計畫編號：**ARDSWC-112-030**

系列固床工對於溪流河道穩定與地形演變之變更影響分析

Impact Analysis of Series of Groundsills on the Fluvial Stability and Geomorphology

(期末報告書)

執 行 單 位：國立臺灣大學生物環境系統工程學系

執 行 期 間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：廖國偉 教授

農業部農村發展及水土保持署　編印

中華民國 112 年 11 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考）

系列固床工對於溪流河道穩定與地形演變之變更影響分析

摘要

為減緩溪床坡度、防止縱橫向沖蝕、控制流心、穩定兩岸坡腳、抑止土石流出，興建固床工為目前國內外普及的工程方法，當保全範圍較大時、系列固床工更是常見之方法。然而溪流的土砂運移為一個動態的過程，系列固床工造成河段縱向廊道不連續對生態環境與景觀產生破壞。許多坡度平緩溪的河道上亦設有固床工，固床工的存在、個數以及間距已成為現今工程與生態界的關注焦點。雖然各界對於系列固床工的各項檢討已存有相當的共識，然而目前多數的研究的重點在於固床工型態(如高度與寬度)對於鄰近下游土砂的影響，且因為已實際施作的案例因時間尚短，資料量過少無法建立管理與操作規則。因此，本計畫擬藉由縮尺寸模型實驗與二維數值模擬推估土砂運移的趨勢，進而計算合理的系列固床工配置方案，冀望合理設置固床工數量與改善生態環境外、更重要地，嘗試提出的系列固床工配置方案，希望可確保經由固床工調整下之土砂運移，對於上下游水保設施有明確的助益並確保下游保全對象的安全性。

關鍵詞：固床工、系列固床工、生態、永續、配置方案

Impact Analysis of Series of Groundsills on the Fluvial Stability and Geomorphology

Abstract

To reduce the slope of the riverbed, prevent erosion in both longitudinal and transverse directions, control the flow, stabilize the slopes on both sides, and prevent the outflow of soil and debris, the groundsill has become a widely adopted engineering method both domestically and internationally. When dealing with larger conservation areas, series of river training works are commonly employed. However, the sediment transport in rivers is a dynamic process, and the implementation of series groundsills can cause discontinuities in the longitudinal corridor of the river, leading to damage to the ecological environment and landscape. The presence of groundsills, the number of works, and their spacing have become a focal point of attention in the fields of engineering and ecology. Although there is considerable consensus on various aspects of series of groundsills, current research primarily focuses on the influence of the configuration of groundsills (such as height and width) on sediment downstream. Additionally, due to the limited duration of implemented cases, there is insufficient data available to establish management and operational rules. Therefore, this project aims to estimate the trends in sediment transport through scaled physical model experiments and two-dimensional numerical simulations. Based on this, reasonable configurations of series of groundsills will be calculated, aiming to achieve proper placement of

the number of groundsills and improve the ecological environment. More importantly, the proposed configuration schemes for series of groundsills are intended to ensure clear benefits to upstream and downstream water conservation facilities and ensure the safety of downstream conservation objectives by regulating sediment transport through river training works.

Keywords: groundsills, ecology, sustainability management

目次

摘要 I

Abstract II

目次 IV

表次 VII

圖次 IX

第一章　前言 1-1

第一節　緣起與目的 1-1

第二節　工作項目 1-2

第二章　工作執行方法 2-1

第一節　背景 2-1

第二節　工作執行方法 2-3

第三節　相關文獻蒐集 2-4

第三章　集水區現況調查 3-1

第一節　現況調查 3-1

第四章　固床工最佳配置方案 4-1

第一節　拆除固床工最佳配置方案說明 4-1

第二節　固床工開口設計之比較 4-5

第五章　HEC-RAS 模式介紹與參數設定 5-1

第一節　HEC-RAS 2D 模式介紹 5-1

第二節　控制方程式 5-2

第三節　數值方法 5-4

第四節　模式相關參數設定 5-7

第六章　室內渠槽試驗.....6-1

第一節　試驗佈置.....6-1

第二節　試驗內容.....6-5

第七章　固床工佈置之數值模擬.....7-1

第一節　固床工拆除方案-Q5.....7-1

第二節　固床工拆除方案-Q95.....7-22

第三節　固床工拆除方案-結論與分析.....7-42

第八章　固床工開口方案之模擬與分析.....8-1

第一節　固床工開口設計-Q1.11.....8-1

第二節　固床工開口設計-Q2.....8-13

第三節　固床工開口設計-Q5.....8-23

第四節　固床工開口設計-Q95.....8-30

第五節　固床工開口設計-結論與分析.....8-37

第九章　固床工間距調整方案.....9-1

第一節　調整固床工間距 30M.....9-1

第二節　調整最下游固床工構造.....9-4

第三節　固床工調整間距-結論與分析.....9-7

第十章　工作進度與交付項目.....10-1

第一節　計畫甘特圖.....10-1

第二節　計畫交付項目.....10-2

第十一章　結論與討論.....11-1

參考文獻.....參-1

附錄.....附錄-1

附錄一、期中審查意見與回覆.....附錄-1

附錄二、期末審查意見與回覆.....附錄-2

表次

表 1-1 國內固床工類型成果摘要.....1-4
表 5-2 恆春雨量站一日暴雨頻率分析成果表(單位:mm).....5-8
表 5-3 保力溪集流時間推估表.....5-10
表 5-4 單位歷線洪峰流量推估表.....5-11
表 5-5 各重現期洪峰流量推估結果.....5-12
表 5-6 Wu et al's 適用範圍數據表.....5-17
表 5-7 Van Rijn 適用範圍數據表.....5-17
表 6-8 現地平均流量與縮尺平均流量對照表.....6-7
表 6-9 現地泥砂粒徑分布.....6-9
表 6-10 試驗流量與馬達赫茲對應表.....6-10
表 7-11 固床工拆除方案比較表.....7-44
表 8-12 Q1.11 三種固床工開口之最大流速與水深圖.....8-6
表 8-13 Q1.11 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖.....8-8
表 8-14 Q1.11 三種固床工開口高度之土砂運移量.....8-11
表 8-15 Q2 三種固床工開口高度之最大流速與水深圖.....8-17
表 8-16 Q2 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖.....8-19
表 8-17 Q2 三種固床工開口高度之土砂運移量.....8-21
表 8-18 Q5 三種固床工開口高度之最大流速與水深圖.....8-24
表 8-19 Q5 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖.....8-26
表 8-20 Q5 三種固床工開口高度之土砂運移量.....8-28
表 8-21 Q95 三種固床工開口高度之最大流速與水深圖.....8-31
表 8-22 Q95 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖.....8-33
表 8-23 Q95 三種固床工開口高度之土砂運移量.....8-35

表 9-24 本計畫之甘特圖 9-1
表 9-25 工作項目與經費表.....9-2

圖次

圖 2-1 工作流程圖 2-4
圖 3-2 保力溪調查範圍圖 3-1
圖 3-3 系列固床工上游調查照片 3-3
圖 3-4 系列固床工下游調查照片 3-4
圖 3-5 保力溪下游調查照片 3-5
圖 4-6 固床工拆除方案分析流程圖 4-3
圖 4-7 淹水計算範圍 4-5
圖 4-8 土砂運移量計算範圍 4-5
圖 4-9 固床工開口之流程圖 4-6
圖 5-10 網格節點和邊示意圖 5-5
圖 5-11 恆春雨量站位序法雨型分布圖 5-8
圖 5-12 恆春雨量站 25 年重現期設計雨型 5-9
圖 5-13 保力溪集水區一公分超滲降雨量之單位歷線 5-11
圖 5-14 保力溪重現期 25 年之流量歷線 5-12
圖 5-15 DEM 圖資與網格繪製結果 5-19
圖 5-16 Google 衛星圖與網格繪製結果 5-19
圖 5-17 邊界條件之變量流設定界面 5-20
圖 5-18 於 DEM 模型上建立之防砂壩 5-21
圖 5-19 固床工之剖面高程設定 5-21
圖 5-20 保力溪模擬之流速結果 5-22
圖 5-21 Rating Curve 設定圖 5-23
圖 6-22 渠道相關配置圖 6-1
圖 6-23 馬達設備圖 6-2

圖 6-24 蜂巢整流設備架設圖.....6-3
圖 6-25 尺規儀器圖.....6-3
圖 6-26 表面粒徑分布曲線圖.....6-8
圖 6-27 多功能渠槽流量與馬達頻率率定曲線圖.....6-10
圖 6-28 壓克力模型圖.....6-11
圖 6-29 木工底床圖.....6-11
圖 6-30 土砂坡面完工圖.....6-12
圖 6-31 初始坡面 DEM 圖.....6-13
圖 6-32 實驗過程.....6-14
圖 6-33 試驗沖刷後 DEM 圖.....6-15
圖 6-34 試驗結果之沖淤圖.....6-15
圖 6-35 沖淤體積分布圖.....6-16
圖 7-36 Q5 最大流速圖.....7-2
圖 7-37 Q5 最大水深圖.....7-3
圖 7-38 Q5 土砂沖淤圖.....7-4
圖 7-39 Q5 土砂運移量.....7-5
圖 7-40 Q5 最上游固床工移除之最大流速圖.....7-7
圖 7-41 Q5 最上游固床工移除之最大水深圖.....7-7
圖 7-42 Q5 最上游固床工拆除之土砂沖淤圖.....7-8
圖 7-43 Q5 拆除最上游固床工之土砂運移量.....7-9
圖 7-44 Q5 第二根固床工移除之最大流速圖.....7-10
圖 7-45 Q5 第二根固床工移除之最大水深圖.....7-11
圖 7-46 Q5 第二根固床工移除之土砂沖淤圖.....7-12
圖 7-47 Q5 第二根固床工移除之土砂運移量.....7-13

圖 7-48 Q5 第三根固床工移除之最大流速圖 7-15
圖 7-49 Q5 第三根固床工移除之最大水深圖 7-15
圖 7-50 Q5 第三根固床工移除之土砂沖淤圖 7-16
圖 7-51 Q5 第三根固床工移除之土砂運移量 7-17
圖 7-52 Q5 第四根固床工移除之最大流速圖 7-19
圖 7-53 Q5 第四根固床工移除之最大水深圖 7-19
圖 7-54 Q5 第四根固床工移除之土砂沖淤圖 7-20
圖 7-55 Q5 第四根固床工移除之土砂運移量 7-21
圖 7-56 Q95 最大流速圖.....7-23
圖 7-57 Q95 最大水深圖.....7-23
圖 7-58 Q95 土砂沖淤圖.....7-24
圖 7-59 Q95 土砂運移量.....7-25
圖 7-60 Q95 最上游固床工移除之最大流速圖.....7-26
圖 7-61 Q95 最上游固床工移除之最大水深圖.....7-27
圖 7-62 Q95 最上游固床工拆除之土砂沖淤圖.....7-28
圖 7-63 Q95 最上游固床工移除之土砂運移量.....7-29
圖 7-64 Q95 第二根固床工移除之最大流速圖.....7-30
圖 7-65 Q95 第二根固床工移除之最大水深圖.....7-31
圖 7-66 Q95 第二根固床工拆除之土砂沖淤圖.....7-32
圖 7-67 Q95 第二根固床工移除之土砂運移量.....7-33
圖 7-68 Q95 第三根固床工移除之最大流速圖.....7-34
圖 7-69 Q95 第三根固床工移除之最大水深圖.....7-35
圖 7-70 Q95 第三根固床工拆除之土砂沖淤圖.....7-36
圖 7-71 Q95 第三根固床工移除之土砂運移量.....7-37

圖 7-72 Q95 第四根固床工移除之最大流速圖.....7-38
圖 7-73 Q95 第四根固床工移除之最大水深圖.....7-39
圖 7-74 Q95 第四根固床工移除之土砂沖淤圖.....7-40
圖 7-75 Q95 第四根固床工移除之土砂運移量.....7-41
圖 8-76 Q1.11 最大流速圖.....8-2
圖 8-77 Q1.11 最大水深圖.....8-2
圖 8-78 Q1.11 土砂沖淤圖.....8-3
圖 8-79 Q1.11 土砂運移量.....8-4
圖 8-80 Q2 最大流速圖 8-13
圖 8-81 Q2 最大水深圖 8-14
圖 8-82 Q2 土砂沖淤圖 8-14
圖 8-83 Q2 土砂運移量 8-15

第一章　前言

河溪治理工程之系列固床工，雖然能夠抑制上游之土砂、保護上游坡面之坡腳、減緩河床，調整河床坡度之功能，卻也可能造成下游沖淤問題。近年來由於氣候變遷、極端降雨事件發生頻繁，再加上生態保育和永續經營意識抬頭，系列固床工因重新審視是否有存在的必要。正因如此，在適當時機做出合理的系列固床工配置方案將成為未來的重要課題。

依據水土保持技術規範第 4 條：「集水區之治理係為保育水土資源、涵養水源、防治沖蝕、崩塌、地滑、土石流、洪水及土砂災害，並以淨化水質、維護自然生態環境為目的。」也就是說，防砂壩設計趨勢應朝向河川的永續經營為目標，而非只有防治土砂災害的功效。

本計畫期望透過數值模擬與縮尺模型的方式，評估系列固床工的配置方案對河川土砂沖淤帶來的影響，最終藉由研究成果歸納出最佳系列固床工配置方案，提供河川管理單位更完整的永續經營參考依據。

第一節　緣起與目的

為有效管理溪流泥砂輸移，防止河床產生嚴重沖刷現象，於河段設置系列固床工一直以來都是國內常見的傳統工程，此方法能穩定溪床坡度與減緩沖刷。然而傳統型固床工存在一些問題，例如固床工下游若產生淘刷坑，在淘刷情況較為嚴重時，固床工有發生破壞之風險；又固床工屬於橫向構造物，對於河段之縱向生態廊道有所阻礙。因此近年來許多人嘗試不同類型之固床工，以改善傳統型

固床工之缺點，如在固床工下游處設置拋石保護段，以改善傳統型固床工淘刷坑之問題，保護固床工不會因淘刷坑而遭到破壞；又或者利用開口式固床工以及透過式固床工，使構造物留有通道，恢復河道縱向之生態廊道。

本計畫擬透過數值與縮尺模型試驗分析的結果，評估既有系列固床工在溪流河道穩定與地形演變兩者間的平衡點，並進行系列固床工最佳配置的研究，最佳化的重點在於當有需求時、既有固床工的改善策略。經查現今並無一套完整的設計流程，改善河道系列固床工的配置，因此本計畫擬以創新的角度，不同於原本使用計畫坡度設定間距，將以利用沖刷深度、淹水水深以及土砂運移量進行比對分析，作為決定是否降低或拆除個別固床工以及固床工開口之準則。同時，為更加了解不同類型之固床工對於河道地形演變的影響，在上述之準則下，本計畫將探討傳統式固床工，與系列固床工之排列組合，藉由縮尺寸模型與數值模擬進行比較，推估河床泥沙運移的趨勢，了解淘刷之深度、位置以及固床工對河床形貌乃至生態可能造成的影響，進而探討不同類型固床工適用之情況，找出最適合溪流之系列固床工配置。根據上述，本計畫的工作項目如下所述。

第二節　工作項目

本計畫之實施依所規劃的 5 個重要工作項目，分別敘述如下。

一、 資料收集選定分析溪流

系列固床工主要目的為管理河床面泥砂的輸移，防止河床產生嚴重沖刷，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。在台灣有些溪流的型態為小型河川或獨流入海的狀態，其沖積扇不發達，土砂量較小，多半有穩定的流量及河道，近年來在生態意識抬頭的狀況下，對於系列固床工的適宜性不斷有討論的 聲音，例如台灣已有系列固床工改變原本的設計之案例(距離蘇樂溪與大漢溪主流匯流口處 1K+560~1K+700 以一組系列固床工取代二座)。在選定製作固床工時台灣西部由於軟岩質河道沖蝕嚴重，故亦有較多之系列固床工在此建設，以新竹頭前溪中正大橋固床工三階固床工為例，由於河床屬軟岩性質，故在此設置固床工防範河床過度淘刷。如前述，在生態意識抬頭下，興建系列固床工時，應同步考量到河流生態棲息之多樣性是否會因為系列固床工而降低。以屏東保力溪為例，保力溪下游之陸蟹為重要之保育物種，本團隊發現在保力溪現地在上下游，皆有設置系列固床工，雖經生物調查，兩岸洄游的生物仍可上溯至中游附近，然而本團隊認為應可藉由溪流系列固床工之有效改善，例如在系列固床工中將傳統固床工替換成開口式固床工或減少減低固床工，在達到緩和床面、減緩沖刷的同時，亦能使洄游性生物往更上游回溯。

系列固床工之目的在於擴大河道的保護區段，因此該地區目標河道之溪流穩定與地形演變是否有明顯改善為關鍵的觀察項目，本計畫初期將先進行河流系列固床工保護區段之觀察，利用歷年在現地觀測之報告資料選定將進行數值模擬之設定包括系列固床工數量、類型與河床坡度(數值模擬方面選用之軟體會在後續有更詳細之說明)。本計畫以數值模擬方式評估系列固床工對於溪流穩定與地形演變之變更影響分析，計畫初期將先進行現地及文獻資料的蒐集與篩選、資料分析並評估資料之可使用性，本團隊將透過文獻查詢所

需要之資料，例如系列固床工之排列以及開口式固床工開口數量及開口排列方式。除了進行數值模擬，本計畫亦會進行縮尺實驗以此來驗證數值模擬的準確性，縮尺實驗在「二、建立縮尺渠道試驗，選定試驗溪流河段之系列固床工」會有更詳細之說明，本計畫雖然是以數值模型和縮尺 模型的方式進行研究，但最終目的是希望能夠應用在不同地區對於系列固床工改善之工程案例上，期望能達到更有效率的工程設計，進而節省製作成本且能更加保育生態，為了可以導入工程，本團隊將選擇台灣目前較常使用之傳統式固床工進行縮尺實驗及數值模擬進行分析與操作，並在計畫時進行事前評估可能遭遇之挑戰，提供未來操作的依據。如前述，目前固床工在台灣已有許多研究與案例，例如高美大橋(經濟部水利署第七河川局)、頭汴坑溪中埔十號橋上游(水土保持局台中分局)、雙溪流域后番子坑溪(水土保持局)、台北市內湖區內溝溪(顧承宇、譚志豪、周君衡)、山豹野溪(台南分局)，詳如表 1-1。

本計畫將針對目前台灣已施作的河道進行綜合評估並選定最適合分析的集水區作為研究目標。根據上述，選定分析溪流至少考量以下因素

1. 是否為具有系列固床工之溪流
2. 集水區固床工上游淤砂坡度
3. 集水區固床工下游沖刷程度
4. 是否具有完整的土砂歷史資料(如不同時期 DEM 圖資)
5. 流域下游是否有保全對象

表 1-1 國內固床工類型成果摘要

地點	分局/作者	材料	面對問題	成效	未來/改善方向
高美大橋	經濟部水	多階	高美大橋橋	於上游淤積砂石	格框下部先拋填大粒

	利署第七河川局	消能固床工	墩裸露，以混凝土加大鞏固橋墩。但也使河川橫斷面及水流面積縮小，使水流加速。	可穩固橋基，並可視砂石淤積情況，於橋墩上游一定距離，適量開採砂石。 河水流量之位能，將會因固床工程結構物之高程而集中於固床工上下游前後，以減少水患。	徑塊石，將頂部再以箱型石龍充填，可使上部之塊石形成一整體面，除保有原設計之透水性外，並可抵抗急速水流沖刷。
頭汴坑溪中埔十號橋上游	水土保持局台中分局	半圓形斜坡式故床工	暴雨或災害後，土砂崩塌滑動，往下游運移，造成下游土石災害及阻礙河道。	固床工採弧形設計，有效控制流心。 向上傾斜之半圓形斜坡式固床工，調整溪床坡降。 二道消能池可減緩水流衝擊，增加水瀑提高溶氧量。	
雙溪流域后番子坑溪	水土保持局	乾砌大塊石拱型固床工	豪雨過後，護岸被破壞，河川水流入周圍造成農地損失。 強降雨後，水中之生物生態環境遭破壞。	大塊石拱型固床工可營造出深潭淺灘，提供魚類棲息。 魚類數量有回升情形。 利用向上拱形應力原理，提高河床穩定性。	
台北市內湖區內溝溪	顧承宇、譚智豪、周君衡	石樑型固床工	傳統工法違反生態性。使用大型天然石塊較為經濟。	在常流水溪流中避免水流侵蝕、沖刷溪床。 可產生多樣性流況。 增加水體溶氧量。 恢復自然景觀風貌。	建議後續研究可以探討在不影響生態之下連結石與河道寬度之關係。
南投縣國姓鄉北坑溪	王傳益副教授等	踏步式固床工	除可以達成以往傳統工程方法所操作之經營內容外，亦可透過生態工法來達成自	較高透水性，在低水流量時，水流仍可透過間隙流動，提供水中生物縱向通路之連續性。 常流量時可以束	

			然資源保育之目標。	縮水流，增加水深，於固床工下游產生跌水可增加水體曝氣能力，提通較佳之棲地環境。 對下游溪床具有分散沖刷之效果，較為安全。 施工容易，且對於既有傳統固床工之改善工法較易操作。 兼具親水作用，提供較高之可及性。	
抽藤坑溪中和橋	水土保持局台中分局	斜坡式固床工	巴砂娜橋上游為高敏感崩塌區位。 每逢豪雨後，常流水會因河道分布塊石，呈左右擺盪，間接影響兩岸基礎穩定。 既有固床工下游持續刷深，導致右岸原護岸基礎掏空，有倒塌疑慮。	以坡地管理措施減少泥砂生產量及防止土砂下移。	
山豹野溪	臺南分局	混凝土(傳統)固床工	因長期受颱風豪雨 響，造成河道兩岸沖刷侵蝕嚴重，已危及周遭農地及建物安全。	防止侵蝕加劇及災害擴大為目標，透過復育計畫工程施作前、後，不同時期紀錄照片對照，可得知整治工程發揮功效。	從不同時期紀錄照片比對，發現原河川環境較為自然且力於生態，本案為了防災、減災，設置高陡之護岸結構物，破壞生態棲息地，且竣工後河道環境植生復育狀況良好，建議未來可研擬相關監測計畫或增加生態友善措施。
台坂溪	臺東分局	多孔式固床工	颱風期間集水區多處崩塌、邊坡沖毀、構造物	利用當地石材固床工，減少混凝土用量及土方挖填平衡，將環境	對於防砂壩調整開口後，影響河川斷面與土砂變遷的結果，還需要持續的監控與修

	基礎淘空、土石流肆意流竄，多處河道及產業道路嚴重土砂堆積。 上游坡地坍塌，造成大量土砂隨溪流下移，破壞兩岸農地。	之衝擊及民眾之影像降至最低，同時能達到節能減碳、防洪減災及景觀美化等多樣化目的。 多孔固床工以拋塊石，增加構造物透水性。 考量指標物種毛蟹，透過設置多孔隙之混凝土砌石生態護岸，營造毛蟹棲避空間。	正。

二、 建立縮尺渠道試驗，選定試驗溪流河段之系列固床工

本計畫設將進行渠道縮尺實驗以模擬現地在系列固床工排列下對泥砂沖淤、河道輸砂以致河道變形之影響。而本次縮尺實驗將利用國立台灣大學水工試驗所之多功能水槽來進行，模型試驗預準備的項目包括：水工模型渠道、相關用水 設施、量測高程儀器、測速儀器、試驗操作平台。縮尺實驗模型設定的範圍為現地系列傳統式固床工與其河道之演變狀況(即不包含開口式固床工的部分)。

縮尺實驗之設定所製作之模型將完全參照現地條件以觀察河道在系列固床工可能之沖淤變化。此水工實驗模型所觀測之水體為模擬現地之明渠流，即透過重力主導之流動，因此選定無因次之參數福祿數作為縮尺試驗之相似。而設計實驗之條件包括：

1.坡度的影響，如溪流上下游條件為陡峭或平緩

2.河床泥砂粒徑(可參考先前地文資料選定)

3.現地系列固床工之間距

4.以重現期距 5 年之定流量進行動床試驗

試驗時觀測之影響因子包括：淘刷坑深度、淘刷坑與固床工趾部的距離、河段底床高程、流場流速等參數，藉此探討水流對於河床沖淤的規模。試驗結束時間設定為當水流沖刷最大深度變動量小於門檻值時(例如 0.5%)，亦即當沖淤穩定時，試驗即將終止，並進行相關量測。量測之儀器分別為記錄高程及水位的設備，其中記錄高程的設備為捲尺；紀錄速度的方式為在水槽設備定流量流動的過程中，在水體中放置數顆保麗龍球，藉由相機或錄影設備於水工渠道上方進行記錄，並追蹤在固定時間下，保麗龍球移動的距離，以推斷表面的流速，如此便可以得到高程、速度等資料。

以縮尺試驗驗證水理模式之準確性:

1.底床高程試驗結果:

沖刷過後底床高程可利用正射影像或雷射測距儀求得，再經由適合之軟體(例如 SURFER、metashape 等)繪出沖淤變化情形。

2.流速試驗結果:

利用測速儀器測的流場流速分布，結合高程圖，觀察淘刷坑及河道變化情形。

於進行現地縮尺寸模型後，所量測之記錄數值，可作為水理模式之驗證依據，而數模在確認其準確性後，將利用數模找出最合乎工程育生態效益的設計，例如在不同系列固床工的數量與配置中尋求最佳方案。

三、 建立二維水理模式

為模擬河道地形變遷，本研究將使用二維水理數值模式分析與探討在不同情境下的沖淤結果。目前常用於演算之二維水理模式選擇眾多，但適用區域和使用功能略有不同，經過初步的評估，HEC-RAS、

SRH-2D 與 CCHE-2D 為較理想之模式。以下為上述三種軟體之概略說明:

1.HEC-RAS:

美國陸軍工兵團水文工程中心所發展之河川分析系統,對於定量流水位剖面線計算模擬、非定量流模擬、降雨逕流、移動邊界的輸砂演算等功能接包含在內,能滿足大部分水理模擬的實務需求。無是簡河道、複雜河道、自然渠道或是人工渠道、定、變演算及是否包含水工結構物等情況,皆可簡快速演算其水況,再加上圖型化介面使其操作更為簡便。

2.SRH-2D:

SRH-2D 為水利署與美國墾務局合作,以臺灣河川為案例所開發之河川水理動床數值模式,功能包括河川水理、河道泥砂運移、軟岩沖蝕、岸壁沖刷及異重流分析等。目前已逐漸廣泛應用於臺灣河川水理輸砂特性之研究,例如:濁水溪及 大甲溪流域中下游河道的沖刷問題探討、水庫異重流模式於庫排砂方案應用、定量降雨預報橋梁沖刷推估研究、拆壩後河相演變及輸砂模式研究等,顯示 SRH-2D 模式能合理呈現真實河道之水流與泥砂之動床特性。此外,就模式整合能力而言 SRH-2D 可以與很多現有的模式相結合,例如:RMA-2(美軍工兵團 1996)以及 MIKE21(DHI 軟體 1996),SRH-2D 在格網的要求上相當有彈性,結構網格、非結構網格及混合網格皆可使用。

3.CCHE-2D:

CCHE-2D 模式係由美國密西西比大學內國家計算水科學及工程中心所發展之二維水輸砂模式,採用隱式時間推進有限元素法作為水理數值方法,可用來模擬穩態及非穩態明渠、亞界、超界、混合、複

雜主支交匯等，天然河川與實驗渠道同樣經過檢定驗證程序。相較於傳統水深積分模式，能更合理地模擬理床改變與河道變遷。此外，美國國家計算水科學及工程中心為配合台灣河川之特性，針對台灣常之軟弱岩盤與岸壁沖刷進模組建置與修正，並採用移動格網技巧使外部邊界格網可隨著 岸壁沖刷過程移動。整體，CCHE-2D 模式功能具有應用於台灣河川之一般化特性。本計畫將評估上述三種軟體並藉由輸入河道與系列固床工的設計參數，模擬不同河道坡度、系列固床工設置數量和固床工類型配置之對應關係，計算可能的較佳設計，做為日後工程規劃設計之參考依據。

目前初步評估的結果，HEC-RAS 2D 為較理想的工具。另外，隨著電腦運算能力的提升，水理分析模式已由較簡單的一維問題逐漸發展到更為複雜的二維及三維問題；因此，本計畫將以 HEC-RAS 2D 二維的方式進行分析。

四、 模擬不同設計情境下之河道地形演變

本研究預期探討不同河道坡度、系列固床工設置數量和固床工類型配置對生態、沖淤與地形演變之影響。在流量方面，本計畫將藉由溪流試區內流量站的歷史紀錄與集水區內降雨紀錄估算重現期距 5 年之流量作為數值模擬之設計流量。在河道坡度方面將選用不同溪流河段如上、下游河段作為不同坡度之模擬河道。固床工設置數量將參考水保手冊「臨界坡度」設計，若有需要減少固床工的數量，最上游的固床工將優先移除，移除後將再重新分析逐次改變系列固床工設置數量，循環分析直到符合設計目標為止，以期找出較佳固床工設置數量(詳見第四章固床工最佳配置方案)。固床工類型配置選用傳統不透水式固床工及單一開口之開口式固床工，開口式固床工於中央開口，

開口寬度選用三種分別為寬度之 1/3、1/4、1/6，開口邊坡比為 1:1，未來計畫將以上兩種固床工設計搭配形成多種配置方案，例如：最上游及最下游第一支固床工改用開口式固床工，或是最下游起算三支固床工改為開口式固床工，進行數值模擬。

五、 提出選定最佳配置之流程

本計畫將根據前述分析結果，彙整管理與操作模式，提供未來設計者、經營者之依據參考。詳細流程將於第四章固床工最佳配置方案進行說明。

第二章　工作執行方法

第一節　背景

本研究室近年來持續投入相關人力針對河道土砂運移的相關研究，今年所提計畫主要係探討系列固床工對於溪流河道穩定與地形演變之變更影響分析。系列固床工在國內產官學各界，均已是經常使用之河道工法，並有多年研究的成果，且水保局許多分局也經常施作於部分的溪流之中。對於這個主題，本團隊過去累積的經驗，應可提供足夠的執行基礎。因此，以下的說明分為兩大部分，第一個部分說明本團隊過去與今年所提計畫(系列固床工對於溪流河道穩定與地形演變之變更影響分析)相關累積的工作內容與成果；第二個部分說明本團隊關於這個主題整理的相關文獻。如下說明。

一、 進行縮尺試驗與數值模擬分析

本團隊已多次利用多功能水槽進行水工試驗並據以建立數值模型，進行後續的分析，以下僅列出部分計畫提供委員參考 。

(一) 透過式調整型防砂壩土砂運移之經營管理與操作成果報告

本團隊去年(111)執行水保局創新研究計畫中，提出「透過式調整型防砂壩土砂運移之經營管理與操作」成果報告，探討該工法對於解決或減緩下游沖刷問題的可行性。調整防砂壩之經營管理方法可在不同時間依據土砂運移量變化進行調整，同時又可以保持河道土砂平衡穩定以及溪流生態之連續性的可調整型防砂壩。計畫執行時首先建立縮尺寸模型進行水工試驗，並進行最佳設計。模擬的對象為台中廊仔溪，台中廊仔溪因既有防砂壩構造物，造成上游土砂淤積嚴重，中下游溪床沖刷的情形，規劃以預鑄混凝土調整型防砂

壩改善上述狀況，該項工程已經完工，不過，台中分局期望未來可以進一步找出適當之經營調整週期，改善未來溪流的土砂收支平衡，故選取為此次計劃案分析的對象。進行時利用臺灣大學水工試驗所之多功能渠槽進行縮尺試驗，同時以 HEC-RAS 2D 進行數值模擬，評估透過式調整型防砂壩土砂運移之經營管理與操作對於減緩下游沖刷問題的成效，並將試驗結果，彙整分析後提出經營管理原則，以作為未來實際工程上之參考依據。

(二)　德島大學學術合作計畫

本團隊曾與日本德島大學進行學術合作計畫，該項計畫的研究目標為：(1)通過試驗和人工智慧研究提出具複雜基礎橋梁的沖刷公式。日本和台灣的橋梁基礎通常很複雜。在這種情況下沖刷深度的評估非常重要。因此，根據試驗結果，提出沖刷深度準確的預測公式以利工程設計。(2)由於全球氣候變化，工程設計需回應複合災害的威脅。在考慮地震和洪水事件的不確定性，提出了一種機率概念的設計流程。本計畫亦 於日本德島大學藉由多功能水槽試驗探討各因子對沖刷深度之影響。經由以上計畫，共培育 6 名碩士生，發表 8 篇 SCI 論文。

二、　文獻整理相關資訊

本團隊根據所收集的文獻整理相關的資訊作為後續進行的參考，以下僅舉其中一個案例略作說明。

「宜蘭大溪溪五座固床工降高度」 (行政院農委會水土保持局)。為同時滿足野溪減緩土砂災害及其生態連續的需求，固定不變的固床工結構已難以應付劇變的溪床土砂環境，隨著流域產砂量之改變而調整防砂壩之結構，維護各時期基本輸砂平衡，並同時減少

固床工對河溪環境之損害及生態廊道之阻斷。藉由調整固床工高度來增加當地魚類向上游上溯。此方案結合固床工型態蒐集、固床工現地調查、土砂量變動概念 模式以及土砂運移公式推導，推求高度變化對於生物多樣性的影響，探討固床工高度的調整與興建如何影響溪流之土砂平衡情形。

第二節　工作執行方法

本計畫執行流程如圖 2-1 所示。由圖可知，本計畫中首先以保力溪附近之恆春雨量測站(467590)之降雨資料、現地河床之粒徑分布、竣工圖與地形測量圖等作為縮尺實驗、數值模型之參數設定如流量、底床粒徑、河床坡度、縮尺模型之比例等，另透過蒐集相關系列固床工之文獻，並將資料統一彙整，分別進行拆除固床工與固床工開口高度設計之方案之數值模型模擬，探討不同重現期距之下各別情況之結果，並進行分析得到最佳配置，且利用縮尺模型進行驗證，並利用相關程式來分析縮尺模型之結果，最後進行整體策略之設計，詳細流程如圖 2-1 最後提出系列固床工相關配置方案。

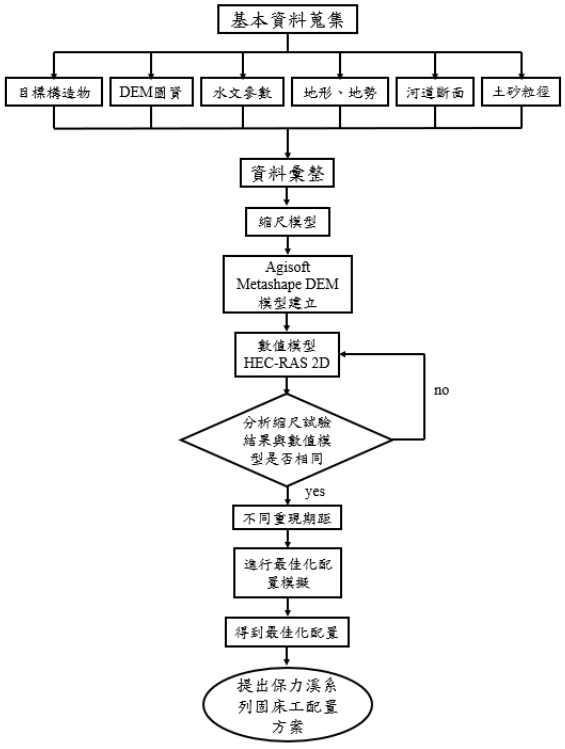


圖 2-1 工作流程圖

第三節　相關文獻蒐集

透過蒐集整理國內外專家學者相關的文獻資料，包含系列固床工特點、國內外系列固床工成果等進行文獻分類，作為本次計畫研究基礎。

一、 系列固床工水理特性

(一) 林伯勳、賴承農、許振崑、謝孟荃、高伯宗(2021)

為保護山坡地範圍內保全對象之安全，行政院農業委員會水土保持局曾依現場環境需求，於野溪溪流及崩塌區域投入保育治理工程，設置防砂壩或固床工等河道之橫向構造物，以調整溪床坡降、防止縱向侵蝕及橫向淘刷。其中，固床工旨在保護溪床免於沖刷下切，而系列固床工係為多座橫向構造物所組成，以擴大溪床保護範圍，若遭遇溪岸地質條件不佳、鄰近有重要保全對象等特殊狀況，

必須調整固床工間距長度；若設置之固床工間距太疏或設置超出防護範圍，易導致基礎下方空洞化；反之，固床工間距太密或與護岸共構時，易導致流速減緩而有溢淹情形。

(二)　吳嘉俊(2016)

透水式固床工可改變了溢流水深及渠床淘刷，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沖刷的影響差異則逐漸縮減。

(三)　郭昌樺(2002)

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，和床面泥砂平均沖刷率越低的總體趨有關趨勢，足以證明固床工具有穩定河床之功能。由泥砂沖刷分配率可知，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，效果並不比保護段來的顯著。

二、　國內外系列固床工成果

(一)　水土保持局-蘇樂溪集水區系列固床工(2018)

蘇樂溪集水區遭逢民國 93 年艾莉颱風侵襲；造成土砂災害以及嚴重崩塌土石流，省道台七線公路中斷，災後水保局分年分期完成崩塌地及土石流治理。統計民國 94~107 年共有 8 件相關治理工程，計有防砂壩 16 座，及固床工 9 座。

(二)　農田水利署-田寮洋取水堰改善工程(2023)

於民國 2023 年六月完工之田寮洋取水堰改善工程，除調整三座

灌溉取水堰外，也一併調整其中下游的 11 道系列固床工，依照溪流原始樣貌分析、並達成引水目標所需之河床高程，以接近自然結構的方式佈設石樑、復建「足夠取水、又不影響防洪安全及生物移動」的溪流地形骨架。

(三)　張緯東-獅潭鄉大東勢溪大東勢尾野溪整治工程(2022)

雙潭沿程消能配合系列長距離崁石斜坡階梯固床工及潭區營造，形成階梯狀溪床，有效穩定溪床、調整縱坡坡度、減緩流速、穩定流心、避免縱橫向沖刷情形；兩岸因地制宜設計預鑄格框、預鑄槽框、砌石護岸，有效保護重要保全對象；過水路面修復，保護用路人安全，調整軸向穩定水流流心；既有固床工修復，採複式斜坡蓄水階梯型式，有效穩定流心、維持生態廊道暢通。

(四)　日本多摩川河流工程

50 年前，因工業污染，多摩川曾被稱為「死亡之川」，但經過半世紀的整治工程，現已恢復清澈樣貌，除了有生態工程之輔佐外，在河道面亦使用固床工等河流整治工程，已達到穩定流心及調整河道坡度。

(五)　日本九頭龍川

在日本福井縣之九頭龍川原先因堰壩導致生態多樣性降低，使自然水流減少並阻斷魚類遷移之路線，藉由拆壩以及興建較矮之系列固床工達到河川整治與生態之間的平衡。

(六)　日本四萬十川

日本四國地区的四萬十川經歷了建造護岸、系列固床工和攔砂壩的一系列河川整治工程，以保護河岸免受侵蚀，並保持河流的自然生態多樣性。

(七)　印尼西馬杜爾河

由於在印尼爪哇島巴登特省的西馬杜爾河靠近 Bantar Karang 橋梁結構附近面臨冲刷問題，冲刷問題可能會損害橋梁結構的橋墩。河川整治中建造固床工試著解決改善問題。在固床工興建的五個月後，通過比較 Bantar Karang 橋梁結構周圍的河床高程，其結果顯示，固床工結構的存在確實增加了河床高程，特別是在 Bantar Karang 橋梁橋墩周圍，並改善了沖刷問題。

三、　固床工土砂水理模擬

(一)　詹勳全 (2017)

以 CCHE-2D 河道二維沖淤水理模式針對石門水庫蘇樂溪集水區進行分析，先透過模式參數檢定，比對模擬颱洪事件前後與 DTM 實測底床高程變化，擇定適切之模式參數，再以檢定完成後合理參數進行不同清疏方案之模擬分析，探討模擬洪水事件後清疏方案之底床高程變化，透過水理模式的預測結果，實務單位可有效進行河道整治工程之效益評估。

(二)　黃宏斌 (2021)

將以建構好之不同組合之模型與現地所蒐集之水理、土砂資料，以二維輸砂數值模式 RiveFlow 2D 進行情境模擬，交相分析探討不同流量及不同組合之模擬結果之水理特性。綜觀三條現地溪流不同重現期距沖淤模擬狀況，可以發現在設計及建置系列固床工時，間距是對於溪流首要考慮的因子，必須配合溪床不同河段沖淤情形安排適合其河段之適當間距，一來可以防止泥砂過度沖刷，也能調整間距使河床達到沖淤平衡狀態，但除了間距影響下，還有另一個因子也是息息相關，就是不同河川的河床坡度不同，在設計及建置時必須要將此因

子考慮進去。

四、 縮尺沖淤模擬

(一) 吳嘉俊 (2019)

在藉由室內水工縮尺試驗，以不同通透率之透水式固床工模型，瞭解透水式固床工於不同通透率情況下對於溪流水理現象的影響，並探討透水式固床工的可行性，進而研發較為適宜的透水式固床工構造，以達到野溪整治之安全、保全、永續的最終目標。

(二) 胡通哲、賴進松、施上粟、韓仁毓 (2010)

水工模型採用縮尺比例 1/25，定床、動床試驗流量峰值採 130、10 cms，數值模式採用 HEC-RAS、CCHE2D 兩種，分別代表一維、二維模式，與水工模型試 驗的資料比較，進行定床、動床率定驗證。經由上述的調查研究，採全斷面階段式+改良型舟通式魚道，此型魚道可適用高、低流量，在土石流災後，魚道仍有機會保有功能。

第三章　集水區現況調查

本計畫為掌握保力溪系列固床工之潛在問題及災害，瞭解現況問題，本計畫針對保力溪系列固床工上下游及保力溪下游為重點進行調查分析，調查項目包含區內之土砂粒徑、溪流河床植生覆蓋情形、溪流坑溝、水土保持構造物與保全對象等，依據調查與分析結果進行集水區現況問題分析與說明，做為後續分析之參考。

第一節　現況調查

本計畫依相關文獻資料初步瀏覽保力溪內之所有系列固床工，篩選後為配合台灣大學多功能水槽之尺寸規格，選定圖 3-2 中紅框處之系列固床工為研究對象。本次現況調查主要探查區域內之系列固床工及固床工上下游之環境。

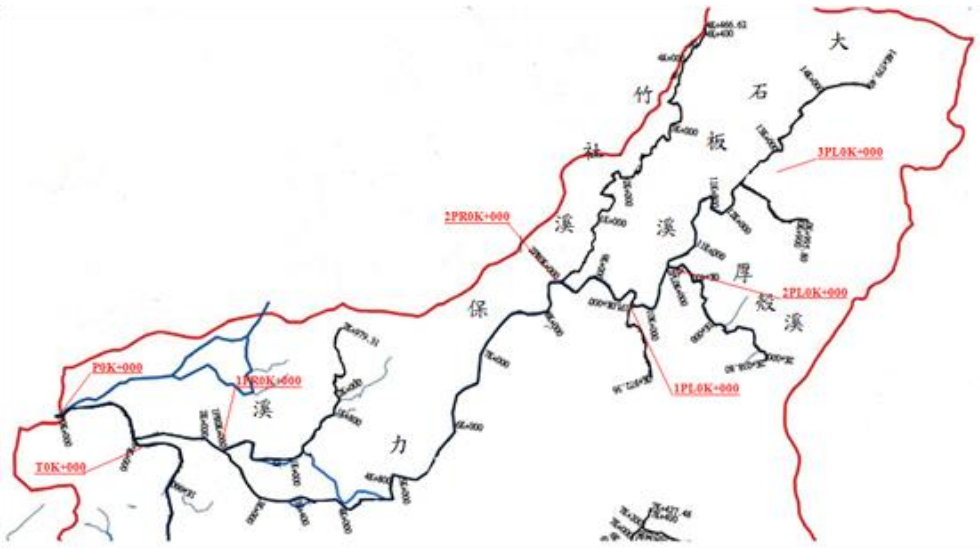


圖 3-2 保力溪調查範圍圖

一、　系列固床工上游

自保力溪系列固床工上游開始，水深較深且岸邊有較多雜草，於衛星影像等大尺度影像中不易辨識，如圖 3-3 照片 2 中所示，沿途往上游發現溪床則有土砂堆積情形，部份的近岸邊坡陡峭處有裸

露情形，如圖 3-3 照片 3 及照片 4。整體而言狀況大致穩定，溪床上有較大粒徑土砂堆積情形。

二、 系列固床工下游

於系列固床工下游目前較無明顯溪流，固床工趾部與河床底床已無明顯高低落差，如圖 3-5 照片 17 及照片 18，其下游面地形平緩，整體土砂粒徑大小偏小。河床有土砂堆積少有植生覆蓋狀況，僅在部分河床觀察到有矮小植株，如圖 3-3 照片 6 及照片 8。

三、 保力溪下游

於保力溪下游仍可看到固床工，此處溪流水皆囤積於固床工趾部之沖刷坑，而在其餘河床則溪流水身部明顯。構造物情況良好無明顯破損，但固床工皆與上下游有明顯落差，兩岸有直升覆蓋情形，且較上游覆蓋情祥更加良好，植株高度更高。河床粒徑分布平均可在此地看到大小粒徑的土砂。



照片 1　固床工上游



照片 2　河床植生覆蓋情形



照片 3　固床工趾部積水



照片 4　固床工側面



照片 5 岸邊植生覆蓋



照片 6　構造物現況良好



照片 7　固床工上游現況



照片 8　固床工上游現況

資料來源:本計畫調查

圖 3-3 系列固床工上游調查照片



照片 9　固床工趾部



照片 10　固床工下游底床



照片 11　固床工底床砂石



照片 12　土砂狀況



照片 13　固床工構造



照片 14　固床工下游積水情形



照片 15　固床工下游



照片 16　固床工構造良好

圖 3-4 系列固床工下游調查照片



照片 17　保力溪下游



照片 18　副保力溪下游



照片 19　保力溪下游



照片 20　保力溪下游

資料來源:本計畫調查

圖 3-5 保力溪下游調查照片

第四章　固床工最佳配置方案

本章節將詳細說明系列固床工之改善配置方案，本計畫會分成兩部分進行分析，第一部分為針對整根拆除固床工方式部份的分析，第二部分為針對固床工開口設計部份的分析。分成兩部分的主要原因為考慮影響現地環境的程度，將固床工整根拆除之影響程度較大，有可能會產生較為劇烈的變動，過多的淤積或沖刷都會產生嚴重的災害，因此如此的變動程度需要審慎評估，且考量到工程方面，拆除成本花費較大，同樣需要謹慎思考，因此本計畫將探討不同的開口深度所產生的影響。固床工開口是現今較為常見的工程手法，能改善生態環境，同時也能保有水工構造物的功用，因此本計畫也將會一併探討固床工之開口設計，以下將分為兩節詳細說明。

