

坡地土砂災害觀測資訊加值分析與應用

Added-value analysis and application of monitoring data on slopedland disaster

主管單位：經濟部中央地質調查所

劉格非¹

魏士超¹

Liu, Ko-Fei¹

Wei, Shih-Chao¹

¹ 國立臺灣大學土木工程學系

摘要

本研究計畫建立以地聲探測器與攝影機搭配土石流監測預警系統。攝影畫面以創新的總灰階值變化率的方式，可以準確偵測土石流的到來，甚至在人類眼睛無法判別的暗度下，仍然可以偵測到。再利用修正顆粒光流法可以估算大石頭的移動與旋轉速度，另以畫面分析精度為要求，提供攝影機監測放置位置的條件。地聲探測器的資料以短時間傅立葉分析後，將主頻率(20-60Hz)總能量當作指標，先以能量時間變率與能量時間斜率變化兩者突然改變為依據，成功偵測土石流抵達時間，以土石流影片為標準來判斷，抵達時間誤差都在 10 秒以內，再以主頻率大小與河川流量建立流量經驗公式，相關度達 96%。

本研究計畫也已經建立了即時監測預警的網頁，網頁中包含目前所有監測站中監測儀器的訊號，同時也包含基本頻率分析與影像分析功能。利用影片與地聲訊號預警之功能，也已經整合到網頁中。未來這網頁也可成為一個公開的研究平台。

關鍵詞：土石流、地聲、影像分析

Abstract

The research project established monitoring and warning system with combined data from CCD and geophone. CCD images are analyzed with a new total grey level temporal variation rate method. This method can detect the arrival of debris flows with error within 2 seconds. Even under dark environment where human eye cannot distinguish object, this method can still issue warning. Modified particle tracking method is used where rotation is considered. This method can produce the boulder velocity in the image with error less than 20%. Geophone signal is analyzed with short time Fast Fourier Transform. Then the integrated total energy between 20-60 Hz is used as the main index. The temporal variation of this index as well as its energy slope variation are used to detect debris flows. If the index changes rapidly, warning will be issued. This method can detect debris flow arrival accurate within 5s compared to CCD images. This index is also used to correlate to flowrate.

The monitoring and warning function is established in a website. All data is displayed and warning function is built in. This website can be an open platform for debris flow research

Keywords : debris flows, geophone, image analysis.

一、前言

行政院農業委員會水土保持局(簡稱水保局)基於職司山坡地保育利用之責，自民國91年開始，陸續發展土石流防災觀測科技，期能更加精進坡地土砂災害之觀測科技研究及發展。目前土石流觀測站已有紀錄影像與地聲的資料，但至今土石流觀測站都尚未結合適當的加值分析流程，要將觀測站資料做加值分析，觀測站的應用與實際預警效果才會提升。因為目前土石流觀測站所有的設備以地聲探測器與攝影機數量最多，因此本計畫將針對這兩項設備，做最大的加值利用。

在影像利用上，目前有光流法可以估算表面流速，但這方法在使用前都是在流速變化小流況單純的假設下，若要應用在土石流的影像上，則必須重新檢視演算法的計算過程，並重新發展可應用於土石流影像的表面流速演算方式。同時影像還富含其它如：水位、大石頭粒徑等資料，應該同步將這些資料都萃取出來。

在地聲的分析上，由於過去研究已證明流況與地聲訊號有極大的關連，如：振動訊號與水位或河床載的關係(Mizuyama, 2010；Rickenmann,2017；Chao et al., 2015)、振動訊號的振幅或能量與土石流流動深度的關係(Arattano and Moia, 1999；Kean et al., 2015；Coviello et al.,2015)、振動頻率分佈與土石流的關係(劉格非與李欣輯，1999；周憲德等人，2013、2015；Huang et al., 2004、2007)等。但卻從來沒有實際利用於現場成功的案例，且國內非常缺乏地聲理論於現場應用相關的研究，使得土石流觀測站的紀錄資料長年無進一步的利用，因此由地聲資料找出土石流確實抵達時間和土石流流況的資訊實屬必要。

