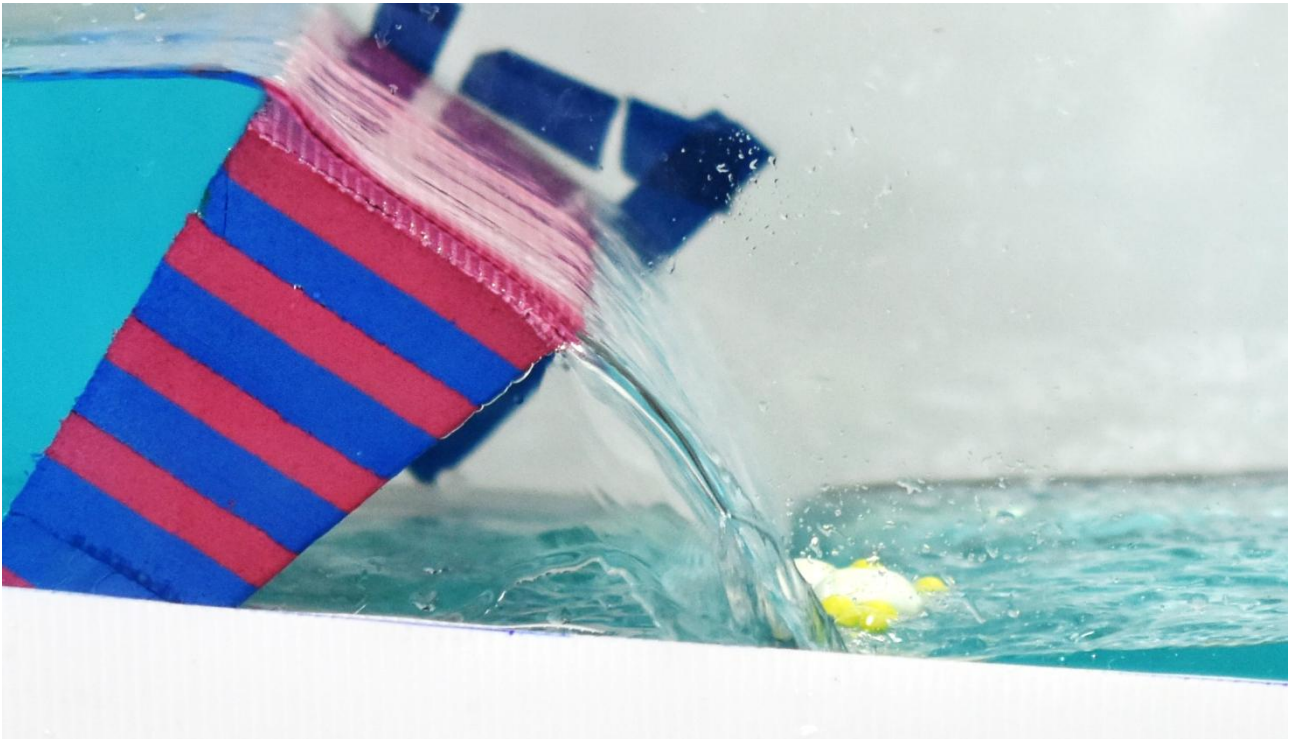


花蓮縣第 66 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書



(圖片來源：作者自攝)

科 別：地球科學科

組 別：國中A組

作品名稱：流漣望翻！—溪流·水躍·翻滾流

關 鍵 詞：水躍現象、翻滾流、福祿數

編 號：

目錄

1. 摘要	3
2. 壹、前言	3
3. 貳、研究設備及器材	5
4. 參、研究過程及方法	6
5. 肆、實驗結果	14
6. 伍、討論	18
7. 陸、結論	18
8. 柒、參考資料及其他	19

摘要

本研究旨在探討溪流中翻滾流（水躍現象）的形成條件與能量耗散特性，利用自行設計的微觀模型，使用沉水馬達、超音波感測器及ESP32晶片組進行數據監測，透過福祿數（Fr）、能量耗散率（ ΔE ）及淹沒比等參數，系統化分析翻滾流特性。本研究將實驗分為三組分別是測試3度、5度、7度何者最佳的坡度組；探討上、中、下游河床石頭配置的石頭組及將土石流代進翻滾流的土石流組。實驗結果顯示，7度坡度具最高能量耗散率，為形成翻滾流的最佳角度。石頭組實驗中，中游放置障礙物的耗散率最高達80.26%，顯著優於其他位置，顯示中游翻滾流效果較佳；而土石流組數據則呈現相對穩定的狀態。

壹、前言

一、研究動機

在今年（2025年）的7月8日，一件憾事發生。兩位新北市的消防員，為了拯救玩SUP立槳而闖入禁區水域的民眾，在新店 北勢溪殉職。消息一傳出，立馬引起了社會嘩然。然而不只這起事件，我們居住的花蓮縣依山傍海、溪流水系發達，過去也曾多次發生因意外而命喪水域的案件。這促使我們思考，到底是哪種水流竟具有如此強大的能量？

而後來，是在一次溪流的探訪中，我們才實地於花蓮的白鮑溪觀察到了翻滾流的威力和危險性。因此我們想藉由這次的研究，來模擬翻滾流的狀態，針對地形坡度及其他因素進行深入探討；若能找出其中的法則，對於山區防砂壩設計又或者其他河流的消能處理都能有實際的參考價值，在颱風或洪災發生時能有效地防範。因此我們決定要投身探究，希望能藉由實驗揭開其中的奧秘。

二、研究目的

- (一) 臨界流模擬水躍現象，藉由微觀模型所產生的翻滾流觀察各臨界流間的轉換。
- (二) 以福祿數（Fr）與能量耗散率（ ΔE ）值之變化，尋找能形成翻滾流的最佳地形坡度。
- (三) 以福祿數（Fr）與能量耗散率（ ΔE ）值之變化，並套用最佳角度，研究上、中、下游河床排列型態對產生翻滾流的影響。
- (四) 以福祿數（Fr）與能量耗散率（ ΔE ）值之變化，並套用最佳角度，模擬土石流和翻滾流之間的關係。

三、 文獻探討

翻滾流（Hydraulic Jump）是水躍現象的一種，根據施養正（2025）發表的文章也說明了此現象通常發生在水壩、攔河堰、落差大或河床突然變淺的地方，水流在經過這些地形後會形成一個向後翻滾的強大水旋，將人或物體不斷捲入水下，極難脫困。

在地型環境的研究方面，龔任義（2000）對新店溪地形進行系統性分析，指出溪床坡度與地形傾角的變化是影響水流狀態的關鍵因素；游牧笛（2014）亦針對新北市大豹溪河道地形與遊憩環境進行調查，發現特定地形坡度條件下極易形成危險漩渦區。我們因而受到啟迪，是作本研究的實驗A以應證文獻並找尋最佳角度。

