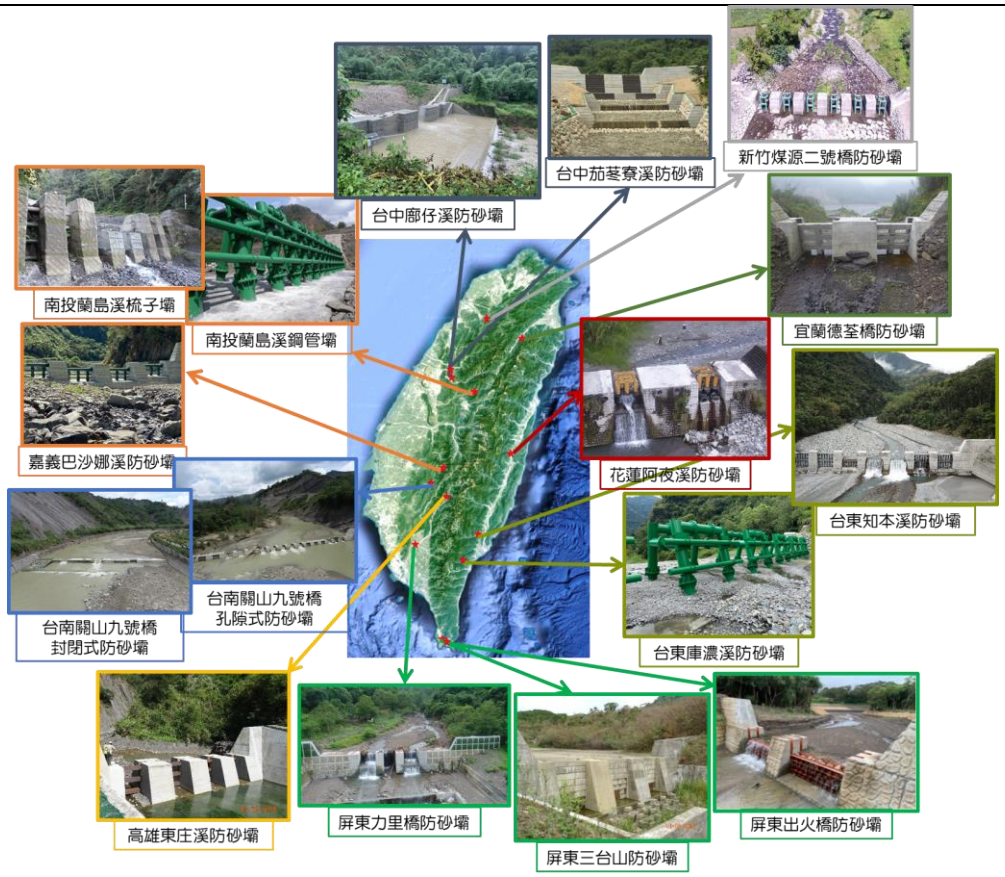
ARDSWC-113-242

農業部農村發展及水土保持署委託專業服務

調整型防砂設施動態活化溪流土砂資源

Optimizing Sediment Dynamic Balance in Streams through Adjustable Erosion Control Structures

公開報告



執行單位：財團法人資源及環境保護服務基金會

執行期間：113 年 4 月 18 日至 113 年 12 月 10 日

計畫主持人：邱渝方　組長

協同主持人：陳樹群　董事長

農業部農村發展及水土保持署　編印

中華民國 113 年 12 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）

目次

農業部農村發展及水土保持署委託專業服務

調整型防砂設施動態活化溪流土砂資源

Optimizing Sediment Dynamic Balance in Streams through Adjustable Erosion Control Structures

公開報告

報告書電子檔 URL：

https://drive.google.com/drive/folders/1jUTYSYftYorBXGn_1aAXwmcoxvYpIE2c?usp=sharing

目次

調整型防砂設施動態活化溪流土砂資源

摘要

地震頻發及氣候變遷導致野溪土砂災害劇增，使河川進入來砂量高峰期，危及下游公共設施與居住安全。針對當時巨量土砂所興建之防砂壩，在時過境遷土砂量減緩後，卻又顯出對長期野溪生態與水流河床連續性的危害。不變的防砂壩結構難以應付劇變的溪床土砂環境，因此有效經營管理防砂壩是現今重要的課題。

防砂壩隨著土砂量的逐年減少，其負面特質也逐漸顯露，壩體直接阻斷河川棲地中的縱向連續性，造成河川型態及生態棲地成為片斷不相連的區塊。壩體上游面因泥砂淤積，減緩河川坡度並降低水流沖蝕及輸砂能力，但也迫使水流趨向蜿蜒，造成左右擺盪向兩側坡腳沖刷。再者防砂壩因細顆粒泥砂淤積使河床孔隙率降低，也改變河川底棲生物的生活空間。其次防砂壩上游的泥砂攔阻及下游的壩高落差，使下游河床泥砂補充不足，同時加劇河道下切的能量，壩體基座常因水流沖擊而形成嚴重淘刷及溪床沖蝕，進而造成壩體基座懸空不穩的情況。此外，防砂壩容易造成生物棲地分割，以及洄游性生物因壩體阻隔而難以順利溯溪等缺點。

調整型防砂壩目的是打破固定的防砂壩概念，考量因應不同時期的輸砂量變化而調整其型態，以適應社會和氣候變化的演變並滿足不同時期的防砂、防災及生態需求。如今，由於對生態和環境需求的日益關注，其防砂壩之用途已逐漸改變中，以通過調整結構的類型來適應自然。面對土砂量高度變動的野溪，必須常態性經營管理防砂壩，

依據土石流發生狀況及攔阻情形，可改變壩體之透過性機能，以達溪流土砂之平衡，最終仍須以回歸自然野溪為原則。

本研究結合防砂壩案例蒐集、現地調查、數值模擬，並結合歷史航拍影像分析以及無人飛行載具(UAV)地形測量，評估防砂壩於溪流之沖淤變動特性，進而提出壩體活化之策略。

第一部分為調整型防砂壩之評估分類。本研究蒐集案例及文獻並分為三大類型之防砂壩(開口型、孔隙型及封閉型)，說明其設置區位及攔砂特性。並針對各研究試區以歷史航拍影像分析防砂壩之上游集水區歷年崩塌面積，評估土砂產量變化。

第二部分為建立數值地形模型，使用 UAV 航拍以及 3D 建模軟體，建立防砂壩所處河段之河段數值地形模型及正射影像，並分析縱剖面特性。並以歷次 UAV 測製 DEM 成果，配合雨量站資料建立數值模擬，探討可能之沖淤變動趨勢。

第三部分以希爾茲數公式推求坡度變化對於河床質粒徑以及輸砂量的影響，說明當淤積造成河床坡度減半後，輸砂量將減為四分之一。並結合河川型態五層分類法所分析之河川特性，將有助於制定適應性之管理方案，以延長防砂壩的使用壽命，提升砂庫的利用效率，並實現可持續的河道管理。因應氣候變遷議題，探討減碳、綠能及因應土砂變化調整，以提出興建防砂壩之建議。並提出防砂壩調整三大步驟，第一階段為調整壩體中央，導正流心於河床中央，以緩慢釋放上游淤積土砂。第二階段擴大開口寬度，以釋放更多土砂並維持流心於河床中央。最後第三階段為調整所有壩柱，以增加生態連續性從及輸砂平衡。

第四部分為調整型防砂壩之管理及維護，各研究試區擬訂出調整建議方案及操作時機之建議。調整型防砂壩維護管理手冊之內容研擬。並製作調整型防砂壩之模型及漫畫，以提供更生動有趣的方式向公眾介紹調整型防砂壩的原理與功能。

現今因生態與環境需求重視度提升，而逐漸轉變為配合大自然來調整構造物型態。調整型防砂壩即在打破壩體固定不變之觀念，考量未來土砂量增減變化之可能，於規劃時就必須針對溪流特性及其所欲發揮的功能進行調整設計，亦需因應社會觀念演進及氣候變遷等因素，隨時間變動的溪床土砂環境，常態性地經營管理防砂壩，以滿足溪流不同時期的輸砂、防災或生態需求，進一步使防砂壩成為溪流棲地環境復育的推手，最終以回歸自然野溪為原則。

關鍵詞：氣候變遷、調整型防砂壩、河床演變、動態活化。

Optimizing Sediment Dynamic Balance in Streams through Adjustable Erosion Control Structures

Abstract

Frequent earthquakes and climate change have caused a dramatic increase in extreme sediment disasters in torrents and these disasters commonly threaten downstream infrastructures and residents. With the passage of time and reduction in sediment yield, many check dams that were built in the past to deal with the vast amounts of sediment, however, become threats to the long-term ecology and sediment transport continuity. The unchangeable check dam structure cannot easily cope with rapidly changing sediment transport, therefore, the effective management of check dams is currently an important issue in Taiwan.

As the amount of sediment from the upstream decreases year by year, the negative characteristics of the check dam are gradually revealed. The dam directly blocks the river, causing the river pattern and the ecological habitat to become disconnected. The sediment deposition upstream mild down the slope of the river and reduces the ability of sediment transport, but it also forces the river to meander, resulting in swaying from side to side and scouring at the foot-slope. Besides, the block also causes a cliff-type morphology and shortage of sediment downstream that aggravates the energy of cutting and dam instability.

The aim of the Adjustable check dam is to break the fixed dam concept and considering the possibility of the increasing and decreasing of sediment yield in the watershed, so it is necessary to design an

adjustable function for adapting the evolution of society and climate change and meet the needs in different periods of lose sand, disaster prevention, or the ecological demand. Nowadays, due to the increasing attention to the needs of ecology and environment, the usage has gradually changed to adapt to nature by adjusting the types of structures. Based on the debris flow scale and feature, the permeability of dams should be changed accordingly to promote sediment balance along rivers. During the period of low sediment yield, the beams of steel check dam can be adjusted to promote sediment transport downstream. The results emphasized routine management of check dams is necessary on torrents with highly variable bed load. Finally, it is indeed necessary to let torrents return to their natural states.

This study integrates case collection of check dams, field surveys, and numerical simulations, combined with historical aerial imagery analysis and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) terrain measurements, to evaluate the sedimentation and erosion characteristics of check dams in stream environments. Furthermore, it proposes strategies for optimizing sediment dynamic balance through adjustable chech dem.

Part I: This section centers on the evaluation and classification of adjustable check dams. The study reviews case studies and literature, classifying check dams into three primary types: open, porous, and closed. It details their installation locations and sediment trapping characteristics. Furthermore, historical aerial imagery is analyzed for each study area to

evaluate changes in upstream catchment collapse areas and sediment yield over time.

Part II: This section focuses on developing a numerical terrain model. By employing UAV aerial photography and 3D modeling software, a detailed numerical terrain model and orthophoto of the river segment housing the check dam are created, and longitudinal profile characteristics are analyzed. The study leverages DEM results from multiple UAV surveys, integrated with rainfall data, to conduct numerical simulations and explore potential trends in sedimentation and erosion.

Part III: This section utilizes the Shields formula to assess how changes in slope affect bed material particle size and sediment transport volume. It illustrates that when sedimentation reduces the riverbed slope by half, the sediment transport volume is reduced to one-quarter of its initial value. By incorporating river characteristics analyzed through the five-class river type classification system, this approach will aid in formulating adaptive management strategies. These strategies are designed to prolong the lifespan of check dams, improve the efficiency of sediment reservoirs, and achieve sustainable river management. Addressing climate change concerns, this study investigates strategies for carbon reduction, green energy, and adaptation to sediment variations to offer recommendations for the construction of check dams. And outlines three key steps for adjusting check dams, Stage 1 would be to remove central bars or cutting a deeper opening at the centre to keep the thalweg at the centre of the channel while slowly releasing sediments. Stage 2

involves widening the opening to increase the volume of sediments output while maintaining the thalweg at the centre. The final stage (stage 3) entails removing the whole dam while retaining the dam wing and foundation. This is to increase the connectivity of the channel bed thereby restoring the riverbed to its natural state.

Part IV: This section addresses the management and maintenance of adjustable check dams. It offers recommendations for adjustments and optimal timing for each study area. Additionally, it develops content for a comprehensive maintenance and management manual for these dams. To enhance public understanding, it also produces models and illustrative cartoons that vividly depict the principles and functions of adjustable check dams.

Adjustable check dams redefine the conventional notion of fixed structures by accommodating potential future fluctuations in sediment volumes. They must also adapt to evolving societal perspectives and climate change. Through ongoing management that responds to the dynamic sediment conditions of the riverbed, these dams can address varying needs for sediment transport, disaster mitigation, and ecological preservation over time. Ultimately, the aim is for these check dams to facilitate the restoration of natural stream habitats, aligning with the principle of returning to a pristine, wild river state.

Keyword: Climate change, adjustable check dam, channel bed change, optimizing sediment dynamic balance.

目次

目次

摘要 V

Abstract VIII

目次 XIII

表次 XVII

圖次 XIX

第壹章 前言 1-1

第一節 計畫需求 1-1

第二節 計畫項目與內容 1-1

(一) 調整型防砂設施之評估分類 1-1

(二) 應用數值模擬提出研究試區之沖淤變動特性 12

(三) 既有防砂壩動態活化之策略 1-2

(四) 調整型防砂壩管理維護 1-2

第三節 工作成果要求 1-2

第四節 驗收方法 1-3

第五節 對本計畫及問題之研析 14

第六節 工作時程訂定 1-6

第貳章 調整型防砂設施之評估分類 2-1

第一節 蒐集全台現有調整型防砂壩至少 10 處，進行功能評估與分類。 2-1

(一) 開口式調整型防砂壩 2-1

(二) 孔隙式調整型防砂壩 2-7

(三) 封閉式調整型防砂壩 2-9

第二節 選擇 1 處研究試區，其溪流含有已進行或可進行動態活化調整作業之防砂壩。 2-11
(一) 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區 2-12
(二) 屏東縣春日鄉力里橋試區 2-29
第三節 研究試區進行現地、上下游河床等調查，並蒐集河床歷史資料。 2-45
(一) 行前作業 2-46
(二) 空間定位 2-46
(三) 現地調查作業 2-46
(四) 環境現況 2-48
第四節 河床表面粒徑調查 2-73
(一) 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區 2-75
(二) 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區 2-78
第五節 歷年影像資料 2-81
(一) 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區 2-81
(二) 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區 2-85
第參章 應用數值模擬提出研究試區之沖淤變動特性 3-1
第一節 利用無人載具測量，建立研究試區之數值地形模型 3-1
(一) UAV 地形測量 3-1
(二) 建立正射影像與數值地形 3-4
第二節 參考水砂觀測站資料建立動態調整前後之數值模擬，探討可能之沖淤變動及河道演變趨勢。 3-12
(一) 土砂運移模式介紹 3-13
(二)壩體調整前後模擬 3-16

(三)壩體調整前後模擬 3-23
第三節 研究試區防砂壩之土砂攔阻特性：包含設置區位、設計特色及土砂攔阻特性等。 3-28
(一) 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區 3-28
(二) 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區 3-29
第肆章 既有防砂壩動態活化之策略 4-1
第一節 防砂壩調查資料,依據河川型態提出壩體活化之可行性方向 4-1
(一)由坡度變化來預測粒徑與土砂量變化 4-1
(二)台灣河川型態五層分類法 4-5
(三)防砂壩動態活化策略 4-16
第二節 依據氣候變遷影響環境之減碳、綠能、因應土砂變化調整等議題，建議未來興建防砂設施之參考。 4-20
(一) 減碳 4-20
(二) 綠能 4-24
(三) 因應土砂變化調整 4-30
第伍章 調整型防砂壩管理維護 5-1
第一節 擬訂研究試區之動態調整建議方案及建議操作時機 5-1
(一) 調整型防砂壩之維護管理 5-3
(二) 動態調整建議方案-臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區 5-6
(三)動態調整建議方案-屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區 5-10
第二節 研擬調整型防砂壩維護管理手冊 5-11
(一)調整型防砂壩維護管理手冊_簡約版 5-12

第三節 調整型防砂壩科普教材及教具 5-13

第陸章 結論與建議 6-1

第一節 結論 6-1

第二節 建議 6-2

參考文獻 6-3

表次

表 1. 1 本計畫執行進度表 1-6
表 1. 2 本計畫工項辦理情況及對應章節 1-8
表 2. 1 開口式調整型防砂壩案例蒐集彙整表 2-3
表 2. 2 孔隙式調整型防砂壩案例蒐集彙整表 2-8
表 2. 3 封閉式調整型防砂壩案例蒐集彙整表 2-10
表 2. 4 研究試區概況及探討重點 2-11
表 2. 5 基本資料填寫標準 2-47
表 2. 6 構造物尺寸調查標準表 2-48
表 2. 7 構造物本體外觀檢視劣化型態照片示意及說明表 2-51
表 2. 8 構造物劣化型態示意圖及說明表 2-52
表 2. 9 潛在劣化營力類型示意圖 2-53
表 2. 10 試區現況調查表-NH_1130206 2-55
表 2. 11 試區現況調查表-NH_1130813 2-58
表 2. 12 試區現況調查表- LLB_1130124 2-61
表 2. 13 試區現況調查表- LLB_1130515 2-64
表 2. 14 試區現況調查表- LLB_1130808 2-67
表 2. 15 試區現況調查表- LLB_1131014 2-70
表 2. 16 河床底質粒徑分類標準 2-74
表 2. 17 河床表面粒徑 d_{50}-關山九號橋後堀溪試區 2-76
表 2. 18 河床表面粒徑 d_{50}-力里橋試區 2-79
表 3. 1 UAV 精度檢測成果表 3-4
表 3. 2 變阻抗公式(Hydronia LLC., 2021) 3-14
表 3. 3 沉降速度公式(Hydronia LLC., 2021) 3-14
表 3. 4 輸砂公式(Hydronia LLC., 2021) 3-15

表 3. 5 關山九號橋後堀溪試區模擬邊界條件設定值 3-18
表 3. 6 關山九號橋後堀溪試區模擬參數設定值 3-18
表 3. 7 關山九號橋後堀溪試區模擬結果流速水深表 3-27
表 3. 8 土砂攔阻特性-關山九號橋後堀溪試區 3-28
表 3. 9 土砂攔阻特性-力里橋力里溪試區(既有防砂壩) 3-29
表 3. 10 土砂攔阻特性-力里橋力里溪試區(力里橋上下游野溪整治工程) 3-29
表 4. 1 量測坡度與預測粒徑、土砂量變化 4-4
表 4. 2 五層分類法之概述及方法 4-6
表 4. 3 第一層-流域特性之流域幾何型態因子(陳樹群等，2012) 4-7
表 4. 4 第一層-流域特性之流域高差因子(陳樹群等，2012) 4-7
表 4. 5 第二層-水系特性之水系網因子(陳樹群等，2012) 4-7
表 4. 6 第三層-主流特性之地形區分表(陳樹群等，2012) 4-7
表 4. 7 第三層-主流特性之河床質粒徑分類表(陳樹群等，2012) 4-8
表 4. 8 第四層-縱橫剖面之橫斷面特性分類表(陳樹群等，2012) 48
表 4. 9 第五層-棲地特性之河溪物理性棲地環境評估表(陳樹群等，2012) 4-9
表 4. 10 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區_原版設計圖之工料碳排估算表 4-21
表 4. 11 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區_新版設計圖之工料碳排估算表 4-23
表 4. 12 關山九號橋後堀溪試區-ExG 植生判釋結果 4-25
表 4. 13 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果 4-27

圖次

圖 1. 1 計畫工作執行流程圖 1-5
圖 2. 1 開口型防砂壩(a)未淤滿(b)礫石淤滿與漂流木攔阻示意圖 .. 2-2
圖 2. 2 孔隙型防砂壩(a)未淤滿(b)淤滿的水流與土砂分離示意圖 .. 2-7
圖 2. 3 封閉型防砂壩未淤滿(a)及淤滿(b)對於土砂攔阻示意圖 2-9
圖 2. 4 後堀溪試區基本地文資料 2-13
圖 2. 5 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區 2-14
圖 2. 6 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)概況(2024/02/06 及 2024/05/16) 2-16
圖 2. 7 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-設計圖說 2-17
圖 2. 8 關山九號橋後堀溪試區下游調整型孔隙式防砂壩-設計圖說 2-18
圖 2. 9 關山九號橋後堀溪試區下游調整型孔隙式防砂壩概況(2024/02/06 及 2024/05/16) 2-19
圖 2. 10 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-凱米颱風概況 2-20
圖 2. 11 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-凱米颱風毀損情況 2-21
圖 2. 12 關山九號橋後堀溪試區下游調整型孔隙式防砂壩-凱米颱風概況(2024/08/13) 2-22
圖 2. 13 康芮颱風-南化關山測站累積雨量(2023/10/30-11/01) 2-22
圖 2. 14 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-康芮颱風概況 2-23
圖 2. 15 天兔颱風-南化關山測站累積雨量(2023/11/14-11/17) 2-24

圖 2. 16 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-天兔颱風概況 2-24
圖 2. 17 上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-清淤土方暫置區 2-26
圖 2. 18 關山九號橋土方堆置區-地籍圖相關資訊 2-26
圖 2. 19 關山九號橋後堀溪試區下游崩塌地現況(2024/08/13) 2-27
圖 2. 20 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-上游高灘地範圍變化 2-28
圖 2. 21 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-分流清淤範圍 2-28
圖 2. 22 力里橋力里溪試區基本地文資料 2-29
圖 2. 23 屏東縣春日鄉力里橋試區 2-30
圖 2. 24 屏東縣力里橋力里溪試區防砂壩概況(2024/01/24) 2-31
圖 2. 25 屏東縣力里橋力里溪試區之七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)-工程範圍 2-32
圖 2. 26 屏東縣力里橋力里溪試區之既有防砂壩及既有尾檻(0K+000)之溢洪口處調降示意圖 2-33
圖 2. 27 屏東縣力里橋力里溪試區之既有防砂壩(0K+000)橫桿採 H 型鋼安裝示意圖 2-34
圖 2. 28 屏東縣力里橋力里溪試區之下游 4 處副壩及尾檻(0K+074.46、0K+087.32、0K+098.49、0K+109.35)調整示意圖 2-35
圖 2. 29 屏東縣力里橋力里溪試區之施工概況(2024/05/15) 2-37
圖 2. 30 屏東縣力里橋力里溪試區之凱米颱風後施工概況(2024/08/08) 2-39
圖 2. 31 康芮颱風-春日力里測站累積雨量(2023/10/30-11/01) 2-40
圖 2. 32 屏東縣力里橋力里溪試區之康芮颱風概況(2024/11/01) ... 2-42
圖 2. 33 天兔颱風-春日力里測站累積雨量(2023/11/14-11/17) 2-43

圖 2. 34 屏東縣力里橋力里溪試區之天兔颱風概況(2024/11/16) ... 2-43
圖 2. 35 試區現況調查作業流程 2-45
圖 2. 36 防砂壩構造物斷面及調查尺寸示意圖 2-48
圖 2. 37 河岸邊坡崩塌類型示意圖 2-50
圖 2. 38 河床沖刷類型示意圖 2-50
圖 2. 39 沖淤變動分析程序流程圖 2-54
圖 2. 40 溪床堆積材料粒徑照片 2-73
圖 2. 41 粒徑調查流程圖 2-74
圖 2. 42 關山九號橋後堀溪試區-粒徑概況(2024/05/16) 2-76
圖 2. 43 關山九號橋後堀溪試區-粒徑概況(2024/08/13) 2-77
圖 2. 44 關山九號橋後堀溪試區-粒徑概況(2024/10/14) 2-77
圖 2. 45 力里橋力里溪試區-粒徑概況(2024/01/24) 2-79
圖 2. 46 力里橋力里溪試區-粒徑概況(2024/08/08) 2-80
圖 2. 47 力里橋力里溪試區-粒徑概況(2024/10/13) 2-80
圖 2. 48 集水區歷年影像與崩塌地分布-關山九號橋後堀溪試區 ... 2-83
圖 2. 49 歷年水文事件及崩塌面積變化-關山九號橋後堀溪試區 ... 2-84
圖 2. 50 歷年累積雨量圖-關山九號橋後堀溪試區(2005~2023 年) . 2-84
圖 2. 51 歷年崩塌面積變化-關山九號橋後堀溪試區 2-84
圖 2. 52 集水區歷年影像與崩塌地分布-力里橋力里溪試區 2-86
圖 2. 53 歷年水文事件及崩塌面積變化-力里橋力里溪試區 2-87
圖 2. 54 歷年累積雨量圖-力里橋力里溪試區(2014~2023 年) 2-87
圖 2. 55 歷年崩塌面積變化-力里橋力里溪試區 2-87
圖 3. 1 建立高解析度地形圖之航拍方式(Rusnák et al., 2018) 3-2
圖 3. 2 Parrot ANAFI Extended 空拍機 3-2
圖 3. 3 UAV 地形測量工作流程圖 3-3

圖 3. 4 STONEX S3A 智慧型 RTK 之 GNSS 衛星接收器 3-3
圖 3. 5 關山九號橋後堀溪試區之 UAV 正攝影像及 DSM..... 3-7
圖 3. 6 關山九號橋後堀溪試區之河道沖淤變動 3-8
圖 3. 7 力里橋力里溪試區之 UAV 正攝影像及 DSM..... 3-11
圖 3. 8 力里橋力里溪試區之河道沖淤變動 3-11
圖 3. 9 關山九號橋後堀溪試區數值模擬網格圖 3-16
圖 3. 10 關山九號橋上游壩數值模擬網格圖 3-17
圖 3. 11 關山九號橋下游壩數值模擬網格圖 3-17
圖 3. 12 數值模擬流程圖 3-18
圖 3. 13 關山九號橋上游壩常流量數值模擬流速水深圖 3-20
圖 3. 14 關山九號橋下游壩常流量數值模擬流速水深圖 3-20
圖 3. 15 關山九號橋上游壩高流量數值模擬流速水深圖 3-20
圖 3. 16 關山九號橋下游壩高流量數值模擬流速水深圖 3-21
圖 3. 17 關山九號橋上游壩高流量數值模擬底床地形變化圖 3-21
圖 3. 18 關山九號橋下游壩高流量數值模擬底床地形變化圖 3-22
圖 3. 19 關山九號橋上游壩疏濬後數值模擬網格圖 3-23
圖 3. 20 關山九號橋下游壩疏濬後數值模擬網格圖 3-24
圖 3. 21 關山九號橋上游壩疏濬後常流量數值模擬流速水深圖 3-25
圖 3. 22 關山九號橋下游壩疏濬後常流量數值模擬流速水深圖 3-25
圖 3. 23 關山九號橋上游壩疏濬後高流量數值模擬流速水深圖 3-26
圖 3. 24 關山九號橋下游壩疏濬後高流量數值模擬流速水深圖 3-27
圖 4. 1 Shield’s diagram (after shields, 1936)..... 4-1
圖 4. 2 台灣河川型態五層分類法架構圖(陳樹群等，2012) 4-6
圖 4. 3 關山九號橋後堀溪試區(a)後堀溪流域河川級序分布，(b)各級河川縱剖面圖，(c)各級河段高程坡度特性比較圖 4-11

圖 4. 4 力里橋力里溪試區(a)力里溪流域河川級序分布，(b)各級河川縱剖面圖，(c)各級河段高程坡度特性比較圖 4-14
圖 4. 5 延壽策略流程 4-16
圖 4. 6 砂庫土方利用流程 4-17
圖 4. 7 橫向構造物之興建與調整時機及流程 4-18
圖 4. 8 防砂壩調整三大步驟及土砂釋放程度 4-19
圖 4. 9 ExG 植生影像辨識步驟 4-25
圖 4. 10 關山九號橋後堀溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/02/06) . 4-26
圖 4. 11 關山九號橋後堀溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/08/13) . 4-26
圖 4. 12 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/01/24) 4-28
圖 4. 13 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/08/08) 4-28
圖 4. 14 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/10/14) 4-29
圖 4. 15 依據環境概況調整壩體型態之功能概念圖(陳樹群等，2021) 4-30
圖 4. 16 防砂壩調整三大階段及土砂釋放程度 4-31
圖 5. 1 橫向構造物之興建與調整時機及流程 5-2
圖 5. 2 維護管理作業 SOP 5-4
圖 5. 3 調整型防砂壩之維護管理流程 5-5
圖 5. 4 上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-清淤土方暫置區 5-7
圖 5. 5 關山九號橋土方堆置區-地籍圖相關資訊 5-7
圖 5. 6 關山九號橋後堀溪試區下游崩塌地現況(2024/08/13) 5-8
圖 5. 7 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-上游高灘地範圍變化 5-9
圖 5. 8 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-分流清淤範圍 5-9
圖 5. 9 調整型鋼構壩-操作步驟及元件拆解示意圖 5-15
圖 5. 10 調整型混凝土壩-操作步驟及元件拆解示意圖 5-17

圖 5. 11 調整型防砂壩模型全景 5-17

圖 5. 12 漫畫角色示意圖 5-18

第壹章　前言

第一節 計畫需求

不同規模和頻率之降雨及地震常使溪流產生各類型土砂災害，亦造成泥砂輸送之週期性變化。而早期興建之防砂壩具有不變的淤砂功能，但自然界的泥砂量卻是變動的。輸砂量在幾十年後會因為上游崩塌地自然復育或是人為防砂壩治理功效而減緩。此時的溪流會因為上游泥砂量補充不足導致下游淘刷，引發輸砂不平衡而破壞溪流河床的自然演變。以不變的防砂壩應對劇烈變動的土砂產量，難以達到溪流土砂治理的效果。

若防砂壩可依不同時期的輸砂量變化而適時調整防砂壩之型態，不僅可因應不同時期的防砂量，亦可平衡上下游土砂並促進溪流生態之連續性，達到動態活化之成效。調整型防砂壩根據現地環境之復育狀況，提出壩體動態活化之策略，故調整型防砂壩操作維護管理手冊有其必要性，以利用自然力來提高構造物之靈活性、適應性及可持續性，並能使防砂壩的功能持續動態發揮以延長使用年限。

第二節 計畫項目與內容

(一)調整型防砂設施之評估分類

1. 蒐集全台現有調整型防砂壩至少 10 處，進行功能評估與分類。
2. 選擇 1 處研究試區，其溪流含有已進行或可進行動態活化調整作業之防砂壩。
3. 研究試區進行現地、上下游河床等調查，並蒐集河床歷史資料。

(二)應用數值模擬提出研究試區之沖淤變動特性

1. 利用無人載具(UAV)測量，建立研究試區之數值地形模型(其所產製 DTM 網格大小為 2m*2m，空間解析度至少達 25cm(含以上))
2. 研究試區防砂壩之土砂攔阻特性：包含設置區位、設計特色及土砂攔阻特性等。
3. 參考水砂觀測站資料建立動態調整前後之數值模擬，探討可能之沖淤變動及河道演變趨勢。

(三)既有防砂壩動態活化之策略

1. 依據防砂壩(含調整型防砂壩)調查資料，依據河川型態提出壩體活化之可行性方向，如：修補延壽、功能調砂等。
2. 依據氣候變遷影響環境之減碳、綠能、因應土砂變化調整等議題，建議未來興建防砂設施之參考。

(四)調整型防砂壩管理維護

1. 擬訂研究試區之動態調整建議方案及建議操作時機
2. 研擬調整型防砂壩維護管理手冊
3. 調整型防砂壩科普教材及教具

第三節 工作成果要求

(一)本項工作所完成之程式與相關資料，著作權歸委託機關所有，其原始程式碼，亦需同時提供。

(二)受託廠商於工作執行期間，須依雙方契約之規定提送各項報告(各項報告書格式請參考本署委辦計畫報告書印製暨電子

檔案製作範本製作)，並舉行簡報；另雙方得視實際需要，召開工作會報。

(三)提送本計畫成果如后：

1. 採書面驗收份數如下：

(1).成果報告書：3 份。

(2).工作執行計畫書、成果報告文字檔及各期報告、簡報檔：採用 ODF(Open Document Format)相容文件格式或*.pdf 或其他可攜式文件格式，並以可攜式電子儲存媒體(儲存容量 1TB 以上)儲存 3 份。

(3).其他：如協助各期會議紀錄等事項。

2. 成果報告、摘要報告及計畫成果(含圖資)電子檔應儲存至電子圖書管理中心，如單一檔案資料量大於 4GB，請連同詮釋資料繳送至本署減災監測組。

第四節 驗收方法

報告部分：

(一)採書面驗收份數如下：

1. 成果報告書 3 份。
2. 手冊 3 份。
3. 工作執行計畫書、成果報告文字檔及各期報告、簡報檔：採用 ODF(Open Document Format)相容文件格式或*.pdf 或其他可攜式文件格式，並以可攜式電子儲存媒體(儲存容量 1TB 以上)3 份。

4. 成果報告、摘要報告及計畫成果(含圖資)電子檔應儲存至電子圖書管理中心，如單一檔案資料量大於 4GB，請連同詮釋資料繳送至本署減災監測組。

(二)成果報告、摘要報告及計畫成果(含圖資)電子檔應儲存至電子圖書管理中心，如單一檔案資料量大於 4GB，請連同詮釋資料繳送至本署減災監測組。

第五節 對本計畫及問題之研析

地震頻發及氣候變遷導致野溪土砂災害劇增，使河川進入來砂量高峰期，危及下游公共設施與居住安全。針對當時巨量土砂所興建之防砂壩，在時過境遷土砂量減緩後，卻又顯出對長期野溪生態與水流河床連續性的危害。因此永續的防砂壩管理必須考量不同時期的土砂變動量，透過改變壩體型態或是壩體的空間配置，將可保持河道泥砂量的均衡性以及溪流生態的連續性，故而提出可隨著來砂量改變而調整防砂壩結構的概念，稱之為「調整型防砂壩」。

為達到上述目的，本計畫藉由蒐集全台現有調整型防砂壩案例，進行功能評估與分類，另配合農村發展及水土保持署挑選一處研究試區，進行研究試區現地調查及土砂河床面測量，搭配 UAV 等空中及地面測量工具，建立研究試區之數值地形模型，並進一步分析壩體上下游之土砂空間變異特性，以及侵蝕區與淤積區之發展過程。此外，本研究收集歷年試區之影像資料，包含遙測影像及實景照片，推估歷次土砂災害事件造成壩體周遭之環境衝擊以及土砂量變化及河道演變趨勢。並參考水砂觀測站資料建立防砂壩調整前後之數值模擬，探討可能之沖淤變動及河道演變趨勢。

最後，提出調整型防砂壩之壩體活化之可行性方向，及未來興建防砂設施時可因應土砂變化調整之策略。此外，計畫還包括推廣及產出部分，以利調整型防砂壩之未來應用及執行。本計畫工作流程如圖 1.1 所示。

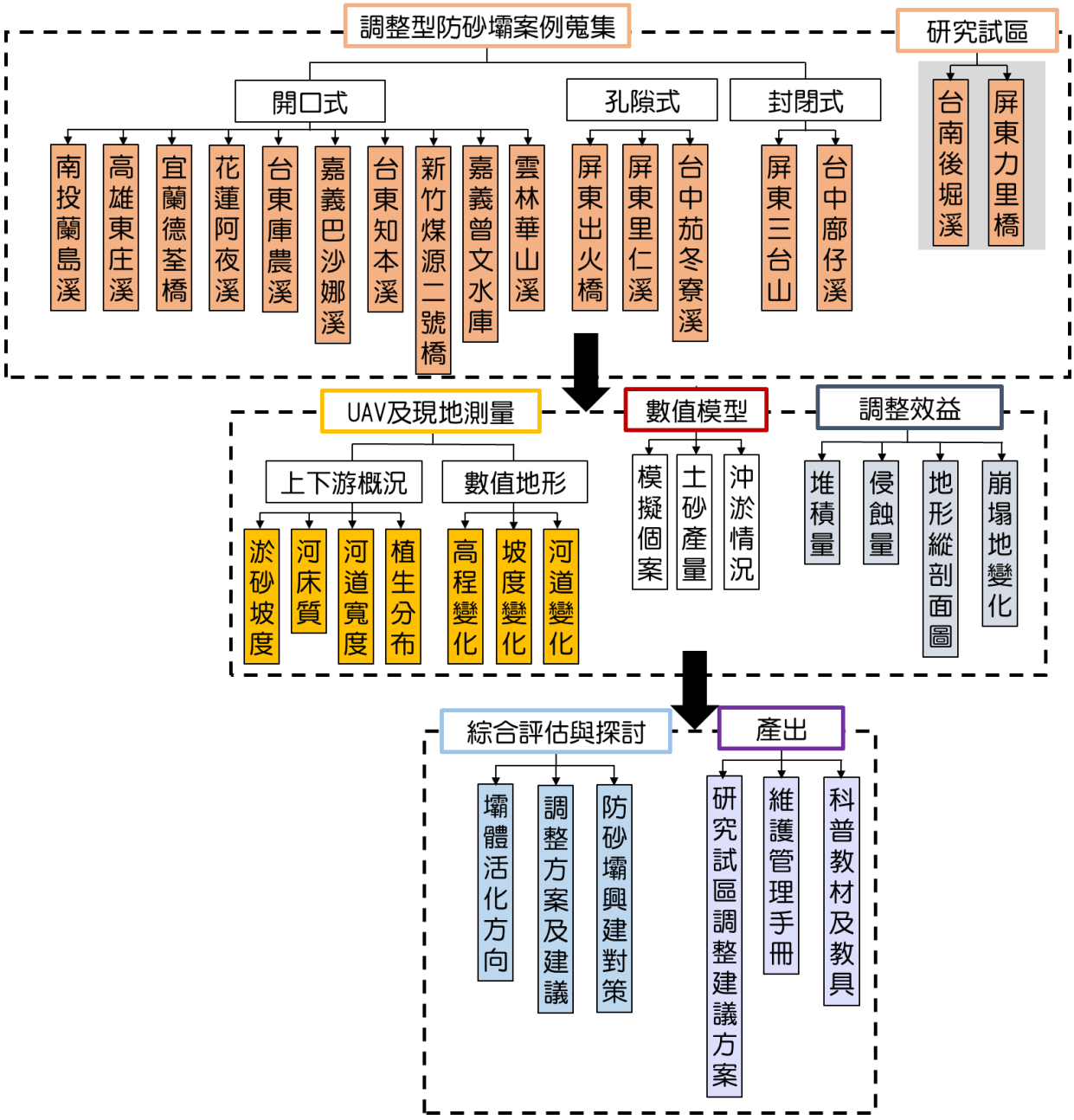


圖 1.1 計畫工作執行流程圖

第六節 工作時程訂定

本計畫預定執行進度及實際執行進度如表 1.1 及表 1.2 所示。

表 1.1 本計畫執行進度表

工作項目	2024 年										各項進度(%)	對應章節
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
蒐集全台現有調整型防砂壩至少 10 處，進行功能評估與分類。	■	■	■								100	第貳章第一節 蒐集 18 處
選擇 1 處研究試區，其溪流含有已進行或可進行動態活化調整作業之防砂壩。	■	■	■	■	■						100	第貳章第二節 兩處研究區
研究試區進行現地、上下游河床等調查，並蒐集河床歷史資料。	■	■	■	■	■	■	■	■			100	第貳章第二、三、四、五節
利用無人載具(UAV)測量，建立研究試區之數值地形模型。	■	■	■	■	■	■	■	■			100	第參章第一節
研究試區防砂壩之土砂攔阻特性：包含設置區位、設計特色及土砂攔阻特性等。	■	■	■	■	■	■					100	第參章第三節
參考水砂觀測站資料建立動態調整前後之數值模擬，探討可能之沖淤變動及河道演變趨勢。			■	■	■	■	■	■	■		100	第參章第二節
依據防砂壩(含調整型防砂壩)調查資料，依據河川型態提出壩體活化之可行性方向，如：修補延壽、功能調砂等。			■	■	■	■	■	■	■	■	100	第肆章第一節
依據氣候變遷影響環境之減碳、綠能、因應土砂變化調整等議題，建議未來興建防砂設施之參考。			■	■	■	■	■	■	■	■	100	第肆章第二節
擬訂研究試區之動態調整建議方案及建議操作時機			■	■	■	■	■	■	■		100	第伍章第一節
研擬調整型防砂壩維護管理手冊	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100	第伍章第二節
調整型防砂壩科普教材及教具			■	■	■	■	■	■	■	■	100	第伍章第三節
工作執行計畫書撰寫	■	■	■								100	2024/05/27
期中報告撰寫				■	■	■					100	2024/08/30

期末報告撰寫							■	■	■		100	2024/11/11
成果報告撰寫及繳交									■	■	100	2024/11/28
預定進度(%)	**8**	**15**	**30**	**42**	**54**	**67**	**77**	**88**	**94**	**100**	--	--
實際完成進度(%)	**10**	**18**	**30**	**45**	**58**	**70**	**80**	**88**	**95**	**100**	--	--

表 1.2 本計畫工項辦理情況及對應章節

工作項目	本計畫辦理情況	對應章節
蒐集全台現有調整型防砂壩至少 10 處，進行功能評估與分類。	本計畫共蒐集 18 **處**調整型防砂壩，並進行功能評估與分類。	第貳章第一節
選擇 1 處研究試區，其溪流含有已進行或可進行動態活化調整作業之防砂壩。	共調查**兩處**研究區,(1)已進行-屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區、(2)可進行-臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區。	第貳章第二節
研究試區進行現地、上下游河床等調查，並蒐集河床歷史資料。	已完成**兩處**研究試區調查及相關河床歷史資料。	第貳章第二、三、四、五節
利用無人載具(UAV)測量，建立研究試區之數值地形模型。	已完成研究試區之數值地形模型建置。(1) 力里溪試區**共四次**、(2) 後堀溪試區**共兩次**。	第參章第一節
研究試區防砂壩之土砂攔阻特性：包含設置區位、設計特色及土砂攔阻特性等。	已完成研究試區防砂壩之土砂攔阻特性分析。	第參章第三節
參考水砂觀測站資料建立動態調整前後之數值模擬，探討可能之沖淤變動及河道演變趨勢。	已完成**一處**研究試區動態調整前後之數值模擬分析。	第參章第二節
依據防砂壩(含調整型防砂壩)調查資料，依據河川型態提出壩體活化之可行性方向，如：修補延壽、功能調砂等。	已完成**兩處**研究試區之台灣河川型態五層分類法分析及研擬之動態活化策略。	第肆章第一節
依據氣候變遷影響環境之減碳、綠能、因應土砂變化調整等議題，建議未來興建防砂設施之參考。	已完成**一處**研究試區之減碳評估;**兩處**研究試區之綠能變化量及土砂量變化之調整方案及建議步驟。	第肆章第二節
擬訂研究試區之動態調整建議方案及建議操作時機	已完成提出**兩處**研究試區之動態調整建議方案。	第伍章第一節
研擬調整型防砂壩維護管理手冊	已完成研擬(1)調整型防砂壩維護管理手冊、(2)調整型防砂壩維護管理手冊_簡約版。	第伍章第二節
調整型防砂壩科普教材及教具	已完成製作調整型防砂壩(1)模**型**、(2)**漫畫**。	第伍章第三節

第貳章　調整型防砂設施之評估分類

第一節 蒐集全台現有調整型防砂壩至少 10 處，進行功能評估與分類。

依據水土保持手冊(2017)工程篇對防砂壩之定義為攔蓄及調節溪流土砂、減緩溪床坡度、穩定流心、防止侵蝕、崩塌或抑止土石流所構築 5.0 公尺以上之橫向阻水構造物，為野溪控制土砂流失與生產。

調整型防砂壩定義為依隨來砂量改變而調整防砂壩結構，以維持各時期的基本輸砂守衡，同時減少防砂壩對河溪環境之損害及生態廊道之阻斷(農業部農村發展及水土保持署，2022)。本計畫彙整歷年調查資料，大致將調整型防砂壩依土砂攔阻特性概分為開口式、孔隙式及封閉式(陳樹群，2016)。

而防砂壩調整之行為可概分為兩類來說明，一類為「一次性調整」，壩體在輸砂量減少後進行不同型態的調整降壩，經壩體調整後即無法恢復原狀；另一類為「動態性調整」，旨為壩體本身具有調整性元件，可依據溪流不同時期輸砂、防災或生態需求進行靈活、反覆性調整作業。本計畫蒐集案例主要以農業部農村發展及水土保持署各分署為主要蒐集對象，並部分蒐集著名案例進行說明之，各蒐集案例皆為實際現勘調查並充分調查，以更好的論述及說明實際概況。

(一)開口式調整型防砂壩

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

流出時間之效果。開口型防砂壩在淤滿前之水流、卵礫石與漂流木運動特性如圖 2. 1 (a)所示，因水流易通過壩體，故最大流速會接近壩體下端，所帶動的卵礫石也易由下端流出，開口型防砂壩目的是讓細小顆粒能從壩體流出。根據實驗與現場調查，粒徑若大於壩體柱間距之 1/2，就易起連拱效應阻斷後續輸砂，轉變成為孔隙型壩體之型態，如圖 2. 1 (b)，因此壩體柱間距設計影響壩對礫石的攔阻功能甚巨。漂流木因水流的浮力及水平推力而極易受壩體所攔擋，這也是該型防砂壩的優點，但同時也必須進行清淤的動作，以恢復其效能。瀨戶俊彥等人(1998)依據對日本大棚沢第二大壩近 10 年間的調查，發現開口型壩體於一般的情況下土砂並不會淤積，而是會從壩體下方直接流過，即使有淤積也會隨小流量水流出，於未來可保有攔阻土石流的空間，並可中斷土石流的連續性，大幅降低下游河道的破壞。目前台灣地區因地質脆弱與暴雨集中等因素，多將開口型防砂壩配置於易發生土石流之溪流。

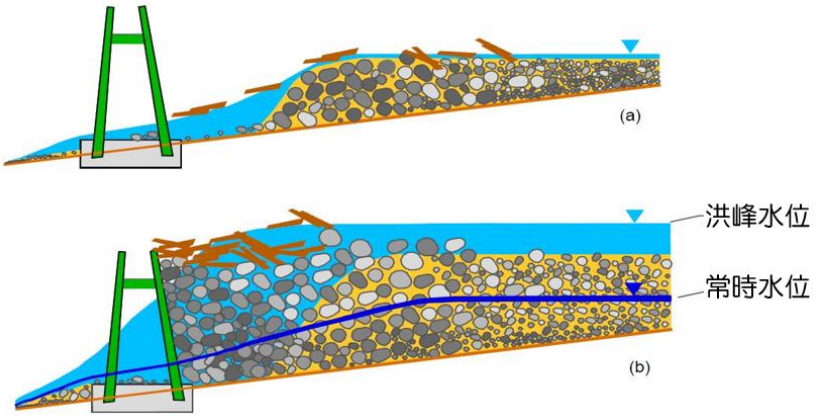


圖 2. 1 開口型防砂壩(a)未淤滿(b)礫石淤滿與漂流木攔阻示意圖
(陳樹群等，2016)

表 2.1 開口式調整型防砂壩案例蒐集彙整表

圖示	概述
	地點：南投縣仁愛鄉蘭島溪下游鋼管壩
	興建日期：2013/03
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2663970.795, E 251421.124
	說明：調整型柵欄式鋼管壩，設計區位於土石流堆積段，溪床坡度於 2°~10°間，設計理念為攔阻漂流木，其材料屬預鑄性、拆卸組裝與施工容易、可有效攔阻漂流木且兼顧生態環境保護等特性。
	地點：南投縣仁愛鄉蘭島溪上游梳子壩
	興建日期：原梳子壩 2007/04；壩體調整 2015/12
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2663754.401, E 251647.096
	說明：2015 年中間兩支墩柱下修 2.5m，2019 年初將中央四支壩柱完全移除，並於年底安裝三組調整型鋼構壩。目的為清除壩後淤積土方，增加囚砂空間並增加常流量時之輸砂量，保護壩基免於傾倒增加溪流生態連續性，以利後續因應土砂量調整壩體型態。
 	地點：高雄市桃源區東庄溪
	興建日期：原鋼構壩 2018/08；壩體調整 2020/08
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2563220.818, E 227173.702
	說明：2018 年設計為梳子壩搭配 H 型鋼軌橫桿，可隨上游來砂量調整壩體鋼構橫桿，透過性結構營造棲地連續性及流況多樣性。至 2020 年已淤滿，因土砂來源豐富，使 H 型鋼中淤滿塊石及細粒料土砂，使 H 型鋼多處彎曲及銹蝕磨損，故無法直接抽取剛材來調整，最後以熱切割將 H 型鋼取出。2020 年 8 月為釋放上游淤積土砂，將全數橫材移除。2021 年進行橫桿安裝作業，改良安裝方式為將 H 型鋼安裝於上游側，以利下次調整時可快速裝卸作業。

圖示	概述
	地點：宜蘭縣大同鄉德荃橋預鑄防砂壩
	興建日期：2018/10/17
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2714783.446, E 296261.424
	說明：開口式防砂壩設計為 E 型預鑄可吊起，以利後續清疏作業，預鑄間埋有發泡劑填縫，以方便調整壩體時之切割作業。
	地點：花蓮縣瑞穗鄉阿夜溪
	興建日期：原壩因年代久遠不可考；壩體調整 2018/05/21
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2602446.511, E 291205.109
	說明：2018 年由封閉型防砂壩降低既有壩高兩處，皆降低高 3.9m 及寬 4m，改善為開口型加裝鋼管並搭配輪胎，以讓適量土砂下移。
	地點：台東縣金峰鄉庫農溪一號壩
	興建日期：原壩 1981；壩體調整 2022/03
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2499806.783, E 247072.924
	說明：2021 年由原先的封閉式防砂壩，降低壩高 1m(5m→4m)，壩體中央開口 38.8m(原壩體全斷面 60m)，改為透過型鋼管壩，以加強土砂調節能力。
	地點：台東縣金峰鄉庫農溪二號壩
	興建日期：原壩 1982；壩體調整 2022/03
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2499494.603, E 247058.591
	說明：2021 年由原先的雙層封閉式防砂壩，降低壩高 1m(5.5m→4.5m)，壩體改為透過型鋼管格柵壩，以加強土砂調節能力。

圖示	概述
	地點：嘉義縣阿里山鄉巴沙娜溪
	興建日期：2020/06/30
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2596880.856, E 225677.418
	說明：調整式開口型鋼管壩之通透性高，有利於溪流生態連續性，壩址為溪流彎曲段下游，利用壩軸方向導正流心。
	地點：台東縣知本溪鋼管壩
	興建日期：2017/07/10
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2509265.865, E 249171.153
	說明：調整型鋼構設計，可視防災需求移除部分鋼管，以提供河川之基本輸砂需求，同時維持房砂能力，為防患下次土砂事件，亦可重新安裝鋼管。
	地點：新竹縣尖石鄉煤源二號橋野溪防砂壩
	興建日期：2016/12/28
	圖片來源：計畫產製
	座標：N 2734334.119, E 277183.351
	說明：其設計概梳子壩混合鋼構，主要利用壩身透水設計，使流到壩前之土石流脫水，進而使土石流停止流動，並在壩前淤積攔截土石流。
	地點：嘉義縣曾文水庫沙力基支流鋼管壩
	興建日期：2013 年
	圖片來源：農村發展及水土保持署(2013)
	座標：N 2580332.540, E 209755.591
	說明：所屬於水利署南水分署，建於曾文水庫上游，屬於砂床值河床，溪床坡度於 0°~2°間，設計理念為攔阻漂流木。

圖示	概述
	地點：雲林縣華山溪右支流鋼管壩
	興建日期：2010 年
	圖片來源：農村發展及水土保持署(2013)
	座標：N 2609943.757, E 210524.228
	說明：設計區位於土石流輸送段，溪床坡度於2°~10°間，設計理念為防砂，能減少流出土砂量，避免造成下游土石災害且穩定河床，促進上游崩塌地復育。

另切口壩利用壩身中間之開口，在平時將粒徑較小之泥砂以水流帶出壩體，增加壩體後方之儲砂空間，而在高含砂水流發生時，因壩前之迴水效應，使泥砂易於沉降，便可增加防砂壩攔阻高含砂水流或土石流之功效。

開口型防砂壩在土石流或高含砂水流與漂流木之攔阻上皆有良好之功效，可維持河道生態機能與山區河川環境。在設計理念上具備容許泥砂自然流出以維持上游囚砂滯洪等功能；然而在實務上，常因壩體上游淤滿而喪失囚砂空間，將面臨防砂壩阻斷輸砂與棲地連通性之窘境。故若能將壩體設計為可因應上游來砂量而調整其攔阻型態，將能有效緩解其窘境，並同時達到輸砂及生態棲地之平衡。

(二)孔隙式調整型防砂壩

孔隙型防砂壩定義為壩身因構築孔隙材料具有透水性，在承受基礎輸砂量時，大部分之土砂無法通過壩身，但水流可由孔隙滲流出。早期孔隙型防砂壩較少用於施作高壩，且不論淤滿與否，水流均能由壩體孔隙間流出如圖 2.2，主要於分離水流，攔阻細顆粒泥沙，達到壩後淤積以減緩河床及壩後沖蝕現象，以防止蝕溝擴大，亦能減緩水流由壩頂向下游淘刷壩體。近幾年有孔隙型混合鋼構之設計壩型，可加強結構強度，其壩基穩固亦可突破以往壩基不穩，故此已有施作高壩之基礎。



圖 2.2 孔隙型防砂壩(a)未淤滿(b)淤滿的水流與土砂分離示意圖
(陳樹群等，2016)

表 2.2 孔隙式調整型防砂壩案例蒐集彙整表

圖示	概述
 	地點：屏東縣恆春鎮東門溪出火橋野溪 興建日期：2021/04/26 圖片來源：農村發展及水土保持署臺南分署提供 座標：N 2433704.274, E 226716.389 說明：壩體開口採鋼柵及卵塊石組裝，設計為可彈性調控囚砂，橫向元件皆為獨立構件，可自由拆卸維修，鋼柵間回填卵、塊石，營造多孔隙濾水，提供水陸域生態棲地。其輕量化構件無須大型機具拆卸，提升維管成效。
	地點：屏東縣牡丹鄉里仁溪上游防砂壩 興建日期：2016/03/03 圖片來源：本計畫產製 座標：N 2451477.67, E 227627.03 說明：以切口壩與孔隙型壩體融合設計而成，多孔隙產生透水效果，可達到過濾土砂與攔阻漂流木之功效,可大幅降低下游牡丹水庫之清淤費用。
	地點：臺中市新社茄苳寮溪上游防砂壩 興建日期：2017/06 圖片來源：本計畫產製 座標：N 2673114.329, E 230981.515 說明：為混合式壩體，以格柵壩與孔隙型壩體融合，並於壩體內填塊石設計而成，上游、下游邊坡處鋪放稻草，裡面灑草種，目的為復育、保水、防日曬之用。

(三)封閉式調整型防砂壩

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

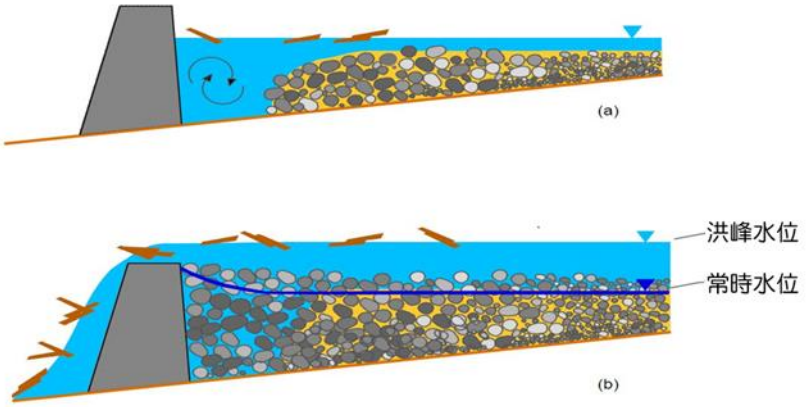


圖 2. 3 封閉型防砂壩未淤滿(a)及淤滿(b)對於土砂攔阻示意圖

(陳樹群等，2016)

庫容較大的封閉型防砂壩，在未淤滿前會因壩後水流擾動，而使推移質向下游移動速度減緩，而產生懸移值落淤現象，經常一場暴雨就造成完全淤滿，台灣相關案例中(如:屏東三台山)，壩體經過歷次土砂災害之淤積，最終都會達到淤滿的狀態，雖然無法再容納更多的土砂，但此時的壩尚有固床及穩定坡度等功能。壩體設計目的為攔阻平日河道中之泥砂，強調穩定上游河道兩岸邊坡與減少沖蝕的功能。由於全封閉型防砂壩下游土砂運移量減少，亦造成壩體下游淘空，故常興建副壩配合水墊保護或以系列壩 (節制壩) 的型態出現，以保護河床並免於壩體淘刷。

封閉型防砂壩最易被環保團體所詬病的是棲地之縱向不連續，防砂壩直接阻斷河川棲地中之縱向連續性，造成棲地成片斷不相連之區塊。對於水土保持專業而言，更應思考於封閉型防砂壩於水流輸砂之不連續、河川水力條件改變、水流受阻、泥砂無法順利下移等危害之疑慮，河川失去應有之基礎輸砂量。若能將調整型防砂壩之概念與封閉型防砂壩做結合，將可達攔阻土砂亦能適時調整輸砂及清淤之功效。

表 2.3 封閉式調整型防砂壩案例蒐集彙整表

圖示	概述
	地點：屏東縣恆春東門溪三台山防砂壩
	興建日期：2015/12/29
	圖片來源：本計畫產製
	座標：N 2434866.626, E 224833.256
	說明：設計為可調整壩體，構造物於土砂淤滿後，預鑄橫梁可吊起，便利清疏作業。壩體經過歷次土砂災害之淤積，最終都會達到淤滿的狀態，雖然無法再容納更多的土砂，但此時的壩尚有固床及穩定坡度等功能。預鑄橫梁可靈活且可反覆性調整以因應不同溪流土砂需求。
	地點：臺中市廊仔溪
	興建日期：2021/09/13
	圖片來源：農村發展及水土保持署臺中分署提供
	座標：N 2673499.581, E 227766.141
	說明：原為一座封閉型防砂壩，於 2021 年將既有防砂壩之溢口改閃為三處可調整式溢洪口(4m)，採多型式組合預鑄塊，可配置成三種型式，可配合土砂運移變化來調整開口，可兼顧生態、安全及多功能特性。

第二節 選擇 1 處研究試區，其溪流含有已進行或可進行動態活化調整作業之防砂壩。

計畫主要以農村發展及水土保持署案例中挑選，挑選基準需符合契約(1)已進行或、(2)可進行動態活化作業之防砂壩。於期初報告後經農村發展及水土保持署決議以兩個具有研究潛力之試區進行研究，分別為臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區、屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區。研究試區之背景分述如表 2.4：

表 2.4 研究試區概況及探討重點

試區	計畫期間概況	探討重點
臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區	➢ 位於南化水庫上游集水區 ➢ 上游調整型封閉式固床工(可調控式堤尾工)，座標 N2561524.245，E207433.783 ➢ 下游調整型孔隙式防砂壩，座標 N2560971.744，E206998.261 ➢ 上、下游橫向構造物皆已淤滿 ➢ 透過近 20 年上游崩塌地面積變化程度，推估尚處於土砂高峰期階段。	➢ 修補延壽、功能調砂 ➢ 提出壩體調整方案，以解決攔砂、輸砂、清淤及邊坡崩塌等困境
屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區	➢ 為系列防砂壩 ➢ 主壩座標 N2480847.963，E213749.015 ➢ 構造物年久失修、基礎淘刷、阻隔縱向廊道等困境 ➢ 壩體改善工程施工中，預計於 2024 年 12 月底完工。 ➢ 透過近 10 年上游崩塌地面積變化程度，可推估已逐漸進入土砂削減期。	➢ 修補延壽、功能調砂 ➢ 壩體調整為可動態性調整之結構，達到靈活且可反覆性調整作業 ➢ 透過壩體透過性調整達到防砂、防災及生態需求

(一)臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

研究區域位於臺南市南化區曾文溪支流後堀溪上游關山里，其下游為南化水庫，研究區域之下游橫向構造物距離水庫約 6 公里。南化水庫容量約 1 億 5,000 萬立方公尺，以阿里山山脈與曾文水庫相隔距離約 10 公里，共同負擔臺南、高雄地區公共給水之重要水庫。南化水庫自 1993 年啟用後至今，每次遇颱風侵襲皆造成大量土石沖入淤積。2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風侵襲，壩前淤積面提升至海拔 150.8m 處。2009 年 11 月，經濟部水利署南區水資源分署進行測量，其有效蓄水容量約為 1 億立方公尺，已減為原先設計容量的 63%；2012 年測量有效蓄水量僅剩 9,943 萬立方公尺，可顯見淤積已嚴重影響水庫蓄水功能。

後堀溪為曾文溪上游其中一條支流，壩體位置於後堀溪上游，下游匯入南化水庫。包含南化水庫上游集水區內之竹子山子集水區、木瓜坑子集水區、平坑仔子集水區等。曾文溪集水區面積為 48,100 公頃，其子集水區面積約為 16,590 公頃，溪流長度約 51.059 公里，溪流坡度 3.4%，地質以北寮頁岩為主，由頁岩、砂質頁岩、泥岩組成(圖 2. 4)。研究區域生態資源豐富，特別魚類、昆蟲及鳥類之種類多樣，然而受上游土砂下移，溪流沿岸縱向廊道受土砂災害破壞，影響水、陸域生態棲地之連續性。

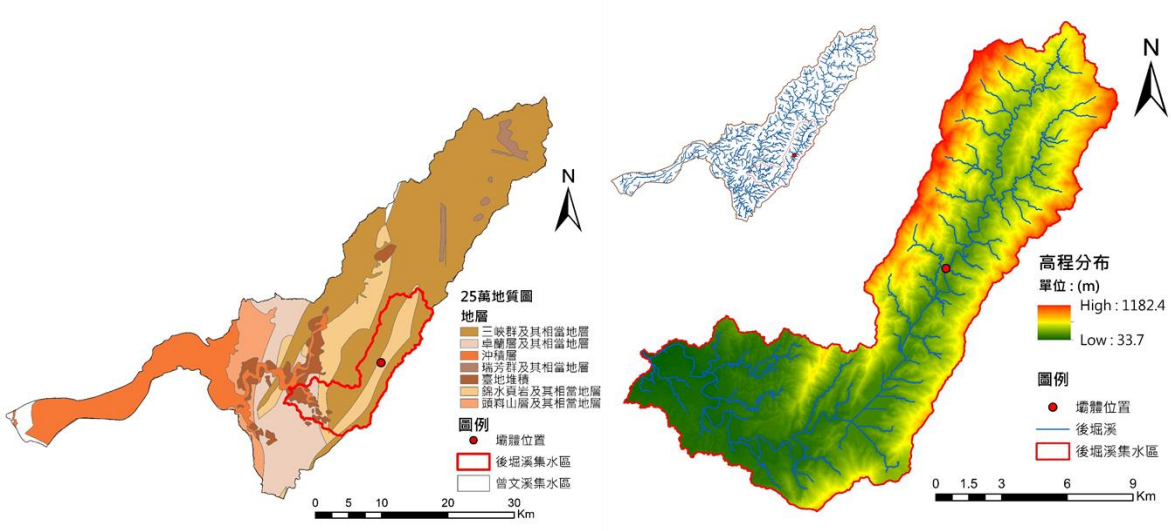


圖 2. 4 後堀溪試區基本地文資料

依據 2017 年農村發展及水土保持署臺南分署提供之調查資料，工程起源為受 2008 年卡玫基及 2009 年莫拉克颱風之高強度及長延時降雨(超過 200 年頻率年之暴雨)影響，造成後堀溪溪水暴漲溢流，致使路基淘空、農地損毀、護岸設施及南 179 線沿線橋梁多處損壞。其興建目的為南化水庫上游之最後一道土砂攔阻防線，且需擴大通洪斷面、護岸治理穩固溪床、避免土石下移至水庫庫區、有效攔阻土砂、降低清疏成本，並延長南化水庫壽命為其重要課題。

