
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 slopeland disaster

成果報告書

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：108年01月01日至108年12月31日

計畫主持人：劉格非 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 108 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)

摘要

本研究計畫建立以地聲探測器與攝影機搭配的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

目次

摘要	I
Abstract	III
目次	V
表次.....	IX
圖次	XI
第一章 前言	1-1
第一節 計畫目的	1-1
第二節 擬解決問題與解決問題重點	1-1
第三節 重要工作項目及實施辦法	1-3
1.3.1 現場影像分析	1-3
1.3.2 現場地聲加值分析	1-4
1.3.3 以預警或研究為目的的土石流觀測站建議	1-4
第四節 預期效益與評核標準	1-6
1.4.1 預期效益	1-6
1.4.2 期中期末評核標準	1-7
第二章 現場影像分析	2-1
第一節 以影像分析顆粒速度	2-1
2.1.1 前人研究	2-1
2.1.2 理論推導	2-4
2.1.3 室內實驗	2-11
2.1.4 現場應用	2-25
第二節 以影像偵測土石流	2-31

2.2.1 分析方法	2-32
2.2.2 室內實驗測試	2-36
2.2.3 現地影像	2-39
第三章 現場地聲分析	3-1
第一節 前人研究	3-1
第二節 研究區域與觀測資料	3-2
3.2.1 地文與水文條件	3-2
3.2.2 歷年土石流觀測資料	3-4
3.2.3 地聲配置與儀器說明	3-5
第三節 分析方法	3-9
3.3.1 時域分析方法	3-9
3.3.2 頻域分析方法	3-10
3.3.3 土石流事件分析	3-12
第四節 土石流警戒條件之探討	3-17
3.4.1 地聲偵測土石流的考量因素	3-17
3.4.2 考量因素間的交互影響	3-18
3.4.3 地聲警戒標準之建立	3-22
3.4.4 小結	3-28
第五節 地聲與流量之分析	3-30
3.5.1 土石流歷史事件流量與地聲能量關係	3-30
3.5.1.1 合理化公式計算流量	3-30
3.5.1.2 三角形單位歷線計算逕流歷線	3-33
3.5.1.3 土石流歷史事件水文分析	3-34
3.5.1.4 地聲訊號分析	3-37
3.5.2 現地清水流之流量與地聲能量之關係	3-43

3.5.2.1 清水流流量量測	3-43
3.5.2.2 地聲訊號實驗結果分析	3-45
3.5.3 結果分析	3-58
第四章 儀器裝設原則	4-1
第一節 攝影機裝設之探討	4-1
4.1.1 光照角度與拍攝角度關係	4-2
第二節 地聲探測器裝設之探討	4-10
第三節 愛玉子溪觀測設備之建議	4-11
4.3.1 軟體層面建議	4-12
4.3.2 硬體層面建議	4-13
第五章 土石流資訊展示與分析系統	5-1
第六章 結論	6-1
參考文獻1	
第二章參考文獻	參-1
第三章參考文獻	參-2
第四章參考文獻	參-4
附錄一、投稿文章	附錄 1-1
附錄二、工作會議記錄	附錄 2-1
附錄三、108 年度「坡地防災與保育」推動小組科技補助計畫「坡地土砂災害觀測資訊加值分析與應用」委員審查意見會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄 3-1
附錄四、108 年度「坡地防災與保育」推動小組科技補助計畫「坡地土砂災害觀測資訊加值分析與應用」委員期中審查意見會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄 4-1
附錄五、108 年度「坡地防災與保育」推動小組科技補助計畫「坡地土砂災	

害觀測資訊加值分析與應用」委員期末審查意見會議紀錄暨回覆辦理情形 附錄 5-1

表 次

表 1-1	問題分析與擬解決問題重點	1-2
表 1-2	研究績效指標	1-6
表 1-3	評核標準	1-7
表 2-1	擬合方框中灰階亮度值之表示方式(局部座標系統).....	2-5
表 2-2	局部座標對應之誤差表示方式	2-8
表 2-3	點 1 與點 26(範例)追蹤點中心 3×3 方框內之灰階亮度值 2-15	
表 2-4	追蹤點中心 3×3 方框內之二次擬合函數係數.....	2-16
表 2-5	追蹤點第一幀和第二幀坐標及位移與瞬時速度.....	2-17
表 2-6	追蹤點第一幀和第二幀實際坐標及位移與瞬時速度	2-19
表 2-7	兩種方法之追蹤點判釋結果與誤差	2-19
表 2-8	顆粒每兩幀間之瞬時角速度	2-21
表 2-9	顆粒每幀間瞬時平移速度	2-21
表 2-10	顆粒每幀間瞬時位移速度與平移速度之誤差	2-23
表 2-11	第一幀到第二幀追蹤點點位資訊統整.....	2-24
表 2-12	愛玉子溪之影像處理流程	2-27
表 2-13	第一幀到第二幀土石流追蹤點點位資訊統整	2-30
表 3-1.	神木觀測站之愛玉子溪歷年土石流事件與觀測資料清單	3-8
表 3-2.	愛玉子溪歷年土石流事件前與事件中之能量最大值與能量 斜率最大值	3-22
表 3-3.	不同條件下的土石流警戒條件與判釋時間.....	3-25
表 3-4.	子集水區面積及水文參數	3-31

表 3-5.	子集水區集流時間計算表	3-32
表 3-6.	有效降雨為 10mm 時愛玉子溪單位歷線參數	3-33
表 3-7.	2006 年 6 月 9 日事件不同頻率區間之最大能量	3-39
表 3-8.	2011 年 7 月 13 日事件不同頻率區間之最大能量	3-41
表 3-9.	2014 年 5 月 20 日事件不同頻率區間之最大能量	3-43
表 3-10.	試驗點座標及量測流速與流量	3-44
表 3-11.	試驗點 1 不同頻率區間之最大能量	3-46
表 3-12.	試驗點 2 不同頻率區間之最大能量	3-49
表 3-13.	試驗點 3 不同頻率區間之最大能量	3-52
表 3-14.	試驗點 4 環境雜訊不同頻率區間之最大能量	3-55
表 3-15.	試驗點 3 不同頻率區間之最大能量	3-57
表 3-16.	能量與流量關係式.....	3-62
表 4-1	愛玉子溪監測設備數量	4-14

圖 次

圖 2-1	兩幀間旋轉運動之示意圖	2-10
圖 2-2	試驗使用之保麗龍顆粒材料	2-12
圖 2-3	試驗渠槽與攝影機架設環境	2-12
圖 2-4	室內實驗原始圖像	2-13
圖 2-5	實驗追蹤點之圖像位置	2-14
圖 2-6	實驗追蹤點之點位示意	2-14
圖 2-7	第一幀中追蹤點位	2-17
圖 2-8	第二幀中追蹤點軌跡與所在位置	2-17
圖 2-9	第二幀中實際追蹤點軌跡與所在位置	2-18
圖 2-10	欲追蹤顆粒邊界之線段	2-20
圖 2-11	第一幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係	2-20
圖 2-12	第二幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係	2-20
圖 2-13	第三幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係	2-21
圖 2-14	第四幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係	2-21
圖 2-15	第一幀至第四幀連續追蹤點位	2-25
圖 2-16	愛玉子溪之監測影像斷面	2-25
圖 2-17	愛玉子溪溢口處之比例尺	2-26
圖 2-18	愛玉子溪第一幀至第四幀連續追蹤點位比例尺	2-28
圖 2-19	欲追蹤土石流表面顆粒邊界之線段	2-28
圖 2-20	第一幀之圓心座標與土石流表面顆粒邊界線段之關係 ..	2-29
圖 2-21	第二幀之圓心座標與土石流表面顆粒邊界線段之關係 ..	2-29
圖 2-22	ROI 的選取 (1)現地影像 (2)室內實驗	2-33
圖 2-23	影片截圖與亮度分佈圖	2-35
圖 2-24	(a)器材架設 (b)保麗龍球，直徑大小為 2~10 公分 (c)攝影機	

正射渠道拍攝的影像，渠道寬 60 公分、兩個紅點間距離為 10 公分	2-37
圖 2-25 四種環境亮度下之亮度分佈隨時間變化圖	2-37
圖 2-26 極微光情況下之 ROI 平均亮度變化	2-38
圖 3-1 雨量統計 (統計自 1987 年 1 月至 2007 年 2 月；參考雨量站為中央氣象局的神木村站)	3-4
圖 3-2 愛玉子溪地聲監測位址與埋設環境照片；(a)為愛玉子溪集水區航拍圖，拍攝於 2017 年 7 月 15 日；(b)、(c)、(d)為地聲的埋設位置照片，其中(b)拍攝於 2016 年 3 月 31 日，(c)與(d)引用自 Huang et al. (2007)	3-7
圖 3-3 愛玉子溪歷年土石流事件之振幅與時頻分析	3-13
圖 3-4 事件前與事件中之能量頻譜與特徵頻率區段之估計；紅線為事件中頻譜能量之平均值加一倍標準差處	3-16
圖 3-5 不同 Δ_t 和頻帶之累積能量與累積能量斜率圖；橫軸皆為時間(分鐘)，黑色實線為累積能量(cm^2/s^2)，青色實線為累積能量斜率(cm^2/s^3)，虛線為影片判釋之土石流前峰時間	3-21
圖 3-6 四場土石流之的累積能量與累積能量斜率警戒圖；其能量計算間隔 Δ_t 為 10 秒，積分頻段為 5-40 Hz；水平藍實線($R_p=10$ 或 $R_s=5$)與藍虛線($R_p=5$ 或 $R_s=2.5$)為方法一的警戒條件；水平紅實線($R_p=10$ 或 $R_s=5$)與紅虛線($R_p=5$ 或 $R_s=2.5$)則為方法二的警戒條件；橘線為影片判釋之土石流前峰時間	3-26
圖 3-7 愛玉子溪子集水區劃分圖	3-31
圖 3-8 三角形單位歷線示意圖 (來源：區域排水整治及環境營造規劃手冊)	3-33

圖 3-9	2006 年 6 月 9 日十分鐘雨量圖	3-34
圖 3-10	2006 年 6 月 9 日愛玉子溪出口處逕流歷線	3-34
圖 3-11	2011 年 7 月 13 日十分鐘雨量圖	3-35
圖 3-12	2011 年 7 月 13 日愛玉子溪出口處逕流歷線	3-35
圖 3-13	2014 年 5 月 19 日時雨量圖	3-36
圖 3-14	2014 年 5 月 19 日愛玉子溪出口處逕流歷線	3-36
圖 3-15	2006 年 6 月 9 日原始地聲訊號	3-38
圖 3-16	2006 年 6 月 9 日 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量 變化圖	3-38
圖 3-17	2006 年 6 月 9 日 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖	3-38
圖 3-18	2011 年 7 月 13 日地聲原始訊號	3-40
圖 3-19	2011 年 7 月 13 日事件 0-60、60-120、120-180、180-250 區 間能量變化圖	3-40
圖 3-20	2011 年 7 月 13 日事件 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖	3-40
圖 3-21	2014 年 5 月 20 日時域原始地聲訊號	3-42
圖 3-22	2014 年 5 月 20 日事件 0-60、60-120、120-180、180-250 區 間能量變化圖	3-42
圖 3-23	2014 年 5 月 20 日 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖	3-42
圖 3-24	河道測量區間流量剖面圖（來源：JIS）	3-44
圖 3-25	推石頭實驗地點儀器佈置	3-45
圖 3-26	試驗點 1 之三台地聲原始時域訊號	3-46
圖 3-27	試驗點 1 之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量變化 圖	3-46
圖 3-28	試驗點 1 之 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖	3-46

圖 3-29	三台地聲時域原始訊號	3-48
圖 3-30	三台地聲一分鐘傅立葉轉換結果，橫軸為頻率(Hz)，縱軸為 能量 3-48	
圖 3-31	3-48
圖 3-32	試驗點 2 之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量變化 圖	3-49
圖 3-33	試驗點 2 之 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖	3-49
圖 3-34	三台地聲時域原始訊號	3-51
圖 3-35	三台地聲兩分鐘傅立葉變換結果，橫軸為頻率(Hz)，縱軸為 能量 3-51	
圖 3-36	3-51
圖 3-37	試驗點 3 之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量變化 圖	3-52
圖 3-38	試驗點 3 之 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖	3-52
圖 3-39	試驗點 4 三台地聲時域環境訊號	3-54
圖 3-40	試驗點 4 三台地聲環境雜訊傅立葉變換結果，橫軸為頻率 (Hz)，縱軸為能量	3-54
圖 3-41	3-54
圖 3-42	試驗點 4 環境雜訊之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間 能量變化圖	3-55
圖 3-43	試驗點 4 模擬土石流時三台地聲時域訊號	3-56
圖 3-44	試驗點 4 模擬土石流時三台地聲訊號傅立葉變換結果，橫軸 為頻率(Hz)，縱軸為能量	3-56
圖 3-45	試驗點 4 模擬土石流時之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量變化圖	3-57

圖 3-46	試驗點 4 模擬土石流時之 0-20、20-40、40-60 區間能量變化 圖	3-57
圖 3-47	等集流時間線流量與四個能量區間關係圖	3-58
圖 3-48	簡單三角形單位歷線流量與四個能量區間關係圖	3-58
圖 3-49	等集流時間線流量與三個能量區間關係圖	3-59
圖 3-50	簡單三角單位歷線能量與三個能量區間關係圖	3-59
圖 3-51	0-60Hz 頻率區間能量與流量之關係	3-60
圖 3-52	60-120Hz 頻率區間能量與流量之關係	3-60
圖 3-53	120-180Hz 頻率區間能量與流量之關係	3-60
圖 3-54	180-250Hz 頻率區間能量與流量之關係	3-60
圖 3-55	0-20Hz 頻率區間能量與流量之關係	3-61
圖 3-56	20-40Hz 頻率區間能量與流量之關係	61
圖 3-57	40-60Hz 頻率區間能量與流量之關係	61
圖 4-1	實驗操作場地與設置	4-3
圖 4-2	短軸等高線圖	4-3
圖 4-3	長軸等高線圖	4-4
圖 4-4	短軸長度對光照角度作圖	4-5
圖 4-5	長軸長度對光照角度作圖	4-5
圖 4-6	短軸長度對光照鏡射角度作圖	4-6
圖 4-7	長軸長度對光照鏡射角度作圖	4-6
圖 4-8	固定光源角度，相機從不同角度拍攝所得粒徑常軸分布圖	4-7
圖 4-9	固定光源角度，相機從不同角度拍攝所得粒徑短軸分布圖	4-8
圖 4-10	愛玉子溪土石流觀測硬體配置圖；左圖為現在配置、右圖為	

建議未來配置..... 4-15

第一章 前言

第一節 計畫目的

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。綜觀過去觀測資料之收集，本計畫期望提供觀測資料的加值分析研究，主要項目包括：

1. 建立自動判釋土石流抵達之方法，並分析土石流抵達之時間。
2. 追蹤土石流夾帶之大石之運移速度，並嘗試估計大石之粒徑。
3. 以降雨資料估算觀測站之土石流流量，並透過地聲觀測紀錄分析推算流量與地聲能量之關係。
4. 以地聲資料預警方法,長期分析現場訊號,並配合影像分析解算地聲資料的預警成功率。
5. 確認與修改影像資料與地聲資料儲存方式與資料分享機制
6. 透過影像分析理論、試驗與現場觀測影像，分析攝影機之架設原則，如：畫面內容、比例尺參考點、拍攝的距離等。
7. 透過地聲分析理論、試驗與現場觀測紀錄，分析地聲探測器之埋設原則，如：埋設深度與距離、單一地聲或多地聲之埋設方式、事件資料之儲存長度等。
8. 以偵測土石流或觀測坡地水文為目的，分析攝影機、地聲探測器、鋼索、水位計、流速計等現有常見之觀測設備的需求條件與架設原則。

第二節 擬解決問題與解決問題重點

依據前節計畫目的，本節將針對各工作項目說明問題與擬解決之研究方法如下表 1-1。

表1-1 問題分析與擬解決問題重點

項目	問題分析	解決問題重點
1	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。	建立監測訊號展示與分析系統，讓監視系統的所有資料與加值資結果都能展現。
2	觀測站資料在加值後可以產生許多直接對預警有幫助的資訊但是需要一套可以即時展示與比較資料的系統，才能讓使用者一目了然，並針對比較的資料做決策。	
3	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，因此必須針對這兩項設備，做最大的加值利用。	
4	在影像利用上，目前有光流法(Farneback, 2002; 2003)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。	本計畫將重新檢視現光流法有的影像分析方法，如：PIV、PTV、光流法等，建立能分析土石流影像物理特性的演算方式。
5	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	針對歷史事件的資料進行分析，設計用地聲資料預警的程序，並嘗試建立地聲與流量的關係。

	<p>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。</p>	
6	<p>由於地聲安裝位置對訊號有很大的影響, 從國內外的文獻回顧發現, 過去有很多事件, 旁邊有裝設地聲檢知器, 但是卻無法得到訊號, 或得到不同訊號的案例很多, 因此有必要針對裝設與應用部分做從基礎理論上的探討。</p>	<p>地聲探測器的安裝位置, 本計畫將透過理論或數值對實驗或現場的地聲傳遞機制進行模擬, 建立地聲擺放位置的評估方法。</p>

第三節 重要工作項目及實施辦法

1.3.1 現場影像分析

實施方法或工作內容摘要說明：

1. 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。
2. 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。
3. 透過影像分析理論與試驗, 產生土石流流動過程之表面流速計算方法。
4. 以現有之理論方法設計試驗, 並改變畫面範圍、距離、角度等, 估計不同拍攝參數對分析結果的影響, 並定義出可接受

的誤差範圍，最後以此範圍建立現場架設原則。

1.3.2 現場地聲加值分析

實施方法或工作內容摘要說明：

1. 以降雨資料估算觀測站之土石流流量，並透過地聲不同頻寬之能量，檢定流量與地聲能量之關係。
2. 以現場不同流量之水流，以地聲估算水流之聲源能量，並嘗試檢定水流流量與地聲能量之關係。
3. 以地聲資料預警方法，長期分析現場訊號，並配合影像分析解算地聲資料的預警成功率。
4. 發展地聲傳播之分析理論，並以試驗與現場觀測紀錄，說明地聲探測器之埋設原則，如：埋設深度與距離、單一地聲或多地聲之埋設方式、事件資料之儲存長度等。

1.3.3 以預警或研究為目的的土石流觀測站建議

實施方法或工作內容摘要說明：

1. 根據現有分析方法與本計畫之成果，初步建立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。
2. 以偵測土石流或觀測坡地水文為目的，分析攝影機、地聲探測器、鋼索、水位計、流速計等現有常見之觀測設備的需求條件與架設原則。

第四節 預期效益與評核標準

1.4.1 預期效益

在本研究計畫的預期效益中，主要落於監測資料的加值分析，其帶動未來監測資料加值分析的效益，並非本研究可量化，故先針對目前研究做簡單的評估如下。

由於本計畫之研究皆為過去較少人接觸的新研究，故每個工作項目皆可產出期刊文章，以影像與地聲為例，分別都能在一年內產出至少 1 篇的期刊論文，但因為本研究皆為過去較少人接觸的新研究，結果產出後，很難在同一年度提出並於年底前被接受，審查時間上較難達成。以研討會方面來說，由於本研究皆為目前國際上監測研究的趨勢，故接收度較高，預估的相關的績效指標如下表 1-2。

表1-2 研究績效指標

共通性 指標 項目	細項指標	預估 量化值 (原始)	預估 量化值 (期中 更新)	預估 量化值 (期末 更新)	內涵說明
研發成果 學術著作 發表	國內期刊論文	1 篇	1 篇	0 篇	依照目前進度，預計於年底投稿一篇以影像判釋土石流的分析至中文期刊，如：農工學報(EI)。
	國際期刊論文	1 篇	3 篇	3 篇	目前被接受兩篇國際期刊(SCI)，其中一篇已刊登(Water; IF: 2.524)，一篇即將刊登(Landslides; IF: 4.252)。另外，被接受一篇一般國際期刊。
	國內研討會論文	2 篇	2 篇	2 篇	預計於期末前投稿。
	國際研討會論文	2 篇	1 篇	1 篇	目前已投稿 1 篇相關研究至今年國際土石流研討會，並於 6 月報告完畢。
	研究報告	1 本	1 本	1 本	預計年底產出一本研究報告

人才 培育	人才培 育	3 人	3 人	3 人	一名博士(已畢業)、兩名碩士(已畢業)、兩名準碩士
----------	----------	-----	-----	-----	---------------------------

1.4.2 期中期末評核標準

本計畫之期中與期末評核標準如表 1-3。針對期中報告所需評核的內容主要撰寫於第二章與第四章，而期末報告所需評估的地聲分析與展示系統則分別撰寫於第三章與第五章。

表1-3 評核標準

檢核點	評核標準	參考內容
期中 報告	提出以影像自動判釋土石流或洪水到達時間的方式。	第二章
	提出適用於土石流預警或適用於坡地水文研究的基本儀器裝設原則。	第四章
期末 報告	提出土石流資訊展示與分析系統。	第五章
	以理論或試驗等方式，探討地聲與土石流重要參數之關係。	第三章

第二章 現場影像分析

第一節 以影像分析顆粒速度

要從影片中取得土石流的資訊，一般就是指取得土石流的流深、流速、土石流中顆粒大小或粒徑分布，但是事實上要利用影像來判斷土石流的資訊，一定就面對資訊不完整的事實，因此在一般影像常用的方法，都無法得到最佳的資訊，例如最常用來求取流速的光流法(optical flow)，在畫質良好、亮度不變的情況，的確是可以用的，但是在充滿泥水的環境，就必須修改才能使用。

2.1.1 前人研究

早期由 Gibson 在 1950 年首先提出光流法(optical flow)的概念，光流為三維空間運動的物體在觀察成像二維平面上，像素點的瞬時速度，是利用圖像序列中，像素亮度在時間域上的變化，以及相鄰幀之間的相關性，來找到上一幀與當前幀之間存在的對應關係，從而計算出相鄰幀之間物體的運動信息得一種方法。

Horn 和 Schunck 在 1980 年正式提出光流計算方法，將二維圖像運動場與像素灰度建立相關性，引入光流條件方程式，得到光流計算的基礎方法，其主要的假設為：相鄰圖像幀間亮度恆定。

若第一幀圖像中位於 (x, y, t) 的像素亮度值為 $I(x, y, t)$ ，則在第二幀圖像中該像素移動了 Δx 、 Δy 、 Δt ，因此亮度值 $I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ 可透過泰勒展開式展開如下：

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t + \text{H.O.T} \quad (2-1)$$

其中 $\frac{\partial I}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial I}{\partial y}$ 為亮度值在水平及垂直方向上的變化、 $\frac{\partial I}{\partial t}$ 為亮度值在時間上的變化、 u 及 v 為物體水平及垂直的移動速度。在物體亮度不變

的假設下，即 $I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) = I(x, y, t)$ 可得

$$\frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t = 0 \quad (2-3)$$

$$u \cdot \frac{\partial I}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial I}{\partial y} = - \frac{\partial I}{\partial t} \quad (2-4)$$

(2-4)式即為光流法的條件梯度方程式，然而求解兩變數 u 及 v 尚缺少一個方程式，因此仍需加入一個方程式以求得速度場。在此概念下，衍生出不同拘束條件與數值方法的速度場求解方法。

若以求解範圍進行劃分，則可分為兩種：(1)稠密光流法、(2)稀疏光流法；稠密光流法不論兩幀圖像中的物體是否移動皆進行整個畫面速度場的求解，因此計算量較大；而稀疏光流法只求解指定的區域或特徵點，因此計算量較小，其方法介紹如下。

稀疏光流法

由 Bruce D. Lucas 和 Takeo Kanade 在 1984 年提出經典算法：L-K 光流法(Lucas-Kanade Optical Flow)，採用(2-4)式為基礎假設，再加入其它假設條件進行求解：假設物體為平滑緩變並包含多個像素點。

以相鄰像素的(2-4)式進行物體上每個像素的速度場求解，其向量式可表示如下

$$AV=b,$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I(x_0)}{\partial x} & \frac{\partial I(x_0)}{\partial y} \\ \frac{\partial I(x_1)}{\partial x} & \frac{\partial I(x_1)}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial I(x_n)}{\partial x} & \frac{\partial I(x_n)}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} u(x_0) \\ v(y_0) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial I(x_0)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(x_1)}{\partial t} \\ \vdots \\ -\frac{\partial I(x_n)}{\partial t} \end{bmatrix}, \quad (2-5)$$

其中 x_0 為求解中心位置、 x_1 至 x_n 為相鄰像素之位置。

稠密光流法

由於稀疏光流法僅能計算指定區域之運動場，無法得知圖像所有像素上的運動信息；由 Gunnar Farneback 在 2003 年提出 Farneback 光流法，由於像素點前後幀間不一定亮度恆定，因此不同於稀疏光流法，捨棄了(2-4)式假設，而改以先求出圖像位移場，在藉由前後幀間之時間差，求得圖像之光流場。

計算方法主要假設：物體在前後幀間擁有相同亮度趨勢分布；並以二次函數擬合像素周圍亮度分布，如下

$$f(x) \sim x^T \mathbf{A}x + \mathbf{b}^T x + c, \quad (2-6)$$

其中 $f(x)$ 為像素點 x 對應的亮度， \mathbf{A} 、 \mathbf{b} 、 c 為二次函數擬合之係數。有了像素周圍的擬合函數分布後，若物體在第一幀的二次擬合函數，如下

$$f_1(x) = x^T \mathbf{A}_1 x + \mathbf{b}_1^T x + c_1, \quad (2-7)$$

當物體由第一幀位移 \mathbf{d} 個像素點到第二幀時，重新擬合可得

$$\begin{aligned} f_2(x) &= f_1(x - \mathbf{d}) = (x - \mathbf{d})^T \mathbf{A}_1 (x - \mathbf{d}) + \mathbf{b}_1^T (x - \mathbf{d}) + c_1 \\ &= x^T \mathbf{A}_1 x + (\mathbf{b}_1 - 2\mathbf{A}_1 \mathbf{d})^T x + \mathbf{d}^T \mathbf{A}_1 \mathbf{d} - \mathbf{b}_1^T \mathbf{d} + c_1, \\ &= x^T \mathbf{A}_2 x + \mathbf{b}_2^T x + c_2 \end{aligned} \quad (2-8)$$

由上式可導出如下的關係

$$\begin{cases} \mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{b}_2 = \mathbf{b}_1 - 2\mathbf{A}_1 \mathbf{d} \\ c_2 = \mathbf{d}^T \mathbf{A}_1 \mathbf{d} - \mathbf{b}_1^T \mathbf{d} + c_1 \end{cases} \quad (2-9)$$

在上述關係中，由前後兩幀圖像的函數擬合之係數關係，則可求取兩幀圖像的位移場如下

$$\mathbf{d} = -\frac{1}{2} \mathbf{A}_1^{-1} (\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_1), \quad (2-10)$$

若將此位移除以前後兩幀時間差，則可得圖像速度場。

稠密光流法雖然可以求得整個圖像內的運動場，但由於計算量龐大，且若圖像素點並非感興趣之運動物體，將大量耗時計算過多不必要的運動信息。

本研究將進行光流法改進，將以單點為基礎的光流法，延伸到以線段為基礎的光流法，多了線段，不但可以確認顆粒，更可考慮運動物體旋轉角度，還有物體本身大小的估算，這些就是我們需要的土石流中大顆粒的速度與粒徑資訊。

2.1.2 理論推導

本研究主要探討為追蹤土石流表面之顆粒，計算顆粒移動速度，故本研究理論基礎建立於稀疏演算法下，追蹤同一光點在不同時間序列下的移動位置；也因此，需要從土石流顆粒影片中切割連續相鄰幀間的影像，以判斷光點移動位置。

2.1.2.1 影像灰階化

首先將彩色畫面之 R(紅色)、G(綠色)、B(藍色)灰階化，由於人眼對於綠色最敏感，而對藍色的亮度感最小，於是採用 JPEG 的標準將彩色影像轉換成灰階影像的標準。

$$I = (0.299R + 0.587G + 0.114B) \quad (2-11)$$

2.1.2.2 空間梯度

假設顆粒邊界與周圍背景有明顯的亮度差，透過計算像素點與鄰近像素點的亮度梯度最大的位置，就代表顆粒的邊界位置；x 與 y 方向的空間梯度，如下式

$$G_x(x, y) = I(x + 1, y) - I(x, y) \quad (2-12)$$

$$G_y(x, y) = I(x, y + 1) - I(x, y) \quad (2-13)$$

最後，將兩方向平方和並開根號，得總方向之空間梯度，如下

$$I'(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (2-14)$$

使每個灰階影像像素點透過梯度計算，轉換為新空間梯度亮度圖像。

2.1.2.3 光流法之二次擬合

因為本研究將點的概念延伸到線段，因此每一點概念上轉化為 3 畫素乘 3 畫素的小區域。以每一個要追蹤的點為其中心，往 x 及 y 方向 ± 1 個 pixels 外擴增形成 3x3 的方形計算框，並計算 3x3 追蹤方框的二次擬合函數，如下

$$G_1(x, y) = [x \quad y] \begin{bmatrix} r_4 & \frac{r_6}{2} \\ \frac{r_6}{2} & r_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + [x \quad y] \begin{bmatrix} r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} + r_1 \quad (2-15)$$

其中 G_1 為第一幀方框內灰階值、 (x, y) 為方框內局部坐標、 $r_1 \sim r_6$ 分別為二次擬合函數之係數。

在擬和的 3x3 方框內，其任意變數於 9 個像素點上之座標將採用局部坐標(local coordinate system)去表示。以灰階亮度值 $G_1(0 \sim 255)$ 為例(表 2-1)，其座標點(2,2)即為追蹤點的坐標位置。

表2-1 擬合方框中灰階亮度值之表示方式(局部座標系統)

$G_1(1,1)$	$G_1(2,1)$	$G_1(3,1)$
$G_1(1,2)$	$G_1(2,2)$	$G_1(3,2)$
$G_1(1,3)$	$G_1(2,3)$	$G_1(3,3)$

將(2-15)式展開可得

$$G_1(x, y) = r_6xy + r_5y^2 + r_4x^2 + r_3y + r_2x + r_1 \quad (2-16)$$

為了得到二次擬合函數之係數($r_1 \sim r_6$)，本研究引用最小二乘法(或最小平方法；least squares method)，在誤差平方和最小的條件下，求取擬和之係數。首先，其誤差平方和可表示如下

$$S(r) = \sum_{(x,y)=(1,1)}^{(x,y)=(3,3)} [G_1(x,y) - (r_6xy + r_5y^2 + r_4x^2 + r_3y + r_2x + r_1)]^2 \quad (2-17)$$

接著，二次擬合函數之係數($r_1 \sim r_6$)則可透過下式($S(r)$ 對 $r_1 \sim r_6$ 的偏導數為 0)求得

$$\frac{\partial S}{\partial r} = 0 \quad (2-18)$$

當 3x3 目標方框由第一幀到第二幀圖像運動時，考慮物體有旋轉運動，假設方框內像素點對坐標系原點順時針旋轉 θ 角度時，如下

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

其中(x' , y')為旋轉過後的座標、 $\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 為旋轉矩陣、(x , y)為原始的座標。

因此，將公式(2-19)的局部座標做旋轉變換後，則可視方框在第二幀經旋轉運動的二次擬合函數，如下

$$G_2(x,y) = \left(\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} r_4' & \frac{r_6'}{2} \\ \frac{r_6'}{2} & r_5' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} r_2' \\ r_3' \end{bmatrix} + r_1' \quad (2-20)$$

將上式展開可得

$$\begin{aligned}
G_2(x, y) = & r_4'x^2\cos^2\theta - r_4'xysin\theta\cos\theta + \frac{r_6'}{2}x^2\sin\theta\cos\theta + \frac{r_6'}{2}xycos^2\theta \\
& + \frac{r_6'}{2}x^2\sin\theta\cos\theta - \frac{r_6'}{2}xysin^2\theta + r_5'x^2\sin^2\theta \\
& + r_5'xysin\theta\cos\theta - r_4'xysin\theta\cos\theta + r_4'y^2\sin^2\theta \\
& - \frac{r_6'}{2}xysin^2\theta - \frac{r_6'}{2}y^2\sin\theta\cos\theta + \frac{r_6'}{2}xycos^2\theta \\
& - \frac{r_6'}{2}y^2\sin\theta\cos\theta + r_5'xysin\theta\cos\theta + r_5'y^2\cos^2\theta + r_2'xcos\theta \\
& - r_2'ysin\theta + r_3'xsin\theta + r_3'ycos\theta + r_1'
\end{aligned} \tag{2-21}$$

由於本研究建立於在圖像序列下追蹤相似的擬合函數分佈，因此必須考慮環境亮度的影響，假設圖像的環境亮度為圖像內所有像素點的平均灰階值，令 $\overline{G_1}$ 為第一幀的平均灰階值， $\overline{G_2}$ 為第二幀的平均灰階值，為了修正環境亮度的影響，將第二幀的環境亮度減去第一幀的環境亮度， $(\overline{G_2} - \overline{G_1})$ 視為修正值，將第二幀的灰階值減去修正值，使得前後兩幀圖像建立於相同的環境亮度，如下

$$G_2(x, y) - (\overline{G_2} - \overline{G_1}) \tag{2-22}$$

為了追蹤相似的擬合函數分佈，有了第一幀的擬合函數，將在下一幀圖像逐行逐列搜索相似的 3×3 方框的擬合函數，比較前後兩幀的擬合函數差值，若差值越小，越接近於追蹤的方框擬合函數，在第二幀圖像下，尋找差值最小的方框，即為追蹤點的所在位置。令前後兩幀的擬合函數誤差值為 F ，如下

$$F = G_1(x, y) - [G_2(x, y) - (\overline{G_2} - \overline{G_1})] \tag{2-23}$$

將式(2-16)以及公式(2-21)代入上式可得

$$\begin{aligned}
 F = & r_6xy + r_5y^2 + r_4x^2 + r_3y + r_2x + r_1 - r_4'x^2\cos^2\theta + r_4'xysin\theta\cos\theta \\
 & - \frac{r_6'}{2}x^2\sin\theta\cos\theta - \frac{r_6'}{2}xycos^2\theta - \frac{r_6'}{2}x^2\sin\theta\cos\theta \\
 & + \frac{r_6'}{2}xysin^2\theta - r_5'x^2\sin^2\theta - r_5'xysin\theta\cos\theta \\
 & + r_4'xysin\theta\cos\theta - r_4'y^2\sin^2\theta + \frac{r_6'}{2}xysin^2\theta \\
 & + \frac{r_6'}{2}y^2\sin\theta\cos\theta - \frac{r_6'}{2}xycos^2\theta + \frac{r_6'}{2}y^2\sin\theta\cos\theta \\
 & - r_5'xysin\theta\cos\theta - r_5'y^2\cos^2\theta - r_2'xcos\theta + r_2'ysin\theta \\
 & - r_3'xsin\theta - r_3'ycos\theta - r_1' + \overline{G_2} - \overline{G_1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F = & r_6xy + r_5y^2 + r_4x^2 + r_3y + r_2x + r_1 \\
 & + (r_6'y^2 - r_6'x^2 - 2r_5'xy + 2r_4'xy)\sin\theta\cos\theta \\
 & + r_6'xy(\sin^2\theta - \cos^2\theta) - r_5'(x^2\sin^2\theta + y^2\cos^2\theta) \\
 & - r_4'(x^2\cos^2\theta + y^2\sin^2\theta) - r_3'(x\sin\theta + y\cos\theta) \\
 & - r_2'(xcos\theta - ysin\theta) - r_1' + \overline{G_2} - \overline{G_1}
 \end{aligned}$$

(2-24)

由於比較方框內九個像素點的前後幀擬合差值，假設方框內九個像素點的 F 誤差依序為，如表 2-2。

表2-2 局部座標對應之誤差表示方式

F1	F4	F7
F2	F5	F8
F3	F6	F9

將局部坐標(1,1)代入上式可得F₁

$$\begin{aligned}
F_1 = & r_6 + r_5 + r_4 + r_3 + r_2 + r_1 + (r'_6 - r'_6 - 2r'_5 + 2r'_4)\sin\theta\cos\theta \\
& + r'_6(\sin^2\theta - \cos^2\theta) - r'_5(\sin^2\theta + \cos^2\theta) \\
& - r'_4(\cos^2\theta + \sin^2\theta) - r'_3(\sin\theta + \cos\theta) \\
& - r'_2(\cos\theta - \sin\theta) - r'_1 + \overline{G_2} - \overline{G_1}
\end{aligned} \tag{2-25}$$

將(1,2)代入上式可得 F_2

$$\begin{aligned}
F_2 = & 2r_6 + 4r_5 + r_4 + 2r_3 + r_2 + r_1 + (4r'_6 - r'_6 - 4r'_5 + 4r'_4)\sin\theta\cos\theta \\
& + 2r'_6(\sin^2\theta - \cos^2\theta) - r'_5(\sin^2\theta + 4\cos^2\theta) \\
& - r'_4(\cos^2\theta + 4\sin^2\theta) - r'_3(\sin\theta + 2\cos\theta) \\
& - r'_2(\cos\theta - 2\sin\theta) - r'_1 + \overline{G_2} - \overline{G_1}
\end{aligned} \tag{2-26}$$

依此類推可得 $F_3 \sim F_9$ 。有了兩幀圖像方框內 9 個像素點的誤差值後，接著計算每個像素點的誤差平方和，並將其視為兩幀圖像方框內的總誤差，如下

$$F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 + F_6^2 + F_7^2 + F_8^2 + F_9^2 \tag{2-27}$$

假設存在一個旋轉角度 θ 使上式誤差平方和為最小，因此可得

$$\frac{\partial}{\partial\theta}(F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 + F_6^2 + F_7^2 + F_8^2 + F_9^2) = 0 \tag{2-28}$$

因此，在下一幀逐行逐列的 3×3 方框計算上式，可得每個 3×3 方框的 θ 角度，將 θ 代回(2-27)式，可得每個 3×3 方框的總誤差，進而尋找整張圖像下，總誤差最小的方框位置，其表示式如下

$$\min(F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 + F_6^2 + F_7^2 + F_8^2 + F_9^2) \tag{2-29}$$

而方框的中心點，即為追蹤點在下一幀的移動位置。

2.1.2.4 推估角速度

完成追蹤顆粒邊界上的點後，本研究則接續嘗試追蹤顆粒邊界上的線段，追蹤前後幀間線段的位移，若利用第一幀之線段中心點座標為 (x_1, y_1) ；第二幀之線段中心點座標為 (X_1, Y_1) ，第一幀線段的法線與圖像水平延長線之夾角為 θ ；第二幀線段的法線與圖像水平延長線之夾角為 θ_1 ，假設其第一幀顆粒之圓心座標為 (x_0, y_0) ；第二幀顆粒之圓心座標為 (X_0, Y_0) ，如圖 2-1 所示。

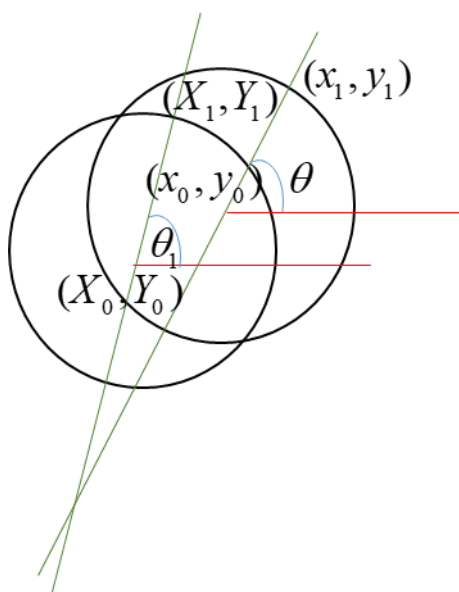


圖2-1 兩幀間旋轉運動之示意圖

由上圖假設座標點以及角度後，透過計算兩幀間法線與圖像水平延長線之夾角差，即 $\theta_1 - \theta$ 可得兩幀間的旋轉運動角度，假設顆粒半徑長度為 r ，可計算圖中座標點之間關係如下

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

再透過假設兩幀間之瞬時運動速度為 V ，兩幀間之時間差為 Δt ，計算圓心在兩幀間的位移如下

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

由上列三方程式求解兩幀間的夾角，再計算夾角之間的差距，可得顆粒之旋轉角度。最後反推式中的 r 即為顆粒半徑(假設顆粒為圓形的條件下)。

2.1.3 室內實驗

2.1.3.1 室內試驗配置與步驟

為了測試前節理論，本計畫使用可穩定供給流量的渠槽(長 12 公尺、寬 0.5 公尺)設計一試驗進行驗證。為了測試表面流場的顆粒速度，

本試驗準備 10 種不同粒徑大小之保麗龍球做漂浮顆粒速度之測試，其粒徑介於 2cm~10cm (如圖 2-2)。

在試驗過程中，攝影鏡頭架設於渠道正上方(如：圖 2-3)，且攝影平面設定為自由表面的正射影像，因此本試驗將不考慮不同景深於座標投影轉換過程所產生的誤差。為了減少環境亮度之影響，故將光源架設於拍攝畫面正上方，使光源均勻分佈於攝影平面。

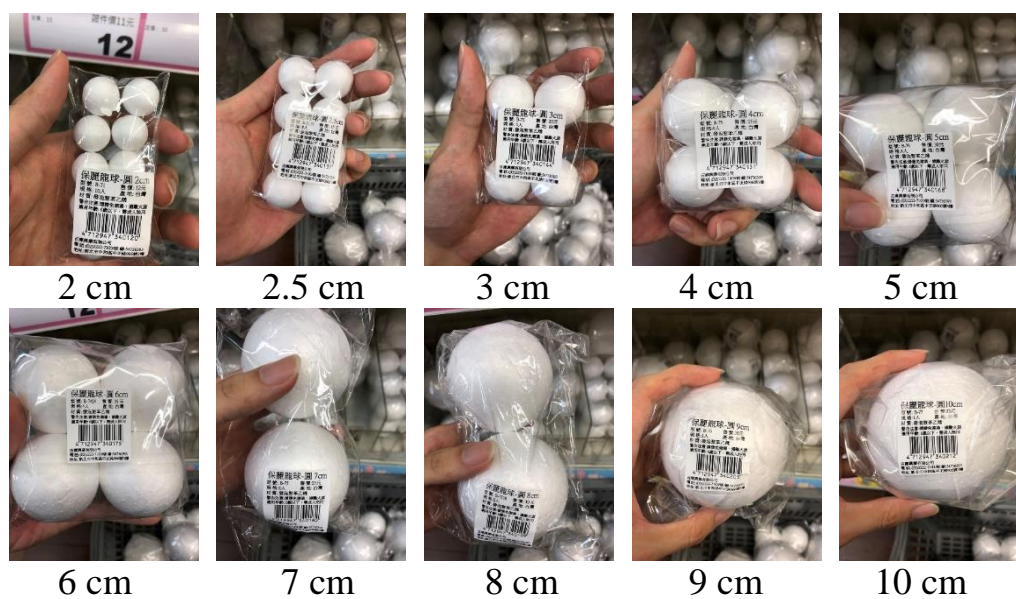


圖2-2 試驗使用之保麗龍顆粒材料



圖2-3 試驗渠槽與攝影機架設環境

試驗步驟：

- 1) 開啟流量循環系統，待流量穩定且達穩態均勻流後，以旋槳式流速儀量測表面流速。(本試驗之表面流速為 18cm/s)
- 2) 於攝影平面上游投入不同粒徑的保麗龍球，並使用檔板擋住保麗龍球。
- 3) 為了減少環境亮度影響，將室內燈源全部關閉，只留下本實驗架

設之光源。

- 4) 開始攝影後，將保麗龍球的檔板釋放，並在保麗龍球通過攝影畫面下游之後關閉攝影，完成試驗。

2.1.3.2 點的追蹤

由於試驗影片的幀數(fps)為 30fps，因此將影片 1 秒切割為 30 幀，即每幀為 $1/30$ 秒(如圖 2-4)，其中每幀影像的尺寸皆為 1920×1080 (pixel)，因此圖像座標 x 軸為 $0 \sim 1920$ (pixel)，y 軸為 $0 \sim 1080$ (pixel)。

