
坡地土砂運移歷程之
觀測技術提升與監測設備校驗方法研究
**Research on Sediment transport monitoring
system and equipment calibration**

成果報告

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：110 年 1 月 1 日至 110 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 110 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

本計畫針對土石流觀測站最常使用的影像與地聲資料，發展可用於預警的快速加值運算，並以智慧型網站串聯，做到自動偵測與預警。

加值資料運算包含以攝影機與地聲檢知器產出流深，流速，流量與表面大粒徑速度。以加值資料配合事先以不同情境的模擬結果，建立早期預警與即時預警的方法。為了確保現場儀器資料的準確度，設計現場檢校儀器的方式，以確保監測儀器獲得的資料的準確度。

針對長期的集水區土砂運移，本計畫以航拍與無人飛機資料，建立土砂堆積與運移的長期分析，經過與雨量的比較，產生長期的災害潛勢預報指標

監測資料，加值分析，長期潛勢等結果都以整合式互動網站呈現，事件偵測後的措施建議與自動執行通告均已自動化。

關鍵詞：土砂運移估算、土石流預警、現場儀器檢校

Abstract

This research utilizes the data from CCD camera and geophone, with fast analyzing method, generate information such as flow depth, flow velocity, flow rate and huge boulder displacement to facilitate debris flow event warning. Detection data analysis and warning are all automated in a website. CCD camera and geophone calibration process in the field is designed and used to insure the accuracy of monitored data.

Simulation of debris flow influenced area with different scenario can be combined with geophone detection data to provide fast warning. Long term and short term warning can be issued with monitoring data.

This research also use aerial photos and UAV photos to produce annual deposition and erosion records. Comparing with rainfall record, long time disaster potential can be estimated.

All monitored data analysis, warning and hazard potential are all exhibited in an interactive website. This intelligent website can further provide suggestions after event detected and perform warning and notification process automatically.

Keywords: Sediment transport estimation, Debris flows warning, Field monitoring device calibration

目次

摘要	I
ABSTRACT	II
目次	1
表次	3
圖次	5
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	1-3
第三節 重要工作項目及實施辦法	1-3
第四節 預期效益與評核標準	1-6
第二章 儀器檢校	2-1
第一節 地聲檢知器檢校	2-2
第二節 攝影機檢校 (CAMERA CALIBRATION).....	2-16
第三章 流況檢測	3-1
第一節 土石流泥位偵測	3-1
第二節 流速	3-25
第三節 大顆粒流速	3-45
第四節 地聲與流量	3-67
第四章 長期災害潛勢預報	4-1
第一節 愛玉子溪土砂生產與運移分析	4-1
第二節 數值地表模型相減與樹冠層高度	4-26
第三節 愛玉子溪歷年地形變化	4-28
第四節 崩塌體積-面積關係式	4-43
第五節 降雨因數與崩塌土砂生產量關係	4-45

第六節 野溪與河道侵淤變化.....	4-47
第七節 河道堆積量.....	4-53
第八節 河道遞移率.....	4-55
第五章 土石流影響範圍預警.....	5-1
第一節 土石流數值模式.....	5-1
第二節 DEBRIS-2D 土石流模式簡介.....	5-3
第三節 土石流料源體積量與分佈.....	5-4
第四節 土石流流變參數之估計.....	5-12
第五節 土石流模擬與預警資訊探討.....	5-20
第六章 智慧防災網站.....	6-1
第一節 展示系統.....	6-1
第二節 資料接收、儲存與預警機制.....	6-4
第七章 結論與建議.....	7-1
結論.....	7-1
建議.....	7-1
參考文獻.....	附-1
附錄一 土石流試驗配置.....	附-1
附錄二 期中審查意見回覆.....	附-13
附錄二 期末審查意見回覆.....	附-16
附錄四：論文發表與人才培育.....	附-19
附錄五：期末暨成果效益報告.....	附-20

表次

表 1.1 研究績效指標.....	1-6
表 2.1 標準地聲與待測地聲之量測振幅.....	2-7
表 2.2 地聲參數檢定之變數、參考數據與尺度大小.....	2-10
表 2.3 參數檢定收斂情形.....	2-11
表 2.4 地聲檢知器參數檢定結果.....	2-14
表 2.5 神木村下游攝影機像元檢定結果(每秒一張畫面).....	2-18
表 2.6 神木測站攝影機不合格點收斂結果.....	2-18
表 2.7 攝影機檢定參數之尺度範圍.....	2-23
表 2.8 攝影機檢定試驗之全測站測量座標、影像座標與檢定誤差.....	2-26
表 2.9 代求變數反覆運算過程之結果.....	2-26
表 2.10 以現場的點檢定參數結果，誤差是以斷面一為標準計算.....	2-29
表 3.1 愛玉子溪影片偵測結果比較.....	3-15
表 3.2 敏督利颱風之愛玉子溪土石流影片偵測結果.....	3-17
表 3.3 愛玉子溪土石流影片之前鋒偵測.....	3-18
表 3.4 程式判釋之前鋒與肉眼比較及誤差.....	3-19
表 3.4 總灰階值法應用於實驗二前鋒偵測之偵測時間.....	3-38
表 3.5 總灰階值法應用於現地影像土石流前鋒偵測.....	3-39
表 3.6 室內水槽試驗以多 ROI 計算平均流速.....	3-42
表 3.7 偵測結果與計算流速.....	3-44
表 3.8 多顆粒人造影像顆粒數量、尺寸與速度.....	3-53
表 3.9 不同速度之顆粒邊界總長與本方法估計的顆粒尺寸.....	3-54
表 3.10 案例一-被追蹤的的巨石邊界點影像座標.....	3-65
表 4.1 日本筒狀模式參數清單.....	4-6
表 4.2 愛玉子溪流域周圍中央氣象局測站列表.....	4-7
表 4.3 愛玉子溪流域歷年無人機航拍影像.....	4-11
表 4.4 模型控制點與檢核點誤差結果.....	4-20
表 4.5 愛玉子溪邊坡與河道土砂變動量計算結果(體積).....	4-41

表 4.6 愛玉子溪邊坡與河道土砂變動量計算結果（質量）	4-42
表 4.7 愛玉子溪歷年河道遞移率.....	4-57
表 5.1 應用於不同類型的土石流數值模擬模式	5-1
表 5.2 土石流數值模擬之所需參數(以 FLO-2D 與 DEBRIS-2D 為例).....	5-2
表 5.3 河床質樣本採樣與土石流流變參數樣本採樣之比較	5-16
表 5.4 試驗樣本之流體參數與估計之降伏應力.....	5-18
表 5.5 土石流模擬之輸入參數.....	5-20
附表 1 攝影機規格.....	附-5

圖次

圖 2.1 地聲檢知器內部構造示意.....	2-2
圖 2.2 地聲探測器(GEOSPACE 產置之 GS-32CT 三軸地聲探測器)之頻率響應曲 線；圖左為振幅響應、圖右為相位響應	2-3
圖 2.3 檢校流程示意圖.....	2-5
圖 2.4 標準地聲儀器(上圖)、待測地聲儀器(下圖)電壓時域資料示意圖.....	2-6
圖 2.5 標準地聲儀器、待測地聲儀器電壓頻域資料.....	2-6
圖 2.6 振動速度振幅之頻率變化圖.....	2-7
圖 2.7 愛玉子溪上游地聲檢知器檢定設置.....	2-12
圖 2.8 愛玉子溪中游地聲檢知器檢定設置.....	2-12
圖 2.9 檢定後的地聲檢知器響應曲線，紅線為檢定後曲線黑線為原廠曲線，兩個 地聲的敏感度都降低不少	2-14
圖 2.10 2021 年 8 月 7 號 0:00-0:10 地聲檢知器記錄分析結果.....	2-15
圖 2.11 像元檢定測試圖；左圖為純藍光攝影原圖、右圖為每一像元灰階值斜率不 連續點	2-17
圖 2.12 全測站測量外參數矩陣之測試實驗；圖中紅色箭頭為世界座標系之軸、藍 色箭頭則為攝影機座標系之軸	2-21
圖 2.13 八個現場測量點，圖中每個黑色與白色的格子都是邊長 5 公的正方形	2-26
圖 2.14 愛玉子溪現場佈點分佈圖，編號為測量順序點編號，相同顏色(以線相連) 為垂直河床的一個斷面上點，從左到右為斷面 1 到 4	2-28
圖 2.15 影片上測量點以檢定參數回推世界座標，虛線為使用全區平均參數結果， 實線為修正到正確區域參數後結果	2-30
圖 3.1 愛玉子溪土石流攝影畫面截圖，其中(A)土石流發生前(B)土石流進入攝影畫 面(C)土石流前鋒抵達監測斷面(D)土石流前鋒後段(E)土石流尾段泥流(F)土石流 結束	3-2
圖 3.2 背景值與雜訊值定義.....	3-3
圖 3.3 土石流畫面擷取邊界流程圖.....	3-4
圖 3.4 土石流移動過程之萃取步驟；(A)為 $t=k$ 之土石流畫面，(B)為 $t=k$ 去除背景	

值及雜訊，(C)為 $t = k + 1$ 之土石流畫面，(D)為 $t = k + 1$ 去除背景值及雜訊，(E)為相減萃取移動範圍結果.....	3-5
圖 3.5 去除可能非移動範圍部分後結果.....	3-7
圖 3.6 A.未去除背景雜訊 B.去除背景雜.....	3-8
圖 3.7 中值濾波示意圖(RAFAEL & RICHARD, 2018).....	3-9
圖 3.8 經中值濾波去除椒鹽雜訊之強化結果.....	3-9
圖 3.9 A/D WINDOW SIZE=3 圖 B/E WINDOW SIZE=5 圖 C/F WINDOW SIZE=7.....	3-10
圖 3.10 土石流移動區域之邊緣偵測結果:A.上邊緣偵測結果、B.左右邊緣偵測結果.....	3-11
圖 3.11 土石流右岸之泥位線.....	3-12
圖 3.12 土石流泥位高度實際值(紅線)與影像偵測值(藍線).....	3-13
圖 3.13 土石流泥位高度實際值(紅線)與影像偵測值(藍線).....	3-16
圖 3.14 敏督利颱風之愛玉子溪土石流影片截圖；其中紅線為泥位高度實際值、藍線為影像偵測值.....	3-16
圖 3.15 土石流前鋒偵測原始點.....	3-17
圖 3.16 土石流前鋒偵測結果.....	3-18
圖 3.17 第 17100 幀結果 A.黑線為第 N 幀、藍線第 N+1 幀(程式) B.紅線為第 N 幀、藍線第 N+1 幀(人眼).....	3-19
圖 3.18 實景圖 A.事件前 B.事件發生水位最大時 C.事件發生水流較趨緩後 D.事件後.....	3-20
圖 3.19 霍薩溪 ROI 範圍.....	3-21
圖 3.20 A.8 月 7 日 6:15:00 B.6:18:00, 程式辨識之表面水位線.....	3-21
圖 3.21 霍薩溪 8 月 7 號水面高度隨時間變化(每 6.6 秒一點).....	3-22
圖 3.22 A.事件尚未發生 B.落石掉落 C.落石墜入河道中 D.事件結束.....	3-23
圖 3.23 紅色外框為 ROI 選取範圍.....	3-23
圖 3.24 愛玉子溪 8 月 7 號之水面高度隨時間變化.....	3-24
圖 3.24 2004 年 7 月 2 日愛玉子溪土石流之影像灰階值分佈隨時間變化圖，(A)ROI 中影像灰階值分佈隨時間變化圖，(B)與(C)分別為(A)上三個時間點之原始影像以及灰階值分佈圖。.....	3-29

圖 3.25 中央平均移動法示意圖	3-30
圖 3.26 偵測土石流事件之流程圖	3-32
圖 3.27 實驗水槽以及 ROI 位置圖；(A)(B)分別為攝影機 1、2 之影像畫面， (1)(2)(3)分別為實驗 1、2、3	3-34
圖 3.28 實驗 1 之影片說明(攝影機 1)；實驗一的底床鋪設少鋪了表層的小顆粒， 當土石流流經時與大顆粒砂石間的摩擦力較大，因此在影片後段土石流流動 近乎停止。開啟閘門後，水花較土石流前鋒更早進入影像畫面中圖 5.23(C)(3)。(A) ROI 位置(B)ROI 中灰階值分佈隨時間變化(C)為(A)中五個時間 點所相對應之影像畫面。	3-35
圖 3.29 實驗 2 之影片說明(攝影機 1)；閘門開啟後，水花較前峰更早進入影像 中，相較於實驗 1 與 3，此次實驗之前鋒較不明顯，實驗後期有大量水進入畫 面。	3-36
圖 3.30 實驗 3 之影片說明(攝影機 1)；在閘門開啟前，水由水槽上游溢出，導致 部分表層小粒徑砂石被沖刷圖 3.25(C)(2)。	3-37
圖 3.31 案例 1 隨時間變化之影像(以時間間隔 5 秒擷取影像畫面).....	3-39
圖 3.32 比較選取 ROI 與否之影像和灰階值隨時間變化圖	3-40
圖 3.33 ROI 的選取；(1)影像可拍攝的水槽範圍，長為 280 公分，寬為 60 公分； (2)以尺寸長 40 公分、寬 60 公分連續選取七個不重疊的 ROI。	3-41
圖 3.34 愛玉子溪敏督利颱風影片中上下游兩個 ROI 位置	3-43
圖 3.35 土石流前鋒接觸 ROI 上游邊界之影像；(1)ROI1 之影像，時間為 22.2 秒 (2)ROI2 之影像，時間為 25.867 秒	3-43
圖 3.36 單一顆粒之二值化影像	3-45
圖 3.37 沿水準方向之一維陣列轉換示意圖	3-47
圖 3.38 多顆粒人造二值化影像；(1)、(2)與(3)依序為第一幀 $I(x, y, t_1)$ 、第二幀 $I(x, y, t_2)$ 與第三幀 $I(x, y, t_3)$ ；(4)為(2)減去(1)的影像 $D(x, y, t_2)$ ；(5)為(3)減去(2) 的影像 $D(x, y, t_3)$ ，在(4)與(5)中黑、灰與白色亮度值分別為-1、0 與 1。	3-54
圖 3.39 人造二值化影像一維陣列之前差分的互相關 $C_y(x, t_3)$ 在區間[-30, 30]的 放大圖	3-54

圖 3.40 室內土石流試驗影像與 ROI 範圍.....	3-55
圖 3.41 實驗開始前 120 幀估計之室內土石流試驗背景影像.....	3-55
圖 3.42 ROI 範圍之灰階化土石流試驗影像(第 4500 幀).....	3-56
圖 3.43 第 4500 幀與第 4499 幀灰階多顆粒影像亮度值相減.....	3-56
圖 3.44 第 4500 幀與 4499 幀互相關最大值對應之速度.....	3-56
圖 3.45 經互相關分析之速度隨時間變化圖.....	3-57
圖 3.46 人工驗證數據中被追蹤顆以綠點標出.....	3-58
圖 3.47 被追蹤顆粒速度分佈圖.....	3-58
圖 3.48 圖元水準長度校正後的室內土石流試驗 ROI 二值化影像；(1)至(3)依序為第 4400、4450 以及 4560 幀；(4)至(6)分別為(1)至(3)與各自的前一幀影像亮度值相減。.....	3-59
圖 3.49 二值化影像之互相關分析結果(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；(1)至(3)依序第 4400、4450 與 4560 幀互相關分析結果在區間 $[-80, 80]$ 的放大圖。.....	3-59
圖 3.50 室內土石流試驗-互相關最大值估計的水準速度隨時間變化圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 N 幀影像；灰色為理論速度最大誤差 ± 1 個圖元的範圍；虛線為在第 4417 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。.....	3-59
圖 3.51 室內土石流試驗-互相關最大值估計的等效圓直徑隨時間變化圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；縱軸為等效圓直徑；橫軸為試驗影片中第 N 幀影像；虛線為在第 4417 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。.....	3-60
圖 3.52 室內土石流試驗-互相關最大值估計的平均水準速度隨時間變化圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 N 幀影像；虛線為在第 4417 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。.....	3-60
圖 3.53 被人眼追蹤顆粒分佈圖(水準校正後).....	3-60
圖 3.54 被追蹤顆粒速度分配直方圖.....	3-61
圖 3.55 案例一-現場影像 ROI 範圍示意圖(第 1380 幀).....	3-61
圖 3.56 案例一-第 1380 幀二值化影像分析結果圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；(1)第 1380 幀灰階影像；(2)為第 1380 幀二值化影像(閾值為 180)；(3)	

- 為第 1380 幀與第 1379 幀二值化影像相減；(4)第 1380 幀二值化影像之互相關分析結果在區間 $[-100, 60]$ 放大圖。..... 3-62
- 圖 3.57 案例一-ROI 之灰階影像；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 以及 1570 幀 3-62
- 圖 3.58 案例一-二值化影像；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 與 1570 幀。 3-63
- 圖 3.59 案例一-兩幀二值化影像亮度值相減後經處理之影像；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 與 1570 幀。 3-63
- 圖 3.60 -二值化影像之互相關分析水準分量速度之結果在區間 $[-100, 60]$ 的放大圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 與 1570 幀。 3-64
- 圖 3.61 二值化影像之互相關分析估計之水準速度隨時間變化圖(不考慮 $[-1, 1]$ 區間內的峰值)；(2)為(1)在第 550 幀到 1570 幀之間放大圖；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 N 幀影像；灰色為理論速度最大誤差 ± 1 個圖元的範圍；紅圈為第 51.074 秒人眼追蹤最多顆粒的速度。 3-64
- 圖 3.62 案例一-二值化影像之互相關分析估計之等效圓直徑隨時間變化圖(不考慮 $[-1, 1]$ 區間內的峰值)；縱軸為等效圓直徑；橫軸為試驗影片中第 N 幀影像；虛線為在第 195 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。 3-65
- 圖 3.63 案例一-二值化影像之互相關分析估計之平均水準速度隨時間變化圖在第 550 幀到 1570 幀之間放大圖(不考慮 $[-1, 1]$ 區間內的峰值)；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 N 幀影像；灰色為理論速度最大誤差 ± 1 個圖元的範圍；虛線為在第 195 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間..... 3-65
- 圖 3.64 被追蹤的的巨石邊界位置圖；(1)與(2)分別為第 1379 幀與第 1380 幀各自與前一幀影像亮度值相減後經影像處理的影像。 3-66
- 圖 3.65 地聲檢知器 5-60HZ 的能量(ENERGY) 與愛玉子溪流量 DISCHARGE(CMS) 經驗公式，每個點 10%誤差範圍以線標於點上 3-67
- 圖 4.1 航空攝影測量技術建置土石流潛勢溪流高精度數值地表模型..... 4-2
- 圖 4.2 愛玉子河流域位置圖與正射影像 4-3
- 圖 4.3 愛玉子河流域地質圖 4-3

圖 4.4 水筒模式概念.....	4-6
圖 4.5 1995-2021 年間愛玉子溪集水區有效累積雨量對應之降雨事件。1999 年前 雨量資料採用中央氣象局阿里山測站為代表，1999 年後則採用阿里山測站與 神木村測站之徐昇氏平均法，權重分別為 0.3512 和 0.6488。.....	4-7
圖 4.6 農航所原始航空照片類型.....	4-9
圖 4.7 1995-2021 年間愛玉子溪集水區有效累積雨量對應之降雨事件與本計畫蒐集 之影像序列。1999 年前因缺乏神木村測站的雨量資料，將其予以忽略。圖下 方直線代表本計畫蒐集到的遙測影像序列，綠色代表農航所原始航照影像； 紅色為 UAV 空拍影像。.....	4-10
圖 4.8 2021 年 9 月 8 日愛玉子溪集水區無人機空拍影像涵蓋範圍，黃色圓圈的區 域因受雲霧影像而未能涵蓋。.....	4-11
圖 4.9 愛玉子溪流域衛星影像崩塌判釋成果.....	4-12
圖 4.10 崩塌體積-面積關係式的示意圖.....	4-13
圖 4.11 祝山觀景台與愛玉子溪野溪的地面控制點量測.....	4-15
圖 4.12 祝山觀景台與愛玉子溪集水區周圍的地面控制點量測.....	4-16
圖 4.13 地面控制點與檢核點的分佈.....	4-17
圖 4.14 運動恢復結構示意圖和多視角拍攝影像.....	4-18
圖 4.15 PIX4D MAPPER 航空攝影測量軟體產製三維模型示意圖.....	4-18
圖 4.16 1999/12/10 正射影像與數值地表模型.....	4-20
圖 4.17 2001/08/02 正射影像與數值地表模型.....	4-21
圖 4.18 2003/03/02 正射影像與數值地表模型.....	4-21
圖 4.19 2004/08/07 正射影像與數值地表模型.....	4-21
圖 4.20 2005/11/28 正射影像與數值地表模型.....	4-22
圖 4.21 2007/01/26 正射影像與數值地表模型.....	4-22
圖 4.22 2008/08/03 正射影像與數值地表模型.....	4-22
圖 4.23 2008/08/26 正射影像與數值地表模型.....	4-23
圖 4.24 2009/11/21 正射影像與數值地表模型.....	4-23
圖 4.25 2013/06/03 正射影像與數值地表模型.....	4-23
圖 4.26 2014/02/17 正射影像與數值地表模型.....	4-24

圖 4.27	2017/10/07 正射影像與數值地表模型.....	4-24
圖 4.28	2018/05/29 正射影像與數值地表模型.....	4-24
圖 4.29	2019/01/11 正射影像與數值地表模型.....	4-25
圖 4.30	2020/05/08 正射影像與數值地表模型.....	4-25
圖 4.31	2020/10/20 正射影像與數值地表模型.....	4-25
圖 4.32	2021/09/08 正射影像與數值地表模型.....	4-26
圖 4.33	兩期數值地表模型相減分析土砂侵淤量的示意圖	4-27
圖 4.34(A)	1999/12/10-2001/08/02 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-31
圖 4.34(B)	2001/08/02-2003/03/02 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-32
圖 4.34(C)	2003/03/02-2004/08/07 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-32
圖 4.34(D)	2004/08/07-2005/11/28 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-33
圖 4.34(E)	2005/11/28-2007/01/26 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-33
圖 4.34(F)	2007/01/26-2008/08/03 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-34
圖 4.35	2008/08/03-2008/08/26 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-34
圖 4.36	2008/08/26-2009/11/21 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-35
圖 4.37	2009/11/21-2013/06/03 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-35
圖 4.38	2013/06/03-2014/02/17 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-36
圖 4.39	2014/02/17-2017/10/07 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-36
圖 4.40	2017/10/07-2018/05/29 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-37
圖 4.41	2018/05/29-2019/01/11 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-37
圖 4.42	2019/01/11-2020/05/08 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-38
圖 4.43	2020/05/08-2020/10/20 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-38
圖 4.44	2020/10/20-2021/09/08 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量.....	4-39
圖 4.45	擷取崩塌參數建立崩塌體積-面積關係式	4-44
圖 4.46	2009 年莫拉克颱風前後的 NDVI 變化與崩塌範圍	4-44
圖 4.47	2021 年盧碧颱風前後的 NDVI 變化與崩塌範圍	4-44
圖 4.48	打荻珠男經驗公式，紅色圓圈為觀測值，左圖橫軸為有效累積雨量；右圖 橫軸為土壤雨量指數，黑線為打荻珠男經驗公式預測結果	4-46
圖 4.49	1999/12/10-2001/08/02 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-48

圖 4.50 2001/08/02-2003/03/02 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-48
圖 4.51 2003/03/02-2004/08/07 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-48
圖 4.52 2004/08/07-2005/11/28 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-49
圖 4.53 2005/11/28-2007/01/26 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-49
圖 4.54 2007/01/26-2008/08/03 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-49
圖 4.55 2008/08/03-2008/08/26 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-50
圖 4.56 2008/08/26-2009/11/21 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-50
圖 4.57 2009/11/21-2013/06/03 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-50
圖 4.58 2013/06/03-2014/02/17 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-51
圖 4.59 2014/02/17-2017/10/07 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-51
圖 4.60 2017/10/07-2018/05/29 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-51
圖 4.61 2018/05/29-2019/01/11 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-52
圖 4.62 2019/01/11-2020/05/08 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-52
圖 4.63 2020/05/08-2020/10/20 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-52
圖 4.64 2020/10/20-2021/09/08 野溪與河道侵淤變化圖.....	4-53
圖 4.65 土砂剩餘量(紅線)隨時間變化，綠×為沒有土石流降雨事.....	4-54
圖 4.66 愛玉子溪河道遞移率隨年份變化圖.....	4-55
圖 5.1 愛玉子溪集水區之航拍正攝影像；(A) 2008 年(B) 2014 年(C) 2017 年.....	5-8
圖 5.2 愛玉子溪集水區之裸露地範圍判釋；(A) 2008 年(B) 2014 年(C) 2017 年....	5-9
圖 5.3 愛玉子溪集水區之地表侵蝕與堆積；(A) 2008 年至 2014 年間(B) 2014 年至 2017 年間.....	5-10
圖 5.4 土石流初始料源之流深分佈.....	5-11
圖 5.5 土石流流動過程之弱剪層與強剪層示意圖.....	5-12
圖 5.6 傾斜平板試驗管道.....	5-14
圖 5.7 傾斜平板試驗過程與萃取之流深頗面.....	5-14
圖 5.8 愛玉子溪土砂料源現場採樣點位與列表.....	5-17
圖 5.9 傾斜平板試驗達穩態時之頗面影像.....	5-18
圖 5.10 影像擷取之流深變化與降伏應力檢定結果.....	5-18
圖 5.11 最大體積量之土石流數值模擬結果.....	5-21

圖 5.12 75%體積量之土石流數值模擬結果	5-22
圖 5.13 50%體積量之土石流數值模擬結果	5-23
圖 5.14 土石流經過監測斷面時的斷面流量、最大流深、平均流速圖	5-25
圖 5.15 土石流流深、運移距離與運移時間關係圖	5-26
圖 5.16 土石流沿河道對下游之影響距離與影響時間關係；以三場不同體積量之土石流為例，其影響距離為監測斷面沿下游計算之距離	5-27
圖 6.1 網站系統架構圖	6-1
圖 6.2 展示系統登入首頁	6-1
圖 6.3 展示網頁中心整體監測設施圖	6-2
圖 6.4 資料下載頁面(一分鐘一筆)；上方為雨量、下方為影片與地聲	6-2
圖 6.5 展示中的歷年衛星影像	6-3
圖 6.6 愛玉子溪 360 度環場照	6-3
圖 6.7 GIS 資料比對；包含等高線圖、航拍圖、裸露地判釋、地形侵蝕與堆積等計算圖	6-4
圖 6.9 事件紀錄儲存模式	6-5
圖 6.10 自動預警流程與預警通知模式	6-6
圖 6.11 預警視窗	6-6
附圖 1 實驗配置簡易圖	附-1
附圖 2 水槽尺寸及坡度	附-2
附圖 3 試驗使用之砂石材料；(A)以篩砂時停留於 10 號篩(2MM)的石頭做為小粒徑材料，其平均粒徑為 3.34MM、乾砂密度為 1591.02kgm ³ 、飽和濕砂密度為 1958.45kgm ³ ，(B)停留於 38inch (9.5MM)篩網上的石頭做為大粒徑材料，其平均粒徑為 11.65MM 乾砂密度為 1648.36kgm ³ 、飽和濕砂密度為 2058.02kgm ³ 。	附-3
附圖 4 供水系統之配置	附-3
附圖 5 地聲儀和資料輸入器 (A) 三軸地聲儀(B) 連接電腦的資料輸入器(C) 地聲檢知器的響應曲線	附-4
附圖 6 相機架設位置圖	附-5
附圖 7 圖示為實驗設置圖，包括地聲儀和錄影機的位置	附-7

附圖 8 水槽底床設置步驟 (A)固定地聲儀 (B)鋪上細顆粒 (C) 鋪上粗顆粒 (D) 最上層再鋪上細顆粒 (E) 完整實驗設置及地聲儀位置..... 附-8

附圖 9 閘門倒下時產生的脈衝..... 附-9

附圖 10 圖示為使用鋼製 HOLLOW DAM 第四組實驗實驗配置圖 附-10

附圖 11 用三峰模型和單峰模型做出的回歸結果對比，實驗(B) 和 (C)用兩個模型做出來的結果很相近，實驗(A)有一些差距且實驗(D)在四組實驗中有最大差距 附-11

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基於職司山坡地保育利用之責，自民國 91 年開始，陸續發展土石流防災觀測科技，期能更加精進坡地土砂災害之觀測科技研究及發展。目前此觀測系統已安裝於全台 21 站，且有三台高靈活度的觀測車，整個系統包含了超過兩百個的各種設備，此系統已經成為國內與國際之亮點，而神木村測站更是所有測站中，台灣防災的代表點，不但過去事件豐富紀錄詳細，更被列為世界上示範監測站之一(Hürlimann et al., 2019)，因此早有建立神木研究中心與試驗場域之計畫，若能建立神木研究中心，除了可提升國內土砂災害研究所需要的實際數據外，更將提升台灣土砂災害研究在國際上的領導地位。

目前的觀測系統要在應用上發揮更大的功能。整套觀測系統，有以下待改進的方向：

- 一、觀測系統資料必須經過加值分析，產出天然災害事件相關資訊，才能提供準確的偵測、預警與分析。
- 二、觀測站資料在加值後需要一套即時的展示、分析與智慧系統來運用資料，才能不但讓所有資料一目了然，還可以針對事件資料比對與建議決策。

觀測站除了提供土石流事件發生時的準確預警，更應該可以延伸到崩塌土方、堰塞湖潰堤、多次上游土砂運移等等各種不同的事件，並藉此發展早期土石流或淺層山崩預警系統，提供長期區域性的災害潛勢分析，進而提供水保與農業的預防措施參考觀測系統資料的加值，在前期計畫中，107 年「坡地土砂災害特徵資訊加值分析與應用」，108 年

「坡地土砂災害觀測資訊加值分析與應用」與 109 年「坡地土砂災害觀測資訊進階加值分析與應用」一系列研究中，已經針對觀測系統中數量最多的設備攝影機與地聲檢知器研發出了快速並準確的判別土石流前鋒的方法，該法也經現地資料驗證過，同時也針對攝影機與地聲檢知器的資料加值，找出了估算土石流(含砂水流)流量，速度與最大石頭大小的方式，這些資料已經可以結合，產出高精確度的預警系統。

這三個前期計畫中，也提出了攝影機與地聲探測器的現場安裝注意準則，但是研究過程中也發現，精確的觀測資料，必須由準確的現場儀器提供，但是目前現場儀器雖有維護，但是沒標準檢校機制，因此偶然會發生數據無法比對的問題，因此需要針對數據的準確度與調整建立標準檢校的方法。而以上所有加值的資訊，也尚未整合到一個即時智慧型的網站，以確保預警可以快速自動化進行。同時在觀測站多年的資料也尚未整合分析，以執行長期的災害潛勢分析，這些都是急需改進之處。

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：

- 一、 針對現有土石流觀測儀器(地聲檢知器、攝影機)發展現場檢校方法。
- 二、 以影像與地聲資料，產出流深，流速，流量與表面大粒徑分析方法。
- 三、 透過現場調查與數值模擬進行先期作業，配合地聲或影像監測資料，建立早期預警方法(偵測到土石流前)，並建立即時警戒範圍與規模方法(偵測到土石流後)。
- 四、 以航拍照片建立土砂堆積與運移分析，產生長期的災害潛勢預報。
- 五、 建立智慧型網站，自動執行預警與建議決策執行事項，且可由遠端執行加值分析。

第三節 重要工作項目及實施辦法

- 一、 針對現有土石流觀測儀器(地聲、影像)發展現場檢校方法。
 - (一) 利用標準地聲檢知器到現場比對檢測目標，並產出檢測目標之響應曲線，重點為響應曲線的 5Hz 到 120Hz 範圍
 - (二) 以標準色板塊，到欲檢測目標固定距離外，檢查攝影機產出的色塊，比例與變形，確保整個畫面功能正常
- 二、 以影像與地聲產出流深，流速，流量與表面大粒徑分析方法。
 - (一) 以總灰階值差法計算流深，進行水槽試驗驗證方法可行性
 - (二) 以地聲訊號估計流量與流速，流速是以雙地聲偵測訊號時間差計算;流量需要持續增加地聲能量與流量經驗曲線中的點。

現地流量量測方式為將地聲埋於河道下方，測量能量，同時間將安裝於河岸的地聲測得的能量換算成距離消減倍數，所有地聲訊號都是以在河道位置為標準。

(三) 以傅立葉轉換法配合互相關運算取得顆粒速度與可能粒徑

三、以航拍照片建立土砂堆積與運移分析，產生長期的災害潛勢預報

(一) 以歷年航拍與無人飛機比對，產生崩坍與土砂運送範圍

(二) 以上述資料與雨量歷程配合，建立土砂運移(崩坍與輸砂)的關係

(三) 建立土石流發生的長期指標

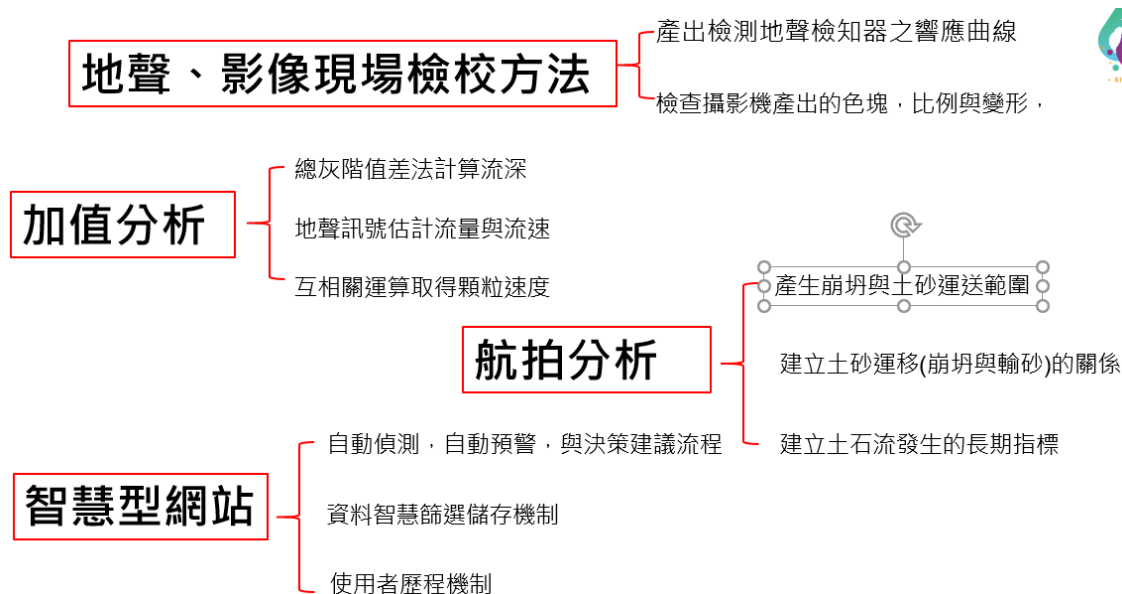
四、建立智慧型網站，自動執行預警與建議決策執行事項，且遠端可執行加值分析

(一) 建立自動偵測，自動預警，與決策建議流程

(二) 建立資料智慧篩選儲存機制

(三) 建立使用者歷程機制

以簡圖將重要工作劃出如下圖



第四節 預期效益與評核標準

一、預期效益

- (一) 建立現場儀器設備的檢校方式，在現場不須換備品並把儀器帶回室內檢校。
- (二) 擴大神木觀測站的影響族群，可推動國際合作外交，成為國內外的研究熱點建立使用者歷程機制。
- (三) 建立以建測站數據滾動評估以年為單位提出未來災害潛勢的初步方法。預估的相關的績效指標如下表 1.1

表 1.1 研究績效指標

共通性 指標 項目	細項指標	預估 量化值	內涵說明
學術著作 發表	國內期刊論文	1 篇	已投稿一篇以影像判釋土石流的分析到中力學期刊。
	國際期刊論文	2 篇	目前一篇已刊登於 Understanding and reducing Landslides disaster risk 專書(Scopus)。
	研究報告	1 本	預計年底產出一本研究報告
國內外合 作研發與 人才培育	研發人才培育數 (博士)	1 人	台大博士生
	研發人才培育數 (碩士)	4 人	台大碩士生

二、評核標準

(一) 期中評核標準

1. 現場儀器檢校方法確認
2. 流況(流深，流速，流量，最大粒徑)估算方法完成。

(二) 期末評核標準

1. 智慧型網站完成
2. 長期潛勢估計建議完成
3. 航照比對崩坍與土石流完成

第二章 儀器檢校

監測設備至於現場，尤其現在幾乎所有設備都是電子設備，經過現場溫度，濕度，日曬雨淋，還有長期突發性斷電的衝擊下，長時間下來，任何儀器都會在設定上與剛出廠時不同，當然也會有部分失常的狀況。

而監測預警除了展現現場狀態外，將現場訊號轉換成物理量也是重要的目標，好讓監測的人或軟體獲得現場狀況的評估值，並藉此評估做決策，因此若現場監測儀器的讀值有誤差，影響到評估與預測，造成該救不救，或救災資源分配錯誤，都是非常嚴重的問題。因此必須每隔一段時間，檢查現場儀器是否有任何問題，若是整體讀值平移，則經過檢校後修正，仍然可滿足儀器的可用性，若檢校出來是極大的問題，則儀器本身必須替換或維修。

本章只針對地聲檢知器與攝影機的現場檢校制定檢校方式，而檢校方式著重在是否該儀器仍然可以使用，使用時若需要修正，該如何修正。

現場儀器的另一個敏感問題為不可移動，現場儀器若已經安裝好，則其參數往往就固定了，若拆下來帶回試驗室檢校，檢校完又安裝回現場，這移動與安裝的過程，本身就改變了整套儀器的特性，尤其像地聲檢知器安裝於現場需要非常穩固，取出再裝回去跟本就改變了整個接收的環境與位置，因此地聲檢知器一定必須於現場檢定而無法拿回試驗室在控制環境中檢定，攝影機的問題也是相同的。因此，本章的檢校並非針對儀器的每一個部分分別去判斷其好壞，而是針對已經穩固安裝於現場的設備，以整套設備(包含感知，電力，承載體等等)為單位去做檢校，如此才能真正適合監測之用。

第一節 地聲檢知器檢校

一、地聲檢知器原理

地聲檢知器有不同廠牌與原理，但是水保局各測站使用的地聲檢知器(不考慮低頻地聲)都屬於相同速度型系統(Geospace)，因此本章僅針對速度型地聲檢知器做檢校設計。

由於地聲檢知器內部是一個類似阻尼與彈簧的系統，如：圖 2.1，當地聲檢知器隨著外部介質一起振動時，其內部透過彈簧與阻尼固定的永久磁鐵也會開始產生一振動速度，透過永久磁鐵的運動，其磁鐵外部的線圈將產生對應的感應電流，最後將感應電流的電壓值輸出，透過外部的訊號放大器、類比數位轉換器輸出數位電壓訊號，此訊號即為一般常見的電壓訊號。而這電壓值就是地聲檢知器輸出的原始資料，要將電壓資料轉變成振動資料，則必須經過該系統的響應函數(response curve)。因此響應函數表示了測得電壓跟真實振動的關係，這跟儀器內部的永久磁鐵質量(m)、電線電阻(R)、電壓敏感度(G)、彈簧彈性係數(k)等參數有關係。

為了分析地聲的檢校流程，本計畫自原廠買全新的地聲檢知器附有原廠提供的這些參數值與檢定過的響應曲線圖(如圖 2.2)。

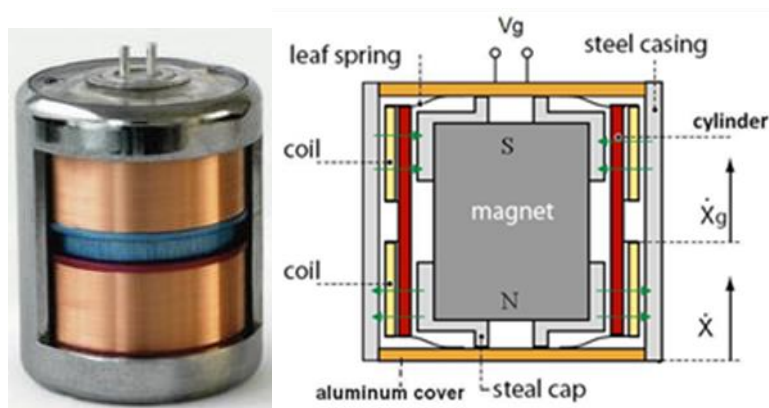
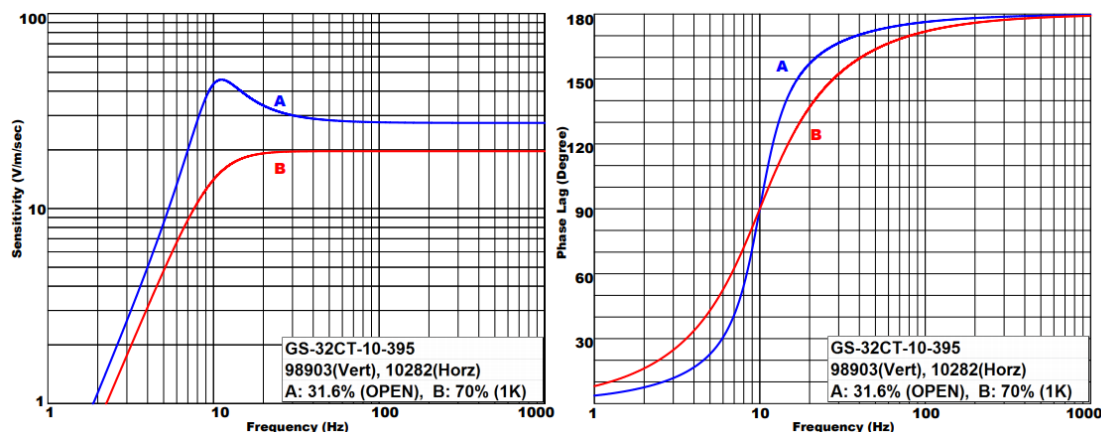


圖 2.1 地聲檢知器內部構造示意



(a)圖 2.2 地聲探測器(GEOSPACE 產置之GS-32CT 三軸地聲探測器)之頻率響應曲線；圖左為振幅響應、圖右為相位響應

在圖 2.2(左圖)中，其縱軸為是振動速度與電壓之比值、橫軸為頻率，而地聲檢知器紀錄的電壓改變是時間上的變化紀錄，因此必須將一段時間的電壓訊號經過傅立葉轉換，取得電壓隨頻率改變的分佈，並應用圖 2.2 將每一個頻率對應的振動速度求出，最後透過傅立葉反轉換將振動速度隨頻率的關係轉換回振動速度隨時間的變化訊號。

而在上述轉換過程中，響應曲線基本上是透過地聲檢知器的構造所推導出的方程式，不同的地聲檢知器，差別僅存在於其各別的參數，其響應曲線之公式如下

$$T(\omega) = \frac{E(\omega)}{V(\omega)} = \frac{G\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{M}\right)^2 - 2\left(\frac{k}{M}\right)\omega^2 + \omega^4 + 4\left(h_0 + \frac{G^2}{2R\sqrt{Mk}}\right)^2 \left(\frac{k}{M}\right)\omega^2}} \quad (2.1)$$

其中 $E(\omega)$ 為電壓振幅、 $V(\omega)$ 為地表振動振幅、 G 為電壓敏感係數 (Intrinsic Voltage Sensitivity)、 k 為彈簧彈性係數 (coefficient of elasticity)、 h_0 為開路阻尼 (open circuit damping)、 R 為總電阻 (total resistance)、 M 為磁體質量。

透過式(2.1)，可由量測之電壓資料與已知的振幅響應曲線求得真實振動資料，但隨著現場地聲檢知器長期暴露於野外，其內部的參數則

可能隨之改變，即使測得相同的電壓資料，其所代表的地表真實振動速度則會出現失真。因此本計畫建議每過一段時間，就必須檢定一次該儀器的響應曲線，以確保能獲得真正的振動速度資料。

二、檢校方法

因為無法移動已經裝好的地聲檢知器，所以本計畫利用帶一個已經於室內檢定好的標準地聲檢知器(內部參數都已知且響應函數已確認)去現場，放在待測地聲檢知器儀器的旁邊(越近越好)，然後在附近以敲擊地面方式產生震源訊號，使標準地聲檢知器與待測地聲檢知各產生一組電壓資料做比對。

假設兩個極靠近的地聲檢知器安裝在相同的介質上，其所測量到的地表振動型態相同，但容許接收訊號的振福相位有些許延遲的差別外，其振動的的頻率將不會改變，因此可用振幅與頻率的關係來檢定待測地聲檢知器的響應曲線。為了減少單一敲擊事件造成的誤差，本計畫在檢測時，以多位置、多次敲擊的試驗確認以上假設是否成立。

檢校時，是以三個方向的總能量來進行檢校，以防止有一個主要流動方向沒有檢校到，因此以下的分析數據都是三個軸進行複列轉換後，每個頻率都是三軸大小平方相加後的總能量值。

三、檢校方式與流程

以圖 2.3 為例，左方為真實地表振動，但是因為標準地聲檢知器與待測地聲檢知器與震源距離有一點差別，因此測得的振幅會稍微有差，也就是圖 2.3 中 1 與 4 的位置是兩個變化相同，但是振幅差一點點的兩個圖 1 與 4 經過傅立葉轉換變成 2 與 5 的頻域圖，再經過 3 與 6 的各別響應曲線轉換，就可以產生不同頻率的振幅。

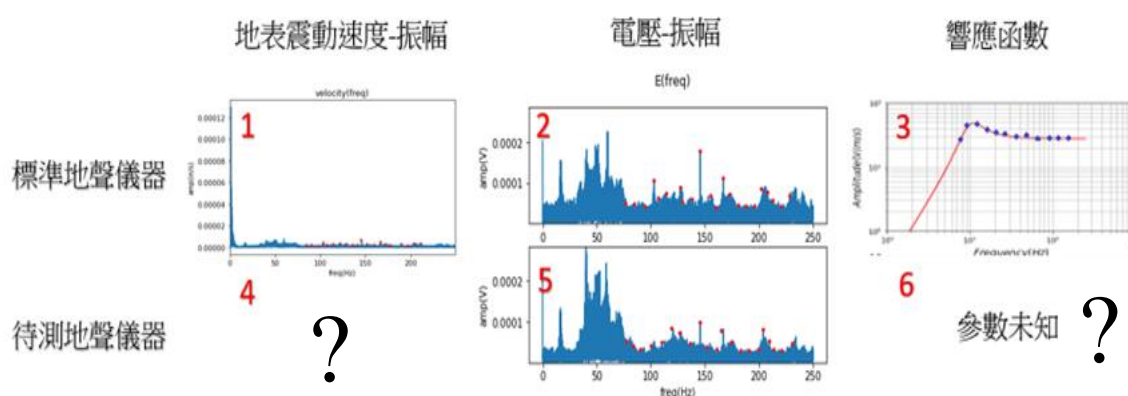


圖 2.3 檢校流程示意圖

但是在以上的流程中，我們只知道標準地聲檢知器的響應曲線，不知道待測地聲檢知器的響應曲線(圖 2.3 中第 6 格)，如果知道了 6 的圖，則每一個頻率的振幅都應該相同，除了因為接收訊號強度有稍微的差別(傳遞介質稍差)與可能的一點點時間差(訊號傳播介質與距離不同)，因此在最後一步，振幅也會稍有差別，但是每一個頻率的差異都是相同的倍數.因此可用標準地聲檢知器的響應曲線來檢定待測地聲檢知器的響應曲線，其步驟如下

(一) 產生待測震源

於現場產生地表振動，以相同取樣頻率與總取樣時間取得資料，標準地聲儀器與待測地聲儀器都會得到電壓時域資料如圖 2.4 的兩筆資料，上圖是標準地聲儀器到的，下圖是待測地聲儀器量到的。

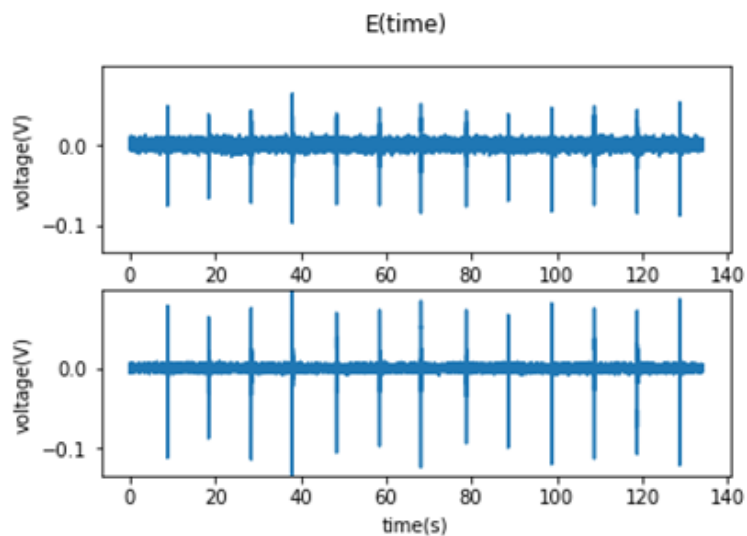


圖 2.4 標準地聲儀器(上圖)、待測地聲儀器(下圖)電壓時域資料示意圖

因為兩者非同一部機器，時域資料一定會有差異，先將兩份資料做時間互相關，以便移除可能的時間差別。

(二) 訊號頻譜分析

移除時間差別後，取相同長度的兩筆時域資料做傅立葉轉換可以分別得到電壓在頻域的分佈圖，因為後面檢定需要用到不同角頻率(ω)對應的電壓振幅。並利用頻率響應函數將每一個角頻率對應的電壓振幅換成真實地表振動振幅。

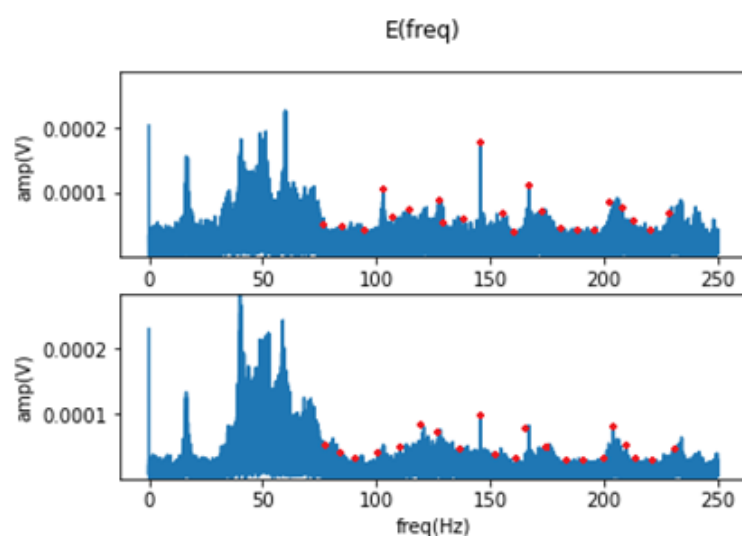


圖 2.5 標準地聲儀器、待測地聲儀器電壓頻域資料經由離散傅立葉轉換後，對兩筆資料取相同頻率點的振幅，如圖

2.5。就可以用來檢定帶測儀器的響應曲線，而圖 2.5 中，可以取非常多點比對，如表 2.1，

表 2.1 標準地聲與待測地聲之量測振幅

頻率	50	100	150	200
$E_{correct}(\omega)$	0.0002	0.0001	0.00015	0.0005
$E_{test}(\omega)$	0.00018	0.0001	0.00014	0.0005

註： $E_{correct}(\omega)$ 為標準地聲在不同頻率對應到的振幅

$E_{test}(\omega)$ 為待測地聲在不同角頻率對應到的振幅

(三) 訊號電壓-振幅轉換

將電壓振幅除以振幅響應函數中對應頻率的值，就可以得地表真實振動速度頻域圖，定義為 $V_{correct}(\omega)$

計算 $V_{correct}(\omega) = \frac{E_{correct}(\omega)}{T_{correct}(\omega)}$ ，結果如圖 2.6

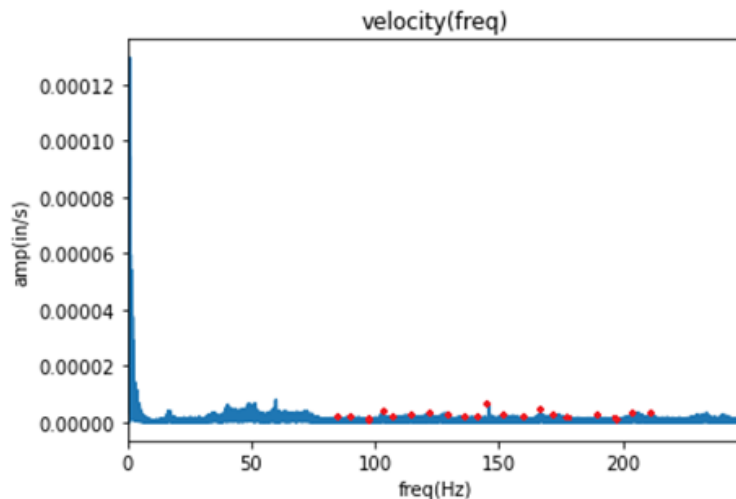


圖 2.6 振動速度振幅之頻率變化圖

將待測地聲檢知器的資料除以待測地聲檢知器的響應曲線值，可得待測地聲檢知器所測得的地表振動 $V_{test}(\omega)$ ，如果待測地聲檢知器沒有問題，就該是相同的結果，也就是說我們可以用最小方差法，取得很多點，來檢定待測地聲檢知器的參數，也就是讓 $\sum(V_{test}(\omega) - V_{correct}(\omega))^2$ 之誤差最小，就可以用來檢定待測地聲檢知器的參數。

四、檢定方程式推導與簡化

待檢定的參數有 G (電壓敏感係數, Intrinsic Voltage Sensitivity), k (彈簧彈性係數, coefficient of elasticity), h_0 (開路阻尼, open circuit damping), R (總電阻, total resistance)和 M (磁體質量, mass)。

因為是彈性系統, 所以重新定義 $\sqrt{\frac{k}{M}} = a$ 、 $2RM = b$, 得響應曲線為

$$T(\omega) = \frac{G\omega^2}{\sqrt{a^4 - 2a^2\omega^2 + \omega^4 + 4\left(h_0 + \frac{G^2}{ab}\right)^2 a^2\omega^2}} \quad (2.2)$$

也就是待檢定參數為 a , b , G 和 h_0 四個參數, 由待檢定地聲檢知器算出的地表每一個頻率的振動振幅為

$$\begin{aligned} V_{test}(\omega) &= \frac{E_{test}(\omega)}{T_{test}(\omega)} \\ &= \frac{E_{test}(\omega)}{\omega^2} \left(\sqrt{\frac{a^4 - 2a^2\omega^2 + \omega^4 + 4a^2\omega^2 h_0^2 + 4a^2\omega^2 \frac{2h_0 G^2}{ab} + 4a^2\omega^2 \frac{G^4}{a^2 b^2}}{G^2}} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

而將待檢定地聲的所有參數, 檢定到與標準地聲檢知器算出的地表振幅相同, 就可以寫成目標函數:

$$\text{誤差} = \sum (V_{test}(\omega) - V_{correct}(\omega))^2 \quad \text{其誤差必須最小} \quad (2.4)$$

待檢定的各參數的大小尺度約為我們檢定的頻率範圍最大到 500, 因此 $\omega = O(100)$ 、電壓 $E = O(10^{-5} \text{ volt})$ 得震動速度 $V = O\left(10^{-7} \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$, 而參數的典型數字 $G = 27.6$ 、 $a = 62.8$ 、 $b = 22000008690$ 、 $h_0 = 0.3$ (原廠提供)。

可以發現其中 b 特別大, 而且在檢定方程式中, b 永遠出現在分

母，表示只要有 b 的項，都非常小(比其他項小 10^{-9})，因此可以忽略，也就是 b 其實不需要檢了，因為即使 b 數字變大十倍，對儀器讀值的影響都是可忽略，因此地表位移可以直接寫成

$$V_{test}(\omega) = \frac{E_{test}(\omega)}{T_{test}(\omega)} = \frac{E_{test}(\omega)}{\omega^2} \left(\sqrt{\frac{a^4 - 2a^2\omega^2 + \omega^4 + 4a^2\omega^2h_0^2}{G^2}} \right) \quad (2.5)$$

五、檢定方法(最陡坡降法， steepest descent method)

如果有一個 3 個變數的函數 $Z = f(G, a, h_0)$ ，想要找到他的局部最小值，可以隨便選一個起始值 (G_0, a_0, h_0) 然後往最大 Z 值減少方向走、這個方向 就是負梯度(再乘上一個 *learning rate*)，然後就這樣不斷地走，直到走到一個 很平很平的地方為止就是局部最小值。而現在我們的目標函數 Z 就是 $\sum(V_{test}(\omega) - V_{correct}(\omega))$ 。

首先將目標函數正規化，並令各參數之無因次參數如下

$$G = G_0 \bar{G} \cdot a = a_0 \bar{a} \cdot b = b_0 \bar{b} \cdot h_0 = (h_0)_0 \bar{h}_0$$

$$\omega = \omega_0 \bar{\omega} \cdot V_{correct}(\omega) = V_0 \overline{V_{correct}(\omega)} \cdot E_{test}(\omega) = E_0 \overline{E_{test}(\omega)}$$

表 2.2 地聲參數檢定之變數、參考數據與尺度大小

	變數	變數之參考數據與無因次尺度
待檢定參數	G	$G_0 = 27.6$
	a	$a_0 = 62.8$
	b	$b_0 = 22000008690$
	h_0	$(h_0)_0 = 0.3$
已知變數	ω	$\omega_0 = 100$
	$V_{correct}(\omega)$	$V_0 = 10^{-7}$
	$E_{test}(\omega)$	$E_0 = 10^{-5}$

目標函數經過正規化後，目標函數變成

$$\bar{z} = \sum \overline{V_{correct}(\omega)^2} - A \frac{\overline{V_{correct}(\omega)} \times \overline{E_{test}(\omega)}}{\bar{\omega}^2} \sqrt{\frac{\bar{a}^4}{\bar{G}^2} + \left[B \frac{\bar{a}^2}{\bar{G}^2} + C \left(\frac{\bar{a}^2 \bar{h}_0^{-2}}{\bar{G}^2} \right) \right] \bar{\omega}^2 + D \left(\frac{1}{\bar{G}^2} \right) \bar{\omega}^4} + E \frac{(\overline{E_{test}(\omega)})^2}{\bar{\omega}^4} \left\{ \frac{\bar{a}^4}{\bar{G}^2} + \left[B \frac{\bar{a}^2}{\bar{G}^2} + C \left(\frac{\bar{a}^2 \bar{h}_0^{-2}}{\bar{G}^2} \right) \right] \bar{\omega}^2 + D \left(\frac{1}{\bar{G}^2} \right) \bar{\omega}^4 \right\} \quad (2.6)$$

其中的係數分別為

$$A = \frac{2E_0 G_0}{V_0 \omega_0^2 a_0^2}, \quad B = -\frac{2}{a_0^2 \omega_0^2}, \quad C = 4 \frac{(h_0)_0^2}{a_0^2 \omega_0^2}, \quad D = \frac{\omega_0^4}{a_0^2}, \quad E = \frac{E_0^2 G_0^2}{V_0^2 \omega_0^4 a_0^4} \quad (2.7)$$

接下來針對目標函數微分如下式

$$\text{梯度 } \nabla Z = \left(\frac{\partial Z}{\partial G}, \frac{\partial Z}{\partial a}, \frac{\partial Z}{\partial h_0}, \frac{\partial Z}{\partial b} \right)$$

檢定過程採最陡坡降法，猜測起始值為原廠設定值，正規化後值都是 1，每一次的逼近如下式

$$(\bar{G}_1, \bar{a}_1, \bar{h}_1) = (\bar{G}_0, \bar{a}_0, \bar{h}_0) + \text{learning rate} * \left(\frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{G}}, \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{a}}, \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{h}_0} \right) \quad (2.8)$$

六、水槽測試檢定資料

在室內將地聲埋在水槽上下游距離 50 公分處，室內試驗水槽規格

如附錄一，以榔頭在水槽旁敲擊，得到圖 2.4 的訊號，圖 2.4 上圖為離敲擊點較遠的地聲檢知器紀錄，將兩個時間訊號以快速傅立葉轉換轉到頻域，得到圖 2.5，選擇 10Hz 到 60Hz 所有點來檢定，得下表

表 2.3 參數檢定收斂情形

第 n 步	\bar{G}	\bar{a}	\bar{h}_0	\bar{Z} 目標函數	$\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{G}}$	$\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{a}}$	$\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{h}_0}$
0	1	1	1	234.9078	-955.168	-63.6007	14.6791
1	1.096	1.006	0.999	210.5252	331.8706	24.35242	-5.64749
2	1.062	1.004	0.999	205.4517	-39.4084	-2.82264	0.653691
3	1.066	1.004	0.999	205.3906	8.396389	0.575224	-0.13291
4	1.065	1.004	0.999	205.3878	-1.69769	-0.14452	0.033739
5	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.349662	0.001362	-3.8E-05
6	1.066	1.004	0.999	205.3877	-0.0693	-0.0285	0.006875
7	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.016285	-0.0224	0.005463
8	1.066	1.004	0.999	205.3877	-0.0012	-0.02364	0.005752
9	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.00237	-0.02339	0.005693
10	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.00164	-0.02344	0.005705
11	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001789	-0.02343	0.005702
12	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001759	-0.02343	0.005703
13	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001765	-0.02343	0.005703
14	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001764	-0.02343	0.005703
15	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001764	-0.02343	0.005703
16	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001764	-0.02343	0.005703
17	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001764	-0.02343	0.005703
18	1.066	1.004	0.999	205.3877	0.001764	-0.02343	0.005703

在表 2.3 中， a 與 h_0 基本上就是 1 也就是原廠設定參數，但 G 大了 6.6%，因為兩個地聲都是新買，參數不該不相同， G 之所以大了 6.6%，是因為敲擊點離此地聲檢知器較遠，訊號減弱了 6.6%，也就是距離 50 公分之效應，因此在現場必須將兩個地聲檢知器放在一起，降低檢定過程的誤差。

七、現場地聲檢知器檢定與計算

我們於 2021 年 8 月 9 號到神木村進行現場，檢定使用器材為：

- (1)待測地聲儀器-GS-20DX
- (2)標準地聲儀器- GS-32CT
- (3)類比數位轉換器-PCI-1713U
- (4)砂袋(裝現地石頭約 40 公斤)

愛玉子溪上游一岩石上

現地介質為岩石，現場地聲檢知器放在一個較平坦的位置，帶過去的標準地聲檢知器放置於待測儀器旁邊(極近)用砂袋壓在兩者上面。



圖 2.7 愛玉子溪上游地聲檢知器檢定設置

愛玉子溪中游一壩體上

現地介質為兩層混凝土，一層防砂壩本身的混凝土，一層為為了固定現場待測地聲儀器後來填上去的混凝土(淺色混凝土)，將帶過去的標準地聲檢知器放置於待測儀器旁邊(極近)用砂袋壓在兩者上面。



圖 2.8 愛玉子溪中游地聲檢知器檢定設置

(一) 敲擊與訊號處理、取樣方法

敲擊

試驗透過鐵錘尖端連續敲擊地面，製造地表震動，使儀器產生電壓

訊號。敲擊速度與敲擊總時長是兩個影響訊號重要的因素，改變敲擊速度會直接影響特徵頻率範圍，理論上敲擊頻率會直接反應在頻域訊號上，像是 1 秒敲擊 4 次，兩組地聲檢知器接收到的訊號在轉換後的電壓頻域資料上靠近 4Hz 附近的低頻波振幅會較明顯。至於總敲擊時間會影響頻域上資料總數，總時間越長，頻域上的點會越多，頻率間隔越小。以現場地聲檢知器資料為例，時域上是每 0.002 秒取一筆測得的電壓值(500Hz)，因為 Nyquist 理論的關係轉成頻域資料只會介於 0~250Hz 之間，若是敲擊總時長 10 秒，頻率域上的頻率間隔(df)會是 $250 \div (10 \text{ 秒} / 0.002 \div 2) = 0.1 \text{ Hz}$ ，所以隨著總敲擊時長越長，頻域解析度越好，界於 0 到 250Hz 之間的資料越多。因此在現場以鐵鎚尖端於地聲檢知器約 10cm 的位置連續敲擊地面，總敲擊時間約 15 秒，取其中 12.5 秒時域資料分析檢定。連續敲擊的速度大約是一秒 4 下，共做 5 次。

(二) 對齊待測資料起始時間

敲擊之後的電壓時域資料，現場待測地聲資料會傳回水保局的伺服器，標準地聲資料會傳回現場電腦，兩筆資料的起始時間是不同的，再加上地表介質差異、當地訊號傳輸可能延遲，所以需要先做兩筆電壓時域資料的互相關性比對，找到兩者最相似的時間差，就知道兩時域資料該如何比對。

(三) 過濾雜訊消除

若有高頻的雜訊，會反應在時域資料上，出現上下震盪的訊號，可以透過在時域上對多個時間的電壓取平均的方式消除高頻雜訊。本次測試採取每 5 個點(總時間長 0.01 秒)平均一次的方式去除高頻雜訊，而在頻率域，也是以 5 點平均來消除雜訊

(四) 參數檢定

從圖 2.2 知道，該型地聲檢知器在 60Hz 以上的響應曲線是一個常數，因此只與 G 有關，所以檢定的時候，先以最陡坡度法配合 60Hz 以上資料檢定出 G，然後以全部資料再檢定 a 與 h_0 ，如此可以加速檢定時間與準確度，檢定結果如表 2.4

表 2.4 地聲檢知器參數檢定結果

	第 N 次	1	2	3	4	5	平均	誤差	與原廠
上游	\bar{G}	4.79	5.1	5.12	4.81	5.21	5	2.4%	敏感性降低
	\bar{a}	1.07	1.1	1.11	1.1	1.06	1.09	2.7%	9%
	\bar{h}_0	0.92	1.03	1.09	1.08	1.01	1.03	4.8%	50%
中游	\bar{G}	2.19	1.8	1.83	1.89	1.73	1.89	15.8%	敏感性降低
	\bar{a}	1.52	1.52	1.57	1.4	1.49	1.5	4.6%	3%
	\bar{h}_0	1.26	1.19	1.19	0.99	1.02	1.13	5.3%	13%

檢定結果顯示神木村上游地聲檢知器參數已經有大幅度的改變，若用原廠參數，20Hz 以下的訊號將會有很大的錯誤

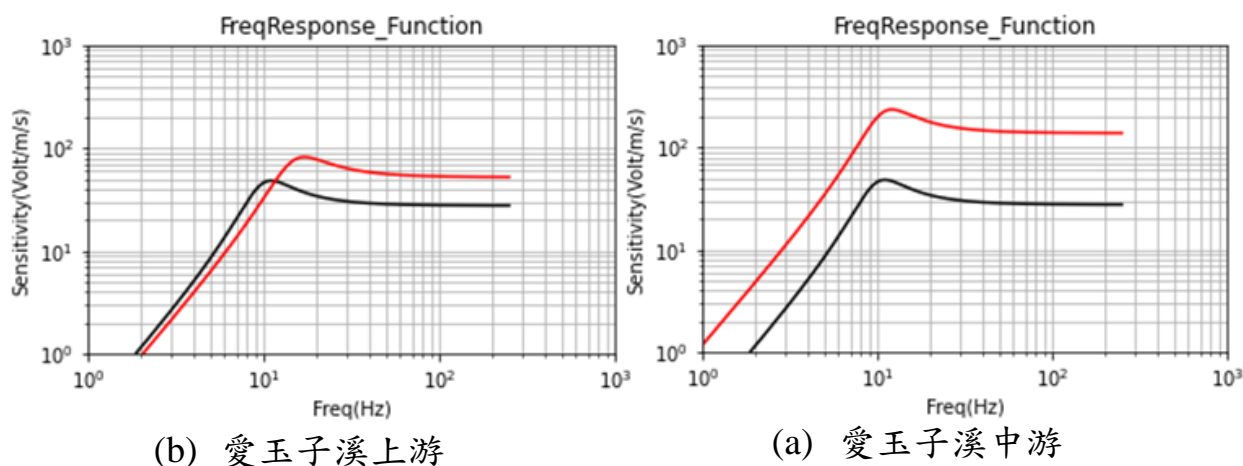


圖 2.9 檢定後的地聲檢知器響應曲線，紅線為檢定後曲線黑線為原廠曲線，兩個地聲的敏感度都降低不少

(五) 8 月 7 號降雨事件地聲紀錄

以檢定出來的參數針對 8 月 7 號凌晨的地聲檢知器分析可以得到如圖 2.9 斜率顯示有不少波事件發生，但是都非土石流，因此系統不會預警

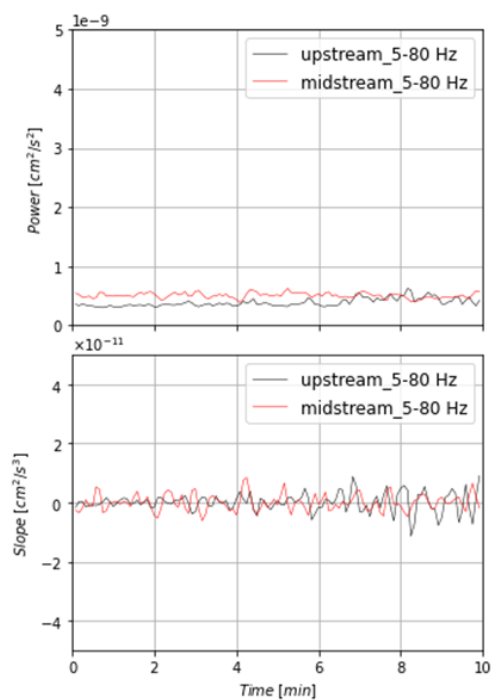


圖 2.10 2021 年 8 月 7 號 0:00-0:10
地聲檢知器記錄分析結果

第二節 攝影機檢校 (camera calibration)

攝影機檢定必須經過幾個步驟，首先必須檢定攝影機本身所有畫素良好，然後檢定攝影畫面與監測畫面間轉換關係，如此才能確保攝影機畫面可以用於監測，數位式攝影機檢定項目至少包含幾何校正(透鏡、CCD 幾何位置精度、光圈校正)、缺陷像元(Defect Pixel Recognition)、雜訊等，像元線性度(Sensor Linearity)對土石流監測較沒有影響，因為即是有偏離，畫面整體對比保持相同，對人類眼睛或影像分析都不會有影響，因此不予檢定，

攝影機都已經裝設於現場固定角度位置，無法拆下來送回試驗室檢定，因此目前所有方式均以在現場可以執行為原則。

一、像元檢定

檢定攝影機每個像元，本該把單色光源打入檢定像元的反應，即可確認其是否有缺陷或雜訊，但考慮所有攝影機都已經固定於現場，不適合移動，在現場有陽光或燈光下，不可能打單色光，因此本計劃透過標準色板去測試感光元件的像元(pixel)讀值。初步構想是將一張標準單色板放在鏡頭前面上下左右搖晃，嘗試確認每一個像元都是否可以得到正確讀值，並依此檢定感光元件內部的像元。

由於現場的光源並非均勻，因此標準顏色會因其他光源而造成不同讀值，因此當色板移動時，感光元件上不同像元理論上會分別記錄到不同的顏色，因此檢定時不以標準色板的顏色作為讀值的標準，而是以像元間讀值的差異來做比較，若有與周圍像元不連續的像元，則將其標示為不正常的像元。

這樣檢定的前提，基本上是假設感光元件上的大部分像元仍然可正常運作，因此才可以用像元間的偏差來檢定。假若大部分像元不正常，則無法使用，但其造成的噪點雜訊應可直接透過肉眼判釋，因此也不需

要去檢定而是直接更換或維修攝影機。這個方式也可以同時檢定像元讀值是否有大的雜訊，只要相鄰像元偏差值非固定，就可知道是雜訊，以下以室內試驗驗證一次流程：

以純藍光為例，顯示於電腦螢幕中，然後以相機拍影片連續一秒，因為螢幕本身位置有光源差異，因此每個點的灰階值都不同，無法以灰階值不同來檢視像元讀值是否有誤，因此本研究選取相隔 0.5 秒的兩幀畫面來檢查圖元，如圖 2.11。

第零秒: (將判定不連續的點畫上白點)



第 0.5 秒: (將判定不連續的點畫上黑點)

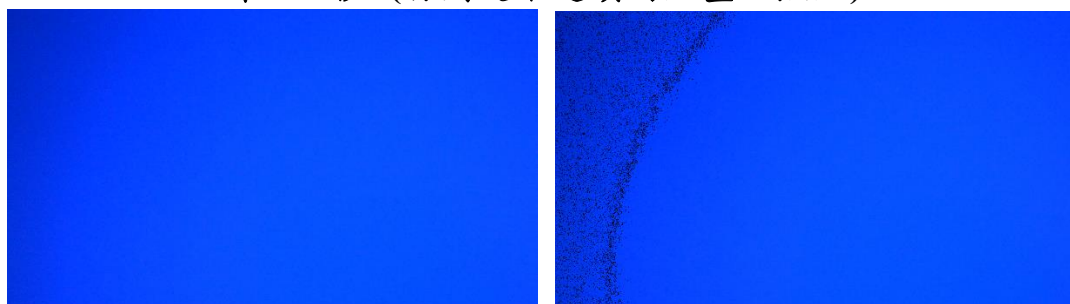


圖 2.11 像元檢定測試圖；左圖為純藍光攝影原圖、右圖為每一像元灰階值斜率不連續點

在圖 2.11 中，左圖為原影像畫面，視覺上顏色似乎沒變，但是若檢查灰階值，事實上兩側的灰階值因為打光關係，變化較大。而右圖為檢查藍光灰階值斜率不連續的圖元，如果一個圖元點與周圍圖元的灰階值斜率大於左右兩邊或是上下點任何一邊的斜率超過 10 倍，本研究即判定為不連續。以黑色(正斜率)或白色(負斜率)標出，可見到不連續點從左跑到右，若是像元有本身問題，則點會留在原地，因為沒有一個圖元點在兩幀畫面下都不連續，因此表示代測相機的像元都正常。

現場攝影機檢校流程

將三原色(藍、綠、紅)純色塊板置於現場攝影機前約 20~30 公分的距離，須確保色塊填滿攝影機畫面，並上下左右移動色塊板約五秒的時間，去檢查三原色灰階值斜率不連續的圖元，如果某個圖元點的灰階值斜率大於上下左右任一邊的斜率超過 10 倍，其圖元點及判定為不連續，先將每幀畫面不合格的點找出，並將此幀與下一幀不合格的點去比較，比較不合格點的重覆率，如果不合格的點在每幀影像中都有，則為有問題的圖元點，最後找出在每幀影像中都不合格的圖元點，並在同影像大小的三原色色塊上用白點標出來。最後不合格點如下表

表 2.5 神木村下游攝影機像元檢定結果(每秒一張畫面)

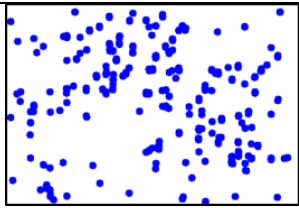
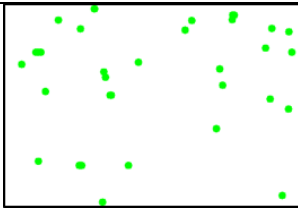
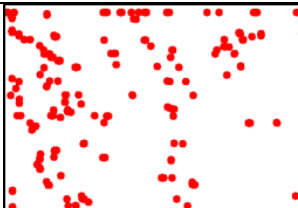
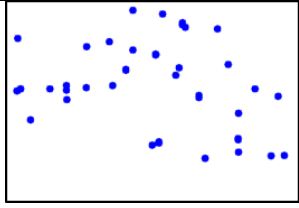
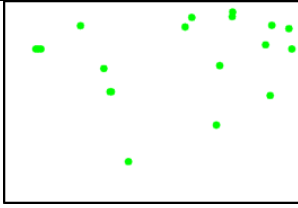
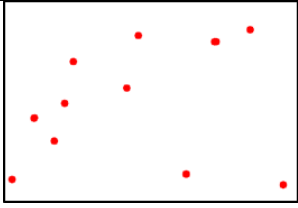
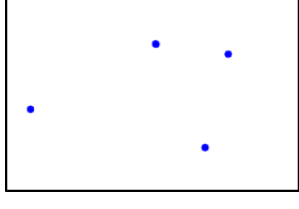
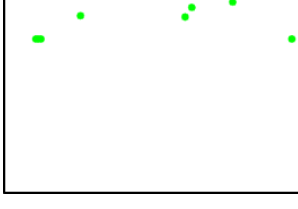
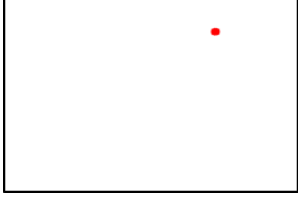
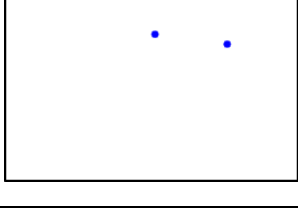
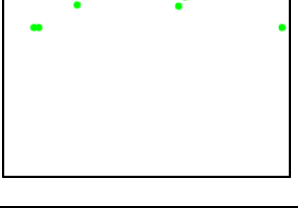

時間	藍色	綠色	紅色
~6 秒			
~7 秒			
~8 秒			
~9 秒			

表 2.6 神木測站攝影機不合格點收斂結果

	藍色	綠色	紅色
0~1 秒	19111 個	18622 個	14451 個
0~2 秒	9464 個	7779 個	10374 個
0~3 秒	5756 個	1799 個	8860 個
0~4 秒	2333 個	534 個	6780 個
0~5 秒	790 個	163 個	2396 個
0~6 秒	330 個	39 個	277 個
0~7 秒	41 個	20 個	14 個
0~8 秒	5 個	8 個	2 個
0~9 秒	2 個	6 個	0 個
0~10 秒	0 個	1 個	0 個
	到第 9 秒時不合格點	到第 10 秒時不合格點	到第 8 秒時不合格點
	(126, 360)	(56, 180)	(95, 505)
	(150, 535)		(95, 509)

所以該攝影機有 5 個圖元是有問題的，但尚不至於影響視覺或分析結果。

二、幾何校正(透鏡、CCD 幾何位置精度、光圈校正)

要校正或檢定所有參數，必須於現場架設全測站，以全測站的測量來檢定所有參數(透鏡、幾何位置精度、光圈校正、還有轉換矩陣)，因此本研究先將檢定公式推導於下。由於現場攝影機架設位置已固定，但全測站的架設點必然會與攝影機有一位置的偏離，因此不同於過去單純的相機檢定模式(Zhang, 2000)，本研究的檢定公式會多出一個現場的全測站位置與現場攝影機位置間的距離參數。

