

國立臺灣大學生物資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所

碩士論文



Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's thesis

以數值模擬評估自然解方在河道防災與

生態保育效益——以港口溪為例

Evaluating Nature-based Solutions in River Disaster

Prevention and Ecological Conservation Using

Numerical Simulation—

A Case Study of Gangkou Creek

闕毓庭

Yu-Ting Chueh

指導教授：廖國偉 博士

Advisor: Kuo-Wei Liao, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July 2025



摘要

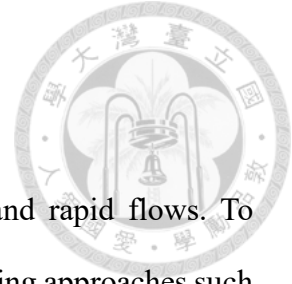
台灣溪流多為坡陡湍急的河道，為了有效抑制河床下切與侵蝕，傳統上多採用固床工等工程手法來進行治水防災。然而，這類剛性結構雖有助於土地安全，卻可能對河川生態造成干擾。為了在防災與生態保育之間取得平衡，現今逐漸導入自然解方（Nature-based Solutions, NbS）來改善傳統工程手法，以兼顧土地安全與生態永續。

為進一步探討自然解方在河川整治上的成效，以港口溪為案例進行分析。港口溪同樣具有坡陡湍急的特性，且長期受到侵蝕與下切影響，對周邊土地安全構成威脅。為評估不同降雨情境下河道的變化，本研究運用 HEC-RAS 水理數值模擬軟體，針對基流量及 2 年、10 年、25 年、50 年與 100 年重現期洪水進行模擬分析。透過模擬結果，將比較整治前後河道在不同重現期洪水下的水位變化、流速分佈及可能的溢淹範圍，以評估自然解方對河道穩定性及防災效益的影響，並為未來類似河川治理提供參考依據。

本研究針對豐富生態資源港口溪整治前後的環境變化進行分析，評估自然解方在河川治理中的應用成效。透過 HEC-RAS 模擬不同重現期洪水情境下的水理變化，進一步結合生物棲息地指標（Habitat Suitability Index, HSI）進行生態面向之評估，結合 NbS 全球 28 項指標進行評分，從生態系統健康、水文功能、土地安全與社會效益等面向，全面檢視整治措施對河道環境的影響。根據評分結果，提出具體的後續改善建議，以進一步提升防災效能與生態保育成果。本研究藉此驗證自然解方的可行性與成效，為未來類似河川整治提供參考依據。

關鍵字：數值模擬、HEC-RAS 2D、洪水管理、自然解方、生物棲息地指標

Abstract



Taiwan's rivers are mostly characterized by steep gradients and rapid flows. To effectively prevent riverbed incision and erosion, traditional engineering approaches such as grade control structures have long been adopted for flood prevention and river management. However, while these rigid structures contribute to land safety, they can also disrupt riverine ecosystems. In pursuit of a balance between disaster prevention and ecological conservation, Nature-based Solutions (NbS) are increasingly being introduced to improve conventional engineering practices, aiming to achieve both land security and ecological sustainability.

To further explore the effectiveness of NbS in river restoration, this study takes the Gangkou Creek as a case study. Gangkou Creek similarly exhibits steep and swift-flowing characteristics and has long been affected by erosion and incision, posing threats to surrounding land safety. To assess river channel responses under various rainfall scenarios, this study employs the HEC-RAS hydraulic modeling software to simulate baseflow conditions as well as flood events corresponding to return periods of 2, 10, 25, 50, and 100 years. The simulation results are used to compare pre- and post-restoration changes in water levels, velocity distributions, and potential inundation extents under different flood return periods. This enables an evaluation of the impact of NbS on channel stability and disaster mitigation, providing valuable reference for similar future river management efforts.

Focusing on the ecologically rich Gangkou Creek, this study analyzes environmental changes before and after river restoration to assess the effectiveness of NbS in river management. By simulating hydraulic conditions under various flood scenarios using HEC-RAS and integrating the Habitat Suitability Index (HSI) for ecological assessment,

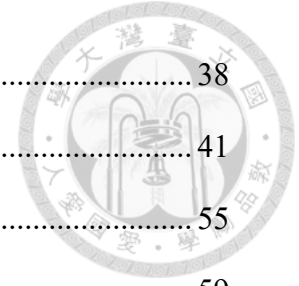
the study further incorporates the 28 global NbS indicators to perform a comprehensive evaluation. These indicators cover ecosystem health, hydrological functions, land safety, and social benefits. Based on the assessment results, the study proposes specific recommendations for further improvement, aiming to enhance disaster resilience and ecological conservation outcomes. Through this approach, the feasibility and effectiveness of NbS are verified, offering a reference for future river restoration projects.

Keywords: Numerical simulation, HEC-RAS 2D, Flood risk management, Nature-based Solutions, Habitat Suitability Index

目次



摘要	i
Abstract.....	ii
目次	iv
圖次	vii
表次	xi
第一章 前言	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究流程	2
1.3 論文架構	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 自然解方	5
2.1.1 定義	5
2.1.2 NbS 概念原則及 7 大社會挑戰	6
2.2 港口溪集水區水砂災害	9
2.3 國內外整治案例	12
2.3.1 國內整治案例	12
2.3.2 國外整治案例	13
2.4 二維水理模式比較	15
第三章 研究方法	25
3.1 NbS 導入流程	25
3.2 NbS 效益評估方法	27
3.3 統整利害關係人之意見	28
3.4 數值模式 HEC-RAS	38



3.4.1 模式簡介.....	38
3.4.2 建模流程.....	41
3.5 生物棲息地指標	55
3.6 自我評估工具 (Self-Assessment Tools)	59
第四章 結果與分析	63
4.1 HEC-RAS 模式驗證	63
4.1.1 淹水潛勢區域.....	63
4.1.2 流量歷線.....	65
4.1.3 水位及流速.....	67
4.2 HEC-RAS 定床模擬	68
4.2.1 模擬結果.....	68
4.2.2 調適策略.....	71
4.3 HEC-RAS 動床模擬	84
4.3.1 泰安橋上下游河段.....	85
4.3.2 福摩沙橋上下游河段.....	90
4.4 生物棲息地指標評分	95
4.4.1 大吻鰕虎.....	95
4.4.2 高屏馬口鱚.....	99
4.5 自我評估工具	102
第五章 結論與建議	106
5.1 結論	106
5.2 建議.....	106
參考資料	108

圖次

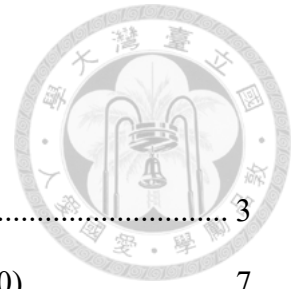


圖 1-1 研究流程圖	3
圖 2-1 自然解方(Nature-based Solutions, NbS)概念圖(IUCN, 2020)	7
圖 2-2 NbS 全球標準的八大準則及七大社會挑戰示意圖(IUCN, 2020)	7
圖 2-3 2011 南瑪都颱風佳樂水雨量站降雨組體圖	11
圖 2-4 2012 天秤颱風佳樂水雨量站降雨組體圖	11
圖 3-1 NbS 導入流程	25
圖 3-2 NbS 效益評估流程圖	28
圖 3-3 小路溪與港口溪匯流處以及永港橋上游位置圖	37
圖 3-4 泰安橋下游以及福摩沙橋下游之舊有整治工程位置圖	37
圖 3-5 泰安橋下游現況圖	38
圖 3-6 福摩沙橋下游現況圖	38
圖 3-7 港口溪網格範圍設置示意圖	42
圖 3-8 泰安橋設置示意圖	43
圖 3-9 福摩沙橋設置示意圖	43
圖 3-10 設計雨型(25 年重現期距)	47
圖 3-11 港口溪上游日流量延時曲線圖	51
圖 3-12 土砂粒徑分佈曲線	51
圖 3-13 Unsteady Computation Options and Tolerances 參數設置	54
圖 3-14 魚類棲地適合度曲線應用原則流程圖(經濟部水利署, 2019)	57
圖 3-15 大吻鰕虎水深適合度指數分布圖	58
圖 3-16 大吻鰕虎流速適合度指數分布圖	58
圖 3-17 高屏馬口鱸水深適合度指數分布圖	59
圖 3-18 高屏馬口鱸流速適合度指數分布圖	59

圖 3-19 自我評估表之評分.....	61
圖 3-20 自我評估工具.....	62
圖 4-1 Q_{50} 淹水潛勢模擬結果與衛星照片疊圖.....	64
圖 4-2 治理規劃報告之淹水範圍示意圖.....	65
圖 4-3 Q_{50} 出流邊界設定之比較.....	66
圖 4-4 Q_{100} 出流邊界設定之比較.....	67
圖 4-5 $Q_{1.11}$ 淹水潛勢模擬結果.....	69
圖 4-6 Q_{10} 淹水潛勢模擬結果.....	69
圖 4-7 Q_{25} 淹水潛勢模擬結果.....	70
圖 4-8 Q_{50} 淹水潛勢模擬結果.....	70
圖 4-9 Q_{100} 淹水潛勢模擬結果.....	71
圖 4-10 港口溪及小路溪匯流處 $Q_{1.11}$ 水深變化.....	73
圖 4-11 港口溪及小路溪匯流處 Q_{10} 水深變化.....	74
圖 4-12 港口溪及小路溪匯流處 Q_{25} 水深變化.....	74
圖 4-13 港口溪及小路溪匯流處 Q_{50} 水深變化.....	75
圖 4-14 港口溪及小路溪匯流處 Q_{100} 水深變化.....	75
圖 4-15 港口溪及小路溪匯流處 $Q_{1.11}$ 流速變化.....	76
圖 4-16 港口溪及小路溪匯流處 Q_{10} 流速變化.....	76
圖 4-17 港口溪及小路溪匯流處 Q_{25} 流速變化.....	77
圖 4-18 港口溪及小路溪匯流處 Q_{50} 流速變化.....	77
圖 4-19 港口溪及小路溪匯流處 Q_{100} 流速變化.....	78
圖 4-20 永港橋上游 Q_2 水深變化.....	78
圖 4-21 永港橋上游 Q_{10} 水深變化.....	79
圖 4-22 永港橋上游 Q_{25} 水深變化.....	79
圖 4-23 永港橋上游 Q_{50} 水深變化.....	80

圖 4-24 永港橋上游 Q_{100} 水深變化	80
圖 4-25 永港橋上游 Q_2 流速變化	81
圖 4-26 永港橋上游 Q_{10} 流速變化	81
圖 4-27 永港橋上游 Q_{25} 流速變化	82
圖 4-28 永港橋上游 Q_{50} 流速變化	82
圖 4-29 永港橋上游 Q_{100} 流速變化	83
圖 4-30 港口溪及小路溪匯流處 Q_{50} 之淹水潛勢與水砂溢淹區	83
圖 4-31 永港橋上游 Q_{50} 之淹水潛勢與水砂溢淹區	84
圖 4-32 泰安橋河段基流量調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)	87
圖 4-33 泰安橋河段 Q_2 調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)	87
圖 4-34 泰安橋河段 Q_{50} 調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)	87
圖 4-35 泰安橋河段基流量調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)	88
圖 4-36 泰安橋河段 Q_2 調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)	88
圖 4-37 泰安橋河段 Q_{50} 調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)	88
圖 4-38 泰安橋河段基流量調適前後之河床冲刷變化(左:調適前;右:調適後)	89
圖 4-39 泰安橋河段 Q_2 調適前後之河床冲刷變化(左:調適前;右:調適後)	89
圖 4-40 泰安橋河段 Q_{50} 調適前後之河床冲刷變化(左:調適前;右:調適後)	89
圖 4-41 福摩沙橋河段基流量調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)	92
圖 4-42 福摩沙橋河段 Q_2 調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)	92
圖 4-43 福摩沙橋河段 Q_{50} 調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)	92
圖 4-44 福摩沙橋河段基流量調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)	93
圖 4-45 福摩沙橋河段 Q_2 調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)	93
圖 4-46 福摩沙橋河段 Q_{50} 調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)	93
圖 4-47 福摩沙橋河段基流量調適前後之冲刷情形(左:調適前;右:調適後)	94
圖 4-48 福摩沙橋河段 Q_2 調適前後之冲刷情形(左:調適前;右:調適後)	94

圖 4-49 福摩沙橋河段 Q_{50} 調適前後之沖刷情形(左:調適前；右:調適後).....	94
圖 4-50 泰安橋河段調適前後之大吻鰕虎 HSI 值(左:調適前；右:調適後).....	98
圖 4-51 福摩沙橋河段調適前後之大吻鰕虎 HSI 值(左:調適前；右:調適後).....	98
圖 4-52 泰安橋河段調適前後之高屏馬口鱾 HSI 值(左:調適前；右:調適後).....	101
圖 4-53 福摩沙橋河段調適前後之高屏馬口鱾 HSI 值(左:調適前；右:調適後)..	101

表次



表 2-1 NbS 設計的 8 大標準及其指標.....	8
表 2-2 港口溪集水區近年較嚴重之淹水事件.....	10
表 2-3 土石流災情雨量概況.....	12
表 2-4 不同二維水理及輸砂模式之比較.....	24
表 3-1 當地居民與 NGO 組織意見整理表.....	29
表 3-2 相關政府單位之意見整理.....	32
表 3-3 港口溪流域各雨量站控制面積及權度表.....	45
表 3-4 港口溪流域各重現期距一日最大暴雨量機率分佈表.....	45
表 3-5 港口溪流域各重現期距二日最大暴雨量機率分佈表.....	46
表 3-6 石門站 Horner 公式參數表.....	47
表 3-7 集水區特性及三角形單位歷線參數表.....	49
表 3-8 三角形單位歷線法計算之洪峰流量結果表.....	49
表 3-9 Wu et al.適用範圍數據表.....	54
表 4-1 水位及流速驗證.....	68
表 4-2 泰安橋模擬結果之平均值.....	86
表 4-3 泰安橋之固床工區域、護岸之模擬結果.....	86
表 4-4 福摩沙橋模擬結果之平均值.....	91
表 4-5 福摩沙橋之固床工區域、護岸之模擬結果.....	91
表 4-6 河流棲息地區分指標.....	95
表 4-7 大吻鰕虎調整方案前後泰安橋區域 HSI 指數.....	97
表 4-8 大吻鰕虎調整方案前後福摩沙橋區域 HSI 指數.....	97
表 4-9 高屏馬口鱸調整方案前後泰安橋區域 HSI 指數.....	100
表 4-10 高屏馬口鱸調整方案前後福摩沙橋區域 HSI 指數.....	100

