
透過性防砂壩型式對漂流木的
攔阻效能之分析

**Woody Debris and Sediment Trapping
Efficiency of Different Permeable-Type Dam
Experimental Analysis
(成果報告書)**

執行單位：中興大學水土保持學系

執行期間：110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳樹群 特聘教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

透過性防砂壩型式對漂流木的攔阻效能之分析

摘要

每當遭受到颱風或豪雨侵襲時，台灣山坡地常發生土石流及崩塌，導致上游倒木隨水流與土砂進入河道，阻塞淤積河道，對其下游造成橋墩和水工結構物之危害。漂流木及土砂阻塞河道導致土石淤積溢流，亦可能擴大土砂災害之規模。近年藉由可調性防砂壩調節河道土砂，降低過往防砂壩下游底床淘刷，進而達到河道土砂平衡之效果，故了解防砂壩間距與土砂攔阻之關係，將有助於防砂壩調整與設計。本研究透過渠槽實驗模擬土石流受壩體攔阻事件，改變不同之土石流型態(單一粒徑、混合粒徑及有漂流木)及防砂壩橫桿間距進行渠槽實驗。實驗中架設攝影機錄影，探討土石流事件受壩體攔阻過程之發展。對通過壩體之土砂進行量體計算，比較相同土石流事件於不同橫桿間距之通過率變化，並數化壩後土砂堆積形貌，探討不同土石流事件堆積形貌之變化。

漂流木對於透過性防砂壩攔阻礫石之效益受礫石粒徑和壩體間距之影響。在礫石粒徑為 0.8cm 及 1.3cm，橫桿間距為 2cm 時，漂流木有最佳囚砂效益；在相同條件下，漂流木對於粒徑 2cm 和混合粒徑之礫石攔阻效果不明顯。因較大粒徑之礫石已受壩體攔阻，其漂流木影響壩體攔阻效果不彰。反之，在較小之粒徑下，漂流木具有更明顯之囚砂效益。實驗計算可得礫石通過率 50% 對應之間距與粒徑之比率介於 1.5 至 3 之間。

關鍵詞：透過性防砂壩、漂流木、渠槽實驗

Experiments of Woody Debris and Sediment

Trapping Efficiency of Permeable Dam

Abstract

When the typhoon or heavy rain hit, debris flows and landslides frequently occurred on the mountain zone in Taiwan, which led to the upstream falling wood entraining into the river with sand and water, consequently blocking and silting up the river, and causing disasters to the piers or structures downstream. Recently, adjustable check dam showed the advantages of moderating the sediment transport in channel, reduced downstream scour, balancing of sediment. Therefore, the study aims to explore the performances of blocking driftwoods and sediments of the permeable check dams were explored through the driftwoods trapping experiments. The experiments were designed as under a one-off debris flow event, the load (single-size sediment, mixed-size sediment, with/without wood logs) and the spacing of the dam bar were the treatments variables of the experiments. A camera was installed to record the development of the debris flow trapping progress. The passing and trapping rate of each experiment was calculated to compare the difference among the experiments. The morphology of the deposition at the back of the dam was also analyzed.

The driftwoods affect the sediment trapping performance of the check dam in conditions of 2cm bar spacing with 0.8 cm or 1.3 cm gravel

diameter. However, for 2 cm gravel diameter and mixed-sized experiments, the effect of driftwoods was not explicated. The results were attributed as the function of the wood logs was replaced by large gravel that blocked the check dam in advance.

Keywords: permeable check dams, driftwoods, flume experiment

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 前言	1-1
第一節 計畫目的	1-1
第二節 計畫預期成果	1-1
第三節 工作時程訂定	1-2
第二章 防砂壩之土砂攔阻特性	2-1
第一節 開口型防砂壩	2-1
第二節 孔隙型防砂壩	2-2
第三節 封閉型防砂壩	2-4
第四節 調整型防砂壩	2-5
第三章 漂流木(large woody debris).....	3-1
第一節 漂流木災害相關防治工法	3-1
第四章 渠槽試驗設計及流程	4-1
第一節 試驗渠槽配置	4-1
第二節 壩體設計	4-3
第三節 漂流木尺寸及數量	4-4
第四節 礫石選擇	4-6
第五節 試驗流程	4-9
第六節 試驗組別	4-12

第五章 試驗分析方法	5-1
第一節 通過率分析	5-1
第二節 座標轉換法	5-1
第三節 影像正射處理	5-3
第六章 結果與討論	6-1
第一節 壩體攔阻過程變化	6-1
第二節 通過率分析	6-32
第三節 堆積歷程斜率分析	6-44
第四節 堆積形貌分析	6-56
第五節 有漂流木實驗漂流木沉積位置	6-60
第七章 結論與建議	7-1
第一節 結論	7-1
第二節 建議	7-2
附錄一、意見回復	附錄-1
參考文獻.....	參-1

表次

表 1-1 本計畫工作執行進度表.....	1-2
表 3-1 大型懸移質攔截工法-河道內	3-3
表 3-2 大型懸移質攔截工法-水庫	3-7
表 4-1 漂流木模型參數.....	4-5
表 4-2 實驗礫石基本物理參數.....	4-7
表 4-3 無漂流木實驗組別代號說明.....	4-12
表 4-4 有漂流木實驗組別代號說明.....	4-13
表 6-1 無漂流木實驗通過率.....	6-33
表 6-2 無漂流木單一粒徑通過率 50%所對應之間距與粒徑關係	6-34
表 6-3 無漂流木實驗混合粒徑通過率.....	6-35
表 6-4 無漂流木混合粒徑通過率 50%所對應之間距與粒徑關係	6-35
表 6-5 無漂流木實驗混合粒徑中各粒徑及間距通過率	6-36
表 6-6 有漂流木實驗通過率.....	6-38
表 6-7 有無漂流木實驗堆積歷程發展斜率之比較	6-55

圖次

圖 2- 1 開口型防砂壩(A)未淤滿(B)礫石淤滿與漂流木攔阻示意圖(陳樹群等，2016)	2-2
圖 2- 2 孔隙型防砂壩(A)未淤滿(B)淤滿的水流與土砂分離示意圖(陳樹群等，2016)	2-3
圖 2- 3 封閉型防砂壩未淤滿(A)及淤滿(B)對於土砂攔阻示意圖(陳樹群等，2016)	2-5
圖 2- 4 可調式防砂壩(陳樹群等，2016)	2-6
圖 2- 5 調整型防砂壩組裝及拆卸流程圖(陳樹群，2019)	2-6
圖 4- 1 試驗渠道配置 (A)試驗段 (B)供水系統	4-2
圖 4- 2 室內渠槽實驗設備配置示意圖	4-2
圖 4- 3 氣動式閘門設置 (A)整體設置 (B)卸壓閥 (C)防水油土	4-3
圖 4- 4 防砂壩壩體設計示意圖	4-4
圖 4- 5 漂流木模型	4-5
圖 4- 6 試驗砂照片 (A)粒徑 0.04 公分 (B)粒徑 0.8 公分	4-7
圖 4- 7 混合粒徑實驗粒徑分布	4-8
圖 4- 8 土石流體積濃度水位線及礫石堆積線	4-8
圖 4- 9 試驗流程圖	4-11
圖 5- 1 座標轉換示意圖	5-3
圖 5- 2 影像正射處理圖(A) 原始視角(B) 正射視角	5-4
圖 6- 1 實驗組別參數	6-1
圖 6- 2 D08H1 實驗過程	6-2
圖 6- 3 D08H2 實驗過程	6-3
圖 6- 4 D08H3 實驗過程	6-4

圖 6- 5 D08H4 實驗過程	6-5
圖 6- 6 D13H1 實驗過程	6-6
圖 6- 7 D13H2 實驗過程	6-7
圖 6- 8 D13H3 實驗過程	6-7
圖 6- 9 D13H4 實驗過程	6-8
圖 6- 10 D20H1 實驗過程	6-9
圖 6- 11 D20H2 實驗過程	6-10
圖 6- 12 D20H3 實驗過程	6-10
圖 6- 13 D20H4 實驗過程	6-11
圖 6- 14 DMIXH1 實驗過程.....	6-12
圖 6- 15 DMIXH2 實驗過程.....	6-13
圖 6- 16 DMIXH3 實驗過程.....	6-14
圖 6- 17 DMIXH4 實驗過程.....	6-14
圖 6- 18 WD08H1 實驗過程	6-15
圖 6- 19 WD08H2 實驗過程展	6-16
圖 6- 20 WD08H3 攔阻過程發展	6-17
圖 6- 21 WD08H4 實驗過程	6-17
圖 6- 22 WD13H1 實驗過程	6-18
圖 6- 23 WD13H2 實驗過程	6-20
圖 6- 24 WD13H3 實驗過程	6-21
圖 6- 25 WD13H4 實驗過程	6-21
圖 6- 26 WD20H1 實驗過程	6-23
圖 6- 27 WD20H2 實驗過程	6-24
圖 6- 28 WD20H3 實驗過程	6-25
圖 6- 29 WD20H4 實驗過程	6-25

圖 6-30 WDMIXH1 實驗過程.....	6-27
圖 6-31 WDMIXH2 實驗過程.....	6-28
圖 6-32 WDMIXH3 實驗過程.....	6-29
圖 6-33 WDMIXH4 實驗過程.....	6-29
圖 6-34 D08 和 WD08 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖	6-30
圖 6-35 D13 和 WD13 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖	6-30
圖 6-36 D20 和 WD20 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖	6-31
圖 6-37 DMIX 和 WDMIX 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖	6-31
圖 6-38 無漂流木實驗各粒徑通過率.....	6-34
圖 6-39 無漂流木實驗混合粒徑中各粒徑通過率	6-36
圖 6-40 無漂流木實驗通過率與粒徑相對間距(間距/粒徑)之關係式	37
圖 6-41 有漂流木實驗各粒徑通過率.....	6-40
圖 6-42 有漂流木實驗通過率與粒徑相對間距(間距/粒徑)之關係式	6-40
圖 6-43 有漂流木實驗通過率與漂流木長度相對間距(間距/漂流木)之 關係式	6-41
圖 6-44 D08 與 WD08 通過率比較圖.....	6-43
圖 6-45 D13 與 WD13 通過率比較圖.....	6-43
圖 6-46 D20 與 WD20 通過率比較圖.....	6-44
圖 6-47 DMIX 與 WDMIX 通過率比較圖	6-44
圖 6-48 堆積歷程 (A)初始歷程 (B)堆積斜率	6-45
圖 6-49 D08 堆積歷程斜率(A)D08H1 (B)D08H2	6-46
圖 6-50 D13 堆積歷程斜率(A)D13H1 (B)D13H2 (C)D13H3	6-47
圖 6-51 D20 堆積歷程斜率(A)D20H1 (B)D20H2 (C)D20H3	6-48
圖 6-52 DMIX 堆積歷程斜率(A)DMIXH1 (B)DMIXH2 (C)DMIXH3...	6-49

圖 6- 53 WD08 堆積歷程斜率(A) WD08H1 (B) WD08H2 (C) WD08H3	6-50
圖 6- 54 WD13 堆積歷程斜率(A) WD13H1 (B) WD13H2 (C) WD13H3	6-51
圖 6- 55 WD20 堆積歷程斜率(A) WD20H1 (B) WD20H2 (C) WD20H3	6-52
圖 6- 56 WDMIX 堆積歷程斜率(A) WDMIXH1 (B) WDMIXH2 (C) WDMIXH3.....	6-53
圖 6- 57 D08 及 WD08 實驗堆積形貌.....	6-57
圖 6- 58 D13 及 WD13 實驗堆積形貌.....	6-58
圖 6- 59 D20 及 WD20 實驗堆積形貌.....	6-59
圖 6- 60 DMIX 及 WDMIX 實驗堆積形貌.....	6-59
圖 6- 61 WD08 實驗漂流木分佈位置	6-60
圖 6- 62 WD13 實驗漂流木分佈位置	6-61
圖 6- 63 WD20 實驗漂流木分佈位置	6-62
圖 6- 64 WDMIX 實驗漂流木分佈位置	6-63

第一章 前言

第一節 計畫目的

台灣因地理位置特殊，颱風、豪雨及地震頻繁，每當遭受到颱風或豪雨侵襲時，山坡地常發生土石流及崩塌，其導致上游倒木伴隨水流與土砂進入河道，河道內大量土砂與漂流木運移，易造成河道阻塞淤積，而其產生撞擊力與衝擊力，常造成橋墩和水工結構物之損害。漂流木及土砂阻塞河道導致土石淤積溢流，亦可能擴大土砂災害之規模，增加人員傷亡與財產損失。為防範河道中漂流木及土砂之災害，上游多實施土砂攔截相關工法，然過往防砂壩設計多針對土砂災害防範作規範，較少考量漂流木攔截需求。因此，本研究將收集國內外漂流木攔截工法之文獻，並設計不同透過性防砂壩型式對攔阻漂流木之渠槽試驗，分析透過性防砂壩對漂流木及土砂之攔阻效益，以供未來透過性防砂壩設計參考之依據。

第二節 計畫預期成果

- 一、蒐集國內外河道透過性防砂壩攔阻漂流木及土砂之工法，並彙整各工法之用途、特性。
- 二、透過試驗影像進行分析，瞭解透過性防砂壩攔阻漂流木之行為。
- 三、利用篩分析探討透過性防砂壩上游之因砂量與漂流木之關係。
- 四、計算不同透過性防砂壩型式對漂流木之攔阻率，探討不同型式之透過性防砂壩攔阻漂流木之效益。

五、藉由因砂量、漂流木攔阻率及漂流木通過壩體行為，分析不同型式之透過性防砂壩對漂流木攔阻之影響，以提供透過性防砂壩型式設計參考之依據。

第三節 工作時程訂定

本計畫預定執行進度及實際執行進度如表 1-1 所示。

表 1-1 本計畫工作執行進度表

工作項目	110 年											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
蒐集並彙整國內外透過性防砂壩攔阻漂流木及土砂之工法及型式												
設計及測試不同防砂壩型式攔阻漂流木之渠槽試驗												
透過試驗影像分析漂流木通過壩體之行為												
分析不同透過性防砂壩型式對上游因砂量與漂流木之關係												
評估不同透過性防砂壩型式對漂流木之攔阻效能												
期初報告撰寫												
期中報告撰寫												
期末報告撰寫												
成果報告撰寫及繳交												
進 度 (%)	8	16	23	35	45	48	56	64	72	80	88	100
■：預定進度 ■：實際進度												

第二章 防砂壩之土砂攔阻特性

依據水土保持手冊(2017)工程篇對防砂壩之定義為攔蓄及調節溪流土砂、減緩溪床坡度、穩定流心、防止侵蝕、崩塌或抑止土石流所構築 5.0m 以上之橫向阻水構造物，為野溪控制土砂流失與生產。透過文獻蒐集與現地案例調查，大致將防砂壩依土砂攔阻特性概分為開口型防砂壩、孔隙型防砂壩及封閉型防砂壩(陳樹群，2016)並分別說明如後。

第一節 開口型防砂壩

開口型防砂壩為讓土砂在承受基礎輸砂量(平日或小型山洪)時，水流及土砂得以穿越壩體，使壩體上游可維持適當之貯砂空間，以供發生高含砂水流或土石流時，可適時發揮攔阻土砂和延遲流出時間之效果。

開口型防砂壩於淤滿前之水流、卵礫石與漂流木運動特性如圖 2-1(a)所示，因水流易通過壩體，故最大流速會接近壩體下端，所帶動的卵礫石也易由下端流出，開口型防砂壩目的是讓細小顆粒能從壩體流出。根據實驗與現場調查，粒徑若大於壩體柱間距之 $1/2$ ，就易起連拱效應阻斷後續輸砂，轉變成為孔隙型壩體之型態，如圖 2-1(b)，因此壩體柱間距設計影響壩對礫石的攔阻功能甚巨。漂流木因水流的浮力及水平推力而極易受壩體所攔擋，這也是該型防砂壩的優點，但同時也必須進行清淤的動作，以恢復其效能。Toshihiko et al. (1998)依據對日本大棚沢第二大壩近 10 年間的調查，發現開口型壩體於一般的情況下土砂並不會淤積，而是會從壩體下方直接流過，即使有淤積也會隨小流量水流出，於未來可保有攔阻土石流的空間，並可中斷土

石流的連續性，大幅降低下流河道的破壞。目前台灣地區因地質脆弱與暴雨集中等因素，多將開口型防砂壩配置於易發生土石流之溪流。

開口型防砂壩在土石流或高含砂水流與漂流木之攔阻上皆有良好之功效，可維持河道生態機能與山區河川環境。在設計理念上具備容許泥砂自然流出以維持上游因砂滯洪等功能；然而在實務上，常因壩體上游淤滿而喪失因砂空間，面臨與全封閉型防砂壩阻斷輸砂與棲地連通性之窘境。

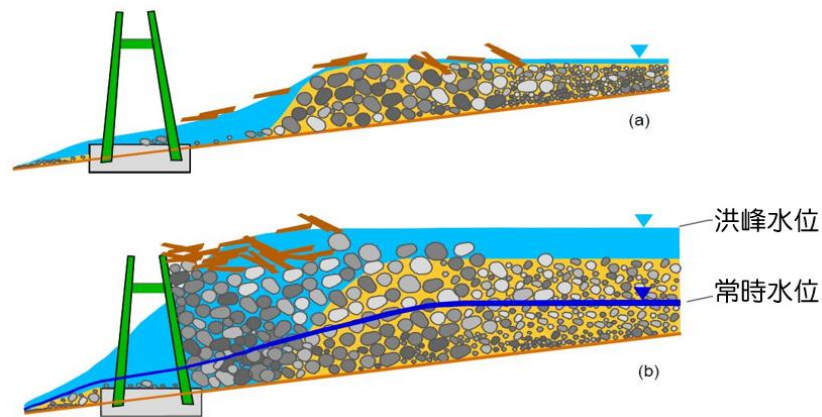


圖 2-1 開口型防砂壩(a)未淤滿(b)礫石淤滿與漂流木攔阻示意圖

(陳樹群等，2016)

第二節 孔隙型防砂壩

孔隙型防砂壩之壩身因構築孔隙材料具有透水性，在承受基礎輸砂量時，大部份之土砂無法通過孔隙壩身，但水流可由孔隙滲流出。開口型防砂壩淤滿後，若淤砂之孔隙較大，水流可自壩體滲出，其因砂行為類似於孔隙型防砂壩。

早期孔隙型防砂壩較少用於施作高壩，且孔隙型防砂壩不論淤滿與否，水流均能由壩體孔隙間流出如圖 2-2，主要在於分離水流，攔阻細顆粒泥沙，達到壩後淤積以減緩河床及壩後沖蝕現象，以防止蝕溝擴大，亦能減緩水流由壩頂向下淘刷壩體。

早期孔隙型防砂壩壩體設計優勢為建造容易快速，且建構之成本低廉且易於取得，以溪床中之卵石與塊石作為填充材料，故本類壩體常用於緊急臨時性之土砂災害防治，但此壩體結構強度較差，遇大流量或受到土石衝撞時，容易產生損毀，故長久性往往不足僅適用在流量小、土砂沖擊力道不大之坡面沖蝕溝之沖蝕控制，無法用做大型溪流中之防砂壩。近幾年已有孔隙型混合鋼構之設計壩型，可加強其結構強度，其壩基穩固亦可突破以往壩基不穩，故此已有施作高壩之基礎。

從台灣早期相關案例，其砌石壩、木造格框、內部砌石壩，以木材、石材間之砌合無法完全密閉，使水流可從壩體縫隙中滲出，並達到與現地自然景觀、生態環境融為一體之效果。方箱型網籠壩及鉛絲蛇籠壩主要常應用於野溪、山坑等流水較少之地區，以控制蝕溝發展之用。



圖 2-2 孔隙型防砂壩(a)未淤滿(b)淤滿的水流與土砂分離示意圖

(陳樹群等，2016)

第三節 封閉型防砂壩

封閉型防砂壩為平時泥砂無法通過壩體，攔阻土砂不具選擇性，全數土砂皆可被防砂壩攔阻，因構築之材料具不透水性，故水流除了排水孔外亦無法通過壩體。於洪峰水位時，洩水孔來不及排出當時水量，故造成溢出壩頂之情況；於常時水位時，因回水效應使壩前水位上升之情形。封閉型防砂壩因水流會翻越壩頂而出，故對漂流木的攔阻效果較差如圖 2-3。

庫容較大的封閉型防砂壩，未淤滿前會因壩後水流擾動，而使推移質向下游移動速度減緩，而產生懸移值落淤的現象，經常一場暴雨就造成完全淤滿，台灣相關案例中，壩體經過歷次土砂災害之淤積，最終都會達到淤滿的狀態，雖然無法再容納更多的土砂，但此時的壩尚有固床及穩定坡度等功能。

封閉型防砂壩設計目的為攔阻平日河道中之泥砂，更強調穩定上游河道兩岸邊坡與減少沖蝕的功能。由於全封閉型防砂壩下游土砂運移量減少，亦造成壩體下游面淘空，故常興建副壩配合水墊保護或以系列壩（節制壩）的型態出現，以保護河床並免於壩體淘刷。

封閉型防砂壩最易被環保團體所詬病的是棲地之縱向不連續，防砂壩直接阻斷河川棲地中之縱向連續性，造成棲地成片斷不相連之區塊。對於水土保持專業而言，更應思考於封閉型防砂壩於水流輸砂之不連續、河川水力條件改變、水流受阻、泥砂無法順利下移等危害之疑慮，河川失去應有之基礎輸砂量。

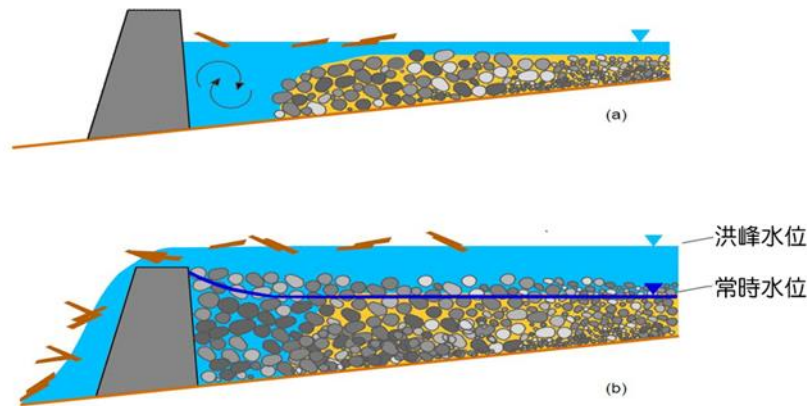


圖 2-3 封閉型防砂壩未淤滿(a)及淤滿(b)對於土砂攔阻示意圖(陳樹群等，2016)

第四節 調整型防砂壩

為了維持河川土砂之平衡及溪流生態連續性，陳樹群(2019)提出調整型防砂壩(會呼吸防砂壩)之概念，在河道高來砂量時期，攔阻過多土砂、巨石及漂流木，避免下游受土砂之災害；河道進入來砂量消減期時，先移除橫桿，使大粒徑土砂流出，之後再拆除縱材，降低上游淤砂高度，故此防砂壩可以隨著土砂環境變遷而調整其功能。

調整型防砂壩主要以橫桿來反覆調整土砂量，當橫桿間距過大，則可能無法達到攔阻效用；間距過小，上則游攔阻過多土砂，使下游河床易受淘刷，因此橫桿為調整型防砂壩主要調整土砂量之因素。

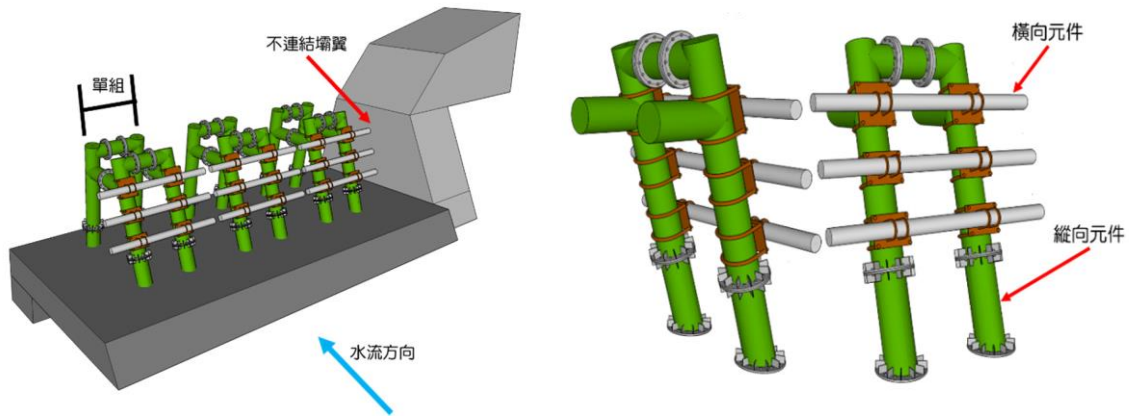


圖 2-4 可調式防砂壩(陳樹群等，2016)



圖 2-5 調整型防砂壩組裝及拆卸流程圖(陳樹群，2019)

第三章 漂流木(large woody debris)

當河岸上之樹木死亡後，或受其他外力（如洪水、崩塌、河岸沖刷等作用）導致進入河道，在樹木進入河道後木頭會發生分解、破碎化、儲存、運移及沉積之過程（陳樹群等人，2012），且長度大於 1 公尺，直徑大於 10 公分即被定義為漂流木（Large Woody Debris, LWD）（Andrus and Stokoe, 1999; Keller and Tally, 1979; Wohl and Scott, 2016）。一般來說，漂流木堆積於河道中會改變水流條件，造成河道泥砂之運移、堆積，影響河道型態，漂流木經由自然分解過程中會提供河流養分（Golladay et al., 1989; Triska et al., 1984），漂流木是河流生態系統的重要組成部分，為眾多生物提供了棲息地多樣性和環境的複雜性（Bisson et al., 1987; Hogan, 1986; Montgomery et al., 1996; Montgomery et al., 1995; Swanson and Lienkaemper, 1978; Fausch and Northcote, 1992）。漂流木於洪水發生期間會加重災害的影響規模，阻塞導致洪水快速迴水效應造成河道拓寬和局部沖刷亦造成洪水氾濫，漂流木之衝擊導致壩體與橋樑坍塌（Diehl, 1997; Lyn et al., 2007; Mao and Comiti, 2010）。

第一節 漂流木災害相關防治工法

近二十年來與河流生態系統相關之科學與技術文獻中漂流木的研究明顯提升（Gurnell et al., 2002; Wohl, 2013; Ruiz-Villanueva et al., 2016），可見許多國家也開始正視漂流木帶來之影響。漂流木攔阻與防範之相關工法逐漸被提出。一般漂流木對策工法（設施）的種類可分為抑制漂流木產生及攔截捕捉漂流木，針對土石流區域，可實施坡面安定工、護岸工、固床工、防砂堰堤等抑制漂流木產生，另外實施透過

型防砂堰堤、流木柵工等藉攔截漂流木；在河川之掃流區域，可實施防砂堰堤、固床工、丁壩、護岸工等抑制漂流木產生，另外實施透過型防砂堰堤、流木柵工等攔截捕捉漂流木(石川芳治等，2006)。

在台灣每逢受到颱風或豪雨侵襲，各地經常發生土石流及崩塌，此現象係導致漂流木進入河道的重要因素之一，而泥砂與漂流木沿著河道運移會產生撞擊力跟衝擊力，導致橋墩和水庫受損；漂流木及土石阻塞河道，容易造成之土石淤積溢流擴大土砂災害之規模，導致生命財產損失。為防範堆積於河道中之漂流木，因此我們本團隊已閱讀國內外文獻，彙整各種防治工法類型及特色。對於攔截捕捉漂流木之工法可分為兩部分進行說明，第一部分為河道內，如實施透過型防砂堰堤、流木柵工，第二部分為水庫上游，如浮壩，有助於攔截水庫上游漂浮的漂流木。攔截漂流木產生之工法的蒐集結果顯示，在河道內防治工法方面，主要是採用透水型防砂壩，例如鋼管壩、圍欄、繩網等。一般在無災害發生時，水流中較小粒徑的土砂能穿過壩體並流向下游，確保土石流發生前壩體上游之泥砂儲存容量，當災害發生時，土石流中含有巨石、大量土砂及漂流木，由於混和之土石流材料容易被攔截，並防範土石沖至下游所引起的災害。其優點為防範突如其來的土石流災害、漂流木攔截效果佳(表 3- 1)。在水庫防治工法方面，大型懸移質進入水庫多以漂浮為主，進入庫區後堆積於壩前對水工結構物、發電廠及灌溉引水設施造成嚴重損失。除此之外，大型懸移質其本身之孔隙將吸入水分及泥漿，並造成大型懸移質單位體積之重量增加沉入庫底，若不即時清除則將造成水庫取水設施操作及安全上之危害。因此針對庫區採取之工法多以浮壩為主，浮壩能夠有效的限制住大型懸移質堆積位置、維護成本低、材料與機具重量輕以及有效災

後清理作業(表 3-2)。

表 3-1 大型懸移質攔截工法-河道內

	工法名稱：B 型鋼管壩
	用途：攔截土石流及大型懸移質，減少流出土砂量，避免造成下游土石及流木災害。
	工法特色：可靈活配合地形設施佈局，施工效率好，安全快捷組裝，零件損壞時，可局部更換零件，因此易於維護，透水性佳，該構件簡單輕鬆安裝。
	資料來源：日鐵住金建材の鋼製スリットダム
	工法名稱：T 型鋼管壩
	用途：利用壩身透水柵設計，攔截土石流及大型懸移質，使流到壩前之土石流脫水，進而使土石流停止流動，並在壩前淤積。
	工法特色：可靈活配合地形設施佈局，施工效率好，安全快捷組裝，零件損壞時，可局部更換零件，因此易於維護，透水性佳，該構件簡單輕鬆安裝。
	資料來源：日鐵住金建材の鋼製スリットダム
	工法名稱：A 型鋼管壩
	用途：利用壩身透水設計，攔截大型懸移質。
	工法特色：可靈活配合地形設施佈局，施工效率好，安全快捷組裝，零件損壞時，可局部更換零件，因此易於維護，透水性佳，該構件簡單輕鬆安裝。
	資料來源：日鐵住金建材の鋼製スリットダム

	工法名稱：R 型鋼管壩
	用途：利用壩身透水設計，攔截大型懸移質。
	工法特色：可靈活配合地形設施佈局，施工效率好，安全快捷組裝，零件損壞時，可局部更換零件，因此易於維護，透水性佳，該構件簡單輕鬆安裝。
	資料來源：日鐵住金建材の鋼製スリットダム
	工法名稱：H 型鋼管壩
	用途：利用壩身透水設計，攔截大型懸移質。
	工法特色：可靈活配合地形設施佈局，施工效率好，安全快捷組裝，零件損壞時，可局部更換零件，因此易於維護，透水性佳，該構件簡單輕鬆安裝。
	資料來源：兵庫縣養父土木事務所 https://www.kobelco.co.jp/products/sand/driftwood_capture.html
	工法名稱：J 型鋼管壩
	用途：利用壩身透水設計，攔截大型懸移質。
	工法特色：安裝寬度小，可有效降低基礎混凝土之成本，可靈活配合地形設施佈局，施工效率好，安全快捷組裝，因此易於維護，透水性佳，該構件僅通過螺栓連接即可進行現場組裝，加工性極佳。
	資料來源：日本 JFE 建材株式會社 https://www.jfe-kenzai.co.jp/product/09/02/index.html

	工法名稱：JD 圍欄
	用途：利用壩身透水設計，攔截大型懸移質。
	工法特色：當泥石流中有 95%之礫石直徑為 20 cm 或更大時，該工法具有與不可透水壩之相同泥石流和大型懸移質的捕獲性能，並且上游結構攔截土砂與大型懸移質能使礫石不直接撞擊支柱。
	資料來源：日本 JFE 建材株式會社 https://www.jfe-kenzai.co.jp/product/09/17/index.html
	工法名稱：D 型鋼管壩
	用途：利用壩身透水設計，攔截大型懸移質。
	工法特色：安裝寬度小，可有效降低基礎混凝土之成本，可靈活配合地形設施佈局，施工效率好，安全快捷組裝，因此易於維護，透水性佳，該構件僅通過螺栓連接即可進行現場組裝，加工性極佳。
	資料來源：日本 JFE 建材株式會社 https://www.jfe-kenzai.co.jp/product/09/03/index.html

	工法名稱：J-HD 型鋼管壩
	用途：利用壩身透水設計，攔截大型懸移質。
	工法特色：可直接安裝在原本的不透水之大壩上游，安裝工時短。透過水工模型試驗證實此鋼管壩對於大型懸移質具有較高的捕獲性能。
	資料來源：日本 JFE 建材株式會社 https://www.jfe-kenzai.co.jp/product/09/19/index.html
	工法名稱：繩網攔截工法
	用途：攔截土石流、大型懸移質
	工法特色：較環保（無需開挖河床），施工時間短，繩網安裝及拆卸方便，清疏便利
	資料來源：国土交通省北陸地方整備局立山砂防事務所 https://www.kobelco.co.jp/products/sand/wire_net.html
	工法名稱：牛框架（小型鋼結構）
	用途：攔截大型懸移質
	工法特色：工期短、施工容易、緊急施工、小規模施工
	資料來源：神戶製鋼所株式會社(2016) https://www.kobelco.co.jp/products/sand/bullmetal.html

表 3-2 大型懸移質攔截工法-水庫

	工法名稱：浮壩
	用途：攔截大型懸移質、垃圾、薄冰
	工法特色：堅固材料、維護成本低、環境適應能力
	資料來源：美國 Worthington 公司 http://www.sscottandassociates.com/waterway-barriers.html

第四章 渠槽試驗設計及流程

近年來由於生態意識抬頭，集水區治理工程不只著重於防災、減災，也期望兼顧環境友善度，透過性防砂壩具有攔阻土石流及漂流木之功能，並可藉由並可藉由不同開孔間距與大小來調節土砂量，達到維持河川輸砂平衡，故本研究選定透過性防砂壩進行渠槽試驗。

第一節 試驗渠槽配置

本研究使用位於中興大學水土保持學系之室內渠槽進行模擬試驗，該渠槽為可調坡度及供水流量之矩形渠槽，由水箱、渠道及蓄水池所構成的，渠道全長 200 公分、深 40 公分、寬 20 公分，兩側均為壓克力邊壁，以利實驗進行及觀測。試驗段為氣動式閘門至防砂壩上游處，長 95 公分，因渠道底部為壓克力材質無摩擦力，並不符合真實河道之流動現象，故將厚 0.1 公分之止滑墊黏於渠道底部，以增加土砂及漂流木流動過程中之摩擦力(圖 4- 1a)；渠道坡度參考土石流發生段之坡度範圍(詹錢登，2000)，故選定坡度為 15 度；供水系統由電動馬達從蓄水池抽水至水箱，水箱採用定水頭之方式將水供至渠道內(圖 4- 1b)。渠槽上半部裝設一氣動式閘門，實驗初始時關閉閘門蓄水，待土砂及漂流木與水流均勻混合後，打開閘門模擬一次性土砂沖下時，不同型式防砂壩對攔阻漂流木及土砂之影響，室內渠槽實驗設備配置如圖 4- 2 所示。

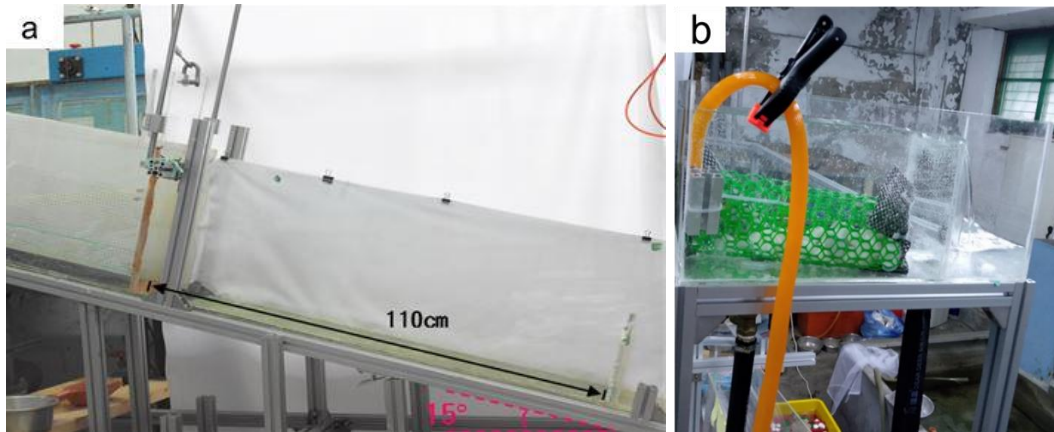


圖 4-1 試驗渠道配置 (a)試驗段 (b)供水系統

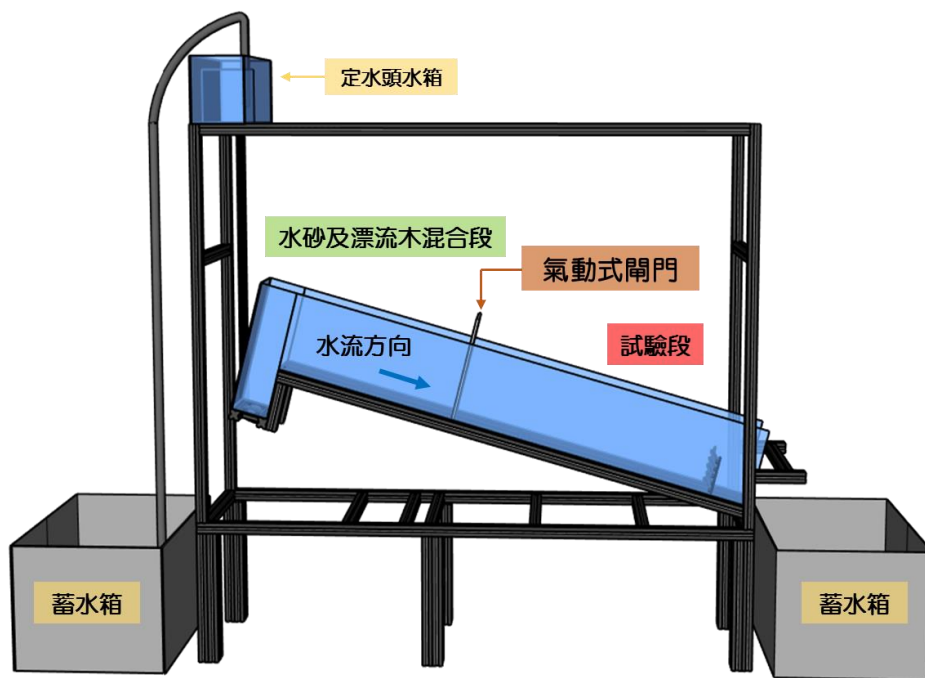


圖 4-2 室內渠槽實驗設備配置示意圖

為了使每次試驗時抽開閘門的速度一致，參考林采蓉(2020)使用的氣動式閘門設置，利用氣壓缸及滑軌將閘門向上抽起。透過氣壓機將空氣打進氣壓缸中，待氣壓機達一定壓力時，以穩定速度向上抽起閘門(圖 4-3a)。因氣壓機本身壓力太大，在沒有分壓的情況下，容易造成管子毀損，故需藉由卸壓閥來調整氣體壓力(圖 4-3b)。而閘門與渠壁之間的縫隙，黏上一層油性黏土，以減少蓄水階段水從縫隙流出之情況(圖 4-3c)。