(一)座標系轉換

真實世界本身為三維，而三維座標投影到攝影機中的成像為二維平面座標，因此這兩個座標必須先定義由世界座標系 (X_w, Y_w, Z_w) 轉換到圖像座標系 (u, v) 的轉換式

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & U \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & V \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

其中 (u_0, v_0) 為圖像座標系的原點(鏡頭光學中心)、 Z_c 為圖像座標系原點至真實景物間的距離、 dx 、 dy 為圖元在 x 、 y 方向上每一單位元元長度在影像中佔多少圖元、 f 為焦距，而旋轉矩陣 R 為世界座標系三個軸與攝影機座標系三個軸的夾角如式(2.10)，平移矩陣 $[U \ V \ H]^t$ 為攝影機座標系原點在世界座標系的座標位置。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

因此 $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & U \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & V \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 又被稱為外參數矩陣，因為其中數字都是當攝影機架好後，可直接測量的。

(二)檢定公式推導

為了檢定外參數矩陣，本研究將採用全測站到現場直接測量攝影機位置等相關數據，其示意如圖 2.12。



圖 2.12 全測站測量外參數矩陣之測試實驗；圖中紅色箭頭為世界座標系之軸、藍色箭頭則為攝影機座標系之軸

在此試驗中，本研究以全測站測得世界座標與攝影機座標三個軸之轉角為： $\theta_x=270^\circ$ 、 $\theta_y=32^\circ 42' 59''$ 、 $\theta_z=0^\circ$ 。將其代入式 2.10 中可求得旋轉矩陣 R

$$R = \begin{bmatrix} 0.841 & -0.540 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0.540 & 0.841 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

在完成全測站測量後，本研究將攝影機安裝於相同位置，但是因為攝影機內部感光元件位置與全測站的感光平面位置不同，因此在垂直於鏡頭的 Y_W 方向會有一個未知的攝影機成像平面與全測站原點間的距離 L，故本研究將攝影機的世界座標令為 $(0, L, 1.18)$ ，並將攝影機的平移矩陣導出如下

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.841 & -0.540 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0.540 & 0.841 & 0 \end{bmatrix} \left(- \begin{bmatrix} 0 \\ L \\ 1.18 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0.540L \\ 1.18 \\ -0.841L \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

由式(2.11)與(2.12)，則可導出攝影機的外參數矩陣如下

$$\begin{bmatrix} 0.841 & -0.540 & 0 & 0.540L \\ 0 & 0 & -1 & 1.18 \\ 0.540 & 0.841 & 0 & -0.841L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

將上式代回式(2.9)如下

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.841 & -0.540 & 0 & 0.540L \\ 0 & 0 & -1 & 1.18 \\ 0.540 & 0.841 & 0 & -0.841L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

並將外參數矩陣與內參數矩陣展開則可得

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.841 \frac{f}{dx} + 0.540u_0 & -0.540 \frac{f}{dx} + 0.841u_0 & 0 & 0.540L \frac{f}{dx} - 0.841Lu_0 \\ 0.540v_0 & 0.841v_0 & -\frac{f}{dy} & 1.18 \frac{f}{dy} - 0.841Lv_0 \\ 0.540 & 0.841 & 0 & -0.841L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

接續將式(2.14)中 x、y、z 三個分量的式子列出

x 分量：

$$\begin{aligned} & \frac{f}{dx} (0.841X_w - 0.540Y_w + 0.540L) + u_0(0.540X_w + 0.841Y_w - 0.841L) \\ & = (0.540X_w + 0.841Y_w - 0.841L)u \end{aligned} \quad (2.15a)$$

y 分量：

$$\begin{aligned} & \frac{f}{dy} (1.18 - Z_w) + v_0(0.540X_w + 0.841Y_w - 0.841L) \\ & = (0.540X_w + 0.841Y_w - 0.841L)v \end{aligned} \quad (2.15b)$$

z 分量：

$$Z_C = 0.540X_w + 0.841Y_w - 0.841L \quad (2.15c)$$

由於式(2.15)中的 $\frac{f}{dx}$ 、 u_0 、 $\frac{f}{dy}$ 、 v_0 、 L 皆為未知數，而 $\frac{f}{dx}$ 、 u_0 、 v_0 與未知數 L 又必須相乘，且 Z_C 裡也有未知數 L ，因此式(2.15a)與(2.15b)為非線性的四元二次聯立方程式。(註： f 、 dx 、 dy 三者可以從畫面長寬比例求出，因此並非絕對的不相關，但本研究將其放進檢定式，作為驗證檢定結果是否正確的條件)

為了檢定式(2.15)，因此本研究先將所有參數的範圍列出，檢查式

(2.15)中所有項的大小範圍，如下表。

表 2.7 攝影機檢定參數之尺度範圍

待檢定參數	尺度範圍估計
f	範圍在 55 左右，級數為 10^1
$1/dx$	可知為 255.31，故 $\frac{f}{dx}$ 項的大小會為 14000 左右，為 $O(10^4)$
$1/dy$	可知為 256.41，故 $\frac{f}{dy}$ 項的大小會為 14000 左右，為 $O(10^4)$
u_0, u	3000 左右，級數為 10^3 (水準畫素)
v_0, v	2000 左右，級數為 10^3 (垂直畫素)
L	小數點後兩位(有可能為負)，級數為 10^{-2}
Z_C, X_W, Y_W, Z_W	級數為 10^0

從表 2.7 的估計中可發現，式(2.15)中凡是包含 L 的項，都比其它項小了至少兩個級數，因此再解式(2.15)時可以利用反覆運算概念，第一步先令 $L=0$ ，以線性方程式解出 $\frac{f}{dx}$ 、 u_0 、 $\frac{f}{dy}$ 、 v_0 四項後，再將數據代回式(2.15)求解 L，重複反覆運算至 L 收斂。

根據上述之方法，先令式(2.15a)與(2.15b)中的 $L=0$ 如下

x 分量：

$$\begin{aligned} \frac{f}{dx}(0.841X_W - 0.540Y_W + 0.540L) + u_0(0.540X_W + 0.841Y_W - 0.841L) = \\ (0.540X_W + 0.841Y_W - 0.841L)u \end{aligned} \quad (2.16a)$$

y 分量：

$$\frac{f}{dy}(1.18 - Z_W) + v_0(0.540X_W + 0.841Y_W - 0.841L) = (0.540X_W + 0.841Y_W - 0.841L)v \quad (2.16b)$$

將式(2.16a)與(2.16b)分別平方相加，再利用最小方差求解：

$$F\left(\frac{f}{dx}, \frac{f}{dy}, u_0, v_0\right) =$$

$$\sum_{i=1}^n \left[\left(u_i(0.540X_{wi} + 0.841Y_{wi} - 0.841L) - \frac{f}{dx}(0.841X_{wi} - 0.540Y_{wi} + 0.540L) - u_0(0.540X_{wi} + 0.841Y_{wi} - 0.841L) \right)^2 \right. \\ \left. + \left(v_i(0.540X_w + 0.841Y_w - 0.841L) - \frac{f}{dy}(1.18 - Z_{wi}) - v_0(0.540X_{wi} + 0.841Y_{wi} - 0.841L) \right)^2 \right]$$

令

$$A_i = 0.540X_{wi} + 0.841Y_{wi} - 0.841L$$

$$B_i = 0.841X_{wi} - 0.540Y_{wi} + 0.540L$$

$$C_i = 0.540X_{wi} + 0.841Y_{wi} - 0.841L$$

$$D_i = 1.18 - Z_{wi}$$

(2.17)

則可簡化如

$$F\left(\frac{f}{dx}, \frac{f}{dy}, u_0, v_0\right) = \sum_{i=1}^n \left[\left(u_i A_i - \frac{f}{dx} B_i - u_0 C_i \right)^2 + \left(v_i A_i - \frac{f}{dy} D_i - v_0 C_i \right)^2 \right] \quad (2.18)$$

將式(2.18)當作檢定的目標函式，檢定使目標函式誤差最小的變數，因此將目標函式對各變數微分，並找尋微分等於零時的變數

$$\frac{\partial F\left(\frac{f}{dx}, \frac{f}{dy}, u_0, v_0\right)}{\partial \frac{f}{dx}} = 2 \sum_{i=1}^n \left[u_i A_i - \frac{f}{dx} B_i - u_0 C_i \right] \cdot [-B_i] = 0$$

$$\frac{\partial F\left(\frac{f}{dx}, \frac{f}{dy}, u_0, v_0\right)}{\partial u_0} = 2 \sum_{i=1}^n \left[u_i A_i - \frac{f}{dx} B_i - u_0 C_i \right] \cdot [-C_i] = 0$$

$$\frac{\partial F\left(\frac{f}{dx}, \frac{f}{dy}, u_0, v_0\right)}{\partial \frac{f}{dy}} = 2 \sum_{i=1}^n \left[v_i A_i - \frac{f}{dy} D_i - v_0 C_i \right] \cdot [-D_i] = 0$$

$$\frac{\partial F\left(\frac{f}{dx}, \frac{f}{dy}, u_0, v_0\right)}{\partial v_0} = 2 \sum_{i=1}^n \left[v_i A_i - \frac{f}{dy} D_i - v_0 C_i \right] \cdot [-C_i] = 0$$

並重新整理成矩陣型式以方便求解如下

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (B_i)^2 & \sum_{i=1}^n B_i C_i & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n B_i C_i & \sum_{i=1}^n (C_i)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (D_i)^2 & \sum_{i=1}^n C_i D_i \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n D_i C_i & \sum_{i=1}^n (C_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} \\ u_0 \\ \frac{f}{dy} \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n u_i A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n u_i A_i C_i \\ \sum_{i=1}^n v_i A_i D_i \\ \sum_{i=1}^n v_i A_i C_i \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

在上式中，待檢定的變數則可透過下式求解

$$\begin{bmatrix} \frac{f}{dx} \\ u_0 \\ \frac{f}{dy} \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (B_i)^2 & \sum_{i=1}^n B_i C_i & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n B_i C_i & \sum_{i=1}^n (C_i)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (D_i)^2 & \sum_{i=1}^n C_i D_i \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n D_i C_i & \sum_{i=1}^n (C_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n u_i A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n u_i A_i C_i \\ \sum_{i=1}^n v_i A_i D_i \\ \sum_{i=1}^n v_i A_i C_i \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

透過上式求出未知數 $\frac{f}{dx}$ 、 u_0 、 $\frac{f}{dy}$ 、 v_0 之後，再將其代回式(2.15a)與

(2.15b)求 L。同樣利用最小方差求解 L 可得

$$L = \sum_{i=1}^n \frac{(2Z_C - A - C) \cdot (B + D)}{(B + D)^2} \quad (2.21)$$

再將 L 代回式(2.17)中更新係數 A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i ，並代入式(2.20)，遞迴直到 L 收斂。

(三)檢定方法之試驗與測試

本研究先於台大校園內選擇一室外場地，在牆上貼上標準方格版(每個方格為 5cm×5cm)，來測試此檢定方法是否可行，並確認檢定式

的精度與誤差，此次實驗取了八個測量點如圖 2.13，其座標列於表 2.8，將此八個點代入前節之公式計算。

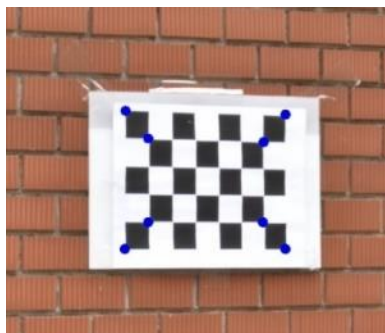


圖 2.13 八個現場測量點，圖中每個黑色與白色的格子都是邊長 5 公的正方形

表 2.8 攝影機檢定試驗之全測站測量座標、影像座標與檢定誤差

世界座標 (由全測站測得)	圖元座標 (影像上對應之座標)	誤差
(2.538, 4.225, 1.420)	(2313, 1295)	0.00589952
(2.538, 4.225, 1.170)	(2313, 2002)	0.00325944
(2.888, 4.225, 1, 168)	(3136, 2007)	0.00329317
(2.88, 4.225, 1.419)	(3136, 1323)	0.00507185
(2.588, 4.225, 1.370)	(2430, 1437)	-0.0121337
(2.588, 4.225, 1.220)	(2430, 1864)	0.00188346
(2.838, 4.225, 1.218)	(3019, 1869)	-0.00488094
(2.838, 4.225, 1.369)	(3019, 1456)	-0.00239175

將表 2.8 中之量測數據代入式(2.17)與(2.20)中，本研究發現只迭帶一次即獲得準確結果，如表 2.9。

表 2.9 代求變數反覆運算過程之結果

$\frac{f_x}{dx}$	u_0	f_x	$\frac{f_y}{dy}$	v_0	f_y	誤差
13912.6	2706.95	54.491	14058.5	1990.76	54.828	1.01889×10^{-6}

(四)檢定方法之驗證

由於標定版的格子一格為 5 公分，故版寬為 25 公分=0.25 公尺，而攝像機之感光元件的垂直長度與水準寬度分別為 15.6mm 與 23.5mm，因為影像垂直方向與水準方向分別為 4000 與 6000 個圖元，因此可得

$$1/dy=4000/15.6=256.410 \quad (2.22a)$$

$$1/dx=6000/23.5=255.319 \quad (2.22b)$$

藉由式(2.22a)與(2.22b)與表 2.5 中算出之 $\frac{f_x}{dx}$ 與 $\frac{f_y}{dy}$ ，則可反推得到 f 分別為 54.491mm 與 54.828mm，其誤差為 0.6%。

三、現場攝影機校正:(愛玉子溪下游)

校正流程

1. 現場設點
2. 使用全測站量測現場測量點及攝影機的世界座標，
3. 並截取現場影像機影像中測量點的圖元座標
4. 檢定參數。
5. 確認區域參數，並計算世界座標

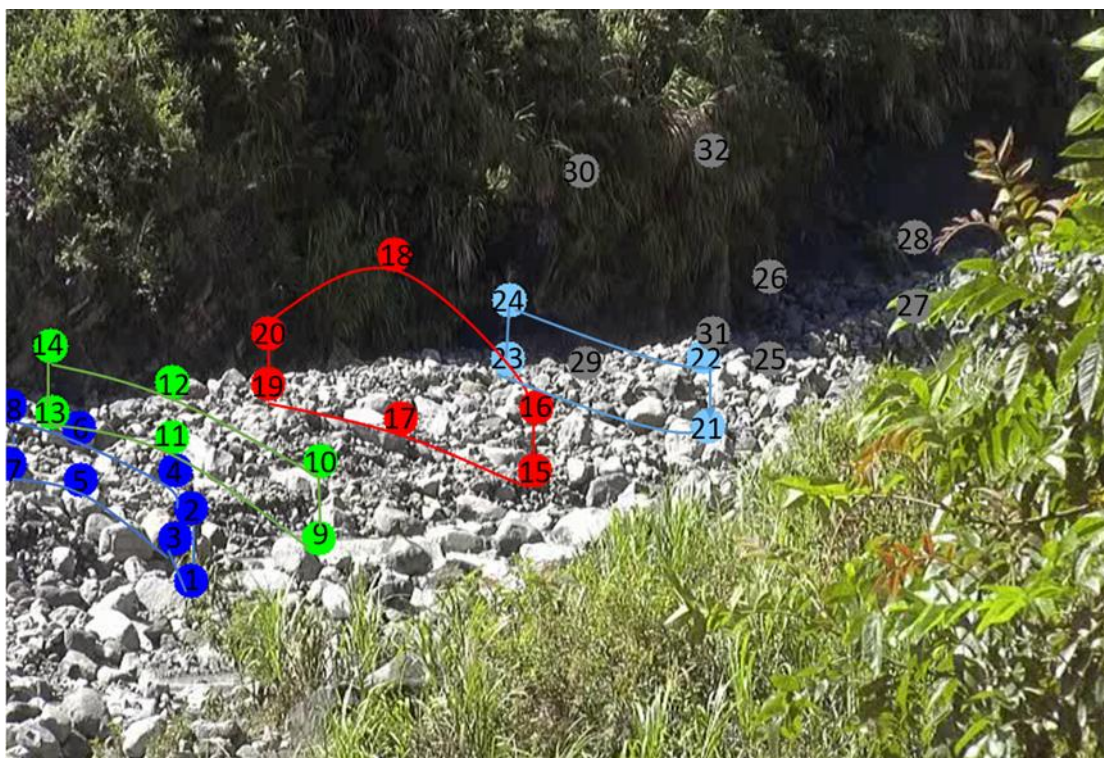


圖 2.14 愛玉子溪現場佈點分佈圖，編號為測量順序點編號，相同顏色（以線相連）為垂直河床的一個斷面上點，從左到右為斷面 1 到 4
(一)攝影機中心線計算

對於攝影機而言，影像中同一列圖元的仰(俯)角都是相等的，不會因為現場的地形而有不同，故需利用影像中有線性變化的平面來進行內插，做法為找出影像中水準尺的最高點到地面有經過影像高中央的測量點，當一平面，並去計算其與攝影機的實際距離與高度差，故只要先計算得到現場測量尺最高點及最低點對於攝影機的俯(仰)角，即可去內插出中心線的角度。

(二)參數檢定

以現場所有點的資料代入(2.20)式進行參數檢定，因為檢定公式為每一個 Z_c 有一個公式，因此以四個斷面分別檢定參數

表 2.10 以現場的點檢定參數結果，誤差是以斷面一為標準計算

	$\frac{f_x}{dx}$	u_0	$\frac{f_y}{dy}$	v_0
斷面一	882.273	63.702	405.288	42.766
斷面二	808.667	54.070	606.146	41.722
誤差	2.55%	2.64%	.89%	0.43%
斷面三	819.542	60.412	539.109	43.917
誤差	2.17%	0.90%	.92%	.47%
斷面四	835.235	63.222	3475.205	248.159
誤差	1.63%	0.13%	2.05%	2.22%

(三) 計算世界座標

先以平均參數計算任何影片畫面上的點，計算出來的世界座標可以由其 Z 座標重新修正到正確的區域，並使用正確斷面的參數

計算出來結果如圖 2.15.

如果光使用全區平均參數，畫面中接近兩側的點，其世界座標位置誤差可以大到 100%，但如果只需要垂直座標(流深方向)，除了邊界點，誤差最大也只有 10%

經過修正到正確區域參數後，Z(垂直方向，流深方向)誤差都不到 5%，Y(垂流通動方向，河寬方向)誤差也不到 20%(除了邊界點)只有流動方向因為與攝影機照射方向幾乎相同，畫面兩側誤差仍然會超過 50%

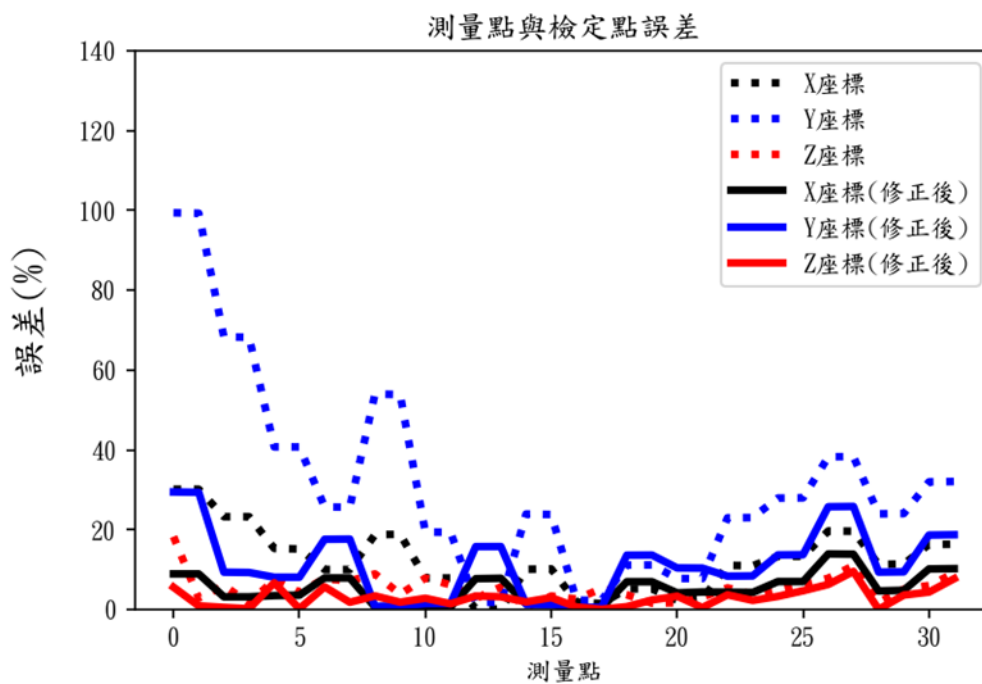


圖 2.15 影片上測量點以檢定參數回推世界座標，虛線為使用全區平均參數結果，實線為修正到正確區域參數後結果

這個結果顯示，雖然檢定公式對 Z_c (垂直攝影機方向)很敏感，但是在分區校正後，流深方向會很準確，河寬的數據會有 20%的誤差

第三章 流況檢測

本章將結合攝影機與地聲檢知器兩者，設法得到現場土石流的範圍(自由液面與前鋒)、表面流速、大顆粒移動速度與流量。其中流量來自兩個方式，一個是以表面流速乘以流深，另一個是以地聲檢知器的能量與流量對照圖，以期能夠獲得現場事件的估計。

但是這些偵測與估算的方式，都建立在一個先決條件，就是系統偵測到土石流的抵達。

第一節 土石流泥位偵測

一、以攝影機萃取土石流泥位與前鋒之方法

土石流的流深為描述土石流運動特性的重要變數之一，尤其可應用於現場土石流斷面流量的估計，並延伸應用於下游土石流的可能致災範圍之評估。但在土石流經過時，其溪床高層的變化量往往較難量測，因此本研究將先針對土石流表面的泥位高層進行分析，並以現場監測畫面為基礎，發展一套萃取土石流泥位高層的方法。

為了發展以現場監測影像為主的泥位元元偵測方法，本研究將先透過歷史影像進行分析，影像來源是 2014 年 5 月 20 日在愛玉子溪的一場事件，愛玉子溪位於濁水河流域陳有蘭溪上游，其土石流之影像截圖如圖 3.1。在圖 3.1 中，其攝影畫面是由左岸往上游監測斷面進行拍攝，攝影角度近乎平行於溪床，影片之幀率為 27fps。

雖然該攝影畫面為彩色畫面，但因現場土砂皆近似於灰階色彩，因此本研究將針對此畫面進行灰階化，並依照灰階色彩進行分析，其灰階化公式如下

$$f(x, y, n) = 0.114 \times B(x, y, n) + 0.587 \times G(x, y, n) + 0.299 \times R(x, y, n) \quad (3.1)$$

其中 $B(x, y, n)$ 、 $G(x, y, n)$ 、 $R(x, y, n)$ 為藍色、綠色、紅色的灰階值， $f(x, y, n)$ 為影像灰階化後之灰階值， x 和 y 代表圖元之水準與垂直座標， n 為影像幀數。

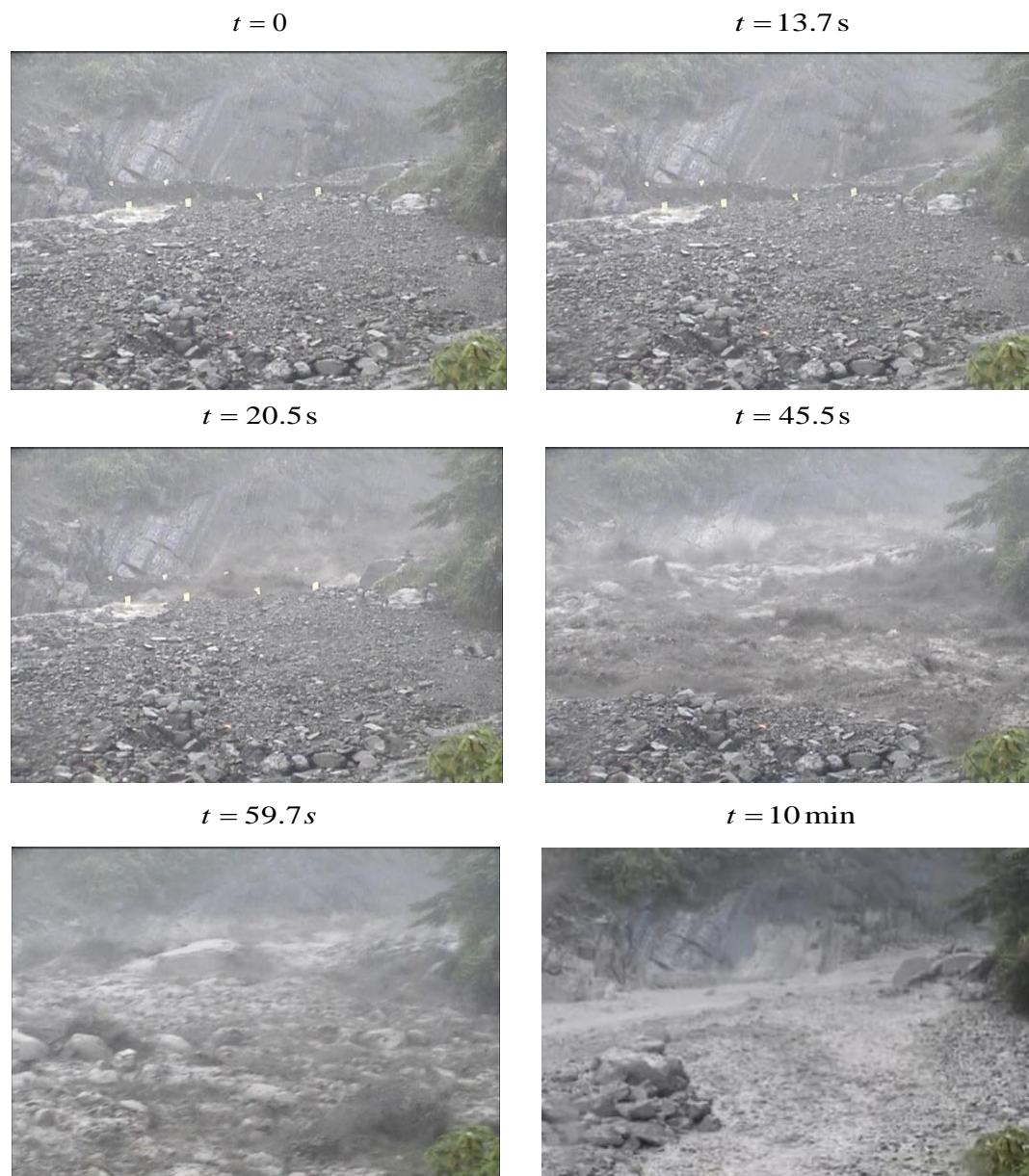


圖 3.1 愛玉子溪土石流攝影畫面截圖，其中(a)土石流發生前(b)土石流進入攝影畫面(c)土石流前鋒抵達監測斷面(d)土石流前鋒後段(e)土石流尾段泥流(f)土石流結束

二、背景雜訊之萃取

為了只針對土石流的部分進行分析並萃取泥位，因此本研究將先以土石流尚未進入畫面前的影像定義每個圖元的畫面背景值。

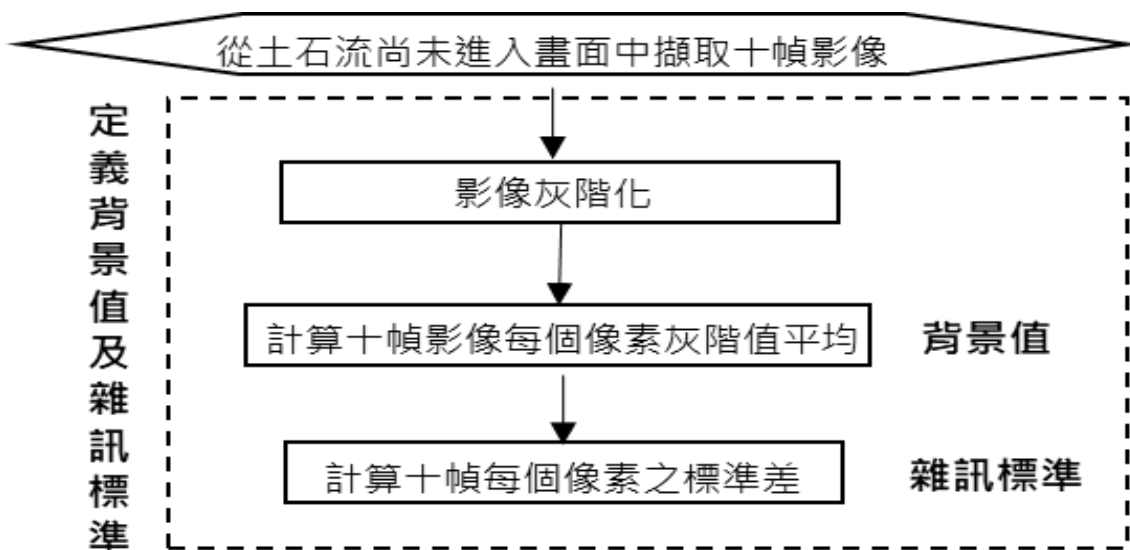


圖 3.2 背景值與雜訊值定義

由於在土石流發生時，通常伴隨大量降雨和起霧等天氣狀況，因此現場影像之雜訊也較大，本研究將針對每個圖元位置，以連續十幀影像的平均值(Liu et al., 2021)定義畫面之背景值如下：

$$f_b(x, y) = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} f(x, y, n) \quad (3.2)$$

同時計算連續十幀影像的標準差，其定義如下

$$\sigma_b(x, y) = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} f^2(x, y, n) - f_b^2(x, y)} \quad (3.3)$$

並透過計算每幀畫面中每個圖元與背景值差異與其標準差之關係判斷其是否為雜訊，以下將雜訊定義為：任何圖元之亮度與該圖元之背景值差距在兩個標準差內者即為雜訊。

理想中的結果希望能夠以雜訊定義去除相機本身或背景亮度改變產生的雜訊，得到實際有改變的地方，背景的石頭、樹...等不動的東西皆會被消除，理論上水流土石流移動時圖元改變的幅度較雜訊本身大很多，透過標準差比較可確認是否如預期可以將需要的資訊萃取出來。

三、土石流移動範圍之萃取

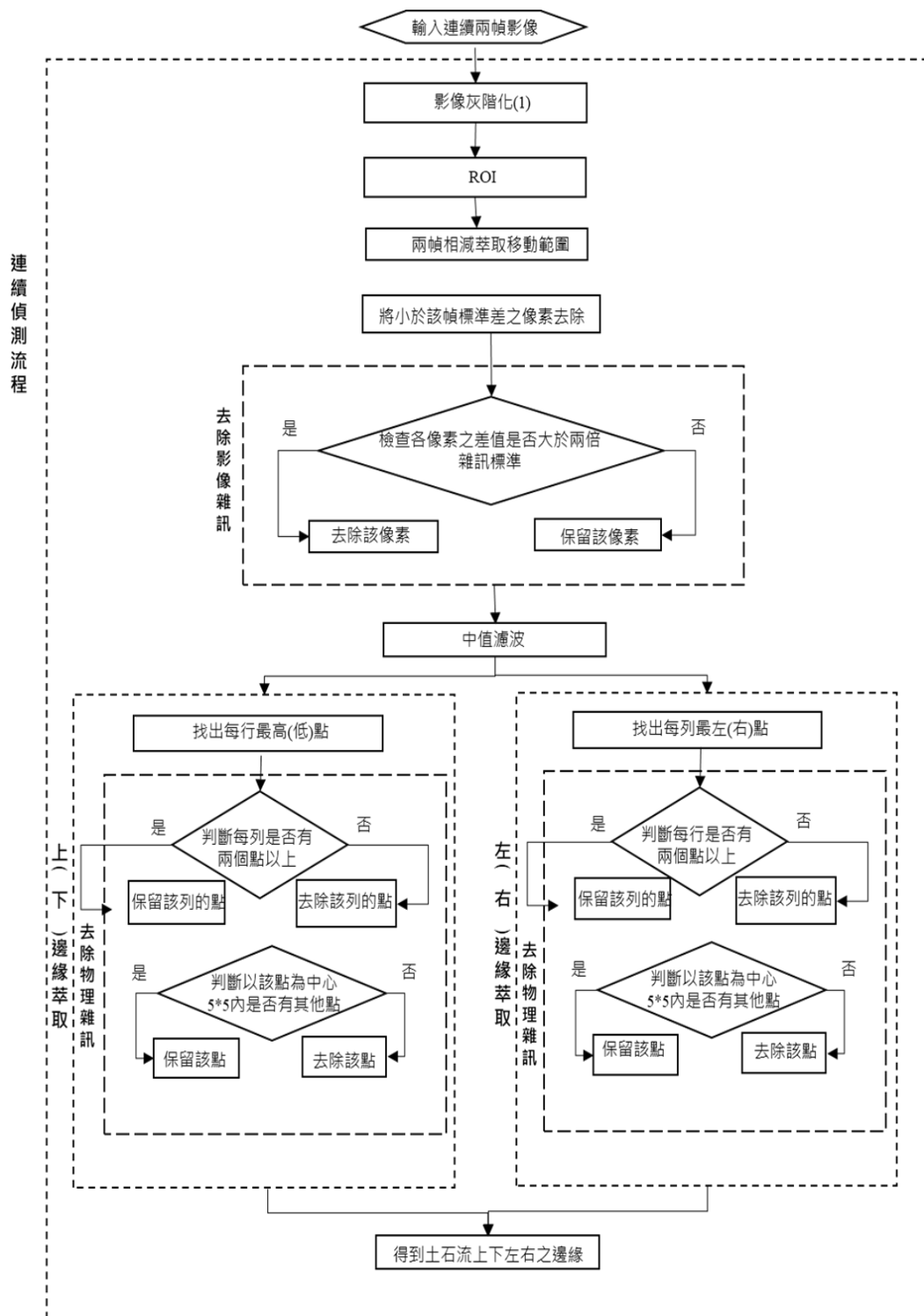


圖 3.3 土石流畫面擷取邊界流程圖

將前後連續兩幀畫面相減進而萃取土石流移動範圍，在背景變化不大的假設下，可以留下實際移動的區域，偵測出移動的物體邊框，在假設背景移動量小的情況，仍然可以有效消除部分雜訊。

$f(x, y, k)$ 為在 $t=k$ 時位元於圖元 (x, y) 之亮度、 $f(x, y, k+1)$ 為在 $t=k+1$ 時位元於圖元 (x, y) 之亮度，將已去除背景值之 $f(x, y, k+1)$ 、 $f(x, y, k)$ 相減，藉此找出土石流實際移動範圍。

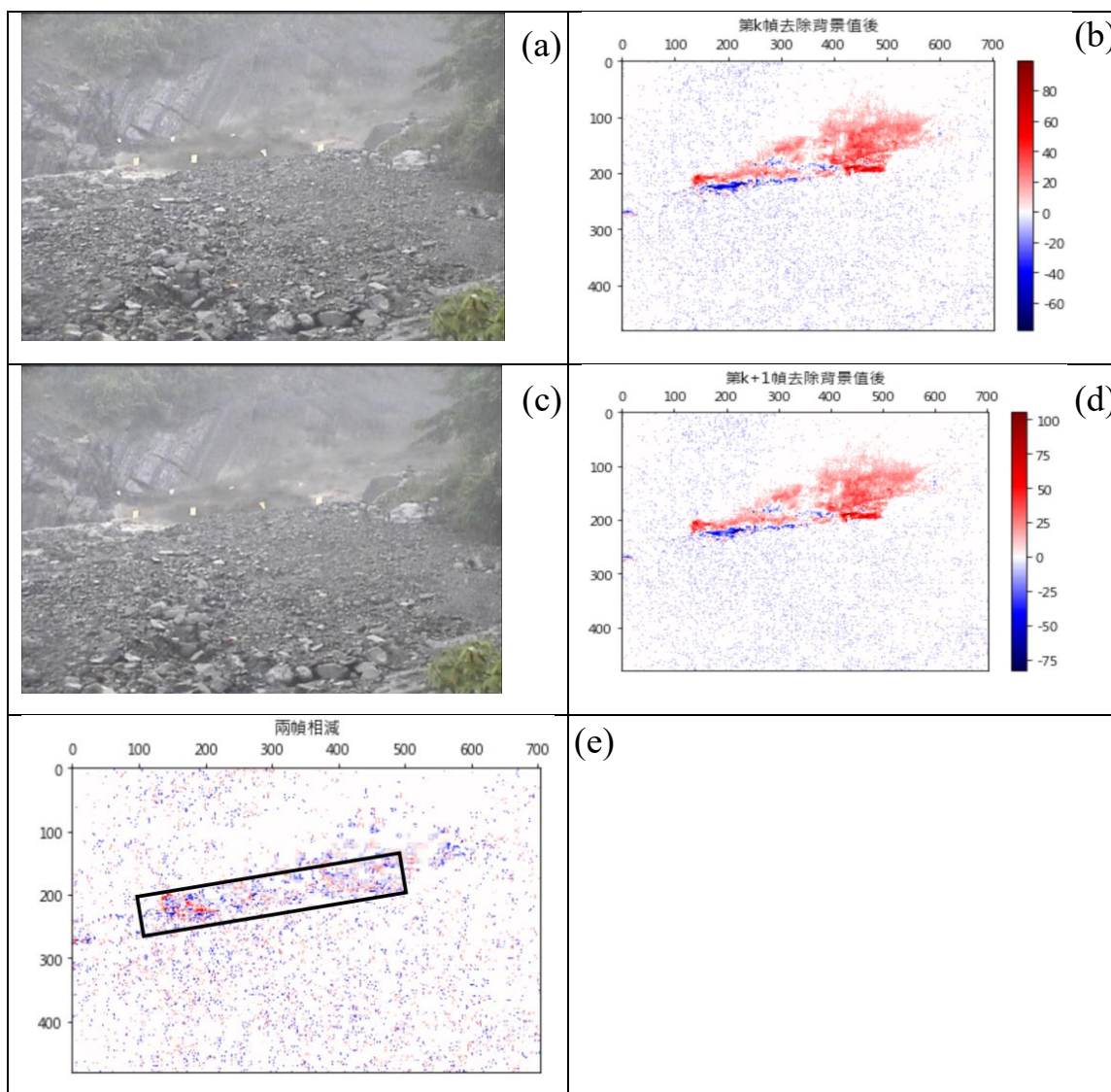


圖 3.4 土石流移動過程之萃取步驟；(a)為 $t=k$ 之土石流畫面，(b)為 $t=k$ 去除背景值及雜訊，(c)為 $t=k+1$ 之土石流畫面，(d)為 $t=k+1$ 去除背景值及雜訊，(e)為相減萃取移動範圍結果

圖 3.4a 與 3.4b 分別為 與 兩幀（相差約 0.03 秒），圖 3.4c 為經程式運算將兩幀相減後之結果，此時可看出土石流整體範圍上下亮度差較大，而在原圖中實際上代表水面處與前鋒移動的部分，並由(3.4)令兩

幀相減後的結果為 $g(x, y)$ ，繼續進行計算。

$$g(x, y) = f(x, y, k+1) - f(x, y, k) \quad (3.4)$$

去除可能非移動範圍部分

經兩幀相減得到的結果 $g(x, y)$ ，此時 $g(x, y)$ 若為 0 代表該圖元前後兩幀亮度不變，極有可能代表不會移動的物體；若 $g(x, y)$ 不為 0，代表該圖元前後兩幀亮度有變化，可能是物體移動造成，亦有可能是影像雜訊導致。理想狀態下，土石流移動速度非常快，土石流又是一個非均質的物體，因此代表土石流的圖元在前後兩幀的變化的理論上會較大；相較之下，雜訊可分為影像本身的雜訊，或是確實有移動，但非土石流所致的（可能是樹葉擺動、空中持續飄落的雨絲），這些雜訊造成的亮度差變化幅度較小，故透過一判斷式去除這些非土石流移動範圍的部分。

先計算兩幀相減後整個畫面的標準差 $\sigma(n)$ ，如(3.5)，並以一個標準差作為基準，若 $g(x, y)$ 小於等於 $\sigma(n)$ ，將其以 0 取代；反之若 $g(x, y)$ 大於 $\sigma(n)$ ，將其以 1 取代，代表該圖元為土石流移動範圍的部分，如(3.1.6)所示。

$$\sigma(n) = \sqrt{\frac{1}{w \times h} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h \left\{ [g(x, y)] - \frac{\sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h [g(x, y)]}{w \times h} \right\}^2} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} g(x, y) = 0 & \text{if } g(x, y) \leq \sigma(n) \\ g(x, y) = g(x, y) & \text{if } g(x, y) > \sigma(n) \end{cases} \quad (3.6)$$

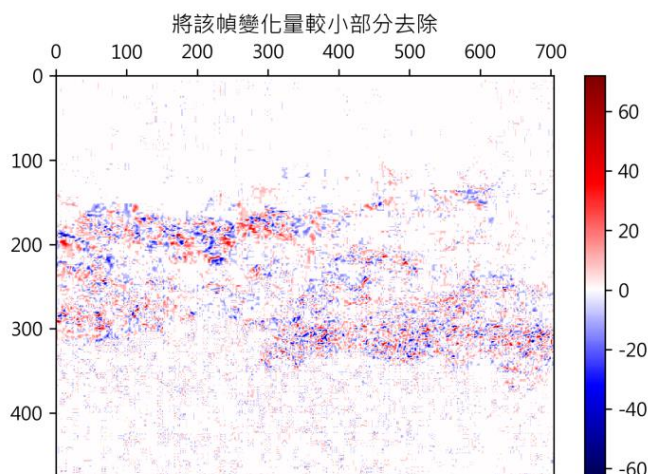


圖 3.5 去除可能非移動範圍部分後結果

去除影像雜訊

每個圖元即使物體沒有移動、改變，依然可能受到光線或其他因素所導致些微的改變，這些變化量可大可小，甚至有可能超過上一步驟中使用的標準 $\sigma(n)$ ，故藉由本章一開始提到由背景值所計算出的每個圖元之標準差 $\sigma_b(x, y)$ 作為基準，取事件尚未發生前的畫面中的十幀計算每個圖元點之標準差，透過與其比較，若變化量在該標準內，表示變動無異常之處；反之若變化大於該標準，表示可能有不同於背景值的物體移動所致。標準為(3.3)式中 $\sigma_b(x, y)$ 的兩倍，即 $2\sigma_b(x, y)$ ，判斷式如(3.7)所示。

$$\begin{cases} g(x, y) = 1 & \text{if } g(x, y) > 2\sigma_b(n) \\ g(x, y) = 0 & \text{if } g(x, y) \leq 2\sigma_b(n) \end{cases} \quad (3.7)$$

實際透過結果來比較此步驟的效用，利用 2021 年 8 月 6 日架設在霍薩溪之攝影機畫面，此時事件尚未發生，在畫面中存在原始流量的河流，水流是整張畫面中唯一隨著時間變動幅度較大的部分，因此經過(3.6)式的判斷後並不會被消除，故在圖 3.6a 中可看到許多代表未被消除的點以紅色圓點標示；而在圖 3.6b 中經過與背景雜訊標準比較後，由於在沒有事件發生時，水流的圖元變化量普遍小於或等於背景值變

動幅度，因此大部分的點都被消除，代表沒有明顯的土石流事件發生。

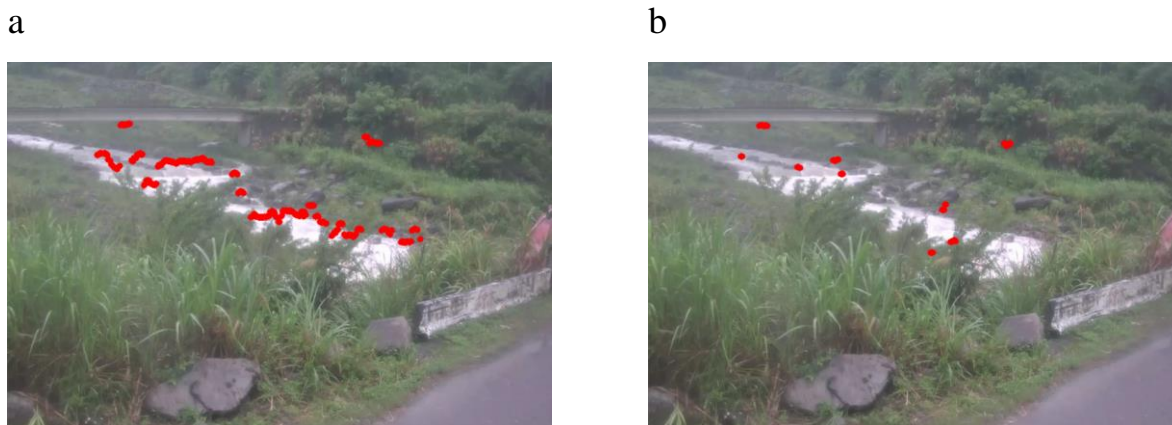


圖 3.6a. 未去除背景雜訊 b. 去除背景雜

四、土石流移動範圍之影像強化

由 3.6 可發現，經過計算，除了土石流移動之區域外，其它背景位置之雜訊還是存在且其形態特徵屬於一般標準的椒鹽雜訊，為了降低椒鹽雜訊的干擾，並凸顯土石流移動區域，因此本研究引入中值濾波 (Median Filter) 濾除非土石流移動區域之雜訊。

中值濾波 (Median Filter) 原先主要被用於影像平滑化、去除雜訊，作法為取奇數窗格 (Window)，如 3×3 、 5×5 、 7×7 ，以確保窗格內個數亦為奇數，將窗格中心的值以中位數 (median) 代替，用於消除影像中雜訊 (尤其對 salt-and-pepper noise) 特別有效，可以去除特別高或特別低的極值，用以消除前後兩幀彼此間的雜訊，優點是可以保存邊緣的特性。

例如：圖 3.7 中左邊的矩陣是中值濾波前，整個矩陣的中位數為 1，由於中心值 255 大於中位數 1，因此將中心值為雜訊，將其以中位數 1 填入取代原值得到右邊的矩陣，得到結果。

$$f(i, j) = \text{median}\{f(i-1, j-1), f(i-1, j), \dots, f(i, j), \dots, f(i+1, j), f(i+1, j+1)\}$$

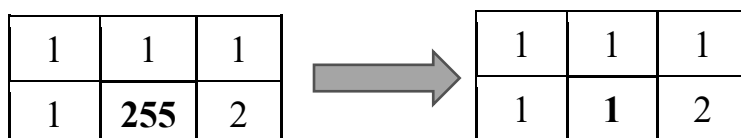




圖 3.7 中值濾波示意圖(Rafael & Richard, 2018)

依照圖 3.7 的九宮格數值更新模式，依序取圖片中每一點周圍 3×3 網格作為矩陣，將九個值排序後之中位數填入中心取代原先數值。

實際應用時是將土石流移動範圍萃取後的矩陣 $g(x,y)$ 進行中值濾波，矩陣中應參雜了 0 與 1，0 代表確定非土石流的部分，1 則為土石流包含雜訊，在假設土石流應為大範圍現象的情況下，中值濾波的目的即去除那些四周皆非土石流的影像雜訊。以窗格為 3×3 時為例，若九宮格內超過四個點為零則中心以 0 取代；反之若四個點以下不為 0，則中心為 1。此外，中值濾波亦是所有前處理中唯一非線性之處理步驟。

圖 3.8 經中值濾波後，除了土石流流經的部分，其餘背景數值大部分已趨近於 0，可看出中值濾波對於消除 salt-and-pepper noise (椒鹽雜訊) 效果顯著。

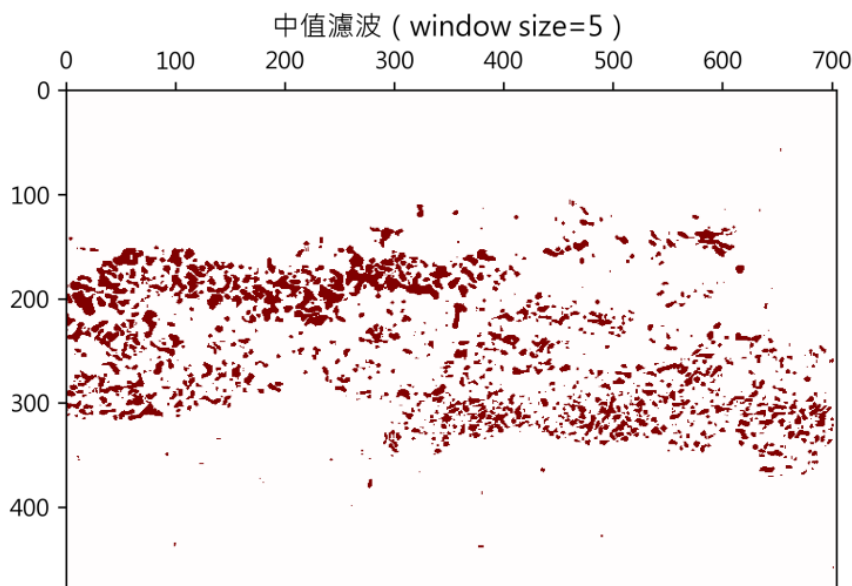


圖 3.8 經中值濾波去除椒鹽雜訊之強化結果

另外針對上述提到中值濾波可選取不同窗格大小的部分亦嘗試作比較，分別取 3×3 、 5×5 、 7×7 進行測試。以第 17100 幀為例，在窗格尺寸為 3×3 時，從錯誤! 找不到參照來源。9a 可看出在土石流範圍以上

依舊存在著許多點被程式視為邊界點，以致於圖 3.9d 土石流邊界有不少突起；在窗格尺寸為 5×5 時（圖 3.9b 及圖 3.9e），雖然土石流邊界點被去除許多，但連帶著剩餘的雜訊也都被去除，邊緣平滑化的程度較剛好，與窗格尺寸為 7×7 時相比，窗格尺寸為 7×7 時（圖 3.9c 及圖 3.9f），明顯又去除了過多細節。因此採用窗格尺寸為 5×5 進行計算。

在中值濾波前一共有 274545 個圖元不為零(可能為土石流或雜訊)，經 3×3 中值濾波後剩餘 40658 個圖元，約去除 85.2%； 5×5 中值濾波後剩餘 26373 個圖元，約去除 90.4%、 7×7 中值濾波後剩餘 17288 個圖元，約去除 93.7%。

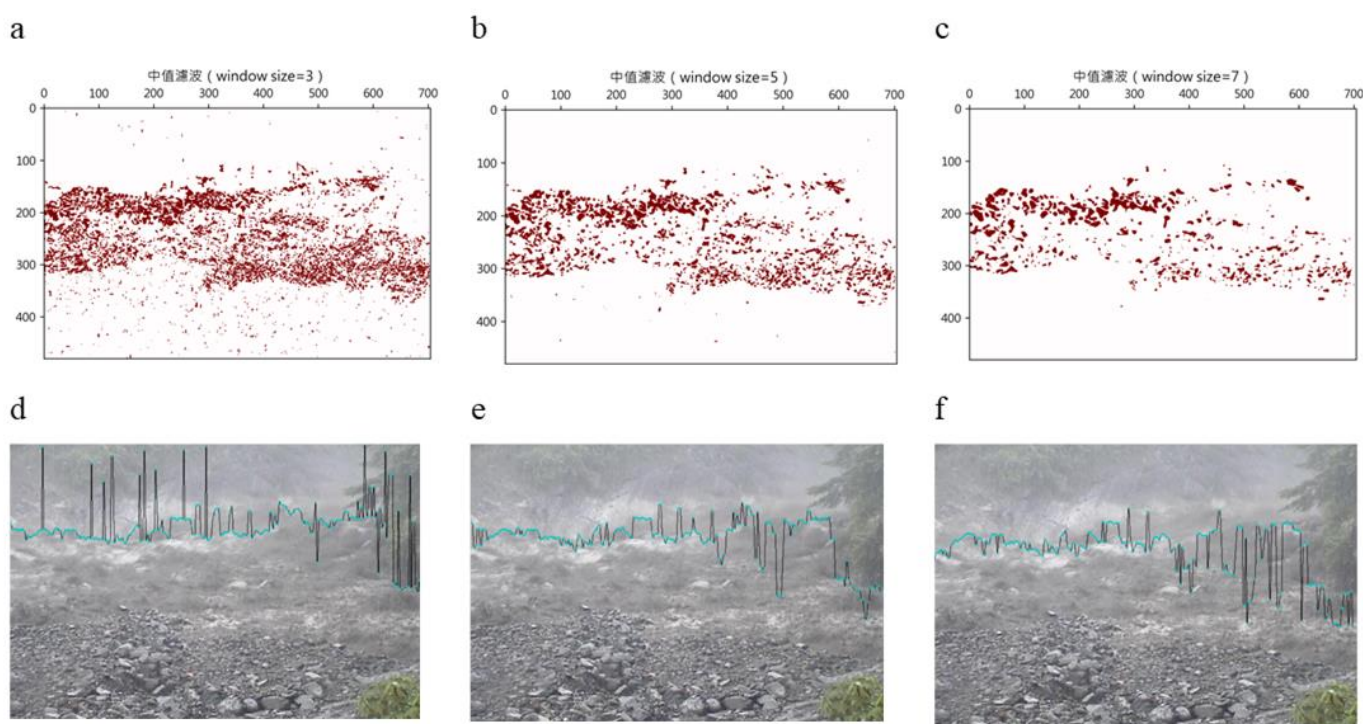


圖 3.9 a/d window size=3 圖 b/e window size=5 圖 c/f window size=7

五、土石流泥位之萃取

經過前一個步驟的強化，土石流移動區域已可描繪出來，為了進一步依此萃取泥位，本研究針對圖 3.9 以由上往下的垂直掃描方式，偵測其土石流移動區域的上邊緣，並以由左到右與由右到左的水準掃描方

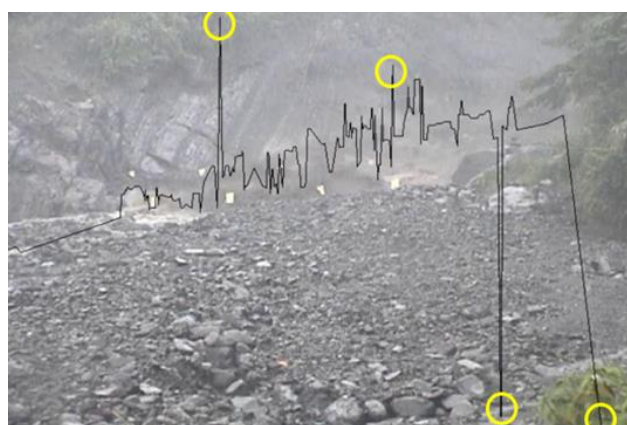
式，偵測其土石流移動範圍的左右邊緣。最後透過土石流移動範圍之邊緣，進一步萃取土石流碰觸到右岸岩盤的泥位高度。以下將針對土石流移動範圍之邊緣的偵測步驟與泥位的萃取步驟分別進行說明。

(一)上邊緣偵測：

由上向下檢測之概念，基於上一步驟之結果，將每行最高的非零點連成線，其結果如圖 3.10(a)，後續步驟將會使用到此結果。

(二)左右邊緣之偵測

針對每一列，分別找出最左及最右的非零點座標，然後將左側與右側的非零點座標分別連線，如圖 3.10(b)。



(a)



(b)

圖 3.10 土石流移動區域之邊緣偵測結果；a. 上邊緣偵測結果、b. 左右邊緣偵測結果

經由上述步驟決定出可能為邊界的點後，將一系列中有兩個點以上且往下五列每列皆超過兩個點的情況時保留，如此可消除非水面、但被

辨識為雜訊的離散點，如圖 3.10 黃色圈起的點。接著將每列最左及最右點連起來作為邊界。

(三) 土石流之泥位線

在上一步驟已經有左側及右側的座標，先找出最高點。由最高點分別向左向右搜尋，若向左邊有座標之 X 在最高點的 X 座標左側且差值在 100 圖元內、Y 座標在最高點座標往下 50 圖元內，則將其加入泥位線的矩陣；若向右邊有座標之 X 在最高點的 X 座標右側且差值在 100 圖元內、Y 座標在最高點座標往下 50 圖元內，則將其加入另一新矩陣，幾個圖元作為標準是觀察照片本身尺度決定。重複上述步驟，最後將點左右連線，則可得結果如圖 3.11。



圖 3.11 土石流右岸之泥位線

(四) 泥位線偵測之誤差討論

為了確認自動偵測結果之誤差，我們將手動萃取如紅線，並將自動偵測之結果以藍線表示，最後繪製在一起，如圖 3.12。接著計算兩種不同誤差，包含：平均相對誤差與平均絕對誤差如下。



圖 3.12 土石流泥位高度實際值(紅線)與影像偵測值(藍線)

1. 平均相對誤差方程式：

$$\text{平均水面高的相對誤差(\%)} = \frac{|\text{模擬值平均高度} - \text{實際值平均高度}|}{\text{實際值平均高度}} \times 100\% \quad (3.6)$$

2. 平均絕對誤差：

$$\text{平均絕對誤差} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{\text{模擬值}}^i - y_{\text{實際值}}^i|}{n} \quad (3.7)$$

3. 誤差計算步驟：

基本上紅線與藍線在程式中寫法相同，以下將以藍線為範例，說明式(3.6)與(3.7)的計算方式。由於紅色線與藍色線長度不一定相同，因此取實際值(紅色線)範圍內藍色線與紅色線的代入式(3.7)，得到平均絕

對誤差。

- (1) 找出圖中為藍色，RGB 值(255, 0, 0)的 pixel，其中可能有些非藍線但 RGB 值亦為(255, 0, 0)的值。
- (2) 利用前面步驟偵測結果的藍線中找出其最高與最低的 Y 座標。
- (3) 將在上一步驟範圍中 RGB 值(255, 0, 0)的 pixel 之高度取平均即為藍色線平均高度。
- (4) 以紅色線作為實際值、藍色線作為程式模擬值，各自平均後代入式(3.6)，得到所求。
- (5) 找出紅色線最左及最右點之 X 座標，並取出藍色線在這段範圍內的點，代入式(3.7)

在表 3.1 中，分別節錄土石流剛出現、土石流充滿畫面一半、土石流已占據整個河道三個階段各取連續 5-6 幀做比較。其中第①、②行分別為紅色線與藍色線平均高度、第③行為 $|\text{①} - \text{②}|$ 之結果、第④行為 $\frac{\text{③}}{\text{①}} \times (100\%)$ ，即式(3.6)、第⑤行即為式(3.7)。

表 3.1 愛玉子溪影片偵測結果比較

	①	②	③	④	⑤
第 K 幀	實際值 (圖元點)R	模擬值 (圖元點)B	平均水面 高差值 (pixel 數)	相對誤差 (%)	平均絕對 誤差 (pixel 數)
16555	322.4	327.9	5.5	1.7	11.0
16556	321.0	345.3	24	7.6	20.2
16557	323.5	348.8	25.4	7.8	15.7
16558	321.8	339.3	17.4	5.4	14.5
16559	319.2	327.9	8.7	2.7	10.1
16890	337.7	352.2	14.5	4.2	14.9
16891	338.2	368.3	30.1	8.9	33.4
16892	340.5	363.9	23.4	6.8	35.6
16893	337.9	369.7	31.7	9.4	34.3
16894	342.0	362.3	20.2	5.9	32.5
17153	348.5	331.3	17.2	4.9	11.1
17154	349.9	351.5	1.5	0.4	11.6
17155	349.8	338.4	11.4	3.2	16.9
17156	349.1	348.9	0.13	0.03	14.7
17157	352.3	347.6	4.7	1.3	16.6
17158	350.9	351.5	0.58	0.2	13.1

由結果可看出計算每個點間的誤差累積後再平均基本上大於整條線平均後的誤差，證明從平均高度的結果來看可能很接近，但實際上兩條線不一定十分吻合，如圖 3.13 中兩條線平均後的結果十分接近，但實際上在中間有極大差異。



圖 3.13 土石流泥位高度實際值(紅線)與影像偵測值(藍線)

(五)現場監測結果

為了測試本節之方法，本計畫另外以敏督利影片的愛玉子溪土石流影片為例做測試，其影片偵測截圖如圖 3.14。透過第二場事件的測試可發現，平均誤差結果較小不一定代表每個點之間誤差很小；反之平均可能算起來相差很大，但每個點間誤差較小。



圖 3.14 敏督利颱風之愛玉子溪土石流影片截圖；其中紅線為泥位高度實際值、藍線為影像偵測值

表 3.2 敏督利颱風之愛玉子溪土石流影片偵測結果

第 K 幀	實際值(圖元點)R	模擬值(圖元點)B	平均水面高差值(pixel 數)	相對誤差(%)	平均絕對誤差(pixel 數)
1031	293.6	296.6	3.3	1.0	25.2
1040	300.2	307.6	7.5	2.5	28.5
1048	294.9	293.2	1.6	2.0	11.2
1117	305.4	302.2	3.2	0.9	35.9
1211	318.4	328.2	9.8	3.1	22.5
1224	318.8	296.1	22.7	7.1	11.5

六、土石流之前鋒偵測

由於現場影像為由下游往上游拍攝，故本計畫另外利用前節(第五(一)點)的方法，反向由下而上進行搜尋，並嘗試偵測土石流前鋒位置。其偵測步驟與五(一)雷同，結果如圖 3.15。

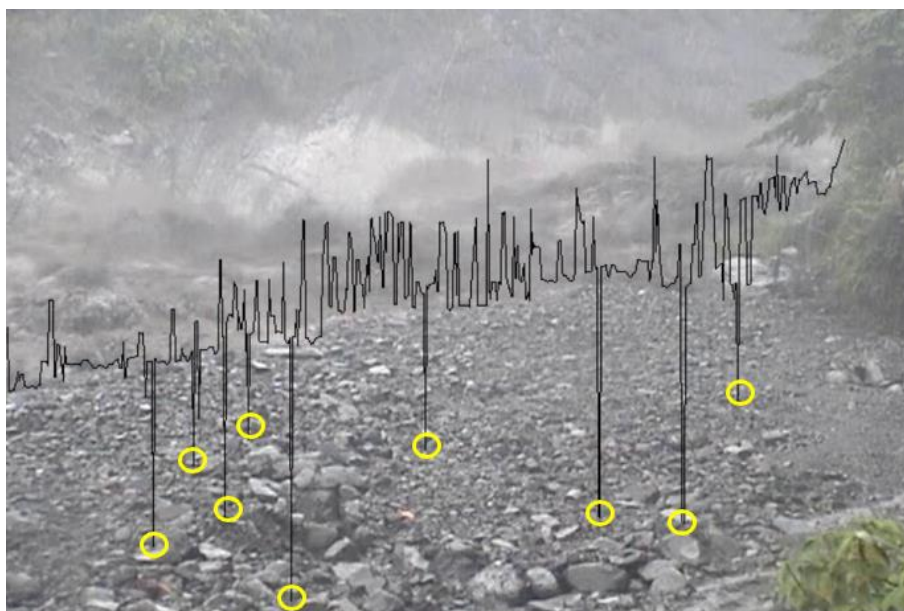


圖 3.15 土石流前鋒偵測原始點

由圖 3.15 中可發現，與前節相同會有零星的離散點，如圖 3.15 的黃色圓圈處，為避免此種離散點出現，故在此同樣將相差較大之極值排除，並比較每行與兩側之點的差距，若兩者間高度相差 5 個圖元點以

上，將其視為畸零點，最終將剩下之點連起，即為前鋒結果，如圖 3.16。
其偵測結果之誤差則表列如表 3.3。



圖 3.16 土石流前鋒偵測結果

表 3.3 愛玉子溪土石流影片之前鋒偵測

第 K 幀	實際值 (圖元點)R	模擬值 (圖元點)B	前鋒高差值 (pixel 數)	相對誤差 (%)	平均絕對 誤差 (pixel 數)
17005	186.2	193.9	7.6	4.1	9.6
17050	180.6	187.5	6.9	3.8	12.6
17155	151.1	161.9	10.8	7.1	17.6

七、前鋒移動速度計算

分析使用的愛玉子溪影像中在土石流剛進入畫面時，上邊界代表水面線；下邊界代表前鋒，而在上節中藉由兩幀間上邊界高度的差異求得水位深度，因此此節亦嘗試透過計算兩幀間前鋒平均位置的差異進而得到前鋒的移動速度，如(3.10)所示，其中 h_1 與 h_2 分別為兩幀前鋒之平均高度。

$$\text{前鋒速度} = \frac{h_2 - h_1}{\text{兩幀時間差}} \quad (3.10)$$

計算流速前亦透過肉眼所見之結果與程式判別之結果相比，並計

算兩者百分誤差，百分誤差 = $\frac{\text{實驗值} - \text{理論值}}{\text{理論值}} \times 100\%$ ，結果如表 3.4 所示。

以第 17100 幀為例，程式判釋與肉眼得到之平均前鋒位置相差約 6.3 個圖元，若以一個圖元代表 7.3 公分計算，兩結果實際上代表誤差約 45.9 公分（0.45 公尺）。

表 3.4 程式判釋之前鋒與肉眼比較及誤差

	程式判釋（圖元）	真實值（圖元）	誤差(%)
第 16900 幀	276.03	278.07	1.0
第 17000 幀	291.66	298.35	3.6
第 17100 幀	320.57	326.96	4.2

圖 3.17 以第 17100 幀做為範例，黑線為第 17100 幀判視結果、藍線為 17001 幀判視結果，兩者時間差約為 0.033 秒，將兩幀平均圖元高度代入(3.10)式計算前鋒移動速度結果如表 3.4，人眼判釋結果亦以第 17100 幀為例繪 3.17b，最後計算程式之百分誤差。

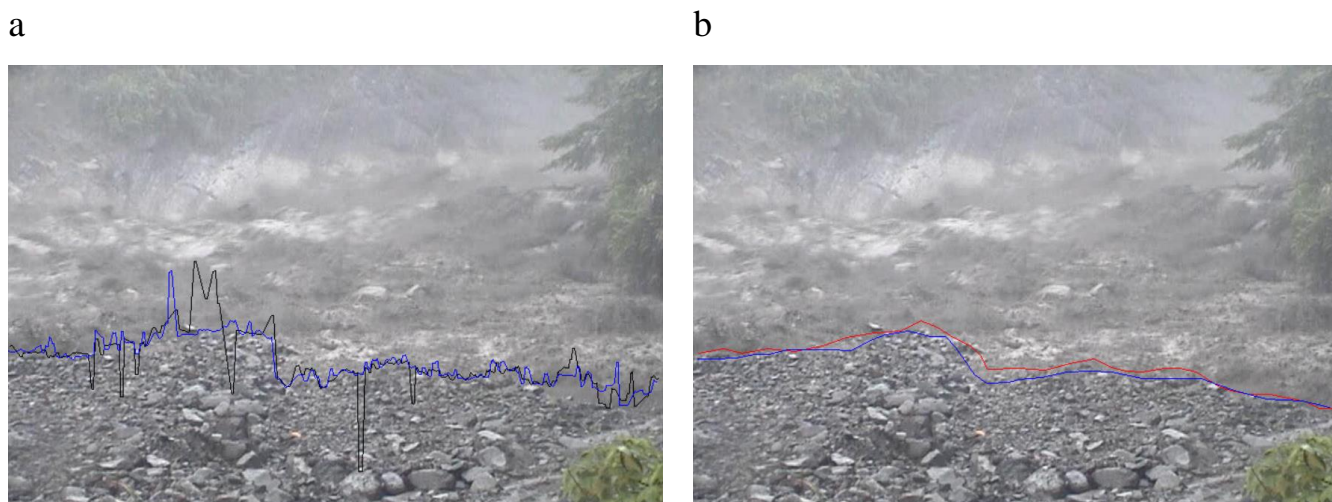


圖 3.17 第 17100 幀結果 a. 黑線為第 N 幀、藍線第 N+1 幀（程式） b. 紅線為第 N 幀、藍線第 N+1 幀（人眼）

八、程式運算時間

一幀之運算時間經程式判斷後為 0.06 秒左右，以 1 秒 15 幀為例，若運算一長 1 分鐘的影片所需時間為 54 秒。

此外，若利用尺寸為 1920*1080 之完整影像，最快可得每幀運算時間

為 0.22 秒。

2021 年 8 月 7 日盧碧颱風暴雨事件流深計算

霍薩溪水位變化

今年（2021 年）8 月 4 日由盧碧颱風引起的暴雨事件，神木大橋上的攝影機，神木大橋橫跨在霍薩溪上。架設在此處的攝影機寬度圖元數為 704、高度圖元數為 480，每秒 15 幀，圖 3.18 為該攝影機在事件發生前至發生後的畫面，圖 3.19 則為運算過程中選取之 ROI 範圍。



圖 3.18 實景圖 a. 事件前 b. 事件發生水位最大時 c. 事件發生水流較趨緩後 d. 事件後



圖 3.19 霍薩溪 ROI 範圍

分析結果

圖 3.20a、b 為分別取 8 月 7 日中兩個時間點作運算的結果，在圖片右側主要偵測到下游水面高點，將範圍內 8 月 7 日 6 時 36 分長度約 400 秒左右之影像以每 6.6 秒繪製水面高度隨時間變化圖 3.21，水深範圍在 ± 1.5 公尺內跳動，推測原因為水流表面較紊亂且鏡頭相距較遠，導致比例尺較小，即一圖元實際代表長度較大，在此範例中一圖元約等於現場的 10 至 15 公分。

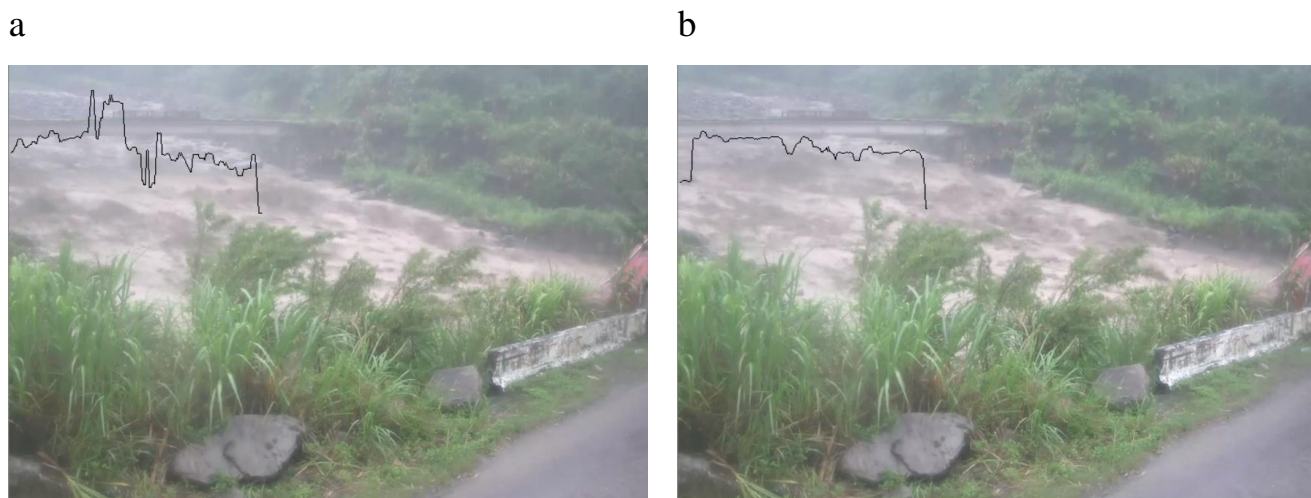


圖 3.20 a. 8 月 7 日 6:15:00 b. 6:18:00，程式辨識之表面水位線

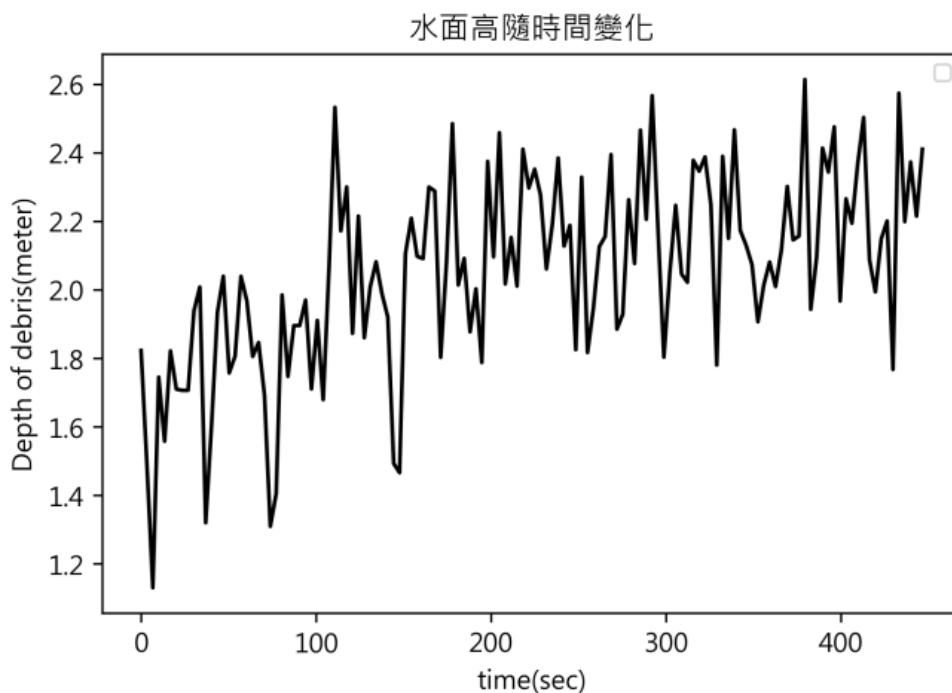


圖 3.21 霍薩溪 8 月 7 號水面高度隨時間變化(每 6.6 秒一點)

愛玉子溪水位變化

2021 年 8 月 7 日由盧碧颱風引發之暴雨事件，玉子溪中游所架設的攝影機，由於影像資料保存問題，只留下約每三十秒一張相片，影像尺寸為寬 704 圖元、高 480 圖元。處理流程與前相同，連續輸入前後兩幀、與背景值做比較去除雜訊後，最後進行邊界偵測得到水面線結果。

圖 3.22 為該攝影機在事件初始至結束的畫面，且過程中捕捉到一巨大落石掉落入河道的狀況 (b、c)，而為計算斷面水深，因此取 ROI 如圖 3.23。





圖 3.22 a. 事件尚未發生 b. 落石掉落 c. 落石墜入河道中 d. 事件結束



圖 3.23 紅色外框為 ROI 選取範圍

水位分析結果

圖 3.23 中 ROI 範圍內經程式偵測後得到之水面高度，按順序繪出得圖 3.24，由於影像來源僅 238 張照片，且中間間隔不均，介於 15 至 35 秒間，因此統一假設兩張照片間時間差距為 30 秒來繪圖，圖 3.24 在第 26 分鐘左右水面高出現高度的極值達到三公尺，即為上述中巨石掉落時濺起的水花使程式將其誤判為土石流表面，而後便回到原先的趨勢中。

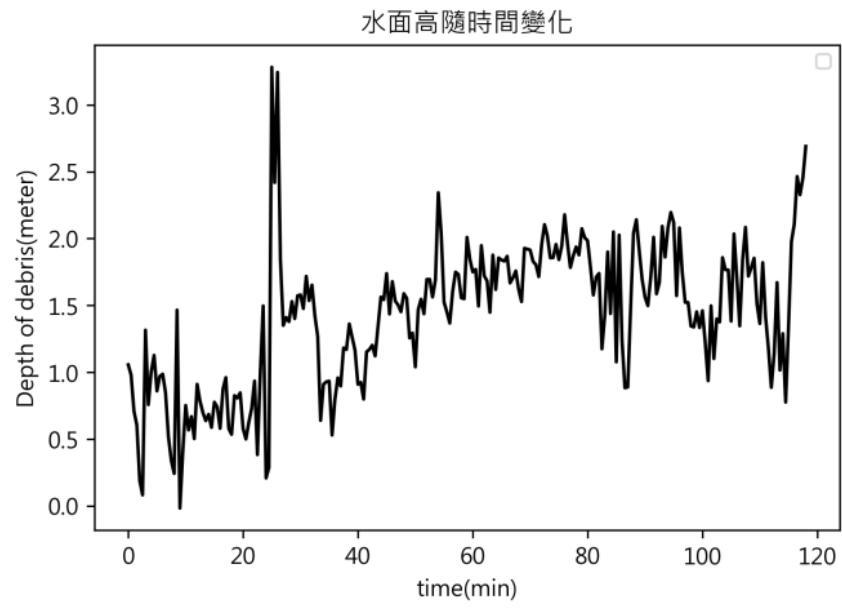


圖 3.24 愛玉子溪 8 月 7 號之水面高度隨時間變化

第二節 流速

一、理論概念

本研究為了採取能即時計算與偵測的方式，回到類似以人類眼睛判斷事件的標準，即畫面中有大量土石流來的時候，此時影片中會有大量畫素改變灰階值，此灰階值改變就是人眼看到且依以判斷是否有土石流事件的主要條件，因此本研究採計每一禎畫面的總灰階值改變，然後依據此改變量來做預警。當然除了總灰階值改變，為了反應這是土石流事件，灰階值變化必須符合土石流來的特徵，前鋒波高大且通常於波前會延續兩秒左右(不同於偶發或人為事件通常時間極短)，這些考慮形成了以下的總灰階值預警方法。

二、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，想萃取出這些物理資訊的嘗試，並非不成功，而是不夠準確，引此就產生了預警是否準確的問題，但是土石流由肉眼判斷時，人人類判斷的標準就是一大片(或大規模)的泥水夾雜石頭留下，肉眼能夠清楚的判定顏色變化與事件規模，卻無法萃取出物理資訊，但是以肉眼判斷的標準，就可以直接拿來做為土石流的預警，本節嘗試以此條件來作預警，而非先萃取出物理因數，再給予物理因數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 中圖元亮度值做統計, 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。

此法另一個好處是, 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。

(一)總灰階值法

當土石流事件發生時, 泥水夾雜大量石頭在河道中移動, 由於重力作用, 巨礫通常會集中於前端, 形成一個有坡度的明顯波前, 泥水以及坡度陡的土石流前鋒會反映出不同的亮度值, 在人眼的判斷下, 土石流發生前後會有劇烈的亮度值變化, 以及顏色上的差異, 但土石流是沒有特定顏色的, 因此利用亮度值的差異偵測土石流事件是否發生。於是, 在開始分析影像灰階值之前先在河道中畫出一個追蹤區塊(Region of interest, ROI), 計算每一幀影像 ROI 中的平均灰階值及其隨時間的改變速率, 以土石流事件發生前的環境亮度改變速率作為雜訊, 去除雜訊後率定出平均亮度值的基準值, 以平均亮度值改變快速與劇烈, 並且事件須持續發生兩秒以上, 做為偵測土石流前鋒的條件, 以排除瞬間但劇烈的灰階值差異事件。

