
以小波分析法、流態超越機率法及地景指標法評估生態基流量及潭瀨流棲地結構特性與品質 (II)

Evaluating ecological flow and fish habitat quality considering the evolution of pool-riffle-run sequences with combined approaches of wavelet analysis, flow exceedance probability, and river corridor indices (II)
(成果報告)

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：114 年 02 月 07 日至 114 年 12 月 31 日

計畫主持人：施上粟 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 114 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

以小波分析法、流態超越機率法及地景指標法評估生態基流量及潭瀨流棲地結構特性與品質 (II)

摘要

本計畫延續前一年研究成果（計畫編號：ARDSWC-113-065），在既有的生態水文模式、水動力模式與景觀指數計算模式基礎上，整合河川形貌模式（Nays2DH），系統性探討蜿蜒河道之形貌演化對潭瀨棲地結構之影響機制。有別於傳統拆壩研究多聚焦於縱向河床濬深與橫向河寬變化，本計畫首次針對中高坡度蜿蜒河道之形貌演變，深入探討堰壩移除後輸砂量改變對短期蜿蜒平面型態演化之影響，填補了此領域的研究缺口。

科學創新與重點突破

本計畫提出兩項核心假說，並以科學及量化方法加以檢驗：（1）沙洲推進假說：堰體拆除導致縱向坡度增加、剪應力上升，促使下游輸砂量增加，加速內岸淤積與沙洲側向推進，使主流偏向外岸並加劇外岸侵蝕，形成蜿蜒發展的正回饋機制；（2）河岸移動假說：在可移動河岸條件下，外岸侵蝕加劇使曲率上升與側向來砂增加，強化內岸淤積並放大沙洲推進效應，形成蜿蜒促進的雙重正回饋。研究區域選定礮溪主流中下游斷面 8 至斷面 14（累距 3,179~5,783 公尺），該河

段具有明顯蜿蜒特徵且過去有顯著形貌變遷，極具代表性。

主要研究成果

1. 沖淤趨勢驗證：利用 108-103 年實測平均河床高資料驗證現況情境在 Q5 流量下的沖淤變化，模擬與實測吻合度達 65%，RMSE 為 1.01 公尺、MAE 為 0.69 公尺，證實模式可靠性。
2. 現況河相分析：完成現況情境模擬（堰不拆除），針對水動力、沖淤、代表性斷面進行系統分析，成功掌握研究區域之河相特徵，包括彎道外岸侵蝕、內岸淤積等典型蜿蜒河道特性。
3. 拆堰情境分析：完成拆堰情境模擬（堰部分拆除、堰完全拆除），透過水動力、沖淤、代表性斷面與蜿蜒特徵分析，成功驗證研究假說。結果顯示，堰體拆除後，堰上游彎道因向源侵蝕導致外岸剪應力上升，堰下游彎道則因內岸淤積增加使水流導向外岸，蜿蜒特徵隨拆除程度呈上升趨勢。
4. 可移動河岸模擬：完成可移動河岸情境模擬（堰不拆除、堰部分拆除、堰完全拆除），與固定河岸情境進行平行比較。結果顯示，可移動河岸情境展現更顯著的外岸侵蝕與內岸淤積現象，蜿蜒特徵增幅更為明顯。在「完全拆除、可移動河岸」情境下，相較於「不拆除、固定河岸」情境，平均振幅、蜿蜒度

與平均弧波長分別提高 22.13%、1.51%與 2.59%，證實河岸侵蝕能力為促進蜿蜒之關鍵因子。

5. 情境評估與決策建議：分析各工程情境可能帶來的影響及其對應措施供管理者參考。

工程應用價值

本計畫成果可應用於野溪治理與河川復育工程，特別是中高坡度具蜿蜒特徵的河道。管理策略之優先順序建議：（1）優先恢復河岸侵蝕能力（如移除堤防、護岸），其對蜿蜒促進效果顯著高於單純拆堰；（2）採取階段性或部分拆除策略，以平衡生態復育與保全對象安全；（3）透過恢復縱向輸砂連續性與河岸侵蝕能力，形塑蜿蜒形貌，維持潭、瀨、流結構棲地，提升棲地多樣性與生物廊道連接度。（4）計畫亦發現拆堰需避開洪水期以錯開輸砂峰值，並需在特定彎道（如彎道五至彎道七）預留緩衝區以應對河岸侵蝕風險，在可移動河岸情境中需監測彎道六的蜿蜒遷移。

關鍵詞：蜿蜒河道、河川形貌、堰壩移除、Nays2DH、棲地復育

Evaluating ecological flow and fish habitat quality considering the evolution of pool-riffle-run sequences with combined approaches of wavelet analysis, flow exceedance probability, and river corridor indices (II)

Abstract

This project extends the research findings from the previous year's study (Project No.: ARDSWC-113-065) by innovatively integrating a river morpho-dynamic model (Nays2DH) with the previously developed eco-hydrological, hydrodynamic, and landscape index models. This integration enables a systematic investigation of the impact of meandering river morphological evolution on pool-riffle habitat structure, addressing a critical knowledge gap in river restoration science.

Scientific Innovation and Key Breakthroughs

Unlike traditional dam removal studies that primarily focus on longitudinal bed incision and lateral channel width changes, this project is the first to systematically investigate the short-term planform evolution of meandering channels with moderate to high gradients following weir removal and changes in sediment supply. Two core hypotheses are proposed and tested: (1) Bar Push Hypothesis: Weir removal increases longitudinal slope and shear stress, enhancing downstream sediment transport, accelerating point bar deposition on the inner bank, deflecting the main flow toward the outer bank, intensifying outer bank erosion, and creating a positive feedback mechanism for meander development; (2)

Bank Pull Hypothesis: Under erodible bank conditions, intensified outer bank erosion increases channel curvature and lateral sediment supply, further enhancing inner bank deposition and amplifying the bar push effect, forming a dual positive feedback mechanism for meander enhancement.

The study area encompasses the middle and lower reaches of the Northern Sulfur Creek mainstream, specifically from cross-section 8 to cross-section 14 (cumulative distance 3,179~5,783 m). This reach exhibits pronounced meandering characteristics and significant historical morphological changes, making it highly representative for this investigation.

Major Research Achievements

1. Scour and Deposition Trend Validation: Observed mean bed elevation data from 2019 to 2014 were utilized to validate scour and deposition changes under Q5 flow conditions for the current state scenario. The simulation achieved a 65% agreement rate with observed trends, with RMSE of 1.01 m and MAE of 0.69 m, confirming model reliability.
2. Current Morphological Analysis: Comprehensive simulation of the current state scenario (weir intact) was completed, with systematic analyses of hydrodynamics, scour and deposition patterns, and representative cross-sections. The results successfully captured the riverine morphological characteristics of the study area, including typical meandering features such as outer bank erosion and inner bank deposition.
3. Weir Removal Morphological Analysis: Simulations of weir removal scenarios (partial removal and complete removal) were completed, with analyses of hydrodynamics, scour and deposition patterns,

representative cross-sections, and meandering characteristics. The results successfully validated the research hypotheses. Following weir removal, upstream bends experienced increased outer bank shear stress due to headward erosion, while downstream bends exhibited enhanced inner bank deposition, deflecting flow toward the outer bank. Meandering characteristics increased with the degree of weir removal.

4. **Erodible Bank Modeling:** Simulations of erodible bank scenarios (weir intact, partial removal, complete removal) were completed and compared in parallel with fixed bank scenarios. Results demonstrated that erodible bank conditions produced more pronounced outer bank erosion and inner bank deposition, with greater increases in meandering characteristics. Under the "complete removal, erodible bank" scenario, compared to the "weir intact, fixed bank" scenario, mean amplitude, sinuosity, and mean arc-wavelength increased by 22.13%, 1.51%, and 2.59%, respectively, confirming that bank erodibility is the key factor in promoting meandering.
5. **Scenario Assessment and Decision-Making Recommendations:** This section analyzes the potential impacts of various engineering scenarios and proposes corresponding mitigation strategies to support decision-making.

Engineering Application Value

The project findings can be directly applied to mountain stream management and river restoration projects, particularly for channels with moderate to high gradients and meandering characteristics. Specific management strategies and prioritized action sequences are proposed: (1) Prioritize restoration of bank erosion capacity (e.g., removal of levees and

revetments), which demonstrates significantly greater effectiveness in promoting meandering than weir removal alone; (2) Adopt phased or partial removal strategies to balance ecological restoration with protection of infrastructure and property; (3) Restore longitudinal sediment connectivity and bank erosion capacity to shape meandering morphology, maintain pool-riffle habitat structure, and enhance habitat diversity and biological corridor connectivity. (4) The project also found that weir removal should be scheduled outside of flood seasons to avoid coinciding with peak sediment transport. Furthermore, buffer zones must be established at specific bends (e.g., Bends 5–7) to mitigate bank erosion risks. In mobile bank scenarios, monitoring the meander migration of Bend 6 is essential.

Keywords: meandering river, river geomorphology, weir removal, Nays2DH, habitat restoration

目次

摘要.....	i
Abstract.....	iv
目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	IV
第一章 緒論	1-1
第一節 研究背景及目的	1-1
第二節 計畫目標及研究架構	1-3
第三節 工作項目與進度控管	1-5
第二章 研究地點	2-1
第一節 簡介	2-1
第二節 資料蒐集	2-33
第三節 現地調查	2-40
第三章 研究方法	3-1
第一節 水理輸砂模式	3-1
第二節 蜿蜒特徵分析工具	3-21
第四章 磺溪主流河道形貌變遷	4-1
第一節 主要關注河段及趨勢驗證	4-1
第二節 水動力模擬分析	4-6
第三節 沖淤分析	4-18
第四節 代表性斷面分析	4-27
第五節 敏感度分析	4-35
第六節 蜿蜒特徵分析	4-39
第五章 綜合討論與工程應用	5-1
第一節 蜿蜒化與潭瀨棲地貢獻	5-1

第二節 拆堰與輸砂連續性對底質的影響	5-2
第三節 促進蜿蜒之優先順序	5-2
第四節 潛在風險分析與策略	5-4
第五節 情境評估與決策建議	5-8
第六章 結論與建議	6-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-2
附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-4

表次

表 1-1 研究假說	1-4
表 1-2 預定進度表	1-6
表 2-1 礮溪主流河床質各粒徑停留百分率分析表.....	2-6
表 2-2 礮溪各河段歷年平均坡度	2-16
表 2-3 河床平均高差異	2-17
表 2-4 礮溪堤防破堤風險中度以上位置及狀況說明.....	2-21
表 2-5 礮溪流域水域動物調查表.....	2-29
表 2-6 礮溪流域各流量控制點最大 24 小時延時暴雨量表.....	2-35
表 2-7 礮溪流域控制點瞬時單位歷線法所得 1 小時單位歷線表 .	2-36
表 3-1 NAYS2DH 模式設定.....	3-11
表 3-2 邊界與初始條件設定	3-17
表 3-3 20 年重現期距之流量歷線表.....	3-18
表 4-1 實測與模擬之各斷面平均河床高程變化及說明.....	4-2
表 4-2 各分區之沖淤變化量	4-3
表 4-3 固定河岸情境下各區域之平均粒徑變化	4-24
表 4-4 可移動河岸情境下各區域之平均粒徑變化	4-24
表 4-5 輸砂參數敏感度測試.....	4-36
表 4-6 安息角敏感度測試結果之沖淤差異.....	4-36
表 4-7 部分拆除與完全拆除情境之蜿蜒遷移率（可移動河岸） .	4-41
表 4-8 各情境之蜿蜒特徵.....	4-41
表 4-9 各情境之蜿蜒特徵增幅.....	4-42
表 5-1 潛在風險與位置	5-6

圖次

圖 1-1 模擬流程圖	1-4
圖 1-2 沙洲推進與河岸拉動示意圖	1-5
圖 2-1 礮溪流域地理位置圖	2-1
圖 2-2 礮溪流域土壤分佈圖	2-5
圖 2-3 礮溪流域之歷年水質指標(2020-2025)分布圖	2-10
圖 2-4 河川型態分類法	2-12
圖 2-5 河川型態分類法階層（陳樹群、彭思顯，2002）	2-13
圖 2-6 歷年平均沖淤深度	2-18
圖 2-7 礮溪一號及二號攔河堰	2-21
圖 2-8 研究區域之礮溪主流堤防護岸	2-22
圖 2-9 礮溪河段之護岸現地空拍影像	2-22
圖 2-10 三和橋上底床淘刷及坡腳保護工	2-23
圖 2-11 複式河心沙州及交互沙洲之變遷	2-24
圖 2-12 研究區域與大斷面編號位置	2-31
圖 2-13 研究區域之 1950 年地形圖	2-31
圖 2-14 2024 年研究區域正射影像	2-32
圖 2-15 礮溪主流洪水平原範圍歷年變化統計示意圖	2-33
圖 2-16 大斷面內插之河道地形	2-34
圖 2-17 礮溪流域鄰近之中央氣象署氣象觀測站地理位置圖	2-37
圖 2-18 礮溪流域主要河段計畫流量分配圖（50 年重現期距） ..	2-38
圖 2-19 礮溪全流域 24 小時暴雨時間雨量分配型態圖	2-39
圖 2-20 研究區域與現勘位置	2-42
圖 2-21 113 年 10 月 19 日現地勘察照片	2-42
圖 3-1 NAYS2DH 非均勻粒徑多層模型	3-3
圖 3-2 考量二次流效應之流線方向	3-6

圖 3-3 邊坡崩塌概念模型	3-9
圖 3-4 FRIEDKIN (1945)之實驗水槽	3-12
圖 3-5 實驗水槽成果與 NAYS2DH 模擬成果比較圖	3-13
圖 3-6 NAYS2DH 模擬之彎道地形和 FRIEDKIN (1945)資料比對	3-14
圖 3-7 模擬範圍之固定床與移動床設定	3-19
圖 3-8 模擬範圍之曼寧 N 值設定	3-19
圖 3-9 底床粒徑分區範圍	3-20
圖 3-10 各區域底床粒徑分佈	3-20
圖 3-11 蜿蜒形貌模組：基本蜿蜒特徵分析	3-23
圖 3-12 蜿蜒形貌模組：小波分析	3-24
圖 4-1 模擬河段之分區敘述範圍	4-4
圖 4-2 模擬河段之主要彎道分布	4-4
圖 4-3 實測與模擬之沖淤深度及趨勢比較圖	4-5
圖 4-4 水深隨時間分佈圖	4-9
圖 4-5 流速隨時間分佈圖	4-11
圖 4-6 剪應力隨時間分佈圖	4-13
圖 4-7 不同拆除情境洪峰時之剪應力（固定河岸）	4-16
圖 4-8 不同拆除情境洪峰時剪應力（可移動河岸）	4-17
圖 4-9 高程變化隨時間分佈圖	4-20
圖 4-10 底床平均粒徑隨時間分佈圖	4-21
圖 4-11 不同拆除情境之沖淤變化（固定河岸）	4-25
圖 4-12 不同拆除情境之沖淤變化（可移動河岸）	4-26
圖 4-13 代表性斷面之底床高程與剪應力隨時間分佈	4-29
圖 4-14 模擬結束時之流速分佈與分流斷面位置	4-30
圖 4-15 分流點斷面之底床高程、水面高程與剪應力隨時間變化	4-31

圖 4-16 分流點斷面之底床高程與水面高程隨時間變化圖.....	4-32
圖 4-17 代表性斷面在不同拆除情境之底床高程與剪應力(固定河岸)	4-33
圖 4-18 代表性斷面在不同拆除情境之底床高程與剪應力(可移動河 岸)	4-34
圖 4-19 平均粒徑觀察點	4-37
圖 4-20 平均粒徑觀察點在不同情境隨時間變化.....	4-37
圖 4-21 彎道斷面之河床高程、水面高程與剪應力.....	4-38
圖 4-22 蜿蜒特徵在不同拆除情境之變化(固定河岸)	4-43
圖 4-23 蜿蜒特徵在不同拆除情境之變化(可移動河岸)	4-44
圖 4-24 在部分拆除與完全拆除情境時河道中心線遷移平面圖(可移 動河岸)	4-45
圖 4-25 部分拆除與完全拆除情境時蜿蜒遷移率隨距離變化.....	4-46
圖 5-1 蜿蜒度在各情境之比較.....	5-3
圖 5-2 平均振幅增幅在各情境之比較.....	5-4
圖 5-3 河岸侵蝕風險區	5-6
圖 5-4 河岸緩衝區位置	5-7
圖 5-5 完全移除、可移動河岸情境中河岸潛勢棲地與洪氾風險位置	5-7
圖 5-6 推移載輸砂量之坡度峰值與流量峰值(上圖:固定河岸;下圖: 可移動河岸)	5-8
圖 5-7 堰壩移除風險管理與應變計畫總圖	5-0

第一章 緒論

第一節 研究背景及目的

天然河道因環境之不穩定性容易產生擾動，造成水流不會沿直線行走，而是蜿蜒前行，因此天然河川一般會呈現蜿蜒狀，形成蜿蜒河道。潭瀨結構常見於彎道處(Keller, 1972)，多為生物利用之熱區，因此為改善棲地劣化、營造微棲地、提升生物多樣性，建立潭瀨結構係河川復育及促進魚類群聚之常見手法(Jackson et al., 2015)。

在造床流量(effective discharge)下，發生於彎道中之二次流會改變河川形貌，二次流使彎道外岸侵蝕形成凹岸，內岸堆積形成凸岸，在持續侵蝕與堆積作用之下，導致外岸形成潭瀨結構中之深潭(pool)，其水深較深、流速較慢；內岸因堆積作用旺盛形成沙洲(bar)，在蜿蜒河道中又稱為河曲沙洲(point bar)；在彎道之間的直線段則沉積較粗顆粒之泥砂，形成水深較淺、流速較快之淺瀨(riffle)，由此在蜿蜒河道中形成連續之潭瀨結構(riffle-pool sequence)。潭瀨結構多以河寬 5-7 倍之間隔出現(Leopold & Wolman, 1957)，顯示彎道流況可能具有維繫潭瀨結構的功能。河道因流況不均勻且不穩定而產生彎道，彎道二次流進一步形成凹凸岸，而凹凸岸之形貌又會維持二次流流況，成為潭瀨結構之外營力。於現象討論時，為方便理解沖淤所發生之河岸區域，本計畫後續將以「外岸」代稱「凹岸」、「內岸」代稱「凸岸」之方式進行描述。

在造床運動中，水流係以泥砂為材料進行造床，Greenberg and Ganti (2024)提到蜿蜒河道因攔沙壩而導致河道上游輸砂量減少時，其側向遷移率會隨之減少，顯示輸砂量對蜿蜒河道演化存在調控作用。另有水槽實驗指出停止供砂則會導致主深槽開始粗化，水流開始集中

淘刷沙洲，最終導致沙洲消失(Venditti et al., 2012)。而沙洲在蜿蜒河道中常扮演內岸堆積之灘地，有助於維持蜿蜒流況並促進棲地多樣性，這顯示上游供砂量有助於維持蜿蜒河道之自然演化。上述文獻指出，來砂量的減少可能抑制蜿蜒河道的形貌演化，本計畫進一步推測，河道形貌的變化將影響潭瀨結構的維持。

堰壩作為跨河構造物，具有攔蓄泥砂之效果，同時也分隔生物廊道，對於蜿蜒河道可能因中斷輸砂連續性而影響其自然演化。然而，堰壩移除對蜿蜒河道影響之研究就為缺乏，最早於 1999 年七家灣溪上游支流之高山溪便進行系列防砂壩移除工程，而直到 2007 年因韋帕颱風帶來豪雨使巴陵壩潰壩，堰壩移除之評估與機制才開始受到重視，雖然後來陸續有七家灣溪一號壩移除、秀巒壩降壩工程等，但是仍較欠缺蜿蜒河道中拆壩案例。此外，現有關注形貌演化之拆壩研究多聚焦在河床濬深之縱向演化，與河道窄寬之橫向分析，針對移除堰壩後輸砂量改變對短期蜿蜒平面型態(planform)演化研究較為不足。

本計畫目標係延續前一年提出的生態水文模式、水動力模式與景觀指數計算模式，並進一步加入河川形貌模式，探討蜿蜒河道之形貌演化對棲地結構之影響。本計畫以形貌演化為切入點，探討堰壩移除所導致之輸砂量改變，對蜿蜒河道平面型態與潭瀨結構的潛在影響，並提出以下假說：「堰體移除後因輸砂量增加將促進河道蜿蜒演化」。為驗證此假說，本計畫透過模擬三組堰體移除情境，探討磺溪主流堰壩移除造成輸砂量增加對河道形貌演化之影響，可更加深化潭瀨棲地形成機制之研究。

第二節 計畫目標及研究架構

本計畫認為蜿蜒河道流況為形塑潭瀨結構主要之外營力，且形貌演化對潭瀨結構之影響最為顯著，在探討蜿蜒河道於堰壩移除後，因輸砂量改變之形貌演化，藉此了解潭瀨結構可能之形成機制。本計畫推測因堰壩移除而使河川縱向輸砂量增加後，上游釋放之泥砂將堆積在彎道內岸，使水流在流經彎道時導向外岸而造成外岸侵蝕加劇，藉此促進蜿蜒河道的演化。計畫採用二維水理輸砂模式 Nays2DH，模擬移除堰體前後之河床形貌變遷，並從四大層面檢視模擬成果：一、水動力變化；二、沖淤分析；三、蜿蜒特徵分析；四、代表性斷面分析。模擬流程圖如圖 1-1 所示。研究成果有助於營造或維持潭瀨結構，或是應用於河川再蜿蜒化工程中，以改善河流棲地品質。同時，為了探討河道在河岸不受限制情況下的形貌演化，本計畫另設可移動河岸情境，模擬在移除護岸並假設河岸為易侵蝕條件下的演化過程，以了解側向遷移對蜿蜒促進的貢獻。本計畫根據前人文獻，提出以下尚未明確予以探討的假說如表 1-1，示意圖如圖 1-2。

表 1-1 研究假說

假說一： 沙洲推進	堰體拆除造成縱向坡度增加、剪應力上升，導致下游輸砂量增加，加速內岸淤積與沙洲側向推進，使主流偏向外岸並加劇外岸侵蝕，促進蜿蜒發展。
假說二： 河岸拉動	在可移動河岸條件下，外岸侵蝕加劇使曲率上升與側向來砂增加，強化內岸淤積並放大沙洲推進效應，形成蜿蜒促進的正回饋。

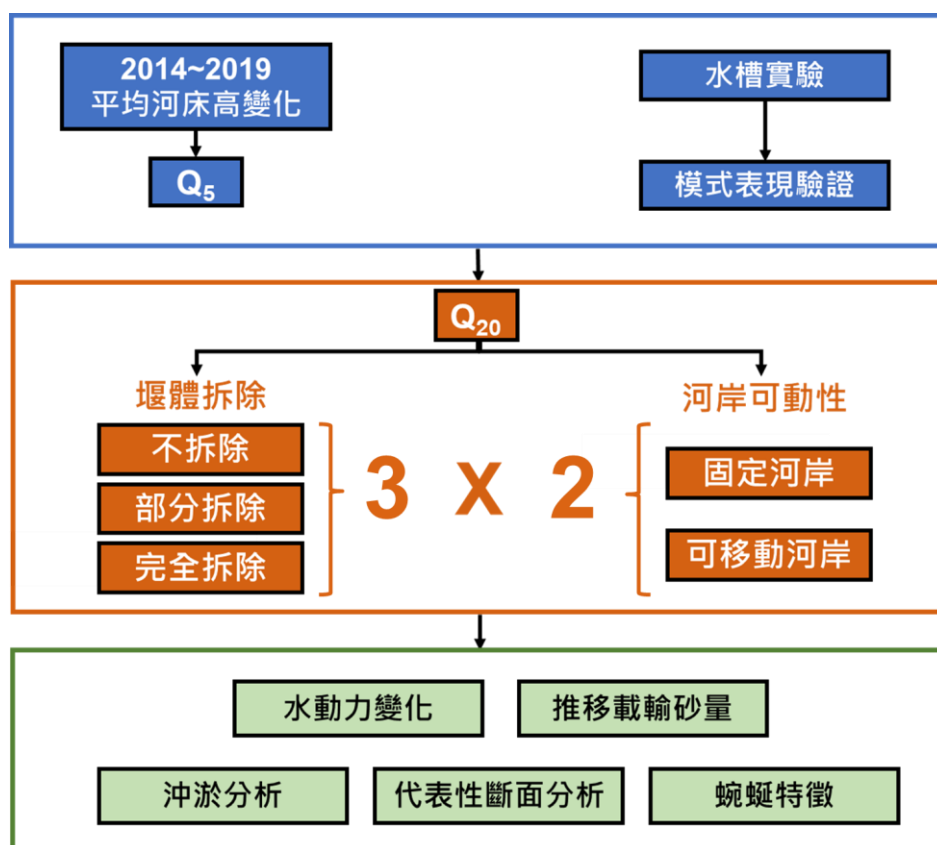
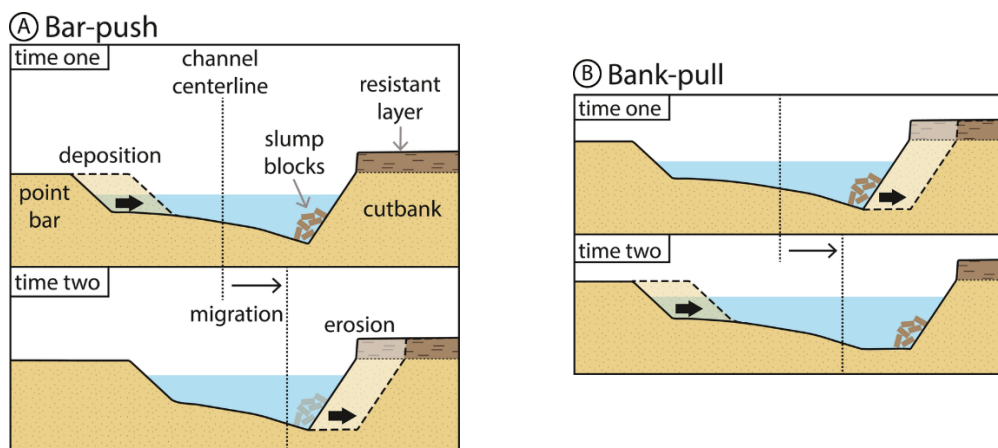


圖 1-1 模擬流程圖



資料來源：Martin et al. (2024)

圖 1-2 沙洲推進與河岸拉動示意圖

第三節 工作項目與進度控管

本年度主要工作項目為（一）模式建立、沖淤趨勢驗證與現況分析；（二）情境模擬與成果比較分析；（三）執行成果報告，三者為主，並另依此三大工作項目之工作內容、工作量比例、本計畫管考事項，分配作業日程及預定進度，以利管理本計畫之執行進度，詳見表 1-2。

「執行成果報告」依本計畫管考事項分期呈現：於 114 年 7 月 17 日前提送期中成果報告書；於 114 年 11 月 13 日前提送期末成果報告書；於 114 年 12 月 31 日前提送成果報告書、相關資料、結束會計報告。

表 1-2 預定進度表

重要工作項目	工作比重 (%)	預定進度	114 年			
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
模式建立、沖淤 趨勢驗證與現況 分析	60	工作量或內容	背景資料搜集	模式訓練與建立	現況情境模擬分析	-
		累計(%)	30	70	100	100
情境模擬與成果 比較分析	30	工作量或內容	-	不同情境模擬	分析各模擬情境結果	整理與檢討
		累計(%)	-	20	80	100
執行成果報告	10	工作量或內容	計畫說明書 籌備期中報告書	期中報告書	籌備期末報告書及成 果報告書	期末報告書 成果報告書
		累計(%)	25	50	75	100
累計總進度(%)			18	47	85	100

第二章 研究地點

第一節 簡介

一、流域概述

本計畫研究區域在新北市金山區的磺溪流域，磺溪屬中央管河川，隸屬於經濟部水利署第十河川分署轄管，其發源於大屯火山群七星山北麓，河道蜿蜒，經三和橋出山谷後河幅始漸開闊，進入金山沖積平原河幅較為寬廣，再經南勢、下六股，於社寮與來自西北向之支流清水溪與西勢溪會合後入東海。磺溪流域北臨淡水沿海河系流域，南與淡水河流域為鄰，東濱東海及基隆沿海河系流域。行政管轄分屬臺北市士林區、北投區及新北市金山區。流域內交通以公路為主，下游有省道台二線以南北橫越，由金山可北通石門、淡水，南抵野柳、基隆。磺溪流域地理位置如圖 2-1 所示。

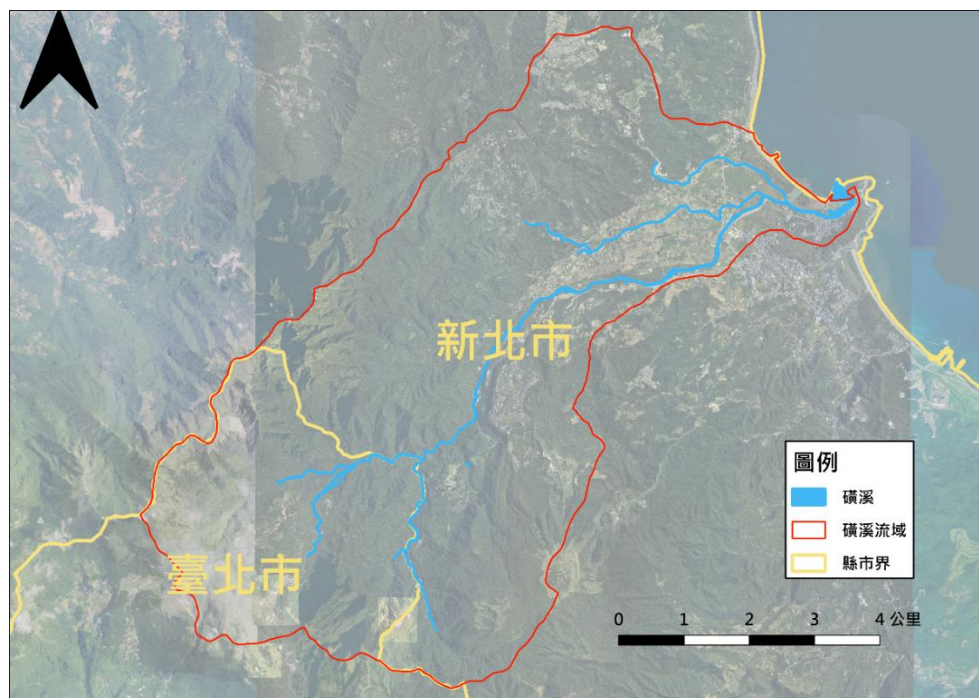


圖 2-1 磺溪流域地理位置圖

(一)、 地文特性

磺溪主流發源於大屯火山群七星山北麓，幹流長 13.75 公里，流域面積約 50 平方公里，其中標高 100 公尺以上山區約佔全流域面積 83%。磺溪上游地處陽明山國家公園保護區，保留原始自然生態，受自然山勢分水走向而呈樹枝狀；中游多為農田；下游為北海岸風景特定區與金山都市計畫區，地勢較為平坦，且受人工開闢渠道等人為因素影響，水系類型大致呈平行狀。根據「106 年磺溪治理規劃報告」（經濟部水利署第十河川局，2017），磺溪之治理河段自斷面編號 00 起（累距 0 公尺）至 26-1 止（累距 10,955 公尺），主要包含河口到上磺溪橋約 10.8 公里河段，平均坡度達 0.017，屬急流型河川。

通過磺溪流域之主要斷層為金山斷層，其屬臺灣北部區域屬於存疑性活動斷層。金山斷層為一東北走向之逆斷層，東北延伸入海西南沿尖山（南莊層）中角溪至重和村穿過磺溪河谷至大屯火山群，更向西南經臺北盆地邊緣，金山斷層局部為臺北盆地的沖積層所掩覆，西南端可能連結臺北斷層。本流域上有一褶皺位於金山斷層北方，屬向斜構造，呈東北西南走向。本區域地層分布主要有三個區域，包括：

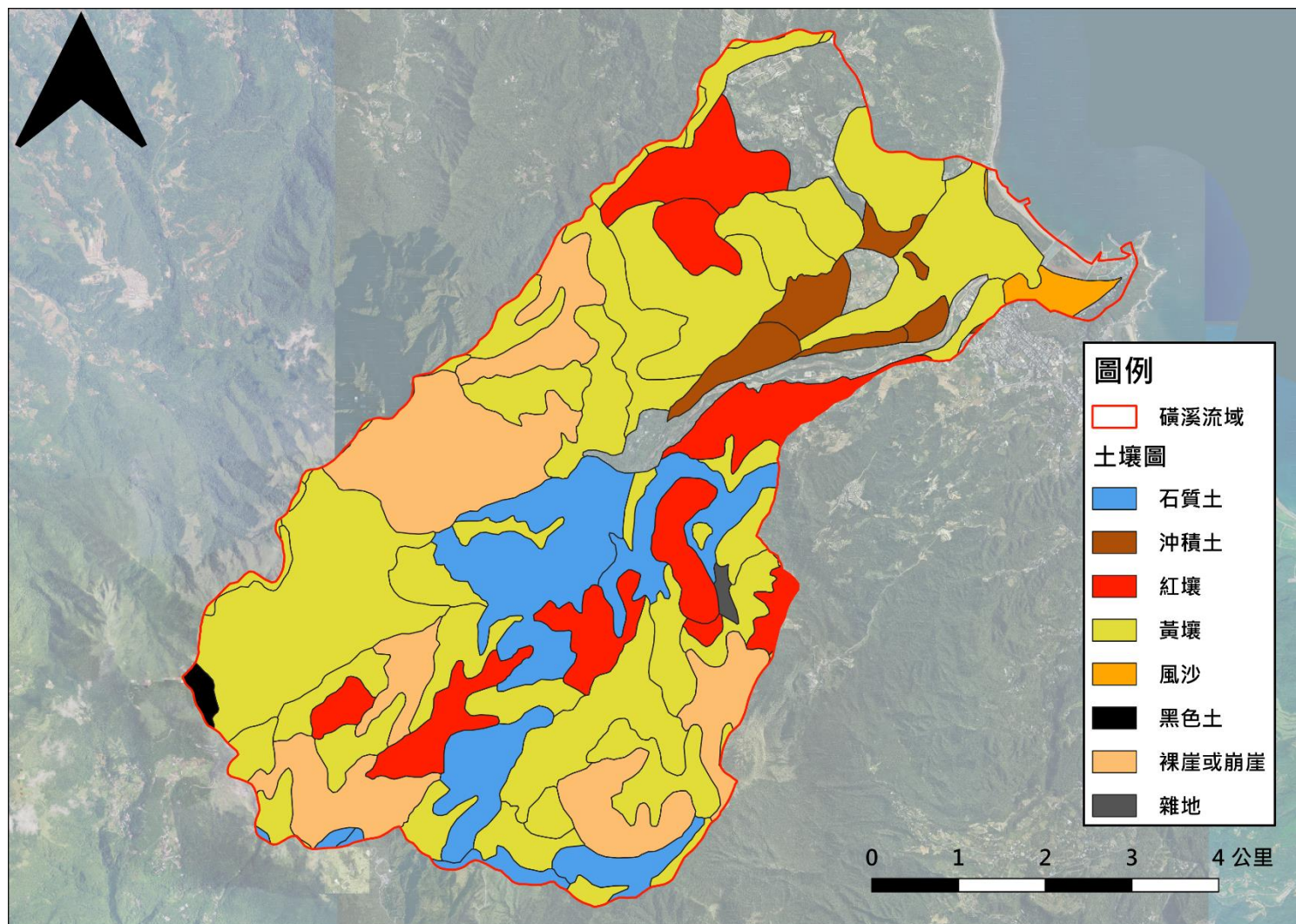
（一）更新世安山岩區域（二）中新世紀晚期桂竹林層大埔段、南莊層及上新世紀之桂竹林層二鬮段（三）現代沖積層及砂丘區域。

磺溪流域土壤屬黃壤、紅壤及石質土交雜分布；中下游多屬黃壤，尤以支流清水溪及西勢溪流域之中下游區域均為黃壤分布區，支流之上游區域具紅壤分布；磺溪下游沖積平原為礫石、砂及黏土等沖積土分布，社寮—金包里山及中角海岸為因季風形成之沙丘，另獅頭山海岬以石質土分布為主，分佈如圖 2-2。至於河道範圍，則多屬沖積層。各種土壤特性茲分述如下：

1. 黃壤：母岩質經弱度化育而生成之土壤，有時可因淋洗作用較強而使粘粒明顯往剖面下層移動，養分（鉀、鈉、鈣、鎂）有的已流失而呈黃、黃棕或紅棕色，多生成丘陵地上之相對地形較安定、坡度起伏較和緩之處。
2. 紅壤：紅壤生成於洪積母岩台地，土層較厚，質地細緻，肥力及物理性較差。又可分為紅棕色紅壤及黃紅色紅壤兩種。
3. 石質土：由母質經由簡單之物理、化學風化作用生成之土壤，含石量超過50%以上，排水、通風良好，通常分布於山坡地或森林地之陡峭區，地形不穩定，甚易崩坍，不宜農牧用途，只宜造林保育。
4. 沖積土：土壤物質經河流沖刷後，帶至下游而漸次淤積成固定土壤者，土層中之顏色因人為耕作漸有所改變成淡黃色，因此可以區分有新沖積土與老沖積土。

礮溪上游蜿蜒曲折於山林，受谷壁限制多，順流而下到中上游三和橋河谷後逐漸開闊，爾後流入沖積平原，最後流入東海。「106 年礮溪治理規劃報告」（經濟部水利署第十河川局，2017）根據高程將治理河段歸類為平原（<100 公尺）及丘陵（100~1,000 公尺）地形，在礮溪主流中，上礮溪橋（斷面 26）至無名橋上游（斷面 16-11）屬丘陵地形，無名橋上游（斷面 16-11）以下至治理河段終點河口（斷面 0）屬平原地形；橫向上以寬深比 40 為界，根據 97 年的調查顯示，主流多屬窄深型（寬深比<40），惟斷面 12 至河口段偶有寬淺型。同年針對河床質的調查指出，礮溪主流平均粒徑較粗大，上游最粗可達 200 毫米以上，接近河口處則為細顆粒泥砂（約為 0.31 毫米），本計畫研究區域平均粒徑位於斷面 8 至斷面 14 之間，平均粒徑約在 98-137 毫

米（表 2-1），屬卵礫石區間。卵礫石雖抗侵蝕能力強，但因礪溪橫斷面多屬窄深型，部分河段河寬小，加上縱向坡度陡峭，易使剪應力升高，在洪水事件發生時仍會造成顯著河床高程變化。



資料來源：農業部農業試驗所(<https://data.gov.tw/dataset/25539>)；本計畫修改及繪製。

圖 2-2 礦溪流域土壤分佈圖

表 2-1 礮溪主流河床質各粒徑停留百分率分析表

斷面號	河心累距 (m)	粒徑 (mm)														
		No.200	No.100	No.60	No.40	No.20	No.10	No.4	3/8"	3/4"	1 1/2"	3"	6"	8"	12"	18"
01-01	396	2.48	32.2	62.29	1.84	0.06	0.02	0.42	0	0	0	0	0	0	0	0
04-11	1,679	0.5	1.31	2.71	6.42	8.07	7.17	3.97	7.47	13.31	26.13	15.23	5.6	1.63	0	0
07-1	2,796	0.74	3.72	8.79	18.07	10.66	4.98	1.82	7.54	14.1	18.58	6.19	4.1	0	0	0
11	4,319	0.7	1.96	2.97	5.67	6.21	5.14	2.22	4.93	8.15	14.65	19.38	7.95	5.98	13.34	0
12-01	4,976	0.39	0.87	1.3	2.55	3.58	4.79	2.35	5.03	6.97	12.23	25.49	10.63	5.71	17.71	0
14-01	5,899	0.39	0.92	1.64	4.09	6.53	8.85	4.56	8.26	10.64	14.54	12.68	10.04	6.19	10.34	0
15-1	6,572	0.38	0.88	1.55	3.62	5.41	6.05	2.76	7.28	11.21	17.73	21.66	7.98	7.28	5.89	0
16-1	6,873	0.46	1.34	2.63	5.9	6.72	6.41	3.54	6.72	8.69	13.01	17.26	7.89	10.23	8.94	0
18-12	7,751	1.07	4.03	7.78	15.11	21.3	12.44	3.17	4.57	5.21	6.16	11.05	4.89	2.87	0	0
25-11	10,849	0.08	0.36	0.87	1.9	11.17	8.76	3.13	7.41	10.26	13.53	10.43	9.91	2.59	19.57	0
26-1	10,955	0.49	1.27	2.13	4.52	11.32	9.02	3.04	13.39	16.33	19.63	13.85	3.67	1.19	0	0