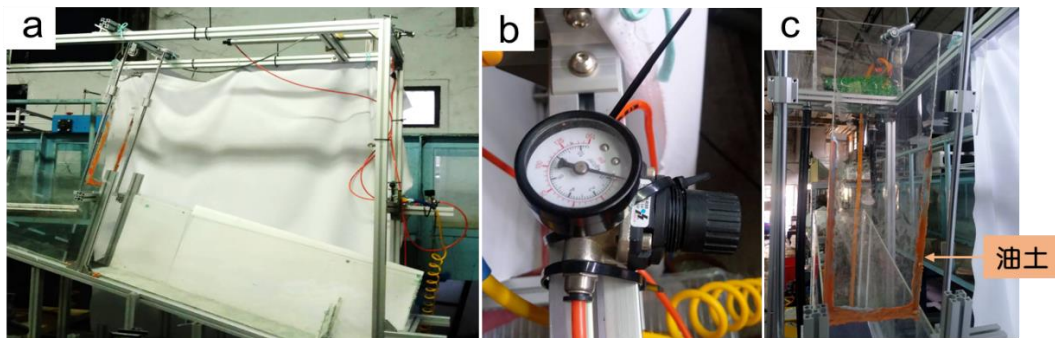


圖 4-3 氣動式閘門設置 (a)整體設置 (b)卸壓閥 (c)防水油土

第二節 壩體設計

本試驗主要探討不同透過性防砂壩型式對土砂及漂流木攔阻之影響，透過試驗了解礫石大小、有無漂流木及透過性防砂壩間距之比例關係，故不考慮現地尺寸縮比，只探討防砂壩一開口攔阻土砂及漂流木之情形，漂流木之情形。設計防砂壩一開口長 19 公分、高度則隨橫桿間距變化而有所不同。橫桿長 20 公分、寬 1 公分之壓克力。橫桿間距可隨每次試驗條件進行調整。此試驗設計 4 種不同的防砂壩橫桿間距，分別為 1、2、3 及 4 公分。橫桿間距 1 及 2 公分設計相同壩高 18 公分；橫桿間距 3 及 4 公分因無法設計出與橫桿間距 1 及 2 公分相同之壩高，而較大的間距易使土砂通過至壩體，並無發生土砂溢流出壩體之現象，故壩體高度設計可低於 18 公分，因此將橫桿間

距 3 及 4 公分之壩體高度設計為 16 公分及 15 公分。壩體設計示意如圖 4-4 所示。

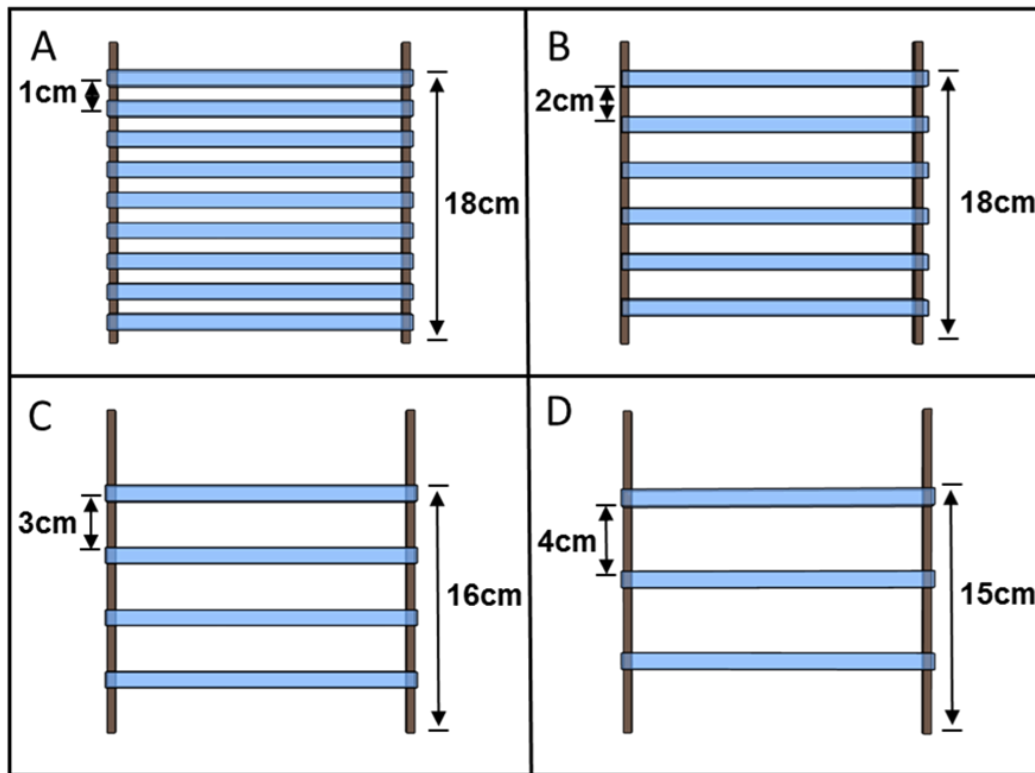


圖 4-4 防砂壩壩體設計示意圖

第三節 漂流木尺寸及數量

本試驗為探討漂流木長度與各橫桿間距之倍數關係對壩體土砂通過率之影響及相同土砂條件下有無漂流木對壩體上游堆積線型態之變化，故漂流木長度設定為與最大橫桿間距相同(4 公分)(圖 4-5)。漂流木丟擲數量根據 2010 日本國漂流木對策及處理實務研習會講義中提及，土石流事件中漂流木體積為土石流土砂量的 0.02 倍。因實驗中丟擲土石流土砂量 0.02 倍的漂流木數量效果較不明顯，經幾組實驗測試後，將丟擲漂流木數量定為土石流事件中漂流木體積為土石流土砂量的 0.05 倍，共 355 根漂流木(誤差 ± 1 根)。實驗中使用的漂流木尺寸詳細敘述如表 4-1 所示。



圖 4-5 漂流木模型

表 4-1 漂流木模型參數

	直徑(cm)	長度(cm)	體積(cm^3)	重量(g)	密度(g/cm^3)
漂流木	0.5	4	0.785	0.69	0.879

第四節 礫石選擇

探討粒徑大小及混合粒徑之粒徑級配對透過性防砂壩不同橫桿間距之比例關係，故實驗礫石的選擇分別有 3 種不同的單一粒徑及 1 種混合粒徑。量測粒徑方式為 1 公分以下之粒徑進行篩分析，1 公分以上因無法進行篩分析，故利用三軸量測法，求得軸平均粒徑。然而每種礫石粒徑大小皆有些微差異，根據錢寧(1983)提出幾何標準偏差 ≤ 1.4 可視為均勻粒徑，以中值粒徑(d_{50})代表幾何平均粒徑，故 3 種單一粒徑其代表粒徑分別為 0.8、1.3 及 2 cm 鵝軟石。為方便實驗觀察，故將 3 種粒徑分別塗上綠、藍及紅色。

混合粒徑實驗則加入粒徑 0.04 cm 之石英砂，並與粒徑 0.8、1.3、2 cm 做粒徑級配，此級配中 d_{50} 為 0.662 cm、 d_{75} 為 1.28 cm 及 d_{90} 為 1.65 cm (圖 4-7)。單一粒徑及混合粒徑所有實驗，重量皆為 15 公斤。每次實驗擺放的礫石都盡量讓體積維持在高 11 公分，長 39 公分之形狀(誤差 ± 2 公分)，避免擺放高度不一，影響堆積成果。實驗礫石基本物理參數如表 4-2 所示。

由於各粒徑體積量不同，故在相同土石流體積濃度 20% 的水體積會隨著各粒徑大小而有所不同，因此將各粒徑之體積與所對應之水體積造成的水位變化貼齊於渠道邊壁上，以維持每組實驗的土石流體積濃度。

表 4-2 實驗礫石基本物理參數

	粒徑	密度 (g/cm ³)	d ₅₀ (cm)	d ₉₀ (cm)	幾何標準偏差
單一 粒徑	D0.8	2.5	0.8	0.9	1.1
	D1.3	2.8	1.3	1.4	1.1
	D20	2.8	2.0	2.0	1.0
混合 粒徑	Dmix	2.5	0.7	1.7	--

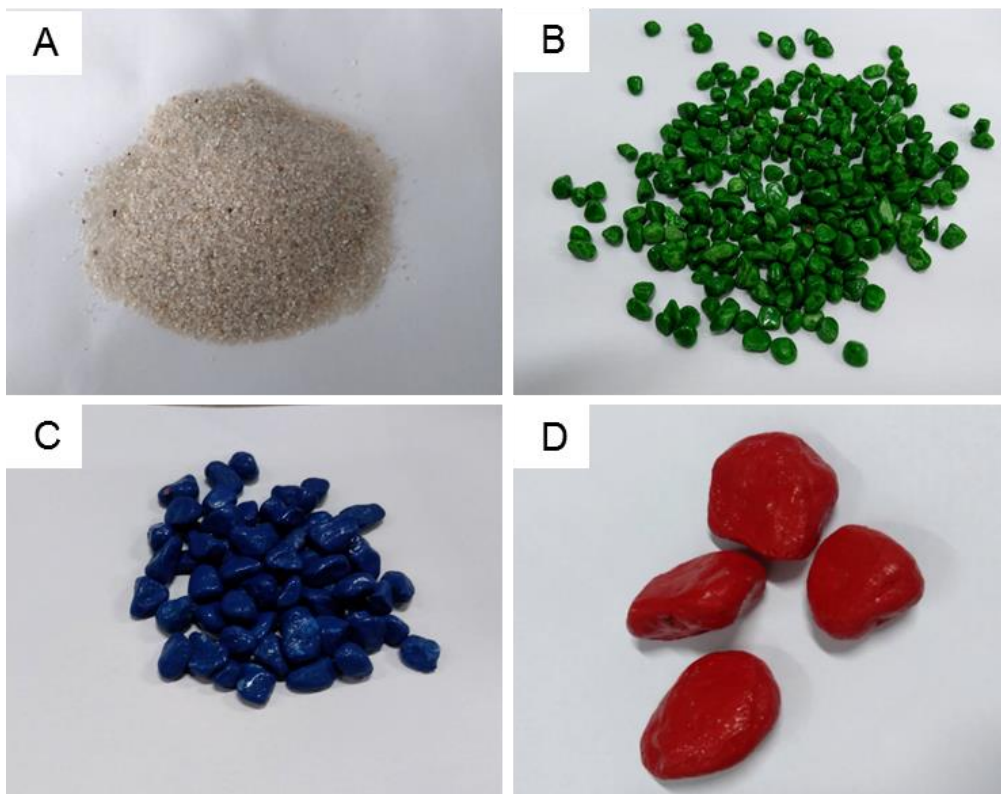


圖 4-6 試驗砂照片 (A)粒徑 0.04 公分 (B)粒徑 0.8 公分
(C)粒徑 1.3 公分 (D)粒徑 2 公分

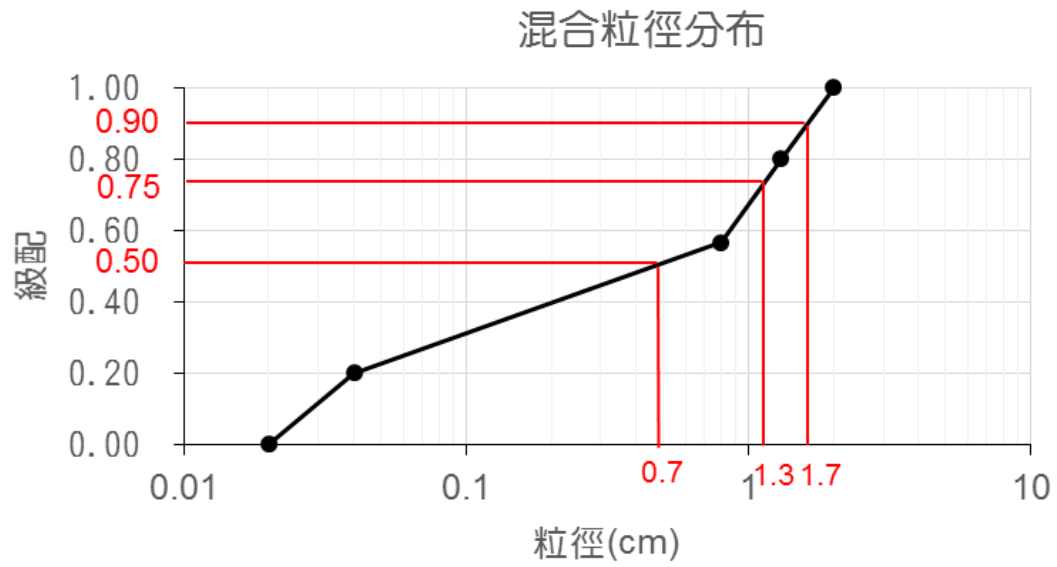


圖 4-7 混合粒徑實驗粒徑分布

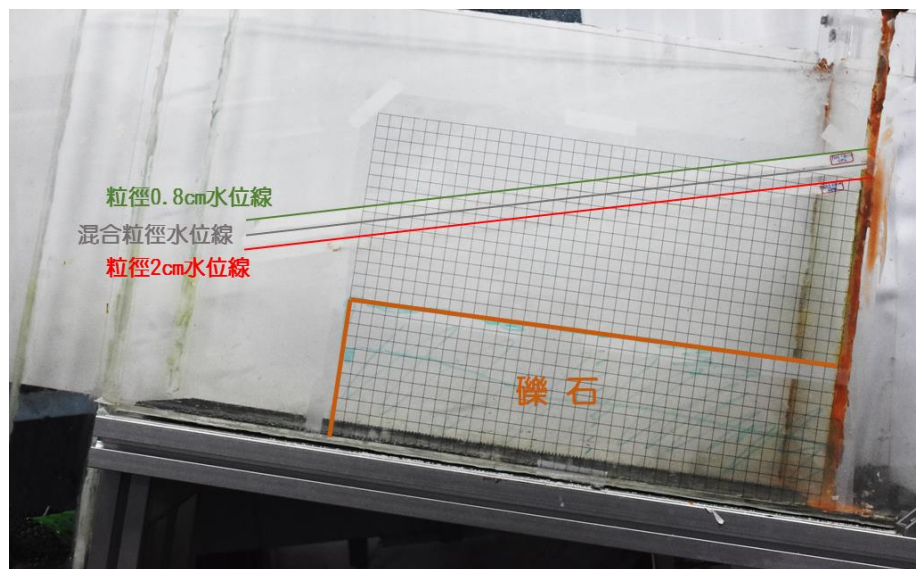


圖 4-8 土石流體積濃度水位線及礫石堆積線

第五節 試驗流程

有無漂流木試驗流程大致相同，只有少數步驟有些微差異，如圖 4-9 所示：

一、實驗前置作業

(一) 架設攝影機及相機：

將影像畫面包覆在率定工具及試驗段中，並根據當天試驗室燈光，調整相機及攝影機之感光度、光圈及快門等參數。

(二) 擺放率定工具：

在試驗段中放置率定工具，透過 Matlab 分析可將影像中之數據轉換成真實座標。

(三) 調整橫桿間距：

依照試驗各組別之配置，調整至相對應之間距。

二、實驗過程

(一) 放置氣動式閘門:

固定相同之氣壓，以確保抽取閘門速度一致，閘門周圍則黏上一層油土，減少水從縫隙滲出之速度。

(二) 擺放率定工具:

在試驗段中放置率定工具，透過 Matlab 分析可將影像中之數據轉換成真實座標。

(三) 放置土砂:

將 15 公斤之土砂放置於氣動式閘門後方，每次擺放體積維持一定形狀，避免擺放高度不一，影響堆積成果。

(四) 加入漂流木(有漂流木試驗):

加入相同數量及長度之漂流木，並與土砂混合。

(五) 待水位到達一定高度，抽起閘門:

當水位到達一定高度時，為土石流體積濃度 20%，即可抽起閘門，模擬一次性土砂事件，透過性壩體攔阻土砂及漂流木之效益及型態。

(六) 記錄流至下游之土砂:

從流出壩體之土砂，求得不同型式之壩體通過率。

三、後續分析

(一) 通過率分析:

分析不同型式之透過性防砂壩土砂通過之比例。

(二) 攔阻型態分析:

分析土砂及漂流木受壩體攔阻時型態之變化，並比較有無漂

流木攔阻型態之改變。

(三) 剖面分析：

分析不同型式之透過性防砂壩堆積剖面之形狀。

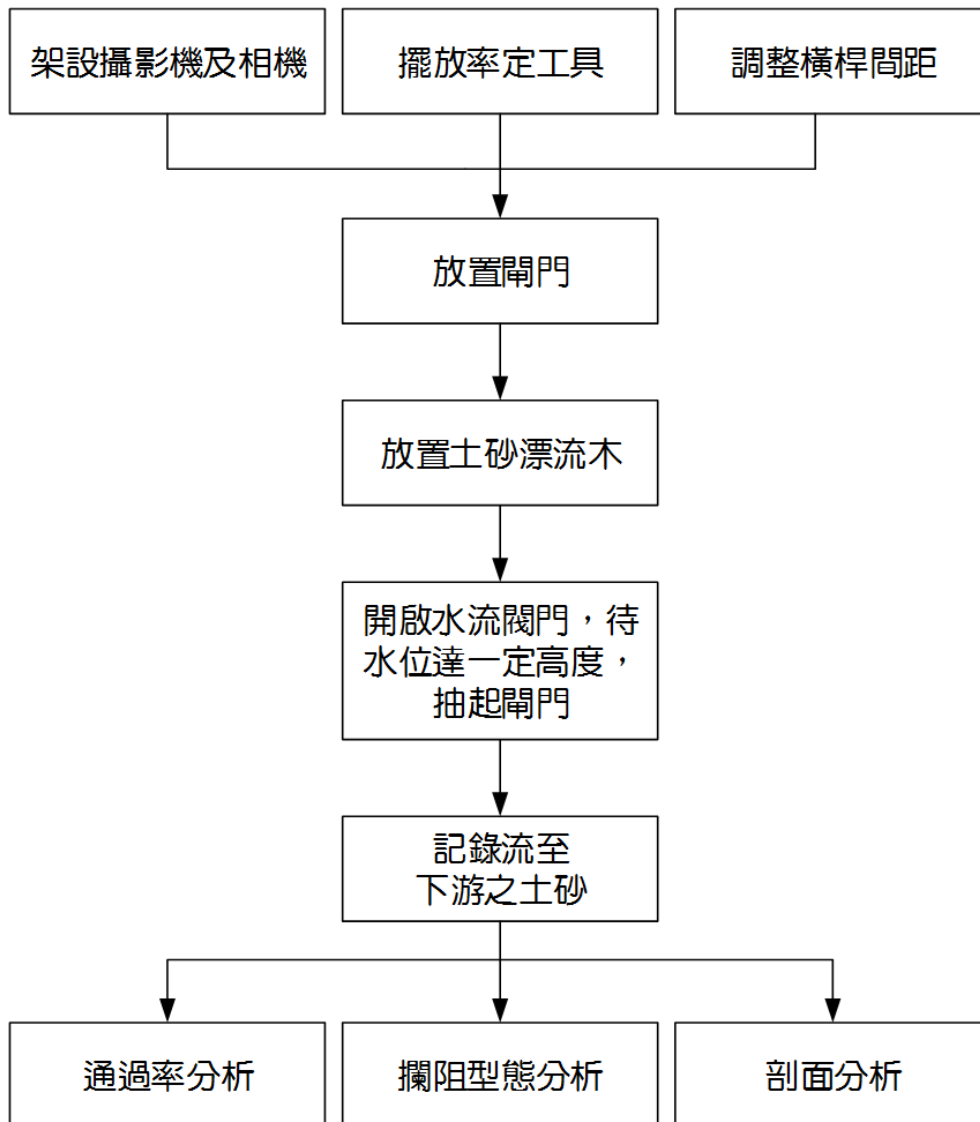


圖 4-9 試驗流程圖

第六節 試驗組別

無漂流木實驗分為單一粒徑及混合粒徑實驗，單一粒徑實驗中變因為 3 種不同粒徑及 4 種不同橫桿間距，共 12 組；混合粒徑中為一種粒徑級配搭配 4 種不同橫桿間距，共 4 組，故無漂流木總實驗組數為 16 組(表 4- 3)。有漂流木實驗則是於每一組實驗中加入 355 根漂流木，其餘變因都與無漂流木實驗相同，故有漂流木總實驗組數同樣為 16 組(表 4- 4) ，而有及無漂流木實驗組別皆重複 3 次實驗，共做 96 組實驗。

表 4- 3 無漂流木實驗組別代號說明

實驗代號	粒徑大小(cm)	橫桿間距(cm)	漂流木(根)
D08h1	0.8	1	--
D08h2		2	
D08h3		3	
D08h4		4	
D13h1	1.3	1	--
D13h2		2	
D13h3		3	
D13h4		4	
D20h1	2	1	--
D20h2		2	
D20h3		3	
D20h4		4	
Dmixh1	Dmix	1	--
Dmixh2		2	
Dmixh3		3	
Dmixh4		4	

註 1：D：粒徑尺寸。h：橫桿間距。例：D08h1：粒徑 0.8 公分及橫桿間距 1 公分之實驗。

表 4-4 有漂流木實驗組別代號說明

實驗代號	粒徑大小(cm)	橫桿間距(cm)	漂流木(根)
WD08h1	0.8	1	355
WD08h2		2	
WD08h3		3	
WD08h4		4	
WD13h1	1.3	1	355
WD13h2		2	
WD13h3		3	
WD13h4		4	
WD20h1	2	1	355
WD20h2		2	
WD20h3		3	
WD20h4		4	
WDmixh1	Dmix	1	355
WDmixh2		2	
WDmixh3		3	
WDmixh4		4	

註 1：W：長度 4 公分之漂流木。D：粒徑尺寸。h：橫桿間距。例：WD08h1：漂流木 355

根、粒徑 0.8 公分及橫桿間距 1 公分之實驗。

第五章 試驗分析方法

本試驗分析方法是將通過壩體之土砂，進行通過率分析，得知土砂之代表粒徑與橫桿間距之關係；將試驗之相片利用 Matlab 進行座標轉換及影像正射處理，可畫出土砂堆積剖面線。

第一節 通過率分析

此分析方法是探討在相同土砂條件下，橫桿間距大小與有無漂流木之設計，對壩體所通過土砂量與漂流木之影響，以瞭解各種間距對土砂攔阻之效率，及漂流木是否有助於攔阻土砂之效能。

$$\text{壩體通過率(\%)} = \frac{\text{壩體總排砂量}}{\text{每組試驗礫石總重}}$$

$$\text{混合粒徑中各粒徑通過率(\%)} = \frac{\text{各粒徑總排出量}}{\text{各粒徑之總重}}$$

第二節 座標轉換法

座標轉換法是將真實的三維座標轉換成照片上之二維座標。此轉換方法需透過座標轉換工具 (率定工具) 之點位來建立真實之三維系統，與照片中二維座標進行推算，得出一座標關係式(Proj)，可藉由此關係式將所拍攝之照片中任一座標，轉換為真實之三維座標，座標轉換如圖 5-1 所示。

本試驗以 Ni(2005)發表論文中所使用之座標轉換法：假設相機真實位置為 P ，相機經 $\vec{q}$ 至所拍攝照片的位置，經過 λ 倍的 $\vec{q}$ 到達真實點位 $X(x,y,z)$ 。

$$X = P + \lambda \vec{q} \quad (3.1)$$

令 S 為從相機到照片上點位之向量，此向量為照片像素(pixels)

值，代入(3.1)式求得：

$$X = P + \lambda S \begin{bmatrix} c \\ r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

將公式重新整理後可得：

$$\lambda \begin{bmatrix} c \\ r \\ 1 \end{bmatrix} = S^{-1}(X - P) \quad (3.3)$$

並令 $A = S^{-1}$ 且 $b = -S^{-1} P$ ，

$$\begin{bmatrix} \lambda c \\ \lambda r \\ \lambda \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + b \quad (3.4)$$

將照片上率定工具中已知點位的二維座標(c_i, r_i)及對應的真實座標(x_i, y_i, z_i)帶入(3.4)：

$$\begin{bmatrix} \lambda c_i \\ \lambda r_i \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

因(3.5)式有多個未知數，故要多個已知點才能求出所有未知數數值，使用越多已知點位可得到越精準之座標轉換式(Proj)：

$$Proj = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

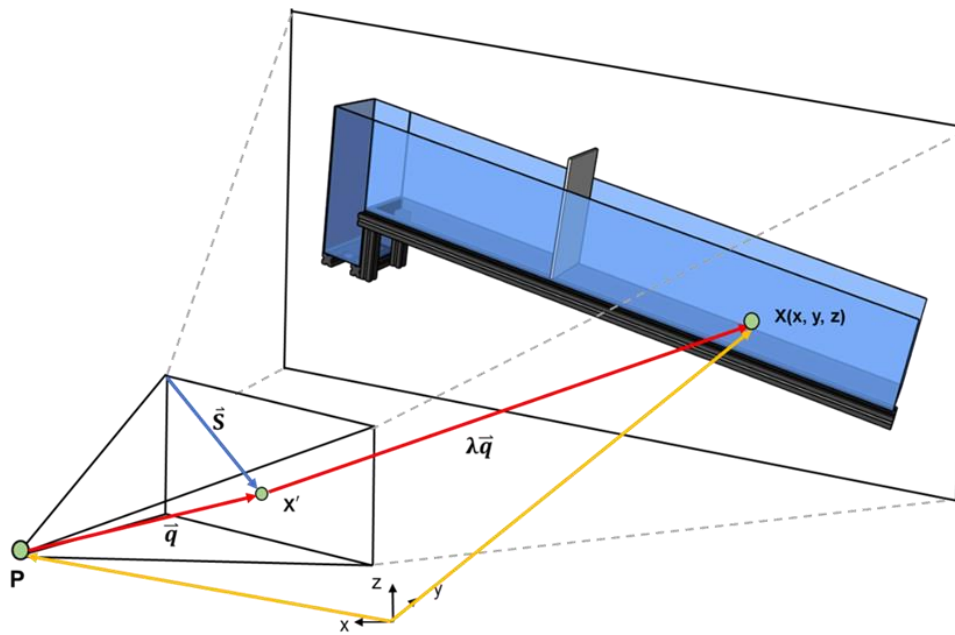


圖 5-1 座標轉換示意圖

第三節 影像正射處理

攝影機及相機拍攝視角為斜向拍攝試驗段，在繪製堆積剖面時，因照片並非正射(圖 5-2a)，判斷剖面線範圍時會產生誤差，故須先將照片進行正射處理再進行分析，由座標轉換式(Proj)轉換後得到一正射視角照片(圖 5-2b)，再進行堆積剖面分析。

影像正射處理參考許修銓(2018)碩士論文提出之方法，利用率定工具得到之座標轉換式(Proj)將正射影像範圍的網格座標經座標轉換式反算至照片上，再將照片 R、G、B 三層矩陣使用雙線性插值法使照片矩陣內插至真實網格座標上，取得正射視角照片。

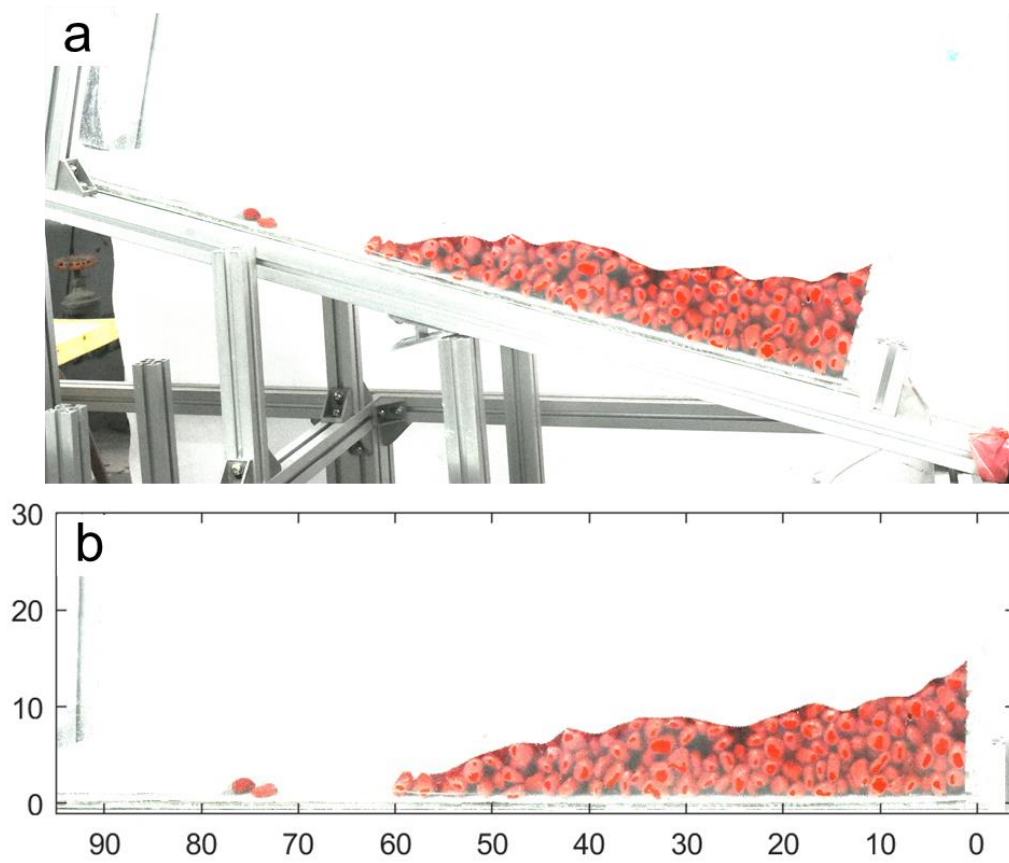


圖 5-2 影像正射處理圖(a) 原始視角(b) 正射視角

第六章 結果與討論

試驗為探討各種土石流事件在橫桿不同間距及有無漂流木對通過率及堆積形貌之變化，故變動因子為粒徑大小、橫桿間距及有無加漂流木，詳細實驗組別說明如圖 6-1 所示。

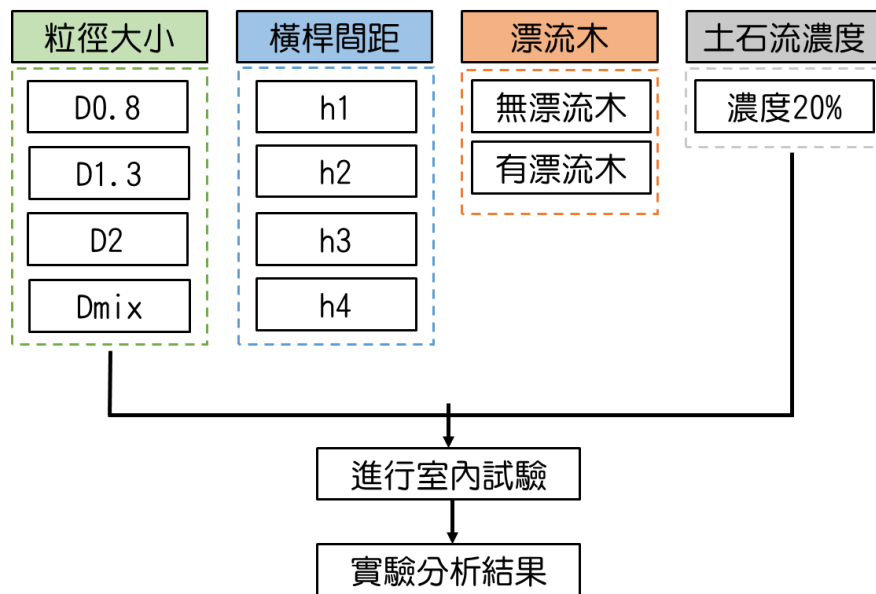


圖 6-1 實驗組別參數

註 1：D：粒徑尺寸。h:防砂壩橫桿間距。

註 2：漂流木尺寸及數量詳述請參考表 4-1。

第一節 壩體攔阻過程變化

一、D08攔阻過程發展

D08h1 實驗初期礫石隨水流流下(圖 6-2, $T = 0.09s$)，礫石受阻擋，水流產生向上之力帶動礫石向上(圖 6-2, $T = 0.46s$)，礫石沿壩體向上與橫桿間距相互卡合。因粒徑 0.8cm 重量輕，易被撞擊壩體之作用力向四處飛濺，使小部分礫石跟著水流越過壩體(圖 6-2, $T = 0.72s$)。部分水流回彈至壩體後方並帶動礫石於壩內堆積，後續水流跟礫石因前方壩體受攔阻進而向上游處堆積(圖 6-2, $T = 0.94s \sim 1.43s$)。而粒徑小

孔隙小，造成後方迴水量多流速降低，土砂慢慢堆積於後方(圖 6- 2, $T = 2.19s$)。

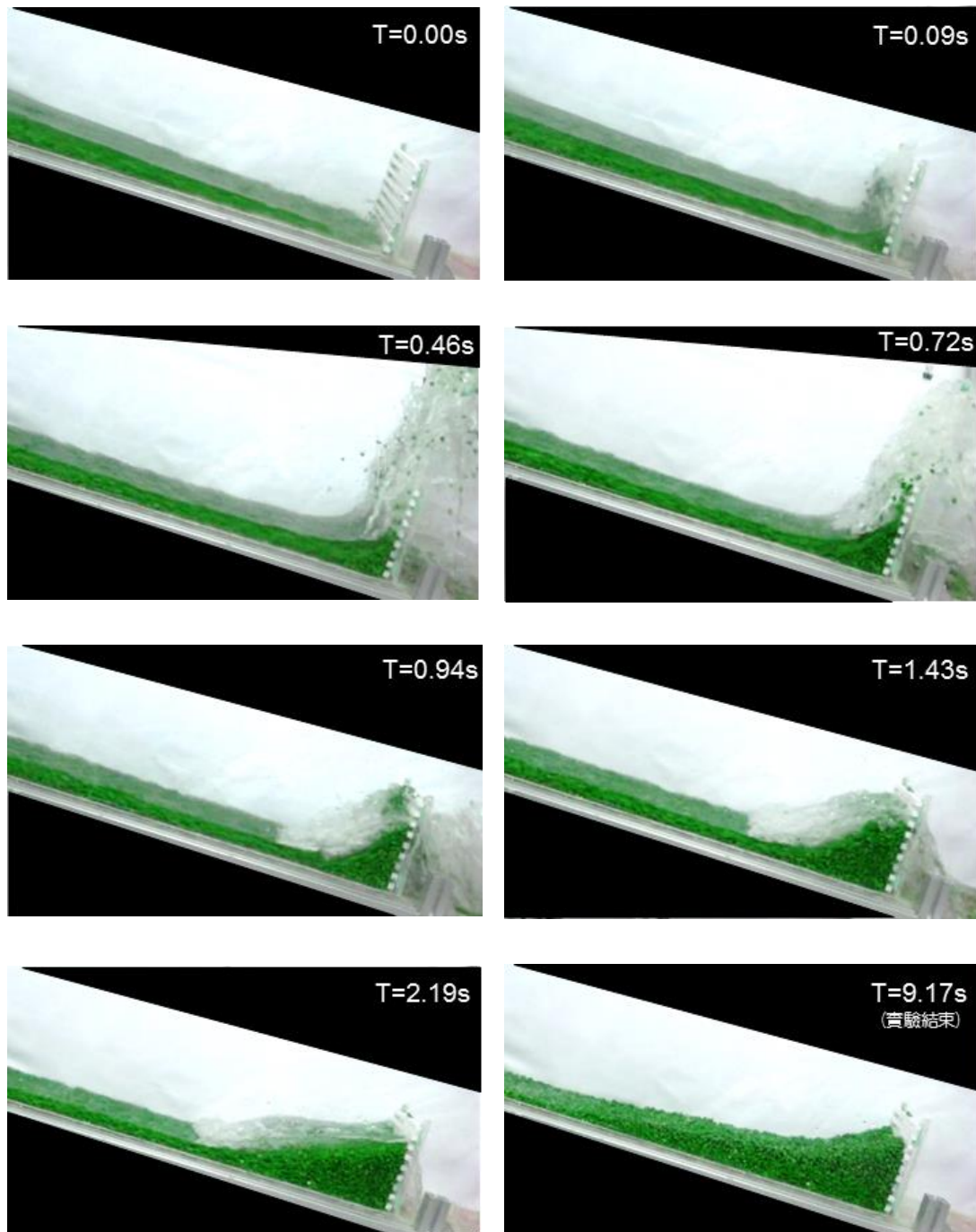


圖 6- 2 D08h1 實驗過程

D08h2 實驗初期因橫桿間距較大，不易受攔阻(圖 6- 3, $T=0.09s$)，待發展一段時間後，礫石顆粒受彼此間摩擦及阻尼作用，於渠底與橫

桿之間形成拱型之堆積，使後方土砂因拱型影響進而向上方堆積(圖 6-3, $T = 0.40 \sim 0.86s$)，待土砂於壩體堆積一定高度後，向後方堆積(圖 6-3, $T = 2.78s$)。實驗後期，因水流不易由孔隙滲流，故後續水流沿著礫石表面由壩體上方排出，使堆積於前方礫石再次受水流影響而產生淘刷(圖 6-3, $T = 2.78 \sim 3.25s$)。