為了展示資料與加值資料結果，本計畫將開發一監測訊號展示與分析系統。

二、現場影像分析

一般影像分析用於土石流預警時，往往都從影像中萃取出波前到來，波速或巨石流速等資訊，然後以這些資訊當作預警的條件，但是真實事件中，或者因為大雨，或者因為泥水，又或者因為土石流本身就不一定有完整定義的形體等因素，想萃取出這些物理資訊的嘗試，並非不成功，而是不夠準確，引此就產生了預警是否準確的問題，但是土石流由肉眼判斷時，人人類判斷的標準就是一大片(或大規模)的泥水夾雜石頭留下，肉眼能夠清楚的判定顏色變化與事件規模，卻無法萃取出物理資訊，但是以肉眼判斷的標準，就可以直接拿來做為土石流的預警，本節嘗試以此條件來作預警，而非先萃取出物理因子，再給予物理因子門檻值作為預警的方式。

當土石流事件發生時，巨礫通常會集中於前端，形成明顯的波前，前鋒都會以較陡的坡度形成前峰。因此在光度反射上，就會產生不同的亮度值，而土石流到達後，因為

泥水與石頭的組成，本身的亮度與土石流到達前的水流亮度也有很大的差異，因此利用這些亮度差異，就可以偵測土石流是否到達。因此可以在河道中畫出一個追蹤區塊(ROI, Region of interest)，只要該區塊的平均亮度值快速改變，且改變延續超過兩秒，就代表土石流到達。

因此只要對ROI中像素亮度值做統計，計算每一幀影像的平均亮度值，以土石流到達前的訊號當作環境雜訊，平均亮度值改變的速度很快且延續一段時間，這條件就可以當作土石流預警地條件，這原理與地聲探測器的預警原理相同。

此法令一個好處是，即使在下大雨或光線不佳時，物理參數無法萃取的情況下，本法因為是看大範圍的平均值，不會受天候的影響太大，因此能應用於氣候不佳、雨滴附著於攝影機鏡頭的影像，甚至光線微弱的情況下。

2.1 分析方法

首先須先針對彩色影像進行灰階化處理，灰階化之過程使用國際電信聯盟(International Telecommunication Union, ITU)所訂定的公式轉化為灰階值，

$$f(x,y) = 0.299 \times R(x,y) + 0.587 \times G(x,y) + 0.114 \times B(x,y) \quad (1)$$

其中 x,y 為二維影像的空間座標， $f(x,y)$ 、 $R(x,y)$ 、 $G(x,y)$ 、 $B(x,y)$ 分別為灰階值、紅色亮度值、綠色亮度值、藍色亮度值，亮度範圍皆介於0~255。

為了減少計算量，本研究以預計會發生土石流的河道區域，劃出分析範圍，切割下影像中的局部區域(Region of interest; ROI)作為影像分析區域。

接著計算ROI的平均亮度值如下

$$\bar{f}(t) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y,t)}{MN} \quad (2)$$

其中 t 為時間、 $\bar{f}(t)$ 為在 t 秒時的平均亮度值、 M 為ROI中 x 座標方向像素數量、 N 為ROI中 y 座標方向像素數量。

為了計算亮度值隨時間的改變速率(或斜率)，本研究採用中央差分法(central difference)去計算如下

$$S(t+\Delta t) = (\bar{f}(t+2\Delta t) - \bar{f}(t)) / 2\Delta t \quad (3)$$

其中 $S(t+\Delta t)$ 為第 $t+\Delta t$ 秒的亮度值改變量，單位為亮度值差值/秒， $\bar{f}(t)$ 為在 t 秒時的平均亮度值，此處的平均量度值為短時間平均值， $\bar{f}(t+2\Delta t)$ 為在 $t+2\Delta t$ 秒時的平均亮度值。

