	ϕ' (°)
Undrained	16	20	30	20

圖 6-1.3 為龍泉溪堰塞湖天然壩 96 年度尚未實施溢洪道開挖之橫斷面數值模型，圖 6-1.4 為 98 年度完成溢洪道開挖及邊坡修整之橫斷面數值模型，圖 6-1.5 為今年度進行上邊坡修整後之橫斷面數值模型，而縱斷面部分則分別以圖 6-1.6~圖 6-1.8 個別表示 96 年度、98 年度及今年度之縱斷面數值模型。數值模型之原始河床及兩側山壁以藍色元素模擬，堰塞湖天然壩則以橘色元素模擬。由於河床材料堅硬且透水性差，壩體滑動破壞時，破壞面應無法切穿原始河床，因此原始河床以高勁度、高強度之線彈性無孔隙材料模擬。天然壩堆積材料則以符合莫爾-庫倫破壞準則之非線性材料模擬。龍泉溪堰塞湖天然壩已進行過數次挖降工程，因此橫斷面之數值模型中壩

後水位面以挖降後之最低壩體高度為最高水位面，而今年度修整上邊坡之工程於數值模型中則以移除上邊坡壩體元素進行模擬。縱斷面之數值模型中壩體滲流線則以地電阻之地下水位量測成果為最高水位面，考量今年度河道整理工程中上邊坡堆置土體處理後之壩體元素進行模擬。

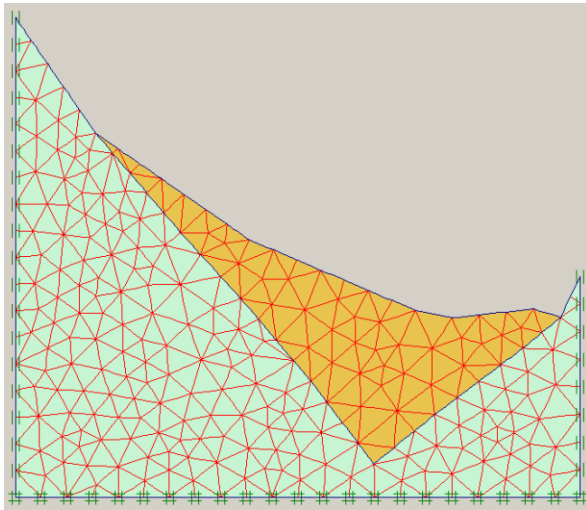


圖 6-1.3 96 年度之橫斷面數值模型

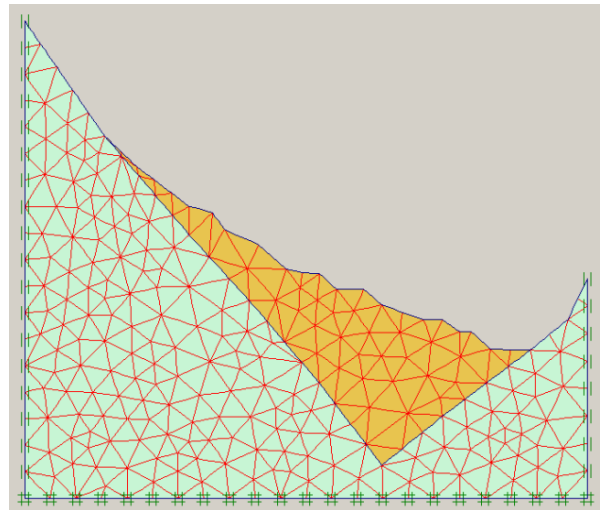


圖 6-1.4 98 年度之橫斷面數值模型

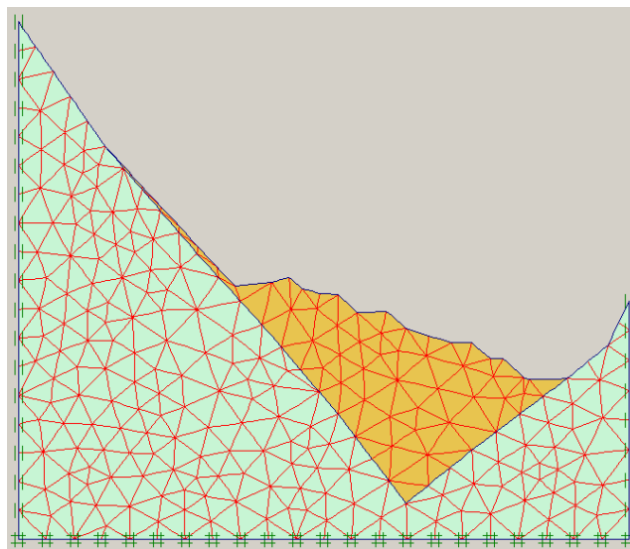


圖 6-1.5 今年度之橫斷面數值模型

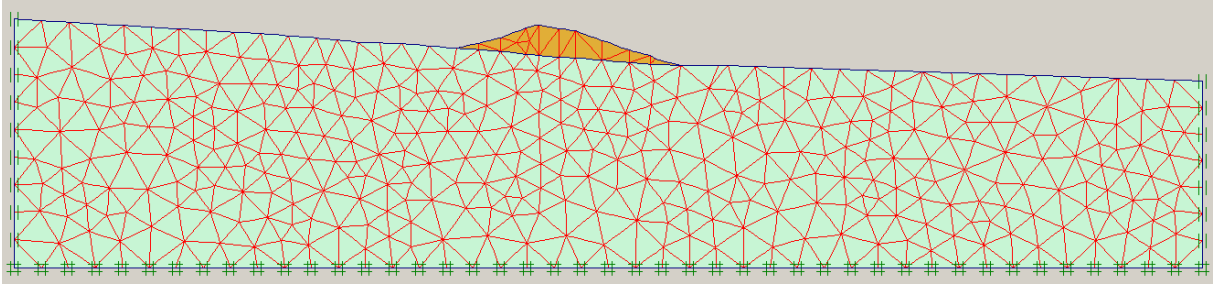


圖 6-1.6 96 年度之縱斷面數值模型

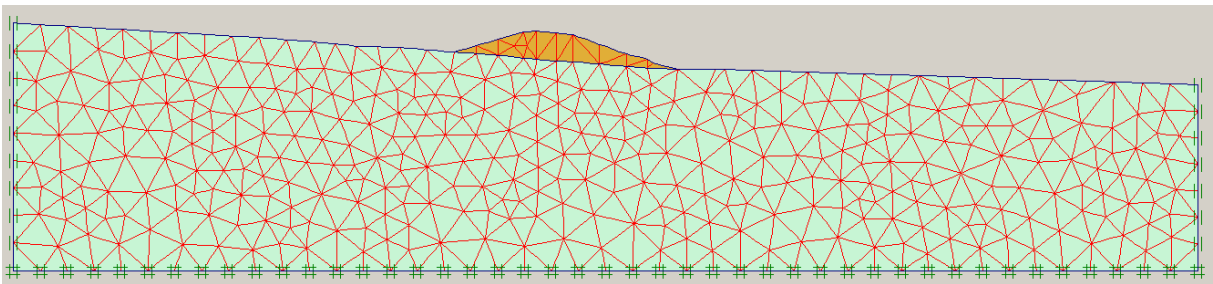


圖 6-1.7 98 年度之縱斷面數值模型

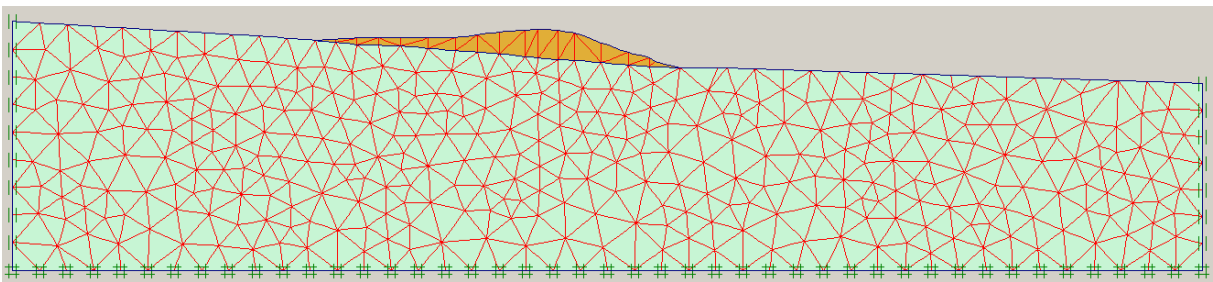


圖 6-1.8 今年度之縱斷面數值模型

由圖 6-1.9~圖 6-1.11 之橫斷面分析結果顯示，溢流水道未進行開挖時(96 年度橫斷面)，天然壩邊坡穩定安全係數為 1.1 [圖 6-1.9]，而進行溢洪道開挖後(98 年度橫斷面)之天然壩邊坡穩定安全係數為 1.0 [圖 6-1.10]，將上邊坡土體移除後(今年度橫斷面)之天然壩邊坡穩定安全係數為 1.1 [圖 6-1.11]。

由分析成果可知，壩體未進行進行開挖時，壩體呈現穩定狀態，潛在滑動面並不明顯[圖 6-1.9]，但進行溢洪道挖降後將坡趾移除，導致整體安全係數略為降低，潛在滑動面將沿上邊坡崩塌土體與岩盤交界面至溢洪道開挖之坡趾[圖 6-1.10]，而 99 年度所實施崩積土移除工程後，因上邊坡土體

已移除，導致上邊坡荷重降低，故整體安全係數升高，提升天然壩橫斷面之邊坡穩定性，致使潛在滑動面生成之可能性降低[圖 6-1.11]。

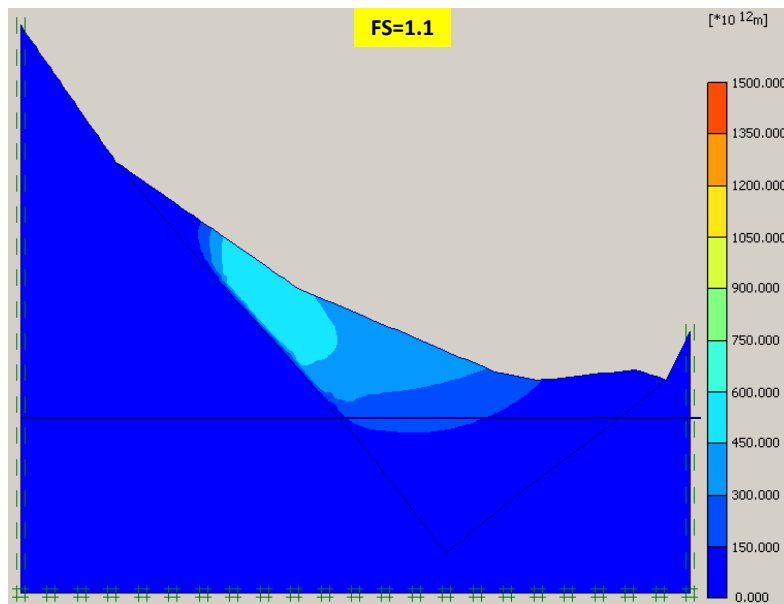


圖 6-1.9 96 年度橫斷面穩定性分析結果

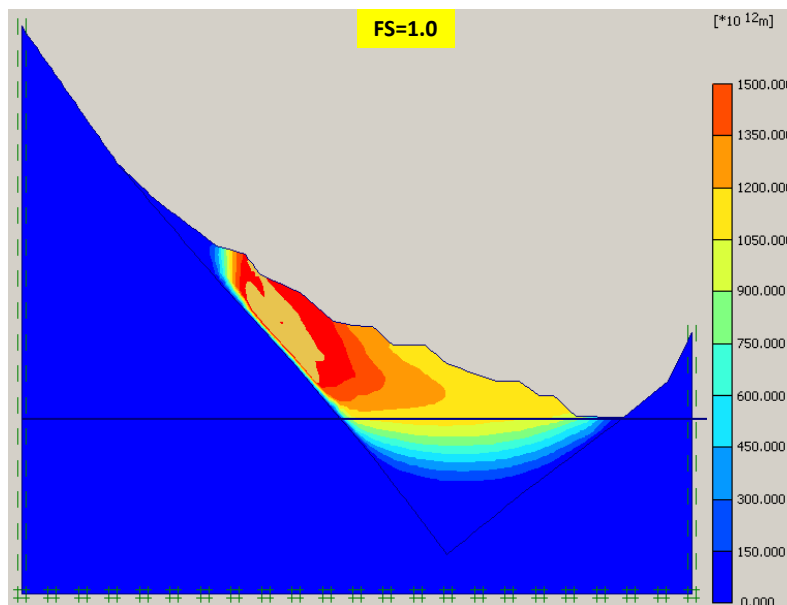


圖 6-1.10 98 年度橫斷面壩面穩定性分析結果

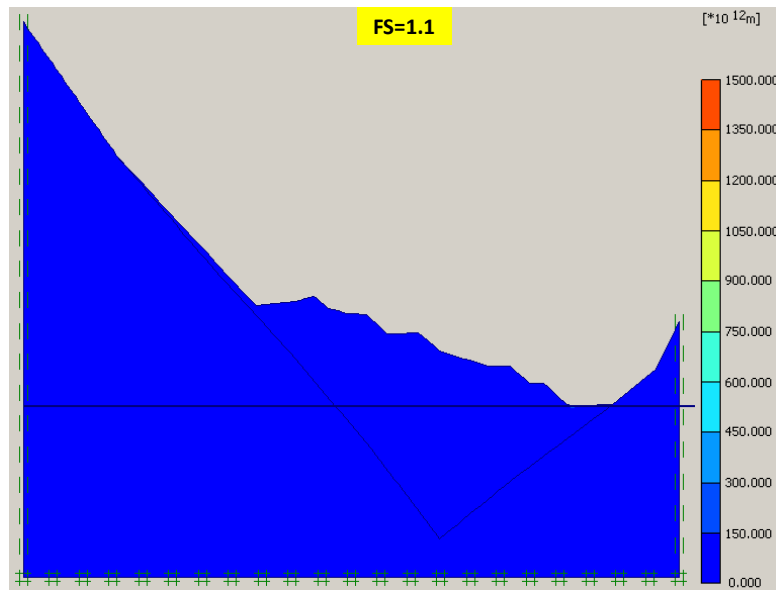


圖 6-1.11 今年度橫斷面壩面穩定性分析結果

另由圖 6-1.12~圖 6-1.14 之縱斷面分析結果顯示，可以發現未進行開挖時(96 年度縱斷面)，天然壩邊坡穩定安全係數為 1.00 [圖 6-1.12]，而進行崩塌土體邊坡修整後(98 年度縱斷面)，因壩體高度略為降低，故天然壩邊坡穩定安全係數提高至 1.01 [圖 6-1.13]，河道整理工程完工後(今年度縱斷面)之天然壩邊坡穩定安全係數為 1.0 [圖 6-1.14]。