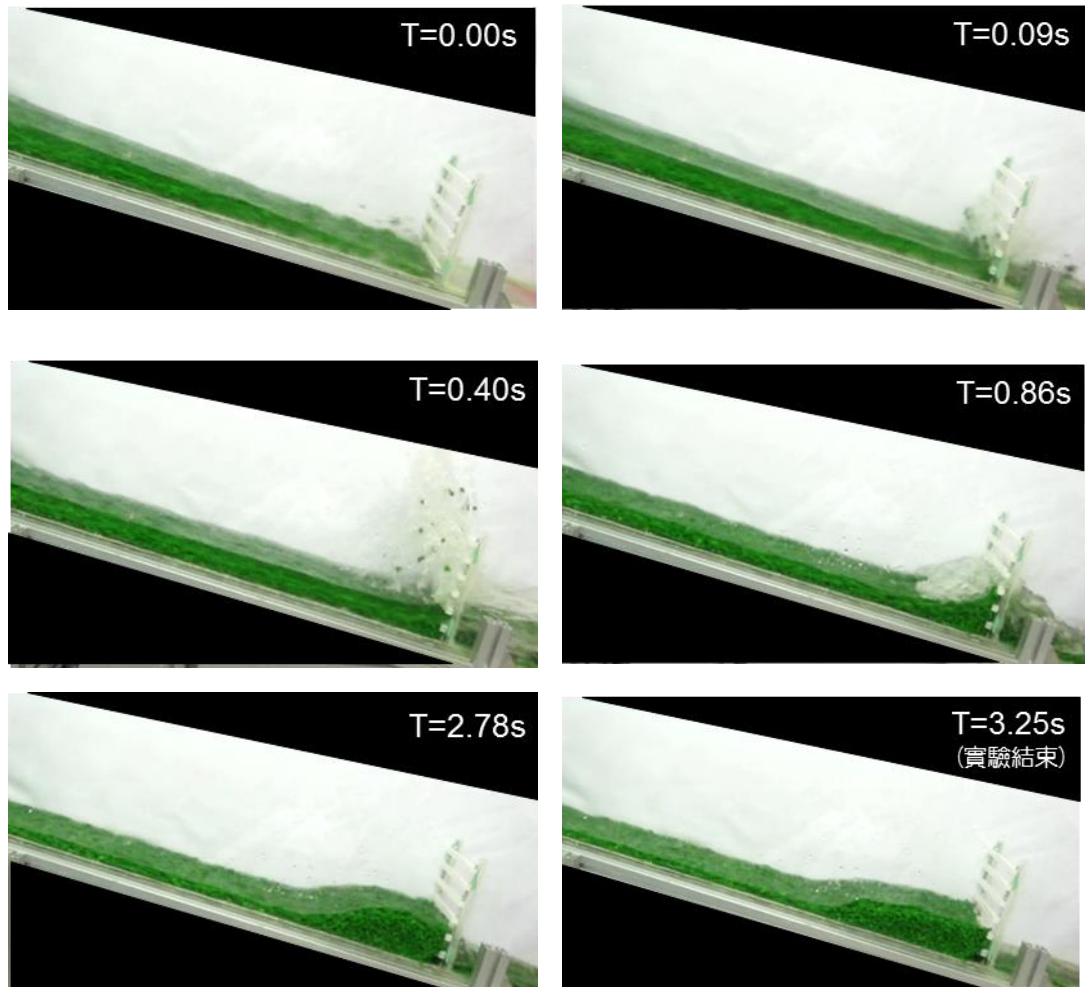


圖 6-3 D08h2 實驗過程

D08h3 實驗於發展初期，礫石無受壩體攔阻之影響(圖 6-4, $T = 0.90s$)。發展一段時間後，小粒徑因顆粒彼此間易發生相互作用，形成拱型堆積形狀，使後續土砂慢慢向上堆積(圖 6-4, $T = 1.24s$)。因橫桿間距較大，使堆積結構較不穩定，後續被水流及礫石冲破，轉為無攔阻狀態(圖 6-4, $T = 3.10 \sim 6.74s$)。

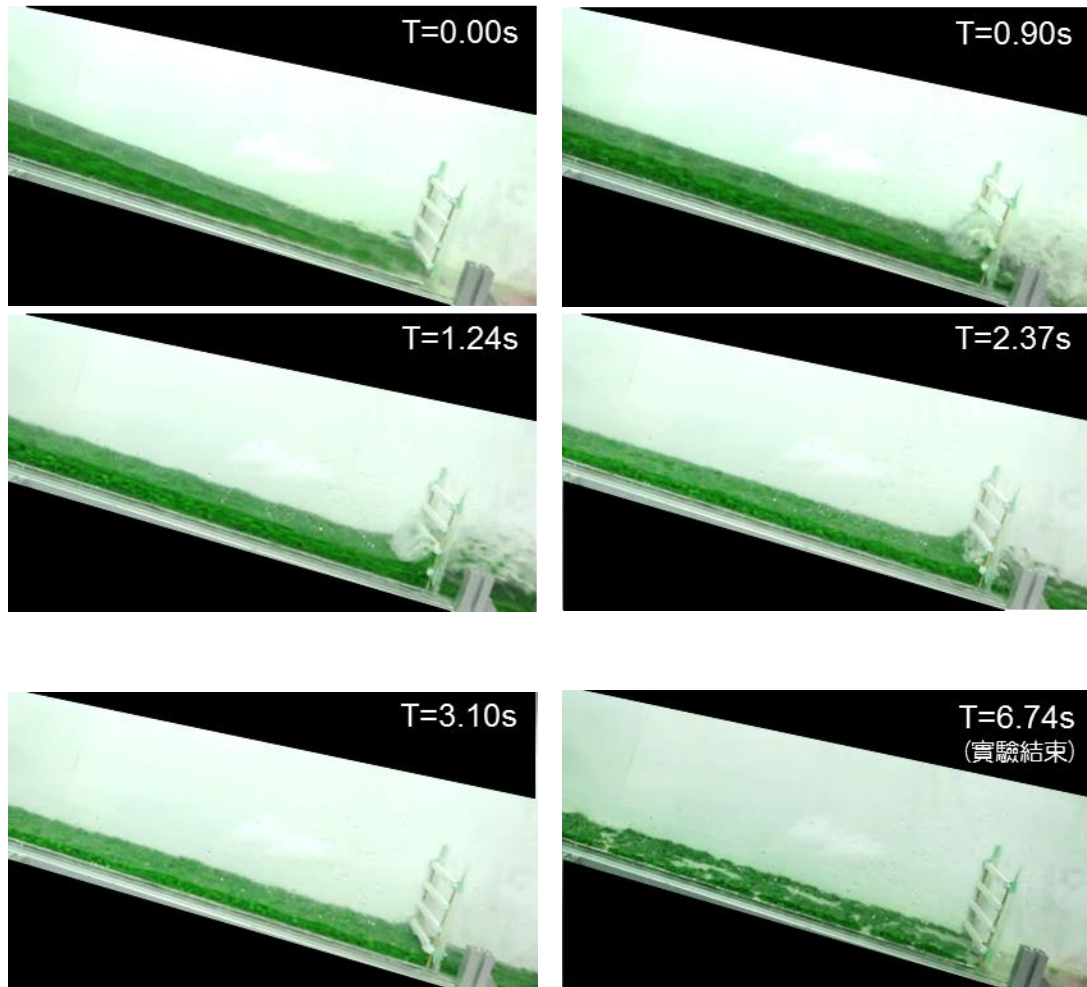
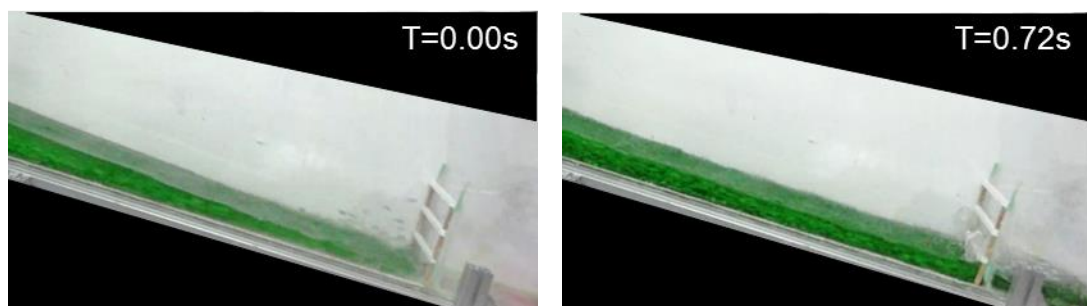


圖 6-4 D08h3 實驗過程

D08h4 實驗於攔阻初期(圖 6-5, $T = 0.72s$)，因橫桿間距過大無發生攔阻，造成大量礫石流出，無法與橫桿間距相互卡合，以致於後續無堆積現象產生。實驗結束後，上游殘留的礫石主要為渠底摩擦力及邊壁效應之因素所造成(圖 6-5, $T = 5.47 \sim 7.97s$)。



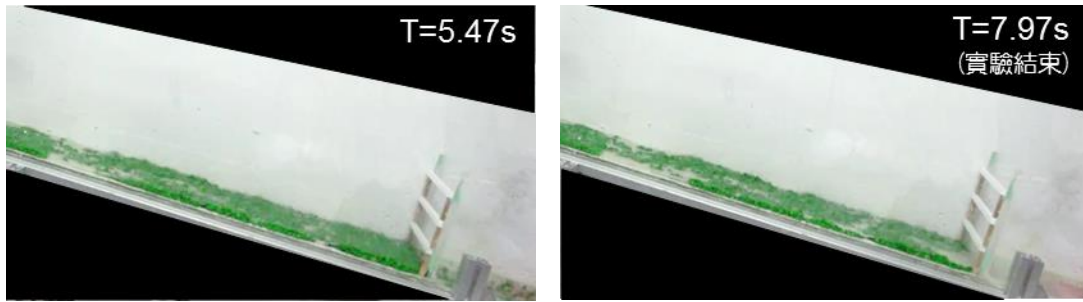
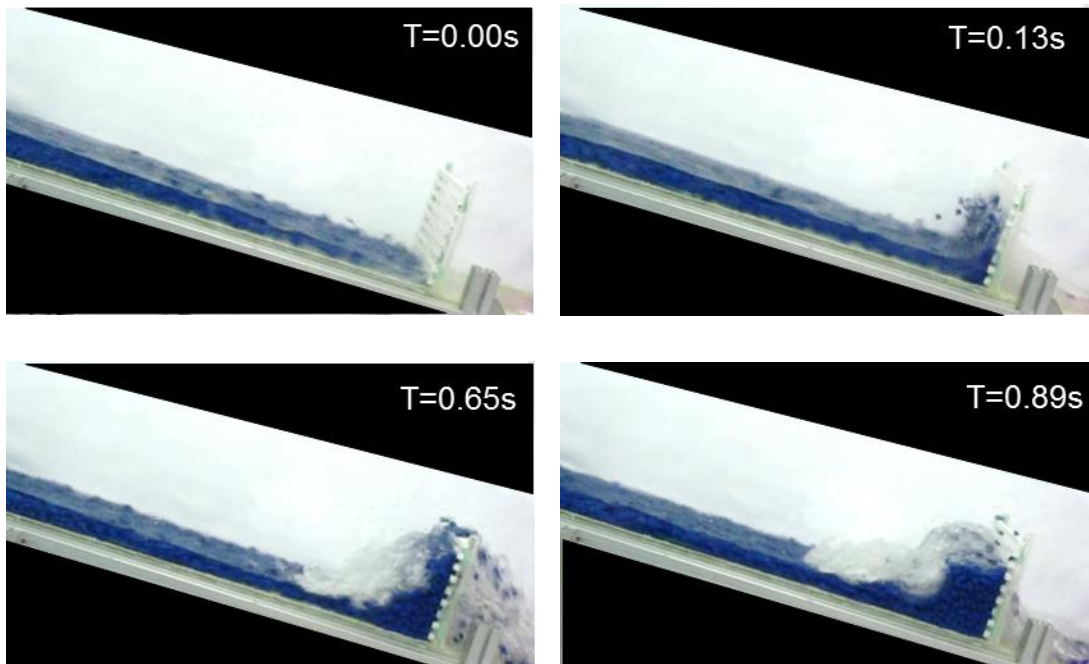


圖 6- 5 D08h4 實驗過程

二、D13攔阻過程發展

D13h1 實驗，礫石撞擊壩體產生攔阻，水流產生向上之力帶動礫石向上(圖 6- 6, $T=0.13s$)，被水流帶動之礫石與壩體上方之橫桿相互卡合，部分礫石跟著水流越過壩體，其餘礫石受壩體攔阻及撞擊壩體部分回彈之水流影響堆積於壩內(圖 6- 6, $T=0.65s$)，後續礫石因前方壩體受堆積影響向後方發展堆積(圖 6- 6, $T=0.65s \sim 8.86s$)。



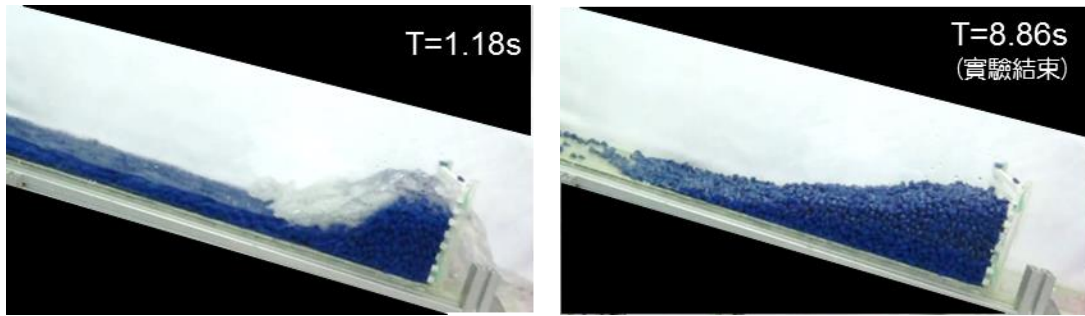


圖 6- 6 D13h1 實驗過程

D13h2 實驗，礫石受壩體攔阻後，受水流影響向上發展帶動礫石向上(圖 6- 7, $T = 0.18s$)，礫石逐漸卡合於橫桿間距上(圖 6- 7, $T = 0.18\sim 0.83s$)。後續礫石繼續向前方堆積，但因間距較礫石大，向上卡合速度慢，之後因撞擊壩體並向後方回彈水流影響，促使壩內瞬間迴水，加速礫石向上方卡合之過程(圖 6- 7, $T = 0.83s\sim 1.36s$)。因礫石受壩體攔阻後，造成後續礫石於後方堆積(圖 6- 7, $T = 1.36s\sim 7.67s$)。

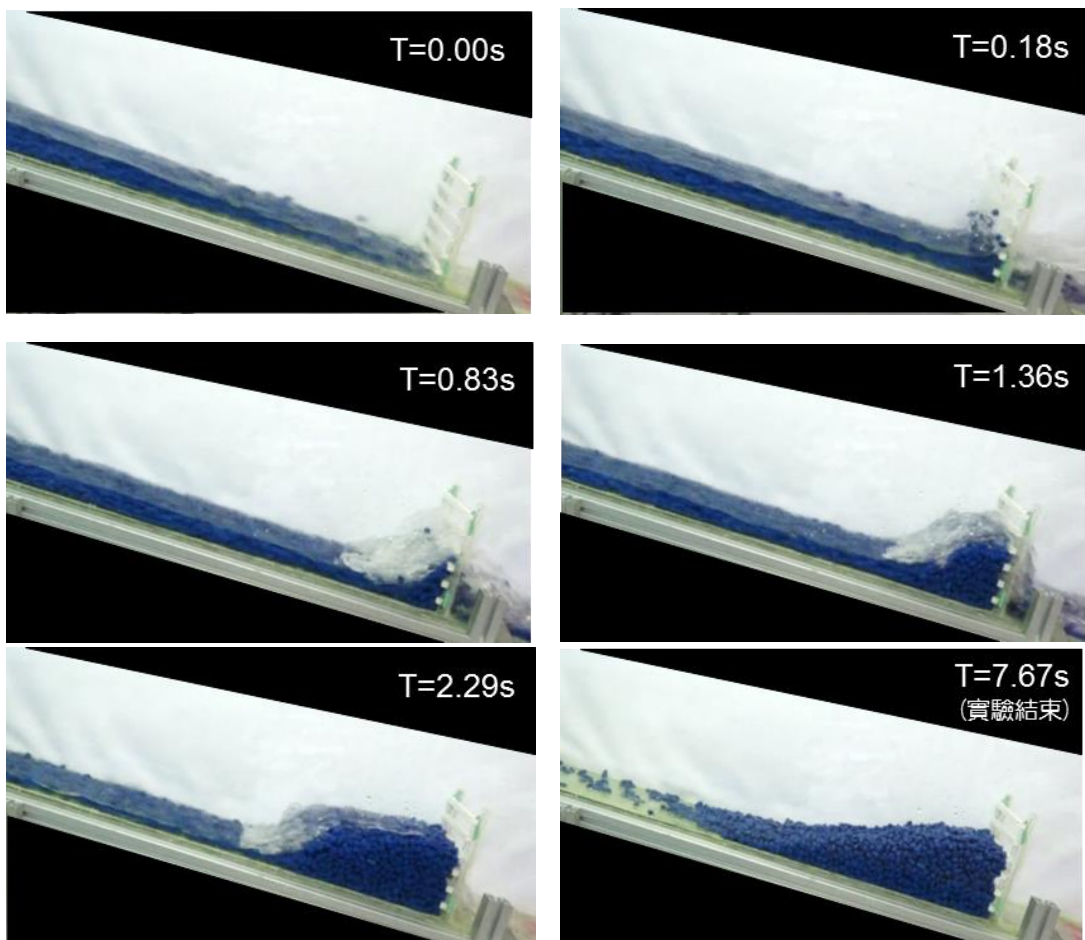


圖 6- 7 D13h2 實驗過程

D13h3 實驗，礫石因自身摩擦及阻尼作用，使礫石相互交疊並在壩體下方受攔阻(圖 6- 8 圖 6- 8, $T = 1.03s$)，攔阻之礫石使水流向上流動，並帶動礫石向壩體上方與橫桿間距進行卡合(圖 6- 8, $T = 1.62s$)。堆積初期因橫桿間距較大，使堆積區結構較不穩定，上方堆積的礫石易受水流推力影響通過壩體(圖 6- 8, $T = 2.47s$)。待堆積量體結構穩定後，礫石開始向後方堆積至實驗結束(圖 6- 8, $T = 3.22s \sim 7.74s$)。

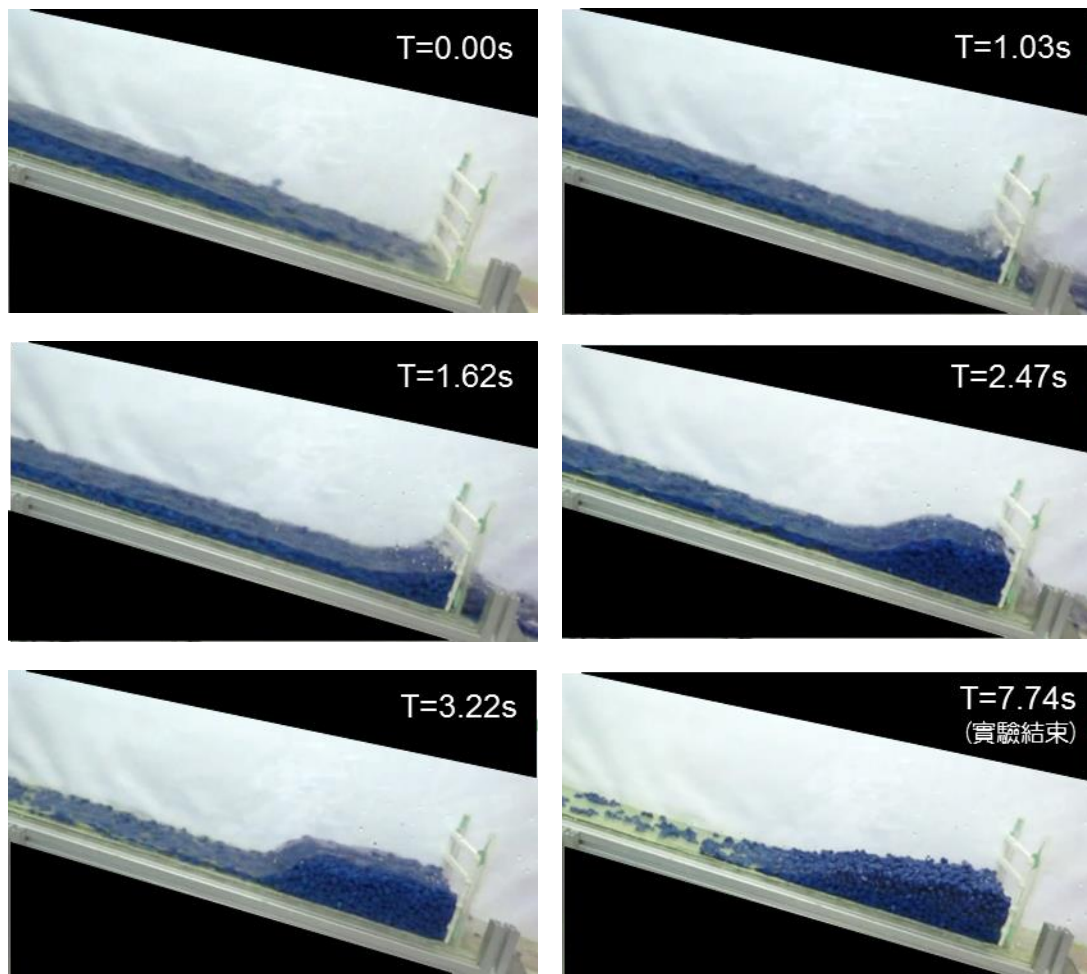


圖 6- 8 D13h3 實驗過程

D13h4 實驗，因橫桿間距相對於礫石較大，故無受攔阻狀態及堆積現象產生，礫石因受渠底摩擦力及邊壁效應之影響使上游殘留一些礫石。

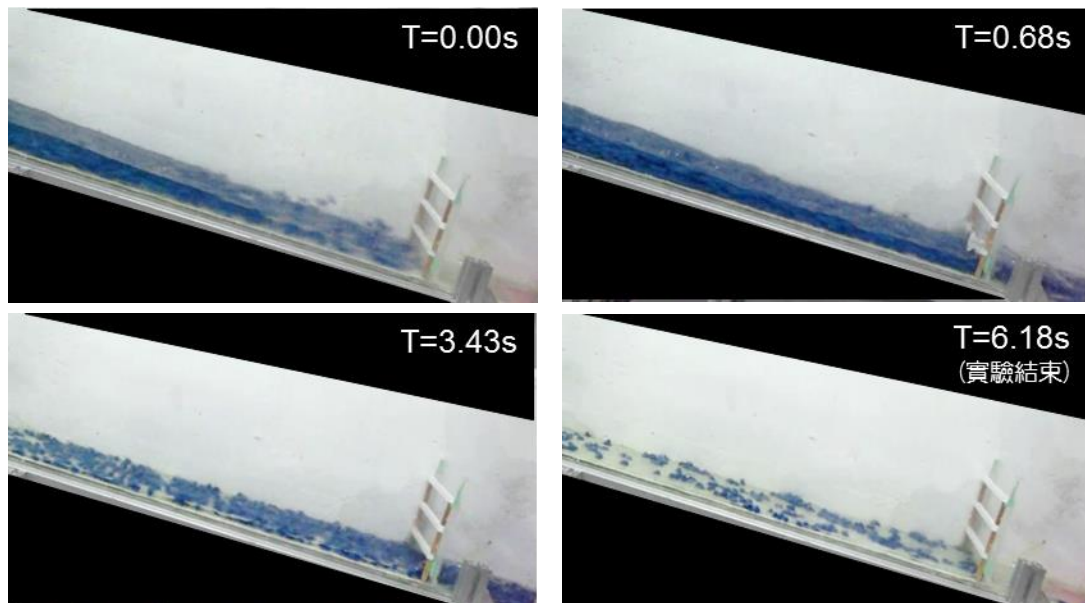
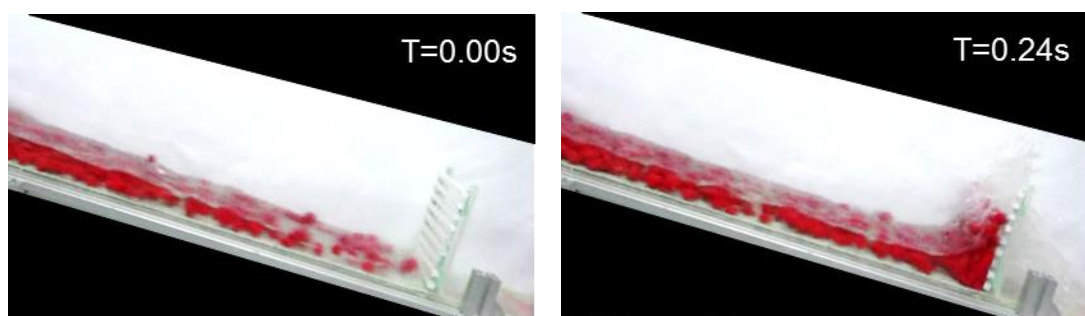


圖 6- 9 D13h4 實驗過程

三、D20攔阻過程發展

D20h1 實驗初期，礫石皆被壩體攔阻，水流向上發展使礫石向上堆積(圖 6- 10, $T = 0.24s$)。因礫石本身重量較重，受撞擊壩體回彈水流影響較小，故只帶動少許礫石向後方堆積(圖 6- 10, $T = 0.46 \sim 0.60s$)。前方受堆積後，使後續水流及礫石向後方堆積(圖 6- 10, $T = 1.02s$)。因堆積礫石孔隙大受迴水影響較小，故後方水流流速較無影響。



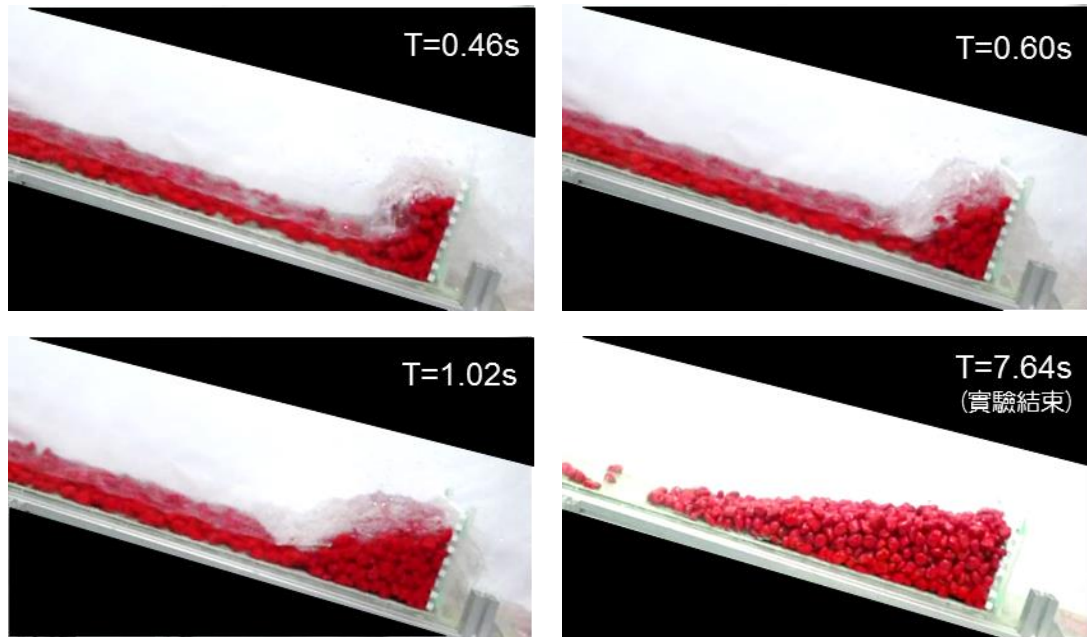
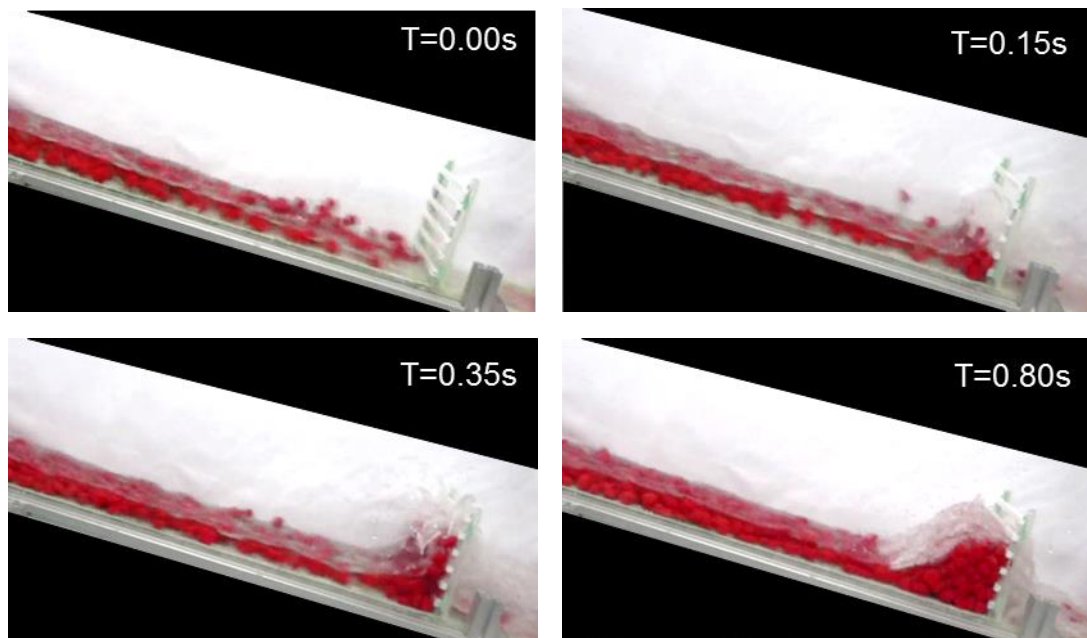


圖 6- 10 D20h1 實驗過程

D20h2 實驗，礫石受攔阻後水流向上發展並帶動礫石向上堆積(圖 6- 11, $T = 0.15 \sim 0.80s$)。而受攔阻之礫石因孔隙較大，不易造成迴水現象，使壩內流速不受影響，後續礫石持續向後方堆積(圖 6- 11, $T = 1.60s \sim 6.80s$)。



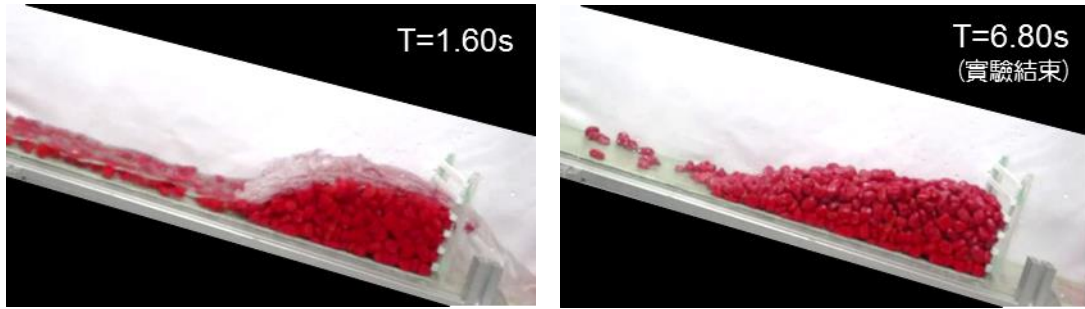


圖 6- 11 D20h2 實驗過程

D20h3 實驗，因橫桿間距較大，礫石不易與橫桿間距進行卡合，需花費較長時間才能使礫石兩兩交疊並與橫桿間距卡合(圖 6- 12, $T = 1.05s$)。橫桿下方礫石受攔阻發生堆積後，水流帶動礫石向上堆積(圖 6- 12, $T = 1.41s$)。壩體受堆積後，後續礫石無法通過並於後方向上游堆積(圖 6- 12, $T = 2.00s \sim 6.56s$)。

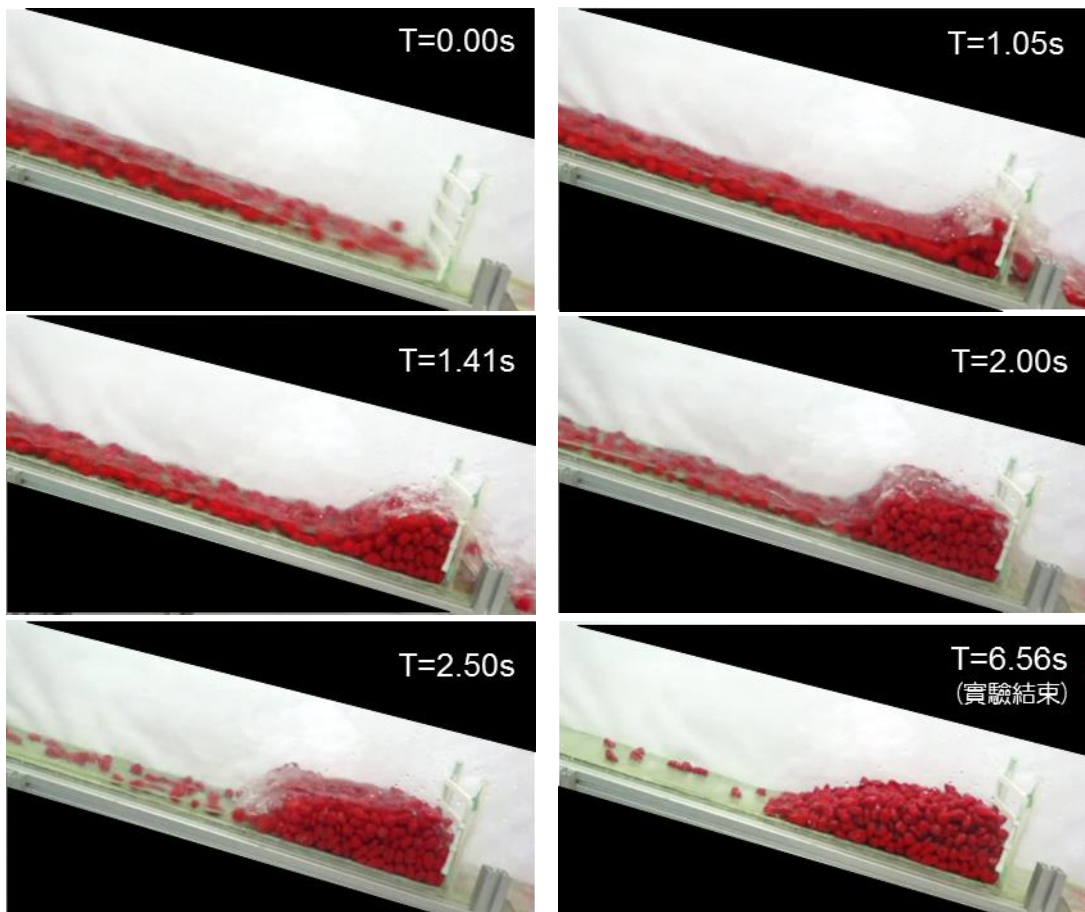


圖 6- 12 D20h3 實驗過程

D20h4 實驗，大粒徑受本身摩擦及阻尼作用影響較小，故無發生

拱型堆積的型式，因此為無受攔阻狀態。上游殘留之礫石為受本身受渠底摩擦力及邊壁效應。

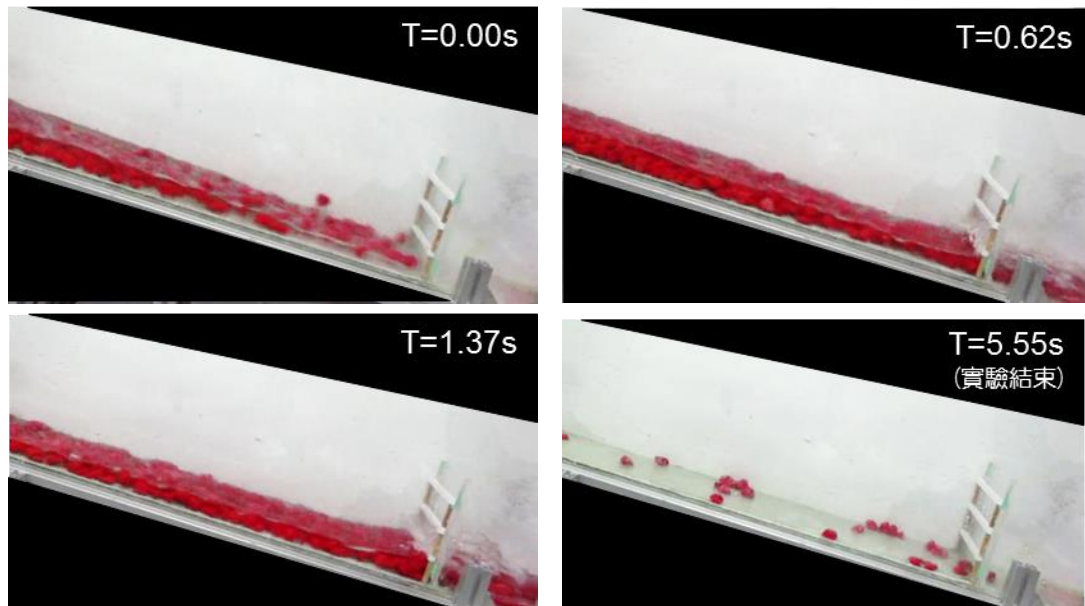
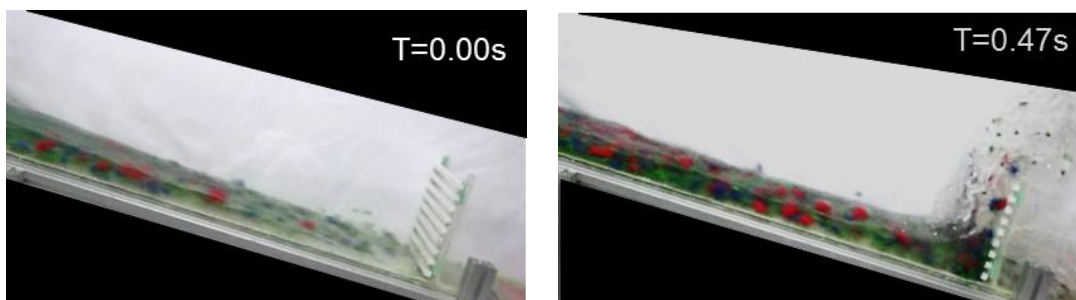


圖 6- 13 D20h4 實驗過程

四、Dmix 攔阻過程發展

Dmixh1 實驗，壩體受礫石攔阻後，水流向上發展，向上水流帶動礫石與橫桿間距相互卡合，部分小礫石因重量較輕而越過壩體(圖 6- 14, $T = 0.47s$)。隨礫石與橫桿間距相互卡合，後續土砂因前方受堆積故向後發展堆積，大礫石受堆積後，小礫石易卡於大礫石間之孔隙造成堆積。後續水流因孔隙被小礫石填滿，產生較多迴水，迴水時細砂做為懸浮質，跟著迴水水流至後方發展(圖 6- 14, $T = 0.90s \sim 1.47s$)。堆積發展後期，迴水水流由壩頂及孔隙排出，細砂多堆積於孔隙中及後方(圖 6- 14, $T = 2.72s \sim 10.72s$)。



