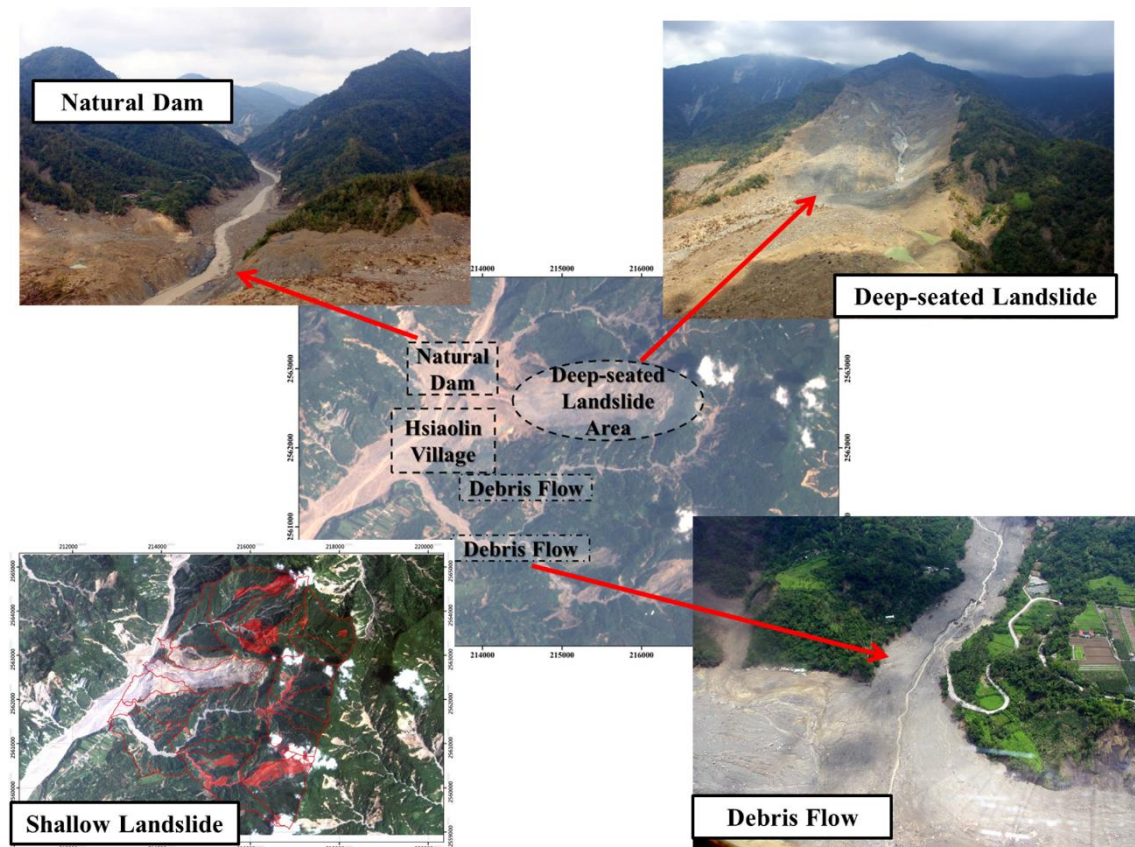


一、研究動機與目的

台灣因位處歐亞大陸板塊與菲律賓板塊交界處，受板塊擠壓影響因而地形陡峻、地質破碎、河短流急等特性，再加以位處西北太平洋颱風易侵襲的區位上，降雨量多且強度大而集中，因此土壤沖蝕、崩塌及土石流等坡地災害發生頻仍。近年全球在氣候變遷影響下，極端降雨及其衍伸災害現象頻傳，以台灣地區因本身地文及水文環境的特性，一旦發生極端降雨事件很容易出現崩塌、堰塞湖、土石流等土砂災害(圖 1-1)。



資料來源：Chen, et al., 2011

圖 1-1 單一極端事件誘發之不同土砂運動型態

以荖濃溪上游集水區來說，過去就有多次主流河道沿程集水區發生多處大規模土砂流出事件，如玉穗溪、布唐布那斯溪、拉庫斯溪等集水區均有土砂流出紀錄。在民國 110 年盧碧颱風暨 0806 水災事件，玉穗溪發生大規模土砂流出事件，雖並未造成聚落重大災害，但卻衝擊區域道路、橋梁等重要基礎設施(圖 1-2)。而在民國 113 年凱米颱風事件中，布唐布那斯溪之流出土砂再次影響區域道路、橋梁之修復(圖 1-3)。

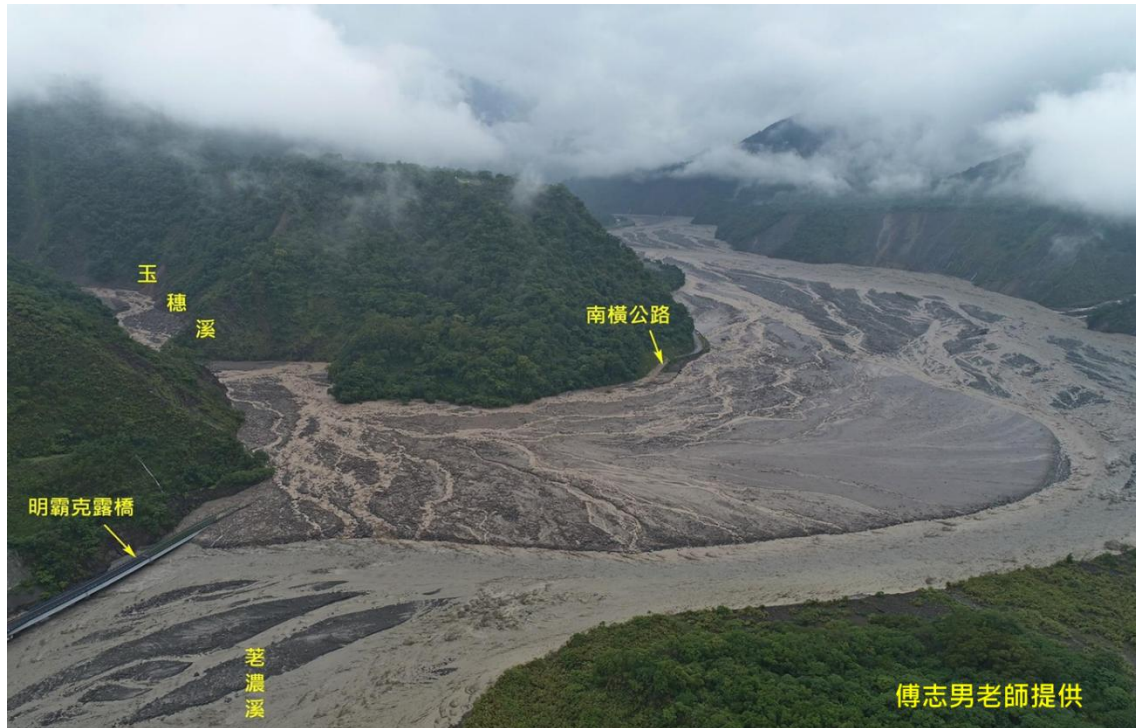


圖 1-2 玉穗溪土砂流出事件



圖 1-3 布唐布那斯溪土砂流出事件

從事件後回顧來看，這些災害發生原因並非由單一集水區之土砂流出所造成，而是多個集水區同時流出後擠壓主流之結果(圖 1-4)。而從發生頻率來看，這樣的致災方式已然成為坡地安全新興威脅。



圖 1-4 山區群發性主支流土砂流出案例 - 老濃溪集水區

依據以往相關研究文獻，較無探討支流不同土砂運移型態形成堆積對於主流造成之影響，同時也未系統性針對主支流匯接處之幾何型態造成之土砂堆積，及其對於主流造成之影響進行探討。綜合上述，本計畫擬建置主支流匯接試驗水槽，探討上述現象特性。此外，本計畫擬與國立成功大學水利及海洋工程學系蔡元融博士合作，將本計畫水槽試驗分析成果提供予蔡組長主持之「山區主支流匯流處之不安定土砂探討-集水區群發性(多重)土砂災害之數值模式可行性研究」計畫，針對多處支流同時流出之群發性土砂災害評估為主題，進行數值評估工具之開發，以提供後續相關情境分析參酌使用。

二、研究方法與第一年成果說明

本計畫以兩年執行期程，透過主支流匯接試驗水槽，分析探討支流不同土砂運移型態以及主支流匯接處之幾何型態，在匯流處形成之堆積特性及其對於主流造成之影響，執行流程如圖 2-1 所示，主要工作項目及初步研究成果說明如下：

(一)、文獻資料蒐集分析

以下針對近年相關文獻初步蒐集彙整，依動床試驗、數值模擬及現場案例三種研究類型，分別探討其成果如下：

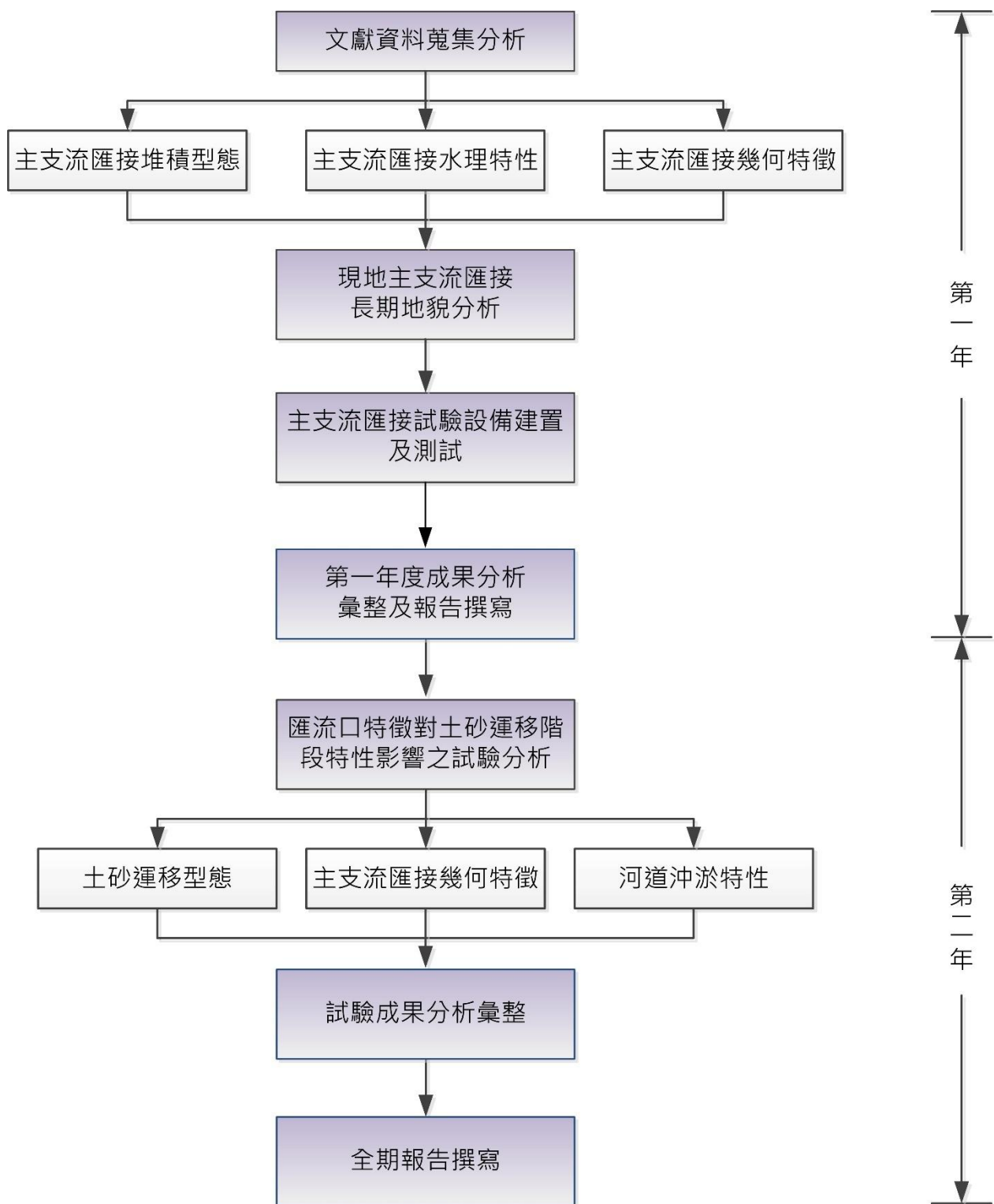


圖 2-1 研究流程圖

● 動床試驗：

1. Confluence morpho dynamics in mountain rivers in response to intense tributary bedload input (2023)

(1)試驗目的

在高山地區，當陡峭的支流在劇烈的降雨事件中產生強烈的底床載運輸時，會對生命、財產與基礎設施造成重大威脅。這類支流的大量輸砂，加上主河道輸送能力不足，常導致匯流處發生淤積，進而引起潰堤、洪水與鄰近地區的沉積災害。過去對山區河川匯流處的研究指出，匯流角與流量比是影響匯流處形態與水力的主要因子。然而，高山河穿通常具有狹窄的匯流口、小流量比、高砂石濃度與陡坡度，相關研究相對較少。本研究透過大型物理模型試驗，分析標準化幾何條件下，不同流量與砂石濃度對匯流處形態與水力動力的影響。

(2)試驗佈置及量測方法

本研究於奧地利因斯布魯克大學的水工實驗室進行實驗模擬，所設計的實體比例模型(如圖 2-2 所示)可進行各種幾何配置與邊界條件的實驗，以代表義大利南蒂羅爾 (South Tyrol) 與奧地利蒂羅爾 (Tyrol) 地區的典型匯流情境。水面高程透過 17 個超音波感測器 (Pepperl & Fuchs UB2000-F42s-I-V15) 監測，每個斷面有兩個感測器，範圍從匯流處上游 1 公尺起延伸 3.5 公尺，下游有一個在尾水箱。土砂沉積量由六個電子秤測定。四部 GoPro Hero 7 相機拍攝實驗過程，實驗前後以 FARO Focus 3D 與 Trimble X7 雷射掃描器進行三維地形建模，透過 ESRI ArcGIS 軟體進行分析。

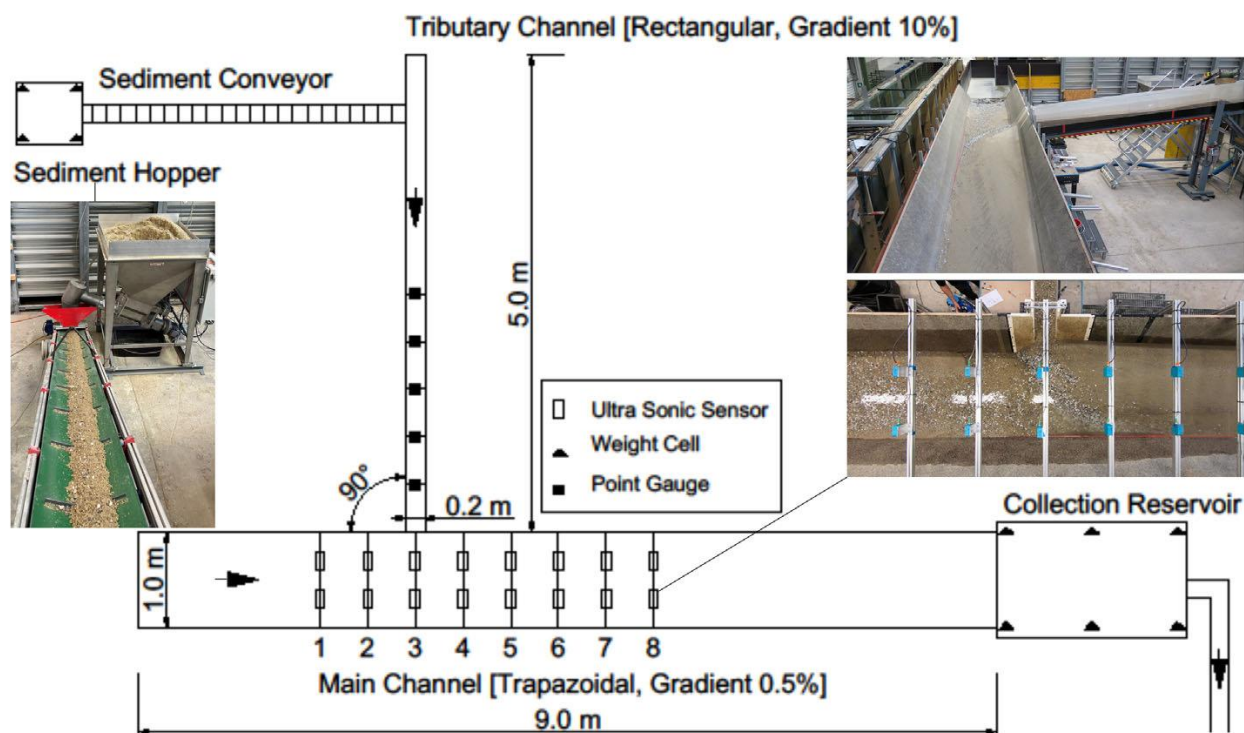


圖 2-2 試驗設備圖(Ostrander et al., 2023)

(3)試驗條件

模型中，主流與支流的坡度分別為 0.5%與 10%，匯流角為 90 度，河寬比為 0.2。土砂材料透過設置於支流上游的自動供料器進行投放，供料量與流量成正比。某些實驗中因技術限制，砂石以預秤方式人工投入。主流並未添加土砂，以模擬高山地區常見情境：支流在局部、短延時、強降雨事件下大量流出土砂，而主流基本不受影響。在每次實驗前，先以 15 L/s 的流量通過主流 5 小時，以建立自然參考河床。所有流量由獨立幫浦與電子儀表控制。每次實驗時間為 20 分鐘，根據實際事件的時間比例縮放而得。所有實驗的流量比固定為 0.1，試驗條件如表 2-1 所示。

表 2-1 試驗條件列表(Ostrander et al., 2023)

EXP (-)	Q_m , target (L s ⁻¹)	Q_m , actual (L s ⁻¹)	Q_t , target (L s ⁻¹)	Q_t , actual (L s ⁻¹)	Sediment target (%)	Sediment actual (%)	Sediment supply rate (kg min ⁻¹)	Sedimentation rate (kg min ⁻¹)
1	15	15.3	1.5	1.5	5	- ^a	7.6	2.0
2	45	45.6	4.5	4.3	5	- ^a	22.9	16.1
3	75	75.5	7.5	7.4	5	5.7	43.5	38.5
4	105	104.5	10.5	10.6	5	4.9	53.4	52.3
5	135	135.4	13.5	13.4	5	5.2	68.7	64.7
6	15	15.1	1.5	1.5	7.5	7.6	11.4	0.0
7	45	46.1	4.5	4.4	7.5	7.5	34.3	21.5
8	75	75.3	7.5	7.5	7.5	7.3	57.2	47.9
9	105	105.1	10.5	10.5	7.5	7.6	80.1	75.7
10	135	134.7	13.5	13.4	7.5	7.5	103	99.8
11	15	14.8	1.5	1.5	10	- ^a	15.3	0.4
12	45	44.9	4.5	4.6	10	10.1	45.8	24.8
13	75	76.1	7.5	7.7	10	10.3	76.3	55.6
14	105	105.7	10.5	10.5	10	10.4	106.8	101.7
15	135	135.4	13.5	13.6	10	- ^a	137.3	131.1

^aManual delivery of sediment where actual sediment concentration could not be determined.