由分析成果可知，壩體邊坡未進行修整前，潛在滑動面沿壩頂周圍至壩體下游坡趾 [圖 6-1.12]，而邊坡修整後因壩體高度略為降低，故壩體整體荷重降低，荷重降低將造成壩體抗滑力下降，故整體安全係數略為提高[圖 6-1.13]，而河道整理工程完工後，整體安全係數略微降低，但潛在滑動面較前兩者不明顯，天然壩壩體破壞之可能性降低[圖 6-1.14]。

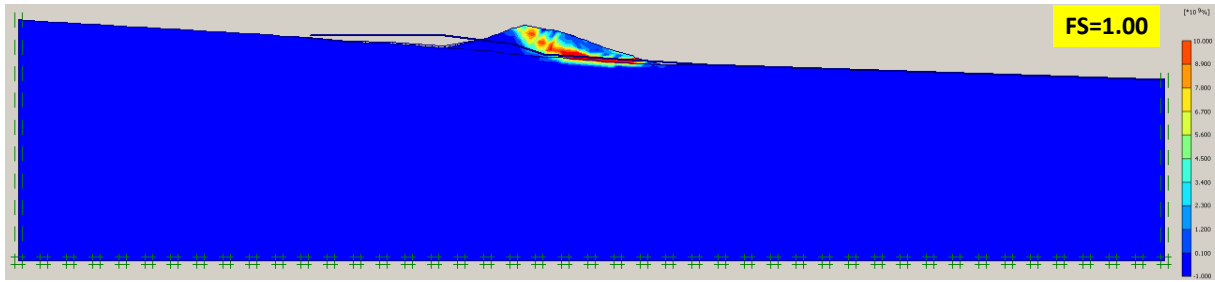


圖 6-1.12 96 年度縱斷面壩面穩定性分析結果

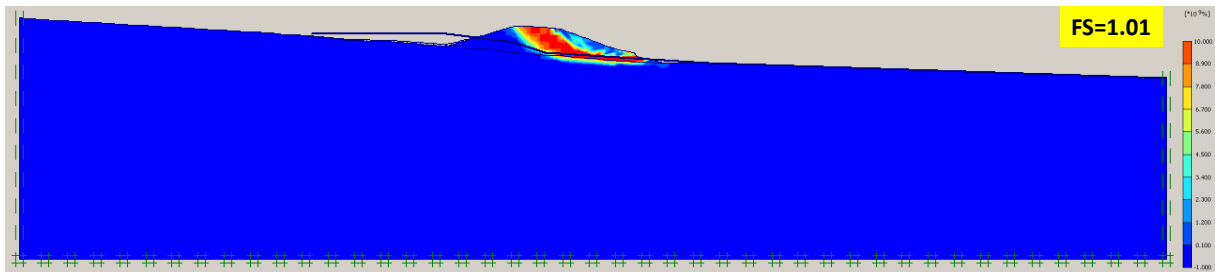


圖 6-1.13 97 年度縱斷面壩面穩定性分析結果

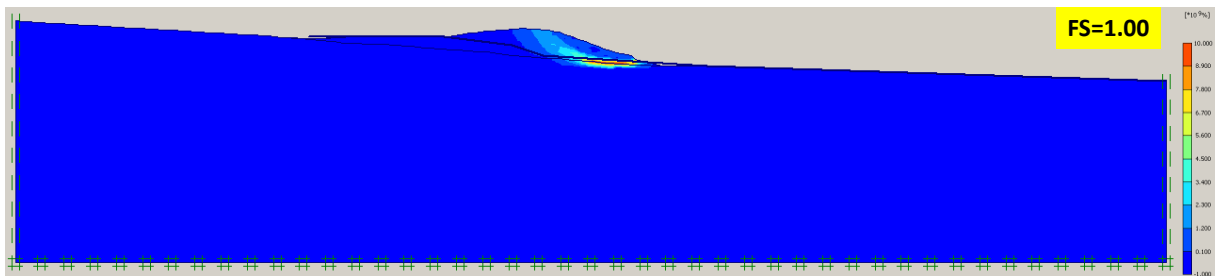


圖 6-1.14 今年度縱斷面壩面穩定性分析結果

目前上述分析之橫、縱斷面成果，為使用汛期時極端狀況下之地下水位進行分析，而河道整理工程完工後之縱斷面(99 年度)，其潛在滑動面皆不明顯，整體壩體不致形成驟然破壞，因分析條件均採暴雨時之極端條件，若枯水期水位降低之條件下，整體壩體之安全係數將會提升，更不易形成驟然破壞。

6-2 堰塞湖土砂整體運移趨勢評估

本節針對堰塞湖土砂運移趨勢進行分析，包含堰塞湖上游來砂量分析以及現有堆積土砂量運移分析，其中堰塞湖來砂量分析係針對庫區上游進行集水區土砂生產量及輸送量評估，建立年平均土砂生產量以及本年度重大事件之評估；而現有堆積土砂量分析則是針對庫區填滿後，主河道土砂運移趨勢進行評估，已探討現有堆積土砂量於日後之運動情形。

6-2.1 堰塞湖淤積土砂量評估

本計畫利用自行開發之集水區土砂管理模式進行龍泉堰塞湖上游集水區土砂生產趨勢分析，本年度延續先前成果，除檢核前期成果外，亦針對本年度較大事件進行分析，本年度所選用事件為凡那比颱風，以下為模式之簡介與分析成果之說明。

(1) 模式簡介

集水區內的土砂運動，為一連續且守恆之過程。由土砂的生產開始，經暴雨逕流的搬運，逐漸往下游輸送。而河道因上游來砂量與下游輸出量的差距，而衍生河道上的堆積與侵蝕現象。此觀念為土砂量守恆之分析，同時也說明了集水區內土砂量的變動情形，故定名為集水區土砂收支分析。

本團隊在 2002 年時，與經濟部水利署共同開發集水區土砂管理模式，結合國內外之研究成果，將集水區內之土砂運動定量模式化。模式分為數個重要的模組，包括了：1. 子集水區匯流系統模組；2. 降雨逕流模組；3. 土砂生產模組；4. 土砂輸送模組；5. 土砂收支 (堆積或侵蝕) 模組，將不同的物理運動機制，在同一集水區系統內進行演算。而此模式歷經多年的應用與修正，已成功應用於濁水溪、大安溪、大漢溪、曾文溪與高屏溪等主

要流域，以及其他工程規劃治理中也多次應用於山區集水區內，如龍泉溪、壽豐溪、烏石坑溪等，各機制所採用理論，簡列如 表 6-2.1。

表 6-2.1 土砂管理模式採用理論

模擬現象	模擬項目	理論方法
降雨逕流	有效降雨量	SCS 理論
	坡面漫地流	運動波理論
	河道水流	運動波理論
土砂生產	地表沖蝕	MUSLE
	崩塌	打荻式或影像判釋
土砂輸送	河道輸砂	輸砂公式
	土石流	平衡濃度公式

● 子集水區匯流系統模組

土砂管理模式計算之概念是以空間分散、參數集塊 (Spatially Varied, Lumped Parameter) 的觀念，將一集水區根據水系匯流關係，細分成許多具地文水文均一性的子集水區 (圖 6-2-1)，各個子集水區內因具有相同的特性，故可給定其地文及水文參數，模擬各個子集水區內降雨逕流、土砂生產、土砂輸送，以及土砂收支 (堆積或侵蝕) 的過程，最終，各個子集水區根據其匯流系統，計算整體集水區內，土砂的運動過程，串聯成一整體土砂運動成果。

在土砂管理模式中，單一子集水區是計算的基本單元，其主要輸入為降雨以及來自上游的水砂，如 圖 6-2-2 所示。將原有子集水區複雜之地形，簡化為兩平面斜坡及中央河道之組合。降雨落於坡面後部分雨水滲入地表下，超滲降雨則轉化為地表逕流並引起表土沖蝕向河道匯集，若降雨持續使得累積降雨量大於崩塌發生之臨界雨量，則坡面發生崩塌地破壞，此土方量亦落入河道形成土砂來源。所有坡面之逕流與土砂材料匯集於河道後，連同來自上游子集水區的逕流與土砂往下游輸送至子集水區出口處。這些程序構成子集水區土砂運動之機

制。綜合前述，一個子集水區的泥砂產出量可由降雨逕流演算（降雨逕流模組）、土砂生產量演算（土砂生產模組）、輸砂演算（土砂輸送模組），以及河道沖淤演算（土砂收支模組）四種機制共同完成，將其以概念圖表示如 圖 6-2.3 所示。各項模組之詳細分析方法，說明如下：

