中華水土保持學報, 51(1):13-20(2020)
Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 51 (1)*: 13-20* (2020)
DOI: 10.29417/JCSWC.202003_51(1).0002

溪流匯口形成不同堵河程度之地形特徵

張詩晨[1] 劉宜君[1] 曾名賢[2] 黃效禹[2] 陳樹群[1]*

摘　　要　本研究蒐集 2008 至 2015 年間主支流交匯處有明顯土砂堆積之 113 次事件，利用地理資訊系統萃取其地形因子 (河寬、坡度、交匯角度、匯點高程及集水區面積)，探討在不同堵河程度發生的地形條件。結果呈現主支流河寬比與堵河程度有明顯的正相關性，且在主支流河寬相近與交匯角接近 90 度時，最有可能發生完全堵河之現象。藉由堵河之潛勢地形，未來在劃定土石流潛勢溪流時，可同時評估發生堰塞湖之潛勢區域，以達到防災之目的。

關鍵詞：主支流交匯、堰塞湖、堵河程度。

Topographic Characteristics by Level of River Blockage Formed by Confluences

Shih-Chen Chang [1]　Yi-Jun Liu[1]　Ming-Hsien Tseng[2]　Hsiao-Yu Huang[2]
Su-Chin Chen[1] *

ABSTRACT　Satellite images were used to collect data on the confluences in Taiwan with considerable deposition for identifying river topography characteristics for different levels of river blockage. To define the levels of river blockage, 113 events from 2008 to 2015 were analyzed using a geographic information system to extract topographic factors, such as river width, slope, confluence angle, elevation, and watershed area. The results revealed that river width ratio and level of river blockage shared a significant, positive correlation, and river blockage occurs where the confluence angle approaches 90°. On the basis of these blockage characteristics, we forecast the potential debris flow torrent and potential areas for natural dams; these forecasts can be used to prevent debris flows into confluences during disasters.

Key Words: Tributary confluence, natural dam, level of river blockage

一、前　　言

溪流匯口可定義為由一個或多個支流所匯合至主流之區段，是組成河道系統的關鍵型態要素 (Giglou et al., 2016)。在溪流匯口處的水流運移模式、泥沙輸送與沉積是極為複雜的運動，會受到主流與支流的交匯角度、匯流處的地形及地貌關係以及主支流的水流流量及泥沙濃度等影響，而形成不同的土砂堆積樣貌。

溪流匯口處複雜運動的議題一直受到眾多學者關注與探討，在過去針對匯口所進行的研究不計其數，其分析方法可概分為三類：室內實驗、現地調查及數值模擬。陳樹群及安軒霈 (2006) 利用室內實驗改變主流坡度及流量、支流土石流流量，探討溪流匯口處土砂堆積扇之樣貌，並細分為無法產生扇狀地、過渡型扇狀地、輕度溯源淤積型扇狀地以及重度溯源淤積型扇狀地。Nakatani et al. (2013) 在固定支流土石流流量下，以改變支流入匯角度以及主流流量來觀察在匯口處之土砂堆積樣貌，其結果呈現主流流量小且入匯角大時，扇狀地堆積範圍小且厚度較大；主流流量小且入匯角小時，扇狀地堆積範圍大而厚度較小；主流流量大時，則入匯角之影響不明顯。Stancanelli et al. (2014) 則改變了主支流交匯角度以及利用兩種不同支流坡度與土石流觸發時間來觀察，結果顯示在支流與主流同時間釋放土石流時且交匯角度為 90° 時，土砂存在主流上量體最大。從室內渠槽實驗結果可知主支流交匯的角度、坡度比值、河寬比值、泥沙體積濃度及主流流量皆為影響匯口處土砂堆積樣貌的因素。現地調查部分，Stokes and Mather (2015) 搜集了摩洛哥高阿特拉斯山脈內的匯口處土砂堆積特徵，並比較土砂堆積面積、坡度及河寬之間的關係，結果發現支流坡度與土砂堆積面積呈現負相關，表示支流坡度越緩其堆積面積則越大。Shakibaeinia et al. (2007, 2010) 使用三維數值

〔1〕國立中興大學水土保持學系
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichng 402, Taiwan, R.O.C.
〔2〕行政院農業委員會水土保持局
Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Nantou, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail: scchen@nchu.edu.tw

模擬改變交匯角度及流量比的變化，觀察在匯口處的泥沙運移情形，結果顯示當交匯角度較小且增大流量比可以減小土砂堆積的面積，並將其運輸至下游。

考量台灣地質條件與河川地形特性，其溪流匯口處易在上游發生崩塌時，發生不同程度的土砂堆積情形，當土砂堆積情形嚴重時，將可能形成堰塞湖 (Kuo et al., 2011; Zhou et al., 2012; Dong et al., 2014)。當堰塞湖潰決時，其沉積物將會迅速被河流運輸到下游，並可能造成嚴重的土石流、河岸侵蝕和下游的洪水災害 (Ermini and Casagli, 2003; Korup, 2004; Dong et al., 2011; Li et al., 2011; Peng and Zhang, 2012; Chen et al., 2014; Shrestha and Nakagawa, 2016)。目前臺灣針對溪流匯口處之研究多以室內實驗觀察匯口處的土砂堆積情形與發展型態，較少有實際災害發生案例調查彙整的研究，因此本研究搜集歷年之影像資料，進行匯口處土砂沖淤之判識，並藉由前人文獻整理出影響土砂堆積之因子作為本研究討論因子，針對其地形條件搜集數據，統計及分析目前現地溪流匯口處土砂堆積情形與影響因子之關係。