(4)主要試驗成果

在高山河流獨特的水砂條件下，匯流處展現出多樣形態（圖 2-3 ~ 圖 2-5），儘管文獻中所描述的典型形態區仍可辨識。在主流與支流分別為 15 與 1.5 L/s 的流量實驗中，所有土砂濃度下均產生了典型的沉積錐。沉積錐的特徵包括：主流上游的局部沉積、沉積區縱向長度短、上下游方向的坡度均陡峭。在陡峭高山支流中，劇烈的暴雨會產生短時間強烈的底床載輸送，並伴隨不穩定的洪水水文曲線與變動性的輸砂量。這使得匯流區產生多樣的地形形態，進一步影響沉積物的通道與分布。匯流處沉積地形的形狀會迫使所有輸入的砂石僅能經由沖刷區通過主河道，這與低地河流中沉積物可繞開沖刷區的情況不同(Best, 1988; Mosley, 1976)。沉積物於沖刷區的集中通過使其成為整個匯流處的關鍵動態控制點。此外，在這些高山匯流處中觀察到的形態常呈現不對稱發展：沉積區域多貼附在主流左岸，沖刷區則集中於右側。這種不對稱性在高輸砂量與高流量條件下尤為明顯。分析指出，雖然流量與單位水流功率(ω)影響沉積與沖刷分布，但輸砂濃度是主要的控制因子（圖 2-6）。

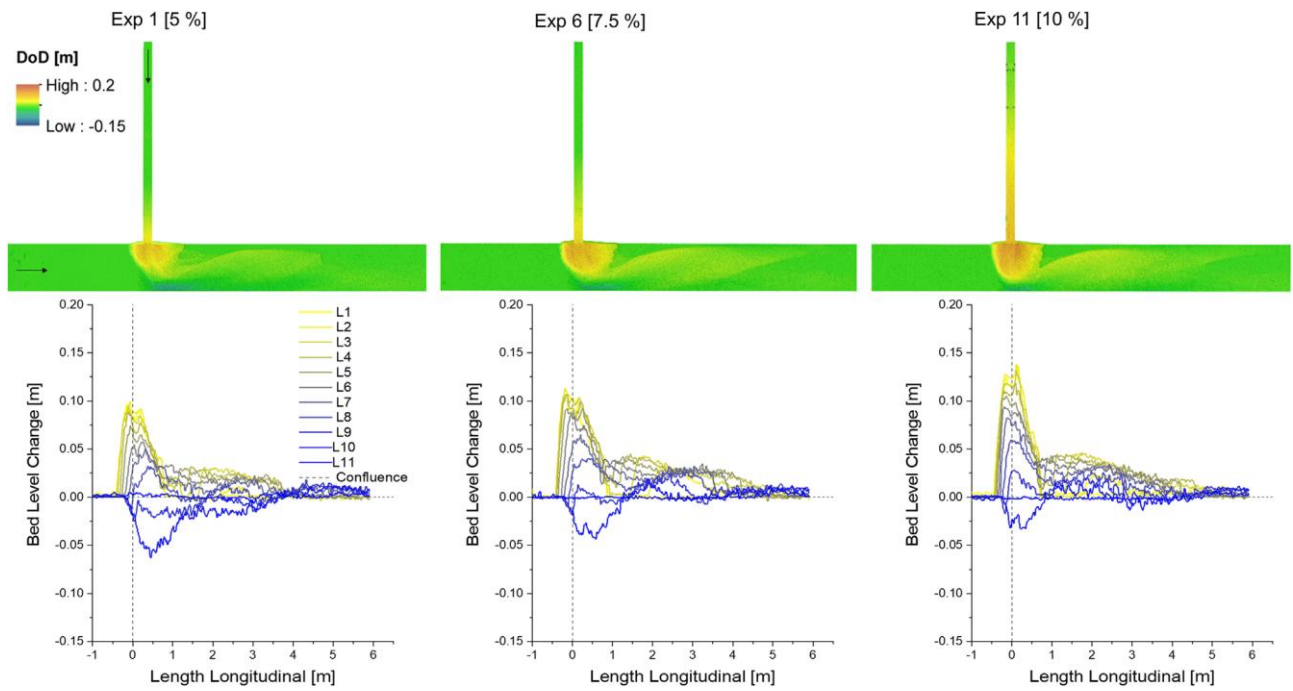


圖 2-3 匯流區地形堆積型態(主流 15 L/s；支流 1.5 L/s)(Ostrander et al., 2023)

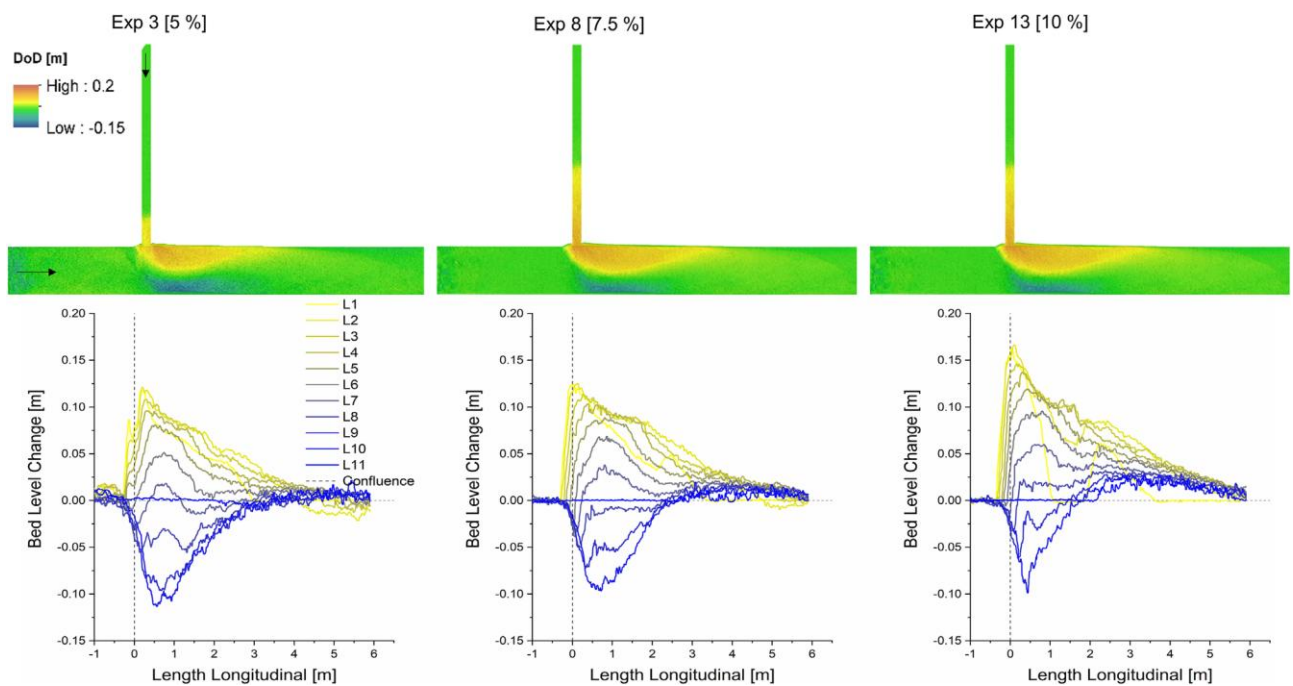


圖 2-4 匯流區地形堆積型態(主流 75 L/s；支流 7.5 L/s)(Ostrander et al., 2023)

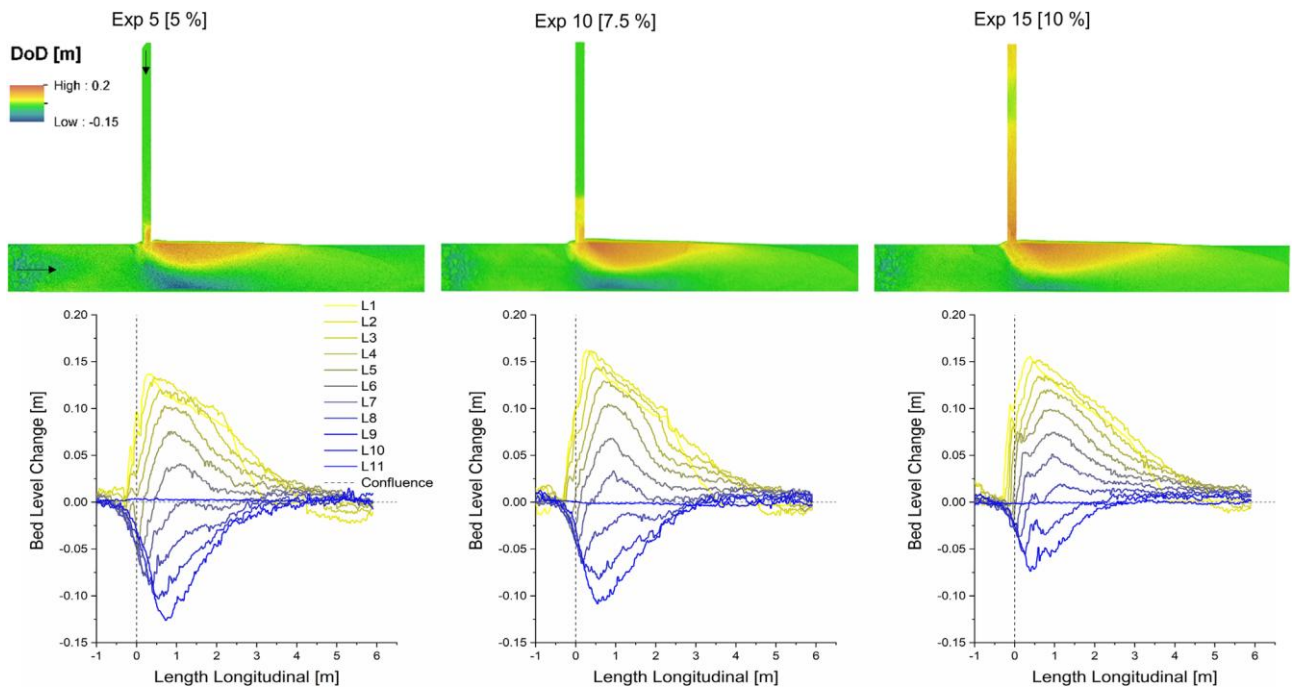


圖 2-5 匯流區地形堆積型態(主流 135 L/s；支流 13.5 L/s)(Ostrander et al., 2023)

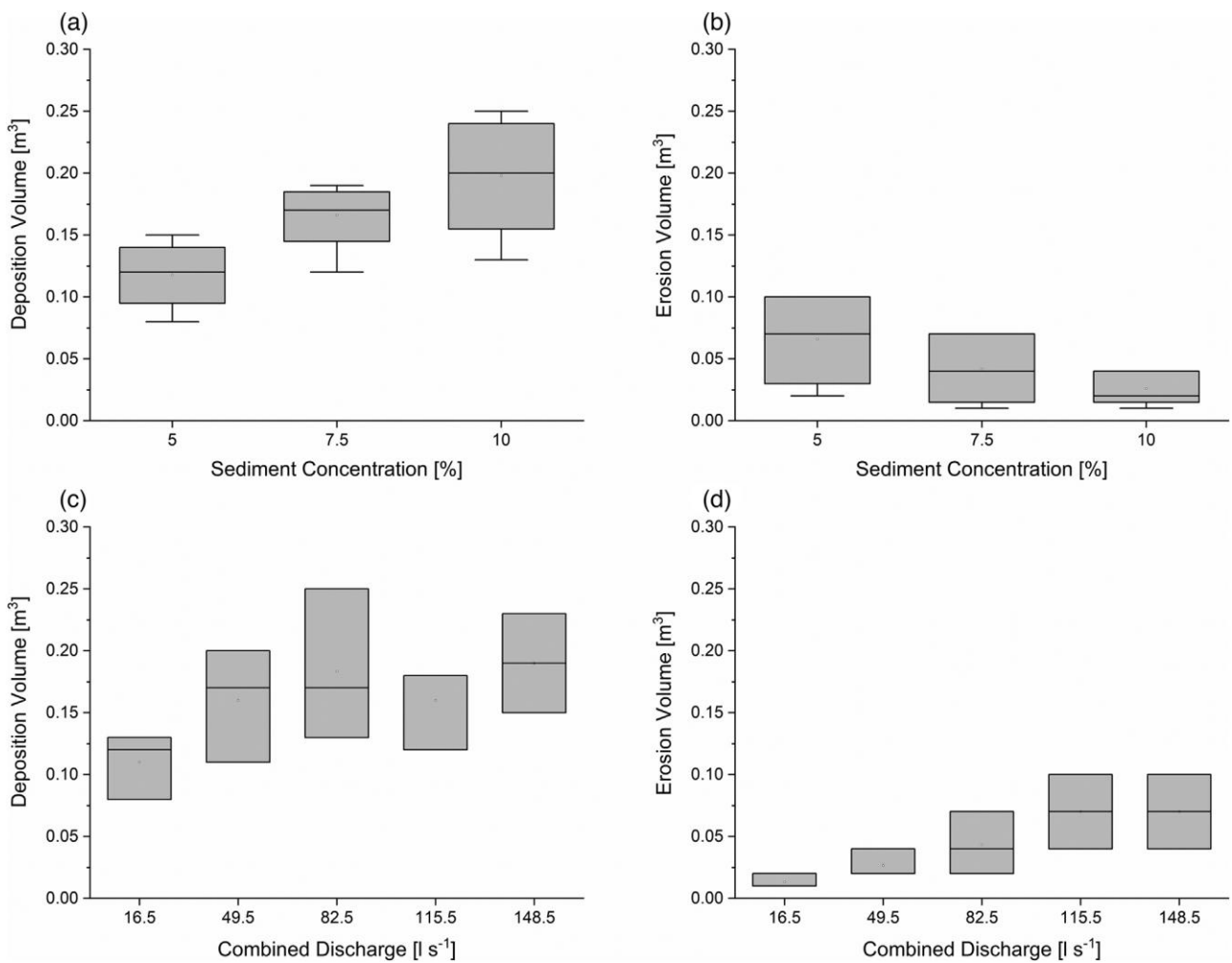


圖 2-6 泥砂濃度對於沖淤量體之影響(Ostrander et al., 2023)

2. Experimental study on the critical condition of river blockage by a viscous debris flow (2022)

(1) 試驗目的

當土石流進入河道時，可能會導致河道阻塞並形成堰塞湖。堰塞湖潰堤時，下游地區可能發生洪水，進而導致人員傷亡和財產損失。在本研究中，河道阻塞的參數被分類為三種類：形態因素、動力因素和土石流特徵因素，而匯合角、無因次體積、單位流量比及無因次屈服應力為河道阻塞的重要參數。河道阻塞的程度則分為四個階段：輕微阻塞、部分阻塞、重大阻塞和完全阻塞。本文研究目的在於提出一種基於阻塞係數的分類方法，根據每次實驗的阻塞係數，得出阻塞程度與關鍵參數之間的關係，基於這些關係，提出了一個預測河道阻塞程度的模型。

(2) 試驗佈置及量測方法

試驗設備及尺寸如圖 2-7 所示，在試驗過程中，首先使用三角堰控制主河道的流量，接著在主河道中的流量穩定後，短暫打開水箱的閘門，將混合物釋放到支流渠中。在匯合處周圍放置四台攝像機，記錄混合物流入主河道的過程。

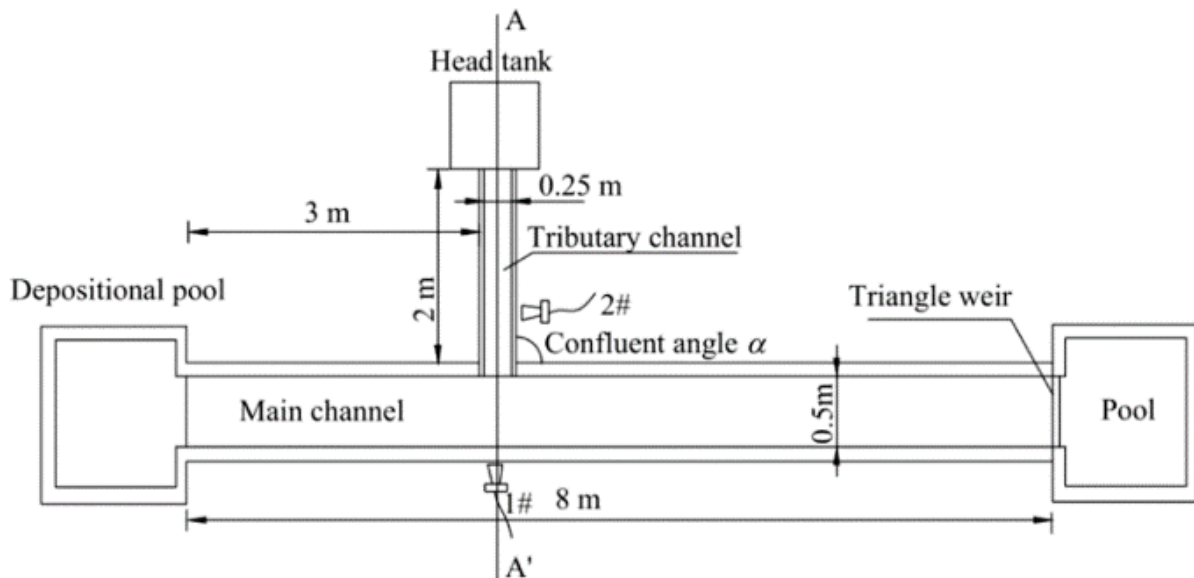


圖 2-7 試驗設備圖(Yu et al., 2022)

(3) 試驗條件

試驗使用混合物的密度、屈服應力以及體積濃度作為實驗條件控制因子，如表 2-2 所示，試驗材料用砂如圖 2-8 所示。

表 2-2 試驗條件列表(Yu et al., 2022)