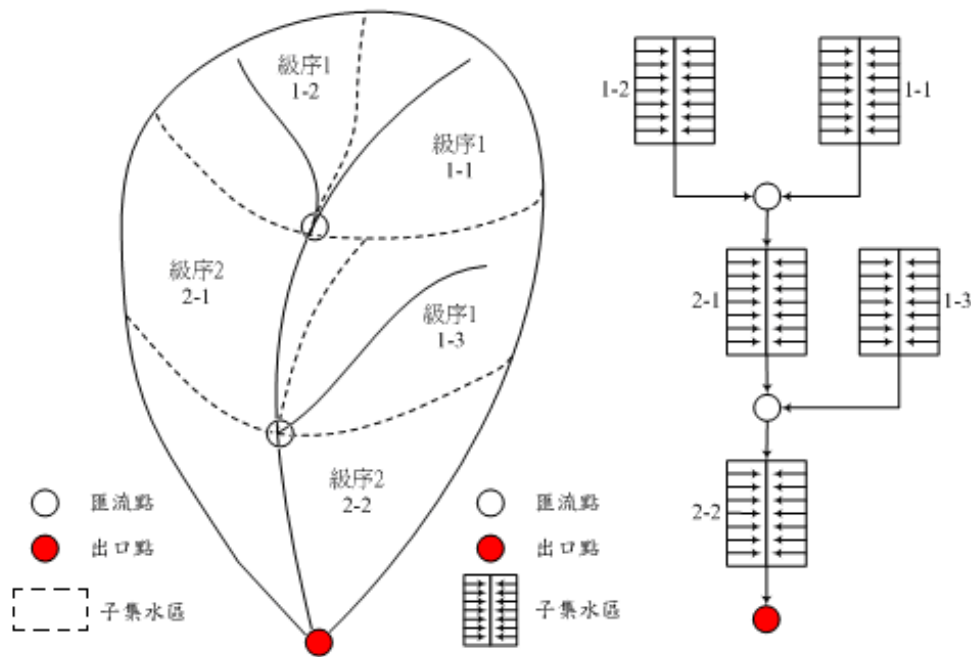


圖 6-2.1 子集水區及河系串接示意圖

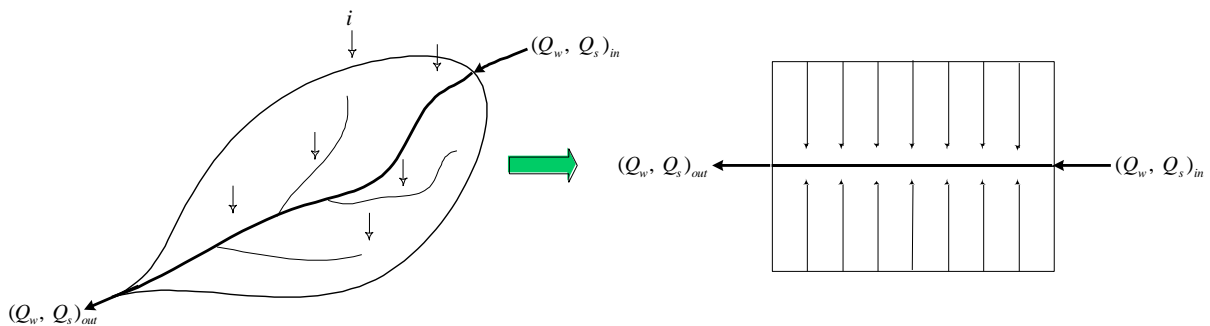


圖 6-2.2 單一子集水區概念化示意圖

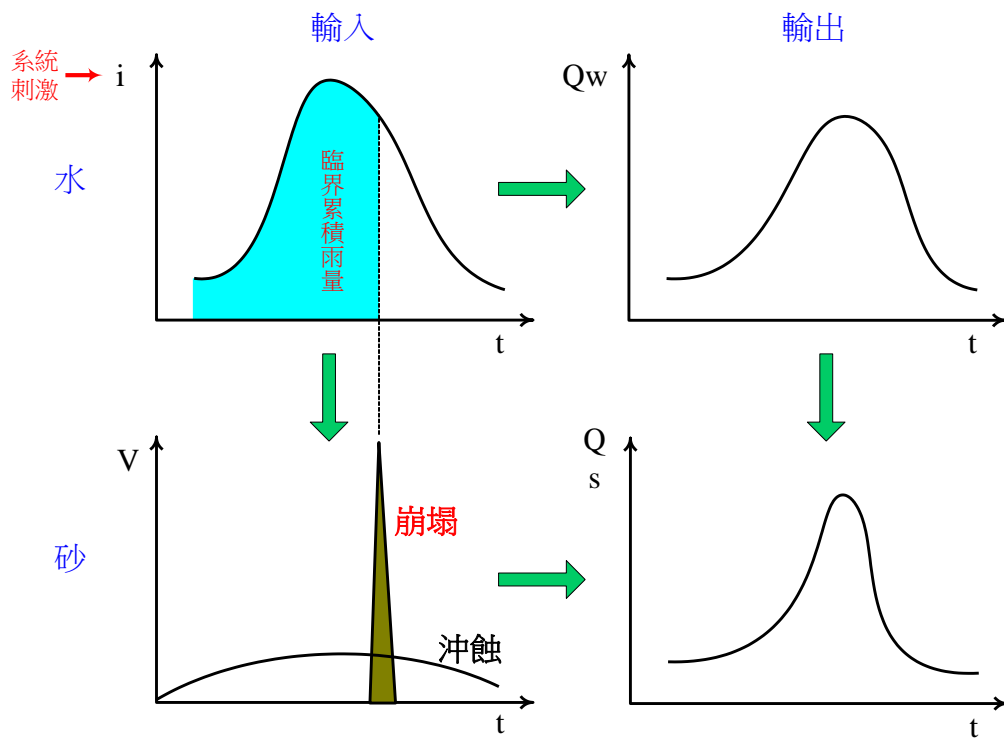


圖 6-2.3 集水區產砂概念圖

● 降雨逕流模組

由於 SCS 曲線值模式適合結合衛星影像資料，以及地理資訊系統方法，來求取模式中所需之集水區地文參數。SCS 模式在國際上被廣泛接受為有效降雨量的推估方法，在國內也有不錯的應用成果。因此，本模式以 SCS 曲線值法推求有效降雨量。SCS 曲線值模式係美國水土保持署所創 (Soil Conservation Service Curve Number model，一般簡稱為 SCS Model)，模式之使用只需要決定曲線值 (Curve Number，簡稱 CN) 一個參數即可。CN 值隨土壤種類、土地利用及臨前土壤水分條件而改變，其計算式如下：

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, \quad P > 0.2S$$

其中， P_e 為累積超滲降雨； P 為累積總雨量； S 為最大滯留量潛勢，其與集水區特性間之關係是透過 CN 值決定，可以表示如下式：

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

上述計算式，透過 CN 值的決定，計算出有效的累積超滲降雨量，進而計算有效之降雨產生之逕流歷線。

超滲降雨如何轉換成谷口輸出之直接逕流歷線，一般採用下列兩種方法，一為經驗模式，如單位歷線模式 (unit hydrograph model)；另一為概念水力模式，如運動波模式 (kinematic-wave model)。單位歷線模式之應用，需要大量的實測資料做參數檢定、驗證。由於山區各子集水區少有實測資料可供使用，因此並不適合採用單位歷線模式作為逕流歷線的推估方法。因此，本計畫採用運動波模式為直接逕流歷線之推估方法，其計算方式具有物理模型為基礎。其所需的參數，可藉由地理資訊系統加以估算，同時推估坡面上的漫地流以及集水區河道逕流。

如圖 6-2-4 所示，運動波模式假設集水區為一非常寬廣之渠道，其側入流量等於超滲降雨量，由於漫地流水深較淺，坡面之底床坡度 S_0 與能量坡度 S_f 相近，其能量坡度可由底床坡度近似，則漫地流流量可以表示如下：

$$Q = \frac{1}{N} AR^{2/3} S_f^{1/2} \approx \frac{1}{N} AR^{2/3} S_0^{1/2} = \alpha A^m$$

其中， Q 為流量； R 為水力半徑； A 為斷面積； N 為漫地流阻力因子，根據地表覆蓋情形所決定； α 與 m 為與地文因子相關之參數，由於集水區視為寬廣渠道，因此， α 與 m 可以表示如下：

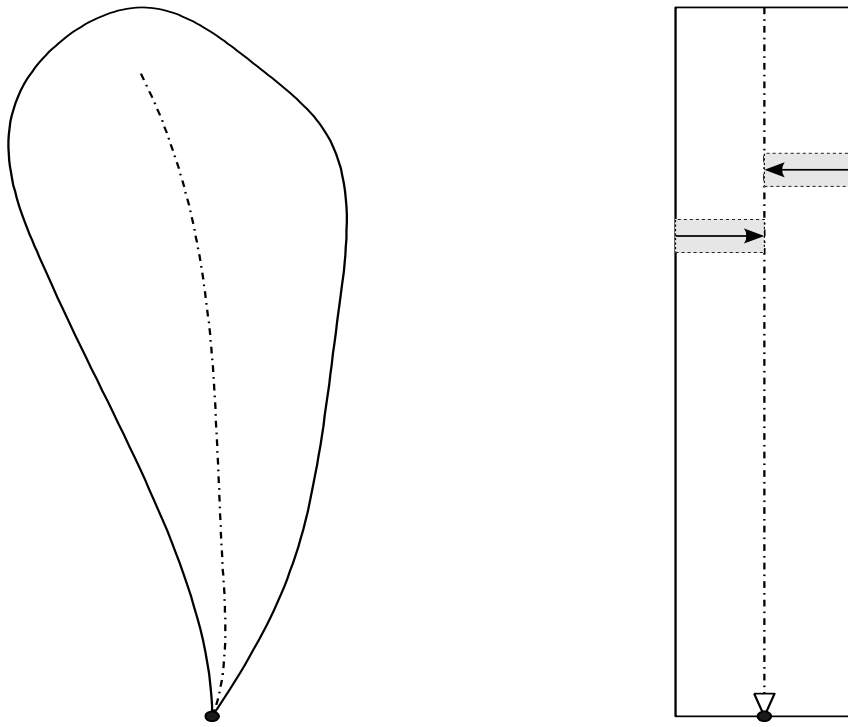


圖 6-2.4 運動波模式之集水區概念化示意圖

$$\alpha = S^{1/2} / N, m = 5/3$$

根據明渠水流控制方程式，水流之連續方程式可以表示如下：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

其中， q 為側入流量，在此為超滲降雨量。將前述曼寧公式求得之流量與連續方程式結合，則可以得到下述控制方程式，即為漫地流之運動坡方程式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha \cdot m \cdot A^{m-1} \frac{\partial A}{\partial x} = q$$

由於上游集水區內之河道坡度較陡、河道窄深，運動波模式可滿足要求。因此本模式同樣以運動波模式進行河道水理計算，其適用範圍約為河道坡度大於 0.002 (即 0.36°)。上述坡面漫地流之運動波方程

式，同樣可做為集水區河道水流控制方程式。惟其中 q 在河道演算中，為河岸兩側坡面漫地流側入流量， N 為曼寧公式糙度係數。

● 土砂生產模組

在土砂生產模組方面，採用坡面上的崩塌與一般地表沖蝕這兩種主要的土砂生產機制作為土砂生產的來源。在崩塌土砂生產量的估算上，本模式應用衛星影像自動判釋分析成果，獲得暴雨事件造成之新增崩塌地面積，進而推估崩塌土砂生產量；而在沖蝕土砂生產量的估算上，則採用 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 公式，應用前述逕流歷線之計算成果，計算暴雨時期之坡面土砂沖蝕量，現將方法分述如下：

崩塌土砂生產模組

應用衛星影像自動判釋崩塌地為近年來常用之集水區監控技術。因衛星影像具有高再臨率，大範圍連續監測之特性，加上近年來衛星影像之定位以及空間精度不斷精進，其成果足以提供集水區監測之用。本團隊為福爾摩沙二號衛星影像（以下簡稱福衛二號，Formosat-II）之影像處理分送中心，近年來產製衛星影像提供各項防災、規劃治理、空間資訊系統開發等應用，並開發自動崩塌地判釋系統，由衛星影像自動取得崩塌地面積。

若欲應用衛星影像之崩塌地自動判釋成果於土砂收支模式中，各幅影像間的校準為應用上最重要的工作。本團隊除完成影像的正射定位外，更進一步以橡皮伸張法 (Rubber sheet stretching)，利用地面控制點 (Ground Control Point, GCP) 模擬地面特徵點與影像對位點之幾何關係來糾正各時期影像，糾正平面方向的錯位，讓崩塌地的變遷判釋成果更加準確 (圖 6-2.5)。

衛星影像經校正後，除可大範圍監測集水區之現況外，更可應用影像光學特性，進行崩塌裸露地之判釋工作，其流程如圖 6-2-6 所示。除前述之影像選擇、正射校正、雲層與陰影區域的濾除，進一步應用正規化植生指標 (NDVI) 進行裸露地的初步判釋。由植生分布指數畫定裸露區域，並以光譜強度分布資料去除明顯雲霧及陰影屏蔽區域，得到初步裸地分類結果。NDVI 正規化植生指標植定義如下：

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

其中，NIR 為近紅外線波段，R 為紅色光波段。NDVI 指數介於 -1 到 1 之間，其值越大表示地表覆蓋程度越好，越低表示覆蓋程度越低。故可由 NDVI 指數判釋非植生裸露地。但在初步裸露地中，針對初步裸地分類判釋中屬於低坡度範圍之河道、人工建物與墾地等誤判區域需予以濾除，以提升崩塌分類之準確度。利用區塊劃分後的分類單元進行型態判斷，估算其分布外形之長寬比例，剔除細長型態之誤判結果，有效濾除次要河道、道路堤防等細長特性之地物。而透過現場調查與既有 GIS 空間資料，可將建物、道路與耕地等非崩塌地區予以濾除，獲得正確之崩塌地判釋成果。最後，透過各期崩塌地判釋成果之比較，則可獲得事件前後崩塌地變遷之行為，獲得定量之崩塌地擴大面積。

故土砂管理模式之崩塌土砂生產量，可由前述獲得之崩塌地擴大面積，乘上崩塌地之平均深度，以及坡面堆積土砂之孔隙率獲得，如下式所示：

$$V_{landslide} = C_a \times h_{mean} \times S_a$$

其中， $V_{landslide}$ 為崩塌新增土砂生產量 (立方公尺)； C_a 為新增崩塌地面積 (平方公尺)； h_{mean} 為子集水區之崩塌平均深度 (公尺)，可由現場調查或崩塌特性統計關係中獲得； S_a 為坡面堆積土砂之孔隙率。由

上述之關係式，可以得知崩塌之新增土砂生產量，在土砂管理模式中，可將衛星影像之判釋新增崩塌地擴大面積 (C_a) 作為輸入條件，由而模式計算崩塌發生後，土砂由坡面運移至河道、直至集水區下游之過程。