二、研究方法

本研究應用 2008 年至 2015 年期間之 SPOT 衛星影像，其解析度分別為 2008 至 2012 年為 2.5m，2013 至 2015 年為 1.5m，並以下列三項搜索條件進行搜集，分別為曾經有發生過不同堵河程度現象、支流上方有大量崩塌、在匯口處有明顯土砂堆積樣貌，共搜集 59 個溪流匯口點位 (圖 1)，且有 46 %的匯口點位隨著年份的變化有不同的土砂堆積情形，顯見有將近一半比例的匯流口具有重複發生堵河之現象，本研究共收集 113 次事件進行討論。接著利用地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 以兩種軟體 (ArcGIS 與 QGIS) 進行操作，蒐集各點位之地形因子，包括主流及支流河寬、坡度、交匯角度等。

1. 河寬

本研究主要是針對土砂入匯後其主流河寬以及被土砂拓寬的支流河寬與土砂堆積長度的關係。主流河寬所繪製方式為主流上游且扇形堆積前的河寬長度；支流河寬則是以土砂輸送段至堆積段的交界處，即河寬突然展寬的交界作為支流的河寬長度；最後土砂堆積長度則是以主流河寬為基準，主要作為後續堵河程度的計算，故繪製方式則以最長堆積長度至垂直主流河寬的邊界上，詳如圖 2。

2. 坡度

坡度以主流上下游及支流較穩定之地形作為觀測的範圍，如圖 2 黑色虛線所示，並利用地形剖面工具，得到此兩條剖面線之高程資料，繪製出具有地形起伏的剖面圖。從剖面圖中可以去除突然隆起的沙洲或土砂堆積的區域，可較準確的計算此主流平均坡度以及支流平均坡度。

3. 集水區面積及匯口點位

利用 ArcGIS 建立匯口點位的水系及萃取其流域之水系資料，依照匯口點位框選出匯口以上之主流集水面積和支流集水面積，統計每個匯口點之集水區面積作分析，繪製方式如圖 3 所示。而匯點的高程則是萃取內政部公告 2010 至 2015 年之全臺灣 20m DEM 的資料進行分析。