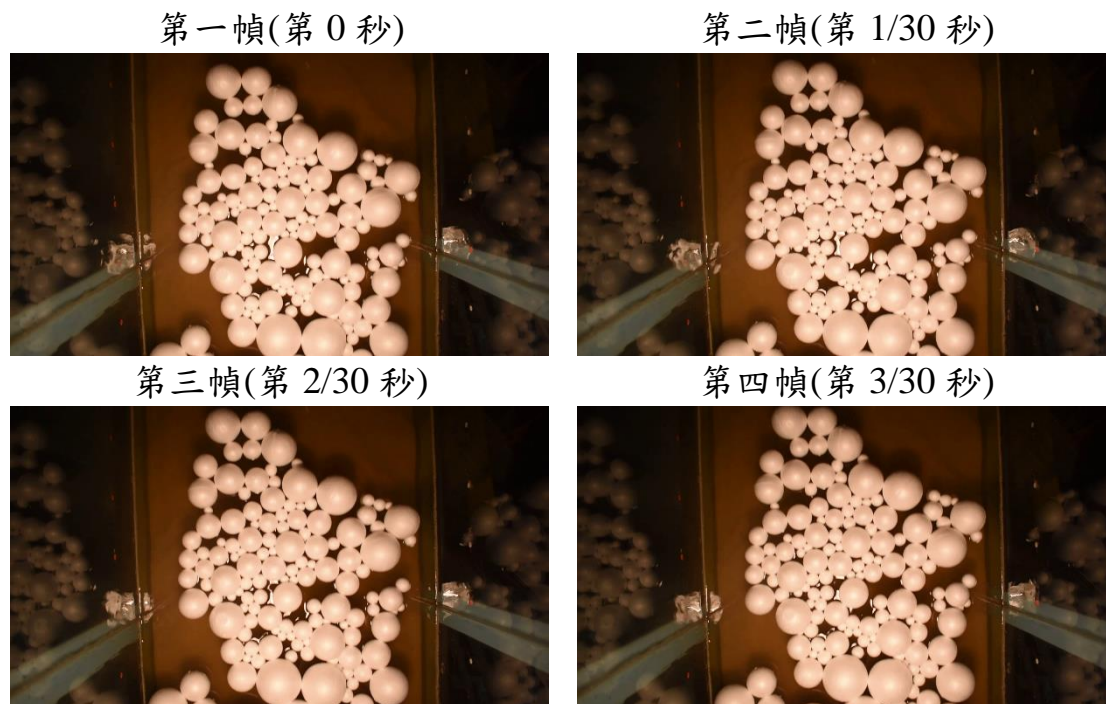


圖2-4 室內實驗原始圖像

以下將先針對圖 2-4 中之四幀圖像做分析，第 0 秒至第 $3/30$ 秒之圖像。

將圖像灰階化後，並計算梯度，選擇局部梯度最大的點，標定為目標追蹤點。將 x 座標 $1800 \sim 1920$ pixels，視為 x 方向最後區塊的座標。y 座標 $1000 \sim 1080$ pixels，視為 y 方向最後區塊的座標，所得追蹤

點如圖 2-5。

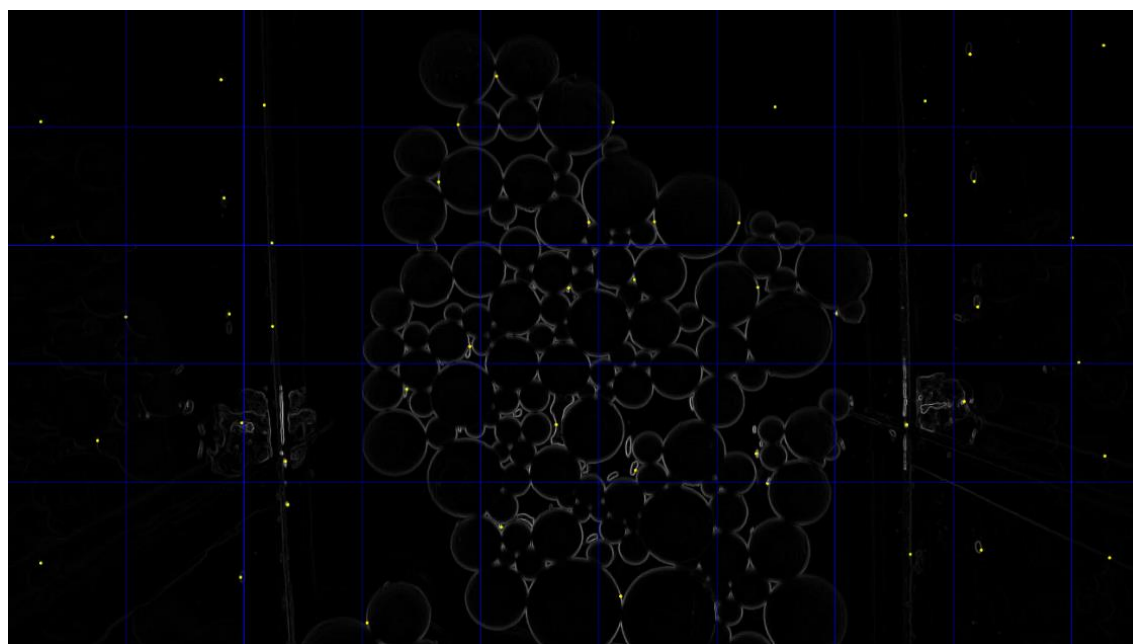


圖2-5 實驗追蹤點之圖像位置

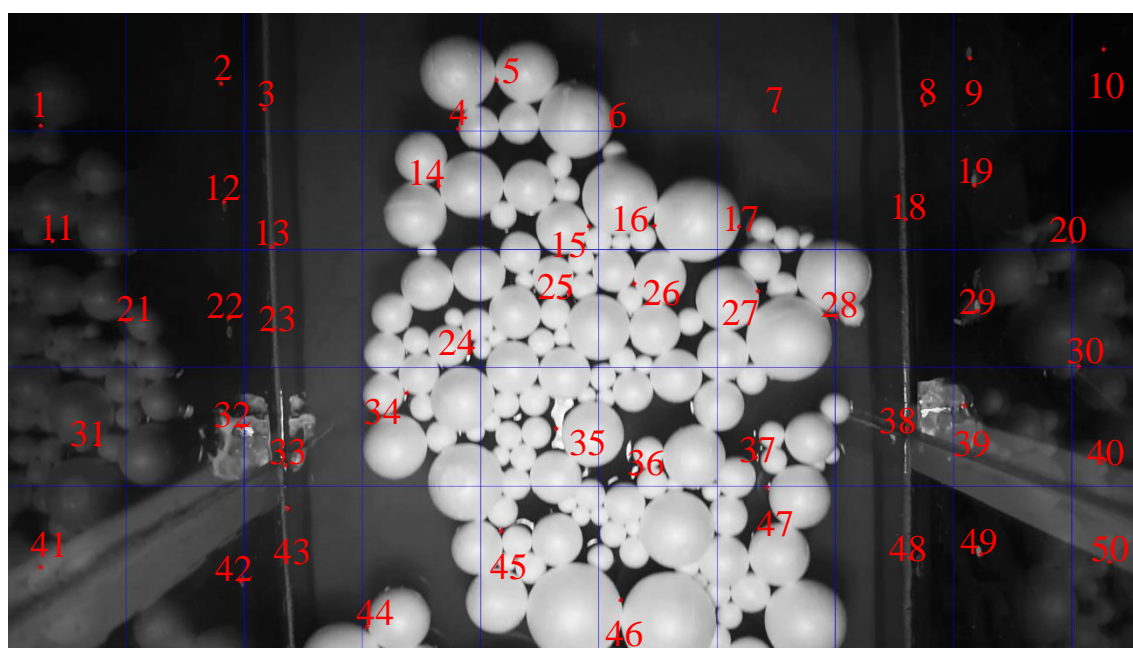


圖2-6 實驗追蹤點之點位示意

如圖所示，藍色線條為區域的間隔線，黃色點為區域內，空間梯度最大的像素點，即本研究追蹤點，由圖像區域最上列追蹤點左至右分別為點 1 至點 10，區域第二列追蹤點由左至右為點 11 至點 20，依此類推，圖像區域最下列的追蹤點，由左至右為點 41 至 50，如圖 2-6

所示。透過圖 2-6，可以看出有些標定點在渠道上的固定點位，如點 2、3、7、8、9、10、12、13、18、19、22、23、29、33、38、42、40、43、48、49，這些固定點經過兩幅圖的對比或前處理，即可自動刪除。而點 32、39，為固定點受到光反射所導致的地方，同理亦可刪除。

有些標定點則為球上邊界，如點 4、5、6、14、15、16、17、24、25、26、27、44、45、46、，有些標定點則為水面波紋，如點 28、34、35、36、37、47，有些則為渠道反射之球影(特性與球相同)，如點 1、11、20、21、30、31、40、41、50，

以下以第 17、26、44 點為例，展示追蹤的座標

追蹤點	x 坐標	y 坐標
點 17	1236	361
點 26	1059	457
點 44	607	1037

二次擬合

首先，在第一幀圖像中，以標定追蹤點為中心，往 x 及 y 方向 ± 1 個 pixels 外擴增形成 3x3 的像素方框，以供後續擬合亮度分佈所用，其方框內 3x3 的像素點灰階亮度值，如表 2-3。

表2-3 點 1 與點 26(範例)追蹤點中心 3x3 方框內之灰階亮度值

追蹤點	方框灰階值		
點 17	150	125	73
	152	123	63
	150	110	52
點 26	29	81	188
	29	56	169
	33	46	141
點 44	32	61	113
	32	49	104
	33	44	95

在確定追蹤點的圖像座標位置及追蹤點周圍 3×3 方框的灰階值後，即可使用式(2-16)，可先擬合出個追蹤點上的二次函數係數，如表 2-4。

表2-4 追蹤點中心 3×3 方框內之二次擬合函數係數

追蹤點	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
點 17	138.778	17.167	15.167	-12.667	-2.667	-5.250
點 26	54.556	-55.333	5.833	37.167	1.667	-12.750
點 44	43.778	-22.000	-1.500	16.833	1.333	-4.750

二次擬合追蹤

接著在下一幀圖像中，本研究逐行逐列計算每個 3×3 方框的二次擬合函數，並透過式(2-29)的條件，尋找追蹤點於下一幀圖像上的位置。

透過計算第二幀整張圖像逐行逐列的每個方框中，本文視滿足式(2-28)和式(2-29)的方框中心點為追蹤點由第一幀移動到第二幀的位置。如圖 2-7 所示，深色點位為第一幀追蹤點的所在位置。而由第一幀到第二幀時，追蹤點的軌跡與所在位置如圖 2-8 所示，深色點位為第一幀的追蹤點位置，淺色點位為第二幀的追蹤點位置，方格線條為區域間格線。

將圖 2-7 與圖 2-8 前後兩幀的追蹤點座標列出如表 2-5，其中 (x, y) 為第一幀追蹤點座標、 (x', y') 為第二幀追蹤點座標。透過兩幀照片的追蹤點座標，則可得其 x 方向與 y 方向的位移 Δx 、 Δy ，將位移除以兩幀照片的時間間隔則可得追蹤點的瞬時速度，最後則透過圖像之比例尺，將長度單位由畫素轉換為公分。

由顆粒邊界上的追蹤點結果，本研究發現同時存在 $-y$ 方向的位移 (約 11~15 個像素點)，比較特別的是，若顆粒上邊界追蹤點附近有許

多顆粒相鄰時，容易產生擬合誤差，使得位移量不準確。

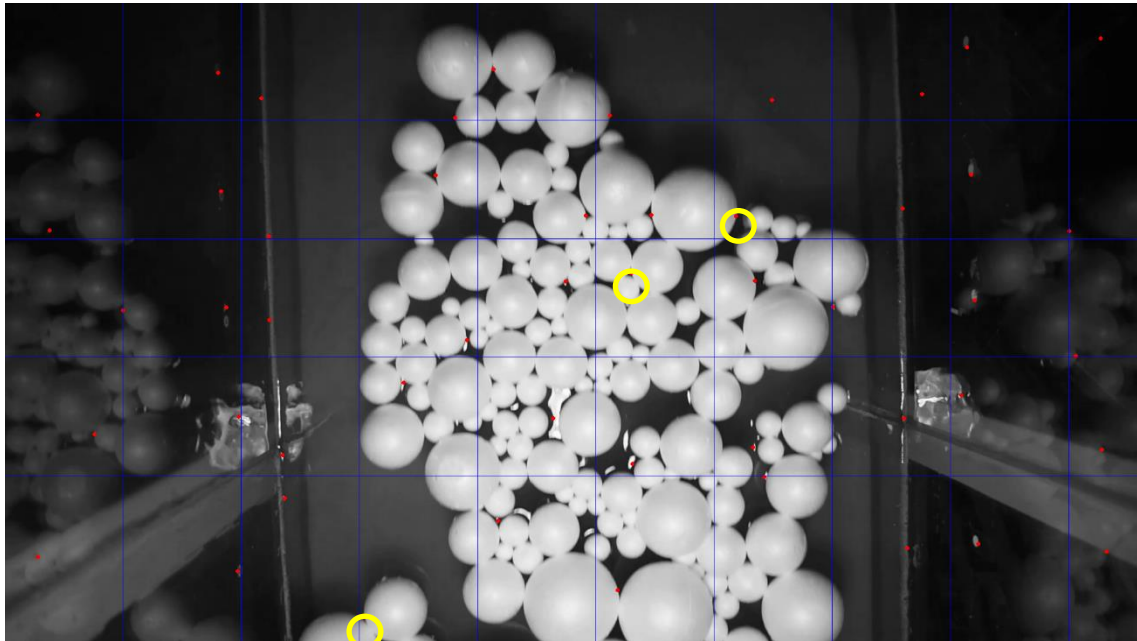


圖2-7 第一幀中追蹤點位

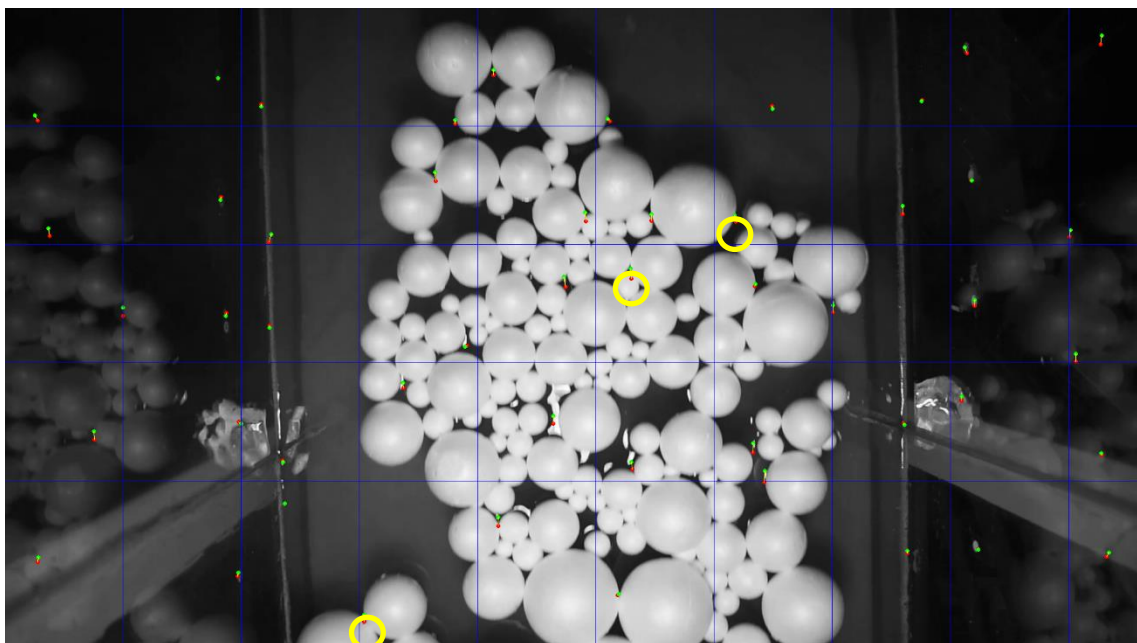


圖2-8 第二幀中追蹤點軌跡與所在位置

表2-5 追蹤點第一幀和第二幀坐標及位移與瞬時速度

追蹤點	追蹤點於第一幀之座標 (pixel)		追蹤點於第二幀之座標 (pixel)		追蹤點於兩幀間之位移 (pixel)		追蹤點於兩幀間之瞬時速度 (cm/s)	
	x	y	x'	y'	Δx	Δy	u	v
點 17	1236	361	1234	350	-2	-11	-2.86	-15.71

點 26	1059	457	1058	440	-1	-17	-1.43	-24.29
點 44	607	1037	607	1025	0	-12	0.00	-17.14

人工追蹤

為了確認此方法的結果是否正確，本文另外使用人工方式去肉眼辨識追蹤點移動的座標，並將肉眼辨識之座標與計算之結果比較。

透過肉眼辨識，若第一幀的標定追蹤點在運動物體的邊界上或水面波紋邊界上，則手動點出第二幀追蹤點點位，如圖 2-9 所示，深色點位為第一幀的追蹤點位置，淺色點位為第二幀的肉眼辨識追蹤點位置，方格線條為參考線。

其中前後兩幀的追蹤點座標則同樣列出，如表 2-6 所示， (x, y) 為第一幀追蹤點坐標，實際坐標 (x', y') 為肉眼辨識之第二幀追蹤點坐標，位移與瞬時速度則與前述算法相同。

其中顆粒邊界與倒影之追蹤點位移介於 13~16 像素點。

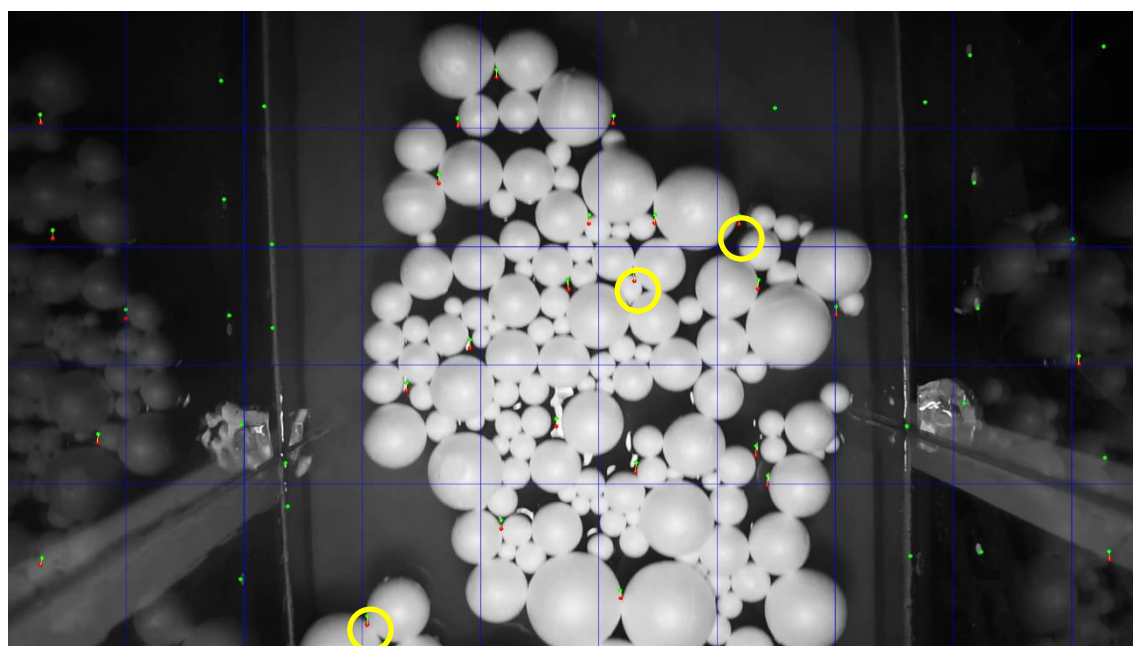


圖2-9 第二幀中實際追蹤點軌跡與所在位置

二次擬合與人工追蹤之比較

假若將人工追蹤之方法視為標準，則可透過此標準計算二次擬合計算結果之誤差，統整表 2-5 與 2-6 之追蹤結果，將其位移與瞬時速

度之誤差則如表 2-7。討論追蹤點在顆粒邊界，其誤差值小於 3 個像素點，誤差小可視為，前後兩幀為同一追蹤點。

表2-6 追蹤點第一幀和第二幀實際坐標及位移與瞬時速度

追蹤點	追蹤點於第一幀之座標(pixel)		追蹤點於第二幀之座標(pixel)		追蹤點於兩幀間之位移(pixel)		追蹤點於兩幀間之瞬時速度(cm/s)	
	x	y	x'	y'	Δx	Δy	u	v
點 17	1236	361	1236	346	0	-15	0.00	-21.43
點 26	1059	457	1058	440	-1	-17	-1.43	-24.29
點 44	607	1037	607	1022	0	-15	0.00	-21.43

表2-7 兩種方法之追蹤點判釋結果與誤差

追蹤點	追蹤點於第二幀之座標(pixel)				兩種方法的位移誤差(pixel)		兩種方法的瞬時速度誤差(cm/s)	
	二次擬合之追蹤結果		人工肉眼辨識之追蹤結果					
	x'	y'	x'	y'	Δx	Δy	u	v
點 17	1234	350	1236	346	2	-4	2.86	-5.71
點 26	1058	440	1058	440	0	0	0.00	0.00
點 44	607	1025	607	1022	0	-3	0.00	-4.29

2.1.3.3 線段的追蹤

完成追蹤顆粒邊界上的點後，接著嘗試追蹤顆粒邊界上的線段，由於本計算方法適用於顆粒邊界上之追蹤線段，故選取圖 2-10 中三條顆粒邊界上之線段進行追蹤，其中第一、二、三、四幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係圖如圖 2-11~圖 2-14。

透過每兩幀顆粒邊界法線與圖像水平延長線之夾角計算角速度，其結果如表 2-8。而每兩幀間顆粒邊界平移速度結果如表 2-9，其中 V_x 為水平方向之瞬時平移速度，定義圖像往右方為正方向，往左方為負方向； V_y 為垂直方向之瞬時平移速度，定義圖像往下方為正方向，往上方為負方向； V 為總方向之瞬時平移速度。

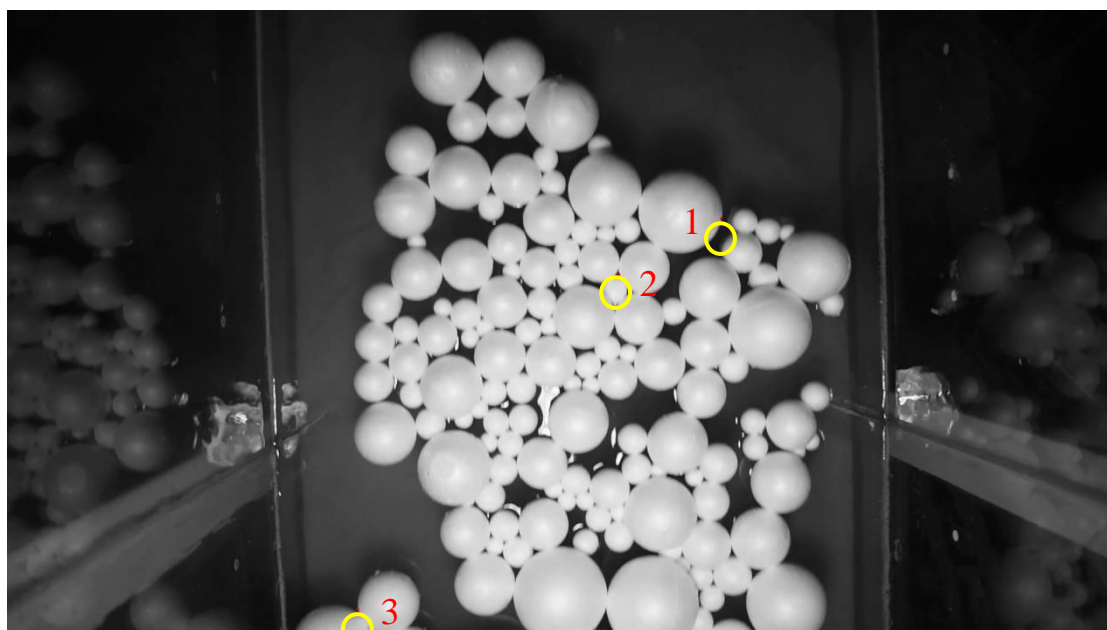


圖2-10 欲追蹤顆粒邊界之線段

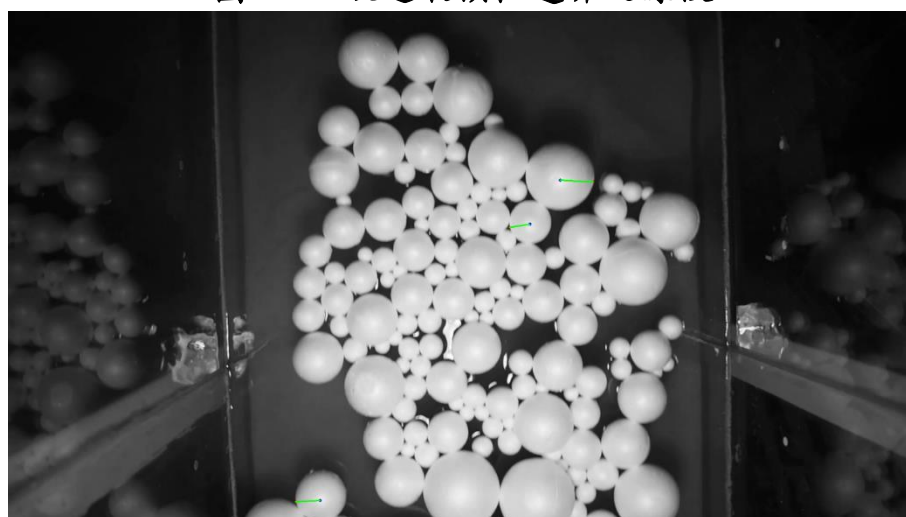


圖2-11 第一幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係

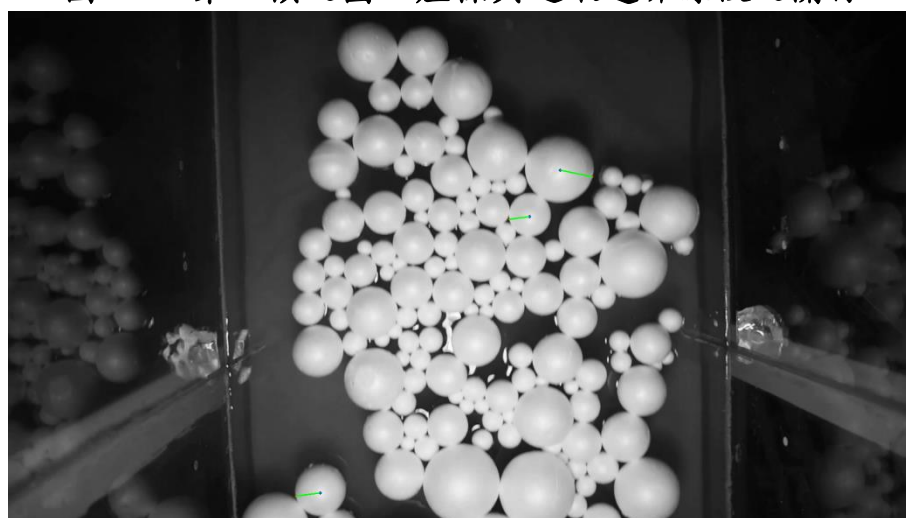


圖2-12 第二幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係



圖2-13 第三幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係

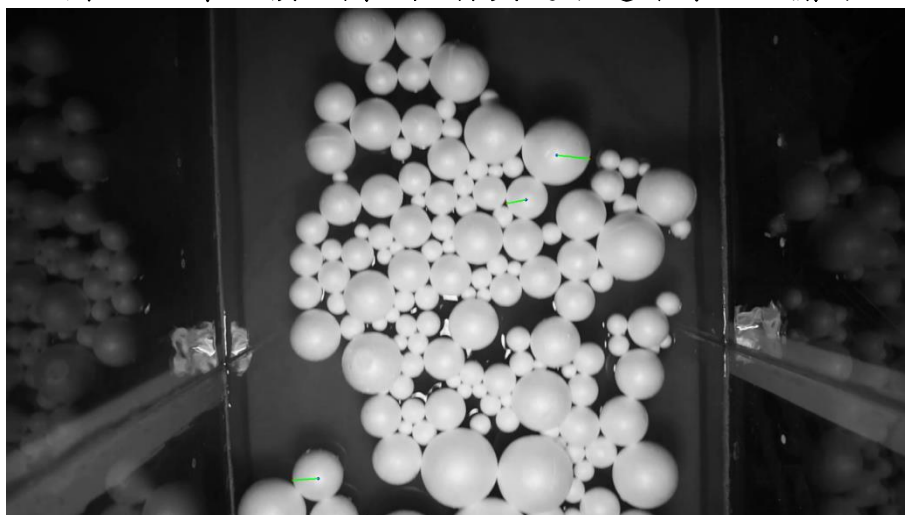


圖2-14 第四幀之圓心座標與追蹤邊界線段之關係

表2-8 顆粒每兩幀間之瞬時角速度

	第一幀與第二幀間 瞬時角速度(度/秒)	第二幀與第三幀間 瞬時角速度(度/秒)	第三幀與第四幀間 瞬時角速度(度/秒)
顆粒 1	-12	2	-3
顆粒 2	-7	1	2
顆粒 3	2	1	3

表2-9 顆粒每幀間瞬時平移速度

	第一幀與第二幀間 之瞬時速度(cm/s)			第二幀與第三幀間 之瞬時速度(cm/s)			第三幀與第四幀間 之瞬時速度(cm/s)		
	V_x	V_y	V	V_x	V_y	V	V_x	V_y	V
顆粒 1	-3.2	-16.7	17.0	-1.5	-23.2	23.3	-1.5	-22.9	23.0
顆粒 2	-1.4	-24.3	24.4	1.0	-18.1	18.1	-1.4	-20.9	21.0
顆粒 3	1.2	-19.2	19.3	-1.1	-20.9	20.9	-1.4	-18.6	18.7

比較由二次擬合追蹤之位移速度，由於此判斷來源是以圖像最終呈現為主，故此位移運動包含了旋轉運動以及平移運動，若與上述所計算的平移運動進行比較整合可得表 2-10，其中 V'_x 為水平方向位移運動(含旋轉及平移運動)速度， V'_y 為垂直方向位移運動(含旋轉及平移運動)速度， V' 為總方向位移運動(含旋轉及平移運動)速度，將平移之瞬時速度減去位移之瞬時速度，可得表 2-10。

假設($\Delta V_x = V_x - V'_x$ ， $\Delta V_y = V_y - V'_y$ ， $\Delta V = V - V'$)

表2-10 顆粒每幀間瞬時位移速度與平移速度之誤差

	第一幀與第二幀間之瞬時速度誤差(cm/s)			第二幀與第三幀間之瞬時速度誤差(cm/s)			第三幀與第四幀間之瞬時速度誤差(cm/s)		
	ΔV_x	ΔV_y	ΔV	ΔV_x	ΔV_y	ΔV	ΔV_x	ΔV_y	ΔV
顆粒 1	-0.3	-1.0	1.1	-0.1	-0.3	0.4	-0.1	0.0	0.1
顆粒 2	0.0	0.1	0.1	1.0	-1.0	1.0	0.0	0.5	-0.5
顆粒 3	1.2	-2.1	2.2	0.3	2.0	-2.1	0.0	0.0	0.0

透過光流法將圖像由第一幀到第二幀之追蹤分析，可以得知每個追蹤點在每幀的坐標位置，若將圖像合併為連續圖像序列，則可以得知追蹤點由第一幀到第二幀之運動軌跡路徑，以及追蹤點的瞬時速度，後續追蹤其追蹤點周圍線段，可以計算出顆粒的角速度將上述計算之結果統整，如表 2-11。

重複同樣的動作，其第一幀到第四幀之追蹤結果，則如圖 2-15；所有點都有四個追蹤位置，最早在下，最晚在上，每一個點期追蹤點排序都相同，每一個點的四幀圖中之追蹤點，其路線軌跡由細線連結表示。圖右側有數個不動點，追蹤出來的四點位在同一位置。

表2-11 第一幀到第二幀追蹤點點位資訊統整

說明	符號	點 1	點 2	點 3
追蹤點第一幀座標	(x,y)	(1236,361)	(1059,457)	(607,1037)
追蹤點第二幀座標	(x',y')	(1234,350)	(1058,440)	(607,1025)
追蹤點位移(pixel)	($\Delta x, \Delta y$)	(-2,-11)	(-1,-17)	(0,-12)
追蹤點速度(cm/s)	(v_x, v_y)	(-2.86,-15.71)	(-1.43,-24.29)	(0,-17.14)
兩方向總速度(cm/s)	v_{xy}	15.97	24.33	17.14
第二幀實際座標	(X,Y)	(1236,346)	(1058,440)	(607,1022)
第二幀實際位移(pixel)	($\Delta X, \Delta Y$)	(0,-15)	(-1,-17)	(0,-15)
第二幀實際速度(cm/s)	(V_x, V_y)	(0,21.43)	(-1.43,24.29)	(0,-21.43)
實際兩方向總速度(cm/s)	V_{xy}	21.43	24.33	21.43
位移誤差(pixel)	($\delta X, \delta Y$)	(2,-4)	(0,0)	(0,-3)
速度誤差(cm/s)	($\delta V_x, \delta V_y$)	(2.86,-5.72)	(0,0)	(0,-4.29)
總速度誤差(cm/s)	δV_{xy}	5.46	0.00	4.29
角速度(度/秒)	ω	-12	-7	2
平移速度(cm/s)	(v'_x, v'_y)	(-3.2,-16.7)	(-1.4,-24.3)	(1.2,-19.2)
平移總速度(cm/s)	v'_{xy}	17.00	24.34	19.24
位移與平移速度差(cm/s)	($\Delta v'_x, \Delta v'_y$)	(0.34,1)	(-0.03,0.01)	(-1.2,2.06)
總平移速度差(cm/s)	$\Delta v'_{xy}$	1.04	0.10	2.42
顆粒計算半徑(cm)	r	3.3	2.1	2.7
實際顆粒半徑(cm)	R	3.5	2.5	3
顆粒半徑誤差(cm)	Δr	0.2	0.4	0.3

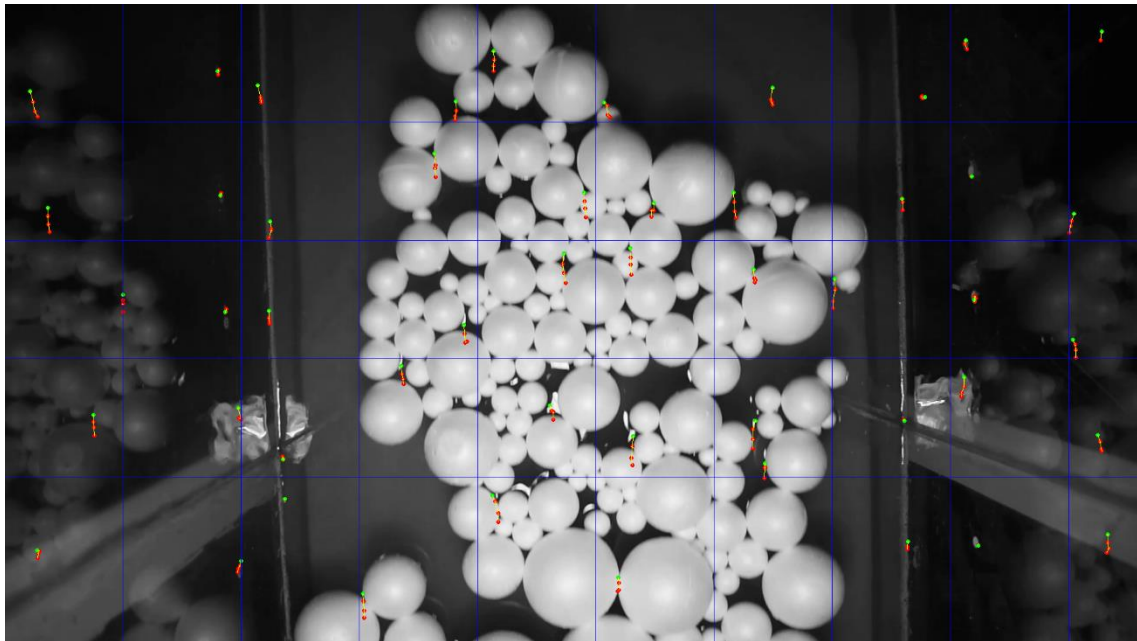


圖2-15 第一幀至第四幀連續追蹤點位

2.1.4 現場應用

為了測試本研究方法，本計畫使用愛玉子溪的歷史土石流事件之影像做測試，本節將以 2013 年 10 月 01 日豪雨所發生之土石流事件做為本研究之案例。現場攝影機畫面，如圖 2-16，其中黃色線段即為佈置鋼索的斷面。現場影像之圖像序列幀數為 10 fps，及每幀間隔為 1/10 秒。



圖2-16 愛玉子溪之監測影像斷面

由於現場拍攝畫面非正射投影拍攝，即拍攝畫面並未平行於相機平面，因此影像存在偏斜；故計算圖像比例尺時需考慮影像深度，若圖像上物體距離相機平面越近，其物體實際長度越大，假設水平方向上圖像比例尺皆為一致，並不隨著垂直方向改變，透過圖 2-16 中斷面上之比例尺信息，計算整個圖像上每 3x3 m 的方框比例尺，如圖 2-17 所示每個藍色方框之實際長度為 3x3 m。

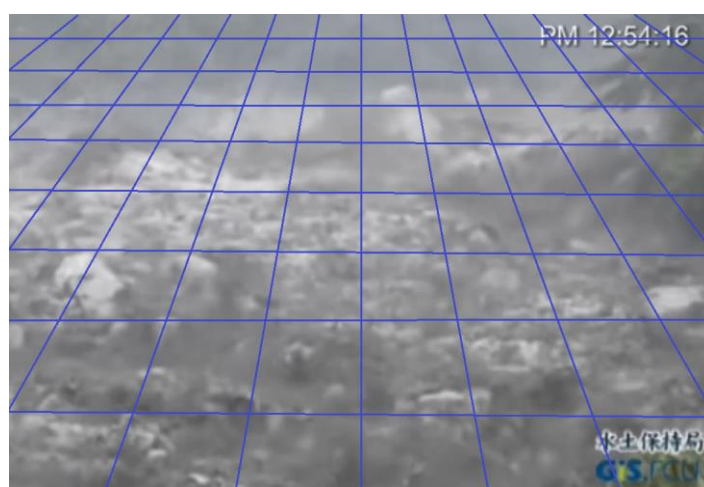



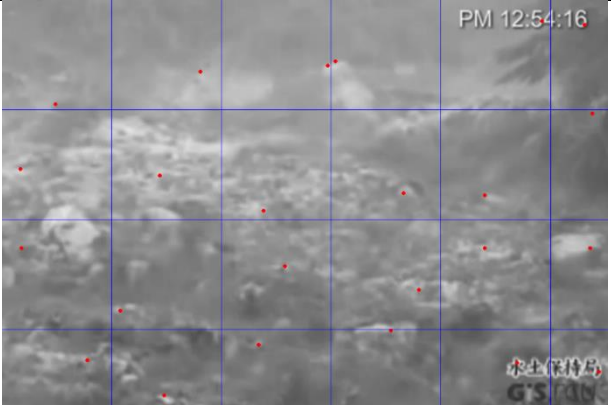


圖2-17 愛玉子溪溢口處之比例尺

按照前節之方法，首先將影片分割及灰階化，並在第一幀上每 200x200 pixels 區域內標定所要追蹤之點位，其過程如表 2-12。

而追蹤點之編號方式則與前節相同。

表2-12 愛玉子溪之影像處理流程

圖像前處理	第一幀(第 0 秒)
原圖	
灰階化	
空間梯度	
標定追蹤點	

連續追蹤第一幀至第四幀之點位，若將比例尺圖繪入上圖以觀察追蹤點移動之實際比例長度，如圖 2-18。

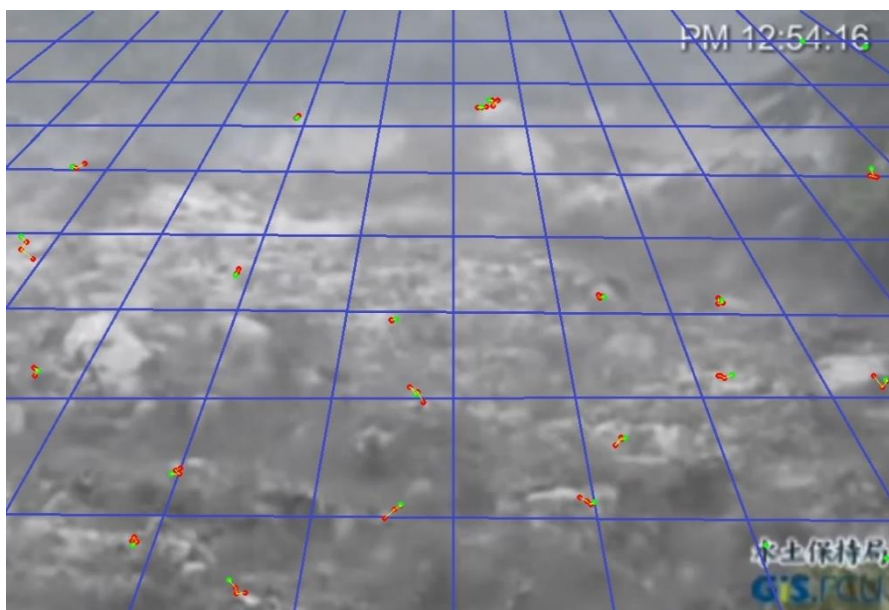


圖2-18 愛玉子溪第一幀至第四幀連續追蹤點位比例尺

將本研究追蹤線段的方法應用於野外現地拍攝的土石流影像，同理，選擇土石流表面顆粒上的邊界線段進行追蹤，後續方能計算角速度，如圖 2-19 選取土石流表面顆粒上的線段。



圖2-19 欲追蹤土石流表面顆粒邊界之線段

第一與第二幀之圓心座標與土石流表面顆粒邊界線段之關係圖如圖 2-20、2-21，其顆粒速度之計算結果則可參考表 2-13。



圖2-20 第一幀之圓心座標與土石流表面顆粒邊界線段之關係



圖2-21 第二幀之圓心座標與土石流表面顆粒邊界線段之關係

表2-13 第一幀到第二幀土石流追蹤點點位資訊統整

說明	符號	點 1
追蹤點第一幀座標	(x,y)	(593,119)
追蹤點第二幀座標	(x',y')	(587,120)
追蹤點位移(pixel)	$(\Delta x,\Delta y)$	(-6,1)
追蹤點速度(m/s)	(v_x,v_y)	(-4.44,0.74)
兩方向總速度(m/s)	v_{xy}	4.50
角速度(度/秒)	ω	5
平移速度(m/s)	(v_x', v_y')	(-4.6,0.8)
平移總速度(m/s)	v_{xy}'	4.67
位移與平移速度差(m/s)	$(\Delta v_x', \Delta v_y')$	(0.16,-0.06)
總平移速度差(m/s)	$\Delta v_{xy}'$	0.17
顆粒計算半徑(m)	r	4.7

第二節 以影像偵測土石流

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。

2.2.1 分析方法

2.2.1.1 影像灰階化

彩色影像先使用國際電信聯盟(International Telecommunication Union,ITU)所訂定的公式轉化為灰階值，

$$f(x,y) = 0.299 \times R(x,y) + 0.587 \times G(x,y) + 0.114 \times B(x,y) \quad (2-33)$$

其中

x,y ：二維影像的空間座標

f ：為影像空間座標 (x,y) 的灰階值， $f(x,y)$ 的範圍為 0 ~ 255

R ：為影像空間座標 (x,y) 的紅色亮度值， $R(x,y)$ 的範圍為 0 ~ 255

G ：為影像空間座標 (x,y) 的綠色亮度值， $G(x,y)$ 的範圍為 0 ~ 255

B ：為影像空間座標 (x,y) 的藍色亮度值， $B(x,y)$ 的範圍為 0 ~ 255

2.2.1.2 分割影像 ROI

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，可減少程式資訊的計算量。

以圖 2-22(1)現地影像來說，通常攝影機都架設於河道兩岸，以側面並面向上游的方式拍攝，影像中每個點的深度都不同，為了獲得最接近真實三維物體的比例尺，使用透視投影法延長護岸線找出消失點，並選取影像中上、下游兩個斷面，沿著護岸框選出 ROI 範圍，排除河道以外的區域，其中 x 方向為水流方向， y 方向為河寬方向；圖 2-22(2)室內實驗，以正射的方式拍攝，影像的深度相同，直接選取渠道區域作為 ROI，排除兩側壓克力板以即上游光源反光處。