楊康廷等（2021）曾藉由放置不同順序、組合及密集度的石頭，來研究漩渦的形成。此種方式做為變因也引發了我們對實驗B的構思，決定以類似的作法進行實驗。

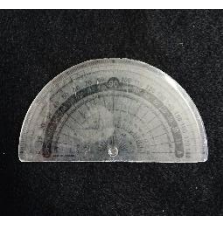
同時，依據于可等（2019）的研究，提到了土石流的諸多要件包含充足水分、豐富堆積物及足夠坡度等等；更以土壤含水量為依據，進一步探討與坡度的關係。作者也以木製渠道製作水流系統，呈現土石流的樣態。然而，該研究主要聚焦在較宏觀的大地區降雨、土壤含水量及地形崩塌之上，並無細緻地將每一發生區段分開觀察。也因此我們認為，若能放大檢視土石流，並同時代入土石流從山區暴漲後流至下游、產生翻滾流的情境，必能以另一種視角進行觀測（實驗C）。最終，偕以上三組內容延伸至福祿數、能量耗散率及淹沒比……的變化，數據化呈現來探討對翻滾流之影響。

貳、研究設備與器材

一、 主要器材

玻璃水缸一個、200cm水管若干捆、最高流量為每小時4200公升之沉水馬達一顆、最高流量為每小時8000公升之沉水馬達一顆、止瀉帶三捆、流量計兩枚、超音波感測器兩枚、AI-Thinker ESP32晶片組一組、量角器一個、巧拼墊若干片、BB彈一罐、木工夾四支、強力黏著劑一支、電腦一台、石頭數顆、黃土粉若干包、粗／細砂礫若干公斤。如下表。

表2-1.主要實驗器材

				
圖A.玻璃水缸	圖B.200cm水管 (裁切過後)	圖C. 4200L/h 沉水馬達	圖D. 8000 L/h 沉水馬達	圖E.止瀉帶
				
圖F.流量計	圖G. 超音波感測器	圖H. AI-Thinker ESP32晶片組	圖I. 量角器	圖J.巧拼墊
				
圖K.BB彈	圖L.木工夾	圖M.強力黏著劑	圖N. 電腦	圖O.石頭
				
圖P.黃土粉	圖Q.粗／細砂礫			

(上表2-1圖片均為作者自攝)

二、 應用程式

Arduino、Visual Studio Code及Tinkercad。如下表。

表2-2.實驗應用程式

		
圖R. Arduino (來源：取自官網)	圖S. VS Code (來源：取自官網)	圖T. Tinkercad (來源：取自官網)

參、 研究過程與方法

一、 名詞解釋

(一) 福祿數

福祿數 (Froude number, 簡稱Fr) 為明渠流體力學中定義流態特徵的重要無因次參數, 其物理本質代表流體慣性力 (Inertial Force) 與重力 (Gravitational Force) 之比值的平方根。福祿數亦可視為流速與擾動傳播速度之比, 或判定流場能量分佈與水躍發生條件的核心指標, 福祿數的變化直接決定了明渠流系統中動能與位能的轉換效率。

(二) 臨界流

臨界流 ($Fr = 1$) 為比能 (Specific Energy) 對於給定流量取極小值之狀態, 此時流速與波速相等。

(三) 超臨界流

超臨界流 ($Fr > 1$) 則具備高流速與淺水深特性, 動能佔主導地位, 擾動僅能向下游傳遞, 其狀態完全取決於上游控制。

(四) 亞臨界流

亞臨界流 ($Fr < 1$) 指流速小於重力波速, 水深大於臨界水深, 擾動可向上游傳遞, 受下游邊界條件控制。

(五) 沸騰線

沸騰線指水躍發生時, 超臨界流與翻滾流沸騰區的分流點交接的橫向邊界, 該線標誌著動量高度集中的快速流與低速紊流循環區的銜接界面。由於速度在此處急遽變化, 導致劇烈的氣液夾帶現象, 使水面呈現如沸騰般的劇烈翻騰並促使白泡區

的泡沫生成。沸騰線的位置決定了能量耗散的起始座標，而它的波動特性反映出水躍的穩定性與紊流尺度的變化。

(六) 明渠流

明渠流是指流體在水道中的流動，受重力驅動而產生之流動現象，可依據福祿數區分為亞臨界、臨界與超臨界流。

(七) 共軛水深

當水流從超臨界流突然轉變為亞臨界流時，水面會產生躍升，此時躍前水深 (h_1) 與躍後水深 (h_2) 互為共軛水深，表水躍發生前後兩個水深之間的特定對應關係。將躍前水深定義為 h_1 (超臨界流區)，躍後水深定義為 h_2 (亞臨界流區)，兩者雖然水深不同，但在同一渠道斷面條件下 (此作為河道寬)，具有相同的比力，因此形成力學上的對應平衡關係。 h_1 越小、流速越快，則對應之 h_2 越大，水躍翻騰越劇烈，能量耗散也越顯著，共軛水深是分析水躍特性與翻滾流強度的核心參數。

(八) 淹沒比

淹沒比 (Submerged Ratio, S) 表示尾水深度 (下游水深, h_2) 與理論共軛水深 (h_2) 的比值。S > 1 時屬淹沒水躍：水躍被淹沒，表面波浪較小，但水躍主體結構改變。而 S = 1 時是自由水躍：實際尾水深度恰好等於共軛水深，躍首在臨界點。