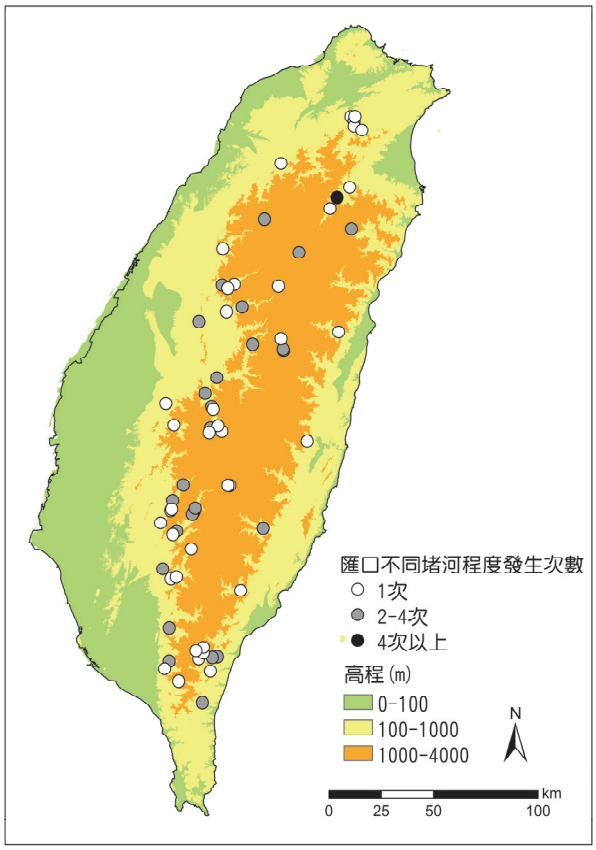


圖 1 不同堵河程度之匯口點位分布圖

Fig.1 The frequency of blocking rivers at confluence

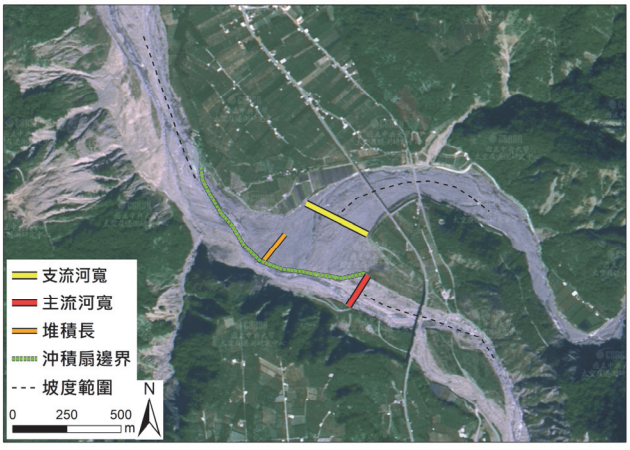


圖 2 河寬及坡度繪製方式

Fig.2 The analysis method of river width and slope

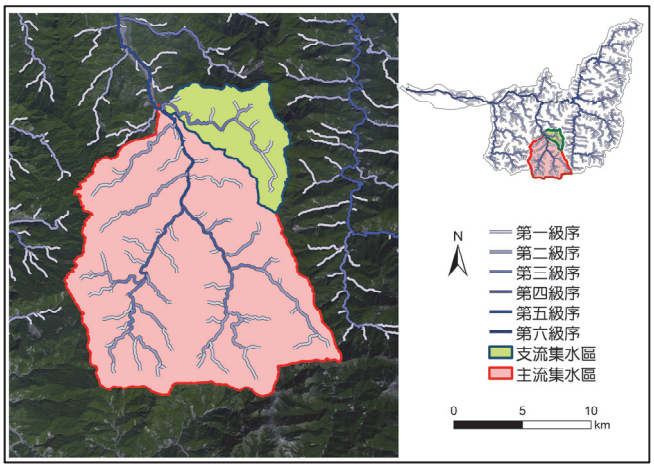


圖 3 主流與支流集水區範圍表示圖

Fig.3 The analysis method of watershed area

4. 交匯角度

主流與支流入匯時所交集的角度在現實的影像中很難去定義，並不像室內實驗中可以使用角度工具去調整最精準的角度進行實驗。故本研究為了在繪製交匯角度時得到最符合現實的角度，以匯口附近進行人工描繪，主流的部分以沖積扇邊界之上緣至下緣為觀測的範圍，並繪製垂直於流線的兩條線段，將中心點連線即代表主流的流向，而支流的部分以突然展寬之河寬往上游約 500m 作為觀測範圍，皆是在觀測的範圍繪製兩條線，並在線上標出中點，連接兩點即為支流的流向，詳如圖 4。將主流及支流的流向連接交集，並利用 QGIS 的 Measure Angle 的功能，即可獲得交匯角度。

5. 堵河程度之定義

本研究為了探討不同堵河程度之地形特徵，定義堵河程度為土砂堆積長度與主流河寬之比值，其代表的意義為來自支流的土砂對於主流影響程度的多寡，各堵河程度之範圍示意圖以及實際案例如圖 5 所示。

針對歷年所蒐集的點位進行統計，各堵河程度的案件數呈現於圖 6，其案例數與各年份重大土砂災例有密切關係，如 2009 年的莫拉克颱風造成中南部大量土砂災害甚至有堰塞湖的形成，其堵河案例數即為研究年分中最多，且以 Level 4 及 Level 5 的堵河程度也占最多，由此可知本研究所搜集之匯口點位具有可信度，可供後續研究之使用。

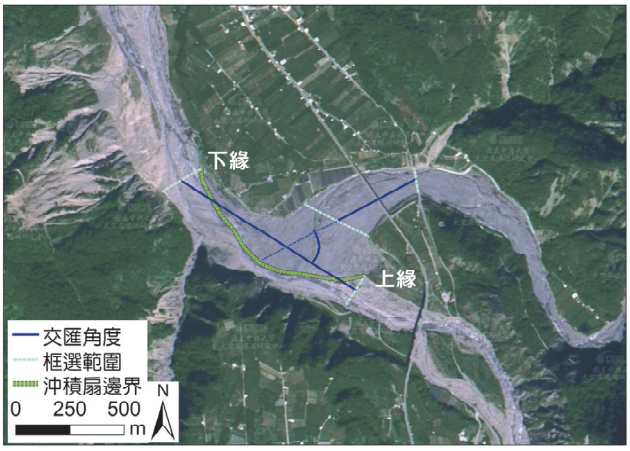
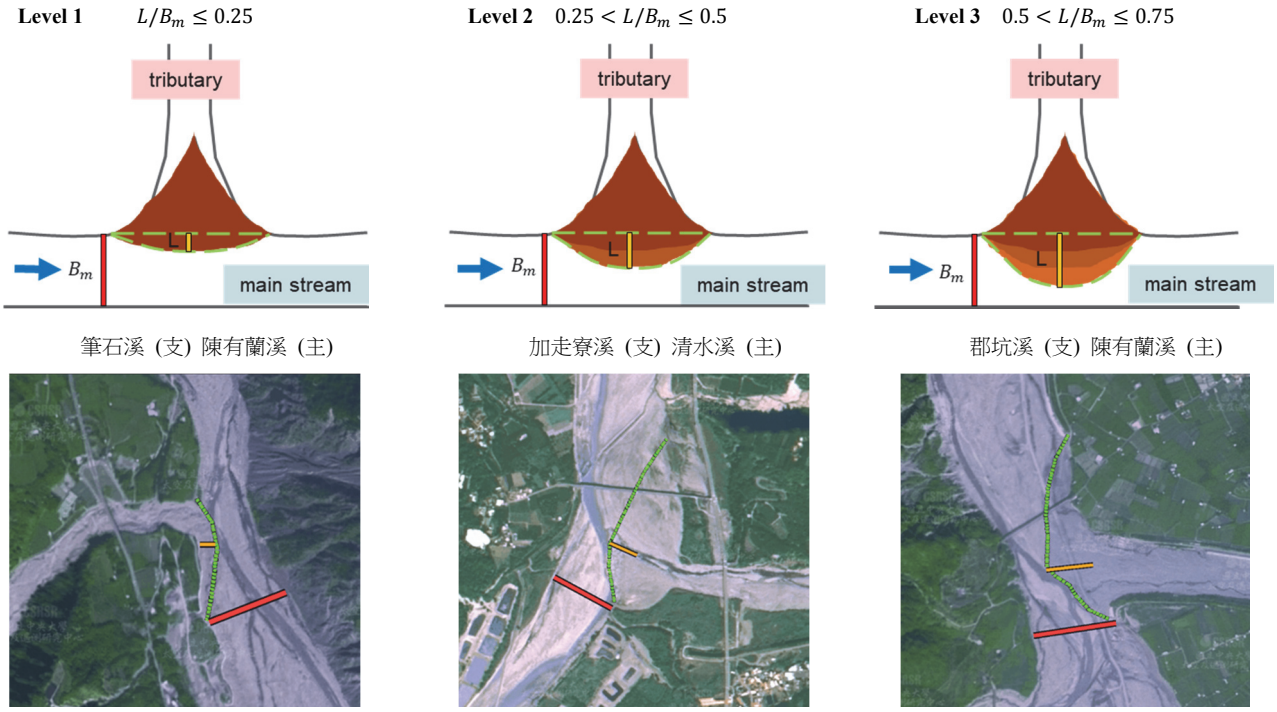