(二)定義 ROI

土石流常發生於山谷之間, 為了供給攝影機電力以及避免其被沖

毀，攝影機因應當地地形架設於河道兩側，以側向或斜向的方式拍攝河道，攝影機架設的遠近和焦距，決定拍攝畫面河道和其他靜態背景的面積比例，然而，當影像涵蓋大面積不必要的背景時，土石流事件發生於佔影像面積比例少的河道，則土石流事件造成的灰階值改變在影像中的影響力小，則會降低偵測事件的靈敏度；因此，在影像涵蓋大面積不必要的背景時，在預計土石流會發生的河道區域劃出分析範圍，切割影像中的局部區域(Region of interest; ROI)作為影像分析區域，目的為分割出影像中有意義的區塊，除了能更明顯的看見土石流事件造成影像亮度值的變化，亦可減少程式資訊的計算量。

(三)擷取灰階化影像

由於土石流沒有特定的顏色，無法以顏色作為偵測土石流事件的標準，因此將彩色影像灰階化，僅留下亮度資訊，並且用以減少的計算量。擷取影片第 t 秒的影像，灰階化先前定義的 ROI 範圍內的圖元，然而，灰階化的計算是很主觀的，通常依照使用者的需求做公式的選擇，常見的灰階化公式有平均值法和加權平均法；由於本研究嘗試以人眼判斷土石流事件的標準判釋土石流事件的發生與否，在此使用國際電信聯盟(International Telecommunication Union, ITU)所訂定的加權平均法公式將彩色影像灰階化，公式中三原色的權重係數依據人眼對該顏色的感光程度而設計，反映出人眼對綠色的感光度最敏感，對藍色最不敏感。

$$f(x, y) = \frac{R(x, y) + G(x, y) + B(x, y)}{3} \quad (3.8)$$

$$f(x, y) = 0.299 \times R(x, y) + 0.578 \times G(x, y) + 0.144 \times B(x, y) \quad (3.9)$$

其中 x, y 為影像二維座標，函數 f, R, G, B 分別為二維影像座標 (x, y) 的灰階值、紅色亮度值、綠色亮度值、藍色亮度值，在此採用 256 個級度分類灰階值，則其範圍皆介於 0 至 255 之間，數值對應之

亮度由暗到亮。

(四) 平均灰階值計算

接著透過對 ROI 中的圖元作灰階值的統計，則可以得到該影像 ROI 中的灰階值分佈，繪製成影像直方圖(如圖 5.1 所示)，加總圖元的灰階值得到總灰階值，再除以圖元的總數量可得到其平均灰階值，平均灰階值的計算公式如下，

$$\bar{f}(t) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y, t)}{MN} \quad (3.10)$$

其中 t 為以秒為單位的時間， $\bar{f}(t)$ 為影像平均灰階值， M 為 ROI 中影像二維座標 x 方向圖元數量， N 為 y 座標方向圖元數量。又時間與幀數的關係式為

$$t = n \times \frac{1}{fps} \quad (3.11)$$

式中 t 為以秒為單位的時間， n 為影像幀數， fps 為幀率，單位為幀數/秒。

以發生於南投縣神木村愛玉子溪的土石流事件影片為例，定義 ROI 後(圖 3.24(b)中的紅框)，透過對影片作灰階值統計分析，繪製該場事件灰階值分佈隨時間變化圖(圖 3.24(a))，而灰階值分佈隨時間變化圖的時間剖面即為該時間點的影像直方圖。由人眼判釋土石流事件於影片第 25 秒時即將進入 ROI 區域，平均灰階值由第 25 秒的 109.835 下降至第 39 秒的 88.483，表示當土石流進入影像時，前鋒夾雜泥水和巨石，使得影像畫面變暗，而後大量泥水進入河道，水面反光使得平均灰階值攀升。

(a)

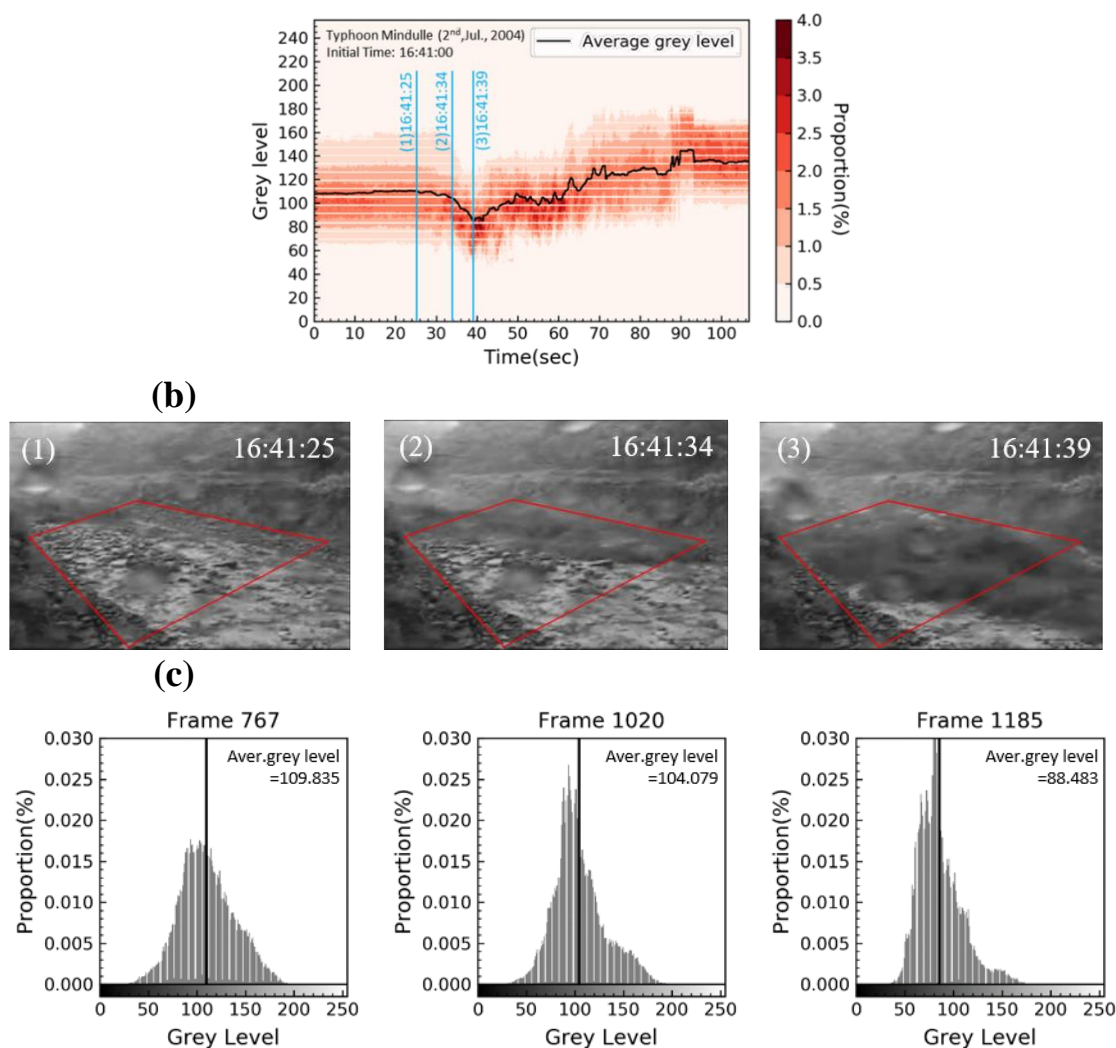


圖 3.24 2004 年 7 月 2 日愛玉子溪土石流之影像灰階值分佈隨時間變化圖，(a)ROI 中影像灰階值分佈隨時間變化圖，(b)與(c)分別為(a)上三個時間點之原始影像以及灰階值分佈圖。

在圖 3.24 中，灰階值分佈圖之橫坐標採用 256 色之灰階值，座標軸旁繪有該灰階值於影像中相對應的亮度，縱軸為 ROI 影像中該灰階值的像數量佔總圖元量的比例，黑色垂直線代表 ROI 平均灰階值的位置；(1)土石流前鋒尚未進入 ROI，影像平均灰階值為 109.835，(2)土石流前鋒到達 ROI 中心處，影像平均灰階值為 104.079，(3)土石流前鋒通過 ROI 下游邊界，影像平均灰階值為 88.483。

影像的平均亮度值受環境亮度(如天氣、晝夜)和河道流況所影響，拍攝每張影像的當下，環境亮度值都不同，因此若以平均亮度值改變量

當作偵測事件的指標因數時，沒有一個固定的基準值，但我們能知道在任何事件發生之前，河道的流況是穩態的或變化緩慢的，所以平均亮度值在長時間的週期內應保持相近的數值，相反的，當事件發生時的灰階值變化相對於環境亮度改變來的劇烈且快速，因此可使用河道流況為穩態情況下的灰階值變化速率，做為事件偵測的基準。

(四) 資料平均

土石流事件發生前，平均灰階值曲線應保持相近的數值，但圖 3.24 的平均灰階值曲線上卻存在著微小且快速變化的波動，這是由隨時間變化的環境亮度所造成的雜訊，此種高頻擾動所造成的不規則脈衝會影響後續的數據處理，為了消除短期波動，突出當下平均灰階值在時間上的趨勢，應用中心移動平均法的概念於此，以第 t 秒(第 n 幀)的數據為中心，以該數據左右相同數量的數據點建立一個數據集，並透過向前位移改變數據集。

$$\bar{f}(t) = \frac{\sum_{i=-\frac{(m-1)}{2}}^{\frac{(m-1)}{2}} \bar{f}(t+i\Delta t)}{m} \quad (3.12)$$

其中 $\bar{f}(t)$ 為雜訊平均後的平均灰階值， $\bar{f}(t)$ 為第 t 秒時的平均灰階值， Δt 為每兩幀影像之間的時間間隔，即為單位時間， ΔT 為中央平均移動法之延時，單位為秒， m 為在延時 ΔT 中，中央平均移動法之延時所包含的數據長度，單位為幀，其兩者之關係為

$$\Delta T = m\Delta t$$

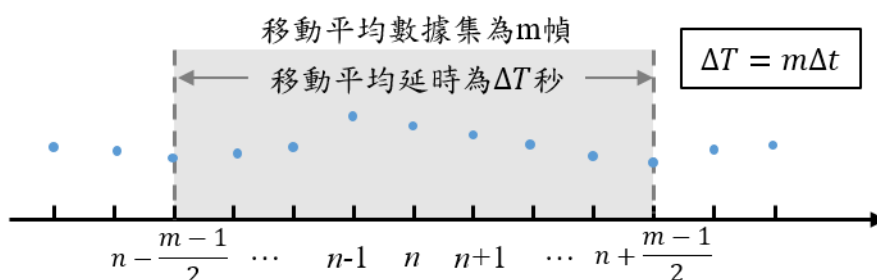


圖 3.25 中央平均移動法示意圖

(五) 計算斜率

在即時偵測的情況下，能得到的是過去以及現在的資料，以向後差分法(RAO 2002)計算平均灰階值的改變速率，即是灰階值隨時間變化之斜率，向後差分公式如下，

$$S(t) = \frac{3\bar{f}(t) - 4\bar{f}(t - \Delta t) + \bar{f}(t - 2\Delta t)}{2\Delta t} \quad (3.13)$$

其中 $S(t)$ 為第 t 秒的灰階值改變速率，單位元元為灰階值差值/秒， Δt 為單位時間， $\bar{f}(t)$ 為第 t 秒經由資料平均後的平均灰階值。

三、土石流前鋒之偵測條件

偵測土石流前鋒門檻值之建立，依據土石流發生時的平均灰階值變化相對於環境亮度改變來的劇烈且快速之特性，以平均灰階值變化率做為偵測事件的指標因數，使用河道流況為穩態情況下的灰階值變化速率，做為事件偵測的基準，當平均灰階值的改變速率大於環境亮度改變速率一個量級，則視為事件的發生。然而，環境亮度值會隨時間改變，若以傳統固定式門檻值偵測土石流事件，則容易造成誤警或未警的情況，故在此使用浮動式門檻值，以因應環境亮度的改變而自動更新數值。浮動式門檻值的計算為以每動態 dt 秒的平均灰階值斜率最大值 S_n ，即為環境雜訊在這段時間變化的最大範圍，乘上一個倍率 α 作為後續偵測土石流前鋒的參考值，即門檻值為兩倍、五倍或十倍之環境雜訊，關於 α 之使用倍率，會於第五章節現地影片分析討論。

除了影像空間上的偵測條件外，再加入土石流特性於時間因數的考量(持續一段時間)，例如斜率值大於門檻值須連續 10 個點，目的為排除瞬間但劇烈的灰階值差異事件，但是在土石流事件發生時，偶爾伴隨著泥水翻騰之景象，使得影像時暗時亮，導致無法滿足斜率值大於門檻值連續多個點之條件，因此對平均灰階值改變速率做區域峰值的判釋，當區域峰值連續大於門檻值 2 秒，即判釋為事件的發生。

假設在時間 t_0 時，平均亮度變化率 $S(t_0)$ 大於 α 倍的環境亮度變化率 S_n ，則視為事件的發生，其中環境亮度變化率 S_n 的量測時間介於 $t_0 - 2dt$ 至 $t_0 - dt$ ，並以該時間區間之最大值作為參考值，因此可將偵測事件的條件式寫為下式

$$S(t_0) > \alpha \cdot S_n \quad (3.14)$$

$$S_n = \max\{S(t) , t_0 - 2dt < t < t_0 - dt\}$$

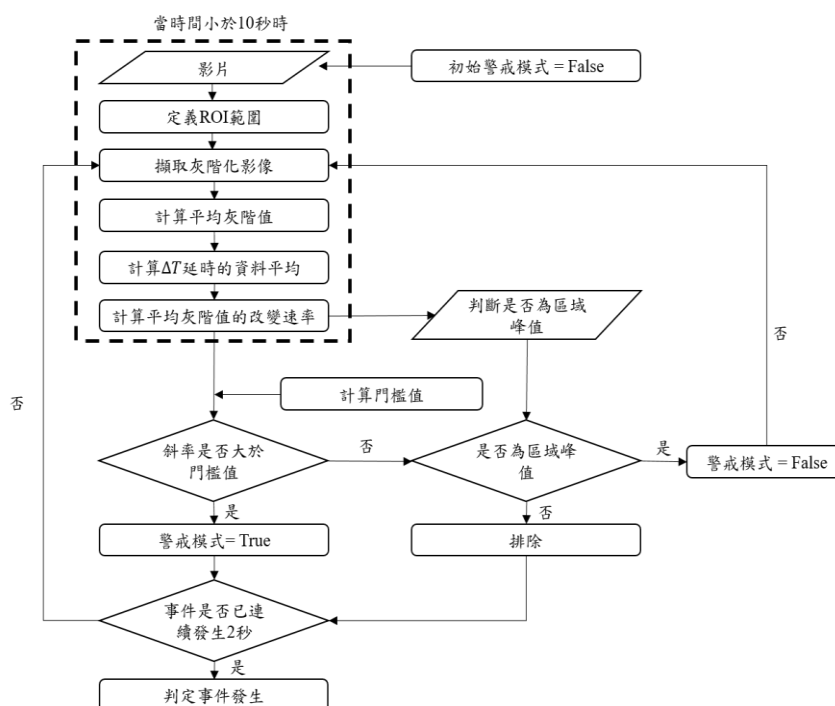


圖 3.26 偵測土石流事件之流程圖

四、室內實驗測試

室內試驗的詳細設計與規格請見附錄一。實驗組數總共為三組，依照三次實驗時間的先後順序，將三次實驗簡稱為實驗 1、2、3，三次實驗中使用固定坡度 24 度，以流量計控制流量，實驗流量分別為 0.002、0.002、0.0175m³/s，其中於實驗 1 之底床鋪設，少了覆蓋於大顆粒表層的小顆粒。當閘門開啟，料源由水槽上方自由落下，料源需要一些時間達到完全發展，因此定義相機 1 影像 ROI 於水槽 3.4 公尺至 4.7 公尺，定義相機 2 影像 ROI 於水槽 0.8 公尺至 2.1 公尺，以捕捉明顯之前

鋒影像。所有 ROI 的尺寸均為 1.3 公尺長、0.6 公尺寬，但因為攝影機 1、2 拍攝角度的不同，則圖元解析度不同。

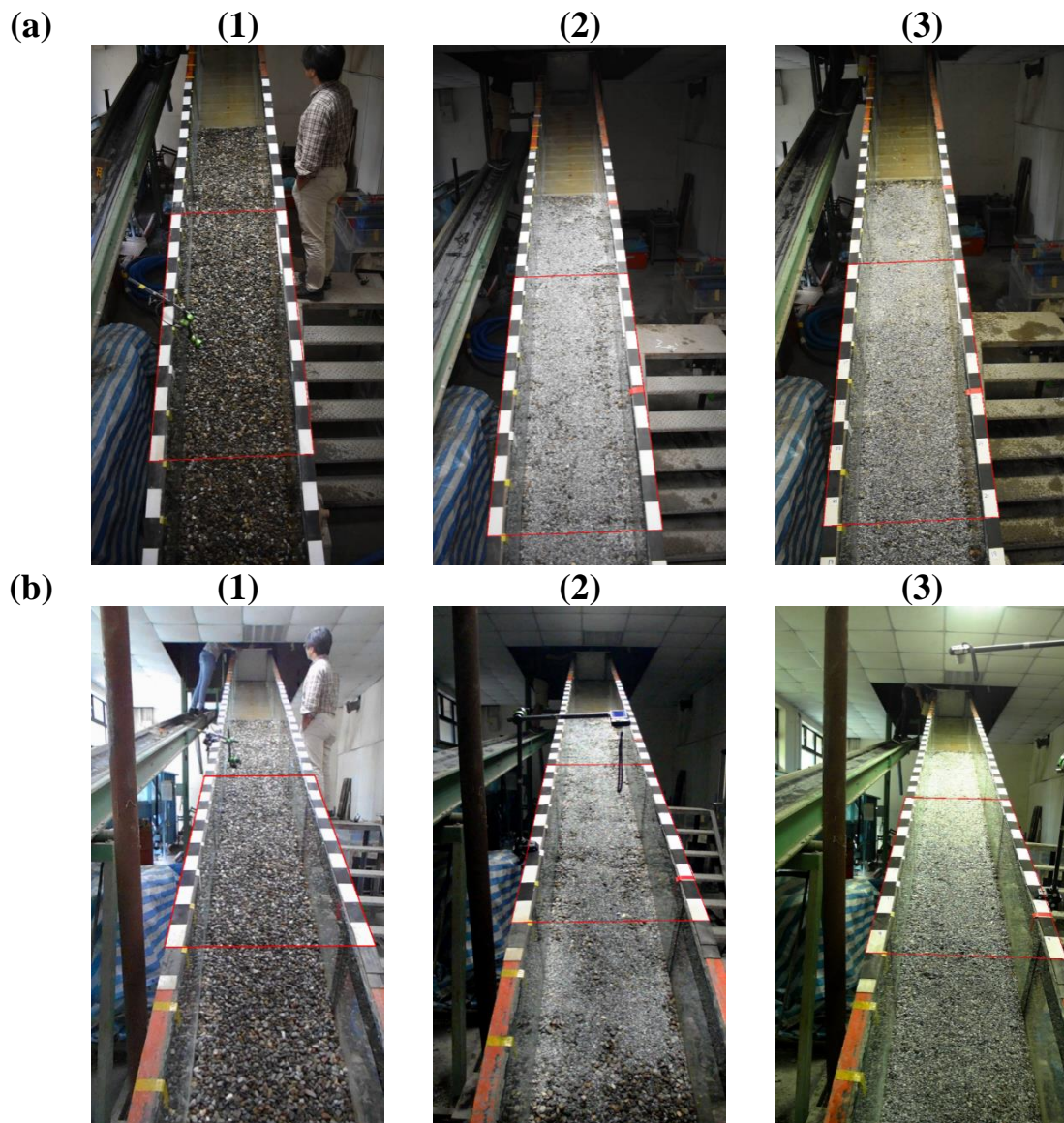


圖 3.27 實驗水槽以及 ROI 位置圖；(a)(b)分別為攝影機 1、2 之影像畫面，(1)(2)(3)分別為實驗 1、2、3

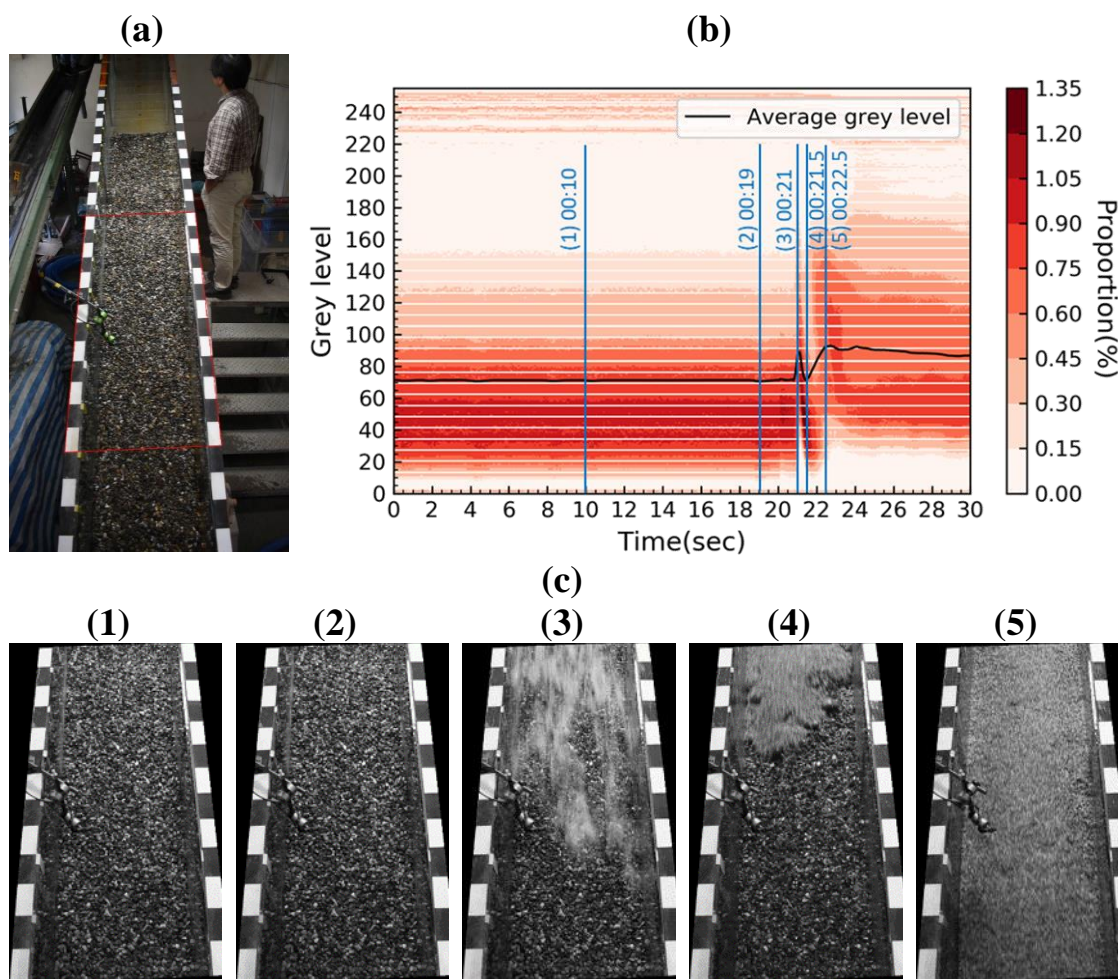


圖 3.28 實驗 1 之影片說明(攝影機 1)；實驗一的底床鋪設少鋪了表層的小顆粒，當土石流流經時與大顆粒砂石間的摩擦力較大，因此在影片後段土石流流動近乎停止。開啟閘門後，水花較土石流前鋒更早進入影像畫面中圖 5.23(c)(3)。(a) ROI 位置(b)ROI 中灰階值分佈隨時間變化(c)為(a)中五個時間點所相對應之影像畫面。

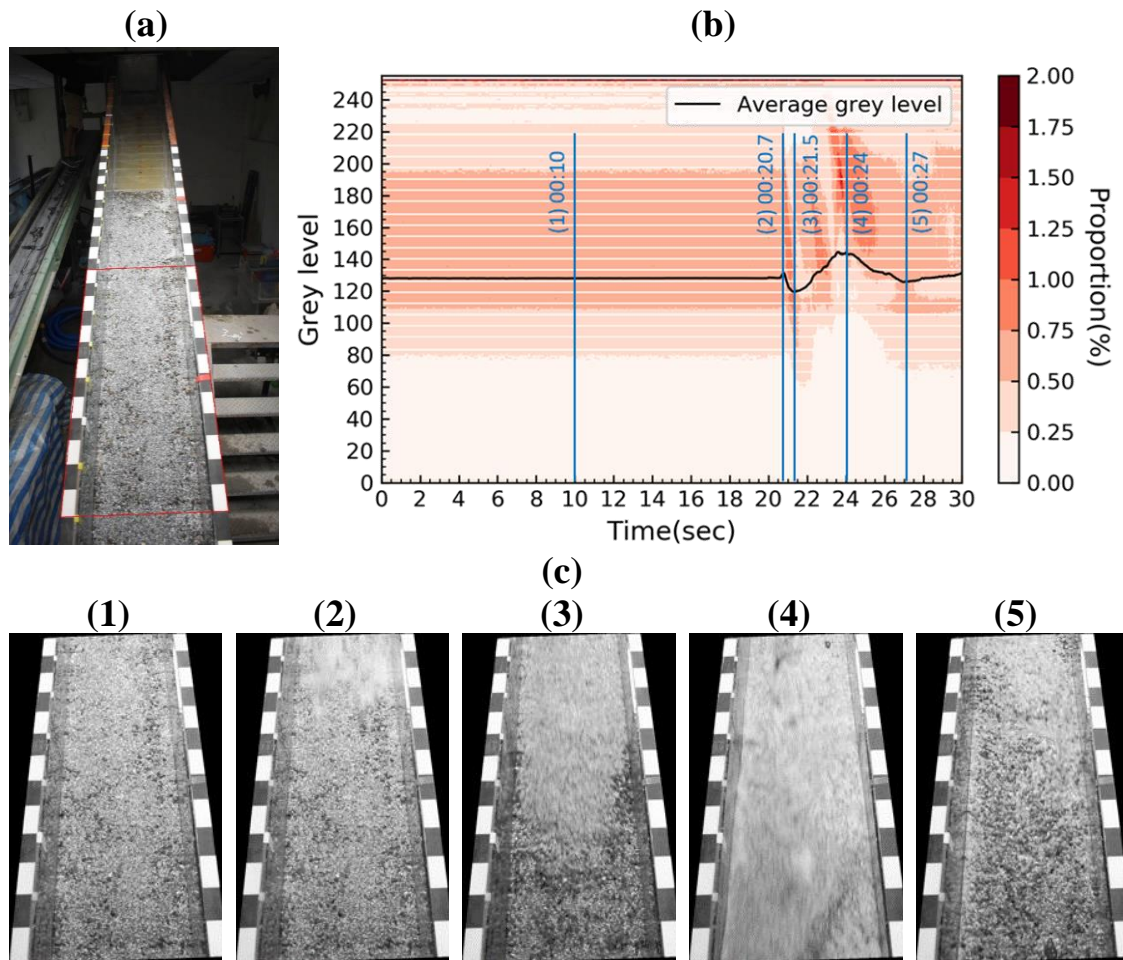


圖 3.29 實驗 2 之影片說明(攝影機 1)；閘門開啟後，水花較前峰更早進入影像中，相較於實驗 1 與 3，此次實驗之前鋒較不明顯，實驗後期有大量水進入畫面。

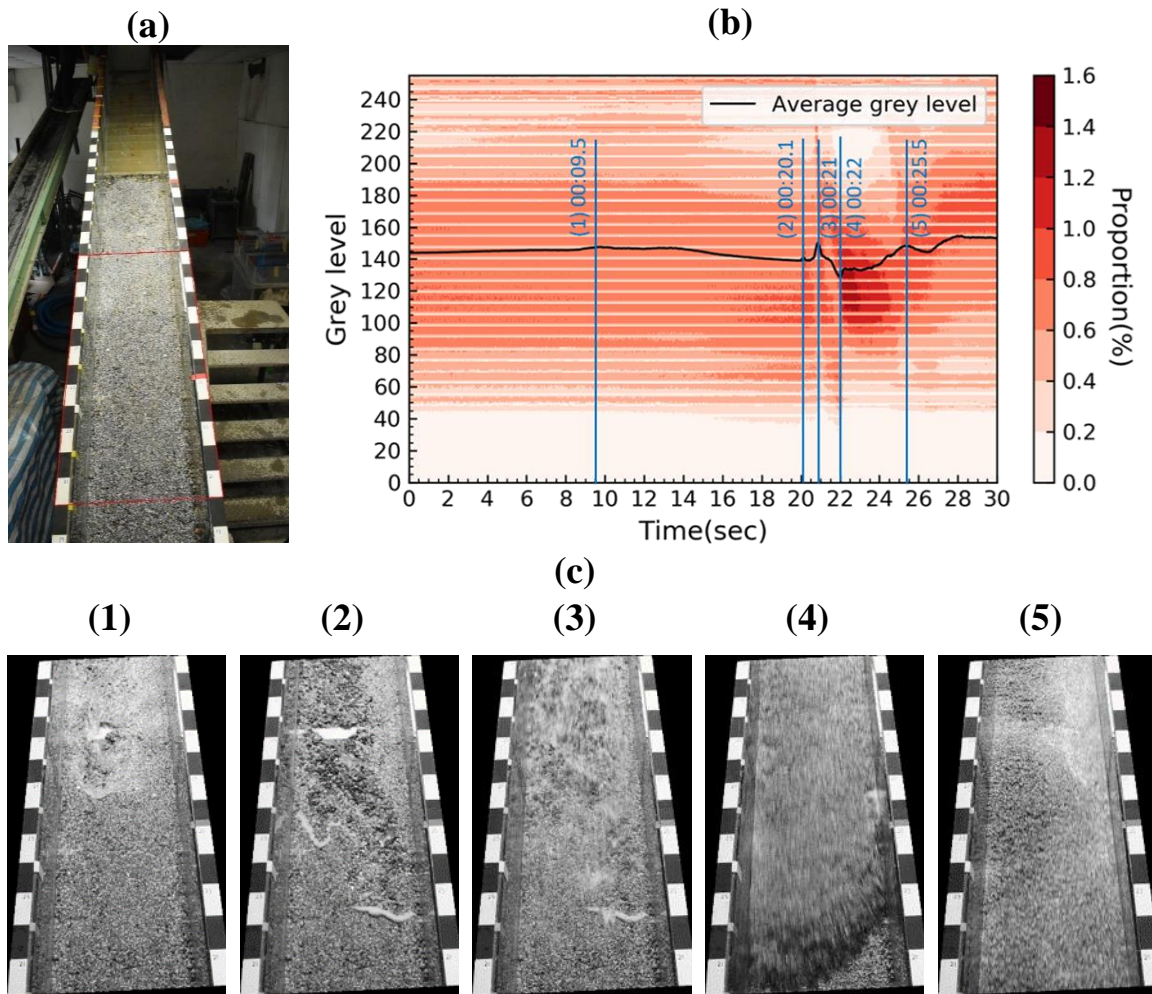


圖 3.30 實驗 3 之影片說明(攝影機 1)；在閘門開啟前，水由水槽上游溢出，導致部分表層小粒徑砂石被沖刷圖 3.25(c)(2)。

實驗影片時間長度均為 30 秒，資料平均之時間延時 $\Delta T = 1$ 秒，在影片幀率為 30、5、2 的情況下，即表示分別以 31 筆、6 筆、3 筆資料計算資料平均值；計算環境雜訊斜率最大值之時間區間為 5 秒，門檻值為兩倍環境斜率最大值，偵測事件的時間連續條件為 1 秒鐘。

表 3.4 總灰階值法應用於實驗二前鋒偵測之偵測時間

	實驗	幀率(fps)			判釋時間(sec)
		30	5	2	
攝影機 1	1	23.03 (晚 2.266 秒)	22.4 (晚 1.633 秒)	23 (晚 2.233 秒)	20.77
	2	21.47 (晚 0.9 秒)	21.4 (晚 0.833 秒)	22 (晚 1.433 秒)	20.57
	3	22.4 (晚 1.8 秒)	22.2 (晚 1.6 秒)	11.5 (早 9.1 秒)	20.6
攝影機 2	1	22.3 (晚 2.333 秒)	21.4 (晚 1.433 秒)	22 (晚 2.033 秒)	19.97
	2	21.2 (晚 1.2 秒)	21.2 (晚 1.2 秒)	22.5 (晚 2.5 秒)	20
	3	11.5 (晚 3.6 秒)	11.6 (晚 3.7 秒)	12 (晚 4.1 秒)	7.9

五、現地影像偵測抵達時間

為了應用總灰階值法偵測土石流前鋒於現場土石流事件，以 2004 年敏督利颱風之影片進行測試，其原始影像之截圖如圖 3.31。以延時 ΔT 為 1 秒做資料平均，以兩倍的動態 10 秒環境雜訊斜率最大值做為偵測土石流前鋒之門檻值，並且滿足持續兩秒之偵測效果，其偵測結果如表 3.5。

表 3.5 總灰階值法應用於現地影像土石流前鋒偵測

幀率	偵測時間	
	有 ROI	無 ROI
30	36.73 (晚 11.17 秒)	37 (晚 33 秒)
5	37 (晚 11.43 秒)	37 (晚 33 秒)
2	37 (晚 11.43 秒)	37 (晚 33 秒)

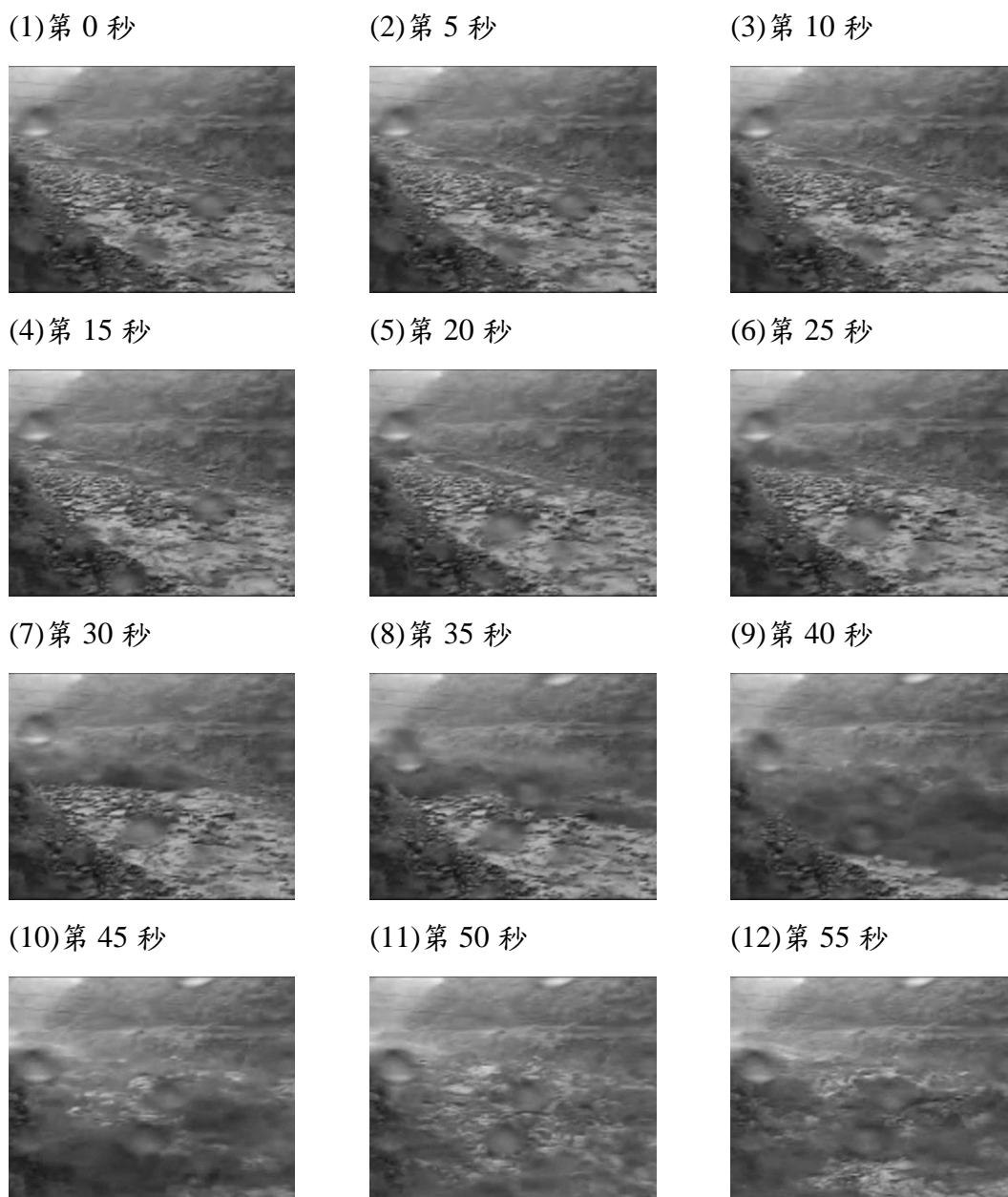


圖 3.31 案例 1 隨時間變化之影像(以時間間隔 5 秒擷取影像畫面)

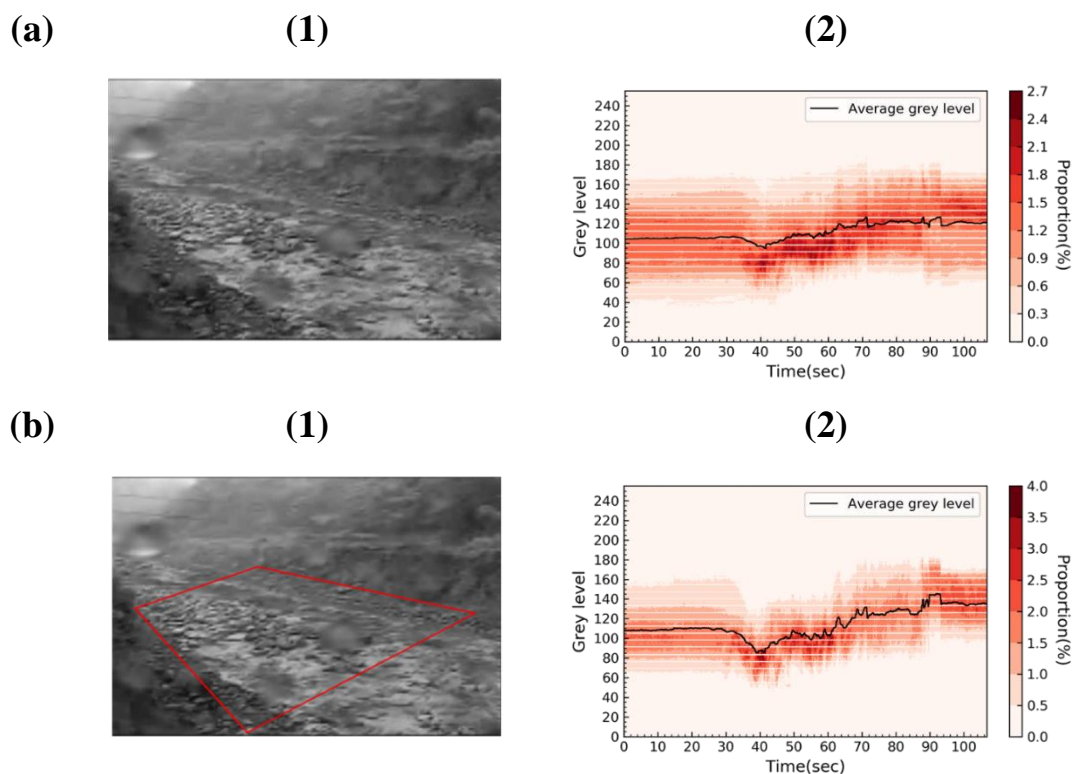


圖 3.32 比較選取 ROI 與否之影像和灰階值隨時間變化圖

圖 3.32(a)無定義 ROI 之情況，灰階值分佈介於 95 至 125 之間；
 (b)為定義 ROI 之情況，灰階值分佈介於 80 至 140 之間。

現地影片時間長度為 1 分 46 秒，資料平均之時間延時 $\Delta T = 1$ 秒；
 計算環境雜訊斜率最大値之時間區間為 10 秒，門檻值為兩倍、五倍、
 時被環境斜率最大値，偵測事件的時間連續條件為 2 秒鐘。

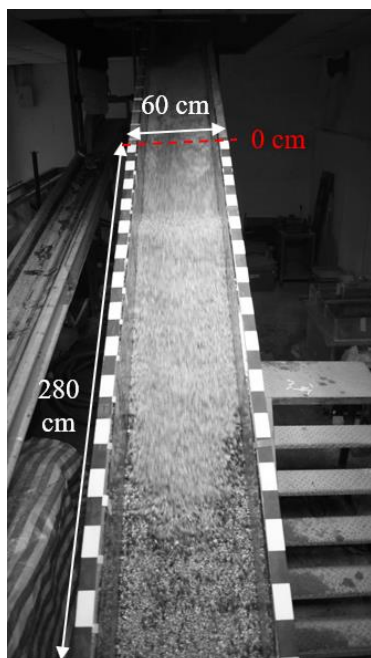
六、流速估算方法

為了應用前述之偵測方法於土石流流速的估算，本計畫在河道中流向方向定義兩個矩形的 ROI，則兩個 ROI 偵測到土石離到達的時間，就是土石流前鋒流過兩個 ROI 間距離的時間，因此可以簡單的計算出土石流的流速，以此簡單的 ROI 即可計算出某方向的整體平均流速。

(一) 室內水槽試驗測試

首先，本計畫先透過式內的水槽試驗進行測試，為了取得水槽流向方向之距離比例尺，本研究在水槽兩側設置黑白相間的比例尺，每一單位為 10 公分，定義比例尺於上游起始點為 0 公分處，於水槽中連續繪製七個 ROI，尺寸為長 40 公分、寬 60 公分的矩形，ROI 之間不重疊，每兩個 ROI 之上游邊界相距 40 公分，如圖 3.28，每個 ROI 的偵測時間結果則整理如表 5.4。

(1)



(2)

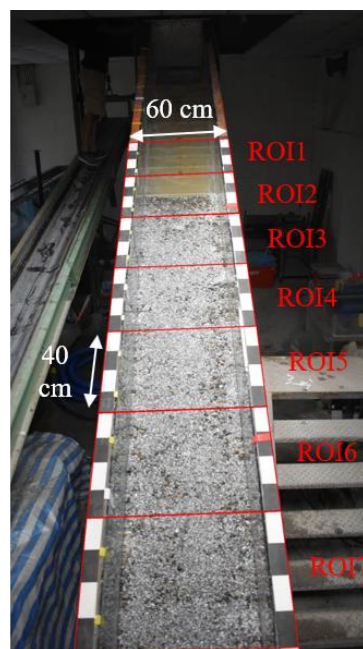


圖 3.33 ROI 的選取；(1)影像可拍攝的水槽範圍，長為 280 公分，寬為 60 公分；(2)以尺寸長 40 公分、寬 60 公分連續選取七個不重疊的 ROI。

表 3.6 室內水槽試驗以多 ROI 計算平均流速

	影像偵測時間(秒)	人眼判釋時間(秒)	比較結果
ROI1	20.7	20.167	晚 0.533 秒
ROI2	20.833	20.300	晚 0.533 秒
ROI3	20.967	20.433	晚 0.534 秒
ROI4	21.1	20.533	晚 0.567 秒
ROI5	21.2	20.650	晚 0.550 秒
ROI6	21.267	20.733	晚 0.534 秒

表 3.6 中的偵測時間與判釋時間之過程則簡述如下：

- (1) 偵測時間：數據處理上，使用時間平均 $\Delta T = 1$ 秒做數據的平均，以 5 秒為時間區間計算最大環境亮度斜率值 S_n ，並以 5 倍的 S_n (即 $\alpha = 5$)作為門檻值所偵測事件的時間。
- (2) 判釋時間：以影像判釋前峰接觸到 ROI 上游的時間。
- (3) 括弧內的時間為偵測時間與判釋時間的時間差，即為誤差時間。

由表 3.6 數據可見偵測時間與判釋時間的誤差介於 0.5 秒至 0.6 秒之間；比較七個 ROI 之事件未發生、偵測到事件發生、前鋒進入 ROI 三個時間點之影像，以水花進入 ROI1 與 ROI6 的時間差和距離差計算水花的速度約為

$$V_{\text{偵測}} = \frac{200 - 0}{21.267 - 20.7} = 352.734(\text{cm/sec})$$

$$V_{\text{判釋}} = \frac{200 - 0}{20.733 - 20.167} = 353.357(\text{cm/sec})$$

誤差只有 0.2%。

(二)現場影片測試

與前節相同，本計畫採用愛玉子溪的敏督利颱風之土石流影片來做分析。敏督利颱風影片時間總長為 106 秒，幀率為 30，我們以該影片測試以多 ROI 計算流速，但是因為沒有現場比例尺，因此將以圖元為單位元去比較。現場影片的上游與下游分別畫出兩個 ROI，如圖 3.34 與 3.35。

由於本計畫的測試過程中，發現當門檻值為 2 倍時的結果為最佳，因此本計畫將採用門檻值倍率為 2 倍的情況做分析。其各 ROI 之偵測時間結果則如表 3.7。



圖 3.34 愛玉子溪敏督利颱風影片中上下游兩個 ROI 位置

(1)



(2)



圖 3.35 土石流前鋒接觸 ROI 上游邊界之影像；(1)ROI1 之影像，時間為 22.2 秒 (2)ROI2 之影像，時間為 25.867 秒

表 3.7 偵測結果與計算流速

幀率	門檻倍率	偵測時間(秒)		ROI 間的偵測時差(秒)	流速(畫素/秒)
		ROI1	ROI2		
5	2	31.4(晚 9.2 秒)	35(晚 9.133)	3.6	43.98
2	2	32(晚 9.8 秒)	33(晚 7.133)	1	153.8
人判釋(秒)		22.2	25.867	3.667	43.16

在偵測過程中，因為不知道現場的比例尺，因此此案例中的速度是以畫素除以時間來計算，實際應用上，若可事先量測現場之比例尺，即可算出真實流速。

在表 3.7 中，兩個 ROI 間距離為 158 畫素，除以時間可得以人眼判視速度為，與用每秒 5 幀影像獲得的速度只有 1.7% 的差別，但在每秒 2 幀影像的情況下，誤差則會達到 300%，因此未來應用於現場流速計算，至少需要每秒有五幀的畫面。

第三節 大顆粒流速

在土石流流動時，有時候會有極大顆的巨石跟著流動，這些巨石對下游造成莫大的威脅，在理論上，巨石的行為與土石流本身也是分開考慮，其物理特性與土石流本身流況並沒有絕對關係，因此若有這種巨石，最好能從影響中萃取出來，並給予警示。

因為要萃取的巨石是與比土石流中平均粒徑大許多，因此本研究採取快速的估算法，以下先以單一顆粒來展示整個分析原理，然後展示多顆粒徑與現場有巨石時的分析結果

一、單一方形顆粒的快速萃取

假設在經過影像前處理後得到一幅二值化影像中，在時間 t 時僅存在單一任意形狀顆粒，且顆粒邊界 S 在極短時間內形狀保持不變僅產生位置改變，該影像共由 $M \times N$ 圖元(pixel)所組成的影像，令影像座標的原點在左上角， x 軸正方向為水準向右， y 軸正方向為垂直向下，顆粒在 x 方向與 y 方向的最大長度分別為 L_x 與 L_y 個圖元，該顆粒之亮度值為 1，背景亮度值為 0，如圖 3.36 所示。

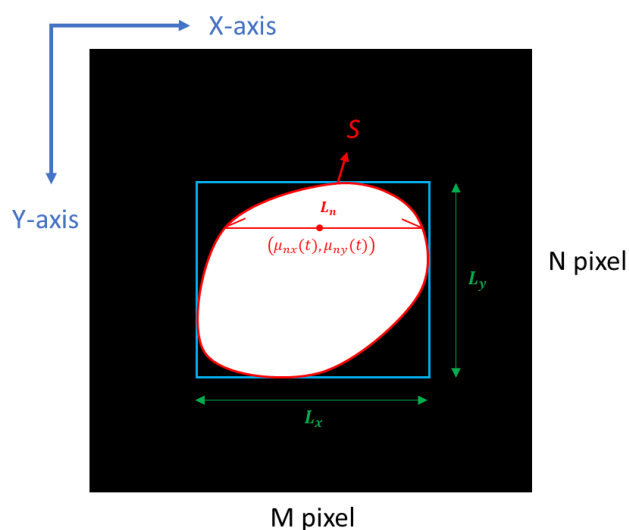


圖 3.36 單一顆粒之二值化影像

令單一顆粒之二值化影像 $I(x, y, t)$ 表示為式(3.15)

$$I(x, y, t) = \begin{cases} 1 & , in S \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (3.15)$$

二、一維陣列轉換

在數位元元影像中，灰階影像一般以二維矩陣的方式被儲存在裝置中，矩陣中每位置的稱作圖元，圖元的數值代表灰階影像的亮度值，為了快速萃取影像中的顆粒，本研究嘗試將二維影像矩陣 $I(x, y, t)$ 轉換為一維陣列 $f(x, t)$ 。

轉換的方式為將二維矩陣重新排列成一維陣列，根據數據讀取方向的不同可分為沿 x 軸方向的水準取出與沿 y 軸方向的垂直取出。今以水準取出為例，將 $I(x, y, t)$ 之數據沿影像座標系 x 軸方向逐列(row)取出後，依照取出的順序將每列前後頭尾相接排序成一維陣列，令得到的一維陣列為 $f(x, t)$ ，其排列方式如下

$$f(x, t) = \{I(1, 1, t), I(2, 1, t), \dots, I(M, 1, t), \\ I(1, 2, t), I(2, 2, t), \dots, I(M, 2, t), \\ \vdots \\ I(1, N, t), I(2, N, t), \dots, I(M, N, t)\}$$

其中 $I(1, 1, t)$ 為影像中第一行第一列之圖元的亮度值，沿水準方向之一維陣列轉換如圖 3-32；若改沿 y 軸方向垂直取出，則排列方式為

$$f(x, t) = \{I(1, 1, t), I(1, 2, t), \dots, I(1, M, t), \\ I(2, 1, t), I(2, 2, t), \dots, I(2, M, t), \\ \vdots \\ I(N, 1, t), I(N, 2, t), \dots, I(N, M, t)\}$$

沿水準與垂直方向之一維陣列與二維矩陣之關係，分別可由式 (3.16) 與式 (3.17) 來描述，其示意圖如 3.37。

$$I(x, y, t) = f(x + (y-1) \times M, t) \quad (3.16)$$

$$I(x, y, t) = f((x-1) \times N + y, t) \quad (3.17)$$

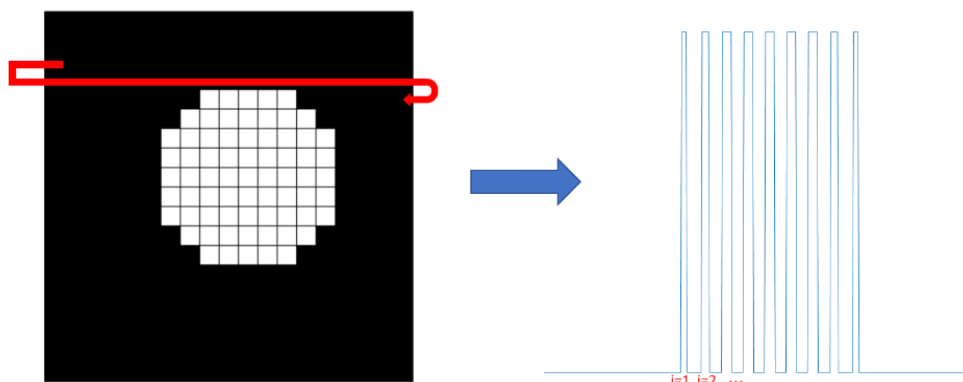


圖 3.37 沿水準方向之一維陣列轉換示意圖

今將一幅二值化影像從原本的二維矩陣 $I(x, y, t)$ 沿 x 軸水準方向轉換成一維陣列 $f(x, t)$ ， $f(x, t)$ 為許多個不同寬度、不同中心的矩形函數 (Rectangular Function) 總和，其表示為式(3.18)

$$f(x, t) = \sum_{n=1}^{L_y} h\left(x - \Delta x \left(\mu_n(t) + \frac{L_n}{2}\right)\right) - h\left(x - \Delta x \left(\mu_n(t) - \frac{L_n}{2}\right)\right) \quad (3.18)$$

$$\mu_n(t) = \mu_{nx}(t) + (\mu_{ny}(t) - 1) \times M \quad (3.19)$$

其中 $h(x)$ 為單位步階函數 (Heaviside function)； $\mu_n(t)$ 為顆粒內第 n 個矩形函數中心距離座標原點的圖元數， $\mu_{ny}(t)$ 與 $\mu_{nx}(t)$ 分別為在顆粒內第 n 個矩形函數中心的二維影像座標； L_n 為顆粒內第 n 個矩形函數之所占之圖元數， Δx 為每一個圖元在一維陣列轉換方向上的長度，單位為長度/pixel，在選擇水準方向的轉換時，在影像比例尺確定前先令 Δx 為 $\frac{1}{M}$ ，若選擇垂直方向轉換，則令 Δx 為 $\frac{1}{N}$ 。

三、傅立葉轉換

由式(3.18)可以觀察到二維影像在同行不同列的位置在一維陣列中相距 M 個間隔，因此顆粒的尺寸與位置的資訊在空間上將重複的以週期 M 出現，故本研究引入傅立葉轉換作為空間頻率分析的工具。本研究在分析過程中使用的傅立葉轉換偶為

$$\hat{f}(k, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-j2\pi kx} dx \quad (3.20)$$

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(k, t) e^{j2\pi kx} dk \quad (3.21)$$

其中變數 x 、 k 、 t 分別為空間、空間頻率(波數)及時間變數。

將式(3.18)代入式(3.20)，對 $f(x, t)$ 的空間變數 x 做傅立葉轉換

$$\begin{aligned}\hat{f}(k, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-j2\pi kx} dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{L_y} h\left(x - \Delta x \left(\mu_n(t) + \frac{L_n}{2}\right)\right) - h\left(x - \Delta x \left(\mu_n(t) - \frac{L_n}{2}\right)\right) e^{-j2\pi kx} dx \quad (3.22) \\ &= \sum_{n=1}^{L_y} e^{-j2\pi k \Delta x \mu_n(t)} \frac{\sin(\Delta x \pi L_n k)}{\pi k}\end{aligned}$$

由式(3.22)得到影像一維陣列 $f(x, t)$ 的頻率域表示式 $\hat{f}(k, t)$ ，令

$\hat{f}(k, t)$ 乘以 $2jk\pi$ 後對變數 k 再做一次傅立葉轉換，記為 $\hat{\hat{f}}(x, t)$ 。

$$\begin{aligned}\hat{\hat{f}}(x, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} 2jk\pi \times \hat{f}(k, t) e^{-j2\pi kx} dk \\ &= 2j \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{L_y} e^{-j2\pi k \Delta x \mu_n(t)} \sin(\pi \Delta x L_n k) e^{-j2\pi kx} dk \quad (3.23) \\ &= \sum_{n=1}^{L_y} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi k \Delta x (-x - \mu_n(t) + \frac{L_n}{2})} - e^{-j2\pi k \Delta x (x + \mu_n(t) + \frac{L_n}{2})} dk\end{aligned}$$

由傅立葉級數的概念可知，式(3.23)僅在 $x = \Delta x \left(-\mu_n + \frac{L_n}{2}\right)$ 與

$x = \Delta x \left(-\mu_n - \frac{L_n}{2}\right)$ 有值，故將 $\hat{\hat{f}}(x, t)$ 表示為

$$\hat{\hat{f}}(x, t) = \sum_{n=1}^{L_y} \delta\left(-x - \Delta x \left(\mu_n(t) - \frac{L_n}{2}\right)\right) - \delta\left(-x - \Delta x \left(\mu_n(t) + \frac{L_n}{2}\right)\right)$$

因 $\delta(x) = \delta(-x)$ ，故

$$\hat{\hat{f}}(x, t) = \sum_{n=1}^{L_y} \delta\left(x + \Delta x \left(\mu_n(t) - \frac{L_n}{2}\right)\right) - \delta\left(x + \Delta x \left(\mu_n(t) + \frac{L_n}{2}\right)\right) \quad (3.24)$$

其中 x 為變數 k 對應的頻率變數， $\delta(x)$ 為狄拉克脈衝函數(delta impulse function)。由式(3.24)可知脈衝函數之位置即為顆粒的邊界位置，透過將這些位在顆粒邊界的脈衝函數連結起來便能萃取顆粒的尺寸與位置，然而在實際情況中，影像中必然存在許多顆粒，使得分析顆粒邊界的工作變得困難。

四、互相關分析

影像中包含著運動中的顆粒以及靜止的背景，由於靜止的背景通

常佔了影像大部分的面積，為了去除背景對互相關分析的影響，將時間相鄰的兩幀影像做亮度值相減以消去背景並得到顆粒在兩幀之間的位置變化。

令時間 t_i 、 t_{i-1} 與 t_{i-2} 的二值化影像分別記為 $I(x, y, t_i)$ 、 $I(x, y, t_{i-1})$ 與 $I(x, y, t_{i-2})$ ，將時間相鄰的兩幀影像代入式後得到 $D(x, y, t_i)$ 與 $D(x, y, t_{i-1})$ ，其中

$$D(x, y, t_i) = I(x, y, t_i) - I(x, y, t_{i-1}) \quad (3.25)$$

其中 t_{i-1} 為 $t_i - \Delta t$ ， t_i 為當前時間； Δt 為兩幀影像間的時間差。

將時間相鄰的兩幀影像做亮度值相減消去背景並得到邊界在兩幀之間的位置變化。令 $f_x(x, t_i)$ 與 $f_x(x, t_{i-1})$ 相減並記做 $D_x(x, t_i)$

$$D_x(x, t_i) = f_x(x, t_i) - f_x(x, t_{i-1}) = \sum_{n=1}^P \delta(x - \Delta x \mu_n(t_i)) - \delta(x - \Delta x \mu_n(t_{i-1}))$$

若兩幀影像間的時間差 Δt 極小時，假設邊界在極短時間 Δt 的運動近似於等速度運動，故將 $\mu_n(t_{i-1})$ 表示為 $\mu_n(t_{i-1}) = \mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t$ ，則

$$D_x(x, t_i)$$

$$D_x(x, t_i) = \sum_{n=1}^P \delta(x - \Delta x \mu_n(t_i)) - \delta(x - \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t])$$

$$D_x(x, t_{i-1}) = \sum_{n=1}^P \delta(x - \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t]) - \delta(x - \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t])$$

其中 $\dot{\mu}_n(t_i)$ 為

$$\dot{\mu}_n(t_i) = \dot{\mu}_{n,x}(t) + M \times \dot{\mu}_{n,y}(t) \quad (3.26)$$

其中 $\dot{\mu}_{n,x}(t)$ 為第 n 個邊界的水準速度； $\dot{\mu}_{n,y}(t)$ 為第 n 個邊界的垂直速度。

為了得到邊界的速度 $\dot{\mu}_n(t_i)$ ，利用脈衝函數 $\delta(x)$ 僅在一個點有定義的特性，將 $D_x(x, t_i)$ 與 $D_x(x, t_{i-1})$ 對變數 x 做互相關運算記做 $C_x(x, t_i)$

$$C_x(x, t_i) = D_x(x, t_{i-1}) \otimes D_x(x, t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{D_x(s, t_{i-1})} D_x(s+x, t_i) ds$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left[\sum_{n=1}^P \delta(s - \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t]) - \delta(s - \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t]) \right] \times \left[\sum_{m=1}^P \delta(s+x - \Delta x \mu_m(t_i)) - \delta(s+x - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t]) \right] \right\} ds$$

其中 \otimes 為互相關運算元； $D_x(x, t_i)$ 的 $\sum_{n=1}^P \delta(x - \Delta x \mu_n(t_i))$ 與 $D_x(x, t_{i-1})$ 的

互相關為

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^P \delta(s - \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t]) \times \left[\sum_{m=1}^P \delta(s+x - \Delta x \mu_m(t_i)) - \delta(s+x - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t]) \right] \right\} ds$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^P \sum_{n=1}^P \delta(s - \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t]) \delta(s+x - \Delta x \mu_m(t_i)) - \delta(s+x - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t]) ds$$

$$= \sum_{m=1}^P \sum_{n=1}^P \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x \mu_m(t_i)) - \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t])$$

同理， $D_x(x, t_i)$ 的 $\sum_{n=1}^P \delta(x - \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t])$ 與 $D_x(x, t_{i-1})$ 的互相關

為

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^P \delta(x - \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t]) \times \left[\sum_{m=1}^P \delta(s+x - \Delta x \mu_m(t_i)) - \delta(s+x - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t]) \right] \right\} ds$$

$$= \sum_{m=1}^P \sum_{n=1}^P \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x \mu_m(t_i)) - \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t])$$

將上述兩式合併，可得 $C_x(x, t_i)$ 為

$$C_x(x, t_i) = \sum_{m=1}^P \sum_{n=1}^P \left\{ \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x \mu_m(t_i)) - \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t]) \right. \\ \left. - \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x \mu_m(t_i)) + \delta(x + \Delta x [\mu_n(t_i) - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta t] - \Delta x [\mu_m(t_i) - \dot{\mu}_m(t_i) \Delta t]) \right\}$$

當 $n=m$ 時，代表在互相關運算中 t_i 與 t_{i-1} 兩不同時刻的邊界重合，

則此時會有最相關， $C_x(x, t_i)|_{n=m}$ 便可表示為

$$C_x(x, t_i)|_{n=m} = \sum_{n=1}^P 2\delta(x - \dot{\mu}_n(t_i) \Delta x \Delta t) - \delta(x) - \delta(x - 2\dot{\mu}_n(t_i) \Delta x \Delta t) \quad (3.27)$$

由上式可知互相關最大值 $C_x(x_{\max}, t_i)$ 為 $\sum_{n=1}^P 2\delta(x - \dot{\mu}_n(t_i)\Delta x\Delta t)$ ，而互相關最大值發生在 $x_{\max}(t_i) = \dot{\mu}_n(t_i)\Delta x\Delta t$ ，代入式(3.27)可得

$$\frac{x_{\max}(t_i)}{\Delta x\Delta t} = \dot{\mu}_n(t_i) = \dot{\mu}_{n,x}(t) + M \times \dot{\mu}_{n,y}(t) \quad (3.28)$$

今若改以垂直方向將影像轉換成一維陣列，會有類似的結論

$$\frac{x_{\max}(t_i)}{\Delta y\Delta t} = \dot{\mu}_n(t_i) = N \times \dot{\mu}_{n,x}(t) + \dot{\mu}_{n,y}(t) \quad (3.29)$$

求解聯立方程式式(3.28)與式(3.29)便可算得 $\dot{\mu}_{n,x}(t)$ 與 $\dot{\mu}_{n,y}(t)$ 。當式(3.28)與式(3.29)分別來自不同的顆粒邊界時，聯立方程組為無解。式(3.28)中 M 為被分析的二值化影像在水準方向的尺寸，以解析度 720p 的攝影機為例，720p 的攝影機之影像解析度為 $1280 \text{ pixel} \times 720 \text{ pixel}$ ，此時 M 與 N 分別為個 1280 與 720。由於 $O(M) \gg 1$ ，故將式()近似為

$$x_{\max} = [\dot{\mu}_{n,x}(t) + M \times \dot{\mu}_{n,y}(t)] \Delta t \Delta x \approx \dot{\mu}_{n,y}(t) \times M \Delta t \Delta x$$

$$\dot{\mu}_{n,y}(t) \approx \frac{x_{\max}}{M \Delta t \Delta x} \quad (3.30)$$

若以式(3.30)估計顆粒在垂直方向的速度 $\dot{\mu}_{n,y}(t)$ ，造成的誤差來自於忽略顆粒的水準速度 $\dot{\mu}_{n,x}(t)$ ，而顆粒的水準速度 $\dot{\mu}_{n,x}(t)$ 最大值為在 Δt 內通過整個影像，即顆粒的水準速度理論最大值 $\dot{\mu}_{n,x}(t)|_{\max}$ 為 M ，故理論最大誤差為

$$\left| \frac{\dot{\mu}_{n,x}(t)|_{\max}}{M} \right| = \left| \frac{\pm M}{M} \right| = 1.$$

故以式(3.30)估計顆粒在垂直方向速度 $\dot{\mu}_{n,y}(t)$ 所造成的理論最大誤差為每幀 ± 1 個圖元，若以百分比表示理論最大誤差 E_{\max} 則可寫成

$$|E_{\max}| = \left| \frac{1}{\dot{\mu}_{n,y}(t)} \right| \times 100\% \quad (3.31)$$

同理，由式(3.29)可得

$$\dot{\mu}_{n,x}(t) \approx \frac{y_{\max}}{N\Delta t\Delta y} \quad (3.32)$$

$$\left| \frac{\dot{\mu}_{n,y}(t)|_{\max}}{N} \right| = \left| \frac{\pm N}{N} \right| = 1.$$

$$|E_{\max}| = \left| \frac{1}{\dot{\mu}_{n,x}(t)} \right| \times 100\% \quad (3.33)$$

由式(3.31)與式(3.33)可知，估計的速度與誤差百分比呈現反比的關係。

$C_x(x, t_i)$ 中每個 x 代表不同的速度； $C_x(x, t_i)$ 的值代表以速度 x 移動的點的總數量，即每個點有各自的速度，若將點以速度分類，在不同速度下的點數量即為 $C_x(x, t_i)$ ，因此互相關最大值的位置代表影像中最多點以此速度移動。

六、試驗驗證

(一) 數值實驗

接下來將以人造二值化影像進行測試與驗證，此二值化影像中存在多顆直徑不盡相同的圓形顆粒。今有一幅尺寸為 $512\text{pixel} \times 256\text{pixel}$ 二值化影像，影像中總共存在 21 顆圓形顆粒如圖 3.38，所有顆粒僅沿水準方向運動，顆粒的中心位置由隨機亂數產生，其中共有四種尺寸的顆粒在影像中，顆粒的數量、尺寸與速度如表 3.8 所示。

錯誤！找不到參照來源。將顆粒邊界以速度分類，其中每幀向右 3 個圖元的速度是整個影像中最多點所擁有的速度；而互相關的結果可

以發現在速度為每幀向右 3、-19 與 5 個圖元都能觀察到明顯的峰值，但其中每幀向右 3 個圖元的速度最為顯著。

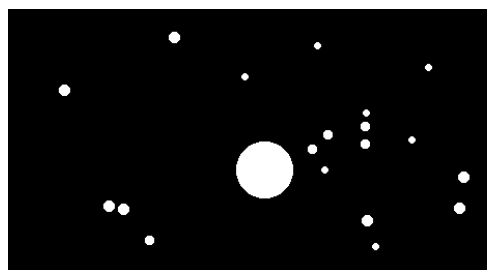
由式**錯誤! 找不到參照來源。**可知，在互相關中每個點在其速度處的互相關值為 2，因此假設互相關最大值僅來自一個圓形顆粒時，可由互相關值算出此圓形顆粒邊界上點的數量。本實驗中互相關最大值發生在每幀向右 3 個圖元處，互相關最大值為 392，故將 392 除以 4 之後得到此等效圓直徑為 98 個點。同理，分別算出在速度 5 與-19 的點所構成的等效圓直徑並列於表 3.9 中，同時可由所有的點計算出整個影像中的平均速度約為每幀向左 1.16 個圖元。

本方法估計的速度並非粒徑最大的顆粒，而是在整個影像中以該速度移動的顆粒邊界是所有移動的顆粒邊界中總和長度最長的邊界與理論的結論相符。

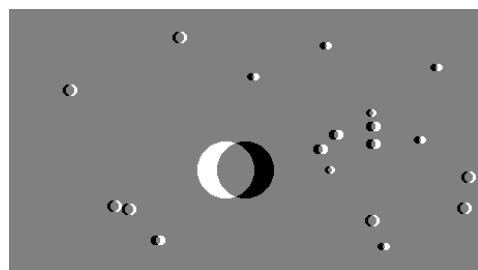
表 3.8 多顆粒人造影像顆粒數量、尺寸與速度

粒徑(圖元)	速度(圖元/幀)	數量
7	3	2
7	5	5
9	5	5
11	3	8
55	-19	1

(1)



(4)



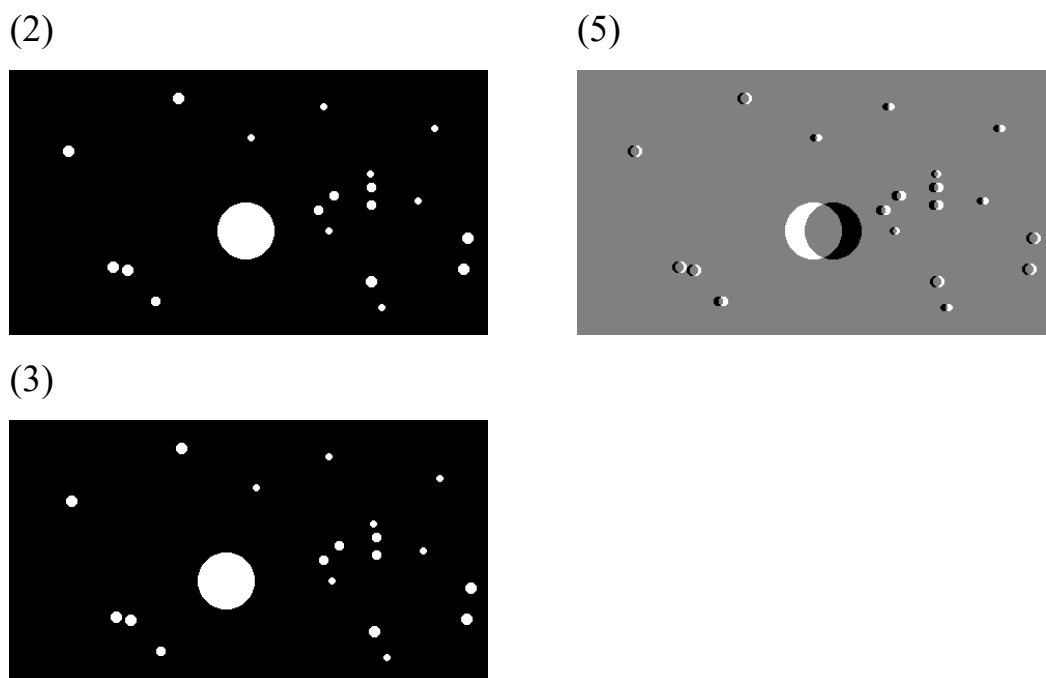


圖 3.38 多顆粒人造二值化影像；(1)、(2)與(3)依序為第一幀 $I(x, y, t_1)$ 、第二幀 $I(x, y, t_2)$ 與第三幀 $I(x, y, t_3)$ ；(4)為(2)減去(1)的影像 $D(x, y, t_2)$ ；(5)為(3)減去(2)的影像 $D(x, y, t_3)$ ，在(4)與(5)中黑、灰與白色亮度值分別為-1、0與1。

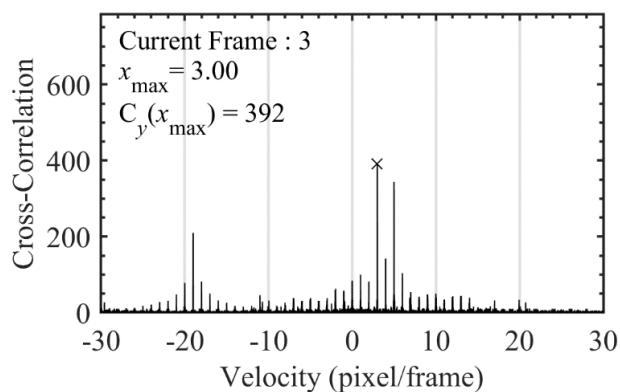


圖 3.39 人造二值化影像一維陣列之前差分的互相關 $C_y(x, t_3)$ 在區間 $[-30, 30]$ 的放大圖

表 3.9 不同速度之顆粒邊界總長與本方法估計的顆粒尺寸

速度(圖元/幀)	數量×粒徑(圖元)	等效圓直徑(圖元)	誤差
3	102	98	3.92%
5	80	86	7.50%
-19	55	52.5	4.55%

(二)室內土石流試驗

試驗詳細規格流程請見附錄一。

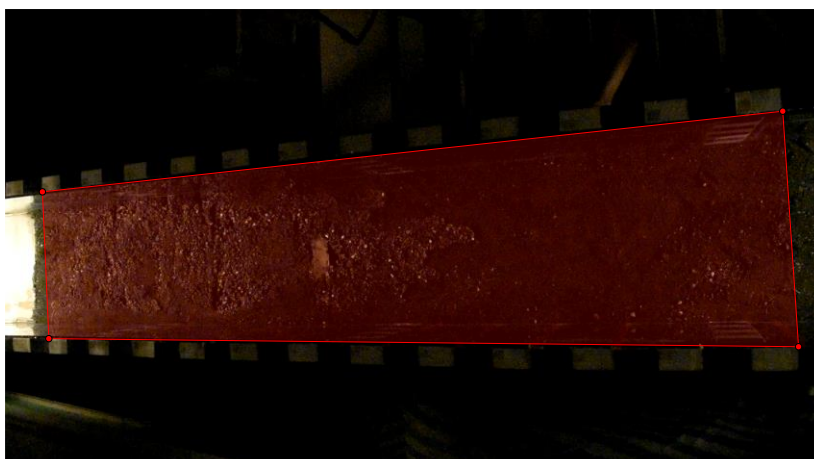


圖 3.40 室內土石流試驗影像與 ROI 範圍

ROI 由 1773X553 個圖元組成，管道寬 50 公分長 230 公分，分析之前必須先把長度變形量修正回來，因為相機是由下游向上照向上游，因此較遠的地方，每一個畫素代表的長度大於較近的畫素(可由圖中水槽旁標示的白色長條看出來)，比較上下游兩處比例尺在影像中圖元的長度，比例尺每格為 10 公分，上游處比例尺在 x 方向所占圖元數為 41 個，下游則為 141 個圖元，因此上下游兩處圖元之長度比例約為 3.4，整張畫面由左到右必須以線性修正長度比例，修正完的影像才能接續下面的分析。

我們先將事件開始前 120 幀當成背景



圖 3.41 實驗開始前 120 幀估計之室內土石流試驗背景影像
在圖 3.41 中，因實驗並無特別打光，在拍攝光源較弱的環境的情

況下進行，在光源較弱的情況下必須將攝影機感光度提高，由高感光度拍攝的畫面無法避免會出現雜訊以及顆粒問題，使得在背景估計時算得之標準差較大。每一禎畫面去除背景值後，前後時間畫面相減(圖 3.42)，經過兩次傅立葉轉換，互相關可得圖 3.44，所有畫面一一處理完畢後，就獲得顆粒在時間上的變化如圖 3.45，可以看出整張影像中最具有優勢的顆粒速度，速度隨幀號增加逐漸減少，即顆粒速度隨時間逐漸降低。

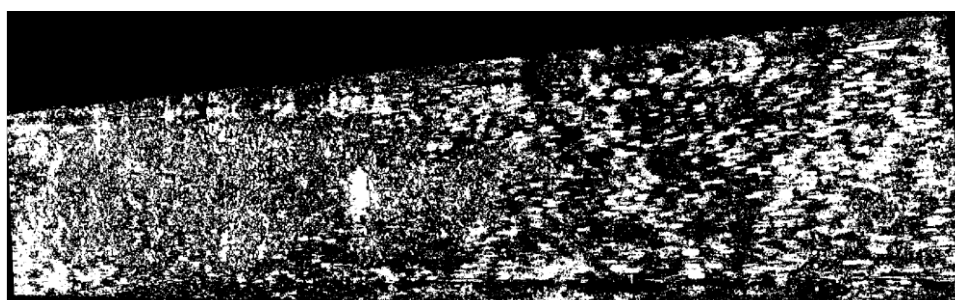


圖 3.42 ROI 範圍之灰階化土石流試驗影像(第 4500 幀)
 $B'(t_0) - B'(t_1)$ [Current Frame:4500]

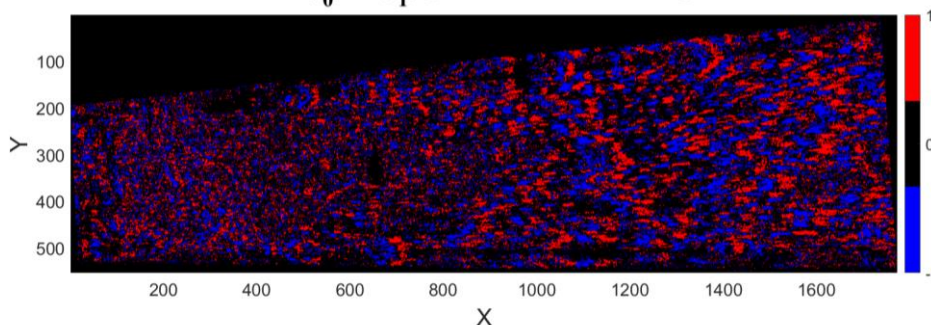


圖 3.43 第 4500 幀與第 4499 幀灰階多顆粒影像亮度值相減
 Cross-Correlation v.s Displacement [Current Frame:4560]