淹沒比是描述水躍淹沒程度的無因次參數，定義為躍後水深 h_2 與躍前水深 h_1 之比值。

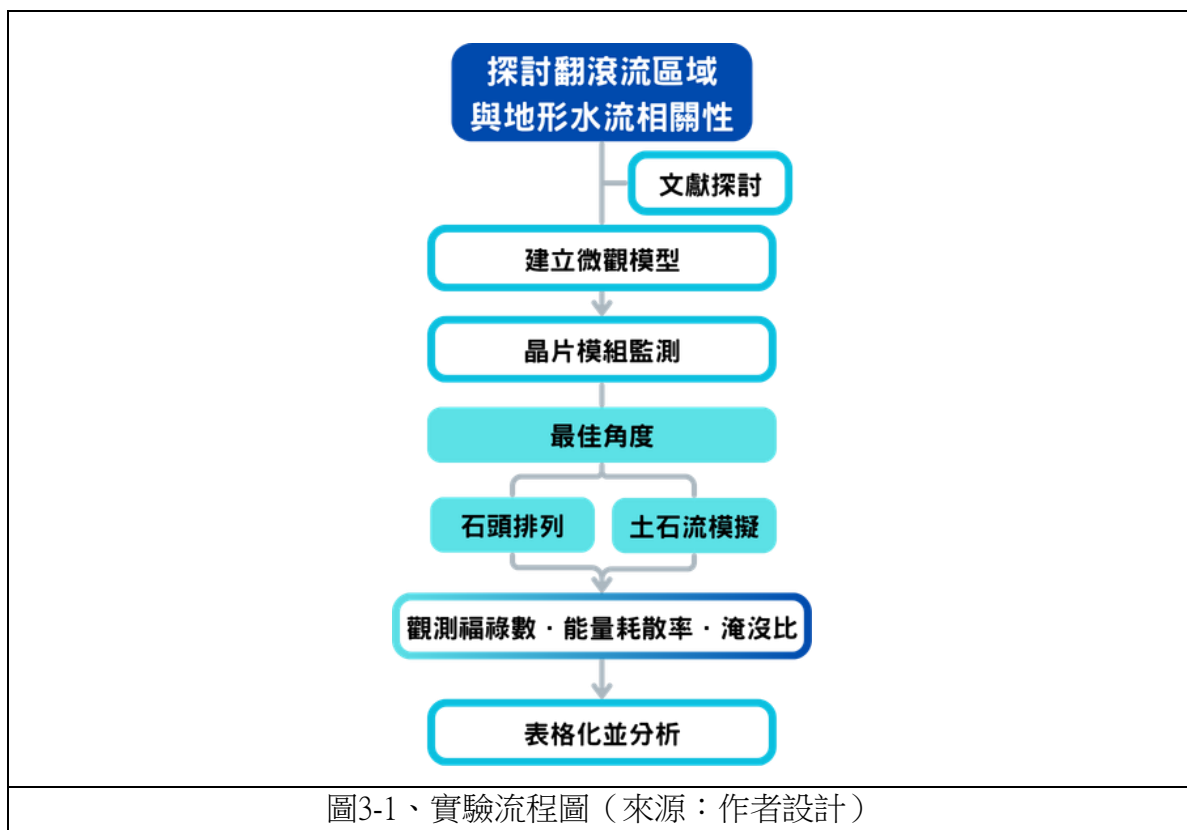
當下游水深 (h_2) 遠高於上游躍前水深 (h_1) 時，淹沒比數值越大，代表水躍被下游水體壓制的程度越高，形成淹沒式水躍 (Submerged Hydraulic Jump)。此時翻滾流的回流旋渦受到抑制，表面紊動減弱，能量耗散效率下降。淹沒比是判斷水躍型態與翻滾流強度的重要指標，對於評估河川危險區域及工程消能設計均具有關鍵參考價值。

(九) 水躍現象

水躍現象是在明渠流中，當水流由超臨界流轉為亞臨界流時，在轉換處出現水流方向迴旋、強烈紊流與能量耗散的現象，表面常見翻捲或泡沫。水躍現象是開放通道流體力學中重要的非線性流況轉換現象，通常發生於水流因速度、能量或外部邊界條件的差異而跨越臨界流態時。在此過程中，水流由原本以慣性作用為主的快速流，轉變為受重力、壓力與紊動主導的緩速流，並在轉換區域形成明顯的水面抬升、強烈混合與能量耗散。水躍在工程領域中具有重要應用價值，例如水壩下游、

消力池與渠道坡降銜接處，都可能利用此現象降低流體動能、穩定下游沖刷情形與改善水利建築耐久性。

二、 **實驗流程圖**：我們根據研究的目的，設計了以下的實驗。



三、 **實驗補充及變因**

(一) 編號

本研究共有三項實驗，分別為研究地形最佳傾斜角度的坡度組、擺放石頭的石頭組和土石流的土組。為清楚分別各組，我們將各組實驗編號，採用各變因的首字命名較直觀。坡度組另外增加了調整的角度、石頭組也區分上游、中游、下游。例：A組坡度5度的第一次小實驗為坡5-1；而土石流第二組小實驗為土1，所有組別如下表4-1。

表3-1.分組編號

實驗A.坡組（角度）	坡3-1~3-5 （3度）	坡5-1~5-5 （5度）	坡7-1~7-5 （7度）
實驗B.石組（石頭擺放）	石上1~5	石中1~5	石下1~5
實驗C.土組（土石流）	土1~5		

(二) 實驗變因

三組實驗之控制變因均為：

1. 水量
2. 流速
3. 高度差
4. 紀錄時間
5. 實驗器具。

而三組實驗之應變變因均為：

1. 福祿數變化
2. 能量耗散率
3. 淹沒比

四、 實驗準備

(一) 微觀模型

為了能清楚觀測水躍現象的運行，我們訂製了一個長寬高為150*30*20公分、厚度均為1公分的玻璃水缸，如下圖3-2，以構成仿溪流型態的微觀模型。

原本其中一邊的高為10公分（圖3-2左側），是想將此處設計成觸發翻滾流的河段。然而在我們初步測試後，發現此發想並不如設計時的可行和理想——也因此我們手動拆除該10公分的隔板，改為開放式的渠道以利水流通暢。

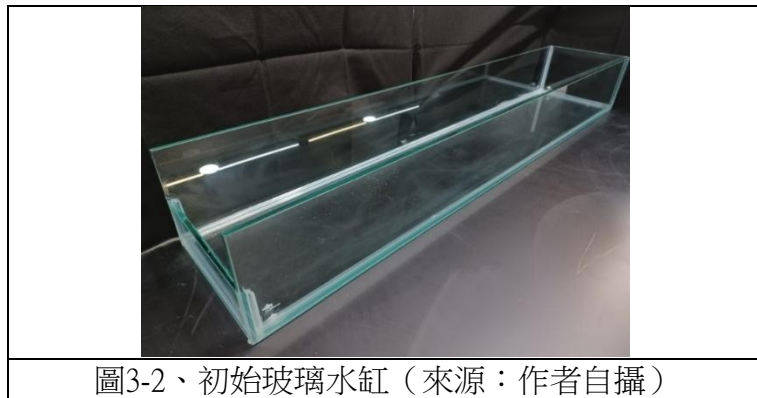
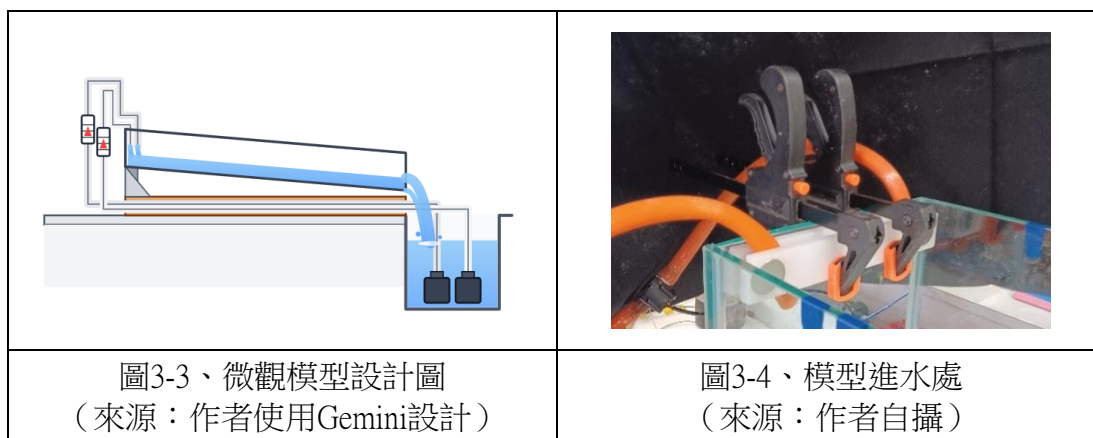