第一節　拆除固床工最佳配置方案說明

本計畫根據先前文獻蒐集彙整，設計出針對保力溪之「拆除固床工配置方案」，其目的在於提供未來系列固床工設計者作為依據參考。以下將針對配置方案進行說明。

過少的河道輸砂量會使河道淤積嚴重，並會讓河道構造物喪失其功能，且大量的淤積會造成河道洪水難以排放，使淹水情形加重，故過少之河道輸砂量是需要避免的，反之過多的河道輸砂量會造成河道沖刷嚴重，並造成系列固床工下游的泥沙量增加，對下游產生嚴重的災害，因此過多的河道輸砂量亦是需要防範的，對此本計畫參考水土保持署台南分局之「101 年保力溪成果報告」中得出之合理土砂運移量，並藉由河道長度等比例縮放與重現期距之平均雨量換算得出不同重現期距之合理土砂運移量，並採用集水區整治

率，其推算可參考陳樹群(2004)之公式進行計算:

$$\text{整治率 RC} = \frac{Q_{so} - Q_s}{Q_{so} - Q_{sp}} \times 100\% \qquad \text{(式 4.1)}$$

式中，分子為治理前產砂量(Qso)與治理後產砂量(Qs)之差值，此為防砂量或防砂效益(即治理成效)，分母為整治前產砂量(Qso)減去合理土砂生產量(Qsp)，此土砂量亦即治理目標，可用以評估工程治理後抑制土壤流失之成效

保力溪研究範圍內的系列固床工由五支傳統式固床工組成，每支構造物寬度約為 80~90 公尺，高度則為 40~50 公分。因此本團隊透過現場勘查及情況模擬，設計出針對本系列固床工之拆除最佳配置方案。固床工最佳配置之分析流程如圖 4-6 所示，而流程圖中提及之方程式如下所式:

$$V_r = \frac{|V_0 - V_n| + |V_n - V_s|}{V_0 - V_s} \qquad \text{(式 4.2)}$$

上式中，V_0是設計前經過降雨後之初始土砂運移量，V_n為設計後經過降雨之土砂運移量，V_s是參考「101 年保力溪成果報告」所得出之合理土砂運移量，即上述之式 4.1，其值係通過重現期距之換算與距離等比例縮放求得。將上述數值代入式 4.1 中可得V_r，本計畫將其初步定義為土砂運移率以供為後續模擬參考標準。

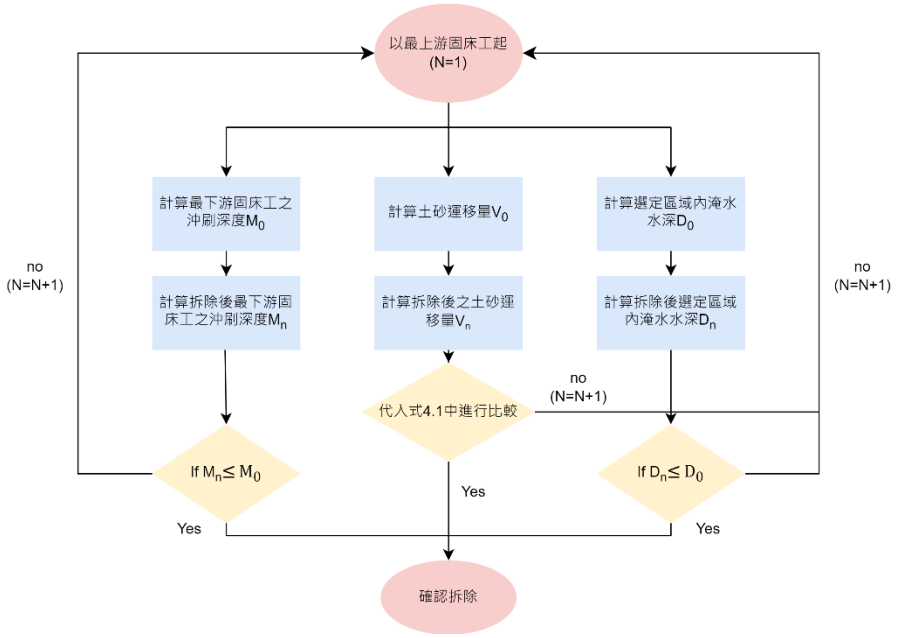


圖 4-6 固床工拆除方案分析流程圖

此流程圖為最終決定某個固床工是否拆除之步驟，接下來將進行詳細說明。以最上游固床工開始，本計畫會先進行初步模擬(基線分析)，設定五根系列固床工皆未進行變動，並以此設定模擬各重現期距降雨，得到M_0、D_0及V_0。上述中M_0為最下游固床工經歷降雨後於固床工趾部產生之沖刷深度，根據先前多次模擬經驗，發現沖刷深度最嚴重之區域為最下游固床工趾部，基於此情形判斷此處之沖刷深度為一重要議題，故將其設定為判斷標準；本計畫於場勘中觀察到，系列固床工之現地狀況右岸是野生植生坡地，左岸是人工堤防，因此在經歷降雨後須更加關注右岸之淹水情況，藉由多次模擬後選定在最上游固床工附近為判斷淹水情況之依據，選定範圍如圖4-7，D_0為計算選定範圍內之水深求得；一場降雨後所產生之河床載與懸浮載兩者相加即為河道輸砂量，由於無法估算邊坡崩塌而進入河道之土砂量，故本計畫著重於分析河道輸砂量，本計畫土砂運移量計算範圍為如圖 4-8 所示，涵蓋五根系列固床工、最上游固床工

往上游延伸 40 公尺及最下游固床工往下游延伸 40 公尺，而V_0即為經歷降雨後選定範圍所產生之土砂運移量。

接著進行拆除分析，由最上游固床工開始進行嘗試拆除(n=1)並分析其結果，現階段所指拆除為整根固床工拆除，分析的產出為M_1、D_1及V_1，其中M_1表示拆除固床工後得到的最下游固床工之沖刷深度，D_1表示拆除固床工後得到的選定範圍之淹水水深，V_1為拆除固床工後求得之土砂運移量。

分析階段中，本計畫將進行三種條件判斷，第一，若$M_1 > M_0$代表沖刷深度在拆除後是增加的，因此不能採納此種拆除方案，若$M_1 \leq M_0$代表沖刷深度是有改善的，除了能減少沖刷，也能避免固床工趾部之掏刷問題，故此種情形是可以採納的；第二，若$D_1 > D_0$代表淹水情形加重會使沿岸產生淹水災害，故不能實施此種方案，若$D_1 \leq D_0$則淹水情形有改善，並評估淹水範圍是否有增加後，可以採納此種方案；第三，將拆除後之土砂運移量代入式 4.1 得出V_r，並以此進行比較評估是否可以進行拆除。

本計畫將比較不同方案選出V_r為 1 之方案。設定標準V_r為 1 背後代表的意義為:整治後之土砂量介於整治前與合理土砂量之間，此情形可以確保無過多或過少的土砂運移量，可防止較為嚴重的災害發生。最後若滿足本計畫所制定之三個標準，則第 n 根固床工則可以拆除。

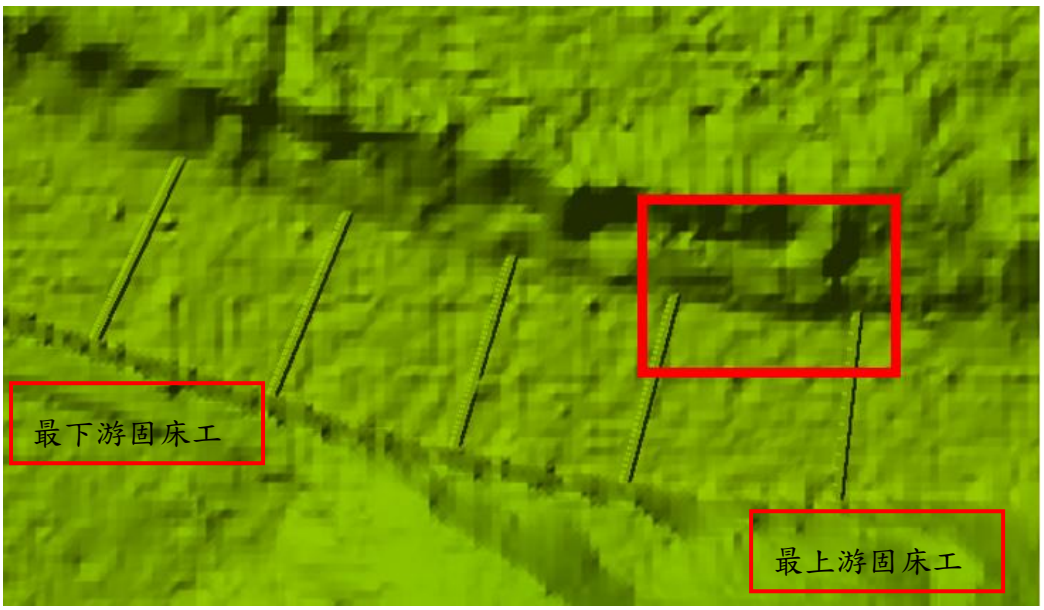


圖 4-7 淹水計算範圍

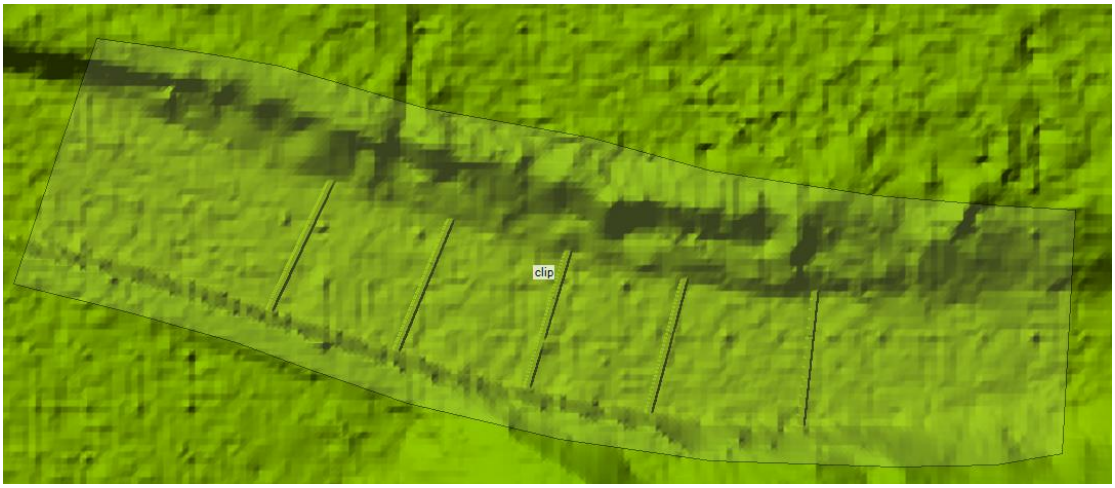


圖 4-8 土砂運移量計算範圍

第二節　固床工開口設計之比較

在調整固床工方面，開口設計一直是常見之工程方法，不只可以改善構造物高度使魚類洄游更加容易，使生態方面獲得改善，亦能同時確保水工構造物發揮其功用，達到穩定流心、調整坡度等功能，如今亦發展出眾多的開口式固床工相關設計與工程，包括調整成圓弧形開口固床工，或是研發各式透水式固床工，都是已有的案例，但在水土保持手冊中並沒有固床工開口高度之相關規範，因此本計畫將深入探討有關固床工開口高度對於溪流河道與地形演變之

影響，對此本計畫將探討三種開口高度，分別為構造物高程之 1/3、1/4 以及 1/6，實際步驟如圖 4-9，接著將詳細說明相關流程。

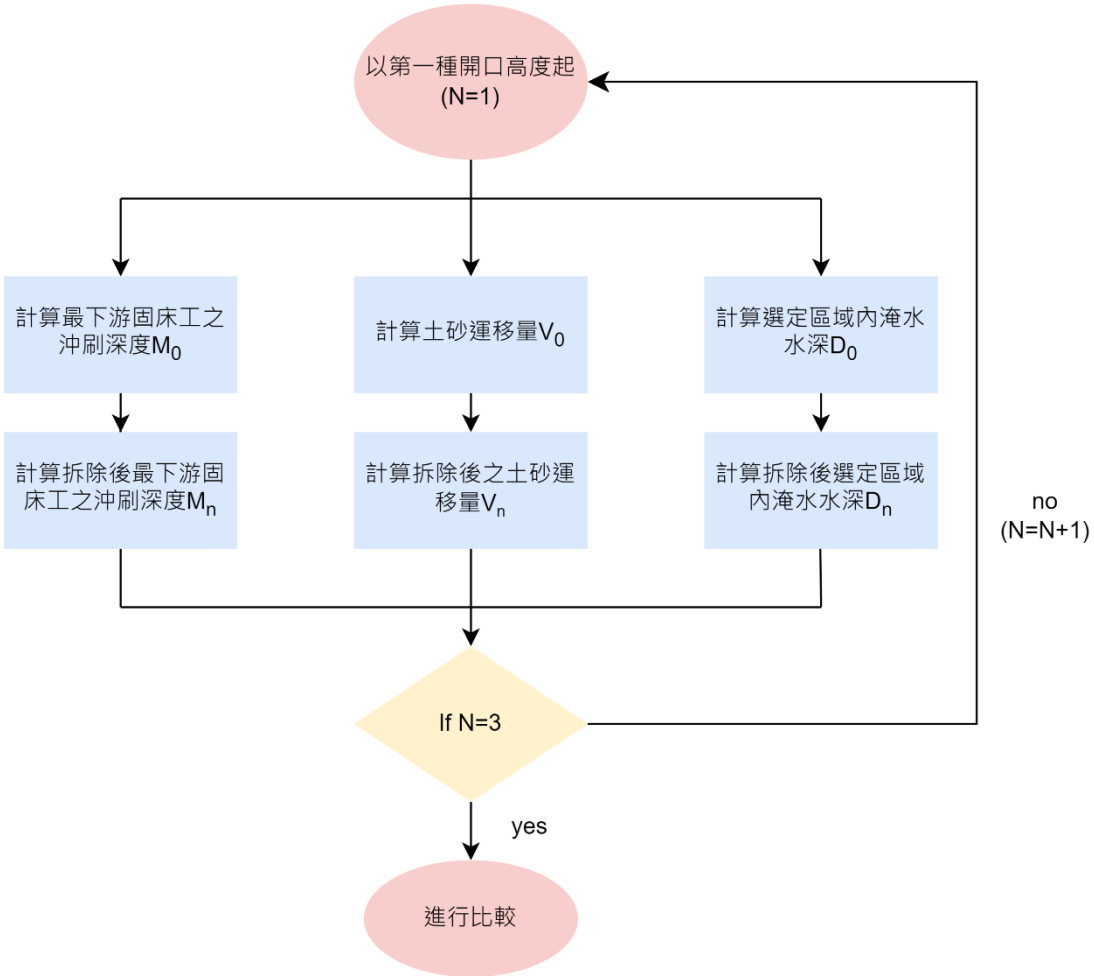


圖 4-9 固床工開口之流程圖

以下將為開口固床工模擬之相關步驟流程圖進行說明，首先為選定一開口高度(構造物高程之 1/3、1/4、1/6)，並透過模擬與分析得到開口後最下游固床工趾部之沖刷深度M_n與開口後選定區域內之淹水水深D_n並與整治前之指標M_0、D_0進行比較分析，若皆滿足條件$M_n \leq M_0$、$D_n \leq D_0$，則進入下一階段。

本計畫所制定之土砂運移量標準，不只考量整根拆除的方案，亦延伸至固床工開口設計，綜觀生態與工程方面，過多及過少之土砂皆會嚴重影響，適當的沖刷可以使河床產生水潭增加水生動植物

之生態多樣性，且可以保持集水區上下游之土砂平衡，適當的淤積可以使河床坡度增加，避免過多的陡坡產生，故本計畫沿用拆除整根固床工方案中V_r之標準，分析開口前後之土砂運移量V_0、V_n，代入式 4.1 中，並分析V_r值為 1 之開口方案，最後結合前述沖刷深度與淹水水深，探討不同開口高度所產生之影響。

第五章　HEC-RAS 模式介紹與參數設定

隨著電腦運算能力的提升，水理數值模型演算涵蓋的範圍已由早期較簡單的一維模式，逐漸發展至更為複雜的二維以及三維空間模式，雖然數值模式具有計算時間短、人力成本較少之優點仍需以取得容易及輸入資料完整性為主要原則；然而對於目標較小的問題如本計畫案，仍有些因素並不容易完全掌握如防砂壩地形，雨量資料及水文條件等，因此建立的數值模型需要進行驗證，驗證所需的資料則由渠槽試驗取得。

本計畫擬採用 HEC-RAS 2D 建立數值模型，HEC-RAS 2D 可執行一維定量流與一維跟二維的變量流模擬，也可做動床輸砂計算、水溫和水質傳輸模擬等等(賴桂文，2016)。原先 HEC-RAS 2D 常用於一維水理分析模型，2016 年延伸出二維水理演算模式，讓模擬範圍不受限於河道內，模擬所需的資料，例如洪峰流量，通常可進行頻率分析取得該項資料。綜合上述，HEC-RAS 2D 雖具有優點，仍需透過相關試驗數據進行驗證；為求土砂經營管理與操作原則之最佳設計參數，本計畫研擬以驗證後之縮尺模型，進行觀測土砂經營管理與操作原則防砂壩下游之沖刷與淤積之變化，避免縮尺試驗不良的規劃耽擱研究時程。透過最佳之設計參數組合，如較保守的調整策略、各種不同尺寸的土砂、依降雨量調整的流量大小等，選擇維持上下游河道土砂平衡效果較好的組合，作為下階段縮尺試驗製作模型的依據。

第一節　HEC-RAS 2D 模式介紹

HEC-RAS 2D 是一款水動力演算模式，由美國陸軍兵工團水文

工程中心（HEC）研發出的河川分析系統軟體，其主要的控制方程式為連續方程、動量方程與擴散波方程，並以有限體積法為處理空間離散之數值方法，其中可處理問題包含分析河川，河斷面計算，一維及二維非穩態水流計算，輸砂運移計算，水質分析等。

第二節　控制方程式

一、 質量守恆方程式

假設流動為不可壓縮，非穩態的質量守恆(連續)方程式如下所示:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=q \qquad \text{(式 5. 1)}$$

上式中，t 是時間，u、v 為 x、y 坐標方向的流體速度，q 是源流(涵流)，將上述連續方程，以向量形式表示可得方程式如下所示:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\nabla\cdot(hV)=q \qquad \text{(式 5. 2)}$$

上式中，$V=(u,v)$為 x、y 坐標方向的流體速度，∇ 是由∇=$\left(\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y}\right)$給出的梯度算子，將上式在邊界法向量 n 的水平方向積分，利用高斯散度定理可得方程式的積分形式如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{\Omega} d\Omega+\iint_{S}(V\cdot n)dS=Q \qquad \text{(式 5. 3)}$$

上式中，體積區域 Ω 代表流體佔據的三維體積，n 是垂直於邊界 S 的單位向量。在這樣的條件下，體積 Ω 將表示一個有限體積單元，將依據底層地形的資訊來計算積分。

二、 動量方程式

當水平尺度遠大於垂直尺度時，體積守恆代表垂直速度很小。Navier-Stokes 的垂直動量方程可以用來證明壓力幾乎為靜水壓力。在沒有斜壓梯度(密度非定值)、強風、非靜水壓、條件下動量方程是適用的。垂直速度及垂直導數是可以被忽略的(質量守恆及動量守恆)，可得到淺水方程如下所示:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-f_c v = -g\frac{\partial z_s}{\partial x}+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\left(v_{t,xx}h\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial y}\left(v_{t,yy}h\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\frac{\tau_{b,x}}{\rho R}+\frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad \text{(式 5. 4)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+f_c u = -g\frac{\partial z_s}{\partial y}+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\left(v_{t,xx}h\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial y}\left(v_{t,yy}h\frac{\partial v}{\partial y}\right) -\frac{\tau_{b,y}}{\rho R}+\frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \quad \text{(式 5. 5)}$$

三、 擴散波假設

曼寧公式用於估計底部摩擦。如果對流動的物理假設進一步的約束，則正壓的壓力梯度和底部摩擦之間的關係可以從動量方程的擴散波形中獲得。然而，必須注意的是，這種關係只能在比之前研究的更一般的動量方程更窄的範圍內應用。在本節所述的條件下，可以使用擴散波方程代替動量方程。在隨後的部分中將看到，相應的模型變成了一個方程模型，稱為淺水方程的擴散波近似 (DSW)。

上述描述了動量的液壓系統。以下將討論將轉向解的公式和數值方法。將水力半徑和表面橫截面積表示為水面高程 H 的函數勢力於計算的，如 R= R(H)、A=A(H)。在淺摩擦和重力控制的流動

中，動量方程的非穩態、平流、紊流和科氏項可以被忽略以得到簡化版本的方程式如下所示：

$$\frac{n^2}{R^{\frac{4}{3}}}|V|V = -\nabla z_s$$

(式 5. 6)

上式中，V 為速度向量，R 為水力半徑，$-\nabla z_s$為水面高程梯度，n 為曼寧粗糙度係數，將方程式兩邊開根號，方程式可以重新排列成更經典的形式如下所示:

$$V = -\frac{R^{\frac{2}{3}}}{n} \cdot \frac{\nabla z_s}{|\nabla z_s|^{\frac{1}{2}}}$$

(式 5. 7)

當速度由正壓的壓梯度和底部摩擦之間的平衡決定時，動量的擴散波形可以代替完整的動量方程，相應的方程組實際上可以簡化為一個方程模型。直接替換質量守恆方程中動量方程的擴散波近似，得到經典的擴散波方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\beta \nabla z_s) + q$$

$$where: \beta = \frac{R^{\frac{2}{3}} h}{n|\nabla z_s|^{\frac{1}{2}}}$$

(式 5. 8)

第三節　數值方法

一、 網格和雙網格(Grid and Dual Grid)

為了能有效地利用 HEC-RAS 2D 的數值方法，會將區域細分為不重疊的多邊形以形成網格。二維方程式的網格不會是結構化或正

交的，若全部或部分網格中有正交的存在，可以提高數值方法的計算速度。由於二階導數項和變量之間關係的微分性質，使雙網格是必要的；除了常規網格之外，還可以對微分方程進行數值建模。下**圖 5-10** 中，網格的節點和邊用點及實線表示；雙重網格的節點和邊用十字及虛線表示。然而，在數值模擬的情況下，是無法將網格擴展到無限大。因此，將兩種網格藉由互相疊加，可達到相比單一網格更為準確。

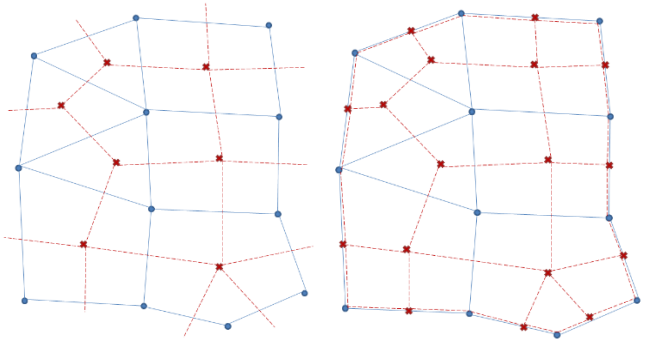


圖 5-10 網格節點和邊示意圖

二、 亞網格測探(Subgrid Bathymetry)

在許多情況下，數值模型的網格會因為數據太密集導致計算時間過久而無法使用。通常必須先使用相對粗略的計算網格來模擬流體，但這種情況下無法結合精細的地形特徵。而 HEC-RAS 2D 裡的解決方案是亞網格測深方法。將原本網格分成較小的網格進行計算，其中的網格包含一些額外的資訊，例如水力半徑、體積和橫截面積，這些資訊可以從水深測量中事先計算出來。雖然會失去高分辨率的細節，但有足夠的資訊可用，因此可以通過質量守恆來解釋精細的水深測量，另外有效地使用較粗的網格來計算表面高程的空間變異性。

三、 網格速度(Cell Velocity)

當前速度是垂直於面上計算而來的。然而，網格平均速度在一些計算中是必要的。在(式 5.9 中，網格速度是使用 Perot 的方法計算的：

$$V_i = \frac{1}{Ai} + \sum_{\kappa \in \mathrm{K}(i)} \triangle x_{i,\kappa} L_\kappa(u_\mathrm{N})\kappa = 0 \qquad \text{(式 5.9)}$$

式中$x_{i,\kappa}$是網格中心(i)的中心到邊緣中心(κ)的距離，L_κ是面(κ)的長度。因為這個方法是經過驗證的，因此所有的加速度項都可以在外部反覆運算開始之前計算出來而不需要更新。

四、 Shallow-Water Equations(SWE)淺水方程

SWE 表示體積和動量守恆，而 HEC-RAS 2D 中解 SWE 有兩種方法：歐拉-拉格朗日法（ELM-SWE）和歐拉法（EM-SWE）。除了處理加速度和壓力梯度的方式外，其餘方程式是相似的。使用有限體積近似對連續性方程進行離散化。在 ELM-SWE 方程式中，使用半拉格朗日方法來離散動量方程中的加速度項，雖然這種方法具有在長時間裡保持穩定的優點，但會產生過多的動量數值擴散，加上實驗室的規模需要一直保持動量守恆，導致模擬中產生不准確的結果。出於這個原因，提供了另一種歐拉 SWE 方程式 (EM-SWE)

動量方程是在面上計算的，但水面高程是在網格上計算的。這種交錯的網格使得正壓梯度非常適合利用簡單的兩點模板。此外，半隱式處理為(式 5.10)：

$$g\nabla \mathrm{H} \cdot n_k = g\frac{\partial {z_s}^{n+\theta}}{\partial N}$$

(式 5. 10)

因 $H^{n+\theta} = (1-\theta)H^n + \theta H^{n+1}$，由於隱式加權，正壓梯度由兩部分組成，一個具有權重θ的隱式項和一個具有權重 (1-θ) 的顯式項，使用相鄰網格水面高程計算水面的面法線梯度。在 EM-SWE 模型中，正壓梯度項的處理與 ELM-SWE 模型類似。該項式使用上述兩點模板在計算面上計算的，並半隱式地處理水位。該項式可以寫為(式 5. 11)

$$g\nabla z_S \cdot n_f = g\frac{h_f}{\overline{h}_f}\frac{\partial {z_s}^{n+\theta}}{\partial N} \qquad \text{(式 5. 11)}$$

EM-SWE 中的壓力梯度項與 ELM-SWE 的不同之處在於包含了 Kramer , Stelling (2008) 之後的比率。值得注意的是，由於 HEC-RAS 2D 使用亞網格測深，因此此處計算的該因子與 Kramer , Stelling (2008)中的計算方式不同，這種方式在 HEC-RAS 2D 中使用的效果較好。

第四節　模式相關參數設定

HEC-RAS 2D 在流量設定中，入流的部分可輸入定量流或變量流，出流的部分可設定出流寬度與坡度，模擬集水區內水文事件的水流分布情形。

一、 設計雨型

參考經濟部水利署歷年各延時降雨及頻率分析資料網站，以恆春 (467590)雨量站為主要依據，整理不同重現期下最大一日暴雨量，如

表 5-2，結果較接近對數皮爾遜三型分布。與保力溪集水區之設計降雨分配型態，如**錯誤! 找不到參照來源。**，設計不同重現期下的降雨事件。以 25 年重現期為例，將一日暴雨量 636.9mm 乘上雨型分布百分比，可得如**圖 5-12** 之設計之 25 年重現期降雨組體圖。

	重現期距(年)	1.11	2	5	10	20
一日暴雨	常態	139.4	318.5	435.6	496.8	547.4
	皮爾森第三類	150.6	305.1	429.7	503.0	567.9
	對數皮爾森第三類	165.9	288.6	419.9	512.9	606.4
	極端值第一類	165.0	295.6	418.6	500.0	578.1

表 5-2 恆春雨量站一日暴雨頻率分析成果表(單位:mm)

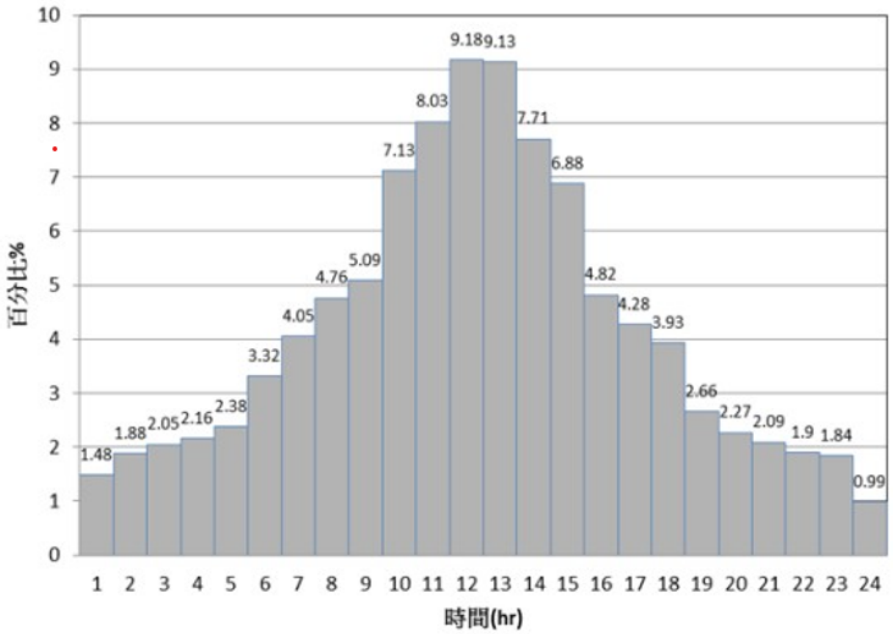


圖 5-11 恆春雨量站位序法雨型分布圖

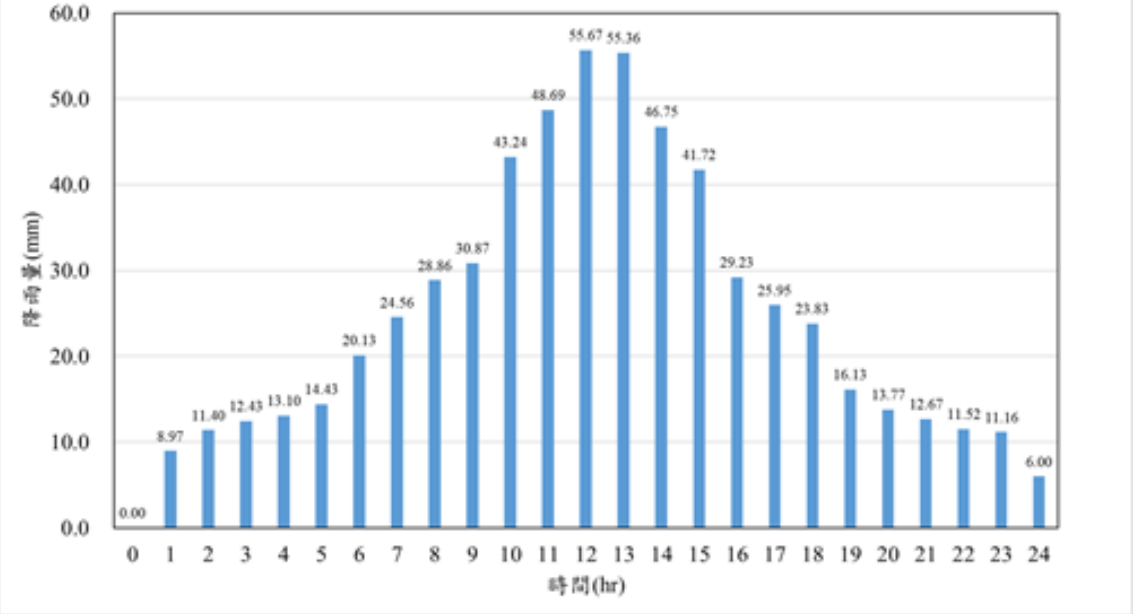


圖 5-12 恆春雨量站 25 年重現期設計雨型

二、 單位歷線計算

參考水土保持手冊(106 版)，調查篇中三角形單位歷線計算方法，採用「加州公路局公式」進行集流時間推估，如(式 5. 12，其公式說明如下：

$$T_c = \left(\frac{0.87L^3}{H}\right)^{0.385} \quad \text{(式 5. 12)}$$

式中，T_c 為集流時間(hr)；L 為集水區內排水路最上游點至控制點之水平距離(km)；H 為集水區內排水路最上游點至控制點之高程差(m)。

表 5-3 保力溪集流時間推估表

集水區	集水面積 A(ha)	流路長 L(m)	高程差 H(m)	集流時間 (min)
保力溪	97.68	20.9	280.3	3.63

依據美國水土保持局所提，在單位降雨延時內，單位超滲降雨 Re 所產生的三角形單位歷線，可依下列公式計算，並得到如**表 5-4** 之洪峰流量及**圖 5-13** 之單位歷線。

$$\mathrm{Qp} = 0.208 \times \mathrm{A} \times \left(\frac{\mathrm{Re}}{TP}\right)$$

$$\mathrm{TP} = \mathrm{D} / 2 + 0.6 \times \mathrm{TC}$$

$$\mathrm{Tb} = 2.67\mathrm{TP} \quad \text{(式 5. 13)}$$

式中，Qp：洪峰流量(cms)

A：流域面積(km^2)

Re：超滲降雨量(mm)

Tp：開始漲水至洪峰發生之時間(hr)

Tc：集流時間(hr)

D：單位降雨時間(hr)，須與雨型單位刻度一致

Tb：洪峰流量發生至歷線終端之時間(hr)

表 5-4 單位歷線洪峰流量推估表

集水區	A 集水面積(km2)	Re 超滲降雨量(mm)	D 單位降雨時間(hr)	Tp 洪峰發生時間(hr)	Tb 洪峰流量發生至歷線終端之時間(hr)	Qp 洪峰流量(cms)
保力溪	97.68	10	0.5	2.43	6.48	83.68

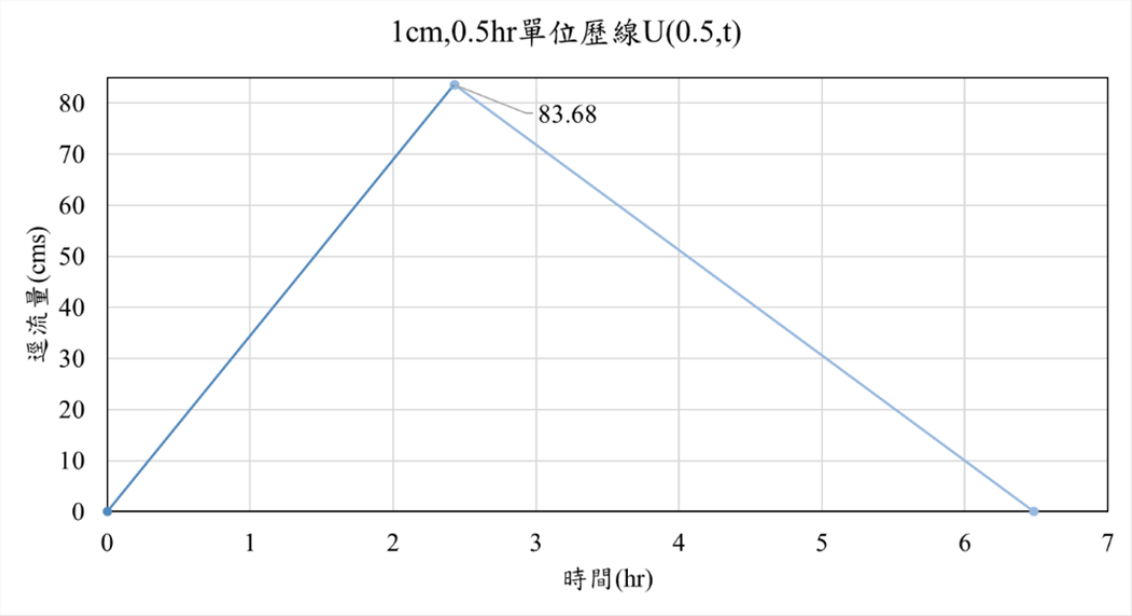


圖 5-13 保力溪集水區一公分超滲降雨量之單位歷線

三、 單位歷線疊加計算逕流歷線

利用上述步驟求得不同重現期之降雨行分布與單位歷線相乘疊加，可推算保力溪集水區各重現期洪峰流量，如**表 5-5**。集水區之逕流歷線，如下**圖 5-14**。

表 5-5 各重現期洪峰流量推估結果

集水區	集水面積(ha)	2 年	5 年	10 年	25 年	50 年	100 年
保力溪	97.68	612	890	1087	1285	1555	1768

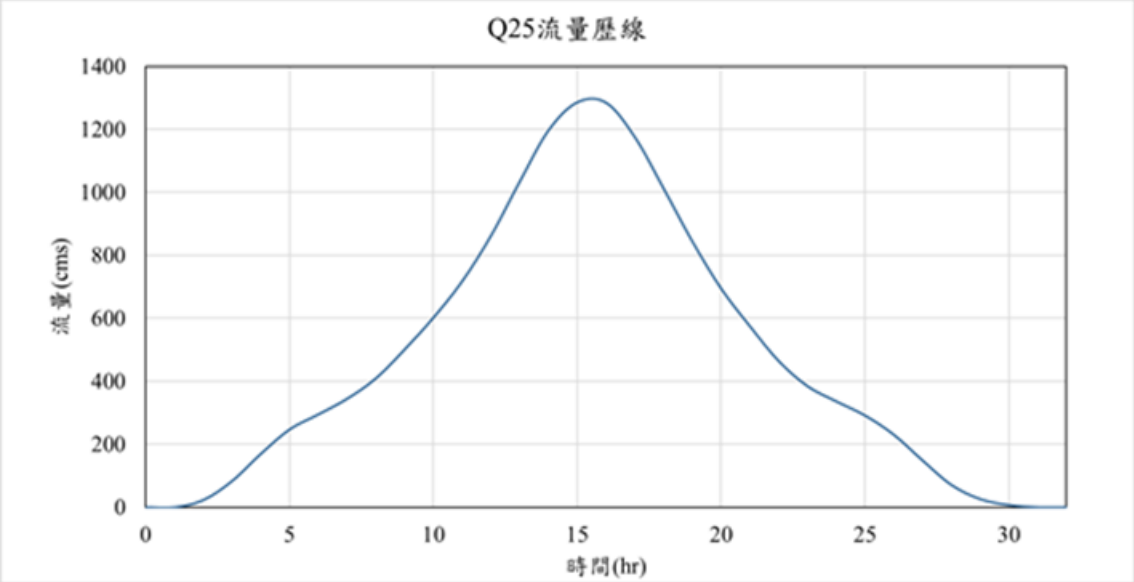


圖 5-14 保力溪重現期 25 年之流量歷線

接著藉由集水區流量模擬完整結果，在建置網格之入流口選取其對應之重現期距流量歷線，作為本計畫後續模擬之流量歷線。

四、 Q95 生態基流量設定

台灣河川棲地經營的最高原則是維護、或改善河川的環境，使之成為更適合台灣特有種或瀕臨絕種等原生種生物的生存、生長及繁衍的場所，因此如何訂定維護生態環境之放流量，並降低人為開

發對河川生態的影響及衝擊，為當前重要之議題。

維護生態環境之放流量，稱為該河川的生態基流量(ecological instream flows)，該流量值與生物的生態有密切關聯，必須滿足河川生物生存之最低需求，以此維持河川生態系統穩定與平衡所需之水量。

(一) 生態基流量評估

研究河川生態基流量至今有許多種方法。常見有生態基準流量、最低流量、維持流量、環境生態流量、水生基本流量、溪內正常流量、最小生態維護放水量、生態環境需水量、生態用水量和保留基流量等。上述各名詞與定義會有些許差異，但其目的都是維護河川生態系統的穩定與平衡的流量，稱為河川的生態基流量(Jowett 1997)。

一般計算河川生態基流量之方法為四大類，即歷史流量法、水理法、棲地法、經驗法，本節針對上述各法說明如下，並決定本計畫所選定之方法與生態基流量為河。

(二) 歷史流量法

一般採用河川年平均流量 MAF（Mean Annual Flow）之百分比、日流量延時曲線（daily flow duration curve）之某個時間百分率，來估算維護生態系統在保育標準下之流量。

(三) 水理法

水理評估法之基本理念為生態功能與某項水理參數具相對應之關係，例如呈現線性關係或某種正比例關係。

(四) 棲地法

評估方法為估算對象物種可利用的棲地面積或權重可使用棲地面積(Weighted Usable Area，簡稱 WUA)，隨流量增減而變化之關係

率定後，再按河川生態維護標準評選合適的可利用棲地面積數量，其對應之流量即為河川生態基流量。

(五) 經驗法

回顧河川生態基流量之設計方法，經驗法為目前簡單而常被採用之方法，如新英格蘭法、日本水力發電事業集水區面積法與彈性調整水權法。

(六) 選定生態基流量

保力溪由於水理資料較少，無法取得完整流量曲線資料，故將使用經驗法推估生態基流量，每 $100km^2$ 應有 0.55cms(荷蘭)，每 $100km^2$ 應有 0.1~0.3cms，此依據參考「濁水溪中上游生態基流量之推估與應用」，而由於台灣地理環境與日本較為相近，故計畫將參考日本之經驗法，即每 $100km^2$ 有 0.3cms。而保力溪集水區面積為 97.68 平方公里，經計算後本計畫 Q95 生態基流量為 0.293cms，將以此數據進行後續模擬。

五、 地文分析

HEC-RAS 2D 在輸砂沖刷模式設定中，可藉由設定土砂粒徑、土砂分布範圍、水流含砂量等參數，模擬不同類型之土砂狀況，亦可針對不同的土砂沖淤情境，選用適合之輸砂公式，模擬河道土砂之沖刷、搬運及堆積等狀態。

(一) 河床質坡度與資料

依照 HEC-RAS 2D 土砂粒徑通過百分比格式輸入，以 32mm、64mm、128mm、256mm、512mm 作為代表粒徑。同時，參考「101 保力溪坡地保育治理調查規劃報告書」河床質採樣成果求得之代表粒徑，並考量分析河段屬山區野溪性質，屬緩坡河道，雖溪床無大

量植生分布，但溪床大多屬礫石分布，故本計畫河道區域之糙度係數採用 0.037。

本模擬參考保力溪集水區範圍，高程分布於海拔 0 至 674 公尺之間，其中 0 至 100 公尺佔 57.24%，而平均高程為 128.46 公尺；坡度分布以一級坡（0-5%）為主，佔 52.3%，整體平均坡度 6.03%；坡向分布則以西向（西、西南及西北）為主，共 45.64%。參考計畫區內保力溪沖淤點位分布圖，以及坡度資料，求出竹社溪、大石板溪、厚殼溪、保力溪支流、東門溪及網紗溪匯流口，這五個入流點位之溪床坡度進行設定。

(二) 水流含砂量

HEC-RAS 2D 在水流含砂量可分為四種輸入方式，分別為 Rating curve、Sediment load series、Equilibrium load 以及 Clear water (no sediment)，以下分別說明。

Rating curve：

Rating curve 是以泥沙運移率(tons/day)或水中含砂濃度(mg/l)作為輸入，並可輸入不同粒徑土砂佔比，作為含砂水流入流之設定。

Sediment load series：

Sediment load series 以泥沙運移率(tons/day)作為輸入， 同時可輸入土砂粒徑分布。不同於 Rating curve，Sediment load series 可隨時間輸入不同泥沙運移率，使模擬狀況更精確。

Equilibrium load：

軟體自動依據流量大小和底床級配計算入流邊界的土砂輸送能力作為水流含砂量，在土砂資料不足，或是初次建模驗證時，能快速模擬出水流含砂量的變化。

Clear water (no sediment)：

Clear water (no sediment)指入流邊界處的水流含砂濃度為零，模擬清水流在河道內的土砂運移。

本計模擬保力溪系列固床工河段，為初次建模模擬，同時較缺乏完整之土砂含量資料，故在期中報告時選擇 Equilibrium load 作為水流含砂量輸入，但考量到與現地情況差異較大，故改為以試誤方式使用 Rating Curve 方法，藉由嘗試不同的泥砂運移率，分析不同的結果，並根據模擬結果選擇與現地情況最為相符之泥砂運移率，並作為後續模擬之設定。

(三) 輸砂公式選定

河床中泥砂的沖淤行為，造成河川形貌上的變化，且結構物調整後沖淤行為的變化為本計畫關注之重點。HEC-RAS 2D 模式中，輸砂公式的使用通常採用 Wu et al's、Van Rijn 及 Soulsby-van Rijn。河床載的運動機制有滾動(Rolling)、滑動(Sliding)、跳躍(Saltation)這三種型態。

Wu et al's：

此輸砂公式考量到非均勻輸砂的傳輸中，會因為粒徑不同而有相互隱藏及顯露的作用，因此加入隱顯參數(hiding and exposure factor)的應用。河床載部分，Wu et al's (2000)參考 Meyer-Peter and Mueller (1948)及 Engelund and Fredsoe (1976)提出無因次非均勻質河床載傳輸率，並透過大量實驗室、實測資料進行比較及調整後提出經驗公式。而懸浮載部分，Wu et al's(2000)結合 Bagnold (1966)的概念將底床泥砂傳輸率應用在河道傳輸功率中，並且結合現地資料比對，提出無因次懸浮載傳輸率公式。下**表 5-6** 為此公式之適用範

圍。

表 5-6 Wu et al’ s 適用範圍數據表

試驗參數	參數範圍
泥砂粒徑(mm)	0.01~250mm
流速(m/s)	0.086~28.7
能量坡降	1/13605 ~ 1/27
水深(m)	0.01~17.5m