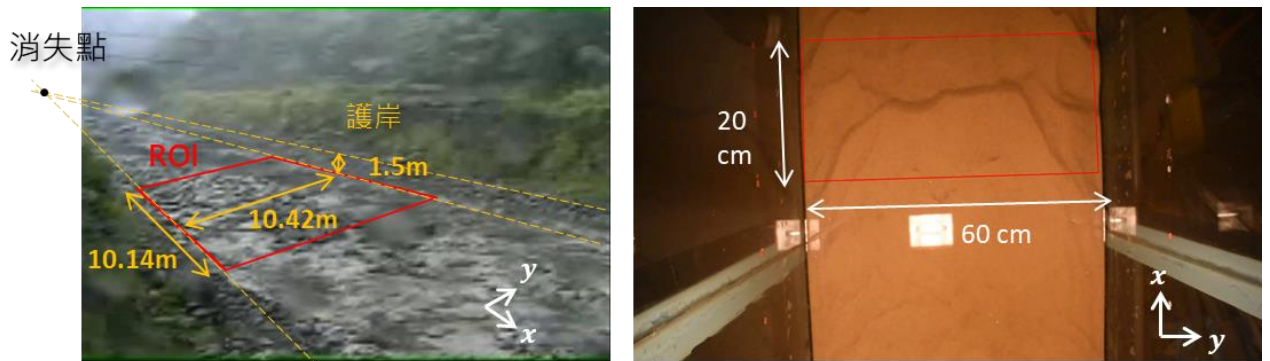


圖2-22 ROI 的選取 (1)現地影像 (2)室內實驗

2.2.1.3 平均亮度值計算

一張影像的平均亮度值計算即為加總 ROI 畫面中所有像素的亮度值，再除以像素的總量。

$$\bar{f}(t) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y,t)}{MN} \quad (2-34)$$

其中

t ：時間，單位為秒

$\bar{f}(t)$ ：在 t 秒時的平均亮度值

M ：ROI 中 x 座標方向像素數量

N ：ROI 中 y 座標方向像素數量

每一張畫面都可快速計算出該畫面的灰階值分布，即該畫面每一個灰階值有幾個畫素，然後可以畫成灰階值分布的直方圖。

以敏督利颱風土石流事件影片為例，影片起始時間為 2004 年 7 月 2 日 16 時 41 分，依照前述影像前處理後，再對 ROI 中的像素點亮度值進行統計，可繪製影像直方圖，影像直方圖是用以表現該張影像像素亮度值分布的直方圖，橫軸為像素亮度值，亮度值範圍為 0 至 255，縱軸為該亮度值所累積的像素數量，為了圖上的判讀方便性，圖 2-23 c 的縱軸為該亮度值累積的像素所佔 ROI 所有像素數量的比例。

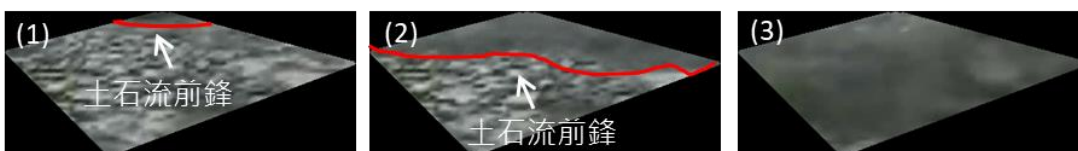
透過對影片作亮度值統計分析，繪製該場事件亮度值分布隨時間的變化圖(圖 2-23d)，由人眼判釋土石流事件於影片第 27 秒時已經進入 ROI 區域，平均亮度值也在第 27 秒後開始下降，即畫面平均亮度值變暗，證實當土石流波前來臨時 ROI 區域(Region of interest)中平均亮度值會大幅改變的想法，因此只要設定一個亮度值變化範圍，即可以做為偵測土石流波前到達的門檻值。

要看亮度值改變，就必須訂出亮度值門檻值，這又跟當下的光源有關，每張都不同，因此本研究採取計算亮度值改變速度，而不去定義亮度值的改變量。

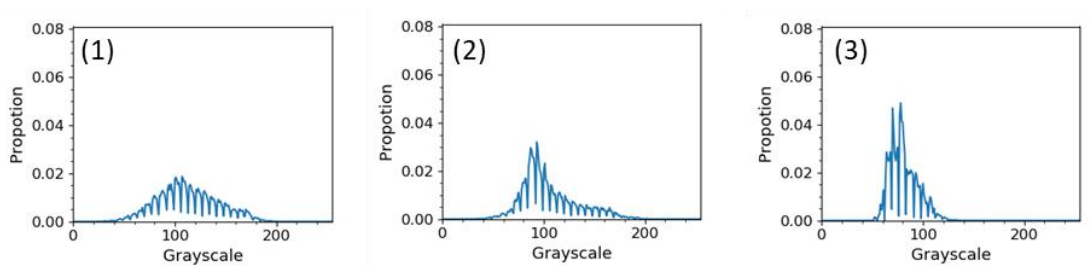
a. CCD攝影機拍攝的土石流事件影像



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

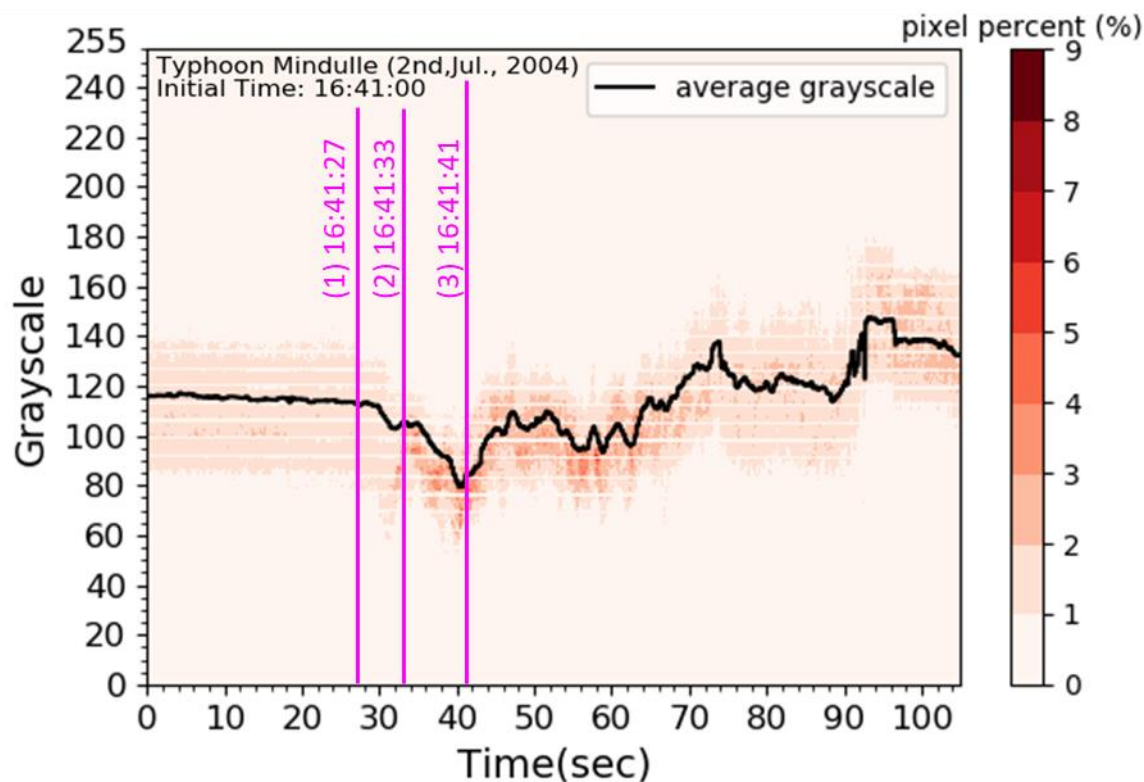


圖2-23 影片截圖與亮度分佈圖

2.2.1.4 平均亮度值的改變速率

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

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

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。

時間資料上，因為短時間會有雜訊的變動，因此資料處理是將每一筆資料與其鄰近資料做平均，若是與前後 5 筆資料平均，就稱為 10 筆平均值，影像因為一般為每秒 30 個畫面，因此前後 5 筆資料就是 1/3 秒平均。

2.2.1.5 預警亮度改變速度門檻值的設定

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。

2.2.2 室內實驗測試

實驗配置：

本次實驗使用 Nikon D5600 單眼相機錄製影片，其感光元件採用 CMOS，動畫解像度為 1920×1080 ，相機架設於渠道正上方(圖表 3-a)，以正射方式垂直拍攝水面；為了使光照均勻，光源的設置也採用正射方式照射。水流中通過保麗龍球(同 2.1 節之室內試驗)。

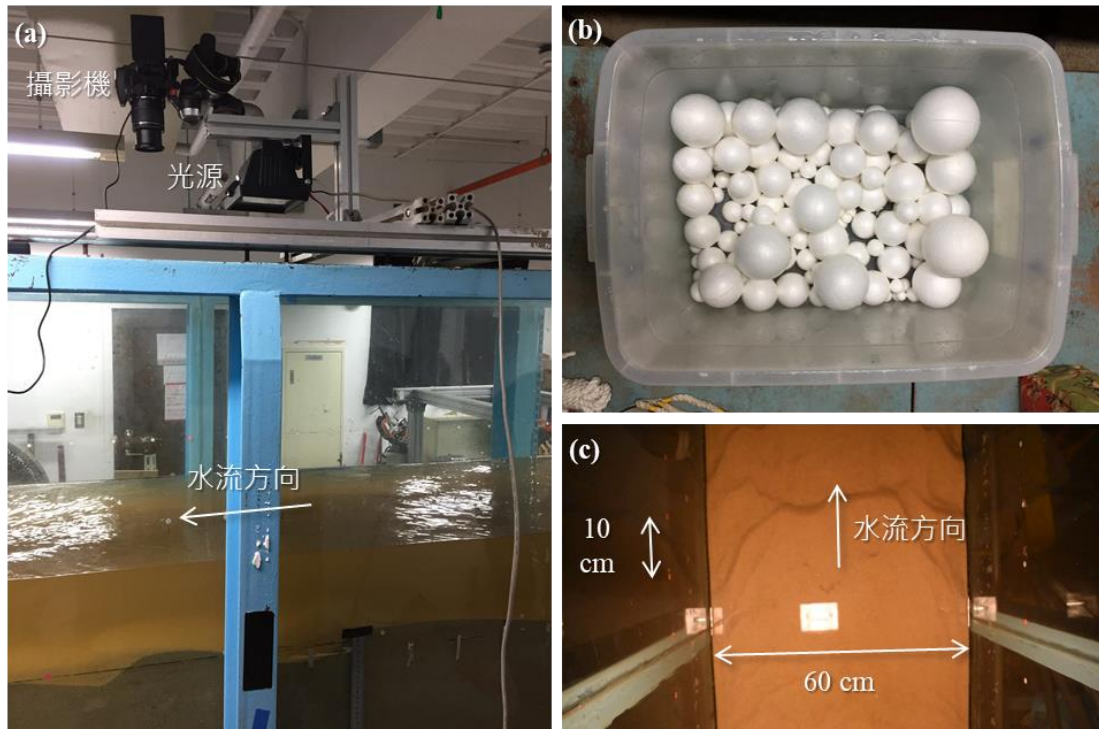


圖2-24 (a)器材架設 (b)保麗龍球，直徑大小為 2~10 公分 (c)攝影機正射渠道拍攝的影像，渠道寬 60 公分、兩個紅點間距離為 10 公分

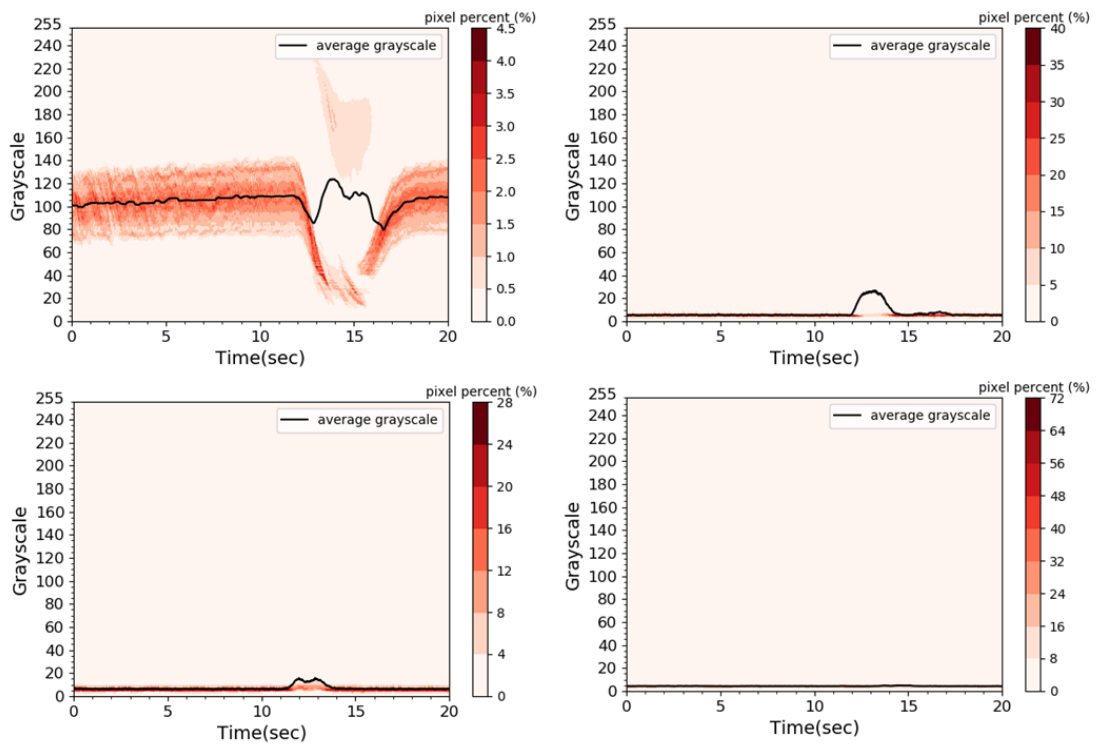


圖2-25 四種環境亮度下之亮度分佈隨時間變化圖

圖 2-25 中四組環境亮度分別代表在強光、弱光、微光與極微光四種情況的灰階值分布改變，強光中灰階值變化明顯可見，隨著燈光越來越暗，其灰階值的變化則越來越小。

但是若放大極微光的圖，則仍然可以看出灰階值是在改變因此斜率計算仍舊有效。

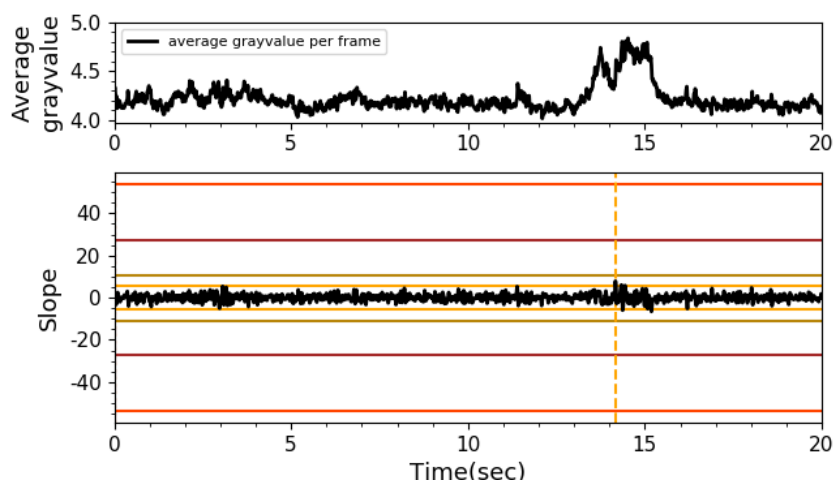


圖2-26 極微光情況下之 ROI 平均亮度變化

以不同短時間平均所得到的斜率門檻值

每1幀平均亮度值變化率 所濾定的門檻值				每20幀平均亮度值的平均值變化率 所濾定的門檻值				每59幀平均亮度值的平均值變化率 所濾定的門檻值			
T	2T	5T	10T	T	2T	5T	10T	T	2T	5T	10T
33.868	67.737	169.343	338.687	8.811	17.623	44.059	88.119	2.585	5.170	12.927	25.854
16.72	33.440	83.600	167.200	0.851	1.702	4.257	8.514	0.200	0.400	1.000	2.000
13.465	26.930	67.326	134.653	0.501	1.003	2.507	5.015	0.106	0.212	0.530	1.060
5.389	10.778	26.946	53.891	0.312	0.623	1.558	3.116	0.079	0.159	0.396	0.793

以不同短時間平均得到的門檻值的偵測能力

實驗	前鋒實際到達的時間(秒)	每1幀平均亮度值變化率 偵測前鋒到達的時間(秒)				每10幀平均亮度值的平均值變化率 偵測前鋒到達的時間(秒)				每29幀平均亮度值的平均值變化率 偵測前鋒到達的時間(秒)			
		偵測前鋒到達時間使用的門檻值				偵測前鋒到達時間使用的門檻值				偵測前鋒到達時間使用的門檻值			
		T	2T	5T	10T	T	2T	5T	10T	T	2T	5T	10T
強光	12.161	12.102	13.186	-	-	12.034	12.203	13.220	-	11.797	11.797	12.288	13.271
	偏差時間(秒)	-0.059	+1.025			-0.127	+0.042	+1.059		-0.364	-0.364	+0.127	+1.11
弱光	11.893	12	12.136	-	-	11.864	11.864	11.864	12.034	8.881	11.339	11.339	11.831
	偏差時間(秒)	+0.107	+0.243			-0.029	-0.029	-0.029	+0.141	-3.012	-0.554	-0.554	-0.052
微光	11.373	8.712	11.746	-	-	7.627	11.186	11.356	11.356	10.847	10.847	10.847	10.847
	偏差時間(秒)	-2.661	+0.373			-3.746	-0.187	-0.017	-0.017	-0.526	-0.526	-0.526	-0.526
極微光	13.085	14.169	-	-	-	13.220	13.390	-	-	12.814	12.814	15.271	-
	偏差時間(秒)	+1.084	-	-	-	+0.135	+0.305	-	-	-0.271	-0.271	+2.186	-

註1: 偏差時間的計算為偵測時間減掉實際時間, 因此負值表示程式偵測時間比實際到達時間還要早, 正值表示程式偵測時間比實際到達時間還要晚

註2: '-' 表示利用該門檻值做偵測, 沒有偵測到保麗龍球進入ROI

由以上四種環境亮度之試驗結果, 只要 10 筆以上的平均資料, 並且以兩倍雜訊斜率去探測, 所得到的準確度就很好, 誤差都低於一秒。

2.2.3 現地影像

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(2-33)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(圖 2-27), 由亮度值統計的數據依照式(2-34)可計算出每張影像的平均亮度值, 再由式(2-35)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。

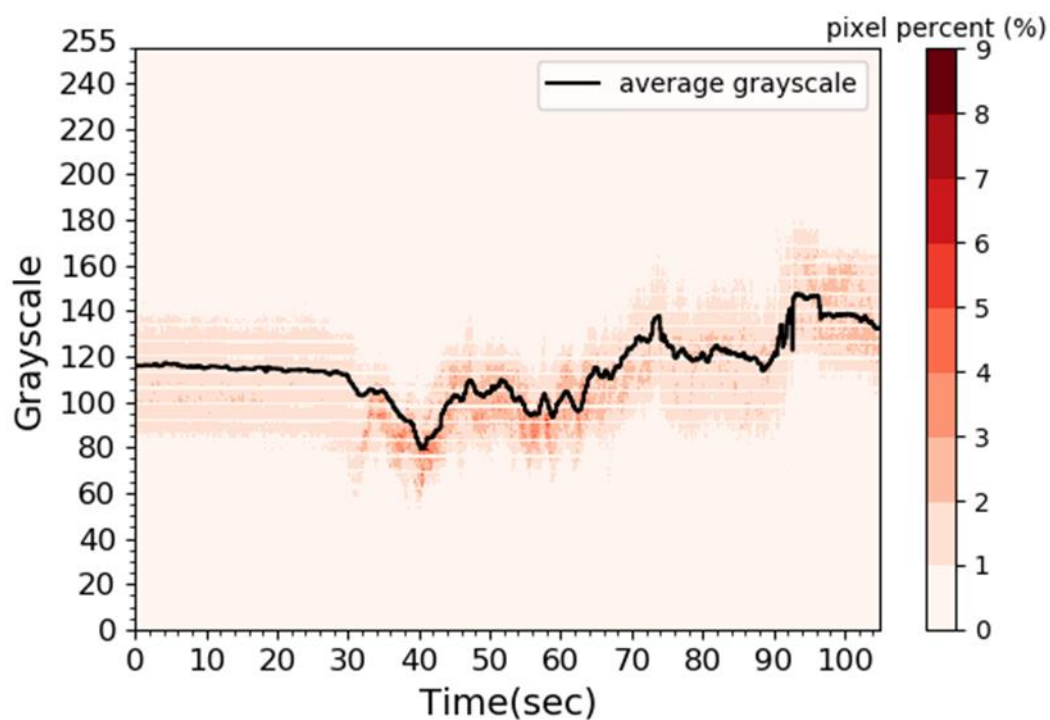


圖 2-27 敏督利颱風現場影像平均灰階值變化過程

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。

第三章 現場地聲分析

第一節 前人研究

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。

而透過地動訊號的監測中，雖然過去不同學者曾採用不同的地震儀(如：地聲探測器、寬頻地震儀、加速度規)進行分析研究，但因為應用在土石流監測上，儀器通常必須擺放於偏遠山區或電力較難到達之區域，因此絕大多數土石流觀測站所配置的地震儀都使用較為穩健(robustness)、省電且價錢較為低廉的地聲探測器(Abancó et al., 2014；Coviello et al., 2015)。以行政院農業委員會水土保持局(以下簡稱水保局)所設置的 21 個固定式土石流觀測站為例，地聲探測器也同樣是目前監測地動訊號的主要地震儀類型(短週期地震儀)，因此本文將針對地聲探測器的監測訊號進行分析。

在過去使用地聲警戒土石流的研究上，一般通常是使用振動速度

值做標準，當超過此值則是為土石流發生，而此值的決定則透過歷史土石流的最大振動速度去反推，如：美國地質調查所(U.S. Geological Survey)的監測系統(Hadley and LaHusen, 1995)、瑞士 Alps、西班牙 Pyrennes (Abancó et al., 2012)、義大利 Marderello 和 Gatria (Coviello et al., 2015)等土石流監測系統。類似的概念也曾被改良，Abancó et al. (2012; 2014)就將紀錄振動速度改成紀錄原始電壓(脈衝法)，並應用於西班牙 Rebaixader 監測站，方耀民等人(2008)也曾使用小波轉換(Wavelet transform)的小波能量去建立愛玉子溪的參考門檻值，Schimmel and Hübl (2015)則結合地聲與次聲去做交互參照的預警判釋。雖然透過門檻值去判釋土石流是目前常用的方法，但至今還沒有一個尋找警戒門檻值的準則，警戒門檻值的決定還是流於經驗(Abancó et al., 2012)，因此如何有系統的建立土石流警戒門檻值也成為目前地聲警戒的重要研究方向。

由於目前水保局所發佈的土石流預警資訊，皆是採用以雨量指標為基礎的預警資訊(詹錢登、李明熹，2004)，雖然水保局在過去已針對 21 處土石流潛勢溪流，建立固定式土石流觀測站，但多數監測資料僅提供做學術研究，至今卻尚未透過的現場其它監測設備的量測資訊，發佈進一步的土石流警戒，包括使用地聲之訊號去發佈警戒。因此本文將透過近年土石流頻繁的愛玉子溪土石流案例，探討土石流地動訊號的特性，並進一步透過訊號的特性去分析判釋土石流或警戒土石流的方法，建立適用於土石流警戒的地聲警戒門檻值。

第二節 研究區域與觀測資料

3.2.1 地文與水文條件

愛玉子溪為濁水溪流域中陳有蘭溪子集水區的上游野溪，位於南

投縣信義鄉的神木村中，並被水保局列管為中潛勢土石流潛勢溪流，編號為投縣 DF226，其土石流之降雨警戒值為 250 mm (參考雨量站為中央氣象局的新高口站和神木村站)。在愛玉子溪的溪流總長度 3.731 公里，其集水區面積為 405.02 公頃，而地形高程則介於 1,200 - 2,500 m，集水區平均坡度約為 39.3°，其中坡度大於六級坡(>55%)的面積超過總集水區面積的 75%(Huang et al., 2007)。

根據經濟部中央地質調查所的地質圖層(二十五萬分之一)，其中上游地質屬於中新世晚期的三峽群南莊層，而中下游則屬於中新世早期至中期的瑞芳群南港層，而南莊層與南港層的上層皆主要以砂岩、深灰色頁岩和砂岩與頁岩之薄葉互層為主。根據陳樹群等人(2012)在愛玉子溪集水區的歷年崩塌調查中，此集水區的崩塌比(崩塌投影面積/總集水區面積)約介於 12%~34.2%(1996 年至 2009 年間)，且有逐年增加的趨勢。

參考中央氣象局的神木村站雨量資料(1987 年 6 月至 2017 年 2 月，如圖 3-1)，此集水區的平均年雨量約為 3054.7 mm，其中雨季(每年 4 月至 10 月)平均總累積雨量則為 2644.5 mm (約佔年雨量 87%)，而旱季(每年 11 月至隔年 3 月)平均降雨量則為 410.1 mm (約佔年雨量 13%)。由於此集水區位處於雨量充沛之地帶，上游又有大量的崩塌土砂料源(如圖 1)，集水區的地形落差大且溪床坡度陡，導致愛玉子溪常常於豪雨事件或颱風期間產生土石流。根據過去水保局的觀測紀錄，愛玉子溪在過去 13 年間(2004 年至 2017 年)就發生過至少 14 次的土石流事件(如表 3-1)。從多場愛玉子溪土石流事件的影片中，我們可看到此地區土石流除了混雜大量的泥砂外，並會帶動溪流上的巨石運移。在多次的現場調查中，沿溪流的土砂料源堆積中，巨石直徑往往都有 1~2 m，並且可看到直徑超過 4~5 m 的巨石。

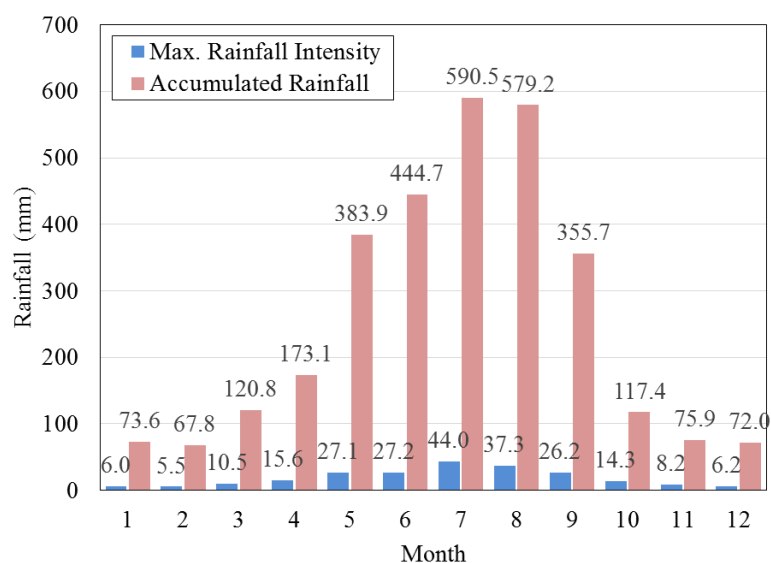


圖3-1 雨量統計 (統計自 1987 年 1 月至 2007 年 2 月；參考雨量站為中央氣象局的神木村站)

3.2.2 歷年土石流觀測資料

過去台灣的土石流觀測研究中，水保局從 2002 年開始建立固定式土石流觀測站，至今已建立 21 站固定式土石流觀測站，而目前固定式土石流觀測站所配置的監測儀器中，主要以傾斗式雨量計、超聲波水位計、地聲探測器、PTZ 攝影機、土壤含水量計、鋼索檢知器為主，部分監測站則會依研究需求添加流速計、伸縮計、傾度盤、土壓計、孔隙水壓計、懸浮固體量測計等。由於資料的儲存量非常龐大，因此目前歷史資料的儲存方式是以有發生事件的資料才另外做長期儲存，但又因為現場的資料儲存很容易遇到不可抗拒之因素而資料遺失，如：監測儀器被沖毀、電力中斷、後台資料庫損壞等，因此並非所有事件都有儲存到完整的資料。

以神木觀測站的愛玉子溪為例，在多達 14 次的土石流事件中，其地聲探測器就多次被沖毀或遇到資料儲存器電力中斷而資料遺失，因此目前有存留的地聲資料只有 4 場(如表 3-1)，包含：2004 年敏督

利颱風事件(72 水災)、2011 年的 1110 豪雨事件、2013 年的蘇力颱風事件、2014 年的 0520 豪雨事件，而本文也將針對這四場事件的地聲資料，分析歷史土石流事件的地動訊號特性。

根據表 3-1 的紀錄，發生於 2004 年敏督利颱風的土石流，因為下游鋼索(上層)有發生斷裂，而此鋼索位於地聲 3 下游 5 m 處(愛玉子橋橋墩)，其上、下兩層鋼索分別距離河床 3 m 與 2 m，因此可以判定經過地聲 3 斷面的土石流流深可能大於 3 m 或土石流運移過程有直徑大於 3 m 的巨石經過此斷面。透過地聲 2 與地聲 3 的累積能量峰值時間差，其土石流前峰的波速則約為 13.3 m/s (Huang et al, 2007)。而在 2011 年 1110 豪雨、2013 年蘇力颱風與 2014 年 0520 豪雨三場事件中，因為上游鋼索檢知器的上、下兩層鋼索(地聲 1 旁)在土石流經過時也都有發生斷裂，因為此處上、下兩層鋼索分別距離河床約 5 m 與 2.5 m，因此可以判定這三場事件的土石流，在經過地聲 1 斷面的流深可能皆大於 5 m 或有直徑大於 5 m 的巨石經過此斷面。這三場事件中因為下游地聲皆以被沖毀，因此並無法透過地聲判斷土石流波速，但水保局透過愛玉子溪上下游的攝影機去判釋，其土石流前鋒經過地聲後的下流平均波速約介於 2~5 m/s 之間。透過觀測紀錄的推估，這四場土石流的規模都不小，但在雨量預警的部分，只有蘇力颱風有達到雨量警戒標準(250mm)。

3.2.3 地聲配置與儀器說明

在愛玉子溪的土石流觀測系統中，地聲探測器主要設置於愛玉子溪下游河道的直線段，共曾在三處設置了三台地聲探測器(如圖 3-2)，其中地聲 3 與地聲 2 分別於 2002 年與 2004 年安裝於右岸護牆底部與右岸砌石牆上，地聲 1 則於 2004 年底安裝於左岸。在地聲 1 與地聲 2 所對應的河道中心上，其直線距離為 275 公尺，而地聲 2 與地聲 3

所對應的河道中心直線距離則為 173 公尺(Huang et al., 2007)。三個位置的地聲皆曾沖毀於 2009 年莫拉克颱風，由於地聲 2 與地聲 3 的位置，經評估已無法再重新裝設地聲，因此只在地聲 1 的位置重新埋設新的地聲於左岸。

三處所安裝的地聲探測器皆為美國 OYO Geospace 所產製的三軸地聲探測器 GS-20DX，其電壓敏感度(Intrinsic Voltage Sensitivity)為 0.28 V/m/s，自然頻率為 10 Hz，實際可量測頻寬約介於 5-500 Hz 之間。由於地聲探測器所紀錄的物理量是電壓(Volt)，因此分析前必須將電壓轉換成地表振動速度。依照目前水保局實務操作或其它相關研究中(Arattano, 1999；Abancó et al., 2012；Coviello et al., 2015)，皆是直接在頻率域除掉其電壓敏感度，雖然會因此造成低頻訊號有部分的失真，但因為沒有與其它地震儀做比較的需求，對於分析結果並不會有太大的影響，因此本研究也將直接使用電壓敏感度做電壓與振動速度的轉換。

除此之外，由於土石流觀測站所需紀錄的資料量非常龐大，因此水保局將地聲訊號的截取頻率(Sampling Frequency)以兩階段的動態調整做資料紀錄的切換。在平時的狀態下，系統會以低負載的正常模式(normal mode)做紀錄，其訊號的截取頻率以較低的頻率做紀錄，而當雨量降雨強度大於 10 mm/hr 或單日累積雨量超過 100 mm 時，系統會自動切換成事件模式(event mode)，其訊號的截取頻率則改為 500 Hz 做紀錄(尹孝元等人，2006；Huang et al. 2007)。由於水保局目前只保存有發生土石流事件的資料，因此本文中所分析的地聲數據皆為事件模式下的紀錄，其訊號截取頻率皆為 500 Hz。



圖3-2 愛玉子溪地聲監測位址與埋設環境照片；(a)為愛玉子溪集水區航拍圖，拍攝於2017年7月15日；(b)、(c)、(d)為地聲的埋設位置照片，其中(b)拍攝於2016年3月31日，(c)與(d)引用自 Huang et al. (2007)

表3-1. 神木觀測站之愛玉子溪歷年土石流事件與觀測資料清單

年度	事件名稱	雨量	地聲	影像	鋼索斷裂時間	雨量警戒判定結果	土石流波速估算
2004	0520 豪雨						
2004	0521 豪雨						
2004	0529 豪雨						
2004	敏督利 颱風	●	▲(2,3)	▲	下游(下)09:16:07; 下游(上)16:41:52		地聲判釋 13.3m/s (Huang et al, 2007)
2006	0609 豪雨	●	▲	×	下游(下)6/9 08:32	達警戒值	
2009	莫拉克 颱風	●	×	×	下游(下)8/8 04:39; 下游(上)8/8 04:41	2009/08/08 04:41 達警戒值	地聲判釋 13m/s;17m/s (王虹萍等,2009)
2011	0713 豪雨	●	▲	●	上游(下)7/13 14:33	鋼索斷裂前未達 警戒值	影像判釋 4.26m/s (水保局, 2015)
2011	0719 豪雨	●	×	×	上游(下)7/19 03:19	鋼索斷裂前未達 警戒值	
2011	1110 豪雨	●	▲(1)	▲	上游(下,上) 11/10 13:29	整場事件未達警 戒值	影像判釋 1.77m/s;1.07m/s (水保局, 2015)
2012	0504 豪雨	●	×	●	上游(下,上) 5/04 15:56	鋼索斷裂前未達 警戒值	
2012	0610 豪雨	●	×	●	上游(下)6/10 10:34 上游(上)6/10 15:14	2012/06/10 20:33 達警戒值	影像判釋 4.26m/s (水保局, 2015)
2013	0517 豪雨	×	×	×	沒有斷裂	2013/05/19 07:02 達警戒值	
2013	蘇力颱風	●	▲(1)	▲	上游(下,上) 7/13 06:54	2013/07/13 06:44 達警戒值	
2014	0520 豪雨	●	▲(1)	●	上游(下,上) 5/20 12:53	整場事件未達警 戒值	影像判釋 4.87m/s (水保局, 2015)
2017	0601 豪雨	●	×	×	上游(下) 6/2 11:40:03	2017/06/02 13:44 達警戒值	

註 1：●表示有紀錄到資料，▲表示有紀錄到部分資料，×則表示資料遺失，空白則表示尚未安裝儀器進行紀錄

註 2：雨量警戒值為 250 mm，參考雨量站採用中央氣象局神木村站

註 3：土石流波速判定採用兩監測點位的距離與土石流波前抵達時間計算，其中地聲判釋法使用振動速度之能量峰值時間近似為土石流波前抵達時間，而影像判釋法則直接以人工判釋影片之土石流波前，無法判釋則空白

第三節 分析方法

在土石流的地聲觀測中，由於現場地層的傳遞介質多屬鬆散料源，受制於鬆散介質的消能現象，故地聲的探測往往只有數十公尺，因此地聲探測器往往會設置於離聲源(Acoustic Source)較近的位置，如：溪流岸邊、人工構造物上。另外也因為安裝位置靠近溪流，使得近溪流的地聲探測器會感測到溪水流動所造成的環境雜訊(Ambient Noise)。因為地聲探測器的安裝位置非常靠近聲源位置，使得訊號之波型較為複雜，因此若要透過地聲訊號判釋是否有土石流事件發生，最直接的方式即是透過比較不同時間區段的訊號能量差異或特徵頻率去決定是否有事件發生，以下將從時域(Time Domain)與頻域(Frequency Domain)的角度分別分析歷史事件。

3.3.1 時域分析方法

在地表振動速度的時間序列分析上，訊號的能量變化是了解土石流運移過程的主要依據，而地表振動速度的能量即為其振幅大小的平方，因此過去多數地聲研究中往往直接以振幅的變化去分析訊號，如常見的振幅法(Method of Amplitude)。此方法透過每秒平均的地表振動速度之振幅大小(Amplitude Level)簡化大量的時間序列資料(Arattano and Moia, 1999; Arattano, 1999; Abancó et al., 2014; Arattano et al., 2014; Coviello et al., 2015)，並藉此判斷地表振動速度隨時間的變化狀況，其轉換式如下

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{f_s} |v|_i}{f_s} \quad (3-1)$$

其中 A 為振幅， v 為三軸地表振動速度向量， f_s 為取樣頻率(1 秒內的總資料筆數)。透過此方法可將三維的振動速度(三軸向)資料降為一維，

並將資料頻率從 500 Hz 降為 1 Hz，即每秒 500 筆轉為每秒 1 筆。此法除了可用於判斷振幅大小的變化外，在實務操作上也可將資料做大幅的壓縮($\approx 0.067\%$)，減少事件中回傳的負載量。

而另一種常見的分析方法則為脈衝法(Method of Impulses)，此種方法則是透過設定一個門檻值將振動訊號做二值化的分類，當電壓(或振動速度)低於此門檻值時，則視訊號為雜訊，超過設定門檻值時，則視為需記錄的事件，並藉此統計一小段時間內(如：1 秒)超過門檻值的資料數量或時間長度(Abancó et al., 2012; Abancó et al., 2014; Arattano et al., 2014)。類似的概念也常用於河床載(Bed Load)試驗中，用以記錄通過某斷面的底床跳動石頭(Saltating Grains)之數量與其對應的河床載輸砂量(Mizuyama et al., 2010; Rickenmann, 2017)。

以上兩種方法除了可透過轉化的資料判讀所需的資訊外，也可大幅壓縮原始資料，降低現場即時回傳的負載。但在脈衝法的使用上必須先決定一個經驗門檻值，因此為了先了解此溪流的土石流特性，本文將先採用振幅法做時域資料的分析。

3.3.2 頻域分析方法

將一段時間下的地表振動訊號做頻譜分析後，如：傅利葉轉換(Fourier Transform)，可將訊號轉換成不同頻率的組成，透過不同頻率的組成，則可判釋此段時間的物理特徵，因此頻譜分析成為此類振動訊號常用的工具。應用在土石流地動訊號的分析上，最常使用的即是快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，如：劉格非和李欣輯(1999)、黃清哲等人(2007)等，但受制於 FFT 只能計算某段時間下的頻譜，而為了瞭解頻譜隨時間的變化，因此多數學者開始引入以短時間傅立葉轉換(Short Time Fourier Transform, STFT)為基礎的時頻分析方法，如：Huang et al. (2004、2007)等曾使用加伯轉換(Gabor Transform)

分析撞擊試驗與愛玉子溪土石流等。除此之外，也有學者採用不同於 STFT 的轉換方法，如：方耀民等人(2008)使用小波轉換(Wavelet Transform)分析愛玉子溪土石流，並初步建立土石流警戒值；周憲德等人(2013、2015)則使用希伯特黃轉換(Hilbert Huang Transform, HHT)去分析火炎山土石流之特性等。

雖然不同學者選用的時頻轉換方法不盡相同，但對結果的分析方式卻都很相近，因此本文將採用較為基本的 STFT 做土石流事件的時頻分析，如下式。

$$X(n\Delta_t, m\Delta_f) = \sum_{p=nS-Q}^{nS+Q} w((nS-p)\Delta_\tau) x(p\Delta_\tau) e^{-j2\pi pm\Delta_\tau\Delta_f} \Delta_\tau$$

當 $|t| > B = Q\Delta_\tau$ 時，窗函數 $w(t) \cong 0$ (3-2)

其中 $x(p\Delta_\tau)$ 為離散的時域資料， $p\Delta_\tau$ 為時間 τ ， Δ_τ 為輸入訊號的時間間隔(=0.002 秒)； $X(n\Delta_t, m\Delta_f)$ 為離散的時頻資料， $n\Delta_t$ 與 $m\Delta_f$ 分別為時間 t 與頻率 f ， Δ_t 與 Δ_f 分別為輸出時頻圖的時間與頻率間隔； $S = \Delta_t / \Delta_\tau$ 。在 STFT 的使用過程中，由於地聲能測得的頻寬下限為 5 Hz，意即在時間的精度上至少必須大於 0.2 秒的週期，才能測得 5 Hz 頻率的波，因此本文在 STFT 的時間窗上選用 256 個資料點($\Delta_t = 0.512$ 秒)做計算，並在每個時間窗中與前個時間窗重疊 128 個資料點(1/2 的時間窗=0.256 秒)，以增加繪圖時的時間精度。在窗函數的選擇上，本文則參考 Harris (1978) 的建議，使用 Kaiser-Bessel 函數來避免頻譜能量洩漏(Leakage)的問題。

$$w(n) = \frac{I_0\left(\beta \sqrt{1 - \frac{4n^2}{(M-1)^2}}\right)}{I_0(\beta)} \quad (3-3)$$

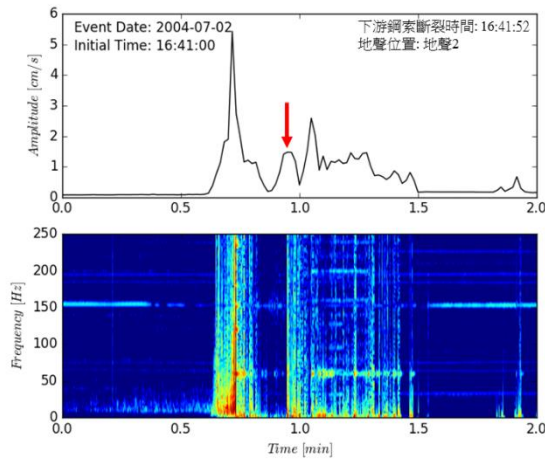
其中 $0 \leq |n| \leq (M-1)/2$ ； I_0 為修正型的第零階貝索函數(the modified zeroth-order Bessel function)； β 為此窗函數之係數，在此選用 14，使此窗函數的旁波瓣(Side Lobe)能量可壓抑至主波瓣(Main Lobe)能量的 10^{-10} 倍(-100 dB)。另外，其能量頻譜密度(power spectral density, PSD 或 power spectrum)以振動速度的平方($|X(n\Delta_t, m\Delta_f)|^2$)去計算，並將三軸的能量頻譜密度加總為總能量頻譜密度。由於事件中的能量往往遠大於事件前或事件後的能量，為了繪圖呈現方便，其頻譜的能量數值將轉換為相對的分貝單位(dB)，如下

$$PSD[\text{dB}] = 10 \cdot \log_{10}(PSD[\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}]) \quad (4)$$

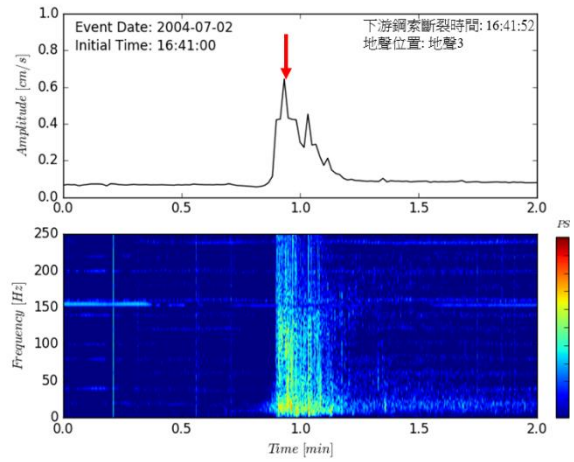
3.3.3 土石流事件分析

應用前節介紹的振幅法以及 STFT 時頻分析法，本文將四場土石流事件的地聲訊號分析結果繪製如圖 3-3，包含：2004 年敏督利颱風、2011 年 1110 豪雨事件、2013 年蘇力颱風和 2014 年 0520 豪雨事件(以下將簡稱為案例 1、2、3、4)。由於地聲的取樣頻率為 500 Hz，因此根據奈奎斯特定理(Nyquist rate)，為了避免頻譜的交疊失真(Aliasing)，分析的頻寬必須低於取樣頻率的 0.5 倍，因此時頻譜圖的頻率分析上限為 250 Hz。

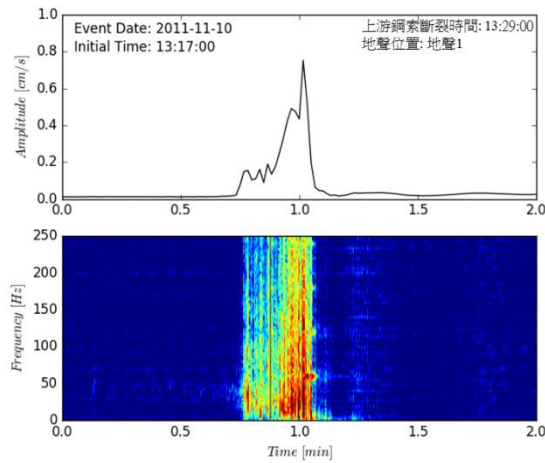
(a) 2004 年敏督利颱風(案例 1)