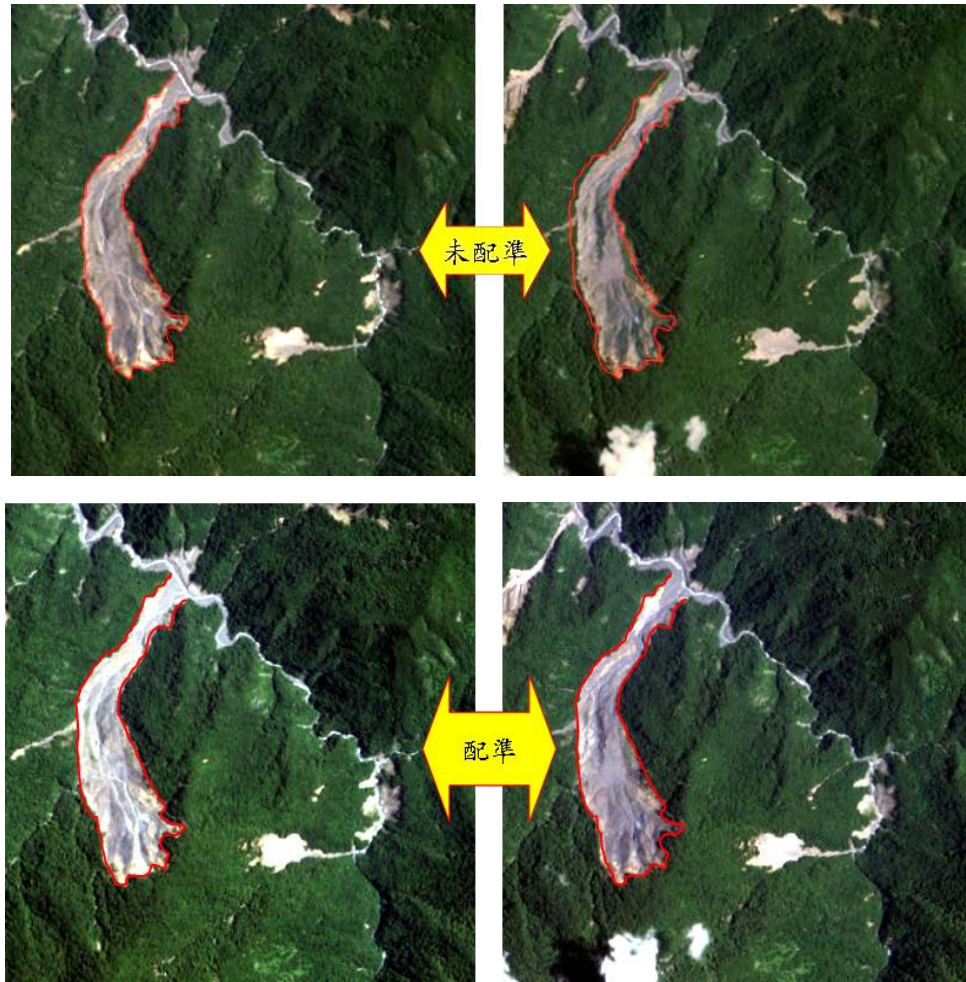


圖 6-2.5 未配準(上) / 配準(下) 之不同期影像

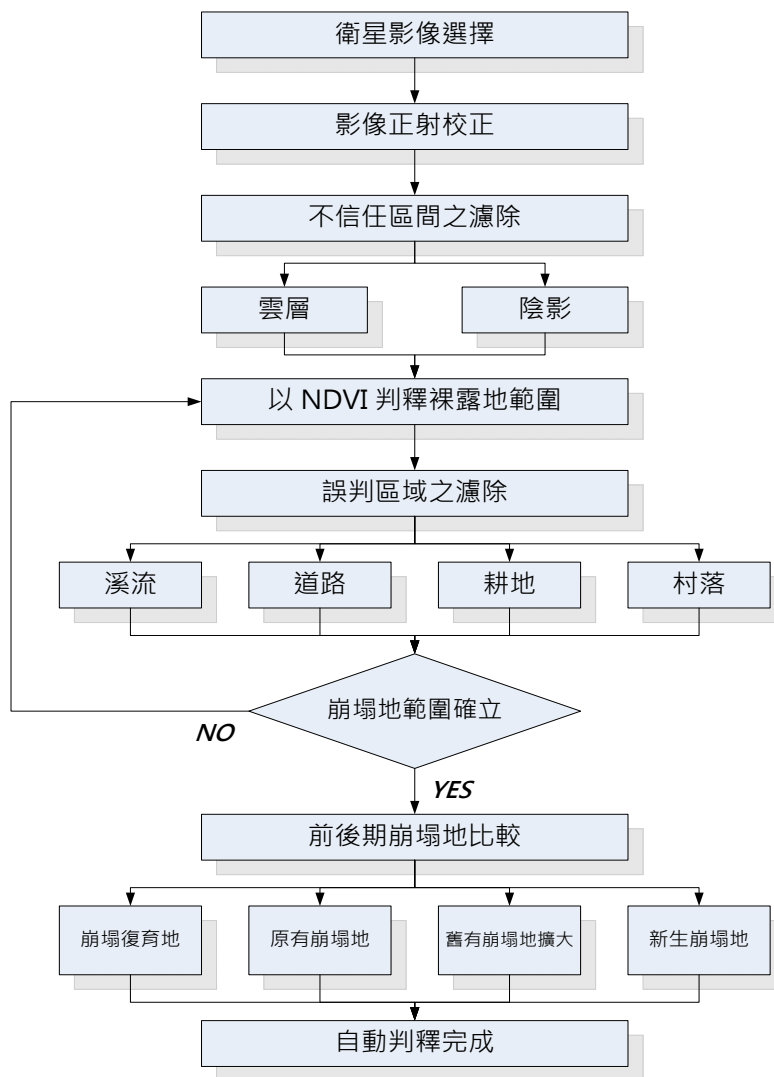


圖 6-2.6 衛星影像崩場地自動判釋流程

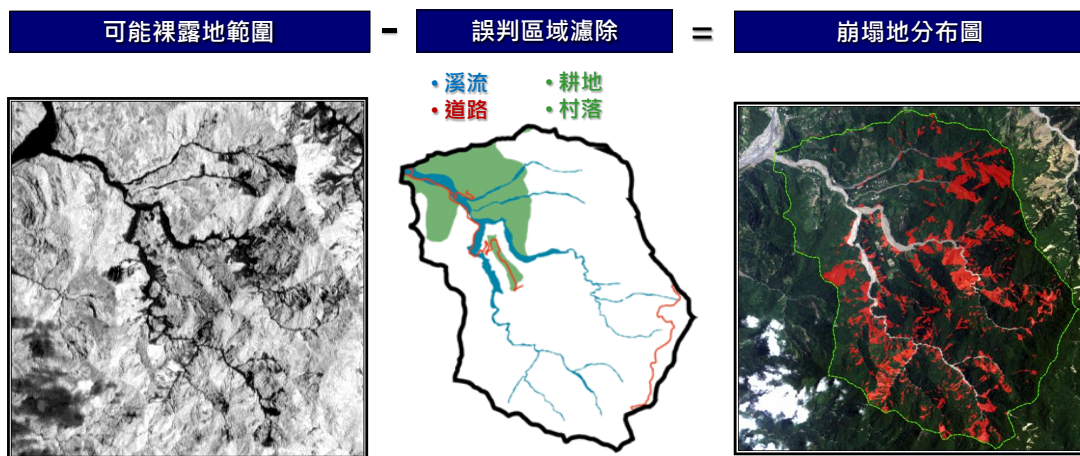


圖 6-2.7 裸露地誤判區域濾除過程示意圖

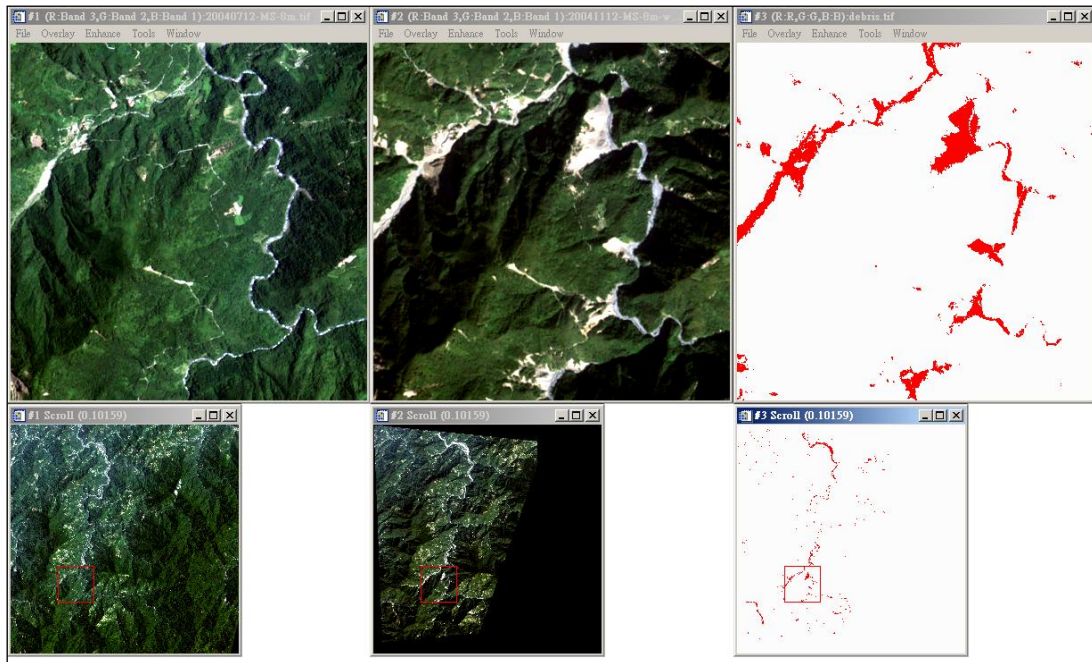


圖 6-2.8 新增裸露區與前後期影像比較圖

沖蝕土砂生產模組

對於山坡地土壤沖蝕量之估算，國內目前較為常用者為通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)，然其計算時間尺度為年沖蝕土砂生產總量（公噸），與土砂收支模式以暴雨時雨量之時間尺度有所不符，因此採用修正版通用土壤流失公式 (MUSLE)，估算單場暴雨內之坡面沖蝕土砂生產量，改善 USLE 時間尺度過大公式之缺點。採用 MUSLE 的主要優點有二：1. 配合降雨逕流模式，則不需要再另外估算泥砂遞移因子 (Soil Delivery Ratio, SDR)，2. 可用於估算單場暴雨事件的泥砂產量，茲將 MUSLE 公式簡述及參數推估如下：

$$V_s = 11.8 \times (V_{eff} \times Q_p)^{0.56} \times K_m \times L \times S \times C \times P$$

其中， V_s 為一場暴雨所造成的土壤流失量（公噸），考慮到堆積孔隙率及土壤密度，本模式以每立方公尺 1.4 公噸之單位轉換土壤流失量為立方公尺； V_{eff} 為有效降雨量 (Effective Rainfall，單位為立方公尺)； Q_p 為集水區尖峰逕流量 (Peak Flow Discharge，單位為每秒立方公尺)；

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。各因子之推求方法如下

1). 土壤沖蝕指數 K_m 值：

萬鑫森及黃俊義 (1989) 依據 Wischmeier and Smith 的列線圖，推算出台灣 280 處土壤沖蝕指數，為目前國內計算土壤沖蝕之依據，並表列於水土保持技術規範內。倘若估算地點的 K_m 值不在此 280 處中，或估算地點因施工或地文特性變遷之故，需進行表土夯實而影響表土的滲透性時，得根據土壤調查與分析結果，分別求出下列 $a, b, c, d, & e$ 等五個參數，並根據下列公式，推求估算地點之 K_m 值：

$$K_m = 0.1317 \{ 2.1 [d (d + e)] 1.14 \times 10^{-6} (12 - a) + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3) \} / 100$$

上式中， a 為有機質含量百分比 (%)； b 為土壤結構參數； c 為土壤透過性參數之判別； d 為土壤粉粒與極細砂 (粒徑介於 0.002 至 0.1 公厘之間) 含量之百分比 (%)； e 為土壤粗砂 (粒徑介於 0.1 至 2.0 公厘之間) 含量之百分比 (%)。故經過土壤調查以及分析，求得上述 a, b, c, d, e 五個參數，即可獲得估算地點之 K_m 值。

2). 坡長因子 L 值：

L 值之計算方法，為先行測出坡面之代表坡長 (Representative slope Length) 之水平距離，通常可以現場調查，或以室內遙測影像、地形圖分析等方法求得，再以下列公式求之：

$$L = \left(\frac{l}{22.13} \right)^m$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad \beta = \frac{1}{0.0896} \cdot \frac{\sin \theta}{3 \cdot (\sin \theta)^{0.8} + 0.56}$$

上式中， l 為坡面之水平投影長度（公尺），根據 USLE 與 Revised USLE 參考手冊之建議，當此水平投影長度大於 100 公尺時，最大以 100 公尺為限；而 θ 為坡面之坡度（度）。

3). 坡度因子 S 值：

坡度因子代表沖蝕坡面之坡度，推求方法可由現場調查、測量，或室內應用地形圖求出沖蝕坡面之平均坡度。根據 USLE 與 Revised USLE 參考手冊之內容，當沖蝕有效坡長大於 4.57 公尺（15 英尺）時，坡度因子 S 可以計算如下：

$$S = 10.8 x \sin \theta + 0.03 \quad (\text{當坡度} < 9\%)$$

$$S = 16.8 x \sin \theta - 0.50 \quad (\text{當坡度} \geq 9\%)$$

但，當沖蝕有效坡長小於 4.57 公尺（15 英尺）時，坡度因子 S 則應計算如下式：

$$S = 3.0 x (\sin \theta)^{0.8} + 0.56$$

4). 覆蓋與管理因子 C 值：

覆蓋管理因子之給定，代表坡面上不同表層覆蓋對於土壤沖蝕之影響，此參數將會依據現地上不同種類之植生、生育狀況、季節、覆蓋及敷蓋程度而定，由 [表 6-2-2](#) 可以得知不同覆蓋條件下，覆蓋管理因子的不同。

表 6-2.2 各種不同植被所代表之覆蓋與管理因子表

地表植被狀況	C 值	地表植被狀況	C 值
百喜草	0.01	裸露地	1.00
水稻	0.10	雜石地	0.01
雜作	0.25	墓地	0.01
果樹	0.20	雜草地	0.05
香蕉	0.14	高爾夫球場植草地	0.01
鳳梨	0.20	建屋用地	0.01
林地（針、闊葉、竹類）	0.01	牧草地	0.15
蔬菜類	0.90	特用作物	0.20
茶	0.15	檳榔	0.10

故在土砂管理模式中，單一子集水區之覆蓋管理因子之給定，係根據地表土地利用圖層，或是現場調查成果，得知各種不同土地利用面積之權重值，並根據其權重值計算子集水區之覆蓋管理因子。

5). 水土保持處理因子 P 值：

水土保持處理因子，表示坡面上因工程效益所帶來的沖蝕量變化，根據水土保持技術規範之規定，在沒有任何水土保持處理、棄土場、陸砂及農地砂石開採處，因無工程抑止坡面之土砂沖蝕生產量，故 P 值設定為 1.0，但有其他坡面工程措施時，依據其工程效益，訂定水土保持處理因子於 0 至 1 之間之參數。

● 土砂輸送模組

土砂的輸送量評估，為土砂管理模式計算中最為重要之模擬項目，但因台灣特殊之地形環境，自山區集水區至河道中，溪床坡度變化劇烈，因而影響不同坡度下之輸砂現象。在上游山區小集水區內，溪床坡度大多大於 3 至 5 度，屬於土石流之輸砂現象，其輸砂濃度與輸砂粒徑與一般河道之底床載或是懸浮載輸砂公式有所不同；當土砂運

移至主河道後，此時河道坡度減緩至 3 至 5 度以下，河道輸砂現象為一般之河道輸砂，但因山區土砂顆粒粒徑分布較大，其輸砂公式的選擇仍受到粒徑分布之影響。

有鑑於此，土砂管理模式在土砂輸送量的評估上，根據不同的輸砂特性，採用多種輸砂公式供使用者選擇，以因應不同的土砂輸送現象，採用之輸砂公式說明如下：

1). 平衡濃度公式

平衡濃度公式由 Takahashi 於 1981 年所提出，應用土砂起動條件推估土石流之平衡輸送濃度，謝正倫、蔡元芳 (1998) 根據 Takahashi 之實驗數據，配合日本多年之觀測成果，以及室內實驗所獲得之土砂輸送濃度，修正 Takahashi 提出之平衡輸砂濃度公式，提出各種坡度下之土砂輸送濃度，並迴歸如下式 (圖 6-2-9) 所示，此迴歸曲線與實驗點之相關係數高達 97%，適合應用於山區上游集水區內之土砂輸送量估算，其公式如下：