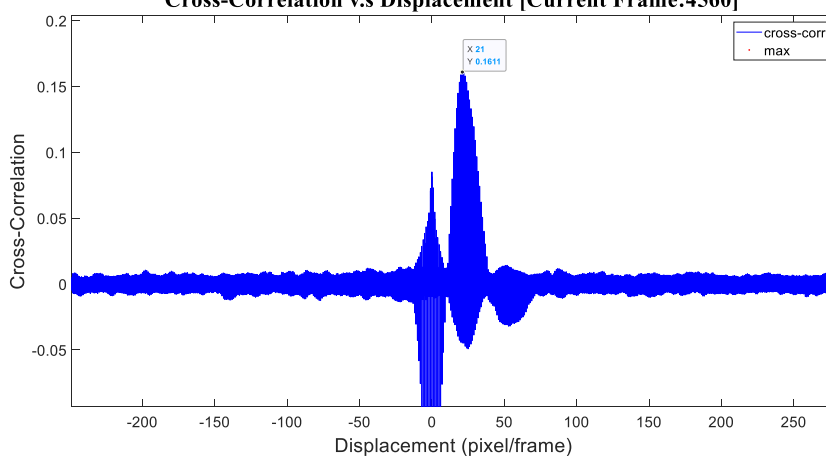


圖 3.44 第 4500 禎與 4499 禎互相關最大值對應之速度

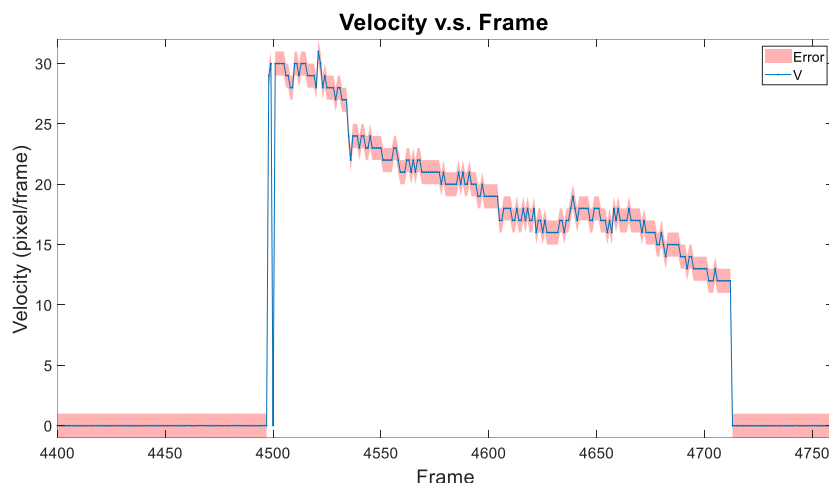


圖 3.45 經互相關分析之速度隨時間變化圖

圖 3.45 為每一幀畫面經互相關分析得到的速度隨時間之變化，為了驗證理論產出的速度是否正確，本研究以由人工取點來進行，將 ROI 畫面分成六等分，在每個區域追縱至少十個顆粒以上，由於在最左方兩個區域為模擬之土石流入口處，在兩幀影像間的變動非常劇烈，對顆粒追縱造成困難，故此兩區追縱的顆粒數量較少。圖 3.46 為被追縱顆粒之位置分佈圖，綠色點為被追縱之顆粒，紅色區域為影像分析之 ROI，紅色虛線將為 ROI 區分為六等分。而追縱時靠人眼點顆粒的尾部點為追縱點，最大誤差理論上應該是 2 個畫素，圖 3.47 記錄了不同速度下之被追縱顆粒的數量，最多顆粒以每幀 18 個圖元，在 85 顆中共有 12 顆，次多的是 21 個畫素有 11 顆，所有追縱顆粒的平均為 20.69 個畫素，而平均速度為 21.6 個畫素，而本研究方法之結果為在有最長顆粒邊界以每幀 21 個圖元移動，考慮追縱過程的誤差為 2 個圖元，此結果相當準確。

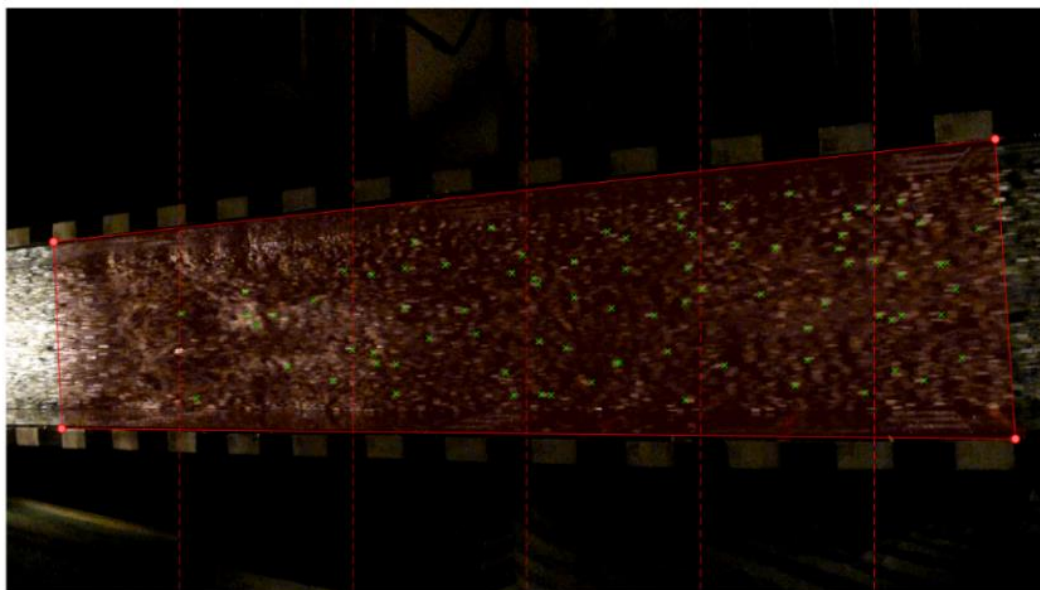


圖 3.46 人工驗證數據中被追蹤顆以綠點標出

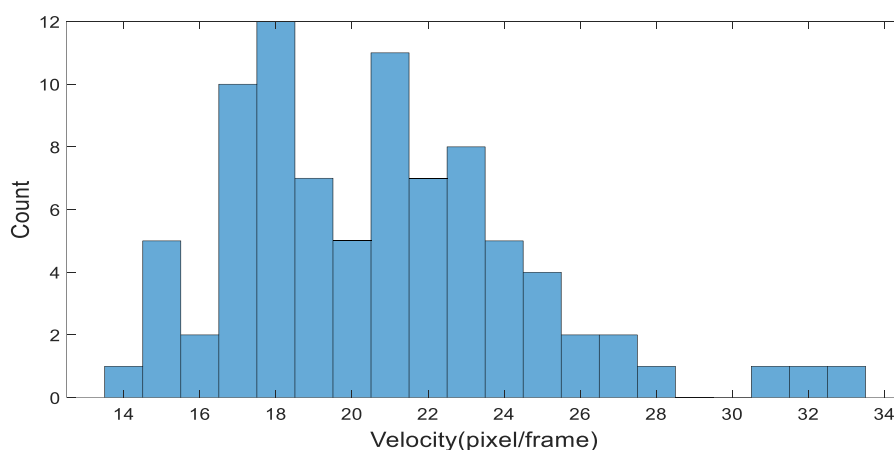
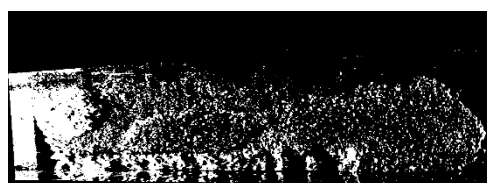


圖 3.47 被追蹤顆粒速度分佈圖

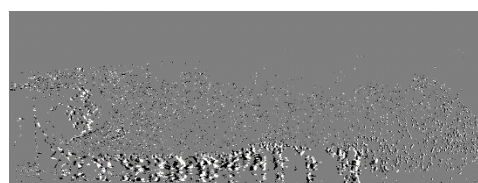
內插後 ROI 影像尺寸為 553X1773，對應的真實長度為 50cmX230cm，因此每圖元長度約為 0.13 公分，由互相關最大值算得 x 分量速度為每幀 21 圖元(約 $21/(1/60)*(230/1773)=163.45$ cm/sec)。這與試驗中所得的流速 1.6m/s 也非常接近。

(1)



(2)

(4)



(5)

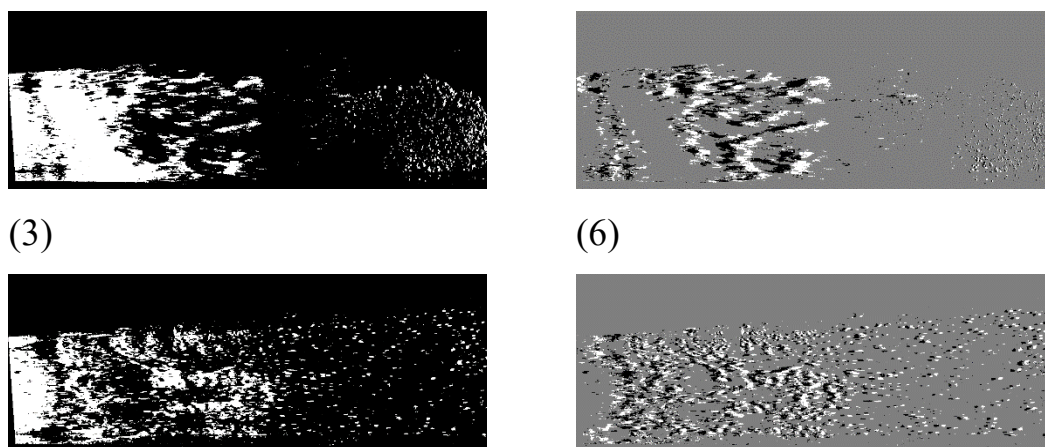


圖 3.48 圖元水準長度校正後的室內土石流試驗 ROI 二值化影像；(1)至(3)依序為第 4400、4450 以及 4560 幀；(4)至(6)分別為(1)至(3)與各自的前一幀影像亮度值相減。

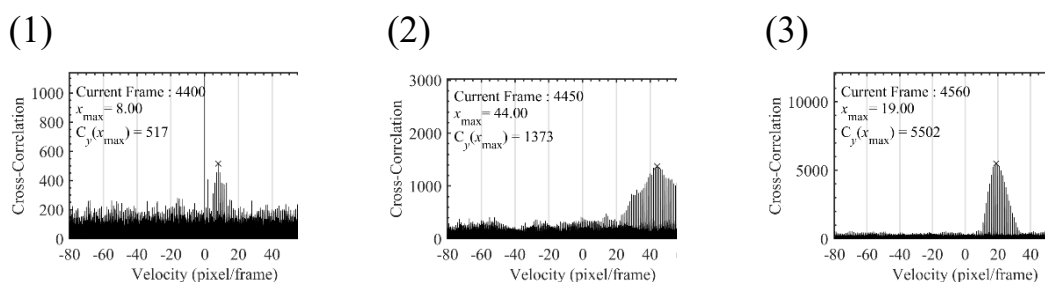


圖 3.49 二值化影像之互相關分析結果(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；(1)至(3)依序第 4400、4450 與 4560 幀互相關分析結果在區間 $[-80, 80]$ 的放大圖。

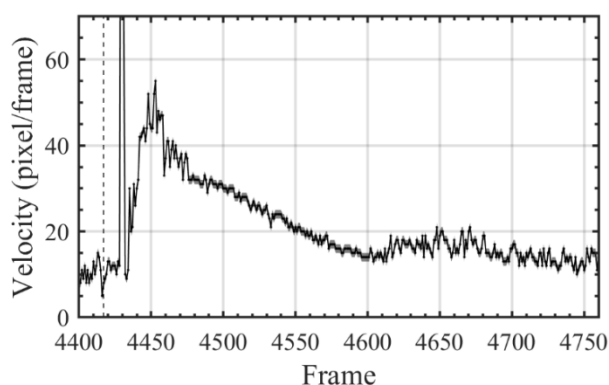


圖 3.50 室內土石流試驗-互相關最大值估計的水準速度隨時間變化圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 n 幀影像；灰色為理論速度最大誤差 ± 1 個圖元的範圍；虛線為在第 4417 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。

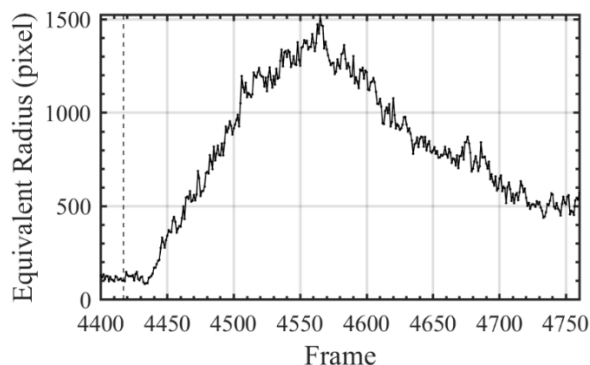


圖 3.51 室內土石流試驗-互相關最大值估計的等效圓直徑隨時間變化圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；縱軸為等效圓直徑；橫軸為試驗影片中第 n 幀影像；虛線為在第 4417 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。

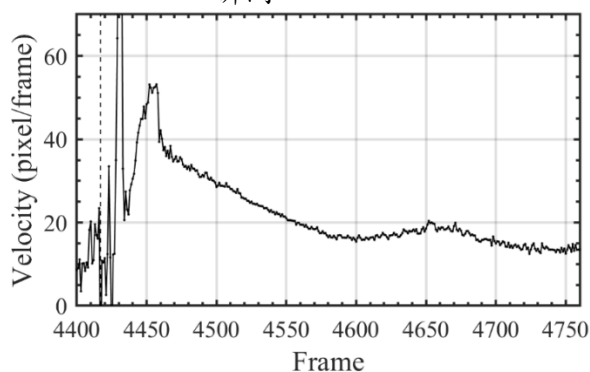


圖 3.52 室內土石流試驗-互相關最大值估計的平均水準速度隨時間變化圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 n 幀影像；虛線為在第 4417 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。

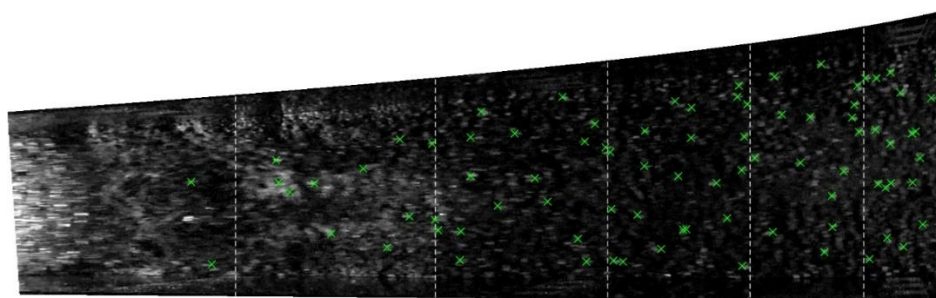


圖 3.53 被人眼追蹤顆粒分佈圖(水準校正後)

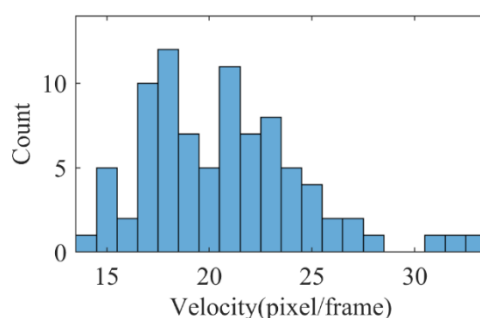


圖 3.54 被追蹤顆粒速度分配直方圖

現場影像分析

以下將應用本方法分析三場發生在南投信義鄉神木村的土石流事件的影像，三場事件分別是 2004 年敏督利颱風、2012 年 6 月 10 號愛玉子溪上游鋼索斷裂事件以及 2014 年 520 豪雨事件。

(1) 案例一：2014 年 520 豪雨事件

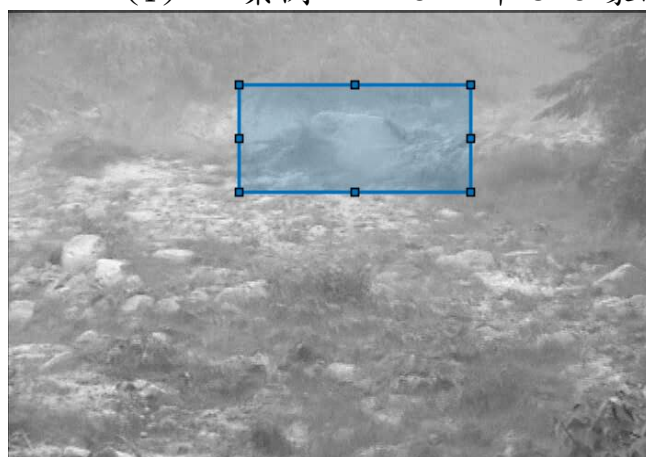


圖 3.55 案例一-現場影像 ROI 範圍示意圖(第 1380 幀)

由室內試驗分析結果發現在互相關在原點常有峰值出現，故搜尋互相關最大值時不考慮 $[-1, 1]$ 區間內的峰值，分析過程與結果如圖 3.56 至圖 3.60 所示。其中圖 3.62 是利用 0.7 倍的互相關最大值估計的等效圓直徑與平均水準速度。

本案例中透過人眼追蹤第 1380 幀出現的巨石對本方法估計的速度進行驗證，在圖 3.64 中綠色叉號為被追蹤的巨石邊界，由人眼追蹤顆粒邊界的水準速度約為每幀向左 4 個圖元，被追蹤點之影像座標列於表 3.9 中。判視結果也是 4 個畫素

在不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內的互相關峰值的情況，第 1380 幀本方法估計的速度為每幀向左 3 個圖元，由於人眼追蹤顆粒邊界的最大誤差為兩個圖元，本方法估計的速度落在 2 個圖元的誤差範圍中。

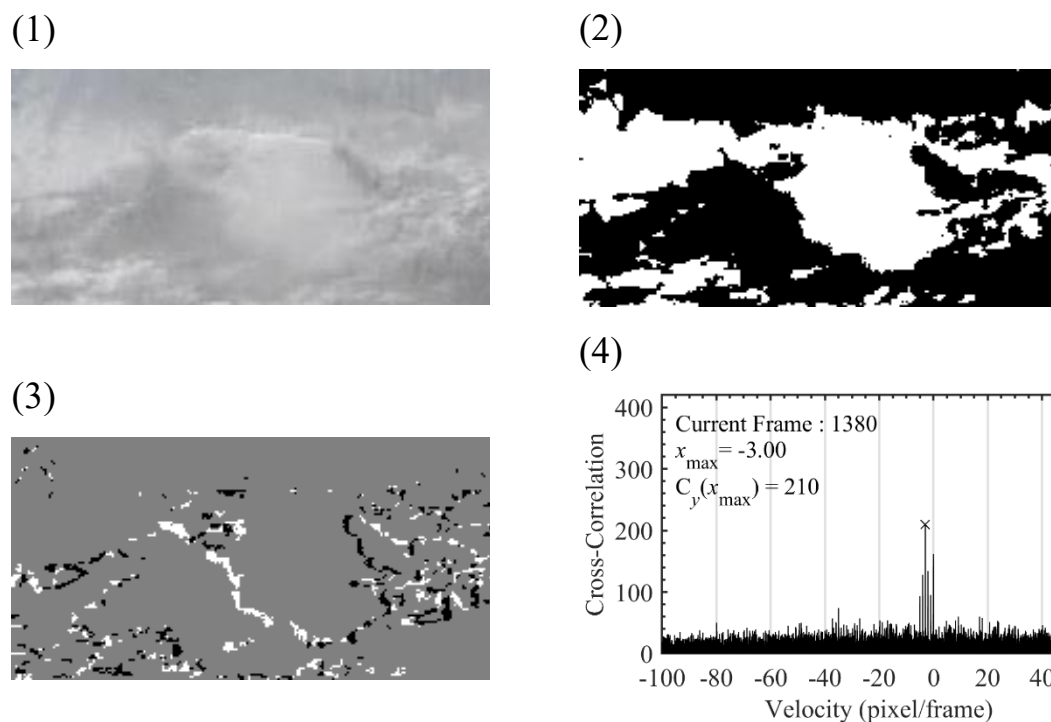


圖 3.56 案例一-第 1380 幀二值化影像分析結果圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；(1)第 1380 幀灰階影像；(2)為第 1380 幀二值化影像(閾值為 180)；(3)為第 1380 幀與第 1379 幀二值化影像相減；(4)第 1380 幀二值化影像之互相關分析結果在區間 $[-100, 60]$ 放大圖。

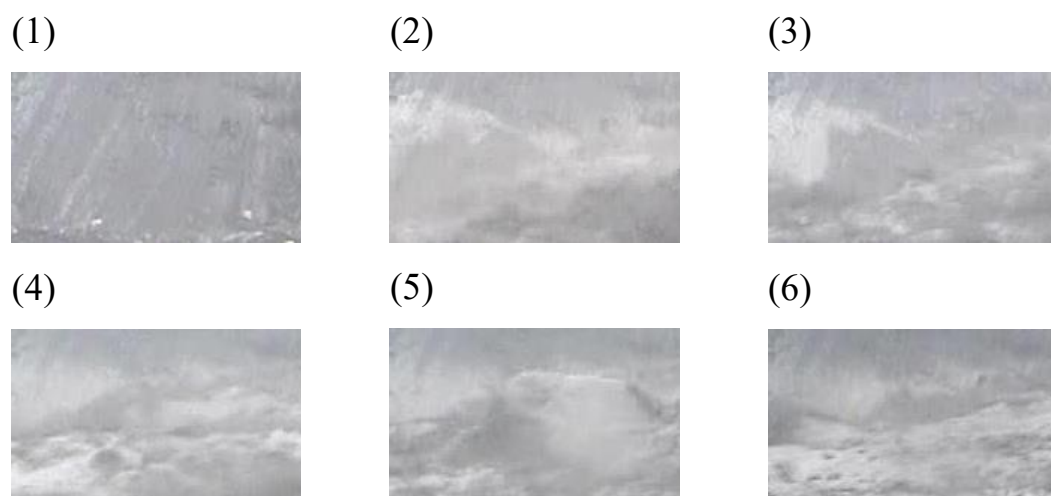


圖 3.57 案例一-ROI 之灰階影像；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 以及 1570

幀。

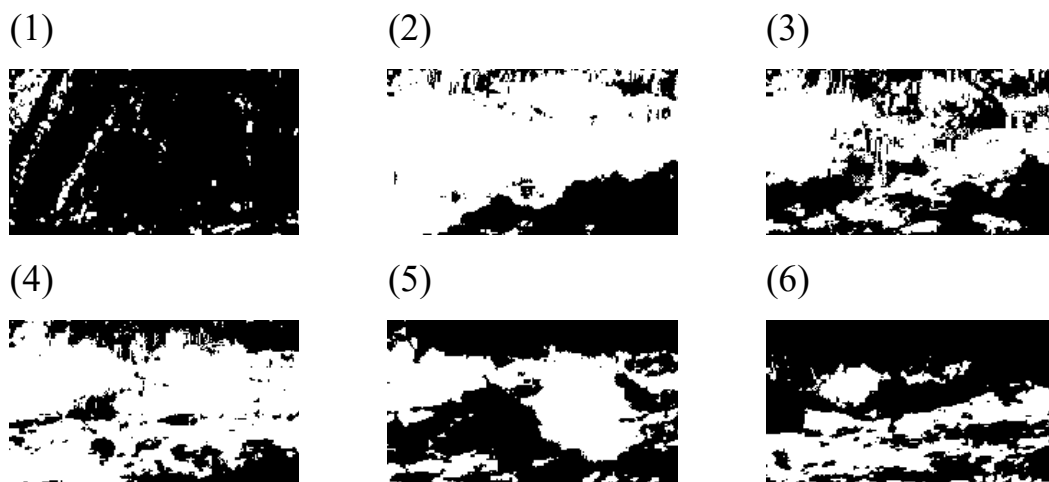


圖 3.58 案例一-二值化影像；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 與 1570 幀。

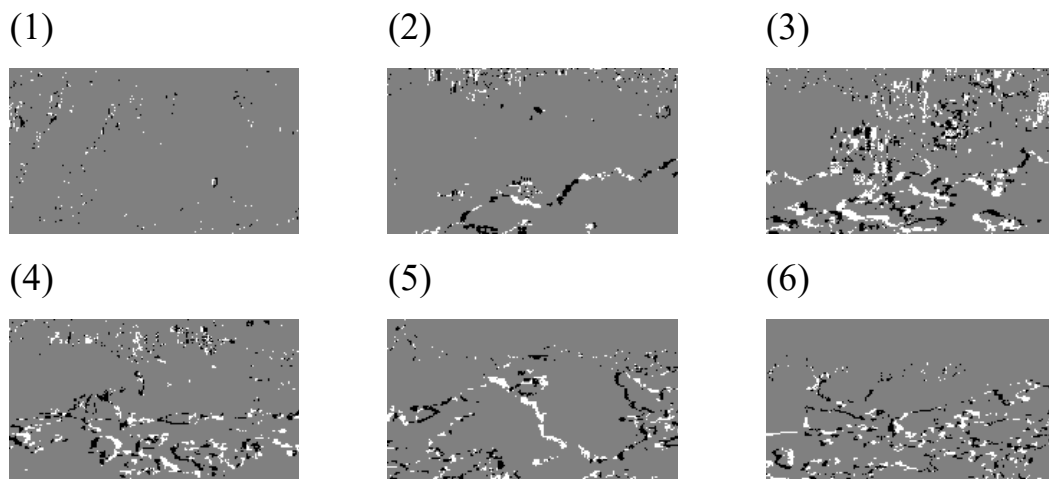
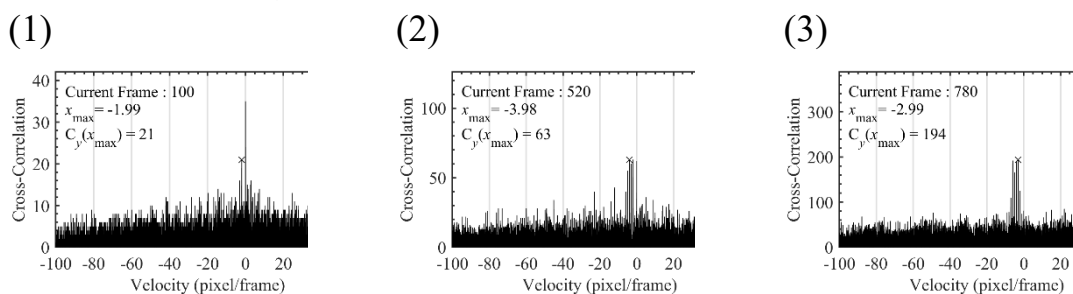


圖 3.59 案例一-兩幀二值化影像亮度值相減後經處理之影像；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 與 1570 幀。



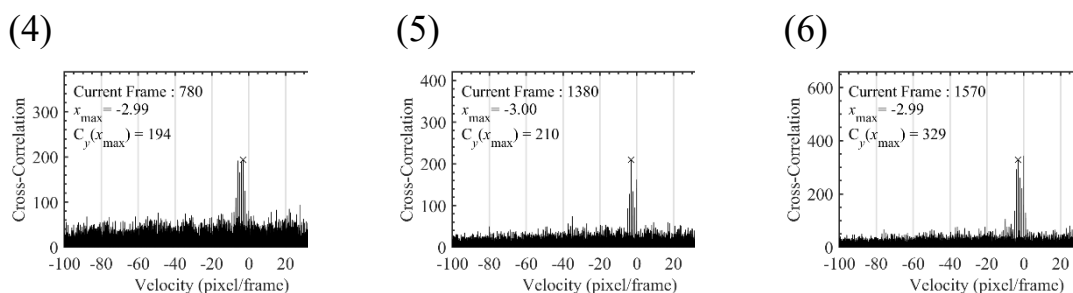


圖 3.60 -二值化影像之互相關分析水準分量速度之結果在區間 $[-100, 60]$ 的放大圖(不考慮位於 $[-1, 1]$ 區間內之最大值)；(1)至(6)依序為第 100、520、780、1212、1380 與 1570 幀。

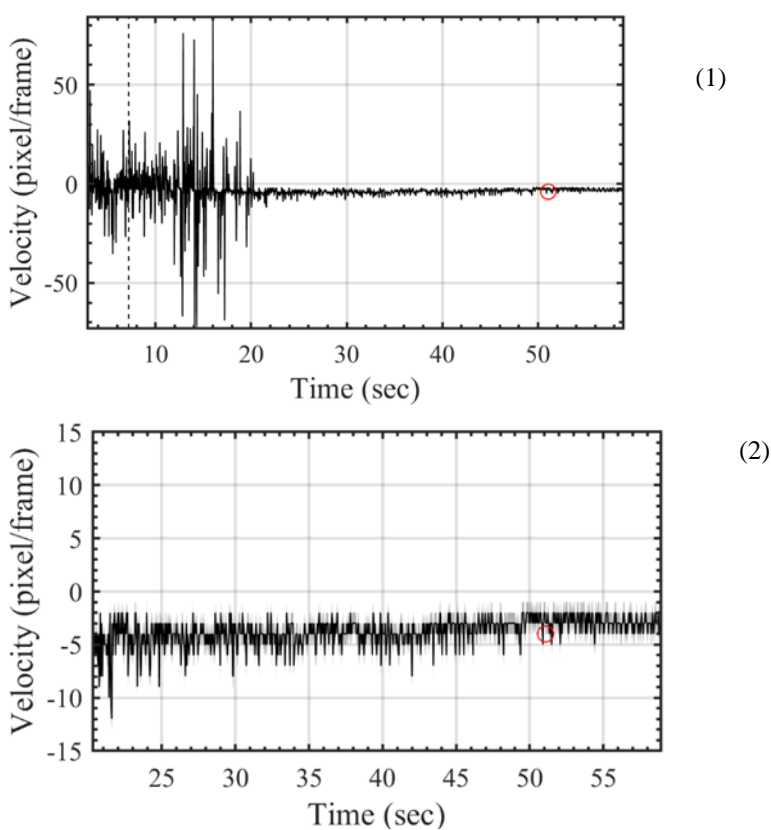


圖 3.61 二值化影像之互相關分析估計之水準速度隨時間變化圖(不考慮 $[-1, 1]$ 區間內的峰值)；(2)為(1)在第 550 幀到 1570 幀之間放大圖；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 n 幀影像；灰色為理論速度最大誤差 ± 1 個圖元的範圍；紅圈為第 51.074 秒人眼追蹤最多顆粒的速度。

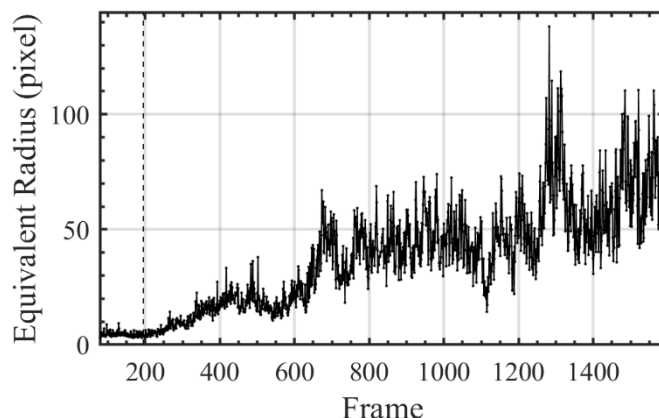


圖 3.62 案例一-二值化影像之互相關分析估計之等效圓直徑隨時間變化圖(不考慮 $[-1, 1]$ 區間內的峰值)；縱軸為等效圓直徑；橫軸為試驗影片中第 n 幀影像；虛線為在第 195 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間。

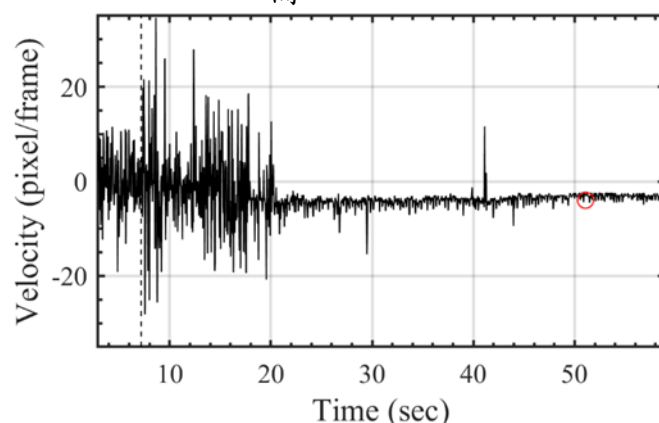
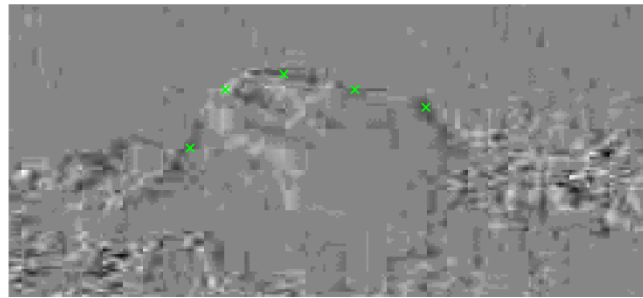


圖 3.63 案例一-二值化影像之互相關分析估計之平均水準速度隨時間變化圖在第 550 幀到 1570 幀之間放大圖(不考慮 $[-1, 1]$ 區間內的峰值)；縱軸為水準速度；橫軸為試驗影片中第 n 幀影像；灰色為理論速度最大誤差 ± 1 個圖元的範圍；虛線為在第 195 幀土石流前峰出現在 ROI 的瞬間

表 3.10 案例一-被追蹤的的巨石邊界點影像座標

	左一	左二	中	右二	右一
1379-1378	(72, 57)	(85, 34)	(109, 28)	(137, 34)	(165, 41)
1380-1379	(68, 57)	(82, 35)	(105, 30)	(133, 33)	(160, 41)
位移	(-4, 0)	(-3, 1)	(-4, 2)	(-4, -1)	(-5, 0)

(1)



(2)

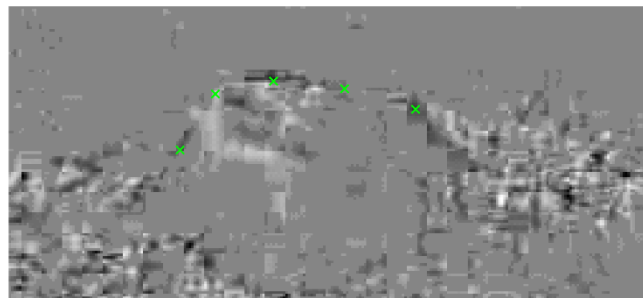


圖 3.64-被追蹤的的巨石邊界位置圖；(1)與(2)分別為第 1379 幀與第 1380 幀各自與前一幀影像亮度值相減後經影像處理的影像。

第四節 地聲與流量

在前期計畫中，我們已經累積了許多流量與能量的點，本年度繼續累積點數，至少 5 個點來自室內試驗，5 個點來自現場測量，而室內試驗的詳細資料，請見附錄一。

將室內水槽試驗由 5-60Hz 總能量與現地試驗地聲檢知器 5-60Hz 能量對流量做圖。現地地聲是將測量到的能量投影到河道中央(以現場測量的三個地聲來外插)，試驗室的地聲檢知器安裝於管道整下方底床處，得到如下圖，今年將會繼續增加現場點數

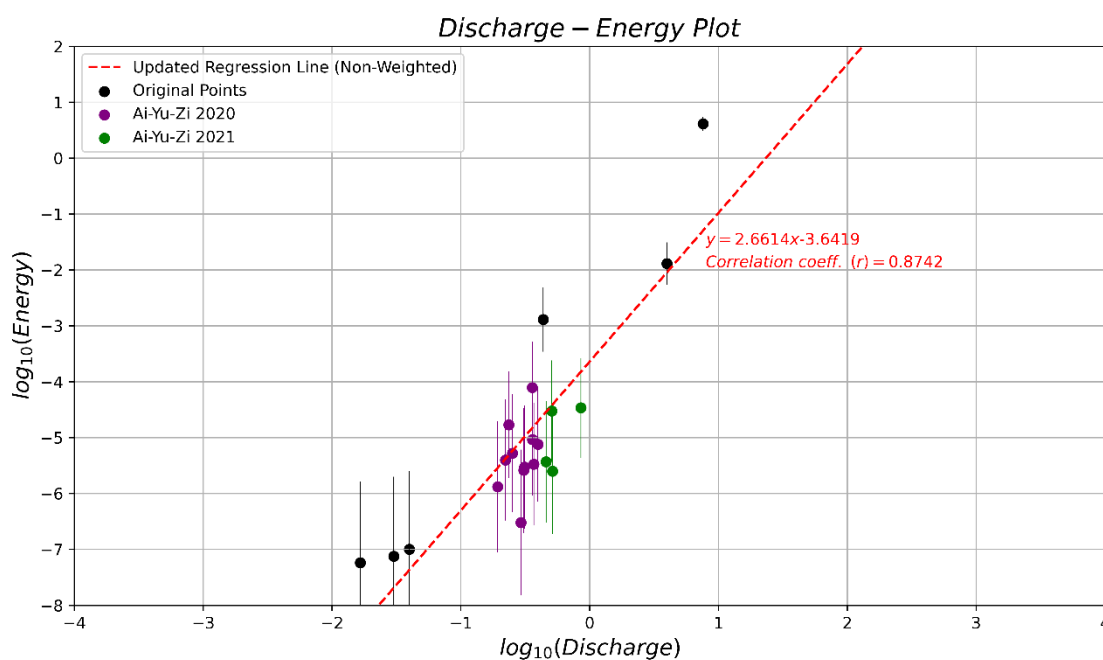


圖 3.65 地聲檢知器 5-60Hz 的能量(Energy) 與愛玉子溪流量 Discharge(cms) 經驗公式，每個點 10% 誤差範圍以線標於點上

第四章 長期災害潛勢預報

第一節 愛玉子溪土砂生產與運移分析

在陡峭山區集水區，崩塌、土壤沖蝕、土石流與河川輸砂等地形作用共同構成的泥砂輸過程 (Liu et al., 2013)，野溪為連接邊坡與下游河道的重要節點，當崩塌和土壤沖蝕產生的大量泥砂變堆積在野溪的河床上，雨水和地表逕流與堆積的土砂混合後，受到重力作用牽引沿著邊坡或河谷向下遊移動的塊體運動 (mass movement) 現象，形成土石流的現象，或著泥砂或河床受到野溪逕流剪應力帶動而產生侵蝕 (Barbour et al., 2009)，使得泥砂順著水流往下游搬運與堆積，這一系列的泥砂生產、搬運與堆積的作用過程式控制制集水區地形演育與泥砂收支，並且也會影響到鄰近人類生命、財產相關設施的安全，形成所謂「複合式災害」。

為了釐清土石流潛勢溪流的潛在威脅與進行適當的防制，則需仰賴一套從上游坡地土砂生產，到中游野溪泥砂傳輸，和下游泥砂淤積的地形、土砂變遷的監測方法。本計畫以愛玉子溪為研究區，將使用無人機攝影與歷史航照影像，配合攝影測量-運動恢復結構法的技術，產製高解析度、多時期的數值地表模型與正射影像，以監測土石流潛勢溪流的地形變遷與土砂侵淤之空間分佈，提供崩塌災害地形演變分析與災害預警的工具 (圖 4.1)。

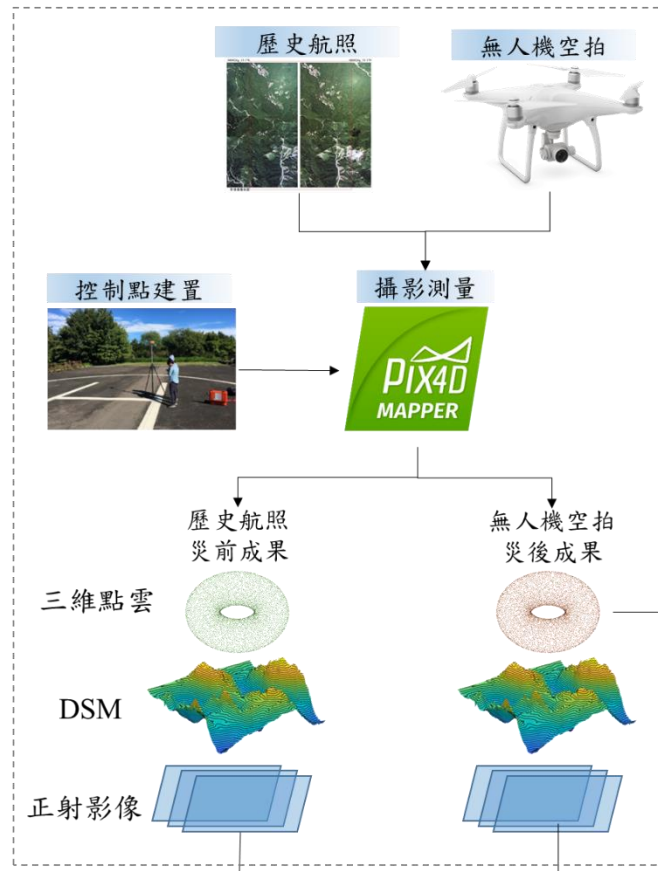


圖 4.1 航空攝影測量技術建置土石流潛勢溪流高精度數值地表模型

一、愛玉子溪流域

愛玉子溪位在濁水溪支流陳有蘭溪之上游，集水區東側的分水嶺為阿里山森林遊樂區和祝山觀景台，溪流東側與霍薩溪匯流。愛玉子溪的集水面積，集水區海拔高程介於 1,153 至 2,492 公尺，平均坡度約為 39 度，年平均雨量從上游分水嶺的 3,932 公釐(阿里山測站，1981-2010 年)，往下游逐漸地減至 1,950 公釐(神木村雨量站)，其中 81% 的降雨量集中在 4 到 9 月的雨季。

愛玉子溪集水區下游地質屬於中新世中期深坑砂岩層，岩性為塊狀砂岩夾薄層砂岩；上游地區則是中新世的南莊層，岩性為淺灰色厚砂岩、砂岩和頁岩所組成的條狀薄紋層和深灰色頁岩(張麗旭等，1960)，此區岩層遭受強烈之擠壓褶曲與變形，岩體不連續面發達。由於集水區

內沒有單壓強度觀測資料，參考阿里山附近的岩樣的抗壓強度的測量結果，抗壓強度分佈之區間在 52.19 ± 10.24 MPa (林慶偉, 1994)。研究區地表覆蓋以森林為主，因海拔落差大，植物分佈具垂直分層，植被分佈從低海拔的暖溫帶闊葉林帶，直到中高海拔的檜木林帶。



圖 4.2 愛玉子河流域位置圖與正射影像



圖 4.3 愛玉子河流域地質圖

二、降雨指標

為分析降雨量對於愛玉子溪土砂生產和運移量的關係，本計畫採用兩種降雨指標，分別為國內水土保持局採用的有效累積雨量 (Effective rainfall)，以及日本氣象廳使用的土壤雨量指數 (Soil Water Index, SWI)，各個降雨指標計算說明如下：

(一)有效累積雨量

我國水土保持局自 2005 年採用 60 分鐘累積雨量及考慮前七天降雨效應之有效累積雨量 (R_t)，組合成為降雨驅動指標 (Rainfall Triggering Index, RTI) 模式，根據各土石流潛勢溪流地的基準值，建議土石流紅、黃警戒發布機制，已證實能夠有效降低土石流災害評估災害發生的可能性，進而實施疏散避難，以降低民眾之傷亡數目(陳振宇，2008；詹錢登、李明熹，2004)。有效累積雨量 (R_t) 和降雨驅動指標 (RTI) 的計算式如下：

$$RTI = I \times R_t \quad (4.1)$$

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \quad (4.2)$$

其中， I 為 60 分鐘累積雨量 (mm)； R_t 稱為有效累積雨量 (mm)， R_i 為前 i 日的 24 小時累積雨量 (mm)， α_i 為前 i 日的折減係數； α 原先採用 0.8，經多年實務應用檢討後，自 2014 年起調整為 0.7 (水土保持局，2016)。

然而，現行 RTI 模式中的有效累積雨量考慮前七日的降雨，並以 24 小時為週期的折減，但這種折減方法對於短延時強降雨、長延時降雨的時序變化上有所不足。因此，在不改變折減係數和考慮前七日降雨，有效累積雨量修正採用陳振宇等 (2017) 提出之「逐時折減」為概念，計算式如下：

$$R_t = I_t + R_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}} \quad (4.3)$$

(二)土壤雨量指數

日本氣象廳自 2007 年開始採用土壤雨量指數做為土砂災害警戒系統發佈的指標，土壤雨量指數的定義為「土壤中所儲留之雨量深度」，即為筒狀模式 (Tank model) 中，儲存於三層筒水深的總和 (陳樹群等，2013) 已有許多研究三層筒水深的總和或特定水筒的水深可應用於崩塌或土石流之警戒 (如陳樹群等，2013；Saito and Matsuyama，2015；Chen et al.，2007；馮智偉，2017；Chen et al.，2018；Matsuyama et al.，2021)。筒狀模式為日本學者菅原正巳 (1972) 所提出的能模擬降雨-土壤含水量-逕流量關係的黑箱模式 (black box)，筒狀模式將地表分層三層水桶：地表、地表土壤層、與地下水層 (錯誤！找不到參照來源。4.4)，筒桶中儲存水的深度則代表各層的含水量，而每一層水筒有不同大小的入滲孔，代表地下水下滲與蒸發散的過程，並且每一層水也有不同高度、大小的水準方向出水孔，從這三層流出的水分別代表：地表逕流、表層滲出水流、地下水流。因此，能夠模擬降雨所產生地表下各層含水量和逕流量。

筒狀模式所需的參數共有 11 個，需要藉由當地雨量和逕流量資料進行率定，Ishihara and Kobatake (1979) 已建立日本的花崗岩、火山岩、古生代地層、第三紀、第四紀的地層所建議之筒狀模式參數 (表 4.1)。

Ishihara and Kobatake 曾利用上述四種地質區的參數計算，發現這四種參數所計算出來的結果差異不大，說明各地質條件的參數不敏感，故氣象廳建議全日本統一採用花崗岩的參數為標準。目前台灣尚未有本土化的筒狀模式參數，大多研究採用日本建立的參數進行模擬 (如陳樹群等，2013；Chen et al.，2018)，例如：Chen et al. (2018) 採用日本第三紀、第四紀地層之筒狀模式參數，模擬石門水庫集水區秀巒和玉

峰水文測站的逕流量，具有不錯的模擬成果。此外，愛玉子溪流域地質屬於中新世的深坑砂岩與南莊層，屬於第三紀(Tertiary Period)的地層，故本計畫的筒狀模式將採用日本第三紀、第四紀地層之參數。

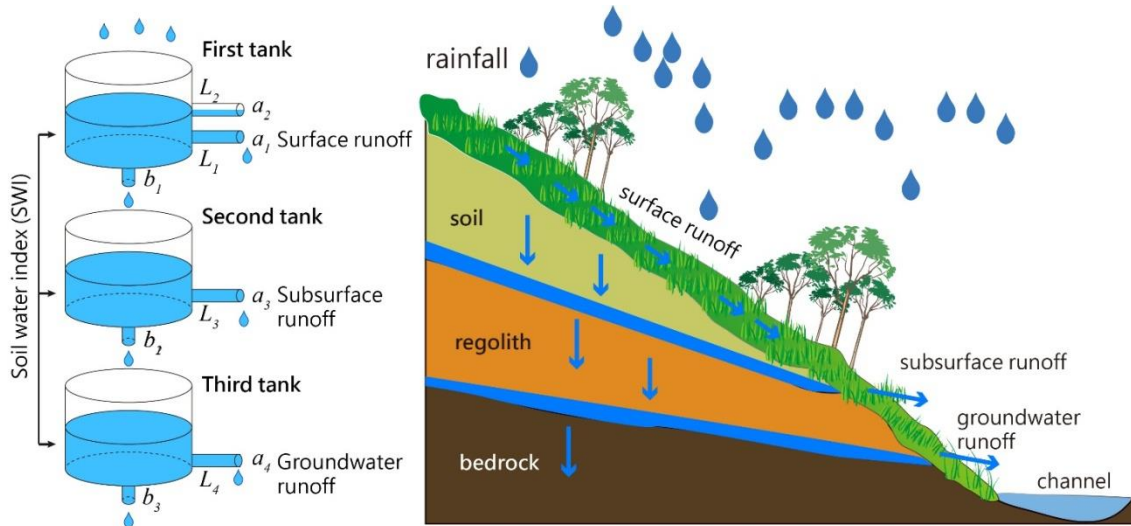


圖 4.4 水筒模式概念

表 4.1 日本筒狀模式參數清單

地質	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	b ₁	b ₂	b ₃
花崗岩	15	60	15	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.05	0.01
火山岩	30-40	60-75	15	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.08	0.01
古生代地層	30	75	5	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01
第三紀、第四紀地層	15	40	5	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01
方程式：	符號說明：										
$R_1 = (H_1 - L_1) \times a_1$	L ₁ ：第一筒第一層出流水深 (mm)				R ₁ ：第一筒第一層出流量(mm)						
$R_2 = (H_1 - L_2) \times a_2$	L ₂ ：第一筒第二層出流水深 (mm)				R ₂ ：第一筒第二層出流量 (mm)						
$R_3 = (H_2 - L_3) \times a_3$	L ₃ ：第二筒出流水深 (mm)				R ₃ ：第二筒出流量 (mm)						
$R_4 = (H_3 - L_4) \times a_4$	L ₄ ：第三筒出流水深 (mm)				R ₄ ：第三筒出流量 (mm)						
$F_1 = H_1 \times b_1$	a ₁ ：第一筒第一層出流比				H ₁ ：第一筒水深 (mm)						
$F_2 = H_2 \times b_2$	a ₂ ：第一筒第二層出流比				H ₂ ：第二筒水深 (mm)						
$F_3 = H_3 \times b_3$	a ₃ ：第二筒出流比				H ₃ ：第三筒水深 (mm)						
	a ₄ ：第三筒出流比				F ₁ ：第一筒入滲量 (mm)						
	b ₁ ：第一筒入滲比				F ₂ ：第二筒入滲量 (mm)						
	b ₂ ：第二筒入滲比				F ₃ ：第三筒入滲量 (mm)						
	b ₃ ：第三筒入滲比										

修改自：Ishihara and Kobatake (1979)；陳樹群等 (2013)

為了計算愛玉子溪歷年的有效累積雨量和土壤雨量指數，本計畫

蒐集中央氣象局的時雨量資料，愛玉子溪周圍的測站為阿里山與神木村測站(表 4.2)，兩者分別位於集水區的上游與下游，年平均雨量分別為 3,932 公釐和 1,950 公釐，雨量有明顯的差異，兩站在對愛玉子溪集水區的徐昇氏權重分別為 0.3512 和 0.6488，神木村佔有較高之權重，但神木村測站從 1999 年 2 月 1 日開始才有觀測資料。為了使雨量指標的計算基準一致，本計畫將採用 1999 年以後阿里山與神木村雨量站的資料，計算集水區徐昇氏加權平均雨量，以計算歷次降雨事件的有效累積雨量和土壤雨量指數，計算結果如下**錯誤! 找不到參照來源**。所示。

表 4.2 愛玉子溪流流域周圍中央氣象局測站列表

測站名稱	編號	座標 (X, Y)	海拔 (m)	觀測時間	年平均雨量 (mm)
阿里山	467530	230915, 2600610	2,413	1933/1/1 至今	3,932
神木村	C0H9A0	233954, 2603460	1,595	1999/2/1 至今	1,950

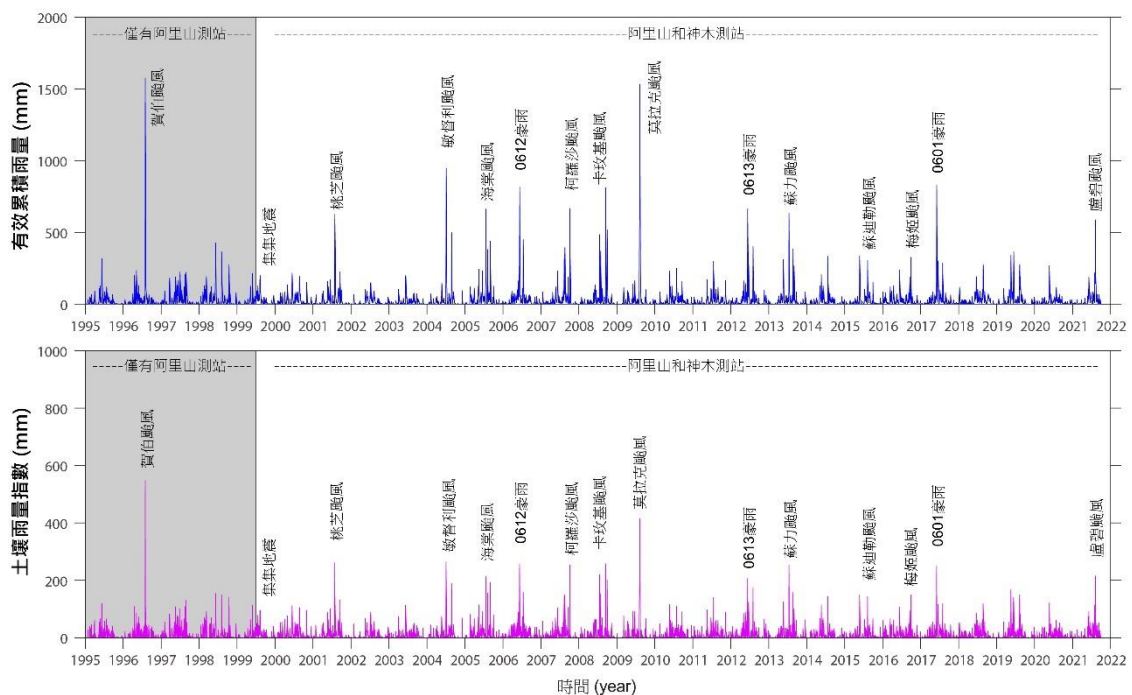


圖 4.5 1995-2021 年間愛玉子溪集水區有效累積雨量對應之降雨事件。1999 年前雨量資料採用中央氣象局阿里山測站為代表，1999 年後則採用阿里山測站與神木村測站之徐昇氏平均法，權重分別為 0.3512

和 0.6488。

三、遙測影像蒐集

為分析愛玉子溪歷年的土砂生產和運移，本計畫蒐集愛玉子溪流域周圍之農委會農林航空測量所（農航所）歷史航拍影像和與無人機的航拍影像，藉由運動恢復結構（Structure from Motion, SfM）產生數值地表模型與正射影像，藉以獲得高解析度三維地形的資料，並比較前後兩期的數值地表模型和正射影像，以分析降雨事件對集水區土砂生產和運移之影響。然而，由於農航所拍攝之歷史航拍影像所能涵蓋的時間解析度較低，每年大約可取得一組涵蓋集水區之影像，因此，本計畫也將蒐集愛玉子溪相關計畫之崩塌地判釋成果，補充歷史航拍影像不足之處。以下就各種影像類型進行說明：

（一）農航所航照影像

本計畫透過水土保持局之「多元衛星遙測影像整合申購模組」申請農航所拍攝歷年原始航照影像。農航所提供的影像分為：黑白航空影像、彩色航空影像、DMC 數位元元影像（錯誤！找不到參照來源。）。

在 2001 年以前，農航所的航照皆為黑白航空照片，利用蔡司高精度影像掃描儀，將類比航照底片影像掃描建置成高解析（ 14μ ）之影像檔，圖元約為 $16,864 \times 16,720$ 。在 2001 年之後，陸續改為彩色航空照片，將類比航照底片影像掃描成影像檔，圖元約為 $11,240 \times 11,143$ 。在 2007 年之後，開始採用 Zeiss Intergraph DMC 數位相機進行拍攝，該數位相機共包含八個鏡頭，由四個鏡頭組成一張 13824×7680 像元的全色態影像，再由周圍四個鏡頭拍攝紅、綠、藍、近紅外線的多光譜影像，解析度僅 3072×2048 像元，經由影像融合組成 13824×7680 像元的紅、綠、藍、近紅外線的四個波段的影像，輻射解析度為 12 bit (王韻皓、陳連晃, 2011)。DMC 數值影像且相對於傳統黑白與彩色照片，DMC 數值航照影像具有較穩定的輻射與正切畸變差，並且拍攝時紀錄

精確的空間位置與姿態。

上述三種原始航照影像於同一條航帶前後重疊率超過 60%；左右重疊率超過 35%故每處影像重疊率大於 5 張。航高介於 3000-6000 公尺，可產生 30-50 公分地面解析度之數值地表模型和正射影像。

本計畫取得 1999-2021 年間共期的農航所航拍影像(錯誤!找不到參照來源。6)，影像日期分別為：1999/12/10、2001/08/02、2003/03/02、2004/08/07、2005/11/28、2007/10/26、2008/08/03、2008/08/26、2009/11/21、2013/06/03、2014/02/17、2019/01/11，共 12 時期的原始航照影像。

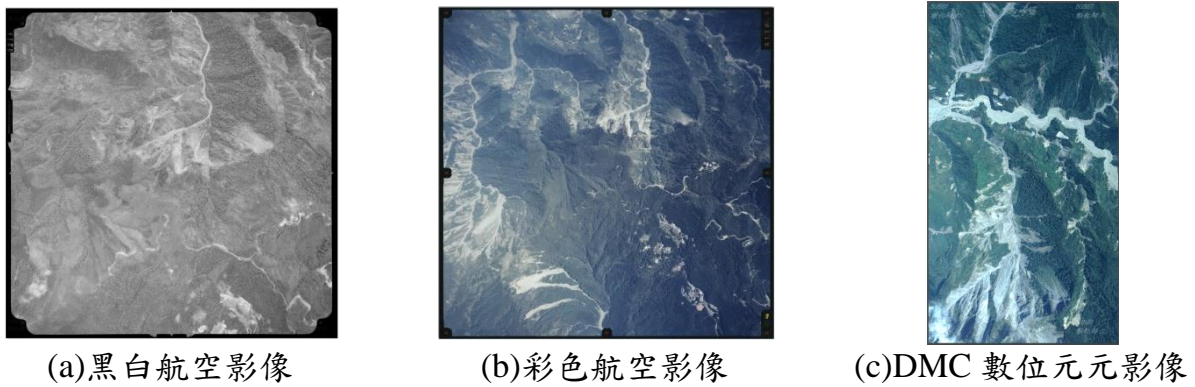


圖 4.6 農航所原始航空照片類型

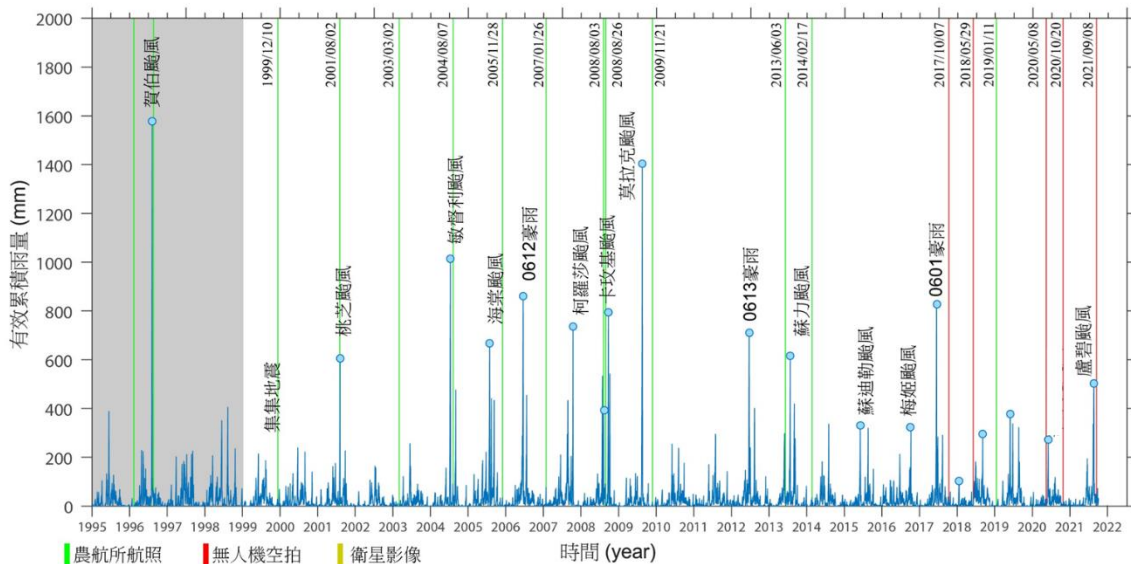


圖 4.7 1995-2021 年間愛玉子溪集水區有效累積雨量對應之降雨事件與本計畫蒐集之影像序列。1999 年前因缺乏神木村測站的雨量資料，將其予以忽略。圖下方直線代表本計畫蒐集到的遙測影像序列，綠色代表農航所原始航照影像；紅色為 UAV 空拍影像。

(二) 無人機航拍影像

近年來，因無人機技術快速發展，不需使用昂貴的儀器，便可以從空間俯視的視角，拍攝高解析度之、相互重疊的數位元元影像，配合運動恢復結構解算內方位與外方位參數，進而計算出地表特徵點的在空間中的三維座標位置，快速的大範圍且高解析度之地面三維模型與多時序、高解析度影像。

因此，本計畫也同時蒐集愛玉子溪流流域歷年無人機航拍影像，本研究已蒐集到 4 期航拍影像，影像清單如表 4.3 所示，影像日期分別為：2017/10/07、2018/05/31、2020/05/08、2020/10/20，可補充農航所航照影像於 2015 年至 2020 年空缺，影像數量皆大於 1,000 張可獲得足夠的重疊率。

此外，本計畫已於 2021 年 9 月 8 日前往愛玉子溪進行空拍，影像數量共 1,090 張，無人機空拍影像涵蓋範圍如**錯誤! 找不到參照來源。**8 所示，除集水區西側的邊坡因受雲霧干擾影像之外，拍攝的影像範圍能夠完整涵蓋愛玉子溪流流域。

表 4.3 愛玉子溪流流域歷年無人機航拍影像

日期	照片數量	影像來源
2017/10/07	2,097	農委會(2017)多元尺度環境因數對崩塌災害發生誘因之研究
2018/05/31	3,112	科技部(2018)災後地形改變影響全流域水砂運移之模擬、劃設與資料庫建置 II
2020/05/08	2,326	水土保持局(2020)土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析
2020/10/20	1,627	水土保持局(2020)土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析
2021/09/08	1,090	本計畫

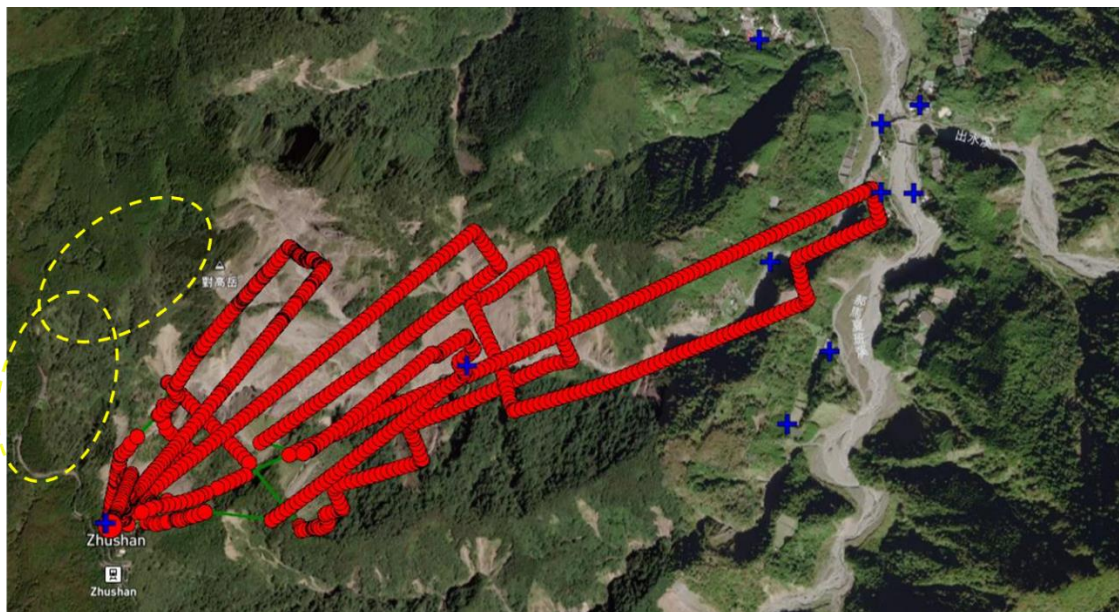


圖 4.8 2021 年 9 月 8 日愛玉子溪集水區無人機空拍影像涵蓋範圍，黃色圓圈的區域因受雲霧影像而未能涵蓋。

(三) 衛星影像崩塌判釋成果

本計畫也將蒐集愛玉子溪相關計畫之崩塌地判釋成果，崩塌資料主要來源科技部（2017）「災後地形改變影響全流域水砂運移之模擬、劃設與資料庫建置」和科技部（2018）「災後地形改變影響全流域水砂運移之模擬、劃設與資料庫建置 II」的愛玉子溪崩塌地判釋成果。

崩塌資料藉由歷年衛星影像進行判釋，在 1999 年至 2014 年之間共完成 15 期的崩塌判釋，受限於衛星影像的空間解析度，部分崩塌判釋成果涵蓋到野溪與河流，導致崩塌面積高估的問題。因此，本計畫重新根據高解析度航拍正射影像，將野溪與河流的區域予以剔除，修正的崩塌判釋成果如所示（圖 4.9）。

本計畫後續將會藉由前、後期數值地表模型相減，獲得各個崩塌地的深度和統計其崩塌的體積，蒐集到數十個崩塌的體積與面積的樣本後，藉由穩健迴歸分析（robust regression）降低估計值偏向離群值的問題（Guzzetti et al., 2009），建立愛玉子溪的崩塌體積-面積關係式（Chen

et al., 2013), 如圖 4.10 示意圖, 該方法以廣泛應用於世界各地之崩塌體積之推估(如; 陳樹群等, 2010; Larsen et al., 2010; Parker et al., 2011; Larsen et al., 2012; Chen et al., 2013)。便可根據此關係式, 輸入衛星影像判釋的崩塌面積, 以推求各個崩塌地的體積。

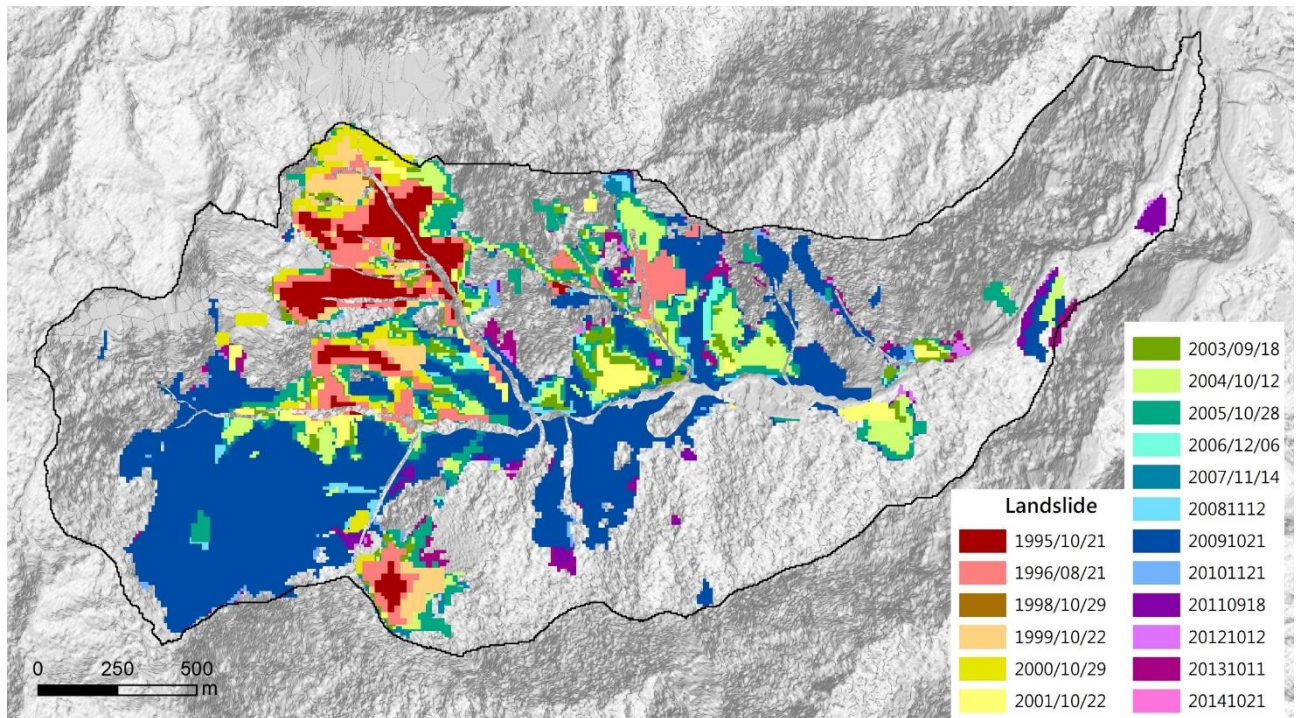
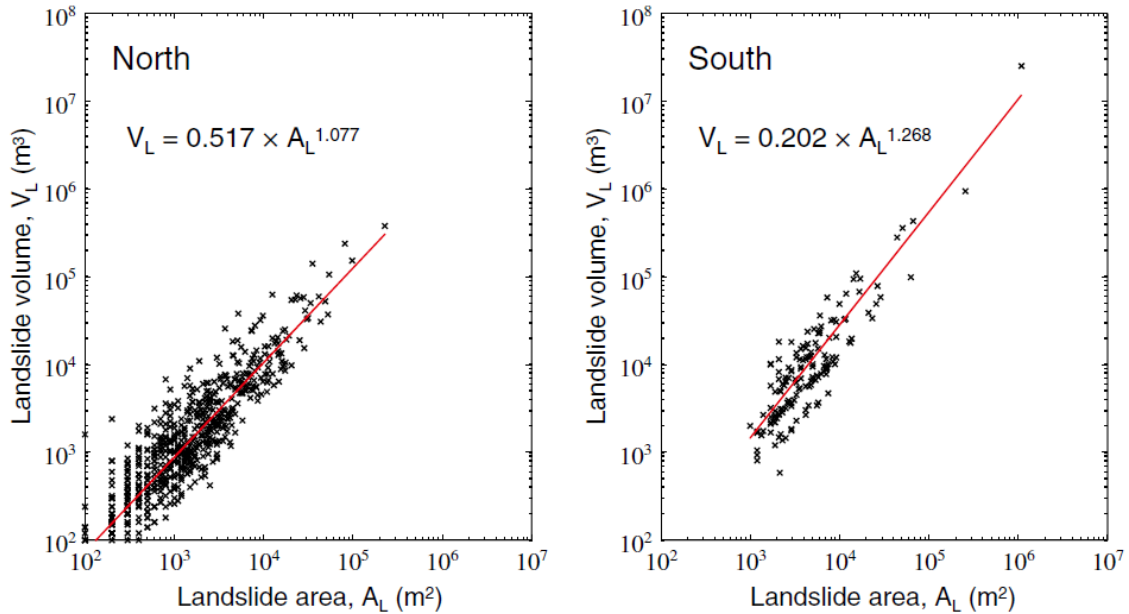


圖 4.9 愛玉子河流域衛星影像崩塌判釋成果



資料來源：Chen et al. (2013)

圖 4.10 崩塌體積-面積關係式的示意圖

(四) 運動恢復結構產製數值地表模型與正射影像

(1) 地面控制點與檢核點

為控制航空攝影測量模型精度與品質，需要藉由控制點率定參數與校正模型。根據何維信（1995）指出控制點進行平差時最少需要六個平面控制點，且須分佈於航帶開始、中間及結束的區域。本計畫的地面控制點有三個來源，分別蒐集自水土保持局（2020）「土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析」、農委會（2017）「多元尺度環境因數對崩塌災害發生誘因之研究」設置的控制點，以及本計畫藉由已建置好的三維模型的點雲，做為歷史航照的控制點的依據。

水土保持局（2020）「土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析」於愛玉子溪土石流野溪中和集水區周圍共設置 35 處控制點（圖 4.11）。在現場作業以白色噴漆在地面上劃定控制點標記，再利用衛星定位儀配合 VBS-RTK（Virtual Base Station Real-Time Kinematic）測量控制點

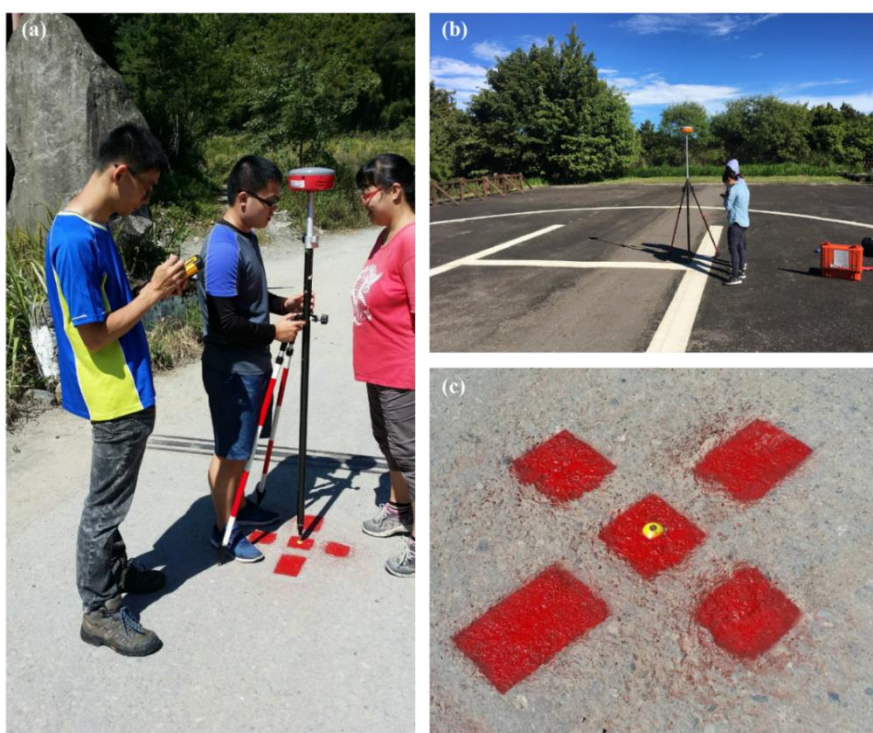
坐標資訊。VBS-RTK 定位技術是藉由多個 GPS 基準站全天候連續地接收衛星資料，彙整計算產生區域改正參數資料庫，提供移動站附近之虛擬基準站的差分訊號，以進行超短距離之 RTK 定位解算，可獲得公分級定位精度，平面和垂直精度優於 2 公分和 5 公分（內政部土地測量局，2006）。



資料來源：水土保持局（2020）「土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析」

圖 4.11 祝山觀景台與愛玉子溪野溪的地面控制點量測

農委會 (2017)「多元尺度環境因數對崩塌災害發生誘因之研究」計畫曾經於愛玉子溪周圍共設置 8 個控制點，在地表釘上控制點樁，並在周圍噴漆標示(圖 4.12)，座標測量採用即時動態後處理技術(post processed kinematic, PPK)。PPK 測量技術是基站與移動站兩台 GPS，將基站需架設在已知點上，移動站同時間採集 GPS 數據，再由程式進行解算與平差求得控制點座標，優點在於不需數據通訊的連接，故較不易受到地形與距離上的限制，且各控制點間的誤差不累積，其精度受到衛星鐘差、軌道誤差、對流層延遲、電離層延遲有關，有效距離約在 50 公里的測量範圍內，能夠在後處理情況下獲得釐米級誤差。其中 GPS 基站位置架設在內政部一等玉泉橋水準點(點號:L056)及阿里山一等衛星控制點(點號:ALIS)上，移動站設定觀測時間為 10 分鐘，並於每 5 秒記錄一筆數據，後解算後可獲得該位置座標。



資料來源：農委會 (2017)「多元尺度環境因數對崩塌災害發生誘因之研究」

圖 4.12 祝山觀景台與愛玉子溪集水區周圍的地面控制點量測

歷史航拍缺乏地面控制點，可透過上述計畫所測量的地面特徵點座標外，如直昇機停機坪符號或神木國小操場外，其它控制或檢核點則需要藉由尋歷史航照中尋找地表未變動的特徵點，從已建置好三維模型的點雲查詢特徵點，做為歷史航照的控制點。本計畫皆採用 2020/05/08 所建置三維模型的點雲資料(模型成果與精度詳如後續說明)做為歷史航照的控制點，因該期三維模型具有最多的控制點校正與檢核，且以相同控制點進行模型校正，能夠降低不同模型之間的系統性誤差。

本計畫所採用的地面控制點與檢核點分佈如圖 4.13 所示，控制點的分佈能夠涵蓋研究區的範圍，同時也能涵蓋集水區最高峰(祝山觀景台)與最下游的河段。此外，本計畫也挑選幾處地面控制點為模型的檢核點，用以驗證模型的精度。

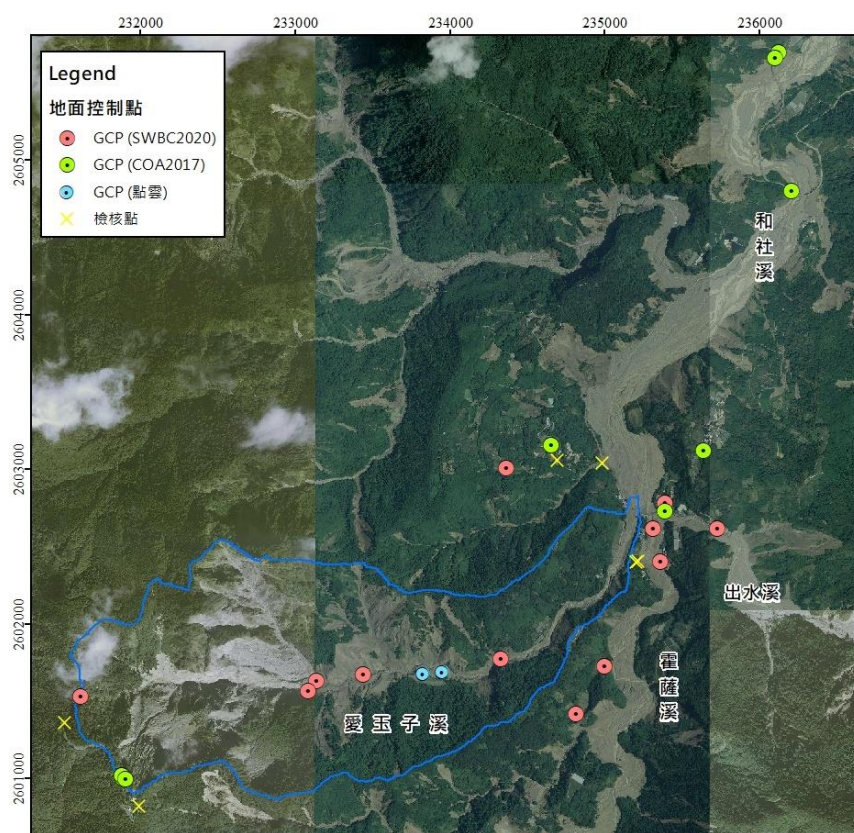


圖 4.13 地面控制點與檢核點的分佈

(2) 運動恢復結構演算

本計畫採用 Pix4D Mapper 專業航空測繪軟體，產製數值高程模型與正射化影像，Pix4D Mapper 發展自瑞士洛桑聯邦理工大學團隊，專門為現今 UAV 航空攝影測量所設計，基於運動恢復結構-多視角攝影 (Structure-from-Motion and Multi-View Stereo, SfM-MVS) 的技術 (圖 4.13)，其特徵點匹配法採用 SIFT 演算法 (Küng et al., 2011)，當相機參數與姿態未知或不精準時時，則需要由多張影像拍攝的物體，反解算相機的位置與姿態，進而計算物體的座標，稱為運動恢復結構原理，計算流程分別輸入多視角拍攝影像，將影像相互匹配後，根據共線性原則率定相機的內、外方位參數，並產生點雲，再將點雲進行空間內插產生正規網格的 DSM，並且將影像鑲嵌成為正射影像 (圖 4.15)。