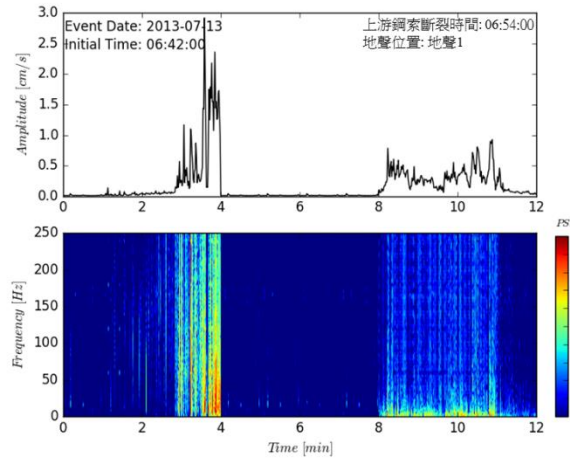
(b) 2004 年敏督利颱風(案例 1)



(c) 2011 年 1110 降雨事件(案例 2)



(d) 2013 年蘇力颱風(案例 3)



(e) 2014 年 0520 降雨事件(案例 4)

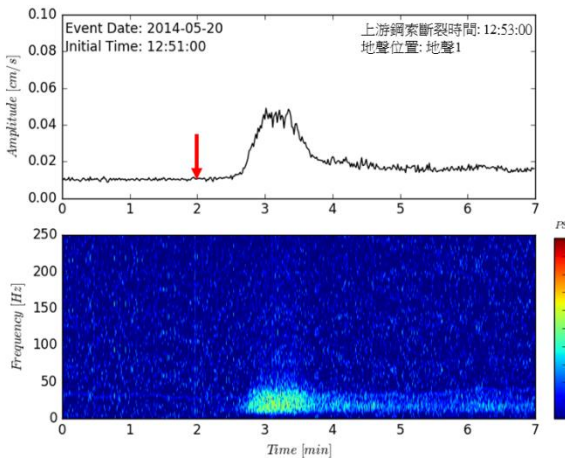


圖3-3 愛玉子溪歷年土石流事件之振幅與時頻分析

在圖 3-3 中時間軸上的任意時間點，其振幅及頻譜能量分佈，基本上是可相呼應的。在傅利葉轉換的基礎上，透過帕塞瓦爾能量守衡定理(Parseval's theorem)，一段訊號的時域振幅平方對時間的積分結果，將恆等於頻率域振幅平方隨頻率的積分結果，因此若將時頻譜圖中某 Δ_t 時間片段的能量 $|X(m\Delta_f)|^2$ 隨著頻率軸做積分，並除掉 Δ_t 時間片段中的總點數 N ，其數值將會恆等於 $|x(p\Delta_\tau)|^2$ 在 $p = ns - Q \sim ns + Q$ 時間區段(即該 Δ_t 時間區段)的積分值。假若選用 $\Delta_t = 1$ 秒，則 $|X(m\Delta_f)|^2$ 積分的數值會約等於振幅 A 的平方，但受限於 FFT 所計算的點數必須為 2 的次方，因此本文在時頻譜圖的分析並沒有採用 $\Delta_t = 1$ 秒，但振幅 A 隨時間的變化關係可近似為時頻譜圖能量隨著分析頻寬積分後再開根號的結果。

透過案例 1 與案例 4 兩場事件的影片比對，當振幅變大時可發現都有土石流經過，而案例 2 與案例 3 雖然留存的影像不完整，但從片段的影片中還是可分辨有土石流經過，因此可從影像的角度判釋這四場事件為土石流事件。為了透過地聲訊號的角度去判釋土石流，以下將從訊號的時域和頻域特徵去做土石流判釋的分析。

在圖 3-3 四場案例的振幅變化中，基本上已可直觀的判定「有事件發生」。在案例 1 中，事件發生前，兩臺地聲(地聲 2 與地聲 3)的振幅的尺度約在 0.1 cm/s，而事件中地聲 2 與地聲 3 的最大振幅峰值則分別為 5.4 cm/s 與 0.6 cm/s，事件前與事件中的振幅差距約在 6~54 倍之間，兩臺地聲之振幅會有如此大的差距，部分學者認為與安裝位置有較大的關係(尹孝元等人，2006；Huang et al., 2007)。與地聲 2 和地聲 3 相比，地聲 1 則是埋設在岸邊較高的位置處，因此其量測到的速度振幅也較小，由案例 2、案例 3 和案例 4 的地聲訊號，其事件前

的振幅尺度皆約落於 0.01 cm/s，三場事件的最大振幅峰值則分別為 0.75 cm/s、2.91 cm/s、0.049 cm/s，三場事件最大振幅則分別為事件前振幅的 75 倍、290 倍、4.9 倍。

當圖 3-3 中各事件的振幅變大時，從其對應的時頻譜圖中(圖 3-3)可發現各頻率能量都遠大於事件前的能量，而頻率域的能量分佈則會隨著頻率增加而遞減，且低頻區的能量皆遠大於高頻區能量至少 10 dB 以上(即能量至少大 10 倍以上)。為了更清楚了解事件中的頻譜特徵，因此本文將事件前與事件中的資料取出做 FFT 並繪製於圖 2-4。在圖 4 的頻譜中可發現事件前的能量皆遠小於事件中的能量，假若將事件中頻譜能量之平均值加上一倍標準差做為參考界限(如圖 3-4 中之紅線)，將能量大於此參考界限的區段視為該事件流況的特徵頻率(Superior Frequency)，四場事件的流況的特徵頻率範圍分別約為 5-35 Hz、10-50 Hz、5-80 Hz、10-40 Hz。

根據過去不同學者的試驗測試，一般礫石的摩擦與撞擊通常會表現出較寬頻的特徵，其不同粒徑之砂石滑動與撞擊的頻率分佈則約介於 20-80 Hz 之間(劉格非和李欣輯，1999; Huang et al., 2004; 黃清哲，2007)，而當河床之土砂中混有以黏土和水混合的泥漿時，河床礫石間的縫隙會因為被填滿使振動傳遞效果提升，但高頻區的能量也會因為泥漿的消能作用而消散較快，使土石流經過含泥量較高的河床時，其頻譜會集中於低頻的頻帶(Huang et al., 2004; 黃清哲，2007)。在本文探討案例的影像中，由於目前只能看到土石流的表面，且暫時無法估計土石流內部的礫石含量或流體濃度，考慮無法透過影像提出有利證據說明土石流型態，本文將忽略以地聲訊號分析土石流類型的探討，但因為不同事件的頻譜特徵頻率皆落於過去土石流試驗研究所認定的頻率區段，因此除了透過振幅變化可判定「有事件發生」外，透過

特徵頻率的判釋，則可將這四場事件認定為「土石流事件」。

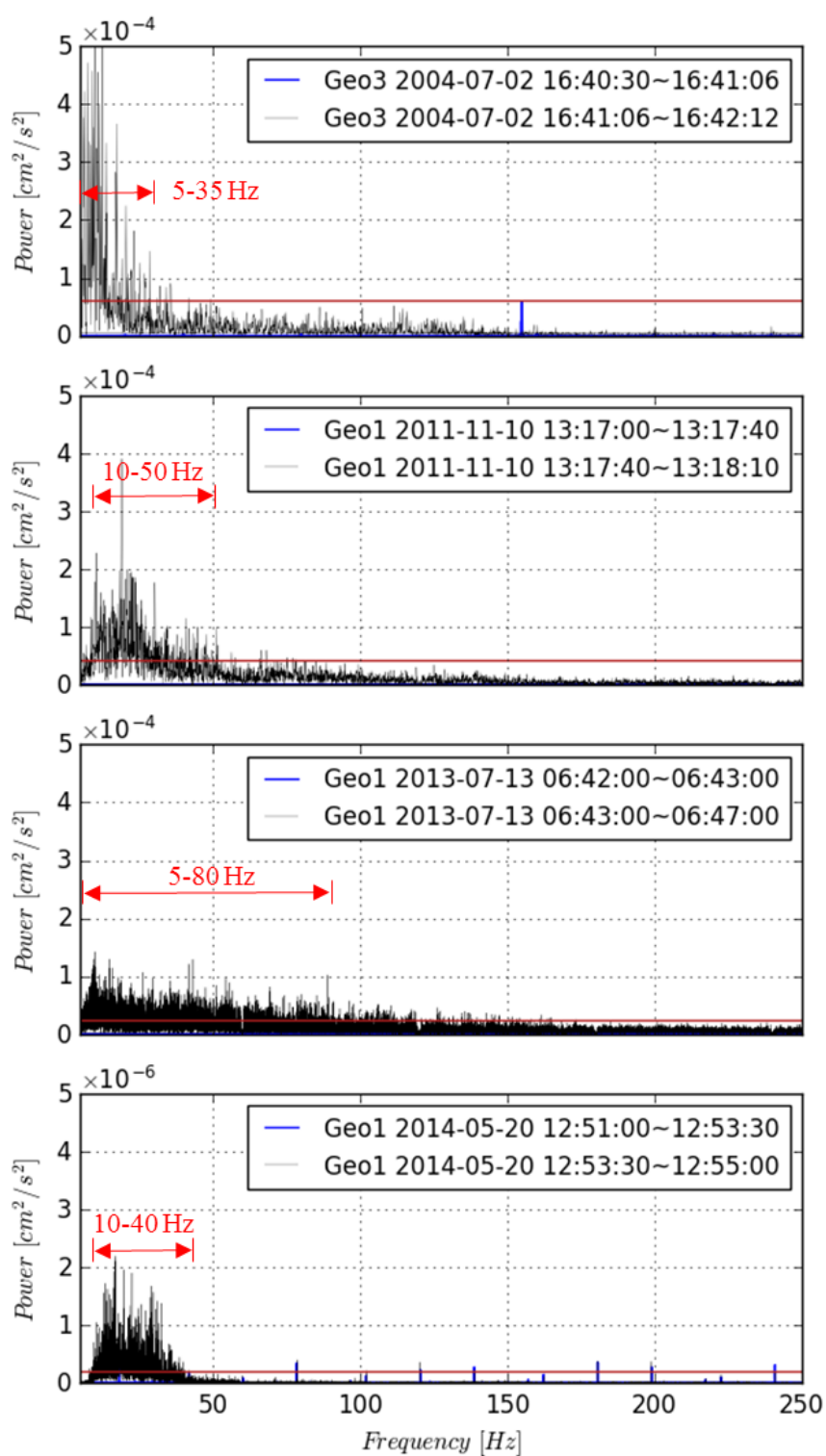


圖3-4 事件前與事件中之能量頻譜與特徵頻率區段之估計；紅線為事件中頻譜能量之平均值加一倍標準差處

第四節 土石流警戒條件之探討

3.4.1 地聲偵測土石流的考量因素

由於土石流前鋒往往夾帶大量礫石與泥沙，大量礫石的滾動、撞擊或摩擦則會促使地表振動的振幅或能量變大，因此透過地聲所偵測的地表振動之速度振幅(Arattano and Moia, 1999; Arattano, 1999; Abancó et al., 2014; Arattano M. et al., 2014; Coviello et al., 2015)或振動能量(Huang et al., 2007; 方耀民等人, 2008)去判釋是否有事件是目前最多人採用的方式。在本文前節的歷史土石流事件分析中也可發現，事件發生時的速度振幅至少是事件前平均振幅的 4.9~290 倍之間，因此透過振幅隨時間的變化的確可以快速的判釋是否有事件發生。

除了能量的絕對大小有很大的變化外，由前節的振幅分析或時頻分析都可觀察到，土石流前峰抵達地聲斷面時，劇烈的水文變化也會直接反應在訊號的變化程度，使其訊號的振幅或能量在短時間內有快速且劇烈的上升，因此除了探討能量的絕對大小變化外，其相對的能量變化速率也可做為偵測土石流的考量因素之一。

在振幅或能量隨時間的改變過程上，前節的振幅法採用的是 1 秒內的平均振幅(Arattano and Moia, 1999; Arattano, 1999; Abancó et al., 2014; Arattano M. et al., 2014; Coviello et al., 2015)，而過去也有部分學者採用 1 秒的累積能量(Huang et al., 2007)，不管是採用平均值或累積值，其能量隨時間的取樣將直接決定能量曲線的平滑程度，其取樣的標準則可視被偵測事件之能量變化尺度去決定。

因為土石流流動過程所夾帶的礫石、泥砂等的摩擦與撞擊運動在振動頻率的表現上往往會集中於某些特徵頻帶(劉格非和李欣輯，

1999；Huang et al., 2004；黃清哲，2007；Schimmel et al., 2015)，因此若要在有限的土石流事件資料下，增加未來土石流的判釋成效，除了考慮振動訊號的能量以外，土石流運移時的特徵頻率(Superior Frequency)也應是探討警戒條件的重要的考量因素之一。

綜上所述，以地聲訊號判釋土石流的主要考量因素可分為四類：(1) 能量(或振幅)絕對大小的變化、(2) 能量變化速率、(3) 能量的取樣時間尺度、(4) 特徵頻率，因此本文將依照以上不同的物理條件探討其影響。

3.4.2 考量因素間的交互影響

為了同時考慮前段所述的四種主要影響因素，本節將以第三節中介紹的時頻分析方法做進一步的資訊萃取。由於透過時頻分析即可計算隨時間和頻率變化的能量值(二維)，利用此能量值對頻率軸積分，則可獲得隨時間變化的累積能量(一維)，而累積能量隨時間變化的斜率即為前節所述之能量變化速率。在此過程中，由於時頻分析的單位時間間隔與積分頻寬範圍的選定將直接響累積能量和累積能量變化速率，因此本節將先分析不同單位時間間隔與不同頻寬範圍對累積能量和累積能量變化速率(斜率)的影響，並依此決定適當的單位時間間隔與分析頻寬範圍。

在時間間隔上，若要有效的表現出土石流的能量變化，而非其它如：落石的短時間訊號能量等，考慮土石流流經地聲斷面的時間尺度應可降低誤警的可能性。從案例 1 與案例 4 的紀錄影片中，其土石流經過地聲斷面的延時可分別估計約為 18.2 秒與 51.6 秒(案例 2 與案例 3 的影片不完全，無法判釋)，其時間尺度約在 10 到 100 秒之間，因此本文將時頻分析的時時間隔 Δ_t 設定為 1 秒、5 秒、10 秒去重新計算，

並依此探討不同單位時間的能量變化。其中在不同 Δ_t 下的 STFT 過程，若資料點不足 2 的次方則補零至足點(Zero Padding)，且不同時間間隔下的 STFT 過程，時間窗同樣都重疊 50% 的 Δ_t 。

在分析頻寬的範圍上，因為前節的土石流特徵頻率分析中，四場土石流事件的特徵頻率區段都介於 5-80 Hz 之間，並且有三場事件的主要特徵頻率集中於 40 Hz 以下的頻段。另外，因為地聲的可測範圍落於 5-250 Hz，因此本文將累積能量的積分頻率範圍以 40 Hz 和 80 Hz 為界線，分為 5-40 Hz、40-80 Hz、80-250 Hz 三種頻段做討論。

在決定時頻分析的時間間隔與累積能量的積分頻寬後，本文將 Δ_t 設定為 1 秒、5 秒、10 秒做討論，在這三種條件下以 STFT 計算其時頻能量，並將時頻能量沿著頻率軸以梯型法(Trapezoidal rule)做數值積分，而其積分的範圍則針對 5-40 Hz、40-80 Hz、80-250 Hz 三種頻段分別計算，最後獲得不同時間(Δ_t)平均下、不同頻寬的累積能量變化值，四種案例的結果如圖 3-5(a)~(d)的黑色實線。此外，透過累積能量隨時間變化之曲線則可進一步以向後差分法計算其累積能量的斜率(或能量變化率)，四種案例的結果如圖 3-5(a)~(d)的青色實線。透過以上分析步驟與四場土石流事件之資料，前節說明的四種因素則可一起討論，其四場土石流事件的累積能量與累積能量之斜率如圖 3-5(a)~(d)，其中各子圖由上而下則分別展示 $\Delta_t=1$ 秒、5 秒、10 秒條件下的結果，由左而右分別展示 5-40 Hz、40-80 Hz、80-250 Hz 頻段下的結果。

在時間間隔 Δ_t 的比較中，從圖 3-5 可發現不管任何頻段的累積能量或斜率，其曲線的振盪程度都會隨著 Δ_t 的延時變長而降低。其原因歸咎於當 Δ_t 越大，則能量(時間與頻率的函數)平均的時間越長，因此

使得延時小於 Δ_t 的能量振盪幅度減小。透過此特性，其環境雜訊的振盪程度在 $\Delta_t=10$ 秒的情況將會比 $\Delta_t=1$ 秒的情況還小，且在 $\Delta_t=10$ 秒的情況下，小於10秒的短時間脈衝訊號，如：人或動物採踏到地聲埋設位置、現場地聲檢校的槌擊測試等，其能量將會因為平均的時間較長而削減。另外，由於一波土石流經過地聲斷面時，一般都大於10秒以上，因此在本文討論的三種 Δ_t 下，若要用於偵測土石流，並減少因短時間不明雜訊而誤判為土石流的狀況，選擇 $\Delta_t=10$ 秒的情況將較優於 $\Delta_t=5$ 秒或1秒的情況。

而在頻率區段的比較上，從圖 3-5(b)、3-5(d)即可很明顯的看到5-40 Hz 的累積能量和斜率皆遠大於其它頻段，而在圖 5(a)、5(c)的案例中，雖然80-250 Hz 的累積能量和斜率與5-40 Hz 的結果在同一個尺度，但80-250 Hz 的頻寬卻是5-40 Hz 頻寬的4.9倍，意即80-250 Hz 間的單位頻寬之累積能量其實只有5-40 Hz 的0.2倍，因此從頻段來考量的話，透過土石流特徵頻率區段(5-40 Hz)的累積能量與斜率的確比其它頻段更能凸顯土石流發生與否的訊號特徵。

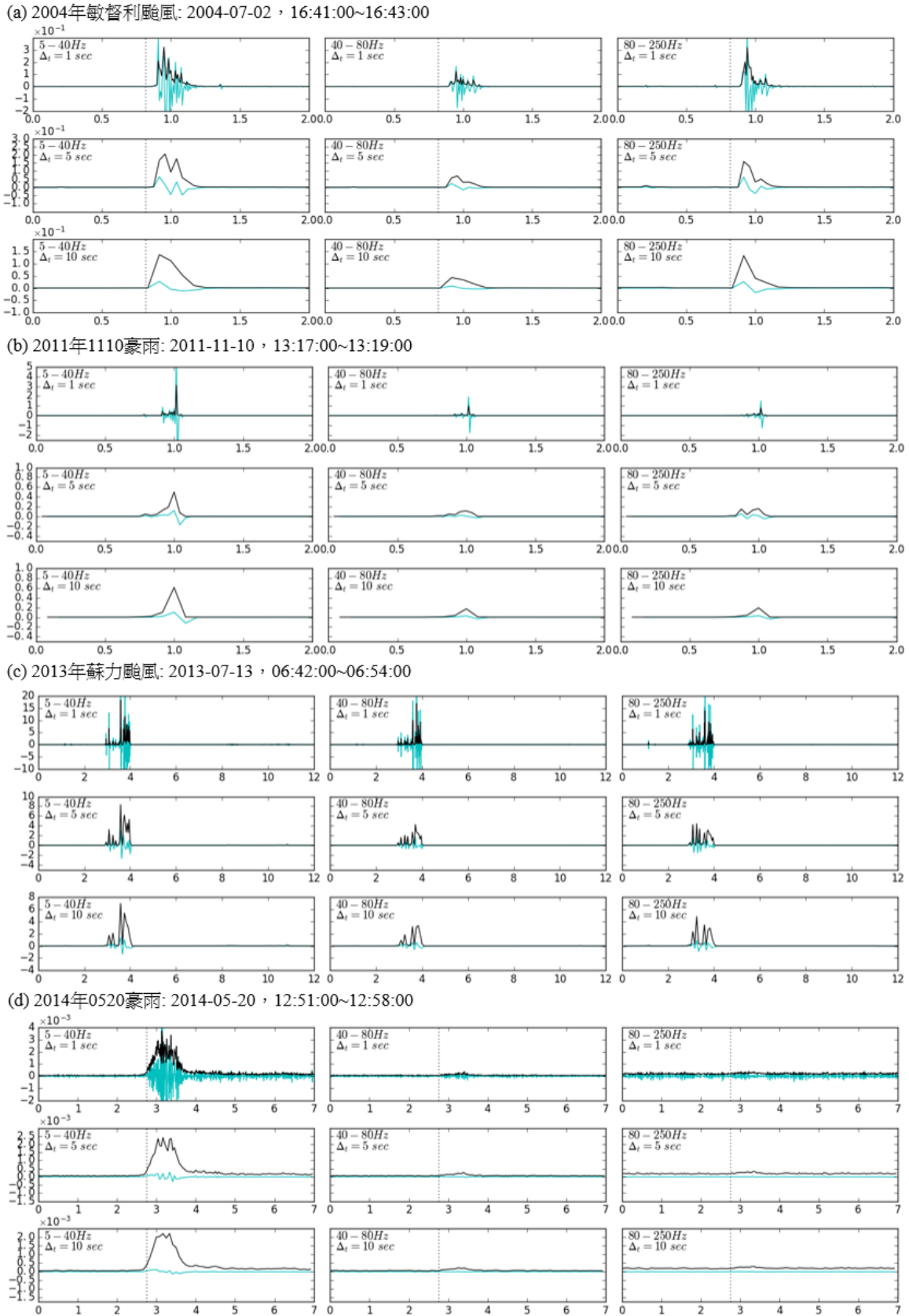


圖3-5 不同 Δ_t 和頻帶之累積能量與累積能量斜率圖；橫軸皆為時間(分鐘)，黑色實線為累積能量(cm^2/s^2)，青色實線為累積能量斜率

(cm^2/s^3)，虛線為影片判釋之土石流前峰時間

3.4.3 地聲警戒標準之建立

綜合以上的分析結果，在分析累積能量或其累積能量斜率時，若要減少短時間脈衝的雜訊干擾，其 STFT 的計算過程應選擇較接近土石流延時時間尺度的 Δ_t ，如： $\Delta_t=10$ 秒，若要凸顯土石流的能量，能量積分的頻段上則建議選用土石流特徵頻率區段，如：5-40 Hz。因此在本節中將使用 $\Delta_t=10$ 秒且 5-40 Hz 區段的累積能量變化與其累積能量斜率去建立土石流的參考警戒值。在上述條件下，本文先依照四場事件的計算結果，將事件發生前與事件中的最大累積能量與最大累積能量斜率列表比較(如表 3-2)。

表3-2. 愛玉子溪歷年土石流事件前與事件中之能量最大值與能量斜率最大值

事件名稱	事件前之環境雜訊			事件中之訊號			比值	
	取樣時間	P_{an} (cm^2/s^2)	S_{an} (cm^2/s^3)	取樣時間	P_{df} (cm^2/s^2)	S_{df} (cm^2/s^3)	P_{df}/P_{an}	S_{df}/S_{an}
敏督利颱風	16:41:00~ 16:41:30	2.87×10^{-4}	7.54×10^{-6}	16:41:30~ 16:43:00	1.37×10^{-1}	2.72×10^{-2}	476	3611
1110 豪雨	13:17:00~ 13:17:30	2.33×10^{-5}	6.17×10^{-7}	13:17:30~ 13:19:00	6.10×10^{-1}	1.02×10^{-1}	26185	164831
蘇力颱風	06:42:00~ 06:42:30	2.80×10^{-4}	3.71×10^{-5}	06:42:30~ 06:54:00	6.96	1.37	24842	36847
0520 豪雨	12:51:00~ 12:53:00	7.34×10^{-5}	5.71×10^{-6}	12:53:00~ 12:56:00	2.21×10^{-3}	1.28×10^{-4}	30	22

註 1： P_{an} 與 P_{df} 分別為事件前與事件中之累積能量最大值； S_{an} 與 S_{df} 則分別為事件前與事件中之累積能量斜率最大值

從表 3-2 中可發現，各事件的最大累積能量比值介於 30~261,855 之間，各事件的最大累積能量斜率比則介於 22~164,831，不管是從能量或斜率的角度去看，其事件中的數值都比事件前至少大 10 倍(一個

尺度)以上,因此在已知平時環境噪音(ambient noise)的累積能量 P_{an} 與累積能量斜率 S_{an} 的情況下,本計畫可透過適當的能量比例係數 R_p 與斜率比例係數 R_s 去建立累積能量與累積能量斜率的警戒門檻值 T_p 與 T_s ,其公式如下。

$$T_p = R_p \cdot P_{an} \quad (3-5a)$$

$$T_s = R_s \cdot S_{an} \quad (3-5b)$$

其中四場土石流事件的 P_{an} 與 S_{an} 可參考表 3-2 第 3、4 欄,而在 P_{an} 與 S_{an} 的選用上,本文將分為以下兩種角度進行討論。若從工程上的角度來探討(方法一),由於本研究探討的土石流皆是發生在愛玉子溪上(但不同位置),因此若想設定一個屬於這條溪流的固定式警戒值,筆者認為 P_{an} 與 S_{an} 可以表 3-2 第 3、4 欄中各事件的平均值去估計。但若從物理的角度來看(方法二),即使在同一條溪流上,每次發生土石流前的河床條件與降雨逕流情況也都會改變,意即振動傳遞介質和振動源也在改變,因此環境噪音的累積能量 P_{an} 和變化斜率 S_{an} 也會因前述條件改變而改變,故應選用表 3-2 第 3、4 欄中各場事件發生前的量測數值。此外,由於表 3-2 第 8 欄中計算的能量比例都在 10 倍以上,因此在前述方法一與方法二的探討中,本文初步先將 R_p 設定為 5 和 10(即警戒門檻值 T_p 比環境雜訊大一個尺度)分別去判釋是否有事件發生。累積能量斜率因為是隨時間變化的速率,而本文的累積能量在時間軸上,每個單位時間間隔有重疊 50%,因此本文將 R_s 設定為 2.5 和 5(即警戒門檻值 T_s 為環境雜訊的 2.5 倍或 5 倍)分別去判釋土石流前峰的到時。

根據以上的設定說明,其對應的警戒門檻值 T_p 與 T_s 計算結果如表 3-3 前 4 列,兩種方法的門檻值與四場事件的累積能量與累積能量斜

率圖可參考圖 3-6。當累積能量或累積能量斜率超過警戒門檻值時，本文則將該時間判釋為土石流經過地聲斷面的到時，其結果可參考表 3-3 後 4 列。

表3-3. 不同條件下的土石流警戒條件與判釋時間

事件名稱	方法一(固定式警戒門檻值)				方法二(浮動式警戒門檻值)				影片判釋前鋒到時	
	T_p		T_s		T_p		T_s			
	P_{an} 為表 2 四場平均值		S_{an} 為表 2 四場平均值		P_{an} 為表 2 各場之數值		S_{an} 為表 2 各場之數值			
	$R_p=5$	$R_p=10$	$R_s=2.5$	$R_s=5$	$R_p=5$	$R_p=10$	$R_s=2.5$	$R_s=5$		
警戒條件	敏督利颱風	8.3×10^{-4}	1.66×10^{-3}	3.19×10^{-5}	6.38×10^{-5}	1.44×10^{-3}	2.87×10^{-3}	1.88×10^{-5}	3.77×10^{-5}	
	1110 豪雨	8.3×10^{-4}	1.66×10^{-3}	3.19×10^{-5}	6.38×10^{-5}	1.17×10^{-4}	2.33×10^{-4}	1.54×10^{-6}	3.08×10^{-6}	
	蘇力颱風	8.3×10^{-4}	1.66×10^{-3}	3.19×10^{-5}	6.38×10^{-5}	1.40×10^{-3}	2.80×10^{-3}	9.30×10^{-5}	1.86×10^{-4}	
	0520 豪雨	8.3×10^{-4}	1.66×10^{-3}	3.19×10^{-5}	6.38×10^{-5}	3.67×10^{-4}	7.34×10^{-4}	1.43×10^{-5}	2.86×10^{-5}	
判釋時間	敏督利颱風	16:41:50.1 (晚 1.1 秒)	16:41:50.8 (晚 1.8 秒)	16:41:48.1 (早 0.9 秒)	16:41:49.5 (晚 0.5 秒)	16:41:50.7 (晚 1.7 秒)	16:41:51.3 (晚 2.3 秒)	16:41:47.1 (早 1.9 秒)	16:41:48.5 (晚 0.5 秒)	16:41:49
	1110 豪雨	13:17:42.9	13:17:43.6	13:17:42.1	13:17:42.7	13:17:40.1	13:17:41.7	13:17:36.2	13:17:40.4	缺漏
	蘇力颱風	06:43:3.6	06:43:5.4	06:42:29.7	06:43:2.1	06:43:5.1	06:43:6.2	06:43:3.1	06:43:4.4	缺漏
	0520 豪雨	12:53:49.9 (晚 4.9 秒)	12:53:57.5 (晚 12.5 秒)	12:53:44 (早 1 秒)	12:53:47.1 (晚 2.1 秒)	12:53:44.7 (早 0.3 秒)	12:53:49.2 (晚 4.2 秒)	12:53:42.0 (早 3 秒)	12:53:43.7 (早 1.3 秒)	12:53:45

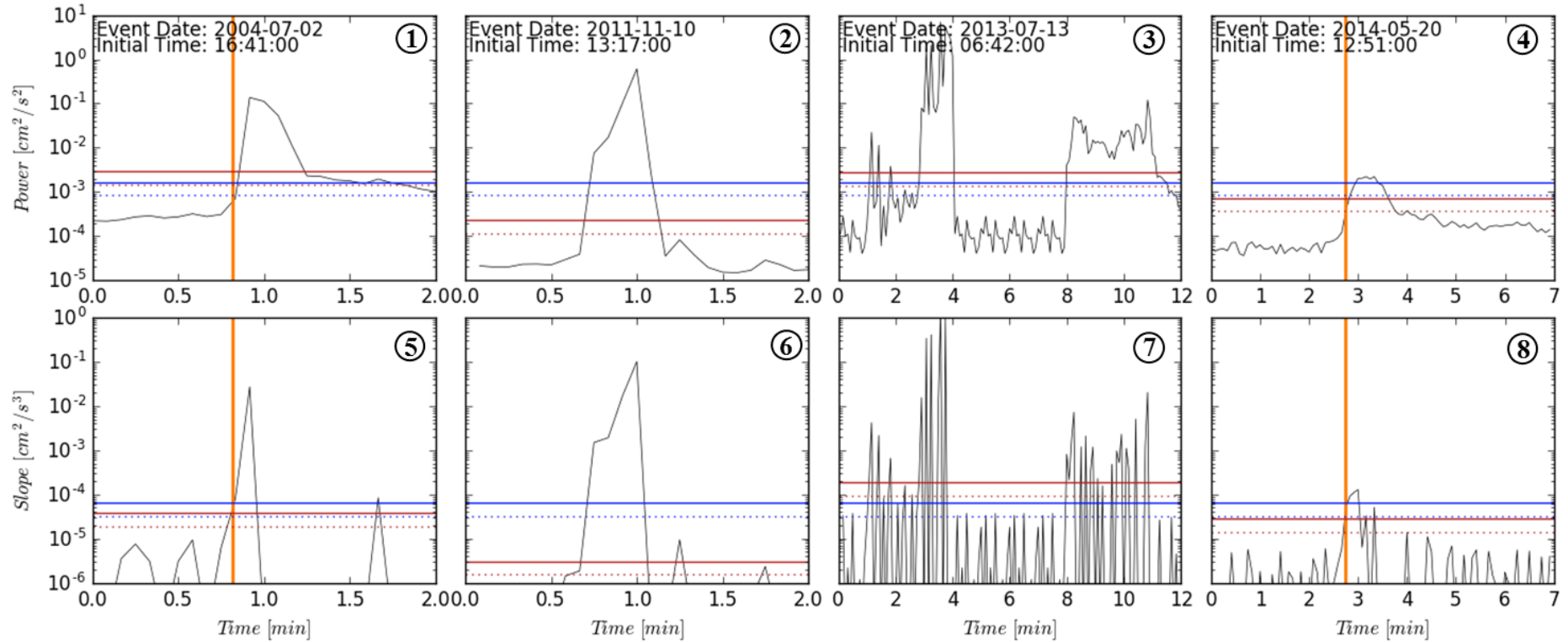


圖3-6 四場土石流之的累積能量與累積能量斜率警戒圖；其能量計算間隔 Δ_t 為 10 秒，積分頻段為 5-40 Hz；水平藍實線($R_p=10$ 或 $R_s=5$)與藍虛線($R_p=5$ 或 $R_s=2.5$)為方法一的警戒條件；水平紅實線($R_p=10$ 或 $R_s=5$)與紅虛線($R_p=5$ 或 $R_s=2.5$)則為方法二的警戒條件；橘線為影片判釋之土石流前峰時間

根據表 3-3 方法一的結果，在敏督利颱風中，兩種 T_p 與兩種 T_s 門檻值計算的警戒時間與影片到時之誤差約介於-1.8~+0.9 秒間，由於累積能量與累積能量斜率是在 $\Delta_t=10$ 秒且重疊 50%下計算的，因此若誤差小於 5 秒(一個單位時間)表示已準確的抓到土石流經過地聲斷面的時間，而在 0520 豪雨中，雖然兩種 T_s 門檻值計算的警戒時間之誤差同樣都在 5 秒內(-2.1~+1 秒)，但兩種 T_p 門檻值計算的警戒時間則延遲 4.9~12.5 秒之間(約延遲 1~2.5 個單位時間)。而在 1110 豪雨和蘇力颱風中，雖然沒有影片到時可做比對，但四種條件下所判斷的時間差則分別落於 1.2 秒和 30.7 秒間，其中蘇力颱風差異較大的原因推測是 T_s 門檻值($R_s=2.5$ 的結果)計算的警戒時間因有較大的逕流而提前誤警。從表 3-3 方法二的結果，所有警戒條件都會達到警戒，除了 1110 豪雨四種條件的時間差達到 5.5 秒外，其它三場事件的時間差都在一個單位時間之內。其結果不管使用累積能量或累積能量斜率都較方法一好。

從兩個方法的比較中可發現，以 T_s 門檻值($R_s=2.5$ 的結果)計算的警戒時間都會有稍微提早的現象，推測是因為土石流前峰接近時，地聲的累積能量變大的速度正在加快，因此較小的累積能量斜率門檻值會稍微提前。另外，透過兩個方法的結果也可發現，在不改變 R_p 和 R_s 的條件下， P_{an} 與 S_{an} 的決定對結果的影響將非常敏感，假若將方法一中的 P_{an} 與 S_{an} 的設定改為表 2 四場數值中的最大值，其 T_p 門檻值則如方法二的敏督利颱風之值(圖 3-6①的紅線與紅虛線)， T_s 門檻值則如方法二的蘇力颱風之值(圖 3-6⑦的紅線與紅虛線)，其結果可發現 T_p ($R_p=10$ 的結果)和 T_s ($R_s=5$ 的結果)的門檻值在 0520 豪雨中都無法達到警戒(未警)。反之，若將方法一中的 P_{an} 與 S_{an} 的設定改為表 2

四場數值中的最小值，其 T_p 門檻值則如方法二的 1110 豪雨之值(圖 6 ②)的紅線與紅虛線)， T_s 門檻值則如方法二 1110 豪雨之值(圖 6 ⑥)的紅線與紅虛線)，其結果則可發現 T_p (兩種 R_p 的結果)和 T_s (兩種 R_s 的結果)的門檻值在敏督利颱風中都會在土石流前峰未到前誤觸警戒(誤警)。從以上分析可發現，固定式警戒門檻值若設定的不好，就可能造成誤警或未警的情況，反之浮動式警戒門檻值則可依環境噪訊的改變去重新調節門檻值，因此若要在有限的事件資料下，建立穩健的警戒模式，使用浮動式警戒門檻值的模式將較固定式警戒門檻值的模式好。

3.4.4 小結

在土石流的預警或警戒上，一直是土石流研究中的重要研究議題，雖然目前水保局已有成熟的雨量預警系統可運用，但若要針對重點地區，發佈「土石流已發生」的警戒，則有賴於現場的實際監測資訊。在眾多監測設備中，地聲探測器則是其中之一可用於探測土石流的儀器，透過愛玉子溪的四場土石流事件，本文使用地聲探測器量測的地表振動訊號進行分析，並從訊號的振幅(或能量)和頻率去判釋土石流是否發生，其中四場愛玉子溪土石流的速度振幅峰值與環境雜訊之比約介於 4.9~290 倍之間，而特徵頻率則都介於 5-80 Hz 之間，並可發現主要集中於 40 Hz 以下。

為了有效的透過土石流的特性去建立地聲的警戒門檻值，本計畫透過不同時間間隔的時頻能量分別對不同頻率區段的能量積分去計算累積能量值，並同時計算相對的累積能量變化之斜率值。透過比較不同時間間隔和不同頻率區段的結果，本計畫發現 10 秒間隔(重疊 50%)且 5-40 Hz 頻段的累積能量和累積能量斜率值較能凸顯土石流

的特徵。

透過萃取 10 秒間隔(重疊 50%)且 5-40 Hz 頻段的累積能量和累積能量斜率指標值，本計畫以事件大於環境雜訊一個尺度的概念初步建立警戒門檻值計算公式，並以固定式和浮動式兩種警戒門檻值的方法探討此公式的適用性，其中固定式警戒門檻值容易受環境噪訊的影響而誤觸警戒或無法警戒，但浮動式警戒門檻值卻能大大改善此問題，並成功的在兩場事件中得到驗證，其誤差都在一個單位時間(5 秒)之內。

雖然本計畫建立的浮動式警戒門檻值分析的都是愛玉子溪的土石流事件，但地聲擺放位置、土石流發生時間、土石流的規模等都不同，因此也間接證明此方法的可用性。未來若應用於現場監測站，因為只需 5 秒回傳一個累積能量值即可進行後續計算，因此本計畫提出的方法也可大大的壓縮地聲的回傳資料，減少傳輸負載量。

第五節 地聲與流量之分析

3.5.1 土石流歷史事件流量與地聲能量關係

首先將在愛玉子溪有完整地聲訊號紀錄的三場土石流事件 2006 年 6 月 9 日，2011 年 7 月 13 日與 2014 年 5 月 19 日記錄進行水文分析求流量，然後比對地聲的能量

愛玉子溪總長度為 3.731 公里，集水區面積為 405.02 公頃，地形高程則介於 1200-2500m，平均坡度約為 39.3°，其中坡度大於六級坡 (>55%) 的面積超過總集水區面積的 75%，屬於小集水區。對於小集水區而言，因此以下假設降雨均勻分佈在集水區上。次處不考慮集水區的貯蓄效應。

3.5.1.1 合理化公式計算流量

小集水區可採用合理化公式 (Rational Formula) 計算洪峰流量。

$$Q_p = \frac{1}{360} CIA \quad (3-6)$$

其中， Q_p 為洪峰流量(立方公尺/秒, m^3/s)， C 為逕流係數(無單位)， I 為降雨強度(公釐/小時, mm/h)， A 為集水區面積(公頃, $10000m^2$)。集水區則將切成數個子集水區，然後以每一子集水區的集流時間來計算下游固定點的集流時間，此處集流時間 (t_c) 指逕流自集水區最遠一點到達一定地點所需時間，一般為流入時間 t_1 與流下時間 t_2 之和。採用計算公式如下：

$$t_c = t_1 + t_2 \quad , \quad \text{其中 } t_1 = \frac{1}{v} \quad (3-7)$$

其中 t_c 為集流時間 (小時)， t_1 為流入時間 (雨水經地面由集水區邊界流至河道所需時間)， t_2 為流下時間 (雨水流經河道由上游至下游所需時間)， v 為漫地流流速 (一般採用 0.3~0.6 m/ sec) 或採用

$$v = KS^{1/2}$$

其中 v 是漫地流速度 (單位 m/s)， K 是漫地流速度常數， S 是平均坡度，漫地流速度之估算，在此種天然河段我們採用芮哈 (Rziha) 經驗公式估算：

$$t_2 = \frac{L}{w}, \text{ 其中 } w = 72 \left(\frac{H}{L} \right)^{0.6} \quad (3-8)$$

其中， t_2 為流下時間 (小時)， w 為流下速度 (公里/小時)， H 為溪流縱斷面高度差 (公里)， L 為溪流長度 (公里)。

估算流入時間時，考慮到愛玉子溪集水區漫地流流動長度大於三百公尺，不符合經驗公式的使用條件，因此首先需要先將集水區切割成小集水區再進行計算。由 DTM (Digital terrain model) 運用 Arc GIS 將愛玉子溪集水區劃分為八個小集水區。

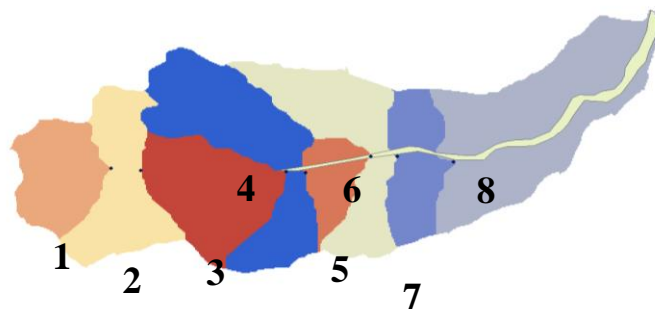


圖3-7 愛玉子溪子集水區劃分圖

表3-4. 子集水區面積及水文參數

集水區編號	集水區面積 (m^2)	坡度	漫地流 長度 (m)	地表覆蓋	漫地流 係數 K	渠流長度 (m)
1	387648	0.70	508	矮短草叢	0.64	
2	498304	0.74	703	矮短草叢	0.64	
3	561500	0.43	624	矮短草叢	0.64	
4	793984	0.37	1074	矮短草叢	0.64	124
5	202048	0.29	708	茂密草叢	0.46	420

6	599296	0.46	889	矮短草叢	0.64	120
7	358016	0.63	436	茂密草叢	0.46	250
8	1133376	0.19	550	矮短草叢	0.64	1910

算出每個小集水區的漫地流速度後，由漫地流速度估算出流下時間，再根據 rizha 公式計算出沿溪的流下時間，流下時間加上小集水區的流入時間即為每個小集水區的集流時間，最終可以得到整個愛玉子溪集水區之集流時間。計算後由最上游到觀測儀器(地聲斷面)的安裝點之總集流時間為 250.5min。

表3-5. 子集水區集流時間計算表

集水區編號	漫地流速度 (m/s)	流入時間 (min)	流下時間 (min)	集流時間 (min)
8	0.3	31	6	37
7	0.3	24	0.5	24.5
6	0.4	37	0.5	37.5
5	0.3	39	1	40
4	0.4	45	0.5	45.5
3	0.4	26		26
2	0.5	23		23
1	0.5	17		17

自上游到下游，每一小區域做下游點的流量，為下在上游所有區域的降雨量在不同時間留下累積的量，使用合理化公式可推估流量歷線為：

$$\begin{aligned}
 t = 1, Q_1 &= \frac{1}{360} C_1 I_1 A_1 \\
 t = 2, Q_2 &= \frac{1}{360} (C_2 I_1 A_2 + C_1 I_2 A_1) \\
 &\dots \\
 t = n, Q_n &= \frac{1}{360} \sum_{i=1}^n C_i I_{n-i+1} A_i \tag{3-9}
 \end{aligned}$$

其中下標 i 為子區域代號，越下游區域， n 愈大，所以會有所有上游子區域的流下水量。 t 為每一時間間隔 (min)， Q_n 為第 n 個區域的流量 (cms)， C 為逕流係數， I 為降雨強度 (mm/hr)， A 為每一集流時間線內之集水區面積 (ha)。

3.5.1.2 三角形單位歷線計算逕流歷線

美國水土保持局（Soil Conservation Service,1957）發展三角形無因次單位歷線以推求無記錄地區之降雨逕流關係。

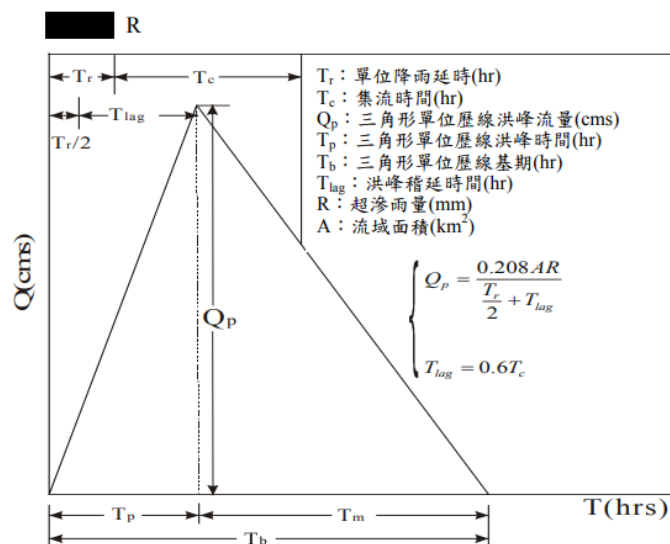


圖3-8 三角形單位歷線示意圖（來源：區域排水整治及環境營造規劃手冊）

依照集流時間 T_c 選擇單位時間間距 T_r ，參考規劃手冊集流時間為 250.5min 應選擇 T_r 為 0.8 小時，退水時間 $T_m=1.67T_p$ 。