Van Rijn：

此輸砂公式針對單一顆粒所受之外力，推導其運動軌跡方程式，且根據不同流況與運動機制進行計算，如跳躍(Saltation)高度，跳躍時水平分速度等參數，再進一步將輸砂率以無因次參數推出。下**表 5-7** 為此公式之適用範圍數據表。

表 5-7 Van Rijn 適用範圍數據表

試驗參數	參數範圍
泥砂粒徑(mm)	0.2~2
流場福祿數	<0.9
水深(m)	>0.1

Soulsby-van Rijn：

Soulsby-van Rijn 公式是將 van Rijn (1993) 泥沙輸送模型進行修正，並將臨界深度之平均流速與粒子間的隱藏、顯露作用校正因子相乘，進而推導出總輸砂率之公式於 1997 年提出。本公式之適用性問題，相關文獻中並無較明確之範圍限定。

本計畫試區為保力溪系列固床工河段，該河段之流速為 3~10 (m/s)，該區段土砂之多為 2~128mm，水深範圍介於 0.5~4 公尺。因此根據輸砂公式之適用範圍數據表，本次研究所選擇之輸砂公式為 Wu et al’s 所提出之輸砂方程式，該公式所適用之參數範圍符合本計畫之

試區需求，且 Wu et al's 方程式為各大水理輸砂分析軟體中常使用之輸砂方程式，包含 SRH-2D、CCHE2D 及本計畫所選用之 HEC-RAS 2D。

六、 模型建置設定

HEC-RAS 2D 建立河道沖刷之數值模擬，模型設定可區分為四個階段進行參數輸入與調整，而四個階段分別為基礎設定、幾何模型網格與邊界條件設定、人工構造物設定、輸出資料設定，以下為各階段之分述：

(一) 基礎設定：

該階段為指定一些基本參數，如單位設定、地理座標系統、DTM 圖層資料等，以使後續模擬具有一致性的標準。而此次數值模擬單位設置採用 SI 制，地理座標系統為橫麥卡托二度分帶 TM2（TWD97，中央經線 121 度），目前 DTM 圖資為內政部 107 年 1*1 公尺網格數值地形模型(DEM)資料。

(二) 幾何模型網格：

於 DTM 底圖上建立幾何模型網格，設定網格大小，HEC-RAS 2D 中網格代表計算單元，因此可在河道中心線、堤防、防砂壩等邊界區域、增加網格密度，以獲得更完整的模擬結果，同時也可在邊界處設定特徵線，提高品質增加模式穩定性。

本模擬網格範圍劃定在保力溪河段，包含五支系列固床工，以及上游一條支流匯流口共兩條入流口。網格大小以 4 公尺 x4 公尺為主，固床工周圍約 10 公尺之區域則採用 1 公尺 x1 公尺，加強土砂結果呈現，如下**圖 5-15** 為 DEM 圖資與網格劃定之結果，**圖 5-16** 為衛星空拍圖與網格範圍。



圖 5-15 DEM 圖資與網格繪製結果



圖 5-16 Google 衛星圖與網格繪製結果

(三)　邊界條件：

邊界條件設定位置如圖 5-15、圖 5-16 藍色線段所示，入流邊界條件選在系列固床工上游約 740 公尺，為變量入流(Unsteady flow analysis)，分別輸入兩個子集水區之 Q5、Q10、Q25、Q50、Q100、Q200 之洪峰流量歷線，如圖 5-17。出流邊界則選在固床工下游約 300 公尺處，並參考「101 保力溪坡地保育治理調查規劃報告書」，保力溪歷年地形剖面調查之結果，設定出流河床坡度為 0.01。

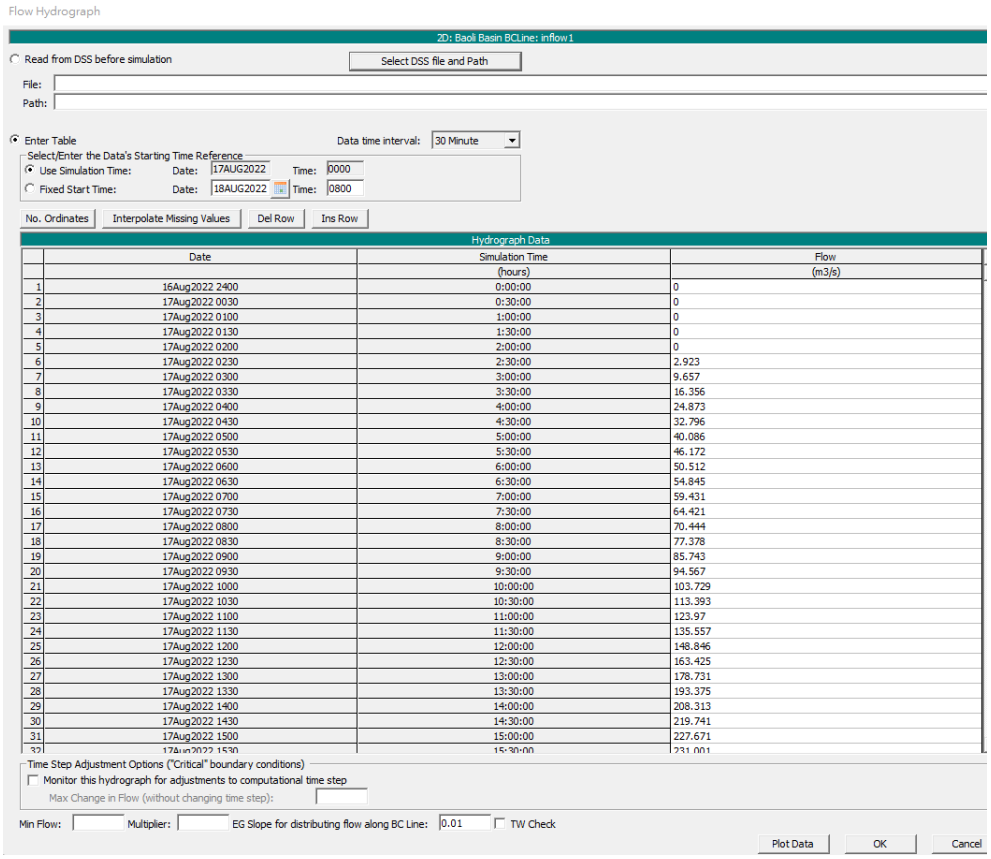


圖 5-17 邊界條件之變量流設定界面

(四)　人工構造物設定：

於 HEC-RAS 2D 模型中建立防砂壩、固床工、堤防等構造物，可透過新增地形圖層的方式，直接在 DEM 資料上進行編輯，如**圖 5-18**，並可自由輸入各段面高程數值，建構如開口壩、梳子壩、斜

坡堤防等較複雜之構造物，本計畫依照現地固床工尺寸建置傳統式固床工，如**圖 5-19**。

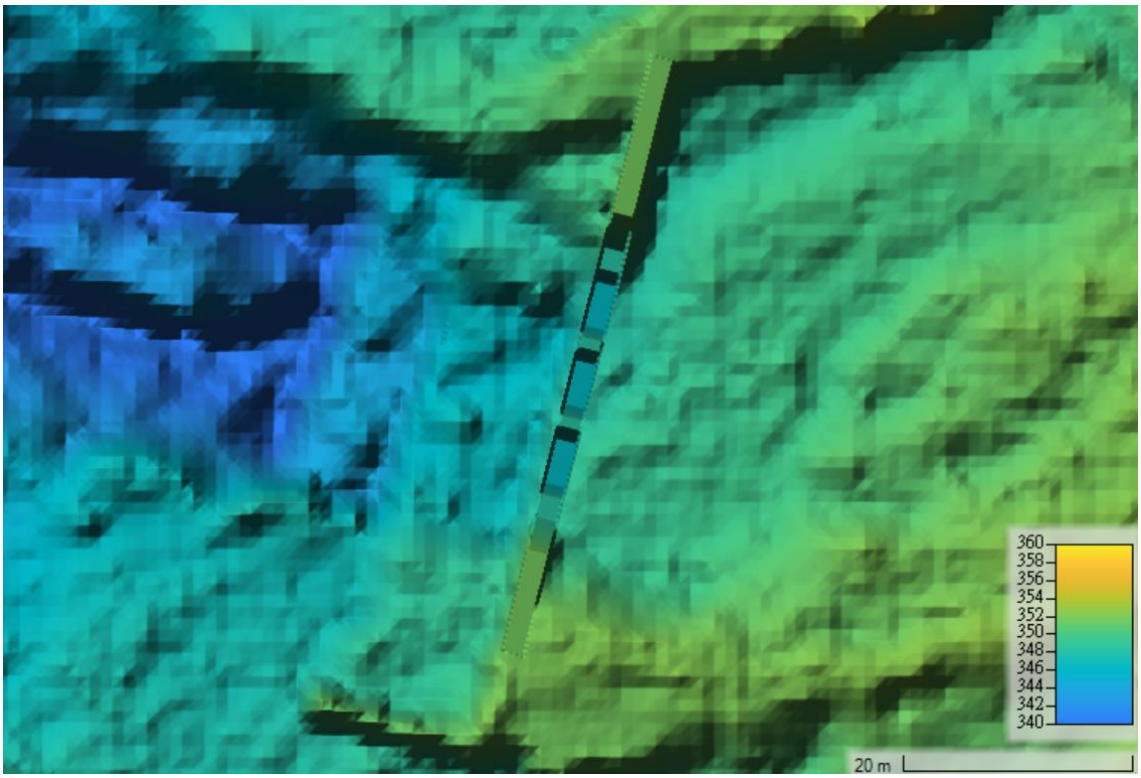


圖 5-18 於 DEM 模型上建立之防砂壩

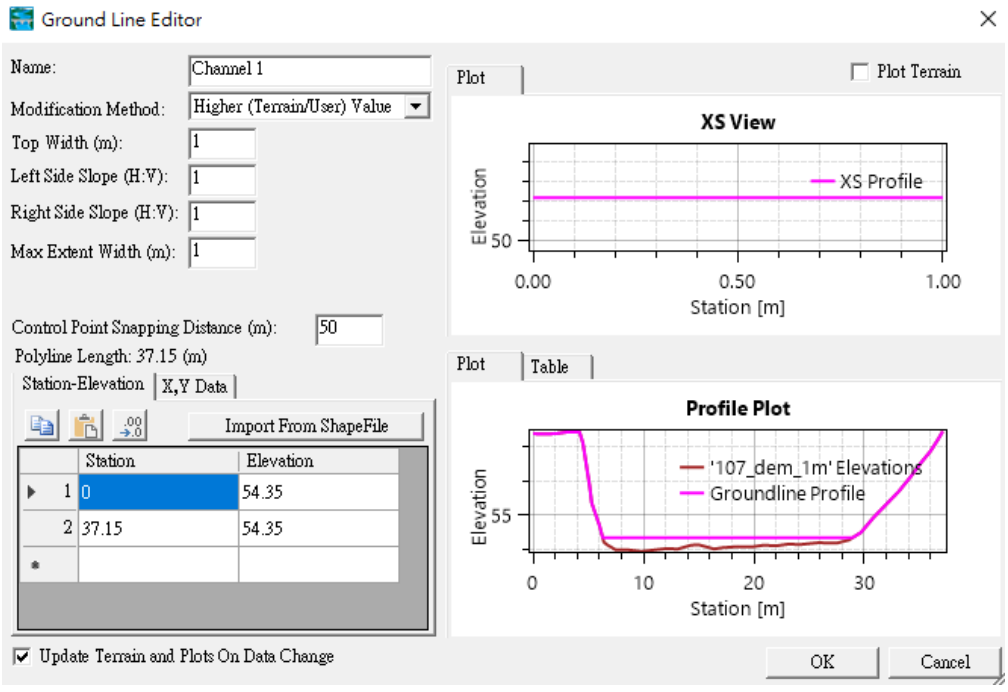


圖 5-19 固床工之剖面高程設定

(五)　輸出資料設定：

關於數值模擬結果輸出資料設定說明如下，首先選擇資料的計算時間(Computation interval)，由於保力溪模擬之流速結果約在 2-6m/s 之區間，如圖 5-20，為確保計算結果之連續性，計算時間不可小於水流通過網格(4 公尺 43 公尺)的時間，故設定每 0.2 秒產生一筆計算資料以利觀察其變化情形。結果呈現時間(Hydrograph/Mapping Output interval)則設定為 10 分鐘，即可大致呈現水流及輸砂之變化情形。其次在數據輸出資料性質上，可依據所需勾選泥砂濃度、水流水理資料等資料。



圖 5-20 保力溪模擬之流速結果

(六)　土砂運移之設定

與期中報告設定相比，本計畫在土砂運移方面有稍加調整，於

期中報告時，土砂入流條件為平衡條件，即土砂為一個固定的數值，並不會因流量情況產生變化，這可能使在低流量時產生較大之沖刷，或是高流量時產生較低之沖刷，此對現地狀況模擬是有出入的，因此本計畫查找 Hec-Ras 使用手冊，決定使用 Rating Curve 選項，此選項可藉由不同流量調整土砂量，為較符合現地之狀況，但由於保力溪並沒有相關資訊，因此本計畫花費大量時間在試誤設定數值之準確性，設定過少的泥砂運移率，會導致產生較嚴重之沖刷，反之過多的泥砂運移率會使淤積過多，因此本研究在試誤中，根據紀錄現地探勘之情形，在眾多模擬結果中選定一泥砂運移率為最符合現地情形，並將此設定為後續模擬之統一標準，本計畫將使用圖 5-21 之設定進行後續模擬。

	Flow (m3/s)	10	100	1000
	Total Load (tonnes/day)	7000	70000	7000000

圖 5-21 Rating Curve 設定圖

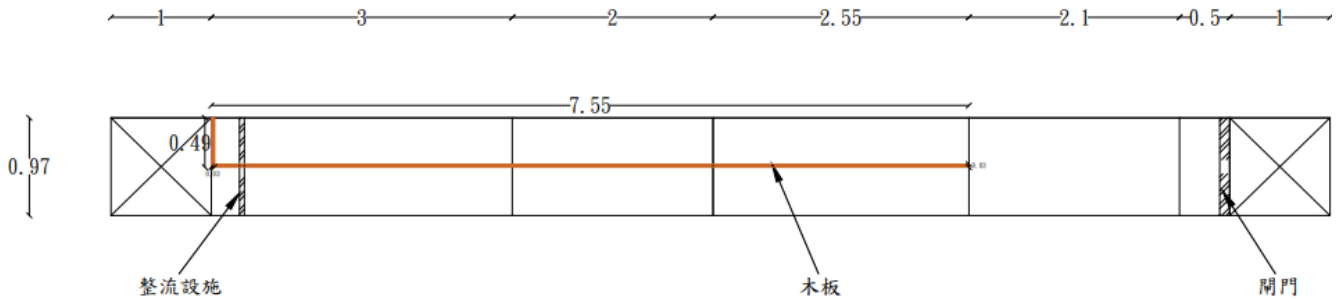
第六章　室內渠槽試驗

第一節　試驗佈置

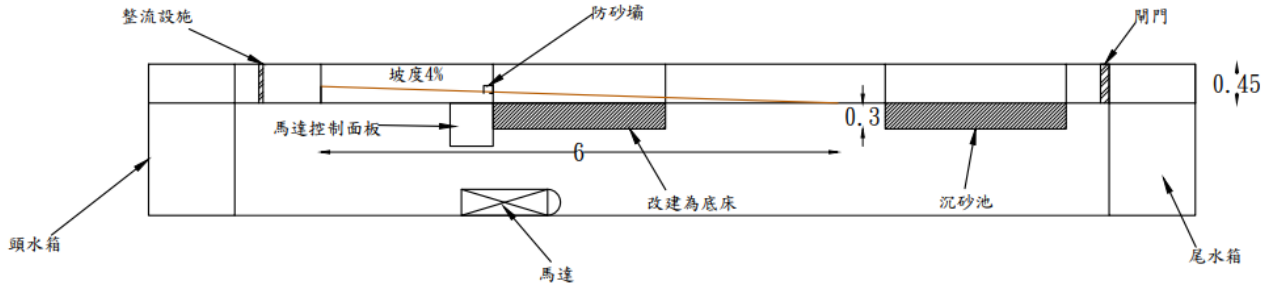
本團隊將利用臺灣大學水工試驗所的多功能渠槽，進行室內縮尺試驗，渠槽相關設計與資料如下：

一、 渠槽設備

本次試驗採用之多功能渠槽，其可分為頭水箱、尾水箱、試驗段、沉砂池等四部分，其相關配置圖如**圖 6-22** 所示，此渠槽為一循環式之渠道，透過渠槽底部馬達來進行控制流量，流量大小可透過渠槽側邊之馬達控制面板來進行調整，如**圖 6-23** 所示。



(A)俯視圖 (unit:m)



(B)側視圖 (unit:m)

圖 6-22 渠道相關配置圖



(A)離心式抽水泵浦



(B)頻率控制系統

圖 6-23 馬達設備圖

二、 試驗儀器

本團隊將採用相關儀器，進行實驗數據之量測，如下：

(一) 蜂巢整流設備

本次選用之渠槽雖為一循環式之渠槽，將尾水箱之水流抽取至頭水箱時，水流流出時常出現亂流且流況較複雜，為減少渦流之影響，故在試驗段上游設置一以直徑 1.2cm 粗型吸管製成之整流設備，如**圖 6-24**，使流場均勻，以利水流平順進入實驗區段。



圖 6-24 蜂巢整流設備架設圖

(二)尺規

用以確認淤積及沖刷深度，於實驗每一小時於第二固床工下游10cm 處用尺規工具確認土砂沖淤狀態，也可以作為三維建模準確性之驗證。

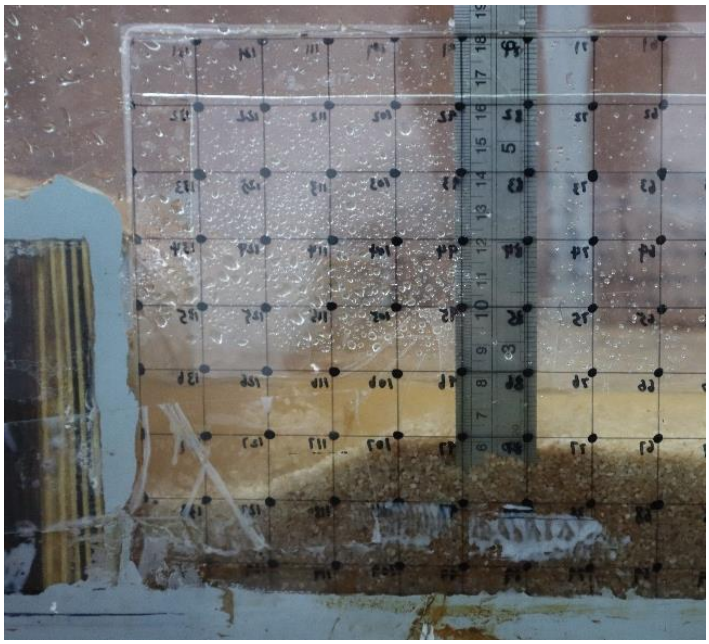


圖 6-25 尺規儀器圖

三、 Agisoft Metashape

本團隊將採用 Agisoft Metashape 進行建置 3D 立體模型，以分析該調整策略下防砂壩調整前後，針對本團隊主要設定之保全對象第二固床工下游的沖刷坑 DEM 變化。

Agisoft Metashape 為三維模型重建之軟體，透過強大的照片自動辨識校列功能，無須對目標物件進行編碼，或特定要求的拍攝條件，即可利用相片之重疊性，簡單且快速地建立具有色彩和紋理的 3D 模型。其主要操作流程如以下六個步驟：

1. 匯入照片 (Add photos)
2. 校正相片位置 (Align photos)
3. 於相片標記控制點，並依序輸入每一個控制點的座標值(x, y, z)
4. 相片位置重新校正 (Align photos)
5. 建立產生密集點雲圖 (Dense cloud)，並將不需要的部分刪除
6. 利用密集點雲圖及設置邊界條件，建立數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)

第二節　試驗內容

一、 目標設施選定

本計畫選取的集水區條件為已建造系列固床工的河道，並以此進行研究。其中保力溪為一平緩河道，且位於台灣南部，具有較為明顯之洪水、枯水期，在平緩的河道中，仍有許多系列固床工存在，不禁使人探究固床工的必要性，因此本計畫選定屏東保力溪中河道之五座系列固床工加以研究，經現地測量，系列固床工間距約為 20 公尺，因此縮尺研究範圍將為五座系列固床工，並以上下游延伸 20 公尺為實驗範圍。

二、 實驗縮尺比例

本團隊將利用臺灣大學水工試驗所的多功能渠槽，如圖 6-22 所示，進行縮尺寸模型試驗。本團隊參考保力溪固床工幾何條件，為了使縮尺寸模型完整呈現目標水土保持設施之形式，且考量多功能水槽之高度約 0.45 公尺，考慮到實驗可能較大流量時有水流溢出，因此留下 0.2 公尺作為保留空間，而現地固床工長度約 25~26 公尺，且水槽寬度約 0.97 公尺，為了能夠清楚模擬固床工構造物之土砂沖淤情形，故幾何縮尺比例將採用 1/25，作為本縮尺寸模型的設計依據，如固床工之寬度為 4 公分，試驗土砂之選擇也將依據現地河川粒徑分佈，進行等比例縮放、調配。透過 107 年保力溪 1*1 公尺 DEM，建立渠槽配置設計圖，調整出符合現地之河道波度。因本次水工模型試驗所探討之水流現象，其物理機制為以重力主導，故本次模型將採用福祿數相似，推估各實驗之參數值，如下：

(一) 長度縮尺

由於考量渠槽高度及上下游高差，故以渠槽高度扣掉保留高度(0.3 公尺)除以現地高差(15 公尺)作為本次長度縮尺之比例。

$$\frac{\mathrm{L_m}}{\mathrm{L_p}} = \frac{0.30}{15} \approx \frac{1}{50} = \lambda \quad \text{(式 6-1)}$$

上式中L_m：模型長度尺寸；L_p：原型長度尺寸；λ：幾何縮尺比例

(二) 速度縮尺

因採用福祿數相似原理，可推求速度縮尺比例(λ_v)，如下式：

$$F_{r_m} = F_{r_p}$$

$$\rightarrow \frac{v_m}{\sqrt{g_m L_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g_p L_p}} \quad ; \because g_m = g_p$$

$$\rightarrow \frac{v_m}{v_p} = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} = \lambda_v = \lambda^{1/2} \quad \text{(式 6-2)}$$

上式中v_m：模型速度尺寸；v_p：原型速度尺寸；g_m：模型重力加速度；g_p：原型重力加速度。

(三) 流量縮尺

流量透過速度(v)與斷面積(A)相乘而得，故透過已知速度縮尺比例(λ_v)與幾何縮尺比例(λ)進行縮尺計算流量縮尺比例(λ_Q)，如下式：

$$Q = Av \ ; \because A\text{為長度尺寸之平方，故}A = L^2$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{{L_m}^2 v_m}{{L_p}^2 v_p} = \lambda^2 \cdot \lambda_v = \lambda^{5/2} = \lambda_Q \quad \text{(式 6-3)}$$

上式中Q_m：模型流量尺寸；Q_p：原型流量尺寸

並依據第五章單位歷線疊加計算逕流歷線分析取得重現期距為Q_5年之平均流量(因實驗條件限制故無法以洪峰流量作試驗，改用實

驗條件許可之Q_5平均流量)，透過流量縮尺比例(λ_Q)換算出各縮尺平均流量，如表 6-8 所示。

表 6-8 現地平均流量與縮尺平均流量對照表

重現期距 (年)	平均流量 (cms)	縮尺平均流量 (cms)
Q_5 (保力溪)	46.53891	0.014892

(四) 時間縮尺

因採用福祿數相似原理，可推求時間縮尺比例(λ_t)，如下式：

$$F_{r_m} = F_{r_p}$$

$$\rightarrow \frac{v_m}{\sqrt{g_m L_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g_p L_p}} \quad ; \because g_m = g_p$$

$$\rightarrow \frac{v_m}{v_p} = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} = \lambda_v = \lambda^{1/2}$$

$$\rightarrow \frac{t_m}{t_p} = \frac{\frac{L_m}{v_m}}{\frac{L_p}{v_p}} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{v_p}{v_m} = \lambda \cdot \lambda^{-1/2} = \lambda^{1/2} = \lambda_t \qquad \textbf{(式 6-4)}$$

上式中v_m：模型速度尺寸；v_p：原型速度尺寸；g_m：模型重力加速度；g_p：原型重力加速度；t_m：縮尺實驗之流量基期；t_p：原型之流量基期

(五) 泥砂粒徑縮尺

泥砂粒徑可透過泥砂起動相似可以 Shields(1936)所建議之底床顆粒起動參數關係來建立，利用相似律原理，Shields 參數無因次臨界剪應力(τ_c^*)其在原型與模型應相同，故可得下式：

$$\begin{cases} \lambda_{\tau_c^*} = \dfrac{\lambda_{\tau_c}}{\lambda_{(\rho_s-\rho)}\lambda_g\lambda_d} = 1 \\ \tau_c^* = \dfrac{\tau_c}{(\rho_s-\rho)gd} \\ \tau_c = \rho g R S_f = \rho g y S_0 \end{cases}$$

$$\rightarrow \lambda_d = {\lambda_y}^2 {\lambda_L}^{-1} \lambda_{(\rho_s-\rho)} \lambda_\rho \qquad \textbf{(式 6-5)}$$

τ_c為泥砂起動之臨界剪力，d 為底床粒徑，ρ_s、ρ分別為水與泥砂顆粒之密度，y 為水深，S_0為渠道坡度S_0 = y/L。在等比條件下，在模型水流與泥砂顆粒之密度與原型相同情況，泥砂顆粒縮尺比例(λ_d)將與幾何縮尺比例相同。

$$\lambda_d = {\lambda_y}^2 {\lambda_L}^{-1} \lambda_{(\rho_s-\rho)} \lambda_\rho = \lambda \qquad \textbf{(式 6-6)}$$

依據表面粒徑分布曲線如圖 6-26 示採用內插法 $D_{12.5}$、$D_{37.5}$、$D_{62.5}$、$D_{87.5}$與泥砂顆粒縮尺比例(λ_d)可推算出泥砂粒徑之縮尺大小，如下表 6-9 所示，依縮尺比例計算後本團隊之實驗用砂選定為 2mm-4mm 大小之間的粒徑土砂。

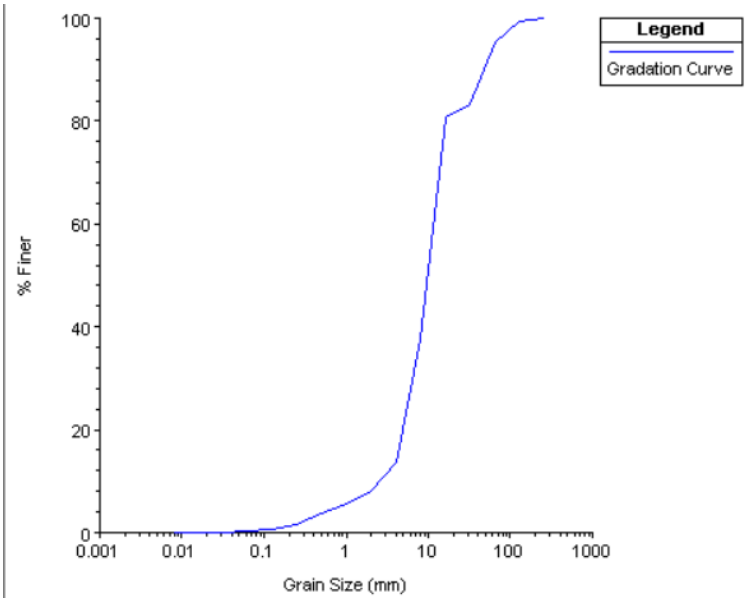


圖 6-26 表面粒徑分布曲線圖

表 6-9 現地泥砂粒徑分布

代表粒徑	泥砂粒徑 (m)	縮尺粒徑 (mm)
D12.5	3.541322	0.1416
D37.5	8	0.32
D62.5	12.61453	0.5
D87.5	43.14412	1.726

三、 實驗配置

(一) 流量

如圖 6-27 所示，為渠槽率定曲線，可透過計算出的Q_m，利用渠槽之率定曲線取得所需之馬達頻率，以作為後續實驗使用，而計算結果如下表 6-10 試驗流量與馬達赫茲對應表所示，因實驗條件限制無法模擬Q_5之洪峰流量故採用Q_5之平均流量，經縮尺比例計算後Q_{50}之縮尺流量為 0.014892cms 依馬達率定曲線換算後為 24.8Hz。

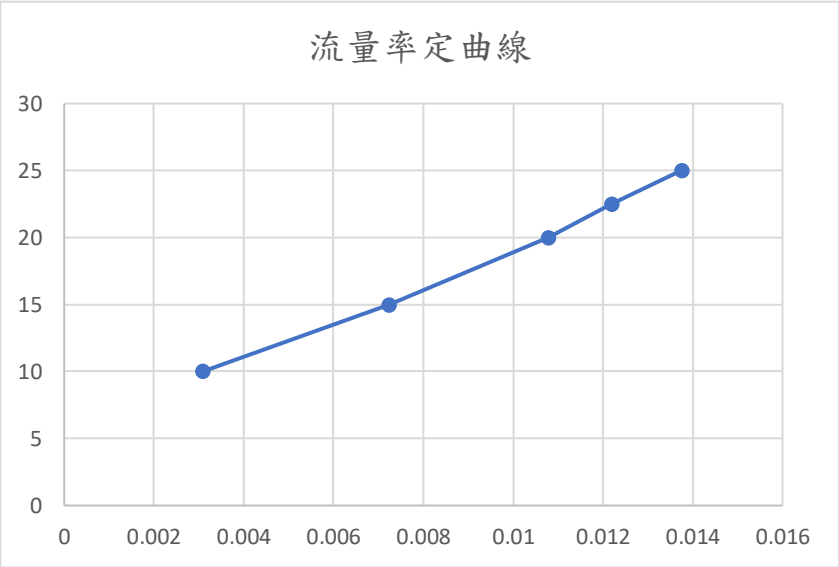


圖 6-27 多功能渠槽流量與馬達頻率率定曲線圖

表 6-10 試驗流量與馬達赫茲對應表

縮尺流量(cms)	馬達(Hz)
0.00308374	10
0.00723691	15
0.010708679	20
0.12191201	22.5
0.0149326	25

(二) 實驗模型尺寸

本實驗採用縮尺比例(λ)為 1/25 進行縮尺試驗，將搭配保力溪現

地尺寸測量，製作五根壓克力縮尺防砂壩模型如圖 6-28，構造物長、寬、高分別為 97cm、4cm、12.4cm，而模型高度則還有 11.6cm、10.8cm、10cm 以及 9.2cm 並且由木工製作底面填平實驗渠槽中第一沉砂池的部分，尺寸長、寬、高分別為 195cm、95cm、29cm，結果如圖 6-29 所示。



圖 6-28 壓克力模型圖



圖 6-29 木工底床圖

由於 107 年保力溪 1*1 公尺 DEM，顯示五根系列固床工處坡度為 1%，故藉由製作不同高度之固床工模型，將實驗渠槽置砂，形

成一坡度為 1%之土砂坡面，結果如圖 6-30 所示。



圖 6-30 土砂坡面完工圖

(三) 粒徑

依據保力溪表面粒徑分布曲線圖 6-26 所示，採用內插法，$D_{12.5}$、$D_{37.5}$、$D_{62.5}$、$D_{87.5}$ 與泥砂顆粒縮尺比例(λ_d)可推算出泥砂粒徑之縮尺大小。由表 6-9 可知本實驗之粒徑介於 0.1mm 至 2mm，本計畫將使用 1 號砂粒徑約 1~2mm，2.5 號砂粒徑約 0.425~0.85mm 與 3 號砂粒徑約 0.1~0.6mm，本計畫將混和三種砂進行試驗。

四、 試驗步驟與結果

本計畫利用實驗渠槽進行縮尺試驗，以 Q5 重現期縮尺後之流量進行實驗，設定條件為五根固床工皆未調整，即五根皆為傳統式固床工，並將結果與數值模擬進行比較，互相驗證，以下將詳細說明。

(一) 佈置土砂

本步驟為建置實驗設計之土砂坡面，結果如圖 6-30 所示，並利用拍照設備拍攝設置好之土砂坡面，並將照片匯入 Metashape，可得到初始坡面之 DEM，結果如圖 6-31 所示，圖片左方為上游側，右方為下游側，本試驗將從左方上游側開始放水，此圖將供後續分析使用。

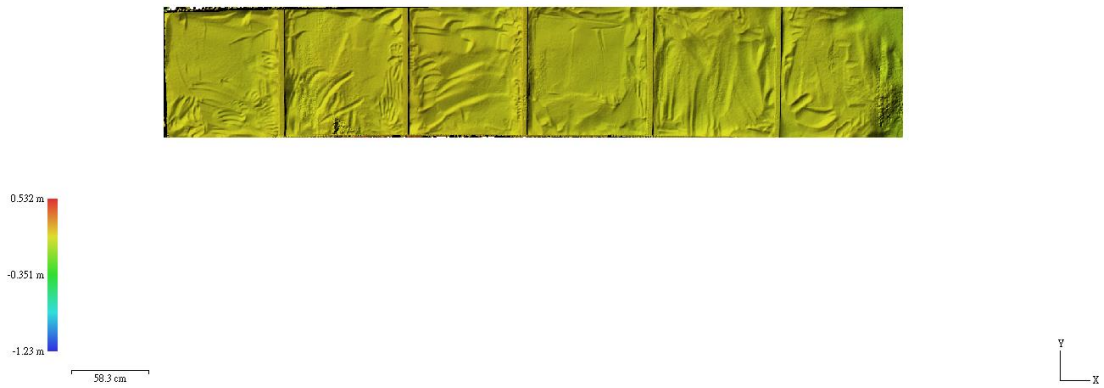


圖 6-31 初始坡面 DEM 圖

(二) 開始試驗

將渠槽馬達頻率調整為設定之頻率，並開始放水，經由圖中本計畫製作之整流器，達到穩定水流，待試驗時間結束，即可開始測量與分析，過程如圖 6-32。

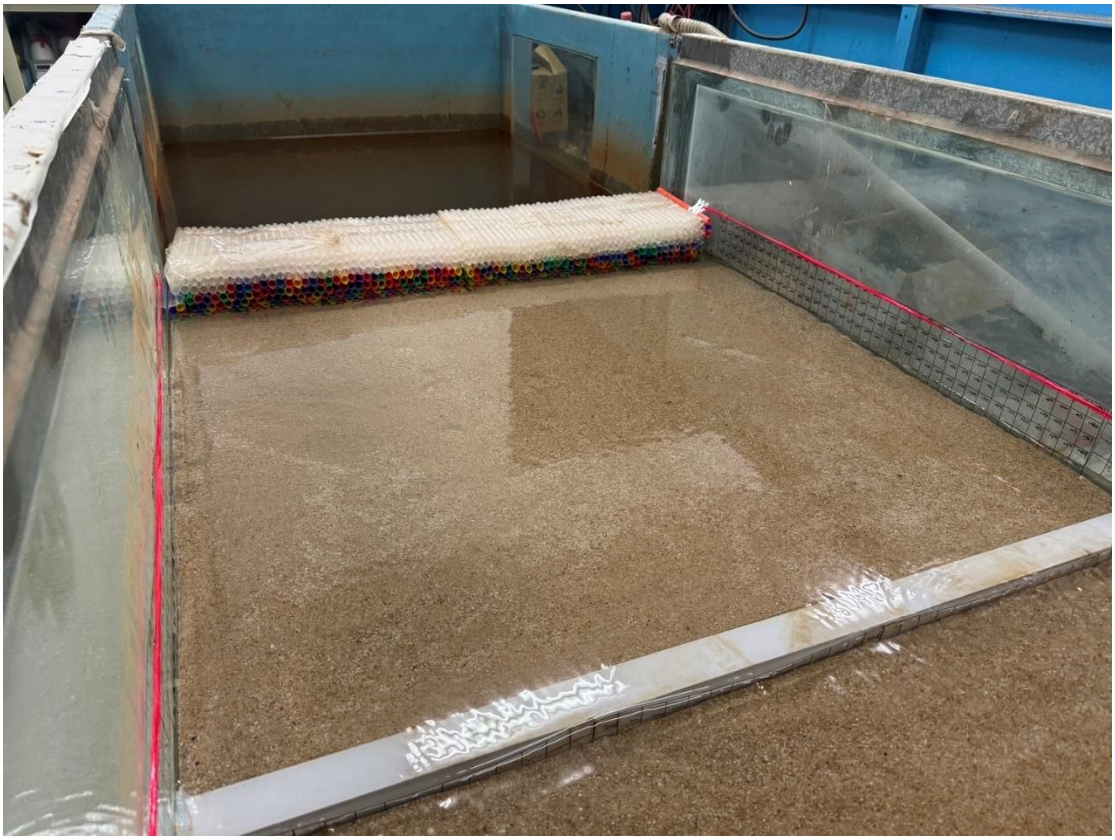


圖 6-32 實驗過程

(三) 試驗結果

待試驗時間結束後，進行試驗結果拍攝，並將拍攝照片匯入 Metashape，可得沖刷後之 DEM 如圖 6-33，圖中左方為上游側，右方為下游側，其後與圖 6-31，兩張圖片匯入 Metlab 進行操作，Metlab 可將兩張相同大小之 DEM 圖進行相減，藉由此步驟可看出試驗結束後之沖淤情形，結果如圖 6-33，圖片中紅色代表淤積，藍色代表沖刷，可看出與數值模擬結果相同，於最下游固床工皆產生較嚴重之沖刷，而其上游皆產生較為明顯之淤積。

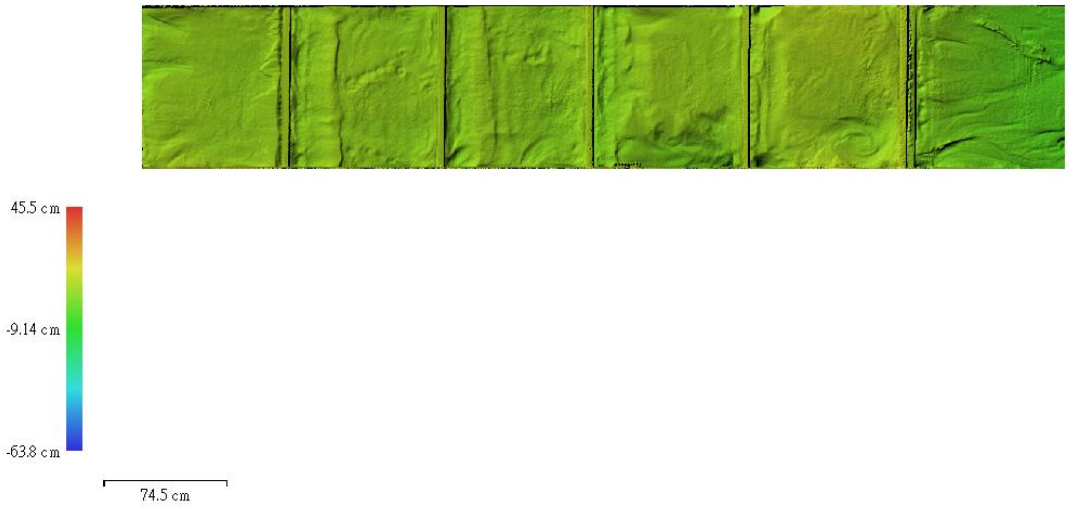


圖 6-33 試驗沖刷後 DEM 圖

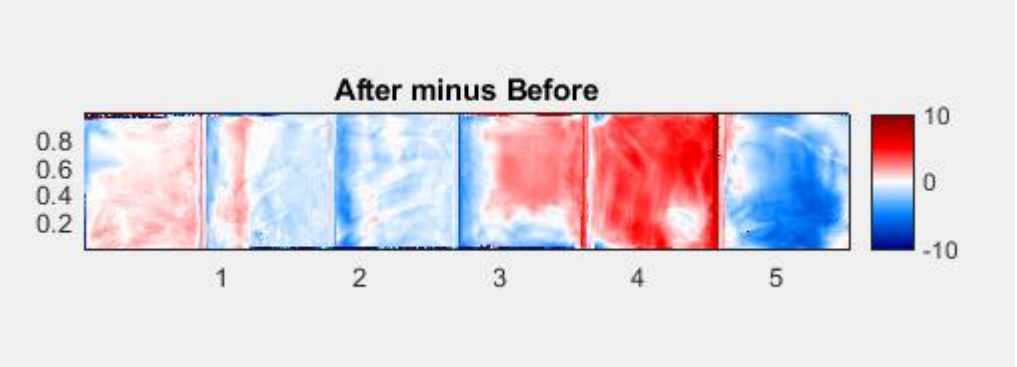


圖 6-34 試驗結果之沖淤圖

(四) 進行分析

本計畫將兩張 DEM 圖匯入 Metlab 得出試驗之土砂沖淤圖，並觀測沖淤現象，與模擬結果相符，初步判斷數值模擬是有一定之準確度。除了匯入 Metlab 外，為了將數值量化，本計畫亦會將兩張 DEM 圖匯入 ArcGis 中，進行兩者相減，並計算沖刷與淤積之體積，如圖 6-35 所示，經由計算後沖刷為 0.052685 立方公尺，淤積為 0.025 立方公尺，與數值模擬結果相比沖刷為 705 立方公尺，淤積為 219 立方公尺，經縮尺比例後數值模擬結果為沖刷 0.04512 立方公尺，淤積為 0.014016，誤差約為 11%。

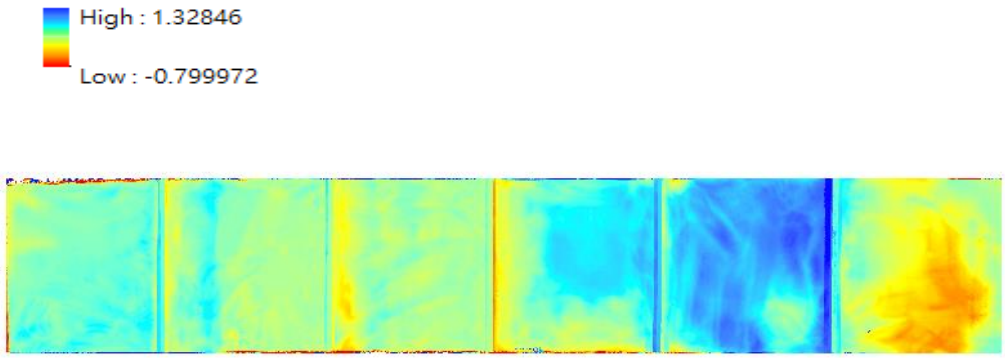


圖 6-35 沖淤體積分布圖

(五) 結論與分析

經本計畫驗證後縮尺試驗與數值模擬為 11%，此誤差可能原因為本試驗為清水流，容易使土砂沖刷更為嚴重，但由於流量較小，易使淤積更為明顯，從試驗過程中可以觀察出，在穩定水流產生後，上游的固床工，尤其為第一、第二、第三根固床工，因水流穩定，且固床工間距不大，會產生十分穩定之流況，不易產生較大之沖刷或淤積，此情形與數值模擬相同，較為劇烈之影響皆發生在最下游固床工上下游，本計畫亦發現，會使最下游固床工產生劇烈變化之原因為，系列固床工設計會使水流流過固床工後因碰到下一根下游之固床工，導致水流有變緩之趨勢，使得流況變為穩定，此情形也呼應固床工之功能，即為穩定流況與坡度，但由於最下游固床工後方並未有下一個水工構造物抵擋，使得流速無法減緩，使刷沖更為嚴重，此問題亦可加深思考，現今固床工間距是否有如此密集之重要，若加大間距，使固床工保護範圍更廣，但固床工數量不變，或許不只可以改善現今因固床工產生之河道斷層，亦可確保河道生物不會因過於密集之固床工，產生生存問題，此為日後可延伸探討之議題。

第七章　固床工佈置之數值模擬

本章節將針對第四章所提及固床工拆除方案之模擬結果進行討論與分析，本計畫所模擬之重現期距為 Q95 與 Q5，詳細內容將分別透過下述各章節進行更加完整之說明。

第一節　固床工拆除方案-Q5

第一節為五年重現期之固床工拆除方案數值模擬詳細說明。固床工最主要功用為調整坡度，達到計畫坡度，但其本身之設計尺寸在面對較大重現期之降雨時，並不能保證穩定發揮構造物之功用，因此本計畫認為五年重現期用來判斷整治固床工是否有效最為適當。

一、 Q5 調整前之模擬結果

本段將說明固床工調整前之模擬結果，模擬條件為五根系列固床工皆沒有進行變動，固床工尺寸為長約 25 公尺、寬約 80~90 公分、高度約為 30 公分，五根皆為傳統型固床工，在此條件下進行五年重現期降雨之相關結果，本段將描述其內容。

(一)　最大流速及水深

固床工是否有成功模擬為進行分析前十分重要之議題，本計畫透過觀測最大流速及水深圖來判斷系列固床工是否有成功模擬，最大流速及水深圖如圖 7-36 Q5 最大流速圖如圖 7-36、圖 7-37，左方為上游側，右方為下游側，右下方為各圖之比例尺。由最大流速圖中可看到在固床工附近有明顯之流速變化，判斷為水流經過構造物後所產生之投潭水流，導致流速有較為明顯之增加，而水流抵達

固床工後亦會有阻擋效果，因此固床工上游側也會有較為明顯之流速變化。由最大水深圖中可以看出，在固床工位置處因水流流經構造物頂部，使該位置所量測之水深較小，此現象可以藉由最大水深圖中固床工位置顏色較淺來加以判斷，而投潭水流會產生較大的動能與位能導致產生較深之沖刷坑，圖中可以看出在固床工下游側會有較深之顏色，因此從最大流速與水深圖中可以判斷五根系列固床工是有成功被模擬出來的。