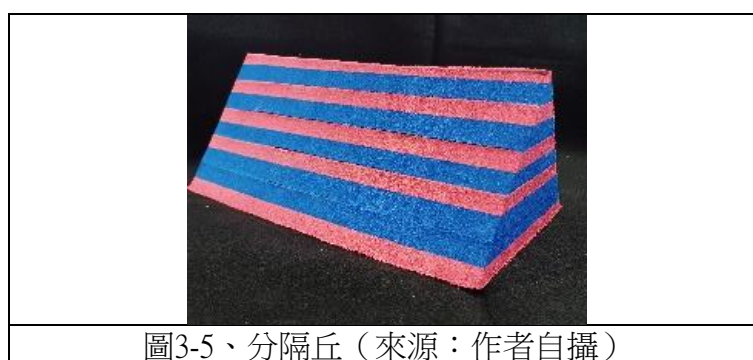
圖3-2、初始玻璃水缸（來源：作者自攝）

(二) 運作設計

微觀模型的擺設及管線布置呈如下圖3-3；藉由水管及雙顆馬達從水槽引進水源，我們使用固定器及木工夾將水管設置於水箱後段（如下圖3-4）。



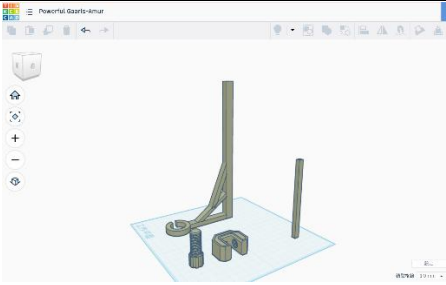
為了使翻滾流能產生，我們還製作了「分隔丘」以構成高低差。首先將若干片100cm*100cm*1cm的巧拼墊裁切成符合模型內寬之28cm*28cm正方形（每大片可切出9小片；誤差值控制在0.5公分之內），總共約27片，堆疊後使用強力黏著劑黏合，最後再裁切成三角柱（如下圖3-5）；其餘不裁切，墊在模型下方作為改變坡度的實驗器具。



(三) 感測器及晶片運作

為了維持並監測控制變因，我們使用Visual Studio Code（VS Code）進行程式編輯，後將其載入AI-Thinker ESP32晶片及擴充版組成的模組，並以杜邦線連接流速計兩枚及超音波感測器、以數據傳輸線連接電腦，才得以監測數據。其中，在流速計的安裝上，我們在加熱水管末端後，將其兩端纏上止瀉帶並塞入固定；而超音波感測器因須要和水面保持20公分以上的距離才能穩定測量，因此我們也使用Tinkercad設計支架的建模並以3D列印的方式呈現，架於沸騰線之上以套用公式推算。



	
圖3-8、超音波感測器及支架 (來源：作者自攝)	圖3-9、支架建模 (來源：作者自攝)

(四) 製造土石流

我們嘗試了多種材料，包括麵粉、太白粉、培養土及泥巴等，然而上述的材料均不理想，若不是質地不符便是會結塊影響馬達的運作。在多次的試驗後，我們最後將目光定格在了「黃土」上。黃土（Loess）是一種砂質堆積物，具疏鬆、多縫隙等特性；我們在混合細沙礫及適量的泥巴後，性質穩定而接近「泥流型土石流」的分類（高濃度、砂泥含量佔比高達約10%~50%、粒徑 $d_s < 0.1\text{mm}$ 以下的細顆粒泥砂含量超過50%，且粒徑 $d_s > 2.0\text{mm}$ 以上的粗顆粒泥砂含量少於10%者），也決定採用此種土石流形式來實驗。

五、 正式實驗

(一) 監測程式使用步驟

1. 打開電腦及VS Code應用程式。
2. 按下Play啟動程式，等待監測視窗彈出。
3. 切換至監測視窗，檢查傳輸線USB接口序列埠號，選擇並連線。
4. 初始化並輸入超音波感測器的高度，以校正水面高度的偵測準確度。
5. 重新整理，按下左下角綠色按鈕「開始記錄」。
6. 3分鐘後，按下左下角紅色按鈕「停止記錄」。
7. 按下「匯出csv。」按鈕轉換並輸出成 .csv檔案，匯入Google試算表取平均值並彙整。

6. 開始監測（步驟如上，括號一）。

(四) 實驗C、土組—水流成分改變

本組旨在研究若將水流成分改為類土石流的組成，其挾帶的泥沙及土礫是否會對翻滾流產生影響。

實驗步驟：

1. 以實驗A取得的最佳角度，使用其層數的堆疊巧拼方塊墊於水缸後段；後以量角器檢查角度並適度移動方塊調整。
2. 塞住水槽塞，開啟水龍頭，並儲水至9分滿（約60公升）。
3. 加入約30公斤的黃土粉及10公斤的砂礫及10公斤的泥巴進行混和。
4. 開啟雙馬達，讓其流淌一段時間至土石流穩定。
5. 完畢後，於膠帶標記位置放置分隔丘，放入BB彈檢測是否有翻滾流產生再移出。同時將超音波感測器及其支架，設於沸騰線正上方。
6. 開始監測（步驟如上，括號一）。

六、實驗原理及運算公式

我們將所有需要運算的公式都放入監測視窗的程式碼中，讓其在觀測數據的同時能夠自動代入所得的數值、一併產出結果，系統化地省去人工大量計算的過程。

(一) 福祿數

$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}}$	$Fr = \frac{u}{\sqrt{gy}}$
----------------------------	----------------------------

左方程式為福祿數的母公式，其中L為任意特徵的長度；然而在明渠流情境的計算中，會將L改為h 特指水深。其餘部分，u為平均流速，g為重力加速度，而其分母項 $\sqrt{gy}$ 即為淺水波之波速。

(二) 能量耗散率

$\frac{\Delta E}{E1} \times 100$	$\Delta E = E1 - E2$
----------------------------------	----------------------

耗散的能量以左方程式計算，耗散率則是代入右方程式。

(三) 理論 h_2 （下游水深）

依據名詞解釋，此為推算的數值，藉由套用共軛水深的公式來計算，公式如下。

$$h_2 = \frac{h_1 \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right)}{2}$$