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2017；本計畫整理繪製。

(二)、人文地理與社會經濟狀況

磺溪流域整體行政分區包含臺北市士林區、臺北市北投區、新北區金山區，因上游屬陽明山國家公園管轄之範圍，土地使用有一定的管制故居住人口較少，流域內人口主要分布於中下游，故人口以中下游之新北區金山區境內為統計對象，依 113 年新北市金山區公所統計，該區人口總數為 20,366 人，男性占 10,039 人、女性占 10,327 人，較男性多 288 人；人口密度每平方公里人數約為 414 人，共計 15 里、201 鄰、總戶數為 7,279，每戶人口數為 2.8 人，各里人口數最多者為金美里 5,544 人，占地面積為 0.4 平方公里，可謂地狹人稠，其次為美田里，人口數為 4,416 人，五湖里人口數為 1,822 人居第三位，再其次磺港里之人口數為 1,815 人，最少人口數為西湖里 173 人，而土地最廣為重和里之 24.5 平方公里，人口數 1,203 人，相對為地廣人稀（新北市金山區公所，2024）。

流域內之經濟型態多以農業、漁業為主，根據新北市金山區公所統計農耕土地面積及農戶人口數，耕地面積總計 843.84 公頃，其中水稻耕作面積約 28.93 公頃。除耕種水稻外，該區亦種植台農 66 號紅心甘藷、筴白筍、跳石芋頭與箭竹筍等經濟農作物，尤以紅心甘藷為金山區之名產，近年來金山區農會推動一年一度金山甘藷節，亦帶動本地區觀光農業之發展。

流域內磺港漁港為一中型漁港，也是金山最大的漁港，主要以延繩釣漁業為大宗，少數從事火誘網漁業，漁獲物以石斑、黑喉、嘉臘、赤鯨、馬頭、火口、白鯧、烏口、透抽、小卷、白口、花市、花枝等為主，漁產相當豐富。除此之外，更有其他漁港所沒有的溫泉資源，新北市政府及金山區公所等單位有鑑於目前漁業經營日益困難，傳統

漁業朝觀光休閒轉型是必然的趨勢，使磺港漁港結合漁業、溫泉及周邊景點等條件，朝向漁業轉型及漁港多元利用，讓漁業得以永續經營方向而努力。

(三)、氣候水文及水質特性

磺溪流域內現存之氣象觀測站僅餘三和氣象觀測站，隸屬於交通部中央氣象署，鄰近流域範圍則另有金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站，亦皆隸屬中央氣象署，可幫助釐清該流域之氣象特性。磺溪主流並無水文流量站，目前有第十河川分署為了防洪需求設立於三和橋與新磺溪橋之水位站，但僅用於汛期，並無公開其歷史資料。

磺溪流域位於臺灣北部，每年十一月至翌年四月盛行東北季風，因地形的影響氣流往上抬升，造成流域雨量豐沛。每年五月至十月間則盛行西南風，西南氣流遭中央山脈阻隔，因而雨量較少；另夏季颱風多由臺灣東部及東北部登陸，因磺溪流域地處迎風面，且無地形阻隔，颱風之強風豪雨常直接侵襲本流域。就年雨量而言，各雨量站降雨量之差異主要為山區雨量較大、平原地區較小，由中央氣象署提供之統計降雨量資料（1991 年~2020 年）可觀察出，從沖積扇平原之 2,888.1 毫米（金山站）至高山區之 4,697.1 毫米（鞍部站），差距達 1,809 毫米，可判斷磺溪流域降雨量有明顯的空間差異。此外，降雨的時間分布亦不均，各月份降雨量差異顯著：以九月至隔年五月為雨季，山區部分尤以九至十一月降雨量更大，流域整體之平均年降雨量由下游河口向上游山區遞增。另在颱風暴雨時期，其雨量分布則受颱風規模、路徑、地形而有所不同之反應。

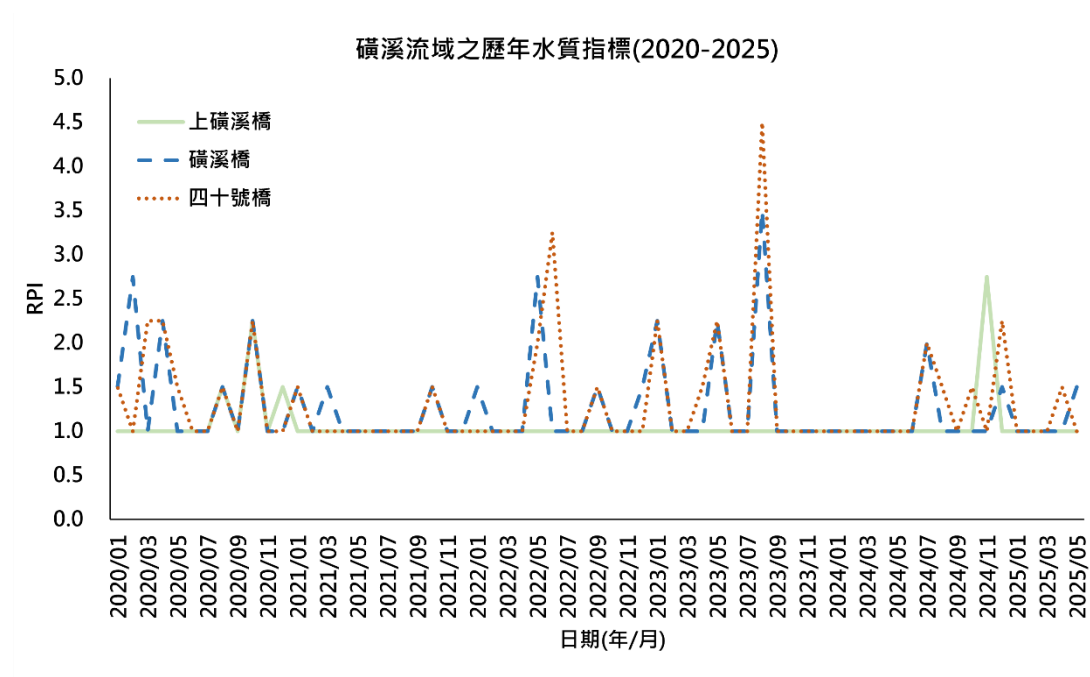
另外，由鄰近磺溪流域之中央氣象署主要氣象站月平均氣溫統計，

磺溪流域最冷的時節為冬季十二月到隔年三月，山區氣溫較低，月平均氣溫約在 9.8~12.8 度，平地月平均氣溫約在 15.8~17.6 度；最熱的時間通常是每年六月至九月間，整體月平均溫度約 21.9~29 度。

而相對濕度因地形、季節不同均有些許差異，北部山區相對濕度月平均約為 86~90%，平原濱海地區約為 80%；山區之相對濕度因季節變化較小，但冬季受東北季風因素影響，相對濕度較夏季高；而平原濱海地區之夏季相對濕度較低，均在 80%以下。

磺溪水系目前有行政院環保署設置於上游之水質監測站，包括上磺溪橋測站、磺溪橋測站與四十號橋測站等。上磺溪橋測站位於上游河段，磺溪橋測站及四十號橋測站則於下游河段。各測站依每月量測之溶氧量、生化需氧量、懸浮固體、氨氮之四項水質資料計算河川污染程度指標(River Pollution Index, RPI)，該指標可分為四級：未受污染(<2.0)、輕度污染(2.0~3.0)、中度污染(3.1~6.0)、嚴重污染(>6.1)。本計畫整理此三測站由 2020 年至 2025 年 5 月之歷年水質變化見圖 2-3。由圖可見，磺溪橋測站及四十號橋測站之 RPI 指標變化相較於上游之上磺溪橋測站頻繁，常介於輕度污染及中度污染間，除水系特性之外，亦受到下游兩岸居民活動之影響。整體而言，磺溪流域多介於未受污染至中度污染之間，隨流量豐枯而呈週期性變化，因此與流量變化有關但整體水質尚稱良好。另磺溪流域上游發源或流經大屯火山群，大屯火山群最後一次噴發大約於 30 萬年前，造成火山地區地層存有小斷層或裂縫。降雨流經小斷層與裂縫，並與地下熱源接觸後形成熱水或熱氣，再混合岩漿釋放之硫、氯等氣體，最後沿著裂縫上升至地表後形成溫泉或噴氣孔。磺溪上游水源受其影響，導致溪水匯流大量的溫泉、氧化鐵等酸性物質，礦物離子含量高，形成 pH 值較低之酸性

水體，河床底石也被染成黃褐色。根據水質測站顯示，上游上礮溪橋之 pH 值約在 2~4 之間，而下游礮溪橋與四十號橋測站仍有 pH 值 3~4。根據環保署針對礮溪水系的水質進行水體分類，礮溪主流上游至石槌子溪匯流處水體仍屬甲類，自石槌子溪匯流處起至出海口則為乙類。



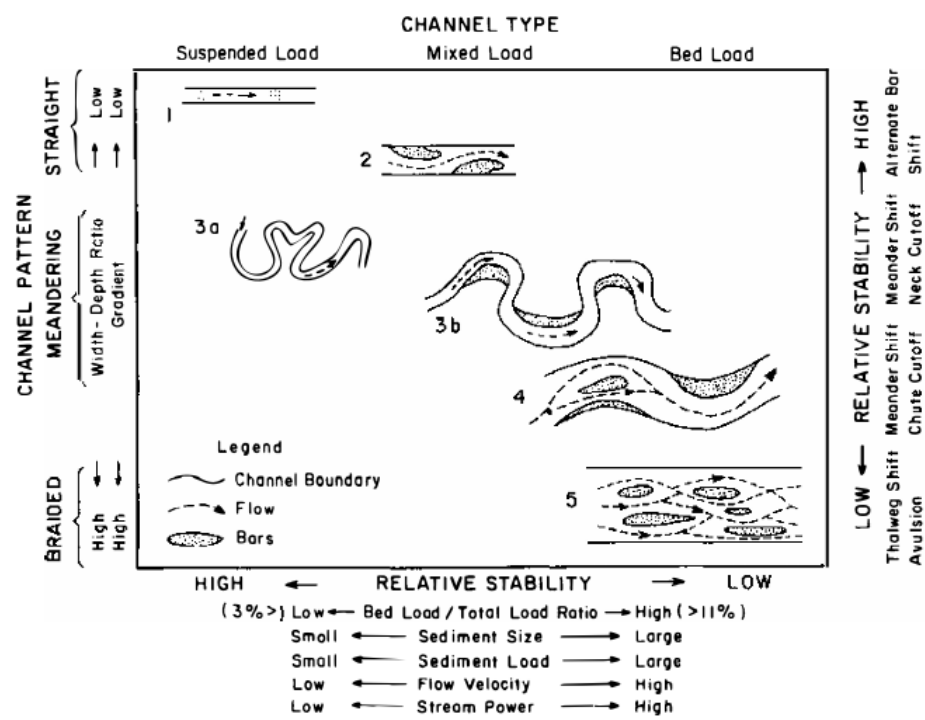
資料來源：行政院環境保護署；本計畫整理繪製。

圖 2-3 礮溪流域之歷年水質指標(2020-2025)分布圖

(四)、河川型態

過去針對河川型態之分類較常使用 Schumm (1985)及 Rosgen (1994)之方法(圖 2-4)，其根據河道之蜿蜒程度、辮狀型態、泥砂粒徑、水理特徵、河寬比、坡度等因子進行分類。而台灣河川地理條件特殊，如河川坡陡流急、且泥砂含量高，以上分類法在台灣河川之應用需再進行調整及在地化。陳樹群、彭思顯(2002)便以 Rosgen 分類系統為基礎，另加入水系與地質條件，以五個階層的方式逐一分析再進行分類，如圖 2-5「106 年磺溪治理規劃報告」(經濟部水利署第十河川局，2017)便根據此五階系統，分別以第二層(主流型態)、第三層(橫斷面特性)闡述磺溪河川特性。雖然磺溪並無辮狀河中常見之沖積扇特徵，但根據歷史影像，中下游地區常有河心沙洲形成河川多流路，本計畫推測係因此緣故才被分類在辮狀河。磺溪主流過去雖可見分流與匯流現象，但大體上仍呈蜿蜒流，且伴隨河曲沙洲等蜿蜒河道之常見形貌。本計畫另根據 Schumm (1985)分類法的示意圖進行對照，可初步研判磺溪為第四型河川(Type 4)，介於蜿蜒與辮狀河道。第四型河川的蜿蜒度較低且以底床質為主，偶有河心沙洲形成但仍有河曲沙洲。整體來說，根據上述國內外河川型態分類之比較，本計畫推測磺溪主流應介於蜿蜒與辮狀之間，河道大體上呈蜿蜒流路，但因坡度陡峭且含砂量高，導致河道在單槽蜿蜒與多槽辮狀之間擺蕩，推測後續模擬可能出現分流或河心沙洲。

(a) Schumm (1985)



(b) Rosgen (1994)

Dominant Bed Material	A	B	C	D	DA	E	F	G
1 BEDROCK								
2 BOULDER								
3 COBBLE								
4 GRAVEL								
5 SAND								
6 SILT/CLAY								
ENTRH.	<1.4	1.4-2.2	>2.2	N/A	>2.2	>2.2	<1.4	<1.4
SIN.	<1.2	>1.2	>1.4	<1.1	1.1-1.6	>1.5	>1.4	>1.2
W/D	<12	>12	>12	>40	<40	<12	>12	<12
SLOPE	.04-.099	.02-.039	<.02	<.02	<.005	<.02	<.02	.02-.039

圖 2-4 河川型態分類法

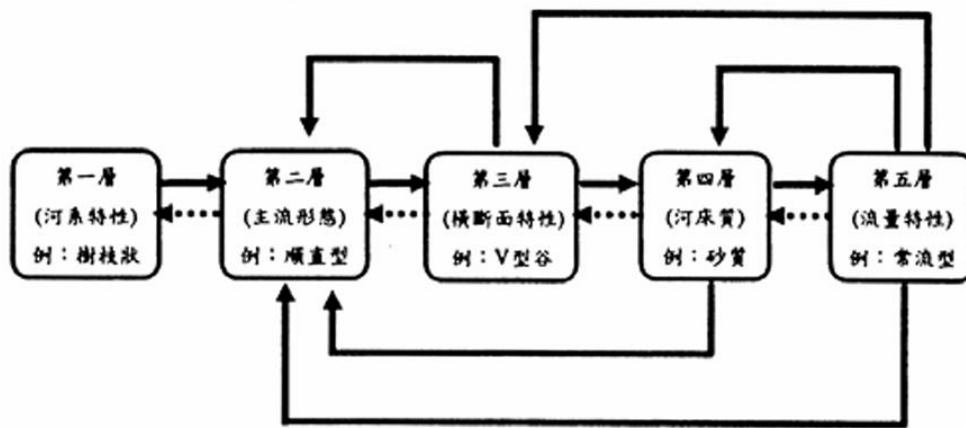


圖 2-5 河川型態分類法階層（陳樹群、彭思顯，2002）

(五)、河道沖淤熱點

109 年礮溪整體疏濬評估計畫（110～112 年）（經濟部水利署第十河川局，2020）整理民國 78 年、95 年、97 年、103 年及 108 年平均河床坡度變化，如表 2-2 所示，全河段平均坡度約 1/30，上游整體坡度陡峭，於三和橋（斷面 12）始趨於平緩，至下游段之新礮溪橋（斷面 5）坡度則大幅下降。

自上游之上礮溪橋（斷面 26）至 78 年治理起點（斷面 15-11）屬於相對陡峭的河段，平均坡度均大於 1/25；自 78 年治理起點（斷面 15-11）至三和橋（斷面 12）坡度略有降低，但仍大於 1/40；到了三和橋（斷面 12）至新礮溪橋（斷面 5）之河段開始變得相對平緩，坡度介於 1/73 至 1/70；下游段之新礮溪橋（斷面 5）開始到西勢溪匯流前（斷面 2）坡度急劇變緩，平均坡度僅剩 1/500 左右。由此可見，礮溪是典型坡陡流急的河川，自發源於山區至流入東海其坡度變化迅速，加上台灣多砂河川的特性，預期在颱風事件發生時會有較顯著的形貌變化。

二號攔河堰（斷面 11.11）下游後來增設五階靜水池，其中第二

層靜水池於民國 80 年代完成，最後三層在民國 91 年完成，因此平均河床高有明顯差異，推測臨近河段亦有可能受其影響而有所變化。根據平均河床資料顯示，斷面 26 至斷面 15 過去的河床變化顯著，短期（103-97 年）資料顯示甚至有 10 公尺的高程變化，對應到該區域屬高坡度河段，推測在洪水事件發生時可能有顯著沖淤，若有河岸坍塌事件發生將反映到平均河床高的劇烈變化。

本計畫摘錄礮溪整體疏濬評估計畫（經濟部水利署第十河川局，2020）觀察礮溪之中下游河段之沖淤變化，從圖 2-6 可觀察出無名橋至三和橋大部分為淤積作用顯著，三和橋上游在 97-95 年間甚至有高達 4 公尺之淤積厚度。根據「礮溪水系徑流分擔評估規劃流域整體改善與調適規劃報告」（經濟部水利署第十河川分署，2022），以 78~108 年、97~108 年之平均河床高分別代表長期及短期變化分析，無名橋（斷面 15）至三和橋（斷面 12）間長期淤積量可達 192,337 立方公尺，短期約為 18,801 立方公尺，其中二號攔河堰前淤積高度逐漸降低，研判最早可能係攔河堰上游回水造成淤積，隨著堰前床高逐漸到達堰頂淤積量開始下降。接著，水流在經過二號攔河堰後，由於高程落差造成堰下跌水侵蝕（斷面 11-11 至斷面 10 之間短期沖刷量可達 73,893 立方公尺）；過了侵蝕段到新礮溪橋（斷面 8）之間則大體呈現淤積（斷面 9-01 至斷面 8 之間短期淤積量達 14,415 立方公尺）。最後，在一號攔河堰下游沖淤變化幅度開始下降，推測可能跟坡度趨緩有關，斷面 8 至斷面 4 長期呈現淤積，斷面 4 以下則以侵蝕為主，短期變化上，兩處皆有觀察到侵蝕與淤積發生。

本計畫針對之研究區域為彎道河段（斷面 14 至斷面 8），故本計畫另比較分析斷面 14 至斷面 8 之歷年平均河床高（表 2-3），其結

果顯示二號攔河堰上游（斷面 14 至斷面 11.13）多為淤積，沖淤深度大約落在-0.43~1.38 公尺之間；二號攔河堰下游（斷面 11.01 至斷面 11）多為侵蝕且深度大，多落於-2.59~0.35 公尺之間；從斷面 10.01 至礮溪中橋上游（斷面 8.02）之間則侵蝕及淤積現象皆有發生，高程變化在-1.7~0.48 公尺之間。二號攔河堰上游推測係因上游迴水的關係，泥砂多為落淤，惟三和橋近年呈侵蝕，推測係因攔河堰接近淤滿，使淤積作用趨緩而侵蝕作用趨於顯著。另外，二號攔河堰發生較大之沖淤落差（2.5 公尺），推測係跟堰下跌水工有關。最後，在斷面 10.01 至斷面 8.02 之間則因有彎道、交互沙洲等形貌，可能造成沖淤皆有之現象。

「106 年礮溪治理規劃報告」（經濟部水利署第十河川局，2017）曾以實測河床質資料與水理因子，使用蕭克力胥(Schoklitsch)及張氏公式(Chang, H.H.)推算河道輸砂量，惟演算為定床模式，輸砂量僅能代表河道沖淤趨勢。整體而言，輸砂量高主要對應到流速高的區域。另外因攔河堰上游迴水與下游跌水影響，造成局部輸砂量驟增與劇減。在斷面 3.1 因堤防束縮使流速變大，造成輸砂能力也相對較大。縱向上整體呈現上游輸砂能力較下游高的現象，推測係受坡度影響較大。

表 2-2 礮溪各河段歷年平均坡度

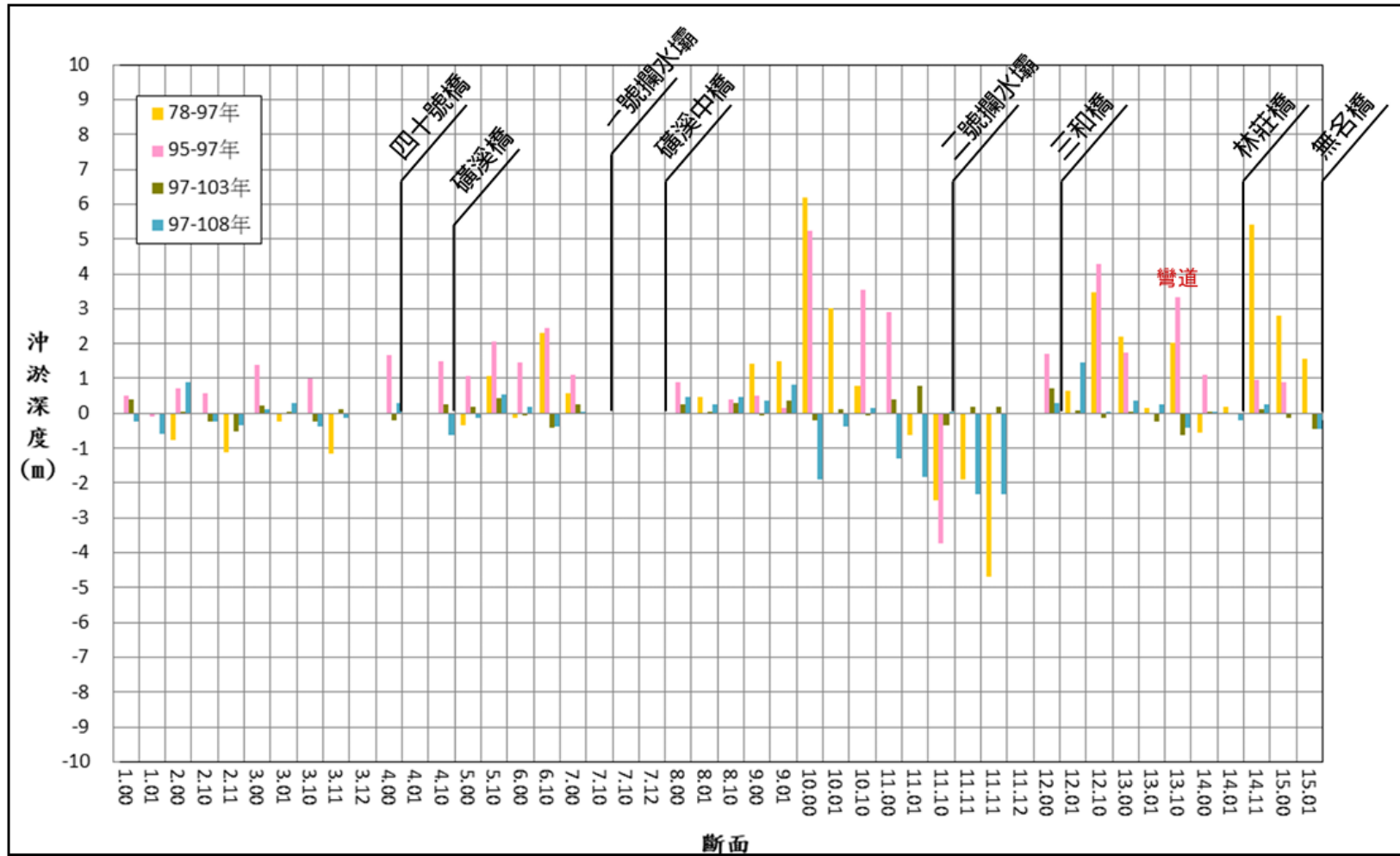
河段	斷面號	78 年	95 年	97 年	103 年	108 年
西勢溪匯流前至新礮溪橋	2~5	1/467	1/458	1/404	1/387	1/605
新礮溪橋至三和橋	5~12	1/73	1/72	1/71	1/70	1/70
三和橋至 78 年治理起點	12~15-11	1/40	1/45	1/42	1/34	-
78 年治理起點至清水坑匯流處	15-11~20-11	-	1/27	1/26	1/25	-
清水坑匯流處至上礮溪橋	20-11~26	-	1/12	1/12	1/12	-
河口至上礮溪橋(平均)	0~26	-	1/30	1/30	1/29	-

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2020。

表 2-3 河床平均高差異

斷面 編號	河心距 (m)	平均河床高 (m)		河床平均高差異 (m)	備註
		103 年 (B)	108 年 (A)	(A)-(B)	
8.02	3,240	15.85	16.04	0.19	
8.01	3,329	15.95	16.12	0.17	
9	3,569	17.06	17.49	0.43	
9.02	3,694	18.33	18.81	0.48	
10	3,883	24.61	22.91	-1.70	
10.02	4,092	25.68	25.20	-0.48	
10.01	4,228	27.39	27.60	0.21	
11	4,319	30.70	28.99	-1.71	
11.02	4,452	34.88	32.29	-2.59	
11.01	4,589	35.29	35.64	0.35	
11.11	4,757	41.19	38.69	-2.50	二號攔河堰下游
11.11	4,760	41.19	38.69	-2.50	二號攔河堰上游
11.13	4,840	-	-	-	三和橋下游
12	4,845	47.75	47.32	-0.43	三和橋上游
12.02	4,976	48.73	50.11	1.38	
12.01	5,182	52.21	52.37	0.16	
13	5,326	53.58	53.90	0.32	
13.02	5,439	54.88	55.39	0.51	
13.01	5,570	59.36	59.57	0.21	
14	5,783	65.56	65.54	-0.02	

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2020；本計畫整理並分析。



資料來源：礮溪整體疏濬評估計畫（110~112 年），經濟部水利署第十河川局，2020。

圖 2-6 歷年平均沖淤深度

(六)、 水工結構物

磺溪流域內之經濟型態多以農業、漁業為主，根據新北市金山區公所統計農耕土地面積及農戶人口數，耕地面積總計 843.84 公頃，其中水稻耕作面積約 28.93 公頃。除耕種水稻外，該區亦種植台農 66 號紅心甘藷、筴白筍、跳石芋頭與箭竹筍等經濟農作物，尤以紅心甘藷為金山區之名產。為了農田灌溉之用，農田水利署北基管理處在磺溪主流、支流清水溪、石槌子溪等皆設有取水設施，磺溪主流則設有一號與二號攔河堰。早期攔河堰又稱作攔水壩或圳首，因此一號攔河堰、二號攔河堰過去也被稱作磺溪一圳（二號攔水壩）、磺溪二圳（一號攔水壩）（圖 2-7）。

磺溪主流雖為合法二級灌溉用水，但因受上游硫磺影響，水質偏酸，多不適用於灌溉，而一、二號攔河堰接近磺溪中下游，相較於上游地區其水質硫磺含量相對少，唯有在天旱無水時，因清水的水量不足，可勉強引用主流溪水作為灌溉水源之用，其灌溉總面積達 30 公頃。攔河堰過去常存有淤積問題，形成攔河堰上游陸化、長草等情形，根據 109 年磺溪水系風險評估報告（經濟部水利署第十河川局，2020），二號攔河堰左岸的六股林口堤防位於彎道內岸，受河水直接衝擊，且無灘地保護，有破堤風險（表 2-4）。另於一號攔河堰下游左岸面臨相同問題，顯示攔河堰跌水加上彎道地形將進一步加劇河道風險。總體來說，一、二號攔河堰的功能已逐年式微，然而卻因阻斷縱向輸砂與跌水沖刷使河道潛在的風險增加。

由於臨近住宅與農地，為降低水患風險，磺溪河岸皆有設置堤防、護岸保護（圖 2-8、圖 2-9），此外，磺溪主流蜿蜒，洪水時彎道外岸易受侵蝕，因此在治理過程中亦增設了不少縱向構造物。例如，三

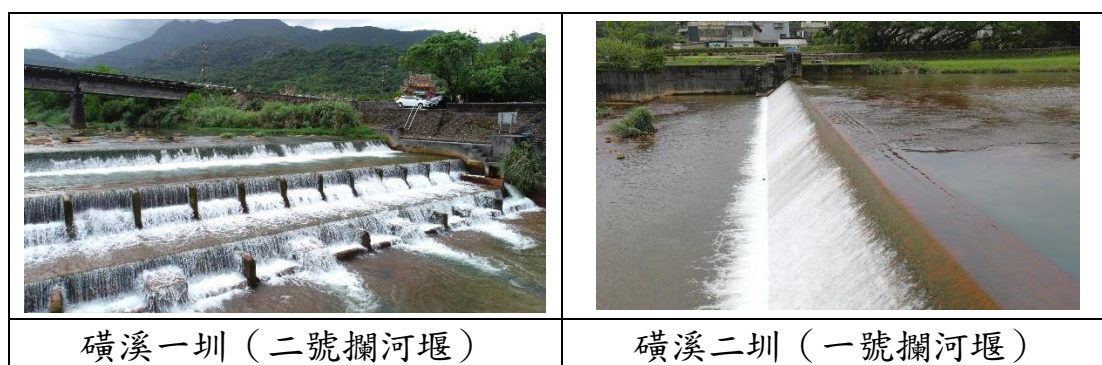
和橋上游因主流迫近造成底床淘深，後續使用了混凝土異型塊作為保護工，如圖 2-10 所示。

比較 Google Earth 歷年正射影像發現，在斷面 9~11 之間有顯著沙洲形貌變遷，推測跟縱向構造物的增設有關，例如斷面 9~10 常年有交互沙洲(alternate bar)，斷面 10~11 則有複式河心沙洲(compound mid-channel bar)。而近年之圖資發現河岸侵蝕有減緩之趨勢，且交互沙洲有面積縮減之現象，結合歷年影像分析與工程報告，本計畫推測上述形貌同時受洪水與人為干預影響，人為增設之護岸抑制河岸侵蝕，減少洪水時期被帶至沙洲之泥砂量，改變了交互沙洲形貌，導致其面積消長與位置變遷。

表 2-4 礮溪堤防破堤風險中度以上位置及狀況說明

岸別	護岸名稱	斷面編號	說明	危險程度
左岸	六股二號堤防	07-1	1.攔水壩下游流速極快，逾 10 m/s 以上，且無堤前灘地保護，流路緊鄰堤腳，堤防現況有裂縫，達中度改善程度	中度
	六股林口堤防	11-1	1.攔水壩下游流速快，逾 7 m/s 以上，且無堤前灘地保護，流路緊鄰堤腳 2.位於彎道凹岸，流路直沖，可能受潛在土砂災害影響	中度
右岸	南勢湖二號堤防	07-1	攔水壩下游流速極快，逾 10 m/s 以上，灘地寬度不足 10m，流路迫近堤腳	中度
	林莊護岸	13-1	1.坡度陡、流速達 6 m/s 以上，且無堤前灘地保護，流路緊鄰堤腳 2.深槽中輸沙集中 1.7m，河道流向不穩定，堤腳保護崩損掏落，可能受潛在土砂災害影響	中度
		13-1	1.流速高達 8 m/s 以上，且無堤前灘地保護，流路緊鄰堤腳，現況護岸有破損情形，達達改善程度 2.位於彎道凹岸，流路直沖，可能受潛在土砂災害影響	高度

資料來源：礮溪水系風險評估，經濟部水利署第十河川分署，2020 年。



資料來源：農業部農田水利署北基管理處。

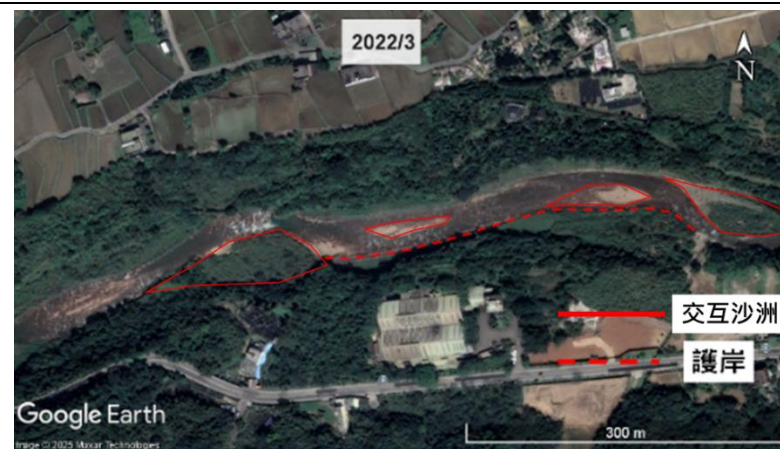
圖 2-7 礮溪一號及二號攔河堰



資料來源：經濟部水利署第十河川局。

圖 2-10 三和橋上底床淘刷及坡腳保護工

交互沙洲(alternate bar)



複式河心沙洲(Compound Mid-channel Bar)



資料來源：Google Earth。

圖 2-11 複式河心沙洲及交互沙洲之變遷

(七)、流域植物分布

磺溪流域自河口至上游陽明山國家公園區，境內野生植物涵括平原農田生態及次生林地等分布，參照「106 年磺溪治理規劃報告」（經濟部水利署第十河川局，2017），茲以磺溪下游至磺溪上游分處敘述：

1. 磺溪出海口會合處（磺溪下游）

山丘上避風處日照強，木本植物以木麻黃，野桐為主；磺溪出海口舊河道有野荸薺、水毛花等水生植物。

2. 西勢溪與磺溪交會口

兩岸主要為水泥堤防護岸，近海處高木，如木麻黃、黃槿、林投、榕樹等、兩旁則有農業時期留下之竹林，令有次生植被如芒草、蘆竹、及大花咸豐草等；河床旁邊有水生植物如稗、水丁香、細葉水丁香、鴨舌草、斷節莎、墨菜、八字蓼；尚有沙崙生態植物如三葉五加、木麻黃、馬櫻丹、海桐、小葉桑、桔梗蘭、茵陳蒿、短葉水蜈蚣、白茅、馬鞍藤、草海桐、蔓荊、天人菊、文殊蘭、濱刺麥等。

3. 三界壇清水溪旁

農作物有荷花、筴白筍、水芋等。旱田中有水生植物如八字蓼、小花水丁香、滿江紅、粉綠狐尾藻、長梗滿天星、水竹葉、尖瓣花、水芙蓉、翼莖闊苞菊、水蕨、七星山穀精草、細葉碎米薺、中國水竹葉、白花霍香薊、鼠麴草等；另有芋麻、水竹葉，喬木下有伏石蕨、橢圓腺蕨、傅氏鳳尾蕨、鱗蓋鳳尾蕨、長葉腎蕨、密毛蕨等蕨類，並有芒草、李氏禾等多種禾本科植物。路旁的水圳邊小水溝旁有杜虹花、細葉芋麻、水竹、魚腥草、糯米糰、扛板歸、漢氏山葡

筍、雞屎藤、香蘭、禾本科幼苗、雀榕等植物分布。

4. 下六股農田

積水的田裡水生植物豐富，周圍有以杜鵑為主的園藝，其他如九留米、麻竹、過溝菜蕨、白花紫蘇、針蘭、畦畔莎草、大井氏水莞、水芹菜、水蓑衣、野慈姑、茯苓菜、心葉母草、鴨舌草及八字寥等；旱田則有爵床、細葉蘭花參、王爺葵、長梗滿天星、扛板歸等為優勢種，溝渠中仍有水棉等植物分布。

5. 金山平原河灘地

該處農業墾殖，呈次生林相，常見的有食茱萸、相思樹、苧麻、小葉桑、青箱子、杜紅花、臺灣澤蘭、蛇莓、灰木、三葉五加、白茅、艾草、火炭母草、點地梅、雙面刺、狗尾草等。

6. 礮溪中橋（礮溪中游）

沖積扇河床有砂土、鵝卵石、壤土，溪邊緣有樹護堤，皆屬陽性樹種，中游河灘以上便是農業區，溪谷有堰壩，混合清水可半灌溉，溪流窄變開闊，水流緩和，有砂土堆積及小鵝卵石與紅土礫石層，礮溪流入平原，形成自由曲流，洪水期因淤塞，流域改道，堆積成開闢地，可長植物漸成植被，接近水邊轉快，河岸灘地，土壤豐厚，植被豐富，有禾本科植物、菊科植物（如大花咸豐草、含羞草、牽牛花、鼠尾粟），高灘地則有如烏桕、水同木、苧麻、杜虹花、蓖麻、野棉花、蘆竹、牛筋草、裡白刺蔥、食茱萸、臺灣野桐、紫蘇、羊蹄、香楠、島榕、紅楠、香葉樹、變葉懸鉤子、腺葉懸鉤子、酸藤、日本山桂花、山桂花、長梗紫麻、山黃麻、紫花霍香薊、相思樹、海州常山、青箱子、李氏禾、紅蓮蕉花、白匏子、青苧麻、

小葉桑、五節芒、象草、杜鵑花、碎米薺、薄姜木、王瓜、紅果、牛乳榕、山柿、風藤、麻竹、海桐、紫花醉醬草、銳葉牽牛、槭葉牽牛、開卡蘆、白花紫蘇、白茅、翼莖闊苞菊、林投、南美朱槿及臺灣何首烏等。

7. 中游開闊地農田

有蛇莓、夏枯草、光風輪、狗尾草、青葙子、芭蕉、幹花榕、裡白蔥木、白匏子、血桐、杜虹花、江某、樹杞、臺灣澤蘭等。往上游處河床變窄水流急，石塊變大，三和橋下攔砂壩河岸以陽性植物為主，其中山黃麻最多；農田植物與中游相似，但兩岸較原始，再往上小平地有梯田，及園藝作物等。

8. 礮溪上游

山谷有闊葉林，有苧麻、江某、棕葉蘆，有苔蘚及草藻類生長，另有紅刺蔥、白匏子、筆筒樹、水桐木、山棕、楠木、月桃、芒草、東方狗脊蕨、申跋、原生的金毛杜鵑、水鴨腳秋海棠、冷清草、水冬瓜、蜜花苧麻、食茱萸、華八仙、五節芒、野桐、山黃麻、裡白刺蔥等。古河床之河階臺地之河床生長芒草，河岸兩旁有水鴨腳、水冬瓜、龍船草、烏毛蕨、長梗紫麻、山芋等。礮溪頭面對東北季風，300 公尺就有雲層，上升氣流擋住山頂，山頂下雨帶來雨量，產生北降植物，東北季風下的植被都是迎風面，風壓大且溫度低，植物特徵為葉乾淨、圓形樹冠、低矮。其植物包含箭竹、粟蕨、金毛杜鵑、滿江紅、紅星杜鵑、中原氏杜鵑、華八仙、狹瓣八仙等。另調查有烏皮九芎、假赤楊等。森林主要的樹木為開闊地陽性樹種，如山黃麻、白匏子、野桐、幹花榕、牛乳榕、九丁榕、菲律賓榕、

烏柏、食茱萸、裡白刺蔥等。沿溪有次生林地，主要林木有楓香、鵝掌柴、樹杞、細葉饅頭果、錫蘭饅頭果、樹梅、烏皮九芎、大葉楠等樹種。

(八)、 流域動物分布

磺溪流域之動物物種亦相當豐富，主因為流域上游為陽明山國家公園，居住人口稀少，生物可利用之棲地較多，整體可以陸域動物、水域動物分述：

1. 陸域動物

磺溪上游穿梭在山林之間，從空中鳥瞰狀似一棵樹的枝幹。因地屬陽明山國家公園，人為干擾較少且植物茂密，森林生態系統豐富，森林密佈使野生動物容易繁衍。早年山羌、水鹿、山豬、臺灣獼猴數量多，後因盜獵者多獵殺山羌、水鹿、山豬，目前大型野生動物僅存山豬、臺灣獼猴；山羌、水鹿則已絕跡，穿山甲因國家公園保護，近年來常見於磺溪頭一帶。此區之蛇類物種相當多樣，常見的有赤尾青竹絲、眼鏡蛇、龜殼花、過山刀、青蛇、水蛇。而食物鏈下方的蛙類數量更多，常見的有澤蛙、貢德氏赤蛙、梭德氏赤蛙、福建大頭蛙、拉都希氏赤蛙、褐樹蛙、艾氏樹蛙、臺北樹蛙、面天樹蛙、中國樹蟾、小雨蛙、盤古蟾蜍、黑眶蟾蜍等 13 種。居於食物鏈上方的猛禽亦是本區的主角，如大冠鷲、松雀鷹等。

中游流域以平原為主，地景上多為水田，造就水田伴生動物，如食物鏈下游的負子蟲、松藻蟲、紅娘華、搖蚊、蟋蟀、螺貝及蝌蚪，供養了多種蜻蜓有白痣珈蟴、青紋細蟴、烏帶晏蜓、薄翅蜻蜓等。

