



行政院農業委員會水土保持局

【拱型固床工之沖淤探討】

期末報告書



計畫主持人 黃宏斌教授

國 立 臺 灣 大 學

中 華 民 國 109 年 11 月

摘要

固床工在定義中，根據水保手冊，係指保護溪床免於被洪水冲刷下切為目的所構築有效高度在 1.0 m 以下之橫向阻水構造物。固床工對於水流有很好的阻滯效應，過往於河溪整治的施工中大量使用固床工，其部分也確實達到了防止溪床之冲刷以及調整溪流坡度之目的。然而近年來，由於生態考量、美觀等因素，施工單位開始嘗試不同形狀之固床工，拱型固床工便是其中一個例子。然而，與直線型固床工不同，拱型固床工在不同拱度、高度以及方向皆會對河床冲淤帶來不同的影響。

本計畫之工作項目如下

1. 固床工相關文獻與資料蒐集。
2. 調查現地資料(新北市水仙溪)與水槽試驗固床工布置。
3. 以室內水槽試驗分析拱型固床工水理機制。
4. 應用二維水理輸砂軟體 RiverFlow 2D 探討拱型固床工之冲淤特性，並以新北市水仙溪之系列固床工資料作為數值模擬之研究對象。
5. 分析探討不同水理因子對於拱型固床工之冲淤特性。

以上部分皆已完成，並呈現於本報告書之內容中。

模擬部分本次計畫以新北市淡水區水仙溪為例，透過 RF-2D 數值模擬現場已建立完工之上下拱型固床工為對象，模擬在不同重現期距對於河道的流況影響。室內水槽實驗部分，則量化上拱型及下拱型固床工在不同拱度及高度的影響下對於河道冲淤的影響。

整理目前數值模擬結果，發現 RF-2D 對於上拱型及下拱型固床工的模擬結果貼近過往所觀察到上拱型固床工具有集中水流之作用、

下拱型固床工具有分散水流之作用，並且隨著上下游入流條件不同，反應如凹岸沖刷、凸岸堆積、水流會集中並沖刷波降較大處等等，RF-2D 對地理條件之反應符合過去觀測之結果，唯本計畫期間並未發生重現期距等級之降雨，無法進行率定，然而就沖淤趨勢而言 RF-2D 展現結果甚佳，相關內容可參考第三章。

水槽試驗方面，本實驗針對四種不同拱度、高度之固床工進行水槽沖刷實驗，並量測上下游水深、流速，下游沖刷坑大小等，得到水流對固床工之衝擊力及能量修正係數，最後回歸出公式，相關內容可參考第四章。

本計畫實施後可見之效益可提供後續拱型固床工相關之查核標準，拱型固床工相關規範之立法依據，而使河溪整治工程能夠更有效地達成防災、生態及美觀等目的，具投資價值。

Abstract

According to the Soil and Water Conservation Handbook, the definition of groundsills refers to lateral water-blocking structures constructed with an effective height of less than 1.0 m. They are constructed for the purpose of protecting the stream bed from being washed down by the flood. Groundsills have a good blocking effect on the flow of water and as a result, in the past, a large number of groundsills have been constructed in rivers and streams. Many of them have indeed achieved the purpose of preventing the erosion of the stream bed and modifying the slope of the stream. However, in recent years, due to ecological considerations, aesthetics and other factors, constructors have begun to build different types of groundsills, and arch groundsills are one example. However, different from the straight groundsills, the arch groundsills have different effects on the riverbed erosion and sedimentation at different curvature, heights and directions.

The work of this project are as follows

1. Collection of related reference and data on groundsills.
2. On-site investigation (Shui-Xian river, New Taipei City) and the layout of the groundsills for the flume experiments.
3. Analyze the hydraulic mechanism of the arch groundsills through the flume experiments.
4. Use the two-dimensional hydraulic modeling software RiverFlow 2D to explore the scour and siltation characteristics of the arch groundsills, and use the data of series groundsills at Shui-Xian river in New Taipei City as the object to do numerical simulation.
5. Analyze scouring and silting characteristics of different hydraulic factors for arch groundsills.

The above parts have been completed and are presented in this report.

In the simulation part, we used RF-2D numerical simulation to simulate the upper and lower arch groundsills which had been constructed on-site and to see the influence of flood with different return periods on the river. The part of indoor flume experiment on the other hand quantified the influence of the upper and lower arches on the river channel erosion and deposition under the influence of different arches and heights.

It is found that the simulation results of RF-2D for the upper arch and lower arch groundsills are close to the previous observations. The upper arch groundsills have the effect of concentrating water flow, since the lower arch groundsills dispersing water flow. As the upstream and downstream inflow conditions are different, the reactions such as concave bank erosion, convex bank accumulation, water flow concentrating and eroding where the slope is relatively large, etc. The response of RF-2D to geographical factors is consistent with the results of past observations. During the period of the project, no rainfall of return period level occurred, and calibration cannot be performed. However, the RF-2D shows very good results in terms of erosion and deposition trends. For related content, please refer to Chapter 3.

In terms of flume experiments, we carried out for four different arches and heights of groundsills, and measured the upstream and downstream water depth, flow velocity, downstream scour pit size, etc., to obtain the thrust and energy correction coefficient of the water flow on groundsills, and finally regress to the formula. For related content, please refer to Chapter 4.

The visible benefits after the implementation of this project can provide checking standards for the arch groundsills, and the legislative basis for the relevant

specifications of the arch groundsills. Making river renovation project more effectively achieve disaster prevention, ecology and beauty. Purpose and investment value were seen.

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XVIII
第一章 前言.....	1-1
一、緣起與目的.....	1-1
二、工作項目與內容.....	1-1
三、預期成果.....	1-2
第二章 固床工水理機制相關文獻與資料收集.....	2-1
一、固床工設置效果.....	2-2
二、水槽沖刷實驗.....	2-8
三、回歸參數因子.....	2-14
四、數值模擬分析.....	2-21
第三章 數值模擬輸砂模式.....	3-1
一、RiverFlow 2D.....	3-1
二、預計模擬區域及參數計算.....	3-8
三、數值模擬結果與討論.....	3-24

第四章 拱型固床工水槽試驗	4-1
一、試驗規劃佈置	4-1
二、試驗內容	4-8
三、水槽與模型試驗之結果與討論	4-15
第五章 工作進度	5-1
一、拱型固床工文獻與現地工程資料蒐集	5-1
二、數值模擬輸砂性質	5-1
三、現地調查與室內實驗	5-2
附錄一、參考文獻	附錄一-1
附錄二、期初審查意見與回覆	附錄二-1
附錄三、期中審查意見與回覆	附錄三-1

圖目錄

圖 2- 1 綜合沖刷坑深度無因次模式圖	2-14
圖 2-2 帶工下游淘刷坑幾何形狀與水理參數關係.....	2-17
圖 3-1 RF2D 泥砂運移公式之設定界面。	3-2
圖 3-2 RF2D 輸砂參數設定之界面.....	3-2
圖3-3 RF2D 現地模擬網格之界面.....	3-3
圖3-4 RF2D 下游邊界條件設定之界面.....	3-3
圖3-5 RF2D 上游邊界條件設定之界面.....	3-4
圖3-6 RF2D 曼寧N 值分區之界面.....	3-4
圖3-7 RF2D 模擬計算之界面	3-5
圖3-8 RIVERFLOW2D 模擬構造物於河面俯視圖	3-6
圖 3-10 RIVERFLOW2D 模擬合面網格.....	3-7
圖 3-11 水仙溪 5 分鐘 10MM 之單位歷線	3-10
圖 3-12 50 年重現期距 24 小時等雨量線圖	3-12
圖 3-13 50 年重現期 24 小時有效降雨歷線圖	3-13
圖 3-14 50 年重現期 24 小時流量歷線圖	3-13
圖 3-15 COURANT NUMBER 對於沖刷深度的敏感度分析 (左岸).....	3-15

圖 3-16 COURANT NUMBER 對於沖刷深度的敏感度分析 (河心).....	3-15
圖 3-17 COURANT NUMBER 對於沖刷深度的敏感度分析 (右岸).....	3-16
圖 3-18 直線型固床工模擬區域範圍	3-16
圖 3-19 直線型固床工及出、入流口設定.....	3-17
圖 3-20 直線型固床工曼寧 N 值之設定範圍	3-18
圖 3-21 直線型固床工數值地表模型	3-19
圖 3-22 上拱型固床工模擬範圍正射影像.....	3-19
圖 3-23 上拱型固床工正攝影像及出、入流口設定.....	3-20
圖 3-24 上拱型固床工曼寧 N 值設定範圍	3-20
圖 3-25 上拱型固床工模擬範圍數值地表模型.....	3-21
圖 3-26 下拱型固床工模擬範圍正射影像.....	3-21
圖 3-27 下拱型固床工出、入流口設定	3-22
圖 3-28 下拱型固床工曼寧 N 值設定範圍	3-22
圖 3-29 下拱型固床工模擬範圍數值地表模型.....	3-23
圖 3-30 直線型固床工河床沖淤深度	3-24
圖 3-31 上拱型固床工河床沖淤深度	3-25
圖 3-32 下拱型固床工河床沖淤深度	3-26

圖 3-33 直線型固床工洪峰水深.....	3-27
圖 3-34 上拱型固床工洪峰水深.....	3-28
圖 3-35 下拱型固床工洪峰水深.....	3-29
圖 3-36 直線固床工洪峰福祿數.....	3-30
圖 3-37 上拱型固床工洪峰福祿數.....	3-31
圖 3-38 下拱型固床工洪峰福祿數.....	3-32
圖 3-39 洪峰底床剪應力	3-33
圖 3-40 上拱型固床工洪峰底床剪應力	3-34
圖 3-41 下型固床工洪峰底床剪應力	3-35
圖 4-1 試驗渠槽之現況照	4-2
圖 4-2 現場試驗渠槽照	4-2
圖 4-3 現場渠槽平面配置圖	4-2
圖 4-4 步階式馬達控制機板	4-3
圖 4-5 離心式抽水泵浦	4-3
圖 4-7 吸管製蜂巢整流箱(1)	4-4
圖 4-8 吸管製蜂巢整流箱(2)	4-4
圖 4-9 吸管製蜂巢整流箱(3)	4-5
圖 4-10 超音波水位計圖(1)	4-6

圖 4-11 超音波水位計圖(2)	4-6
圖 4-12 超音波水位計圖(3)	4-6
圖 4-13 小型拉壓兩用式荷重計圖	4-7
圖 4-14 荷重計感測頭之圖	4-7
圖 4-15 捲尺照片圖	4-8
圖 4-16 水仙溪 0K+194 之固床工橫斷面圖	4-9
圖 4-17 固床工試驗之水槽率定曲線.....	4-11
圖 4-18 固床工之水槽與模型試驗之俯視配置圖.....	4-11
圖 4-19 固床工之水槽與模型試驗之側視配置圖.....	4-12
圖 4-20 直線型高度 3.0 公尺固床工模型	4-13
圖 4-21 直線型高度 4.5 公尺固床工模型	4-13
圖 4-22 直線型高度 6.0 公尺固床工模型	4-13
圖 4-23 直線型高度 7.5 公尺固床工模型	4-13
圖 4-24 拱型固床工不同曲率半徑之模型示意圖.....	4-14
圖 4-25 水位計架設之位置圖	4-14
圖 4-26 流速量測之位置圖	4-14
圖 4-27 衝擊力、壓力量測位置正視圖與側視圖.....	4-15
圖 4-28 直線型固床工高度、流量與流速之關係圖.....	4-16

圖 4-29 上拱型固床工各曲率半徑流速與流量之關係圖 ..	4-16
圖 4-30 下拱型固床工各曲率半徑流速與流量之關係圖 ..	4-17
圖 4-31 直尺量測水深之示意圖	4-17
圖 4-32 超音波水位計量測之示意圖	4-18
圖 4-33 直線型各固床工高度、流量與上游水深關係圖 ..	4-18
圖 4-34 直線型各固床工高度、流量與下游水深關係圖 ..	4-19
圖 4-35 上拱型各曲率半徑、流量與上游水深關係圖	4-19
圖 4-36 上拱型各曲率半徑、流量與下游水深關係圖	4-20
圖 4-37 下拱型各曲率半徑、流量與上游水深關係圖	4-20
圖 4-38 下拱型各曲率半徑、流量與下游水深關係圖	4-21
圖 4-39 直尺量測沖刷坑之示意圖	4-21
圖 4-40 流量 0.0045CMS 下直線型固床工最大沖淤深度關係圖	4-23
圖 4-41 流量 0.0067CMS 下直線型固床工最大沖淤深度關係圖	4-23
圖 4-42 流量 0.009CMS 下直線型固床工最大沖淤深度關係圖	4-24
圖 4-43 流量 0.0112CMS 下直線型固床工最大沖淤深度關係圖	4-24
圖 4-44 直線型固床工高度 7.5CM 下不同流量、位置最大沖	

淤深度之關係圖	4-25
圖 4-45 直線型固床工高度 6.0CM 下不同流量、位置最大沖淤深度之關係圖	4-25
圖 4-46 直線型固床工高度 4.5CM 下不同流量、位置最大沖淤深度之關係圖	4-26
圖 4-47 直線型固床工高度 3.0CM 下不同流量、位置最大沖淤深度之關係圖	4-26
圖 4-48 直線型固床工高度與各流量之沖刷坑長關係圖 ..	4-27
圖 4-49 上拱型固床工曲率半徑 1.82M 流量與沖刷坑深之關係圖	4-27
圖 4-50 上拱型固床工曲率半徑 1.1M 流量與沖刷坑深之關係圖	4-28
圖 4-51 上拱型固床工曲率半徑 0.82M 流量與沖刷坑深之關係圖	4-28
圖 4-52 上拱型固床工曲率半徑 0.68M 流量與沖刷坑深之關係圖	4-29
圖 4-53 下拱型固床工曲率半徑 1.82M 流量與沖刷坑深之關係圖	

.....4-29

圖 4-54 下拱型固床工曲率半徑 1.1M 流量與沖刷坑深之關係圖

.....4-30

圖 4-55 下拱型固床工曲率半徑 0.82M 流量與沖刷坑深之關係圖

.....4-30

圖 4-56 下拱型固床工曲率半徑 0.68M 流量與沖刷坑深之關係圖

.....4-31

圖 4-57 直線型固床工流量 0.0045CMS 下各固床工高度之應力分佈圖.....4-37

圖 4-58 直線型固床工流量 0.0067CMS 下各固床工高度之應力分佈圖.....4-37

圖 4-59 直線型固床工流量 0.009CMS 下各固床工高度之應力分佈圖.....4-38

圖 4-60 直線型固床工流量 0.0112CMS 下各固床工高度之應力分佈圖.....4-38

圖 4-61 直線型不同固床工高度、流量於渠道右岸應力關係圖

.....4-39

圖 4-62 直線型不同固床工高度、流量於渠道中間之應力關

係圖

.....4-39

圖 4-63 直線型不同固床工高度、流量於渠道左岸應力關係圖

.....4-40

圖 4-64 上拱型固床工曲率半徑 1.82M 流量與應力之關係圖

.....4-40

圖 4-65 上拱型固床工曲率半徑 1.1M 流量與應力之關係圖

.....4-41

圖 4-66 上拱型固床工曲率半徑 0.82M 流量與應力之關係圖

.....4-41

圖 4-67 上拱型固床工曲率半徑 0.68M 流量與應力之關係圖

.....4-42

圖 4-68 下拱型固床工曲率半徑 1.82M 流量與應力之關係圖

.....4-42

圖 4-69 下拱型固床工曲率半徑 1.1M 流量與應力之關係圖

.....4-43

圖 4-70 下拱型固床工曲率半徑 0.82M 流量與應力之關係圖

.....4-43

圖 4-71 下拱型固床工曲率半徑 0.68M 流量與應力之關係圖	4-44
圖 4-72 直線型固床工高度 H3.0CM 之能量修正係數 A 圖	4-45
圖 4-73 直線型固床工高度 H4.5CM 之能量修正係數 A 圖	4-46
圖 4-74 直線型固床工高度 H6.0CM 之能量修正係數 A 圖	4-46
圖 4-75 直線型固床工高度 H7.5CM 之能量修正係數 A 圖	4-47
圖 4-76 上拱型固床工曲率半徑 1.82M 之能量修正係數 A 圖	4-47
圖 4-77 上拱型固床工曲率半徑 1.1M 之能量修正係數 A 圖	4-48
圖 4-78 上拱型固床工曲率半徑 0.82M 之能量修正係數 A	4-48
圖 4-79 上拱型固床工曲率半徑 0.68M 之能量修正係數 A 圖	4-49
圖 4-80 下拱型固床工曲率半徑 1.82M 之能量修正係數 A 圖	4-49
圖 4-81 下拱型固床工曲率半徑 1.1M 之能量修正係數 A 圖	4-50

圖 4-82 下拱型固床工曲率半徑 0.82M 之能量修正係數 A 圖	4-50
圖 4-83 下拱型固床工曲率半徑 0.68M 之能量修正係數 A 圖	4-51
圖 4-84 上拱型固床工曲率半徑 1.82M 之能量修正係數之迴歸公式	4-52
圖 4-85 上拱型固床工曲率半徑 1.1M 之能量修正係數之迴歸公式	4-52
圖 4-86 上拱型固床工曲率半徑 0.82M 之能量修正係數之迴歸公式	4-53
圖 4-87 上拱型固床工曲率半徑 0.67M 之能量修正係數之迴歸公式	4-53
圖 4-88 下拱型固床工曲率半徑 1.82M 之能量修正係數之迴歸公式	4-54
圖 4-89 下拱型固床工曲率半徑 1.1M 之能量修正係數之迴歸公式	4-54

圖 4-91 下拱型固床工曲率半徑 0.68M 之能量修正係數之迴歸公式	4-55
圖 4-92 上拱型固床工各曲率半徑之能量修正係數迴歸公式圖	4-57
圖 4-93 下拱型固床工各曲率半徑之能量修正係數迴歸公式圖	4-58

表目錄

表 3-1 水仙溪水理參數表	3-9
表 3-2 淡水雨量站無因次參數表	3-11
表 3-3 RIVERFLOW2D 模擬介面輸入參數	3-14
表 4-1 試驗條件總整理	4-12
表 4-2 上下拱型固床工上游面受力公式表	4-35
表 4-3 上拱型固床工不同拱度之流量與能量損失係數之迴歸 式	4-55
表 4-4 下拱型固床工不同拱度之流量與能量損失係數之迴歸 式	4-56
表 4-4 下拱型固床工不同拱度之流量與能量損失係數之迴歸 式	4-58
表 5-1 工作進度表	5-1

第一章 前言

一、緣起與目的

水土保持局積極推動創新工法與近自然工法，治理工程中採用多樣化的固床工，藉由拱型的特性，穩固河床，導正流心，維持河川基流量，營造出深潭、淺灘、急流與緩流等多樣性的流況，提供生態補償。本計畫預計接續去年度之拱型固床工之力學性質探討計畫，繼續探討拱型固床工上拱型、下拱型固床工之沖淤特性，作為現地工程施作依據。預計透過模擬分析以及水槽試驗，探討拱型固床工上拱型、下拱型固床工之沖淤特性，提供後續工程設計之依據，並提升治理功效。

二、工作項目與內容

(一) 蒐集現地系列固床工布置資料

本團隊將蒐集各案例的固床工現地布置之資料，包括設計圖，上下游邊界流速，輸砂量，土壤性質分布等，並進行空拍，納入數值模式，建置現地地形，使數值模式資料更加完善。

(二) 固床工相關文獻與資料收集

本團隊預計蒐集歐美日及國內與固床工之水流特性、沖刷類型、影響因子、深度評估、設計參數及分析模式等有關之文獻資料，了解其設計應用以及模式分析時所需考慮之水理機制與設計因子估算方法，並針對其設計可能遭遇的問題進行分析。

(三) 數值模擬輸砂性質

本項目預計建置輸砂之數值模擬，針對拱型固床工工法進行水理分析與探討，考量工程設計所需之水理重要因子，驗證之項目包括：

固床工附近之水深、流速、福祿數與沖刷深度等4項。

(四)水槽試驗

本團隊預計針對拱型固床工進行分析，針對不同形式拱型固床工進行水槽試驗，水槽試驗以明渠試驗進行，進行試驗之水槽需考量可能之模型縮比與入口渦流及下游邊界控制對試驗結果的影響，試驗條件包括：不同之流量、不同之粒徑及固床工高度所造成之底床沖淤變化等進行探討，考量野溪河道遭遇洪水時多為紊流流況，試驗過程以觀測儀器記錄結構物附近之流場進行水理分析，藉由渠槽試驗精確分析拱型固床工水理機制，分析結果包括：水深、壓力與沖刷深度等多項成果，提供後續工程設計之依據，提升治理效益。

三、預期成果

(一)完成固床工相關文獻與資料收集

(二)完成蒐集現地系列固床工布置資料

(三)完成數值模擬輸砂性質

(四)完成現地調查與室內水槽實驗

第二章 固床工水理機制相關文獻與資料收集

本團隊蒐集歐美日及國內有關固床工的文獻資料，其中包括水流特性、影響因子、深度評估、設計參數及分析模式等資料，以瞭解其設計應用時所需考慮的水理機制、設計因子估算方法以及模式分析方法，並針對其設計可能遇到的問題進行分析。

水土保持局 2005 年所出版之水土保持手冊有關固床工之定義為：固床工為一個橫向構造物，可以與河床齊平或略高於河床面，同時常採用連續施設方式而構成一系列固床工，以擴大河道的保護區段。其目的有下列二項：

1. 有效抑制河床面泥砂的輸移，防止河床產生嚴重沖刷現象。
2. 可以緩和床面及兩岸的流速，具有整流、導流、減緩沖刷、調整河床坡度等功能。

而 2017 年修訂後的水土保持手冊則有：固床工(ground sill)為保護溪床免於被洪水沖刷下切的一種橫向阻水構造物，可以略低於溪床、或與溪床齊平、或略高於溪床面(有效高度以不超過 1.0m 為原則)。因固床工上游僅有小規模的土砂蓄積，具有調降溪床坡度，以調節水流流速，惟其主要功能在於洪水時得以控制溪床高程，免於被洪水持續沖刷而影響兩岸構造物或土地之安全。

拱型固床工有下列議題值得探討：

1. 拱型固床工將水流集中在固床工中央下游處排放，增加沖擊力，其沖刷坑會較直線型固床工深，基礎深度必須比直線型固床工深。
2. 拱型固床工係利用圓弧之特性將應力由兩側拱腳張力分擔，因此，拱型固床工拱腳與護岸界面之結構需要依圓拱之角度重新分析設計。

3. 河水溢流過拱型固床工之水壓力需要分段計算，避免傾倒或滑動等安定分析不足問題產生。

4. 當水深小於拱型固床工頂高時，水流會順著圓弧往兩側流動，拱腳與護岸界面在水流沖擊下需要加強保護，避免界面處被沖擊崩壞。

5. 依據水土保持手冊，設計之拱型固床工和直線型者一樣，可以達成調整河床坡度之目的。

6. 目前許多直線型固床工因為不同規劃設計原因而有基礎淘空現象，在未解決這些肇因之前，拱型固床工淘空之可能性會更大。

7. 營造生態棲地並非固床工規劃設計之目的，任何型式固床工都可以在其下游處營造深潭，適當之複式斷面設計亦可方便魚類溯游。

本研究整理前人之研究並分類為固床工設置效果、水槽沖刷實驗、回歸參數因子、數值模擬分析等四大類研究方向，茲分述如下：

一、固床工設置效果

(一) 張則安(1994)

證實河床面若構築固床工可有效降低水流總剪力強度以減少泥砂起動，因固床工增加了河床糙度，減緩斷面平均流速。並發現在河床坡度較陡或河寬較狹窄之河道處，就整流工程效果而言固床工所形成之連續式低壩群較單一防砂壩來得經濟有效。

(二) 陳聖文(2000)

透過水槽試驗結果，以跌水高 H 將沖刷坑長度 L 無因次化與跌水數 D 之關係，經迴歸得到無因次沖刷坑長度之經驗模式。

$$\frac{L}{H} = 2.99D^{0.442}e^{3.042S}$$

其中 L 為沖刷坑長度， H 為跌水高度， D 為跌水數， S 為坡度， e 為自然對數。

(三) 林雲睨，黃宏斌(2002)

以不同固床工間距之設置情形，就臨界流量之試驗結果得知，有固床工之設置時泥砂需較大之水流強度才能起動，且固床工之間距愈短時，所需增加之水流強度愈大，證明固床工的確有減緩流速、穩定溪床之效能。

根據試驗結果發現固床工設置會增加渠床之阻力，且固床工之設置密度越高，其阻力係數越大。

試驗結果顯示固床工設置能夠降低河川輸砂量，且隨著固床工之設置密度越高，其輸砂量越少。當流量越大與坡度越陡時其降低輸砂量之效能越高，表示固床工具穩定河床、防止沖刷之功用。

(四) 郭昌樺(2002)

因固床工設置於河床底而增加底床的糙度，故當固床工間距越小，其加糙效應愈顯著，使泥砂流出量越低。

1. 藉由平均沖刷率與固床工數量之關係，可以看出固床工間距愈小，數量愈多，床面泥砂平均沖刷率越低的總體趨勢，顯現河道全區保護段內均設置固床工有穩定河床之效果。
2. 由泥砂沖刷分配率可得知，固床工在保護河段內所發揮的作用是將由上游而來的沖刷能力往下游傳遞，以減少保護段內的沖刷量來達到保護的作用，而其對降低全河段之泥砂沖刷量的效用，並不如預期。

3. 帶工間距為渠寬的 2~7 倍時有激增的現象且接近巔峰值，似乎在 $L=32\text{cm}$ 時接近最高值，故在本研究帶工間距中， $L=32\text{cm}$ 可作為最適間距之考量。即是帶工間距為渠寬的 4 倍時，對保護段河床沖刷現象的轉移，以及讓水流功率消耗而達到抑制挾砂能力的作用，有最佳的效果。

(五) 孫崇育(2015)

1. 不透水固床工基礎點沖刷與流量關係具有一個轉折點，原因與跌水衝擊底床的位置和能量有關，當衝擊底床的位置愈遠，對於基礎點受到影響的時間愈慢，而衝擊底床的能量愈小，對基礎點受到沖刷力度愈小。
2. 水流流經透水性固床工時會分成形成跌水之“溢頂流”，和從透水材料穿過後再從固床工下游立面邊緣流出之“穿透流”；穿透流分散原流量，進而減少了溢頂流之流量，使溢頂流之流量撞擊河床之能量小於不透水固床工之跌水能量。此外，穿透流也會讓溢頂流之跌水位置更往下游。
3. 透水性固床工之孔隙率愈大，減少溢頂流愈大，其溢頂流之流量會愈小，而穿透流之流量會愈大，使基礎點沖刷深度減緩。
4. 不同流量對相同孔隙率之透水性固床工之基礎點沖刷深度的相對大小為 $1.6q > 2q > 1.3q$ 。其原因在 $1.6q$ 時，溢頂流和穿透流會合二為一，往更下游沖刷，所以只會有一個沖刷坑；而 $2q$ 時因溢頂流跌水較遠，其衝擊到河床面往上游方向之水流會與穿透流相互消能，所以有兩個沖

刷坑形成。

5. 本研究中透水性固床工孔隙率不同對於溢頂流減少之差異如下：孔隙率 0.27($K \approx 1.25 \text{ cm/s}$) 的溢頂流減少 7%、孔隙率 0.34($K \approx 10 \text{ cm/s}$) 的溢頂流減少 20%。

(六) 吳嘉俊(2016)

1. 透水式固床工改變了溢流水深及渠床淘刷的機制，使淘刷規模得以減緩，但透水式固床工趾部的局部淘刷深度及其規模仍以渠槽坡降的影響最為明顯。當流量逐漸增加時，不同透水式固床工之間通透率的差異對於固床工趾部及渠床的局部淘刷的影響差異則逐漸縮減。
2. 水工試驗的結果顯示，高通透率的透水式固床工較適用於流量小、渠床坡度較緩的環境。當渠床坡度陡時，則較容易因為穿透射流作用，造成固床工趾部局部淘刷深度的發生位置較貼近於固床工，對固床工基礎造成隱憂，因此不建議用於渠床床質粒徑偏細、渠床坡降陡的溪床。
3. 低通透率的透水式固床工，雖然通透率僅 7%，但設置初期對於上游溪水的通透有優於傳統式固床工的現象，使得原本應該固床工頂部的溢流水深明顯下降，對於溢流水的投潭潛能降低有著正面的幫助。此外，格柵內因為填充塊石的緣故，增加了其對於通透水流的摩擦水頭損失，進而減緩了通透水流對於下游渠床床砂的淘刷作用。
4. 水工試驗結果顯示，低通透率的透水式固床工較適合應用於渠床坡度小於 6% 的環境，其降低固床工趾部局部淘刷深度的效益可達傳統式固床工的 69%，亦可將最大淘

刷深度發生位置推離固床工基礎，且亦具備降低溢流水深水頭落差的功能。

(七) D'Agostino(1994)

當固床工下游產生局部淘刷現象時，於淘刷坑的下游會形成淤積砂丘。D'Agostino 將淤積砂丘分成兩類；即長砂丘和短砂丘。高泥砂產量之淘刷坑往往於其下游發展出長砂丘，由於高泥砂產量，使得長砂丘之長度往往朝下游方向延伸到下一個障礙物，即相鄰的固床工，導致所得到的砂丘外貌通常與固床工頂部齊平。長砂丘之發展，有助於降低回水效應(backwater effect)；另一方面，低泥砂產量的淘刷坑則產出短砂丘，而短砂丘的形成，可侷限回水效應的傳播。

(八) Bennett et al.(2000)

研究指出，當水流通過固床工時，水流於投潭過程中會形成兩股方向相反的循環渦流；其中一股渦流朝下游方向觸及渠床，而另一股渦流朝上游方向溢流而出。朝向上游方向的渦流，其主要的的作用在於侵蝕渠床床砂及抵抗投潭水流，使淘刷坑上游滑動面維持動態平衡(dynamic equilibrium)。另一方面，朝下游方向的渦流，其大部分能量消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂，同時保持淘刷坑下游滑動面的平衡。

(九) Pagliara(2007)

沖刷時間(t)與沖刷達平衡所需時間(t_c)之比值影響固床工局部沖刷行為。於清水沖刷，局部沖刷深度隨時間緩慢增加；至於濁水沖刷，達到平衡沖刷深度時間則較清水沖刷迅速。

(十) Farhoudi-Smith(1985)及 Oliveto 等(2008)(歐)

於試驗室溢洪道沖刷試驗中，相繼指出尾水深影響水躍發生

之位置及結構物下游之最大沖刷深度。

(十一) 道上正規、鈴木幸一(1979)

其對固定床面工程結構物之功能進行研究，將無任何構造物保護之河床與河床上構築固定床面等保護工程在沖刷後相比較，發現固床構造物上游側之河床刷深程度得到控制；但是固床結構物下游側之河床刷深程度卻因此變大。

(十二) Cun-Hong et al. (2007)

提供將固床工改為斜坡道時，指出下游的沖刷坑可能為主要的破壞因子，文中對此加以量化並給予避免問題的建議。

(十三) Dell'Agnese et al. (2013)

討論了壩體基本的破壞形式，根據在意大利北部南蒂羅爾收集的經驗證據，開發了一種程序來評估固床工的物理脆弱性。評估固床工洪水事件前及事件後的破壞指數。文中評估了 18 條山區河流中的 362 處結構以及相關過程和影響其的結構特徵。儘管可用的數據集不允許在破壞指數和衝擊變量之間建立確定的功能關係，但是可以根據結構特徵，事件類型和強度評估固床工的平均預期剩餘功能。這些結果可能有助於計劃適當的檢查固床工維護。

(十四) Mazzorana et al. (2018)

在這份文獻中，通過特定指標來量化檢查壩的損傷敏感性。項目中包括事件後損壞條件，導致的條件變化，剩餘的條件（RC）及之後的功能（FPost）。實驗希望建立模型預測固床工的經歷事件後的破壞指標改變程度。事件選用在意大利南蒂羅爾發生的三個洪災事件，並進行固床工建造材料的識別和結構的年齡確定，進行統計分析。為了基於粗糙集分析預測破壞指數，建

立了一個通用模型，該模型考慮了所有固床工的建造材料，之後分別針對混凝土和磚石結構建立了兩個特定模型，並建立了通用模型的簡化版本。僅當選擇事件後功能 FPost 時，派生的規則庫才具有令人滿意的預測精度。通用模型的預測準確度為 68%，混凝土類別的預測準確度為 79%，磚石類別的預測準確度為 60%，而將決策簡化為二進制形式時則可以達到 86%。

從以上十四篇論文之試驗以及理論推導成果得知，固床工的設置會導致區域性河段挾砂能力的改變，能夠有效的減少保護河段的沖刷，然而於區段內減少的挾砂能力會轉移至下游，透過實驗提供不同水流狀況、設置密度、固床工結構等因素，可以使工程師有能力透過固床工的設置方式，以達到防止沖刷同時又不產生額外不良影響之目的。然拱型固床工對河段造成的影響並未在上述文章中提及，於近年為營建生態棲地、穩正流心等需求增加，增加了本計畫的探討價值。

二、水槽沖刷實驗

(一) 張則安(1994)

假設阻力係數為可加性，而將阻力係數劃分為二，一為溪床阻力係數、二為固床工群之阻力係數，探討阻力係數與固床工個數的關係，從中推導固床工間距之推估式如下：

$$\left(\frac{L}{L_0}\right) = 10^{9.8} \left(\frac{h_e}{R}\right)^{-3.46} \left(\frac{\nu}{UR}\right)^{5.1} \left(\frac{gR}{U^2}\right)^{-3} \left(\frac{\tau_g}{\rho U^2}\right)^{-3.9}$$

式中，

L 為固床工間距； L_0 為試驗區總長； h_e 為固床工有效高度； R 為水力半徑； ν 為運動黏滯係數； U 為水流速度； g 為重力加速

度； τ_g 為固床工產生之形狀阻力； ρ 為流體密度。

由於此公式中所假設之條件與現場實際狀況並不相符，造成理論間距有高估之情形，因此其適用之對象、適用之範圍有必要再予以檢討。

(二) 黃政達(1995)

利用動態平衡理論、室內動床試驗以及野外實地調查將資料予以修正，得到固床工間距與河道下游總輸砂率、含砂水流之流速、雷諾數及福祿數等泥砂水理參數間之關係，由此得知最佳固床工密度所造成之水理特性並推導出現場動床固床工間距之公式。

$$L = 4.67d_{65}^{0.14}H_1^{-0.73}S^{-0.45}$$

式中，

L 為固床工間距(m)； d_{65} 為河床質代表粒徑(m)； H_1 為設計流動水深(m)； S 為原河床坡度(%)。

由上式得知當流動水深增加或河床坡度較陡時，固床工之間距應縮小。

(三) 游繁結(1995)

在滲流影響極小之情況下，以清水流對三組均勻砂及兩組非均勻砂進行水槽試驗。試驗結果認為 D_{50} 為一適宜之代表粒徑，且固床工間距之減少的確有降低水流剪力及減少淘刷量之功能。

(四) 吳尚訓(2000)

1. 藉由分析泥砂臨界起動功率與固床工間距變化之關係，得知臨界起動功率將因為固床工間距減小而逐漸下降，如此將會減低固床工抑制冲刷以及穩定河床之功效。
2. 因為固床工在適當之間距下可以有效抑制河床泥砂的輸送，但若在粒徑大小不一、水流條件及固床工間距不適當之情況下，則會造成固床工之功效削減，更可能會造成河床下游冲刷加劇。所以由相對

冲刷率得知，河道中保護段愈長則對於整個河床的穩定作用也就愈明顯。

3. 依照局部區域保護試驗和未設置固床工試驗所得之數據資料，再根據日本學者道上、鈴木之研究，而確切證明了固床工設置時對於上游河床面下降得到控制，但是對於下游一側的河床則產生劇烈冲刷。此外針對局部保護區域之下游冲刷進行觀測，發現隨著固床工間距的縮短對於下游河床冲刷有減緩之趨勢，此結果證明在局部地區構築固床工依然可對下游河床有一定之保護效果。
4. 試驗中採用臨界起動功率與水流功率之觀念，由已知固床工之設計間距推求平均冲刷率及其他相關因子之關係式。由試驗結果得知河床上泥砂平均冲刷率、水流功率、泥砂顆粒之臨界起動功率、固床工間距與鋪設坡度等參數相關，可表示如下：

$$S''_{ra} = S''_{rco} - 8 \times 10^{-5} \left(\frac{W - W_c}{W_c} \right)^{0.83} \left(\frac{L_0 - L}{L_0} \right)^{2.81} (S)^{1.23}$$

式中，

相關係數 $r = 0.90$ ； S''_{ra} 為全區段設置固床工時之保護無因次冲刷率； S''_{rco} 為半區段設置固床工保護時之無因次冲刷率； S 為河床坡度； W 水流功率； W_c 臨界起動功率； L 為固床工間距； L_0 為試驗區段總長度。

(五) 何國勇(2007)

針對近直線弧形開口式固床工進行水工模型試驗，試驗結果得知：

1. 固床工開口數量的增加，得以分散水流對開口下游底床的衝擊，使淘刷坑範圍縮小，淘刷深度變淺，且由於水流的分散而使開口下游淘刷坑水流形成漩渦，以致流速減緩。
2. 床型高程歧異度為淘刷坑深度變化之指標，其值隨著固床工開口數

量的增加、床質粒徑的粗化、渠道坡度的減緩及流量的降低而減少。

(六) 柴鈺武(2001)

透過清水流之渠槽試驗，探討溪床上系列固床工設置前後之泥砂運移情形，以解析系列固床工抑制床面泥砂沖刷之效果。經研究結果指出，系列固床工可以有效抑制床面泥砂沖刷量，並隨著固床工間距縮小，相對平均沖刷率亦隨之減小，抑制泥砂沖刷效果越佳；同時，從全區試驗及半區試驗結果顯示，雖系列固床工可以減少泥砂的沖刷外移，但其所減少的土砂量，總會在其下游側無固床工保護的溪床上獲得補充。

(七) 黃彥文，黃宏斌(2003)

藉由渠槽試驗，利用兩種河床質，配合五種固床工間距，三種坡度，在每特定間距與坡度下再施以四種不同之試驗流量來做試驗。其研究成果如下：

1. 經試驗流量沖刷過後，固床工下游端均會沖出一個明顯之沖刷坑，但其大小不一。在同一間距與坡度下，沖刷坑會隨流量之增加而遞增，且沖刷深度最大之位置也隨之往下游移動。沖刷坑之深度亦會隨坡度增加而遞增，但其增加之趨勢並不因固床工間距不同而有其相關性；然而在間距較大者會產生深度較大之沖刷坑。
2. 由試驗結果所推求之臨界流量可看出，大多會隨著坡度的增加而明顯的減少，亦會伴隨著固床工間距的增加而明顯的減少，但是在部份數據上，卻無此性質，主要原因在於試驗組數太少，且在經由線性迴歸後所求的趨勢線，其斜率大小差異過大，使得試驗數據所推估出之臨界流量值呈現不規則的跳動。

3. 在同一間距下，輸砂量隨著流量的增加而逐漸增加，且增加的程度，也伴隨著坡度的不同而有所差異，在坡度較緩的情況下，其增加之程度較緩慢，在坡度較陡的情況下，其增加之程度較為劇烈。
4. 固床工在坡度較緩之情況下確實能有效保護河床避免淘刷，減低泥砂輸砂量，但在坡度較陡時，則需再加以討論，尤其是針對細顆粒而言。

(八) Aderibigbe et al. (1998)

於研究中發現福祿數與淘刷坑長度及深度之相關性，並提出中值粒徑大小為影響河床質發展及淘刷坑變化的因子，同時渠道傾斜程度及漸變水深變化亦是另一決定因子，尤其是漸變水深變化的程度直接影響了淘刷變化的過程，其原因是構造物設置後所產生水躍程度與類型之沖擊角度直接對淘刷坑深度產生作用。

(九) Melville-Coleman(2000)

底床特性影響因子包括底床質中值粒徑(D_{50})、幾何標準偏差(σ_g)、底床質密度(ρ_s)等。若已知底床質中值粒徑(D_{50})且溫度與顆粒變化不大時，即可由 Shields 臨界啟動曲線(Shields,1936)，推求其相對之臨界啟動剪力速度(critical shear velocity, u_{*c})。Melville-Coleman 重新迴歸臨界啟動試驗數據獲得下式：

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125D_{50}^{1.4} \quad 0.1\text{mm} < D_{50} < 1\text{mm}$$

$$u_{*c} = 0.0305D_{50}^{0.5} - 0.0065D_{50}^{-1} \quad 1\text{mm} < D_{50} < 100\text{mm}$$

可由水深(y)推求底床質臨界啟動速度，如下式：

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \log(5.53 \frac{y}{D_{50}})$$

其中， V_c 為底床質臨界啟動速度， u_{*c} 與 V_c 之單位為 m/s。

- (十) Gaudio et al. (2000)
- (十一) Chinnarasri & Kositgittiwong (2008)
- (十二) Meftah & Mossa (2002)
- (十三) Keshavarzi & Khaje Noori (2010)
- (十四) Sohrabi et al. (2018)

上述文獻中或透過水槽試驗將原型縮小以進行分析、或透過縮小模型與實際沖刷狀況的比較以校正從縮小模型得出的結果，都試圖以實驗的方式盡可能量化固床工的設置對區域河段內的影響，雖模型為縮小模型，然而透過相似性條件可以推測放大為原型時的狀況。本計畫內容亦期待透過水槽實驗，量化不同拱度的拱型固床工對上下游的影響，也透過應力量測分析、了解固床工的量體應為多少避免因水流狀況不同所造成的破壞。

三、回歸參數因子

(一) 黃宏斌(2016)

綜合前人公式與本研究之沖刷坑深度無因次模式(如圖 2-1)

得下述公式：

$$\frac{h_s}{H} = 1.301 \left(\frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.4004} \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.5019}$$

式中：

h_s 為沖刷坑深度(m)； H 為壩高(m)； q 為單寬流量(cms/m)；
 d 為渠床粒徑(m)； g 為重力加速度(m/s²)。

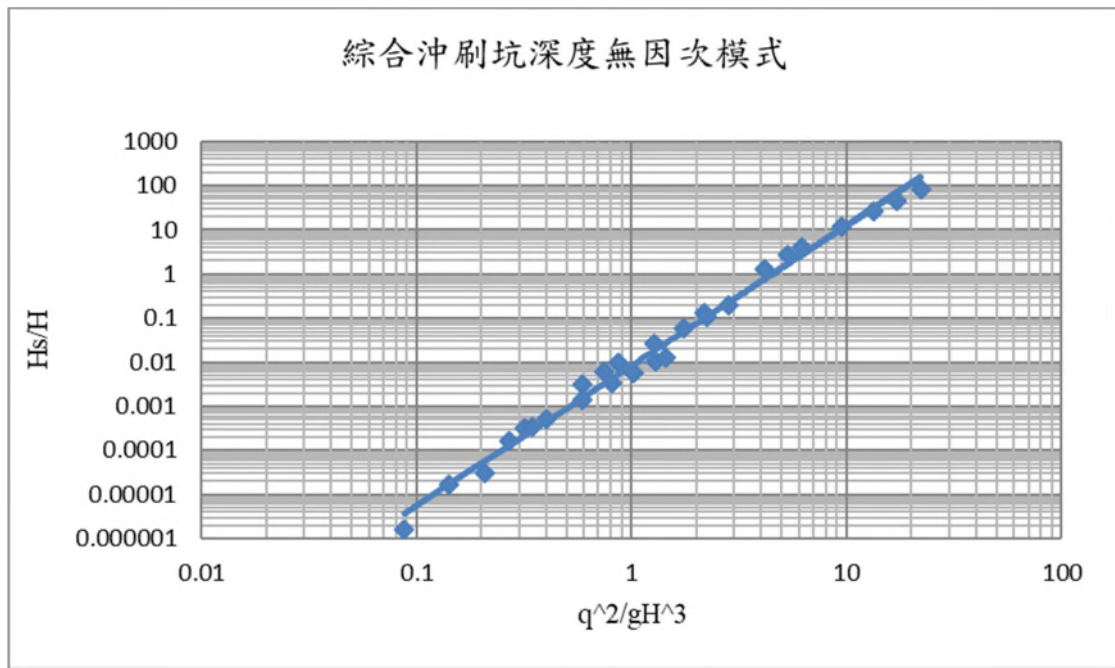


圖 2-1 綜合沖刷坑深度無因次模式圖

資料來源：黃宏斌，2016，105 年水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治方法之探討

(二) Dietz(1972)

提出以淘刷坑斷面流速描述淘刷坑之平衡深度：

$$\frac{y_m}{y_{m,e}} = \frac{\omega(U_0 - U_C)}{U_C}$$

式中，

y_m 為最大淘刷深度(m)； $y_{m,e}$ 為平均淘刷深度(m)； U_c ：臨界流流速(m/s)； U_0 ：斷面平均流速(m/s)、 $U_0 = Q/A$ ， Q 為固定流量(m³/s)、 A 為通水斷面(m²)； $\omega=1+3\gamma_0$ ， γ_0 ：紊流強度係數。

但Dietz 所提出的公式中僅探討淘刷坑的平衡淘刷深度，並未將構造物間距、溪床床質與溪床坡降等因子納入考量，因此其實用性還需依不同之區域進行調整。

(三) Gaudio et.al(2000)