土石流尚未到來前，大自然本來就會有變動，因此短時間平均亮度值會有小幅度的跳動，此現象為現場雜訊，當土石流事件發生時，亮度值改變的強度必定會大於環境亮度值，因此以動態每10秒中，平均亮度值改變速度的最大值 T ，代表環境雜訊的最大範圍，在使用此最大變化量 T 的不同倍率門檻值 $2T$ 、 $5T$ 、 $10T$ ，來測試預警的準確度。

2.2 歷史影像測試

本研究先採用的現地影像為敏督利颱風於2004年7月2日16時40分引起的土石流事件，影像的幀率為59.94幀/秒。利用式(1)對影像作灰階化後，再選取ROI範圍排除不感興趣的區域，經由亮度值統計後可以繪製出亮度分布隨時間的變化圖(如圖1)，由亮度值統

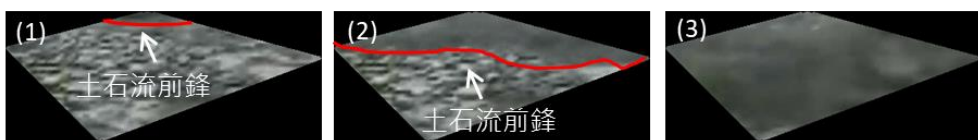
計的數據依照式(2)可計算出每張影像的平均亮度值，再由式(3)求得每兩幀影像的亮度值變化率。門檻值T的選定為影片前10秒亮度變化率的最大值，並比較不同倍率門檻值。

敏督利颱風土石流事件灰階值變化由不同門檻值的測試,可看出以10幀圖的平均配合兩倍雜訊斜率值，可得到最好的結果，誤差僅有0.3s。

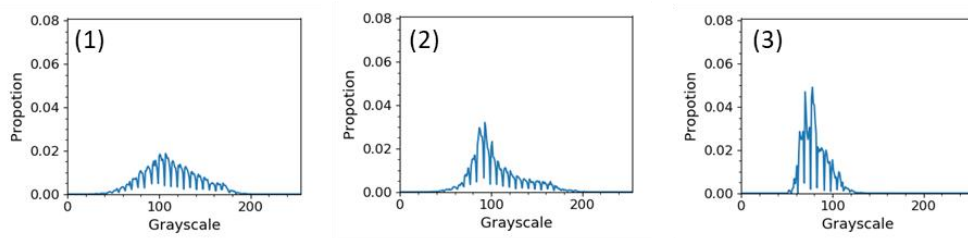
a. CCD攝影機拍攝的土石流事件影像



b. ROI中的土石流事件影像



c. 影像直方圖



d. 亮度值分布隨時間變化圖

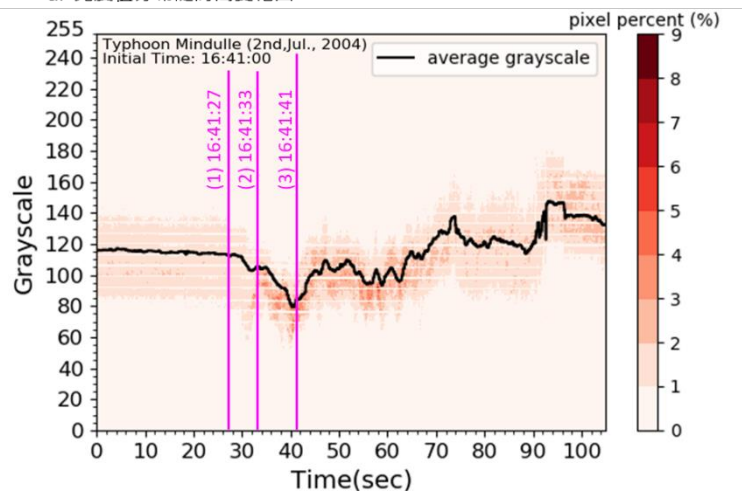


圖1、土石流影像偵測過程之影片截圖、ROI、亮度分佈圖、平均灰階值指標

三、現場地聲分析

透過地動訊號的分析，我們可以從量測位置的振動情況去反推振動源的相對應資訊，以河川輸砂或土石流的監測為例，國內外就有不少學者透過地動訊號去探討流況中的不同物理量，並透過試驗或現場監測數據證明地動訊號與流況有著極大的關連，如：振動訊號與水位或河床載的關係(Mizuyama, 2010；Rickenmann, 2017；Chao et al., 2015)、振