圖 4 交匯角度繪製方式

Fig.4 The analysis method of confluence angle



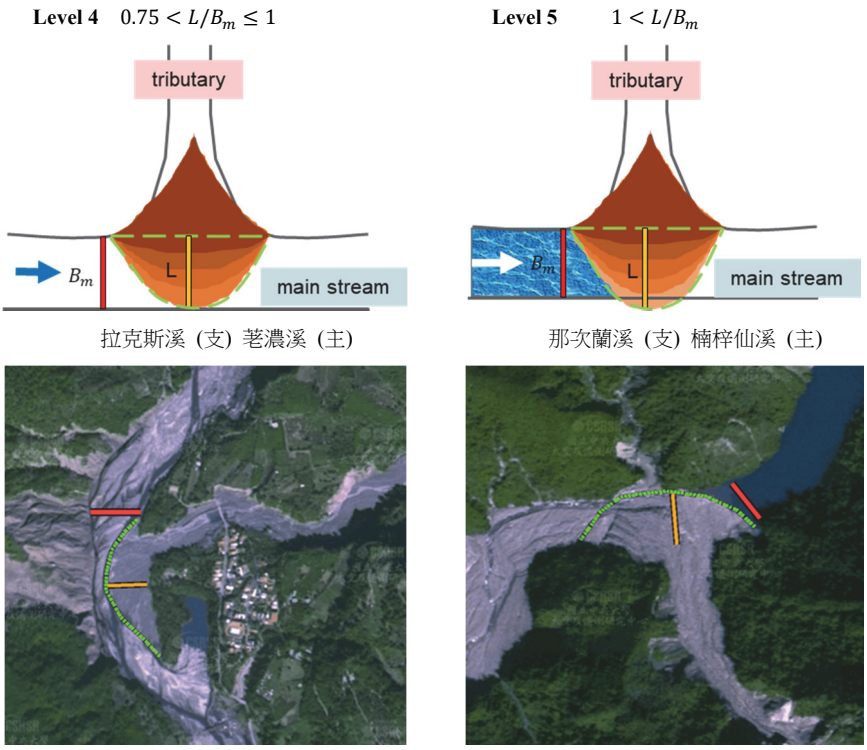


圖 5 各堵河程度定義圖

Fig.5 The definition of each level of river blockage

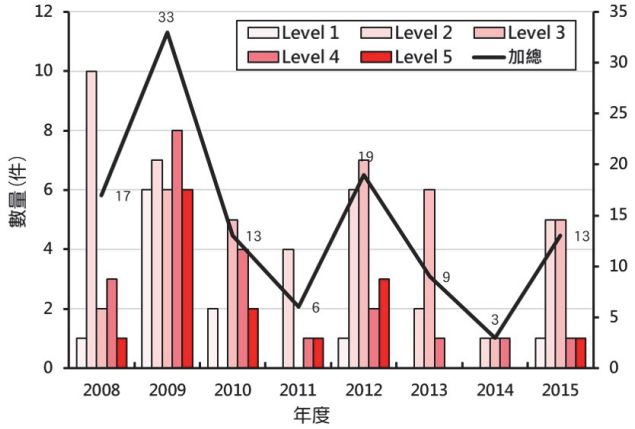


圖 6 歷年堵河程度之分布

Fig.6 The levels of river blockage in historical records

三、河川地形與堵河型態之關係

本研究將搜集之匯點地形資料繪成分布圖及小提琴圖 (Violin Plot) 加以呈現，其可用於顯示數據分佈及其概率密度，並結合了箱形圖和密度圖的特徵，可顯示數據的分佈情形。從圖 8 說明小提琴圖可觀測到數值的資訊，黑色方框表示四分位數範圍，而中間的黑線表示中位數，黑色圓點為數據之平均數，從方框延伸的細黑線代表 95 %的信賴區間，兩端的十字記號為數據之離群值，而小提琴圖與箱型圖最不同的為外框呈現數據分布的情形，代表在各數值間其發生的頻率。

1. 河寬比

圖 7 呈現各點位主流、支流河寬相對分布情形與堵河程度之關係，並繪製河寬比 (支流河寬/主流河寬) 為 1 將其分成兩部分，在河寬比大於等於 1 佔 39 %，河寬比小於 1 佔 61 %，且此區域 Level 1 及 Level 2 分布甚多，傾向主流河寬較大，支流河寬較小的情形，表示多數案例呈現支流河寬小於主流河寬，符合現實所表現的樣貌。而在 Level 3 到 Level 5 主要集中在比值為 1 的線附近，表示為在支流河寬相近於主流河寬時，其土砂堆積的情形較為明顯。Level 5 有 86 %分布於主流與支流河寬為 300 公尺內，顯見河寬小之流況較易發生堵河的現象。