(四) 淹沒比

淹沒比為躍後水深及躍前水深的比值，公式如下。

$$S = \frac{h_2}{h_1}$$

肆、研究結果

一、實驗A、坡組數據分析

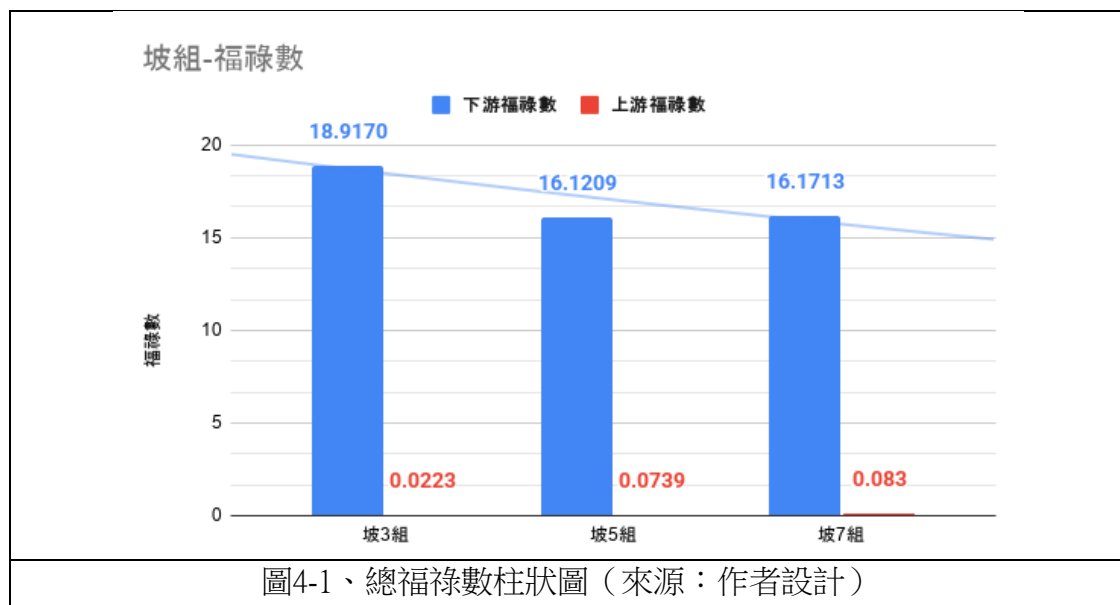
表4-1. 坡3組實驗數據

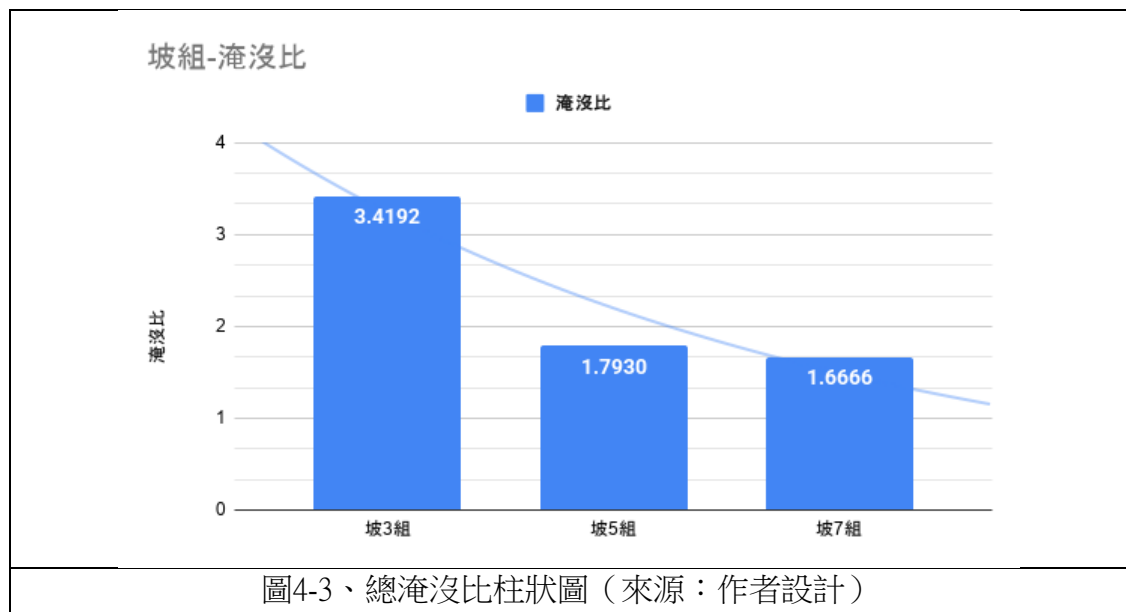
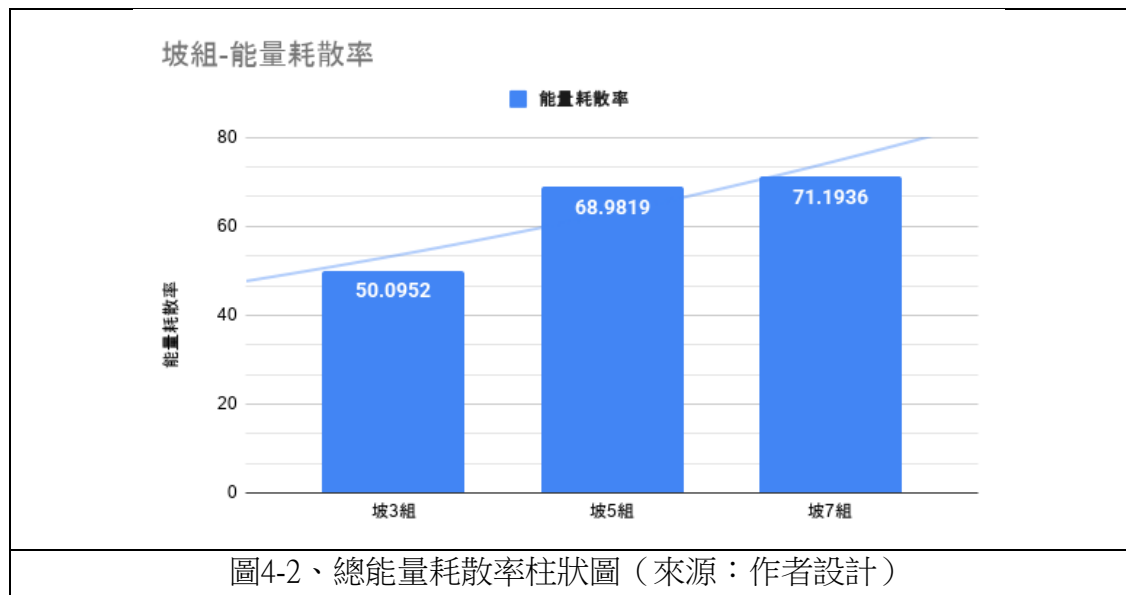
項目 組別	水深	總流量 (L)	ΔE (cm)	耗散率 (%)	下游 福祿	上游 福祿	淹沒比
坡3-1	7.9850	0.4388	8.0131	50.0815	18.9477	0.0222	3.4252
坡3-2	7.9840	0.4392	8.0141	50.0878	18.9380	0.0222	3.4231
坡3-3	7.9860	0.4408	8.0120	50.0752	18.9026	0.0223	3.4177
坡3-4	7.9840	0.4407	8.0140	50.0877	18.9034	0.0223	3.4170
坡3-5	7.9750	0.4408	8.0230	50.1439	18.9017	0.0223	3.4128
標準差	0.0044	0.0010	0.0044	0.0277	0.0223	0.0001	0.0026
平均	7.9828	0.4401	8.0152	50.0952	18.9170	0.0223	3.4192