表 4-11 自我評估工具評分成果-1.....	105
--------------------------	-----

表 4-12 自我評估工具評估成果-2.....	105
--------------------------	-----





第一章 前言

1.1 研究動機與目的

台灣地形狹長，河川多為坡陡湍急型態，降雨具有集中、高強度與短延時等特性，易引發嚴重的水患與土砂災害。長期以來，河川治理多倚賴混凝土構造物如固床工、護岸與堤防等工程方式，雖有助於快速穩定水流與防範災害，但也常造成河道自然形態喪失、棲地破碎化、生物遷徙受阻等生態問題，進一步影響流域整體的永續發展與生態韌性。

面對極端氣候頻率增加、自然資源耗竭與生物多樣性下降等全球挑戰，自然解方（Nature-based Solutions, NbS）逐漸被視為一種兼具生態保育與災害調適效益的新興策略。NbS 強調透過修復與強化自然系統功能來達成防災、水資源管理、生物多樣性維護及社會福祉等多重目標。為推動 NbS 的實踐與規劃，IUCN 提出了全球標準 28 項指標，作為系統性評估與決策依據。然而，NbS 於台灣河川治理的實務應用仍處於初期階段，相關案例與驗證資料相對有限，亟需在地化的實證研究支撐。

本研究選定港口溪流域作為研究對象，觀察該區域有河道下切與溢淹問題，並且存在生態廊道中斷與構造物破壞風險，極具整治與調適潛力。研究透過蒐集水文、地形、降雨等空間與時序資料，並運用 HEC-RAS 2D 數值模式進行洪水與輸砂模擬，分析不同重現期情境下之水理變化與災害潛勢，規劃調適策略如水砂溢淹區配置、結構物改善等方案。

此外，本研究導入棲地適合度指數（Habitat Suitability Index, HSI）評估兩種原生魚類：大吻鰕虎與高屏馬口鱮，來判斷調適前後棲地條件之變化，以評估方案之生態成效，進而量化生態保育效益。並以 NbS 全球標準進行自我評估，利用自我評估工具分析港口溪方案在防災韌性、生態效益、參與治理、經濟可行性等面向的達成程度與改善空間。期望本研究能補足台灣在 NbS 實務應用上的案例經驗與方

法發展，並提升河川治理策略的生態永續與調適能力。



1.2 研究流程

本研究範圍於港口溪集水區，港口溪流域擁有獨特的地形與水文特性，歷年來受到降雨集中與地勢陡峭影響，容易發生洪水與土砂災害。因此，本研究首先進行現地資料蒐集，包括架設水位站以取得水文監測數據，並整合地形、土地利用等流域基礎資料，以深入了解集水區內水文動態與環境特性。此外，透過現地勘查與訪談當地居民及相關利害關係人，蒐集各方對於流域現況的認知與關切問題，並綜合整理這些意見，進一步分析問題的優先調適性與可行性，確保後續調適策略能兼顧地方需求與實際環境條件。

在明確掌握研究區域的現況與關鍵問題後，進一步蒐集相關文獻資料，以作為分析與模擬的理論基礎。研究方法上，採用二維水理分析，並運用定床與動床模式來模擬集水區所面臨的挑戰及潛在的調適策略。文獻蒐集除了 HEC-RAS 的操作模式，還涵蓋水文資料分析方法、模式參數設定、不同場景的降雨事件及歷史水文紀錄等，將模擬之結果與歷史資料進行驗證，以證實模擬結果之可信度，最後再利用模擬結果評估生物棲地的變化，以調整相應的調適策略，以解決集水區所面臨的問題。

依據上述所設計之理念，彙整出相關流程圖如圖 1-1 所示，藉由選定研究區域、現地勘查、確定改善目標、選定 NbS 措施、模式參數蒐集與建置、驗證模式等，最後進行自我評估與討論結果。

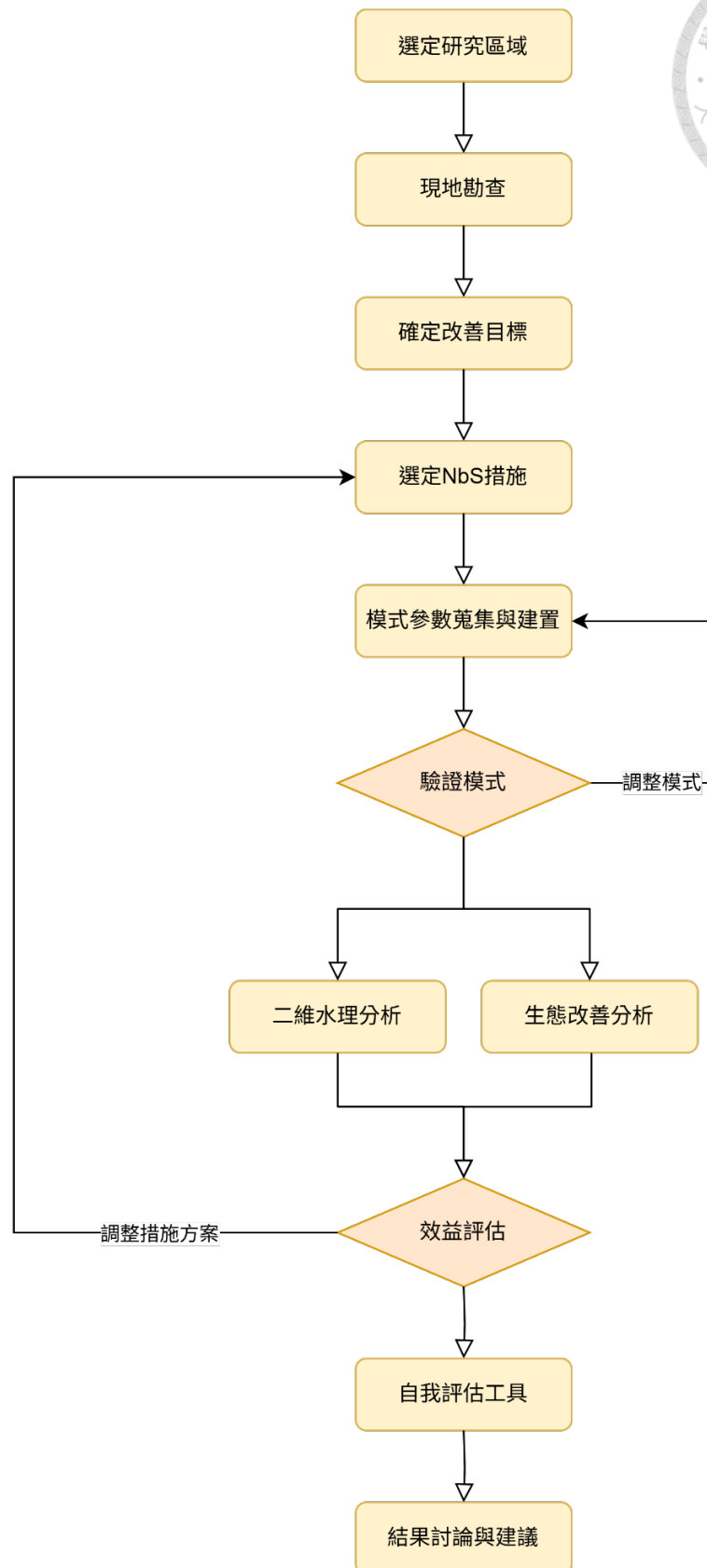


圖 1-1 研究流程圖



1.3 論文架構

本研究分為五個章節，再依據各章節之內容細分，主要內容概述如下：

第一章 前言

說明本研究之研究動機與目的，概述研究流程、論文架構與介紹研究區域。

第二章 文獻回顧

蒐集港口溪集水區歷年災害、水砂災害之調適策略、回顧國內外自然解方、二維水理模式及輸砂模式等相關文獻並將其彙整。

第三章 研究方法

詳述研究流程(NbS 導入流程、NbS 效益評估方法)，敘述流域分析、數值模型 HEC-RAS 2D 設定、生物棲息地指標之設定、以及介紹自我評估工具。

第四章 結果與分析

討論港口溪調適方案之 NbS 導入過程、二維水理分析，並以模擬結果分析生物棲息地指標，以及自我評估工具之分析結果。

第五章 結論與建議

總結研究結果，並提出未來可改進之事項及後續研究之建議。

第二章 文獻回顧



2.1 自然解方

2.1.1 定義

聯合國環境規劃署（UNEP）於 2022 年 3 月 2 日，在第五屆聯合國環境大會（UNEA 5.2）通過 UNEP/EA.5/Res.5 決議，正式針對自然解方（Nature-based Solutions, NbS）提出統一定義。該定義指出，

“Nature-based solutions (NbS) are actions aimed at protecting, conserving, restoring, and sustainably managing natural or modified terrestrial, freshwater, coastal, and marine ecosystems, which address social, economic and environmental challenges effectively and adaptively, while simultaneously providing human well-being, ecosystem services, resilience and biodiversity benefits.”

根據此定義，自然解方乃是一系列以保護、養護、恢復、永續利用與管理自然或經人為改變之陸域、淡水、沿海與海洋生態系為核心之行動，旨在有效且具調適性地回應社會、經濟與環境等挑戰，同時創造對人類福祉、生態系統服務、系統韌性與生物多樣性之多重效益。其補充說明如下：

- 1.自然解方根據里約三公約「生物多樣性公約」、「聯合國防治荒漠化公約」和「聯合國氣象變化框架公約」，尊重在地社群與原住民族之社會與環境保障。
- 2.自然解方可因應不同區域、國家或在地脈絡進行實施，並應符合「2030 年永續發展議程」，採取具彈性的適應性管理機制。
- 3.自然解方作為促進永續發展目標（SDGs）之一項重要行動，其功能包括但不限於應對生物多樣性喪失、氣候變遷、土地劣化、糧食與水資源安全、災害風險管理、城市擴張及促進人類健康與社會福祉等。



- 4.自然解方可有助於激發永續的創新和科學研究。
- 5.自然解方雖無法取代溫室氣體大幅減量行動，但在減緩與調適氣候變遷上發揮關鍵補充功能，需關注其長期效益與潛在風險。
- 6.自然解方應符合全球氣候、生物多樣性與環境保育等多邊協定之規範，並認識潛在風險對地方社群與原住民之可能影響。
- 7.自然解方可視為生態系基礎管理（EbA）與現有國內法規與政策架構下之管理策略之延伸或整合。

2.1.2 NbS 概念原則及 7 大社會挑戰

IUCN (2016)為了推動 NbS 的作業框架，讓大眾理解 NbS 概念，提出八大原則 (Principle)，作為判別與設計 NbS 計畫之基本依據，原則包含如下：

- (一) 原則 1：奉行自然保護規範和原則
- (二) 原則 2：策略可獨立實施，也可與應對社會挑戰的其他解決方案（如技術和工程解決方案）結合實施。
- (三) 原則 3：由特定地域的自然和文化背景決定，包括傳統知識、本土知識和科學知識。
- (四) 原則 4：公平公正地產生社會效益，提高透明度，促進廣泛參與。
- (五) 原則 5：維繫生物多樣性和文化多樣性，維護生態系統自然發展的能力。
- (六) 原則 6：應用於景觀尺度
- (七) 原則 7：認識到並解決由發展產生的促進短期經濟利益與長期生態系統服務全面恢復之間的權衡問題。

- (八) 原則 8：與總體政策方案、措施或行動整合，應對具體挑戰。

若要使一項調適策略被認定為 NbS，其設計必須具備整合性，並能同時回應一項或多項社會挑戰。IUCN (2020)提及的七項社會挑戰包括：氣候變遷減緩及適應 (climate change adaptation and mitigation)、減少災害風險 (disaster risk reduction)、

經濟與社會發展 (socioeconomic development)、人類健康 (human health)、糧食安全 (food security)、水安全 (water security) 及環境劣化與生物多樣性喪失 (ecosystem degradation and biodiversity loss) 等七項(圖 2-2)。



圖 2-1 自然解方(Nature-based Solutions, NbS)概念圖(IUCN, 2020)



圖 2-2 NbS 全球標準的八大準則及七大社會挑戰示意圖(IUCN, 2020)

IUCN 將八大原則與七大挑戰整合成標準化的 NbS 評估基礎。特別是面對極端降雨、乾旱頻率上升、生態系統功能下降等氣候變遷效應，NbS 透過加強自然地景、水文系統與土壤保育的管理行動，能有效減緩碳排放與強化氣候韌性，是現今因應複合式環境危機的重要策略之一。

IUCN(2020)提出 NbS 全球標準，該標準是一個由 8 項標準(standard) 和 28 項指標(indicator)組成的自我評估工具(self-assessment tool)，用以評估一項自然解方是否具備足夠的科學基礎、社會效益與執行合理性，並協助強化 NbS 設計之適應性與永續性。

本研究參考經濟部水利署 (2019)報告，該報告引用 IUCN (2020)提出的全球

NbS 標準，作為我國推動 NbS 設計與政策檢討之參考依據。該標準涵蓋八大核心項目，分別為：有效應對社會挑戰、考量設計尺度、生物多樣性淨效益、經濟可行性、公正治理、多重效益權衡、調適性管理與推動主流化等。每一標準再細分 28 項具體指標，詳細如表 2-1 所示。透過此標準不僅可檢驗既有 NbS 成效，亦可作為未來跨域協作、政策整合與計畫主流化的重要工具，強化 NbS 的永續性與擴散性，並促進全球應用經驗之交流與學習。

表 2-1 NbS 設計的 8 大標準及其指標

準則 1：NbS 能有效應對社會挑戰	
1.1	優先考慮利害關係者最急迫的社會挑戰
1.2	所對應的社會挑戰能被清楚的理解與紀錄
1.3	確立、設定基準並定期評估 NbS 所提升的人類福祉
準則 2：NbS 的設計應考慮尺度	
2.1	NbS 的設計反應出經濟、社會及生態系統間的交互作用
2.2	NbS 的設計整合其他互補措施及跨部門的協同合作
2.3	NbS 的設計包含實施地區以外的風險辨識及風險管理
準則 3：NbS 帶來生物多樣性淨效益及生態系統完整性	
3.1	NbS 行動直接反應生態系統現況的實證評量以及退化主因
3.2	確立、設定基準並定期評估明確且可衡量的生態多樣性保育成效
3.3	監測及定期評估 NbS 對自然造成的非預期負面影響
3.4	確認增進生態系統完整性的機會並納入 NbS 策略
準則 4：NbS 具有經濟可行性	
4.1	確立並記錄 NbS 相關的直接及間接成本效益，例如誰付出及誰受益
4.2	提供成本效益研究以支持 NbS 的選擇，包括相關法規和補助的影響
4.3	NbS 設計的可行性相較於備選方案是合理的，並顧及相關外部影響
4.4	NbS 設計考慮資源選項的組合，如市場導向、公部門、自發性提供與符合規範的行動
準則 5：NbS 是基於包容、透明和賦權的治理過程	
5.1	在啟動 NbS 前，設定明確且取得共識的回饋及申訴解決機制以供所有利害關係者使用
5.2	參與係基於互敬平等的基礎，不受性別、年齡、社會地位影響且保障原住民自由、事前且充分告知、同意的權益
5.3	盤點受 NbS 直接或間接影響的利害關係者，並使其能參與 NbS 措施的所有過程