可進一步以圖 8 來說明各堵河程度的河寬比分布情形，從河寬比中位數及平均值觀察，其數值都呈現依不同的堵河程度其數值有逐漸往上的趨勢，代表在河寬比越高時，其造成的土砂堆積情形更嚴重，可以想像為當支流河寬越相近或大於主流河寬時，來自支流的土石流有更多的空間可以匯集土砂在交匯處，並隨著土砂的擴散越能將主流堵塞。另外根據各堵河程度之四分位距與全距資料，以 Level 4 的差距最大，代表其數值分散程度較其他類型離散且數值涵蓋大範圍，因此在 Level 4 較無法明確指出其代表河寬比，反之，在 Level 1 的四分位距及全距最小，代表其數值較為集中，涵蓋的數值大致在河寬比為 0.5 以下的區域。

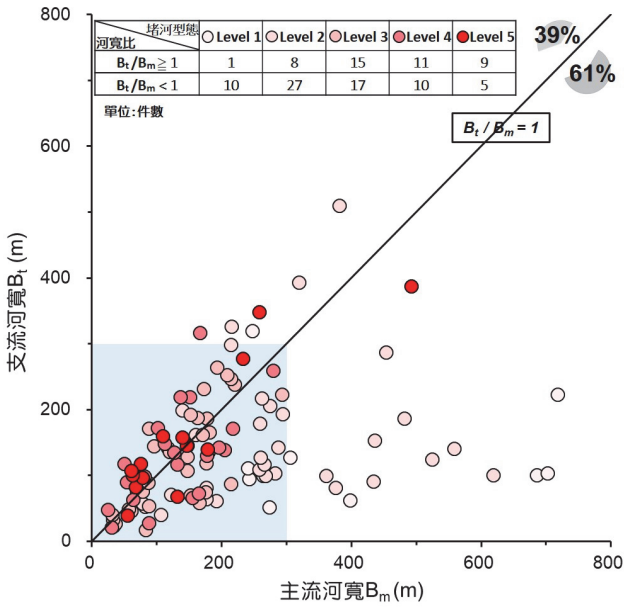


圖 7 主流及支流河寬與堵河型態之關係

Fig.7 The relation between the river width and the levels of river blockage

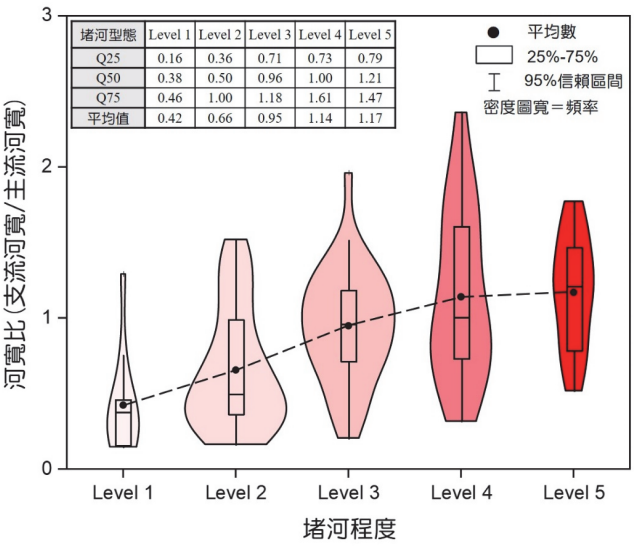


圖 8 河寬比與堵河程度分布圖

Fig.8 The ratio of river width in each levels of river blockage

2. 坡度比

圖 9 呈現各匯口點位主流、支流坡度相對分布情形與堵河程度之關係，坡度比等於 1 為臨界坡度，與現實支流坡度會陡於主流坡度相符，並以坡度比為 2 作為區分，80 %的案例都在坡度比大於等於 2，但從各堵河程度分布情形無明顯的相關性，僅能得知在坡度比大於 2 時，其發生土砂堆積的現象越明顯。進一步以圖 10 說明各堵河程度的坡度比分布情形，其數據外框呈現各程度的分布情形可分為兩部分，以 Level 1 及 Level 2 分佈範圍類似；Level 3 至 Level 5 分佈圖形相似，但依據整體數值分布都以坡度比約為 2 時，其發生機率都占最多。而各堵河程度之居中 50 %的資料分布也都落在坡度比 2 至 4 之間，故綜合來看坡度比的趨勢較無法分辨各堵河程度的差別，以各類型之數值分布情形，可得知坡度比大於 2 時較容易在匯口有土砂堆積現象。