表4-2. 坡5組實驗數據

項目 組別	水深	總流量 (L)	ΔE (cm)	耗散率 (%)	下游 福祿	上游 福祿	淹沒比
坡5-1	4.0270	0.4478	8.9631	68.9471	16.0241	0.0713	1.8084
坡5-2	3.7017	0.4436	9.2870	69.4381	16.1004	0.0797	1.6696
坡5-3	3.9970	0.4408	8.9925	69.1731	16.1521	0.0740	1.8083
坡5-4	4.0440	0.4388	8.9497	68.8434	16.1880	0.0730	1.8321
坡5-5	4.0841	0.4414	8.9060	68.5076	16.1400	0.0713	1.8465
標準差	0.1537	0.0034	0.1527	0.3500	0.0625	0.0035	0.0084
平均	3.9708	0.4425	9.0197	68.9819	16.1209	0.0739	1.7930

表4-3. 坡7組實驗數據							
項目 組別	水深	總流量 (L)	ΔE (cm)	耗散率 (%)	下游 福祿	上游 福祿	淹沒比
坡7-1	3.3343	0.4251	9.6411	72.1627	16.4548	0.0945	1.5409
坡7-2	3.7768	0.4341	9.1967	70.7437	16.2842	0.0774	1.7293
坡7-3	3.7427	0.4432	9.2403	71.0788	16.1075	0.0814	1.6913
坡7-4	3.7477	0.4471	9.2248	70.9599	16.0362	0.0819	1.6906
坡7-5	3.7327	0.4505	9.2330	71.0227	15.9740	0.0798	1.6811
標準差	0.1866	0.0103	0.1874	0.5565	0.1964	0.0067	0.4113
平均	3.6668	0.4400	9.3072	71.1936	16.1713	0.0830	1.6666





以上三張圖表分別為不同坡度各取5次實驗的平均值。比較數據後，發現根據坡度的改變，能量耗散也有對應的變化。其中7度的耗散率為最高，5度次之，3度最低，耗散率仍不及其餘兩組。由此推測在不改變其他變因下，坡度能直接對能量耗散造成影響。根據下游福祿數可發現，從坡度由低至高的改變中，其數值標準差逐漸變高，由此推斷因坡度的增加造成水流不穩的狀況愈發強烈。而除了超臨界流的數據外，以上游福祿（亞臨界流）的數值比較也可以看出坡度造成之改變；最後，關於淹沒比的數值中，三者皆大於1，是屬於淹沒型翻滾流的特徵。

經過比較後，是訂最佳角度為7度。實驗B和C也將以此角度進行實驗，並設為控制變因。

二、實驗B、石組數據分析

表4-4. 石上組實驗數據

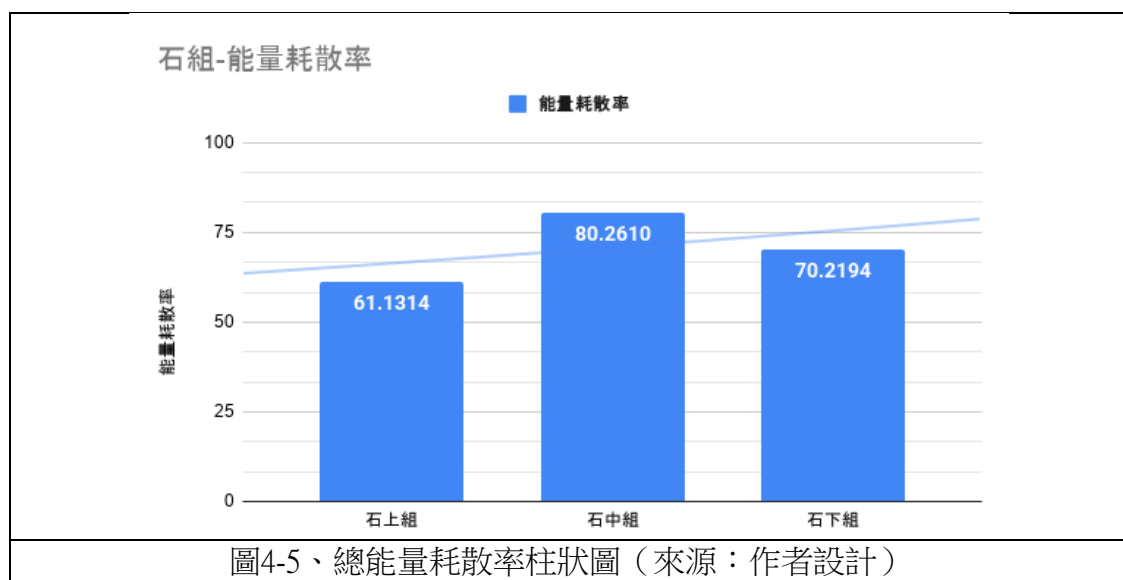
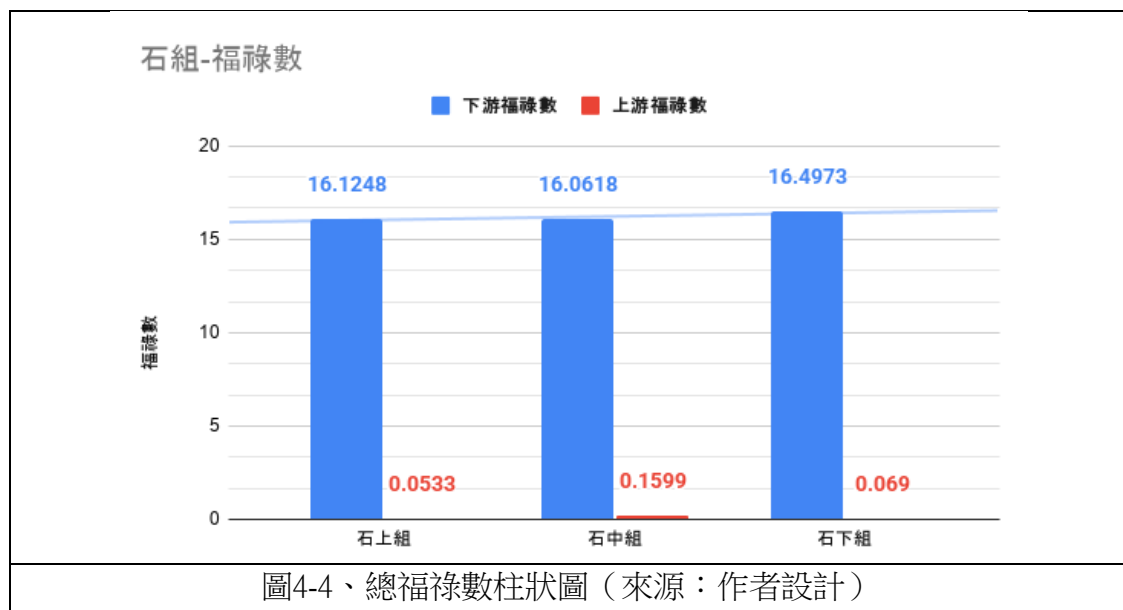
項目 組別	水深	總流量 (L)	ΔE (cm)	耗散率 (%)	下游 福祿	上游 福祿	淹沒比
石上-1	4.7528	0.4416	8.2347	60.3436	16.1380	0.0582	2.1510
石上-2	4.9660	0.4420	8.0279	61.7531	16.1297	0.0502	2.2439
石上-3	4.8517	0.4422	8.1412	60.6242	16.1266	0.0548	2.1920
石上-4	4.8959	0.4430	8.0970	62.2848	16.1111	0.0542	2.2098
石上-5	5.1041	0.0490	7.8847	60.6515	16.1186	0.0490	2.3074
標準差	0.1314	0.0005	0.1311	0.8404	0.0103	0.0037	0.0013
平均	4.9141	0.4423	8.0771	61.1314	16.1248	0.0533	2.2208