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

式中， $C_{d\infty}$ 為土砂運動之體積濃度， θ 為河道縱向坡度 (度)，此公式可求得不同河床坡度之輸砂平衡濃度，再配合流量計算輸砂量，故輸砂量可由流量乘上此體積濃度而獲得。此平衡濃度公式，解決山區野溪中，土砂輸送量評估不易之問題，為土砂管理模式中評估山區土砂輸送量之主要公式。但於一般河道之土砂輸送量估算，則略有高估土砂輸送量之可能，可選擇其他輸砂公式進行演算。

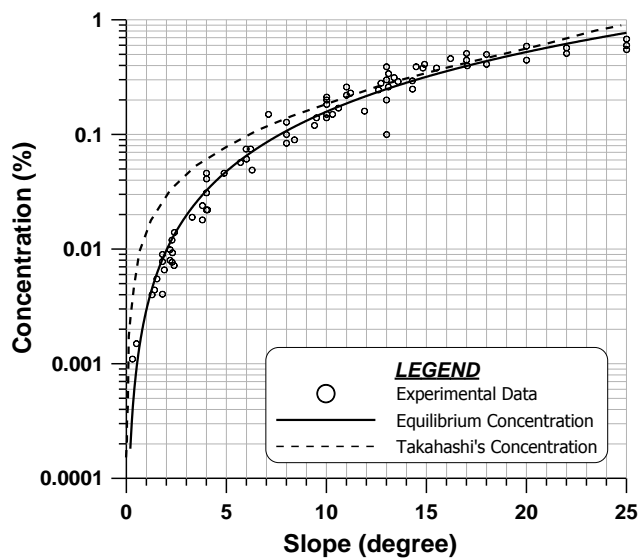


圖 6-2.9 平衡濃度公式迴歸成果

2). 何、黃氏公式 (1992)

何智武教授於台灣山區河道，從事多年的輸砂量觀測研究，並利用實測資料對各種河床載公式加以測試比較，分析較適用於台灣山區的輸砂公式，並推求何、黃公式如下式：

$$q_B = 0.438S^{1.41}(q - q_C)$$

$$q_C = 1.259 \times 10^{-7} \times D_g^{1.56} \times S^{-1}$$

$$D_g = \frac{D}{\left[\frac{v^2}{(\sigma/\rho - 1)g} \right]^{1/3}}$$

其中， q_B 為單位河寬河床載運移量 (CMS/公尺)； S 為底床坡度 (%)； q 為單位河寬流量 (CMS/公尺)； q_C 為單位河寬之河床載起動流量 (CMS/公尺)； D_g 為河床無因次粒徑， D 為砂粒直徑 (公尺)， σ 為砂粒密度 (公斤/立方公尺)， ρ 為清水密度 (公斤/立方公尺)， v 為水的運動黏滯係數 (平方公尺/秒)， g 為重力加速度 (公尺/秒²)。

3). Schoklitsch 公式 (1943)

$$q_s = 2500S^{3/2}(q - q_c)$$

$$q_c = 0.26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{5/3} \frac{D^{3/2}}{S^{7/6}}$$

其中， q_s 為單位河寬河床載運移量 (公斤/秒/公尺)； q 為單位河寬流量(CMS/公尺)； q_c 為單位河寬之河床載起動流量啟動流量 (CMS/公尺)， γ_s 為砂粒單位重 (牛頓/立方公尺)， γ 為水單位重 (牛頓/立方公尺)， S 為底床坡度 (%)； D 為砂粒直徑 (公尺)。

4). 楊志達公式

楊志達以最小能量耗損率之定律，推導河川總輸砂量公式，該公式經美國土木工程師學會以及德國水資源及土地利用學會評選，為評估河道總輸砂量高精度輸砂公式，目前在美洲、歐洲及中國被普遍採用，該公式根據不同的泥沙粒徑，而有不同型式，表示如下：

Yang's Formula (1973) for sand ($D < 2 \text{ mm}$)

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega}$$

$$+ \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right)$$

Yang's Formula (1984) for gravel ($D \geq 2 \text{ mm}$)

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d}{\nu} - 4.816 \log \frac{U_*}{\omega}$$

$$+ \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d}{\nu} - 0.282 \log \frac{U_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right)$$

其中， C_t 為泥砂濃度 (p.p.m. by weight)； ω 為砂粒沈降速度 (公尺/秒)； d 為平均粒徑 (公尺)； ν 為水的運動黏滯係數 (平方公

尺/秒)； U_* 為剪切流速 (公尺/秒)； V 為平均流速 (公尺/秒)； S 為能量坡度； V_{cr+} 為泥沙臨界啟動流速 (公尺/秒)，並可由下式推算：

$$\frac{V_{cr}}{\omega} = \begin{cases} \frac{2.5}{\log(U_*d/\nu) - 0.06} + 0.66 & \text{for } 1.2 < \frac{U_*d}{\nu} < 70 \\ 2.05 & \text{for } 70 \leq \frac{U_*d}{\nu} \end{cases}$$

楊志達公式因適用於不同粒徑範圍之總輸砂量，對於台灣河川粒徑分布過大之特性，仍可有效反映出一般河道輸砂之輸砂量，故設定為土砂管理模式之土砂輸送模組之一。

本計畫於龍泉崩塌地上游集水區之土砂輸送公式選擇，因上游段大多為坡度大於 5 度之土砂運動劇烈區域，考量模式之適用性，故選擇以平衡濃度輸砂公式作為輸砂量計算公式。

● 土砂收支 (侵蝕或堆積) 模組

經上述土砂生產模組運算後，配合土砂輸送模組之計算成果，可以求得在暴雨下各個子集水區於計算時距內之土砂生產量以及土砂輸送量，土砂收支模組即應用土砂量守恆之觀念，計算各個子集水區土砂生產量以及土砂輸送量之差額，即土砂變遷量，可以由下式表示：

$$\text{土砂變遷量} = \text{上游土砂來量} + \text{土砂生產量} - \text{土砂輸送量}$$

此一計算便是由最上游之子集水區單元開始，透過 子集水區匯流系統模組 之匯流關係，由上游子集水區單元逐漸往下游演算，直至整體集水區出口為止，故各個子集水區在計算時距內的土砂變遷量即可獲得，當土砂變遷量為正時，表示該子集水區河道為淤積之情形，反之，若當土砂變遷量為負時，表示該子集水區河道為侵蝕之情形。透過土砂收支模組的分成果，可以得知全集水區河道段的土砂變動量，

配合河道寬度以及河道長度的計算，即可演算該變遷量對應的平均河床高程變動量（抬升或下降）。

(2) 模式設定

● 子集水區劃定

在土砂運動分析中，首要工作為進行集水區內部之子集水區分區，本計畫參考經建版兩萬五千分之一地形圖與五千分之一之相片基本圖之地形資料，配合內政部 5 米網格數值地形模型，進行龍泉溪集水區之水系描繪，並依據各水系主支流之匯流特性、地形特性與坡度特性劃分成子集水區，劃分之結果表示如圖 6-2.10 所示，共劃分為 11 個子集水區，並將子集水區間之連接關係加以模式化，作為龍泉溪堰塞湖上游集水區土砂生產、輸送分析之基本架構，圖 6-2.11 為各子集水區之串接關係圖，表 6-2.3 為子集水區之基本參數。

根據子集水區劃分成果，子集水區 6 與子集水區 8 上游之區域，溪床坡度皆大於 8 度，為土石流發生與流動之範圍，可能發生劇烈之土砂運動，這區段之子集水區總面積共約 870 公頃，足以誘發可能之土石流運動。而子集水區 10 與子集水區 11 則為流入天然堰塞湖前之溪流段，此段溪流之坡度約為 3 至 5 度，為土石流淤積轉換為一般河道輸砂之過渡區，一般來說，來自上游粒徑較大的土砂材料將在此河段堆積，其於較小顆粒部分則持續往下游輸送，但若一旦上游發生土石流運動，土砂材料將大量堆積在此範圍，造成劇烈的地形變動。

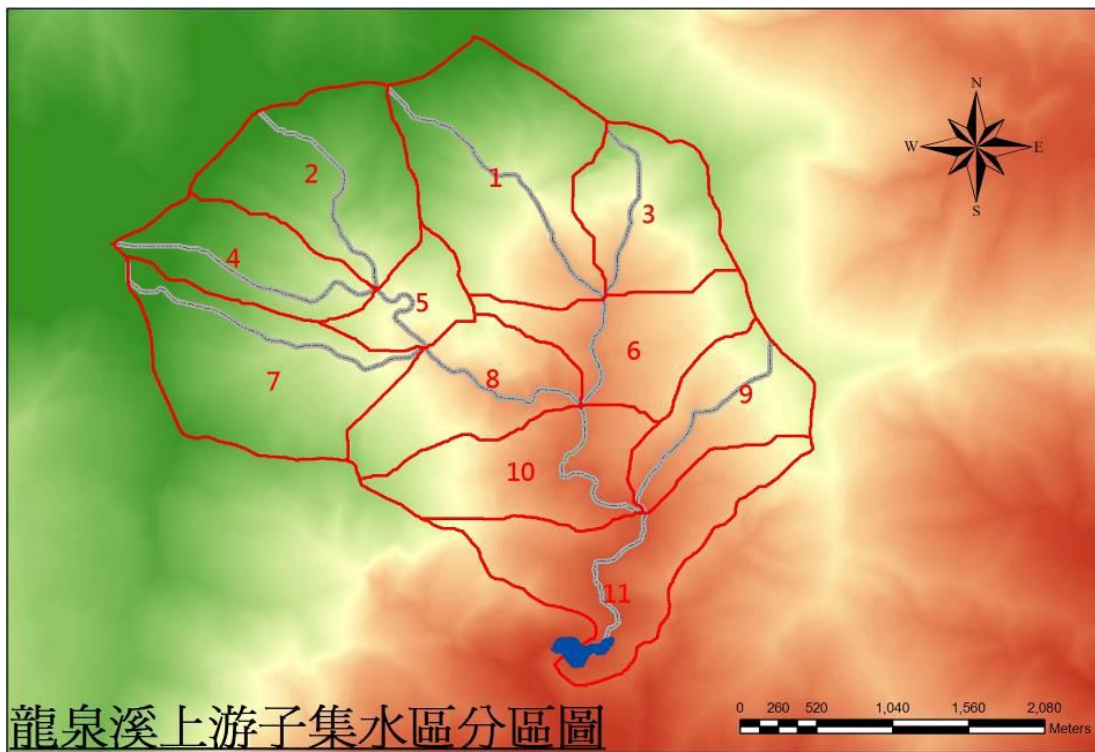


圖 6-2.10 龍泉溪堰塞湖上游集水區子集水區分區圖

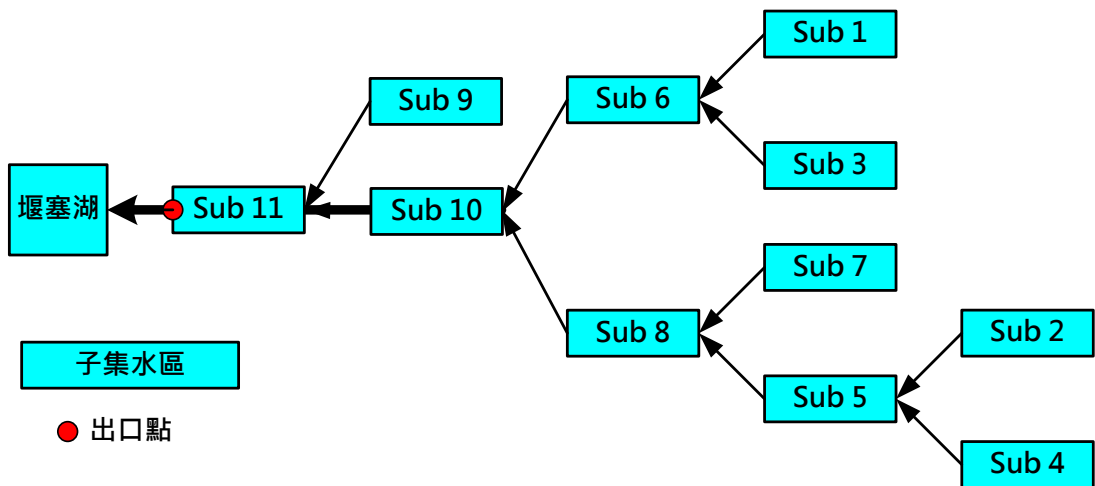


圖 6-2.11 龍泉溪堰塞湖上游集水區各子集水區之串接關係圖

表 6-2.3 龍泉溪堰塞湖上游集水區各子集水區之基本參數表

子集水區 編號	下接子集水區 編號	子集水區面積 (公頃)	子集水區坡度 (度)	溪流長度 (米)	溪流坡度 (度)
1	6	186.5	40.0	2323.0	21.2
2	5	131.6	38.8	1761.9	21.2
3	6	93.1	42.5	1450.6	25.7
4	5	82.6	37.3	2088.5	20.6
5	8	43.6	38.2	841.5	10.3
6	10	92.1	33.3	878.4	8.3
7	8	149.6	35.3	2508.4	20.3
8	10	97.2	38.7	1394.5	12.1
9	11	79.1	33.1	1752.4	18.8
10	11	108.3	34.9	1372.3	4.8
11	-1	138.3	35.1	1671.6	3.0

● 集水區崩塌土砂生產來源分析

龍泉溪集水區雖屬於較陡峭的河川，但由於集水區上游屬於未開發區，並無人為開發行為，集水區得以保持天然的原始林相，僅有部分區域因坡面過陡、或植生較差而有局部沖蝕及裸露區。

集水區崩塌土砂生產來源分析可以透過比對集水區歷年崩塌地的變遷而得，本計畫應用土砂收支模式內之崩塌地影像判釋模組，對福衛二號衛星影像進行影像判釋分析，配合數值地形高程資料，與植生覆蓋率評估之常態化差異植生指標 (Normalization Difference Vegetation Index, NDVI)，進行前後期影像比對，完成前後期影像的變異點分析，判釋崩塌地之位置與範圍