Densities (kg/ m ³)	Yield stress (Pa)	Concentration of clay	Concentration of sand
1660	21	0.044	0.36
1721	31	0.039	0.40
1749	43	0.041	0.41
1782	52	0.042	0.43
1804	65	0.044	0.44

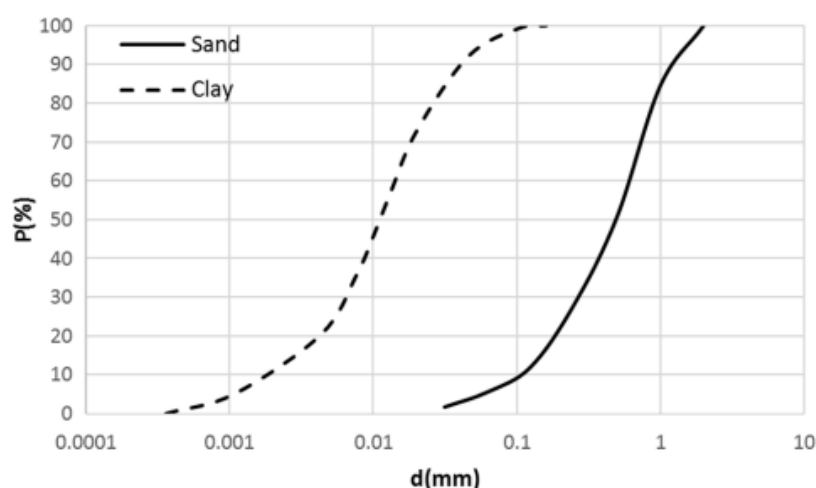


圖 2-8 試驗用砂材料(Yu et al., 2022)

(4)主要試驗成果

圖 2-9 呈現以 24 個試驗例的河道堵塞預測模型之分析結果，臨界值為 0.68、1.3 和 2.0，研究並將河道堵塞程度劃分為四個等級：

- 當 $P < 0.68$ ($R < 0.3$) 時，泥石流對河道的影響為輕微堵塞
- 當 $0.68 \leq P < 1.3$ ($0.3 \leq R < 0.7$) 時，河道部分堵塞
- 當 $1.3 \leq P < 2$ ($0.7 \leq R < 1$) 時，河道堵塞嚴重
- 當 $P \geq 2$ ($R \geq 1$) 時，河道完全堵塞

以往用於預測土石流引發的河流堵塞的模型涉及 20 多個參數，這些參數可歸納為三種類型的因素：形態因素、動態因素、土石流的特徵因素，其中匯流角度、無因次體積、單位流量比和無因次屈服應力等無因次獨立參數為評估河流堵塞的重要關鍵參數。

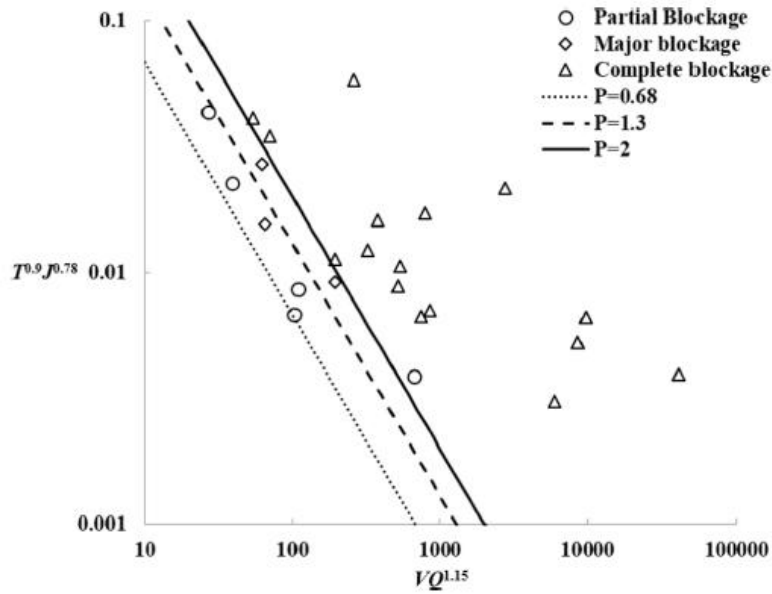


圖 2-9 土石流阻塞河道之預測模型(Yu et al., 2022)

3. Experimental study on the influence of river flow confluences on the open channel stage – discharge relationship (2019)

(1) 試驗目的

水流匯合點通常出現在天然河流或溪流的交匯處，本研究透過試驗測量主支流交會處之速度場和水位，並根據中國西南部河流建立兩個物理合流模型，發現匯流點對山區河流交會處的水位-流量關係的影響，此點對於準確評估明渠水流的水位-流量關係，以及對於水工結構和工程的設計和管理具有重要意義。

(2) 試驗佈置及量測方法

試驗設備及尺寸如圖 2-10 所示，測量點之間的距離約為 0.5 cm，利用聲學多普勒測速儀 (ADV, Sontek，頻率 16 MHz) 測量不同位置的三維流速分量。每個點的測量持續 60 秒，取樣頻率為 50 Hz。垂直線上以平均值代表 ± 5 cm 區域的流速，總共測量 10 條垂直線 (標示為 #5 到 #95)。此外，水位使用精度為 0.5 mm 的標尺測量。

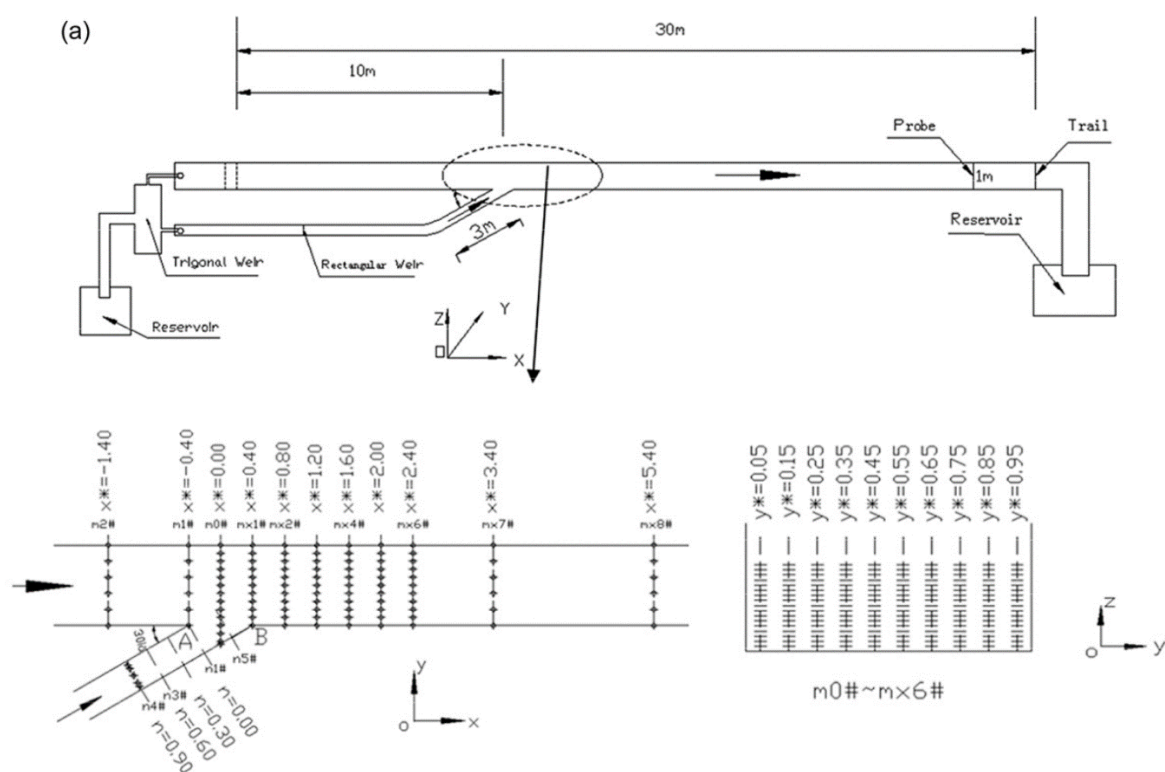


圖 2-10 試驗設備圖(Wang et al., 2019)

(3)試驗條件

試驗條件整理如表 2-3，主要控制因子為主支流流量及坡度，其中包含兩種模型設定(表 2-4 及表 2-5)，其中模型一為模擬中國西南部白沙河與深溪河的匯流口流量，幾何縮尺比例為 1:20；模型二則基於四川省瓦黑河與仙家堡河匯流區原型建造，幾何縮尺比例為 1:50。

表 2-3 試驗條件列表(Wang et al., 2019)

Main flume discharge (m ³ /s)	Tributary flume discharge (m ³ /s)	Total discharge (m ³ /s)	Main flume		Tributary flume	
			Width (m)	Slope	Width (m)	Slope
0.069	0.053	0.122	1.0	2‰	0.4	2‰

表 2-4 模型一試驗條件列表(Wang et al., 2019)

		Test case			
		5	6	7	8
Baisha River	Q_p (m ³ /s)	266.2	203.6	144.6	89.7
	Q_m (m ³ /s)	0.149	0.114	0.081	0.050
Shenxi River	Q_p (m ³ /s)	101.8	101.8	101.8	101.8
	Q_m (m ³ /s)	0.057	0.057	0.057	0.057

表 2-5 模型二試驗條件列表(Wang et al., 2019)

		Test group				
		Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
Wahei River	Q_{wp} (m ³ /s)	554	1350	1220	1350	1540
	Q_{wm} (m ³ /s)	0.031	0.076	0.069	0.076	0.087
Xianjiapu River	Q_{xp} (m ³ /s)	159	712	796	886	1010
	Q_{xm} (m ³ /s)	0.009	0.040	0.045	0.050	0.057

(4)主要試驗成果

本研究調查了河流匯合區域的流動結構特徵和水位-流量關係，包括大量的實驗水槽測試和物理模型應用。在水槽實驗中，首先詳細測量了流速和水位場，結果與分析清楚顯示河流匯合對流速分佈的影響(圖 2-11)，在河流匯合處可以將低速區和高速區區分開來。基於所得資訊，還討論了河道匯合對回水和流動分離特性的影響，結果驗證了先前研究中所發現的河流匯合處的複雜水動力特性。

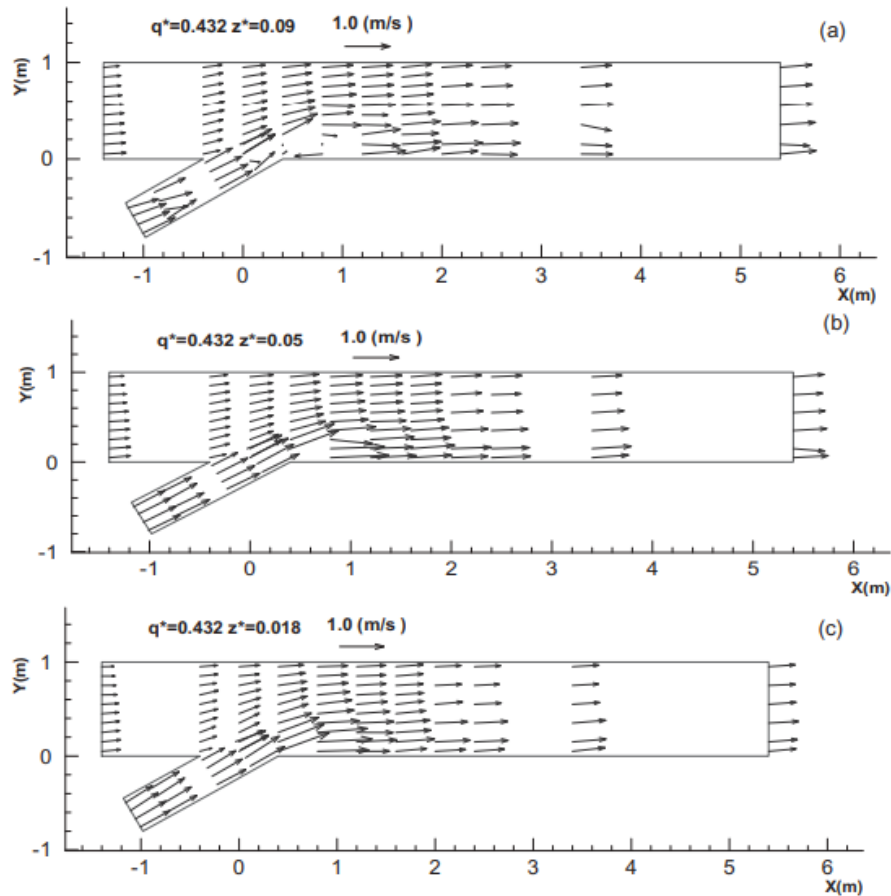


圖 2-11 河流匯合對流速分佈的影響(Wang et al., 2019)

4. Evolution of the hydromorphodynamics of mountain river confluences for varying discharge ratios and junction angles (2016)

(1) 試驗目的

山區河流匯流點的特徵是狹窄且陡峭的支流，這些支流向主河道輸送大量的沉積物，而主河道則提供主要的水流量。目前對於山區河流匯流處的水動力學和形態動力學的了解仍然有限，因為大多數現有的匯流動態研究集中在低地匯流點。本研究旨在檢驗匯流角度(α)和流量比($Q_r = Q_t/Q_m$)對山區河流匯流處流動動態和河床形態的影響。

(2) 試驗佈置及量測方法

試驗設備及尺寸如圖 2-12 所示，匯流設置由矩形玻璃壁水槽主河道及矩形 PVC 水槽支流組成。支流以兩個角度匯入主河道，匯流點分別位於距主河道入口 3.50m 和 4.50m 處。河床地形的測量使用了 Mini-Echo-Sounder，精度為 $\pm 1\text{mm}$ ，水面高度使用了超聲波水位計，精度同樣為 $\pm 1\text{mm}$ 。

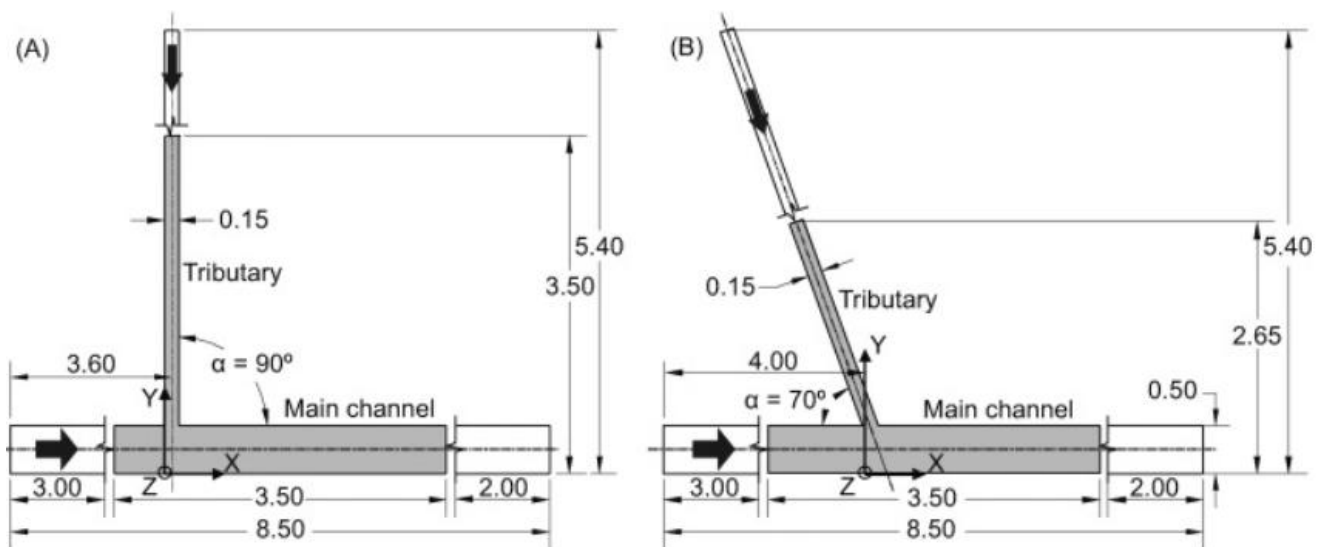


圖 2-12 試驗設備圖(Guillén-Ludeña S. et al., 2016)

(3) 試驗條件

每個匯流角度採用的流量比分別為 $Q_r = 0.11$ 、 0.15 、 0.23 L/s (Q_r 和 α 值為瑞士上羅納河匯流點的代表性數值)。每次試驗期間，分別採用兩種不同的沉積物混合物，每個水槽一種。兩種沉積物混合物也同樣基於羅納河上游交匯處的沉積物混合物，試驗條件整理如表 2-6 及圖 2-13。

表 2-6 主支流試驗材料列表(Guillén-Ludeña S. et al., 2016)

Channel	ρ_s [kg/m ³]	d_{30} [mm]	d_{50} [mm]	d_m [mm]	d_{90} [mm]
Main channel	2650	0.4	0.8	1.4	3.0
Tributary	2650	0.4	0.8	2.3	5.7

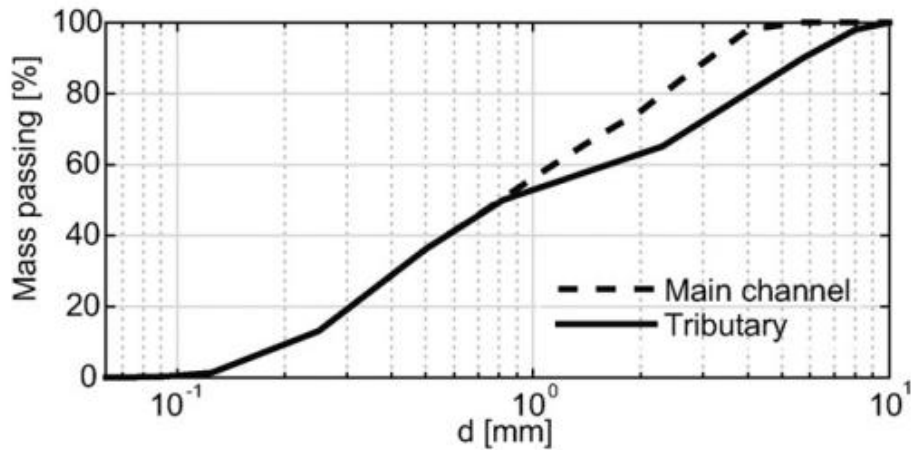


圖 2-13 主支流試驗用砂材料(Guillén-Ludeña S. et al., 2016)

