

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 地球科學科

第三名

030511

扇扇「模」法師－探討影響沖積扇外形的環境因素

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 施子閔 國二 趙翊安 國二 黃子捷	指導老師： 侯依伶 曹嘉修
---	-----------------------------

關鍵詞：沖積扇、沉積物、降雨強度

摘要

本研究藉由文獻探討和實地探勘了解沖積扇的外觀特色，並以模擬實驗探討影響沖積扇形成的環境因素。研究結果發現沖積扇的形成過程包含了堆積與擴散的過程，河流帶來的沉積物顆粒較大時，堆積作用較明顯；而沉積物顆粒較小時，沖積扇的擴散作用較明顯。支流坡度的增加與降雨時間拉長都會導致沖積扇的堆積與擴散作用明顯提升，而降雨強度的增加會明顯增加沖積扇的擴散作用。本研究也發現沖積扇上的建築物，須遠離河岸、扇頂、扇端，才可大幅降低未來災害的危害。希冀透過本次研究更了解造就沖積扇外形的因素，也能應用於土石流發生前的防災與離災工作。

壹、前言

一、研究動機

2021年8月7日南橫公路受到熱帶性低氣壓所帶來超過2700毫米的致災性雨勢，導致南橫公路西段的明霸克露橋遭到沖毀。我們看到新聞報導時，除了感嘆大自然的反撲，從空拍畫面也看到了特別的景象：土石在匯入荖濃溪後，在河道形成了一個扇端邊緣平滑的沖積扇。查閱文獻後，我們發現除了荖濃溪，台灣各處的河流也都分佈著大大小小、形狀不一的沖積扇。我們便開始思考，哪一些因素導致了沖積扇的外形的差異呢？於是我們帶著對於沖積扇的好奇心，開始了一系列的研究。



圖 1：玉穗溪口沖積扇(傅志男攝)

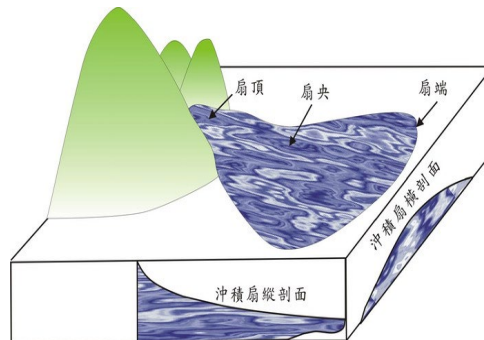


圖 2：沖積扇構造介紹(取自蘭陽博物館官網)

二、文獻探討

(一) 沖積扇(alluvial fan)的形成

沖積扇指河流從山區流至山麓或平地後，在谷口堆積形成的扇形地形。由於河川水流受阻、坡度減緩、河道逐漸變寬、水量變小等因素，河水搬運能力降低，導致泥沙在谷口堆積。沖積扇以谷口為頂點，向下呈扇狀分布，邊緣處稱為扇端，自扇頂至扇端的直線距離稱為縱長，而中間扇形部分稱為扇央。

(二) 荖濃溪沿岸的沖積扇

荖濃溪上游河谷共有約22個沖積扇，分布如圖3所示。此處水文條件變化劇烈，地質相當不穩定，雨季經常受到颱風及梅雨所帶來的豪大雨侵襲，導致此處的南橫公路陸續遭到崩塌或沖積扇覆蓋。此處的沖積扇，例如拉克斯溪扇、清水溪扇、少年溪扇、玉穗溪扇、美秀溪扇、東莊溪扇、扇平溪扇、三合溪扇等，面積皆在2平方公里以下，其中又以少年溪扇為此處沖積扇中最大者。2021年遭沖積扇覆蓋的明霸克露橋即位在玉穗溪上。

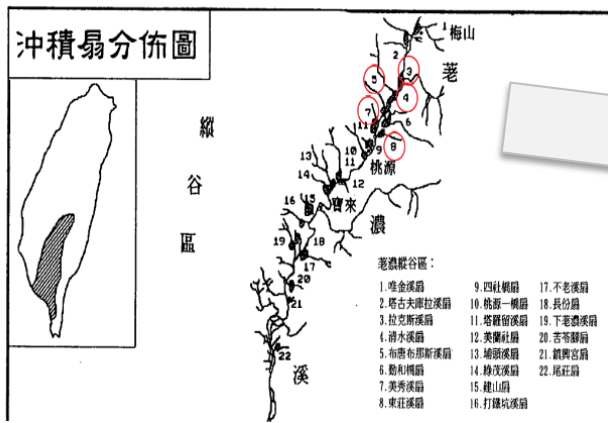


圖 3：荖濃溪上游沖積扇分布圖，改編自潮州斷崖與高屏溪谷的地形學研究，第 24 期。

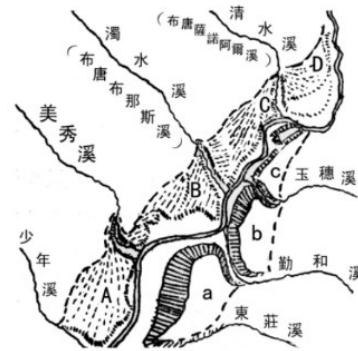


圖 13. 美濃沖積扇群，A 為美秀臺，B 為琉球臺，C 為清水臺，D 為薩巴阿爾臺。a 為勤和臺（妖怪丘），b 為歐帕客爾段丘，c 為濁水臺（塔喀珠安段丘）。（引自日人富田原圖）

圖 4：左圖之紅色區塊放大圖，取自莫拉克颱風荖濃溪桃源—梅山段地貌變遷，莊文星，國立自然科學博物館館訊第 284 期。

三、研究目的與問題

本研究擬透過實察了解荖濃溪上游河谷的沖積扇，並模擬不同環境變因，包括降雨情況、沉積物顆粒大小、河流坡度等情形，了解影響沖積扇外形的因素；另外，透過二次災害的模擬，給予相關的防災策略建議，因此我們擬定了以下的研究架構：



圖 5：研究架構

本研究擬定的研究問題如下：

- (一) 台灣地區不同地理位置的沖積扇特徵為何？
- (二) 荖濃溪上游河谷的沖積扇形狀與其形成情形為何？
- (三) 沖積扇的形成過程為何？
- (四) 支流坡度對沖積扇的形狀有何影響？
- (五) 主流坡度對沖積扇的形狀有何影響？
- (六) 降雨強度對沖積扇的形狀有何影響？
- (七) 降雨時長對沖積扇的形狀有何影響？
- (八) 沉積物顆粒大小對沖積扇的形狀有何影響？
- (九) 砂石組成對沖積扇的形狀及沉積物分布有何影響？
- (十) 二次災害對沖積扇的影響為何？

貳、研究工具的改進與實驗設置

一、河道的模擬改進

(一) PP板河道模擬實驗

1. 依照荖濃溪與玉穗溪口地形圖 1:1000 的比例裁切 PP 板，再將支流部分製成彎曲的形狀，最後將支流與主流組裝後即完成河道交會之模型，如圖 6 所示。
2. 結果發現製作河道模型時，由於接縫處難以密合，且模型難以固定，導致砂石容易從主流河道兩側流出，故需要換成較堅固的壓克力。

(二) 谷口地形模型實驗

1. 利用中央地調所之玉穗溪口附近等高線地形圖作為製作模型的參照，利用保麗龍板、黏土製作成模型，最後以壓克力顏料將模型上色即完成(圖 7)。
2. 結果發現壓克力顏料容易從模型上脫落，且沙子容易卡在模型縫隙中，不易流動外難以清理，也難以設定砂石厚度、鋪上厚度一致的砂石。

(三) 壓克力河道(正式實驗裝置，圖 8)

1. 實驗裝置製作方法：按照明霸克露橋附近之地形以 1:1000 的比例製作，主流為 40 公分寬，支流為 8 公分寬，並將壓克力河道組裝好。
2. 在主流下方黏上一層塑膠袋用來防水與回收溢出砂石的功能，並在主流、支流下方各墊上不同高度的磚塊，形成坡度。

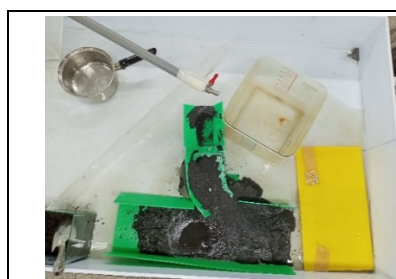


圖 6：PP 板河道模擬裝置

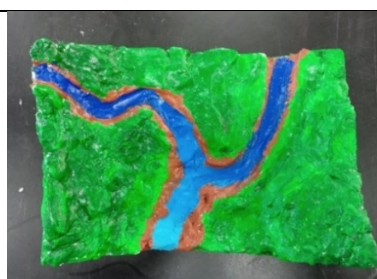


圖 7：谷口地形模型



圖 8：正式實驗裝置

二、測量裝置：15 公分直尺、游標尺、定標量尺

(一) 定標量尺用途：方便進行測量定位。

(二) 定標量尺器材：PP 板、牙籤(圖 9)。

(三) 定標量尺使用方法說明：此定標量尺可以測量出 45 度，進而取得三條縱長，且每間隔 5 公分就有一個牙籤，用來定位。

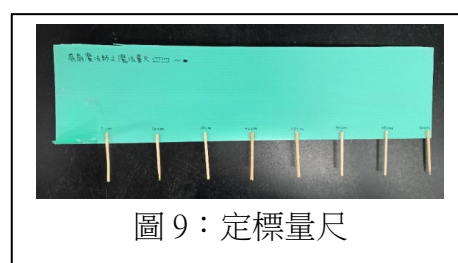


圖 9：定標量尺

三、砂石種類：分為細砂及中砂(0.1mm~1mm)、粗砂(1mm~2mm)、礫石(1mm~6mm)。

四、降雨水箱及水循環系統

(一) 用途：用來穩定水流速度，並節省用水

(二) 製作原因與方法說明：

1. 製作目的與原理說明：本實驗設計的降雨水箱，是透過加上不同孔徑瓶蓋來防止出水量過大。當

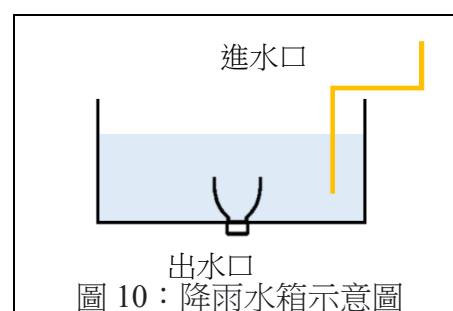


圖 10：降雨水箱示意圖

進水量大於出水量，水位即會長時間保持在出水口高度以上，進而達到讓出水量保持穩定(圖 10)。

2. 製作方法與使用說明：

- (1) 將抽水馬達依序放入玻璃箱、豆漿濾袋，再把三樣物品放入大水箱。
- (2) 先將寶特瓶從 1/3 處切開，並在保麗龍箱中鑽一個瓶蓋大小的洞，再將切開的寶特瓶穿過保麗龍箱，並以保麗龍膠固定，作為出水口。
- (3) 在瓶蓋上戳大小不等的洞，將瓶蓋旋上寶特瓶後打開馬達開關使水流進水箱，並計時 1 分鐘，記錄通過的水流量，即得該瓶蓋的降雨強度(公升/分)。
- (4) 正式實驗時仿照測量降雨強度的步驟，等待水位高於出水口高度後計時。

五、 砂石回收處理設備

(一) 用途：用來回收、過濾砂石

(二) 回收過程說明：

1. 將實驗後的砂石統一收集至水箱中。
2. 砂石利用豆漿濾袋過濾至無水滴出，插入土壤感測器探針，確認含水量約為 30%。

六、 實驗前測試

(一) 砂石量設定：本實驗鋪設主流厚度為 1 公分，支流砂石量為 7 公斤。

(二) 砂石含水比設定：砂石含水比計算方式：水量 / 砂石與水量之總和，砂石含水比作為實驗的控制變因(約 30%)。

(三) 降雨時長設定：本實驗初始設定降雨時間為 1 分鐘。

(四) 支流坡度設定：初始以玉穗溪下游坡度設定本實驗支流坡度為 8 度。

(五) 主流坡度設定：以荖濃溪在玉穗溪出口附近的坡度設定本實驗主流坡度為 4 度。

(六) 降雨強度設定：以 1 分鐘之水流量作為降雨強度依據，設定降雨強度為 3.6 公升/分。

(七) 沖積扇觀測方式與計算方式：

1. 將實驗過程錄製成影片，並拍攝沖積扇完整外觀。
2. 測量沖積扇扇頂高度，再利用定標量尺測量出三條縱長(圖 11 綠色線段)。
3. 接著利用游標尺從扇頂以 5 公分為級距測量深度，直到沖積扇扇端為止。
4. 利用 ImageJ 程式分別測量：沖積扇面積、縱長、扇端長度、寬度及坡度。

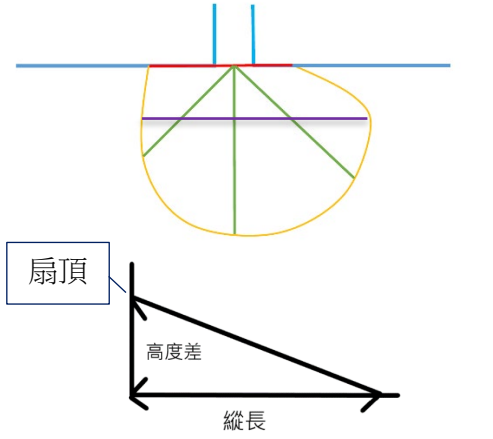
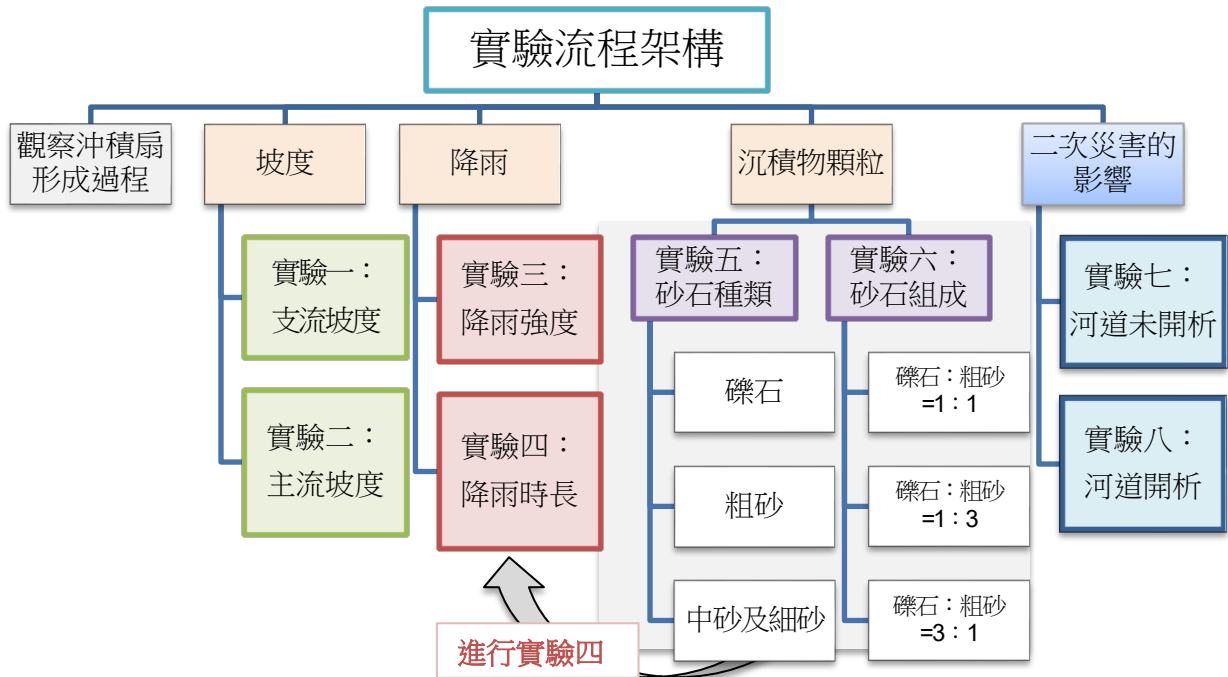
	說明
	(1) 沖積扇面積：圖 11 黃色線段與紅色線段所圍成的面積。
	(2) 沖積扇縱長：圖 11 三條綠線的長度的平均值。
	(3) 沖積扇扇端長度：圖 11 黃色線段。
	(4) 沖積扇寬度：垂直於綠色鉛直線縱長的最長線段，即為紫色線段。
	(5) 沖積扇坡度：取得三組沖積扇扇頂高度除以沖積扇縱長的平均值。

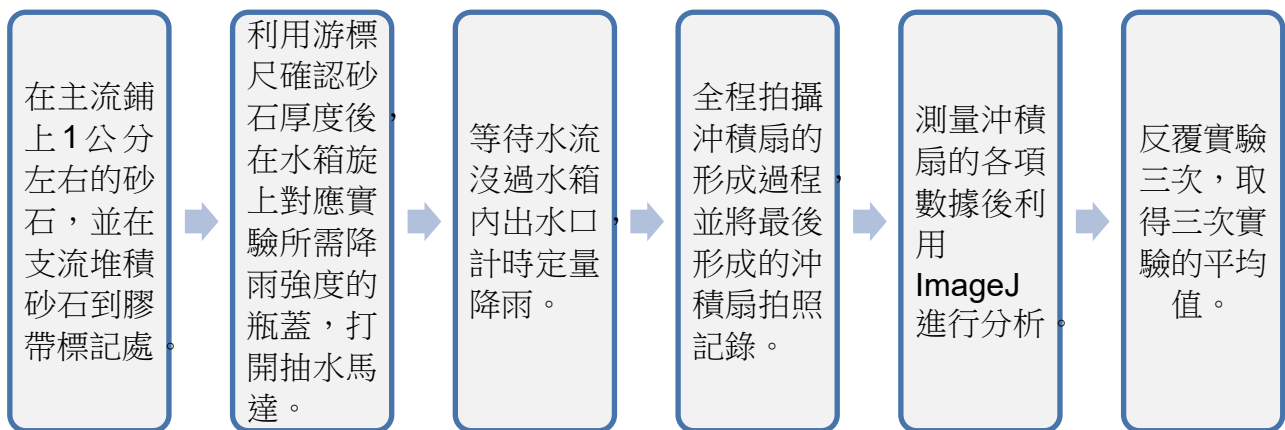
圖 11：沖積扇測量方式、坡度測量示意圖

參、正式實驗設置

一、實驗流程架構



二、實驗步驟



肆、研究結果

一、台灣各地的沖積扇

我們上網搜尋了台灣各地沖積扇的報告，除了文獻探討中所提及的荖濃溪上游的沖積扇群外，我們也找出以下具有較多沖積扇群的地方做簡單的整理。

表 1：台灣的沖積扇分析

沖積扇位置	地質條件	沖積扇形成現況
屏東平原及潮州斷崖	年降雨量在 3000mm 以上 沉積物顆粒平均粒徑 20~50 公分 沉積岩、砂岩、頁岩	縱長 11~30 公里，面積多在 100 平方公里以上，最大者達 1681 平方公里，即荖濃溪所形成沖積平原。

蘭陽平原	年降雨量在 4000mm 以上 沉積物顆粒徑 10~50 公分 多為板岩等變質岩。	縱長大多在 10 公里以上，面積最大者 為 66 平方公里之蘭陽溪扇。
蘭陽溪谷	年降雨量在 2000~4000mm 沉積物顆粒平均粒徑 40~200 公分 多為板岩等變質岩	縱長 0.1~3.9 公里，面積約 0.01~1.78 平方 公里。
荖濃溪及 楠梓仙溪	年降雨量在 3000mm~4000mm 沉積物顆粒平均粒徑 70~200 公分 沉積岩、砂岩、頁岩。	縱長 0.5~2 公里，面積約 0.5 平方公里 ~2 平方公里。
花東縱谷	年降雨量在 2000~3000mm 板岩、火山岩、碎屑沉積岩為主	縱長約 1.5~8 公里，根據形成位置不 同，山谷區的面積在 2 平方公里左右， 縱谷平原區約 63 平方公里。
八卦台地及濁 水溪沖積平原	沉積岩、礫岩	沖積扇面積在 2 平方公里以下，但濁水 溪沖積平原達 1339 平方公里。

根據以上的文獻，我們歸納出幾個特色：

- (一) 西部的平原地區，因有較大的堆積環境，因此較易形成面積大的沖積扇，如濁水溪及荖濃溪沖積平原；而東部平原地區則相對較小，面積僅數十平方公里，此種沖積扇的特色是形成花費的時間較久。
- (二) 受限於河谷的堆積環境較小，在河谷內形成的沖積扇面積都不大，至多 1~2 平方公里，而此種沖積扇的特色為發生時間短，大多為分類中的土石流扇。
- (三) 觀察到沉積物的粒徑較大者(如蘭陽溪谷、荖濃溪及楠梓仙溪)，其形成的沖積扇面積會較小。氣候方面，由於台灣各處的降雨量皆非常豐沛，因此我們認為氣候不是影響沖積扇的主因，但短時間的強降雨仍可能是影響沖積扇的重要因子。另外，山谷中的坡度較平原更陡峭，坡度也可能是導致面積較小的因子之一。最後，我們決定探討坡度(包含支流及主流形成面)、降雨情形(降雨強度及降雨時長)、沉積物顆粒大小及組成比例對沖積扇的形狀有何影響，並且選擇荖濃溪上游作為實地探勘對象。