有關崩塌所生產之土砂量估算，本計畫利用不同時期衛星影像判釋崩塌地面積成果相減得到新增崩塌地面積，將新增崩塌地面積乘上崩塌地厚度做為新增崩塌土方量。其中崩塌厚度的估算，因上游目前皆為人員不可及區域，本計畫採用鄰近崩塌地之現場調查成果，設定崩塌地之平均深度為 1.0 公尺，估算崩塌生產土方量。歷年衛星影像

進行崩塌地判釋之成果列於 表 6-2.4 中，由 2010 年之分析成果可看出在崩塌地變化上，屬於復育之狀態，崩塌面積減少為 10.56 公頃。

表 6-2.4 龍泉溪堰塞湖上游集水區崩塌變遷圖

影像時間	上游集水面積 (公頃)	崩塌面積 (公頃)	崩塌率 (%)	新增崩塌面積 (公頃)	新增崩塌率 (%)
2005/04/30	1201.8	8.56	0.71	0	0.00
2006/12/23	1201.8	10.12	0.84	1.56	0.13
2007/07/20	1201.8	15.45	1.29	5.33	0.44
2008/07/02	1201.8	16.31	1.36	0.86	0.07
2008/12/21	1201.8	16.61	1.38	0.3	0.02
2009/08/28	1201.8	18.16	1.51	1.85	0.15
2010/04/	1201.8	10.56	0.9	0	0

● 集水區沖蝕土砂生產來源分析

估算集水區的年沖蝕量，本計畫採用 USLE 公式作為沖蝕量的估算依據，各別計算各子集水區的坡面土砂沖蝕量。在參數的選定上，因集水區上游並無過去之調查或參考資料，本計畫依據水土技術保持規範之台灣地區建議值，選定鄰近之觀測調查成果，做為龍泉堰塞湖上游集水區之參數設定。且因集水區上游面積較小，並無明顯之地文地質條件變動，故於降雨沖蝕指數與土壤沖蝕指數兩個部分，給定全集水區為均一值。

在降雨沖蝕指數部分，根據堰塞湖下游池上地區之土壤調查成果，給定降雨沖蝕指數為 11,659。而土壤沖蝕指數部分，同樣選定堰塞湖下游池上地區之土壤調查成果，給定建議值為 0.0237，由這兩個指數的給定，可以發現在池上地區土壤沖蝕之潛勢較大，表示可能會有較多的細微土砂材料顆粒。

而坡長因子、坡度因子與水土保持因子，則依據 USLE 之操作手冊建議值，應用前述內政部 5 米數值高程模型，進行參數之萃取與自動計算。但其中坡長因子則參照 USLE 之建議，僅給定最大沖蝕坡長為 100 公尺，反映逕流在坡面上之沖蝕特性。覆蓋管理因子之給定，因龍泉堰塞湖上游皆為原生林區，故依據森林與崩塌裸露地之比例，依照面積權重比例原則給定各子集水區之覆蓋管理因子。最終，龍泉溪堰塞湖上游各子集水區之沖蝕土方量，可列表於 表 6-2.5 中。

表中列出各子集水區之沖蝕土方量，各子集水區之生產量極為平均，大約都在 0.1 至 0.2 萬方之間，總觀全上游集水區之成果，龍泉堰塞湖上游集水區之年坡面土砂沖蝕量大約為 1.84 萬方，換算為全集水區之平均沖蝕深度，約為 1.5 公釐/年。

表 6-2.5 龍泉溪堰塞湖上游集水區年平均沖蝕土方量

子集水區 編號	面積 (公頃)	降雨沖蝕指數 (池上)	土壤沖蝕指數 (池上)	坡長因子	坡度因子	覆蓋管理 因子	水土保持 因子	沖蝕土方 (萬方)
1	186.5	11659.00	0.02370	2.1257	7.3194	0.01	1.0	0.30
2	131.6	11659.00	0.02370	2.1257	7.1406	0.01	1.0	0.21
3	93.1	11659.00	0.02370	2.1257	7.6562	0.01	1.0	0.16
4	82.6	11659.00	0.02370	2.1257	6.9211	0.01	1.0	0.13
5	43.6	11659.00	0.02370	2.1257	7.0549	0.01	1.0	0.07
6	92.1	11659.00	0.02370	2.1257	6.3172	0.01	1.0	0.13
7	149.6	11659.00	0.02370	2.1257	6.6274	0.01	1.0	0.22
8	97.2	11659.00	0.02370	2.1257	7.1243	0.01	1.0	0.15
9	79.1	11659.00	0.02370	2.1257	6.2842	0.01	1.0	0.11
10	108.3	11659.00	0.02370	2.1257	6.5685	0.01	1.0	0.16
11	138.3	11659.00	0.02370	2.1257	6.6008	0.01	1.0	0.20

註：坡長因子以 USLE 之建議最大沖蝕坡長值為限，設定為 2.1257

● 子集水區之土砂輸送能力分析

集水區土砂輸送量的分析，主要在於計算集水區各節點之土砂輸送能力，本計畫應用平衡濃度輸砂公式計算龍泉溪上游集水區各支流出口處之土砂輸送量，表 6-2-6 所列各子集水區出口處之土砂濃度係數即為應用平衡濃度輸砂公式之計算成果。

表 6-2.6 龍泉溪堰塞湖上游集水區各子集水區平衡土砂濃度

子集水區 編號	下接子集水區 編號	集水面積 (公頃)	子集水區坡度 (度)	溪流長度 (米)	溪流坡度 (度)	土砂濃度係數
1	6	1864.6	40.0	2323.0	21.2	0.410
2	5	1315.9	38.8	1761.9	21.2	0.410
3	6	930.9	42.5	1450.6	25.7	0.410
4	5	825.7	37.3	2088.5	20.6	0.410
5	8	2577.6	38.2	841.5	10.3	0.166
6	10	3716.0	33.3	878.4	8.3	0.113
7	8	825.7	35.3	2508.4	20.3	0.410
8	10	5045.2	38.7	1394.5	12.1	0.218
9	11	790.8	33.1	1752.4	18.8	0.410
10	11	9844.2	34.9	1372.3	4.8	0.044
11	0	12017.6	35.1	1671.6	3.4	0.025

註：當流動濃度高於最大可輸送濃度時，以最大可輸送濃度為限

(3) 年平均分析成果

本計畫對於堰塞湖區長期之沖淤分析主要在瞭解上游各河段之土砂供應、輸送量，透過各重現期之雨量進行各頻率年降雨對於河道土砂沖淤情形與進入堰塞湖之土方量進行推估，因此配合機率加權計算以瞭解各河段之年輸砂量期望值，配合土砂收支計算能獲得各河段之長期沖淤趨勢，則步驟如後所述。

- 1、各河段之輸砂能力為此河段中各斷面能力之平均值。
- 2、利用各重現期距之降雨推估集水區土砂生產量分析，推估各子集水區年土砂供應量期望值。
- 3、由各重現期距之降雨推估河道不同重現期之逕流量進而透過水理分析成果，估算各重現期距之輸砂能力。

4、最後由概率加權計算各河段之河床質載平均年輸砂量，採用之概率加權計算公式如下所示。

5、經由集水區土砂供應量期望值與河道各段輸砂能力期望值進行比較，以進行子集水區土砂生產、運移與堆積趨勢評估。

$$Q_A = 0.01Q_{200} + 0.005Q_{100} + 0.015Q_{50} + 0.04Q_{25} + 0.08Q_{10} + 0.2Q_5 + 0.4Q_2 + 0.25Q_{1.11}$$

式中， Q_A 為平均年輸砂之期望值， Q_{200} 等表示各重現期距洪水之輸砂量。

本計畫根據上述流程完成堰塞湖上游之年平均土砂生產量、輸送量計算(如表 6-2.1 所示)，由表 6-2.1 顯示，在集水區未發生重大崩塌事件之前提下，主要土砂生產量之來源為坡面沖蝕，土砂收支計算結果顯示，集水區中、上游各子集水區所生產之土砂，透過河道之輸送後，年平均之土砂輸出量約 1.8 萬方(子集水區 11 出口流入堰塞湖)，對於堰塞湖容積影響有限，又與前節所完成之堰塞湖庫容量變化之結果比較後，兩種計算方法均有相同之結論，即短時間內上游之土砂並不足以影響堰塞湖之蓄水體積。

由於龍泉溪上游集水區崩塌情形並不嚴重，且近年來，因颱風暴雨在龍泉堰塞湖集水區之降雨量較小，故自堰塞湖形成後，集水區上游之新生崩塌面積增加不多，也影響了土砂收支計算時，崩塌土砂量的評估，故在進行土砂生產量計算時，目前以坡面沖蝕為堰塞湖上游集水區為主要土砂的來源。

然崩塌之發生與降雨強度、累積雨量、土體滲透性、地下水位等均有密切關聯性，未來若上游集水區發生高強度或是長延時之降雨事件，可能新增崩塌，造成土砂生產來源增加，這樣的土砂條件改變，將會造成堰塞湖集水區之土砂運動改變，故未來若要考慮堰塞湖區的土砂變遷情形，需追蹤觀察崩塌地之變化趨勢，透過長時期追蹤崩塌地變化，提供後續進行

崩塌潛勢土方量之推估，以完整考量集水區之年平均土砂生產量，掌握堰塞湖上游土砂變動趨勢。

表 6-2.7 龍泉溪堰塞湖各子集水區年平均土砂變動表

子集水區 編號	集水面積 (公頃)	年平均輸砂量能力 (立方公尺)	年平均生產量 (立方公尺)	上游土方 (立方公尺)	輸出土方量 (立方公尺)
1	186.5	285,932	3,025	0	3,025
2	131.6	201,793	2,083	0	2,083
3	93.1	142,757	1,580	0	1,580
4	82.6	126,621	1,267	0	1,267
5	43.6	121,337	682	3,349	4,031
6	92.1	119,768	1,289	4,605	5,894
7	149.6	126,134	2,197	0	2,197
8	97.2	312,536	1,535	6,228	7,763
9	79.1	105,773	1,102	0	1,102
10	108.3	122,142	1,577	13,657	15,234
11	138.3	67,947	2,023	16,335	18,358

(4) 本年度事件分析

本年度於龍泉溪堰塞湖發生較大事件為凡那比颱風（99年09月17日~99年09月17）日，紀錄雨量與水位如圖 6-2.12 所示，事件累積雨量為 301 公釐，最大時雨量為 29 公釐。

而透過模式計算後，本事件土砂生產量為 1.3 萬立方公尺，輸出量為 0.8 萬方，圖 6-2.13 為出口點（入庫點）模擬成果，可以看到最大流量為 190 CMS，而最大輸砂量為 0.17 CMS。

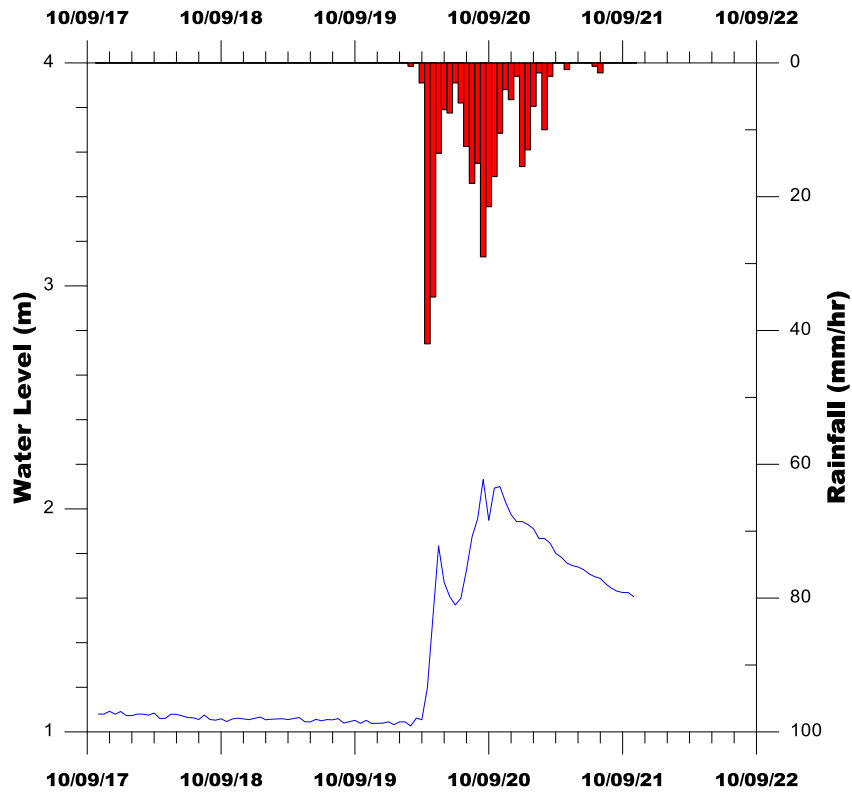


圖 6-2.12 凡那比颱風紀錄之雨量及水位歷線圖

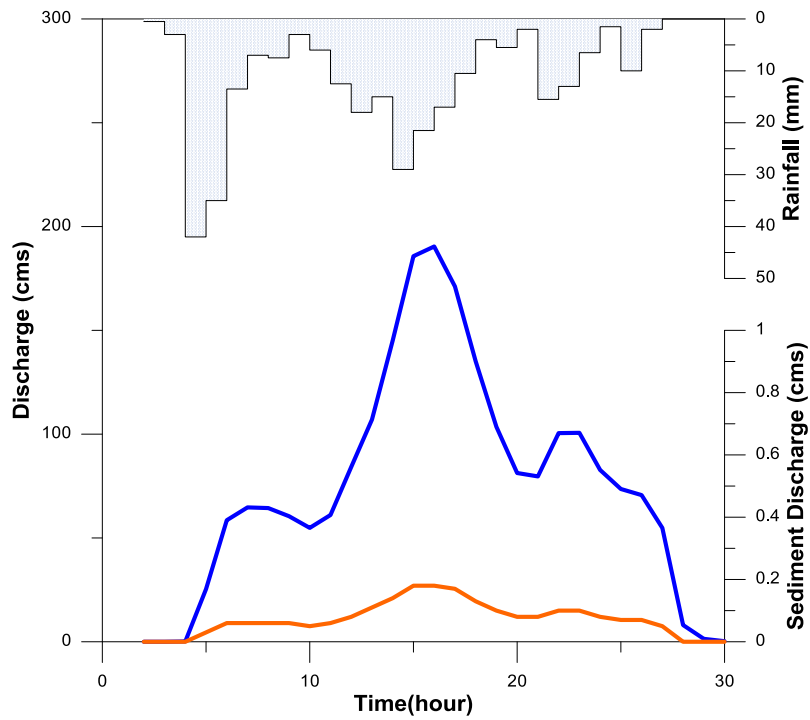


圖 6-2.13 凡那比颱風計算成果 - 入庫流量及輸砂量

6-2.2 堰塞湖土砂整體運移趨勢評估

由於本年度林務局針對龍泉溪堰塞湖之崩塌土體進行邊坡整治，將大量不安定土砂堆置於原有庫區位置，大量減少庫區範圍，減低原有天然壩瞬間潰決之可能性，因此本計畫針對目前地形，重新分析土砂運移趨勢，以檢討現有工程之功能性。