(4)主要試驗成果

本研究分析了流量比和匯合角對山區河流匯流處水文地貌動力學的影響。結果顯示，這些參數對匯流處的形態和水動力特徵具有顯著影響。一般而言，支流對主河道水文地貌動力學的影響在較高的流量比和匯合角下會被放大。隨著流量比增加，岸附沙洲高度降低，以及在不同匯合角下支流的不同的流態等特徵，與低地匯流處的研究結果形成對比，這進一步強化了山區河流匯流動態與低地匯流不同的觀點。山區河流匯流的動態受到支流攜帶的豐富沉積物的高度影響，為了將這些沉積物輸送到低流量的主河道，支流會發展出必要的水文地貌動力條件，這些條件包括明顯的河床不連續和取決於匯合角及流量比的流態(亞臨界、臨界或超臨界流態)。

5. Flow and sediment dynamics in channel confluences (2012)

(1)試驗目的

為了瞭解自然界中經常出現流量和動量通量比相對較低的匯流，本試驗模擬位於瑞士上羅納河的匯流環境，並進行了三維流速場、湍流、沉積物運輸、河床物質粒徑和形態的測量。本研究提出了一個匯流處水動力—形態—沉積過程的概念模型，並與已有的針對不同特徵匯流處的概念模型進行比較。

(2) 試驗佈置及量測方法

試驗設備及尺寸如圖 2-14 所示，試驗裝置由具有光滑垂直岸的匯流槽組成，支流河道在入口下游 3.60 m 處以 90° 角與主河道相連(支流寬度與主河道寬度之比 $B_t/B_m=0.3$ 以及主河道寬度與匯合後河道寬度之比 $B_m/B_{p-c}=1$ 代表了上羅納河的匯流)。試驗過程中使用超音波儀和迷你迴聲測深儀測量水位和河床地形，儀器安裝在可移動框架上，覆蓋匯流區 $3.80\text{ m} \times 3.00\text{ m}$ 的區域，分別透過主河道上的校正 V 型缺口堰和支河道上的電磁流量計精確測量上游流量。

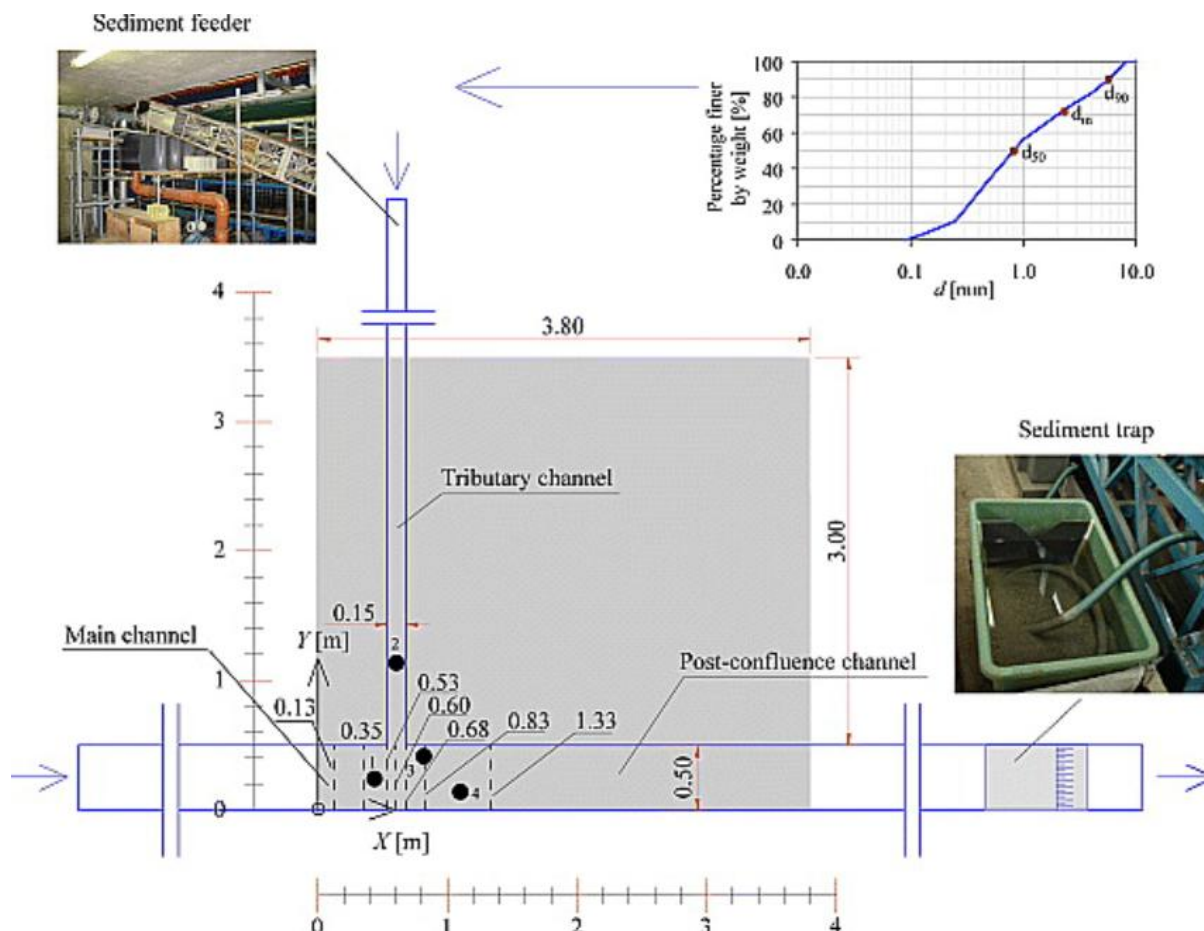


圖 2-14 試驗設備圖(Leite Ribeiro, M. et al., 2012)

(3) 試驗條件

試驗條件整理如表 2-7，其中試驗控制因子為主支流流量及主支流寬深比。此外，主支流採用土砂材料粒徑分布如圖 2-15 所示。

表 2-7 主支流試驗條件列表(Leite Ribeiro, M. et al., 2012)

Q_m (l s ⁻¹)	Q_t (l s ⁻¹)	Q_t/Q_m	Q_{s_t} (kg min ⁻¹)	Fr_m	Fr_t	Fr_{p-c}	M_r	B/h		
								Main	Tributary	Post-Confluence
18.0	2.0	0.11	0.3	0.32	1.30	0.70	0.2	5	7.5	7

^aValues are averaged in the main channel upstream of the confluence, the tributary, and the post-confluence channel.

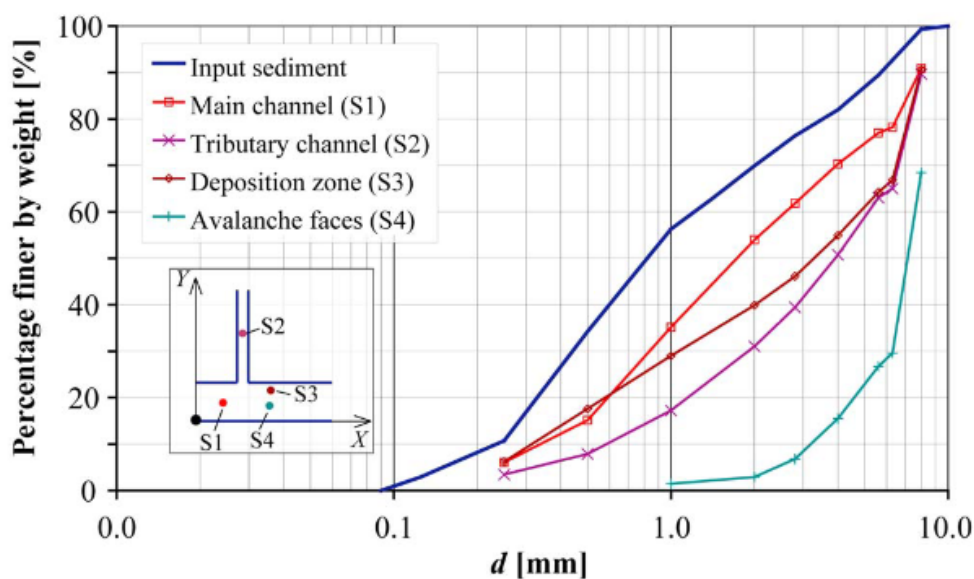


圖 2-15 主支流試驗用砂粒徑分布圖(Leite Ribeiro, M. et al., 2012)

(4) 主要試驗成果

試驗成果顯示有三種水文-形態交互作用提供了所需的沉積物運輸能力，以通過匯流區域輸送由支流提供的沉積物。首先，下游通道的內側河岸發展出沙洲，導致當地流深減小，近底層流速加快，並通過地形引導使該流向外偏轉。其次，河床不連續產生兩層流結構和三維流動模式，特徵為具有較高流速的近底層流核，具備增加的沉積物運輸能力。第三，在主河道與支流匯合處的剪切層中產生大量紊流，該剪切層與粗顆粒沉積物的優先運輸通道位置一致，表示增強的紊流能明顯提高沉積物運輸能力(圖 2-16)。

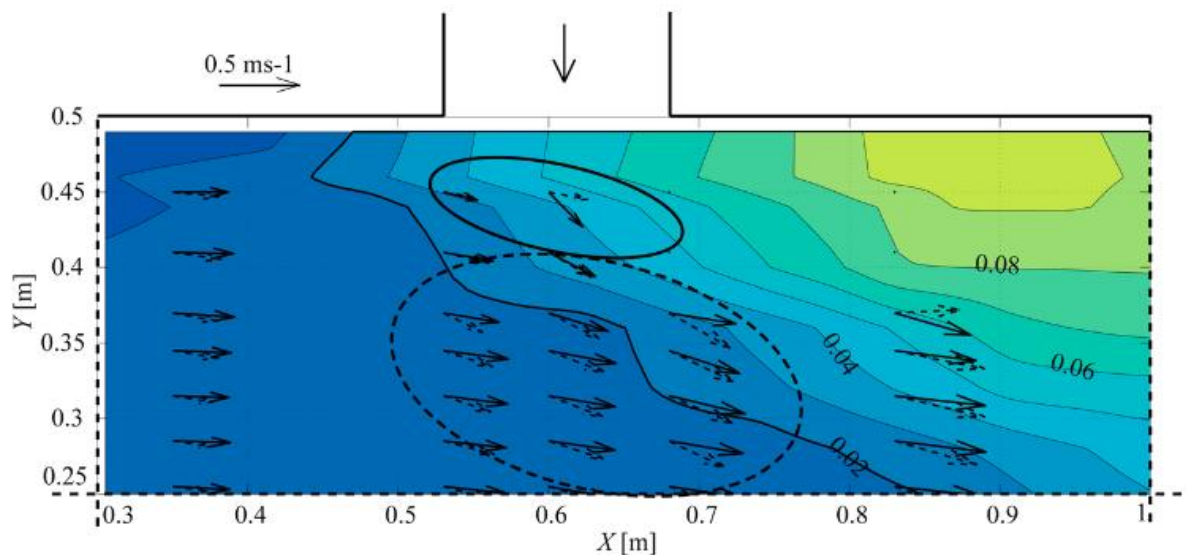


圖 2-16 主支流匯流處之水流結構分布

6. The formation and failure of debris flow-dams, background, key factors and model tests: case studies from China (2009)

(1) 試驗目的

土石流突然進入主河道可能會形成阻塞，導致上游大規模蓄積水形成堰塞湖，完全堵塞或壩的形成與支流和主河道的流量比、速度比、泥石流的容重、匯流角度及顆粒尺寸不均勻程度密切相關。為了建立壩形成的臨界指數 C ，本研究進行了 19 組水槽試驗，並找出匯流處堵塞的特徵以及壩形成的閾值和這些壩的潰壩模式。

(2) 試驗佈置及量測方法

試驗設備及尺寸如圖 2-17 所示，主流的流量通過固定在水箱前的三角形堰測量，主流的流速則通過浮標在不同間隔測量的速度平均值來計算。泥石流的運動特徵以及在交叉點的沉積物交換過程通過固定在支流槽側面和交叉點頂部的 CCD 相機進行記錄。

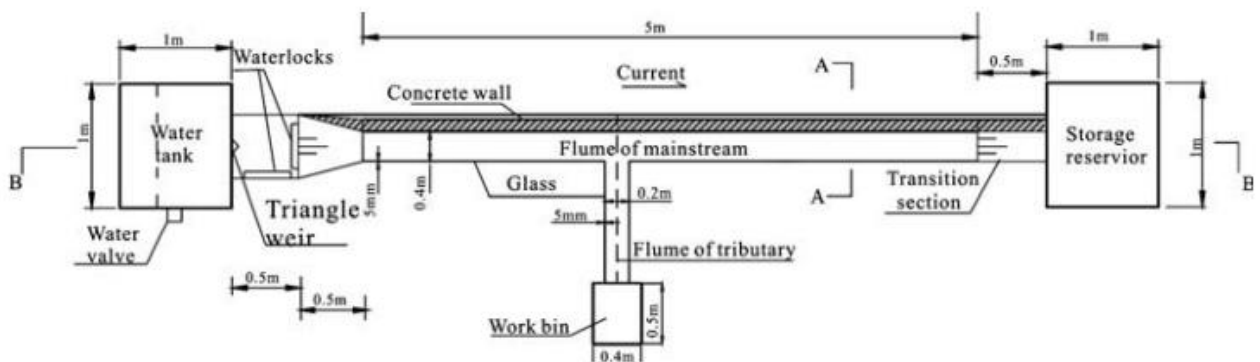


圖 2-17 試驗設備圖(Dang et al., 2009)

(3) 試驗條件

試驗分別在兩個矩形水槽中進行，試驗中使用的支流與主河道的流量比範圍為 0.88 至 10.53 L/s，泥石流的體積密度範圍為 1.9 至 2.16 ton/m³，匯流角範圍：30°、60° 和 90°。此外，主支流採用土砂材料粒徑分布如圖 2-18 所示。

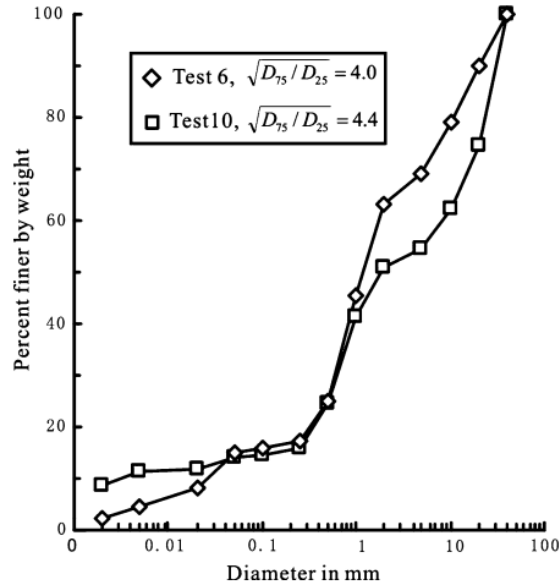


圖 2-18 試驗土砂材料粒徑分布圖(Dang et al., 2009)

(4) 主要試驗成果

試驗結果顯示壩體形成的主要因素，包括流量比、速度比、泥石流的體積密度、匯合角度以及顆粒大小的不均勻度，並通過模型測試數據推導出了一個無因次的臨界指數，如下所示：

臨界指數公式：

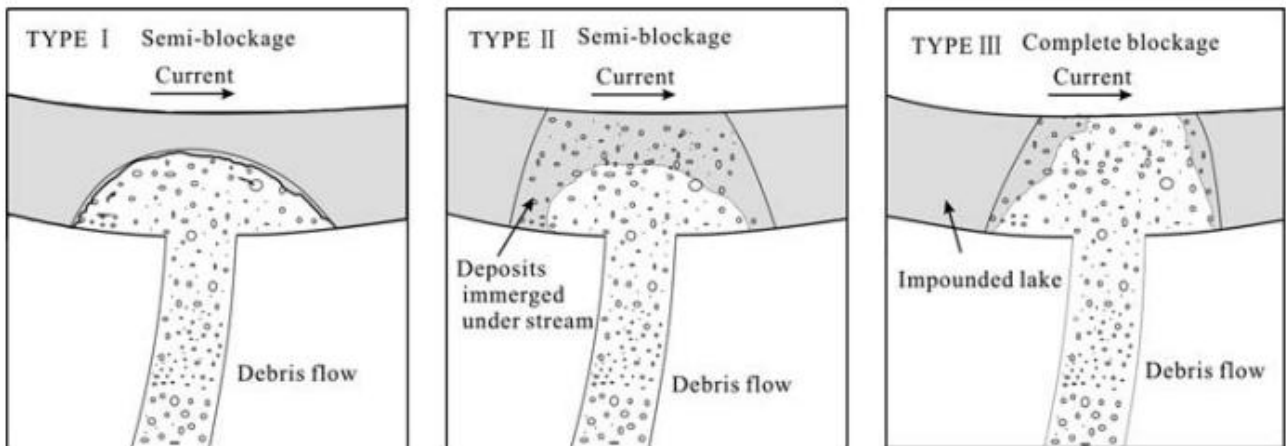
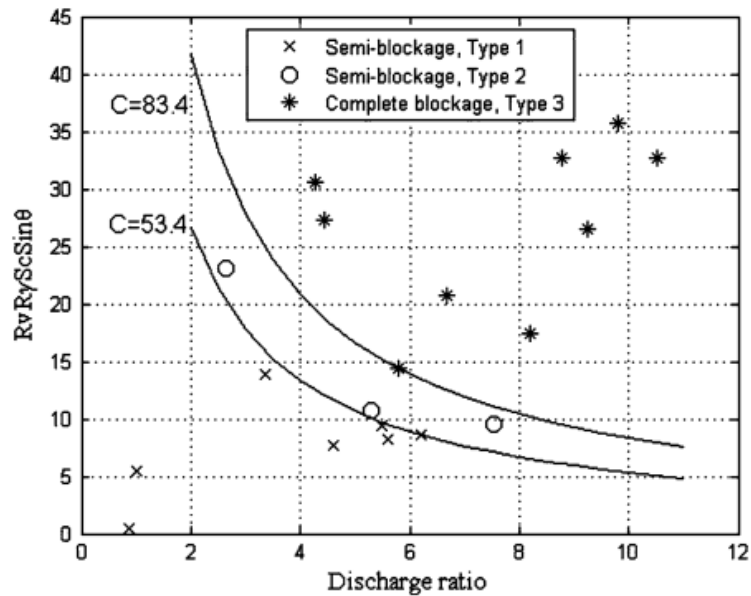
$$C = R_Q \cdot R_V \cdot R_c \cdot S_c \cdot \sin\theta \quad (1)$$