表3-6. 有效降雨為 10mm 時愛玉子溪單位歷線參數

集水區面積	集流時間	單位時間	洪峰時間	退水時間	基期	洪峰流量
A(ha)	t_c (min)	t_r (min)	t_p (min)	t_m (min)	t_b (min)	Q_e
405.020	250.500	33.000	166.800	278.556	445.356	3.030

根據規劃手冊的參數設置，可以得到愛玉子溪集水區超滲降雨為 10mm 時的簡單三角逕流歷線。再按照降雨資料，可以計算出每十分鐘或每小時的三角形逕流歷線，最後再疊加即可得到這個集水區整場降雨的徑流歷線。

3.5.1.3 土石流歷史事件水文分析

2006年6月9日事件：

從雨量站所記錄的資料可以看出這場降雨持續約三天，顯然大於集水區之集流時間，首先計算出降雨強度隨時間的變化。為得到每10分鐘愛玉子溪流量之變化，按照DTM資料可以計算出每個網格至神木村雨量站之集流時間，將集流時間為10min、20min、30min…的網格點連接起來，即可建立10分鐘等集流時間線，再計算出每個集流時間線內集水區之面積，再按照滲透係數表按照地表特性選取每個區域對應的滲透係數。兩種方法計算所得逕流歷線如下圖所示，兩種方式所得相差不大，可用以比對土石流事件時間時的流量。

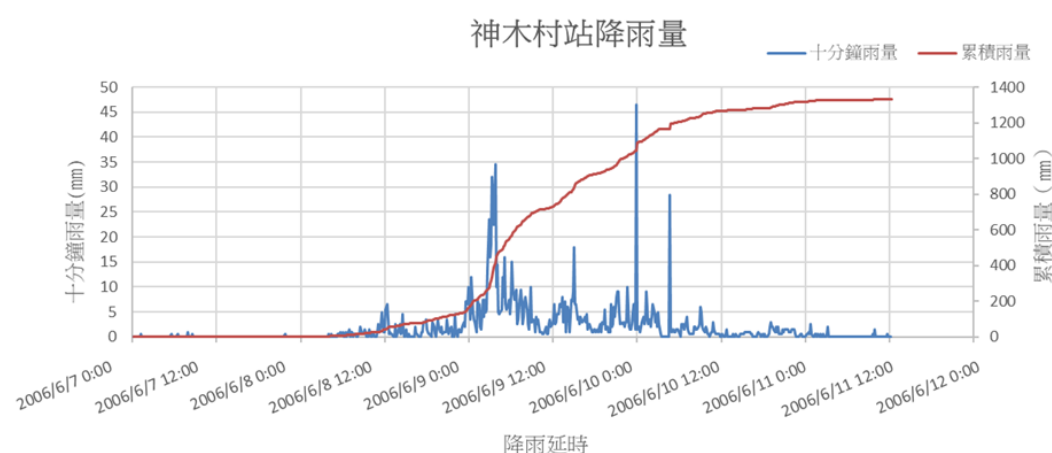


圖3-9 2006年6月9日十分鐘雨量圖

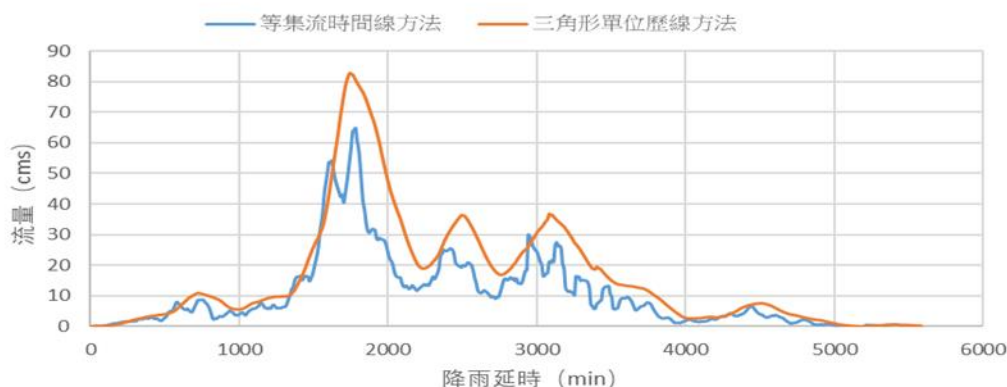


圖3-10 2006年6月9日愛玉子溪出口處逕流歷線

2011年7月13日事件：

從雨量資料可以看出降雨事件從 14:00 開始，降雨延時為 220min，小於集流時間 250.5min。首先計算出整場降雨的降雨強度隨時間之變化。同樣按照前述兩種方法計算此場降雨的完整徑流歷線，如圖 3-12 所示。

在圖 3-12 中可以明顯看出兩種方法計算出的逕流歷線形狀完全不同，這是因為三角形單位歷線方法僅適用於降雨延時大於集流時間的情況，而此場降雨的延時事實上小於整個集水區的集流時間，因此比對時，本研究採用集流時間算得之歷線。



圖3-11 2011年7月13日十分鐘雨量圖

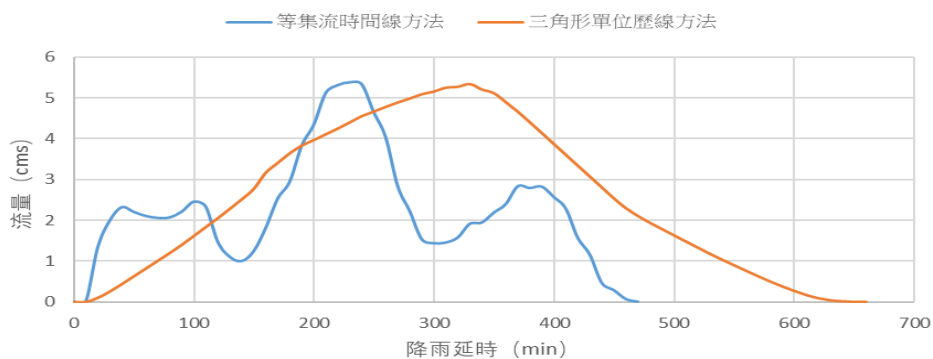


圖3-12 2011年7月13日愛玉子溪出口處逕流歷線

2014 年 5 月 19 日事件：

根據神木村雨量站所記錄雨量資料，可以看出這場降雨從 2014 年 5 月 20 日 12 點開始，結束于 2014 年 5 月 21 日 18 點，降雨延時大約持續 30 小時，遠大於集水區集流時間。但因為雨量站所記錄雨量資料為一小時一筆，所以無法按照 10 分鐘等雨量線來推估逕流歷線，但依然可以根據 10 分鐘等雨量線資料，推算出 1 小時等雨量線，以計算每小時集水區出口處流量變化。

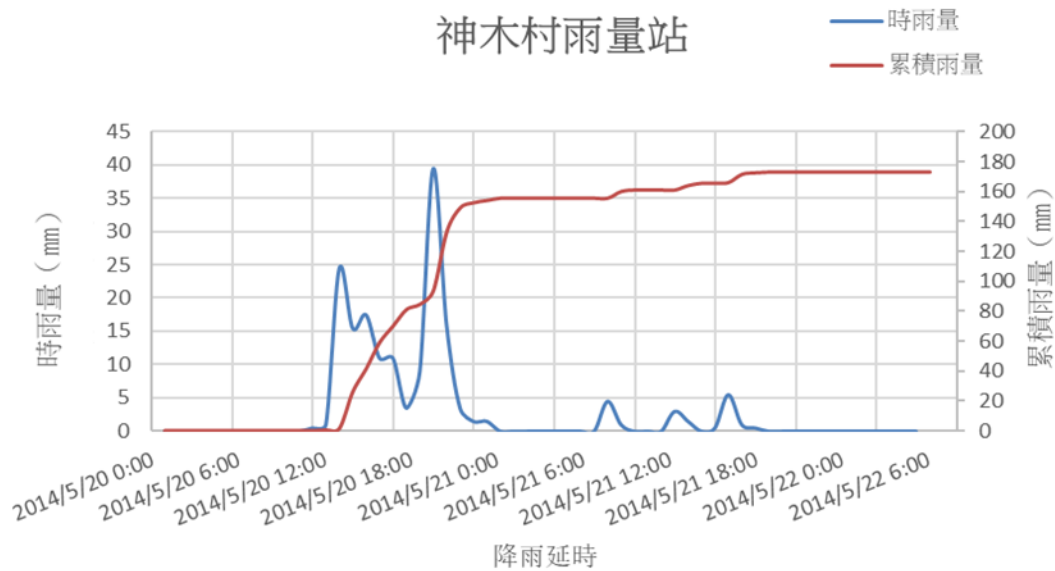


圖3-13 2014 年 5 月 19 日時雨量圖

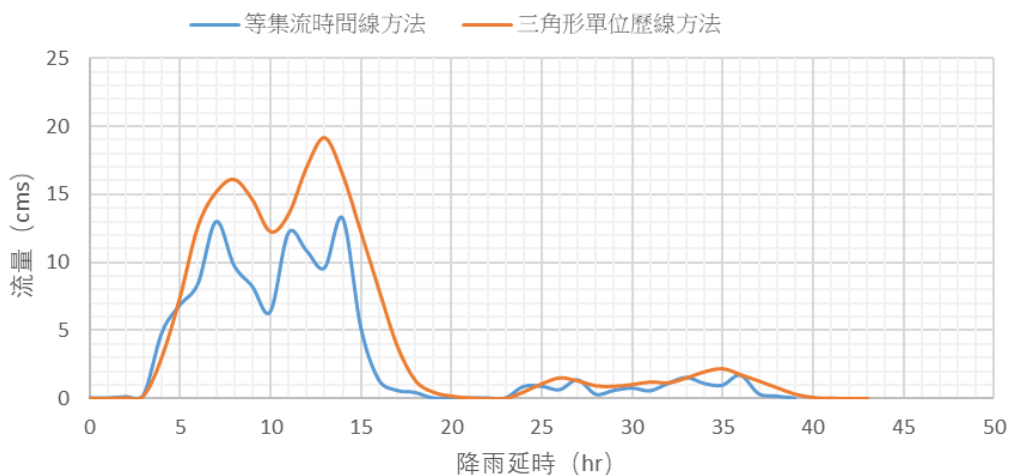


圖3-14 2014 年 5 月 19 日愛玉子溪出口處逕流歷線

3.5.1.4 地聲訊號分析

2006年6月9日事件：

2006年6月9日的地聲原始數據如圖3-15，其土石流事件發生在8點38左右，因此截取事件發生前後10分鐘訊號來進行分析。原始時域訊號從8點32分開始，結束于8點42分。

為分析地聲能量大小隨時間的變化，使用短時距傅里葉轉換對原始時域訊號進行分析。從原始時域訊號可以看出，土石流事件發生前有一些不知來源的雜訊產生，為了減少這些雜訊對土石流事件訊號得干擾，截取8點36到8點39這三分鐘訊號進行分析。窗函數長度選取為2秒(1000筆資料點)，窗函數重疊長度為1秒(500筆資料點)。得到頻率域能量圖。再將頻率域分為0-60Hz、60-120Hz、120-180Hz、180-250Hz四個部分分別計算每一個頻率區間總能量，如：圖3-16。其中，圖3-16中，藍色曲線代表0-250Hz所有頻率能量總和，淺藍色代表0-60Hz頻率區間總能量，黃色代表60-120Hz頻率區間總能量，紅色代表120-180Hz頻率區間總能量，紫色代表180-250Hz頻率區間總能量。

由圖3-16可以看出，土石流發生時產生的能量的確是主要是由0-60Hz區間頻率所產生，其次是180-250Hz區間，然後是120-180Hz頻率區間，最後為60-120Hz。從數值上能看出其餘三個區間所產生能量大小較為相似，取四個區間最大能量作為該區間的代表。因此本研究接續將0-60Hz頻率區間，接續細分為0-20Hz、20-40Hz、40-60Hz做分析，不同頻率區間的最大能量則列於表3-7。

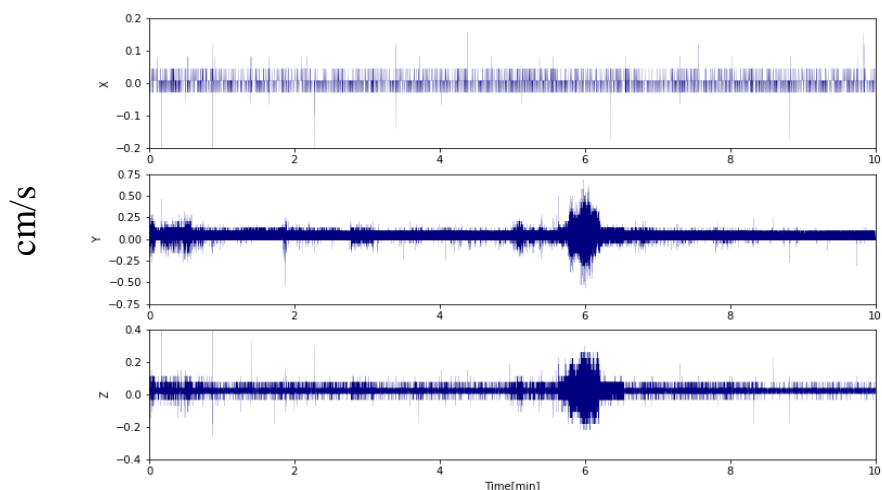


圖3-15 2006年6月9日原始地聲訊號

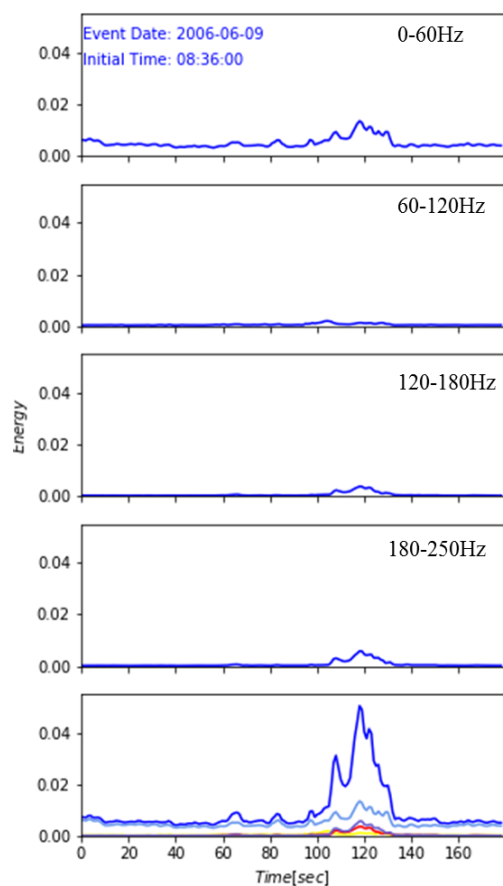


圖3-16 2006年6月9日0-60、60-120、120-180、180-250區間能量變化圖

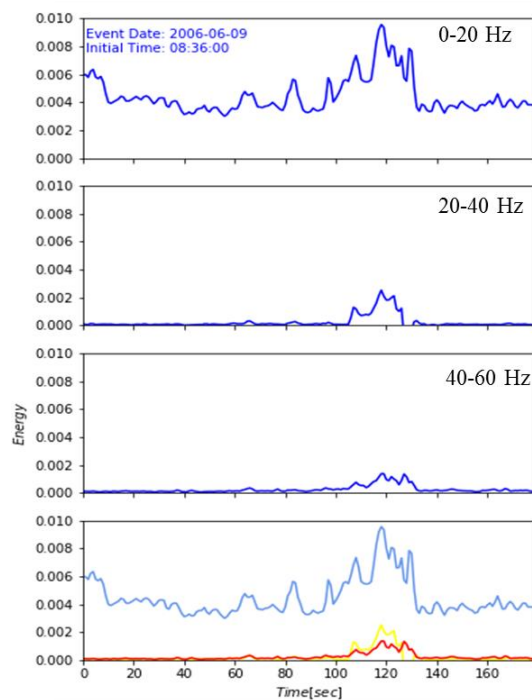


圖3-17 2006年6月9日0-20、20-40、40-60區間能量變化圖

表3-7. 2006年6月9日事件不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m^2/s^2)	0.013513	0.001918	0.003679	0.005782

頻率區間	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
能量 (m^2/s^2)	0.009571	0.002525	0.001367

2011年7月13日事件：

土石流事件發生在 2011 年 7 月 13 日，14 點 33 分左右。截取 14:32:30 至 14:33:30 一分鐘作分析。去除發電機頻率后，對地聲原始訊號做快速傅立葉變換，將訊號從時域轉換到頻率域。可以較清晰觀察出各個頻率的分佈情況，以及能量大小。顯然可以觀察得出在發生土石流這一分鐘內，頻率集中分佈在 30-60Hz 區間內。

同樣選取窗函數選 2 秒（1000 筆數據），重疊長度為 1 秒（500 筆數據），下圖為 13:32:30 至 13:32:32，取 2 秒做傅立葉轉換后所得結果。與全部訊號傅立葉轉換結果比較可以看出，這 2 秒內顯著的頻率不僅僅在 0-60Hz 區間內，顯然全部訊號的傅立葉變換結果無法代表截取的這 2 秒內頻率分佈。

截取土石流發生時地聲探測儀所記錄訊號做短時距傅立葉轉換，初始時間為 14 點 32 分 30 秒，持續時間為一分鐘。

使用短時距傅里葉轉換即可得到頻譜隨時間之變化，由前人研究可以得知土石流頻率範圍分佈在 30-80Hz 左右，為探求土石流特徵頻率之能量隨時間變化，將頻率區間分為 0-60Hz、60-120Hz、120-180Hz、180-250Hz 四個部分，每個區間頻率產生能量做積分得到該區間頻率產生總能量。將四個區間總能量隨時間變化畫圖如 3-19 所示，取每個區間總能量最大值代表該區間。同前事件的分析方式，在此也將

0-60Hz 再次細分為 0-20、20-40、40-80Hz，不同頻率區間的最大能量則列於表 3-8。

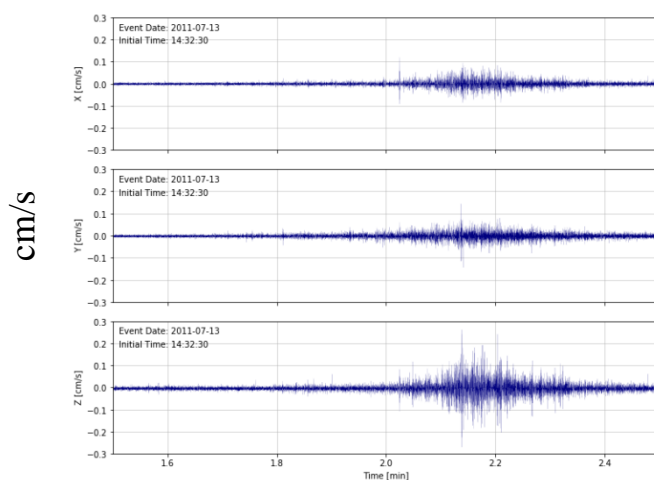


圖3-18 2011年7月13日地聲原始訊號

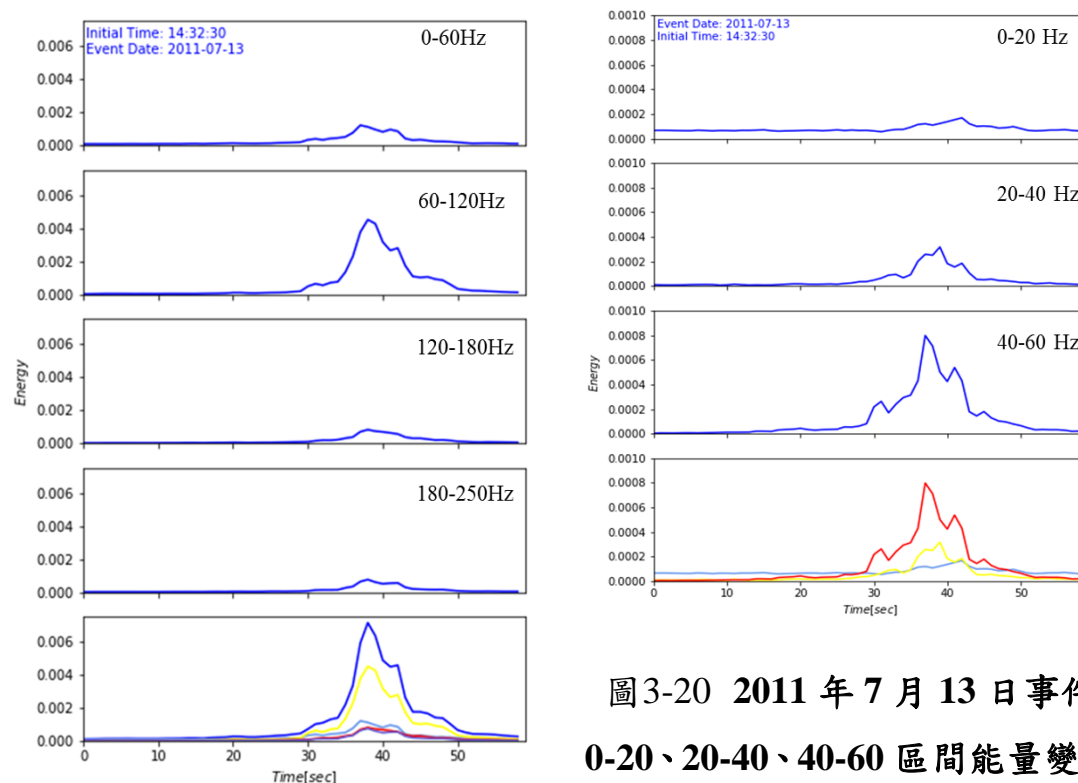


圖3-19 2011年7月13日事件
0-60、60-120、120-180、180-250
區間能量變化圖

圖3-20 2011年7月13日事件
0-20、20-40、40-60 區間能量變化

圖

表3-8. 2011年7月13日事件不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m^2/s^2)	0.001211	0.004508	0.000811	0.000759

頻率區間	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
能量 (m^2/s^2)	0.000168	0.000318	0.000798

2014年5月20日：

根據水保局所設置地聲探測儀記錄資料繪出土石流發生時原始地聲訊號。

去除掉發電機頻率后，原始時域訊號則代表環境雜訊，同樣是自然頻率。按照前面兩場時間同樣的分析方法，取1分鐘長度的原始訊號作分析。因為沒有記錄到土石流事件之地聲訊號，所以取前一分鐘，即分析訊號開始于6點50分。

做短時距傅里葉轉換時，選擇窗函數長度為2秒(1000筆資料)，重疊窗口長度為1秒(500筆資料)。

為了能對分析結果更好的作比較，依然同前兩場事件一樣，將頻率區間分為0-60Hz、60-120Hz、120-180Hz、180-250Hz。每個頻率區間取總能量最大值代表該區間，並將不同頻率區間的最大能量列於表3-9。

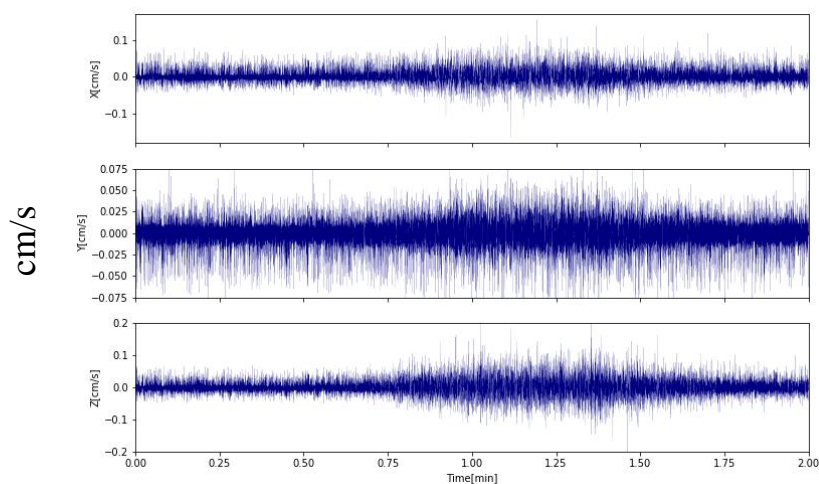


圖3-21 2014年5月20日時域原始地聲訊號

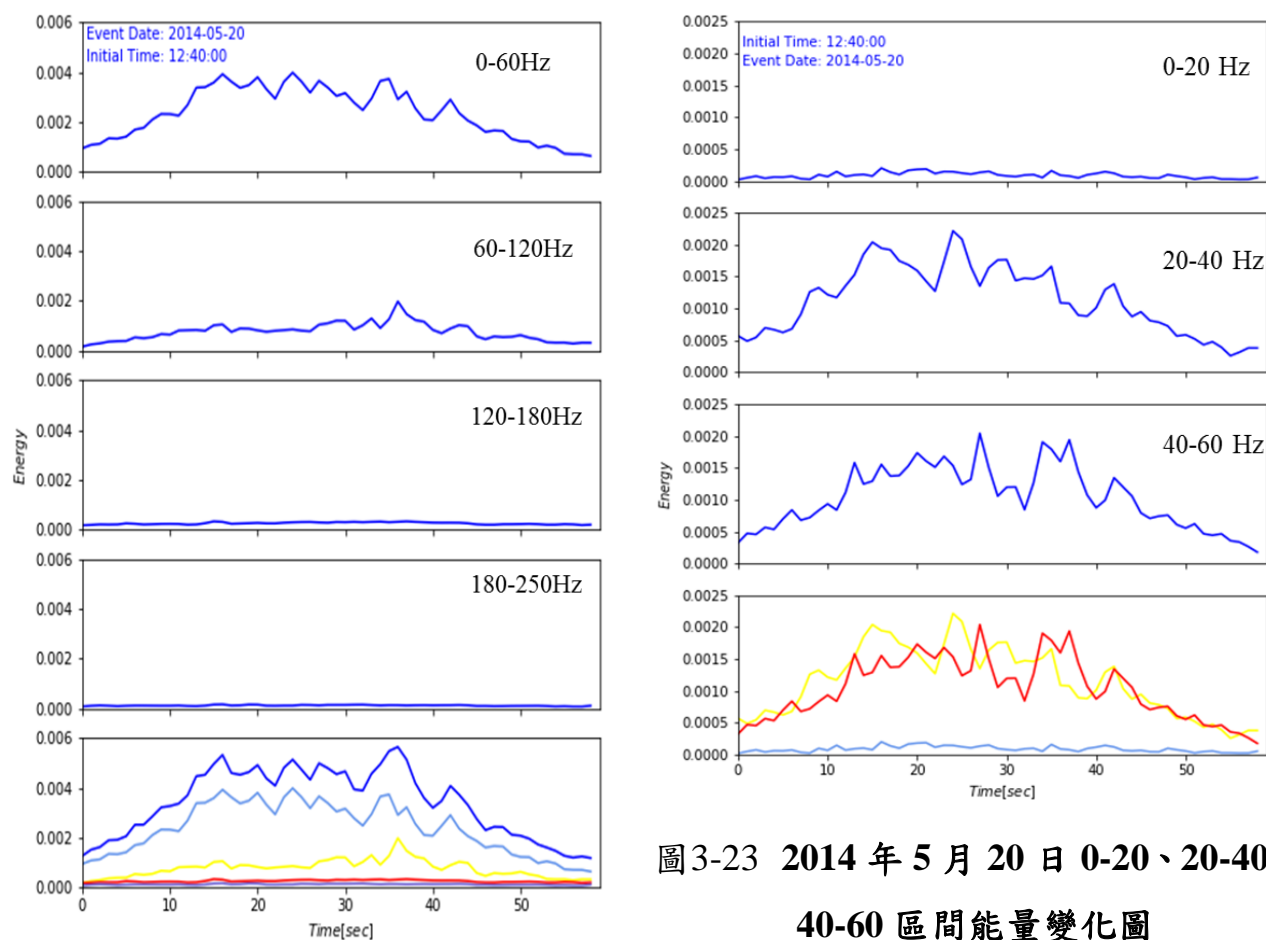


圖3-23 2014年5月20日0-20、20-40、40-60區間能量變化圖

圖3-22 2014年5月20日事件0-60、60-120、120-180、180-250區間能量變化圖

表3-9. 2014年5月20日事件不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m^2/s^2)	0.0039798	0.0019738	0.0003195	0.0001545

頻率區間	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
能量 (m^2/s^2)	0.0002016	0.0022168	0.0020411

3.5.2 現地清水流之流量與地聲能量之關係

以上三場事件都是歷史事件，因沒有流量紀錄，因此採水文分析的方式，為了補充實際流量與地聲的關係，本計畫另於現場測量愛玉子溪上下游不同地點的流量與當時地聲測量結果，以互相比較。

試驗地點有三個地點，沿著愛玉子溪從下游到中上游，且試驗的時間為12月中旬，因此愛玉子溪流量較小。在測量地點都在垂直愛玉子溪河岸方向埋三台地聲，每台地聲間距離4~5公尺。每次記錄都分兩次，第一次記錄五分鐘環境雜訊，第二次在不同地聲位置砸石頭以模擬土石流石頭撞擊產生的訊號。

最上游的點因為有約5公尺的陡坡，因此以推石頭下陡坡的方式產生訊號，如圖3-25。

3.5.2.1 清水流流量量測

本計畫採用手持旋槳式流速儀針對地聲所在之斷面進行流速量測(如圖3-24)，其各子斷面之平均流速 V 之計算方法如下

$$\text{當水深} \leq 0.4\text{m 時, } V = V_{0.6}$$

$$\text{當水深} \geq 0.4\text{m 時, } V = (V_{0.2} + V_{0.8}) / 2$$

其中， $V_{0.2}$ 、 $V_{0.6}$ 、 $V_{0.8}$ 分別為水面開始至水深的0.2、0.6、0.8倍流深位置的流速，由此量測流速搭配子斷面的流深，則可估算各子斷面的

流量如下

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n + \dots + q_{m+1}$$

$$Q = b \times \frac{H_0 + H_1}{2} \times \frac{V_0 + V_1}{2} + \dots + b \times \frac{H_{n-1} + H_n}{2} \times \frac{V_{n-1} + V_n}{2} + \dots$$

$$+ b' \times \frac{H_m + H_{m+1}}{2} \times \frac{V_m + V_{m+1}}{2}$$

(3.10)

Q：流量 (m³/s)
q：區間流量 (m³/s)

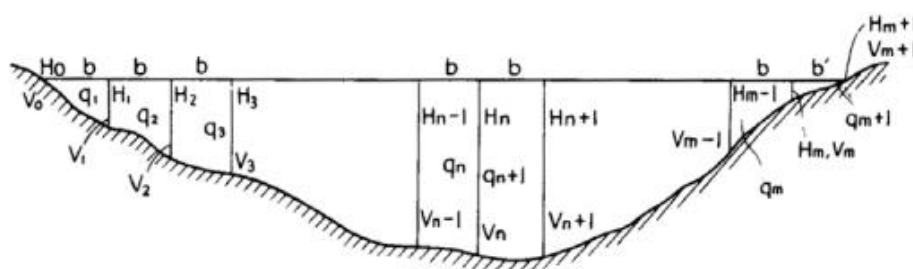
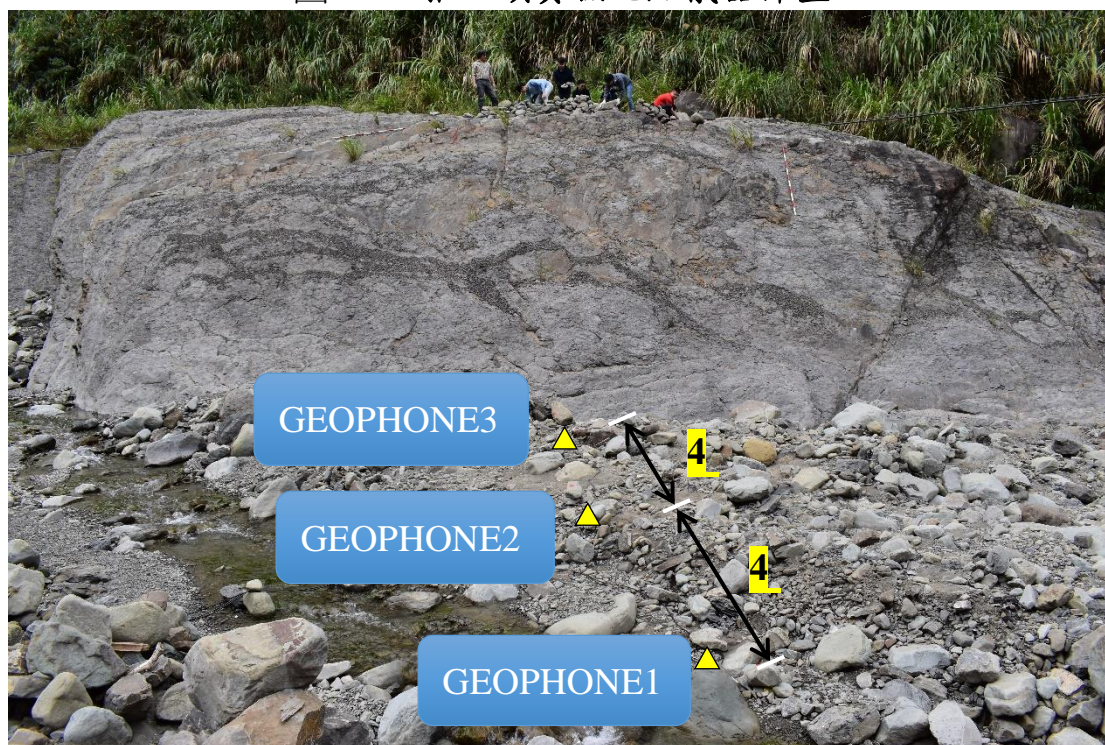


圖3-24 河道測量區間流量剖面圖 (來源：JIS)

表3-10. 試驗點座標及量測流速與流量

No.	測量時間	坐標		平均流速(m/s)	流量(m ³ /s)
1	2018 年 12 月 15 日 16:10	N	2602423	0.11	0.02
		E	235104		
		Z	1216		
2	2018 年 12 月 16 日 13:17	N	2602243	0.36	0.03
		E	235013		
		Z	1246		
3	2018 年 12 月 17 日 10:08	N	2602070	0.44	0.04
		E	234730		
		Z	1269		

圖3-25 推石頭實驗地點儀器佈置



3.5.2.2 地聲訊號實驗結果分析

試驗點 1：

第一個實驗點為接近神木國小的河道，原始訊號如 3-26。GEO1 地聲探測儀設置鄰近河岸，GEO2 與 GEO1 連線垂直于河岸，相距 5 公尺，GEO3 與 GEO2 同樣相距 5 公分，距離河岸最遠。原始時域訊號從 17 點開始測量，記錄持續 5 分鐘。從時域原始訊號能看出距離河岸越近震動速度會越大，GEO2 與 GEO1 相比，在 X 軸和 Y 軸方向上震動速度都有明顯的減少，但是在 Z 軸上上反而有增加，而在 GEO3 的訊號中能看出和 GEO1 與 GEO2 明顯不同的部分是多了幾個高峰，這個可能是因為人為走動帶來的干擾。

為了較少人為干擾帶來的雜訊，僅截取原始時域訊號前 1 分鐘做傅里葉變換，得到這一分鐘訊號的頻率分佈。比較三台地聲，選擇靠近河岸的第一台地聲探知器測得地聲訊號做能量分析（因為在歷史事件中，地聲也都是裝設於接近河岸處），用短時距傅里葉轉換。窗

函數同樣選取 2 秒 (1000 筆數據)，重疊寬度為 1 秒 (500 筆數據)。頻率區間同樣分成 0-60Hz、60-120Hz、120-180Hz、180-250Hz 四個部分，取每個區間最大總能量。其個頻段的能量分析則如同歷史土石流的方式，如圖 3-27 與 3-28，各頻段之最大能量則同樣列表，如表 3-11。

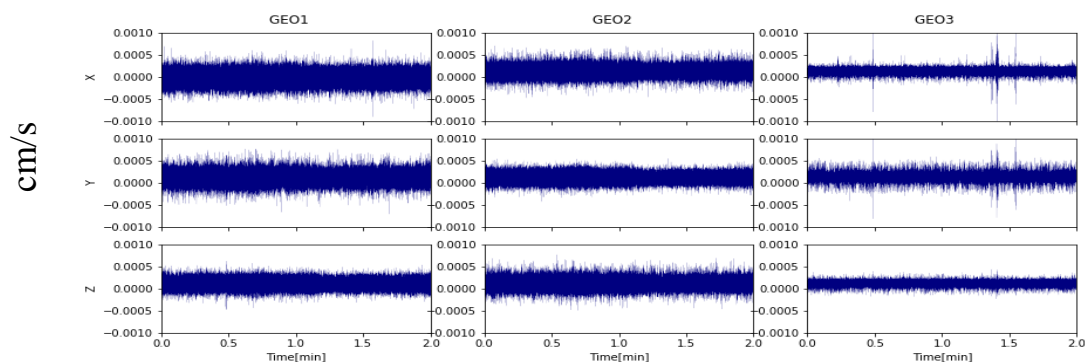


圖3-26 試驗點 1 之三台地聲原始時域訊號

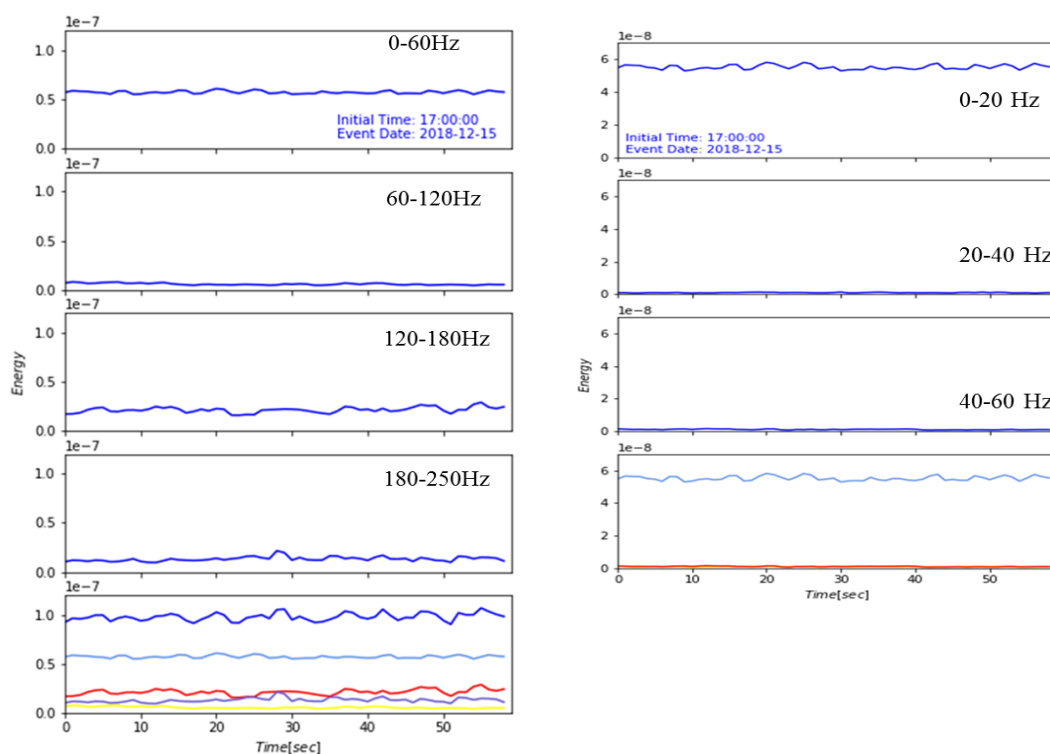


圖3-27 試驗點 1 之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量變化圖

圖3-28 試驗點 1 之 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖

表3-11. 試驗點 1 不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m^2/s^2)	6.1037e-8	7.8921e-9	2.8990e-8	2.1495e-8

頻率區間	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
能量 (m^2/s^2)	5.8148e-8	1.3252e-9	1.6102e-9

試驗點 2：

第二個實驗點為愛玉子溪土石流觀測點的河道。GEO1 最靠近河岸，GEO3 距離河岸最遠，從時域原始訊號來看，在 X 軸方向上，GEO3 震動速度最大，在 Y 軸方向三台地聲看不出顯著差別，在 Z 軸方向則是 GEO2 震動速度最大。同樣選取原始訊號前一分鐘做傅立葉變換得到頻率分佈，能看出 GEO1 的低頻地聲相比較另外兩台地聲更大，GEO2 則是 60-140Hz 的地聲能量顯著最大，GEO3 高頻部分最大。

所以這裡僅取最靠近河岸的地聲探測儀 GEO1 來進行短時距傅立葉變換，分別計算出 0-60Hz、60-120Hz、120-180Hz、180-250Hz 四個能量區間的能量積分。

為與測量點一以及三場歷史事件作比較，同樣將 0-60Hz 頻率區間分為三個部分，分別計算 0-20Hz、20-40Hz、40-60Hz 的總能量。結果對比可以看出，在沒有土石流的情況下，水流產生的地聲能量主要是分佈在 0-20Hz 頻率區間。