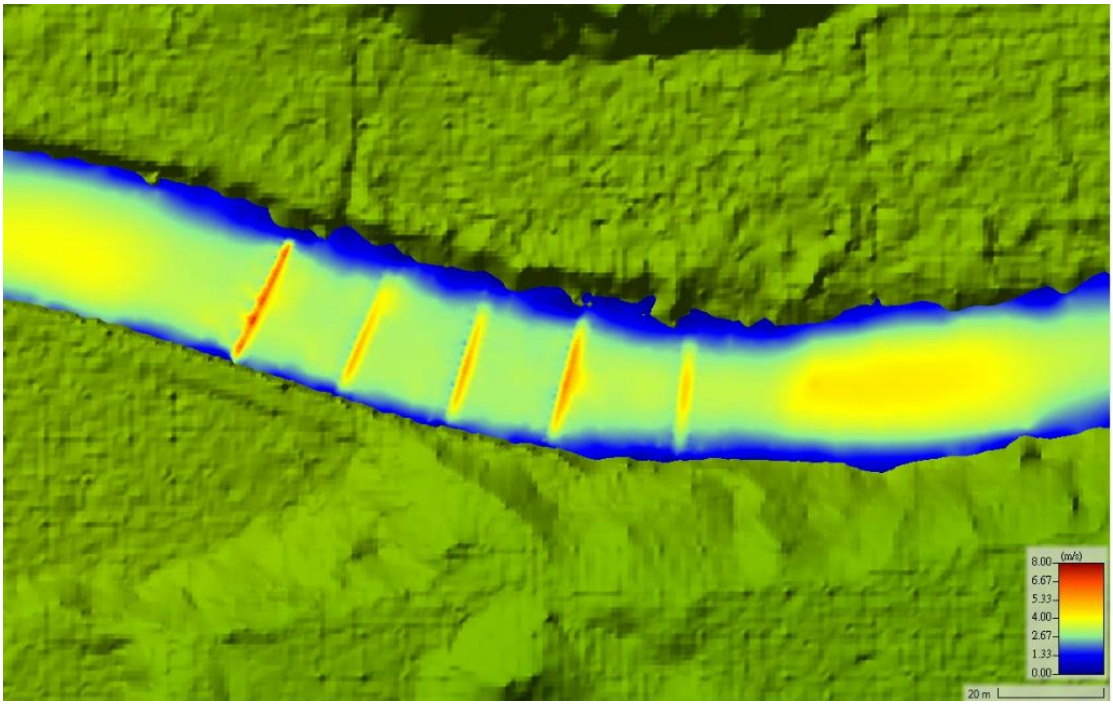


圖 7-36 Q5 最大流速圖

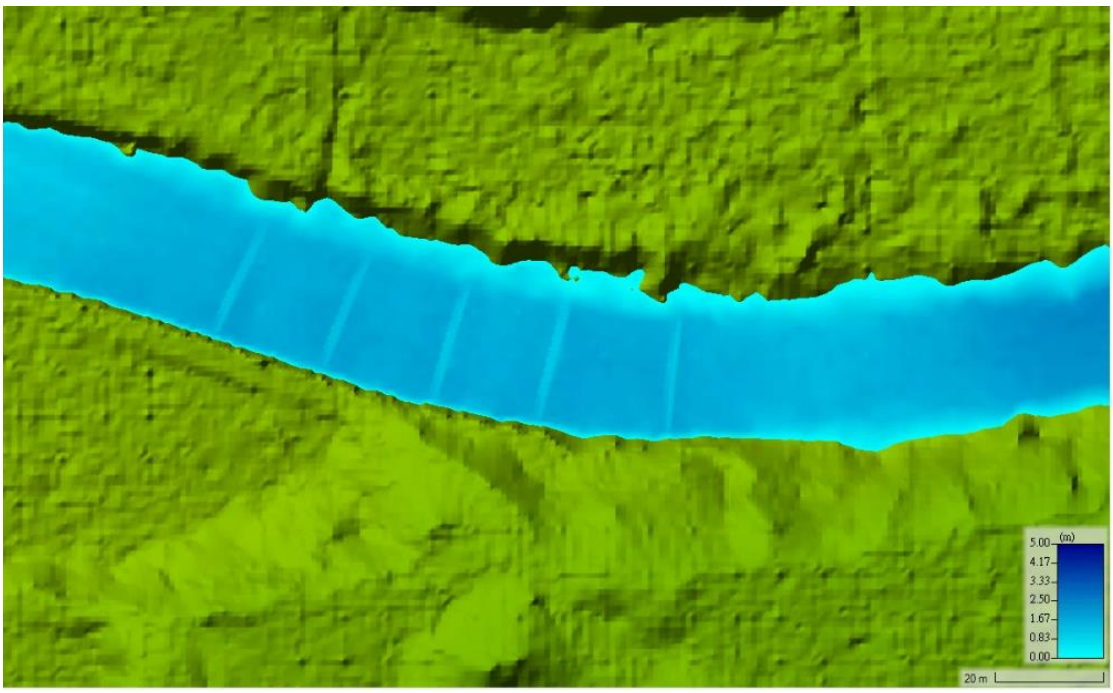


圖 7-37 Q5 最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

沖刷深度為本計畫判斷是否拆除之重要依據，降雨後河道水流流經固床工所產生之投潭水流為造成趾部沖刷之主要原因，其現象在最下游固床工趾部最為嚴重，因此本計畫將分析最下游固床工趾部位置之沖刷深度。土砂沖淤圖如圖 7-38，圖中左方為上游側，右方為下游側，右下方為比例尺，圖中紅色代表降雨後河道沖刷，藍色代表河道淤積。由圖中可判斷在最下游固床工之沖刷最為嚴重，可能原因為水流經過上游四根固床工影響，水流中已無足夠懸浮土砂，導致水流近似於清水流，從而導致沖刷較為嚴重，或是地勢影響導致此位置水流流速較快，因而較容易產生嚴重之沖刷現象。本計畫藉由分析最下游固床工趾部各網格之沖刷數據，進行平均得出最下游固床工之沖刷深度為 1.69 公尺，並令為M_0將以此數據作為依據供後續拆除方案使用。



圖 7-38 Q5 土砂沖淤圖

(三) 淹水水深

依照現地情形，河道右側為植生坡岸，左側則為人工堤岸，本計畫認為右側產生淹水災害可能性大於左側，因此本計畫將最上游之第一及第二固床工河道右側區域選定為淹水潛勢區域如圖 4-7，選定依據為此區域在其他重現期降雨後並沒有發生淹水情形，因此判斷此區域為淹水潛勢區域，並將著重討論此處之淹水水深，並透過選定區域後，透過最大水深圖，將區域內網格數據加總得到總水深 11.48 公尺，此數據將供後續拆除方案使用。

(四) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，因此本模擬所產生之土砂運移量即為V_0整治前土砂運移量，計算方式為透過圖 4-8 所示之範圍結合圖 7-38 土砂淤積圖，由於土砂淤積圖之數據為降雨後河道地形之高程變化，因此只要將範圍內之數據加總並乘上 DEM 底圖網格面積(1 公尺×1 公尺)，即可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量，結果如圖 7-39 所示，為沖刷 873.018 立方公尺，而式 4.1

中合理土砂運移量V_r在 Q5 重現期之值為沖刷 742 立方公尺，兩種數據將供後續模擬使用。

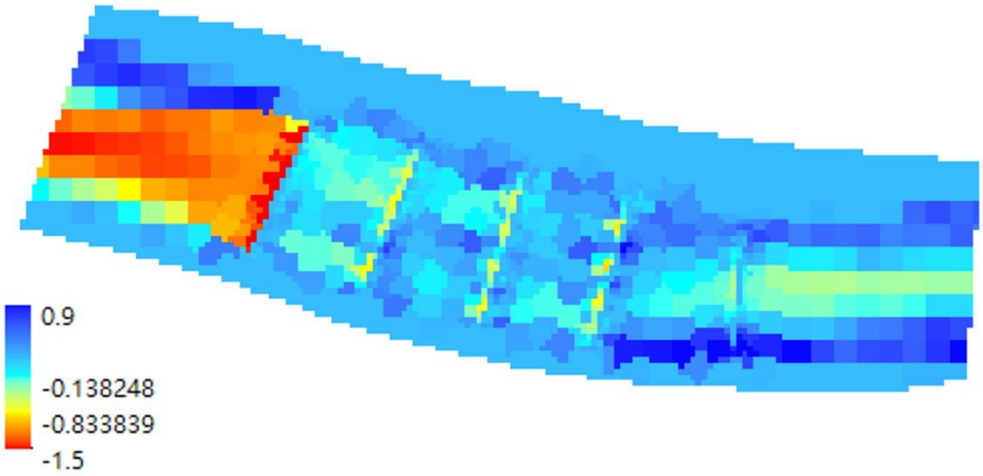


圖 7-39 Q5 土砂運移量

二、 Q5 最上游固床工拆除之模擬結果

由**圖 4-6** 中可知，最先進行為最上游固床工之拆除，本段將詳細說明拆除後其相關水理結果。

(一) 最大流速及水深

本計畫在判斷是否成功模擬固床工之判斷依據為最大流速與水深圖，因拆除最上游固床工後，在網格上僅有四根固床工，因此如圖 7-40 所示，圖中僅有四處有明顯流速變化，但可觀察到在第二根固床工位置流速變化較不明顯，可能原因為此處地勢本身較為平坦，坡度僅有 0.9%，因此水流較為緩慢，在整治前因有最上游固床工所引發之投潭效應加速了水流流速，因此帶動了第二根固床工較為明顯之流速變化。在圖 7-41 所示，四根固床工因水流流經頂部，使水深較低。因而在圖中顏色較淺，而因應坡度之影響，判斷此處流速較為緩慢，因而使第二根固床工並沒有產生明顯之水深變化，僅有在構造物位置處有較淺之顏色，但經由兩張圖相互驗證，本計畫判斷四根固床工皆有被成功模擬。

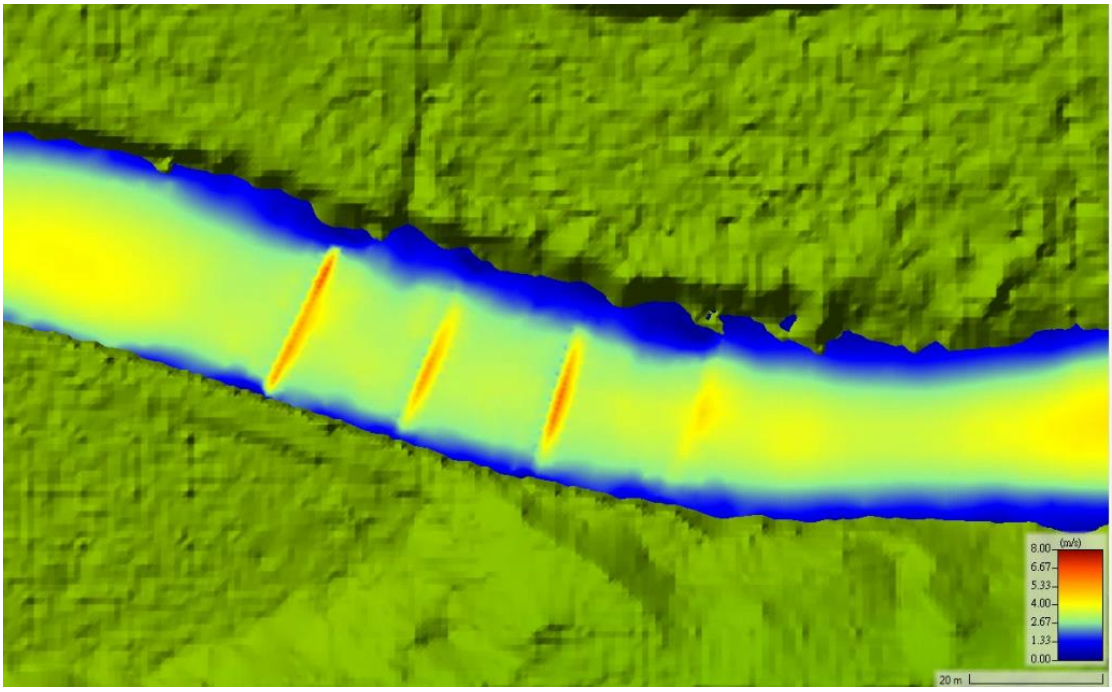


圖 7-40 Q5 最上游固床工移除之最大流速圖

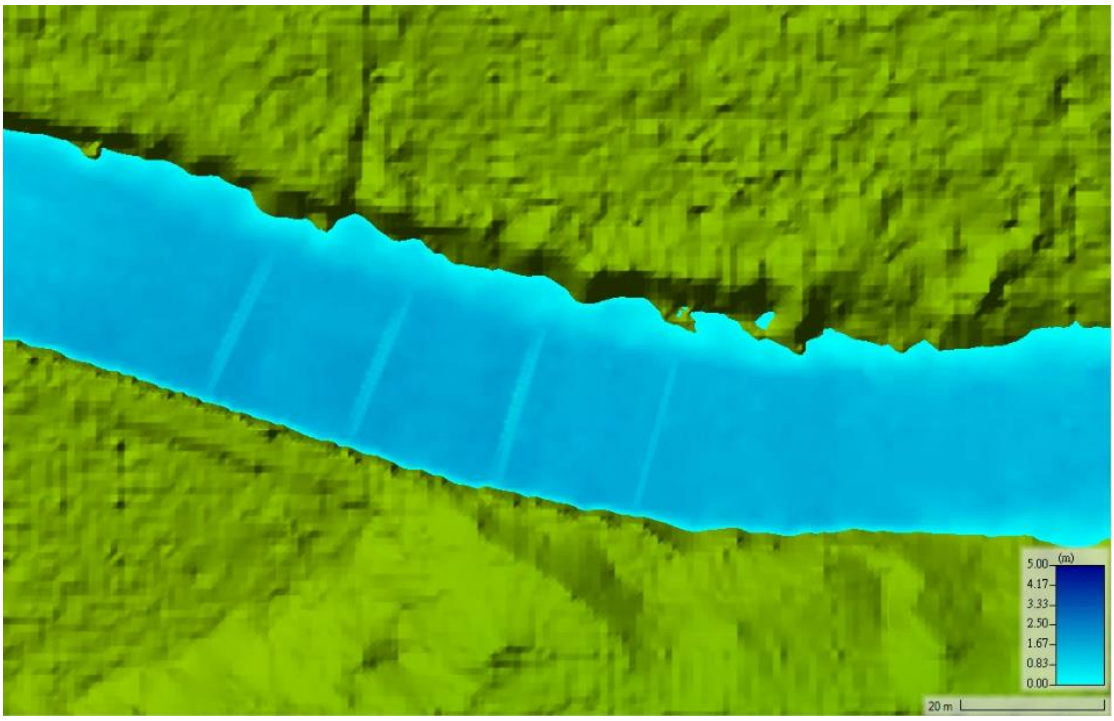


圖 7-41 Q5 最上游固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

根據本計畫制定之判斷標準，將透過土砂淤積圖，分析最下游固床工趾部之沖刷深度，結果如圖 7-42 所示，在最下游固床工趾部計算各網格數據，進行平均得出為 1.28 公尺，並將此數據令為M_1，根據判斷標準$M_n \leq M_0$(此處n = 1)，結合前段所得整治前沖刷深度M_0為 1.69 公尺，本計畫認為在沖刷深度方面，拆除最上游固床工是有改善沖刷之效果，可能原因為最上游固床工拆除後，對整體水流流速有減緩之效果，因此對下游衝擊減少，使沖刷深度降低，分析結果此條件為通過。

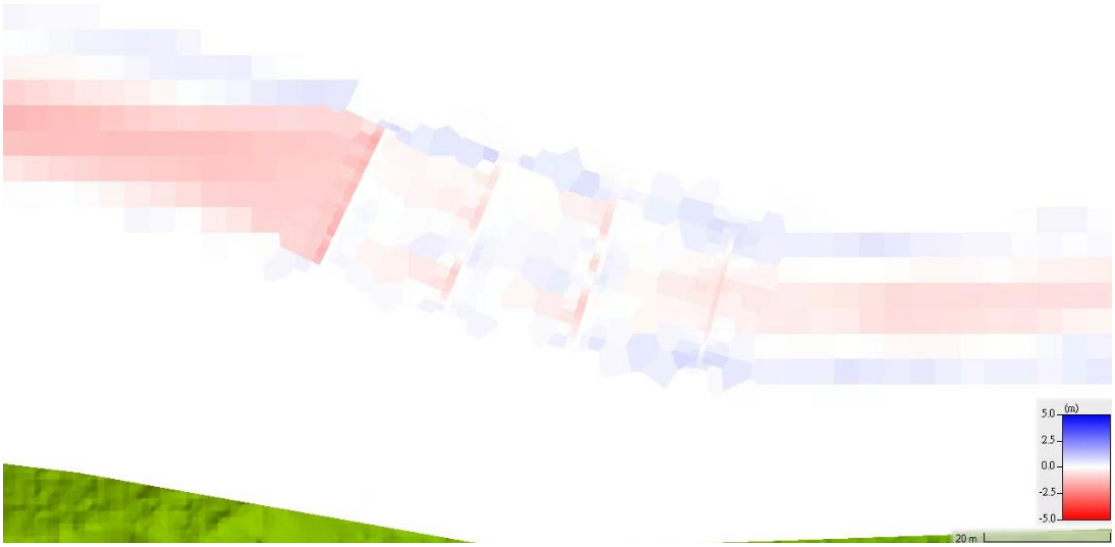


圖 7-42 Q5 最上游固床工拆除之土砂沖淤圖

(三) 淹水水深

本計畫將最上游之第一及第二固床工河道右側區域選定為淹水潛勢區域如圖 4-7，將拆除最上游固床工之最大水深圖結合選定範圍，計算選定範圍內各網格之水深，並進行加總，得出總水深為，且由圖 7-41、圖 7-37 兩者在選定區域內觀察可發現，拆除後的淹水範圍有明顯減少，可能原因為水流流速降低，因而降低淹水情形，分析結果此條件為通過。

(四) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為沖刷 873.018 立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值(此處n = 1)，透過圖 4-8 所示之範圍結合圖 7-43 土砂運移量圖，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為沖刷 699 立方公尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為 1.66 並非為 1，本計畫設定之標準V_r為 1，若大於 1 則代表此方案中會產生過多之土砂淤積，而在拆除最上游固床工後淤積量的提升，可能原因為河流在上游處流速降

低，且從圖 7-42 可觀察到，由於流速降低，在河道兩岸會產生明顯淤積，進而有引發災害之疑慮，因此分析結果此條件未通過。縱使在沖刷深度與淹水水深有改善，但整根拆除固床工需要謹慎評估，因此任一條件並未滿足情況下，則不能進行拆除，故最上游固床工無法拆除。

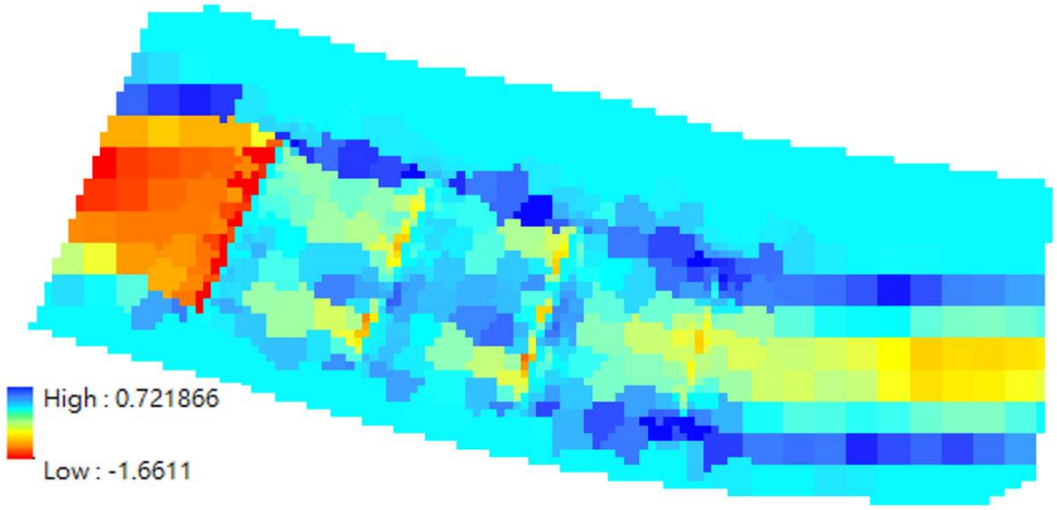


圖 7-43 Q5 拆除最上游固床工之土砂運移量

三、 Q5 第二根固床工拆除之模擬結果

接續上一段結果，並配合拆除方案流程圖，由於最上游固床工無法拆除，因此根據流程圖，本計畫將進行第二根固床工拆除之模擬，本段將詳細說明第二根固床工拆除之水理相關結果。

(一) 最大流速及水深

最大流速及水深圖為本計畫判斷是否成功模擬固床工之依據，由於並未拆除最上游固床工，只拆除第二根固床工，故本次模擬系列固床工依舊為 4 根，而如圖 7-44 所示最大流速方面在第一及第三與最下游固床工皆有明顯之流速變化，但在第四根卻沒有較為明顯之改變，推測可能原因為地形影響，本研究發現在地形中，第四根因鄰近最下游固床工，故其結果常常會因最下游固床工反應過激烈導致其反應有類似被稀釋的情形發生，因此在第四根固床工是否有被成功模擬須結合圖 7-45 最大水深圖，由圖中可觀察出四根固床工位置處皆有明顯較淺之水深，因此本計畫判斷，結合水深圖以及流速圖，四根系列固床工皆有被成功模擬，可進行後續拆除之分析。

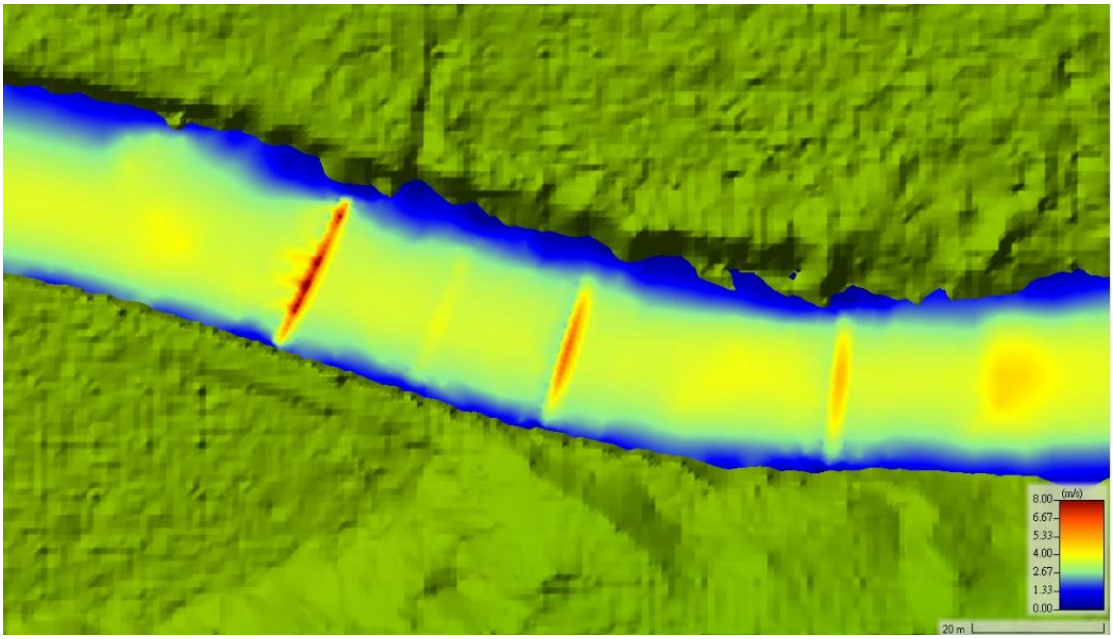


圖 7-44 Q5 第二根固床工移除之最大流速圖

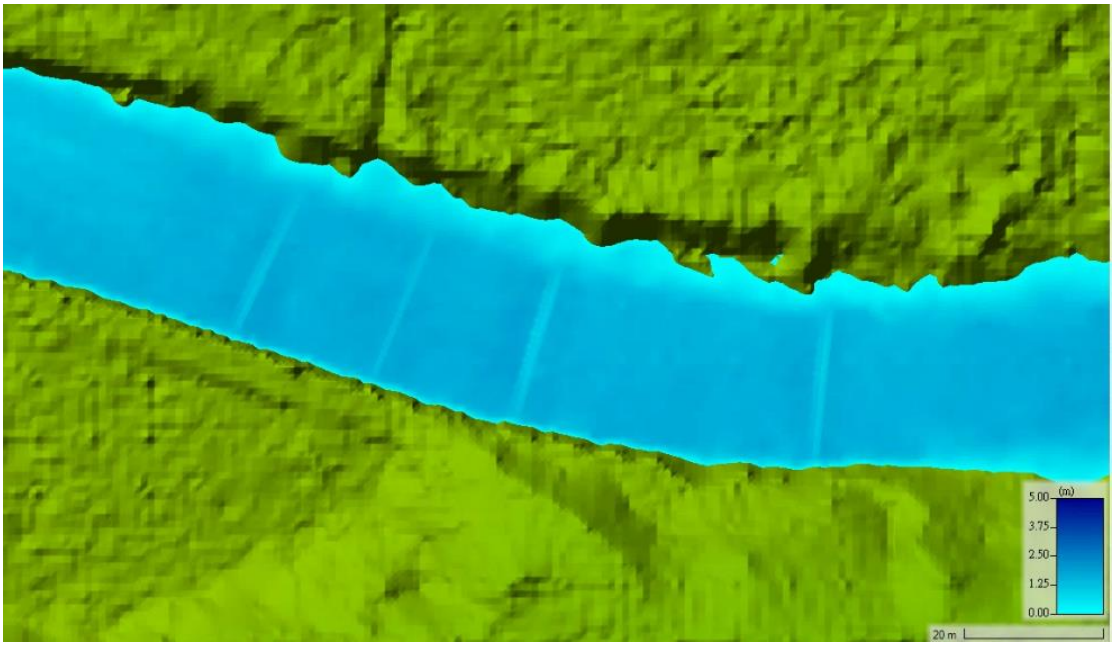


圖 7-45 Q5 第二根固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

本計畫拆除之判斷標準為最下游固床工之沖刷深度，將結合土砂沖淤圖來進行分析，土砂沖淤結果如圖 7-46，本計畫分析最下游固床工各網格之數據，進行平均得出最下游沖刷深度為 1.83 公尺，而此沖刷深度大於整治前之沖刷深度 1.69 公尺，因此基於本計畫所制定之判斷條件$M_n > M_0$(此處 n=2)，代表拆除後會加深最下游之沖刷深度，因此第二根固床工拆除方案是不可進行的，本計畫仍會分析其他判斷標準，並統合所有結果進行分析。

，

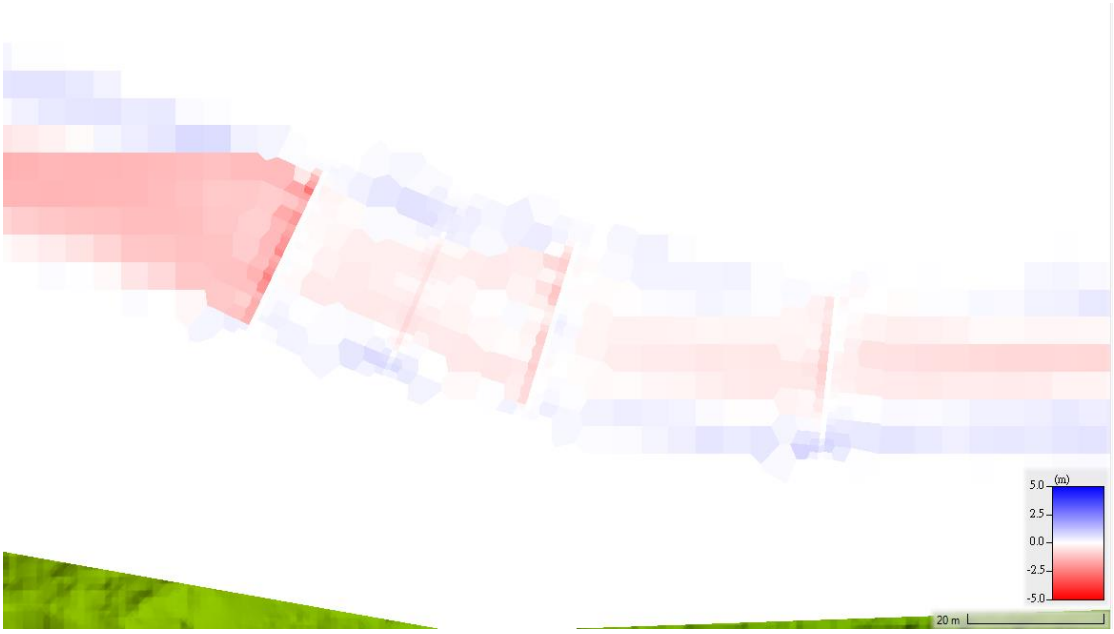


圖 7-46 Q5 第二根固床工移除之土砂沖淤圖

(三) 淹水水深

由淹水水深判斷，藉由選定區域內結合最大水深圖，並加總選定區域內網格資料，可得出總水深為 4 公尺，為小於整治前之 11.48 公尺。此情形推論是選定區域為第一及第二根固床工之間，由於固床工拆除，此區域內河道坡度不會受構造物影響，導致水流能有更多分散空間，使淹水水深可以降低。但可能因此加重影響河道下游的狀況，本計畫判斷此條件通過。

(四) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為沖刷 873.018 立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值(此處n = 2)，透過圖 4-8 所示之範圍結合圖 7-47 土砂運移量圖，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為沖刷 996.951 立方公尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為 2.89，並非為 1，本計畫設定之標準V_r為 1，若大於 1 則代表此方案中會產生過多之土砂淤積，而V_r為值 2.89 代表沖刷相較前段拆除最上游固床工又更為嚴重，而此

跡象可以從最大流速圖中分析，從圖 7-44 可以觀察出在最下游固床工處流速相較整治前變快許多，這也反映在沖刷深度中，本方案之沖刷深度亦增加許多，也因為此情形導致土砂沖刷過多，使得土砂沖刷大增，根據判斷$V_r \neq 1$，此方案中有兩項指標未達標，故第二根固床工不能進行拆除。

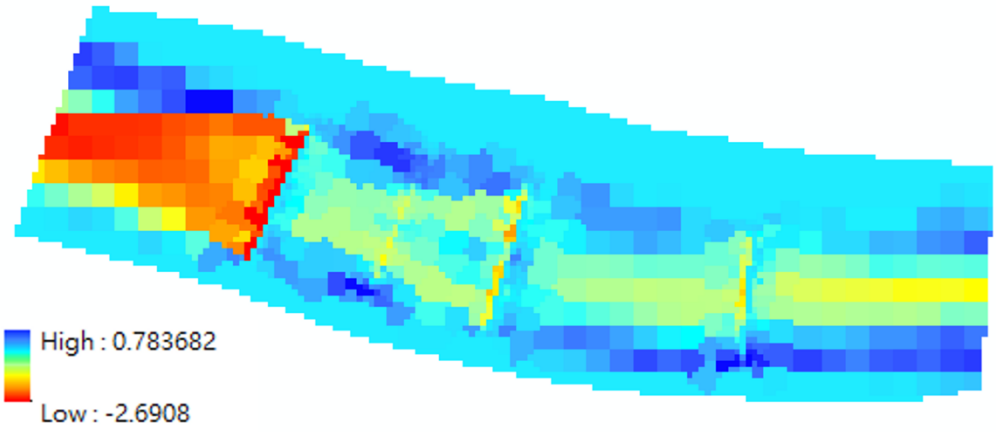


圖 7-47 Q5 第二根固床工移除之土砂運移量

四、 Q5 第三根固床工拆除之模擬

接續上一段結果，並配合拆除方案流程圖，由於最上游與第二根固床工無法拆除，因此根據流程圖，本計畫將進行第三根固床工拆除之模擬，本段將詳細說明第三根固床工拆除之水理相關結果。

(一) 最大流速及水深

與前幾段雷同，本計畫將使用最大流速及水深圖來判斷是否有成功模擬出系列固床工。最大流速圖如圖 7-48，可以觀察到第三根移除後，剩餘四根位置皆有明顯之流速變化，其中尤其在第二、第四與最下游之固床工最為明顯，而最上游固床工相較部明顯的原因，推測可能原因為地形影響，較為平緩的地勢造成在接觸固床工後沒有產生較為明顯之流速變化，因此最上游流速變化較不明顯，但仍能觀測出有變化。而最大水深圖結果如圖 7-49 所示，在固床工位置處皆有較淺之水深，而與流速互相對照，水深方面在最上游固床工位置相較其餘固床工亦沒有較為明顯之變化，可能原因推測與流速相同，為地勢坡度所影響。本計畫對比兩張圖後，判斷四根系列固床工皆有被成功模擬，可進行後續相關指標之判斷分析。

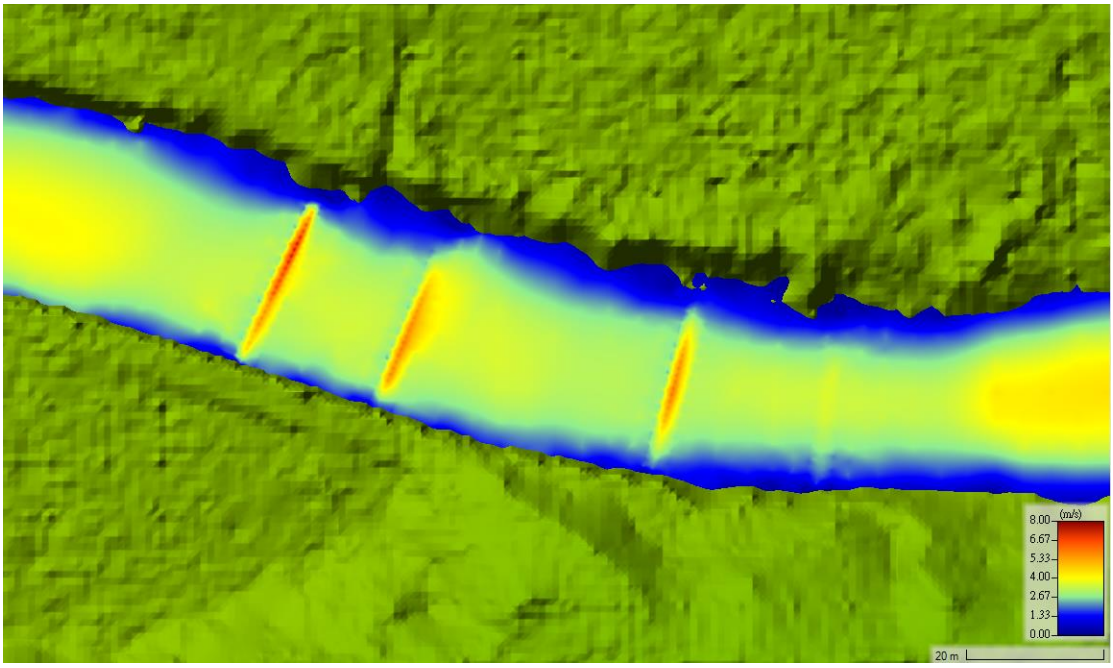


圖 7-48 Q5 第三根固床工移除之最大流速圖

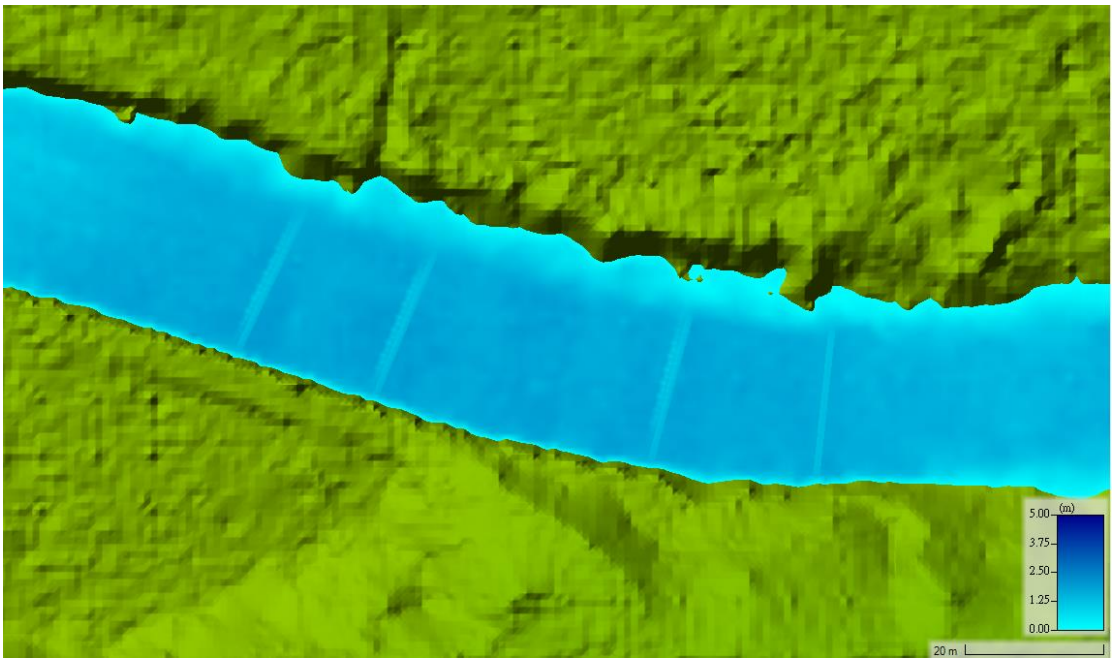


圖 7-49 Q5 第三根固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

最下游固床工之沖刷深度判斷需參考土砂沖於圖，結果如圖 7-50 所示，計算最下游固床工趾部各網格之數據，平均後求得為 1.38 公尺，此數據將計為M_n(此處 n=3)，並與整治前最下游固床工之沖刷深度$M_0$1.69 公尺進行比較分析，由判斷標準$M_n \leq M_0$，可以

分析出此方案對於最下游固床工有減緩沖刷之效果，可能原因為拆除第三根固床工後，在系列固床工中間區域產生了一個類似緩衝之區域，導致水流流速減緩，使河道下游影響較小，進而降低了沖刷效果。依據此判斷標準，分析此方案在沖刷深度方面為通過。

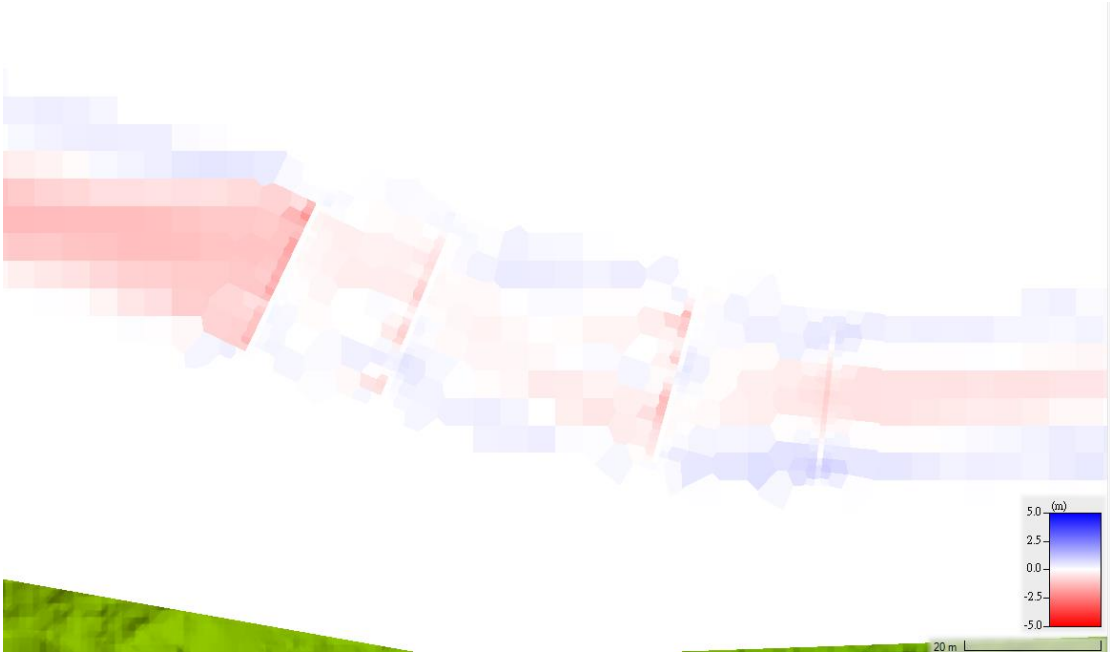


圖 7-50 Q5 第三根固床工移除之土砂沖淤圖

(三) 淹水水深

淹水水深計算方式需參考最大水深圖並藉由先前制定之區域，加總區域內之水深數據得出，為 11.2963 公尺令為D_n(此處 n=3)，與整治前D_0之數據 11.48 公尺相比，$D_n \leq D_0$，在淹水水深方面亦有改善，可能原因推測為拆除第三根固床工後，導致後方多了減緩的空間，使水深能些微改善，因此本計畫判定淹水水深之標準通過。

(四) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為沖刷 873.018 立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值(此處n = 3)，透過圖 4-8 所示之範圍結合土砂運移量圖，圖 7-51，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為沖刷 727.098 立方公

尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為 1.23，並非為 1，本計畫設定之標準V_r為 1，若大於 1 則代表此方案中會產生過多之土砂淤積，而V_r為值 1.23 代表仍有過多之淤積量，雖已與V_r值 1 相差不遠，仍有待考量是否進行拆除。第三根拆除為目前最接近理想之拆除方案，可能原因為拆除後會使系列固床工範圍中產生一緩衝區域，始得上下游皆有改善，例如減緩沖刷與降低淹水，但考慮到評出拆除需有較高之嚴謹性，減少的沖刷量會使範圍外的區域有額外的輸砂量，未必能帶來良好的結果，因此本計畫判斷第三根固床工不能進行拆除，將根據流程圖進行第四根固床工之模擬。

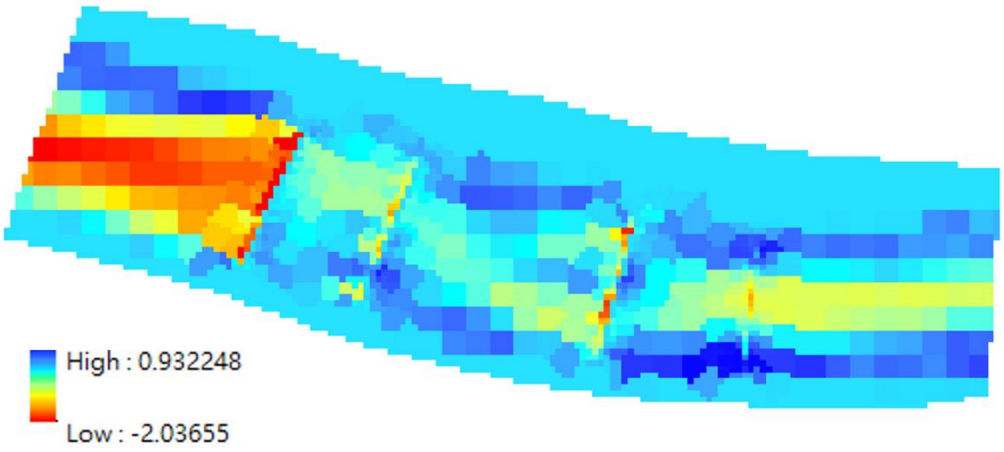


圖 7-51 Q5 第三根固床工移除之土砂運移量

五、 Q5 第四根固床工拆除之模擬

根據流程圖與前段結果，將進行第四根固床工拆除之模擬，本段將進行詳細說明，而由於本計畫認為最下游固床工為整段系列固床工最為重要之一根，不只為系列固床工中沖刷反應最為劇烈，且更有標示保護範圍之用途，故依據流程圖，第四根為拆除方案之最後一根。

(一) 最大流速與水深

本計畫將由最大流速及水深圖判斷是否有成功模擬，最大流速圖結果如圖 7-52，由最大流速圖中可觀察到四根系列固床工皆有流速變化，但可看出第三根固床工相較其他三根流速變化較小，本計畫推測可能原因為第四根移除後，由於河道下游側坡度相對較大，因此在第四根固床工拆除後水流會較快速流向下游，這也使水流有較大之迴水效應，導致第三根固床工因迴水使投潭效應降低，使第三根固床工位置處流速變化不明顯。而從最大水深圖結果，圖 7-53，可以觀察到四根固床工位置水深皆較淺，因此結合最大流速圖，本計畫判斷四根固床工皆有被成功模擬出來。可進行後續之模擬。