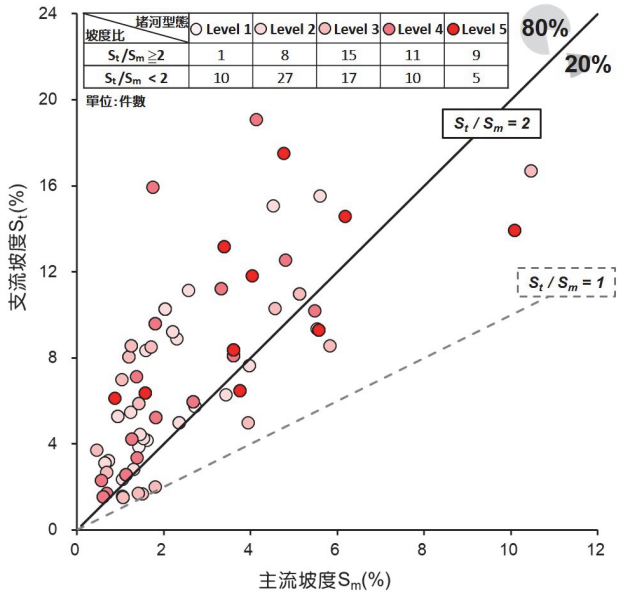


圖 9 主流及支流坡度與堵河型態之關係

Fig.9 The relation between the slope and the levels of river blockage

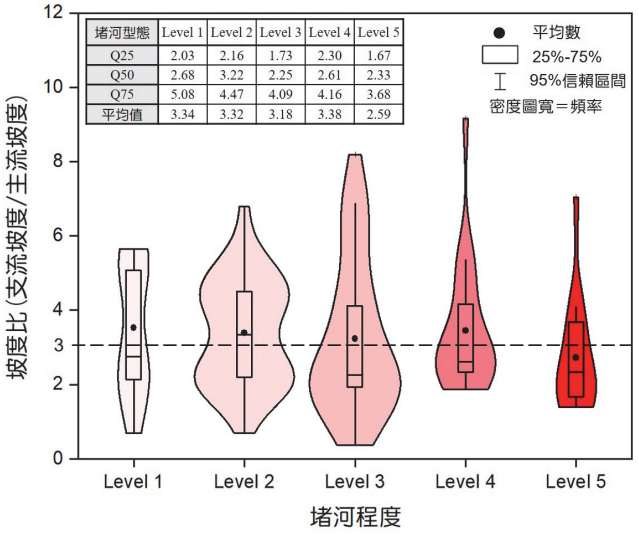


圖 10 坡度比與堵河程度分布圖

Fig.10 The ratio of slope in each levels of river blockage

3. 集水區面積比

圖 11 呈現各點位主流、支流集水區面積相對分布情形與堵河程度之關係，支流集水區面積分布範圍為 1 至 100 平方公里，而主流集水面積分布在 10 至 1000 平方公里內。落在集水區面積比為 0.03 至 0.2 之間的匯流口約佔 51 %，而 Level 1 與 Level 2 主要分布在集水區面積比小於 0.2 間，Level 3 與 Level 4 分布於集水區面積比大於 0.03 間，表示在集水區面積比越大時，代表支流集水區面積與主流集水區面積更相近，其

發生半堵河以上之趨勢愈大，而 Level 5 為全堵河情形，其發生機率受到河寬、交匯角度的影響較為顯著，因此在此於與其他堵河程度之趨勢不符。進一步以圖 12 說明各堵河程度的集水區面積比分布情形，其中可發現 Level 1 與 Level 2 分布的型態相似，其數值大多介於 0.02 到 0.10 區間，又以集水區面積比為 0.05 時案件數佔最多數，而 Level 3、Level 4 及 Level 5 的分布形貌較類似，都有較大值的分布，數值主要分布於 0.01 至 0.30 區間。從各類型堵河程度的集水區比盒狀圖資訊中，Level 1、Level 2 及 Level 5 居中 50 %的數值都呈現集中的趨勢，而 Level 3 及 Level 4 的資料較為分散，從中位數及平均數中都沒有明顯趨勢，故整體而言，在集水區面積比約為 0.05 至 1 區間時，其匯口處最有機會發生土砂堆積情形。