動訊號的振幅或能量與土石流流動深度的關係(Arattano and Moia, 1999 ; Kean et al., 2015 ; Coviello et al., 2015)、振動頻率分佈與土石流的關係(劉格非與李欣輯, 1999 ; 周憲德等人, 2013、2015 ; Huang et al., 2004、2007)等。由於地動訊號已被證明可反應出現場水文物理量等的變化, 因此若要透過現場監測的地動訊號去判釋土石流是否發生, 並依此對下游部落、村莊等保全對象發出土石流警戒則成為可實現的議題。

3.1 土石流偵測過程

地聲探測器的資料以短時間傅立葉分析後, 將主頻率(10-40 Hz)總能量當作指標, 先以能量時間變率與能量時間斜率變化兩者突然改變為依據, 成功偵測土石流抵達時間, 以土石流影片為標準來判斷, 抵達時間誤差都在 10 秒以內(Wei & Liu, 2019)。

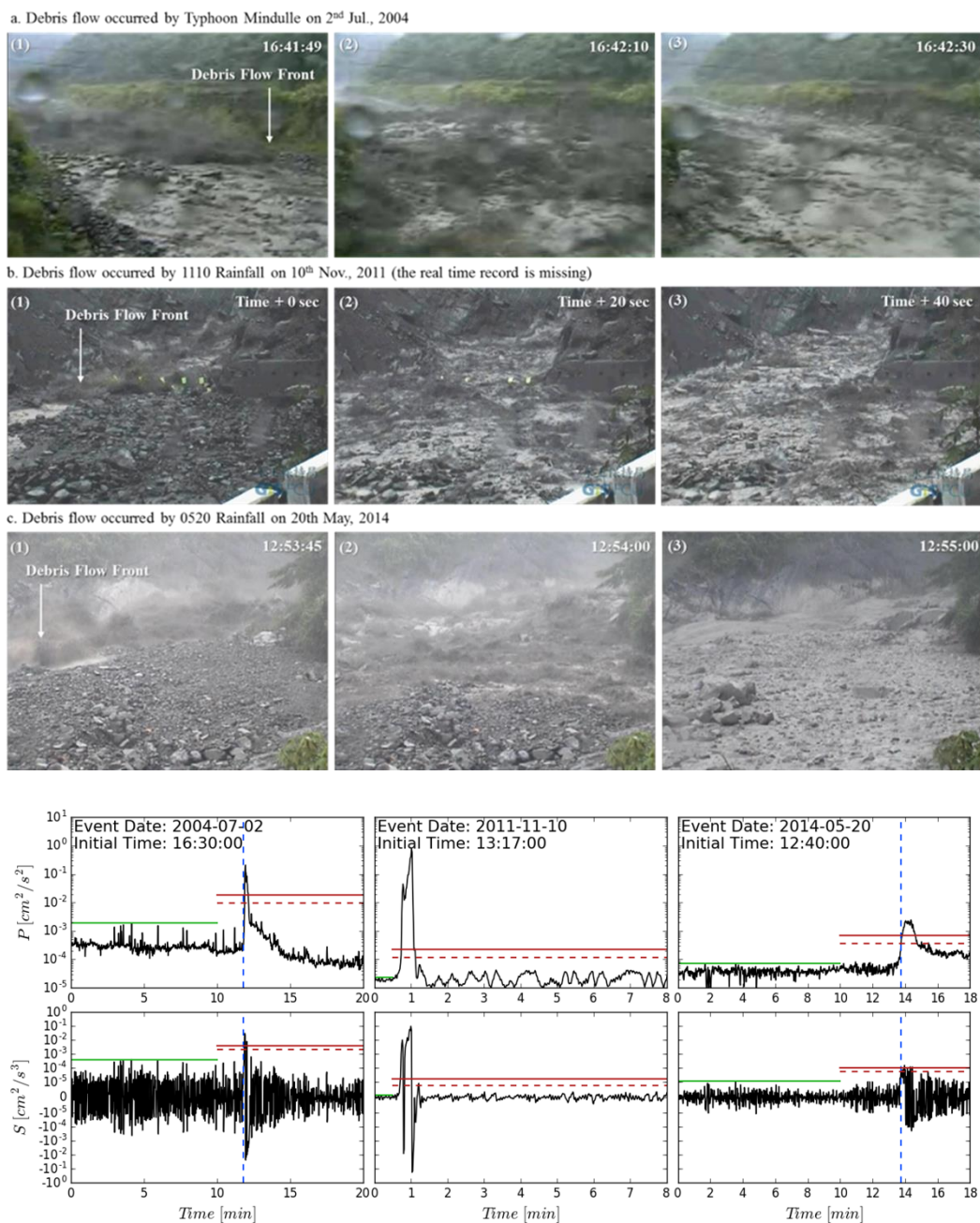


圖 2、土石流地聲之偵測過程與影像驗證

3.2 土石流與流量

為了分析土石流與流量之關係，本研究以愛玉子溪三場土石流事件2006年6月9日，2011年7月13日與2014年5月19日的地聲能量與估計流量做比較。在小集水區的假設下，本計畫主要採用合理化公式搭配降雨量去估計的地聲位置之流量，並採用兩種流量計算方式，包含：等集流時間線計算所得流量、簡單三角單位歷線方法計算所得流量，兩種方式之流量與地聲能量所回歸之結果如下表1。

表1、能量與流量關係式

地聲能量選用之 頻率區段e	流量Q	
	等集流時間線法	簡單三角單位歷線法
0-20Hz	$e = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{1.72}$	$e = 1.3 \cdot 10^{-4} \cdot Q^{1.75}$
20-40Hz	$e = 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{2.04}$	$e = 7 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{2.00}$
40-60Hz	$e = 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{2.01}$	$e = 7 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{1.92}$