以清水流方式進行水工模型試驗，探討固床工下游淘刷坑形成之機制，在連續兩固床工間距不影響其間淘刷坑發展之前提下，認為固床工下游淘刷坑所產生之最大淘刷深度(y_s)與下列參數有關：

$$y_s = f(g, \nu, \rho_s, \rho_w, q, y_n, D, a_1)$$

式中：

g 為重力加速度(m/s²)； ν 為水之黏滯度(m²/s)； ρ_s 為床質粒徑密度(kg/m³)； ρ_w 為水之密度(kg/m³)； q 為單寬流量(m²/s)； y_n 為正交水深(m)； D 為床質代表粒徑(m)； a_1 為型態水躍(morphological jump) = $(S_0 - S_{eq})L$ 。

同時，Gaudio et.al 利用固床工下游淘刷坑的量測結果，應用 Buckingham π 理論，以臨界比能 H_s 代替均勻流之正交水深 y_n ，同時，選擇重力加速度 g 、水之密度 ρ_w 及單寬流量 q 之變化，作為基本的變量指標，得到以下公式：

$$\frac{y_s}{H_s} = \phi \left[\frac{q}{\nu}, \Delta, \frac{a_1}{\Delta D}, \frac{a_1}{H_s} \right]$$

若忽略紊流流速的影響並假設床質密度為常數，則上式簡化為：

$$\frac{y_s}{H_s} = \phi \left[\frac{a_1}{H_s}, \frac{a_1}{\Delta D} \right]$$

式子中 $\frac{a_1}{H_s}$ 可表達因固床工設置產生不同型態水躍能量間的損失比例，而 $\frac{a_1}{\Delta D}$ 則呈現型態水躍與床質代表粒徑(D)之關係， Δ 為床質之比密度($\Delta = \rho_s / \rho_w$)。據此，推估出固床工下游淘刷深度及淘刷坑長度之無因次公式：

$$\begin{aligned} \frac{y_s}{H_s} &= 0.18 \frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 0.369 \\ \frac{l_s}{H_s} &= 1.87 \frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 4.02 \end{aligned}$$

(四) Wu et al.(2002)

將吳嘉俊(2000)之研究資料進行彙整分析，獲得帶工下游淘刷坑之幾何形狀公式如下，而淘刷坑幾何形狀(Y)與相關水理參數(II)之關係圖如圖 2-5 所示。

$$Y = \left(\frac{d_{sc}}{L_{sc}} \right) = f(II) = 2.7046 \left(\frac{1}{(S_g - 1) D_{50} S L_I} \sqrt[3]{\frac{q^4}{g^2}} \right)^{-0.3384}$$

其中， d_{sc} =帶工下游溪床最大淘刷深度(m)、 L_{sc} =帶工構造物下游面至下游淘刷坑最大淘刷深度的水平距離(m)、 q =整治段之單寬流量(cms/m)、 S_g =溪床床質比密度、 g =重力加速度、 S =溪床水力坡降、 D_{50} =溪床床質中值粒徑(m)。

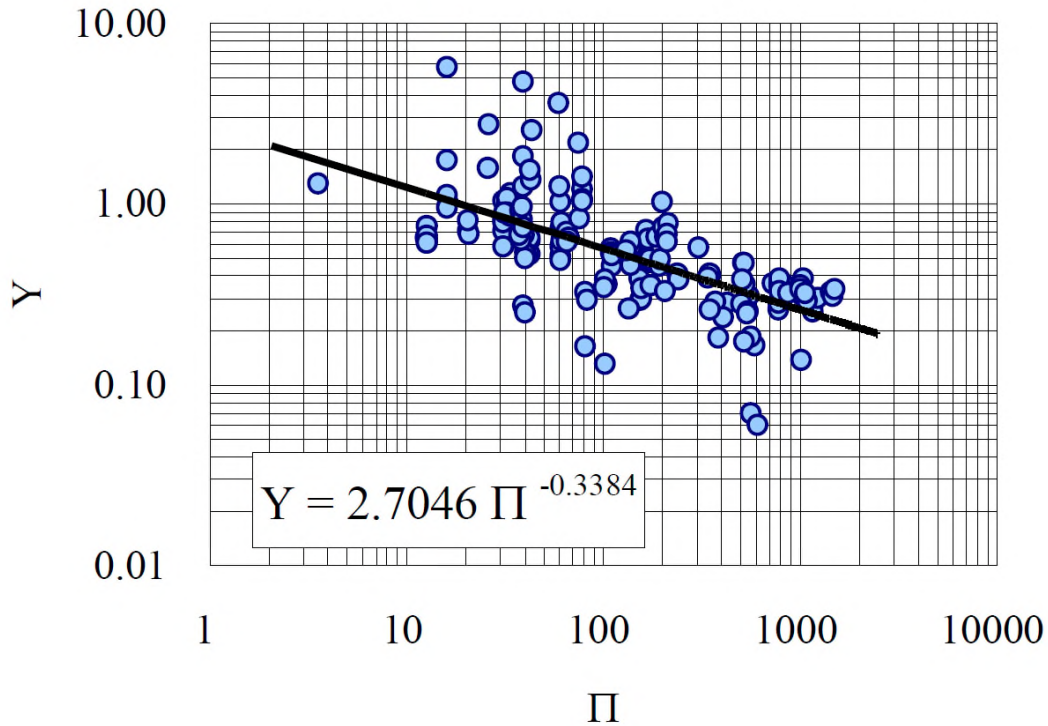


圖 2-2 帶工下游淘刷坑幾何形狀與水理參數關係(摘自 Wu et al., 2002)

資料來源：Wu C.-C., C.-H. Hou, C.N. Chen, and C.-Y. Shih (2002) Determination of groundsills interval for stream training, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. 4(6)

(五) 游繁結、黃政達(1996)

以長 300cm，寬 21cm，高 25cm 之矩形斷面渠槽進行試驗，試驗流量為 40、60、80 及 100(l/min)，試驗坡度為 5%及 10%，試材均勻砂之粒徑分別為 1.5、3、5mm，混合砂之中值粒徑為 2.3 及 4.1mm。經由 320 組之試驗數據求出固床工之推估式如下：

$$\frac{H}{L} = 0.042 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{-0.1994} \left(\frac{u}{\sqrt{gh}} \right)^{-0.3846} S^{0.4818}$$

式中：H 為固床工有效高度(m)；L 為固床工間距(m)； D_{50} 為中值粒徑(m)；h 為水深(m)；u 為平均流速(m/s)；g 為重力加速度 (m/s^2)；S 為水力坡降。

(六) 連惠邦(2001)

採三種混合砂樣從事渠槽試驗，試驗所使用之循環渠槽長 5.76m，寬 0.08m，深 0.25m，渠槽升降最大坡度為 30 度，固床工間距分別為 20、40、80 及 160cm，渠槽坡度為 2、3、4 度，水流流量為 0.5403、0.2897 及 0.0892(1/s)。其試驗結果得到下列公式：

$$\frac{S_r}{\sqrt{gh}} = 2.9 \times 10^{-4} \left(\frac{W - W_c}{W_c} \right)^{0.86} \left(\frac{L}{L_0} \right)^{0.37} S^{1.28}$$

式中，

S_r 為設置固床工後之平均沖刷率； W 為水流功率； W_c 為臨界水流功率； L_0 為河段長度； L 為固床工間距； S 為坡降。

(七) 林雲睨，黃宏斌(2002)

利用試驗之資料與其相關之因子進行迴歸分析，結果固床工設置後渠槽之阻力係數可表示成：

$$f = 8.272 \times 10^{-5} \times \left(\frac{q_s}{q - q_c} \right)^{-0.00753} \times \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.00318} \times \left(\frac{h}{D_s} \right)^{0.0302} \\ \times \left(\frac{B}{h} \right)^{0.715} \times (S)^{2.03} \times \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{-1.97}$$

式中，

f ：Darcy-Weisbach 阻力係數； q_s ：單寬輸砂量(cms/m)； q ：單寬流量(cms/m)； q_c ：單寬臨界流量(cms/m)； B ：渠槽寬度(m)； L ：固床工間距(m)； h ：水深(m)； D_s ：泥砂粒徑(m)； S ：坡度(%)； g ：重力加速度(m/s²)

利用此式可推得固床工設置後所增加之阻力 $\tau_{固}$ 為：

$$\tau_{固} = \frac{f}{8} \rho v^2 = \frac{\rho v^2}{8} 8.272 \times 10^{-5} \times \left(\frac{q_s}{q - q_c} \right)^{-0.00753} \times \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.00318} \\ \times \left(\frac{h}{D_s} \right)^{0.0302} \times \left(\frac{B}{h} \right)^{0.715} \times (S)^{2.03} \times \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{-1.97}$$

由上式可知其阻力會隨著單寬輸砂量、坡度以及重力加速度增加而增加，其中又受坡度影響最為劇烈。

(八) 黃彥文，黃宏斌(2003)

藉由渠槽試驗，利用兩種河床質，配合五種固床工間距，三種坡度，在每特定間距與坡度下再施以四種不同之試驗流量來做試驗。其試驗結果顯示，固床工的設置的確能穩定河床並減少河川輸砂量的產生，最後藉由 120 組輸砂試驗結果進行迴歸分析，分別求得臨界流量模式及輸砂量模式：

1. 臨界流量模式

$$q_c = 0.01689 \times 10^{-6} \left(\frac{L}{B}\right)^{-0.4590} (D_g)^{3.1429} (S)^{-1.4771}$$

$$D_g = D/[v^2/(\rho_s/(\rho - 1))g]^{1/3}$$

$$\text{相關係數 } R^2 = 0.49127$$

2. 輸砂量模式

$$\frac{q_s}{q - q_c} = 0.0786 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.8115} \left(\frac{h}{D}\right)^{1.3503} (D_g)^{-0.0729} (S)^{2.5320}$$

$$\text{相關係數 } R^2 = 0.82367$$

式中：

q_c ：單位河寬之河床載起動流量($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)； q ：單位河寬流量($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)； q_s ：單位河寬之河床載運移量($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)； L ：固床工間距(m)； B ：河道寬度(m)； D_g ：河床質之無因次粒徑； D ：河床質之代表粒徑(m)； S ：河床坡度； v ：動力黏滯係數(m^2/s)； ρ_s ：河床質密度(kg/m^3)； ρ ：流體密度(kg/m^3)； g ：重力加速度(m/s^2)； h ：斷面水深(m)。

(九) 水土保持手冊(2005)

早期固床工間距之決定，是以累積之經驗為設計之依據，常

使用之公式如下：

$$L = \frac{100}{S - S_p} h_e$$

式中，

L 為固床工間距(m)； S_p 為計畫河床之坡度(%)； S 為原河床坡度(%)； h_e 為固床工之有效高度。

上式於緩坡時利用幾何分析所推導之公式，工程人員須按其經驗決定計畫河床坡度及固床工之有效高度，而依臺灣工程施工設計標準，一般以 3%作為計畫河床坡度。

(十) 池谷浩(1977)

由河床安定坡降探討固床工間距 L ，根據野外量測資料提出固床工間距與計畫坡度之關係為：

$$L = \frac{(1 \sim 2)}{S_p}, \left(\frac{1}{30} > S_p > \frac{1}{60} \right)$$
$$L = \frac{(1 \sim 1.5)}{S_p}, \left(\frac{1}{60} > S_p \right)$$

式中，

L 為固床工間距； S_p 為計畫河床坡降

(十一) 泉岩男(1984)

為了有效穩定河床，利用不同間距、高度、流量及河床粒徑級配等，來探討固床工效果，由試驗得知河床泥砂輸出量隨固床工高度及數量而遞減，並由試驗中得到試驗區間內固床工之防治效率 E_n 為：

$$E_n = \frac{q_0 - q_n}{q_0} = 1 - e^{-0.60[1+0.2029(n-1)]\frac{H}{h_0}}$$

式中，

q_0 為未設置固床工時之下游沖刷量(kg)； q_n 為設置 n 座固床

工時之下游沖刷量(kg)；H 為固床工下游最大沖刷深度(cm)； h_0 為最大洪水波高(cm)；n 為固床工的支數。

(十二) 木村喜代治等(1990)

針對野外蜿蜒溪流之水理特性進行矩形河道之理論推得固床工間距公式：

$$\frac{L}{B} = (\phi \cdot \pi)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^{-\frac{1}{3}}$$

式中，

L 為固床工間距(m)； $\phi = \frac{U}{U_*}$ 為流速係數， U_* 為摩擦速度(m/s)；

B 為河道寬度(m)； h 為斷面水深(m)。

由以上相關文獻可以看到對於固床工之計算式多為經由回歸或是經驗式得到，然其不同之計算式均有不同之設定條件，因此於參考或採用公式時需注意其設定條件與自身設定之合適性以及相符性，且也能看到影響最劇為河床本身之坡度，然改變其坡度也連帶改變其流速，勢必會影響其水流生態，也導致部分水滲流之情形。

四、數值模擬分析

(一) 王傳益等人(2004)

藉由 SMS 模式，針對不同水力條件下之固床工形式與設置間距進行模擬，並以 RMA2 模式模擬流場情況，其結果顯示鋸齒式固床工較傳統式固床工之消能與整流效果為佳。

(二) 李豐佐等人(2017)

運用無人飛行載具(UAV)於中沙大橋下游固床工拍攝之影像，提供固床工變動及周圍流場分析使用，經研究結果顯示固床工辨識軟體應用於現地，輔以人工辨識後能成功計算固床工各別面積及比較面積差異，以及固床工中心位移量。且所提出之大尺度粒子影像分析法亦已證實能應用於現地固床工周圍流場分析，然分析流速時則需要佈設地面控制點，將影像進行校正後才能進行流速分析。

由於無人飛行載具以及電腦數值模擬軟體之進步，透過模擬能大幅降低實際實驗所需之時間以及經費，且可以依模擬情況隨時調整參數，並能有一定之準確度。

(三) 楊廣培(2015)

透過 COMSOL Mutiphysics 軟體模擬不同尺度河床載於不同流量下之運動行為，分析預測河床中固床工遭受卵礫石撞擊之情形，以此做為後續補強固床工混凝土強度之建議，且可參考模擬結果之撞擊位置及分布，改變固床工之幾何布置

(四) 張程凱(2016)

運用三維模擬軟體 Fluent 針對固床工下游側平衡前後沖刷坑，進行流場數值模擬，以瞭解不同流量於平衡前後坑內不同位置之水理狀況，分析項目包刮平均速度剖面、紊流強度以及雷諾應力。經過模擬得出水躍以及平均流速剖面均與實測資料相當一致，以及得到紊流強度與流量呈正相關。

(五) Volz et al. (2010)

利用二維數值模型對壩的垂直侵蝕進行模擬分析，且同時預測壩體結構因溢頂流而破壞的情形。

(六) Faeh (2007)

利用 2dMb 模型進行數值模擬堤壩侵蝕情形，其中考慮了不同流量、輸砂情況之間的相互作用，由模擬結果顯示堤壩破壞情形供後續維護建議。

利用水理模式進行數值模擬對水工構造物於溪流中之影響目前已廣泛應用於水利、水保工程中，例如淹水潛勢評估、工業區水質模擬、堤防溢堤安全分析、外水防洪工程配置等等，現今由於科技的日新月異，不像以往只能依靠經驗而去做判定，現在多了數值模擬方法能以科學的角度去探討，是值得去研究探討的方向數值模擬可視為分析泥沙運移機制與過程的重要工具，隨著科學的進步，目前仍不斷被開發與創新。

除了國內，國外如歐美日等國家也利用二維模式進行數值模擬行之有年，以數值模擬方式評估潛在危險，並預測危害公共安全之破壞，提供更準確結果分析以供參考。

第三章 數值模擬輸砂模式

一、RiverFlow 2D

本團隊擬使用 RF-2D 模式，此模式輸砂模組控制方程式嚴謹，同時考慮懸浮載與底床載運移程式，並綜合水文和水力在河流中模擬動床和污染物擴散的有限體積模型，可以在河流中佈設洪水，模擬洪水氾濫、洪氾平原和複雜的地形，且其分辨率高，速度快，穩定性好，精度高。使用調整過後的三角網格可以實現在任何河流環境的關鍵特徵周圍解決流場問題，可運用於涵管、橋墩、堰、橋、閘門等構造物及水文事件、潰壩、土石流、泥砂傳輸模擬。

RiverFlow2D 發展於 1981 年，是一款最先進的融合水力學、水文學彈性網格的二維仿真計算軟體，最初模擬淺水流方程式，採用 Fortran 語法和 MacCormack 有限差分法 (MacCormack Finite Difference Scheme)，其功能和模型計算能力獲得美聯邦公路局。

(FHWA) 的認可。在洪水、泥石流、滑坡、河流、港灣等工程中用於快速、精準的體積守恆計算，提供高性能的有限體積引擎。RiverFlow2D 可以解決最苛刻的洪水建模情況，例如在初始乾燥地形上的潰壩和潰堤仿真計算。在水利、交通、地質工程有著普遍應用。二維水理輸砂模式 RiverFlow-2D ST(Sediment Transport) module，輸砂模組控制方程式相當嚴謹，同時考慮懸浮載與底床載運移程式，可針對區域沖淤情勢評估、防砂工程方案評估、探討底床的變化，本研究將利用 RiverFlow 2D 進行水仙溪程前後沖淤情勢評估及底床變化。

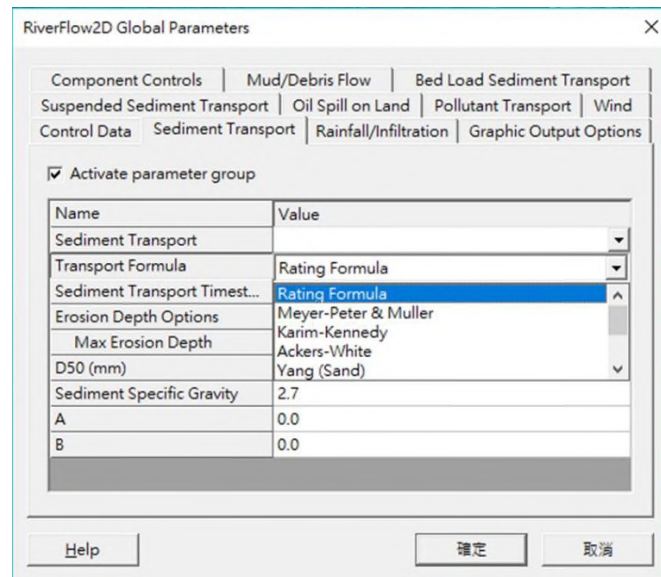


圖 3-1 RF2D 泥砂運移公式之設定界面。

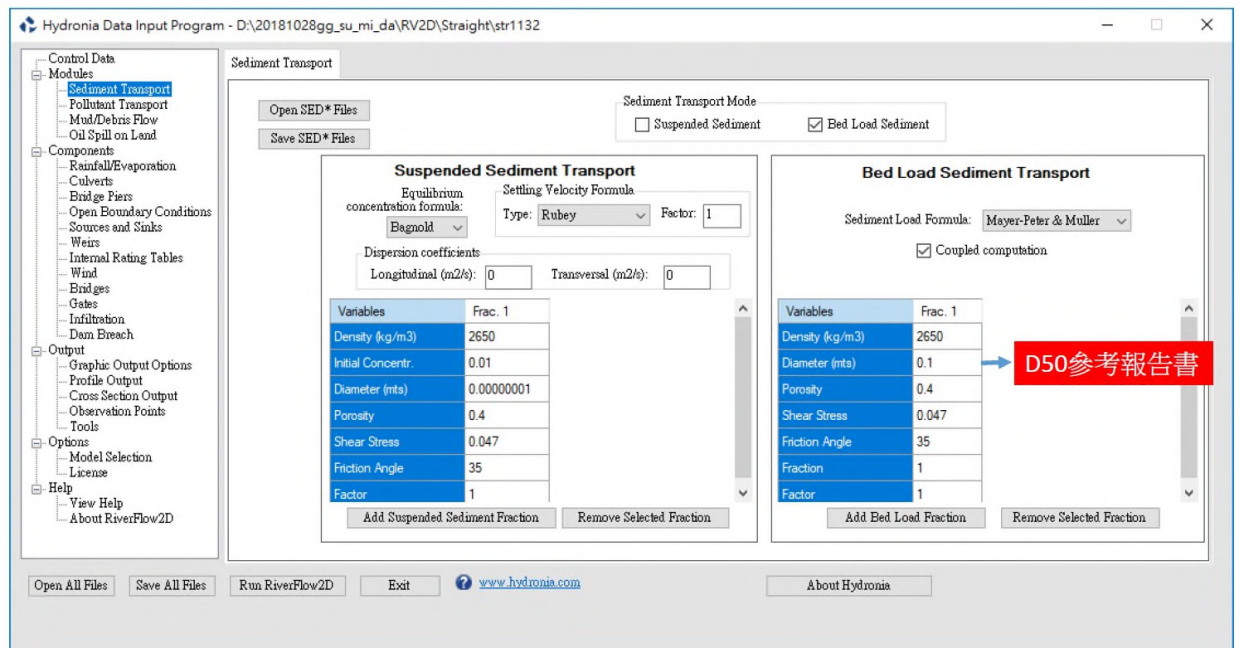


圖 3-2 RF2D 輸砂參數設定之界面



圖3-3 RF2D 現地模擬網格之界面



圖3-4 RF2D 下游邊界條件設定之界面

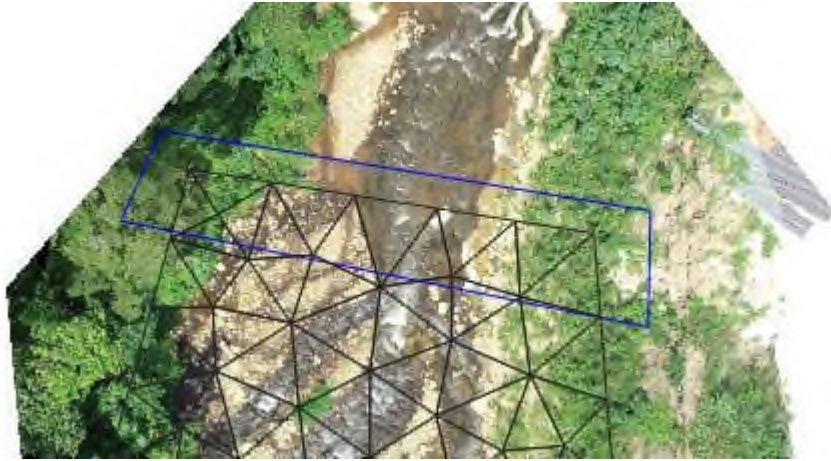


圖3-5 RF2D 上游邊界條件設定之界面



圖3-6 RF2D 曼寧n 值分區之界面

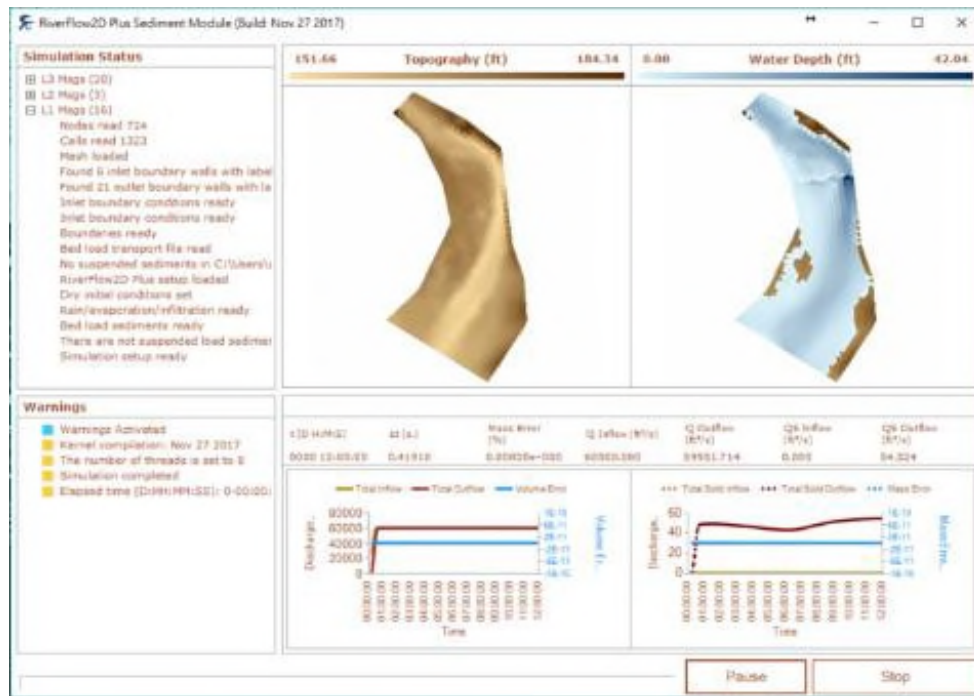


圖3-7 RF2D 模擬計算之界面

利用 GPU 版本的 RiverFlow2D 彈性網格模型的發布對於許多 2D 模型製作者來說是一個改變遊戲規則的模型，與非平行演算或非並行模型相比，模擬的速度通常快150 倍，將運行時間從幾天或幾小時減少到幾分鐘。

泥砂輸送模式可顯示的項目，包含了單獨計算懸移質和泥砂輸砂量、動床侵蝕沉積量，並利用10 個輸砂公式，導出泥砂運送在剛性床上、最大侵蝕深度地區。

底床載控制方程式：

1. 質量守恆方程式：

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

2. 動量守恆方程式(x 方向)：

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial \left[hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right]}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = \frac{p_{bx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w}$$

3. 動量守恆方程式(y 方向)：

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial \left[hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right]}{\partial y} = \frac{p_{by}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w}$$

4. 底床高度變化：

$$\frac{\partial \sum_{p=1}^{N_p} [z_p(1 - p_p)]}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0$$

其中 $h(m)$ 代表水深， $z(m)$ 代表底床高， $u(m/s)$ 為x軸方向流速， $v(m/s)$ 為y軸方向流速， t 為時間， $p = 1 \sim N_p$ 表示搬運過程中懸浮不同種沉積物的數目， p_p 代表不同 p 值時底床的孔隙率， z_p 為不同種沉積物的底床高， $p_{bx}(N/m)$ 和 $\tau_{bx}(N/m)$ 分別為沿著底床的壓力及剪應力， $\rho_w(m^3/kg)$ 為水的密度， $q_{sx}(m^3/s/m)$ 和 $q_{sy}(m^3/s/m)$ 為單位寬度之體積流通量，可藉由定律及輸砂公式求得。

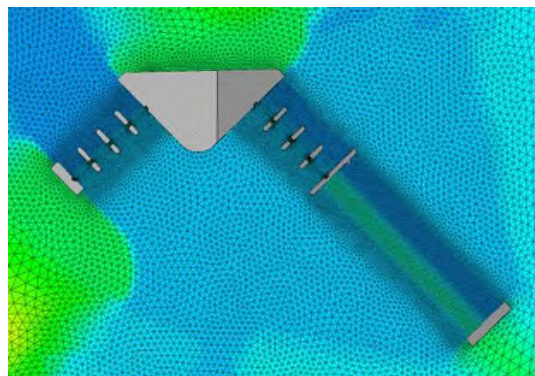


圖3-8 RiverFlow2D 模擬構造物於河面俯視圖

資料來源: <http://www.hydronia.com/riverflow2d/>

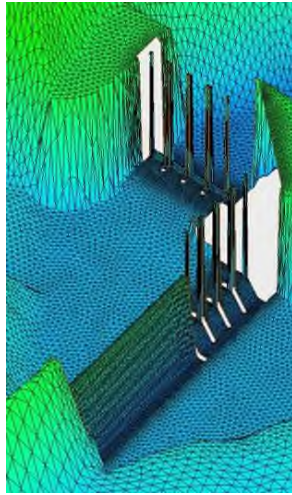


圖3-9 RiverFlow2D 模擬構造物於河面側視圖

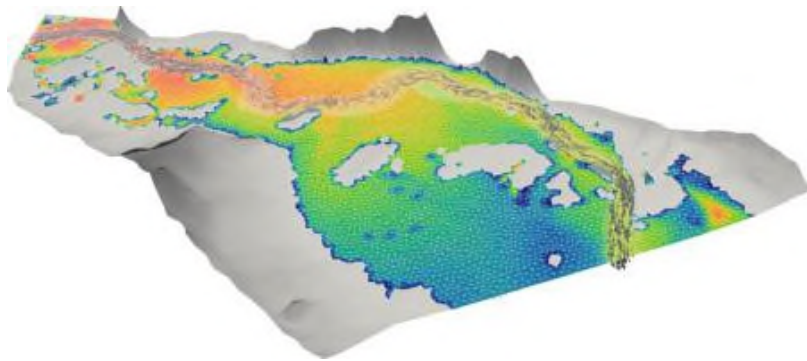


圖 3-10 RiverFlow2D 模擬合面網格

資料來源: <http://www.hydronia.com/riverflow2d/>

資 料 來 源 : <http://s377446641.initial-website.com/two-dimensional-models/riverflow2d-gpu/>

二、預計模擬區域及參數計算

參數部分分為兩部分說明，分別為流量歷線之水理計算以及沖刷條件設定。

(一) 流量歷線之水理計算

本團隊選用新北市八里區水仙溪做為模擬對象，水仙溪屬市管河川，流域範圍涵蓋新北市八里區及林口區，地勢多為丘陵地，河幅寬度變化不大，屬於野溪型河川。由水土保持手冊中表列之具無因次參數之雨量站中，距離計畫地點最近的為淡水雨量站，固以淡水雨量站之無因次參數進行流量歷線設計。

本模擬採取之流量歷線採用水土保持手冊修正三角形單位歷線法進行計算，進行重現期距 50 年，降雨延時 24 小時之離量歷線設計。水理計算參數採用水仙溪下游野溪治理計畫之水理計算基本資料中採用之數值。修正三角形單位歷線法分為三大步驟，第一步驟為推算出單位歷線，第二步驟為利用交替組體法設計雨型，並利用水文應用設計手冊中 24 小時 50 年重現期距之等雨量圖，將雨型進行修正，第三步驟為將雨型與單位歷線結合，生成流量歷線，下面將會出每一步驟的詳細過程。

1. 單位歷線

首先利用水仙溪下游野溪治理工程之基本資料以水土保持技術規範中記載計算集流時間的公式，計算出集流時間 T_c

表 3-1 水仙溪水理參數表

集水面積 A	272 公頃
山坡長度 L1	300 m
溪流長度 L2	4466 m
高 差 H	230 m
流入速度 V1 = 0.5 m/s	
流下速度 V2 = $20(230 / 4466)^{0.6} = 3.37$ m/s	
$t_1 = (300/0.5) = 600s = 10$ min	
$t_2 = (4466 / 3.37) = 1323.6$ s = 22.06 min	
集流時間 Tc = t1 +t2 = 32.06 min	

三角形單位歷線之基期 Tb、洪峰流量 Qp 及到達洪峰時間 Tp 與地文因子關係為：

$$Q_p = \frac{0.208 \cdot A \cdot Re}{t_p} = 15.8876 \text{ cms}$$

$$T_p = 0.5D + TL = 0.5D + 0.6T_c = 21.366 \text{ min} = 0.3561 \text{ hr}$$

$$T_b = 2.67 T_p = 57.047 \text{ min} = 0.95 \text{ hr}$$

$D \leq 0.133T_c = 4.26 \text{ min}$ 依水土保持手冊 $D < 5 \text{ min}$ 取
 $5 \text{ min} = 1/12 \text{ hr}$

其中：Qp 為洪峰流量(立方公尺/秒)；A:流域面積(平方公里)；Re:單位有效雨量(毫米)取 10mm；Tp:開始漲水至洪峰流量發生時間(小時)；D:單位降雨延時(小時)；Tb:歷線基期。

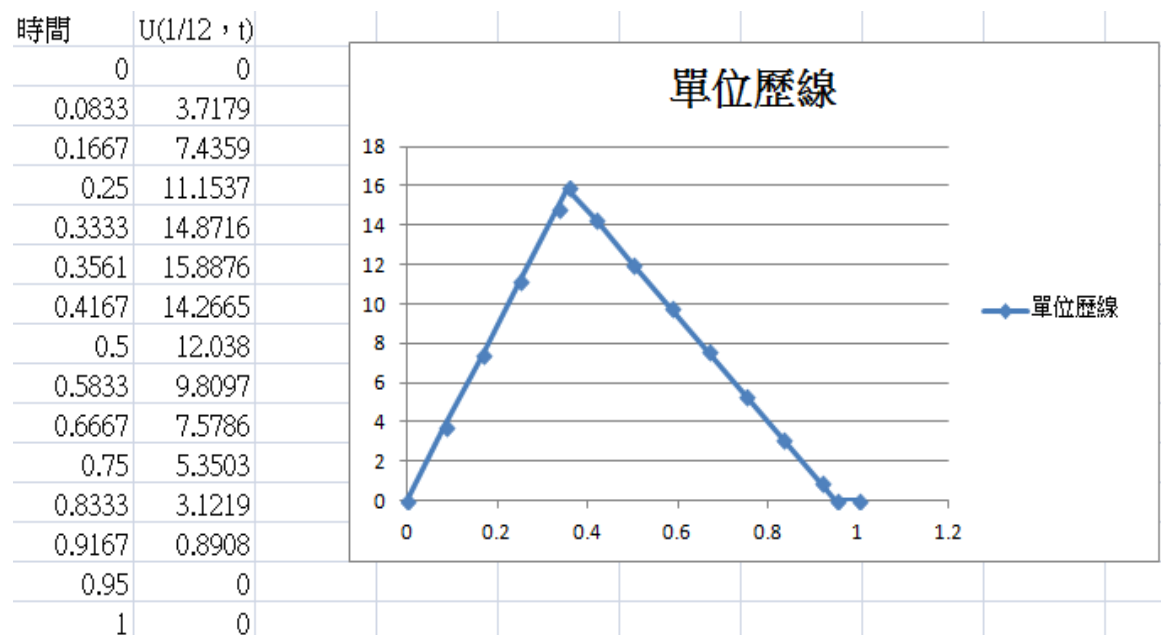


圖 3-11 水仙溪 5 分鐘 10mm 之單位歷線

求出三角形單位歷線 $U(1/12, t)$ 後，因與設計雨型時間間隔相符而不再進行 s 歷線轉換，之後進而配合設計雨型，扣除集水區入滲損失推求模擬流量。

2. 設計雨型

取得淡水測站無因次降雨強度公式之 A 、 B 、 C 、 G 、 H 參數，運用無因次降雨強度公式：

$$\frac{I_t^T}{I_{60}^{25}} = (G + H \log T) \frac{A}{(t + B)^C} \quad \text{.....(1)}$$

$$I_{60}^{25} = \left(\frac{P}{25.29 + 0.094P} \right)^2 \quad \text{.....(2)}$$

取得每五分鐘延時降雨強度、10 分鐘延時降雨強度... 直到 24 小時延時降雨，單位為 mm/hr。

將降雨強度乘以該降雨延時，得到該段時間內之累積雨量，單位為 mm，接著將後五分鐘累積雨量減去前五分鐘累積雨量，得出每五分鐘之降雨量，單位為 mm。

無因次參數如表 3-2 展示。

表 3-2 淡水雨量站無因次參數表

淡水地區之無因次降雨強度係數	
A	24.62938
B	55
C	0.68187
G	0.53402
H	0.32378

利用交替組體法設計雨型，將最大之雨量放置於中間，接著依次將次等大雨量擺置最大之雨量兩邊，依序排列，最後得出該地區 24 小時之設計雨型。但因為是五分鐘一筆的資料，總共 24 小時，總共會有將近 300 多組得資料，故利用程式迴圈將雨量歷線計算出來。

得出設計雨型後將其變換為百分比，並乘上水文應用手冊中 50 年重現期距 24 小時總降雨深度，得出設計雨量歷線。

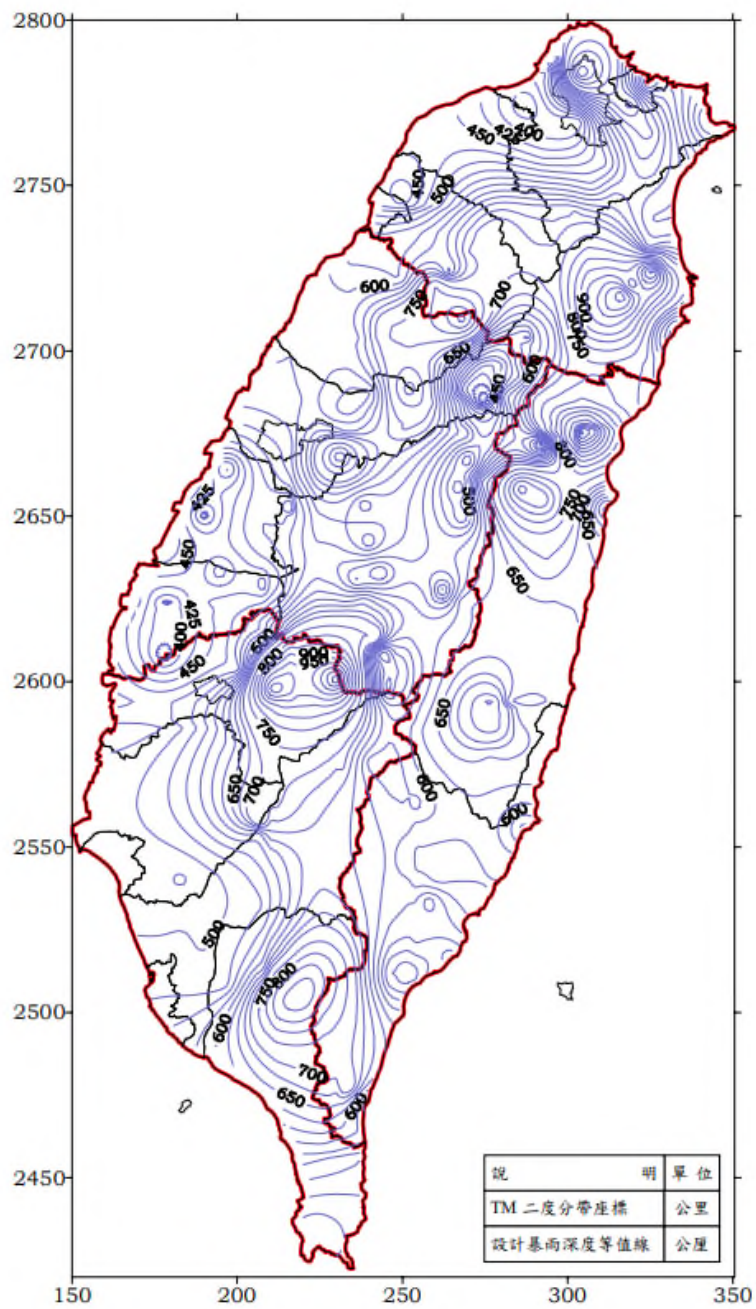


圖 3-12 50 年重現期距 24 小時等雨量線圖

最後將設計雨量歷線，扣除 2mm/hr 降雨損失，即得出設計有效降雨。

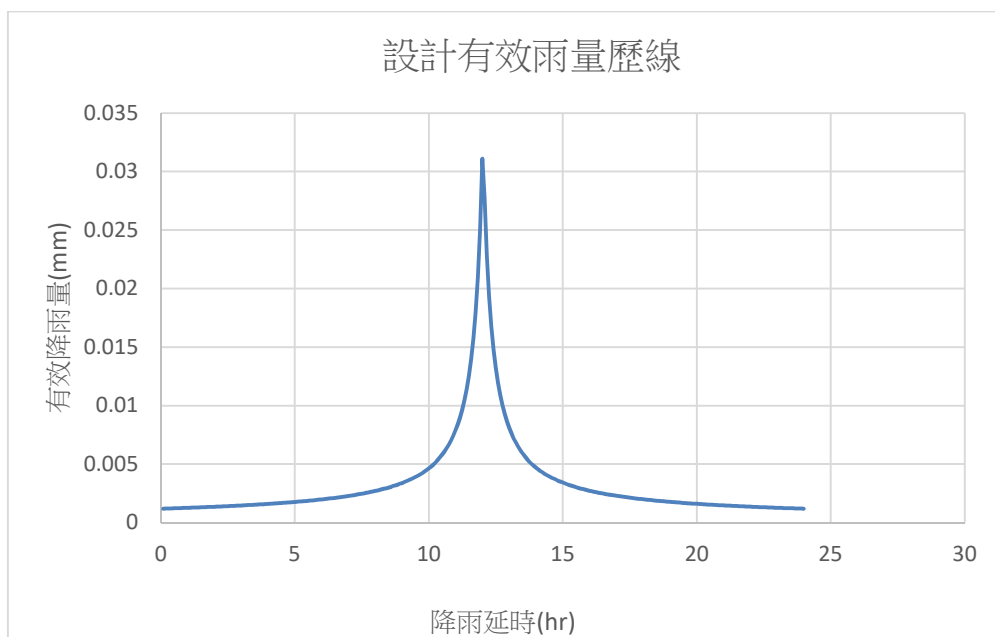


圖 3-13 50 年重現期 24 小時有效降雨歷線圖

3. 流量歷線

在單位歷線與雨型都計算出來之後，將兩者進行疊合計算出流量歷線。洪峰流量為 **82.51577 cms**

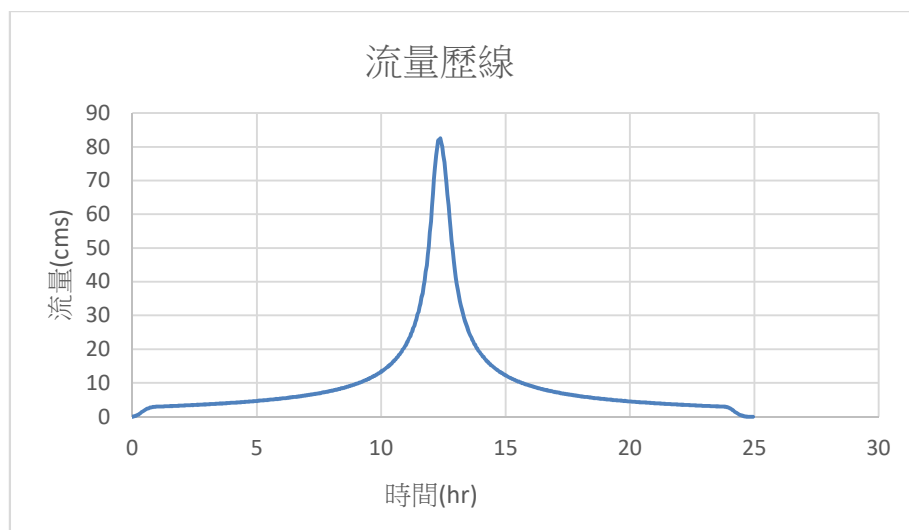


圖 3-14 50 年重現期 24 小時流量歷線圖

(二) 沖刷條件設定

水仙溪河床粒徑屬極粗礫石，故土體顆粒密度採 2550(模式預設為 2700 石英砂)，D50 採取 0.1，土體孔隙率也依照過去文獻資料採取 0.297(模式預設為 0.4)，摩擦角該地礫石為 28(模式預設為 30)、底床剪應力採 0.051(模式預設為 0.047)，曼寧 n 依照文獻水理資料設為 0.035，非成河段為 0.04，參數表列如表 3-3。

表 3-3 RiverFlow2D 模擬介面輸入參數

RiverFlow2D 模擬介面輸入參數		
參數	數值	說明
Density (kg/m^3)	2550	土砂顆粒密度
Diameter (mts)	0.1	中值粒徑(D50)
Porosity	0.297	土壤孔隙率
Shear Stress	0.051	底床剪應力
Friction Angle	35	摩擦角(排水摩擦角)
MaximumErosion Depth (m)	非固床工區域 2，固床 工 0	最大沖刷深度
Manning n	0.035	曼寧相關係數

1. 敏感度分析

此外本研究將對該河段進行 Courant Number 敏感度分析，將橫軸做為 Courant Number 縱軸為沖淤深度，模擬後的結果進行呈現。三個資料分別為河流橫斷面之左岸(凹岸)、河心中央、右岸，Courant Number 將從 1 降至 0.5，由圖 3-15 到圖 3-17 可以發現 Courant Number 由 1 降至 0.8 後，沖淤深度皆趨向穩定，但降至 0.5 時又破壞了穩態，

可發現降至 0.5 後開始發散，故本研究 Courant Number 將採取 0.7 作為模擬參數。

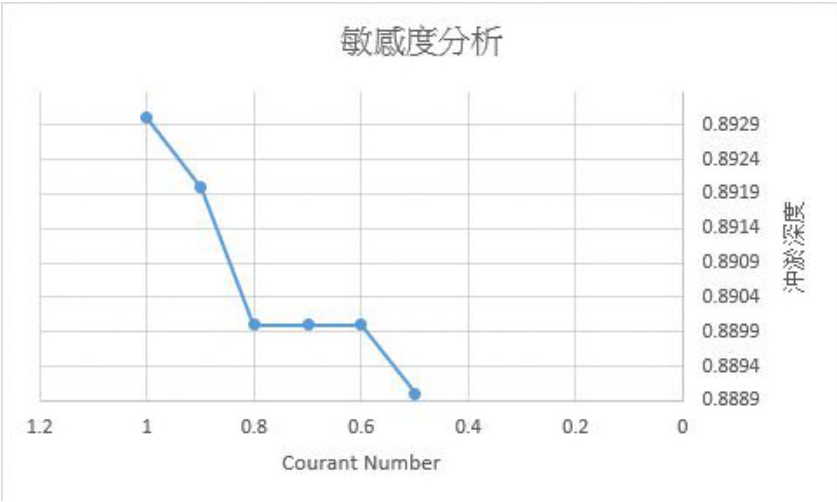


圖 3-15 Courant Number 對於冲刷深度的敏感度分析(左岸)