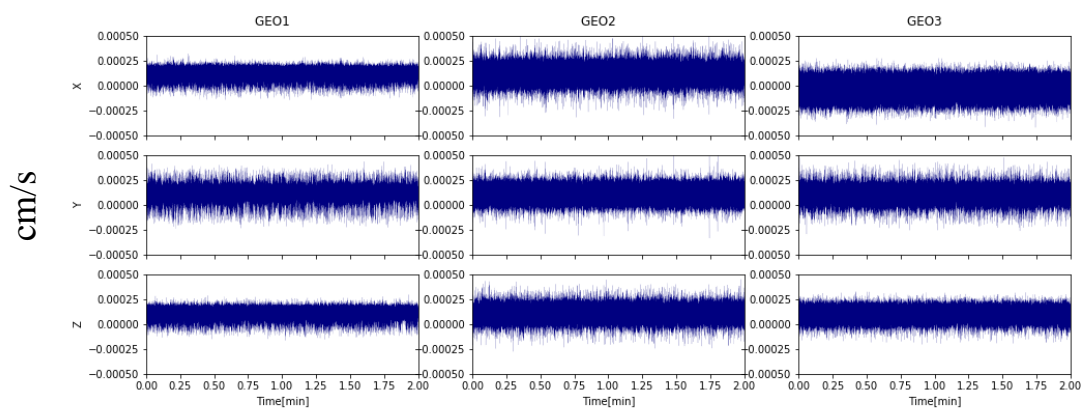


圖3-29 三台地聲時域原始訊號

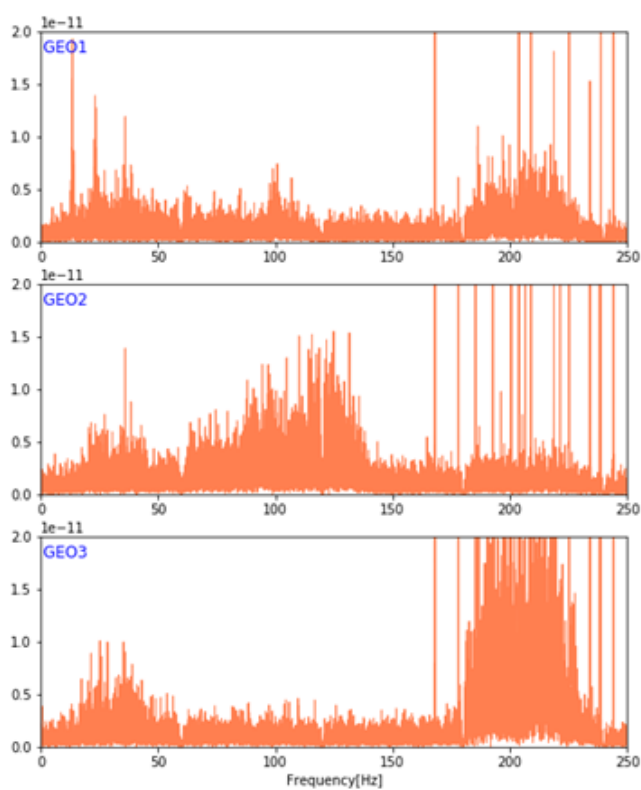


圖3-30 三台地聲一分鐘傅立葉轉換結果，橫軸為頻率(Hz)，縱軸為
能量

圖3-31

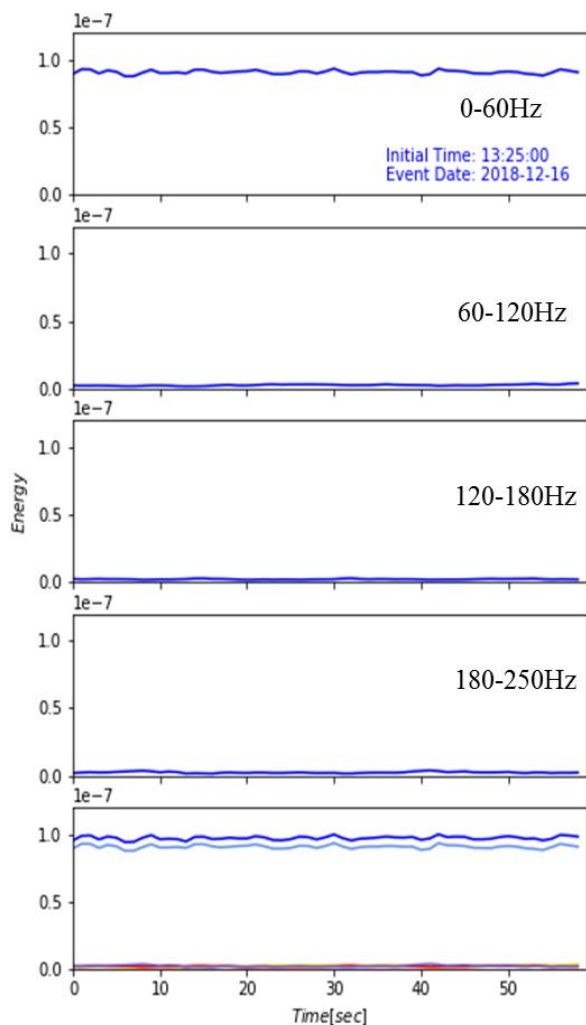


圖3-32 試驗點 2 之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量變化圖

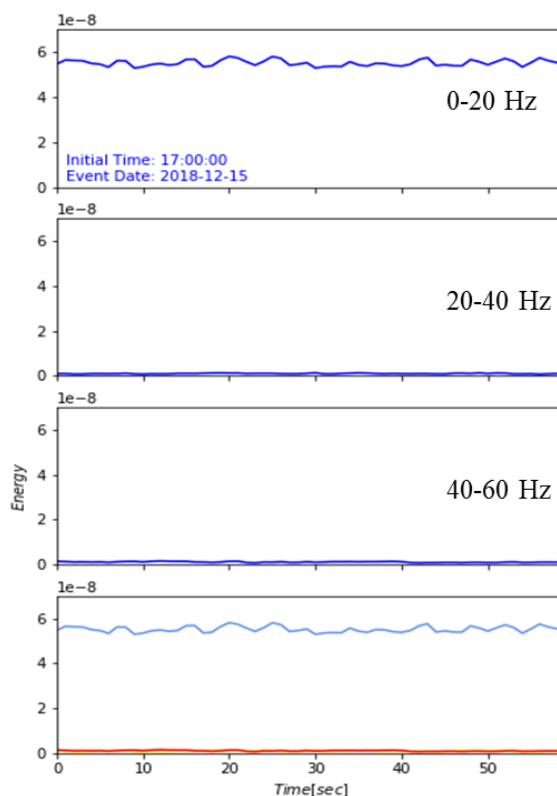


圖3-33 試驗點 2 之 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖

表3-12. 試驗點 2 不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m ² /s ²)	9.3670e-8	3.5788e-9	2.6152e-9	3.7718e-9

頻率區間	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
能量 (m ² /s ²)	9.2232e-8	2.2971e-9	1.6640e-9

試驗點 3：

第三個實驗點為最上游，GEO1 靠近河岸，GEO3 距離河岸最遠。從時域原始數據能看出，在 X 軸方向上，GEO1 的振動速度最大，在 Y 方向上 GEO1 略大於 GEO3 的振動速度，兩者都顯著大於 GEO2 的震動速度。在 Z 軸方向上則是 GEO2 顯著大於另外兩台的振動速度。

截取原始數據前 2 分鐘的地聲資料做傅立葉變換後，得到三台地聲前兩分鐘所有頻率分佈及大小。

在高頻部分三台地聲都有幾個典型的高峰出現，推測可能是較遠處的人為訊號。在 60-180Hz 頻率區間能看到 GEO1 的能量大於 GEO2 的能量，GEO2 的能量大於 GEO3 的能量，符合地聲能量與距離成反比的結論。

取靠近河岸的地聲探知器 GEO1 做短時距傅立葉轉換。

最後一圖中，藍色曲線代表 0-250Hz 所有頻率能量總和，淺藍色代表 0-60Hz 頻率區間總能量，黃色代表 60-120Hz 頻率區間總能量，紅色代表 120-180Hz 頻率區間總能量，紫色代表 180-250Hz 頻率區間總能量。

從短時距傅立葉轉換結果看，GEO1 前 2 分鐘地聲所產生的訊號能量大部分都是 0-60Hz 區間頻率產生的，其餘三個區間產生能量相近，和 0-60Hz 產生能量相差 100 倍。

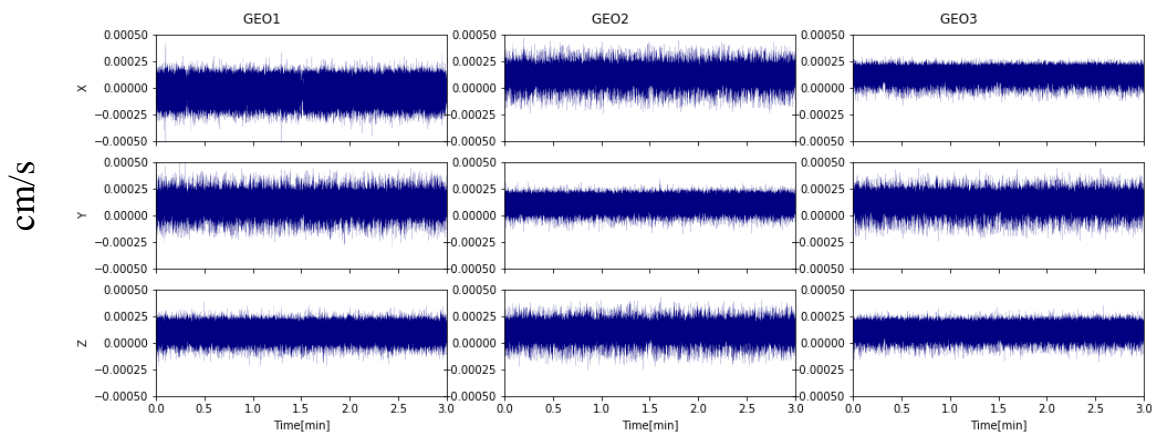


圖3-34 三台地聲時域原始訊號

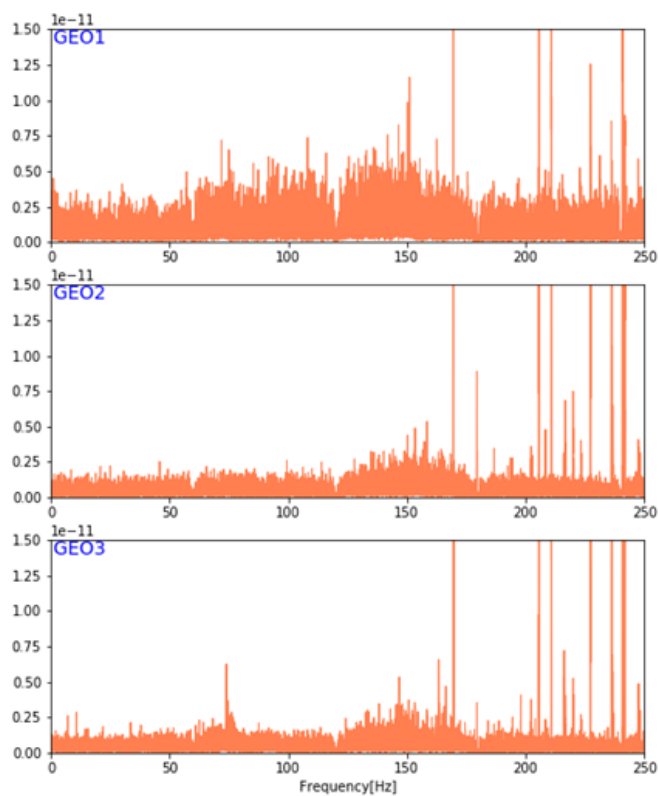


圖3-35 三台地聲兩分鐘傅立葉變換結果，橫軸為頻率(Hz)，縱軸為
能量

圖3-36

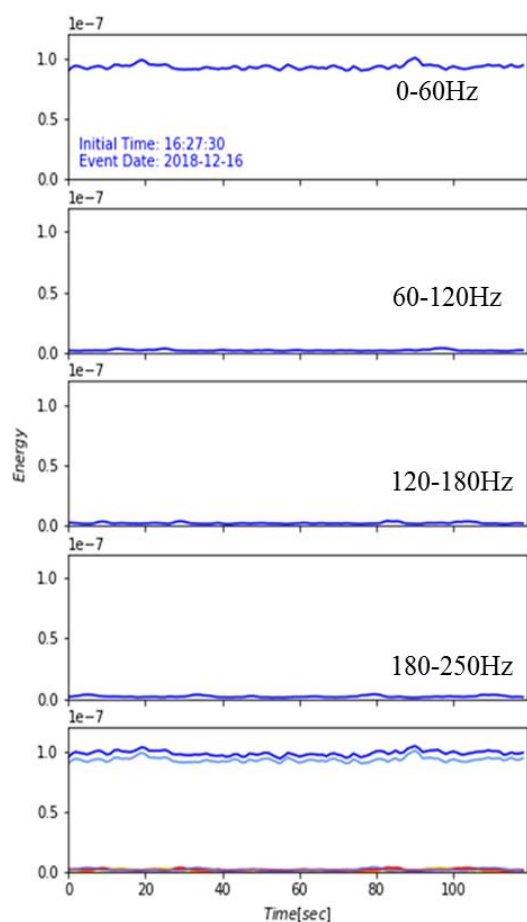


圖3-37 試驗點 3 之 0-60、60-120、120-180、180-250 區間能量變化圖

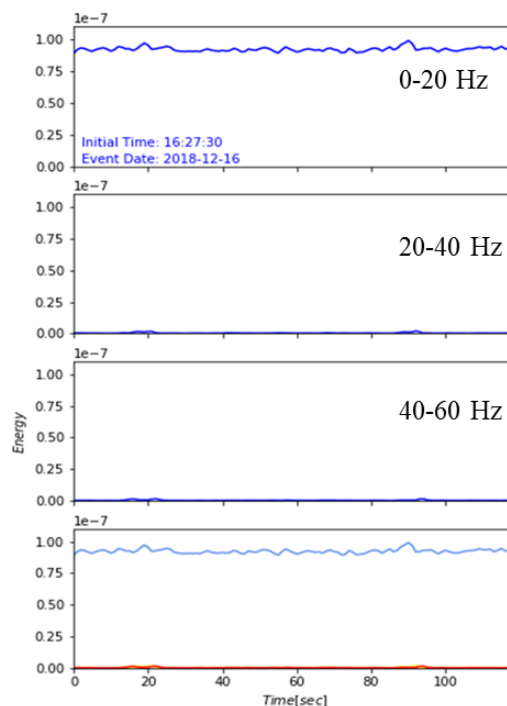


圖3-38 試驗點 3 之 0-20、20-40、40-60 區間能量變化圖

表3-13. 試驗點 3 不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m^2/s^2)	1.0088e-7	3.3630e-9	3.7804e-9	3.7444e-9

頻率區間	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
能量 (m^2/s^2)	9.9106e-8	2.0347e-9	1.6974e-9

試驗點 4：

第四個實驗點為最上游陡坡處(如圖 3-52)，第一次測量環境雜訊，第二次測量用推石頭模擬土石流撞擊產生的訊號。從環境雜訊的分析結果發現，不同區間訊號能量呈現週期性分佈，推測地聲沒有測到流動產生之訊號，測到的是人為訊號。第二次實驗於早上 10 點開始連續推石頭，石頭從高處滾落，約 1 分鐘左右。

從地聲記錄原始訊號來看只有 GEO2 記錄到石頭滾落時產生之訊號。推測靠近推石頭高低的地聲探知器埋置時操作失敗。三台地聲全部訊號做傅立葉變換後得到，模擬期間石頭滾落時產生訊號在頻率域的分佈及大小。

從短時距傅立葉轉換結果看，石頭滾動互相摩擦撞擊地面時產生的訊號能量，四個頻率區間產生能量相差不大，60-120Hz 區間頻率總能量略大於其他三個區間。

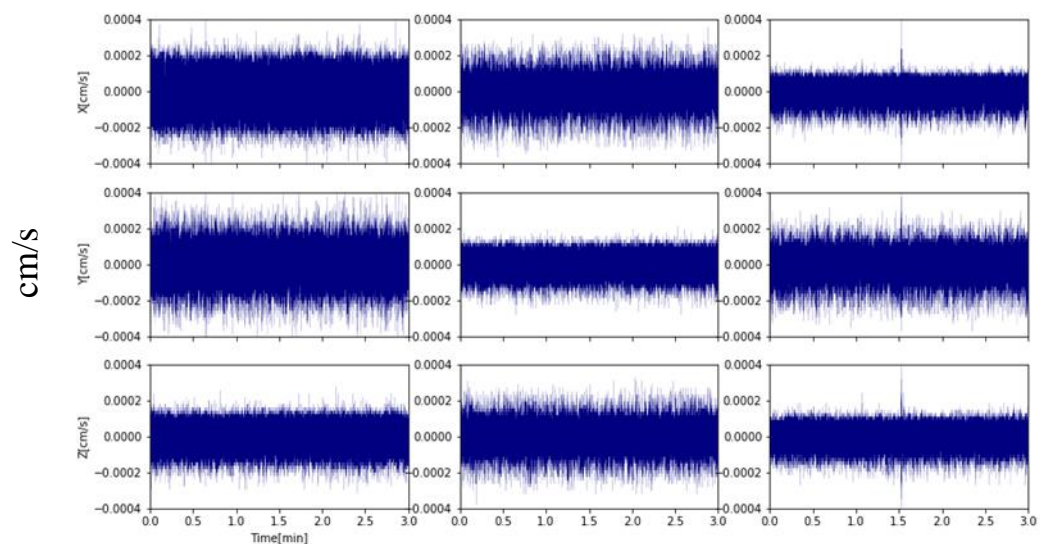


圖3-39 試驗點 4 三台地聲時域環境訊號

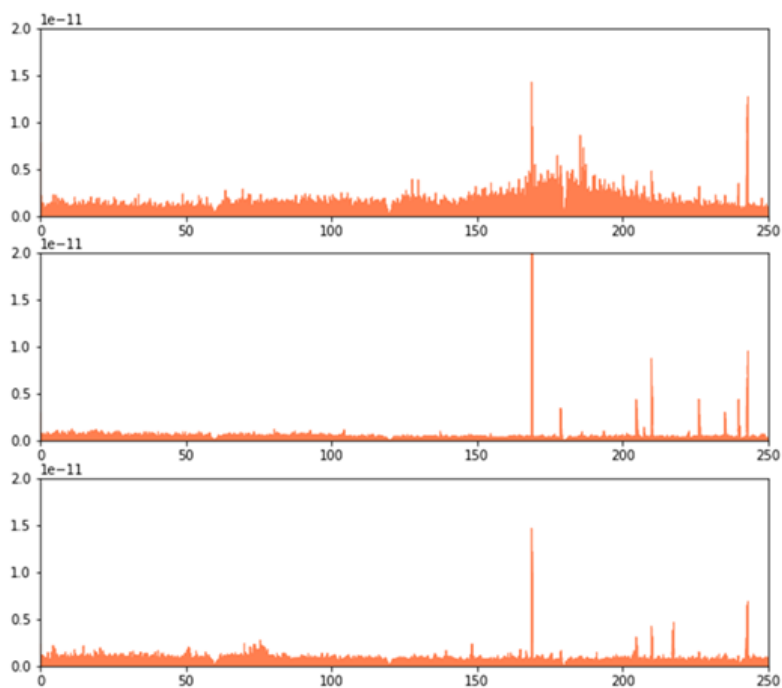


圖3-40 試驗點 4 三台地聲環境雜訊傅立葉變換結果，橫軸為頻率(Hz)，
縱軸為能量

圖3-41

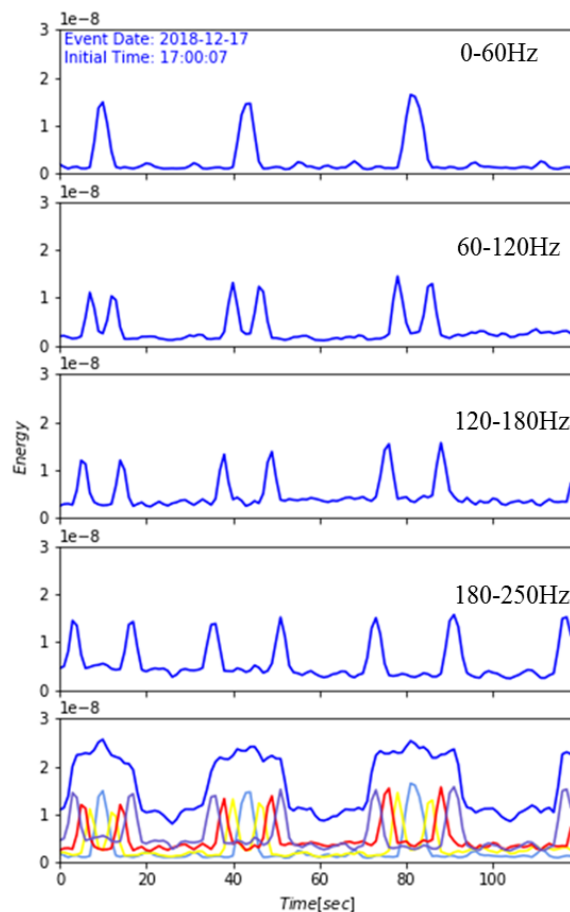


圖3-42 試驗點 4 環境雜訊之 0-60、
60-120、120-180、180-250 區間能量
變化圖

表3-14. 試驗點 4 環境雜訊不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m^2/s^2)	1.6431e-8	1.4486e-8	1.5643e-8	1.5708e-8

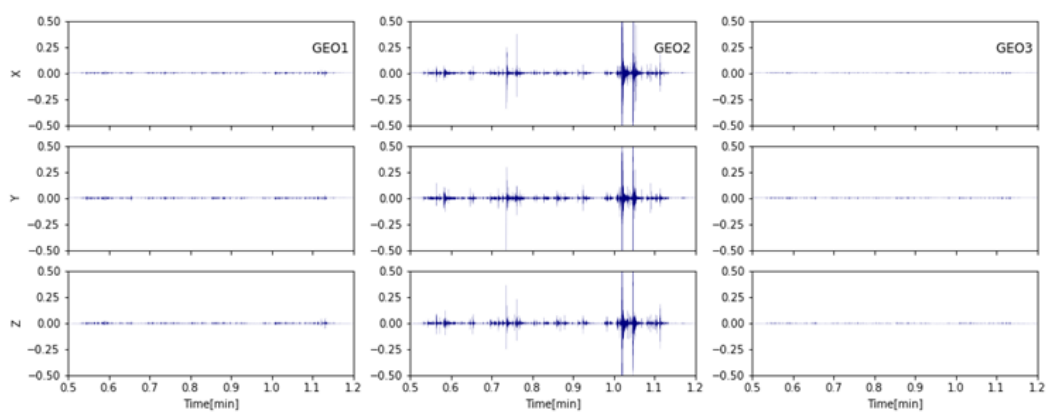


圖3-43 試驗點 4 模擬土石流時三台地聲時域訊號

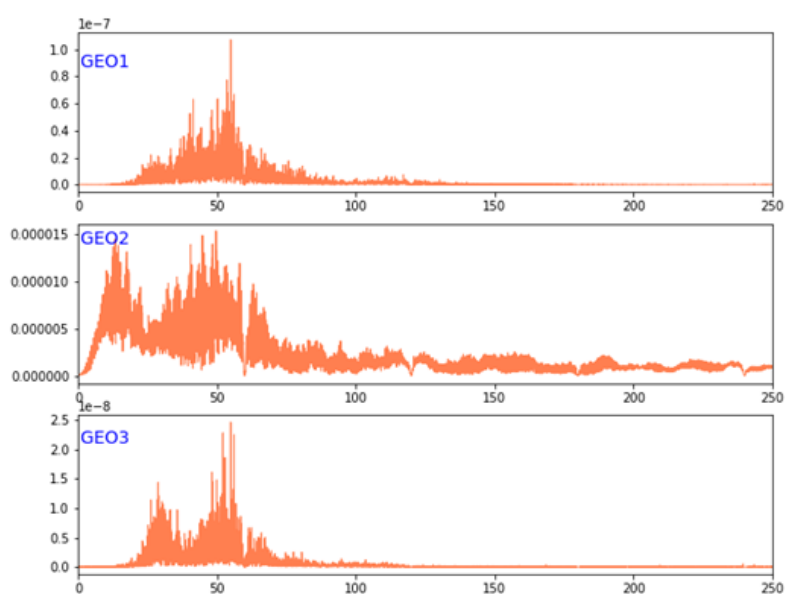


圖3-44 試驗點 4 模擬土石流時三台地聲訊號傅立葉變換結果，橫軸為頻率(Hz)，縱軸為能量

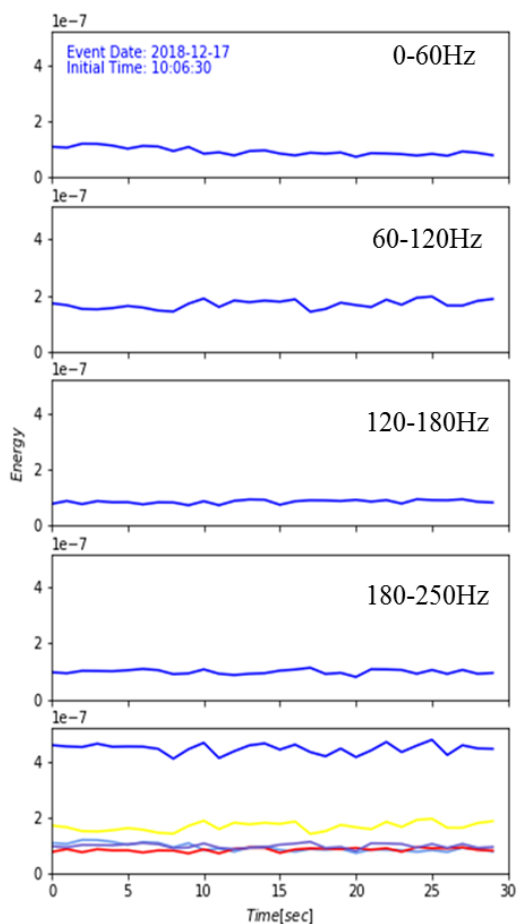


圖3-45 試驗點 4 模擬土石流時之
0-60、60-120、120-180、180-250 區
間能量變化圖

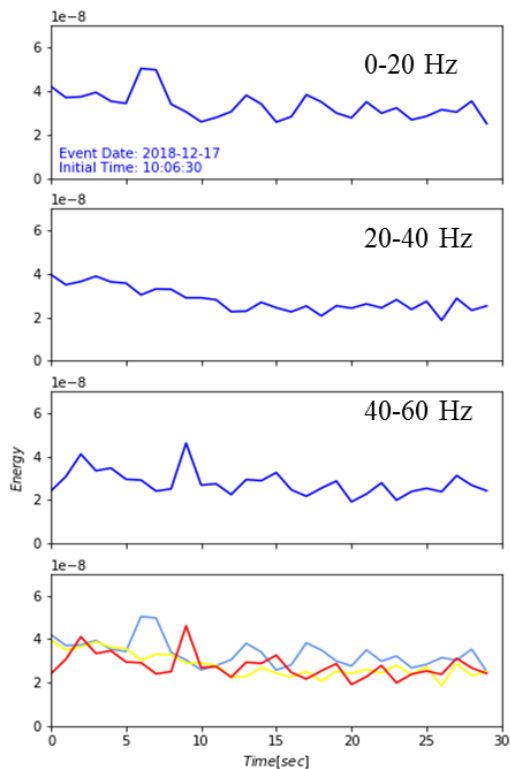


圖3-46 試驗點 4 模擬土石流
時之 0-20、20-40、40-60 區間能量
變化圖

表3-15. 試驗點 3 不同頻率區間之最大能量

頻率區間	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
能量 (m^2/s^2)	9.3670e-8	3.5788e-9	2.6152e-9	3.7718e-9

頻率區間	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
能量 (m^2/s^2)	5.0417e-8	3.9673e-8	4.6170e-8

3.5.3 結果分析

首先，將前兩小節中之量測流量與地聲各頻率區段之能量峰值統整繪於圖 3-44 與 3-45 中，以探求流量與各區間能量的關係，其中圖 3-44 包含第一種土石流流量估算方法與清水流流量之點，而圖 3-45 則包含第二種土石流流量估算方法與清水流流量之點。

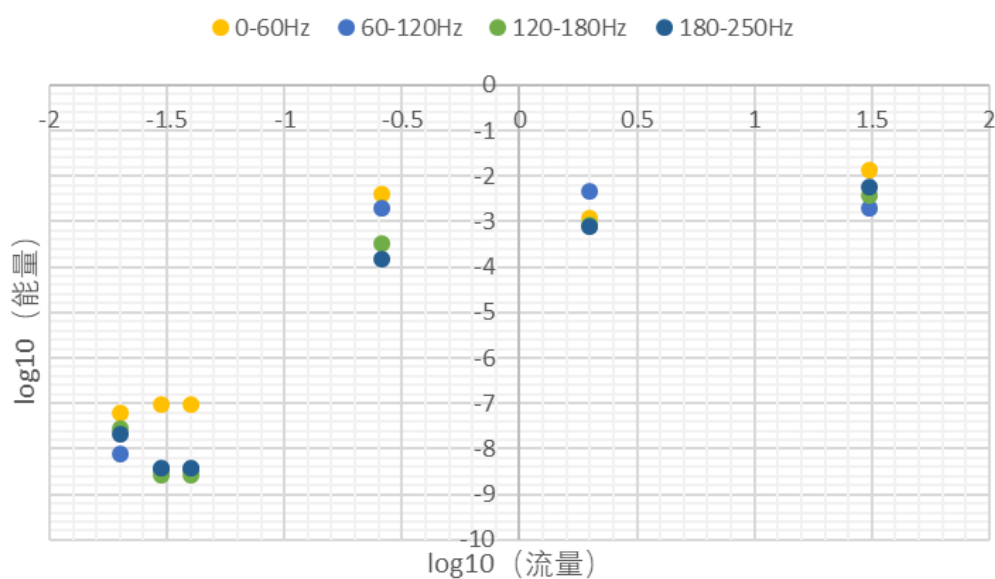


圖3-47 等集流時間線流量與四個能量區間關係圖

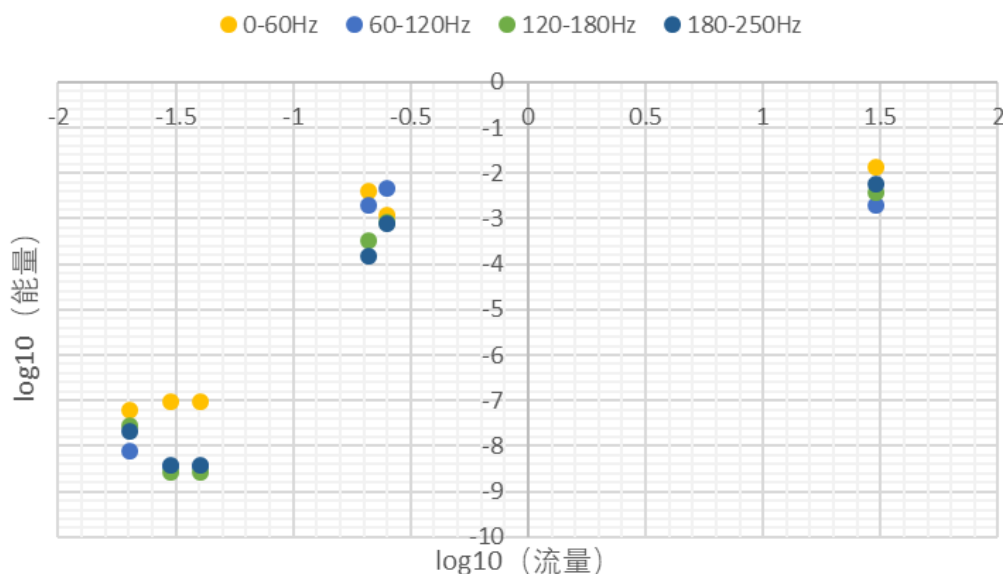


圖3-48 簡單三角形單位歷線流量與四個能量區間關係圖

接著，將三個能量區間最大能量與兩種流量計算方法所得流量繪製成圖。

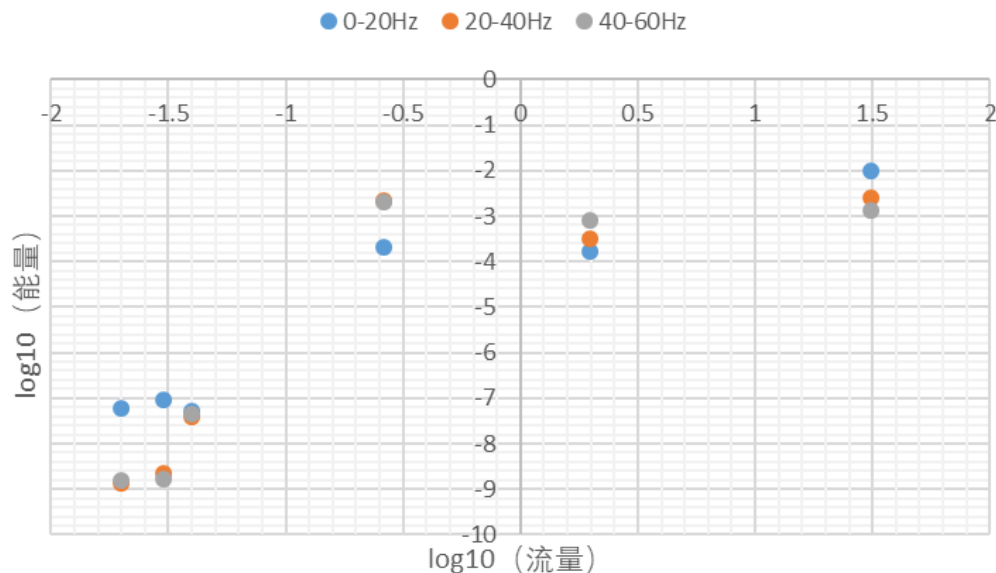


圖3-49 等集流時間線流量與三個能量區間關係圖

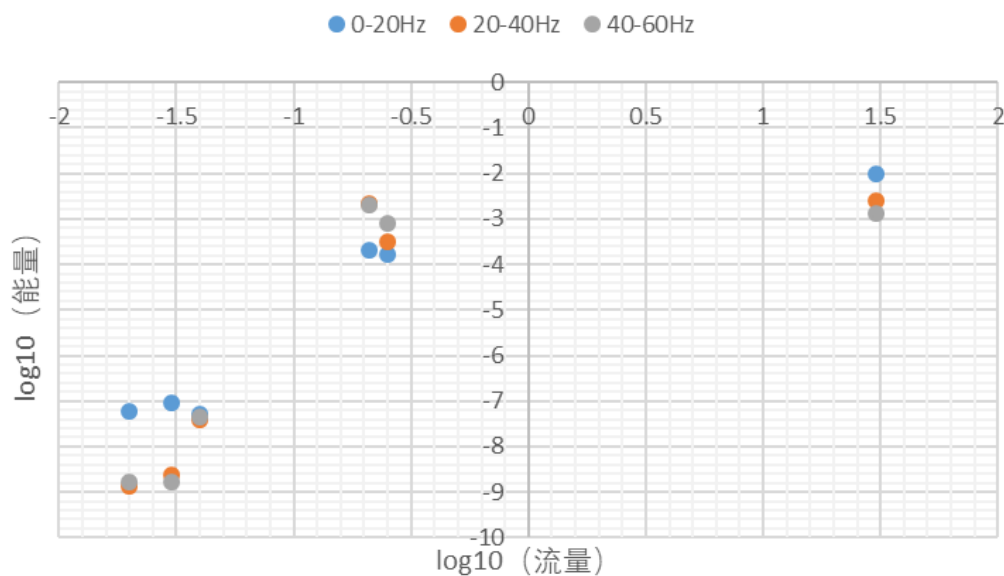


圖3-50 簡單三角單位歷線能量與三個能量區間關係圖

以下將接續將不同頻率區間之能量與劉亮點分開繪製，並以線性回歸方式求取流量與地聲能量之關係式。

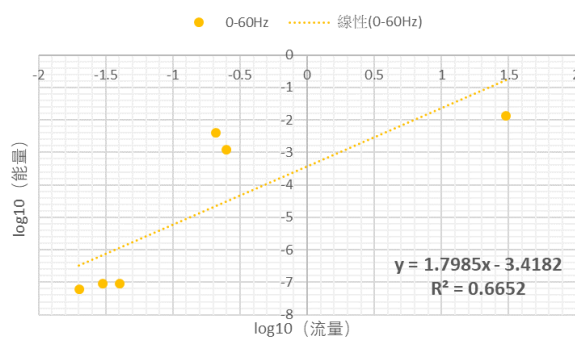
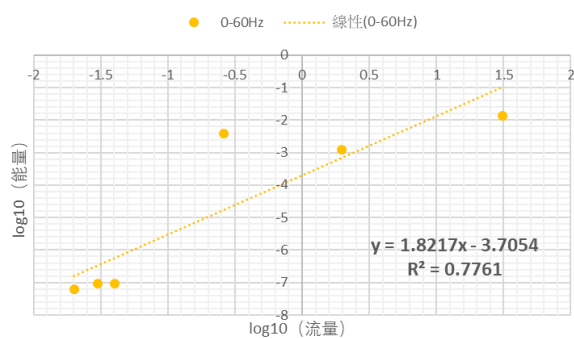


圖3-51 0-60Hz 頻率區間能量與流量之關係

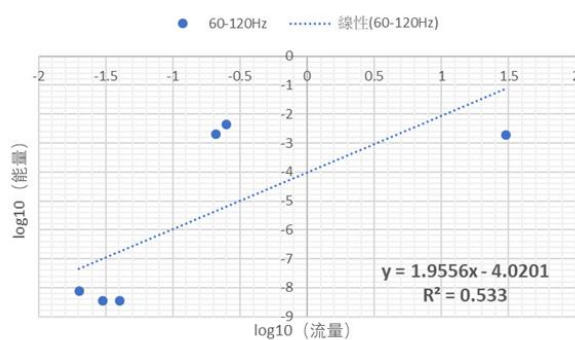
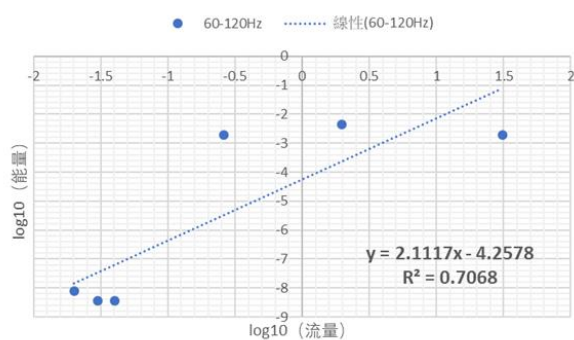


圖3-52 60-120Hz 頻率區間能量與流量之關係

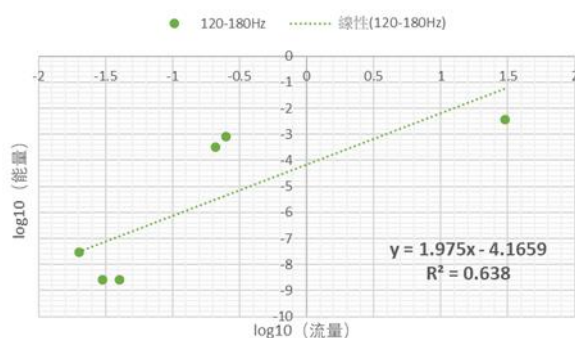
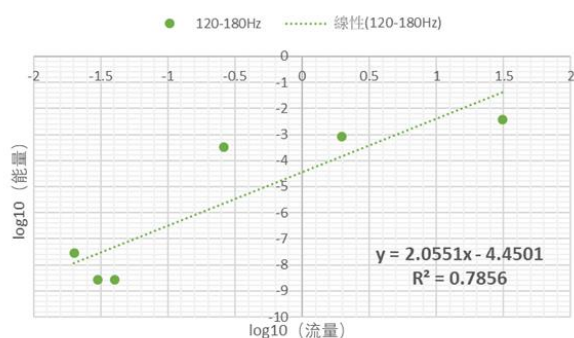


圖3-53 120-180Hz 頻率區間能量與流量之關係

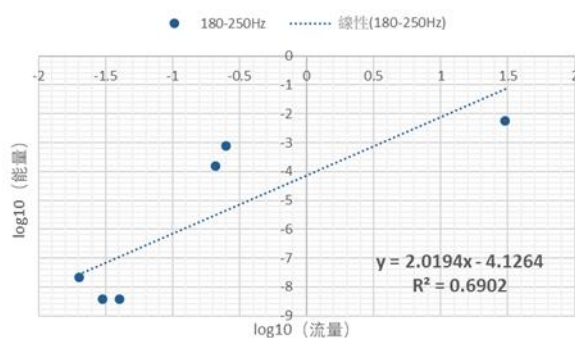
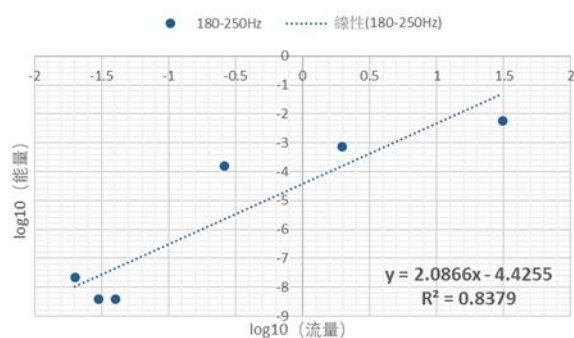


圖3-54 180-250Hz 頻率區間能量與流量之關係

從圖可以看出能量與流量取對數後呈現某種線性關係。使用一次函數擬合的話可以看出第一種方法計算出的流量與能量擬合效果更好。流量差異比較大的主要是 2011 年 7 月 13 日這場降雨事件，推測原因是第二種方法不適用於計算降雨延時小於集流時間的降雨事件，所以兩種方法計算出流量相差較大。

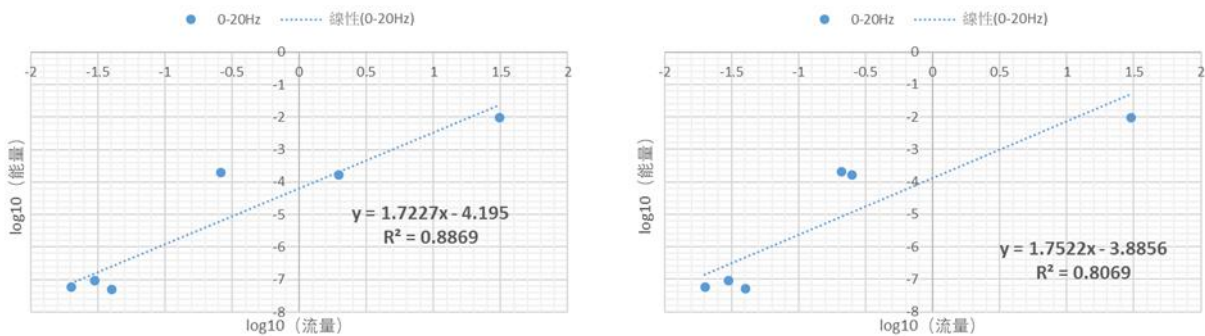


圖3-55 0-20Hz 頻率區間能量與流量之關係

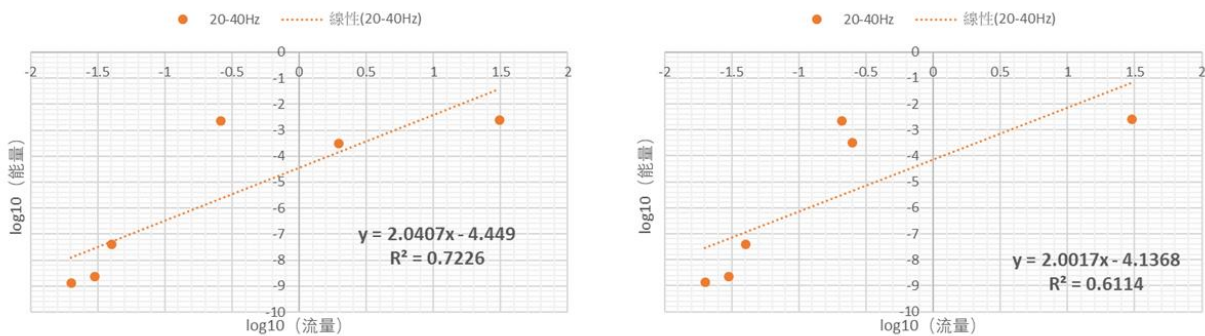


圖3-56 20-40Hz 頻率區間能量與流量之關係

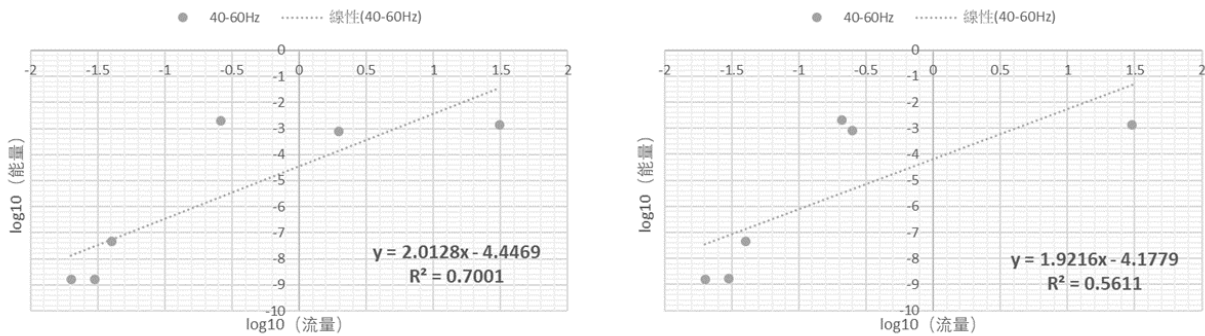


圖3-57 40-60Hz 頻率區間能量與流量之關係

三個區間總能量再分別與兩種方法計算所得流量進行分析。從三個頻率區間能量與流量關係對比來看，能明顯發現最為相關的區間即為 0-20Hz，同前人研究結果相符合。最後將回歸之公式整理列於表 3-16 中提供後續研究參考。

表3-16. 能量與流量關係式

	0-60Hz	60-120Hz	120-180Hz	180-250Hz
等集流時間線計算所得流量	$e = 0.00020Q^{1.82}$	$e = 0.00006Q^{2.11}$	$e = 0.00004Q^{2.06}$	$e = 0.00004Q^{2.09}$
簡單三角單位歷線方法計算所得流量	$e = 0.00038Q^{1.80}$	$e = 0.00009Q^{1.96}$	$e = 0.00006Q^{1.98}$	$e = 0.00007Q^{2.02}$

	0-20Hz	20-40Hz	40-60Hz
等集流時間線計算所得流量	$e = 0.00006Q^{1.72}$	$e = 0.00004Q^{2.04}$	$e = 0.00004Q^{2.01}$
簡單三角單位歷線方法計算所得流量	$e = 0.00013Q^{1.75}$	$e = 0.00007Q^{2.00}$	$e = 0.00007Q^{1.92}$

第四章 儀器裝設原則

第一節 攝影機裝設之探討

裝設攝影機必須考慮到幾個因素：

- 1) 必須照到全景
- 2) 要有足夠的解析度
- 3) 電源與訊號傳輸要能安裝。

一般而言，電源與訊號傳輸會是成本考量，在此避開成本問題，先就攝影機安裝位置做建議。

攝影機是最直觀的設備，對人類而言由視覺判斷事件是最直觀的，因此攝影機必須放在一個能綜觀事件發生全景的地方，這是第一個基本要求。

但是因為攝影機分析數據時，又不能讓解析度太差，造成分析的數據無法使用，因此也不能太遠，因此就距離而言，不能讓解析度低於每個畫素(pixel)等同現場場景中央距離超過 10 公分，因為一般分析都至少會有 5-10 個畫素的誤差，因此每個畫素 10 公分等同最後分析出來的數據會有半公尺以上的差異，若是換算成流速，再除以 0.1 秒，則誤差會非常可觀，因此攝影機安裝的距離最遠不可超過畫面畫素乘以 0.1m。