0-60Hz	$e = 2 \cdot 10^{-4} \cdot Q^{1.82}$	$e = 3.8 \cdot 10^{-4} \cdot Q^{1.80}$
60-120Hz	$e = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{2.11}$	$e = 9 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{1.96}$
120-180Hz	$e = 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{2.06}$	$e = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{1.98}$
180-250Hz	$e = 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{2.09}$	$e = 7 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{2.02}$

四、土石流資訊展示與分析系統

為了整合並展示所有資訊，並能夠將分析工具放於平台上共享，有必要建立一個神木中心的網站。這網站必須能針對地聲、攝影機、雨量與其它神木村測站的資料，同時展現，也需要能有各種分析工具。

本計畫資料接收方式為由逢甲大學的神木資料接收系統，針對不同設備的儀器，將資料儲存於本計畫在神木國小設置的資料分析電腦。地聲資料為五分鐘儲存一次，影像資料分為兩種，一種是高精度可分析資料之影像，一種是低解析度用於展示的影像，低解析度資料每五分鐘會儲存352*240的影片(視監測系統的工作量)，高解析度影像若是現場設備允許，則是至少每一小時，由本計畫電腦直接抓取現場資料。雨量資料取自雲端，低頻地聲資料也是取自雲端，但是低頻地聲資料儲存並非即時，因無法做即時分析。以目前本系統為研發展示成果而言，應該可以接受。

網站功能分管理模式與用戶模式，管理模式為管理者處理資料與輸入資料的模式，用戶模式為使用者能看到的部分。用戶模式中即時監控、歷史資料與事件查詢三部分，包含所有儀器資料的展示與儀器資料加值分析的結果，衛星照片，計畫報告與其他為靜態資料提供用戶參考。