下游河口常見灰瓣足鷸覓食，該水鳥來自西伯利亞，常因市場

魚肉販倒廚餘受食物吸引，常年聚集於此。海尾沙崙則形成天然屏障，成為北海岸最重要候鳥棲地，內側水田沼地常見雁鴨種、鷺鷥科、鶺鴒科、鴿科、鷗科及鷺鷥成群聚集，本地留鳥如小白鷺、黑鳶等整年可見。

2. 水域動物

磺溪因上游大量的溫泉、氧化鐵等酸性物質流入磺溪，水棲動物多難以生存，直到下游美田段至出海口，溪水經大幅稀釋後才出現蝦蟹類、龜、鰻魚等，兩大支流的清水溪、西勢溪則有豐富的水棲動物，尤其以清水溪的族群數量最豐，如表 2-5。

根據水利規劃分署發佈之中央管流域 26 條水系生態情報圖資，其中被記錄到出現在磺溪主流的水生物種有纓口臺鰍、臺灣米蝦、日本鰻鱺、貪食沼蝦；鳥類則有棕背伯勞、臺灣畫眉、東方白鸛、小水鴨、紅胸濱鵲、黑鳶、無霸勾蜓。

表 2-5 磺河流域水域動物調查表

生物族群	物種
魚類	臺灣鬚鱨、臺灣石鱸、臺灣鏟頰魚、粗首鱨、鯽魚、泥鰍、赤吻斑鰍、臺灣纓口鰍
蝦蟹類	澤蟹、蔡氏澤蟹、日本絨螯蟹、米蝦、臺灣沼蝦、日本沼蝦、大和沼蝦、粗糙沼蝦
螺貝類	捲螺、榔螺、圓田螺、石田螺、川卷、塔卷、瘤卷、網卷、河蚌、蛤蜊
水棲昆蟲	水蜚、水蜈蚣、負子蟲、龍蟲、水黽、鼓蟲、長鬚石蠹、石蠹蛾幼蟲、蜉蝣幼蟲、石蠅幼蟲

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2017。

二、研究區域選定

本計畫研究區域為礮溪主流中下游斷面 8 至斷面 14（累距 3,179~5,783 公尺），總長度約 2.7 公里，如圖 2-12 所示。模擬區域起自上游直流段，中間經過二號攔河堰，延續至一號攔河堰上游為止。如前述，礮溪主流水質不利灌溉，又因攔河堰上游迴水長期造成淤積，其功能已相對式微。同時，根據 109 年礮溪水系風險評估報告（經濟部水利署第十河川局，2020）二號攔河堰下游左岸因跌水加速加上彎道凹岸，具破堤風險。另一方面，由正射影像可判斷該河段具有明顯蜿蜒特徵，且過去有明顯之形貌變遷現象，如先前提到之交互沙洲、河心沙洲等。本計畫根據中央研究院之 1950 年地形圖進行比較，可見礮溪在斷面 9~10 過去具有範圍更大之蜿蜒流路，相較如今流路更往左岸偏移，形成兩個河心沙洲，如圖 2-12 所示。由近年（2024 年）之影像分析，此處尚可見交互沙洲形貌，惟形貌相較過去影響已有明顯變化，如圖 2-13 所示。將該河段作為研究對象，可具備攔砂壩移除之實務工程探討，同時深化河川蜿蜒形貌演化之科學研究。

因此，本計畫選定該區段為對象，針對二號攔河堰進行拆堰評估，探討整體河相與蜿蜒特徵之變化。模擬將以不移除情境為現況，全移除為供砂量最大之設定，探討河道在供砂量變化下蜿蜒形貌之演變。本計畫雖以蜿蜒河道為主軸，但需注意河道將在不同的環境條件下持續發生變動，根據過去影像判斷與過去河川型態分類之判別，該河段可能介於蜿蜒與辮狀之間。

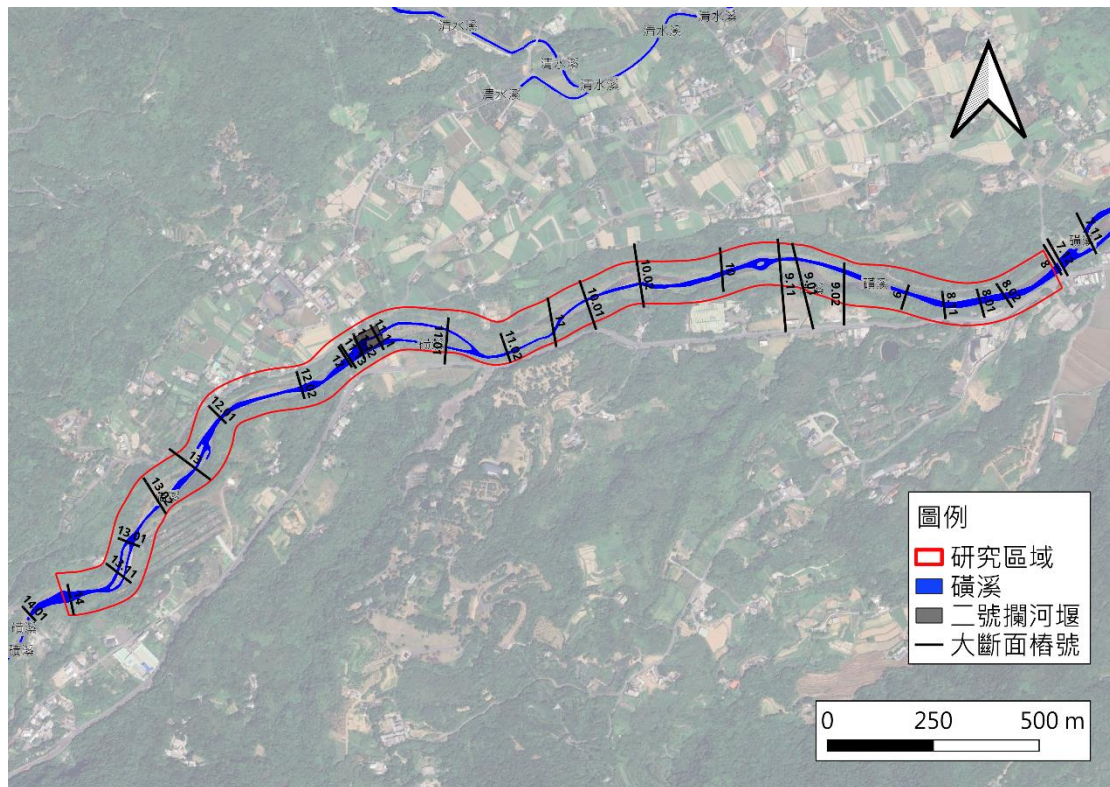
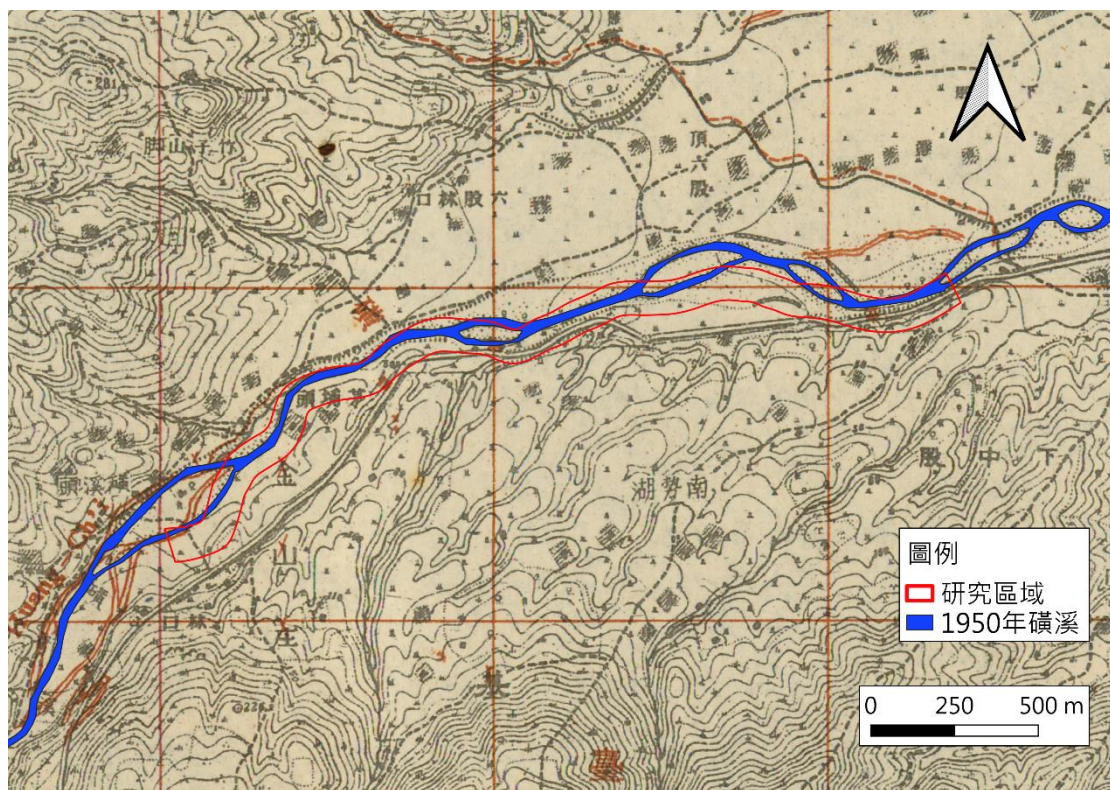
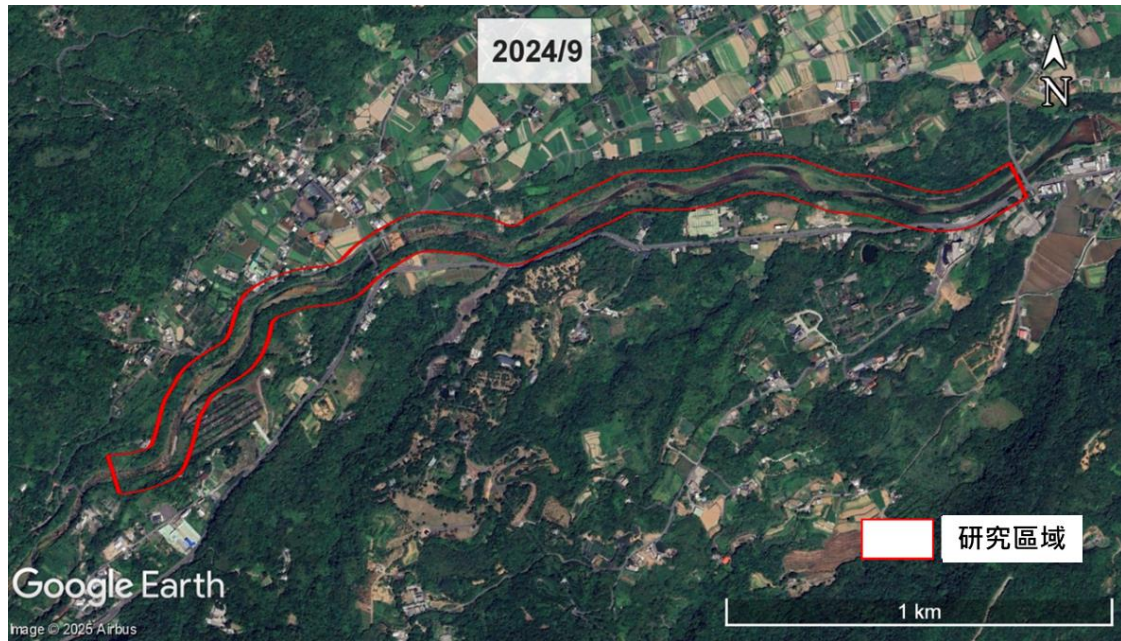


圖 2-12 研究區域與大斷面編號位置



資料來源：中央研究院，<https://gis.sinica.edu.tw/tileserver/>。

圖 2-13 研究區域之 1950 年地形圖



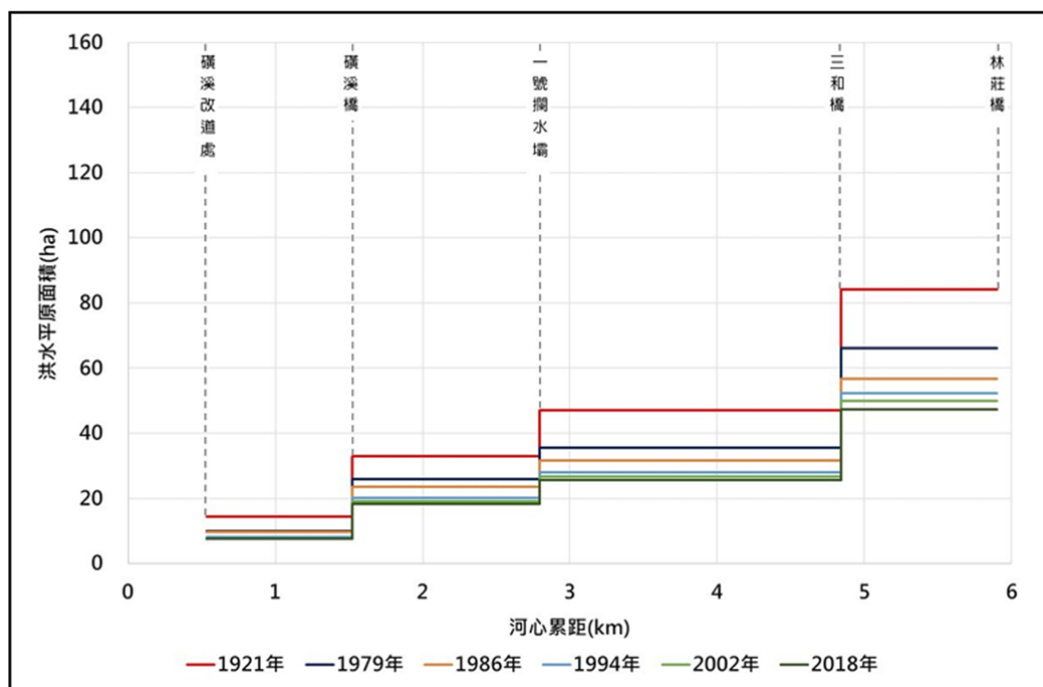
資料來源：Google Earth (2024/9)

三、圖 2-14 2024年研究區域正射影像議題分析

根據「礮溪水系徑流分擔評估規劃流域整體改善與調適規劃報告」（經濟部水利署第十河川分署，2022），研究區域面臨之主要議題如所示，包括（一）攔河堰上游淤積影響排洪；（二）二號攔河堰下游流速偏高，導致左岸列入中度破堤危險之堤段；（三）洪水平原面積減少，造成河床與河岸之連結性降低（圖 2-15）。

根據上述議題，本計畫認為攔河堰造成上游攔砂、下游缺砂之特性為造成（一）、（二）之緣故。關於（三），根據前人研究，堰壩造成水文流態改變，其中包括流量均質化導致洪峰流量降低，造成洪水平原面積減少。例如，有研究指出建壩後乾旱事件的頻率、時長、大小皆明顯增加，中度隔離的洪氾平原面積亦增加(Amanambu et al., 2024)。因此，堰體拆除有助於一定程度解決上述議題，此外堰壩同時還會造成生態系統改變（使流水變靜水、阻斷縱向廊道、營養鹽滯留在上游等）、水質改變（熱分層(thermal stratification)、上游植被與土

壤在厭氧環境下分解釋放溫室氣體等）、泥砂位置改變（上游淤積、下游沖刷、泥砂供應不足導致海岸侵蝕等）、維護成本隨時間增加並可能帶來潰壩風險。惟拆堰尚會帶來其他問題包括：水質衝擊、向源侵蝕、下游淤積、細顆粒造成卵石間隙堵塞、河岸侵蝕等，需經謹慎評估。



資料來源：經濟部水利署第十河川分署（2022）

圖 2-15 礮溪主流洪水平原範圍歷年變化統計示意圖

第二節 資料蒐集

一、地形資料蒐集

本計畫採用水利空間資訊服務平台 2023 年之礮溪主流大斷面資料匯入 HEC-RAS 中進行內插作為研究地形，並匯入 Nays2DH 中（圖 2-16）。整體而言，高程介於 13.28~78.52 公尺之間，由河川上游向下游遞減。此外，攔河堰上游坡度陡峭，可高達 0.019，攔河堰下游至

研究區域下游則相對較緩，多保持在 0.014。

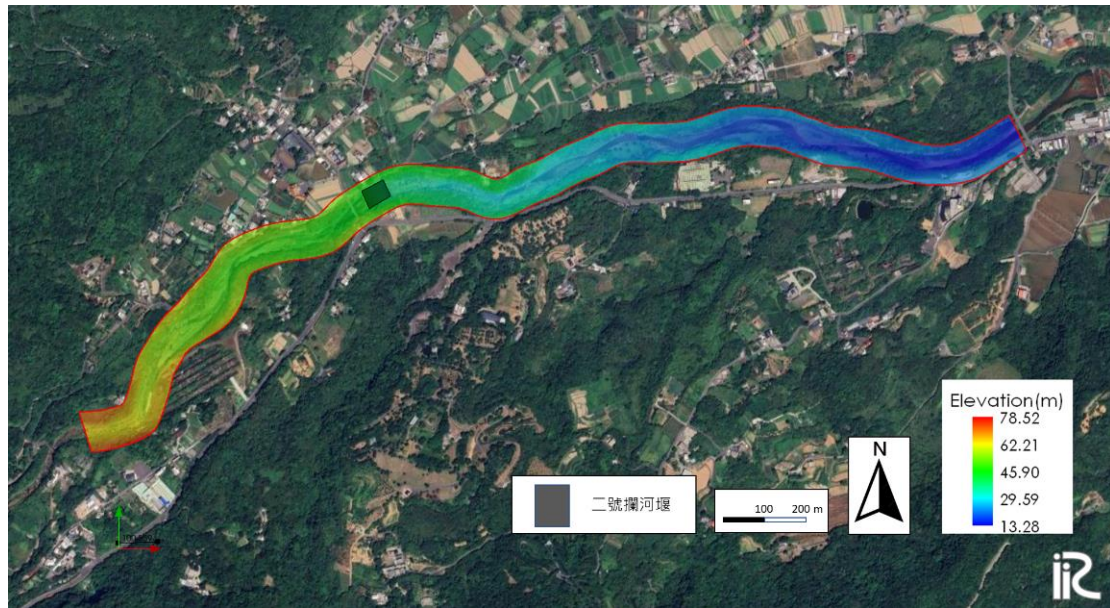


圖 2-16 大斷面內插之河道地形

二、水文資料蒐集

由於礪溪主流並無水文流量站，目前僅有第十河川分署為了防洪需求設立於三和橋與新礪溪橋之水位站，但僅用於汛期之流量監測，並無公開其歷史資料。而臨近雨量站則包括竹子湖站、金山站、三和站與鞍部站（圖 2-17）。礪溪流域過去進行暴雨量分析時，採用極端值一型分佈之最大 24 小時延時暴雨頻率分析成果（表 2-6），並計算各控制點（清水坑溪匯流前、三和橋、清水溪匯流前、西勢溪匯流前、河口）重現期距洪峰流量值，以 50 年重現期距洪水量為例，其流量分配圖如圖 2-18。

本計畫採瞬時單位歷線法所推求之 1 小時單位歷線 $U(1, t)$ 進行逕流量演算，如表 2-7，一日暴雨量則利用上述之四處雨量站之面積計算權重，並依照「106 年礪溪治理規劃報告」（經濟部水利署第十河川局，2017）中 97 年分析之 24 小時雨型進行雨量分配（圖 2-19），計算 24 小時之非均勻流量，提供水理模式之上游邊界條件。由於模

擬上游位置仍與最靠近之流量控制點三和橋約距離 940 公尺，故需使用比面積法進行流量修正，才可推算出貼近模式上游邊界位置之流量。比面積法係根據模擬上游邊界與三和橋之集水區面積比例進行修正，三和橋子集水區面積約為 28 平方公里，模式上游邊界之子集水區約為 26.6 平方公里，因此可計算得集水區面積比例為 0.95，以該數值乘上三和橋流量修正為模式上游邊界流量。

表 2-6 礮溪流域各流量控制點最大 24 小時延時暴雨量表

控制點	集水面積(km ²)	重現期距（單位：mm）							
		200 年	100 年	50 年	25 年	20 年	10 年	5 年	2 年
河口	50.8	1,049	937	825	711	675	559	438	255
西勢溪匯流前	44.31	1,080	965	850	734	696	577	453	266
清水溪匯流前	33.88	1,144	1,024	903	781	742	618	488	292
三和橋	28.13	1,204	1,079	953	826	785	656	520	316
清水坑溪匯流前	6.67	1,402	1,260	1,118	974	928	781	627	396

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2017；本計畫整理。

表 2-7 礮溪流域控制點瞬時單位歷線法所得 1 小時單位歷線表

時間(hr)	河口	西勢溪匯流前	清水溪匯流前	三和橋	清水坑溪匯流前
	流量(m ³ /s)				
0	0	0	0	0	0
1	6.03	5.60	4.56	6.75	2.85
2	19.72	17.18	13.52	17.34	6.12
3	28.99	24.25	18.57	19.55	5.15
4	28.08	23.37	17.65	14.87	2.69
5	21.90	18.52	13.92	9.28	1.11
6	14.99	13.06	9.81	5.16	0.4
7	9.40	8.52	6.43	2.65	0.13
8	5.55	5.26	3.99	1.29	0.04
9	3.13	3.12	2.39	0.61	0.01
10	1.70	1.79	1.38	0.27	0
11	0.90	1.00	0.78	0.12	0
12	0.46	0.55	0.43	0.05	0
13	0.24	0.30	0.24	0.02	0
14	0.12	0.16	0.13	0.01	0
15	0.06	0.08	0.07	0	0
16	0.03	0.04	0.04	0	0
17	0.01	0.02	0.02	0	0
18	0	0.01	0.01	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2017；本計畫整理。

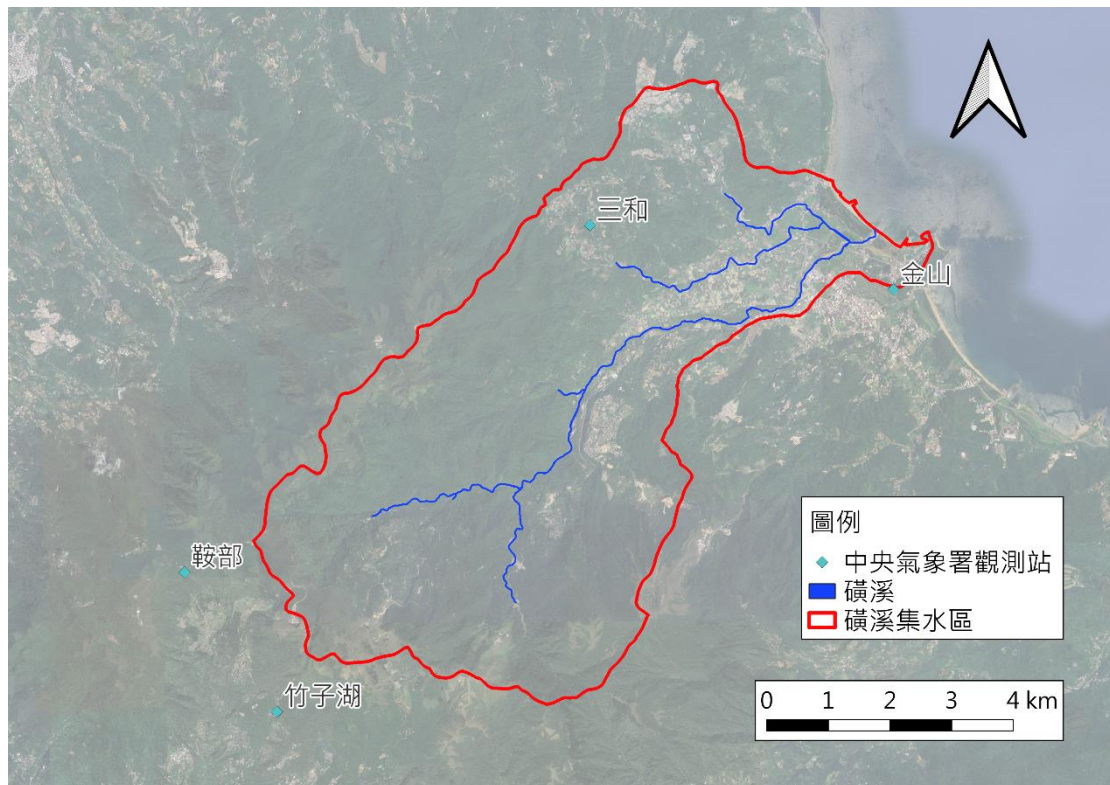
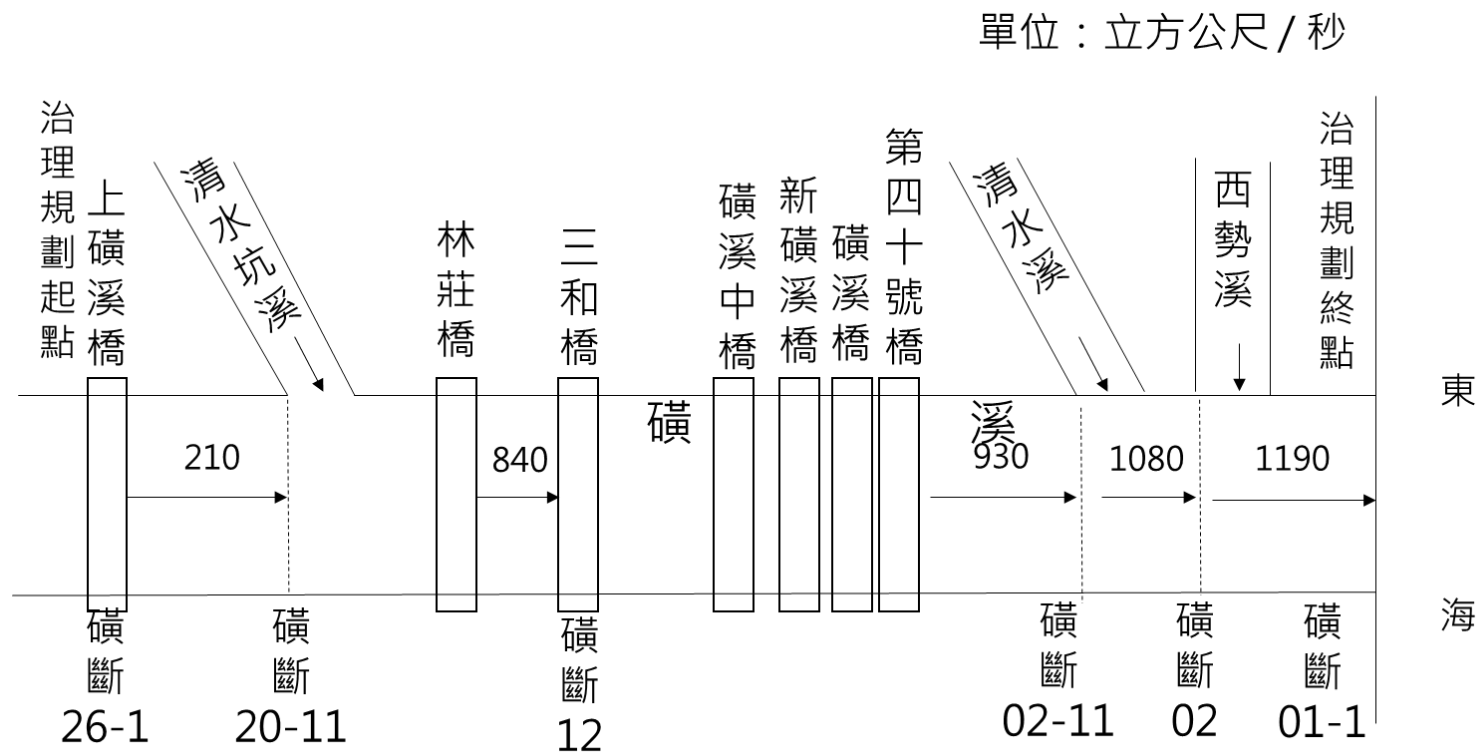


圖 2-17 礮河流域鄰近之中央氣象署氣象觀測站地理位置圖



資料來源：經濟部水利署第十河川局，2017；本計畫整理繪製。

圖 2-18 礮河流域主要河段計畫流量分配圖（50 年重現期距）

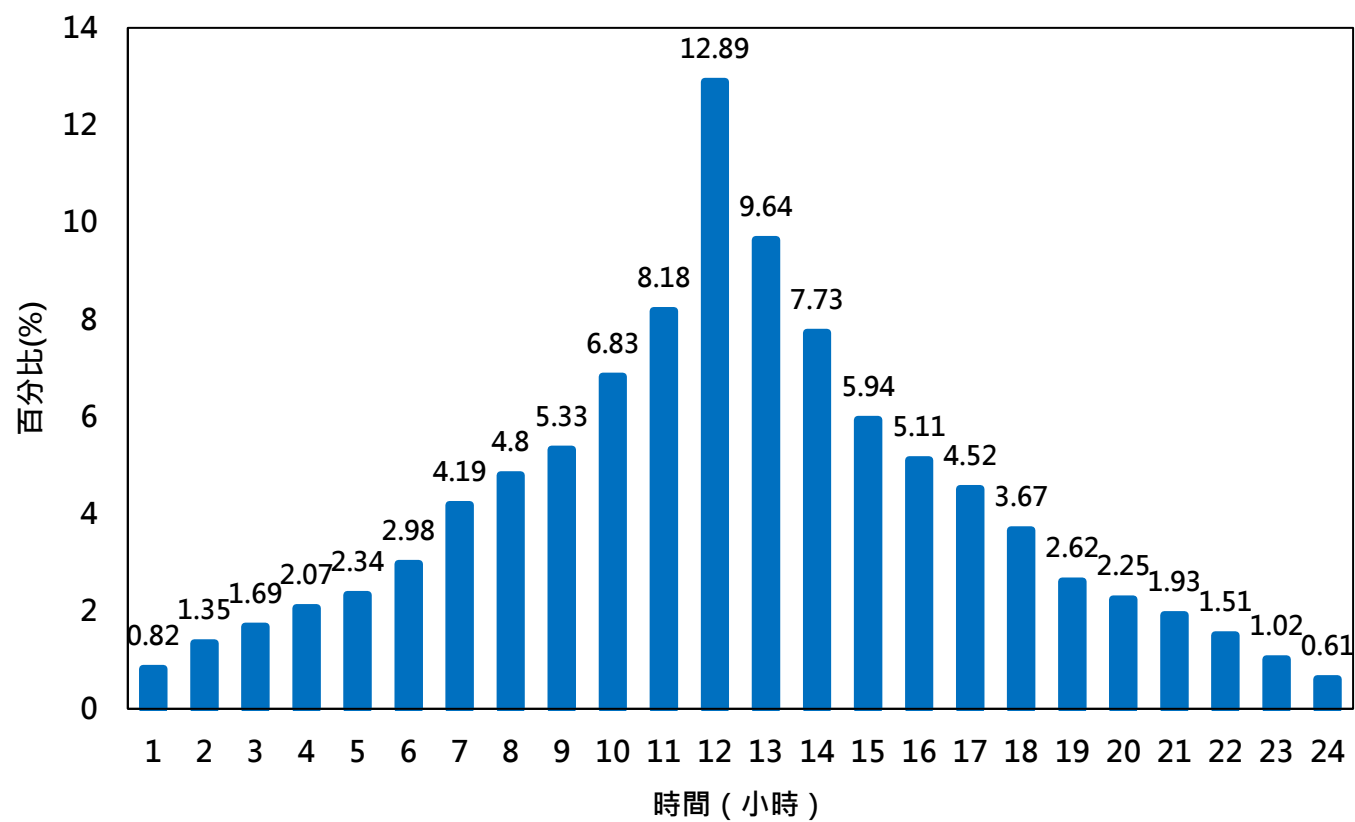


圖 2-19 礪溪全流域 24 小時暴雨時間雨量分配型態圖

第三節 現地調查

為了了解取得現地資料之可及性，本團隊於 2024 年 10 月 19 日前往研究河段進行現勘。此次調查發現河道兩旁多為茂密植生且坡度陡峭，較難進入河道，主要可以觀測主河道的地方為道路橋，自選定研究區域上游起分別為林莊橋、三和橋、磺溪中橋。現勘照片主要以這三座橋為據點，簡述當日觀察到之河道特徵。現勘位置與照片如圖 2-20、圖 2-21 所示。

一、林莊橋

自林莊橋往下游方向，緊鄰一處左彎道，紅框處可見彎道外岸河床和河岸之間有明顯高程差，推測過去應有顯著河床下切，目前亦可見有以塊石護岸的方式保護河岸避免侵蝕。河道灘地多為大顆粒礫、塊石，河床中亦多為被硫磺染紅之大顆粒塊石。此處位於磺溪主流中上游，坡度較為陡峭，河床可見湍急之淺瀨。

二、三和橋

此次現勘剛好於 2024 年 10 月 4 日山陀兒颱風後，磺溪流域發生大豪雨事件，導致多處發生洪流、坍方、土石流等現象，現勘時河道內尚有復原工程正在執行。三和橋下游為二號攔河堰，照片中可見有挖土機正在清淤，還有大型構造物跌落在攔河堰下游跌水工。從三和橋往下游方向，攔河堰上游河床高程近乎與攔河堰同高，推測堰體已幾近淤滿，攔河堰下游則有明顯之跌水。初步推測，攔河堰上游河床主要仍為卵礫石，但粒徑明顯較林莊橋小，推測可能因攔河堰上游迴水效應造成細顆粒泥砂沉降之緣故。

三、礮溪中橋

本次研究區域以礮溪中橋為終點，往其上游方向可發現存在一處彎道，彎道內岸有明顯沙洲，沙洲上有車輪駛過痕跡，同樣有挖土機正在執行清淤工程。由於彎道外岸侵蝕作用強，照片左側可見有水泥護岸構造物。該處水深相較前兩處來得深，肉眼難以觀測河床粒徑組成。由於礮溪中橋下游即為一號攔河堰，河川流速相對較慢，推測係因攔河堰上游迴水效應造成。另外，自礮溪中橋往下游看可見河道中央有粗顆粒河心沙洲，推測也為受攔河堰回水效應影響造成落淤，初步推測此處之粒徑應仍屬卵礫石以上粒徑。

透過以上三處的觀察記錄，初步了解礮溪主流屬於野溪型河川，主要由粗顆粒河床質組成，且河道有明顯之彎道沖淤效應，特別是外岸之侵蝕劇烈。另外，自林莊橋至礮溪中橋僅 2.7 公里距離，卻呈現顯著之河段特性變化，林莊橋下游陡峭、水流湍急、顆粒巨大；礮溪中橋下游流速則相對和緩、水深較深、泥砂粒徑組成較細，顯示河相變化迅速。

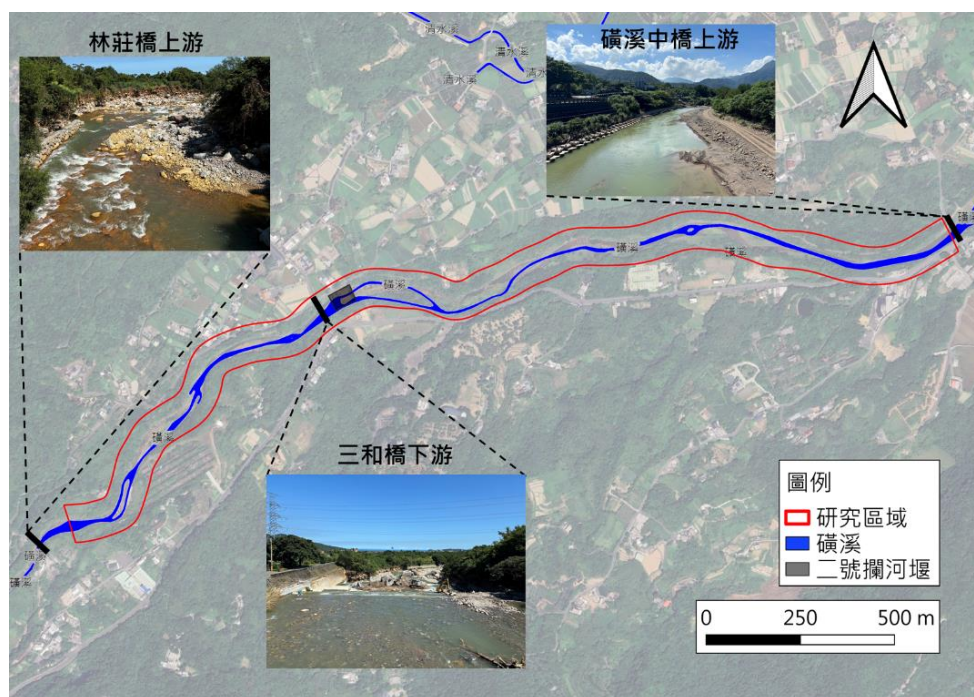


圖 2-20 研究區域與現勘位置



圖 2-21 113 年 10 月 19 日現地勘察照片

第三章 研究方法

第一節 水理輸砂模式

過去評估壩體移除之研究主要以水槽實驗或數值模擬，例如石岡壩拆壩模擬利用一維模式探討拆壩影響範圍、二維模式探討河相變化與棲地品質、三維模式探討局部橋墩之沖刷（邱彥瑜等人，2016）。考量到本計畫主要探討拆壩造成之蜿蜒形貌變化，本計畫採用 Nays2DH 建立礮溪之數值模型。Nays2DH 為 iRiC (International River Interfaces Cooperative) 軟體之二維水理輸砂模組，由北海道大學與美國地質調查所(USGS)於 2007 年共同開發一組河道模擬軟體，其模式功能包含淹水模擬、水文、海嘯、土石流、棲地評估等。該模組整合了過去 Nays2D 和 Morpho2D 模式之優勢，具備支流匯入、構造物與植生設置、河岸侵蝕與崩塌功能，極具模擬彎道演化能力。iRiC 底下尚有其他模組如 RiTER Xsec、EvaTRiP 等模組可用於評估泥砂收支 (sediment budget) 與棲地結構，且可以跟 Nays2DH 輸出結果簡易地整合，使分析流程更加流暢。

該模組採用四邊形均勻網格系統，座標軸採曲線座標系統，透過在網格內設置構造物可模擬水流阻擋效果，亦可設置植生高度與密度考量額外拖曳力；另外，輸砂模組中之河岸崩塌與侵蝕功能有潛力模擬彎道造成外岸沖刷、內岸堆積的效果。在數值方法方面，該模式採用有限差分法，其主要控制方程式為質量守恆方程式（式 3-1）和動量守恆方程式（式 3-2）：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial s} + \frac{\partial hv}{\partial n} = 0 \quad \text{式 3-1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + g \frac{\partial z_w}{\partial s} + \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} - v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} \right) + F_s = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + g \frac{\partial z_w}{\partial n} + \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} - v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial n^2} \right) + F_n = 0 \end{aligned} \quad \text{式 3-2}$$

其中， s 是流線方向座標； n 是垂直流線方向座標； z_w 是自由水面表面高度； u 是 s 方向的水深平均流速； v 是 n 方向的水深平均流速； h 是水深； C 是 Chezy 粗糙度； g 為重力加速度常數； v_t 為渦流黏性係數； $F_{s,n}$ 是植生造成之阻力項。

另外，模式可選用固定渦流黏性係數($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、零方程模型或 $k - \varepsilon$ 模型計算渦流黏性係數，本計畫主要採用零方程模型(式 3-3)。

$$v_t = \frac{\kappa}{6} A u_* h + B \quad \text{式 3-3}$$

其中， v_t 是渦流黏性係數； κ 是 von Kàrmàn 係數； A 和 B 是自定係數，預設為 1 和 0。

一、輸砂量計算

Nays2DH 有提供兩組輸砂公式，分別為 Meyer-Peter and Müller (1948)（式 3-4）和 Ashida and Michiue (1972)（式 3-5）。兩者均為根據剪力觀念推導之半經驗式，前者適用之粒徑介於 0.4-33mm，後者適用於 0.3-7mm (Hsu & Hsu, 2022)。在臨界剪應力方面，模式參考 Iwagaki (1956) 公式，該公式根據平均泥砂粒徑計算臨界剪力速度（式 3-6）。

在非均勻粒徑模組中，為考慮分選(sorting)效應，模組採用 Ashida et al. (1990)的多層模型(multilayer model)。根據該模型，河道底床分為推移載層(bedload layer)、過渡層(transition layer)和沉積層(deposited layer)。另外，為考量遮蔽與露出效應(hiding and exposure effect)，本模式採用 Asada and Ishikawa (1972)的遮蔽因子（式 3-7），修正後使細顆粒臨界剪應力增加、粗顆粒臨界剪應力降低。