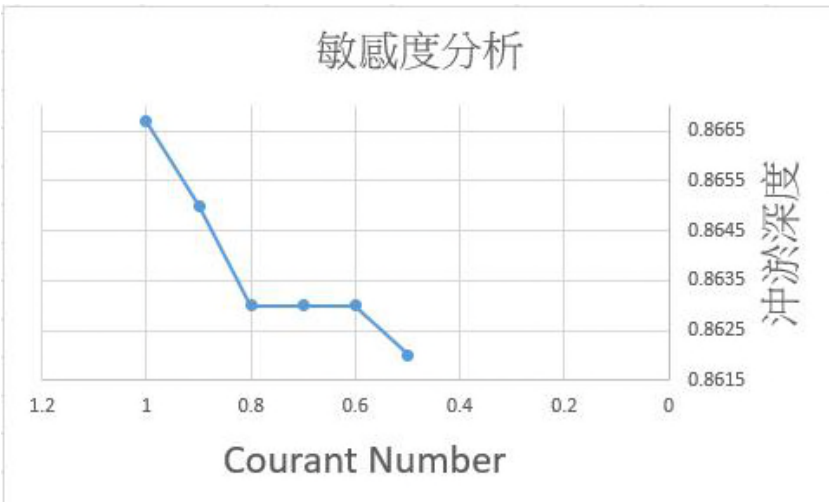


圖 3-16 Courant Number 對於冲刷深度的敏感度分析(河心)

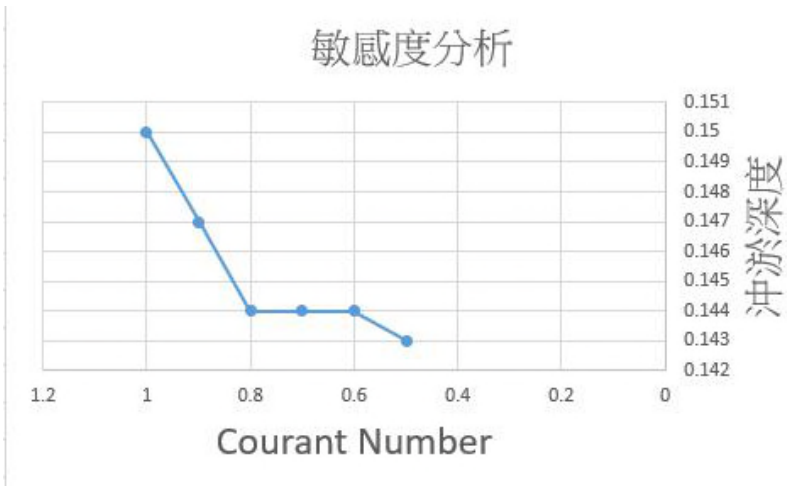


圖 3-17 Courant Number 對於沖刷深度的敏感度分析(右岸)

2. 模擬區域範圍

本研究針對水仙溪流域中直線型及拱型固床工各一支進行河到沖刷模擬，其正射影像及數直表面模型如以下所示。



圖 3-18 直線型固床工模擬區域範圍

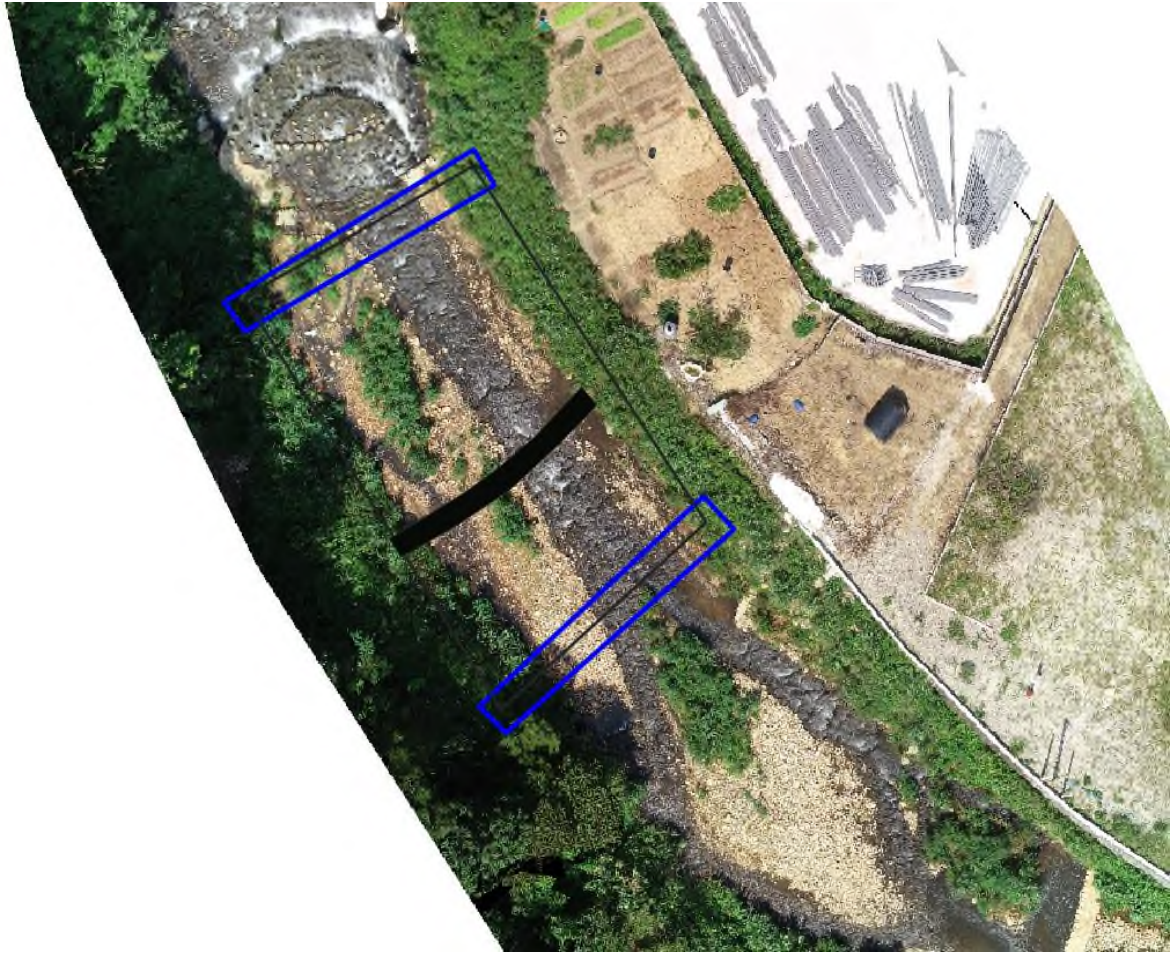


圖 3-19 直線型固床工及出、入流口設定

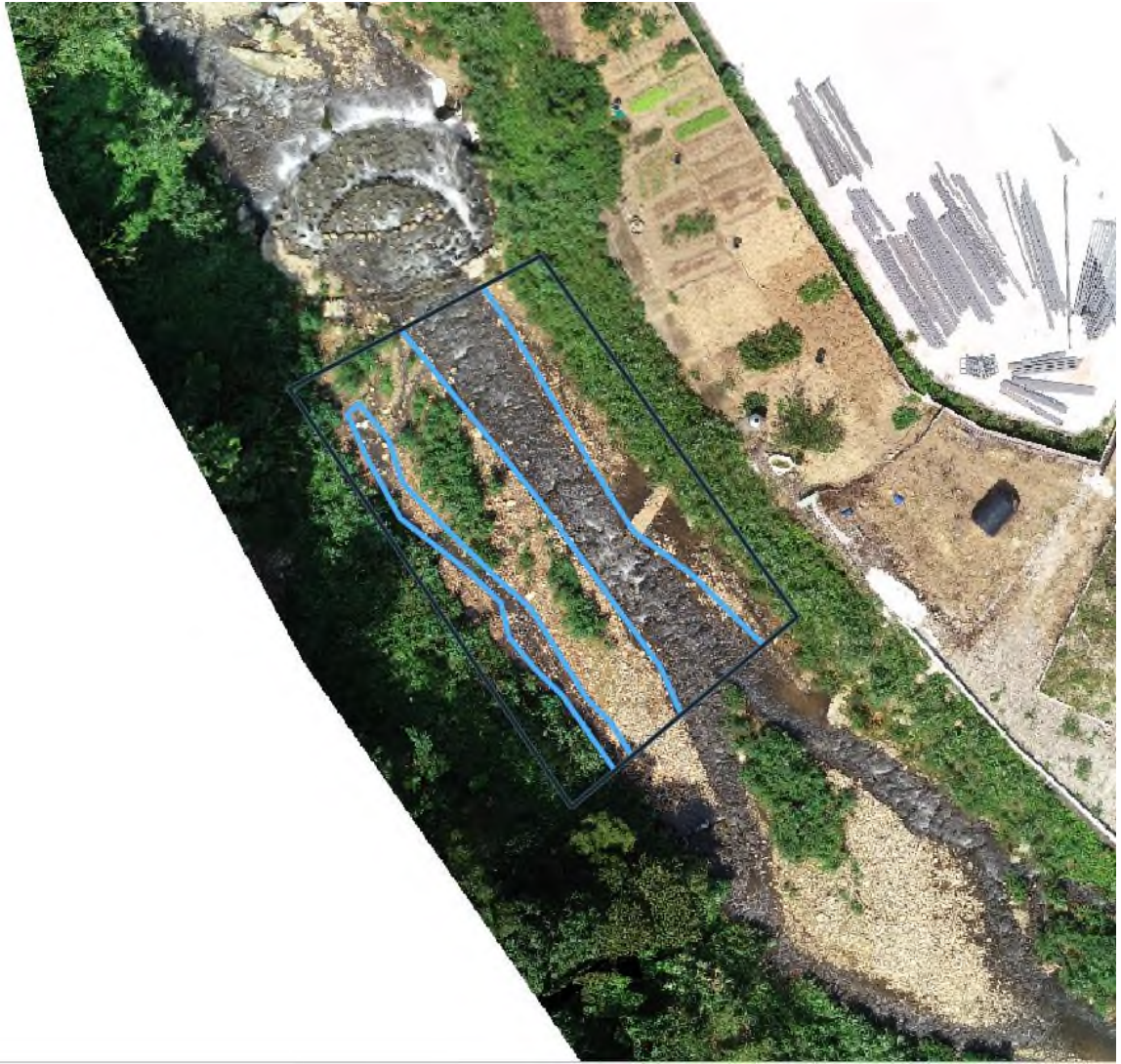


圖 3-20 直線型固床工曼寧 n 值之設定範圍

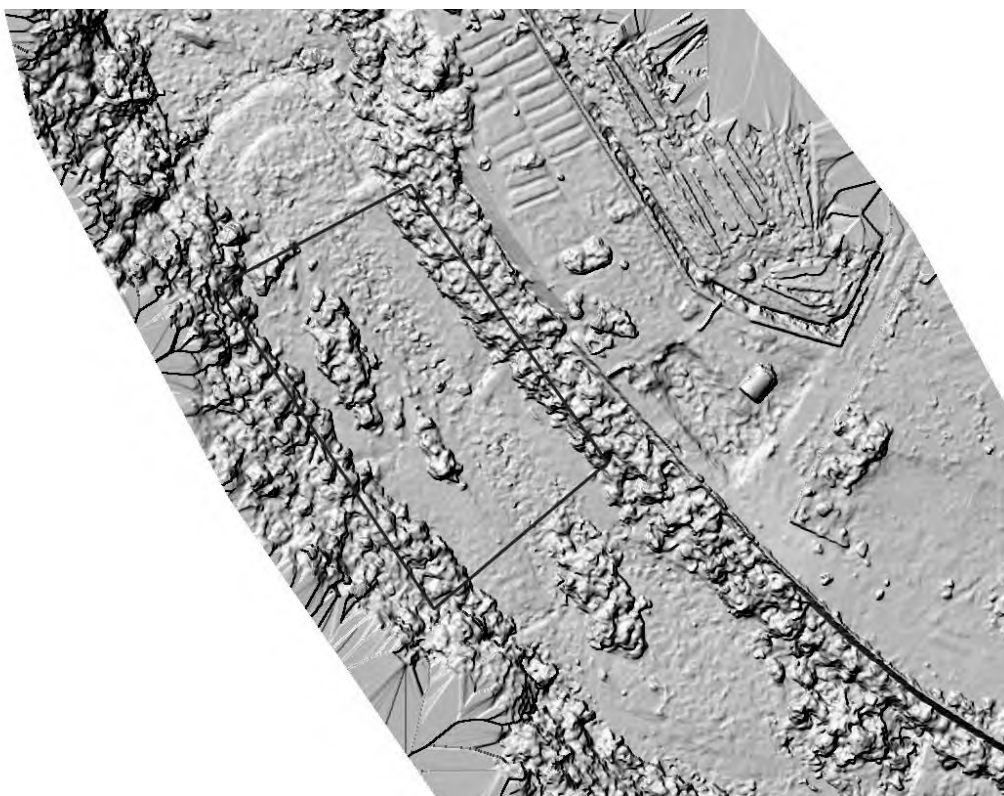


圖 3-21 直線型固床工數值地表模型



圖 3-22 上拱型固床工模擬範圍正射影像



圖 3-23 上拱型固床工正攝影像及出、入流口設定



圖 3-24 上拱型固床工曼寧 n 值設定範圍

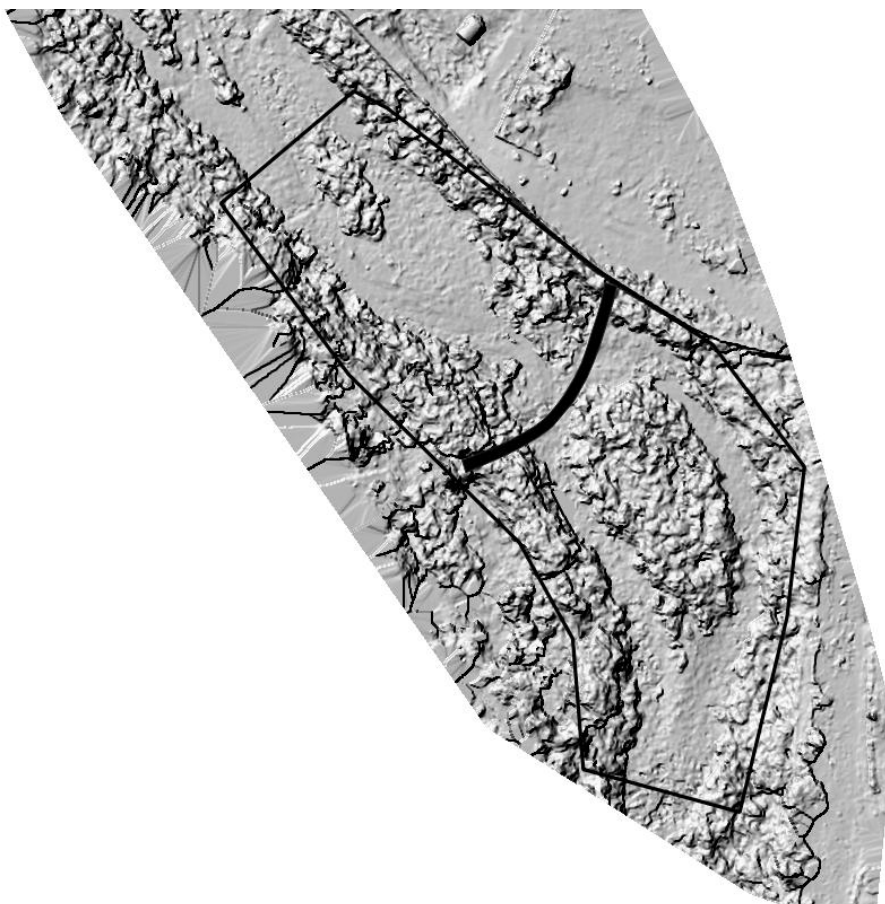


圖 3-25 上拱型固床工模擬範圍數值地表模型

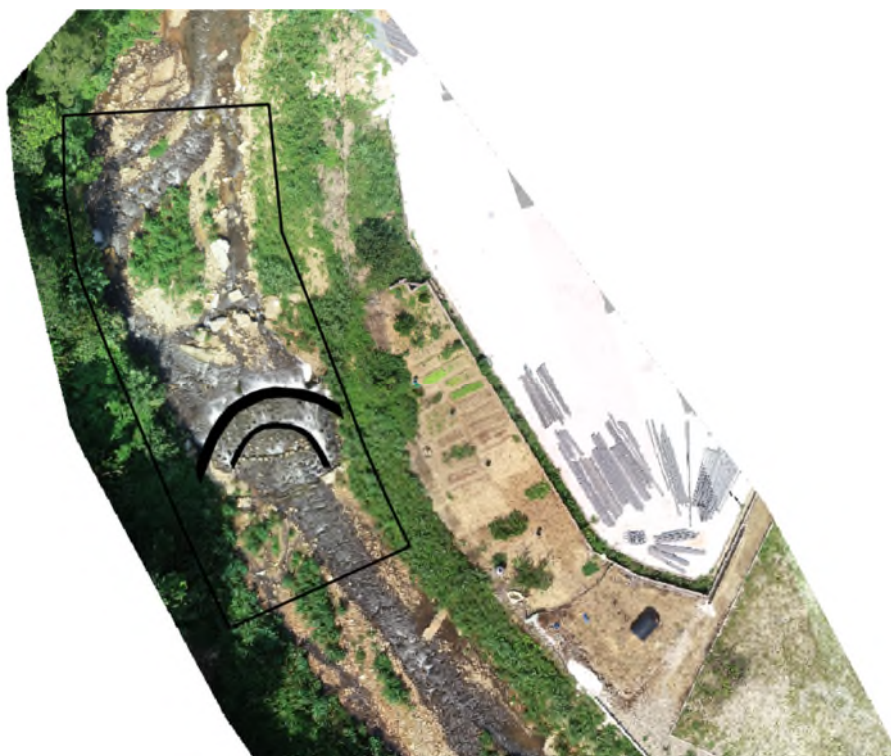


圖 3-26 下拱型固床工模擬範圍正射影像

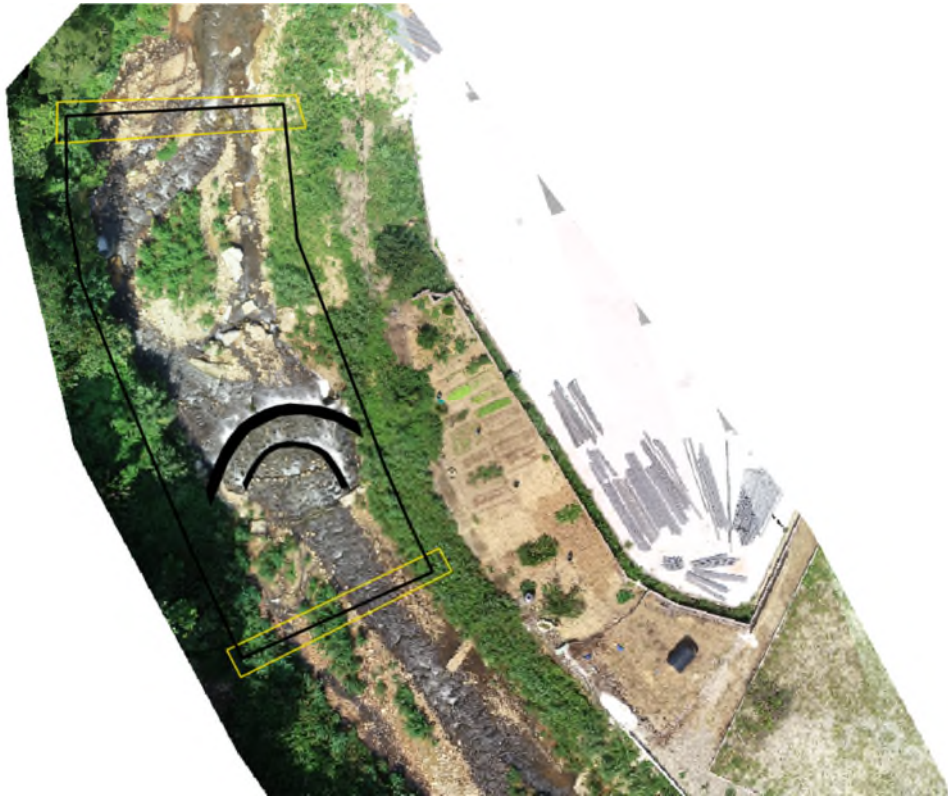


圖 3-27 下拱型固床工出、入流口設定

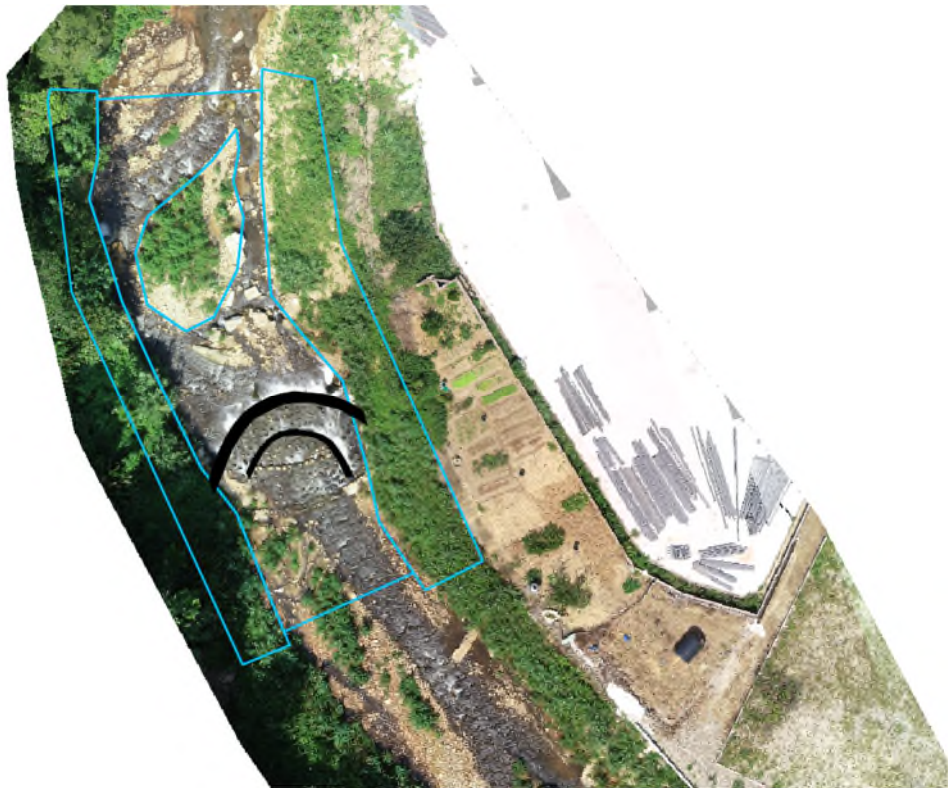


圖 3-28 下拱型固床工曼寧 n 值設定範圍

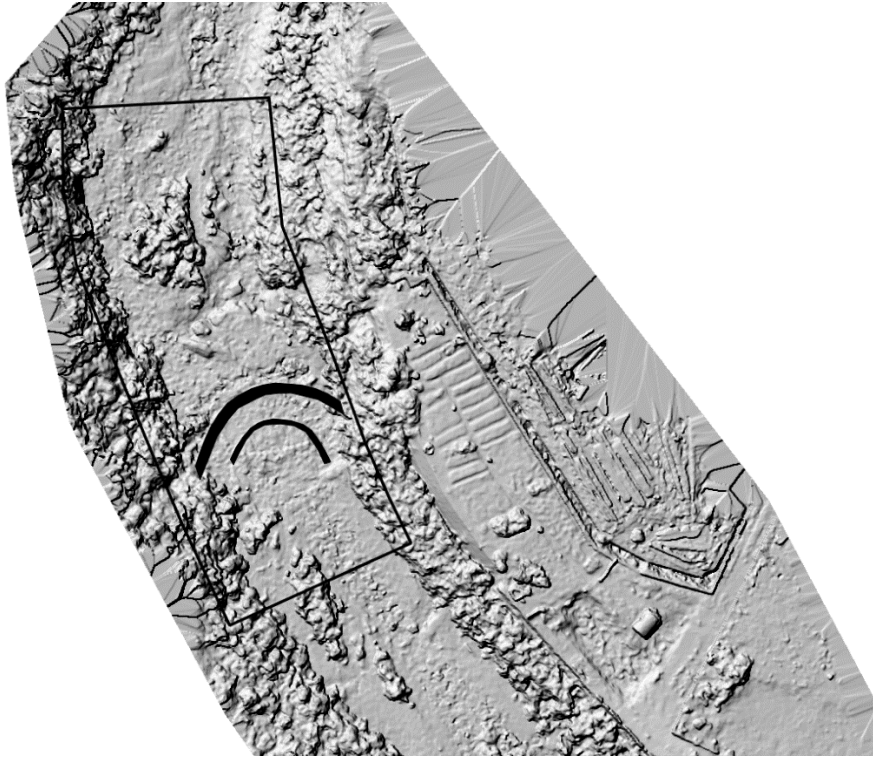


圖 3-29 下拱型固床工模擬範圍數值地表模型

三、數值模擬結果與討論

模擬結果將就河道沖淤深度、洪峰水深、洪峰流速、洪峰福祿數、洪峰底床剪應力分別作探討。

(一) 河床沖淤深度

1. 直線型固床工

圖中沖淤深度負值表示沖刷(圖 3-30 紅色部分)，正值表示淤積(圖 3-30 藍色部分)。固床工上游由於河道坡度較陡，因此雖位於固床工上游仍有較大的沖刷，直到固床工前不遠處才開始淤積。圖中上游及下游各有一處有較嚴重之沖刷(圖中深紅色區域顯示)，由於該兩區域透過 DSM 可以發現目前已淤積嚴重，淤積高度甚至高過固床工高度，推測為造成兩區域在發生 50 年重現期距之流量時有較大沖刷的緣故。此外，透過模式模擬亦可以發現於固床工下游處產生的沖刷坑，結果如圖 3-30 所示。

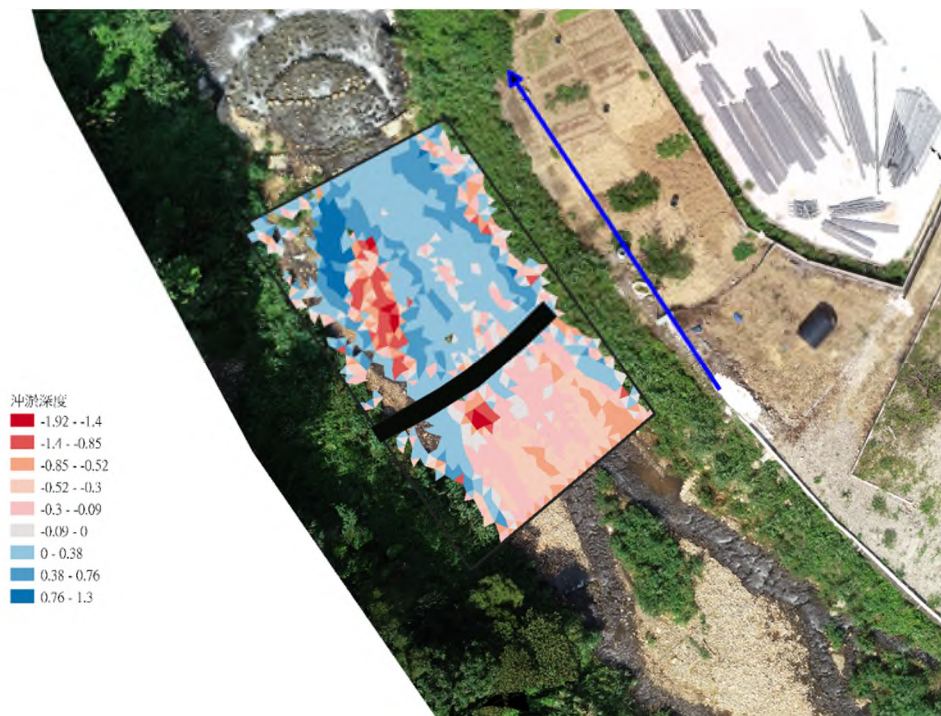


圖 3-30 直線型固床工河床沖淤深度

2. 上拱型固床工

上拱型固床工上游部分，可以發現右岸之沖刷較左岸輕微，違反「凹岸沖刷、凸岸堆積」之常理。然而，因為左岸的坡度較右岸陡，左岸的平均坡度約 0.0507，右岸僅 0.0452，故水流會傾向往左岸集中，而造成較大之沖刷。固床工下游處，因上拱型固床工具有匯聚水流之作用，河心之沖刷加大，比較圖 3-30 可以看出直線型及上拱型之河心處沖刷強度差異。

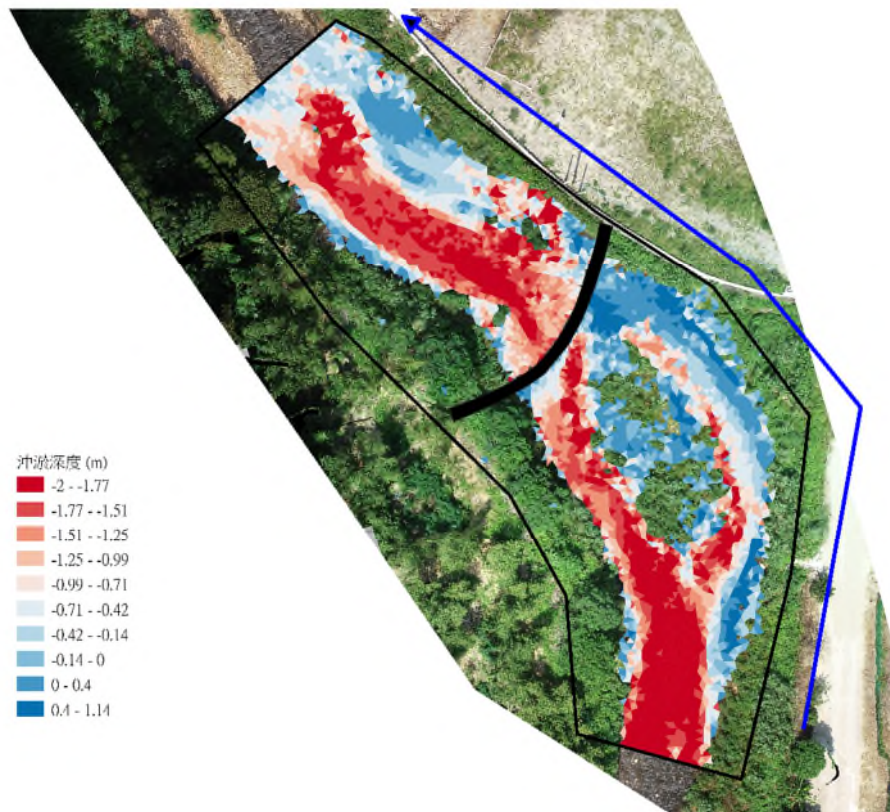


圖 3-31 上拱型固床工河床沖淤深度

3. 下拱型固床工

由於固床工較上游地區之坡度較大，水流挾沙力大，因此造成了大面積的沖刷，然而，當水流到了固床工前，由於流速趨緩，水流挾沙力變小，而出現淤積的情形。下拱型固床工之特色為水流會趨向兩岸流動，此一現象可造成

水流離開固床工後往兩岸之沖刷變大。透過模擬可以發現，下拱型固床工下游出現了大面積的沖刷，而以兩岸較嚴重，河道中央偏左較為輕微。兩岸沖刷的比較中，右岸又明顯較左岸沖刷為大，推測由於原本右岸之高程高於左岸，而造成此沖刷情形。固床工所造成之沖刷坑，其泥沙為被帶往下游淤積，可於圖 3-32 中發現，緊鄰下游沖刷處，河道淤積明顯，皆可由模擬結果看出。

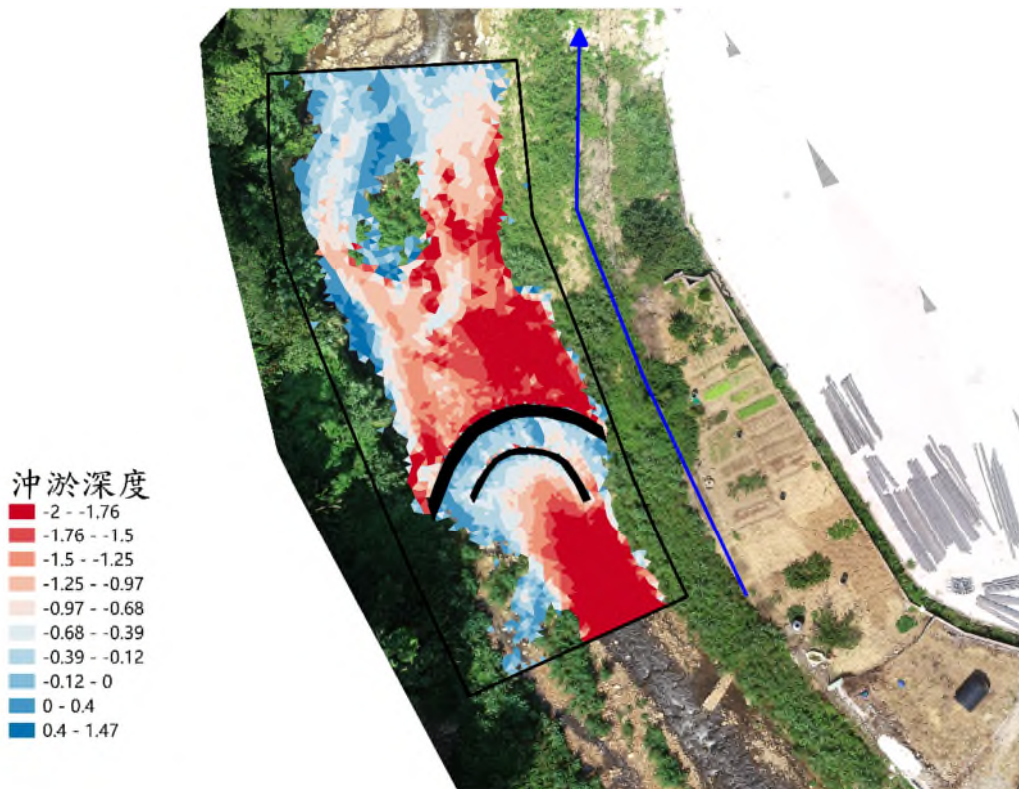


圖 3-32 下拱型固床工河床沖淤深度

(二) 洪峰水深

1. 直線型固床工

洪峰流量發生時，可以發現下游河心處之水深稍微較河道兩側之水深深，然此有可能是因原本河心之高程就較兩側為低之緣故。由於全河段為亞臨界流，因此可以發現下游離固床工不遠處水深迅速增高。

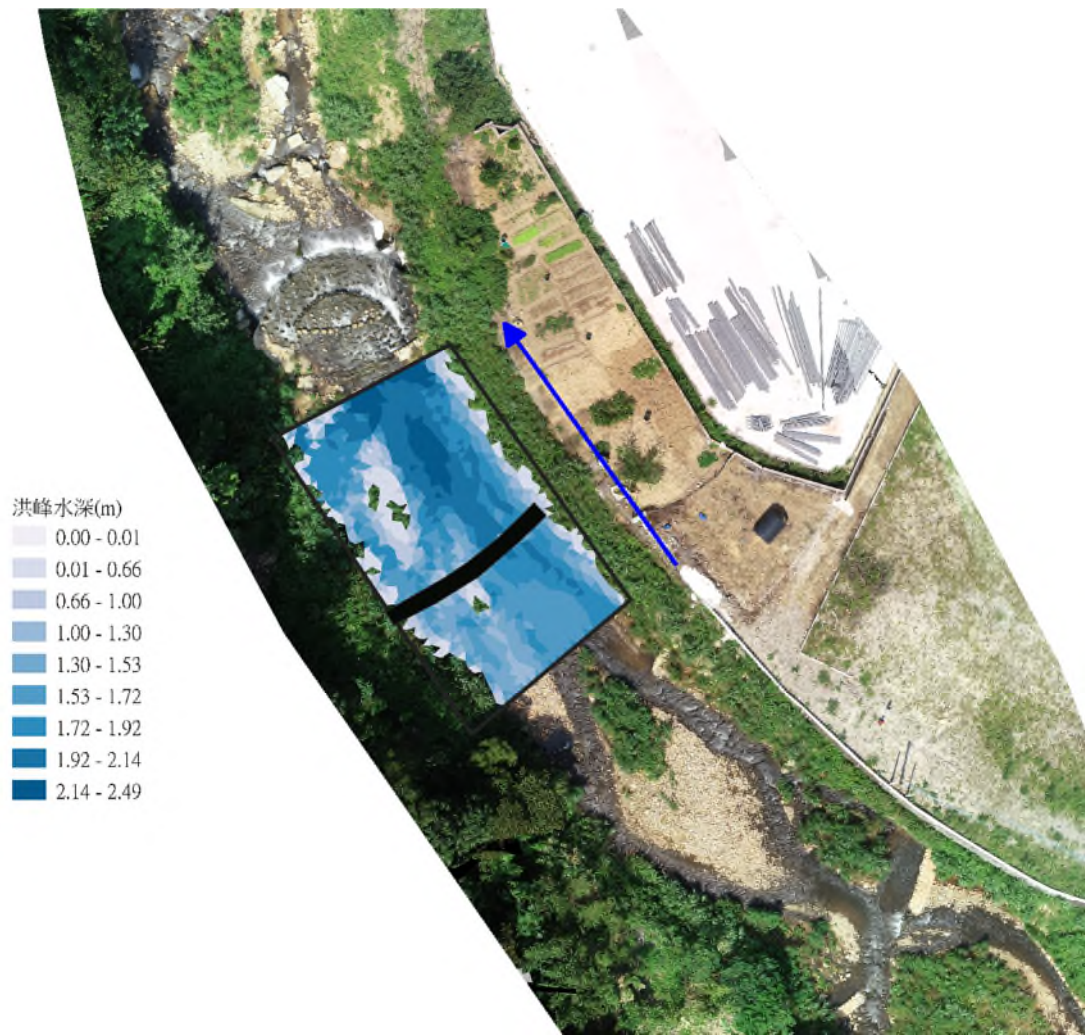


圖 3-33 直線型固床工洪峰水深

2. 上拱型固床工

由圖 3-34 中可以看出上游左岸水深對比右岸明顯較高，透過曼寧公式可以判斷左岸河道之流量較大，得到水傾向往左岸流動之結論。

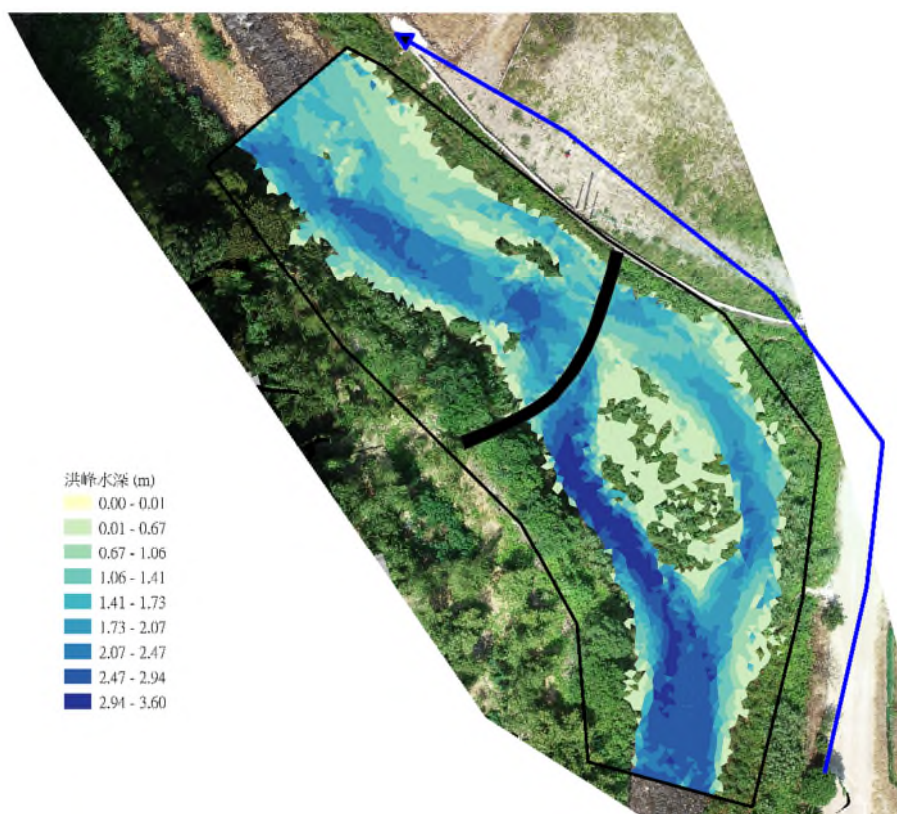


圖 3-34 上拱型固床工洪峰水深

3. 下拱型固床工

下拱型固床工之特色，當水流流經固床工時，會傾向往河岸兩側流動，而造成兩側流量較大，河道中央流量較小。透過模擬發現，於河道中央，在洪峰流量發生時，水深明顯較兩側還來的低，顯示 RF-2D 此套軟體在模擬上可以模擬出下拱型固床工之水流流動特性。固床工上游由於坡度較緩，由固床工之雍水影響而造成水深較深。

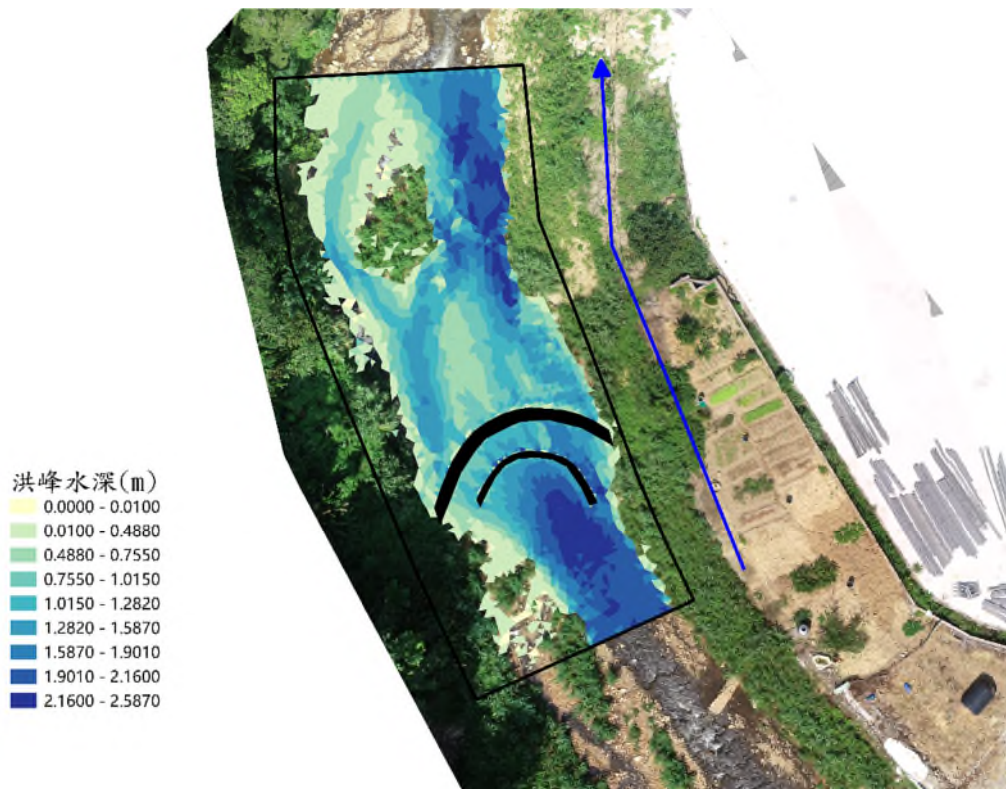


圖 3-35 下拱型固床工洪峰水深

(三) 洪峰福祿數

1. 直線型固床工

福祿數大於 1 為超臨界流(圖 3-36 藍色部分)，小於 1 則為亞臨界流(圖 3-36 紅色部分)。洪峰流量發生時，可以發現河流全段均屬亞臨界流為主。河心較左右兩岸之福祿數大。在下游有跌水發生的情況下，亞臨界流在經過固床工後會經歷跌水形成超臨界流，而後進行水躍而變回亞臨界流。圖中固床工下游處並未看到跌水情形發生，由於洪峰水深高，導致水流在經過固床工時僅水位面下降，又由於流況為接近臨界流之亞臨界流，導致下降幅度輕微。