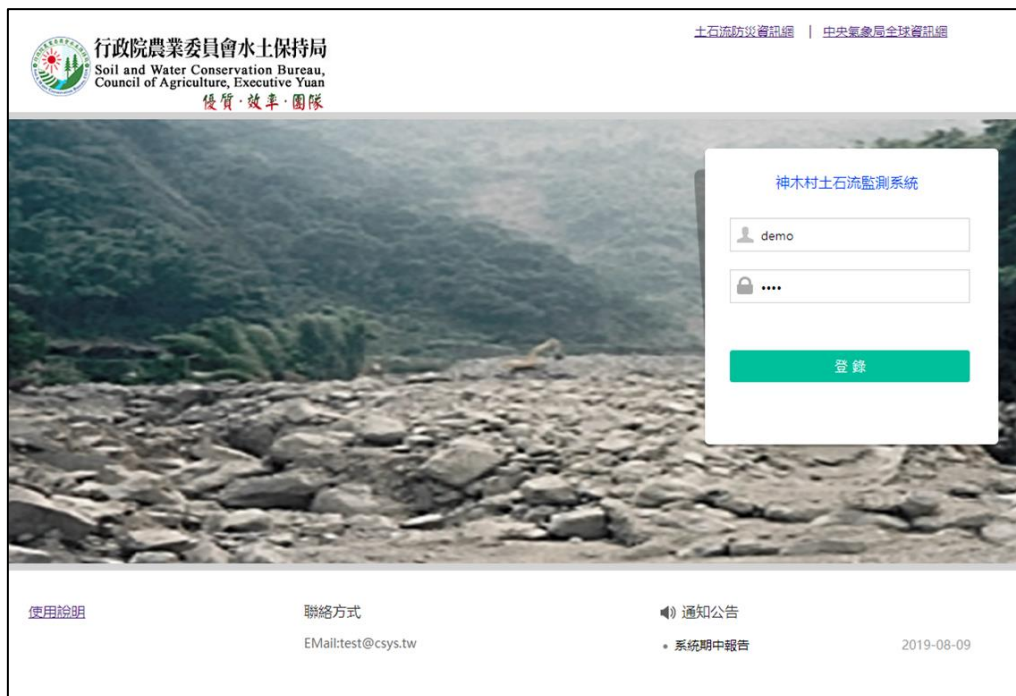
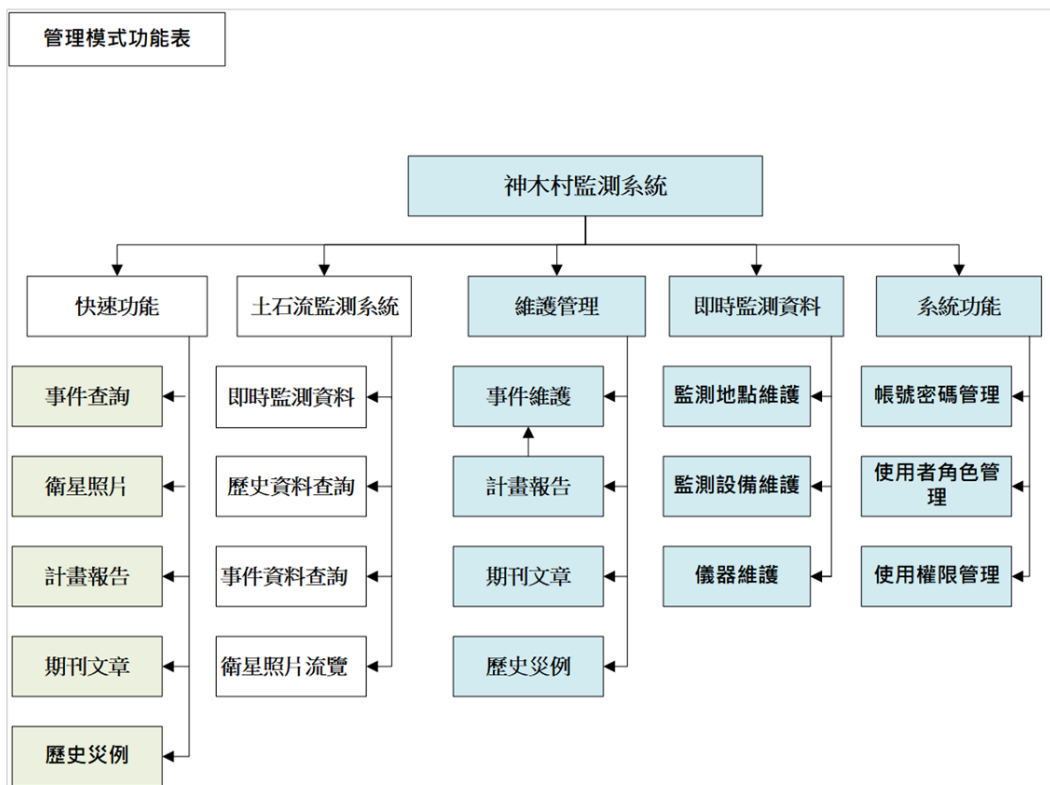