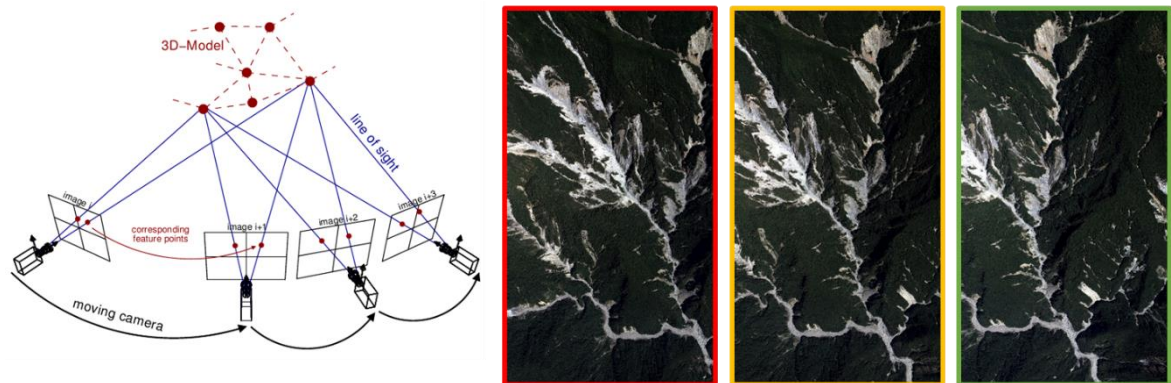


圖 4.14 運動恢復結構示意圖和多視角拍攝影像



圖 4.15 Pix4D Mapper 航空攝影測量軟體產製三維模型示意圖

(5) 數值地表模型與正射影像

表 4.4 為本計畫完成的 17 期的模型的控制點與檢核點誤差分析結果，農航所航拍產製的數值地表模型之對地解析度介於 14.8 – 45.9 公分，檢核點的水準誤差（root mean square error，RMSE）介於 31.8 – 119.8 公分，垂直誤差介於 39.2 – 129.2 公分；UAV 航拍產製的對地解析度介於 5.8 – 20.4 公分，檢核點的水準誤差介於 18.6 – 74.5 公分，垂直誤差介於 24.4 – 84.8 公分。因對農航所航拍的拍攝範圍較廣，地解析度略低，故誤差略大於 UAV 航拍之成果。整體來說，兩種來源的影像產製的數值地表模型的平均誤差小於 1 公尺；垂直誤差小於 2 公尺。4.16 至 4.32 為歷年的正射影像與數值地表模型。

表 4.4 模型控制點與檢核點誤差結果

編號	時間	影像類型	對地解析度 [cm]	控制點誤差 [cm]		檢核點誤差 [cm]	
				(水準、垂直)	(水準、垂直)	(水準、垂直)	(水準、垂直)
01	1999/12/10	農航所航照	33.2	28.3	40.2	86.0	107.8
02	2001/08/02	農航所航照	45.4	42.4	22.6	84.3	60.0
03	2003/03/02	農航所航照	45.9	44.2	55.8	57.6	49.5
04	2004/08/07	農航所航照	31.4	39.3	24.9	69.4	100.9
05	2005/11/28	農航所航照	34.1	35.4	52.5	119.8	129.2
06	2007/01/26	農航所航照	36.3	19.3	63.9	55.4	78.3
07	2008/08/03	農航所航照	36.3	33.5	92.7	67.3	107.4
08	2008/08/26	農航所航照	32.4	34.9	48.6	36.6	65.6
09	2009/11/21	農航所航照	32.1	17.5	38.1	38.0	39.2
10	2013/06/03	農航所航照	33.9	28.7	35.7	39.7	54.3
11	2014/02/17	農航所航照	32.2	21.4	45.3	31.8	49.3
12	2017/10/07	UAV 航拍	20.4	40.7	41.9	42.9	24.4
13	2018/05/29	UAV 航拍	5.8	9.1	9.2	74.5	65.6
14	2019/01/11	農航所航照	33.5	42.9	37.2	64.4	58.7
15	2020/05/08	UAV 航拍	17.2	72.4	72.7	58.5	77.7
16	2020/10/20	UAV 航拍	14.8	4.5	7.6	41.5	84.8
17	2021/09/08	UAV 航拍	17.7	17.9	31.8	18.6	73.0

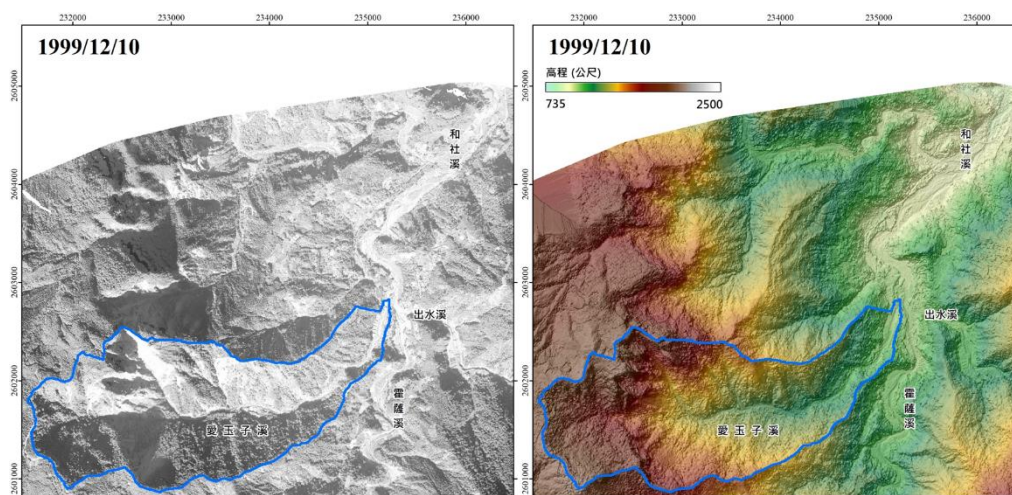


圖 4.16 1999/12/10 正射影像與數值地表模型

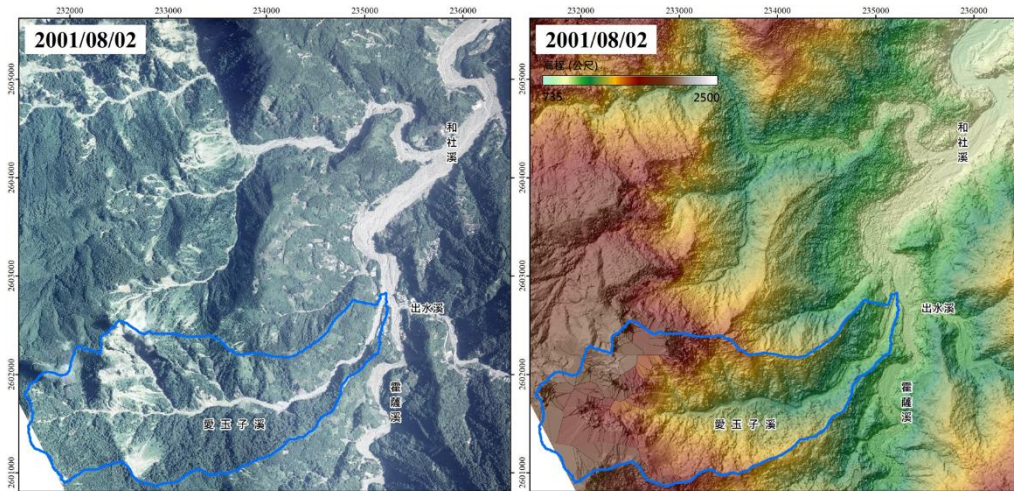


圖 4.17 2001/08/02 正射影像與數值地表模型

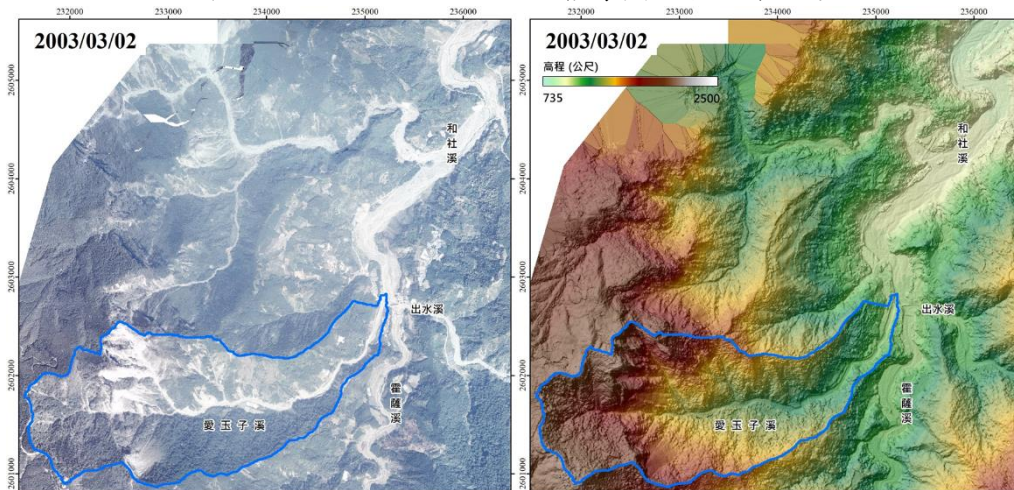


圖 4.18 2003/03/02 正射影像與數值地表模型

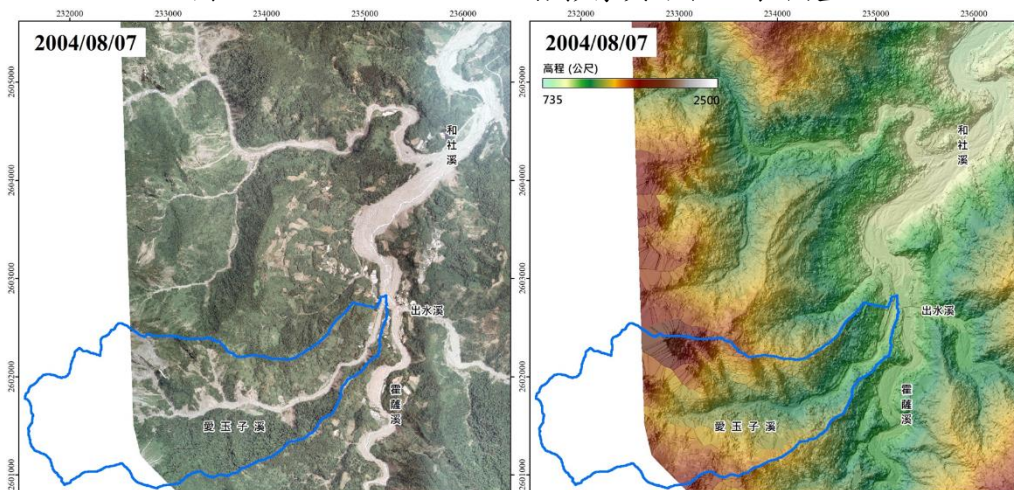


圖 4.19 2004/08/07 正射影像與數值地表模型

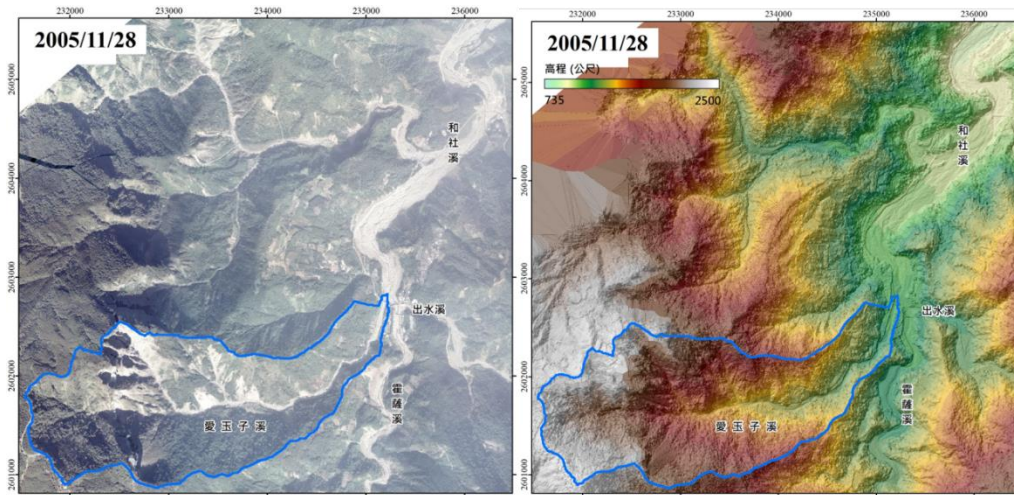


圖 4.20 2005/11/28 正射影像與數值地表模型

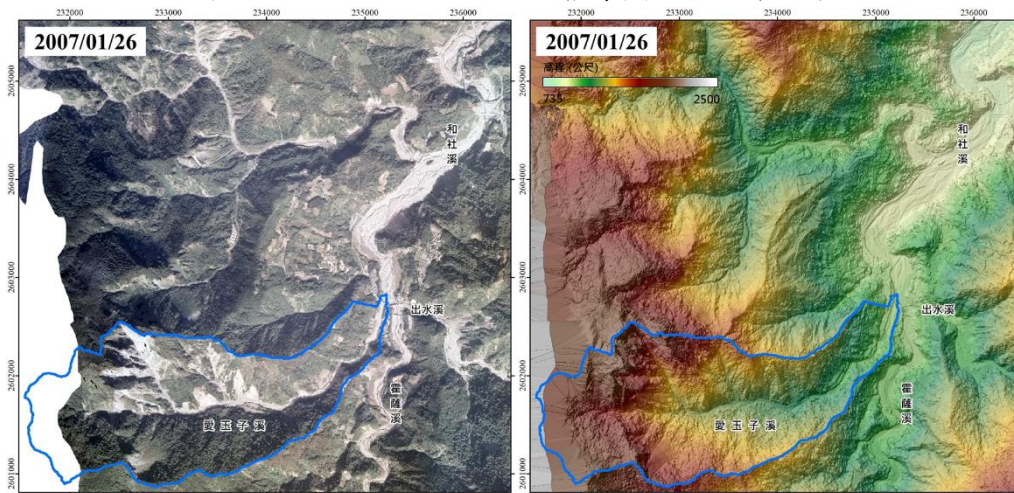


圖 4.21 2007/01/26 正射影像與數值地表模型

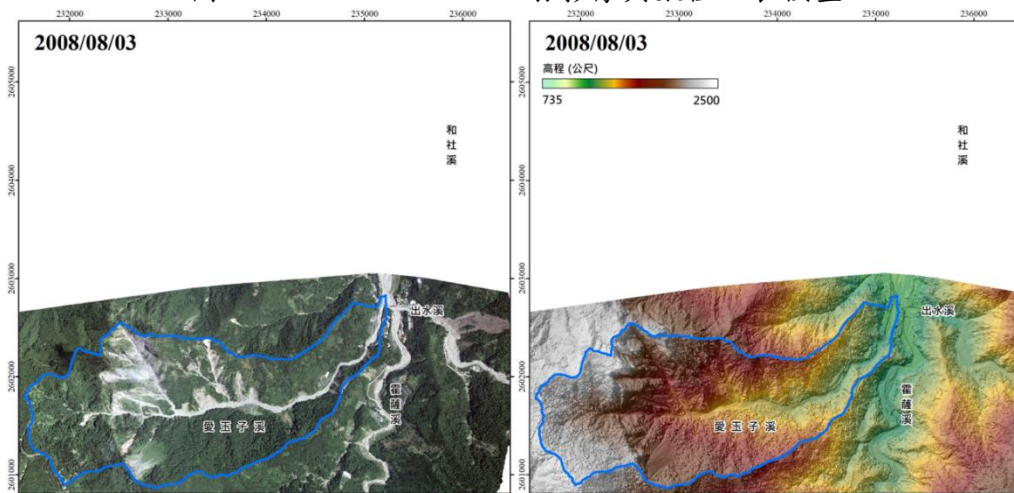


圖 4.22 2008/08/03 正射影像與數值地表模型

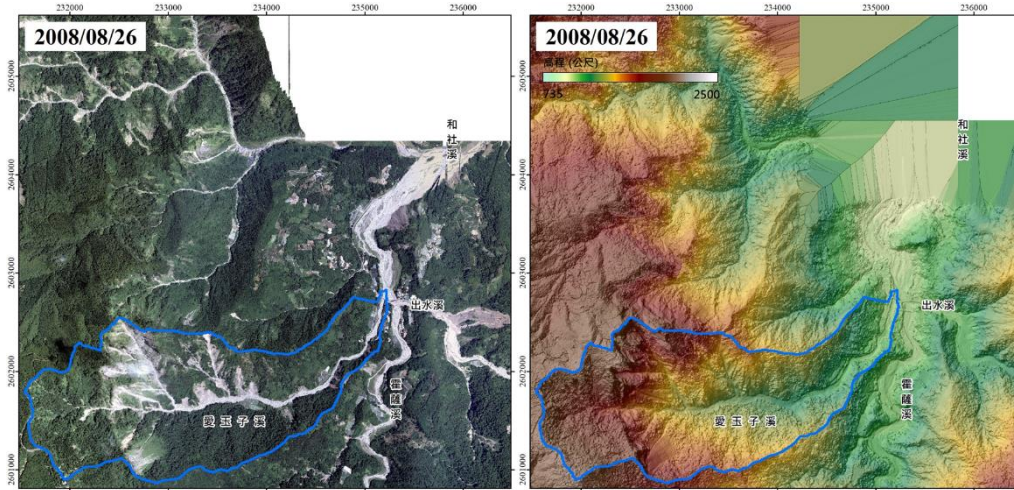


圖 4.23 2008/08/26 正射影像與數值地表模型

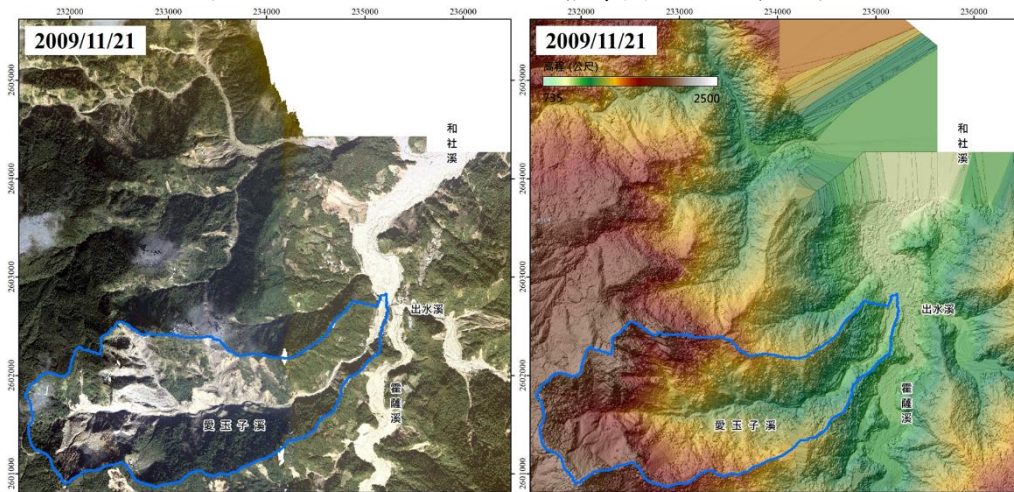


圖 4.24 2009/11/21 正射影像與數值地表模型

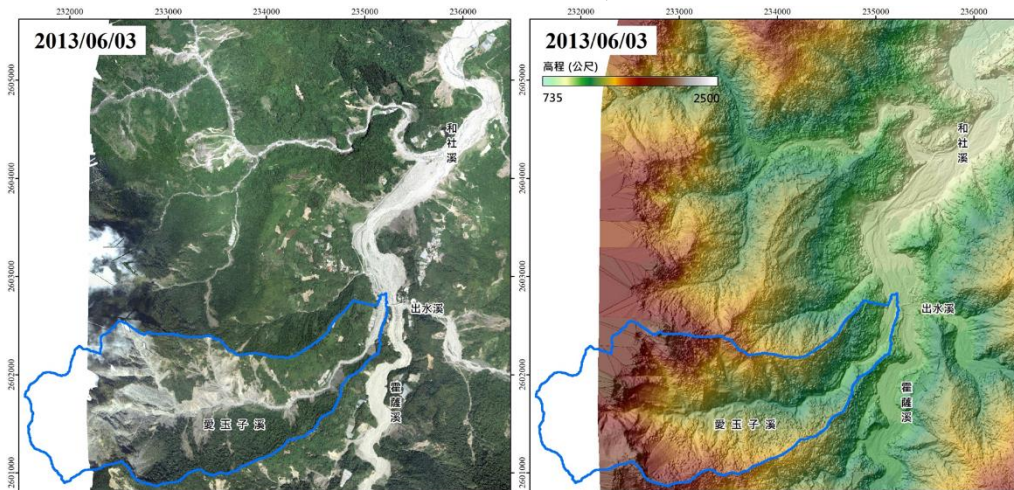


圖 4.25 2013/06/03 正射影像與數值地表模型

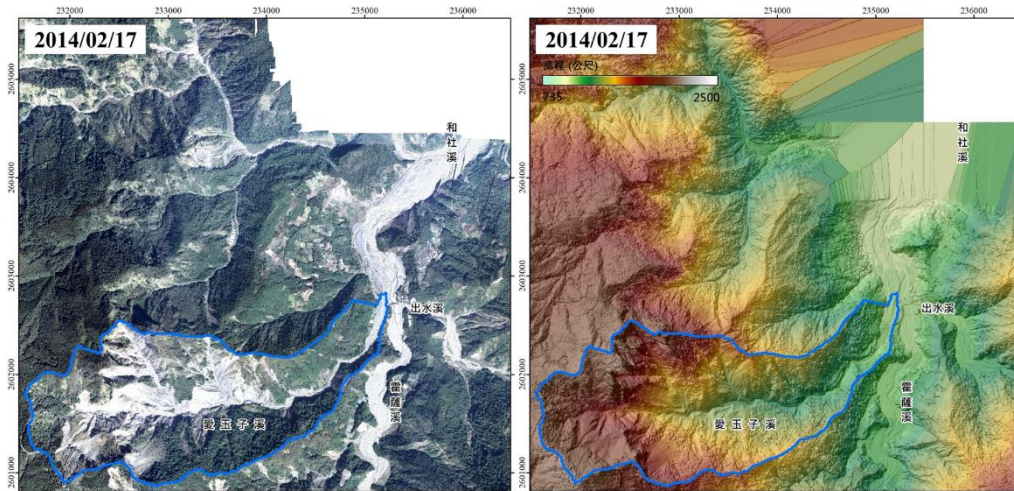


圖 4.26 2014/02/17 正射影像與數值地表模型

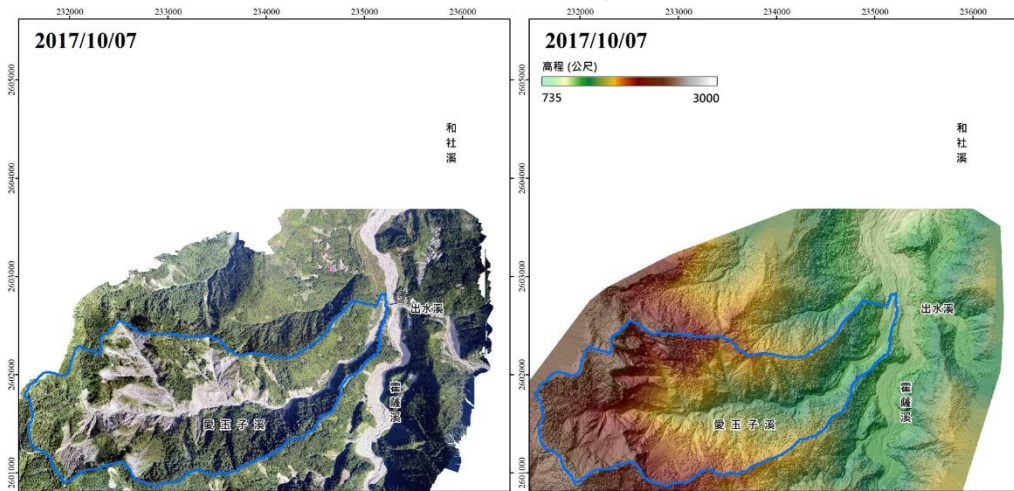


圖 4.27 2017/10/07 正射影像與數值地表模型

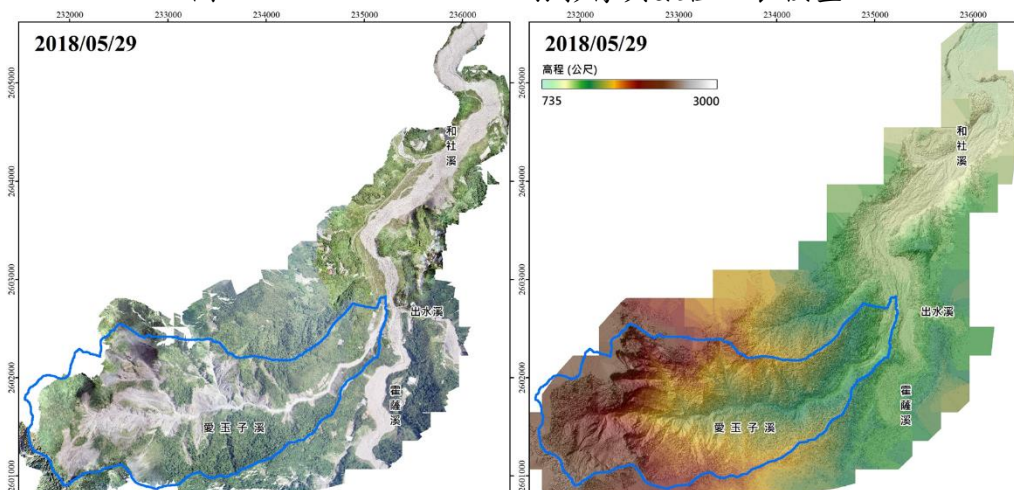


圖 4.28 2018/05/29 正射影像與數值地表模型

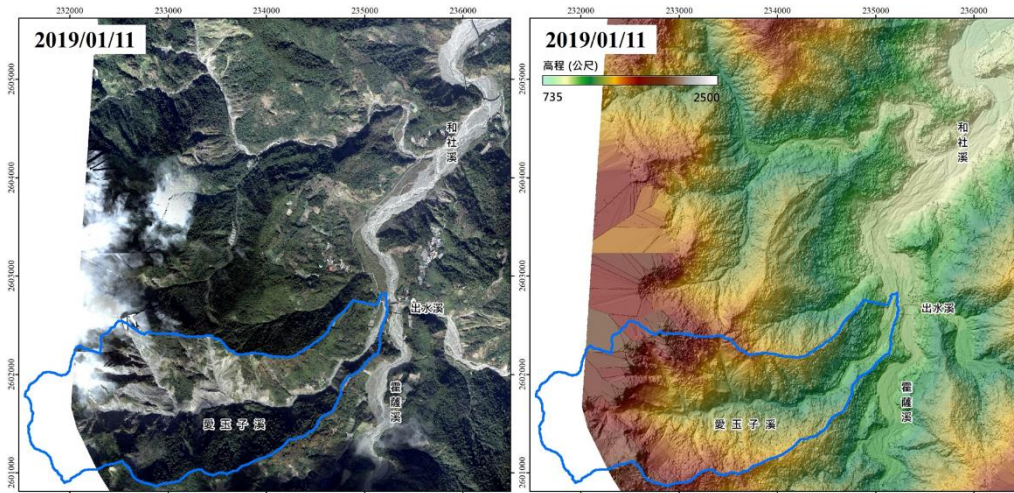


圖 4.29 2019/01/11 正射影像與數值地表模型

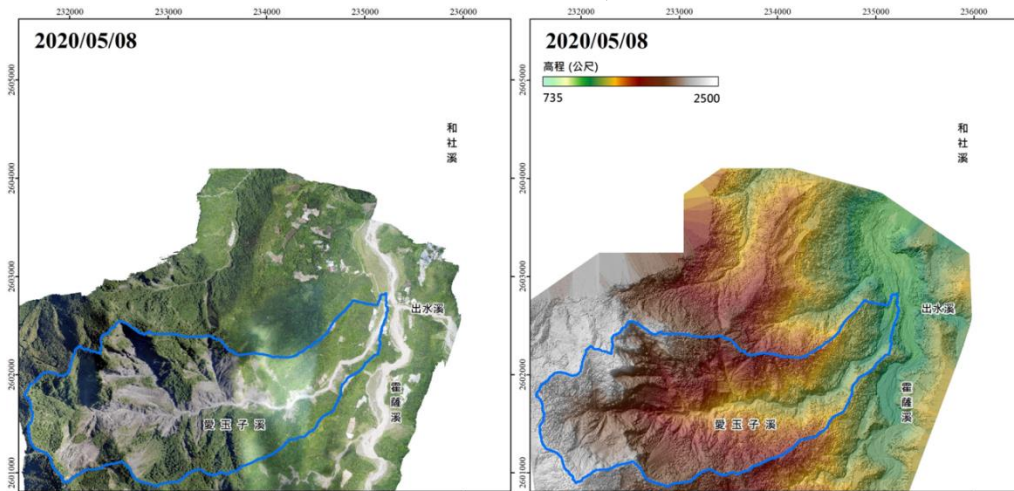


圖 4.30 2020/05/08 正射影像與數值地表模型

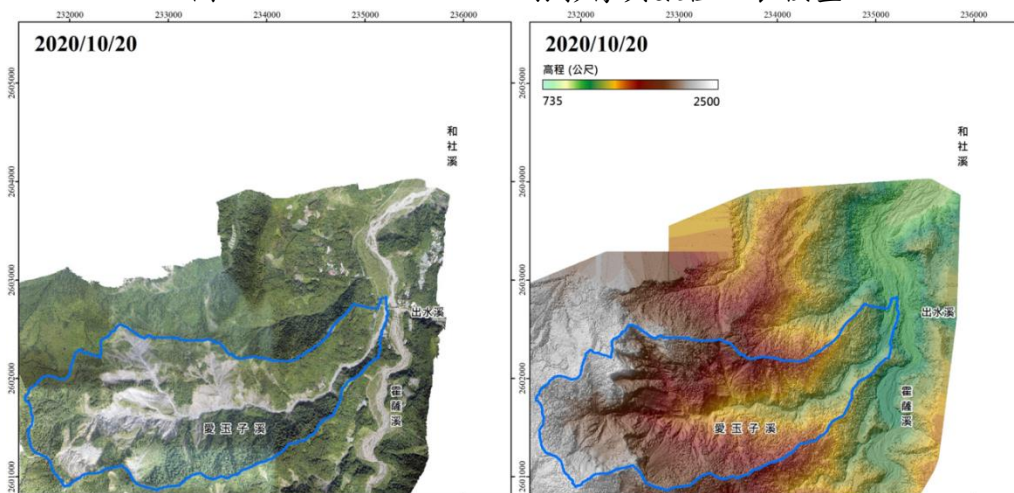


圖 4.31 2020/10/20 正射影像與數值地表模型

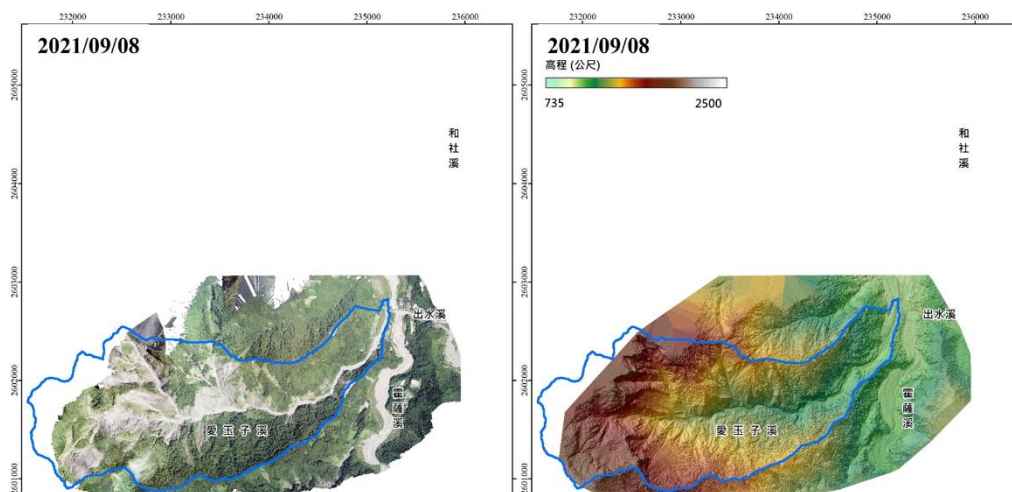


圖 4.32 2021/09/08 正射影像與數值地表模型

第二節 數值地表模型相減與樹冠層高度

在取得歷年數值地表模型與正射影像後，可藉由前、後期的數值地表模型相減，分析地形變化量，然而航照影像屬於皆屬光學影像，無法穿透森林的樹冠層，故產製的數值地表模型（Digital Surface Model，DSM）包含建物、樹冠層之高程資訊。若直接將兩期的數值地表模型相減時，前、後兩期地表覆蓋為裸露地的地區，樹冠層高度不會造成影響，如舊崩塌、野溪、河道等。但是對於前期為地表覆蓋為森林，後期轉變為裸露地的區域，如新生崩塌地與河岸侵蝕等，便會嚴重高估崩塌的深度，或低估土砂堆積的深度。而愛玉子溪流流域絕大多數的地表覆蓋為森林，建物的影響相對較小，可以予以忽略，因此，若要解決上述問題，則需要對於研究區內的樹冠層高度和地表覆蓋範圍進行測量與數化。

本計畫將透過樹高測量與裸露地人工數化的方式，來校正樹冠層導致的誤差，其概念如圖 4.32 所示。計算規則如下：

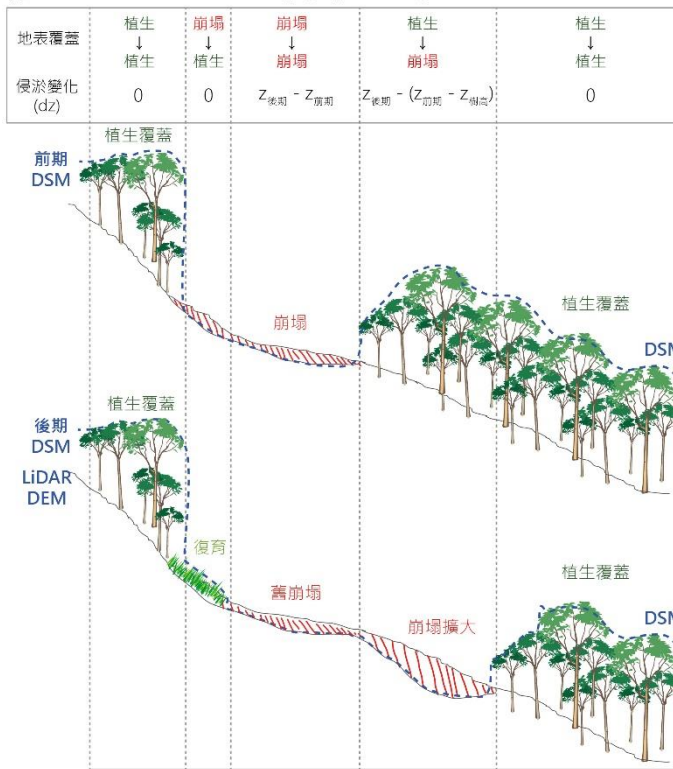
- (a) 前後皆為植生時，地形變化量 = 0
- (b) 前後皆為裸露地時，地形變化量 = 後期高程 - 前期高程
- (c) 由植生變成裸露地時，地形變化量 = 後期高程 - [前期高程 -

樹高]

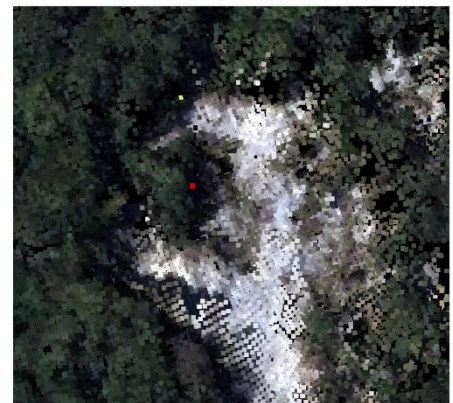
(d) 由裸露地復育為植生，地形變化量 = 0

樹高的測量方法是根據三維模型的點雲資料，分別測量樹冠層和鄰近裸露地的三維座標 (4.33b)，將裸露地的 XYZ 座標 (4.33c 中紅色圓點) 以克利金空間內差(Kriging interpolation)計算樹底的地面高程 (4.33c 綠色線段底部)，再計算每個樹冠層點雲的樹高 (4.33c 綠色箭頭頂部)，相減後得到該樹叢的平均樹高。本計畫將根據上述的方法，計算出愛玉子溪流域內與周遭的樹冠層高度的分佈，此外，也將透過野外樹高調查，以確認此方法計算樹高的準確性。相關分析成果將於期末報告階段呈現。

(a) Schematic of calculation of topographic change from two DSMs



(b) Measuring the coordinates of tree and ground



(c) Interpolation of tree heights

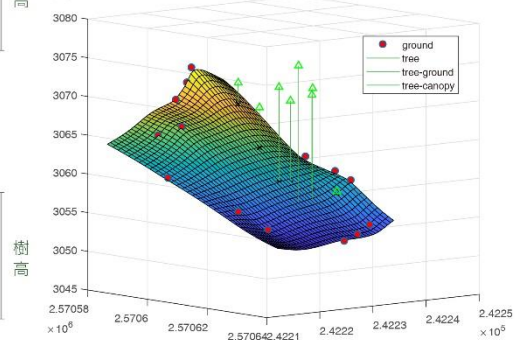


圖 4.33 兩期數值地表模型相減分析土砂侵淤量的示意圖

在圖 4.33 中，(a)呈現前、後期地表覆蓋組合所採用的計算方法，其中當前期為植生轉變為崩塌或裸露地時，則需要考慮樹冠層的高度 Z

樹高，(b)藉由點雲資料量測樹冠層和周圍裸露地的 XYZ 的資訊，(c)藉由裸露地的點雲 XYZ（紅色圓圈）進行克利金（Kriging）空間內插樹冠層底下的高程（綠色線段底部），與樹冠層高程（綠色箭頭頂部）相減後得到該樹叢的平均樹高。

由於本計畫產製的數值地表模型存在一定的誤差，將前、後期數值地表模型相減亦會使誤差傳遞（error propagation）而放大。為減少數值地表模型誤差影響估算的地形變化量，本計畫將從歷年正射影像中尋找固定不動的區域，例如道路、停車場、裸岩、民宅前的空地等，以 2002/05/08 期的數值地表模型為基準期，統計固定不動點的範圍內，各時期相對於基準期的高程誤差，再將該誤差進行克利金空間內插，減少歷年的數值地表模型與基準期之間的誤差。

第三節 愛玉子溪歷年地形變化

將歷年數值高程模型相減，扣除樹冠層高度，得到愛玉子溪歷年地形變化，如 4.34 至圖 4. 所示。愛玉子溪邊坡與河道土砂變動量計算結果如表 4.5 所示。

1999/12/10 至 2001/08/02 期間（圖 4.34(a)），愛玉子河流域主要降雨事件為 1999 年桃芝颱風，邊坡侵蝕量 53.6 萬方；堆積 24.9 萬方，上游野溪河段呈現大量侵蝕，淨侵蝕量 135.5 萬方，和社溪則呈現淤積的現象，係因集集地震於愛玉子溪產生鬆散的土砂堆積，於桃芝颱風期間被沖刷、搬運至下游的和社溪。

2001/08/02 至 2003/03/02 期間（圖 4.34(b)），集水區最大降雨事件為 2002 年雷馬遜颱風，邊坡無明顯的新增崩塌地，邊坡侵蝕量 28.0 萬方；堆積量 18.5 萬方，上游野溪河段呈現侵蝕，淨侵蝕量 10.7 萬方，下游和社溪明顯侵蝕，可能小型洪水將原本大量堆積的泥沙侵蝕與搬運。

2003/03/02 至 2004/08/07 期間 (圖 4.34(c))，愛玉子溪流域主要降雨事件為 2004 年敏督利颱風，在愛玉子溪中游產生許多的崩塌地，邊坡侵蝕量 75.3 萬方；堆積量 41.5 萬方。野溪河段則以侵蝕和淤積互現，淨堆積量 2.4 萬方，愛玉子溪匯流至和社溪後，使和社溪河床整體呈現淤積，在曲流得凹岸處則有明顯的側蝕發生。

2004/08/07 至 2005/11/28 期間 (圖 4.34(d))，主要降雨事件為 2005 年海棠颱風，愛玉子溪中游產生兩處較大的崩塌，且舊崩塌持續擴大的現象，邊坡侵蝕量 46.4 萬方；堆積量 49.4 萬方。野溪河段侵淤積互現，淨侵蝕量 8.8 萬方，和社溪則以侵蝕為主。

2005/11/28 至 2007/01/26 期間 (圖 4.34(e))，主要降雨事件為 2006 年 612 豪雨，邊坡舊崩塌持續沖刷與擴大，邊坡侵蝕量 19.8 萬方；堆積量 23.7 萬方，愛玉子溪野溪以堆積為主，淨堆積量 22.6 萬方，和社溪呈現侵蝕和淤積互現，侵蝕主要發生在河道轉彎處。

2007/01/26 至 2008/08/03 期間 (圖 4.4(f))，主要降雨事件為 2007 年柯羅莎颱風，集水區中游北岸之邊坡地崩塌持續向源侵蝕，使得崩塌地持續擴大，邊坡侵蝕量 71.4 萬方；堆積量 12.8 萬方。愛玉子溪野溪以侵蝕為主，淨侵蝕量 70.5 萬方，和社溪的侵淤量不明顯。

2008/08/03 至 2008/08/26 期間(圖 4.3 錯誤! 找不到參照來源。5)，無侵台颱風事件，僅有為午後熱對流雨，邊坡與河道地形無明顯變化，僅有少量的舊崩塌沖刷。

2008/08/26 至 2009/11/21 期間 (圖 4.36)，主要降雨事件為 2009 年莫拉克颱風，在祝山觀景台下邊坡產生一處深層大規模崩塌，崩塌平均深度約為 50 公尺，大規模崩塌的下邊坡出現侵淤互現，可能為崩塌崖錐堆積所致，邊坡侵蝕量 1029.6 萬方；堆積量 526.5 萬方。愛玉子溪中下游野溪地形變化則以侵蝕為主，野溪中游整體侵蝕量遠大於堆積

量，淨侵蝕量達 155.8 萬方，因野溪的坡度陡峭，崩塌土石和與水混和後形成土石流，土石流搬運過程中對河床與河岸產生侵蝕之捲增效應，這些大量的土砂被搬運至和社溪後，將大量土砂搬運出集水區，導致與和社溪之匯流口大量淤積，淤積深度介於 10-20 公尺之間。

2009/11/21 至 2013/06/03 期間(圖 4.37)，主要降雨事件為 2012 年蘇拉颱風，集水區邊坡在莫拉克颱風後仍相當不穩定，集水區上游有量大新增崩塌地，邊坡侵蝕量 303.0 萬方；堆積量 56.7 萬方，許多崩塌堆積於愛玉子溪野溪，但水流也將莫拉克颱風所堆積的泥沙沖刷，野溪整體以侵蝕為主，淨侵蝕量 12.2 萬方，和社溪則呈現侵蝕和淤積互現。

2013/06/03 至 2014/02/17 期間(圖 4.38)，主要降雨事件為 2013 年蘇力颱風，位於上游大規模崩塌持續擴大，產生許多新崩塌地，邊坡侵蝕量 52.3 萬方；堆積量 55.6 萬方，新增邊坡土砂堆積於野溪，淨侵蝕量 49.0 萬方，和社溪整體以堆積為主，但位於愛玉子溪匯流處的主深刷深的現象。

2014/02/17 至 2017/10/07 期間(圖 4.39)，主要降雨事件為 2014 年的麥德姆颱風和杜鵑颱風、2015 年的蘇迪勒颱風、與 2016 年的梅姬颱風和海棠颱風和 2017 年 6 月的豪雨事件，邊坡崩塌加深與擴大，並堆積在下邊坡形成崖錐，位於中游南側的崩塌擴大最為明顯，邊坡侵蝕量 91.0 萬方；堆積量 48.0 萬方。愛玉子溪野溪以堆積為主，淨侵蝕量 18.6 萬方。

2017/10/07 至 2018/05/29 期間(圖 4.40)，無重大颱風或豪雨事件，但在集水區上游南坡仍有新增崩塌，邊坡侵蝕量 30.7 萬方；堆積量 18.9 萬方。愛玉子溪野溪以侵蝕為主，淨侵蝕量 8.5 萬方。

2018/05/29 至 2019/01/11 期間(圖 4.41)，無重大颱風事件，邊坡侵蝕量 23.1 萬方；堆積量 22.4 萬方。愛玉子溪野溪以堆積為主，淨堆

積量 15.4 萬方。2019/01/11 至 2020/05/08 期間 (圖 4.42)，無重大豪雨事件。然而，由於 2019/01/11 影像其上游因雲霧較多，陰影較為明顯，該時期數值高程模型誤差較大，故估算的邊坡崩塌量之誤差較大。

2020/05/08 至 2020/10/20 期間 (圖 4.43)，無重大豪雨事件，這段期間邊坡崩塌明顯復育，僅在流域上游、的舊崩塌地上有較明顯的土砂變動與崩塌地擴大的情形，邊坡侵蝕量 11.9 萬方；堆積量 11.7 萬方。愛玉子溪野溪河道的侵蝕和淤積狀況皆不明顯，淨侵蝕量 3.2 萬方。

2020/10/20 至 2021/09/08 期間 (圖 4.44)，主要降雨事件為 2021 年盧碧颱風，集水區土砂變化量不明顯，僅在零星舊崩塌有持續沖刷的現象，邊坡侵蝕量 11.6 萬方；堆積量 7.8 萬方。愛玉子溪野溪以侵蝕為主，淨侵蝕量 2.4 萬方，下游的和社溪則是侵淤互現。

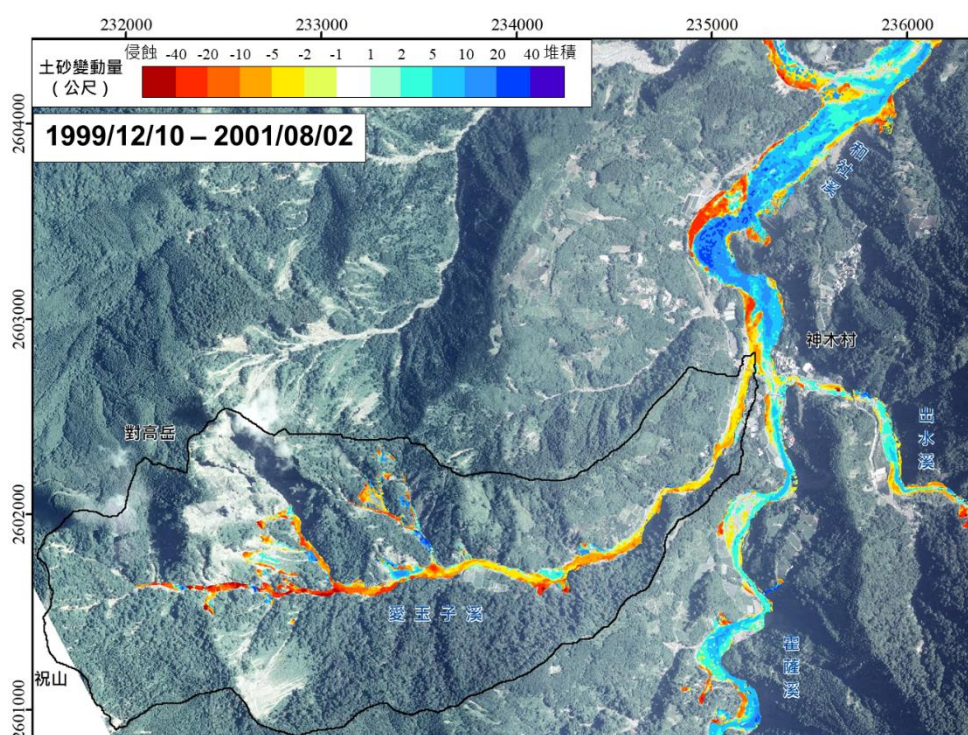


圖 4.34(a) 1999/12/10-2001/08/02 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

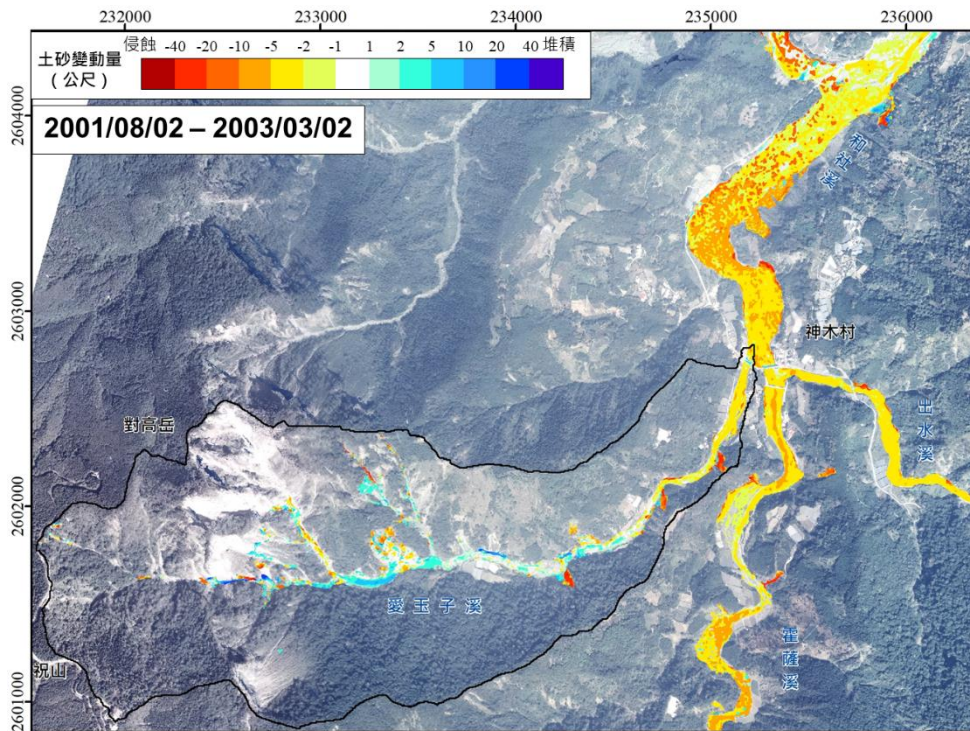


圖 4. 34(b) 2001/08/02-2003/03/02 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

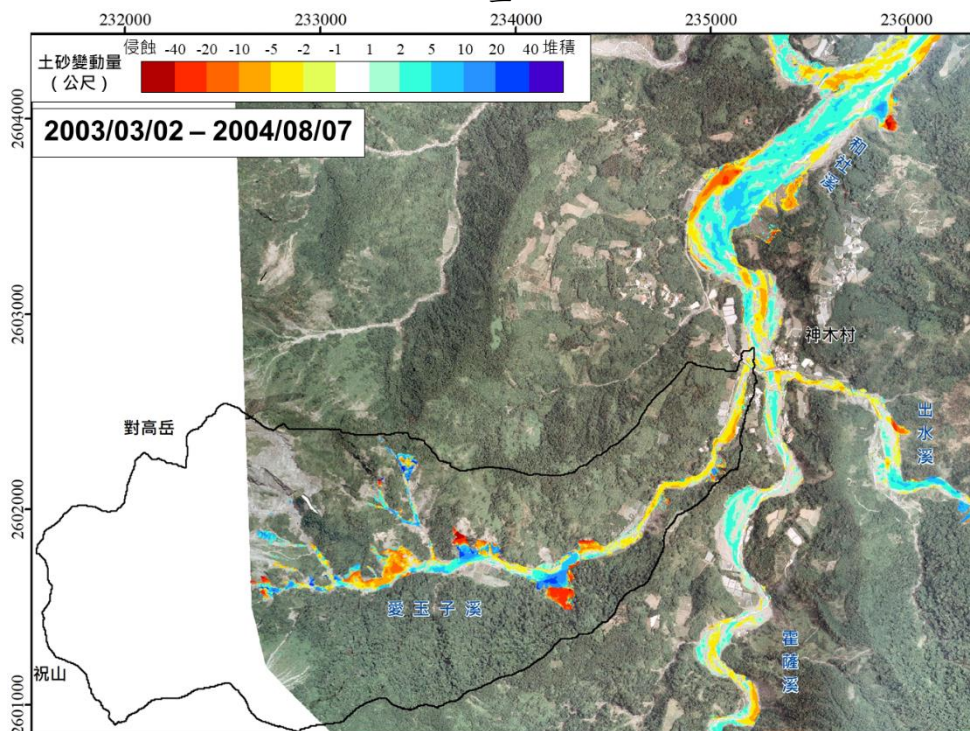


圖 4. 34(c) 2003/03/02-2004/08/07 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

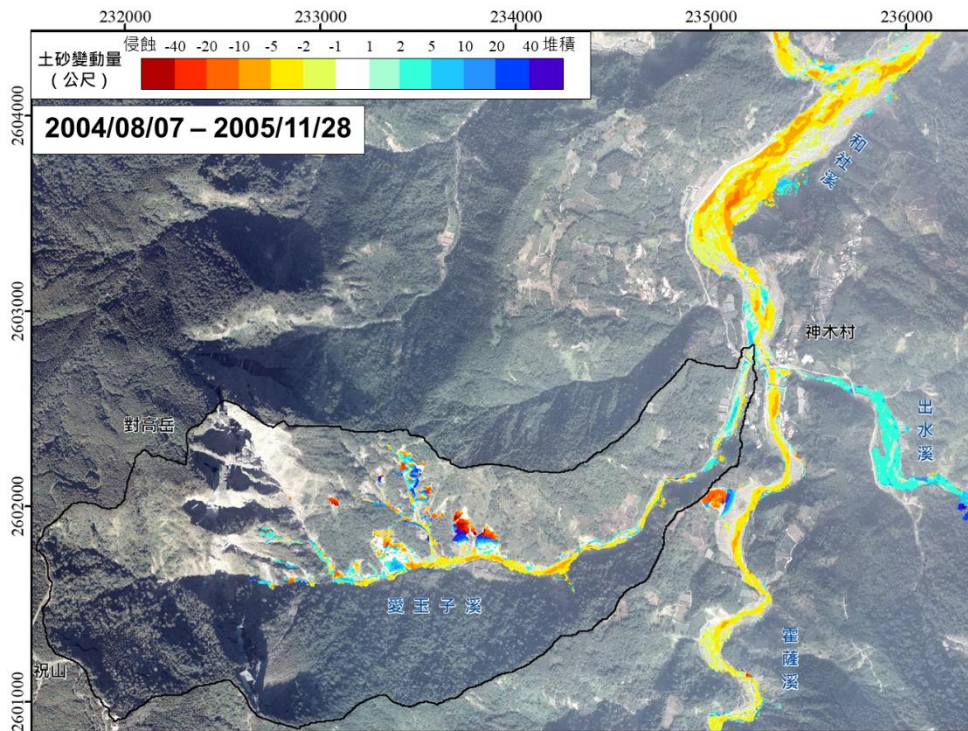


圖 4. 34(d) 2004/08/07-2005/11/28 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

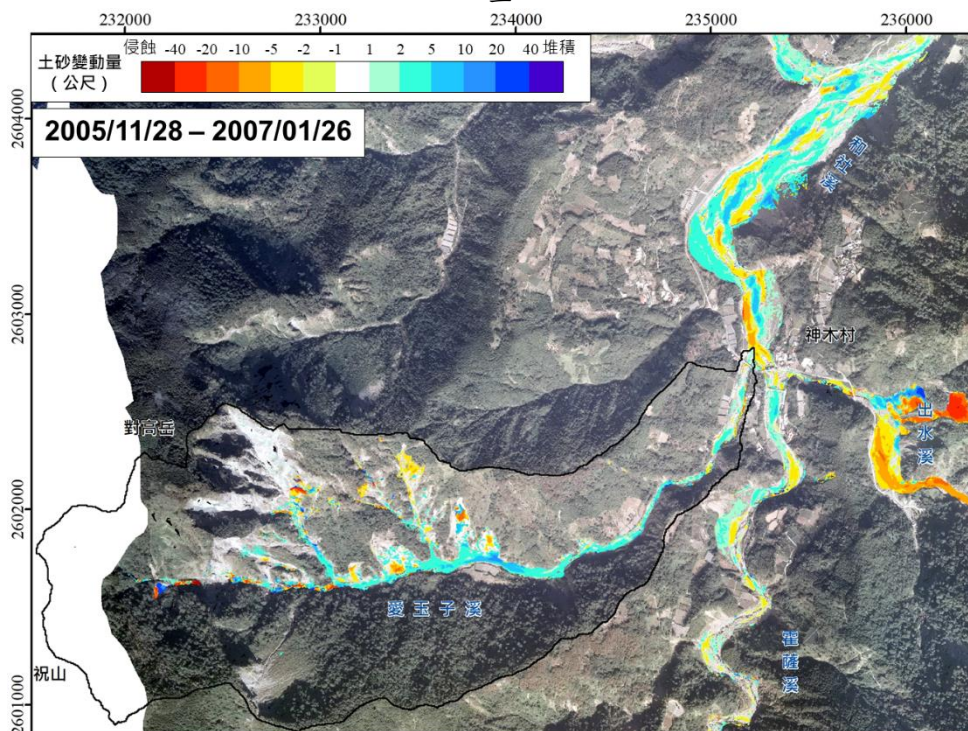


圖 4. 34(e) 2005/11/28-2007/01/26 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

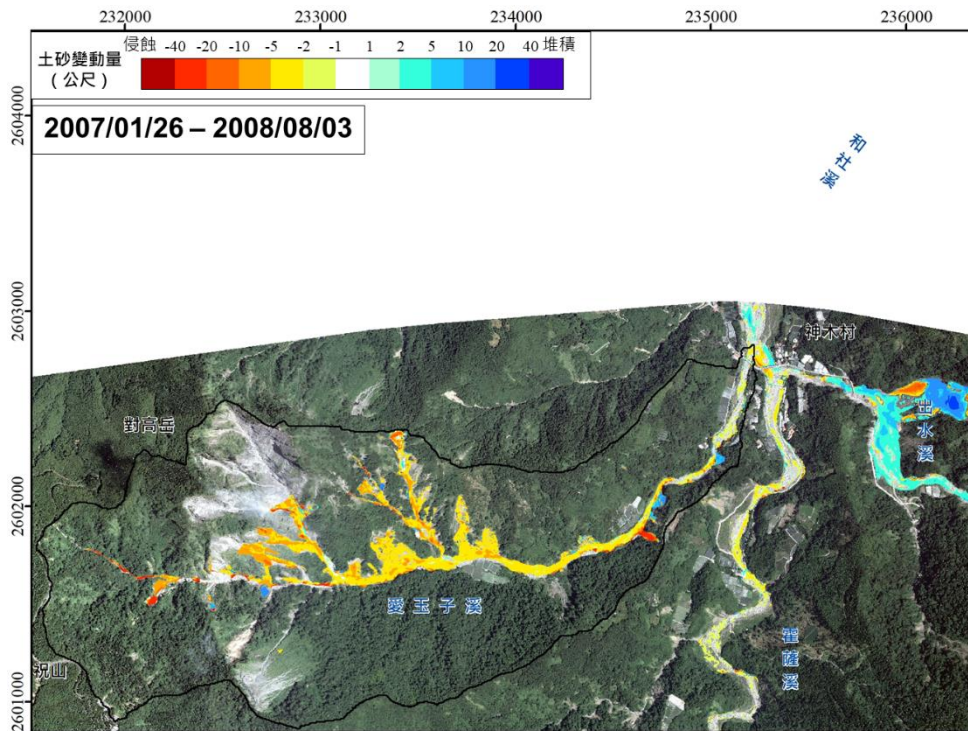


圖 4.34(f) 2007/01/26-2008/08/03 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

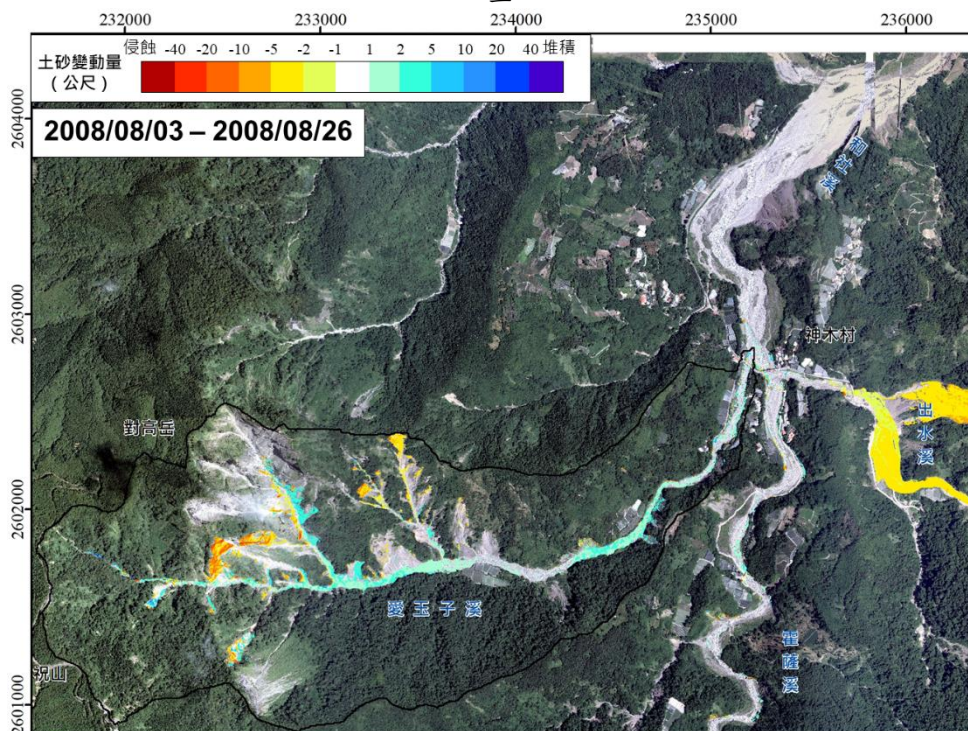


圖 4.35 2008/08/03-2008/08/26 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

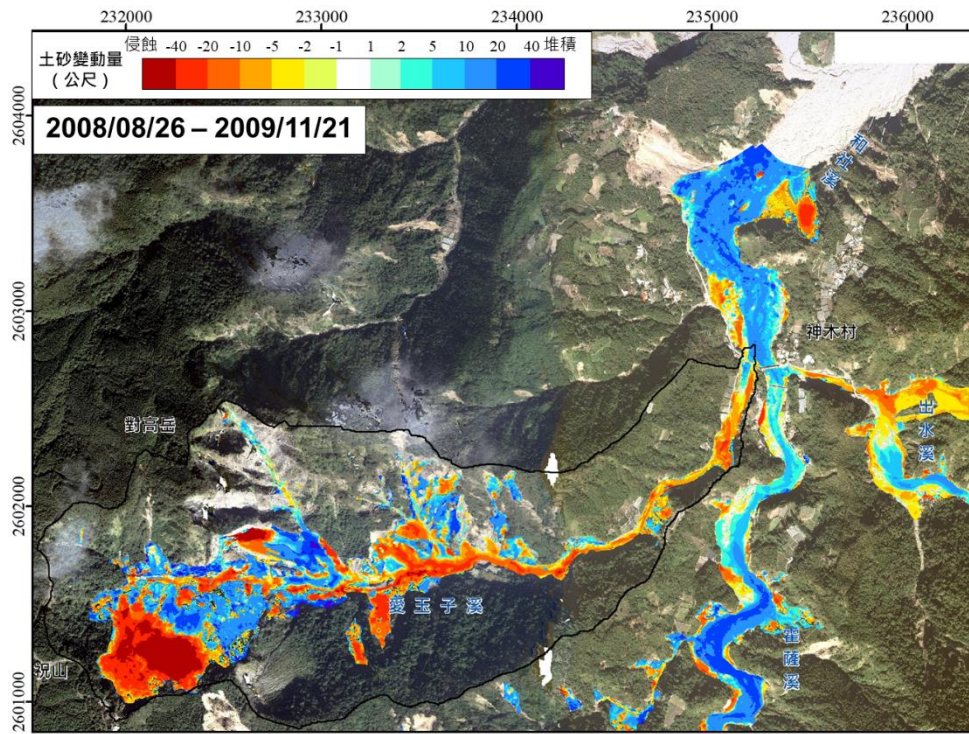


圖 4.36 2008/08/26-2009/11/21 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

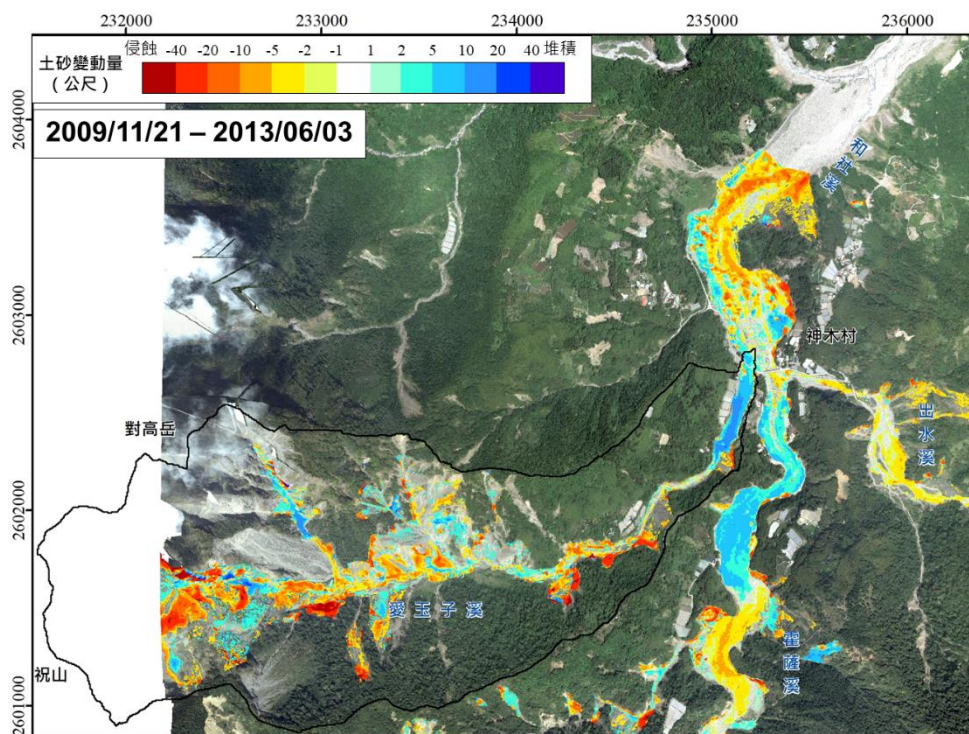


圖 4.37 2009/11/21-2013/06/03 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

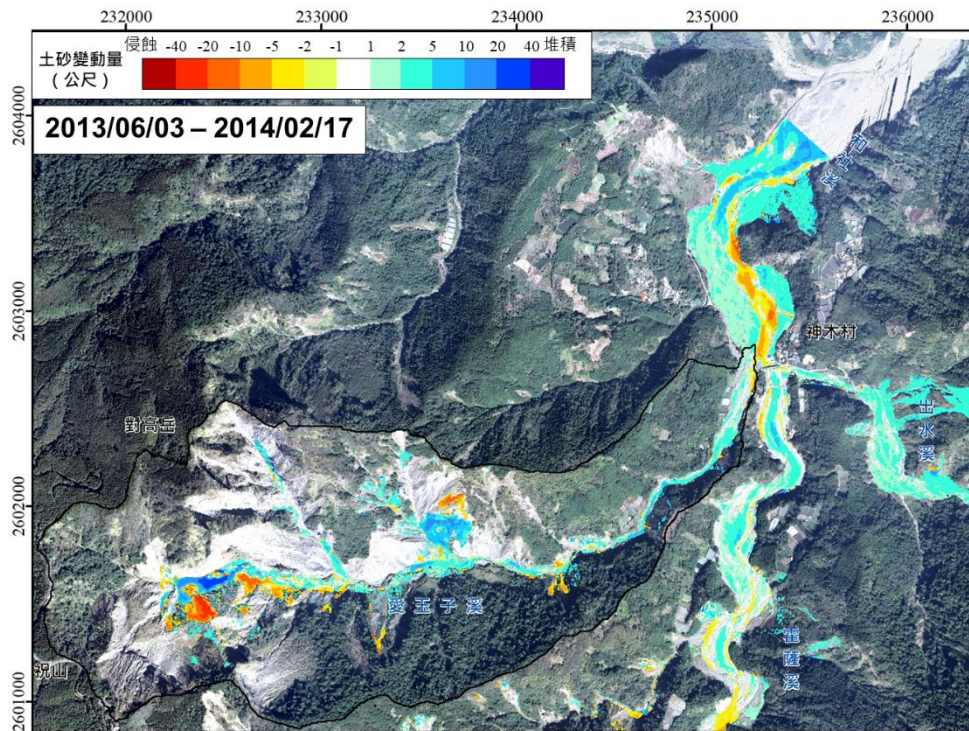


圖 4.38 2013/06/03-2014/02/17 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

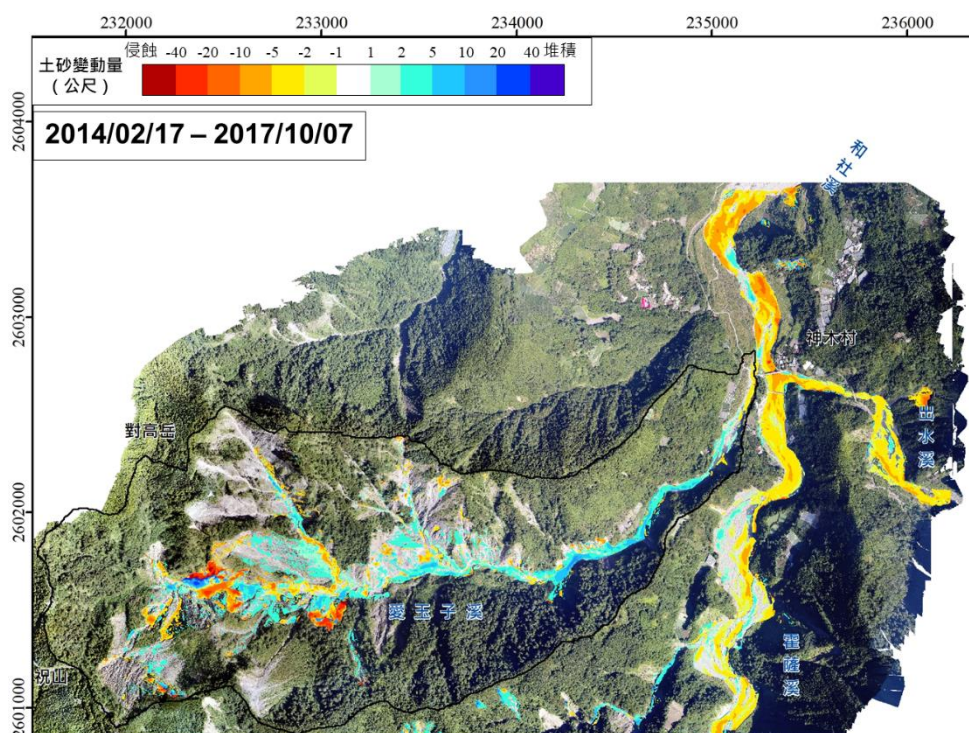


圖 4.39 2014/02/17-2017/10/07 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

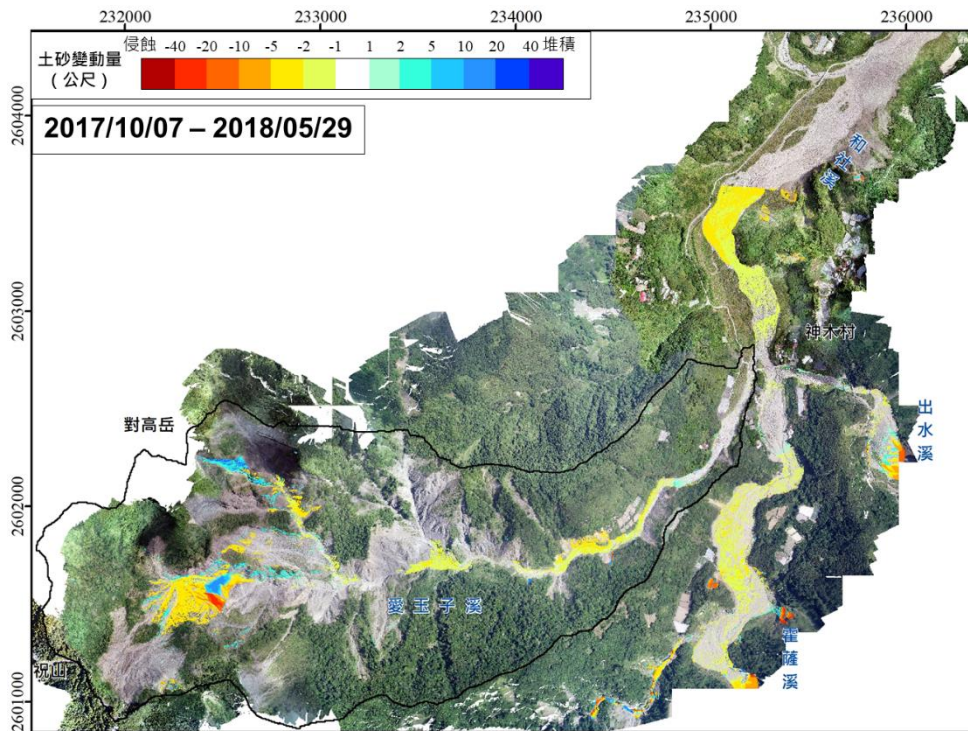


圖 4.40 2017/10/07-2018/05/29 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

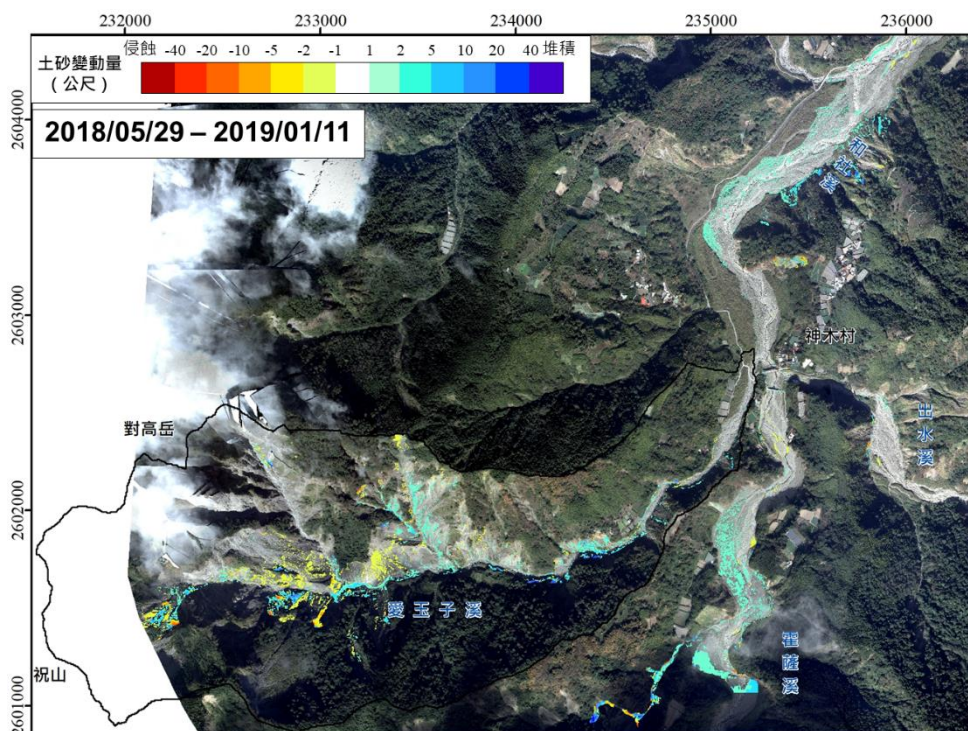


圖 4.41 2018/05/29-2019/01/11 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

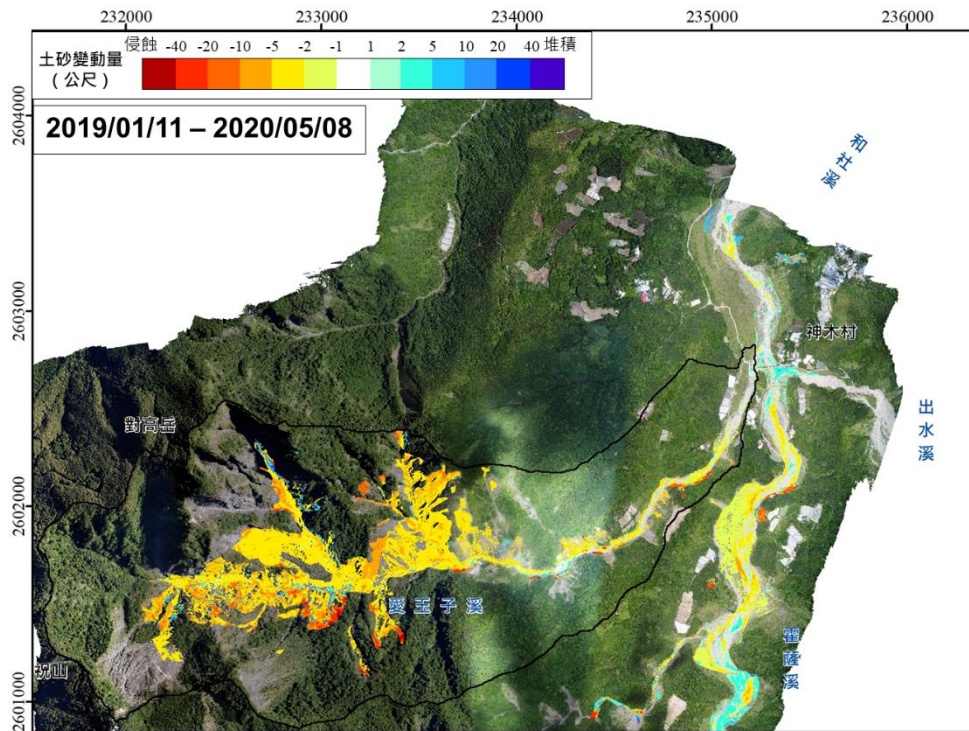


圖 4.42 2019/01/11-2020/05/08 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