2024 年至現地調查關山九號橋上、下游皆有一座調整型橫向構造物，上游為調整型封閉式固床工(可調控式堤尾工)，而下游為調整型孔隙式防砂壩，上、下游橫向構造物間距離約 850 公尺，上游橫向構造物上游右岸有明顯崩塌坡面，而下游壩上游左岸亦有明顯崩塌坡面之跡象(圖 2. 5)。

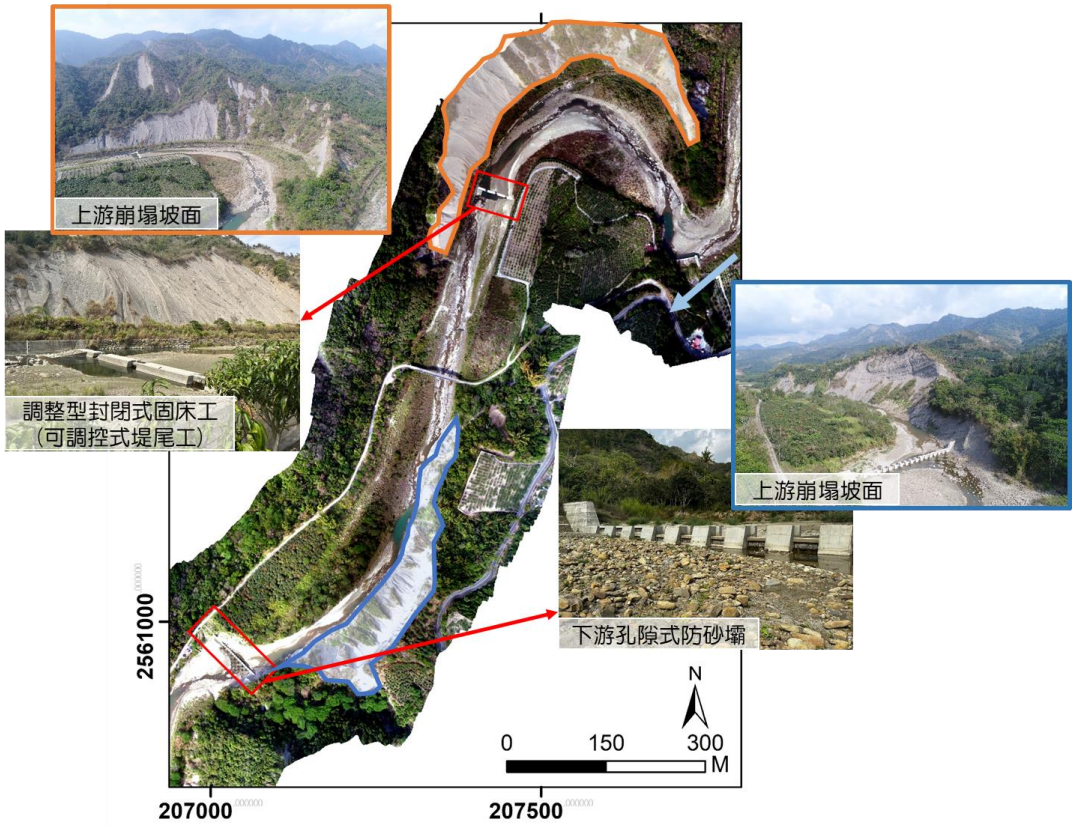


圖 2.5 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

1. 關山九號橋後堀溪試區上游橫向構造物(可調控式堤尾工)：

上游橫向構造物為可調控式堤尾工，為農村發展及水土保持署臺南分署執行「仁耀橋下游護岸整治三期工程」，於 2017 年 7 月 27 日竣工之防砂壩。興建此壩可將土砂攔阻於上游，避免土砂進入庫區，並於上游進行清疏作業，此清淤方式與土砂進入庫區後抽取泥砂所需之經費相比，可節省約 10 倍成本。

其橫桿設計為可拆式吊裝預鑄板，可依據溪流不同時期輸砂、防災或生態需求進行靈活、反覆性調整作業。每塊預鑄橫樑長 4m、寬 1 公尺、高 0.4 公尺，每個缺口皆有三塊預鑄橫樑。搭配魚梯提供魚類洄遊廊道、下游施作拋石靜水池增加棲息空間。2024 年至現地調查，三個缺口中靠右岸之兩個缺口皆有調降一塊預鑄橫樑，讓適量土砂下移之跡象，經調查為 2017 年興建時即下調右岸之兩個缺口，此

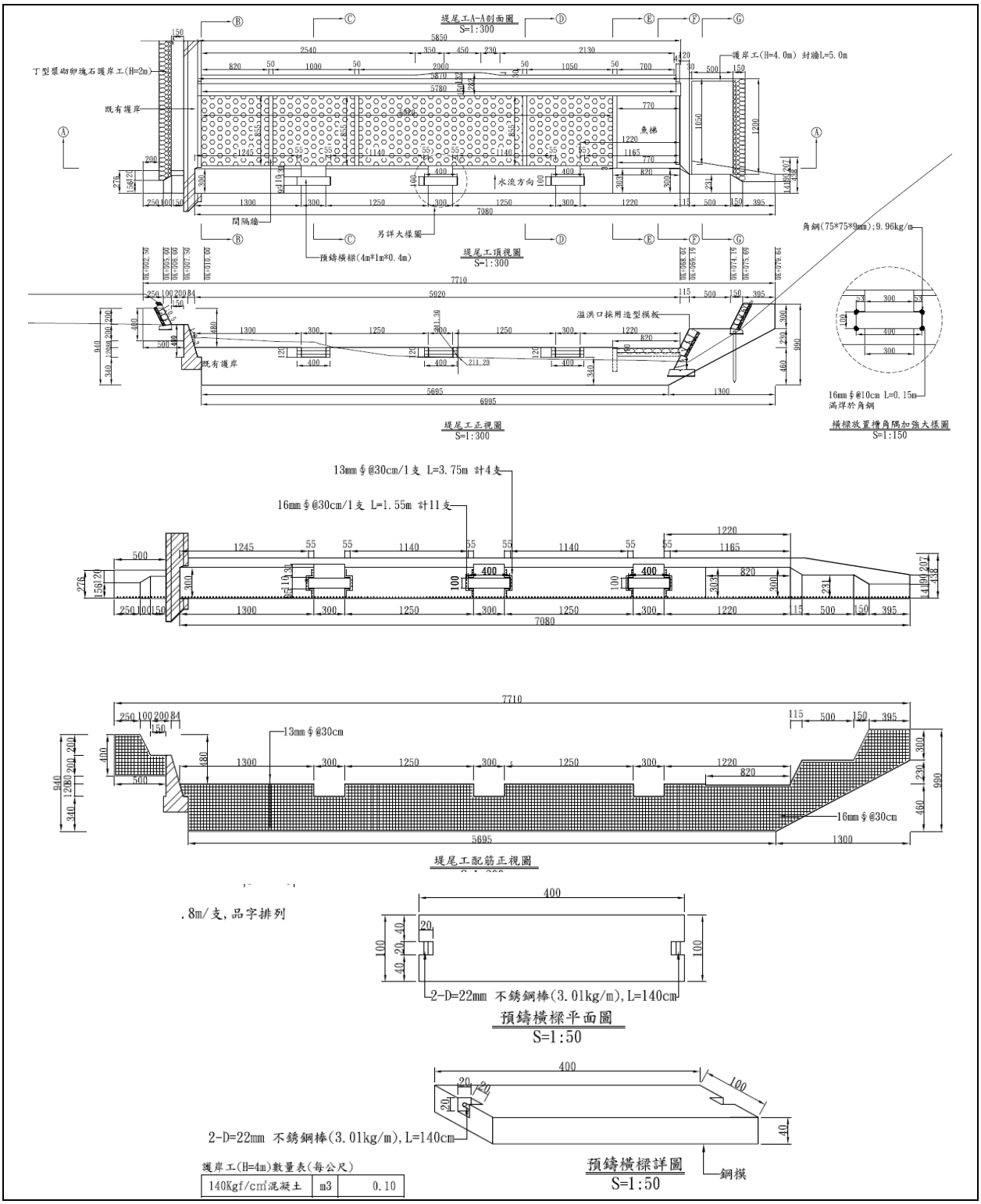
舉為試驗性調整之緣故。兩岸邊坡設複式漿砌石護岸，砌石護岸採就地取材，利用現地塊石、卵石，減少混凝土用量，並增加通洪斷面。

可調控式堤尾工下游側丙型漿砌卵塊石護岸間設有隔牆，具有友善生態迴避之功能，為魚蝦等於常流水及洪水時期之棲避場所，以補償工程對生態棲息之擾動。相關設計圖詳見附錄四及資料來源：仁耀橋下游護岸整治三期工程(立成剴盛工程顧問有限公司)

圖 2.7。其上游側及凹岸處土砂淤積程度頗高(圖 2.6)。

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>右岸魚梯及上游側土砂淤積概況，右側兩個缺口有調降一塊預鑄橫樑。</td><td>上游側土砂概況</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>下游側土砂概況</td><td>壩體上游崩塌坡面概況</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>丙型漿砌卵塊石護岸間隔牆
(生物躲避設施)</td><td>複式漿砌石護岸</td></tr>
</table>

圖 2.6 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)概況 (2024/02/06 及 2024/05/16)



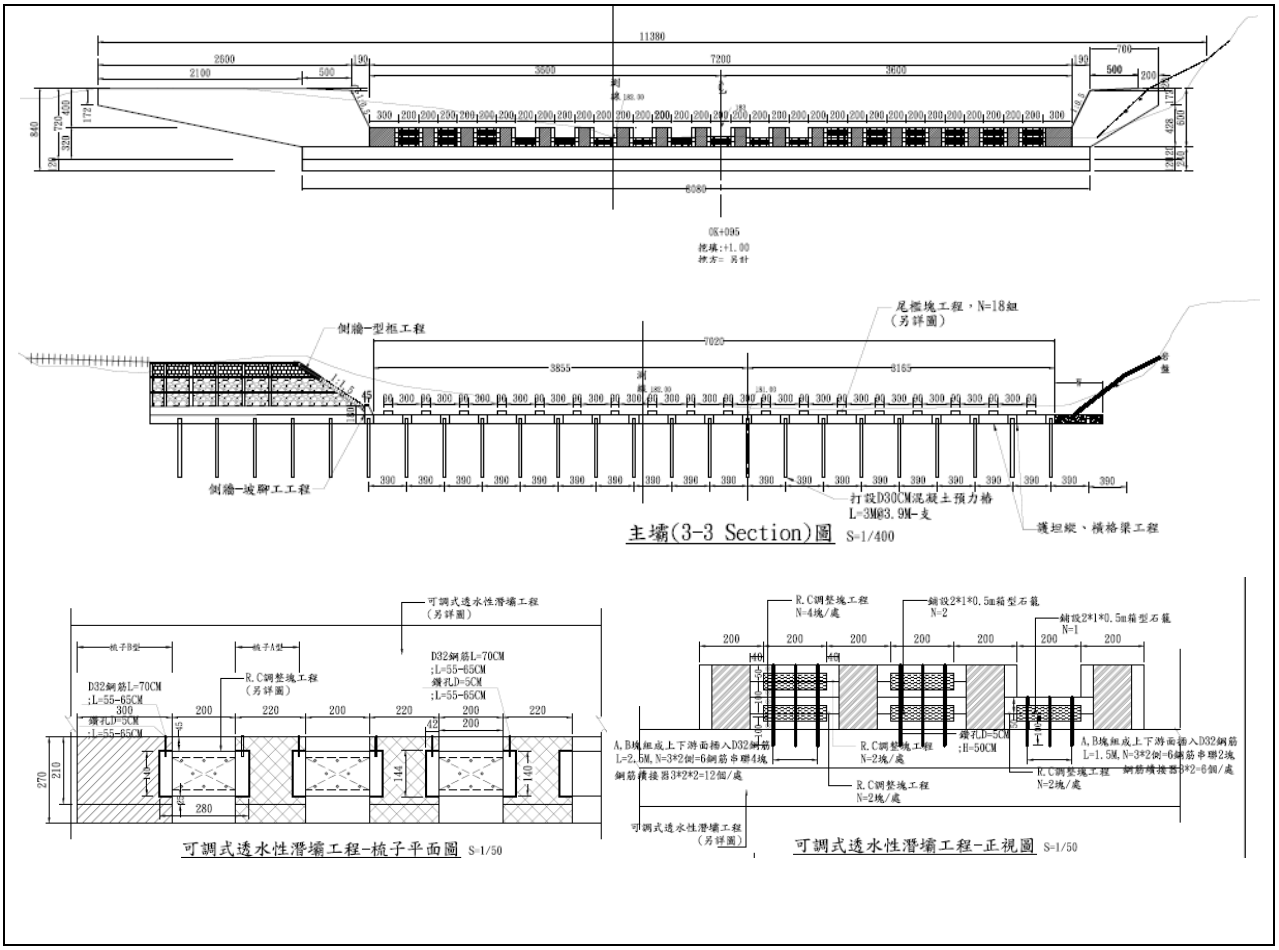
資料來源：仁耀橋下游護岸整治三期工程(立成剴盛工程顧問有限公司)

圖 2.7 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-設計圖說

2. 關山九號橋後堀溪試區下游壩：

為調整型孔隙式防砂壩(可調式透水性淺壩)，為農村發展及水土保持署臺南分署執行「關山九號橋下游防砂工程」，於 2023 年 5 月 29 日竣工之防砂壩。橫桿設計為預鑄橫樑，橫樑間設有格網回填塊石，共有 17 個缺口，上、下兩塊預鑄橫梁間皆有鋼筋(3*2)6 處鋼筋續接處相互連接。其中靠近右岸有八處缺口之橫向元件僅配置 1m 高(每個缺口移除兩塊預鑄橫樑及橫樑間之塊石)，推估為適量輸砂及引導水流所致(圖 2. 9)。相關設計圖詳見附錄五及資料來源：關山九號橋下游防砂工程(剴盛工程顧問有限公司)

圖 2. 8。



資料來源：關山九號橋下游防砂工程(剴盛工程顧問有限公司)

圖 2. 8 關山九號橋後堀溪試區下游調整型孔隙式防砂壩-設計圖說

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>橫桿設計為預鑄橫樑，橫樑間設有格網回填塊石</td><td>右岸有八處缺口之橫向元件僅配置 1m 高</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>上游側土砂概況</td><td>下游側土砂概況</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>壩體上游崩塌坡面</td><td>壩體左岸崩塌現況</td></tr>
</table>

圖 2. 9 關山九號橋後堀溪試區下游調整型孔隙式防砂壩概況 (2024/02/06 及 2024/05/16)

3. 凱米颱風(Typhoon Gaemi)概況：

在 2024 年計畫執行期間，面臨了兩次重大氣象事件：6 月的數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi）。根據氣象署的監測資料，凱米颱風在 2024 年 6 月 23 日至 26 日期間，對臺南市關山地區造成了顯著的降雨影響，累積降雨量高達約 1,245 毫米。

關山九號橋後堀溪試區現場之監測概況，上游之調整型封閉式固床工(堤尾工)於凱米颱風期間，洪水水位上升並漫淹至複式漿砌石護岸之洪峰水位高(紅線處)(圖 2. 10)。在超大降雨量的挑戰下，洪水對邊坡、護岸的危害尚需進一步評估。



2024 年豪雨災害前概況(2024/02/06)
洪峰水位高(紅線)，出水位高(黃線)



凱米颱風概況(2024/07/26)
資料來源：113 年水庫集水區保育減砂暨崩塌地變遷評估

圖 2. 10 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-凱米颱風概況

透過空拍紀錄(圖 2. 11)可明顯看出游調整型封閉式固床工(堤尾工)上游土砂淤積情況，凱米颱風前(2024/02/06)固床工上游右岸凹岸有大面積淤積灘地(黃圈處)，而凱米颱風過後右岸淤積之土砂被帶往下游後，可明顯看出洪水將 B 型基礎固床工被沖毀之情況(2024/08/13 及 2024/10/13)。

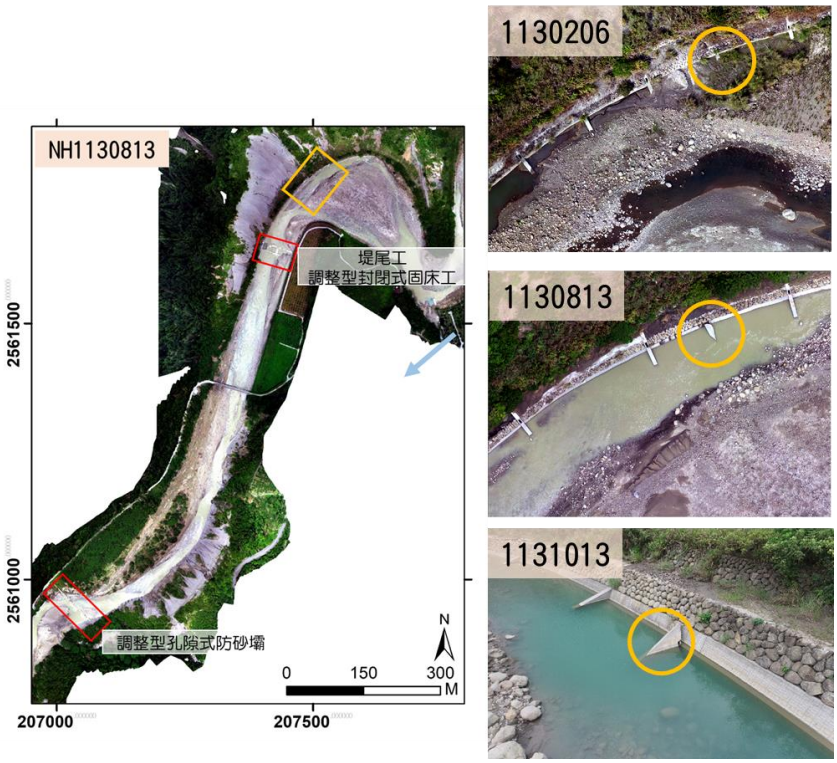


圖 2. 11 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-凱米颱風毀損情況

下游調整型孔隙式防砂壩(可調式透水性淺壩)依照地形及現況河道水流流路主要衝擊左岸及其邊坡，而於凱米颱風期間壩體左岸預鑄橫樑在洪水的沖刷下被沖翻，上、下兩塊預鑄橫梁間 6 處鋼筋續接處被洪水沖起使預鑄塊被掀起。此外，根據當地居民的描述，洪水不僅淹至左岸防砂壩，還淹及右岸的道路，故提出陳情要求提高右岸道路，以避免極端氣候下，阻斷對外道路之通行(圖 2. 12)。

	
預鑄橫樑被凱米颱風期間被洪水沖翻(下游往上游)	預鑄橫樑被凱米颱風期間被洪水沖翻(上游往下游)



洪水淹至右岸道路

圖 2. 12 關山九號橋後堀溪試區下游調整型孔隙式防砂壩-凱米颱風概況(2024/08/13)

4. 康芮颱風(Typhoon Kong-rey)概況：

接續於 2024 年 10 月強烈颱風康芮（Typhoon Kong-rey）侵襲，康芮颱風影響臺灣時間將落在 10 月 30 日至 11 月 2 日之間，根據土石流及大規模崩塌防災應變系統之監測數據，南化(關山測站)累積雨量達 139 毫米(圖 2. 13)，造成強風及豪雨災害，全台最大陣風皆達 10 級以上。上游之調整型封閉式固床工(堤尾工)於凱米颱風期間，洪水水位上升接近複式漿砌石護岸之洪峰水位高(紅線處)，與凱米颱風相比水位稍低(圖 2. 14)。



圖 2. 13 康芮颱風-南化關山測站累積雨量(2023/10/30-11/01)



2024 年豪雨災害前概況(2024/02/06)
洪峰水位高(紅線)，出水位高(黃線)



康芮颱風 2024/10/31(資料來源:113 年水庫集水區保育減砂暨崩塌地變遷評估)





康芮颱風 2024/11/01(資料來源:113 年水庫集水區保育減砂暨崩塌地變遷評估)

圖 2. 14 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-康芮颱風概況

5. 天兔颱風(Typhoon Usagi)概況：

於 2024 年 11 月天兔颱風（Typhoon Usagi）侵襲，天兔颱風影響臺灣時間將落在 11 月 14 日至 11 月 17 日之間，根據土石流及大規模崩塌防災應變系統之監測數據，南化(關山測站)累積雨量僅 23.5 毫米(圖 2. 15)，並未造成相關災害(圖 2. 16)。

調整型防砂設施動態活化溪流土砂資源

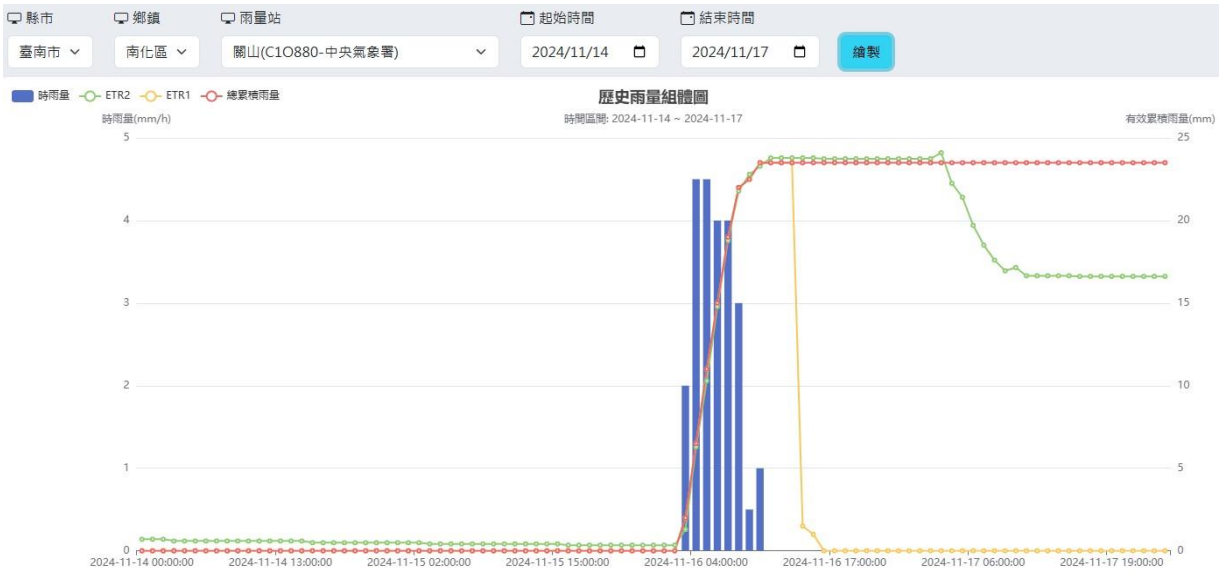


圖 2. 15 天兔颱風-南化關山測站累積雨量(2023/11/14-11/17)



天兔颱風 2024/11/22(資料來源:113 年水庫集水區保育減砂暨崩塌地變遷評估)

圖 2. 16 關山九號橋後堀溪試區上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-天兔颱風概況

6. 探討改善對策

本計畫於 2024 年 8 月與農村發展及水土保持署及臺南分署至現地勘查，對於關山九號橋後堀溪試區進行改善對策之探討，並提出以下幾點建議進行討論：

(1) 依據第伍章第一節調整時機，及第貳章第五節透過近 20 年上游崩塌地面積變化程度，推估試區處於土砂高峰期階段，而關山九號橋試區兩處橫向構造物上游皆已淤滿，已無庫容來預防下次大型土砂事件。建議調整橫向元件，並進行上游清淤作業，亦需定期觀測土砂量變化，評估大型土砂事件再次發生之機率。

(2) 考量上游調整型封閉式固床工(堤尾工)其興建目的為南化水庫上游之土砂攔阻防線，建議部分調降預鑄橫樑，使清淤機具可利用此清淤通道，對上游淤積土方進行人工清淤作業。

(3) 上游調整型封閉式固床工(堤尾工)右岸(複式漿砌石護岸處)估算沿線有長 1 公里、高 2 公尺之土方回填區可利用；壩體左岸之芒果樹種植區為國有土地，亦可規劃暫置清淤土方，以達到土方去化、土方交換之效果。估算暫置土方量可達 53,952 立方公尺(A 處暫置區約 20,536 立方公尺;B 處暫置區約 33,416 立方公尺)(圖 2. 17)。透過內政部地政司之地籍圖網路服務系統查詢相對應之土方暫置區(A、B 區)屬 8049 北勢段，分別為林業用地、農牧用地之使用地類別(圖 2. 18)。

(4) 清淤後之土方除了放置於土方暫置區(A、B 區)外，亦建議可回填土方於下游調整型孔隙式防砂壩左岸崩塌地下方之河道邊坡處，此處指南 179 號線下方河道邊坡處，以進行邊坡穩定。

(5) 對於土方暫置區(A、B 區)之保護措施，評估土方暫置區並不會受到洪水擾動及沖刷，建議採用拋塊石或土包袋方式進行穩定即可，以避免使用混凝土。



圖 2. 17 上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-清淤土方暫置區

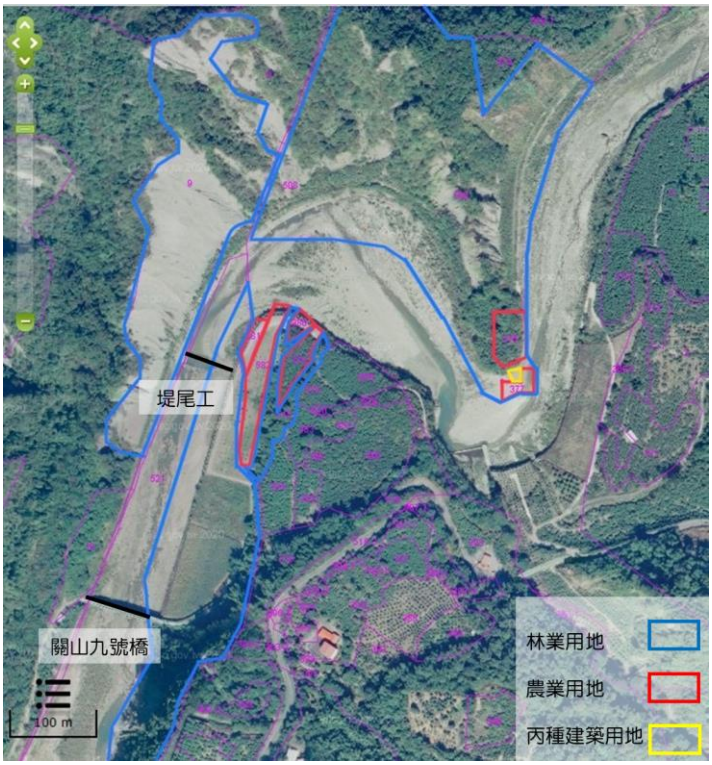


圖 2. 18 關山九號橋土方堆置區-地籍圖相關資訊

(參考內政部地政司 2024 年 10 月 22 日版本)

(6) 下游調整型孔隙式防砂壩為南化水庫上游之最後一道土砂攔阻防線，其防砂壩左岸之崩塌地，現況調查與南 179 號線間距僅剩約 30 公尺(圖 2. 19)，需針對壩體上游左岸邊坡進行邊坡保護作業，並回填土方以減緩崩塌範圍持續擴大。

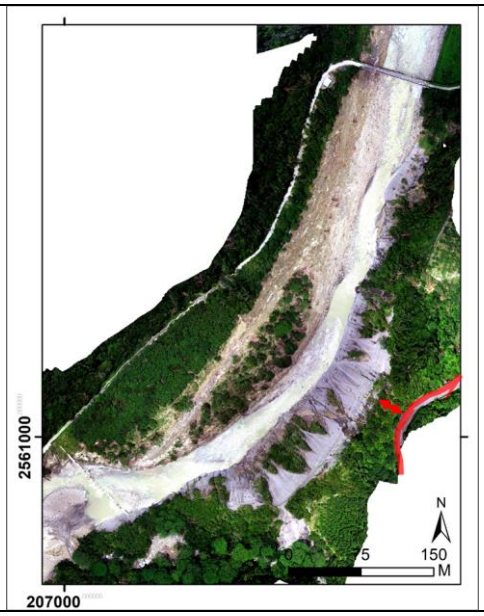
	
下游防砂壩之左岸崩塌地	南 179 號線與崩塌地間距剩約 30m

圖 2. 19 關山九號橋後堀溪試區下游崩塌地現況(2024/08/13)

(7) 下游調整型孔隙式防砂壩之上游右岸有大面積之淤積灘地，將壩體上游之河道由原先約 112 公尺寬，束縮後僅剩約 22 公尺。可利用此灘地，規劃部分清淤以引導水流流向，以避免水流持續攻擊左岸，甚至影響南 179 號線。對此請參閱數值模擬結果第參章第二節，提出以下建議：

A. 下游調整型孔隙式防砂壩之上游右岸淤積灘地於洪水前後之範圍有明顯差異，於 2024 年凱米颱風後(2024/08/13)之空拍影像，可明顯看出高灘地中有一條洪水沖出之流路痕跡(圖 2. 20)，其河寬寬度約 10~15 公尺。

B. 考量河道輸砂特性，建議利用高灘地內之此流路，進行模擬後建議利用洪水所沖刷出之河寬寬度約 10~15 公尺內範圍進行分流清淤作業，其河道深槽建議與主河道一致，於常流水時就能引導水流，減緩水流對於左岸邊坡沖刷之風險，亦保護南 179 號線(圖 2. 21)。

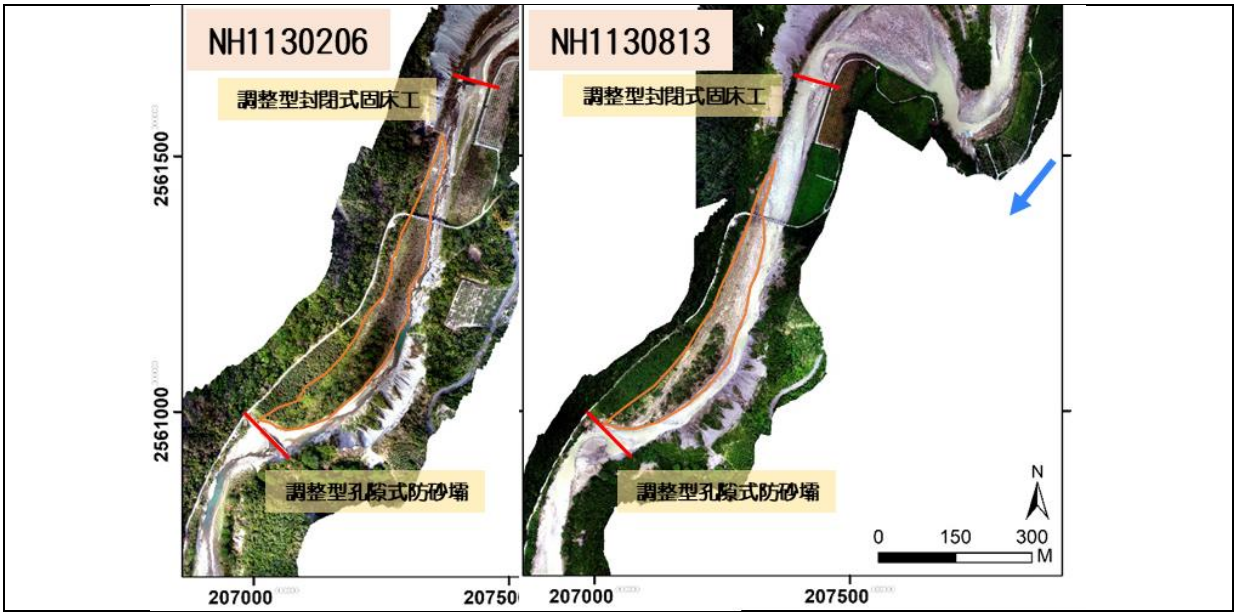


圖 2. 20 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-上游高灘地範圍變化

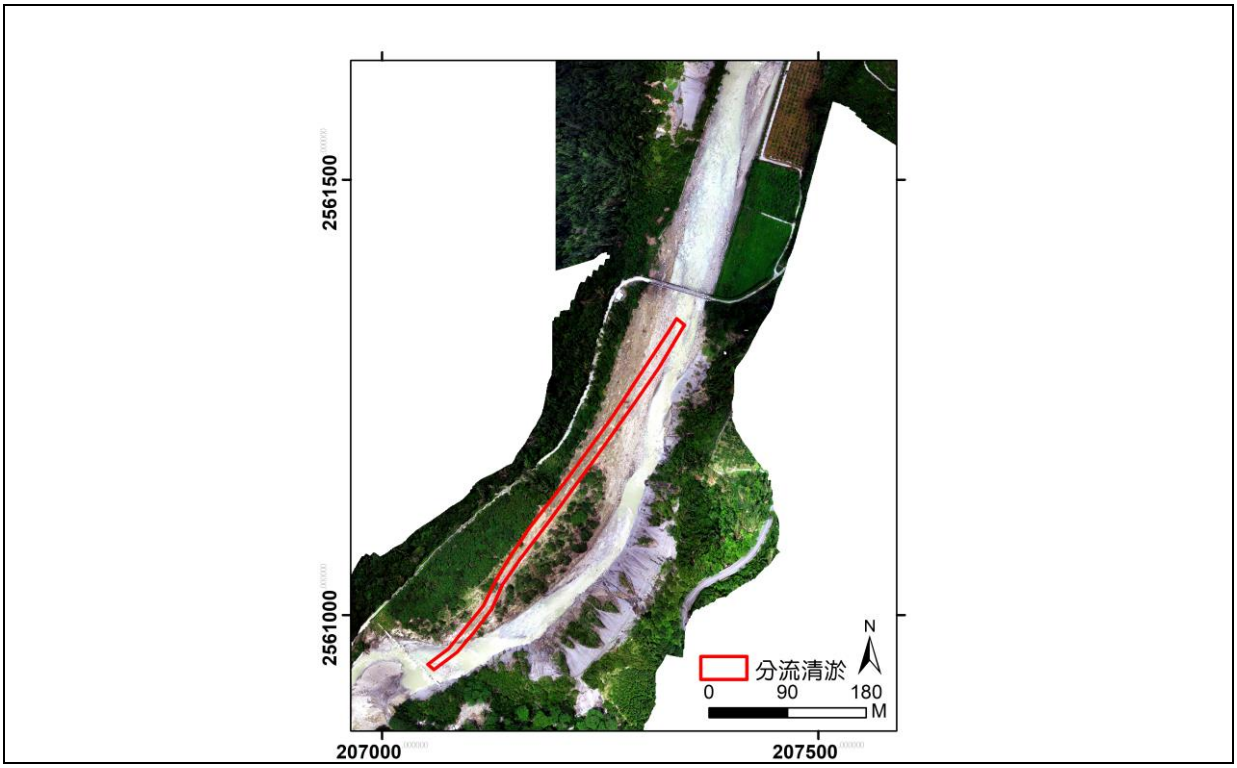


圖 2. 21 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-分流清淤範圍

(8) 下游調整型孔隙式防砂壩若有壩體加高之需求，尚需先探討分流清淤後之效益，再進行評估是否需要提升土砂攔阻之需求。

(二)屏東縣春日鄉力里橋試區

屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區，位於布卡里娃欄溪，其為力里溪上游的其中一條支流，位於屏東縣春日鄉，力里溪集水區面積為12,500 公頃，其子集水區布卡里娃欄溪集水區面積為 374.9 公頃，溪流長度約 2.412 公里，溪流坡度 14.7%，地質主要為廬山層，主要岩性為厚層板岩及硬頁岩，含有砂岩及板岩的互層及灰黑色變質砂岩的夾層(圖 2. 22)。

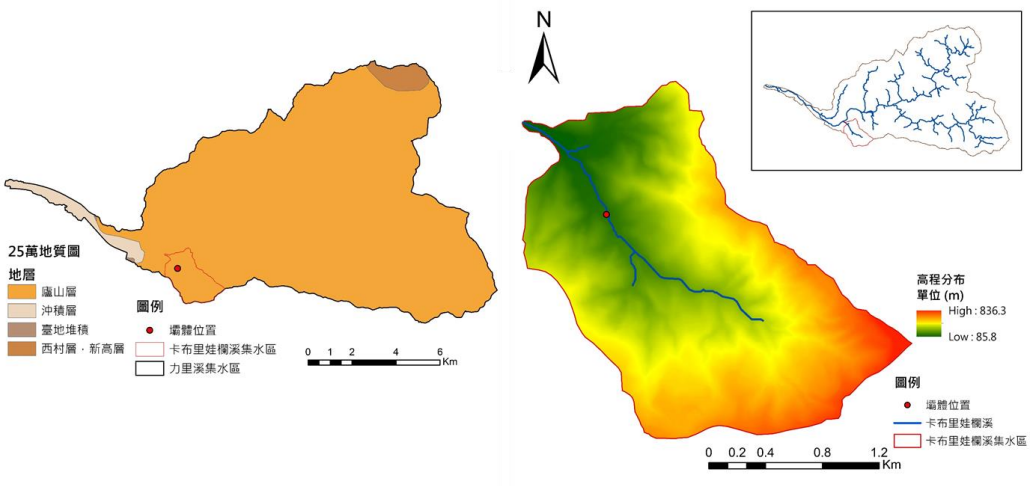


圖 2. 22 力里橋力里溪試區基本地文資料

調查範圍中估算有七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)，經調查為 1985 年完工，壩體間的落差非常大且上游土砂淤積嚴重。工程設計將力里溪流心向右岸偏移，以避免影響左岸芒果園之虞。

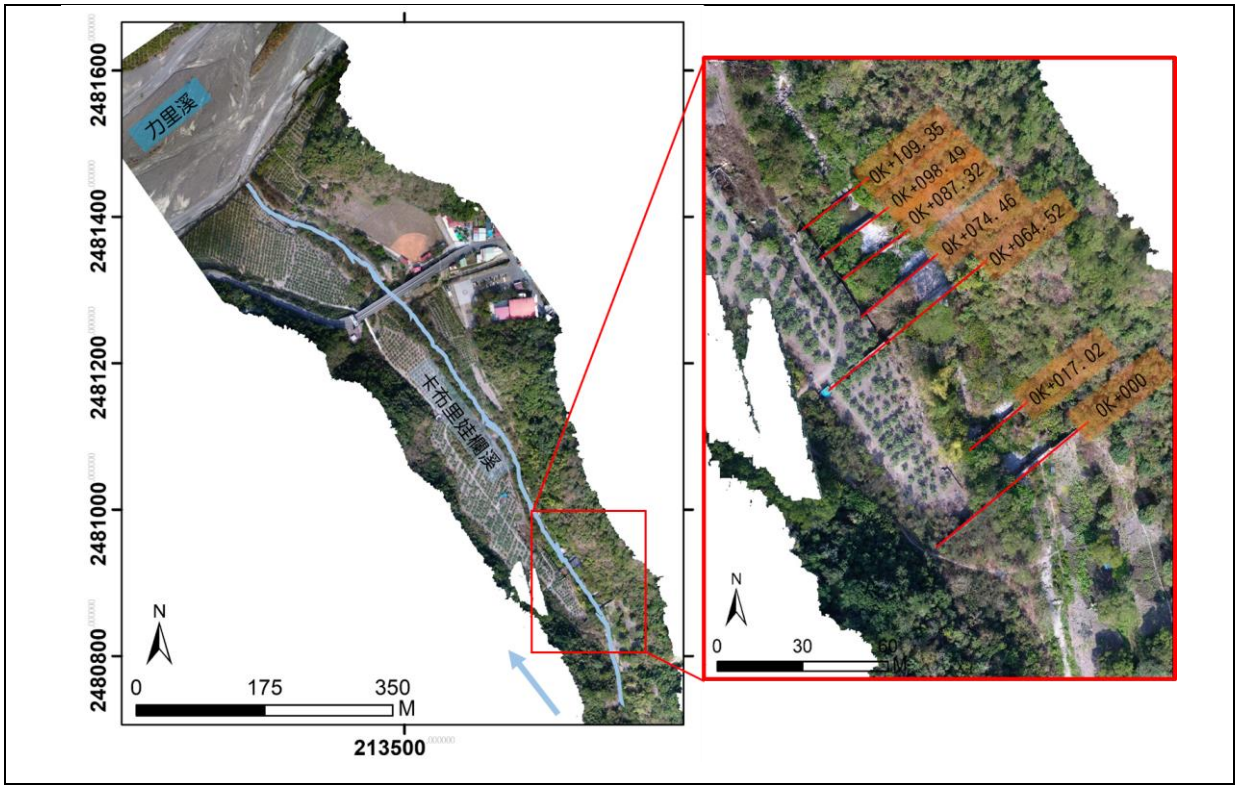


圖 2. 23 屏東縣春日鄉力里橋試區

於 2024 年 2 月現地勘查，目前皆為已淤滿狀態，上游已無庫容，河床面淤升處於阻斷水流呈現伏流水狀態(圖 2. 24)。潛在威脅為既有構造物多處磨損，試區範圍內下游橫向構造物基礎淘刷，縱橫向生態阻隔等。預計壩體調整之防砂壩(0K+000)，壩寬約為 65 公尺，上游淤積地右岸有明顯居民及農作占地情況，使河道縮減為約 14.9 公尺。



既有防砂壩(0K+000)上游淤積概況



既有防砂壩(0K+000)上游淤積地占地情況



下游河道概況及力里橋　　布卡里娃欄溪匯入力里溪



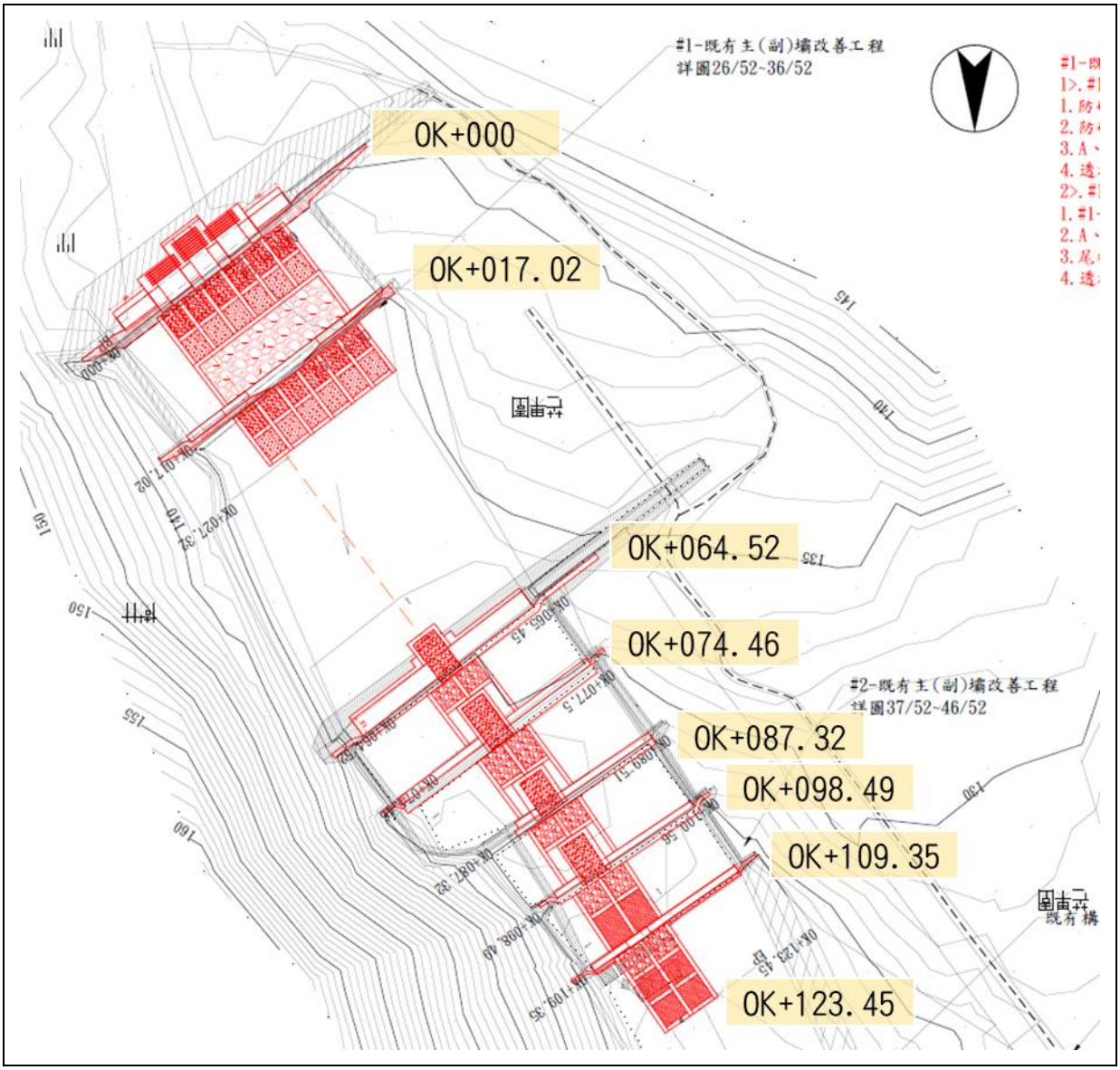
(0K+064.52)既有防砂壩及下游 4 處副壩及尾檻(0K+074.46、0K+087.32、0K+098.49、0K+109.35)

圖 2. 24 屏東縣力里橋力里溪試區防砂壩概況(2024/01/24)

農村發展及水土保持署臺南分署於 2023 年之規劃案「力里橋上下游野溪整治工程」，於 2024 年 2 月 19 開工，預計於 2024 年 11 月完工，工程範圍共七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)(資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

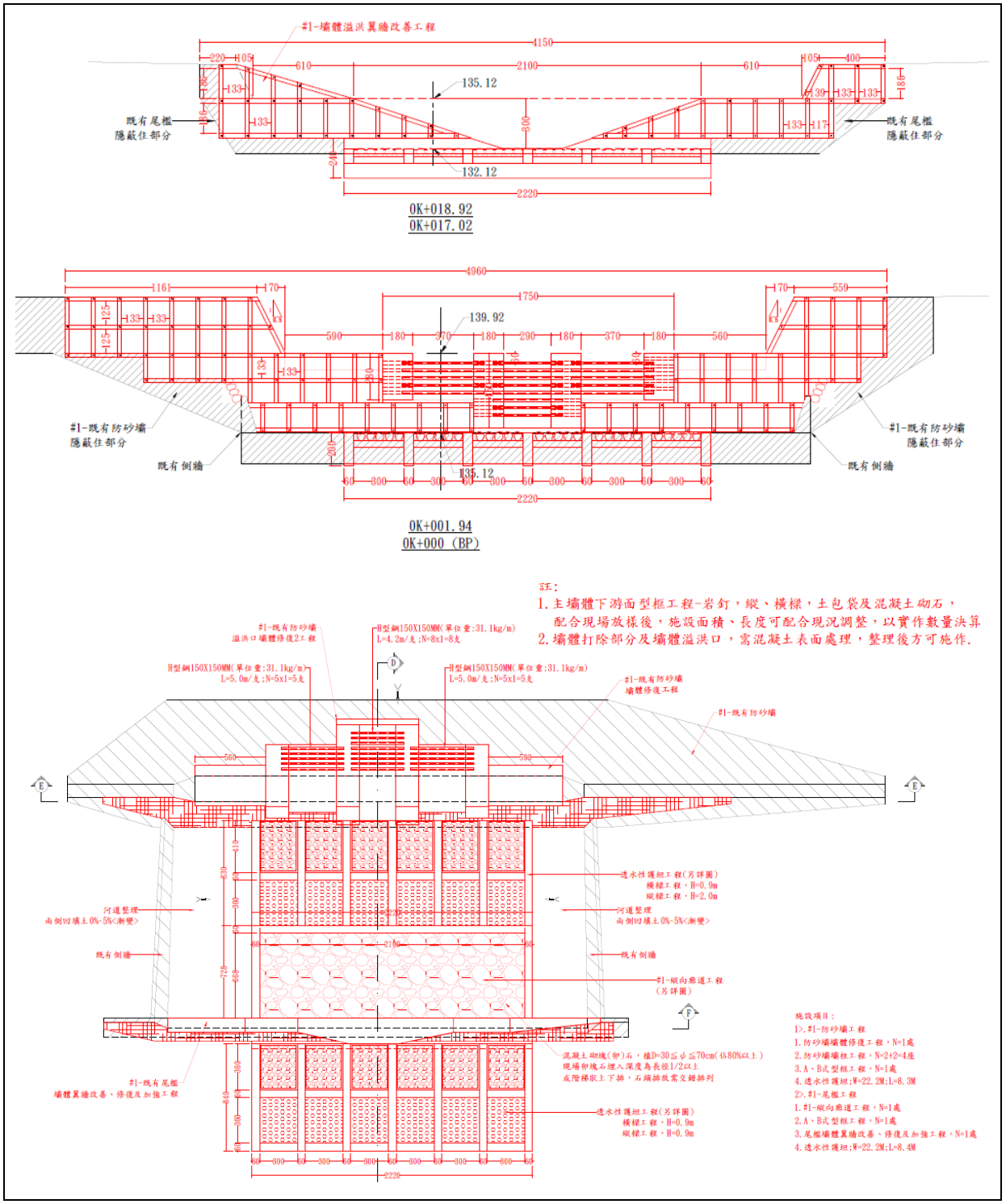
圖 2. 25)，其中紅色標示部分為變更設計之內容，詳細設計圖請查閱附錄六。將(0K+000)既有防砂壩之溢洪口處調降三個開口寬共 17.5 公尺(分別為 3.7、2.9、3.7 公尺)，開口深度分別為 2.8、4.5 及 2.8 公尺，及(0K+017.02)既有尾檻降低開口寬 21.0 公尺及深度 3.0 公尺(資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

圖 2. 26)。設計圖中紅色標示部分為討論後變更設計之內容。



資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

圖 2.25 屏東縣力里橋力里溪試區之七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)-工程範圍

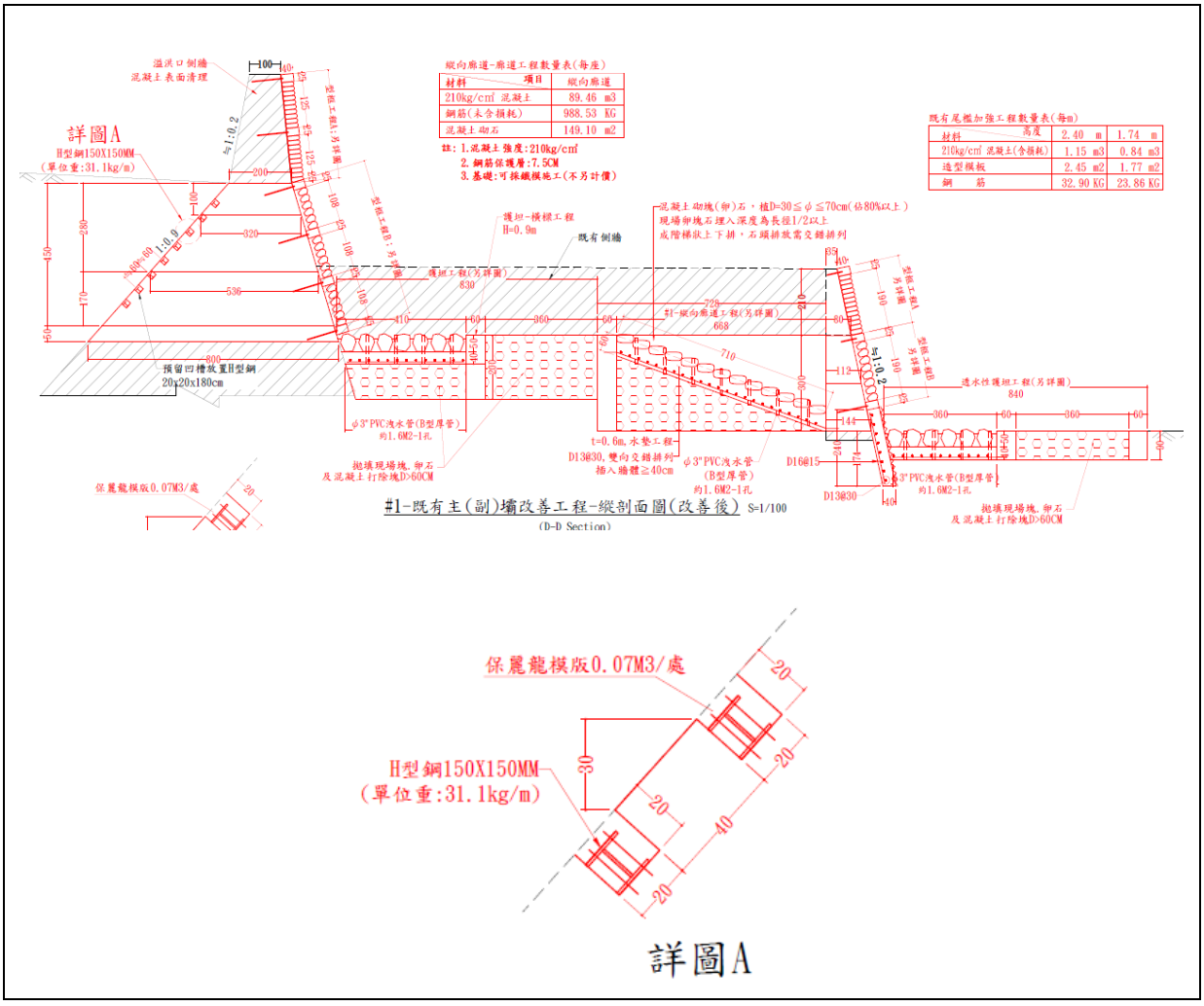


資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

圖 2.26 屏東縣力里橋力里溪試區之既有防砂壩及既有尾檻(0K+000)之溢洪口處調降示意圖

溢洪口調降三個開口處，其橫桿採 H 型鋼長 5*寬 1.5*高 1.5 公尺，分別安裝五支、八支及五支 H 型鋼，從上游側預留凹槽(20*20*180 公分)安裝 H 型鋼，其傾角為 1:0.9(資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

圖 2. 27)。



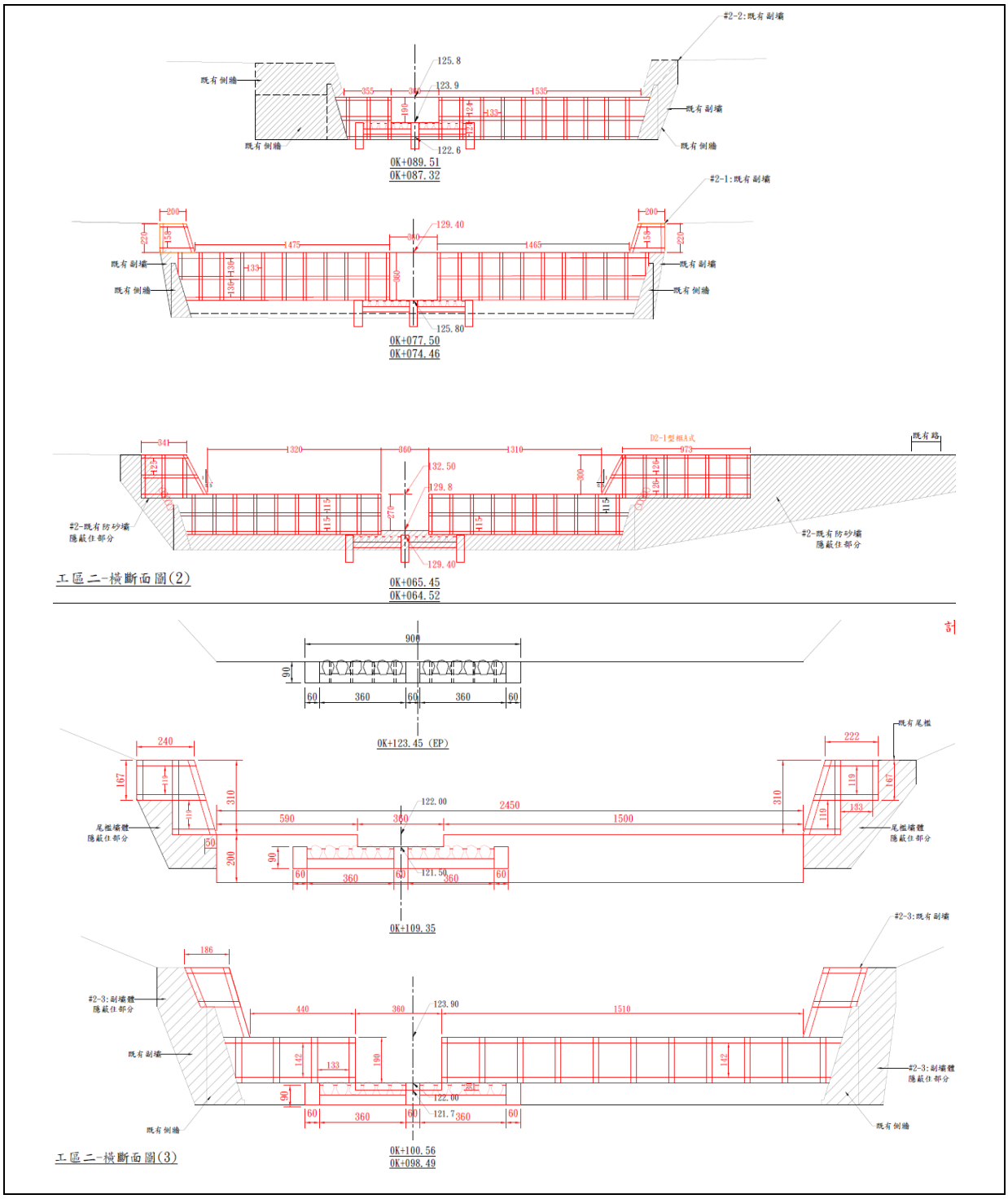
資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

圖 2. 27 屏東縣力里橋力里溪試區之既有防砂壩(0K+000)橫桿採 H 型鋼安裝示意圖

而(0K+064.52)既有防砂壩及下游 4 處副壩及尾檻(0K+074.46、0K+087.32、0K+098.49、0K+109.35)調整說明如下，(0K+064.52)既有防砂壩主壩之溢洪口處調降一個缺口寬 3.6 公尺，開口深度 2.7 公尺，下游之 4 處副壩之溢洪口處各調降一個缺口寬皆為 3.6 公尺、高分別

為 2.7、3.6、1.9、1.9、0.5 公尺(資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

圖 2. 28)。



資料來源：力里橋上下游野溪整治工程

圖 2. 28 屏東縣力里橋力里溪試區之下游 4 處副壩及尾檻 (0K+074.46、0K+087.32、0K+098.49、0K+109.35)調整示意圖

「力里橋上下游野溪整治工程」於 2024 年 2 月 19 日開工，於壩體打除的過程中，發現既有防砂壩之混凝土含有現地卵石(cobble)及塊石(boulder)，故無法依照原設計植筋方式施作，改以自鑽式岩釘搭配格框方式施作。2024 年 5 月至現地勘查，工程範圍七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)皆已開缺口，相關環境概況如圖 2. 29 說明，

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>工程範圍之橫向構造物</td><td>(0K+000)既有防砂壩</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>(0K+000)既有防砂壩上游暫用現場塊石阻擋土砂下移</td><td>(0K+000)既有防砂壩之岩釘及型框工程</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>(0K+000、0K+064.52)既有防砂壩、副壩</td><td>下游 4 處副壩及尾檻(0K+074.46、0K+087.32、0K+098.49、0K+109.35)</td></tr>
</table>

	
副壩 0K+098.49	副壩 0K+087.32
	
副壩 0K+074.46	0K+123.45

圖 2. 29 屏東縣力里橋力里溪試區之施工概況(2024/05/15)

1. 凱米颱風(Typhoon Gaemi)概況：

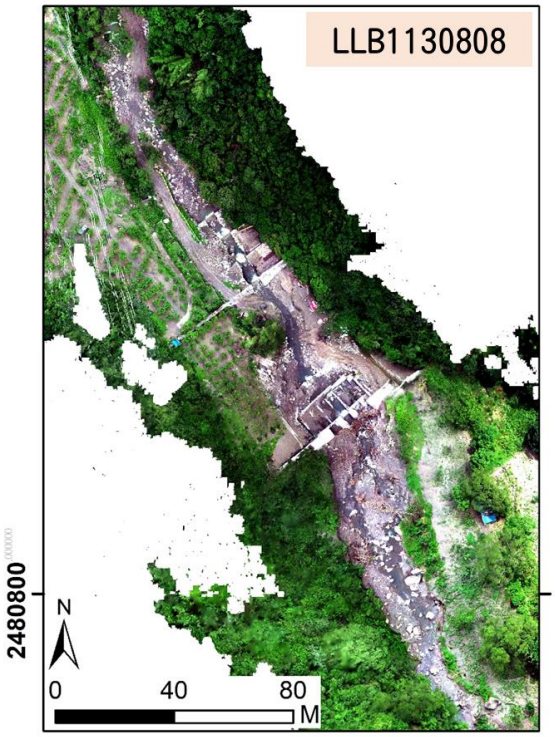
在 2024 年計畫執行期間，面臨了兩次重大氣象事件：6 月的數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi）。根據氣象署的監測資料，凱米颱風在 2024 年 6 月 23 日至 26 日期間，以屏東縣尾寮山地區之累積降雨量高達約 1,584 毫米評估，可推斷屏東縣力里橋力里溪試區亦造成期端氣候下之顯著降雨量。

由於凱米颱風前尚於工程施工階段，而 0K+000 既有防砂壩下游之透水性護坦工程尚未完工，颱風後遭受洪水沖刷以致傾斜破損，工程單位已隨即進行相關補修作業中。而 0K+000 既有防砂壩已調降溢洪口並安裝橫向 H 型鋼，颱風後有效攔阻土砂及漂流木(圖 2. 30)。

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>工程範圍之橫向構造物</td><td>(0K+000)既有防砂壩</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>(0K+000)既有防砂壩之上游攔阻概況</td><td>H 型鋼攔阻效果</td></tr>
</table>



下游邊坡護岸工程



凱米颱風後河道刷出深槽線

圖 2. 30 屏東縣力里橋力里溪試區之凱米颱風後施工概況(2024/08/08)

至 2024 年 10 月 14 日至現場調查 0K+000 既有防砂壩上游淤積土砂被帶往下游，亦有刷出河道深槽線之趨勢。0K+000 既有防砂壩下游之透水性護坦工已修復。而下游#既有副壩改善工程三處副壩間(0K+074.46、0K+087.32、0K+098.49)之縱向廊道工程由於尚未完工，又經歷颱風豪雨持續沖刷，使其淘刷情況持續加重。

2. 康芮颱風(Typhoon Kong-rey)概況：

接續於 2024 年 10 月強烈颱風康芮（Typhoon Kong-rey）侵襲，康芮颱風影響臺灣時間將落在 10 月 30 日至 11 月 2 日之間，根據土石流及大規模崩塌防災應變系統之監測數據，春日(力里測站)累積雨量達 120.5 毫米(圖 2. 31)，造成強風及豪雨災害，全台最大陣風皆達 10 級以上。而工程施工範圍豪雨期間，河道中橫向構造物皆於凱米颱風前已開口，河道明顯刷出深槽線並持續引導水流及土砂輸送。而下游 0K+064.52 至 0K+098.49 之橫向構造物下游側受 2024 年之豪雨及雨起颱風侵擾，造成嚴重淘刷情況。施工單位於 2024 年 12 月完工前將填補並修復淘刷問題(圖 2. 32)。