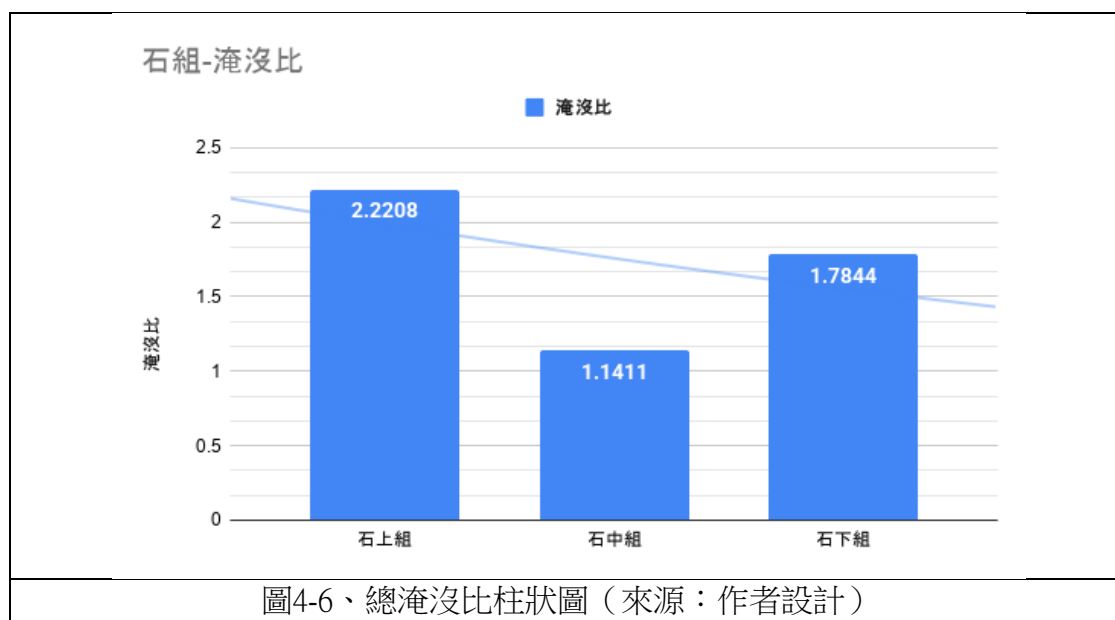
表4-5. 石中組實驗數據

項目 組別	水深	總流量 (L)	ΔE (cm)	耗散率 (%)	下游 福祿	上游 福祿	淹沒比
石中-1	2.5355	0.4455	10.4273	80.2100	16.0659	0.1570	1.1448
石中-2	2.4905	0.4453	10.4601	80.4621	16.0702	0.1667	1.1292
石中-3	2.5506	0.4459	10.4199	80.1529	16.0593	0.1569	1.1476
石中-4	2.5365	0.4456	10.4331	80.2547	16.0634	0.1600	1.1414
石中-5	2.5405	0.4464	10.4293	80.2255	16.0502	0.1590	1.1425
標準差	0.0233	0.0004	0.0154	0.1184	0.0076	0.0040	0.0010
平均	2.5307	0.4457	10.4339	80.2610	16.0618	0.1599	1.1411

表4-6. 石下組實驗數據

項目 組別	水深	總流量 (L)	ΔE (cm)	耗散率 (%)	下游 福祿	上游 福祿	淹沒比
石下-1	3.9760	0.4023	9.0169	69.3612	16.9186	0.0597	1.8811
石下-2	3.9219	0.3794	9.0711	69.7775	17.4265	0.0598	1.9091
石下-3	3.7998	0.4458	9.1896	70.6887	16.0586	0.0751	1.7096
石下-4	3.8008	0.4466	9.1888	70.6826	16.0455	0.0745	1.7089
石下-5	3.8128	0.4470	9.1764	70.5872	16.0373	0.0757	1.7133
標準差	0.0816	0.0315	0.0797	0.6127	0.6421	0.0084	2.1820
平均	3.8623	0.4242	9.1285	70.2194	16.4973	0.0690	1.7844





根據數據得知，對照坡度7度的組別，障礙物組除了遭影響的位置之外，其餘數據有更加穩定的呈現，耗散率部分以中游障礙最為突出，其耗散率數值為所有組別最高且最穩定，此數據值得延伸探討；福祿數數值的呈現也較7度組穩定許多，除下游障礙物組別的影響之外表現穩定；而淹沒比數值也因障礙物不同位置造成了影響。根據以上判斷，中游在此組別的數值呈現最為優秀，若延伸探究消能塊等河流的環境工程，也許會有不錯成效。

三、實驗C、土組數據分析

表5-7. 土組實驗數據							
項目 組別	水深	總流量 (L)	ΔE (cm)	耗散率 (%)	福祿1	福祿2	淹沒比
土1	4.9965	0.4109	7.9989	61.5301	16.7356	0.0428	2.1363
土2	5.0671	0.4118	7.9284	60.9881	16.7172	0.0422	2.1385
土3	4.9980	0.4131	7.9973	61.5178	16.6922	0.0435	2.1417
土4	4.9890	0.4164	8.0062	61.5864	16.6232	0.0439	2.1502
土5	4.9760	0.4168	8.0191	61.6854	16.6153	0.0446	2.1512
標準差	0.0356	0.0027	0.0355	0.2728	0.0547	0.0009	0.0068
平均	5.0053	0.4138	7.9900	61.4616	16.6767	0.0434	2.1436