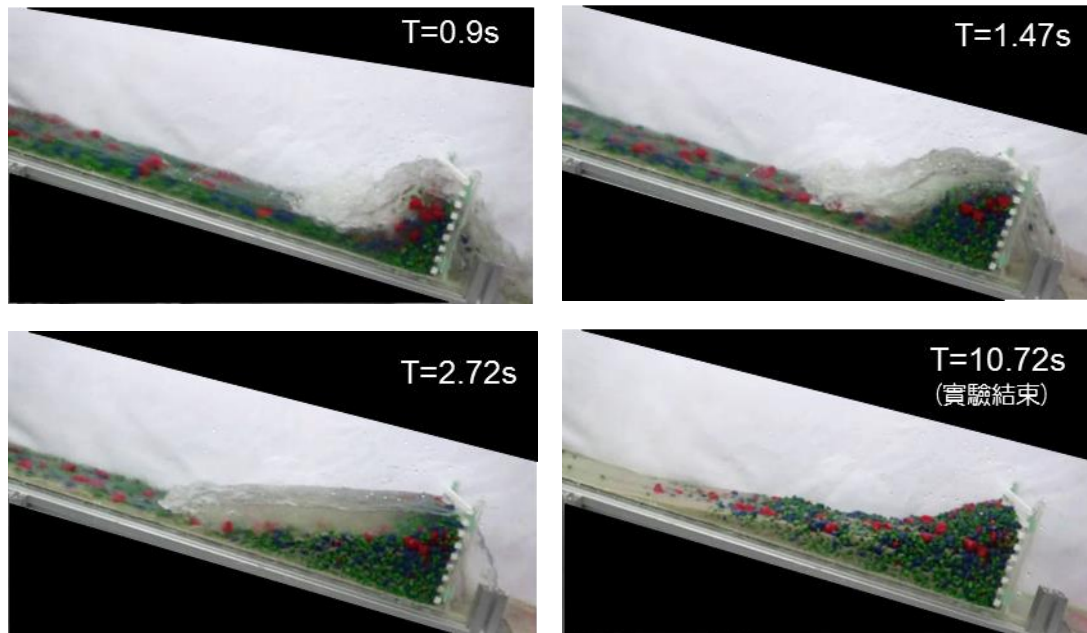
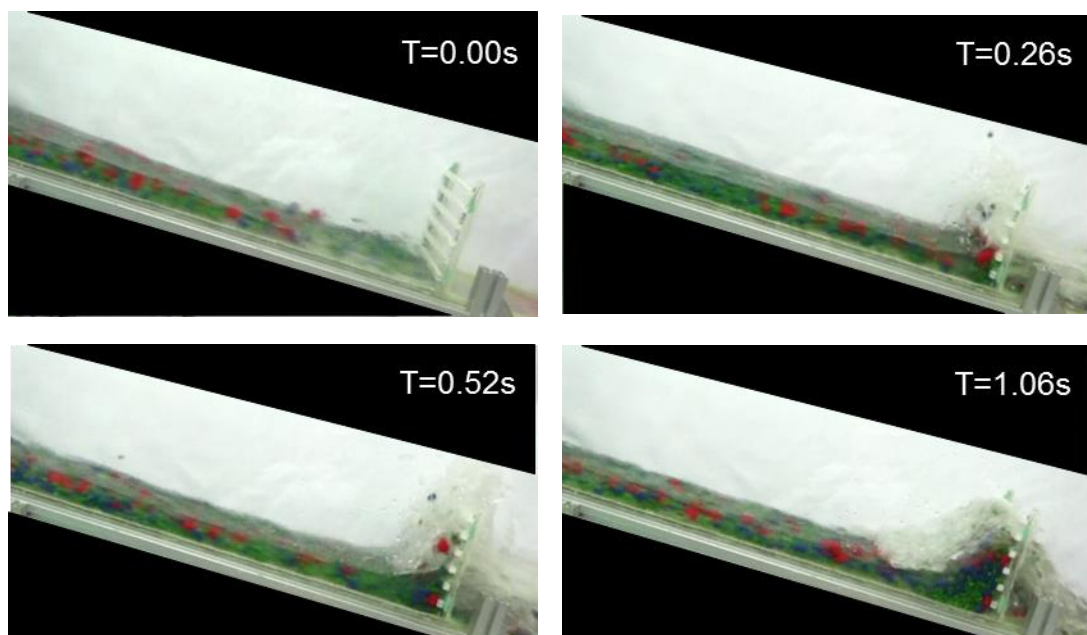


圖 6- 14 Dmixh1 實驗過程

Dmixh2 實驗，受粒徑 2cm 於下方橫桿攔阻(圖 6- 15, $T = 0.26s$)，水流向上發展帶動較輕之礫石，使其相互卡合於橫桿上(圖 6- 15, $T = 0.52s$)，後續礫石向後方堆積，大礫石堆積後，小礫石多堆積於大礫石間之孔隙中，細砂則做為懸浮質，跟著迴水流至後方(圖 6- 15, $T = 1.06s \sim 1.95s$)。因堆積體孔隙小，因此於後方產生較多迴水(圖 6- 15, $T = 2.43s$)，使後方堆積趨緩，待迴水退去後，細砂沉積於後方及孔隙中。



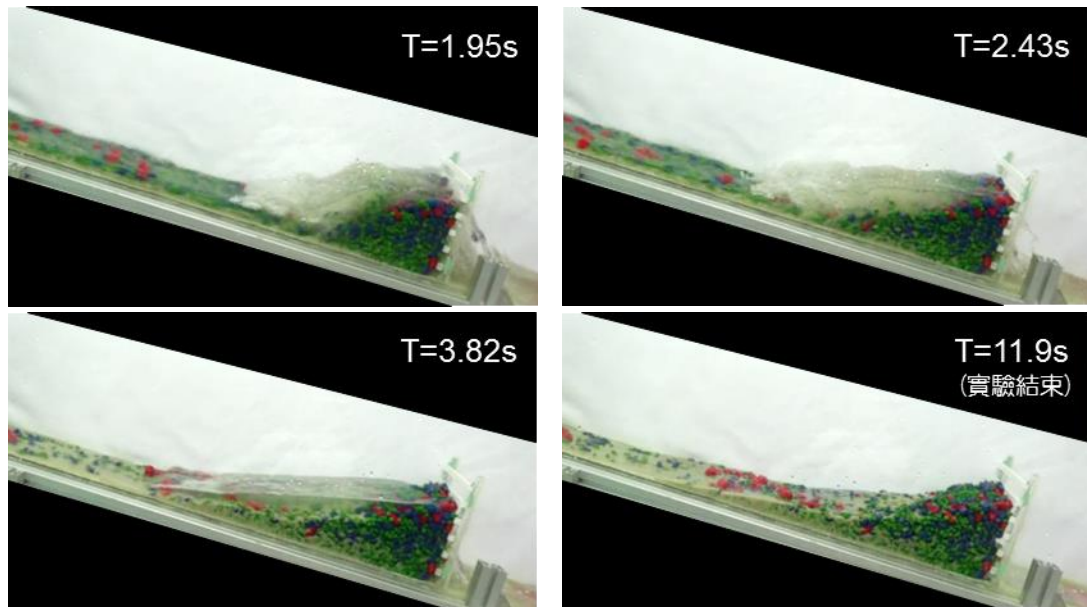
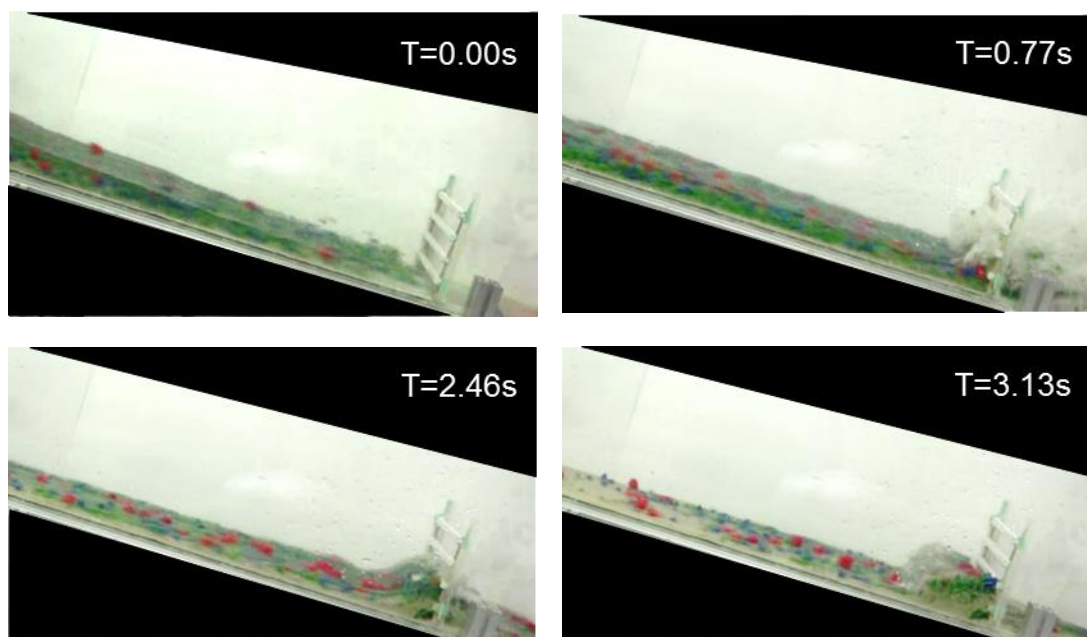


圖 6- 15 Dmixh2 實驗過程

Dmixh3 實驗因橫桿間距較大，需大礫石及小礫石同時卡合於橫桿間距中才能形成攔阻(圖 6- 16, $T = 0.77s$)，受攔阻後水流向上發展，礫石沿壩體上方卡合，因橫桿間距大使礫石不易卡合，形成較低的堆積高度(圖 6- 16, $T = 2.46s$)。前方受堆積後向後方發展(圖 6- 16, $T = 3.13s \sim 5.63s$)。



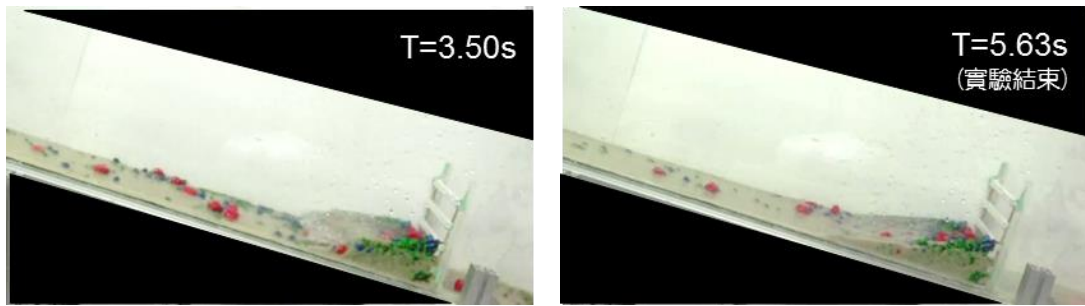


圖 6- 16 Dmixh3 實驗過程

Dmixh4 實驗在此間距皆無受攔阻，殘留的土砂主要因渠底摩擦力及邊壁效應之因素所造成。

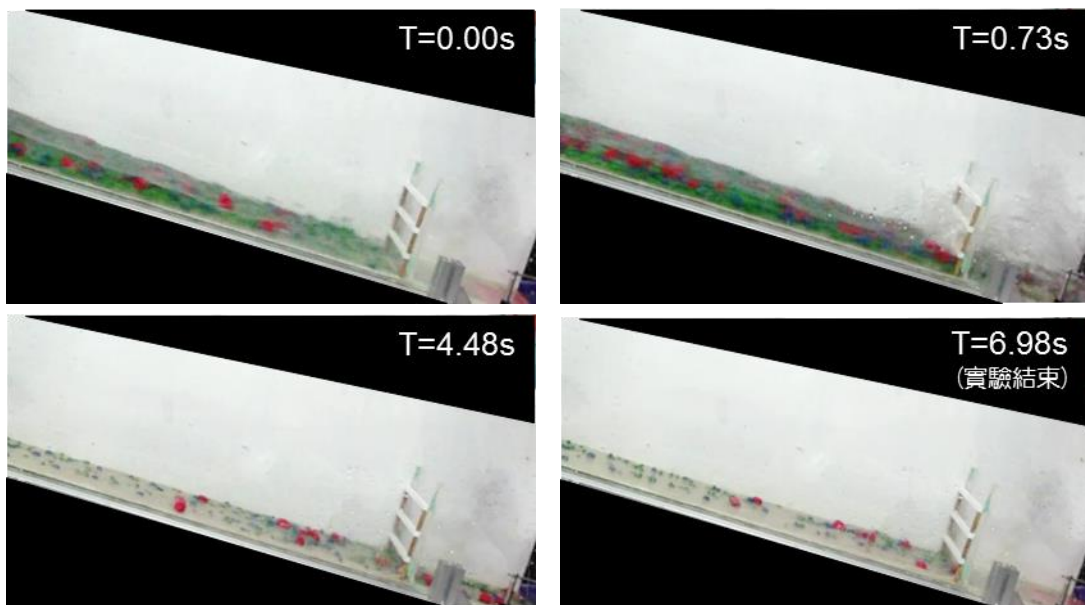


圖 6- 17 Dmixh4 實驗過程

五、WD08攔阻過程發展

WD08h1 實驗初期因間距小使礫石受攔阻，水流向上發展，帶動漂流木向上，漂流木方向從平行水流方向轉變為垂直水流方向，漂流木呈垂直水流方向後，橫桿間距小於漂流木長度，漂流木因而受壩體攔阻，受攔阻的漂流木形成遮蔽，使原本應通過的礫石被攔阻，並沿著壩體向上卡合於間距中，使壩後堆積高度變高(圖 6- 18, $T = 0.09s \sim 0.28s$)。因礫石本身較輕，礫石及水流撞擊壩體後，容易向上方飛濺，使些微礫石越過壩體(圖 6- 18, $T = 0.28s$)。部分水流因撞擊壩

體回彈至壩內。漂流木及礫石受壩體攔阻後，後方礫石不易通過，堆積於壩體後方(圖 6- 18, $T = 0.91s$)。部分漂流木受壩體攔阻，堆積於壩頂後方；部分漂流木因堆積量體孔隙小，後方迴水多，漂流木因浮力關係跟著迴水水流向後方滾動，待後方礫石堆積完成後，迴水水流滲流時間慢，使水流有足夠推力帶動漂流木沉積於前方(圖 6- 18, $T = 1.86s \sim 7.82s$)。

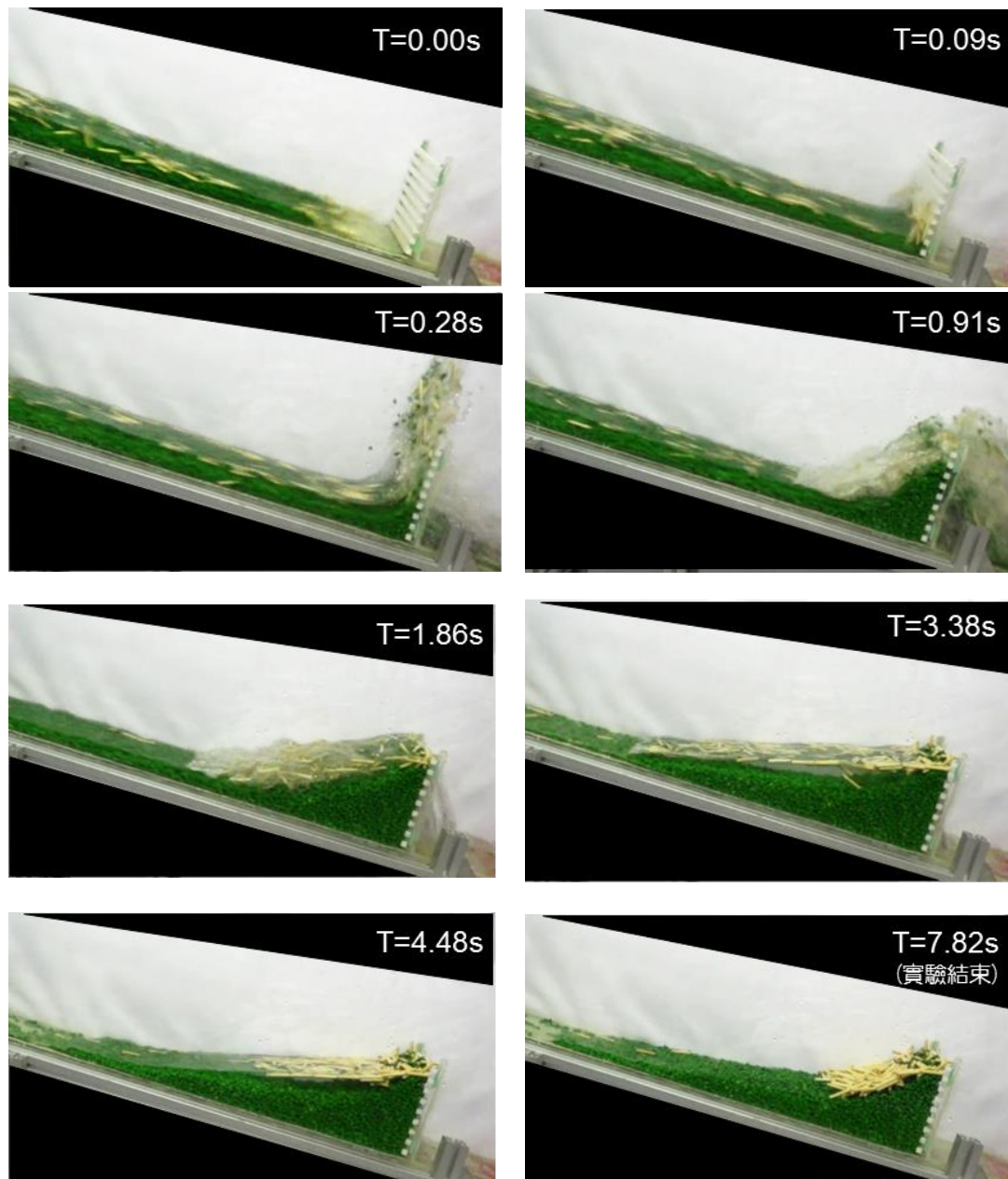


圖 6- 18 WD08h1 實驗過程

WD08h2 實驗攔阻發展與 WD08h1 相似，皆是礫石受攔阻後，向上發展之水流使漂流木呈垂直水流方向，進而與礫石受橫桿間距卡合(圖 6- 19, $T = 0.08s$)。水流因撞擊壩體，使部分水流回彈，瞬間流速較慢，後方礫石易卡合於橫桿間距中，使壩後堆積高度變高(圖 6- 19, $T = 0.92s$)。由於前方壩體皆受攔阻，後續礫石開始向後方堆積，水流挾帶漂流木，部分漂流木跟著水流至壩體，進而遭壩體攔阻；部分因迴水現象跟著至後方(圖 6- 19, $T = 1.68s$)。因堆積體孔隙小，造成迴水較多，待迴水消滅時，水流有足夠推力將漂流木推至前方沉積(圖 6- 19, $T = 2.48s \sim 6.00s$)。

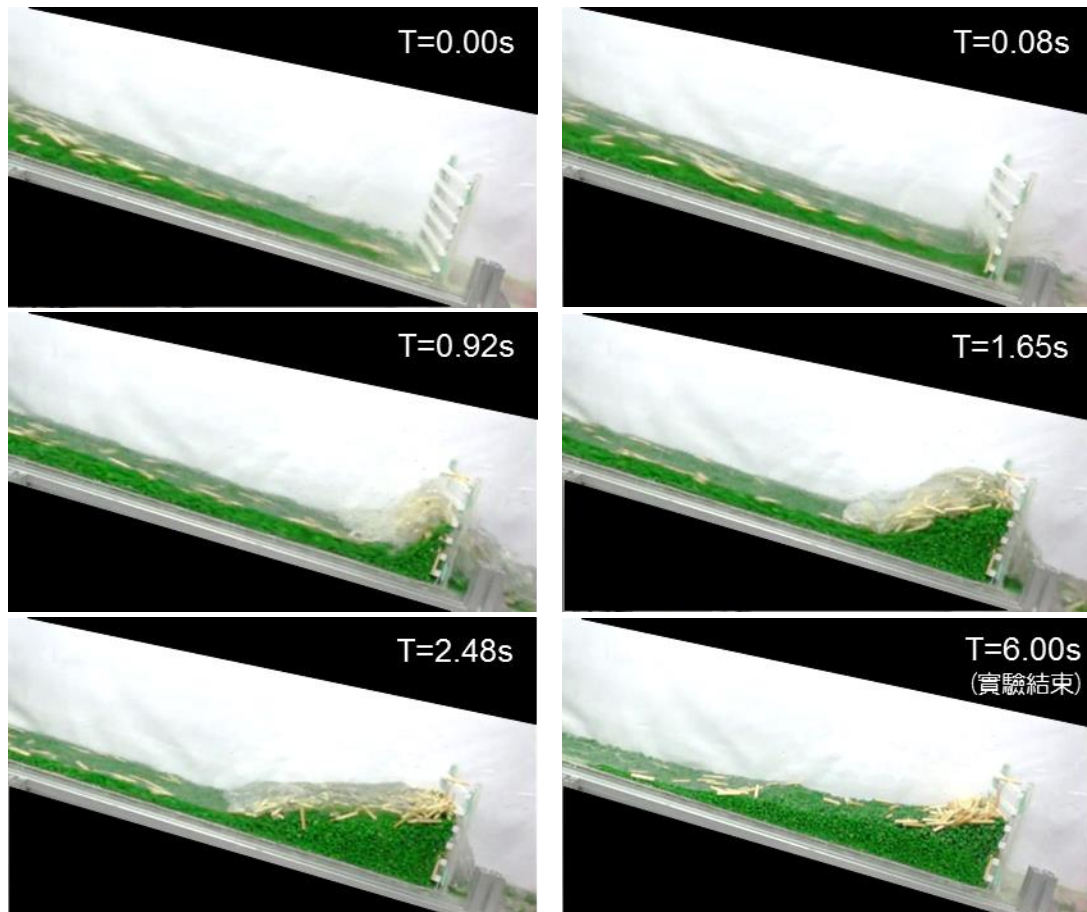


圖 6- 19 WD08h2 實驗過程展

WD08h3 及 WD08h4 實驗因礫石未受橫桿間距之攔阻，水流不會向上發展，使漂流木無法因向上水流改變其方向，故皆為無攔阻狀態。

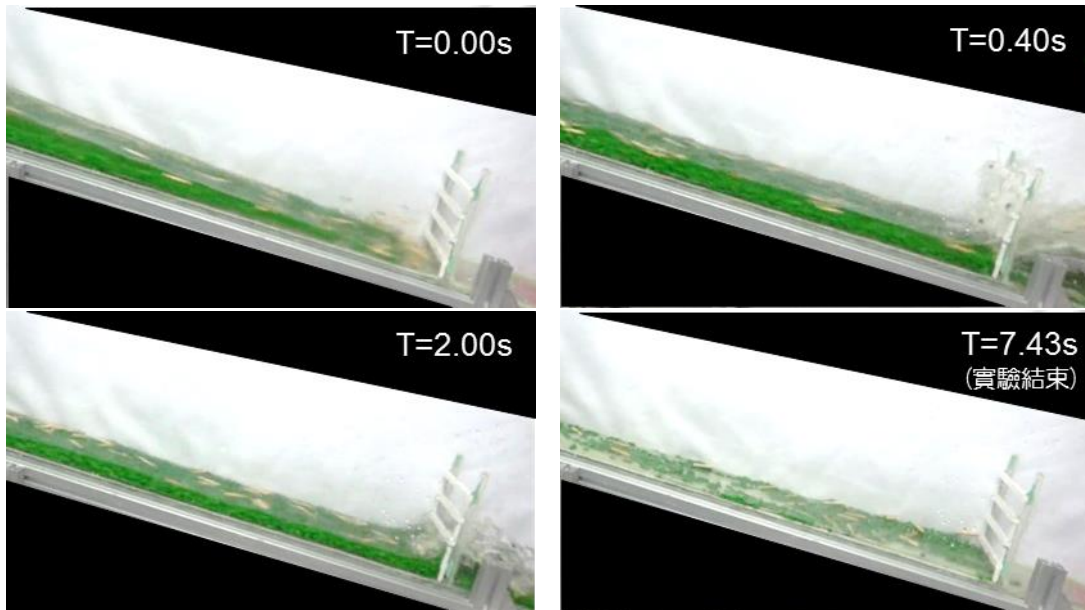


圖 6- 20 WD08h3 攔阻過程發展

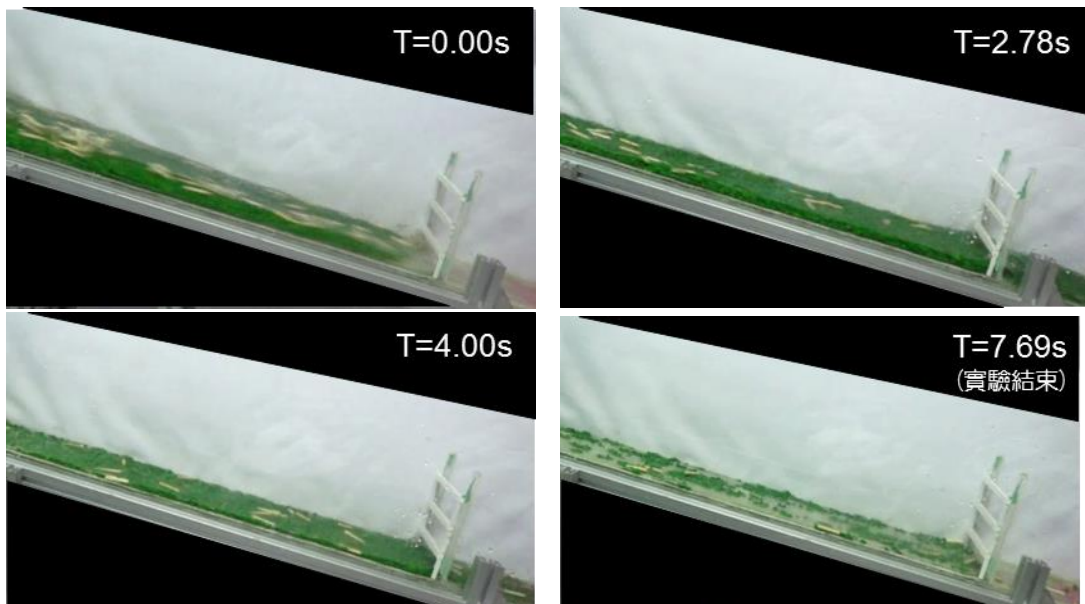


圖 6- 21 WD08h4 實驗過程

六、WD13攔阻過程發展

WD13h1 實驗礫石於壩體下方受攔阻後，水流因下方礫石堆積向上發展，促使漂流木方向呈垂直水流方向，並與後方礫石相互卡合於橫桿間距上(圖 6- 22, $T = 0.15s$)。向上發展的水流一部分受壩體影響，回彈至壩後形成堆積(圖 6- 22, $T = 0.5s \sim 0.78s$)。因堆積形成，後續礫石沿堆積後方發展，部分水流流出壩體，漂流木受攔阻於壩頂後方堆

積；部分水流向後方迴水並帶動漂流木在後方滾動(圖 6- 22, $T = 0.94s \sim 1.59s$)。因橫桿間距小，後方迴水帶動漂流木多拖曳力大，礫石受拖曳力影響於後方堆積較陡，而礫石孔隙大，迴水滲流快，因後方堆積較陡使水流無足夠推力將漂流木向前方沉積，漂流木沉積於後方較陡之處(圖 6- 22, $T = 3.89s \sim 6.58s$)。

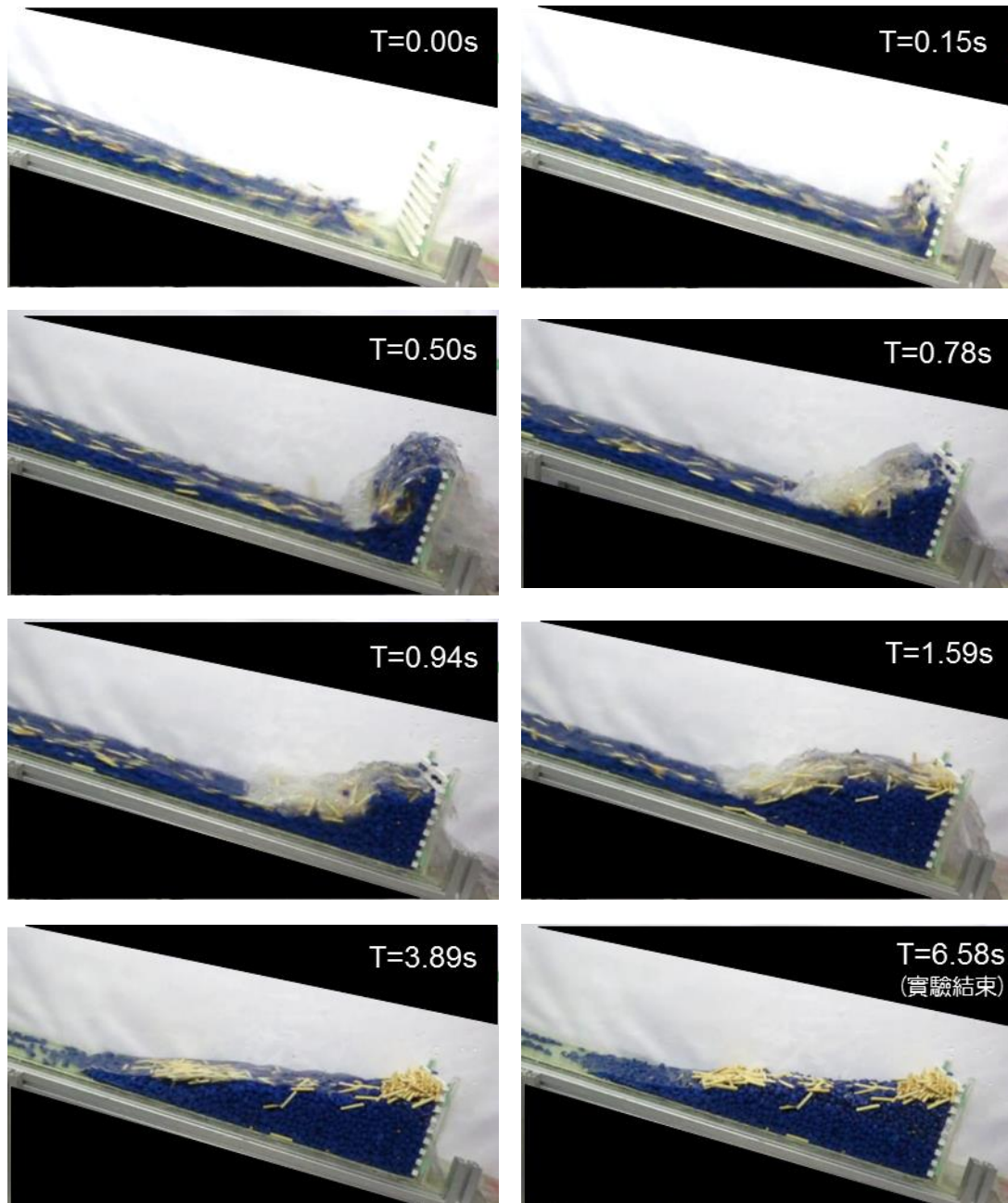


圖 6- 22 WD13h1 實驗過程

WD13h2 實驗，礫石受壩體攔阻，水流向上堆積，漂流木受向上

水流影響呈垂直水流方向與後方礫石相互卡合於橫桿上(圖 6- 23, $T = 0.34s$)。部分水流受壩體影響回流至壩後，帶動礫石於壩後堆積，形成堆積區，後續礫石向後堆積，漂流木部分隨著水流受壩體攔阻；部分受迴水影響向後方滾動(圖 6- 23, $T = 0.86s \sim 2.92s$)。漂流木受迴水的數量較橫桿間距 1cm 少，使後方堆積礫石受漂流木拖曳力影響小，後方堆積斜率較緩，迴水滲流時，仍有足夠推力將漂流木運送至前方處(圖 6- 23, $T = 3.58s \sim 6.11s$)。

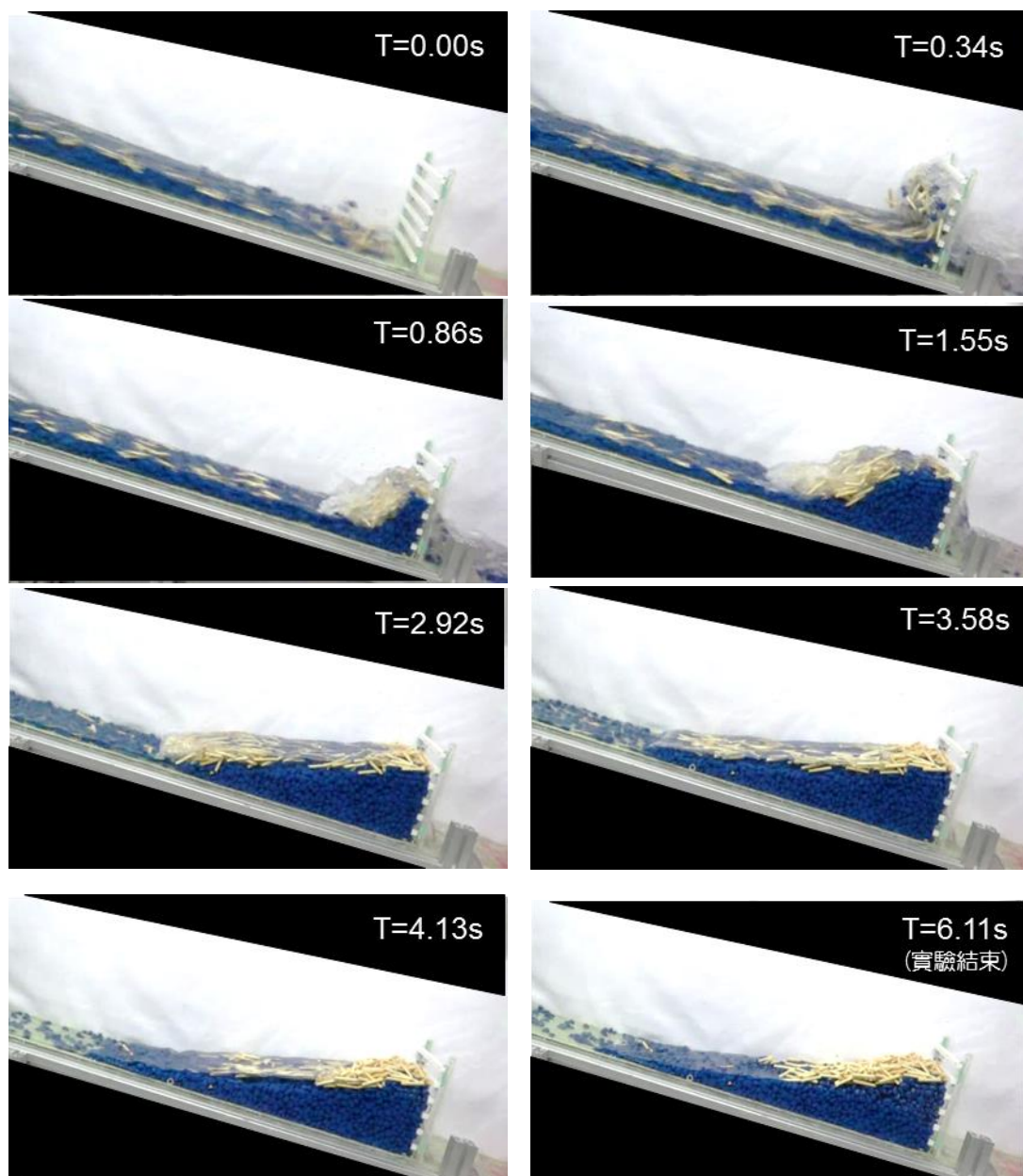
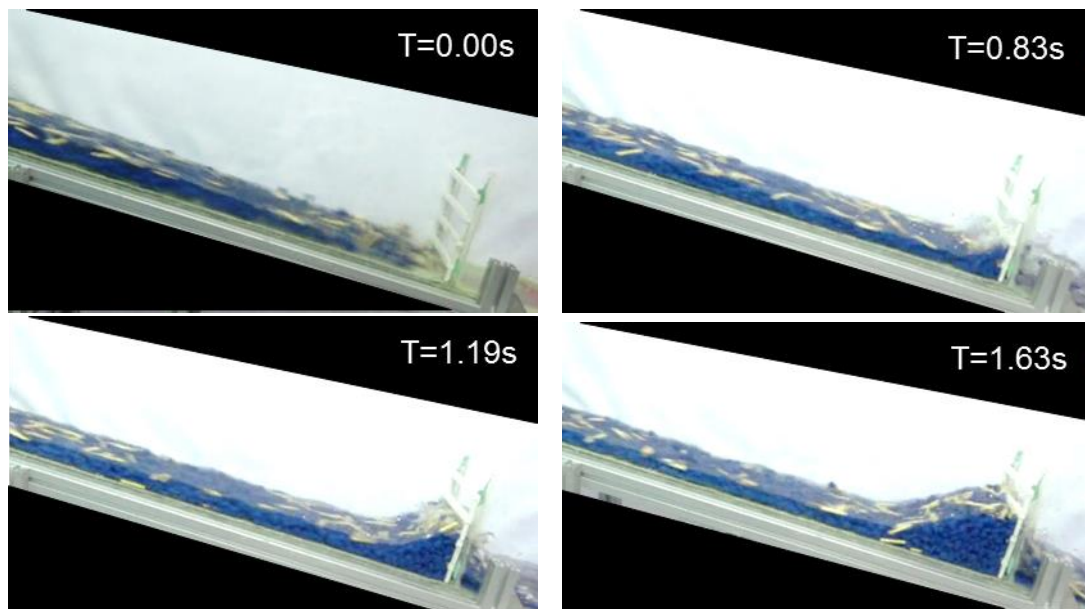


圖 6- 23 WD13h2 實驗過程

WD13h3 實驗因橫桿間距大，攔阻礫石不易，待一段時間後，礫石因自身摩擦及阻尼作用，受壩體攔阻並產生堆積，使堆積區產生水流向上發展(圖 6- 24, $T = 0.83s$)，水流帶動漂流木及礫石向上，向上的礫石也因自身的摩擦及阻尼作用卡合於橫桿間距上；雖然漂流木長度與橫桿間距差異不大，向上水流使漂流木改變其方向，漂流木的不同角度與礫石進行卡合在橫桿間距上 (圖 6- 24, $T = 1.19s$)。後續水流挾帶漂流木及礫石，礫石因前方的堆積不易通過，進而向後方堆積；漂流木具有浮力，跟著水流通過壩體(圖 6- 24, $T = 1.63s$)。待堆積區穩定後，礫石不易流出壩體，後續礫石開始向堆積區上方堆積，使後方堆積高度變高(圖 6- 24, $T = 2.46s$)。因後方堆積高度變高，造成些許迴水，部分漂流木受迴水影響於後方滾動(圖 6- 24, $T = 3.32s$)。水量消減後，迴水由孔隙滲流，帶動漂流木向前沉積，而漂流木受堆積礫石影響，沉積於堆積區較陡處(圖 6- 24, $T = 4.17s \sim 6.54s$)。