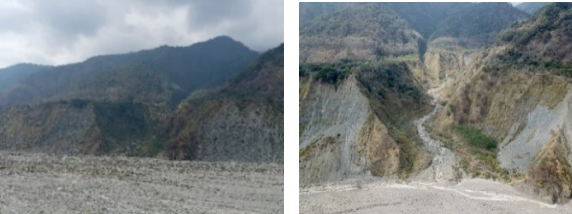


二、荖濃溪上游河谷沖積扇實察結果


(一) 實察步驟

1. 我們在文獻資料中挑選出荖濃溪沿岸的九個地點進行沖積扇的實察，最後決定挑選清水溪、玉穗溪(明霸克露橋)、少年溪、美秀溪、扇平溪(三合橋)、東莊溪(勤和部落)、拉克斯溪(復興部落)、新發大橋附近、新開附近、新禮觀、中之關等 11 個地點進行實地探勘。
2. 每一個沖積扇皆以空拍機進行拍攝，除部分沖積扇難以步行到達之外，皆以步行方式進行拍攝或探勘。本次探勘以觀察沖積扇的外觀為主，並未採集砂石。
3. 探勘後利用 Google Earth 比較不同年份沖積扇的演變。

(二) 實察結果

1. 本次實察時間為：2023 年 2 月 26 日、4 月 29 日
2. 實察結果說明(由上游而下排列)：

表 2：荖濃溪上游河谷實察結果	
沖積扇名稱	實察發現
拉克斯溪(復興部落) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 2013 年拉克斯溪匯入荖濃溪處有河道變寬的情形。 ● 此沖積扇南端有明顯的斷面，如左圖所示。 ● 此沖積扇已開發，且植被覆蓋相當完全，因此可推測沖積扇的形成年代久遠。
清水溪 	<ul style="list-style-type: none"> ● 推測左圖中右扇的沖積扇應為較古老的沖積扇，而現今河道改道左扇，另於下游側於 2009 年八八風災後形成沖積扇；近年來持續有擴散的情形，水文變化劇烈。 ● 此沖積扇已開發，左半扇(下游側)則無。
少年溪 	<ul style="list-style-type: none"> ● 2009 年時八八風災後先形成上游扇，後於 2010~2013 年間形成下游扇，如左圖所拍攝角度。現今河道行走於上游扇，因此下游扇上有覆蓋著植被，且受到荖濃溪沖刷影響，扇端呈現斷面的情形。 ● 此沖積扇的下游扇曾開發，2012 年被土石流掩埋。
玉穗溪(明霸克露橋)  <p>圖 a 圖 b</p> <p>於 2021 年遭玉穗溪土石流掩埋，並形成此沖積扇。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 2023 年 2 月前往探勘時，發現沖積扇已遭挖開，故無法拍攝空拍照片，但可觀察沖積扇的堆積情形。 ● 此處的沖積扇深度可達 20~30 公尺，但斷面皆被工程所掩埋的土石破壞，因此我們所見的斷面已不是原來的情况。 ● 沖積扇在數次的土石流後逐漸擴散至 1000 公尺，且下游扇明顯大於上游扇。
美秀溪  <p>圖 a 圖 b</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 推測此處原先已經有古老的沖積扇，後來河谷下切後再形成一新沖積扇(圖 a)。 ● 此沖積扇規模較小，但荖濃溪河谷從 1985 年開始不斷的向內侵蝕(圖 b，從左到右依序為 1985, 2010, 2012, 2021 年)。 
東莊溪(勤和部落) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 此沖積扇受到荖濃溪主流沖刷情形嚴重，且受到東莊溪支流沖刷情形亦劇烈，因此沖積扇的面積縮小。 ● 河流行走於下游扇，為此次探訪中少數。 ● 此沖積扇已開發，且上方覆蓋大量植被，因此推測此沖積扇形成年代久遠。

<p>新開附近</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 推測此處原先已有古老沖積扇，後來於2009年八八風災再形成一年輕的沖積扇。 ● 經由實地探勘我們觀察到完整的斷面，但我們沒有看到斷面有明顯分層的情況。 ● 此沖積扇河流行走於上游扇。 	
<p>新發大橋附近</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 沖積扇於2009年八八風災後才形成，是相當年輕的沖積扇。 ● 近年水文變化劇烈，向源侵蝕現象明顯，因此沖積扇面積增加。 ● 此沖積扇扇端受荖濃溪主流侵蝕，因此扇端呈現斷面。 	
<p>扇平溪(三合橋)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 此沖積扇於2009年八八風災後才形成，也是相當年輕的沖積扇。 ● 此沖積扇扇端受荖濃溪主流侵蝕現象嚴重，因此沖積扇的扇端完全消失不見。 ● 此沖積扇未開發。 	
 <p>新禮關</p>	 <p>中之關</p>	 <p>實察沖積扇分布位置</p>



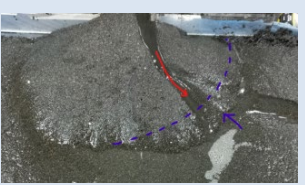

3. 經過實地勘查，得出以下結論：

- (1) 荖濃溪上游沖積扇大部分在2009年八八風災後才形成或於該次事件中沖積扇形狀有明顯改變。
- (2) 觀察到沖積扇的沉積物分布不易觀察，但我們仍然想嘗試觀察沖積扇的沉積物分布情形，因此我們決定改變砂石組成來觀察沖積扇的沉積物分布情形。
- (3) 沖積扇形成後仍會持續受到主流與支流河道的侵蝕，尤其以扇端最為明顯。
- (4) 觀察到在一次降雨事件後，沖積扇仍然可能受到二次(或以上)的災害影響，進而導致沖積扇的河道變化，因此我們想透過設計兩次實驗來觀察此現象。

三、 模擬實驗中沖積扇的形成過程

我們在進行沖積扇的控制變因訂定時，發現當水流量較小時，可以很清楚的觀察到整個沖積扇的形成過程，因此我們將沖積扇的形成過程記錄如下：

本次觀察實驗的變因為：主流河道坡度4度，支流河道坡度8度，降雨強度0.7公升/分。

表 3：沖積扇形成過程概述			
開始後~1'15"	此時大部分的水皆滲入砂堆中，並沒有砂石移動的現象，僅可觀察於降雨處有較少的砂石被搬動。		
1'16"~1'31"	降雨處的砂堆開始崩落，發現大部分為砂石自行滑動，而非水流帶動砂石崩落。崩落的砂堆緩慢移動至堆積處，但此時尚未形成沖積扇。		
1'32"~1'50" (圖 A)	沖積扇形成，且一開始砂石堆積於谷口中央，導致水流皆從谷口兩側流至堆積區(此時大部分為水流帶動砂石崩落)，擴散範圍不大。		
1'51"~8'20" (圖 B)	此時河流再次匯集至中央處，並從沖積扇的中間略偏右側流出，沒有明顯擴散，但砂石高度有墊高的情形。河流大部分時間選擇略偏右側流出，少部分從左側流出，擴散現象不明顯，堆積厚度相當高。		
8'21"~21'59" (圖 C)	沖積扇左側、中間、右側的砂石依序崩塌，此段時間內河道在中間偏左側來回變動，左半邊的面積也明顯增加，堆積高度明顯增加，此時的河流皆滲入堆積之沖積扇內。 沖積扇的最右側崩塌，且擴散情形明顯，右側面積增加。		
22'00"~27'30" (圖 D，結束觀察)	此時沖積扇的變化與擴散現象不明顯，大部分的水流皆滲入堆積之沖積扇內，堆積高度無特別明顯增加。		
			
圖 A	圖 B	圖 C	圖 D

小結：

- (一) 河流在通過沖積扇時，會左右改變河道行經的方向，且方向不固定。
- (二) 沖積扇的崩塌情形，以右側較左側頻繁，推測是受到主流坡度的影響。
- (三) 沖積扇的形成過程大致為：沖積扇堆積至一定程度後(此時的水流會滲入堆積之沖積扇內，而不會流出)，砂石崩落，由河流搬運後擴散出去，使沖積扇的面積更大，堆積現象與擴散現象交替出現。
- (四) 最後一段時間，沖積扇的變化與擴散現象不明顯的原因為上游砂石已幾乎被搬運完畢。

四、 觀察支流河道坡度對沖積扇形狀的影響

根據上述的觀察結果，我們推測支流河道坡度可能對於沖積扇形狀的影響程度很大，因此我們改變支流河道坡度，觀察沖積扇在支流 5 度、支流 8 度，支流 11 度、支流 14 度時，以降雨強度 3.6 公升/分，降雨時間 1 分鐘情況下沖積扇形狀的變化，並全程錄製沖積扇形成過程。由數據分析結果發現：

- (一) 支流坡度對沖積扇縱長的影響：隨著支流坡度增加，沖積扇的縱長也增加，且坡度較大時增加幅度較大(圖 12)。
- (二) 支流坡度對沖積扇面積的影響：隨著支流坡度增加，沖積扇的面積也增加，且坡度較大時增加幅度較大(圖 13)。
- (三) 支流坡度對沖積扇弧長的關係：隨著支流坡度增加，沖積扇的弧長也增加(圖 14)。
- (四) 支流坡度對沖積扇寬度的影響：隨著支流坡度增加，沖積扇的寬度先減少再增加。由實驗結果無法推論支流坡度對沖積扇寬度的影響(圖 15)。

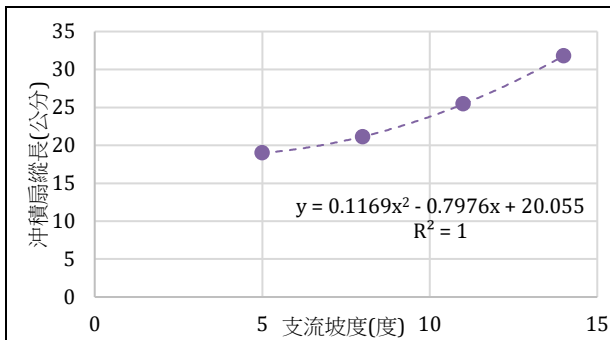


圖12：支流坡度對沖積扇縱長的影響

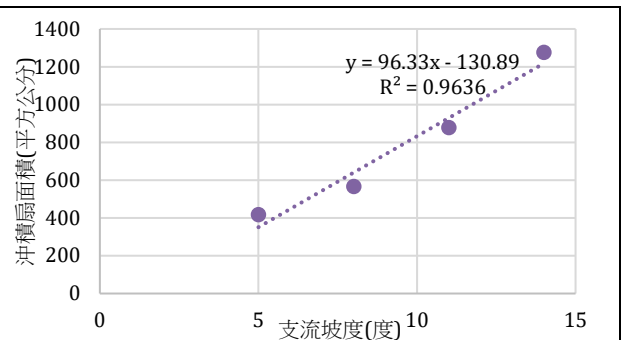


圖13：支流坡度對沖積扇面積的影響

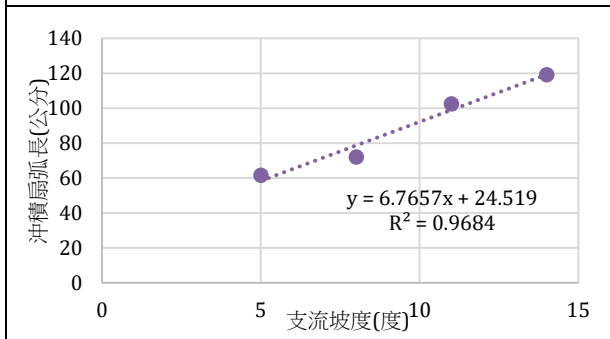


圖14：支流坡度對沖積扇弧長的關係

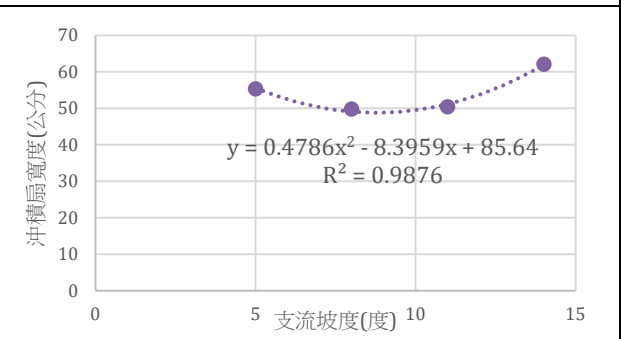


圖15：支流坡度對沖積扇寬度的影響

(五) 支流坡度對沖積扇坡度的影響：無法看出支流坡度對沖積扇坡度有影響 (圖 16)。

(六) 支流坡度對沖積扇扇頂高度的影響：隨著支流坡度增加，沖積扇扇頂高度也增加(圖17)。

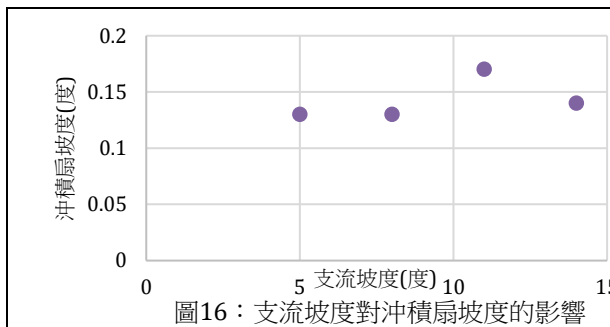


圖16：支流坡度對沖積扇坡度的影響

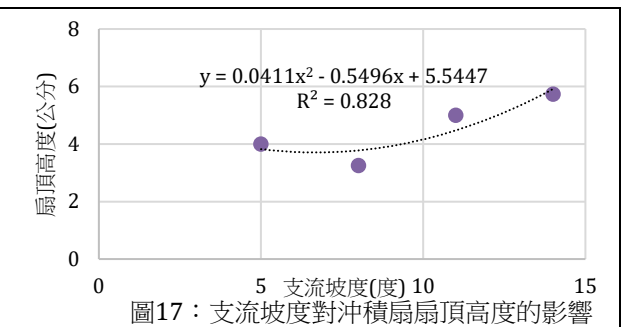


圖17：支流坡度對沖積扇扇頂高度的影響

(七) 支流坡度對沖積扇形成形狀之影響：

1. 隨著支流坡度增加，沖積扇上、下游兩側的增加幅度較小，沖積扇多向前擴散。
2. 在主流坡度固定為4度的情況下，沖積扇的下游側面積略大於上游側面積。
3. 隨著支流坡度增加，沖積扇的面積逐漸變大，且增加幅度相當明顯。
4. 在此實驗條件下改變支流坡度所形成的沖積扇形狀略偏圓弧狀，如圖 18。

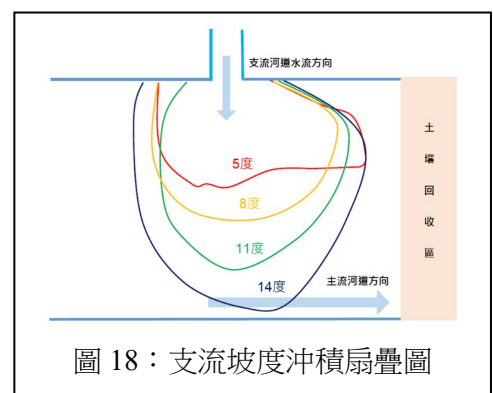


圖 18：支流坡度沖積扇疊圖

小結：

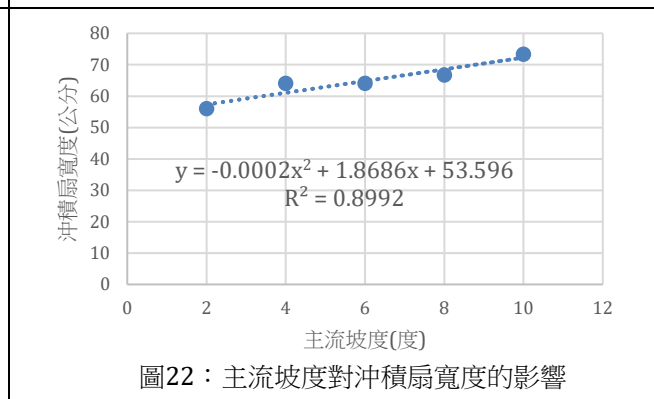
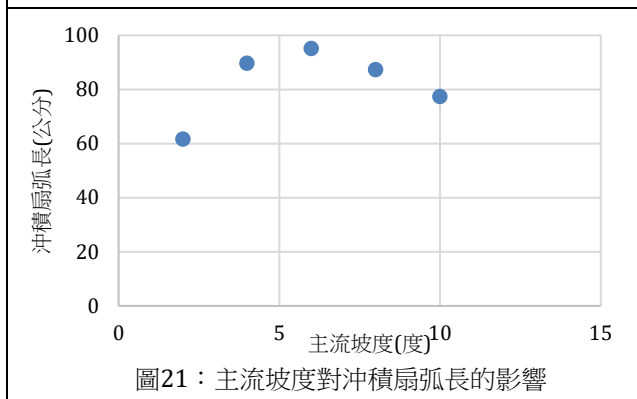
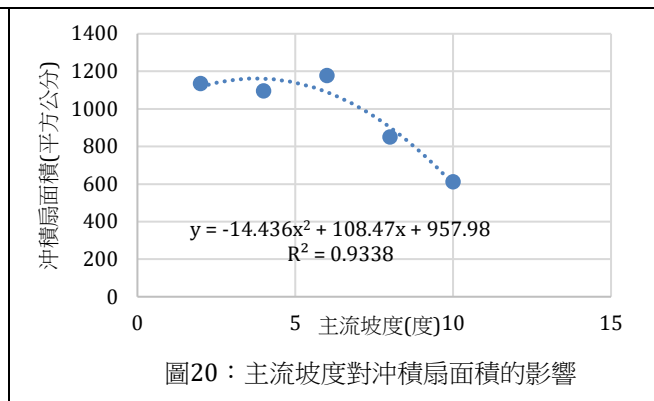
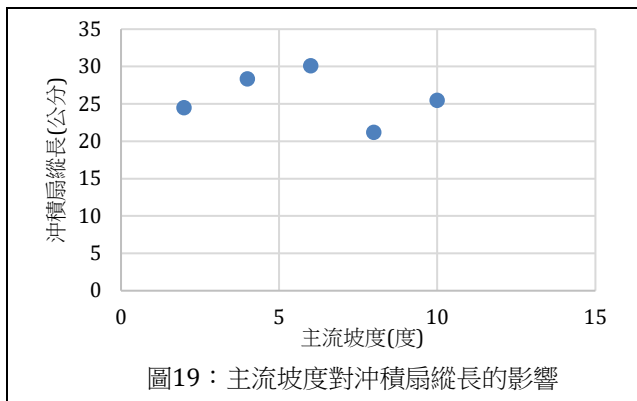
1. 隨著支流坡度增加，沖積扇的縱長、面積、寬度、弧長及扇頂高度皆增加。
2. 經由圖表分析後，發現沖積扇坡度與支流坡度沒有關聯。
3. 在此變因(降雨時間 1 分鐘，降雨強度 3.6 公升/分，主流坡度 4 度)的情況下，改變支流坡度所形成的沖積扇，其形狀邊緣類似圓弧形。

4. 隨著支流坡度增加，沖積扇左右兩側的增加幅度較小，而沖積扇多以向前擴散為主，且在主流坡度為 4 度的情況下，沖積扇的下游側面積略大於上游側面積。
5. 支流坡度對沖積扇的擴散作用與堆積作用皆有顯著影響。

五、觀察主流河道坡度對沖積扇形狀的影響

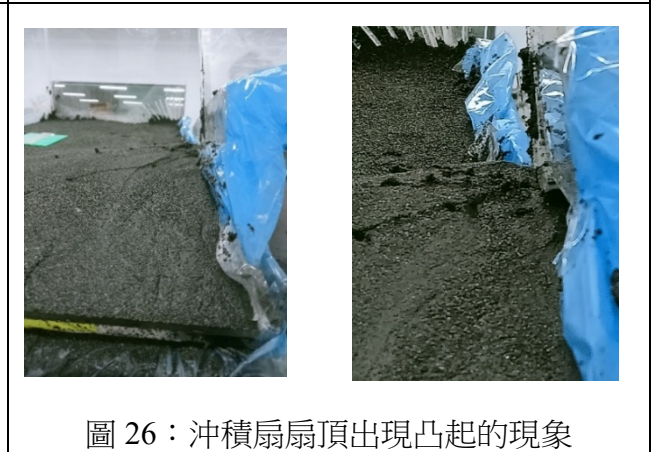
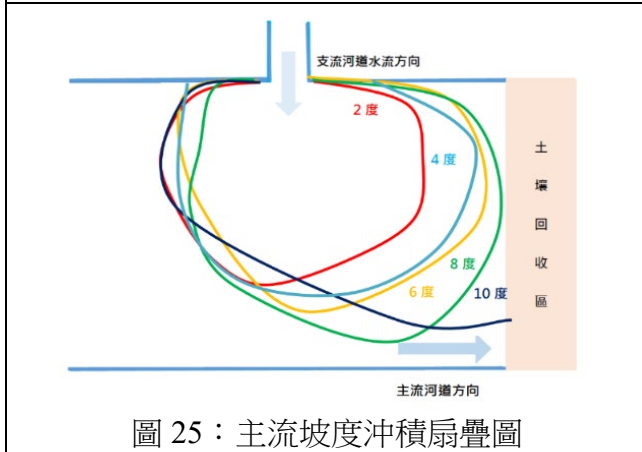
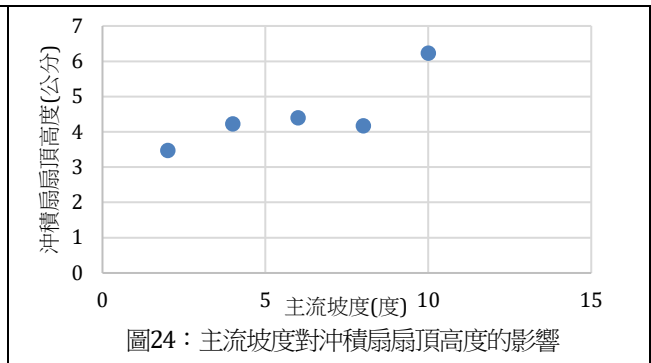
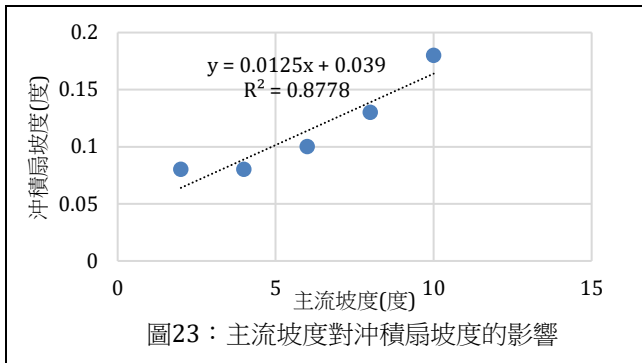
我們推測若將沖積扇的形成區，也就是主流坡度改變坡度，可能會影響到沖積扇的形成，進而導致沖積扇往下游方向堆積，為驗證我們的猜想，因此本實驗改變主流河道坡度，觀察沖積扇分別在主流 2 度、4 度、6 度、8 度及 10 度時，以降雨強度 3.6 公升/分，支流坡度 8 度，降雨 1 分鐘情況下沖積扇形狀的變化。研究結果如下：