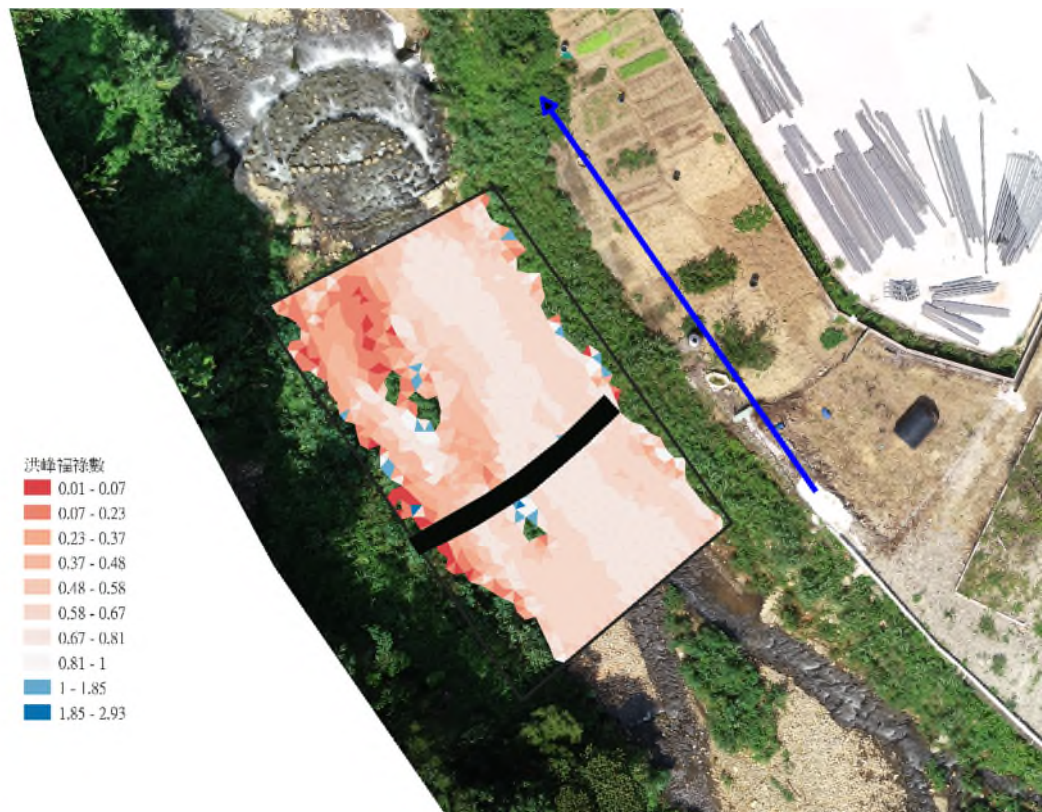


圖 3-36 直線固床工洪峰福祿數

2. 上拱型固床工

在圖 3-37 中可以發現下游緊鄰固床工部份發生了超臨界流。此一上拱型固床工採複式斷面設計，故於河心處有一部分的水受到影響較小，於上游就已發展出超臨界流。而下游坡度較陡，故河段經水躍變成亞臨界流後，又再一次發展為超臨界流。

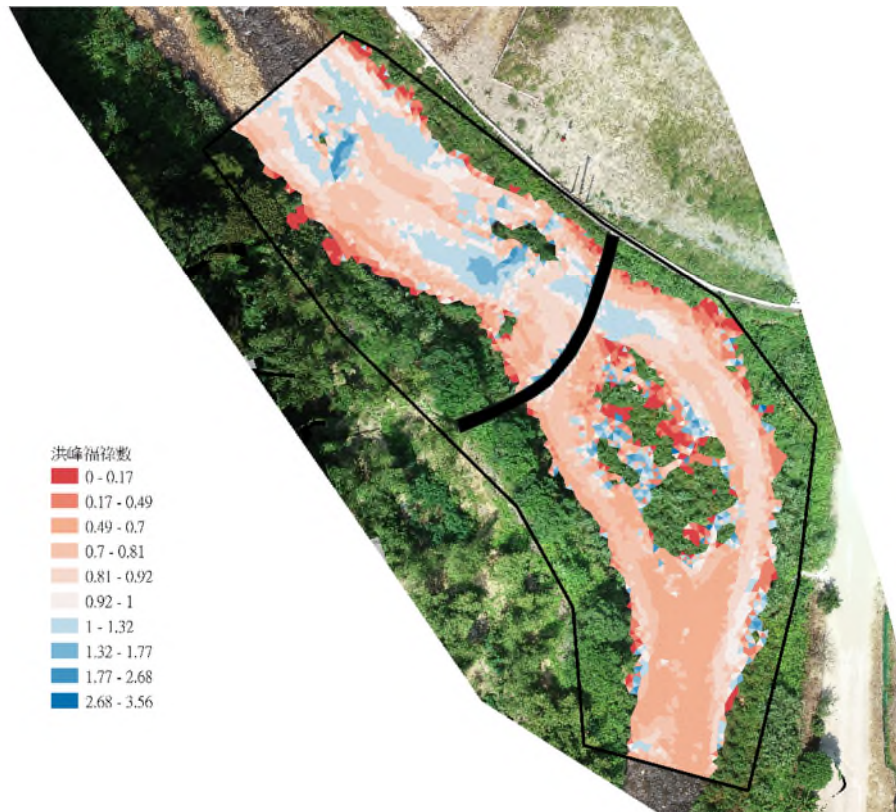


圖 3-37 上拱型固床工洪峰福祿數

3. 下拱型固床工

可以發現下拱型固床工上游，流速及緩慢，為亞臨界流；並於緊鄰固床工下游面發展出超臨界流，可以發現兩岸福祿數較大，與上拱型固床工不同，下拱型固床工具有分散水流沖刷護岸之特性，再往更下游處，福祿數主要受到坡降的影響左右其大小。

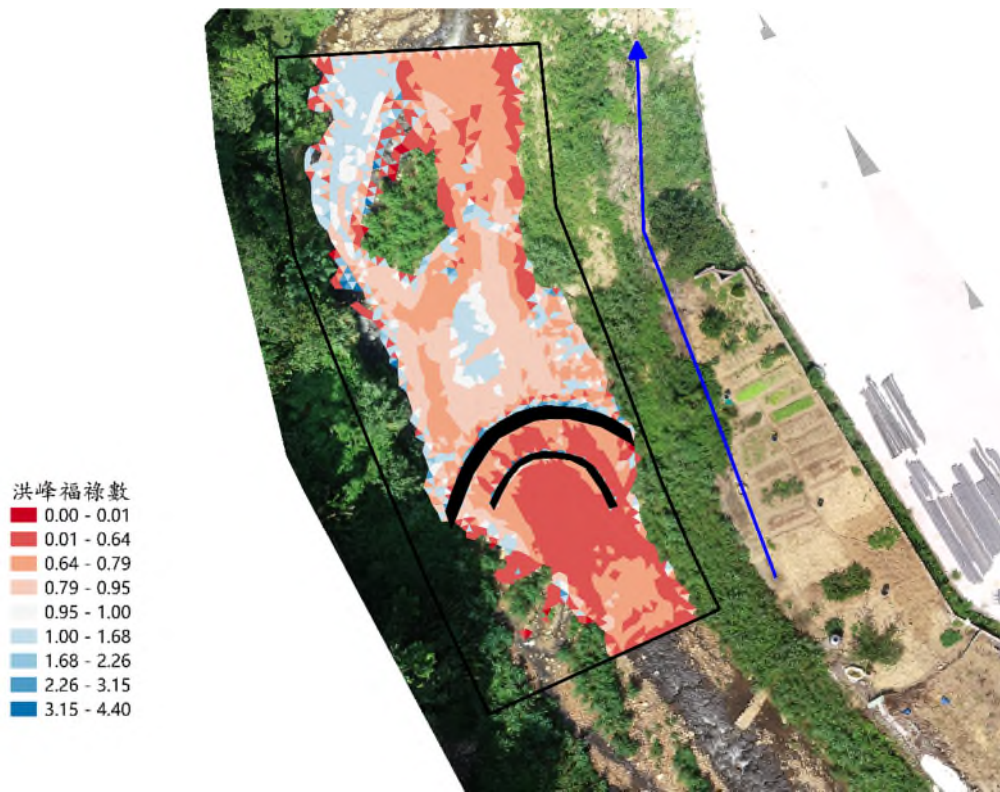


圖 3-38 下拱型固床工洪峰福祿數

(四) 洪峰底床剪應力

1. 直線型固床工

底床剪應力為造成沖刷及淤積的主要因素，可以發現於洪峰發峰時，固床工下游的底床剪應力明顯較上游為大，顯示在洪峰時會有大規模掏刷。然而，在退水段時，下游處會因為剪應力降低，水流挾帶沙粒減小而造成淤積，為造成下游淤積之主要原因。

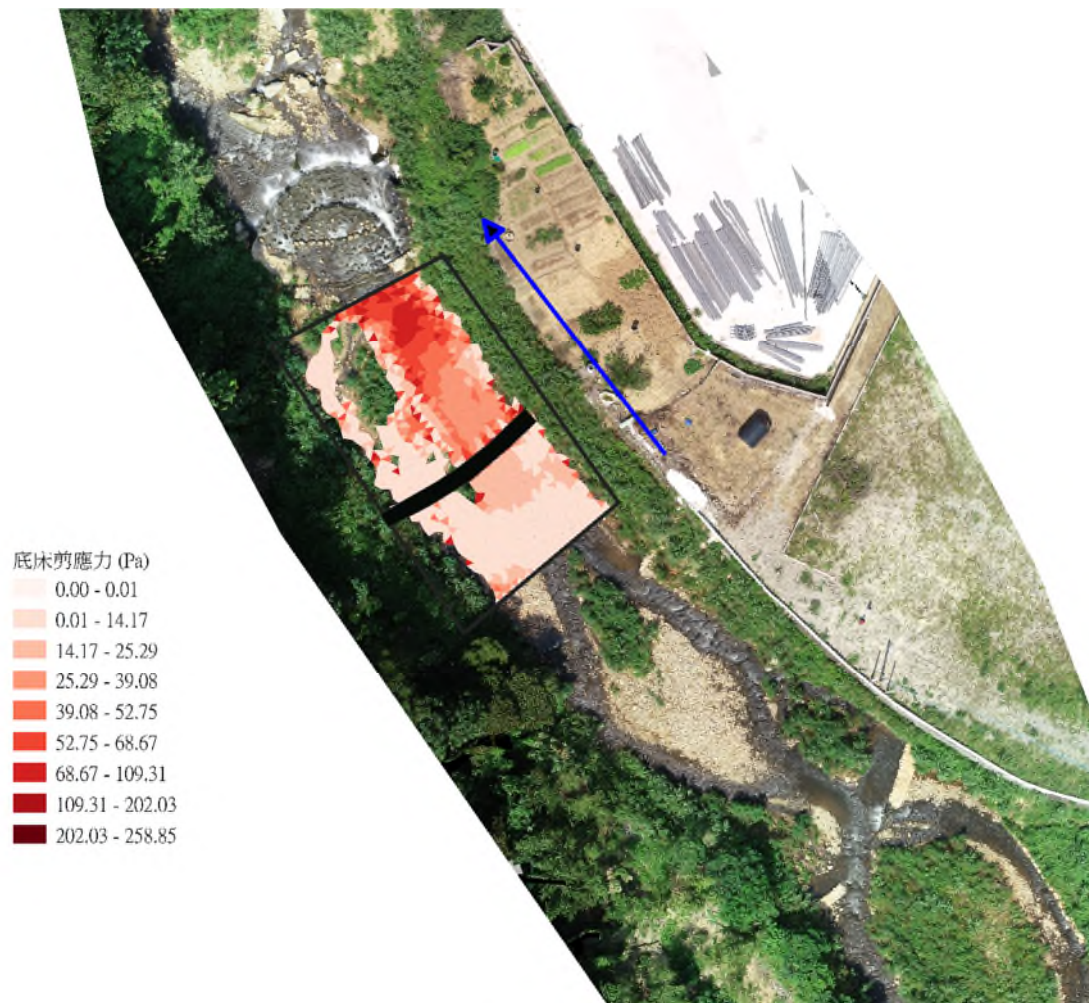


圖 3-39 洪峰底床剪應力

2. 上拱型固床工

由圖 3-40 現超臨界流發生處，底床剪應力也較大，上拱型固床工具有匯聚水流之功能，因此底床剪應力最大處集中於河心，可與直線型固床工所產生之沖刷做比對。

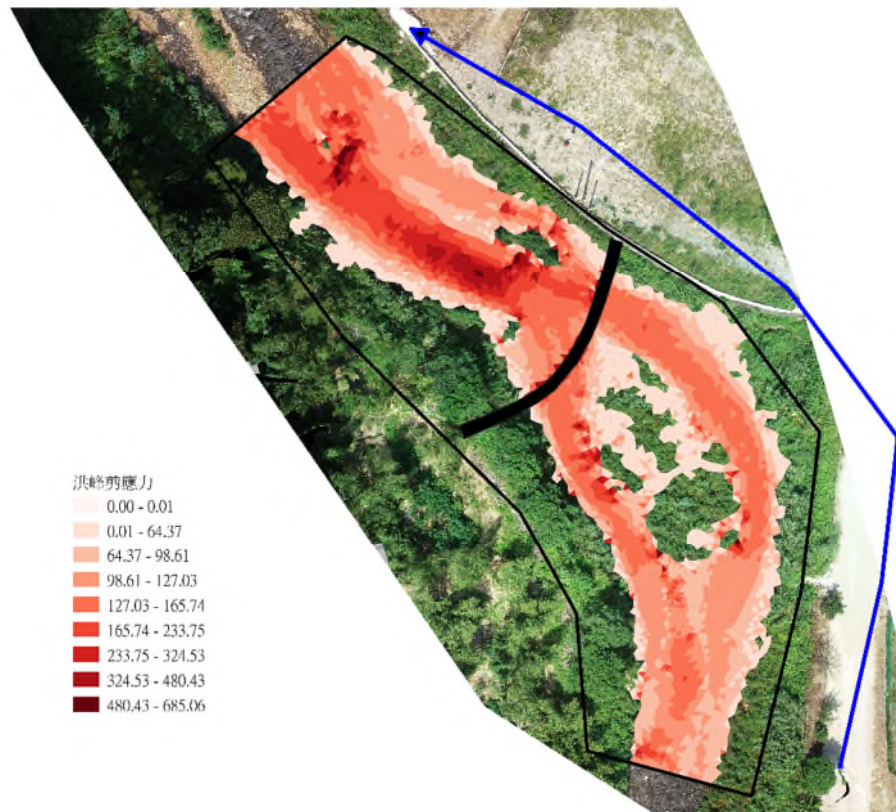


圖 3-40 上拱型固床工洪峰底床剪應力

3. 下拱型固床工

由圖 3-41 可以發現下拱型固床工有別於上拱型固床工集中掏刷於河心處，下拱型固床工將水流分散後，增加洪峰時固床工下游兩岸底床斷面水流掏刷之剪應力，與直線型不同的地方是，直線型因河流主流走向主要還是匯流於河心，因此直線型固床工下游處仍然無法分散河心底床掏刷之剪應力，下拱型固床工則能分散水流，改善此現象。

底床剪應力 (Pa)

0.01 - 65.45
65.45 - 87.96
87.96 - 112.95
112.95 - 157.26
157.26 - 236.82
236.82 - 335.84
335.84 - 490.21
490.21 - 783.18

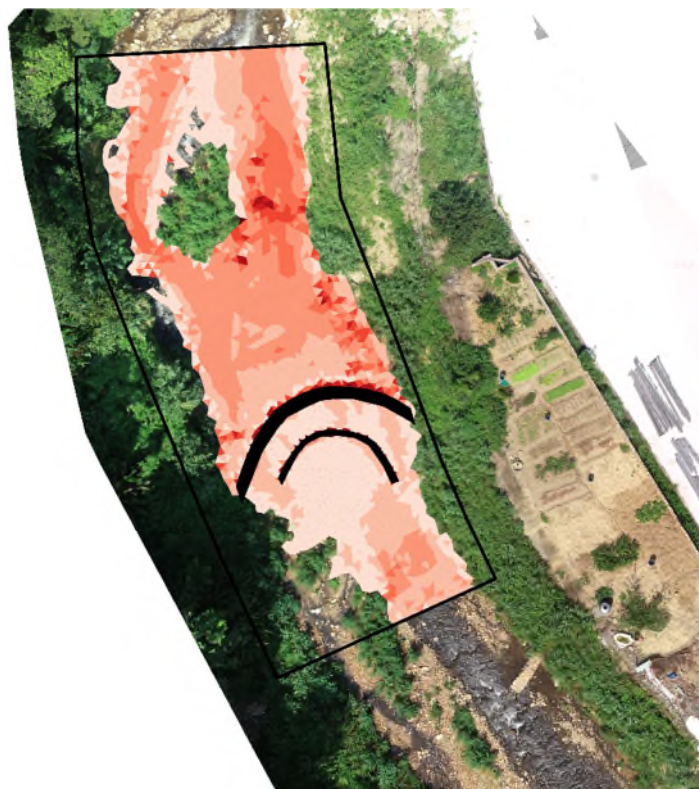


圖 3-41 下型固床工洪峰底床剪應力

第四章 拱型固床工水槽試驗

一、試驗規劃佈置

本計畫使用之試驗渠槽位於臺灣大學校總區之水工試驗場，該渠槽為一循環式鋼架試驗渠槽，以步階式馬達系統控制流量，渠槽平面配置圖如圖 4-3，主要配備如圖 4-4~圖 4-6。渠槽相關資料如下：

(一) 渠槽：

包含試驗段、頭水箱、尾水箱和沉砂池等四部分，總長 12m，寬 1m，高 80cm。其中，試驗段泥砂鋪設厚度必須大於可沖刷深度，如圖 4-1、圖 4-2。

(二) 渠槽設備：

包含步階式馬達及其控制面板、離心式泵浦、蜂槽整流箱、尾水控制閘門等。

(三) 流量：

由步進馬達系統控制，經率定後設定最大單寬流量可達 0.025cms/m。



圖 4-1 試驗渠槽之現況照



圖 4-2 現場試驗渠槽照

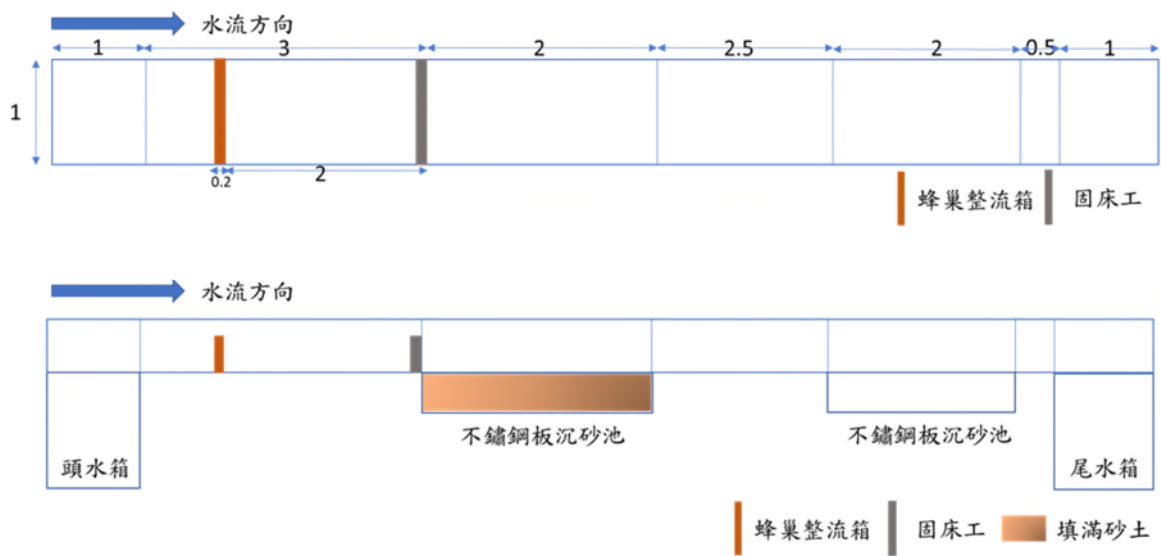


圖 4-3 現場渠槽平面配置圖



圖 4-4 步階式馬達控制機板



圖 4-5 離心式抽水泵浦

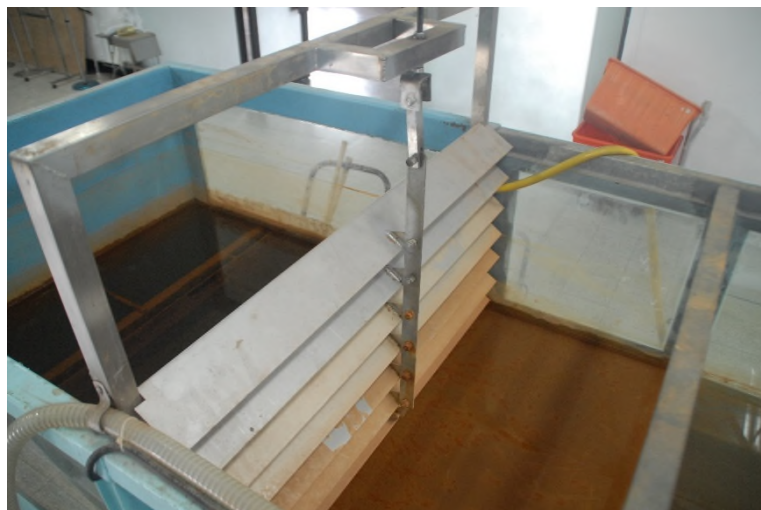


圖 4-6 尾水控制閘門

(四)實驗儀器：

此團隊為量測實驗中各項數據，使用各項儀器進行量測。

1. 蜂巢整流設備:

為減少入口渦流之影響，本團隊在水槽前端置入一以直徑 1.2cm 粗吸管製成之整流箱，如圖 4-7 至圖 4-9 所示，使水流可快速達到平順與穩定，尺寸為長 100cm，寬 20cm，高 15cm。



圖 4-7 吸管製蜂巢整流箱(1)



圖 4-8 吸管製蜂巢整流箱(2)



圖 4-9 吸管製蜂巢整流箱(3)

2. 水位計:

本研究採用自製水位計，如圖 4-10 至 4-12，以 Arduino Nano 作為運算核心，透過前端超音波感測器進行距離的資料擷取，擷取後之資料會存於 SD 卡中，再使用 LabVIEW 開發程式，將其程式寫入 Arduino 之微處理器。LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) 是美國國家儀器公司所開發之圖控程式語言，初期是為了儀器自動控制所設計，至今已經轉變成為高階程式語言。而 Arduino 是一個以 ATmega328 微控制器為主之處理器，為開放原始碼之開發平台，具有 14 個數位輸入和輸出，其中 6 個可以 PWM 輸出，6 個類比輸入，並以 USB 連接電腦或電源。

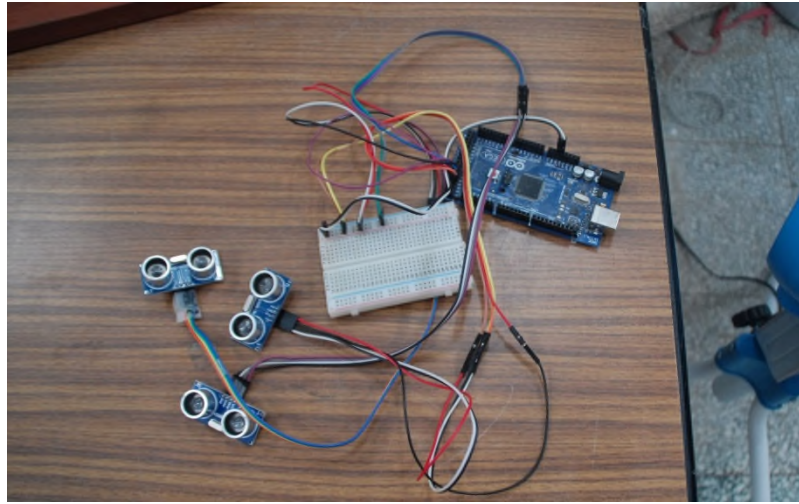


圖 4-10 超音波水位計圖(1)

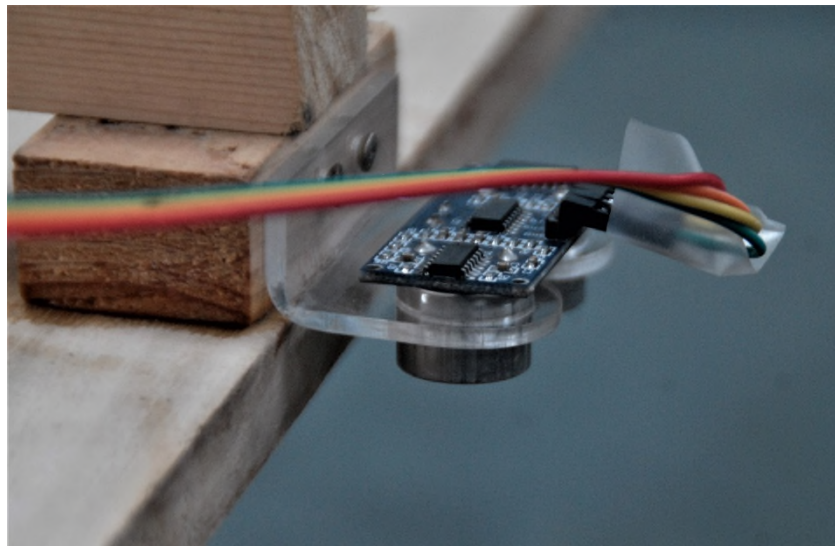


圖 4-11 超音波水位計圖(2)

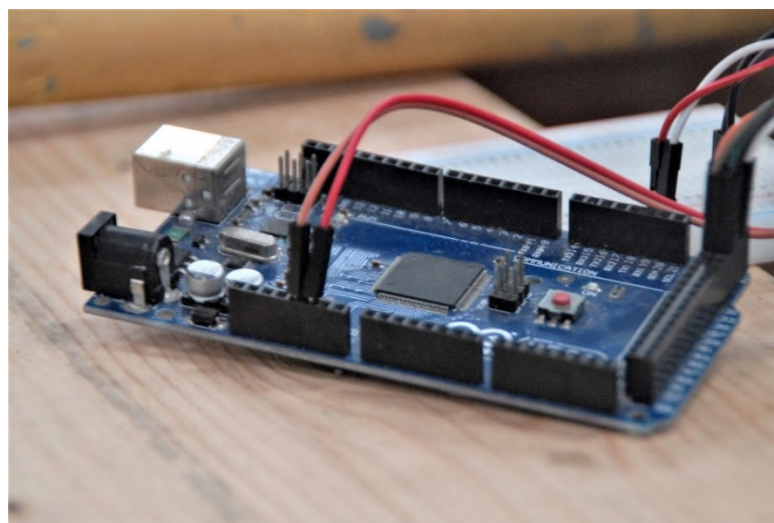


圖 4-12 超音波水位計圖(3)

3. 小型拉壓兩用式荷重計:

本研究使用拉壓兩用荷重計量測固床工上游之衝擊力，進而計算轉換為壓力，如圖 4-13 與圖 4-14。



圖 4-13 小型拉壓兩用式荷重計圖



圖 4-14 荷重計感測頭之圖

4. 捲尺:

此實驗將使用捲尺以量測沖刷坑長度、最大沖刷深度以及上下游水深，以便雨水位計之數據進行比較檢查，如圖 4-15 所示。



圖 4-15 捲尺照片圖

二、試驗內容

本團隊分析了直線型與拱型固床工在水理特性上之差異。其中，直線型固床工將包括四種高度以及四種不同流量，共計十六種組合，每種固床工單次實驗時間約為五至十小時。參考新北市八里區水仙溪下游野溪治理工程之設計流量資料及其延伸流量，進行模型試驗。固床工材料則以水泥製作為主。在渠道尾水箱入口處設有尾水控制閘門，本次試驗尾水控制閘門開度保持一致，且本次試驗水深皆未達閘門最小開度，因此未受閘門阻擋水流；試驗過程亦會針對不同之固床工高度、不同流量所造成之底床沖淤變化進行探討。此外，試驗階段以側視之攝影角度記錄隨時間水流通過固床工所造成的沖刷分布與深度之特性，並進行水理分析，比較直線型固床工的水理特性、沖淤情形之差異。

本團隊之模型試驗將參考水仙溪下游之上拱型固床工(0K+194)來設計，其雨量站採用淡水測站，降雨強度以頻率 50 年進行計算，得到之洪水量為 73.59cms，溝渠排洪斷面設計流量則為 81.75cms，而橫斷面圖如圖 4-16 所示。並進行福祿數相似及沖刷力相似之兩種模型比。

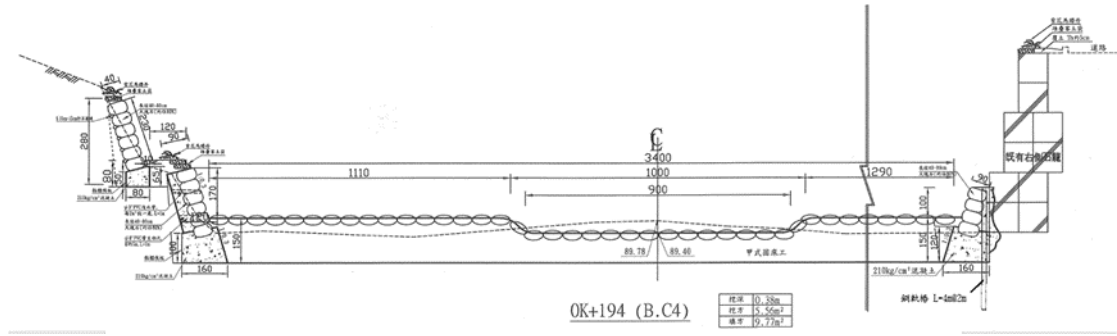


圖 4-16 水仙溪 0k+194 之固床工橫斷面圖

資料來源：水仙溪下游野溪治理工程圖檔

(一) 福祿數相似原理

1. 長度比尺

$$\frac{L_m}{L_p} = \lambda_L = \frac{1}{34}$$

式中，

L_m 為模型長度尺寸； L_p 為原型長度尺寸； λ_L 為長度比尺。

2. 速度比尺

在動力相似上，模型與原型其對應之受力成比例，本研究考慮『慣性力、重力』的動力相似來探討，也就是福祿數相似之探討，可推求出速度比尺。

$$(F_r)_m = (F_r)_p$$

$$\rightarrow \frac{(V_m)^2}{g_m L_m} = \frac{(V_p)^2}{g_p L_p}$$

$$\rightarrow \frac{(V_m)^2}{(V_p)^2} = \frac{g_m L_m}{g_p L_p}$$

$$\because g_m = g_p$$

$$\rightarrow \lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\sqrt{g_m L_m}}{\sqrt{g_p L_p}} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2} = \lambda_L^{1/2} = 0.1715$$

式中，

V_m 為模型水流速度； V_p 為原型水流速度；

g_m 為模型重力加速度； g_p 為原型重力加速度；

λ_v 為速度比尺。

3. 流量比尺

流量 Q 與水之密度 ρ 、流速 V 及長度 L 有關，利用柏金漢 (Buckingham) 之 π 定理作因次分析，則可將流量無因次化為：

$$\pi = \frac{Q}{VL^2}$$
$$\rightarrow \lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{V_m L_m^2}{V_p L_p^2} = \lambda_v \cdot (\lambda_L)^2 = 0.00014836$$

$$\text{故 } Q_m = 0.00014836 \times 73.59 = 0.010918 \text{ cms}$$

式中，

Q_m 為模型流量， Q_p 為原型流量， λ_Q 為流量比尺。

由圖 3-16 可知率定曲線為 $Q = 0.000553X - 0.002105$

式中，

Q 為流量(cms)； X 為赫茲(Hz)。

$$0.010918 = 0.0006X - 0.0025$$

$$\rightarrow X = 23.55$$

因此可求得水槽之頻率約調為 24Hz，即能和原型之福祿數相似。

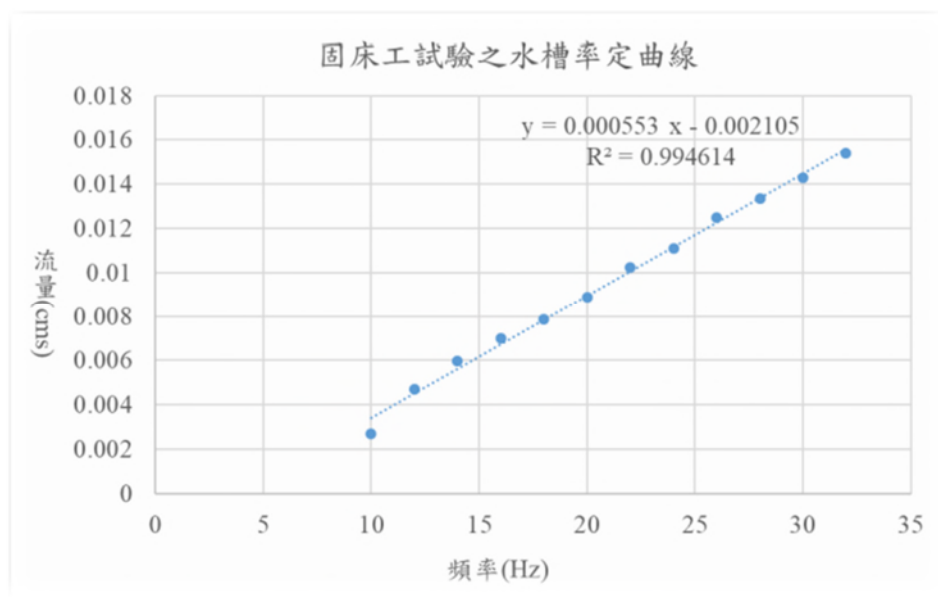


圖 4-17 固床工試驗之水槽率定曲線

因此本團隊以流量為 24Hz 之頻率為基礎，並同時使用流量為 20Hz、16Hz、12Hz 等共 4 種流量進行實驗，實驗流量由小而大分別是 0.0045cms、0.0067cms、0.0090cms、0.0112cms。探討在不同流量、不同固床工高度時，所造成之底床沖淤情形。透過水槽與模型試驗，以供後續工程設計之依據，提升野溪治理效益。實驗水槽之俯視圖及側視配置圖如圖 4-18 至圖 4-19。

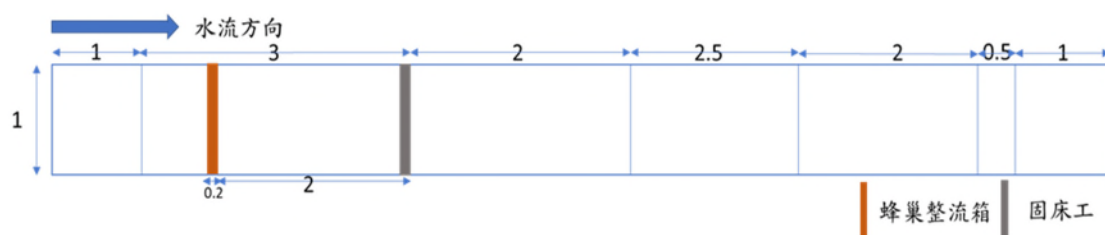


圖 4-18 固床工之水槽與模型試驗之俯視配置圖



圖 4-19 固床工之水槽與模型試驗之側視配置圖

(二) 試驗條件統整與數據量測位置

本團隊以直線型固床工共四種固床工高度與四種大小之流量，共計十六組試驗，以固床工下游沖淤情形討論。而固床工高度由現地固床工高度透過福祿數相似理論中的長度比尺得到固床工模型高度分別為 3.0m、4.5m、7.5m、9.0m，而拱型固床工之曲率半徑亦分為四種，由大至小分別為 182.071cm、110.167cm、82.029cm、67.818cm，表 4-1 為試驗條件總整理。實驗所使用之泥砂粒徑大小依福祿數相似理論為 0.8mm~1.5mm。圖 4-20~圖 4-24 為不同固床工模型尺寸示意圖、圖 4-25~4-27 為固床工量測各項數據位置標示圖。

表 4-1 試驗條件總整理

直線型固床工高度	直線型固床工高度 3.0m
	直線型固床工高度 4.5m
	直線型固床工高度 6.0m
	直線型固床工高度 7.5m
拱型固床工曲率半徑	拱型固床工曲率半徑 1.82m
	拱型固床工曲率半徑 1.10m
	拱型固床工曲率半徑 0.82m

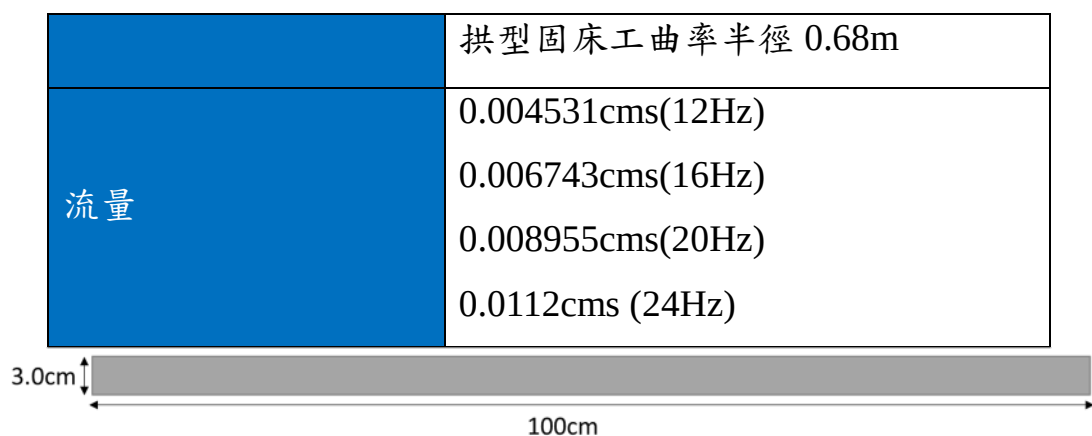


圖 4-20 直線型高度 3.0 公尺固床工模型

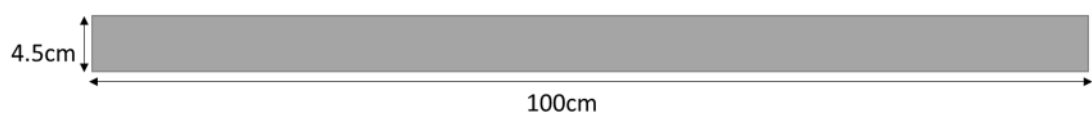


圖 4-21 直線型高度 4.5 公尺固床工模型

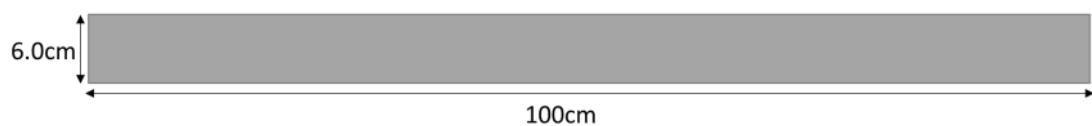


圖 4-22 直線型高度 6.0 公尺固床工模型

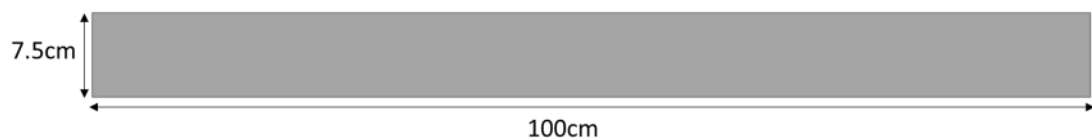


圖 4-23 直線型高度 7.5 公尺固床工模型

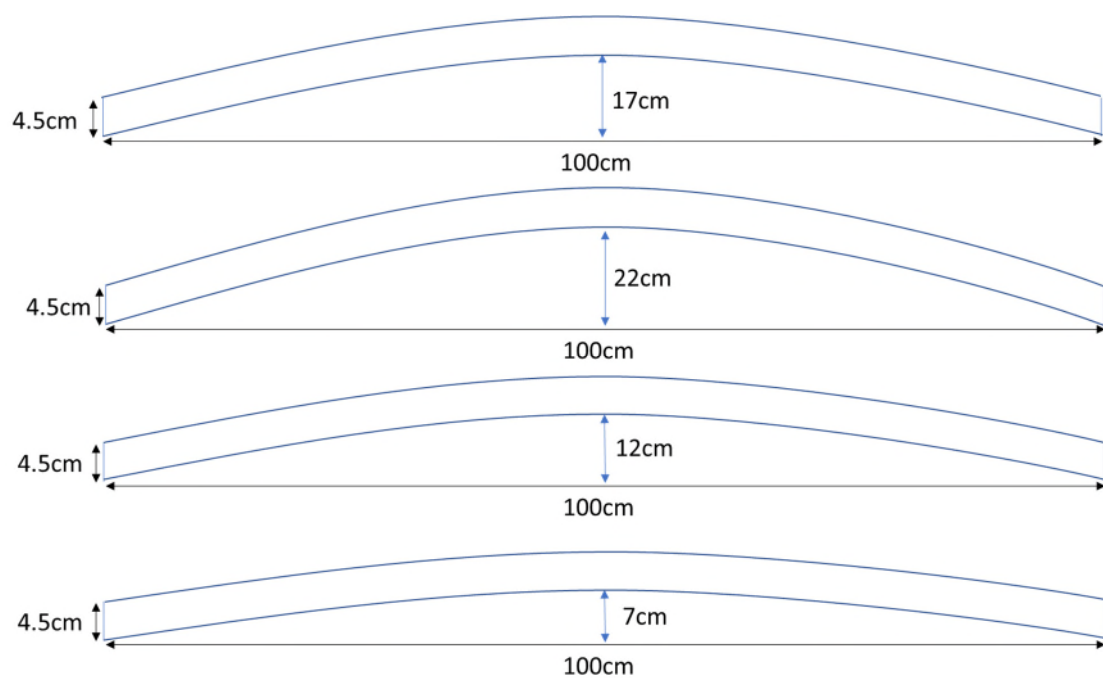


圖 4-24 拱型固床工不同曲率半徑之模型示意圖

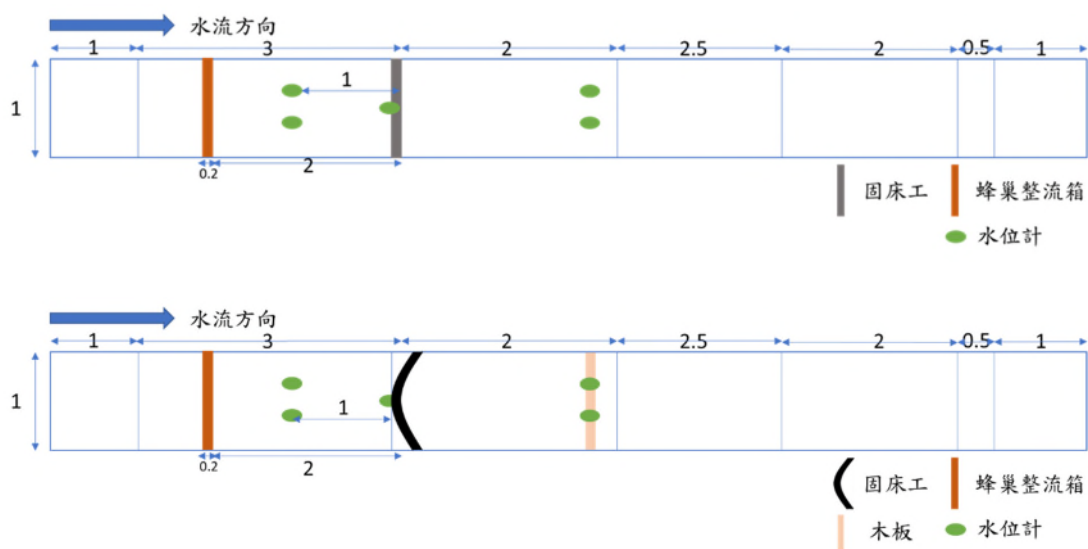


圖 4-25 水位計架設之位置圖

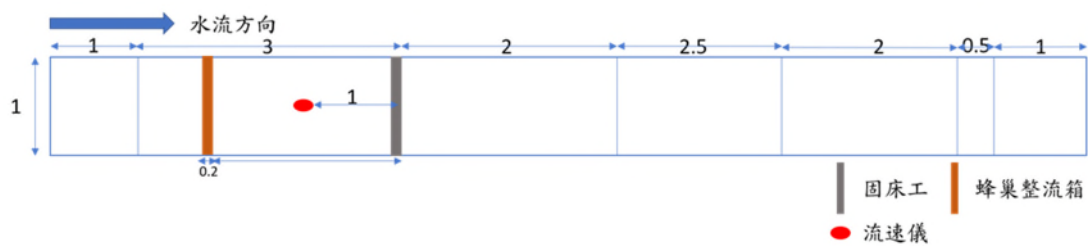


圖 4-26 流速量測之位置圖

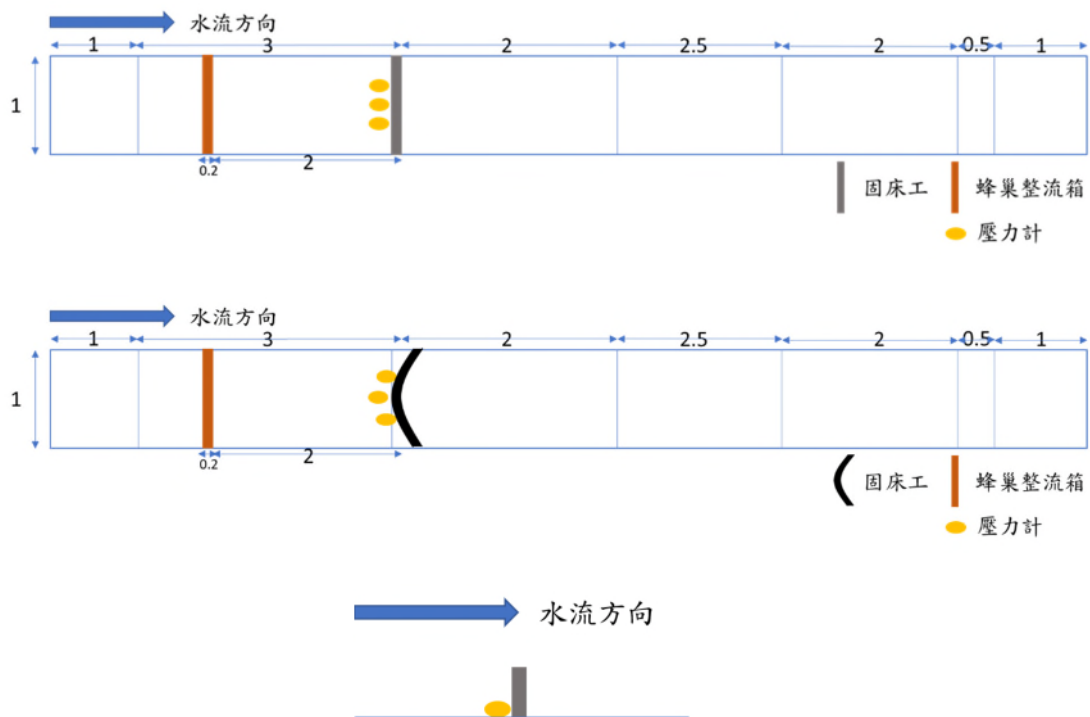


圖 4-27 衝擊力、壓力量測位置正視圖與側視圖

三、水槽與模型試驗之結果與討論

本團隊規劃直線型與上下拱型固床工進行水槽試驗，而此處將針對結果進行分析與討論。

本團隊探討了固床工之水理特性及沖淤情形之變化，其分析依水深、沖刷深度以及沖擊力等三點水理機制為主要探討項目，並提供未來工程設計之依據。其結果討論如下：

(一) 流速

流量由步進馬達控制，另因水槽內放置整流箱，故經率定後，設定最大單寬流量可達 cms/m ，並由流速儀求得流速。由圖 4-28 為直線型固床工之流量與流速之關係圖，可得知當流量增加，流速也隨之增加，而在直線型固床工其固床工高度較小時，因固床工對渠道流況的影響漸小，故流速較其他高度大，拱型固床工之結果趨勢也有與之相同之處，流量越大時，流速隨之上升，但拱型固床工之曲