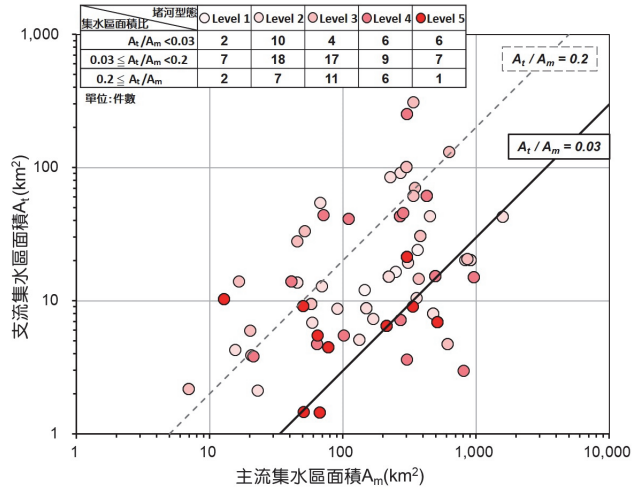


圖 11　主流及支流集水區面積與堵河型態之關係

Fig.11　The relation between the watershed area and the levels of river blockage

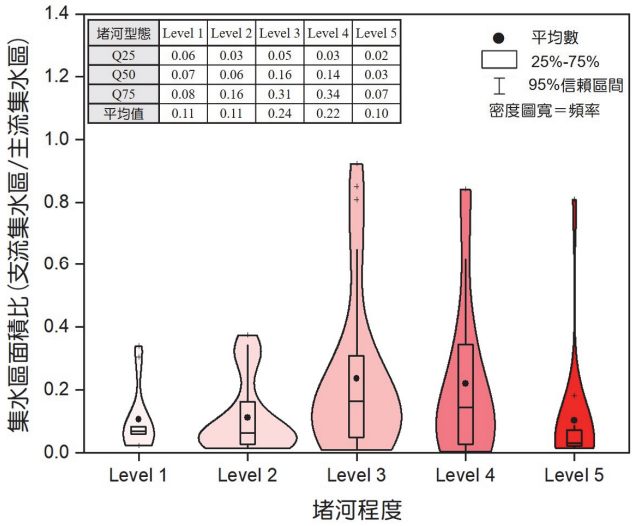


圖 12　集水區面積比與堵河程度分布圖

Fig.12　The ratio of watershed area in each levels of river blockage

4. 匯點高程

從圖 1 可發現匯口點位主要坐落於高程 100 公尺以上，進一步以圖 13 說明各堵河程度的匯口高程分布情形，以 Level 1 的數值分布在 150 到 1000 公尺，是受到極端值之影響，其主要分佈區間為 150 至 600 公尺內；Level 2 數值均勻分布在 150 至 700 公尺區間，而平均數受到極端值之影響，較無法表示此數值之趨勢；Level 3 數值較集中分布於高程 400 至 750 公尺間，又以 500 公尺佔此類型案例數最多；Level 4 數值分布情形如花瓶樣貌，在 1000 公尺以上佔有少數的案例數，但主要數值集中於 400 至 750 公尺區間；Level 5 分布情形最為廣闊，分布於高程各個區域，以高程為 600 公尺時，其案例數最多。

整體分布情形類似，前四種類型的居中 50 %的資料分布相似，大致都位在 250 至 700 公尺之間，反之 Level 5 數據全距較高，橫跨了 200 至 1600 公尺的範圍。若從各堵河程度的中位數觀察，可發現堵河程度越大時，在前四項有略為正向增加趨勢，以 Level 5 代表高程突然升高，大致可呈現在高程越高的地方，造成土砂堆積的情形越嚴重。

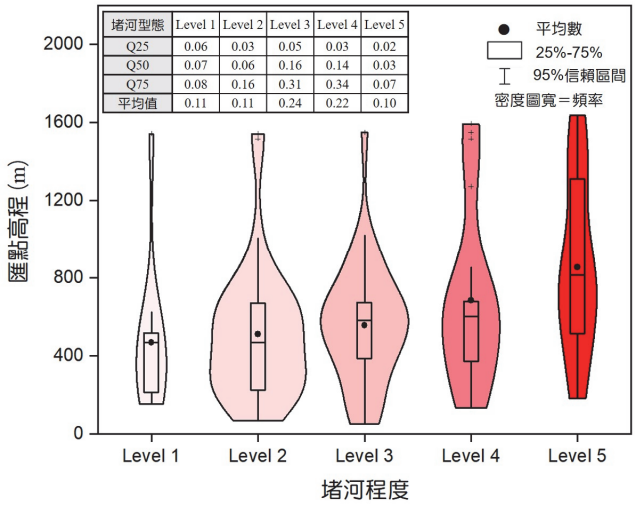
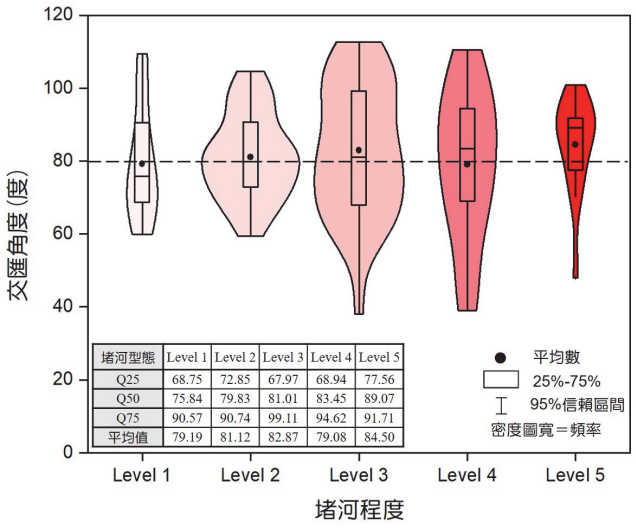


圖 13　匯點高程與堵河程度分布圖

Fig. 13　The ratio of elevation in each levels of river blockage

5. 交匯角度

圖 14 顯示各堵河程度的交匯角度分布情形，從五種堵河程度數據分布情形中，可以發現在 Level 1、 Level 2 及 Level 3 的入匯角度皆為側向入匯佔比較多數，而以 Level 4 及 Level 5 都呈現於垂直入匯發生機率越高，因於此現象表示在交匯角越接近垂直時，其發生堵河的情形越嚴重。從各類型堵河程度的交匯角度盒狀圖資訊中，其居中 50 %的資料分布類似，大部分都介於交匯角度 70 至 95 度之間，而平均約為 80 度，Level 4 的全距甚大，代表在這類型的資料較為分散。從中位數觀察，可發現其數值隨著堵河程度越大有逐漸往上遞增的趨勢，而至 Level 5 時數值將近為 90 度，其可表示交匯角度越接近 90 度時，其堵河的程度越來越明顯。



堵河型態	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Q25	68.75	72.85	67.97	68.94	77.56
Q50	75.84	79.83	81.01	83.45	89.07
Q75	90.57	90.74	99.11	94.62	91.71
平均值	79.19	81.12	82.87	79.08	84.50