其中 R_Q ：流量比； R_V ：速度比； R_c ：密度比； S_c ：粒度不均指數； θ ：匯流角。

當 $C < 53.4$ ：發生 Type 1 堵塞，土石流未橫跨整個河谷，主流仍能通過縮窄的橫截面流動；

當 $53.4 \leq C < 71.5$ ：發生 Type 2 堵塞，土石流橫跨整個河谷，但由於沉積物密度低或流速低，

迅速發生溢流；當 $C > 83.4$ ：發生 Type 3 完全堵塞，土石流橫跨並填滿整個河谷，形成穩定的土石壩(圖 2-19)。



資料來源：Dang et al., 2009

圖 2-19 主支流匯流處之堆積影響主流型態

7. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences (1988)

(1) 試驗目的

河道匯合處必須適應流速、沉積物輸送和水力幾何形態的快速變化，匯合處的沉積物分散模式不僅受到流動動力學的影響，也會影響河床形態，這反過來又影響流動和沉積物輸送的路徑。因此本試驗目的在於了解沉積物在河道匯合處的行為，對於解釋匯合處河床形態有著重要意義。

(2) 試驗佈置及量測方法

試驗設備及尺寸如圖 2-20 所示，試驗使用一個專門建造的匯合水槽進行，且該水槽設計

成五種可調整互換的匯合角度。在試驗達到平衡條件後，水流逐漸停止，然後慢慢排水以保持河床不受擾動，試驗過程由一台垂直安裝在水槽上方的攝像機記錄泥砂運移過程。

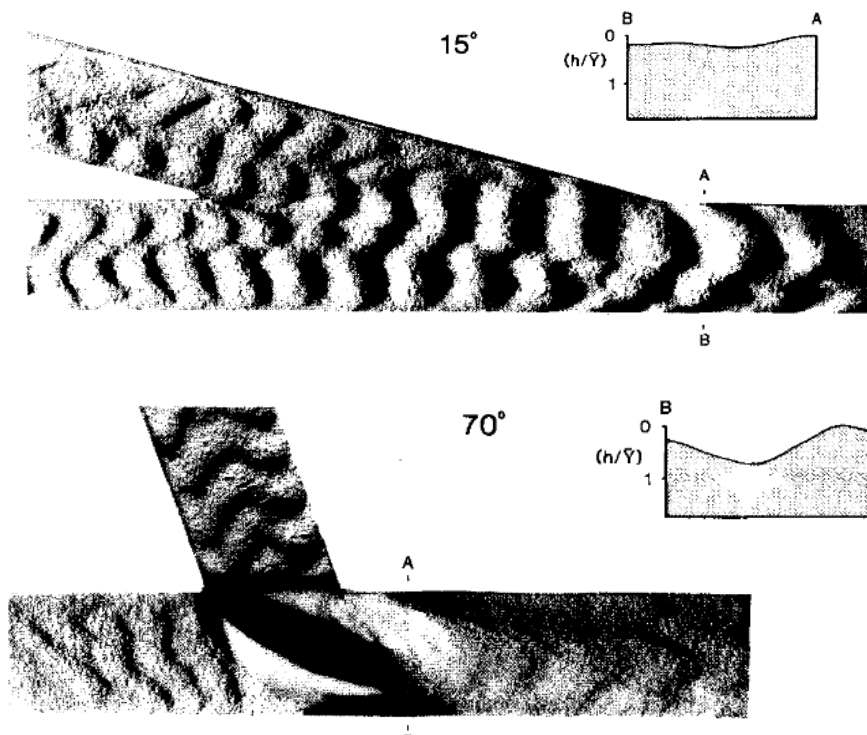


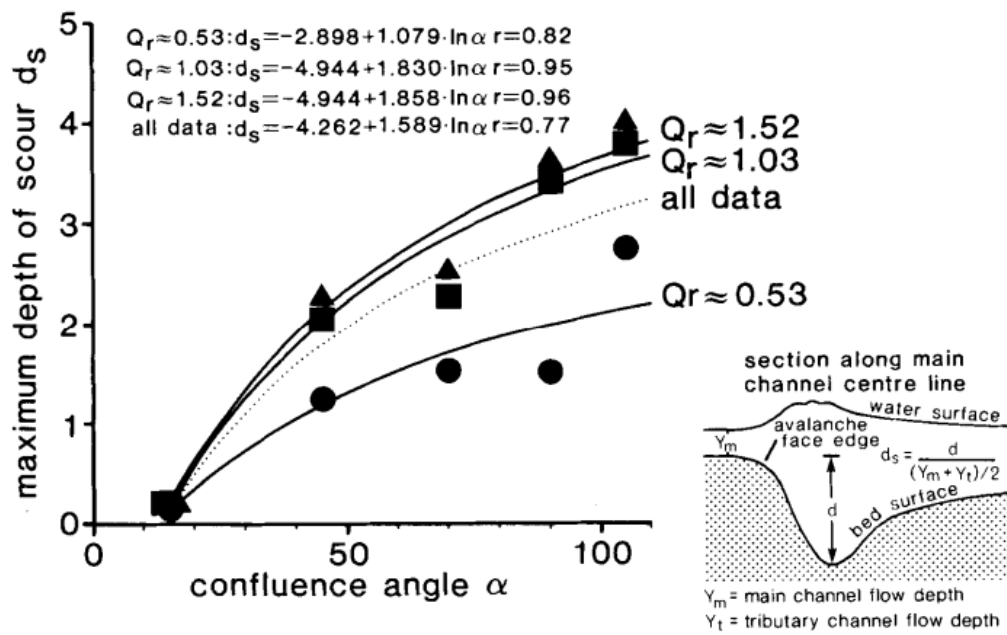
圖 2-20 試驗布置圖(Best, 1988)

(3)試驗條件

試驗流量比例：0.5、1.0、1.50；使用的沉積物為均質石英砂，粒徑約 0.49 mm。

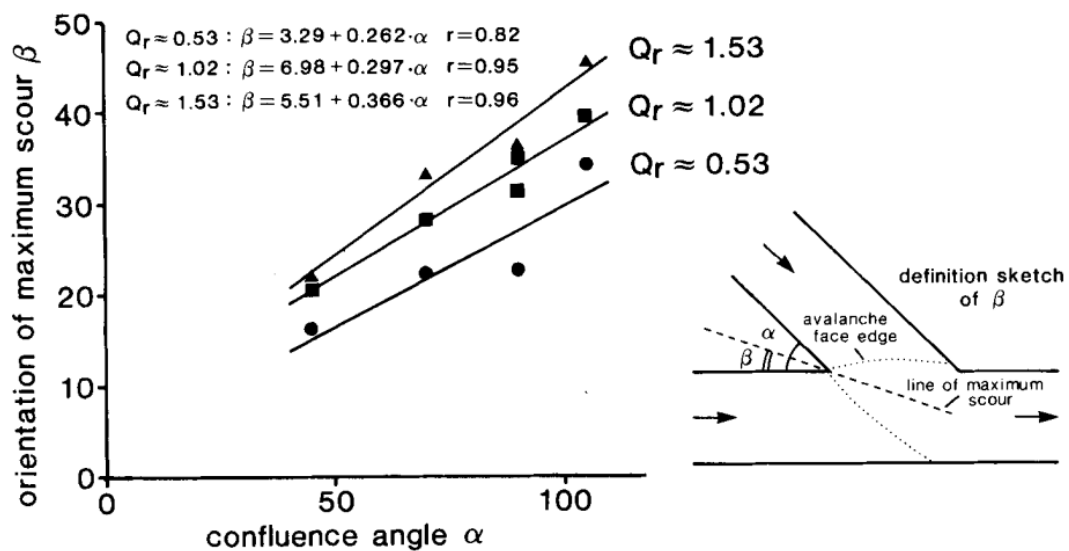
(4)主要試驗成果

試驗成果顯示，河道匯合處的流量比例與匯合角度對河床形態與沉積物分布有顯著影響。首先，匯合處中心形成深潭，其深度隨匯合角度增大而加深，最大深度出現在匯合角度為 105° 時，顯示較大的匯合角度會集中更多的水流能量在中心區域(圖 2-21)。此外分離區內形成顯著的沙洲，其範圍與高度隨匯合角度增大而擴展。在匯合角度為 15° 時，沙洲面積最小，主要局限於分離區內；當角度達到 105° 時，沙洲範圍顯著增加，並向主河道延伸，顯示更大的匯合角度促進了沉積物的分離和堆積。同時，支流與主河道的沉積物在匯合處的分布具有顯著差異，支流沉積物主要集中於分離區，而主河道沉積物則更偏向於下游區域(圖 2-22)。



資料來源：Best, 1988

圖 2-21 深潭深度與不同匯合角度之關係



資料來源：Best, 1988

圖 2-22 不同匯合角度下之沙洲分布情形

● 數值模擬：

1. Impact of Debris and Non-Debris Flow in Flood Damage at River Confluence, Case Study of Miu-Tuva River Confluence (2024)

(1)研究目的

本研究的主要目的在於探討 Miu 河與 Tuva 河交會處的水動力模式，非土石流（即清水，牛頓流體）與土石流（非牛頓流體）兩種流體在洪水事件中造成的影響。由於 2018 年的地震導致該地區土石流頻發，其破壞力遠高於一般水流。因此，本研究旨在分析這兩種流體在淹水範圍、流速上的差異，以期為該河段的災害防治提供優化策略。

(2)研究方法

首先進行水文分析，蒐集了三個雨量站的長期資料，並利用 DEMNAS 地形圖與 2021 年的 LiDAR 地形圖，計算出 2 年重現期(Q_2)與 25 年重現期(Q_{25})的洪水流量歷線（經校準後採用 SCS 法）。接著，本研究使用 HEC-RAS 軟體進行水理分析，針對 Q_2 與 Q_{25} 兩種流量，分別模擬清水和土石流的流動情境。其中，土石流的動態特性是採用 Bingham(賓漢)模型來進行模擬。

(3)參數設定

在模擬參數的設定上，本研究定義了兩種流體。牛頓流體（清水）的參數（以 20°C 水為準）為：降伏應力 $\tau_y = 0 \text{ Pa}$ ，黏滯性 $\mu = 1.005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。非牛頓流體（土石流）則採用 Bingham 模型，設定其含砂濃度為 60%，降伏應力 $\tau_y = 80 \text{ Pa}$ ，塑性黏滯性 $\mu = 1.48 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。水文條件則分別輸入 Q_2 與 Q_{25} 的洪水流量。

(4)研究成果

研究成果顯示，由於黏滯性較高，非牛頓流體（土石流）的流速明顯低於牛頓流體（清水）。然而，因為土石流挾帶了額外的土砂體積，在相同的重現期下，土石流造成的淹水範圍（圖 2-23）和水位深度（圖 2-24），反而大於清水洪水。但研究也發現一個異常現象：在某些地勢較高、水深較淺的內陸區域，清水的淹沒範圍反而比土石流更廣，這是因為土石流具有降伏應力，在推力不足的淺水區會停止流動，而清水則不會。此外，在匯流點，支流（Tuva 河）的匯入會導致主流（Miu 河）在遠離匯流點的另一側流速顯著增加。在 Q_{25} 的情境下，左岸流速高達 6 m/s，產生嚴重的沖刷，並有極高風險導致河流改道沖向左側的舊河道。

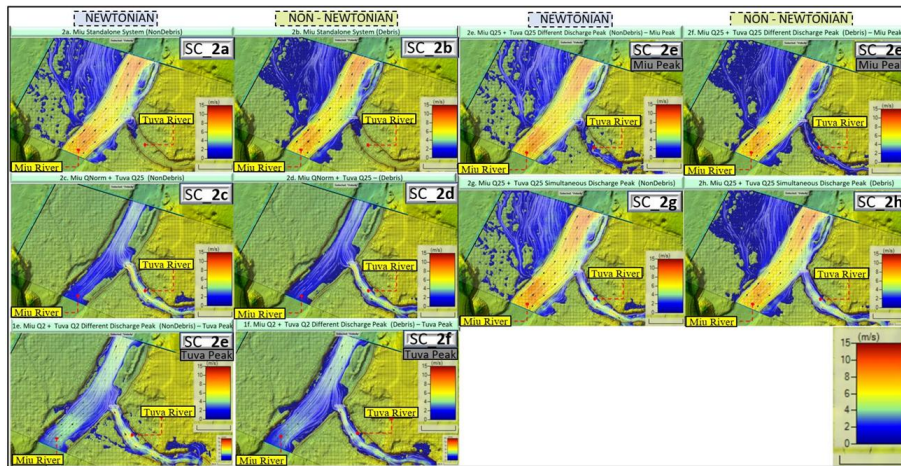


圖 2-23 不同流體下造成的淹水範圍圖

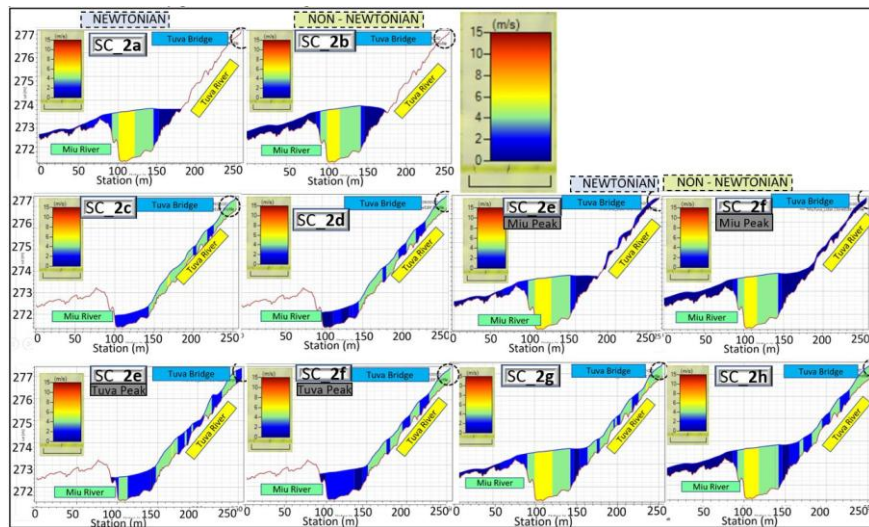


圖 2-24 不同流體下造成的淹水斷面圖

2. Effect of channel confluence on the dynamics of debris flow in the Niutang Gully (2024)

(1)研究目的

本研究的主要目的在於探討土石流的「匯流」現象，如何改變其運動動力特性（如流速、堆積高度）以及災害的衝擊範圍。具體而言，以 2011 年牛塘溝(Niutang Gully)發生的「8.20」土石流事件為觀測基礎，透過數值模擬來分析不同情境（包含匯流的渠道數量與匯流角度）如何影響匯流後的土石流運動特性。

(2)研究方法

主要採用 RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) 這套軟體來進行數值模擬。在地形資料方面，使用 ArcGIS 預處理高程資料，並透過兩次現場調查取得了模擬所需的地面模型與土石流源頭分佈資料。研究設計了兩種模擬情境：首先是針對牛塘溝案例，模擬了包含單一流路、兩流路匯流至三流路匯流的 7 種不同情境；其次，為了專門探討匯流角度的影響，額外設計了水槽試驗模擬如圖 2-25，分析在 10° 、 30° 、 70° 及 90° 等不同角度下的匯流動態。

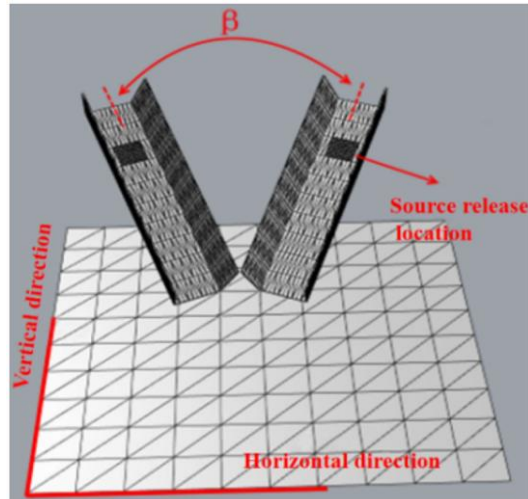


圖 2-25 土石流匯流角度之水槽模擬試驗配置圖

(3) 參數設定

在參數設定上，本研究於 RAMMS 軟體中採用 Voellmy-Salm 流體模型。為確保模擬準確性，團隊透過多次的反覆模擬與校準(圖 2-26)，最終決定了關鍵的動力參數：紊流係數 ξ 設定為 700，乾摩擦係數 μ 設定為 0.09。此外，根據現場侵蝕狀況，在模型中定義了兩種不同的侵蝕區域，高侵蝕區的侵蝕深度參數設為 0.2，低侵蝕區則設為 0.1。

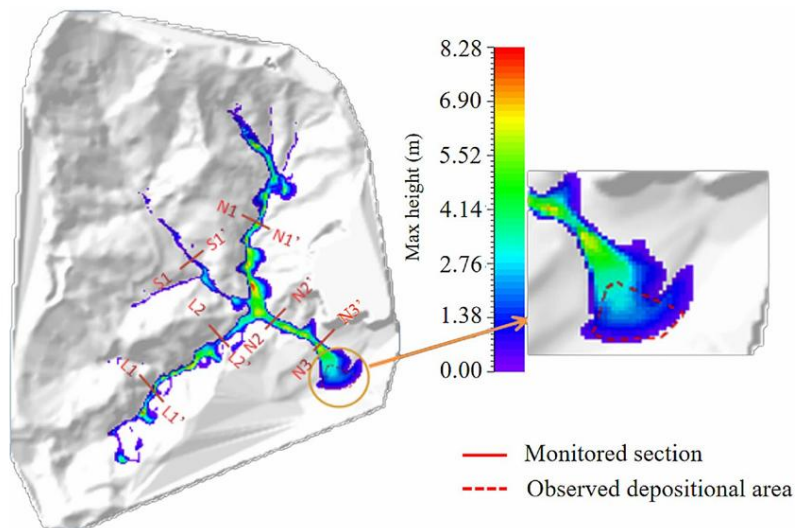


圖 2-26 模擬範圍與觀測範圍之比較

(4) 研究成果

研究成果明確指出，土石流的匯流現象會顯著放大災害規模；越多的渠道同時匯流，下游的堆積高度就越大。其中，「匯流角度」是影響動力行為的關鍵因素。研究發現，隨著匯流角度增加(例如 90°)，土石流的流速會因能量耗損而降低，但堆積高度反而會增加(圖 2-27)。

同時，越大的匯流角度也會使最終的堆積扇形態變得更「窄長」（寬度縮小、長度增加）。此外，研究還觀察到一個反直覺的現象：小角度的匯流（如 A+C）反而可能導致匯流後的流速高於單一流路，而大角度的匯流（如 B+C）則會使流速顯著降低（圖 2-28）。