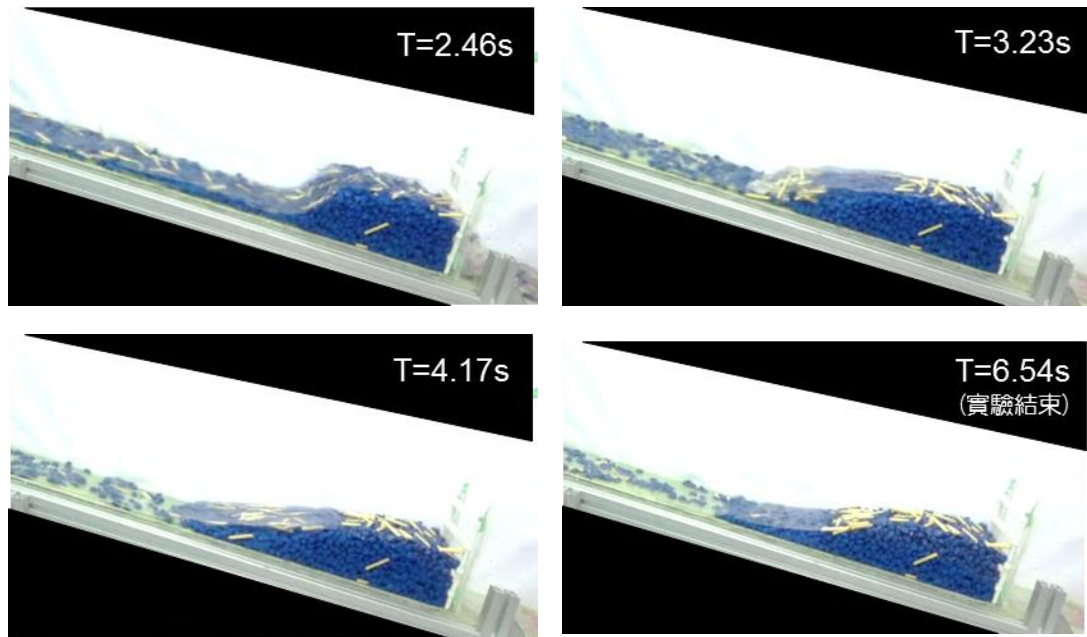


圖 6- 24 WD13h3 實驗過程

WD13h4 實驗因礫石無攔阻，加上間距較大之影響，導致漂流木也無法受攔阻，故皆為無攔阻狀態。

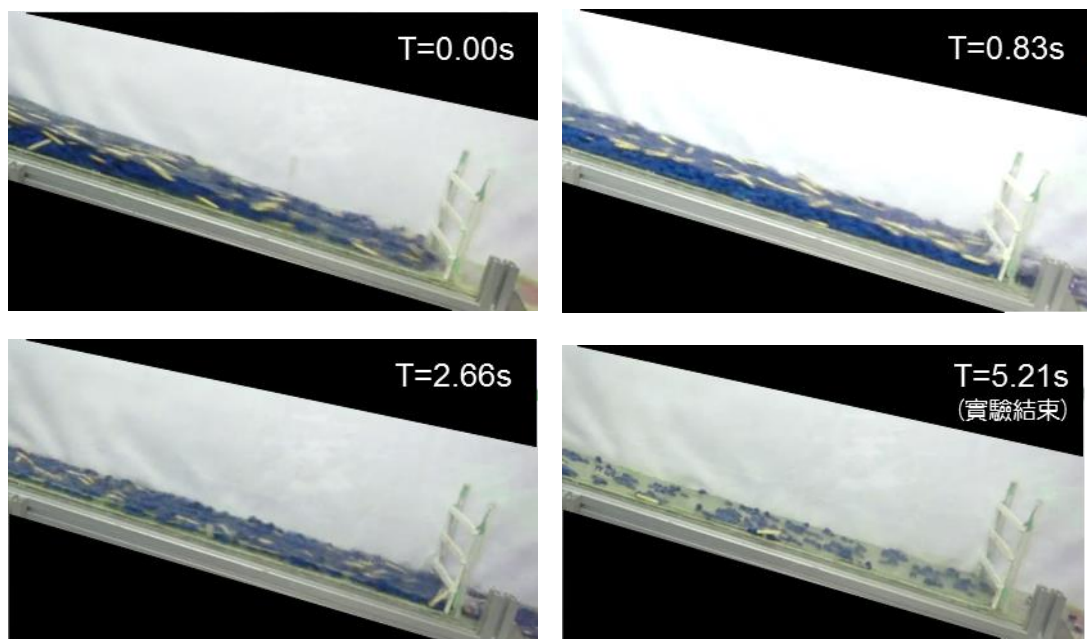
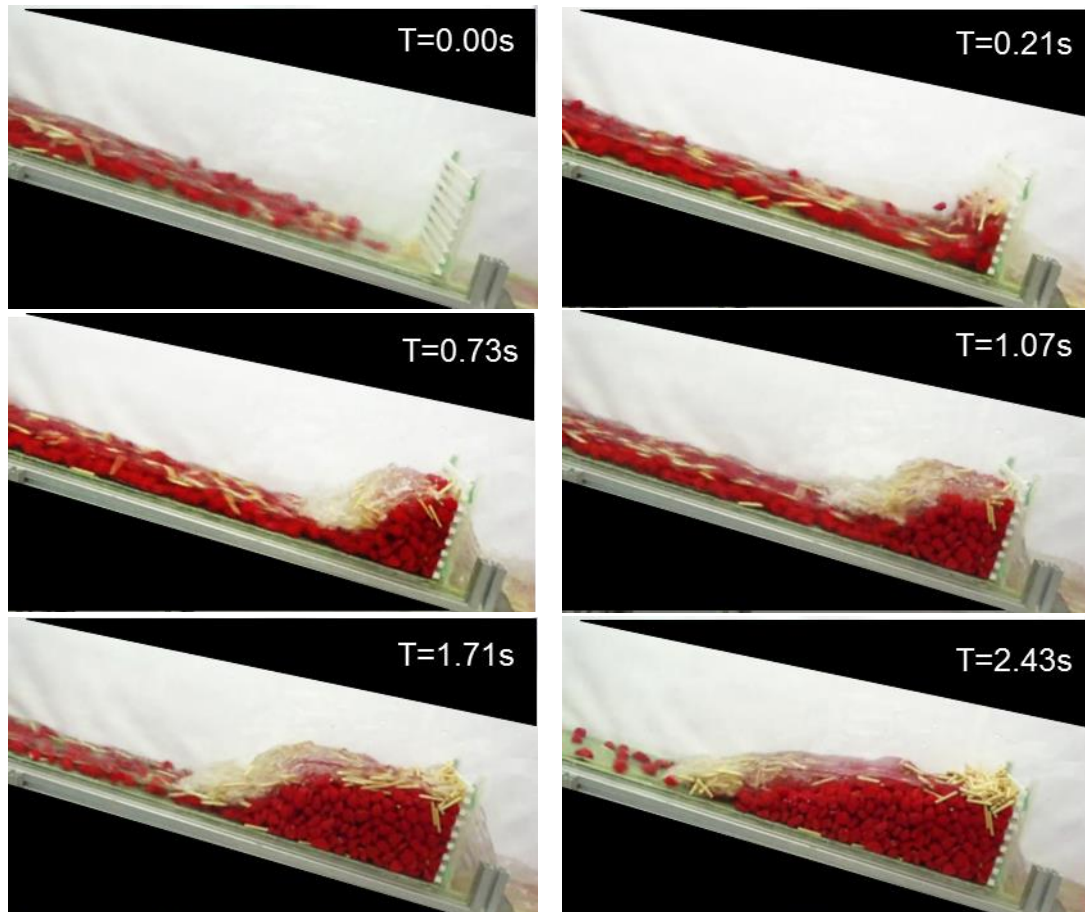


圖 6- 25 WD13h4 實驗過程

七、WD20攔阻過程發展

WD20h1 實驗因粒徑大小相對於橫桿間距大，礫石易受攔阻，水

流向上發展，使漂流木及礫石相互與橫桿卡合(圖 6- 26, $T = 0.21s$)。由於卡合的礫石孔隙大，較多水流通過壩體，僅部分水流回彈至壩內，後續礫石持續向上堆積，形成較大的堆積區(圖 6- 26, $T = 0.73s$)。堆積過程中，部分水流挾帶漂流木，於壩體後方受阻擋；部分水流跟著迴水至後方滾動(圖 6- 26, $T = 1.07s \sim 2.43s$)。由於漂流木較多受拖曳力影響，使後方礫石堆積高度較高，後續水流不易爬升流出壩體，僅透過孔隙排出，故迴水水量較多。堆積完成後堆積量體孔隙大，迴水較快滲流，後方漂流木因迴水消散快及大礫石堆積表面較凹凸不平，使漂流木沉積於後方(圖 6- 26, $T = 4.08s \sim 5.86s$)。



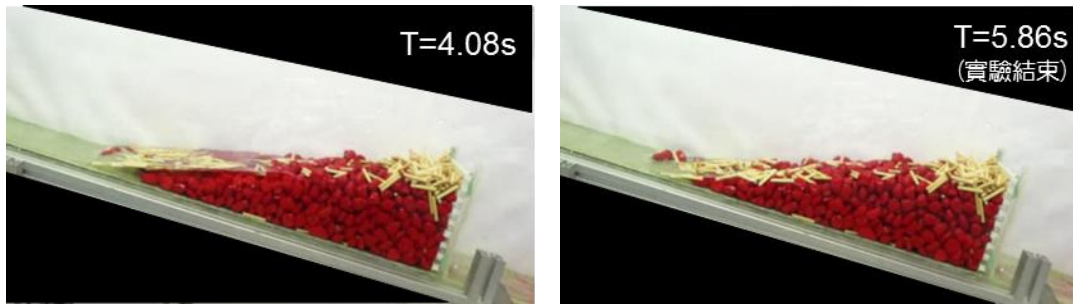
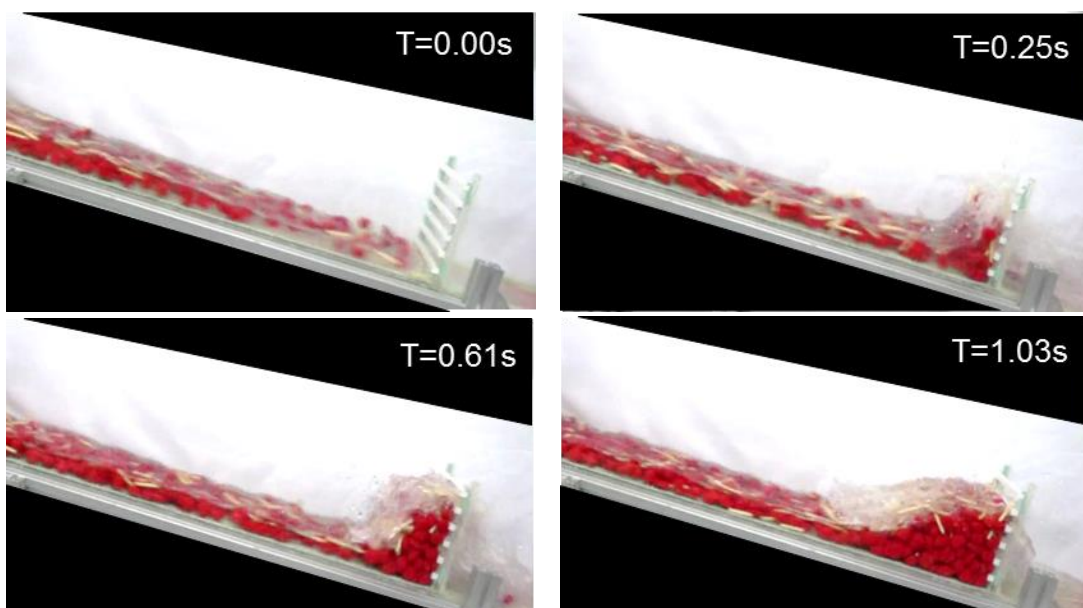


圖 6- 26 WD20h1 實驗過程

WD20h2 實驗礫石受橫桿攔阻，水流向上發展，使漂流木及礫石相互與橫桿卡合(圖 6- 27, $T = 0.25s \sim 0.61s$)。由於前方壩體皆受礫石攔阻，後續礫石沿上游處堆積，堆積過程中，漂流木部分受水流影響於壩體後方堆積；部分因迴水影響向後方滾動(圖 6- 27, $T = 1.03s$)。後方礫石受漂流木拖曳力影響小，使礫石不易被帶動向上堆積，故後續堆積坡度較緩，迴水的水流除滲流流出外，容易順著緩坡，沿壩體上方流出(圖 6- 27, $T = 1.81s$)，使迴水水量較 WD20h1 少。隨迴水水量較少，漂流木漂的高度較低，當後續礫石流下時，容易將漂流木卡於礫石與礫石之間(圖 6- 27, $T = 2.35 \sim 5.95s$)。



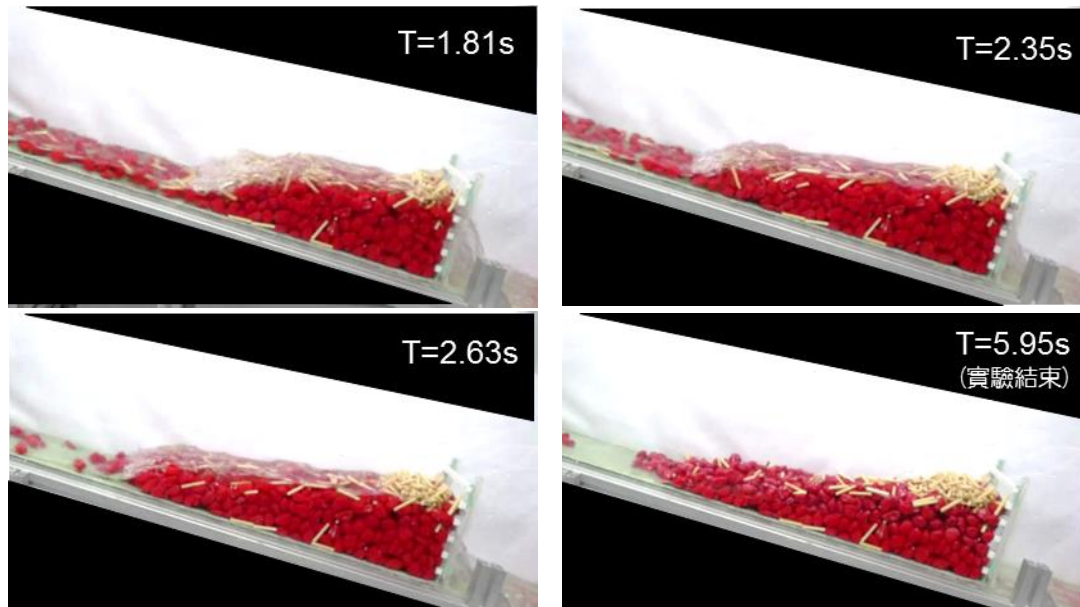
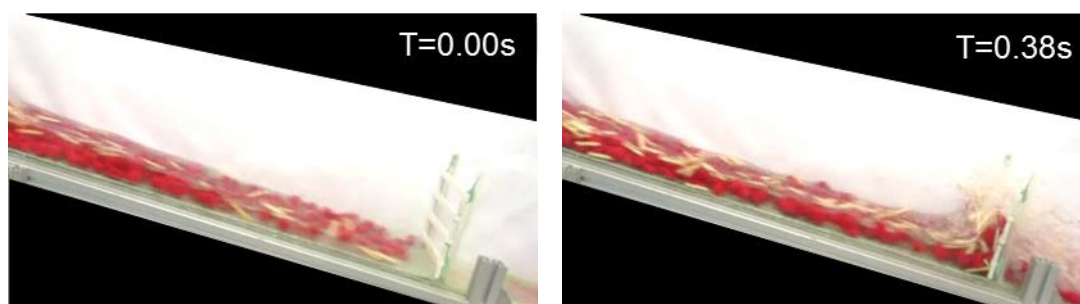


圖 6- 27 WD20h2 實驗過程

WD20h3 實驗因橫桿間距較粒徑大，需花費較久時間礫石才能進行卡合，水流因受橫桿阻擋，產生抬升現象，此現象容易造成礫石跟著抬升，造成礫石倆倆相互卡合，使壩體下方橫桿受阻擋，水流進而往上發展(圖 6- 28, $T = 0.38s$)。向上的水流，改變漂流木其方向，使漂流木與礫石慢慢卡合於間距中，堆積高度變高(圖 6- 28, $T = 1.10s$)。後續的礫石因前方受攔阻，進而向上游處堆積；漂流木部分受水流挾帶於壩體處受攔阻，沉積於壩頂後方，部分跟著迴水向後方滾動(圖 6- 28, $T = 1.63s$)。堆積結束後，迴水因滲流速度快及大礫石表面凹凸不平，使水流無足夠推力將漂流木推移至前方，故堆積於後方處(圖 6- 28, $T = 2.00\sim 6.38s$)。



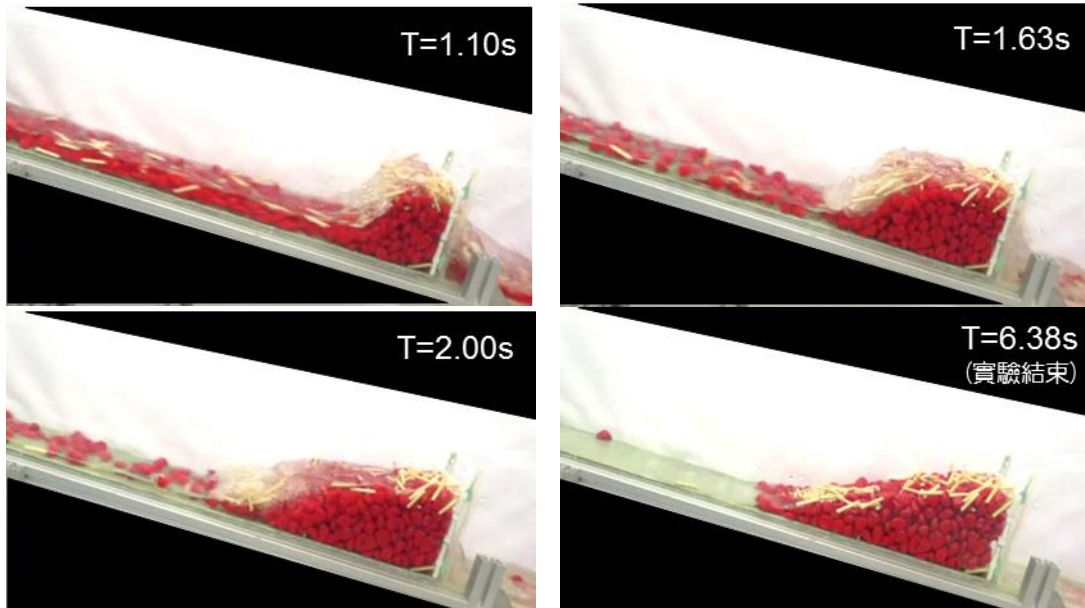


圖 6- 28 WD20h3 實驗過程

WD20h4 實驗因礫石無攔阻，導致漂流木也無法受攔阻，故皆為無攔阻狀態。

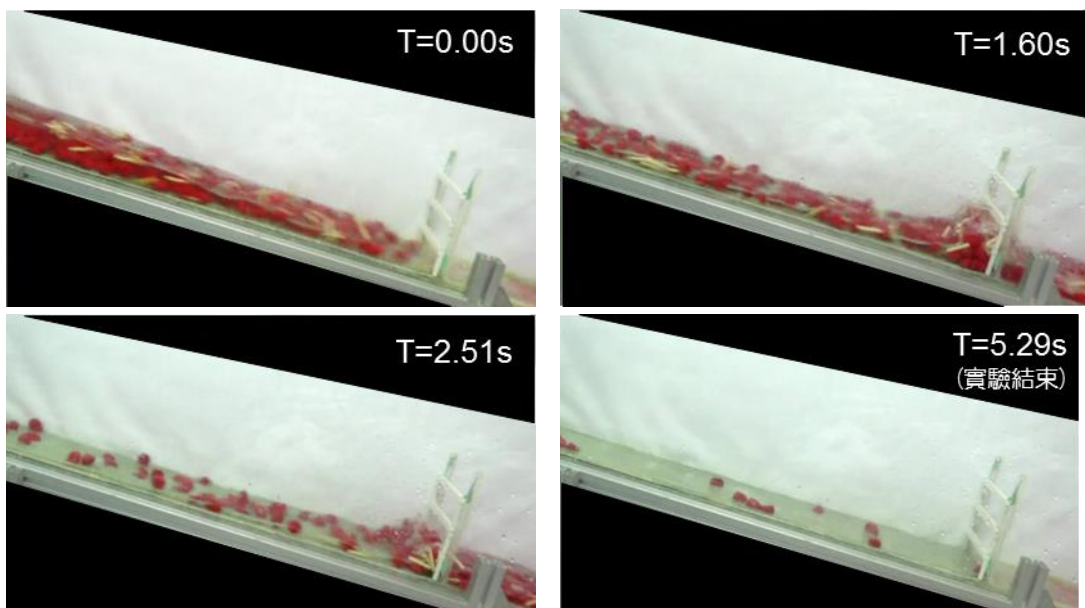


圖 6- 29 WD20h4 實驗過程

八、WDmix攔阻過程發展

WDmixh1 實驗中，土砂沖下時礫石受橫桿攔阻，向上發展的水流使漂流木呈垂直方向，並且與大小礫石卡合在橫間距上(圖 6- 30, T

= 0.09s~0.18s)。小礫石因重量較輕，跟著水流越過壩體(圖 6- 30, $T = 0.63s$)。壩體受堆積後，後續土砂向上游處堆積(圖 6- 30, $T = 1.64s$)。後續水流持續進來，部分水流挾帶漂流木至壩體上方流出，漂流木因橫桿間距小，於壩上方受阻擋並沉積；部分水流因小礫石多堆積於大礫石之孔隙中，使堆積量體之孔隙小，迴水不易滲流，水量較多，導致漂流木漂浮於迴水上方(圖 6- 30, $T = 2.48s$)。迴水消散時，因水量多使水流有較多推力，而將漂流木推至前方沉積(圖 6- 30, $T = 6.78s \sim 11.1s$)。

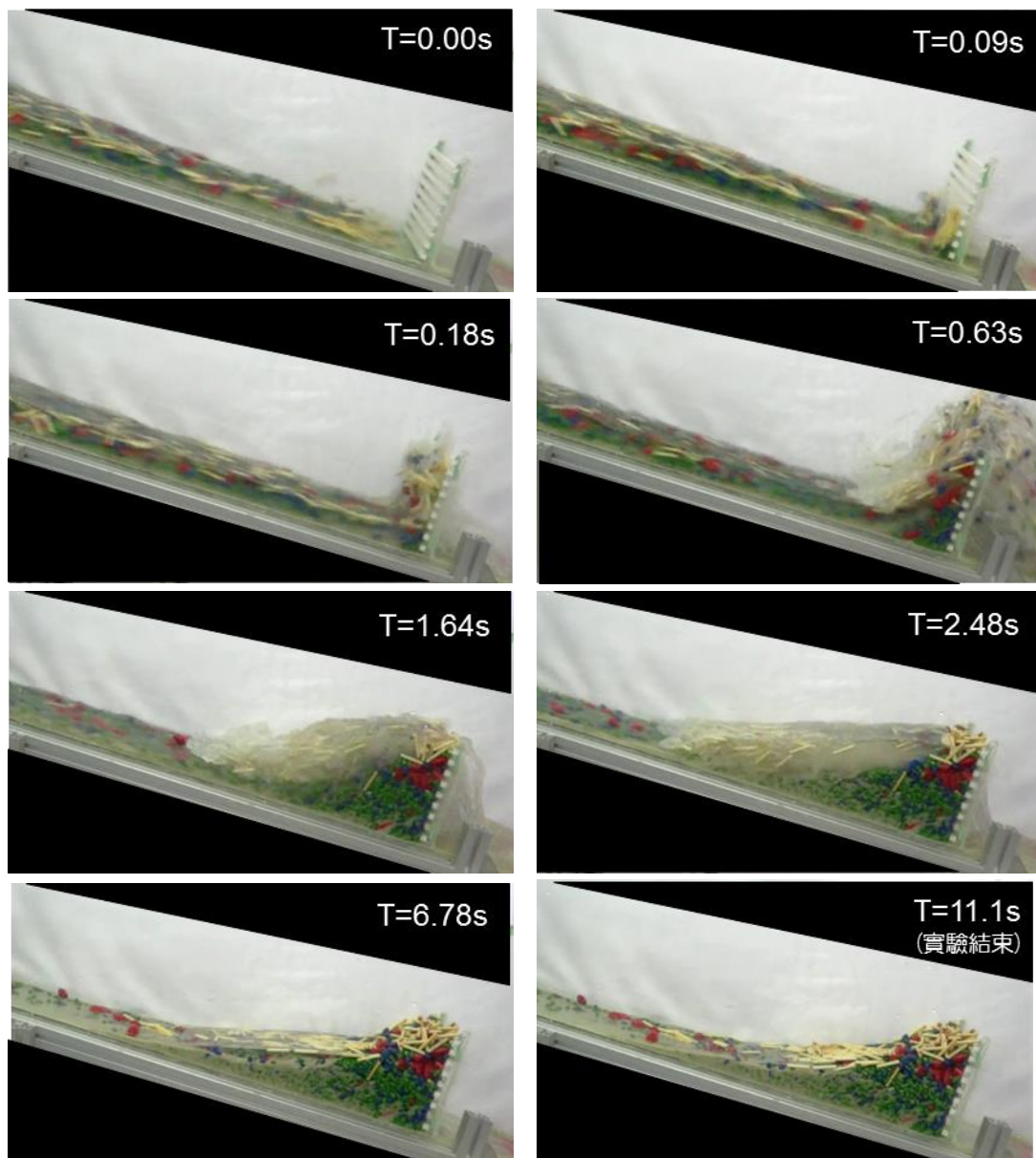


圖 6- 30 WDMixh1 實驗過程

WDMixh2 實驗因橫桿間距大，較 WDMixh1 需經過長時間，礫石才能受到攔阻，攔阻後水流向上發展使漂流木呈垂直方向與大小礫石交錯卡合在橫桿上(圖 6- 31, $T = 0.41s \sim 0.92s$)。後續土砂因前方壩體皆受土砂攔阻，進而向上游處堆積，部分水流流出壩體，因水流挾帶漂流木之關係，使漂流木受壩體攔阻而沉積於此處；部分水流因堆積量體孔隙皆受小礫石填滿，使水流不易滲流，於後方造成較多的迴水(圖 6- 31, $T = 1.68s \sim 2.88s$)。土砂堆積完成後，迴水退去時間較長，使水流有足夠的推力，將漂流木由後方推移至前方沉積 (圖 6- 31, $T = 4.41s \sim 9.93s$)。

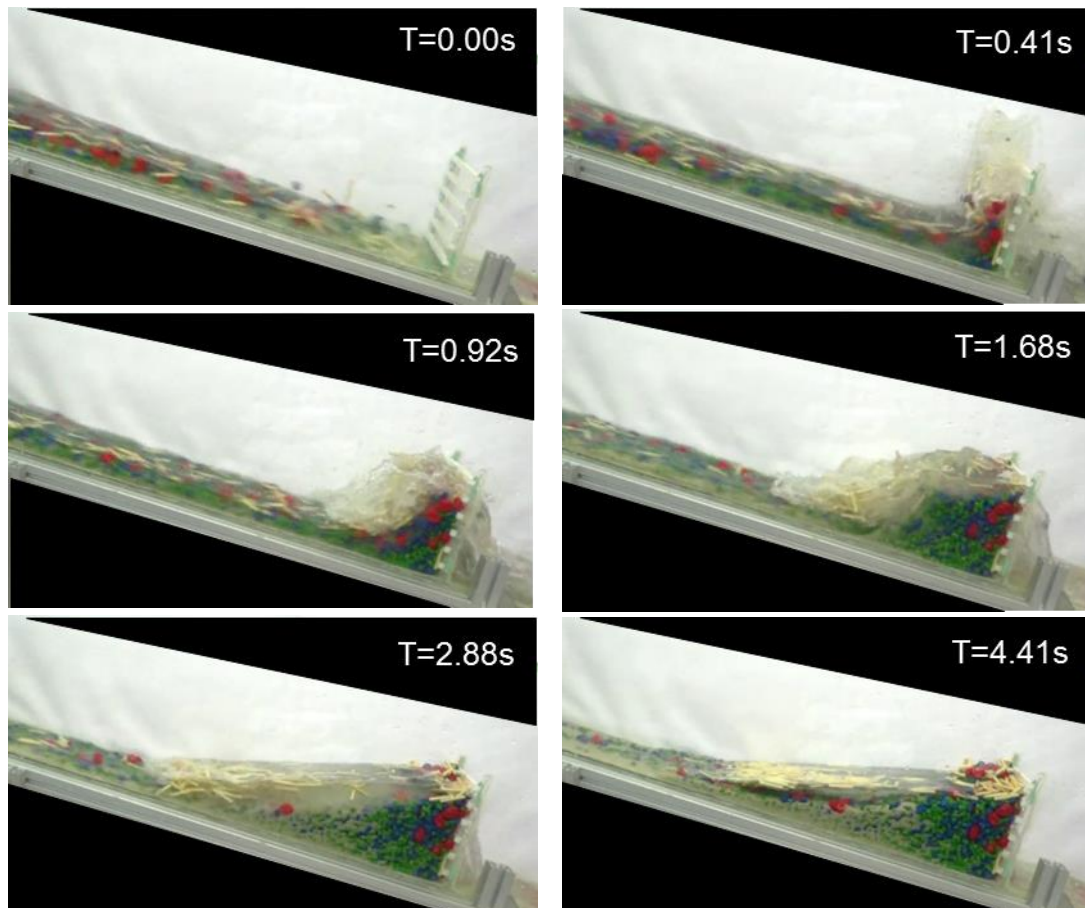




圖 6- 31 WDMixh2 實驗過程

WDMixh3 實驗，因混合粒徑沖下時礫石排列順序皆會有差異，使礫石間的卡合型式變化，但整體攔阻過程皆為壩體下方受攔阻，使水流向上發展，造成漂流木與礫石卡合於橫桿間距上(圖 6- 32, $T = 0.84s \sim 2.19s$)。後續土砂因前方受攔阻後於後方堆積(圖 6- 32, $T = 3.03s$)，部分水流流出壩體，因橫桿間距較大，漂流木不易受攔阻，故跟著水流流出壩體；部分受孔隙影響形成較多的迴水，隨著迴水消滅，迴水水流帶動漂流木於前方沉積(圖 6- 32, $T = 3.53s \sim 6.25s$)。

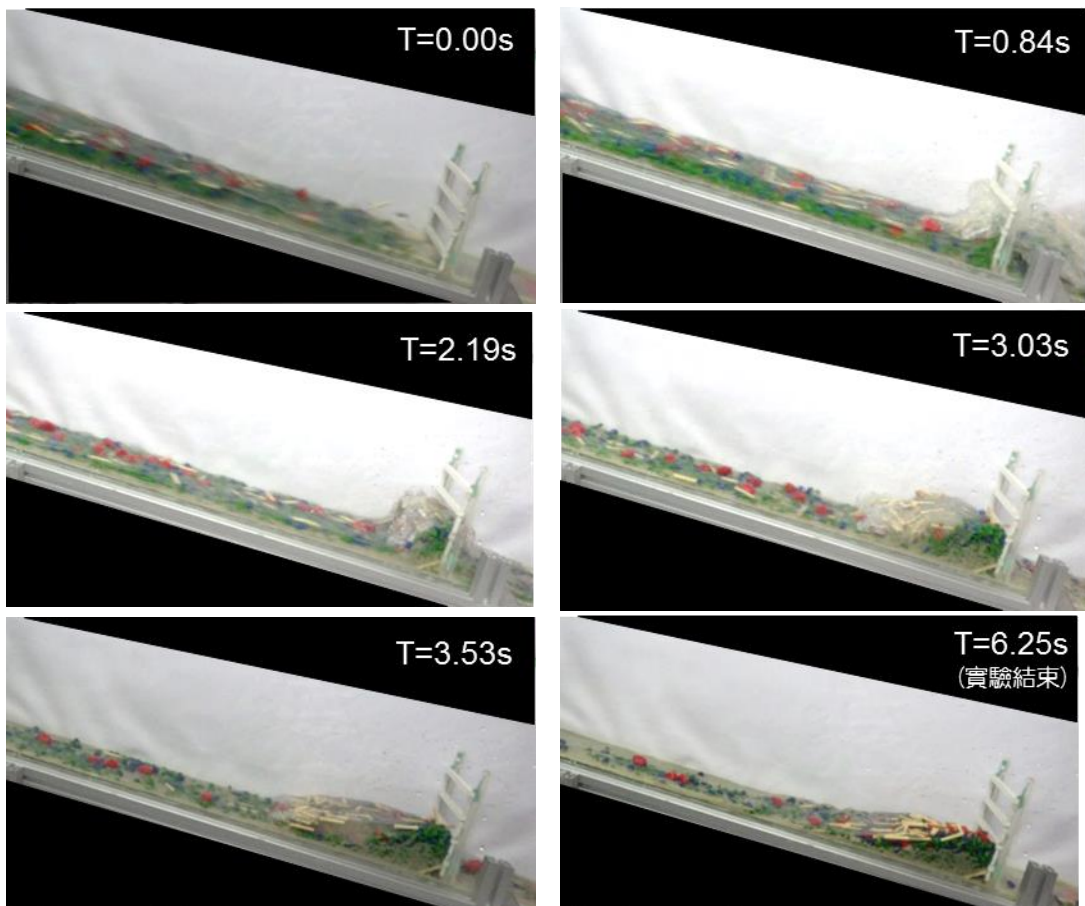


圖 6-32 Wdmixh3 實驗過程

Wdmixh4 實驗因橫桿間距較大，大小礫石皆不易卡合無法受攔阻，故無堆積現象。

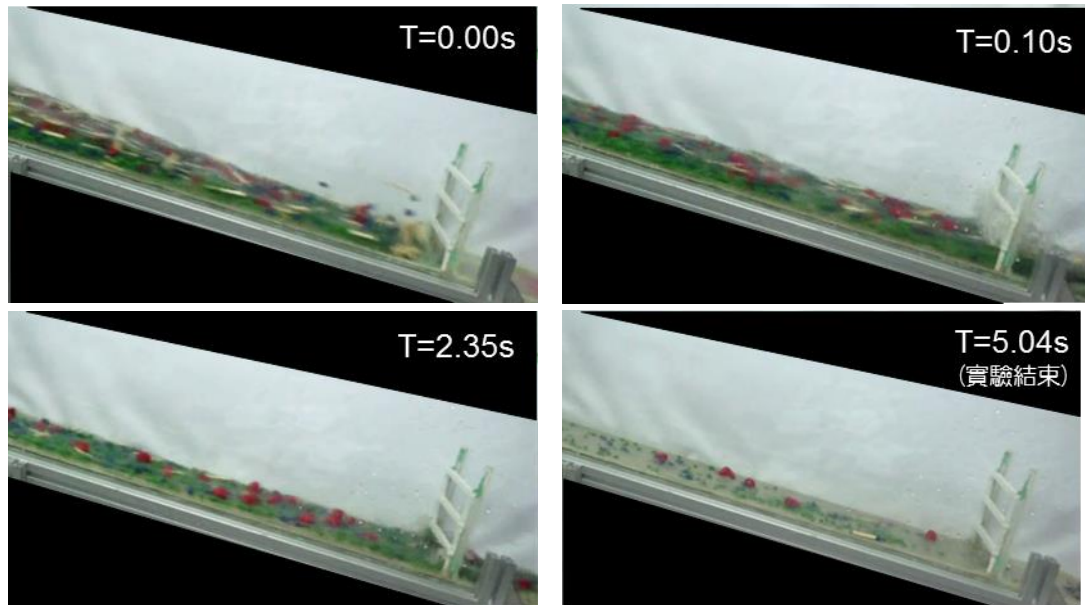


圖 6-33 Wdmixh4 實驗過程

九、同粒徑實驗下有無漂流木對攔阻過程之共通點

在相同粒徑、渠道坡度及土石流體積濃度皆固定下，僅不同橫桿間距及有與無漂流木改變整體攔阻過程。統整各實驗攔阻過程發展，不考慮漂流木因拖曳力改變的堆積高度及長度，僅探討攔阻過程之發展，故歸納出相同粒徑實驗下有無漂流木對攔阻過程之共通點。圖上淺色代表初始礫石堆積之形貌；深色代表礫石於後方堆積之形貌。

D08 和 WD08 實驗有無漂流木實驗攔阻共通點，橫桿間距小，礫石受攔阻並向上堆積，部分水流回彈至壩體後方並帶動礫石於壩內堆積，形成較大堆積，因堆積體孔隙小，迴水量多，後方以較緩型式堆積。橫桿間距大，待顆粒間摩擦及阻尼作用形成拱型之堆積，水流帶動礫石向上堆積形成抬升段，因有漂流木實驗，漂流木會卡合於橫桿間距，使後方礫石因漂流木遮蔽無法通過，故抬升段較高。後方堆積

皆因迴水使堆積較緩。

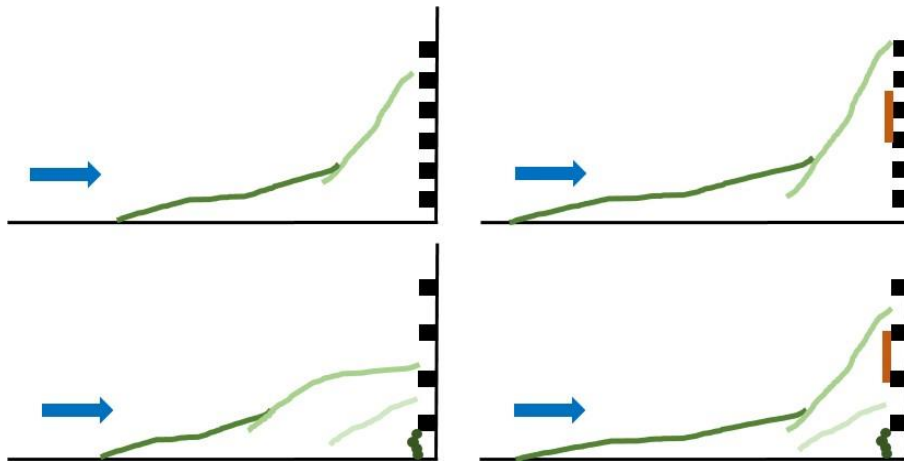


圖 6-34 D08 和 WD08 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖

D13 和 WD13 實驗有無漂流木實驗攔阻共通點，橫桿間距小，礫石沿壩體向上堆積，部分礫石受壩體回彈水流影響而堆積，因壩體受堆積後，後續礫石進而向後方發展堆積。橫桿間距大，不易受攔阻，待礫石因彼此間摩擦及阻尼作用形成兩兩交疊於壩體下方受攔阻，水流帶動礫石沿壩體上方發展，礫石相互卡合於間距中，形成抬升段，後續礫石堆積高度變高及向後方堆積。