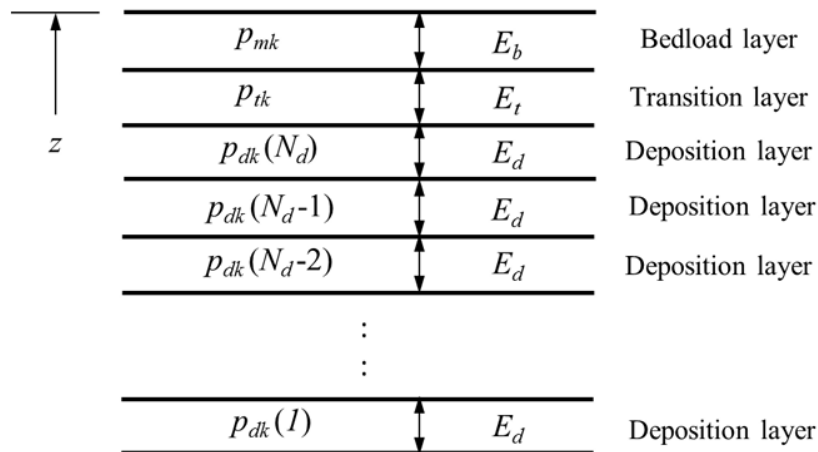


Figure II-2. Conceptual diagram of the multilayer model

圖 3-1 Nays2DH 非均勻粒徑多層模型

$$q_b = 8 (\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{s_g g d^3 r_b} \quad \text{式 3-4}$$

$$q_b = 17 \tau_{*e}^{1.5} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \sqrt{s_g g d^3 r_b} \quad \text{式 3-5}$$

其中， τ_* 是無因次剪應力； τ_{*c} 是無因次臨界剪應力； s_g 是比重； d 是泥砂直徑； r_b 是交換層厚度； τ_{*e} 是無因次有效剪應力； K_c 是局部地形坡度修正因子。

$$\begin{aligned} d \geq 0.303\text{cm}: u_{*c}^2 &= 80.9d \\ 0.118 \leq d \leq 0.303\text{cm}: u_{*c}^2 &= 134.6d^{31/22} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.118\text{cm}: u_{*c}^2 &= 55d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565\text{cm}: u_{*c}^2 &= 8.41d^{11/22} \\ d \leq 0.0065\text{cm}: u_{*c}^2 &= 226d \end{aligned} \quad \text{式 3-6}$$

$$\begin{aligned} \tau_c &= \rho u_c^{*2} \\ \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} &= \left(\frac{\log_{10} 23}{\log_{10} \left(21 \frac{d_k}{d_m} + 2 \right)} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{式 3-7}$$

其中， d_m 是平均粒徑； d_k 是k層之平均粒徑； u_{*c} 是無因次臨界剪力速度； τ_{*cm} 是平均粒徑之無因次臨界剪應力； τ_{*ck} 是k層之無因次臨界剪應力。

二、二次流校正

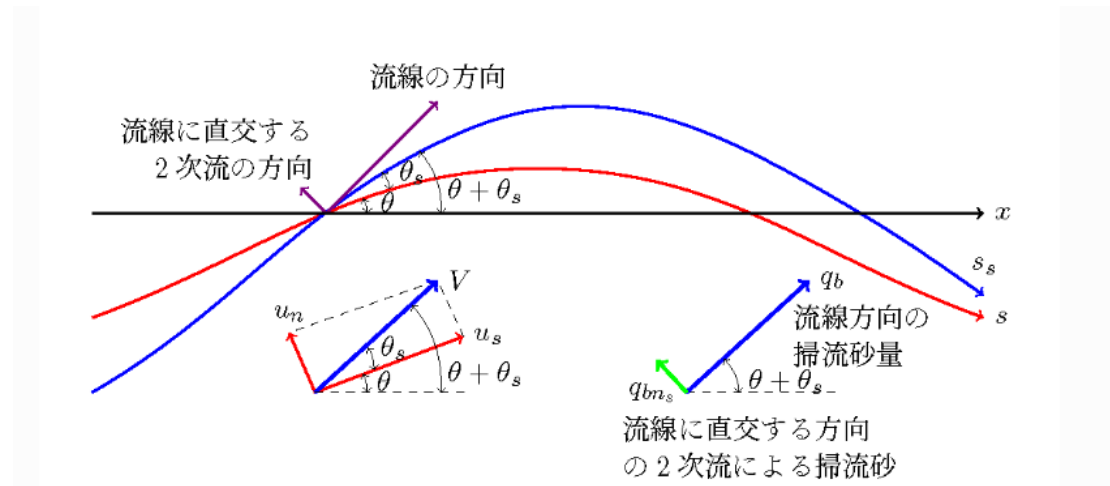
Nays2DH 在計算流速時，為考慮二次流效應，將流速分為兩個分量，分別為流線方向與垂直流線方向，二次流主要影響垂直流線方向流速。Nays2DH 在考量二次流效應時，可選擇平衡或非平衡模型針對流速進行修正。

在平衡模型中，Nays2DH 在計算垂直流線方向流速時會乘上水深除以曲率半徑，並額外乘上二次流強度常數，其默認值為 7 (Engelund, 1974)，當使用者將該常數提高時，就使垂直流線方向之流速增加。在計算推移質輸砂時，主要作用的是近底床流速，因此需要對總流速進行修正。在平衡模型中，模組參考 Engelund (1974) 根據拋物線方程的方式計算（式 3-8）。

在非平衡模型中，Nays2DH 則使用流線方向深度平均之渦度 (vorticity) 計算二次流（式 3-9）。相較 Engelund (1974) 只根據當下曲率計算二次流，使用流線方向深度平均之渦度可額外考量曲率變化對二次流造成的影響，因此可考量二次流的延遲效應。對於曲率較高的河道而言，非平衡的計算方式能提供更準確的二次流演算。考量到本計畫主要探討蜿蜒演化，二次流係影響彎道沖淤重要的因子，因此本計畫主要採用第二種更具物理基礎之非平衡模型進行二次流校正。

在動床模擬中，二次流不僅會影響流速，同時也會影響輸砂。在計算輸砂量的分量時，模式根據輸砂公式先計算出總輸砂量 q_b ，再根據流速分量、坡度修正因子計算流線與垂直流線方向之輸砂量 (Watanabe, 2001)（式 3-10）。此時，流線與垂直流線方向之流速皆修正為近底床流速，其中垂直流線方向之流速另根據二次流效應進行修正，修正方式取決於平衡或非平衡模型。圖 3-2 為二次流對流線與

輸砂之影響，其中紅線為蜿蜒河道之河道中線，蜿蜒河道因為同時受慣性與二次流影響，因此深度平均流線並不會沿著河道中線，而是會稍微偏向河道外岸（藍線）。



資料來源：iRiC 技術網站，https://i-ric.org/yasu/nbook2/11_Chapt11.html。

圖 3-2 考量二次流效應之流線方向

$$\widetilde{u}_b^s = \beta V \quad \beta = 3(1 - \sigma)(3 - \sigma) \quad \sigma = \frac{3}{\phi_0 \kappa + 1} \quad \text{式 3-8}$$

$$\begin{aligned} u_b^n &= u_b^s N_* \frac{h}{r_s} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\lambda_v \frac{A_n}{J} \right) &+ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(u^\xi|_s \frac{\widetilde{u}_s^n}{J} - u^\xi|_b \frac{\widetilde{u}_b^n}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(u^\eta|_s \frac{\widetilde{u}_s^n}{J} - u^\eta|_b \frac{\widetilde{u}_b^n}{J} \right) \\ &= \frac{1}{r_s} \left(\widetilde{u}^{s^2}|_s - \widetilde{u}^{s^2}|_b \right) = \frac{A_n}{J} \frac{V}{\chi_1^3 h} \left(\chi^2 + \frac{7}{12} \chi + \frac{1}{12} \right) \end{aligned} \quad \text{式 3-9}$$

$$\begin{aligned} \widetilde{q}^\xi &= q_b \left[\frac{\widetilde{u}_b^\xi}{V_b} - \gamma \left(\frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \cos \theta \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \right] \\ \widetilde{q}^\eta &= q_b \left[\frac{\widetilde{u}_b^\eta}{V_b} - \gamma \left(\frac{\partial z_b}{\partial \eta} + \cos \theta \frac{\partial z_b}{\partial \xi} \right) \right] \end{aligned} \quad \text{式 3-10}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}}$$

其中， u_b 、 v_b 為 ξ 和 η 方向之近底床流速； V_b 是近底床之總流速； θ 是 ξ 和 η 的夾角； N 是二次流強度常數； h 是水深； r_s 是曲率半徑； A_n 表示二次流強度；下標 s 和 b 分別代表水面與河床的取值；上標 s 和 n 則分別代表流線方向和垂直流線方向； z_b 是底床高程； γ 是坡度重力效應修正因子； μ_s 是靜摩擦係數； μ_k 是動摩擦係數； τ_* 是無因次剪應力； τ_{*c} 是無因次臨界剪應力。

三、河岸侵蝕與崩塌

在河岸侵蝕方面，該模式透過將 x-y 軸轉換為 s-n 軸，將輸砂分為流向與垂直向，利用垂直輸砂模擬河岸侵蝕與堆積，其公式如式 3-11：

$$der = \pm \frac{1}{1 - \lambda} \frac{\tilde{q}_b^\eta}{\eta_r B_h} \Delta t + \frac{\Delta z}{\tan \theta_c} \quad \text{式 3-11}$$

其中， der 表示河岸侵蝕量； λ 表示土壤孔隙率； $\tilde{q}_b^\eta$ 表示 η 方向輸砂量； η_r 表示座標軸轉換係數； B_h 是河岸高度； Δz 表示底床高程變化； θ_c 是安息角。

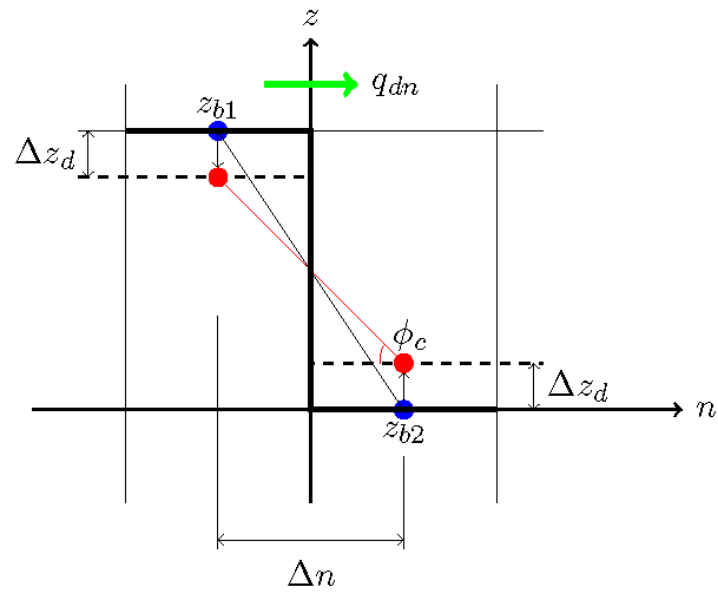
當輸砂量方向往河道中心時表示河岸侵蝕，右式第一項會是正值；往河岸方向則表示河岸堆積，右式第一項會是負值。第二項主要看河岸坡腳的沖淤變化，當底床發生侵蝕時模式為了確保河岸維持安息角，會判定河岸發生侵蝕。這裡的河岸侵蝕公式並不考量流向方向之輸砂變化，係因模式假設非凝聚土壤會因河岸崩塌留於原址(slump block)或植生增生而抑制流向方向之輸砂量(Eke et al., 2014)。

該模式考量河岸侵蝕過程中可能發生的邊坡崩塌(slope collapse)，根據使用者輸入之安息角進行修正。當坡度大於此值時即發生崩塌使其回到安息角，並將崩塌量計入泥砂連續方程式之中（式 3-12）。其概念如圖 3-3 所示， z_{b1} 和 z_{b2} 分別對於相鄰網格點之高程，當兩點之夾角大於安息角時，模式透過降低 z_{b1} 高程，並將產生之泥砂量堆積在 z_{b2} ，崩塌之泥砂量則以崩塌後地形不超過安息角為準則。

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_b E_b) + (1 - \lambda) \frac{\partial z}{\partial t} + \left[\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q_{su} - w_f c_b \right] = 0 \quad \text{式 3-12}$$

式中， c_b 表示懸浮質的參考濃度； E_b 表示底床載層厚度； z 是底床高程； q_{bx} 、 q_{by} 分別表示 x 和 y 方向的輸砂量； q_{su} 表示向上的懸浮載通

量； w_f 表示懸浮質沉積速度。



資料來源：Shimizu (2021)，https://i-ric.org/yasu/nbook2/11_Chapt11.html

圖 3-3 邊坡崩塌概念模型

四、植生設定

Nays2DH 模式假設植生為一圓柱體，並使用植生密度、阻力係數、植生高度計算植生所產生之阻力，植生密度係由每一網格中，植生平均樹徑總和與該網格面積之比值計算而得，如下式：

$$a_s = \frac{n_s \times D_s}{S_s^2} \quad \text{式 3-13}$$

上式中， a_s 為植生密度； S_s^2 為網格面積； n_s 為植生數量； D_s 為植生平均樹徑。

在計算植生阻力時模式考量植生是否為浸沒狀態，此會影響計算阻力時之 h_v 應採用何種數值：當植生完全浸沒時， h_v 採用植生高度；當植生非完全浸沒時， h_v 則採用水深。阻力之計算方式如下：

$$\frac{F_x}{\rho} = \frac{1}{2} C_D a_s h_v u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{式 3-14}$$

$$\frac{F_x}{\rho} = \frac{1}{2} C_D a_s h_v v \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{式 3-15}$$

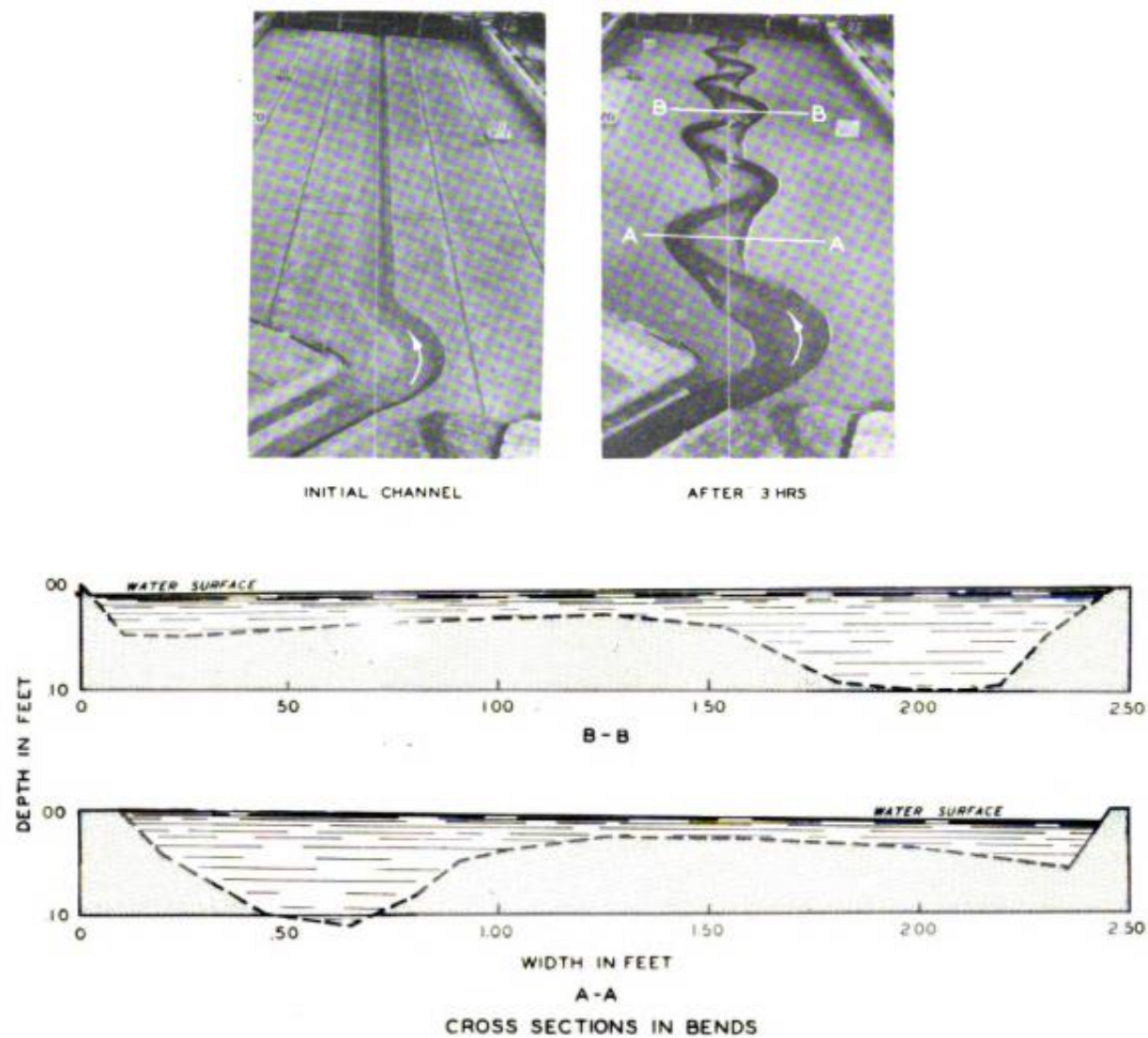
其中， $F_{x,y}$ 為植生產生之阻力； C_D 為阻力係數； u 是 s 方向的水深平均流速(m/s)； v 是 n 方向的水深平均流速(m/s)。

五、模式驗證

本計畫透過前人水槽實驗成果驗證模式功能，考量本計畫之主要研究目的為探討堰體移除後蜿蜒特徵之演化，因此主要測試模式河岸侵蝕與邊坡崩塌之功能，水槽實驗採用最早開始研究蜿蜒演化的學者 Friedkin (1945) 的實驗資料。Friedkin (1945) 透過在直線水槽中設計一具攻角之入流，探討河道由直發展到蜿蜒的演化過程，文獻中提供了水槽實驗初始與實驗進行三小時後之影像，同時提供三小時後彎道之橫斷面地形(A-A 和 B-B)。本計畫嘗試透過 Nays2DH 模式之河岸侵蝕與邊坡崩塌功能重現 Friedkin (1945) 之實驗成果，模式設定如表 3-1 所示。結果顯示河道平面型態與橫斷面圖大體上與水槽實驗結果相似，惟接近河道下游的彎道特徵較不明顯，推測原因為 Nays2DH 河岸侵蝕功能仍有其極限；下游彎道之發展受上游形貌影響，推測可能因誤差傳播而導致下游區域累積較大之差異，結果比對圖如圖 3-5、圖 3-6 所示。

表 3-1 Nays2DH 模式設定

設定項目	參數	
邊界條件	上游流量 (cms)	0.001416
	下游水位	均勻流
初始條件	初始水面線	均勻流
計算設定	時間步長 (s)	0.005
	紊流模式	零方程
	二次流強度	8
	曼寧 n 值	0.0185
輸砂條件	底床粒徑 (mm)	0.45
	輸砂類型	底床質
	輸砂公式	Ashida and Michiue
河岸侵蝕與邊坡崩塌	安息角 ($\tan\theta$)	0.524
	河岸高度 (m)	0.045



註：（上）實驗初始及結束之形貌演化；（下）橫斷面 A-A 及 B-B 之地形。

圖 3-4 Friedkin (1945)之實驗水槽

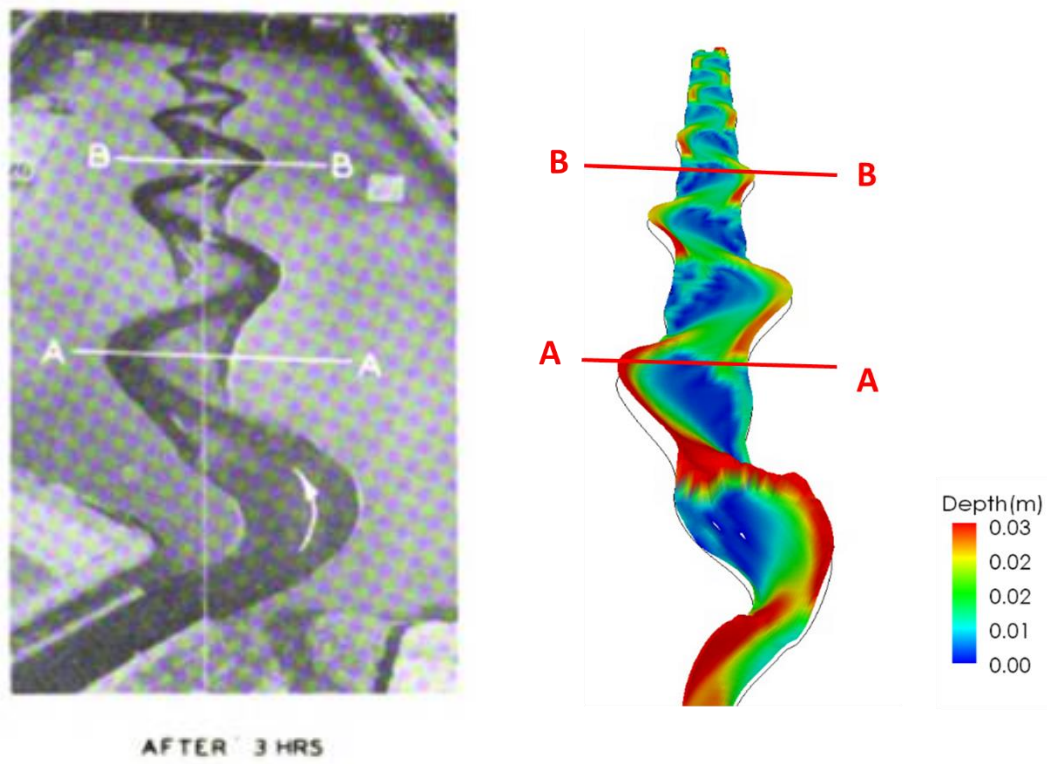


圖 3-5 實驗水槽成果與 Nays2DH 模擬成果比較圖

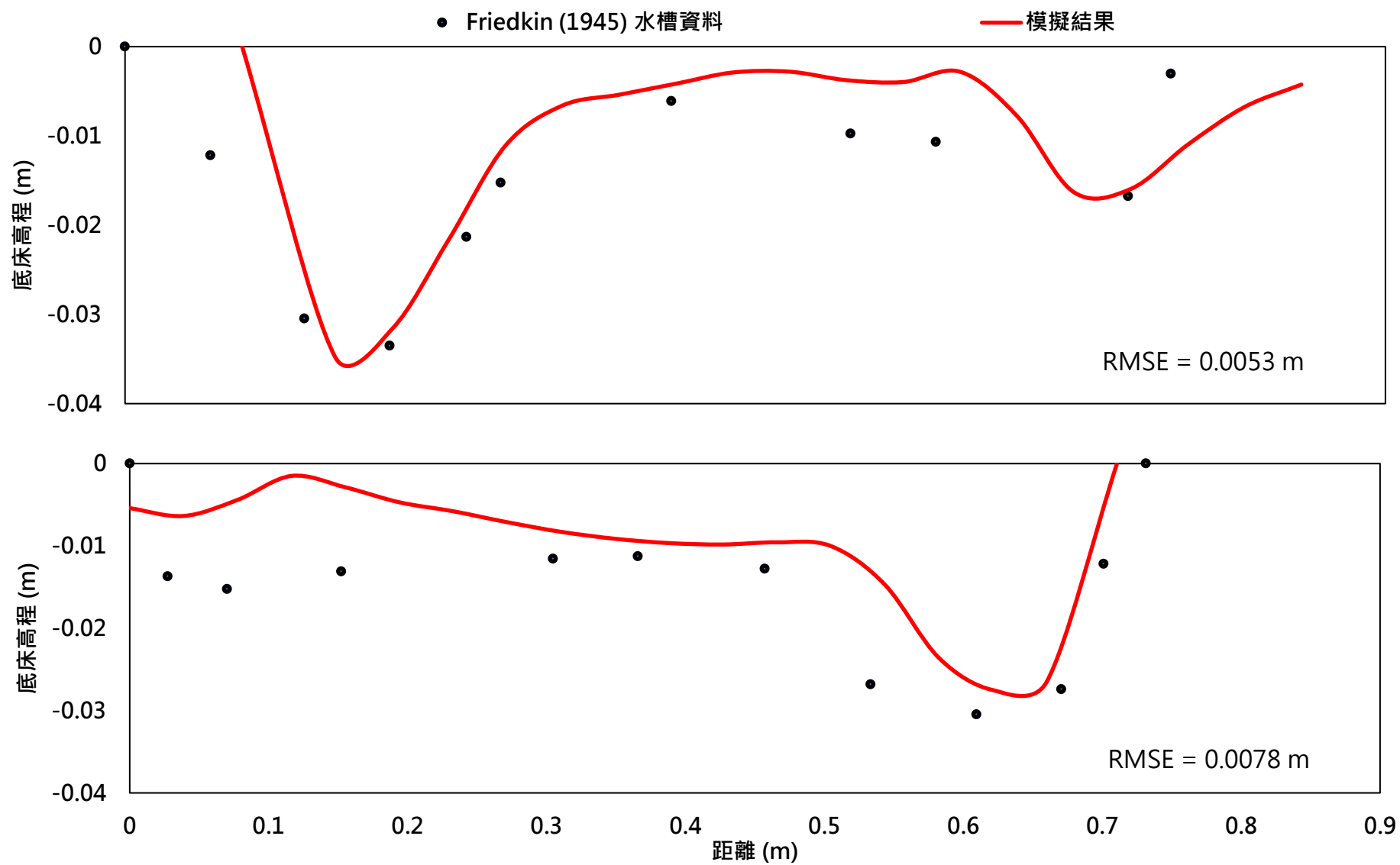


圖 3-6 Nays2DH 模擬之彎道地形和 Friedkin (1945)資料比對

六、情境與參數設定

本計畫設計三種情境：現況、部分移除、完全移除。現況情境即不移除跨河構造物情境，二號攔河堰及跌水工設定為不可沖刷，模擬攔河堰與階梯靜水池不會發生侵蝕作用，但可能會發生淤積作用；部分移除情境模擬攔河堰移除(高程降低)並將部分跌水工設定為可沖刷，允許河道侵蝕基準面下移，釋放部分泥砂；完全移除情境則將攔河堰及跌水工均設定為可沖刷，使河道能夠自然沖刷過去攔河堰與跌水工形成之陡坡，並使河道坡度能夠自然調整，模擬河道不具任何構造物之情境。

本計畫採用大斷面內插地形匯入 Nays2DH 中，模擬範圍上游邊界至攔河堰之河床坡度達 0.0193、攔河堰下游至模擬範圍下游邊界則為 0.014，另外，本計畫以水深大於 0.1 公尺之河段寬當作河道初始平均寬度（約為 35 公尺），平均寬深比約為 2.54，上游邊界子集水面積約為 26.6 平方公里，根據正射影像將河岸設定為固定床(fixed bed)，河道設定為移動床(movable bed)，如圖 3-7。河道曼寧 n 值依治理規劃報告之分析成果設定：河道設為 0.042，河岸設為 0.045，攔河堰設為 0.07，如圖 3-8。攔河堰因五階靜水池消能顯著，但模擬結果在低流量時僅能表現出兩次水躍，且未使用高階紊流模型，推測可能與網格有關，本計畫參考陳怡良、李光敦（2012）針對階梯河道消能效果之研究，將曼寧 n 值估為 0.07，以貼近現地靜水池之消能效果。

現地因攔河堰上游攔砂、下游沖刷之特性，在其上下游形成不同之粒徑分佈。本計畫底床粒徑輸入過去河床質調查之粒徑分佈，將模擬區段分為粒徑分區一（藍）、粒徑分區二（紅）及粒徑分區三（綠）三個區域，平均粒徑分別為 98 毫米、136 毫米、111 毫米，如圖 3-9，

粒徑累積百分比如圖 3-10。另外，輸砂參數參考模式手冊建議將混合層厚度設為最大粒徑(d_{max})，沉積層厚度設為最大粒徑的兩倍，安息角亦參考手冊建議設為 30° 。另為了探討河道在河岸侵蝕潛力，本計畫另設定一自由侵蝕情境，將河岸設為可沖刷，探討河道恢復河岸侵蝕能力、極端情境下蜿蜒遷移潛能。需注意的是，本計畫主要利用邊坡崩塌功能模擬河岸侵蝕過程(Iwasaki et al., 2016; Nagata et al., 2014)，因 Nays2DH 之河岸侵蝕功能主要針對非凝聚性土壤，且僅限於網格邊界發生侵蝕，可能忽略礮溪兩岸植生對河岸保護之效果，而邊坡崩塌透過河床侵蝕導致崩塌間接模擬河岸侵蝕，較貼近現地物理現象。

模式初始條件與邊界條件設定如表 3-2 所示。邊界條件上，拆壩模擬多以歷史流量或重現期距流量作為上游邊界，邱彥瑜等人(2016)使用 20 年重現期距流量探討拆壩影響範圍，部分研究以造床流量(2 年重現期流量)或極端流量(50 年重現期流量)評估河相變化(段紀湘, 2010)。本計畫採用 20 年重現期距之流量歷線作為上游邊界設，下游邊界設為自由出流，如表 3-3，模式設定在第一小時為定床模擬，第二小時開始動床模擬，總模擬時長為 25 小時。

表 3-2 邊界與初始條件設定

設定項目	參數		依據
邊界條件	上游流量 (cms)	Q_{20} 非均勻流量	106 年礮溪治理規劃報告
	下游水位	自由出流	數據限制下之模式假設
初始條件	初始水面線	均勻流	
計算設定	時間步長 (s)	0.03	模式穩定性與計算成本
	紊流模式	零方程	
	二次流	非平衡模型	貼合物理基礎
	曼寧 n 值	0.042 (河道) 0.045 (灘地)	106 年礮溪治理規劃報告
輸砂條件	底床粒徑 (mm)	98~136	
	輸砂類型	底床質	現況推估
	輸砂公式	Ashida and Michiue	模式限制
	混合層厚度 (m)	0.3048	模式手冊建議
	沉積層厚度 (m)	0.6096	
河岸侵蝕與邊坡崩塌	安息角 ($\tan\theta$)	0.524	

表 3-3 20 年重現期距之流量歷線表

時間 (hr)	流量 (cms)
0	38
1	38
2	38
3	44
4	65
5	86
6	114
7	150
8	190
9	234
10	286
11	366
12	456
13	503
14	492
15	443
16	382
17	324
18	269
19	218
20	174
21	138
22	107
23	80
24	54
25	38



圖 3-7 模擬範圍之固定床與移動床設定

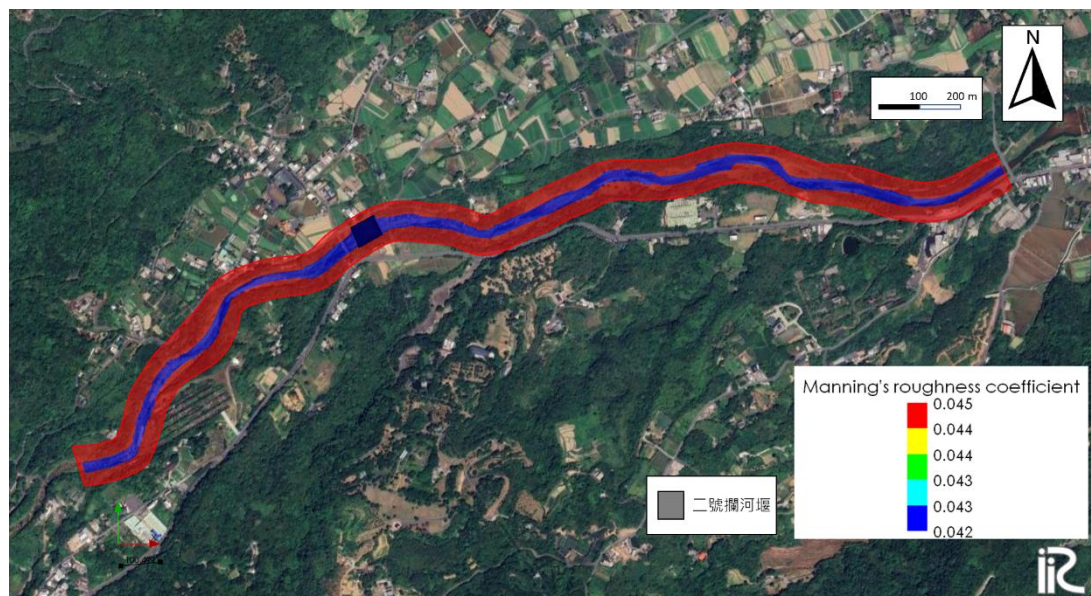


圖 3-8 模擬範圍之曼寧 n 值設定

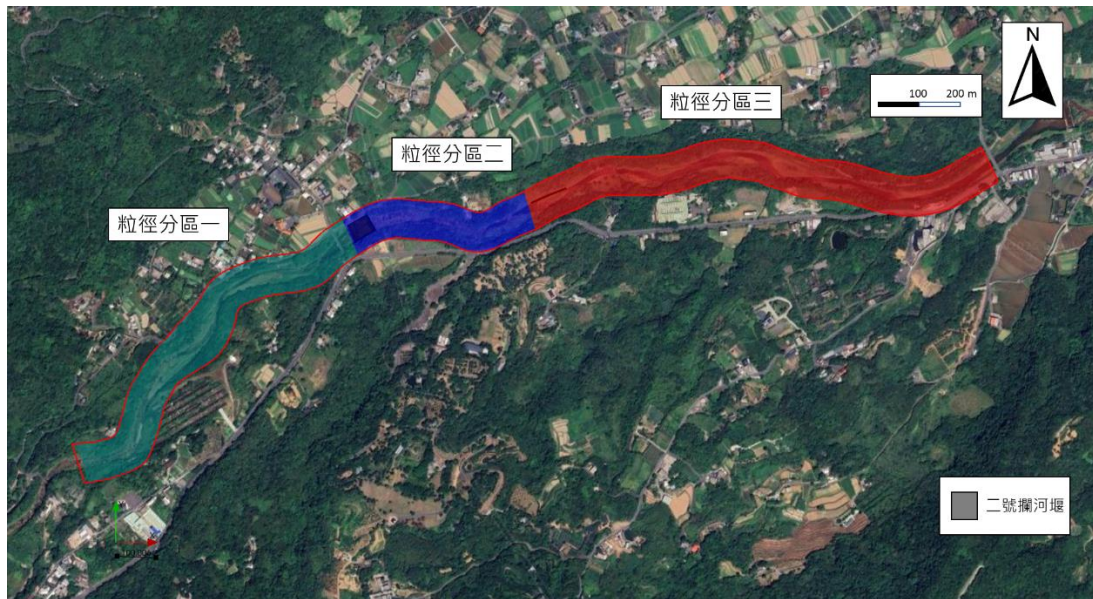


圖 3-9 底床粒徑分區範圍

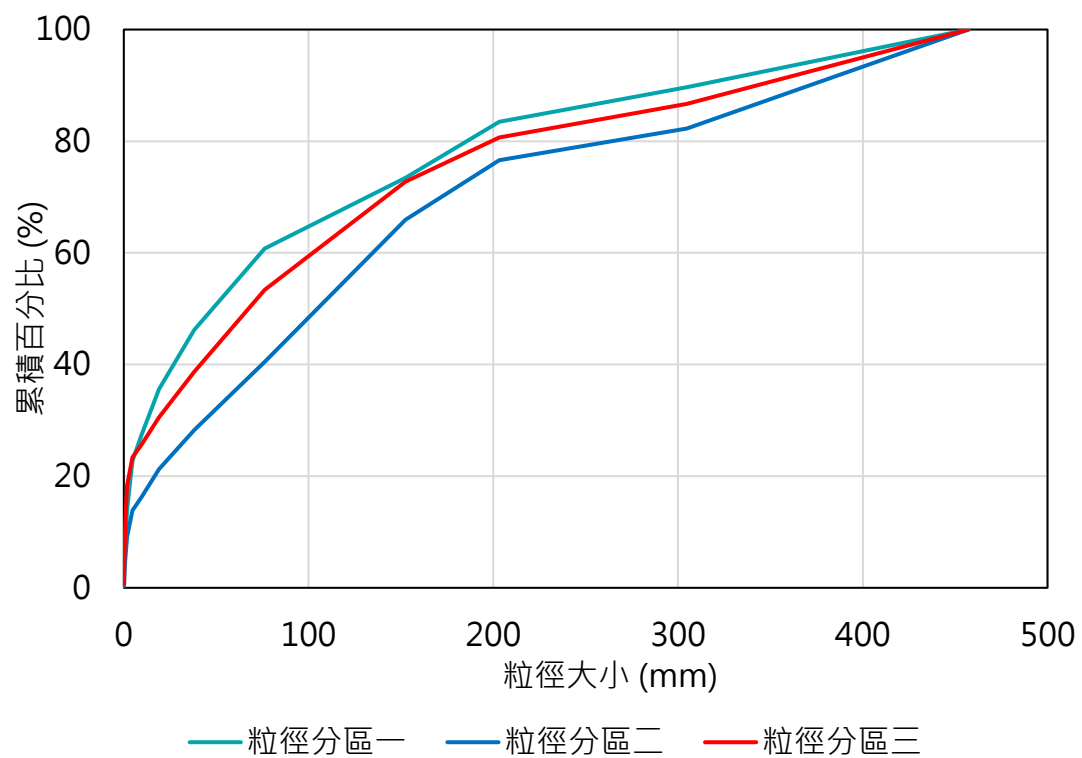


圖 3-10 各區域底床粒徑分佈

第二節 蜿蜒特徵分析工具

Meander Statistic Toolbox (MStaT)開發者為阿根廷國立濱海大學(UTEC)的博士生，為一款基於 MATLAB 開發之蜿蜒河道平面型態分析工具，首次發表於 Software X (Ruben et al., 2021)。該工具包含三個模組，分別為（一）蜿蜒形貌模組（二）遷移模組（三）匯流模組。作者透過建立一個使用者界面，使用戶可以簡易地根據該界面分析河道之振幅、波長、曲率，以及根據曲率計算之小波頻譜。

MStaT 的資料輸入源為河道中心線，針對使用者選定之彎道辨識方法（平均中心點法、反曲點法），可快速辨別彎道位置，並計算對應之物理量。蜿蜒的特性常以波來描述，所以每個彎道可被視為一個完整的波，可計算對應之波的振幅、波長等值。MStaT 根據河道中心線計算曲率，並將曲率視為訊號，使用莫萊小波(Morlet Wavelet)為母小波進行連續小波轉換(Continuous Wavelet Spectrum, CWT)，將河道局部蜿蜒特性在空間上的變化展現為在不同尺度上散佈之小波能量。進一步將各尺度能量在空間上進行平均，就可得到全局小波頻譜(Global Wavelet Spectrum, GWT)。將 GWT 在各尺度得到之空間平均能量並結合顯著性分析，我們可以判斷能量相對於背景噪聲是否顯著，從而得到河道主波長，藉此了解研究區域的主要蜿蜒特徵。

另外，遷移模組則需輸入兩年之河道中心並輸入對應之年份，首先將兩年中心線做套疊，可框出遷移範圍，再透過遷移範圍內節點位置之變化，計算出每年遷移距離與遷移角(northward angle)，除上時間差即可計算出遷移率。當後期河道的弧形波長(arc wavelength)相較於前期出現縮減時，工具會判斷其發生截彎取直，但並不分辨頸部截彎(neck cutoff)或捷徑截彎(chute cutoff)。根據遷移率，該工具亦可計算

出小波頻譜圖。最後，匯流模組係用於分析支流對主河道形貌之影響，透過比較支流與主河道的特性，工具可計算出支流的影響距離。

小波分析主要用於訊號分析，在蜿蜒河道的應用除了透過曲率了解蜿蜒性質，尚有研究利用河岸侵蝕率作為訊號，探討 Q_{95} 、 Q_{max} 與小波尺度的相關性。結果發現， Q_{max} 在 0 至 20 公里的尺度上具有高度相關性，一旦到了 30 公里尺度相關係數就低於 0.5，藉此證明 Q_{max} 主要驅動尺度小於 20 公里的河岸侵蝕 (Mount et al., 2013)。另一方面，Holusová et al. (2023) 則使用 MStaT 的蜿蜒形貌模組計算蜿蜒性質（蜿蜒度、波長、振幅），藉此發現礫石沙洲和蜿蜒振幅、蜿蜒度具有正相關性。本計畫主要採用（一）蜿蜒形貌模組計算河道之初始、洪水後基本蜿蜒特性，並結合（二）遷移模組計算洪水事件後之遷移率，透過量化蜿蜒幾何特徵了解洪水事件對整體蜿蜒形貌之影響