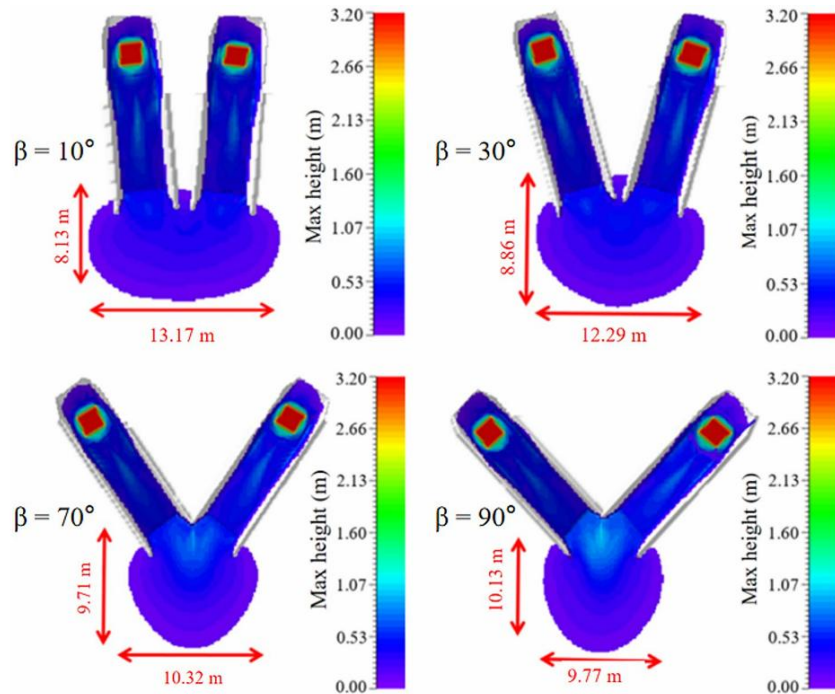


圖 2-27 不同匯合角度下水槽模擬試驗結果

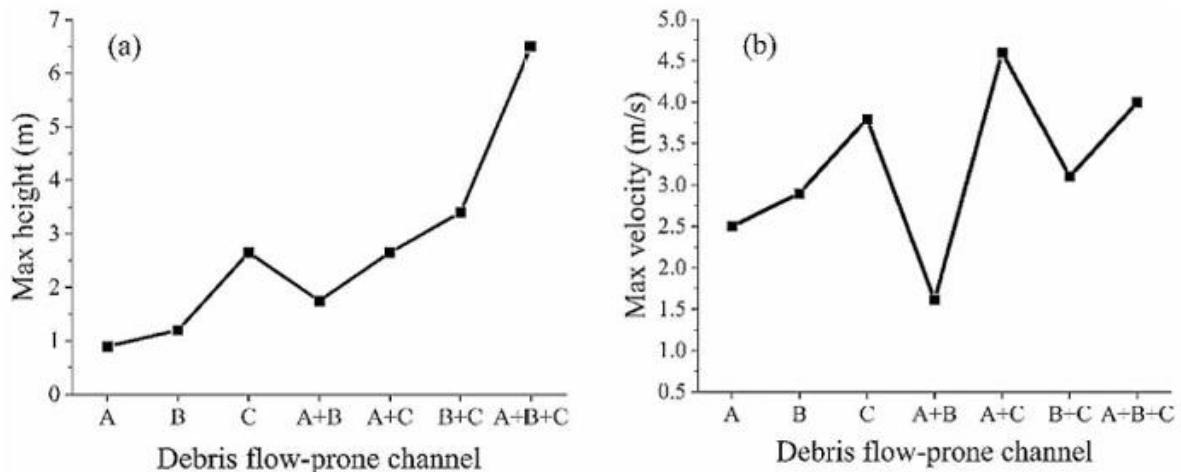


圖 2-28 匯流區土石流最大高度(a)與速度(b)之統計分析

3. 泥石流渠道匯流堆積危險範圍影響的數值模擬研究 (2016)

(1)研究目的

本研究的主要目的在於探討「渠道匯流」對土石流運動堆積特徵及「堆積危險範圍」的

影響。由於自然界中的匯流現象極具破壞性，且現場觀測和傳統模擬的成本高、難度大，本研究旨在利用數值模擬的方法，將模型簡化並專注於分析「渠道匯合角」這單一因素，如何影響土石流匯流後的堆積長度與寬度。

(2)研究方法

本研究採用了 DEM 來建立土石流的運動堆積模型。為了克服傳統 CPU 計算規模有限的問題，利用了 GPU 並行計算技術，以實現大規模土石流匯流的可視化與數值模擬。研究建立了一個虛擬的試驗裝置，包含兩個可變角度的「流通槽」(坡度 30°)和一個平坦的「堆積板」(坡度 0°)如圖 2-29，堆積板上佈有網格以便量測。

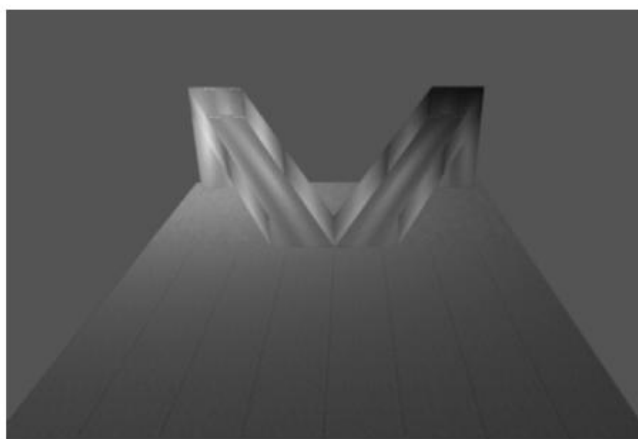


圖 2-29 流通槽圖

(3)參數設定

本研究共設計了 7 組模擬試驗。唯一的變數是匯合角，其角度範圍設定為 20° 至 80° 。其他條件則保持固定，包含兩側流通槽的坡度皆為 30° ，示意圖如圖 2-30，且兩側的初始土石流顆粒數皆固定為 125,000 個，並採用同時釋放的方式進行模擬。

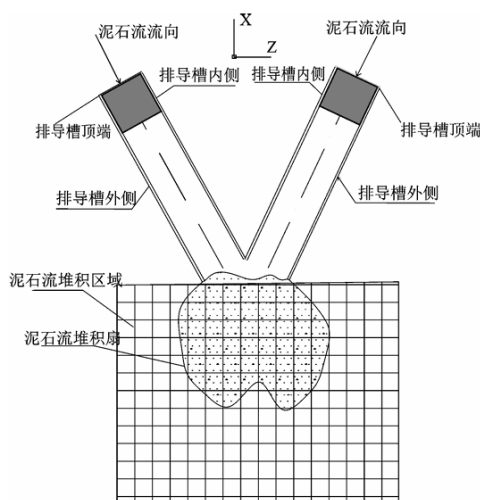


圖 2-30 土石流匯流堆積模擬平面示意圖

(4)研究成果

研究成果顯示，模擬成功再現了土石流的運動特徵，包含匯流初期的堆積、中後期的堆積扇擴展，以及最終因摩擦力而停止(圖 2-31)。研究發現，在僅考慮匯合角的影響下，最大堆積長度隨著交匯角的變化「未發生明顯變化」。然而，最大堆積寬度則與匯合角呈現顯著的「線性負相關」。其成因被歸結為：隨著匯合角增大，兩股土石流之間的「相互頂托作用」加大，導致阻礙作用變大，從而抑制了土石流的橫向擴展，使得最大堆積寬度隨之減小(圖 2-32)。

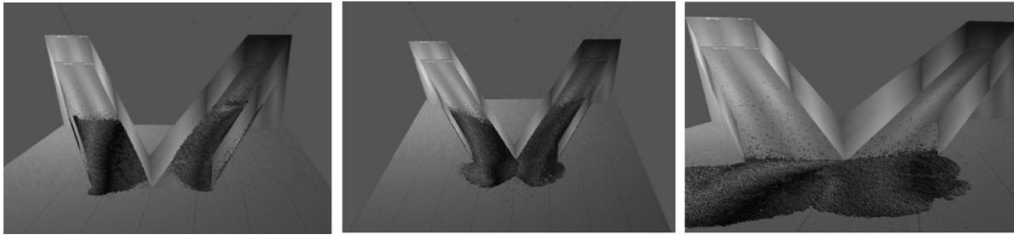


圖 2-31 土石流匯流堆積過程

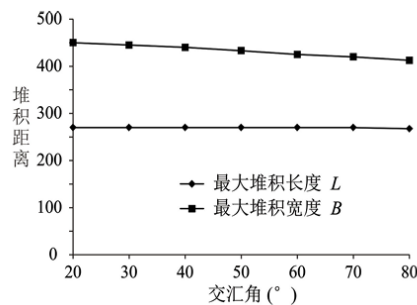


圖 2-32 最大堆積長度、最大堆積寬度與土石流匯合角關係

4. Numerical simulation of deposit in confluence zone of debris flow and mainstream (2011)

(1)研究目的

本研究的主要目的在於建立一個能模擬土石流匯入主流河道時，其匯流區泥砂淤積過程的數值模型。由於汶川地震後產生了大量鬆散土石，當暴雨發生時，這些土石源形成大規模土石流，匯入主流河道後造成的淤積難以被河水沖走，從而引發一系列災害。本研究旨在重現汶川地震後綿竹市清平鎮文家溝的土石流淤積過程，並分析淤積對主流河道路線、流速及水深的影響。

(2)研究方法

本研究採用了「分別模擬、再行耦合」的策略，因為將土石流與主流視為單一系統求解極為困難，因此簡化了兩者間的交互作用機制：假設土石流對水流的主要影響是地形改變，而水流對土石流的主要影響則是「泥砂運移造成的淤積深度改變」。在數值演算法上，導入了「有限元素特徵線分裂法」(Finite Element Characteristic-Based-Split, CBS)，以確保在處理對流項佔主導地位的流體力學問題時，能獲得良好的數值穩定性。

(3) 參數設定

本研究以 2010 年文家溝的土石流事件為模擬案例。土石流模型採用了基於兩相流結構的單一流體模型，其初始流速假設為 5 m/s。主流的上游入口流量設定為 300 m³/s，且輸砂已達飽和，下游邊界水位則設定為 874.5 m。考量計算效率，泥砂粒徑被分為 12 個等級，並設定為 1 公尺厚的可動層。

(4) 研究成果

模擬結果顯示，土石流首先在溝口淤積，並在主流河水的頂托作用下，淤積扇主要朝著主流下游方向不對稱地擴展。土石流的淤積導致主流的流路被推擠，明顯地向右岸偏移。淤積同時造成了上游水位顯著抬高，且主流在匯流口處的流速大幅增加，並在淤積扇的下游邊緣產生擴散流，加劇了對右岸的側向侵蝕。模擬的總淤積量歷線如圖 2-33，淤積速度隨時間逐漸減緩。最終模擬的淤積範圍與厚度分佈如圖 2-34，與現場實測的地形在質性上大致吻合。

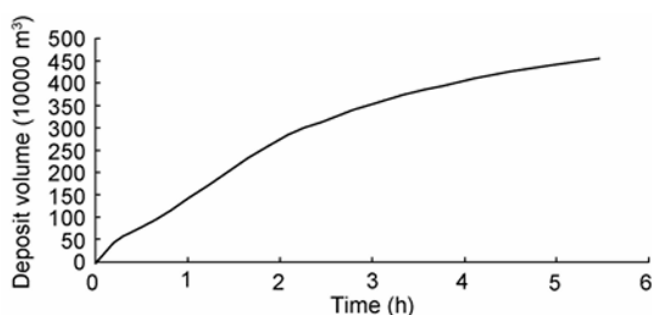


圖 2-33 土石流淤積歷線圖

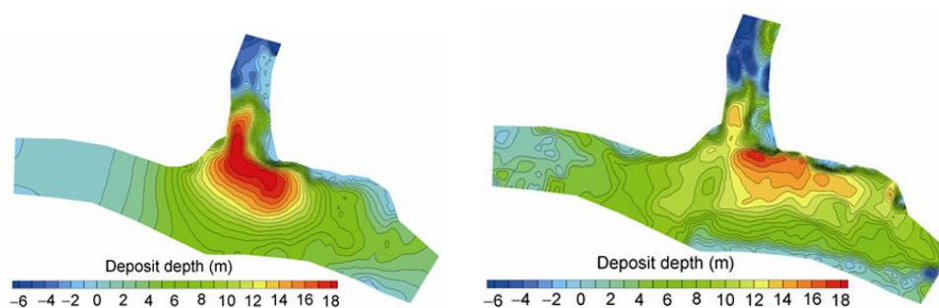


圖 2-34 模擬(左)與現地(右)淤積範圍與厚度分佈圖

● 現場案例：

1. Decadal and Episodic Changes in Morphology and Migration of the Confluence Bar of Two Alluvial Rivers in Louisiana, USA (2020)

(1) 研究區域

本研究的區域位於美國路易斯安那州，具體聚焦於兩條自由蜿蜒沖積河——Amite 河(主流)與 Comite 河(支流)——的匯流口(圖 2-35)。此匯流點鄰近 Denham Springs 市，其河道特性為地

勢平坦、坡度小，匯流口形成的沙洲主要由平均粒徑 D_{50} 約 0.3mm 的純沙組成。

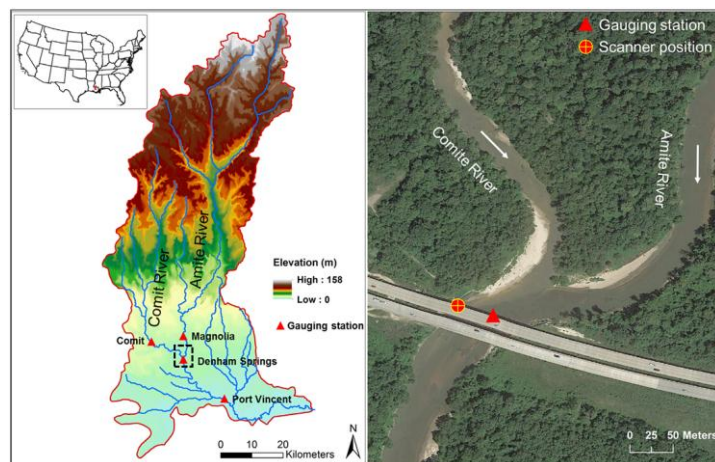


圖 2-35 Amite 河與 Comit 河（支流）匯流口地形圖

(2)研究目的

過去對河流匯流的研究多集中在實驗室或數值模擬，對於匯流口沙洲的真實動態變化，特別是利用現場測量來分析的部分仍然缺乏深入探討。因此，本研究旨在利用遙測影像分析該匯流口「十年尺度」的長期形態遷移；分析匯流口遷移與水文條件之間的關聯以及利用地面雷射掃描（TLS）技術，調查單次事件的洪水如何影響沙洲的短期形態變化。

(3)研究方法

本研究採用了兩種不同時間尺度的分析方法。在「長期(十年尺度)」分析上，團隊蒐集了 2002 年至 2017 年間的六幅遙測影像，透過描繪沙洲上植被區域的邊界來分析其面積變化，並量測匯流角度。在「短期(單次事件)」分析上，團隊使用了高精度的地面雷射掃描技術，在 2017 年的三次洪水事件之前和之後進行了四次掃描，藉此建立高解析度的 DEM，並計算沙洲體積與地表的精確變化。

(4)研究成果

研究成果顯示，這個匯流口具有高度的動態性。在 2002 年至 2017 年的 15 年間，沙洲顯著地向下游遷移了 55 公尺，且匯流角度也從 100° 縮小至 45° (圖 2-36)。這種快速遷移主要發生在支流/主流之流量比較低的年份(<0.25)。更關鍵的發現是，沙洲的成長主要由「中度洪水」驅動；2017 年的一次中度洪水使沙洲的投影面積增加了 114%，體積增加了 68% (表 2-8)。然而，2016 年一場千年一遇的超級大洪水，反而中斷了沙洲的成長，其面積幾乎沒有變化 (圖 2-37)。本研究因此推論：中度洪水是沙洲成長和遷移的關鍵，而超級大洪水反而可能會阻止其生長。

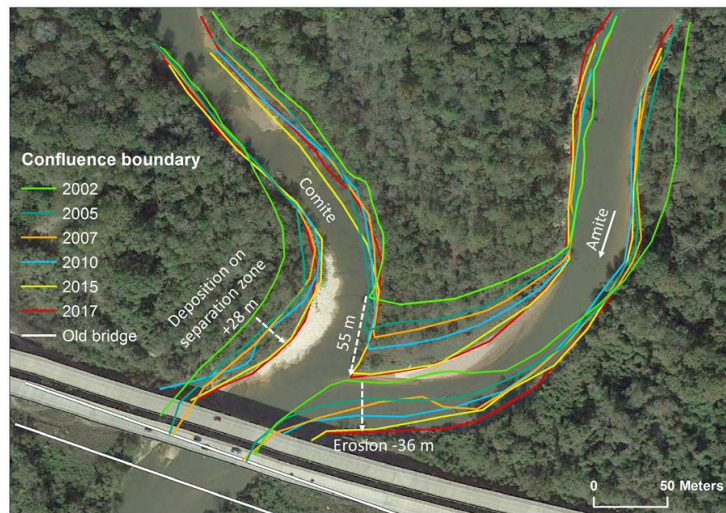


圖 2-36 2002~2017 年河流匯合處地形變化圖

表 2-8 2017 年 3 月 22 日至 9 月 15 日期間匯流口沙洲的表面積與體積變化

Date	Projected bar surface area (m ²)	Area increase, %	Cumulative surface area increase, %	Bar volume (m ³)	Volume increase, %	Cumulative volume increase, %
March 22	320	—	—	202	—	—
March 29	322	1	1	223	10	10
April 28	689	114	115	375	68	86
September 15	701	2	119	501	34	148