率半徑與流速似乎無較明顯之規律與關係，如圖 4-29 和圖 4-30 所示。

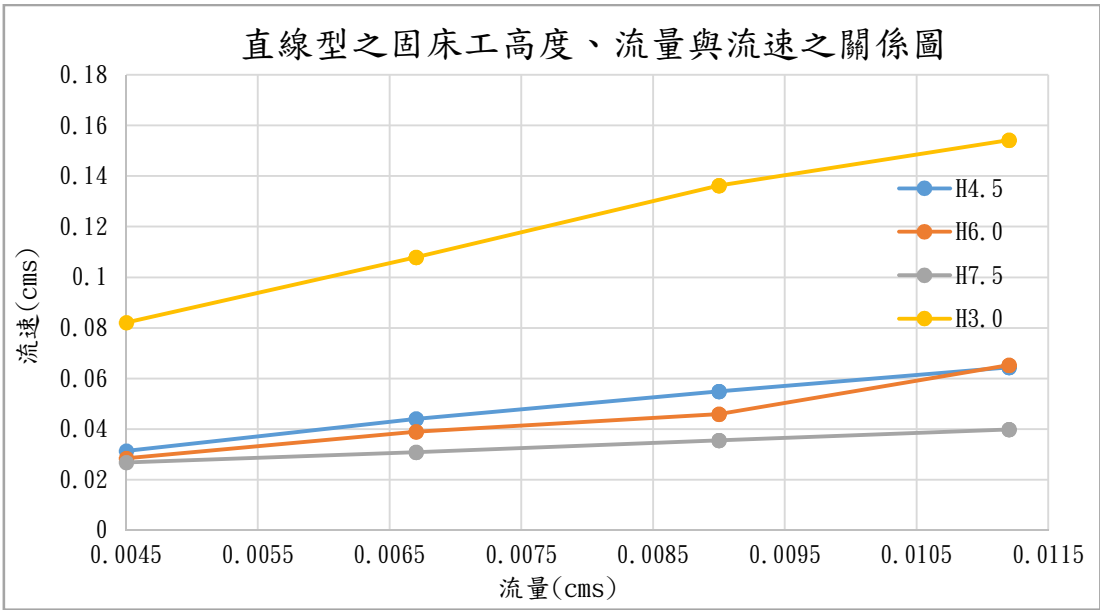


圖 4-28 直線型固床工高度、流量與流速之關係圖

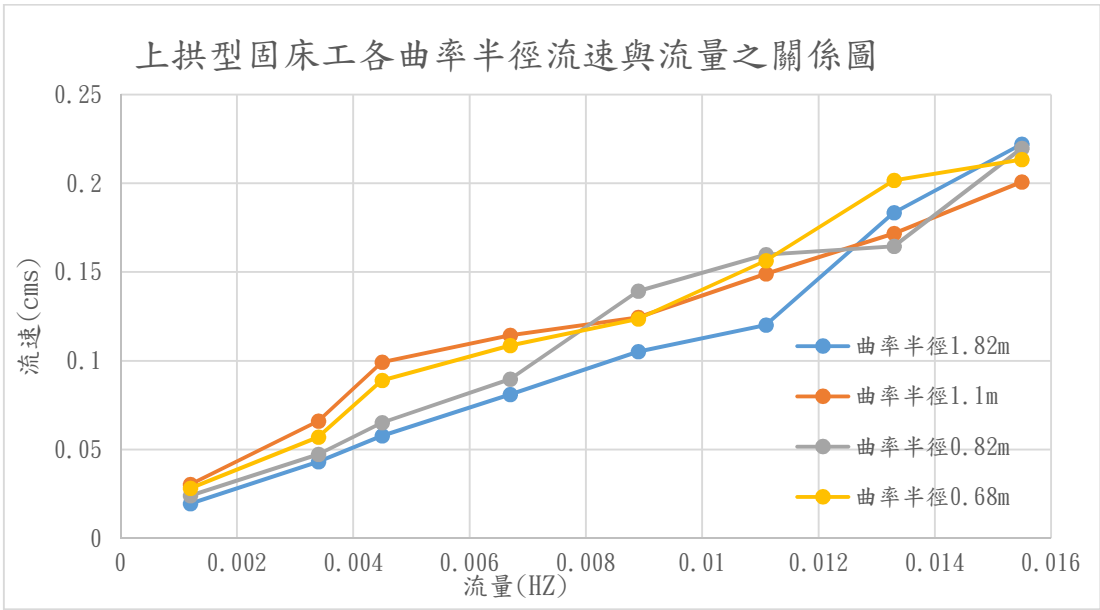


圖 4-29 上拱型固床工各曲率半徑流速與流量之關係圖

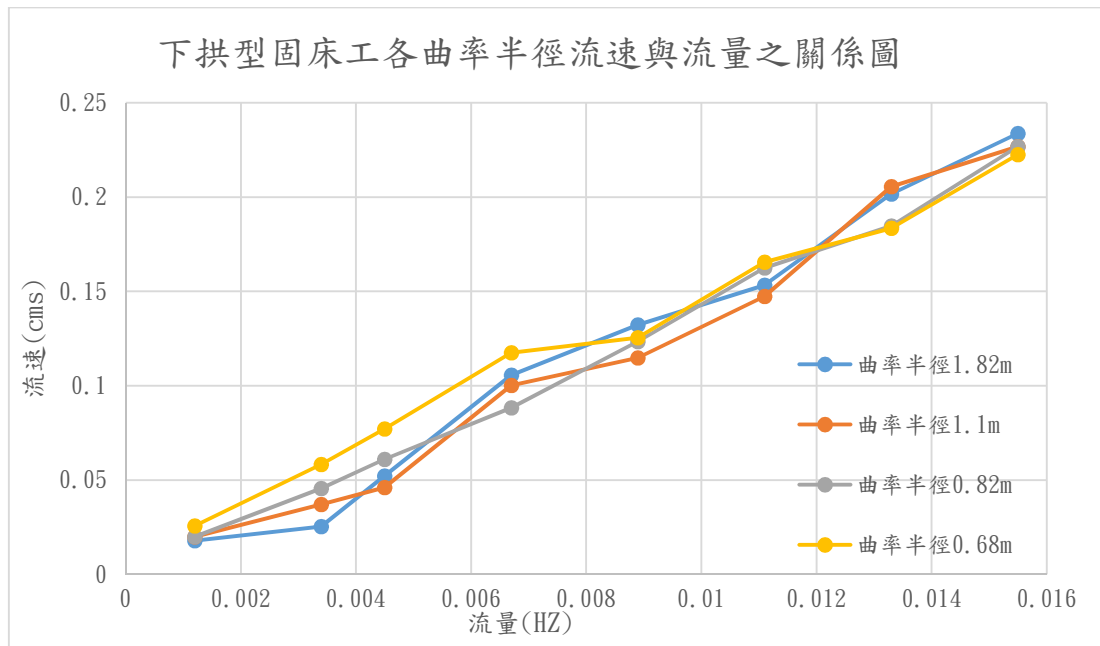


圖 4-30 下拱型固床工各曲率半徑流速與流量之關係圖

(二) 水深

水深乃受到總水頭的影響而有所變化，本研究渠道實驗使用直尺量測在沖刷坑尾部之水深，並使用超音波水位計量測上下游水深，互做比較，進行誤差校正。



圖 4-31 直尺量測水深之示意圖

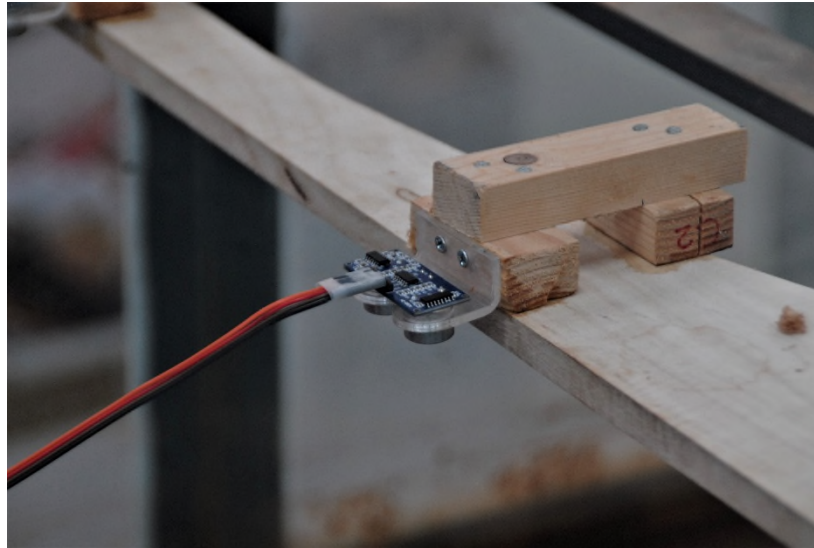


圖 4-32 超音波水位計量測之示意圖

經由數據結果顯示，直線型固床工高度、流量與水深呈正相關，及當流量越大時，上下游水深隨之越深，上下拱型固床工之結果也與之有相同趨勢。

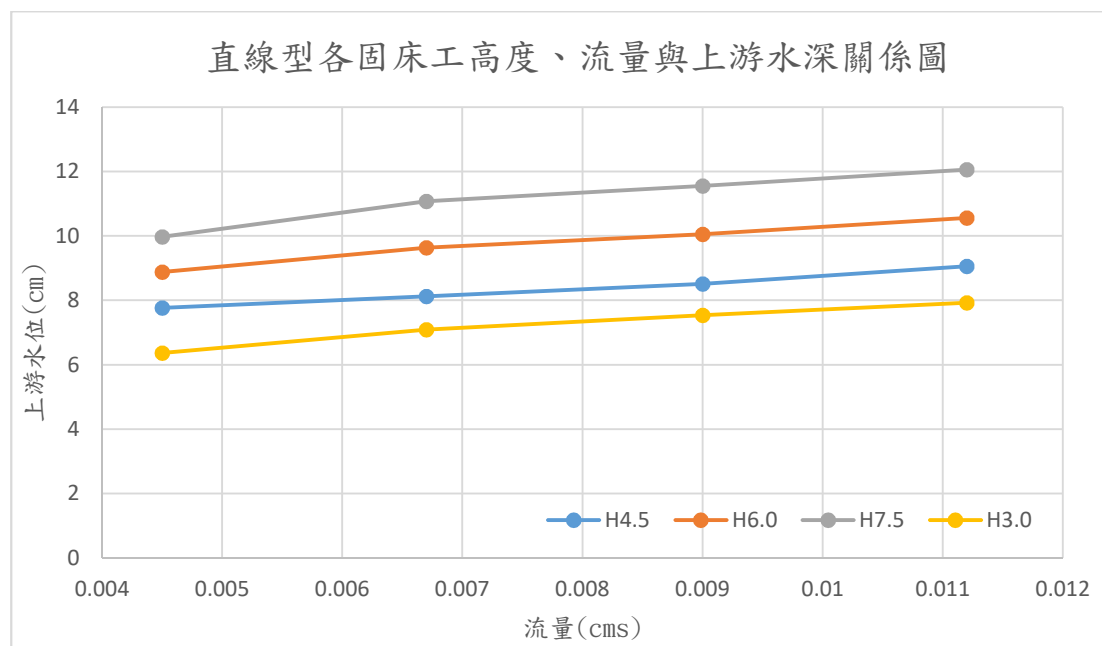


圖 4-33 直線型各固床工高度、流量與上游水深關係圖

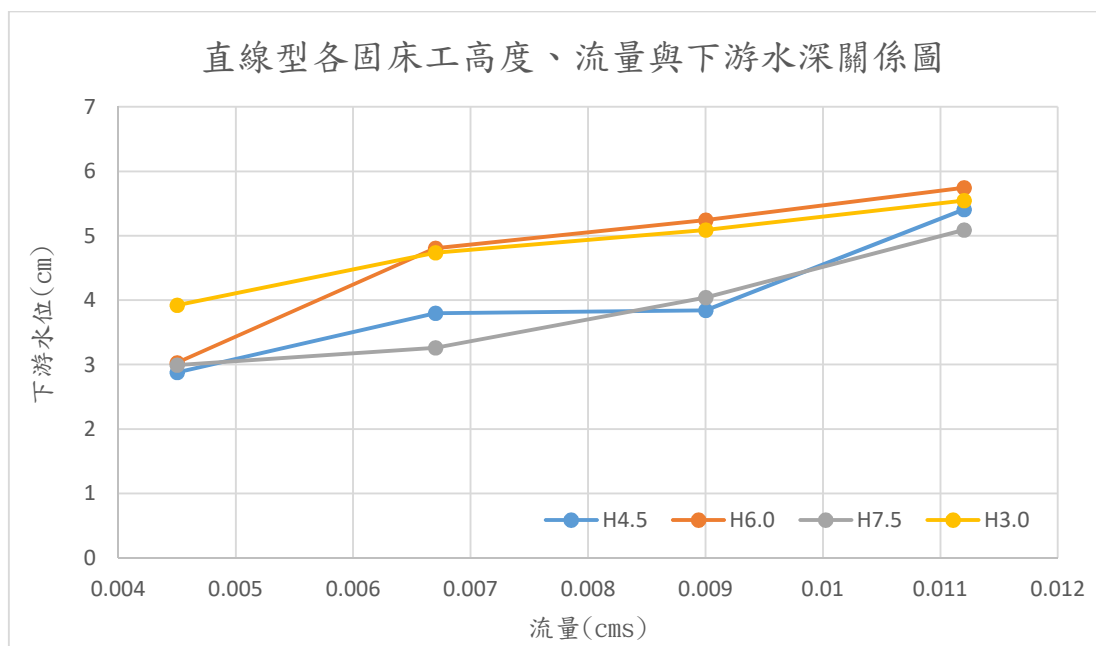


圖 4-34 直線型各固床工高度、流量與下游水深關係圖

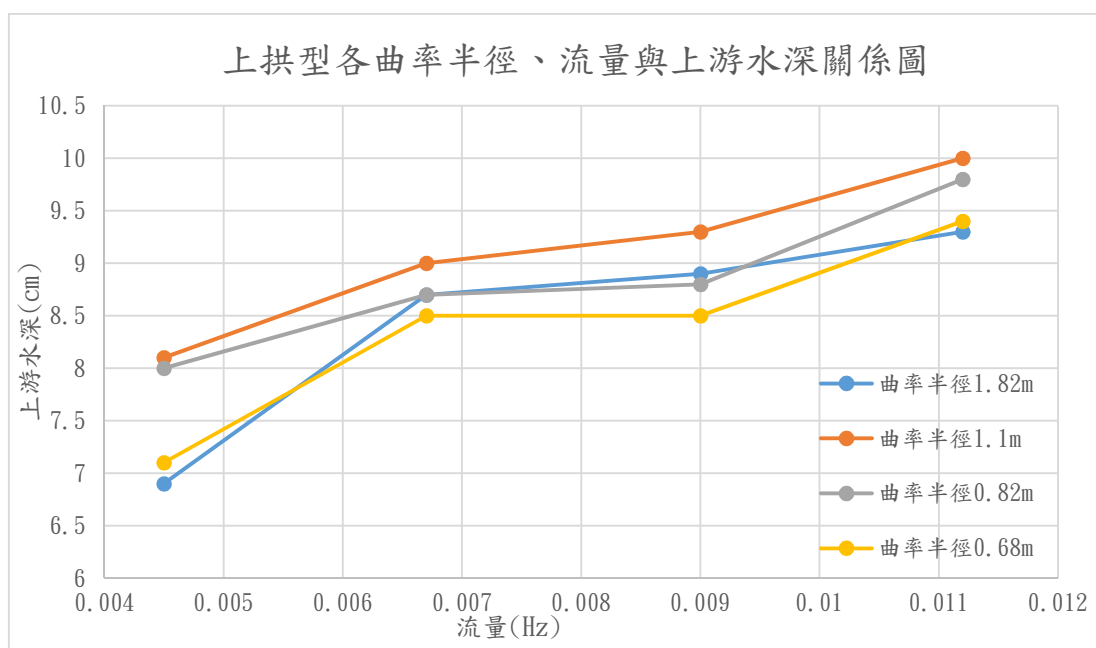


圖 4-35 上拱型各曲率半徑、流量與上游水深關係圖

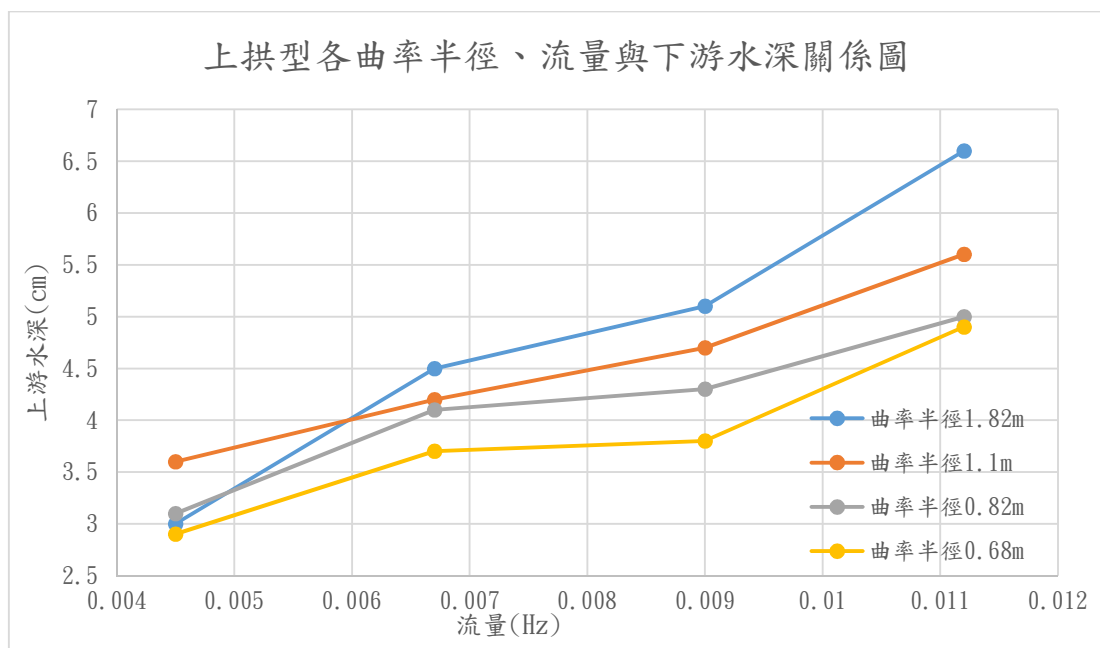


圖 4-36 上拱型各曲率半徑、流量與下游水深關係圖

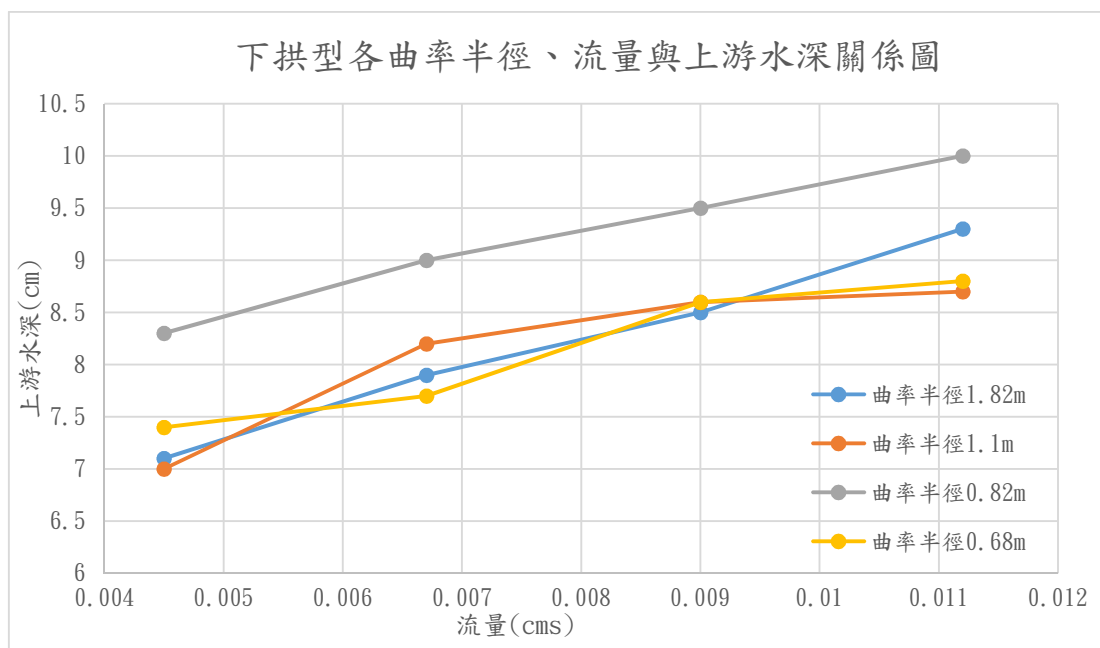


圖 4-37 下拱型各曲率半徑、流量與上游水深關係圖

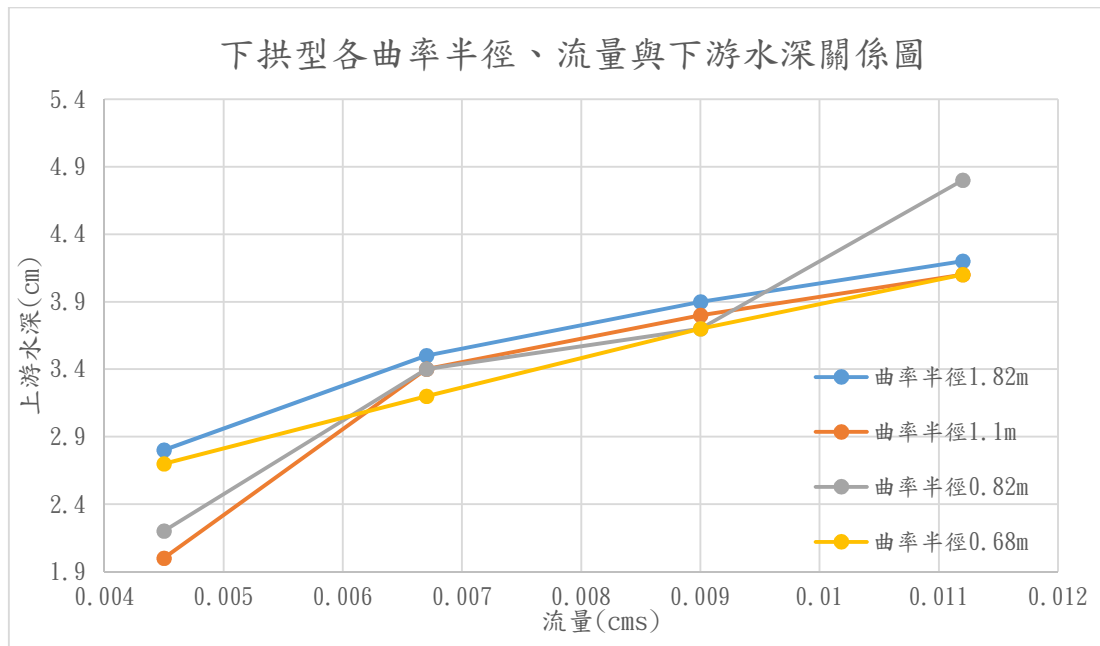


圖 4-38 下拱型各曲率半徑、流量與下游水深關係圖

(三) 冲刷現象

冲刷坑大小乃受流量、跌水高度、粒徑大小、尾水深度、時間及固床工型式等因子影響，且以清水流進行試驗，清水流所造成之冲刷坑比含沙水流深，可預測並考慮到最危險之情況進行探討與分析，而造成之冲刷深度本研究於冲刷平衡後以直尺垂直進行測量，探討固床工下游之底床之冲刷情形。



圖 4-39 直尺量測冲刷坑之示意圖

1. 直線型與拱型之沖刷深度討論

圖 4-40 至圖 4-47 為直線型固床工在不同流量下，固床工下游不同橫斷面位置的沖刷深度。從圖中可以看出直線型固床工之沖刷坑於不同位置的沖刷深度大致皆相同，因此我們可以得知直線型固床工能產生均勻沖刷。而關於上下拱型固床工之沖刷結果可以發現，上拱型固床工水流集中於渠道中心，因而導致渠道中心沖刷深度較深；下拱型則可發現因水流受結構物阻擋而向外分散，導致水流向兩側流動，因此下拱型之下游沖刷可以發現兩側沖刷深度較深，但靠近渠道中心之位置較無明顯趨勢。

2. 固床工高度與半徑曲率之沖刷深度討論

由圖 4-40 至圖 4-47 可發現，直線型固床工高度越高，固床工下游沖刷即會越深。這可以表示當直線型固床工高度愈大，其水流的能量越大，向下沖刷力也越大，導致沖刷深度越深。於上拱型部分也可看出當曲率半徑減少，拱度增加時，水流越趨於集中，渠道中心之沖刷深度也會隨之上升。

3. 流量變化之沖刷深度討論

由下圖中曲線可以得出，當流量變大時，固床工沖刷深度也會隨之加深。另外，由下圖可知，在固床工高度較小時，流量較大時，可能會有最大沖刷深度變淺的現象發生，此現象應為於固床工高度較小時，因流量上升，上游與下游之水位差減少，垂直向下之沖刷力減小，導致最大沖刷深度下降，反而是沖刷坑長度增加，沖刷坑橫向成長。