5.4	決策過程記錄並回應所有參與及受影響利害關係者的權益
5.5	若 NbS 的尺度超過管轄範圍，建立受影響管轄區利害關係者共同決策的機制
準則 6：NbS 在達成主要目標與持續提供多重效益間，要進行公平的權衡	
6.1	確認 NbS 措施相關權衡的潛在成本和利益，並告知保護和適當的改善措施
6.2	承認與尊重不同利害關係者在土地與資源的權利、使用、許可與責任
6.3	定期檢視已建立的保護措施，以確保達成共識之權衡條件且不破壞整體 NbS 的穩定性
準則 7：NbS 根據實證進行調適管理	
7.1	NbS 策略可做為定期監測和評估的基礎
7.2	在 NbS 措施的生命週期中，發展並實施監測和評估計畫
7.3	在 NbS 措施的生命週期中，應用調適管理的反覆式學習框架
準則 8：NbS 為永續且可成為主流	
8.1	分享 NbS 的設計、實施與經驗傳承以帶來改變
8.2	NbS 加強促進政策與規範框架以支持理解與主流化
8.3	NbS 對人類福祉、氣候變遷、生物多樣性和人權(包括「聯合國原住民族權利宣言(UNDRIP)」)等相關的國家及全球目標有所貢獻

2.2 港口溪集水區水砂災害

港口溪集水區位於臺灣屏東縣東南部，涵蓋滿州鄉、恆春鎮與牡丹鄉等行政區域，區域內生態資源豐富，尤以陸蟹多樣性最為著名。根據李政璋 (2019) 調查，港口溪地區原記錄之陸蟹物種計有 45 種，近年又新增 4 種新紀錄種，總計達 49 種，為恆春半島五大陸蟹熱區——保力溪、後灣、香蕉灣、港口溪及出風鼻中，物種數量最為豐富者。劉烘昌等 (2009) 針對墾丁國家公園所進行的陸蟹資源調查亦指出，港口溪河口樣區雖在物種多樣性上排名第二，但其族群數量則為全園最高，並以奧氏後相手蟹與中型仿相手蟹數量最為優勢，顯示本區在陸蟹保育上的高度重要性。

除生態價值外，港口溪集水區亦屬於水砂災害潛勢區域。歷年來曾受數起極端天氣事件影響，其中以 2011 年之南瑪都颱風及 2012 年之天秤颱風為最具代表性。

兩次颱風皆造成港口溪流域嚴重淹水災情，影響區域主要為港口村與里德村，相關災情整理如表 2-2 所示。

港口村因位處河口區域，當強降雨恰逢漲潮時段，易形成排水壅塞，導致長時間淹水，淹水持續時間可達 12 至 24 小時，最深水位甚至高達 2.5 公尺。上述兩村落皆鄰近河道，且境內未設置堤防、滯洪池或抽水站等主要防洪設施，使其防災能力受限。根據地方政府調查，滿州鄉淹水主因包括短時強降雨、排水系統容量不足及港口溪溢堤等因素。

此外，港口溪集水區亦包含 3 條經農業部農村發展及水土保持署所公告之土石流潛勢溪流。上述兩次颱風事件不僅引發淹水，亦導致屏縣 DF070 與屏縣 DF064 兩處潛勢溪流發生大規模土石流災害。參考農業部農村發展及水土保持署提供之風災事件雨量組體圖進行探討，如圖 2-3 和圖 2-4 所示，兩場事件累積雨量分別達到 824 毫米及 596 毫米，最大降雨強度則分別為 108.5 毫米/小時與 78.5 毫米/小時，如表 2-3 所示。此兩次事件均屬長延時降雨導致之坡地災害類型，顯示本集水區具高洪災與地質災害風險，需整合性治理策略。

表 2-2 港口溪集水區近年較嚴重之淹水事件

致災淹水事件	村里別			
	港口村		里德村	
	淹水歷程	淹水深度	淹水歷程	淹水深度
南瑪都颱風	12~15 小時	0.3~2.5 公尺	6~12 小時	0.3~1.5 公尺
天秤颱風	12~24 小時	0.3~2.5 公尺	6~12 小時	0.3~1.5 公尺

（資料來源：103 年屏東縣易致災環境指標調查與評估報告-易致災環境指標調查）

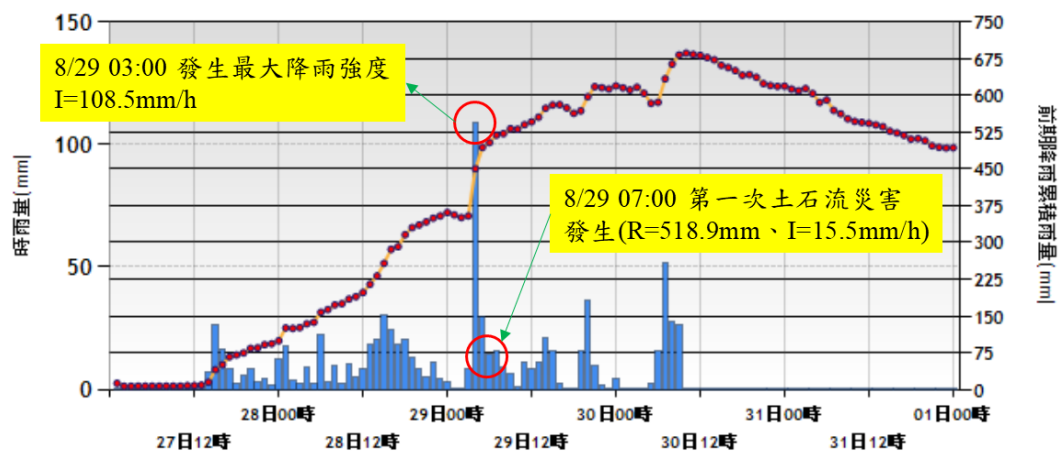


圖 2-3 2011 南瑪都颱風佳樂水雨量站降雨組體圖

(資料來源:100 年南瑪都颱風重大土砂災例最速報)

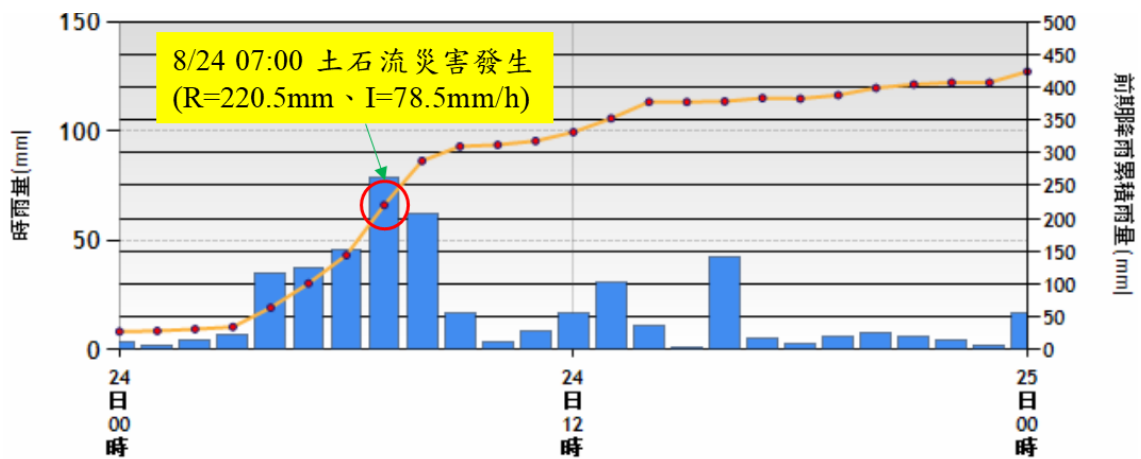


圖 2-4 2012 天秤颱風佳樂水雨量站降雨組體圖

(資料來源:101 年天秤颱風重大土砂災例最速報)

表 2-3 土石流災情雨量概況

土石流潛勢溪流編號		屏縣 DF070	屏縣 DF064
日期		2011/8/27~2011/8/30	2012/8/24~2012/8/28
災害事件		南瑪都颱風	天秤颱風
雨量站設置單位		中央氣象局	中央氣象局
參考雨量站		檳榔(C0R280)	佳樂水(C0R370)
雨量資料	土石流災害點時雨量 (mm/hr)	108.5	78.5
	土石流災害點累積雨量 (mm)	518.9	220.5
	災害事件總雨量 (mm)	824	596

2.3 國內外整治案例

隨著氣候變遷導致極端降雨與洪水事件頻率日益升高，傳統以剛性設施為主之防洪手段逐漸顯現其限制，自然解方（Nature-based Solutions, NbS）被視為因應複合型災害與生態退化問題之新興策略。國內外已累積諸多導入 NbS 的河川整治與流域治理案例，顯示其在兼顧防災韌性與生態保育目標上具高度潛力。

2.3.1 國內整治案例

1. 種瓜坑溪生態復育計畫(洪煒甯等人, 2024)

種瓜坑溪位於南投縣的淺山區域，具有高度的生態敏感性與多樣化生物棲地。過去為防止右岸農地遭受冲刷流失，曾施作固床工與混凝土護岸等傳統工程，初期確實達到一定防洪與土地保全效果。然而，隨著農業使用需求消退與設施老化，原有構造物不僅失去功能性，亦阻隔河道與周邊環境的連結，影響當地水陸生態系統互動。為改善此情形，相關單位著手移除右岸混凝土護岸，並重新規劃為滯洪空間

與濱溪生態帶。整治後，河水於洪水期能自然擴散至右岸區域，發揮調蓄功能，並恢復溪流流動動態與棲地連續性。經觀察，右岸植生逐漸恢復，多樣性水流型態也促進區域生物多樣性的提升，整體生態系統呈現出良好的復育與自我修復趨勢。

2.打狗溪集水區調適策略（水利署臺北分局, 2022）

打狗溪位於宜蘭縣大同鄉及冬山鄉內，受水砂災害影響，流域現況具大型防砂壩，河床淤積，常態呈現伏流水狀態，提高了兩岸高灘地之溢淹風險。為此，臺北分局於 111 年度推動導入自然解方之調適策略，整合地方公民參與、環境監測及多重效益規劃，作為實踐流域治理與生態復育的示範案例。

3.基隆河截彎取直後都市綠帶規劃（顏啟峯, 2015）

基隆河為臺北盆地的重要河川，歷經長期氾濫威脅後，政府於 1964 年及 1991 - 1994 年間實施兩次截彎取直工程，改善士林、大直至南港段的河道，成功降低臺北市段的洪災風險。第二次截彎取直後，原舊河道形成 501 公頃新生地，其中 224 公頃轉作堤內河濱公園，提供親水空間與生態綠帶，有效緩衝洪峰與提升市區綠覆率。雖中上游仍需仰賴員山子分洪道協助洪水調節，整體而言本案整合了水患治理與都市綠地再生，成為都會區自然解方融合都市規劃的先驅性案例，亦展現河道整治後土地再利用的多元效益。

2.3.2 國外整治案例

1. 荷蘭「Room for the River」計畫(Rijke et al., 2012)

此計畫為荷蘭因應氣候變遷與洪水風險轉型治理的重要範例，核心理念為「還地於河」，透過擴大河道空間、調整堤防位置、營造溢洪區等手段，同時提升防洪安全與空間品質。計畫採取中央統籌、地方執行的多層級治理架構，整合水資源管理、生態保育、農業與土地利用等多重目標，並重視利害關係人參與、公眾溝通與能力建構。最終成功促成河川治理邏輯由傳統防洪導向轉型為整合性流域管理。

2. 比利時「藍帶計畫（Blue Belt）」(Smets et al., 2023)



比利時藍帶計畫藉由導入 NbS 措施，提升河川調洪能力與生態韌性，具體作法包括河岸後退、氾濫平原復育、濕地重建與河道自然化。治理機制強調多層級協作，整合地方政府、水利單位與土地所有權人，並促進社區參與與多方協調。實施成果不僅有效降低洪峰水位，亦促進棲地多樣性、創造綠色休憩空間，是結合防災與生態復育的典型示範，提供政策與實務操作的重要借鏡。

3. 英國 River Skerne 整治計畫(Downs & Kondolf, 2011)

作為英國早期河川復育代表案例之一，River Skerne 於 1990 年代在達靈頓地區實施，重點措施包括恢復河道曲度、強化氾濫平原與河岸間連通性及植生帶重建。此計畫重視社區參與與景觀美學，並透過長期監測檢視生態與水文變化。結果顯示，該計畫有效提升魚類與底棲無脊椎動物棲地多樣性，亦具備一定洪水調節效益，成為日後歐洲河川治理整合防災與生態的參考典範。

4. 國際都市洪水治理應用(Nakamura et al., 2020)

都市地區亦逐步導入 NbS 進行洪水風險調適。Nakamura 等人歸納美國波特蘭、荷蘭鹿特丹及中國北京等案例，展示 NbS 於都市水文與空間治理的整合潛力。波特蘭透過雨水花園與透水鋪面降低地表逕流並增進都市生態系統服務；鹿特丹規劃多功能水廣場兼具滯洪與社區活動空間功能；北京則推動「海綿城市」政策，廣設城市濕地與雨水滯留設施。這些案例顯示 NbS 在都市空間的應用具有良好成效，惟長期監測與部門協調仍為挑戰所在。

5. 多瑙河下游氾濫平原復育計畫(Schneider, 2010)

多瑙河下游氾濫平原復育計畫為跨國性自然解方實踐案例，涵蓋羅馬尼亞、保加利亞、烏克蘭與摩爾多瓦等多國合作，旨在恢復過去因堤防與開發而喪失的天然氾濫區域。透過拆除不必要的堤防、退田還濕與濕地重建等手段，計畫有效提升河川緩洪能力與區域生態系統服務功能。根據 WWF (2009)報告指出，此計畫除改善洪水管理外，亦提升漁業生產力、水質淨化與生物多樣性，並促進當地經濟與社區發展。該案例展現自然解方不僅具防災效益，亦能在大尺度跨國治理中發揮多重功

能，為流域整體管理與區域合作提供示範。



2.4 二維水理模式比較

水理模式依模擬維度可區分為一維、二維與三維數值模式，應根據研究目標、河道特性與資料可得性選擇合適的維度。一維模式主要用於描述水流沿主流方向之運動，具備高效計算能力，適合於進行水位與流量變化之縱向分析。然而，其對於橫向流動與複雜流場描述能力有限。相較之下，二維模式可模擬水平平面上的水流變化，能更準確地呈現淹水範圍、流速分布與地形交互作用，廣泛應用於洪水模擬、漫地流分析與輸砂評估等領域(Brunner, 2016)。三維模式則進一步考慮垂直方向流速與濃度剖面，能精細模擬渦流、局部沖刷與層化現象，惟其計算資源需求較高，通常應用於特殊場址如地下水或構造物局部流況模擬(Wu, 2008)。