圖 14 交匯角度與堵河程度分布圖

Fig. 14 The ratio of confluence angle in each levels of river blockage

四、結　　論

本研究由河川地形的角度去觀測在台灣主支流交匯處發生不同堵河程度的特徵樣貌，利用 2008 年至 2015 年之衛星影像，蒐集 113 筆資料分析，結果顯示歷年的匯口案例數與各年份重大土砂災例有密切關係，且發現在支流與主流的河寬比會影響來自土石流的土砂堆積於交匯角處的長度，河寬越相近其堵河程度越嚴重。而其他地形條件與堵河程度較無明顯的趨勢，整體型態以未到達半堵河及半堵河到全堵河的兩種型態有較不同的差異，在未達半堵河之地形條件呈現為河寬比小於 0.5、坡度比約為 2、屬於側向入匯為主以及位在河川較下游區域。而半堵河至全堵河之地形條件呈現為河寬比大於 0.5、坡度比約為 2、屬於垂直入匯為主以及位在河川較上游區域。而完全堵河形成堰塞湖 (Level 5) 的地形條件，為支流河寬與主流河寬相近、交匯角度為 90 度以及在河川較上游之區域最有可能發生。

綜合上述結果，本研究已可針對匯口之地形條件達到初步判定是否為堵河之危險區域，往後可針對半堵河至全堵河之區域加入流量及輸砂量進行數值模擬，可望獲得更準確的預測於土砂災害地點供相關單位整治或預防。

五、參考文獻

[1] 陳樹群、安軒霈 (2006)，「土石流入匯主流形成沖積扇型態之渠槽實驗」，中華水土保持學報，37(3)，317-326。(Chen, S.C., and An, S.P. (2006). "Flume Experiment of Debris Flow Confluence Form Alluvial Fan in the Main Channel." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation,* 37(3), 317-326. (in Chinese))

[2] Chen, K.T., Kuo, Y.S., and Shieh, C.L. (2014). "Rapid geometry analysis for earthquake-induced and rainfall-induced landslide dams in Taiwan" *Journal of Mountain Science*, 11(2), 360-370.

[3] Dong, J.J., Li, Y.S., Kuo, C.Y., Sung, R.T., Li, M.H., Lee, C.T., Chen, C.C., and Lee, W.R. (2011). "The formation and breach of a short-lived landslide dam at Hsiaolin village" *Engineering Geology*, 123, 40-59.

[4] Dong, J.J., Lai, P.J., Chang, C.P., Yang, S.H., Yeh, K.C., Liao, J.J., and Pan, Y.W. (2014). "Deriving landslide dam geometry from remote sensing images for the rapid assessment of critical parameters related to dam-breach hazards" *Landslides*, 11(1), 93-105.

[5] Ermini, L., and Casagli, N. (2003). "Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index" *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 31-47.

[6] Giglou, A.N., Sahaberi, A. J., Shakibaeinia, A., and Borghei, S.M. (2016). "An experimental study of sediment transport in channel confluences" *International journal of Sediment Research*, 31, 87-96.

[7] Korup, O. (2004). "Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams." *Engineering Geology*, 73, 13-35.

[8] Kuo, Y.S., Tsang, Y.C., Chen, K.T., and Shieh, C.L. (2011). "Analysis of landslide dam geometries" *Journal of Mountain Science*, 8(4), 544-550.

[9] Li, M.H., Sung, R.T., Dong, J.J., Lee, C.T., and Chen, C.C. (2011). "The formation and breaching of a short-lived landslide dam at Hsiaolin Village, Taiwan - Part II: Simulation of debris flow with landslide dam breach." *Engineering Geology*, 123, 60-71.

[10] Nakarani, K., Sakata, T., Maeda, D., Satofuka, Y., and Mizuyama, T. (2013) "Effect of Debris Flow Confluence on Main Channle Deposition Considering Junction Angle." *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 69(4), 1931-1936.

[11] Peng, M., and Zhang, L.M. (2012). "Breaching parameters of landslide dams." *Landslides*, 9(1), 13-31.

[12] Shakibaeinia, A., Zarrati, A.R., and Tabatabai, M.R.M. (2007). "Three-dimensional numerical study of river channel confluence with bed changes." *In Proceeding of 32nd IAHR congress*, 2, 609-617.

[13] Shakibaeinia, A., Tabatabai, M.R.M., and Zarrati, A.R. (2010). "Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(5), 772-781.

[14] Shrestha, B.B., and Nakagawa, H. (2016). "Hazard assessment of the formation and failure of the Sunkoshi landslide dam in Nepal" *Natural Hazards*, 82(3), 2029-2049.

[15] Stancanelli, L.M., Lanzoni, S., and Foti, E. (2014). "Mutual Interference of two Debris Flow Deposits Delivered in a Downstream River Reach." *Journal of Materials Science*, 11(6), 1385-1395.

[16] Stokes, M., and Mather, A.E. (2015). "Controls on modern tributary-junction alluvial fan occurrence and morphology:

high Atlas Mountains, Morocco." *Geomorphology,* 248, 344-362.

[17] Zhou, G.G.D., Cui, P., Chen, H.Y., Zhu, X.H., Tang, J.B., and Sun, Q.C. (2012). "Experimental study on cascading landslide dam failures by upstream flows." *Landslides*, 10(5), 633-643.

2020 年 01 月 02 日 收稿
2020 年 02 月 17 日 修正
2020 年 03 月 12 日 接受
(本文開放討論至 2020 年 06 月 30 日)