4. 沖刷坑長之討論

由圖 4-48 中可以看出當固床工高度增加、流量上升時，

冲刷坑长度會隨之增加，與前兩者呈正比。但於固床工高度較小、流量較大之情況下，因上下游水位差減小，冲刷深度減小，導致冲刷坑橫向發展，冲刷坑长度會大幅度地增加。

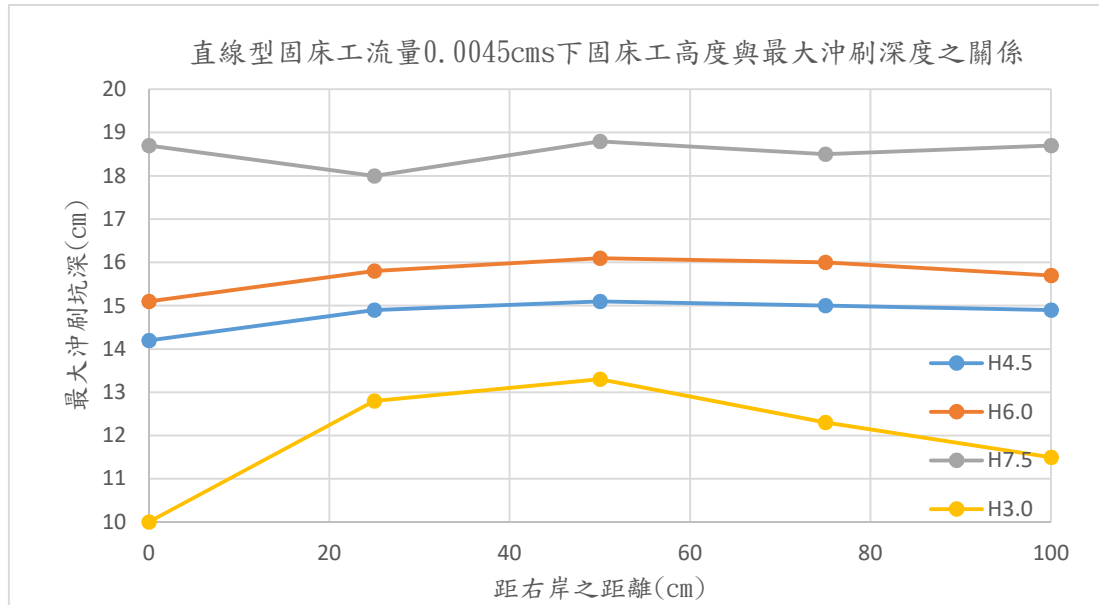


圖 4-40 流量 0.0045cms 下直線型固床工最大冲刷深度關係圖

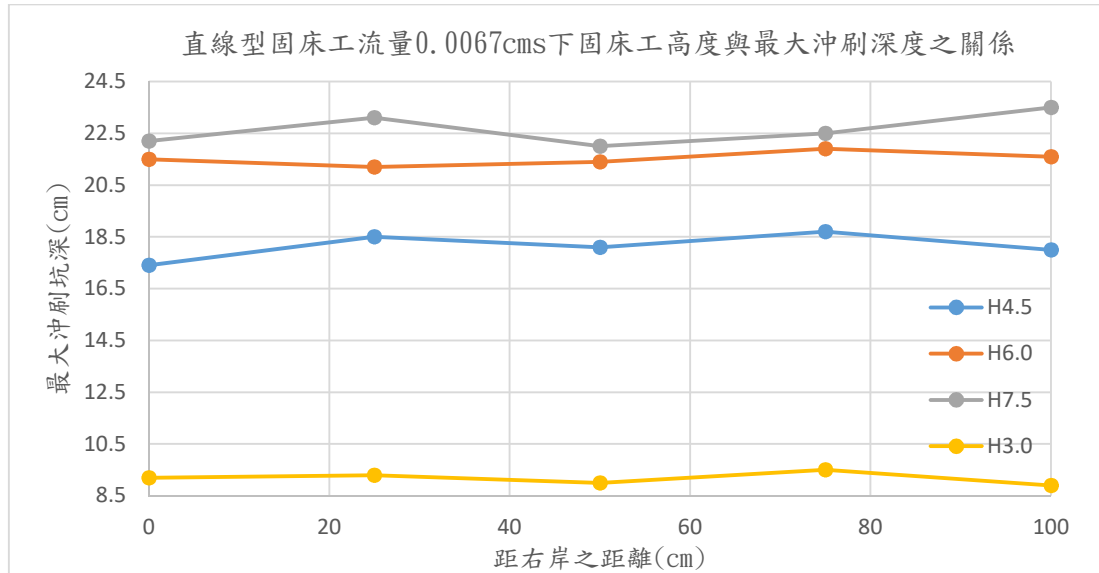


圖 4-41 流量 0.0067cms 下直線型固床工最大冲刷深度關係圖

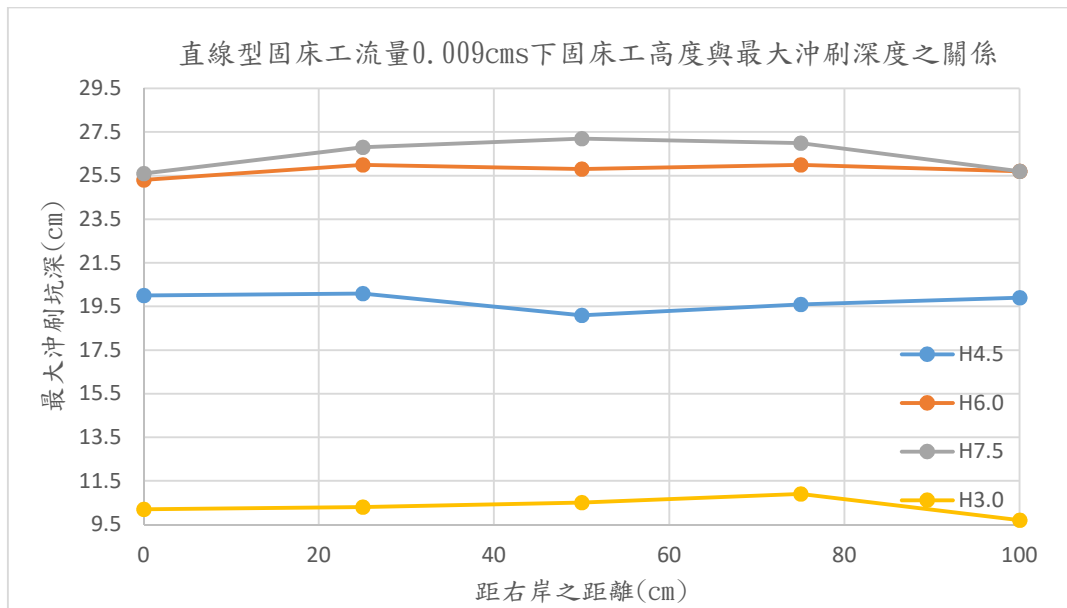


圖 4-42 流量 0.009cms 下直線型固床工最大沖淤深度關係圖

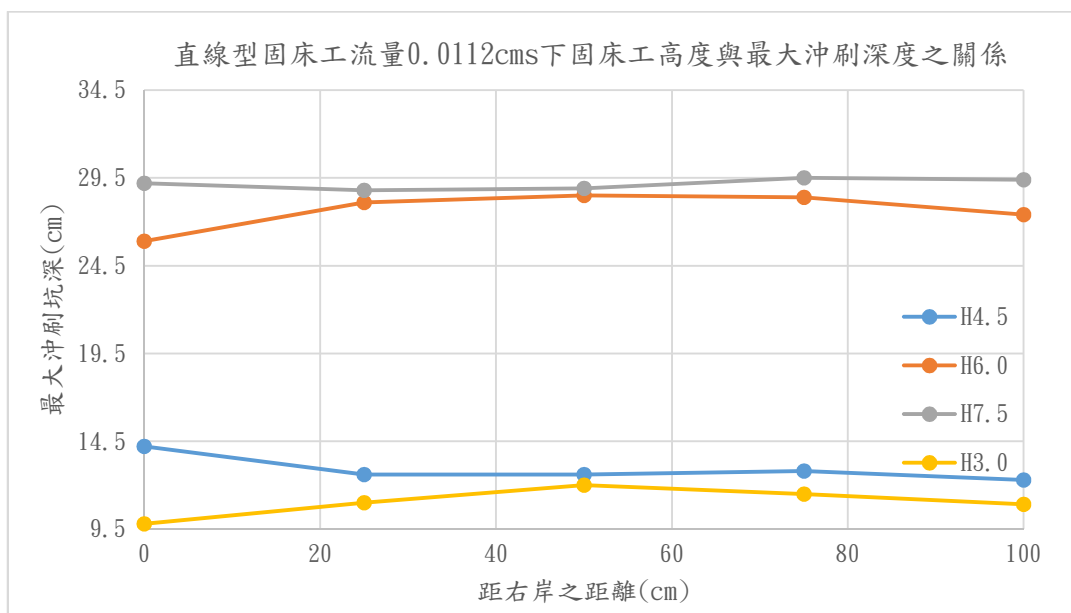


圖 4-43 流量 0.0112cms 下直線型固床工最大沖淤深度關係圖

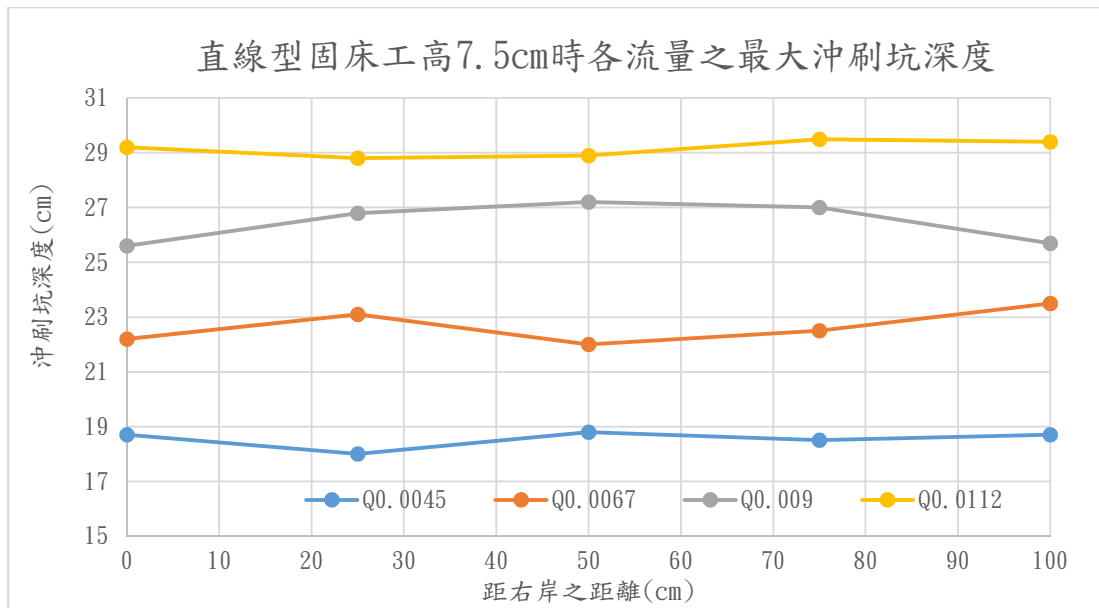


圖 4-44 直線型固床工高度 7.5cm 下不同流量、位置最大沖淤深度之關係圖

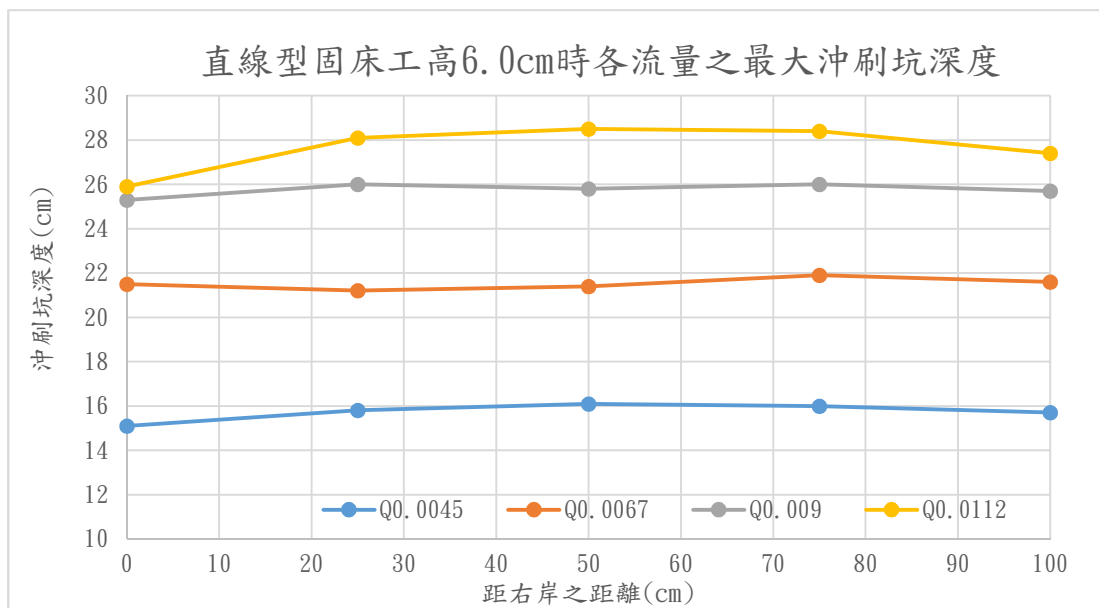


圖 4-45 直線型固床工高度 6.0cm 下不同流量、位置最大沖淤深度之關係圖

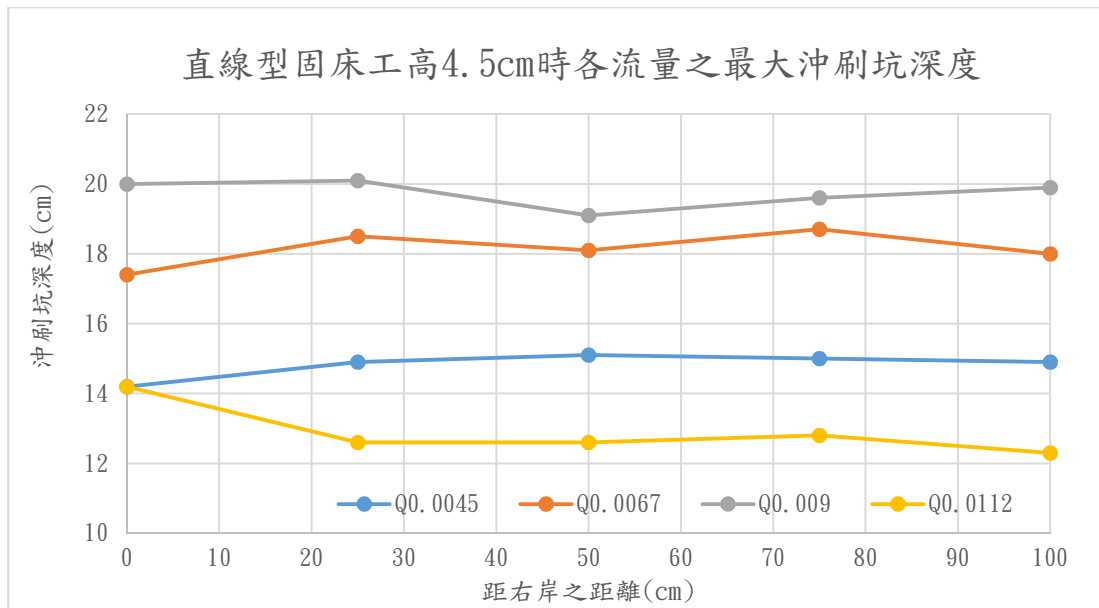


圖 4-46 直線型固床工高度 4.5cm 下不同流量、位置最大沖淤深度之關係圖

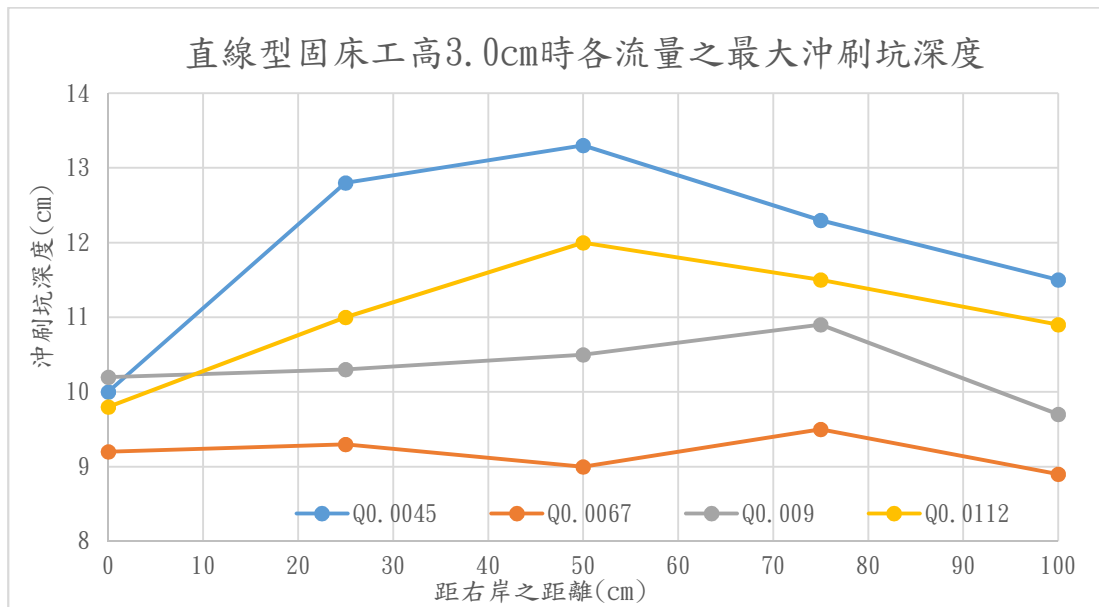


圖 4-47 直線型固床工高度 3.0cm 下不同流量、位置最大沖淤深度之關係圖

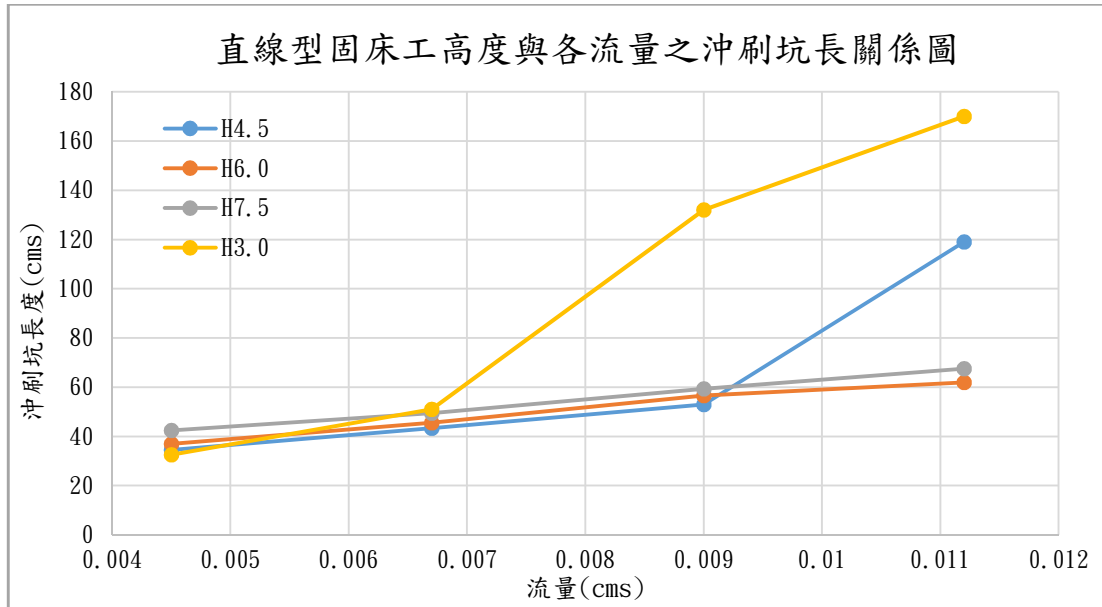


圖 4-48 直線型固床工高度與各流量之冲刷坑長關係圖

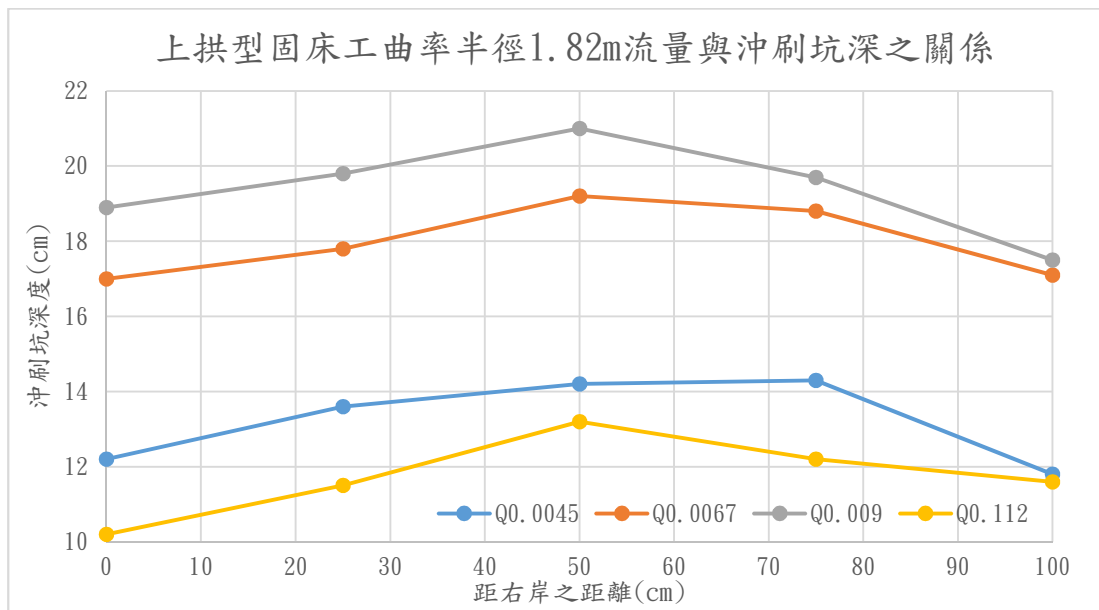


圖 4-49 上拱型固床工曲率半徑 1.82m 流量與冲刷坑深之關係圖

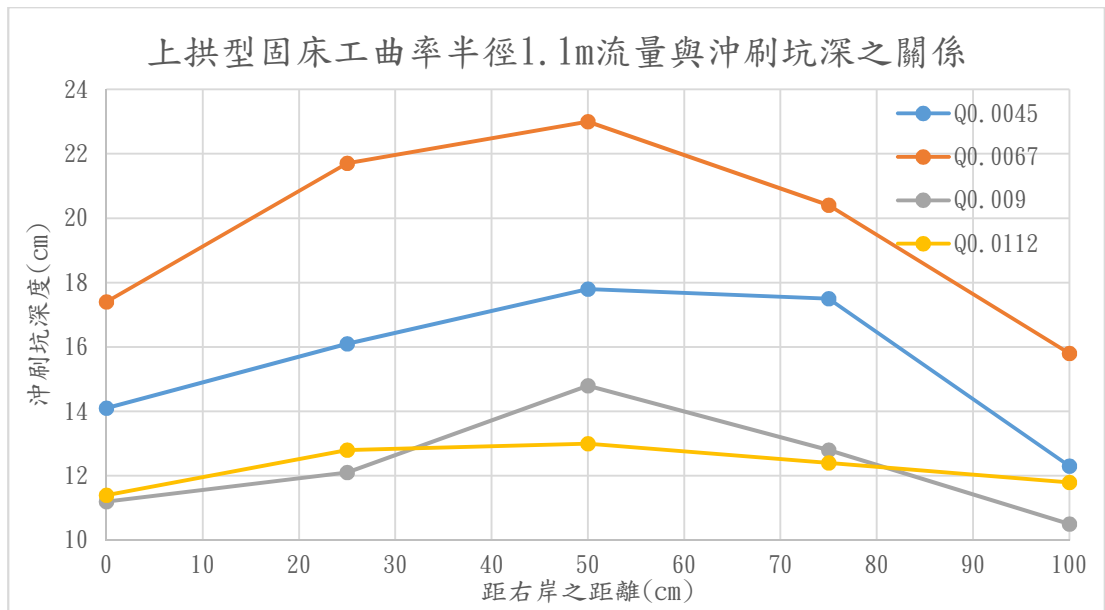


圖 4-50 上拱型固床工曲率半徑 1.1m 流量與沖刷坑深之關係圖

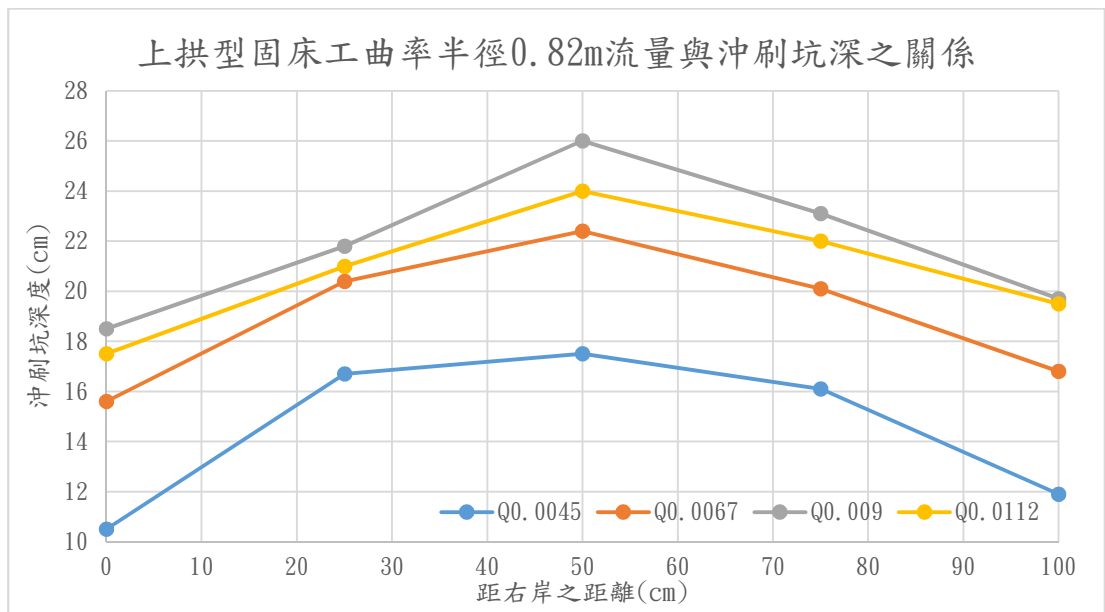


圖 4-51 上拱型固床工曲率半徑 0.82m 流量與沖刷坑深之關係圖

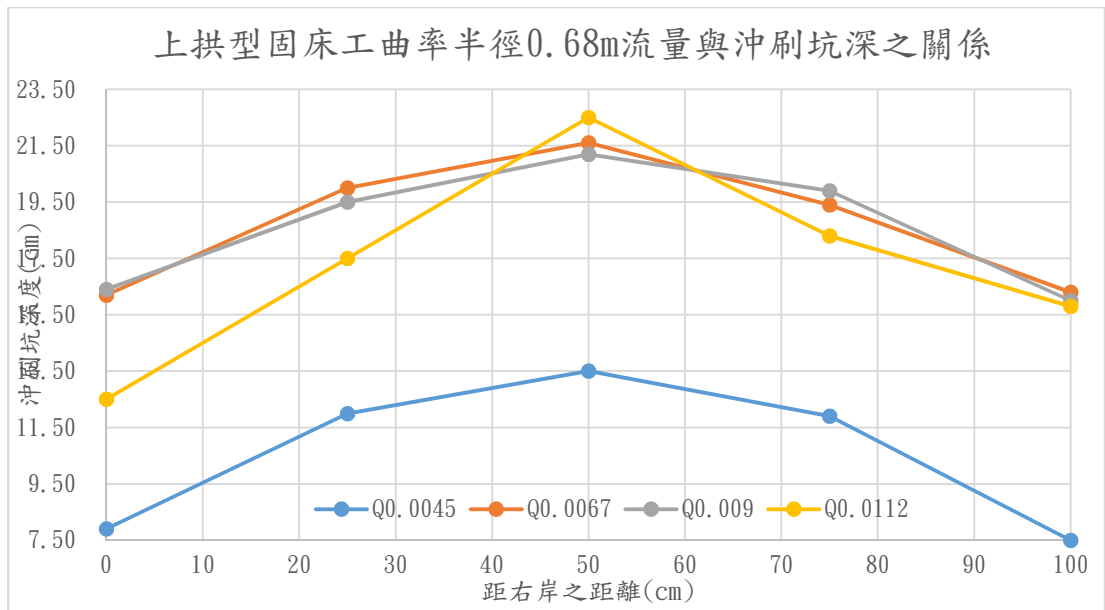


圖 4-52 上拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與沖刷坑深之關係圖

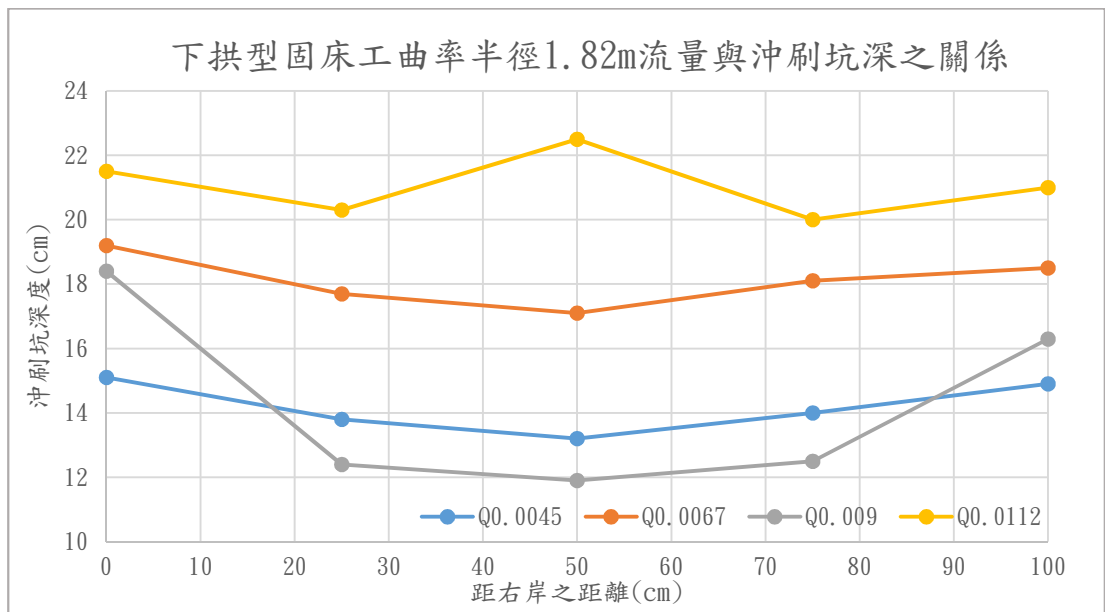


圖 4-53 下拱型固床工曲率半徑 1.82m 流量與沖刷坑深之關係圖

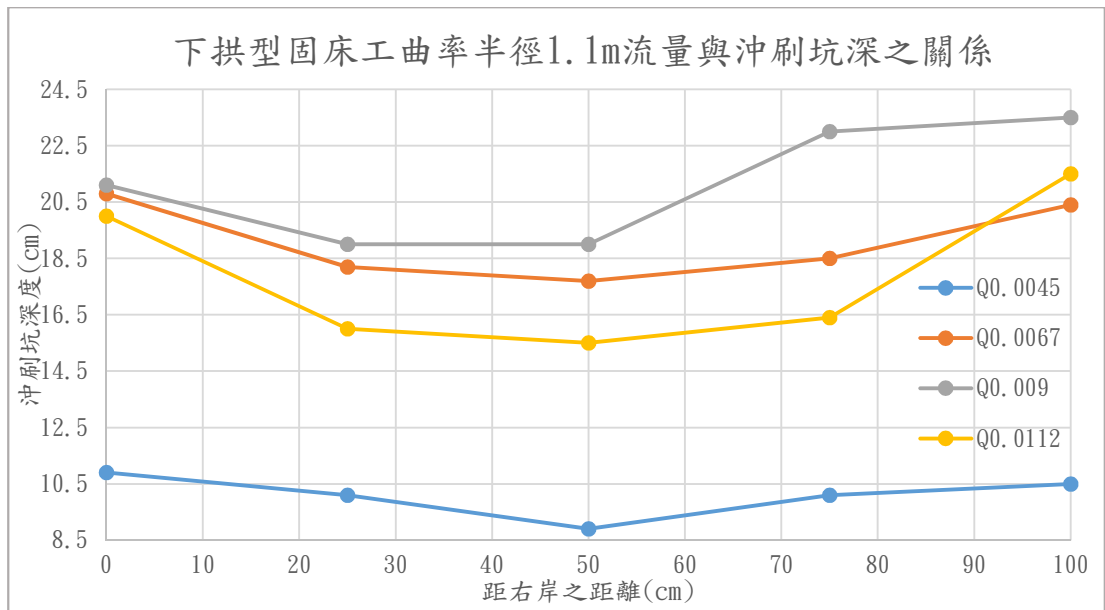


圖 4-54 下拱型固床工曲率半徑 1.1m 流量與沖刷坑深之關係圖

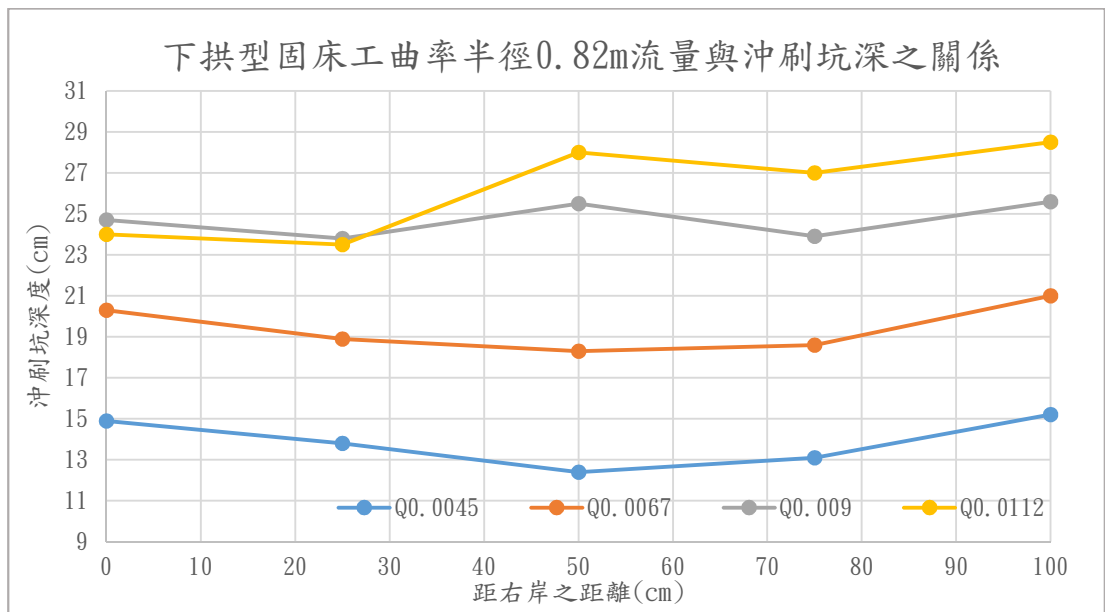


圖 4-55 下拱型固床工曲率半徑 0.82m 流量與沖刷坑深之關係圖

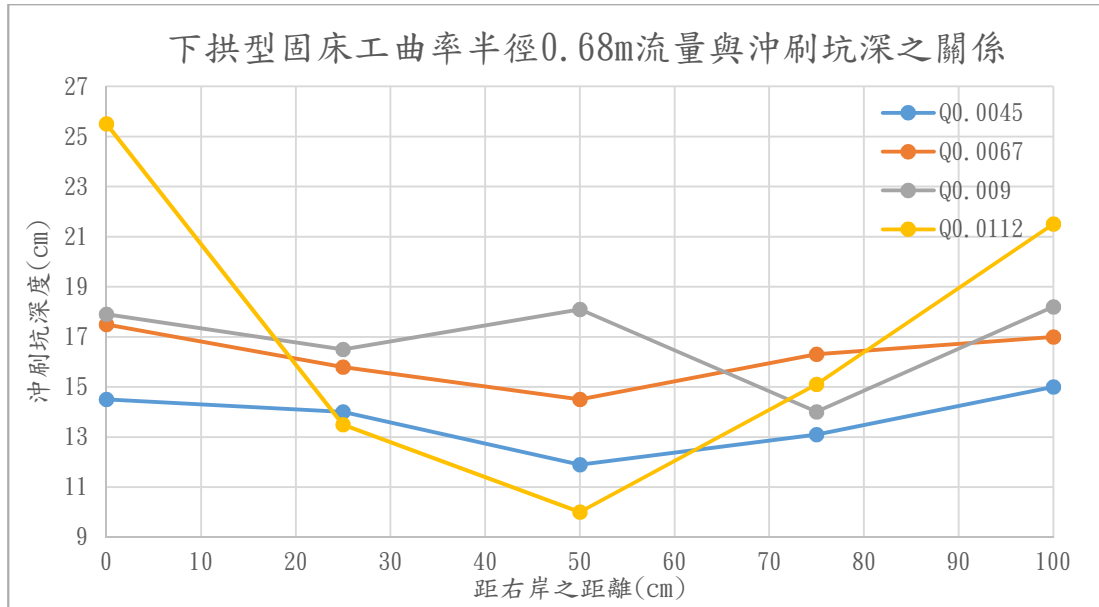


圖 4-56 下拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與冲刷坑深之關係圖

(四) 水流冲击力

本研究將使用小型拉壓兩用式荷重計進行試驗，量測水流作用於固床工之冲击力，並比較不同型態之固床工所受之水流冲击力分布的相異之處，上下拱型固床工其受力公式推導如下：

1. 流線函數 stream function ψ

對流場為不可壓縮及二維流動，則流場連續方程式為

$$\nabla \cdot (\vec{v}) = 0$$

若考慮 x-y 平面流動，則上式變成

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

在不可壓縮之二維流動，定義一流線函數 $\Psi(x,y)$ 以自動滿足流場連續方程式，而其中流線函數與速度的關係如下：

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$$

及

$$v = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}$$

欲證明上兩式自動滿足連續方程式，可將其帶入上式得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial x} = 0$$

而對圓柱座標之不可壓縮之二維流動，連續方程式為

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} = 0$$

則流線函數 $\psi(r, \theta)$ 可定義為

$$V_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}$$

及

$$V_\theta = -\frac{\partial \Psi}{\partial r}$$

上兩式代入前連續方程式中亦自動滿足不可壓縮流之連續方程式。

2. 速度位勢 velocity potential ϕ

若流場為無旋流動($\nabla \times (\vec{v}) = 0$)，則依向量恆等式可知，其必存在一純量函數 ϕ ，可使得

$$\nabla \times \nabla \phi = 0$$

其中 ϕ 即為速度位勢或位勢函數(potential function)。換言之，若流場中存在 ϕ ，則此流場必為無旋流場($\nabla \times (\vec{v}) = 0$)，則 $\vec{v}$ 與 ϕ 之關係可得出

$$\vec{v} = \nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{k}$$

則速度場三分量與 ϕ 之關係為

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

及

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

而對圓柱座標之無旋流場而言，速度場與 ϕ 之關係為

$$\vec{v} = \nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{e}_r + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{e}_\theta + \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{e}_z$$

則速度場三分量與 ϕ 之關係為

$$V_r = \frac{\partial \phi}{\partial r}$$

$$V_\theta = \frac{\partial \phi}{\partial \theta}$$

及

$$V_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

3. 圓柱之流體壓力與速度

圓柱半徑 a 的圓柱體流體之流線函數可表示為

$$\Psi = Ur(1 - \frac{a^2}{r^2}) \sin \theta$$

由流線函數定義

$$V_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[Ur(1 - \frac{a^2}{r^2}) \sin \theta \right] = U(1 - \frac{a^2}{r^2}) \cos \theta$$

及

$$V_\theta = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial r} \left[Ur(1 - \frac{a^2}{r^2}) \sin \theta \right] = -U(1 + \frac{a^2}{r^2}) \sin \theta$$

故速度場為

$$\vec{v}(r, \theta) = U(1 - \frac{a^2}{r^2}) \cos \theta \vec{e}_r - U(1 + \frac{a^2}{r^2}) \sin \theta \vec{e}_\theta$$

將速度場取散度得

$$\begin{aligned}
\nabla \cdot \left(\vec{v} \right) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \\
&= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[U r \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \theta \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[U \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \theta \right] \\
&= \frac{1}{r} U \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \theta - \frac{1}{r} U \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \theta
\end{aligned}$$

$$\nabla \cdot \left(\vec{v} \right) = 0$$

其滿足連續方程式。

將速度場取旋度

$$\begin{aligned}
\nabla \times \left(\vec{v} \right) &= \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \vec{e}_r & r \vec{e}_\theta & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ V_r & r V_\theta & V_\theta \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{r} \left[-U \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \theta + U \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \theta \right] \vec{e}_z = 0
\end{aligned}$$

故此為無旋流場。

因流場為不可壓縮($\nabla \cdot \left(\vec{v} \right) = 0$)及無旋($\nabla \times \left(\vec{v} \right) = 0$)流場，

故 Ψ 及 ϕ 滿足 Cauchy-Riemann 方程式，即

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = V_r = U \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \theta$$

及

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} = V_\theta = -U \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \theta$$

將前式積分得 ϕ

$$\phi(r, \theta) = U \left(r + \frac{a^2}{r} \right) \cos \theta + f(\theta)$$

代入後得

$$V_{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[U \left(r + \frac{a^2}{r} \right) \cos \theta + f(\theta) \right]$$

$$= -U \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \theta + f'(\theta)$$

比較兩式中 V_{θ} 後，得

$$f'(\theta) = f(\theta) = 0$$

故此流場之速度位勢為

$$\phi(r, \theta) = Ur \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \theta$$

4. 拱型固床工上游端壓力與流速之關係

在離圓柱極遠處，壓力與速度分別為 P_0 及 V_0 ；而在圓柱表面上壓力為 P_s 且速度為 U_s 為

$$U_s(a, \theta) = \sqrt{V_r^2 + V_{\theta}^2} = 2V_0 \sin \theta$$

取離圓柱極遠處之一點兩圓柱表面上一點且忽略位能變化代入柏努利方程式中，可得

$$\frac{P_s}{\rho} + \frac{1}{2} V_s^2 = \frac{P_0}{\rho} + \frac{1}{2} V_0^2$$

將 V_s 代入上式可得

$$P_s = P_0 + \frac{1}{2} V_0^2 \rho (1 - 4 \sin^2 \theta)$$

表 4-2 則詳列上拱型固床工與下拱型固床工之上游面受力公式，以供後續設計計算用。

表 4-2 上下拱型固床工上游面受力公式表

	曲率半徑	位置	應力公式
上 拱 型	曲率半徑 1.82m	左岸、右岸	$P_{sB} = P_{sD} = P_0 + 0.461554 V_0^2 \rho$
		渠道中心	$P_{sC} = P_0 + 0.5 V_0^2 \rho$
		左岸、右岸	$P_{sB} = P_{sD} = P_0 + 0.39107 V_0^2 \rho$

固 床 工	曲率半徑 1.1m	渠道中心	$P_{SC} = P_0 + 0.5V_0^2\rho$
	曲率半徑 0.82m	左岸、右岸	$P_{SB} = P_{SD} = P_0 + 0.29276V_0^2\rho$
		渠道中心	$P_{SC} = P_0 + 0.5V_0^2\rho$
	曲率半徑 0.68m	左岸、右岸	$P_{SB} = P_{SD} = P_0 + 0.1756V_0^2\rho$
		渠道中心	$P_{SC} = P_0 + 0.5V_0^2\rho$
下 拱 型 固 床 工	曲率半徑 1.82m	左岸、右岸	$P_{SB} = P_{SD} = P_0 - 0.461554V_0^2\rho$
		渠道中心	$P_{SC} = P_0 - 0.5V_0^2\rho$
	曲率半徑 1.1m	左右岸	$P_{SB} = P_{SD} = P_0 - 0.39107V_0^2\rho$
		渠道中心	$P_{SC} = P_0 - 0.5V_0^2\rho$
	曲率半徑 0.82m	左右岸	$P_{SB} = P_{SD} = P_0 - 0.29276V_0^2\rho$
		渠道中心	$P_{SC} = P_0 - 0.5V_0^2\rho$
	曲率半徑 0.68m	左右岸	$P_{SB} = P_{SD} = P_0 - 0.1756V_0^2\rho$
		渠道中心	$P_{SC} = P_0 - 0.5V_0^2\rho$

由以上公式計算出固床工受力之理論值，會與實驗所量測之實測值進行比較，討論下一小節所列出之能量修正係數。獸力結果部分可從圖 4-64 至圖 4-71 看出上拱型固床工因水流集中導致渠道中間之應力值較兩側高，而下拱型固床工則因水流分散導致渠道兩側之應力值會較中間值較高，與之相反。