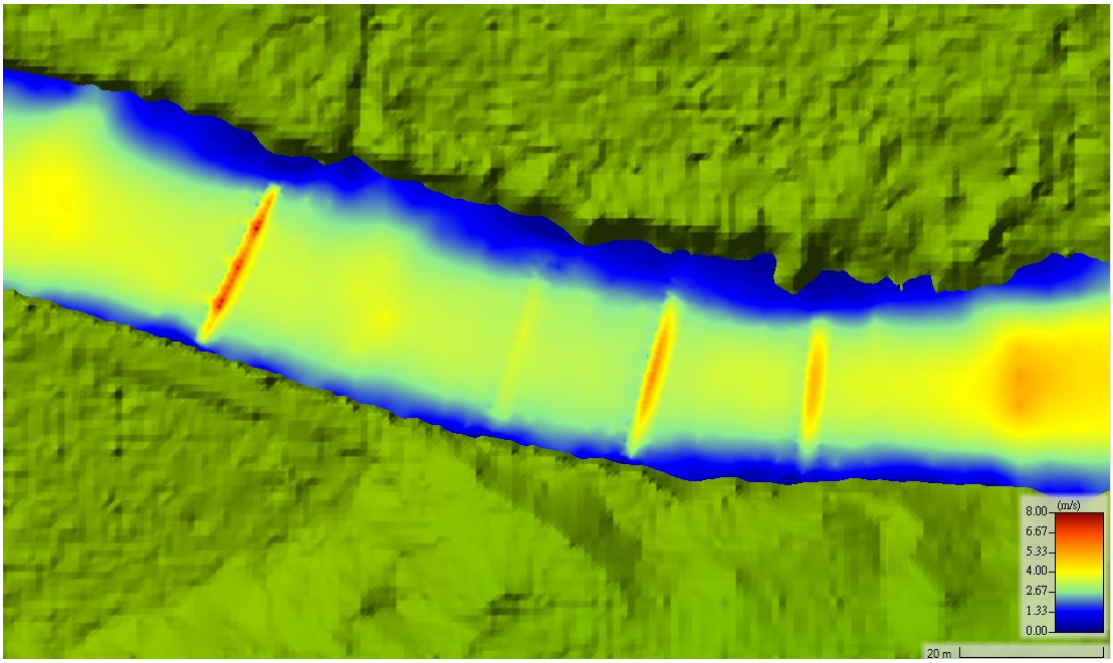


圖 7-52 Q5 第四根固床工移除之最大流速圖

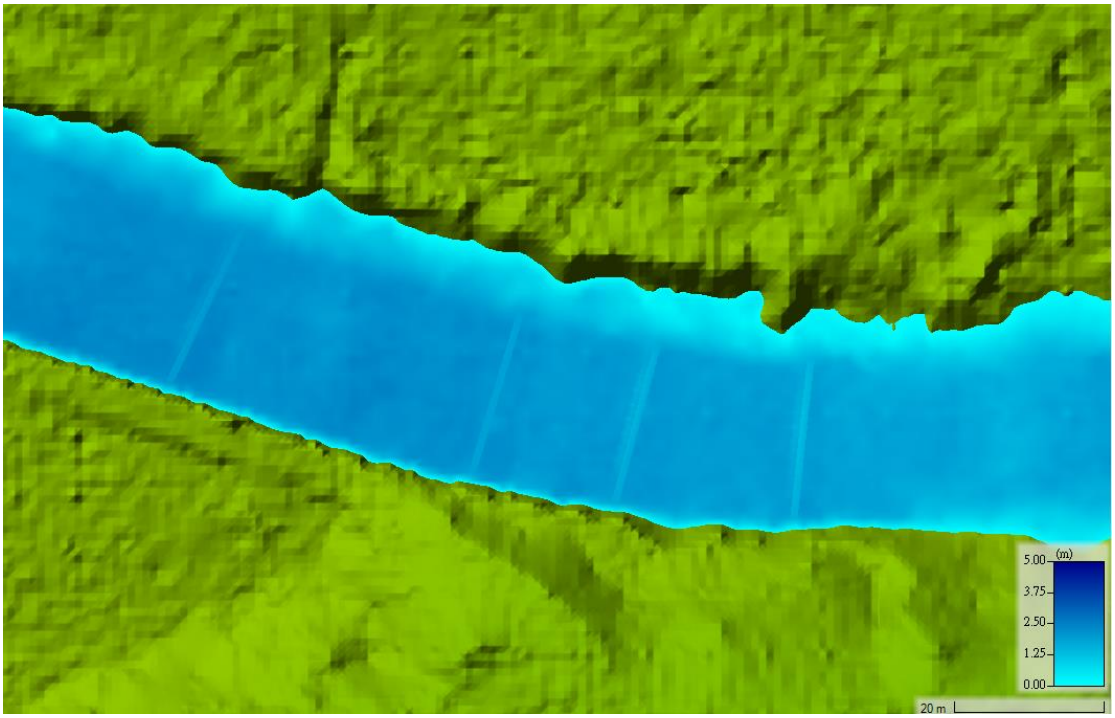


圖 7-53 Q5 第四根固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

根據本計畫制定之判斷標準，將透過土砂淤積圖，分析最下游固床工趾部之沖刷深度，結果如圖 7-54 所示，在最下游固床工趾部計算各網格數據，進行平均得出為 1.3 公尺，並將此數據令為M_n(此處 n=4)，根據判斷標準$M_n \leq M_0$(此處$n = 1$)，結合前段所得整治前

沖刷深度M_0為 1.69 公尺，本計畫認為在沖刷深度方面，拆除第四根固床工是有改善沖刷之效果，推測可能原因如同拆除第三根固床工情形類似，在最下游固床工前有緩衝區域，直接影響到最下游固床工，使沖刷深度降低，本計畫依據分析結果此條件為通過。

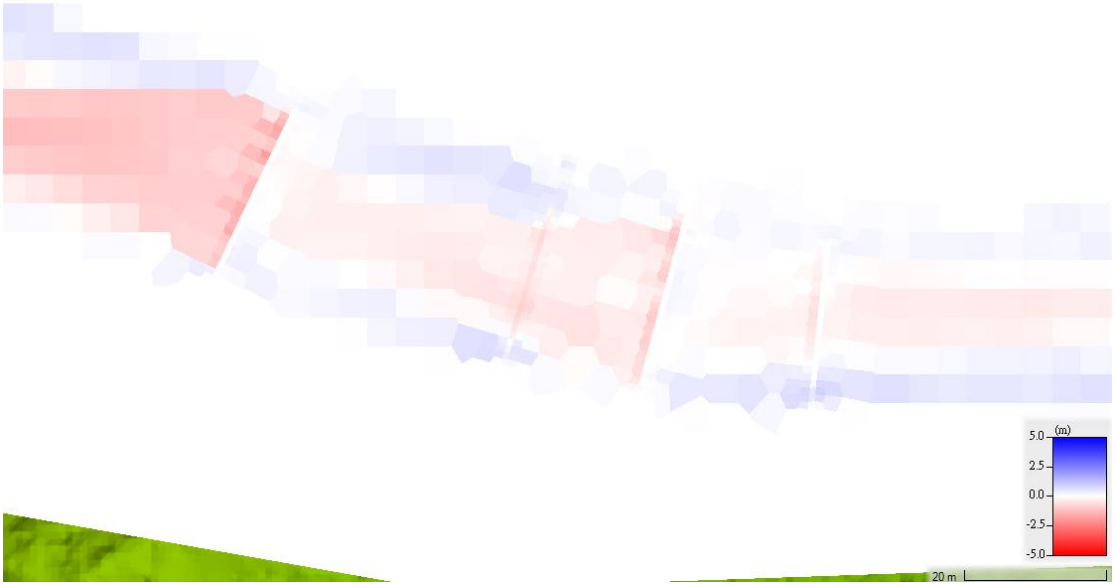


圖 7-54 Q5 第四根固床工移除之土砂沖淤圖

(三) 淹水水深

淹水水深計算方式需參考最大水深圖並藉由先前制定之區域，加總區域內之水深數據得出，為 24.548 公尺令為D_n(此處 n=4)，與整治前D_0之數據 11.48 公尺相比，$D_n > D_0$，在淹水水深方面為增加的，且增加幅度較大，差異為 13.068 公尺，且從模擬之最大水深圖與整治前之最大水深圖可以發現，淹水區域亦有增加，故本計畫判斷在淹水水深方面並未通過，第四根固床工無法拆除。

(四) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為沖刷 873.018 立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值

(此處n = 4)，透過圖 4-8 所示之範圍結合土砂運移量圖，圖 7-55，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為沖刷 670.853 立方公尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為 2.1，並非為 1，本計畫設定之標準V_r為 1，若大於 1 則代表此方案中會產生過多之土砂淤積，而V_r為值 2.1 代表有過多之淤積量，會對下游地段產生較為嚴重之災害，因此判定不符合標準。本計畫結合三種判斷標準，在水深與土砂運移量皆不滿足條件，因此判斷為不能拆除，根據流程圖整根固床工拆除方案到此結束。統整結果將在本章第三節詳細說明。

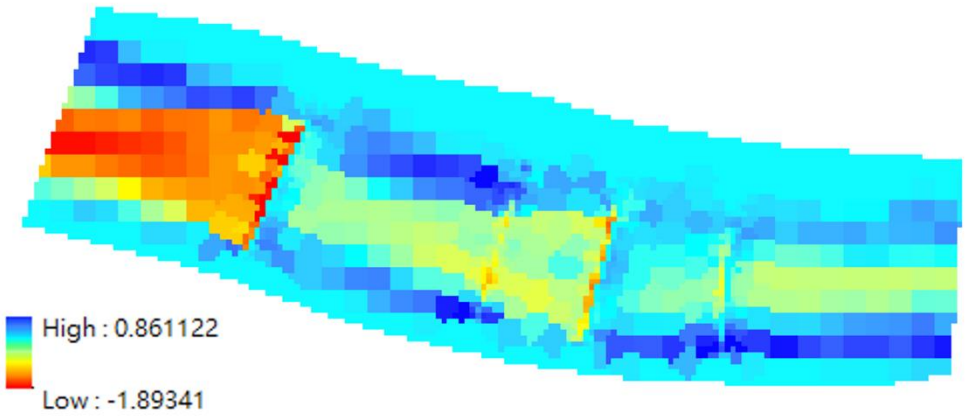


圖 7-55 Q5 第四根固床工移除之土砂運移量

第二節　固床工拆除方案-Q95

第二節為 Q95 生態基流量之固床工拆除方案數值模擬詳細說明。Q95 生態基流量，定義為維護生態環境之放流量，稱為該河川的生態基流量。除了工程方面，本計畫亦十分注重於生態保育方面，因此將生態基流量納入考量，確保拆除方案在生態方面亦有保障。而由於生態基流量其流量較小，並沒有淹水等相關問題，因此本節討論是否拆除之判斷依據時，將著重討論最下游沖刷深度與土砂運移量，淹水水深將不納入考量。

一、 Q95 調整前之模擬結果

本段將說明在生態基流量下，固床工調整前之模擬結果，模擬條件與前節相同為五根系列固床工皆沒有進行變動，固床工尺寸為長約 25 公尺、寬約 80~90 公分、高度約為 30 公分，五根皆為傳統型固床工，在此條件下進行生態基流量之相關結果，本段詳細描述其內容。

(一) 最大流速與水深

Q95 生態基流量之最大流速圖其結果如圖 7-56 所示，五根固床工位置處皆有明顯之流速變化，而最大水深圖結果如圖 7-57 所示，亦可以從圖中看出在水流位置亦有較淺之水深，其顏色呈現較淺之藍色。結合最大流速與水深圖，可以明顯看到在固床工位置處有明顯變化，故本計畫判斷固床工有成功模擬，可以進行後續標準使用。

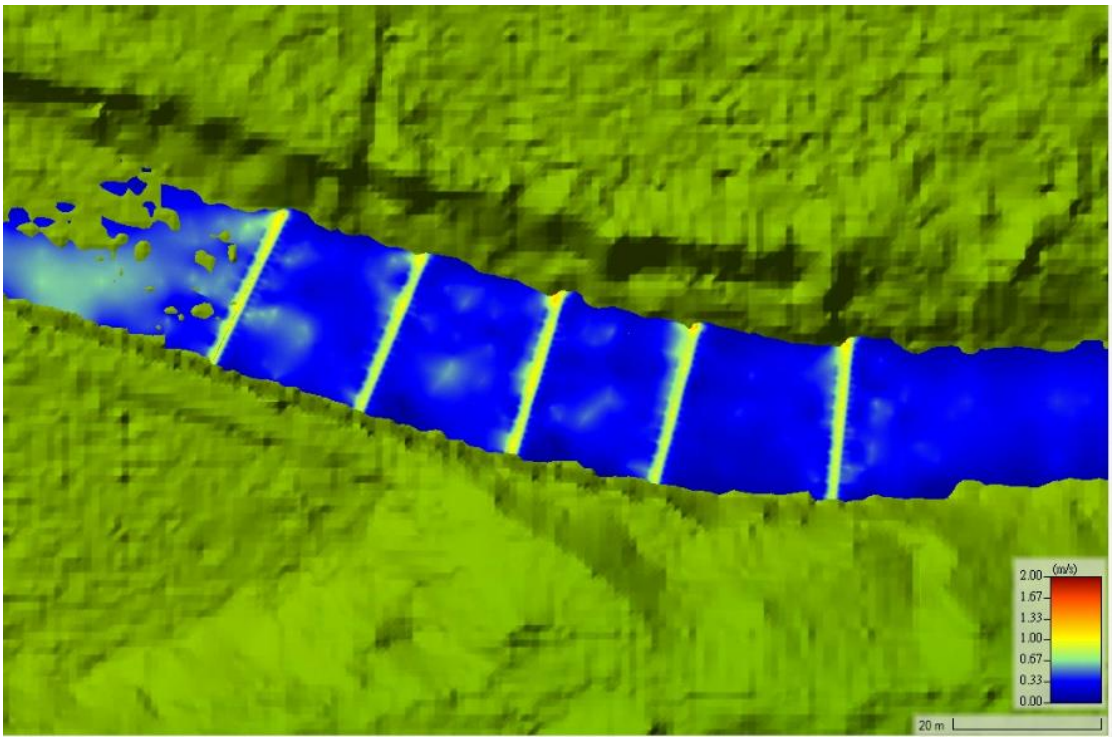


圖 7-56 Q95 最大流速圖

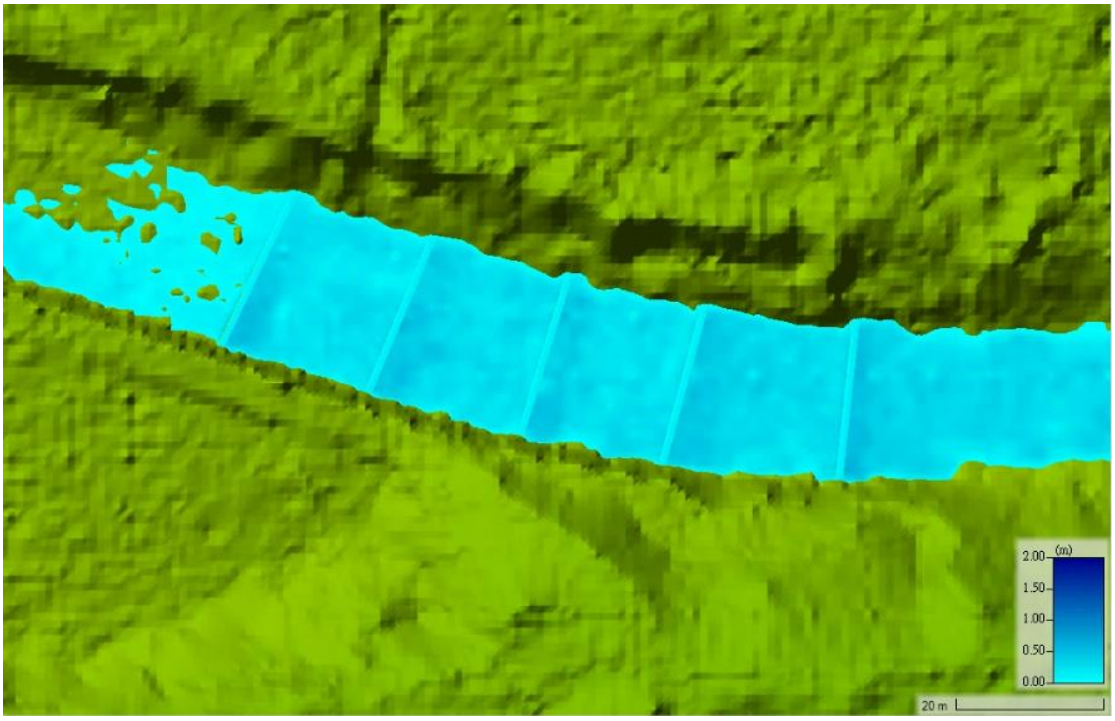


圖 7-57 Q95 最大水深圖

(二) 最下游固床工沖刷深度

整治前之最下游固床工沖刷深度為拆除方案之重要指標，沖刷深度將根據土砂沖淤圖分析，其結果如圖 7-58 所示，整體表現皆為

淤積較多，但在最下游固床工趾部仍為沖刷，故本計畫判斷，最下游固床工仍為一重要參考依據。因此結合沖淤圖計算最下游固床工趾部之網格數據，進行平均，得到沖刷深度為 0.051 公尺，此數據將作為流程圖中之M_0，並提供後續分析使用。

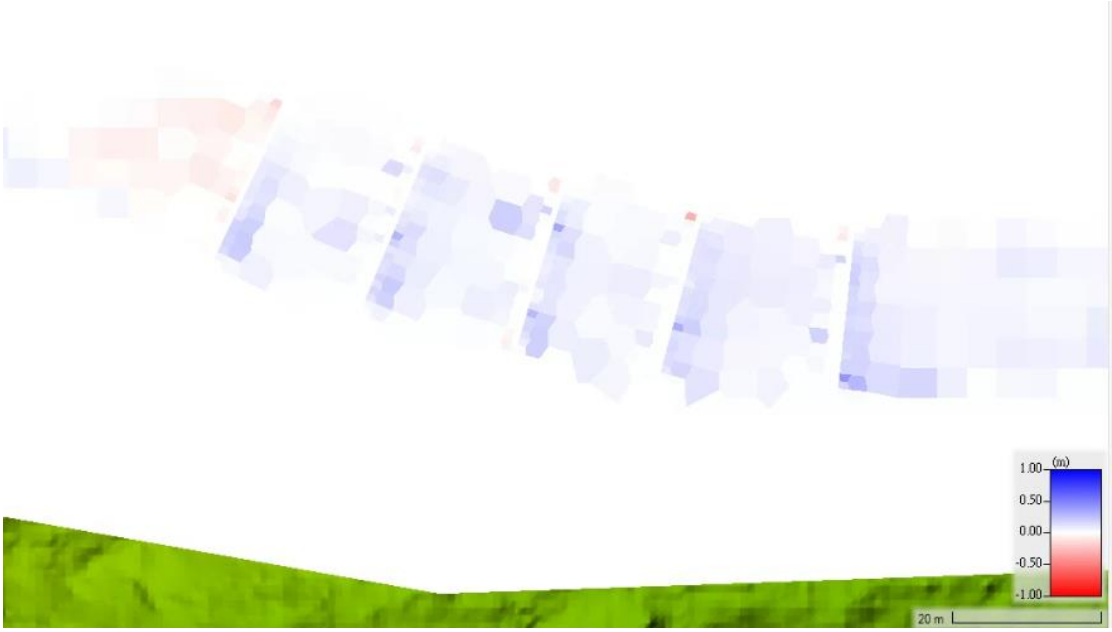


圖 7-58 Q95 土砂沖淤圖

(三) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，因此本模擬所產生之土砂運移量即為V_0整治前土砂運移量，計算方式為透過圖 4-8 所示之範圍結合土砂淤積圖，圖 7-59，將範圍內之數據加總並乘上 DEM 底圖網格面積(1 公尺×1 公尺)，即可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量，為淤積 136.223 立方公尺，而式 4.1 中合理土砂運移量V_r在 Q95 生態基流量之值為沖刷 4.7 立方公尺，此兩種數據將供後續拆除方案使用。而 Q95 之土砂運移量圖顏色較前節 Q5 顏色不同，原因為兩者比例尺設定不同，Q95 之數據較小，因此在結果圖上會有所差異。

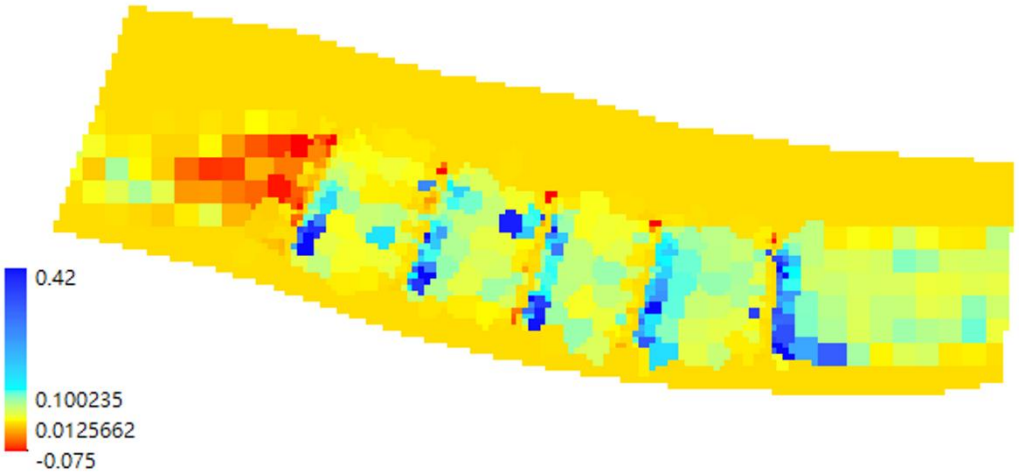


圖 7-59 Q95 土砂運移量

二、 Q95 最上游固床工拆除之模擬結果

由拆除方案流程圖中，第一步進行模擬為最上游固床工之拆除，因此本段將以 Q95 生態基流量，最上游固床工拆除之模擬，進行詳細說明。

(一) 最大流速與水深

最大流速與水深結果如圖 7-60 與圖 7-61，由兩張圖可以觀察出四根固床工位置皆有明顯之流速變化，且水深亦較淺，因此本計畫認為，四根系列固床工皆有被成功模擬，可以繼續後續分析。

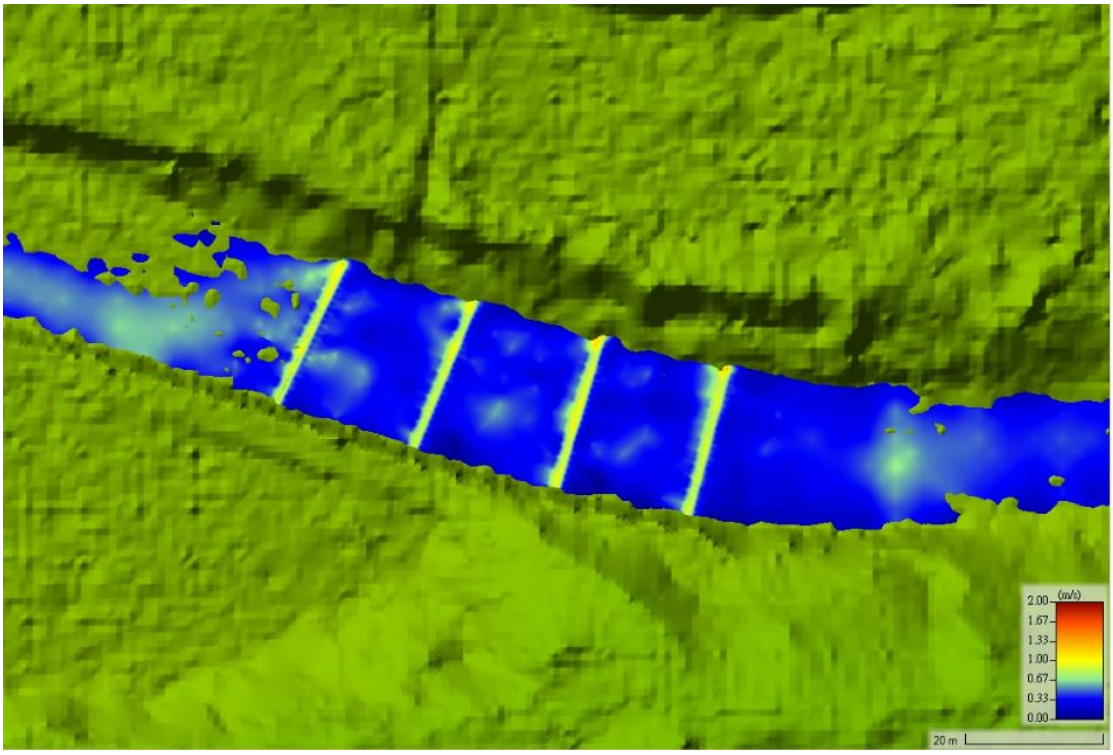


圖 7-60 Q95 最上游固床工移除之最大流速圖

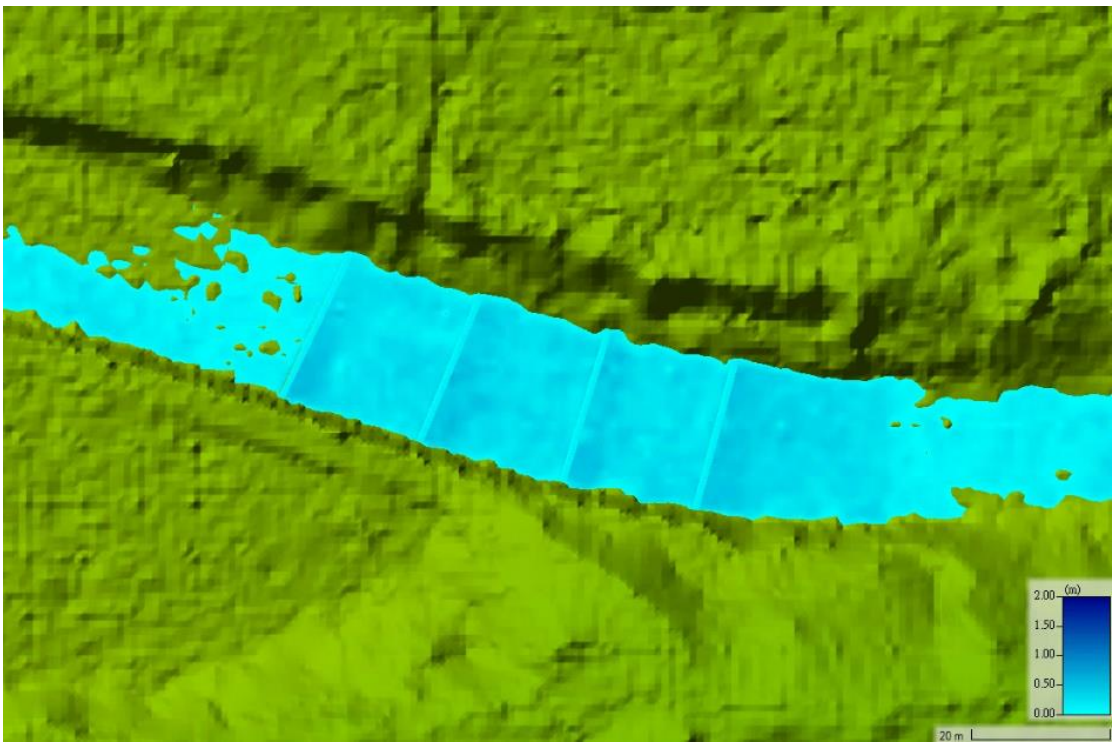


圖 7-61 Q95 最上游固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

最上游固床工拆除之土砂沖淤圖結果如圖 7-62 所示，透過計算最下游固床工趾部各網格內之數據，進行平均，得出為 0.053 公尺，此數據令為M_n(此處 n=1)，並根據制定之可拆除條件$M_n \leq M_0$，條件並未符合，代表沖刷有較為嚴重，本計畫判斷拆除最上游固床工並不會影響太多，但仍會增加下游之沖刷深度，根據沖淤圖可以發現，土壤在系列固床工之淤積情形與整治前之淤積情形雷同，影響不大，但於最下游固床工仍有沖刷增加之情形發生，故此條件為不通過。

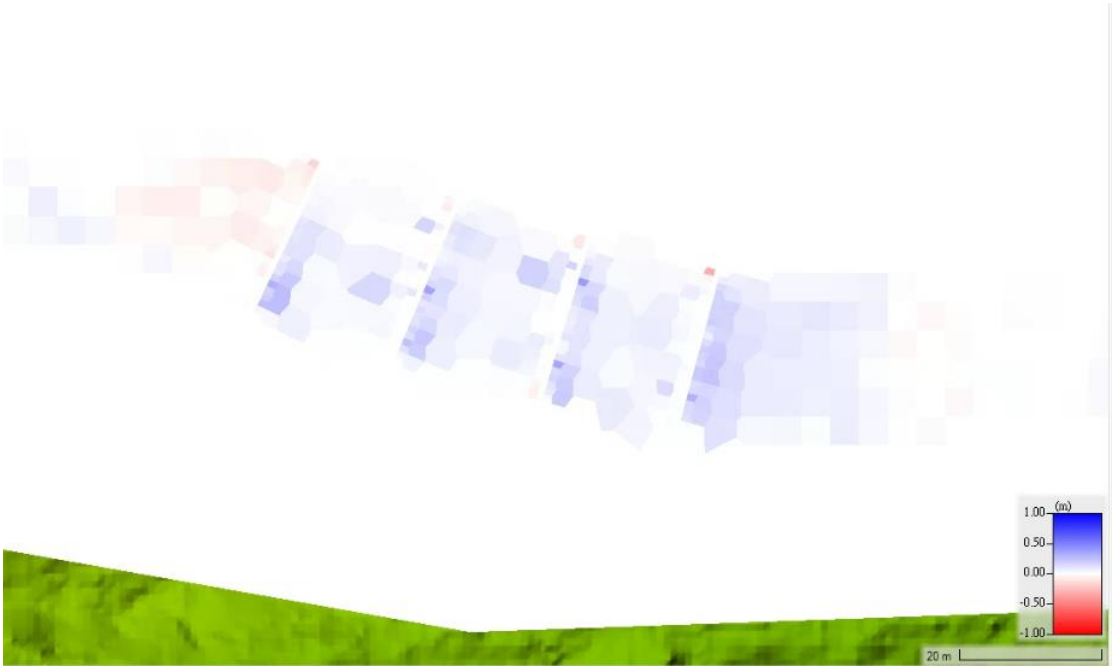


圖 7-62 Q95 最上游固床工拆除之土砂沖淤圖

(三) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為 136.223 沖刷立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值(此處n = 1)，透過圖 4-8 所示之範圍結合圖 7-43 土砂運移量圖，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為淤積 114.268 立方公尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為為 1，代表在土砂運移量方面是符合判斷條件的，本計畫認為調製至完全與合理土砂量V_r較為困難，且生態基流量之流量較小，進而影響V_s值較小，故此方案之土砂運移量本計畫判斷是可以接受的，但由於在沖刷深度並沒有改善，因此拆除最上游固床工不可行，根據流程圖將進行第二根固床工拆除。

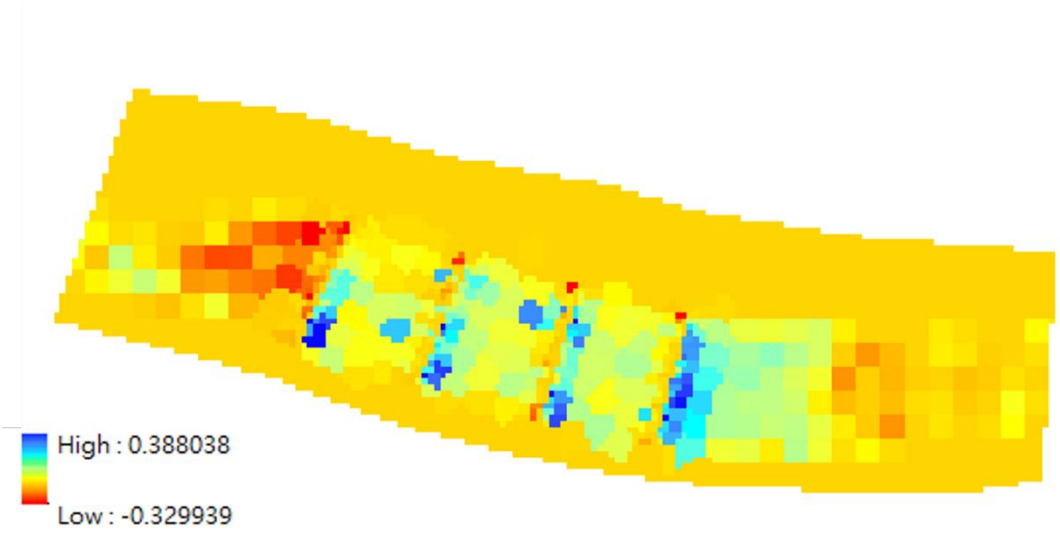


圖 7-63 Q95 最上游固床工移除之土砂運移量

三、 Q95 第二根固床工拆除之模擬結果

接續前段結果，將進行第二根固床工之拆除方案，本段將詳細說明該模擬結果與進行分析。

(一) 最大流速與水深

最大流速與水深結果如圖 7-64 圖 7-60 與圖 7-65 由兩張圖可以觀察出四根固床工位置皆有明顯之流速變化，且水深亦較淺，而從最下游固床工趾部流速可以觀察到，在右岸有較大流速產生，可能使沖刷加劇，由以上結果計畫認為，四根系列固床工皆有被成功模擬，可以繼續後續分析。

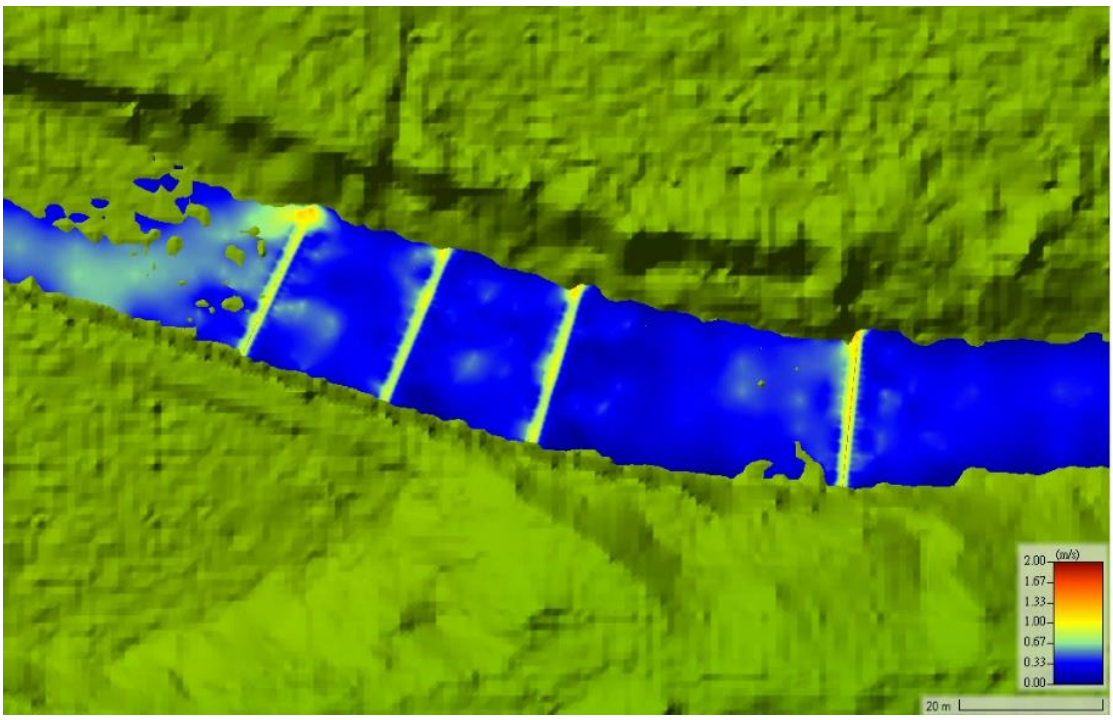


圖 7-64 Q95 第二根固床工移除之最大流速圖

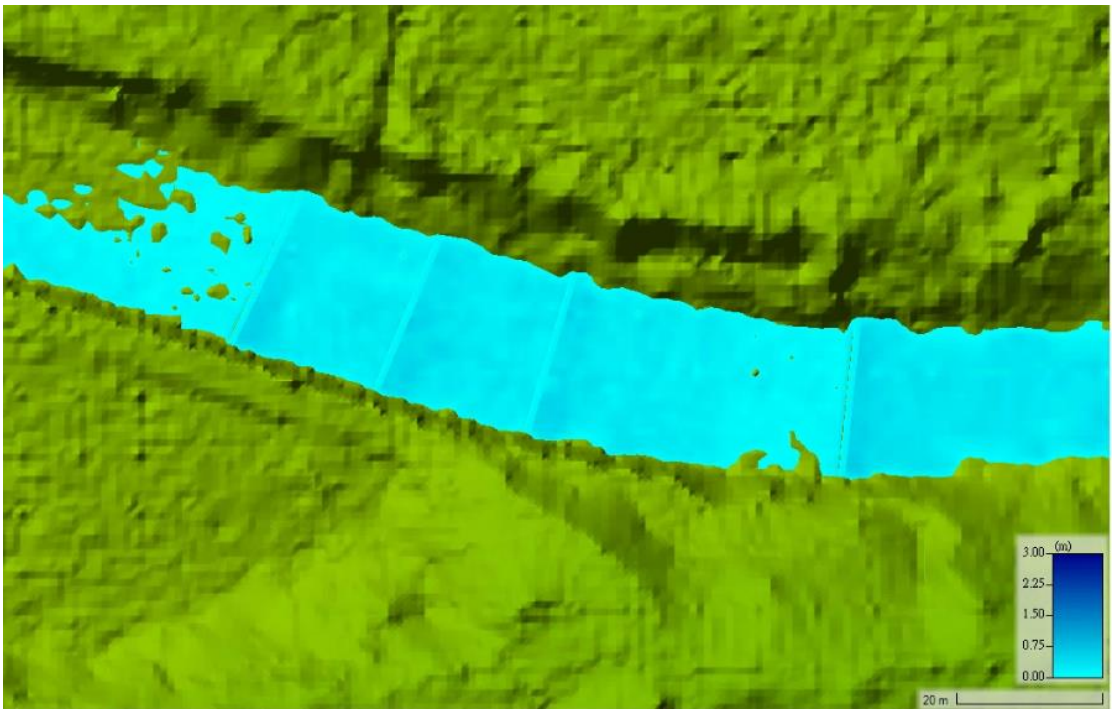


圖 7-65 Q95 第二根固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

第二根固床工拆除之土砂沖淤圖結果如圖 7-66 所示，並透過計算最下游固床工趾部各網格內之數據，進行平均，得出為 0.054 公尺，此數據令為M_n(此處 n=2)，並根據制定之可拆除條件$M_n \leq M_0$，條件並未符合，代表沖刷有較為嚴重，本計畫判斷拆除第二根固床工，會使最下游固床工沖刷增加，推測原因可能為流速增加導致，由最大流速圖，圖 7-64，可觀察出右岸流速增加，結合土砂沖淤圖可看出，在右岸處沖刷確實增加，進而導致沖刷深度增加，判斷為不符合拆除標準。



圖 7-66 Q95 第二根固床工拆除之土砂沖淤圖

(三) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為 136.223 沖刷立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值(此處n = 2)，透過圖 4-8 所示之範圍結合土砂運移量圖，圖 7-67，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為淤積 72.3598 立方公尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為 1，代表在土砂運移量方面是符合判斷條件的，土砂運移量有降低趨勢，判斷可能原因為在拆除第二根固床工後，提供較大之平坦區域可使土砂沖刷，造成沖刷量增加，但考慮到沖刷深度條件，第二根固床工為不可拆除之方案，本計畫將根據流程圖進行第三根固床工之拆除方案。

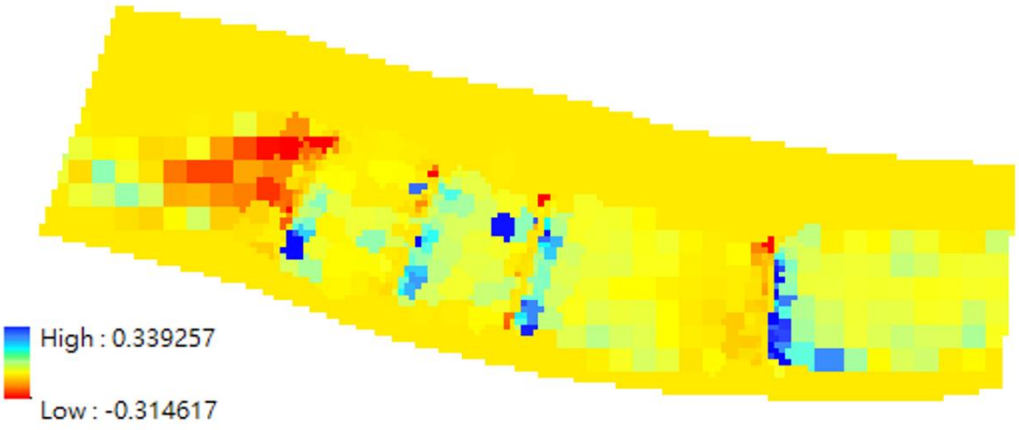


圖 7-67 Q95 第二根固床工移除之土砂運移量

四、 Q95 第三根固床工拆除之模擬結果

接續前段結果，將進行第三根固床工之拆除方案，本段將根據流程圖進行模擬，並根據模擬結果，詳細說明結果與進行分析。

(一) 最大流速與水深

最大流速與水深結果如圖 7-68 與圖 7-69，由兩張圖可以觀察出四根固床工位置皆有明顯之流速變化，且水深亦較淺，而從圖中可以觀察出，第三根固床工移除後，由於地形關係，在系列固床工範圍中，產生一段枯水區域，此現象有可能使沖淤產生變化，將於後續結果進行分析。本計畫認為，四根系列固床工皆有被成功模擬，可以繼續後續分析。

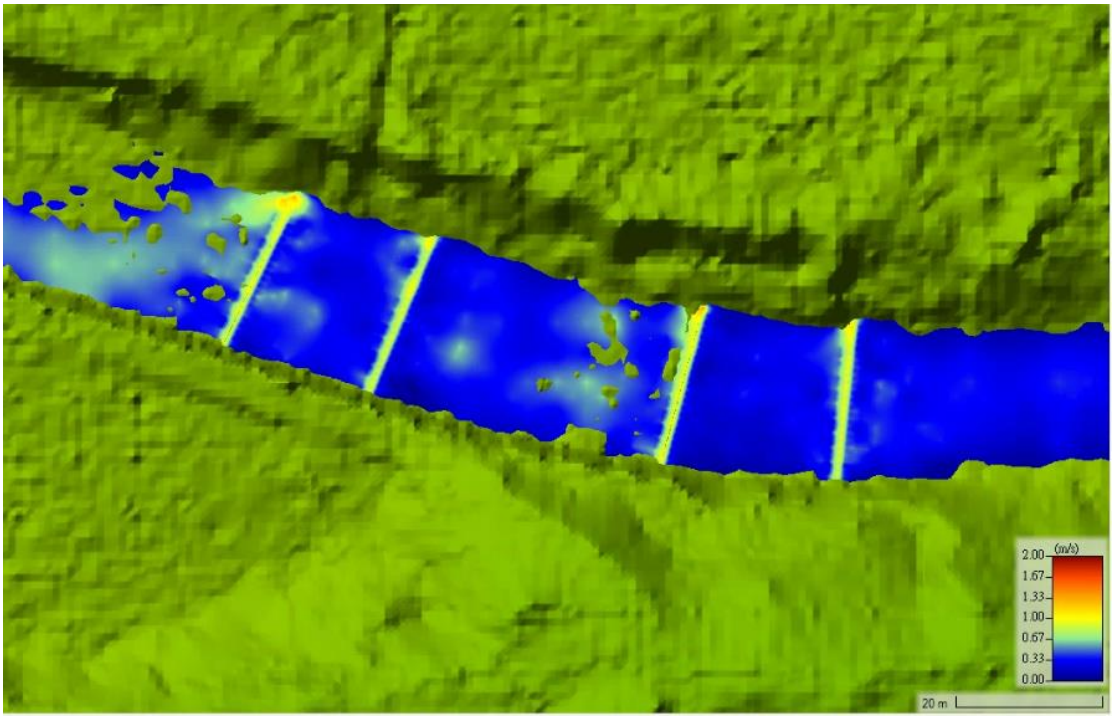


圖 7-68 Q95 第三根固床工移除之最大流速圖

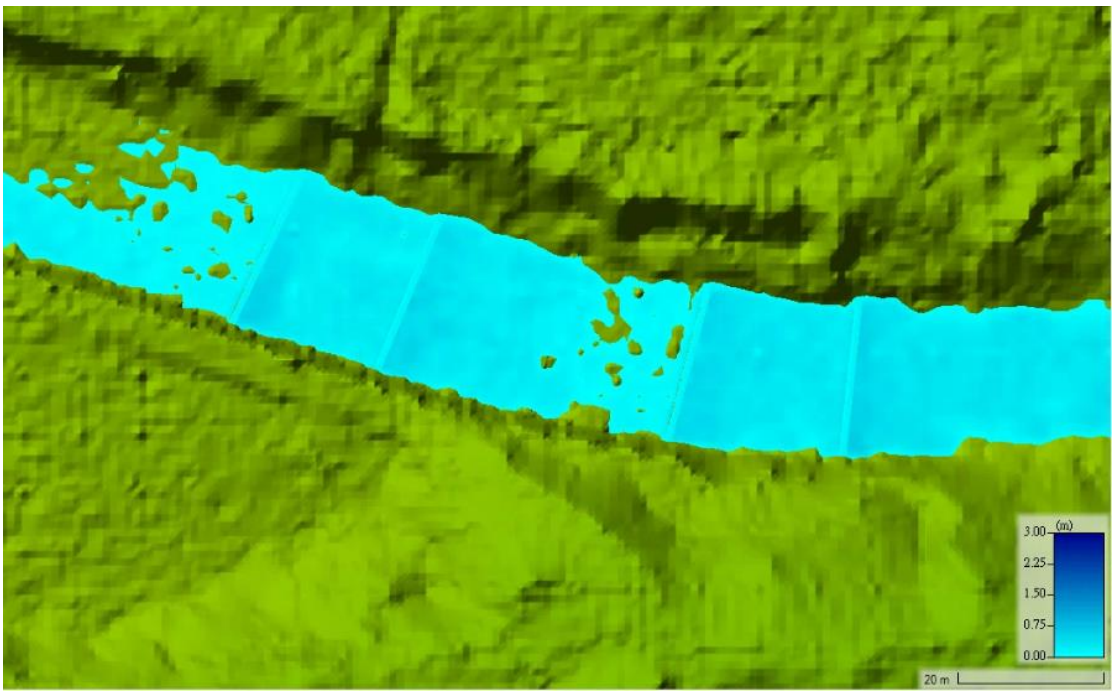


圖 7-69 Q95 第三根固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

第三根固床工拆除之土砂沖淤圖結果如圖 7-70 所示，並透過計算最下游固床工趾部各網格內之數據，進行平均，得出為 0.056 公尺，此數據令為M_n(此處 n=3)，並根據制定之可拆除條件$M_n \leq M_0$，條件並未符合，代表沖刷相較整治前更為嚴重，本計畫判斷拆除第三根固床工，不只使最下游固床工沖刷深度增加，於圖中可觀察出，第二根固床工之沖刷範圍亦增加，可以透過最大流速與水深圖，判斷此處地形較高，若第三根固床工拆除，易產生枯水區段，除了可能發生斷流，更會導致第二根固床工之沖刷範圍增加，因此本計畫判斷拆除第三根固床工在沖刷深度標準並未通過。