本研究考量港口溪流域地形起伏顯著，並存在坡面逕流與堆積作用，為有效模擬自然解方措施實施前後對於水位與輸砂行為之影響，採用具備平面模擬能力之二維水理模式進行分析。尤其在流域尺度下，二維模式對於水力與地形交互影響之描述能力具實用價值，亦能作為洪氾潛勢與沖淤趨勢分析之有效工具。

常見於模擬河道之二維水理及輸砂模式有許多種，包含 HEC-RAS 2D、FLO-2D、CCHE-2D、SRH-2D 等，故本研究將蒐集各個二維水理和輸砂模式之文獻資料，評估對於本研究最合適之二維水理及輸砂模式，作為後續模擬之工具。

一、HEC-RAS 2D

HEC-RAS 2D 為美國陸軍工兵團水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center, HEC) 所開發之河川分析系統，其自 6.0 版本後整合多項模擬功能，包括一維定量流 (Steady Flow)、一維與二維變量流 (Unsteady Flow)、動床輸砂模擬、水溫與水質傳輸分析，以及非牛頓流體模擬能力(HEC, 2021)。其介面友善，資料整合性高，已成為全球廣泛應用之二維水理模擬工具之一。

1.Quirogaa et al. (2016)



本研究應用 HEC-RAS 5.0 的二維數值模擬功能，分析 2014 年 2 月玻利維亞亞馬遜河流域的嚴重洪災事件。該區地勢低平、河網密集，傳統一維模擬難以準確再現洪水在漫地流區的擴散與退水過程。研究透過 DEM 數值地形、歷史洪水觀測資料與土地覆蓋參數建立二維模式，模擬洪峰期間的流速、水位與淹水範圍，並與衛星影像及現地災損資料比對驗證。結果顯示 HEC-RAS 2D 可有效再現平原地區洪水傳輸與水力行為，並具備高解析度空間分布能力，為洪災風險評估與應變規劃提供可靠工具。

2. Farooq et al. (2019)

本研究於巴基斯坦喀布爾河應用二維水理與輸砂模式，評估當地防洪與河道整治措施的成效。研究使用 HEC-RAS 5.0 進行二維模擬，整合地形、流量與粒徑分布等資料，模擬不同流況下的水位、流速與河床變化，並比較整治前後的水理與輸砂行為差異。結果顯示，2D 模式能有效捕捉河道與洪氾區的水力動態與沖淤分布，對於不同工程方案的效益分析具重要參考價值。研究證實 HEC-RAS 2D 可作為開發中國家進行洪水風險與河道變遷評估的實用工具。

3. Ongdas et al. (2020)

該研究運用 HEC-RAS 2D 模式，針對哈薩克 Yesil（又稱 Ishim）河流域進行洪水災害潛勢圖的產製。研究整合高解析度地形資料（LiDAR 與 DEM）、土地覆蓋類型及設計洪水流量，模擬不同重現期（10 年、50 年與 100 年）洪水條件下的水深分布與淹水範圍。研究特別強調 HEC-RAS 2D 於平原地區可準確模擬淹水動態，並可輸出圖資應用於災害風險分級與都市防洪規劃。模擬結果成功再現歷史洪水特徵，顯示 HEC-RAS 2D 為適用於哈薩克此類大面積低平河川的有效洪災評估工具，有助於區域防災規劃與土地利用決策。

HEC-RAS 2D 為一具備模擬精度與操作便利性之數值工具，廣泛應用於河道與都市環境之洪水模擬與輸砂分析，其模組功能完備，能應對多樣化的水文場景與管理需求。本研究選擇 HEC-RAS 2D 作為模擬工具，除可妥善處理港口溪集水區

自然解方實施後之流況變化與沖淤分布，亦能對調適策略成效提供量化分析依據。

二、FLO-2D

FLO-2D 淹水模式是 O'Brien (2004) 所開發之二維洪水模擬程式，具備處理漫地流、都市水文、泥流及土石流之能力，廣泛應用於都市淹水模擬、洪水平原管理、工程風險分析與不規則河道水理演算，亦支援涵洞、橋梁與滯洪池等構造物的水力行為評估。該模式基於有限差分法進行動態模擬，可模擬高濃度流體的流動特性，並適用於複雜地形條件下之淹水分析與災害風險評估。

1.Erena et al. (2018)

本研究聚焦於衣索比亞的 Dire Dawa 市，該地區經常發生洪災，研究目的是建立洪水潛勢圖並探討當地社區的洪災管理策略。研究採用 FLO-2D 水力模型來模擬洪水，判定高、中、低潛勢區，並透過 232 戶問卷調查收集當地對洪水的應對方式。模擬結果與實際災損資料高度吻合。研究也發現當地居民透過氣味、雲層變化、極端天氣與槍聲等方式進行洪水預警。儘管社區管理策略在一般條件下具有效性，但在極端事件發生時仍存在應對不足之處。該研究建議未來應結合 FLO-2D 建立之洪水圖與現有管理措施，以提升該市與集水區整體防災能力。

2.Calligaris et al. (2008)

本研究針對義大利朱利安阿爾卑斯山 (Julian Alps) 中 Val Canale 地區在 2003 年 8 月 29 日遭遇之極端暴雨事件進行模擬分析。該事件導致大量土石流、兩人死亡及基礎設施重大損壞。研究團隊選定 12 個地質與地形條件各異之流域，採用 FLO-2D 數值模式進行模擬，以建立潛在災害風險地圖並支援未來規劃。研究首先透過實地調查與粒徑分布分析建立模型輸入參數，再以回推分析校正 FLO-2D 模型參數，評估每一流域潛在土石流路徑與沉積範圍，並考量事件後新建之防災設施與最新地形資料 (5m 格網 DEM) 納入模擬。結果指出，FLO-2D 能有效模擬高濃度土石流，為地區災害管理與土地利用規劃提供重要決策工具。

3.Ding (2023)



以中國雲南北部嶺西地區為研究場域，針對極端降雨條件下可能引發的三條土石流溝渠道，採取實地地質調查與 FLO-2D 模擬進行災害風險評估。研究主要比較工程防治前後之風險變化，模擬不同降雨重現期（20 年、50 年、100 年）對土石流流深、流速與沉積範圍的影響。模擬結果顯示，在 5% 重現期（20 年）情境下，FLO-2D 模型預估的沉積範圍與實地資料高度吻合；經工程介入後，高風險區域顯著減少，100 年一遇情境下非危險區域面積較防治前增加約 5.92%。最終，研究提出基於流深、流速與爆發頻率等參數的風險分級圖資，並針對土石流防控與災害管理提供具體建議。

FLO-2D 具備模擬洪水與高濃度流體（如土石流）之能力，並能整合地形與災損資訊進行災害潛勢評估，其靈活的應用性與高空間解析度使其成為災害管理與土地規劃之重要工具，特別適用於具複雜地貌條件的集水區。

三、CCHE2D

CCHE2D 為一套由美國密西西比大學國家計算水科學與工程中心（National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE）所研製的二維數值模擬工具，主要用於描述天然環境中複雜流動條件下之水理與輸砂行為。該模式具備處理自由水面流、流速分佈、泥砂輸移、水質變化以及污染物擴散等能力，廣泛應用於河道演變、水土保持與污染傳輸等相關領域(Jia & Wang, 2001; Thakur et al., 2018)。其可應用於沖積河槽遷移預測、河床剪應力分佈模擬及河道形態演變分析，在實務治理與學術研究中具有廣泛應用潛力。

1. Lee et al. (2019)

本研究運用 CCHE2D 數值模式，評估越南 Co Chien 河口地區之河相變化。作者蒐集現地調查資料並建構模擬模型，結合水理與地形資料進行模式校驗與驗證。模擬結果顯示，CCHE2D 能夠有效再現流速與沖淤變化，並捕捉河口形態演變趨勢。研究指出，河道中央與岸邊區域的冲刷與淤積特性受季節性水流與泥沙供給影響顯著，並建議未來管理單位應以數值模擬為依據進行河道調整與基礎設施規劃。

本研究提供應用 CCHE2D 模式於河口地區治理之案例參考。



2.Nassar (2011)

本研究針對 CCHE2D 數值模式在尼羅河河道流模擬中的應用進行多參數敏感度分析，探討不同水理與網格參數對模擬結果（流速、水位、剪應力等）的影響程度。研究選擇多組幾何、粗糙度、邊界條件及輸砂參數進行組合測試，藉以了解模型對個別因子變動的反應。結果顯示，Manning 粗糙係數、上游邊界流量設定與網格解析度為影響模擬結果最敏感的參數，須精確校準以提高模擬可靠性。本研究提供一套系統化方法，有助於未來在實際應用 CCHE2D 進行大型河川模擬時選定參數並掌握不確定性來源。

3.Salmasi et al. (2020)

本研究應用 CCHE2D 模型模擬伊朗 Beshar 河中兩段具不同河型特性的河段（直線段與蜿蜒段），分析其流場分布與水力行為差異。透過建立高解析度二維水理模型，模擬各段河道的流速、流線與剪應力分布，並探討河道形狀對水流模式與沖刷潛勢的影響。結果顯示，蜿蜒段流場變化更為劇烈，容易形成側向流速梯度與局部渦旋，導致潛在河岸侵蝕風險；而直線段則表現較穩定且流向集中。研究證實 CCHE2D 能準確模擬不同河型之流場特性，為河道整治與生態工程設計提供有力工具。

CCHE2D 具備高度空間解析度與水理動態模擬能力之模式，可應用於河道形態變化預測、參數敏感性分析與河型比較等多元議題，在考量河道治理、防災規劃與生態需求等多重目標下，CCHE2D 提供了穩健之模擬依據。

四、SRH-2D

SRH-2D 是由水利署及美國墾務局官方共同開發之公開免費軟體，具備模擬河川水動力、泥砂運移、軟岩沖蝕及異重流等功能(經濟部水利署水利規劃試驗所, 2012)。該模式已通過多項理論與實務測試，並逐步應用於臺灣多處河川治理與防災工程分析。



1. Merufinia et al. (2015)

系統性介紹 SRH-2D 之數學理論基礎與模組功能，強調其在輸砂模擬中之高度彈性與參數敏感性。SRH-2D 採用二維淺水方程與床沙連續方程耦合計算，適用於複雜地形與河道結構，並內建多項輸砂公式（如 Engelund-Hansen、Parker、Wilcock-Crowe、Meyer-Peter-Muller 等），可處理粒徑分級、活躍層變化與底床交互等物理機制。研究透過敏感度分析指出，粗糙係數、適應長度、活躍層厚度等參數對模擬結果影響顯著，不同輸砂公式亦可能導致明顯差異。因此，在實務應用上應依據河床條件選擇適當參數組合，並輔以現地調查進行校準，以提升模擬準確性。

2. Abban et al. (2023)

研究應用了 SRH-2D 二維水理與輸砂模式，模擬美國加州 Upper Cache Creek 流域在 2015 年森林野火（Rocky 與 Jerusalem Fires）發生前後的水文與輸砂變化。模擬區域面積達 282 km²，其中有 163 km² 為燒災範圍。研究使用 Landsat 衛星影像與 SURGO 資料建立土地覆蓋與土壤滲透性分布，並考量火災後土壤疏水性與植被變化。模擬結果與 USGS 的實測資料比較，其 NSE 效能係數為流量 0.81（前）與 0.79（後），輸砂為 0.90（前）與 0.67（後），顯示 SRH-2D 能有效預測森林火災後之逕流與泥沙輸送。研究亦指出火災不一定增加輸砂量，需視氣候與土地狀況整合評估。

SRH-2D 為一高度彈性且適用性廣泛之二維數值模式，具備處理多種水理與輸砂問題之能力，特別適用於複雜地形與變化快速之流域環境。透過靈活之參數設定與多種輸砂公式選擇，SRH-2D 可有效模擬災後變遷、工程效益評估與生態基礎設施設計等議題。

五、SOBEK

SOBEK 模式為荷蘭 WL | Delft Hydraulics 所開發之多模組整合型數值模擬系統，具備河川流動、都市排水、水質、水沙傳輸、降雨逕流等九套模組，可支援水資源規劃、洪水風險管理及政策評估之應用（水利技師公會, 2007）。該系統以模

組化設計為特點，可根據研究需求整合一維與二維流模擬，適用於自然河道、堤外漫地、都市雨水系統及輸水工程等多元環境。



1.Prinsen and Becker (2011)

研究介紹了荷蘭的「國家水文模擬工具 (NHI, Netherlands Hydrological Instrument)」，其中地表水模擬部分即使用 SOBEK 1D 模式進行主要河川與運河的水動力模擬。儘管鹽水入侵為典型三維現象，SOBEK 結合移流-擴散公式與 Thatcher-Harleman 方法，可在多數情境下有效模擬鹽度空間分布，且模擬結果與三維模式相近，顯示其於氣候變遷下水資源調適政策模擬中的高適用性。

2.Lomulder (2004)

應用 SOBEK 1D2D 整合模式於德國易北河 (Elbe River) 潰堤模擬，1D 模式模擬主河道流況，2D 模式則模擬堤防潰決後洪水於堤外低地擴散與淹沒過程。模擬整合雨量、局部地形、滲流與洩洪口等多重因子，並可產出淹水範圍、村落受影響區與基礎設施衝擊資訊，協助防災單位進行緊急應變與防洪優先區劃設計。研究強調「適當建模」之原則，指出模擬解析度與複雜度應依問題層級與應用目標適度調整，以提升模擬效能與政策應用價值。

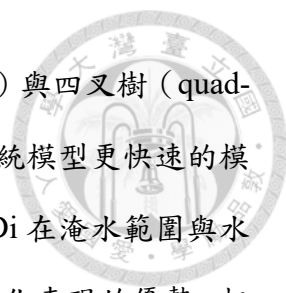
SOBEK 模式憑藉其多模組、可整合與高靈活性特性，已廣泛應用於歐洲洪水調適、水資源管理與氣候情境模擬等領域，亦可作為臺灣地區水沙模擬與決策支援之潛在工具選項。

六、3Di

3Di 為台夫科技大學(TU Delft)Guus Stelling 教授於 2009 年發展，其核心演算法以 SOBEK 模式為基礎，結合四叉樹 (Quad tree) 與子網格 (Sub-grid) 計算技術，能大幅提升模擬效率與解析度，特別適用於高解析度地形資料(如 LiDAR DEM)之應用場景。(林庭任, 2023)

1.Dahm et al. (2014)