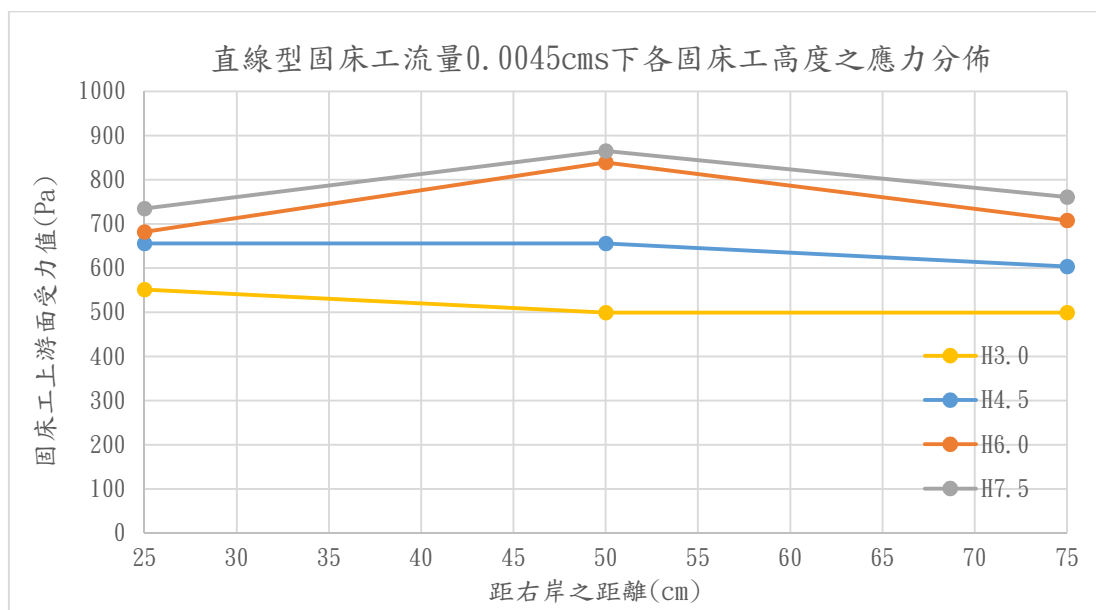


圖 4-57 直線型固床工流量 0.0045cms 下各固床工高度之應力分佈圖

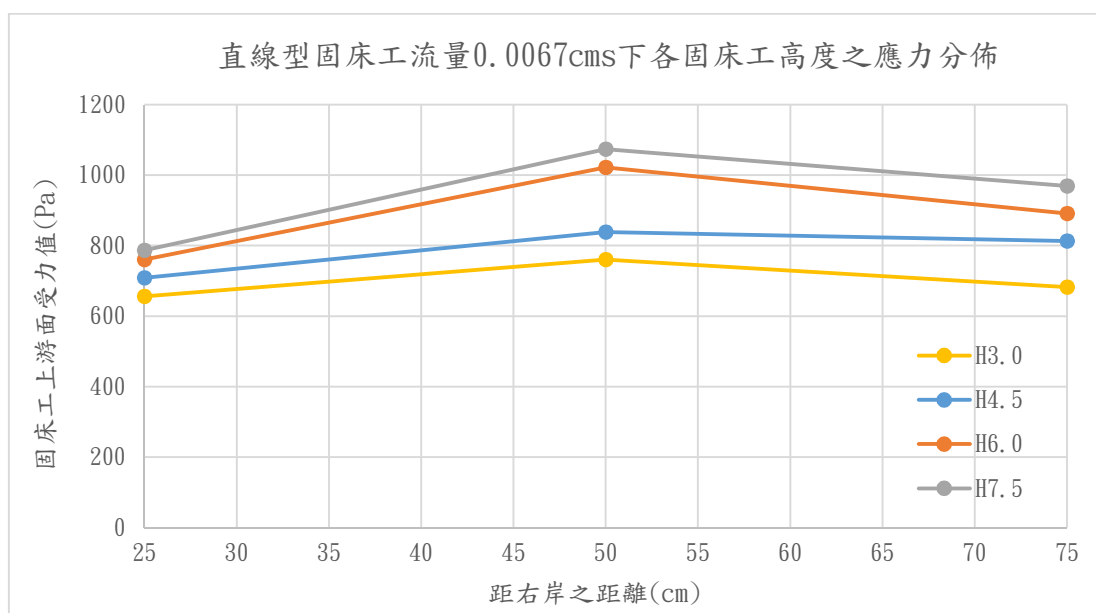


圖 4-58 直線型固床工流量 0.0067cms 下各固床工高度之應力分佈圖

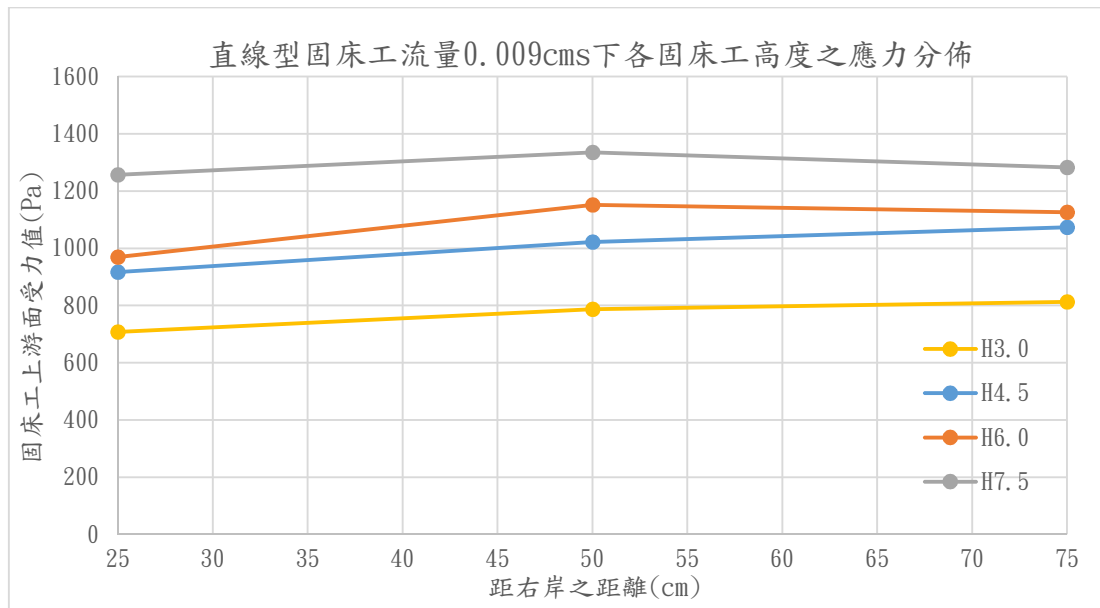


圖 4-59 直線型固床工流量 0.009cms 下各固床工高度之應力分佈圖

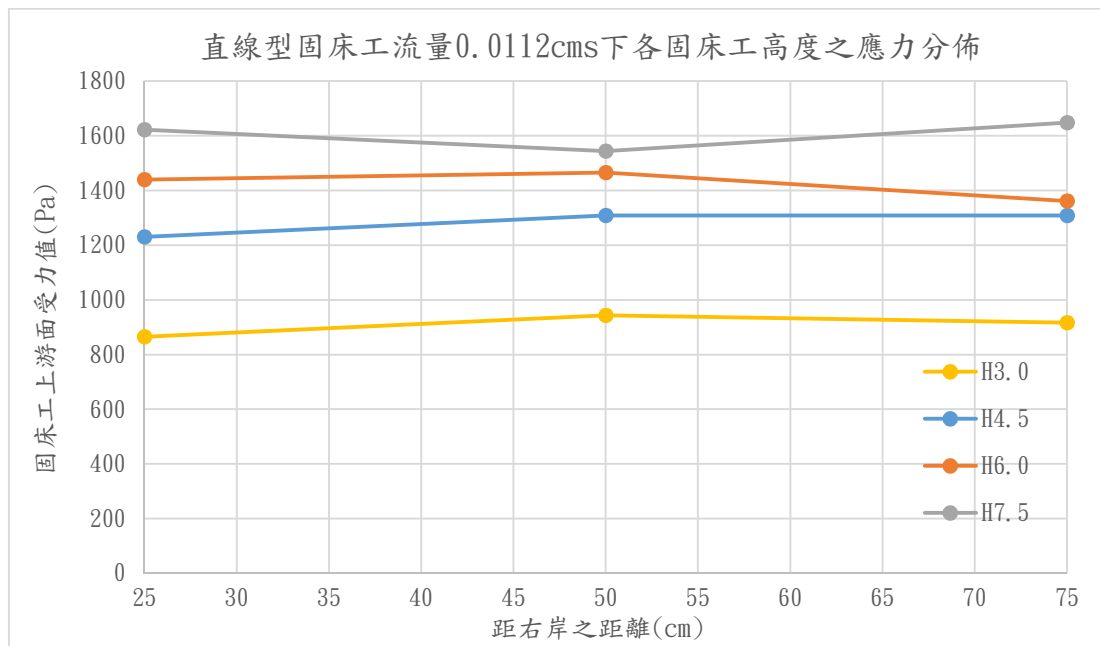


圖 4-60 直線型固床工流量 0.0112cms 下各固床工高度之應力分佈圖

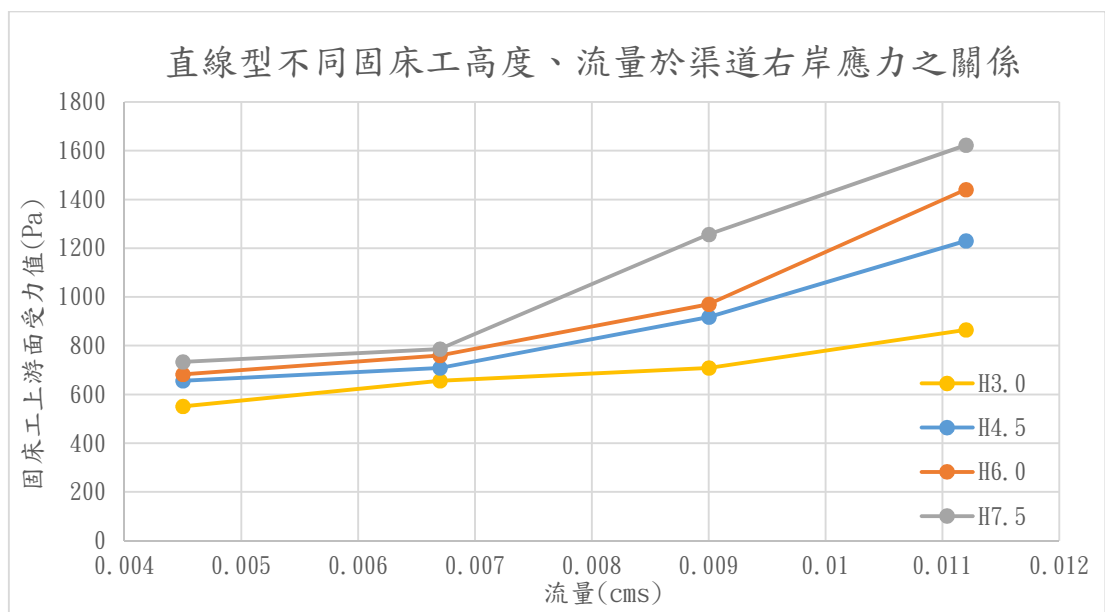


圖 4-61 直線型不同固床工高度、流量於渠道右岸應力關係圖

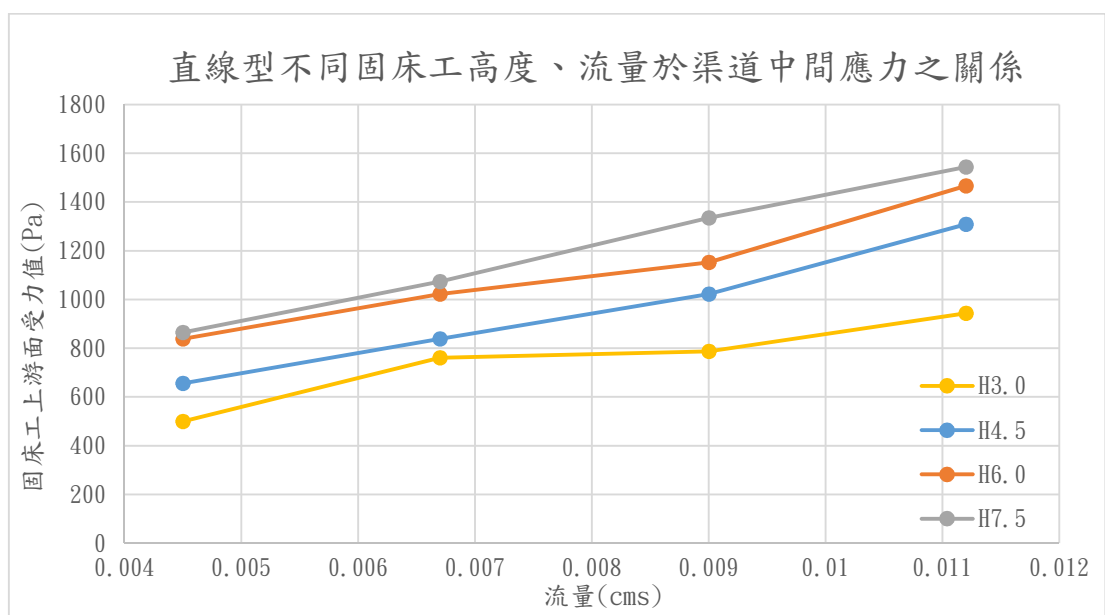


圖 4-62 直線型不同固床工高度、流量於渠道中間之應力關係圖

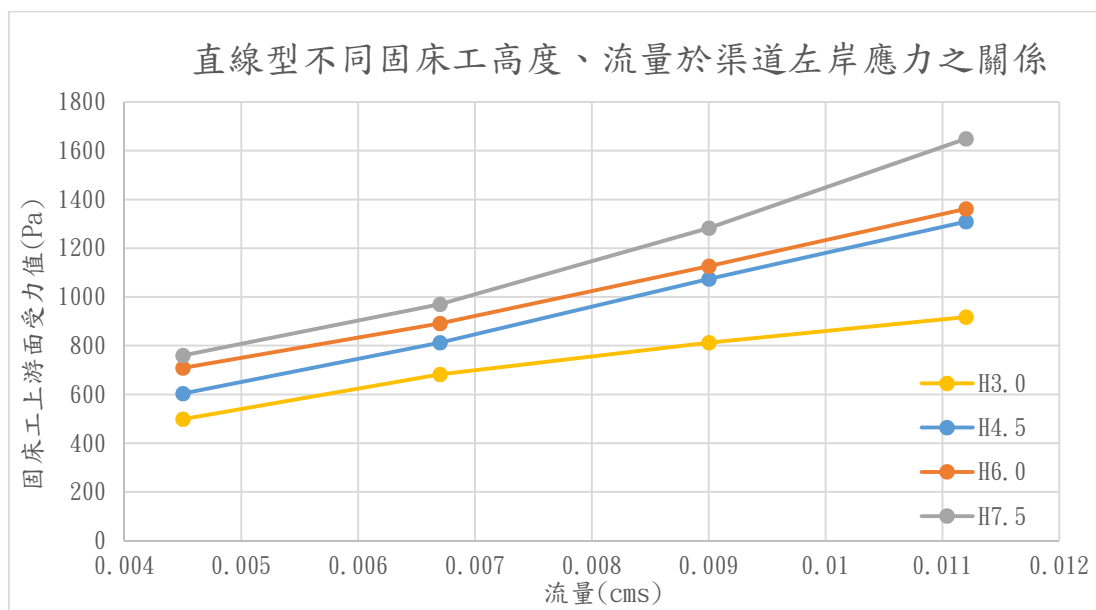


圖 4-63 直線型不同固床工高度、流量於渠道左岸應力關係圖

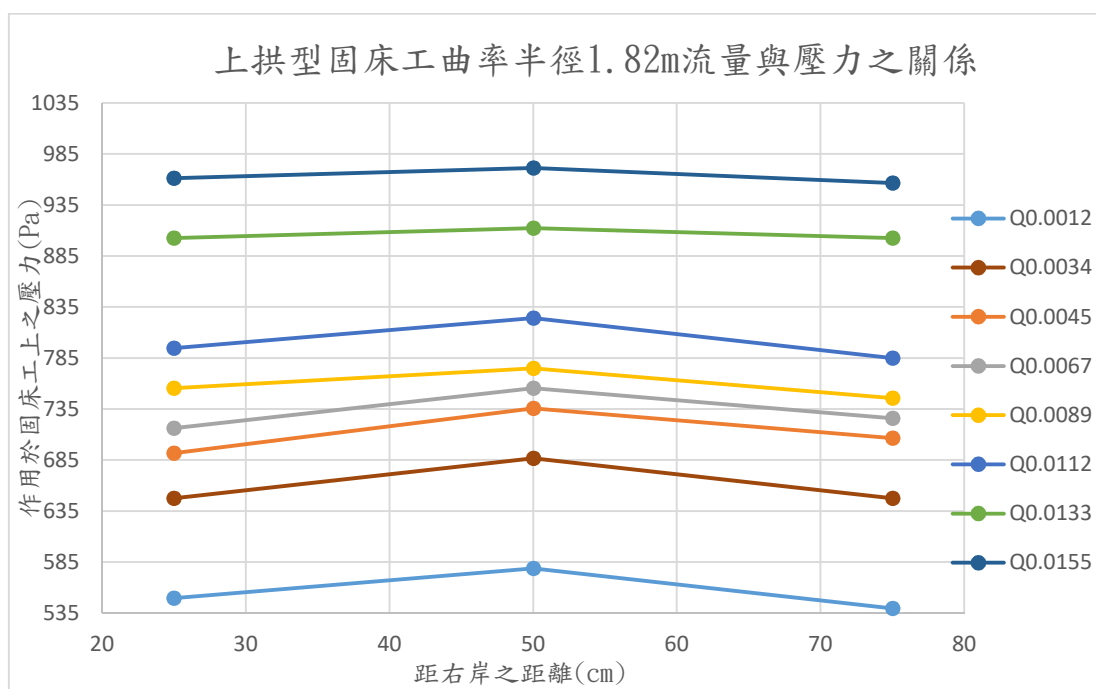


圖 4-64 上拱型固床工曲率半徑 1.82m 流量與應力之關係圖

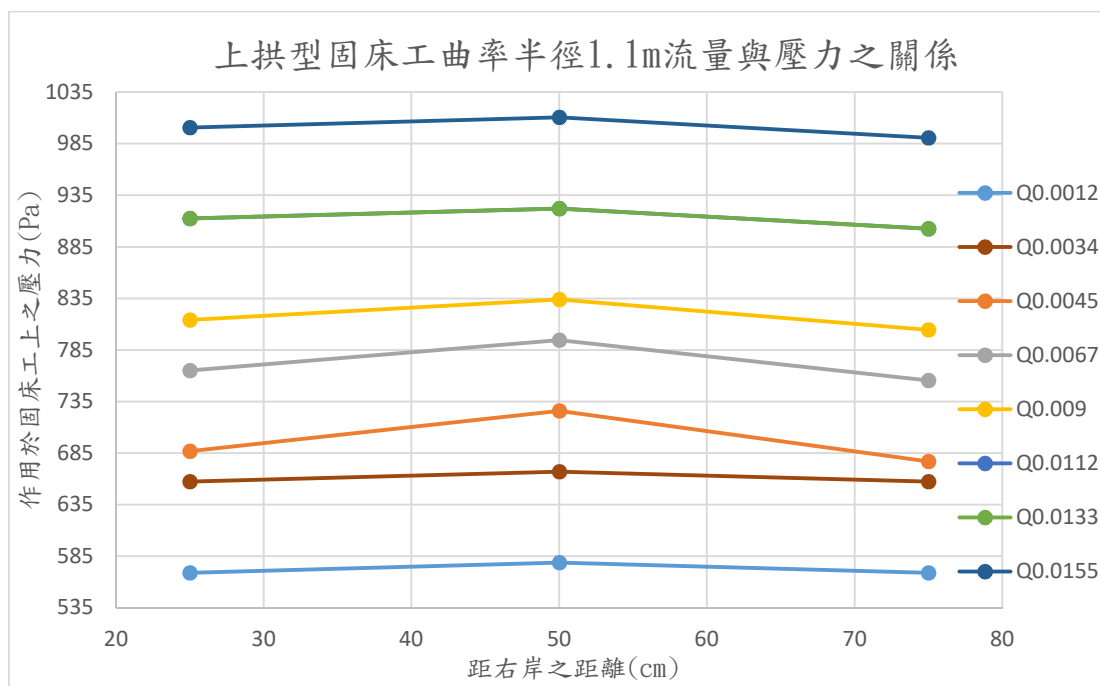


圖 4-65 上拱型固床工曲率半徑 1.1m 流量與應力之關係圖

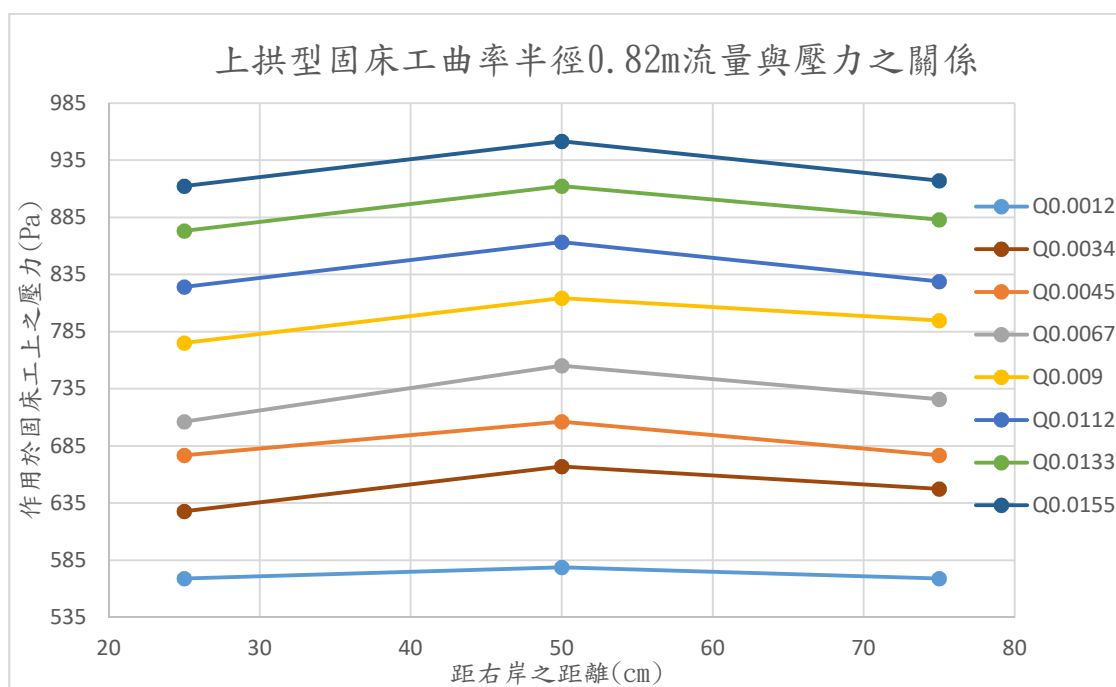


圖 4-66 上拱型固床工曲率半徑 0.82m 流量與應力之關係圖

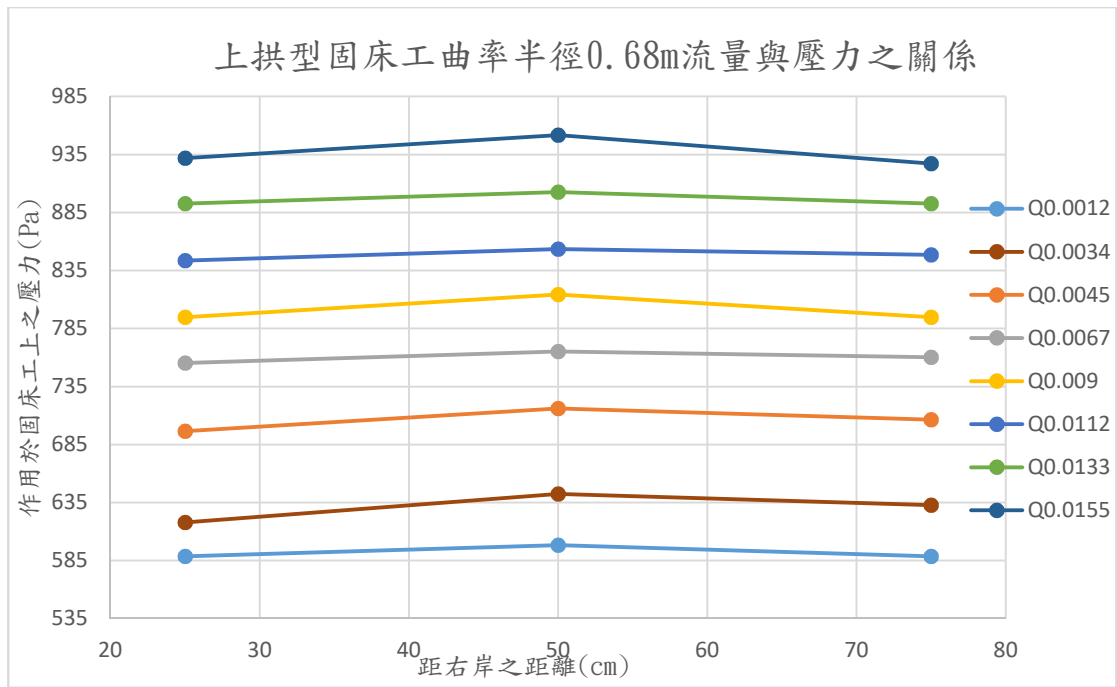


圖 4-67 上拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與應力之關係圖

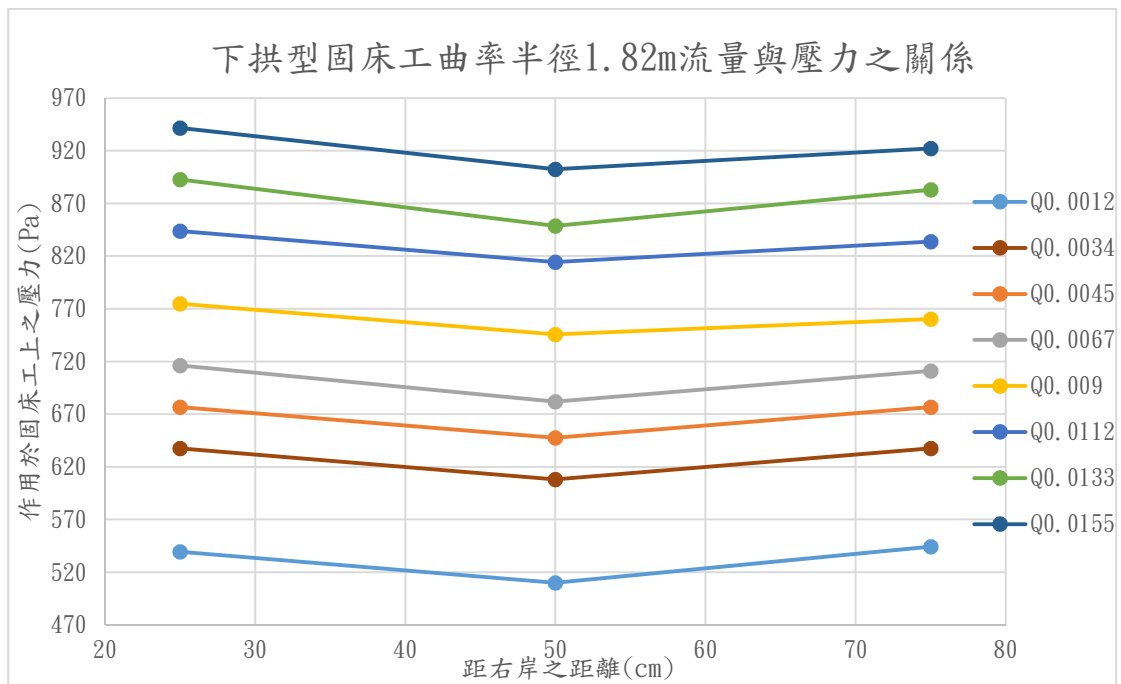


圖 4-68 下拱型固床工曲率半徑 1.82m 流量與應力之關係圖

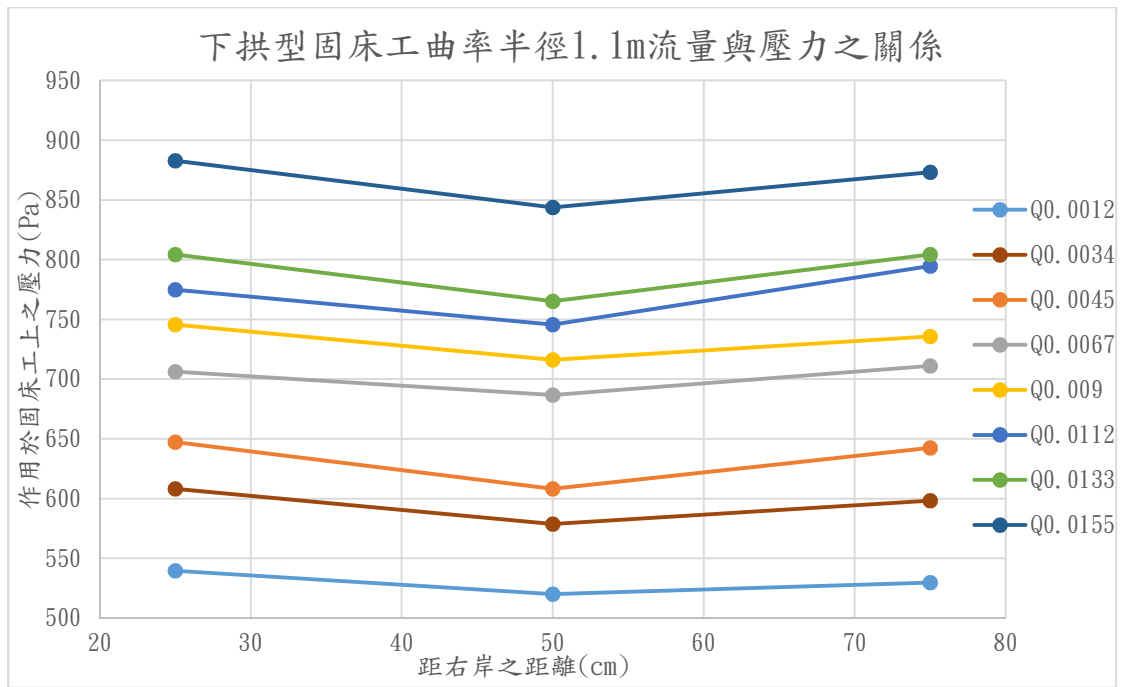


圖 4-69 下拱型固床工曲率半徑 1.1m 流量與應力之關係圖

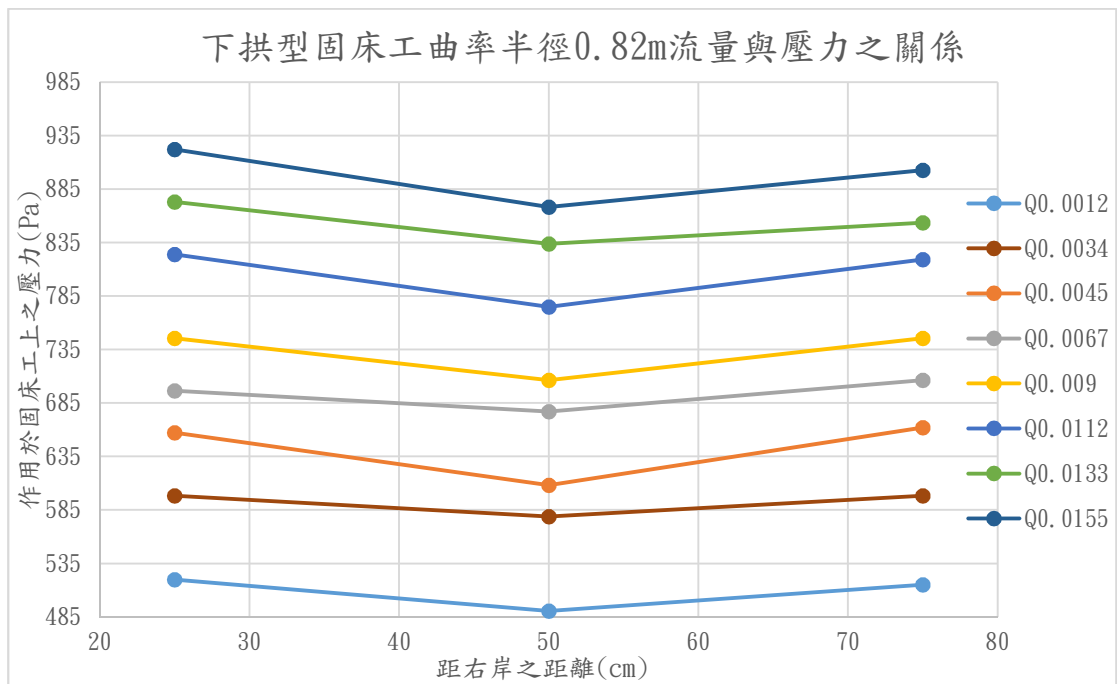


圖 4-70 下拱型固床工曲率半徑 0.82m 流量與應力之關係圖

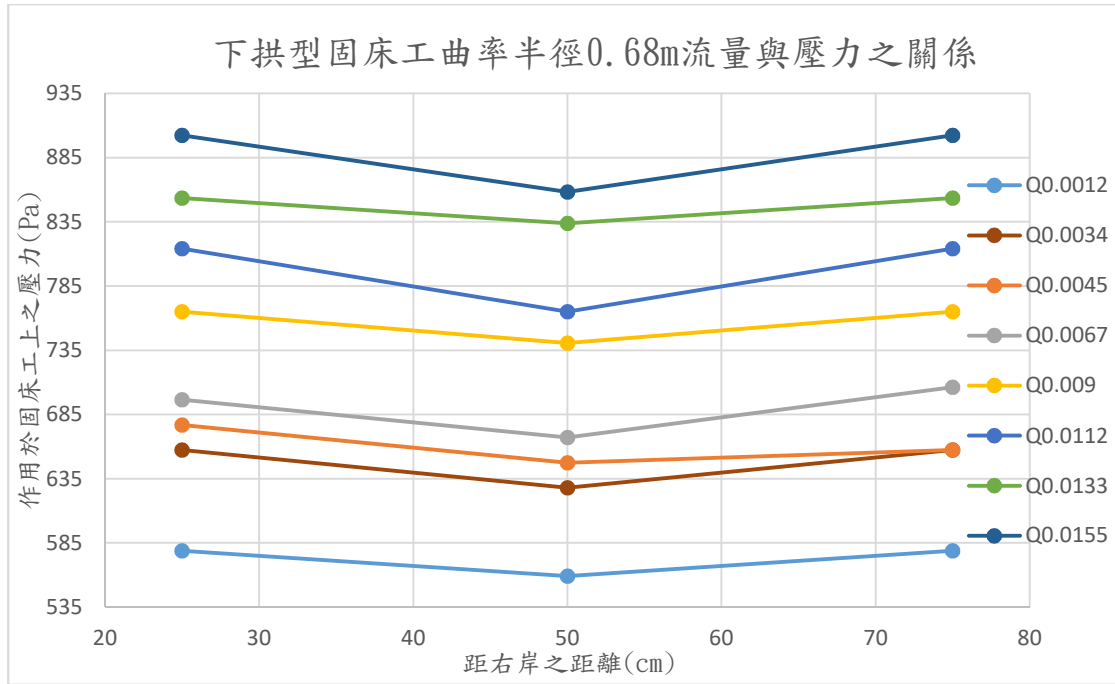


圖 4-71 下拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與應力之關係圖

(五) 能量修正係數 α

由於實際上之渠道斷面並非沒有摩擦阻力之存在，不可將其完全忽略，以致渠道水流單位中之實際動能，即 Bernoulli 方程式中之速度水頭，通常會比理論之速度水頭 $\frac{V^2}{2g}$ 所計算的要來的大，因此於此研究使用 Bernoulli 方程式之時，其真正之流速水頭應以 $\alpha \frac{V^2}{2g}$ 表之，此係數 α 即為能量修正係數。

此部分將固床工上游面之壓力實測值與理論值相減，得出其能量損失 h_e ，再與實際流速水頭進行相比較，計算出真正流速水頭之能量修正係數 α 值。

理論之 Bernoulli 方程式應表示為

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constant}$$

因摩擦阻力之關係，應於式中加上能量損失之值 h_e ，可表為

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_e$$

能量修正係數計算公式可如下所示

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = h_e = \alpha \frac{V^2}{2g}$$

式中， ΔP 為壓力理論值與實測值之差； γ 為流體單位重，此處可視為水之單位重。

此部分能量損失修正係數將柏努力定律公式進行計算，由於原先實驗所設定之四種流量所得出之結果無法較精準的判斷其趨勢以及能量修正係數與流量之間之實際關係，因此，此研究將上下拱型固床工部分流量擴大範圍，減小至 6Hz 增加擴大至 32Hz，而得出以下之關係圖，如下圖 4-72 至圖 4-83 所示。從下述圖片可以發現，當流量越大時，能量修正係數會隨之下降並趨於穩定值，可得出其呈一函數關係。

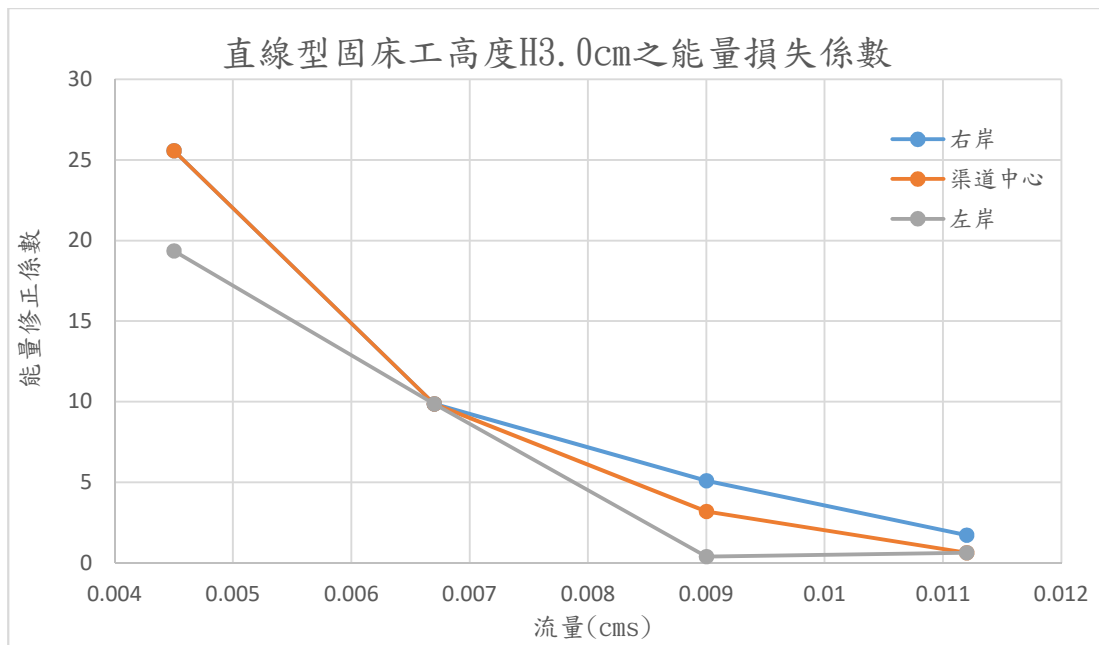


圖 4-72 直線型固床工高度 H3.0cm 之能量修正係數 α 圖

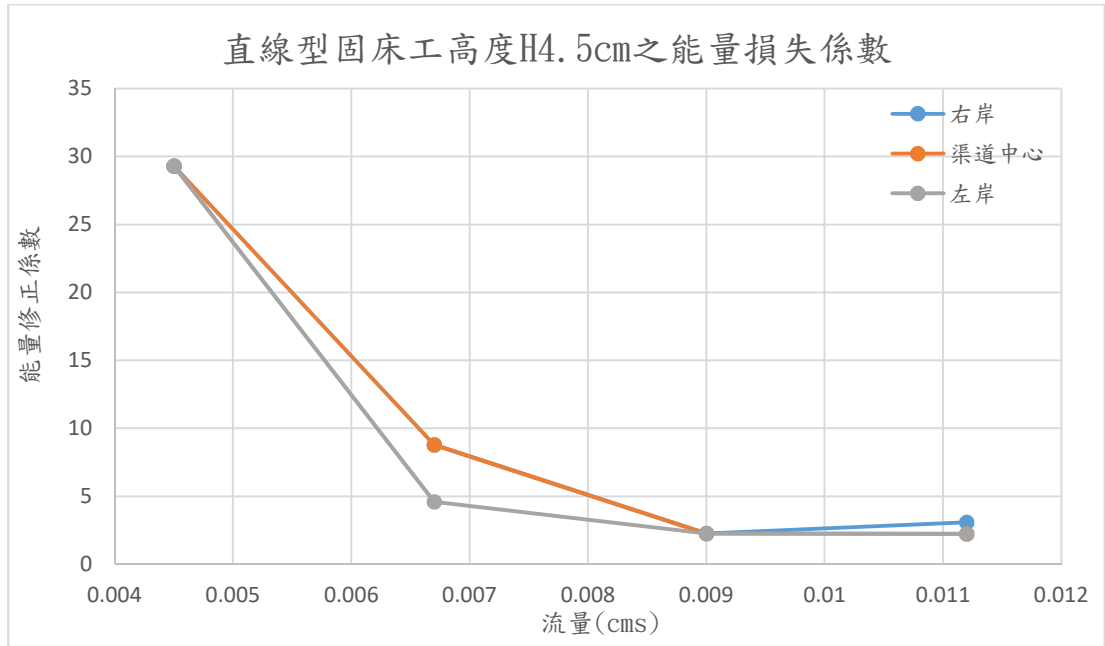


圖 4-73 直線型固床工高度 H4.5cm 之能量修正係數 α 圖

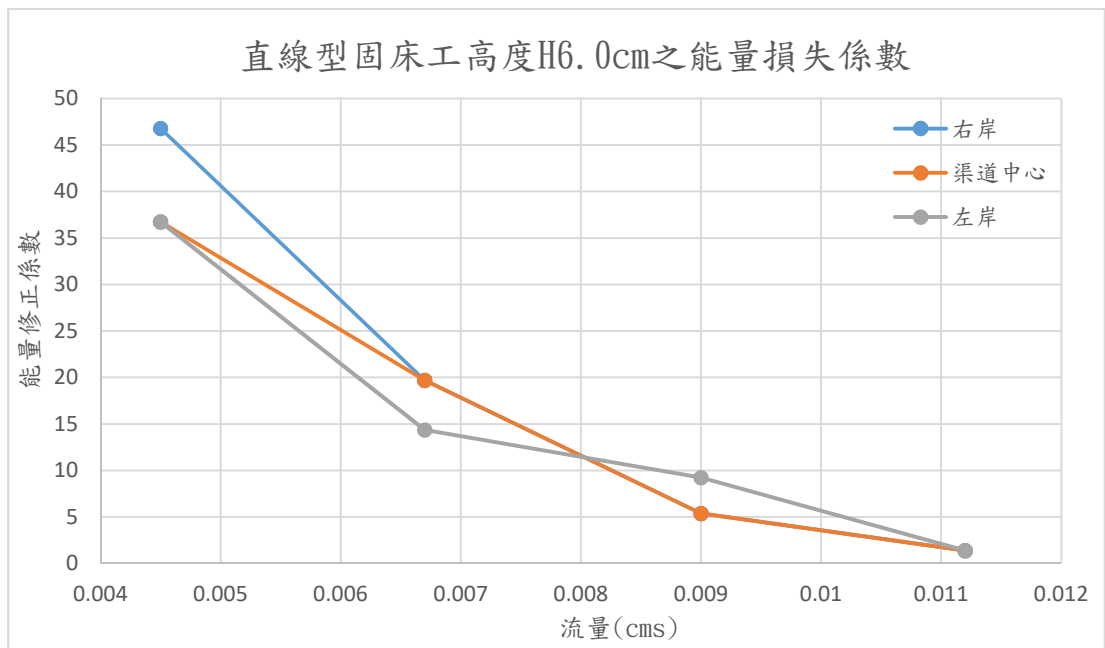


圖 4-74 直線型固床工高度 H6.0cm 之能量修正係數 α 圖

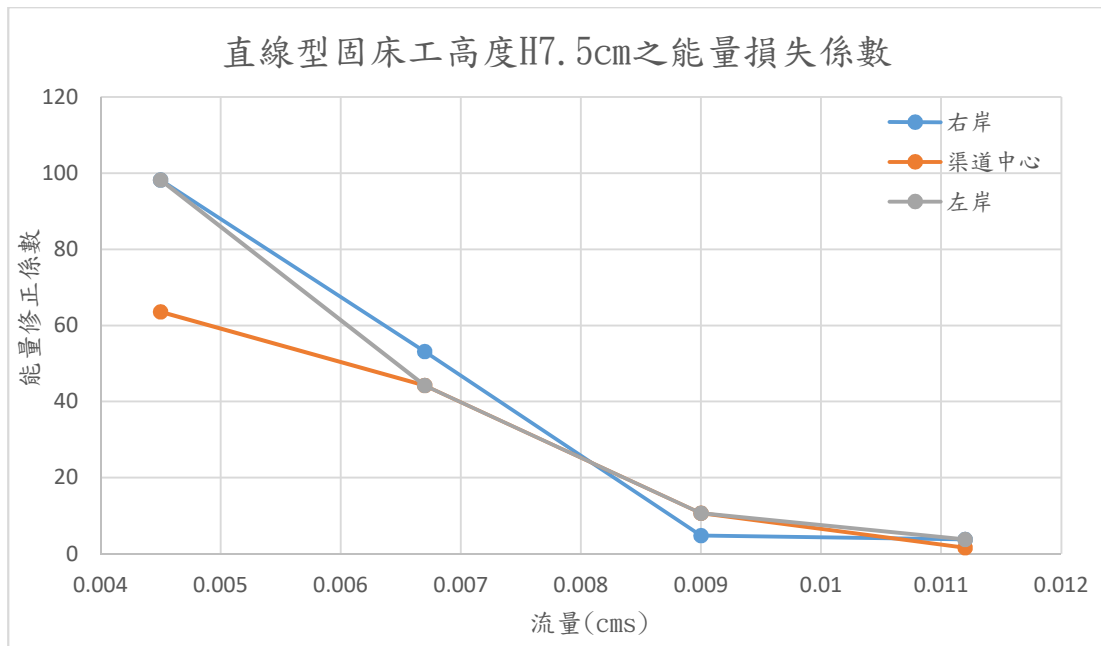


圖 4-75 直線型固床工高度 H7.5cm 之能量修正係數 α 圖

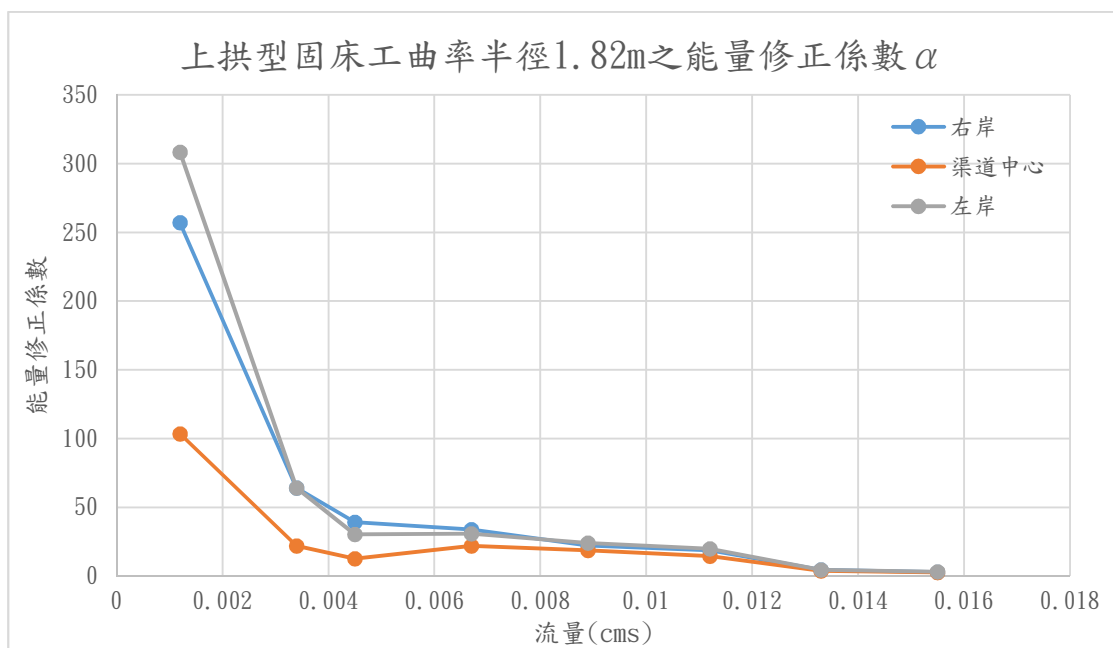


圖 4-76 上拱型固床工曲率半徑 1.82m 之能量修正係數 α 圖

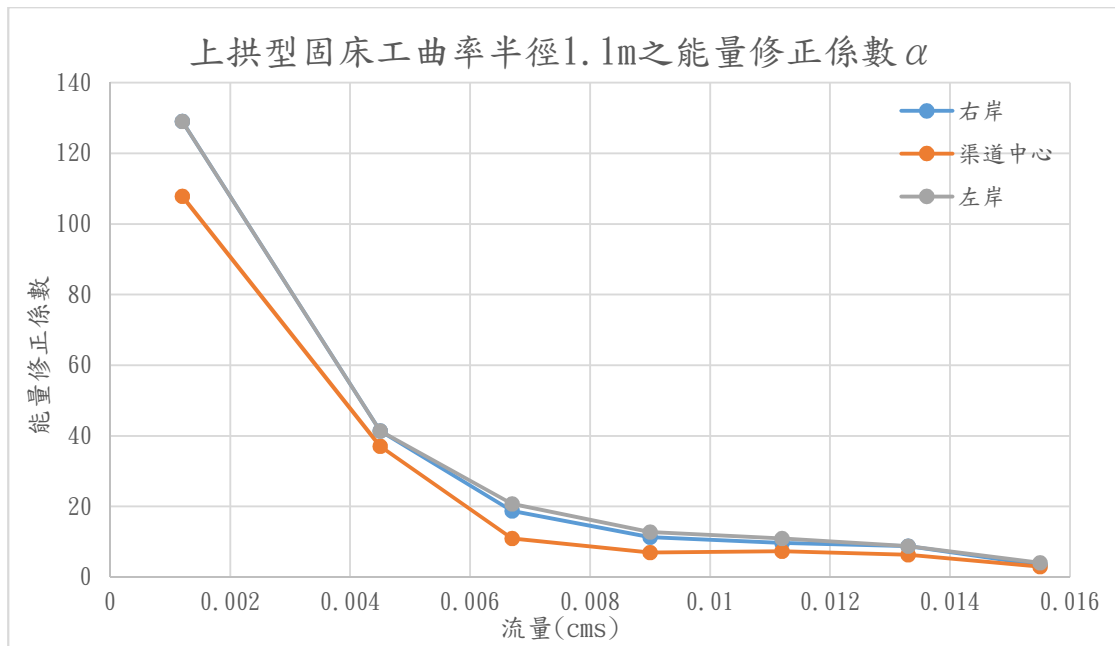


圖 4-77 上拱型固床工曲率半徑 1.1m 之能量修正係數 α 圖

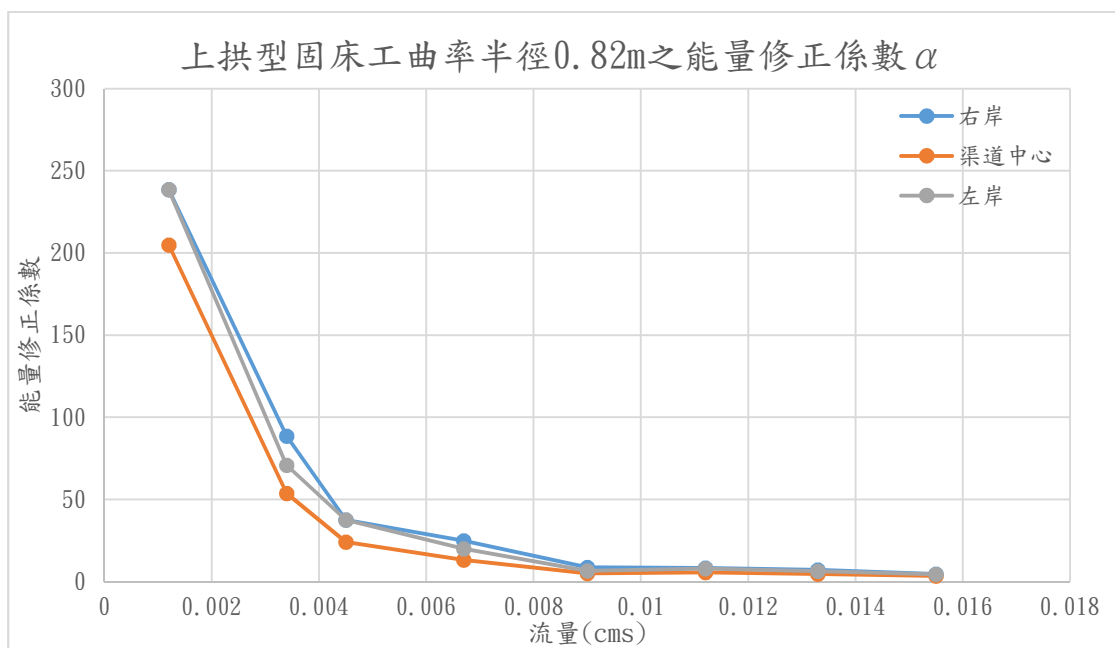


圖 4-78 上拱型固床工曲率半徑 0.82m 之能量修正係數 α

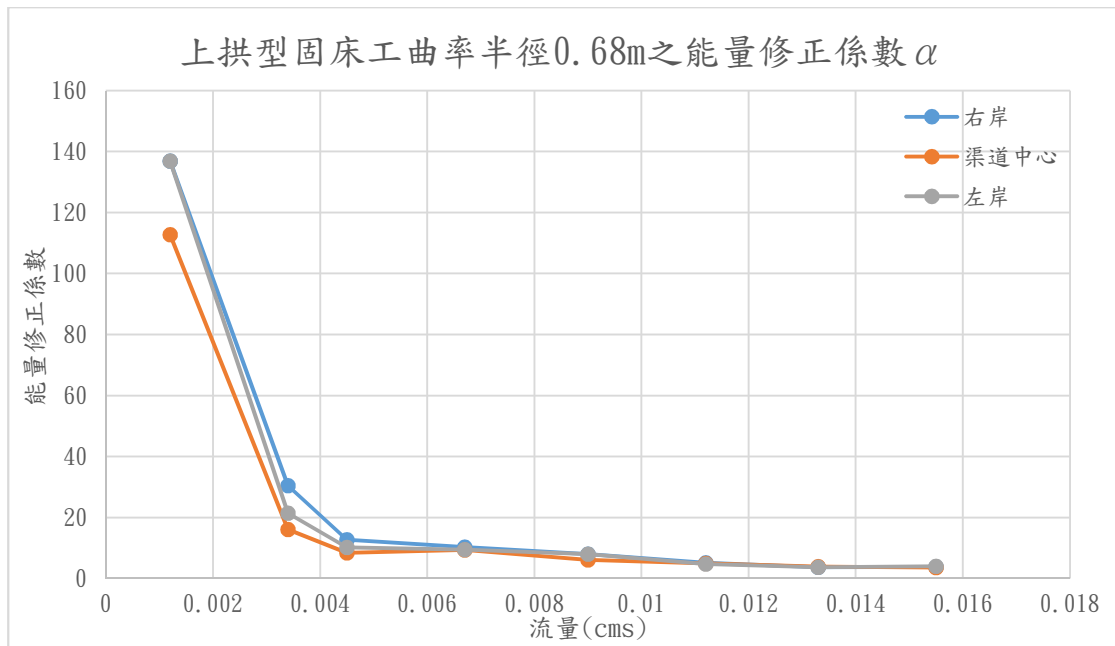


圖 4-79 上拱型固床工曲率半徑 0.68m 之能量修正係數 α 圖

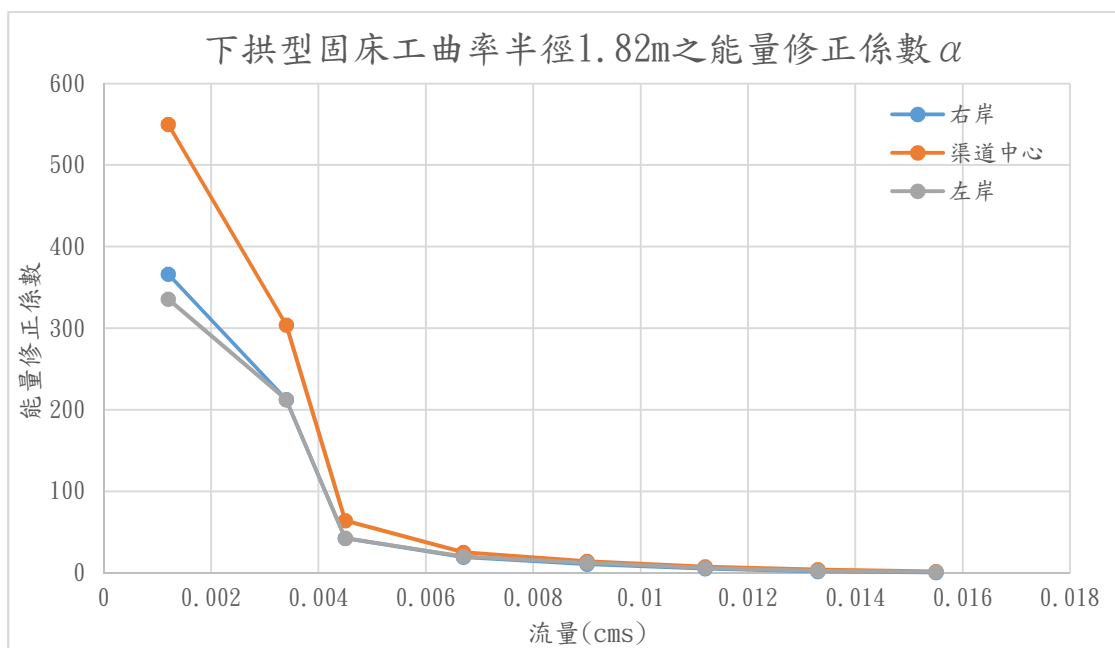


圖 4-80 下拱型固床工曲率半徑 1.82m 之能量修正係數 α 圖

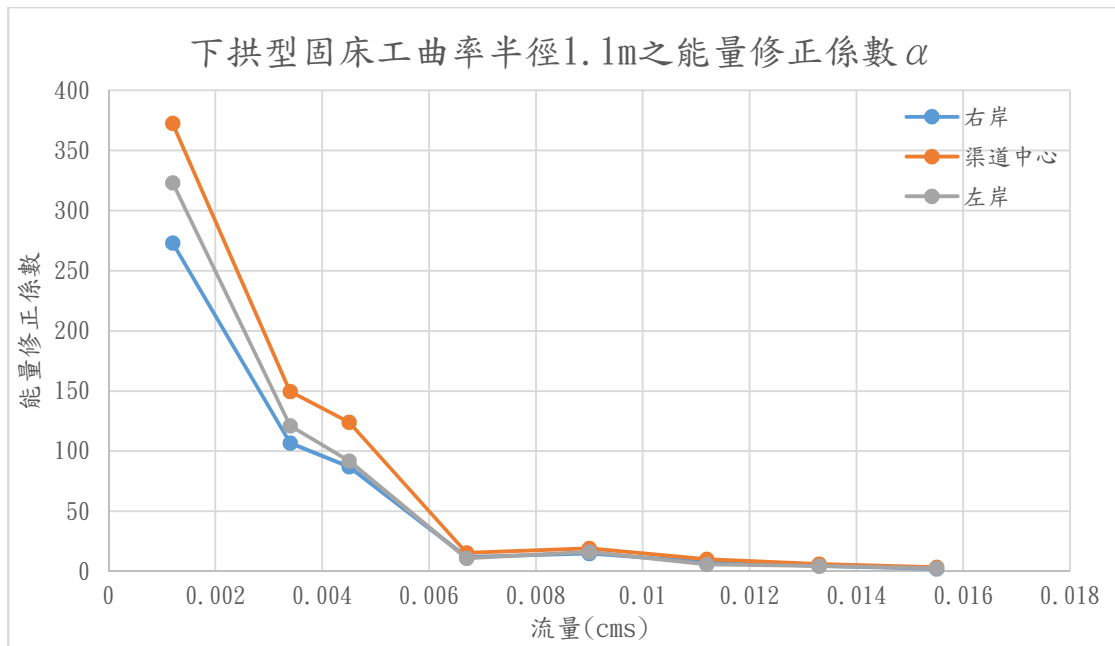


圖 4-81 下拱型固床工曲率半徑 1.1m 之能量修正係數 α 圖

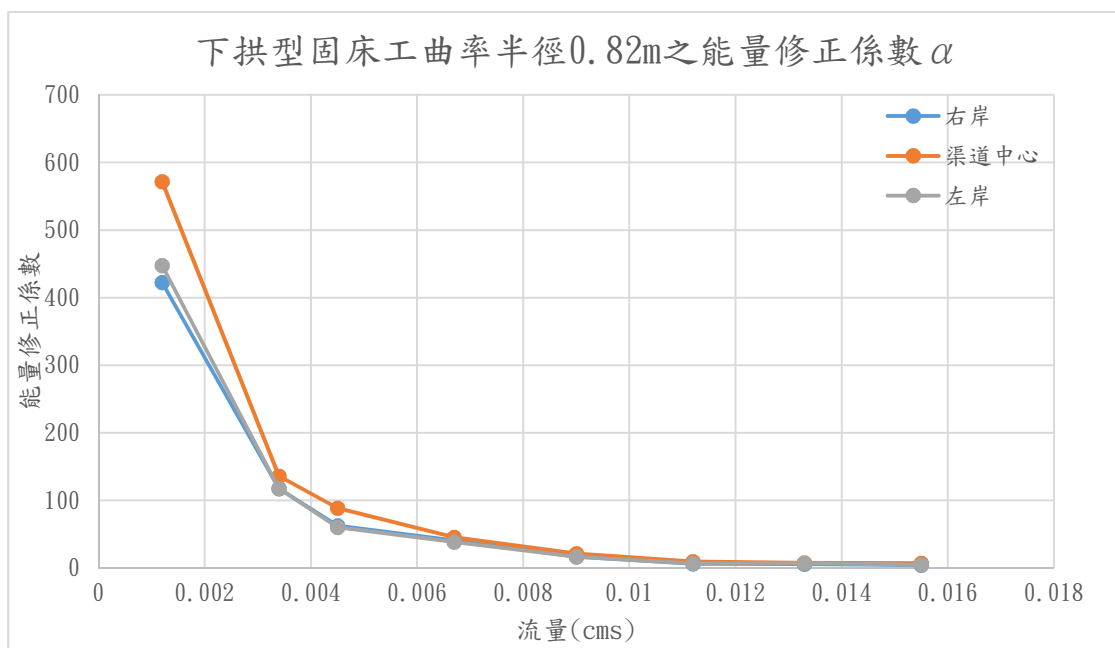


圖 4-82 下拱型固床工曲率半徑 0.82m 之能量修正係數 α 圖

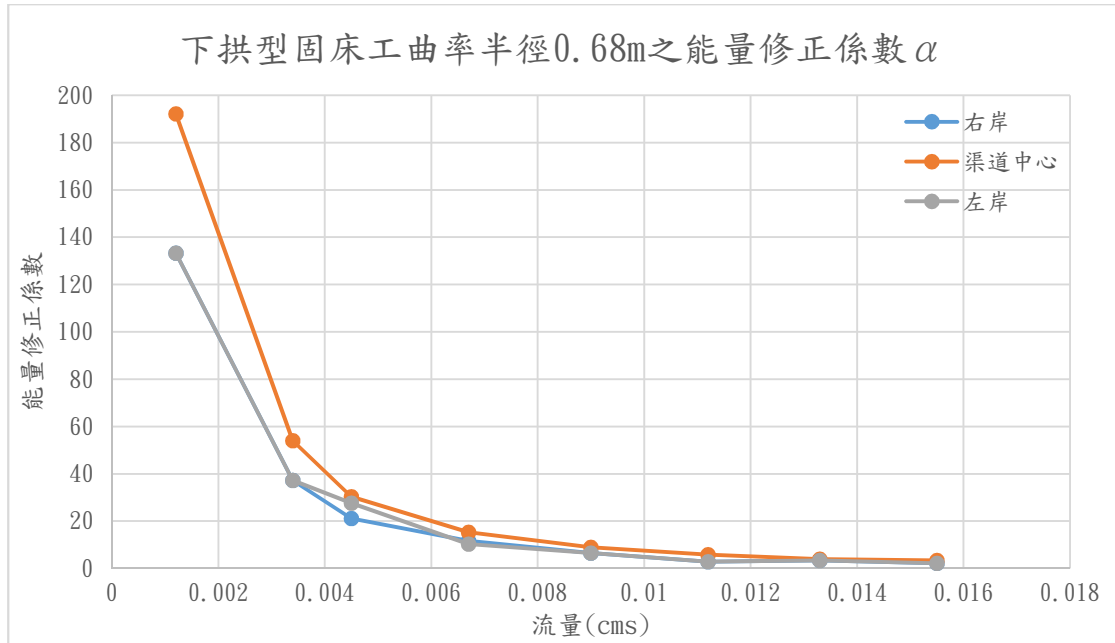


圖 4-83 下拱型固床工曲率半徑 0.68m 之能量修正係數 α 圖

(六) 能量修正係數迴歸公式之整理

為求其能量損失係數 α 之迴歸式，本渠道試驗於粒徑介於 0.8mm 至 1.5mm 之間、水平渠坡，拱型固床工高度為 4.5cm，以及流量範圍介於 6Hz 到 32Hz 的條件下，以多項式擬合各拱型固床工型式之能量損失係數 α ，由圖 4-84 至圖 4-91 可以發現當流量較小時，其量測值與迴歸式有較大的誤差，但隨著流量增加，誤差也隨之減少，以致於大流量發生時，其能量損失係數能由公式中獲得。其結果擬合之公式如表 4-3 至表 4-4。公式中 X 為流量(cms)，Y 為能量損失係數 α 。