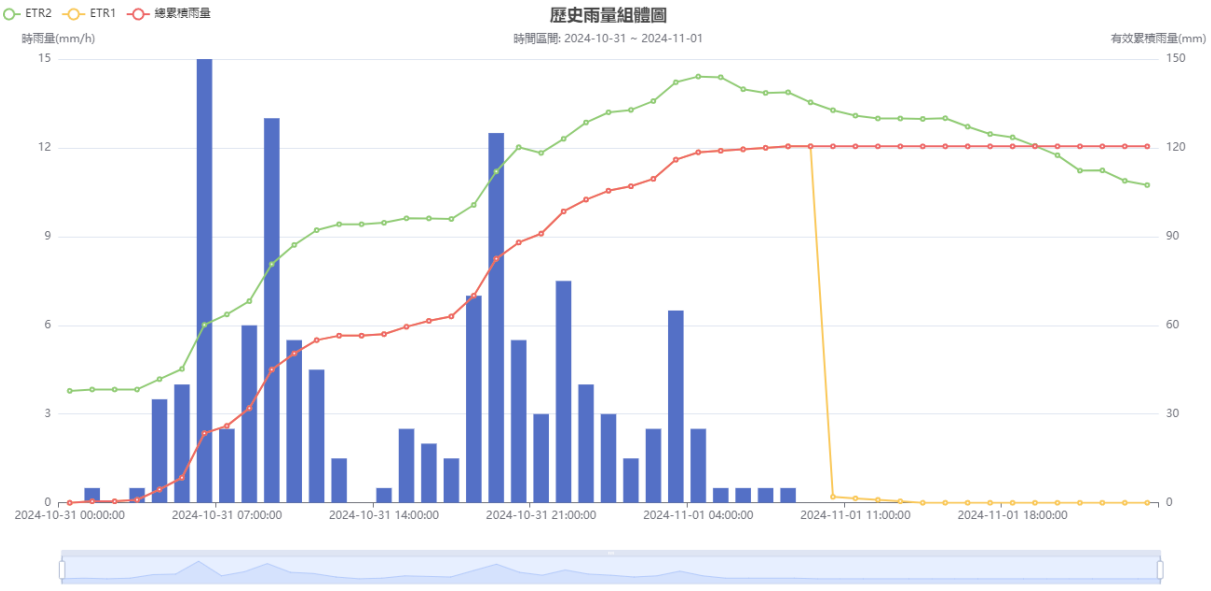
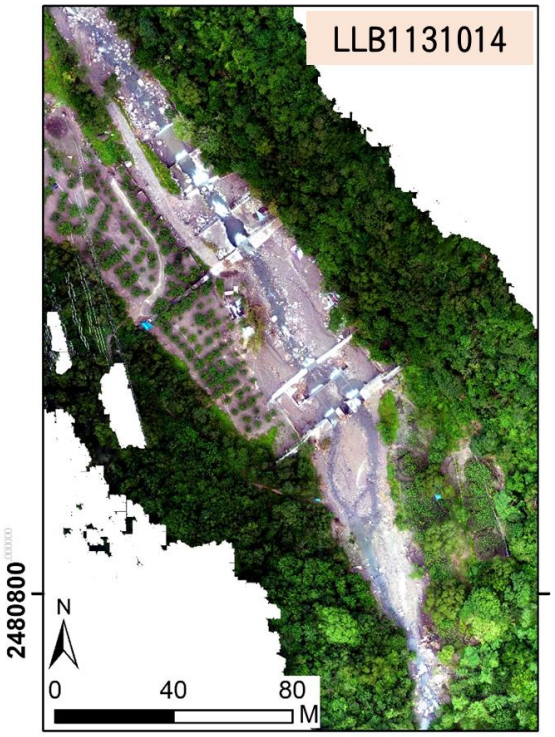


圖 2. 31 康芮颱風-春日力里測站累積雨量(2023/10/30-11/01)

	
工程範圍之橫向構造物(下游往上游)	0K+074.46 至 0K+109.35 之橫向構造物(上游往下游)
	
0K+064.52 至 0K+109.35 之橫向構造物(上游往下游)	0K+074.46 至 0K+064.52 之橫向構造物淘刷情況(下游往上游)
	
0K+017.02 至 0K+000 之橫向構造物(下游往上游)	工程上游河道深槽線



康芮颱風後河道刷深之深槽線

圖 2. 32 屏東縣力里橋力里溪試區之康芮颱風概況(2024/11/01)

3. 天兔颱風(Typhoon Usagi)概況：

於 2024 年 11 月天兔颱風（Typhoon Usagi）侵襲，天兔颱風影響臺灣時間將落在 11 月 14 日至 11 月 17 日之間，根據土石流及大規模崩塌防災應變系統之監測數據，春日(力里測站)累積雨量僅 119 毫米(圖 2. 33)，使施工便道部分沖毀及微淘刷之情況(圖 2. 34)。

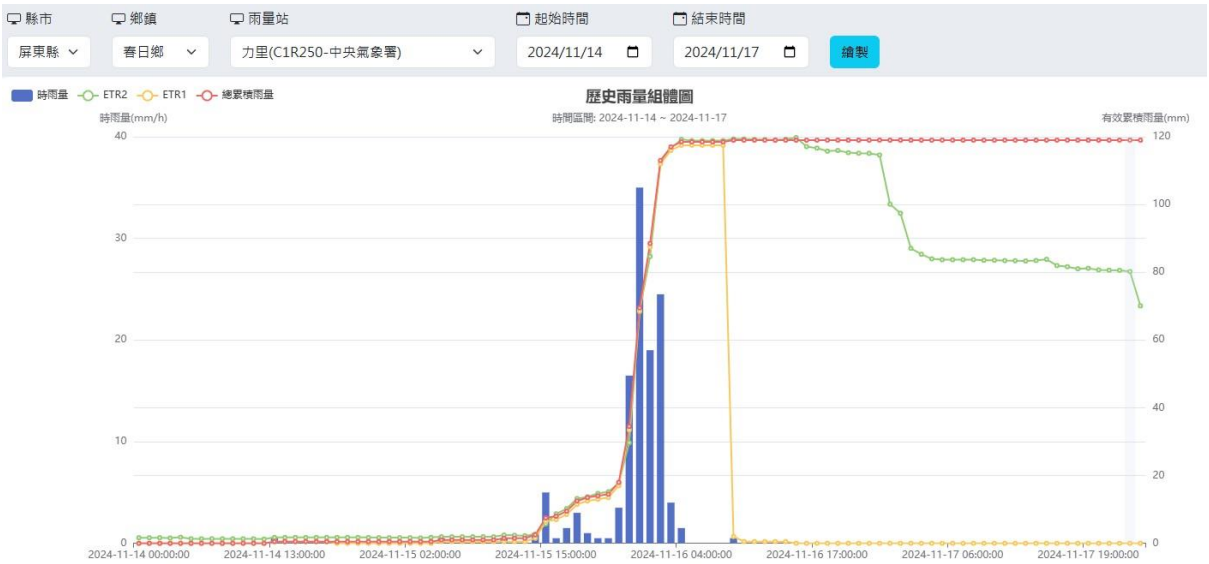


圖 2. 33 天兔颱風-春日力里測站累積雨量(2023/11/14-11/17)



0K+017.02 至 0K+000 之橫向構造物(下游往上游)



下游邊坡護岸工程

圖 2. 34 屏東縣力里橋力里溪試區之天兔颱風概況(2024/11/16)

4. 探討改善對策

力里橋力里溪試區於 2023 年 1 月推動改善規劃及現地調查，當時即對原始設計圖提出以下幾點建議：

(1) 依據第伍章第一節調整時機，及第貳章第五節透過近 10 年上游崩塌地面積變化程度，推估試區進入土砂削減期階段，建議力里橋試區可進行壩體調整作業，釋放上游淤積土砂，亦可達改善縱向廊道、友善生態及灰土砂連續性之目的。

(2) 既有封閉型防砂壩(0K+000)之溢口處，建議調整為「打開三處缺口並加裝橫桿」，以利後續因應上游來砂量及土砂淤積問題，進行壩體調整作業。

(3) 每處調整缺口之寬度，建議至少 3 公尺，其亦可作為清淤通道，便於挖土機等機具之進出作業，同時此間距也有利於河道之自然力下洩土砂。

(4) 護岸工程建議由預鑄塊封牆工程改為格框護岸工程，已減少混凝土用量，亦可達到相同之保護邊坡之效果。

由於工程期間經歷 6 月的數次豪雨、7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi）、10 月強烈颱風康芮（Typhoon Kong-rey）及 11 月天兔颱風(Typhoon Usagi)之影響，使工程進度延滯，故「力里橋上下游野溪整治工程」預計展延至 2025 年 1 月 20 日完工。

第三節 研究試區進行現地、上下游河床等調查，並蒐集河床歷史資料。

參考農業部農村發展及水土保持署既有之構造物規定調查程序及使用表格辦理現況調查工作，適當調整調查內容後，內容可包含試區座標、構造物種類及型式、尺寸、溪床質、溪床坡度、沖刷程度、河道平均寬度、結構外觀、周邊環境、潛在劣化營力等概況等(圖 2.35)，將視試區現場情況做調查資訊之調整。而研究試區之河床歷史資料，規劃透過歷年影像資料了解至少近 5~10 年之河床演變趨勢，詳見下一節。

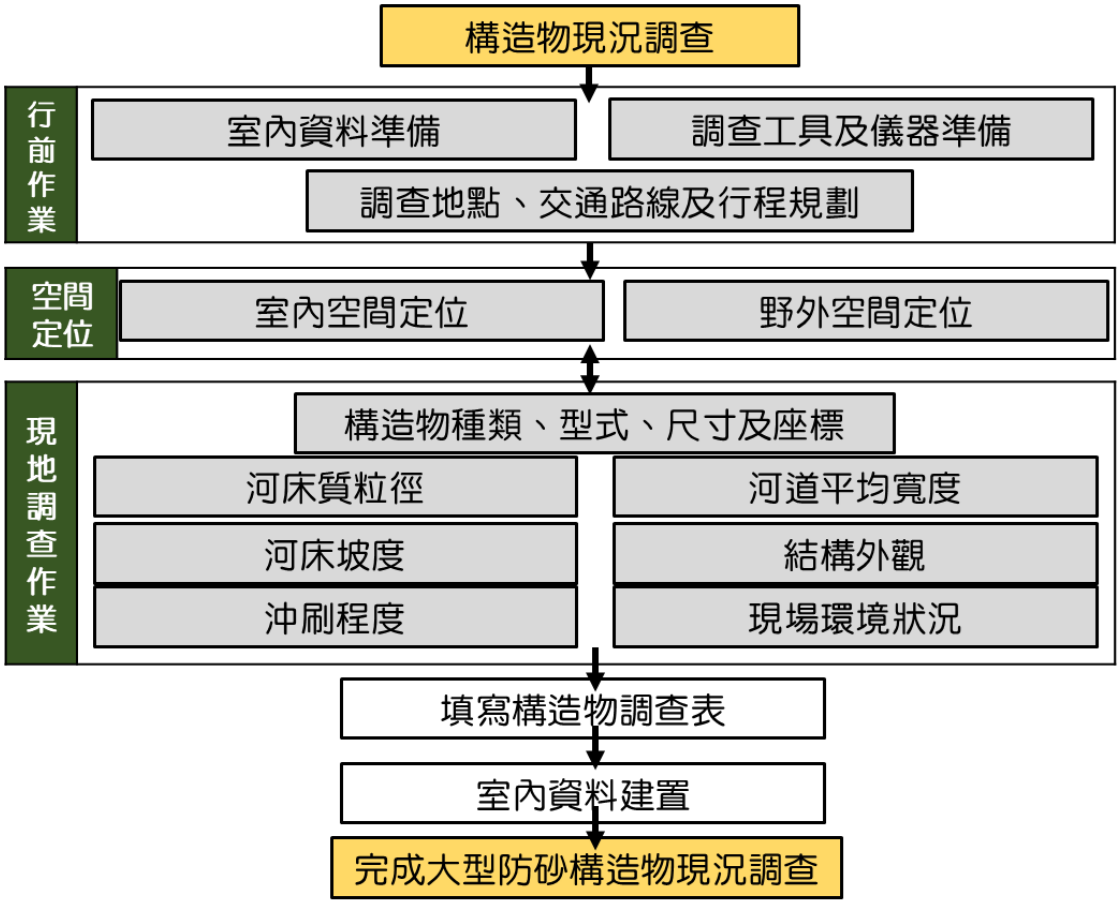


圖 2.35 試區現況調查作業流程

(一)行前作業

1. 室內資料準備

(1).集水區內 GIS 基本圖層：利用 Google Earth®搜尋衛星影像、道路、集水區範圍、溪流線及其他相關圖層等。

(2).試區點位位置。

2. 調查地點、交通路線及行程規劃

經由 Google Earth®電子地圖，並於地形圖、航照圖上標示工程調查點位，初步瞭解各工程點位地理位置及空間分布概況，透過調查路線安排，以作為野外調查交通路線規劃依據。

3. 調查工具及儀器準備

包含相關圖資、筆記型電腦、RTK 定位功能之設備、UAV、數位相機、皮捲尺、安全配備及調查表單等。

(二)空間定位

依據室內空間定位與規劃之調查點位，輸入至手持式導航設備，以協助於現地調查。此外，亦可同時覆核室內空間定位結果之正確性。

(三)現地調查作業

調查內容包含試區構造物種類及型式、尺寸、座標、溪床質平均粒徑、溪床坡度、沖刷程度、河道平均寬度、結構外觀及其他現場環境狀況等。進行大型防砂設施構造物現況踏勘工作，並記錄與拍攝構造物環境現況及相關調查，供以填寫構造物調查表。針對調查內容，逐項說明如下。參考農業部農村發展及水土保持署既有調查表，基本資料包括調查人員、調查日期、所屬分署、集水區、縣(市)及鄉(鎮、區)、工程名稱、構造物型式、構造物坐標等，說明如下表 2.5、

表 2. 6 及圖 2. 36。現況調查表參考自農業部農村發展及水土保持署(2016)之「濁水溪流域大型防砂設施調查建置」內容修改而成。

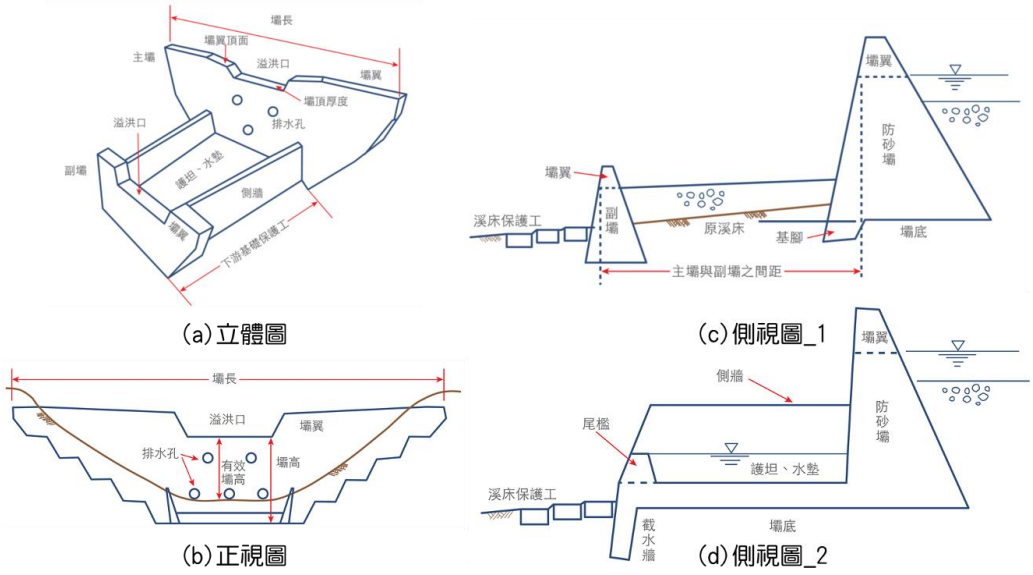
表 2. 5 基本資料填寫標準

資料欄位	說明
調查人員	執行現地調查人員姓名。
調查日期	現地調查之日期。例如，2024 年 01 月 01 日調查，則以『2024/01/01』記錄。
所屬分署	該構造物之轄管分署。分別以臺北分署、臺中分署、南投分署、臺南分署、臺東分署及花蓮分署填寫。
集水區	該構造物所在集水區名稱，以農業部農村發展及水土保持署公布之 741 個山坡地集水區圖資為原則。
縣(市)及鄉(鎮、區)	依構造物所在縣(市)及鄉(鎮、區)填寫，如南投縣仁愛鄉。
工程名稱	以所屬之工程於工程管考系統之編號進行填寫。
構造物型式	依構造物型式填寫，如非透過式(混凝土壩)或透過式(梳子壩)。
構造物坐標	依據竣工資料、歷年航照於室內空間定位結果，填寫其坐標，若 無室內空間定位結果，則填寫現地調查定位坐標。本計畫採 TWD97 系統紀錄空間座標，以填列構造物之中點坐標進行定位，於現場使用手持式 GPS (GARMIN Oregon 550t)量測構造物或其周邊控制點位。
試區坐標	依據竣工資料、歷年航照於室內空間定位結果，填寫其坐標，若無室內空間定位結果，則填寫現地調查定位坐標。本計畫採 TWD97 系統紀錄空間座標，以填列試區坐標進行定位，於現場使用手持式 GPS (GARMIN Oregon 550t)量測構造物或其周邊控制點位。
定位說明	試區內既有工程或規劃工程範圍內為原則。
構造物尺寸	依據水保署既有調查表，應調查構造物尺寸包括現況壩高、壩長、壩頂寬(溢洪口底部寬)、壩體厚度等尺寸。本計畫調查試區如無竣工圖，則以現況有效壩高及現況壩長進行調查，以記錄現況構造物尺寸及環境現況。

資料來源：修改自農村發展及水土保持署(2016)

表 2. 6 構造物尺寸調查標準表

資料欄位	說明
壩高	現況壩高是現況調查量測構造物出露河床面部分，自溢洪口底至河床之垂距(參考水土保持手冊，2017)。若構造物遭淹埋，溢洪口無出露於河床面，則現況壩高則以 0m 填表。
壩長	現況壩長是現況調查時，壩翼出露與兩岸溪床交界處之距離(參考水土保持手冊，2017)。
壩頂厚度 (溢洪口頂部寬)	針對防砂壩其現況壩頂寬，係為溢洪口頂部之寬度(參考水土保持手冊，2017)。



資料來源：建設省河川砂防技術基準(案)同解說設計編[II](1997)

圖 2. 36 防砂壩構造物斷面及調查尺寸示意圖

(四)環境現況

1. 構造物周遭溪床坡度

針對構造物周遭上、下游(含護岸處)溪床坡度，本計畫參考水土保持技術規範(2014)坡度分析方法，透過遙測技術 UAV 拍攝空拍照片，製作出正射影像及數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)。以距構造物上、下游溪床 5m 為調查

起始點，以構造物為基準，分別沿溪床上下游取 100~200 公尺之縱向距離，紀錄兩點間高差(ｈ)與兩點間之水平距離(Ｌ)，計算該河段之河床平均坡度：

$$S = \frac{h}{L} \times 100 \qquad (1)$$

式中，h：兩點高程差(m)

L：兩間點水平距離(m)

若該河段溪床較為彎曲，溪床之縱線長度會再做適當調整。

2. 河道平均寬度

針對構造物上、下游河道，本計畫透過遙測技術 UAV 量測，製作出正射影像及數值地表模型，量測河道上、下游河道平均寬度，係為量測構造物兩岸堤河道間距，以距構造物上、下游溪床 5 公尺為調查起始點，分別沿溪床縱線取 150~200 公尺之河段，以 30~50 公尺之間距取一斷面做河寬測量，至少取五個測量值之平均值填表為原則，其中包含河道變化、轉點等區位。

3. 河岸邊坡

針對調查之大型防砂設施構造物，參考農業部農村發展及水土保持署(2016)，以其上游溪床坡度調查及目視可通達範圍，根據現場調查人員觀察河岸或山腹邊坡是否呈現裸露狀況，或坡面植生有不連續性及移動之狀況，進以初步判定河岸邊坡是否呈現穩定，或具有河岸淘刷崩塌、山腹崩塌等情況(圖 2. 37)。



(a) 河岸淘刷崩塌



(b) 山腹崩塌

資料來源：農村發展及水土保持署(2016)

圖 2. 37 河岸邊坡崩塌類型示意圖

4. 河床沖刷

其調查試區鄰近溪床沖刷或淤積，係以現場觀查構造物基礎部位是否露出，以判定河床沖刷、淤積及穩定等情況(圖 2. 38)。



(a) 河床沖刷



(b) 河床淤積

資料來源：農村發展及水土保持署(2016)

圖 2. 38 河床沖刷類型示意圖

5. 功能評估

由於構造物調查表為水保署既有橫、縱向結構物調查紀錄表，因本計畫主要針對防砂設施等橫向構造物進行調查，故僅針對橫向構造物所涉及之表格欄位進行資料填列，並依其現地調查需要做適當增減項目。

(1) 外觀檢視劣化型態：於現場檢視構造物外觀劣化程度，包含良好、裂縫、磨蝕、傾倒、沉陷、錯動斷裂、錯動變形、位移、砌石鬆脫、外框損毀或其他等(表 2. 7)。

(2) 構造物周邊：檢視構造物周遭環境，包含良好、床面淤升(影響通洪斷面)、床面沖降(基礎裸露)、回填土(石)流失或其他等(表 2. 8)。

(3) 潛在劣化營力：依現況研判造成結構物外觀劣化營力，包含溪床沖蝕、溪岸溢流沖刷、兩岸邊坡崩塌、土石(或洪流)撞擊、凹岸淘刷及其他等(表 2. 9)。

表 2. 7 構造物本體外觀檢視劣化型態照片示意及說明表

類型	照片	說明
裂縫		混凝土裂縫產生原因相當複雜，在混凝土構造物形成過程中均有產生裂縫的內、外因素存在。其中，部分與材料性質、環境因素、設計、施工及構造等因素有關。由於裂縫的存在和發展通常會使構造物內部的鋼筋等材料產生腐蝕，降低鋼筋混凝土材料的承載能力、耐久性及抗滲能力，影響構造物的外觀及使用壽命。
傾倒		設施因地震、背填材流失、地盤承載力不足、河水衝擊等各種因素，造成設施呈現傾斜和傾倒等情況，導致設施結構體減少或失去設計之功能。

錯動斷裂		設施因地震、背填材流失、側向土壤壓力推擠、河水衝擊等各種因素，造成設施呈現應力斷裂等情況，導致設施結構體減少或失去設計之功能。
基礎淘空(沉陷)		因設施底部土壤遭河水沖刷或土壤承載力不足等各種因素，造成設施往下沉陷、滑動等情況，導致設施結構體減少或失去設計之功能。
沖毀		設施因地震、背填材流失、側向土壤壓力推擠、河水衝擊等各種因素，造成設施呈現應力斷裂等情況，導致設施結構體減少或失去設計之功能。
外框損毀		河溪工程構造物長期遭受高速挾砂水流之沖刷磨損及穴蝕作用，導致構造物表面混凝土產生剝離流失，不僅可能影響構造物機能，嚴重時亦可能危及構造物安全。

資料來源：修改自農村發展及水土保持署(2022)

表 2.8 構造物劣化型態示意圖及說明表

類型	照片	說明
床面淤升(影響通洪斷面)		因上游來砂量或近岸崩落量高於下游輸砂量之影響，導致溪床床面抬升而影響通洪斷面。

床面沖降 (基礎裸露)		因下游土砂輸出量高於上游來砂量，導致溪床床面沖降而致使結構物基礎裸露。
回填土(石)流失		護岸背填土方因地表逕流集中沖刷或回填夯實不足而流失，導致護岸毀損。

資料來源：修改自農村發展及水土保持署(2022)

表 2.9 潛在劣化營力類型示意圖

	
(a)溪床沖蝕	(b)兩岸邊坡崩塌及凹岸淘刷
	
(c)溪岸溢流沖刷	(d)土石(或洪流)撞擊

資料來源：修改自農村發展及水土保持署(2022)

6. 室內資料建置

根據現場調查及記錄核對，填寫現地調查表，彙整坐標與現場調查資訊，並補充試區位置圖、現況照片等圖片，進行調查表、GIS 圖資等資料建檔工作。

7. 調查成果與分析

根據現場調查及記錄核對，填寫現地調查表，彙整坐標與現場調查資訊，並補充位置圖、現況照片等，進行調查表、GIS 圖資等資料建檔工作及其他相關說明等(圖 2. 39)。

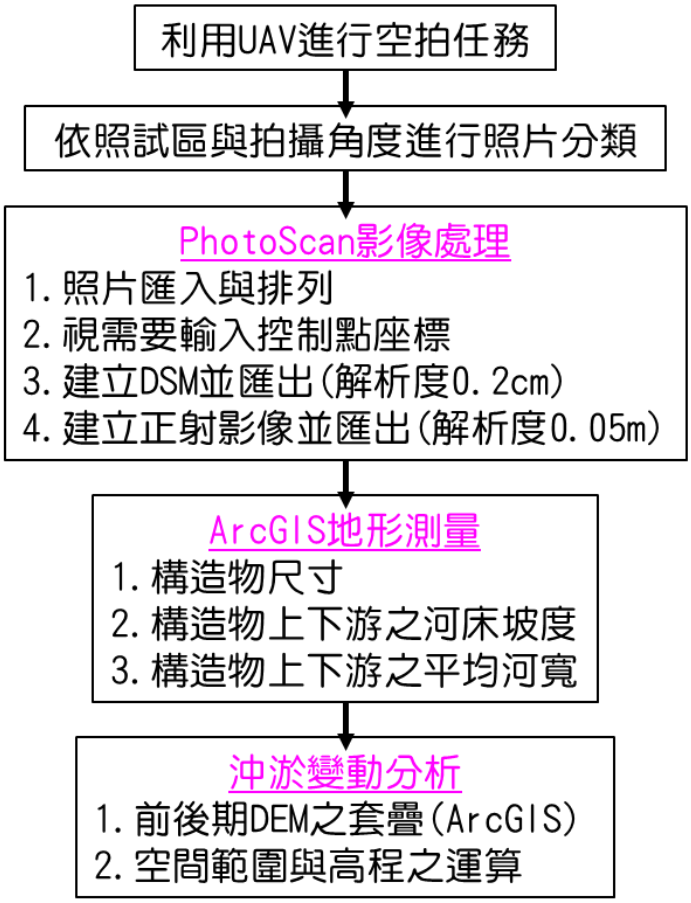


圖 2. 39 沖淤變動分析程序流程圖

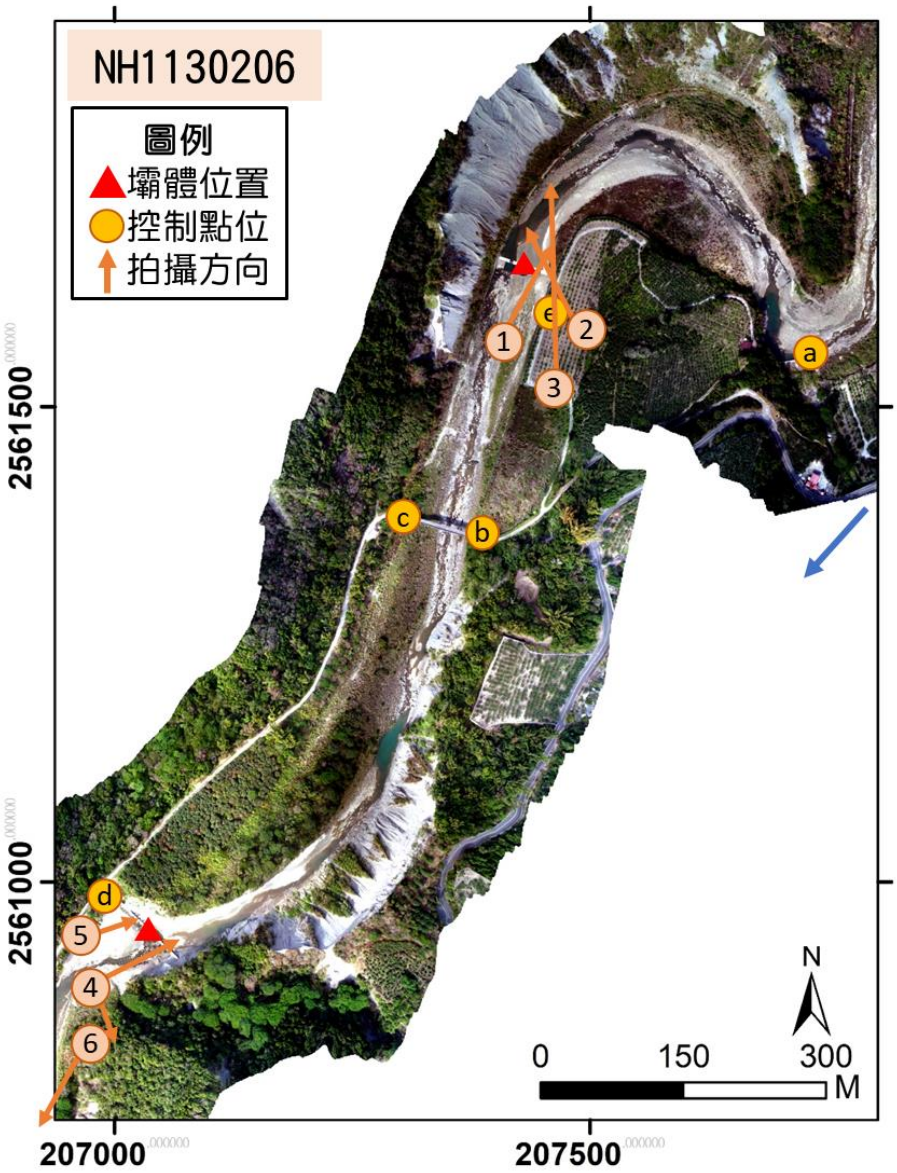
8. 試區現況調查表

見表 2. 10~表 2. 15。

表 2. 10 試區現況調查表-NH_1130206

<table>
<tr><td colspan="2">調查人員</td><td colspan="3">邱渝方、梁閔智、洪瑋甯、陳乙暄</td><td>調查編號</td><td colspan="2">NH_1130206</td></tr>
<tr><td colspan="2">工程名稱</td><td colspan="3">(上游壩)仁耀橋下游護岸整治工程
(下游壩)關山九號橋下游防砂工程</td><td>集水區</td><td colspan="2">後堀溪集水區</td></tr>
<tr><td colspan="2">調查日期</td><td colspan="3">2024/02/06</td><td>所屬機關</td><td colspan="2">農村發展及水土保持署臺南分署</td></tr>
<tr><td rowspan="4">基本資料</td><td>構造物種類/型式(上游壩)</td><td colspan="2">調整型封閉式防砂壩</td><td>構造物尺寸(上游壩)</td><td colspan="3">壩長(m)：77.1　溢口長度(m)：59.2
壩高(m)：4.6　壩頂厚度(m)：3.0</td></tr>
<tr><td>構造物種類/型式(下游壩)</td><td colspan="2">調整型孔隙式防砂壩</td><td>構造物尺寸(下游壩)</td><td colspan="3">壩長(m)：108.8　溢口長度(m)：72.0
壩高(m)：4.4　壩頂厚度(m)：2.1</td></tr>
<tr><td>新建年份</td><td colspan="3">(上游壩)2017 年 7 月 27 日竣工
(下游壩)2023 年 5 月 29 日竣工</td><td>縣(市)鄉(鎮、區)</td><td colspan="2">臺南市南化區</td></tr>
<tr><td colspan="2">定位說明</td><td>a</td><td>b</td><td>c</td><td>d</td><td>e</td></tr>
<tr><td rowspan="3">控制點座標</td><td>North(m)</td><td>2561521.195</td><td>2561365.736</td><td>2561378.558</td><td>2561603.799</td><td>2560968.147</td></tr>
<tr><td>East (m)</td><td>207767.522</td><td>207373.318</td><td>207321.231</td><td>207458.259</td><td>206998.378</td></tr>
<tr><td>Elev</td><td>224.093</td><td>219.888</td><td>220.005</td><td>218.762</td><td>207.221</td></tr>
<tr><td rowspan="4">環境現況上游壩</td><td rowspan="2">溪床質</td><td>上游</td><td colspan="3">❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型</td><td rowspan="2">河岸邊坡</td><td rowspan="2">❑穩定
❑河岸淘刷崩塌
☑山腹崩塌</td></tr>
<tr><td>下游</td><td colspan="3">❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型</td></tr>
<tr><td></td><td>溪床坡度</td><td colspan="2">河道平均寬度</td><td colspan="2">沖淤概述</td></tr>
<tr><td>壩體上游</td><td>約 0.31 %</td><td colspan="2">約 114.35 m</td><td colspan="2">坡面崩塌程度高</td></tr>
<tr><td>壩體下游</td><td>約 0.81 %</td><td colspan="2">約 68.75 m</td><td colspan="2">坡面崩塌程度高</td></tr>
<tr><td rowspan="4">環境現況下游壩</td><td rowspan="2">溪床質</td><td>上游</td><td colspan="3">❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型</td><td rowspan="2">河岸邊坡</td><td rowspan="2">❑穩定
❑河岸淘刷崩塌
☑山腹崩塌</td></tr>
<tr><td>下游</td><td colspan="3">❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型</td></tr>
<tr><td></td><td>溪床坡度</td><td colspan="2">河道平均寬度</td><td colspan="2">沖淤概述</td></tr>
<tr><td>壩體上游</td><td>約 0.33 %</td><td colspan="2">約 42.10 m</td><td colspan="2">坡面崩塌程度高</td></tr>
<tr><td>壩體下游</td><td>約 0.19 %</td><td colspan="2">約 49.20 m</td><td colspan="2">坡面有崩塌痕跡，且有植被復育跡象</td></tr>
<tr><td rowspan="3">功能評估</td><td>外觀檢視劣化型態</td><td colspan="6">☑良好❑裂縫☑磨蝕❑傾倒❑沉陷❑錯動斷裂❑錯動變形❑位移❑砌石鬆脫❑外框損毀
❑其他_____
補充說明：</td></tr>
<tr><td>構造物周邊</td><td colspan="6">❑良好☑床面淤升(影響通洪斷面) ❑床面沖降(基礎裸露) ❑回填土(石)流失
❑其他_____
補充說明：</td></tr>
<tr><td>潛在劣化營力</td><td colspan="6">❑溪床沖蝕❑溪岸溢流沖刷☑兩岸邊坡崩塌❑土石或洪流撞擊❑凹岸淘刷❑其他
補充說明：上下游壩之上游庫區皆已淤滿</td></tr>
<tr><td>其它</td><td colspan="7">1. 上、下游壩距離約 850m，上游壩上游右岸有明顯崩塌坡面，而下游壩上游左岸亦有明顯崩塌坡面。
2. 2024 年 2 月現地勘查關山 9 號橋上游壩為調整型封閉式防砂壩，橫桿設計為預鑄橫樑，三個缺口中靠右側的兩個缺口皆有調降一塊預鑄橫樑，讓適量土砂下移之跡象。其上游側土砂淤積程度頗高，建議思考後續是否增加庫容空間之疑慮。
3. 關山 9 號橋下游壩為調整型孔隙式防砂壩，橫桿設計為預鑄橫樑，橫樑間設有格網回填塊石，共有 17 個缺口。其中靠近右岸有八處缺口進行壩體調降作業，每個缺口移除兩塊預鑄橫樑及橫樑間之塊石。目試推估為適量輸砂及引導水流所致。</td></tr>
</table>

試區位置圖含照片拍攝方向



現況照片



1	2024/02/06	照片重點：上游壩 拍攝位置：下游往壩口



2	2024/02/06	照片重點：上游壩 拍攝位置：左岸往右岸

						
	3	2024/02/06	照片重點：上游壩上游側崩塌地概況 拍攝位置：上游壩往上游面	4	2024/02/06	照片重點：下游壩 拍攝位置：下游往壩口
						
	5	2024/02/06	照片重點：下游壩 拍攝位置：下游往壩口	6	2024/02/06	照片重點:下游壩下游側崩塌地概況 拍攝位置：下游壩往下游面

表 2. 11 試區現況調查表-NH_1130813

調查人員		邱渝方、洪瑋甯、陳乙暄、宋珮煊			調查編號	NH_1130813	
工程名稱		(上游壩)仁耀橋下游護岸整治工程 (下游壩)關山九號橋下游防砂工程			集水區	後堀溪集水區	
調查日期		2024/08/13			所屬機關	農村發展及水土保持署臺南分署	
基本資料	構造物種類/型式(上游壩)	調整型封閉式防砂壩	構造物尺寸(上游壩)		壩長(m)：77.1 壩高(m)：4.6	溢口長度(m)：59.2 壩頂厚度(m)：3.0	
	構造物種類/型式(下游壩)	調整型孔隙式防砂壩	構造物尺寸(下游壩)		壩長(m)：108.8 壩高(m)：4.4	溢口長度(m)：72.0 壩頂厚度(m)：2.1	
	新建年份	(上游壩)2017 年 7 月 27 日竣工 (下游壩)2023 年 5 月 29 日竣工			縣(市)鄉(鎮、區)	臺南市南化區	

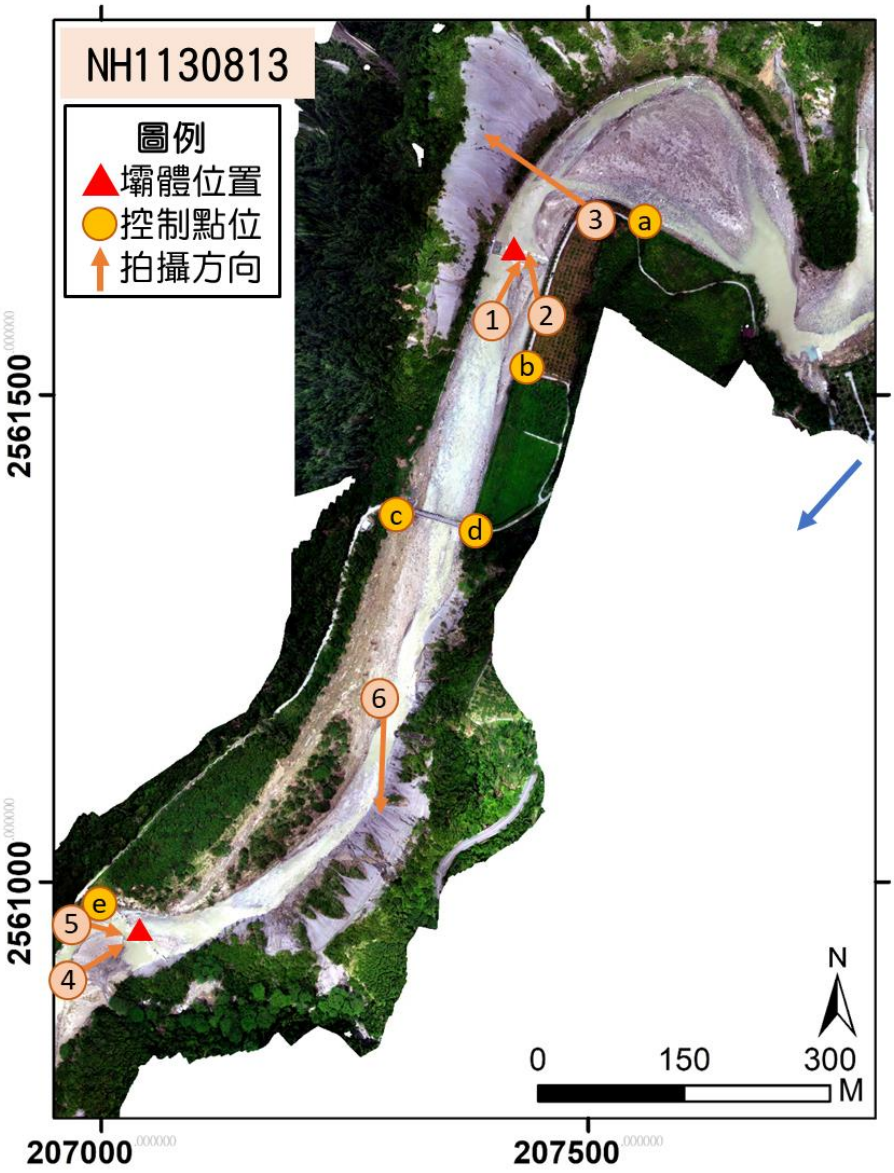
定位說明		a	b	c	d	e
控制點座標	North(m)	2561673.363	2561524.245	2561378.532	2561365.723	2560971.744
	East (m)	207557.289	207433.783	207321.241	207373.315	206998.261
	Elev	221.364	218.479	219.944	219.772	208.447

環境現況上游壩					
溪床質	上游	❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型	河岸邊坡	❑穩定 ❑河岸淘刷崩塌 ☑山腹崩塌	
	下游	❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型			
		溪床坡度	河道平均寬度	沖淤概述	
壩體上游		約 0.24 %	約 106.04 m	坡面崩塌程度高	
壩體下游		約 0.80 %	約 79.25 m	坡面崩塌程度高	

環境現況下游壩					
溪床質	上游	❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型	河岸邊坡	❑穩定 ❑河岸淘刷崩塌 ☑山腹崩塌	
	下游	❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型			
		溪床坡度	河道平均寬度	沖淤概述	
壩體上游		約 0.60 %	約 45.20 m	左岸崩塌坡面鄰近南 179 線，且有擴大崩塌範圍之趨勢	
壩體下游		約 0.30 %	約 67.19 m	坡面有崩塌痕跡，且有植被復育跡象	

功能評估		
	外觀檢視劣化型態	☑良好❑裂縫☑磨蝕❑傾倒❑沉陷❑錯動斷裂❑錯動變形❑位移❑砌石鬆脫❑外框損毀 ❑其他_____ 補充說明：
	構造物周邊	❑良好☑床面淤升(影響通洪斷面) ❑床面沖降(基礎裸露) ❑回填土(石)流失 ❑其他_____ 補充說明：
	潛在劣化營力	❑溪床沖蝕❑溪岸溢流沖刷☑兩岸邊坡崩塌❑土石或洪流撞擊❑凹岸淘刷❑其他 補充說明：上下游壩之上游庫區皆已淤滿
其它		1.經歷 2024 年 6 月的數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi）。上游之調整型封閉式防砂壩於凱米颱風期間，洪水水位上升並漫淹至複式漿砌石護岸之洪峰水位高。 2.而下游調整型孔隙式防砂壩於凱米颱風期間，壩體左岸預鑄橫樑在洪水的沖刷下被沖翻。此外，根據當地居民的描述，洪水不僅淹至左岸防砂壩，還淹及右岸的道路，故提出陳情要求提高右岸道路，以避免極端氣候下，阻斷對外道路之通行。

試區位置圖含照片拍攝方向



現況照片



1	2024/08/13	照片重點：上游壩 拍攝位置：下游往壩口



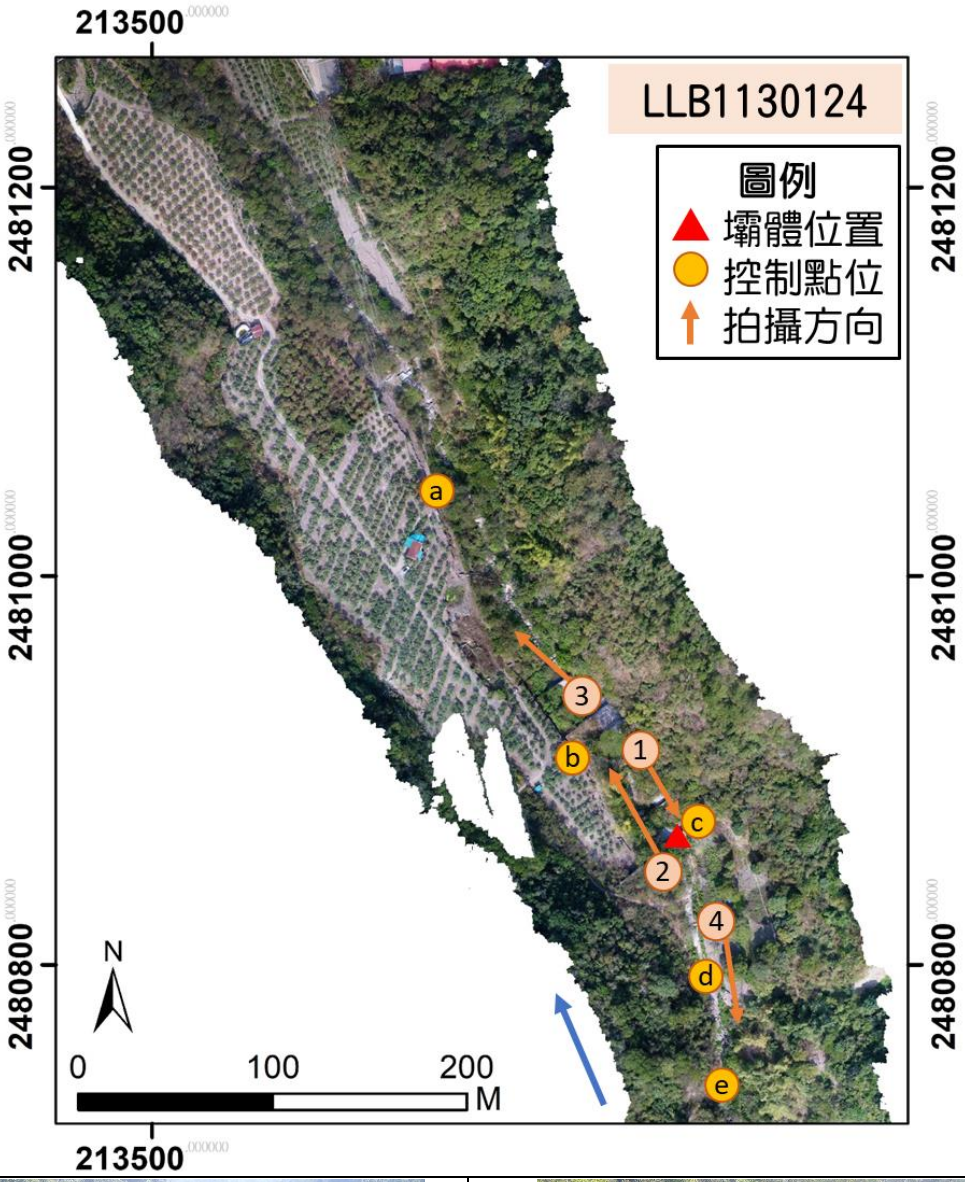
2	2024/08/13	照片重點：上游壩 拍攝位置：左岸往右岸

						
	3	2024/08/13	照片重點：上游壩上游側崩塌地 拍攝位置：上游壩往上游面	4	2024/08/13	照片重點：下游壩 拍攝位置：下游往壩口
						
	5	2024/08/13	照片重點：下游壩 拍攝位置：下游往壩口	6	2024/08/13	照片重點：下游壩下游測崩塌地 拍攝位置：下游壩往下游面

表 2. 12 試區現況調查表- LLB_1130124

<table>
<tr><td colspan="2">調查人員</td><td colspan="3">邱渝方、梁閔智、洪瑋甯、陳乙暄</td><td>調查編號</td><td colspan="2">LLB_1130124</td></tr>
<tr><td colspan="2">工程名稱</td><td colspan="3">力里橋上下游野溪整治工程</td><td>集水區</td><td colspan="2">卡布里娃欄溪集水區</td></tr>
<tr><td colspan="2">調查日期</td><td colspan="3">2024/01/24</td><td>所屬機關</td><td colspan="2">農村發展及水土保持署臺南分署</td></tr>
<tr><td rowspan="4">基本資料</td><td>構造物種類/型式</td><td>封閉式防砂壩</td><td colspan="2">構造物尺寸(上游壩)</td><td colspan="3">壩長(m)：49.6　溢口長度(m)：29.0
壩高(m)：4.5　壩頂厚度(m)：8.0</td></tr>
<tr><td>新建年份</td><td colspan="3">➢ 既有防砂壩及固床工，於 1985 年完工
➢ 力里橋上下游野溪整治工程於 2024 年 2 月 19 日開工，預計於 2024 年 12 月 28 日完工。</td><td>縣（市）鄉(鎮、區)</td><td colspan="2">屏東縣春日鄉</td></tr>
<tr><td colspan="2">定位說明</td><td>a</td><td>b</td><td>c</td><td>d</td><td>e</td></tr>
<tr><td rowspan="3">控制點座標</td><td>North(m)</td><td>2480941.031</td><td>2480906.105</td><td>2480869.198</td><td>2480820.845</td><td>2480764.304</td></tr>
<tr><td>East (m)</td><td>213687.62</td><td>213718.972</td><td>213775.465</td><td>213780.272</td><td>213793.179</td></tr>
<tr><td>Elev</td><td>149.833</td><td>159.102</td><td>163.569</td><td>164.533</td><td>165.925</td></tr>
<tr><td rowspan="6">環境現況</td><td rowspan="2">溪床質</td><td>上游</td><td colspan="2">❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型</td><td rowspan="2">河岸邊坡</td><td colspan="2" rowspan="2">☑穩定
❑河岸淘刷崩塌
❑山腹崩塌</td></tr>
<tr><td>下游</td><td colspan="2">❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">溪床坡度</td><td colspan="2">河道平均寬度</td><td colspan="2">沖淤概述</td></tr>
<tr><td colspan="2">壩體上游</td><td colspan="2">約 1.66　%</td><td colspan="2">約 14.96 m</td><td>淤積程度高，上游為自然河道，壩寬約為 65m，右岸有明顯居民及農作占地情況。</td></tr>
<tr><td colspan="2">壩體下游</td><td colspan="2">約 10.85　%</td><td colspan="2">約 21.80 m</td><td>淤積程度高，下游既有構造物有 6 處。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">功能評估</td><td>外觀檢視劣化型態</td><td colspan="6">❑良好☑裂縫☑磨蝕❑傾倒❑沉陷❑錯動斷裂❑錯動變形❑位移❑砌石鬆脫❑外框損毀
❑其他_____
補充說明：</td></tr>
<tr><td>構造物周邊</td><td colspan="6">❑良好☑床面淤升(影響通洪斷面) ☑床面沖降(基礎裸露) ❑回填土(石)流失
❑其他_____
補充說明：</td></tr>
<tr><td>潛在劣化營力</td><td colspan="6">☑溪床沖蝕❑溪岸溢流沖刷❑兩岸邊坡崩塌❑土石或洪流撞擊❑凹岸淘刷❑其他
補充說明：上下游壩之上游庫區皆已淤滿</td></tr>
<tr><td>其它</td><td colspan="7">1. 既有防砂壩及固床工興建於 1985 年，壩體間的落差非常大且上游土砂淤積嚴重。
2. 力里橋上下游野溪整治工程設計將力里溪流心向右岸偏移，以避免影響左岸芒果園之虞。
3. 2024 年 2 月現地勘查，預壩體調整下游有多處既有橫向構造物(估算有 6 處)，皆為已淤滿狀態，上游已無庫容，處於穩定狀態。
4. 潛在威脅為既有構造物多處磨損，下游橫向構造物基礎淘空，縱橫向生態阻隔等。
5. 預壩體調整之上游右岸淤積地疑似有居民及農作於占地情況。</td></tr>
</table>

試區位置圖含照片拍攝方向



現況照片



1	2024/01/24	照片重點：預壩體調整之壩 拍攝位置：壩口往上游面



2	2024/01/24	照片重點：預壩體調整之壩下游 拍攝位置：壩口往下游面

							
	3	2024/01/24	照片重點：下游河床概況 拍攝位置：上游往下游	4	2024/01/24	照片重點：預壩體調整之壩上游 拍攝位置：壩口往上游面	

表 2. 13 試區現況調查表- LLB_1130515

調查人員		邱渝方、梁閔智、洪瑋甯、陳乙暄			調查編號	LLB_1130515	
工程名稱		力里橋上下游野溪整治工程			集水區	卡布里娃欄溪集水區	
調查日期		2024/05/15			所屬機關	農村發展及水土保持署臺南分署	
基本資料	構造物種類/型式	原況-封閉式防砂壩 現況-開口型防砂壩	構造物尺寸(上游壩)		壩長(m)：49.6 壩高(m)：4.5	溢口長度(m)：29.0 壩頂厚度(m)：8.0	
	新建年份	➢ 既有防砂壩及固床工，於 1985 年完工 ➢ 力里橋上下游野溪整治工程於 2024 年 2 月 19 日開工，預計於 2024 年 12 月 28 日完工。			縣（市）鄉(鎮、區)	屏東縣春日鄉	

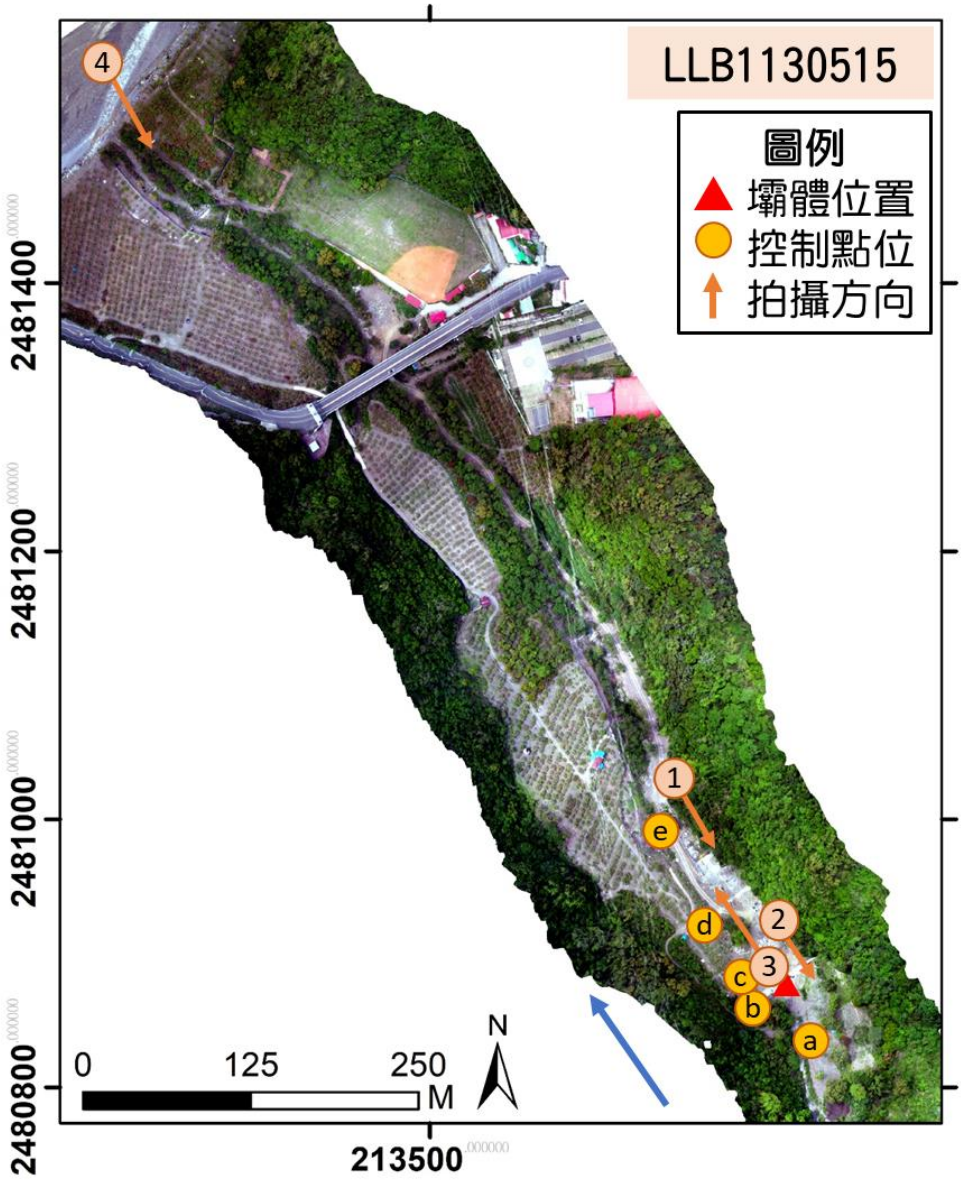
定位說明		a	b	c	d	e
控制點座標	North(m)	2480820.835	2480870.189	2480891.078	2480937.056	2480966.414
	East (m)	213780.258	213741.955	213737.272	213721.759	213702.044
	Elev	164.556	170.404	161.103	159.022	150.256

環境現況	溪床質	上游	❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型	河岸邊坡	☑穩定 ❑河岸淘刷崩塌 ❑山腹崩塌
		下游	❑ 泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型		

	溪床坡度	河道平均寬度	沖淤概述
壩體上游	--	--	施工中
壩體下游	--	--	施工中

功能評估	外觀檢視劣化型態	❑良好❑裂縫❑磨蝕❑傾倒❑沉陷❑錯動斷裂❑錯動變形❑位移❑砌石鬆脫❑外框損毀 ❑其他_____ 補充說明：施工中
	構造物周邊	❑良好❑床面淤升(影響通洪斷面) ❑床面沖降(基礎裸露) ❑回填土(石)流失 ❑其他_____ 補充說明：施工中
	潛在劣化營力	❑溪床沖蝕❑溪岸溢流沖刷❑兩岸邊坡崩塌❑土石或洪流撞擊❑凹岸淘刷❑其他 補充說明：施工中
其它	1. 力里橋上下游野溪整治工程於 2024 年 2 月 19 日開工，預計於 2024 年 11 月完工。將持續觀測相關進度。	

試區位置圖含照片拍攝方向



現況照片



1	2024/05/15	照片重點：工程範圍概況 拍攝位置：下游往上游面



2	2024/05/15	照片重點：0K+000 工程概況 拍攝位置：壩口往上游面

						
	3	2024//05/15	照片重點：0K+064.52 既有防砂壩及下游 4 處副壩及尾概況 拍攝位置：上游往下游	4	2024/05/15	照片重點:布卡里娃欄溪匯入力里溪 拍攝位置：力里溪往上游

表 2. 14 試區現況調查表- LLB_1130808

調查人員		邱渝方、洪瑋甯、陳乙暄、宋珮煊			調查編號	LLB_1130808	
工程名稱		力里橋上下游野溪整治工程			集水區	卡布里娃欄溪集水區	
調查日期		2024/08/08			所屬機關	農村發展及水土保持署臺南分署	
基本資料	構造物種類/型式	原況-封閉式防砂壩 現況-開口型防砂壩	構造物尺寸(上游壩)		壩長(m)：49.6 壩高(m)：4.5	溢口長度(m)：29.0 壩頂厚度(m)：8.0	
	新建年份	➢ 既有防砂壩及固床工，於 1985 年完工 ➢ 力里橋上下游野溪整治工程於 2024 年 2 月 19 日開工，預計於 2024 年 12 月 28 日完工。			縣（市）鄉(鎮、區)	屏東縣春日鄉	

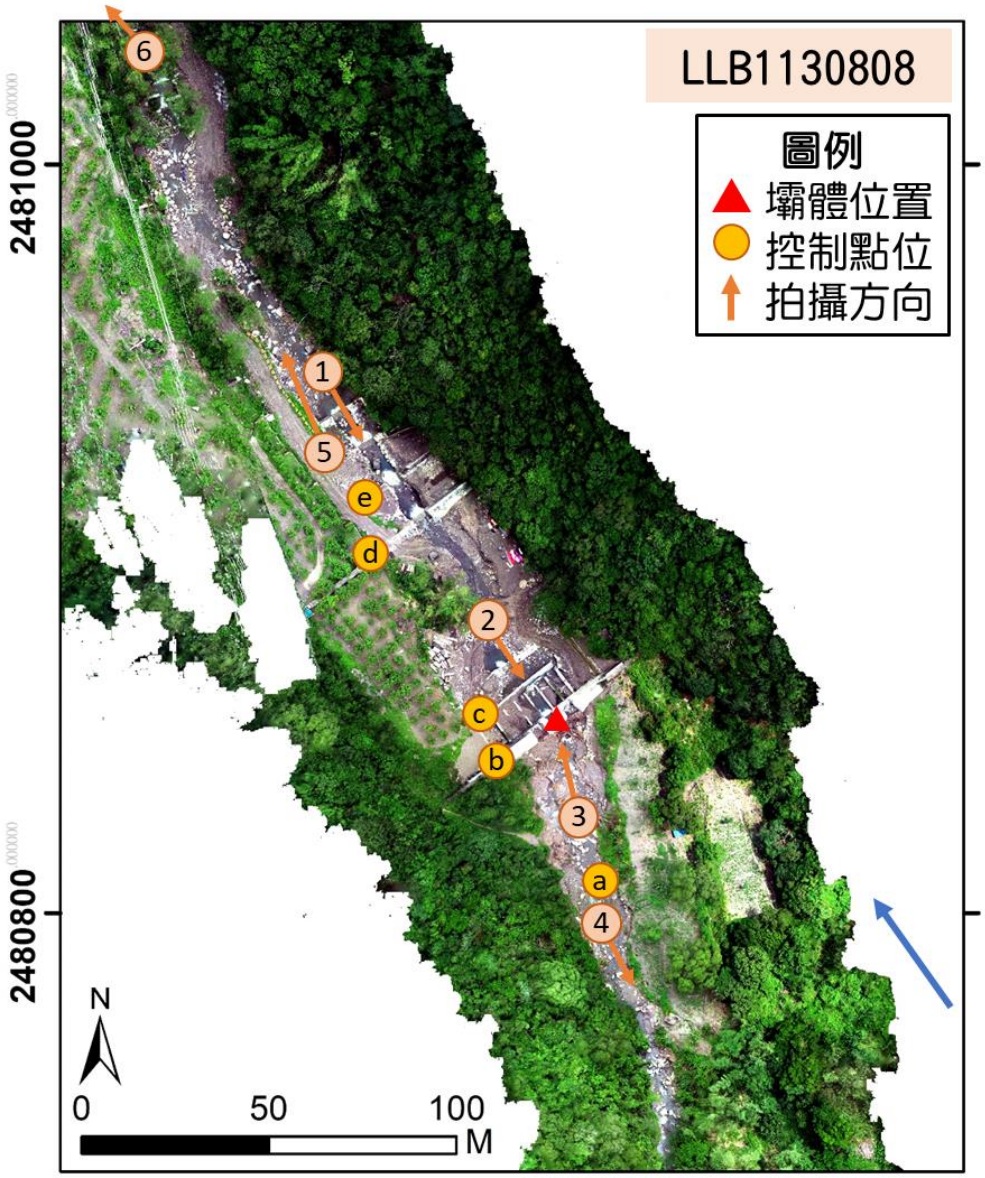
定位說明		a	b	c	d	e
控制點座標	North(m)	2480906.104	2480847.963	2480801.323	2480897.33	2480909.318
	East (m)	213719.012	213749.015	213789.571	213738.394	213713.568
	Elev	159.204	166.696	160.158	152.064	149.021

環境現況	溪床質	上游	❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型	河岸邊坡	☑穩定 ❑河岸淘刷崩塌 ❑山腹崩塌
		下游	❑ 泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型		

	溪床坡度	河道平均寬度	沖淤概述
壩體上游	約 12.00 %	約 25.23 m	施工中
壩體下游	約 10.82 %	約 23.79 m	施工中

功能評估	外觀檢視劣化型態	❑良好❑裂縫❑磨蝕❑傾倒❑沉陷❑錯動斷裂❑錯動變形❑位移❑砌石鬆脫❑外框損毀 ❑其他_____ 補充說明：施工中
	構造物周邊	❑良好❑床面淤升(影響通洪斷面) ❑床面沖降(基礎裸露) ❑回填土(石)流失 ❑其他_____ 補充說明：施工中
	潛在劣化營力	❑溪床沖蝕❑溪岸溢流沖刷❑兩岸邊坡崩塌❑土石或洪流撞擊❑凹岸淘刷❑其他 補充說明：施工中
其它	1. 6 月的數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi）。由於凱米颱風前尚於工程施工階段，而 0K+000 既有防砂壩下游之透水性護坦工程尚未完工，颱風後遭受洪水沖刷以致傾斜破損，工程單位已隨即進行相關補修作業中。 2. 0K+000 既有防砂壩已調降溢洪口並安裝橫向 H 型鋼，颱風後有效攔阻土砂及漂流木。	