本研究探討新一代洪水模擬軟體 3Di 在臺灣宜蘭美福地區的應用，並與



SOBEK 1D2D 模型進行比較。3Di 模型整合了子網格 (sub-grid) 與四叉樹 (quad-tree) 技術，能有效運用高解析度 LiDAR DEM 資料，提供比傳統模型更快速的模擬結果。應用於 2012 年颱風蘇拉期間的洪水案例，結果顯示 3Di 在淹水範圍與水深模擬方面與實測數據吻合度高，並具備高效能計算與細緻可視化表現的優勢。相比 SOBEK，3Di 可在保有準確度下減少計算時間，提升應用於都市與農村地區極端降雨情境下之洪災預測與應變規劃潛力。該研究支持 3Di 作為洪水模擬與風險管理應用之有效工具。

2. Speet (2014)

本研究探討如何透過新世代的 3Di 水理模擬系統提升都市暴雨管理的決策品質。3Di 系統整合高解析度地形 (LiDAR DEM)、四叉樹網格與子網格計算技術，具備即時模擬、互動操作與圖像化分析功能。研究透過多個荷蘭城市實例展示 3Di 系統如何輔助規劃者在設計階段快速比較不同排水策略的成效，並提高利害關係人參與度與共識建立效率。相較傳統模式 (如 SOBEK 或 Infoworks)，3Di 能以更短時間提供高解析模擬結果，支援設計決策與緊急應變。研究強調，「資訊透明」與「模擬即時視覺化」是提升都市水利工程決策品質的關鍵。

3Di 透過演算法創新與資料視覺化整合，具備即時性、高解析與互動式操作特性，已廣泛應用於荷蘭及其他地區都市洪災模擬與排水策略規劃。其在精細模擬與決策支援方面展現高度優勢，亦具應用於臺灣都市與農村極端氣候下調適規劃之潛力。

七、River2D

River2D 模式是由加拿大淡水研究所 (Freshwater Institute，簡稱 FWI)、亞伯特大學土木環境系 (Civil and Environmental Department of the University of Alberta)、美國地質調查局中部生態科學中心 (Midcontinent Ecological Science Center of the U.S. Geological Survey，簡稱 MESCC)、亞伯特漁業部 (Fisher's Division of the Alberta Government) 共同研發與測試。(陳仲安, 2006)



1.Gard (2009)

本研究比較了 PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) 與 River2D 兩種水理棲地模式對魚類產卵棲地預測的差異。作者以美國維吉尼亞州 Smith River 為案例，針對褐鱒 (brown trout) 與虹鱒 (rainbow trout) 的產卵期水文條件進行模擬與分析。結果顯示，雖然 PHABSIM 與 River2D 所提供的物理棲地適合度 (WUA) 有一定的相關性，但 PHABSIM 傾向於高估某些區域的適合性，特別是在流速與水深分布變化劇烈之處。River2D 可捕捉到較多細節的流場資訊，提供更準確的棲地空間分布評估。研究強調選擇適當模型應考量物種需求與研究尺度，並指出二維模式在描述橫向與縱向流場變化方面的優勢。

2.Akter and Tanim (2019)

本研究使用 River 2D 二維生態水理模型，評估孟加拉 Karnafuli 河潮汐段中三種印度主要鯉魚 (Catla、Mrigala 與 Rohi) 的產卵棲地適合度。研究區域長 3 公里、寬 450~700 公尺，水深變化範圍為 3.28~7.5 公尺。研究採用物理棲地模擬法 (PHABSIM) 並結合偏好曲線，針對流速、水深與底質建立適合度指標，計算各節點的綜合適合度 (C_i) 與加權可用棲地面積 (WUA)。結果顯示，在流量為 $25\text{m}^3/\text{s}$ 時可達最大棲地異質性與適宜棲地面積，適合魚類產卵。該研究亦指出，受潮汐與地形影響的流速變異是關鍵因子，而 2D 模式相較於 1D 模式能更精準掌握此類變動，並可輔助決策環境基流需求。

River2D 為適用於生態導向河川治理的二維模式工具，具有準確模擬局部流場與物種棲地空間分布的能力，特別適合應用於棲地異質性高、流況複雜的河段，有助於提供生態基礎流量、復育空間設計等管理策略之量化支援。

八、小結

透過蒐集以上多個二維水理及輸砂模式之文獻資料，利用前人研究案例之經驗作為本研究選定二維水理及輸砂模式之參考。

前述模式中，SOBEK、3Di 與 River2D 雖具優異模擬能力，惟主要聚焦於都市

淹水管理與棲地評估，與本研究關注之輸砂與洪氾議題相關性較低，故初步排除。綜合考量模擬精度、操作便利性與功能完整性，如表 2-4 所示，最後依據比較結果，並參酌研究室既有應用經驗，最終選定 HEC-RAS 2D 作為本研究之模擬平台。

表 2-4 不同二維水理及輸砂模式之比較

模式名稱		HEC-RAS 2D	FLO-2D	CCHE-2D	SRH-2D
水 理 分 析	定量流	○	○	○	○
	變量流	○	○	○	○
	超臨界流	○	○	○	○
	亞臨界流	○	○	○	○
	混合流	○	○	○	○
輸 砂 分 析	均勻粒徑	○	○	○	○
	級配粒徑	○	○	○	○
	非平衡輸砂	○		○	○
	岩壁沖刷			○	○
河工結構		○	○	○	○
圖形介面		○	○	○	○

第三章 研究方法



3.1 NbS 導入流程

為推動自然解方（Nature-based Solutions, NbS）於實務上的應用，本研究參考 NbS 全球標準中所提出的 28 項評估指標(Angela et al., 2020; Saikia et al., 2022)，並引據林冠余 (2024)所建構具通用性之 NbS 導入架構，以因應如防災減災、生態系統退化等複合型社會與環境挑戰。導入流程如圖 3-1 所示，共分為五個階段：「了解系統」、「確定改善目標」、「制定行動計畫」、「實施行動計畫」，以及「監測與評估」。

本研究於港口溪流域的應用目前進行至「制定行動計畫」階段，並在導入過程中致力於對應 NbS 全球標準的核心要求，以建立一套具參考價值之應用案例。



圖 3-1 NbS 導入流程

第一階段：了解系統

本階段旨在確保所規劃之 NbS 能實質回應當地的問題情境。首先須進行利害關係人盤點與參與機制設計，確保其在 NbS 規劃過程中具充分參與與表達權，並兼顧原住民族群之權益保障。透過工作坊、座談會等參與式方法，彙整各界關注的流域議題，對應相關社會挑戰進行明確辨識與紀錄。同時，規劃者應深入掌握流域

背景，並參考過往研究與計畫成果，以奠定 NbS 規劃之知識基礎。

第二階段：確定改善目標

在此階段，須明確回應利害關係人之需求與期望，確保改善目標具有社會認同。透過議題共構方式，自利害關係人所關心的問題中篩選優先議題，並結合其對未來流域的發展願景，明確設定改善目標。目標可能涵蓋生物多樣性提升、水質改善、洪災風險降低等，作為後續 NbS 設計方向與成果評估之依據。

第三階段：制定行動計畫

在此階段，本研究著手制定具體可行之自然解方行動計畫。首先，參考 Morello (2020)整理在不同空間尺度所適用之 NbS 工具與措施，從中篩選最符合本研究改善目標之策略方案。選擇過程中，規劃者需綜合考量社會、經濟與生態系統等多重面向的交互影響，確保所提行動具系統整合性與永續性。行動計畫設計須先進行流域現況之基線評估，並針對擬議措施進行預期效益評估。評估內容包括對人類福祉之促進、生態多樣性之保育成效、以及對全球永續發展目標之潛在貢獻等。

本研究特別聚焦於應對「防災減災」與「生態系統退化」等核心社會挑戰，結合二維水理模擬與生態系服務分析方法進行量化效益評估，作為行動計畫制定之依據，亦可提供未來研究與實務操作參考。此外，行動計畫需同步評估其潛在成本與效益，並針對實施區域內外可能衍生之風險進行辨識與管理。規劃過程中亦應納入互補性措施整合、跨部門協調機制設計，並考量多元資金來源之可行性。最終，規劃者將依據評估結果，秉持科學依據與利益衡平原則，全面權衡各可行設計方案之預期效益與潛在影響，確保所選定之行動計畫具備相對於其他備選方案更高之可行性、合理性與永續潛力。

第四階段：實施行動計畫

此階段須建立完善之申訴與回饋機制，並因應跨轄區或跨部門議題，促成聯合決策與政策法規協調。如 NbS 執行受限於現行法規，應推動制度調整，確保措施與政策環境相容，進而保障其可行性與永續性。此外，實施過程亦需同步建立監測

機制，以支撐未來成效評估與調整需求。

第五階段：監測與評估

執行後需持續監測 NbS 對人類福祉與生態系統之實質影響，並定期檢視其是否達成原訂改善目標。監測重點包括潛在負面影響之預警、生態與社會系統變遷分析、利害關係人參與機制評估等。為確保 NbS 成效具韌性與調適性，應採用適應性管理策略，持續修正與優化措施內容。最終，透過成果公開與經驗分享，促進 NbS 知識交流與主流化推展，擴大其應用範圍與社會影響力。

此導入流程不僅適用於港口溪流域，亦可作為其他地區因應防災與生態退化挑戰之策略框架，進而推動 NbS 在政策與實務層面的整合應用，邁向永續治理之目標。

3.2 NbS 效益評估方法

為量化自然解方對港口溪河道之調適效益，本研究建構一套整合水理與生態指標之評估流程，如圖 3-2 所示，水理模擬部分使用 HEC-RAS 2D 模式分析不同重現期下之水位與流速變化，評估洪水調適成效；生態系評估則結合模擬結果，並透過 Python 建構棲息地適合度指標 (Habitat Suitability Index, HSI)，評估魚類棲地品質與變化趨勢。藉此方法，能有效檢視 NbS 行動計畫對生態與防災目標之綜效。



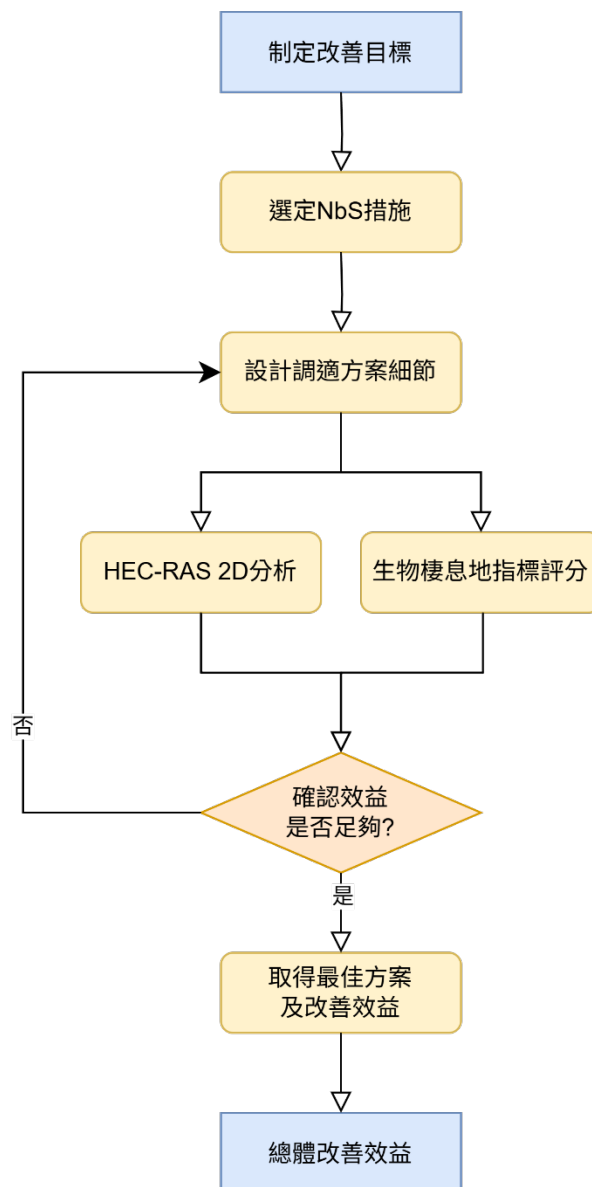


圖 3-2 NbS 效益評估流程圖

3.3 統整利害關係人之意見

在透過現地場刊港口溪集水區，對集水區有一定的了解後，並與在地人士進行交流溝通，統整當地居民及相關利害關係人之意見，以便整理所面臨的問題。

在整理問題時，將分成三大主題進行討論，分別為生活、生產及生態，針對三大主題提出問題，蒐集問題後再針對問題提出調適策略以及進行二維水理模擬。其各議題背景資料如下：



1. 議題一、生活：社區部落居住安全

南瑪都颱風及天秤颱風曾造成港口溪集水區內發生大規模水砂災害，加上氣候變遷所造成之短延時強降雨，易增加水砂災害風險，因此提升集水區居民居住安全的工作刻不容緩。

此議題的討論預期蒐集：a.集水區潛在風險地區；b.在地居民對於農村水保署之韌性坡地補助方案(草案)之看法及意見。

2. 議題二、生產：永續農業生產及產業願景

由資料蒐集及現勘結果顯示，港口溪集水區經濟產業以農業生產及生態旅遊兩類為主，由訪談社區居民得知目前於支流欖仁溪兩岸為雨來菇密集種植區域，雨來菇的種植需要大量乾淨水資源，加上極端氣候所造成的豐枯水期落差，水資源配置及管理即為重要課題。

此議題的討論預期蒐集：a.地方居民農業行為在未來氣候變遷下可能存在之風險；b.友善農耕及推動意願；c.低耗水農作之可行性討論。

3. 議題三、生態：港口溪生物棲地保育及生態旅遊

港口溪集水區下游為陸蟹重要棲地，中游及上游溪畔沿線保留完整濱溪帶植被，及淺山的覆層森林，為螢火蟲、梅花鹿等生物優良的棲地並成為生態旅遊資源，因此如何保育港口溪集水區內的生物資源為此議題之目標。此議題的討論預期蒐集：a.地方居民發展生態旅遊之自然資源重點區域；b.生物棲地改善需求及區位。

針對此三項議題，將蒐集當地居民以及 NGO 組織之意見，並稍作分類整理，如表 3-1 所示。

表 3-1 當地居民與 NGO 組織意見整理表

區域	項目	課題	提出單位人員
下游	生活	港口村附近 6 條坑溝過往為達治理成效以三面光工法進行，間接造成粗糙度下降，流速增加，希望未來可討論改善方案。	港口社區生態旅遊解說員
	生產	農作偶見受梅花鹿破壞，造成農民的困擾，希望可以透過相關計畫，輔導農民防範	港口社區生態旅遊解說員