(1) 模式簡介

有關現有堆積土體運移趨勢之模擬，採用自行開發之一維河道動床模式進行分析，此模式係根據現有市面上模式優、缺點進行歸納與修正後自行發展，表 6-2.8 為國內常見動床模式之比較。

表 6-2.8、國內常見一維水理輸砂模式整理

模式名稱	HEC-6	FLUVIAL12	MIKE 11	LALLUVIAL	GSTARS	CHARIMA	SEDI COUP	EFDC1D	3STD
建立年份	1977	1972	1976	1982	1986	1990	1990	2001	2004
應用流況	Quasi-Steady	Unsteady	Unsteady	Quasi-steady	Unsteady	Unsteady	Unsteady	Unsteady	Unsteady
水理模式	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs	St. Venant Eqs
數值方法	有限差分法	隱式差分法	隱式差分法	有限差分法	有限差分法	隱式差分法	有限差分法	有限差分法	有限差分法
底床載 (bed load)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
懸浮載 (Suspended load)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
總輸砂 (Total load)	○	○	○	○	○	x	x	○	○
底床變動	○	○	○	○	○	○	○	○	○
河岸侵蝕變動	x	○	○	x	○	x	○	○	x
水力篩選	○	○	○	○	○	○	○	○	x
構造物影響	x	x	○	x	x	x	x	○	x

本研究以 Two-Step LAX-WENDROFF'S SCHEME 進行差分計算，並在水躍處加入人工黏性項 (ARTIFICIAL VISCOSITY TERM) 抑制水躍可能引起之數值不穩定現象。

而在淤砂過程之模擬上則針對超臨界流與亞臨界流共存情況下，檢討河床擾動之傳播方向，決定河床變動計算時其差分形式與計算方向，並引入交換層之觀念，模擬底床淤砂中之粒徑之效應。

一般河川變量流的質量及動量方程式表示為：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(uA)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g \left(i - \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}} \right)$$

式中，A 為通水面積；T 為時間；U 為流速；X 為向下游之縱向距離；G 為重力加速度； i 為河床坡度；N 為曼寧係數；R 為水力半徑。而上式變量流方程式之守恆形式 (CONSERVATION FORM) 可改寫如下：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{P}{\rho} \right)_{b=\text{const}} + \frac{Q^2}{A} \right] = gA \left(i - \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \right)$$

式中：P 為水壓力； ρ 為水的密度；B 為河寬。對於矩形渠道而言

$$\frac{P}{\rho} = gb \frac{h^2}{2}$$

整理上述控制方程式，以矩陣方式表示可得如下：

$$U_t + F_x = B$$

$$U_t = \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix}$$

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} Q \\ (P/\rho + Q^2/A) \end{bmatrix}$$

$$B = \left\{ gA \left[i - \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \right] \right\}$$

非均質砂之河床：實際河川之底床質，其粒徑分布較廣，上述之輸砂公式須加以修正後才能使用，假設均質輸砂公式可以如下方式表示：

$$q_b = f(\tau_*, \tau_{*c})$$

則非均勻質輸砂公式修正如下：

$$q_b = \sum_{\lambda=1}^{\kappa} q_{bi}$$

$$q_{bi} = f(\tau_{*i}, \tau_{*ci}) \cdot i_b$$

式中， q_{bi} 為混合砂中粒徑 d_i 輸砂率； κ 為粒徑之級數； $\tau_{*i} = U_*^2 / \text{sgd}_i$ ； i_b 為粒徑 d_i 在河床上所佔之體積百分比； τ_{*ci} 為粒徑 d_i 之砂礫在混合砂中的臨界應力值。而僅考慮河床載對河床變動之影響，則泥砂之連續方程式可以表示為：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0$$

式中， z 為河床高程； λ 為河床上泥砂之孔隙率。假設河床發生沖或淤時，運動中之泥砂與河床材料之交換，僅侷限於表面之薄層中，稱之為交換層，亦即河床粒徑變化僅發生在交換層內，唯當河床發生侵蝕或淤積時，交換層之位置會隨之改變。在此為便於處理，假設交換層厚度不變，且孔隙率之變化可以忽略，則交換層內粒徑變化之關係，經推導得以下兩式：

$$\frac{\partial z}{\partial t} \geq 0 \text{ (淤積時)}; \quad \frac{\partial i_b}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial z_i}{\partial t} - i_b \frac{\partial z}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} < 0 \text{ (侵蝕時)}; \quad \frac{\partial i_b}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial z_i}{\partial t} - i_{b_0} \frac{\partial z}{\partial t} \right)$$

其中

$$\frac{\partial z_i}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial (q_b \cdot i_B)}{\partial x}$$

式中， i_b 為粒徑 d_i 在輸砂中所佔之體積百分比； i_{b_0} 為交換層下方河床內粒徑為 d_i 體積百分比； a 為交換層厚度。

(2) 模式設定

本計畫利用現地測量成果與 5 米精度數值地形，進行河道變動解析，將河道縱剖面展示如圖 6-2.14 所示，圖中剖面上游為入庫點，下游則為便橋處。

而在水理條件部份，本計畫採用土砂管理模式所輸出之流量、輸砂量歷線，作為模式之上游輸入條件，圖 6-2.15 則為土砂模式所輸出之年平均流量、輸砂量歷線，年平均最大流量為 432 cms，最大輸砂量為 0.18 cms。

而粒徑之設定，則參考前期計算之分析成果，上游樣孔之中值粒徑為 15.15mm、下游粒徑較大約在 22.65mm，累積曲線如圖 6-2.16、圖 6-2.17 所示。