試區位置圖含照片拍攝方向



現況照片



1	2024/08/08	照片重點：工程範圍概況 拍攝位置：下游往上游面

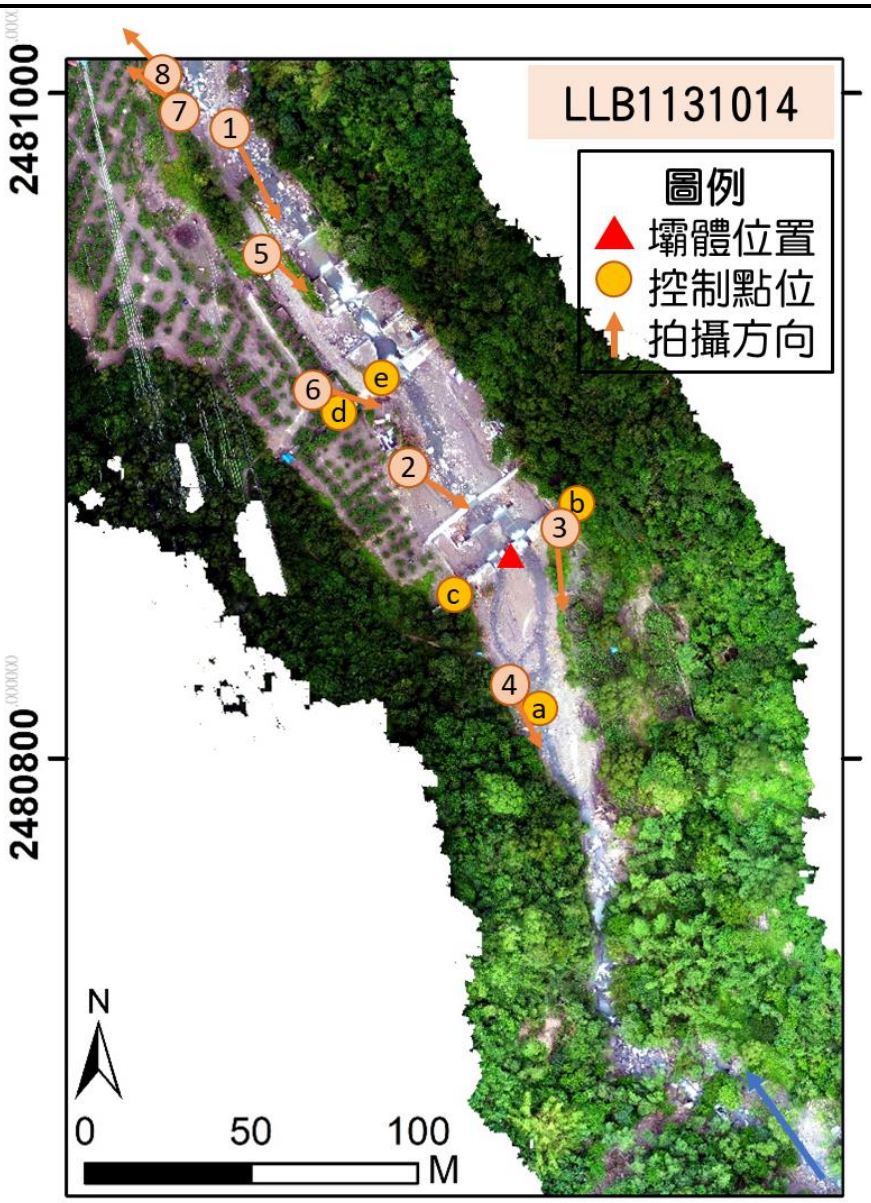


2	2024/08/08	照片重點：0K+000 工程概況 拍攝位置：壩口往上游面

						
	3	2024/08/08	照片重點：壩口上游概況 拍攝位置：上游往壩口	4	2024/08/08	照片重點：上游河道淤積概況 拍攝位置：下游往上游
						
	5	2024/08/08	照片重點：工程範圍下游概況 拍攝位置：上游往下游	6	2024/08/08	照片重點：下游邊坡護岸工程 拍攝位置：上游往下游左岸

表 2. 15 試區現況調查表- LLB_1131014

調查人員		邱渝方、梁閔智、陳乙暄、蕭芳芳				調查編號	LLB_1131014	
工程名稱		力里橋上下游野溪整治工程				集水區	卡布里娃欄溪集水區	
調查日期		2024/10/14				所屬機關	農村發展及水土保持署臺南分署	
基本資料	構造物種類/型式	原況-封閉式防砂壩 現況-開口型防砂壩		構造物尺寸(上游壩)		壩長(m)：49.6 壩高(m)：4.5	溢口長度(m)：29.0 壩頂厚度(m)：8.0	
	新建年份	➢ 既有防砂壩及固床工，於 1985 年完工 ➢ 力里橋上下游野溪整治工程於 2024 年 2 月 19 日開工，預計於 2024 年 12 月 28 日完工。				縣（市）鄉(鎮、區)	屏東縣春日鄉	
	定位說明		a	b	c	d	e	
	控制點座標	North(m)	2480820.352	2480867.099	2480847.94	2480906.103	2480914.797	
		East (m)	213779.857	213771.976	213749.002	213718.975	213728.844	
		Elev	164.205	163.687	166.709	159.211	155.343	
環境現況	溪床質	上游	❑泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型			河岸邊坡	☑穩定 ❑河岸淘刷崩塌 ❑山腹崩塌	
		下游	❑ 泥質型☑砂質型☑礫石型☑塊石型					
			溪床坡度		河道平均寬度		沖淤概述	
	壩體上游		約 2.27 %		約 20.42 m		施工中	
	壩體下游		約 11.07 %		約 25.08 m		施工中	
功能評估	外觀檢視劣化型態		❑良好❑裂縫❑磨蝕❑傾倒❑沉陷❑錯動斷裂❑錯動變形❑位移❑砌石鬆脫❑外框損毀 ❑其他_____ 補充說明：施工中					
	構造物周邊		❑良好❑床面淤升(影響通洪斷面) ❑床面沖降(基礎裸露) ❑回填土(石)流失 ❑其他_____ 補充說明：施工中					
	潛在劣化營力		❑溪床沖蝕❑溪岸溢流沖刷❑兩岸邊坡崩塌❑土石或洪流撞擊❑凹岸淘刷❑其他 補充說明：施工中					
其它	1. 於 2024 年 10 月強烈颱風康芮（Typhoon Kong-rey）侵襲，康芮颱風影響臺灣時間將落在 10 月 30 日至 11 月 2 日之間，根據土石流及大規模崩塌防災應變系統之監測數據，春日(力里測站)累積雨量達 120.5 毫米，造成強風及豪雨災害，全台最大陣風皆達 10 級以上。 2. 工程施工範圍於豪雨期間，河道中橫向構造物皆已開口，河道明顯刷出深槽線並持續引導水流及土砂輸送。 3. 下游 0K+064.52 至 0K+098.49 之橫向構造物下游側受 2024 年之豪雨及雨起颱風侵擾，造成嚴重淘刷情況。施工單位於 2024 年 12 月完工前將填補並修復淘刷問題。						

試區位置圖含照片拍攝方向	
現況照片	

1	2024/10/14	照片重點：工程範圍概況 拍攝位置：下游往上游面	2	2024/10/14	照片重點：OK+000 工程概況 拍攝位置：壩口往上游面

						
	3	2024/10/14	照片重點：壩口上游概況 拍攝位置：壩口往上游	4	2024/10/14	照片重點：上游河道淤積概況 拍攝位置：壩口往上游
						
	5	2024/10/14	照片重點：工程範圍下游概 拍攝位置：下游往上游	6	2024/10/14	照片重點：0K+064.52 淘刷概況 拍攝位置：下游往上游
						
	7	2024/10/14	照片重點：下游邊坡護岸工程(預鑄護岸) 拍攝位置：下游往上游	8	2024/10/14	照片重點：下游邊坡護岸工程(透水性護坦縱、橫梁工程) 拍攝位置：下游往上游

第四節 河床表面粒徑調查

主要為配合構造物調查時，約略評估構造物周遭、其上游溪床堆積表面材料之概況，主要針對河道中水流經過之區域進行採樣記錄，並計算其 d_{50} 變化。參考水土保持技術規範(2014)河床質調查方法中之表面粒徑調查分析方法，並考量實際判斷操作可行性，依現場堆積材料狀況，於距構造物上(下)游溪床 5 公尺為調查起始點，共調查五個斷面，斷面之間距離相等，其間距至少 5 公尺。每一個斷面以等間隔(如 2 公尺)取一測點，量測在該測點上之泥砂粒徑，每一個斷面量測至少五個測點，依河段現況其每一河段各個段面測點數量均一致。以構造物上(下)游所測得之所有粒徑資料，可求得該河段之粒徑中值(D_{50})。本計畫依現場環境狀況做評估再決定是否可現場採樣，若無法採樣將會採用目測調查方式，可分為泥質型、砂質型、礫石型及塊石型(圖 2. 40 及圖 2. 41)。粒徑 0.2 公分以上之資料將紀錄為採樣數據，小於 0.2 公分之數據將紀錄為砂質及泥質型土砂。



(a)泥質型



(b)砂質型



(c)礫石型



(d)塊石型

資料來源：整理自農村發展及水土保持署(2016)

圖 2. 40 溪床堆積材料粒徑照片

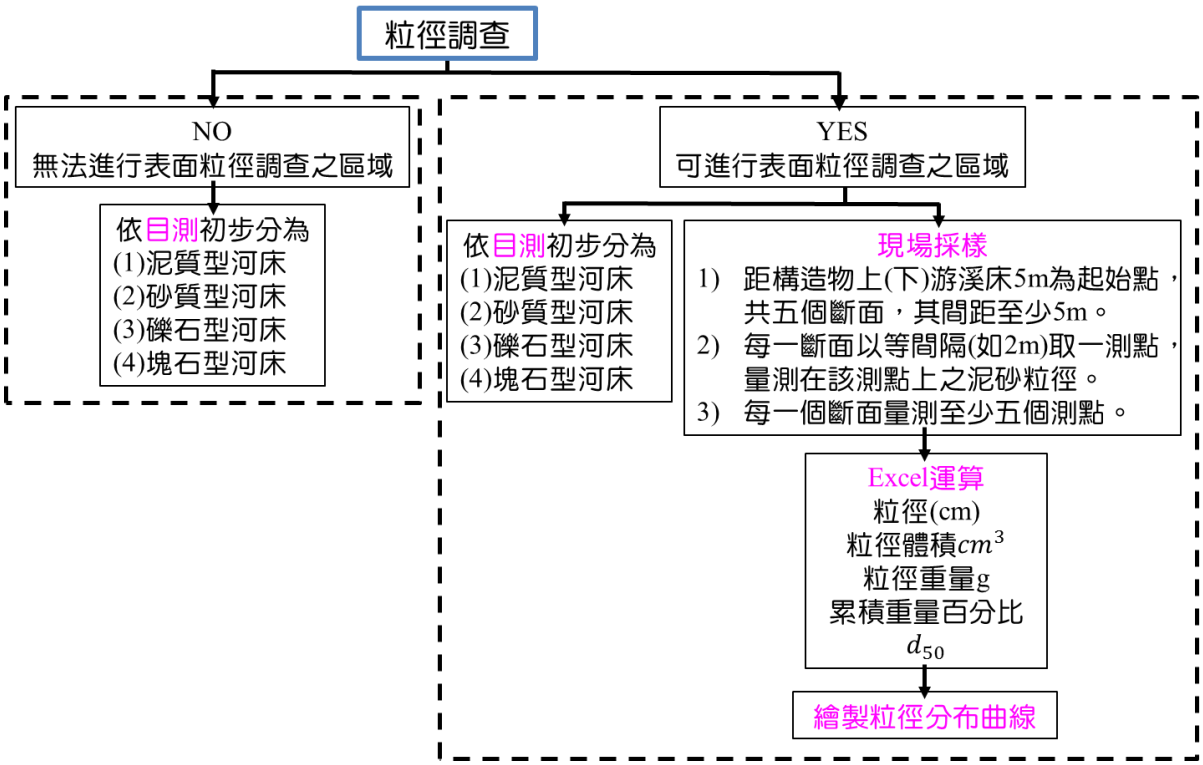


圖 2. 41 粒徑調查流程圖

依各試區之量測可行性，以構造物上(下)游所測得之所有粒徑資料，可求得該河段之粒徑中值(D_{50})，河床底質粒徑分類標準如下表2. 16。會依現場環境狀況做評估再決定是否可現場採樣，若無法採樣將會採用目測調查方式。

表 2. 16 河床底質粒徑分類標準

底質等級	底質粒徑範圍(單位 mm)
細沈積砂土、有機質碎屑、黏土、泥、砂 fine sediments、organic detritus、clay、silt、sand	<2.0
礫石 gravel	2.0~64
卵石 cobble	64~256
塊石 boulder	>256

來源：美國地球物理學會 (AGU) 之泥砂粒徑分類基準

(一)臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

關山九號橋後堀溪試區上、下游皆有一座橫向構造物，上游為堤尾工(調整式封閉型固床工)，而下游為調整型孔隙式防砂壩，上、下游構造物間距離約 850m。橫向構造物上、下游河床面之粒徑概況如表 2. 17 及圖 2. 42 至圖 2. 44 所示。

2024 年 5 月 16 日現地調查，(上游) 堤尾工(調整式封閉型固床工)上游河床面之 d_{50} 為 8.0cm，上游構造物下游河床面之 d_{50} 為 11.024 公分，皆屬粒徑分級中之卵石(cobble)；(下游)調整型孔隙式壩上游河床面之 d_{50} 為 15.384 公分，下游壩下游河床面之 d_{50} 為 13.335 公分，皆屬粒徑分級中之卵石(cobble)。

經歷 2024 年 6 月的數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi），上游之堤尾工(調整式封閉型固床工)洪水水位上升並漫淹至複式漿砌石護岸之洪峰水位高。而下游調整型孔隙式防砂壩，根據當地居民的描述，洪水不僅淹至左岸防砂壩，還淹及右岸的道路。由於現況河道不利於表面粒徑採樣，故先以影像紀錄方式呈現(圖 2. 43)。2024 年 10 月 13 日至現地調查橫向構造物上、下游河床面之粒徑概況，(上游) 堤尾工(調整式封閉型固床工)上游河床面之 d_{50} 為 5.93 公分，屬粒徑分級中之礫石(gravel)，上游構造物下游河床面之 d_{50} 為 9.452 公分，屬粒徑分級中之卵石(cobble)；(下游)調整型孔隙式壩上游河床面之 d_{50} 為 6.2 公分，屬粒徑分級中之礫石(gravel)。經現況調查上游淤積土砂及漂流木明顯沖刷至下游，依據環境現況洪水使橫向構造物上游面淤滿，加劇洪水淘刷下游面基礎，粒徑調查皆有細化趨勢。

表 2. 17 河床表面粒徑 d_{50}-關山九號橋後堀溪試區

d_{50} (cm)	(上游)堤尾工 上游	(上游)堤尾工 下游	(下游)調整型孔隙式壩 上游	(下游)調整型孔隙式壩 下游
2024/05/16	8.000	11.024	15.384	13.335
2024/08/13	洪水後不便採樣	洪水後不便採樣	洪水後不便採樣	洪水後不便採樣
2024/10/13	5.930	9.452	6.200	不便採樣

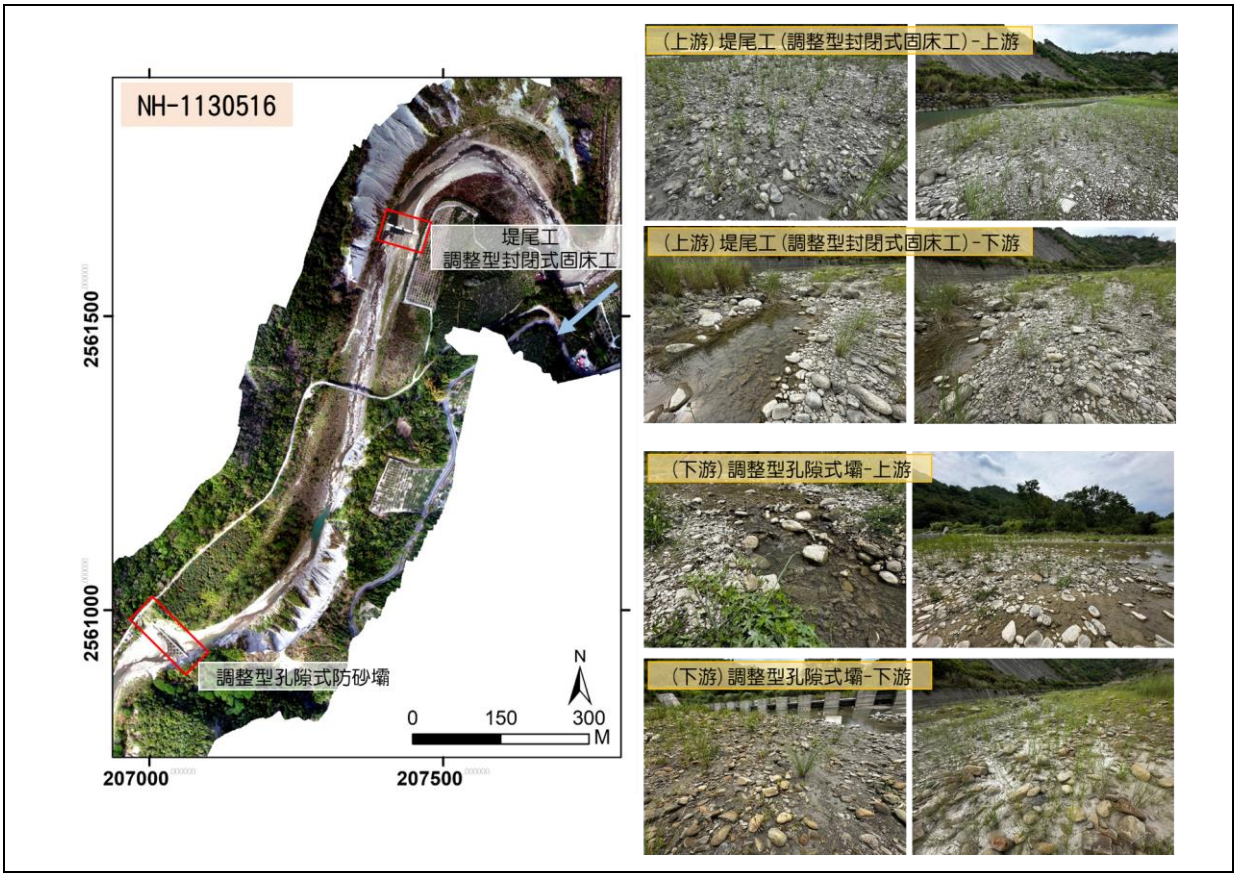


圖 2. 42 關山九號橋後堀溪試區-粒徑概況(2024/05/16)

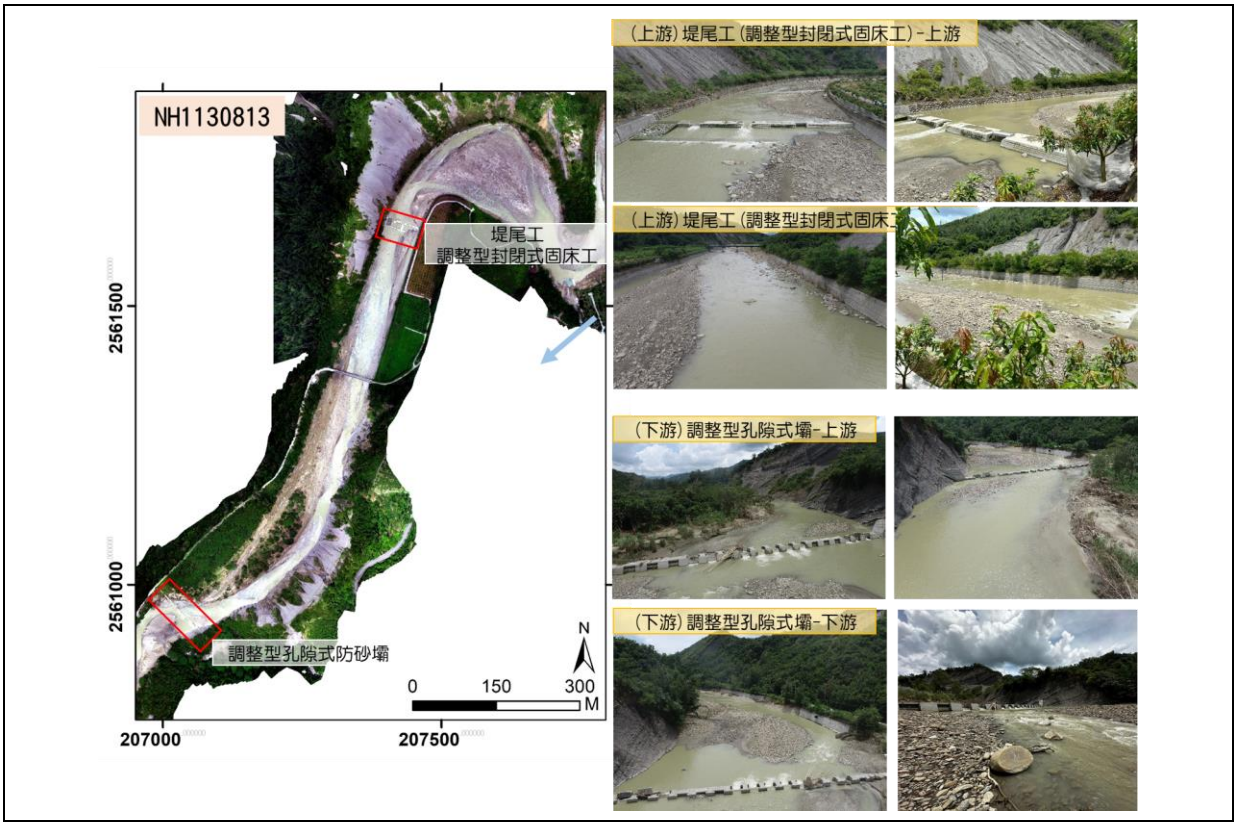


圖 2. 43 關山九號橋後堀溪試區-粒徑概況(2024/08/13)

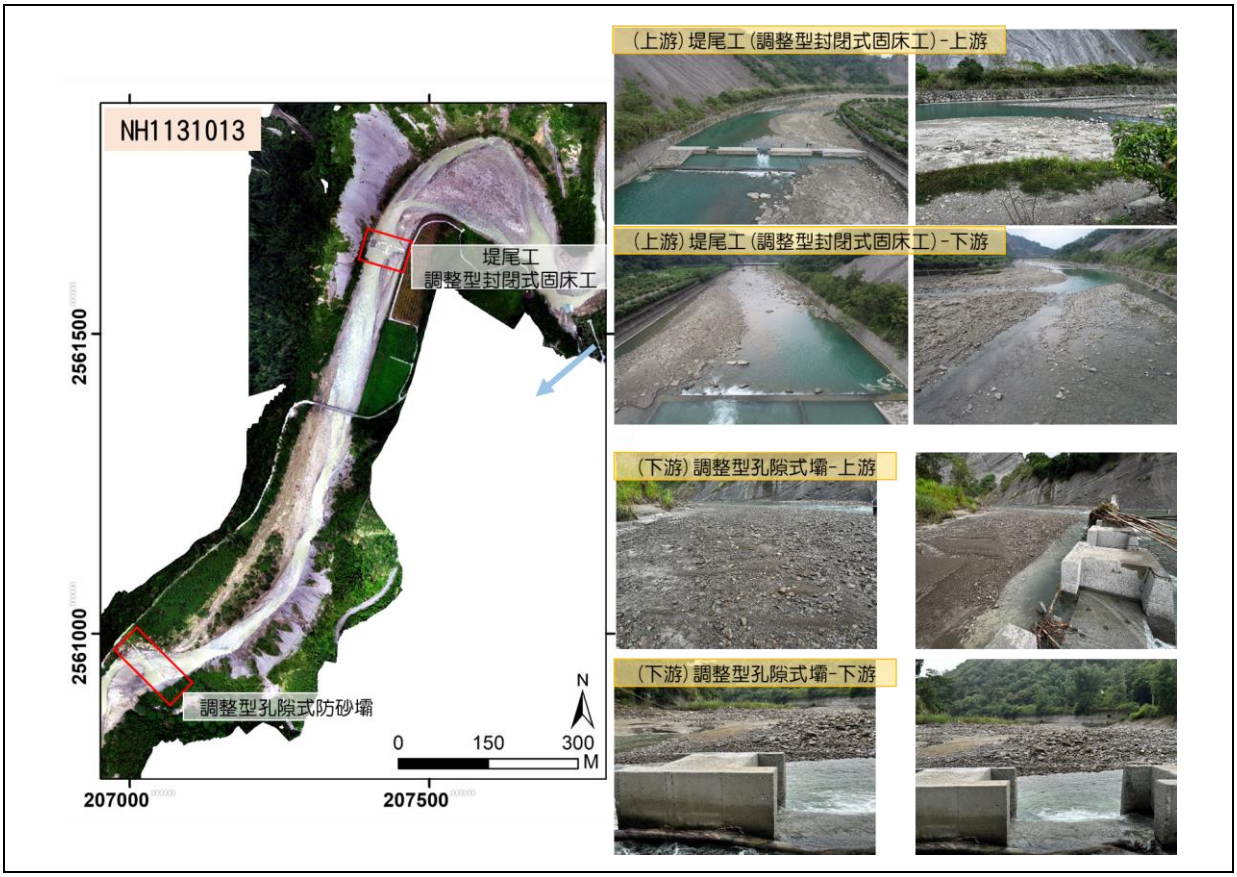


圖 2. 44 關山九號橋後堀溪試區-粒徑概況(2024/10/14)

(二)屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

2024 年 1 月 24 日現地調查時力里橋力里溪試區之研究範圍共有七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)，依照現場環境可採樣之區域為 0K+000 上、下游為粒徑採樣區，橫向構造物皆為封閉式防砂壩。防砂壩上、下游河床面之粒徑概況如表 2. 18 及圖 2. 45 至圖 2. 47 所示。

2024 年 1 月 24 日現地調查，0K+000 壩上游 1~5 公尺處河床面之 d_{50} 為 11.479 公分，屬粒徑分級中之卵石(cobble)，0K+000 壩上游 10~20 公尺處河床面之 d_{50} 為 58.898 公分，屬粒徑分級中之塊石(boulder)，0K+000 壩與 0K+017.02 間河床面之 d_{50} 為 3.014 公分，屬粒徑分級中之礫石(gravel)。

由於凱米颱風前尚於工程施工階段，0K+000 既有防砂壩下游之透水性護坦工程尚未完工，颱風後遭受洪水沖刷以致傾斜破損。0K+000 壩上游 10~20 公尺處河床面之 d_{50} 為 35.78 公分，屬粒徑分級中之塊石(boulder)。2024 年 10 月 14 日至現地調查 0K+000 壩上游 1~5 公尺處河床面之 d_{50} 為 15.522 公分，屬粒徑分級中之卵石(cobble)，0K+000 壩與 0K+017.02 間河床面之 d_{50} 為 21.21 公分，屬粒徑分級中之塊石(boulder)。經現況調查上游淤積土砂及漂流木明顯沖刷至下游，依據環境現況洪水使土砂往下游輸送，0K+000 壩上游面明顯刷出深槽線。而 0K+000 壩與 0K+017.02 間之粒徑並非皆全數為洪水下刷之土砂，部分上為施工鋪排之塊石粒徑，故採樣數據建議不納入考量。

表 2. 18 河床表面粒徑 d_{50}-力里橋試區

d_{50} (cm)	0K+000 壩 上游 1~5m	0K+000 壩 上游 10~20m	0K+000 壩 與 0K+017.02 間
2024/01/24	11.479	58.898	3.014
2024/05/15	施工中	施工中	施工中
2024/08/08	施工中	35.78	施工中
2024/10/13	15.522	--	21.210

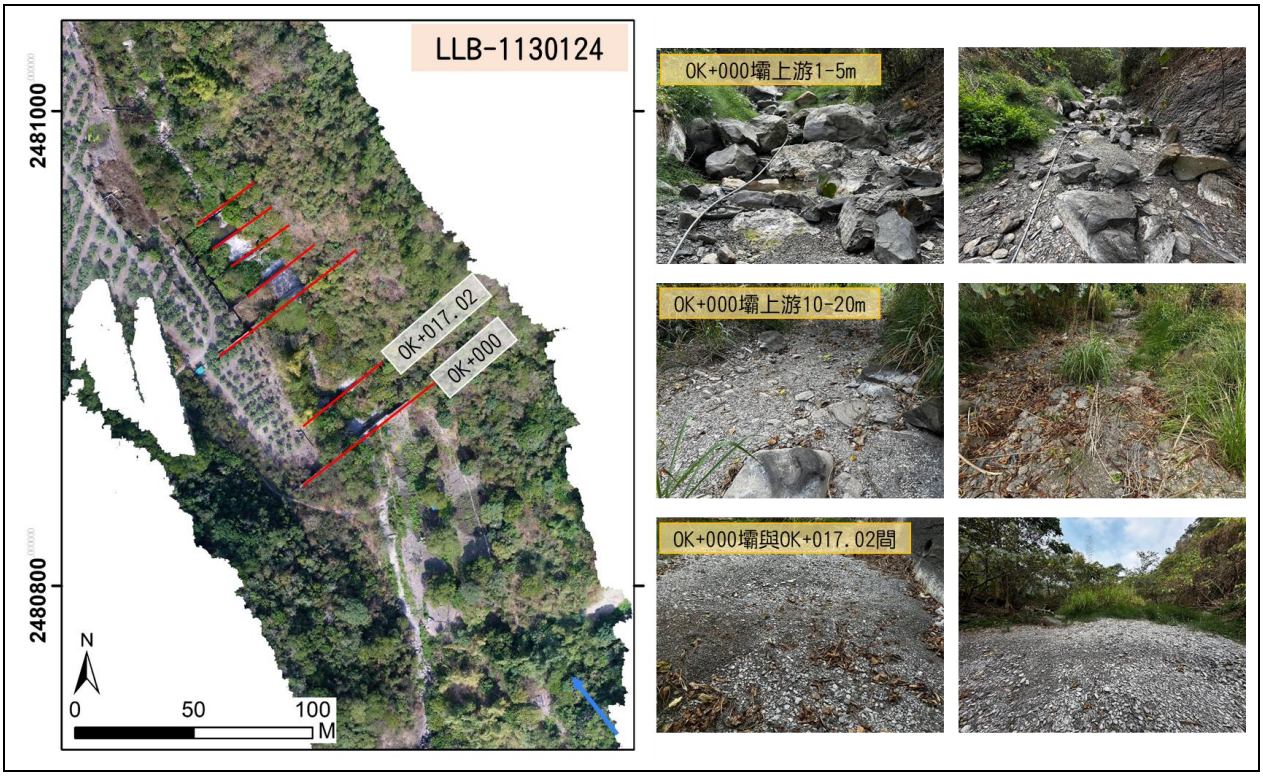


圖 2. 45 力里橋力里溪試區-粒徑概況(2024/01/24)

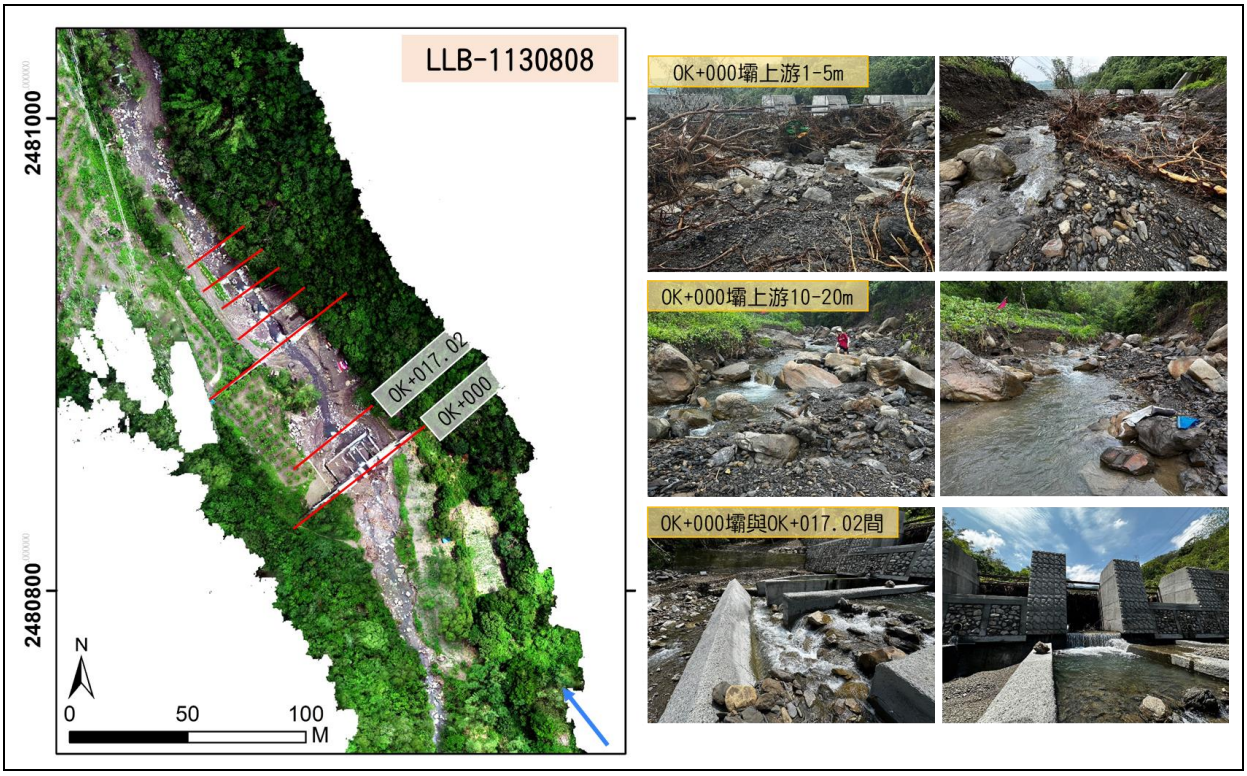


圖 2.46 力里橋力里溪試區-粒徑概況(2024/08/08)

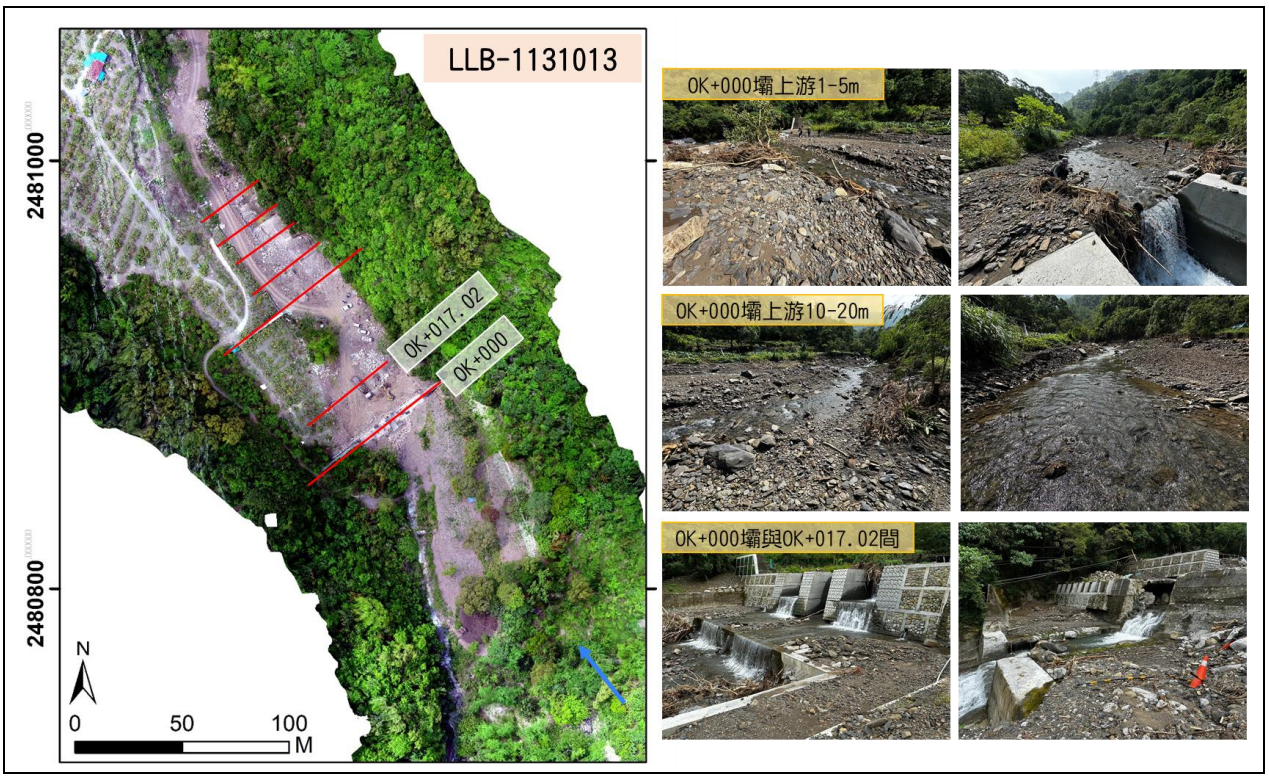


圖 2.47 力里橋力里溪試區-粒徑概況(2024/10/13)

第五節 歷年影像資料

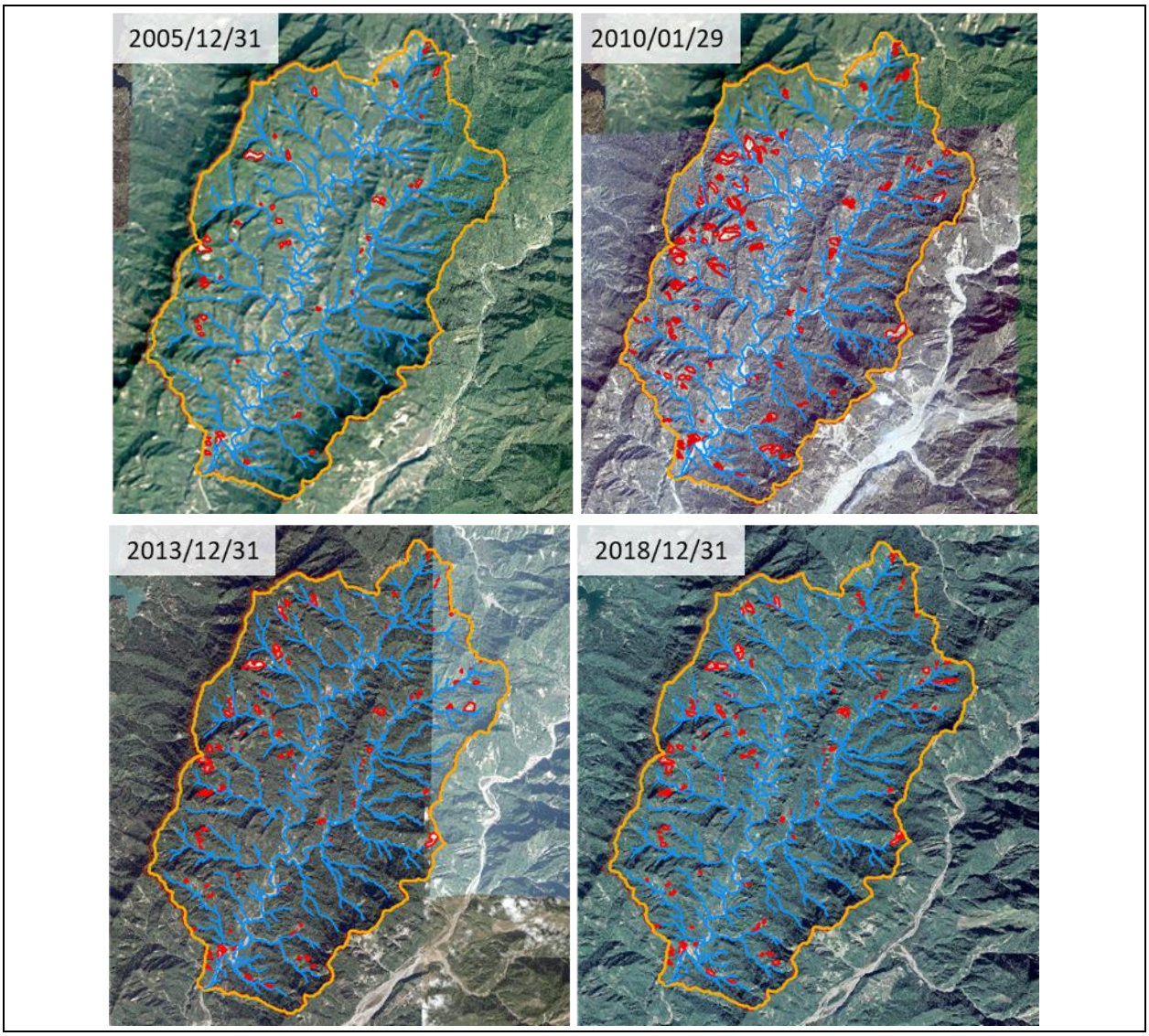
計畫蒐集研究試區內近 10~20 年影像資料判讀與分析，推估上游之土砂產量變化及趨勢。影像資料包含航拍以及衛星正射影像，航拍資料來源為農林航空測量所產製之彩色正射影像，衛星影像包含福衛二號(彩色融合影像，解析度 2 m)以及 SPOT 6(彩色影像，地面解析度 6 公尺)。考量因研究試區之上游野溪窄小且密林覆蓋，河道土砂量部分不易以影像判釋評估，故主要以上游集水區崩塌面積的消長來推估土砂產量之變化趨勢。而歷年雨量資料來源為中央氣象署之雨量站測站資料，並與歷年崩塌地面積對照演變趨勢。

(一)臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

本計畫蒐集後堀溪集水區自 2005 年至 2023 年共計八期的衛星影像資料，數化上游集水區之崩塌裸漏地，合併計算崩塌面積，繪製歷年變化圖(圖 2. 48)。與歷年累計雨量(圖 2. 50)及重大災害事件進行對照(圖 2. 49)，於臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區之雨量及崩塌地面積之增減趨勢略同(圖 2. 51)。而崩塌地與災害事件對比，如下述：

影像判釋顯示該區域於 2005 年崩塌面積為 47.6 公頃，然而 2008 年 7 月 17 日發生卡玫基颱風與 2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風事件，其高強度及長延時降雨造成後堀溪溪水暴漲溢流，致使路基、農地、橋梁設施等多處損壞，於 2010 年崩塌面積的影像中指出，歷經兩場高強度颱風事件的影響下，崩塌面積增加至 176.1 公頃。自莫拉克颱風過後，2013 年 8 月 29 日的康芮颱風帶來較大的降雨而造成幾處崩塌，裸露面積共佔 74.9 公頃，除了幾處產生崩塌外，過去災害造成的崩塌地因過去三年未受到明顯災害事件影響，使植生恢復程度大，崩塌

面積明顯下降。2017 年 7 月關山九號橋後堀溪試區之防砂壩竣工，在此之後的 2018 年與 2019 年共有兩起分別為熱帶低壓與豪雨災害，而崩塌面積僅由 88.5 公頃增加至 95.0 公頃，以及 2021 年的盧碧颱風事件後，崩塌面積則增加至 103.3 公頃，崩塌面積相較於過去事件產生的變化較小，推估為防砂壩在一定程度內減緩上游的崩塌情形。而經由 2022 年與 2023 年的影像監測顯示，崩塌面積分別為 106.7 公頃與 138.5 公頃，可推斷該區域仍持續有崩塌的現象。透過近 20 年上游崩塌地面積變化程度，推估尚處於土砂高峰期階段。



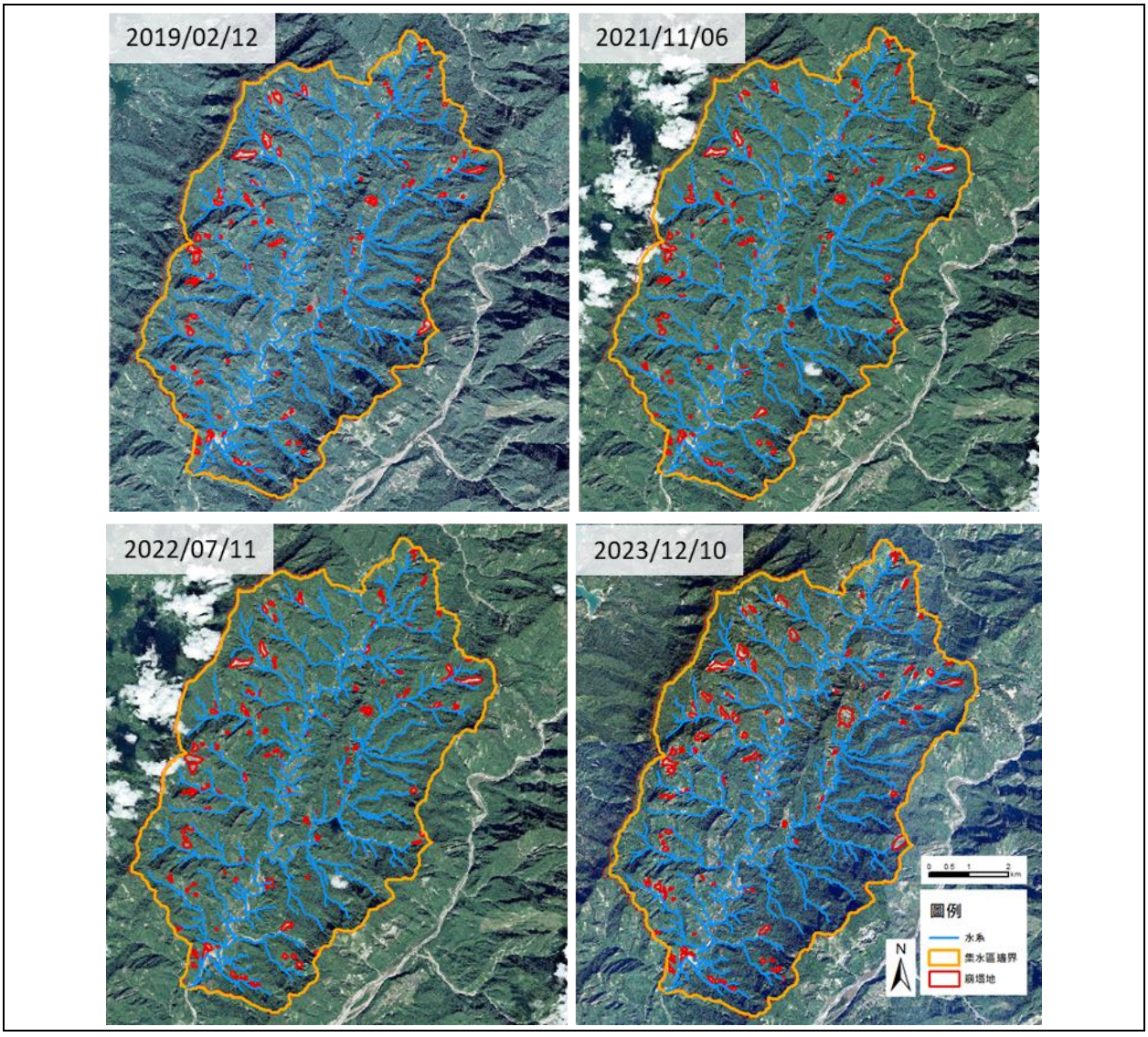


圖 2. 48 集水區歷年影像與崩塌地分布-關山九號橋後堀溪試區

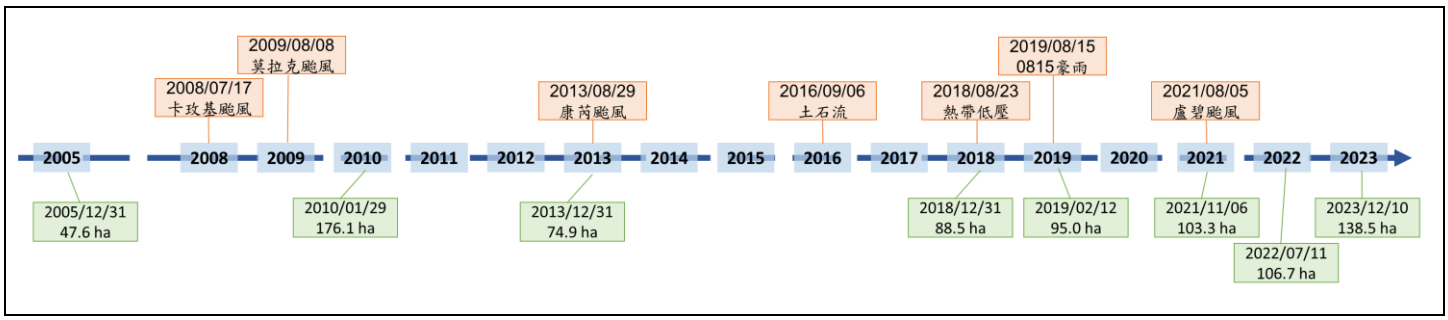


圖 2. 49 歷年水文事件及崩塌面積變化-關山九號橋後堀溪試區

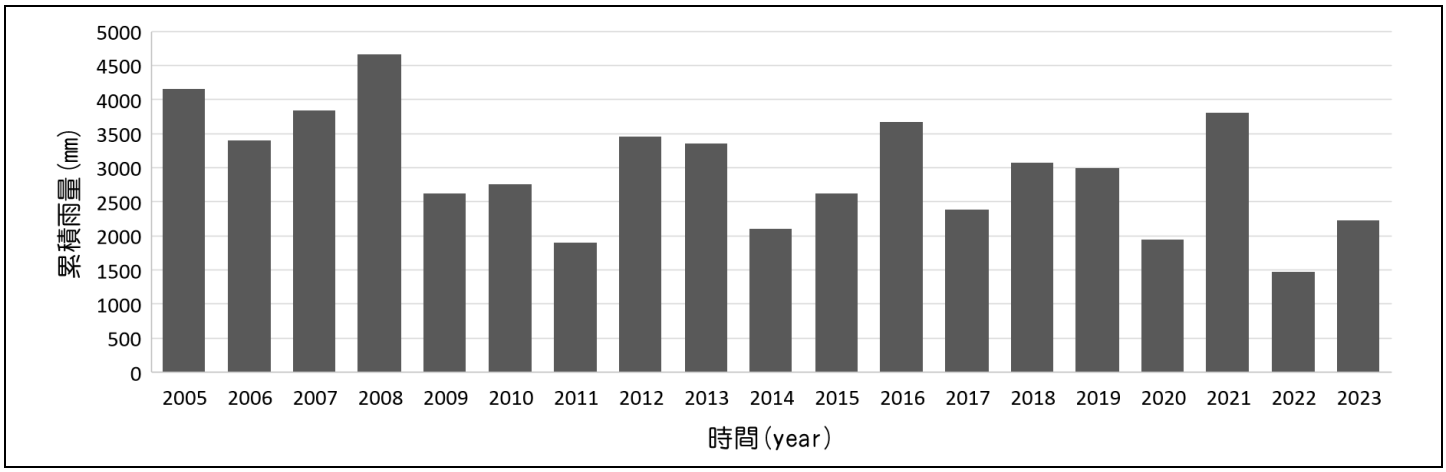


圖 2. 50 歷年累積雨量圖-關山九號橋後堀溪試區(2005~2023 年)

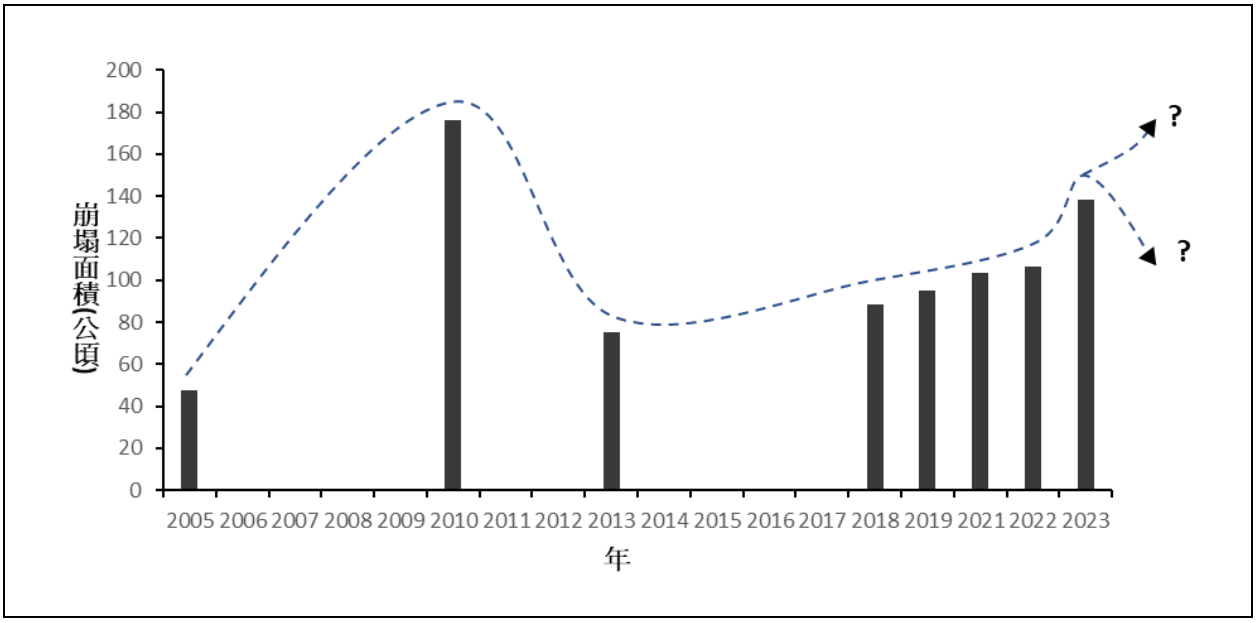
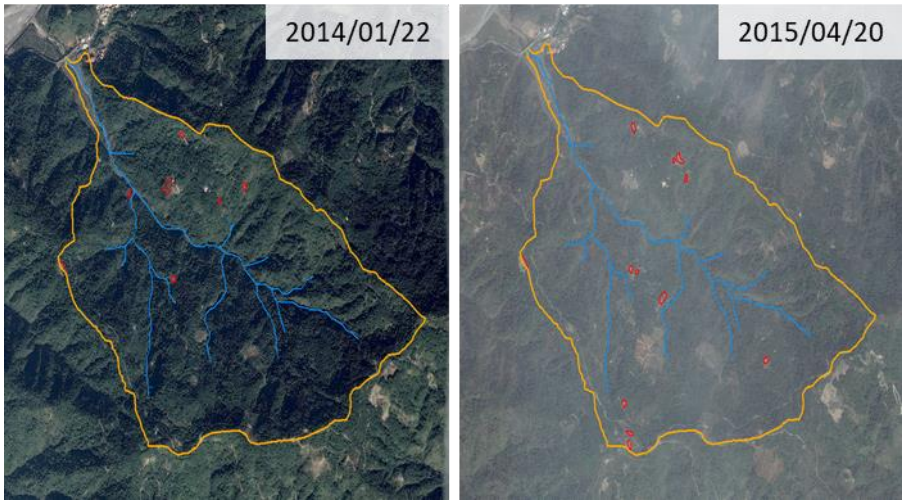


圖 2. 51 歷年崩塌面積變化-關山九號橋後堀溪試區

(二)屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

本計畫蒐集力里溪集水區自 2014 年至 2023 年共計八期的衛星影像資料，數化上游集水區之崩塌裸漏地，合併計算崩塌面積，繪製歷年變化圖(圖 2. 52)。與歷年累計雨量(圖 2. 54)及重大災害事件進行對照(圖 2. 53)，於屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區之雨量及崩塌地面積之增減趨勢略同(圖 2. 55)。而崩塌地與災害事件對比，如下敘述：

力里溪整治段的七支橫向構造物興建於 1985 年，壩體間的落差非常大且上游土砂淤積嚴重。「力里橋上下游野溪整治工程」將力里溪流心向右岸偏移，以避免影響左岸芒果園之虞，降低壩體中間高度，形成複式斷面，讓上游土砂得以下移，工程於 2024 年 2 月 19 開工，預計 2024 年 11 月完工。力里溪集水區面積為 28.7 公頃，上游崩塌地面積皆小於 1 公頃，崩塌後植生復育良好。2015 年及 2021 年崩塌面積較大，分別為 0.93 公頃與 0.59 公頃，隨著時間的推移，面積有漸漸下降的趨勢，估推測力里溪集水區之坡面安定程度高，未來將會持續觀察力里橋力里溪試區工程調整坡度之後，對上游造成的變化。透過近 10 年上游崩塌地面積變化程度，推估已逐漸進入土砂削減期。



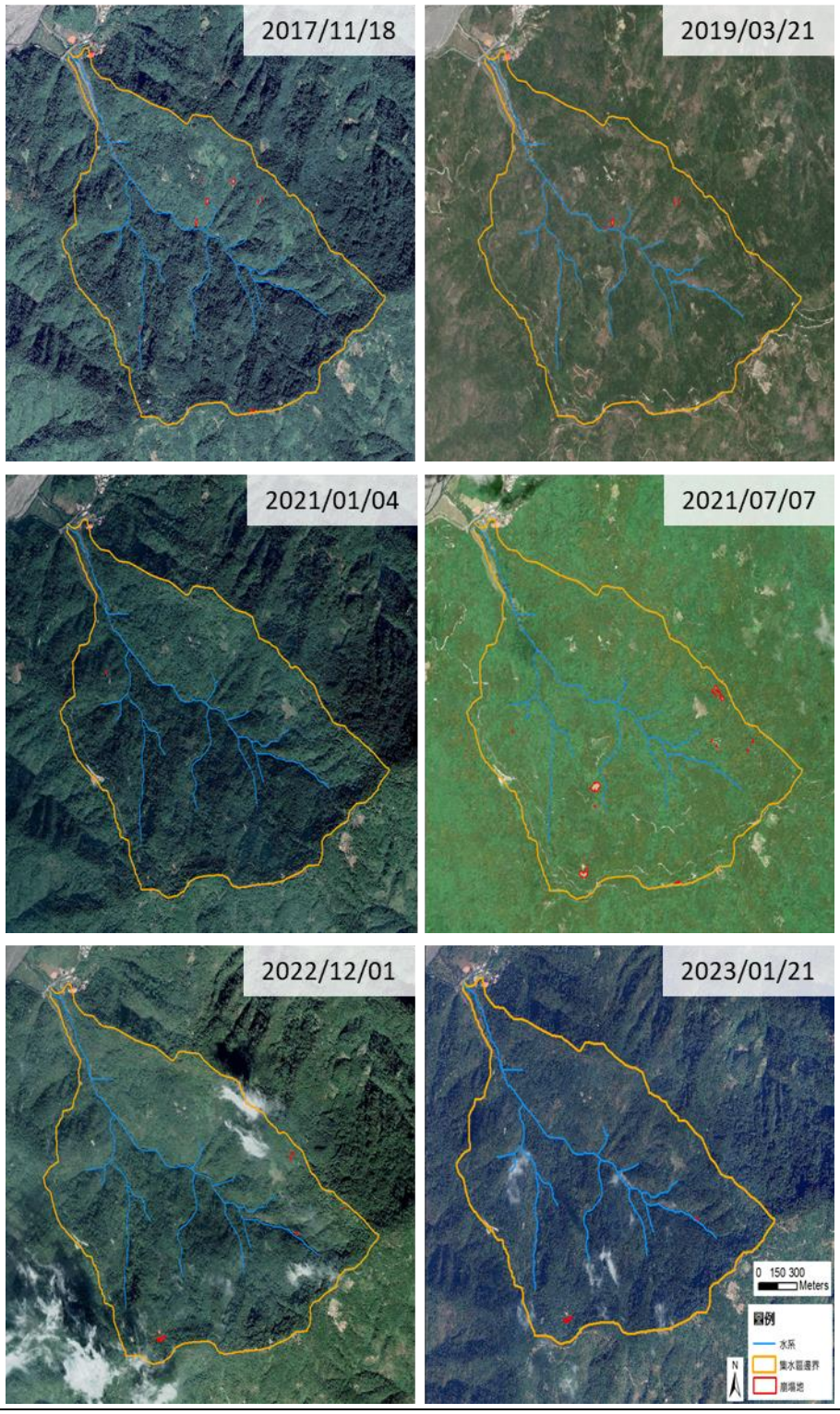


圖 2. 52 集水區歷年影像與崩塌地分布-力里橋力里溪試區

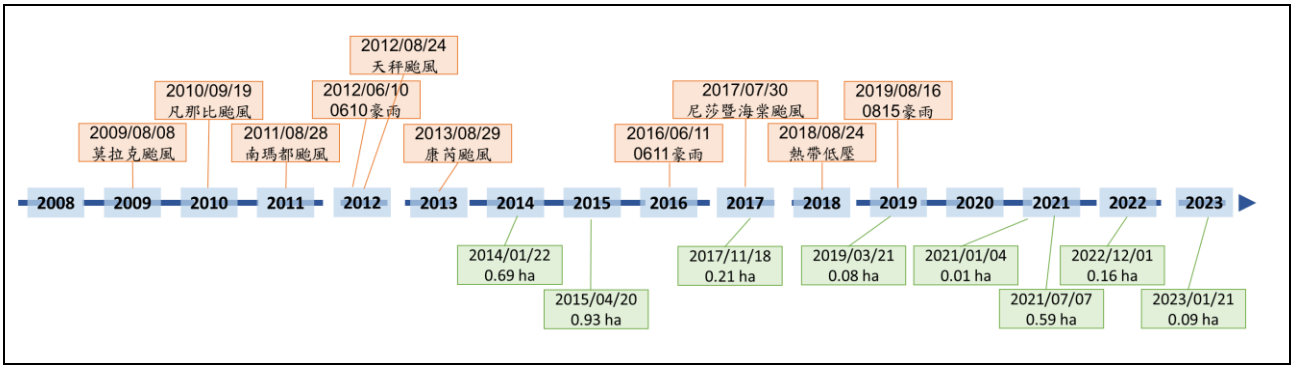


圖 2. 53 歷年水文事件及崩塌面積變化-力里橋力里溪試區

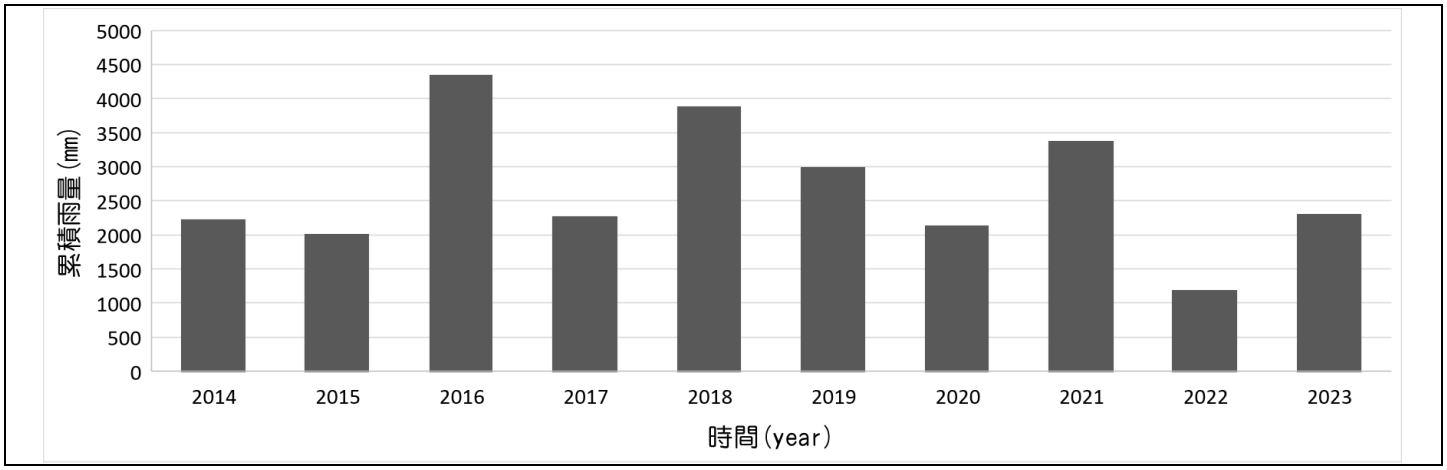


圖 2. 54 歷年累積雨量圖-力里橋力里溪試區(2014~2023 年)