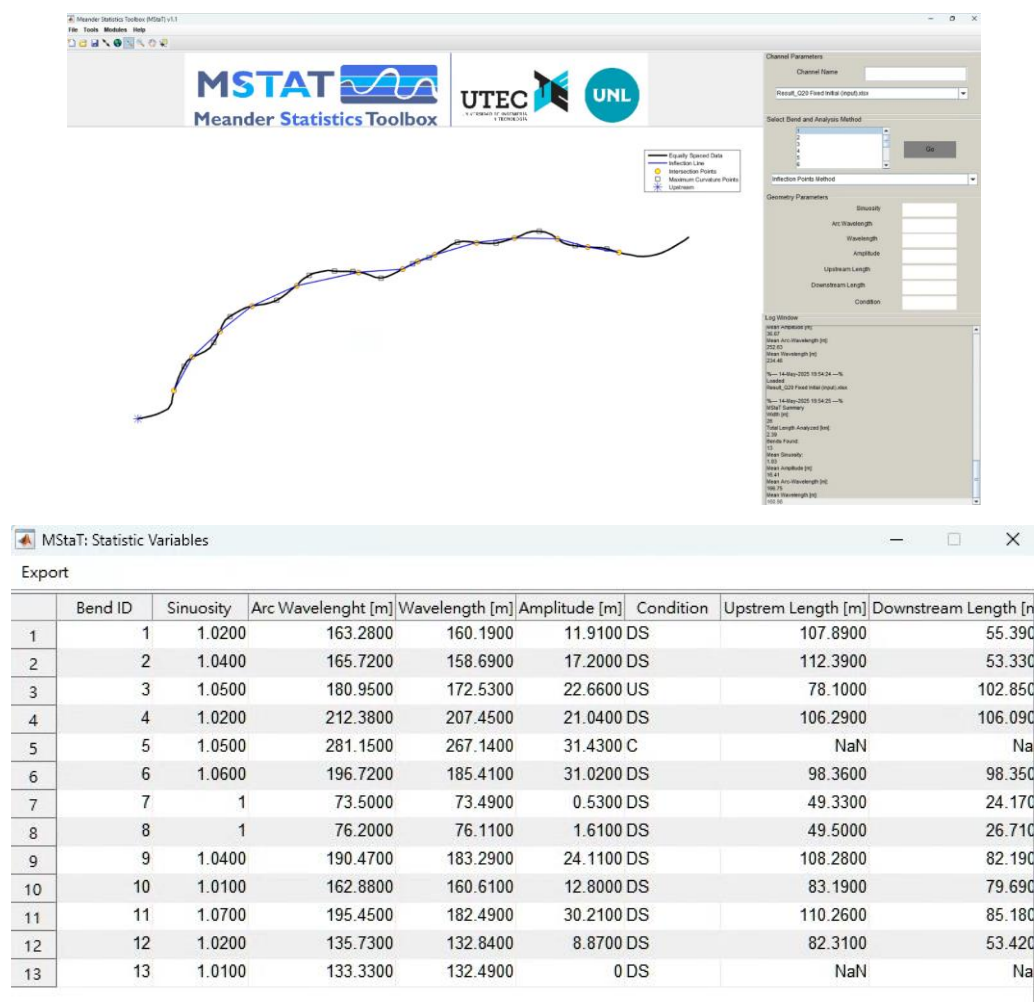


圖 3-11 蜿蜒形貌模組：基本蜿蜒特徵分析

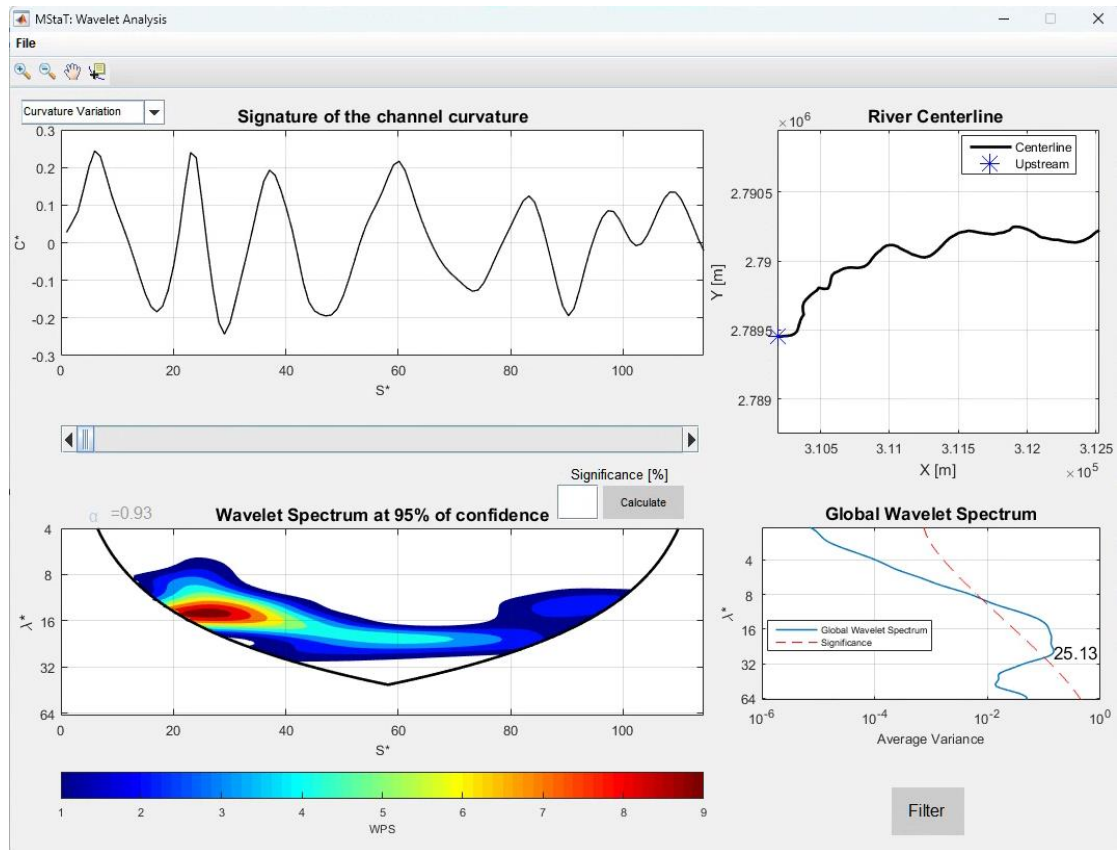


圖 3-12 蜿蜒形貌模組：小波分析

第四章 礮溪主流河道形貌變遷

第一節 主要關注河段及趨勢驗證

本計畫將斷面 15~12 定義為堰上游區、斷面 11.11~10 定義為堰下游區以及斷面 10~8 定義為下游寬廣區（圖 4-1），主要彎道區域包含 9 處，並以「外岸」代稱「凹岸」、「內岸」代稱「凸岸」之敘述方式進行分析，如圖 4-2。

本計畫根據礮溪調適規劃報告整理之短期(97~108)與長期(78~108)沖淤量對照模擬結果，驗證沖淤趨勢。假設 108~103 年之沖淤趨勢和 112 年地形發生 Q_5 洪水後之沖淤趨勢相似，因此根據礮溪疏濬評估計畫整理之平均河床高驗證各斷面沖淤趨勢。整體來說，在預測沖淤趨勢方面，模擬與實測之吻合度達 65%（趨勢吻合斷面位置數 / 總斷面位置數 $\times 100\%$ ），RMSE 為 1.01 公尺、MAE 為 0.69 公尺，整體趨勢如圖 4-3。其中趨勢差異較大之部分將根據更早期的沖淤趨勢結合航照影像補充說明，詳細參考表 4-1。在泥砂收支平衡方面，計算結果如表 4-2 所示，趨勢上基本與實測資料一致。整體來說，研究區域呈淨淤積，體積達 16,519 立方公尺，佔總淤積量的 31%，推測係因下游的一號攔河堰使坡度調整受阻、下游寬廣區流幅較大，剪應力下降導致泥砂淤積所致。

表 4-1 實測與模擬之各斷面平均河床高程變化及說明

斷面位置	實測 (108-103 年) (m)	模擬 (m)	說明
8.02	0.19	-0.16	此處為一號攔河堰上游，河寬較窄，往年皆為淤積，但根據歷年資料顯示淤積深度逐漸降低，若淤滿加上洪水時外岸侵蝕效果增強，可能導致侵蝕
8.01	0.17	0.08	沖淤趨勢一致，且深度接近
9	0.43	0.11	沖淤趨勢一致，因 Q ₅ 洪水導致此處發生分流，沖淤深度可能跟現地觀測有些微落差
9.02	0.48	1.25	沖淤趨勢一致，位於分流點下游斷面，受分流影響可能產生沖淤深度落差
10	-1.7	0.78	此處位於彎道，內岸有一沙洲，沙洲上有茂密植生。推測觀測到的侵蝕應為彎道外岸侵蝕，但應模式未考慮沙洲植生效應，可能低估沙洲植生增加內岸阻力、將水流導流到外岸之效果。
10.02	-0.48	0.41	同樣位於彎道，內岸有植生沙洲。模擬顯示有外岸侵蝕，但內岸淤積程度更為劇烈，導致平均高度略有上升，且早期資料亦有出息過淤積現象。
10.01	0.21	-0.05	此處為直流河道，中央有一河心沙洲，過去資料皆為淤積趨勢。推測係因模式未考量河心沙洲的植生，低估了沙洲植生的阻水、攔砂效應。
11	-1.71	-0.14	此處位於攔河堰下游彎道，右岸有台地造成河道局部束縮，水流加速使河床下切。最大侵蝕深度達 0.76 公尺，推測累積多次洪水可能造成更多侵蝕，或模式無法考量側向水力侵蝕。
11.02	-2.59	-0.28	位於二號攔河堰下游彎道，右岸有

斷面 位置	實測 (108-103 年) (m)	模擬 (m)	說明
			明顯侵蝕，最大侵蝕深度達-2.62 公尺，但內岸高程亦有增加，平均後使高程變化下降。推測係因單次洪水造成效果有限，或模式無法考量側向水力侵蝕。
11.01	0.35	-0.46	此處位於二號攔河堰下游，洪水時因上游跌水沖刷造成左岸侵蝕顯著。早期資料顯示有嚴重侵蝕，推測係 108-103 年並無顯著洪水或侵蝕後淤回。
12	-0.43	0.18	此處位於二號攔河堰上游、三和橋的位置，早年多為淤積，推測近年因河道逐漸淤滿，所以略有沖刷。
12.02	1.38	-0.06	此處靠近彎道外岸，早年正射影像在內岸顯示有一明顯沙洲，推測觀測到的淤積係該沙洲攔砂貢獻。然而，2024 年影像顯示沙洲位置已略有變化，目前在同一斷面無顯著沙洲形貌。
12.01	0.16	0.01	沖淤趨勢一致，且深度接近
13	0.32	0.20	沖淤趨勢一致，且深度接近
13.02	0.51	0.36	沖淤趨勢一致，且深度接近
13.01	0.21	0.24	沖淤趨勢一致，且深度接近
14	-0.02	-0.16	沖淤趨勢一致，且深度接近

註：紅色字體為趨勢不一致；綠色字體為趨勢一致。

表 4-2 各分區之沖淤變化量

單位：m ³	堰上游區	堰下游區	下游寬廣區	總計
總淤積量	15,475	9,373	26,538	53,002
總侵蝕量	11,142	20,642	4,488	36,483
淨變化量	4,333	-11,269	22,050	16,519

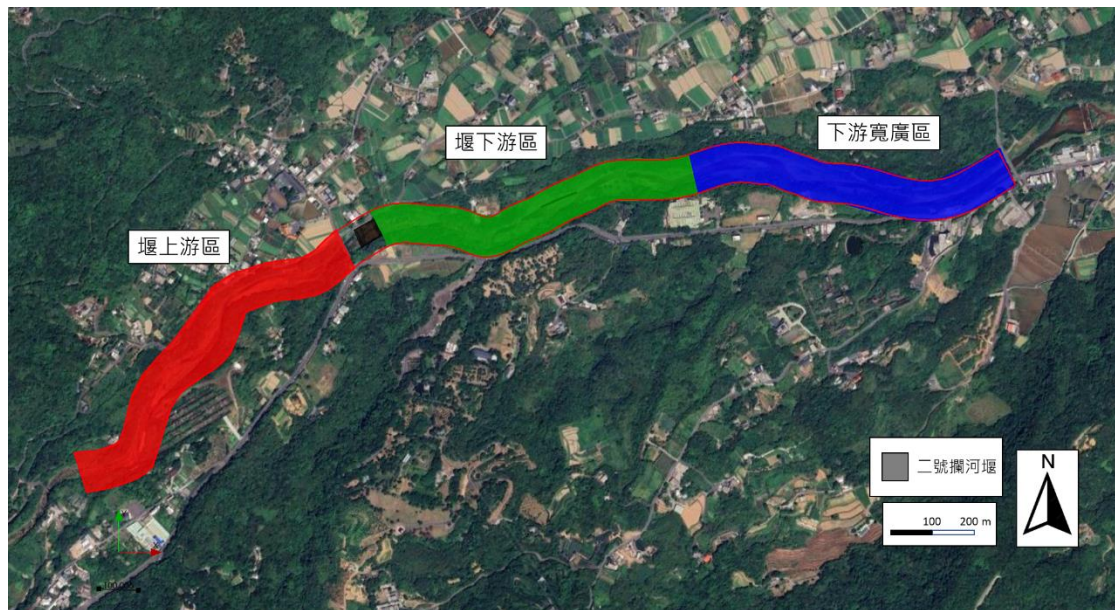


圖 4-1 模擬河段之分區敘述範圍



圖 4-2 模擬河段之主要彎道分布

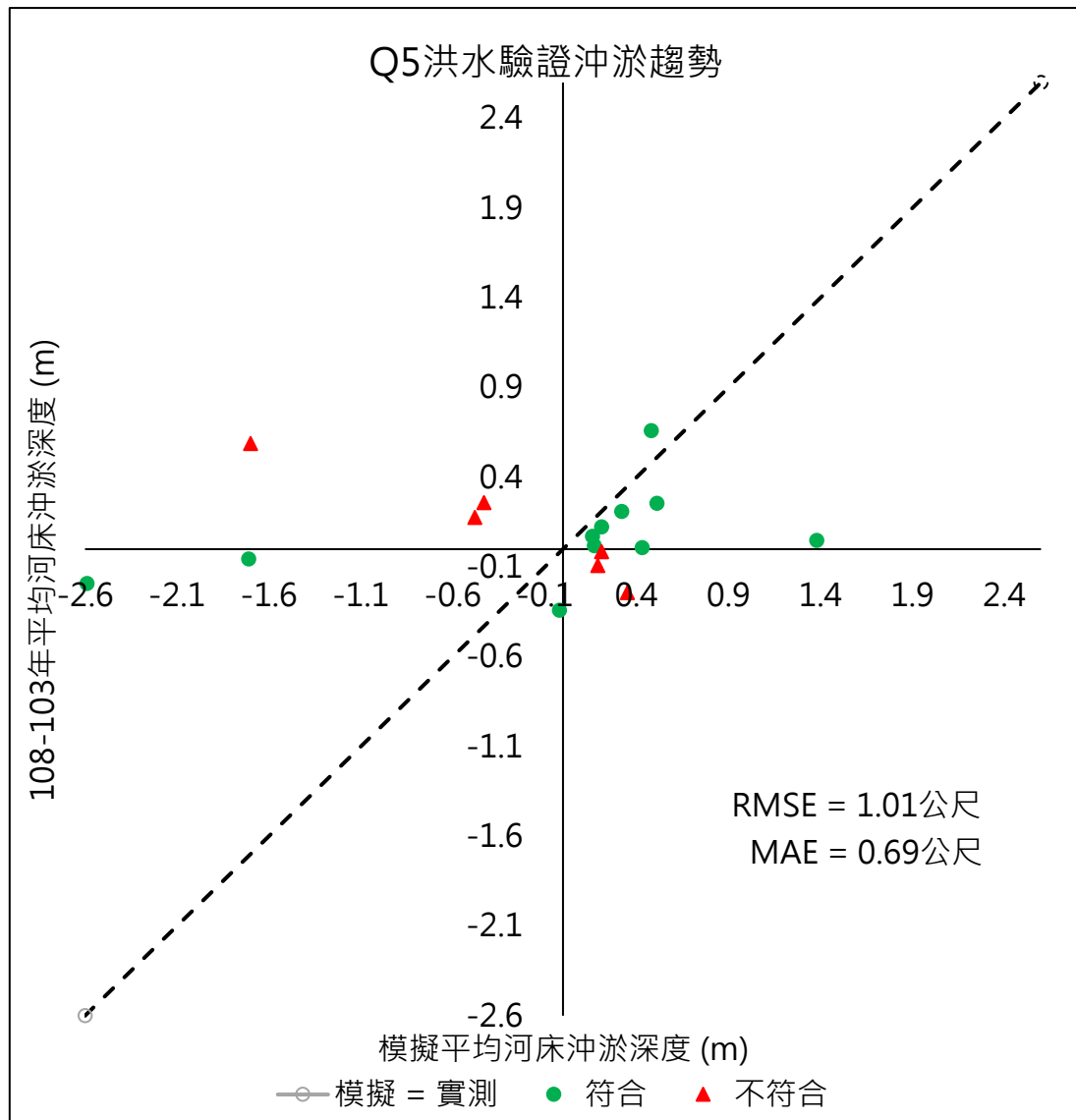


圖 4-3 實測與模擬之沖淤深度及趨勢比較圖

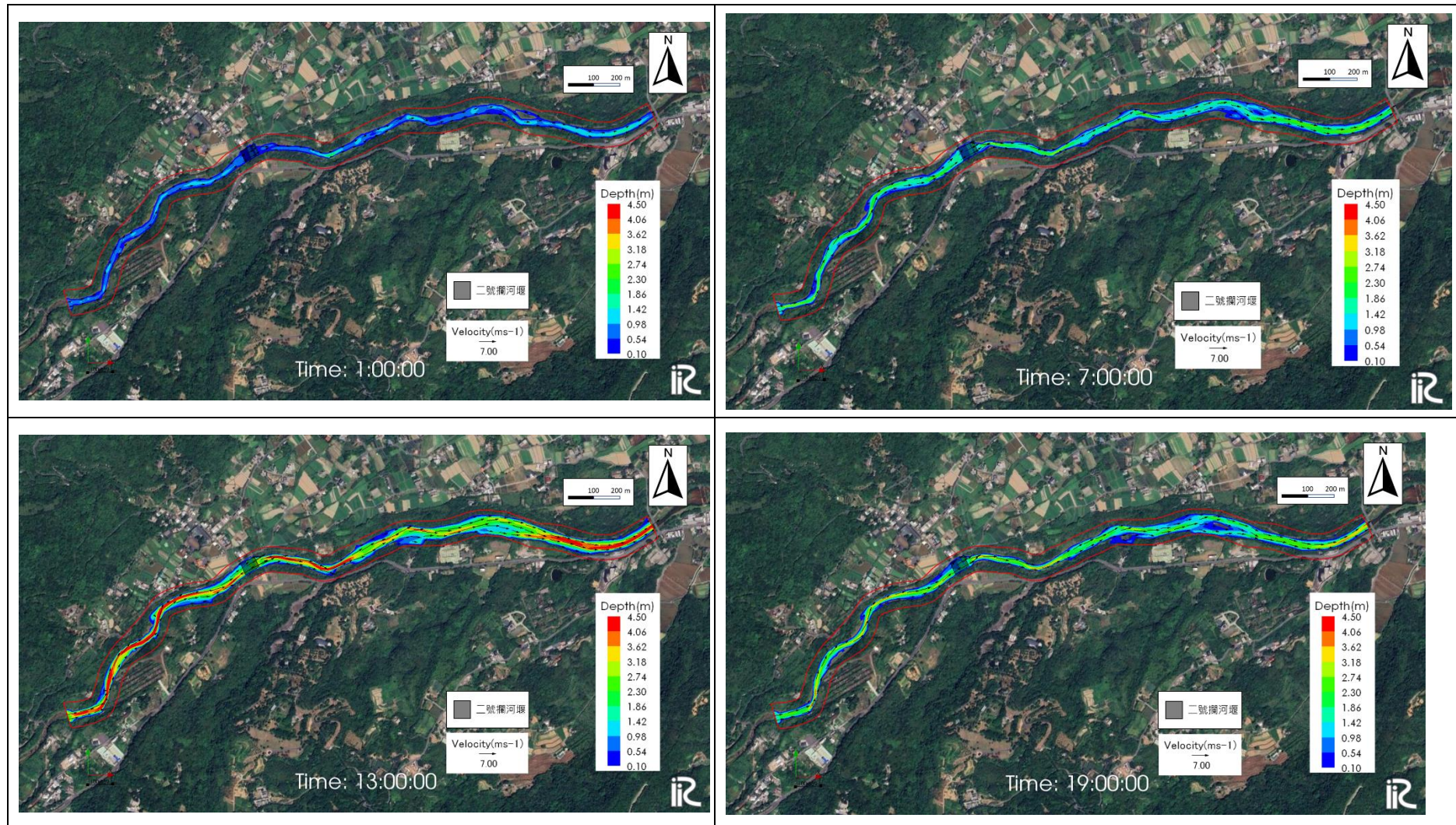
第二節 水動力模擬分析

一、堰體拆除前

圖 4-4、圖 4-5 分別為水深和流速在初始（第 1 小時）、洪峰前（第 7 小時）、洪峰（第 13 小時）、洪峰後（第 19 小時）以及洪水結束後（第 25 小時）之分佈圖。整體而言，堰上下游彎道的外岸皆出現較高的水深與流速，這可能是由於水流慣性作用，導致外岸加速，進而造成底床下切、形成較深的槽線。在下游寬廣區域，水深亦較高，但流速相對較低，推測與該區域河道較寬、坡度較緩有關。在洪峰（第 13 小時）時，攔河堰處流速最高可達 8.9 m/s；堰下游的彎道七與堰上游的彎道一流速亦達約 7.7 m/s。彎道七位於堰後且波長較長，彎道一則因曲率大、離心力強，兩者皆有助於流速提升。上述兩處在洪峰期間的水深亦可達 7 公尺，顯示洪水期間底床有顯著下刷現象，導致水深增加。在其餘時間點，整體流速分佈呈現典型彎道特性，即外岸流速較快、內岸較慢的趨勢。

圖 4-6 顯示剪應力在初始（第 1 小時）、洪峰前（第 7 小時）、洪峰（第 13 小時）、洪峰後（第 19 小時）以及洪水結束後低流量時（第 25 小時）之分佈圖。整體可歸納出以下幾項特徵：（一）彎道外岸剪應力普遍較高、內岸則較低。此現象在各時段均一致，尤以洪峰前後最為明顯。例如最上游的彎道一、以及堰下游連續的彎道六與

彎道七之外岸，皆出現橘紅色高值區，剪應力超過 570 N/m^2 。此現象顯示彎道處離心力作用強，使得外岸具較高輸砂潛能；（二）堰下游外岸區域剪應力顯著升高。在洪峰時特別明顯，可見堰下游多處呈紅色高剪力分佈。推測原因包括水流自堰處跌落後位能轉為動能、導致加速，以及彎道曲率加劇離心力，使得彎道六至彎道七外岸之剪應力增加。；（三）下游寬廣區剪應力偏低。在洪峰前與洪峰時，此區多呈藍綠色分佈，顯示流場能量較低。推測因河寬加大與坡度減緩，導致流速降低，輸砂能力隨之下降。；（四）不同流量條件下彎道高剪應力位置有所變化。以堰下游的彎道六與彎道七為例，洪峰期間的高剪應力位置偏向彎道頂點後方、延伸至下游段；而在低流量條件下，則集中於彎道頂點及其上游一段。此一差異顯示，高流量時水流受離心力影響較大，傾向沿直線前進，進入彎道後較不受曲率導流作用，導致沖刷重心轉移至彎道後段。



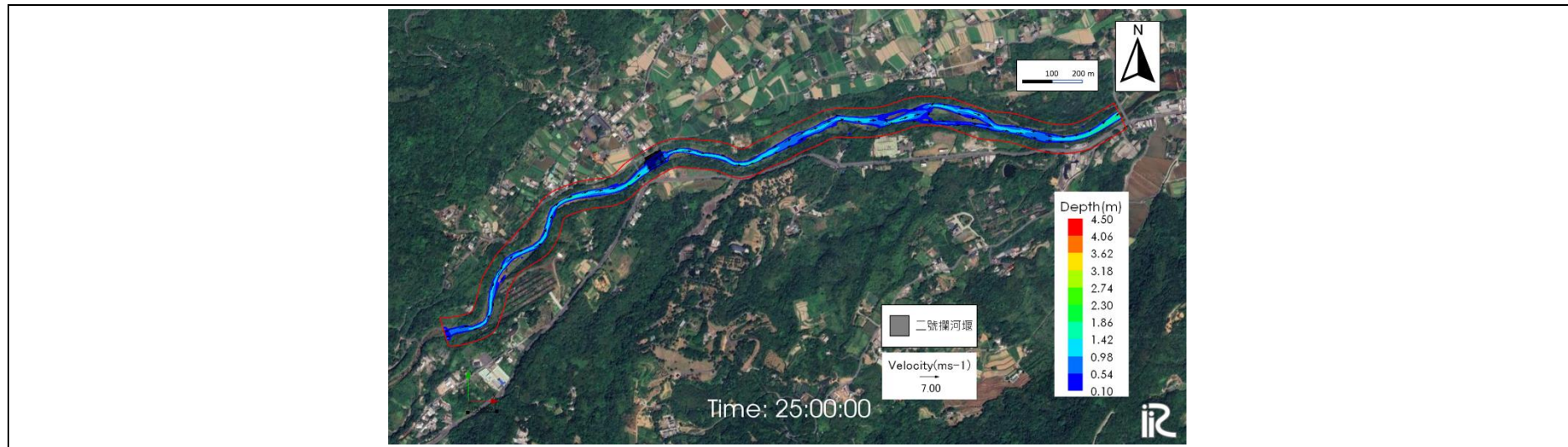
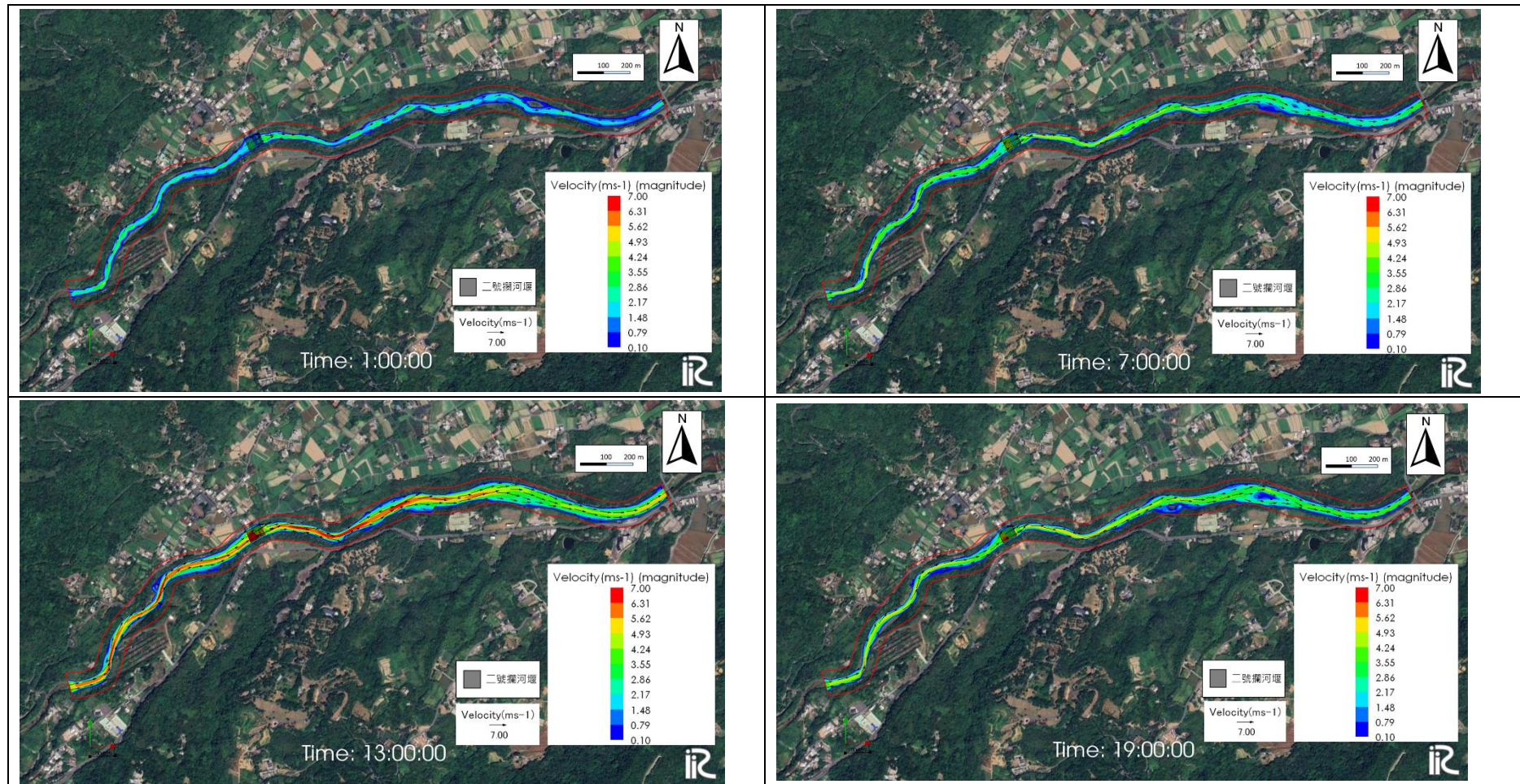


圖 4-4 水深隨時間分佈圖



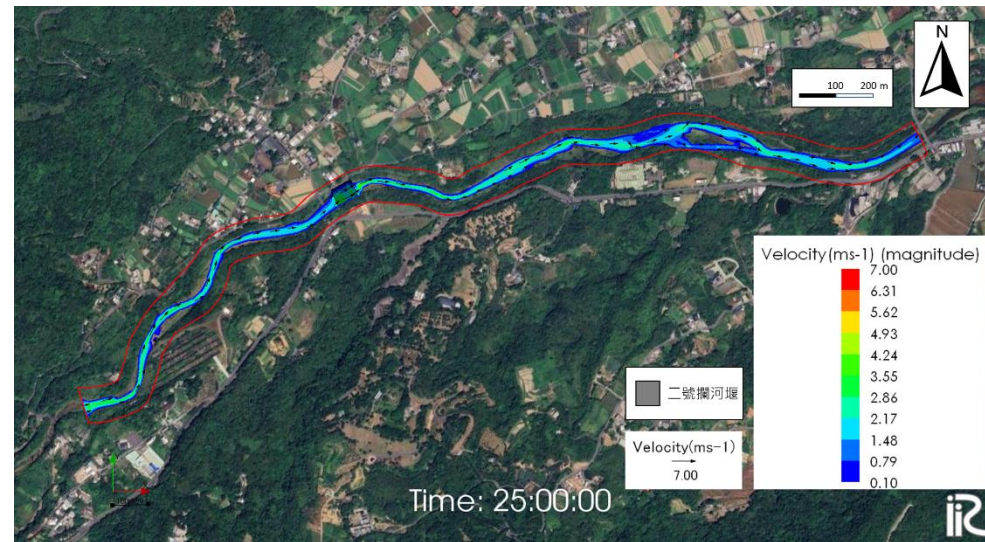
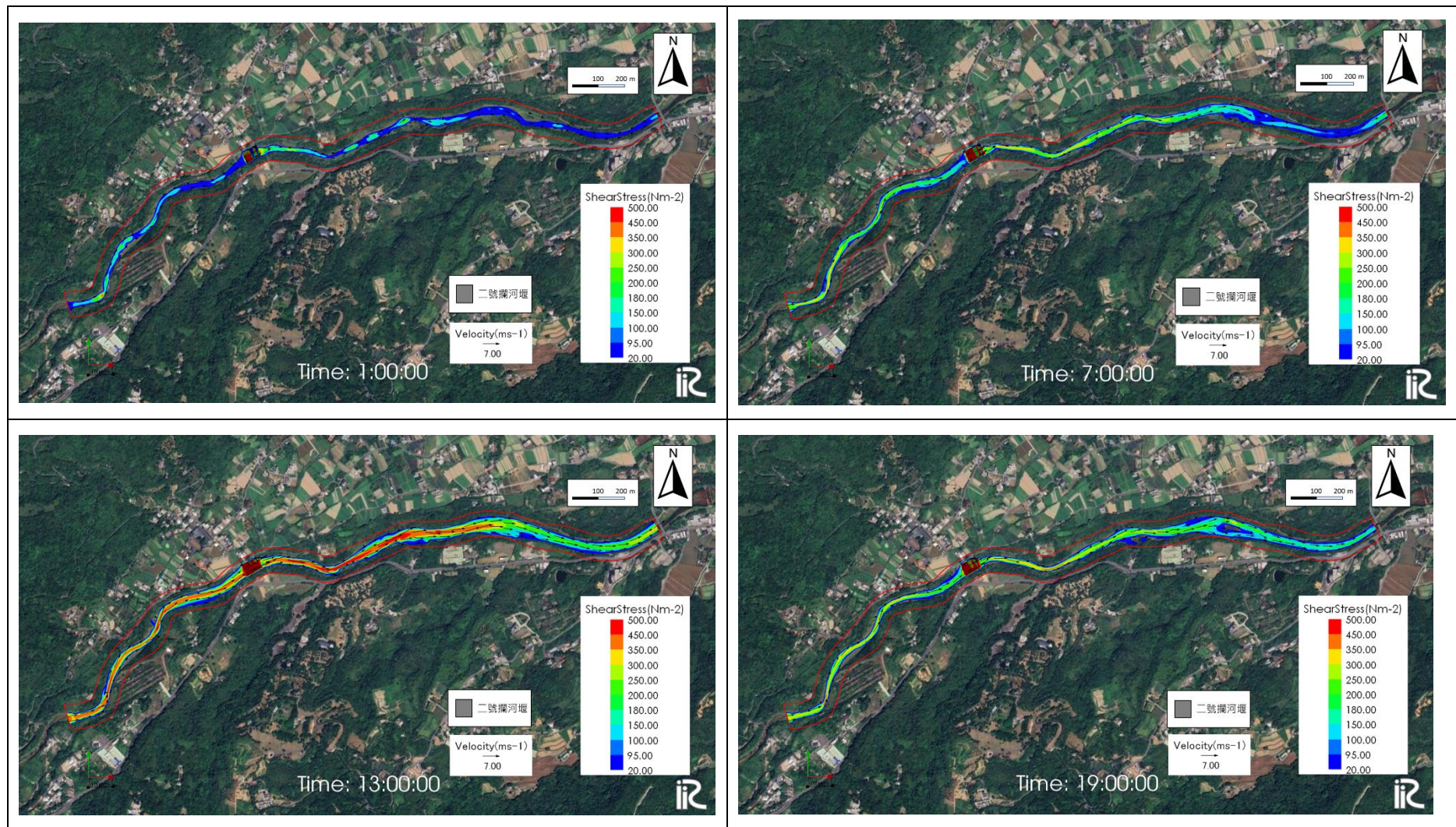


圖 4-5 流速隨時間分佈圖



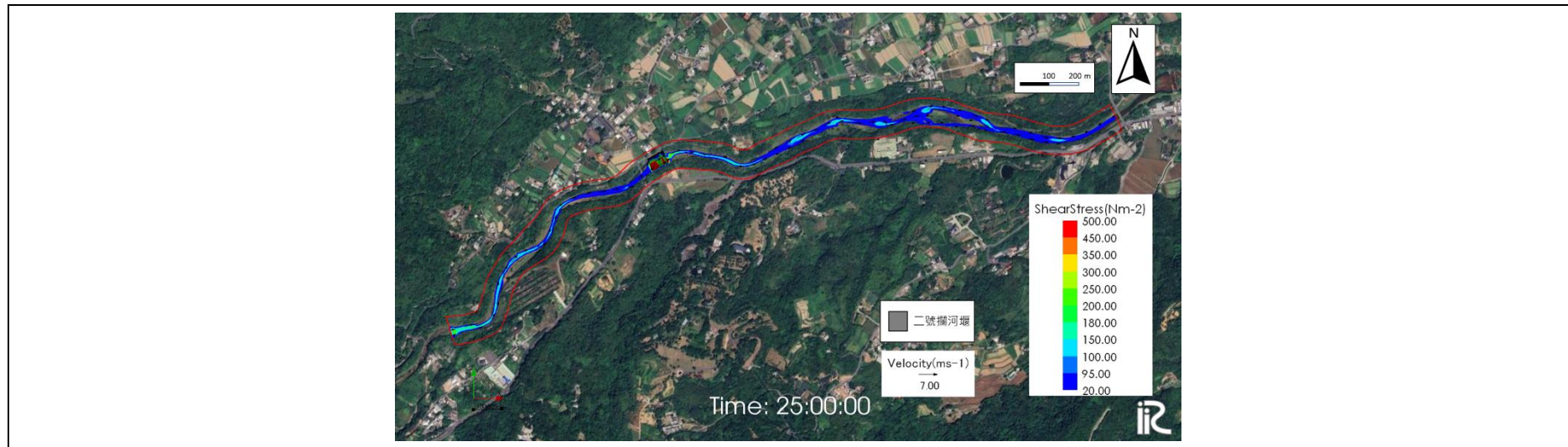


圖 4-6 剪應力隨時間分佈圖

二、堰體拆除後

圖 4-7 為固定河岸時不同堰體拆除情境下之洪峰期間剪應力分佈。整體而言，堰體拆除後，水流剪應力上升，且離堰體越近的彎道其於洪峰時之剪應力增幅越為明顯，而堰下游剪應力熱點普遍有向上游移動的趨勢，顯示堰體拆除後水流的侵蝕能力增強，且因沙洲在內岸之緣故，導致水流主軸產生偏移。進一步比較各區域在部分拆除與完全拆除時之剪應力，堰體原址的剪應力自 600 N/m^2 增加至 670 N/m^2 ；堰上游的彎道五剪應力自 390 N/m^2 提升至 659 N/m^2 ；堰下游的彎道六剪應力自 485 N/m^2 上升至 720 N/m^2 。總的來說，隨著堰體逐步拆除，河床之侵蝕基準面隨之降低，導致水流在重力驅動下加速，流速上升、剪應力增強，水流的侵蝕能力上升。

圖 4-8 展示的是可移動河岸時不同堰體拆除情境下之洪峰期間剪應力分佈。整體而言，與固定河岸情境趨勢一致，堰體拆除後，整體水流剪應力上升，並有向上游移動的趨勢，特別是彎道六。不同的是，可移動河岸的高剪應力熱點位置更趨近外岸，且水理分佈更具蜿蜒特徵。此外，在可移動河岸情境中，彎道七出現分流，顯示次級河道的形成。具體來看，堰體原址的剪應力自 585 N/m^2 上升至 666 N/m^2 ；堰上游的彎道五自 377 N/m^2 上升至 575 N/m^2 ；堰下游的彎道六自 410 N/m^2 上升至 510 N/m^2 。綜合而言，無論固定或可移

動河岸，堰體拆除均皆使洪峰期間河道流速與剪應力普遍上升。但相對而言，可移動河岸不僅剪應力上升幅度較大，外岸高剪應力熱點分布亦更為集中，且因河岸侵蝕能力上升，主流更貼近外岸，並於下游彎道形成分流，呈現與固定河岸不同之水動力分布特徵。