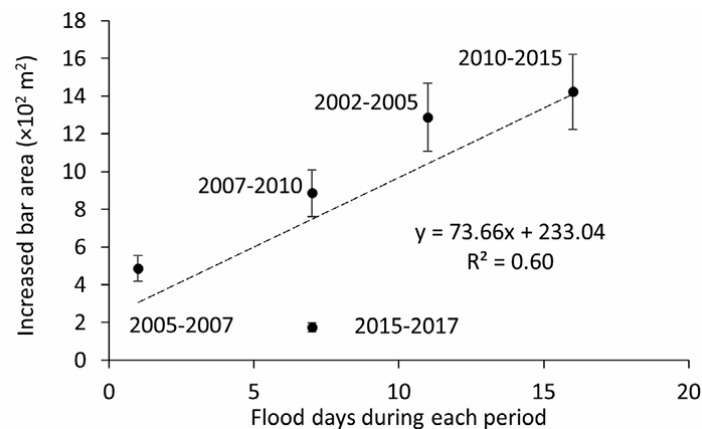


圖 2-37 2002~2017 年五個不同時期匯流口沙洲植被總表面積變化與洪水天數之間的相關性

(二)、主支流匯接處地形特徵之現地案例分析

本研究以高屏溪流域內之多處匯流點為案例，特別是針對荖濃溪支流玉穗溪匯流點，以及旗山溪流域內之支流匯流點進行探討：

荖濃溪支流玉穗溪：

1. 集水區特性

玉穗溪位於高雄市桃源區勤和里，屬於高屏溪流域荖濃溪上游「復興」次集水區，集水區基本資料如表 2-9 所示。玉穗溪集水區北鄰布唐布瓦那斯東溪、南側為東莊溪集水區 (圖 2-38 及圖 2-39)。集水區發源於斯拉巴庫山，集水面積為 1,236.4 公頃，集水區地形高程介於

621~2,795 公尺，平均坡度為 40.3 度，玉穗溪溪流長度為 8.96 公里 (圖 2-40 及圖 2-41)。集水區主要出露岩層為畢祿山層(上游至中游)及潮州層(中游至下游)，並有唯金溪斷層、檜谷斷層通過 (圖 2-42)，唯金溪與檜谷斷層皆為逆斷層，受風化影響，岩體破碎，有利崩塌發育。玉穗溪集水區有 4 處大規模崩塌潛勢區，共 330.95 公頃，主要分布於溪流中游與上游源頭崩塌區 (圖 2-43)。玉穗溪無保全住戶，主要保全對象為下游的台 20 線南橫公路明霸克露橋及上游玉穗農路(已損毀)；山崩地滑地質敏感區共有 116 處，共 257.7 公頃。過去在民國 98 年莫拉克颱風期間，台 20 線勤和至復興路段，五公里長的路段全數摧毀。110 年 0806 豪雨期間，台 20 線南橫公路明霸克露橋處因玉穗溪發生土石流，橋面遭到沖毀，河道溢流土砂也導致道路掩埋中斷。而 106 年 0601 及 0613 豪雨事件、尼莎及海棠颱風事件亦有土砂流出情形 (圖 2-44)。

表 2-9 玉穗溪集水區基本資料

基本資料					
行政區域	高雄市桃源區勤和里		溪流名稱	玉穗溪	
所屬流域	高屏溪	集水區	荖濃溪	次集水區	復興
溪流坐標	X： 228279 Y：2565075(明霸克露橋)			集水面積(公頃)	1,236.4
溪流長度	8.96 公里	平均坡度	40.3	蜿蜒度	1.32
歷史災害 ■有 □無	時間	災害類型	災害原因	災損情況	防砂工程
	98/08/08	土石流	土砂溢流、堆積	橋樑沖毀、中斷	防砂壩
	110/08/07	土石流	土砂溢流、堆積	橋樑沖毀、中斷	護岸
	110/9/12	土石流	土砂溢流、堆積	交通中斷	護岸
	110/10/12	土石流	土砂溢流、堆積	交通中斷	護岸

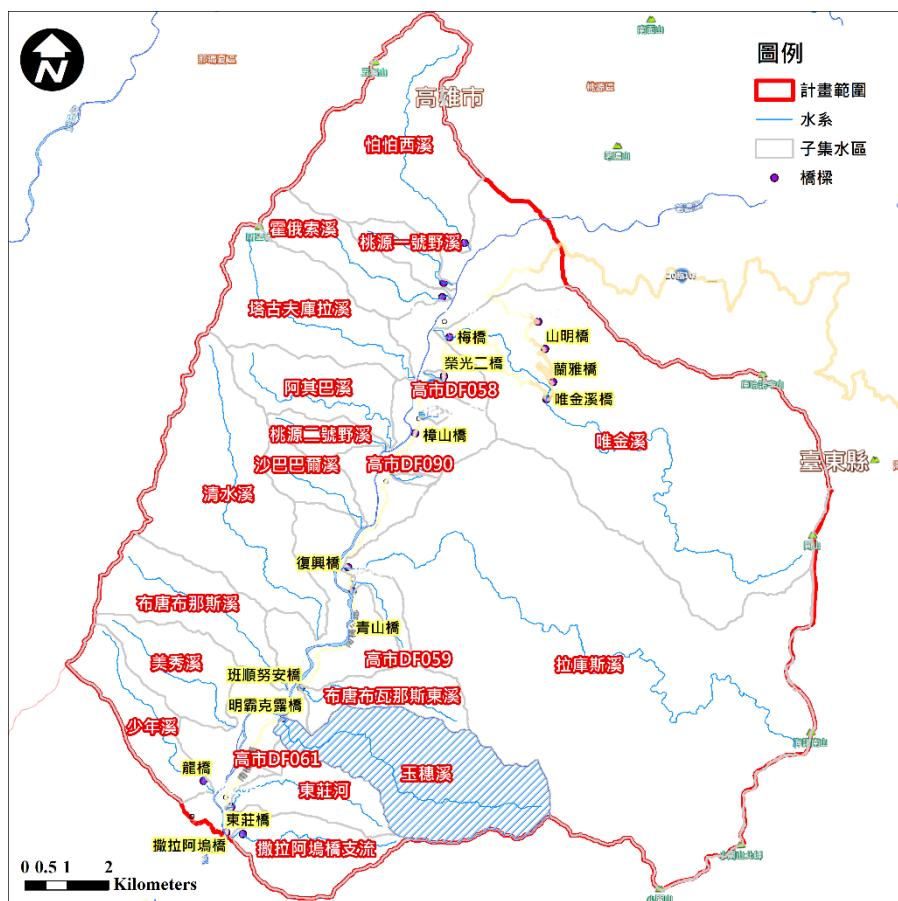


圖 2-38 玉穗溪集水區位置圖

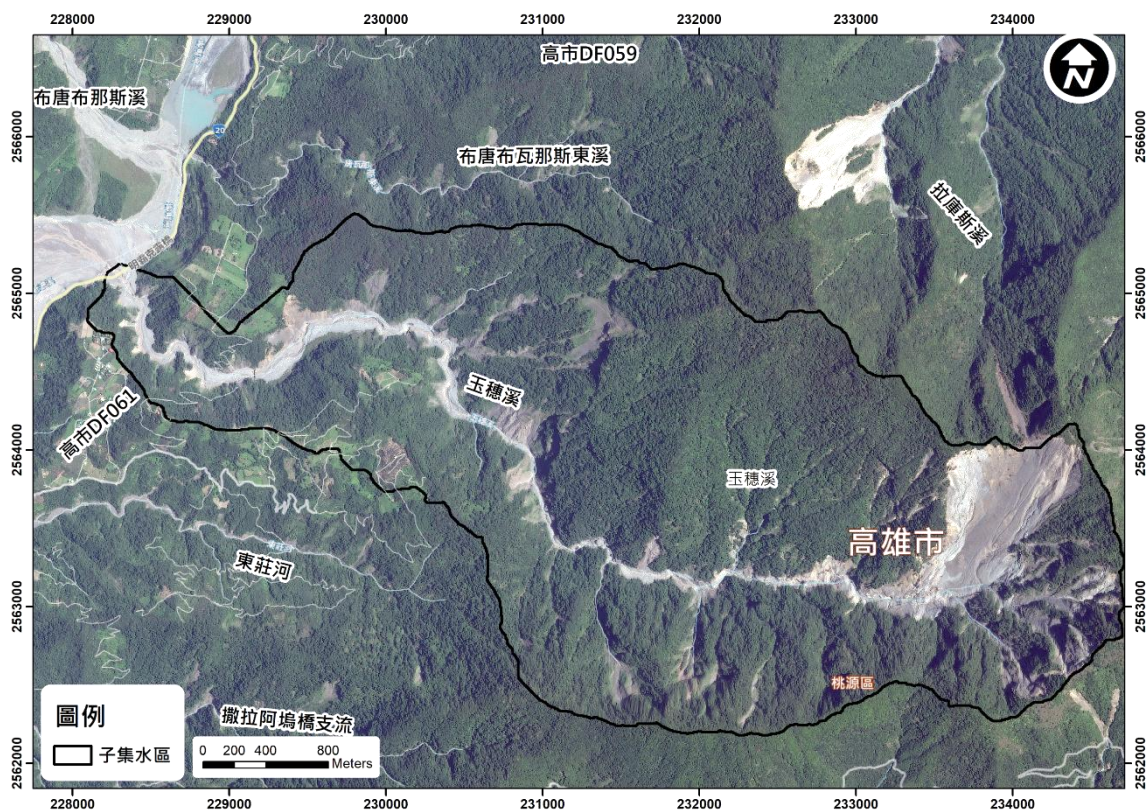


圖 2-39 玉穗溪集水區遙測影像



圖 2-40 玉穗溪集水區地形圖

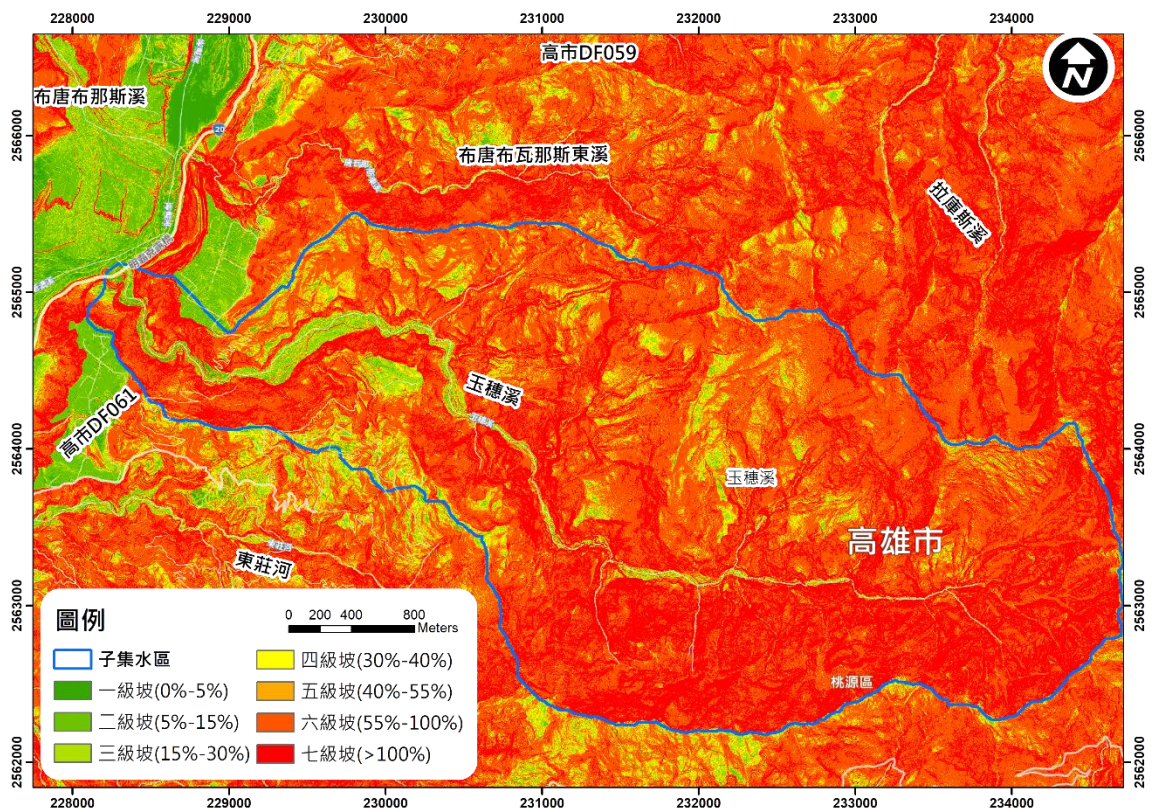


圖 2-41 玉穗溪集水區坡度圖

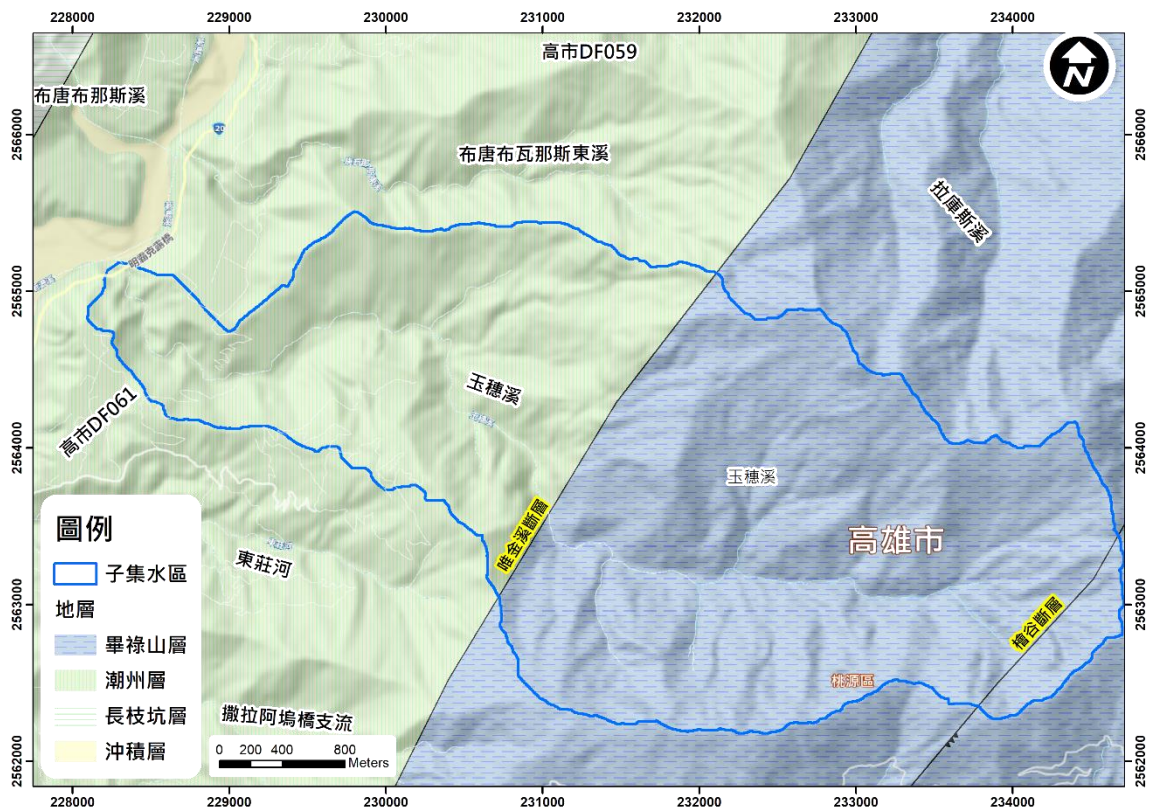


圖 2-42 玉穗溪集水區地質圖

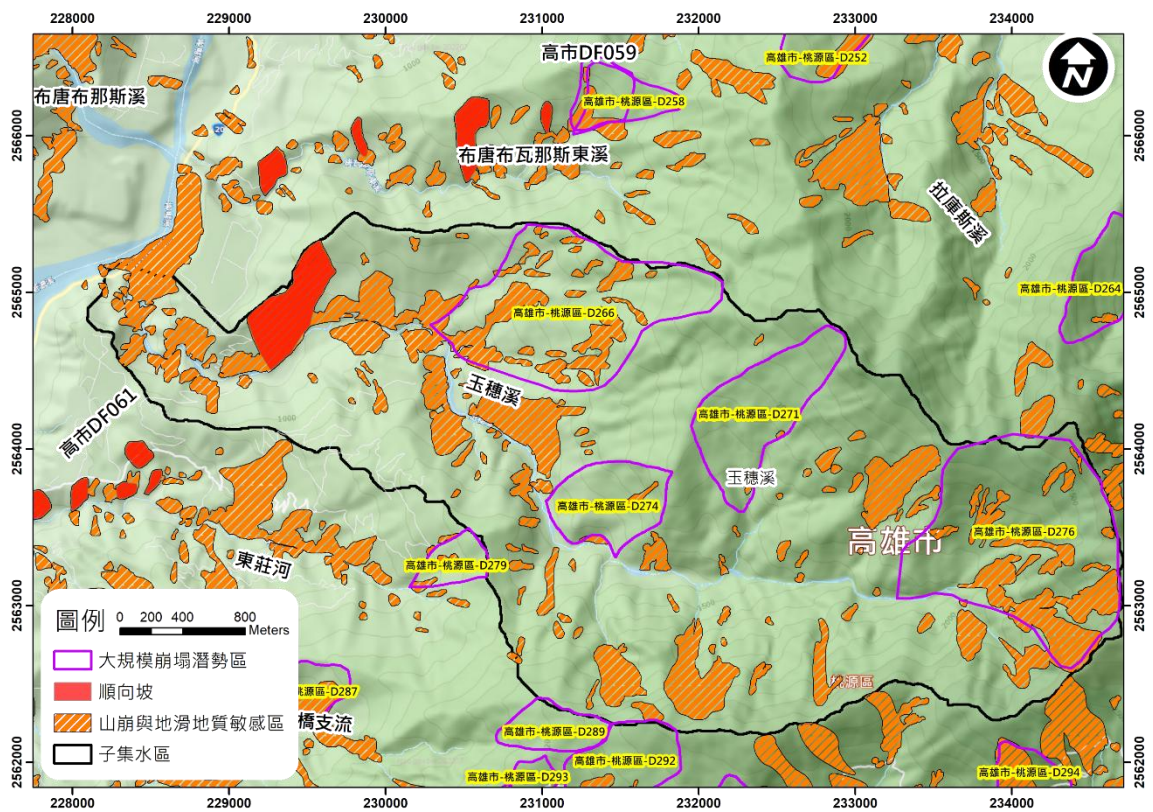


圖 2-43 玉穗溪崩塌潛勢區分布圖



106 年 0601 及 0613 豪雨事件後

106 年尼莎&海棠颱風事件後

資料來源：水土保持局歷史影像平台

圖 2-44 玉穗溪 106 年豪雨事件土砂流出情形

2. 土砂變異特性

玉穗溪集水區與台 20 線交會處為明霸克露橋，為一鋼便橋(原簡易鋼橋已沖毀)，該橋樑位於玉穗溪、布唐布那斯溪及荖濃溪三水系匯流處，該橋樑下游為土石流沖積扇，兩岸邊坡為河階台地(左岸為勤和台，右岸為歐帕喀爾台)、橋樑上游左右岸邊坡為岩盤及崩積土。台南分署(2022)將明霸克露橋設定為集水區土砂變異檢核點。根據現地調查，該橋樑通水淨寬為 90 公尺，樑底高度為 9 公尺，通水斷面為 810 平方公尺，該河段上游淤積約 14 公尺，下游淤積約 4~9 公尺，惟因集水區上游崩塌發生後，仍有大量不穩定土砂堆積河道，每逢降雨事件仍持續發生規模不等之土石流狀況。根據 99 年、105-106 年及 107 內政部光達地形土砂變異侵淤分析結果 (表 2-10)，河道及崩塌地等集水區地表裸露處之土砂變異情形如圖 2-45 及圖 2-46、可知玉穗溪集水區河道沖淤情形變化，於明霸克露橋上下游處主要以淤積為主，自明霸克露橋至玉穗農路檢核點河道主要以沖刷為主，玉穗農路上游處為主要沖刷區域。