- (一) 主流坡度對沖積扇縱長的影響：無法看出主流坡度對沖積扇縱長有顯著的影響，但主流坡度為 6 度時，沖積扇縱長達到最大值(圖 19)。
- (二) 主流坡度對沖積扇面積的影響：當主流坡度大於 8 度時，沖積扇面積明顯減少(圖 20)。
- (三) 主流坡度對沖積扇弧長的影響：當主流坡度為 6 度時，弧長達到最大值(圖 21)。
- (四) 主流坡度對沖積扇寬度的影響：隨著主流坡度的增加，沖積扇寬度也增加(圖 22)。



- (五) 主流坡度對沖積扇坡度的影響：隨著主流坡度增加，沖積扇坡度也增加(圖 23)。
- (六) 主流坡度對沖積扇扇頂高度的影響：沖積扇扇頂高度在 4 到 8 度無明顯增加，但在 10 度時有明顯增加的趨勢(圖 24)。
- (七) 主流坡度對沖積扇形狀的影響：
 1. 在支流固定為 8 度的情況下，隨著主流坡度的增加，沖積扇往下游側堆積的情形越明顯(圖 25)。
 2. 在這樣的實驗條件下，沖積扇的形狀較呈不規則狀，且隨著主流坡度的增加，沖積扇越往下游側堆積(圖 25)。

3. 主流坡度較大時，沖積扇扇頂出現凸起的現象(圖 26)。



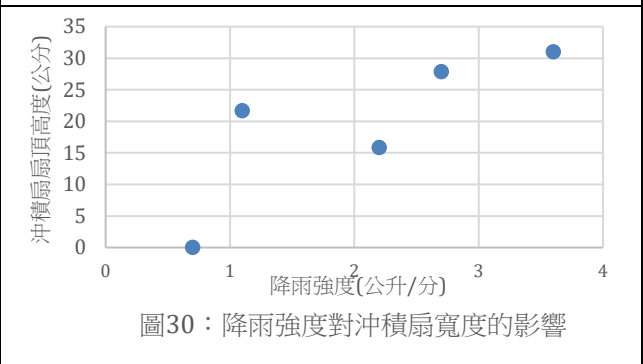
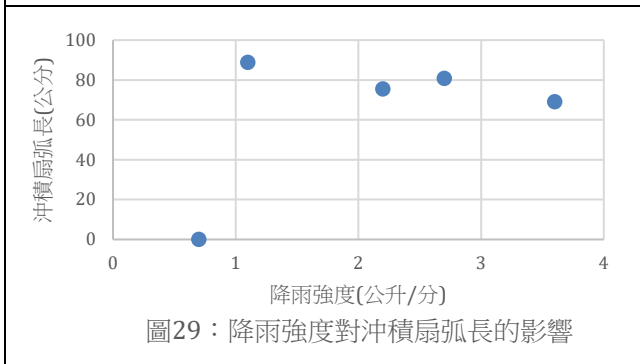
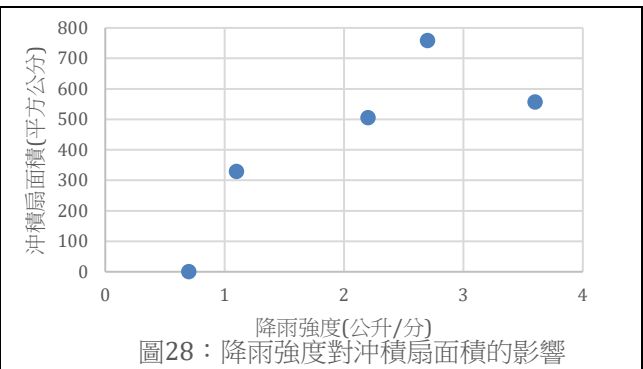
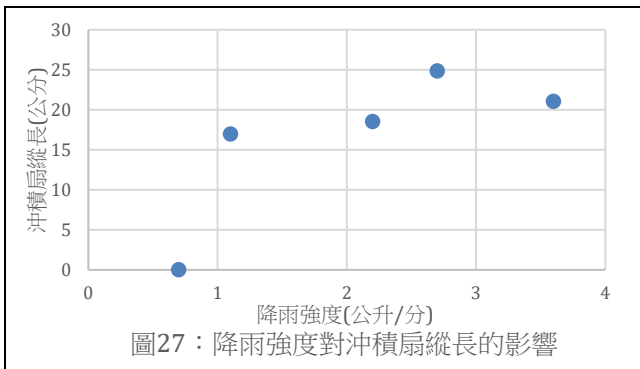
小結：

1. 無法看出主流坡度對沖積扇縱長有顯著的影響。
2. 隨著主流坡度增加，沖積扇面積減少，寬度、坡度、扇頂高度則隨之增加。
3. 當主流坡度為 6 度時，沖積扇弧長達到最大。
4. 根據觀察結果，隨著支流坡度的增加，沖積扇往下游側堆積的情形越明顯，且形成的沖積扇形狀較不規則。
5. 我們也觀察到在主流坡度較大時，沖積扇扇頂處出現砂石凸起的現象。

六、觀察降雨強度對沖積扇形狀的影響

目前土石流的警戒方法為計算累計降雨量，因此我們希望了解在相同的時間下(1 分鐘)，改變降雨強度對沖積扇形狀的影響。我們觀察當降雨強度為 0.7 公升/分、1.1 公升/分、2.2 公升/分、2.7 公升/分、3.6 公升/分時所形成的沖積扇形狀，研究結果如下：

- (一) 降雨強度對沖積扇縱長的影響：隨著降雨強度增加，沖積扇的縱長也增加(圖 27)。
- (二) 降雨強度對沖積扇面積的影響：隨著降雨強度增加，沖積扇的面積也增加(圖 28)。
- (三) 降雨強度對沖積扇弧長的影響：隨著降雨強度增加，沖積扇的弧長減少(圖 29)。
- (四) 降雨強度對沖積扇寬度的影響：隨著降雨強度的增加，沖積扇寬度也增加(圖 30)。

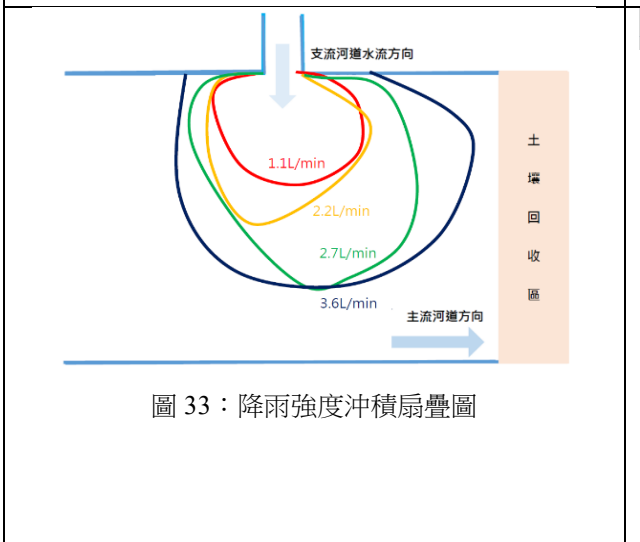
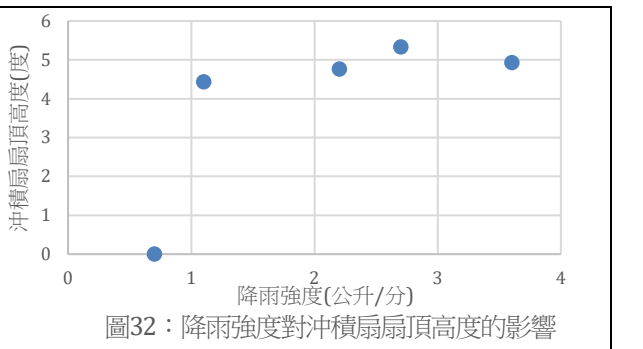
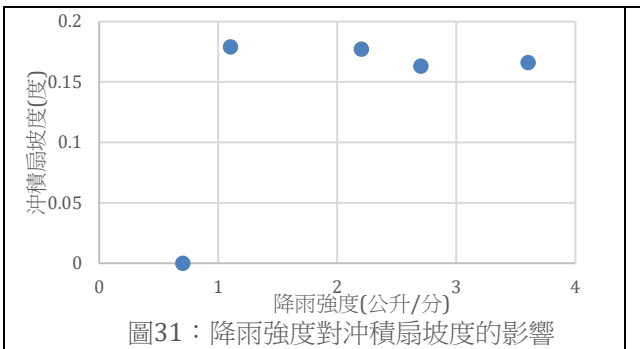


(五) 降雨強度對沖積扇坡度的影響：隨著降雨強度增加，沖積扇坡度減少(圖 31)。

(六) 降雨強度對沖積扇扇頂高度的影響：隨著降雨強度增加，扇頂高度也增加(圖 32)。

(七) 降雨強度對沖積扇形狀的影響

1. 降雨強度為 0.7 公升/分時，沖積扇直到 1 分 30 秒左右才會形成沖積扇。
2. 隨著降雨強度的增加，在主流坡度 4 度的情況下，沖積扇向前及下游側發展的情形比較明顯，但在上游側也有發展，整體而言沖積扇的下游扇大於上游扇(圖 33)。



小結：

1. 當降雨強度大於 0.7 公升/分時才會在一分鐘內形成沖積扇。
2. 隨著降雨強度增加，沖積扇的縱長、面積、寬度、扇頂高度皆有增加。
3. 隨著降雨強度的增加，沖積扇的弧長、坡度減少。
4. 隨著降雨強度的增加，在主流坡度為 4 度的情況下，沖積扇向前及下游側發展的情形比較明顯，但在上游側也有發展的情形。
5. 降雨強度會導致沖積扇的擴散作用提升，堆積作用相對不明顯。

七、觀察降雨時長對沖積扇形狀的影響

承接上一個實驗，我們也想要探討在相同的降雨強度下，觀察改變降雨時長對沖積扇的形狀有何影響。由於不同的降雨強度所形成的沖積扇差異甚大，因此我們認為不能夠只探討一種降雨強度，因此選了降雨強度大(3.6 公升/分)、降雨強度中(2.2 公升/分)、降雨強度小(0.7 公升/分)，又因為降雨強度小時，沖積扇差異較不容易觀察，因此我們在降雨強度小時，以 2 分鐘為觀察間距，觀察沖積扇在 2、4、6、8、10 分鐘時的形狀；其餘則以 1 分鐘為觀察間距，觀察沖積扇在 1、2、3、4、5 分鐘時的形狀。實驗結果如下：

(一) 降雨時長對沖積扇縱長、面積及扇端弧長的影響(降雨時長= 0.7, 2.2, 3.6 公升/分)：

1. 隨著降雨時長的增加，在降雨強度小時沖積扇縱長增加幅度不明顯，降雨強度中時在 3 分鐘後便沒有顯著增加，降雨強度強時增加幅度則較前兩者明顯(圖 34)。
2. 隨著降雨時長的增加，三種降雨強度的沖積扇之面積皆有顯著增加，唯獨降雨強度中的沖積扇在 3 分鐘後便沒有明顯增加(圖 35)。
3. 隨著降雨時長的增加，降雨強度小時沖積扇扇端長度沒有明顯的增加趨勢，但其他兩者皆有增加(圖 36)。
4. 隨著降雨強度增加，沖積扇寬度有減少的趨勢，降雨時長增加，沖積扇寬度也隨之增加(圖 37)。

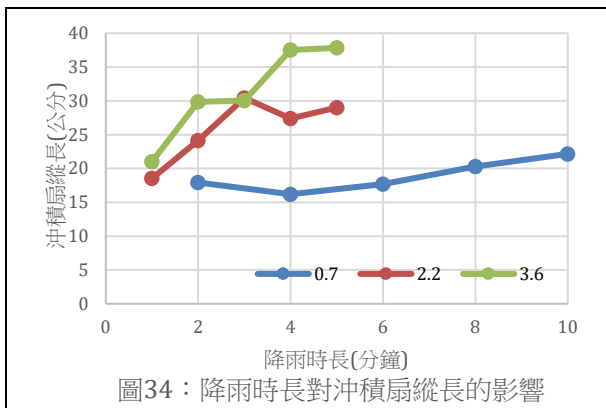


圖34：降雨時長對沖積扇縱長的影響

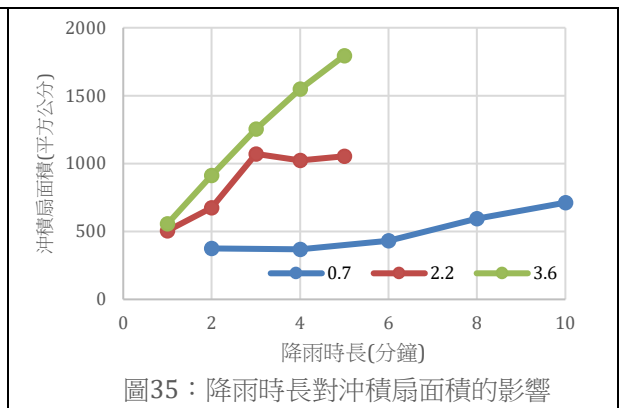


圖35：降雨時長對沖積扇面積的影響

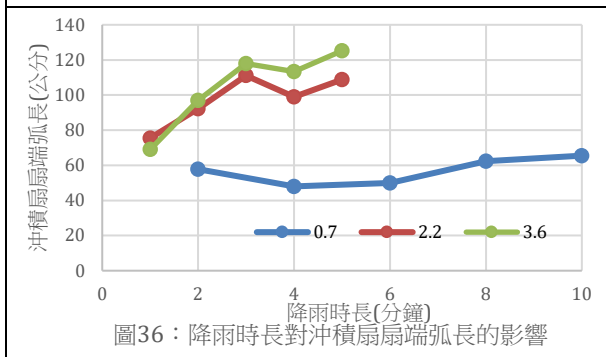


圖36：降雨時長對沖積扇扇端弧長的影響

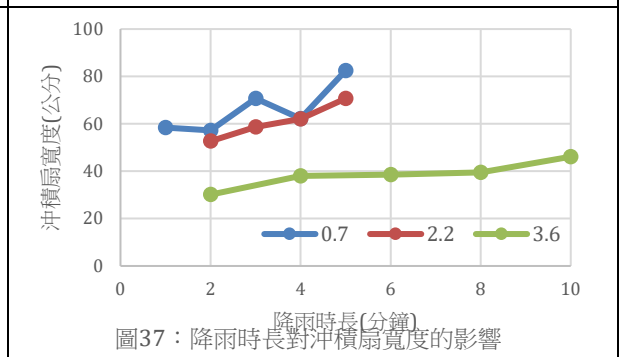
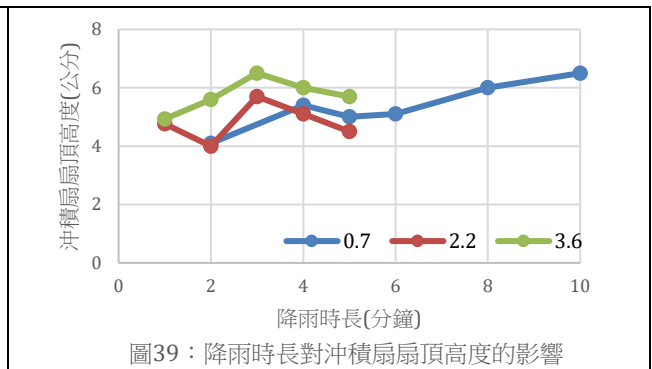
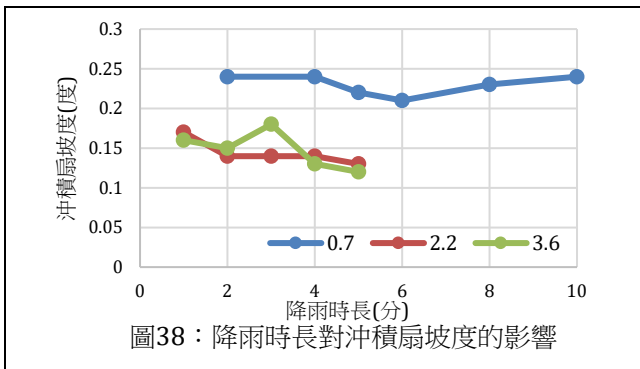


圖37：降雨時長對沖積扇寬度的影響

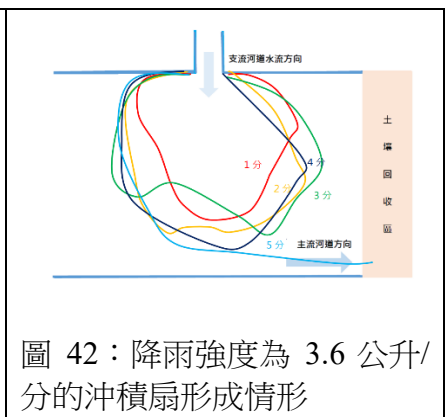
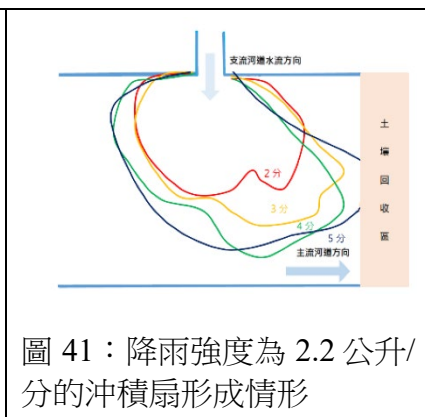
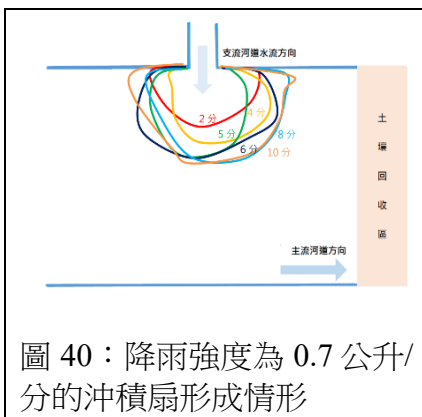
(二) 降雨時長對沖積扇坡度及扇頂高度的影響(降雨時長=0.7, 2.2, 3.6 公升/分)：

1. 降雨強度小時，沖積扇的坡度變化不大，但隨著降雨強度的增加，降雨時長越長，沖積扇的坡度隨之降低(圖 38)。
2. 降雨強度小時，沖積扇扇頂高度隨著降雨時長變長穩定的成長，但在降雨強度大時則會有降低再增加的情形(此為沖積扇交替進行擴散及堆積所造成，如圖 39)



(三) 降雨時長對沖積扇的形狀的影響(降雨時長=0.7, 2.2, 3.6 公升/分)：

1. 透過觀察後我們發現，降雨強度小時沖積扇的擴散現象不明顯，而降雨強度大時沖積扇的面積隨著沖積扇的降雨時長增加而隨之增加(圖 40、圖 41、圖 42)。
2. 降雨強度小時，沖積扇成均勻向外擴散，降雨強度較大時沖積扇以向前或向下游側擴散居多(圖 40、圖 41、圖 42)。
3. 沖積扇的形狀不論在任何降雨情況下皆成不規則狀(圖 40、圖 41、圖 42)。



小結：

1. 隨著降雨時長增加，沖積扇的縱長、面積、弧長、寬度及扇頂高度皆有增加，且降雨強度大的時候此現象比較明顯；反之，扇頂高度在降雨強度小時比較明顯。
2. 降雨強度小時，沖積扇成均勻向外擴散，降雨強度較大時沖積扇以向前或向下游側擴散居多。
3. 降雨時長會導致沖積扇的擴散作用與堆積作用增加。

八、觀察沉積物顆粒大小對沖積扇的形狀有何影響？

經過文獻探討，我們認為沖積扇的形成與砂石種類有很明確的關聯，因此我們找了不同顆粒大小的砂石，固定主流 4 度、支流 8 度，以不同的降雨情況模擬沖積扇形成過程，觀察沖積扇的形成情形。實驗結果如下：