圖3、網站架構圖與展示首頁

五、結論與建議

針對影像訊號分析部分，本計畫透過現場錄影畫面，追蹤土石流特性，並定義出土

石流抵達時間。抵達時間採總灰階值變化偵測，準確度在2秒以內。另外，以影像分析法追蹤土石流夾帶之大石，估計其粒徑，並追蹤不同時間下的相對位移，計算其運移速度。目前粒徑大小只能估算表面露出部分，包含旋轉速度下，大顆粒竟準確度為20%。

針對攝影機在現地的裝設，攝影機照射方向以與垂直線角度超過30度為原則，攝影機裝設位置離偵測目標區距離建議為攝影畫面單方畫素數目乘以0.1後的距離(單位:公尺)為最遠距離。

在地聲訊號加值部分，本計畫以地聲資料利用短時間平均，配合振幅改變率方法，可以準確偵測土石流抵達時間，並配合影像分析驗證地聲資料的預警歷史事件誤差在5秒以內。另外，本計畫以降雨資料估算觀測站之土石流流量，並以現場測量不同流量之水流來檢定流量與地聲能量之關係，得到以0-60Hz能量與流量有最佳的關係，其關係式為:能量=0.002x流量^{1.82}。

以地聲傳播理論分析，地聲探測器之埋設以在堅硬岩盤(最好不要有破碎帶或泥沙堆積層)為原則，若無岩盤，則以埋置於壩體中，利用壩體吸收聲音為佳，連續設置多個地聲，以相鄰地聲不超過100公尺為最佳。

最後，本計畫已初步建立土石流資訊展示與分析系統，包含即時監測資料分析之儲存資料庫與分析展示網頁，提供水保局或相關計畫人員測試使用。目前已將攝影機、地聲探測器、鋼索、水位計、流速計等資料放於網頁，並將加值軟體也結合於系統中。

參考文獻，

1. Mizuyama,T.,Fujita,M,&Nonaka,M (2003) Measurement of bed load with the use of hydrophones in mountain torrents.
2. Itakura Y.,Y.Koga,J.I.Takahama, and Y.Nowa(1997) Acoustic detection sensor for debris flow.
3. Arattano,M. (2003) Monitoring the presence of the debris-flow front and its velocity through ground vibration detectors, The third Int. Conf. on Debirs-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos,Switzerland,pp.719-730.
4. Friedlander B. and A. Zeira(1995) Over-sampled Gabor representation for transient signals.
5. O'Callaghan, J.F. and Mark, D.A. (1984) The Extraction of the Drainage Networks from Digital Elevation Data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28, 323-344.
6. Jenson, S. and Domingue, J. (1988) Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, 1593-1600.
7. Andreas Schimmel (2018) Automatic Identification of Alpine Mass Movements by a Combination of Seismic and Infrasound Sensors
8. Wei, S. C., and Liu, K. F. (2019) Automatic Debris Flow Detection with Geophones., Landslides. DOI 10.1007/s10346-019-01258-9