舉例來說，當攝影機的感光元件(CCD 或 CMOS)畫素為 1024x768 時，代表單方向最多 1024 畫素，每個畫素照到現場範圍必須低於 10 公分，表示攝影機的拍攝畫面，其畫面最寬處不能超過 102.4 公尺，當然越小越好，因此攝影機裝設的位置必須能看到全景，而該全景最寬處又不能超過寬度畫素數目乘 10 公分的距離。

攝影機安裝的角度，應該是以 45 度線直接照到目標區中心，為

最佳的視覺與數據分析角度。但是當攝影機放在目標區 100 公尺以外，又要有 45 度的視角，表示攝影機必須架設到 100 公尺高，若是現場有山坡可架設，當然最好，若現場為溪流，就很難架設到如此的高度，但是視角的角度太平，會造成直觀畫面受限與分析數據誤差太大的問題，因此建議最低不要低於 30 度。

有裝設攝影機，就有必要在攝影機照設的範圍內至少兩處地方，裝設長度標準尺，以公尺為單位即可，兩處地方要一處接近攝影機，一處遠離攝影機，兩處之間的距離達到攝影機景深的一半為最佳。

攝影機若是有光源，做為夜間打光用，則光源應該放在能照亮觀測目標區的位置，因此不需要跟攝影機放一起，若是光源到目標區能與攝影機到目標區夾角少於 60 度，會是最好的架設方式，光照與拍攝角度關係請見下節。

4.1.1 光照角度與拍攝角度關係

為了檢驗太陽光照角度與相機拍攝角度對粒徑分析結果之影響，本研究於室內，分別將相機及光源分別變換角度，然後檢視其對於顆粒粒徑分析的影響。

在此試驗中，試驗區為 1m x 1m 的方形區域(如：圖 4-1)，在此區域內擺放卵石進行測試，其中測試之卵石的長軸平均長度為 72 毫米、次長軸為 52 毫米及最短軸為 40 毫米。

光源照射與相機對焦中心都在該一公尺平方的正中心點，相機與光源都以距離該中心點 2 公尺的半圓形為路徑，以從地面夾角 15 度開始、每次拍攝增加 15 度至 165 度為止，進行 11x11 組共 121 組的拍照量測。最後利用本計畫前期計畫(107 年度計畫之成果)發展的自動化粒徑分析程式(AGS)進行石頭長軸及短軸之分析。

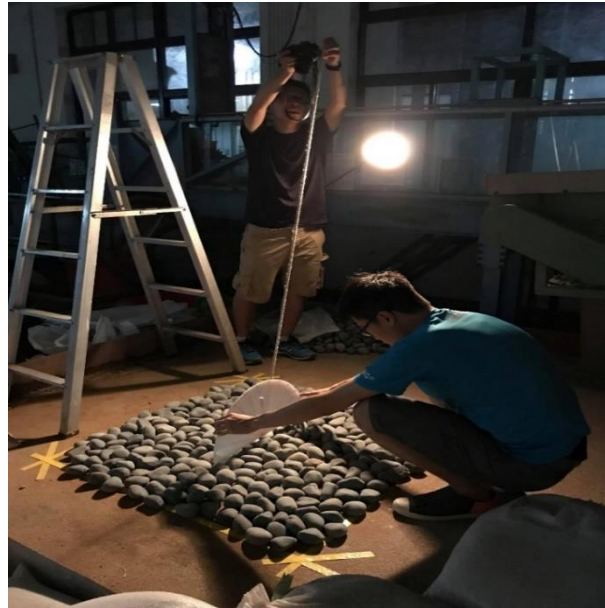


圖4-1 實驗操作場地與設置

將所有組別結果以粒徑累積百分比 50%(D50)所對之粒徑大小進行等高線圖之繪製，橫軸為光照角度、縱軸為相機拍攝角度、高度為 D50 對應石頭長度，可得圖 4-2 及圖 4-3。

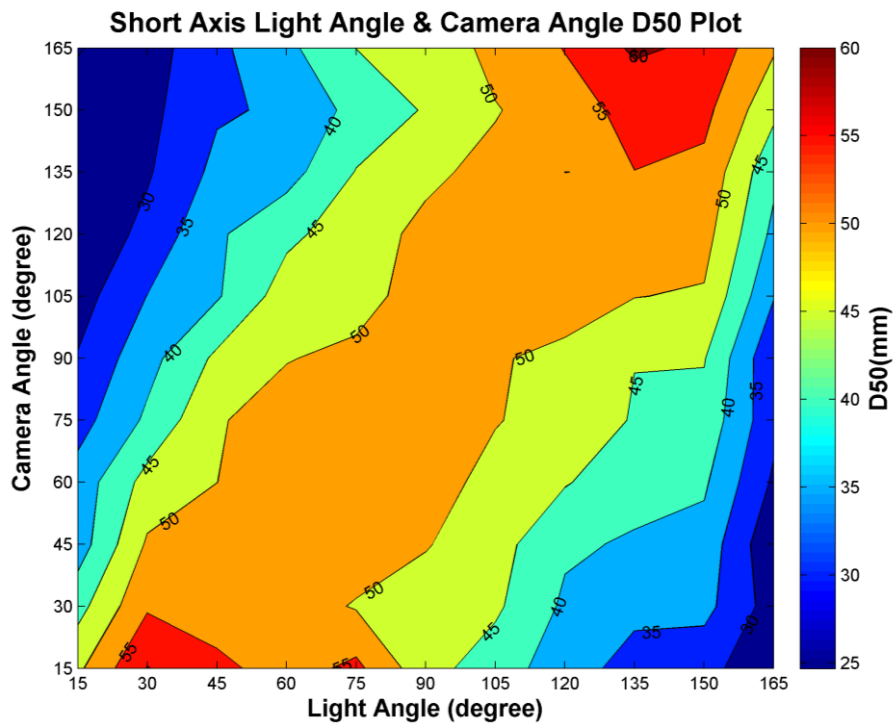


圖4-2 短軸等高線圖

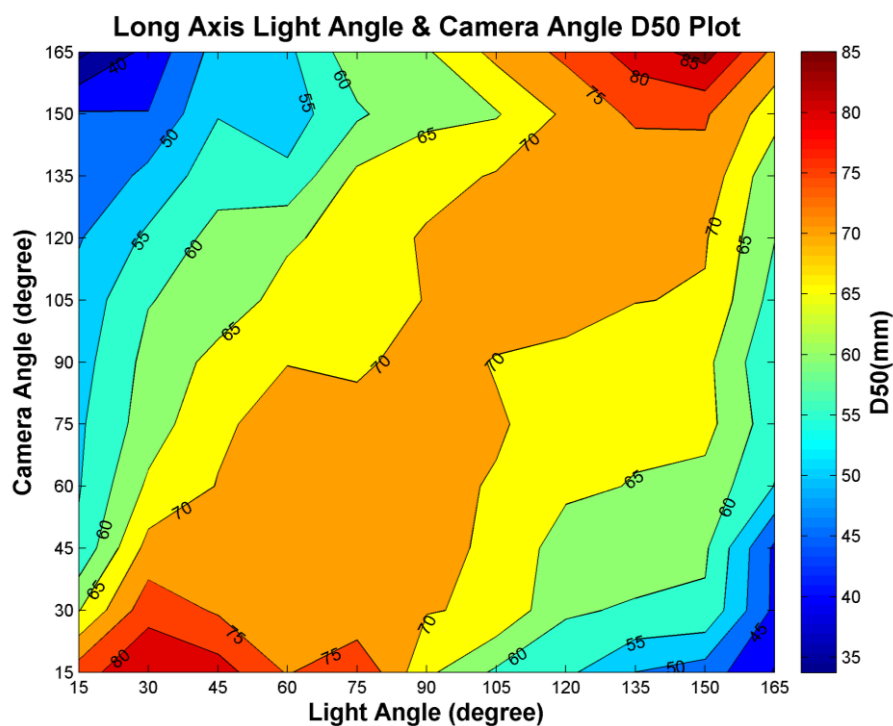


圖4-3 長軸等高線圖

若以橫軸為粒徑累積百分比 50%(D50)所對之粒徑大小、縱軸為光照角度逐次依照拍攝角度進行作圖，則可得圖 4-4 及圖 4-5。

因為 15 度在現場為不可能的角度，且對整群資料影像過大，所以將圖 4-4 及圖 4-5 中 15 度及 165 度的資料刪除，並以 90 度進行資料鏡射顯示可得圖 4-6 及圖 4-7。

以固定光源角度、相機拍攝角度從 15 度至 165 度，分別進行石頭長軸及短軸的長度累積百分比繪製分布圖，可得長軸與次長軸之累積粒徑分佈曲線，如圖 4-8 與圖 4-9。

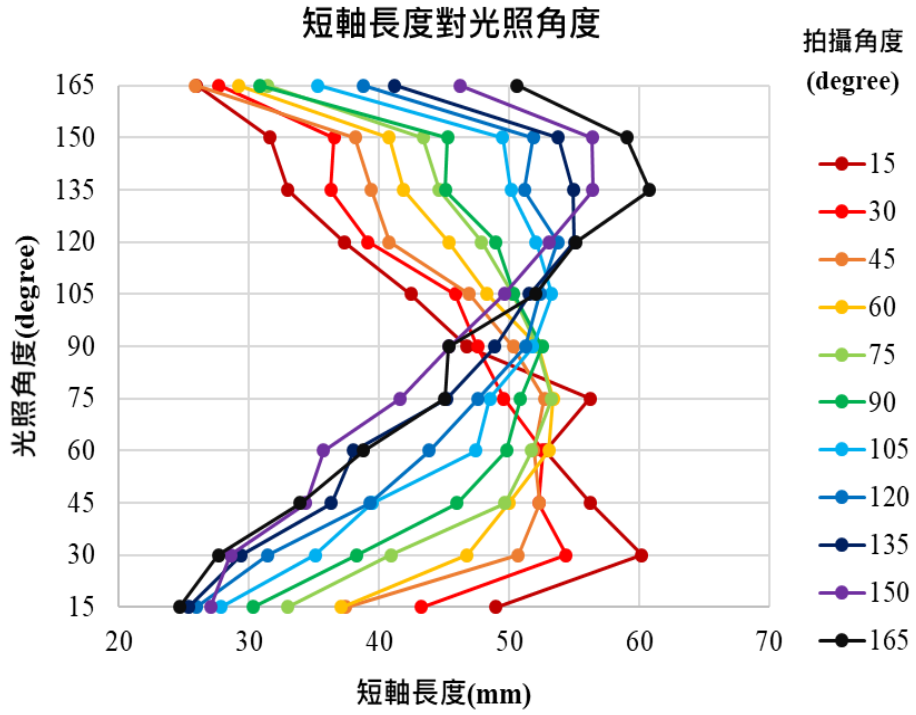


圖4-4 短軸長度對光照角度作圖

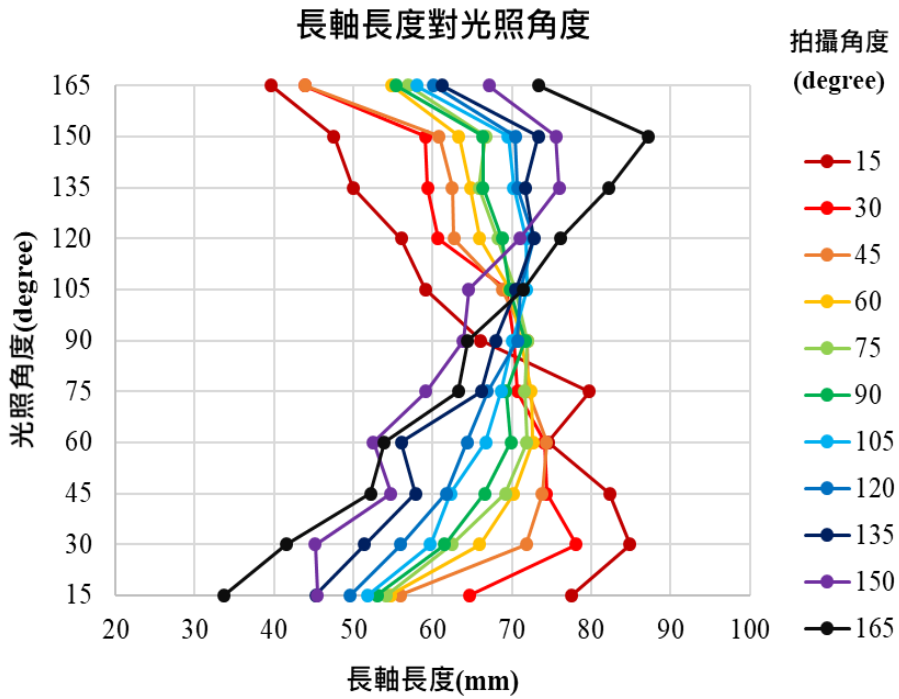


圖4-5 長軸長度對光照角度作圖

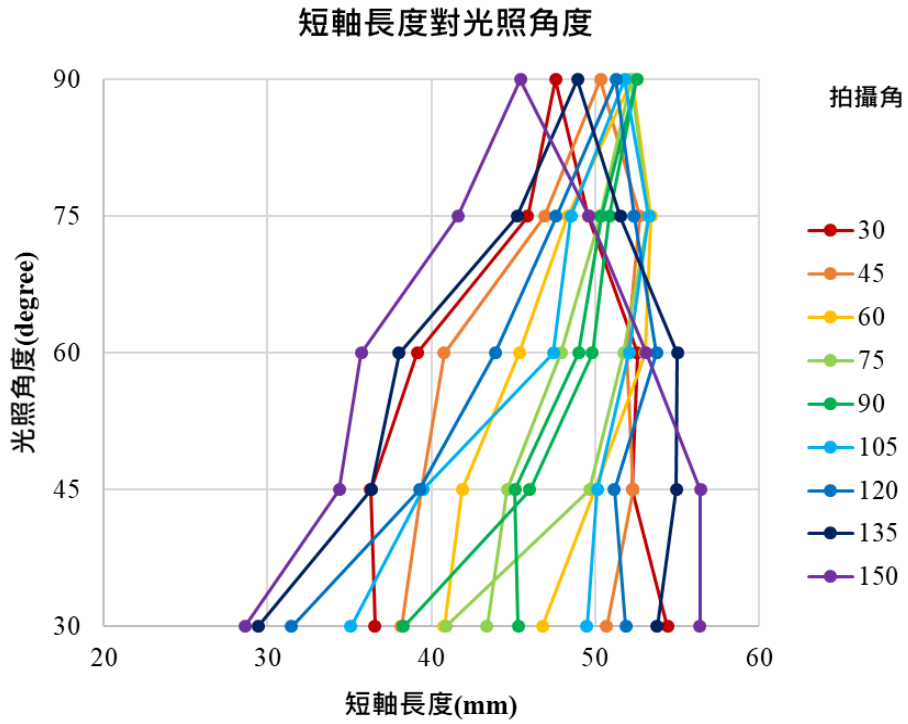


圖4-6 短軸長度對光照鏡射角度作圖

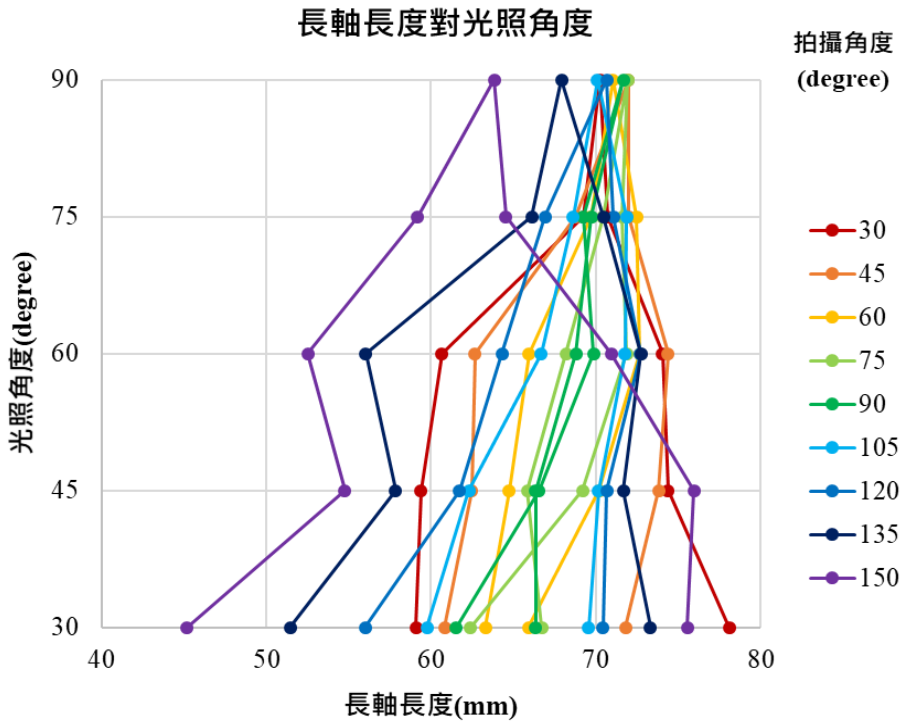


圖4-7 長軸長度對光照鏡射角度作圖

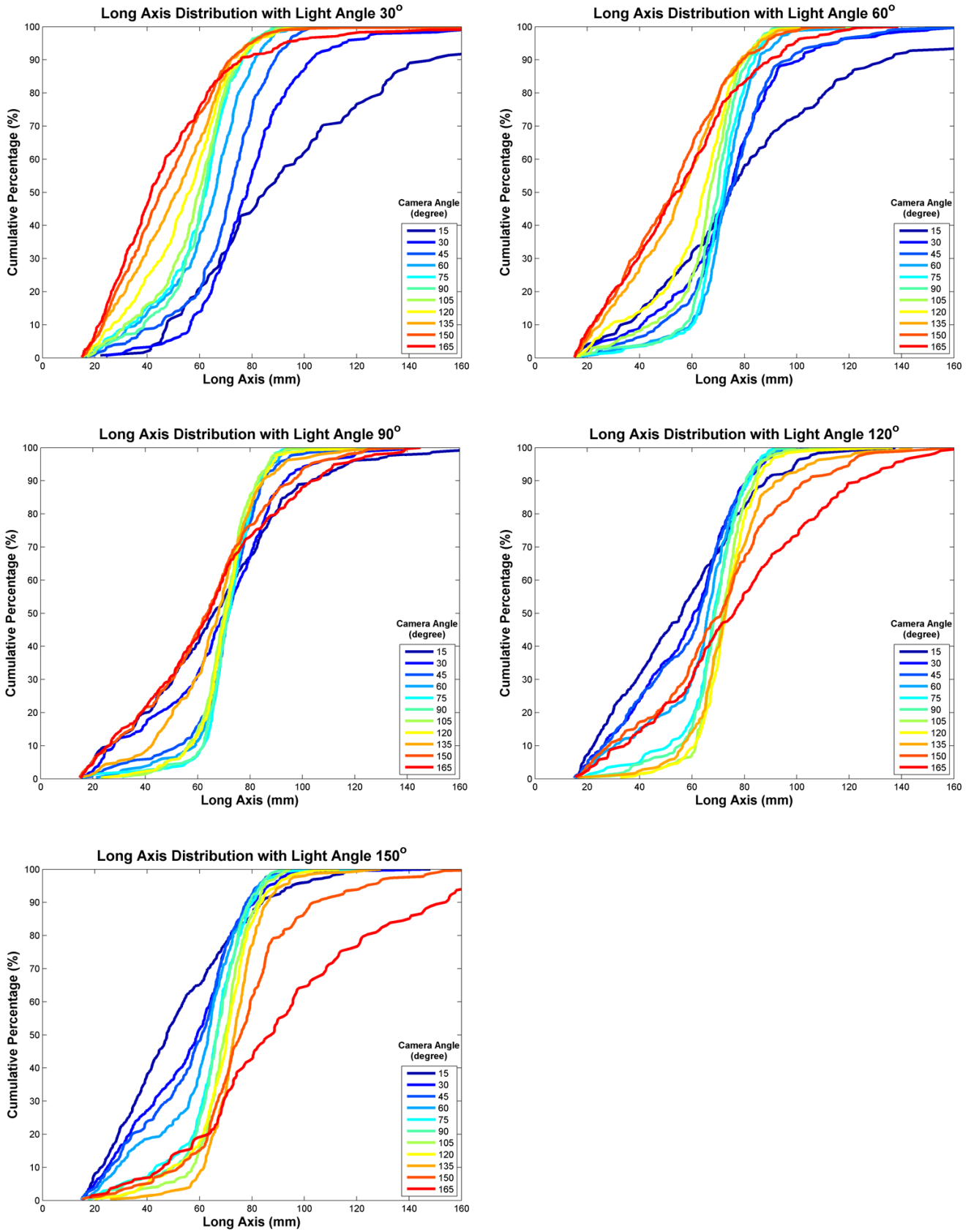


圖4-8 固定光源角度，相機從不同角度拍攝所得粒徑常軸分布圖

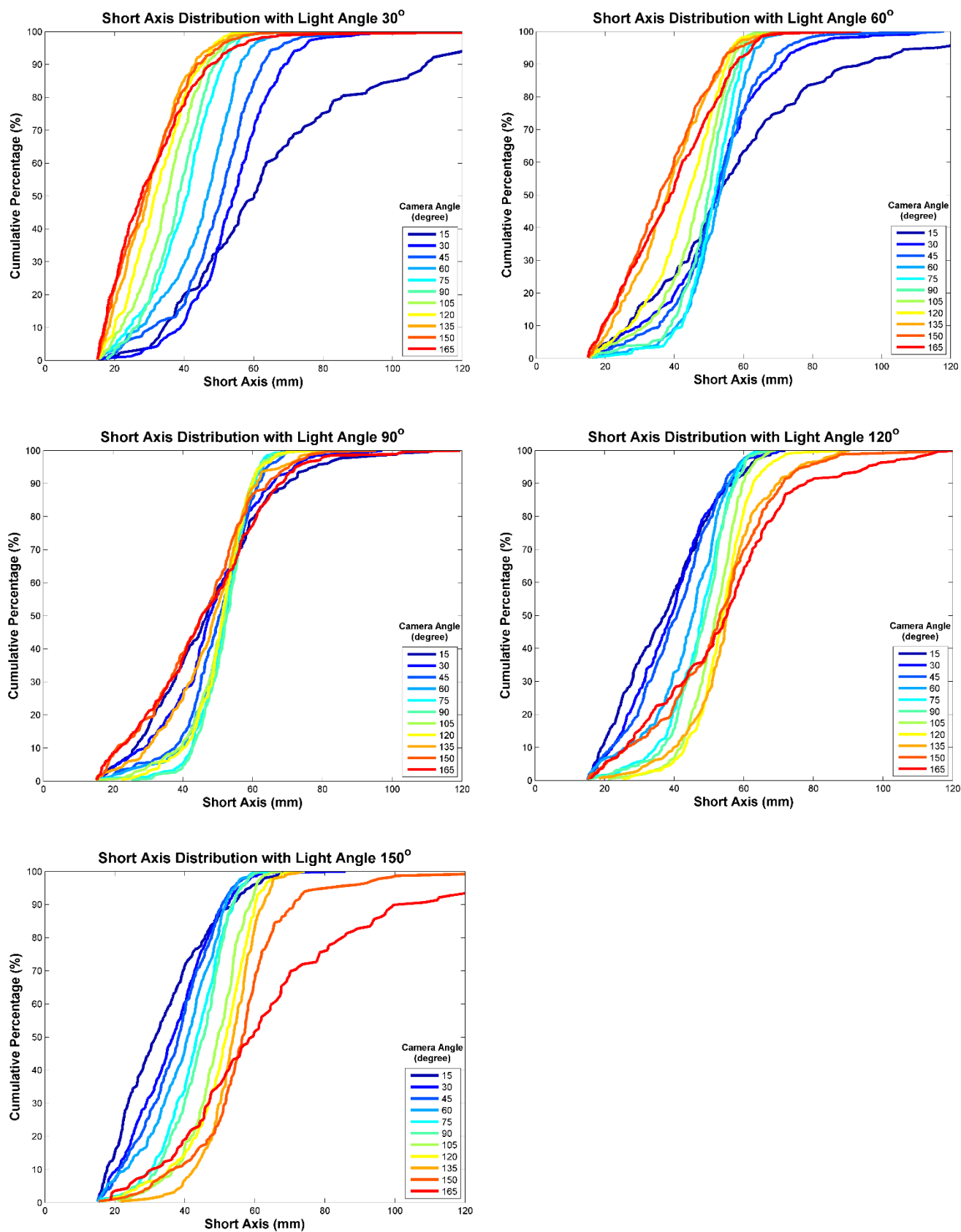


圖4-9 固定光源角度，相機從不同角度拍攝所得粒徑短軸分布圖

由上述結果可知，光照角度及相機拍攝角度影響了粒徑分佈的量測結果。光照的角度會影響石頭陰影的方向，因此光在垂直 90 度時，結果最準確，當光照偏了超過 30 度以後，較大或較小的顆粒，誤差會超過 40%。以白天太陽光照為主要光源時，就必須考慮地形與時間，在早上 9 點到下午三點間，誤差應該都不大，在此時間之外，若地形為峽谷地形，光照必須來自上方時，準確度較高，若為空曠地形，則誤差會很大。若光源是人工的(夜間)，則應該布置於目標區上方，但是若光源不是在目標區上方，則需要事先做好修正係數，因為人工光源角度固定，修正係數應該做一次就好。

另外相機的裝設，也應該越垂直於目標區越好，若因為安全性考量，將相機設置於一段距離之外，則越高越好，否則也應該有相機裝設角度修正係數的修正。

第二節 地聲探測器裝設之探討

地聲探測器的裝設，其實有許多年的經驗，但是往往裝設的時候會因為方便與其它因素，裝設在不正確的位置，造成訊號接收上的問題，以下針對地聲探測器的裝設要求，做原則上的分析。

地聲探測器要能接收到土石流事件的最大能量，必須越接近土石流越好，但是這又會造成儀器本身的危險與維護的問題，因此建議如下：

- 1) 若土石流經過區域為岩盤地區，岩盤地區聲音傳遞優良，則地聲探測器裝在河谷中岩盤露出點，直接連接岩盤區較好。
- 2) 若土石流經過區域為軟泥層或砂石沉積區，這種軟性介質區域聲音耗損極大，聲音無法遠傳，建議於河道下方修建一長條形潛壩，潛壩會將接觸到的土石流聲音藉由硬的水泥與石頭傳遞到岸邊，地聲探測器可以直接固著於壩體的一部分即可。
- 3) 若沒有以上兩種條件，地聲探測器切忌擺設於軟泥層地區，或岸邊太高的點。
- 4) 土石流的特徵聲頻約在 5Hz 到 80Hz，端視為哪一種土石流，與利用地聲的分析方式，若集中低頻分析，且地形配合有岩層，則放到百公尺以外都可以，若目標為 40Hz-80Hz 屬於石頭撞擊的範圍，則最好在硬介質的條件下，且不要超過 30 公尺。
- 5) 地聲探測器不能按裝於箱子中，再安裝在現場，固定形狀的箱子本身會有自然頻率，同時會改變地聲接收的頻率，地聲探測器最好是直接接觸與土石流有接觸的硬介質，才能接收到最正確的聲頻。

以上為單一地聲的安裝注意事項，若能在現場連續安裝數個地聲探測器，則必須注意兩點間的訊號相關性，地聲探測器間的距離最好不要超過 100 公尺，因為台灣土石流在百公尺內就會有特性上的改變，任何結合數個地聲探測器的分析，通常都會假設土石流本身並沒有大的變化，其分析才有意義。另外，同時有數個地聲探測器時，訊號接收系統必須針對時間做精密校準，否則就失去連續安裝的意義。針對現場的建議可參考後節愛玉子溪的案例建議。

第三節 愛玉子溪觀測設備之建議

去台灣的土石流觀測研究中，水保局從 2002 年開始建立固定式土石流觀測站，至今已建立 21 站固定式土石流觀測站，而目前固定式土石流觀測站所配置的監測儀器中，主要以傾斗式雨量計、超聲波水位計、地聲探測器、PTZ 攝影機、土壤含水量計、鋼索檢知器為主，部分監測站則會依研究需求添加流速計、伸縮計、傾度盤、土壓計、孔隙水壓計、懸浮固體量測計等。

由於資料的儲存量非常龐大，因此目前歷史資料的儲存方式是以有發生事件的資料才另外做長期儲存，但又因為現場的資料儲存很容易遇到不可抗拒之因素而資料遺失，如：監測儀器被沖毀、電力中斷、後台資料庫損壞等，因此並非所有事件都有儲存到完整的資料。以神木觀測站的愛玉子溪為例，在多達 14 次的土石流事件中，其地聲探測器就多次被沖毀或遇到資料儲存器電力中斷而資料遺失，因此目前有存留的較完整資料的只有 4 場(如表 1)，包含：2004 年敏督利颱風事件(72 水災)、2011 年的 1110 豪雨事件、2013 年的蘇力颱風事件、2014 年的 0520 豪雨事件。

為了未來研究與土石流監測預警之需求，以下將透過過去觀測站

之計畫報告與研究成果提供軟硬體兩大面相的建議，提供未來規劃之參考。

4.3.1 軟體層面建議

1. 歷史事件資料庫：

由第三章表 3-1 可發現，目前觀測到之事件，不管是影像或地聲都有資料遺失的狀況，因此對於過去的觀測成果，應先建立歷史事件資料庫，盡可能蒐集觀測資料(如：原始數據)與過去研究(包含：歷年發表之文章與報告書)，並以網站形式提供使用者瀏覽或下載，此方面建議除了可以彰顯過去水保局的績效外，亦可拋磚引玉吸引更多學者專家投入觀測站之研究，提升國內土石流研究之能量(水保局，2016)。

2. 未來資料儲存建議：

透過檢視過去歷史事件，應重新檢核現有觀測站之資料儲存架構與事件資料儲存標準，以利提升未來之觀測資料品質。以下將舉例說明應檢核的內容。

- 1) 資料時間之統一：不同儀器的紀錄時間必須統一，以利不同儀器間之資料檢核與數據整合。
- 2) 資料儲存：地聲與影像應至少儲存整場降雨事件長度，並建立多處備份之機制，以利未來不同新興研究都有足夠之資料可運用。
- 3) 儀器身分證：儀器必須建立安裝時間、座標位置、安裝環境、型號、逐次校驗、量測資料內容等說明文件，以增加使用者對儀器的了解，並避免使用者對觀測資料的誤用。

- 4) 潛勢溪流與觀測站變遷報告：每年應重新建立觀測站環境之描述並建立調查報告提供下載，如：空拍圖、現場調查照片(同位置同角度之拍攝)、河床高度、堆積狀況、粒徑調查等。

3. 觀測站之檢討建議：

透過歷史資料與過去研究之成果，建議應每五年檢討一次現有觀測站之不足，並反饋至硬體設備的更新與維運等，以利觀測站能與時並進，跟上國內外最新研究的趨勢。

短期目標上應朝向透過觀測技術發展雨量預警(詹錢登、李明熹，2004)外的第二道土石流警戒防線(魏士超等，2018)。長期目標則應透過觀測站之觀測資料回饋至坡地水文研究(水保局，2016)，包含：崩塌、土石流或其它監測之應用價值。

4.3.2 硬體層面建議

目前全台共有21處固定式觀測站，若要提升觀測站之成果價值，應區分出不同觀測站之主要架設目的，如：防災監測目的或研究觀測目的等(水保局，2016)。雖然至今尚未區分各觀測站的應用目的，但建議可設置一示範地區做為未來觀測站轉型或應用的規劃參考，此做法除了可彰顯本國之土石流觀測技術外，亦可促進國內外土石流監測研究的發展。

以愛玉子溪為例，因為常年會發生土石流(如表 3-1)，且下游人仍有居民居住於此，故建議可做較全面性的觀測考量，包含：土石流研究觀測目的與土石流防災監測目的等。以下將針對愛玉子溪的監測硬體給與初步建議。

依照水保局(2016)之建議，愛玉子溪應至少建立兩個水泥斷面，

並在此斷面上架設儀器，每個斷面上應架設鋼索(上、下層)、水位計、流速計做為水位、流速、流量檢核的標準，並在斷面旁架設攝影機與地聲，以下將針對各儀器做簡單的架設說明(詳細位置有待現場調查)。

- 1) **攝影機**：攝影機除了觀看方便外，攝影面應與斷面垂直(與溪流平行)，以減少影像的事後校正，增加影像流深、影像流速估算時的準確度，此外影像攝影範圍必須至少於四處繪製比例尺(可於岩盤、水泥霸多處繪製，減少比例尺損壞後無法判釋的狀況)。
- 2) **地聲**：於斷面旁設置一部地聲，並於斷面上游與下游各 100 公尺處(或 50 公尺)各設置一部地聲，透過三部地聲的聯合解算則可估計土石流之平均波速，地聲網的建立也可進一步提供波束形成 (beamforming) 等研究的測試。此外為了了解土石流產生振動的物理機制，建議可在壩中埋設一部地聲提供未來研究參考。
- 3) **水位計與流速計**：建議設置於斷面旁，量測位置必須在攝影機的攝影平面中，依此才能做為影像或地聲估計流量的檢核標準。

表4-1 愛玉子溪監測設備數量

儀器	物理量	現有設備數量	建議設備數量
雨量計	雨量(1mm)	1	1
PTZ 攝影機	影像	1	4
地聲探測器	地聲	1	8
超聲波水位計	水位	0	2
雷達波流速計	流速	0	2
鋼索檢知器		2	4
水泥霸		1	2

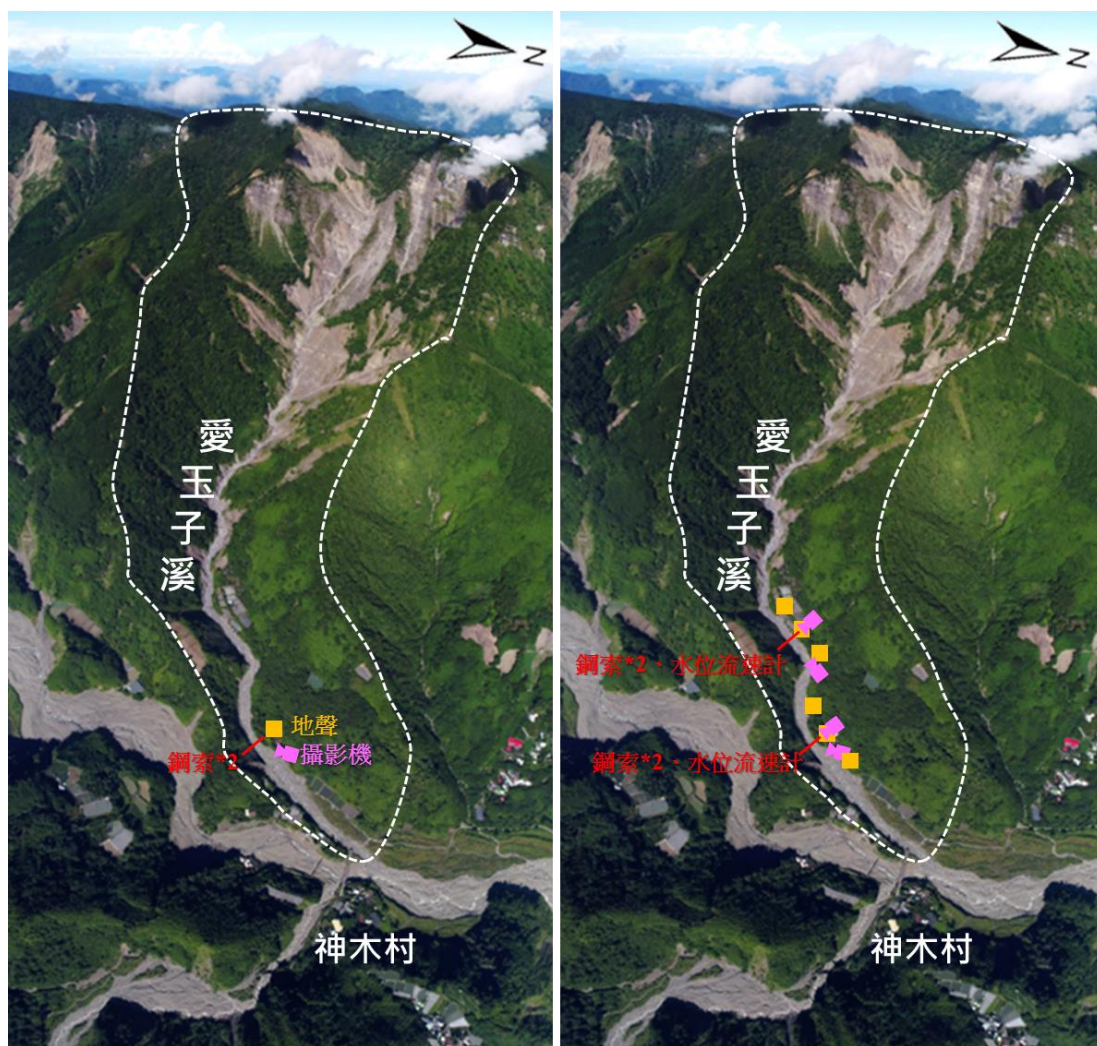


圖4-10 愛玉子溪土石流觀測硬體配置圖；左圖為現在配置、右圖為建議未來配置

第五章 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。

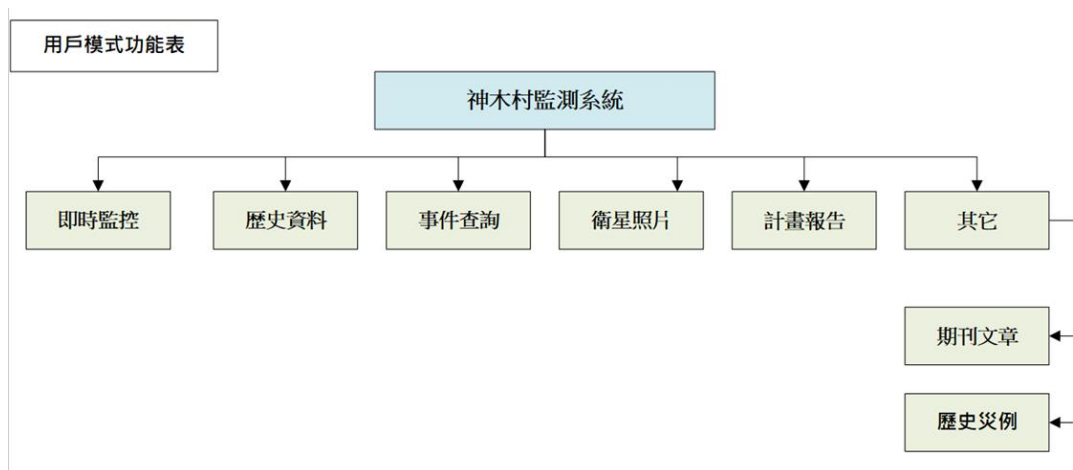
資料傳輸

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。

網頁功能

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。

用戶模式架構如下圖



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。

以下從網站登入開始，逐步介紹資訊展示系統。

首先，網站在網路上必須有登入的機制，如圖 5-1

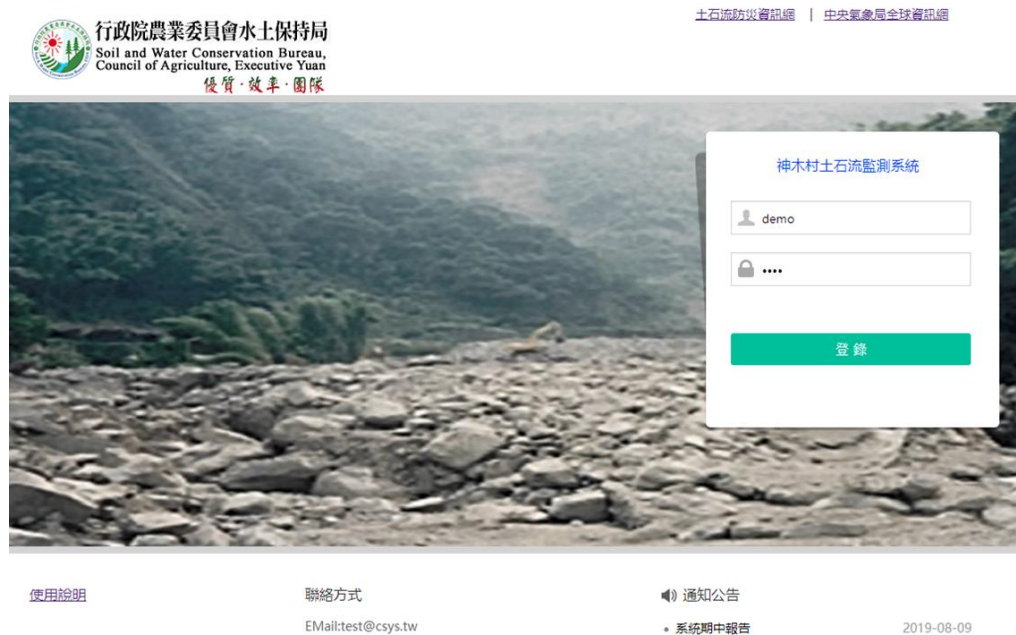
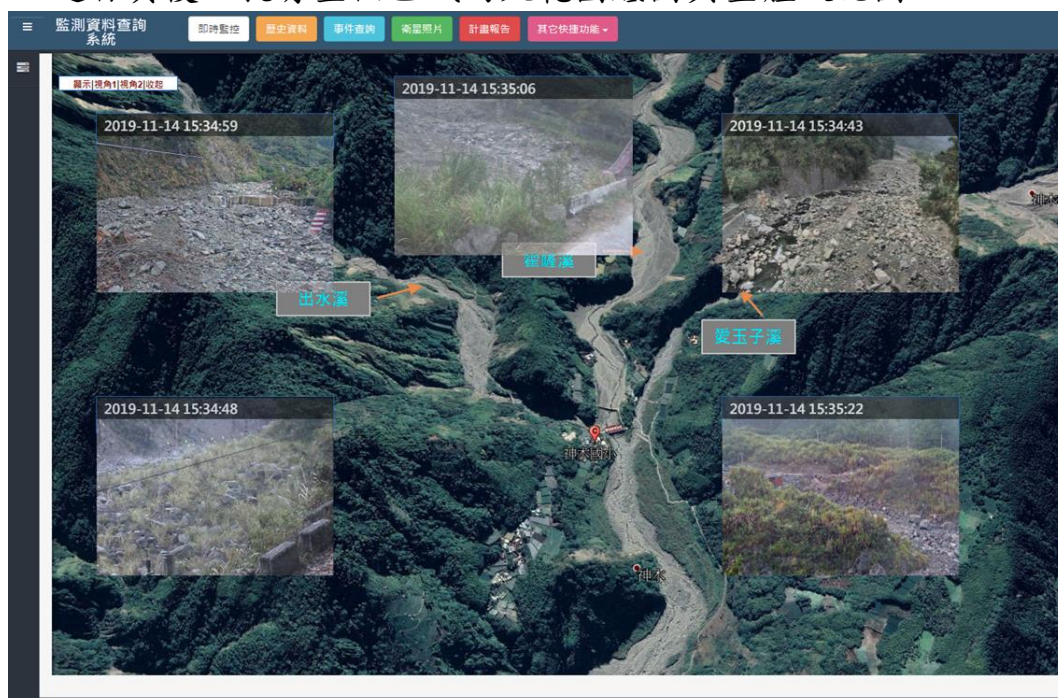


圖5-1 展示中心首頁

進首頁後，就有整個區域的大範圍底圖與整體設施圖



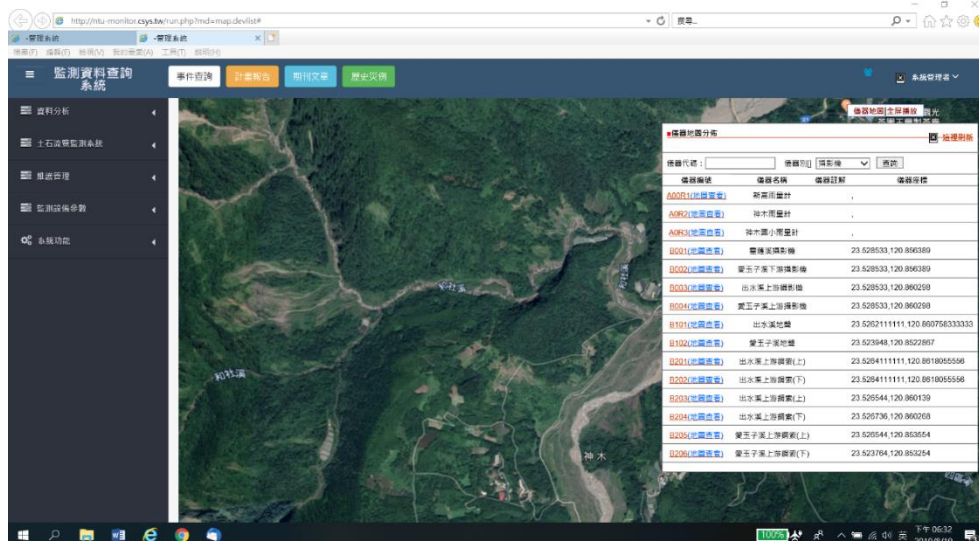


圖5-2 展示網頁中心整體監測設施圖(設施與大圖可互相切換)