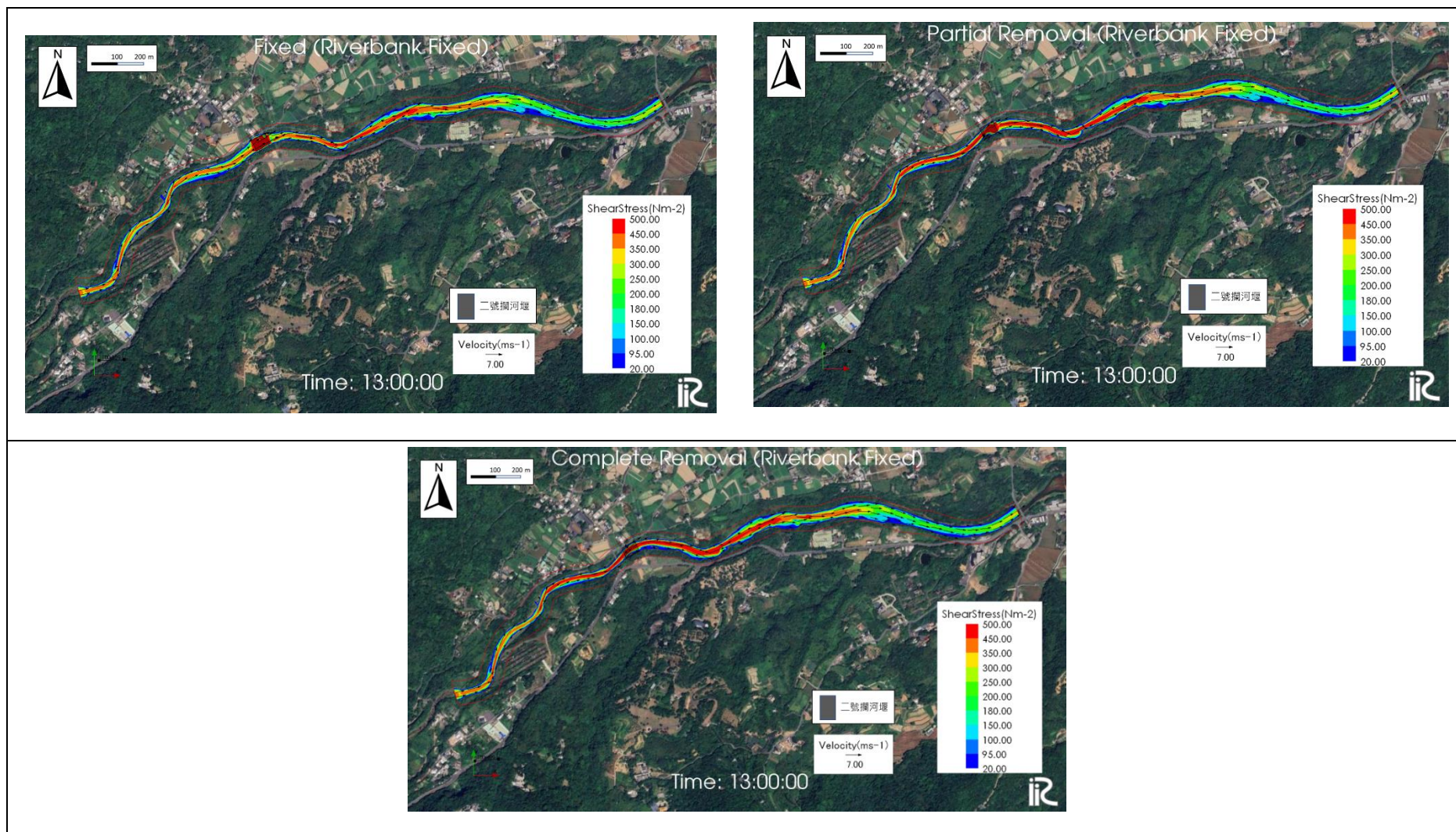


圖 4-7 不同拆除情境洪峰時之剪應力（固定河岸）

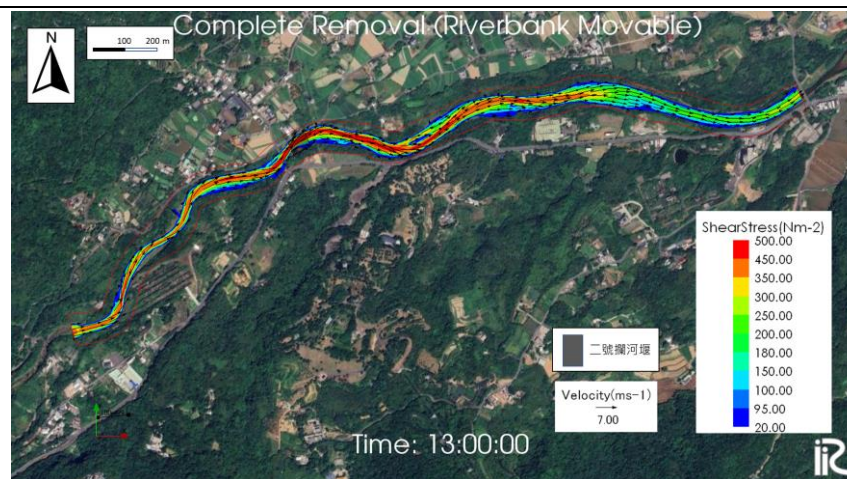
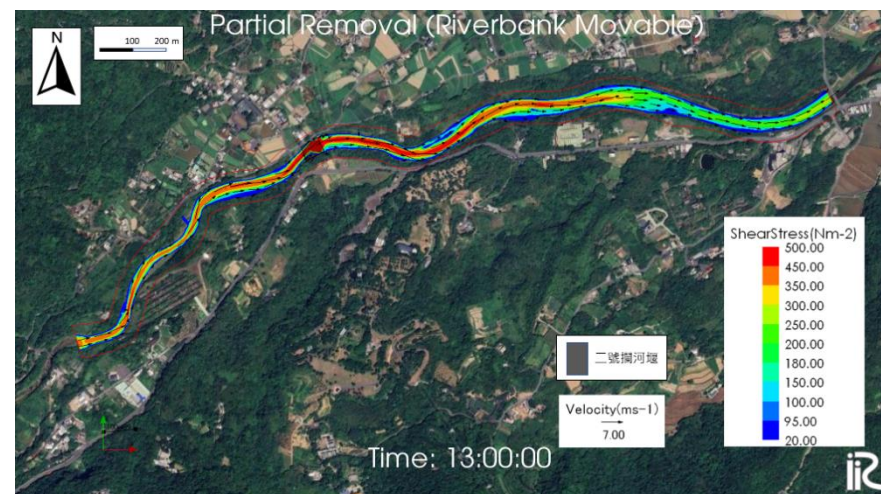
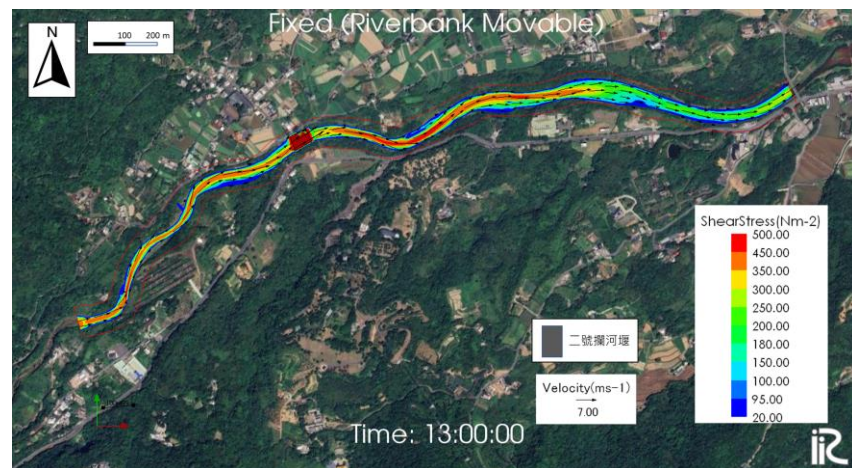


圖 4-8 不同拆除情境洪峰時剪應力（可移動河岸）

第三節 沖淤分析

一、堰體拆除前

圖 4-9 為洪峰前（第 7 小時）、洪峰（第 13 小時）、洪峰後（第 19 小時）與洪水結束後低流量時（第 25 小時）的高程變化分佈圖，最大淤積深度達 4.54 公尺，位於彎道一內岸；最大侵蝕深度達 5.03 公尺，位於彎道六外岸。依據沖淤分佈圖可觀察出以下幾種現象：（一）彎道外岸侵蝕、內岸淤積。對應剪應力分佈圖可知，外岸因離心力作用造成剪應力增加，促使輸砂能力上升，進而導致河床下切；內岸因剪應力較低，輸砂能力下降，加上二次流產生的環流作用，促進泥砂沉積於內岸；（二）堰下游區侵蝕明顯，尤以彎道外岸更甚。剪力分佈圖顯示堰下游區剪應力較高，加上攔河堰具攔砂作用，使得水流挾砂量降低，輸砂能力相對提高，進一步造成明顯的河床侵蝕；（三）下游寬廣區呈現大面積淤積。對應剪力分佈圖可知，此區流速與剪應力均較低，輸砂能力下降，使泥砂易於沉降，形成淤積；（四）彎道主要侵蝕區位置隨時間變化而有所轉移。以堰下游的右彎道（彎道七）可見，洪峰時主要侵蝕區位於彎道頂點下游；洪峰後則轉移至彎道頂點上游處，至洪水結束時該處下刷更為明顯。對照剪應力分佈圖可見，高剪應力區亦有相似位移現象，從彎道頂點轉移至其，反映彎道地形在不同流量條件下，形貌演化機制的變化。

圖 4-10 為洪峰前（第 7 小時）、洪峰（第 13 小時）、洪峰後（第 19 小時）、洪水結束後低流量時（第 25 小時）河床質平均粒徑分佈圖。平均粒徑可反映河道在洪水作用後的分選效應，特別是在具跨河構造物的河道，極易在堰下游形成護甲層。就堰下游區而言，河道呈現明顯粒徑粗化現象，從原來的 136 毫米上升到約 370 毫米，形成紅色帶狀粗化區，該範圍主要跟洪峰時主流通過位置重疊。顯示跌水與彎道離心力共同作用下，產生顯著的粒徑分選效果。此外，部分彎道和下游寬廣區亦有粒徑粗化的現象，例如靠近彎道八外岸雖為淤積區，但退水過程中，因水流匯聚可能帶走細顆粒泥砂，使模擬結束時的平均粒徑較粗；彎道九外岸亦呈現粗化，但主要發生於分流點附近，推測因水流分流時挾砂能力降低，造成粗粒物質率先沉降。

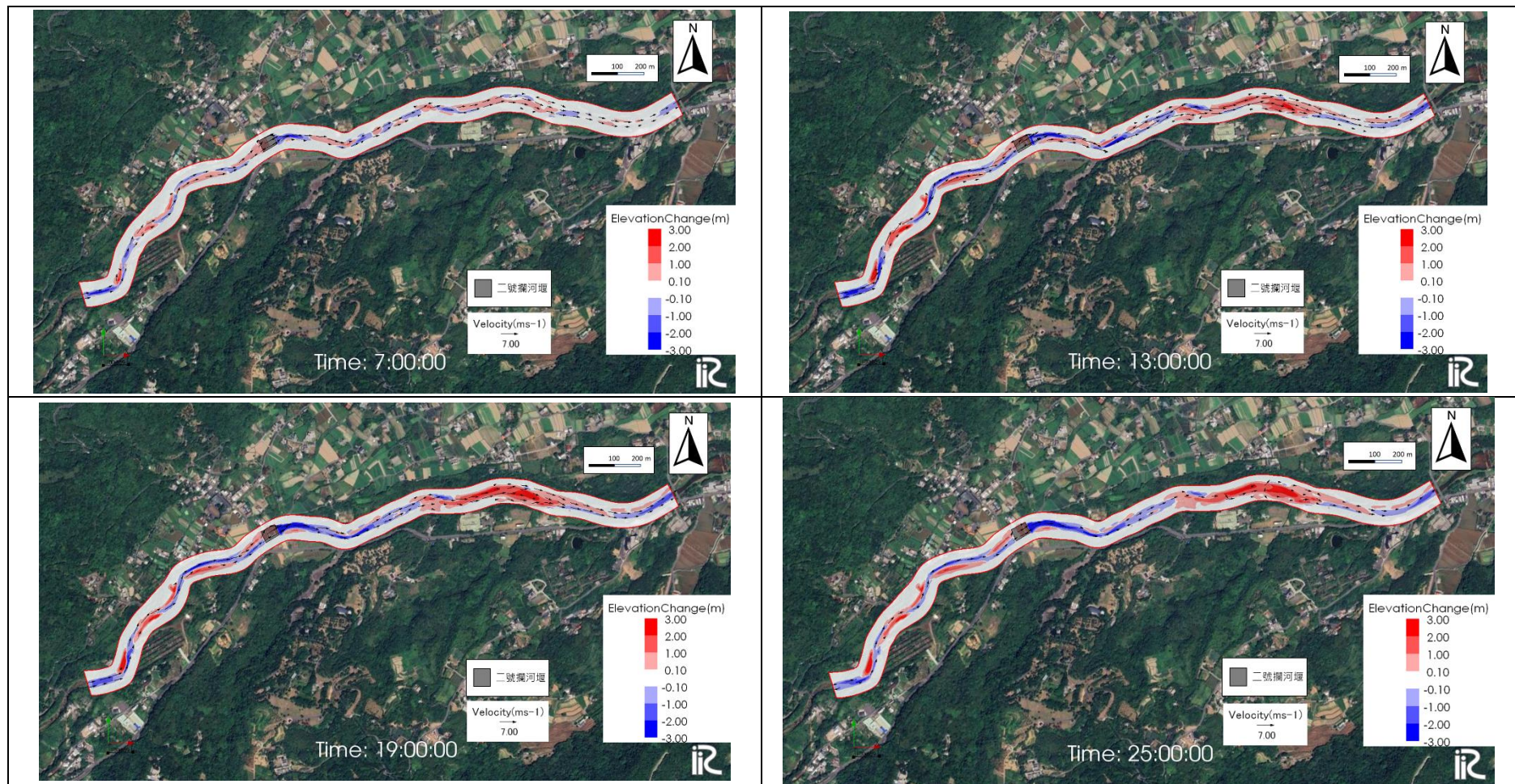


圖 4-9 高程變化隨時間分佈圖

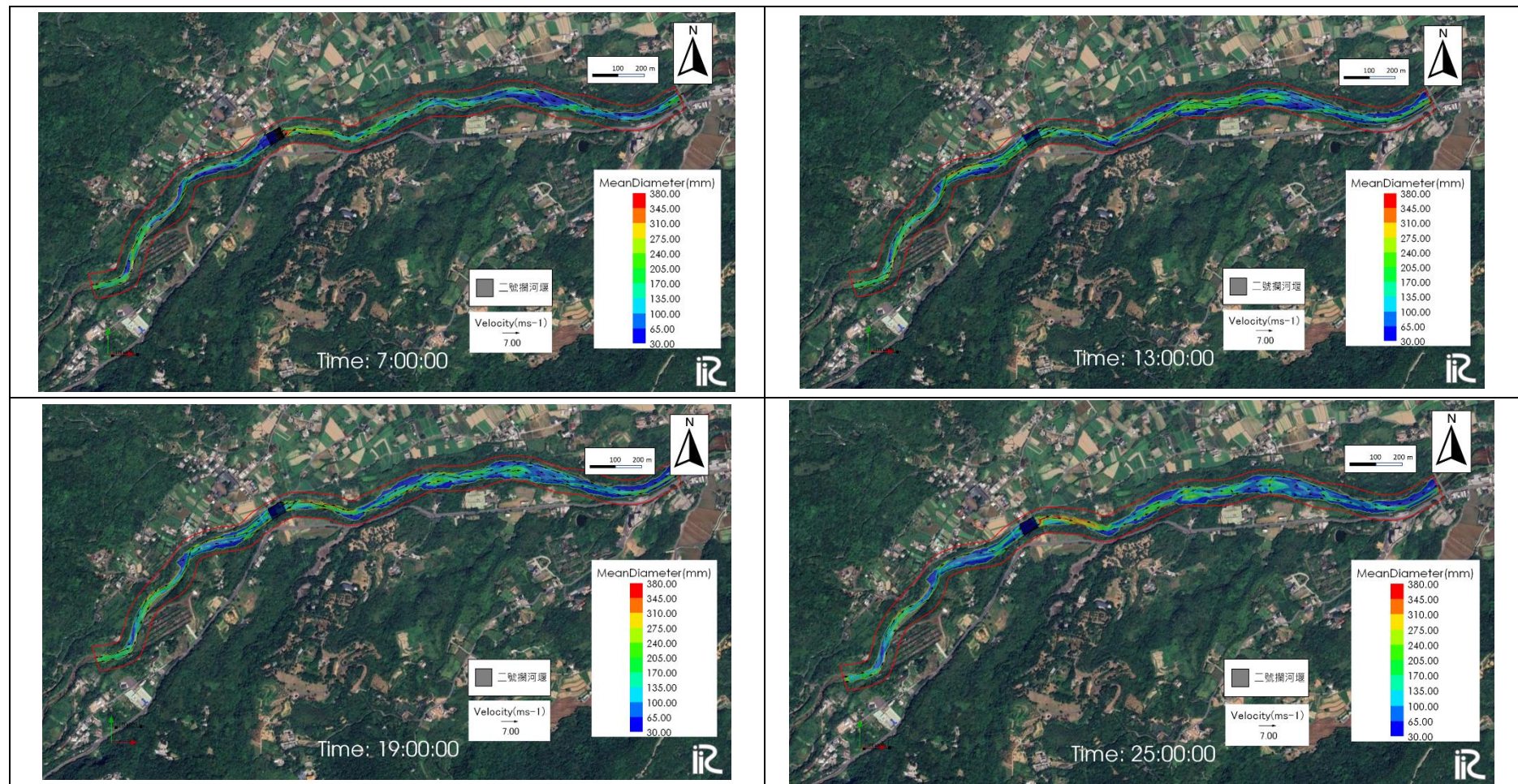


圖 4-10 底床平均粒徑隨時間分佈圖

二、堰體拆除後

圖 4-11 為在固定河岸情境下不同拆除情境之沖淤變化，最大淤積發生在彎道五，淤積深度為 3 公尺（部分拆除）和 4.6 公尺（完全拆除）；最大侵蝕發生在彎道六，侵蝕深度為 5.76 公尺和 8.9 公尺。整體而言，堰體拆除後，沖淤變化多集中在攔河堰上下游區段，主要影響範圍為彎道四（斷面 12.01）至彎道八（斷面 10.02），且堰體上游彎道外岸侵蝕加劇，堰下游彎道則呈外岸侵蝕減緩、內岸淤積增加現象，符合剪應力模擬結果。具體來看，下游彎道內岸之淤積向上下游延展，呈現寬長之型態，推測係因二次流將泥砂輸送至內岸所致。此外，剪應力雖隨堰體拆除而增加，但由於固定河岸情境限制了外岸侵蝕，剪應力雖高卻未帶來侵蝕，反而驅動大量上游泥砂往下游輸送，成為下游主要淤積來源。底床粒徑變化可參照表 4-3，整體而言，顯示堰體拆除後上游床面發生粗化，堰下游區在恢復連續性後，因高程跌水造成的粗化現象減緩，轉為細化。

圖 4-12 展示的是可移動河岸情境下不同拆除情境之沖淤變化，最大淤積發生在彎道七，淤積深度為 6 公尺（部分移除）和 6.2 公尺（完全移除）；最大侵蝕分別發生在彎道四（部分移除）和彎道五（完全移除），侵蝕深度為 6.7 公尺（部分移除）和 8.5 公尺（完全拆除）。整體而言，隨著堰體拆除，彎道外岸的侵蝕與彎道內岸的堆積現象皆

更明顯，與剪應力結果一致。再者，可移動河岸情境亦展現更顯著之沖淤變化，且呈現更明顯橫向遷移現象，顯示堰體拆除與河岸可動性對蜿蜒河段形貌變化具明顯影響。具體來看，彎道四、彎道五因拆堰發生向源侵蝕，因此形成明顯侵蝕；彎道六、彎道七因此有大量泥砂輸入，造成內岸淤積明顯，亦進一步帶動水流導向外岸。在底床粒徑方面，可參照表 4-4。整體而言，趨勢和固定河岸情境一致，但粒徑變化幅度低於固定河岸情境（約為 1~1.5%，相較於 10~17%）。根據 Eaton and Church (2009)之研究結果，推測在可移動河岸情境中，河道形態變化較傾向於藉由調整蜿蜒度而非底床粒徑來回應上游來砂條件之變化，但此推論仍需更多長期觀測或數值驗證支持。

表 4-3 固定河岸情境下各區域之平均粒徑變化

單位：mm	堰上游區	堰下游區	下游寬廣區
現況	148	161	107
部分移除	161	138	105
完全移除	164	133	111

表 4-4 可移動河岸情境下各區域之平均粒徑變化

單位：mm	堰上游區	堰下游區	下游寬廣區
現況	163	147	115
部分移除	164	143	113
完全移除	165	145	115

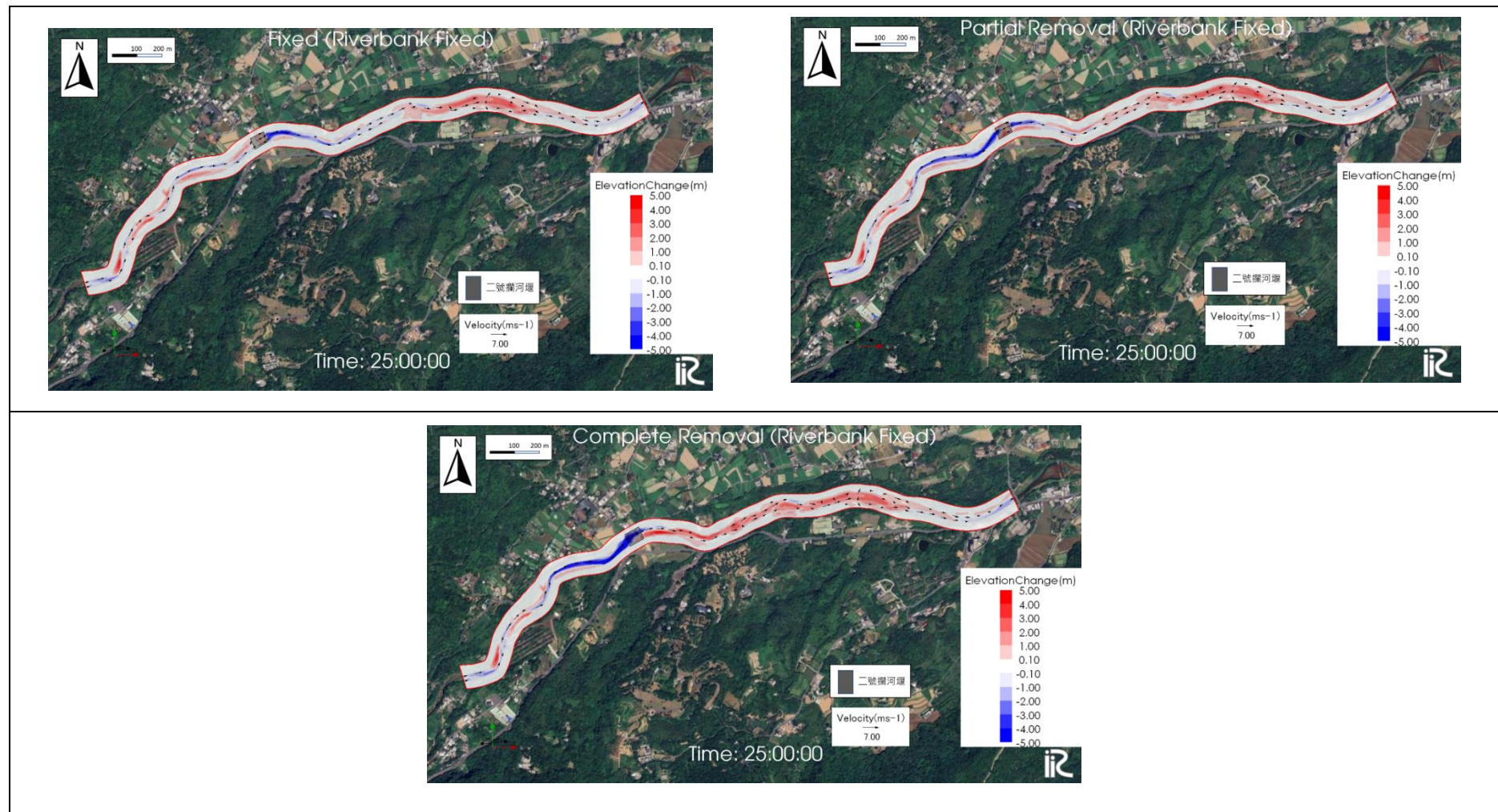


圖 4-11 不同拆除情境之沖淤變化（固定河岸）

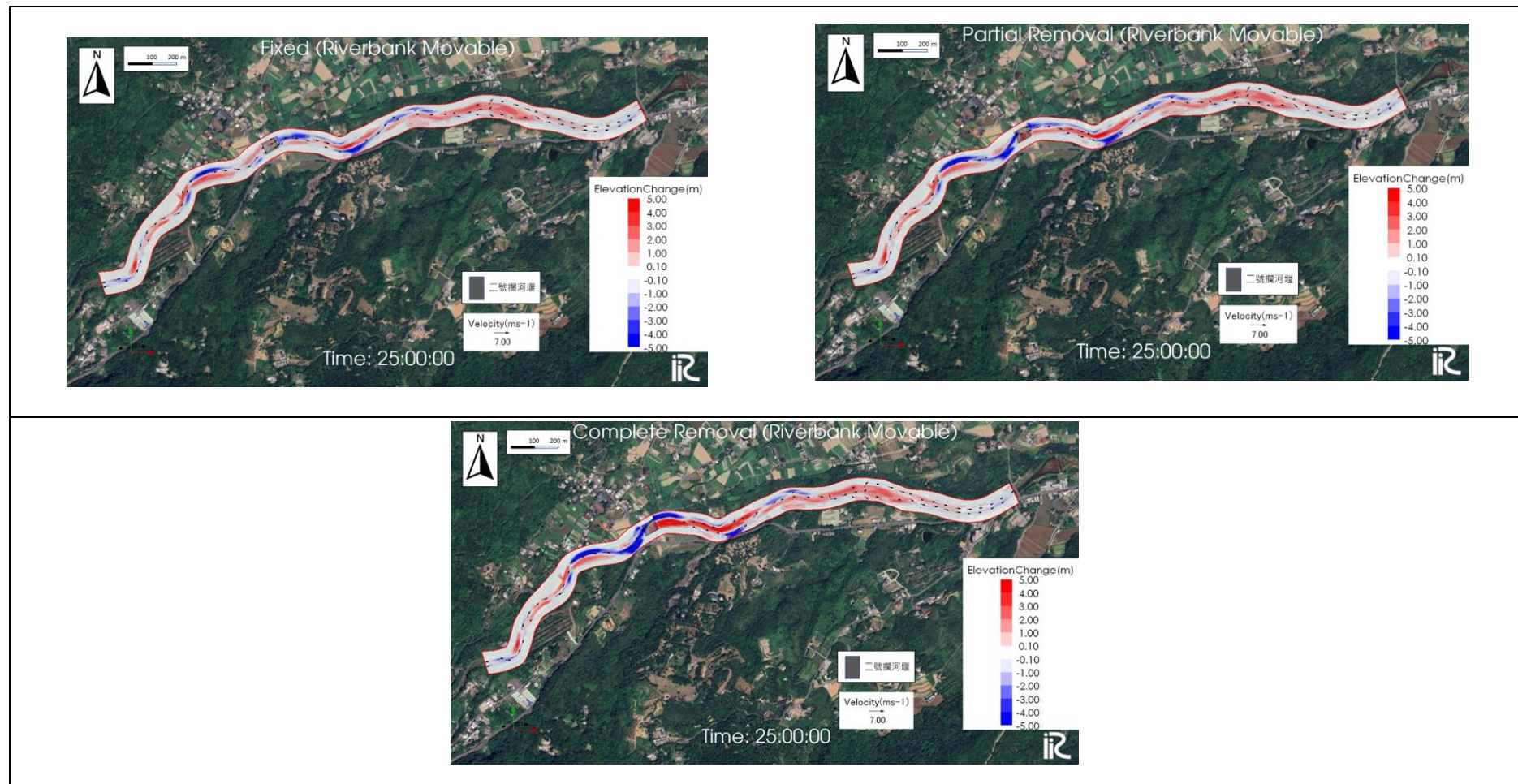


圖 4-12 不同拆除情境之沖淤變化（可移動河岸）

第四節 代表性斷面分析

一、堰體拆除前

本計畫針對臨近攔河堰上下游共六個斷面（斷面三至斷面八）作為代表性斷面，分析其底床高程與剪應力隨時間之分佈，如圖 4-13 所示，分別對應上游三個彎道與下游三個彎道。上游自第一斷面起，依序為右彎道、左彎道與右彎道；下游自第四斷面起則為左彎道、右彎道與左彎道。底床高程與剪應力分析主要繪製初始（第 1 小時）、洪峰（第 13 小時）和洪水結束後低流量時（第 25 小時）之資料，並以顏色淺至深表示時間前進；棕色呈現底床高程，紅色則為剪應力變化。從圖 4-14 中可觀察到，經洪水事件後，各彎道普遍呈現外岸侵蝕、內岸堆積之現象。進一步比較初始與洪水結束後低流量時之剪應力分佈，發現剪應力高峰位置有向外岸偏移之趨勢，推測可能因內岸淤積導致流線外移所致。

此外，觀察圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6 中洪峰後與洪水結束後低流量時的分佈結果，可發現下游寬廣區出現分流(bifurcation)現象，結合圖 4-6 所示初始與洪峰的剪應力分佈可見，該分流點原本係一右彎道，其左岸有一沙洲。由於洪峰時水流慣性力較強，加上左岸沙洲高程較低、地形導流效果較差，導致水流出現捨棄原有曲流河道、直接越過沙洲形成較短、較直流槽的現象，原來主深槽則成為轉為次要河道

(secondary channel)，該現象可視為流槽切斷(chute cutoff)。

本計畫觀測分流點在初始、洪峰與洪水結束低流量時之底床高程與剪應力變化，如圖 4-15 所示。初始階段主深槽位於右岸；洪峰時，右岸剪應力約為 80 N/m^2 ，左岸剪應力則高達其三倍，造成右岸堆積、左岸侵蝕；洪峰過後，左岸水深較深、右岸趨於變淺，顯示主深槽已轉向左岸，原主深槽則轉為次要河道，中間形成一河心沙洲。本計畫進一步將初始、洪峰與洪水結束後低流量時之底床高程與水面高程繪製在同一張圖（圖 4-16），可明顯觀察到主深槽轉移與次級河道形成之現象。

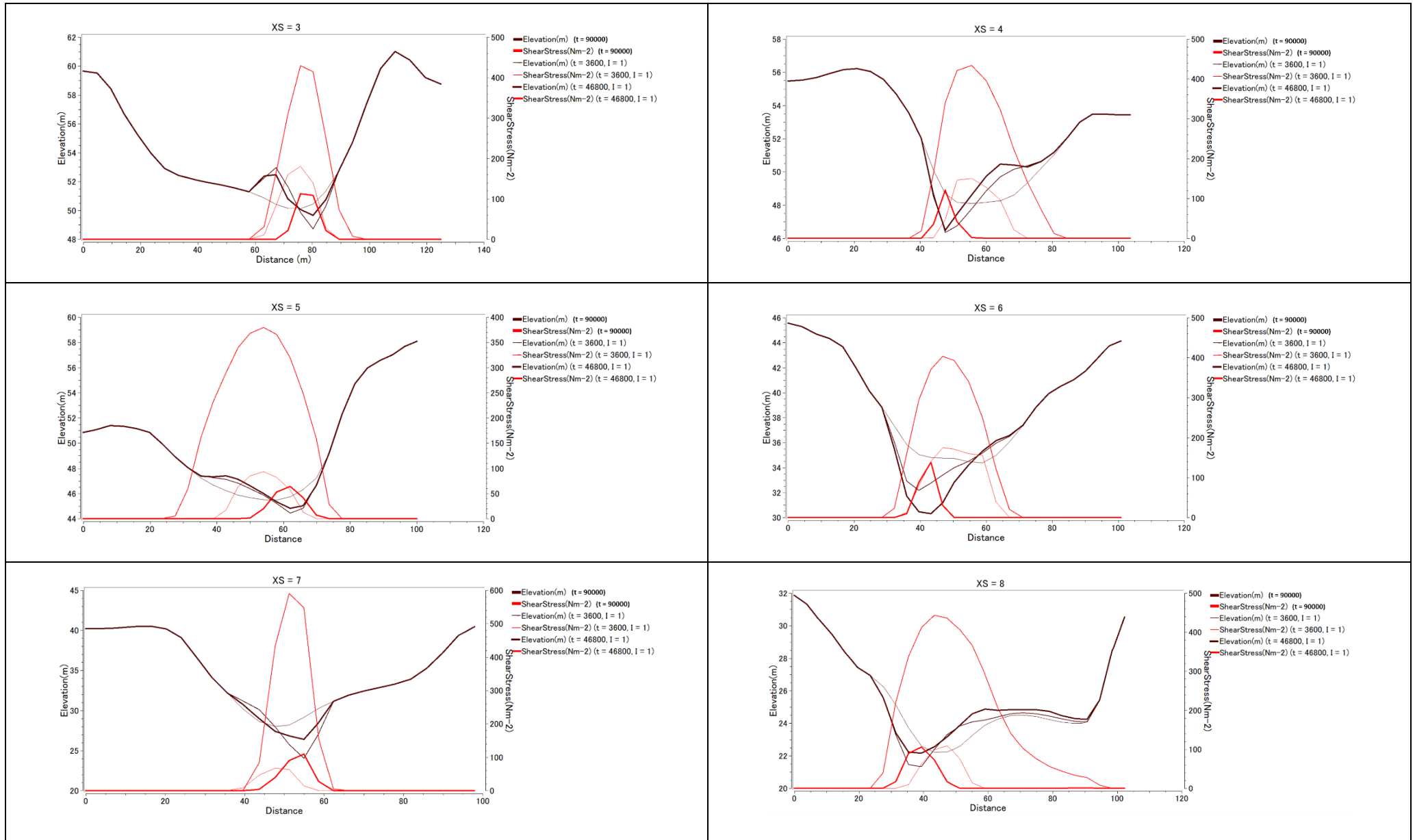


圖 4-13 代表性斷面之底床高程與剪應力隨時間分佈

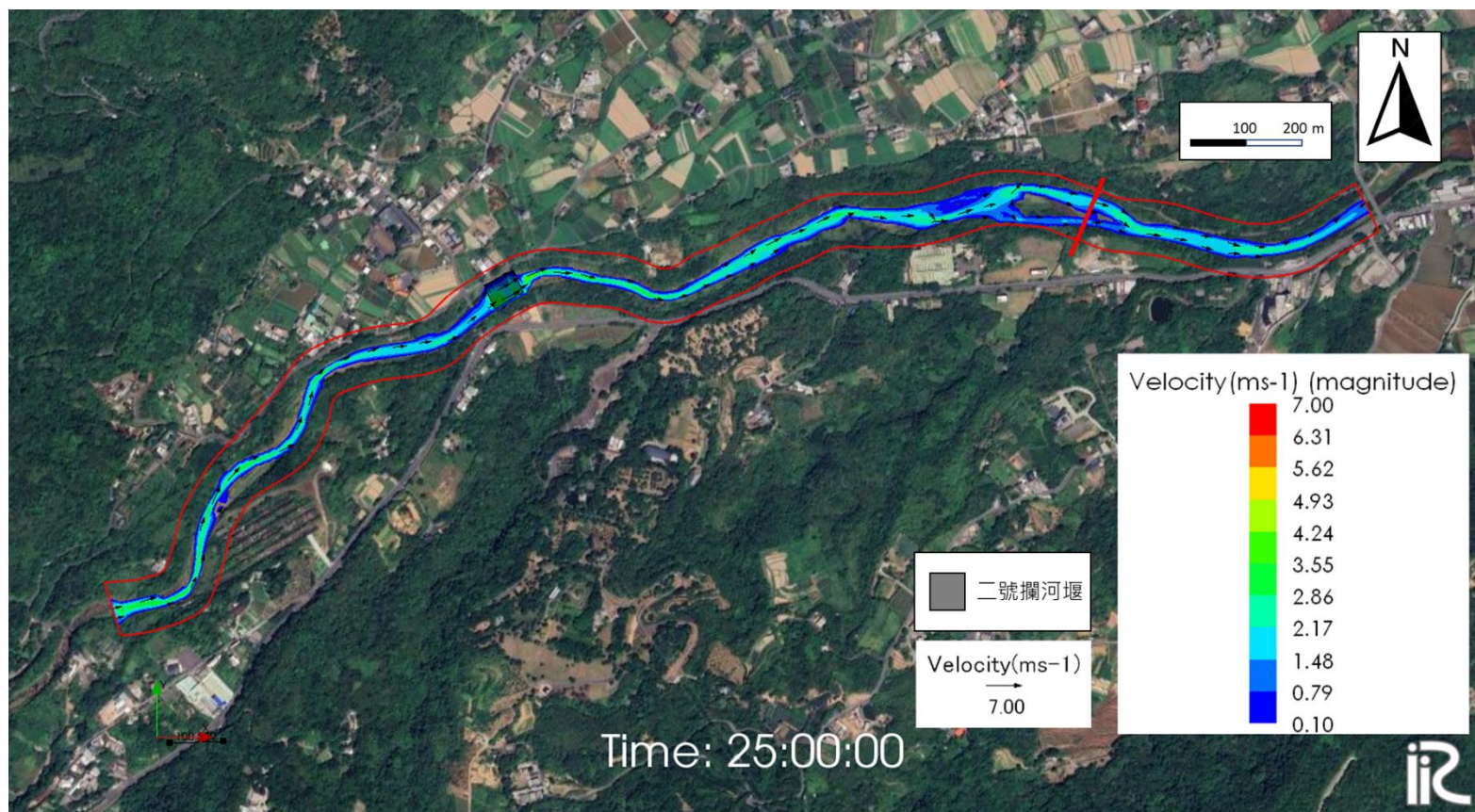


圖 4-14 模擬結束時之流速分佈與分流斷面位置

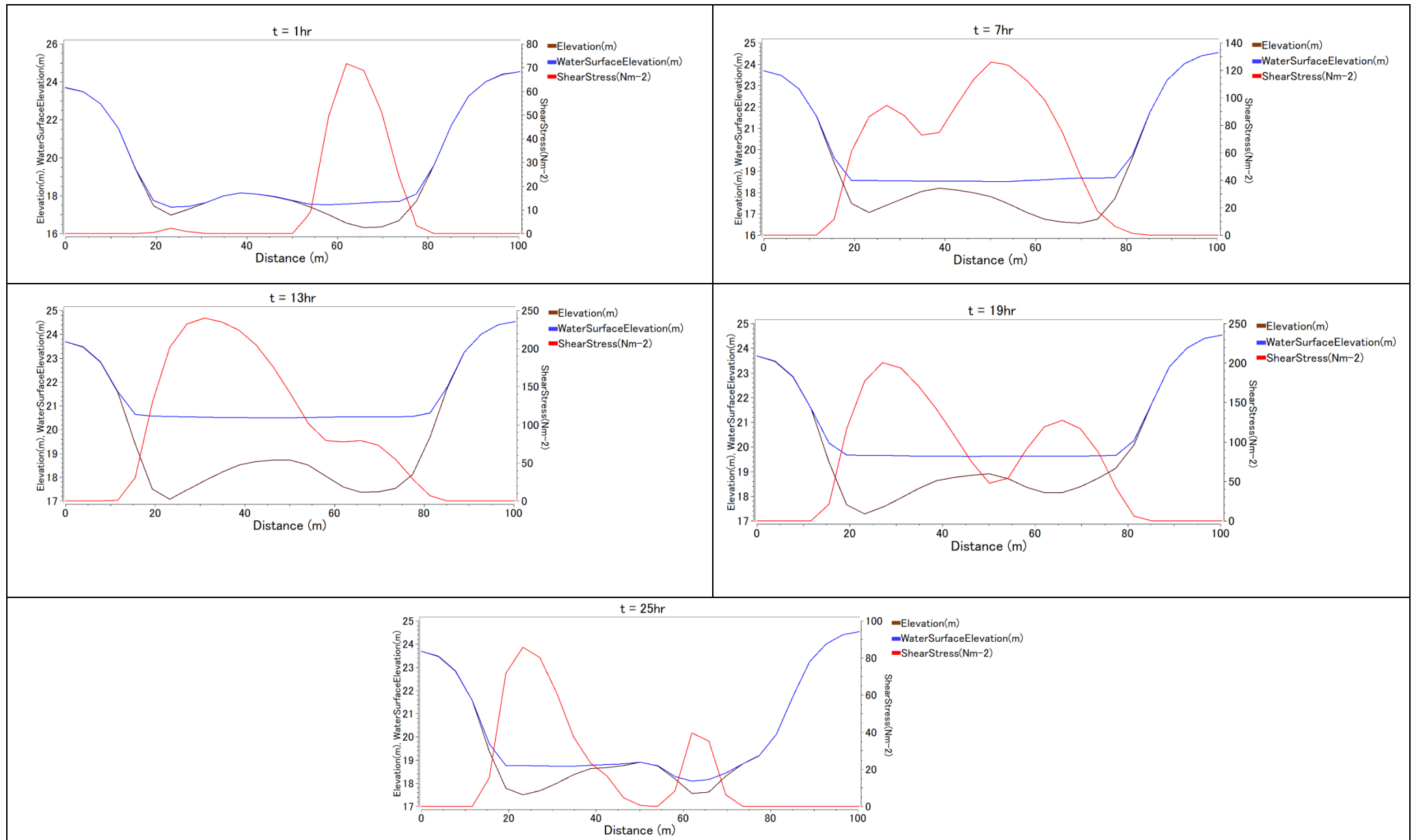


圖 4-15 分流點斷面之底床高程、水面高程與剪應力隨時間變化

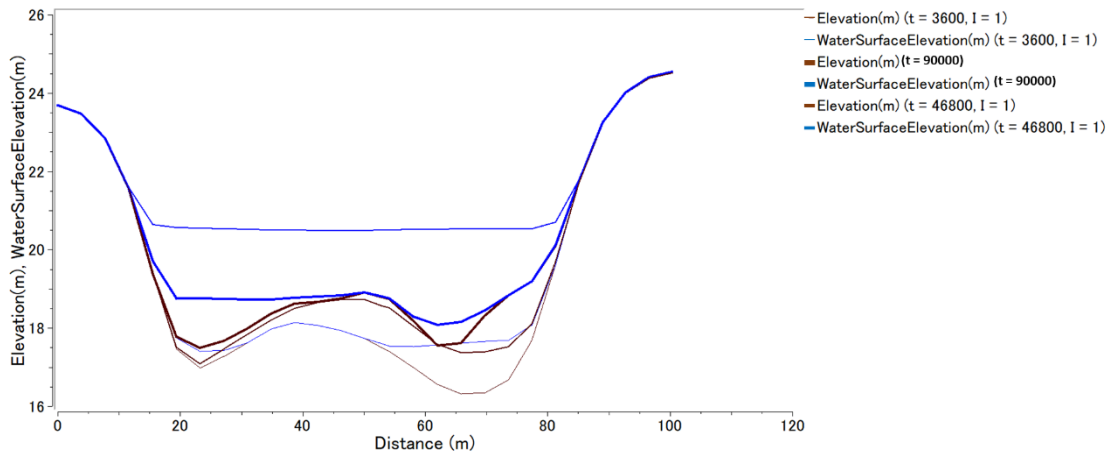


圖 4-16 分流點斷面之底床高程與水面高程隨時間變化圖

二、堰體拆除後

圖 4-17 為固定河岸情境下代表性斷面（斷面三至斷面八）在不同拆除情境之底床高程與剪應力。根據模擬結果，堰上游斷面（斷面三至斷面五）呈現河床下切、剪應力往外岸偏移之趨勢；堰下游斷面（斷面六至八）則呈現河床抬升、剪應力往外岸偏移和內岸淤積更甚之現象。固定河岸雖抑制了外岸侵蝕，代表性斷面整體仍呈現剪應力往外岸偏移之趨勢。堰上游斷面因向源侵蝕的關係，外岸剪應力上升，導致上游斷面之偏移現象；堰下游斷面因內岸淤積更甚，因而導致水流導向外岸，這顯示上游泥砂量增加有助於促進遷移。