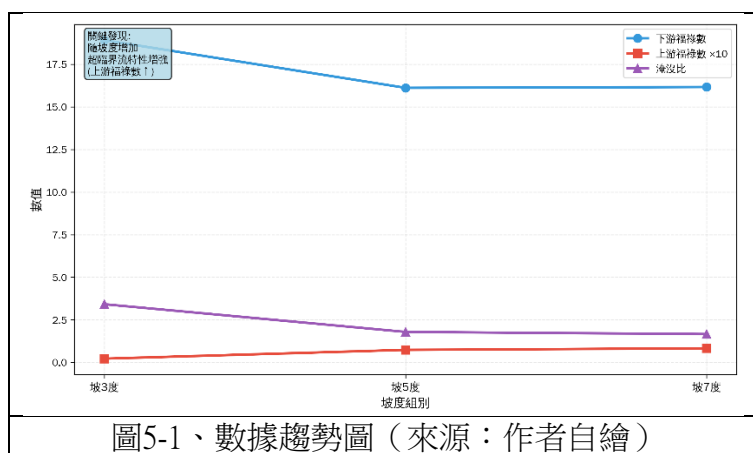
此張表格以能量耗散之數值比較下，土石流組的耗散率明顯降低，顯示是因為物質混合後造成的影響；實驗中，土石流組上游及下游福祿數的呈現較穩定，推測是因為黃土粉及泥巴於攔沙壩內淤積，使河床結構更加穩定，淹沒比亦是如此。而土石流組別中，因使用穩定流速以進行實驗分析，若進一步深入實驗，也許可以將真實溪流中不穩定的流速納入變因，更深入探討土石流與翻滾流的奧秘。

伍、討論

綜上所述，我們期望往後能彌補的實驗盲點，並進行更深度的探究。

一、 本實驗的坡度組，原有考慮進行更高或其他角度的河床模擬，然而基於實驗中設備限制，才將角度設為3度、5度及7度。且以網路參考資料做為參考，花蓮溪全程平均坡度僅約0.2度，為了更全面模擬河床，分別以上游、中游及下游的坡度進行模擬，而水道角度若過低，將直接影響水躍及翻滾流的形成。因此，若能在一開始時精準設計並能隨意調整模型角度不受結構穩定性或安全性等因素影響，必能更全面的探討所謂「最佳角度」的範疇。

二、 據數據觀測，坡度從5度遞增後，與7度的各項指標皆極為相近，表示出在同樣水流量及流速下，坡度從5度開始，翻滾流及水躍現象的數值逐漸趨近上限；也可能是5度和7度的差距過小，不足以讓數據產生較明顯的變化（如下圖5-1）。



而其餘B、C組實驗的控制變因之所以選擇7度作為最佳角度與控制變因，也是因為福祿數與淹沒比的數值過於接近，最後採取能量耗散率進行比較。

三、 除此之外，馬達的能量供應無法在土石流的組別進行更有效的區分。土石流往往是具強大的能量，而馬達作為動力來源決定了翻滾流的強度上限，若缺乏足夠馬力則

無法觸發具土石流規模的水躍。如果能增加可調節馬力的馬達，實驗呈現的效果或許會更佳。

陸、結論

綜上所述，我們得出了以下結論。

- 一、在我們的探究之下，翻滾流的最佳角度為7度，能量耗散率最高，能夠營造出最強勁的翻滾流。
- 二、實驗發現，當障礙物設置於河道中游時，其對流場的干擾與能量耗散率最為高漲，產生的翻滾流最為完全且劇烈。相較於設置在流速尚未完全發展的上游，或流速已趨於平緩的下游，中游段的設計最能誘發劇烈的翻滾流出現。
- 三、在模擬土石流與黏滯力的實驗中，加入的固體沙礫及泥巴雖然改變了流體的組成，但並未改變翻滾流形成的物理本質。固體砂礫及泥巴的加入有讓土石流更加的實際化，更符合泥流型土石流的定義，然而也同時造成了泥沙淤積的情況，讓能量耗散率有顯著的下降。

柒、參考資料及其他

- 一、林奕汝等，(2011)。《漩機妙算》<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/040101.pdf>
- 二、楊康廷等，(2021)。《河中「漩」機》
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/62/pdf/NPHSF2022-080504.pdf?0.7951011080>
- 三、于可等，(2019)。《水土比一比》
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-030508.pdf>
- 四、王國川，(2004)。《探討台北縣溪域發生溺水之危險因素》
<http://portal.lib.ntnu.edu.tw/items/ffcf4c5f-8b60-4d10-a656-6a87d2465276>
- 五、謝伯彥，(2013)。《激流訓練的美妙》。內政部消防署消防月刊，3:66-68。
<https://ebook.nfa.gov.tw/10203/files/basic-html/page68.html>
- 六、龔任義，(2000)。《新店溪之地形研究》。
<https://hdl.handle.net/11296/4gg59h>
- 七、游牧笛，(2014)。《新北市大豹溪之河道地形憩環境分析》
<https://smallpdf.com/zh-TW/file#s=387882a3-052f-46ec-994d-2afb73798e5c>
- 八、山、水與浪人，(2025)，Facebook。
<https://www.facebook.com/share/p/15gkK8QuKKR/>

九、施養正，(2025)，〈勇消殉職 | 遇奪命「翻滾流」如何脫困？專業曝5招必知〉，壹蘋新聞網。

<https://news.nextapple.com/local/20250709/B8B06B6C7FB766537E2C9B59B7233282>

十、Wikipedia。《Hydraulic jump》

https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_jump

十一、Wikipedia。《明渠流》

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%98%8E%E6%B8%A0%E6%B5%81>

十二、Wikipedia。《福祿數》

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%A6%8F%E7%A5%BF%E6%95%B8>

十三、Wikipedia。《耗散》

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%80%97%E6%95%A3>

十四、經濟部水利署全球資訊網。〈臨界流〉。

https://www.wra.gov.tw/NewsRiverNoun_Content.aspx?n=25142&s=2798

十五、經濟部水利署全球資訊網。〈亞臨界流〉。

https://www.wra.gov.tw/NewsRiverNoun_Content.aspx?n=25142&s=2797

十六、經濟部水利署全球資訊網。〈超臨界流〉。

https://www.wra.gov.tw/NewsRiverNoun_Content.aspx?n=25142&s=2799

十七、Practical Engineering，YouTube。〈What is a Hydraulic Jump?〉

<https://www.youtube.com/watch?v=7tjf8HWiR3Y>

十八、Gupta，S. K.， & Dwivedi，V. K. (2025). Experimental evaluation of hydraulic jump characteristics in gradually expanding sloping channel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*，18(7)，1843-1860.

十九、Elshaarawy，M. K.， & Hamed，A. K. (2025). Modeling hydraulic jump roller length on rough beds: a comparative study of ANN and GEP models. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*，16(1)，111-133.

二十、Zhang，H.，Zhang，N.，Liu，X.，Wang，H.， & Bai，R. (2025). Turbulent characteristics of free surface and velocity transition from free hydraulic jump to open-channel flow. *Physics of Fluids*，37(9).

二十一、Hu，J.， & Chanson，H. (2025). Characterisation of free-surface turbulence in hydraulic jump roller at low inflow Froude number. *Flow Measurement and Instrumentation*，103107.

二十二、Arduino <https://www.arduino.cc/en/software/>

二十三、 Visual Studio Code <https://code.visualstudio.com/>

二十四、 Tinkercad <https://www.tinkercad.com/>

本篇研究之所有圖片、圖表及表格，除了具個別標記之素材，其餘均為研究人員拍攝、整理及繪製。