區域	項目	課題	提出單位人員
	生態	草鴉過去曾有出現在河口地區的紀錄，近年則沒有紀錄，此生態資訊可提供給相關單位。	臺灣蜻蜓學會
中游	生活	對於目前提出的韌性補助表示肯定，可鼓勵民眾接受溢淹區劃設或緩坡化，除減少對生態的影響外，亦可增加防減災的空間。	東峰生態工作室、臺灣蜻蜓學會、港口社區生態旅遊解說員、落山風解說工作室
	生產	支流攬仁溪近年多種植雨來菇，因此水資源分配的課題越加重要。	里德村、里德社區發展協會、屏東環境保護聯盟
	生態	支流林祿溪與港口溪匯流口，常見外來種刺軸含羞木，於河灘地大肆生長，希望可以移除計畫。	里德社區發展協會、屏東環境保護聯盟、永靖村、里德村
上游	生活	長樂村下部落因位於地質災害敏感區，近年開始有遷村的討論，可參考分水嶺部落(已完成遷村)過去的經驗，來持續推動。	落山風解說工作室
	生產	在地農產品(如：黑豆及盤固拉牧草)之附加價值普遍偏低，希望有相關單位可以輔導。	港口社區生態旅遊解說員
	生態	可持續維護原始自然地貌，維持生物多樣性高的環境。	臺灣蜻蜓學會、落山風解說工作室
全區	生活	公所有「水保服務團」的設立，民眾如有需求可前往諮詢了解，可多加利用。	屏東縣政府水利處
	生產	集水區內常見農作受台灣獼猴破壞	港口社區居民、落山風解說工作室
		農業生產可參考「墾丁國家公園友善農業」的模式經營。	墾丁國家公園管理處
	生態	外來種刺軸含羞木，於河灘地大肆生長，希望後續可以有移除計畫。	里德社區發展協會、屏東環境保護聯盟、永靖村、里德村
		早期為達治理成效，集水區內部分區域以三面光工法施做，希望未來可討論改善方案。	東峰生態工作室、臺灣蜻蜓學會、里德村、里德社區發展協會、港口社區生態旅遊解說員

(資料來源：112 年度集水區調適規劃研究計畫-港口溪集水區；本研究整理)

除了與在地人士交流，相關政府單位的意見也需要進行整合，對於政府部門之

間各單位之權責分工或跨機關之合作，以及確認不同意見預設調適策略之可行性。

對於政府部門各單位之權責分工或跨機關合作，確認不同問題預設調適策略之可行性，皆須進一步進行討論，其相關政府單位之意見整理如表 3-2 所示。





表 3-2 相關政府單位之意見整理

內容說明	分工討論	結論
經本研究分析港口溪及小路溪匯流口發生 Q ₅₀ 情境下可能發生溢淹，爰此，期以運用水砂溢淹區及緩衝綠帶規劃推動改善方案。	農業部農村發展及水土保持署臺南分署： 1. 港口溪及小路溪匯流口區域經查現況為私有土地。 2. 農村水保署為提升山坡地韌性承災能力、降低易致災區域淹水風險、控制土壤沖蝕及營造生物棲地，將集水區保育治理策略，除工程治理手段外，納入藏水、保土、自然解方及生態永續之調適對策，112年10月15日推動韌性坡地補助試辦方案正式通過，規劃辦理棲地友善、緩衝綠帶及水砂溢淹區等三項補助，作為推動韌性坡地之措施。 3. 有關緩衝綠帶希冀請益農業部林業及自然保育署屏東分署提供專業建議(如植栽配置、樹種選擇及樹苗提供等)，以臻完善緩衝綠帶營造。 農業部林業及自然保育署屏東分署： 建議參考於101年12月出版的「緩衝綠帶適生植物及其栽植方法彙編」，可提供該書建議苗木，並以適地適種為原則。	後續針對水砂溢淹區進行更細部之模擬，另外緩衝綠帶之設置除了參考「緩衝綠帶適生植物及其栽植方法彙編」之外，也會洽詢農業部林業及自然保育署之專業建議。
經研究調適計畫分析永港橋上游左岸地勢低處發生 Q ₅₀ 情境下可能發生溢淹，期以運用水砂溢淹區及緩衝綠帶規劃推動改善方案，經調查其溢淹範圍鄰近河川區域且為公有土地。	農業部農村發展及水土保持署臺南分署： 1. 永港橋上游左岸地勢低處區域現況鄰近河川區域且為公有土地(國有財產署)。 2. 農村水保署112年10月15日推動韌性坡地補助試辦方案正式通過，規劃辦理棲地友善、緩衝綠帶及水砂溢淹區等三項補助。 3. 其中水砂溢淹區因鄰近河川區域且為公有地，請經濟部水利署第七河川分署及屏東縣政府共同確認可供緩衝綠帶規劃設置區域(如:河川區域範圍確認) 4. 有關緩衝綠帶部分，希望請益農業部林業及自然保育署屏東分署提供專業	後續針對水砂溢淹區進行更細部之模擬，另外緩衝綠帶之設置除了參考「緩衝綠帶適生植物及其栽植方法彙編」之外，也會洽詢農業部林業及自然保育署之專業建議。

內容說明	分工討論	結論
	建議(如植栽配置、樹種選擇及樹苗提供等)，以利完善緩衝綠帶營造。 農業部林業及自然保育署屏東分署： 建議參考於101年12月出版「緩衝綠帶適生植物及其栽植方法彙編」，可提供該書建議苗木，並以適地適種為原則。 經濟部水利署第七河川分署： 無意見。 屏東縣政府： 1. 對於公有土地設置水砂溢淹區，無意見。 2. 設置在私有土地若能取得居民同意，無意見。 3. 因應法規，對於使用公有土地設置緩衝綠帶，無意見。	
近年欖仁橋上游支流欖仁溪沿岸雨來菇業者數量增加，需要大量灌溉用水，且取水管線欠缺規劃，亦存在水資源分配的課題。	農業部農村發展及水土保持署臺南分署： 可提供資料蒐集(如取水區域及取水量)亦可請益相關單位提供既有或未來可能改善方案構想。 4. 感謝農水署相關資訊轉達，再請規劃團隊於後續執行過程轉達當地民眾相關資訊，已逐漸改善欖仁溪水資源課題。 屏東縣政府： 當地舊有灌溉設施已廢棄，本府對於灌溉用水並無管轄權。 農業部農田水利署屏東管理處： 1. 欖仁溪於民國71年以後便已經劃出農水署的事業區外，之後便無興建灌溉用水設施。 1. 民國109年後，配合改制有擴大灌溉服務計畫，可套用在欖仁溪區域對農民的改善。	請相關政府單位所提供之資訊轉達給當地民眾，以逐漸改善欖仁溪水資源問題。

內容說明	分工討論	結論
	2. 擴大灌溉服務內容包括:水源之水權、設施盡量設置在公有地上、若設置於私有地需取得同意書。補助計畫由滿州鄉公所提出，送屏東縣政府書審，申請書可提及當地作物產能及經濟價值。 3. 當地具有農田水利作業基金土地，若有配合農田灌溉之需求，農水署皆會同意使用。 4. 若有個人需要申請管線等灌溉設施，農水署有旱作補助，個人也可申請，可補助至49%左右。	
港口溪近出海口右岸排水，匯入港口溪流處既有構造物毀損，形成高約2公尺之落差，阻隔水域生物棲息。	農業部農村發展及水土保持署臺南分署： 希望請教相關單位提供未來可能改善方案構想。 屏東縣政府： 將於後續現地勘查後提出意見。 經濟部水利署第七河川分署： 無意見。 墾丁國家公園管理處： 無意見。	位置坐標：TWD97 (X=232931, Y=2432175)，提供屏東縣府現地勘查後，以利辦理後續事宜。
支流林祿溪與港口溪匯流口刺軸含羞木蔓延嚴重，於河灘地大肆生長，因此生態關注團體極為重視，希望逐步推動改善計畫	農業部農村發展及水土保持署臺南分署： 1. 在地民眾與環保團體深切關心刺軸含羞木於河灘地大肆生長，希望請教相關單位提供未來可能改善方向構想，如移除計畫等。 2. 建議屏東縣政府於工程預算編列時，將稻草或種子敷蓋採密集鋪設方式辦理，以減少刺軸含羞木生長空間。 屏東縣政府： 刺軸含羞木於施工當下協同廠商清除，完工後便無經費清除。後續會研擬是	為減少刺軸含羞木生長空間，需請屏東縣政府日後於該處編列工程預算時，額外編列台除外來種之工法所花費經費。

內容說明	分工討論	結論
	否編列專責經費清除入侵物種。 經濟部水利署第七河川分署： 因港口溪集水區未涉及本分署轄區，故未能支援外來種移除工作。 農業部林業及自然保育署屏東分署： 農業部林業及自然保育署屏東分署109年成立「高屏澎地區外來入侵植物防治聯繫平台」定期召開會議邀集所涉機關針對港口溪刺軸含羞木分年分期執行排除工作，並請各機關洽墾丁國家公園管理處確認移除地點是否為陸蟹或其保育熱點，避免除時影響陸蟹生態及破壞物種棲地；另港口溪為國土綠網關注獨流溪，下游位恆春半島海岸保育軸帶。須關注保育棲地及相關物種。 墾丁國家公園管理處： 無意見。	

(資料來源：112 年度集水區調適規劃研究計畫-港口溪集水區；本研究整理)

透過文獻回顧、現地場刊以及統整利害關係人之意見，並考量使用二維水理及輸砂模式分析之可行性，最終選定兩個問題：河道溢淹問題以及河道土砂沖淤問題，以 HEC-RAS 2D 不同模擬方法進行後續之研究。

其中河道溢淹問題，經初步模擬結果發現，位於小路溪與港口溪匯流處，以及永港橋上游左岸為淹水潛勢區域，並透過當地居民以及相關政府單位交流後，確認此兩處地區每逢雨量較大時，變會有淹水災害發生，進而使保全對象受損，後續將透過 HEC-RAS 2D 之定床模擬針對兩個地區分析淹水潛勢，並設計相對應之調適策略。小路溪與港口溪匯流處以及永港橋上游位置如圖 3-3 所示。

其中河道土砂沖淤問題，經由現地場刊發現泰安橋下游以及福摩沙橋下游之舊有整治工程，兩處之固床工有嚴重沖刷，除了固床工毀損之安全疑慮外，高落差也使生物縱向廊道遭受阻隔，且泰安橋區域有一處護岸有開裂之情況，而福摩沙橋有一處護岸造成基腳淘刷之情形。對此，本研究後續將透過 HEC-RAS 2D 之洞床模擬分析河道土砂運移之情形，並設計相對應之調適策略。泰安橋下游之舊有整治工程以及福摩沙橋下游之舊有整治工程的位置如圖 3-4 所示，泰安橋及福摩沙橋之現場情形如圖 3-5、圖 3-6 所示。

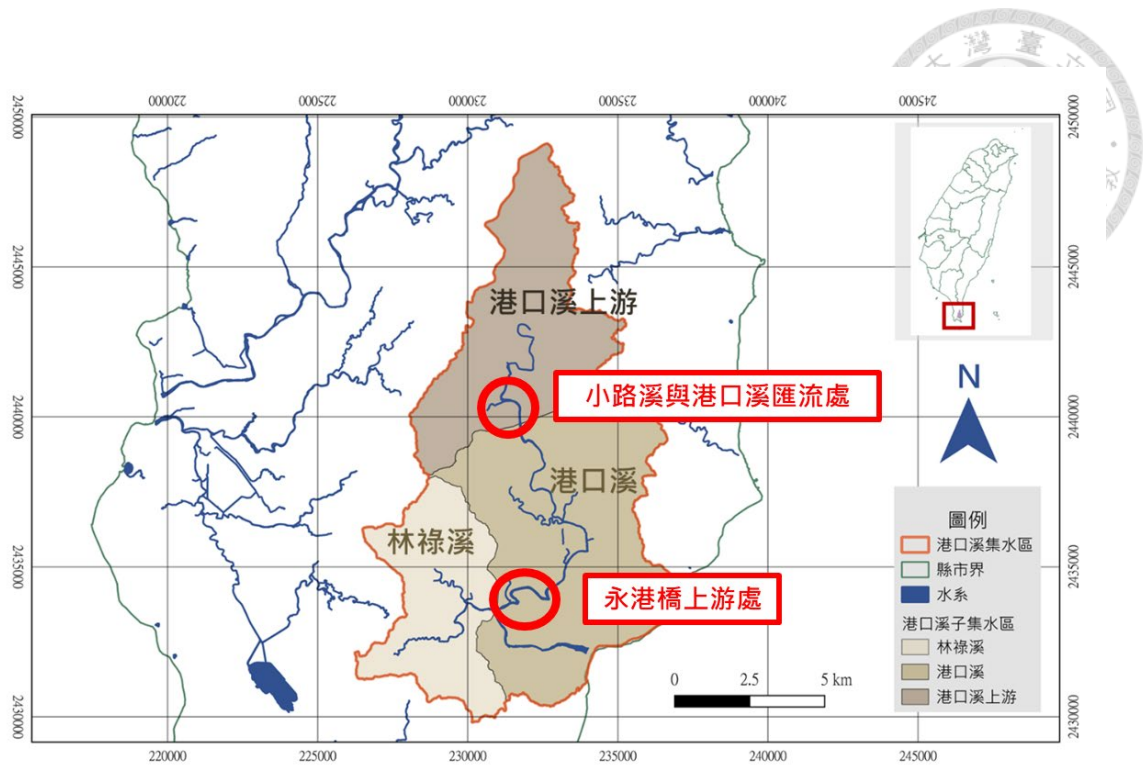


圖 3-3 小路溪與港口溪匯流處以及永港橋上游位置圖



圖 3-4 泰安橋下游以及福摩沙橋下游之舊有整治工程位置圖



圖 3-5 泰安橋下游現況圖



圖 3-6 福摩沙橋下游現況圖

3.4 數值模式 HEC-RAS

本研究採用美國陸軍工程兵團水文工程中心（U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC）開發之 HEC-RAS 2D 數值模式作為主要模擬工具。透過邊界條件、流量歷線與模式參數之設定與驗證，建立具可信度之數值模式，進而分析港口溪集水區之水砂災害分布與調適策略研擬。

3.4.1 模式簡介

HEC-RAS 2D 為一種水理及輸砂模式之分析工具，二維模擬之主要控制方程式為質量守恆方程式（Mass conservation equation）與動量方程式（Momentum equation），分述如下：

1. 質量守恆方程式（Mass conservation equation）

不可壓縮之二維流體連續方程式如式 3.1 所示。



$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (\text{式 3.1})$$

其中， t 為時間， u 為 x 方向之速度， v 為 y 方向之速度， q 為單位流量。若將上式以向量方式表示，則如式 3.2 所示。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (hV) + q = 0 \quad (\text{式 3.2})$$

其中， $V = (u, v)$ 為二維速度向量， ∇ 為向量微分算子。

2. 動量方程式 (Momentum equation)

當流場內的水深水平方向尺度遠大於垂直方向尺度時，可忽略垂直方向之速度，並假設水流為靜水壓力分佈，此時可將三維流場垂向積分簡化為二維淺水動量方程式，如式 3.3 及式 3.4 所示。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + V_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - C_f u + f_v \quad (\text{式 3.3})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + V_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - C_f v + f_u \quad (\text{式 3.4})$$