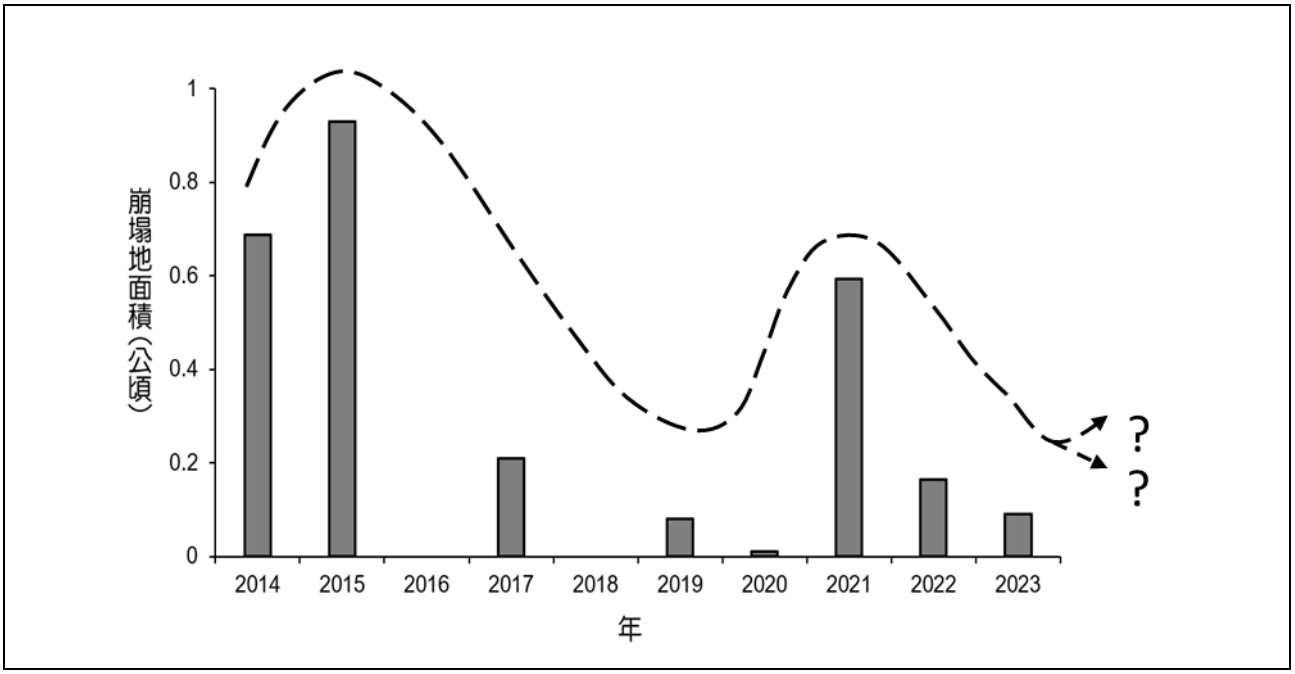


圖 2. 55 歷年崩塌面積變化-力里橋力里溪試區

第參章　應用數值模擬提出研究試區之沖淤變動特性

第一節 利用無人載具測量，建立研究試區之數值地形模型

(一)UAV 地形測量

量測範圍約至少工程規劃或施工範圍為基準;量測方式主要為無人飛行載具 UAV，並輔以其他人工測量方式。無人飛行載具(unmanned aerial vehicle, UAV)為近年來新興的測量工具,使用定翼機或旋翼機搭載相機雲台,對地面進行航拍作業。其具備了即時、快速、便利等優點，相較於正規航空攝影測量，雖然可涵蓋的測量範圍較小,但卻具備較低成本與較高解析度等優勢(Tamminga et al., 2015a)，目前已廣泛地應用至地形測量、災害調查等面向 (白絜成等，2015)。除了坡地災害之外，於河川環境調查亦能發揮優異的性能(劉寅春等，2015；蕭震洋等，2015；Tamminga et al., 2015a&b)。

在 UAV 拍攝技術方面，參考 Rusnák et al (2018) 提供能建立高解析度地形圖之航拍方式，航拍方式考慮不同角度，分別為正拍(nadir)、側拍(oblique)、斜拍(horizontal)(圖 3. 1)，過去 UAV 進行攝影任務時，容易受到植被的影響導致物件下方的資料取得受限，因此使用不同角度拍攝能補足被遮蔽的數據，使地形資料更加完整。

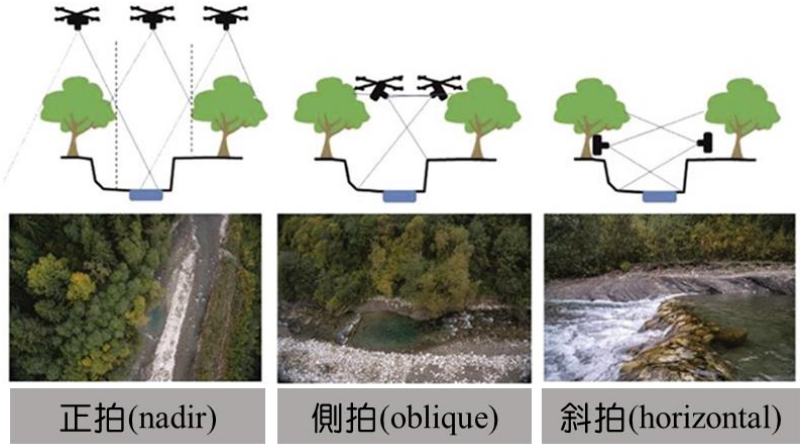


圖 3. 1 建立高解析度地形圖之航拍方式(Rusnák et al., 2018)

本計畫利用 UAV 正射影像，以判讀試區植生、土砂分布概況。本研究之地形測量，使用 Parrot ANAFI Extended 空拍機進行空拍(圖 3. 2)，由法國無人機廠商 Parrot 於 2018 年推出，搭載 2.8 倍無損變焦、4K HDR 錄影功能、180 度傾斜式雲台，總重量 320 克，飛行時間可達 25 分鐘，是一款十分輕巧又堅固耐用的折疊式無人機。配合地面控制點之布設與 GNSS 座標測量，將拍攝之序列影像進行正射化，並建立試區的數值地形模型(DEM)詳見流程圖 3. 3，地面解析度可達 0.2 公尺以上，控制點之垂直方向精度可達 0.1 公尺以上。



圖 3. 2 Parrot ANAFI Extended 空拍機

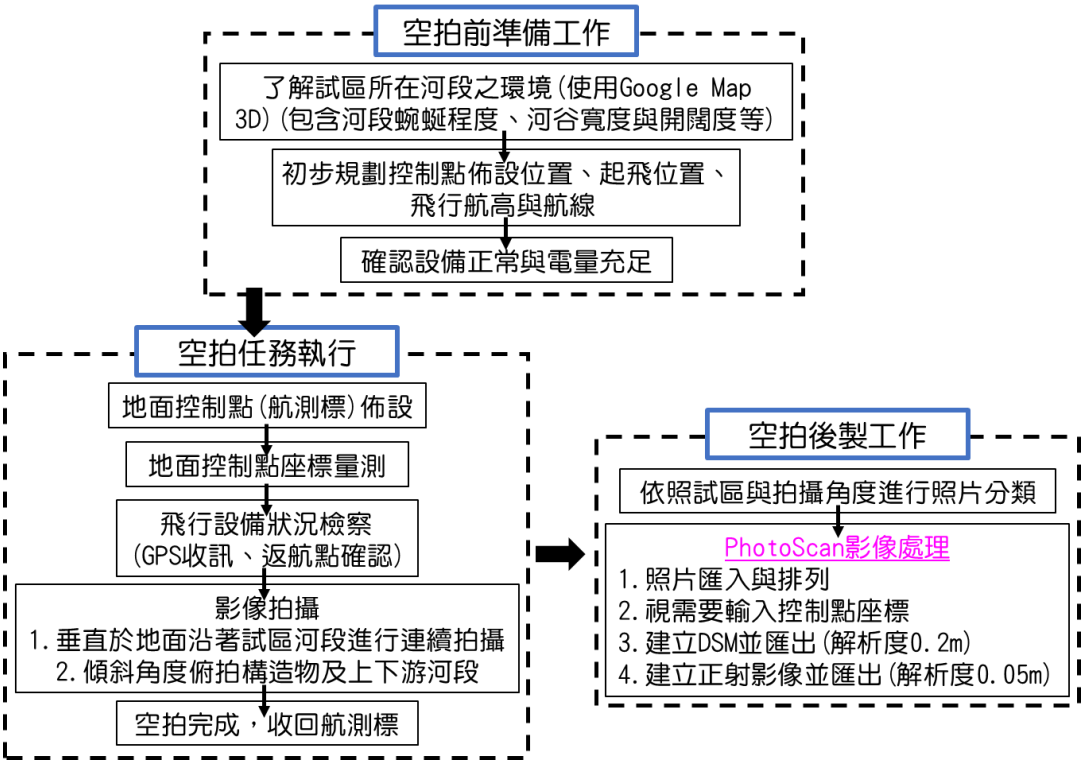


圖 3. 3 UAV 地形測量工作流程圖

同時搭配STONEX S3A 智慧型RTK之GNSS衛星接收器(圖3. 4)來進行地面控之點之量測，其追蹤技術之靜態精度可達平面±(2.5mm+1ppm)Rms、高程±(5mm+1ppm)Rms，而RTK精度可達平面±(8mm+1ppm)Rms、高程±(15mm+1ppm)Rms。



圖 3. 4 STONEX S3A 智慧型 RTK 之 GNSS 衛星接收器

(二)建立正射影像與數值地形

使用 UAV 航拍影像，搭配 Agisoft PhotoScan 影像處理軟體，製作河段的正射影像與數值地表模型(Digital Surface Model，DSM)。正射影像輸出之解析度可達 0.05 公尺，DSM 輸出之解析度可達 0.2 公尺，對於表面覆蓋判釋、地形特徵描述與土砂量變動已十分足夠。各試區受兩岸茂密的植生影響，使用 UAV 所產製的 DSM 僅能表現樹冠層的高度，但多數試區的河床開闊度佳且植生有限，因此 DSM 可精確描述河道與灘面的空間特徵。透過持續的河床地形監測，觀察工程前後其上下游面對颱洪事件的河床高程與沖淤變化。本計畫每個試區控制點數量視環境條件佈設約 4~10 不等，將不定期進行調查記錄，UAV 精度檢測成果每期隨機選取至少 4 點做為代表呈現，如表 3. 1。而表中所列之誤差值，由 UAV 拍攝每張照片中的影像座標與地面之控制點座標，相互交叉運算出的估計誤差量(cm)。精度檢測點位控制點位置示意圖詳見於表 2. 10~表 2. 15 中。

表 3. 1 UAV 精度檢測成果表

行政區	試區/日期	編號	TWD97_X	TWD97_Y	Z (m)	誤差		
						X (cm)	Y(cm)	Z(cm)
臺南市	關山九號橋後堀溪試 2024/02/06	1	2561521.195	207767.522	224.093	1.149	1.258	-0.704
		2	2561365.736	207373.318	219.888	-0.647	-0.916	1.333
		3	2561378.558	207321.231	220.005	-1.677	-0.318	-0.564
		4	2561603.799	207458.259	218.762	0.163	-0.305	-0.328
		5	2560968.147	206998.378	207.221	1.010	0.281	0.262
	關山九號橋後堀溪試 2024/08/13	1	2561673.363	207557.289	221.364	-0.036	-0.013	0.000018
		2	2561524.245	207433.783	218.479	0.057	-0.027	-0.027
		3	2561378.532	207321.241	219.944	-0.352	0.050	0.021
		4	2561365.723	207373.315	219.772	0.319	-0.033	0.013
		5	2560971.744	206998.261	208.447	0.023	0.118	-0.055
屏東縣	力里橋力里溪試區 2024/01/24	1	2480941.031	213687.62	149.833	-0.115	-0.289	-0.230
		2	2480906.105	213718.972	159.102	0.481	0.765	1.175
		3	2480869.198	213775.465	163.569	-0.258	-0.708	-1.089

		4	2480820.845	213780.272	164.533	-0.149	0.352	0.277
		5	2480764.304	213793.179	165.925	0.240	-0.375	-0.543
	力里橋力里溪試區2024/08/08	2	2480847.963	213749.015	166.696	0.386	-2.076	-0.038
		3	2480801.323	213789.571	160.158	-0.241	1.022	0.126
		5	2480909.318	213713.568	149.021	0.250	2.713	0.211
		6	2480926.67	213718.697	143.332	-0.395	-1.659	-0.295
	力里橋力里溪試區2024/10/14	1	2480820.352	213779.857	164.205	-1.806	-1.467	0.378
		2	2480867.099	213771.976	163.687	0.030	0.209	0.649
		3	2480847.94	213749.002	166.709	2.687	1.546	-1.405
		4	2480906.103	213718.975	159.211	1.084	-0.380	1.562
		5	2480914.797	213728.844	155.343	-1.244	0.174	-0.441

1. 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

關山九號橋後堀溪試區上、下游皆有一座調整型橫向構造物，上游為堤尾工(調整式封閉型固床工)於 2017 年 7 月 27 日竣工，而下游為調整型孔隙式防砂壩於 2023 年 5 月 29 日竣工，上、下游橫向構造物間距離約 850 公尺。2024 年經歷 6 月數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi），上游為堤尾工(調整式封閉型固床工)於凱米颱風期間，洪水水位上升並漫淹至複式漿砌石護岸之洪峰水位高。而下游調整型孔隙式防砂壩之壩體左岸預鑄橫樑在洪水的沖刷下被沖翻，此外，根據當地居民的描述，洪水不僅淹至左岸防砂壩，還淹及右岸的道路。

於計畫執行期間現地調查，上、下游橫向構造物上游皆屬於幾乎淤滿狀態，繪製 2024 年 2 月 6 日、2024 年 8 月 13 日之正攝影像、地形及河床沖淤變化圖(圖 3. 5 及圖 3. 6)，歷經今年度之豪雨事件後，

上游為堤尾工(調整式封閉型固床工)之上游凹岸處於 2024 年 2 月 6 日有明顯高灘地淤積情況，凱米颱風經洪水沖刷，高程變化可達 4.65 公尺，而距上游為堤尾工上游 180 公尺處，淤積程度約 3.32 公尺，距上游為堤尾工上游 30 公尺處，淤積程度約 2.87 公尺，距上游為堤尾工下游 30 公尺處，淤積程度約 3.22 公尺，可看出凱米颱風期間洪水擾動之情況。

上、下游橫向構造物間有明顯高灘地，其上方植生生長茂密，於凱米颱風期間，靠近上游側植生於洪水期間，有大面積倒伏情況。

下游為調整型孔隙式防砂壩，距壩上游面約 45 公尺處，淤積程度約 1.72 公尺，而距壩下游面約 40 公尺處，淤積程度約 3.4 公尺。

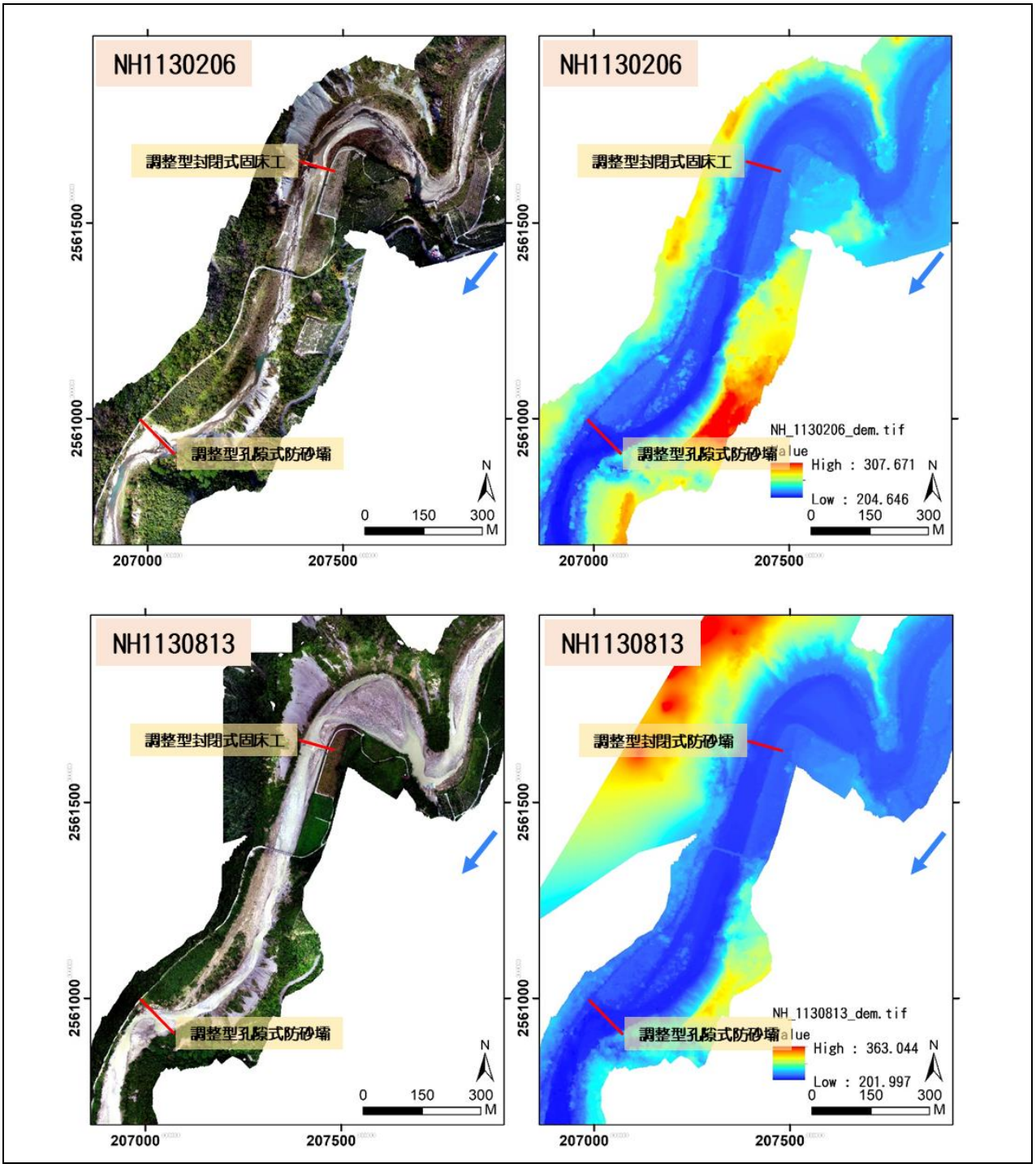
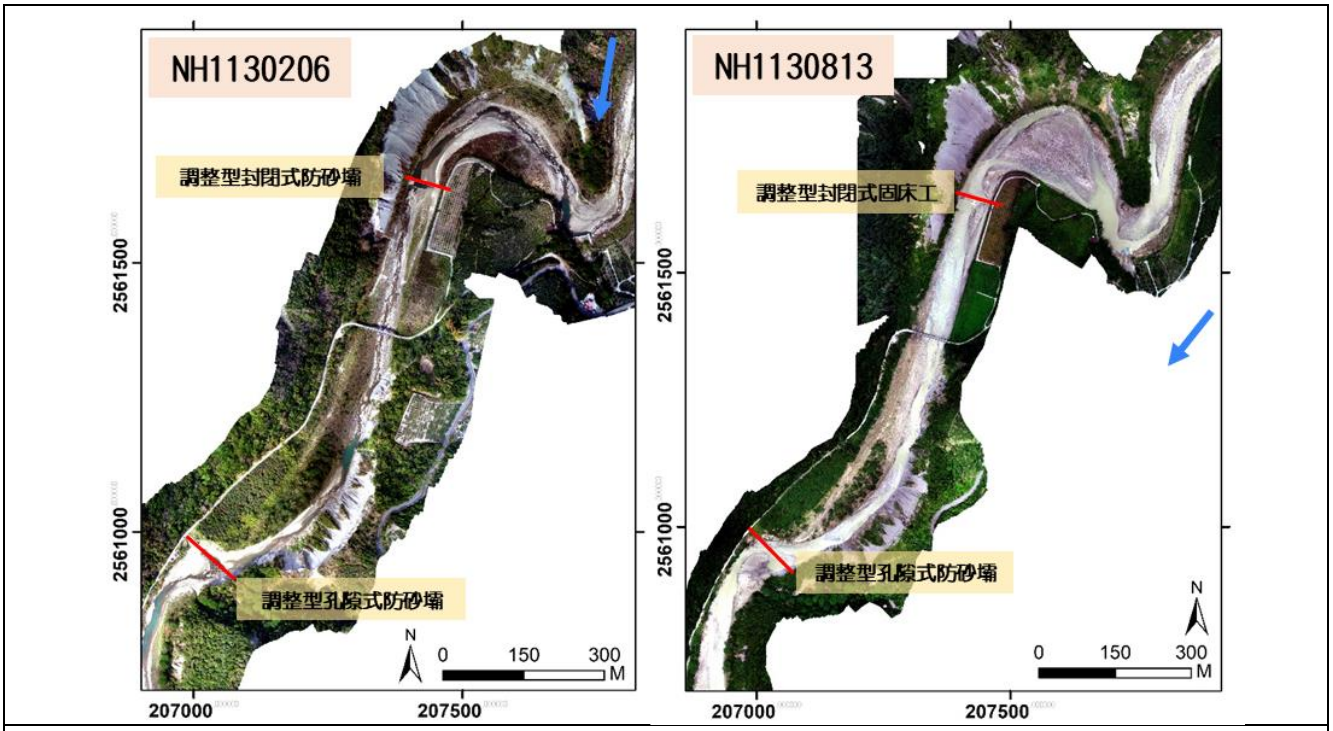


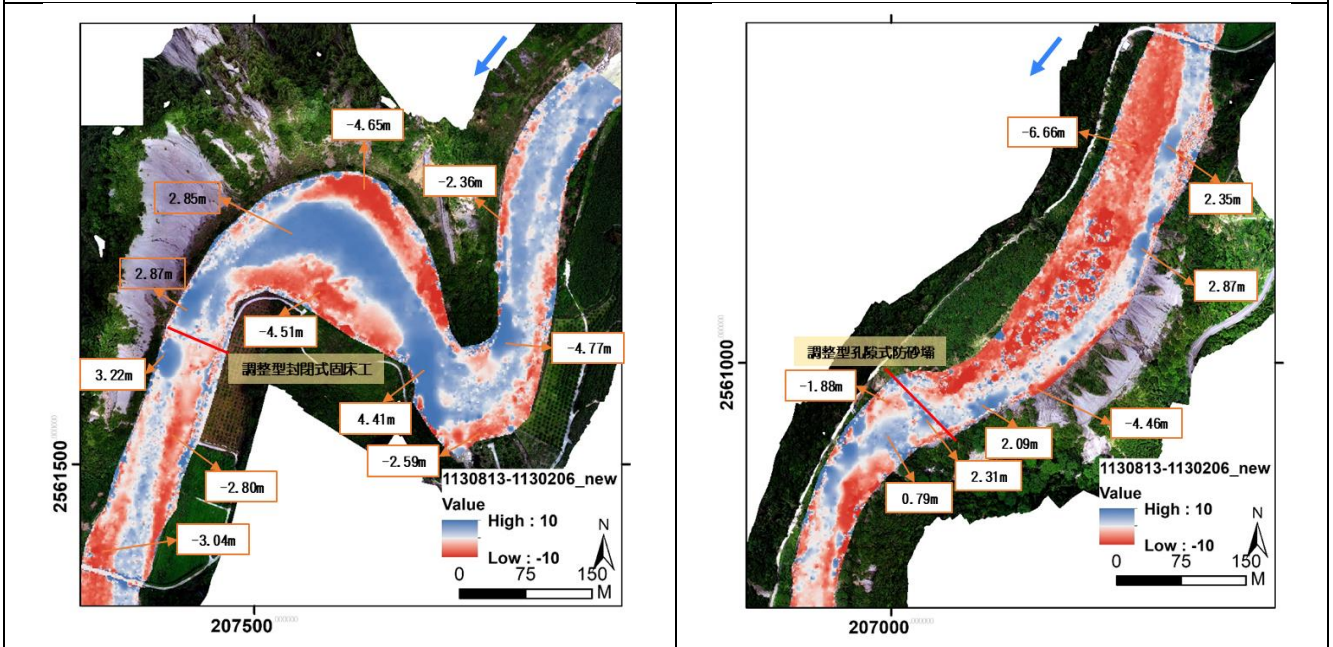
圖 3.5 關山九號橋後堀溪試區之 UAV 正攝影像及 DSM

凱米颱風後之土砂沖淤變化量之估算，由於河道中亦有茂密植生擾動，故計算出之量體包含植生變化所造成的誤差，故僅供參考。土砂沖淤變化範圍中，土砂淤積量達 86,804.54 立方公尺，土砂沖刷量達 120,203.94 立方公尺。以關山九號橋為分界，分別以上游、下游進

行土砂沖淤變化之呈現，沖刷區多有植生擾動情況，而河道中水流區多有土砂淤積情況，其土砂變化詳見圖 3.6。亦可透過正射影像瞭解河道中植生分布受洪水沖刷後之變化情況。



河道中植生分布情況



以關山九號橋為分界之上游段沖淤變化　　以關山九號橋為分界之下游段沖淤變化

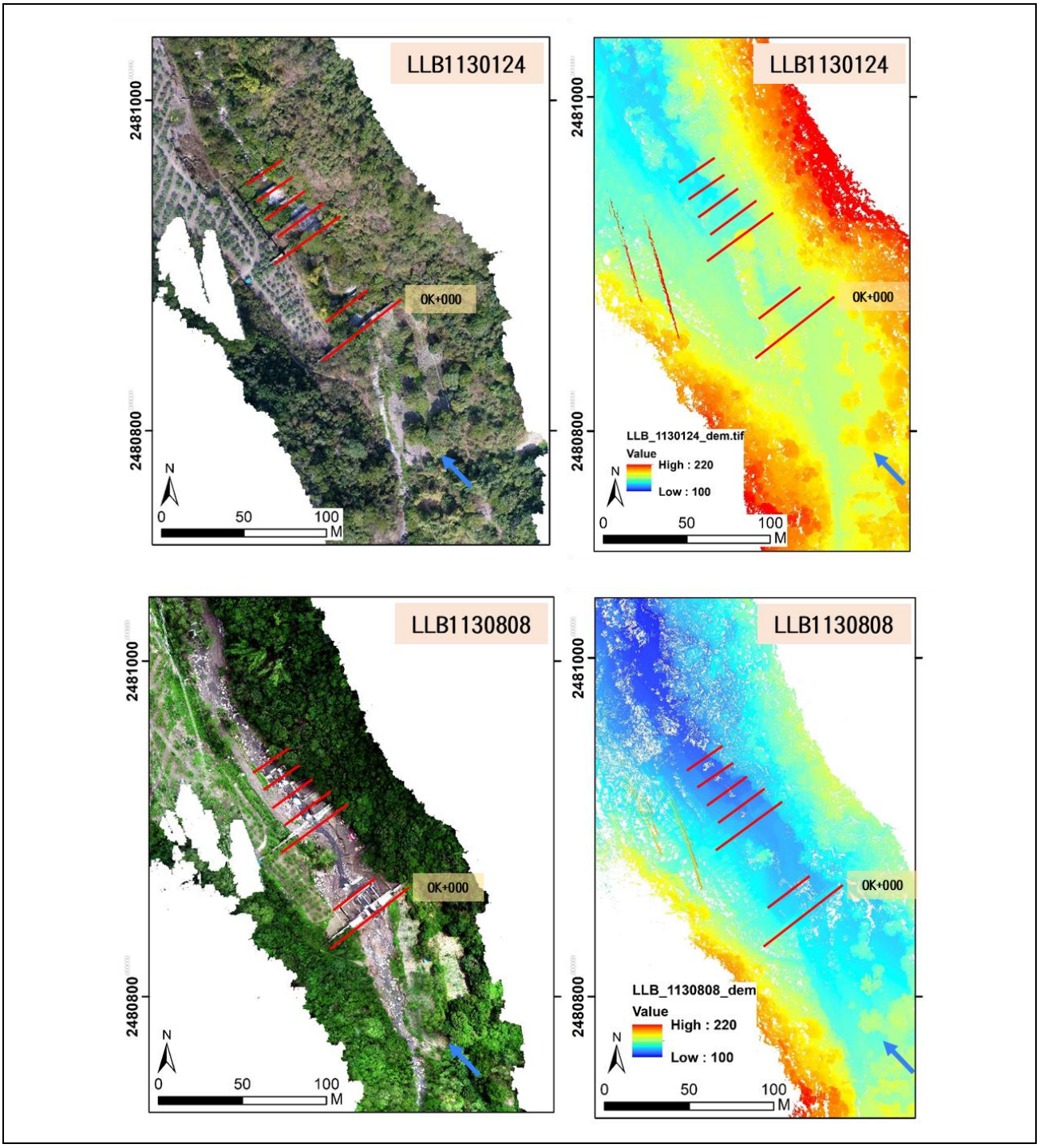
圖 3.6 關山九號橋後堀溪試區之河道沖淤變動

2. 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

力里溪整治段的七支防砂壩興建於 1985 年，壩體間的落差非常大且上游土砂淤積嚴重。「力里橋上下游野溪整治工程」將力里溪流心向右岸偏移，以避免影響左岸芒果園之虞，降低壩體中間高度，形成複式斷面，讓上游土砂得以下移。2024 年 1 月 24 日現地調查時力里橋力里溪試區之研究範圍共有七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)，目前皆為已淤滿狀態，上游已無庫容，河床面淤升處於阻斷水流呈現伏流水狀態。潛在威脅為既有構造物多處磨損，下游橫向構造物基礎淘刷，縱橫向生態阻隔等。「力里橋上下游野溪整治工程」於 2024 年 2 月 19 開工，預計於 2424 年 11 月完工。

2024 年經歷 6 月的數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi），由於凱米颱風前尚於工程施工階段，而 0K+000 既有防砂壩下游之透水性護坦工程尚未完工，颱風後遭受洪水沖刷以致傾斜破損，工程單位已隨即進行相關補修作業中。2.0K+000 既有防砂壩已調降溢洪口並安裝橫向 H 型鋼，颱風後有效攔阻土砂及漂流木。

於計畫執行期間現地調查，繪製 2024 年 1 月 24 日、2024 年 8 月 8 日及 2024 年 10 月 14 日之正攝影像、地形及河床沖淤變化圖(圖 3. 7 及圖 3. 8)，施工過程中歷經 2024 年之豪雨事件，以 1 月 24 日原始地形與 10 月 14 日施工過程相比，相關地形變化多屬於施工擾動、植生擾動等相關變化(圖 3. 8)。


LLB1130124
0K+000
2481000
2480800
N
0
50
100
M
LLB1130124
0K+000
LLB_1130124_dem.tif
Value
High : 220
Low : 100
LLB1130808
0K+000
LLB1130808
0K+000
LLB_1130808_dem
Value
High : 220
Low : 100

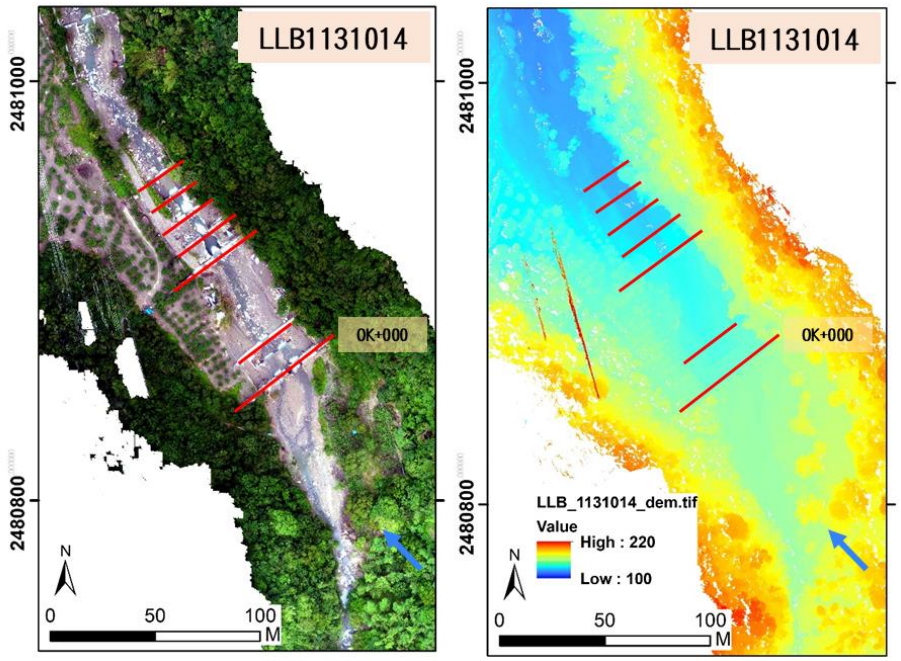


圖 3.7 力里橋力里溪試區之 UAV 正攝影像及 DSM

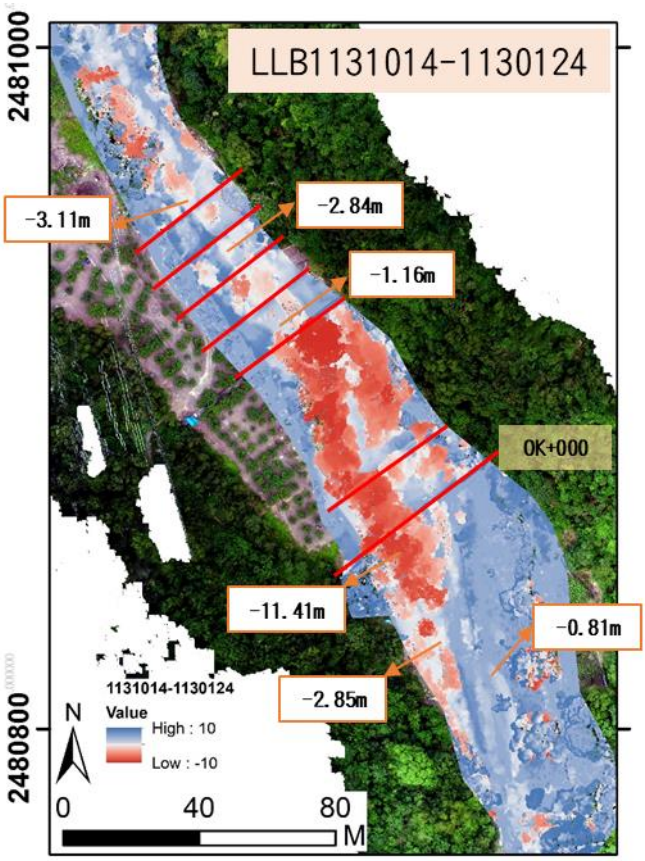


圖 3.8 力里橋力里溪試區之河道沖淤變動

第二節 參考水砂觀測站資料建立動態調整前後之數值模擬，探討可能之沖淤變動及河道演變趨勢。

在土石流流動路徑上設置橫向構造物(transversal structures)，用以降低流速與動能，並將土石攔阻堆積壩後，過去常採用封閉式防砂壩(Close-type check dam)，封閉式防砂壩在未淤滿前用以攔截土砂與抑制土石流，淤滿後之防砂壩仍可以減緩上游溪流之坡度，降低河道沖蝕能力。但由於無選擇性完全攔阻泥砂，封閉式防砂壩無論是否淤滿，都造成嚴重地上下游水砂不平衡(Jaeggi and Pellandini, 2007; Sodnik et al., 2015)，當防砂壩淤滿後更形成上淤下刷的地形特徵，除對下游基礎設施造成重大淘刷外對生態連續性更嚴重破壞。

為考慮上下游土砂平衡，自 1980s 開始許多研究聚焦於開放式防砂壩之設計(Watanabe et al., 1980; Senoo and Mizuyama, 1984; Mizuyama et al., 1988; Johnson and McCuen, 1989; Armanini and Larcher, 2001; Osanai et al., 2010; Piton and Recking, 2016)，為了解決上下游輸砂不連續的問題，Chiu et al. (2021) 提出防砂壩調整程序，用於調節沉積物運輸。同時過去許多文獻探討開放式防砂壩縱材**相對間距**(b/d_{max}，b =壩柱間距、d_{max} =最大粒徑)對壩體囚砂之效益(Watanabe et al., 1980; Ikeya and Uehara, 1980; Mizuyama et al., 1988; Johnson and McCuen, 1989)。Mizuyama et al. (1988)建議梳子壩縱材相對間距設計應在 1.5~2.0 之間距；Johnson and McCuen (1989)提出縱材相對間距為影響梳子壩的截留或調節土砂功能之重要參數。Shima et al. (2016) 透過現場調查指出當相對間距低於 1.5，梳子壩容易被土石流中之顆粒物質填滿，從而導致攔阻效益(trapping capacity)下降。

由上述可知防砂壩間距改變影響所釋放之泥砂多寡，亦對上下游地形與土砂平衡具有關鍵作用。因此，本計畫將參考水砂觀測站資料，利用數值模式 RiverFlow2D 對壩體調整前後狀況進行模擬，藉以探討可能之沖淤變動及河道演變趨勢。

(一)土砂運移模式介紹

本計畫選用 RiverFlow2D 作為數值模模擬工具，為有限體積所建構之模式，模式中已包含河床模擬中各項元素套件，例如水文、水理、土砂運移動床、汙染物傳輸等，可以處理各種流況，包括亞臨界與超臨界流，並擁有 GPU 高速處理模組，其優點為擁有高分辨率和卓越的速度、穩定性和準確性，並以精度高之特點獲得美國聯邦公路局（FHWA）的認可。RiverFlow2D 可使用非結構性(三角形)網格對於解析流場的關鍵特徵更加容易，非結構性網格對於河道中結構物地形變化具有較佳的解析能力。而模式中可設定初始水位或乾河床，亦可運用於不同水工結構造及複雜的地形水文事件。RiverFlow2D 結合 QGIS 介面，使用上清楚明瞭且操作友善，其具有土石流、泥砂運移、破壩溢堤等模組，提升模式的多元應用。

RiverFlow2D 泥砂運移模組為研究流動的水和泥砂顆粒之間的相互關係，其中泥砂(泥砂運移模組)又包含懸浮質(suspended sediment)與推移質(bed load sediment)，其控制 RiverFlow2D 的沖淤變化，兩者可以都選擇，也可以只挑選其中一個。模式提供十種不同的泥砂傳輸公式，如: Meyer-Peter & Mueller (1948)、Parker fit to Einstein (1979)、Nielsen (1992)、Wong1 等，該模式可將泥砂與清水的流動特性良好地預測，準確模擬緩慢與快速演變的河床變化，且能模擬流速、水深等，

以此推測合理的動床歷程(Hydronia, 2021)，模式內懸浮載沉降與推移載輸砂公式如表 3. 2 與表 3. 3，土石流(mud flow)或尾礦流(tailings flow)的流動為不穩定現象且變化迅速，其特性通常為非牛頓流體，擁有停走機制，整體阻力取決於不同來源的剪應力。土石流模組採用的數學模型基於 Murillo & Garcia-Navarro (2012)的模型，考慮了從清水到體積濃度高之混合物的自由表面流動河床和內摩擦力，提供八種不同的流變公式包括：Turbulent、Full Bingham、Simplified Bingham、Turbulent and Coulomb、Turbulent and Yield、Turbulent, Coulomb and Yield、Quadratic、Granular Material 等如表 3. 4。

表 3. 2 變阻抗公式(Hydronia LLC., 2021)

公式	流體阻力計算	輸入參數
紊流	$\tau_b = \tau_t$	曼寧n
完全實漢	$\tau_b = \tau_0$ with $2\tau_0^3 - 3(\tau_y + 2\mu q/h^2)\tau_0^2 + \tau_y^3 = 0$	實漢黏滯度、降伏應力、密度
簡單實漢	$\tau_b = 1.5\tau_y + 3\tau_\mu, \tau_\mu = \mu q/h^2$	實漢黏滯度、降伏應力、密度
紊流與庫倫	$\tau_b = \tau_t + \tau_f$	曼寧n、摩擦角度、密度
紊流與降伏	$\tau_b = \tau_t + \tau_y$	曼寧n、降伏應力
紊流、庫倫與降伏	$\tau_b = \tau_t + min\left(\tau_y, \tau_f\right)$	曼寧n、降伏應力、摩擦角度、密度
二次方程Quadratic	$\tau_b = \tau_t + \tau_y + \frac{\kappa}{8}\tau_\mu$	曼寧n、降伏應力、密度
顆粒材質	$\tau_b = \tau_f = g\rho h\cos\theta\tan\theta_b$	曼寧n=0、、摩擦角度

表 3. 3 沉降速度公式(Hydronia LLC., 2021)

FORMULA 公式	沉降速度 ω_s	OBSERVATIONS 觀測參數
Rubey (1933)	$\omega_s = F\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d_s}$	If $d_s > 1$ mm, $F = 0.79$, otherwise $F = \left(\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g d_s^3(\rho_s/\rho_w - 1)}\right)^{0.5} - \left(\frac{36\nu^2}{g d_s^3(\rho_s/\rho_w - 1)}\right)^{0.5}$
Zhang (1961)	$\omega_s = \sqrt{\left(13.95\frac{\nu}{d_s}\right)^2 + 1.09\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d_s} - 13.95\frac{\nu}{d_s}$	Valid for a wide range of d_s
Zanke (1977)	$\omega_s = 10\frac{\nu}{d_s}\left[\left(1 + 0.01\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)\frac{g d_s^3}{\nu^2}\right)^{0.5} - 1\right]$	
Van Rijn (1984)	$\omega_s = \left(\frac{1}{18}\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g\frac{d_s^2}{\nu}\right)$	$d_s < 0.1$ mm
Raudkivi (1990)	$\omega_s = \left(\frac{(2/3)(\rho_s/\rho_w - 1) g d_s^2}{\nu} - 32\right)\frac{\nu}{1.2 d_s}$	$d_s > 1$ mm
Julien (1995)	$\omega_s = \left(\frac{(2/3)(\rho_s/\rho_w - 1) g d_s^2}{\nu} - 24\right)\frac{\nu}{1.5 d_s}$	
Cheng(1997)	$\omega_s = \frac{\nu}{d_s}\left(\sqrt{25 + 1.2 D_*^2} - 5\right)^{1.5}$	$D_* = d_s\left(\left(\rho_s/\rho_w - 1\right) g/\nu^2\right)^{1/3}$
Jiménez-Madsen (2003)	$\omega_s = (C_1 + C_2 S_*)\sqrt{(s-1) g d_s}$	C_1, C_2 and S_* as in Jiménez-Madsen
Wu-Wang(2006)	$\omega_s = \frac{M\nu}{N d_s}\left(\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{4N}{3M^2} D_*^3\right)^{1/n}} - 0.5\right)^n$	M, N and n as in Wu and $D_* = d_s\left(\left(\rho_s/\rho_w - 1\right) g/\nu^2\right)^{1/3}$

表 3. 4 輸砂公式(Hydronia LLC., 2021)

公式	Φ	參數
Meyer-Peter & Mueller (1948)	$8\left(\theta-\theta_c\right)^{3/2}$	d_{50},θ_c,ρ_s
Ashida Michiue (1972)	$17\left(\theta-\theta_c\right)\left(\sqrt{\theta}-\sqrt{\theta_c}\right)$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Engelund and Fredsøe (1976)	$18.74\left(\theta-\theta_c\right)\left(\sqrt{\theta}-0.7\sqrt{\theta_c}\right)$	d_{50}, θ_c,ρ_s
Fernandez-Luque and van Beek (1976)	$5.7\left(\theta-\theta_c\right)^{3/2}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Parker fit to Einstein (1979)	$11.2\left(1-\theta/\theta_c\right)^{9/2}$	d_{50},θ_c,ρ_s
Smart (1984)	$4\left(d_{90}/d_{30}\right)^{0.2} S_0^{0.6} C\theta^{1/2}\left(\theta-\theta_c^s\right)$	d_{30},d_{50}, d_{90}, θ_c, θ_c^S, ρ_s
Nielsen (1992)	$12\theta^{1/2}\left(\theta-\theta_c\right)$	d_{50}, θ_c,ρ_s
Wong	$4.93\left(\theta-\theta_c\right)^{1.6}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Wong	$3.97\left(\theta-\theta_c\right)^{3/2}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Camenen-Larson	$12\theta^{3/2} exp\left(-4.5\theta_c/\theta\right)$	d_{50}, θ_c, ρ_s

(二)壩體調整前後模擬

本計畫為模擬臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區之壩體調整前後地形變化，反映構造物周邊地形，模擬使用非結構性的三角網格(圖 3. 9 至圖 3. 11)，圖中為關山九號橋後堀溪試區網格建置，採用三角網格可依各種構造物周邊流況設定大小尺寸。因此，為分析防砂壩結構物周邊變化，將網格分為數層建置，其中外層高灘地最大網格尺寸為 10 公尺，深層流路網格加密至 2 公尺，防砂壩構造物開口周邊加密至 0.1 公尺，圖中可看出防砂壩開口網格極密細緻變化。起始地形 DEM 採用 113 年 02 月 06 日攝製。

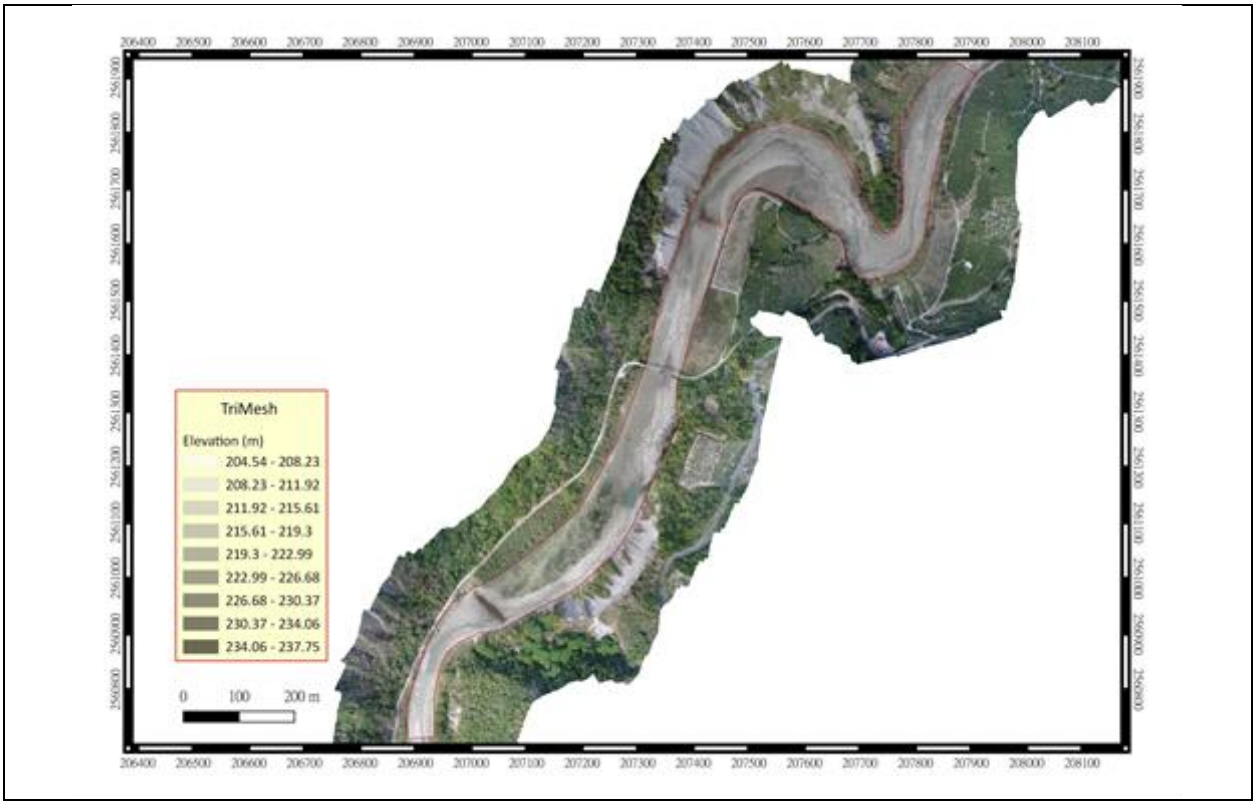


圖 3. 9 關山九號橋後堀溪試區數值模擬網格圖



圖 3. 10 關山九號橋上游壩數值模擬網格圖

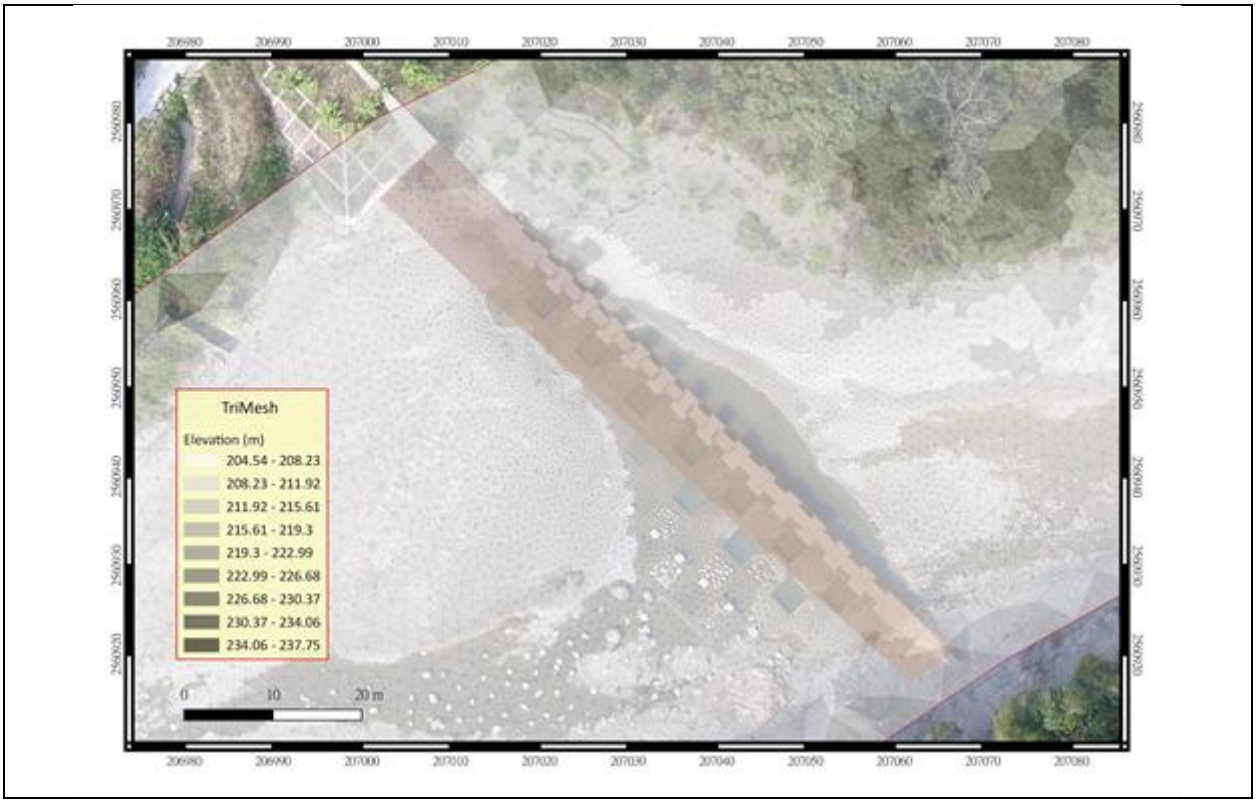


圖 3. 11 關山九號橋下游壩數值模擬網格圖

利用 RiverFlow2D 模擬整體流程如圖 3. 12，上游流量邊界分別採用高流量與常流量兩種進行模擬，流量設定如表 3. 5，高流量參考中興顧問社 113 年 7 月 24 日於關山九號橋測得洪峰流速約 2.26 m/s，水深約 2.96 公尺，經計算斷面積推估得洪峰流量約 250 cms，體積濃度給定則由 7 月 24 日測得最大濃度 3,554.427 mg/L；常流量設置為 2 cms；下游邊界則採用開放邊界之方式進行建置。模擬水理輸砂各項參數設定如表 3. 6，此河段底床多為卵礫石，曼寧粗糙係數設置為 0.035，土砂顆粒密度為 2,650(kg/m^3)，底床推移質中值粒徑參考調查資料設置為 0.11 m，孔隙度為 0.4，摩擦角度為 25°。

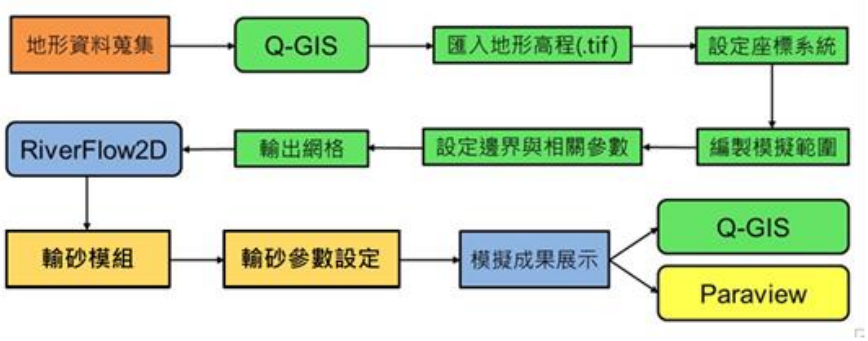


圖 3. 12 數值模擬流程圖

表 3. 5 關山九號橋後堀溪試區模擬邊界條件設定值

邊界	流量	模擬時間
常流量	2 cms	3 小時
高流量	250 cms	1 小時 48 分鐘

表 3. 6 關山九號橋後堀溪試區模擬參數設定值

參數	數值
曼寧粗糙係數 n	0.035
土砂顆粒密度 density(kg/m^3)	2650
推移質中值粒徑 D_{50} (m)	0.11
懸浮質中值粒徑 D_{50} (m)	0.00015
孔隙度 porosity	0.4
摩擦角度 friction angle (°)	25

關山九號橋上下游壩常流量水深流速模擬結果如圖 3. 13 與圖 3. 14，圖中黑色箭頭為流速大小與方向，藍色圖塊為水深，水深為 0 則不顯示顏色，結果得知常流量流路主要為溪流深槽，上游壩流路沿壩體右側開口流出，開口處下游流速約 1.3 m/s；下游壩流路沿壩體左側第 1 個開口流出，開口處下游流速約 1.22 m/s，其他區域主要為漫流影響。高流量水深流速模擬結果如圖 3. 15 與圖 3. 16，圖中紅色箭頭為流速大小與方向，藍色圖塊為水深，水深為 0 則不顯示顏色，結果得知高流量狀況下，上游壩主要流路接近河心偏右並越過防砂壩體，壩體下游主流接近右岸，流速最高約 3.3 m/s，部分漫流至左岸；下游壩主要流路接近河心偏左並越過防砂壩體，流速最高約 2.9 m/s，壩體下游可看出明顯迴水與渦流現象，流速最高約 0.8 m/s，並向右岸擴張。高流量底床地形變化如圖 3. 17 與圖 3. 18，圖中可看出壩體開口下游區域為淤積狀態，上游壩淤積約 2.6 公尺，下游壩淤積約 1 公尺。