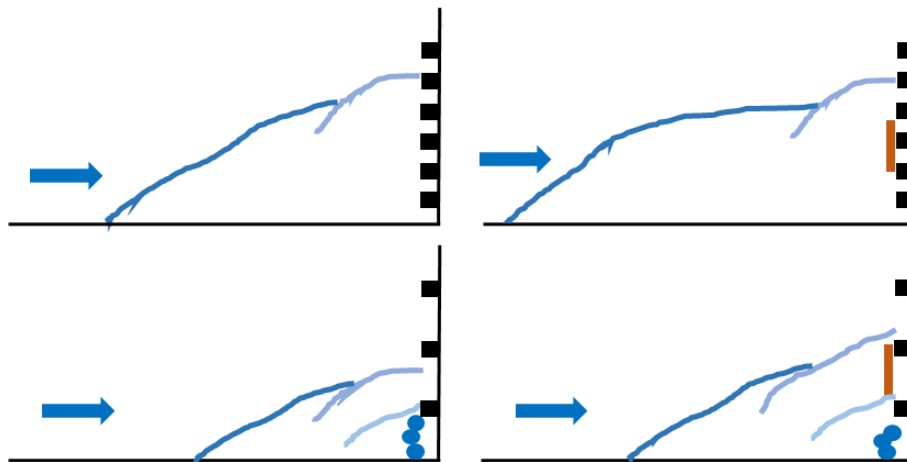


圖 6-35 D13 和 WD13 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖

D20 和 WD20 實驗有無漂流木實驗攔阻共通點，橫桿間距小，礫石向上堆積，因礫石本身重量較重，受撞擊壩體回彈水流影響較小，因壩體受堆積，故後續礫石向後方堆積。橫桿間距較大，礫石不易與

橫桿間距進行卡合，需花費較長時間使礫石兩兩交疊與橫桿間距進行卡合造成攔阻，水流帶動礫石向上堆積。壩體受堆積後，後續礫石無法通過並向後方堆積。

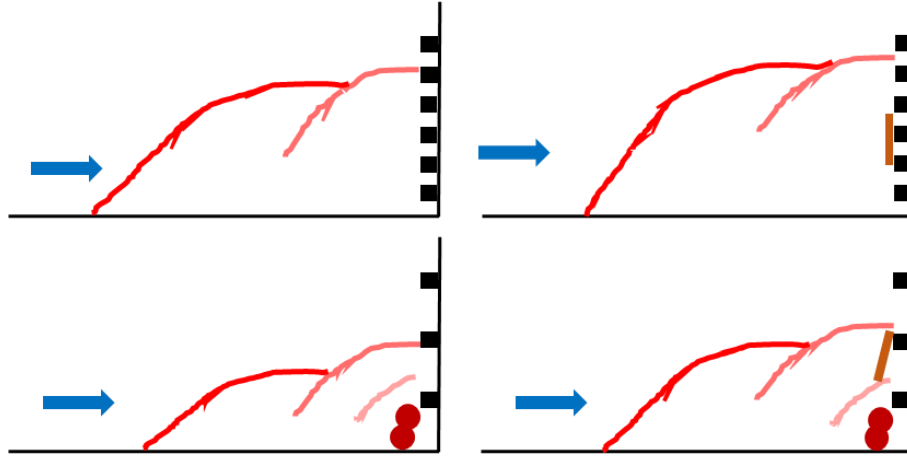


圖 6- 36 D20 和 WD20 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖

Dmix 和 WDMix 實驗有無漂流木實驗攔阻共通點，橫桿間距大及小，皆是大礫石受壩體攔阻後，水流挾帶礫石沿壩體向上方發展，並與上方橫桿間距相互卡合，後續土砂向後方堆積。大礫石受堆積後，小礫石及些微細砂則卡於大礫石間的孔隙，大部分細砂做為懸浮質跟著迴水水流至後方發展。待迴水退去，部分細砂跟著水流滲流於孔隙中，部分堆積於後方。整體堆積形貌與陳樹群(2016)彙整開口型防砂壩形貌相似。

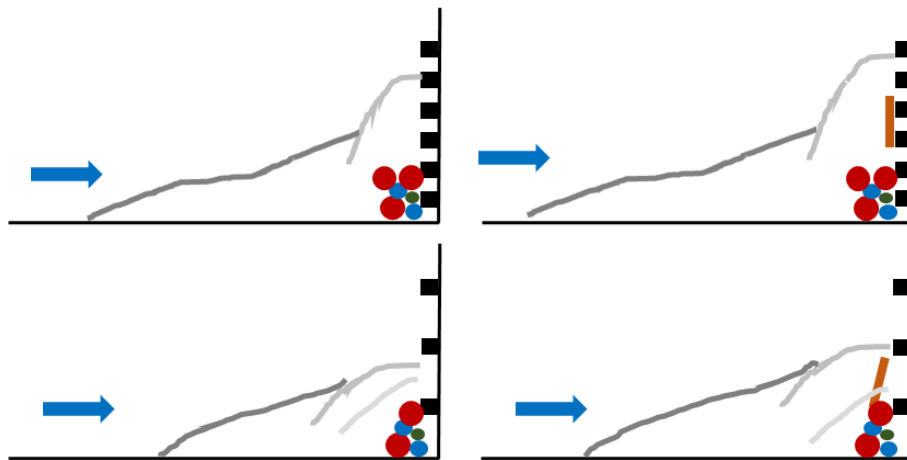


圖 6- 37 Dmix 和 WDMix 橫桿間距大及小攔阻過程示意圖

第二節 通過率分析

一、無漂流木實驗

將無漂流木實驗各粒徑及間距通過率(表 6- 1)之數據繪製成圖 6- 38，圖上點代表各組別 1 至 3 次實驗的通過率；折線為相同粒徑不同間距之平均通過率連接而成。各粒徑於各橫桿間距之通過率如以下說明。

渡邊正幸(1980)提出梳子壩開口寬度(b)會影響土石流之因砂效率，當梳子壩相對開度 $b/d_{max} < 2.0$ (b 為梳子壩開口寬度、 d_{max} 為最大泥砂顆粒粒徑)時，梳子壩可降低土石流尖峰流出土砂量 50%以上。池谷浩(1980)、盧田和男等(1980)及水山高久等(1988)針對各類型之透過性防砂壩進行實驗，結果顯示壩體相對開度 $b/d_{max} < 1.5 \sim 2.0$ 時，會使土石流挾帶的土砂產生閉塞作用。因此本實驗採用土砂通過率 50%所對應之橫桿間距來探討其間距對粒徑之相對關係。

D08 實驗數據(表 6- 1)，橫桿間距 1cm，平均通過率為 11.8%；橫桿間距 2cm，平均通過率為 57.7%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約為 2cm，此間距約為粒徑 2.5 倍之關係(表 6- 2)。其因小粒徑顆粒與顆粒間阻尼及摩擦作用易發生拱型堆積，使後續土砂因前方拱型影響而受堆積。由表 6- 1 及圖 6- 38，橫桿間距 3 及 4 cm 通過率相近，原因為此間距土砂為無攔阻狀態，殘留於上游之礫石主要受渠底摩擦力及渠道邊壁因素，故無法造成 100%之通過率。

D13 實驗數據(表 6- 1)，橫桿間距 2cm，平均通過率為 29.5%；橫桿間距 3cm，平均通過率為 49.2%；橫桿間距 4cm，平均通過率為 91.2%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約為 3cm，此間距為粒徑 2.3 倍之關係(表 6- 2)。由圖 6- 38 可看到 D13 橫桿間距

2cm 至 3cm 折線斜率較橫桿間距 3cm 至 4cm 的斜率低，故橫桿間距 3cm 至 4cm 為通過率變化較大之區間。橫桿間距 4 cm 為無攔阻狀態，上游之礫石主要為渠底摩擦力及邊壁效應所殘留。

D20 實驗數據中(表 6- 1)，橫桿間距 3cm，平均通過率為 36.7%；橫桿間距 4cm，平均通過率為 95.8%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約為 3cm，此間距為粒徑 1.5 倍之關係(表 6- 2)。由圖 6- 38 可看到 D13 橫桿間距 2cm 至 3cm 折線斜率較橫桿間距 3cm 至 4cm 的斜率低，故橫桿間距 3cm 至 4cm 為通過率變化較大之區間。橫桿間距 4 cm 為無攔阻狀態，上游之礫石主要為渠底摩擦力及邊壁效應所殘留的。

表 6- 1 無漂流木實驗通過率

實驗代號	通過率(%)			
	1	2	3	平均通過率
D08h1	11.8	11.2	12.3	11.8
D08h2	58.7	56.1	58.4	57.7
D08h3	83.7	82.7	81.9	82.8
D08h4	82.9	82.5	82.4	82.6
D13h1	4.74	4.73	4.86	4.78
D13h2	28.8	31.2	28.6	29.5
D13h3	46.7	49.3	51.5	49.2
D13h4	90.2	91.1	92.3	91.2
D20h1	0.00	0.00	0.00	0.00
D20h2	6.89	5.98	4.48	5.79

D20h3	36.1	38.3	35.7	36.7
D20h4	96.3	95.2	96.1	95.8

表 6-2 無漂流木單一粒徑通過率 50%所對應之間距與粒徑關係

粒徑(cm)	通過率 50%所對應之間距(cm)	間距與粒徑之關係
0.8	2.0	2.5
1.3	3.0	2.3
2.0	3.0	1.5

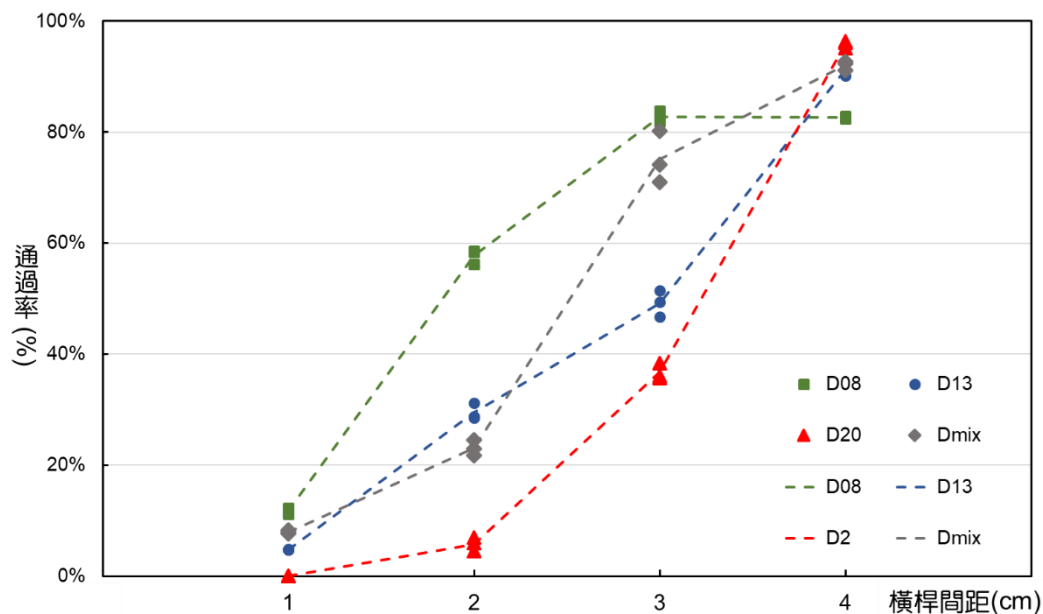


圖 6-38 無漂流木實驗各粒徑通過率

Dmix 實驗數據中(表 6-3)，橫桿間距 2cm，平均通過率為 23.1%；橫桿間距 3cm，平均通過率為 75.1%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約 2.5cm，為粒徑 d_{75} 之 1.9 倍、粒徑 d_{90} 之 1.5 倍之關係(表 6-4)。

比較表 6-1 及表 6-5，粒徑 0.8cm 於橫桿間距 3cm 時，單一粒徑實驗通過率為 82.8%；混合粒徑實驗通過率為 82.3%，無明顯之差異。

粒徑 1.3cm 於橫桿間距 3cm 時，單一粒徑實驗通過率為 49.2%；混合粒徑實驗通過率為 82.4%。粒徑 2cm 於橫桿間距 3cm 時，單一粒徑實驗通過率為 36.7%；混合粒徑實驗通過率為 73.0%。粒徑 0.04cm 皆是堆積於礫石間之孔隙，故礫石有無堆積為影響通過率之因子。因此影響混合粒徑通過率因子為粒徑 1.3 及 2cm，大致為混合粒徑 $d_{75} \sim d_{90}$ 之級配。

表 6-3 無漂流木實驗混合粒徑通過率

實驗代號	通過率(%)			
	1	2	3	平均通過率
Dmixh1	8.22	7.67	7.97	7.95
Dmixh2	22.9	21.7	24.5	23.1
Dmixh3	80.2	74.1	70.9	75.1
Dmixh4	92.7	92.4	91.1	92.1

表 6-4 無漂流木混合粒徑通過率 50% 所對應之間距與粒徑關係

粒徑級配	粒徑 (cm)	通過率 50% 所對應之間距 (cm)	間距與粒徑之關係
d_{75}	1.3	2.5	1.9
d_{90}	1.7	2.5	1.5

表 6-5 無漂流木實驗混合粒徑中各粒徑及間距通過率

間距 (cm)	粒徑 (cm)	通過率(%)			
		1	2	3	平均通過率
1	0.04	15.4	13.2	15.1	15.8
	0.80	8.13	7.98	8.15	8.20
	1.30	6.25	7.65	7.04	6.84
	2.00	3.56	1.60	2.16	2.35
2	0.04	24.5	16.4	21.7	20.8
	0.80	22.6	23.4	22.1	22.7
	1.30	28.3	26.4	29.7	28.2
	2.00	15.8	18.6	25.7	20.0
3	0.04	60.7	53.7	51.8	55.4
	0.80	87.8	81.0	78.0	82.3
	1.30	87.4	81.1	78.7	82.4
	2.00	77.3	73.7	68.0	73.0
4	0.04	81.9	80.1	77.1	79.7
	0.80	97.4	97.2	96.2	96.9
	1.30	96.1	95.1	94.6	95.3
	2.00	91.0	92.6	91.7	91.8

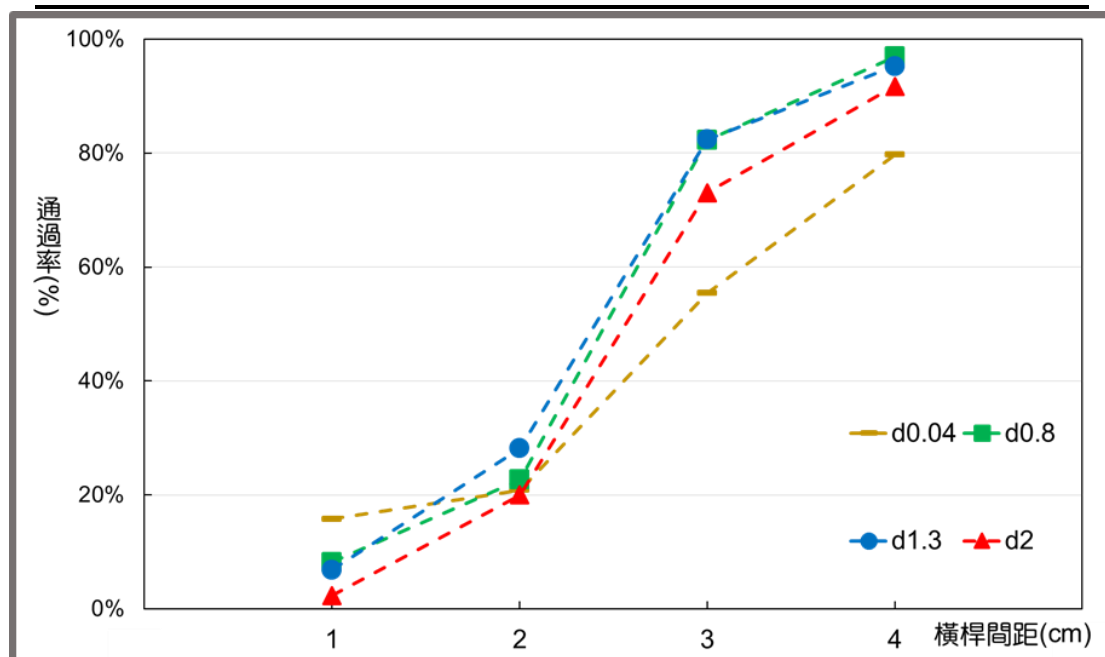


圖 6-39 無漂流木實驗混合粒徑中各粒徑通過率

根據上述無漂流木實驗數據得出各粒徑相對間距與通過率之關係式(圖 6-40)，並將各粒徑關係式以通過率 50%代入，可得間距與粒徑 0.8cm 之關係為 2.7 倍；粒徑 1.3cm 之關係為 2.1 倍；粒徑 2cm 之關係為 1.5 倍。混合粒徑中粒徑 d_{75} 之關係為 1.9 倍、粒徑 d_{90} 之關係為 1.5 倍。由關係式求出通過率 50%所對應之間距與粒徑之比例與透過平均通過率內插求得之比例相似，故此關係式可代表通過率與粒徑相對間距(間距/粒徑)之關係。

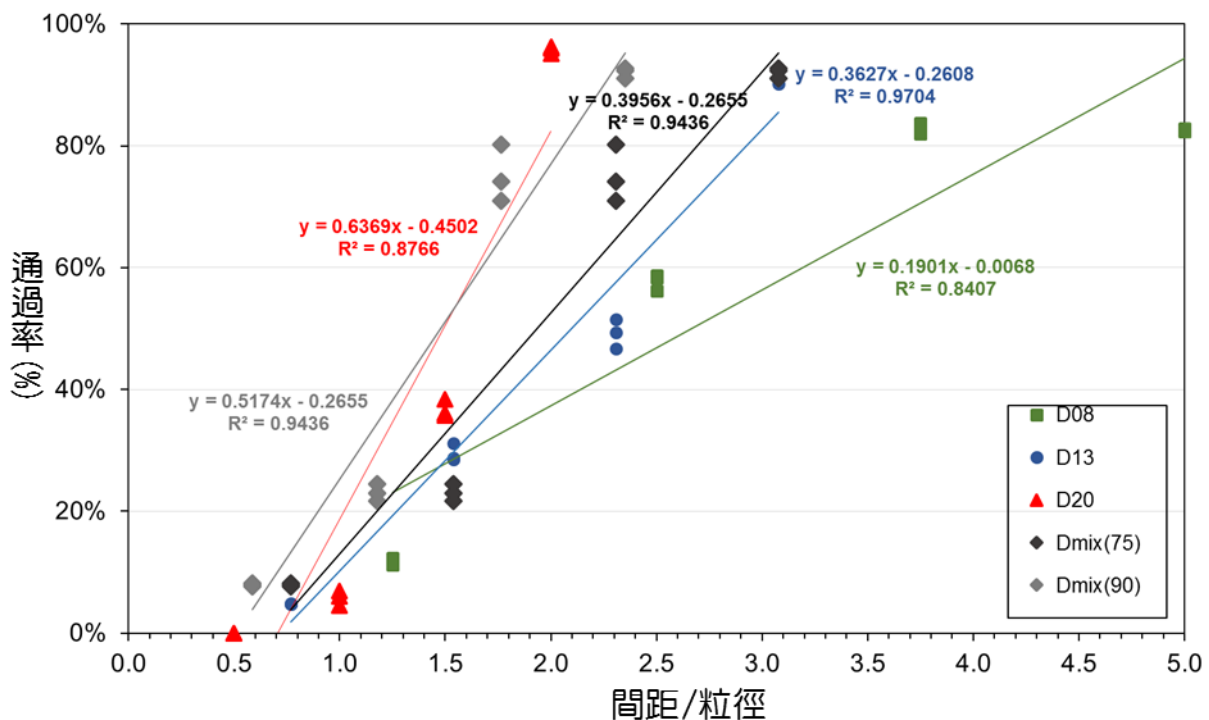


圖 6-40 無漂流木實驗通過率與粒徑相對間距(間距/粒徑)之關係式

二、有漂流木實驗

在漂流木實驗中，量測了單一粒徑及混合粒徑之通過率，並將有無漂流木之通過率進行比較，進而了解有無漂流木是否有囚砂之效益，詳細比較內容如第三節。

WD08 實驗數據(表 6-6)，橫桿間距 2cm，平均通過率為 29.3%；橫桿間距 3cm，平均通過率為 88.0%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約為 2.35cm 為粒徑 2.9 倍；漂流木長度之 0.59 倍。

WD13 實驗數據(表 6-6)，橫桿間距 3cm，平均通過率為 39.8%；橫桿間距 4cm，平均通過率為 92.0%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約為 3.2cm 為粒徑之 2.4 倍；漂流木長度之 0.8 倍。

WD20 實驗數據(表 6-6)，橫桿間距 3cm，平均通過率為 31.2%；橫桿間距 4cm，平均通過率為 98.8%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約為 3.3cm 為粒徑之 1.6 倍；漂流木長度之 0.8 倍。

WDmix 實驗數據中(表 6-6)，橫桿間距 2cm，平均通過率為 16.6%；橫桿間距 3cm，平均通過率為 67.6%，透過線性內插得通過率 50%所對應之橫桿間距約為 2.7cm 為 d75 粒徑之 2.08 倍；d90 粒徑之 1.59 倍；漂流木長度 0.68 之倍。

漂流木受橫桿卡合後會形成遮蔽，使較多的礫石無法通過至壩體，壩內受攔阻的礫石變多。由 3 種單一粒徑及混合粒徑通過率 50%得知因漂流木的囚砂效益使所對應的橫桿間距皆變大。

表 6-6 有漂流木實驗通過率

實驗代號	通過率(%)			
	1	2	3	平均通過率
WD08h1	12.6	12.1	13.4	12.7

WD08h2	28.8	33.8	25.4	29.3
WD08h3	88.7	87.7	87.6	88.0
WD08h4	89.1	88.6	89.2	89.0
WD13h1	1.89	2.22	2.43	2.18
WD13h2	13.2	18.1	19.9	17.1
WD13h3	43.8	36.8	39.0	39.8
WD13h4	91.9	92.2	91.9	92.0
WD20h1	0.00	0.00	0.00	0.00
WD20h2	3.58	2.22	4.30	3.37
WD20h3	29.0	30.1	34.7	31.2
WD20h4	99.1	98.3	98.9	98.8
WDmixh1	9.63	7.08	8.32	8.34
WDmixh2	16.5	16.2	16.9	16.6
WDmixh3	70.4	69.3	62.9	67.6
WDmixh4	92.6	93.7	94.0	93.4

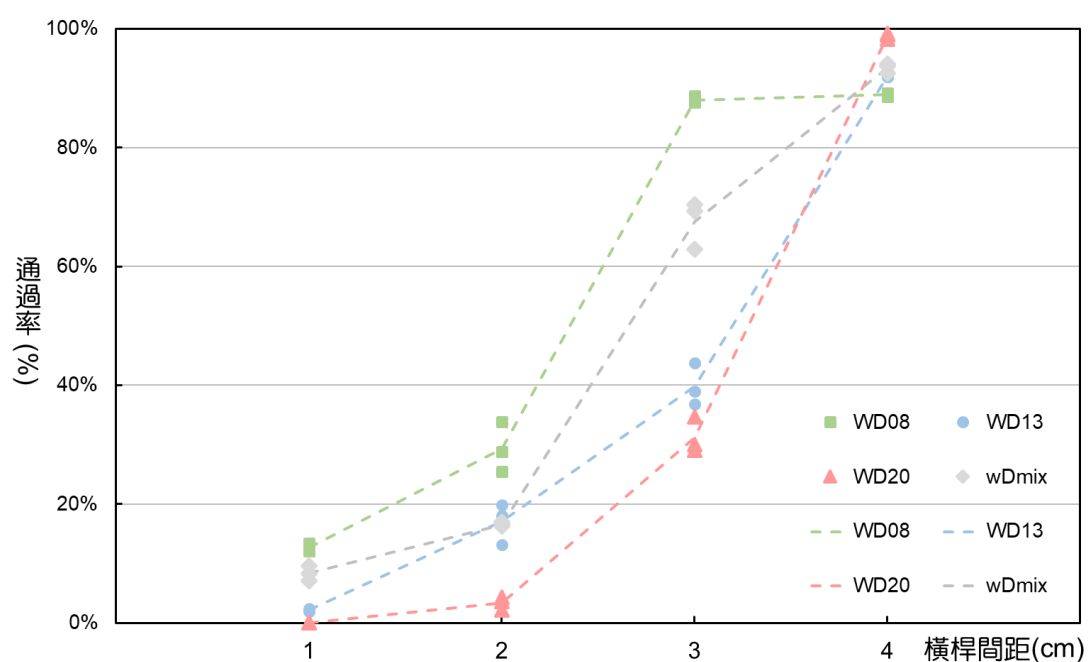


圖 6- 41 有漂流木實驗各粒徑通過率

根據有漂流木實驗數據得出各粒徑相對間距與通過率之關係式(圖 6- 42)，並將各粒徑關係式以通過率 50%代入，可得間距與粒徑 0.8cm 之關係為 2.9 倍；粒徑 2cm 之關係為 1.5 倍。由關係式求出的間距與粒徑之關係與透過平均通過率內插求得之關係相似，故此關係式可代表有漂流木實驗通過率與粒徑相對間距(間距/粒徑)之關係式。

由圖 6- 43 可得知各粒徑通過率與漂流木長度相對間距之關係式，當通過率 50%時，粒徑 0.8cm 所對應之間距與漂流木為 0.58 倍；粒徑 2cm 為 0.75 倍；混合粒徑為 0.65 倍，皆與由平均通過率內插求得倍數相似。

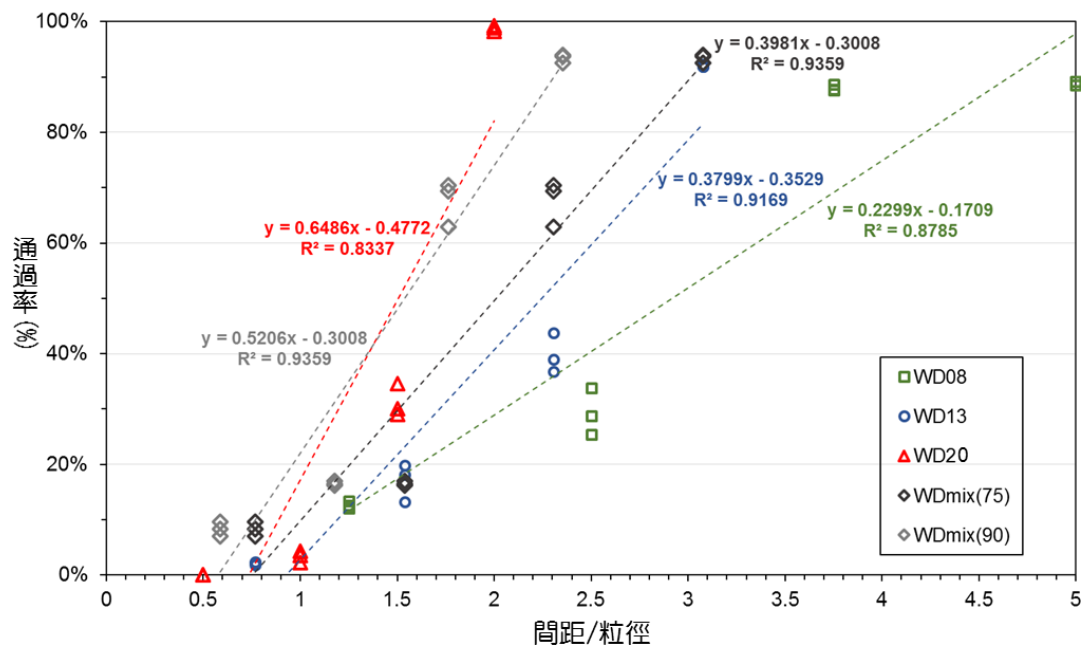


圖 6- 42 有漂流木實驗通過率與粒徑相對間距(間距/粒徑)之關係式

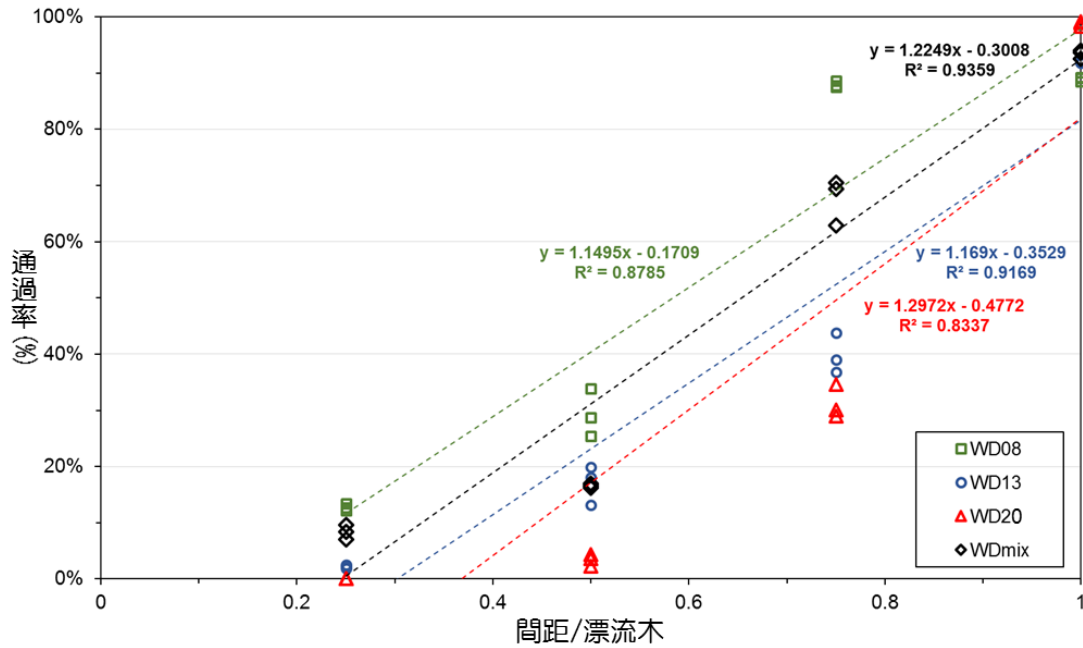


圖 6-43 有漂流木實驗通過率與漂流木長度相對間距(間距/漂流木)之關係式

三、無漂流木及有漂流木實驗比較

粒徑 0.8cm(圖 6-44)於無漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 57.7%，有漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 29.3%，兩者差異 28.4%，故漂流木於橫桿間距 2cm 較具有攔阻效益，此時漂流木長度為橫桿間距之 2 倍。橫桿間距 3cm 及 4cm，有漂流木通過率皆高於無漂流木通過率，因漂流木具有拖曳力，會帶動水流及較小之礫石流至下游。

粒徑 1.3cm(圖 6-45)於無漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 29.5%，有漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 17.1%，兩者差異 12.4%；無漂流木橫桿間距 3cm 通過率為 49.2%，有漂流木橫桿間距 3cm 通過率為 39.8%，兩者差異 9.4%，雖兩種間距皆有差異，但仍以橫桿間距 2cm 之差異較大。

粒徑 2cm(圖 6-46)於無漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 5.79%，有

漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 3.37%，兩者差異 2.42%；無漂流木橫桿間距 3cm 通過率為 36.7%，有漂流木橫桿間距 3cm 通過率為 31.2%，兩者差異 5.5%，故此粒徑在橫桿間距 3cm 有較大差異。因礫石本身粒徑較大，在橫桿間距 2cm 時本身易受攔阻，故其間距有無漂流木對粒徑 2cm 之通過率較無影響。

混合粒徑中(圖 6-47)無漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 23.1%，有漂流木橫桿間距 2cm 通過率為 16.6%，兩者差異 6.5%；無漂流木橫桿間距 3cm 通過率為 75.1%，有漂流木橫桿間距 3cm 通過率為 67.6%，兩者差異 7.5%。從有無漂流木比較得知橫桿間距 2cm 及 3cm 所造成通過率之差異相近，故混合粒徑可根據不同的礫石級配而有所調整。

由上述單一粒徑實驗可得知粒徑 0.8、1.3cm 於橫桿間距 2cm 為漂流木囚砂效益最佳，此時橫桿間距為漂流木長度之一半；粒徑 2cm 因礫石粒徑大，容易受攔阻，使漂流木最佳囚砂效益為橫桿間距 3cm，此間距大於漂流木長度之一半。混和粒徑於橫桿間距 2、3cm 漂流木囚砂效益差距不大，可根據粒徑級配中大小礫石之比例而調整其間距大小。而橫桿間距等於漂流木長度時皆為無攔阻狀態。

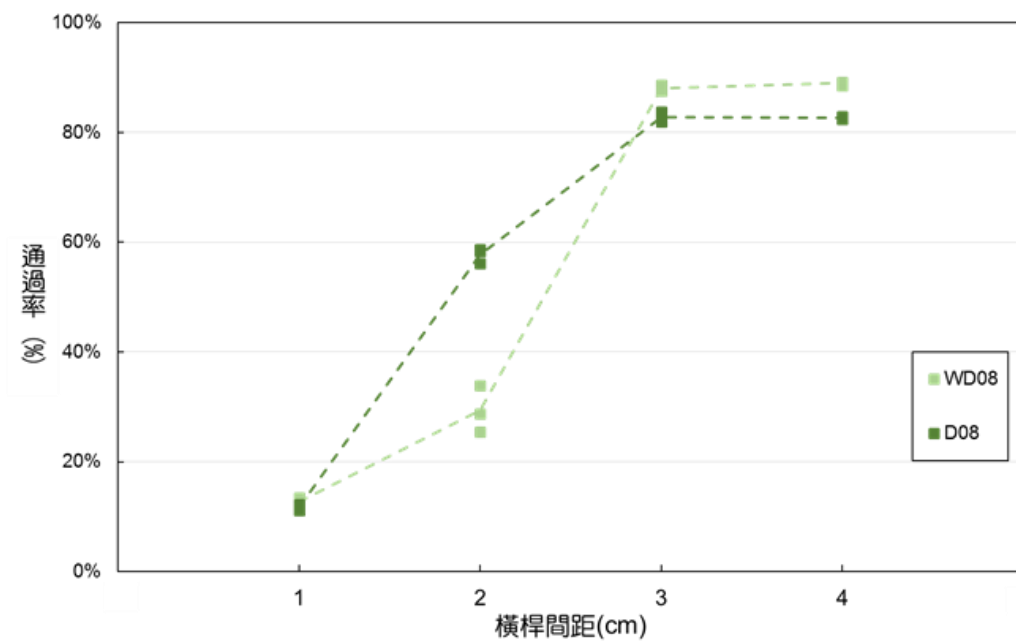


圖 6- 44 D08 與 WD08 通過率比較圖

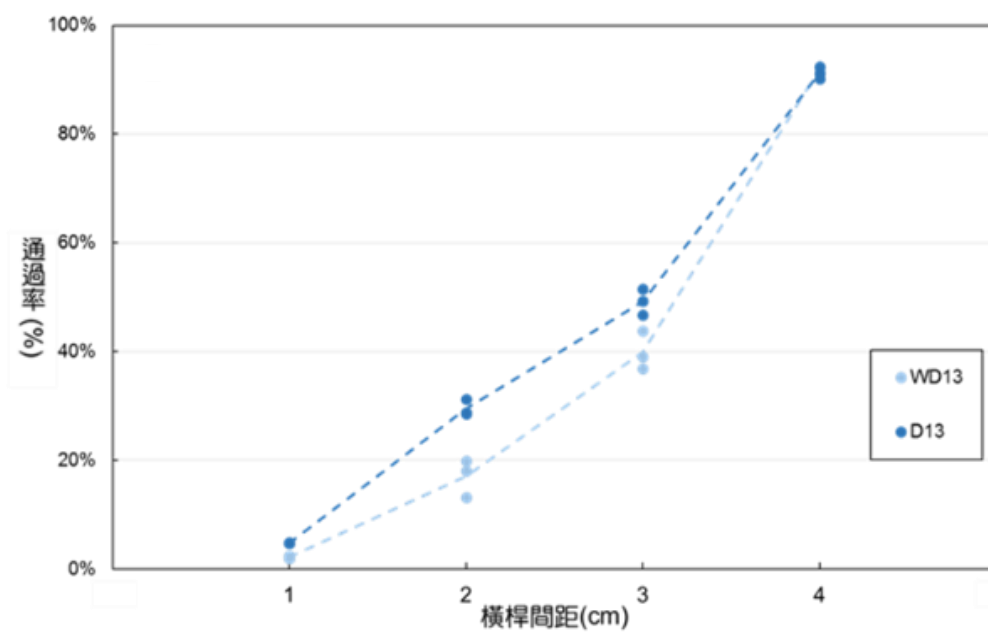


圖 6- 45 D13 與 WD13 通過率比較圖

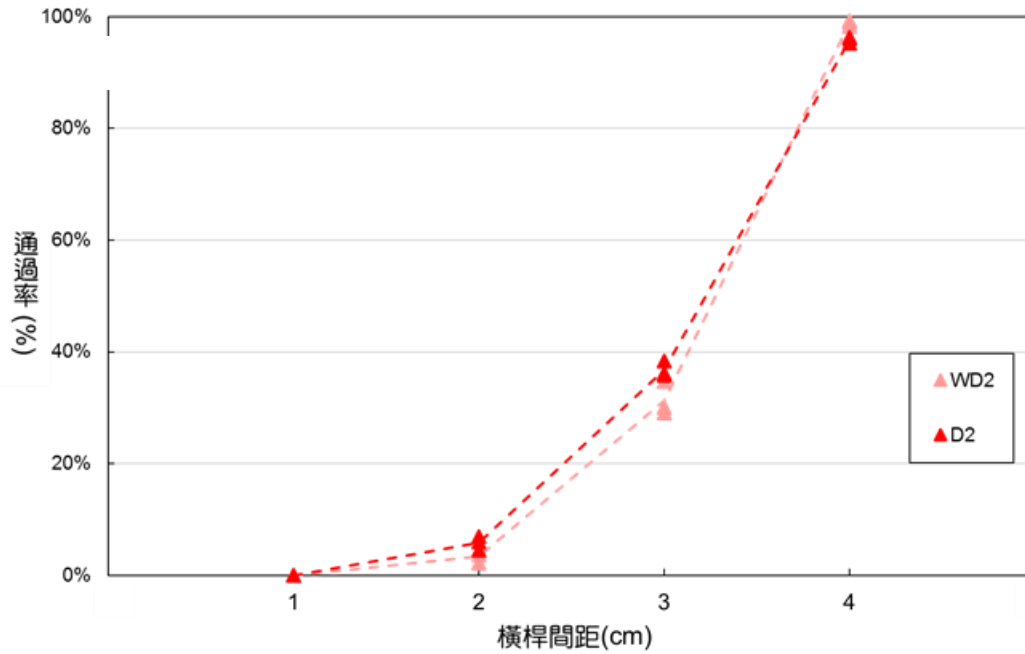


圖 6- 46 D20 與 WD20 通過率比較圖

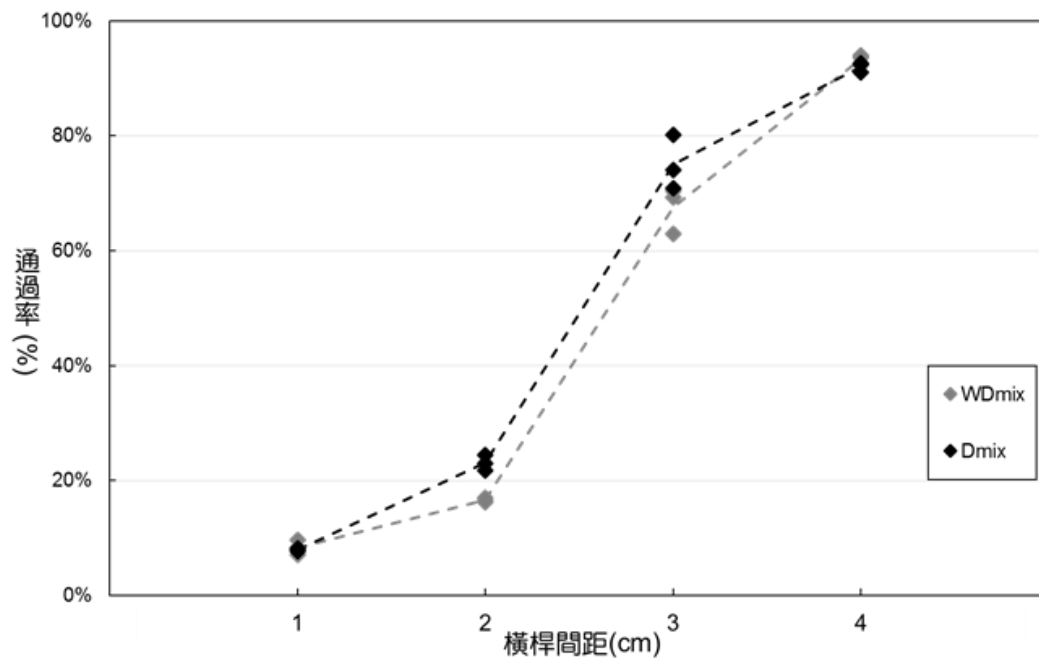


圖 6- 47 Dmix 與 WDMix 通過率比較圖

第三節 堆積歷程斜率分析

本節配合各實驗組別於壩體攔阻過程之發展，探討粒徑對不同橫

桿間距的壩體堆積歷程之變化。定義堆積初始歷程($T=0$)為土砂碰觸壩體之時刻(圖 6-48 A)，依序每 0.5 秒繪製一堆積線並計算其斜率。實驗後期因前方堆積土砂呈現穩定狀態，故只探討水流於後方堆積土砂之斜率(圖 6-48 B)。因橫桿間距 4cm 及 D08h3 的實驗組別皆是無攔阻，故不進行分析。由堆積歷程斜率，可以得知水流在此時刻帶動礫石堆積之能力，若斜率大代表此時水流有足夠能力帶動礫石向上堆積；斜率小代表水流能力較小無法帶動礫石向上堆積，僅能以較緩之型式向後方堆積。