其中， H 為水面高程， t 為時間， u 、 v 分為 x 、 y 座標方向之速度分量， g 為重力加速度， V_t 為黏滯係數， C_f 為底床摩擦係數， f_c 為科式參數。若將上述兩式以向量表示，則如式 3.5 所示

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H + V_t \nabla^2 V - C_f V + f k \times V \quad (\text{式 3.5})$$

其中 k 為垂直單位向量。

在二維模式演算過程中，其控制方程式可分為二維擴散波方程式 (Diffuse wave equations) 及二維聖維南方程式 (Saint Venant equations)，如式 3.6~式 3.9 所示，兩者計算時皆採用有限體積法 (Finite Volume Method, FVM)，以下針對兩種方程式進行大略說明。

二維擴散波方程式 (Diffuse wave equations)：



$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \text{ (當 } C \text{ 有最大值 } 5.0)$$

(式 3.6)

$$\Delta T = \frac{\Delta X}{V} \text{ (當 } C=2.0)$$

(式 3.7)

二維聖維南方程式 (Saint Venant equations) :

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (當 } C \text{ 有最大值 } 3.0)$$

(式 3.8)

$$\Delta T = \frac{\Delta X}{V} \text{ (當 } C=1.0)$$

(式 3.9)

其中， C 為庫朗數 (Courant number)， V 為波速， ΔT 為計算時距， ΔX 為平均網格大小。

二維擴散波方程式為系統預設選項，具有計算速度快與穩定性高之優勢，適用於多數模擬情境；而聖維南方程式則屬全動量模式，適合於模擬紊流、潮汐、水面劇烈變化等高動態條件，但對時間步長要求較高，計算成本亦較大。

根據 HEC-RAS 2D 6.2 版使用手冊，以下情境建議採用聖維南方程式 (Saint Venant equations) 以提升模擬準確性：

(1) Highly Dynamic Flood Waves:

若在執行潰壩或山洪分析時，洪水波將快速上升及下降，速度及加速度在空間和時間的變化都較大，為獲得準確的模擬結果，應使用聖維南方程式。

(2) Abrupt Contractions and Expansions:

若有突然收縮或擴張的區域，利用聖維南方程式更能準確地模擬。

(3) Flat Sloping River Systems:

在模擬坡度較為平坦的河流時，當水體從一處移動到另一處時，重力與摩擦力可能並不是主要作用的力量，使用聖維南方程式較為適合。

(4) Tidally Influenced Conditions:

若模擬區域為受潮汐影響的海灣、河口或河流，潮汐之波的傳遞無法用擴散波方程式建模。

(5) General Wave Propagation Modeling:



若需要對快速打開或關閉結構所導致的波進行建模，及波在牆壁或物體周維上升等情況，需使用聖維南方程式。

(6) Super Elevation around Bends:

若在模擬渠道中有急彎，且欲察看彎道凹岸處之水面高是否有溢出岸頂，應使用聖維南方程式。

(7) Detailed Velocities and Water Surface Elevations at Structures:

若想嘗試計算水工結構物及其附近的詳細速度分布，使用聖維南方程式將會得到更準確的結果。

(8) Mixed Flow Regime:

利用聖維南方程式能更準確地模擬亞臨界流及超臨界流之間的轉變。

依據前述建議與模擬目標，本研究定床模擬採用系統預設之「二維擴散波方程式」進行；而動床模擬則採用「二維聖維南方程式」以提升土砂輸移模擬之準確性。

利用 HEC-RAS 2D 進行水理分析時，其主要步驟為利用雨型及單位歷線進行疊加，得到流量歷線後輸入 HEC-RAS 2D 模式，並分析模擬結果。本研究關於 HEC-RAS 2D 之輸入參數設定參考民國 99 年「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告，其水文資料統計至民國 94 年。

本研究以變量流定床模擬結果進行淹水潛勢分析，並同時作為模式可信度驗證依據。動床模擬則用以掌握構造物上下游段之土砂運移與沖淤平衡狀態，提供後續調適策略設計之依據與參考。

3.4.2 建模流程

HEC-RAS 2D 模擬作業中需設定多項參數，其中數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）為空間分析之基礎資料來源。本研究定床模擬使用解析度為 20 公尺之 DEM，動床模擬則採用解析度 1 公尺之 DEM 進行局部區域模擬，以提升地形呈現與模擬精度。

在網格設定部分，參考魏楷倫 (2024)之研究設計，定床模擬之計算網格設定為 $5\text{m} \times 5\text{m}$ ，動床模擬範圍則採 $3\text{m} \times 3\text{m}$ ，而針對構造物部位，則細化為 $1\text{m} \times 1\text{m}$ ，以確保水力結構行為之精確模擬。曼寧粗糙係數 (Manning's n) 參數依據港口溪治理規劃報告(2010)所建議，將其曼寧 n 值設定為 0.035。定床模擬網格範圍設置如圖 3-7 所示，動床模擬網格設置則如圖 3-8、圖 3-9 所示。其餘參數設定將透過以下章節說明。

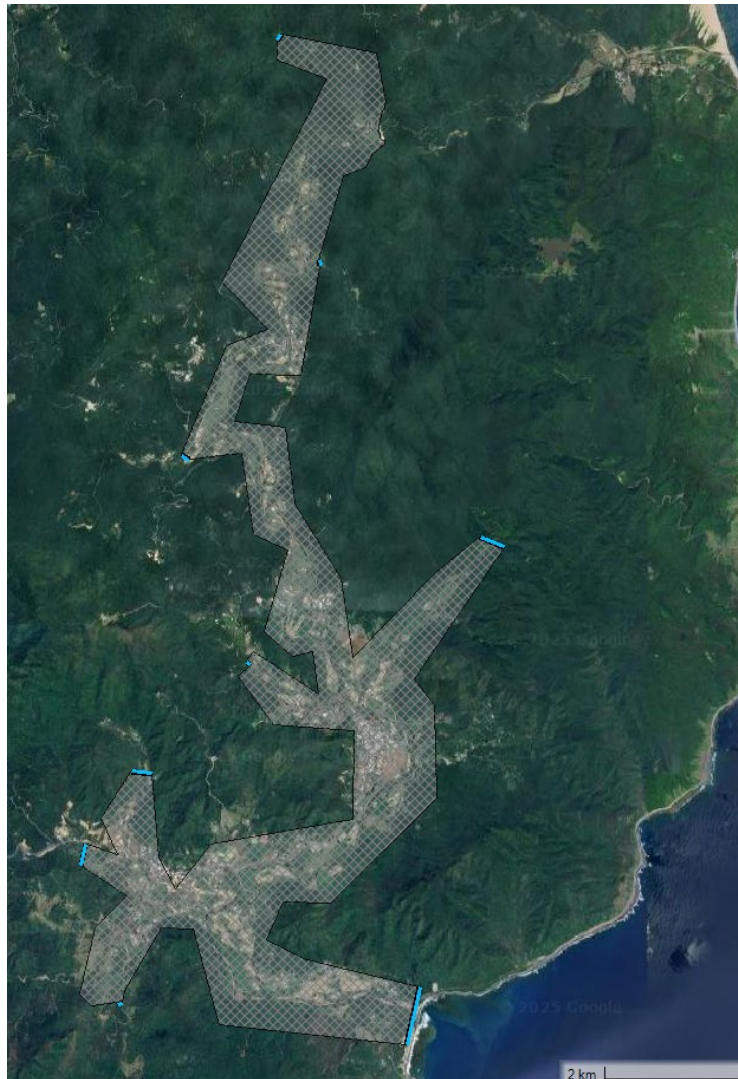


圖 3-7 港口溪網格範圍設置示意圖



圖 3-8 泰安橋設置示意圖

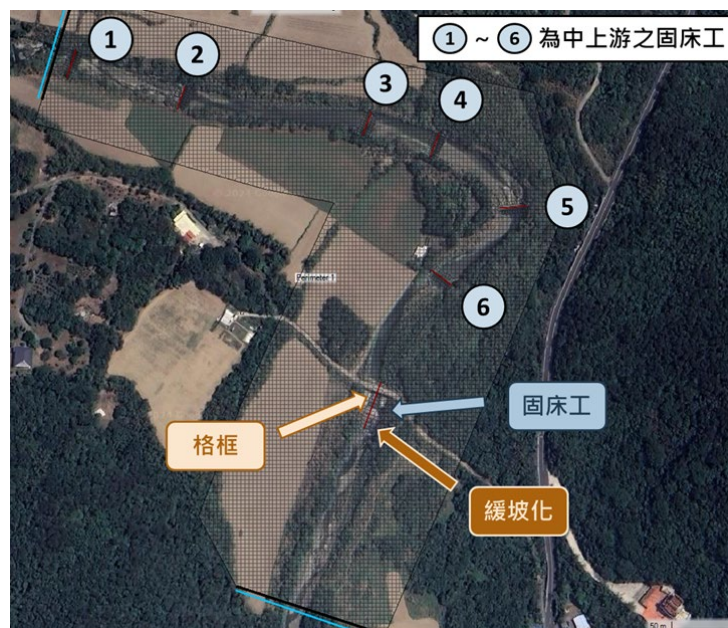


圖 3-9 福摩沙橋設置示意圖

1. 水文頻率分析

本研究採用牡丹、石門、恆春(1)、恆春(2)等四座鄰近雨量站進行水文頻率分析。首先以徐昇多邊形法估算各雨量站控制面積比例，推算集水區加權平均降雨量(見表 3-3)。降雨頻率分析方面，分別以三參數對數常態、皮爾遜III型、對數皮爾遜III型及極端值I型等四種機率分佈進行降雨頻率分析，並利用卡方檢定進行機率分佈之適合度檢定，此外，為確認機率分佈選擇之準確性，進一步計算平方差和

(SSE)以及標準誤差(SE)兩種方式，其平方差和標準誤差之公式如式 3.10 和式 3.11 所示。

$$SSE = [\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2]$$

(式 3.10)

$$SE = \left[\frac{SSE}{n-r} \right]^{\frac{1}{2}}$$

(式 3.11)

式中：

n：資料年數

r：機率分布之參數個數

X_i ：實測資料由大至小排列之第 i 大值

根據 Hazen 點繪法，選擇 SE 與 SSE 最小者為最佳分布。分析結果顯示，表 3-4 及表 3-5 為港口溪集水區一日及二日最大暴雨之降雨分布，綜觀表內 SE 及 SSE 值，選定對數皮爾遜III型為最適當之機率分佈。由於本研究區域河道坡陡流急，急流時間較短，故依規劃報告分析結果，採用一日降雨量較為適宜。

表 3-3 港口溪流域各雨量站控制面積及權度表

測站		面積(km ²)	權度(%)
1850P001	牡丹	2.17	2.14
1850P002	石門	34.07	33.50
457590	恆春(1)	34.07	15.78
1865P003	恆春(2)	16.05	48.58
合計		101.69	100.00

(資料來源：「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告)

表 3-4 港口溪流域各重現期距一日最大暴雨量機率分佈表

機率分佈 重現期距	LOG-NORMAL III	PEARSON III	LOG-PEARSON III	EXTREME I
2	213.0	209.8	214.7	217.3
5	295.2	295.7	296.7	309.3
10	352.3	355.6	352.5	370.2
20	408.8	413.7	407.2	428.6
25	427.0	432.2	424.8	447.2
50	484.2	489.2	479.8	504.2
100	542.8	545.9	535.8	560.9
(SSE)	7497	9322	7972	14270
(SE)	13.2	14.72	13.62	18.01

Mean Value = 231.935
 Standard Deviation = 93.64
 Skewness Coefficient = 1.518 (單位:mm)

(資料來源：「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告)

表 3-5 港口溪流域各重現期距二日最大暴雨量機率分佈表

機率分佈 重現期距	LOG-NORMAL III	PEARSON III	LOG-PEARSON III	EXTREME I
2	288.6	284.1	295.8	294.9
5	387.6	387.8	394.8	406.3
10	457.4	461.6	458.4	480.1
20	527.2	534.0	518.0	550.9
25	549.9	557.1	536.7	573.4
50	621.5	628.9	593.8	642.5
100	695.4	700.6	650.1	711.2
(SSE)	37930	42420	35120	44400
(SE)	29.7	31.41	28.58	31.77

Mean Value = 212.63
 Standard Deviation = 113.44
 Skewness Coefficient = 1.635 (單位:mm)

(資料來源：「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告)

2. 兩型設計

使用治理規劃報告(2010)所採用之 Horner 之降雨強度公式，計算得到各延時之降雨強度，如式 3.12 所示。

$$I_T = \frac{a}{(T+b)^c} \quad (\text{式 3.12})$$

式中：

I_T ：降雨延時 T 小時內之平均降雨強度(mm/hr)

T：降雨延時(min)

a、b、c：常數

因權重最大之恆春(2)為普通雨量站，無時雨量紀錄，故選擇權重次高之石門站作為代表站，依照經濟部水利署提供之臺灣地區雨量測站降雨強度-延時 Horner 公式分析，如表 3-6 所示。

透過 Horner 降雨強度公式計算出各單位時間之降雨量後，利用位序法設計雨

型，將降雨量百分比最大值放在第 12 小時，依大小向前後對稱排列形成設計雨型，如圖 3-10 所示。

表 3-6 石門站 Horner 公式參數表

重現期距(年)	a	b	c
2	1040.013	18.256	0.5972
5	934.951	10.688	0.5409
10	810.131	5.644	0.4984
20	711.614	1.482	0.4616
25	685.197	0.542	0.4508
50	603.573	-2.998	0.4175
100	544.380	-5.060	0.3888

(資料來源：「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告)