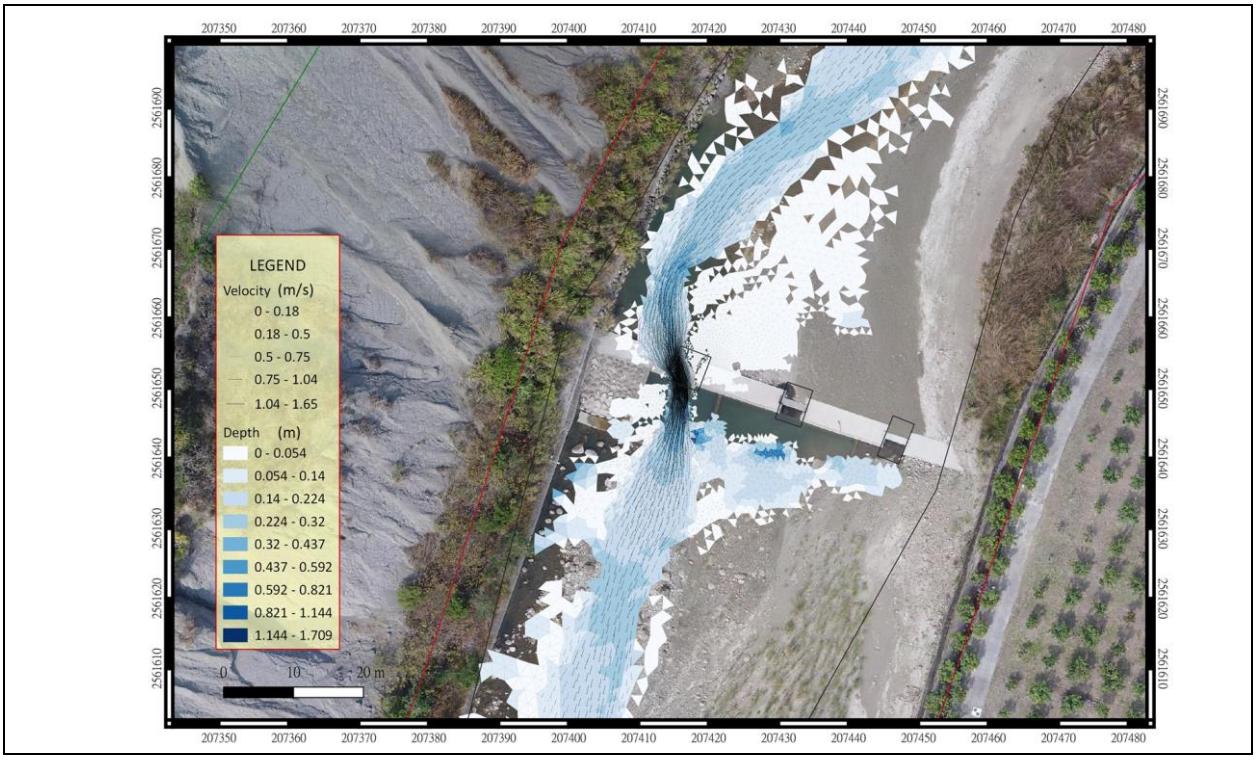


圖 3. 13 關山九號橋上游壩常流量數值模擬流速水深圖

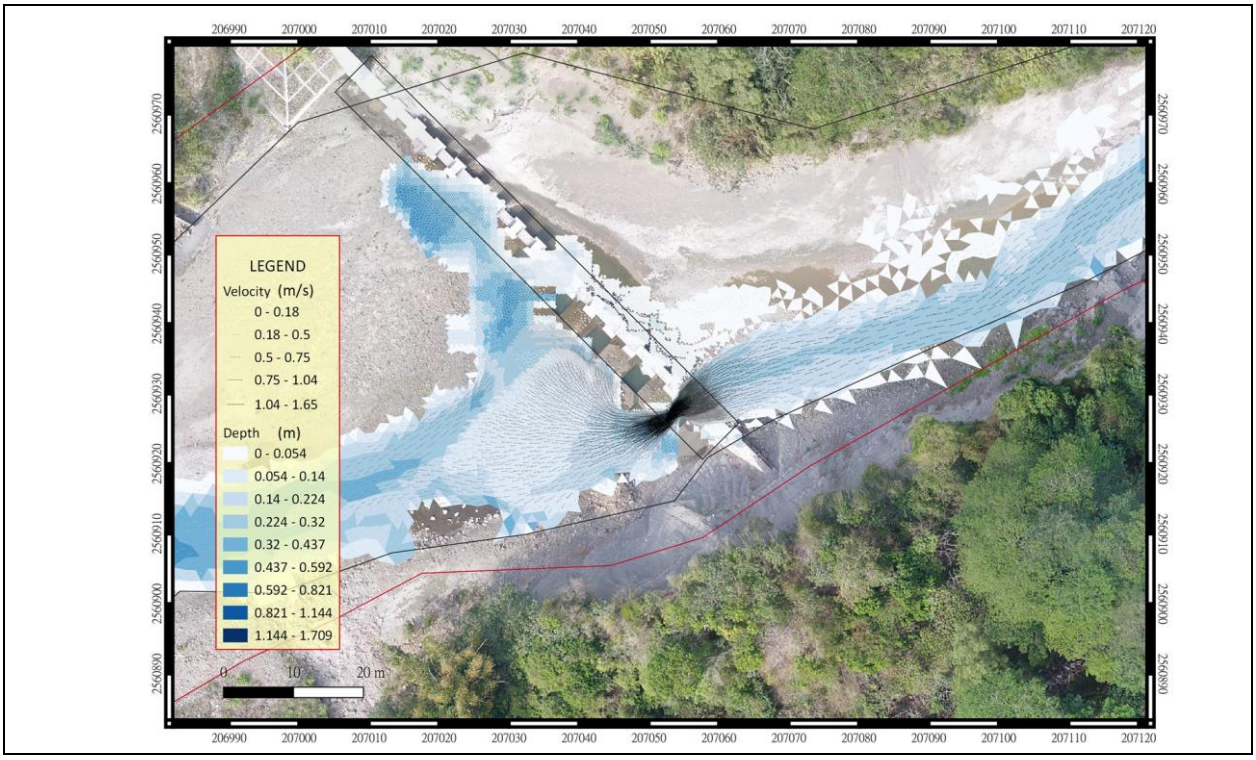


圖 3. 14 關山九號橋下游壩常流量數值模擬流速水深圖

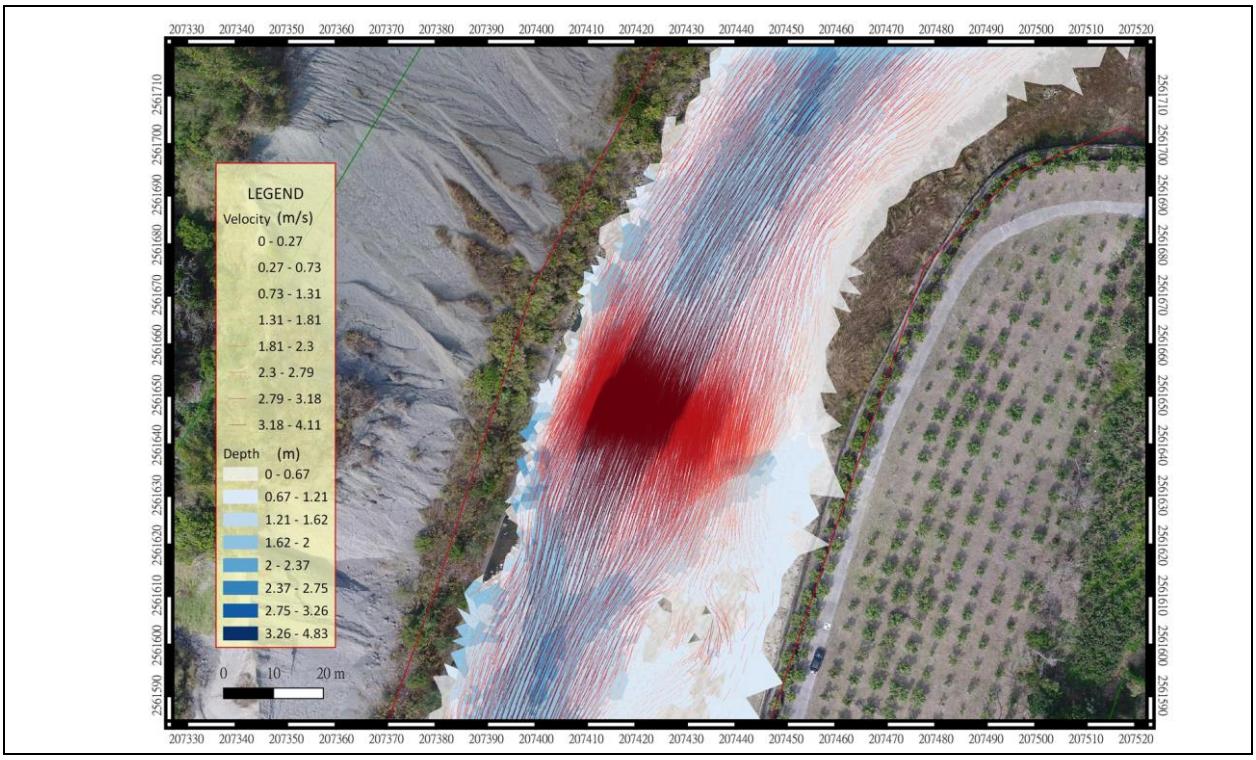


圖 3. 15 關山九號橋上游壩高流量數值模擬流速水深圖

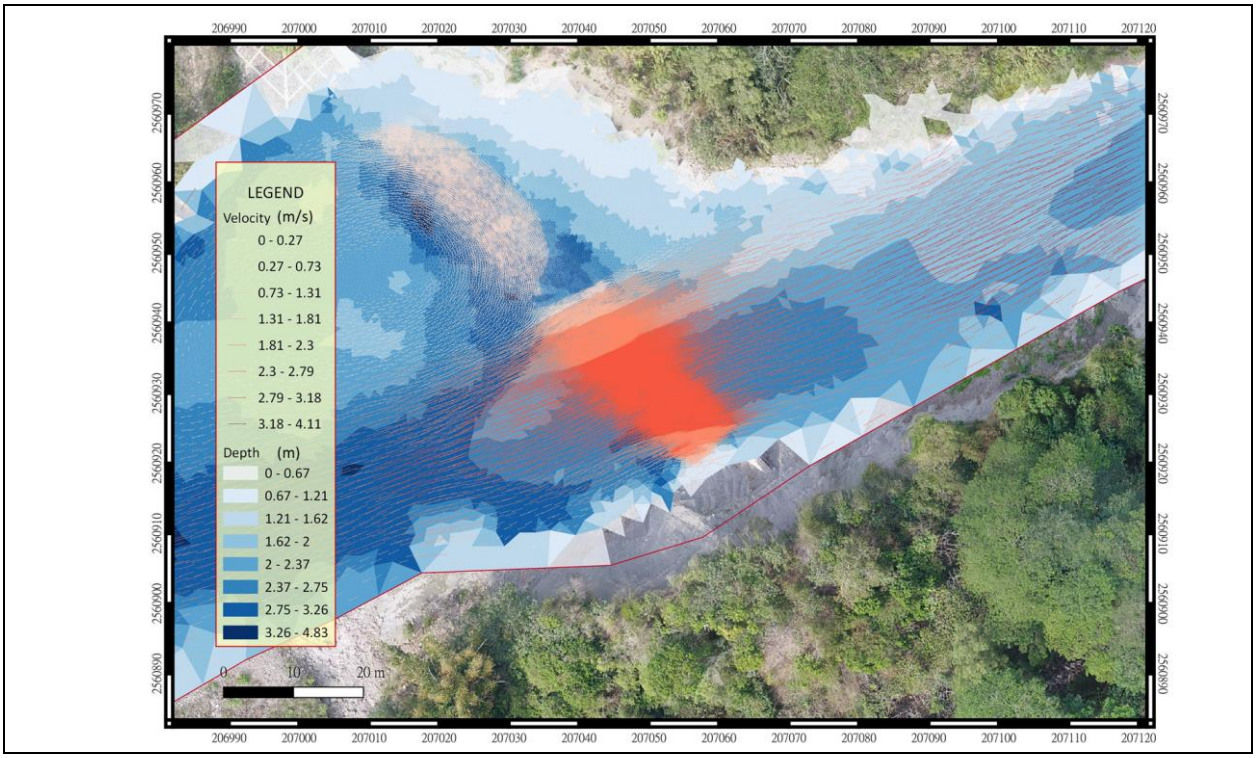


圖 3. 16 關山九號橋下游壩高流量數值模擬流速水深圖

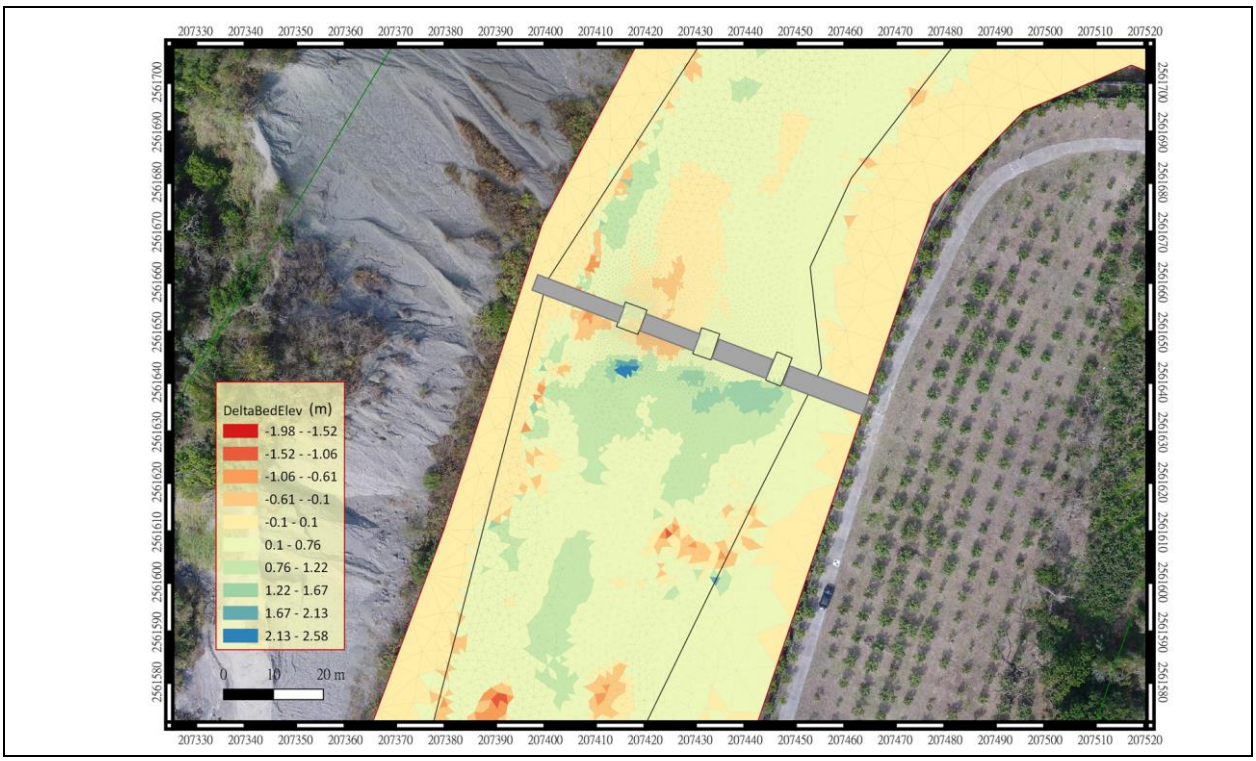


圖 3. 17 關山九號橋上游壩高流量數值模擬底床地形變化圖

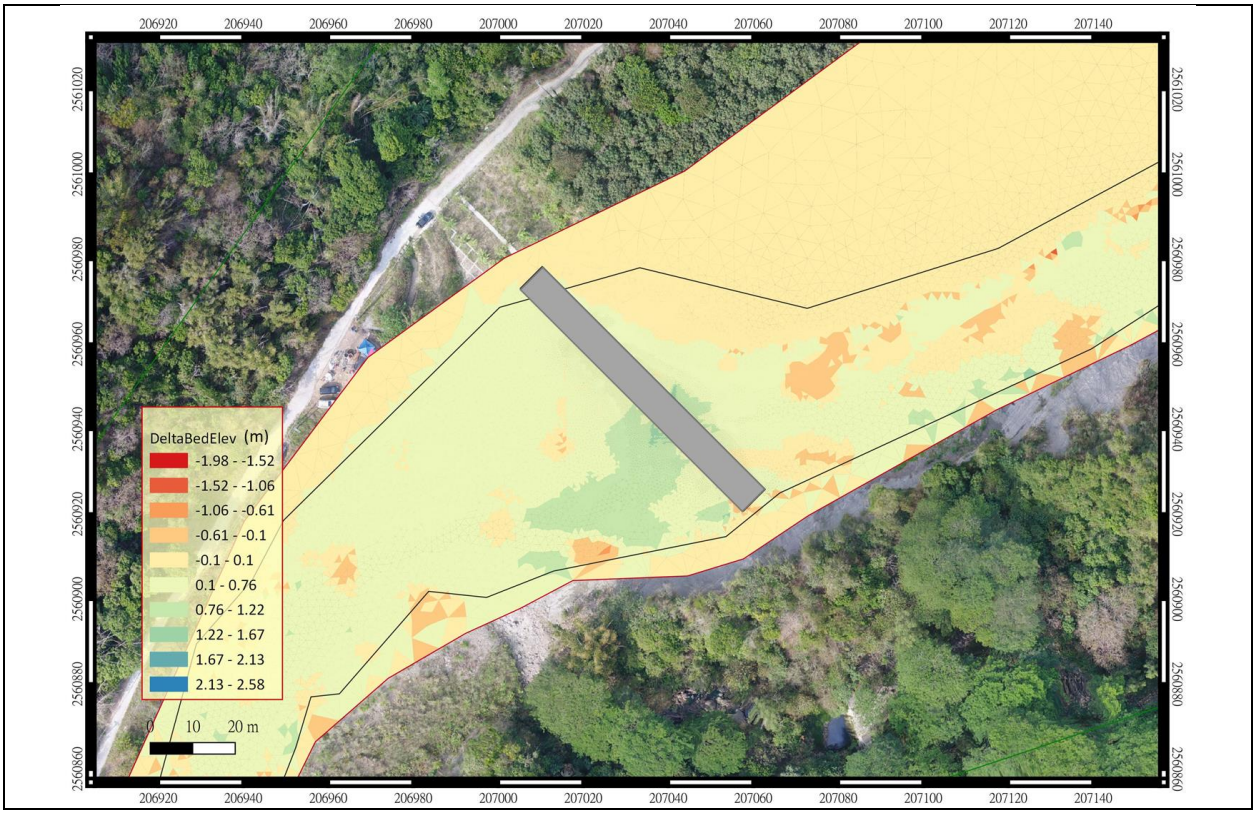


圖 3. 18 關山九號橋下游壩高流量數值模擬底床地形變化圖

(三)壩體調整前後模擬

關山九號橋後堀溪試區疏濬後網格建置如圖 3. 19 與圖 3. 20，採用三角網格並依各種構造物周邊流況設定大小尺寸，將網格分為數層建置，其中外層高灘地最大網格尺寸為 10 公尺，深層流路網格加密至 2 公尺，防砂壩構造物開口周邊加密至 0.1 公尺。模擬起始地形 DEM 採用 113 年 02 月 06 日攝製，並依防砂壩開口與上游疏濬處調整地形，由圖 3. 19 中可看出上游壩為使流路置中，由中間開口向上游疏濬，圖 3. 20 中顯示下游壩上游右岸高灘地分流，並於壩後 40m 處匯流至主流。



圖 3. 19 關山九號橋上游壩疏濬後數值模擬網格圖



圖 3. 20 關山九號橋下游壩疏濬後數值模擬網格圖

疏濬後關山九號橋上下游壩常流量水深流速模擬結果如圖 3. 21 與圖 3. 22，圖中黑色箭頭為流速大小與方向，藍色圖塊為水深，水深為 0 則不顯示顏色，結果得知常流量流路主要為溪流深槽，上游壩流路接近河心沿壩體中央開口流出，開口處下游流速約 0.8 m/s，開口處上游流速約 1.2 m/s，上游最大水深約 0.9m；下游壩分流匯流處流速約 0.6 m/s，匯流後流路沿壩體各開口流出，因下游右岸淤積，主流偏向左岸，開口處下游流速約 0.9 m/s。

疏濬後高流量水深流速模擬結果如圖 3. 23 與圖 3. 24，圖中紅色箭頭為流速大小與方向，藍色圖塊為水深，水深為 0 則不顯示顏色，結果得知高流量狀況下，上游壩主要流路接近河心並越過防砂壩體，壩體下游主流接近右岸，流速最高約 2.9 m/s，部分漫流至左岸；下游壩上游分流匯流處流速約 3.2 m/s，匯流後主要流路接近河心偏左並越過防砂壩體，壩體下游流速約 2.9 m/s，受上游匯流影響，部分流路偏向右岸並於下游 50 公尺處匯流。最後將疏濬前後上/下游壩流

速水深結果彙整於**錯誤! 找不到參照來源。**，並分為壩體上/下游區域，由結果可知高流量下上游壩疏濬後流速變小，水深變深，而下游壩因上游新增右岸流路，降低洪峰水流遲滯，因此流速變大，水深變深。

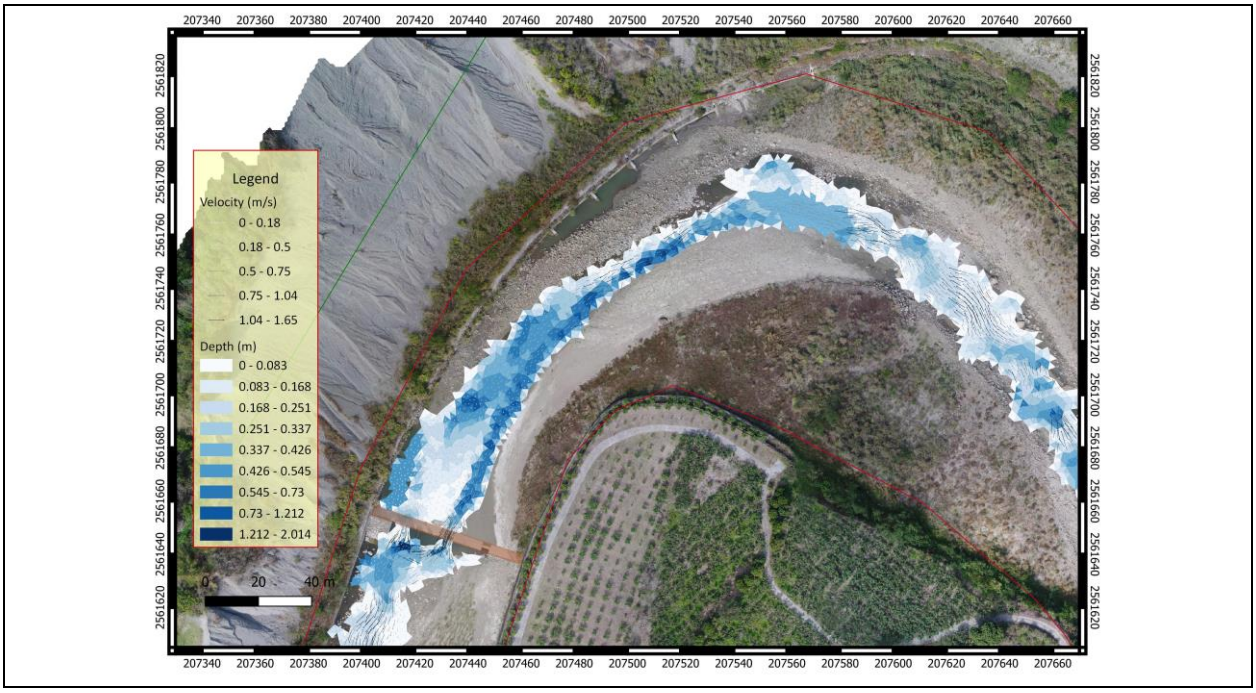


圖 3. 21 關山九號橋上游壩疏濬後常流量數值模擬流速水深圖



圖 3. 22 關山九號橋下游壩疏濬後常流量數值模擬流速水深圖

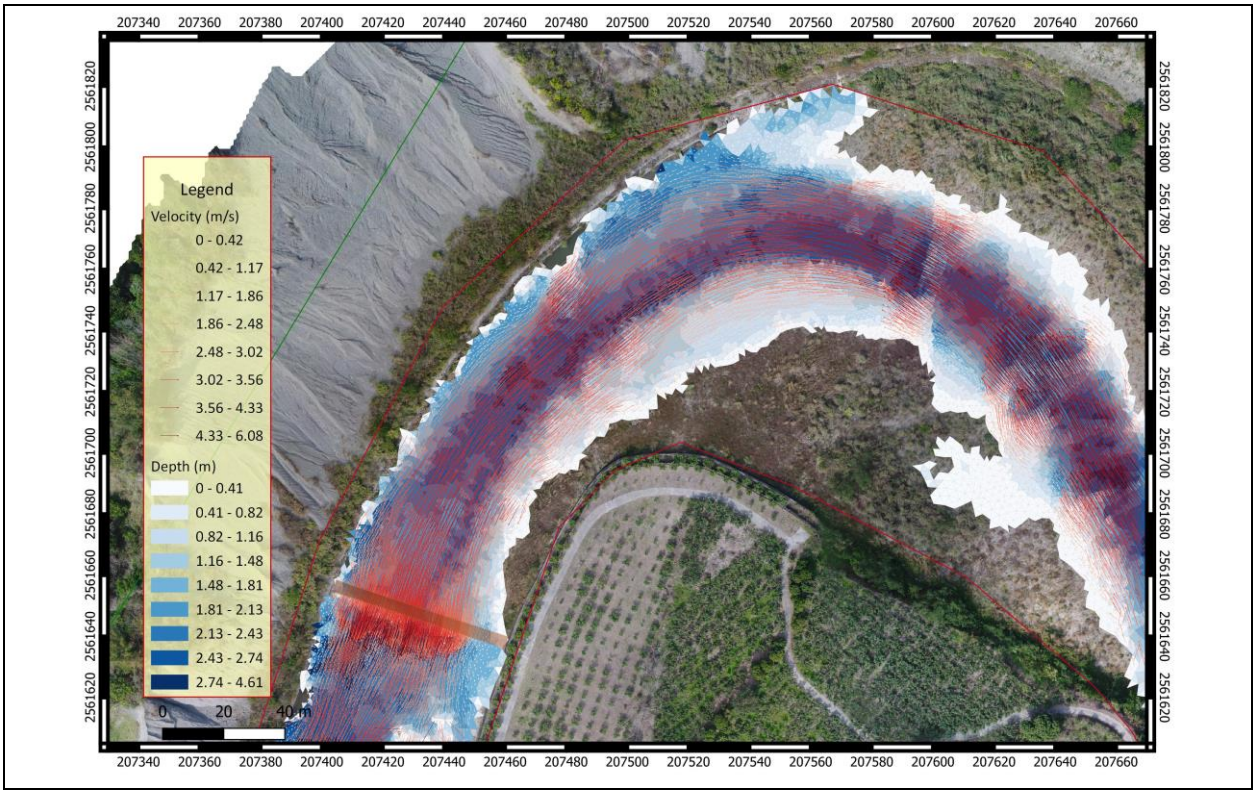
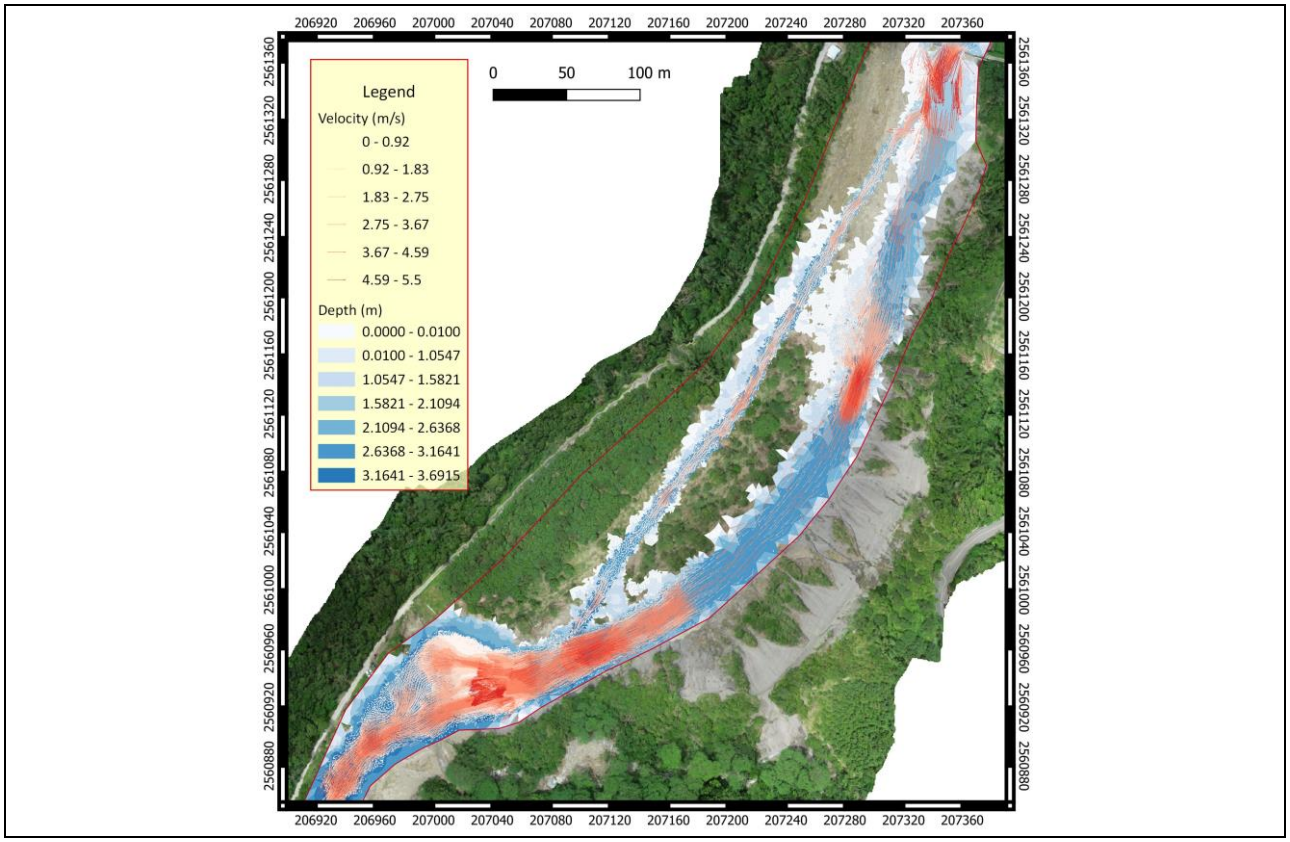


圖 3. 23 關山九號橋上游壩疏濬後高流量數值模擬流速水深圖



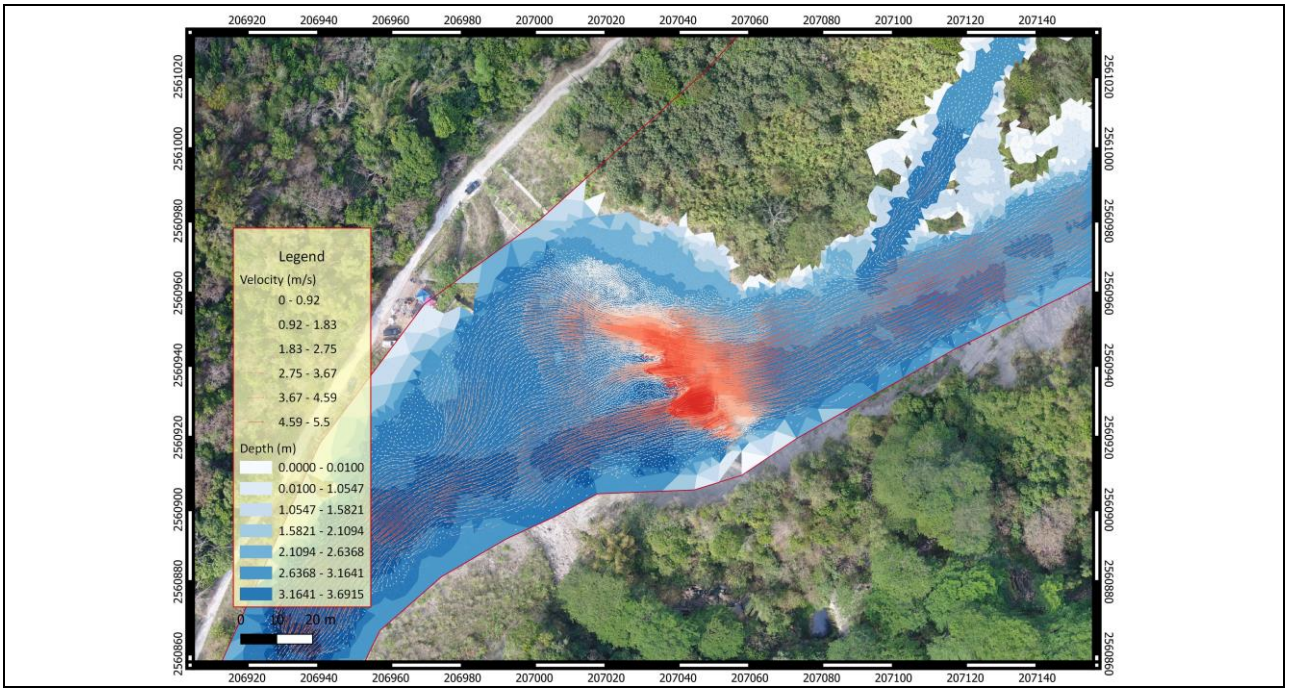


圖 3. 24 關山九號橋下游壩疏濬後高流量數值模擬流速水深圖

表 3. 7 關山九號橋後堀溪試區模擬結果流速水深表

高流量下	疏濬前/後	位置	流速 (m/s)	水深 (m)
上游壩	疏浚前	上游	3.2	2.0
		下游	3.3	1.75
	疏濬後	上游	2.8	2.2
		下游	2.9	1.77
下游壩	疏浚前	上游	2.1	2.5
		下游	2.9	3.5
	疏濬後	上游	3.2	2.8
		下游	2.9	3.6
常流量下	疏濬前/後	位置	流速 (m/s)	水深 (m)
上游壩	疏浚前	上游	0.9	0.75
		下游	1.3	1.3
	疏濬後	上游	1.2	0.9
		下游	0.8	0.77
下游壩	疏浚前	上游	0.85	0.28
		下游	1.22	0.35
	疏濬後	上游	0.6	0.54
		下游	0.9	0.54

第三節 研究試區防砂壩之土砂攔阻特性：包含設置區位、設計特色及土砂攔阻特性等。

彙整前述章節之調查資料，綜合提出研究試區防砂壩之土砂攔阻特性，包含設置區位、設計特點(結構形式、材料選擇、尺寸等)、攔阻效能(現地調查、數值分析)，以評估防砂壩的攔阻效能，以提升對調整型防砂壩功能之更全面的了解。

(一)臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

表 3.8 土砂攔阻特性-關山九號橋後堀溪試區

項目	說明	
設置區位	➢ 臺南市南化區關山里曾文溪支流後堀溪上游 ➢ 南化水庫上游集水區 ➢ 距南化水庫約 6km	
災害源由	➢ 受 2008 年卡玫基及 2009 年莫拉克颱風之高強度及長延時降雨(超過 200 年頻率年之暴雨)影響，造成後堀溪溪水暴漲溢流，致使路基淘空、農地損毀、護岸設施及南 179 線沿線橋梁多處損壞。 ➢ 需擴大通洪斷面、護岸治理穩固溪床、避免土石下移至水庫庫區、有效攔阻土砂、降低清疏成本，並延長南化水庫壽命為其重要課題。	
設計特點	上游壩	➢ 調整型封閉式防砂壩(可調控式堤尾工) ➢ 2017 年 7 月 27 日竣工 ➢ 壩長 77.1m、壩高 4.6m、溢口長度 59.2m、壩頂厚度 3.0m。 ➢ 溢口有三個缺口，每個缺口皆有三塊預鑄橫樑。每塊預鑄橫樑長 4m、寬 1m、高 0.4m。 ➢ 搭配魚梯提供魚類洄遊廊道、下游施作拋石靜水池增加棲息空間。 ➢ 生態迴避孔，為魚蝦等於常流水及洪水時期之棲避場所。
	下游壩	➢ 調整型孔隙式防砂壩(可調式透水性淺壩) ➢ 2023 年 5 月 29 日竣工 ➢ 壩長 108.8m、壩高 4.4m、溢口長度 72m、壩頂厚度 2.1m。 ➢ 溢口有 17 個缺口，橫桿設計為預鑄橫樑，橫樑間設有格網回填塊石。 ➢ 靠近右岸有八處缺口之橫向元件僅配置 1m 高(每個缺口移除兩塊預鑄橫樑及橫樑間之塊石)。
攔阻效能	上游壩	➢ 橫桿為可拆式吊裝預鑄板，可依溪流不同時期輸砂、防災或生態需求進行靈活、反覆性調整作業。

	下游壩	➢ 土砂攔阻於上游，避免土砂進入庫區，並於上游進行清疏作業，與土砂進入庫區後抽取泥砂所需之經費相比，可節省約 10 倍成本。

(二)屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

表 3. 9 土砂攔阻特性-力里橋力里溪試區(既有防砂壩)

項目	說明
設置區位	➢ 屏東縣春日鄉力里溪支流布卡里娃欄溪 ➢ 系列壩
災害源由	➢ 待確認
設計特點	➢ 於 1985 年竣工 ➢ 屬混凝土之封閉式防砂壩 ➢ 有七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工) ➢ 主壩(0K+000)尺寸依現況調查，壩寬約為 65m。
攔阻效能	➢ 依據現況調查資料，壩體間的落差非常大且上游土砂淤積嚴重。 ➢ 上游已無庫容，河床面淤升處於阻斷水流呈現伏流水狀態。 ➢ 潛在威脅為既有構造物多處磨損，下游橫向構造物基礎淘刷，縱橫向生態阻隔等。

表 3. 10 土砂攔阻特性-力里橋力里溪試區(力里橋上下游野溪整治工程)

項目	說明
設置區位	➢ 屏東縣春日鄉力里溪支流布卡里娃欄溪 ➢ 系列壩
災害源由	➢ 將力里溪流心向右岸偏移，以避免影響左岸芒果園之虞。 ➢ 上游已無庫容，河床面淤升處於阻斷水流呈現伏流水狀態。 ➢ 潛在威脅為既有構造物多處磨損，下游橫向構造物基礎淘刷，縱橫向生態阻隔等。
設計特點	➢ 於 2024 年 2 月 19 開工，預計於 2424 年 11 月完工。 ➢ 工程範圍共七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)。 ➢ (0K+000)既有防砂壩之溢洪口處調降三個開口寬共 17.5m(分別為 3.7、2.9、3.7m)，開口深度分別為 2.8、4.5 及 2.8m，及(0K+017.02)既有尾檻降低開口寬 21.0m 及深度 3.0m。 ➢ (0K+000)既有防砂壩之溢洪口調降三個開口處，其橫桿採 H 型鋼長 5*寬 1.5*高 1.5m，分別安裝五支、八支及五支 H 型鋼，從上游側預留凹槽(20*20*180cm)安裝 H 型鋼，其傾角為 1:0.9。 ➢ (0K+064.52)既有防砂壩主壩之溢洪口處調降一個缺口寬 3.6m，開口深度 2.7m。 ➢ 下游之 4 處副壩(0K+074.46、0K+087.32、0K+098.49、0K+109.35)之溢洪口處各調降一個缺口寬皆為 3.6m、高分別為 2.7m、3.6m、1.9m、1.9m、0.5m。
攔阻效能	➢ 釋放上游適量土砂至下游，以平衡河道縱向連續性。

第肆章　既有防砂壩動態活化之策略

第一節 防砂壩調查資料，依據河川型態提出壩體活化之可行性方向

(一)由坡度變化來預測粒徑與土砂量變化

本計畫執行人員於 2021 年執行計畫「調整型防砂壩之技術研發與應用(3/3)」中藉由影響土砂傳輸的重要因子「地文因子」，挑選坡度、粒徑及土砂量來探討坡度變化與粒徑與土砂量變化之相互關係。河床質的臨界起動值一般導循希爾茲數(Shields Number, Θ) (圖 4. 1 及式 1)，當河川處於紊流時，Θ值趨近於定值。

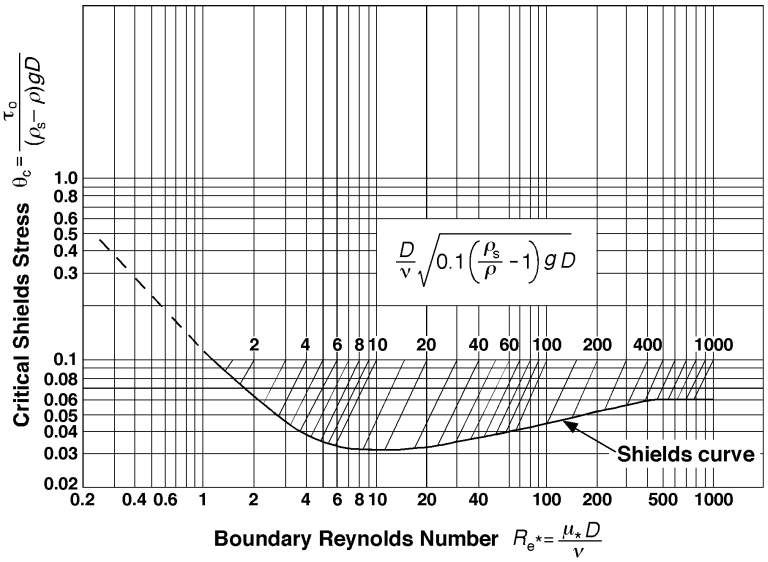


圖 4. 1 Shield's diagram (after shields, 1936)

$$\Theta = \frac{\gamma RS}{(\gamma_S - \gamma)d_{50}} \tag{1}$$

式中， R 為水力半徑，S 為河床坡度，γ 為水體密度，γ_s 為土砂密度，d_{50} 為粒徑中值。因此**假若野溪因防砂壩上游淤積導致坡度 S 減半，則上游淤積之河床粒徑 d_{50} 也將減半。當坡度減緩時，啟動拖曳力(搬運能力)也會減低，因此可以帶動的泥砂粒徑相對變小。**

假若輸砂量與流速之 m 次方成正比

$$Q_S \sim V^m \tag{2}$$

依據 Colby(1964)對指數 m 的研究，發現 $3 \leq m \leq 7$，常流量愈大則 m 值愈小，反之亦然。

一般在分析防砂壩輸砂量時，都假設在高流量之情況。若假設 $m=4$，當淤積坡度變為原來的 $1/2$，則輸砂量僅為原來的 $1/4$。此倍數關係反應局部河段的溪床搬運能力之變化，可適用於不同坡度。倍率可能會因參數的假設而有所變化。而台灣山區河川缺乏輸砂量資料，在沒有明確資料前，m=4 為中值國際慣例。

$$Q_S \sim \left(\frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}\right)^4 \sim S^2 \tag{4}$$

綜合上述，**坡度降低會導致水流速度減慢，防砂壩若導致上游淤積坡度減半，則上游之淤砂粒徑也將減半，同時輸砂量僅為原先的 0.25 倍**，大大減緩輸砂量，這是防砂壩的優點，同時也是造成下游淘刷的缺點。依上述理論推估研究試區之壩體調整前後之輸砂量變化。

然土砂量高度變動的野溪，需常態性經營管理防砂壩，以達到壩體活化及延壽之目的。依壩體攔阻情形及土石流發生狀況，改變壩體之透過性機能，以達溪流土砂之平衡。故當坡度變化導致上游的泥砂粒徑變化，防砂壩將面臨不同的沉積壓力。降低的拖曳力**(搬運能力)**

亦影響防砂壩對土砂輸送量及攔阻能力。進而需對橫向構造物之攔阻能力提出不同之應對策略。

本計畫於研究室區內進行河床質粒徑調查，然而缺乏壩體興建前後之粒徑資料，僅能以計畫執行期間調查資料做比對。表 4.1 之相關運算公式為，坡度計算為(上游高程-下游高程)/河段長求得。粒徑變化倍數計算為(調整後粒徑/調整前粒徑)*100 求得。輸砂量計算為(調整後坡度平方/調整前坡度平方)/100 求得。

1. 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區上游為堤尾工(調整式封閉型固床工)，2024 年 5 月上游坡度 0.31%，經歷 2024 年 6 月的數次豪雨及 7 月凱米颱風於 2024 年 8 月坡度為 0.24%，坡度變更緩，依坡度減少之比例換算，推估粒徑 D_{50} 變將減少為原來的 77.41%，實際粒徑細化為原先的 74.12%，其推估粒徑變化程度與實際變化程度相近，而砂量將減少為原先的 59.93%。

而下游之孔隙型防砂壩，2024 年 5 月上游坡度 0.33%，經歷 2024 年 6 月的數次豪雨及 7 月凱米颱風，於 2024 年 8 月坡度為 0.60%，坡度變陡，依坡度增加之比例換算，推估粒徑 D_{50} 變將增加為原來的 181.81%，實際粒徑細化為原先的 40.30%，而輸砂量將增加為原先的 3.30 倍。其推估粒徑變化程度與實際變化相反，評估為壩體上游已淤滿，而上游橫向構造物(堤尾工)土砂亦淤滿，洪水大量將淤積土砂帶往下游堆積，使其坡度反而變陡，但實際粒徑細化情況。

2. 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區於 2024 年 1 月現地調查時尚為封閉型防砂壩，當時上游坡度 1.66%，壩體改善工程於 2024 年 2 月

開工，將調降溢洪口並安裝橫向 H 型鋼，並經歷 2024 年 6 月的數次豪雨及 7 月凱米颱風，於 2024 年 10 月尚處於施工階段，坡度增加為 2.27%坡度變陡，依坡度增加之比例換算，推估粒徑 D_{50} 變將增加為原來的 136.74%，實際粒徑有粗化現象，增加為原先的 135.22%，而輸砂量將增加為原先的 186.99%。

表 4.1 量測坡度與預測粒徑、土砂量變化

試區	狀態	DEM 測製日期	河段長 (m)	高程差 (m)	坡度 (%)	預測粒徑 D_{50} 變化倍數	粒徑 D_{50} 實際變化倍數	預測土砂量 Q_s 變化倍數
關山九號橋後堀溪試區-上游橫向構造物	構造物淤滿	2024/02/06	221.97	0.69	0.31	77.41%	74.12%	59.93%
	颱風後	2024/08/13	243.42	0.59	0.24			
關山九號橋後堀溪試區-下游壩	壩體淤滿	2024/02/06	386.11	1.26	0.33	181.81%	40.30%	330.57%
	颱風後	2024/08/13	385.78	2.32	0.60			
力里橋力里溪試區	調整前	2024/01/24	105.61	1.75	1.66	136.74%	135.22%	186.99%
	施工中	2024/10/14	104.92	2.38	2.27			

註：後堀溪試區上游橫向構造物實測：2024/05/16 D_{50}=8.00cm，2024/10/13 D_{50}=5.93cm。
後堀溪試區下游壩實測：2024/05/16 D_{50}=15.384cm，2024/10/13 D_{50}=6.2cm。
力里橋試區實測：2024/01/24 D_{50}=11.479cm，2024/10/14 D_{50}=15.522cm。

(二)台灣河川型態五層分類法

Lane (1955)提出著名的關係式：Q*d ∝ Qs*S。其中 Q 為流量，d 為河床質粒徑，Qs 為輸砂量，S 則為河床坡降。透過此關係式，可說明河道上游來水來砂量 (Q 與 Qs)變化時河道特性(d 與 S)的變動行為；其後亦有學者進一步將河川幾何因子(如河寬、水深、寬深比、河灣跨度、彎曲係數)等納入來水來砂條件之影響因子(Schumm, 1969)；將來砂條件區進一步分為推移質與懸移質兩部分(Li et al., 1982)，構造物修建或拆除 (Phillips et al., 2005, Boix-Fayos et al., 2007)及土地利用行為(Hooke et al., 2000; Kondolf et al., 2002; Mount et al., 2005)，列入河相關係考量。Rosgen (1996) 則匯整相關河川演變及分類等相關研究，建立河川型態分類系統，根據該系統的分類，一個河川系統可分成四層：以深槽比、寬深比、蜿蜒度、坡度、地形與土壤等特徵進行河川平面型態分類的 Level I；將 Level I 以岩床、塊石、卵石、礫石、砂粒及矽土/粘土六項河床質種類細分的 Level II；以沉滓供應、河流機制、土石來源、渠道穩定等因子探討河川狀態的 Level III；及河流測量、輸砂分析等現場資料驗証的 Level IV。

本計畫利用台灣河川型態五層分類法，依據陳樹群等 (2002, 2012)彙整適合台灣本土化之台灣河川型態五層分類法，以第一層流域特性(表 4. 3 及表 4. 4)、第二層水系特性(表 4. 5)、第三層主流特性(表 4. 6 及表 4. 7)、第四層河道特性(表 4. 8)與第五層棲地特性(表 4. 9)的分層結構 (圖 4. 2 及表 4. 2)，來定義河川之河相型態及河型演變行為。透過台灣河川型態五層分類法，以更加了解整個集水區透過五層分類法「依據空間尺寸大小」於各層級之環境分析情況，以對應所提

出之壩體調整方案是否恰當，然而對於橫向構造物之調整，最主要且直接之影響範圍為第四層河道特性及第五層棲地特性之範圍。



圖 4.2 台灣河川型態五層分類法架構圖(陳樹群等，2012)

表 4.2 五層分類法之概述及方法

分類	概述	方法
第一層 流域特性	主要受地質條件控制，地層走向影響河流走向及地形侵蝕的難易程度。 流域演變所需時間尺度最長，累積百年以上重現期距的洪水或地質事件後，其特性會慢慢改變。 人為營力干涉流域型態發展的程度極低。	透過外觀幾何型態與高差特性，可分類出流域性質。以流域圓度(R_c)及狹長度(R_e)計算，可數據化流域的形狀及河川特性。 詳見表 4.3 及表 4.4。
第二層 水系特性	水系的發展受地質之構造、岩性與地形侷限等控制，而地質受侵蝕之難易程度則影響水系發展之密度。 採用 Horton(1945)的河川級序(stream order)觀念，以 Strahler(1957) 之河川級序系統，對水系網的河系組成定律加以分析。	計算分歧比 R_b、流長比 R_l 與河流下凹度 R_s 等，並以河流下降比(R_s/R_l)來說明水系演化的穩定性。 詳見表 4.5。 河流級序用來描述在支流層次結構中的位置。兩個一級序的並集形成一個二級序，定義為僅具有一級序河道作為支流。通過將兩個二級序河流合併而形成三級序河流，依此類推。
第三層 主流特性	受到地質與地形控制，依地形區位、平面型態與河床質組成對主流加以定義，即可建立河川主流的通盤性描述。	依地表之高程與平均坡度做為地形類別的判釋因子，對主流所流經之地形作區分。 河床質採用美國地球物理學會 (AGU) 之泥砂粒徑分類基準，將其分為粗顆粒、細顆粒與岩床三大類。 詳見表 4.6 及表 4.7。
第四層 河道特性	探討河段在來水來砂條件、河床邊界條件及侵蝕基準面等條件下，受中型洪水、人為工程干預之後所形成的河谷地形及縱橫剖面特性。	水理輸砂之數值模式藉由大斷面資料或河道之數值高程模型(DEM)、河床質等，分析河道中水流與輸砂的分佈情形，並與歷年河道變動情形比較，說明與預測河道的演變趨勢。 詳見表 4.8。
第五層 棲地特性	以棲地的物理組成為主，空間尺度則以河段中數百公尺的棲地空間為範圍，演化之速度則以年為單位。營力部分以人為與水流兩者影響最大。 將河川物理棲地依空間區分為水域及裸露之沙洲與邊灘兩大區域；再依營力類型將組成棲地之因子分為泥砂、地形、水流、植生與人為五大類。	以現地評估之方式，建立各河段之棲地物理環境之資料庫，以可量化棲地物環境之評估指標為主。 詳見表 4.9。

彙整自陳樹群(2002 及 2012)

表 4.3 第一層-流域特性之流域幾何型態因子(陳樹群等，2012)

項目	說明
流域面積 (km^2)	A
流域最大長度 (km)	L_b
流域最大寬度 (km)	B_b
平均寬度 (km)	A /主流長
流域周長 (km)	P
流域圓度	$R_c = A$ / (同周長的圓面積)
流域狹長度	R_e = (同面積的圓直徑) / L_b
型態要素	$R_f = A / L_b^2$
流域密度	c = (同面積的圓周長) / (流域周長)

表 4.4 第一層-流域特性之流域高差因子(陳樹群等，2012)

項目	說明
河床比降	S_{bed}
流域高差	ΔH=流域內最高點高程與流域出口高程差
地面平均坡度	$Sc = \Delta H / L_b$
流域平均坡度	$S = \Delta H / L_Q$, (L_Q 為主流長度)

表 4.5 第二層-水系特性之水系網因子(陳樹群等，2012)

類別	項目	說明
水系網因子	河流級別	u (用作下標)
	主流長度 (km)	L_0
	平均分歧比	$R_b = N_u / N_{n+1}$ (Nu 為 u 級河川之數量)
	平均流長比	$R_l = \bar{L}_u / \bar{L}_{u-1}$ ($\bar{L}_u$ 為 u 級河川之長度)
	平均河流凹度	$R_s = S_u / S_{u+1}$ (Su 為 u 級河川之坡降)
	河川碎形維度	$D_b = logR_b / logR_l$
	計盒碎形維度	$D_{box} = \lim_{\epsilon \to 0} \frac{\log N_\varepsilon}{-\log \varepsilon}$
切割程度	河網密度 (km^{-1})	$D_u = (\Sigma L_u) / A$
	河流頻度 (km^{-2})	$F_u = (\Sigma N_u) / A$

表 4.6 第三層-主流特性之地形區分表(陳樹群等，2012)

地形	高程	平均坡度
山地	>1000 m	--
丘陵	100~1000 m	>5%
台地	100~1000 m	<5%
平原	<100 m	--
河口區	主流受到潮汐影響之河段	

表 4.7 第三層-主流特性之河床質粒徑分類表(陳樹群等，2012)

分類	類型	D_{50} 粒徑範圍(mm)	
細顆粒	矽土/粘土 (silt/clay)	＜0.062	($<2^{-4}$)
	砂粒 (sand)	0.062~2	(2^{-4}~2)
粗顆粒	礫石 (gravel)	2~64	(2~2^6)
	卵石 (cobble)	64 ~256	(2^6~2^8)
	塊石 (boulder)	256 ~4096	(2^8~2^{12})
岩床	岩床 (bedrock)	--	--

表 4.8 第四層-縱橫剖面之橫斷面特性分類表(陳樹群等，2012)

型態	說明	寬深比	深槽比	河階指標
V 型	常見於山區形成峽谷。	<100	1.4~2.2	<1000
U 型	侵蝕程度較 V 型完整，常見於中下游地區。	<100	1~1.4	<1000
複式斷面	常見於平原具有洪汎區或河漫灘地區。	>100	>2.2	>1000

註：上述分類標準僅供分類時之參考，在不同類型河川有時需作調整。

表 4.9 第五層-棲地特性之河溪物理性棲地環境評估表(陳樹群等，2012)

水域					
泥砂	底質孔隙多樣性	卵石、礫石、塊石間之孔隙被砂粒填滿 25%以下，表層提供多樣的孔隙。	礫石、卵石、塊石間之孔隙被砂粒填滿 25%~50%。	礫石、卵石、塊石間之孔隙被砂粒填滿 50%~75%。	礫石、卵石、塊石間之孔隙被砂粒填滿 75%以上。
	評分	16-20	11-15	6-10	0-5
	土砂堆積程度	少於 5%的的水域受 到泥沙堆積影響。	主要由礫石、砂與細砂組成，5~30%的水域受到泥 沙堆積影響，深潭中輕微泥砂淤積或出現穩定沙洲。	中度泥砂堆積，30~50%(緩坡 50~80%)的水域受到泥沙堆積影響，水道阻礙、束縮、彎曲處及深潭受到中等泥沙淤積影響或出現複列式沙洲。	強烈的泥砂堆積，或大量沙洲增長，為不穩定沙洲，50%以上的水域受到泥沙堆積影響，深潭因而幾乎消失。
	評分	16-20	11-15	6-10	0-5
水流	水流穩定性	日常流量下有效河道 皆有水流流動，只有很少的河川底質暴露出來。	日常流量下水流填滿有效河道之 75%以上，或是少於 25%的河床底質暴露出來。	日常流量下水流填滿有效河道之 25~75%，或淺瀨的底床質出露。	日常流量下河道幾乎無水流，或只在深潭中存在水流，形成靜水潭。
	評分	16-20	11-15	6-10	0-5
	水流多樣性	淺瀨/淺流/深潭/深流四種型態皆出現。	淺瀨/淺流/深潭/深流四種型態出現其中三種。	淺瀨/淺流/深潭/深流四種型 態出現其中二種。	淺瀨/淺流/深潭/深流四種型態出現其中一種。
	評分	16-20	11-15	6-10	0-5
地形	基質之穩定性	超過 70%的穩地底床質適合營造新的棲 地，或可供水域生物生存，此類區通常存有不是新落下斷落樹枝、深潭、草木的突出部分、巨礫/大卵石或其他穩定棲息地之 要素。	40~70%之底床質適合生物拓殖使用，或較為穩定不常被移除。	20~40%之底床質適合生物拓殖使用，基質經常被擾動或移除。	少於 20%的穩定良好棲息地存在，底床質不穩定或缺乏。
	評分	16-20	11-15	6-10	0-5
	地形多樣性	淺瀨出現頻率高，淺瀨間距與河寬之比值小於 1，溪流中淺瀨具有連續性，且淺瀨為 自之塊石或更大之石塊所組成。	淺瀨出現頻率低，淺瀨間距與河寬之比值為 1~2。	淺瀨不常見，底床提供些許棲地空間，淺瀨間距與河寬之比值為 3~5。	大量平坦河床或水流全為淺水之淺瀨，淺瀨間距與河寬之比值大於 5。
	評分	16-20	11-15	6-10	0-5
人為	人工構造物種類	沒有人工構造物，也無工程活動	人工構造物為自然資材	人工構造物為自然資材加人造	人工構造物全為人造
	評分	9-10	6-8	3-5	0-2
	人工構造物高度	沒有人工構造物，也無工程活動。	人工構造物高度 0.3~ 1m，抑制了區段裡生物之移動，如：固床工。	人工構造物高度 1~5m，也許附設功能良好魚道，如：潛壩。	人工構造物高度 5m 以 上，也許附設功能良好魚道，如：防砂壩。
	評分	9-10	6-8	3-5	0-2
	人工構造物排列密度	沒有人工構造物，也無工程活動	只有單一構造物	連續的人工構造物	密集的人工構造物，甚至水域底床為水泥封底。
	評分	9-10	6-8	3-5	0-2

1. 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

壩體位於後堀溪上游，下游匯入南化水庫。包含南化水庫上游集水區內之竹子山子集水區、木瓜坑子集水區、平坑仔子集水區等。研究區域生態資源豐富，特別魚類、昆蟲及鳥類之種類多樣。

(1) 第一層流域特性

曾文溪集水區面積為 48,100 公頃，後堀溪為曾文溪上游其中一條支流，其子集水區面積約為 16,590 公頃，溪流長度約 51.059 公里，溪流坡度 3.4%，地質以北寮頁岩為主，由頁岩、砂質頁岩、泥岩組成。

(2) 第二層水系特性

由於後堀溪流域呈狹長幾何型態，低級序的支流在上游匯集成高級序的河川後，中游的支流不易增加主流的河川級序，水流至集水區出口的時間較長。許多支流從不同方向匯入主河道，形成分支狀的結構，類似於樹枝的型態，屬於樹枝狀水系(圖 4. 3a)。

(3) 第三層主流特性

壩體位於主流上游段，附近河道寬度約為 60 公尺，能有效容納大量水流，故該集水區的洪水風險較低，屬於第四級河川(圖 4. 3a)，主流長度約 39,042 公尺，關山九號橋工程處位在主流上，其距離河口流長約為 32,940 公尺，後堀溪各河段的平均高程、坡度分布情況如圖 4. 3c，一級河川主要平均坡度大多在 0.5 至 25 %，二級河川為 0.8 至 16 % 之間，三級河川為 1 到 2 % 之間，而四級河川則落在 0.5%。

由後堀溪高程與距河口流長(圖 4. 3b)可見在 23,000 公尺處，有較明顯的高程落差，因後堀溪位處在南化水庫出口處造成此處產生約 70 公尺的落差，一級河川最高高程約 780 公尺，距河口流長最遠距離約為 52,800 公尺；二級河川最高高程約 610 公尺，距河口流長最遠距離約為 31,580 公尺；三級河川最高高程約 330 公尺，距河口流長最遠距離約為 48,500 公尺；四級河川最高高程約 220 公尺，距河口流長最遠距離約為 39042 公尺。

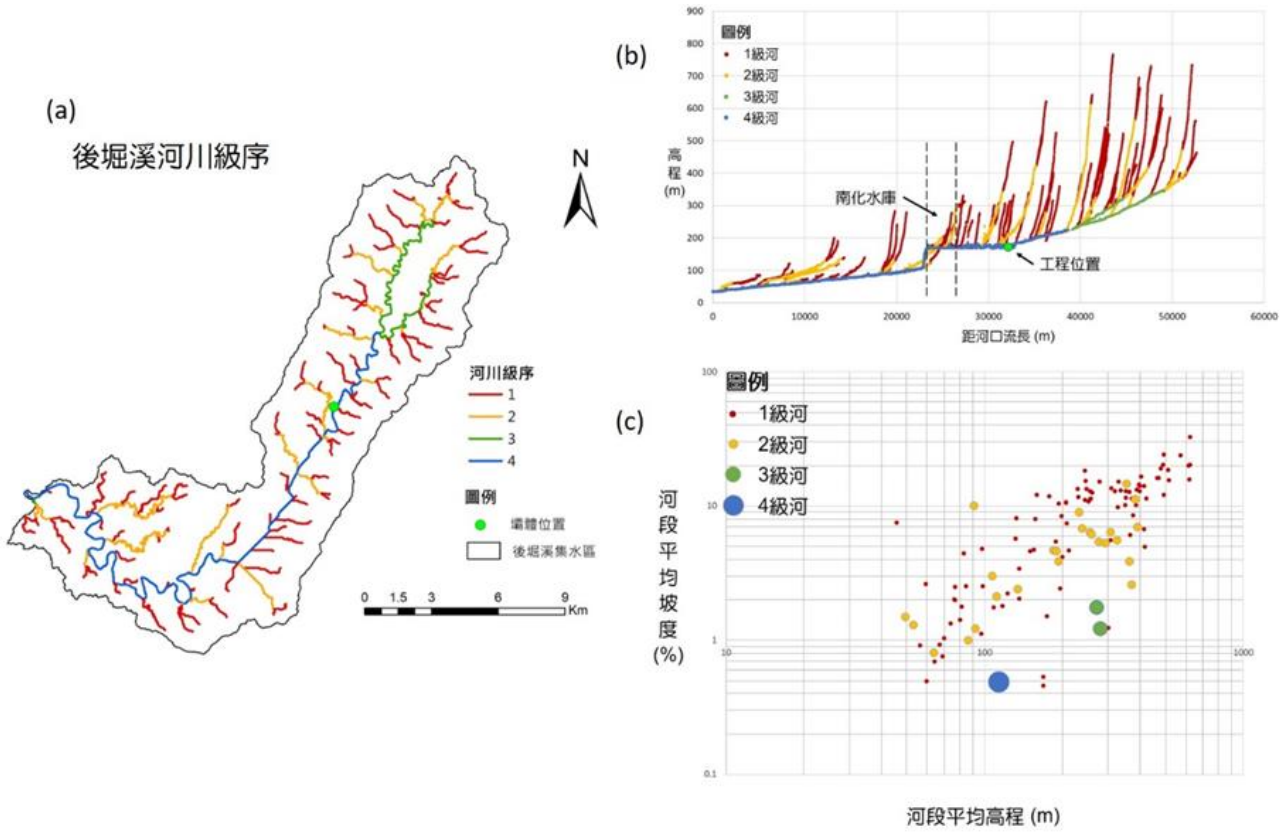


圖 4. 3 關山九號橋後堀溪試區(a)後堀溪流域河川級序分布，(b)各級河川縱剖面圖，(c)各級河段高程坡度特性比較圖

(4) 第四層河道特性

2024 年至現地調查關山九號橋上、下游皆有一座調整型橫向構造物，上游為堤尾工(調整式封閉型固床工)，而下游為調

整型孔隙式防砂壩，上、下游橫向構造物間距離約 850 公尺，上游橫向構造物上游右岸有明顯崩塌坡面，而下游壩上游左岸亦有明顯崩塌坡面之跡象。整體的流速減緩，河道偏向蜿蜒及辮狀的狀態，具有水流分隔，河道中形成高灘地(中島)的特性。由於上游崩塌情形，為避免土砂進入庫區，於上游建造堤尾工(調整式封閉型固床工)，河道的來水來砂量較大，卻僅於右岸處調降缺口，水流的攜沙能力下降，導致土砂將近淤滿，其攔砂功能已幾乎消失。

(5) 第五層棲地特性

辮狀河川受大型洪水事件作用，水流將會溢淹至整個河道，因河道內沙洲與邊灘的刷新，導致植生生長環境較不穩定、演化速度快。河道中來砂量大，導致泥砂淤積量大增、水流迴水範圍增加，使棲地中的泥砂及水流多樣性皆降低，溪流沿岸橫向廊道受土砂災害破壞，影響水、陸域生態棲地之連續性，生物多樣性也將跟著下降。為避免大量土砂進入下游的南化水庫，故於河道上興建可調整防砂壩並定期於防砂壩清淤，同時兼顧防洪、水庫維持、生態環境，有助於實現人類活動與自然環境的平衡。

2. 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區，位於布卡里娃欄溪，其為力里溪上游的其中一條支流，位於屏東縣春日鄉。

(1) 第一層流域特性

力里溪集水區面積為 12,500 公頃，其子集水區布卡里娃欄溪集水區面積為 374.9 公頃，溪流長度約 2.412 公里，溪流坡度 14.7%，地質主要為廬山層，經歷強烈的變質作用和摺皺，形成之主要岩性為厚層板岩及硬頁岩，含有砂岩及板岩的互層及灰黑色變質砂岩的夾層。

(2) 第二層水系特性

力里溪屬於格子狀水系，水系特徵主要由區域內的地質條件決定。變質頁岩和砂岩岩性相對較軟，河流因此更易沿著軟岩層進行侵蝕，當遇到較硬的岩層時，水流會因阻擋而轉彎或改道，最終形成規則的格子狀排列(圖 4. 4a)。

(3) 第三層主流特性

力里溪為四級河川(圖 4. 4a)，主流長度約 23,671 公尺，力里橋工程處距離河口流長約為 10,000 公尺，力里溪各河段的平均高程、坡度分布情況如圖 4. 4c，一級河川主要平均坡度大多在 15 至 55 %，二級河川為 5 至 30 % 之間，三級河川為 8 到 15 % 之間，而四級河川則落在 1.6 %。

由力里溪高程與距河口流長圖(圖 4. 4b)可見，一級河川最高高程約 1300 公尺，距河口流長最遠距離約為 32,000 公尺；二級河川最高高程約 1110 公尺，距河口流長最遠距離約為 31,300 公尺；三級河川最高高程約 1000 公尺，距河口流長

最遠距離約為 30650 公尺；四級河川最高高程約 400 公尺，距河口流長最遠距離約為 23,671 公尺。

工區位於布卡里娃欄溪，屬於第二級河川，上游集水區小，匯入力里溪的下游主流段。力里溪集水區出口接近出海口，河流逐漸進入平原區域，形成辮狀細顆粒溪流。

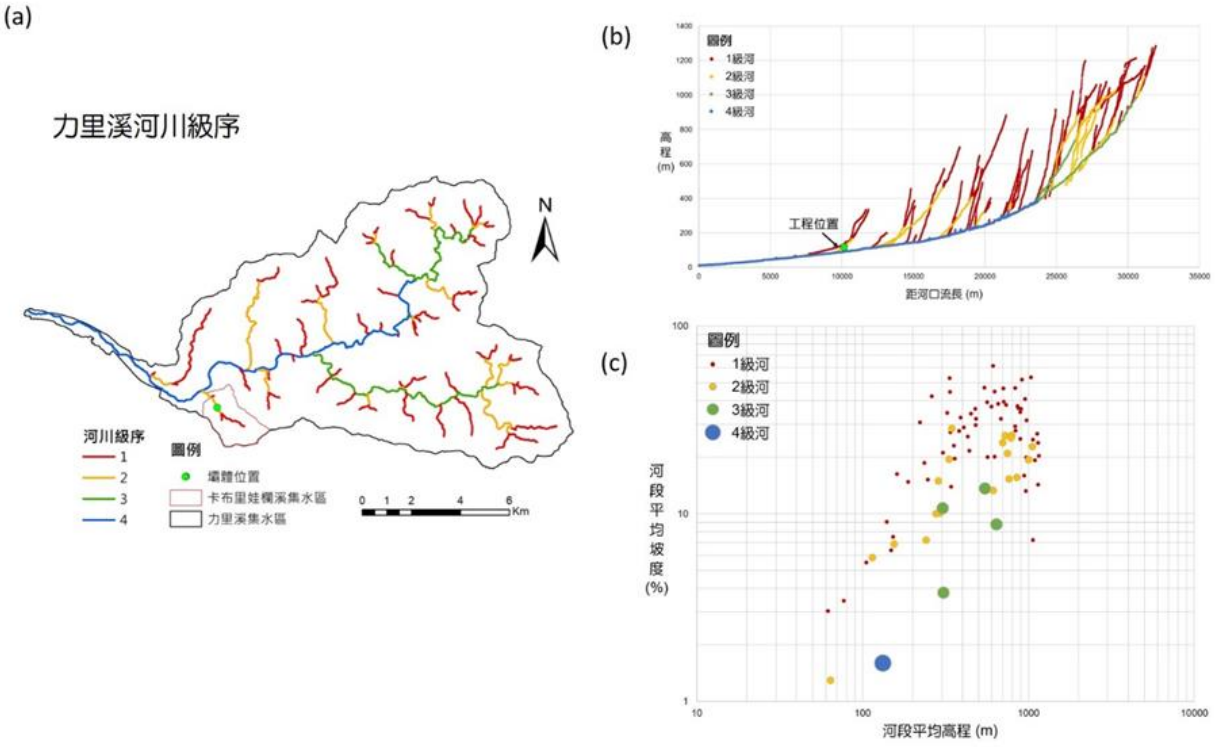


圖 4. 4 力里橋力里溪試區(a)力里溪流域河川級序分布，(b)各級河川縱剖面圖，(c)各級河段高程坡度特性比較圖

(4) 第四層河道特性

調查範圍中估算有七座橫向構造物(主壩、副壩、固床工)，經調查為 1985 年完工，壩體間的落差非常大且上游土砂淤積嚴重。工程設計將力里溪流心向右岸偏移，以避免影響左岸芒果園之虞。於 2024 年 2 月現地勘查，目前皆為已淤滿狀態，上游已無庫容，河床面淤升處於阻斷水流呈現伏流水狀態。潛在威脅為既有構造物多處磨損，下游橫向構造物基