(一) 沉積物為礫石時，不同降雨情況對沖積扇的縱長、面積、扇端弧長的影響：

1. 本次實驗降雨情況設定為：降雨強度=3.6, 5, 6，降雨時長=1, 3, 5
2. 隨著降雨時長的增加，除各組 1 分鐘時皆沒有產生沖積扇外，在降雨強度大時，沖積扇縱長有些微增加(圖 43)。
3. 隨著降雨時長的增加，除各組 1 分鐘時皆沒有產生沖積扇外，沖積扇的面積、扇端弧長皆沒有明顯增加(圖 44、45)。

4. 降雨強度小時，隨著降雨時長的增加，沖積扇寬度有明顯的增加；降雨強度大時則較無影響(圖 46)。

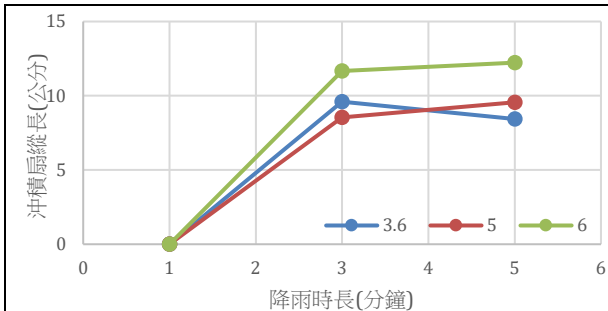


圖43：礫石，降雨時長對沖積扇縱長的影響

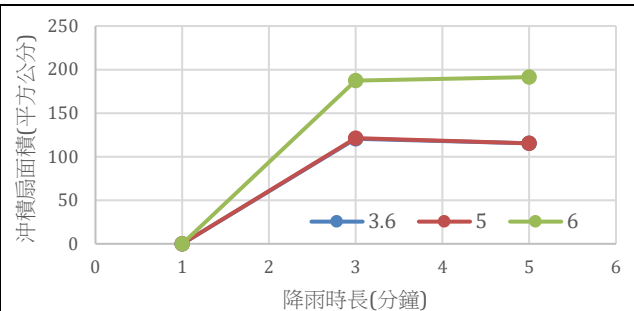


圖44：礫石，降雨時長對沖積扇面積的影響

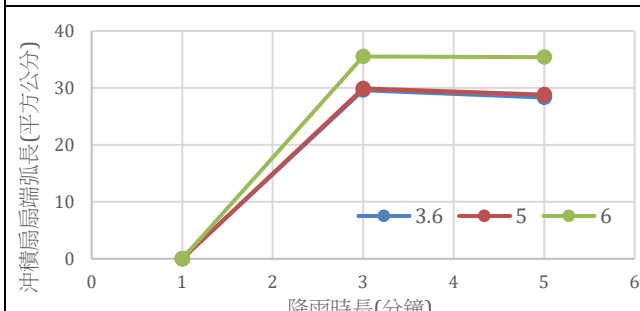


圖45：礫石，降雨時長對沖積扇扇端弧長的影響

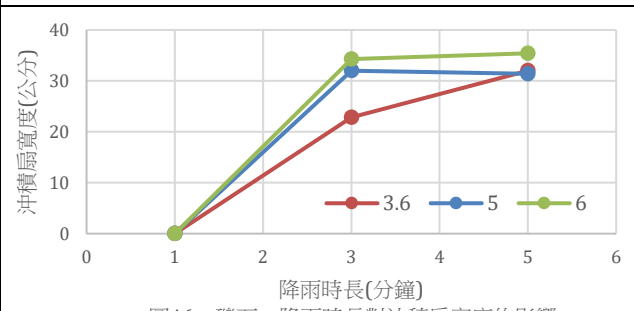


圖46：礫石，降雨時長對沖積扇寬度的影響

(二) 沉積物為礫石時，不同降雨情況對沖積扇的坡度、扇頂高度的影響：

1. 本次實驗降雨情況設定為：降雨時長(後續以 I 表示)=3.6, 5, 6，降雨強度(公升/分)(後續以 T 表示)=1, 3, 5
2. 隨著降雨時長增加，沖積扇坡度在任何降雨強度下超過 3 分鐘後皆沒有顯著的變化。
3. 隨著降雨時長的增加，沖積扇扇頂高度在任何降雨強度下皆有增加，且高度按照降雨強度大小排列(圖 48)。

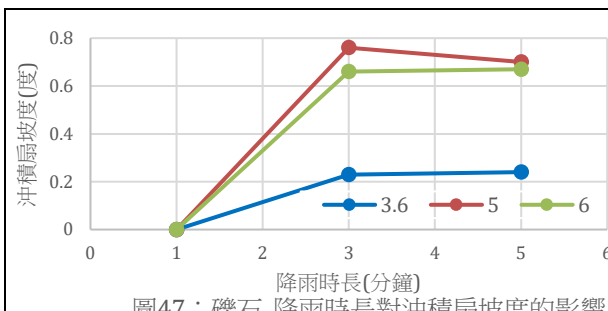


圖47：礫石，降雨時長對沖積扇坡度的影響

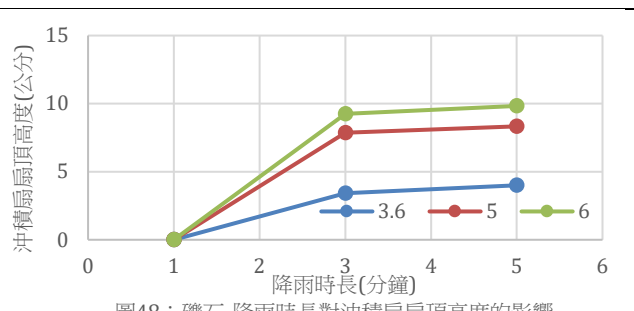


圖48：礫石，降雨時長對沖積扇扇頂高度的影響

(三) 沉積物為礫石時，不同降雨情況對沖積扇的形狀的影響：

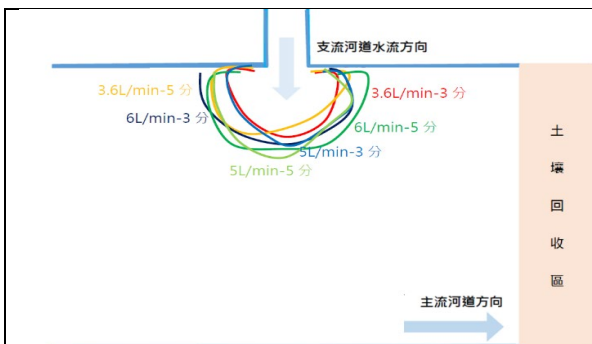


圖 49：沉積物為礫石時沖積扇的形狀

1. 由於沉積物顆粒大小較大，水流一開始能帶動礫石，但到後來便無法搬運礫石，水流便從沖積扇頂端開始滲入沖積扇，而從扇端處排出水流。
2. 沖積扇在形成後約 1 分 30 秒面積便無太大變化，僅增加其堆積高度。
3. 隨著降雨時長與降雨強度的增加，沖積扇的面積雖有增加，但擴散現象不明顯。(圖 49)

(四) 沉積物為粗砂時，不同降雨情況對沖積扇的縱長、面積、扇端弧長的影響：

1. 本次實驗降雨情況設定為： $I=2.2, 3.6, 5$ ， $T=1, 3, 5$ ，由於沖積扇在 $I=5, T=3$ 時即達本實驗裝置最大設計量，故未進行 $T=5$ 的實驗。
2. 隨著降雨時長的增加，沖積扇的縱長也增加，且又以降雨強度大者較明顯(圖 50)。
3. 隨著降雨時長的增加，沖積扇的面積也增加，且增加幅度相當規律，其中又以降雨強度大者增加幅度最大(圖 51)。
4. 隨著降雨時長的增加，沖積扇的扇端弧長也增加，其中又以降雨強度大者增加幅度最大(圖 52)。
5. 隨著降雨時長的增加，沖積扇寬度也增加(圖 53)。

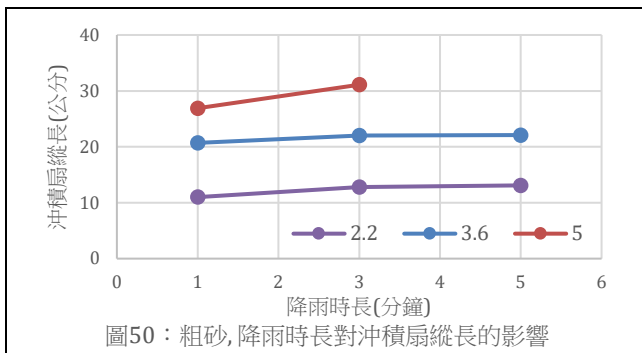


圖50：粗砂，降雨時長對沖積扇縱長的影響

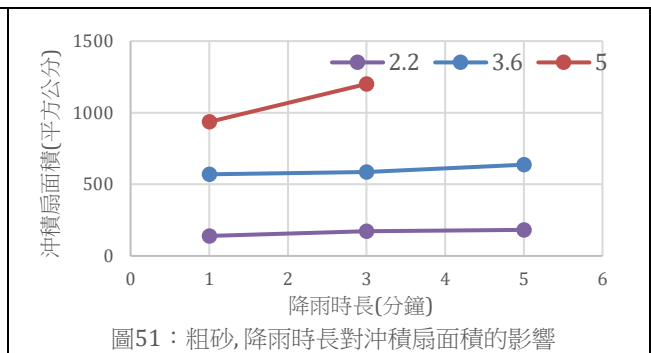


圖51：粗砂，降雨時長對沖積扇面積的影響

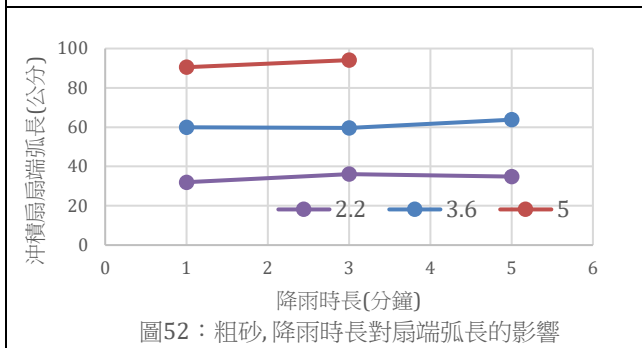


圖52：粗砂，降雨時長對扇端弧長的影響

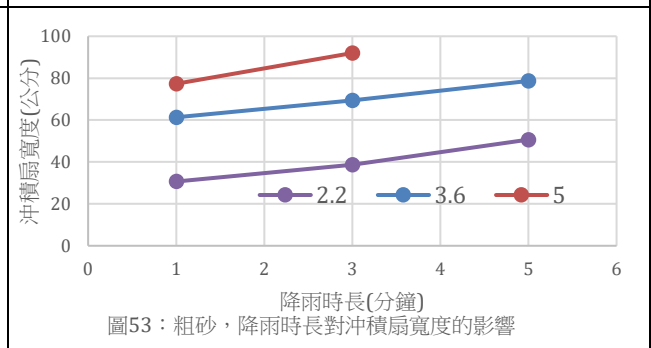


圖53：粗砂，降雨時長對沖積扇寬度的影響

(五) 沉積物為粗砂時，不同降雨情況對沖積扇的坡度及扇頂高度的影響：

1. 本次實驗降雨情況設定為： $I=2.2, 3.6, 5$ ， $T=1, 3, 5$ ，由於沖積扇在 $I=5, T=3$ 時即達本實驗裝置最大設計量，故未進行 $T=5$ 的實驗，僅以現有數據模擬呈現。
2. 隨著降雨強度的增加，沖積扇的坡度也增加，但降雨強度大時卻減少(圖 54)。
3. 隨著降雨強度的增加，沖積扇的扇頂高度也增加，但在降雨強度大時扇頂高度增加的情形不明顯(圖 55)。

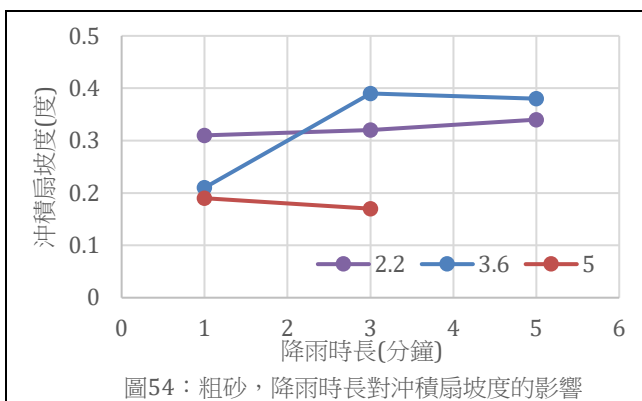


圖54：粗砂，降雨時長對沖積扇坡度的影響

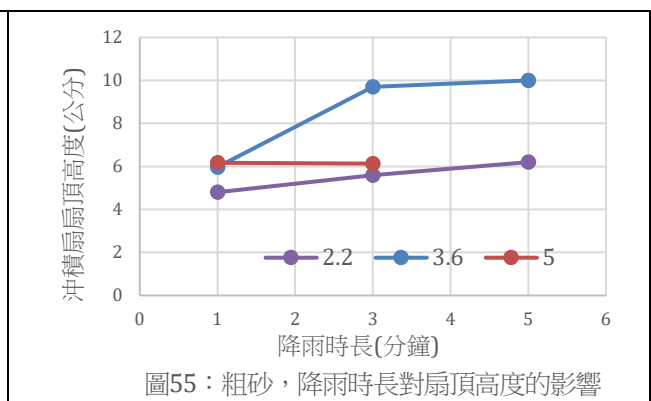
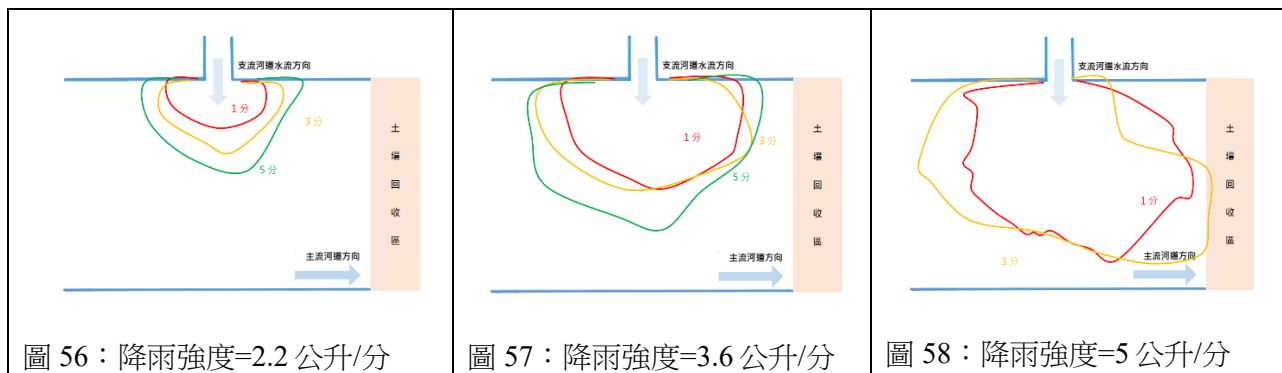


圖55：粗砂，降雨時長對扇頂高度的影響

(六) 沉積物為粗砂時，不同降雨情況對沖積扇的形狀的影響：

1. 我們發現，隨著降雨強度增加，沖積扇面積皆增加，且隨著降雨時長增加，三組實驗的沖積扇面積皆增加(圖 56、圖 57、圖 58)。
2. 整體而言，沉積物為粗砂時，沖積扇向左右方向擴散的情形略比向前擴散的情形明顯(圖 56、圖 57、圖 58)。
3. 整體而言，沖積扇在降雨強度大時的形狀較不規則，但上、下游扇的大小沒有太大差異(圖 58)。



小結：

1. 當沉積物為礫石時，沖積扇外形較無明顯的變化，但其中扇頂高度隨著降雨時長增加而增加。
2. 當沉積物為粗砂時，沖積扇的縱長、面積、扇端弧長皆在降雨強度大時變化較明顯；沖積扇的坡度及扇頂高度在降雨強度大時變化反而較不明顯。
3. 沉積物顆粒較大時，沖積扇的堆積現象較明顯；沉積物顆粒較小時，沖積扇的擴散現象較明顯，綜合比較後，整體而言堆積現象為礫石>粗砂>中砂與細砂；擴散現象為礫石<粗砂<中砂與細砂。

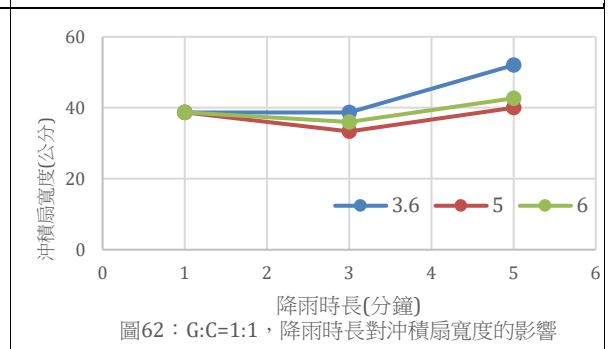
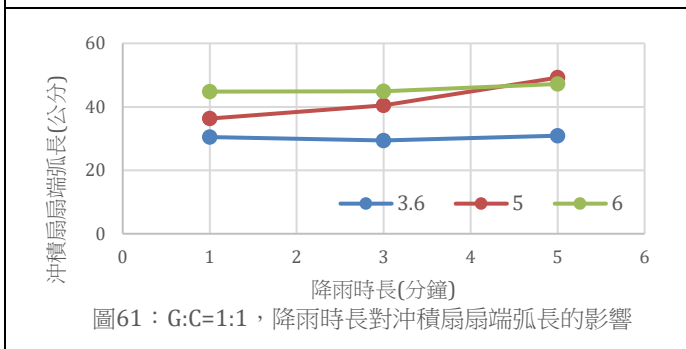
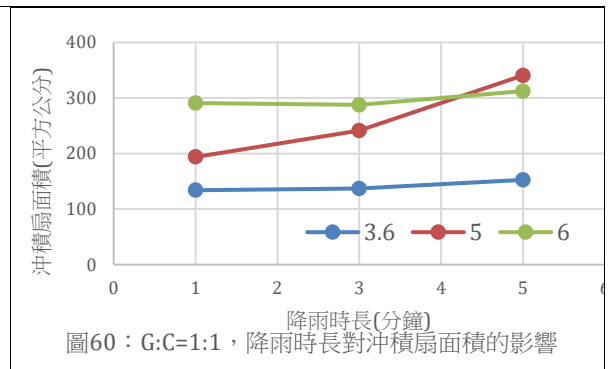
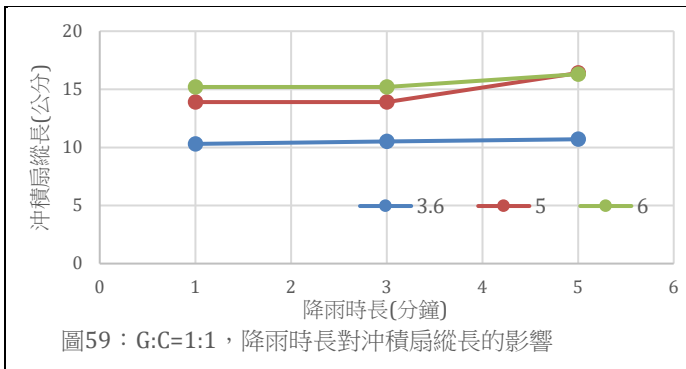
九、觀察不同的砂石組成對沖積扇形狀的影響

因觀察到在粗砂觀察時，我們發現黑砂和白砂有明顯的分層現象，黑砂在下，白砂在上，所以我們想要知道是因為重量，亦或是顆粒大小導致出現分層，因此開始了本實驗。沖積扇的礫石、砂石的分布情形不盡相同，我們認為其所產生的沖積扇應該也有所不同，因此我們改變不同的砂石組成，包含礫石型土石流(礫石比例超過 50%)及泥流型土石流(泥沙比例超過 50%)，並固定主流 4 度、支流 8 度，以不同的降雨情形(I=3.6、5、6, T=1、3、5)進行實驗，觀察沖積扇的形成情形。實驗結果如下：

(一) 礫石：粗砂(後續圖表中簡稱為 G:C)=1:1

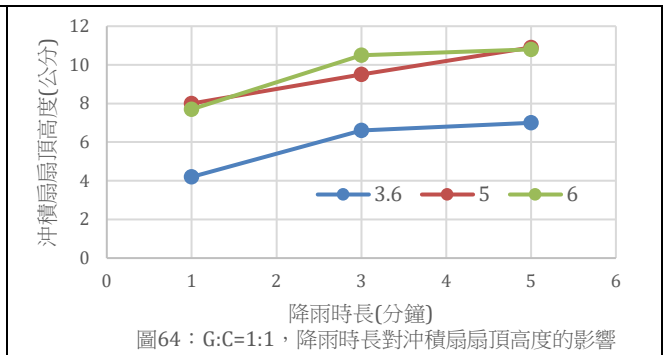
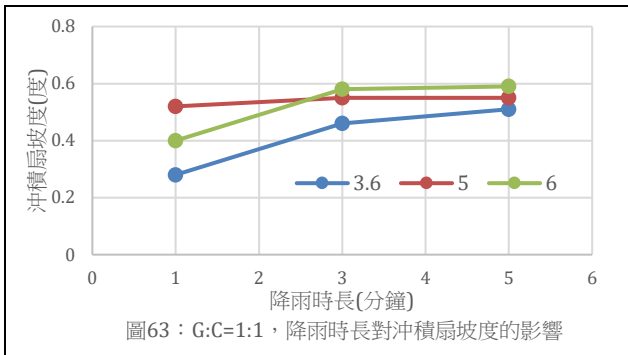
1. 不同降雨情形對沖積扇的縱長、面積、扇端弧長的影響：