進入系統後是整個集水區的空拍底圖(目前初步使用 Google 航拍圖)，右側欄位可以點選所有觀測設備的位置與資料，也可以將右側視窗隱藏。

而在左側選項中則包含資料分析，監測系統與維護管理，剩下功能為系統管理員功能，不對外開放。點選資料分析可以看到各個監測儀器的資料，點選監測系統，可以看到即時監測，歷史事件重播，或其它資料，其中也包含大量圖資，如選擇衛星資料可看到下圖

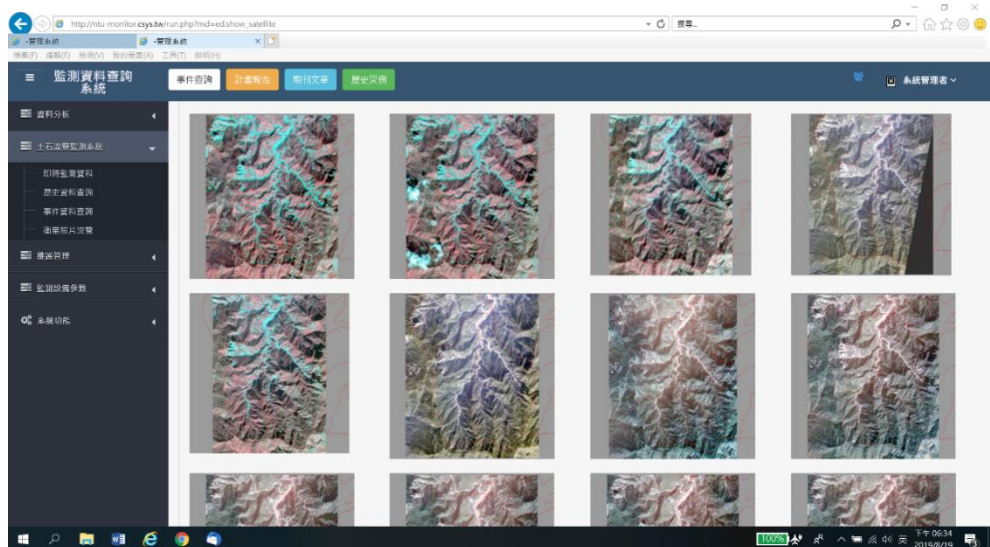
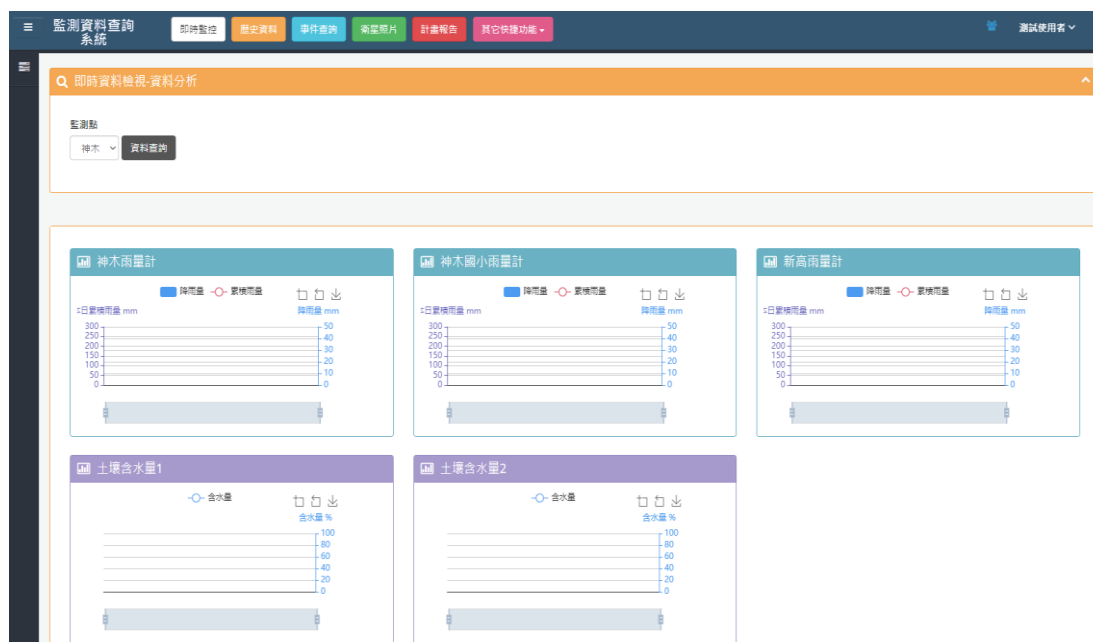


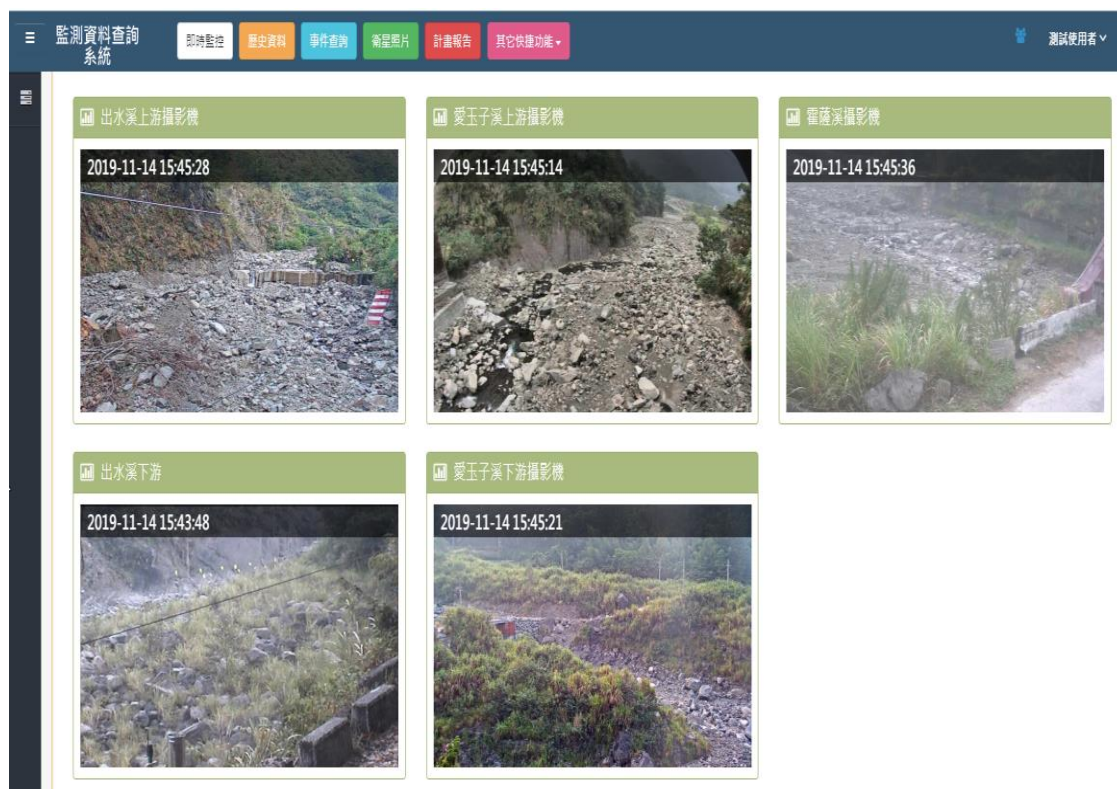
圖5-3 資料展示中的歷年衛星影像

若選擇觀看監測資料。每一個設備都有其監測資料的展示，點選過去(歷史)資料，擇點選該事件後，網頁會顯示該事件的整個流程，包含所有監測儀器的紀錄會同步撥放，等同監測該事件

- 即時監測資料：雨量每 10 分鐘更新，土壤含水量每分鐘更新



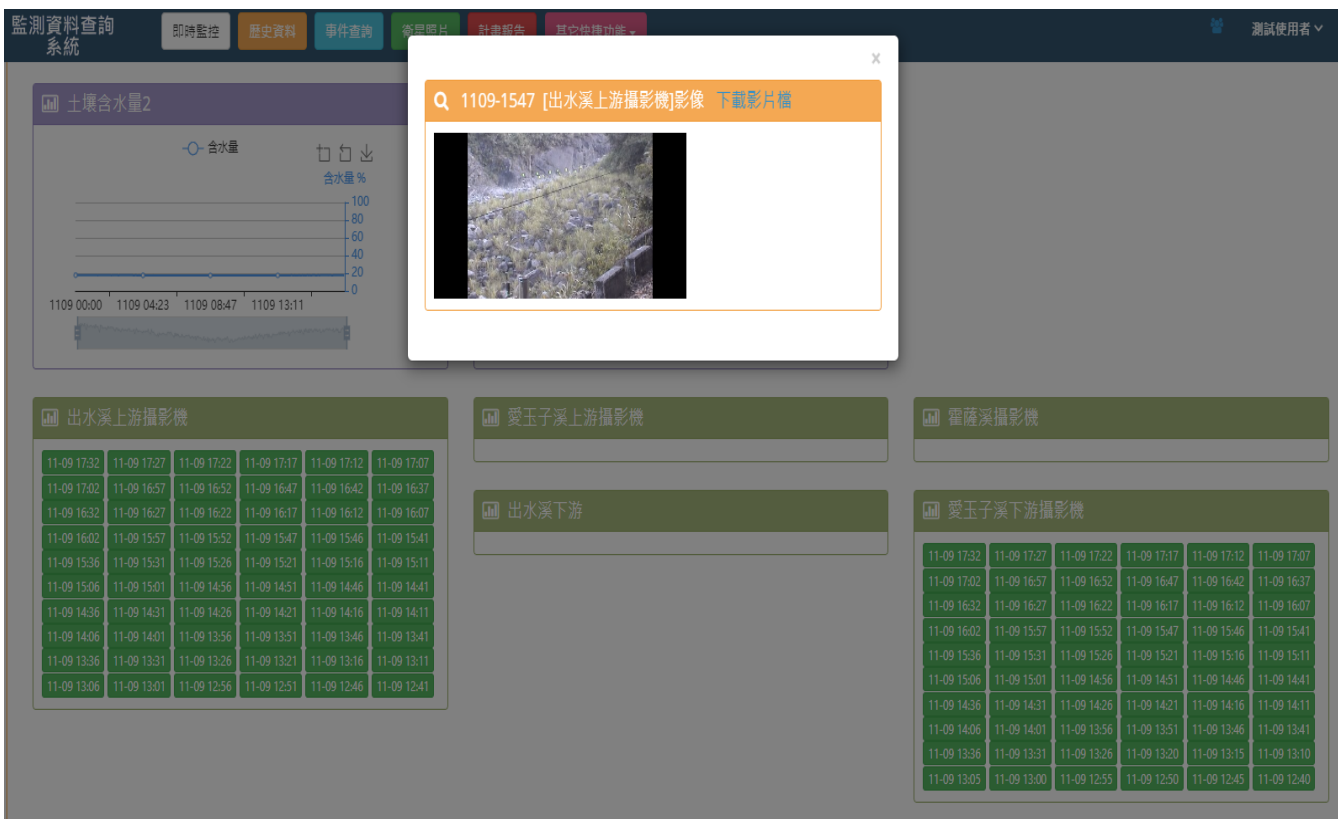
- 影像即時監測：影像每 5 分鐘更新



- 地聲即時監測：每 5 分鐘更新，資料右側視窗為 FFT 即時分析結果。



- 歷史資料查詢模式，會顯示攝影機查詢：分別查詢時間資料，並可下載



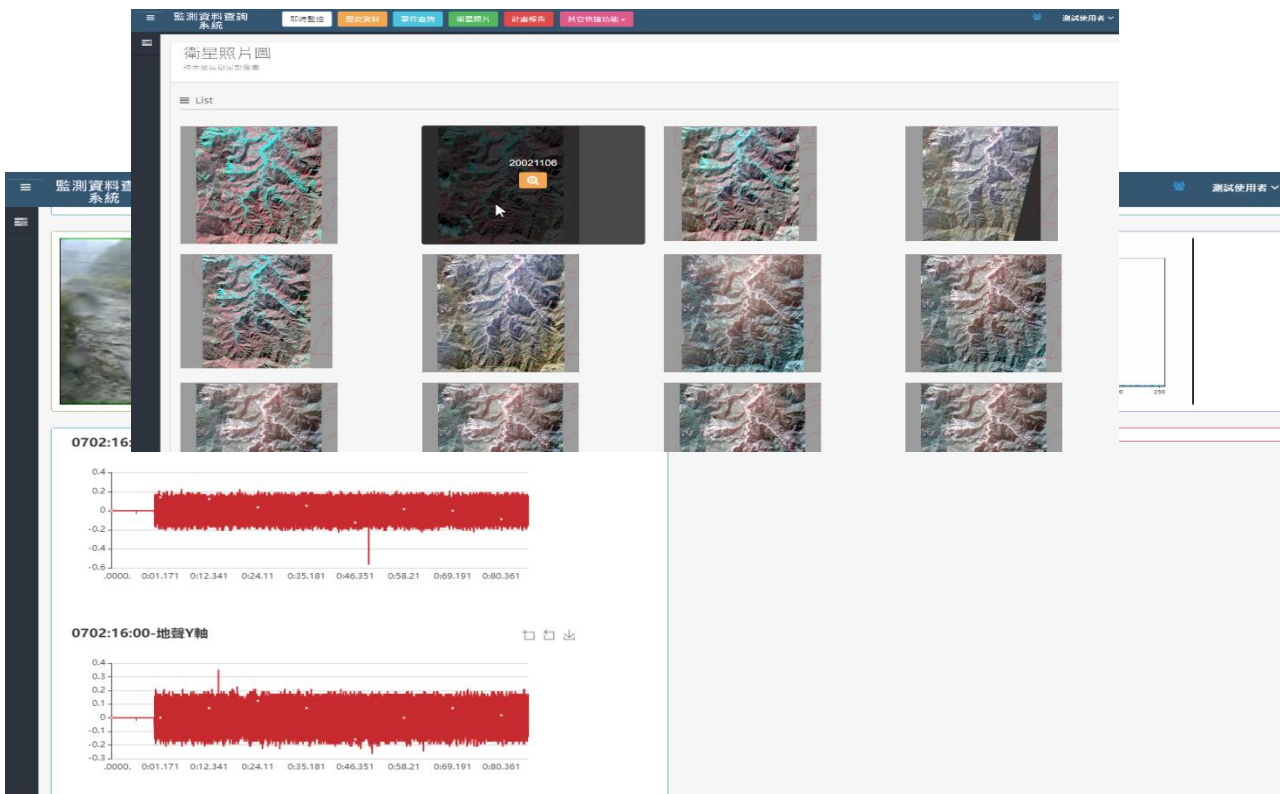
- 地聲歷史資料查詢:已經切成每一分鐘的紀錄,方便查詢下載

出水溪地聲						愛玉子溪地聲					
11-09 17:35	11-09 17:32	11-09 17:30	11-09 17:27	11-09 17:26	11-09 17:25	11-09 17:25	11-09 17:21	11-09 17:20	11-09 17:19	11-09 17:18	11-09 17:17
11-09 17:21	11-09 17:20	11-09 17:19	11-09 17:18	11-09 17:17	11-09 17:16	11-09 17:16	11-09 17:12	11-09 17:10	11-09 17:08	11-09 17:02	11-09 16:59
11-09 17:13	11-09 17:12	11-09 17:09	11-09 17:08	11-09 17:07	11-09 17:06	11-09 16:58	11-09 16:55	11-09 16:51	11-09 16:49	11-09 16:47	11-09 16:46
11-09 17:04	11-09 17:02	11-09 16:57	11-09 16:55	11-09 16:51	11-09 16:49	11-09 16:45	11-09 16:43	11-09 16:42	11-09 16:40	11-09 16:39	11-09 16:38
11-09 16:47	11-09 16:46	11-09 16:43	11-09 16:42	11-09 16:40	11-09 16:36	11-09 16:37	11-09 16:34	11-09 16:31	11-09 16:30	11-09 16:28	11-09 16:25
11-09 16:35	11-09 16:34	11-09 16:31	11-09 16:27	11-09 16:25	11-09 16:24	11-09 16:24	11-09 16:23	11-09 16:22	11-09 16:21	11-09 16:17	11-09 16:15
11-09 16:23	11-09 16:21	11-09 16:20	11-09 16:19	11-09 16:17	11-09 16:15	11-09 16:13	11-09 16:08	11-09 16:07	11-09 16:03	11-09 16:02	11-09 15:57
11-09 16:13	11-09 16:08	11-09 16:06	11-09 16:05	11-09 16:03	11-09 16:02	11-09 15:53	11-09 15:50	11-09 15:44	11-09 15:43	11-09 15:42	11-09 15:39
11-09 15:56	11-09 15:54	11-09 15:53	11-09 15:52	11-09 15:50	11-09 15:46	11-09 15:30	11-09 15:25	11-09 15:22	11-09 15:21	11-09 15:18	11-09 15:15
11-09 15:45	11-09 15:44	11-09 15:43	11-09 15:41	11-09 15:39	11-09 15:38	11-09 15:13	11-09 15:11	11-09 15:07	11-09 15:05	11-09 15:00	11-09 14:58

- 事件查詢：自事件視窗選擇事件後，銀幕會顯示該事件的整個流程與部分儀器的分析結果

圖5-4 查詢事件時展示雨量,攝影機與畫素分析同步

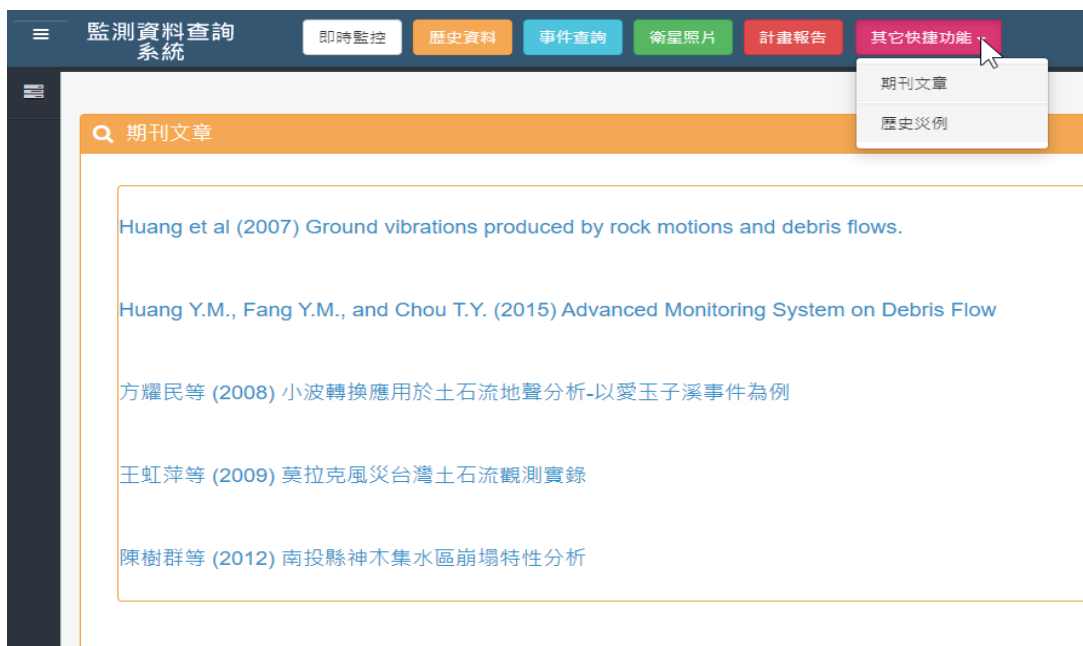
剩餘功能為資料查詢，目前已經將部分報告,期刊論文,衛星照片放於網站.. 衛星照片



研究計畫報告



- 期刊論文



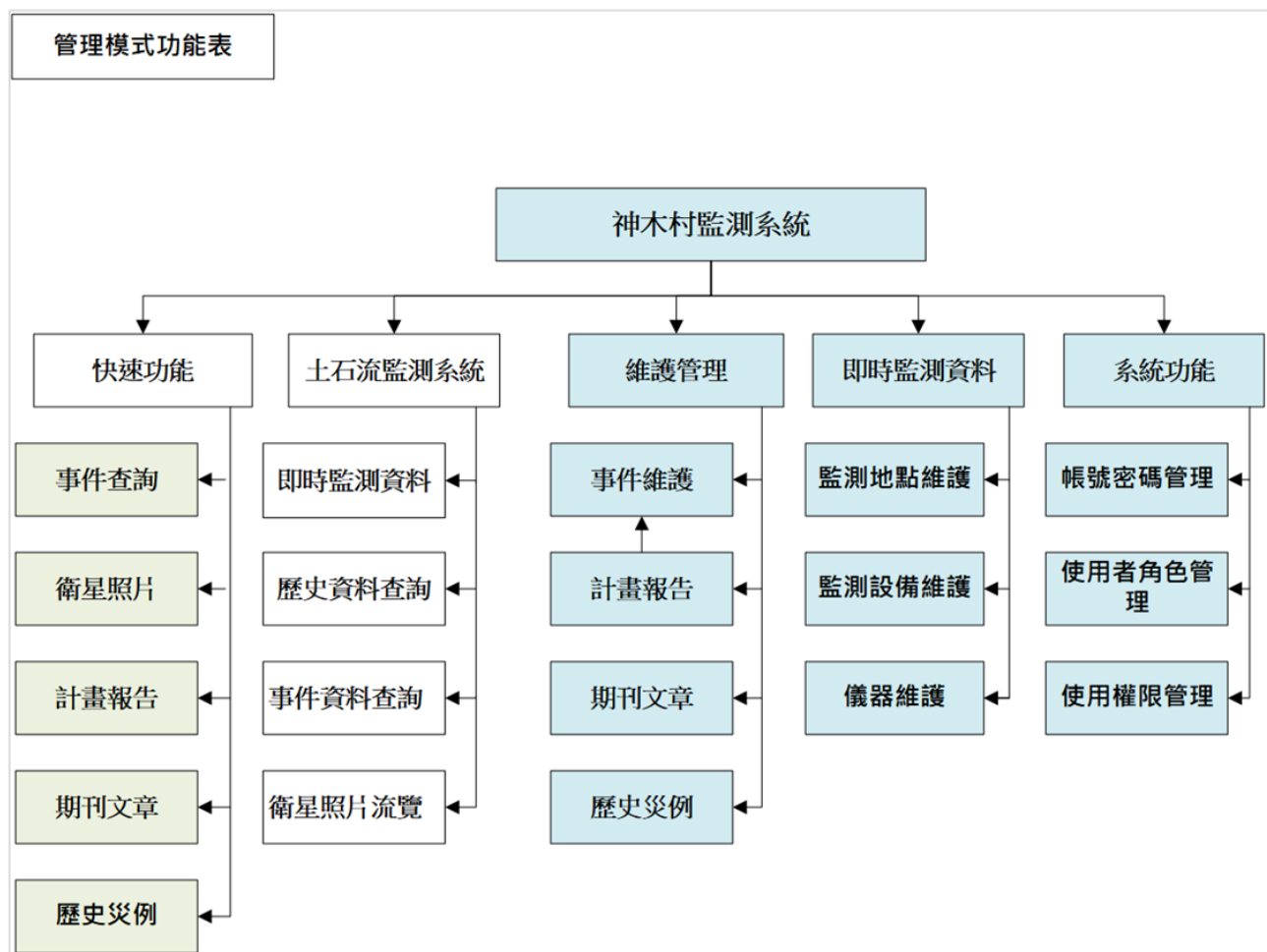
- 歷史災例

分析軟體是由分析軟體開發者，依據規定的路徑去取資料，然後依照規定的檔名與格式輸出資料，就可以展現在網頁上，這種機制確



認後，以後任何人都可以拿他開發的軟體放於這系統，然後公開驗證
是否可以用或是否準確

配合以上的各項功能與資料輸入，網頁管理功能架構如下圖



第六章 結論

本計畫工作內容總結如下：

(一) 影像訊號分析部分

1. 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。
2. 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。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%
3. 以光流法，產生土石流流動過程之表面流速顯示法，其精度須配合 1,2 兩項工作。
4. 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。

(二) 地聲訊號加值部分

1. 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}。

2. 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。
3. 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。

(三) 土石流觀測站網站成果

1. 已建立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。
2. 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

第二章參考文獻

- [1]. Optical Flow by Integrating Multi-Frame Information” , Journal of Information Science and Engineering 24, 1719-1731
- [2]. Simon Baker ,& Iain Matthews.(2004)“Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework” ,nternational Journal of Computer Vision 56(3), 221–255,
- [3]. J. Y. Bouguet,(1999) “Pyramidal implementation of the ILcas Kanade feature tracker description of the algorithm” ,Intel Corporation Microprocessor Research Labs
- [4]. S. S. Beauchemin,& J. L. Barron,(1995) “The Computation of Optical Flow” , ACM Computing Surveys (CSUR) Surveys Homepage archive Volume 27 Issue 3, Sept,Pages 433-466
- [5]. Thomas Brox,Andrés Bruhn,Nils Papenberg,Joachim Weickert.(2004)“High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Warping” ,ECCV 2004: Computer Vision - ECCV pp 25-36
- [6]. D. Sun, S. Roth, and M. J. Black.(2010)“Secrets of optical flow estimation and their principles”. In CVPR. 6
- [7]. ITU-R Recommendation BT.709, Basic Parameter Values for the HDTV Standard for the Studio and for International Programme Exchange (1990), [formerly CCIR Rec. 709] (Geneva: ITU, 1990)

第三章參考文獻

- [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 Debris-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]. 李欣輯 (2000),「地聲探測器應用於土石流預警」, 國立台灣大學土木學系研究所碩士論文。
- [9]. 周憲德 (2015),「火炎山土石流之流動型態與地聲特性分析」, 中華水土保持學報。
- [10]. 黃清哲 (2007),「不同形態土石流地聲特性之實驗研究」, 中華水土保持學報。
- [11]. 張婉真 (2005),「地聲檢知器複式探測之研究」, 國立台灣大學

土木學系研究所碩士論文。

- [12]. 魏士超、劉格非、黃亦敏、方耀民、尹孝元、黃效禹、林建良 (2018),「愛玉子溪土石流之地動訊號特性與警戒方法之探討」, 中華水土保持學報, 49(2): 77-88。
- [13]. 水土保持技術規範 (中華民國 103 年 9 月 11 日)
- [14]. 區域排水整治及環境營造規劃手冊

第四章參考文獻

- [1]. 王虹萍、黃彥豪、葉美伶、方耀民、李秉乾、周天穎、尹孝元 (2009), 「莫拉克風災台灣土石流觀測實錄」, 中華水土保持學報, 40(4): 311-328。
- [2]. 行政院農業委員會水土保持局 (2015), 「歷年觀測資料成果彙編」, 行政院農業委員會水土保持局。
- [3]. 行政院農業委員會水土保持局 (2016), 「神木國際土砂災害觀測研究中心暨坡地水文試驗研究場域規劃」, 行政院農業委員會水土保持局。
- [4]. 詹錢登、李明熹 (2004), 「土石流發生降雨警戒模式」, 中華水土保持學報, 第 35 卷, 第 3 期, 第 273-283 頁。
- [5]. 魏士超、劉格非、黃亦敏、方耀民、尹孝元、黃效禹、林建良 (2018), 「愛玉子溪土石流之地動訊號特性與警戒方法之探討」, 中華水土保持學報, 49(2): 77-88。
- [6]. Huang C.J., Yin H.Y. Chen C.Y., Yeh C.H., Wang C.H. (2007) Ground vibrations produced by rock motions and debris flows. J. Geophys. Res. 112, F02014.

附錄一、投稿文章

已接受之期刊文章：

- [1]. Hsu, Y., Liu, K. (2019) Combining TRIGRS and DEBRIS-2D Models for the Simulation of a Rainfall Infiltration Induced Shallow Landslide and Subsequent Debris Flow. *Water*, 11, 890; doi: 10.3390/w11050890
(SCI, IF: 2.524, Rank: 29/91 (Q2) in 'Water Resources', Rank: 39/203 (Q1) in 'Water Science and Technology')
- [2]. Wei, S. C., and Liu, K. F. (2019) Automatic Debris Flow Detection with Geophones., *Landslides*. DOI 10.1007/s10346-019-01258-9
(SCI, IF: 4.252, Rank: 1/38 (Q1) in 'Engineering, Geological', Rank: 21/196 (Q1) in 'Geosciences, Multidisciplinary')
- [3]. Liu, K.F., Jhou, J.M., Wei, S.C., Chien, C.H. (2019) Tipping Bucket Rain Gauge Performance Analysis under Heavy Rainfall. *Adv Civil Eng Tech*. 3(3); doi: 10.31031/ACET.2019.03.000564

已接受之研討會文章：

- [4]. Hsu, Y., Liu, K., Shu, H. Debris-flow assessment from rainfall infiltration induced landslide. Proceedings of the 7th international conference on debris flow hazards mitigation, Golden, Colorado, USA, June 10-13, 2019

附錄二、工作會議記錄

時間：2019 年 5 月 22 日

地點：行政院農業委員會水土保持局

主旨：神木村愛玉子溪土石流觀測站之即時監測資料介接

參與人員：

單位	姓名
行政院農業委員會水土保持局	林建良
國立臺灣大學土木工程學系	劉格非
國立臺灣大學土木工程學系	魏士超
全陞科技有限公司	許文達
逢甲大學都市計畫與空間資訊學系	方耀民
逢甲大學 GIS 中心	黃國豪
逢甲大學 GIS 中心	Benson

決議事項：

1. 在不影響現有監測站系統的前提下，水土保持局(以下簡稱水保局)擬請逢甲大學 GIS 中心(觀測站維護單位)協助國立臺灣大學(本計畫執行單位，以下簡稱本計畫)，進行資料介接，詳細如下：
 - 1) 逢甲大學 GIS 中心將協助水保局將即時觀測資料以內部區域網路轉存至私有雲(NAS)中暫存，並透過 NAS 做為資料儲存橋樑，進行資料介接，資料內容包含：影像(串流影片、回傳照片)、地聲(原始電壓訊號)、水位計、流速計、鋼索狀態等。
 - 2) 本計畫將設置 server 於神木國小三樓教室，透過區域網路下載私有雲(NAS)內之備份資料。
 - 3) 有關「即時雨量資料」之介接，水保局建議本計畫申請 FEMA 系統之權限，透過 FEMA 系統下載。
 - 4) 有關「低頻地聲」之介接，逢甲 GIS 中心將提供 Google 雲端下

載連結。

5) 有關逐年更新之航拍、DEM 與 DSM 成果，將由逢甲大學 GIS 中心提供。

2. 為了即時傳輸 server 之測試資料，水保局建議本計畫另外申請中華電信之 ADSL 進行資料傳輸。

附錄三、108 年度「坡地防災與保育」推動小組科技
補助計畫「坡地土砂災害觀測資訊加值分析與應用」
委員審查意見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：		
1	可考量訂定地聲之安裝準則及標準作業程序。	感謝委員建議，委員提供的建議即為本計畫發展地聲傳播理論的目標之一，未來也將嘗試分析地聲安裝的準則。
2	加值應用對防災預警之提升有何貢獻；監測訊號分析如何融入AI技術以提升價值。	感謝委員建議，監測加值應用一般具有兩大目的，包含：防災預警和研究目的。目前本計畫規劃的項目，本質上這兩項目的都包含在內，以防災預警層面來說，不管是影像或地聲，都是先確認土石流到達，再加值產出土石流物理量，準確確認土石流到達，再估算對下游影響的時間與範圍，準確地預警。廣義的 AI 技術需要大量資料，以及該資料的可信度與代表意義，才能讓 AI 深入學習。本計畫並未利用 AI 技術去分析資料，但本計畫的加值分析、多維資料庫等成果都是未來發展 AI 技術的必備條件與重要關鍵。
3	資訊加值分析尤其應用影像分析有很大的空間，理論可行實際可資應用仍有一段距離待努力。	感謝委員建議，如委員所述，影像的加值分析的確有很大的發展空間，雖然目前實際應用上仍有許多困難，但這也是本計畫期望突破的重點研究項目，希冀本計畫之成果對未

項次	審查意見	回覆辦理情形
		來應用有所貢獻。
4	地聲檢知器的安裝位置是否有初步成果；宜敘明和前期計畫之差異性；攝影機下雨天如何處置鏡頭的清晰度。	<p>感謝委員建議，有關地聲檢知器的安裝，雖然已有前期計畫初步研究的依據，但還有賴理論的發展與驗證，本計畫將會於各期報告詳述此部分的研究進展。</p> <p>有關下雨天攝影機的清晰度問題，目前並無法排除，僅能將其視為影像的雜訊。因此本計畫直接假設此雜訊必然存在，並在此雜訊存在的狀況下建立可分析的方法，分析土石流的相關物理量。</p>
5	加值分析與應用，初步建立即時監測資料分析之介面程式或網頁，可否提供水保局成果產出？	感謝委員建議，本計畫未來規劃建立的相關介面程式或展示網頁，即是為了提供水保局相關人員使用的，所有產出都將直接提供水保局使用。
6	本案預算細目中有編列「資本門」購置資訊硬體設備29萬5仟元，建議酌減刪除改列為相關物品租用項目，總體經費調降為174萬元。(土石流防災中心)	感謝委員建議，經費編列將遵照建議辦理，詳如經費表。

附錄四、108 年度「坡地防災與保育」推動小組科技 補助計畫「坡地土砂災害觀測資訊加值分析與應用」 委員期中審查意見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：		
1	本期中報告對於”現場影像分析”，”現場地聲分析”，甚或”預期效益”，均有非常明確的交待，惟對於以預警或研究惟目的的土石流觀測站建議所對應的第四章卻較難以明確呼應，請補充說明。	謝謝委員，對於以預警或研究為目的的土石流觀測站，內容放於第五章，已於期末報告中增加說明。
2	P2-6，P2-7，請將式(2-20)一次展開至式(2-21)，建議中間過程可省略。	感謝委員建議，遵照辦理。
3	P2-4，式(2-21)RGB影像灰階化前的係數所產生的彩色影像，其公式係出自於何處？請補充說明	該公式為 JPEG 計算亮度的標準公式，已經補充說明。
4	光流法於畫質良好的，亮度不變的情況下效果較佳，惟於現實充滿泥水的土石流環境下，其該如何修正？	正是因為光流法在充滿泥水的情況下，的確效果不佳，因此本計畫改採以眾多點的總灰階值計算。
5	監測系統之建置，建議能將相關文獻之 PDF 檔上傳	因為上傳檔案無法跟著期末報告走，且部分文獻有版權問題，因此建議報告中仍只列出文獻。
6	流量與地聲能量以雙log建置，其維度應可被定義出，請補充說明。	理論上當點足夠時，可以用不同的碎形維度來形容試驗成果，但是本計畫目前點數太少，因此計算維度不具意義，建議等點數夠多了，再進型這

項次	審查意見	回覆辦理情形
		類計算較具意義。
7	P2-12 試驗之表面流速為 18m/s，是否太快?導槽可能達成否?請補充說明。	謝謝指正，應為 18cm/s，已經修正
8	圖 2-6 何以點 2.3 為球上邊界?該兩點似為水槽邊壁?而非為所謂之”固定點位”	謝謝指正，點位標錯,連同追蹤點應為點 17,26,44 也一併修正
9	P2-25 愛玉子溪現地拍攝影像非為正射影像，何以不進行影像校正?請補充說明。	報告中呈現的為原始影像檔，分析時會直接校正,因此並沒有額外列出校正後的影像
10	P2-38 文中所述之”圖 4”，未見該圖，且圖號不連續	謝謝指正,應該為圖 2-2,已修正
11	P2-37，圖 2-26 在極微光下之平均亮度變化似已不顯著?是否適用在現地夜晚之環境?(光照度之最小量多少?)請補充說明。	的確在極微光下，亮度大小變化不大，但是因為我們是用亮度變化斜率，因此仍然能偵測。一般有月光或星光的夜晚，現場石頭反光可以到達 100
12	P3-6，文中之”如圖 2”，未見!圖號不連續及 P3-17，文中之”如圖 3”，未見!圖號不連續，請確認修正。	圖 2 為頻率響應圖原文已刪，圖 3 不具任何效益,因此原文已刪,期中報告在刪除圖的時候忘了刪文,已修正。
13	建立地聲警戒值用意固佳，惟一旦土石流流動發出地聲警戒已有來不及之情形，是否有實質效果?請斟酌!	本計畫的設置原則為將警戒點設於警戒區域上游,利用警戒爭取 1 到 2 小時的時間,為此研究的目標所在
14	P3-30 文中”地形高層”，應是”地形高程”，請確認修正。	謝謝指正，文中多處此錯誤均已修正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
15	流量之大小容易量測，惟流體中所含水、砂量之比例與土砂材料差異對地聲能量之關係如何，請補充說明。	謝謝委員提醒，此部分是本計畫無法得到的結論，一部分是本計畫無法測量真實高濃度土石流，一部分是濃度測量本身誤差太大，因此恐無法回應，只能在記住有此差異性下，整理所有資料。
16	灰階試驗所採保麗龍顏色對比較大，可產生顯著反射光，若同為土石材料能否顯著反應？請補充說明。	土石材料在現場有較劇烈的灰階值變化，正對光源處或含水處的反射都較強烈，這反而是室內保麗龍球無法比較的，但是試驗中將光源全部關掉，就是希望試驗能反映所有非常差的狀況。
17	建議對於”附近”發生的山崩事件，僅造成地聲 power 斜率變化，但影像分析不會有變化之情況，進行討論。	謝謝建議，目前尚未有這種情況，但是若未來把探測儀器裝到離山崩較近處，或低頻地聲資料可以分析後，這是極好的討論。
18	“陣流型”的土石流流動型態可考慮。可能會影響警戒的判斷。	謝謝委員指正，陣流行土石流對於警界的確是挑戰，在目前方法下，除非一波波土石流間有大的變化，否則難以區分，本研究未來將對於如何區分進行研究，但是以現在的實際救災流程，解除警報如果是由人為操作，那就只需要發出警報，並不需要連續針對每一波土石流發出警報
19	短時Fourier 分析之” Time window” 之給定原則與本計畫所定數值，請補充說明。	本計畫的短時 window 為 5 秒，原則為資料量不可太少 (<500)，配合現場採樣頻率去選即可，自由度很高

項次	審查意見	回覆辦理情形
20	流量與地聲能量可能受尺寸效應的影響具有高度非線性的關係。	謝謝委員指正，其實以現在的試驗點已經有此趨勢，只是點太少，畫非線性關係會遭挑戰，未來點多了，會針對非線性關係探討
21	部分圖無座標說明，如圖 3-41，請確認修正。	謝謝指正，已加強於圖說明中
22	本計畫現場架設 CCD 之設計，包含 CCD 本身規格，建議予以明確化，提供水保局相關計畫之規畫參考。	CCD 的規格，會因為探測目標不同而改變，如果只針對土石流，會建議用 20Hz-120Hz 響應曲線為常數的產品，但要加入山崩洪水後，規格會改變，CCD 的訊號線長與訊號儲存也會有影響，會建議把市售產品都研究後給建議，否則僅給功能性建議，恐難當成 SOP
23	現場 CCD 影像進行灰階分析時，其參考背景影像如何選取？因每日 24hr 光影及陰天晴天皆不同，是否進行動態背景之選取？請補充說明。	本研究是以灰階值的差異與變化速度來做分析，因此在環境(如陽光,雲等)造成的灰階值變化下，並不影響分析結果
24	洪水之地聲訊號頻率範圍為何？因土石流事件少，故要找出地聲訊號與土石流流量關係，可能資料不足；是否有可能試著先分析地聲訊號與洪水流量之關係，再推演較大之土石流流量，請補充說明。	依照文獻，純洪水的特徵頻率往往在 100Hz 以上，但含沙水流則會包含 24-100Hz,若能找到高含砂水流，的確就有可能進行點的補充
25	建議計畫協助找出本局土石流觀測站委辦計畫地聲訊號缺漏之原因及改進方式，供水保局未來改進規劃，請補充說明。	地聲訊號缺漏，經詢問均為被土石流破壞(含線路被破壞)，因此會建議地聲探測

附錄五、108 年度「坡地防災與保育」推動小組科技
補助計畫「坡地土砂災害觀測資訊加值分析與應用」
委員期末審查意見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：		
1	相片圖為彩色,無法與文字說明比對閱讀,宜注意報告編輯之圖文對照	謝謝委員,已將圖中點以深淺顏色表示,文中也將顏色改為深淺色的點。
2	圖2-15,無法判視紅色點位所在?請補充說明	感謝委員建議,文中與圖中統一將紅色改深色,其他點改淺色,較易判別。
3	以保麗龍球之為宜可採平面2為之運動規期,但現地愛玉子溪之流動畫面,期垂直位移影響為何?請補充說明	影像的判釋,僅能得到表面資訊,因此垂直方向的詳細資訊的確無法獲得。
4	P3-13,案例4雖有峰型之振幅,但從頻譜比對似屬雜訊,何以可以判釋為土石事件?請補充說明	案例四所有能量都集中在20-50Hz 能量,且能量大小比5分鐘前大10倍以上,因此判定為土石流。
5	振幅雖為訊號的一種,但其與距離之關係較大,是否為距離之函數,其振幅差6-54倍是否為一通用之參考值?請補充說明	振幅會隨感知器與聲源的距離成至少平方遞減,因此影響非常大。6-54 倍之差距非通用值,本文所有研究都是以相對變化2-10為基準,不同事件間不需要做比較。
6	本文內多處之圖號與內文無法對照,請一一檢視,確認修改。	謝謝委員細心檢查,檢查完畢已修正8處。

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	表3-16，流量與能量關係式之常數大小，似乎顯示關係差異不大?請確認說明。	由檢定關係，仍能看出 0-60Hz 的檢定相關係數較佳，而檢定較差的頻率範圍，的確常數部分差異不大，但是採用 0-60Hz 資料時，常數大小就差了 3 倍
8	洪水波與土石流波之灰階值是否有類似的變化?請補充說明	土石流與洪水波的波文差異在波長大小，請洪峰時間不同，土石流前鋒約 2 秒就會減弱，洪水往往是很長時間(5 分鐘以上)的改變，因此很容易判式
9	土石流發生過程中，泥沙含量的變化與流量是否可以從錄影影片中導出proxy曲線, 請補充說明	泥沙濃度恐怕無法由影片找出，流量的確可以從影片中的流深與斷面來估算，但準確度有待商榷。
10	有關投稿這篇landslide文章資料請補充,已有DOI,也請補充	Landslides DOI 10.1007/s10346-019-01258-9 以增加到文獻中
11	有關震動訊號之處理應該考慮振源距離的衰減,請確認說明。	的確應該把振源衰減效應加到流量檢測資料中，但是因為衰減係數並不知道，因此沒有予以修正，未來可以執行衰減係數試驗，以期有較好的結果
12	圖3-43,3-34,3-29,3-26,3-15等地生訊號縱座標單位請確認。	的確為 cm/s,已經都於圖上加註
13	請補充地聲檢知器的反應範圍,以利未來參考	地聲檢知器的常數範圍在 5Hz 到 150Hz,但因為響應曲線有稍微改變,在未執行儀器檢較下,無法放上正確的曲線,因此沒有放

項次	審查意見	回覆辦理情形
14	本計畫攝影與地聲搭配加值,建立土石流流速,抵達偵測,室內檢測運用到現場,有沒有尺寸效應,請補充說明	本研究在影像分析部分,影像一定經過現場扭曲度修正,也用現場的比例尺確認過,因此不會有尺寸效應,但是如果今天應用的對象為一寬 500 公尺的河川,則尺寸效應必須檢查過後才能確定。
15	影像與地聲搭配,若地形有岩盤,建議在較好的岩盤(避開岩體之不連續面,節理,破碎帶,剪裂區)。	謝謝委員提醒,此部分會加到建議事項中。
16	以後有沒再加入其他(如鋼索,雨量計)觀測的需要,以使預警應變可以更為周全,請補充說明。	今年計畫為針對攝影機與地聲探測器,加入越多儀器,正確性與安全性越高,未來的確可以多加入其他儀器以增加系統的穩定與正確。