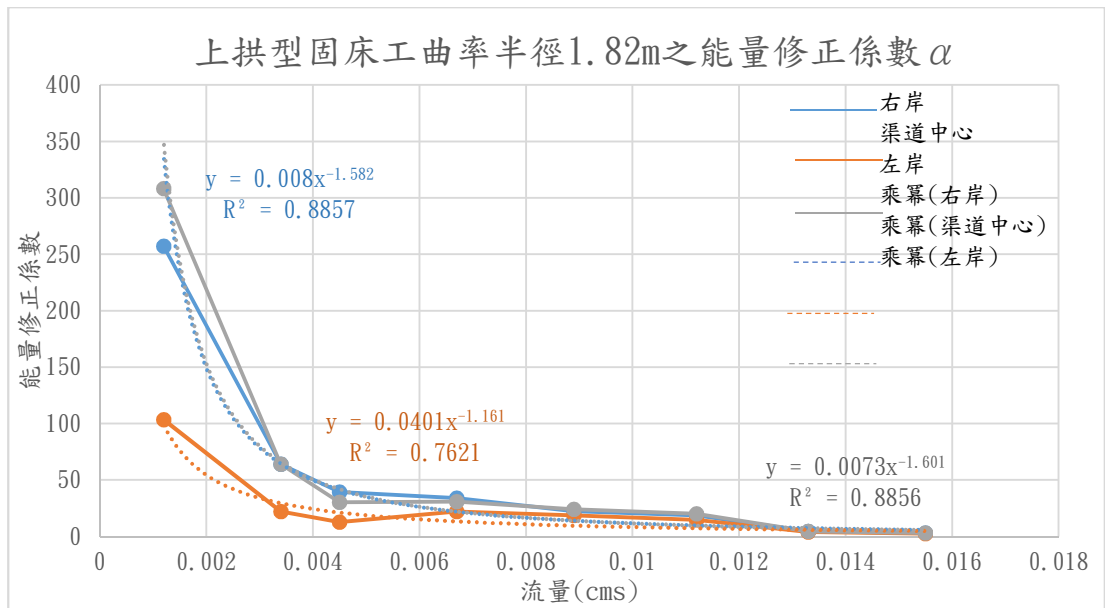


圖 4-84 上拱型固床工曲率半徑 1.82m 之能量修正係數之迴歸公式

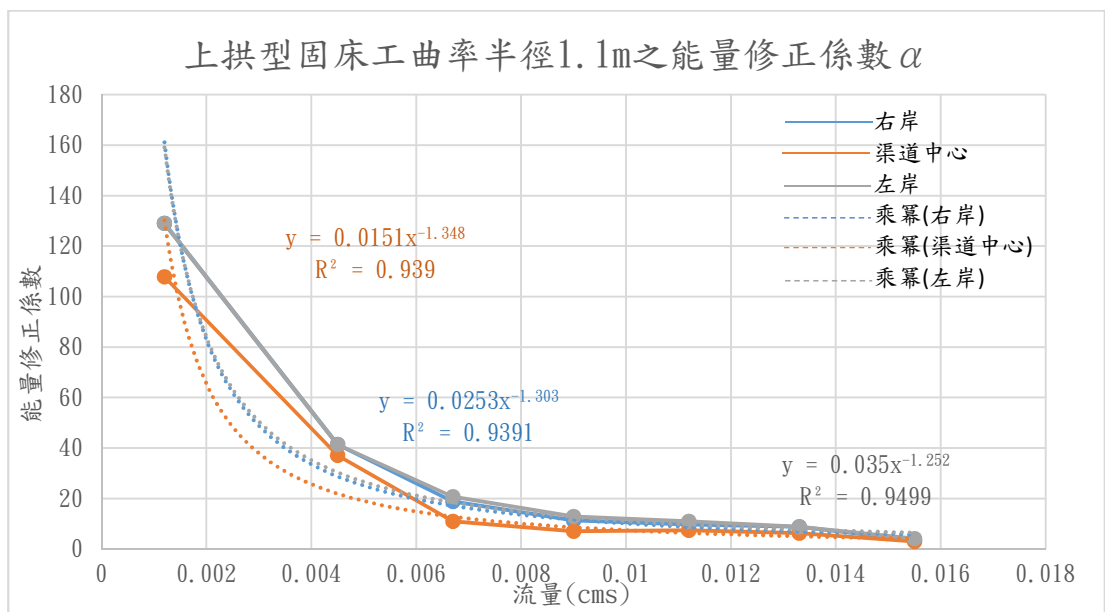


圖 4-85 上拱型固床工曲率半徑 1.1m 之能量修正係數之迴歸公式

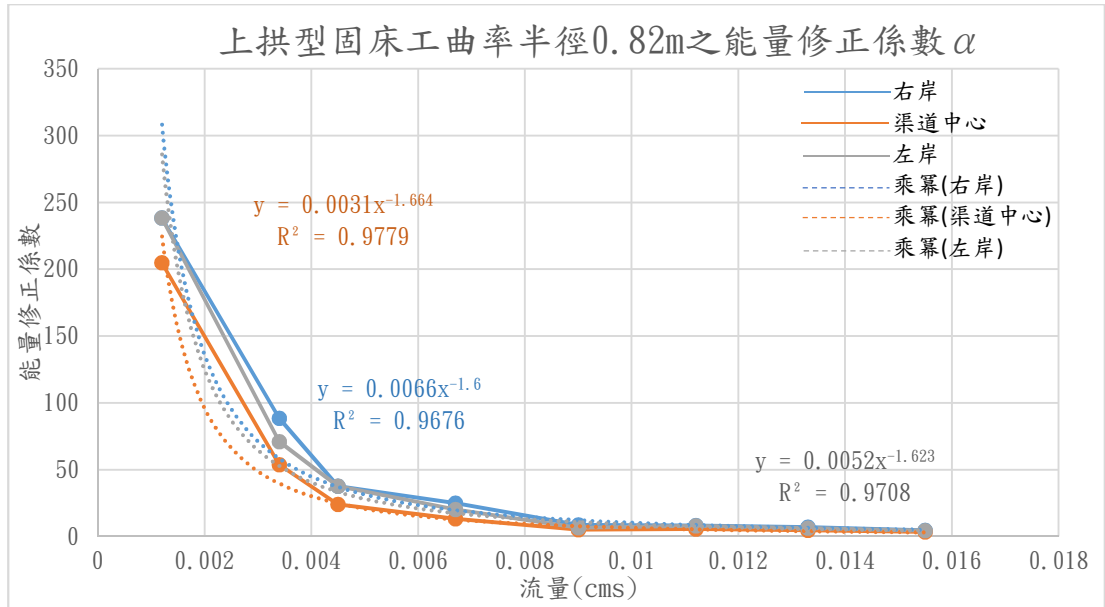


圖 4-86 上拱型固床工曲率半徑 0.82m 之能量修正係數之迴歸公式

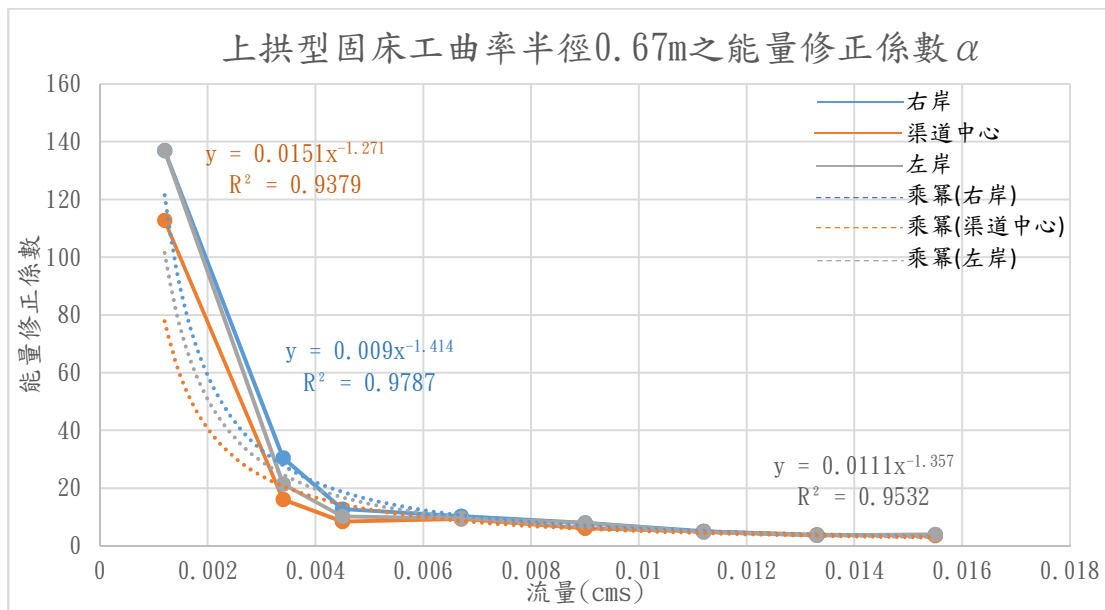


圖 4-87 上拱型固床工曲率半徑 0.67m 之能量修正係數之迴歸公式

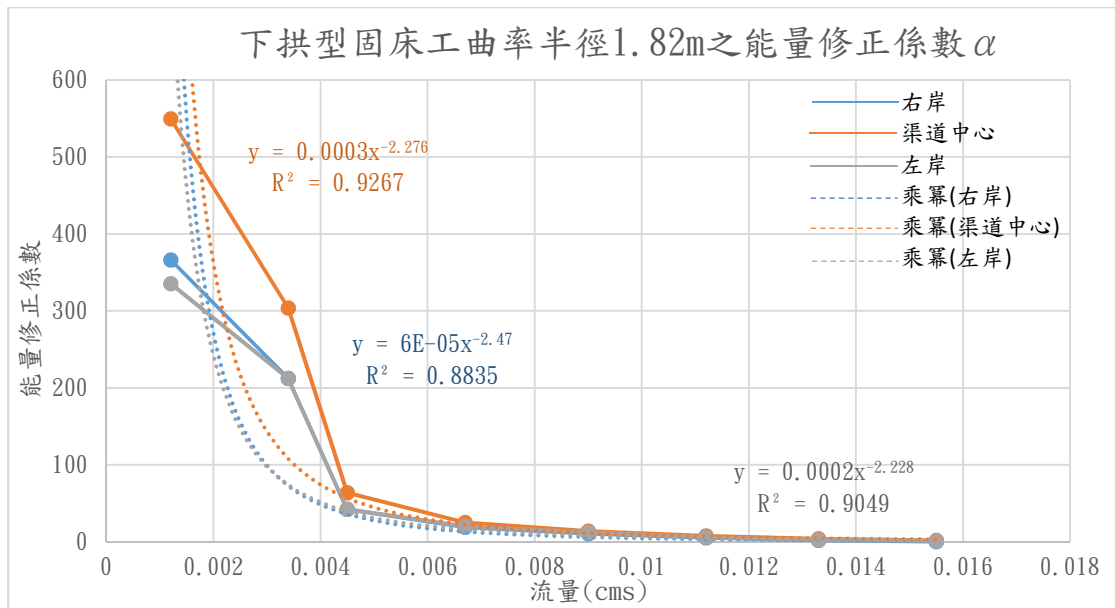


圖 4-88 下拱型固床工曲率半徑 1.82m 之能量修正係數之迴歸公式

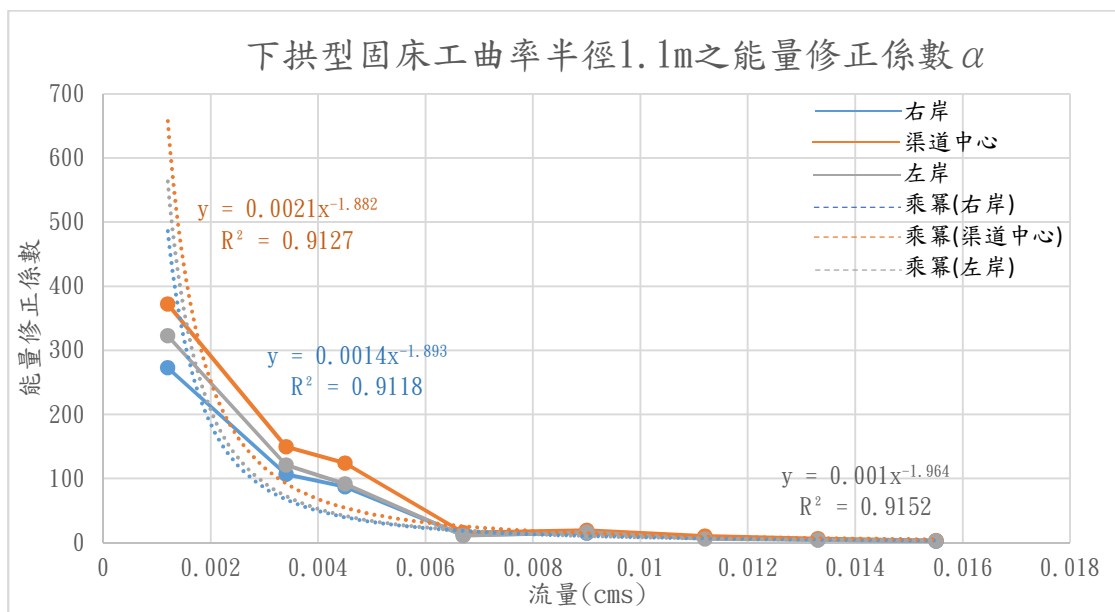


圖 4-89 下拱型固床工曲率半徑 1.1m 之能量修正係數之迴歸公式

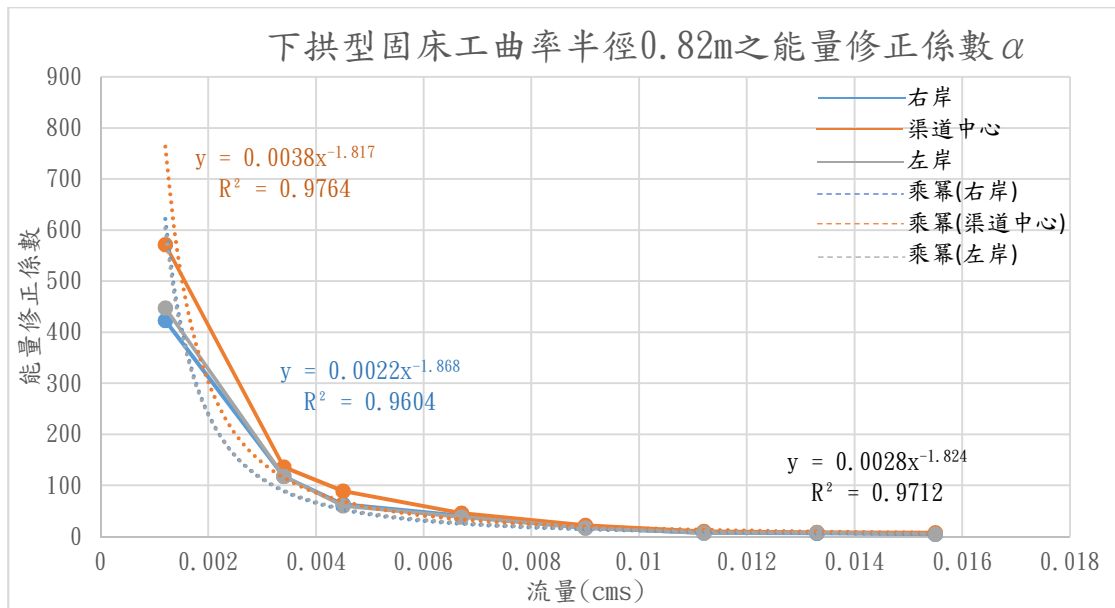


圖 4-90 下拱型固床工曲率半徑 0.82m 之能量修正係數之迴歸公式

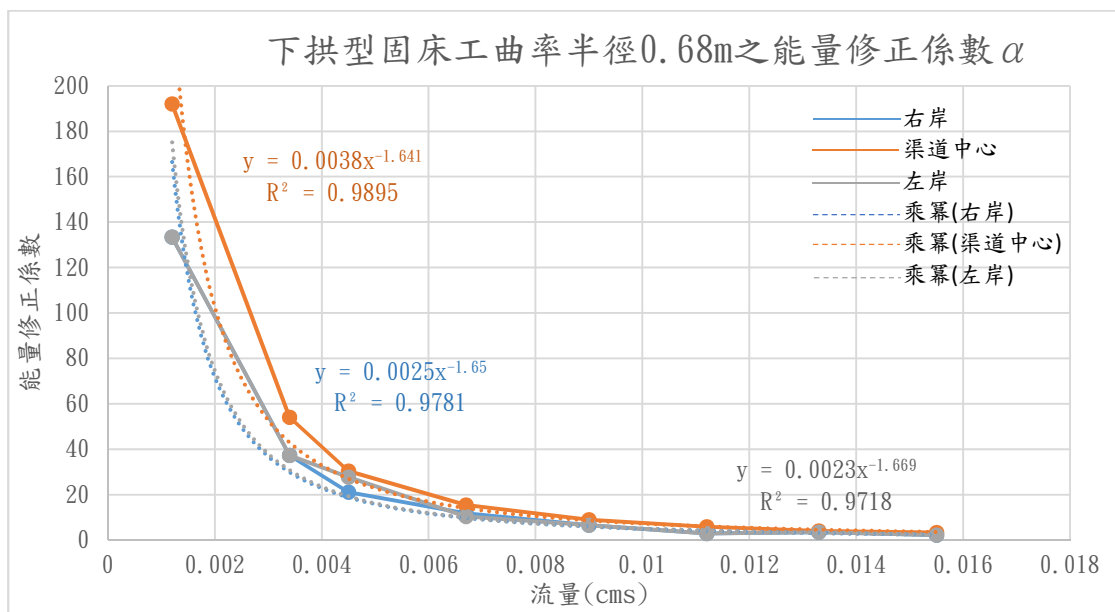


圖 4-91 下拱型固床工曲率半徑 0.68m 之能量修正係數之迴歸公式

表 4-3 上拱型固床工不同拱度之流量與能量損失係數之迴歸式

上拱型固床 工曲率半徑	位置	迴歸公式	R Square 值
曲率半徑 1.82m	右岸	$y = 0.008X^{-1.582}$	$R^2 = 0.89$
	渠道中心	$y = 0.0401X^{-1.161}$	$R^2 = 0.76$
	左岸	$y = 0.0073X^{-1.601}$	$R^2 = 0.89$

曲率半徑 1.1m	右岸	$y = 0.0253X^{-1.303}$	$R^2 = 0.94$
	渠道中心	$y = 0.0151X^{-1.348}$	$R^2 = 0.94$
	左岸	$y = 0.035X^{-1.252}$	$R^2 = 0.95$
曲率半徑 0.82m	右岸	$y = 0.0066X^{-1.6}$	$R^2 = 0.97$
	渠道中心	$y = 0.0031X^{-1.664}$	$R^2 = 0.98$
	左岸	$y = 0.0052X^{-1.623}$	$R^2 = 0.97$
曲率半徑 0.68m	右岸	$y = 0.009X^{-1.414}$	$R^2 = 0.98$
	渠道中心	$y = 0.0151X^{-1.271}$	$R^2 = 0.94$
	左岸	$y = 0.0111X^{-1.357}$	$R^2 = 0.95$

表 4-4 下拱型固床工不同拱度之流量與能量損失係數之迴歸式

下拱型固床 工曲率半徑	位置	迴歸公式	R Square 值
曲率半徑 1.82m	右岸	$y = 0.00006X^{-2.47}$	$R^2 = 0.88$
	渠道中心	$y = 0.0003X^{-2.276}$	$R^2 = 0.93$
	左岸	$y = 0.0002X^{-2.228}$	$R^2 = 0.90$
曲率半徑 1.1m	右岸	$y = 0.0014X^{-1.893}$	$R^2 = 0.91$
	渠道中心	$y = 0.0021X^{-1.882}$	$R^2 = 0.91$
	左岸	$y = 0.001X^{-1.964}$	$R^2 = 0.92$
曲率半徑 0.82m	右岸	$y = 0.0022X^{-1.868}$	$R^2 = 0.96$
	渠道中心	$y = 0.0038X^{-1.817}$	$R^2 = 0.98$
	左岸	$y = 0.0028X^{-1.824}$	$R^2 = 0.97$
曲率半徑 0.68m	右岸	$y = 0.0025X^{-1.65}$	$R^2 = 0.98$
	渠道中心	$y = 0.0038X^{-1.641}$	$R^2 = 0.99$
	左岸	$y = 0.0023X^{-1.669}$	$R^2 = 0.97$

以下，本研究再將各曲率半徑之三點資料進行彙整，得出各上下拱型固床工能量損失係數之迴歸公式，r1 至 r4 分別為曲率半徑由大至小，1.82m、1.1m、0.82m、0.68m，如圖 4-92 和圖 4-93 所示，詳細各公式將詳列於表 4-5 中，公式中 X 為流量(cms)，Y 為能量損失係數 α 。

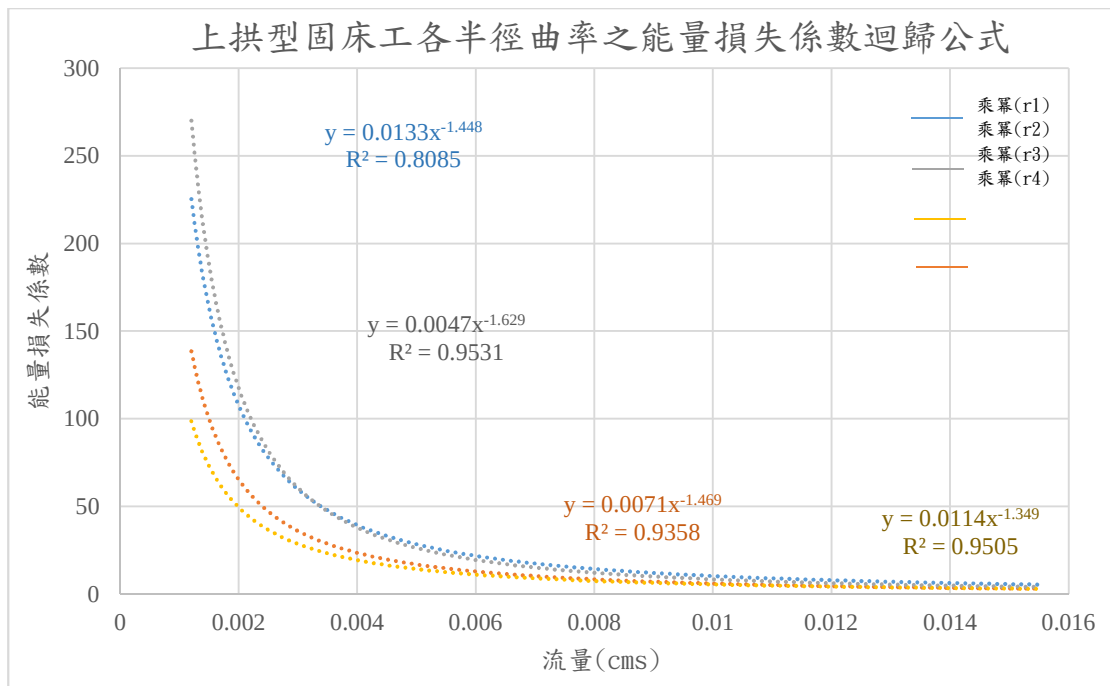


圖 4-92 上拱型固床工各曲率半徑之能量修正係數迴歸公式圖

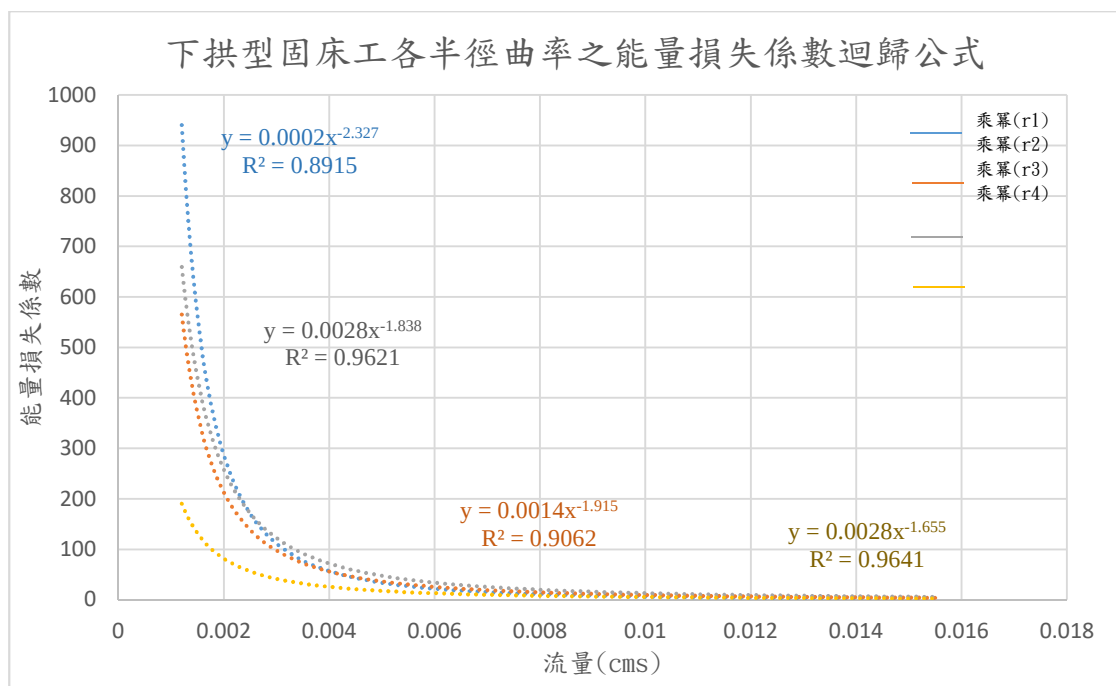


圖 4-93 下拱型固床工各曲率半徑之能量修正係數迴歸公式圖

表 4-4 下拱型固床工不同拱度之流量與能量損失係數之迴歸式

	曲率半徑	迴歸公式	R Square 值
上拱型 固床工	1.82m	$y = 0.0133X^{-1.448}$	$R^2 = 0.81$
	1.1m	$y = 0.0047X^{-1.629}$	$R^2 = 0.95$
	0.82m	$y = 0.0114X^{-1.349}$	$R^2 = 0.95$
	0.67m	$y = 0.0071X^{-2.327}$	$R^2 = 0.94$
下拱型 固床工	1.82m	$y = 0.0002X^{-1.893}$	$R^2 = 0.89$
	1.1m	$y = 0.0014X^{-1.915}$	$R^2 = 0.91$
	0.82m	$y = 0.0028X^{-1.838}$	$R^2 = 0.96$
	0.67m	$y = 0.0028X^{-1.655}$	$R^2 = 0.96$

第五章 工作進度

預定工作項目為拱型固床工文獻與現地工程資料蒐集、固床工數值模擬輸砂性質、現地調查與室內實驗等3大項。工作進度如表5-1。

表 5-1 工作進度表

檢核項目	時間	109年 3-4月	109年 5-6月	109年 7-8月	109年 9-10月	109年 10-11月	完成比例
固床工相關文獻與資料蒐集							100%
調查現地資料(新北市水仙溪)							100%
水槽試驗固床工佈置							100%
室內水槽試驗							100%
軟體數值模擬							100%
沖淤特性分析(水槽)							100%
沖淤特性分析(模擬)							100%

一、拱型固床工文獻與現地工程資料蒐集

目前已蒐集歐美日及國內有關固床工之文獻共 46 篇，總共將文獻分為四大方向，分別為：

1. 固床工設置效果，共有六篇國內文獻、三篇國外文獻
2. 水槽沖刷實驗，共有七篇國內文獻、七篇國外文獻
3. 回歸參數因子，共有六篇國內文獻、六篇國外文獻
4. 數值模擬分析，共有四篇國內文獻、兩篇國外文獻

藉由蒐集分析上述文獻等資料，以瞭解其設計應用時所需考慮的水理機制、設計因子估算方法以及模式分析方法，並針對其設計可能遇到的問題進行分析。

二、數值模擬輸砂性質

本團隊擬使用 RiverFlow 2D 二維水理輸砂模式，此模式輸砂模

組控制方程式嚴謹，同時考慮懸浮載與底床載運移程式，並綜合水文和水力在河流中模擬動床和污染物擴散的有限體積模型，可以在河流中佈設洪水，模擬洪水氾濫、洪氾平原和複雜的地形，且其分辨率高、速度快、穩定性好、精度高，流量部分以所設計之重現期距50年，降雨延時24小時之流量，針對水仙溪中直線型與拱型固床工沖刷進行數值模擬。

三、現地調查與室內實驗

目前已完成透過縮小模型，完成拱型固床工之試驗，其中包含了直線型之四種不同高度、拱型之四種不同曲率半徑再搭配上四種不同流量，以探討出其沖淤狀況以及固床工上游之受力情形，並回歸出公式。

附錄一、參考文獻

研究報告與論文

1. “大溪溪鐵路橋上游治理二期工程簡報”，行政院農業委員會水土保持局臺北分局”，2016
2. “水土保持工程設計參考圖冊”，行政院農業委員會水土保持局，2017
3. “水土保持手冊”，行政院農業委員會水土保持局，2005
4. “水仙溪下游野溪治理工程圖檔”，行政院農業委員會水土保持局臺北分局，2015
5. 王傳益，薄榮鋼，張耿偉，李昱廷，“固床工於河川棲地改善之數值研究”，水土保持學報 36(1)，2004
6. 何國勇，碩士論文，“近直線弧型開口式固床工應用於野溪治理之研究”，國立屏東科技大學水土保持學系，2007
7. 何皓愷，碩士論文，“垂直跌水之沖刷探討”，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2017
8. 吳尚訓，碩士論文，“固床工間距對河床穩定性影響之研究”，逢甲大學土木及水利工程學系，2000
9. 吳紋瑩、盧昭堯，碩士論文，“雙道固床工下游沖刷之室內試驗研究”，國立中興大學土木工程學系，2012
10. 吳嘉俊，“固床工間連續帶工間距之研究”，89 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 66 號，2001
11. 吳嘉俊，“透水式固床工之工法研發與水理特性研究”，行政院農業委員會水土保持局，2016
12. 李木青，“固床工規劃設計理論”，教育訓練講義，2018

13. 李柏葦，碩士論文，“雙道固床工下游沖刷坑流場之紊流特性研究”，國立中興大學土木工程學系，2014
14. 李豐佐，“應用 UAV 影像分析技術於固床工變動及周圍流場之研究”，2017
15. 林原巧，碩士論文，“開口式固床工應用於野溪整治之研究”，國立屏東科技大學水土保持學系，2005
16. 林雲暉，黃宏斌，碩士論文，“固床工水理特性之研究”，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2002
17. 施東榮，“固床工之設計”，教育訓練講義，2018
18. “修訂版水土保持手冊”，行政院農業委員會水土保持局，2017
19. 孫崇育，碩士論文，“以渠槽試驗比較透水與不透水固床工下游之沖刷坑差異”，逢甲大學水利工程與資源保育學系，2015
20. 徐金煌，碩士在職專班論文，“以 Pix4DMapper 進行 UAV 影像快速空間資料產製之探討”，國立臺灣師範大學地理學系第一屆空間資訊，2017
21. 柴鈺武，“固床工抑制溪床泥砂沖刷效果之研究”，中華水土保持學報 32(3)，2001
22. 張則安，碩士論文，“固床工間距之研究”，國立中興大學水土保持學系，1994
23. 梁惟喬，碩士論文，“固床工改善對河道底床環境影響之試驗研究”，逢甲大學水利工程學系，2005
24. 連惠邦，“防砂壩下游河床演變及其整流工程配置模式之研究(一)”，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號，2001

25. 連惠邦，“固床工過流之水理探討”，教育訓練講義，2018
26. 郭昌樺，碩士論文，“固床工間距對河床穩定性影響之研究”，國立中興大學水土保持學系，2002
27. 彭建文，碩士論文，“軟弱岩質河道固床工之破壞機制及穩定分析”，國立交通大學土木工程學系，2014
28. 游繁結，“固床工間距之調查研究(三)”，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號，1995
29. 黃宏斌，“105 年水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治方法之探討”，行政院農業委員會水土保持局，2016
30. 黃宏斌，“107 年流域綜合治理之成效評析之工作執行計畫書”，行政院農業委員會水土保持局，2018
31. 黃宏斌，“不同型式固床工應力分析”，教育訓練講義，2018
32. 黃宏斌，“固床工與沖刷坑”，教育訓練講義，2018
33. 黃宏斌，陳樹群，“台灣水土保持名人錄”，行政院農業委員會水土保持局，2007
34. 黃宏斌，“智慧化土石流預警系統建置(2)”，行政院農業委員會水土保持局，2017
35. 黃宏斌，“智慧化土石流預警系統建置”，行政院農業委員會水土保持局，2016
36. 黃彥文，黃宏斌，碩士論文，“固床工與輸砂量之相關研究”，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2003
37. 黃政達，碩士論文，“由動床試驗探討固床工之間距”，中興大學水土保持學系，1995
38. 新北市政府，水仙溪治理基本團隊，2011
39. 詹勳全，“固床工下游之沖刷型態”，教育訓練講義，2018

40. “縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告”，新北市政府，2011
41. 謝佩瑜，碩士論文，“斜坡式固床工對減緩河床沖刷效能之研究”，逢甲大學水利工程與資源保育學系，2008
42. 聶志成，2007，應用 Fluent 於土石流對防砂壩衝擊力之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文
43. 郭正壹，2008，河溪固床工配置生態化之研究，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士論文
44. 吳健賓，2013，丁壩區之三維流場研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文
45. 楊廣培，2015，卵礫河床載衝擊破壞河道固床工之模擬分析，國立交通大學土木工程學系碩士論文
46. 池谷浩，“砂防流入工之計畫和實務”，1977
47. 泉岩男，“床固工の溪床侵蝕防止效果について”，新砂防 59，1984
48. 木村喜代治、高橋迪夫、長林久夫，“流路工における床固工の間隔に関する研究”，新砂防，Vol. 43，No.2，1990
49. 楊廣培(2015)，「卵礫河床載衝擊破壞河道固床工之模擬分析」，交通大學土木工程系所學位論文。
50. 張程凱(2016)，「明渠流通過固床工下游粗糙底床沖刷坑之紊流流場數值分析」，中興大學土木工程學系所學位論文。
51. Aberibigbe, J. and O. Rajaratnam. “Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets”，Journal of Hydraulic Engineering.124(10), 1998.
52. Breusers, H. N. C. and Raukivi, A. J. “Scouring” A. A. Balkema, 1991.
53. Bennett, S.J., Alonso, C.V., Prasad, S.N., and Römken, M.J.M.

- “Experiments on headcut growth migration in concentrated flows typical of upland areas.” *Water Resour. Res.*, 36(7), 2000.
54. Dietz, J.W. “Ausbildung von langen Pfeilern bei Schraganströmung am Beispiel der BAB-Mainbrücke Eddersheim, ” *Mitteilungsblatt der BAW*,(31), 1972.
 55. D’Agostino, V. “Indagine sullo scavo a valle di opera trasversali mediante modello fisico a fondo mobile.” *Energ.Elett.*, 71(2), 1994.
 56. Farhodi, J. and Smith, K. V. H. “Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump” *J. Hydraul. Res.*, 23(4), 1985.
 57. Gaudio, R.,A. Marion, and V. Bovolin “ Morphological effects of bed sills in degrading rivers,” *Journal of Hydraulic Research.* 38(2), 2000.
 58. Melville, B. W. and Coleman, S. E. “Bridge Scour” *Water Resources Publications, LLC*, 2000.
 59. Oliveto, G., Comuniello, V. and Onorati, B. “Temporal development of local scour downstream of positive-step stilling basins” *River flow* 2008, vol.2, 2008.
 60. Pagliara, S. “Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps” *J. Hydraul. Eng.*, 133(11), 2007.
 61. Wu C.-C., C.-H. Hou, C.N. Chen, and C.-Y. Shih “Determination of groundsills interval for stream training, ” *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics.* 4(6), 2002.
 62. Cun-Hong, P., Bing-Yao, L., & Mao, X.-Z. (2007). Case Study: Numerical Modeling of the Tidal Bore on the Qiantang River, China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4), 440–450.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133)
 63. Dell’Agnese, A., Mazzorana, B., Comiti, F., VonMaravic, P., & D’Agostino, V. (2013). Assessing the physical vulnerability of

- check dams through an empirical damage index. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(1), 9–16.
<https://doi.org/10.4081/jae.2013.e2>
64. Mazzorana, B., Trenkwalder-Platzer, H., Heiser, M., & Hübl, J. (2018). Quantifying the damage susceptibility to extreme events of mountain stream check dams using Rough Set Analysis. *Journal of Flood Risk Management*, 11(4), 1–12.
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12333>
 65. Gaudio, R., Marion, A., and Bovolin, V, 2000. Morphological effects of bed sills in degrading rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 38 (2), 89–96.
 66. Chinnarasri, C., and Kositgittiwong, D., 2008. Laboratory study of maximum scour depth downstream of sills. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 161(5), 267–275. Thomas Telford Ltd.
 67. Keshavarzi, A. and Khaje Noori, L., 2010. Environmental protection stability of river bed and banks using convex, concave, and linear bed sills. *Environmental Monitoring and Assessment*, 17(1), 621-631.
 68. Moslem Sohrabi, Alireza Keshavarzi, and Mahmood Javan, 2019. Impact of bed sill shapes on scour protection in river bed and banks. *International Journal of River Basin Management*, 17(3), 277-287
 69. Ben Meftah, M., & Mossa, M. (2004). Experimental study of the scour hole downstream of bed sills. In M. Greco, A. Carravetta, & R. Della Morte (Eds.), *RiverFlow 2004* (Vol. 2, pp. 585–592), 23–25 June, Napoli, Italy.
 70. Faeh, Roland. 2007. “Numerical Modeling of Breach Erosion of River Embankments.” *Journal of Hydraulic Engineering*.
 71. Volz, C., P. Rousselot, D. Vetsch, R. Mueller, R. Faeh, and R. Boes. 2010. “Numerical Modeling of Dam Breaching Processes Due to Overtopping Flow.” 8th ICOLD European Club Symposium.

網路資源

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所- 規劃工具與知識，
<https://www.wrap.gov.tw/pro72.aspx?type=0207000000>
2. 行政院農委會水土保持局- 水保榮耀，
<https://www.swcb.gov.tw/form/index-1.asp?m=3&m1=3&m2=694&gp=688&id=3419>
3. 花蓮電子報，
<https://www.ecoast.com.tw/trave/item/3707-2017-12-07-05-36-47>
- .
4. 士盟科技股份有限公司，
<http://www.simutech.com.tw/product-simulia.php?cid=1&kid=24&id=19>

附錄二、期初審查意見與回覆

期初審查意見回覆	
委員意見	意見回覆
1. 資料蒐集或前人研究應求廣度後再深入，但期初報告僅規劃分析 3 篇國內相關文獻，由此即做為立論之支持，其依據過於薄弱，應盡力蒐集可能有用資訊予以分析比較。	感謝委員意見，以補充歐美日及國內文獻共 46 篇進行分析，並將內容補充於第二章。
2. 資料內容請予適時修正、校對，如水土保持手冊已修正完成，並非於 2017 年正在修正、梗訪南勢溪，請修正為梗枋南溪。	感謝委員意見，由於欲接續去年計畫之研究成果，地點將由梗枋南勢溪為水仙溪，水仙溪屬市管河川，流域範圍涵蓋新北市八里區及林口區，位於台灣西北側，人口約十萬人，地勢多為丘陵地，河幅寬度變化不大，屬於野溪型河川。
3. 水深影響分析結果甚鉅，僅以直尺量測水深，易因觀測者之視角、習慣產生誤差，建議改為針尺或其他較精密量測方式。	感謝委員意見，水槽實驗之量測水深方式將改為利用超音波水位計進行量測，可減少量測之人為誤差及得到較精確之數值。
4. 本計畫工作項目包含固床工相關文獻蒐集回顧、案例現地調查及空拍、建立模型及水槽試驗。涵蓋現場地調查資料、數值模型、及水槽試驗相當完整，應用空拍調查可快速獲取現場環境資訊，惟今年 3 月 31 日以後民航法無人機專章實施後，建議注意無人機空拍區域及操作人員之合法申請。	感謝委員意見，本團隊將會依照民航法遙控無人機專章合法申請從事遙控無人機活動取得現地環境資訊做為後續數值模型、水槽試驗之應用。
5. 本計畫為延續去年之研究成果，請補充相關成果說明。	感謝委員意見，將於內文第三章中延續去年研究成果更詳細進一步分析說明。
6. 計畫預計蒐集歐美日相關文獻，惟未見相關國外文獻資料。	感謝委員意見，已補充國外相關文獻於第二章。
7. 於細部計畫說明書內將採用 SRH2D 及 RiverFlow2D 進行數值模擬，而期初報告僅採用 RiverFlow2D 分析。	感謝委員意見，由於 SRH2D、RiverFlow 2D 皆為二為水理模式，其中 RiverFlow 2D 之輸砂模組控制方程式較 SRH2D 更為細緻且同時考慮懸浮載及底床載運移方程式，因此後續將以 RiverFlow 2D 進行數值模擬分析。
8. 數值模擬以「梗訪南勢溪修繕工程」(應為梗枋南勢溪)為對象，請補充正確工程名稱(修繕工程?)及相關工程基本資料如水文、水理、平面配置圖、構造物標準圖等。	感謝委員意見，為接續去年之研究成果已取得連貫性，將模擬地點更正至新北市八里區的水仙溪，水仙溪屬市管河川，流域範圍涵蓋新北市八里區及林口區，位於台灣西北。

	側，人口約十萬人，地勢多為丘陵地，河幅寬度變化不大，屬於野溪型河川。
9. P.4-6，由圖 3-16 可知率定曲線為...，應為圖 4-10。	感謝委員意見，已修正。

附錄三、期中審查意見與回覆

編號	委員意見	回覆意見
1	期中報告應補附”摘要”，敘述個工作項目及已獲致之初步結論；檢視已完成項目、數量及完成百分比；待完成項目、期程。	遵照辦理，將會報告摘要成果，並納入初步結論；檢視已完成項目、數量及完成百分比和待完成項目、期程已放入工作進度篇章中。
2	數值模擬沒有經過率定，建議可以以一組渠槽實驗率定數值模擬的分析結果。	謝謝委員指教，數值模擬模式運算理論已有多篇文獻驗證率定其可行性，而模擬結果率定將會與渠槽試驗之沖淤特性進行分析探討做比對驗證。
3	第 3-14 頁的沖刷條件的設定，未清楚說明輸入參數是參考哪一篇文獻的數據。建議列出該文獻，因輸入參數會影響分析結果，且利於其他研究參考與引用。	謝謝委員指教，數值模擬沖刷相關條件設定已列於第 3 章 3-14 頁中，其中包括現地固床工布置、水理演算以及河床質粒徑分析等現地條件相關文獻供數值模擬使用。
4	渠槽試驗並未說明泥沙的粒徑大小，是否為參考水仙溪的極粗礫石，但以圖 4-27 來看，試驗泥沙為細沙。泥沙的粒徑會影響沖刷深度的結果，建議說明清楚。	謝謝委員指教，渠槽試驗將會依照現地各項資料進行尺度比例縮放，將固床工模型尺寸、流量以及尼砂粒徑進行換算應用於試驗中。
5	渠槽試驗僅進行直線型固床工的分析，並未進行拱型固床工的試驗，此報告的重點為分析兩種固床工在水文水理和沖刷上的差異。建議可進行拱型固床工的試驗，並比較兩者固床工的試驗結果。	謝謝委員指教，本計畫於期中部分進行到四種流量對應四組直線型固床工，將會於期末報告書完成不同拱度、上拱型與下拱型固床工渠槽試驗結果並分析討論其沖淤特性。
6	報告中未說明如何量測沖刷坑的深度以及量測的時間點，因沖刷淤積為持續之動態過程，建議說明清楚。	謝謝委員指教，本計畫利用相機長時間固定間格時間擷取沖刷狀態，觀察其沖刷狀態、沖刷坑平衡穩定後，才進行量測，量測方式是利用直尺直接量測，由於大流量與小流量時達到沖刷平衡狀態時間不一樣，將會補上量測時間點。