圖 4-18 為可移動河岸情境下代表性斷面在不同拆除情境之底床高程與剪應力。整體而言，可移動河岸情境之外岸侵蝕、內岸淤積現象更顯著，彎道發生明顯遷移，並在斷面六發生分流。其中，變化最明顯的斷面最靠近堰體，分別為彎道五、彎道六與彎道七。值得注意的是，在完全拆除情境中，斷面六的彎道內岸測得 40 N/m^2 之剪應力，顯示此處發生分流，推測係因主流往外岸偏移幅度大，形成更明顯之坡降優勢所致。

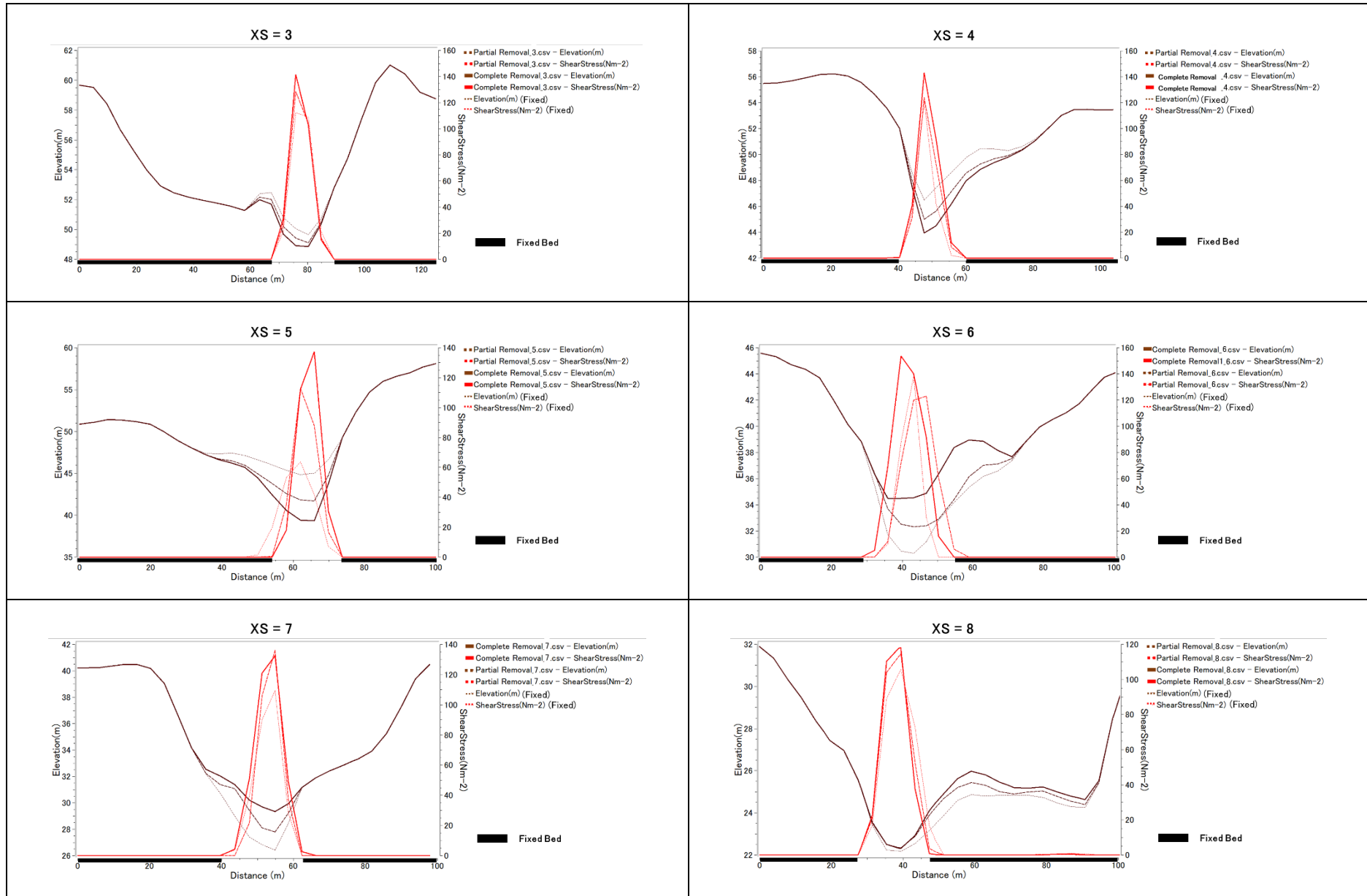


圖 4-17 代表性斷面在不同拆除情境之底床高程與剪應力（固定河岸）

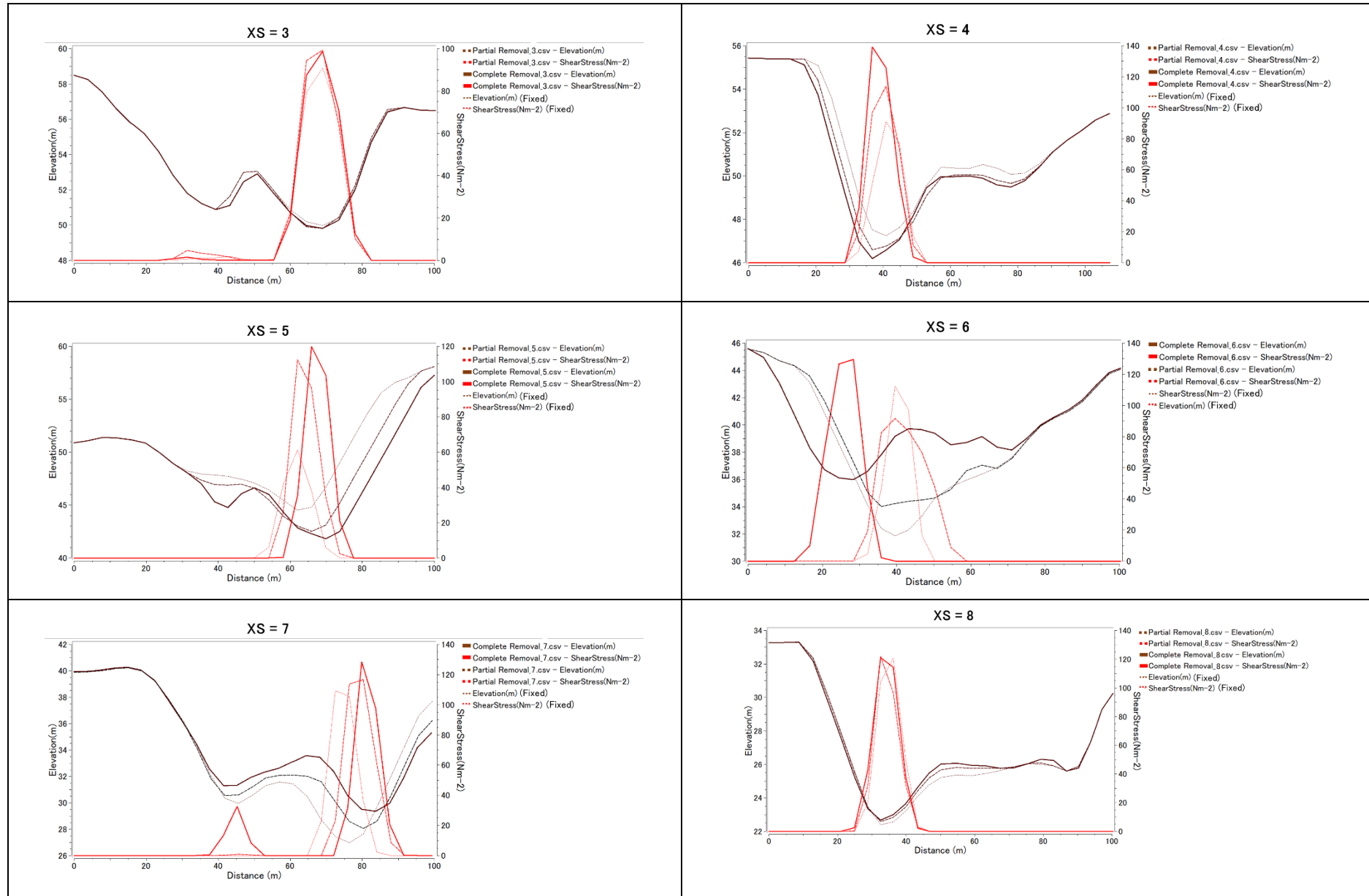


圖 4-18 代表性斷面在不同拆除情境之底床高程與剪應力（可移動河岸）

第五節 敏感度分析

為了解各參數對河床變動之影響，本計畫分別針對交換層與堆積層厚度、安息角等參數進行敏感度測試，設定組合如表 4-5、表 4-6。由於交換與堆積層厚度為輸砂參數，安息角則主要影響床形變化，因此本計畫將以沖淤深度作為分析指標。

交換層與堆積層厚度之設定係根據 Nays2DH 手冊建議，分別為最大粒徑及最大粒徑之兩倍，本計畫測試將交換層與堆積層厚度改為原先之 2 倍及 0.5 倍，分別設定為情境 1 及情境 2，比較模擬之平均粒徑差異，旨在探討厚度在合理變動範圍內高估與低估情況下對模擬結果的影響。本計畫推測當交換層厚度成長一倍後，模式將更容易判斷交換層已被侵蝕殆盡，使分選效應較不顯著；相對的，當交換層厚度減少一倍後，模式將更容易判斷尚有交換層可供交換，故分選效應較為明顯。結果顯示，隨著交換層與沉積層厚度增加，整體平均粒徑下降，但差異不大，顯示參數較不敏感。分選效應較顯著之區域圍堰下游區彎道六，位在洪水結束後的彎道外岸位置（圖 4-19），從下圖可見平均粒徑呈現交換層厚度增加，平均粒徑減少的趨勢（圖 4-20）。另外，之所以呈現平均粒徑粗化以及細化再粗化的原因係因剛開始水流侵蝕造成粗化，退水時剪應力減少細顆粒沉降造成細化，最後在退水過程中水流逐漸集中到目前的位置，細顆粒再度被帶走，造成河床粗化。

在安息角的部分，本計畫原先選擇手冊建議之安息角為 30° 。考量到本研究區域屬寬級配，除了卵礮石以外還有約 13~22% 的砂石，而小顆粒泥砂可能透過填補大顆粒之間的孔隙進而提升其安息角 (Yang et al., 2009)，而礮石的水下安息角最大接近 40° (Cobb, 2008)，

因此本計畫挑選 35° 與 40° 進行敏感度測試。從表 4-6 比較安息角 30° 與 40° 之沖淤深度差異可發現，最大淤積深度減少了 0.050 公尺、最大侵蝕深度增加了 0.327 公尺、平均淤積深度減少 0.015 公尺、平均侵蝕深度則增加 0.035 公尺。本計畫推測在安息角增加後，河道更不易發生崩塌，較易出現局部較大的淤積與沖刷深度。然而，結果卻顯示安息角增加時淤積深度下降，觀測彎道一接近洪峰後（模擬時間 16.5 小時）之結果可發現，安息角較大時右岸河床坡度更為陡峭，且左岸有侵蝕溝；當安息角為 30° 時左岸並無明顯之侵蝕溝，推測係因左岸發生崩塌，使河床淤平所致。侵蝕溝使水流部分集中，造成模擬結束時（模擬時間 25 小時）安息角較大的斷面雖然在主深槽下切得較深，但是在內岸卻無法淤高，藉此回應安息角增加時，最大淤積深度反而下降之趨勢。成果如圖 4-21 所示。

表 4-5 輸砂參數敏感度測試

情境	交換層厚度 (m)	沉積層厚度 (m)	平均粒徑 (mm)
現況	0.3048	0.6096	134.071
情境 1 (2 倍)	0.6096	1.2192	134.046
情境 2 (0.5 倍)	0.1524	0.3048	130.938

表 4-6 安息角敏感度測試結果之沖淤差異

安息角 ($^\circ$)	最大 淤積深度 (m)	最大 侵蝕深度 (m)	平均 堆積深度 (m)	平均 侵蝕深度 (m)	平均 沖淤深度 (m)
30	4.539	5.031	0.555	0.890	0.104
35	4.503	-5.212	0.548	0.900	0.102
40	4.488	-5.358	0.539	0.924	0.086

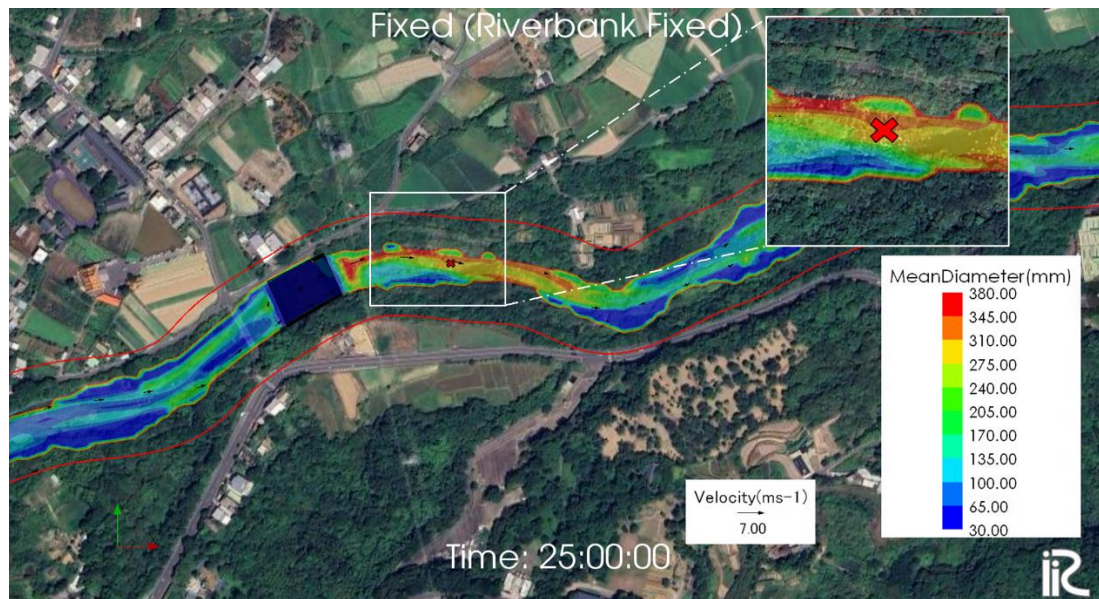
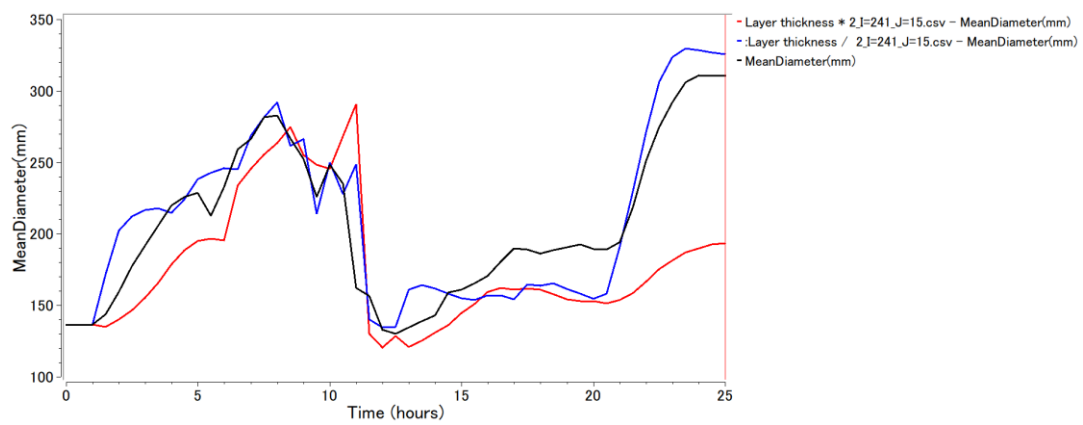
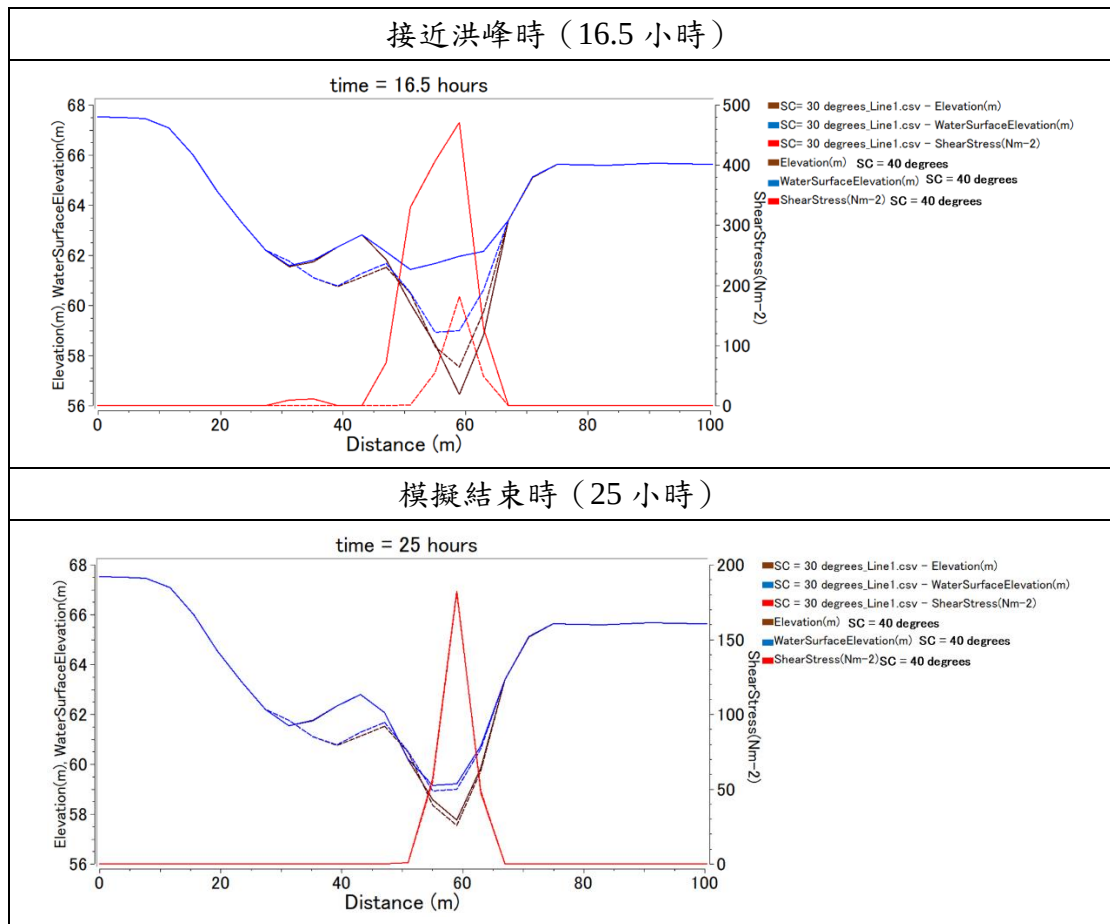


圖 4-19 平均粒徑觀察點



註：黑線為現況；紅線為情境 1；藍線為情境 2。

圖 4-20 平均粒徑觀察點在不同情境隨時間變化



註：紅色方框及線段為安息角(30°)；藍色方框及線段為安息角(40°)。

圖 4-21 彎道斷面之河床高程、水面高程與剪應力

第六節 蜿蜒特徵分析

一、堰體拆除前

本計畫採用 MStaT 工具，根據河道主深槽進行蜿蜒特徵計算及分析，主要評估指標包括蜿蜒度(sinuosity)、平均振幅(average amplitude)與平均弧波長(average arc wavelength)。圖 4-22 為是在固定河岸情境下蜿蜒特徵在不同拆除情境下之變化。結果顯示，雖然固定河岸情境限制了河岸侵蝕，但是蜿蜒特徵仍隨拆除程度呈現上升趨勢。具體來看，堰上游彎道因下切幅度增加，導引水流朝外岸集中；堰下游彎道則因其內岸淤積更甚，導致水流偏向外岸，因而促使河道蜿蜒特徵上升。

二、堰體拆除後

圖 4-23 為是在可移動河岸情境下蜿蜒特徵在不同拆除情境下之變化。結果顯示，隨著拆堰程度增加，蜿蜒特徵呈上升趨勢。相較於固定河岸情境，可移動河岸情境提供更多橫向調整空間，因此蜿蜒特徵相較更高。再者，外岸發生侵蝕後將使曲率增加，進一步強化二次流作用，帶動內岸淤積、外岸侵蝕的正回饋效應（沙洲推進）。此外，河岸侵蝕同時提供更多側向來砂，使內岸淤積增加，主流導向外岸程度增加，形成外岸侵蝕、內岸淤積的正回饋效應（河岸拉動）。故在蜿蜒特徵方面，可移動河岸情境展現更顯著的增幅。

為了解河道在縱向上之遷移率變化，本計畫進一步量化發生一次 Q_{20} 事件後的蜿蜒遷移率。表 4-7 為堰部分拆除與完全拆除情境之平均與最大遷移率，圖 4-24 為在可移動河岸情境下河道中心線遷移平面圖；圖 4-25 為不同拆除情境下蜿蜒遷移率隨縱向距離之變化。分析結果顯示，蜿蜒遷移率最大位於堰體原址處（彎道六），本計畫推測係因攔河堰鄰近彎道，拆堰後水流路徑受彎道幾何所控制，造成外岸流速集中，使得拆堰後侵蝕下切帶來之泥砂大量沉積於堰體下游鄰近彎道之內岸，促進橫向遷移；再者，完全拆除情境均大於部分拆除情境，顯示河岸侵蝕程度隨堰拆除程度增加。

表 4-8、表 4-9 為各情境之蜿蜒特徵及其增幅。在六組模擬情境中，「完全拆除、可移動河岸」情境之蜿蜒特徵最顯著，顯示同時恢復縱向輸砂連續性與河岸侵蝕能力最有助於促進蜿蜒，與「不拆除、固定河岸」情境相比，平均振幅、蜿蜒度與平均弧波長分別提高 22.13%、1.51%與 2.59%。在三種拆堰程度下比較固定岸與可動岸，啟用河岸可動性帶來的平均振幅增幅為 7.98~20.74%；蜿蜒度增幅為 0.38~1.13%；平均弧波長增幅為 0.43~0.95%，顯示河岸可動性增強了拆堰帶來之蜿蜒促進效果，且在較高拆除程度下此差距更為明顯。

表 4-7 部分拆除與完全拆除情境之蜿蜒遷移率（可移動河岸）

單位： m/event（一次洪水事件）	部分拆除	完全拆除
平均蜿蜒遷移率	1.95	2.98
最大蜿蜒遷移率	12.78	22.9

表 4-8 各情境之蜿蜒特徵

蜿蜒特徵/情境	固定河岸			可移動河岸		
	不拆除	部分拆除	完全拆除	不拆除	部分拆除	完全拆除
蜿蜒度	1.062	1.065	1.066	1.066	1.075	1.078
平均振幅(m)	25.31	25.61	25.60	27.33	30.26	30.91
平均弧波長(m)	218.51	221.49	222.04	220.47	222.44	224.16

表 4-9 各情境之蜿蜒特徵增幅

堰體拆除和河岸可動性	Δ 平均振幅 (%)	Δ 蜿蜒度 (%)	Δ 平均弧波長 (%)
堰體拆除 (固定河岸)	1.15-1.19	0.28-0.38	1.36-1.62
堰體拆除 (可移動河岸)	10.72-13.10	0.84-1.13	0.89-1.67
河岸可動性	7.98-20.74	0.38-1.13	0.43-0.95
「完全拆除、可移動河岸」v.s 現況 (堰不拆除、固定河岸)	22.13	1.51	2.59

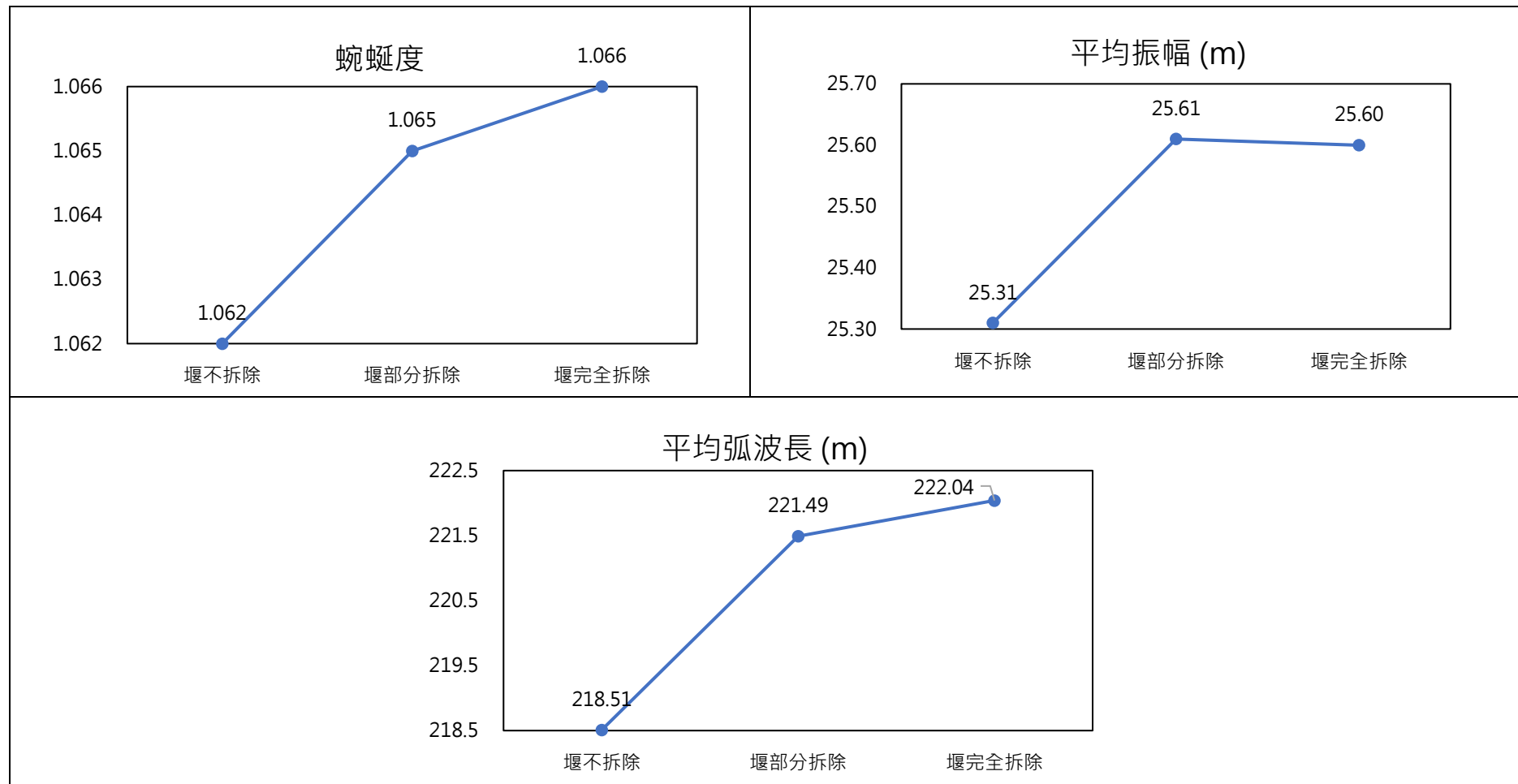


圖 4-22 蜿蜒特徵在不同拆除情境之變化（固定河岸）

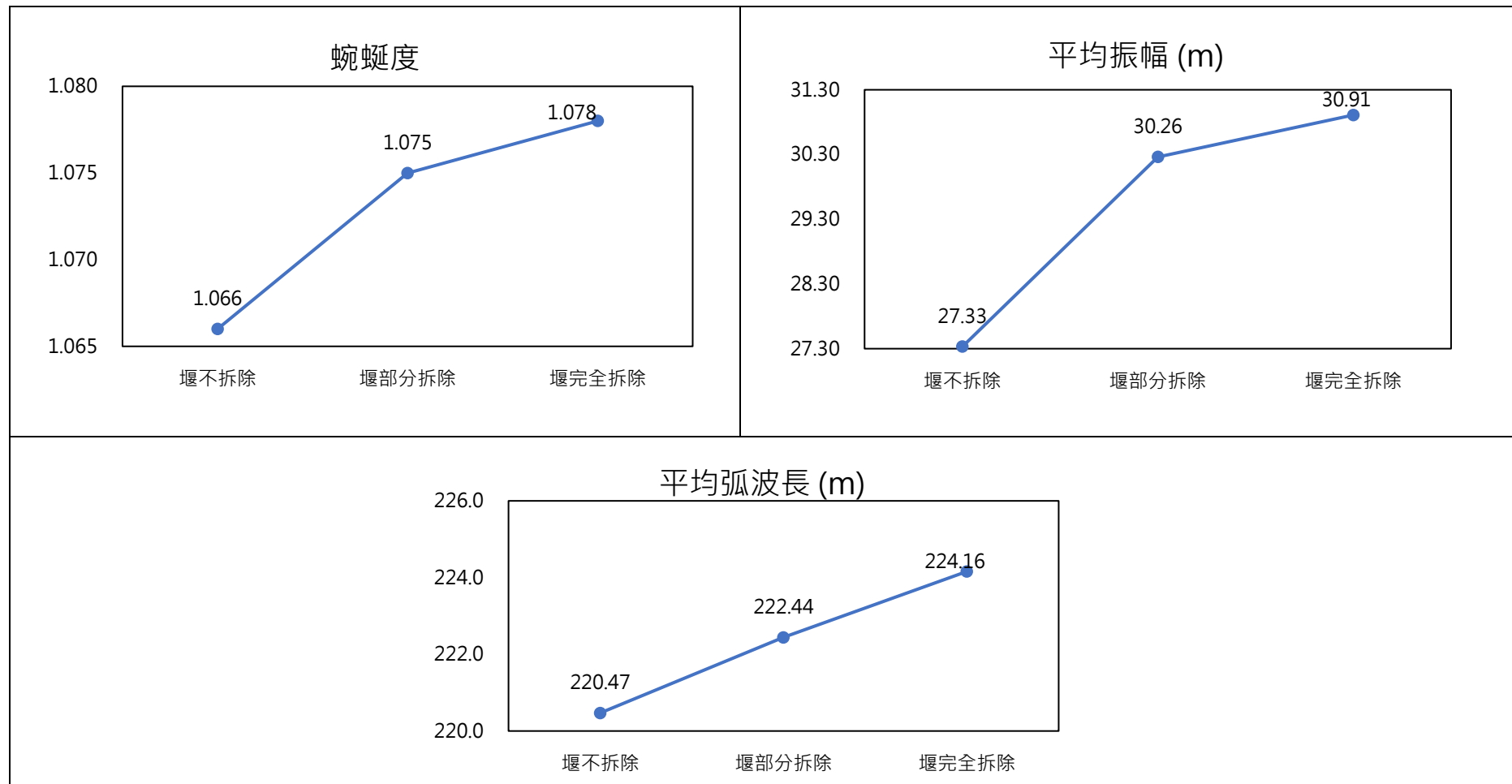


圖 4-23 蛇迴特徵在不同拆除情境之變化（可移動河岸）

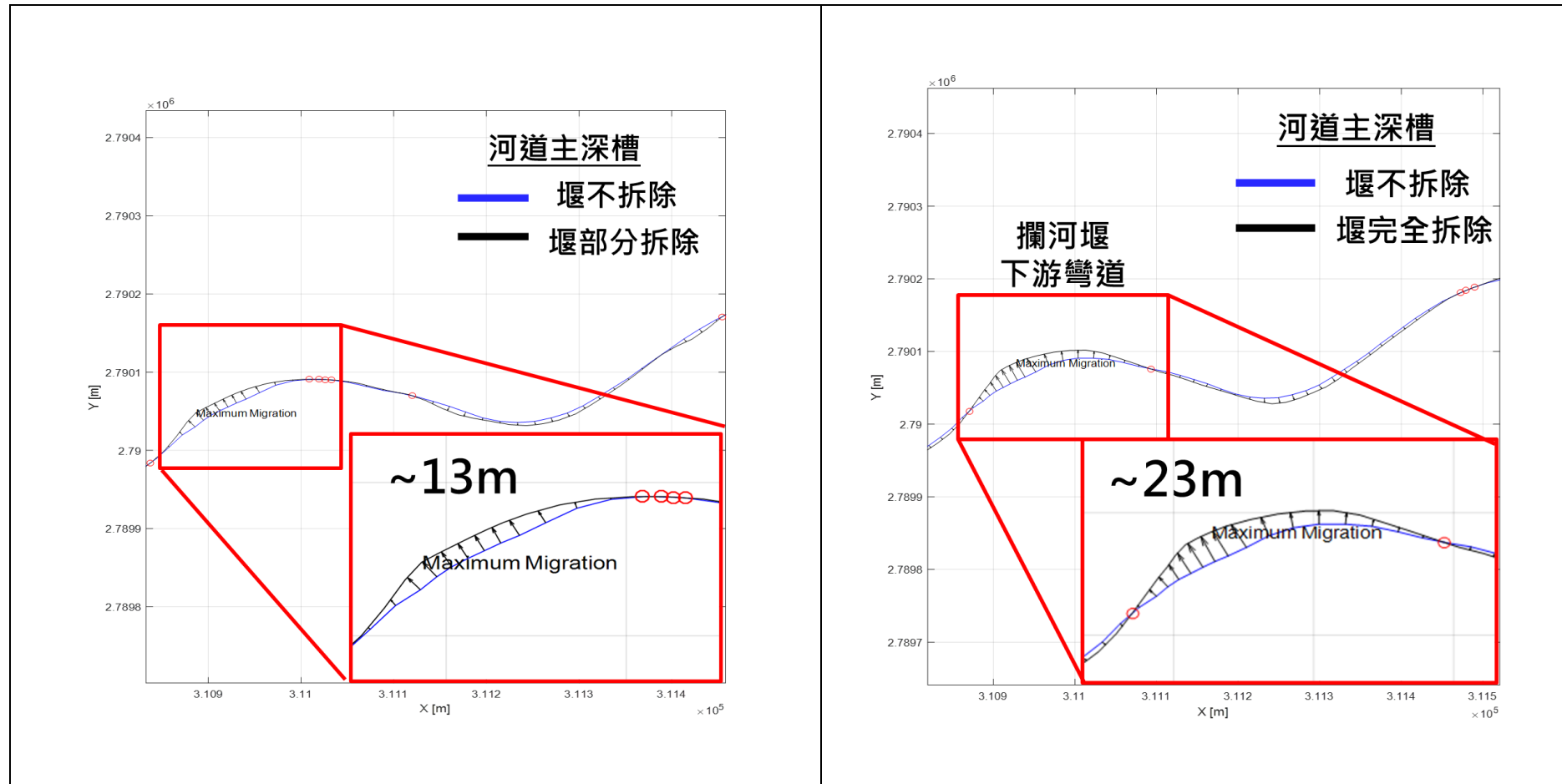


圖 4-24 在部分拆除與完全拆除情境時河道中心線遷移平面圖（可移動河岸）

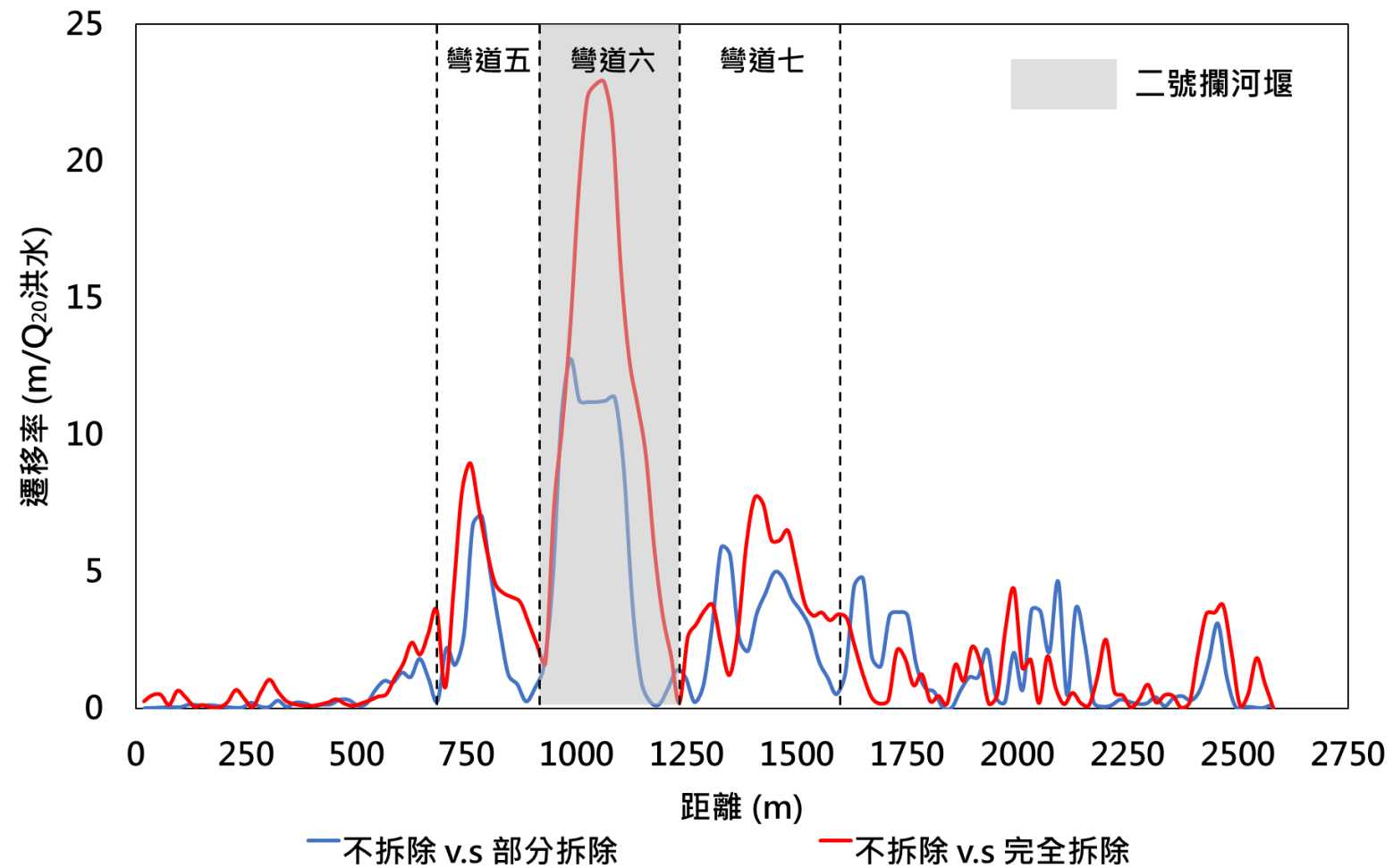


圖 4-25 部分拆除與完全拆除情境時蜿蜒遷移率隨距離變化

第五章 綜合討論與工程應用

第一節 蜿蜒化與潭瀨棲地貢獻

潭瀨結構在蜿蜒河道中與彎道位置高度相關，深潭多位於彎道外側深槽，淺瀨則多出現在彎道之間的直線段(Keller, 1972)。根據前述，潭瀨結構間距通常約為河寬的 5-7 倍(Leopold & Wolman, 1957)，顯示彎道流況可能具有維繫潭瀨結構的功能。本計畫旨在探討堰體拆除後對蜿蜒促進之效果，結果發現拆堰有助於促進蜿蜒，雖本計畫並無進一步針對生物棲地作分析，但根據前人研究可合理推論蜿蜒棲地較具生態潛能，包括提高棲地多樣性與維護潭瀨棲地。