- (1) 隨著降雨時長(T)及降雨強度(I)的增加，沖積扇的縱長增加幅度皆不明顯(圖 59)。
- (2) 沖積扇的面積在 I=5 時有明顯的增加，但在 I=3.6 及 6 時增加幅度不明顯(圖 60)。
- (3) 隨著降雨時長(T)及降雨強度(I)的增加，沖積扇的扇端弧長增加幅度皆不明顯(圖 61)。
- (4) 隨著降雨時長(T)及降雨強度(I)的增加，在 I=3.6 及 5 時沖積扇寬度也增加，但在 I=6 時，增加較不明顯(圖 62)。



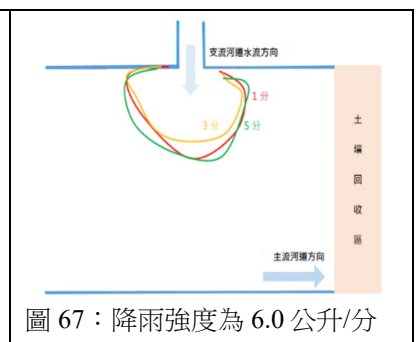
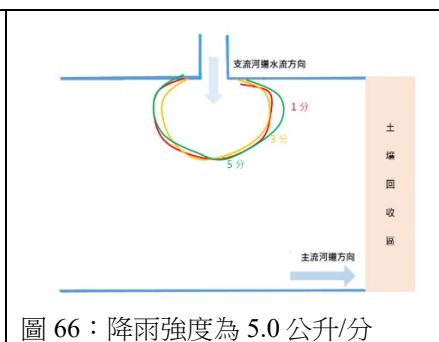
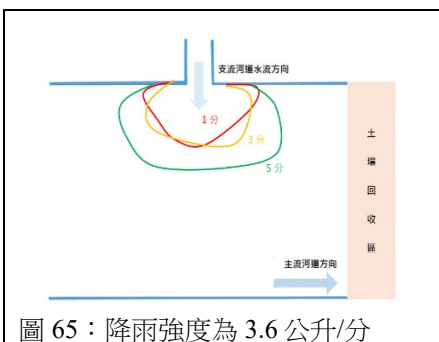
2. 不同降雨情形對沖積扇的坡度、扇頂高度的影響：

- (1) 隨著降雨時長增加，沖積扇的坡度皆增加，其中又以 I=3.6, 6 的最為明顯(圖 63)。
- (2) 隨著降雨時長增加，扇頂高度皆增加，其中又以降雨強度中、大時較為明顯(圖 64)。



3. 不同的砂石組成，不同降雨情況對沖積扇的形狀的影響：

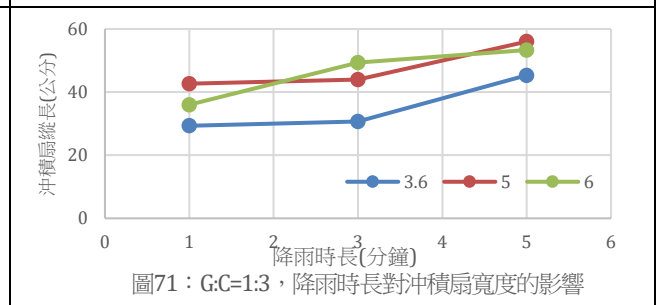
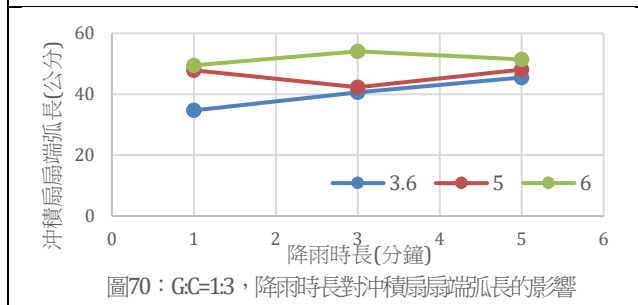
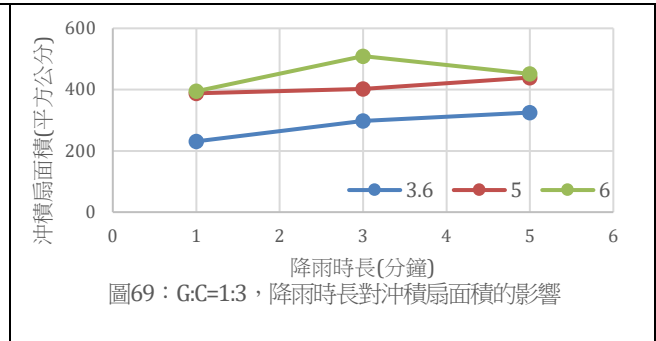
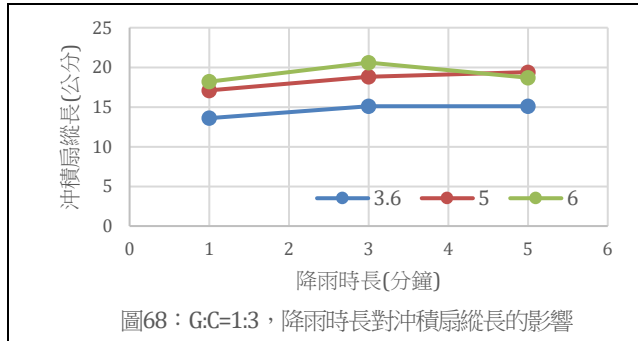
- (1) 我們發現，隨著降雨時長的增加，在降雨強度小時沖積扇的面積增加，在降雨強度大時沖積扇的面積增加幅度不明顯(圖 65、圖 66、圖 67)。
- (2) 我們發現，沖積扇的上、下游扇沒有明顯的大小關係之分(圖 65、圖 66、圖 67)。



(二) 礫石：粗砂=1:3

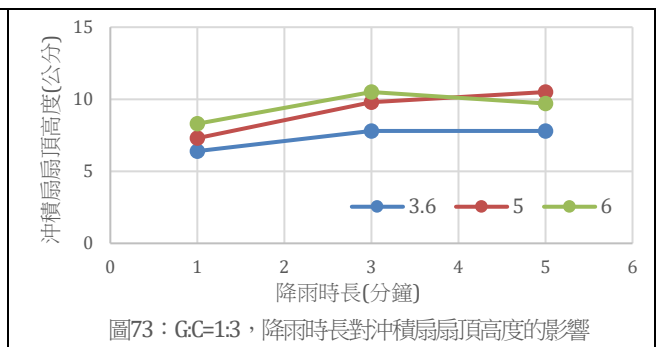
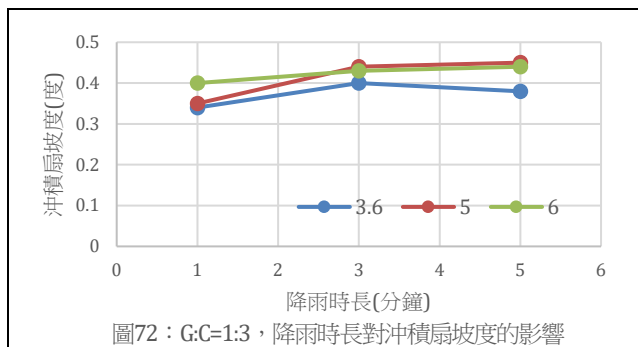
1. 不同降雨情形對沖積扇的縱長、面積、扇端弧長的影響：

- (1) 隨著降雨時長的增加，在任何降雨情況下沖積扇縱長都會增加(圖 68)。
- (2) 隨著降雨時長的增加，降雨強度小的情況下沖積扇面積與扇端弧長增加，降雨強度大時兩者增加幅度並不明顯(圖 69、70)。
- (3) 隨著降雨時長的增加，沖積扇寬度也隨之增加(圖 71)。



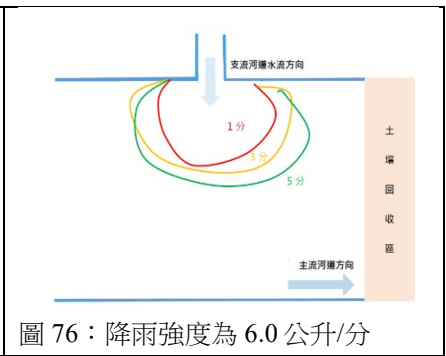
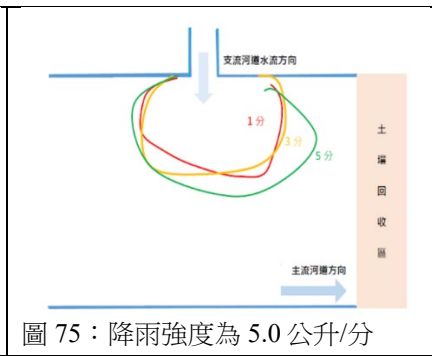
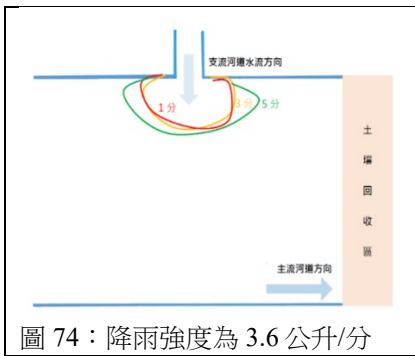
2. 不同降雨情形對沖積扇的坡度、扇頂高度的影響：

- (1) 隨著降雨時長增加，沖積扇坡度也增加(圖 72)。
- (2) 隨著降雨強度增加，沖積扇扇頂高度在任何降雨情況下，前三分鐘的增加幅度比較明顯(圖 73)。



3. 不同的砂石組成，不同降雨情況對沖積扇的形狀的影響：

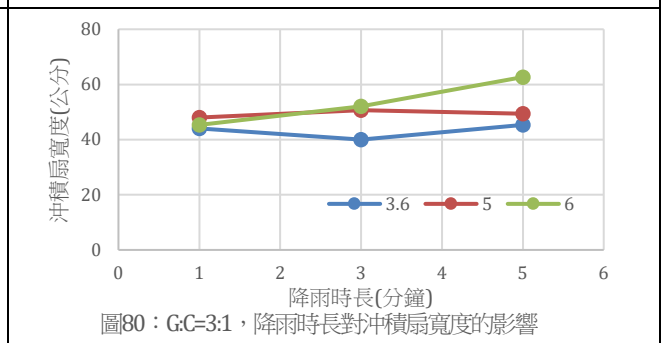
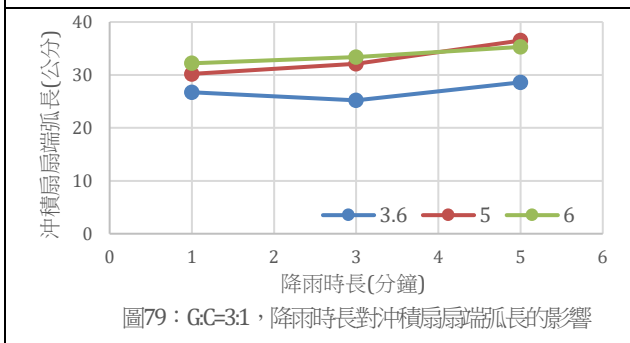
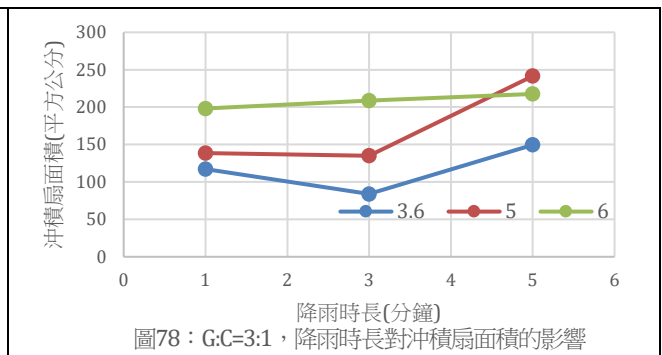
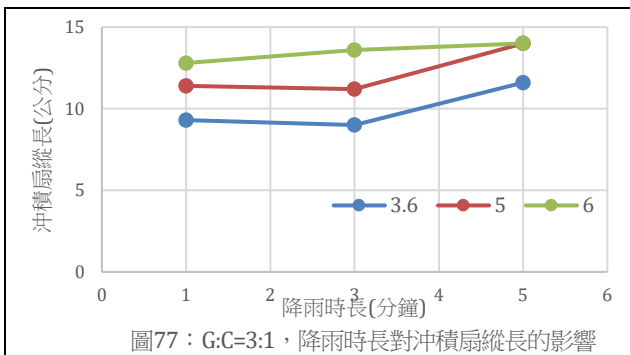
- (1) 隨著降雨強度的增加，沖積扇有相當明顯的擴散情形，且隨著降雨時長的增加，沖積扇的面積也都增加(圖 74、圖 75、圖 76)。
- (2) 沖積扇在降雨強度較小時，以向主流的上、下游方向擴散為主，降雨強度變大時則均勻擴散(圖 74、圖 75、圖 76)。



(三)礫石：粗砂=3:1

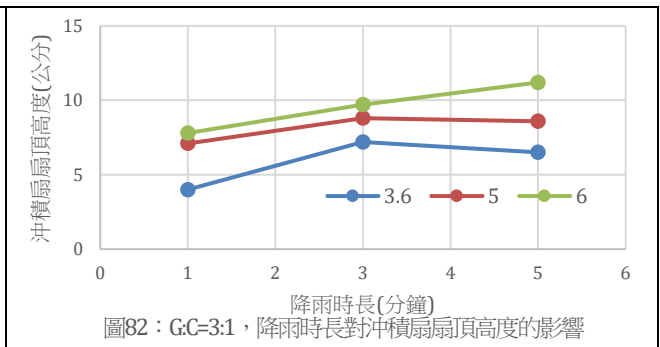
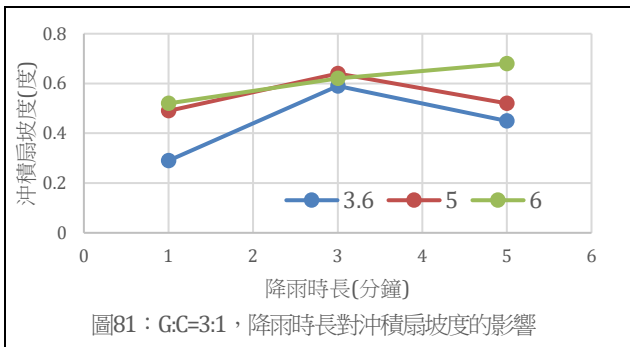
1. 不同降雨情形對沖積扇的縱長、面積、扇端弧長的影響：

- (1) 隨著降雨時長的增加，沖積扇的縱長雖有增加，但幅度皆不明顯(圖 77)。
- (2) 隨著降雨時長的增加，沖積扇的面積在降雨強度大時增加，但降雨強度小時則不一定(圖 78)。
- (3) 隨著降雨時長的增加，沖積扇扇端弧長也增加(圖 79)。
- (4) 隨著降雨時長的增加，在 I=6 時，沖積扇寬度也增加，在 I=3.6 或 5 時則較無明顯變化(圖 80)。

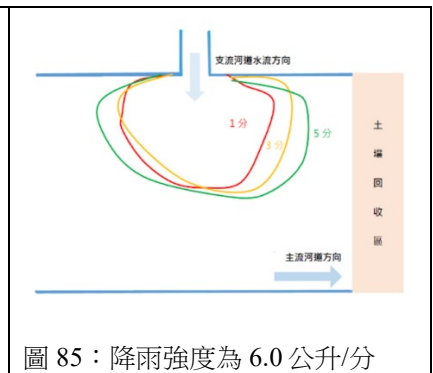
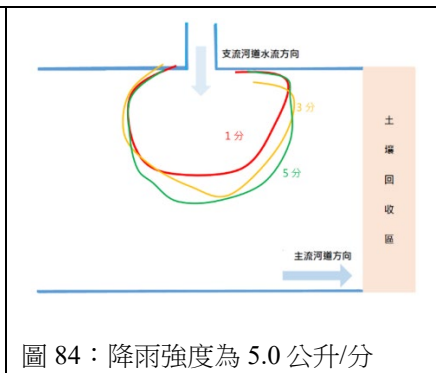
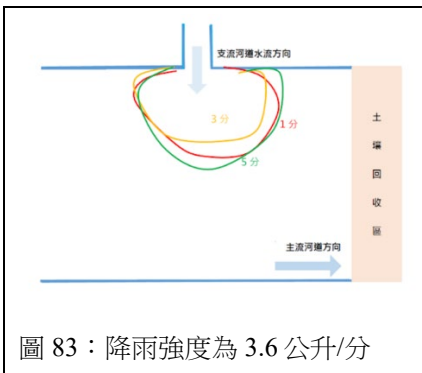


2. 不同降雨情形對沖積扇的坡度、扇頂高度的影響：

- (1) 隨著降雨時長增加，沖積扇坡度也增加，但到 5 分鐘時降雨強度小的沖積扇坡度則減少，推測為沖積扇擴散導致(圖 81)。
- (2) 隨著降雨時長增加，沖積扇扇頂高度也增加，但到 5 分鐘時降雨強度小的沖積扇扇頂高度則減少，吻合上點所推測的情形(圖 82)。

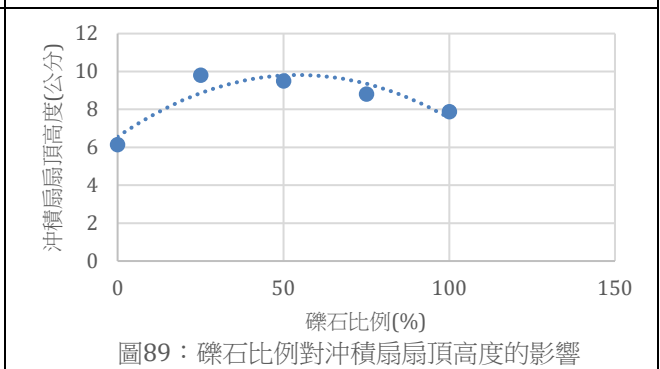
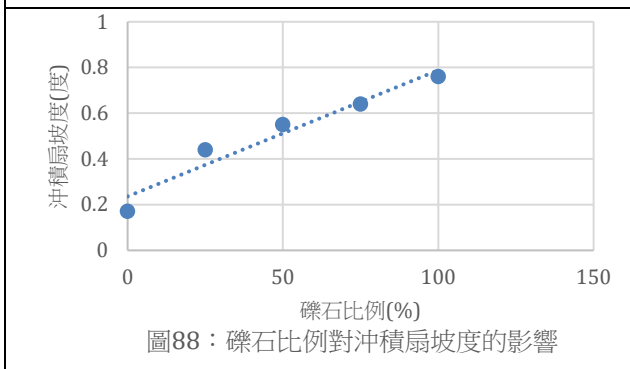
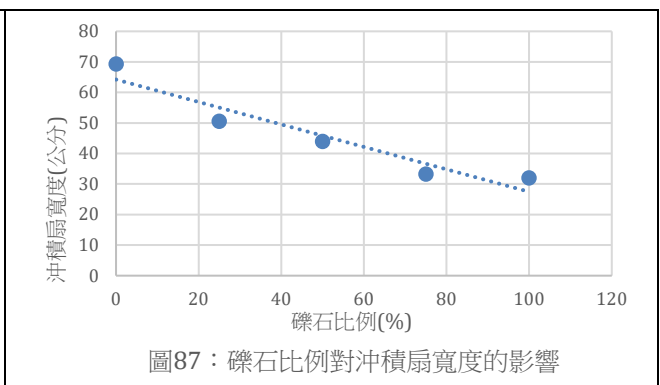
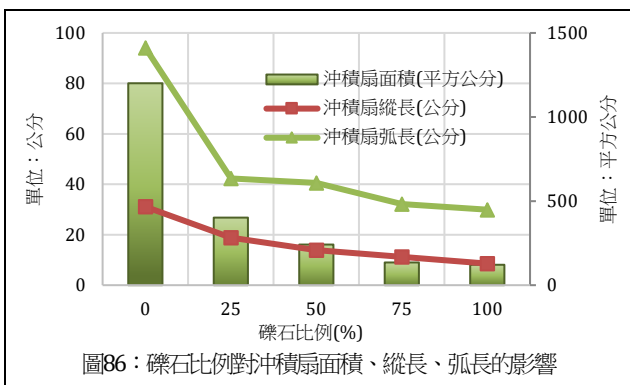


3. 不同降雨情況對沖積扇的形狀的影響：隨著降雨強度的增加，沖積扇的面積也增加，且擴散方向以向下游側擴散為主(圖 83、圖 84、圖 85)。



(四) 綜合比較：礫石比例對沖積扇的影響

1. 隨著礫石比例的增加，沖積扇的面積、縱長、弧長、坡度都減少(圖 86、87)。
2. 隨著礫石比例的增加，沖積扇的坡度也增加(圖 88)。
3. 隨著礫石比例的增加，沖積扇扇頂高度在粗砂 25%達到最高後下降，綜合其他圖表皆有陡升、陡降的情形推測在此比例下砂石最易堆積(圖 89)。