礎淘刷，縱橫向生態阻隔等。預計壩體調整之防砂壩(0K+000)，壩寬約為 65 公尺，上游淤積地右岸有明顯居民及農作占地情況，使河道縮減為約 14.9 公尺。原系列防砂壩接近淤滿狀態，導致水流主要以伏流水形式存在。為改善此狀況，將主壩階梯式調降，並設置尾檻，副壩則營造缺口，並在下游進行邊坡護岸工程的設計。這些措施旨在使河道水流由伏流水轉為地表逕流，提升地表流量，不僅有助於將河道上的沉積物帶往下游，也有助於穩定流心，維持河道的長期穩定性。

(5) 第五層棲地特性

系列防砂壩於 1985 年完工，經過多年運作，主壩及副壩逐漸被泥砂淤積填滿，如今僅剩一條狹窄的排水流路。由於泥砂已達穩定狀態，植被生長良好，甚至被當地地主用作耕地。由於防砂壩之間的高度落差，大部分地表水已轉為地下伏流水，雖然這補充了地下水源，卻對當地動植物的棲息地造成影響，破壞了生物多樣性，並阻礙了水生生物的遷徙和生存。

這些橫向構造物形成了橫向阻隔，影響河道的基準面，破壞河道的縱向連結，導致沉積物運移的中斷。為恢復河道的連續性，計劃通過調降主壩及副壩的高度，開闢缺口，將上游滯留的泥砂帶至下游。同時，在上游主壩設置 H 型鋼，以在洪水期間攔截巨石及大型漂流木，減少對副壩的衝擊，並降低下游可能遭受的災害。此外，在主壩設置尾檻，以避免過大落差導致下游嚴重沖刷。

(三)防砂壩動態活化策略

根據河川型態的五層分類法，評估橫向構造物所在區域的流域特性及河道變化，並透過橫向構造物之基本環境調查，結合坡度、粒徑變化進行綜合探討，有助於制定更適應性的活化策略及調整方案，以達到延長防砂壩的使用壽命，提升砂庫的利用效率，並實現可持續的河道管理。主要可分為以下三個層級進行分項說明：

1. **防砂壩壩體延壽**：需先依據環境概況評估，主要可分為結構物概況(損壞評估)及構造物周邊環境(土方淤積、淘刷程度)進行評估，進而提出延壽策略，以延長橫向構造物使用壽命及效能為目標(圖4. 5)。

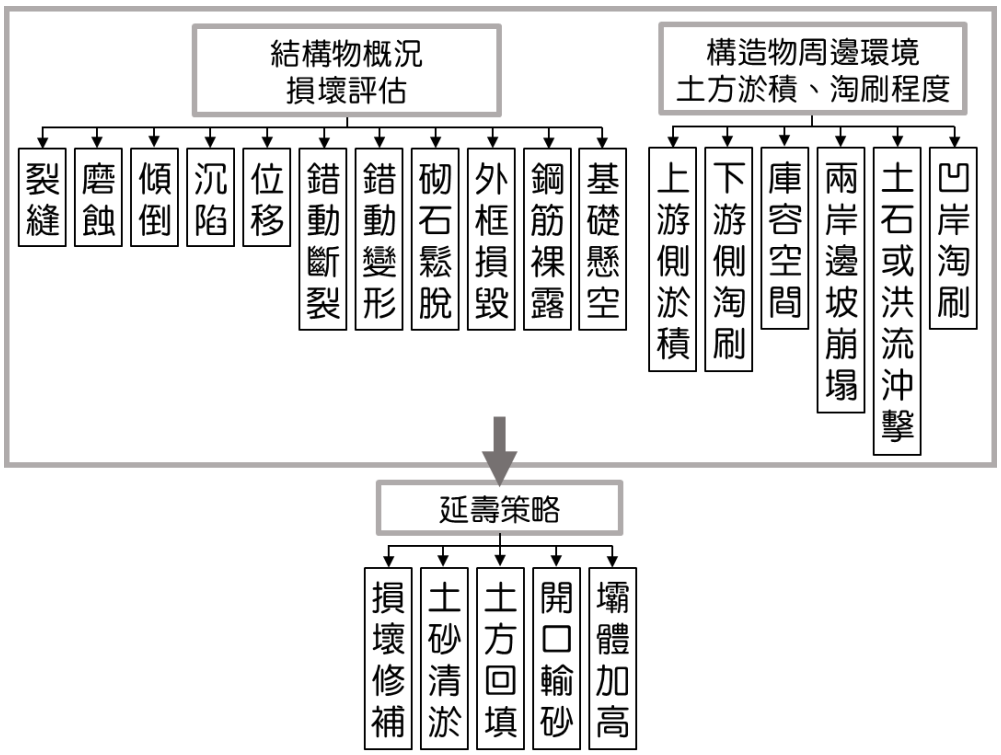


圖 4. 5 延壽策略流程

2. **砂庫土方利用**：橫向構造物上游之淤積土方，進行優化砂庫的土方利用評估，以提升沉積物的有效處理及利用。如：回填下游淘刷、土方交換、土方去化、囚砂效率…等(圖 4. 6)。

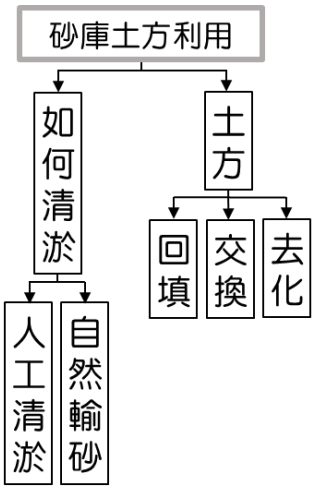


圖 4. 6 砂庫土方利用流程

3. **永續發展**：設計及調整橫向構造物時應考慮長期土砂量變化及河道演變趨勢，需根據流域及河道特性進行評估，靈活調整橫向構造物之型態，利用自然力量進行輸砂、排砂，以河道縱橫向之生態連續性、土砂管理(攔砂、輸砂)等為目標，使橫向構造物於河道中能持續發揮效用。橫向構造物之興建與調整時機及流程不需要標準化，但應考量當地環境情況並遵循圖 4. 7 中之程序，下游所需的沉積量及上游潛在的沉積供應量，將是調整橫向構造物的主要考量因素。調整橫向構造物之開口程度，將會改變沉積物的攔截及釋放能力，從而創造一個新的平衡。

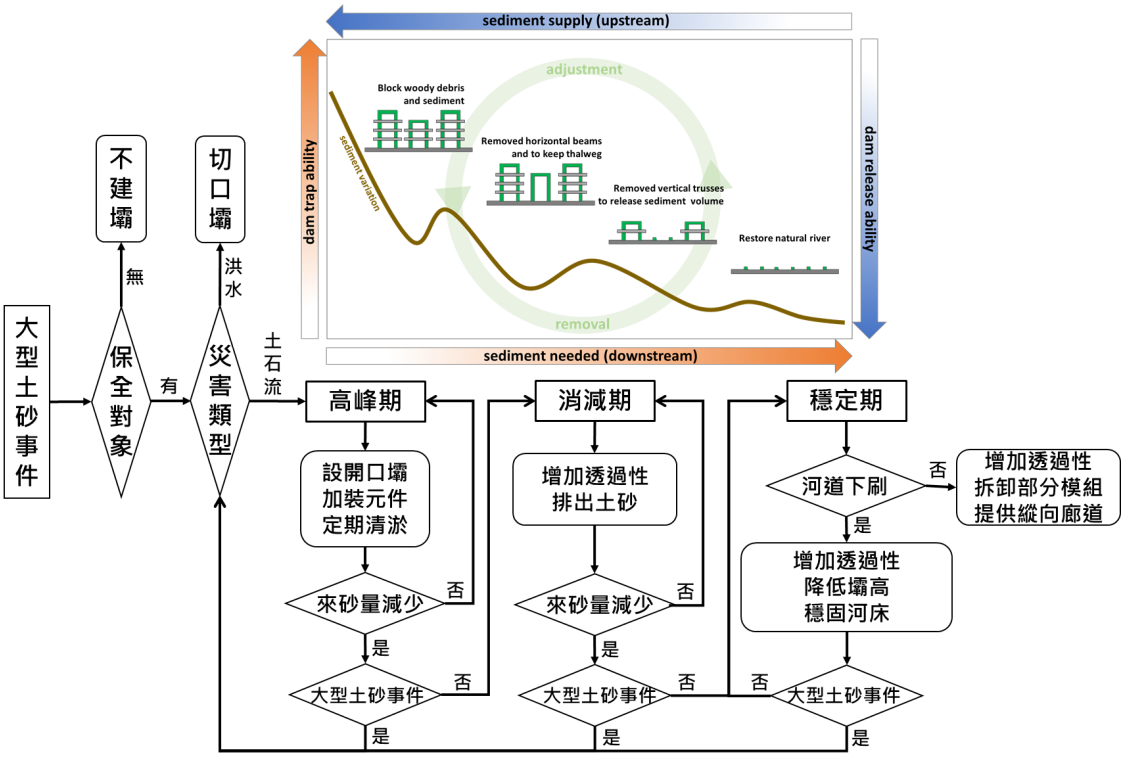


圖 4. 7 橫向構造物之興建與調整時機及流程

防砂壩調整可概分為三大階段及土砂釋放程度(圖 4. 8)：

(1) 第一階段為先調整壩體中央橫材，自然排砂刷出一條深槽線，以導正流心於河床中央範圍，緩慢釋放上游之淤積土砂。開口位置尚需考量上下游河道需求進行相對應的開口變化型式。

(2) 第二階段為適量調整縱材寬度範圍，增加壩口寬度以釋放更多上游淤積土砂。使時不僅可維持流心於河床中央，亦可同時保護上游兩岸邊坡穩定。

(3) 第三階段為持續增加橫材、縱材之調整範圍，以增加縱向廊道，恢復生態與土砂連續性及輸砂平衡。

防砂壩調整三大階段主要表達調整流程、目的及效益，實際執行尚需對環境進行上下游環境調查、評估，以提出更適應性之調整

方案。此三大階段將視環境、土砂釋放程度之需求，而有執行程度之差異及進程。

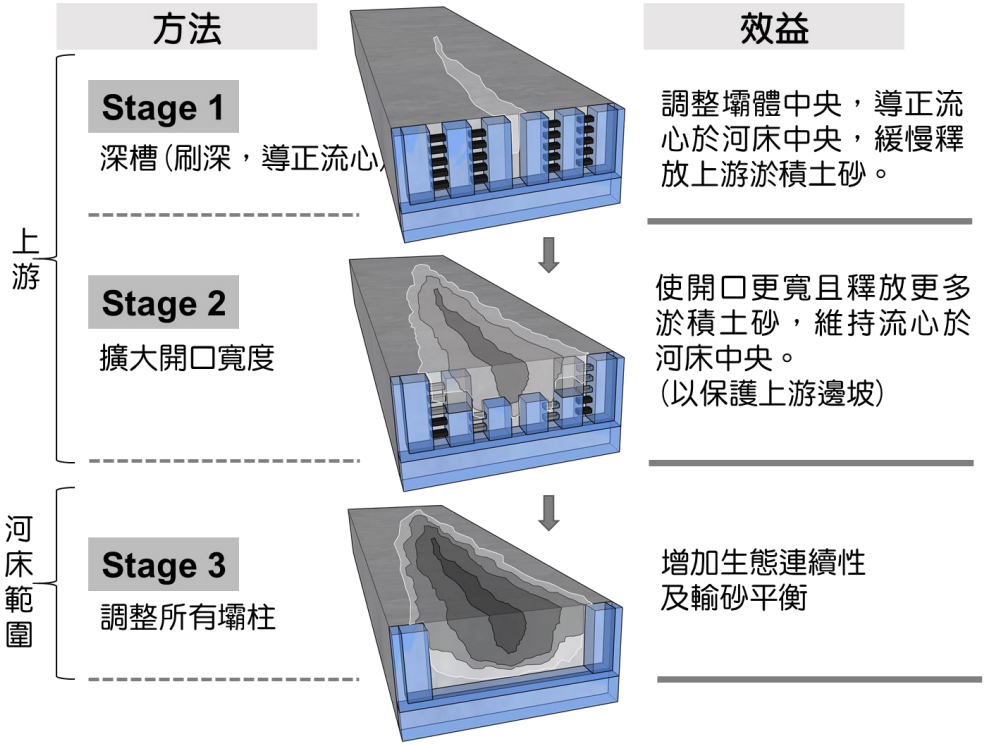


圖 4.8 防砂壩調整三大步驟及土砂釋放程度

第二節 依據氣候變遷影響環境之減碳、綠能、因應土砂變化調整等議題，建議未來興建防砂設施之參考。

在面對氣候變遷所帶來的環境挑戰時，本計畫章節以減碳、綠能及因應土砂變化調整等議題進行探討。減碳措施旨在減少溫室氣體排放，這對於防砂壩的設計和運營機具有直接關係。綠能則以工程期間盡可能減少周圍植被及生態的擾動，工程前後/調整前後植生恢復情況等。此外，因應土砂變化來調整防砂壩，因自然界中土砂量的變動會直接影響防砂壩的壽命(效用)、友善生態、輸砂平衡等。

在這些議題的探討下，將收集並彙整相關防砂壩調整案例，以更了解目前的實踐和挑戰。基於這些分析可更精進於未來興建防砂壩設施的建議。

(一)減碳

防砂設施（如橫向構造物、防砂壩、堤防等）因施工材料、施工方式及壩體設計型式之不同，會有相對應不同的碳排放量，若不同作法皆能達到相同之防砂、輸砂及生態目的，建議採用更友善的方式執行。以下是相關說明：

1. **施工材料**：選用低碳材料或替代材料可減少碳排放量，如，使用再生混凝土、現地既有土砂資源等，代替傳統混凝土，能有效降低整體碳排放量。
2. **施工方式**：施工過程中的技術和方法也會影響碳排放。如就地取材、節能設備、乾式施工、預鑄工程等，能有效減少施工過程中的能量消耗，均可降低碳排放量。

3. **設計型式**：壩體之設計型式會影響碳排放效益，如混凝土使用量、綠色基礎設施（如植生堤防）、具自然過濾功能之防砂設施等，能在減少碳排放的同時，提升環境保護效果。

4. **案例碳排估算：**

依據試區改善工程設計圖之施工材料進行碳排估算。依照農業部農村發展及水土保持署公告之工項碳排分析列表(2023/08/24)，挑選相對應適用項目，進行「排放係數法」之估算。

數量*碳排係數=碳排放量(tonCO2e)

本工項將以屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區之「力里橋上下游野溪整治工程」設計圖之「原始工程改善設計圖」及「討論後修改之工程改善設計圖」進行施工材料之估算。屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區之原版設計圖之工料碳排估算共 679.113 (tonCO2e)(表 4. 10)，而依照討論後修改之工程改善設計圖之工料碳排估算共 68.481 (tonCO2e)(表 4. 11)，**減少約 89.916%之碳排量**。

表 4. 10 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區_原版設計圖之工料碳排估算表

編碼	項目與說明	單位	碳排係數	數量	碳排量 (tonCO2e)
02300C0003	土方工作，挖方	M3	2.51	482.257	1.210
02300DF0003	土方工作，填方和回填方	M3	2.78	225.284	0.626
0237400002	石籠，鍍鋅鋼線箱形石籠網材	M2	1.30	45.000	0.058
0237430002	石籠，1.0m × 1.0m ×1.0m(箱型)	M2	15.535	90.000	1.398
0238631202	砌排石工，乾砌石，塊石(15≦§≦40cm，厚 25cm，未含溝縫)	M2	1.221	147.997	0.180
0311012102	場鑄結構混凝土用模板，普通模板，軀体	M2	0.290	982.674	0.284
0311090002	場鑄結構混凝土用模板，鋼製模板	M2	8.897	3363.800	29.927

03110A0002	場鑄結構混凝土用模板，造型模板	M2	3.253	1444.136	4.697
0321000005	鋼筋(不分類)	T	983.720	47.594	46.819
0331023003	結構用混凝土，預拌，140kgf/cm2	M3	293.570	12.563	3.688
0331025003	結構用混凝土，預拌，210kgf/cm2	M3	324.340	1282.669	416.020
0331026003	結構用混凝土，預拌，245kgf/cm2	M3	334.520	423.802	141.770
0406130003	水泥砂漿，1:3	M3	437.000	5.560	2.429
共計					**679.113**

說明	主流工程(挖、填方) 約 35 處	1.378 估算共(tonCO2e)
	A 式預鑄護岸工程 共計 67m	32.425 估算共(tonCO2e)
	B 式預鑄護岸工程 共計 76.9m	37.216 估算共(tonCO2e)
	基礎預鑄塊材料數量_A 式預鑄護岸工程 共計約 65 塊	30.107 估算共(tonCO2e)
	基礎預鑄塊材料數量_B 式預鑄護岸工程 共計約 74 塊	34.275 估算共(tonCO2e)
	牆身預鑄塊材料數量_A 式預鑄護岸工程 共計約 260 塊	35.924 估算共(tonCO2e)
	牆身預鑄塊材料數量_B 式預鑄護岸工程 共計約 296 塊	40.899 估算共(tonCO2e)
	A 式預鑄塊護岸隔牆工程 共 3 處	20.281 估算共(tonCO2e)
	B 式預鑄塊護岸隔牆工程 共 1 處	6.760 估算共(tonCO2e)
	封牆工程 共 3 處	9.500 估算共(tonCO2e)
	箱型石籠_高鍍鋅鋼線 共 45 個	1.457 估算共(tonCO2e)
	可拆式攔砂設施鋼構數量 共 4 支	0.612 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_可拆式攔砂設施_A-A 斷面 共 776m	36.417 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_可拆式攔砂設施_B-B 斷面 共 776m	73.427 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_主壩體下游面老化及破損改善 共 184.4m2	36.216 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_溢洪口側牆 共 11.4m2	2.239 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_主壩體溢洪口磨損底部改善 共 2m	1.295 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_尾檻壩體改善_縱向廊道工程 共 1 處	27.393 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_尾檻壩體改善_主壩體下游面老化及破損改善 共 142m2	2.558 估算共(tonCO2e)
	#1 防砂壩改善工程_尾檻壩體改善_溢洪翼牆工程 共 9.45m	4.130 估算共(tonCO2e)
	#2 既有主(副)壩改善工程 每處共 3.6m	2.862 估算共(tonCO2e)
	#2 既有主(副)壩改善工程 共 269m2	51.174 估算共(tonCO2e)
	#2 既有主(副)壩改善工程_可拆式攔砂設施_A-A 斷面 共 5.49m	5.49 估算共(tonCO2e)
	#2 既有主(副)壩改善工程_可拆式攔砂設施_B-B 斷面 共 5.49m	29.096 估算共(tonCO2e)
	#2 既有主(副)壩改善工程_主壩體下游面老化及破損改善 共 53m2	10.409 估算共(tonCO2e)
	#2 既有主(副)壩改善工程_溢洪口側牆 共 6.3m2	1.237 估算共(tonCO2e)
	#2 既有主(副)壩改善工程_主壩體溢洪口磨損底部改善 共 28.6m	18.591 估算共(tonCO2e)
	#2-1 縱向廊道工程 共 1 處	38.546 估算共(tonCO2e)
	#2-2、#2-3 副壩-壩體縱向廊道改善工程 共 2 處	30.316 估算共(tonCO2e)

	#1-既有主(副)壩改善工程_透水性護坦縱、橫格梁工程 共 16.9m	5.250 估算共(tonCO2e)
	#2-既有主(副)壩改善工程_透水性護坦縱、橫格梁工程 共 37.7m	11.711 估算共(tonCO2e)

表 4. 11 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區_新版設計圖之工料碳排估算表

編碼	項目與說明	單位	碳排係數	數量	碳排量(tonCO2e)
02300DF0003	土方工作，填方和回填方	M3	2.780	335.750	0.933
0231912003	選擇性回填材料，透水材料，礫石	M3	9.088	305.000	2.772
0231919003	選擇性回填材料，透水材料，塊石	M3	11.672	640.000	7.470
0238614102	砌排石工，乾砌石，大塊石(41≦ϕ≦80cm)	M2	8.860	234.875	2.081
0238616102	砌排石工，乾砌石，巨石(80cm≦ϕ≦120cm)	M2	12.300	554.610	6.822
0321000005	鋼筋(不分類)	T	983.720	1.278	1.257
0331025003	結構用混凝土，預拌，210kgf/cm2	M3	324.340	145.360	47.146
共計					**68.481**

說明	#1 崁石階梯式固床工 共計 1 座(OK+139.33~OK+149.33)	28.405 估算共(tonCO2e)
	#2 崁石階梯式固床工 共計 1 座(OK+228.08~OK+238.08)	26.434 估算共(tonCO2e)
	#1 砌石固床工 共計 1 座(OK+040)	0.69372 估算共(tonCO2e)
	#2 砌石固床工 共計 1 座(OK+080)	0.472 估算共(tonCO2e)
	#3 砌石固床工 共計 1 座(OK+180)	0.472 估算共(tonCO2e)
	#4 砌石固床工 共計 1 座(OK+209.80)	0.472 估算共(tonCO2e)
	坡腳保護 共計 100m(OK+040~OK+149.33)	8.3764 估算共(tonCO2e)
	既有護岸基礎台隱藏處理 共計 61m(OK+150~OK+220)	2.7718 估算共(tonCO2e)
	乾砌石護岸 共計 14.5m(OK+215.30)	0.3559 估算共(tonCO2e)
	土堤 共計 25m(OK+041.50)	0.0271 估算共(tonCO2e)

(二)綠能

本章節主要探討工程期間盡可能減少周圍植被及生態的擾動，工程前後植生恢復情況，及洪水前後之植生擾動情況之呈現。植被的生長狀況被普遍用來評估環境是否良好的重要指標，傳統的植被分布狀況主要依靠現地調查，雖然準確率高，但相當耗費人力資源，而隨著遙感技術發展，遙感探測植被的方法已被廣泛利用。本研究使用 Parrot ANAFI Extended 空拍機進行空拍，可見光波段有良好的感應能力，能夠得到高解析度之 RGB 圖像。利用空拍之連續照片建置 DSM 並輸出點雲資料，以供後續規則網格處理及搭配可見光指標進行計算。使用 UAV 進行航拍，航拍方式透過 UAV 拍攝不同角度，來建置高解析度之正射影像，分別採用為正拍(nadir)、側拍(oblique)、斜拍(horizontal)的方式，在飛行中會提高影像的覆蓋率及拍攝張數，建立高解析度正射影像及高精度數值高程模型(DEM)。利用影像分析技術對河道之正射影像進行植生分布辨識。利用影像分析技術，配合 MATLAB 程式分析 RGB 色彩模型，利用 RGB 資料估算過量綠色指數(Excess Green Index，ExG)，指將光譜的綠色(G)、紅色(R)及藍色(B)進行對比，並凸顯綠色波段在每個網格中的重要性，以區分出植被與土壤之分布情形(Woebbecke et al., 1995)。各期影像記錄皆會受到日照、天氣等因素影響 RGB 之呈現，故對於各期影響記錄進行色彩數據設定閥值範圍，以計算辨識之網格數並計算其面積。

$$\text{Excess Green Index} = 2 * G - R - B$$

式中 g 為綠光反射率、r 為紅光反射率、b 為藍光反射率。

將航拍成果進行正射化運算，並建置數值地表模型(Digital Surface Model，DSM)且輸出點雲資料，供後續網格數搭配可見光指標之計算分析及 RGB 計算等，欲計算裸露地與植生覆蓋之比率，流程如圖 4. 9。

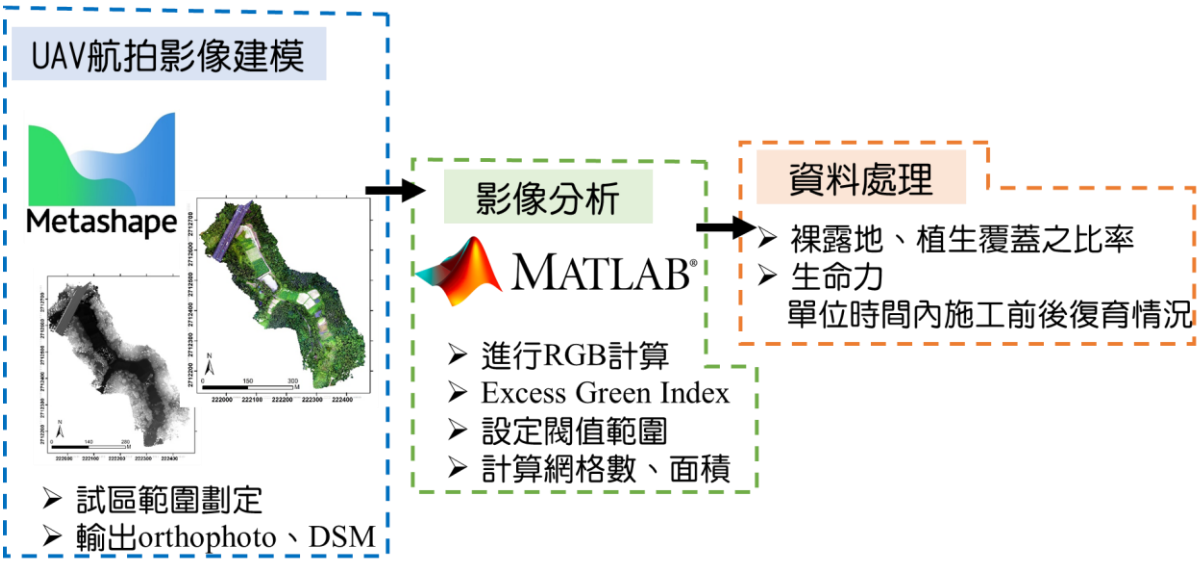


圖 4. 9 ExG 植生影像辨識步驟

1. 臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

取樣 2024 年 2 月 6 日及凱米颱風（Typhoon Gaemi）後 8 月 13 日，共兩期影像資料，數化河道中研究範圍之植生覆蓋面積(表 4. 12、圖 4. 10 及圖 4. 11)，影像判釋結果顯示 2024 年 2 月 6 日由 1.14 公頃(網格數 12,683,941)，凱米颱風後減少為 0.96 公頃(網格數 10,731,497)。評估受經歷 2024 年 6 月數次豪雨及 7 月的強烈颱風凱米影響，大部分喬木、植生受倒伏、沖刷所致。

表 4. 12 關山九號橋後堀溪試區-ExG 植生判釋結果

植生覆蓋	網格數	面積(ha)
NH_1130206	12,683,941	1.14
NH_1130813	10,731,497	0.96

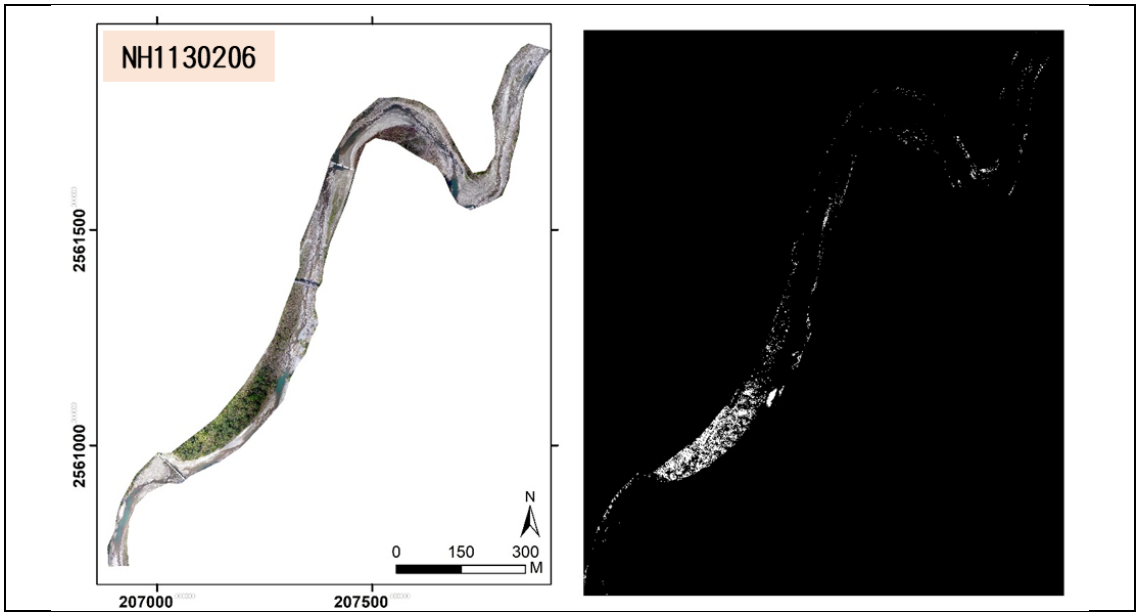


圖 4. 10 關山九號橋後堀溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/02/06)

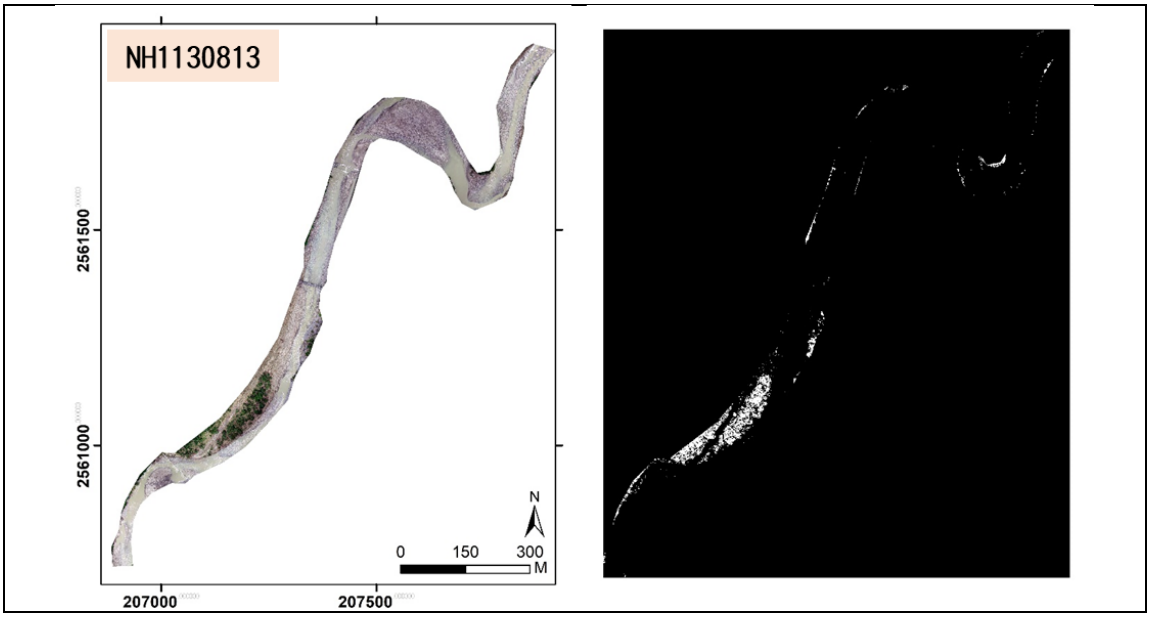


圖 4. 11 關山九號橋後堀溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/08/13)

2. 屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

取樣 2024 年 1 月 24 日(原始地形/施工前)及凱米颱風（Typhoon Gaemi）後 8 月 8 日共兩期影像資料，數化河道中研究範圍之植生覆蓋面積(表 4. 13、圖 4. 12 至圖 4. 14)，影像判釋結果顯示 2024 年 1 月 24 日由 0.614 公頃(網格數 6,827,192)，壩體改善工程於 2024 年 2 月開工，將調降溢洪口並安裝橫向 H 型鋼，並經歷 2024 年 6 月的數次豪雨及 7 月凱米颱風，於 2024 年 8 月尚處於施工階段，影像判釋結果減少為 0.541 公頃(網格數 6,019,112)。評估研究範圍主要受工程施工擾動所致。

而接續於 2024 年 10 月強烈颱風康芮侵襲，河道中橫向構造物皆於凱米颱風前已開口，河道明顯刷出深槽線並持續引導水流及土砂輸送。2024 年 10 月 14 日影像判釋結果增加為 0.542 公頃(網格數 6,025,525)。評估研究範圍植生覆蓋範圍變化，受數次洪水沖刷及工程施工擾動所致。

表 4. 13 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果

植生覆蓋	網格數	面積(ha)
LLB_1130124	6,827,192	0.614
LLB_1130808	6,019,112	0.541
LLB_1131014	6,025,525	0.542

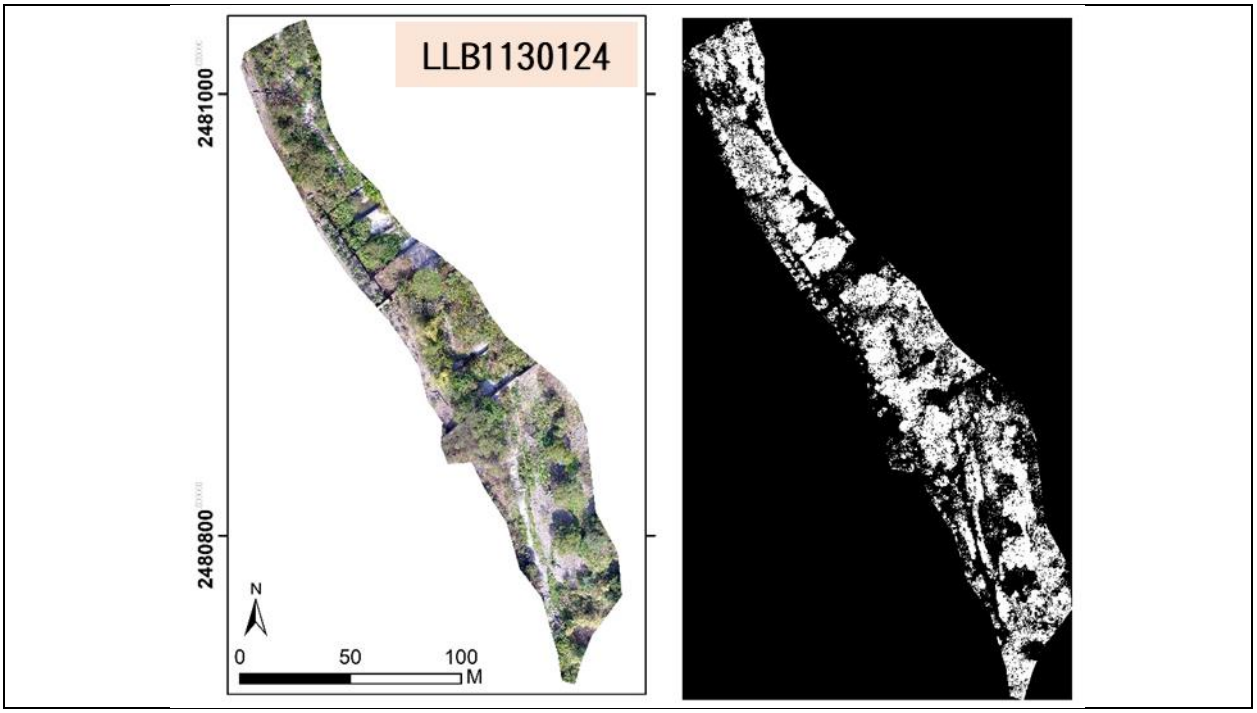


圖 4. 12 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/01/24)

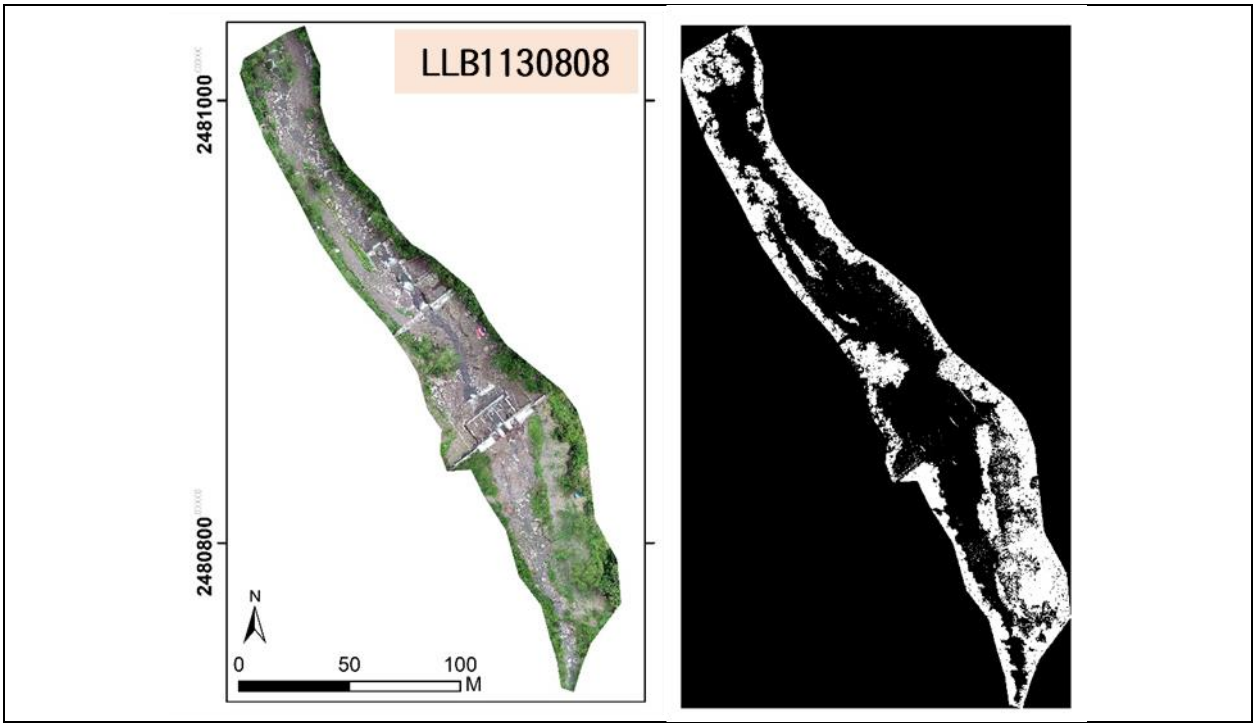


圖 4. 13 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/08/08)

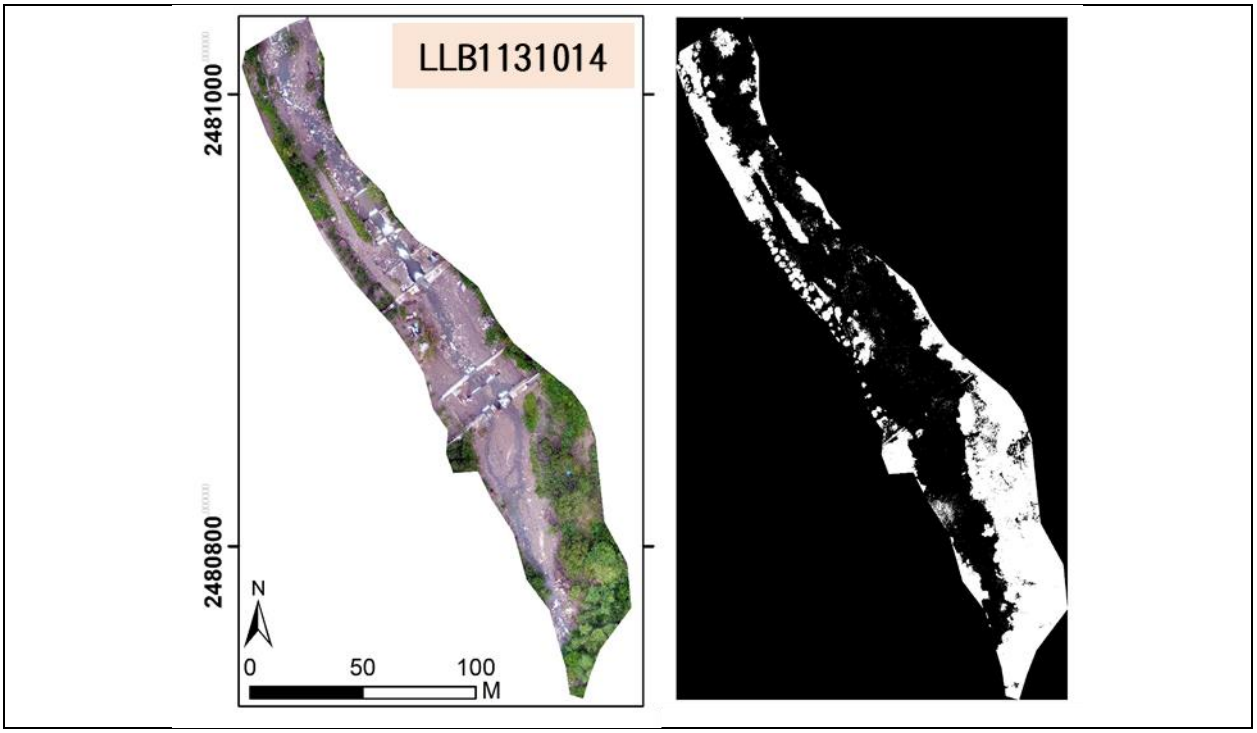


圖 4. 14 力里橋力里溪試區-ExG 植生判釋結果(2024/10/14)

(三)因應土砂變化調整

面對土砂量高度變動的野溪，必須常態性經營管理防砂壩，依據土石流發生狀況及攔阻情形，可改變壩體之透過性機能，以達溪流土砂之平衡，最終仍須以回歸自然野溪為原則。

為預防災害可依照圖 4. 15 所示，全面安裝縱材及橫桿。根據當前情況沉積物狀況，防砂壩的類型可以有所變化，其攔截沉積物的能力也會相應改變，以滿足最佳沉積物管理對策及生態考量。如果下游沉積物不足，可以通過調整橫桿來釋放細小顆粒，同時保持主流床在中心。如果需要增加沉積物的釋放量，可以調整縱材，隨著釋放量的增加，這一過程會促進河道恢復。這種靈活性使得在面對較大災害時能夠實現可逆性，或者根據特定河道的現狀進行調整。

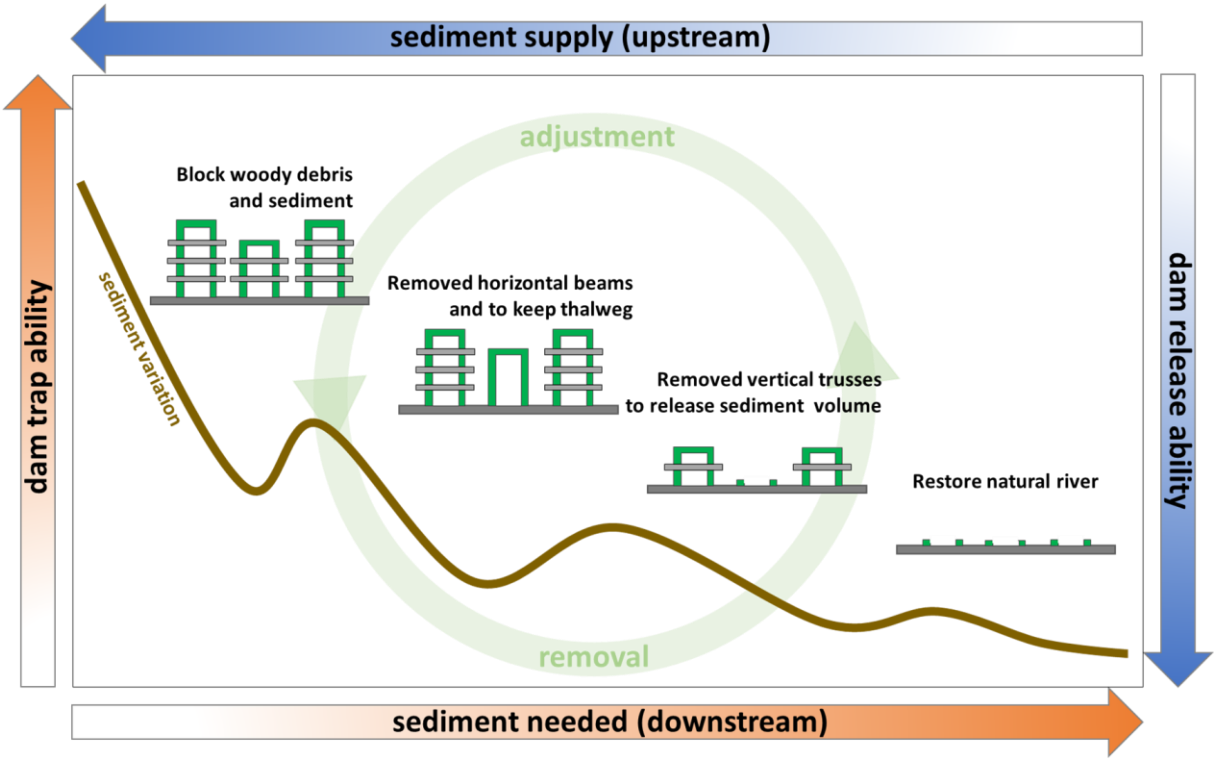


圖 4. 15 依據環境概況調整壩體型態之功能概念圖(陳樹群等，2021)

防砂壩調整可概分為三大階段 (圖 4. 16)，第一階段為先調整壩體中央橫材，自然排砂刷出一條深槽線，以導正流心於河床中央範圍，緩慢釋放上游之淤積土砂。開口位置尚需考量上下游河道需求進行相對應的開口變化型式。第二階段為適量調整縱材寬度範圍，增加壩口寬度以釋放更多淤積土砂，此時不僅可維持流心於河床中央，亦可同時保護上游兩岸邊坡。第三階段為持續增加橫材及縱材之調整範圍，以增加縱向廊道，恢復生態與土砂連續性及輸砂平衡。防砂壩調整三大階段主要表達調整流程、目的及效益，實際執行尚需對環境進行上下游環境調查、評估，以提出更適應性之調整方案。此三大階段將視環境、土砂釋放程度之需求，而有執行程度之差異及進程。

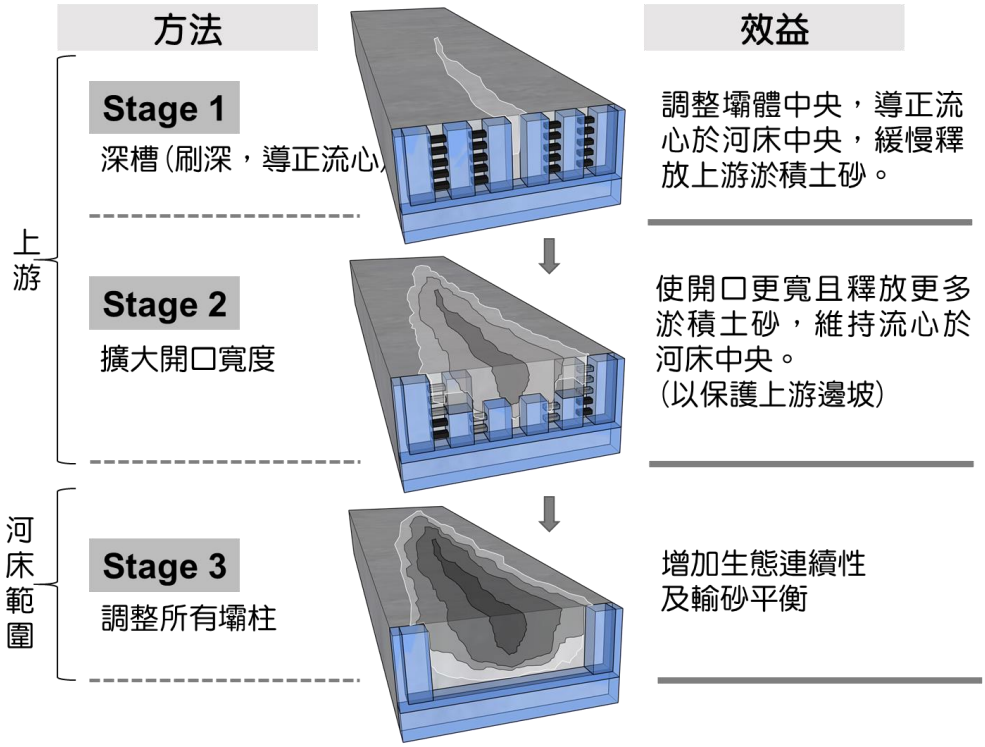


圖 4. 16 防砂壩調整三大階段及土砂釋放程度

調整型防砂壩之縱橫向元件，以調整型之鋼構壩及混凝土壩為例，其土砂通過率係由橫材之間距來調節。壩體縱向間距中至少一處開口寬最小維持 3.0 公尺，以作為人工清淤通道，便於挖土機等機具

之進出作業，同時加大之縱向間距也有利於河道之自然水力下洩土砂。

第伍章　調整型防砂壩管理維護

第一節 擬訂研究試區之動態調整建議方案及建議操作時機

依據圖 5.1 當大型土砂事件發生時，先思考該區域是否有道路、居民等保全對象。若沒有保全對象，基於河溪自然演變及生態連續性的原則，不宜興建任何人工結構物。若有保全對象，僅屬於洪水災害，而非土砂災害，則以興建切口壩的滯洪池來調整洪峰流量即可。假若保全對象為**高峰期**的土石流溪流，可興建調整型防砂壩，並視情況定期調整橫向元件以清淤，例如壩體上游淤滿已無庫容來預防下次大型土砂事件，及下游壩基或固床有嚴重淘刷情形者，即可啟動橫向元件調整之清淤作業。亦同時定期觀測土砂量，評估大型土砂事件再發生機率。若是仍處於土砂高峰期，則仍應保持現有壩體。

但若評估已進入**土砂消減期**，可隨著泥砂量的減少先減少橫向元件，以排除上游多餘土砂。若評估已進入河道土砂削減期 (僅為基礎輸砂量)且可預見的未來不會再出現大型土砂事件，可拆除數組縱向元件允許更多土砂流出，以提供完整的縱向廊道，恢復生態與土砂的連續性。

若來砂量再次減少且上游不再有崩塌，進入河道**土砂穩定期**，仍有洪水引起河道下刷之疑慮，則可把防砂壩降低成低矮的固床工型態，甚至把固床工回復成自然的潭瀨溪流結構，以恢復完整縱向生態廊道，回到自然生態的連續性。若僅是調整橫向元件，則較屬常態性之拆組作業，可由管理單位自行評估施作時機，但若是降低或拆除縱向元件(壩柱等)，則涉及土砂高峰期、削減期及穩定期之判釋。

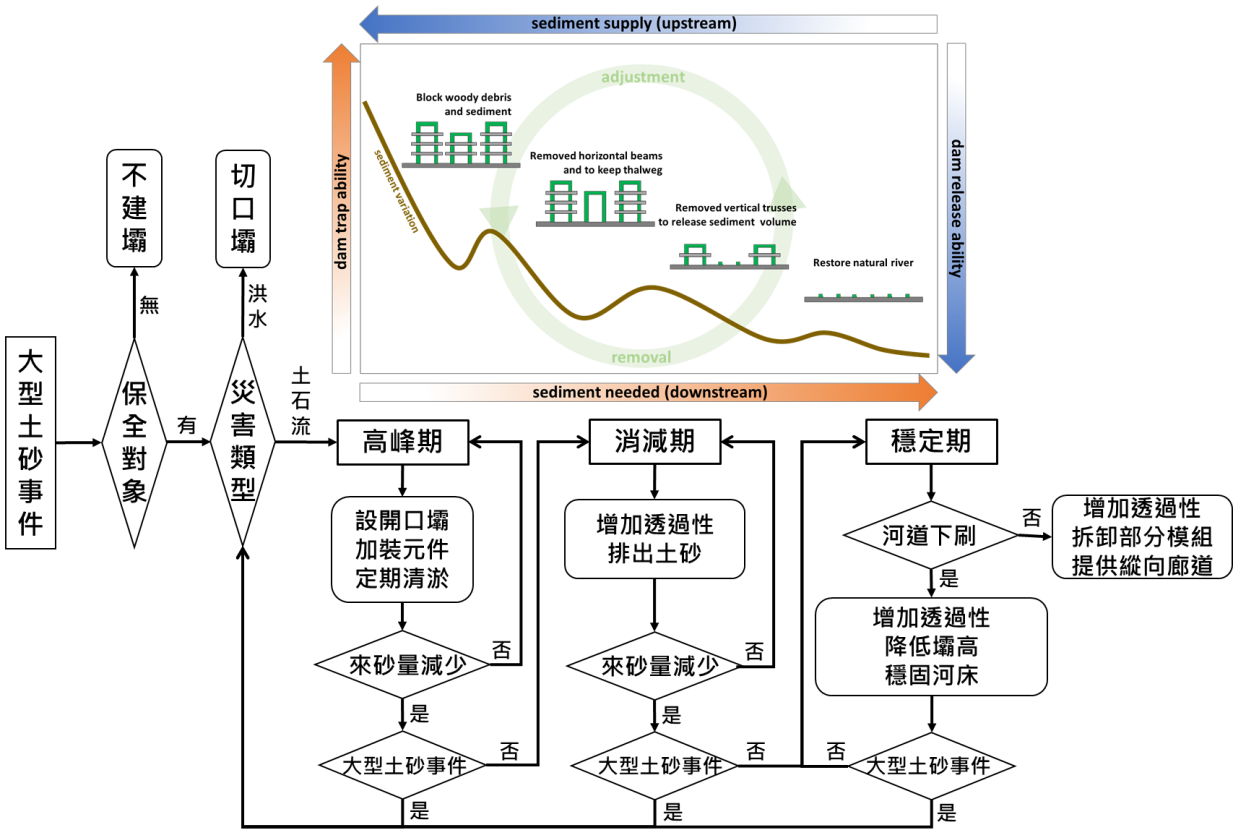


圖 5.1 橫向構造物之興建與調整時機及流程

調整型防砂壩俗稱「會呼吸的防砂壩」，一般多採用開口型，在開口處裝置鋼管及格柵設施等，主要強調橫桿、縱材等都必須相互獨立，分別組裝及拆卸。可分為經常性的反覆調整及長久性調整，**經常性的反覆調整**指當防砂壩上游已淤滿，未能保有庫容以攔阻下次土砂來襲，且防砂壩下游有淘刷嚴重之情況或風險時，此時可於**非汛期**調整橫材以讓適量土砂下移，於**汛期時**在將橫材裝回預防下次土砂事件；**長久性調整**指評估河道已進入土砂穩定期，預期未來不會再有大型土砂事件時，則可調整縱材，使開口更寬且釋放更多淤積土砂，增加縱向廊道，恢復生態與土砂連續性。

調整型防砂壩提供靈活性、適應性和可持續性，需根據當地情況量身定制，並利用自然力量進行輸砂、排砂。操作程序的調整不需要標準化，但應考慮當地情況並遵循圖 5.1 中之程序。**下游所需的沉積**

量和上游潛在的沉積供應量將是調整壩體的主要因素。防砂壩的調整會改變沉積物的攔截和釋放能力，從而創造一個新的平衡。

(一)調整型防砂壩之維護管理

調整型防砂壩之設計理念，即為了後續因應環境變化而作調整及維護管理作業。野溪中防砂壩之設置，時過境遷後常因上游來砂量、下游淘刷等問題，而需考量調整壩體、設置固床工及防砂壩等需求，若設計時即思考調整型壩體，即可避免後續野溪中更多的人工構造物設置需求，亦兼顧生態之連續性及多樣性。

壩體若歷經數次災害後有所毀損，先考量壩體是否還保有其既有功能，其次考量其安全性，鋼構壩每組分開之設計有利於更換局部組件即可，而調整型混凝土式防砂壩，亦可替換其橫向元件。

維護管理作業 SOP(圖 5. 2)主要分為監測、診斷、處理及追蹤四大步驟，可分為幾個面向進行探討，第一步彙整壩體基礎資料及監測資料並分析地文及水文概況；第二步釐清所面臨之困境，如集水區崩塌及土壤流失、壩體安全結構、壩體上游淤積及下游淘刷、生態連續性議題等面向進行診斷；第三步以縱向刷深穩定流心、橫向擴寬排除土砂、全面卸除回歸自然、反向操作預防災害等面向進行處理；第四部以土砂平衡長期觀測、生態連續長期調查、保全對象安全評估等面向進行追蹤。並以此流程進行長期維護管理作業。

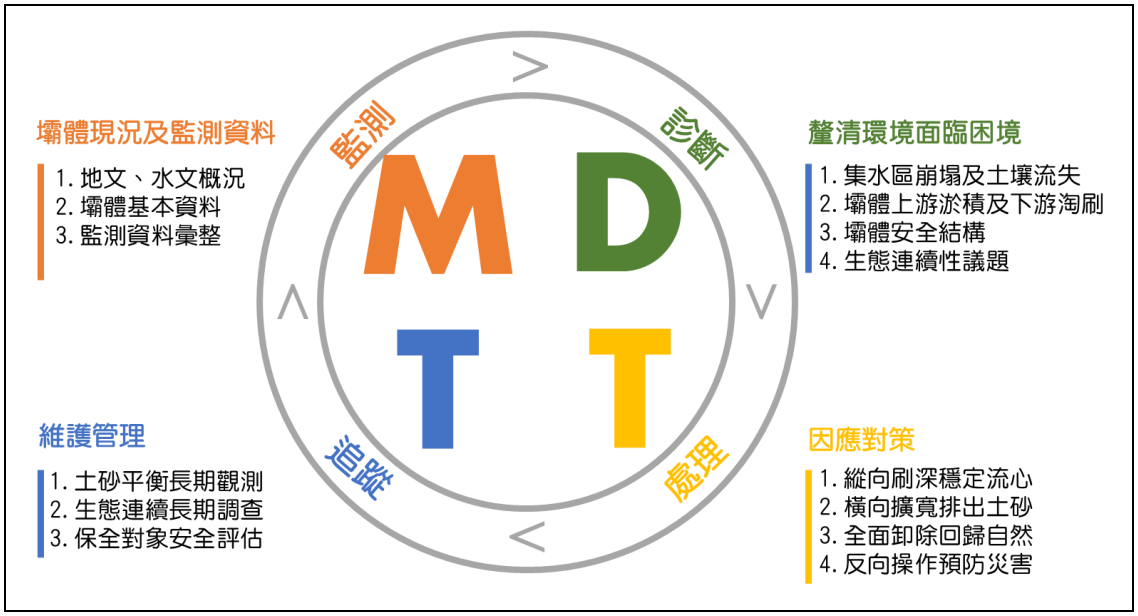


圖 5. 2 維護管理作業 SOP

建議選擇適當之維護管理指標(圖 5. 3)，**監測**之第一步為進行集水區特性、河溪特性、災害歷史等瞭解，以進行防砂壩現況分析並作為維護管理指標訂定之參考，第二步為由地文水文資料觀測、河道土砂資料監測及空中航照衛星影像以獲得集水區之相關資料，從而建立崩塌、綠覆率、河床質、上游淤積及下游淘刷等維護管理指標。**診斷**是指利用維護管理指標來分析防砂壩位處之土砂流失、水文流量及河床質等環境問題，並瞭解其主要原因為何。

處理則是針對不同驅力所造成溪流問題之因應策略，第一步為選定管理目標，第二步為解決問題進行策略規劃及方案擬定；第三步為經由效益分析選定適合之策略方案。**追蹤**是指方案完成後之維護管理情形，並建立預警制度以進行調整型防砂壩之維護管理流程，模式架構如圖 5. 3 所示。

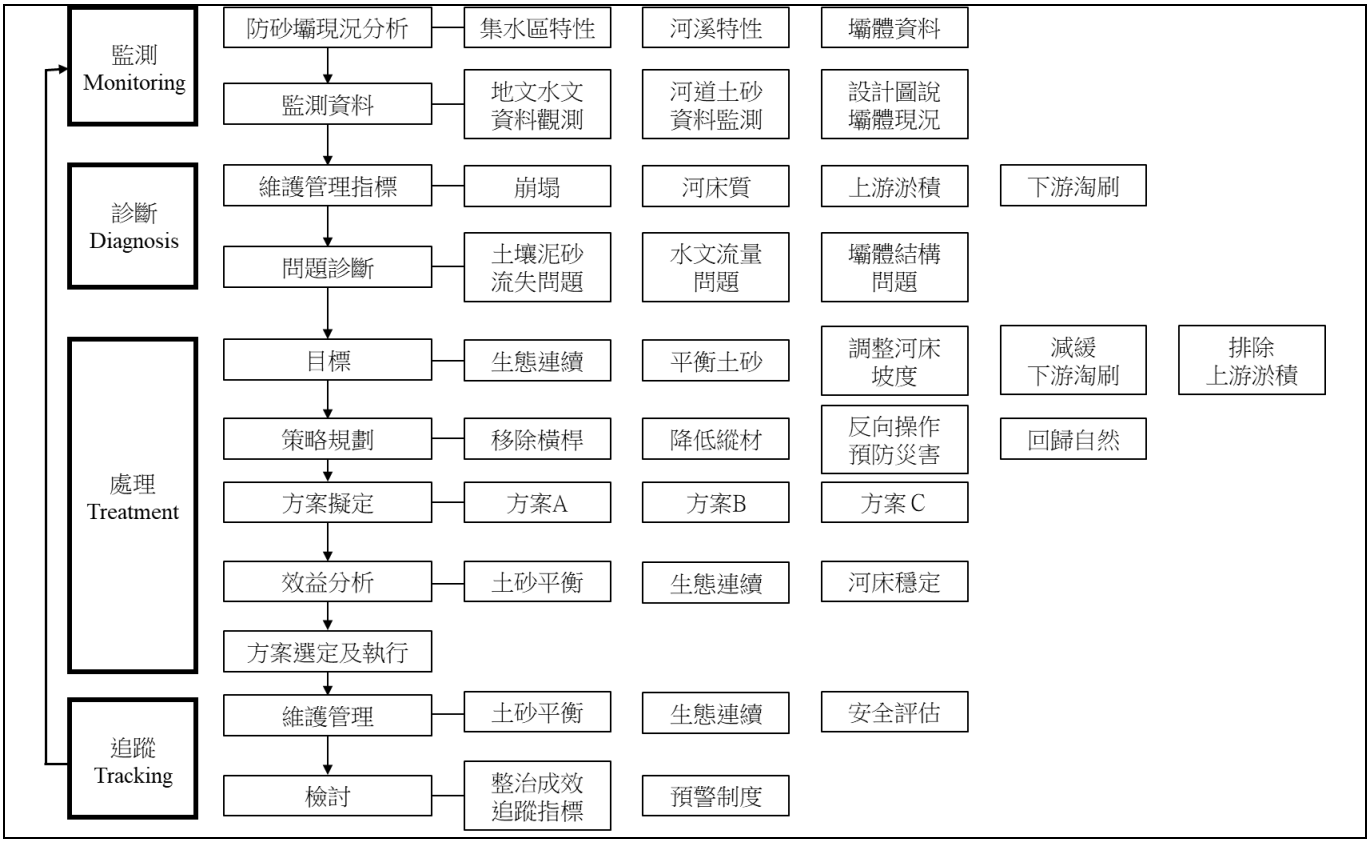


圖 5.3 調整型防砂壩之維護管理流程

(二)動態調整建議方案-臺南市南化區關山九號橋後堀溪試區

提出關山九號橋後堀溪試區，參考第參章第二節數值模擬成果，綜合提出之改善對策，如下進行討論。

(1) 依據第伍章第一節調整時機，及第貳章第五節透過近 20 年上游崩塌地面積變化程度，推估試區處於土砂高峰期階段，而關山九號橋試區兩處橫向構造物上游皆已淤滿，已無庫容來預防下次大型土砂事件。建議調整橫向元件，並進行上游清淤作業，亦需定期觀測土砂量變化，評估大型土砂事件再次發生之機率。