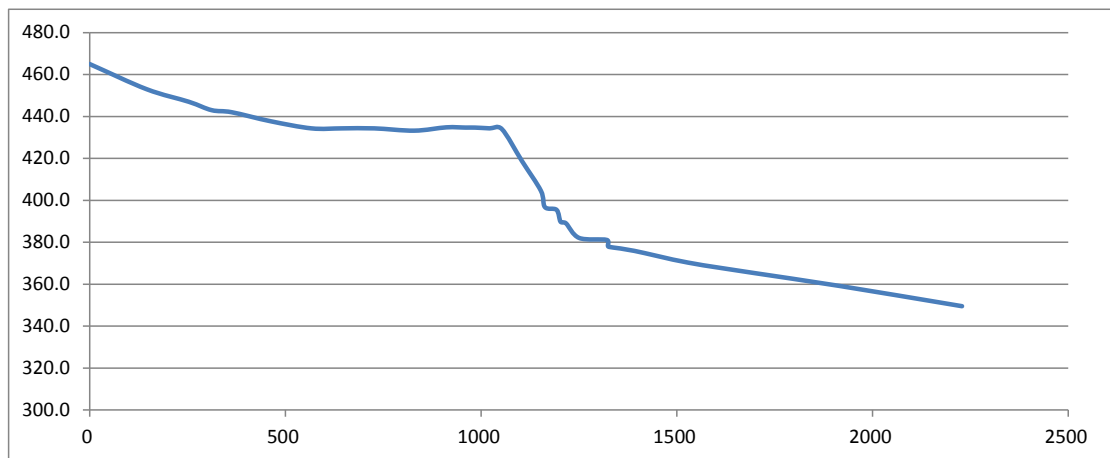


圖 6-2.14 龍泉堰塞湖現有河道縱剖面

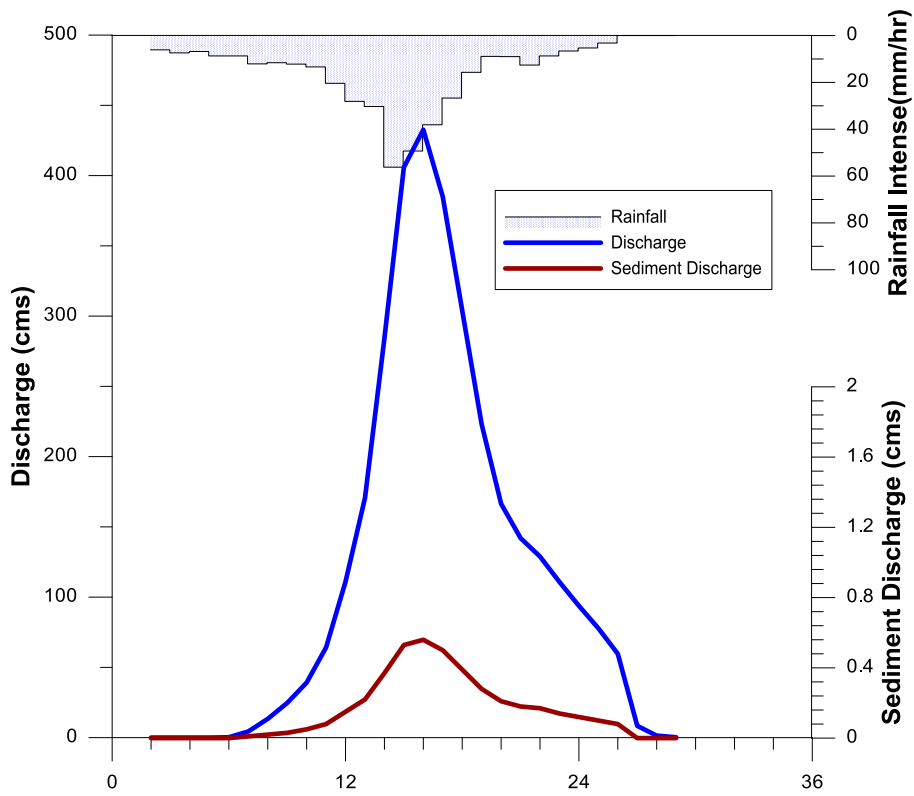


圖 6-2.15 龍泉堰塞湖現有河道上游邊界條件

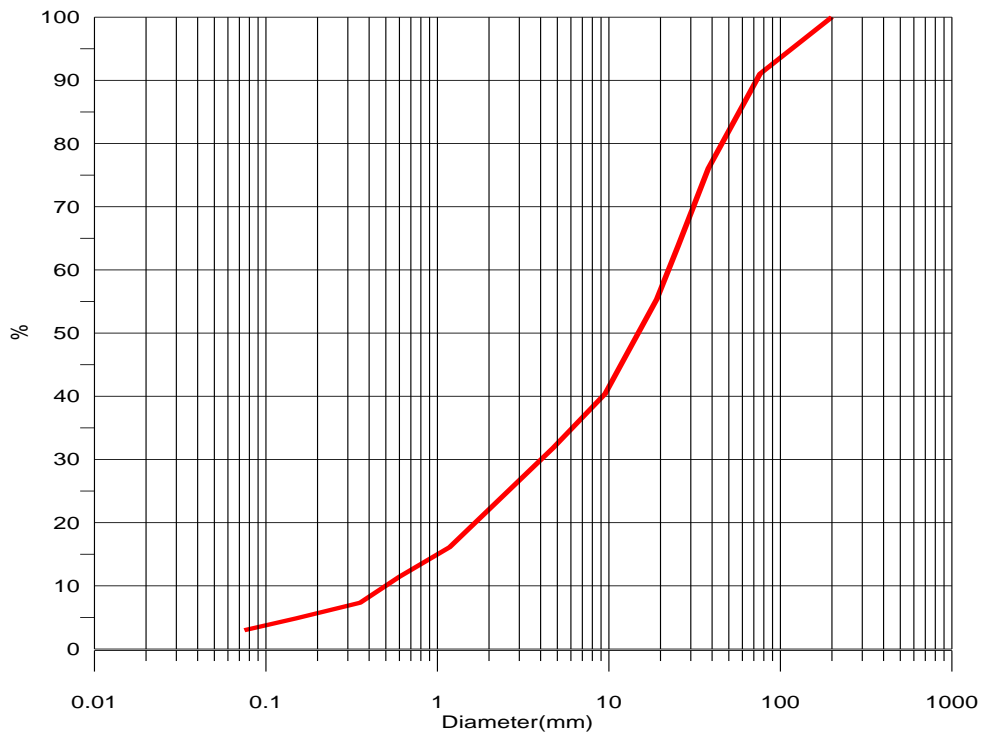


圖 6-2.16 上游採樣分析成果圖

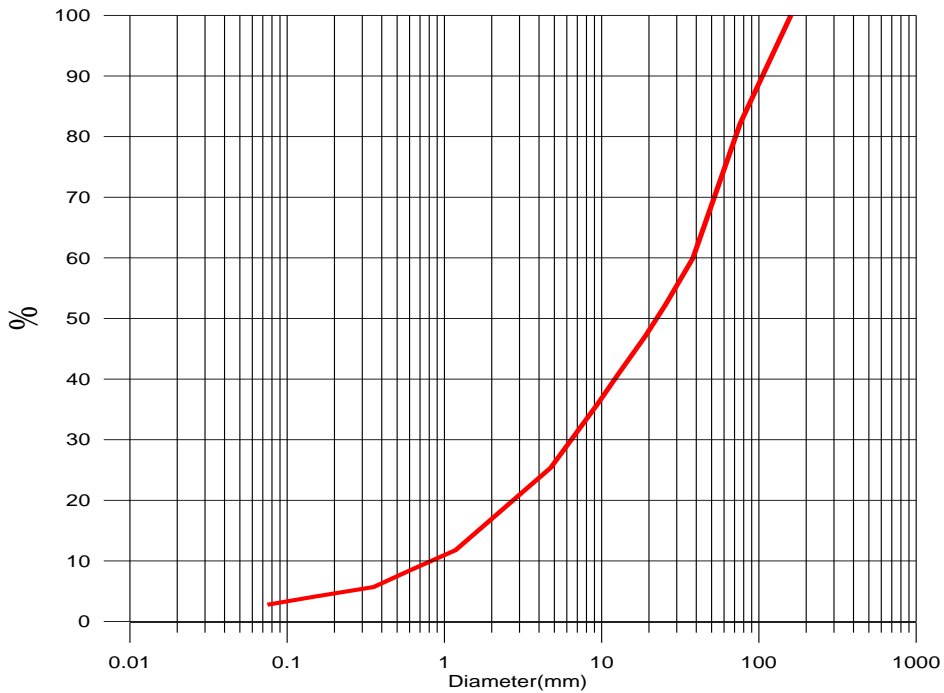


圖 6-2.17 下游採樣分析成果圖

(2) 分析成果

圖 6-2.18 為土砂運移分析成果，圖中藍線為現有地形，紅線為期望事件後變動成果，從圖中可以看到，變化較多者為現有溢洪道下游部份，約刷深近 20 公尺，原因為原有庫區具有攔阻土砂、水流輸送之效果，而將庫區填滿後，雖然降低突然潰壩因形成土石流運動之可能，但原本中斷之土砂運動過程將獲得連結，重新恢復輸砂運動，而崩塌所造成之崩塌土體，對於原有河床來說為一土砂來源，由於河床變動係往穩定坡度發展，因此現有河床將大幅度下刷，以符合輸砂運動特性，而由分析過程來看，下游端（便橋）處並無太大變動，因此在河道穩定來看，僅需減緩河道下刷過程，對下游河道並無太大之影響。

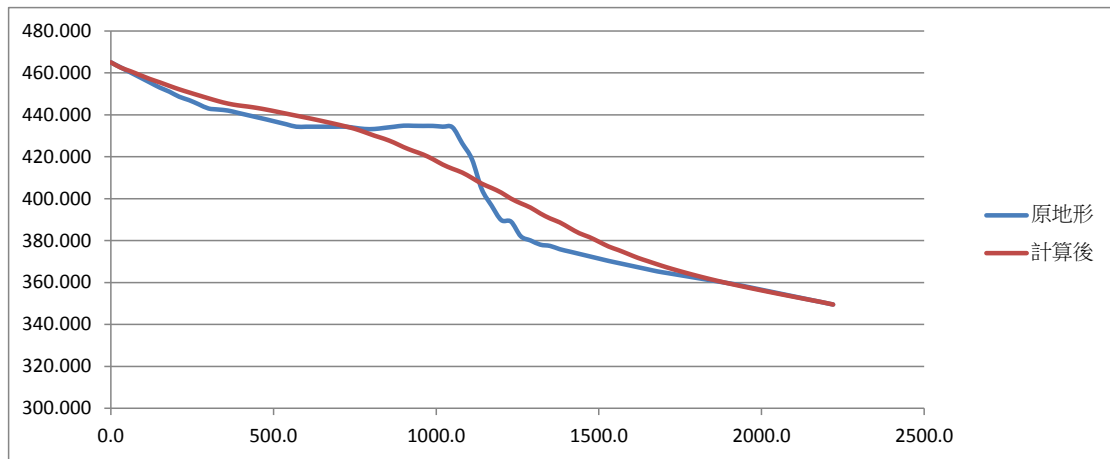


圖 6-2.18 龍泉堰塞湖現有河道變動分析成果

柒、結論與建議

7-1 結論

本年度計畫主要工作項目包括 (1).針對龍泉堰塞湖現地既有土砂觀測系統之各項設備與儀器進行定期維護檢修、不定期維修與更新，維持土砂觀測系統正常運作(包括網路、電力、影像、雨量與水位觀測系統)，並新設一處堰塞湖水位監測系統以強化原系統之防災預警功能；(2).透過不同時期(颱風豪雨事件前後)現地調查、地形測量與影像判釋分析作業之實施，持續追蹤堰塞湖、崩塌區、堆積壩體與河道地形之變化，並探討本年度降雨事件對於堰塞湖天然壩體安定性所造成之影響，適時修正災害可能影響範圍與防災預警基準；(3).依據歷年天然壩體及堰塞湖之地形變動，配合現地觀測資料及衛星影像判釋分析，探討本堰塞湖上游土砂生產、運移及堆積趨勢，長期演變趨勢。

透過本計畫之實施，可協助各級防救災單位有效掌握堰塞湖災害徵兆，適時啟動相關防救災措施，提升防災應變效率，並增進我國對於堰塞湖災害評估、防治、防災預警與演變趨勢等課題之瞭解，本年度工作成果說明如下：

一、土砂觀測系統維護

1. 為能維持現地端相關設備正常發揮功能，於計畫初始階段，透過系統總檢測之實施，掌握現地各項儀器設備之運作現況，並完成檢修工作。計畫執行期間，並持續針對觀測儀器進行定期與不定期之維護工作，以確保功能正常。維護計畫分為「定期維護」與「不定期維護」兩類型，「定期維護」為例行性之功能檢測與儀器檢修，每月執行 1 次，共計執行 7 次。「不定期維護」則針對偶發性事件做快速處置，包括颱風警報發布前，與系統出現異常狀況時，立即派員進行檢修，本年度共計執行 4 次不定期維護。

2. 透過定期與不定期維護檢修作業之實施，本年度重大之颱風降雨事件並不多，系統於侵台之凡那比颱風期間均能維持正常運作。惟本系統運作已近 4 年，部分儀器設備因現地溫度、濕度、電壓穩定性及電子元件自然衰減等問題，常有異常狀況出現，包括無線傳輸功率衰減造成資料收錄中斷、電力突波造成儀器毀損、高溫及潮濕環境造成儀器功能發生異常等。已透過定期維護保養、更換設備或零件之方式，期能維持系統正常運作，考量部分儀器設備之功能隨使用時間增長已逐漸衰減，儀器出現異常狀況之頻率可能增高，除增加維護成本外，並對於系統運作穩定性造成極大影響，建議未來應考量針對部分重要設備進行更新汰換，以避免因故障頻率增高影響系統正常運作。
3. 本計畫所建立之土砂觀測系統，整合現地端與後端系統，可於防災應變期間提供龍泉堰塞湖即時影像與水情資料。各級防救災單位可依據現地變化適時啟動防災預警與疏散避難作業機制，提升應變效率。

二、現地資料調查收集與量測

1. 為探討天然壩體及其下游河道之變遷情形，本年度除於重大事件後實施現地調查外，並已完成 2 次地形測量作業、1 次地電阻探測作業、1 次無人載具空拍作業以及 2 期遙測影像收集及比對分析工作，持續補充與追蹤所需之重要資訊。其中地形測量作業於 8 月份(河道整理工程後)及 9 月底(凡那比颱風後)分別實施 1 次，可比對天然壩及其下游河道於本年度工程整治及颱風豪雨後之地形變化；地電阻探測工作之施測，可以瞭解堰塞湖天然壩體之地層變化及地下水位之分佈。
2. 本計畫完成龍泉溪堰塞湖之二期影像，範圍涵蓋上游集水區、天然壩體崩塌區及湖區、下游河道及保全對象等，提供台東林管處針對轄管林班地範圍之崩塌地、土地使用變化進行影像判釋，同時考量全區影像檔案資料量過大問題，將全區影像裁切成適當大小，以利後續判釋及使用之便利性。相關成果並已依規定期限內交付。

三、堰塞湖與崩塌區地形變動監測分析

1. 依據現地資料觀測、現場調查、壩體及下游河道地形測量結果顯示，本年度因並未發生較大規模之降雨事件，溢流水道及下游河道於本年度颱風豪雨事件後並無顯著變化，惟因本年度進行河道整理工程，於工程完工後所進行之地形變動測量成果發現，目前湖區已大致淤滿而導致蓄水量減低。其中溢流水道僅有局部區段發生少量沖刷及淤積，下游河道由於土砂多已遭防砂壩阻擋，河道高程大多保持一致，河道地形並無明顯變化。
2. 本計畫利用福衛二號衛星影像進行堰塞湖上游集水區崩塌地判釋，依據2期衛星影像判釋成果顯示。97年度集水區內崩塌地面積約16.31公頃，98年度集水區內崩塌地面積約18.16公頃，新增崩塌地約1.85公頃，並無明顯變化，99年度上游集水區內並無新增崩塌區域，原本崩塌面有縮小的趨勢，根據影像判釋的結果，上游集水區內之崩塌面積約為10.56公頃。

四、堰塞湖水位觀測系統建置

1. 天然壩溢流流量增大時，可能造成壩體沖刷，為監控堰塞湖溢流量之變化，本年度完成堰塞湖水位觀測系統建置，長期觀測並記錄溢流水深之變化，相關觀測成果並與雨量計及下游水位計之觀測成果進行分析，初步完成降雨逕流分析，因本年度所蒐集得之颱風事件，除侵台之凡那比颱風外，均屬降雨規模較小之事件。未來仍需持續蒐集降雨規模較大之事件，進行更詳盡之降雨—逕流模擬，獲得計畫範圍的降雨—逕流關係，提供後續防災之參考。

五、堰塞湖演變趨勢評估

1. 根據土砂收支模擬結果，原有庫區具有攔阻土砂、水流輸送之效果，而將庫區填滿後，雖然降低突然潰壩因形成土石流運動之可能，但原本中斷之土砂運動過程將獲得連結，重新恢復輸砂運動，而崩塌所造成

之崩塌土體，對於原有河床來說為一土砂來源，由於河床變動係往穩定坡度發展，因此現有河床將大幅度下刷，以符合輸砂運動特性，而由分析過程來看，下游端（便橋）處並無太大變動，因此在河道穩定來看，僅需減緩河道下刷過程，對下游河道並無太大之影響。

3. 依據 99 年度完成河道整理工程後之邊坡穩定分析結果顯示，目前分析之橫、縱斷面成果，為使用汛期時極端狀況下之地下水位進行分析，而河道整理工程完工後之縱斷面(99 年度)，其潛在滑動面皆不明顯，整體壩體不致形成驟然破壞，因分析條件均採暴雨時之極端條件，若枯水期水位降低之條件下，整體壩體之安全係數將會提升，更不易形成驟然破壞。

7-2 建議

- 一、據前期歷年計畫與本年度計畫之現地調查、地形測量、衛星影像判釋、天然壩體安定性分析及土砂運移趨勢分析成果，堰塞湖蓄水量已因河道整理工程之完成而降低，且天然壩體並未於颱風豪雨事件後發生明顯變化，現仍穩定存於現地，顯示龍泉溪堰塞湖在歷年防災工程投入後，已有效降低其對於下游社區之致災風險。然考量堰塞湖形成至今並未遭遇較大規模之降雨事件，且集水區上游地區未來發生大規模崩塌的機率難以預料，為防範災害於未然，本計畫建議未來仍有必要對於龍泉堰塞湖持續進行監測以及後續分析。以便及時掌握災害發生徵兆，提供各級單位防災預警及應變之參考。
- 二、目前堰塞湖在壩體穩定性分析及土砂演變趨勢分析的模擬結果均顯示目前堰塞湖已處於穩定的狀態，然而在未遭逢重大事件的考驗下，仍需維持觀測系統的穩定運作並將監測目的由防災的觀點轉換為堰塞湖演變趨勢的追蹤，並建議配合地表地形變化監測及壩體組成材料的調查，利用鑽探作業取樣及地下水井的設置，以維持堰塞湖事件處置過程資料的完整性。
- 三、透過定期與不定期維護檢修作業之實施，本系統於南修、萊羅克及侵台之凡那比颱風期間雖均能維持正常運作。惟本系統運作已近 4 年，部分儀器設備因現地溫度、濕度、電壓穩定性及電子元件自然衰減等問題，常有異常狀況出現，包括無線傳輸功率衰減造成資料收錄中斷、電力突波造成儀器毀損、高溫及潮濕環境造成儀器功能發生異常等。雖已透過定期維護保養、更換設備或零件之方式，期能維持系統正常運作，考量部分儀器設備之功能隨使用時間增長已逐漸衰減，儀器出現異常狀況之頻率可能增高，除增加維護成本外，並對於系統運作穩

定性造成極大影響，建議未來應檢視現有設備，針對部分重要設備進行更新汰換，以避免因故障頻率增高影響系統正常運作。

- 四、龍泉溪堰塞湖為林務局轄內第一座自堰塞湖形成之初即著手進行相關短、中、長期應變處置之堰塞湖，目前堰塞湖透過各種工程治理的方式仍存在著，於應變期間所建置之土砂觀測系統能穩定持續運作中，相關資料保留完整，值得妥善規劃成為堰塞湖防災教育宣導的案例，搭配系統的展示、解說導覽設施及指示牌的設置，並配合網頁及簡介手冊的說明，更能達到教育推廣的目的。