(五) 綜合比較：砂石組成對沖積扇顆粒物分布情形的影響

我們將實驗後的沖積扇沿藍色線切開後拍照(圖 90)，並根據圖片分析砂石分布情況，做出歸納與整理。

首先，在 $G:C=1:1$ ， $I=3.6$ 時我們可以發現先被沖刷下來的大部分是礫石(圖 91)，隨著降雨時長增加，才有粗砂堆積在上層。圖 92，圖 93、圖 94 可以明顯看出上層粗砂堆積，下層及扇端分布較多礫石。

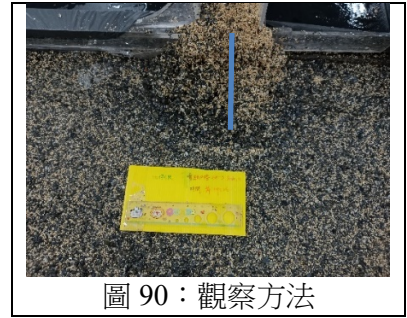


圖 90：觀察方法

在 $G:C=1:3$ 的實驗中，礫石的比例較低，受流水帶動後多數堆積於靠近支流口處(圖 95)，推測是因為礫石較難被流水帶動擴散導致；在降雨強度大的情況下，我們發現礫石會位在沖積扇的表層，應該是最後被沖刷出來的緣故(圖 96)。推測在 $G:C=1:3$ 時粗砂含量高，反而較容易先被沖刷。

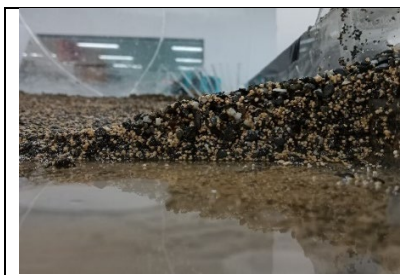


圖 91：G:C=1:1, I=3.6, T=1



圖 92：G:C=1:1, I=3.6, T=5

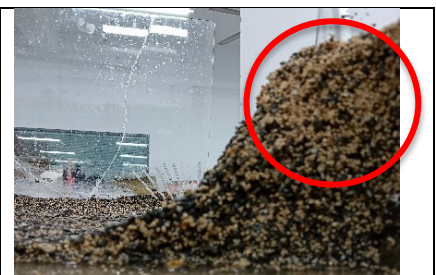


圖 93：G:C=1:1, I=6, T=5



圖 94：G:C=1:1, I=5, T=5



圖 95：G:C=1:3, I=5, T=5



圖 96：G:C=1:3, I=6, T=5

在 $G:C=3:1$ 時，粗砂所占比例低，與礫石凌亂參差分布，並無明顯的上下層分布差異(圖 97、圖 98)。

根據研究的觀察結果，初步總結：沖積扇的沉積物大小分布並無一致的規律，而是會受到水流速度、流量以及河水中沉積物顆粒大小比例的影響。在大部分情況下，粗砂多的時候會帶動沖積扇的擴散現象，而礫石則導致堆積現象。然而在進行實地探勘時，發現荖濃溪上游的砂石分布情形不易觀察，因此較難分析出當地的沖積扇沉積物分布情形。



圖 97：G:C=3:1, I=3.6, T=1

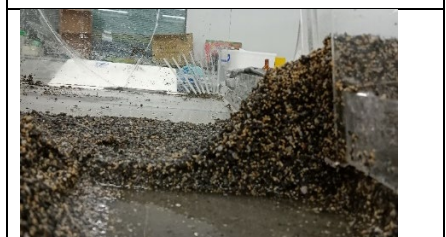


圖 98：G:C=3:1, I=6, T=5

小結：

1. 在 $G:C=1:1$ 時，隨著降雨時長增加，沖積扇之縱長、面積、扇端弧長、寬度皆較無明顯變化；而沖積扇的坡度和扇頂高度皆增加。
2. 在 $G:C=1:3$ 時，隨著降雨時長增加，沖積扇的縱長、面積、扇端弧長、寬度、坡度、扇頂高度都增加。

3. 在 G:C=3:1 時，隨著降雨時長增加，沖積扇的面積、扇端弧長皆增加。
4. 在 G:C=3:1 時，隨著降雨時長增加，沖積扇坡度、扇頂高度增加，但到 5 分鐘時降雨強度小的沖積扇坡度、扇頂高度則降低，推測為沖積扇擴散導致。
5. 混合沉積物中，若沉積物中的大顆粒較多，堆積作用較明顯；若沉積物中的大顆粒較少，擴散作用較明顯。
6. 沖積扇顆粒分布主要受到水流速度、沖積扇顆粒大小的影響，然而探勘荖濃溪上游時無法觀察到當地的沖積扇顆粒組成，因此較難對當地的情況進行分析討論。

十、觀察二次災害影響沖積扇的情形

(一) 二度災害直接覆蓋沖積扇

在台灣，經常有豪雨事件引發土石流，進而形成沖積扇。若今天在谷口已經形成了一個沖積扇，此時再有豪雨事件的發生，大量的砂石會如何影響原有的沖積扇？我們推測可能會覆蓋住原先的沖積扇，並希望能夠劃出在沖積扇上相對較安全的區域，因此我們設計了以下實驗：

1. 以相同變量(降雨強度 5.0L/min，降雨時長 3mins)製造第一次災害，形成沖積扇：仿照一般型土石流比例，礫石：粗砂：細沙=1:3:4
2. 分別用降雨強度為 0.7、2.2、3.6、5.0 L/min，降雨 3 分鐘模擬第二次災害，觀察沖積扇的變化情形。

實驗結果發現：

1. 沖積扇在二次災害後面積增加，覆蓋在原有沖積扇之上，依序是：中間、上游側及下游側。上游側形成了堰塞湖，扇端形成斷面。
2. 災害規模大時，沖積扇皆不安全；災害規模小時，沖積扇的上游偏前側較安全；模擬最小流量時，河流隨機選擇走向，以下游側最多，上游側次之。



圖 99：降雨強度=5.0L/min



圖 100：降雨強度=3.6L/min



圖 101：降雨強度=2.2L/min



圖 102：降雨強度=0.7L/min

小結：

在降雨強度較大時，沖積扇的任何區域都非常危險，皆有被覆蓋的可能；降雨強度較小時，以沖積扇的上游側、距離谷口越遠處越安全。在實驗中也發現，沖積扇會導致主流上方形成堰塞湖，及沖積扇扇端形成斷面，證實了探勘的發現。

(二) 二度災害影響已經河道開析的沖積扇

根據實地探勘，我們發現許多早期形成的沖積扇都已經開發，成為農田或當地居民的住所，且沖積扇皆有開析的情形(支流貫穿沖積扇)(圖 103)，但賴以立命的沖積扇卻又潛伏著極大的危機，極有可能在未來暴雨發生時，遭到沖毀。因此我們想探討若房子蓋在沖積扇上，則受到二次災害的反應時間及破壞程度的差異為何？

由於在實驗的砂石、水流條件下，河道需耗費長時間才能自然開析。因此我們用人工的方式，在谷口的垂直連線處開挖一條寬 8 公分的河道，模擬河道開析(圖 104 中黃色線段)。

1. 我們準備了數支木棍，以 6 公分作間距的棋盤狀埋入沖積扇中(如圖 105)，僅露出 3.5 公分的木棒，並分別測量木棒受到土石流破壞所需的時間，以及二次災害結束後所掩埋的深度。(註：實驗中，由於每次形成的沖積扇略有差異，因此木棒的點也會略有不同)
2. 實驗結果將掩埋深度 1.6 公分以上的區域圖成紅色、0.5~1.5 公分為橘色、小於 0.5 公分的區域塗為綠色；反被掏空的地區塗為紫色。當地被災害破壞時間在 0~20 秒



圖 103：河道開析(拉克斯溪)



圖 104：實驗模擬開析情形



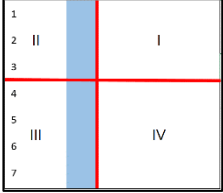
圖 105：以木棍進行定位

塗為紅色、21~40 秒為橘色、41 秒以上為綠色。實驗結果舉例如下表示：

降雨強度為 5.0 公升/分：										降雨強度為 2.2 公升/分：															
掩埋深度(單位：公分)					破壞時間(單位：秒)					掩埋深度(單位：公分)					破壞時間(單位：秒)										
0.9	1.6		1.1	1.6	1.6	x	34	23		16	20	20	x	0.0	0.0	0.4	0.0	1.3	0.7	180	180	36	36	118	157
1.7	1.4		1.9	2.3	1.6	x	32	24		16	30	31	34	0.0	0.0	0.7	1.4	1.7	0.0	180	180	32	36	121	160
3.0	1.3		1.6	1.2	1.5	1.0	30	24		23	27	27	32	0.0	0.8	0.7	0.9	0.5	0.0	180	180	36	41	121	180
2.4	1.3		1.0	0.3	0.4	-0.3	28	24		27	27	32	53	0.0	0.2	0.9	0.2	1.6	-0.1	180	109	36	97	122	180
2.0	0.0		0.3	0.1	0.4	0.0	31	29		41	93	37	37	0.0	0.7	-0.2	0.0	0.0	0.5	180	109	87	122	122	126
x	0.0		0.0	0.2	0.1	-0.3	x	34		41	93	93	93	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	180	180	180	180	126	126
x	x		0.3	-0.2	0.3	毀	x	x		41	93	93	93	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.5	180	180	180	180	180	180

小結：在圖 106 中，我們在實驗中將沖積扇分成四個象限討論，結果發現：

1. 不論降雨量的大小，第 IV 象限的秒數是全部最長、深度是全部最淺；第 II 象限則相反。由此現象大致可說明：離扇頂較遠的第 III、IV 象限較第 I、II 象限安全；另外，遠離河岸居住較安全(表 5、6)。
2. 然而，實驗中發現河流大多選擇第 IV 象限及第 I 象限行走，因此居住在沖積扇的下游側不一定比較安全，前述「上游側沖積扇較安全」的猜測在本次實驗中無法證實，因此仍需視不同環境(地勢高低)選擇上游側或下游側居住。
3. 整體而言，選擇沖積扇上的居住點時，以遠離扇頂、(開析)河岸為原則。

 <p>圖 106：自訂實驗象限</p>	<p>表 5：I=5.0，二次災害平均值</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>象限</th> <th>秒數(sec.)</th> <th>深度(cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>28.75</td> <td>1.34</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>26.25</td> <td>1.66</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>35.9</td> <td>0.70</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>50.67</td> <td>0.66</td> </tr> </tbody> </table>	象限	秒數(sec.)	深度(cm)	I	28.75	1.34	II	26.25	1.66	III	35.9	0.70	IV	50.67	0.66	<p>表 6：I=2.2，二次災害平均值</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>象限</th> <th>秒數(sec.)</th> <th>深度(cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>89.67</td> <td>0.47</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>103.17</td> <td>0.44</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>138.32</td> <td>0.34</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>154.85</td> <td>0.12</td> </tr> </tbody> </table>	象限	秒數(sec.)	深度(cm)	I	89.67	0.47	II	103.17	0.44	III	138.32	0.34	IV	154.85	0.12
	象限	秒數(sec.)	深度(cm)																													
	I	28.75	1.34																													
	II	26.25	1.66																													
	III	35.9	0.70																													
IV	50.67	0.66																														
象限	秒數(sec.)	深度(cm)																														
I	89.67	0.47																														
II	103.17	0.44																														
III	138.32	0.34																														
IV	154.85	0.12																														

伍、討論

一、沖積扇的面積與縱長的關係為何？

由於前述的實驗結果皆觀察到沖積扇面積和平均縱長數據的趨勢皆有同樣的表現性質。例如圖 107 與圖 108，在相同的降雨強度下，降雨時長對沖積扇的縱長和面積的影響結果相似，都是在 5 分鐘之前穩定增加，5 分鐘之後就維持固定。因此我們認為沖積扇的平均縱長與面積應該有關，故統整本研究所有的沖積扇縱長和面積，將兩者作成散布圖(圖 109)。

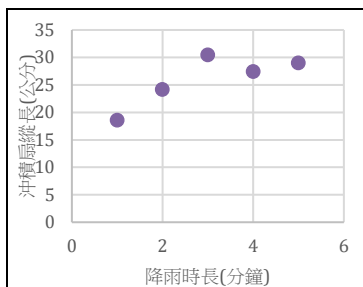


圖 107：I=2.2, 降雨時長對沖積扇縱長的影響

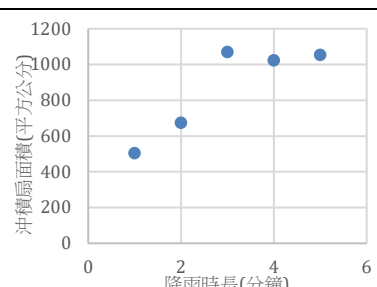


圖 108：I=2.2, 降雨時長對沖積扇面積的影響

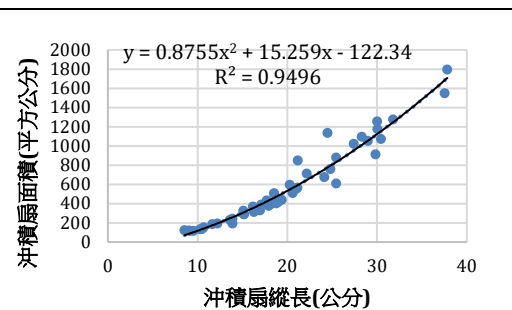


圖 109：沖積扇縱長對沖積扇面積的關係圖

	面積	平均縱長	帶入公式結果	偏差	偏差率
A.明霸克陸橋	371314	519.6	244218.1	-127095.9	-0.34
B.少年溪	188812	486.8	214822.7	26010.7	0.13
C.清水溪	81463	331.4	101076.4	19613.4	0.24
D.拉克斯溪	392315	668.6	401433.3	9118.2	0.02
E.東莊溪	208654	608.3	333129.7	124475.7	0.59
F.新開	326525	602.3	326712	187	0
G.新威大橋	145960	427.4	166358.2	20398.2	0.13
平均					0.11

由圖 109 可以發現縱長和面積之間密切，縱長愈長，沖積扇的面積也就愈大，且 R^2 高達 0.95。未來，若能得知沖積扇的平均縱長，透過回歸方程式便能很快地計算出沖積扇的面積。

我們也將此方程式回推到荖濃溪上游的沖積扇，表 7 可看出出方程式的偏差率在 0.11 左右，顯示以此方程式來推算實際情況下的沖積扇面積也是相當

合適的。然而，若以此方程式對其他地區的沖積扇進行推估，則發現只有在溪谷型的沖積扇會有較好的推測結果，平原型的沖積扇則出現較大的偏差。

二、降雨時長與降雨強度如何影響沖積扇的形狀？

在探討不同降雨時長和降雨強度時，我們便思考兩組總降雨量(降雨強度 I x 降雨時長 T)相同的沖積扇，降雨強度大的沖積扇和降雨時長較長的沖積扇形狀有何差異？因此本研究找出了四組總降雨量近似的沖積扇做觀察：

表 8：降雨時長與降雨強度影響比較表

組別(I×T)		降雨量	平均縱長	沖積扇面積	平均坡度	沖積扇扇端弧長	扇頂高度
降雨強度 (公升/分)	降雨時長 (分)						
3.6	1	3.6	21.0	556.4	0.10	69.0	4.93
0.7	5	3.5	17.3	452.6	0.22	54.8	5.00
3.6	2	7.2	29.8	911.8	0.10	96.9	5.60
0.7	10	7.0	22.1	712.0	0.20	65.5	6.50
3.6	3	10.8	30.0	1254.1	0.10	118.0	6.50
2.2	5	11.0	29.0	1053.7	0.10	108.9	4.50
2.2	2	4.4	24.1	675.0	0.10	92.2	4.00
0.7	6	4.2	17.7	431.7	0.21	49.9	5.10

由表 8 的整理發現，降雨強度較大的沖積扇，其縱長、面積、扇端弧長皆比另一組大，換句話說，總降雨量近似時，降雨強度較大的沖積扇擴散現象較明顯；即瞬間降雨強度大時沖積扇的面積增加較多。反之，降雨強度較小，而降雨時長較長的沖積扇，其坡度、扇頂高度皆比另一組大，換句話說，總降雨量近似時，降雨時長較長的沖積扇堆積現象較明顯；即降雨時間拉長時，沖積扇的堆積高度增加較前者更明顯。

三、沖積扇可以分類嗎？

根據觀察與實驗結果，本研究將沖積扇分成兩大類：堆積型與擴散型。我們取資料的中位數 0.2 作為分類標準：坡度超過 0.2 的沖積扇為堆積型(圖 110、111)，反之則為擴散型(圖 112、113)。當沉積物顆粒較大時，沖積扇多為堆積型，反之，當沖積扇顆粒較小時，沖積扇多為擴散型(表 9)。此外，當降雨強度小，且降雨時長較大時，沖積扇也會偏向成為堆積型。如沉積物為細沙，降雨強度為 0.7L/min，且降雨時長為 2、4、6、8、10 分鐘時，沖積扇為堆積型，與其他沉積物為細沙的沖積扇不同。

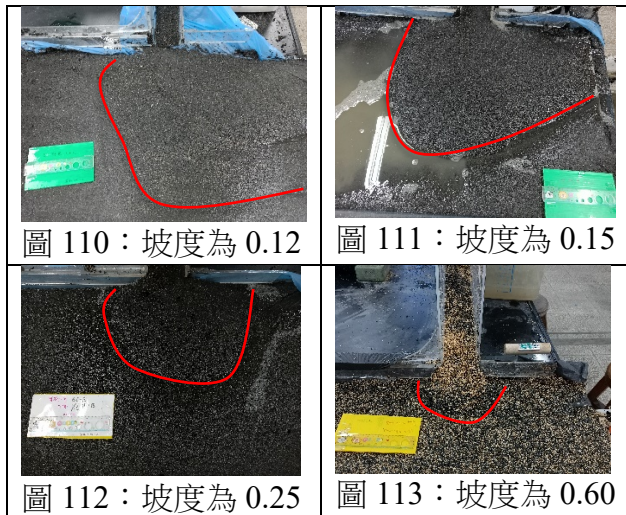


表 9：本研究中沖積扇類型分類

沉積物	堆積型 (個)	擴散型 (個)	總數 (個)
顆粒小的細沙	5	24	29
顆粒大的粗砂	6	2	8
顆粒最大的礫石	6	0	6

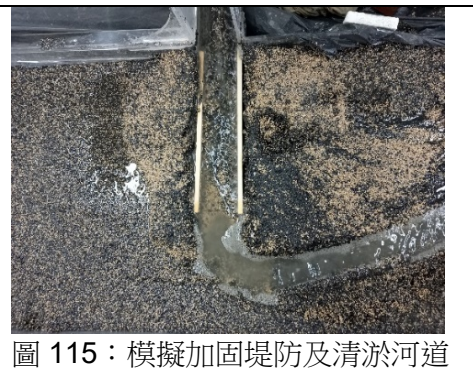
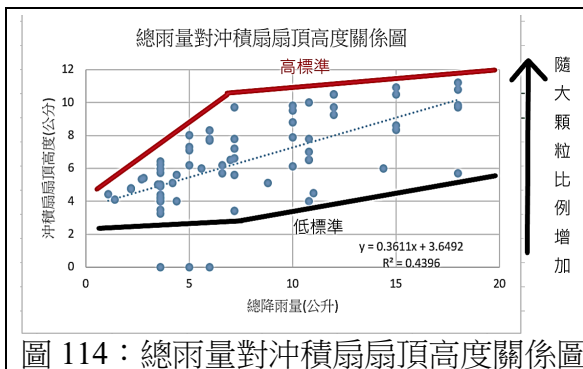
四、沖積扇研究的應用

- (一) 根據本研究的結果得知沖積扇縱長與面積有一定的關係(圖 109)，利用人工簡單測量縱長即可推算出沖積扇的面積。
- (二) 利用沖積扇研究，推論過去與未來的地質變化：由於過去留下來的地質資料較少，因此我們希望可以透過研究結果，發揮以今窺古的精神，進一步推展至過去的古地形，並推

論該處未來沖積扇形成的可能情況。科學家發現火星表面也有類似沖積扇的地形，應用本研究的結果，或許能推測這些地形形成時相關的環境因素。

(三) 擬定防災策略：以下作四點討論

1. **根據不同的沖積扇類型，劃定受災範圍：**擴散型的沖積扇會帶著砂石擴散較大的面積，甚至堵住主流河道，形成堰塞湖，造成下一個階段的洪水危機；而堆積型的沖積扇會堵塞在支流出口，造成河水溢流至原沖積扇上，破壞原沖積扇建築物(橋梁、屋舍)的安全。兩種類型可能造成的災害不盡相同，需有不同的防災策略。
2. **橋梁設計：**經過我們初步統計，南橫公路西段通過沖積扇上方的高風險橋樑就有 6 座，若豪大雨侵襲則可能使居民們回家的路因而中斷。因此我們提出兩個建議：
 - (1) 由於橋梁經過的地區大多是扇頂，因此最好的方法是架高橋面，並減少落墩數。我們將模擬實驗中的扇頂高度與降雨總量作圖(如圖 114)，發現總降雨量越大及土石流中顆粒物越大，扇頂高度就越大。
 - (2) 以衝垮明霸克露橋的豪雨事件為例，經換算後得到該次降雨事件相當於實驗模擬中的總降雨量 8L，如圖 114，顯示其若要抵擋土石流的衝擊，橋面至少需 40 公尺以上(1:1000 比例放大)。根據報導，當時的沖積扇扇頂高度約 35 公尺，若根據此圖建議，明霸克露橋有可能倖免。然而，此情況未考慮橋墩受到的衝擊，仍需搭配橋墩相關的研究，使其更加符合需求。
 - (3) 實驗中發現，若今天橋梁位於沖積扇形成的對岸，仍需防範河流的侵蝕。由於沖積扇堵塞了河道，迫使河道改往對岸走，導致沖積扇的扇端受到侵蝕，而在對岸的橋樑、聚落也可能受到威脅。
3. **減災：**現有的工程方法多為：加固堤防及清淤支流河道。我們進行了簡單的模擬(圖 115)，發現此種作法可以有效引導支流河水前進，而不會隨機選擇方向；然而，遇到較大的災害事件時，砂石仍可能漫過堤防(圖 115)，因此並不是長久之計。**河道需定期搭配清淤，居民也應避免居住在過於河岸兩側的地方。**
4. **沖積扇上的居住環境選擇：**經過二次災害的模擬，我們發現居住的選擇須注意三點：**遠離扇頂、遠離河道、遠離扇端**，並根據當地地勢，選擇上游側或下游側以增加逃生時間及機會。