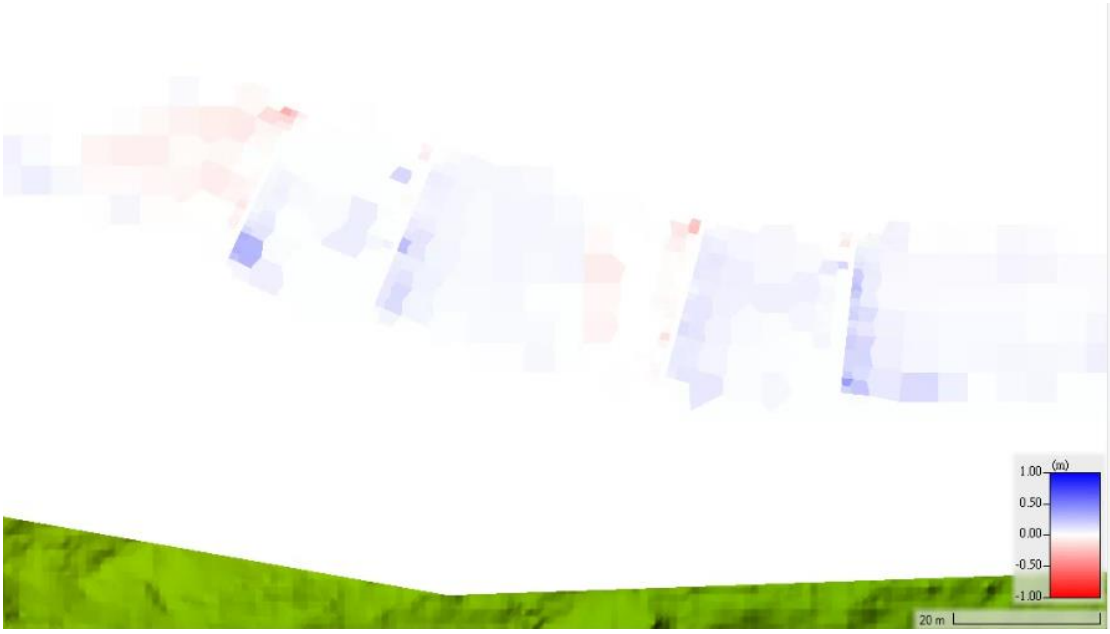


圖 7-70 Q95 第三根固床工拆除之土砂沖淤圖

(三) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為 136.223 沖刷立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值(此處n = 3)，透過圖 4-8 所示之範圍結合土砂運移量圖，圖 7-71，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為淤積 73.73607 立方公尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為 1，代表在土砂運移量方面是符合判斷條件的，土砂運移量有降低趨勢，但與拆除第二根固床工相比，則有些微減少沖刷量，判斷可能原因為在拆除第三根固床工後，由於此處地形關係，導致一些地形較高處，形成天然構造物，增加攔砂，造成土砂運移量淤積增加，考慮到沖刷深度條件，第三根固床工為不可拆除之方案，本計畫將根據流程圖進行第四根固床工之拆除方案。

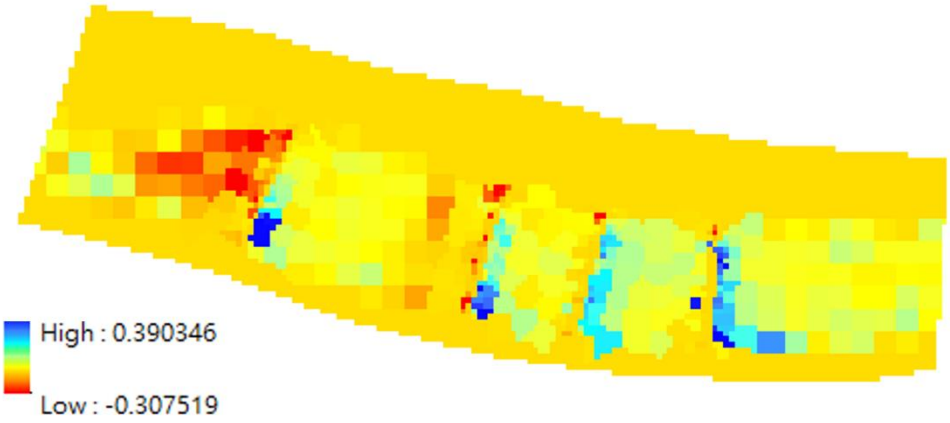


圖 7-71 Q95 第三根固床工移除之土砂運移量

五、 Q95 第四根固床工拆除之模擬結果

接續前段結果，將進行第四根固床工之拆除方案，而第四根固床工為流程圖中最後之拆除方案，本段將根據流程圖進行模擬，並根據模擬結果，詳細說明結果與進行分析。

(一) 最大流速與水深

最大流速與水深結果如圖 7-72 與圖 7-73，由兩張圖可以觀察出四根固床工位置皆有明顯之流速變化，且水深亦較淺，而從圖中可以觀察出，相較第三根固床工移除後，河段較無明顯枯水區域，因此流速變化較為平均，僅在固床工位置處有較為明顯之流速變化，此情形亦反映在最大水深圖中，僅有些許本身地勢較高處，有些許隔斷水流。本計畫判斷四根固床工皆有被成功模擬，可進行後續之模擬分析。

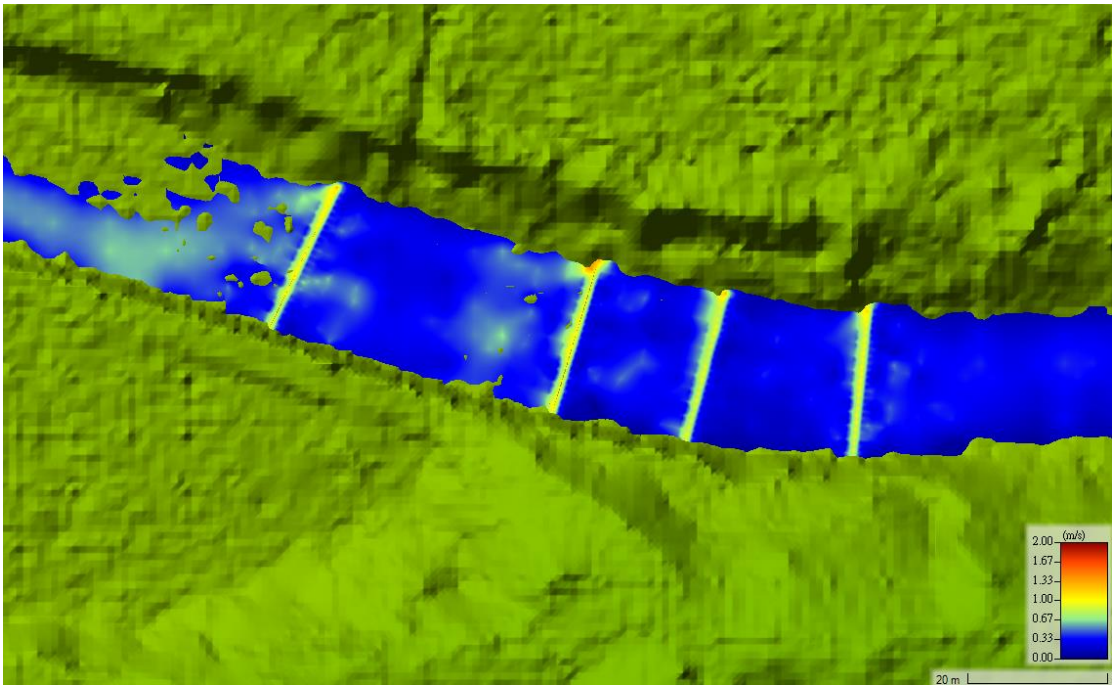


圖 7-72 Q95 第四根固床工移除之最大流速圖

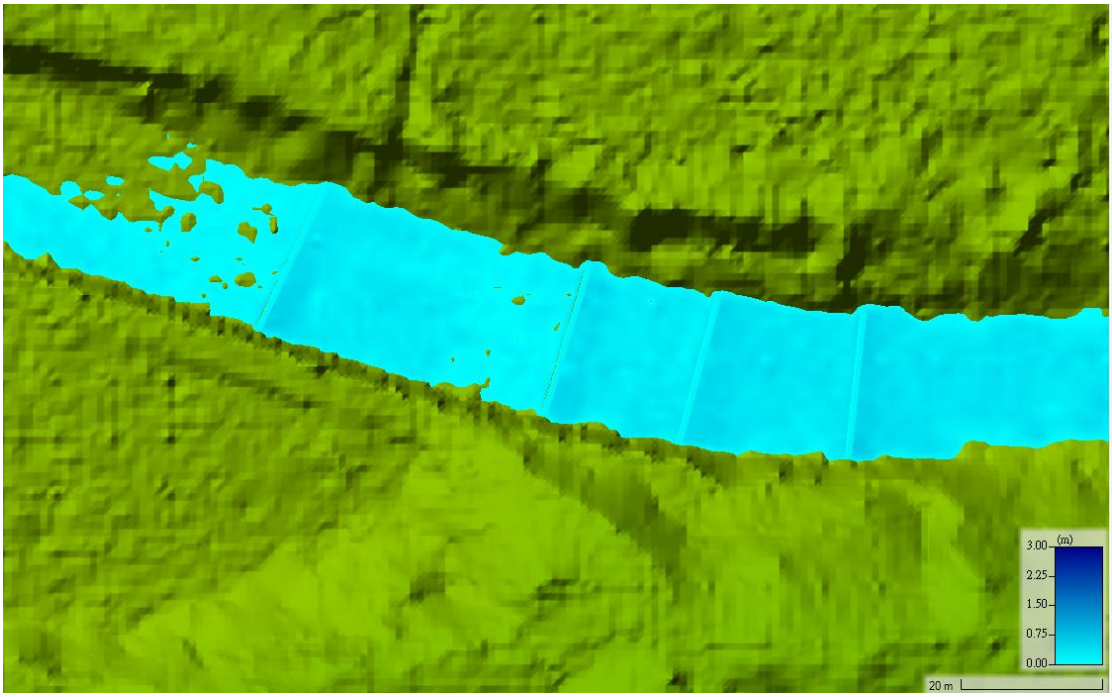


圖 7-73 Q95 第四根固床工移除之最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

第三根固床工拆除之土砂沖淤圖結果如圖 7-74 所示，並透過計算最下游固床工趾部各網格內之數據，進行平均，得出為 0.054 公尺，此數據令為M_n(此處 n=4)，並根據制定之可拆除條件$M_n \leq M_0$，條件並未符合，代表沖刷相較整治前更為嚴重，本計畫判斷拆除第四根固床工，因為地形因素，使水流更為平穩，相較拆除第二、三根固床工，沖刷深度有較為減少之趨勢，透過圖中可以看出第三根固床工之沖刷範圍亦有增加，本計畫認為在生態基流量這種低流量下，固床工下游段若有較大之區域，有可能會使沖刷範圍增加。而根據最下游固床工之沖刷深度判斷條件，仍未符合標準，故不能拆除。

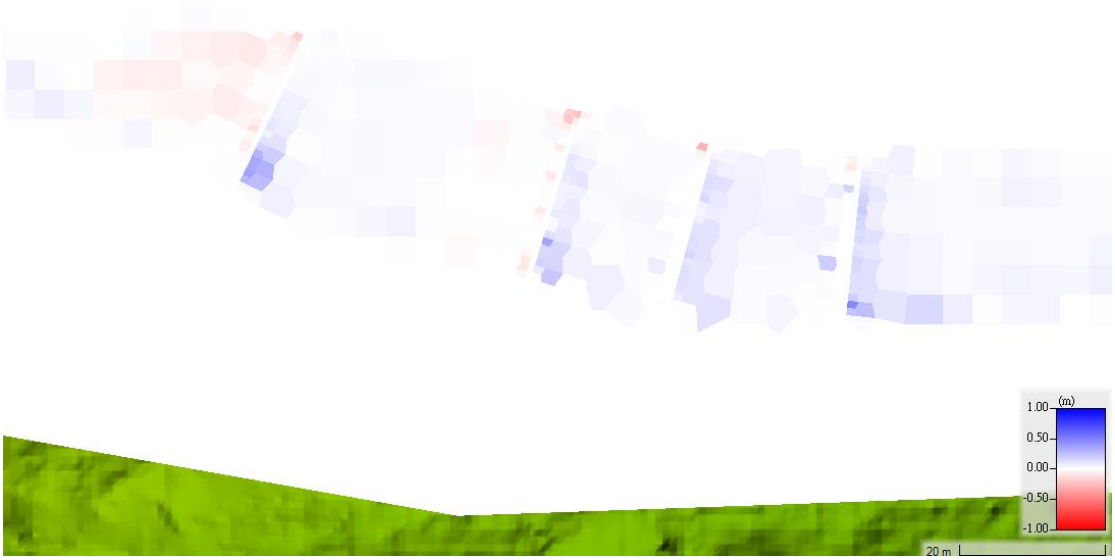


圖 7-74 Q95 第四根固床工移除之土砂沖淤圖

(三) 土砂運移量

在式 4.1 中V_0代表整治前之土砂運移量，而透過前段之結果得出V_0為 136.223 沖刷立方公尺，而經由此次模擬可以得出式中V_n之值(此處n = 3)，透過圖 4-8 所示之範圍結合土砂運移量圖，圖 7-75，可得到降雨後區域內所產生之土砂運移量為淤積 81.732 立方公尺，將此數據代入式 4.1 中可算出V_r為 1，代表在土砂運移量方面是符合判斷條件的，土砂運移量有增加沖淤之趨勢，判斷可能原因為在拆除第四根固床工後，由於沒有較高之地形，導致整體河流較為平緩，造成土砂運移量與整治前更為接近，但考慮到沖刷深度條件，第四根固床工為不可拆除之方案，

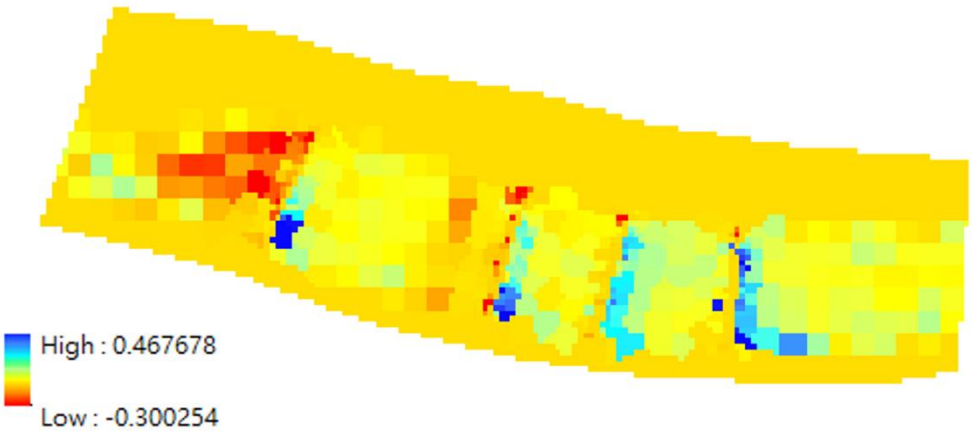


圖 7-75 Q95 第四根固床工移除之土砂運移量

第三節　固床工拆除方案-結論與分析

本節將針對兩種流量 Q5、Q95，在模擬完拆除固床工，進行結論與分析。

一、 沖刷深度

在沖刷深度方面，Q5 除了拆除第二根固床工方案外，皆有明顯改善，而最大沖刷觀測發現較常發生河道右側，應多加注意河道右側之防洪與趾部掏刷，改善原因可能為拆除固床工可以產生一緩衝區域，此區域水流由於沒有構造物阻擋，可使流速更加穩定，到達下一根固床工時可使投潭水流降低其動能，進而改善沖刷深度，此現象於拆除第四根固床工方案中更為明顯，因此本計畫認為過於密集之固床工，亦使水流流速不穩定，導致沖刷增加，未來應仔細審視固床工間距所帶來之影響。

且河流流心可能因為地勢較高處而使水流分流，導致流心產生改變，此情形也導致沖淤有許多額外因素考量，使得沖刷深度並沒有辦法改善，故在各拆除方案中，沖刷深度皆比整治前更加嚴重，本計畫認為在低流量的情況下，河道本身之地形為更加影響沖淤之因素。

二、 淹水水深

淹水水深將著重於 Q5 的條件，由於 Q95 流量極低，並沒有淹水災害產生，故淹水水深之結論僅會探討 Q5 重現期之結果。

淹水水深方面，在靠近最上游、第二根固床工之拆除工程，皆有使淹水情形獲得改善，拆除方案中只有第四根固床工拆除方案在淹水水深無通過標準，本計畫認為若要改善淹水災害，過遠之工程

將無法有效治理，且第四根固床工拆除，水深增加許多判斷此處影響水深較大。

三、 土砂運移量

土砂運移量方面，本計畫認為在高流量方面，整根拆除固床工會對土砂運移量產生過多影響，過少的河道輸砂量會使河道淤積嚴重，會使河道構造物使用年限大幅減少，增加工程成本，且大量的淤積會造成河道洪水難以排放，使淹水情形加重，反之過多的河道輸砂量會造成河道沖刷嚴重，並造成系列固床工趾部掏刷情形加重，增加災害風險，對下游產生嚴重的災害。考量到土砂運移量方面，整根拆除會產生過於劇烈之影響，並不適合應用在高流量之條件。

而在低流量情況下，土砂運移量皆有所改善，但與沖刷深度考量相同，影響因素為河道本身地形，因此低流量情況下，因更加著重於判斷地勢高低，採取不同的工法。

四、 總結

在固床工整根拆除之方案中，不論是 Q5 或 Q95，皆有判斷標準無法滿足，本計畫認為整根固床工拆除，影響皆過於劇烈，須謹慎評估，若要改善生態方面，可以使用影響較小之工程方法，如使用開口設計，或是建置透水式固床工，或是調整構造物整體高程，這些工程方法會比整根固床工拆除，影響程度更小，更能確保災害風險不會增大。

表 7-11 固床工拆除方案比較表

	Q5	Q95
沖刷深度	除了拆除第二根固床工方案外，皆有明顯改善，而最大沖刷觀測發現較常發生河道右側。	本身流量極小，容易在拆除固床工後，產生枯水區域，導致河流流況不穩定，使沖刷深度不穩定。
淹水水深	皆有改善	不討論
土砂運移量	整根拆除影響較大，需考慮結合不同工法。	皆有改善，仍需考量地形帶來影響

第八章　固床工開口方案之模擬與分析

本章節將針對第四章所提及固床工開口設計方案之模擬結果進行模擬。前段中，本計畫發現整根移除固床工會對現況產生劇烈影響，可能有引起災害的疑慮，故延伸探討固床工開口設計之可能性。本計畫選定之重現期距為 Q1.11、Q2、Q5 與 Q95，開口高度分別為構造物高程之 1/3、1/4 及 1/6，將分析重現期降雨後各項水理結果，本計畫將根據結果進行分析與討論，並提出固床工開口設計之相關建議。

第一節　固床工開口設計-Q1.11

本節將以 Q1.11 重現期進行固床工不同開口高度設計之模擬，將分別討論三種開口高度之各項指標，並進行分析。

一、 Q1.11 調整前之模擬結果

本段將說明 Q1.11 重現期，固床工調整前之模擬結果，模擬條件為五根系列固床工皆沒有進行變動，固床工尺寸為長約 25 公尺、寬約 80~90 公分、高度約為 30 公分，五根皆為傳統型固床工，在此條件下進行 1.11 年重現期降雨之相關結果，本段將描述其內容。

(一)　最大流速與水深

最大流速與水深圖為判斷是否有成功模擬固床工之重要依據，水流遇固床工等橫向構造物時，流經構造物頂部之水流，會產生投潭效應，造成固床工位置處產生流速變化，且相較於河道之水深，固床工頂部之水深較淺，藉由最大流速與水深圖，分析模擬結果是否有這類情形，為判斷是否有成功模擬固床工之重要依據。最大流速與水深圖結果如圖 8-76、圖 8-77，由最大流速圖可觀察出，在五

根固床工位置處皆有明顯之流速變化，且最大水深圖中，五根固床工位置處水深較淺，皆符合投潭效應與頂部水深較淺之情形，故本計畫判斷系列固床工是有成功模擬，可進行後續分析。

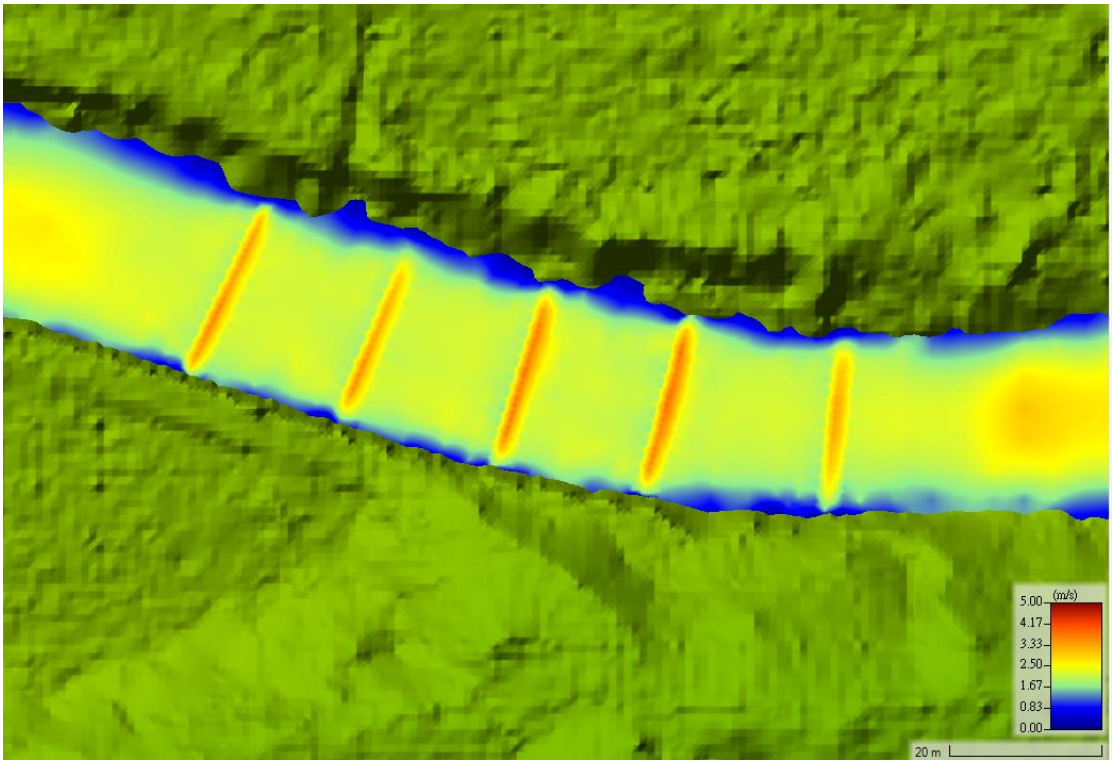


圖 8-76 Q1.11 最大流速圖

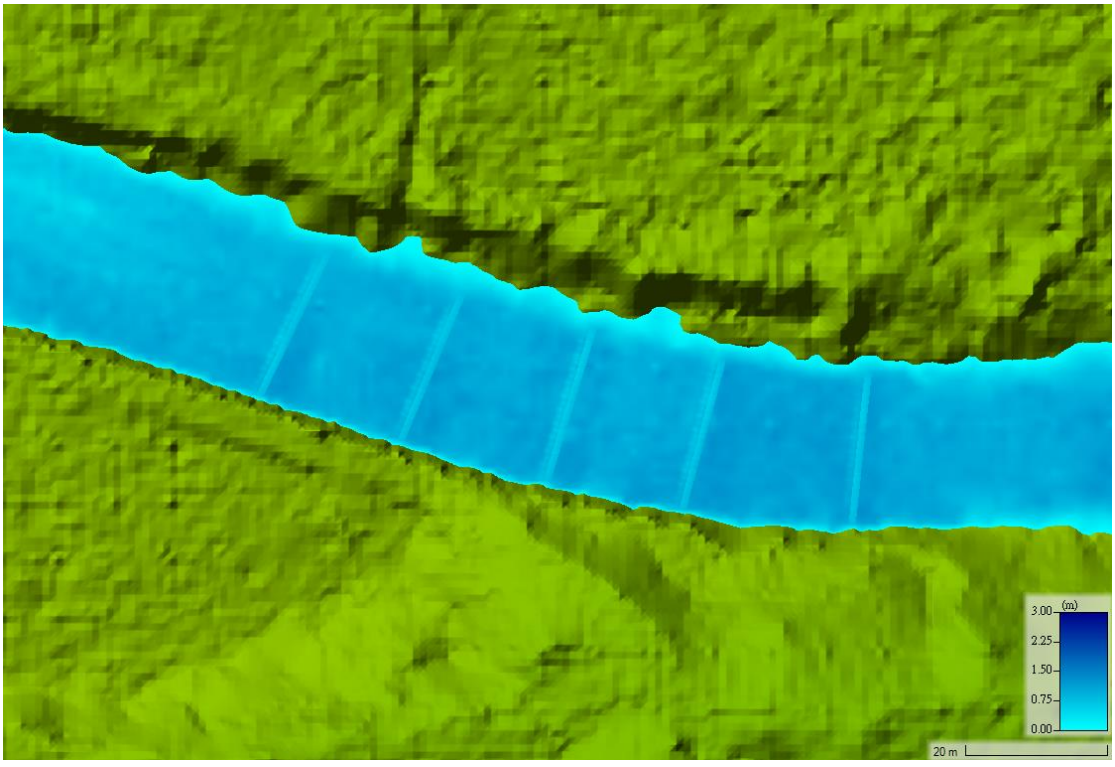


圖 8-77 Q1.11 最大水深圖

(二)　最下游固床工之沖刷深度

最下游固床工之沖刷深度為判斷固床工整治方案之重要標準，最下游固床工常為沖刷最為嚴重之處，因此固床工趾部之掏刷情形已經是不可忽視之議題，如同本計畫前段所說，將結合土砂沖淤圖，並計算最下游固床工趾部之各網格數據，進行平均以求得最下游固床工之沖刷深度，土砂沖淤圖如圖 8-78，經計算求得為沖刷 0.7091 公尺，此標準將定為 Q1.11 固床工調整方案中之M_0，以供後續使用。

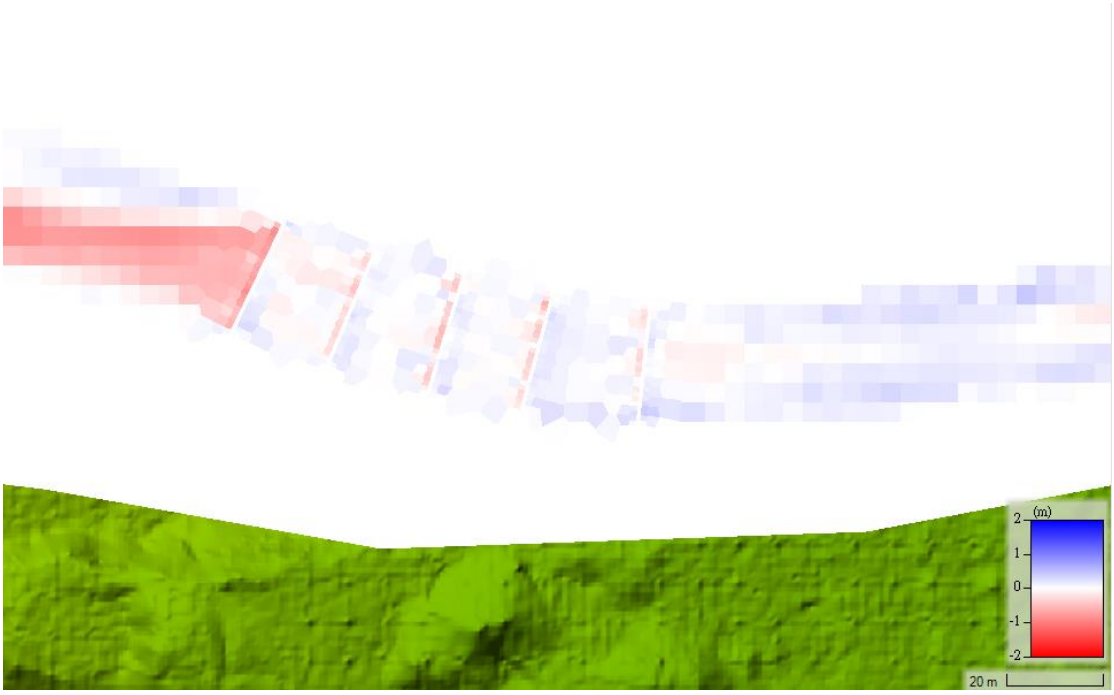


圖 8-78 Q1.11 土砂沖淤圖

(三)　淹水水深

位於最上游固床工與第二根固床工之間的區域，本計畫認為為淹水潛勢區，淹水水深將以此區域之總水深，作為衡量標準，透過前段提及之選定範圍，結合最大水深圖，計算後求得 Q1.11 調整前之淹水水深為 0.272 公尺，此標準將定為 Q1.11 固床工調整方案中之D_0，以供後續使用。

(四)　土砂運移量

利用土砂沖淤圖，結合土砂運移量選定範圍，加總此處之土砂沖淤總量，可以得到經過降雨後之土砂運移量，其結果如圖 8-79，經計算後求得為沖刷 247.165 立方公尺，此將定為V_0調整前之土砂運移量，而參考「101 保力溪成果報告」並經過重現期距換算與長度比例縮放後，求得 Q1.11 之合理土砂量為沖刷 292.2091 立方公尺，定為V_s，兩種數據將供後續使用。

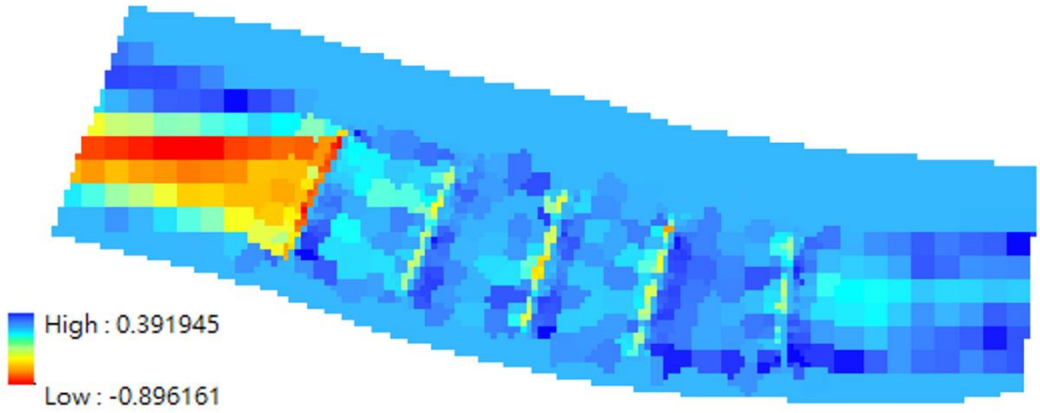


圖 8-79 Q1.11 土砂運移量

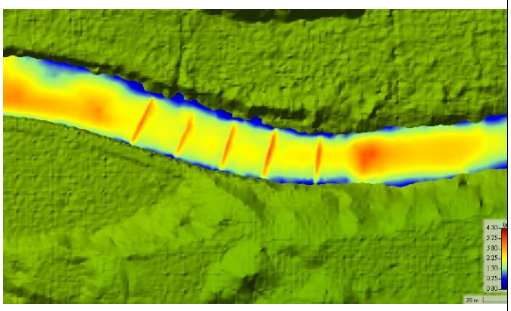
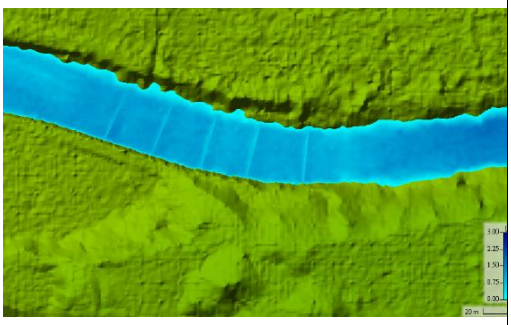
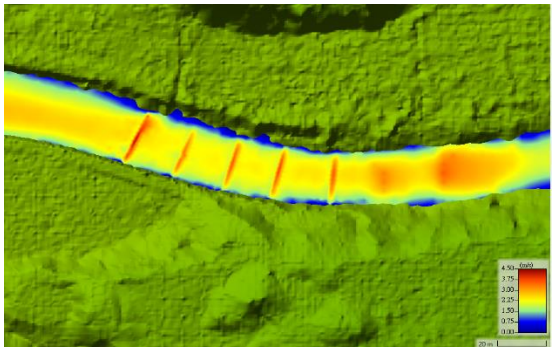
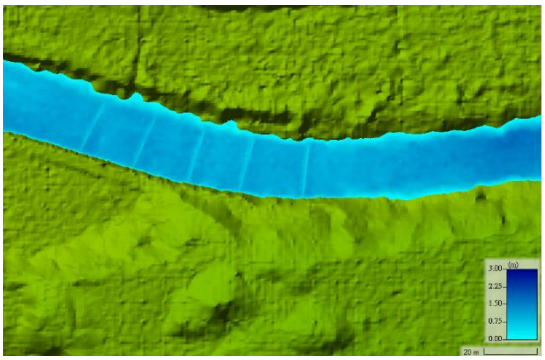
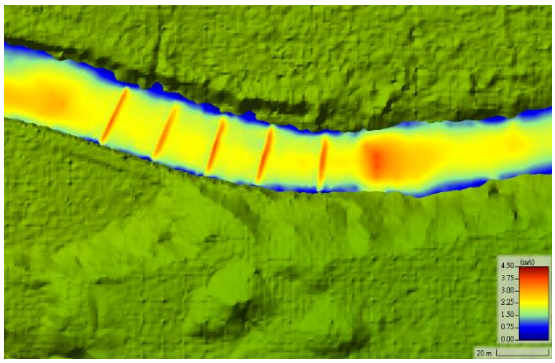
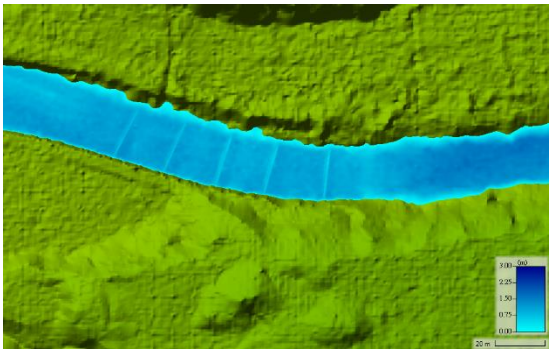
二、 Q1.11 固床工開口之模擬結果

本段將說明 Q1.11 固床工三種開口高度之相關模擬結果，並透過流程圖中三種指標，討論出固床工開口高度之相關建議，以下將詳細說明。

(一) 最大流速與水深

本段將以最大流速與水深圖，分析三種開口高度下，系列固床工是否有被成功模擬，以進行後續結果分析，最大流速與水深圖將表 8-12 以來呈現，由表中三種開口高度之最大流速與水深圖中可以看出相同比例尺下，在五根系列固床工位置處皆有明顯之流速變化，且有較淺之水深，但可以觀察出在開口高度為構造物高程之 1/4 時，流速變化與水深相較其他兩種在最下游固床工流速較快，且水深更深，將持續留意此現象，並在後續分析給出本計畫判斷之原因，但在三種開口高度下，系列固床工皆有被成功模擬，可進行後續分析。

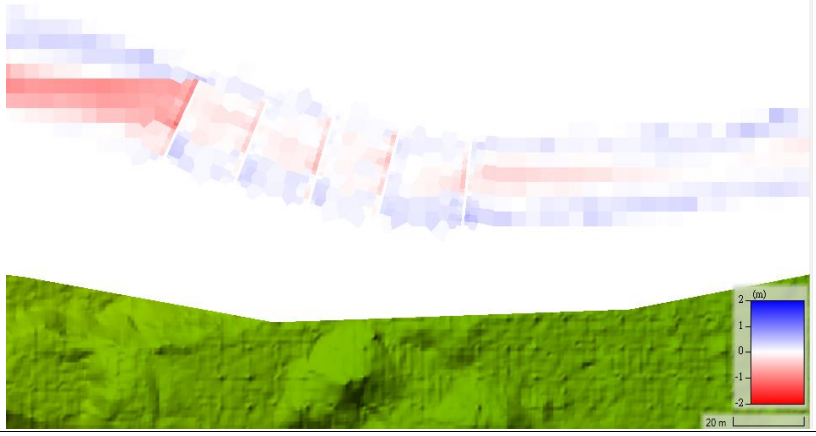
表 8-12 Q1.11 三種固床工開口之最大流速與水深圖

	
Q1.11 開口高度 1/3 最大流速圖	Q1.11 開口高度 1/3 最大水深圖
	
Q1.11 開口高度 1/4 最大流速圖	Q1.11 開口高度 1/4 最大水深圖
	
Q1.11 開口高度 1/6 最大流速圖	Q1.11 開口高度 1/6 最大水深圖

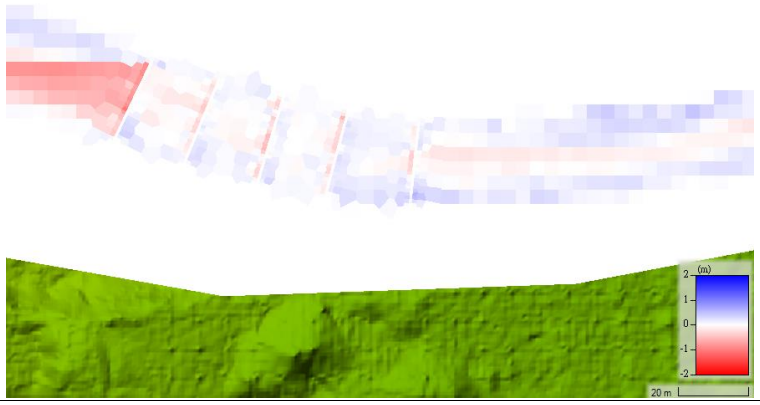
(二)　最下游固床工之衝刷深度

於最下游固床工之沖刷深度，藉由土砂沖淤圖，將固床工趾部各網格數據加總後進行平均，三種開口高度之土砂沖淤圖將由表 8-13 進行呈現，分別將最下游固床工趾部之沖刷數據進行平均，最下游固床工沖刷深度分別，開口高度 1/3 為沖刷 0.667 公尺，開口高度 1/4 為沖刷 0.725 公尺，開口高度 1/6 為沖刷 0.706 公尺，各另計為M_n。判斷式$M_n \leq M_0$，符合此條件方可通過，而由前段得出M_0為沖刷 0.7091 公尺，因此符合條件為開口高度 1/3 與 1/6，此情形亦可從前段之最大流速與水深圖中推測，由於在開口高度 1/4 時，最下游固床工之流速較快，進而導致沖刷深度提高，此結果將與其他兩項指標，淹水水深與土砂運移量之結果，互相對比與分析。

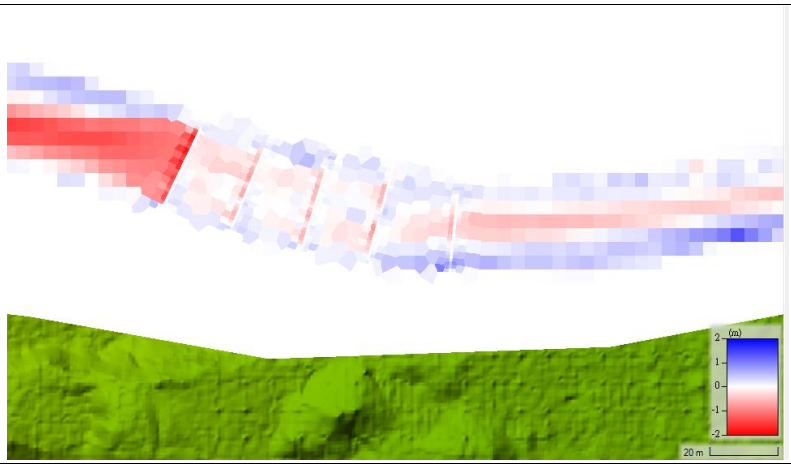
表 8-13 Q1.11 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖



Q1.11 開口高度 1/3 土砂沖淤圖



Q1.11 開口高度 1/4 土砂沖淤圖



Q1.11 開口高度 1/6 土砂沖淤圖

(三)　淹水水深

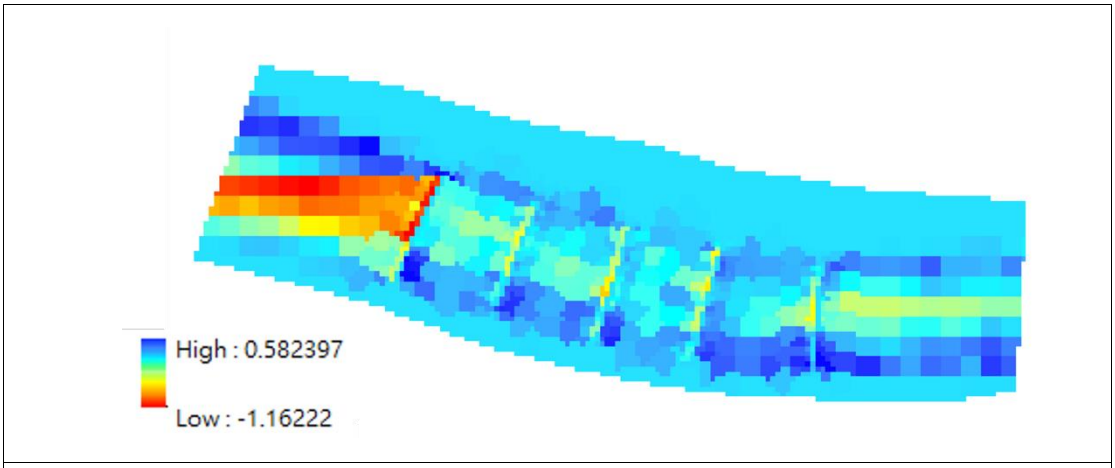
由第四章所選定之範圍，結合上述之最大水深圖，計算區域內之總水深，以此確保在較無邊坡保護之河道不會引發淹水災害，而經計算淹水水深分別為，開口高度 1/3 為 0.15818 公尺，開口高度 1/4 為 0.172421 公尺，開口高度 1/6 為 0.183376 公尺，而 Q1.11 固床工調整前之淹水水深為 0.272 公尺，與沖刷深度不同，因此三者皆符合條件$D_n \leq D_0$(D_n為調整後之淹水水深、D_0為調整前之水深)，且皆有一定程度之減少。

(四)　土砂運移量

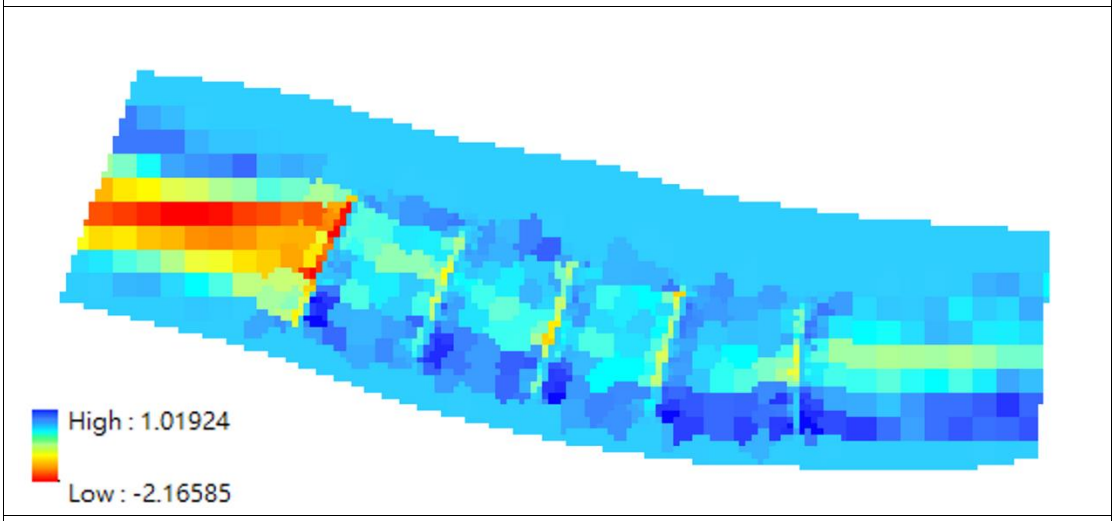
土砂運移量則分別以三種固床工開口高度之土砂沖淤圖，結合土砂運移量之選定範圍，計算範圍內之沖淤總量，三種開口高度之土砂運移量圖，則以表 8-14 進行比較，而土砂運移量分別為，開口高度 1/3 為沖刷 201.088 立方公尺，開口高度 1/4 為沖刷 327.348 立方公尺，開口高度 1/6 為沖刷 208.991 立方公尺。結合第一節之調整前土砂運移量與合理土砂量，將數據分別代入式 4.1，可得到三者土砂運移量V_r皆非為 1，此現象可從 Q1.11 之合理土砂運移量進行分析，Q1.115 之合理土砂量為沖刷 292.2091 立方公尺，已經相較調整前要多，而調整後開口高度 1/3 與 1/6 之土砂運移量皆減少，代表有更多淤積產生，而從土砂沖淤圖可看出，土砂明顯往河道兩岸淤積，此情形可能原因，本計畫判斷可能是固床工開口導致水流產生集流，使河道中心之泥沙往兩邊分散，且由於 Q1.11 之流量較小，使水流流速較為緩慢，進而導致沖刷效果較低，使土壤淤積增加，而開口高度 1/4 之情形則較為特殊，此方案從最大流速圖可知為最下游固床工流速較大之情形，造成最下游固床工流速較快之原因通

常為上游流速增加導致，當上游流速增加過多，容易連帶影響下游，且最下游固床工後方無任何水工構造物可減緩水流，影響更為明顯，故開口高度 1/4 可能本身並不適合此流量。