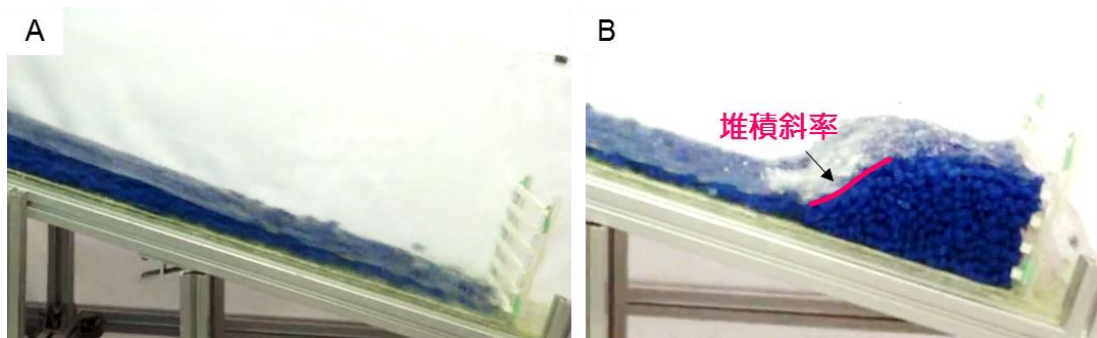


圖 6-48 堆積歷程 (A)初始歷程 (B)堆積斜率

一、D08堆積歷程斜率

D08h1 實驗(圖 6-49 A)，因本身粒徑體積小，造成初期堆積高度較矮($T=0.5s$)，隨著水流逐漸向上爬升，礫石向壩體上方卡合，使堆積高度變高斜率變大($y'=1.29$)。受壩體攔阻較多後，堆積體因孔隙小，使後方產生較多迴水，流速變慢，無法將礫石向上堆積，使後期土砂堆積斜率較小。

D08h2 實驗(圖 6-49 B)，由於橫桿間距較粒徑大使礫石不易受攔阻，初期斜率主要為礫石及水流撞擊橫桿，水位抬升之斜率($y'=0.33$)。一段時間後，礫石於壩體下方產生一拱型之堆積，後方土砂進而向上堆積，形成抬升段使斜率變大($y'=0.48$)。隨幾段抬升段後，後續水流

受迴水影響，使坡度變小($y' = 0.34$)。

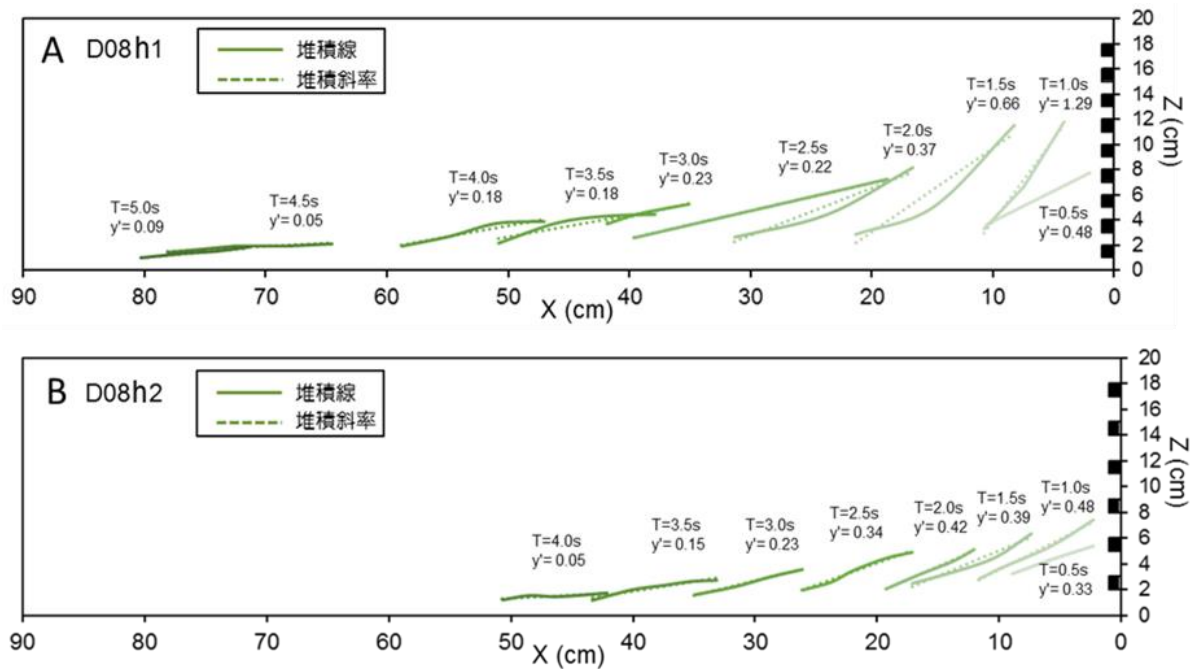


圖 6- 49 D08 堆積歷程斜率 (A)D08h1 (B)D08h2

二、D13 堆積歷程斜率

D13h1 實驗(圖 6- 50 A)，因橫桿間距小，礫石不易通過壩體，水流挾帶礫石沿壩體向上堆積，於初期形成較大斜率($y' = 1.04$)。壩體受堆積後，後續礫石向後發展堆積，待後續水量及礫石逐漸減少，使後期堆積斜率逐漸變小至堆積結束。

D13h2 實驗(圖 6- 50 B)，因橫桿間距較大，礫石不易卡合，故前期堆積速度慢，斜率較緩。待橫桿間距逐漸與礫石卡合後，後續礫石不易通過壩體，礫石開始向上抬升並堆積，形成抬升段堆積斜率變大($y' = 0.9$)。抬升一段時間後，後續水量及礫石變少，堆積斜率逐漸變小。

D13h3 實驗(圖 6- 50 C)，初期堆積發展與 D13h2 實驗一致。待壩體下方橫桿逐漸與礫石卡合後，堆積開始向上抬升，斜率變大($y' = 0.91$)。礫石向上堆積後，因橫桿間距大，使堆積結構不穩定，易受水

流推移，造成堆積斜率變小($y'=0.59$)。待堆積體穩定後，礫石以較大斜率向上堆積($y'=0.99$)。後期堆積斜率也因水量及礫石減少而變小。

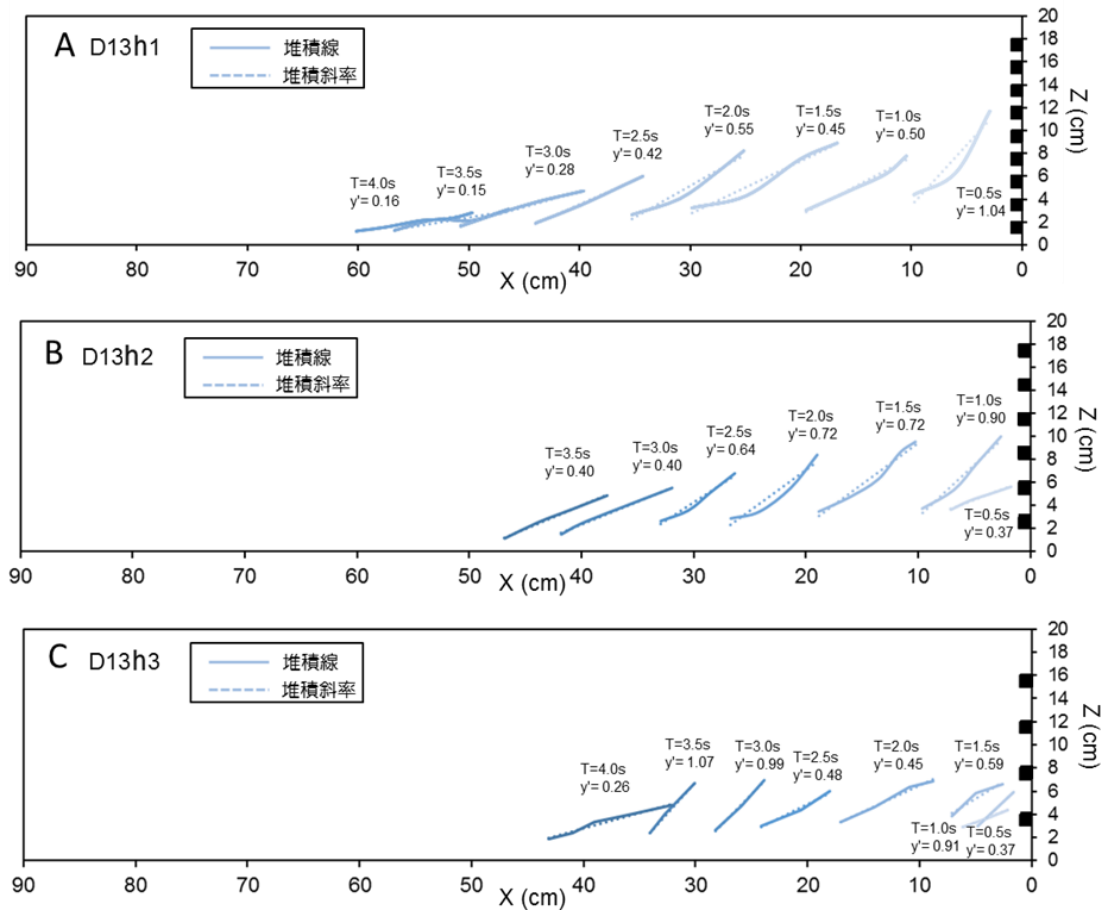


圖 6- 50 D13 堆積歷程斜率(A)D13h1 (B)D13h2 (C)D13h3

三、D20堆積歷程斜率

D20h1 實驗(圖 6- 51 A)，因橫桿間距小礫石易受攔阻，水流向上發展，初期堆積斜率大。後續水流與礫石持續向後方堆積，待後方水量及礫石量減少，使斜率由大變小至實驗結束。

D20h2 實驗(圖 6- 51 B)，其堆積斜率皆大於 D20h1 實驗，因通過的礫石較 D20h1 多，堆積於壩內土砂減少，使各歷程的堆積斜率較 D20h1 實驗大。

D20h3 實驗(圖 6- 51 C)，初期因橫桿間距較大，不易與礫石相互卡合，初期斜率小。礫石與橫桿間距卡合後，礫石向上堆積，形成抬

升段斜率變大。

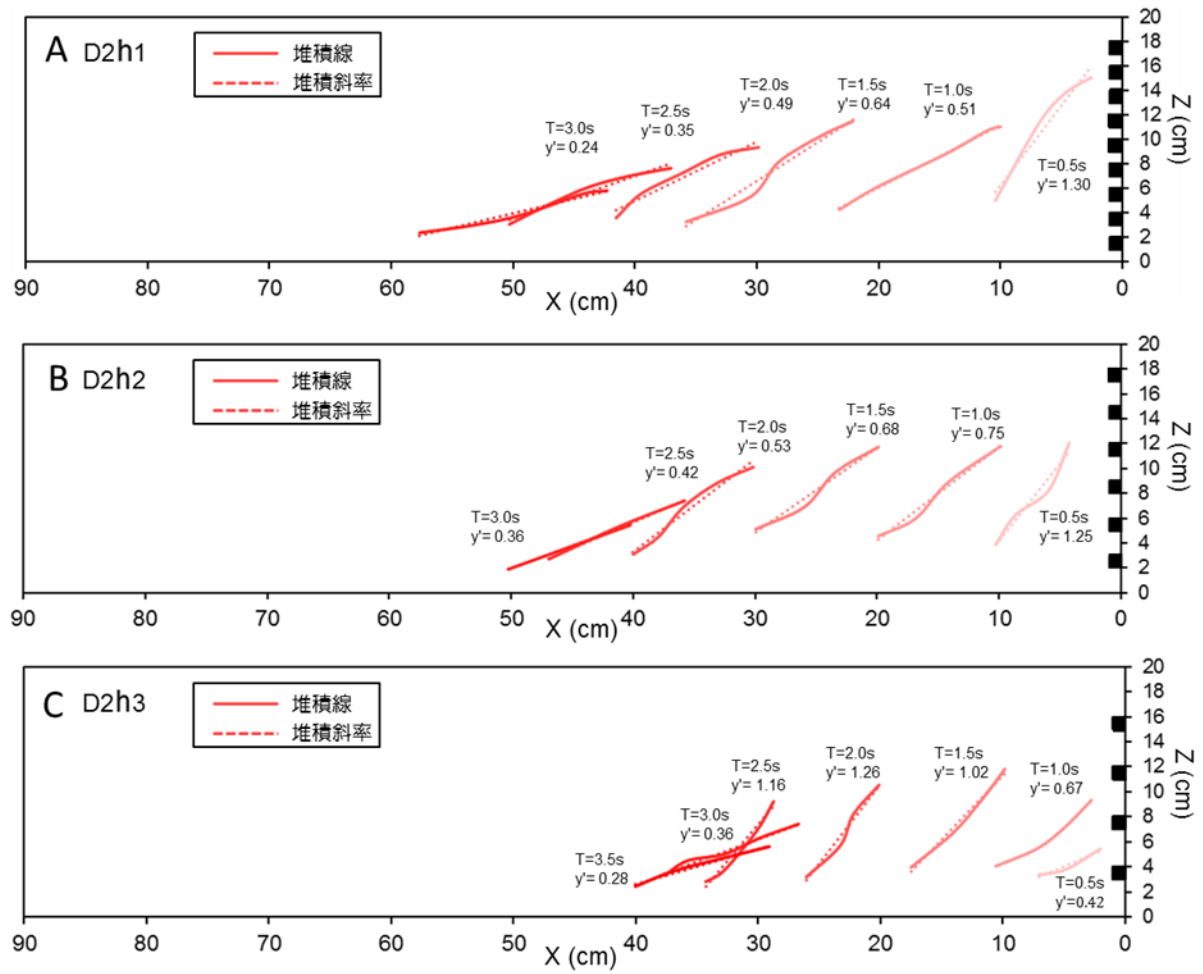


圖 6- 51 D20 堆積歷程斜率(A)D20h1 (B)D20h2 (C)D20h3

四、Dmix堆積歷程斜率

混合粒徑堆積歷程斜率(圖 6-52)皆是初期堆積斜率緩，因礫石仍處相互卡合階段。待卡合穩定後，礫石向上堆積，形成抬升段，此時斜率最大，幾段抬升後，較小礫石易卡於大礫石孔隙中，使堆積量體孔隙小，造成後方迴水多，後方流速變慢，使後續土砂堆積斜率變小。

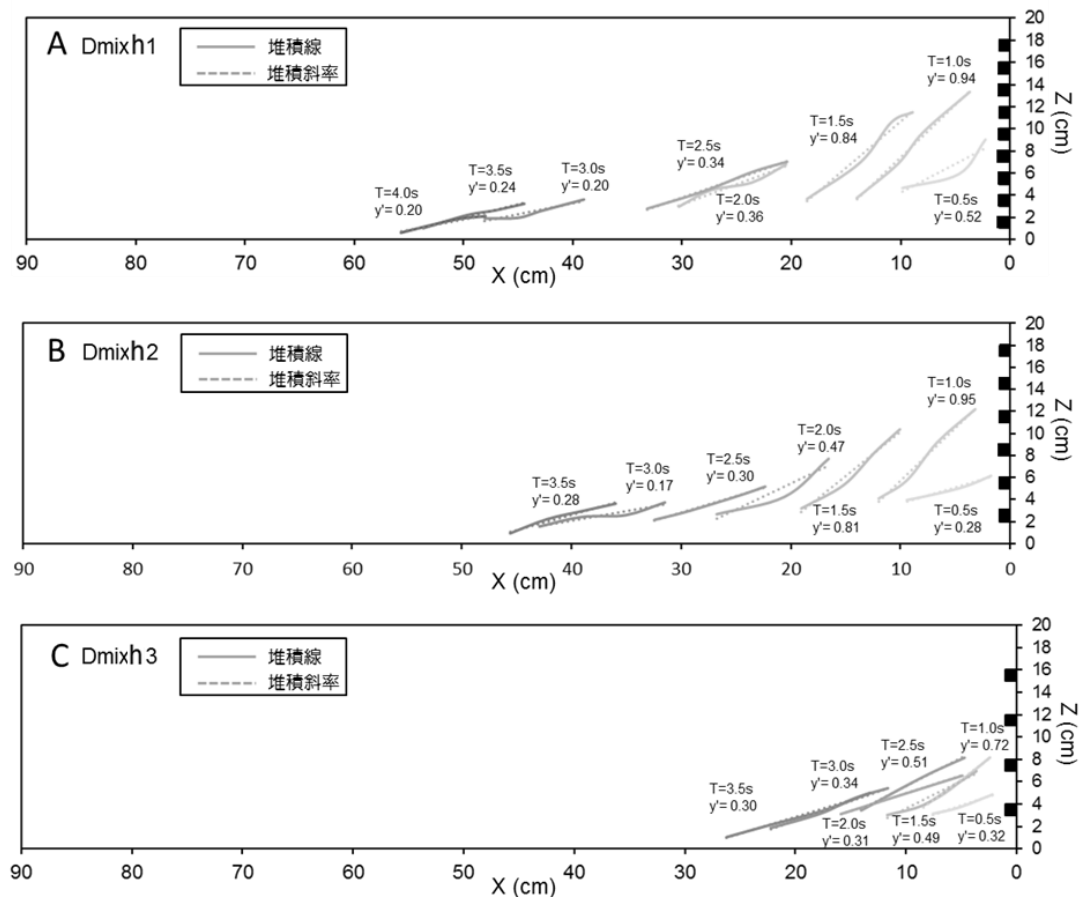


圖 6- 52 Dmix 堆積歷程斜率(A)Dmixh1 (B)Dmixh2 (C)Dmixh3

五、WD08 堆積歷程

WD08h1 實驗(圖 6- 53 A)堆積初期，受漂流木拖曳力影響，帶動水流及礫石發展，斜率較大。堆積後期，因堆積體孔隙小，後方迴水增加，故後續堆積歷程斜率較小。

WD08h2 實驗(圖 6- 53 B)堆積初期因礫石不易攔阻，堆積斜率小。礫石與橫桿間距卡合後，由於漂流木囚砂效益，使壩體後方堆積高度變高斜率大。後期因堆積體孔隙小，水流不易排出，造成較多迴水，使斜率變小。

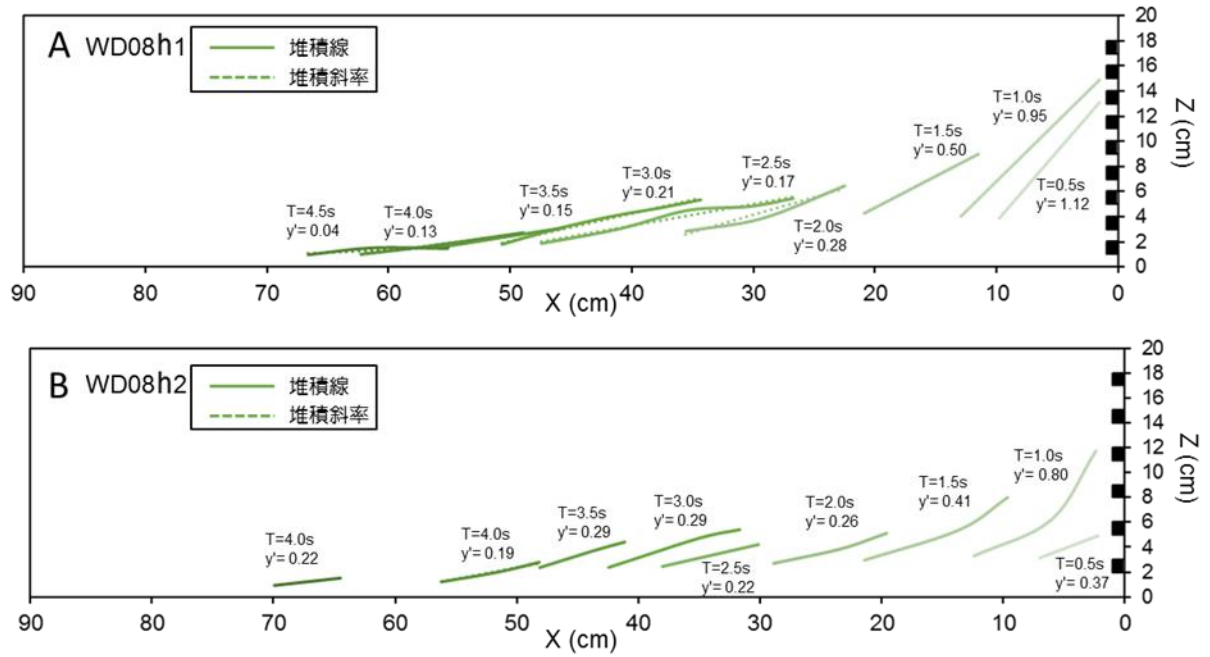


圖 6- 53 WD08 堆積歷程斜率(A) WD08h1 (B) WD08h2 (C) WD08h3

六、WD13堆積歷程

W138S1 實驗(圖 6- 54 A)，堆積初期，橫桿間距小易受攔阻，又因漂流木拖曳力影響帶動水流及礫石向上發展使斜率大。後續因漂流木通過率小使後方跟著迴水滾動的漂流木較多，產生較大的拖曳力，使後續的斜率仍較大，後續因水量及礫石減少，使斜率變緩至實驗結束。

WD13h2 及 WD13h3 實驗(圖 6- 54 B、C)，堆積初期因橫桿間距大，礫石不易攔阻使斜率較緩，之後礫石於壩體下方受堆積後，水流向上發展，水流帶動礫石向上卡合，形成抬升段斜率大。後期堆積斜率因 WD13h2 實驗受漂流木影響通過率較小，壩內堆積礫石多斜率小；WD13h3 實驗通過率大於 WD13h2 實驗通過率，壩內堆積礫石少斜率大。

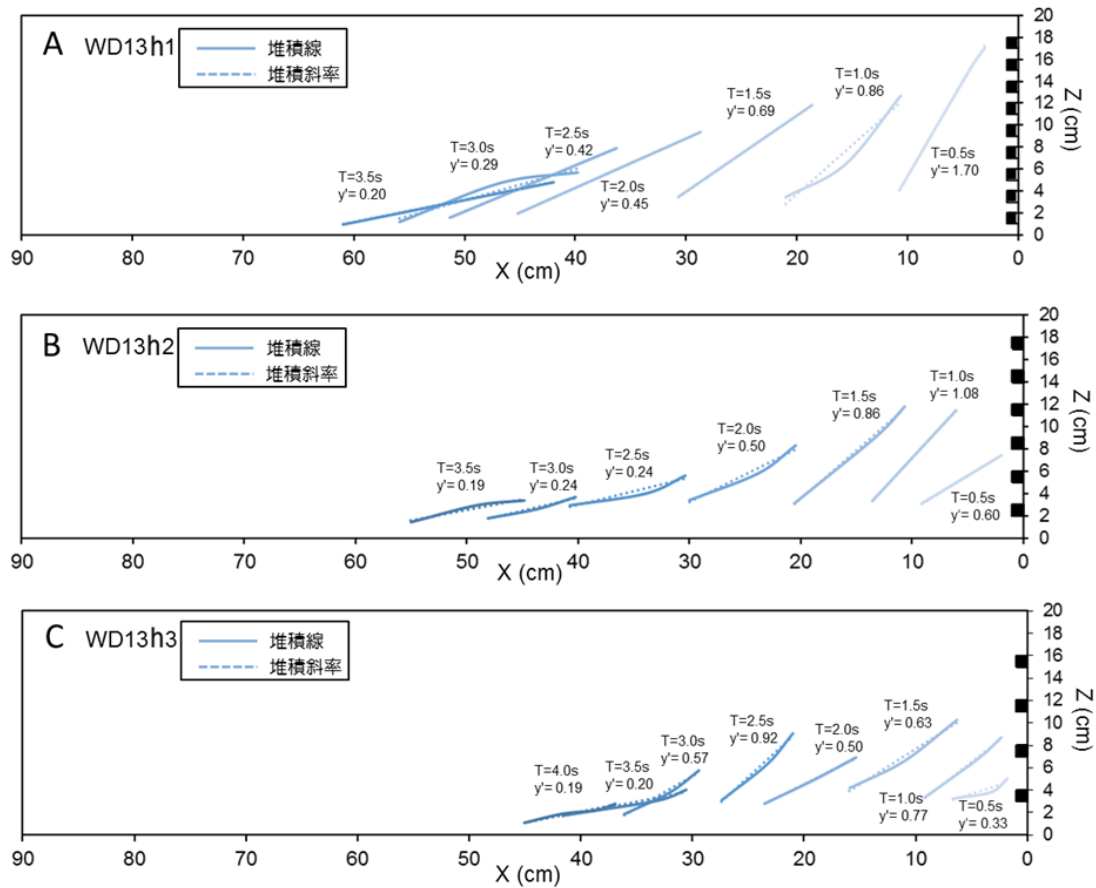


圖 6- 54 WD13 堆積歷程斜率(A) WD13h1 (B) WD13h2 (C) WD13h3

七、WD20堆積歷程

WD20h1 實驗(圖 6- 55A)，堆積初期因礫石受壩攔阻，水流向上發展，在漂流木拖曳力及橫桿間距小之影響使斜率大。後期堆積斜率，受較多漂流木於後方迴水滾動，後方礫石因較大之拖曳力，使後期斜率仍較大。

WD20h2 及 WD20h3 實驗(圖 6- 55 B、C)，初期受漂流木遮蔽作用使堆積高度變高斜率變大，後期因漂流木囚砂效益，較多礫石於壩內堆積使斜率變小。

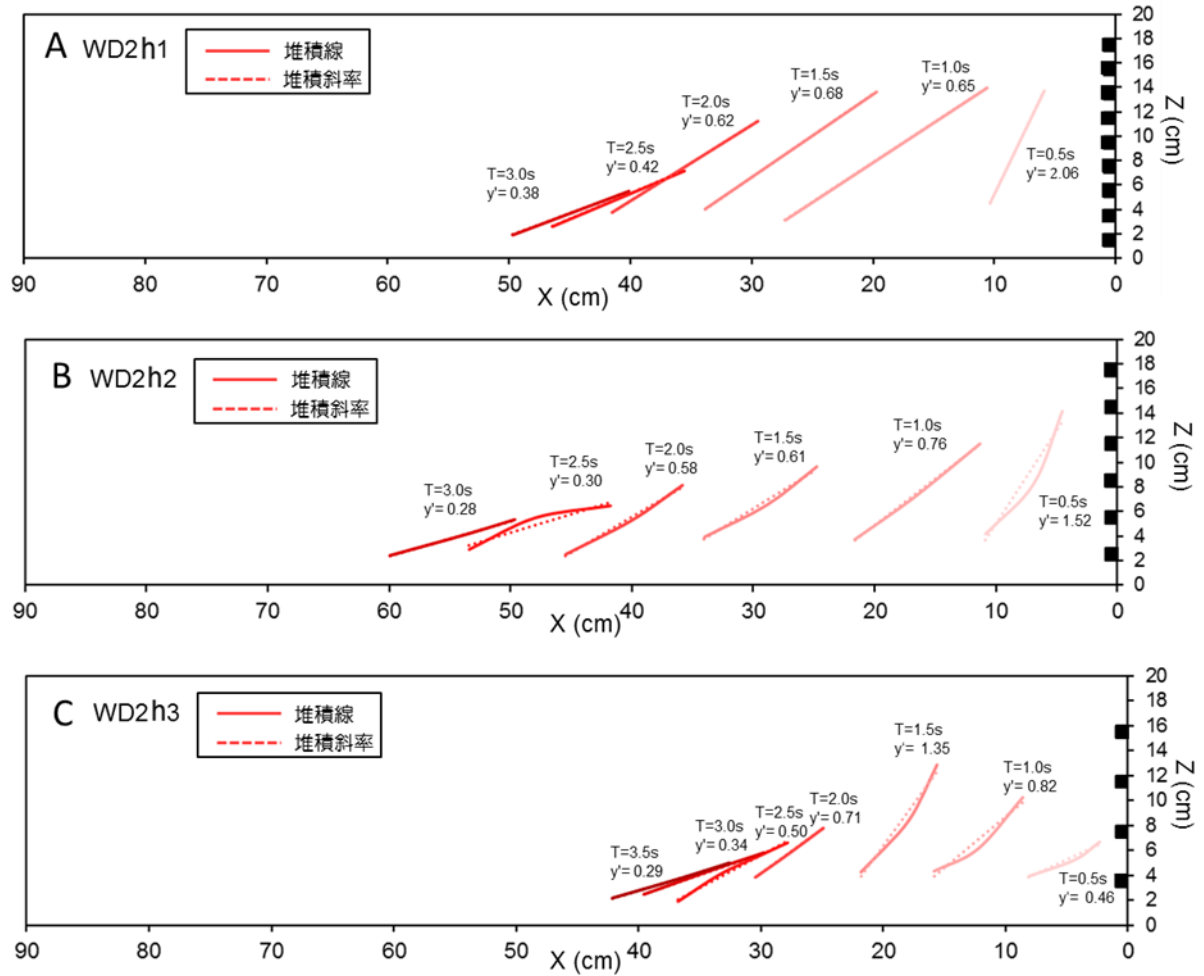


圖 6- 55 WD20 堆積歷程斜率(A) WD20h1 (B) WD20h2 (C) WD20h3

八、WDmix堆積歷程

WDmixh1 實驗(圖 6- 56 A)，因橫桿間距小礫石易受攔阻，因漂流木拖曳力之影響，所帶動的水流較高，故 $T=0.5s$ 堆積斜率較 WDmixh1、WDmixh2 實驗大。

WDmixh2、WDmixh3 實驗(圖 6- 56 B、C)因橫桿間距大，使礫石需花較多時間與橫桿進行卡合，因此在 $T=0.5$ 堆積斜率小，需等待礫石卡合於間距上，才會出現抬升段，形成最大之斜率。WDmixh2 實驗在 $T=1.5s$ 、WDmixh3 實驗在 $T=2.0s$ 出現較大斜率，因橫桿間距大，礫石卡合時間較久，出現最大斜率越晚。

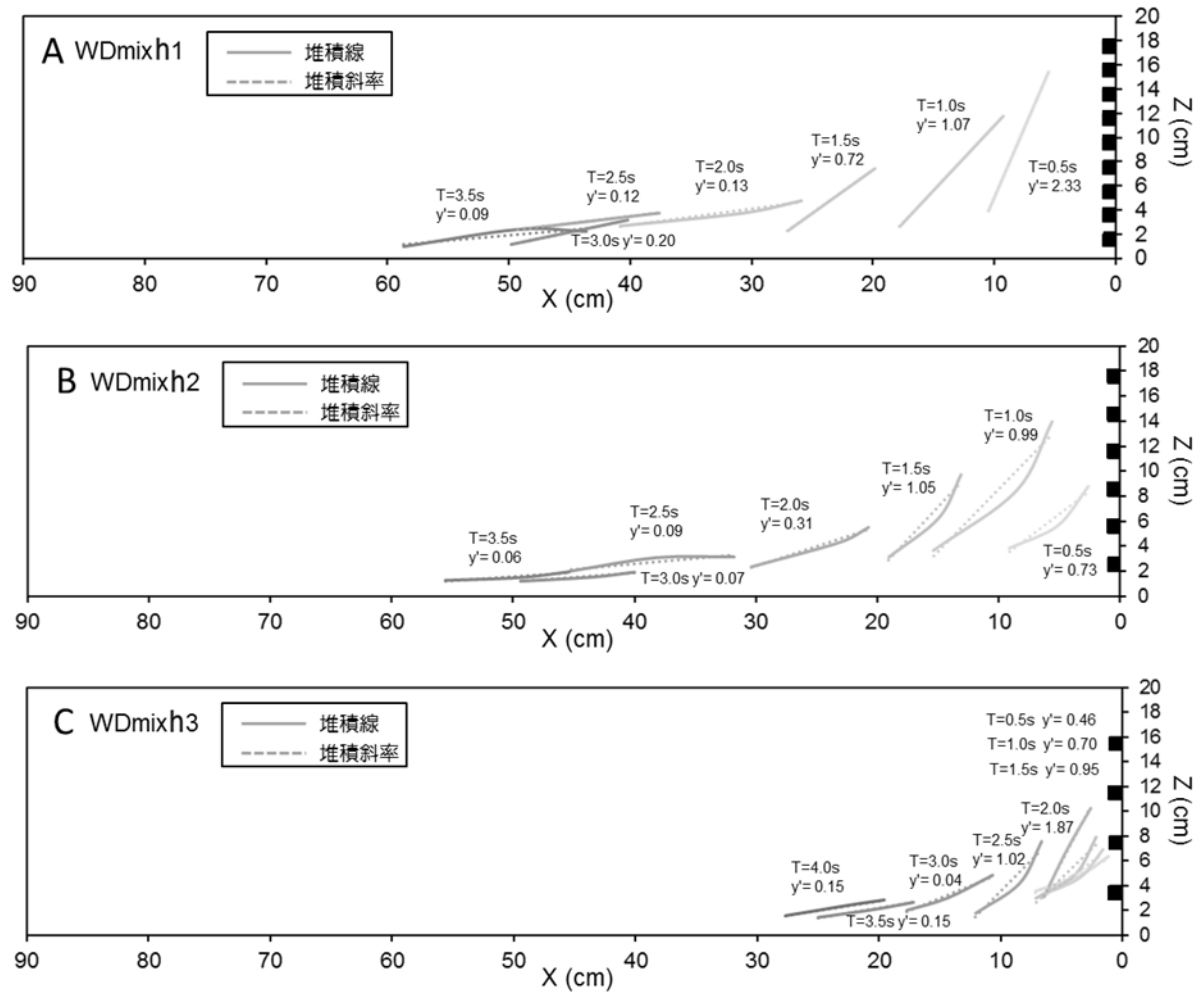


圖 6- 56 WDMix 堆積歷程斜率(A) WDMixh1 (B) WDMixh2 (C)

WDMixh3

九、同粒徑實驗下有無漂流木對堆積歷程之比較

D08 及 WD08 實驗數據比較(表 6- 7)，WD08h1 及 WD08h2 堆積歷程發展大致與 D08h1 及 D08h2 相似，僅斜率大小之差異。在 $T = 0.5s$ 因漂流木拖曳力影響使斜率較大；堆積後受漂流木因砂效益，加劇迴水現象，使 $T = 2.5s \sim 4.0s$ 斜率較小。

D13 及 WD13 實驗數據比較(表 6- 7)，在 $T = 0.5s$ WD13h1 實驗受漂流木拖曳力影響使堆積斜率較 D13h1 實驗大； $T = 1.0s \sim 3.0s$ ，WD13h1 實驗因橫桿間距小，後方受攔阻之漂流木多，後方滾動拖曳

力大，使斜率較 D13h1 實驗大。WD13h2 實驗在 $T = 0.5s$ 堆積斜率因漂流木拖曳力及囚砂效益，使礫石向壩體上方堆積，堆積斜率較 D13h2 實驗大； $T = 2.0s \sim 3.5s$ ，WD13h2 實驗因漂流木使礫石於壩體通過率減少，壩內礫石堆積量多，使斜率較 D13h2 實驗小。WD13h3 實驗堆積歷程發展與 D13h3 實驗相似，在 $T = 0.5s$ 礫石未與橫桿間距卡合，堆積斜率小，卡合後會形成抬升段使 $T = 1.0s$ 堆積斜率變大，兩者皆會在初期堆積抬升後，因堆積體不穩定，使斜率變緩，待堆積體穩定後，礫石堆積會變高，出現第二次較大斜率。

D20 及 WD20 實驗數據比較(表 6- 7)，WD20h1 實驗在 $T = 0.5s$ 堆積斜率較 D20h1 實驗大，當水流挾帶礫石及漂流木沿壩體上方發展，漂流木因拖曳力影響，使堆積斜率大； $T = 1.5s \sim 3.0s$ WD20h1 實驗因壩內受攔阻的漂流木較多，使後方迴水時，漂流木拖曳力大較易帶動礫石向上堆積，故斜率大於 D20h1 實驗。WD20h2 及 WD20h3 實驗在 $T = 0.5s$ 堆積斜率皆因漂流木拖曳力及囚砂效益使堆積高度變高，故斜率較 D20h2 及 D20h3 實驗大； $T = 2.0s \sim 3.0s$ ，WD20h2 實驗漂流木囚砂影響，使壩內礫石堆積量變多故斜率較 D20h2 實驗小， $T = 2.0s \sim 3.5s$ ，WD20h3 實驗也因此原因斜率小於 D20h3 實驗。因 WD20h3 實驗漂流木囚砂量較 WD20h2 實驗多，故 WD20h3 與 D20h3 實驗斜率差異較為明顯。