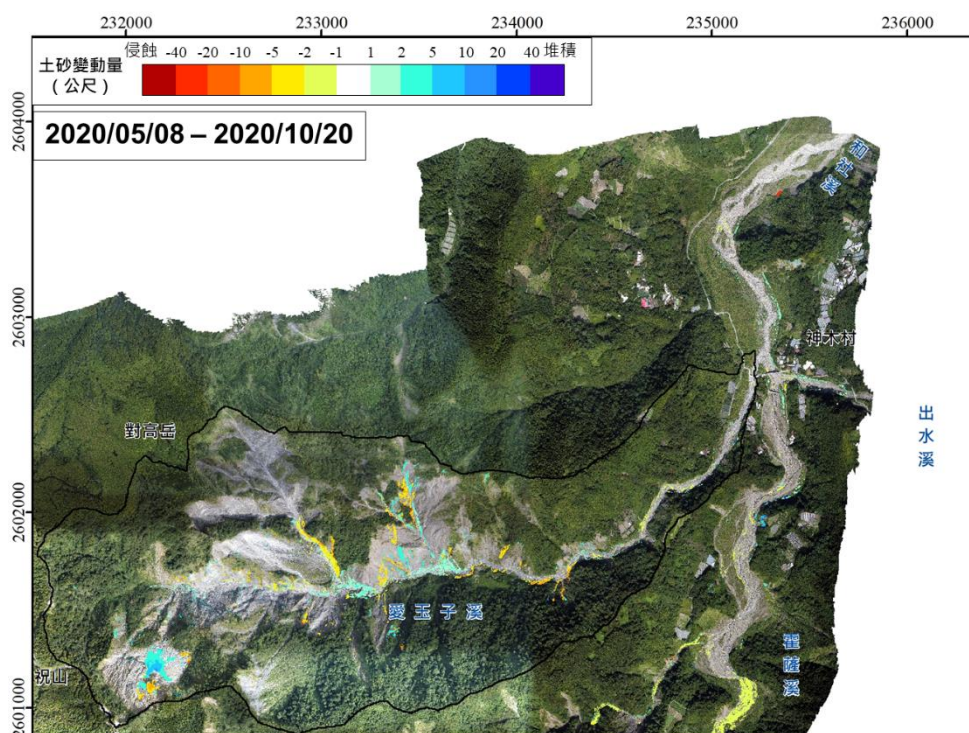


圖 4.43 2020/05/08-2020/10/20 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

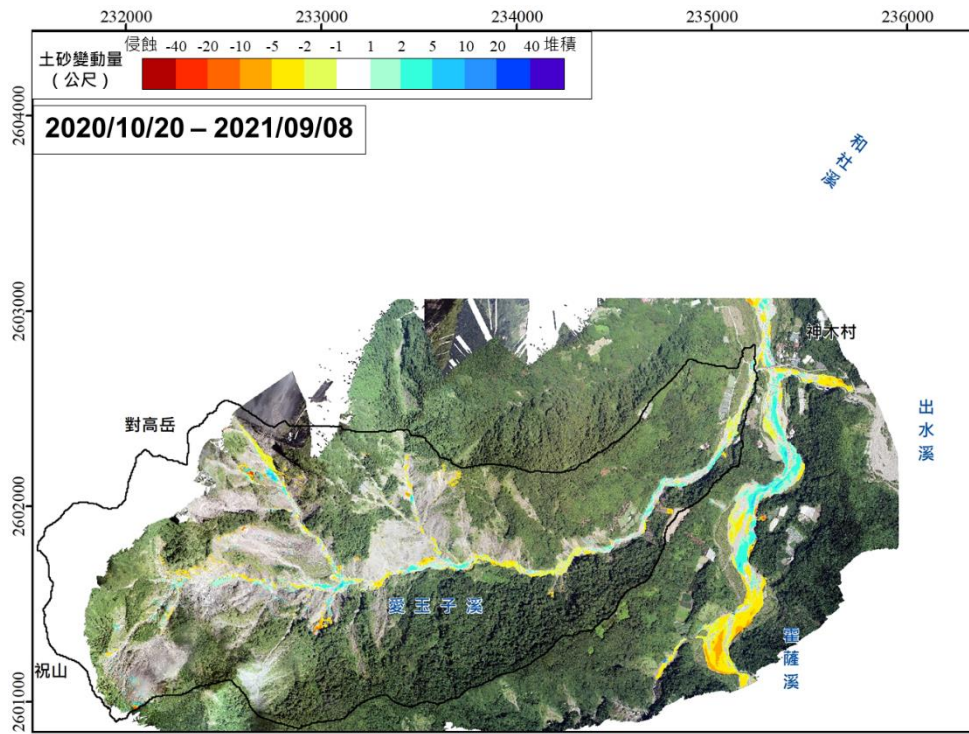


圖 4.44 2020/10/20-2021/09/08 愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量

表 4.5 愛玉子溪邊坡與河道土砂變動量計算結果 (體積)

Event	愛玉子溪邊坡 (萬立方公尺)			愛玉子溪河道 (萬立方公尺)			霍薩溪河道 (萬立方公尺)		
	Erosion	Deposition	Net	Erosion	Deposition	Net	Erosion	Deposition	Net
19991210 – 20010802	53.6	24.9	-28.7	146.3	10.8	-135.5	44.4	101.1	56.7
20010802 – 20030302	28.0	18.5	-9.5	30.6	19.9	-10.7	122.6	2.5	-120.1
20030302 – 20040807	75.3	41.5	-33.8	28.5	31.0	2.4	25.8	37.9	12.1
20040807 – 20051128	46.4	49.4	3.0	25.4	16.6	-8.8	37.8	70.5	32.7
20051128 – 20070126	19.8	23.7	3.9	20.5	43.0	22.6	65.2	27.2	-37.9
20070126 – 20080803	71.4	12.8	-58.6	72.2	1.7	-70.5	21.3	33.8	12.4
20080803 – 20080826	29.6	11.0	-18.6	7.6	22.7	15.1	36.5	8.3	-28.2
20080826 – 20091121	1029.6	526.5	-503.1	238.0	82.2	-155.8	114.1	433.3	319.2
20091121 – 20130603	303.0	56.7	-246.2	73.2	61.0	-12.2	94.5	89.0	-5.5
20130603 – 20140217	52.3	55.6	3.3	15.3	64.2	49.0	23.3	75.8	52.5
20140217 – 20171007	91.0	48.0	-43.0	27.6	46.2	18.6	96.3	21.0	-75.3
20171007 – 20180529	30.7	18.9	-11.9	17.7	9.2	-8.5	38.4	11.6	-26.8
20180529 – 20190111	23.1	22.4	-0.8	9.1	24.5	15.4	11.5	43.9	32.3
20190111 – 20200508	201.9	10.2	-191.7	70.8	7.1	-63.7	40.4	38.6	-1.9
20200508 – 20201020	11.9	11.7	-0.2	11.6	8.5	-3.2	18.7	7.5	-11.2
20211020 – 20210908	11.6	7.8	-3.8	13.5	11.1	-2.4	30.6	16.2	-14.4
Total (萬立方公尺)	2067.8	931.9	-1135.9	808.1	459.7	-348.4	821.5	1018.3	196.8

表 4.6 愛玉子溪邊坡與河道土砂變動量計算結果 (質量)

Event	愛玉子溪邊坡 (萬公噸)			愛玉子溪河道 (萬公噸)			霍薩溪河道 (萬公噸)		
	Erosion	Deposition	Net	Erosion	Deposition	Net	Erosion	Deposition	Net
19991210 – 20010802	124.4	39.9	-86	234.1	17.3	-217	71.1	161.8	91
20010802 – 20030302	65.0	29.6	-39	49.0	31.8	-17	196.2	4.0	-192
20030302 – 20040807	174.6	66.4	-113	45.7	49.5	4	41.3	60.7	19
20040807 – 20051128	107.7	79.1	-32	40.7	26.6	-14	60.4	112.7	52
20051128 – 20070126	46.0	38.0	-13	32.7	68.8	36	104.2	43.6	-61
20070126 – 20080803	165.7	20.5	-150	115.6	2.7	-113	34.1	54.0	20
20080803 – 20080826	68.7	17.5	-54	12.2	36.4	24	58.5	13.3	-45
20080826 – 20091121	2388.7	842.5	-1,556	380.8	131.6	-249	182.6	693.3	511
20091121 – 20130603	702.9	90.8	-614	117.1	97.5	-20	151.2	142.4	-9
20130603 – 20140217	121.4	89.0	-37	24.4	102.8	78	37.2	121.3	84
20140217 – 20171007	211.0	76.8	-136	44.2	73.9	30	154.1	33.7	-120
20171007 – 20180529	71.3	30.2	-43	28.3	14.7	-14	61.5	18.6	-43
20180529 – 20190111	53.7	35.8	-19	14.6	39.2	25	18.5	70.2	52
20190111 – 20200508	468.5	16.3	-456	113.3	11.3	-102	64.7	61.7	-3
20200508 – 20201020	27.6	18.7	-10	18.6	13.5	-5	30.0	12.1	-18
20211020 – 20210908	26.9	12.5	-18	21.6	17.8	-4	49.0	25.9	-23
Total (萬公噸)	4797.2	1491.0	-3,361	1293.0	735.5	-557	1314.5	1629.4	315

第四節 崩塌體積-面積關係式

本計畫從上述歷年愛玉子溪及其下游地形侵淤變化量，擷取出 40 處崩塌地，如圖 4.45 左所示，計算 40 個崩塌地的平面積和體積，以穩健迴歸分析(robust regression)得到崩塌體積(V_L)-面積(A_L)關係式(如圖 4.46 右所示)：

$$V_L = 0.216 \times A_L^{1.399} \quad (R^2 = 0.71) \quad (4.4)$$

V_L 單位為 m^3 ， A_L 單位為 m^2 。

崩塌體積-面積公式可提供在缺乏多時期數值地形模型的情況下，利用衛星影像判釋崩塌面積，進而估算集水區崩塌量。以下分別以 2009 年莫拉克颱風和 2021 年盧碧颱風事件進行測試分析：

圖 4.46 為 2009 年莫拉克颱風前後的 NDVI 變化與崩塌範圍，利用崩塌體積-面積關係式所估算總崩塌體積為 998 萬立方公尺，相較於觀測的總崩塌體積為 1,035 萬立方公尺，約低估 3.5%。圖 4.47 為 2021 年盧碧颱風前後的 NDVI 變化與崩塌範圍，崩塌體積-面積關係式所估算總崩塌體積為 9.2 萬立方公尺，而觀測的總崩塌體積為 11.6 萬立方公尺，約低估 21%。崩塌體積估算和觀測的差異皆在同一個級距範圍內，其誤差主要來源為崩塌體積-面積關係式，以及衛星影像判釋崩塌地的面積，因此，未來可藉由崩塌體積-面積關係式，配合衛星影像之崩塌判釋成果估算集水區崩塌量。

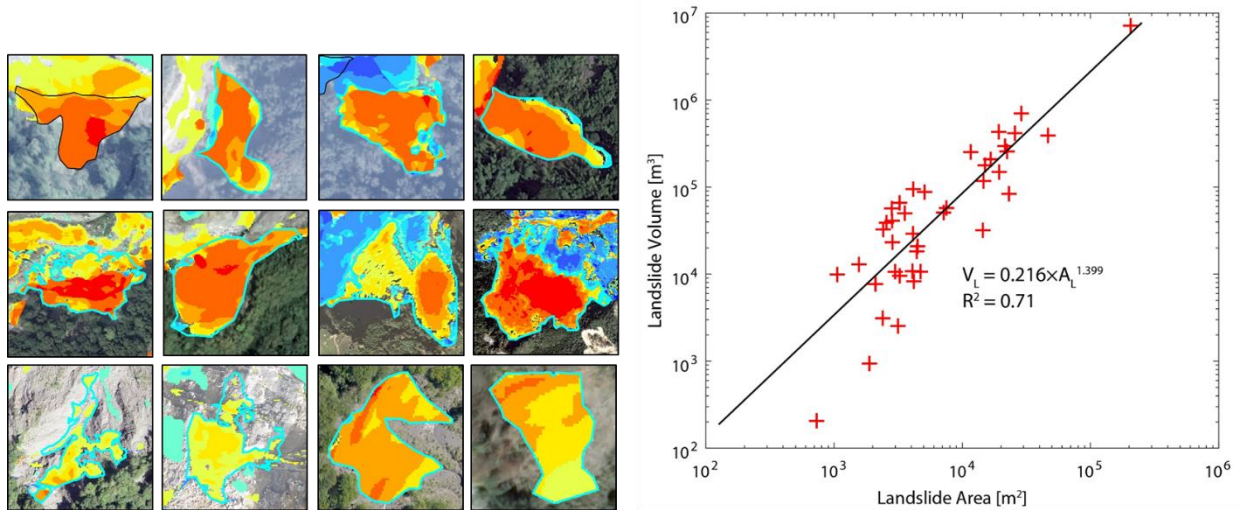


圖 4.45 擷取崩塌參數建立崩塌體積-面積關係式

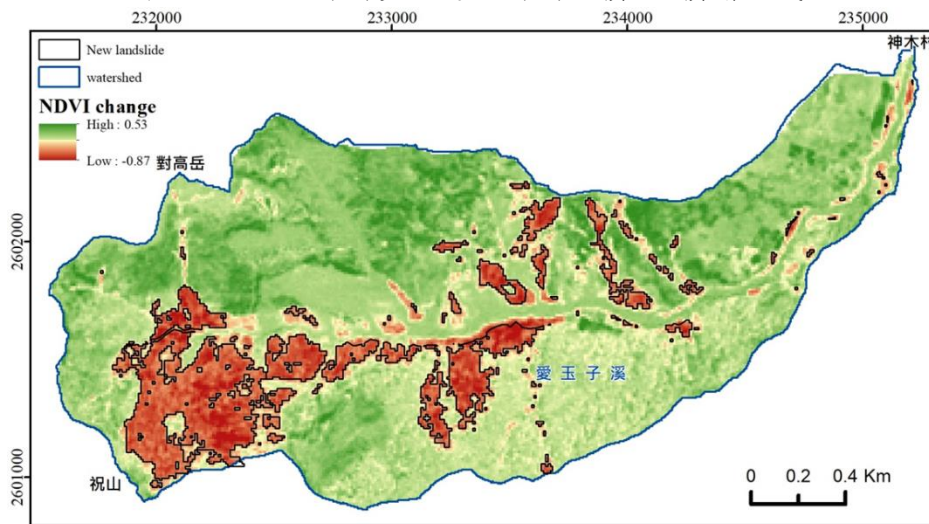


圖 4.46 2009 年莫拉克颱風前後的 NDVI 變化與崩塌範圍

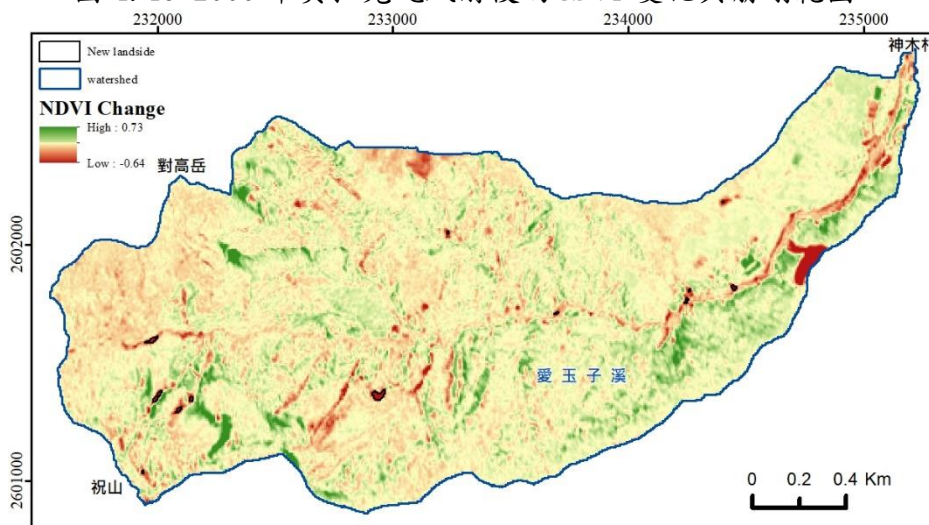


圖 4.47 2021 年盧碧颱風前後的 NDVI 變化與崩塌範圍

第五節 降雨因數與崩塌土砂生產量關係

藉由上述分析可獲得各降雨事件的降雨因數與崩塌量，本計畫將藉由修正後的打荻珠男經驗公式，連結崩塌體積與降雨關係。打荻珠男(1971)利用村野義郎之研究成果，進一步探討崩塌地面積和雨量的關係，發現累積雨量越大，流域崩塌地面積越多，崩塌面積與引發崩塌之臨界降雨量經驗公式如下：

$$\frac{s}{A} = 10^{-6} k(P - P_0)^2 \quad (4.5)$$

其中， s 為崩塌面積(平方公尺)、 k 為集水區係數、 A 為集水區面積(平方公尺)、 P 為累積雨量(毫米)、 P_0 為發生崩塌之臨界降雨量(毫米)。於上述公式乘以崩塌深度 $[h]$ (公尺)，可得到崩塌體積 $[V]$ (立方公尺)，可改寫為：

$$V = kAh(P - P_0)^2 \quad (4.6)$$

早期的研究因受限於無崩塌深度觀測資料，通常給定一個假定之平均深度。而本計畫可以藉由多時期數值地表模型或崩塌體積-面積關係式計算崩塌體積，故本計畫直接利用各場暴雨事件之崩塌體積進行率定，將 k 和 h 視為單一參數(K)。此外，冪次係數(r)則設定為可調整之參數， P 和 P_0 可該改為有效累積雨量或土壤雨量指數，修改為 R 和 R_0 ，可以得到下列公式：

$$V = KA(R - R_0)^r \quad (4.7)$$

集水區參數(K)、臨界的有效累積雨量或土壤雨量指數(P_0)、冪次係數(r)則以歷次降雨事件的崩塌體積為觀測值，並且調整不同的

係數的組合測試，以尋找估計值和觀測值之最小均方根誤差 (root mean square error, rmse)。

打荻珠男經驗公式分析結果如圖 4.48 所示，左圖橫軸為有效累積雨量；右圖橫軸為土壤雨量指數，得到的公式如下：

$$V = 0.04 \times (R - 200)^{2.7} \quad (4.8)$$

$$V = 0.17 \times (SWI - 130)^{3.1} \quad (4.9)$$

其中， V 為崩塌體積 (萬立方公尺)； R 為有效累積雨量 (mm)； SWI 為土壤雨量指數 (mm)。有效累積雨量的公式(式 4.8)之均方根誤差為 82 萬立方公尺；為土壤雨量指數的公式(式 4.9)之均方根誤差為 180 萬立方公尺，有效累積雨量的誤差較小，較適合於估算降雨和崩塌量之間的關係。

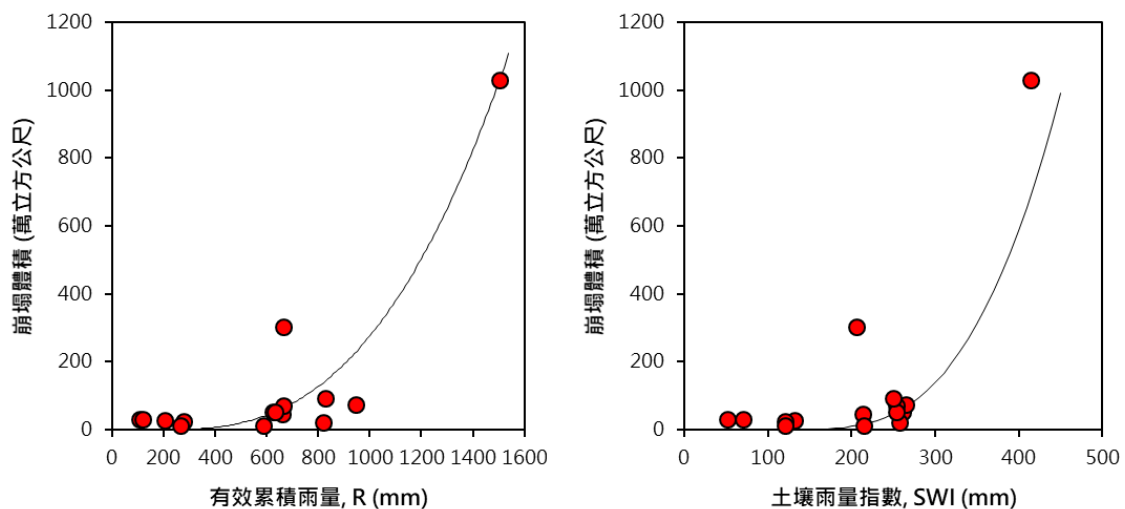


圖 4.48 打荻珠男經驗公式，紅色圓圈為觀測值，左圖橫軸為有效累積雨量；右圖橫軸為土壤雨量指數，黑線為打荻珠男經驗公式預測結果

第六節 野溪與河道侵淤變化

傳統河道侵蝕淤積分析大多著重於河流谿線（橫斷面最低點的連線），但容易忽略河床橫斷面的侵蝕和淤積的情況，以至於難以掌握河床地形變動的情勢。

本計畫產製歷年高解析度的數值地表模型，利用單流向演算法(D8)產生河床谿線的路徑，並以縱向距離每 10 公尺繪製一條橫斷面，分析河床在縱向和橫向的沖淤變化，並取其平均的侵淤量。圖 4.49 至圖 4.64 為歷年野溪與河道侵淤變化圖。在 1999/12/10-2001/08/02 期間(圖 4.49)，愛玉子溪上游呈現劇烈的侵蝕，如(a)和(t)剖面河道呈現下切，部分河段下切深度可達 10 公尺，下游河道淤積約 5 公尺，應為 1999 年集集地震產生土砂淤埋的野溪，在 2001 年桃芝颱風被水流侵蝕而搬運至下游。

2001/08/02-2008/08/26 期間(圖 4.50 至圖 4.55)，愛玉子溪野溪呈現侵蝕和淤積互現，代表堆積在河道的泥砂持續往下游搬運。2008/08/26-2009/11/21 期間(圖 4.56)，莫拉克颱風導致愛玉子溪河道地形劇烈沖刷，侵蝕量可超過 20 公尺，而僅在對高嶽支流和主流局部區域產生堆積，代表極端降雨事件會造成野溪上游亦發生明顯的侵蝕，可能因為其坡度陡峭，崩塌土石和與水混和後形成土石流，而土石流在搬運過程中，同時對河床與河岸產生侵蝕之捲增效應，將大量土砂搬運出集水區，並於下游的和社溪淤積達 10-20 公尺。

在 2009/11/21 至 2021/09/08 期間(圖 4.57 至圖 4.64)，愛玉子溪河道呈現侵淤互現的情況，在 2013 年河道侵淤變化仍然相當大，最大侵蝕和淤積量可超過 10 公尺，但隨著時間變化，河道的侵淤變化逐漸趨緩，代表河道的土砂逐漸穩定。

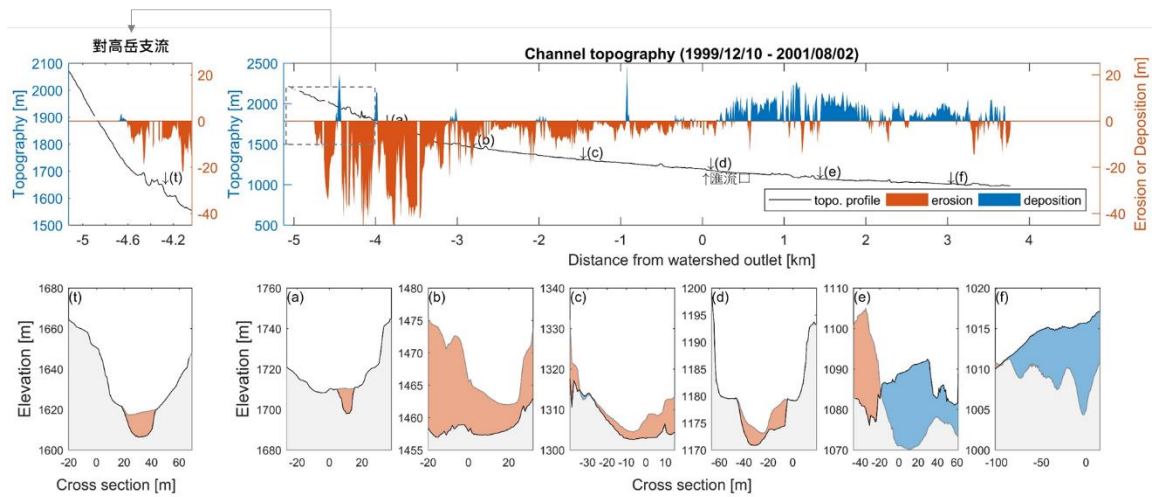


圖 4.49 1999/12/10-2001/08/02 野溪與河道侵淤變化圖

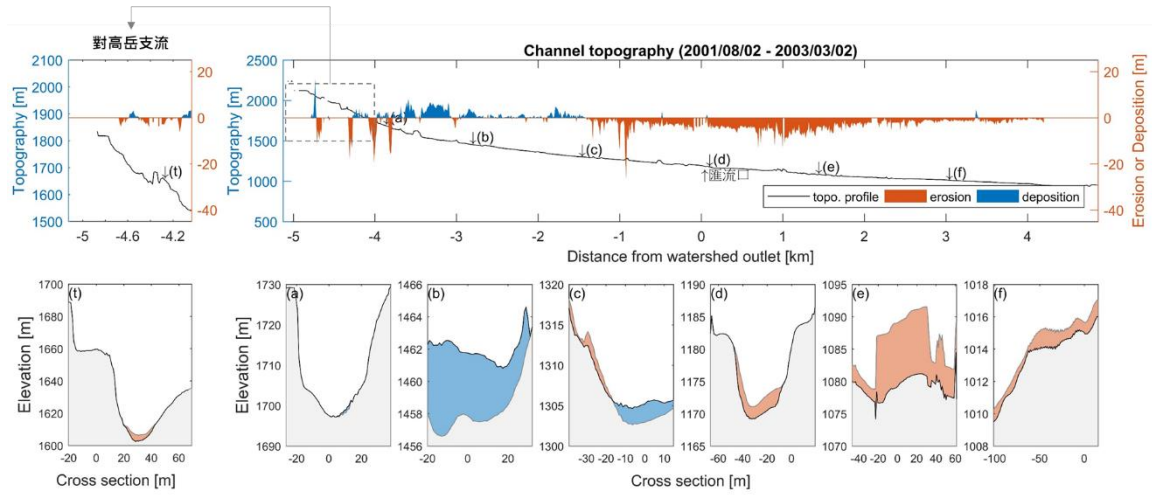


圖 4.50 2001/08/02-2003/03/02 野溪與河道侵淤變化圖

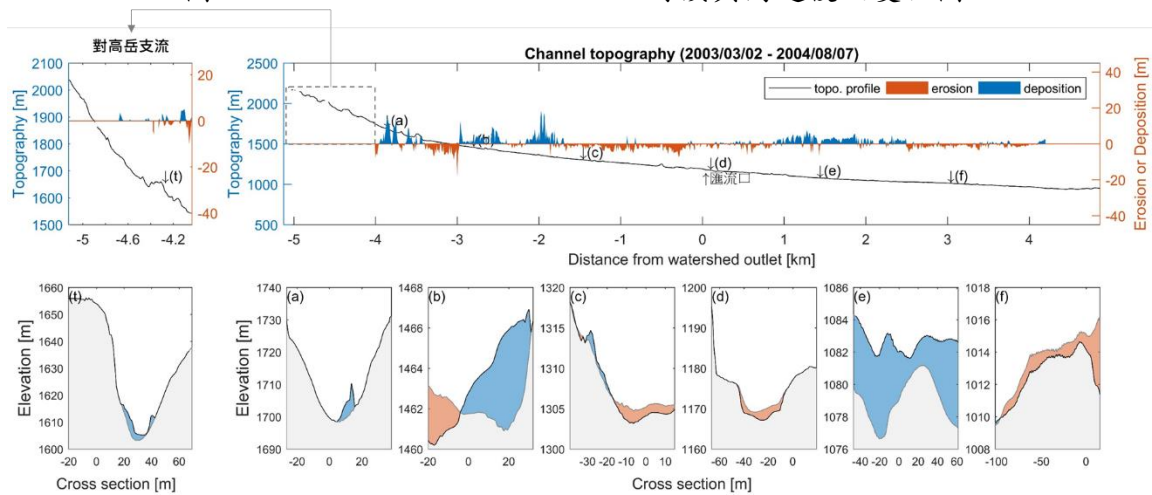


圖 4.51 2003/03/02-2004/08/07 野溪與河道侵淤變化圖

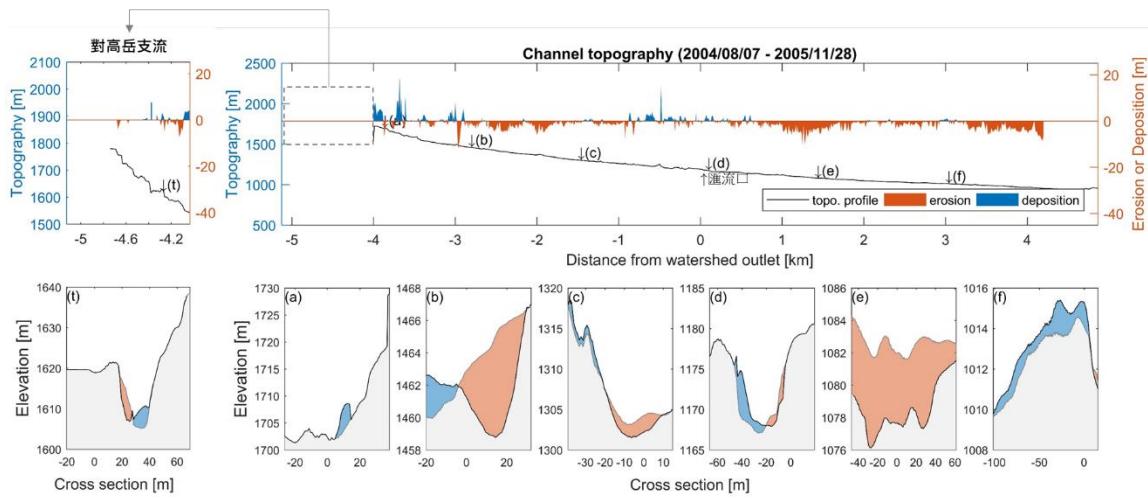


圖 4.52 2004/08/07-2005/11/28 野溪與河道侵淤變化圖

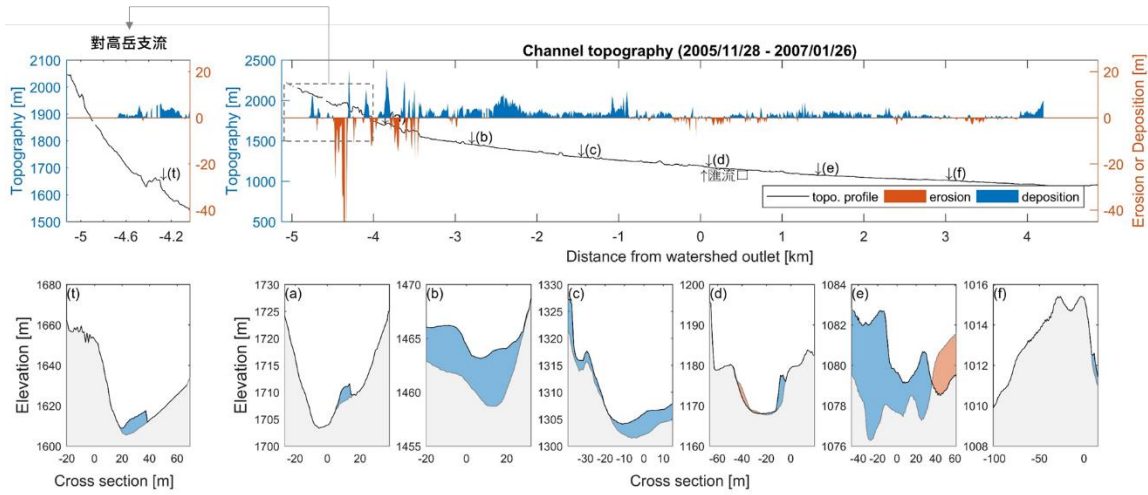


圖 4.53 2005/11/28-2007/01/26 野溪與河道侵淤變化圖

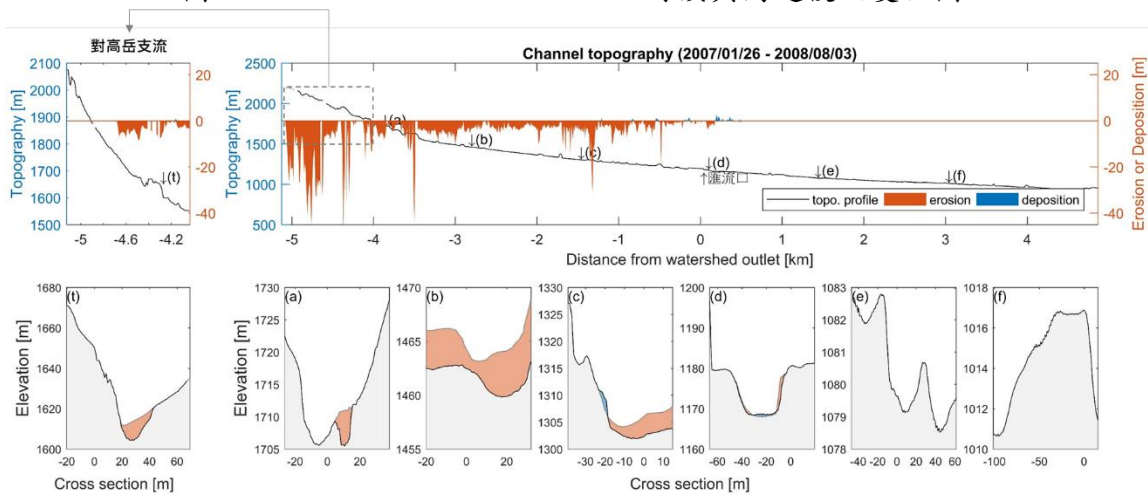


圖 4.54 2007/01/26-2008/08/03 野溪與河道侵淤變化圖

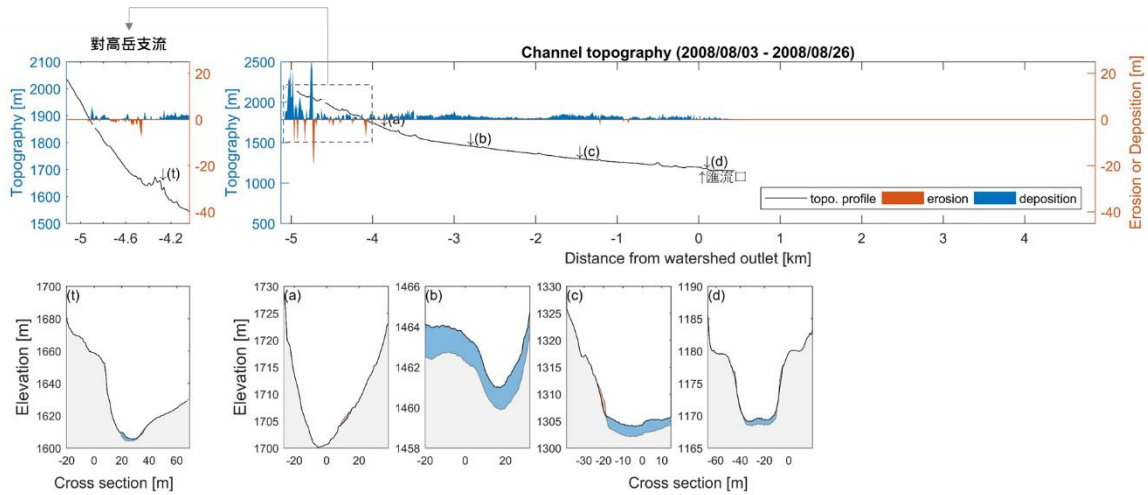


圖 4.55 2008/08/03-2008/08/26 野溪與河道侵淤變化圖

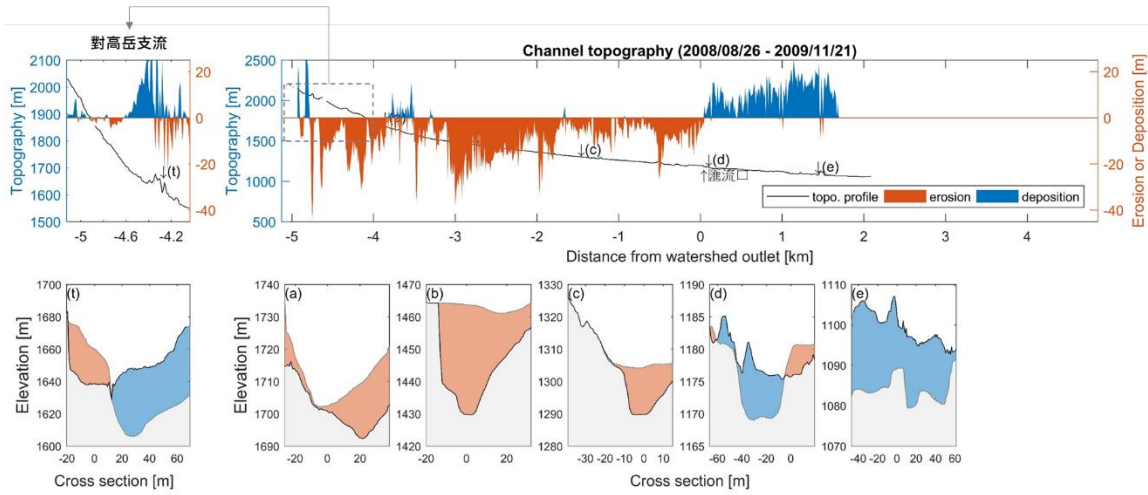


圖 4.56 2008/08/26-2009/11/21 野溪與河道侵淤變化圖

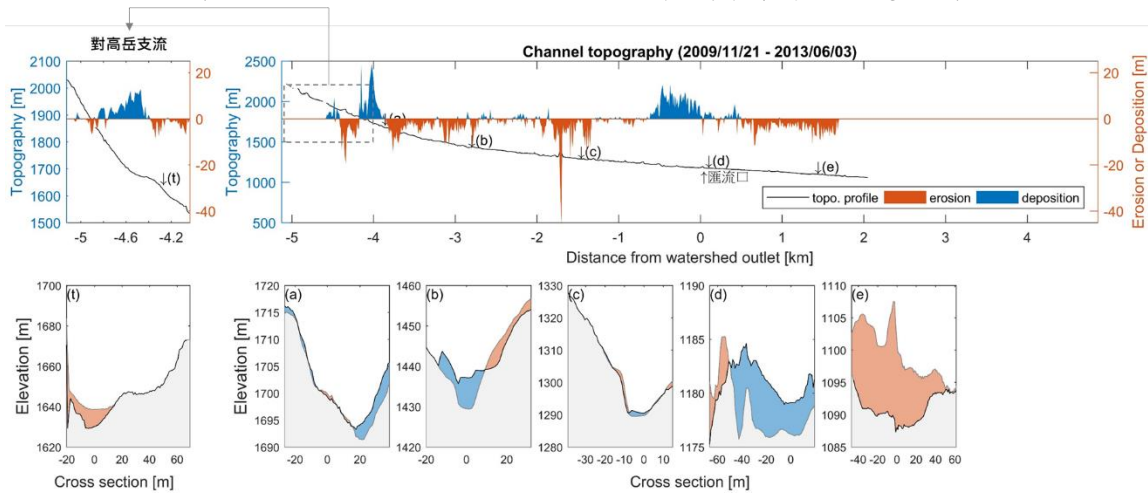


圖 4.57 2009/11/21-2013/06/03 野溪與河道侵淤變化圖

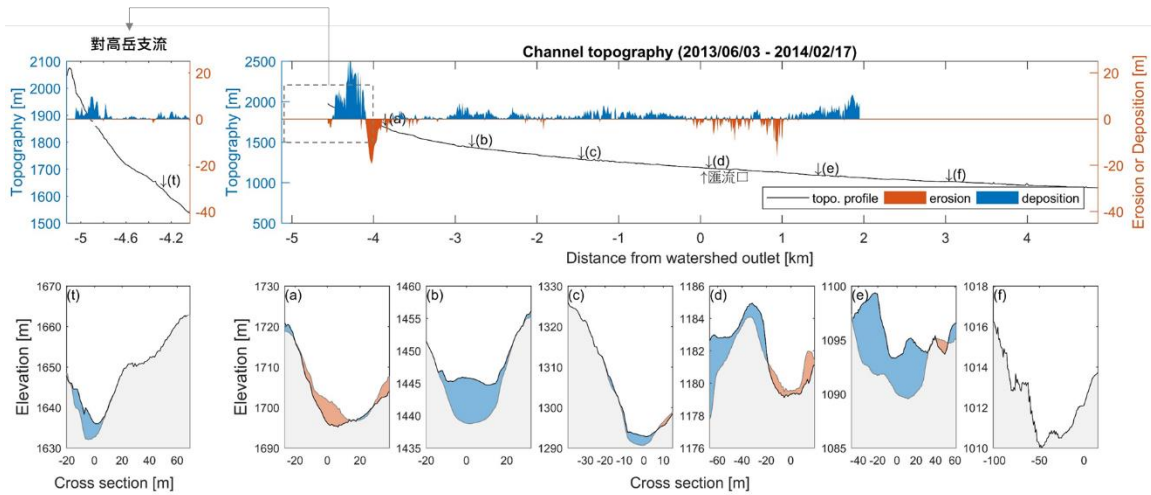


圖 4.58 2013/06/03-2014/02/17 野溪與河道侵淤變化圖

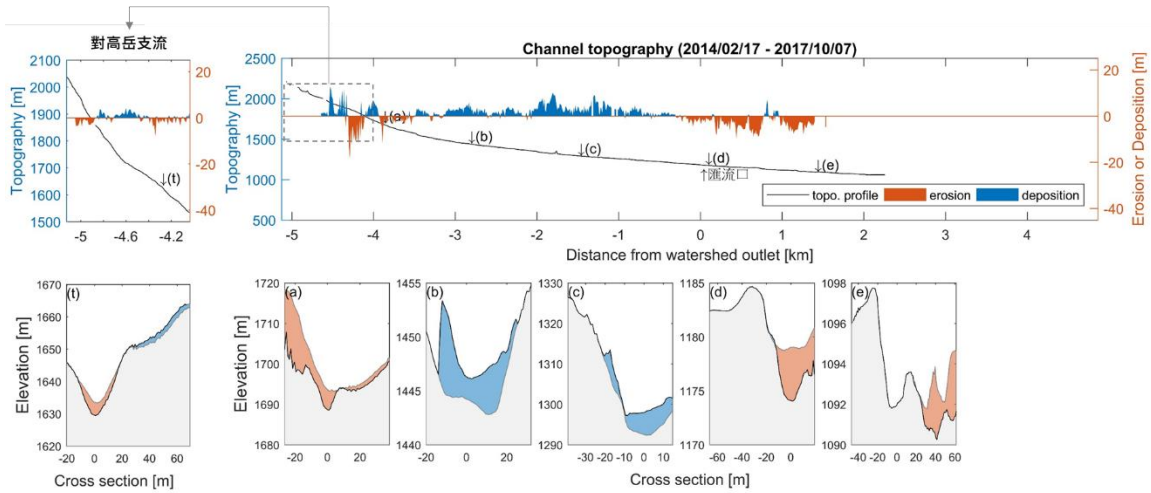


圖 4.59 2014/02/17-2017/10/07 野溪與河道侵淤變化圖

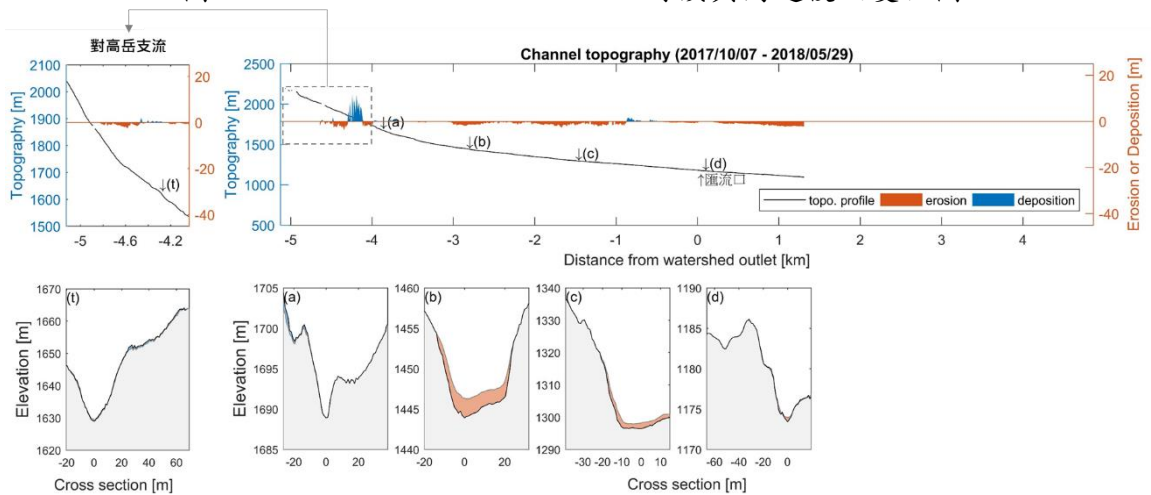


圖 4.60 2017/10/07-2018/05/29 野溪與河道侵淤變化圖

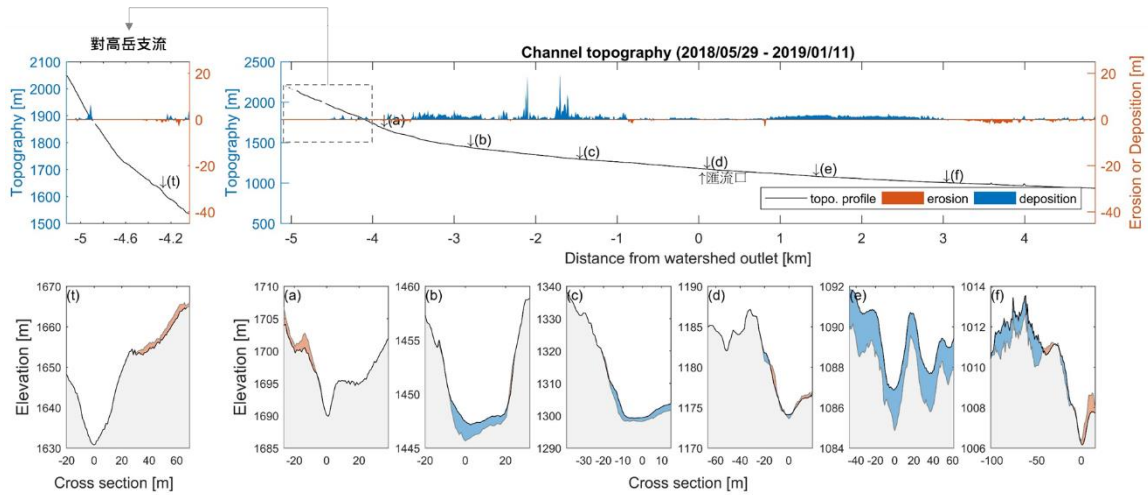


圖 4.61 2018/05/29-2019/01/11 野溪與河道侵淤變化圖

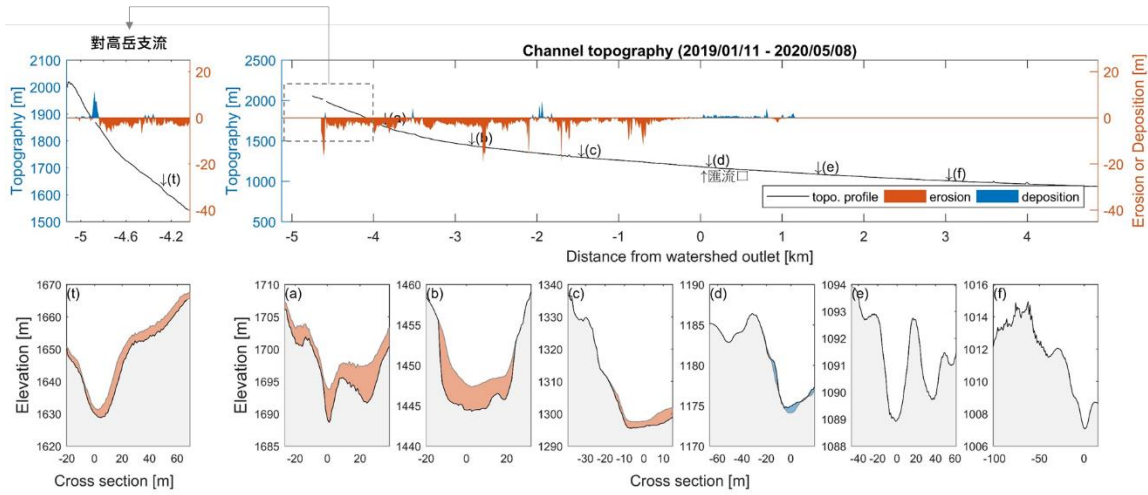


圖 4.62 2019/01/11-2020/05/08 野溪與河道侵淤變化圖

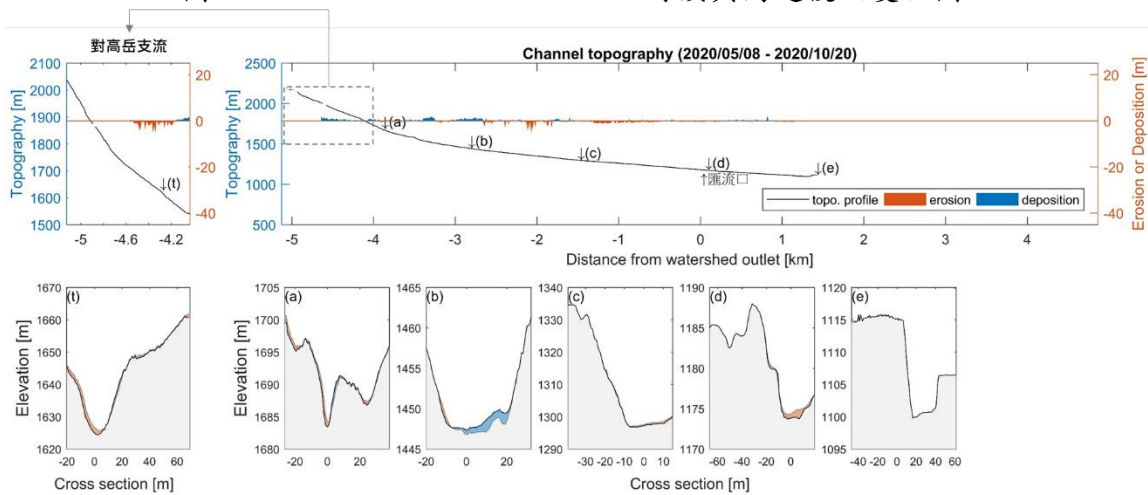


圖 4.63 2020/05/08-2020/10/20 野溪與河道侵淤變化圖

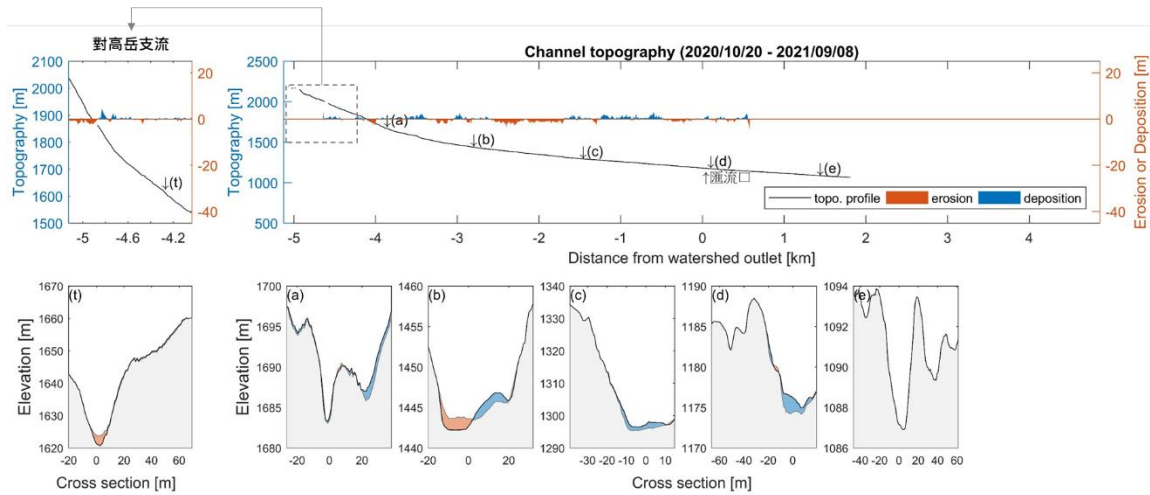
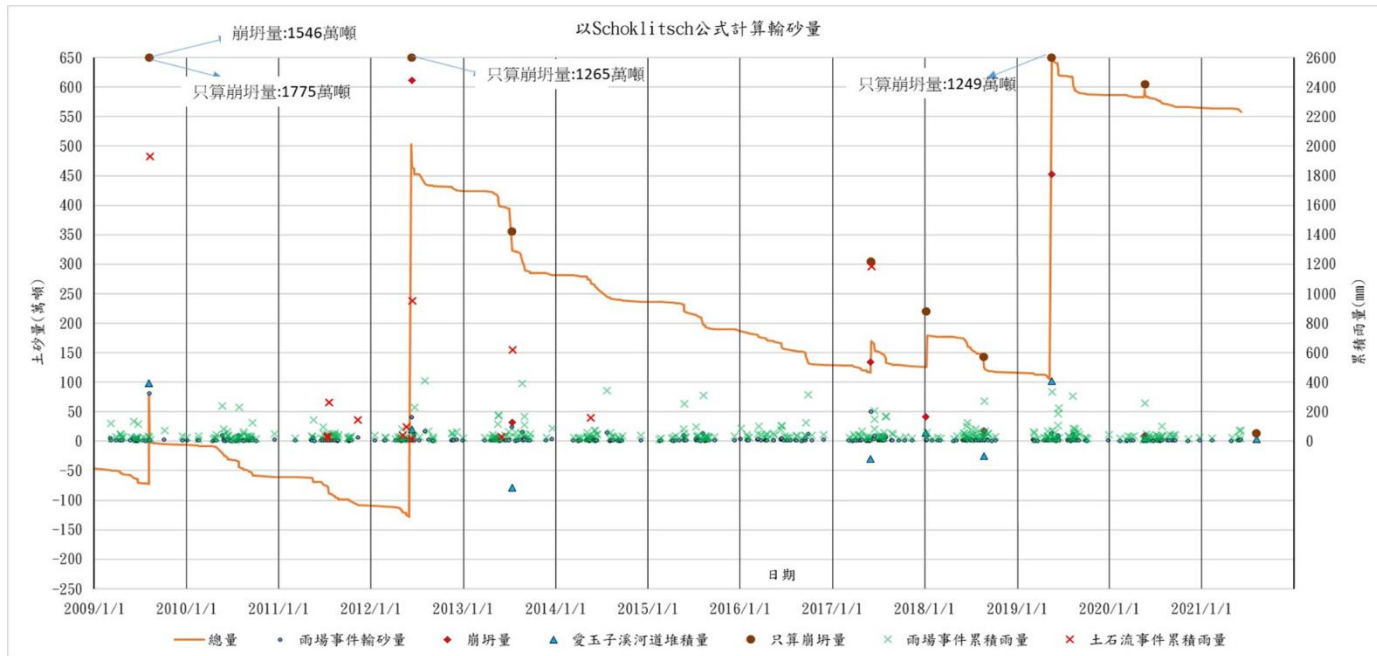


圖 4.64 2020/10/20-2021/09/08 野溪與河道侵淤變化圖

第七節 河道堆積量

將崩坍(土砂產生)減去河道沖淤，就可以得出集水區中剩餘多少土砂，將崩坍減去河道沖淤等於集水區中的土砂剩餘量，我們將土砂剩餘量畫出，然後扣除年度輸砂量，得到圖 4.65



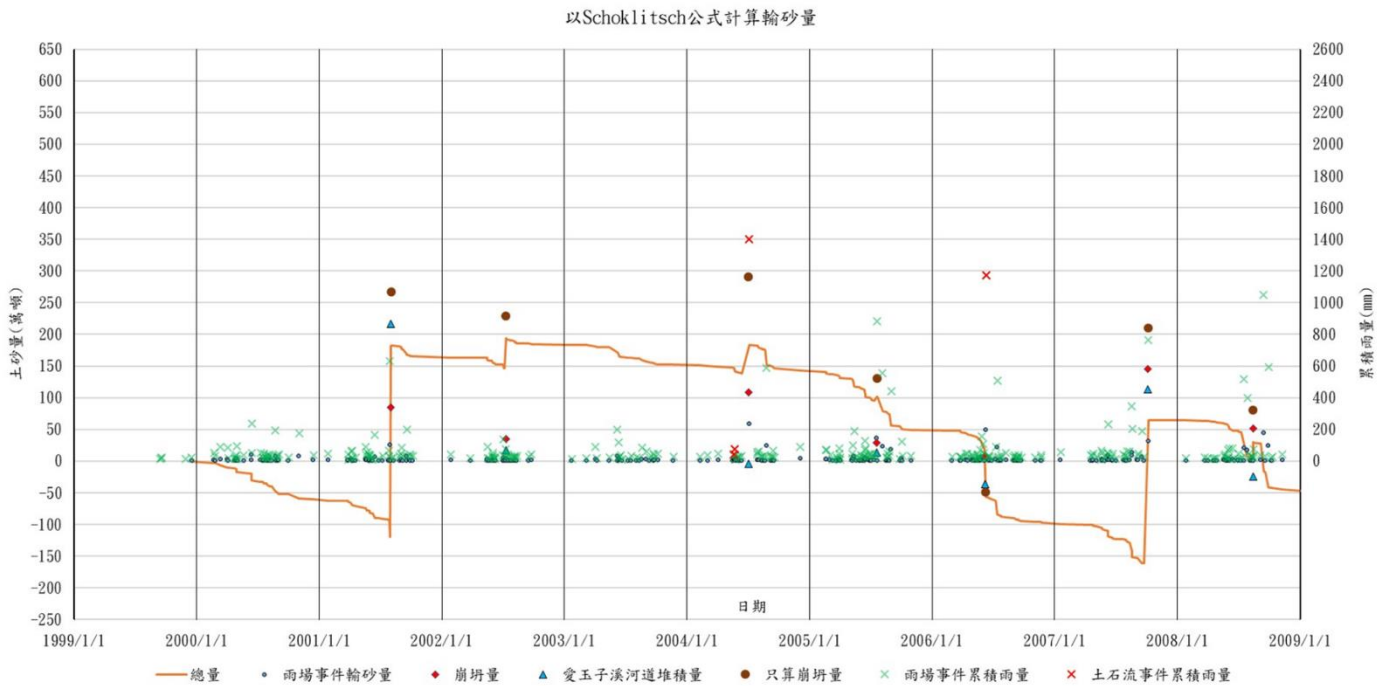


圖 4.65 土砂剩餘量(紅線)隨時間變化，綠×為沒有土石流降雨事件，紅×為發生土石流降雨事件，2019 賀伯颱風有另外扣除土石流輸砂量

圖 4.65 中紅色 X 為發生土石流事件，紅色 X 的高低代表該事件累積降雨量，不難從圖中得到結論，降雨超過 300mm 就會發生土石流，但是 2014 年一場小降雨也發生了土石流，這是為什麼呢？

如果我們回頭檢查表 4.6，去看河道的堆積量，不難看出 2009-2014 有著非常多的堆積量在河道上，因此一場小型降雨，就會引發土石流，而 2019 有大量崩坍與土砂運移，但是因為土石流輸出的砂量未知，因此 2019 以後的部分線條都過度高估土砂殘存量。

因此河道堆積量，應該可以考慮視為一個以年度為單位考量是否容易發生土石流的指標，若河道堆積量大於 200 萬公噸，則小雨都容易引發土石流，若河道沒有甚麼堆積量(<200 萬噸)，那就不容易發生，除非碰到極端降雨，崩坍馬上可以變成土石流。

第八節 河道遞移率

有了歷年崩坍量與河道沖淤量，就可以計算河道遞移率，計算結果如表 4.7 與圖 4.66。

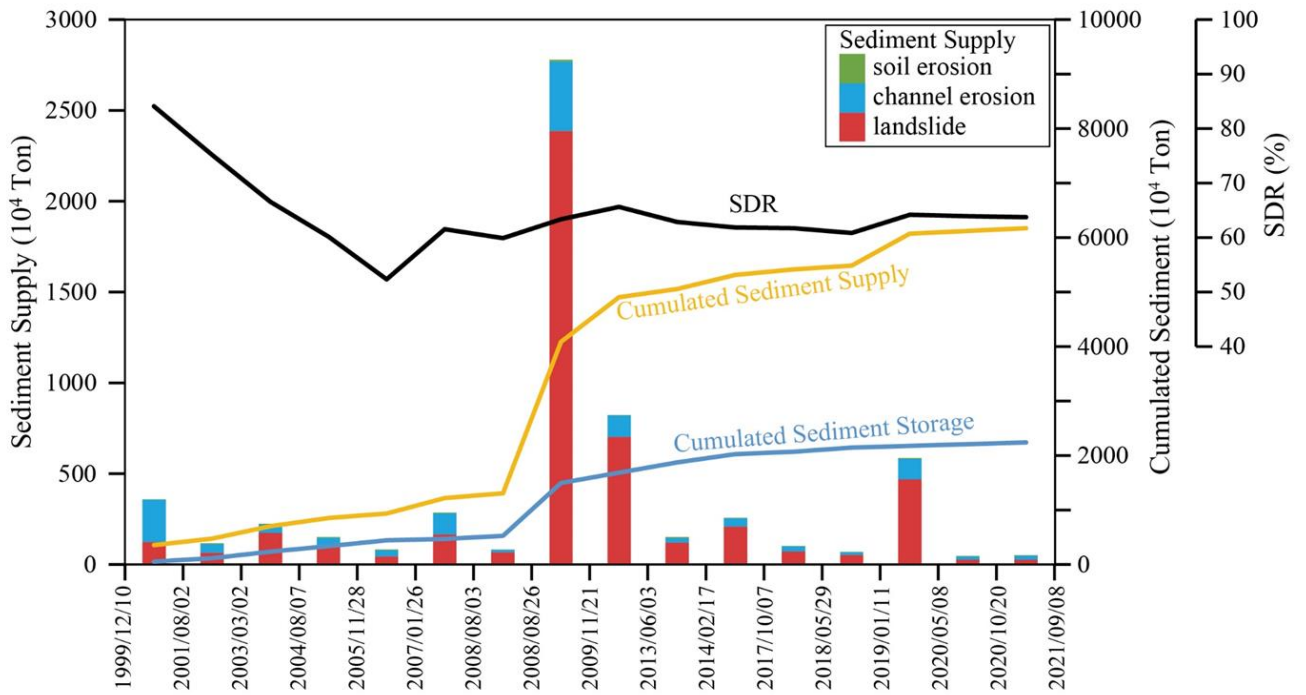


圖 4.66 愛玉子溪河道遞移率隨年份變化圖

	邊坡 (萬公噸)			河道 (萬公噸)		泥砂供給 [v6 = (v1+v2+v4) sediment supply	累積泥砂供給 [v7= Σ v6] cumulated supply	泥砂儲存 [v8=(v3+v5)] sediment storage	累積泥砂儲存 [v9= Σ v8] cumulated storage	泥砂遞移率 (%) [v10=(v7-v9)/v7] SDR (%)
	土壤沖蝕 [v1]	侵蝕 [v2]	堆積 [v3]	侵蝕 [v4]	堆積 [v5]					
19991210 - 20010802	1.0	124.4	39.9	234.1	17.3	359.5	359.5	57.2	57.2	84.1%
20010802 - 20030302	3.4	65.0	29.6	49.0	31.8	117.4	476.9	61.4	118.6	75.1%
20030302 - 20040807	4.5	174.6	66.4	45.7	49.5	224.8	701.7	115.9	234.5	66.6%
20040807 - 20051128	3.3	107.7	79.1	40.7	26.6	151.7	853.4	105.7	340.2	60.1%
20051128 - 20070126	5.4	46.0	38.0	32.7	68.8	84.1	937.5	106.8	447.0	52.3%
20070126 - 20080803	4.4	165.7	20.5	115.6	2.7	285.7	1223.2	23.2	470.2	61.6%
20080803 - 20080826	3.3	68.7	17.5	12.2	36.4	84.2	1307.4	53.9	524.1	59.9%
20080826 - 20091121	9.9	2388.7	842.5	380.8	131.6	2779.4	4086.8	974.1	1498.2	63.3%
20091121 - 20130603	2.0	702.9	90.8	117.1	97.5	822.0	4908.8	188.3	1686.5	65.6%
20130603 - 20140217	4.8	121.4	89.0	24.4	102.8	150.6	5059.4	191.8	1878.3	62.9%
20140217 - 20171007	2.1	211.0	76.8	44.2	73.9	257.3	5316.7	150.7	2029.0	61.8%
20171007 - 20180529	1.5	71.3	30.2	28.3	14.7	101.1	5417.8	44.9	2073.9	61.7%
20180529 - 20190111	0.8	53.7	35.8	14.6	39.2	69.1	5486.9	75.0	2148.9	60.8%
20190111 - 20200508	3.6	468.5	16.3	113.3	11.3	585.4	6072.3	27.6	2176.5	64.2%
20200508 - 20201020	1.2	27.6	18.7	18.6	13.5	47.4	6119.7	32.2	2208.7	63.9%
20211020 - 20210908	3.4	26.9	12.5	21.6	17.8	51.9	6171.6	30.3	2239.0	63.7%

表 4.7 愛玉子溪歷年河道遞移率

第五章 土石流影響範圍預警

第一節 土石流數值模式

在土石流影響範圍的評估有許多方法，如果要能反映不同雨量、崩坍量地域分佈下的不同影響範圍，使用最多的是採用數值模擬，針對不同類型的土石流運移模擬，本計畫將其整理如表 5.1。

表 5.1、應用於不同類型的土石流數值模擬模式

模式	應用	參考文獻
DAN	崩塌	Oldrich Hungr et al. (1995)
LS-RAPID	崩塌	Kyoji SASSA et al. (1988, 2004)
Savage-Hutter	礫石型山崩或雪崩	Hutter, K. et al. (1993, 1995)
Debris-2D	土石流	Ko-Fei Liu et al. (2006, 2009)
TRENT-2D	土石流	Aronne Armanini et al. (2009)
DFEM	無黏性土石流	D. Naef et al. (2006) Swiss Federal Research Institute WSL
Kanako-1D&2D	土石流	Kana NAKATANI et al. (2008)
Flo-2D	泥流	O'Brien et al. (1993)

雖然可應用的數值模擬工具很多，但目前於臺灣較易取得的土石流數值模擬模式目前僅有 FLO-2D 與 DEBRIS-2D 兩種程式，因此我們將這兩種程式需要的輸入條件整理如表 2。在這兩種數值模式中，其模擬的概念是完全不同的，FLO-2D 主要是以土石流的流量歷線做為輸入，因此必須設定一個入流點，並在此入流點先計算流量歷線，再透過平衡濃度的假設轉換成土石流的流量歷線進行模擬。而 DEBRIS-2D 的模擬主要是輸入土砂料源與水混合後的土石流初始位置與體積量，並依此進行土石流模擬。比較這兩種類型的模擬，FLO-2D 的模擬比較類似一般河川模擬，其入流點的流量歷線必須再透過其它模式進行流量歷線的模擬或參數的率定，通常較適用於泥流型的

土石流，而 DEBRIS-2D 則較適用於礫石型土石流的模擬，只要知道崩塌的位置與體積量即可做模擬(Wu et al., 2013)。以本計畫區域之愛玉子溪土石流屬於礫石型土石流，因此本計畫將採用 DEBRIS-2D 進行模擬。

表 5.2、土石流數值模擬之所需參數(以 FLO-2D 與 DEBRIS-2D 為例)

需要輸入之資料	FLO-2D	DEBRIS-2D
地形資料	DEM	DEM
降雨逕流資料	流量歷線(從降雨計算)	-
土石料源	土石流流量歷線	崩坍點位分佈
入流點	土石流溢流點之位置	-
初始體積量	-	崩坍體積量
相關參數	體積濃度 C_v 降伏應力 τ_0 動力黏滯係數 η 曼寧粗糙度 n 阻力參數 K	降伏應力 τ_0

DEBRIS-2D 經過多次的理論與實驗室內的試驗驗證(Liu & Huang, 2006)，並有多次的現場驗證案例，且此模式開發後第一個現場驗證的案例即是針對本研究計畫區域。在 1996 賀伯颱風的神木村土石流案例中，Liu & Huang (2006)模擬的最後影響範圍與實際土石堆積範圍最大誤差為 20 公尺(全長約 2.5 公里，0.1%誤差)，而模擬的最大厚度與實際土石堆積厚度誤差來自現場的大石頭，為 1 公尺(最大厚度約 10 公尺，誤差 10%)。

除了神木村的現場土石流驗證外，Liu & Wu (2010)則在韓國麟蹄郡(Inje, Korea)的土石流模擬中發現，其最後土石流堆積位置有 95% 的精確度。Wu et al. (2013)應用 DEBRIS-2D 模擬在莫拉克颱風期間，新發村發生的崩塌型土石流，模擬的最後土石流堆積厚度與水保局現場量測的誤差在 8%以內，影響範圍的平均誤差為 4%，在當時救難人

員有測量的兩個點，其最後堆積厚度深度誤差僅 20cm(3%)。Tsai et al. (2011) 在 2008 預測大鳥村的土石流範圍，其結果與 2010 年的災害比對，土石流影響範圍只有 2.76%的誤差。因此 DEBRIS-2D 已經證明可以模擬出真實的災害情形，尤其是礫石型土石流，模擬的效果最好。

第二節 DEBRIS-2D 土石流模式簡介

DEBRIS-2D 模式的控制方程式是由質量守衡與動量守衡方程式，配合二維長波理論的假設所組成。為一定床模式，不考慮底床的刷深。應變率與剪力的本構關係式則是採用 Julien & Lan(1991)提出的土石流關係式，此關係式是修正泥流的賓漢模型(Bingham model)，再以應變率的二次項來考慮碰撞的效應，因此可以用來表現泥流與石流混合狀態下的流動行為，其剪力張量與流速的關係式如下：

$$\tau_{ij} = \left(\frac{\tau_0}{\varepsilon_{II}} + \mu_d + \mu_c \varepsilon_{II} \right) \varepsilon_{ij}, \quad \text{當 } \tau_{II} \geq \tau_0 \quad (\text{強剪層}) \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{II} = 0, \quad \text{當 } \tau_{II} < \tau_0 \quad (\text{弱剪層}) \quad (5.2)$$

$$\text{其中 } \varepsilon_{II} = \left(\frac{1}{2} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} \right)^{1/2}, \quad \tau_{II} = \left(\frac{1}{2} \tau_{ij} \tau_{ij} \right)^{1/2}$$

其中， ε_{ij} 是應變率張量， τ_0 是降伏應力， μ_d 和 μ_c 分別為動力黏滯係數與紊亂離散參數。因為接近表面空氣不受力，式(5.2)的弱剪層應該為接近自由水面的部份，該區剪力小於降伏應力，其範圍為 $B(x, y, t) + \delta(x, y, t) \leq z \leq h(x, y, t)$ ， $B(x, y, t)$ 為底床地形高層， $\delta(x, y, t)$ 為強剪層厚，而 $h(x, y, t)$ 則為自由表面高層。式(5.1)為剪力大於降伏應力的情況，就應該是靠近底床的部份，所以強剪層範圍為 $B(x, y, t) \leq z \leq B(x, y, t) + \delta(x, y, t)$ 。Liu & Huang (2006)的研究中發現強剪層的厚度小於全部厚度的 10%，因此從底床 $z = B(x, y, t)$ 到自由表面 $z = h(x, y, t)$ 對 z 積分，並忽略強剪層厚度後，可得到一組深度平均的質量與動量守恆方程式如式(5.3)、(5.4)和(5.5)所示

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(uvH)}{\partial y} = gH \sin \theta - gH \cos \theta \frac{\partial(B+H)}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\tau_0 u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial(vH)}{\partial t} + \frac{\partial(uvH)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2H)}{\partial y} = -gH \cos \theta \frac{\partial(B+H)}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\tau_0 v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5.5)$$

其中 θ 為地形的平均坡度， ρ 為土石流的密度， g 為重力加速度， H 為流深， B 為底床地形的高程， u 和 v 分別為 x 和 y 方向的流速。式(5.3)為質量守恆方程式。式(5.4)和式(5.5)分別為 x 和 y 方向的動量守恆方程式，式子的左邊由時間項和對流項組成；式子的右邊則由重力項、壓力項與剪力項所組成。

由於有降伏應力的關係，因此土體給與底床剪力若小於降伏應力，土體將不會有任何運動($u=v=0$)，因此利用式(5.4)與(5.5)的平方和，可推導出如下土石流啟動條件，來判斷土石料源是否會開始流動

$$\left(\frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} - \tan \theta \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 > \left(\frac{\tau_0}{\rho g \cos \theta H} \right)^2 \quad (5.6)$$

式(5.6)中的 B 和 H 的一階微分為壓力的效應， $\tan \theta$ 則是重力的效應。只要壓力與重力的效應大於降伏應力，則該處的土石料源就會開始流動。

數值方法上，DEBRIS-2D 用有限差分法來離散控制方程式，為了計算的效率，採用顯式的計算(explicit scheme)，所以時間上是以 Adams-Bashforth 的三階法處理；空間上，採用二階的中央差分法，但為了處理震波問題，在動量方程式中的對流項，則在速度大時改用一階上風法。

運用此模式可以得到土石流流深在時間與空間上的變化，因此在土石流流動範圍內，任意位置之流深、流速及土石流所造成的衝擊力(劉格非、李峰昌，1997)皆可計算。

第三節 土石流料源體積量與分佈

一、DEBRIS-2D 模擬之輸入

在 DEBRIS-2D 的土石流模擬當中首先必須瞭解現場土石料源體

積量的分佈狀況以及土石料源組成的性質，並透過料源的組成性質去推估土石流的降伏應力。透過現地勘察的結果可以得到現場土石料源的分佈以及其體積量，這些材料在流動中會因為強烈混合，濃度達到平衡濃度(Takahashi, 1981)

$$C_{d\infty} = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad C_{d\infty} \leq 0.603 \quad , \quad (5.7)$$

其中 $C_{d\infty}$ 為土石流中固體顆粒的體積濃度，稱之為平衡濃度； ρ 為水的密度 1.00 g/cm^3 ； σ 為砂礫的密度約取 2.65 g/cm^3 ； ϕ 為砂礫的內摩擦角約為 37 度； θ 為溪床的平均坡度，當此濃度大於 0.603 時則取 0.603 (Liu & Huang, 2006)。

在已知平衡濃度 $C_{d\infty}$ 的條件下，土石流體積量的估計一般則可分為兩種類型；第一種是當集水區中降雨的水量足夠帶動所有料源的情況下，透過現地調查的乾土石料源體積量去估計土石流的初始體積量如下

$$V_1 = \frac{V_{debris}}{C_{d\infty}} \quad (5.8)$$

其中 V_{debris} 為乾土石料源量， V_1 為料源控制的土石流總體積量。第二種則是在集水區中降雨的水量不足以帶動所有料源的情況下，則利用累積雨量去估計集水區的總水量，並利用此總水量去估算可產生的土石流體積量如下

$$V_2 = \frac{V_{water}}{1 - C_{d\infty}} \quad (5.9)$$

其中 V_{water} 為累積雨量所估計的集水區總水量(通常以合理化公式得到的流量乘上集流時間來計算)， V_2 為累積雨量所控制的土石流總體積量。

一般而言，通常會取 V_1 和 V_2 中較小的值代表現場可能產生的土石流總體積量，再按照現地土石崩坍點輸入模式中進行模擬(Liu et al., 2009)。但在考慮氣候變遷或極端事件的條件下，為了瞭解最糟情況下的土石流災害，過去也曾有學者採用 V_1 和 V_2 中較大的值去估計現場的土石流(Liu et al., 2014; Wei et al., 2018)。但不管使用式(5.8)或式

(5.9)去估計土石流之初始體積量，基本上都必須先瞭解現場的乾土石料源的位置與分佈，最後才針對現場狀況或探討的問題去產製土石流模擬使用的初始體積分佈。

二、愛玉子溪土石流體積量之估計

本計畫之研究區域「愛玉子溪」，基本上屬於高頻率發生土石流之區域，從 2004 年以來至少發生過 15 次土石流(魏等人，2018)，在本計畫與前期計畫多次的現場調查中發現，河床高層變化的速度非常快，每次事件前後皆會造成河床高層的改變，因此無法單純透過上游崩坍點位之崩坍體積量去估計現場乾土石料源，必須將河床堆積的鬆散料源也考量在內。為了詳細估計出現場的乾土石料源之位置與分佈，本計畫則嘗試以不同年期之 DSM 進行地表高層變化之分析。