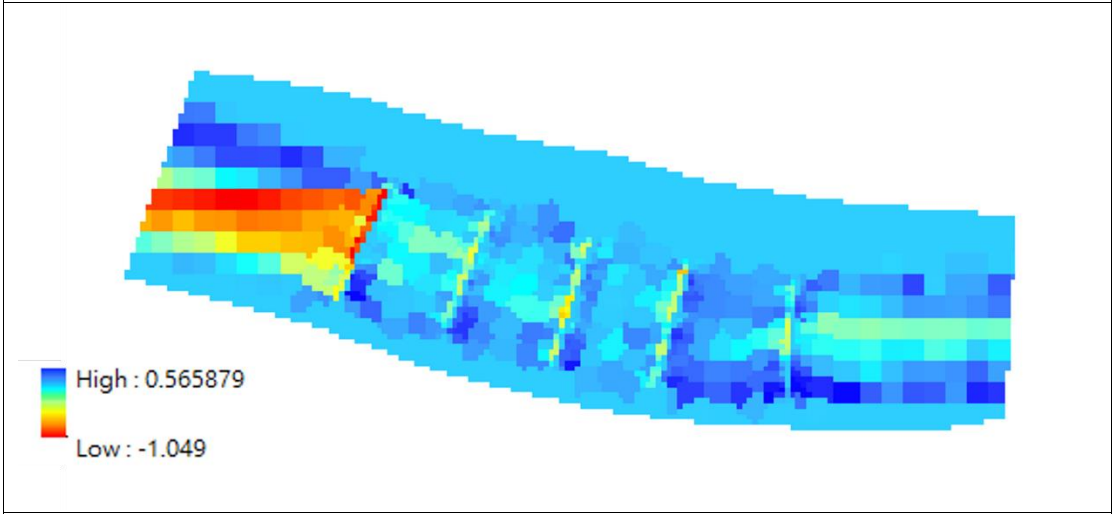
表 8-14 Q1.11 三種固床工開口高度之土砂運移量



Q1.11 開口高度 1/3 土砂運移量



Q1.11 開口高度 1/4 土砂運移量



Q1.11 開口高度 1/6 土砂運移量

(五)　分析 Q1.11 三種固床工開口高度

在 Q1.11 流量下，三種開口高度皆有未滿足之條件，但仍可以觀察出一些趨勢，首先由最大流速圖可看出在開口高度 1/4 時，其最下游固床工流速較快，這也連帶影響到沖刷深度與土砂運移量，而開口高度 1/4 亦不滿足這兩種判斷條件，但從淹水水深可看出，不論何種高度，皆可以改善淹水潛勢區域之淹水水深，而若結合三種指標，雖皆有不符合之條件，但透過比較，開口高度為 1/6 時仍為較好之方案，此方案最下游固床工之沖刷深度改善良好，且土砂運移量與開口高度 1/3 相差不大，故本計畫認為若能做好河道兩岸土砂淤積之防範工程，固床工開口高度 1/6 在 Q1.11 流量下是較為適合的。

第二節　固床工開口設計-Q2

本節將以 Q2 重現期進行固床工不同開口高度設計之模擬，將分別討論三種開口高度之各項指標，並進行分析。

一、 Q2 調整前之模擬結果

由於本計畫於整根拆除方案尚未模擬 Q2 重現期之調整前模擬，為了後續相關分析，仍需進行 Q2 固床工調整前之相關模擬，本段將詳細說明。

(一) 最大流速與水深

藉由最大流速與水深判斷是否成功模擬系列固床工，為本計畫分析前之重要工作，而最大流速與水深之結果如圖 8-80、圖 8-81 所示，皆在固床工位置處有明顯之流速變化與較淺之水深，判斷為有成功模擬出系列固床工，可進行後續之模擬與分析。

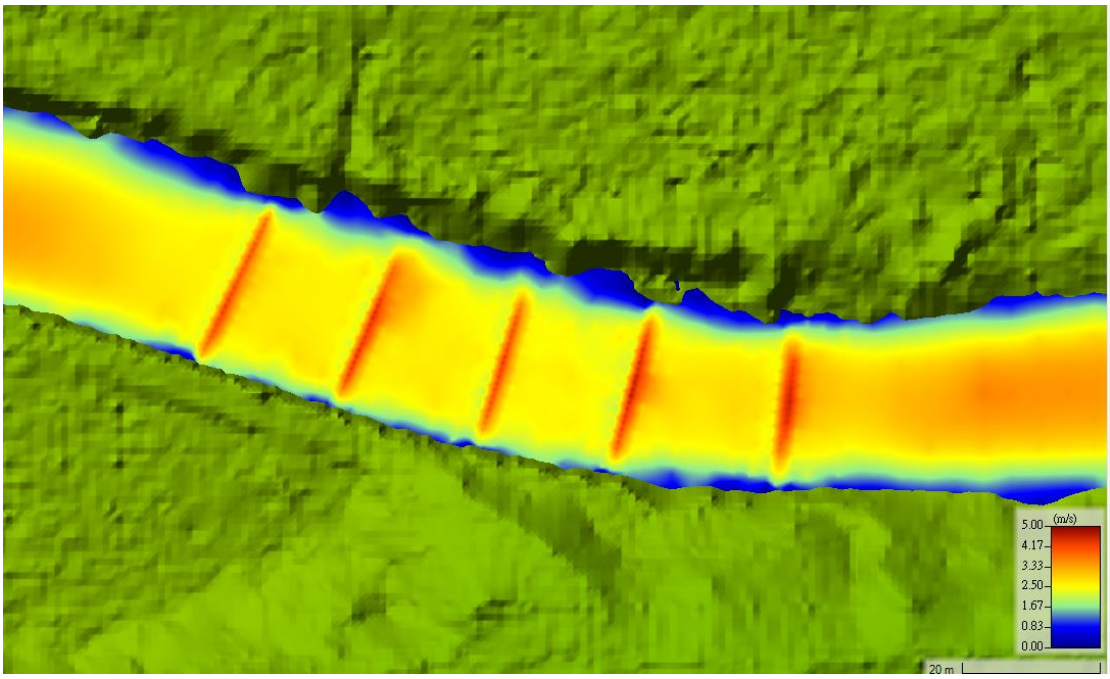


圖 8-80 Q2 最大流速圖

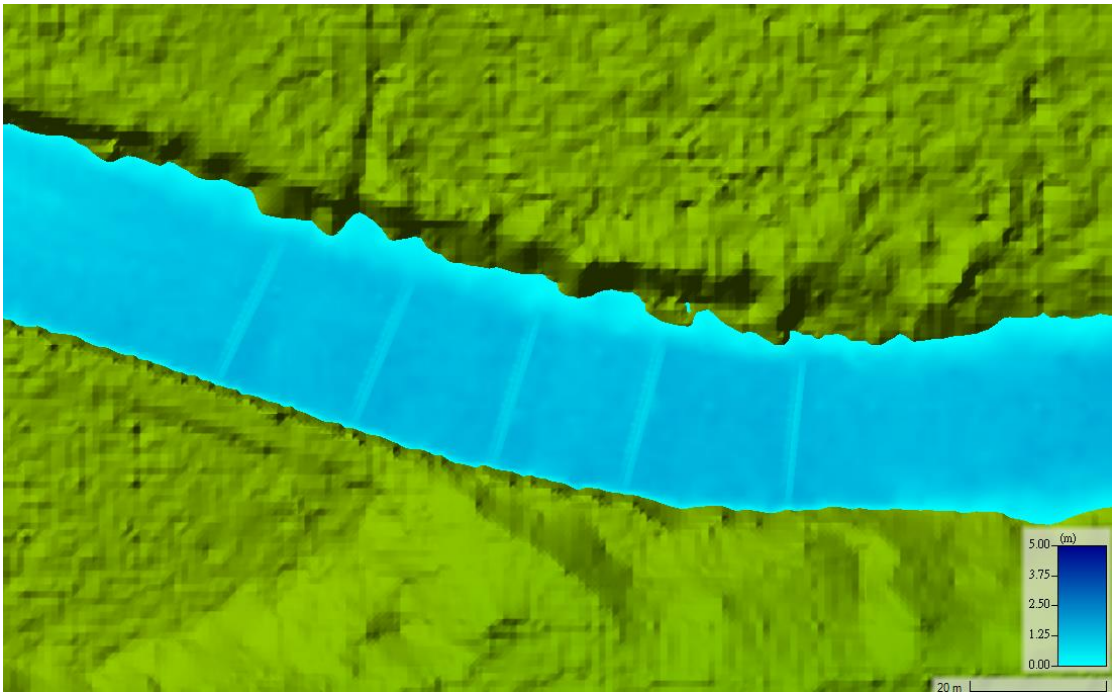


圖 8-81 Q2 最大水深圖

(二) 最下游固床工之沖刷深度

此步驟主要為計算出後續模擬所需要之M_0，藉由圖 8-82 之土砂沖淤圖，計算最下游固床工趾部網格之沖刷數據，並進行平均得沖刷深度為 1.056 公尺，此數據將供後續模擬分析使用。

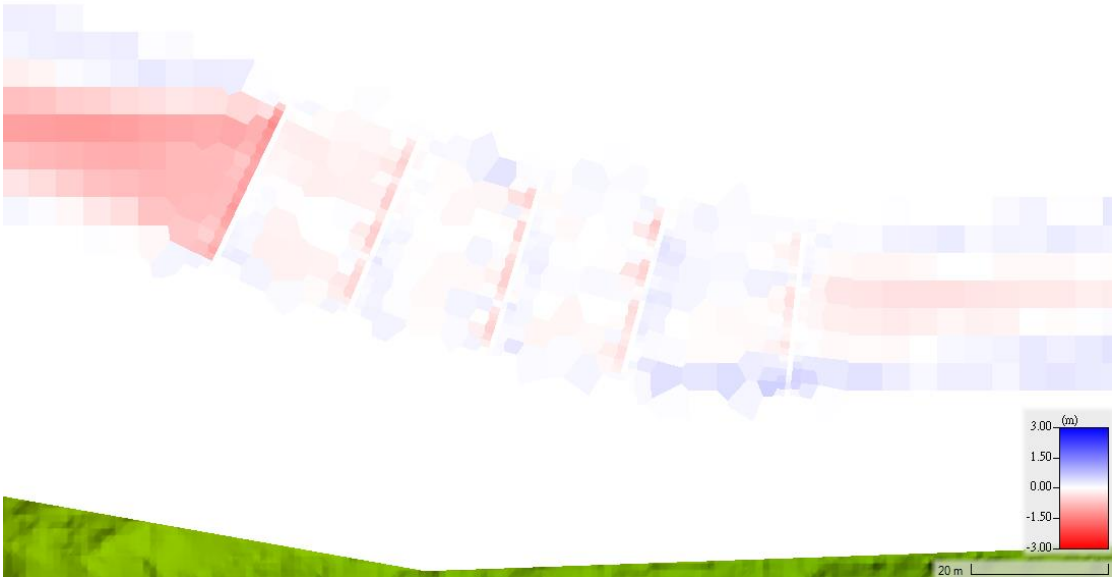


圖 8-82 Q2 土砂沖淤圖

(三) 淹水水深

結合 Q2 最大水深圖，計算淹水潛勢區域之淹水總水深，定為D_0，計算後得為 1.71604 公尺，並提供後續模擬使用。

(四)　土砂運移量

利用土砂沖淤圖，並計算選定範圍內之土砂沖淤總量，可得出土砂運移量為沖刷 571.066 立方公尺，結果如圖 8-83，將此數據定位V_0，調整前土砂運移量，並以「101 保力溪成果報告」計算重現期兩年之合理土砂運移量為沖刷 514.3107 立方公尺，計為V_r，兩種數據將結合後續開口模擬之調整後土砂運移量，代入式 4.1，以供分析。

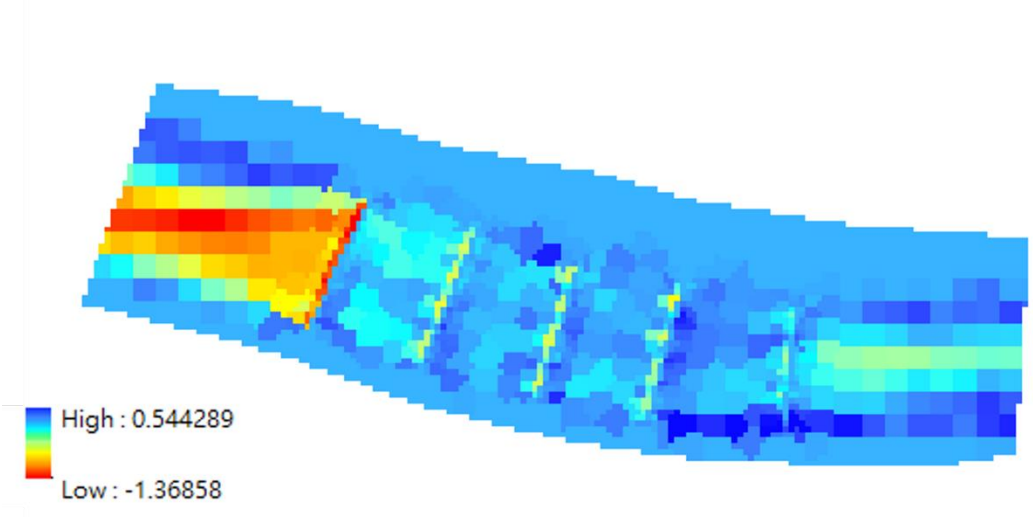


圖 8-83 Q2 土砂運移量

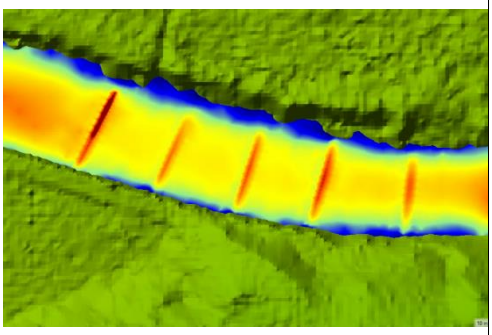
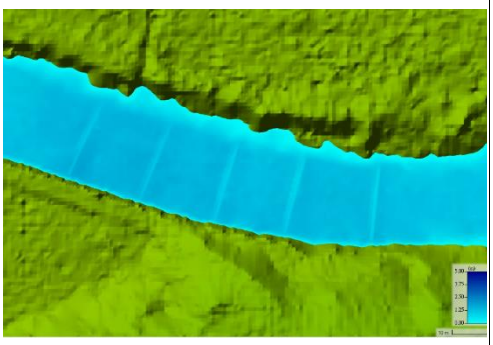
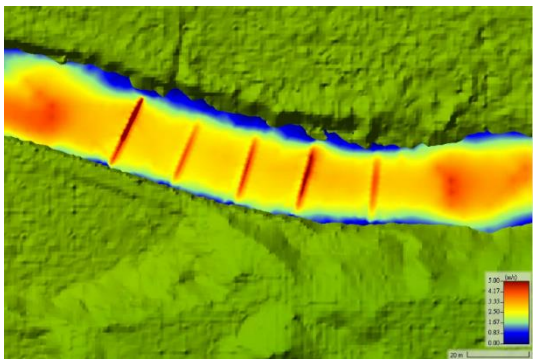
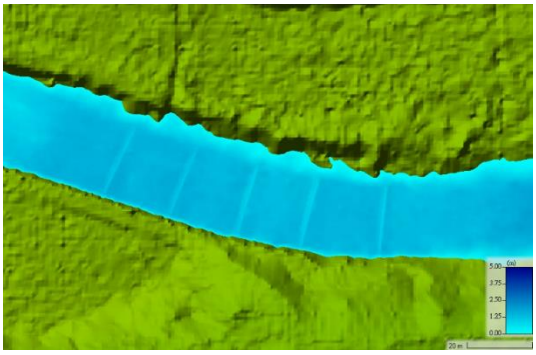
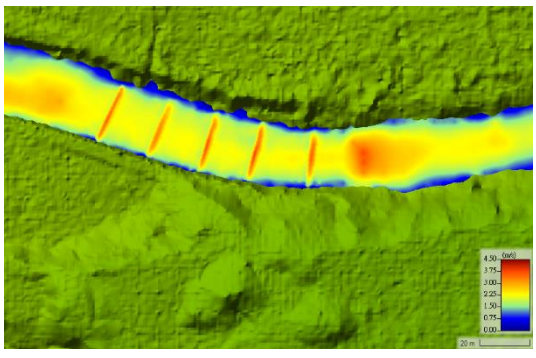
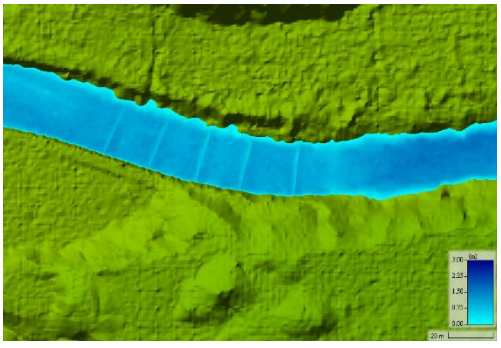
二、 Q2 固床工開口之模擬結果

本段將以 Q2 重現期，分析不同開口高度，分別為構造物高程之 1/3、1/4、1/6。並以流程方案中三種判斷標準與條件進行分析，並比較結果，以下將詳細說明。

(一) 最大流速與水深

本段將以最大流速與水深圖，分析三種開口高度下，系列固床工是否有被成功模擬，以進行後續結果分析，最大流速與水深圖將表 8-15 以來呈現，由表中三種開口高度之最大流速與水深圖中可以看出相同比例尺下，在五根系列固床工位置處皆有明顯之流速變化，且有較淺之水深，可以觀察出在開口高度為構造物高程之 1/3 與 1/4 時，流速變化與水深相較開口高度 1/6，在最下游固床工流速較快，且開口高度 1/4 最下游固床工下游處，水深更深，本計畫將持續留意此現象，並在後續分析給出推測之可能原因，但在三種開口高度下，系列固床工皆有被成功模擬，可進行後續分析。

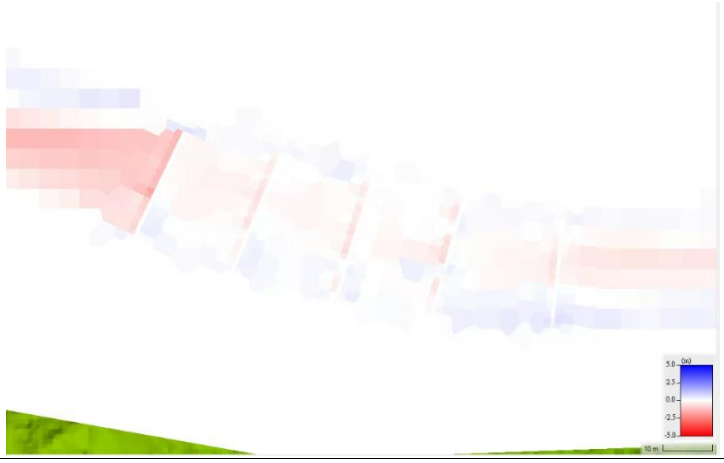
表 8-15 Q2 三種固床工開口高度之最大流速與水深圖

	
Q2 開口高度 1/3 最大流速圖	Q2 開口高度 1/3 最大水深圖
	
Q2 開口高度 1/4 最大流速圖	Q2 開口高度 1/4 最大水深圖
	
Q2 開口高度 1/6 最大流速圖	Q2 開口高度 1/6 最大水深圖

(二)　最下游固床工之沖刷深度

於最下游固床工之沖刷深度，藉由土砂沖淤圖，將固床工趾部各網格數據加總後進行平均，三種開口高度之土砂沖淤圖將由表 8-16 進行呈現，分別將最下游固床工趾部之沖刷數據進行平均，最下游固床工沖刷深度分別，開口高度 1/3 為沖刷 1.1587 公尺，開口高度 1/4 為沖刷 1.32125 公尺，開口高度 1/6 為沖刷 1.13875 公尺，各另計為M_n。判斷式$M_n \leq M_0$，符合此條件方可通過，而由前段得出M_0為沖刷 1.056 公尺，因此皆沒有開口方案符合此條件。從最大流速圖可觀察出，三種方案尤其是 1/4 最下游固床工流速較大，隨著流量提高，可能使水流集流現象更為明顯，且與 Q1.11 情況相同，又以開口高度 1/4 最為明顯，這也反映在最大的沖刷深度下，相比之下開口高度 1/6 之流速變化相對較平緩，流速分配也較為穩定，使沖刷深度為三者最低。

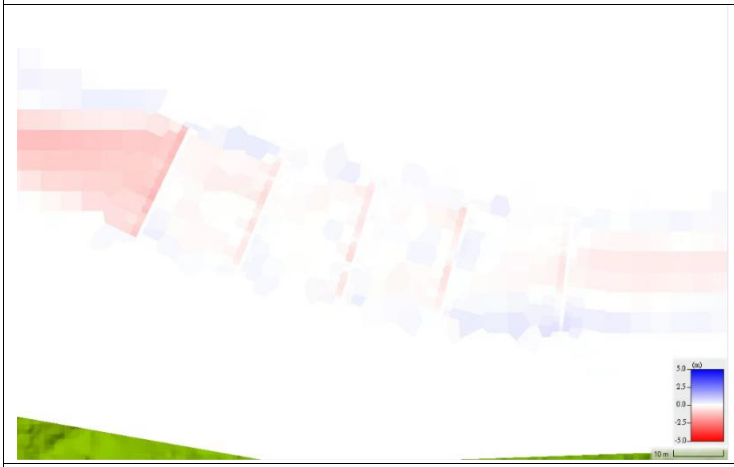
表 8-16 Q2 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖



Q2 開口高度 1/3 土砂沖淤圖



Q2 開口高度 1/4 土砂沖淤圖



Q2 開口高度 1/6 土砂沖淤圖

(三)　淹水水深

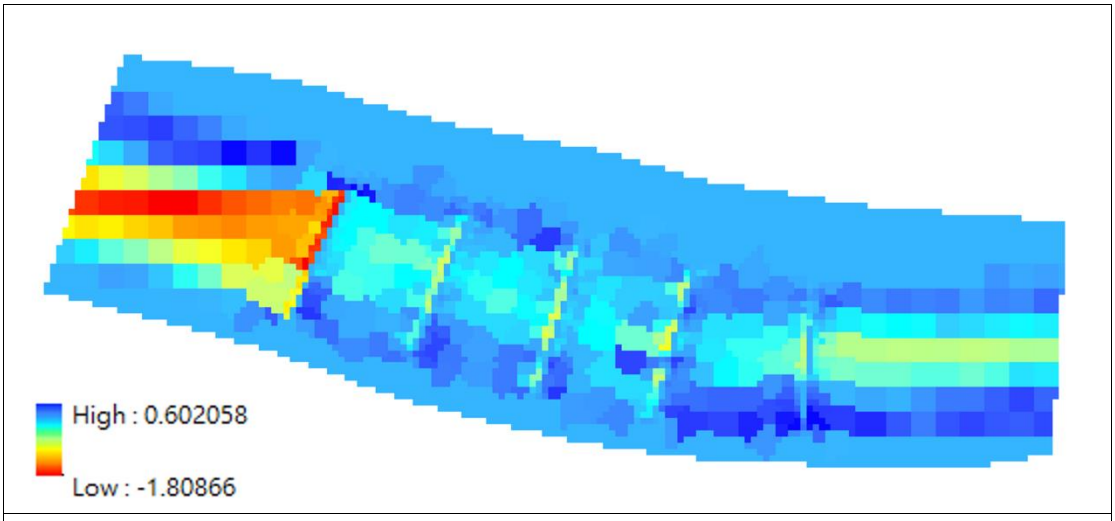
由第四章所選定之範圍，結合上述之最大水深圖，計算區域內之總水深，以此確保在較無邊坡保護之河道不會引發淹水災害，而經計算淹水水深分別為，開口高度 1/3 為 0.97 公尺，開口高度 1/4 為 2.19552 公尺，開口高度 1/6 為 0.85083 公尺，而 Q2 固床工調整前之淹水水深為 1.71604 公尺，相較沖刷深度，開口高度 1/3 與 1/6 符合條件$D_n \leq D_0$(D_n為調整後之淹水水深、D_0為調整前之水深)，而開口高度 1/4 仍未符合判斷標準，且淹水範圍較大。

(四)　土砂運移量

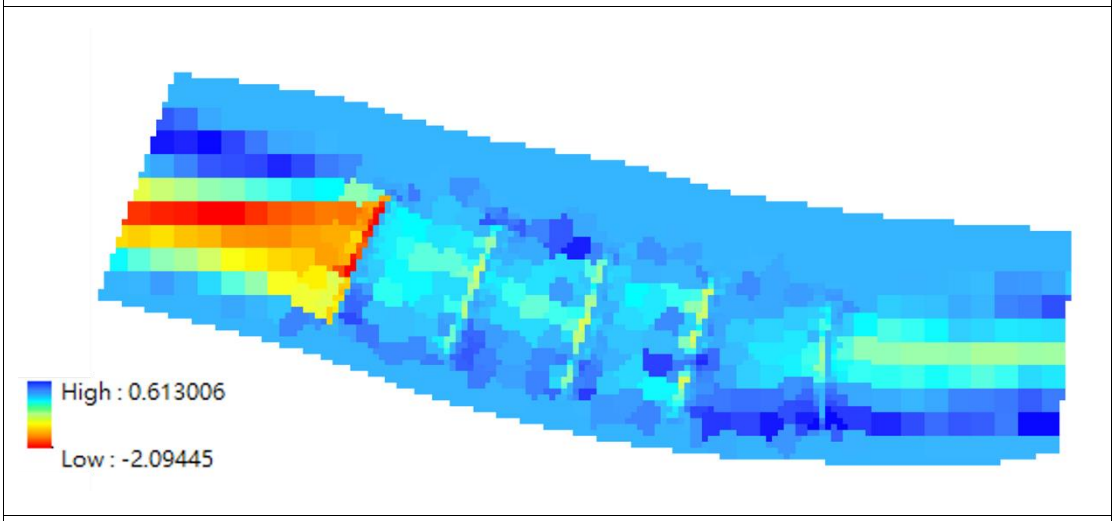
土砂運移量則分別以三種固床工開口高度之土砂沖淤圖，結合土砂運移量之選定範圍，計算範圍內之沖淤總量，三種開口高度之土砂運移量圖，則以

表 8-17 進行比較，而土砂運移量分別為，開口高度 1/3 為沖刷 603.245 立方公尺，開口高度 1/4 為沖刷 682.521 立方公尺，開口高度 1/6 為沖刷 619.559 立方公尺。結合第二節之調整前土砂運移量與合理土砂量，將數據分別代入式 4.1，可得到三者土砂運移量V_r皆非為 1，此現象可能與沖刷深度較有相關，在 Q2 中三種開口高度相比調整前，在最下游固床工皆有較大之流速，此除了造成沖刷深度增加，也使土砂運移量沖刷增多。

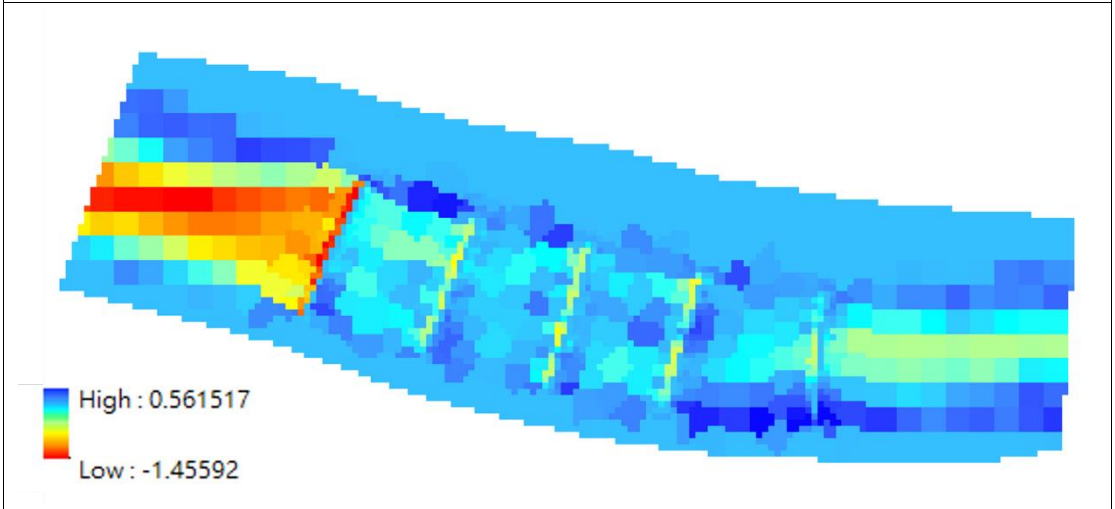
表 8-17 Q2 三種固床工開口高度之土砂運移量



Q2 開口高度 1/3 土砂運移量



Q2 開口高度 1/4 土砂運移量



Q2 開口高度 1/6 土砂運移量

(五)　分析 Q2 三種固床工開口高度

在 Q2 流量下，三種開口高度皆未滿足沖刷深度與土砂運移量之條件，而淹水水深則為開口高度 1/3 與 1/6 通過。可看出隨流量增大，有可能會使水流集流現象更為明顯，造成更加嚴重之沖蝕，但在淹水水深方面，開口高度 1/3 與 1/6 仍舊有良好的改善成效，不論是淹水範圍或是水深皆有成功改善，而開口高度 1/4 仍為三種中較不理想之方案，可能原因推測與 Q1.11 相同，構造物高程之 1/4 或許為不適合之條件，在 1/3 高度雖有集流效果，但透過開口高度較高，亦有類似防砂壩降壩之成效在，而 1/6 高度雖降低高度不多，但也因此可降低集流效果，因此表現亦可接受，1/4 開口高度也許處在一個中間的效果，使其有集流效果，降壩成效亦不明顯，使其表現較不理想，而在三種開口方案中，與 Q1.11 相同，仍為 1/3 開口高度較為理想。

第三節　固床工開口設計-Q5

本節將以 Q5 重現期進行固床工不同開口高度設計之模擬，將分別討論三種開口高度之各項指標，並進行分析。

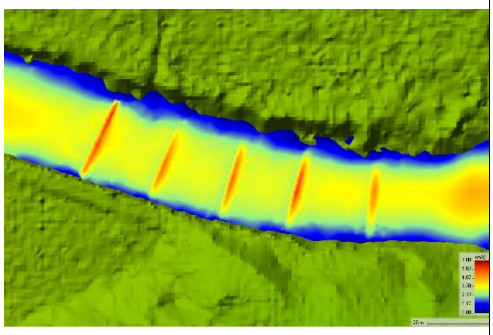
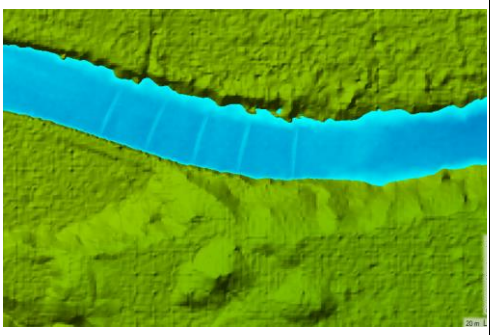
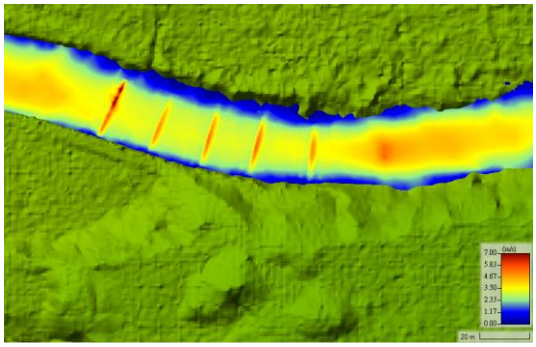
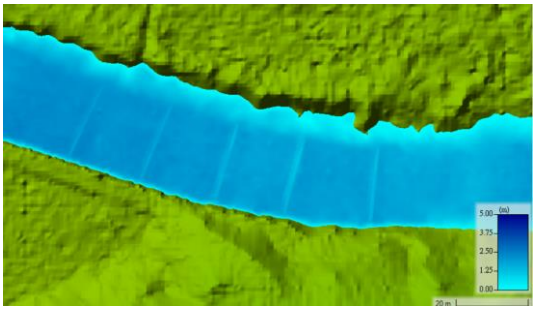
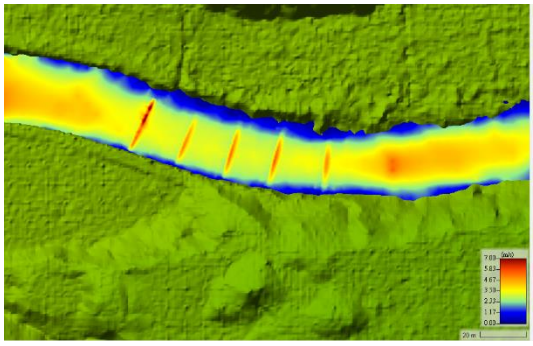
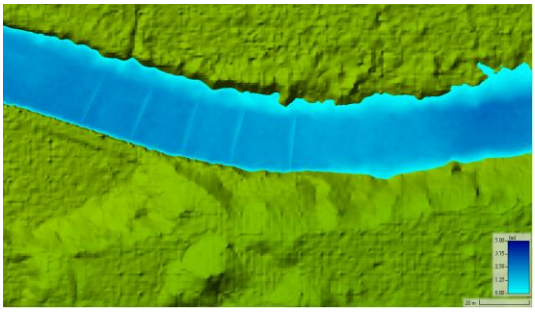
一、 Q5 固床工開口之模擬結果

由於 Q5 重現期之調整前模擬已在上章 Q5 調整前之模擬結果有所結果，故本章節將直接說明有關 Q5 在三種固床工開口高度之模擬結果並進行分析。

(一) 最大流速與水深

本段將以最大流速與水深圖，分析三種開口高度下，系列固床工是否有被成功模擬，以進行後續結果分析，最大流速與水深圖將表 8-18 以來呈現，由表中三種開口高度之最大流速與水深圖中可以看出相同比例尺下，在五根系列固床工位置處皆有明顯之流速變化，且有較淺之水深，可以觀察出在最上游固床工之上游處，隨著流量變大，有愈明顯之集流現象，可從最大流速圖之流速分佈判斷，而從三種開口高度之最大流速與水深圖中，可判斷五根系列固床工皆有被成功模擬，可進行後續分析。

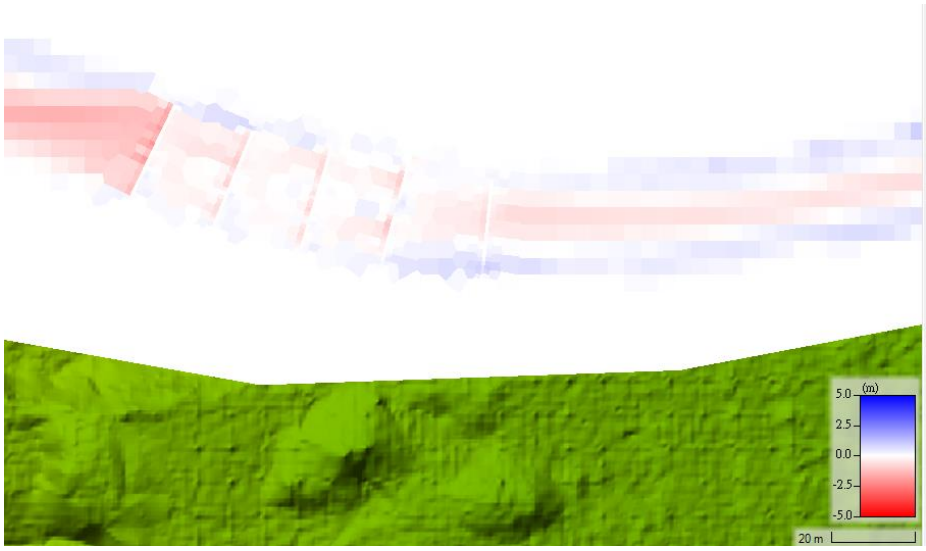
表 8-18 Q5 三種固床工開口高度之最大流速與水深圖

	
Q5 開口高度 1/3 最大流速圖	Q5 開口高度 1/3 最大水深圖
	
Q5 開口高度 1/4 最大流速圖	Q5 開口高度 1/4 最大水深圖
	
Q5 開口高度 1/6 最大流速圖	Q5 開口高度 1/6 最大水深圖

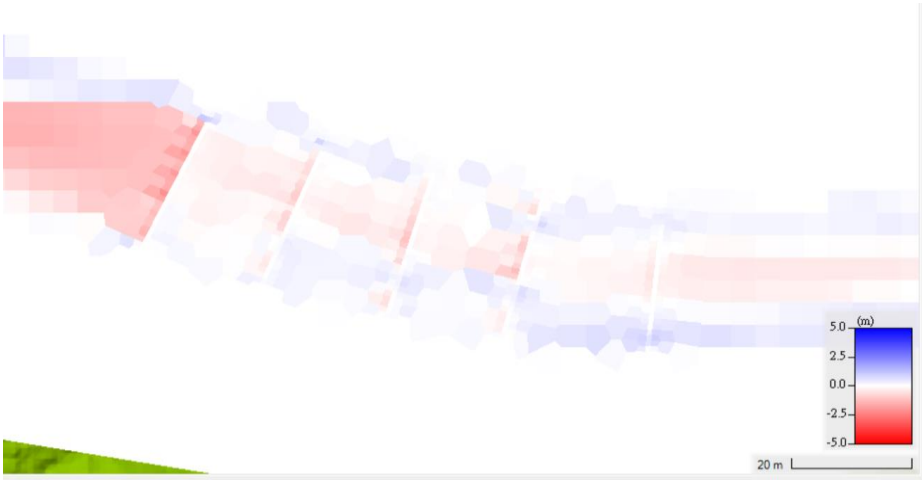
(二)　最下游固床工之沖刷深度

於最下游固床工之沖刷深度，藉由土砂沖淤圖，將固床工趾部各網格數據加總後進行平均，三種開口高度之土砂沖淤圖將由表 8-19 進行呈現，分別將最下游固床工趾部之沖刷數據進行平均，最下游固床工沖刷深度分別，開口高度 1/3 為沖刷 1.43208 公尺，開口高度 1/4 為沖刷 1.52667 公尺，開口高度 1/6 為沖刷 1.325 公尺，各另計為M_n。判斷式$M_n \leq M_0$，符合此條件方可通過，而由前章得出M_0為沖刷 1.68917 公尺，因此不同於前面流量，所有方案皆有通過，其中又以開口高度 1/6 改善最多。從最大流速圖可觀察出，三種方案皆有較穩定之流速，皆有所改善，而與之前趨勢相同的是，在改善沖刷深度分面為 1/6 開口高度最為理想，1/3 開口高度次之，1/4 開口高度改善幅度較小。

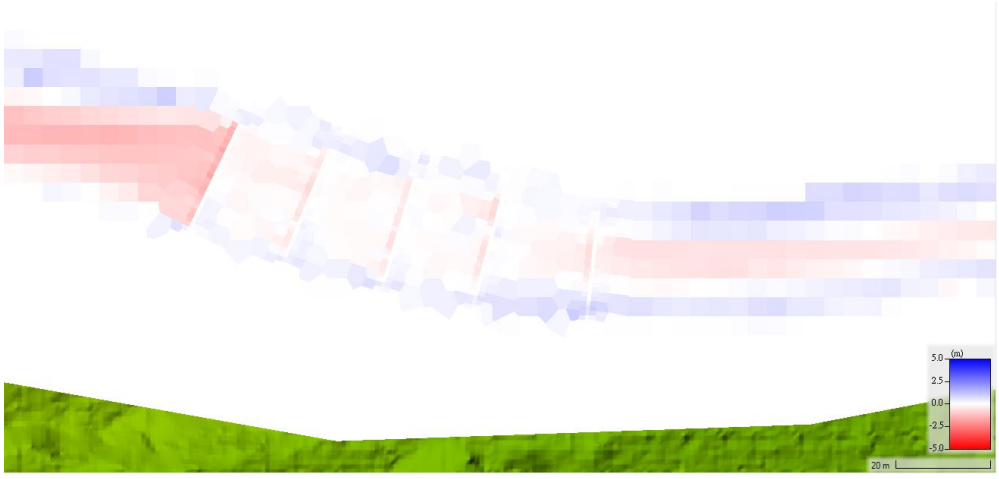
表 8-19 Q5 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖



Q5 開口高度 1/3 土砂沖淤圖



Q5 開口高度 1/4 土砂沖淤圖



Q5 開口高度 1/6 土砂沖淤圖

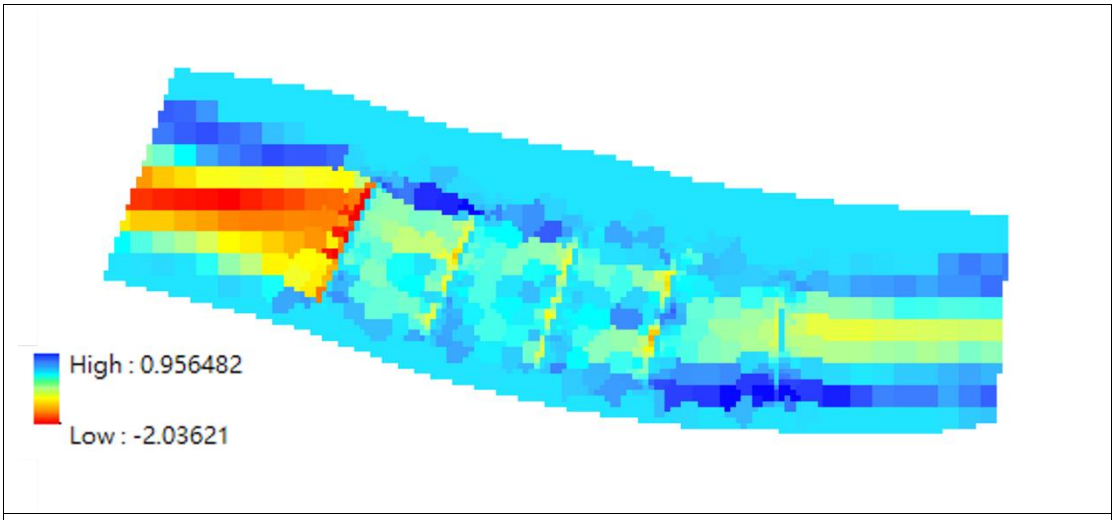
(三)　淹水水深

由第四章所選定之範圍，結合上述之最大水深圖，計算區域內網格之水深，並進行加總得到總水深，藉由比較總水深，以此確保在較無邊坡保護之河道不會引發淹水災害，而經計算淹水水深分別為，開口高度 1/3 為 6.35 公尺，開口高度 1/4 為 10.973 公尺，開口高度 1/6 為 6.013 公尺，而 Q5 固床工調整前之淹水水深為 11.48 公尺，三種開口高度皆符合條件$D_n \leq D_0$(D_n為調整後之淹水水深、D_0為調整前之水深)，而開口高度 1/4 與調整前相差不大，且淹水範圍相較其他兩種開口高度更大。

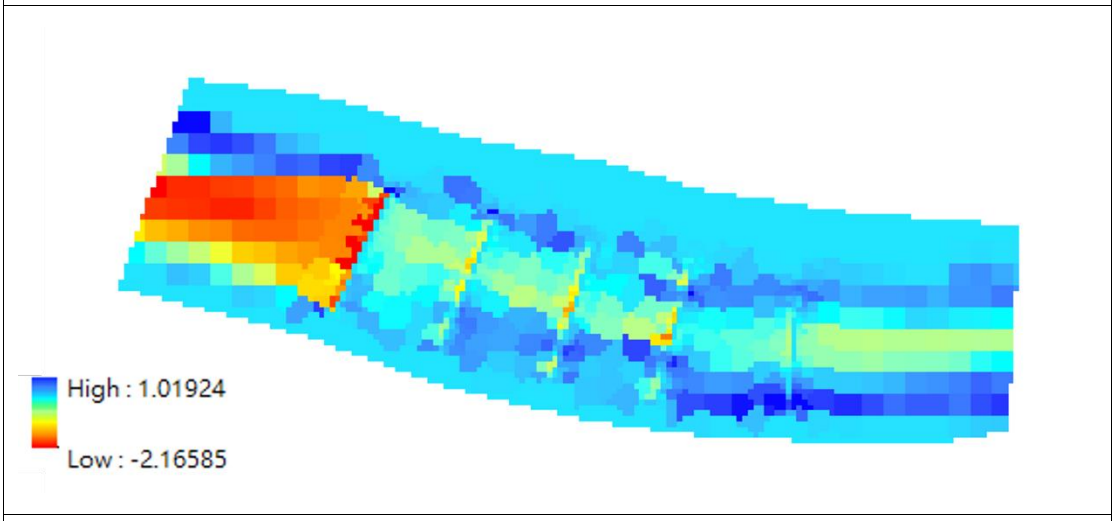
(四)　土砂運移量

土砂運移量則分別以三種固床工開口高度之土砂沖淤圖，結合土砂運移量之選定範圍，計算範圍內之沖淤總量，三種開口高度之土砂運移量圖，則以表 8-20 進行比較，而土砂運移量分別為，開口高度 1/3 為沖刷 847.005 立方公尺，開口高度 1/4 為沖刷 758.898 立方公尺，開口高度 1/6 為沖刷 635.505 立方公尺。結合上一章之調整前土砂運移量與合理土砂量，將數據分別代入式 4.1，可得到在 1/3、1/4 開口高度之V_r值為 1，為符合判斷條件的，而 1/6 開口高度並未符合，目前三種開口高度，條件皆通過有 1/3 與 1/4，1/6 開口高度其土砂運移量標準並未通過。