當河道流量低於生態基流量時，可能導致無法形成魚類休息躲避之深潭，破壞潭瀨棲地之連續性，進一步導致棲地連接度下降。然而，蜿蜒河道因其形貌特徵與二次流，更容易形成潭瀨結構，在面對流量變化時可能更具有維繫棲地之韌性。本計畫成果指出，若想在具蜿蜒潛勢之河段促進蜿蜒形貌，可透過工程手段恢復輸砂連續性與河岸侵蝕能力，其中又以恢復河岸侵蝕能力為優先，藉此形塑蜿蜒形貌，達到維持潭瀨棲地之目的。

第二節 拆堰與輸砂連續性對底質的影響

河床底質與潭瀨棲地息息相關，例如淺瀨一般形成較粗顆粒泥砂，而深潭則形成細顆粒泥砂。礪溪主流在攔河堰未拆除時，在堰下游區因餓水效應(hungry water)而形成較粗顆粒之底質；堰體拆除後，上游細顆粒泥砂輸送至下游，使堰下游區之泥砂明顯細化，而堰上游區之底質則因此粗化。此外，上游釋放之泥砂亦進一步形塑了下游的河曲砂州，形成蜿蜒形貌。總的來說，攔河堰除了阻擋了生物通道之外，亦透過阻斷泥砂連續性而使棲地變得單一，例如在堰下游造成粒徑粗化，堰上游則造成粒徑細化，同時還導致堰體下游難以形成河曲砂州，抑制蜿蜒形貌之形成。因此，本計畫亦建議為了恢復河床底質之異質性與河道形成河曲砂州之能力，應恢復縱向輸砂連續性。

第三節 促進蜿蜒之優先順序

根據表 4-9 之結果，可看出恢復河岸侵蝕能力對平均振幅與蜿蜒度之增幅更為顯著。在相同拆除情境下，可移動河岸帶來之蜿蜒度增幅比起單純拆堰更顯著（圖 5-1）；從平均振幅增幅亦可發現，可移動河岸帶來之增幅較堰體拆除更顯著，而兩者同時實施最顯著（圖 5-2）。因此，針對促進蜿蜒之工程，可優先從恢復河岸侵蝕能力下手，並將目標設為同時恢復縱向輸砂連續性（堰體拆除）與河岸侵蝕能力（可移動河岸）。為了平衡河岸安全與河道遷移空間，本計畫建議可以透過設定

觀察線(observation line)和干預線(intervention line)的雙重邊界，即河岸在觀察線內可自由侵蝕，而干預線的位置離河道較遠，為最大允許侵蝕線，需透過護岸、拋石等方式進行保護，以此在有限的河川廊道內最大化生態效益。

此外，本計畫在恢復河岸侵蝕能力情境中未考慮根據保全對象設置之護岸，假想為一自由侵蝕之情境，藉此證明恢復河岸侵蝕能力之貢獻，未來尚需根據保全對象在模式中設定對應之「固定床」位置，重新評估蜿蜒促進成效。

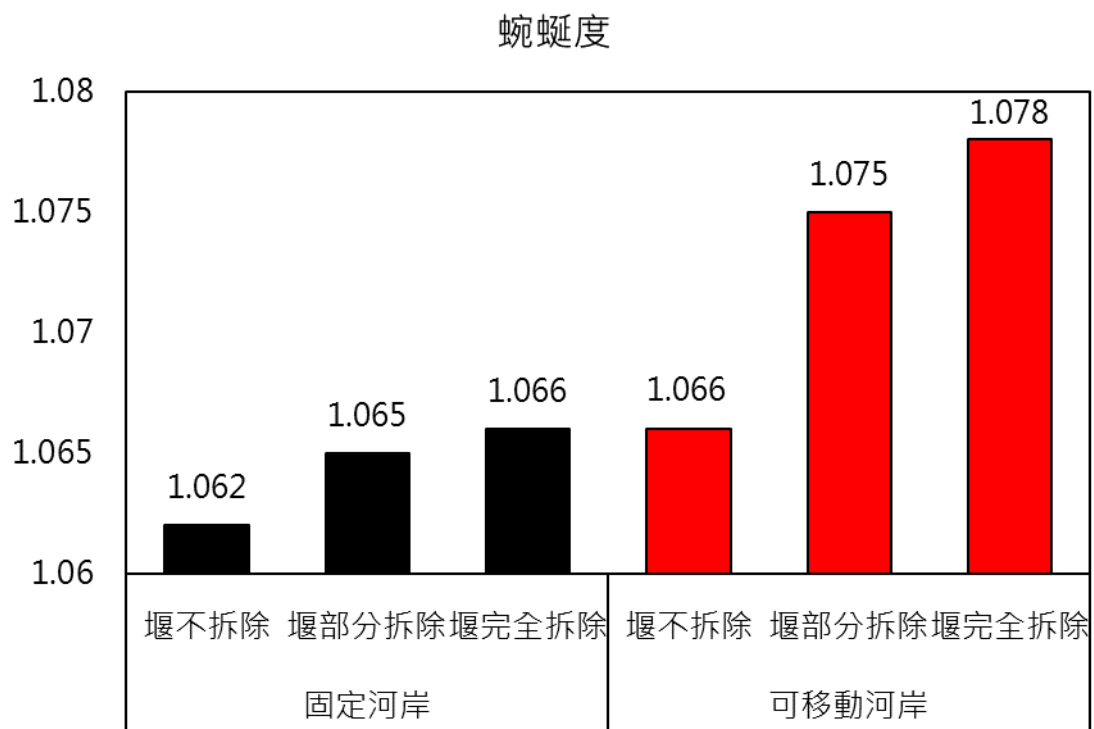


圖 5-1 蜿蜒度在各情境之比較

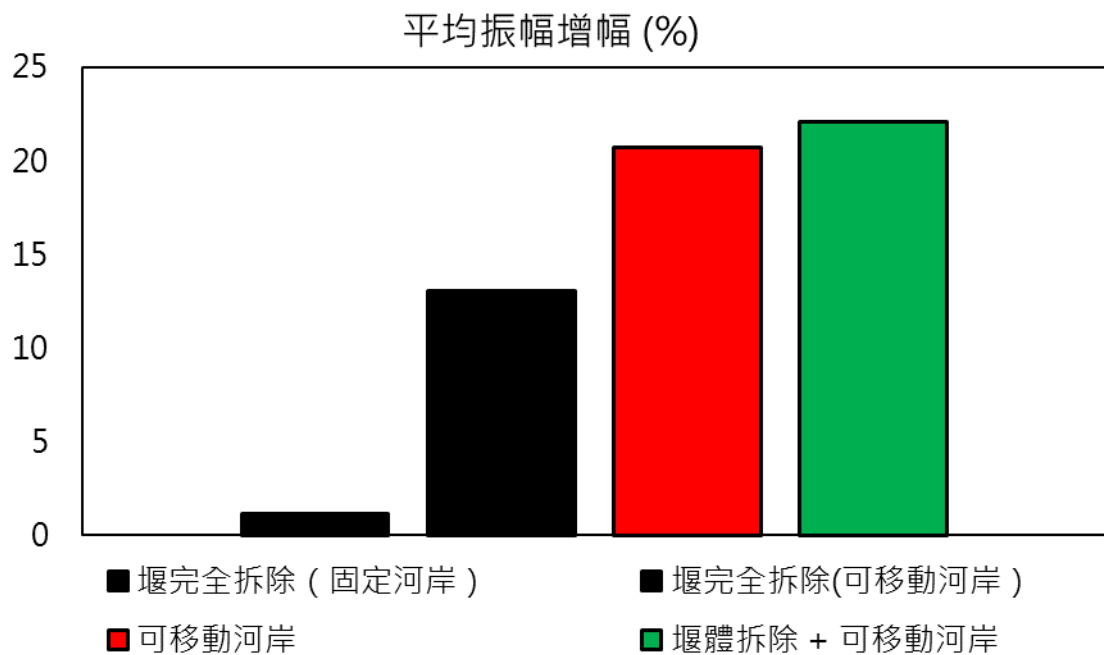


圖 5-2 平均振幅增幅在各情境之比較

第四節 潛在风险分析與策略

堰體拆除帶來大量泥砂，對於彎道而言，可能造成外岸侵蝕加劇，危及河岸保全對象。再者，泥砂堆積造成河床抬升，可能使河床變淺，提升洪氾機率。對此，本計畫根據最大遷移率、最大侵蝕與堆積深度、推移載隨時間變化界定風險並提出實務建議。

根據表 5-1，彎道四、彎道五、彎道六、彎道七是地貌變動最劇烈的區域。最大蜿蜒遷移率的位置可能對河岸的農地、道路造成影響；最大侵蝕深度的位置則可能造成崩塌；最大淤積深度的位置主要是彎道內岸，象徵其外岸的侵蝕可能也相對較高。其中，彎道五至彎道七為河岸侵蝕風險區（圖 5-3），本計畫建議其河岸需設為緩衝區，緩衝區寬

度在最脆弱的情境中需 23 公尺（圖 5-4）。另外，彎道六與彎道七之淤積主要位於彎道內岸，有潛勢進一步塑造為河岸棲地。然而，彎道七下游亦有明顯堆積，且主要位於河道內，容易造成河床變淺，增加洪氾風險，建議應進行清淤（圖 5-5）。

根據圖 5-6 可觀察到在堰完全拆除情境中，推移載輸砂量隨時間之分佈呈現雙峰，第一次出現在第七~第八小時左右（本文稱之為坡度峰值），第二次則是第十三小時（本文稱之為流量峰值），說明堰完全拆除時因侵蝕基準面快速下降，造成輸砂量在流量峰值之前就先出現坡度峰值，除此之外大致呈現流量越大、推移載輸砂量越大之趨勢。本計畫建議，拆堰應在低流量期間進行，在低流量時拆堰，待坡度峰值隨自然流量帶往下游之後，再釋放流量峰值，避免河道同時負荷兩股推移載峰值。

表 5-1 潛在風險與位置

風險	位置與情境
最大蜿蜒遷移率	彎道六 彎道四（可移動河岸：部分拆除） 彎道五（固定河岸：部分拆除、完全拆除；可移動河岸：完全拆除）
最大侵蝕	彎道六（固定河岸：不拆除） 彎道七（可移動河岸：不拆除） 彎道一（固定河岸：不拆除）
最大淤積	彎道六（固定河岸：部分拆除、完全拆除） 彎道七（可移動河岸：所有情境）

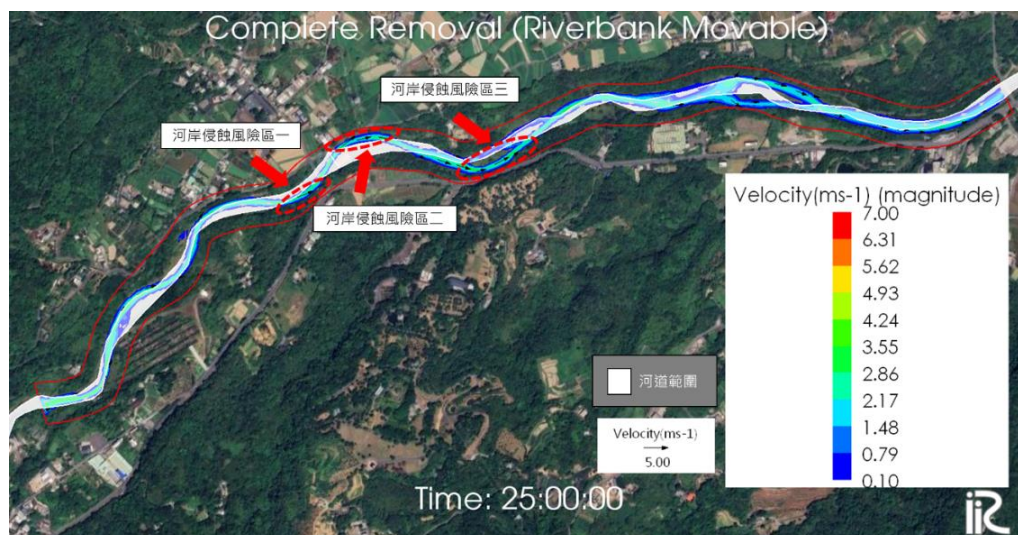


圖 5-3 河岸侵蝕風險區

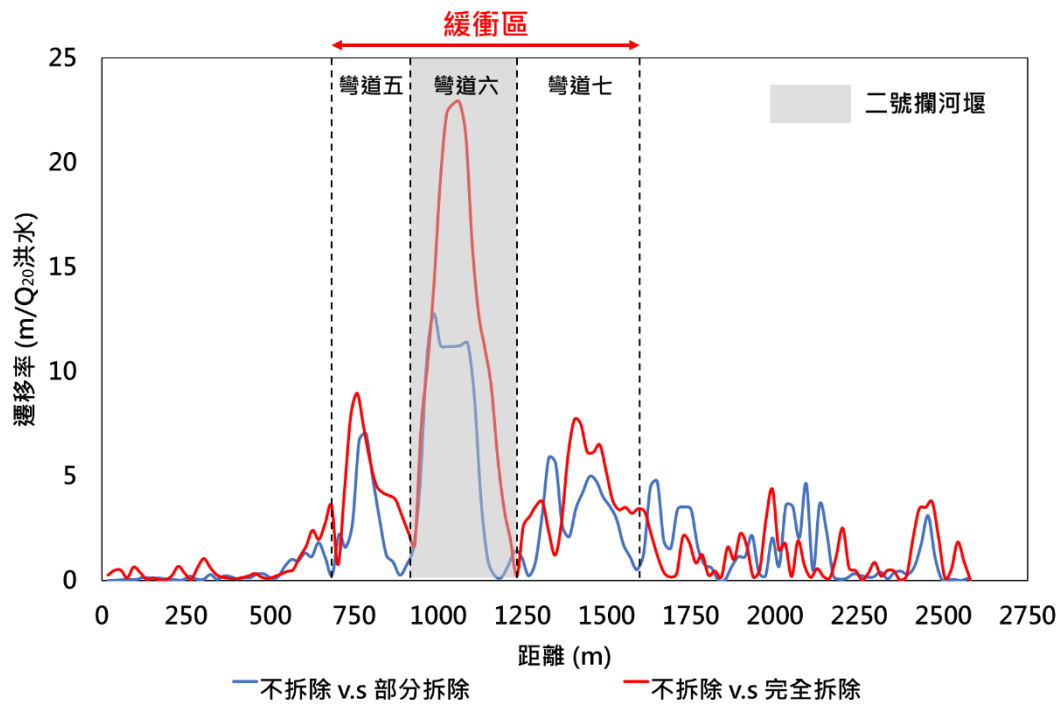


圖 5-4 河岸緩衝區位置

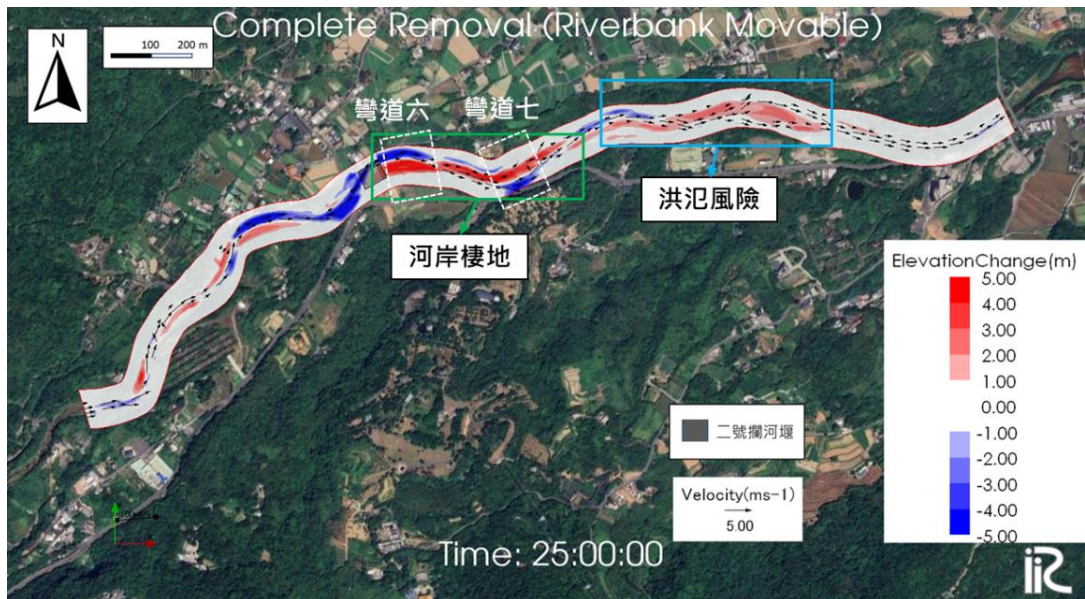


圖 5-5 完全移除、可移動河岸情境中河岸潛勢棲地與洪氾風險位置

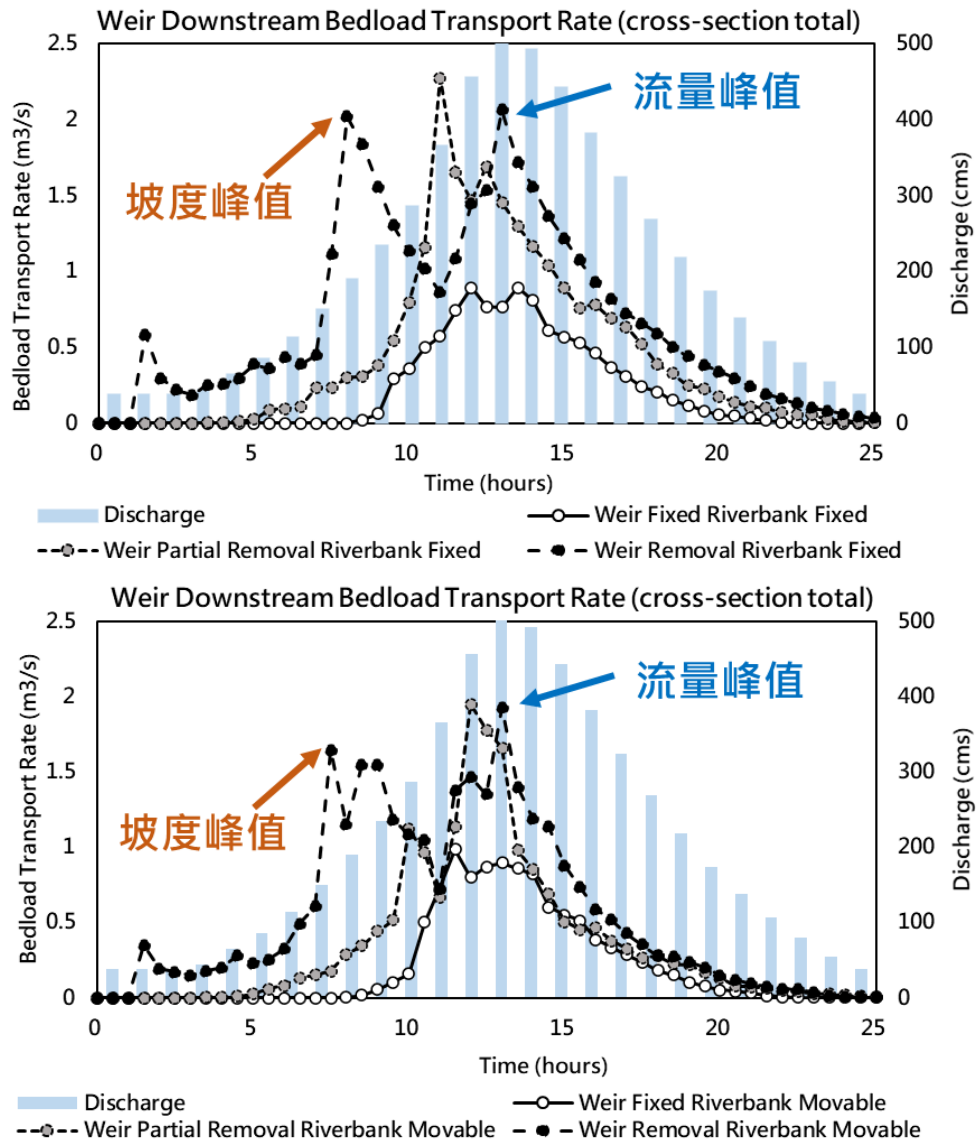


圖 5-6 推移載輸砂量之坡度峰值與流量峰值（上圖：固定河岸；下圖：可移動河岸）

第五節 情境評估與決策建議

本計畫模擬了六組情境，針對促進蜿蜒之目標，研究結果指出完全拆除、可移動河岸最有效促進蜿蜒。然而，實務上基於土地規劃、洪氾風險、下游生態等因素，不宜單以促進蜿蜒為目的。本小節根據各拆除策略提出對應之優缺點，供管理者參考。

在現況（堰不拆除、固定河岸）中，洪水將加劇堰下游下切問題，需進一步針對下游河床進行保護。相對的，堰拆除情境則會造成向源侵蝕與下游淤積，沖淤程度隨拆堰程度增加。上游需注意河床侵蝕造成崩塌，下游需注意過度淤積造成之洪氾風險。其中，可移動河岸之上游侵蝕與下游淤積距離較固定河岸更短，但是河岸侵蝕更為顯著，若是可移動河岸情境需在河岸設定緩衝區。再者，可移動河岸之淤積高度高於固定河岸，需在高風險區域進行清淤，而彎道內岸之淤積則有潛勢作為棲地營造之用（圖 5-5）。模擬結果顯示，所有拆堰情境皆會產生推移質載輸砂量之坡度峰值與流量峰值，因此本計畫建議應在低流量時進行拆堰，避免兩股峰值疊加對河川造成劇烈影響。最後，堰完全拆除、可移動河岸情境在一場洪水（25 小時）之後會產生分流，河道辮狀化程度增加。辮狀河快速且持續之變化，提升了河道之不穩定性，增加了管理風險。站在管理者的角度，本計畫建議為促進蜿蜒最甚可執行至部分拆除、可移動河岸，並不一定需達完全拆除的程度。整體決策圖可參照圖 5-7。

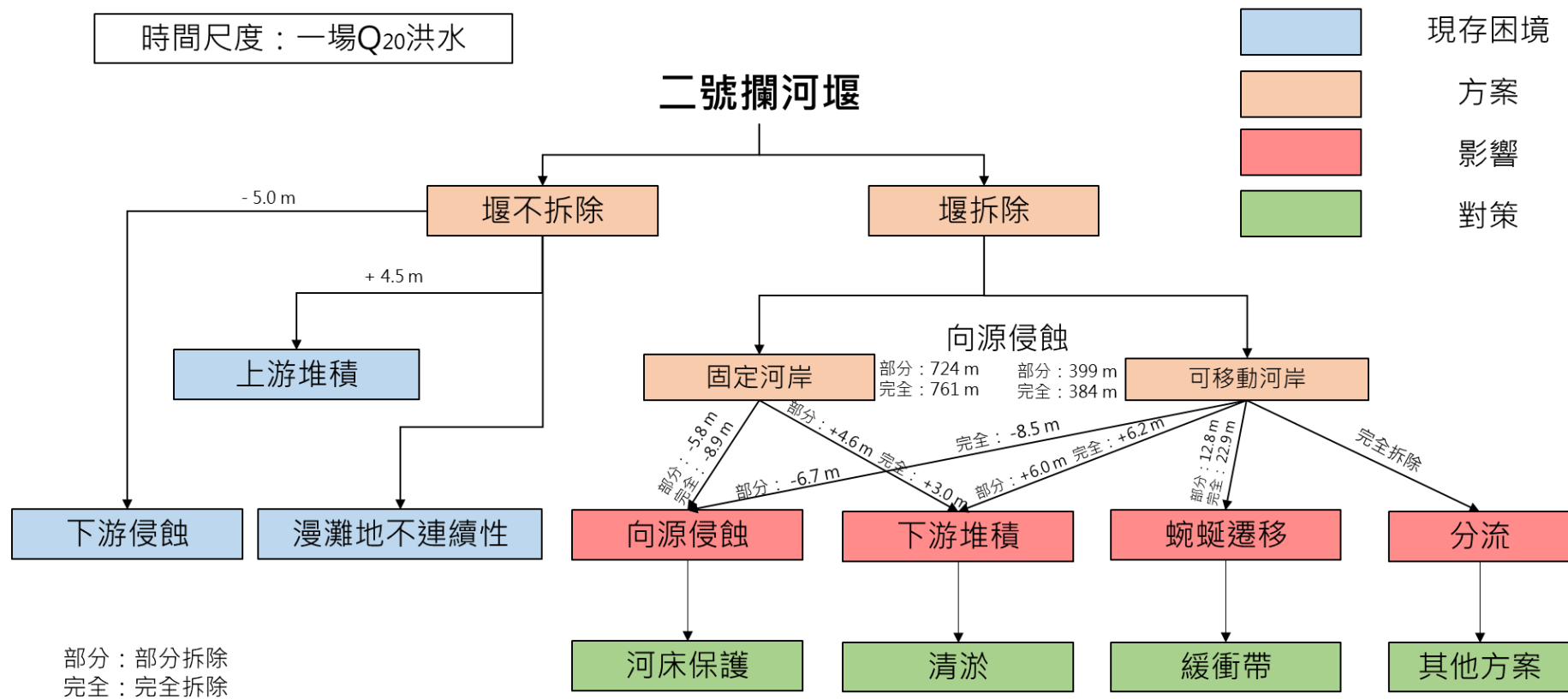


圖 5-7 堰壩移除風險管理與應變計畫總圖

第六章 結論與建議

本計畫首先釐清研究區域河道形貌之特性（蜿蜒、瓣狀、直線化之間的演變機制），接著進行礮溪主流現況、拆堰、可移動河岸情境之模擬，同時根據過去資料進行沖淤深度之驗證，完成現況情境之水動力分析、沖淤分析、代表性斷面分析、敏感度分析與蜿蜒特徵分析。本計畫整體研究重點目標係探討堰體移除與河岸可動性是否能夠促進河道蜿蜒演化，透過比較不同拆除情境（堰不拆除、堰部分拆除、堰完全拆除）與不同河岸條件（固定河岸、可移動河岸）之情境，釐清促進蜿蜒之主要影響因子。

本年度已完成原訂計畫的所有工作，研究成果重點說明如下：（一）透過水動力與沖淤變化分析，了解礮溪形貌變化主要以彎道為主，其表現為外岸侵蝕、內岸淤積，符合普遍蜿蜒河道之形貌變化特徵；（二）選定代表性斷面，除了可觀察現況情境底床高程與剪應力之時序變化外，後續可直接利用移除情境之斷面結果套疊進行比較，具體比較堰體移除對彎道之影響。（三）透過敏感度分析，了解 Nays2DH 模式之特性，可知交換層與堆積層厚度為較不敏感之參數，而安息角則較為敏感，須審慎設定。（四）河岸侵蝕程度隨拆堰程度增加，為避免因過於劇烈之形貌變動影響周遭農田、住戶，建議可採部分拆除或階段性拆除策略。（五）堰體拆除與河岸侵蝕能力有助於促進蜿蜒，其中又以河岸侵蝕能力更為顯著，未來在針對中高坡度具蜿蜒特征的河道而言，針對其形貌復育或蜿蜒化工程需特別強調其河岸侵蝕能力與縱向輸砂連續性，特別需以河岸侵蝕能力為優先，例如移除堤防、護岸等。（六）針對礮溪需避開洪水期以錯開輸砂峰值，並需在特定彎道（如彎道五至彎道七）預留緩衝區以應對河岸侵蝕風險，並在可移

動河岸情境中特別監測彎道六之蜿蜒遷移。

本計畫於中高坡度具蜿蜒特徵的河道之管理策略建議如下：(1) 優先恢復河岸侵蝕能力（如移除堤防、護岸），其對蜿蜒促進效果顯著高於單純拆堰；(2) 採取階段性或部分拆除策略，以平衡生態復育與保全對象安全；(3) 透過恢復縱向輸砂連續性與河岸侵蝕能力，形塑蜿蜒形貌，維持潭、瀨、流結構棲地，提升棲地多樣性與生物廊道連接度。另外，本計畫建立的模式架構與分析方法可延伸至其他具類似特性的野溪或河川，並可進一步整合長期監測資料，探討多次洪水事件累積效應與河道達到新沖淤平衡所需時間。此外，尚可結合生態特性、棲地結構等調查資料，量化蜿蜒形貌變化對魚類群聚與棲地品質的實際影響，為河川生態系統管理提供更全面的科學依據。

參考文獻

1. Amanambu, A. C., Mossa, J., Serafin, K. A., & Binford, M. (2024). Hydrological drought and floodplain disconnectivity: quantifying flow thresholds in a large coastal plain river. *Hydrological Sciences Journal*, 69(16), 2436-2454.
2. Asada, H., & Ishikawa, H. (1972). *Study on selective transportation of river bed materials* (3).
3. Ashida, K., Egashira, S., Liu, B., & Umemoto, M. (1990). Sorting and bed topography in meander channels. *Annals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 33, 1-19.
4. Ashida, K., & Michiue, M. (1972). Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams. *Proceedings of the Japan society of civil engineers*,
5. Cobb, F. (2008). *Structural Engineer's Pocket Book* (2nd Edition: British Standards Edition ed.). s.n.
6. Eke, E., Parker, G., & Shimizu, Y. (2014). Numerical modeling of erosional and depositional bank processes in migrating river bends with self-formed width: Morphodynamics of bar push and bank pull. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 119(7), 1455-1483. <https://doi.org/10.1002/2013jf003020>
7. Engelund, F. (1974). Flow and bed topography in channel bends. *Journal of the Hydraulics Division*, 100(11), 1631-1648.
8. Friedkin, J. F. (1945). *A laboratory study of the meandering of alluvial rivers*. United States Waterways Experiment Station.
9. Greenberg, E., & Ganti, V. (2024). The pace of global river meandering influenced by fluvial sediment supply. *Earth and Planetary Science Letters*, 634, 10, Article 118674. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118674>
10. Holusová, A., Poledníková, Z., Vaverka, L., & Galia, T. (2023). Spatiotemporal dynamics and present perception of gravel bars in

- natural and regulated environments. *Science of the Total Environment*, 892, 13, Article 164711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164711>
11. Hsu, S. Y., & Hsu, S. M. (2022). Morphological evolution mechanism of Gravel-bed braided river by numerical simulation on Da-jia River. *Journal of Hydrology*, 613, 16, Article 128222. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128222>
 12. Iwagaki, Y. (1956). (I) Hydrodynamical study on critical tractive force. *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, 1956(41), 1-21.
 13. Iwasaki, T., Shimizu, Y., & Kimura, I. (2016). Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River. *Advances in Water Resources*, 93, 118-134. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.02.001>
 14. Jackson, J. R., Pasternack, G. B., & Wheaton, J. M. (2015). Virtual manipulation of topography to test potential pool-riffle maintenance mechanisms. *Geomorphology*, 228, 617-627. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.016>
 15. Keller, E. (1972). Development of alluvial stream channels: a five-stage model. *Geological Society of America Bulletin*, 83(5), 1531-1536.
 16. Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1957). *River channel patterns: braided, meandering, and straight*. US Government Printing Office.
 17. Martin, H., Edmonds, D., & Lewis, Q. (2024). Four years of meander-bend evolution captured by drone-based lidar reveals lack of width maintenance on the White River, Indiana, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(6), e2023JF007574.
 18. Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport.
 19. Mount, N. J., Tate, N. J., Sarker, M. H., & Thorne, C. R. (2013). Evolutionary, multi-scale analysis of river bank line retreat using continuous wavelet transforms: Jamuna River, Bangladesh.

- Geomorphology*, 183, 82-95.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.017>
20. Nagata, T., Watanabe, Y., Yasuda, H., & Ito, A. (2014). Development of a meandering channel caused by the planform shape of the river bank. *Earth Surface Dynamics*, 2(1), 255-270.
 21. Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*, 22(3), 169-199.
 22. Ruben, L. D., Naito, K., Gutierrez, R. R., Szupiany, R., & Abad, J. D. (2021). Meander Statistics Toolbox (MStaT): A toolbox for geometry characterization of bends in large meandering channels. *SoftwareX*, 14, 100674.
 23. Schumm, S. A. (1985). PATTERNS OF ALLUVIAL RIVERS [Review]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13, 5-27.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.13.050185.000253>
 24. Shimizu, Y. (2021). 蛇行河流河床變動計算 (實踐篇). Retrieved 2025 July 4 from https://i-ric.org/yasu/nbook2/11_Chapt11.html
 25. Venditti, J. G., Nelson, P. A., Minear, J. T., Wooster, J., & Dietrich, W. E. (2012). Alternate bar response to sediment supply termination. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 117, 18, Article F02039. <https://doi.org/10.1029/2011jf002254>
 26. Watanabe, A. (2001). Groin arrangements made of natural willows for reducing bed deformation in a curved channel. *Advances in River Engineering*, 7, 285.
 27. Yang, F.-g., Liu, X.-n., Yang, K.-j., & Cao, S.-y. (2009). Study on the angle of repose of nonuniform sediment. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 21(5), 685-691.
 28. 段紀湘 (2010)。防砂壩壩體移除之模型試驗－以七家灣溪一號壩為例。逢甲大學水利工程與資源保育研究所。
 29. 經濟部水利署第十河川局 (2017)。礮溪治理規劃檢討報告。
 30. 經濟部水利署第十河川局。(2020)。礮溪三和橋上游左岸防災

減災工程。

31. 經濟部水利署第十河川局（2022）。礮溪水系逕流分擔評估規劃暨流域整體改善與調適規劃(2/2)。
32. 邱彥瑜、廖仲達、游景雲、石棟鑫、葉克家（2016）。拆壩對河道影響評估——以大甲溪石岡壩為例。災害防救科技與管理學刊，5（2），79-97。https://doi.org/10.6149/jdm.2016.0502.04
33. 陳怡良、李光敦（2012）。階梯河道水流型態模擬與阻力分析。中華水土保持學報，43（2），97-108。
34. 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。

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	野溪具河床坡度陡、河床質粒徑較大、一般無常流水，依溪流治理分工此為水土保持署負責，請將歷年研究成果延伸至野溪治理應用層面，以吻合計畫需求。	感謝委員提醒及建議。本計畫會先以目前提出之研究區域為中心，研究河段具有坡度陡、粒徑大的特性，研究成果未來可供具有相關特性之野溪治理進行參考。亦將針對清水溪之河道特性，結合研究結果一併參考之。
二	核定經費為 700 仟元。	感謝貴署支持，已修正本計畫之經費編列。

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	摘要除列出計畫目的、工作項目、至期中階段完成項目、獲致之初步成果外，請補充後續待執行項目及期程。	感謝委員建議。本計畫已將期中階段列出之後續執行項目盡數完成，並將其成果列在摘要中。
二	請詳細比對河床坡度、地質等條件不同河段之差異性。	感謝委員建議。本計畫已將河床坡度在不同河段之差異性列在 P.2-14；地質差異則列於 P.2-2~P.2-3。
三	水土保持署之創新研究計畫為應用型計畫，請於期末報告提出具體可行之應用成果。	感謝委員建議。本計畫已將模擬成果之具體應用建議列在 P.6-1~P.6-2 的結論章中。
四	補充各方法的數據來源、分析步驟與參數設定，並在圖表中加入統計檢定與數值標註，以增加透明度與結果說服力。	感謝委員建議。本計畫針對參數設定另列了一欄「依據」作為各參數選擇之參考資料來源或推測依據（P.3-17）。另外，根據沖淤趨勢驗證之結果亦另新增了 MAE 之計算，列於 P.4-1。
五	在討論中明確連結水文變化與生態影響，並針對基流量下降或棲地連結性減弱提出具體管理策略與優先行動順序。	感謝委員建議。本計畫新增了「第五章 形貌變遷對棲地之潛在貢獻」章節（P.5-1~P.5-2），詳細討論河川形貌與棲地之間的關聯，並提出具體管理策略與優先行動順序。
六	P1-2 所提「堰體移除後因輸砂量增加將促進河道蜿蜒演化」假說，是否考慮增加時間因子，研究堰體移除後多久可達新沖淤平衡？	感謝寶貴建議。加入時間因子確實能夠使本計畫進一步深化，然而磺溪主流因缺乏流量實測資料，目前邊界條件採用 20 年重現期距流量，若用多次洪水事件疊加可能忽略實際情況中大流量造床、小流量穩定河床之過程，較缺乏實際物理意義。
七	P1-3 所提本案研究成果有助於營造或維持潭瀨結構，對於生態系保育維護有正面效益，惟水保署工程係	感謝寶貴建議。本計畫針對堰體拆除與河岸侵蝕能力兩個面向進行實驗設計，結果顯示提高河岸侵蝕能力能更

	為保全對象之安全而規劃設計，如何在維持或促進生態棲地及保全對象之安全間選擇，是否可提供衡量時需考慮之因子供水保署再移除堰體時參考？	有效促進蜿蜒（詳如 P.4-3~P.4-4）。另外，針對堰體拆除亦有「部分拆除」和「完全拆除」兩組情境，對於需顧及到河岸範圍保全對象之情況，可採取河岸變動程度較低之部分拆除方式。
八	P2-24 圖 2-11 請標註資料來源。	感謝委員提醒，已補上參考資料來源。
九	P6-1 「Nature-based Solutions」一詞字首請用大寫	感謝委員提醒，已修改完成。

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	後續可強化不同構造物種類所能形成的棲地情形，以供設計參考。	感謝委員建議。河工構造物建設之主要目的即為改變河川流場分布，如減小流速、提高水深等，對於生物棲地之影響十分直接且劇烈，此方面之研究仍仰賴後續更多科研能量投入，方能提供工程設計及施工方法上之參考依據。
二	提供河川水體動態對河道變遷之基礎資料，對於整體生態工程具有相當之貢獻。	感謝委員肯定。
三	研究成果針對中高坡度蜿蜒特徵的河道提出相關管理策略，其中移除堤防、護岸等，雖能促進蜿蜒效果，然過劇之河道形貌變動恐威脅兩岸之住戶、農田，應再考慮部分拆除策略。	感謝委員建議。堤坊、護岸為周邊聚落不受河水溢淹之屏障，於工程設計上確實應考量兩岸之住宅、農田、既有道路等是否會受堤防拆除之衝擊影響。本計畫以科學研究角度出發，提供科學研究之能量累積與方向指引，建議於實務執行上之應用須具備更加全面性之思考、規劃、溝通成果。