五、實驗設計與實際環境的落差

- (一) **雨量：**實驗中我們的降雨的單位是「公升/分」，降雨總量使用「公升」的體積單位；而中央氣象局所使用的單位皆是「毫米」，為長度單位。經由我們初步的換算後，玉穗溪 0807 豪雨事件的 700 毫米約等於實驗中的總雨量 8.67 公升。然而，實驗中的總雨量

在 5 分鐘內下完，而現實情況中須使用一天。若比照真實情況的降雨時長，我們將難以觀測，因此縮短降雨時間。

- (二) **河道**：實驗裝置採用壓克力板製作，且讓支流河道垂直主流河道，沒有模擬支流進入主流開展的樣態，可能導致砂石較易堆積在實驗箱的邊緣。
- (三) **砂石量及大小、比例**：我們實地到荖濃溪上游的沖積扇考察時，看到河流帶來的石頭大小差異很大，有許多巨大的石塊滾落至此，砂石的總量更是龐大。這些都是在實驗室難以模擬的。根據農委會的定義，台灣發生的土石流中，泥流型土石流大約 50%，一般型土石流占 30% 居次，而礫石型土石流占 20%。但鑒於使用泥土進行實驗會有無法回收再利用的問題，故本研究並沒有以泥土作為沉積物成分來進行研究。
- (四) **砂石含水比**：由於砂石難以烘乾再使用，本實驗只以瀝乾的砂石進行實驗，並沒有改變含水比例。此與實際上支流發生土石沖刷的數量，會受到原先含水量的差異而有所不同。
- (五) **主流上游降雨量**：會對沖積扇形成造成影響，但本實驗囿於時間因素尚未進行討論。

陸、結論

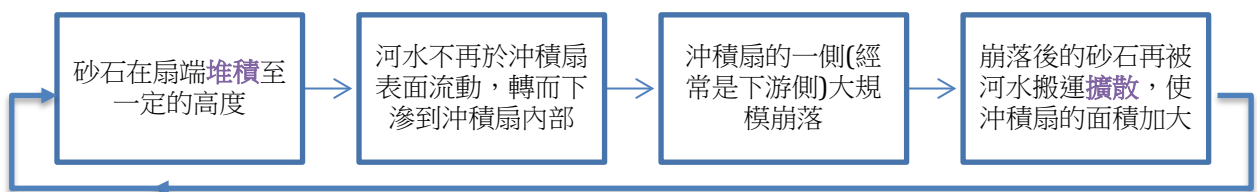
我們根據查詢文獻與實地走訪荖濃溪上游河谷，觀察沖積扇的形狀，並設計出一連串的實驗，研究結果說明如下：

一、 台灣各地沖積扇與荖濃溪上游河谷的沖積扇

比較文獻中台灣各地的沖積扇，我們推測沖積扇的形成與外形會受到流域面積、河流坡度的影響。由實地探勘與 google earth 的資料發現荖濃溪上游有許多在八八風災時形成的沖積扇，共同的特徵是面積皆不大，而且沖積扇形成後，持續受到主流與支流河道的侵蝕，尤其以扇端最為明顯。

二、 沖積扇的形成過程是堆積現象與擴散現象的交替出現。

沖積扇的形成過程大致可以描繪如下：



三、 支流坡度的增加會導致沖積扇的堆積與擴散作用明顯提升

支流坡度的增加會增加沖積扇的扇頂高度與面積，而且在其他因素控制不變的情況下，沖積扇隨著支流坡度增加會向著支流出口方向延伸明顯。在坡度很大的支流情況下，甚至成為縱長大於寬度的沖積扇。

四、 主流坡度的增加時，沖積扇會向下游側發展，並減少上游扇的面積，形成較不對稱的沖積扇。

五、 降雨強度的增加會導致沖積扇的擴散作用明顯提升：

降雨強度導致沖積扇的面積增加，扇頂高度的增加幅度不明顯，沖積扇成擴散型。

六、 降雨時長的增加會增加沖積扇的堆積與擴散作用，且受到降雨強度的影響，會有不同的發展方向。

降雨時長會導致沖積扇的面積與扇頂高度皆增加。降雨強度大且降雨時長者會形成擴散型的沖積扇；降雨強度小時且降雨時長者會形成堆積型的沖積扇。

七、沉積物顆粒較大時，沖積扇的堆積作用較明顯；顆粒較小時，沖積扇的擴散作用較明顯：

河流帶來的沉積物為顆粒較小的砂子時，擴散作用較明顯，且隨著降雨時長增加，沖積扇面積的增加較明顯；反之，沉積物為顆粒較大的礫石時，堆積作用較擴散作用明顯，且即使降雨時長增加，沖積扇的坡度增加並不明顯。

八、混合沉積物中，若沉積物中的大顆粒較多，堆積作用較明顯；若沉積物中的大顆粒較少，擴散作用較明顯。

九、支流坡度大、沉積物顆粒小、且降雨強度大的條件下，容易形成面積廣大的擴散型沖積扇；沉積物顆粒愈大、而降雨強度小且降雨時長愈長，則容易形成堆積型的沖積扇。

十、若居住在沖積扇上，極可能再受到二次災害的影響，因此遠離扇頂、扇端及河道即可減少災害的影響。

柒、研究省思與展望

山上可供居住的地區相當有限，因此居民被迫選擇在沖積扇上居住，卻也是最危險的地區。加固堤防及清淤河道只能拉長撤離時間，卻不是防範大規模災害的長久之計，因此我們仍須戒慎警戒。透過我們的防災建議，可預測沖積扇的堆積高度，並建議居住在扇頂及扇端的居民搬離，最大程度避免生命財產受到威脅。

文獻探討整理時，觀察到不同地區的沖積扇有不同的堆積環境及構成土石流組成的砂石不同，因此我們認為，我們可以藉由改變不同組成進行實驗，或進行電腦模擬進行不同環境的探討，改善單一方程式預測不準確的問題。另外，研究之初所規畫製作的壓克力河道容易因為堆積過多砂石而氾濫到外側，未來也須規劃重新修正。

我們在實驗中也學習到許多實驗進行的方法，縱使在實驗室中模擬大自然力量所形成的地形，雖然有很多限制，但卻能親身見證這些地形的形成。也是一個難得的經驗。

捌、主要參考文獻

- 一、費立沅、紀宗吉、吳文隆、楊智堯(2012)。土石流扇狀地危險度分析案例探討。取自中華顧問工程司。<https://www.ceci.org.tw/Upload/Download/42AE35A2-D005-428E-AA4F-9F2635420592.pdf>
- 二、張瑞津、石再添、楊淑君、林譽方、陳翰霖(1994)。花東縱谷沖積扇的地形學研究。國立臺灣師範大學地理學系研究報告，第 21 期。<https://www.geo.ntnu.edu.tw/wp-content/uploads/2022/01/212.pdf>
- 三、張瑞津、石再添、楊淑君、林譽方、陳翰霖、董德輝(1995)。台灣沖積扇的地形學研究，取自 <https://twsec.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2020/pdf/TISF2020-180013.pdf>
- 四、盧政璋、施睿、羅傳鈞、邱奕旭、黃郅軒(2020)。堆積扇地貌特性與土砂災害類型之探討，取自 <https://tech.swcb.gov.tw/api/File/1413>

【評語】 030511

實驗做的量多，結論有考量到防災的應用很不錯，將來也可以延伸到土地利用分析上。

收集現有文獻的數據與實驗結果比對，統計分析都可以證明出自身的結論，實驗規模可再加大，也連結到沖積扇與地下水的連結，與水資源找尋等等的相關性。

模型與實際的沖積扇尺寸比例尺需明載。

作品海報

扇扇「模」法師

- 探討影響沖積扇外形的環境因素

摘要

本研究藉由文獻探討和實地探勘了解沖積扇的外觀特色，並以模擬實驗探討影響沖積扇形成的環境因素。研究結果發現沖積扇的形成過程包含了堆積與擴散的過程，河流帶來的沉積物顆粒較大時，堆積作用較明顯；而沉積物顆粒較小時，沖積扇的擴散作用較明顯。支流坡度的增加與降雨時間拉長都會導致沖積扇的堆積與擴散作用明顯提升，而降雨強度的增加會明顯增加沖積扇在主流中的擴散作用。希望本研究不僅能釐清影響沖積扇外形的因素，更能應用於防災、離災所需。

壹、研究動機

2021年8月7日南橫公路受到熱帶性低氣壓所帶來超過2700毫米的致災性雨勢，導致南橫公路西段的明霸克露橋遭到沖毀。我們看到新聞報導時，除了感嘆大自然的反撲，從空拍畫面也看到了特別的景象：土石在匯入荖濃溪後，在河道形成了一個扇端邊緣平滑的沖積扇。查閱文獻後，我們發現除了荖濃溪，台灣各處的河流也都分佈著大大小小、形狀不一的沖積扇。我們便開始思考，哪一些因素導致了沖積扇的外形的差異呢？於是我們帶著對於沖積扇的好奇心，開始了一系列的研究。

貳、研究問題

- 一、台灣地區不同地理位置的沖積扇特徵為何？
- 二、荖濃溪上游河谷的沖積扇形狀與其形成情形為何？
- 三、沖積扇的形成過程為何？
- 四、觀察不同環境變因對沖積扇形狀的影響為何？
- 五、觀察二次災害影響沖積扇的情形為何？

參、研究器材



圖1：實驗裝置

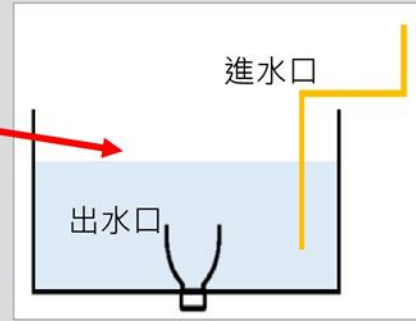
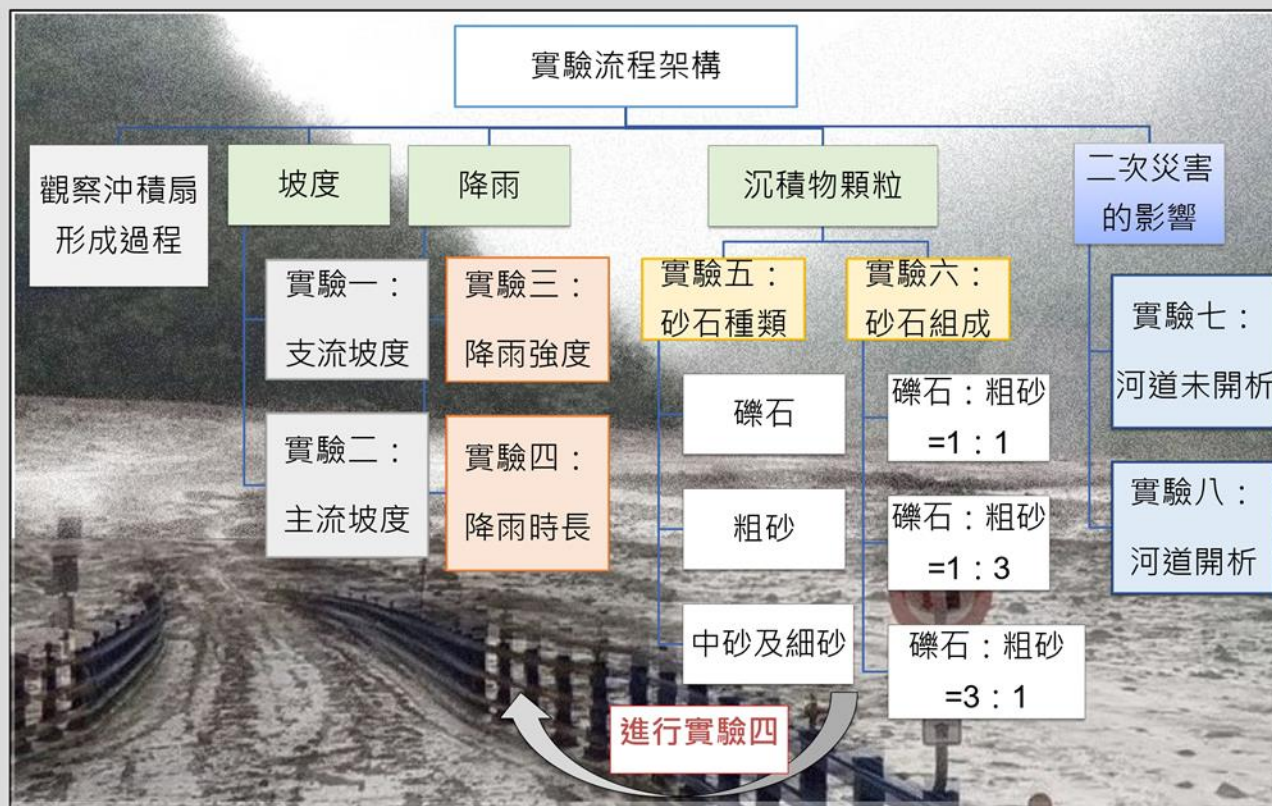


圖2：水箱示意圖

實驗裝置說明：水從實驗裝置下方水箱，經由抽水馬達抽至實驗裝置上方水箱，如圖2，再進行定量降雨。

肆、實驗架構



伍、沖積扇測量方法

測量項目	測量方法
沖積扇面積	圖3黃色線段與紅色線段所圍成的面積。
沖積扇縱長	圖3三條綠線的長度的平均值。
沖積扇寬度	圖3紫色線段，即垂直於綠色鉛直線縱長的最長線段。
沖積扇扇端弧長	圖3黃色線段。
沖積扇坡度	取三組沖積扇扇頂高度除以沖積扇縱長的平均值。

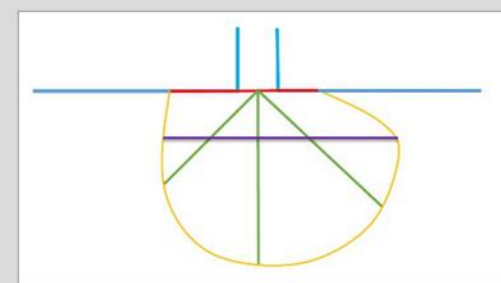


圖3：沖積扇測量示意圖

陸、實驗步驟

在主流鋪上1公分左右的砂石，並在支流堆積砂石到膠帶標記處。

利用游標尺確認砂石厚度後，在水箱旋上所需降雨強度的瓶蓋，打開抽水馬達。

等待水流沒過水箱內出水口計時定量降雨。

全程拍攝沖積扇的形成過程，並將最後形成的沖積扇拍照記錄。

測量沖積扇的各項數據後利用ImageJ進行分析。

反覆實驗三次，取得三次實驗的平均值。

柒、研究結果

一、台灣各地的沖積扇

- (一)西部平原地區的沖積扇較東部平原地區的大，此種沖積扇的特色是形成花費的時間較久。
- (二)受限於河谷的堆積環境較小，形成的沖積扇面積都不大、發生時間短，為分類中的土石流扇。
- (三)沉積物的粒徑較大者(如蘭陽溪谷、荖濃溪及楠梓仙溪)，其形成的沖積扇面積會較小。

三、模擬實驗中沖積扇的形成過程

- (一)在降雨強度小的情況下模擬沖積扇的形成，形成過程較長，相對也較容易觀察。
- (二)沖積扇的形成過程大致為：沖積扇堆積至一定程度後(此時的水流會滲入堆積支沖積扇內，而不會流出)，砂石崩落，由河流搬運後擴散出去，使沖積扇的面積更大，堆積現象與擴散現象交替出現。

二、荖濃溪上游河谷沖積扇實查結果

- (一)荖濃溪上游沖積扇大部分在2009年八八風災後才形成或於該次事件中沖積扇形狀有明顯改變。
- (二)沖積扇形成後扇端仍會持續受到主流與支流河道的侵蝕；另外，觀察到沖積扇的沉積物分布不易觀察。
- (三)觀察到在一次降雨事件後，沖積扇仍然可能受到二次(或以上)的災害影響，進而導致沖積扇的河道變化，因此我們想透過設計兩次實驗來觀察現象。



圖4：拉克斯溪扇



圖5：少年溪扇

四、觀察不同環境變因對沖積扇形狀的影響

- (一)我們的測量重點包括：沖積扇縱長、沖積扇面積、沖積扇弧長、沖積扇寬度、沖積扇坡度、沖積扇扇頂高度及沖積扇形成情況。
- (二)實驗的環境變因：支流坡度、主流坡度、降雨強度、降雨時長、沉積物顆粒大小、沉積物組成比例。

實驗一、觀察支流河道坡度對沖積扇形狀的影響

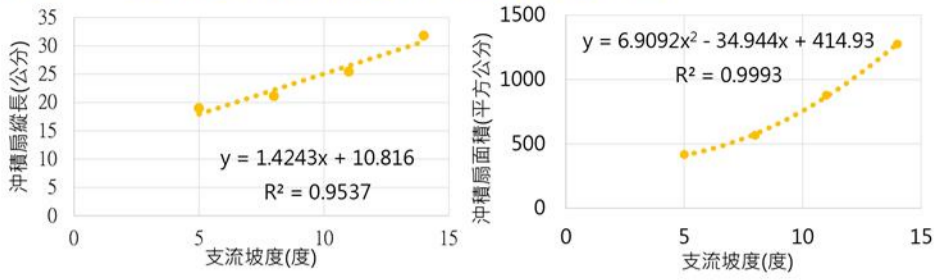


圖5：支流坡度對沖積扇縱長的影響

圖6：支流坡度對沖積扇面積的影響

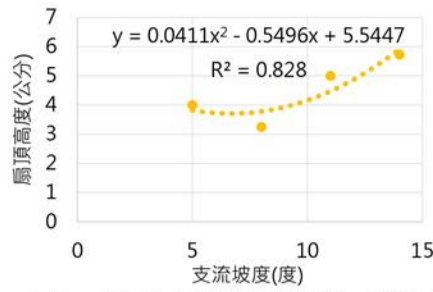


圖7：支流坡度對沖積扇扇頂高度的影響

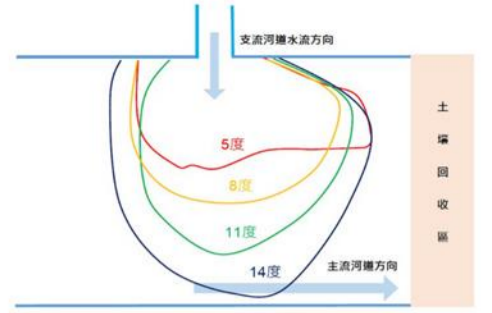


圖8：支流坡度沖積扇疊圖

1. 隨著支流坡度增加，沖積扇的縱長、面積、寬度、弧長及扇頂高度皆增加；而沖積扇坡度與支流坡度沒有關聯。
2. 隨著支流坡度增加，沖積扇左右兩側的增加幅度較小，而沖積扇多以向前擴散為主，且在主流坡度為4度的情況下，沖積扇的下游側面積略大於上游側面積。
3. **支流坡度**對沖積扇的**擴散作用**與**堆積作用**皆有顯著影響。

實驗二、觀察主流河道坡度對沖積扇形狀的影響

1. 隨著主流坡度增加，沖積扇面積減少，寬度、坡度、扇頂高度則隨之增加，弧長和縱長則無太大影響。
2. 根據觀察結果，隨著**主流坡度**的增加，**沖積扇往下游側堆積**情形越明顯，且**主流坡度**較大時，沖積扇扇頂處會出現凸起的現象。

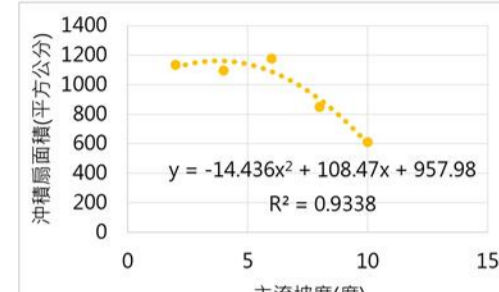


圖9：主流坡度對沖積扇面積的影響

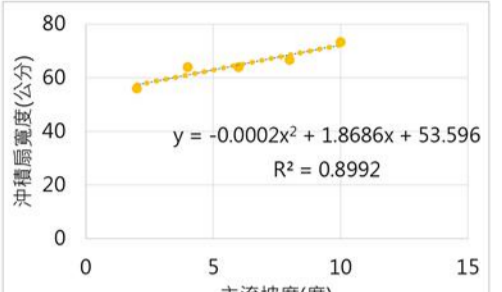


圖10：主流坡度對沖積扇寬度的影響

實驗三、觀察降雨強度對沖積扇形狀的影響

1. 隨著降雨強度的增加，沖積扇的縱長、面積、寬度、扇頂高度皆有增加；而沖積扇的弧長、坡度減少。
2. 隨著降雨強度的增加，在主流坡度為4度的情況下，沖積扇向前及下游側發展的情形比較明顯，但在上游側也有發展的情形。
3. **降雨強度**會導致沖積扇的**擴散作用**提升，堆積作用相對不明顯。