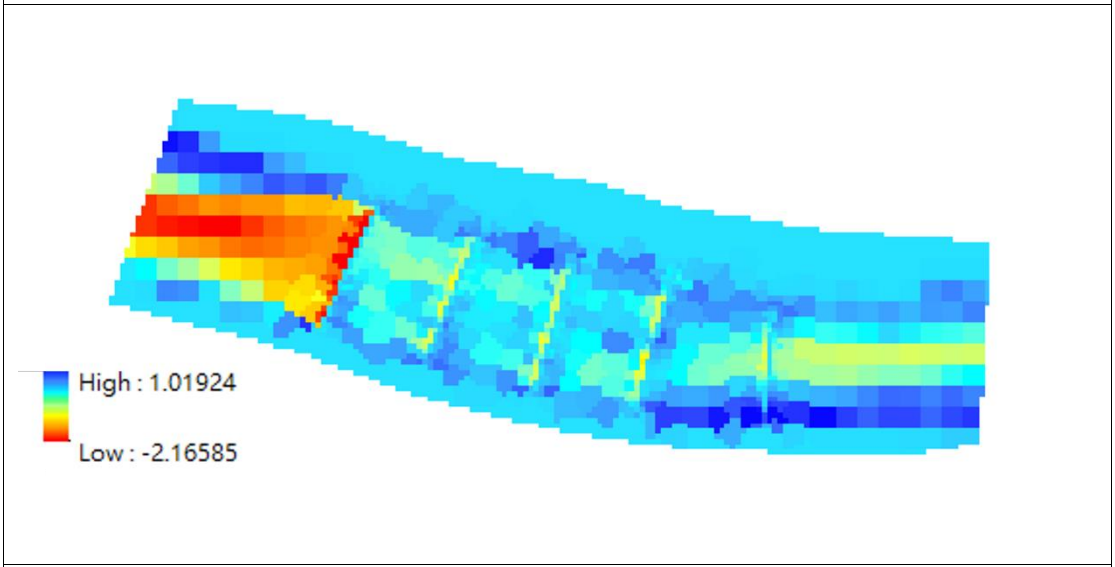
表 8-20 Q5 三種固床工開口高度之土砂運移量



Q5 開口高度 1/3 土砂運移量



Q5 開口高度 1/4 土砂運移量



Q5 開口高度 1/6 土砂運移量

(五)　分析 Q5 三種固床工開口高度

在三種開口高度中，1/3 與 1/4 開口高度為全通過，1/6 開口高度未通過土砂運移量，可能原因為，單從最下游固床工之沖刷深度，1/6 開口高度此種方案皆較理想，而考慮到土砂運移量，最下游固床工下游側為影響沖刷量最為劇烈之區域，因此有可能導致開口高度 1/6 方案降低過多之沖刷量，而雖開口高度 1/4 皆通過，但其在沖刷深度與淹水水深方面，皆為勉強通過標準，其穩定狀況並不如 1/3 高度開口，考量到三種判斷標準，1/3 開口高度仍為較為理想之方案，且在 Q5 重現期條件下，皆通過。

第四節　固床工開口設計-Q95

本節將以 Q95 重現期進行固床工不同開口高度設計之模擬，與判斷固床工是否整根拆除雷同，Q95 由於流量較低，故並不會有淹水問題，因此在判斷標準時，將只分析最下游固床工之沖刷深度與土砂運移量。

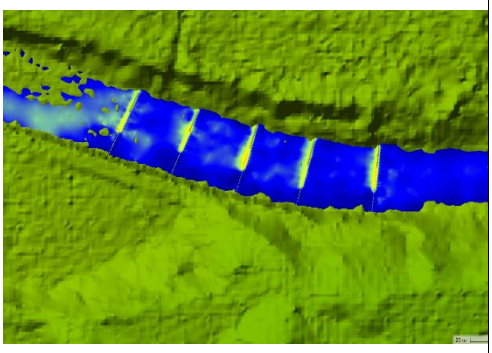
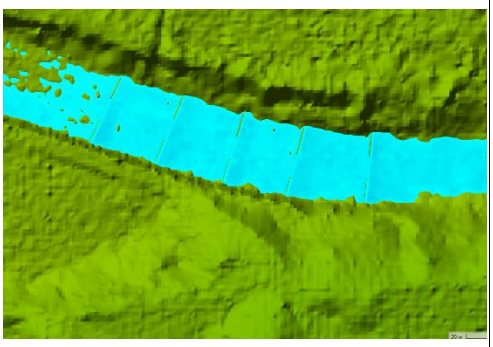
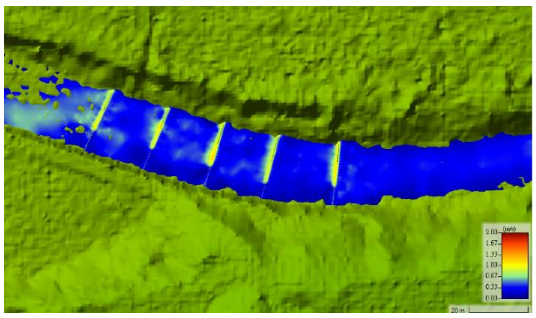
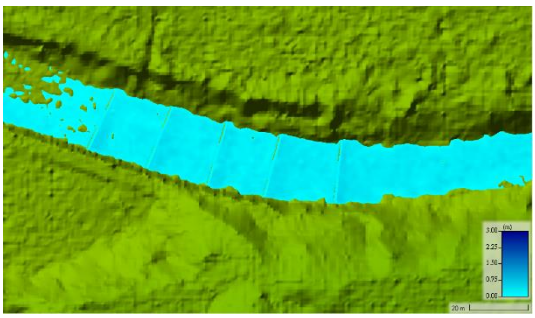
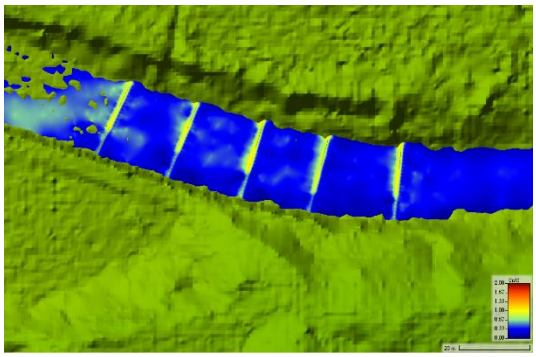
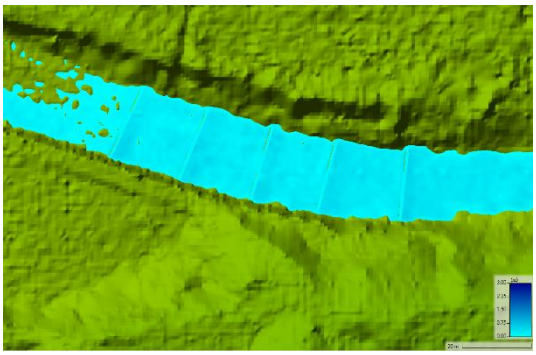
一、 Q95 固床工開口之模擬結果

以下將針對與前段相同之三種固床工開口高度，進行 Q95 模擬結果說明。

(一) 最大流速與水深

本段將以最大流速與水深圖，分析三種開口高度下，系列固床工是否有被成功模擬，以進行後續結果分析，最大流速與水深圖將以表 8-21 來呈現，由表中三種開口高度之最大水深圖中可以看出在較小流量的情況下，可以明顯看出在固床工位置中間處有水流流過，可更加證明是有被成功模擬的，且由最大流速圖可看出，皆有明顯流速變化，且較靠近河道右側，本計畫判斷系列固床工為有效模擬，可進行後續相關分析。

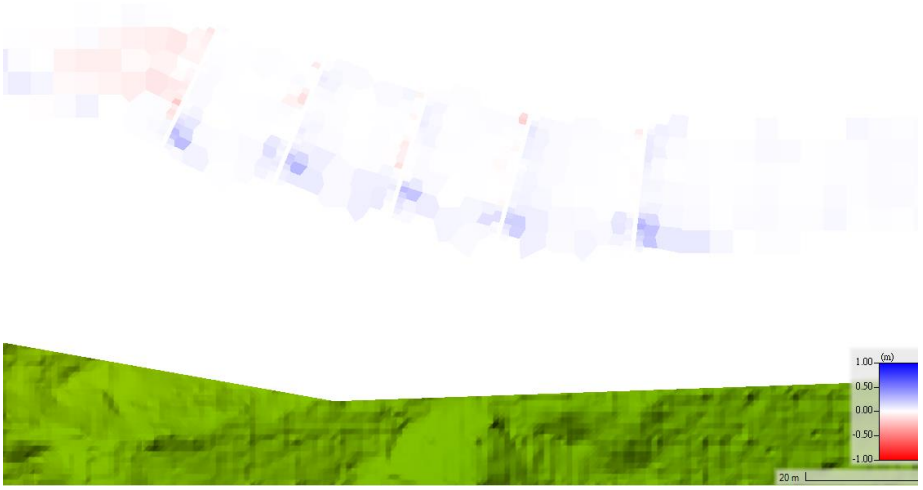
表 8-21 Q95 三種固床工開口高度之最大流速與水深圖

	
Q95 開口高度 1/3 最大流速圖	Q95 開口高度 1/3 最大水深圖
	
Q95 開口高度 1/4 最大流速圖	Q95 開口高度 1/4 最大水深圖
	
Q95 開口高度 1/6 最大流速圖	Q95 開口高度 1/6 最大水深圖

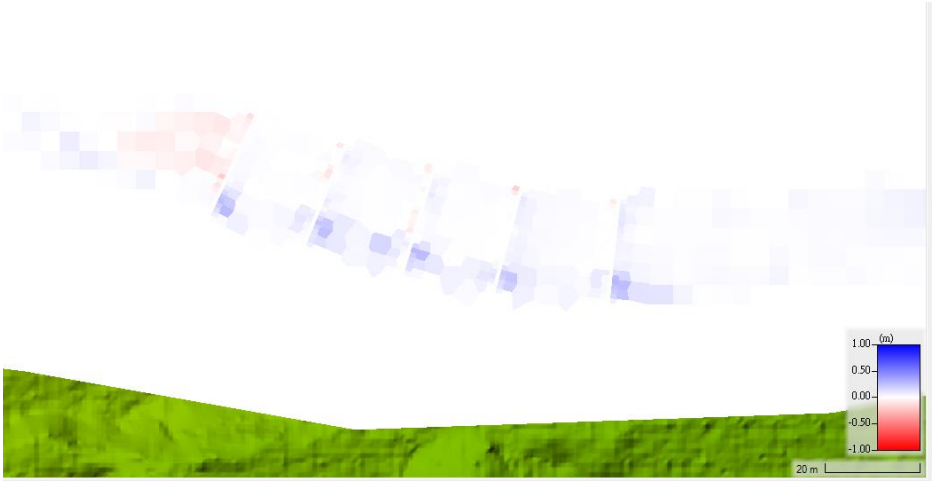
(二) 最下游固床工之沖刷深度

於最下游固床工之沖刷深度，藉由土砂沖淤圖，將固床工趾部各網格數據加總後進行平均，三種開口高度之土砂沖淤圖將由表 8-22 進行呈現，分別將最下游固床工趾部之沖刷數據進行平均，最下游固床工沖刷深度分別，開口高度 1/3 為沖刷 0.0633 公尺，開口高度 1/4 為沖刷 0.05889 公尺，開口高度 1/6 為沖刷 0.06278 公尺，各另計為M_n。判斷式$M_n \leq M_0$，滿足此條件方可通過，而由前章得出M_0為沖刷 0.05111 公尺，所有方案皆未通過，但與之前趨勢相同，為 1/6 開口高度最為理想，1/3 開口高度次之，1/4 開口高度改善幅度較小，推測可能原因如同整根固床工拆除相同，流量太小導致，在變動時亦產生較為劇烈之影響。

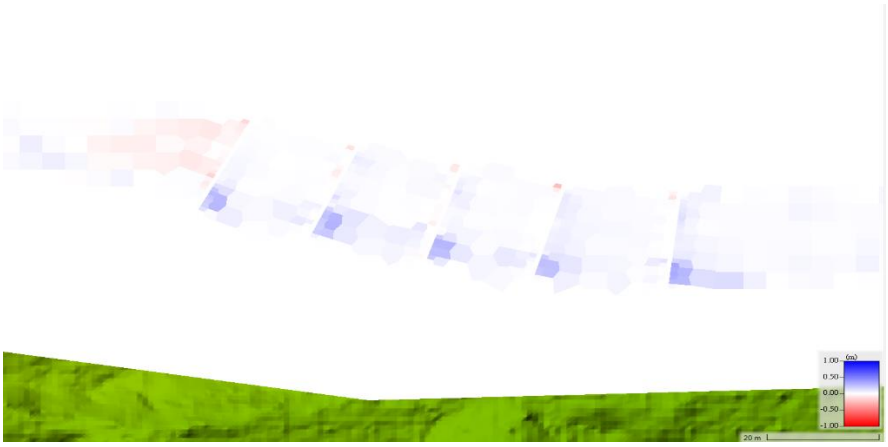
表 8-22 Q95 三種固床工開口高度之土砂沖淤圖



Q95 開口高度 1/3 土砂沖淤圖



Q95 開口高度 1/4 土砂沖淤圖



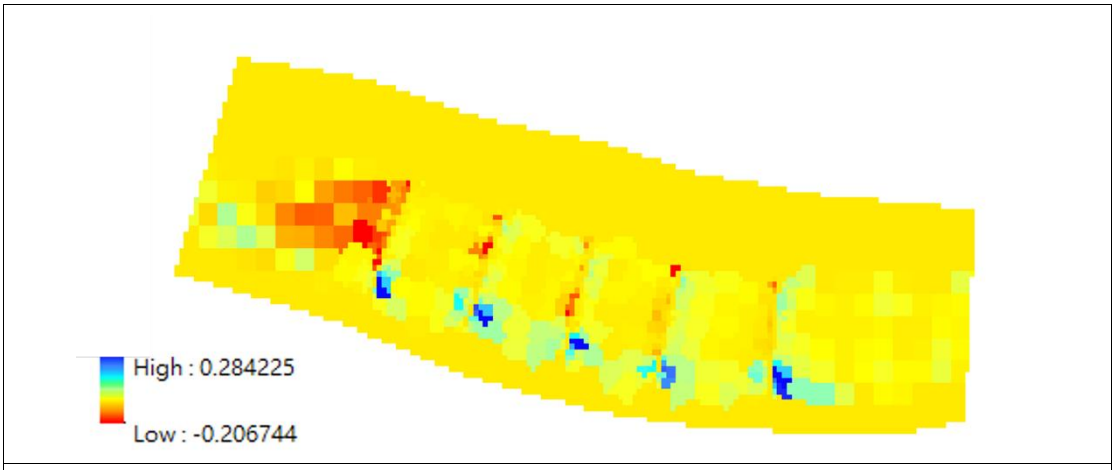
Q95 開口高度 1/6 土砂沖淤圖

(三) 土砂運移量

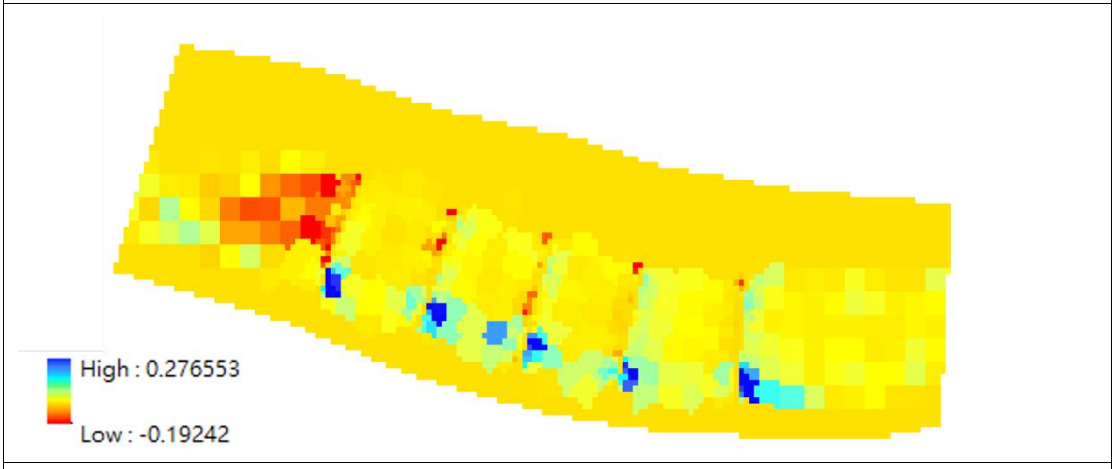
土砂運移量則分別以三種固床工開口高度之土砂沖淤圖，結合土砂運移量之選定範圍，計算範圍內之沖淤總量，三種開口高度之土砂運移量圖，則以表 8-23

表 8-17 進行比較，而土砂運移量分別為，開口高度 1/3 為淤積 85 立方公尺，開口高度 1/4 為淤積 72 立方公尺，開口高度 1/6 為淤積 80 立方公尺。結合上一章之調整前土砂運移量與合理土砂量，將數據分別代入式 4.1，可得到在 1/3、1/4 與 1/6 開口高度之V_r值皆為 1，皆符合判斷條件。

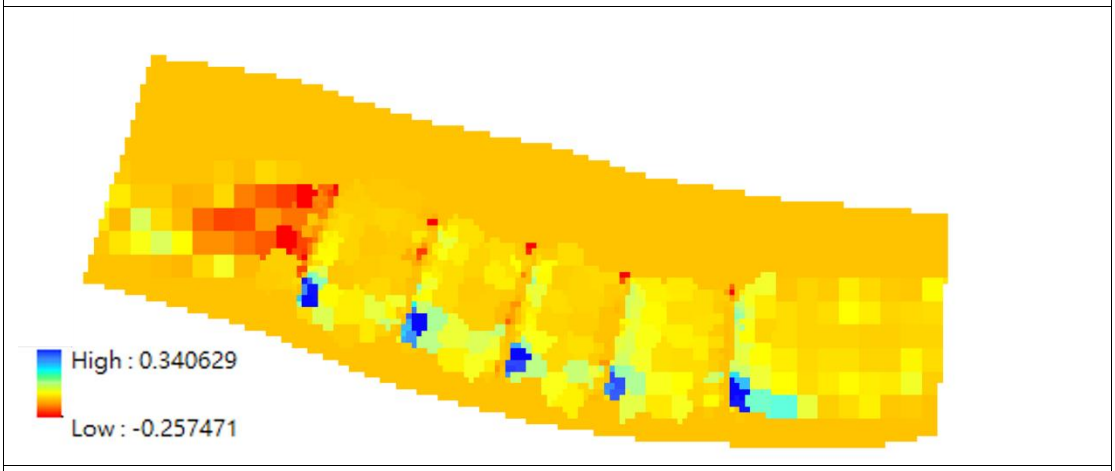
表 8-23 Q95 三種固床工開口高度之土砂運移量



Q95 開口高度 1/3 土砂運移量



Q95 開口高度 1/4 土砂運移量



Q95 開口高度 1/6 土砂運移量

(四)　分析 Q95 三種固床工開口高度

在 Q95 流量下，三種固床工開口方案在沖刷深度方面，相較整根拆除，整體更加沖刷，推測可能原因為在極低流量下，水流相較於平均通過固床工，反而這種開口設計會使水流容易集中，此集流會使沖刷深度更為嚴重，而在土砂運移量方面，與整根拆除無異，由於 Q95 換算後之合理土砂量較小，因此只要有減少淤積，則皆為有改善。

第五節　固床工開口設計-結論與分析

現今，相較於整根固床工拆除這種影響較大且對安全較有疑慮之工程，普遍較為能接受固床工開口，改善生態的同時亦可以同時兼顧構造物本身之功用，本節將針對不同重現期之模擬結果進行結論與分析。

一、 沖刷深度

在沖刷深度方面，在各重現期流量皆為同一種趨勢，開口高度 1/6 為最優，1/3 次之，1/4 最不理想，因此若想改善系列固床工最下游趾部之沖刷深度，可選擇開口構造物高程之 1/6，其次為 1/3，河流之集流效應容易使河道中心掏刷更為嚴重，由土砂沖淤圖可以發現，相較於調整前之方案，在河道中心之沖刷深度有略為增加，除了原本右岸較為掏刷情形，開口後也須評估河道中心之掏刷情況，以免造成更為嚴重之災害。

二、 淹水水深

淹水水深方面，在各重現期流量中，三種方案幾乎皆可有效改善淹水災害，其中又以開口高度 1/3 與 1/6 最為理想，推測解可以改善原因為固床工開口後，可以一定程度集流，分散了水流往兩側之流速，使淹水水深降低，此現象也可以反映在更多的河道兩岸淤積。

三、 土砂運移量

在土砂運移量方面，符合條件方案並不多，唯有 Q5 重現期之開口高度 1/3 與 1/4，但在其餘方案中，開口高度 1/3 雖未符合標準，但改善成效仍最為穩定，由於固床工開口後，沖刷深度並不一

定會穩定改善，原因如同沖刷深度所提，有集流現象發生，導致河道中心有更為嚴重之沖刷，而此現象主要集中在最下游固床工，而本研究發現若固床工間距密集，雖然在固床工之間可以使河道坡度穩定，且有效改山土砂沖淤，但在最下游固床工後，尤其其下游並沒有後續之水工構造物可以延緩水流，容易使最下游固床工產生嚴重之沖刷，本計畫發現，主導土砂運移量最大占比，即為最下游之固床工，因此開口後對最下游固床工之沖刷產生之不穩定性，亦會對土砂運移量產生影響

四、 總結

固床工開口設計為一有效改善生態方面之調整工程，但在固床工開口高度之取捨，本計畫認為可以考慮兩點，一為降高程所產生之類似降壩效應，二為水流之集流，建議將兩者可以做取捨，往其中一點進行改良，期望可以各項皆有穩定表現，則可以加深開口，若僅想改善沖刷深度，且能進行一定程度之防範淤積策略，則開口深度可以較淺。

第九章　固床工間距調整方案

現今固床工間距參考水土保持手冊進行設計，其公式如下述:

$$L_g \leq \frac{H_g}{(1-S_r)S_0} \qquad \text{(式 9-1)}$$

式中L_g =固床工間距，H_g=固床工高度，S_0=原溪床坡度，S_r=淤砂坡度比。一般令S_r為 0.5。

本計畫蒐集現地資料，其固床工高度為 30 公分，代入$S_r = 0.5$後得，固床工間距為 20 公尺，與現地情況相符，本計畫將延續上一章節之結論，探討調整固床工間距下，對溪流河道產生之影響。

第一節　調整固床工間距 30M

本節將延續上述，將固床工間距改為 30 公尺，其餘條件保持不變，式 9-1 之S_r將改為 0.67，在分析部分，同樣以本計畫所制定三種標準，最下游固床工之沖刷深度、選定區域之淹水水深以及土砂運移量，搭配 5 年重現期降雨，來探討調整間距後對現地是否有改善。

一、 Q5 調整間距後之模擬結果

Q5 調整前之模擬結果已於第七章有相關結果，故本節將直接討論調整間距後之模擬結果。

(一) 最下游固床工之沖刷深度

本段將以土砂沖淤圖來分析最下游固床工之沖刷深度，結果如圖 9-1 所示，將最下游固床工趾部網格數據進行加總平衡，可得最下游固床工之沖刷深度為 1.4375 公尺，而相較調整前之 1.69 公尺，顯示調整間距為 30 公尺在沖刷深度標準是有明顯改善的，而從圖中

可以看出河道平均沖刷在河道中心處，主要淤積在河道兩岸處，

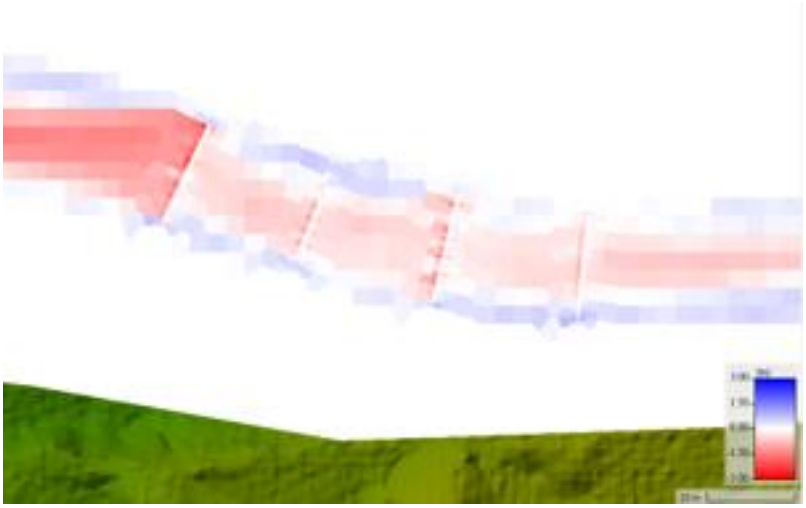


圖 9-1 Q5 間距 30M 之土砂沖淤圖

(二)　淹水水深

本段將依據水深圖，結合本計畫選定之區域，計算區域內之淹水水深，分析是否有改善。水深結果如圖 9-2 所示，將選定範圍之網格數據加總，可得固床工間距 30M 之淹水水深為 6.26M，相較調整前之 11.48 公尺，有明顯改善，本計畫認為可能原因為間距拉大後可使水流有較大的面積可供流動，使水深降低。



圖 9-2 Q5 間距 30M 水深圖

(三)　土砂運移量

由土砂運移量可探討是否有過多或過少的土砂運移到下游，為防止災害發生，本計畫也將透過土砂沖淤圖，並結合選定範圍透過ArcGis 計算土砂運移量，結果如圖 9-3 所示，計算後可得土砂運移量為沖刷 1001 立方公尺，代入式 4-2 後，得V_r不為 1，因此在土砂運移量標準並不通過，在調整間距為 30 公尺後造成較為嚴重的土砂沖刷，但本計畫發現，過多的沖刷量，較為集中在最下游固床工下游側，因此本計畫認為能透過改善最下游固床工，來解決過多的土砂沖刷量。

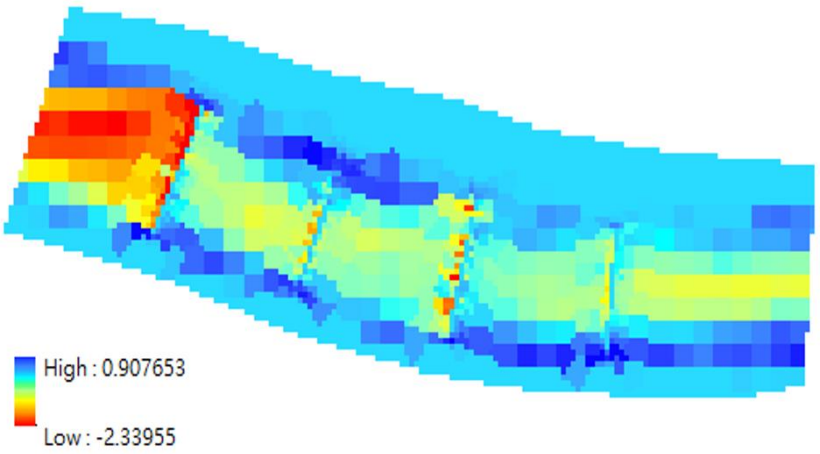


圖 9-3 Q5 間距 30M 之土砂運移量圖

第二節　調整最下游固床工構造

如前段所述，本計畫希望透過改善最下游固床工之構造，改善最下游固床工下游側沖刷過多之問題，本計畫將最下游固床工從傳統式固床工改為階梯式固床工，每階為 10 公分，如圖 9-4 所示，本章節將針對改變構造後進行分析。

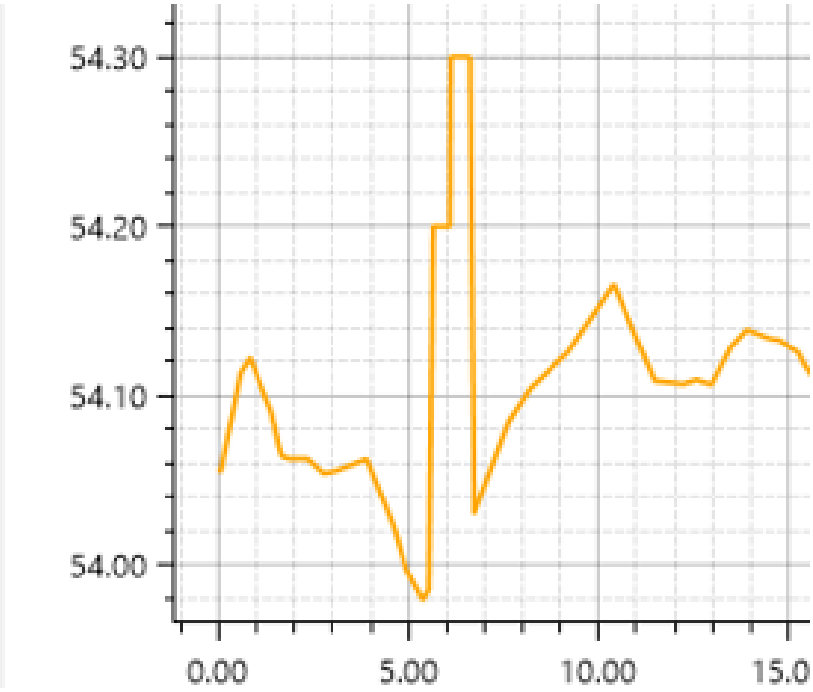


圖 9-4 最下游固床工階梯式構造

(一) 最下游固床工之沖刷深度

最下游固床工之沖刷深度將以土砂沖淤圖進行計算，其結果如圖 9-5 調整構造後之土砂沖淤圖圖 9-5 所示，計算最下游固床工趾部之沖刷深度後進行平均，可得 1.06 公尺，相較調整前之 1.69 公尺，有顯著改善，推斷為階梯式構造，有效減緩投潭水流所造成之沖刷。

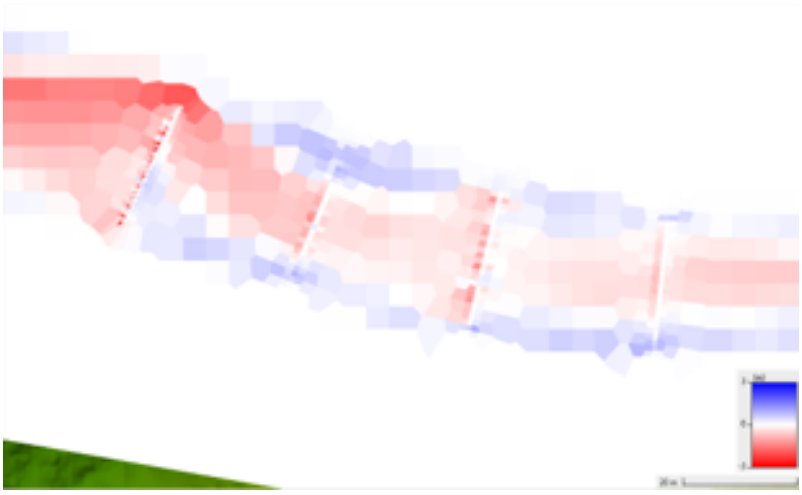


圖 9-5 調整構造後之土砂沖淤圖

(二) 淹水水深

在淹水水深方面，可透過水深圖，如圖 9-6 所示，經計算選定範圍之淹水水深後，得淹水水深為 11.1 公尺，與調整前之 11.48 公尺相異不大，但仍有些微改善，推斷調整後之水流因為沖刷效應降低，往下游水流減少，造成上游處水深加高。

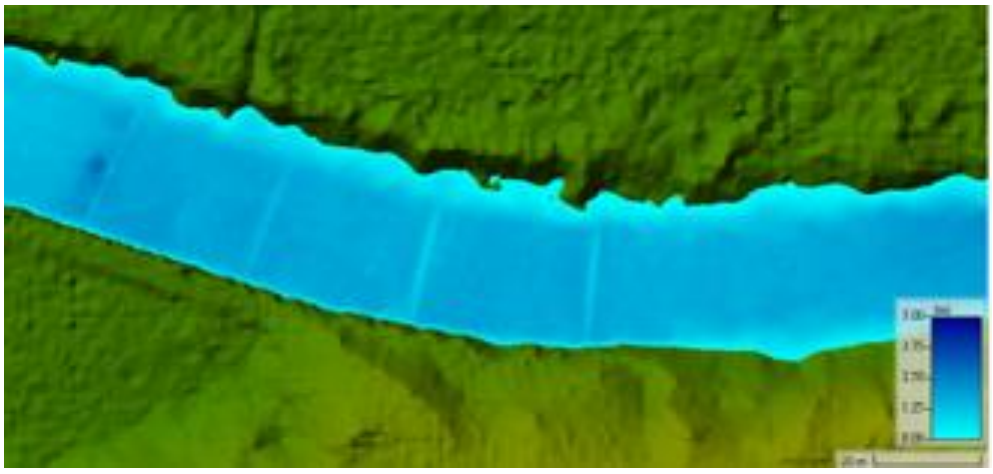


圖 9-6 調整構造後之水深圖

(三) 土砂運移量

在土砂運移量方面，可透過土砂沖淤圖，進行加總後得，其結果如圖 9-7 所示，可得土砂運移量為沖刷 870.192 立方公尺，將此數據代入式 4-2 後可得V_r為 1，符合標準，因此本計畫認為此調整方法

有效改善下游沖刷嚴重之問題，判斷為良好的固床工配置方案。

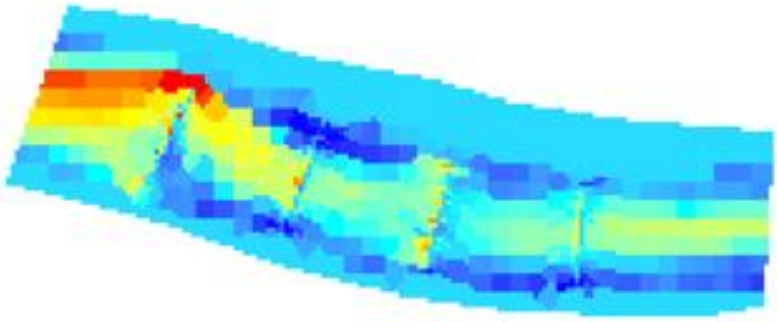


圖 9-7 調整構造後之土砂運移量圖

第三節　固床工調整間距-結論與分析

在固床工個數固定的情況下，本計畫適度加大間距並探討是否可使系列固床工保護範圍更廣，使保護河道沖於情形更加減緩。模擬結果顯示，加大間距並不會使坡度有過於劇烈的改變，但間距之調整或直接影響計畫淤沙坡度，仍需謹慎評估；對於生態方面，加大間距也可降低迴游生物之負擔，增加生物多樣性；但現地生物調查顯示此段系列固床工的上游處仍可發現兩側回游的魚蝦，顯示目前河道已趨穩定，任何擾動均可能引發未知的影響。關於降低最下游固床工之沖刷現象，為未來可多加探討之議題，本計畫目前採用階梯式固床工，目的為降低最下游固床工之投潭水流，然仍有許多工程方案可以使用，例如:拋石護岸、將固床工增加多個開口等，是未來可以延伸探討的議題。

第十章　工作進度與交付項目

第一節　計畫甘特圖

本計畫之甘特圖如表 9-24 所示，由表中可知，本計畫工作項目包含相關文獻蒐集、進行固床工縮尺模型試驗、期中報告書撰寫、建立數值 HEC-RAS 2D 模型、驗證數值模擬與縮尺模型的準確性、提出固床工最佳配置方案原則、期末報告書撰寫以及口頭報告暨修正，目前執行進度符合規畫行程。

表 9-24 本計畫之甘特圖

	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
相關文獻蒐集											
進行固床工縮尺模型試驗											
期中報告書撰寫											
建立數值 HEC-RAS 2D 模型											
驗證數值模擬與縮尺模型的準確性											
提出最佳配置方案											
期末報告書撰寫											
口頭報告既修正											

第二節　計畫交付項目

本計畫重要交付工作項目與經費如表 9-25 所示，重要工作項目計有資料收集選定分析溪流、進行系列固床工試驗、建立二維水理模型並驗證其準確性、模擬選定溪流於設定情境下之土砂運行以及提出最佳配置方案規則，各工作項目均符合規畫期程。

表 9-25 工作項目與經費表

重要工作項目	工作數量				預算金額(千元)		實施地點
	單位	112/02 ~ 112/12	累計成果	本年度預定目標	水保局經費	其他經費	
資料收集與分析溪流	式	1	100%	100%	100	0	臺大生工系研究室
建立縮尺渠道試驗，選定試驗溪流河段之系列固床工	式	1	100%	100%	250	0	臺灣大學水工試驗所
建立二維水理模型	式	1	100%	100%	150	0	臺大生工系研

							究室
模擬不同設計情境下之河道地形演變	式	1	100%	100%	150	0	臺大生工系研究室
選定最佳固床工配置	式	1	100%	100%	130	0	臺大生工系研究室

第十一章 結論與討論

固床工為現今工程與生態界的關注焦點，本計畫藉由縮尺寸模型實驗與二維數值模擬推估土砂運移的趨勢，進而計算合理的系列固床工配置方案，冀望合理設置固床工數量與改善生態環境外，對於上下游水保設施有明確的助益並確保下游保全對象的安全性。本計畫針對不同的方案(如移除固床工或開孔)進行數值模擬，方案是否可行取決於三個標準: 是否加劇下游沖刷、是否增加淹水潛勢與土砂運移量是否合理。

為了確保數值模型的準確性，本計畫在進行一系列的數值分析前，先進行縮尺模型試驗並驗證數值模型的準確性。

根據分析的結果，在固床工整根拆除的方案中，無論是 Q5 或 Q95，都無法完全滿足所設定的三個標準。因此，根據模擬結果顯示移除整根固床工對環境產生過於劇烈的影響，可能導致不穩定的情況發生，因此需要謹慎評估。

固床工的開口設計是一種有效改善生態方面的調整工程，關於開口高度的設計，本計畫分析時考慮兩個因素:一是降低高程所產生的類似降壩效應，二是水流的集流情況。兩者之間為一個取捨的問題，增加開口的深度雖有助於生態、但可能過於集中水流造成非預期的沖刷，反之亦然。具體而言，開口設計方案是否採用同樣是依據前述三個標準作為判斷的依據。

根據縮尺試驗與數值模擬的結果，系列固床工的設計應全面的考量、不能僅考慮單一因素。如分析結果顯示，過於密集的固床工間距(現況)雖然可以提供穩定的河川形貌(在系列固床工範圍內)，但在固

床工範圍外如最下游固床工的下游，河道通常存在較大的沖刷現象。此與規範的計畫坡度相關，因計畫坡度與固床工間距存有關係，在固床工個數固定的情況下，加大間距可使系列固床工保護範圍更廣，且能使保護河道沖於情形減緩，對於生態方面，也可降低迴游生物之負擔。密集的間距在保護範圍內的河道流速十分穩定，且坡度改善良好，但過於密集之間距除不利迴游生物外，亦可能導致生物多樣性降低，這樣的設計可能過於保守。若調整使間距過大，亦可能失去保護河道、調整坡度的效果，增加災害發生風險，因此尋求適當的間距應為研究重點之一。水保手冊中提及固床工設計應使河道調整後之坡度為原先坡度之 1/2，應有討論的空間。

參考文獻

1. 盧錫彥. (2012). 應用二維水理模式評估河道演變之研究。
2. 廖仲達, & 葉克家. (2006).水平二維動床模式於複式河槽洪水位壅高之研究(Doctoral dissertation)。
3. 葉克家, 陳弘凷, 王書益, 陳春宏,& 廖仲達. (2006).美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究。
4. 李豐佐, 黃聰憲, 賴進松, 林詠彬, & 張國鎮. (2017). 應用二維水理輸砂模式於橋墩沖刷之模擬分析探討. *農業工程學報*, *63*(4), 65-78。
5. 吳嘉駿.(2018) 透水式固床工之工法研發與水理特性研究(三)。
6. 胡通哲, 賴進松, 施上粟, 韓仁毓. (2017). 十文溪橫向構造物改善規畫研究。
7. 傅桂霖, 洪志祥, 林秉賢, 曾品潔, 鍾侑達, & 許惠綺. (2020). 一維土砂動床模式應用於莫拉克後嚴重土砂沖淤問題分析與調適策略之模式建立-以旗山溪為例. *土木水利*, *47*(3), 36-47。
8. 吳亭燁, 李欣輯, 施虹如, 張駿暉, 劉哲欣, 林聖琪, & 蘇元. (2015). 山坡地及上游流域之土砂量推估與模擬。
9. 林書豪, 蔡易達, & 連惠邦. (2019). 山坡地保育治理於石門水庫集水區對土砂流失與生產之抑制成效分析. *水保技術*, *13*(1), 36-49。

10. 蔡易達, & 連惠邦. (2014). 曾文溪上游集水區土砂運移計算及分析. *水保技術*, *9*(2), 1-7。
11. 沈哲緯, 劉時宏, 陳毅青, 邱昱嘉, & 劉格非. (2016). 全臺流域集水區崩塌土砂收支研究與探討-以莫拉克颱風前後期間 (2008~ 2012 年) 為例. *農業工程學報*, *62*(3), 23-42。
12. 陳樹群, 安軒霈, & 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。
13. 經濟部水利署(2020). 流域整體改善與調適規劃參考手冊。
14. 吳沛恩. (2018). 石門水庫集水區颱風事件下之山崩、土壤沖蝕及泥沙遞移特性。
15. 楊凱傑. (2016). 石門水庫集水區土壤沖蝕的地形因子分析。
16. 林建宏. (2010). 石門水庫集水區泥砂收支與遞移率之研究。
17. 陳子晴. (2017). 以水土保持觀點探討山坡地果樹專區劃設之研究。
18. 何謹余, 童慶斌, 王晉倫, & 林永峻. (2019). 多層級治理於氣候調適與減災融合決策上之研究-以新北市石碇區大崙山大規模崩塌潛勢區為例. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, *50*(4), 166-177。
19. 詹勳全, 邱亮鈞, 彭振捷, 張承遠, & 郭炳榮. (2017). 應用二維水理輸砂模式評估野溪清疏成效之研究. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, *48*(3), 113-126。
20. 賴桂文. (2016). HEC-RAS 2D 水理模式 2D 模組介紹及應

用。

21. Drown, P., & French, B. (2017). *French Modular Impoundment: Final Cost and Performance Evaluation* (No. DOE-FDE-0007244). French Development Enterprises, LLC, North Billerica, MA (United States).
22. 經濟部水利署中區水資源局. (2019). 大甲溪石岡壩下游河道穩定及消能設施改善工程計畫.
23. 黃宏斌. (2020). 系列固床工間距對泥砂沖淤之數值模擬探討.
24. 林伯勳, 賴承農, 許振崑, 謝孟荃, 高伯宗. (2021). 系列固床工間距分析與評估.
25. 周志勇.(2011). 固床工工法之研究-以高美大橋下游固床工為例.
26. 陳政宏.(2018). 頭汴坑溪中埔十號橋上游整治工程分享.
27. 水土保持局. 后番子坑溪復育整治.
28. 翁彩瓊. 溪流之生態工程設計案例-1.
29. 水土保持局. 山豹野溪復育整治.
30. 王傳益等人. 濁水溪中上游生態基流量之推估與應用.
31. Armiza Fitri. Effectiveness of a groundsill structure in reducing scouring problem at Cimadur River, Banten Province
32. 屏東縣政府環境保護局. 屏東縣政府日本考察河川整治及現地處理業務活動報告.

附錄

附錄一、期中審查意見與回覆

	審　查　意　見	意　見　回　覆
1	報告書 P16,國內外系列固床工或果建議再增加國外相關案例,如日本、美國、奧地利等，並針對各案稍加說明改善或果或困境，如日本地理環境與本國類似，該國於系列固床工的調整與精進上有那些可以借鏡，另美國與奧地利等國是否有相關且較優的設計流程或機關管理模式可供參考?	感謝委員意見，本計畫目前已有更多參考國內外的實際案例，例如日本及印尼，將可以有更多的借鏡。
2	報告書 P18,現況調查建議增加該系列固床工當初設計時之相關參數，如構造物長寬深、原地形測量現況等等,尤其構造物深度在模擬調整配置判斷上,如超過沖刷深度，則此方案將不適宜。	感謝委員意見，本計畫有與台南分局進行溝通，詢問是否有保力溪固床工建造時的相關竣工圖，但經由告知無法查得相關工程設計圖，本計畫目前則是調整模式參數，確保更加符合現地。
3	報告書 P54,如圖 6.13 所示，本次模擬的範圍為第 1 根~第 5 根固床工之間,那在本範圍外的上下游延伸多長才不致影響第 1 根或第 5 根工床工之判斷，請說明本計畫在上開延伸段長度的選擇考量?另依報告書 P55 6.15 來看，第 1 根(最下游)固床工在 Q25 模擬造成落差超過 2m 的沖刷深度，倘原設計構造物深度不敵所模擬的沖刷深度時，實務上該根固床工應以不復存在。	感謝委員意見，本計畫原先在模擬時只有模擬上下游各延伸 20 公尺，即系列固床工平均間距，但亦考慮到委員所提該延伸多長才不致影響，故本計畫將上下游之網格各延伸上游 500 公尺，下游 250 公尺，且經過結果比對，確認已不會影響結果之改變，至於判斷依據上游為延伸至有第二個入流口，以確保河道入流可進行比對，下游則為延伸 10 倍間距長度，針對 Q25 模擬，本計畫將有進行參數修改，以確保更為符合現地狀況。
4	報告書 P60,綠色線為拆除第五根固床工後之河道縱剖面地形圖，非第四根,請修正。	感謝委員意見，本計畫將會更審密檢查圖片錯誤。
5	報告書 P84,圖 6.56 顯示未拆除固床工之土砂沖淤穩定度高於拆	感謝委員意見，本計畫將再更仔細論述拆除之條件與進行分析。

	除後，請在加強論述拆除必要性。	
6	請再檢視報告內容錯字,並刪除文字間多餘的空格。	感謝委員意見，本計畫將再更仔細檢查錯字，謝謝提醒。

附錄二、期末審查意見與回覆

	審　查　意　見	意　見　回　覆
1	固床工坡度研究部分應可再加強論述	感謝委員意見，本計畫將對固床工坡度進行更加詳細之論述，詳見結論一節。
2	坡度部分建議30公尺是否考慮生態目的，與調整間距後整體平均坡度的變化，進行拆除模擬，是否可用於未來固床工配置之模擬方案用。	感謝委員意見，本計畫調整間距時有將生態納入考量，調整間距後整體平均坡度的變化為觀察的要點之一。拆除模擬的分析架構可運用於未來設計固床工之配置。
3	不是所有工程都需要優化，以樣點中的固床工照片來看，已形成穩定棲地，提供旱季時生物躲藏的深潭。拆掉後，乾旱時生物將沒有地方棲息。建議不須拆壩。	感謝委員意見，根據委員建議增列第九章第三節，補充說明相關內容。
4	不同指標之數值模擬結果有價值，研究方法可擴及更大範圍，間距調整需有更具體研判依據。	感謝委員意見，本計畫目前僅根據經驗調整間距，未來將依據更具理論基礎的研究方法與指標、擴大研究範圍以得到更加完整的分析結果。