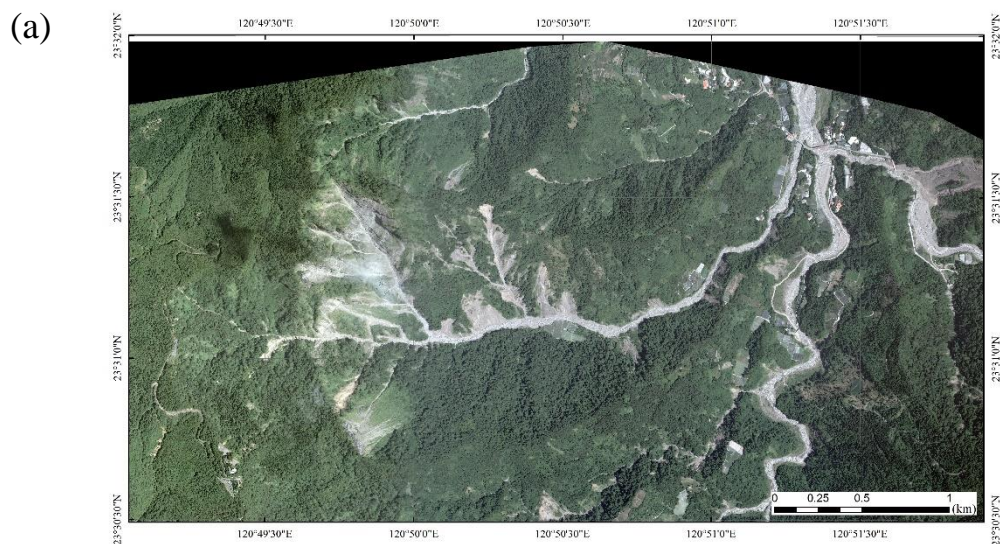
本計畫透過水土保持局之「多元衛星遙測影像整合申購模組」申請農航所拍攝歷年原始航照影像合成地表數值模型(詳如第四章所述)，並參考科技部(2017)「災後地形改變影響全流域水砂運移之模擬、劃設與資料庫建置」和科技部(2018)「災後地形改變影響全流域水砂運移之模擬、劃設與資料庫建置 II」的愛玉子溪崩塌地判釋成果。目前已建構 2008、2014、2017 三個年份的 DSM，此三年份之正射影像與裸露地之判釋，如：圖 5.1 與圖 5.2。

在三期之正射影像中，其裸露地是逐年在擴大的，在 2008 與 2014 年間，主要擴大的範圍集中在源頭的崩塌範圍，且沿著主河道的河道寬度也有增加的趨勢。而在 2014 與 2017 年間，崩塌範圍並無明顯繼續擴大，且有少部分植生恢復的跡象。為了瞭解裸露地之料源深度，本計畫則接續透過前後期 DSM 地形之比對，嘗試建立不同年間之地表侵蝕與堆積深度，如：圖 5.3。

在圖 5.3(a)中，本計畫發現 2008 年至 2014 年間的裸露地範圍有

將近 90% 的範圍屬於向下侵蝕，僅在上游左支流內與主河道出流口位置有部分堆積，透過過去土石流觀測紀錄(魏等人，2018)，2008 年至 2014 年有將近 9 場土石流，由其 2009 年莫拉克期間曾發生一場即大規模的土石流(王等人，2009)，因此判定在此期間產生之大部分的崩積料源皆已流出此集水區，無法採用 2008 年至 2014 年間的地表侵蝕與堆積深度資料估計現場之鬆散土方料源量。

在圖 5.3(b)中，本計畫發現 2014 年至 2017 年間的裸露地範圍並無繼續擴大，左支流 1(上游左支流)有趨於穩定的現象，主要侵蝕的範圍落於左支流 2(中游左支流)與主河道兩岸之邊坡，其崩積料源則主要分佈於監測點位上游的主河道。由過去土石流觀測資料，在 2014 年至 2017 年間僅有一場土砂洪流發生於 2017 年 0601 豪雨，且此場土石流僅破壞了監測點之下層鋼索(2.5 公尺高)，因此估計此場事件屬於最大流深不超過 3 公尺的小型土石流。



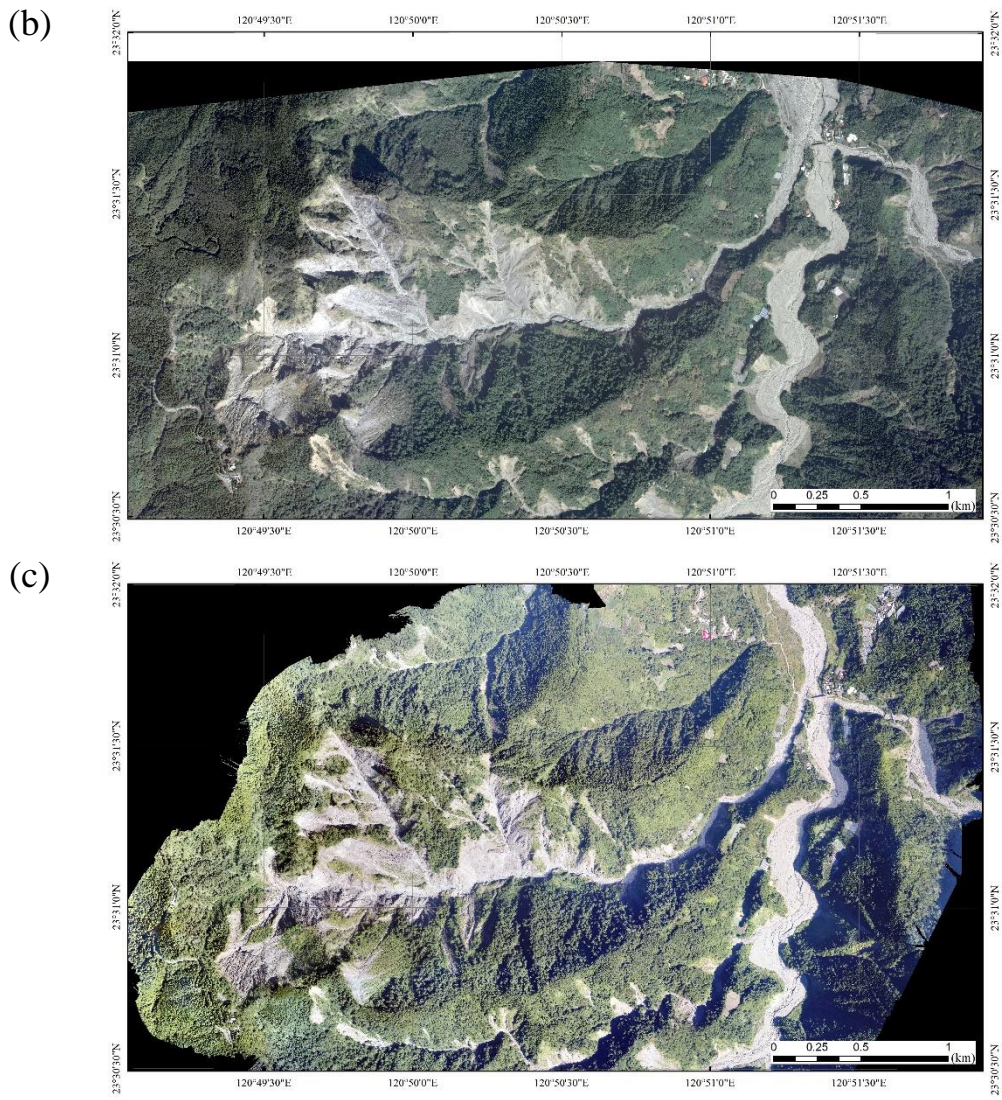
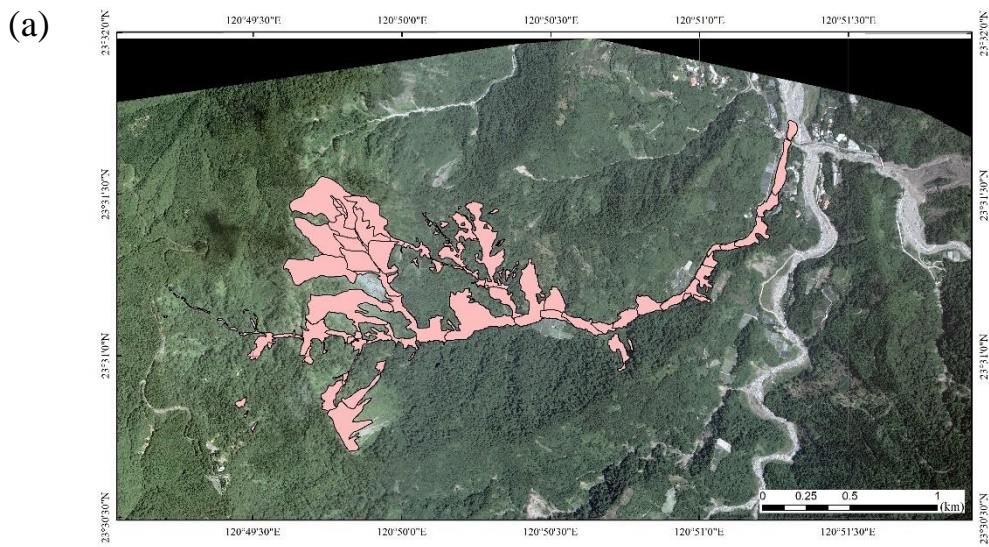


圖 5.1 愛玉子溪集水區之航拍正攝影像；(a) 2008 年(b) 2014 年
(c) 2017 年



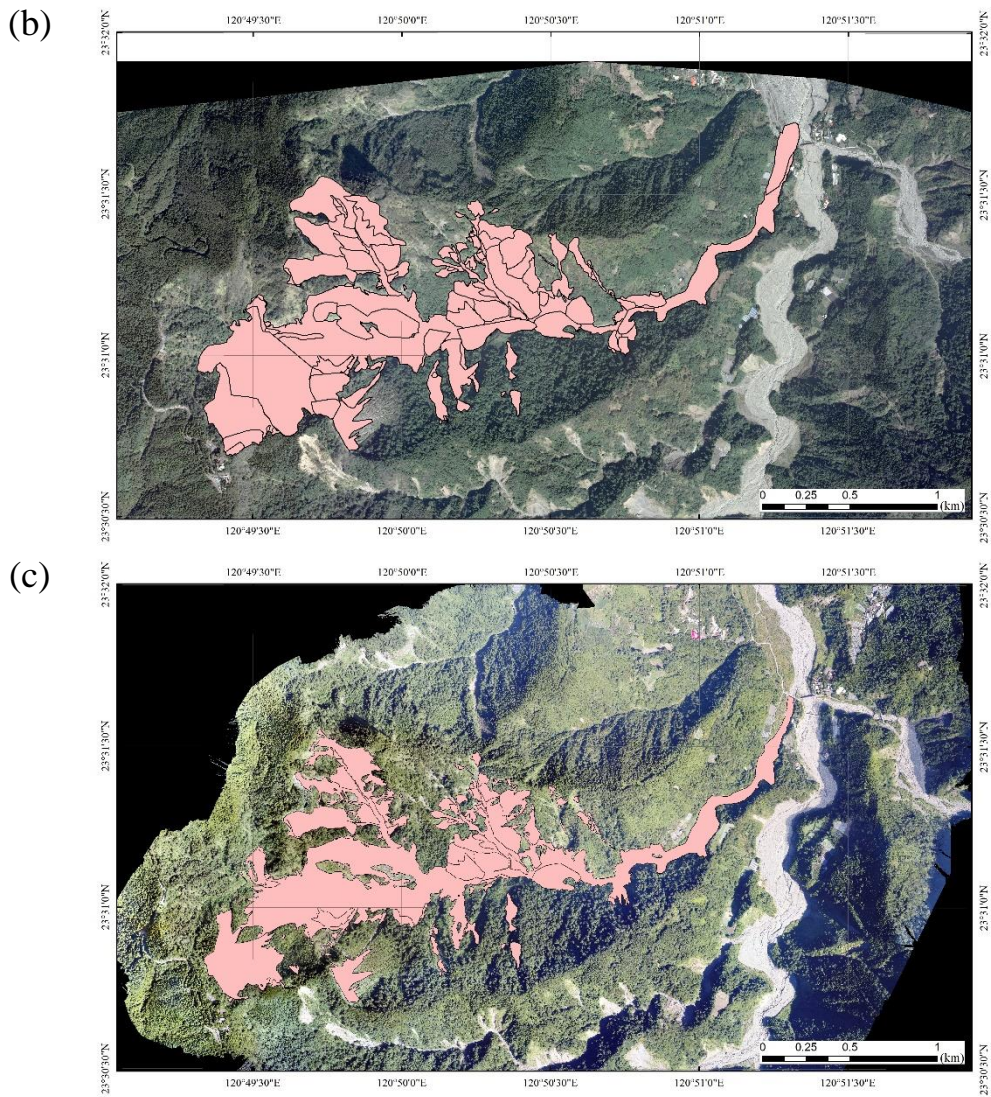
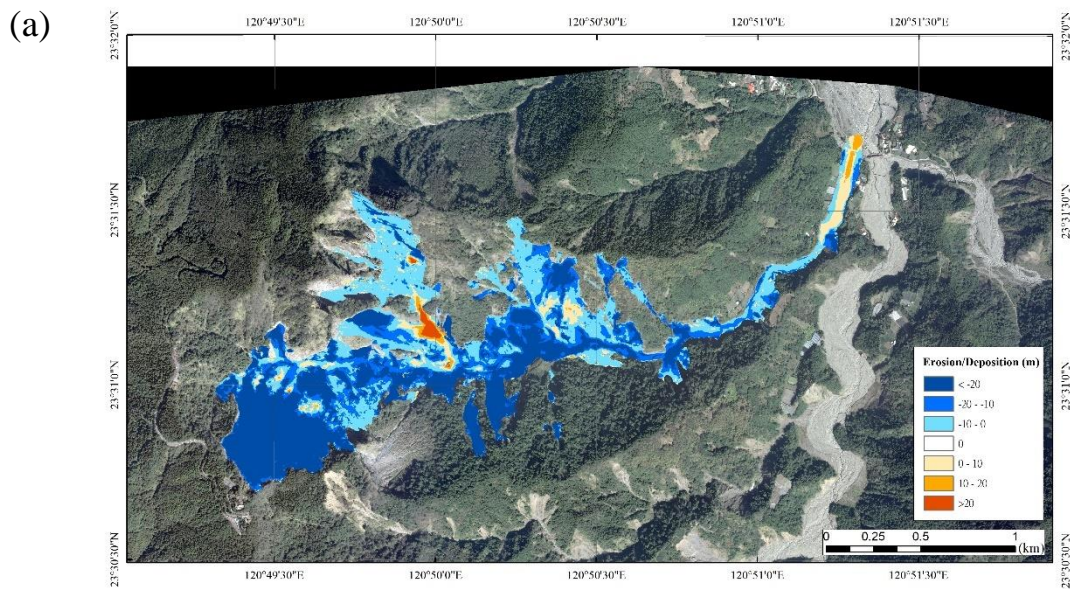


圖 5.2 愛玉子溪集水區之裸露地範圍判釋；(a) 2008 年(b) 2014 年
(c) 2017 年



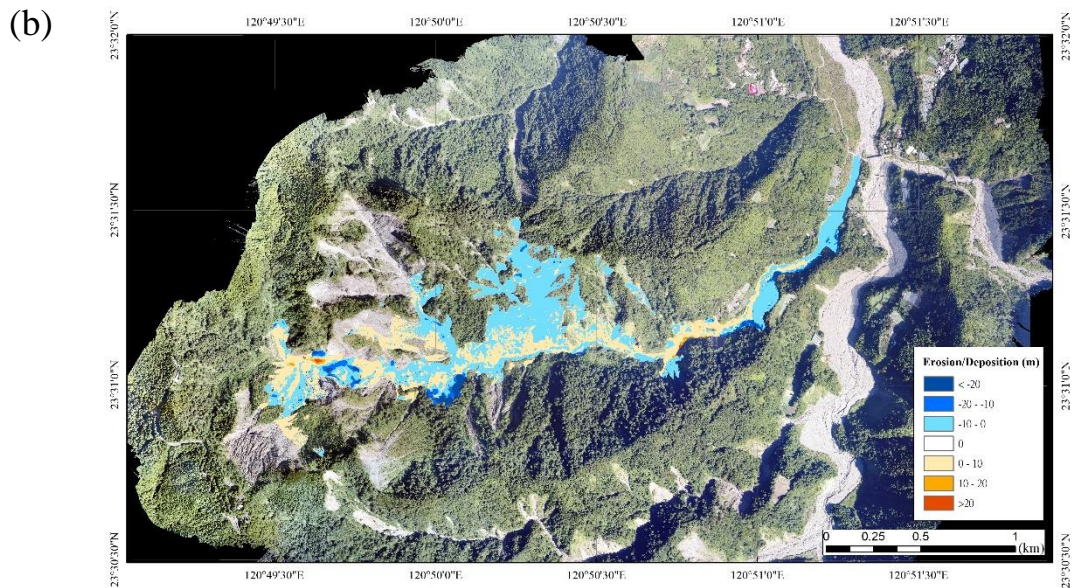


圖 5.3 愛玉子溪集水區之地表侵蝕與堆積；(a) 2008 年至 2014 年間(b) 2014 年至 2017 年間

由於 2017 年後至今，愛玉子溪也尚未發生其它土石流事件，因此本計畫將圖 5.3(b)中堆積於主河道的料源視為未來可能轉變為土石流的鬆散土方料源 V_{debris} ，其體積量約為 951,125 m³。在平衡濃度的假設下，由式(5.8) 與圖 5.3(b)中堆積之鬆散土砂料源，現場可能形成的最大土石流體積量則可進一步估算為 1,577,323 m³，而其分佈則如圖 5.4。

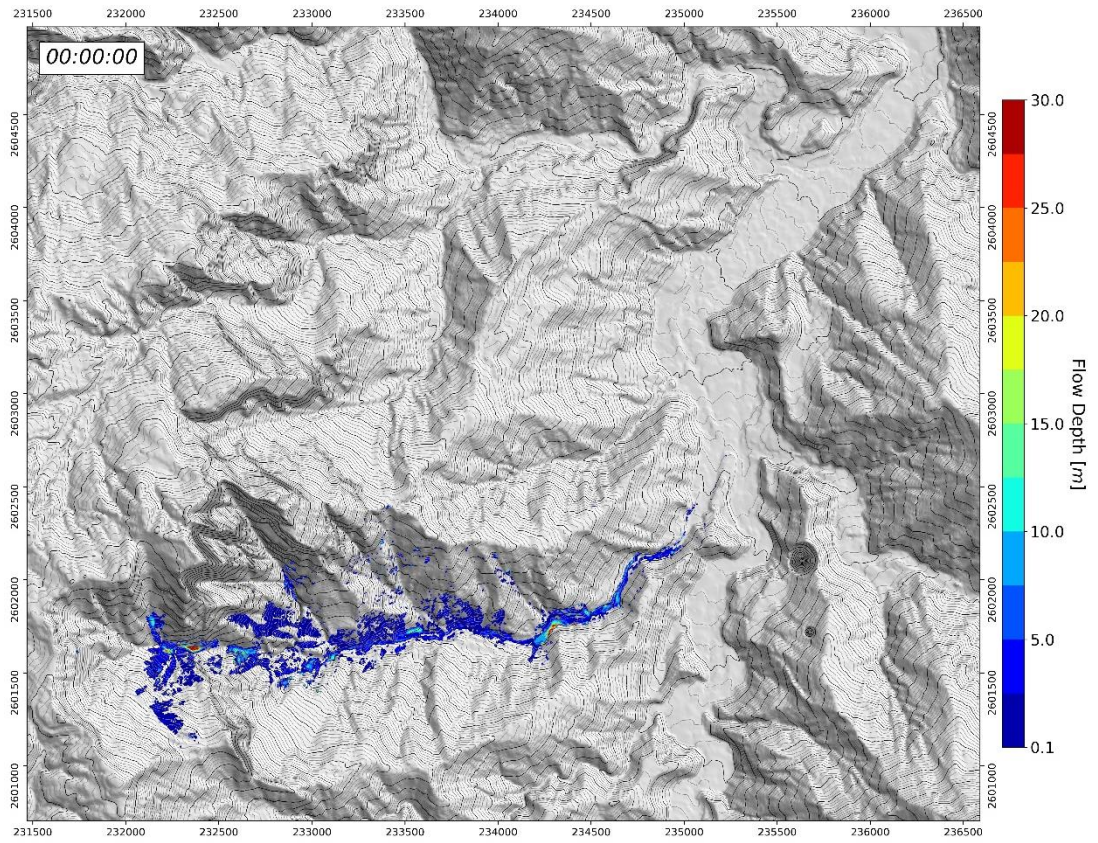


圖 5.4 土石流初始料源之流深分佈

第四節 土石流變參數之估計

在 DEBRIS-2D 所需要輸入的資料中，除了代表現地狀況的土石流體積與分佈外，另一個必須輸入的參數則是代表土石流物質組成的降伏應力。降伏應力是黏塑性流體(Viscoplastic Fluid)很重要的一個流變參數，代表著流體開始運動的瞬間所需施予的外力，若沒有超過此降伏應力則流體將不會有運動發生。而降伏應力也可視為材料組成的函數，理論上降伏應力在土石流內會隨著時間、位置而變化，然而配合前述平衡濃度的假設，DEBRIS-2D 假設土石流的降伏應力為一個常數值。降伏應力的量測方式有很多，實驗室內常用流變儀(O'Brien & Julien, 1988)，但僅限用於泥狀流體，不能含有顆粒或砂石。因此現場估算往往採用傾斜木板的簡易測量法(Liu & Huang, 2006; Coussot & Boyer, 1995)。本研究將採集現場樣本，並使用傾斜平板法，以現場飽和土樣做量測。

一、傾斜平板法基本理論與步驟

根據土石流的本構關係式，可將土石流流體方程式分為弱剪層 (Plug layer) 和強剪層 (Shear layer) 兩個部分，而弱剪層與強剪層則以 $|\tau| = \tau_0$ 為分界，其中 $|\tau| < \tau_0$ 的區域為弱剪層，而 $|\tau| > \tau_0$ 的區域則為強剪層，如：圖 5.5。

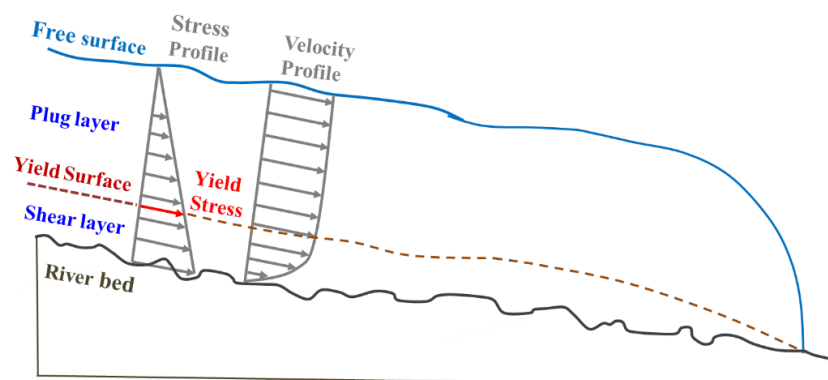


圖 5.5 土石流流動過程之弱剪層與強剪層示意圖

對一個有降伏應力的流體而言，其底部之剪應力一定要大於降伏應力，才能在靠近底床的區域產生強剪層，並開始流動。反之，當土石流流體逐漸停止流動時，底部之強剪層也會越來越薄，直到停止流動時，強剪層將消失並只剩下弱剪層，因此其底床上剪應力將剛好等於降伏應力。

透過上述的流動特性，我們則可透過土石流的弱剪層控制方程式去模擬流體，其一維情形下的方程式如下(黃名村，2003)

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} = -gH \cos \theta \frac{\partial(B+H)}{\partial x} + gH \sin \theta - \frac{1}{\rho} \tau_{zx} \Big|_{z=B} \quad (5.10)$$

其中 u 是 x 方向流速； H 是流深； B 是底床； g 是重力加速度； θ 為平均底床坡度； $\tau_{zx} \Big|_{z=B}$ 為剪應力作用於底床之分量； ρ 為土石流之密度。在土石流停止(或啟動)的瞬間，意即所有點之速度皆趨近於零時 ($u \approx 0$)，作用於底床之剪應力則約等於降伏應力 ($\tau_{zx} \Big|_{z=B} \approx \tau_0$)，因此可將式(5.10)化簡，並在底床 B 不隨 x 方向變化的假設下，即可推求在平均底床坡度為 θ 時的流深-降伏應力關係式如下

$$H + \frac{\tau_0}{\rho g \sin \theta} \ln \left(H - \frac{\tau_0}{\rho g \sin \theta} \right) = x \tan \theta + Const. \quad (5.11)$$

其中，當平均底床坡度 $\theta = 0^\circ$ 時，則式(5.10)可再次被化簡，並推得水準底床下的流深-降伏應力關係式如下

$$\frac{H^2}{2x} = -\frac{\tau_0}{\rho g} + Const. \quad (5.12)$$

由式(5.11)與式(5.12)可發現，降伏應力 τ_0 可透過土石流每個位置 x 的流深 H 進行檢定，因此本研究設計一長、寬、高分別為 77 cm、20cm、20cm 的管道(見圖 5.6)，並以螺桿搭配一垂直於底床之平板裝置去推動土砂流體向下游運動，模擬逐漸停止流動時的土石流流況(如圖 5.7(a))，並依此試驗之流深頗面檢定土石流之降伏應力(如圖

5.7(b))。



圖 5.6 傾斜平板試驗管道

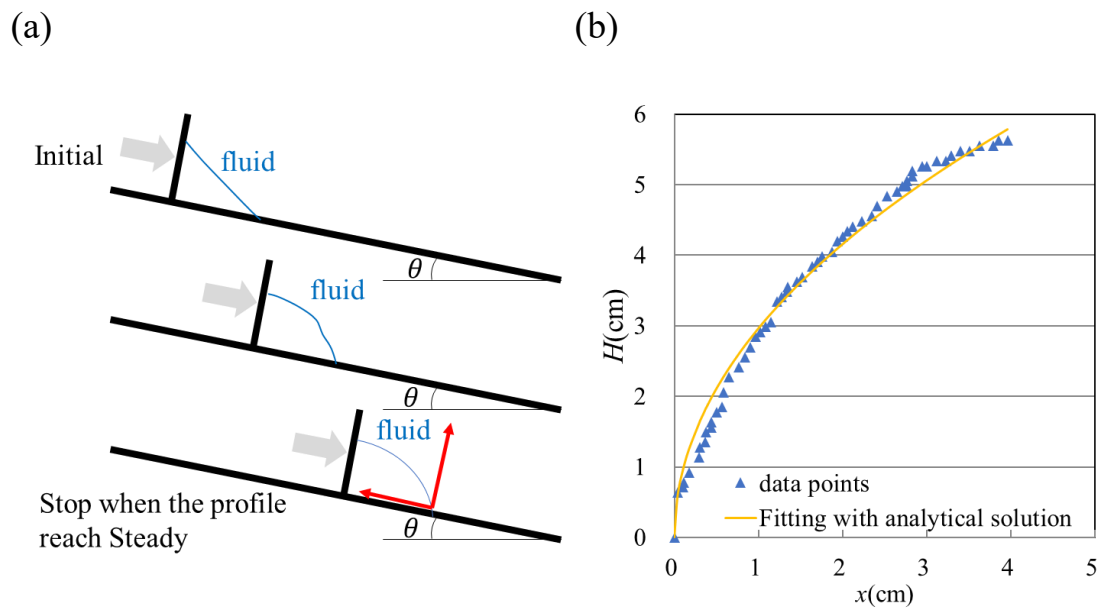


圖 5.7 傾斜平板試驗過程與萃取之流深頗面

針對式(5.11)或式(5.12)與前述之降伏應力檢定概念，其量測降伏應力試驗過程之詳細步驟如下：

- (一) 架設管道並量測管道坡度。
- (二) 將採樣之土樣加水混合
- (三) 量測試驗土樣之體積量、重量、密度。
- (四) 將試驗土樣堆置於傾斜之管道中，並一側以一垂直於管道底床的平板阻擋。錄影並緩慢推動平板，使試驗土樣緩慢向前移動，如此即可產生一每一點均達啟動狀態之剖面，如圖 5.7(a)所示。當試驗土樣不再隨著平板推動而改變流深分佈時即可停止。
- (五) 以錄影之影像萃取最後停止時的流深剖面，並紀錄流深 H 隨 x 變化的情形，以式(5.11)或式(5.12)檢定降伏應力 τ_0 ，如圖 5.7(b)所示。
- (六) 試驗完成後，將土樣烘乾，量測乾土重，並計算前述每次試驗過程的對應重量濃度 C_w 。
- (七) 參考標準土壤力學試驗之乾土比重量測步驟，量測土樣之比重，並以下式之轉換公式推求每次試驗的體積濃度。

$$C_v = \frac{C_w}{G - C_w(G-1)} \quad (5.14)$$

其中 $G = \gamma_s / \gamma_w$ 為比重； γ_s 和 γ_w 分別為土樣與水的容重。

- (八) 參考標準土壤力學試驗之粒徑分佈量測步驟，量測試驗土樣之粒徑分佈。

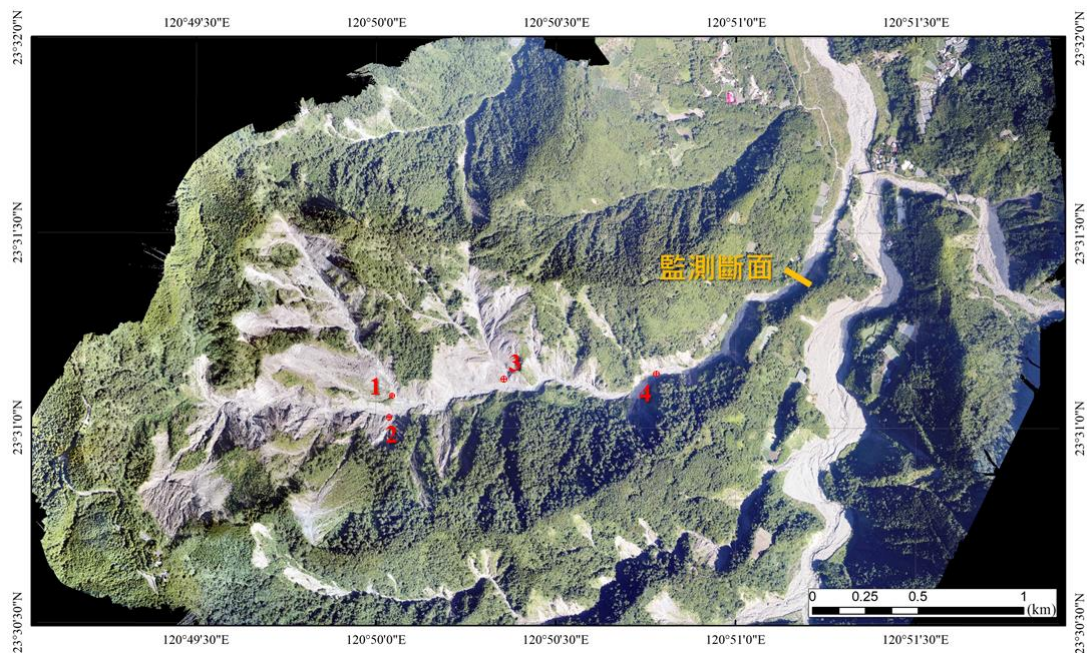
二、愛玉子溪土石流降伏應力之估計

由於過去研究或相關規範中並沒有針對現場土石流流變參數樣本採樣的方法，因此在現場挖掘樣本過程，本計畫則初步參考水土保持技術規範第三十七條的河床質調查方法，並重新考量土石流溪流之特性與流變參數試驗之需求，將採樣原則進行微調修正，如表 5.3。

表 5.3、河床質樣本採樣與土石流流變參數樣本採樣之比較

	河床質樣本採樣	土石流流變參數樣本採樣
選點	沖淤嚴重河段，且每 1 km 至少採樣一個點位	針對崩塌或過去土石流堆積之鬆散料源，因土石流溪流較短，故約 500 m 即採樣一個點位
採樣面積	1 平方米範圍之正方形	因溪床大於 1 米之巨石非常多，因此僅能尋找約 1 平方米範圍之多邊形
採樣深度	從表面挖掘約 0.6 公尺深	由於土石流溪流之表面粒徑較大，且礫石居多，因此依現場人工可挖掘的深度，從表面挖掘約 0.1~0.3 公尺深
最大粒徑	大於 2 mm 的大顆粒篩掉，並於現場做大粒徑篩分析	由於流變實驗之管道寬高都約 20 cm，因此僅將大於 10 mm 的大顆粒篩掉。
攜回土樣	採用四分法，將對角兩個等分的土樣攜回	採用四分法，將對角兩個等分的土樣攜回

根據表 5.3 所列之採樣原則，並參考圖 5.4 的初始體積料源分佈，本計畫於今年 10 月 5 日至愛玉子溪進行崩積料源的採樣，實際採樣之點位有四處，如圖 5.8 所示，包含：中上游兩條支流與主流的匯流點(點位 1、3)、主流上游右岸崩塌邊坡之坡趾(點位 2)、歷史土石流前鋒堆積等(點位 4)。攜回的土樣則依照前節所列之試驗步驟(步驟 1~6)進行試驗，其試驗之影像如圖 5.9，擷取之流深頗面與透過式(5.12)檢定之結果如圖 5.10。



點位	座標(TWD97)	採樣時間	描述
1	233141 · 2601621	2020/10/05	左岸支流一與主流匯流點
2	233122 · 2601540	2020/10/05	主流右岸崩塌邊坡坡趾
3	233600 · 2601706	2020/10/05	左岸支流二與主流匯流點
4	234337 · 2601764	2020/10/05	歷史土石流前鋒堆積處

圖 5.8 愛玉子溪土砂料源現場採樣點位與列表

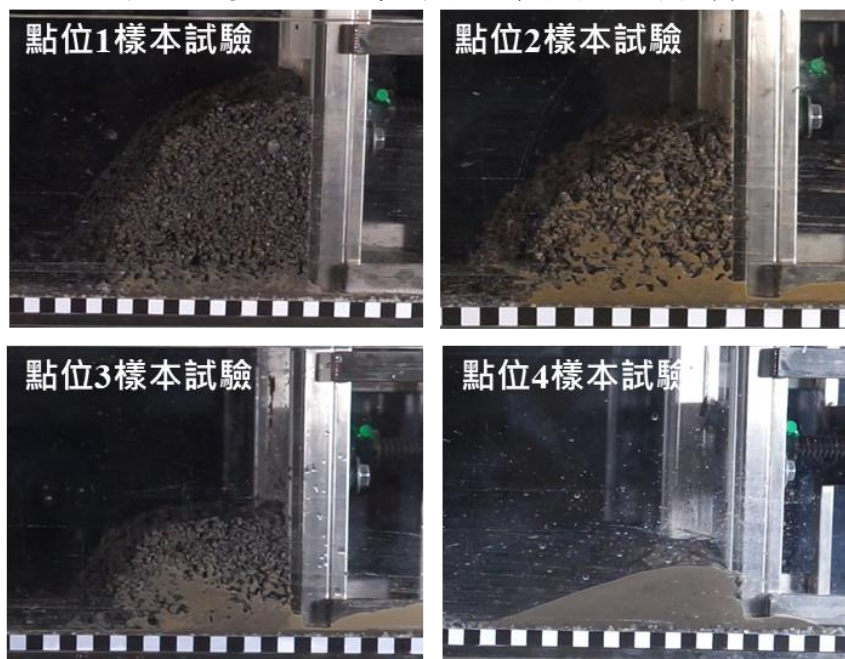


圖 5.9 傾斜平板試驗達穩態時之頗面影像

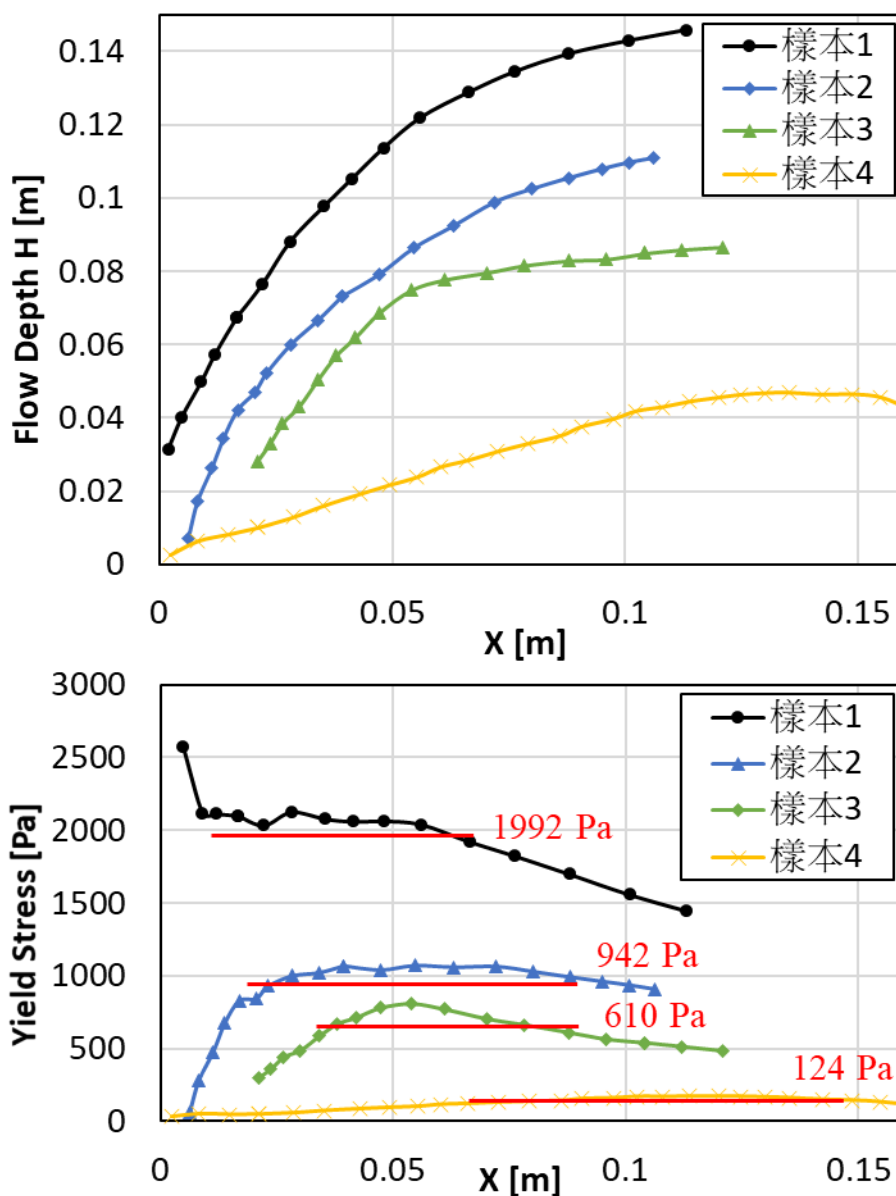


圖 5.10 影像擷取之流深變化與降伏應力檢定結果

表 5.4 試驗樣本之流體參數與估計之降伏應力

樣本 點位	試驗 體積量 (cm ³)	流體 密度 (g/cm ³)	重量 濃度 (%)	乾土 比重	體積 濃度 (%)	d50 (cm)	降伏 應力 (Pa)
1	5176.76	1.57	0.88	2.669	0.73	2.12	1991.79
2	3632.61	1.60	0.87	2.661	0.71	2.30	942.25
3	2779.50	1.59	0.83	2.655	0.66	1.77	609.73
4	2009.42	2.02	0.78	2.658	0.57	0.17	124.02

試驗完成後則接續參考標準土壤力學試驗量測乾土比重與粒徑

篩分析，並將數據統整如表 5.4。在此試驗中，四個樣本的中值粒徑約介於 0.17~2.30 cm，在體積濃度接近土石流平衡濃度的情況下，其降伏應力約介於 124~1991 Pa 之間。

若由樣本的空間分佈去評估，四個樣本的中值粒徑和土石流的降伏應力皆由上游往下游逐漸遞減，而土石流在形成時，其靠近底床的剪應力必須先克服降伏應力才能開始流動，因此可推估沿著溪流越下游的鬆散堆積土砂越容易形成土石流向下游運移。但在防災應用上，為了確認土石流發生後的最大可能影響範圍，因此本研究將採用較小的降伏應力值(第四個樣本之結果)作為降伏應力之代表值，並依此去模擬愛玉子溪土石流對下游的影響距離與範圍。

第五節 土石流模擬與預警資訊探討

在愛玉子溪的土石流模擬中，採用本章第二節介紹之 DEBRIS-2D 模式進行模擬。雖然經由第三節所估計之土方量多為崩坍後的鬆散堆積土方，但不代表所有土方都會在一次事件中形成土石流像下游運移，因此本計畫另外將 75%與 50%的土方量的土石流事建情境納入考量，並依此進行土石流致災評估。根據本章第三節與第四節之說明，其土石流模擬之輸入參數統整如下表 5.5，而其土石流模擬結果則繪圖如圖 5.11~圖 5.13。

表 5.5 土石流模擬之輸入參數

參數	模擬參數	備註
地形精度	5 [m]	
土石流之平衡濃度	0.603	Takahashi (1981); Liu & Huang (2006)
土石流初始體積量	1, 577, 323[m ³]	其分佈如圖 5.4
	1, 182, 992.25[m ³]	75%最大體積量
	788, 661.5 [m ³]	50%最大體積量
土石流降伏應力	124.02 [Pa]	

為了有效應用本計畫發展之監測加值分析結果，如：攝影機與地聲分析之監測斷面土石流泥位高度、土石流前鋒運移速度、土石流流量等資訊，並結合土石流模擬之影響範圍提供有效且足夠的預警資訊，通過監測斷面的土石流模擬資訊，如：斷面最大流深、斷面最大流速、斷面流量等則變得非常重要。假若能透過現場監測確認土石流通過監測斷面的流況資訊，則有機會透過事前的土石流模擬，快速確認土石流對下游的影響時間，並提供土石流發生後的最大影響距離或最大影響範圍。

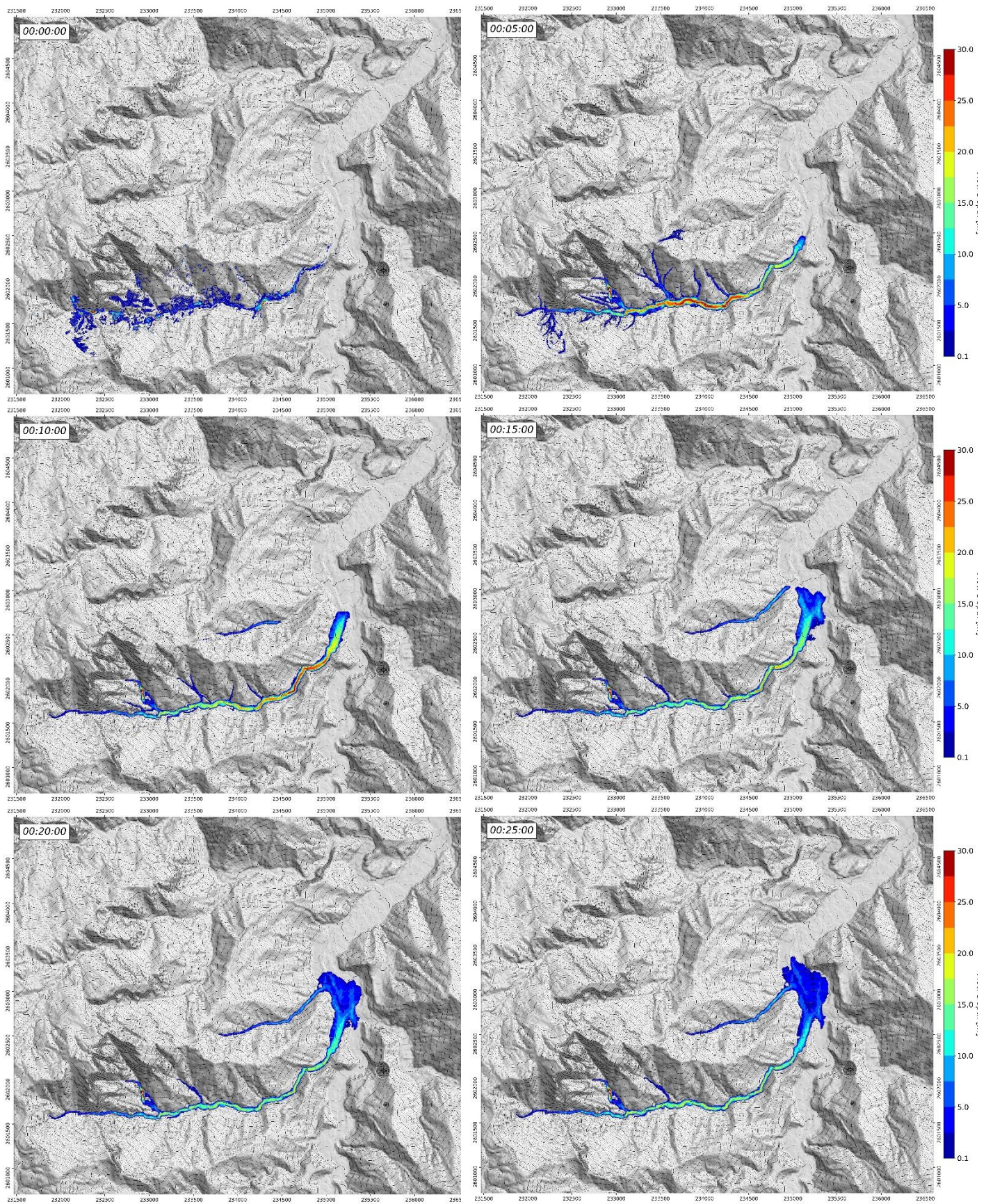


圖 5.11 最大體積量之土石流數值模擬結果

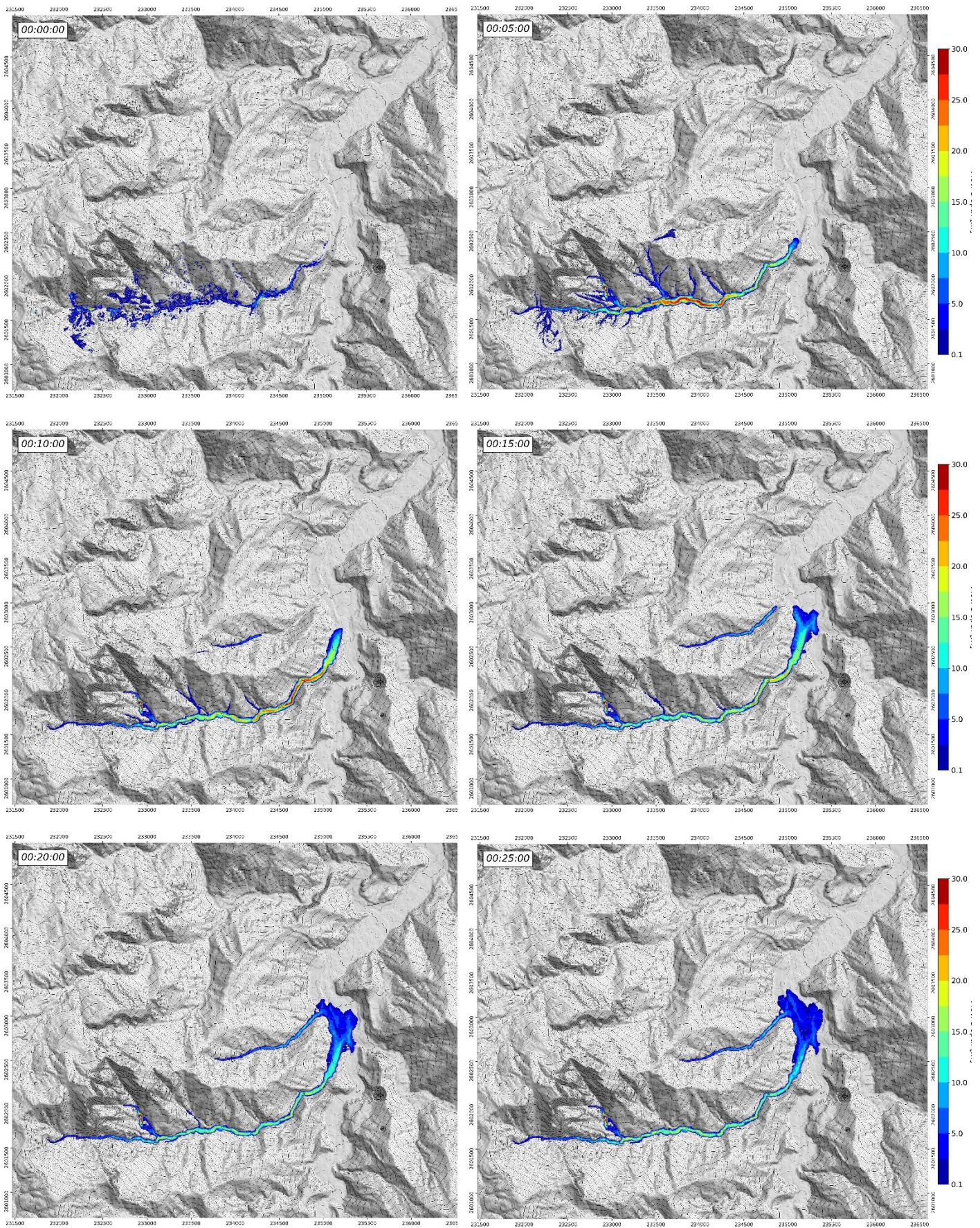


圖 5.12 75%體積量之土石流數值模擬結果

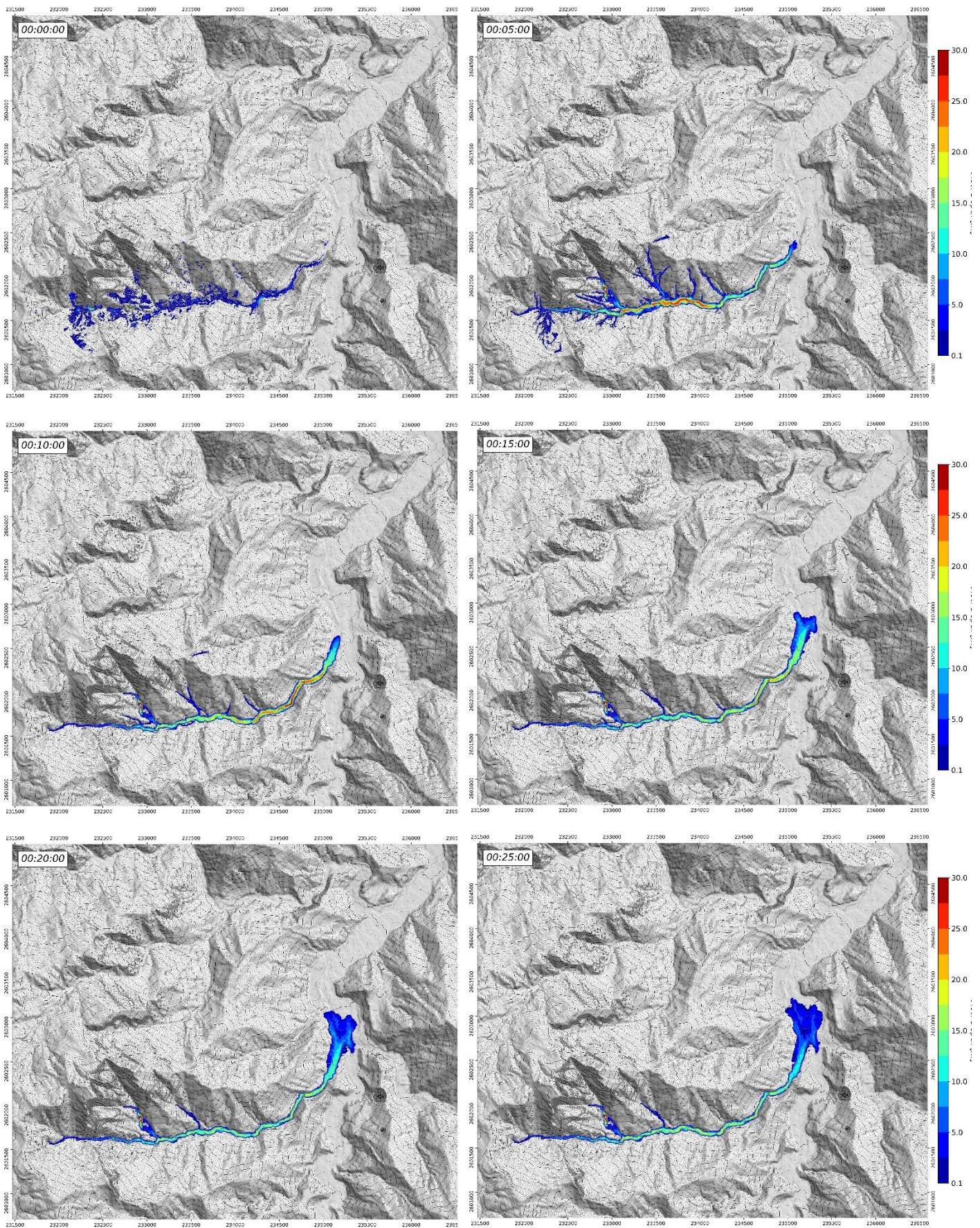


圖 5.13 50%體積量之土石流數值模擬結果

由於通過監測斷面的土石流流況資訊極為重要，因此本計畫應用圖 5.11~圖 5.13 展示之土石流數值模擬結果，內插通過監測斷面格點之流深 H 與流速 u 、 v ，由於模擬之流速 u 、 v 為深度平均之流速，因此通過每個網格點之單寬流量 q 可近似為 $H\sqrt{u^2+v^2}$ ，最後將斷面上的所有單寬流量加總為通過該斷面之土石流流量 Q ，其斷面流量隨時間之變畫圖，如：圖 5.14。

在本計畫第三章中，已經逐步建立影像估算的土石流泥位與土石流平均流速等方法，為了可以將流況估算的結果應用在對下游的預警，因此本研究將土石流通過監測斷面的最大流深與平均流速也繪製出來(如圖 5.14)，期許未來可以透過模擬，建製斷面流況與下游影響範圍的資料庫。

本計畫為了瞭解土石流延著溪流的流況，如：流深與距離或時間的關係，並推算土石流前鋒向下游的運移距離與抵達時間，本計畫則沿著溪流的縱頗面方向萃取流深資訊，並進一步繪製流深-距離-時間圖，如：圖 5.15。此分析數據可快速瞭解土石流延著溪流的運移狀況，並可藉此圖分析土石流波速、前鋒速度、流深變化等，未來也可做為監測斷面配置修正的參考依據。

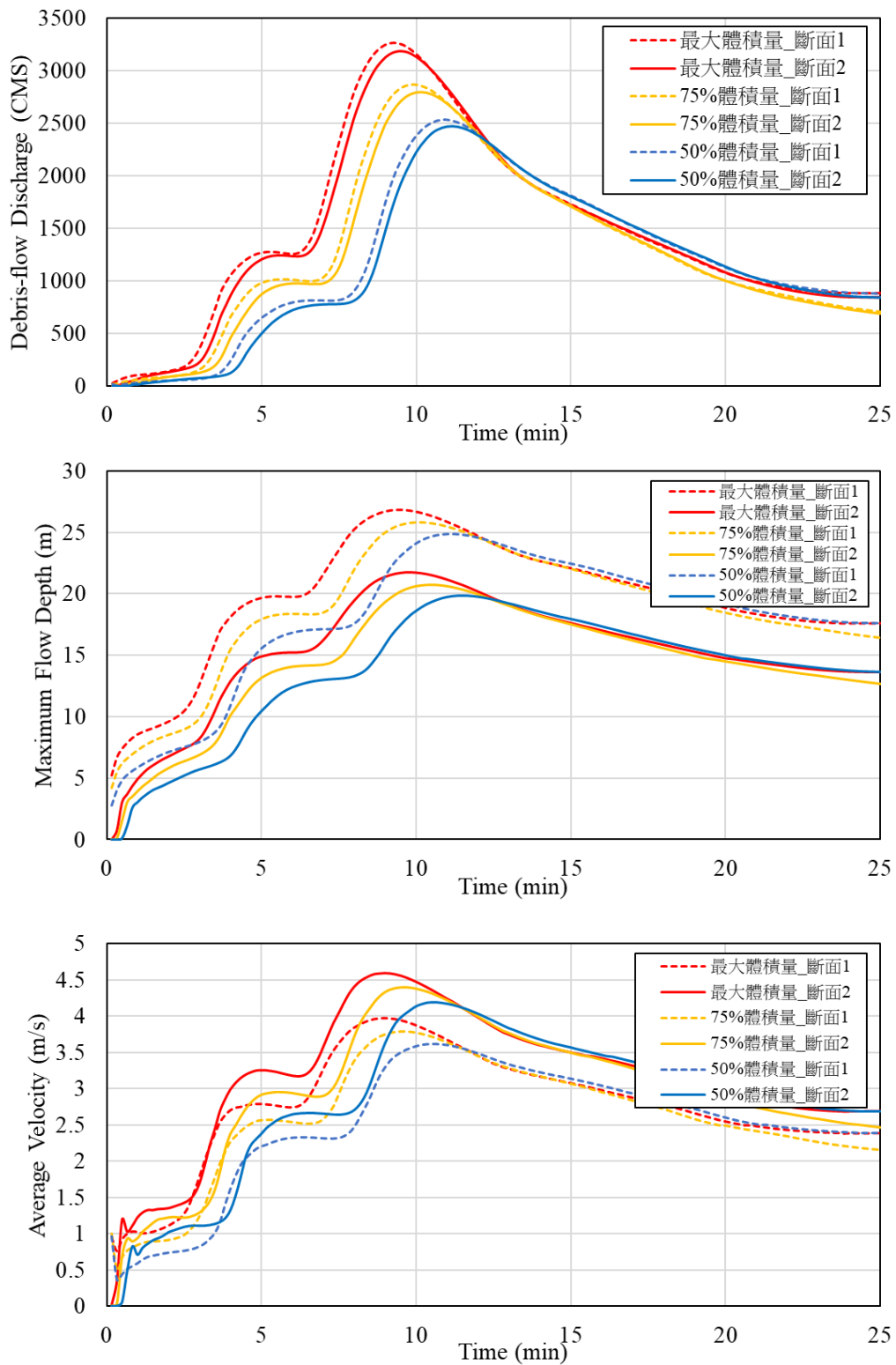


圖 5.14 土石流經過監測斷面時的斷面流量、最大流深、平均流速圖

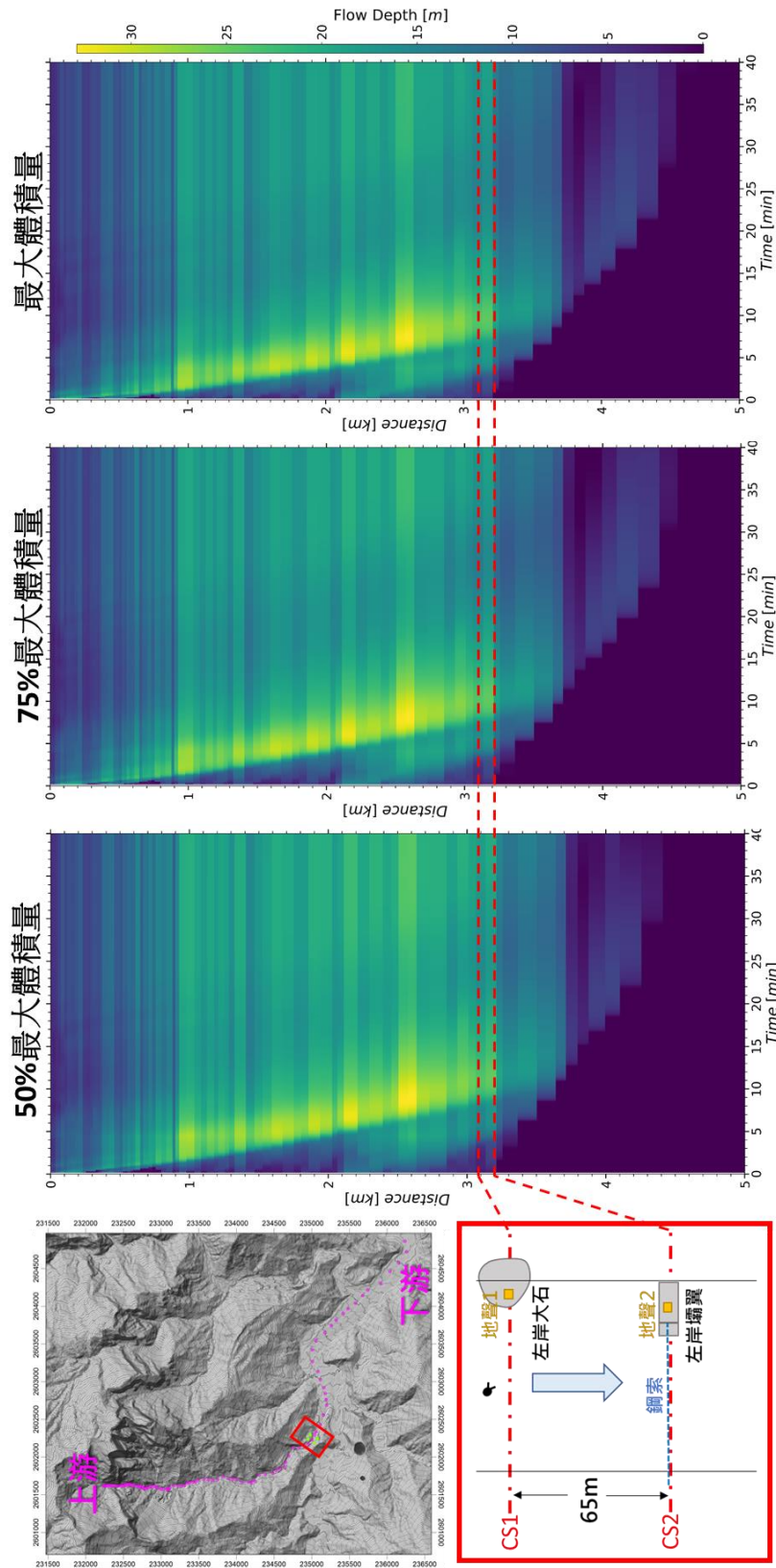


圖 5.15 土石流流深、運移距離與運移時間關係圖

透過圖 5.15，其實已可看出土石流前峰沿著溪流往下游的影響距離與影響時間，但為了提供更簡潔與快速的數據供防災人員或居民瞭解當監測站發出預警後，土石流可能影響多遠的距離，多久會抵達等問題，因此本計畫初步將土石流前峰的影響距離與時間等資訊統整於圖 5.16，期望依此提供土石流影響範圍與影響時間的預警資訊。

未來本計畫也將持續透過不同初始條件進行土石流模擬，逐步建立不同情境下，土石流的運移距離與前鋒抵達時間，並嘗試以愛玉子溪為例建構監測斷面流深(或流量)對下游影響距離和影響時間的經驗公式，提供快速的預測資訊供防災決策或現場疏散避難之參考。

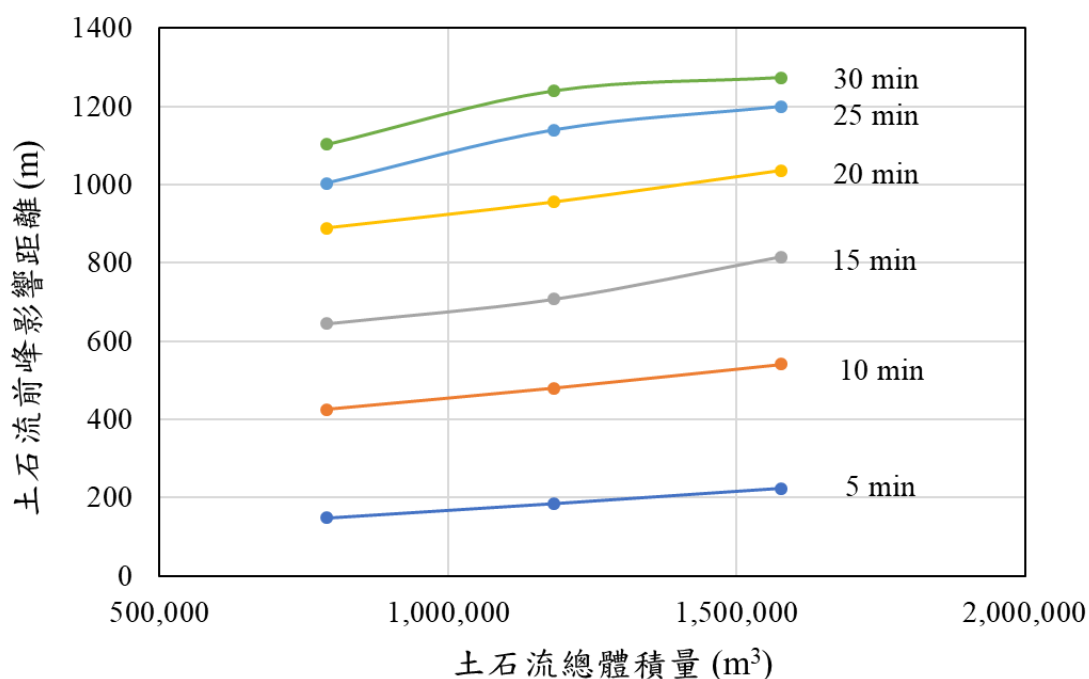


圖 5.16 土石流沿河道對下游之影響距離與影響時間關係；以三場不同體積量之土石流為例，其影響距離為監測斷面沿下游計算之距離

第六章 智慧防災網站

整合並展示所有資訊，並能夠將分析工具放於平臺上共用，再產生及時預警與相關措施，神木中心的網站已經建立完成，其架構如下，分成資料接收，即時分析，監控顯示與自動預警四大部分。

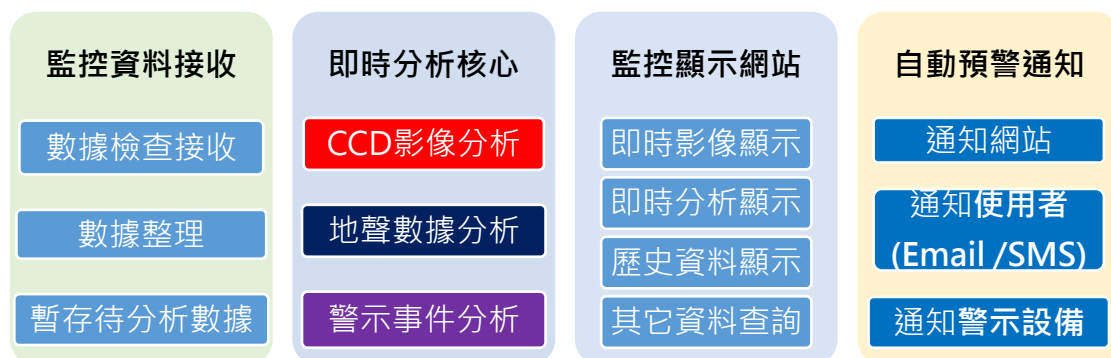


圖 6.1 網站系統架構圖

第一節 展示系統

網站上必須有登入的機制，如圖 6.2。

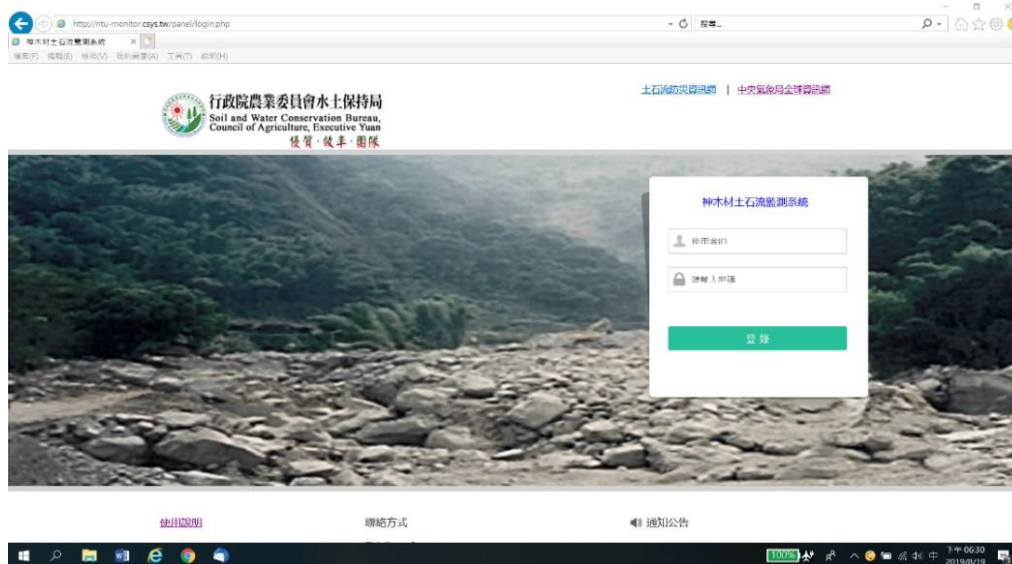


圖 6.2 展示系統登入首頁

進入系統後是以整個集水區的空拍圖(目前初步使用 Google 航拍圖)為底，攝影機與地聲探測器的訊號直接顯示在該設備所在溪流，同時攝影機以灰階值法計算的結果就顯示於攝影機下方，地聲檢知器的

訊號與 FFT 分析預警曲線也顯示在一起，右下增加了集水區的雨量分佈區線，如圖 6.3。

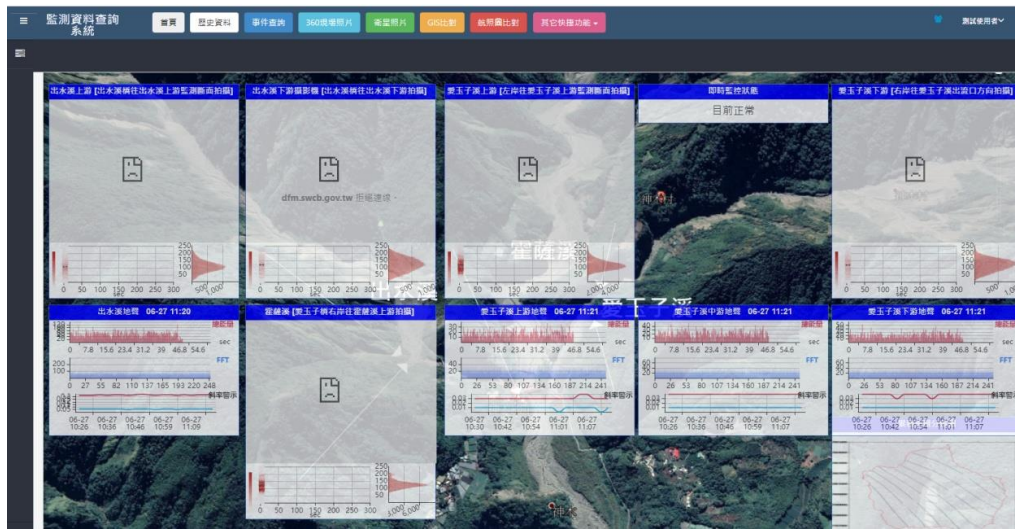


圖 6.3 展示網頁中心整體監測設施圖

而在上方選項中(圖 6.3)則包含:歷史資料(可供下載)、事件查詢、360 度現場照片、衛星照片、GIS 與航照圖對比等功能，若選擇過去事件，使用者可以把過去事件資料下載，資料切成一分鐘一筆，方便下載，如圖 6.4。

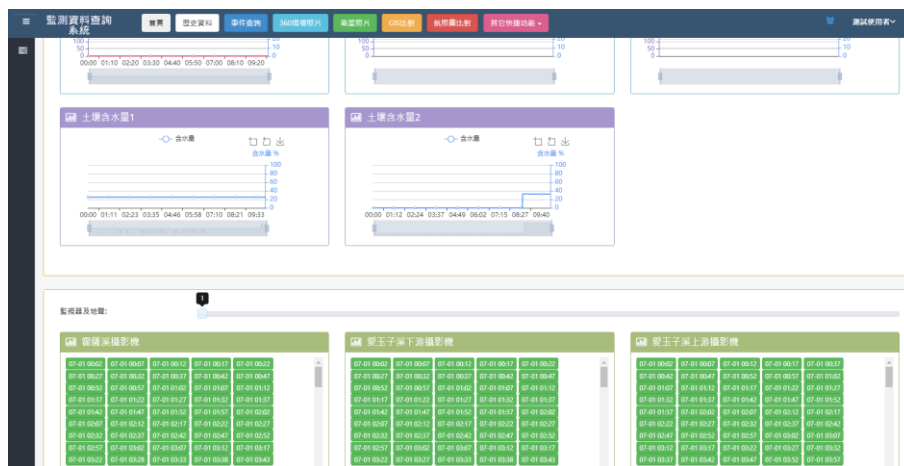


圖 6.4 資料下載頁面(一分鐘一筆)；上方為雨量、下方為影片與地聲

選擇衛星資料可看到下圖

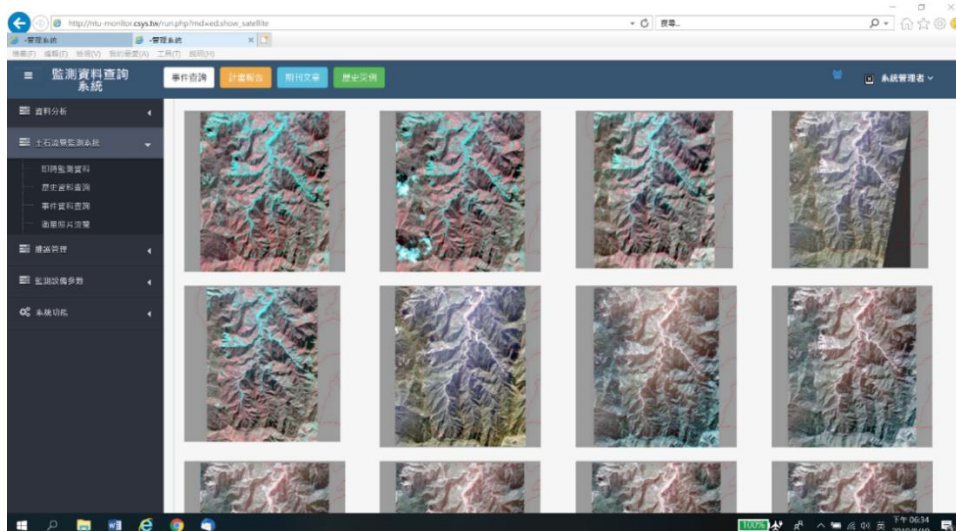


圖 6.5 展示中的歷年衛星影像

若選擇觀看過去(歷史)資料，則點選該事件後，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，若該設備有分析的結果，也會同步顯示。

若選 360 度現場照片，會有三個時期(107 年 7 月、107 年 9 月、109 年 8 月)的環場照，自下游到上游分 45 個點照出來。



圖 6.6 愛玉子溪 360 度環場照

若選擇 GIS 比對，會有多筆資料的對比，可以用左右拉動的方式來比對資料

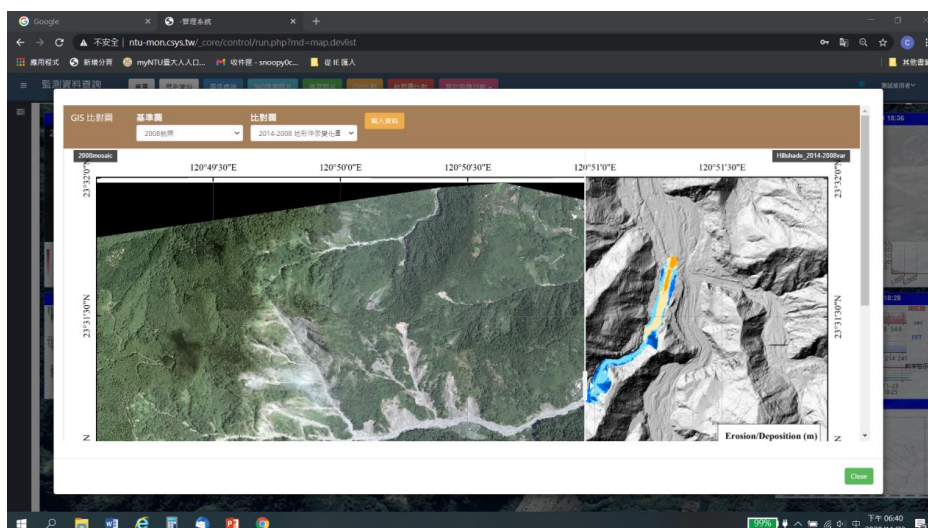


圖 6.7 GIS 資料比對；包含等高線圖、航拍圖、裸露地判釋、地形侵蝕與堆積等計算圖

第二節 資料接收、儲存與預警機制

資料接收

此網頁的資料，是由逢甲大學的神木測站將該站資料於接收後，存到在神木國小三樓同步儲存(NAS)裝置，但是當儲存硬碟滿了，就必須以人工方式抽換硬碟，才能繼續儲存，否則資料就中斷了，因為這原因，往往會損失一些資料。同時資料的儲存，並非即時同步，而使每隔一段時間(如五分鐘)，才把資料以檔案形式儲存至本系統中，尤其在警戒時期，因為 CPU 工作量很重，資料儲存可能更慢，因此系統並無法做即時預報或即時處理，但是以目前測試系統的角色應該可以接受。

資料展示

資料接收後，即刻於首頁展示本集水區五台攝影機的即時畫面，2 地聲檢知器與影像資料也同步以快速傅立葉轉換與總灰階值法分析，分析結果也同步顯現於首頁如圖 6.3，所有分析資料都是同步即時進行，流量資料則是隨時都由地聲檢知器資料算出顯示

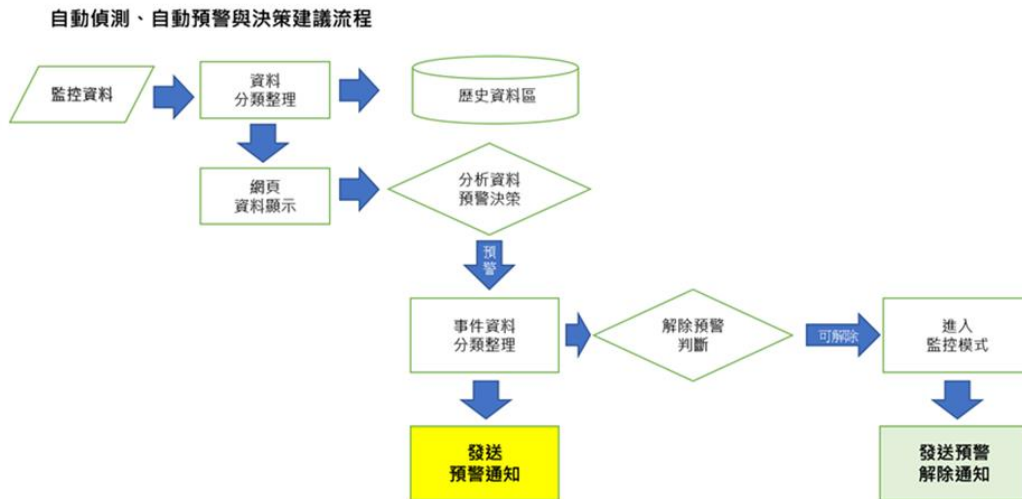


圖 6.8 自動偵測預警系統流程圖

預警機制

若地聲檢知器或攝影機兩者有一個顯示偵測到土石流，首頁就會顯示警報，同步流深流量流速與下游警報時間就都會顯示出，若有連結預警通報與設備遙控，也會直接自動控制

資料自動儲存機制

只要來偵測到土石流抵達的資料(以地聲檢知器或攝影機)，系統立刻展開自動事件儲存機制，等到事件結束，從事件偵測到事件前五分鐘的所有資料(雨量、影片、地聲)就會從 NAS 中拷貝到另一個長期儲存硬碟，然後顯示於系統的「過去事件」以備查詢，其流程如圖 6.9。

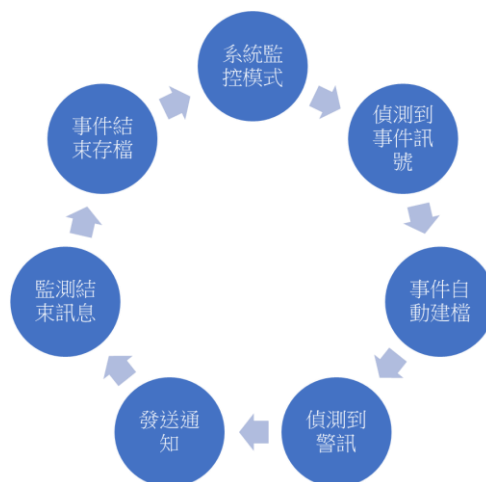


圖 6.9 事件紀錄儲存模式

而過程中如果資料到達警戒，則會以警戒模式處理，如圖 6.9 與

6.10 之步驟。

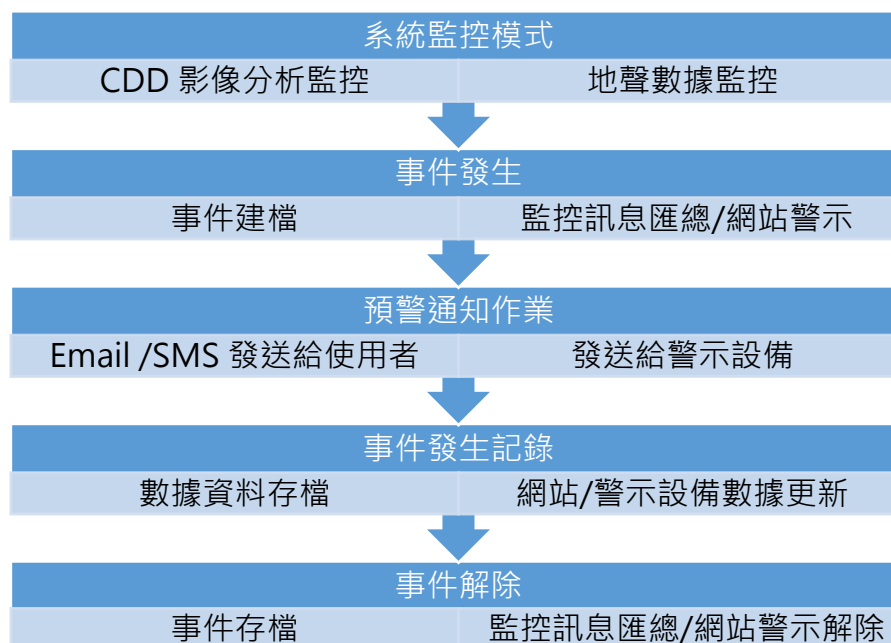


圖 6.10 自動預警流程與預警通知模式

警戒模式分兩部分，一部分是於網站上直接顯示訊息，另一部分是直接發訊息給相關人員，若有需要則直接控制遠方裝置，此部分將於期末報告展示。

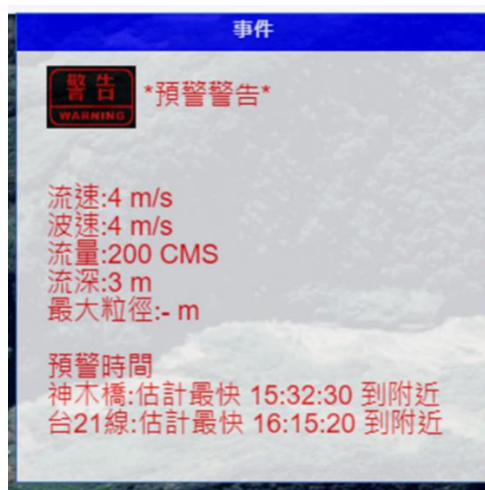


圖 6.11 預警視窗

(二) 使用者紀錄系統

為了控管使用網站的人員與分析其使用歷程，建立了使用者系統，每個使用者皆有帳號密碼，而使用者的指令與使用到的資料也會

持續記錄

使用者歷程機制

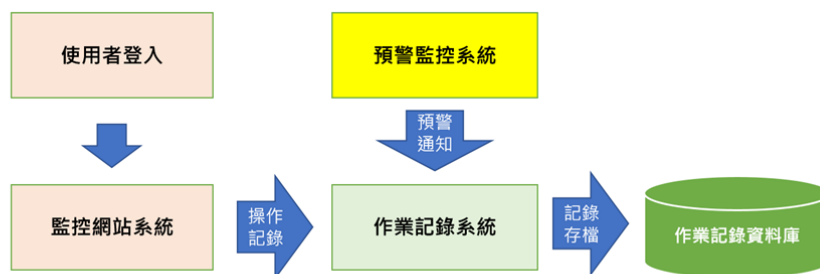


圖 6.12 使用者歷程記錄流程圖

如此可以仔細分析資料使用與程式使用的量與單位，以備未來使用者多且資料量大的時候的系統分析與保密作業作業。

第七章 結論與建議

結論

- 一、攝影機與地聲檢知器現場檢校方式理論與檢定方式都已經設計並驗證完成，並於現場驗證完成，愛玉子溪的地聲檢知器與攝影機都有微小瑕疵，但經過檢校修正後不影響功能。
- 二、由影像擷取水位技術完成，可以獲得任何時候影像中的水位變化，誤差不超過 10%。
- 三、以互相關求取顆粒速度與粒徑的方式，最大顆粒速度與平均速度可以快速估計出來，但是誤差有可能到達 25%。
- 四、以多年航照與無人飛機照片分析集水區土砂平衡工作完成到 2020，產出多年崩坍量，河道沖淤量，並可比對計算集水區中剩餘土砂量及土砂遞移率。
- 五、利用集水區中剩餘土砂量是否超過 200 萬噸為指標，可作為長期土石流預警指標之一
- 六、網站已建置完成，包含：監測展示、資料下載、事件查詢、3D 環場照、航照、資料比對等功能，而監測資料也已與攝影機和地聲的偵測結合，可以做即時預警的現場測試。

建議

- 一、本自動偵測預警系統已經初步完成，建議將此系統選擇其他土石流潛勢溪流測試，以了解換地區後是否參數設定會不容易
- 二、建議將所有土石流監測站的地聲檢知器與攝影機都進行現場檢定，以確認是否功能正常

三、建議將神木村測站整體升級為英文系統，並繼續「神木國際土石災害觀測研究中心暨坡地水文試驗研究場域」之設置

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. 水土保持技術規範 (中華民國 103 年 9 月 11 日)
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 區域排水整治及環境營造規劃手冊
8. 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。
9. 黃名村 (2003),「土石流災害範圍之數值模擬及利用微波偵測土石流之研究」,國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
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. 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。
12. 劉格非、李峰昌 (1997),「石流撞擊機制之試驗分析」,中華民國力學學會期刊, 第 13 卷, 第 1 期, 第 87-100 頁。
13. 劉格非、魏士超、鄺寶成 (2013),「累積雨量對土石流影響範圍評估之影響」,中華水土保持學報, 第 44 卷, 第 3 期, 第 225-233 頁。
14. 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。
15. 魏士超 (2019),「土石流震聲波之理論研究」,博士論文,國立台灣大學土木工程學系。
16. 內政部土地測量局 (2006) e-GPS 衛星基準站即時動態定位系統-VBS-RTK 定位測試成果報告,內政部土地測量局。
17. 水土保持局 (2020)「土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析」

- 計畫成果報告，行政院農委會水土保持局。
18. 王韻皓、陳連晃 (2011) 農業委員會林務局農林航空測量所業務介紹，地籍測量，第 30 卷第 1 期，第 38-46 頁。
 19. 何維信 (1995) 「航空攝影測量學」，大中國出版社。
 20. 林慶偉 (1994) 玉山國家公園新中橫地區地質構造分析及其對崩塌地發育之影響，玉山國家公園出版。
 21. 科技部 (2017) 「災後地形改變影響全流域水砂運移之模擬、劃設與資料庫建置」，科技部專題研究計畫成果報告。
 22. 科技部 (2018) 「災後地形改變影響全流域水砂運移之模擬、劃設與資料庫建置 II」，科技部專題研究計畫成果報告。
 23. 張麗旭、詹新甫、李朝雄 (1960) 阿里山煤田地質，台灣省地質調查所彙刊，第十二號，第 91-102 頁。
 24. 陳振宇(2008)，「國內土石流警戒發布機制沿革」，台灣水土保持季刊，第 63 卷，第 1-7 頁。
 25. 陳振宇、劉維則、許家祥 (2017) 使用 QPESUMS 雨量資料建立崩塌災害預警模式，中華水土保持學報，第 48 卷，第 1 期，第 44-55 頁。
 26. 陳樹群、翁愷翎、吳俊鎰 (2010) 玉峰溪集水區崩塌特性與崩塌體積之探討，中華水土保持學報，第 41 卷，第 3 期，第 217-229 頁。
 27. 陳樹群、蔡喬文、陳振宇、陳美珍 (2013) 筒狀模式之土壤雨量指數應用於土石流防災警戒，中華水土保持學報，第 44 卷，第 2 期，第 131-143 頁。
 28. 馮智偉 (2017) 「整合土壤雨量指數與降雨驅動指標之警戒模式可行性評估」，行政院農業委員會水土保持局委辦計畫。
 29. 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 275-285 頁。
 30. 農委會 (2017) 「多元尺度環境因數對崩塌災害發生誘因之研究」，農委會補助研究計畫成果報告。
 31. 農委會 (2018) 「多元尺度環境因數對崩塌災害發生誘因之研究 II」，農委會補助研究計畫成果報告。
 32. 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.
 33. Armanini A., Fraccarollo L. &Rosatti G. (2009) Two dimensional simulation of debris flows in erodible channels.