Dmix 及 WDMix 實驗數據比較(表 6- 7)， $T = 0.5s$ WDMix 實驗皆因漂流木拖曳力影響，使斜率皆大於 Dmix 實驗。後期堆積斜率皆因前方堆積體空隙小，迴水滲流速度慢，使後方迴水量多，故後續土砂以較緩的斜率堆積；又因 WDMix 實驗通過率較 Dmix 實驗小，上游所囚土砂量多，因堆積量多及迴水現象，使 WDMix 實驗斜率較 Dmix

實驗小。

若不考慮有無漂流木堆積斜率之大小，僅探討其堆積歷程斜率之發展，可得知有無漂流木堆積歷程斜率發展之共通點，粒徑 0.8cm 堆積初期斜率受橫桿間距影響，橫桿間距小，攔阻較多礫石，斜率較大；橫桿間距大，礫石易通過，斜率較小，須等礫石進行卡合後，形成抬升段，才有較大斜率產生。堆積後期斜率，兩者皆受迴水影響，斜率最為平緩，彼此差異不大。

粒徑 1.3cm 在橫桿間距較小時，前期堆積斜率較陡；橫桿間距大時，須等礫石進行卡合後，才會形成較陡之斜率。堆積發展中期，橫桿間距 2cm 斜率大於橫桿間距 1cm，因間距大通過土砂多，壩內土砂少，故堆積斜率大。橫桿間距 3cm 因堆積結構不穩定，斜率緩，待結構穩定後，斜率陡。發展後期因後續水量及礫石減少，皆是以較小斜率堆積至實驗結束。

粒徑 2cm 在橫桿間距小時，初期堆積斜率較陡；橫桿間距大時，須等待礫石與橫桿間距逐漸卡合，形成一抬升段並出現較大斜率。發展中的堆積斜率會因通過率而有所改變，通過率小壩內土砂多，堆積斜率緩；通過率大壩內土砂少，堆積斜率陡。

混合粒徑會因橫桿間距的大小所造成的斜率會有些微變化，雖然整體堆積歷程斜率皆是在卡合未穩定前以較緩形式堆積，卡合穩定後向上抬升，形成抬升段以較陡形式堆積，但因橫桿間距大，礫石不易受攔阻，故需較長時間才會形成抬升段。

表 6-7 有無漂流木實驗堆積歷程發展斜率之比較

實驗組別	堆積歷程 T(s)							
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

D08h1	0.48	1.29	0.66	0.37	0.25	0.23	0.18	0.18
WD08h1	1.11	0.95	0.50	0.28	0.17	0.21	0.15	0.13
D08h2	0.32	0.48	0.39	0.42	0.34	0.23	0.15	0.05
WD08h2	0.37	0.80	0.41	0.26	0.22	0.29	0.29	0.19
D13h1	1.04	0.50	0.45	0.55	0.42	0.28	0.15	0.16
WD13h1	1.70	0.89	0.69	0.45	0.42	0.29	0.20	--
D13h2	0.37	0.90	0.72	0.72	0.64	0.40	0.40	--
WD13h2	0.60	1.08	0.86	0.50	0.24	0.24	0.19	--
D13h3	0.37	0.91	0.59	0.45	0.48	0.99	1.07	0.26
WD13h3	0.33	0.77	0.63	0.50	0.92	0.57	0.20	0.19
D20h1	1.30	0.51	0.64	0.49	0.35	0.24	--	--
WD20h1	2.06	0.65	0.68	0.62	0.42	0.38	--	--
D20h2	1.25	0.75	0.68	0.74	0.53	--	--	--
WD20h2	1.52	0.76	0.61	0.58	0.30	0.28	--	--
D20h3	0.42	0.67	1.02	1.26	1.16	0.36	0.28	--
WD20h3	0.46	0.82	1.35	0.71	0.52	0.34	0.29	--
Dmixh1	0.52	0.94	0.84	0.36	0.34	0.20	0.24	0.20
WDmixh1	2.33	1.07	0.72	0.13	0.12	0.21	0.09	--
Dmixh2	0.28	0.95	0.81	0.47	0.30	0.17	0.28	--
WDmixh2	0.73	0.99	1.05	0.31	0.09	0.07	0.06	--
Dmixh3	0.32	0.72	0.49	0.31	0.51	0.34	0.30	--
WDmixh3	0.46	0.70	0.95	1.87	1.02	0.40	0.15	0.15

第四節 堆積形貌分析

一、D08及WD08實驗堆積形貌比較

由圖 6- 57 得知，WD08 實驗堆積形貌在 $x=1\sim 10\text{cm}$ 斜率皆大於

D08 實驗，因漂流木受水流影響發展為垂直方向並與橫桿間距進行卡合，使更多礫石受攔阻，造成堆積高度變高，又因漂流木的拖曳力使水流向上發展較高。WD08 實驗整體斜率皆大於 D08 實驗，因前方堆積高度變高，進而影響整體堆積斜率，使整體斜率皆變大。WD08h1 實驗礫石受壩體攔阻後，較多漂流木無法通過，跟著迴水於後方旋轉，後續礫石受漂流木拖曳力影響，後方堆積高度變高，因向上堆積使後方無礫石堆積，故堆積長度較 D08h1 實驗短；WD08h2 實驗堆積長度大於 D08h2 實驗，因此間距漂流木囚砂效益最佳，使壩內堆積礫石較無漂流木多，故後方礫石堆積長度長。當礫石受攔阻時，水流向上發展，導致漂流木呈垂直水流方向，進而受壩體攔阻，使後方礫石攔阻率變多，壩後堆積高度較無漂流木實驗高，故 WD08 實驗堆積高度皆高於 D08 實驗。

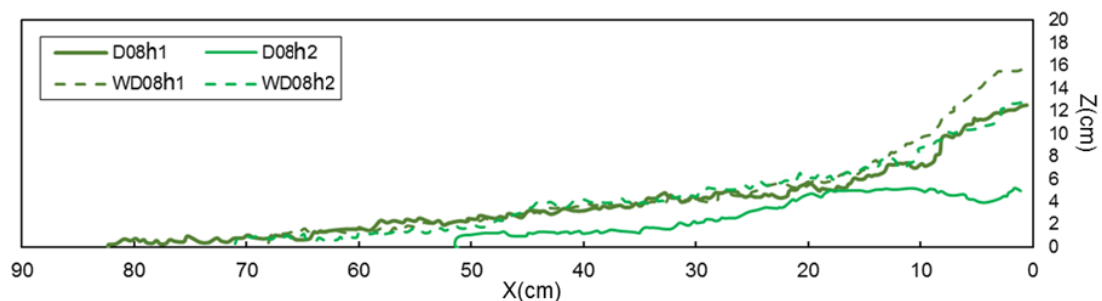


圖 6- 57 D08 及 WD08 實驗堆積形貌

二、D13 及 WD13 實驗堆積形貌比較

WD13h2 及 WD13h3 實驗因漂流木囚砂效益使 $x=1\sim10\text{cm}$ 斜率及堆積高度皆大於 D13h2 及 D13h3 實驗；WD13h1 實驗因礫石在小間距就易受攔阻，故有無漂流木所囚之體積差異不大，故 $x=1\sim10\text{cm}$ 斜率及堆積高度與 D13h1 實驗差異不大。WD13h1 實驗攔阻漂流木多，使較多漂流木跟著迴水向後方滾動形成的拖曳力大。後續堆積礫石受

拖曳力影響，使礫石堆積抬升，由於礫石向上堆積，礫石無法向後方堆積，故堆積長度較 D13h1 實驗短；WD13h2 實驗因漂流木於此橫桿間距囚砂率最高，故堆積長度較長；WD13h3 與 D13h3 堆積長度相似，雖然 WD13h3 實驗通過率較 D13h3 實驗小，但所攔阻的礫石皆堆積於前方，因此壩後堆積高度較高。WD13 實驗皆因漂流木囚砂效益使壩體後方堆積高度高於 D13 實驗。雖然壩後堆積高度皆變高，但 WD13h1 實驗對礫石囚砂影響較小，整體斜率不變；WD13h2 實驗因通過率降低，使堆積長度變長，整體斜率較 D13h2 實驗小；WD13h3 實驗後續礫石會向上堆積，整體斜率較 D13h3 實驗大。

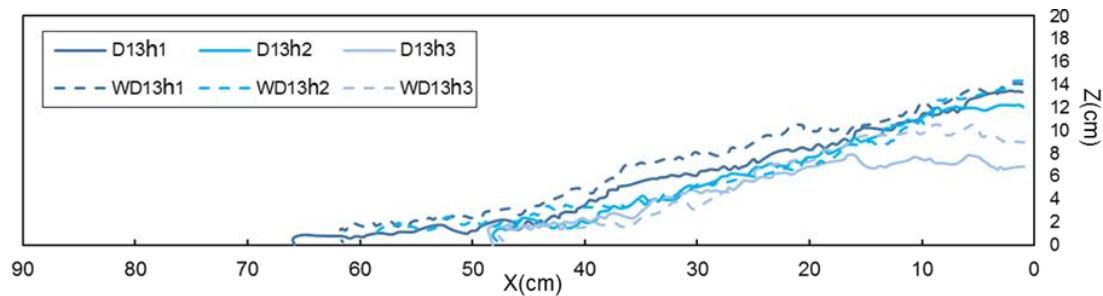


圖 6- 58 D13 及 WD13 實驗堆積形貌

三、D20及WD20實驗堆積形貌比較

由圖 6- 59 得知，D20h1 實驗堆積長度較 WD20h1 實驗長，因 D20h1 與 WD20h1 實驗礫石較橫桿間距大，使有無漂流木對通過率較無影響，代表礫石攔阻於壩體體積內，但 WD20h1 實驗受漂流木拖曳力作用，使堆積中間段高度較高，故堆積長度較短。WD20h2 實驗因漂流木囚砂效益影響，使通過率較無漂流木少，故堆積於壩內之礫石多，因此堆積長度較 D20h2 實驗長。雖然 WD20h3 實驗攔阻之礫石較 D20h3 實驗多，但因 WD20h3 實驗前方堆積高度較高，故使後方堆積長度較短。

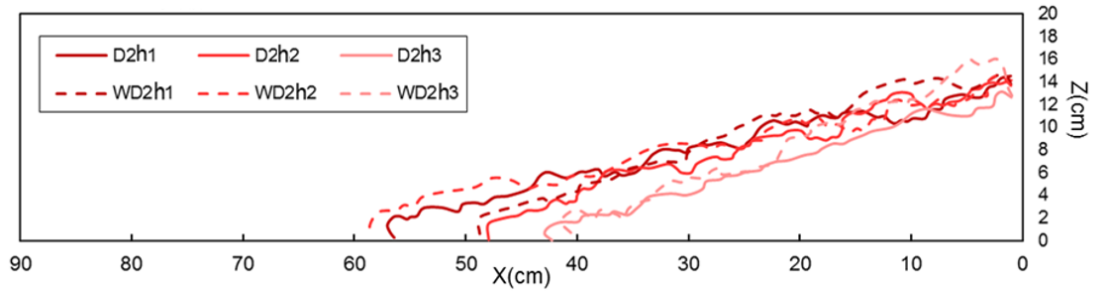


圖 6- 59 D20 及 WD20 實驗堆積形貌

四、Dmix及WDmix實驗堆積形貌比較

Dmix 及 WDMix 實驗整體堆積形貌比較(圖 6- 60)，皆受漂流木攔阻之影響，使更多土砂上堆積，故 WDMix 實驗壩後堆積高度皆高於 Dmix 實驗。因 WDMixh1 實驗前方堆積高度高，使後續土砂無法於後方堆積，使堆積長度較 Dmixh1 實驗短。WDMixh2 實驗雖前方堆積高度高，但因砂能力較 Dmixh2 實驗好，故堆積長度較長。WDMixh3 實驗也因此因素使堆積長度較長。WDMix 實驗壩後堆積高度高使整體斜率較 Dmix 實驗大。

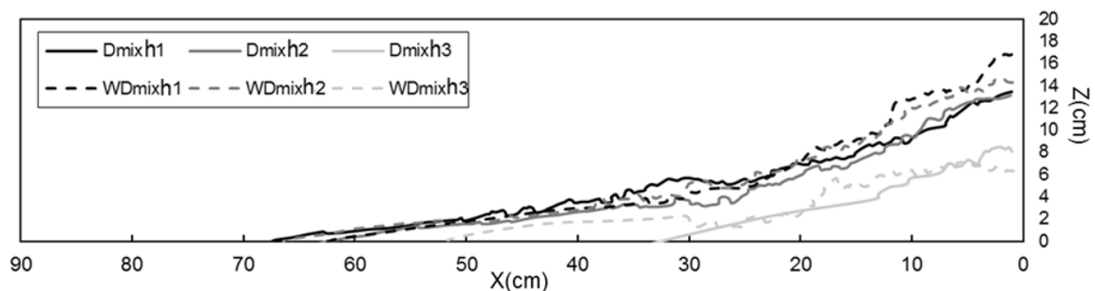


圖 6- 60 Dmix 及 WDMix 實驗堆積形貌

第五節 有漂流木實驗漂流木沉積位置

WD08 實驗(圖 6- 61)，在橫桿間距 1 及 2cm 中漂流木分佈位置皆堆積於前方，因攔阻過程中部分水流挾帶漂流木並受壩體攔阻，使漂流木沉積於壩頂處；部分水流跟著迴水向後方滾動，由於後方迴水水量多，迴水滲流慢，促使在退水期間水流有足夠推力將漂流木推至前方沉積。

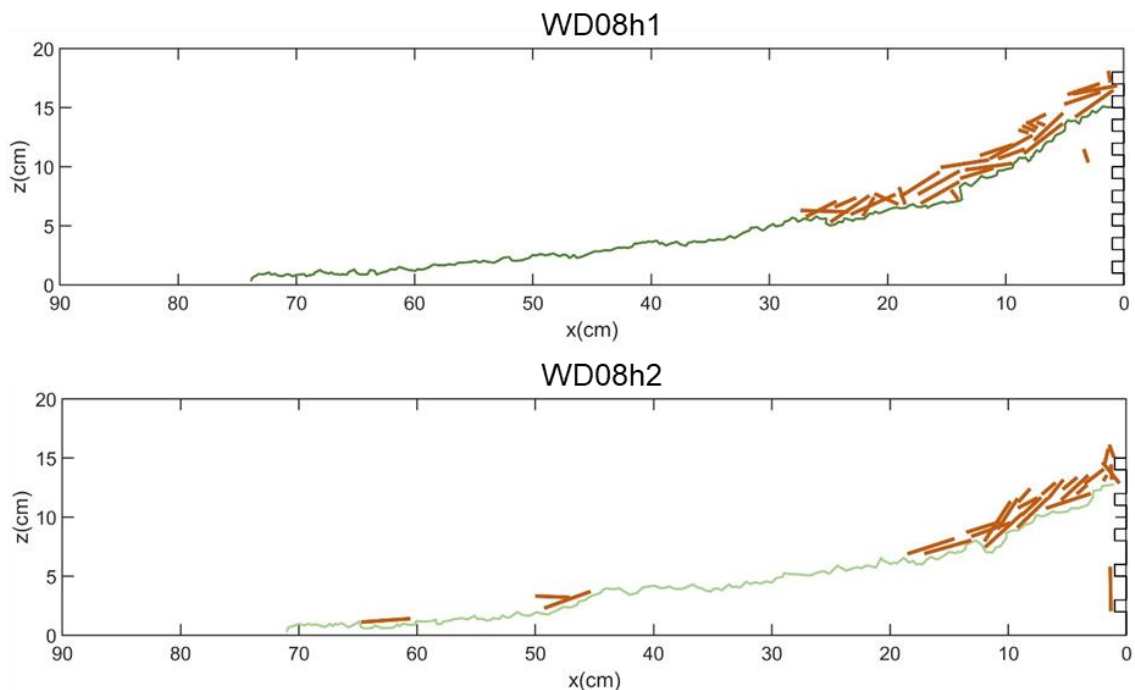


圖 6- 61 WD08 實驗漂流木分佈位置

WD13 實驗(圖 6- 62)，漂流木分佈位置在橫桿間距 1cm，漂流木沉積分佈部分因水流挾帶漂流木流出壩體，漂流木受壩體阻攔而沉積於壩頂後方處；部分漂流木跟著迴水向後滾動，待迴水退去時，因後方堆積高度受漂流木拖曳力影響仍較高，而水流滲流快，水流無足夠推力將漂流木向前推，故沉積於較陡處。橫桿間距 2cm 漂流木沉積分佈也是部分受壩體攔阻沉積於壩頂後方；部分因後方堆積較緩，使水流有足夠推力將漂流木推至前方皆沉積於前方處。橫桿間距 3cm，在礫石堆積前期漂流木隨水流漂至壩體處，因橫桿間距大不易攔阻漂流

木，使大部分漂流木流出壩體，隨礫石於後方堆積升高產生迴水，前方水流因迴水使水量不足無法推動使漂流木沉積。迴水退去後，漂流木受較突出之礫石攔阻並沉積於此處。

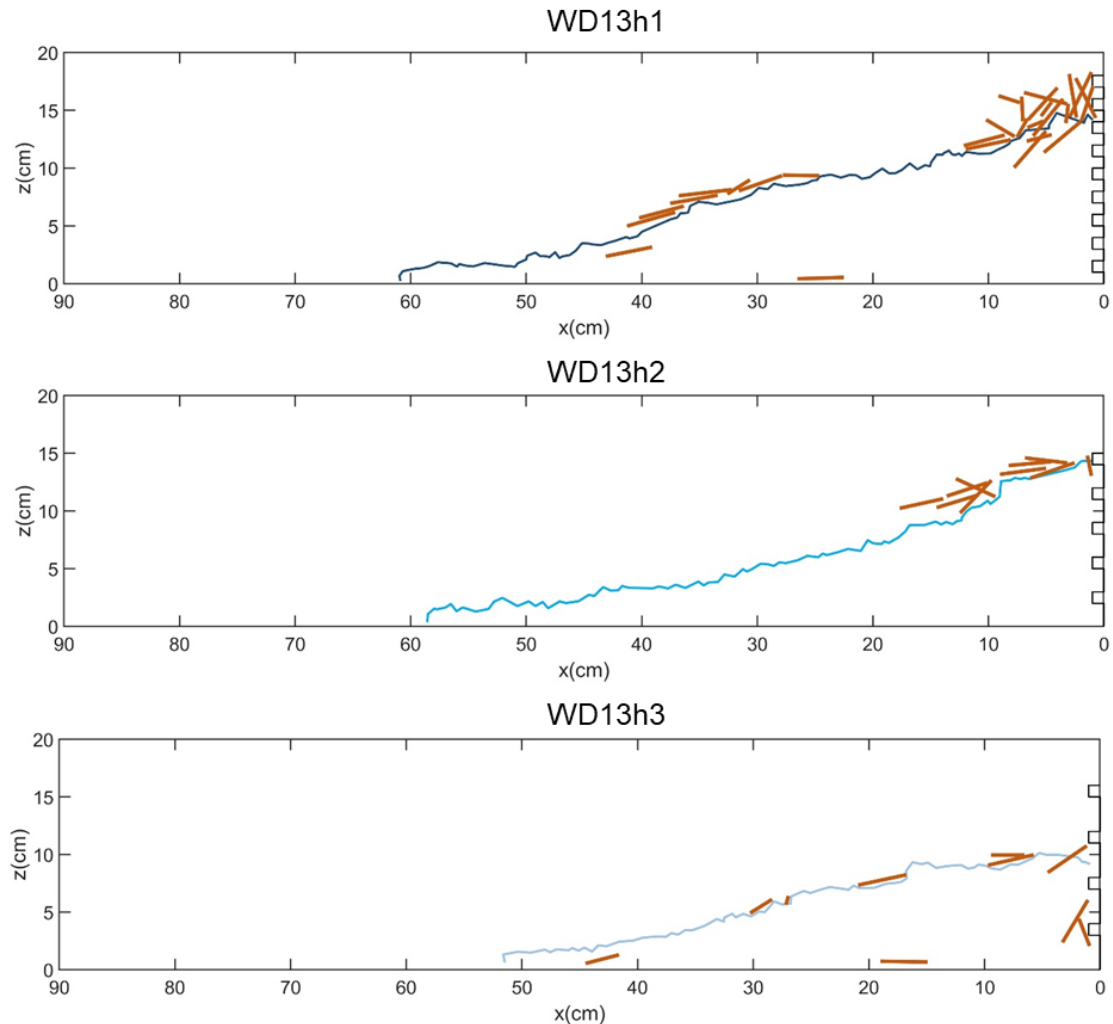


圖 6- 62 WD13 實驗漂流木分佈位置

WD20 實驗(圖 6- 63)，在橫桿間距 1cm 及 3cm 中漂流木分佈位置皆是部分漂流木受水流挾帶之後受壩體攔阻並沉積於壩頂後方，部分因迴水影響及大礫石堆積表面較凹凸不平使漂流木沉積於堆積體的後方處。橫桿間距 2cm 堆積於後方之坡度較平緩，使漂流木受水流推力沉積於前方。

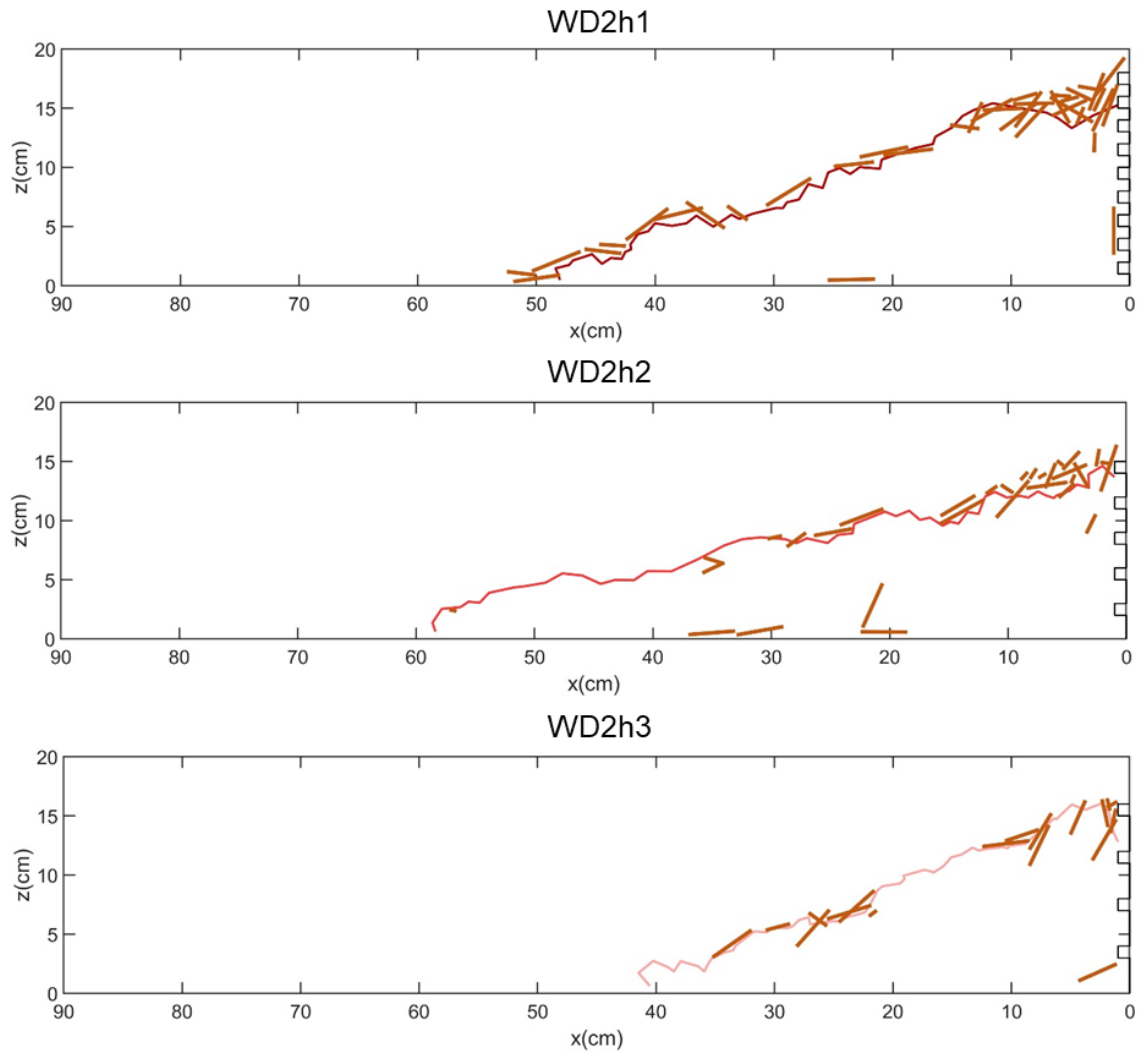


圖 6- 63 WD20 實驗漂流木分佈位置

WDmix 實驗(圖 6- 64)，漂流木分布位置主要因堆積體孔隙中卡合較小礫石及細砂，使整體孔隙小，迴水滲流不易，故後方迴水水流有足夠推力將漂流木推至前方沉積，而有些微漂流木在推移的過程受後方大礫石的攔阻並堆積於後方處。

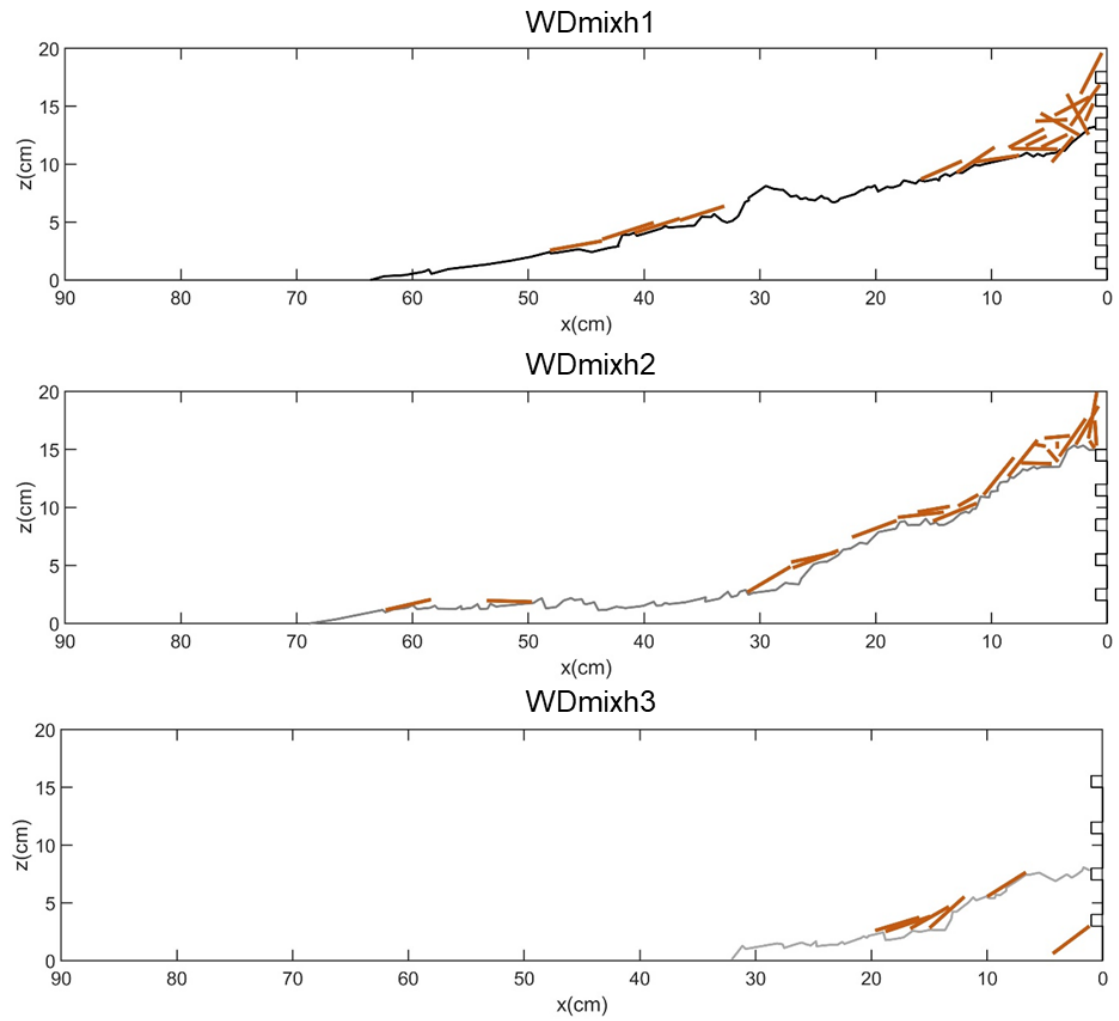


圖 6- 64 WDMix 實驗漂流木分佈位置

第七章 結論與建議

第一節 結論

本研究探討不同粒徑之土石流條件下於不同橫桿間距及有無漂流木之變因，攔阻過程、壩體土砂通過率及堆積形貌之變化，並比較同一粒徑下有無漂流木實驗之共通點或相異點，提出以下結論：

1. 在有無漂流木條件下，不同橫桿間距，粒徑 0.8cm 試驗組其攔阻共通點為，當壩體橫桿間距小，礫石受攔阻向上堆積，部分水流回彈至壩體後方，礫石於壩內堆積，形成較大堆積。當壩體橫桿間距大，待顆粒間摩擦及阻尼作用形成拱型之堆積，水流帶動礫石向上堆積形成抬升段。而有漂流木實驗，漂流木產生遮蔽使後方礫石無法通過，抬升段較高。整體而言，後方堆積皆因迴水使堆積較緩。
2. 在有無漂流木條件下，不同橫桿間距，粒徑 1.3 驗組其攔阻共通點為，橫桿間距小，礫石沿壩體向上堆積，部分礫石受壩體回彈水流影響而堆積，因壩體受堆積，後續礫石進而向後方發展堆積。橫桿間距大，不易受攔阻，待礫石因彼此間摩擦及阻尼作用形成兩兩交疊於壩體下方受攔阻，水流帶動礫石沿壩體上方發展，礫石相互卡合於間距中，形成抬升段，後續礫石堆積高度變高並向後方堆積。
3. 在有無漂流木條件下，不同橫桿間距，粒徑 2cm 試驗組其攔阻共通點為，當壩體橫桿間距小，受攔阻的礫石向上堆積，因礫石本身重量較重，受撞擊壩體回彈水流影響較小，後續礫石進而向後方堆積；當壩體橫桿間距大，當礫石兩兩交疊與橫桿間距卡合才會造成攔阻，使水流帶動礫石向上堆積，形成抬升段，後續礫石因無法通過向後方堆積。

4. 混合粒徑有無漂流木攔阻共通點於橫桿間距大及小，皆是大礫石受攔阻後，水流挾帶礫石沿壩體向上方發展並卡合，使後續土砂向後方堆積。大礫石受堆積後，小礫石及些微細砂則卡於大礫石間的孔隙，大部分細砂做為懸浮質跟著迴水水流至後方發展。待迴水退去，部分細砂跟著水流滲流於孔隙中，部分堆積於後方。
5. 水流撞擊壩體時，橫桿間距小，使水流產生回彈現象，部分水流回彈至壩內，如礫石重量輕，易被回彈水流帶動，進而向後方堆積；礫石重量重，不易受回彈水流影響；橫桿間距大，使大部分水流皆流出壩體，較無回彈水流產生。
6. 壩體攔阻礫石之過程可分為三個階段，初期礫石受下方之橫桿攔阻開始堆積，導致水流向上發展。攔阻中期，向上發展之水流帶動礫石向上，卡和於橫桿間距間。後續礫石堆積累積，逐漸向上游發展，待堆積至一定高度後，產生迴水之現象，此惟堆積後期。
7. 漂流木攔阻過程分為三個階段，初期漂流木平行水流方向流下。因礫石受堆積後，水流向上發展，使漂流木方向轉變為垂直方向移動，此為攔阻中期。後期受橫桿間距之影響，卡合於橫桿上形成障礙，使後方礫石無法通過。

第二節 建議

1. 由實驗結果可知，在礫石粒徑為 0.8cm 及 1.3cm，橫桿間距為 2cm 時，漂流木有最佳囚砂效益；在相同條件下，漂流木對於粒徑 2cm 和混合粒徑之礫石攔阻效果不明顯，其原因為粒徑 2cm 之礫石因粒徑較大，易受橫桿攔阻，因此受漂流木之影響較小。漂流木對於礫石攔阻之影響程度不一，建議需進行現地調查，考慮當地礫石粒徑分布情形，研擬治理對策。

2. 實驗計算結果得知，有無漂流木實驗之粒徑通過率 50% 對應之間距與粒徑之比率介於 1.5 至 3 之間，建議橫桿間距設計約為粒徑之 1.5 至 3 倍，能提供有效之攔阻效果。
3. 承 2，雖橫桿間距亦能提供有效攔阻，但因其現地條件，其壩體設計多為縱向結構。日後可針對縱向結構攔阻礫石及漂流木情形，進行探討分析。
4. 實驗只針對單一尺寸形狀之漂流木，現地之漂流木尺寸形貌不一，建議日後可針對不同尺寸之漂流木進行實驗。

附錄一、意見回復

期末委員意見與辦理情形及回覆

委員意見	辦理情形及回覆
1. 一般工程倘採納透過性防砂壩設計，除了橫桿外尚有其他複合型設計（如配合梳子壩或其他組合等），本研究橫桿間距結論可提供複合型設計適用性，是否可補充說明。	感謝委員意見，由本研究試驗結果可得調整橫桿間距對防砂壩攔砂影響顯著，而當間距與粒徑之比率介於 1.5 至 3 之間具有明顯攔阻率變化，透過性防砂壩如完全攔阻泥砂或完全通過泥砂，皆會失去透過性防砂壩施做之意義，因此可參考試驗結果配合現場土砂粒徑進行橫桿製作與微調，藉以達成具防砂與河道平衡之意義。

參考文獻

1. 詹錢登 (2000), 「土石流概論」, 科技圖書股份有限公司, 台北。
2. 行政院農委會林業試驗所(2010), 「2010 日本國漂流木對策及處理實務研習會講義」。
3. 陳樹群、安軒霈、國領ひろし、林永欣 (2016), 「野溪高土砂災害之模組化防砂壩管理」, 中華水土保持學報, 47(3), 111-121。
4. 水土保持手冊 (2017), 行政院農業委員會水土保持局, 台灣。
5. 陳樹群 (2017), 「防砂壩長期管理以精準調控土砂平衡」成果報告書, 行政院農業委員會水土保持局, 台灣。
6. 水土保持單元叢書 02—透過性防砂壩 (2019), 行政院農業委員會水土保持局。
7. 許修銓 (2018), 「以動床實驗探討土石流入匯主流之沖積扇形貌與內部變化」, 國立中興大學水土保持學系碩士論文。
8. 吳佳晏 (2020), 「土石流混合漂流木運移對沖積扇演變之動床實驗」, 中興大學水土保持學系研究所碩士論文。
9. 林采蓉 (2020), 「以新型折射率對應材料建立二維及三維小尺度水下崩塌探究內部流場變化」, 中興大學水土保持學系研究所碩士論文。
10. Andrus, R. D. and Stokoe, K. H. (1999). “A liquefaction evaluation procedure based on shear velocity.” Paper presented at the Technical memorandum of PWRI 3653 Proceedings, Tsukuba, Japan.
11. Keller, E. A., & Swanson, F. J. (1979). Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth surface processes*, 4(4), 361-380.
12. Keller, E. A. and Tally, T. (1979). Effects of large organic debris on

- channel form and fluvial processes in the coastal redwood environment. Paper presented at the Proceedings, Tenth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton, Dubuque, Iowa.
13. Wohl, E., and Scott, D. N. (2016). “Wood and sediment storage and dynamics in river corridors.” *Earth Surface Processes and Landforms*, n/a-n/a. doi: 10.1002/esp.3909
 14. Golladay, S.W., Webster, J.R. and Benfield, E.F. (1989). Changes in stream benthic organic matter following watershed disturbance. *Holarct. Ecol.* 12 (2), 96-105.
 15. Triska, F.J., Sedell, J.R., Cromack, K., Gregory, S.V. and McCorison, F.M. (1984). “Nitrogen budget for a small coniferous forest stream. *Ecol.*” *Monogr*, 54 (1), 119 – 140.
 16. Bisson, P. A., Bilby, R. E., Bryant, M. D., Dolloff, C. A., Grette, G. B., House, R. A. and Sedell, J. R. (1987), “Large woody debris in forested streams in the Pacific Northwest: Past, present, and future.” In E. O. Salo & T. W. Cundy (Eds.), *Streamside Management: Forestry and Fisheries Interactions* (pp. 143 – 190). Seattle, Washington.
 17. Hogan DL. (1986), “Channel Morphology of Unlogged, Logged, and Debris Torrented Streams in the Queen Charlotte Islands, Land Management Report Number 49,” British Columbia Ministry of Forests and Lands: Vancouver; 94 pp.
 18. Montgomery DR., Abbe TB., Peterson NP., Buffington JM., Schmidt KM. and Stock JD. (1996). “Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins,” *Nature* 381: 587–589.
 19. Montgomery, D. R., J. M., Buffington, R. D., Smith, K. M., Schmidt G. and Pess. (1995). “Pool Spacing in Forest Channels,” *Water Resource Research*, 31:1097-1105

20. Frederick J. Swanson. and George W. Lienkaemper. (1978). “Physical consequences of large organic debris in pacific northwest streams.” Gen, Tech, Rep, PNW-69, Portland, OR: U.S Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1-12
21. Diehl, T. H. (1997), “Potential drift accumulation at bridges,” Report FHWA-RD-97-028. Washington: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.
22. Lyn D., Cooper T., Condon D. and Gan L. (2007). “Factors in debris accumulation at bridge piers,” Washington, US Department of Transportation, Federal Highway Administration Research and Development, Turner-Fairbank Highway Research Center.
23. Mao L., Comiti F. (2010). “The effects of large wood elements during an extreme flood in a small tropical basin of Costa Rica,” In Debris Flow III, De Wrachien D, Brebbia CA (eds). WIT Press: UK; 225–236.
24. Gurnell, A. M. and G. E. Petts. (2002). “Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective,” *Freshwater Biol.*, 47(4), 581–600.
25. Wohl, E. (2013), “Floodplains and wood,” *Earth-Science Reviews* 123, 194–212.
26. Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gaertner, V., Perret, F. and Stoffel, M. (2016). “Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers,” *CATENA*, 140, 182-194
27. Fausch, K.D., Northcote, T.G. (1992). ”Large Woody Debris and Salmonid Habitat in a Small Coastal British Columbia Stream,” *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49, 682–693.