(2) 考量上游調整型封閉式固床工(堤尾工)其興建目的為南化水庫上游之土砂攔阻防線，建議部分調降預鑄橫樑，使清淤機具可利用此清淤通道，對上游淤積土方進行人工清淤作業。

(3) 上游調整型封閉式固床工(堤尾工)右岸(複式漿砌石護岸處)估算沿線有長 1 公里、高 2 公尺之土方回填區可利用；壩體左岸之芒果樹種植區為國有土地，亦可規劃暫置清淤土方，以達到土方去化、土方交換之效果。估算暫置土方量可達 53,952 立方公尺(A 處暫置區約 20,536 立方公尺;B 處暫置區約 33,416 立方公尺)(圖 5. 4)。透過內政部地政司之地籍圖網路服務系統查詢相對應之土方暫置區(A、B 區)屬 8049 北勢段，分別為林業用地、農牧用地之使用地類別(圖 5. 5)。

(4) 清淤後之土方除了放置於土方暫置區(A、B 區)外，亦建議可回填土方於下游調整型孔隙式防砂壩左岸崩塌地下方之河道邊坡處，此處指南 179 號線下方河道邊坡處，以進行邊坡穩定。

(5) 對於土方暫置區(A、B 區)之保護措施，評估土方暫置區並不會受到洪水擾動及沖刷，建議採用拋塊石或土包袋方式進行穩定即可，以避免使用混凝土。



圖 5. 4 上游調整型封閉式固床工(堤尾工)-清淤土方暫置區

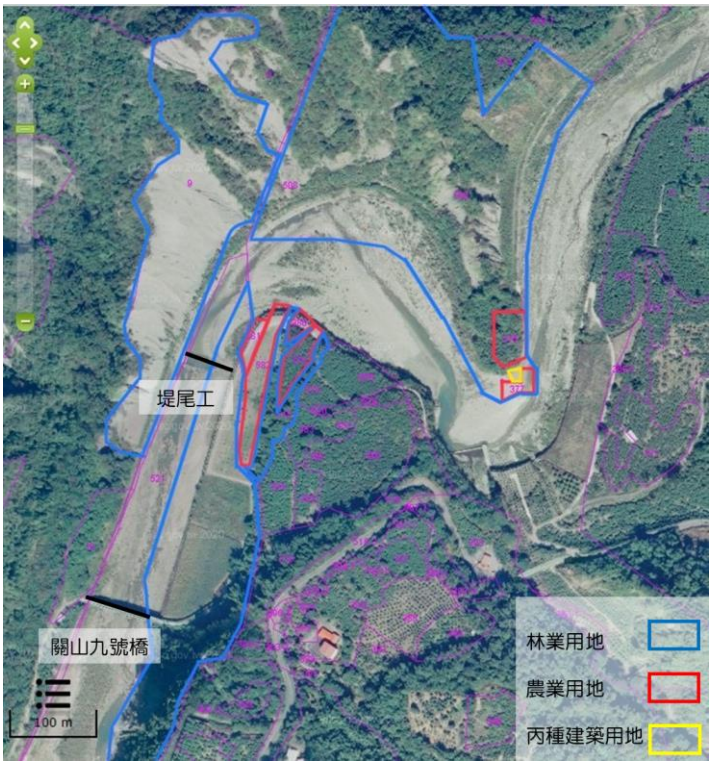


圖 5. 5 關山九號橋土方堆置區-地籍圖相關資訊

(參考內政部地政司 2024 年 10 月 22 日版本)

(6) 下游調整型孔隙式防砂壩為南化水庫上游之最後一道土砂攔阻防線，其防砂壩左岸之崩塌地，現況調查與南 179 號線間距僅剩約 30 公尺(圖 5. 6)，需針對壩體上游左岸邊坡進行邊坡保護作業，並回填土方以減緩崩塌範圍持續擴大。

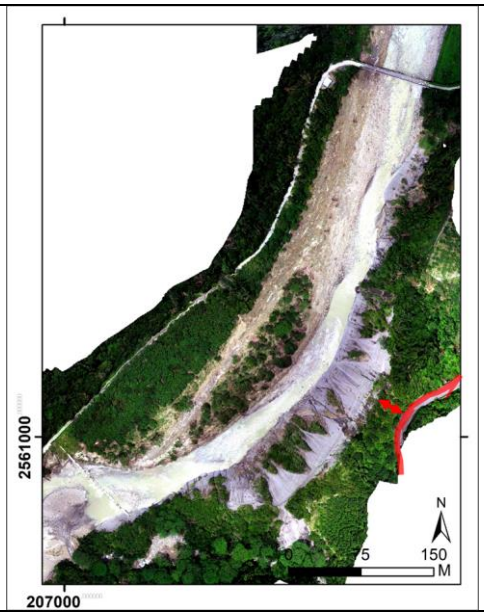
<table>
<tr><td></td><td>
</td></tr>
<tr><td>下游防砂壩之左岸崩塌地</td><td>南 179 號線與崩塌地間距剩約 30m</td></tr>
</table>

圖 5. 6 關山九號橋後堀溪試區下游崩塌地現況(2024/08/13)

(7) 下游調整型孔隙式防砂壩之上游右岸有大面積之淤積灘地，將壩體上游之河道由原先約 112 公尺寬，束縮後僅剩約 22 公尺。可利用此灘地，規劃部分清淤以引導水流流向，以避免水流持續攻擊左岸，甚至影響南 179 號線。對此請參閱數值模擬結果章節，提出以下建議：

A. 下游調整型孔隙式防砂壩之上游右岸淤積灘地於洪水前後之範圍有明顯差異，於 2024 年凱米颱風後(2024/08/13)之空拍影像，可明顯看出高灘地中有一條洪水沖出之流路痕跡(圖 5. 7) ，其河寬寬度約 10~15 公尺。

B. 考量河道輸砂特性，建議利用高灘地內之此流路，進行模擬後建議利用洪水所沖刷出之河寬寬度約 10~15 公尺內範圍進行分流清淤作業，其河道深槽建議與主河道一致，於常流水時就能引導水流，減緩水流對於左岸邊坡沖刷之風險，亦保護南 179 號線(圖 5. 8)。

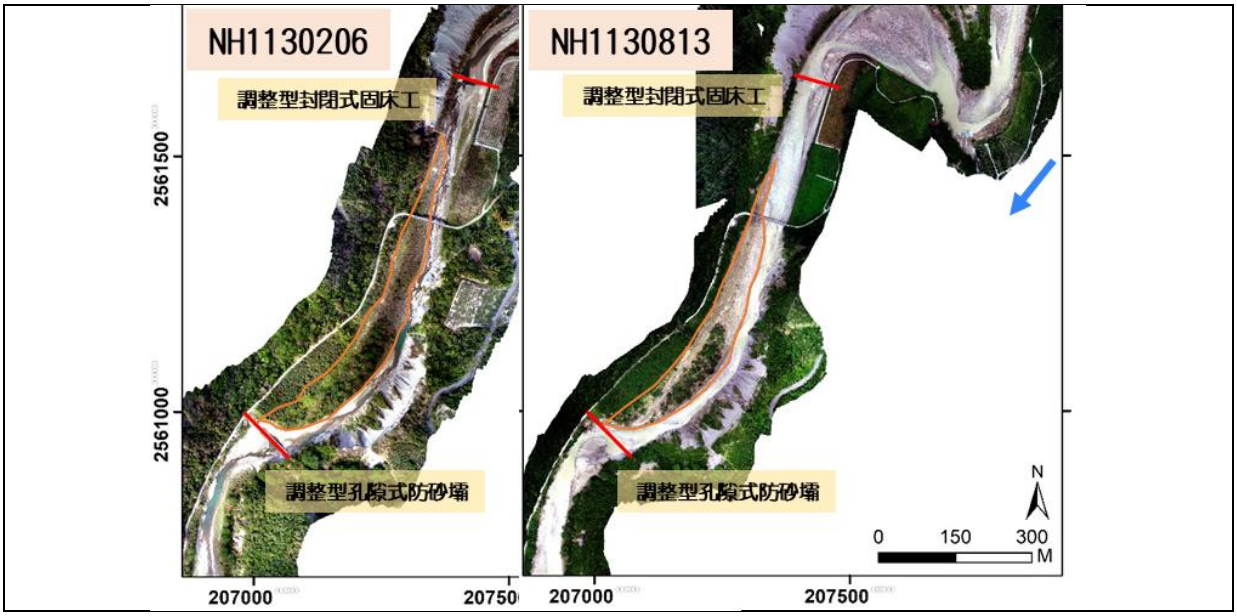


圖 5.7 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-上游高灘地範圍變化

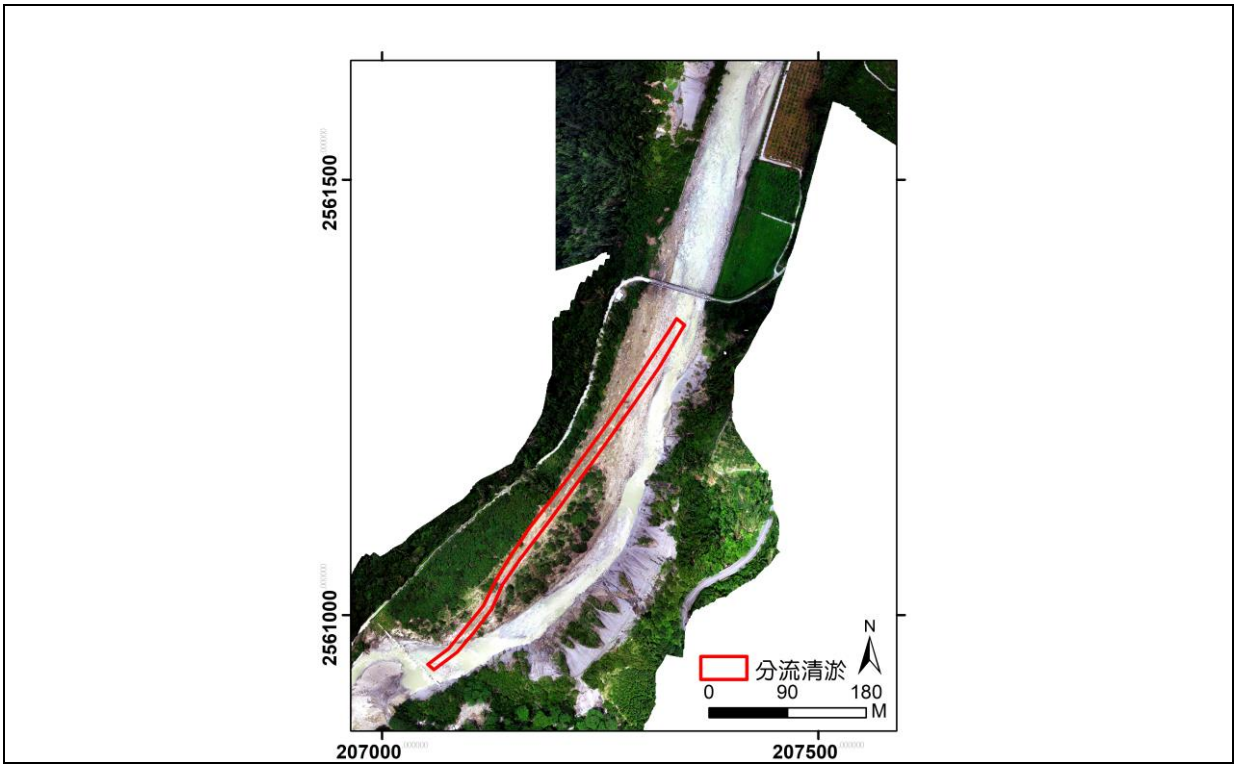


圖 5.8 關山九號橋下游調整型孔隙式防砂壩-分流清淤範圍

(8) 下游調整型孔隙式防砂壩若有壩體加高之需求，尚需先探討分流清淤後之效益，再進行評估是否需要提升土砂攔阻之需求。

(三)動態調整建議方案-屏東縣春日鄉力里橋力里溪試區

力里橋力里溪試區於 2023 年 1 月推動改善規劃及現地調查，當時即對原始設計圖提出以下幾點建議：

1. 依據第伍章第一節調整時機，及第貳章第五節透過近 10 年上游崩塌地面積變化程度，推估試區進入土砂削減期階段，建議力里橋試區可進行壩體調整作業，釋放上游淤積土砂，亦可達改善縱向廊道、友善生態及灰土砂連續性之目的。
2. 既有封閉型防砂壩(0K+000)之溢口處，建議調整為「打開三處缺口並加裝橫桿」，以利後續因應上游來砂量及土砂淤積問題，進行壩體調整作業。
3. 每處調整缺口之寬度，建議至少 3 公尺，其亦可作為清淤通道，便於挖土機等機具之進出作業，同時此間距也有利於河道之自然力下洩土砂。
4. 護岸工程建議由預鑄塊封牆工程改為格框護岸工程，已減少混凝土用量，亦可達到相同之保護邊坡之效果。

農村發展及水土保持署臺南分署於 2023 年之執行「力里橋上下游野溪整治工程」，於 2024 年 2 月 19 開工。由於工程期間經歷 6 月的數次豪雨、7 月的強烈颱風凱米（Typhoon Gaemi）、10 月強烈颱風康芮（Typhoon Kong-rey）及 11 月天兔颱風(Typhoon Usagi)之影響，使工程進度延滯，故「力里橋上下游野溪整治工程」預計展延至 2025 年 1 月 20 日完工。

第二節 研擬調整型防砂壩維護管理手冊

防砂壩空間配置在歷經數十載的經驗累積，已有良好具體成效。但氣候變遷或防砂壩造成之空間環境改變，導致原先合理之配置出現偏差，而引起一系列的環境災害。以往多考量為控制土砂，現今因生態與環境需求越加重視，逐漸轉變為配合大自然來調整構造物型態。

「調整型防砂壩維護管理手冊」即以此出發點撰寫，透過現地案例調查及蒐集，彙整農村發展及水土保持署歷年調整型防砂壩相關研究資料，進行應用分析及探討。規劃將內容劃分為以下章節撰寫，主要分為(1)各類型防砂壩之土砂攔阻特性，說明壩體型態之分類、攔阻特性及其相關配置差異；(2)調整型防砂壩，說明過去與現在的環境、觀念、需求等轉變，防砂壩需如何因應，坡度、粒徑、上游來砂量、下游淘刷等情況來調整，及縱橫向原件如何配置及調整機制；(3)防砂壩經營管理與調整時機，以配置橫向構造物長期來看對河道之影響，為符合生態、環境、保護對象等需求，因應環境需求之建議調整方式，防砂壩在時間軸上該如何執行；(4)調整型防砂壩設計型式參考圖，主要為提供設計理念及建議，其設計還須因地制宜來做調整。調整型防砂壩維護管理手冊相關內容詳見附錄八。

調整型防砂壩維護管理手冊主要為原則說明，其調整時機及方式皆需因地制宜，決定防砂壩之調整時機及方式，需長期之規劃分析，建議設立檢討委員會或小組並現地勘查討論評估後再做決定。本計畫增列研究試區進行案例說明。將歷年調整案例可概分為**(1)單一防砂壩**：針對壩體上下游之沖淤狀況進行調整、**(2)系列防砂壩**：由上游至

下游或由下游至上游系列排放溪流輸砂量，以調整坡度淤砂、及**(3)水庫上游集水區防砂壩**：配合水庫清淤，調整防砂壩及清淤沉砂池。

(一)調整型防砂壩維護管理手冊_簡約版

從調整型防砂壩維護管理手冊內文中，摘要出幾項重點，以簡約版方式呈現，可更加快速、簡潔的瞭解評估、操作流程。調整型防砂壩維護管理手冊_簡約版，相關內容詳見附錄九。內容分為調整型防砂壩、縱橫向元件、防砂壩興建及調整時機、防砂壩壩體調整方式、調整型防砂壩之維護管理，共五項進行簡要說明。

第三節 調整型防砂壩科普教材及教具

規劃製作調整型防砂壩模型及漫畫，目的是提供更生動有趣的方式向公眾介紹調整型防砂壩的原理與功能。在氣候變遷的影響下，調整型防砂壩能夠在劇變的土砂環境中滿足不同時期的防砂、防災及生態需求，以促進大眾對防災工程的認知。通過模型展示及漫畫宣傳，公眾可更直觀地了解調整型防砂壩如何應對不同的氣候挑戰，並學習其在防災及生態保護中的重要作用。以下為進一步的說明：

(一)實施對象

1. 公眾教育：主要針對社區居民、學生及一般公眾，旨在提升他們對防砂壩和防災工程的認識和理解。
2. 專業人士：包括設計師、工程師、環境保護及政策制定者，以簡易及易懂的方式幫助他們了解調整型防砂壩的新思維和應用範圍。
3. 學術界：供研究機構和學術界使用推廣教育使用，以促進相關研究和學術討論。

(二)產製數量

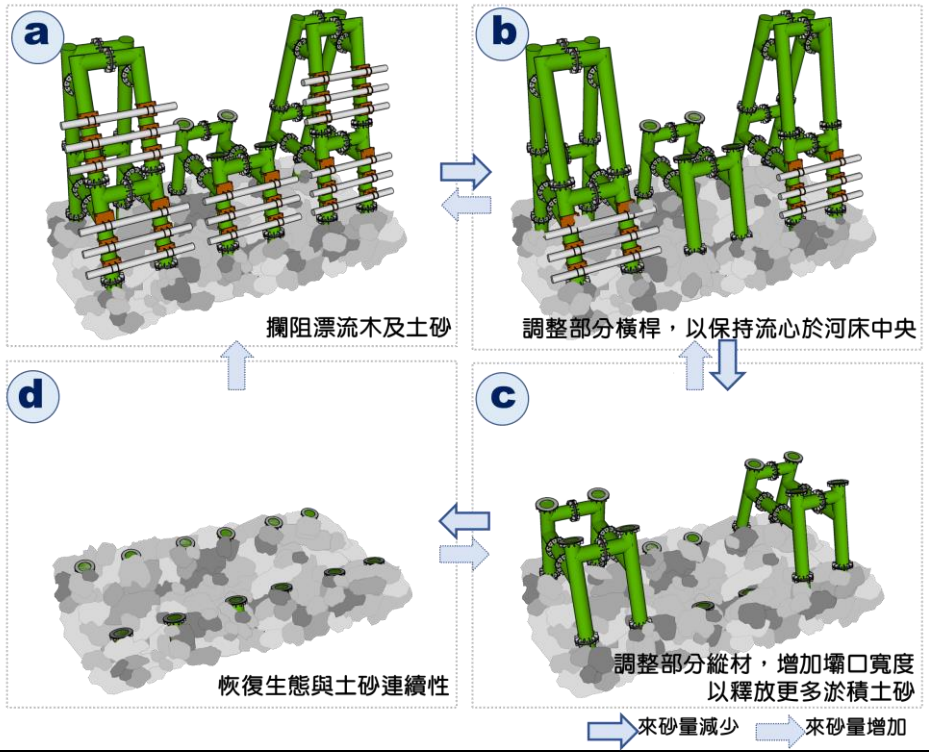
1. 模型：製作一組不同型式之調整型防砂壩模型，以便在不同場合、地點進行展示。
2. 漫畫：已完成初步故事建構及人物設定。漫畫可輸出紙本、電子版在不同平台快速、便利的進行宣傳教育。
3. 分配使用：模型可借出展示使用，如教育機構、社區中心及相關的公共展覽場地，提供給有需求的專業機構和學術機構進行展示和研究。漫畫可網路、社群...等平台進行宣傳教育。

(三)調整型防砂壩-模型

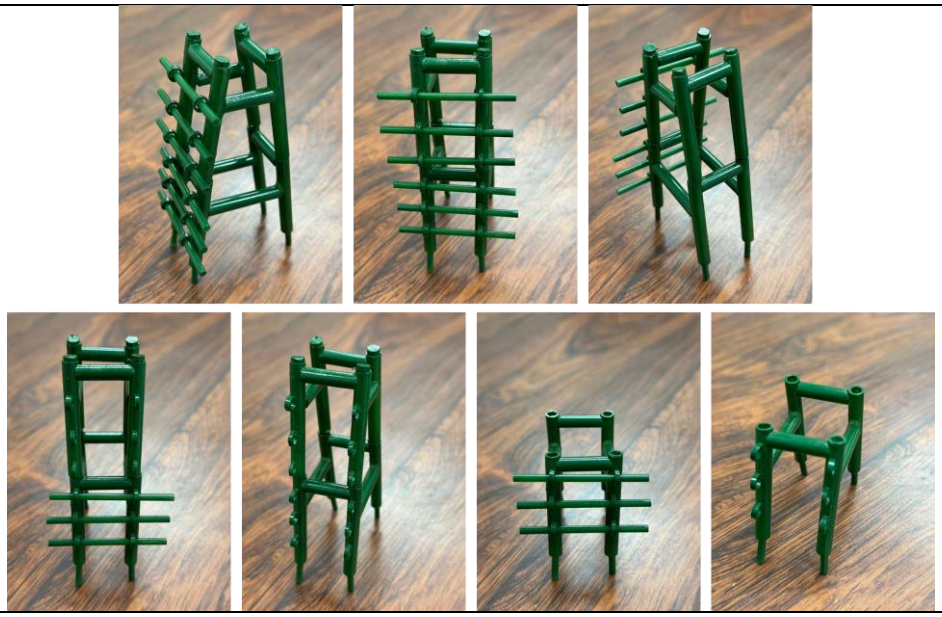
以往在防治山坡地土砂的對策，主要採用興建防砂壩的方式攔阻土砂。然而，上游土砂的供應減少，使河流的輸砂功能下降，會加劇河道下切、壩基裸露等現象。有鑑於此，「調整型防砂壩/會呼吸的防砂壩」因應而生，可依據不同時期的土砂狀態，對橫向、縱向的防砂壩元件進行調整，使河道能透過水流進行自然輸砂，進而維持河流正常的水力運作。

模型主要呈現調整型防砂壩之「可調整式」功能操作示意為主(圖 5. 11)，比例尺縮比約為 1:75。其可依輸砂量由大到小而不斷拆解，補僅可因應不同時期的防砂量，亦可保持泥砂量的均衡性及溪流生態連續性。防砂壩之縱向元件主要為架設橫向元件之基礎，其土砂通過率由橫材之間距來調節。而縱向間距至少一處開口寬最小維持 3.0m，以做為人工清淤通道，便於機具之進出作業，亦有利於河道之自然水利下洩土砂。詳細說明可參閱「調整型防砂壩維護管理手冊中第肆章調整型防砂壩設計型式」。

1. **調整型鋼構壩**：模型中開口型鋼管壩有三組鋼構壩可供調整，各橫向元件不需相互連接，且縱向元件以強化法蘭螺帽進行組合。數組鋼構壩併排配置成一整座可靈活調整的模組化鋼構壩(圖 5. 9)。



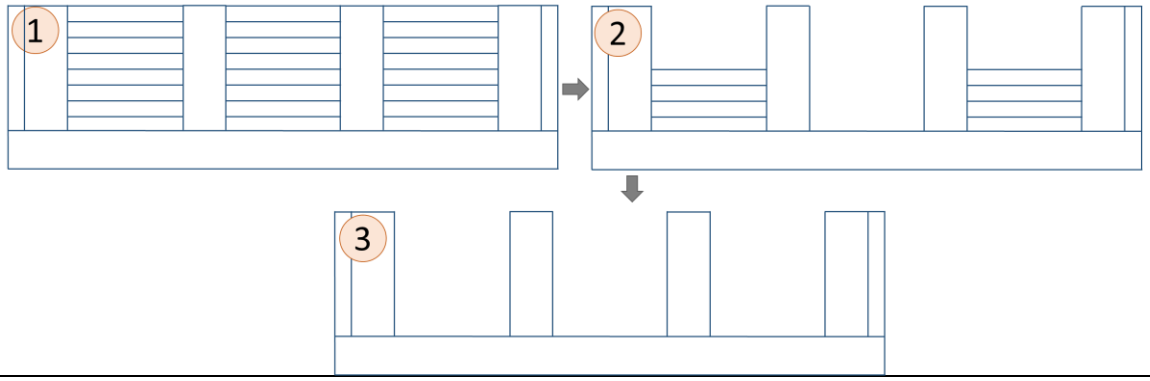
調整型鋼構壩-操作步驟



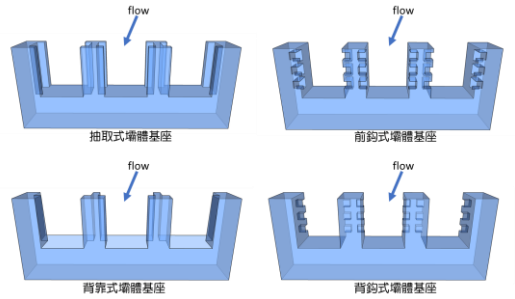
每組元件拆解示意圖

圖 5. 9 調整型鋼構壩-操作步驟及元件拆解示意圖

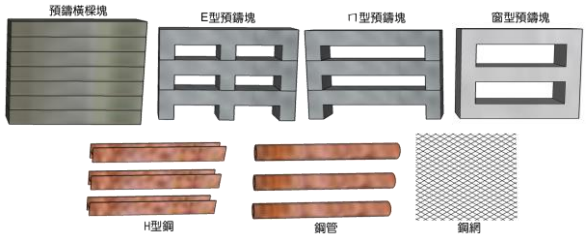
2. **調整型混凝土壩**：其橫向元件與壩體間可填充發泡劑、保麗龍、橡膠緩衝墊等軟性材料，以方便調整作業，避免橫桿與壩體間因相互碰撞而磨損。模型中壩體基座採用背靠式壩體基座搭配三種不同橫向元件，分別為預鑄橫梁塊、冂型預鑄塊、E 型預鑄塊可供參考(圖 5. 10)。



調整型混凝土壩壩-操作步驟



壩體基座型式示意圖



橫向元件型式示意圖



調整型混凝土壩壩(下游往上游)



調整型混凝土壩壩(上游往下游)



模型橫向元件

圖 5. 10 調整型混凝土壩-操作步驟及元件拆解示意圖







圖 5. 11 調整型防砂壩模型全景

(四)調整型防砂壩-漫畫

1. **故事大綱**：為了證明哪種防砂壩最厲害，在山裡土石流的好發處舉辦防砂比武大會。專家們帶著自己最得意的防砂壩來參加比賽。土石流將從上游放出，大家輪流上陣對抗土石流，最後由帥教授的「會呼吸的防砂壩」獲得勝利。

2. **主要角色**：詳見圖 5. 12

(1) 豬村長(裁判)：牠是新上任的村長，但是預算太少無法興建新的防砂壩。牠想到透過比賽的方式，獲得免費的防砂壩。
(2) 老教授：只會用他熟悉、傳統的方式做事。
(3) 女王教授：給人趾高氣昂的感覺。
(4) 帥教授：考慮到防砂壩的缺點，決定採用改良後的設計。

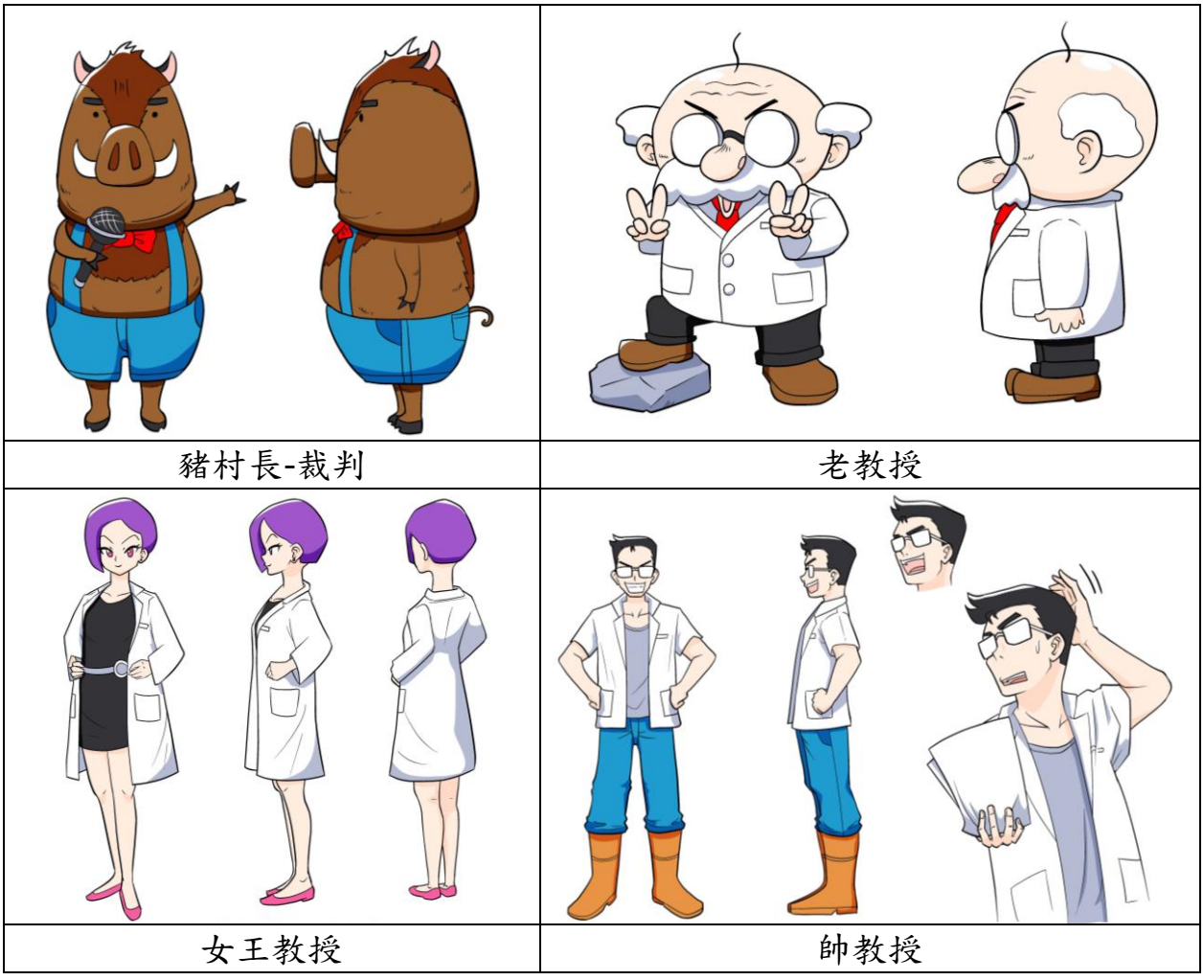


圖 5. 12 漫畫角色示意圖

3. 防砂壩基礎知識傳達

(1) 防砂壩的主要功能：抑止土石流、阻攔砂石。攔蓄及調節溪流土砂、減緩溪床坡度、穩定流心、防止侵蝕、崩塌或抑止土石流所構築 5 公尺以上之橫向阻水構造物。

(2) 封閉型防砂壩：台灣早期多為此型並未考慮平衡土砂及生態之未來性。沒有選擇性地全面攔阻土砂，構築材料不具透水性，故水流只能從排水孔流出，壩體上下游之高度落差，使下游河床泥沙補充不足，造成下游淘刷、河床沖蝕，壩基基座因水流沖擊而露出、不穩，而阻斷基礎輸砂量。水流會翻越壩頂而出，對漂流木攔阻較差。經過幾次土砂災害後，最終都會淤滿，只能再建另一座，最終演變成整條溪連綿不斷的防砂壩群，導致棲地之縱向不連續，對生態環境保護不佳。淤滿後雖無防砂功能，但尚有固床及穩定坡度等功能。

(3) 開口型防砂壩：阻攔土石流及漂流木，讓水流和土砂得以穿越壩體，使壩體上游可維持適當儲砂空間，以供發生高含砂水流或土石流時，可發揮攔阻土砂和延遲流出時間之效果。

(4) 調整型防砂壩：若設計時即思考調整型壩體，可避免後續野溪中更多的人工構造物設置需求，亦兼顧生態連續性及多樣性。考量未來土砂量會變化，隨時間變動的溪床土砂環境需常態性地經營管理防砂壩，以滿足溪流不同時期的輸砂、防災或生態需求，最終以回歸自然野溪為原則。要從中間開始拆除，引導並穩定流心。

(5) 會呼吸的防砂壩：約每 3~5 年可拆可組，30~50 年為一使用週期。各組鋼構壩並非相連，而均為獨立個體。先拆橫材，

再拆縱材。土砂通過率由橫材與縱材之拆卸間距來自由調節。縱向間距至少一處開口為 3 公尺，以作為人工清淤通道，便於挖土機等機具進出作業，同時加大縱向間距也有利於河道之自然力下洩土砂。橫向元件不互相連接，縱向元件以強化法蘭螺帽來組合。縱向刷深穩定流心、橫向擴寬排除土砂、全面卸除回歸自然。

(6) 如何選擇哪個壩體型式：依照不同坡度(S)或泥沙中值粒徑(d_{50})來選擇適合的防砂壩。

A. 梳子壩：阻擋巨石，而卵礫石可以往下游移動。

B. 格柵壩：坡度減緩區。

C. 封閉壩：下游水流動能減緩區。

4. 調整型防砂壩-漫畫內容





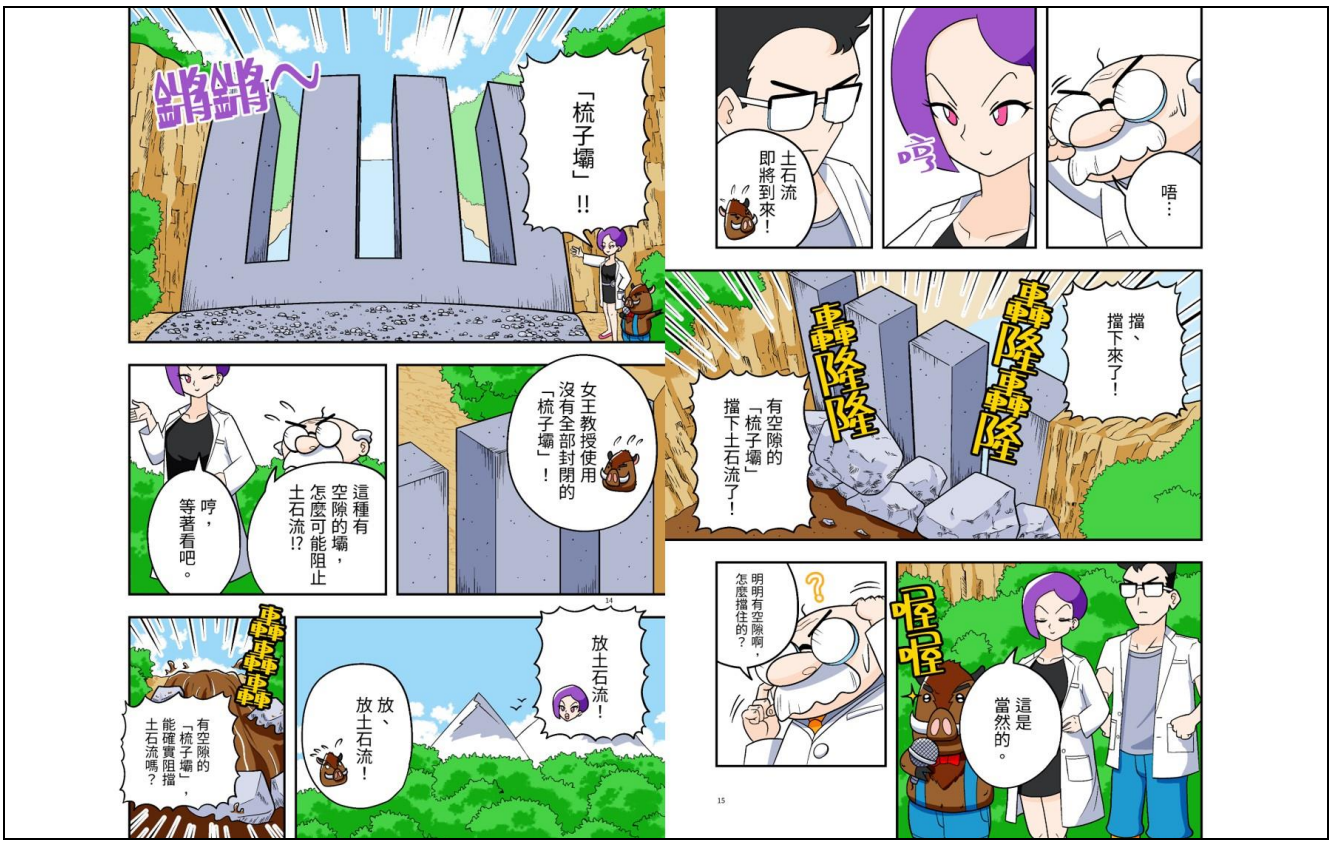

「傳統封閉式水泥防砂壩」！
哇好大！
上游請放出土石流！
俺已經驗證很多次了，這種防砂壩絕對有效！
是這樣嗎？
等著瞧吧。
唔，不管看幾次，土石流還是很可怕。
大石頭接連不斷砸到防砂壩上！
轟咧
轟咧
「封閉式水泥防砂壩」正面迎擊土石流！
啪轟
轟轟咧
哈哈哈，來吧、來吧！
好激烈，大自然的力量相當可怕！
倒數3、
2、1！
土石流就快結束了，傳統防砂壩能成功全部擋住嗎!?


居、居然，
0，
土石流停止！
嗚嗚嗚
那是當然的，這可是最堅固的水泥！
全部都擋住了。
好厲害！
就是這樣，比賽結束了。
讓年輕人白跑一趟啦！
ADADAD
不，請等一等。
土石流防災是個漫長的過程，並不是一下子就能結束的。
什、什麼？
比賽還沒結束！
DL
DL
DL

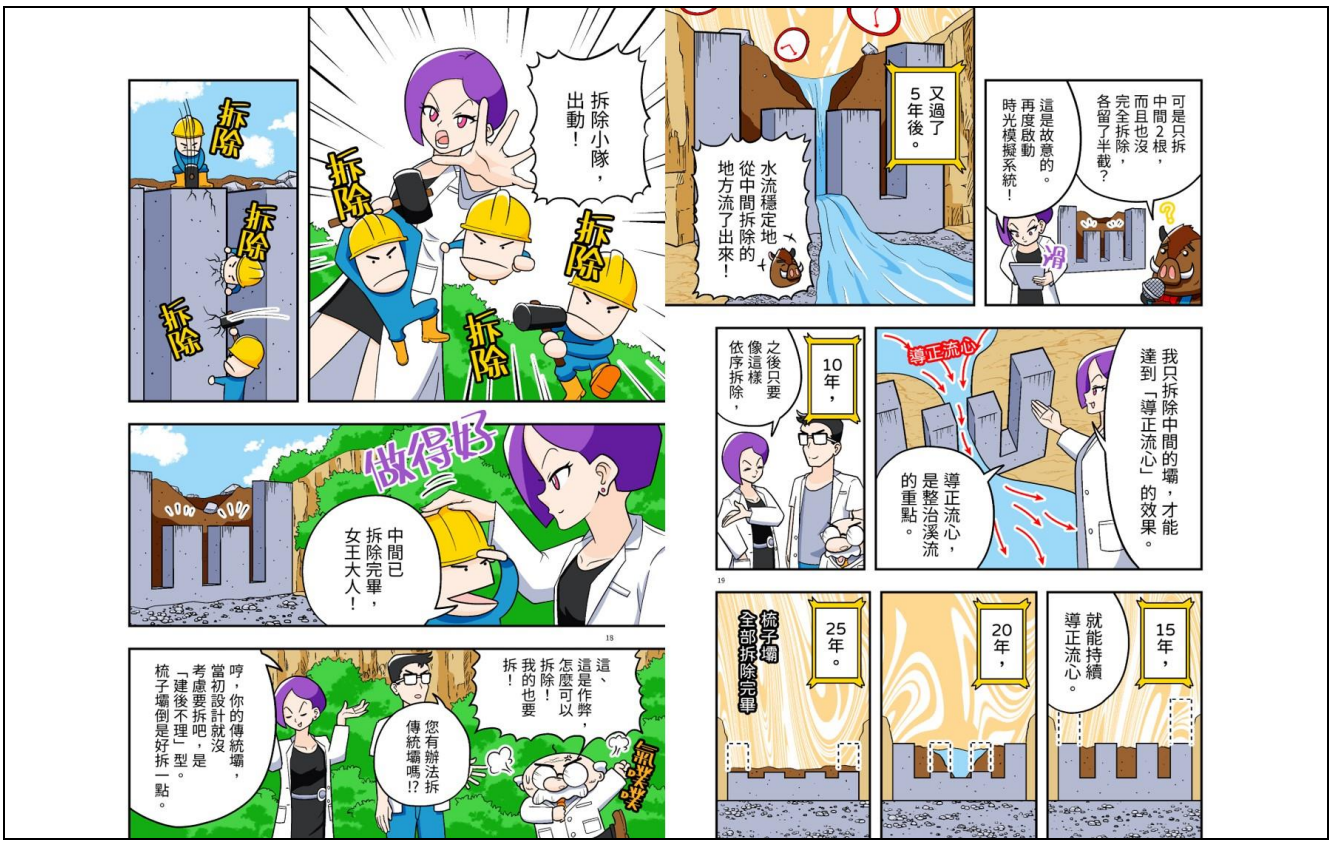

啟動「時光模擬系統」！
加速
滑
減速
加速
時、時光模擬系統!?
「時光模擬系統」!?怎麼會有這種高科技的東西!?
不是沒預算嗎!?
5、50年!?
請看，這是防砂壩3年後的樣子。
不要無視我！
土石越來越多，防砂壩快要淤滿了！
4年後、
5年後、
6年後！
才6年，防砂壩就已經「完全淤滿」！
淤滿了!!
「淤滿」就是已經裝不下的意思！
終於來了…
就是這個。
50年
防砂壩的任務是非常久的，要把時間拉長到50年才能分出勝負。

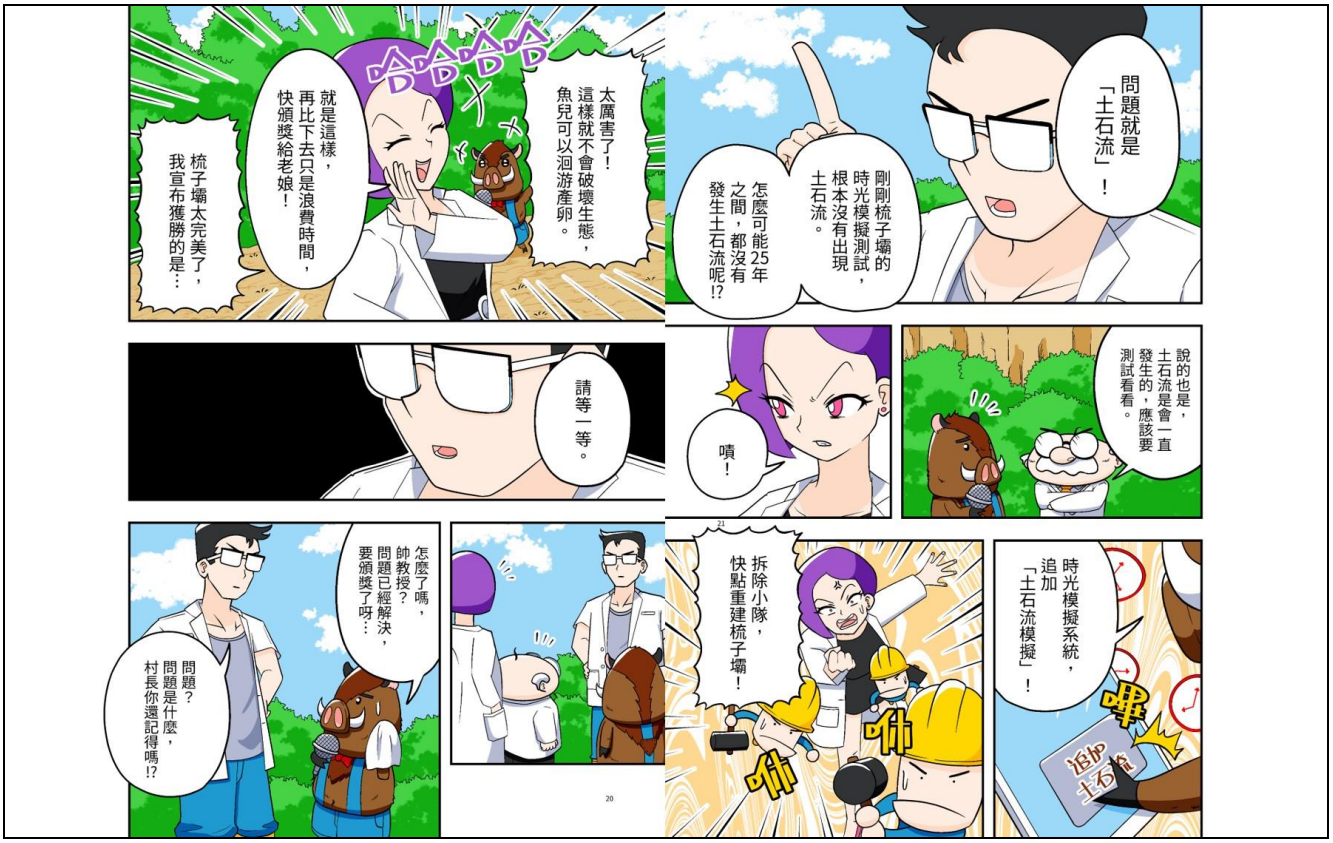

加蓋、
加蓋防砂壩？
加蓋！
啪
啪
壓
淤滿這種小事，只要再蓋一座防砂壩就好了！根本不是問題。
溪流
淤滿
第3座
淤滿
淤滿
又加蓋了第3座防砂壩。
淤滿
淤滿
果然5年後又淤滿了。
第2座
淤滿
老教授加蓋了第2座傳統防砂壩。
加蓋、
加蓋、
加蓋！
啪
啪
啪
可惡，看我的…
又淤滿了。
……。
啊ADADAD
這樣來1萬次土石流，我都不怕了！
呼呼呼
這樣還能稱作溪流嗎？
根本整條溪都蓋滿防砂壩了。
看哪！地球的第八大奇蹟。
根本沒有地方可以加蓋了呀，老教授。
蓋不下是我的錯，是溪流的錯！
溪流太小條了！
怎、怎麼樣!?還有土石流的話，我再加蓋就好。


嗚嗚嗚
生態都被破壞殆盡了！
老教授…
魚兒根本無法洄游產卵！
河道的連續性被破壞，
因為壩基過度淘刷，有些已經坍塌了。
不只這樣。
再看看那些先蓋好的防砂壩。
老教授落敗!!!
因此，比賽判定…
我、我沒想到原來時間拉長，防砂壩對生態的影響如此巨大。
呼吸力
防禦力
生態永續力
「傳統封閉式水泥防砂壩」
呼吸力(易拆卸組裝)★
生態永續力★
防禦力★★★★★
我的防砂壩是……
快退下，換老娘上場了！
時光模擬系統已恢復原狀。
我認輸了…。


「梳子壩」!!
這種有空隙的壩，怎麼可能阻止土石流!?
哼，等著看吧。
女王教授使用沒有全部封閉的「梳子壩」！
有空隙的「梳子壩」能確實阻擋土石流嗎？
放土石流！
放、放土石流！
土石流即將到來！
哼
唔…
轟隆隆
有空隙的「梳子壩」擋下土石流了！
擋、擋下來了！
明明有空隙啊，怎麼擋住的？
哇哇
這是當然的。


因為大石頭都被擋住了，
所以土石流的傷害度大幅降低。
NO
OK
「梳子壩」只阻擋大型土石，讓普通砂可以流過。
要阻止土石流災害，只要擋住巨石就行，剩下的砂流其實不會造成重大災害。
我只是把土石流轉化成傷害度比較小的「土砂流」罷了。
時光模擬系統，啟動。
3年，
5年，
梳子壩淤積的狀況：
10年。
看吧，它終究還是淤滿了！只能不斷蓋新的梳子壩，這是個死循環，一定會破壞生態。
梳子壩淤積的速度比傳統防砂壩緩慢許多！
畢竟只擋住大石，其餘都流掉了。
把時間暫停！
哼哼，是嗎!?
咦!?
滑
減速
「土砂流」啊…
平板給我，啟動時光模擬系統。
哇啊啊…


拆除
拆除小隊，出動！
又過了5年後。
水流穩定地從中間拆除的地方流了出來！
可是只拆中間2根，而且也沒完全拆除，各留了半截？
這是故意的。再度啟動時光模擬系統！
我只拆除中間的壩，才能達到「導正流心」的效果。
導正流心
導正流心，是整治溪流的重點。
10年，
之後只要像這樣依序拆除，
做得好
中間已拆除完畢，女王大人！
這、這是作弊，怎麼可以拆除！我的也要拆！
您有辦法拆傳統壩嗎!?
哼，你的傳統壩，當初設計就沒考慮要拆吧，是「建後不理」型。梳子壩倒是好拆一點。
就能持續導正流心。
15年，
20年，
25年。
梳子壩全部拆除完畢


問題就是「土石流」！
剛剛梳子壩的時光模擬測試，根本沒有出現土石流。
怎麼可能25年之間，都沒有發生土石流呢!?
嘖！
說的也是，土石流是會一直發生的，應該要測試看看。
時光模擬系統，追加「土石流模擬」！
追加土石流
拆除小隊，快點重建梳子壩！
太厲害了！這樣就不會破壞生態，魚兒可以洄游產卵。
就是這樣，再比下去只是浪費時間，快頒獎給老娘！
梳子壩太完美了，我宣布獲勝的是…
請等一等。
怎麼了嗎，帥教授？問題已經解決，要頒獎了呀…
問題？問題是什麼，村長你還記得嗎!?
20
21


重建
重建
重建
重建
重建
土石流即將抵達。
轟隆轟隆
轟隆
動作快點，土石流就要來了！
22
重建非常困難…
女、女王大人，這個梳子壩是水泥做的，
嗚嗚嗚
23
救命
救命
唰唰
唰唰
拆除後的梳子壩無法擋住土石流，也來不及重建…
女、女王教授落敗!!!
23
「梳子壩」
呼吸力（易拆卸組裝）★★
生態永續力★★★
防禦力★★★★
呼吸力
防禦力
生態永續力
我的梳子壩…


水泥做的梳子壩跟傳統壩一樣，一般來說是不會拆的，因為拆除後非常難重建。
喔喔
要阻擋土石流只能再蓋1座新的，那梳子壩終究會跟傳統防砂壩一樣，破壞生態連續性。這就是梳子壩的缺點。
這是我用鋼材做的，
「會呼吸的防砂壩」！
那麼，該我上場了。
接著輪到帥教授！
女王教授的梳子壩，肯定能再改良得更好，
…鋼材。
上下游的兩面不一樣!?
會呼吸!?
上游面
縱材
橫材
下游面
縱材
(無橫材)
我的防砂壩，並不是水泥做的…
但絕對比不上我的作品。


「會呼吸的防砂壩」成功抵擋了大石頭，將土石流轉化成土砂流！
轟隆
轟隆
上游放土石流！
只要擋住大石頭，就能大幅減少土石流災害！這是梳子壩測試過的。
成功擋住土石流後，就開啟時光模擬系統吧。
滑
帥教授看起來很有自信，我也覺得他有特別的法寶呢！
防砂壩淤滿時，我會先暫停。
好。
時光模擬，啟動！
你到底想怎麼做？
報告，防砂壩已淤滿，暫停中。
如此如此，這般這般。
什麼，喂！
拆除小隊借我用一下。
3位請看這張設計圖。
拆開
OK，開工！
咔
咔
我也想看。


什麼，居然是可以分段拆卸的!?
拆除
拆除
拆除
拆除
自由調整
輕鬆拆裝
再重新裝上去就好啦！
「會呼吸的防砂壩」是可重複組裝的模組化設計。
像這樣，從中間開始逐年往外拆，除了可以「導正流心」，也能兼顧「生態連續性」。
28
可以依照需求任意拆裝，就像生物會呼吸一樣，所以我才取名「會呼吸的防砂壩」。
吼吼吼！
能夠拆卸又重新組合，真是厲害！
居然這麼方便…
29
這個嘛…
是啊，你要如何重建？
那麼遇到土石流，或是土砂量變多的時候怎麼辦呢？
那麼我宣布…
我們認輸了…


恭喜~
恭喜
「會呼吸的防砂壩」獲勝!!!
優勝
呼吸力
「會呼吸的防砂壩」
呼吸力(易拆卸組裝)★★★★★
生態永續力★★★★★
防禦力★★★★
防禦力
生態永續力
30
(只留下基座即可)
能夠拆卸又重組，對生態的破壞力大幅降低。魚兒可以迴游了！
謝謝豬村長！
趁此機會，我也有事情要宣布。
吼吼！
吼吼！
31 END
「會呼吸的防砂壩」的技術，開放大家「免費使用」！
畢竟防砂壩是公共建設，有公益性。
歡迎大家來使用！
回饋社會，值得讚賞！
「會呼吸的防砂壩」免費使用
吼吼吼吼，吼吼吼吼吼！

第陸章 結論與建議

第一節 結論

台灣早期防砂工程多為封閉式防砂壩，於當時皆有其時空背景及需求，主要為攔阻砂石、穩定河床，但並未考慮平衡土砂及生態之未來性。由於自然界的泥砂量是變動的，幾年後，因上游崩塌地的自然復育或人為防砂壩的治理效果，泥砂量會減少，這會導致下游泥砂量補充不足，從而引起河道下切。壩體基座常因水流沖蝕而形成嚴重淘刷，造成輸砂不平衡，破壞河床的自然演變。此外，防砂壩對溪流生態和自然河川水砂平衡有著重要影響，可能導致生態棲地的分割和縱向不連續，使水中生物無法洄游和繁殖。

現今因生態與環境需求重視度提升，開始思考防砂壩的設計也需重視與自然相協調的方式。調整型防砂壩即在打破壩體固定不變之觀念，考量未來土砂量增減變化之可能，於規劃時就必須針對溪流特性及其所欲發揮的功能進行調整設計，這種設計需要因應社會觀念的演變和氣候變遷等因素，對於隨時間變動的溪床土砂環境進行常態性經營和管理。這樣可以滿足溪流在不同時期的輸砂、防災或生態需求，延長防砂壩的使用壽命，並促進其在溪流棲地環境復育中的作用，最終實現回歸自然野溪的永續發展原則。

第二節 建議

以下是幾點未來研究建議，以進一步探討和完善防砂壩設計、調整及維護管理策略，以確保其適應未來氣候條件：

1. **調整案例推動及研究分析**：對於研究試區後續之調整方案推動，並研究分析其成效，以促進廣納相關案例，以精進「防砂壩維護管理手冊」之內容。
2. **長期效果評估**：建議進行長期的效果評估研究，跟蹤調整型防砂壩對河床變化、生態系統和土砂平衡的實際影響。可以幫助驗證這些結構的有效性並調整管理策略。
3. **生態影響分析**：研究防砂壩對生態系統的影響，特別是對水生生物的棲息地、遷徙路徑和繁殖行為的影響。可以幫助制定更具生態友善的設計和管理措施。
4. **社會觀念影響**：加強防砂壩調整抑或是調整型防砂壩於官方、學界、社會大眾之觀念及教育，以提高接受度和支持力。
5. **維護與管理策略**：推動防砂壩定期檢查及調整措施之執行，以達到壩體活化、防砂壩延壽、砂庫土砂利用及永續發展之目的。
6. **技術創新應用**：探索和試驗新技術，如智能感測器和數據分析工具，以提高防砂壩的監控和調整可行性，實現更加精確的管理。

參考文獻

1. 農業部農村發展及水土保持署(2022)，「推動調整型橫向結構物以平衡全溪流土砂與生態之分析評估」成果報告書，國立中興大學，台灣。
2. 農業部農村發展及水土保持署(2021)，「調整型防砂壩之技術研發與應用(3/3)」成果報告書，國立中興大學，台灣。
3. 農業部農村發展及水土保持署(2020)，「調整型防砂壩之技術研發與應用(2/3)」成果報告書，國立中興大學，台灣。
4. 農業部農村發展及水土保持署(2019)，「調整型防砂壩之技術研發與應用(1/3)」成果報告書，國立中興大學，台灣。
5. 農業部農村發展及水土保持署(2017)，「防砂壩長期管理以精準調控土砂平衡」成果報告書，國立中興大學，台灣。
6. 農業部農村發展及水土保持署(2017)，「水土保持手冊」，台灣。
7. 陳樹群、安軒霈、國領ひろし、林永欣 (2016)，「野溪高土砂災害之模組化防砂壩管理」，中華水土保持學報，47(3)，111-121。
8. 行政院農業部農村暨水土保持署(2016)，「濁水溪流域大型防砂設施調查建置」成果報告書，財團法人中興工程顧問社，台灣。
9. 農業部農村發展及水土保持署(2016)，「濁水溪流域大型防砂設施調查建置」成果報告書，財團法人中興工程顧問社，台灣。
10. 劉寅春、張睿宇、王議平、林冠儀 (2015)，「四旋翼型 UAV 自動化空間資訊蒐集平臺設計--以河川高灘地為例」，中國土木水利工程學刊，27:(3)，183-190。
11. 蕭震洋、安軒霈、陳俊愷、饒見有、陳樹群 (2015)，「應用 UAV 量化臺東金崙溪河川型態演變及致災特性」，中國土木水利工程學刊，27:(3)，213-222。

12. 農業部農村發展及水土保持署(2014) ，「水土保持技術規範」，台灣。
13. 農業部農村發展及水土保持署(2013)，「鋼構防砂設施本土化可行性評估與設計手冊彙編」，農業委員會水土保持局，台灣。
14. 陳樹群、安軒霈(2012)，「河川型態五層分類法架構與應用」，中華水土保持學報 43(1)，21-40。
15. 陳樹群、彭思顯 (2002)，「台灣河川型態五層分類法研究」，中華水土保持學報 33(3)，175-190。
16. 瀬戸俊彦、葛西俊一郎、山口健太郎、水山高久 (1998)，「鋼製透過型ダムによる砂礫型土石流の捕捉状況」,砂防学会誌 ,51(3)，19-26。
17. 日本河川協会(1997)，「建設省河川砂防技術基準(案)同解説設計編」，技報堂出版，日本。
18. Yu-Fang Chiu, Samkele S. Tfwala, Yung-Ching Hsu, Yen-Yu Chiu, Chen-Yang Lee, Su-Chin Chen*(2021) “Upstream morphological effects of a sequential check dam adjustment process”, *Earth Surface Processed and Landforms*. https://doi.org/10.1002/esp.5178
19. hiu, Y. F., Tfwala, S. S., Hsu, Y. C., Chiu, Y. Y., Lee, C. Y., &Chen, S. C. (2021). Upstream morphological effects of a sequential check dam adjustment process. *Earth Surface Processes and Landforms*, *46*(13), 2527–2539. https://doi.org/10.1002/esp.5178
20. Hydronia LLC. (2021). RiverFlow2D Two-Dimensional Flood and River Dynamics Model. September, 319.
21. Piton, G., &Recking, A. (2016). Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes. *Journal of Hydraulic Engineering*, *142*(2), 04015045. https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001048

22. Shima, J., Moriyama,H., Kokuryo, H., Ishikawa, N., &Mizuyama, T. (2016). Prevention and mitigation of debris flow hazards by using steel open-type sabo dams. *International Journal of Erosion Control Engineering*, *9*(3), 135–144.
23. Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B. and Lapointe, M. (2015a). "Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): a first assessment in the context of river research and management." *River Research and Applications*, 31(3), 379-391.
24. Tamminga, A.D., Eaton, B.C. and Hugenholtz, C.H. (2015b). "UAS-based remote sensing of fluvial change following an extreme flood event". *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(11), 1464-1476.
25. Sodnik, J., Martinčič, M., Mikoš, M., &Kryžanowski, A. (2015). "Are torrent check-dams potential debris-flow sources?". *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes*, 485-488.
26. Osanai, N., Mizuno, H., &Mizuyama, T. (2010). "Design standard of control structures against debris flow in Japan". *Journal of Disaster Research*, *5*(3), 307–314.
27. Boix-Fayos, C., Barber·, G. G., LÛpez-Berm˙dez, F., and Castillo, V.M. (2007). "Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: Case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain) ". *Geomorphology*, 91, 103-123.
28. Jaeggi, M. N. R., &Pellandini, S. (2007). "Torrent check dams as a control measure for debris flows". *Recent Developments on Debris Flows*, 186-207.
29. Phillips, J.D., Slattery, M.C., and Musselman, Z.A. (2005). "Channel adjustments of the lower Trinity River, Texas, downstream of

Livingston Dam". *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1419-1439.

30. Mount, N.J., Sambrook Smith, G.H., and Stott, T.A. (2005). "An assessment of the impact of upland af forestation on lowland river reaches: the Afon Tran non, mid-Wales". *Geomorphology,* 64, 255-26.
31. Hui-Pang, L. (2003). "Design of slit dams for controlling stony debris flows". *International Journal of Sediment Research*, *18*(1), 74–87.
32. Kondolf, G.M., PiÈgay, H., and Landon, N. (2002). "Channel response to increased and decreased bed load supply from land use change: contrasts between two catchments". *Geomorphology,* 45, 35-51.
33. Armanini, A., &Larcher, M. (2001). "Rational criterion for designing opening of slit-check dam". *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 94-104.
34. Hooke, J.M., and Mant, J.M. (2000). "Geomorpho logical impacts of a flood event on ephemeral chan nels in SE Spain". *Geomorphology*, 34, 163-180.
35. Rosgen, D. (1996). Applied River Morphology, Printed Media Companies.
36. Johnson, P. A., and McCuen, R. H. (1989). "Slit dam design for debris flow mitigation". *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(9), 1293-1296.
37. Mizuyama, T., Abe, S., and Ido, K. (1988). Sediment control by sabo dams with slits and/or large drainage conduits. *6th Congress Asian and Pacific Regional Division-Int. Association for Hydraulic Research*.
38. Senoo, K., and Mizuyama, T. (1984). "Function of structures against debris flow". *Proc. Int. Symp. Interpraevent*, 113-120.

39. Watanabe, M., Mizuyama, T., and Uehara, S. (1980). “Review of debris flow countermeasure facilities”. *Journal of the Japan Erosion Control Engineering Society*, 115(115), 40-45.
40. Ikeya, H., and Uehara, S. (1980). “Experimental study about the sediment control of slit Sabo dams”. *Journal of the Japan Erosion Control Engineering Society*, 114, 37–44.
41. Li, R.M., and Simons, D.B. (1982). “Geomorpho logical and Hydraulic Analysis of Mountain Streams”. *Gravel Bed Rivers*, 425-441.
42. Schumm, S.A. (1969). “River metamorphosis, Pro ceedings of the American Society of Civil Engineers”. *Journal of the Hydraulics Division*, 95, 255-273.
43. Colby, B.R. (1964) Practical Computation of Bed-Material Discharge, *Journal of Hydraulics Division*, 90.
44. Strahler, A.X. (1957). “Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology.” *Amer. Geominute Un ion Trans*, 88, 913-920.
45. Lane, E.W. (1955). “The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering”. Proc., ASCE, 745(81), 17.
46. Horton, R.E. (1945). “Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology.” *Geol. Soc. America Bull*, 56, 275-370.
47. Shields, A. (1936), Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement. California Institute of Technology, Pasadena (Translate from German).