- Computers & Geosciences , 35 , 993–1006.
34. Andreas Schimmel(2018)Automatic Identification of Alpine Mass Movements by a Combination of Seismic and Infrasound Sensors
 35. Beauchemin S. S. , Barron J. L.(1995) The Computation of Optical Flow , ACM Computing Surveys (CSUR) Surveys Homepage archive Volume 27 Issue 3 , Sept , Pages 433-466
 36. Bouguet J. Y.(1999) Pyramidal implementation of the ILcas Kanade feature tracker description of the algorithm , Intel Corporation Microprocessor Research Labs
 37. Coussot , P. , and Boyer , S. (1995) “Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test.” *Rheologica Acta*. 34(6):534-543
 38. FLO-2D (2006) FLO-2D User’s manual (version 2006.01) , FLO-2D Software , Inc. , Arizona , USA
 39. Friedlander B. and Zeira A.(1995)Over-sampled Gabor representation for transient signals.
 40. 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.
 41. Hungr , O. (1995) A model for the runout analysis of rapid flow slide , debris flow , and avalanches , *Canadian Geotechnical Journal* , 32 , 610–623.
 42. Hutter , K. & Greve , R. (1993) Two-dimensional similarity solutions for finite-mass granular avalanches with Coulomb- and viscous-type frictional resistance. *J. Glaciol.* 39 , 357–372
 43. Hutter , K. , Koch , T. , Pluˆss , C. & Savage , S. B. (1995) The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. *Acta Mech.* 109 , 127–165.
 44. 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)
 45. Itakura Y. , Koga Y. , Takahama J.I. , and Nowa Y.(1997) Acoustic detection sensor for debris flow.
 46. 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.
 47. Julien , P.Y. and Y. Lan (1991). “Rheology of

- Hyperconcentrations.” *J. Hydr. Engrg* , 117(3):346-353.
48. Kuo H.M. , Ren H. , Lee C.S. , Chen Yen-Liang , Lin Yen-Shuo , and Su Yeng. (2013) Monitoring Debris Flows Using Spatial Filtering and Entropy Determination Approaches. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* , Vol. 24 , No. 5 , 773-791 , October
 49. Liu , K.F. and Huang , M.C. (2006). “Numerical simulation of debris flow with application on hazard area mapping.” *Computational Geoscience* , 10(2): 221-240.
 50. Liu , K.F. , Hsu , Y.C. and Huang , M.C. (2007). Study on the sensitivity of Parameters Relating to Debris Flow Spread. 2007 International Conference on Slope land Disaster Mitigation , Taipei , Oct. 29-30 , 212-220
 51. Liu K.F. , Kuo T.I. , Wei S.C. (2021) Debris flow detection using a video camera. In: Sassa K. et al. (ed) *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk* (accepted)
 52. Liu , K.F. , Li , H.C. and Hsu , Y.C. (2009). “Debris flow hazard assessment with numerical simulation.” *Natural Hazards*. 49:137-161.
 53. Liu K.F. , Wei S.C. , and Wu Y.H. (2014) The influence of accumulated precipitation on debris flow hazard area. In: Sassa K. et al. (ed) *Landslide Science for a Safer Geo-Environment* , Vol 3 , Springer , pp 45-50
 54. Liu , K.F. and Wu , Y.H. (2010). The Assessment of Debris Flow Hazard in Korea Using Debris 2D. *Interpraevent 2009* , 820-82
 55. MizuyamaT. , FujitaM. , NonakaM. (2003)Measurement of bed load with the use of hydrophones in mountain torrents”.
 56. Naef , D. , D. Rickenmann , P. Rutschmann and B.W. McArdell (2006) Comparison of friction relations for debris flows using a one dimensional finite element simulation model , *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* , 6 , 155–165.
 57. Nakatani K. , Wada T. , Satofuka Y. , Mizuyama T. (2008). Development of “Kanakano 2D (Ver.2.00) , ” a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface. *International Journal of Erosion Control Engineering: Vol.1* , No.2 , 62-72.
 58. 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.

59. O'Brien JS , Julien PY , Fullerton WT. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119 : 244-259.
60. O'Brien , J. and Julien , P. (1988). "Laboratory Analysis of Mudflow Properties." *J. Hydraul. Eng.* , 114(8) , 877-887.
61. Sassa K (1988) Geotechnical model for the motion of landslides. In: *Proc. 5th International Symposium on Landslides* , "Landslides" , Balkema , Rotterdam , vol. 1. pp 37-56
62. Sassa K , Wang G , Fukuoka H , Wang FW , Ochiai T , Sugiyama , Sekiguchi T (2004) Landslide risk evaluation and hazard mapping for rapid and long-travel landslides in urban development areas. *Landslides* 1(3):221-235
63. Simon Baker , Iain Matthews.(2004)"Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework" , *International Journal of Computer Vision* 56(3) , 221-255
64. SunD. , RothS. , and Black.M. J (2010)Secrets of optical flow estimation and their principles. In *CVPR*. 6
65. Takahashi , T. (1981). "Debris flow." *Annual Review Fluid Mechanics* , 13:57-77.
66. 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
67. Tsai , M.P. , Hsu , Y.C. , Li , H.C. and Liu , K.F. (2011). "Application of simulation technique on debris flow hazard zone delineation: a case study in the Daniao tribe , Eastern Taiwan." *Nat. Hazards Earth Syst.* , 11:3053-3062
68. Wang Chia-Ming , Fan Kuo-Chin , and Wang Cheng-Tzu (2008)Optical Flow by Integrating Multi-Frame Information , *Journal of Information Science and Engineering* 24 , 1719-1731
69. Wei , S.C. , Li , H.C. , Shih , H.J. , and Liu , K.F. (2018) Potential Impact of Climate Change and Extreme Events on Slope Land Hazard – A Case Study of Xindian Watershed in Taiwan , *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* , 18 , 1-14.
70. Wei , S.C. , and Liu K.F. (2019) Automatic Debris Flow Detection with Geophones , *Landslides*. 17(2) , 349-359. doi: 10.1007/s10346-019-01258-9
71. Wu , Y.H. , Liu , K.F. and Chen , Y.C. (2013) Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment

- of granular debris flow hazards with case study. *Journal of Mountain Science*. 10(2):293-304
72. Barbour , J.R. , Stark , C.P. , Lin , C.W. , Chen , H. , Horng , M.J. , Ko , C.P. , Yi , T.C. , Tsai , T.T. , Chang , W.S. , Lee , S.P. , Huang , C. , 2009. Magnitude-frequency distributions of boundary shear stress along a rapidly eroding bedrock river. *Geophysical Research Letters* , 36(4).
 73. Chen , C.W. , Saito , H. , and Oguchi , T. 2017. Analyzing rainfall-induced mass movements in Taiwan using the soil water index. *Landslides* 14 , 1031-1041
 74. Chen , Y.-C. , Chang , K.-t. , Chiu , Y.-J. , Lau , S.-M. , Lee , H.-Y. , 2013. Quantifying rainfall controls on catchment-scale landslide erosion in Taiwan. *Earth Surface Processes and Landforms* , 38(4) , 372-382.
 75. Guzzetti , F. , Ardizzone , F. , Cardinali , M. , Rossi , M. , Valigi , D. , 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria , central Italy. *Earth and Planetary Science Letters* , 279(3-4) , 222-229.
 76. Ishihara , Y. , and Kobatake , S. 1979. *Runoff Model for Flood Forecasting*. Bull. Disas. Prev. Res. Inst. , Kyoto Univ. , Vol. 29 , Part 1. NO.260.
 77. Küng , O. , Strecha , C. , Fua , P. , Gurdan , D. , Achtelik , M. , Doth , K.-M. , Stumpf , J. , 2011. Simplified building models extraction from ultra-light UAV imagery. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry , *Remote Sensing and Spatial Information Sciences* , 3822 , 217-222.
 78. Larsen , I.J. , Montgomery , D.R. , 2012. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision. *Nature Geoscience* , 5(7) , 468-473.
 79. Larsen , I.J. , Montgomery , D.R. , Korup , O. , 2010. Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience* , 3(4) , 247-251.
 80. Liu , K.-F. , Wu , Y.-H. , Chen , Y.-C. , Chiu , Y.-J. , Shih , S.-S. , 2013. Large-scale simulation of watershed mass transport: a case study of Tsengwen reservoir watershed , southwest Taiwan. *Natural hazards* , 67(2) , 855-867.
 81. Parker , R.N. , Densmore , A.L. , Rosser , N.J. , de

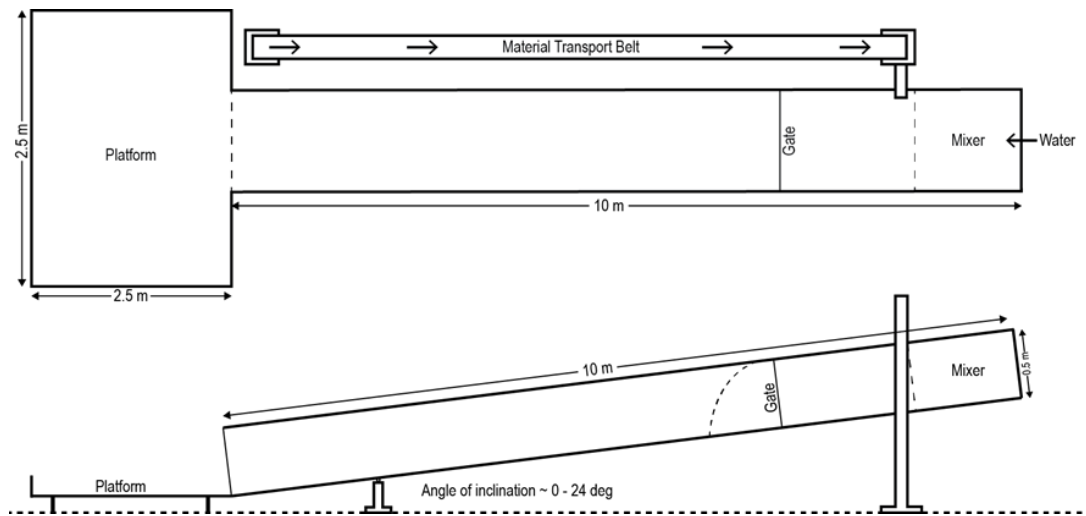
- Michele, M., Li, Y., Huang, R., Whadcoat, S., Petley, D.N., 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nature Geoscience*, 4(7), 449-452.
82. Saito, H., and Matsuyama, H. 2015. Probable Hourly Precipitation and Soil Water Index for 50-yr Recurrence Interval over the Japanese Archipelago. *SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere)* 11, 118-123.
83. Zhang, Z., (2000) A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330–1334.
84. 岡田憲治 (2002) 「土壤雨量指數」, 測候時報, 69.5。
(Okada, K. (2002). Soil Water Index. *Weather service bulletin*, 69.5, 67-97. (in Japanese))
85. 菅原正巳 (1972) 「流出解析手法」, 共立出版社。(Sugawara, M. (1972). “Analytical method of outflow.” *Kyoritsu Shuppan Co., Ltd.* (in Japanese))

附錄一 土石流試驗配置

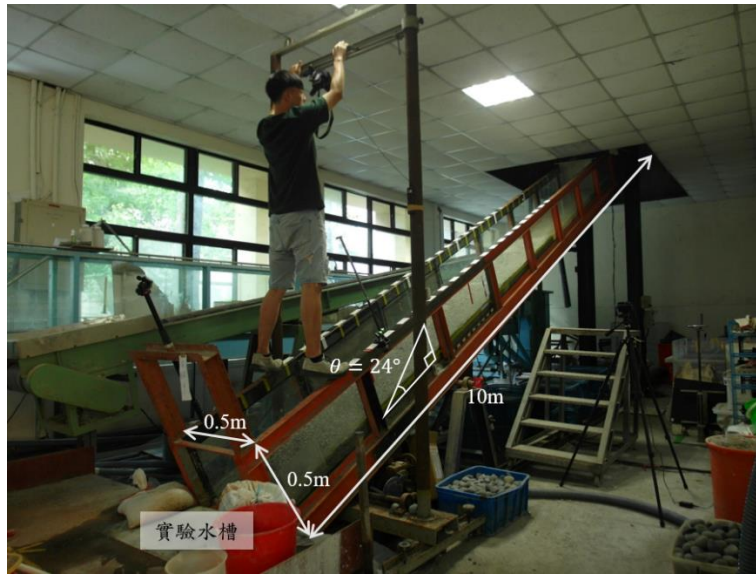
以室內水槽實驗模擬土石流事件，使用體積 $0.2m^3 \pm 10\%$ 之小粒徑石頭(平均粒徑為 3.34mm)做為料源，混合足夠的水後，自長 10 公尺、坡度 24 度之水槽釋放，料源受重力作用流下，形成一個明顯波前，使用攝影機記錄其流動過程，並對該影像進行事件偵測，以測試事件偵測的準確度。

一、實驗配置

在此實驗中，本計畫採用一尺寸為長 10 公尺、寬 0.5 公尺、深 0.5 公尺的矩形斷面水槽作為試驗渠槽，如：圖 3.2、圖 3.3。由於一般現場土石流發生於坡度介於 15 度至 30 度的河道中，但因室內實驗場地限制以及安全考量，因此實驗使用坡度為 24 度。

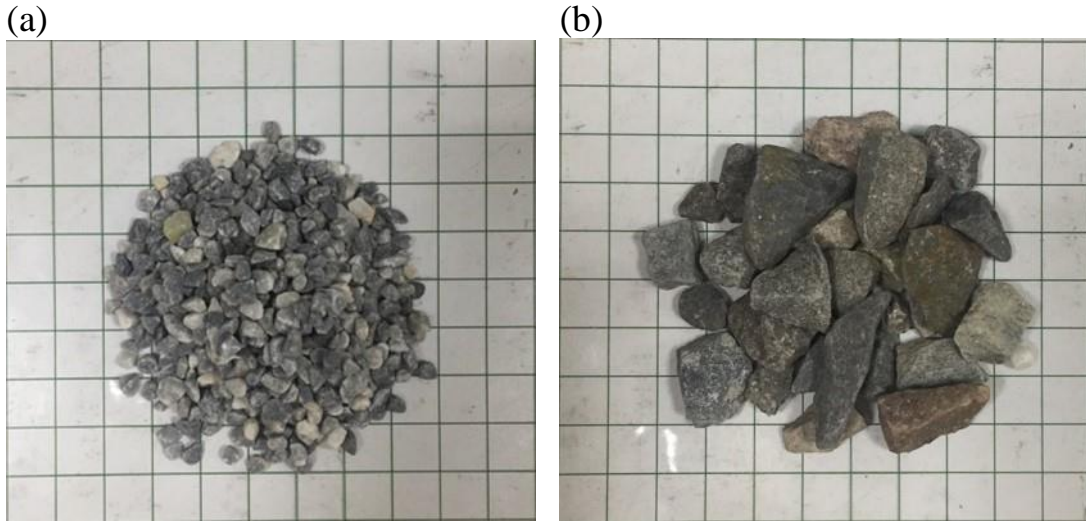


附圖 1 實驗配置簡易圖



附圖 2 水槽尺寸及坡度

水槽側壁為透明強化玻璃，以便使用相機記錄土石流流動之側向影像，上方貼有黑白格比例尺，其單位長度為 10 公分/格，水槽底部為金屬材料，槽底中央線上，每間隔 10 公分均預留直徑 2 公分的圓孔，以裝設地聲或其他儀器。然而，全長 10 公尺的水槽可依據土石流的運動型態分為三個區域，自水槽出口算起，距離 7.1 公尺處設有一個人工開啟式閘門，以閘門將水槽分為土石料源儲存區以及土石流動區，閘門後 2.9 公尺為土石料源儲存區以及混和區，閘門前 7.1 公尺為土石流動區。土石流動區又可分為兩個部分，第一個為土石加速區，閘門前設有長 2.3 公尺、深 8.5 公分的光滑壓克力平臺，目的為讓因閘門開啟後受重力作用下滑土石流完全發展，第二個部分為土石流觀測區，為了模擬天然河道的底床摩擦力，因此水槽底部鋪上石頭，底床厚度設計為 9 公分，由三層石頭所組成，首先最下層先以膠黏住一層小粒徑石頭當作底床，其上再以大粒徑石頭覆蓋於底床表面，同時覆蓋住 7 公分高的地聲使其不裸露於底床，厚度為 2 公分，最表面再鋪上一層小粒徑石頭於底床表面，減小摩擦力，使土石流能順利流下水槽，又為了避免管道抬升後底床石頭滑動，並且不阻擋水流流動，埋設兩個門字型木架於底床中和磚頭於管道出口處。



附圖 3 試驗使用之砂石材料；(a)以篩砂時停留於 10 號篩(2mm)的石頭做為小粒徑材料，其平均粒徑為 3.34mm、乾砂密度為 $1591.02 \frac{kg}{m^3}$ 、飽和濕砂密度為 $1958.45 \frac{kg}{m^3}$ ，(b)停留於 $\frac{3}{8}$ inch (9.5mm)篩網上的石頭做為大粒徑材料，其平均粒徑為 11.65mm 乾砂密度為 $1648.36 \frac{kg}{m^3}$ 、飽和濕砂密度為 $2058.02 \frac{kg}{m^3}$ 。

在試驗渠槽的供水系統部分，本研究在水槽最上游處連接一條水管，並由抽水馬達抽水至水槽上游供水，在水槽上游出水口以及抽水馬達處都各有一個能調節供水量的閥門，本實驗以流量計控制流量，流量計範圍為 $0.005 \frac{m^3}{s}$ 至 $0.05 \frac{m^3}{s}$ ，設計流量為 $0.002 \frac{m^3}{s}$ 。

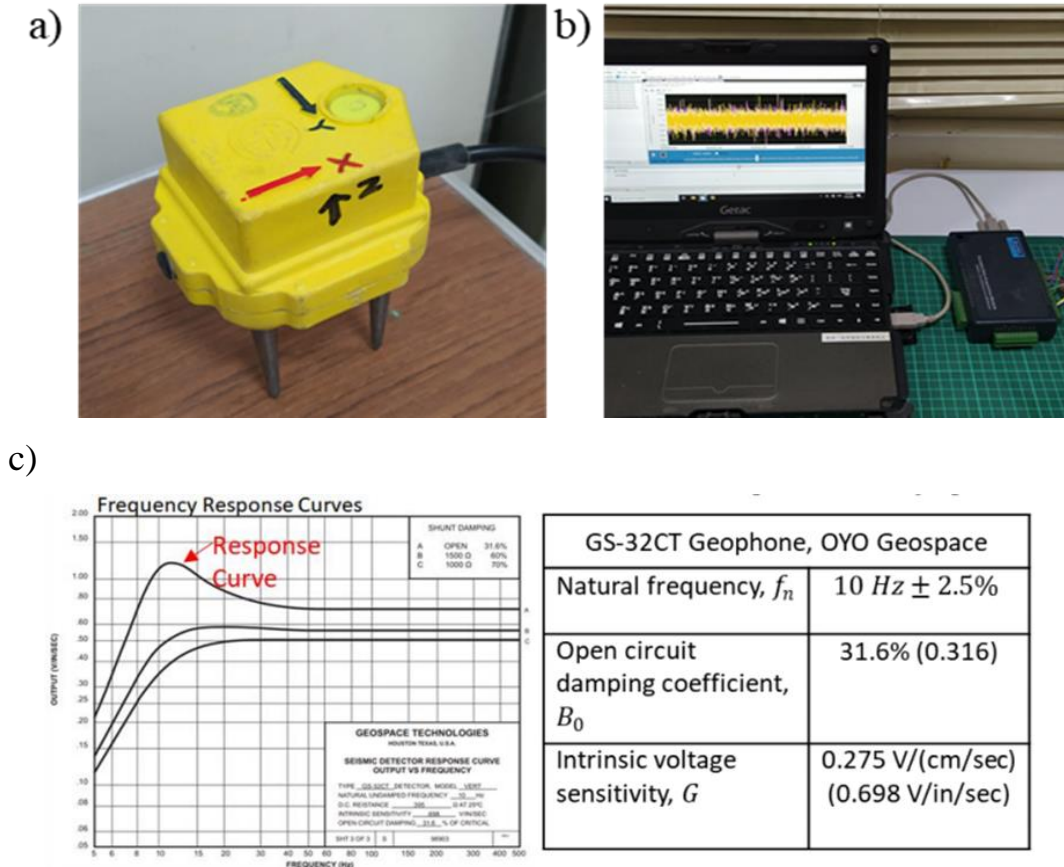


附圖 4 供水系統之配置

二、地聲與資料登錄器

本實驗使用的地聲檢知器是 Geospace Technologies' SNG 32CT

(10-395)/GSC-3C/OPEN，其無阻尼自然頻率為 $10\text{ Hz} \pm 2.5\%$ ，直流電阻為 $395\ \Omega$ ，內電阻敏感度為 0.275 V/cm/sec 資料接收器為 Advantech's USB-4716 portable data acquisition module. 本試驗資料接收器由 9 個頻道各以 $5000\text{Hz}(0.0002\text{ sec})$ 速度接收資料。



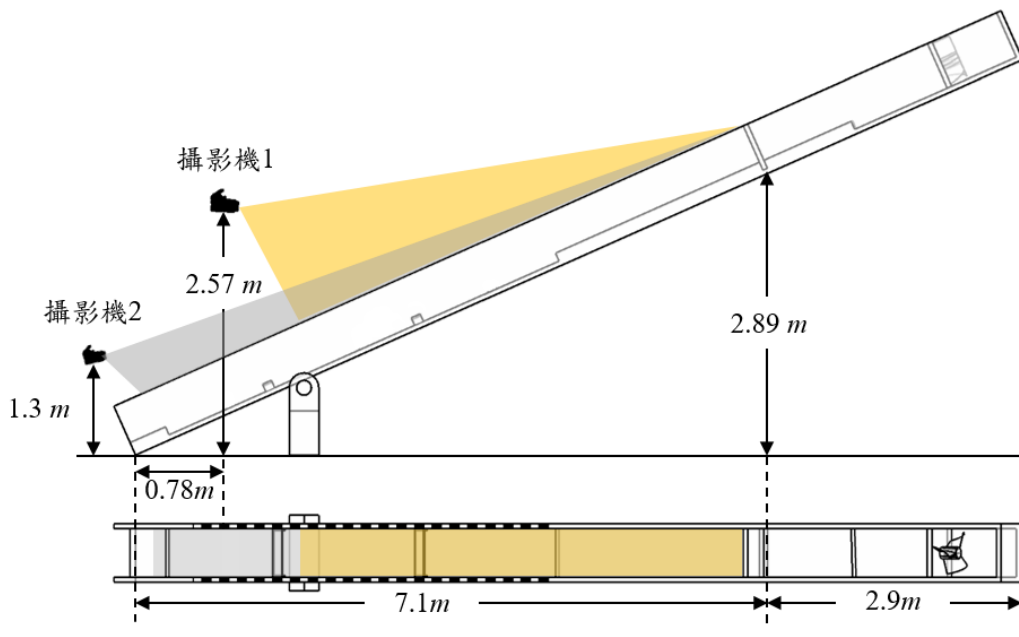
附圖 5 地聲儀和資料輸入器 (a) 三軸地聲儀(b) 連接電腦的資料輸入器(c) 地聲檢知器的響應曲線

在攝影機的部分，本試驗在管道上架設兩台攝影機，以不同角度拍攝實驗時土石流流動的整個過程，以提供影片做後續研究分析。定義水槽出口為水槽第 0 公尺處，攝影機 1 架設於水槽 0.78 公尺、高 2.57 公尺處，拍攝範圍自水槽 2 公尺至 7.1 公尺(閘門位置)，以俯視拍攝水槽，使得影像中每個圖元之比例尺較一致；攝影機 2 架設於水槽出口高 1.3 公尺處，拍攝範圍自水槽 0.4 公尺至 7.1 公尺，主要用於記錄整個實驗過程。

另外，為了方便堆置土砂於管道中，本研究在試驗管道的右岸外側架設輸送帶，在每次試驗前透過輸送帶運送土石料源至水槽上游的土石料源儲存區。

附表 1 攝影機規格

	攝影機 1	攝影機 2
相機型號	NIKON D5600	SAMSUNG EX2F
感光元件尺寸	23.5mm × 15.6mm	7.6mm × 5.7mm
影像解析度	2992 × 2000	1920 × 1080
焦距	18mm	5mm
幀率	30fps	30fps



附圖 6 相機架設位置圖

三、實驗流程

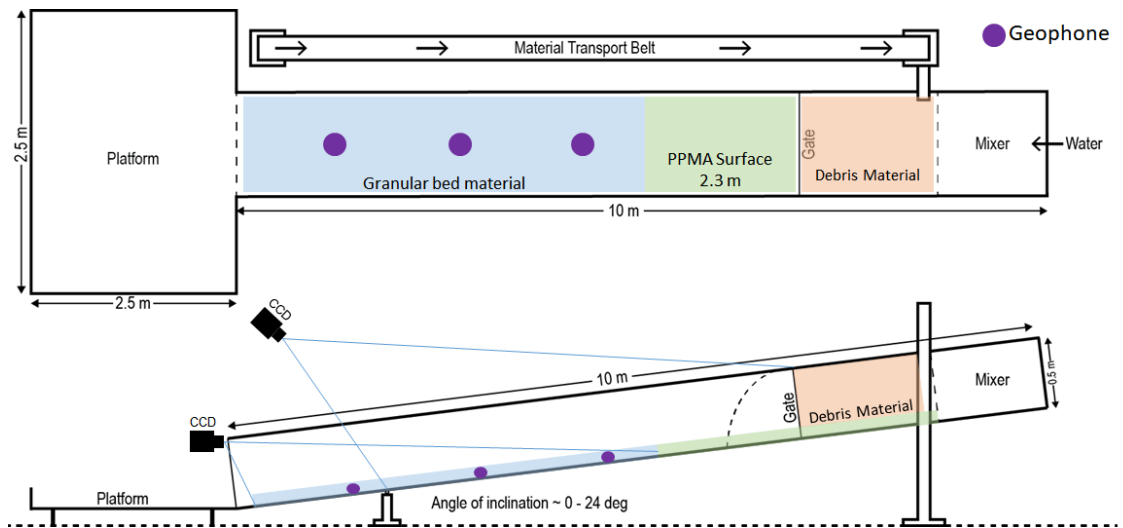
- 一、 水槽底床鋪設:將小粒徑石頭鋪於水槽底部，厚度為 7 公分，為剛好覆蓋住地聲檢知器的厚度(這一層為固定層)，接著鋪上厚度 2 公分厚的大粒徑石頭，用以保護底床，減少小粒徑石頭被掏刷，最後於底床表面鋪上薄薄一層的小粒徑石頭，減少摩擦力，使得土石流能順利流下水槽。
- 二、 土石料源的準備:利用實驗水槽旁的輸送帶，將小粒徑石頭運送到土石料源儲存區，並將料源堆積成上底為 0.94m、下底為 1.52 公尺、寬為 0.5 公尺、深度為 0.35 公尺的梯型體，體積約為 $0.2m^3$ ± 10%。
- 三、 抬升水槽:將水槽抬升至實驗設計坡度 24 度。
- 四、 儀器的架設及測試:在抬升水槽的同時，將四台相機架設定位，並確認每台相機的電量及錄影功能。
- 五、 濕潤底床:以輕輕潑灑水的方式濕潤底床石頭，在避免底床表面被沖刷的情況下，使底床水分達飽和。
- 六、 啟動儀器:啟動相機，開始紀錄影像。
- 七、 啟動供水系統:開啟抽水馬達，將水運送至土石料源儲存區。
- 八、 開啟閘門:待土石料源儲存區的水溢出水槽、浸潤料源後，開啟閘門。
- 九、 結束:當土石流流下水槽，不再移動後，則關閉抽水馬達以及結束錄影。

四、監測設備(地聲與攝影機)配置

整個水槽模擬土石流實驗中土石流的流動範圍可分為三個部分。前 2.3m 鋪上光滑的壓克力材料，讓土石流材料此區減少磨擦力進行加速。再向下游長 4.8m 水槽都鋪上厚 7cm 的土砂底床，前 3m 是土

石流動區，剩下的 1.8m 是堆積區，土石流材料會堆積在堆積區。大粒徑石頭會被放置在加速區和土石流區的交界處以防底床材料因土石流加速而被沖刷出水槽。

有壩體的試驗，會有一個尺寸為長 200mm，寬 500mm，高 300mm 的鋼製中空壩體被放置在離第二個地聲儀 200mm 的地方。第三個地聲儀被放置在壩裡面，離上游面 100mm，離旁邊 250mm，離壩底 173mm。壩內砂石是採 270mm 的細粒徑材料和 30mm 的粗粒徑材料均勻混合而成。

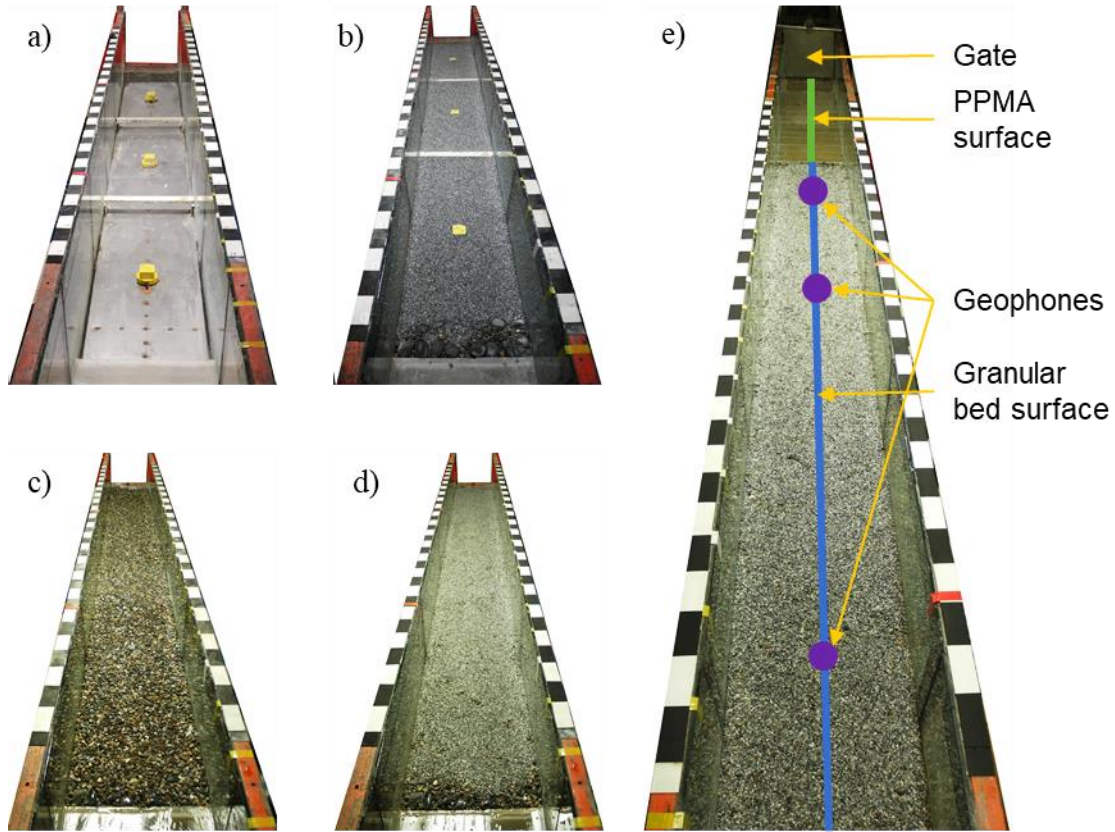


附圖 7 圖示為實驗設置圖，包括地聲儀和錄影機的位置

三個三維地聲探測器以螺絲固定在水槽底部。x 軸是沿著土石流的方向，y 軸是平行地面垂直土石流流動的渠寬方向，z 軸是垂直底床往上的方向。三個地聲探測器之間各相隔 1.5m，第一個地聲探測器放置在離閘門 3m 的地方（離加速區結束 0.73m）。地聲探測器之上的底床材料維持在 20mm。

為配合試驗，本計畫使用了四個錄影機來錄影，以捕捉土石流前端的的速度。在四個相機中，第一個是放置在離水槽 0.9m，高 2.2m 的地方。第二個放置在離水槽 1.1m，高 1.24m 的地方，且其拍攝範圍

會照到第三臺地聲儀。第三台錄影機放置在離水槽 0.9m 的地方，其拍攝範圍會照到第二臺地聲儀。第四台錄影機放置在水槽的最尾端，用來錄製完整的實驗流程。

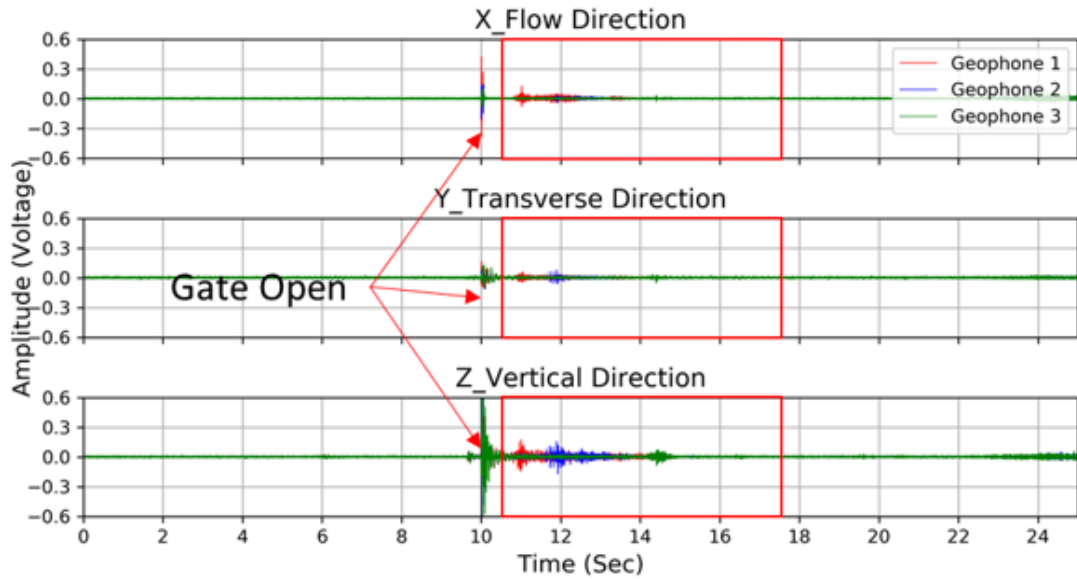


附圖 8 水槽底床設置步驟 (a)固定地聲儀 (b)鋪上細顆粒 (c) 鋪上粗顆粒 (d) 最上層再鋪上細顆粒 (e) 完整實驗設置及地聲儀位置

實驗開始前，先在渠槽中加水使土砂材料和底床皆保持濕潤飽和。待底床飽和和土砂材料達飽和時，地聲探測器和錄影機開始記錄資訊，紀錄試驗環境之資訊(環境噪訊與初始光源分佈狀態)。

試驗開始時則將上游閘門打開，釋放飽和土砂，製造人造土石流，當土石流抵達水槽的末端，會流入堆積平臺，一直堆積到土石流材料停止流動。

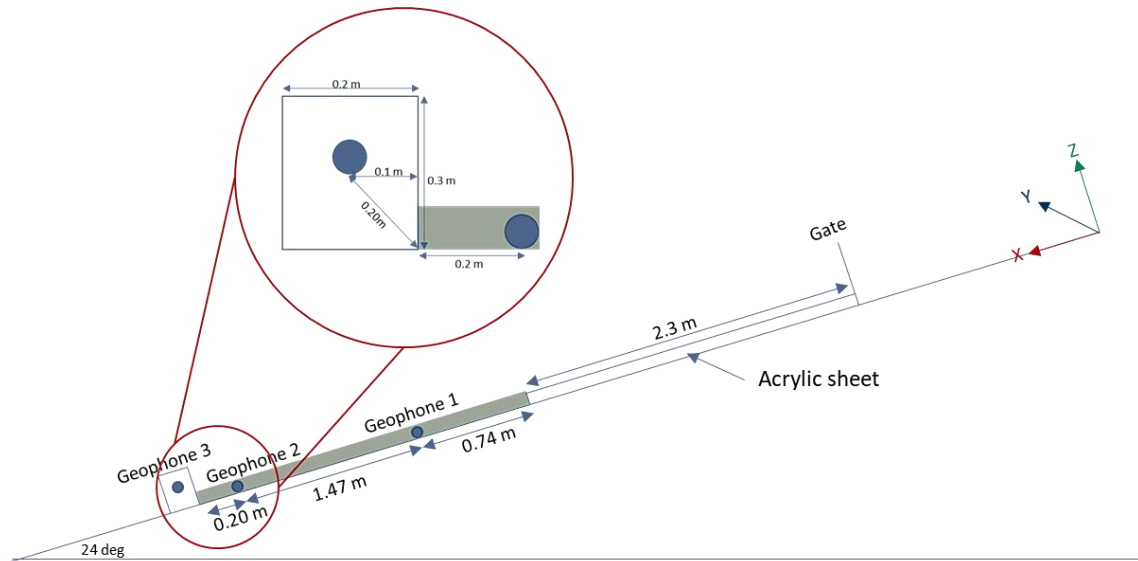
但是打開閘門時，5 閘門倒下會產生一個大的撞擊，在記錄上會有一個波峰如下圖，最後資料分析時，必須截斷這部分，才能正確分析資料



附圖 9 閘門倒下時產生的脈衝

進行下次試驗前，堆積的材料粗顆粒材料和細顆粒材料會混在一起，所以需重新進行篩分析以便重複實驗。

在實驗中，本計畫針對不同流量與初始土砂條件做了 4 組實驗。第一、二組實驗，試驗之流量為 $0.002 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，第三組實驗的流量為 $0.00175 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。第四組實驗則另外在第二個地聲探測器下游 200mm 的地方多設置一鋼製壩(如：圖 3.10)，並控制流量為 $0.002 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。基於實驗尺度較小，為了使土石流材料流動，4 組實驗都以傾角 24° 來進行。



附圖 10 圖示為使用鋼製 hollow dam 第四組實驗實驗配置圖

五、最大能量頻率

先將地聲檢知器紀錄的振動訊號的時間順序經過傅立葉轉換可以得到振動訊號的頻譜。接下來使用非線性回歸可以從數據中得到最大振動能量的代表頻率。

(一) 回歸模型

土石流所發出的震動聲頻通常落在 10-80 Hz，且在波前會觀測到低頻率，而在尾端觀測到高頻率(Huang et al., 2007)。其中具有代表性的頻率通常落在 20-50 Hz (LaHusen, 2005)，且高頻地聲常常是水流所導致的。從本計畫的實驗和 DFT 分析也可以觀測到同樣的趨勢。

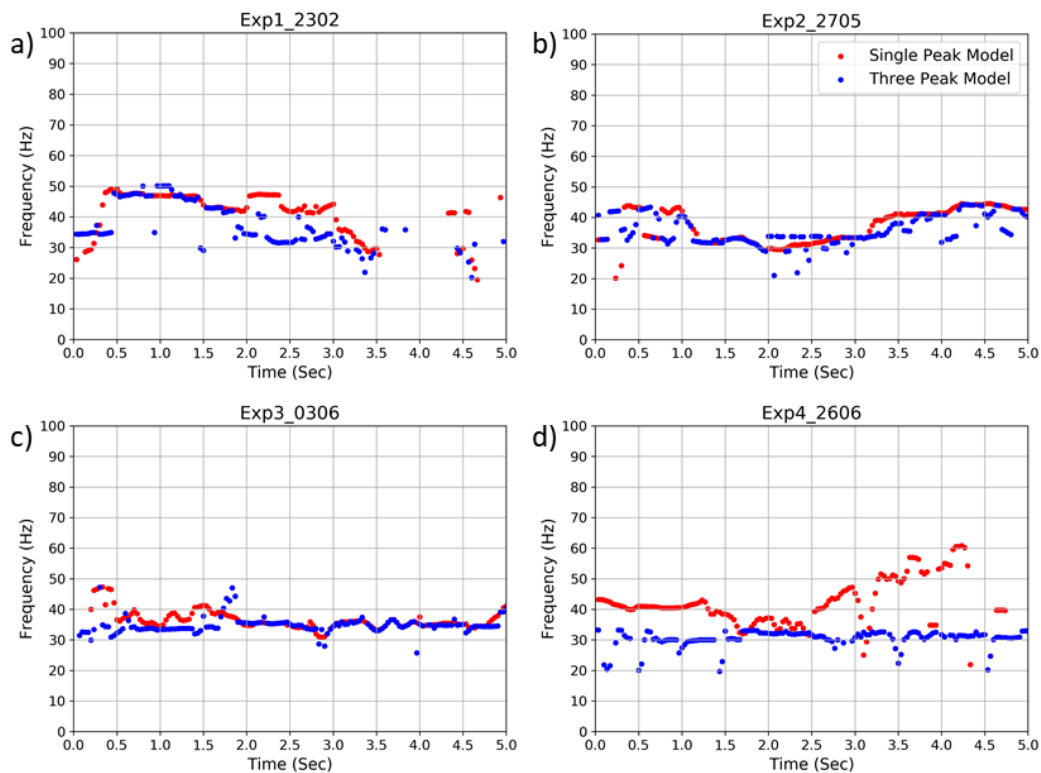
從試驗中發現，土石流波前、土石流流動過程與土石流波尾所觀測到的頻譜各有其峰值，且均為常態分佈。因此本計畫透過線性疊加來對這三組常態分佈的頻率進行疊加。因此這三個高斯分佈頻率的非線性回歸模型為

$$f(F) = \sum_{n=1}^3 \alpha_n \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{F - \mu_n}{\sigma_n} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中 F 是欲分析的頻率範圍， α_n 是函數的振幅， μ_n 是峰值的位置

以及 σ_n 是分佈趨勢。高斯函數有三個未知變數，若考慮三個函數就會產生九個未知變數，因此本計畫透過加權最小平方回歸法去回歸這九個未知變數。

另外考慮到頻率分佈屬於常態分佈，本計畫也將僅含一個高斯函數的模型納入回歸分析，並與三個高斯分佈的結果做比較。以下圖 11 是通過兩個模型做出來的頻率結果的對比。



附圖 11 用三峰模型和單峰模型做出的回歸結果對比，實驗(b) 和 (c)用兩個模型做出來的結果很相近，實驗(a)有一些差距且實驗(d) 在四組實驗中有最大差距

儘管本計畫使用三峰模型來得到低頻率(10-20)，中頻率(20-50)和高頻率(50-100)，但在本計畫只對中頻率進行分析。低頻率被排除是因為本計畫採用的地聲檢知器的自然頻率是 $10\text{ Hz} \pm 2.5\%$ ，這使得在這範圍中由共振產生的振幅不能被分辨與排除。而高頻率被排除的原因是因為高頻通常是水流所發出，不是我們所關心的部分，故排除。

加權最小方差是一個被廣泛運用在許多模型上的工具，這個方法有別於普通的最小平方回歸法，加權最小方差針對數據的代表性給每一個數據不同的權重。在此方法中，本計畫通過變異數的倒數做為該數據組合的權重，所以變異數越低的數據組合會有越高的權重，但本實驗專注在偵測峰值的頻率，故數據本身的能量能作為數據的權重。

式(2)為加權最小方差的關係式。

$$\operatorname{argmin}(e) = \sum w_i [y_i - f(x)_i]^2 \quad (2)$$

而 e 是平方剩餘誤差的總和，需要最小。 w_i 是權重函數， y_i 是真實數據，而 $f(x)_i$ 是預測函數。

附錄二 期中審查意見回覆

審查人員意見	意見回覆
第一章 前言	
1. 中文摘要最後一段，文章不連貫，另中英文摘要之關鍵詞不對稱，請確認修正。	謝謝指正，已修正
2. P1-3，倒數第七行語意不明，另重要工作項目及實施辦法，請以流程圖的方式繪製，請確認修正。	遵照辦理
第二章 儀器檢校	
1. 圖 2.3 中，所載 4 及 6 項均未見圖示，另外以 A 地聲檢知器去檢校 B 地聲檢知器，似乎不是一個正確的校正方法？請確認修正。	<p>圖中的 4 與 6 是空白代表未知，也就是檢校過程必須去算得或檢校的地方，避免混淆，現在多加個問號</p> <p>在現場檢校儀器，無法以室內重儀器進行，唯一可行的就是以已經檢校過的儀器比對，理論上，應該可行</p>
2. 圖 2.3 中，圖 2.2 之圖左及圖右，請用 a、b 表示，另圖 2.2 右應該為“相位響應”，請確認修正。	已修正
3. P2-9，檢定方法（最陡坡度法），請確認文字表達方式。	謝謝指正，已修正
4. P2-20，圖 2.9 之圖示說明所謂格子一格 5CM，請說明如何為一格。	已經修成為圖中每個黑色白色格子都是邊長 5 公分之正方形
5. 本計畫執行至第四年研究課題越來越多，包括地聲檢知器、攝影機取像、航照(含 UAV)比較土砂輸送範圍及數值模擬等，建議未來應思考成果如何聚焦於實務的應用上。	已將所有課題結合，擬移到新地點實際測試
第三章 流況檢測	
1. P3-3，式 3.3 請確認是否正	已修正，謝謝指正

確，另該頁內文仍有誤植文字及缺固，請確認修正。	
2. P3-4 及 P3-5，文中之圖 3.1 是否為 3.2，請確認修正。	該部分已經全部改寫，謝謝指正
3. P3-6，內文圖號不正確，請確認修正。	該部分已經全部改寫，謝謝指正
4. P3-7，何以出現圖 1.3 之圖號，請確認修正。	謝謝指正，已修正
5. P3-44、3-50、3-51 及 3-58 內文有“錯誤!找不到參照來源文字”，請確認修正。	謝謝指正，已修正
6. P3-66，圖 3.41 之縱坐標代表為何，單位請註明，又該迴歸式之適用性是否合理，請確認修正。	該迴歸式是過去三年以現場測量，水文推估累積的資料，發現可以回歸出合理的經驗式，但是只能用於愛玉子溪，每年加入的新點都能合理落於該線的 10% 誤差範圍內
7. 以 DSM 減去樹高方式建置地表模型，而作為分析土砂清淤之推估，將造成甚大誤差，請確認修正。	減去樹高會使新生崩塌地（森林轉變為裸露地）的各個網格侵蝕深度有較大的誤差，但本計劃估算崩塌量是以集水區為尺度，其誤差傳遞後而減少。且對於裸露地沖刷或河道地形侵蝕變化（裸露地變裸露地）不受樹高影響不確定性影響
8. 以影像分析流速及流深等分析方法來驗證，成效值得肯定，惟其分析之執行能否在實體上直接應用，以利即時之運用，請補充說明。	期末報告已經直接用於現場事件
9. 分析資料來源大多為愛玉子溪神木村土石流現況、試驗室模擬測試與現場搜查等，大多為計畫產製的資料，建議思考未來如何應用在其他土石流潛勢溪流現況分析上。	謝謝建議，規劃明年直接移到新地點測試
10. 計畫之分析方法越複雜，計算速度就越慢，會漸失去即時預	期末報告有將計算時間納入，本計畫的設計方法. 都是採 cpu 最

警能力，建議未來可思考如何簡化精進。	小的方法，幾乎不會造成系統負擔
11. 建議說明如何最佳化使用地聲檢知器，資料分析上要有多精細，設置現場環境影響如何考量。	安裝方式與環境選擇其實在前期計畫有提，基本上在越堅固的環境接收越好 資料分析則沒有刻意要求精度，因為都是用比較大小來發布預警，但是若要採取監測產出的物理量，會建議地聲檢知器參數不變化超過 20%.
12. 流況檢測影響 ROI 之平均灰階值，差多少可分辨洪水與土石流，請補充說明	本研究並沒有刻意去分辨洪水與土石流，因為在預警上，不管何者發生，都得預警，重點是規模是否夠大值得預警，因此設定與警條件為突然大一個尺度，若是發生小型土石流，即刻停止，也沒有必要對下游預警
第四章 長期災害潛勢預報	
1. 航照判識後的土砂運移比較及後續資料之運用規劃為何，請補充說明。	土砂運移是為了找出較長期的預警指標，這個預警指標就是從集水區土砂沖淤的觀點出發
第五章 土石流影響範圍預警	
1. 21 個觀測站儀器廠牌、精度及訊號接收可能不同，標準檢核機制方法是否相同，其參數檢核是否因地而異，請補充說明	21 個觀測站新品的攝影機與地聲檢知器都屬同一類型，檢校方式可以用同一種方式
第六章 智慧防災網站	
1. 硬碟於神木國小同步儲存 (NAS)，然而用人工方式抽換硬碟較費時費工，建議可思考改善較便捷方式。	這個資料儲存方式目前是以最不花經費的方式協調，因為本計畫沒有資料主控權，實在無法要求資料方改進

附錄二 期末審查意見回覆

審查人員意見	意見回覆
第一章：前言	
1. 表次(P. 3)最下一行缺表號且頁碼亦有誤，其連接 P. 4 之首二行亦是，請確認修正。	謝謝指正，已修正
2. 圖次之各行排頭應平齊，圖名較長換行應退 1 格，該編輯方式請斟酌，請確認說明。	謝謝指正，已修正
第二章：儀器校正	
1. 地聲檢知器三個方向的數值是分別判斷，還是其數值事先平均後才做判斷，請補充說明。	是三個方向平方相加後的數值，是用總能量的概念，已於 2-4 頁最下方加強說明
2. 文內所示之圖號與圖示有多處未配對，請確認修正。	謝謝指正，已修正
3. P2-4，本計畫已至期末階段，故「初步建議..」及「本計畫擬在檢測時...」敘述法，建議以完成式語法述明，請確認修正。	謝謝指正，所有類似語法皆已修正
4. P2-11，表 2.3 參數檢定收斂於 G 部分尚存 6.6%的誤差，然推測其為距離效應，因此，在得知本現象是否有在將兩地聲檢知器儘可能接近，以利削減誤差，請補充說明。	現地測量時，標準地聲檢知器是緊貼在待測地聲檢知器旁邊的，可以由照片 2-7 看出，因此才能得到結論為 G 之衰減
5. P2-14，表 2-4，地聲檢知器參數檢定結果於上游、中游的 G 與原廠之比對為不重要，請述明欲忽略的理由，請補充說明。	不重要為誤植 已改為敏感度降低
第三章：流況檢測	

<p>1. P3-24，倒數第二行，文中之圖 3.23 應是圖 3.24，請確認修正。</p>	<p>謝謝指正，已修正</p>
<p>2. 文中說明應與圖號配合說明該圖之內涵。</p>	<p>謝謝指正，已修正</p>
<p>3. 圖 3.65 之迴歸式應有相關係數與樣品大小之註記，又以該迴歸式採雙對數，故誤差均是 10 的次方，宜注意其準確性，請補充說明。</p>	<p>已經修改圖，標出迴歸參數，標準差，另每個點 10% 誤差範圍以線標於點上</p>
<p>第四章：長期災害潛勢預報</p>	
<p>1. 既然已經分析了歷年航照，也產出了 DTM 等圖資，是否將泥沙遞移率(SDR)估計一下，請補充說明。</p>	<p>第四章增加第八節泥沙遞移率，計算於表 4.7 與圖 4.66</p>
<p>2. P4-10，缺圖 4，請補充說明。</p>	<p>為漏刪，已更正</p>
<p>3. P4-11，倒數第 5 行，(4.8)為何意思，請確認修正。</p>	<p>謝謝指正，已修正</p>
<p>4. P4-27，倒數第 11-12 行之圖號與表號不符，請確認修正。</p>	<p>謝謝指正，已修正</p>
<p>5. P4-33~P4-38，P4-45，圖號不正確，請確認修正。</p>	<p>謝謝指正，已修正</p>
<p>6. P4-41，式(4.4)應註明各參數的單位，請確認修正。</p>	<p>謝謝指正，已註明</p>
<p>第五章：土石流影響範圍預警</p>	
<p>1. 報告中 P.5-20，因崩塌後的土方「不代表所有土方都會在一次事件中形成土石流向下游運移，因此本計畫另外將 75%與 50%的土方量的土石流事件情境納入考量...」，這也關於 SDR。再者 75%或 50%之選取也是範圍很大，但又不確定是多</p>	<p>為了示範本方法的適用性，因此在舉例時，將百分比拉到最大，在真實比對時，我們有跑 10%， 20%， 30%， 40%， 50%， 60%， 70%， 75%， 80%， 85%， 90%， 95%， 100% 所有的曲線，比對時才能精細，報告中僅畫出了幾條線，否則會線條太多，難以分辨</p>

少，請補充說明。	
2. 本計畫所模擬之 DEBRIS-2D 是否考慮到動床之侵蝕與堆積，請補充說明。	DEBRIS-2D 屬定床版本，已於 5-3 頁增加「為一定床模式，不考慮底床的刷深。」
3. P5-1，文中謂目前土石流評估最受歡迎方式為數值模擬，此等說法不妥，請確認修正。	已於 5-1 頁，修改為「在土石流影響範圍的評估有許多方法，如果要能反映不同雨量、崩坍量地域分佈下的不同影響範圍，使用最多的是採用數值模擬」
其他	
1. 計畫為科技補助計畫，建議將年度發表論文及期刊等研究發表成果一併納入。	遵照辦理，已放入附錄四
2. 請將農業科技計畫管理系統中期末成果效益報告等資料一併納入。	遵照辦理，已放入附錄五
3. 報告書中，常見簡體字請更正為繁體字，請確認修正。	謝謝指正，已改完
4. 本報告書建議應加入”建議”之章節，以呈現計畫之成果，請補充說明。	第七章更正為結論與建議，並增加建議

附錄四：論文發表與人才培育

已發表之期刊(專書)文章：

- [1]. Liu, K.F., L.T. Kuo and S.H. Wei (2021) Debris Flow Detection Using a Video Camera, Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk pp 141-147
- [2]. Chae B.G., K.-F. Liu, Y.-H. Wu, J.h. Choi, and H.-J. Park (2021) Simulation of Debris-Flow Runout Near a Construction Site in Korea, Appl. Sci. 10, 6079; doi:10.3390/app10176079 (SCI, IF=1.23)

已發表之研討會文章：

- [1]. Liu, K.F. and S.H. Wei (2021) Debris Flow Detection Using a Video Camera, World landslide forum, Tokyo

碩博士人才培育

博士後研究:魏士超博士

博士候選人:蘇德罕

碩士論文:張智涵 (2021) 以傅立葉轉換估算影像中顆粒位移的方法

碩士生:鄭宇文、陳世霖、劉偉辰

附錄五：期末暨成果效益報告



本計畫執行機關識別碼：070304S300

行政院農業委員會水土保持局補助研究期末暨成果 效益報告

計畫主管機關 行政院農業委員會水土保持局

計畫執行機關 國立臺灣大學

計畫名稱 坡地土砂運移歷程之觀測技術提升與監測設備校驗方法研究 (第1年/全程1年)

審議編號 1102101011705-070304S3

農委會
計畫編號

110農科-7.3.4-保-S3



110年度行政院農業委員會水土保持局科技計畫期末暨成果 效益報告

坡地土砂運移歷程之觀測技術提升與監測設備校驗方法研究

一、基本資訊

計畫名稱：坡地土砂運移歷程之觀測技術提升與監測設備校驗方法研究	
計畫編號：110農科-7.3.4-保-S3	
主管機關：行政院農業委員會水土保持局	執行機關：國立臺灣大學
計畫主持人：劉格非	電話：0926259440
期程： 全 程：自 110年1月1日 至 110年12月31日 本年度：自 110年1月1日 至 110年12月31日	
經費：全程：1,700 仟元；本年度：1,700 仟元	
報告頁數：249；使用語言：中文 全文處理方式：可立即對外提供參考	

二、執行成果中文摘要

本計畫針對觀測站最常使用的影像與地聲資料，發展可用於預警的快速加值運算。加值資料包含以攝影機與地聲產出流深，流速，流量與表面大粒徑分析，同這些即時加值資料配合事先以不同情境的模擬結果，建立早期預警與即時預警的方法針對長期的集水區土砂運移，本計畫以航拍與無人飛機資料，建立土砂堆積與運移的長期分析，經過與雨量的比較，可以產生長期的災害潛勢預報然後以整合式互動網站呈現分析後資料，所有即時與長期監測與分析數據，都以互動式方式呈現於網站，網站更提供事件偵測後的措施建議與自動執行通告

三、執行成果英文摘要

This research utilize the data from CCD camera and geophone, with fast analyzing method, generate information such as flow depth, flow velocity, flow rate and maximum boulder size to facilitate debris flow event warning. With simulation with different scenario, long and short term warning can be issued with monitoring data.

This research also use aero photos and UAV photos to produce annual deposition and erosion records. Comparing with rainfall record, long time disaster potential can be estimated.





All the data, data analysis, warning and potential are all exhibited in an interactive website. This intelligent website can further provide suggestions after event detected and auto executing all follow warning and notification process.

四、中英文關鍵詞

土石流預警；Debris flow warning；現場儀器檢校；Field monitoring device calibration；土砂運移估算；Sediment transport estimation

五、計畫目標

1. 針對現有土石流觀測儀器(地聲檢知器、攝影機)發展現場檢校方法。
 - (1) 建立於現場進行的地聲檢知器檢校方式
 - (2) 建立於現場進行的攝影機檢校方試
2. 以影像與地聲資料產出流深,流速,流量與表面大粒徑分析方法。
 - (1) 由影像分析產生流深,與表面最大粒徑的方法
 - (2) 由地聲訊號強度推估流量方法
 - (3) 由影像分析與地聲系統推估流速方法
3. 透過現場調查與數值模擬進行先期作業,配合地聲或影像監測資料,建立早期預警方法(偵測到土石流前),並建立即時警戒範圍與規模方法(偵測到土石流後)。
 - (1) 以不同的雨量,模擬土石流影響範圍與流深變化,作為長期
 - (2) 以地聲訊號配合模擬結果,產生下游影響範圍與規模
4. 以航拍照片建立土砂堆積與運移分析,產生長期的災害潛勢預報
 - (1) 以歷年航拍與無人飛機紀錄,計算崩坍與土砂運移的量
 - (2) 配合雨量分析,計算年度主要土砂運移模式
5. 建立智慧型網站,自動執行預警與建議決策執行事項,且可由遠端執行加值分析
 - (1) 建立自動預警流程,與自動預警時的通告模式
 - (2) 建立事件偵測後的建議決策模式

六、主要內容

1. 針對現有土石流觀測儀器(地聲、影像)發展現場檢校方法。
 - (1) 以標準地聲檢知器到現場比對檢測目標,並產出檢測目標之響應曲線,重點為響應曲線為直線段的5Hz到120Hz範圍
 - (2) 以標準色差板塊與形狀,到欲檢測目標固定距離外,檢查攝影機產出的色塊,比例與變形,確保整個畫面功能正常
 - (3) 制定檢校週期
2. 以影像與地聲產出流深,流速,流量與表面大粒徑分析方法。
 - (1) 以灰階值差法計算流深,進行水槽試驗驗證方法可行性



1100532_110/11/25
2021012117281993843



(2) 以地聲訊號估計流量與流速,流速是以雙地聲偵測訊號時間差計算;流量需要持續增加地聲能量與流量經驗曲線中的點

現地流量量測方式為將地聲埋於河道下方,測量能量,同時間將安裝於河岸的地聲測得的能量換算成距離消滅倍數,所有地聲訊號都是以在河道位置為標準

- (3) 以二次傅立葉轉換法取得最大粒徑
- 3. 以航拍照片建立土砂堆積與運移分析,產生長期的災害潛勢預報
 - (1) 以歷年航拍與無人飛機比對,產生崩坍與土砂運送範圍
 - (2) 以上述資料與雨量歷程比對,建立土砂運移(崩坍與土石流)的關係式
 - (3) 以歷年觀測站紀錄建立土石流發生的長期指標
- 4. 建立智慧型網站,自動執行預警與建議決策執行事項,且遠端可執行加值分析
 - (1) 建立自動偵測,自動預警,與決策建議流程
 - (2) 建立資料智慧篩選儲存機制
 - (3) 建立使用者歷程機制

七、計畫執行情形

(一) 進度比較

	預定進度%	實際進度%	比較%
當年	100.00	100.00	0.00
全程	100.00	100.00	0.00

(二) 資源使用情形

1. 經費支出

	預定經費(千元)	實際經費(千元)	支用率%
當年	1,700	1,700	100.00
全程	1,700	1,700	100.00

2. 經費明細

單位：千元

	110年度				執行率(%) (d/a)	111年度 預算數	112年度 申請數	備註
	預算數 (a)	初編決算數		合計 (d=b+c)				
		實支數 (b)	保留數 (c)					
總計	1,700.00	1,700.00	0.00	1,700.00	100			
一、經常門小計	1,700.00	1,700.00	0.00	1,700.00	100			
(1)人事費	498.30	498.30	0.00	498.30	100			
(2)材料費	97.62	97.62	0.00	97.62	100			



1100532_110/11/25
2021012117281993843



(2) 以地聲訊號估計流量與流速,流速是以雙地聲偵測訊號時間差計算;流量需要持續增加地聲能量與流量經驗曲線中的點

現地流量量測方式為將地聲埋於河道下方,測量能量,同時間將安裝於河岸的地聲測得的能量換算成距離消滅倍數,所有地聲訊號都是以在河道位置為標準

- (3) 以二次傅立葉轉換法取得最大粒徑
- 3. 以航拍照片建立土砂堆積與運移分析,產生長期的災害潛勢預報
 - (1) 以歷年航拍與無人飛機比對,產生崩坍與土砂運送範圍
 - (2) 以上述資料與雨量歷程比對,建立土砂運移(崩坍與土石流)的關係式
 - (3) 以歷年觀測站紀錄建立土石流發生的長期指標
- 4. 建立智慧型網站,自動執行預警與建議決策執行事項,且遠端可執行加值分析
 - (1) 建立自動偵測,自動預警,與決策建議流程
 - (2) 建立資料智慧篩選儲存機制
 - (3) 建立使用者歷程機制

七、計畫執行情形

(一) 進度比較

	預定進度%	實際進度%	比較%
當年	100.00	100.00	0.00
全程	100.00	100.00	0.00

(二) 資源使用情形

1. 經費支用

	預定經費(仟元)	實際經費(仟元)	支用率%
當年	1,700	1,700	100.00
全程	1,700	1,700	100.00

2. 經費明細

單位：千元

	110年度				111年度 預算數	112年度 申請數	備註
	預算數 (a)	初編決算數		執行率(%) (d/a)			
		實支數 (b)	保留數 (c)				
總計	1,700.00	1,700.00	0.00	1,700.00	100		
一、經常門小計	1,700.00	1,700.00	0.00	1,700.00	100		
(1)人事費	498.30	498.30	0.00	498.30	100		
(2)材料費	97.62	97.62	0.00	97.62	100		



1100532_110/11/25
2021012117281993843



(3)其他經常支出	1,104.08	1,104.08	0.00	1,104.08	100			
二、資本門小計	0.00	0.00	0.00	0.00	0			
(1)土地建築	0.00	0.00	0.00	0.00	0			
(2)儀器設備	0.00	0.00	0.00	0.00	0			
(3)其他資本支出	0.00	0.00	0.00	0.00	0			

與原計畫規劃差異說明：

無差異

3. 人力

姓名	計畫職級	投入人月數及 工作重點	學、經歷及專長	
			學歷	專長
劉格非	研究員級	(12.0) 指導與規劃整體研究	學歷	博士
			經歷	教授
			專長	土木水利工程類
魏士超	副研究員級	(12.0) 數值模擬	學歷	博士
			經歷	博士後研究
			專長	土木水利工程類
蘇得罕	研究助理級	(12.0) 現場試驗與室內試驗	學歷	博士班研究生
			經歷	博士生
			專長	防災工程
張智涵	研究助理級	(8.0) 大粒徑追蹤	學歷	碩士班研究生
			經歷	碩士畢業
			專長	土木水利工程類
洪梓航	支援人員	(12.0) 行政業務	學歷	學士
			經歷	學士
			專長	土木水利工程類
鄭宇文	研究助理級	(12.0) 水位追蹤	學歷	碩士班研究生
			經歷	碩士研究生
			專長	土木水利工程類
陳世霖	研究助理級	(12.0) 攝影機校正	學歷	碩士班研究生
			經歷	碩士研究生
			專長	土木水利工程類
劉偉辰	研究助理級	(12.0) 地聲檢知器校正	學歷	碩士班研究生
			經歷	碩士研究生
			專長	土木水利工程類

與原計畫規劃差異說明：

無差異

(三) 期末評核標準達成情形：

序號	期末評核標準	是否已達成	辦理情形
1	智慧型網站完成	是	網址 http://ntu-mon.csys.tw/



1100532_110/11/25
2021012117281993843



2	長期潛勢估計建議完成	是	由土砂的崩坍量,河道沖淤量,表面沖刷量,輸砂量綜合所得集水區土砂殘餘量為建議指標
3	航照比對崩坍與土石流完成	是	產生35符相對崩坍地與河道沖淤比對圖

八、計畫已獲得之主要成就與量化成果(output)

【表一】初級產出、效益及重大突破

績效指標構面：試驗研究產出構面

共通性指標項目	細項指標	預估量化值	實際量化值	效益說明	重大突破
學術著作發表	國內期刊論文	1篇	0篇		
	國外期刊論文	2篇	2篇	將土石流偵測與模擬技術結合,產出偵測後的準確預警	
	國際研討會論文	0篇	1篇	於國際研討會提出突破性的影像分析方式,讓國際學者了解台灣監測技術的進步	
	研究報告	1本	1本	建立新式監測預警系統	
國內外合作研發與人才培育	研發人才培育數(博士)	1人	1人	訓練研究人才,同時研發最新監測系統	
	研發人才培育數(碩士)	4人	4人	訓練執行現場調查能力,室內試驗與數值能力	
	研發人才培育數	0人	0人	1個博士生,5個研究人才	
研究團隊養成	機構內跨領域合作團隊數	0個	1個	建立航照與無人飛機照片分析集水區殘餘土砂量的技術	
	跨國合作團隊數	0個	1個	將本國防災技術介紹推廣並應用於越南	

論文學術期刊論文(國內、外)						
國內/國外	文章名稱	期刊名稱	出版年月	作者	ISSN	是否為SCI、SSCI、E1、AHCI、TSSCI
國外	Simulation of Debris-Flow Runout Near a Construction Site in Korea. doi:10.3390/app10176079	Appl. Sci. 10, 6079	110年6月	K.-F. Liu, Chae B.G., Y.-H. Wu, J.h. Choi, and H.-J. Park		是
國外	Debris flow detection using a video camera.	Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk	110年9月	Liu K.F.*, Kuo T.I., Wei S.C		否
研討會論文(國內、外)						
國內/國外	文章名稱	研討會名稱	研討會年月	報告方式		
國外	Debris flow detection using a video camera.	World Landslide forum 5	110年11月	口頭報告		

名稱	類型	人數	專長
越南地質調查所	跨國合作團隊	5	防災
彰化師範大學地理系	機構內跨領域	4	崩坍地分析

學位(碩士/博士)	姓名	專長	學校系所
博士	Sudhan Regmi	水保	台大土木系
碩士	張智涵	土木水利	台大土木系



1100532_110/11/25
2021012117281993843



碩士	鄭宇文	土木水利	台大土木系
碩士	陳世霖	土木	台大土木系
碩士	劉偉辰		台大土木系

研究報告					
國內/國外	專著/書籍名稱	出版機關名稱	出版年月	作者	授權金(千元)
國內	披地土砂運移歷程之觀測技術提升與監測設備校驗方法研究	水保局	110年12月	劉格非	

九、主要成果之價值與貢獻度

(一)、學術成就(科技基礎研究)

無

(二)、技術創新(科技技術創新)

將攝影與地聲檢知器的監測資料,加值整合出現場流況的詳細物理資料,如流深,流速,流量,進而判斷顯場流況
並發出警報,採取相關措施,所有技術整合出一個完整系統

(三)、經濟效益(經濟產業促進)

無

(四)、社會影響(民生社會發展、環境安全永續)

無

(五)、其它效益(科技政策管理及其他)

十、檢討與展望

無

十一、後續工作構想之重點

將技術推廣到東南亞,建立國民外交的基礎
將現存技術,換一個場地進行實際測試,以確認現存系統的適應性與正確性

十二、其他補充資料

(一)、跨部會協調或與相關計畫之配合

無

(二)、其他補充說明

無



以下欄位請於期末評核(審查)後,由主辦專家至系統考評作業填寫列印,並請單位主管簽章。

主辦專家簽章

單位主管簽章