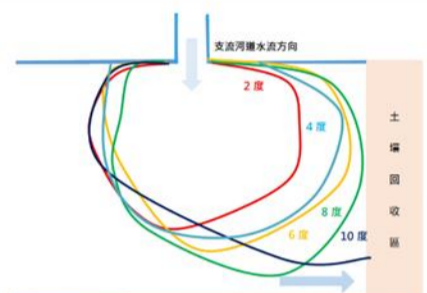


圖11：主流坡度沖積扇疊圖

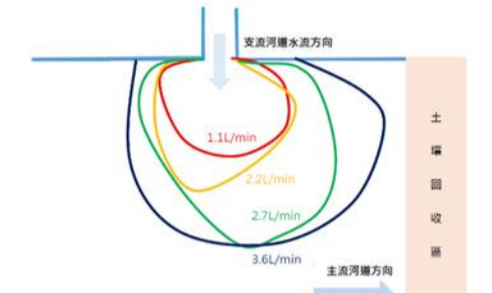


圖12：降雨強度沖積扇疊圖

實驗四、觀察降雨時長對沖積扇形狀的影響

1. 隨著降雨時長增加，沖積扇的縱長、面積、弧長、寬度及扇頂高度皆有增加，且降雨強度大時增加明顯；但扇頂高度在降雨強度小時增加較明顯。
2. 降雨強度小時，沖積扇均勻擴散，降雨強度較大時沖積扇以前或向下游側擴散居多。
3. **降雨時長**會導致沖積扇的**擴散作用**與**堆積作用**增加。

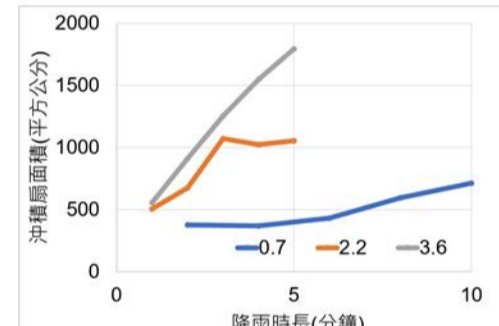


圖13：降雨時長對沖積扇面積的影響

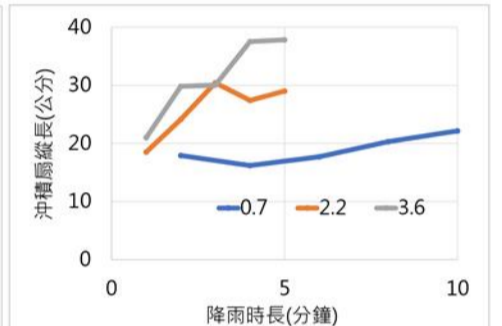


圖14：降雨時長對沖積扇縱長的影響

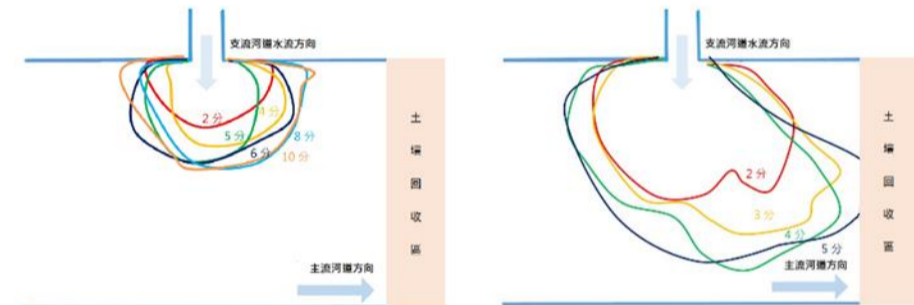


圖15：降雨強度小(0.7公升/分)的沖積扇疊圖

圖16：降雨強度中(2.2公升/分)的沖積扇疊圖

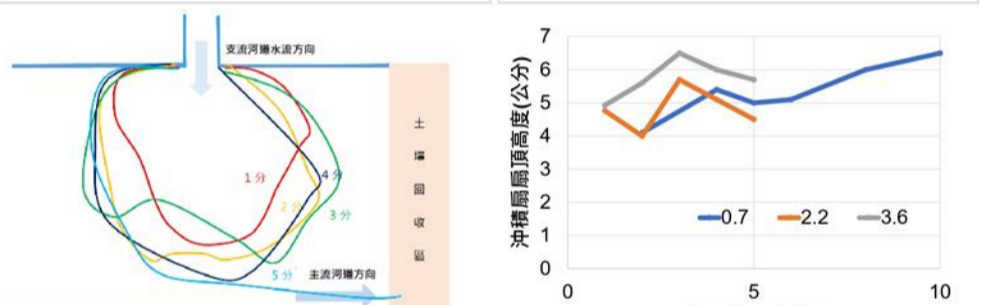


圖17：降雨強度大(3.6公升/分)的沖積扇疊圖

圖18：降雨時長對沖積扇扇頂高度的影響

實驗五、觀察沉積物顆粒大小對沖積扇形狀的影響

註：由於沖積扇在I=5, T=3時即達本實驗裝置最大設計量，故未進行T=5的實驗。

(一) 沉積物為礫石

(二) 沉積物為粗砂

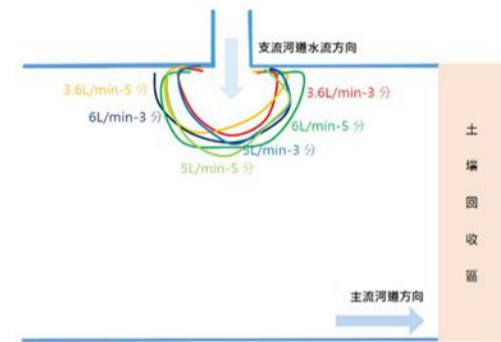


圖19：沉積物為礫石的沖積扇疊圖

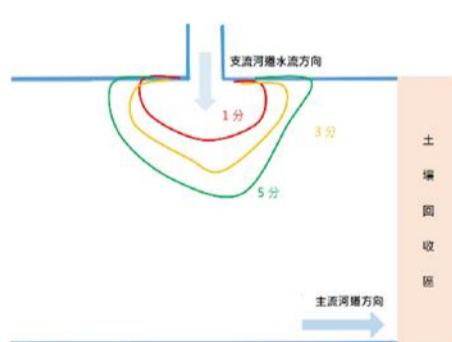


圖20：降雨強度(2.2公升/分)的沖積扇疊圖

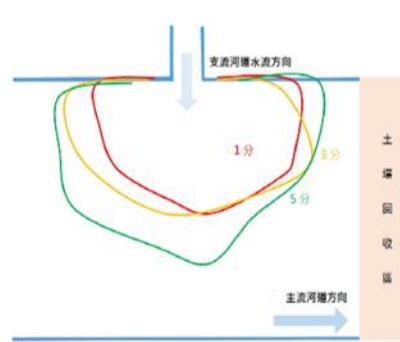


圖21：降雨強度(3.6公升/分)的沖積扇疊圖

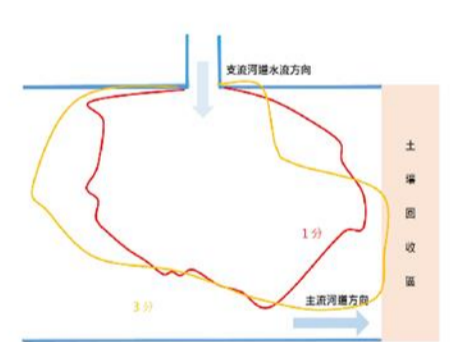


圖22：降雨強度(5公升/分)的沖積扇疊圖

1. 當沉積物為礫石時，沖積扇外形較無明顯的變化，但扇頂高度增加。
2. 當沉積物為粗砂時，沖積扇的縱長、面積、扇端弧長皆在降雨強度大時增加較明顯；沖積扇的坡度及扇頂高度在降雨強度大時增加反而較不明顯。
3. 沉積物**顆粒較大**時，沖積扇的**堆積現象**較明顯；沉積物**顆粒較小**時，沖積扇的**擴散現象**較明顯，綜合比較後，整體而言**堆積現象為礫石>粗砂>中砂與細砂**；**擴散現象為礫石<粗砂<中砂與細砂**。

實驗六、觀察沉積物組成對沖積扇的影響

註：本實驗所使用的砂石為礫石及粗砂

本實驗進行了「礫石：粗砂」為1:3、1:1、3:1的實驗，即礫石比例為25%、50%、75%，分別設定降雨強度為3.6, 5, 6公升/分、降雨時長1, 3, 5分鐘，進行實驗，以瞭解礫石比例在不同降雨情況之下對沖積扇形狀的影響，綜合實驗五的實驗數據，最後選出了降雨強度為5公升/分、降雨時長為3分鐘的實驗數據做比較。

(一) 礫石比例對沖積扇的影響

1. 隨著礫石比例的增加，沖積扇的面積、縱長、弧長、寬度都減少，而坡度增加，沖積扇扇頂高度在礫石比例為25%達到最高，推測在此比例下砂石最易堆積。
2. 混合沉積物中，若沉積物中的大顆粒較多，堆積作用較明顯；若沉積物中的大顆粒較少，擴散作用較明顯。

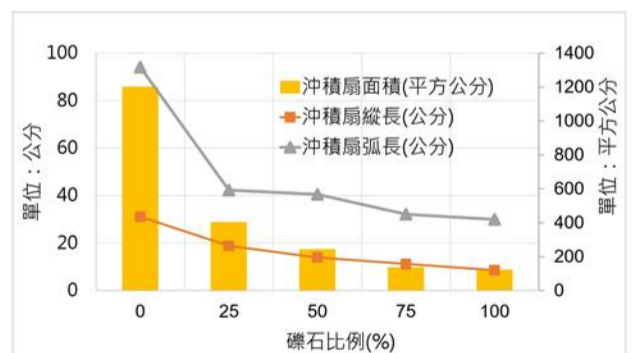


圖23：礫石比例對沖積扇面積、縱長、弧長的影響

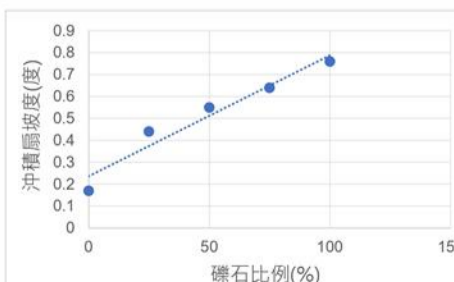


圖24：礫石比例對沖積扇坡度的影響

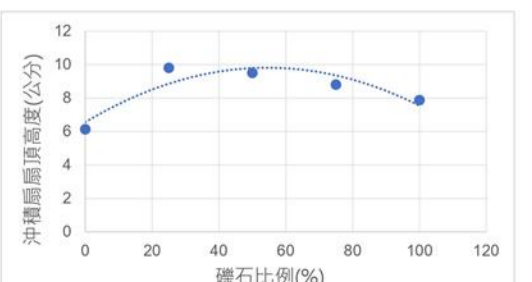


圖25：礫石比例對沖積扇扇頂高度的影響

(二) 沖積扇的沉積物分布情形

1. 在礫石比例為50%時，發現**先被沖刷**下來的大部分是**礫石**，隨著降雨時長增加，才有粗砂堆積在上層。
2. 在礫石比例為25%的實驗中，由於**礫石**受流水帶動後多數**堆積於靠近支流口**處。
3. 在礫石比例為75%時，並無明顯的上下層分布差異。
4. 總結上述結果，沖積扇的沉積物大小分布並無一致的規律，而是會受到水流速度、流量以及河水中沉積物顆粒大小比例的影響。



圖26：G:C=1:1, I=3.6, T=5

五、觀察二次災害影響沖積扇的情形

註：本實驗仿照一般型土石流比例，礫石：粗砂：細沙=1:3:4

我們進行二次災害的方法如下：

1. 以相同變量(降雨強度5.0L/min，降雨時長3mins)製造第一次災害，形成沖積扇；
2. 分別用降雨強度為0.7、2.2、3.6、5.0 L/min，降雨3分鐘模擬第二次災害，觀察沖積扇的變化情形。

實驗七、二次災害直接覆蓋沖積扇

1. 沖積扇在二次災害後覆蓋在原有沖積扇之上，依序是中間、上游側及下游側。
2. 上游側形成了**堰塞湖**，扇端形成**斷面**。
3. 災害規模大時，沖積扇皆不安全；災害規模小時，河流隨機選擇走向，觀察後推測沖積扇的上游偏前側較安全

實驗八、二次災害影響已經河道開析的沖積扇

1. 實驗方法：以6公分作間距的棋盤狀埋入沖積扇中，僅露出3.5cm的木棒，並分別測量木棒受到土石流破壞所需的時間及二次災害結束後所掩埋的深度。
2. 結果：不論降雨量的大小，**第IV象限的平均秒數是全部最長、平均深度是全部最淺**；第II象限則相反。
3. 選擇沖積扇上的居住點時，以**遠離扇頂、(開析)河岸**為原則。另外，仍需視不同環境(地勢高低)選擇上游側或下游側居住。

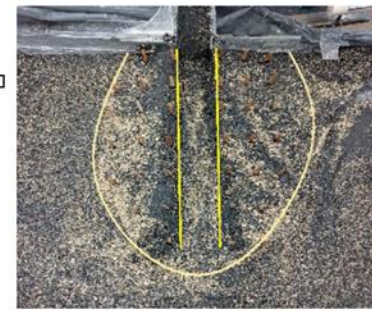


圖27：實驗模擬開析

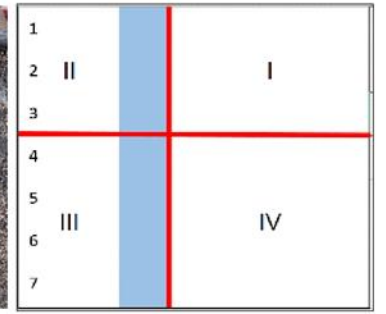


圖28：自訂實驗象限

表1：I=5.0，二次災害平均值			表2：I=2.2，二次災害平均值		
象限	秒數(sec.)	深度(cm)	象限	秒數(sec.)	深度(cm)
I	28.75	1.34	I	89.67	0.47
II	26.25	1.66	II	103.17	0.44
III	35.9	0.70	III	138.32	0.34
IV	50.67	0.66	IV	154.85	0.12

捌、討論

一、沖積扇的面積與縱長的關係為何？

我們統整本研究所有的沖積扇縱長和面積，將兩者作成散佈圖。結果發現縱長愈長，沖積扇的面積也就愈大，且 R^2 高達0.95(如圖29)。我們也將此方程式回推到荖濃溪上游的沖積扇，可看出偏差率在0.11左右，顯示以此方程式來推算實際情況下的沖積扇面積也是相當合適的。然而，若以此方程式對其他地區的沖積扇進行推估，則發現只有在溪谷型的沖積扇會有較好的推測結果，平原型的沖積扇則出現較大的偏差。

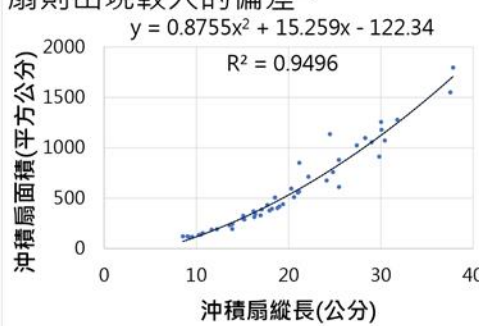


圖29：沖積扇面積對縱長作圖

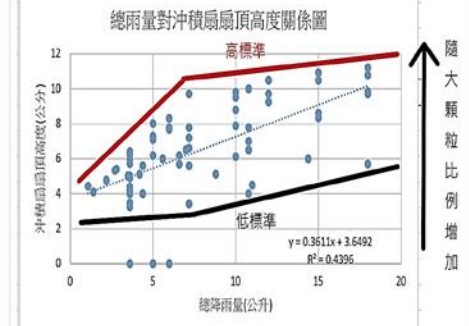


圖30：總雨量對沖積扇扇頂高度關係圖

二、降雨時長與降雨強度如何影響沖積扇的形狀？

- (一) 總降雨量近似時，降雨強度較大的沖積扇擴散現象較明顯；即**瞬間降雨強度大時沖積扇的面積增加較多**。
- (二) 降雨強度較小，而降雨時長較長的沖積扇，其坡度、扇頂高度皆比另一組大，換句話說，即**降雨時間拉長時，沖積扇的堆積高度增加較前者更明顯**。

三、沖積扇研究的應用-擬定防災策略

- (一) **根據不同的沖積扇類型，劃定受災範圍**：本研究將沖積扇分成兩大類：堆積型與擴散型。我們取資料的中位數0.2作為分類標準：坡度超過0.2的沖積扇為堆積型，反之則為擴散型。

1. **擴散型**的沖積扇會帶著砂石擴散較大的面積，甚至堵住主流河道，形成堰塞湖，造成下一個階段的洪水危機。
2. **堆積型**的沖積扇會堵塞在支流出口，造成河水溢流至原沖積扇上，破壞原沖積扇建築物(橋梁、屋舍)的安全。

- (二) **橋梁設計**：南橫公路西段通過沖積扇上方的高風險橋樑就有6座，若豪大雨侵襲則可能使居民們回家的路因而中斷。因此我們提出兩個建議：

1. 橋梁**經過扇頂**時須架高橋面，並減少落墩數。我們將模擬實驗中的扇頂高度與降雨總量作圖(如圖30)，發現總降雨量越大及土石流中顆粒物越大，扇頂高度就越大。以衝垮明霸克露橋的豪雨事件為例，經換算後得到該次降雨事件相當於實驗模擬中的總降雨量8L，顯示其若要抵擋土石流的衝擊根據此圖建議，橋面至少需40m以上，根據報導，當時的沖積扇扇頂高度約35m，明霸克露橋有可能倖免，若搭配橋墩相關的研究，可使其更加符合需求。
2. 橋梁**位於沖積扇形成的對岸**仍需防範河流的侵蝕。由於沖積扇堵塞了河道，迫使河道改往對岸走，導致沖積扇的扇端受到侵蝕，而在對岸的橋樑、聚落也可能受到威脅。

(三) 減災與離災：

1. 即使加固堤防及清淤支流河道，砂石仍可能漫過堤防，並不是長久之計，因此仍需**定期搭配清淤**，居民也應避免居住在過於河岸兩側的地方。
2. 經過二次災害的模擬，我們發現居住的選擇須注意三點：**遠離扇頂、遠離河道、遠離扇端**，並根據當地地勢，選擇上游側或下游側以增加逃生時間及機會。

四、實驗設計與實際環境的落差

台灣發生的土石流中，泥流型土石流大約50%(實驗一~六)，一般型土石流占30%居次(實驗七、八)，而礫石型土石流占20%(實驗五)。但鑒於使用泥土進行實驗會有無法回收再利用的問題，故本研究並沒有以泥土作為沉積物成分來進行研究。另外，降雨時間縮短、壓克力河道也可能造成影響。

玖、結論

1. 我們推測沖積扇的形成與外形會受到流域面積、河流坡度的影響。由實地探勘與google earth的資料發現荖濃溪上游有許多在八八風災時形成的沖積扇，共同的特徵是面積皆不大，且沖積扇形成後，持續受到河道的侵蝕。
2. 沖積扇的形成過程是堆積現象與擴散現象的交替出現。

舌狀	不對稱狀	扁狀	半圓狀
形成條件：支流坡度大、主流坡度小、降雨強度大	形成條件：主流坡度大	形成條件：沉積物顆粒大	形成條件：支流坡度小、主流坡度小、沉積物顆粒小

4. 支流坡度的增加會導致沖積扇的**堆積與擴散作用**明顯提升，主流坡度的增加時，沖積扇會向下游側發展。
5. 降雨強度增加導致沖積扇的面積增加，扇頂高度的增加幅度不明顯，沖積扇成**擴散型**；而降雨強度大且降雨時長者會形成擴散型的沖積扇；降雨時長長者會形成**堆積型**的沖積扇。
6. 支流坡度大、沉積物顆粒小、且降雨強度大的條件下，容易形成面積廣大的**擴散型**沖積扇；沉積物顆粒愈大、而降雨強度小且降雨時長愈長，則容易形成**堆積型**的沖積扇。
7. 若居住在沖積扇上，極可能再受到二次災害的影響，因此**遠離扇頂、扇端及河道**即可減少災害的影響。

拾、研究省思與展望

山上可供居住的地區相當有限，因此居民被迫選擇在沖積扇上居住，卻也是最危險的地區。透過我們的防災建議，可預測沖積扇的堆積高度，並建議居住在扇頂及扇端的居民搬離，最大程度避免生命財產受到威脅。我們在實驗中也學習到許多實驗進行的方法，縱使在實驗室中模擬大自然力量所形成的地形，雖然有很多限制，但卻能親身見證這些地形的形成。也是一個難得的經驗。

拾壹、主要參考文獻

- 一、張瑞津、石再添、楊淑君、林譽方、陳翰霖(1994)。花東縱谷沖積扇的地形學研究。國立臺灣師範大學地理學系研究報告，第21期。<https://www.geo.ntnu.edu.tw/wp-content/uploads/2022/01/212.pdf>
- 二、張瑞津、石再添、楊淑君、林譽方、陳翰霖、董德輝(1995)。台灣沖積扇的地形學研究，取自<https://twsec.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2020/pdf/TISF2020-180013.pdf>