表 2-10 玉穗溪 99-107 年土砂變異深度統計表

淤積高度(m)	面積(公頃)	侵蝕深度(m)	面積(公頃)
0~0.3	27.26	-0.3~0	23.18
0.3~0.5	13.38	-0.5~-0.3	10.28
0.5~1	15.56	-1~-0.5	17.61
1~3	18.80	-3~-1	33.73
3~5	8.29	-5~-3	16.84
5~8	6.41	-8~-5	15.08
8~10	1.99	-10~-8	5.66
10~20	1.47	-20~-10	8.93
>20	0.00	<-20	4.04
合計	93.17	合計	135.35

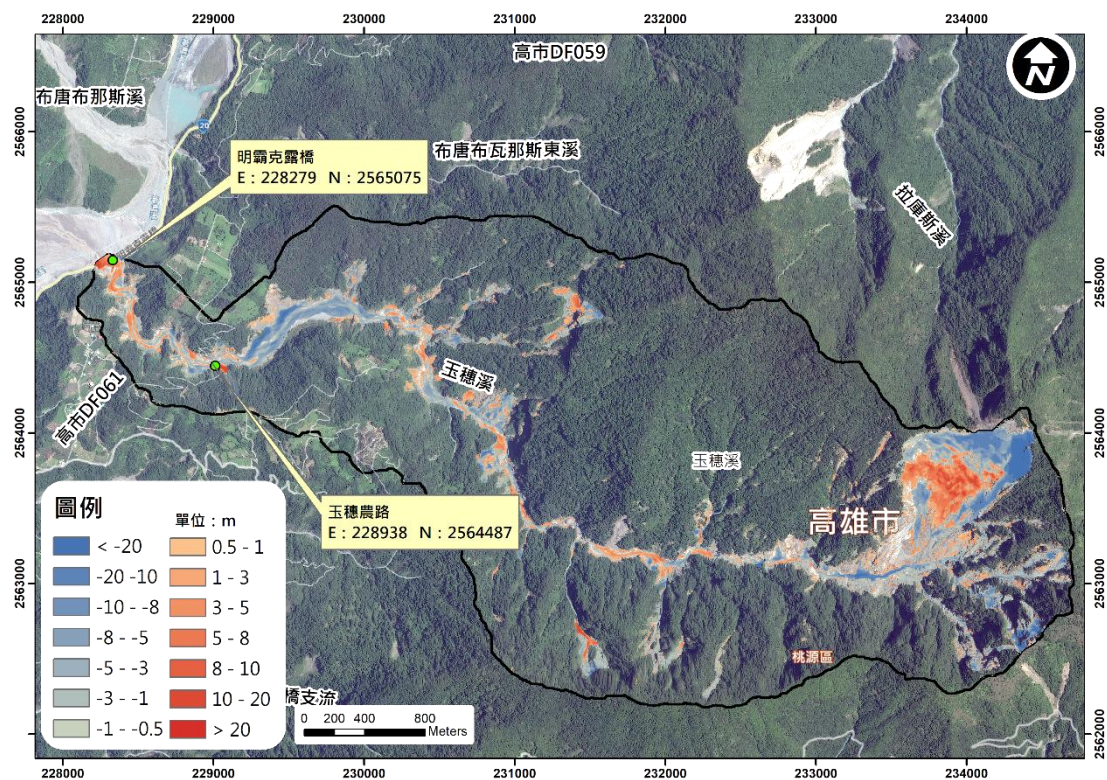


圖 2-45 玉穗溪 99-107 年土砂變異深度分布圖

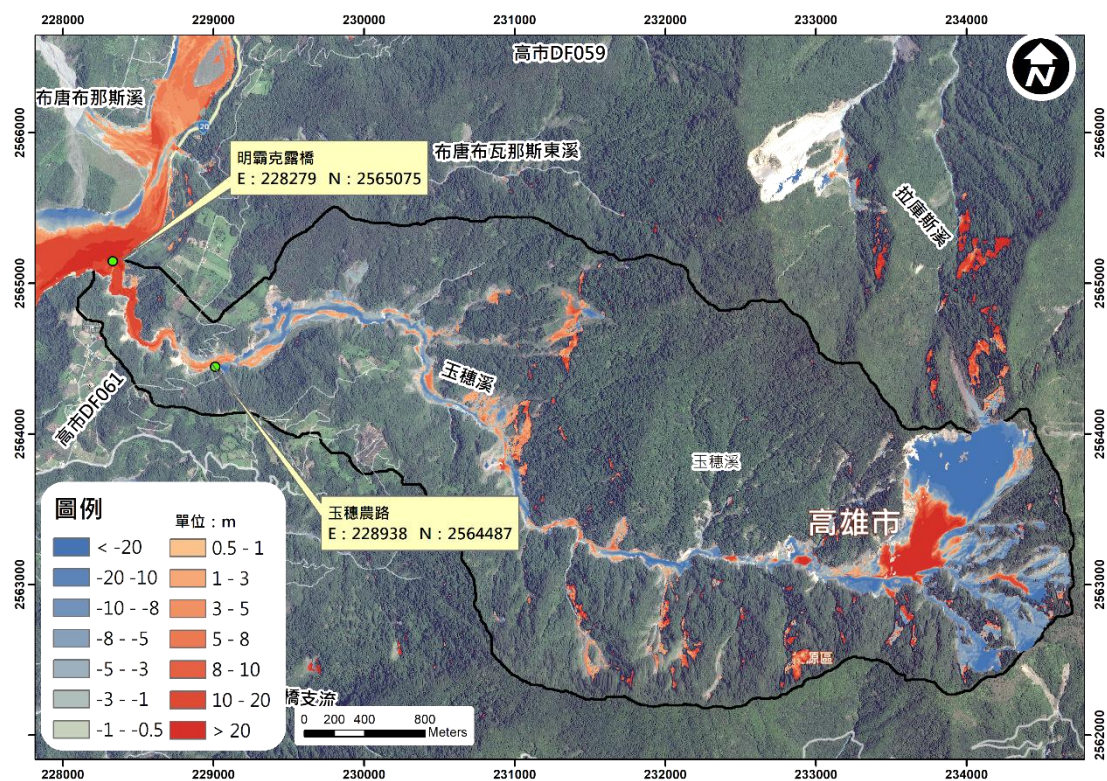


圖 2-46 111 年 3 月 DSM 相減 105 至 107 年 DEM 之土砂變異深度分布圖

荖濃河流域之主支流匯流點：

1. 集水區土砂來源

高屏河流域的集水區土砂來源，主要受到極端氣候事件與脆弱地質條件的雙重影響。2009 年莫拉克颱風為流域帶來歷史性的降雨，直接導致上游集水區觸發大規模崩塌，釋放出數以億計的土砂量。這些土砂成為荖濃溪下游數年內持續性的負載來源，造成主河床基線顯著淤積抬升，使玉穗溪、布唐布那斯溪等支流匯口段呈現高度不穩定的多股瓣狀河道型態，其河床抬升幅度甚至可達數十公尺。

荖濃溪的土砂來源主要來自於這些易風化、高崩塌潛勢的坡面。在極端降雨事件期間，高強度逕流藉由支流的侵蝕作用，將大量細顆粒與粗顆粒土砂迅速帶入荖濃溪主河道，最終匯入高屏溪，共同加劇了整個流域的土砂威脅與河道不穩定性

2. 多時期沖淤前後對比

荖濃河流域內的主支流匯流點，因其水動力與土砂交互作用，是整個水系中最不穩定的地貌熱區之一。此處的動態主要受到上游土砂供給和主流流路擺盪的雙重影響：每一次極端降雨事件，都會引發劇烈的沖淤交替循環。這種循環導致支流的沖積扇不斷堆積、改變地形，並將主流水流推向對岸，造成嚴重的側向侵蝕，成為威脅周邊設施和道路安全的主要因素。

這種持續性、累積性的劇烈變遷，難以透過單次的現場勘查或傳統監測方式完整捕捉。因此，本研究透過以下四個關鍵年份(2009 年莫拉克颱風、2012 年強降雨、2021 年盧碧颱風、2024 年凱米颱風)的高解析度衛星影像前後對比(圖 2-47)，分析匯流處之長期地貌變化。這些多時序影像的對比，將幫助我們量化並呈現匯流口地貌在極端氣候衝擊下，累積且不可逆的變遷過程，以作為評估後續防災與工程設計的依據。

自 2009 年莫拉克颱風過後，本區地質狀況極為不穩定，布唐布那斯溪、玉穗溪及鄰近集水區不斷有大量土砂崩落沖刷並淤積至荖濃溪主河道，且使布唐布那斯溪沖積扇之琉球平台地貌持續改變。2024 年 07 月 22 日強颱凱米颱風挾帶強降雨且持續對台 20 線 92k~99k 路段造成危害，透過 2009 年莫拉克颱風至 2023 年卡努颱風期間的災害事件探討，並延伸至 2024 年颱風(如凱米、山陀兒、康芮及天兔颱風)對研究區域的影響。可以發現布唐布納斯溪沖積扇之琉球平台是一個地形變動熱區，特別是在颱風及豪雨事件後，地表侵蝕、沉積物搬運及沉積變化成為研究的重點。

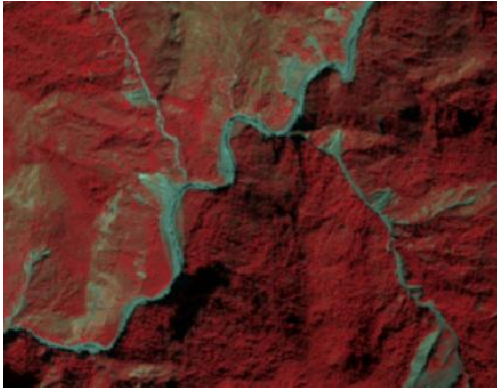
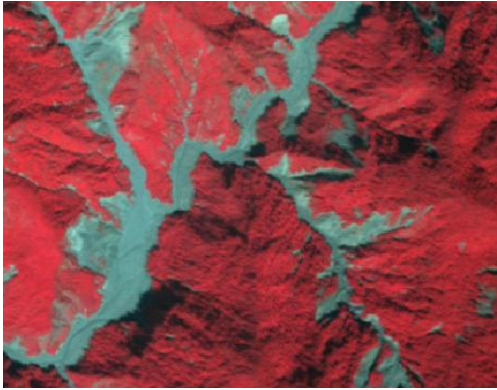
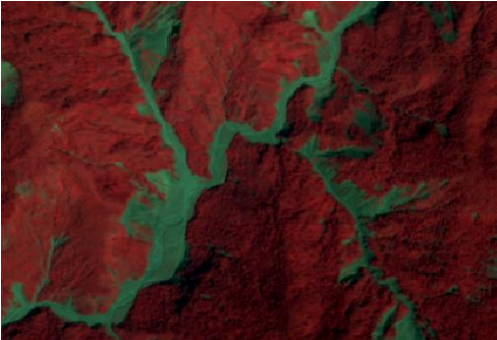
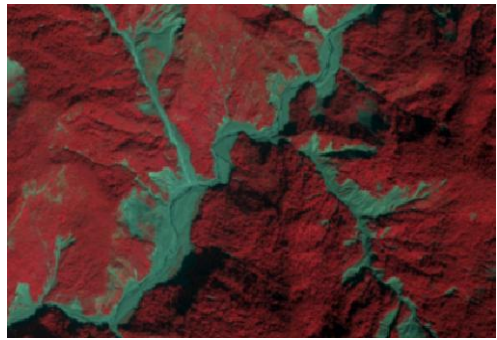
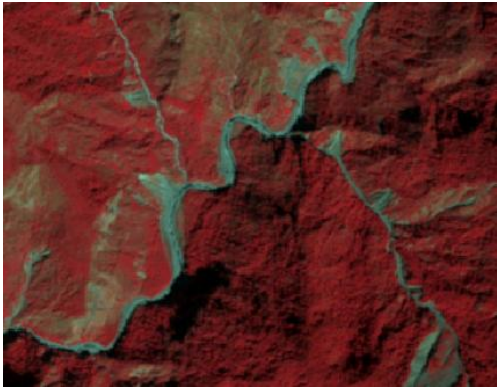
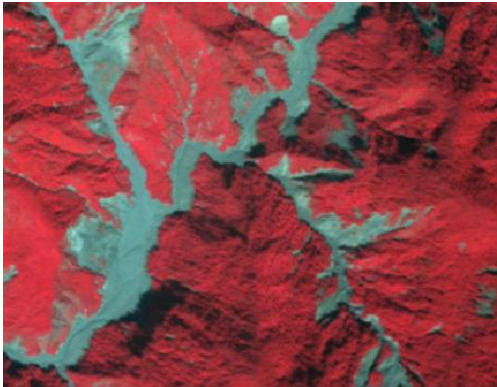
	
莫拉克颱風前	莫拉克颱風後
	
2012 強降雨前	2012 強降雨後
	
盧碧颱風前	盧碧颱風後
	
凱米颱風前	凱米颱風後

圖 2-46 荖濃河流域匯流處多時序衛星影像

(三)、主支流匯接土砂運移試驗設備調整測試

本計畫擬採用之玻璃水槽試驗設備目前位於國立成功大學水利及海洋工程學系一樓水砂實驗室，其中包含主河道水槽(長 1,000 cm；寬 100 cm；高 50 cm)及支流水槽(長 290 cm；寬 25 cm；高 45 cm)，支流最大可調整角度為 30° ，主支流匯接角度包含 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 等 6 種角度。主流上游包含供水供砂設備，支流上游為水砂混合體供應箱。本計畫期末階段已完成主流渠道及支流渠道接合程序(圖 2-47 ~ 圖 2-51)，第二年度即可進行後續測試及試驗工作。



圖 2-47 本計畫擬建置應用之玻璃水槽試驗設備示意圖(支流水槽)



圖 2-48 本計畫擬建置應用之玻璃水槽試驗設備示意圖(主支流匯接)



圖 2-49 本計畫擬建置應用之玻璃水槽試驗設備示意圖(主支流匯接)



圖 2-50 本計畫擬建置應用之玻璃水槽試驗設備示意圖(支流上游水砂攪拌筒)



圖 2-51 本計畫擬建置應用之玻璃水槽試驗設備示意圖(支流上游水砂攪拌筒)

參考文獻

1. Best, J.L., Reid, I. (1984). "Separation zone at open-channel junctions" *J. Hydraul. Eng.*, 110(11): 1588-1594.
2. Best, J.L. (1988). "Sediment transport and bed morphology at river channel confluences" *Sedimentology* 35, 481-498.
3. Dang, C., Cui, P., Cheng, Z. (2009). "The formation and failure of debris flow-dams, background, key factors and model tests: case studies from China" *Environ Geol* 57:1901–1910.
4. Guillén-Ludeña, S., Franca, M.J., Cardoso, A.H., Schleiss, A.J. (2016). "Evolution of the hydromorphodynamics of mountain river confluences for varying discharge ratios and junction angles" *Geomorphology* 255, 1–15.
5. Leite Ribeiro, M., Blanckaert, K., Roy, A.G., Schleiss, A.J. (2012). "Flow and sediment dynamics in channel confluences" *Journal of Geophysical Research Earth Surface* <https://doi.org/10.1029/2011JF002171>.
6. Théo St. Pierre Ostrander, Johannes Holzner, Bruno Mazzorana, Maria Gorfer, Andrea Andreoli, Francesco Comiti, Bernhard Gems (2023). "Confluence morphodynamics in mountain rivers in response to intense tributary bedload input" *Earth Surface Processes and Landforms*, 48:2277–2298.
7. Wang, X., Yan, X., Duan, H., Liu, X. Huan, E. (2019). "Experimental study on the influence of river flow confluences on the open channel stage–discharge relationship" *Hydrological Sciences* 64.
8. Yu, B., Yang, C., Yu, M. (2022). "Experimental study on the critical condition of river blockage by a viscous debris flow" *Catena* 213, 106198.
9. 「荖濃溪上游集水區(玉穗溪至梅山口段)大規模土砂流出風險量化與跨域對策研擬」(2022)，農村水保署臺南分署。

附錄、期末審查回覆及辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
1.	主、支流匯流之試驗條件，是否已涵蓋實際山區常見之匯流角度與供砂比例？	本計畫擬規劃之主支流匯接角度包含 0、15、30、45、60、75 度等 6 種角度，應可涵蓋實際山區常見之匯流角度。
2.	主、支流匯流之實驗研究並非近年始有。	主、支流匯流之實驗雖非近年始有，但對於支流多次土砂流出造成之影響探討仍然較少。
3.	試驗條件是否符合實際山區常見之匯流角度與供砂比例？	如前回覆，本計畫擬規劃之主支流匯接角度包含 0、15、30、45、60、75 度等 6 種角度，應可涵蓋實際山區常見之匯流角度。
4.	當匯流角度下，支流進入主流之腹地寬度足夠時，是否可透過開挖新河道，以解決支流正交主流之問題(如布唐布納斯溪案例)？	建議後續可以實驗或數值模擬方式探討不同方案成效。
5.	支流進入主流之方式，除以平面方式將支流依不同角度導入主流外，是否可考量其他工法，例如以洩洪道水躍方式進入主河道，以避免支流土砂直接束縮主流河道，進而影響輸砂效率(如玉穗溪案例)？	建議後續可以實驗或數值模擬方式探討不同方案成效。
6.	請說明「不同土砂運動狀態」之定義，建議先行釐清。	不同土砂運動狀態係指土石流、高濃度挾砂水流及一般河道輸砂。
7.	承上，其所對應之試驗設計為何？	不同土砂運動狀態係依據泥砂粒徑在不同坡度區間表現之運移型態予以分類。
8.	試驗中是否有將河床粒徑分布納入試驗因子？	泥砂粒徑為試驗控制因子之一。
9.	試驗參數與實際現地參數在尺度上之差異，係如何加以考量與轉換？	本計畫僅為定性之主支匯流基礎試驗，尚無考量不同尺度之縮尺轉換。