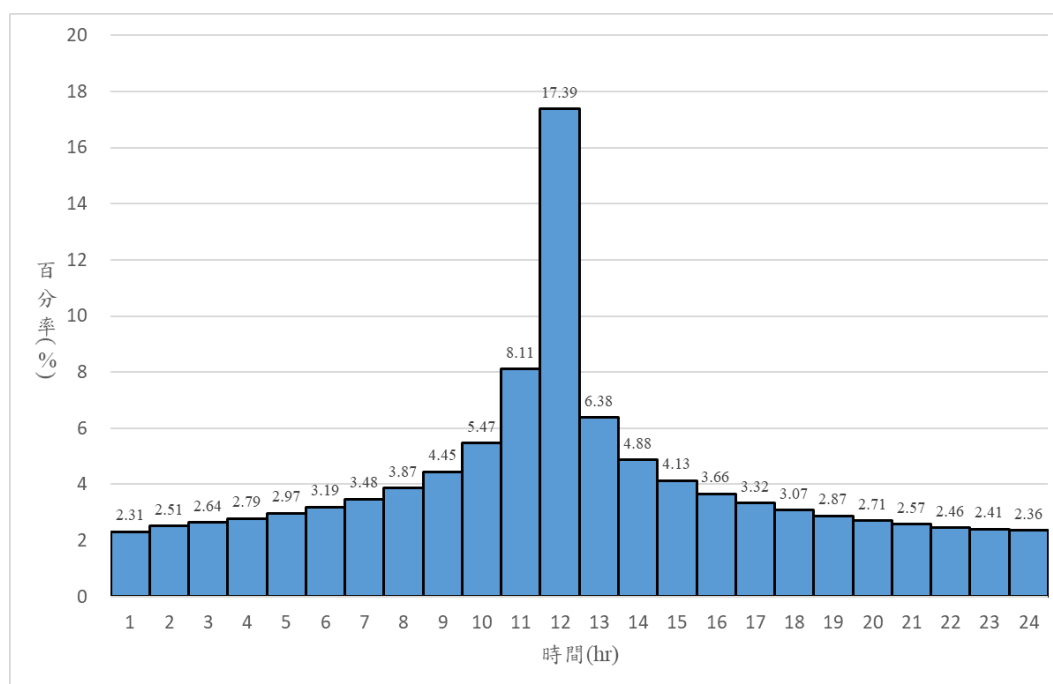


圖 3-10 設計雨型(25 年重現期距)

(資料來源：「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告)

3.單位歷線



計算單位歷線常見的方法有三角形單位歷線法及瞬時單位歷線法，也可以使用合理化公式推估洪峰流量後再計算單位歷線。本研究採用治理規劃報告(2010)所建議使用之方法，即三角形單位歷線法。

依據美國水土保持局之經驗公式：

$$Q_p = \frac{0.208 \times A \times R_e}{T_p} \quad (\text{式 3.13})$$

$$T_p = \frac{D}{2} + 0.6T_c \quad (\text{式 3.14})$$

$$T_r = 1.67T_p \quad (\text{式 3.15})$$

式中：

Q_p ：洪峰流量(cms)

A ：流域面積(km²)

R_e ：超滲雨量(mm)

T_p ：開始漲水至洪峰發生之時間(hr)

D ：單位降雨延時(hr)，需與雨型單位刻度一致

T_r ：洪峰流量發生至歷線終端之時間(hr)

T_c ：集流時間(hr)

其中雨型單位刻度 D 由 T_c 之推算值依下列原則選擇。

$$T_c > 6\text{hr} \quad D=1.0\text{hr} \quad (\text{式 3.16})$$

$$3\text{hr} < T_c \leq 6\text{hr} \quad D=0.8\text{hr} \quad (\text{式 3.17})$$

$$1\text{hr} < T_c \leq 3\text{hr} \quad D=0.4\text{hr} \quad (\text{式 3.18})$$

$$T_c \leq 1\text{hr} \quad D=0.15\text{hr} \quad (\text{式 3.19})$$

急流時間 T_c 採用治理規劃報告(2010)所建議之加州公路公式，如式 3.20 所示。

$$T_c = \left(\frac{0.87L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (\text{式 3.20})$$

L ：集水區內排水路最上游點至控制點水平距離(km)

H ：集水區內排水路最上游點至控制點高程差(m)

依據三角形單位歷線法原理，綜合考量集水區地形特性與流域參數，推估出各控制點之集水面積、流路長、高程差與集流時間等參數，結果如表 3-7 所示。進一步結合各重現期距之 24 小時暴雨量與設計雨型，扣除治理規劃報告(2010)中建議之初期降雨損失 4.5 mm/hr，並應用線性疊加原理計算各重現期距之流量歷線及其洪峰流量，彙整結果如表 3-8 所示。

表 3-7 集水區特性及三角形單位歷線參數表

控制點	集水面積 A(km ²)	流路長 L(km)	高差 H(m)	集流時間 T _c (hr)	降雨延時 D(hr)	洪峰時間 T _p (hr)	T _r (hr)	基期時間 T _b (hr)
出海口	101.69	31.18	400	5.02	0.8	3.41	5.69	9.10
林祿溪匯流前	69.03	27.27	390	4.34	0.8	3.00	5.02	8.02
攬仁溪匯流前	39.61	20.65	364	3.23	0.8	2.34	3.91	6.25
林祿溪出口	22.97	6.50	150	1.20	0.4	0.92	1.53	2.45
攬仁溪出口	10.22	4.20	100	0.84	0.15	0.58	0.97	1.55

(資料來源：「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告)

表 3-8 三角形單位歷線法計算之洪峰流量結果表

重現期距 洪峰流量	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₁₀₀
出海口	611	784	879	965	991	1068	1213
林祿溪匯流前	445	569	636	696	714	767	818
攬仁溪匯流前	294	373	413	449	460	490	519
林祿溪出口	275	343	375	401	409	429	447
攬仁溪出口	150	186	202	217	220	233	243

(資料來源：「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告)

4.生態基流量設定

河川生態基流量的研究已發展出多種計算與定義方式，包括最低維持流量、環境基準水量、水生棲地基本需水量、生態環境供水量等。儘管這些術語在定義上略有差異，其共同目的皆為確保河川生態系的穩定運作與生物多樣性之維繫，總稱為生態基流量(Jowett, 1997)。

目前常見的基流量評估方法可歸納為四大類：歷史流量法、水理參數法、棲地模擬法與經驗法。各方法簡述如下：

(1)歷史流量法(historic flow methods)



此類方法通常以河川長期流量紀錄為基礎，從年平均流量（Mean Annual Flow, MAF）之百分比或日流量延時曲線中擷取代表性流量值，作為生態保育之參考標準。

A. Tennant 法

Tennant (1976)以年平均流量（Mean Annual Flow，簡稱 MAF）為基礎，根據 MAF 不同比例與生態系狀態的關聯，水域生態環境之表現狀態，建立河川保育等級分類。

B.日流量延時曲線法

選取日流量延時曲線中 95%時間達成之流量，作為基流代表值，為臺灣地區常用方式。

(2)水理法(hydraulic methods)

本方法假設特定水理變數與生態功能間存在相關性，例如流速或水深與棲地適存性的線性關係，透過調整水理參數以維持棲地功能。

(3)棲地法(habitat methods)

強調物種可利用棲地面積（WUA）隨流量變動的關聯性。當可用棲地達某一標準範圍時，即可對應出所需之生態基流量，常結合 PHABSIM 等生態模式進行推估。

(4)經驗法(empirical methods)

此法基於過往工程或研究案例建立經驗公式，常用於初步評估階段，例如新英格蘭方法、日本集水區面積法與彈性水權調整法等。

本研究採用港口溪上游既有水位觀測站之紀錄資料進行換算，並基於臺灣地區廣泛應用的歷史流量法中之延時曲線法，選取日流量延時曲線中 95%時間達成之流量值作為本區域之生態基流量。最終推估出之生態基流量為 2.987 cms，並據此作為後續數值模擬之基礎，結果如圖 3-11 所示。

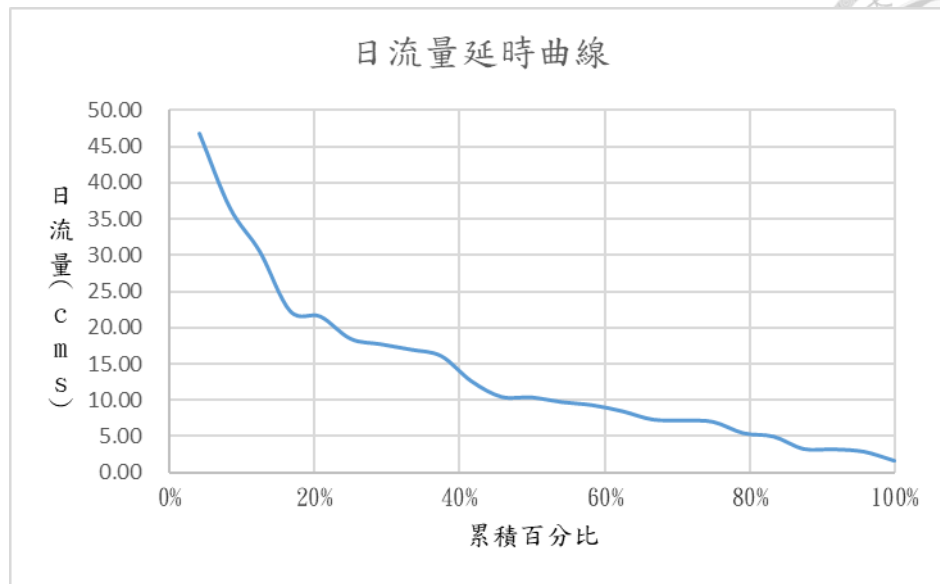


圖 3-11 港口溪上游日流量延時曲線圖

5. 動床模擬參數設定

(1) 土砂粒徑分佈

河床材料之粒徑分佈為動床模擬中重要之輸入參數之一。本研究參考治理規劃報告(2010)中之現地採樣成果，繪製粒徑分佈曲線如圖 3-12 所示，並以其結果作為模擬所需之底床級配資料。

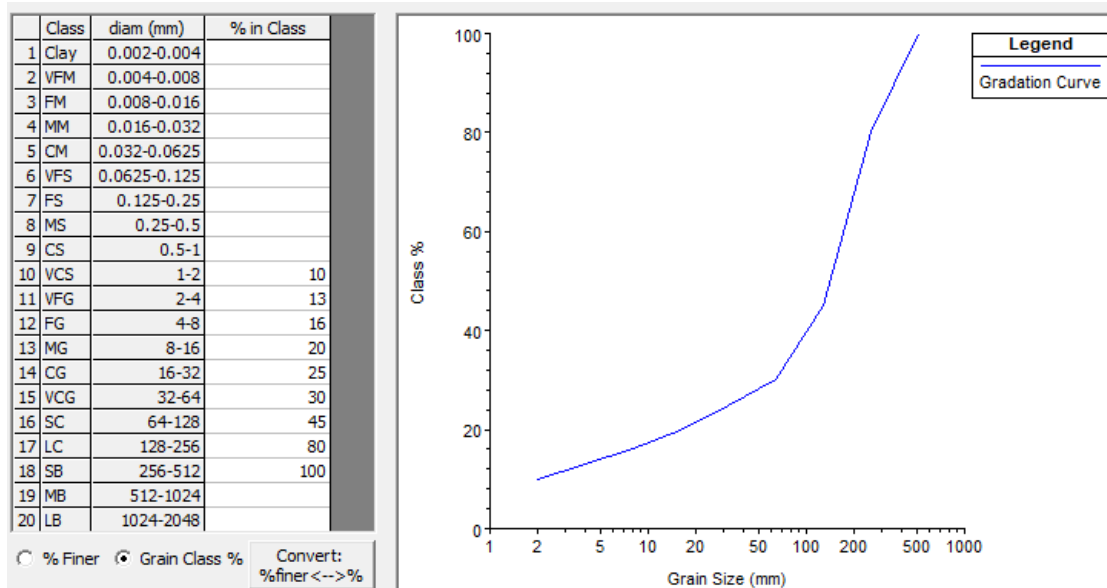


圖 3-12 土砂粒徑分佈曲線

(2) 水流含砂量

HEC-RAS 2D 在沉積物邊界條件 (Sediment Boundary Conditions) 中可設定水流含砂量，其分為 5 種輸入方式，分別為 Rating Curve、Sediment Load Series、Equilibrium Load、Capacity Ratio 以及 Clear Water (no Sed)，以下將分別說明。

A. Rating Curve

以單位時間之土砂輸移量 (tons/day) 或水中含砂濃度 (mg/l) 作為輸入，並可指定不同粒徑級配，適用於一般含砂水流邊界建模。

B. Sediment Load Series

與 Rating Curve 類似，惟可輸入隨時間變化之泥砂資料，適用於有實測含砂資料者，可提升模擬準確性。

C. Equilibrium Load

依據流量與河床級配由系統自動估算運砂能力。當缺乏實測數據時，此法可有效提供合理初步估算，為模式初建時常用選項。

D. Capacity Ratio

將邊界含砂量設定為 Equilibrium Load 之比例。此法屬 Equilibrium Load 變型，提供較彈性之調整空間。

E. Clear Water (no Sed)

模擬清水條件，邊界不含砂，較少應用於實際泥砂運移模擬中。

經現地調查並進行多次試算與比較，考量資料可得性與模擬穩定性，本研究最終採用 Equilibrium Load 作為邊界條件之設定方式，以作為動床模擬之含砂水流參數。

(3)其他參數設定

除上述設定外，HEC-RAS 2D 動床模擬尚需設定其他關鍵參數。參考魏楷倫 (2024)之設計，進行改動之數據包括 Transport Function、Sorting Method、Fall velocity Method、Unsteady Computation Options and Tolerances 及 Transport Energy Slope Method，其餘未提到參數皆為 HEC-RAS 2D 之預設，無進行改動。



進行改動之參數設置如下：

Transport Function：Wu

Sorting Method：Active Layer

Fall velocity Method：Soulsby

Transport Energy Slope Method：Averaged(Centered)

傳輸功能(Transport Function)選擇 Wu et al. (2000)公式，此傳輸公式考量到非均勻輸砂的傳輸中，會因為粒徑不同而有相互隱藏及顯露的作用，因此加入隱顯參數(hiding and exposure factor)的應用。表 3-9 為此公式之適用範圍。

排序法(Sorting Method)選項當中，二維輸砂模式一律使用類似於一維「主動層法 (Active Layer method)」的方式，但它允許設定任意數量的床層。其中，主動層的厚度預設為 D90 粒徑大小，或是 D90 的一個倍數。

沉降速度法 (Fall Velocity Methods) 中選擇 Soulsby 公式，Soulsby (1997) 提出了非黏性沉積物的沉降速度公式，其中包括顆粒大小和密度、水黏度和沈積物濃度的影響。其公式如式 3.21 所示。

$$\omega_{sd} = \frac{v}{d} \left[(10.36^2 + 1.049d_*^3)^{1/2} - 10.36 \right] \quad (\text{式 3.21})$$

v =運動黏滯係數(L^2/T)

d =粒徑(L)

$d_* = d(Rg)^{1/3} v^{-2/3}$ =無因次粒徑

$R = \rho_s / \rho_w - 1$ = 粒子與水的比重差，即有效比重 (submerged specific gravity)

ρ_s =沉積物密度

ρ_w =水的密度

g =重力加速度

傳輸能量斜率法(Transport Energy Slope Method)中選擇平均能量坡度(Average Energy Slope)，透過計算某計算斷面上下游的能量線落差來估算坡度，其公式如下：



$$S_f = \frac{EGL_{US\ XS} - EGL_{DS\ XS}}{DS\ Dist_{US\ XS} + DS\ Dist_{XS}}$$

EGL_{US XS}：上游斷面的能量線高程

EGL_{DS XS}：下游斷面的能量線高程

DS Dist_{US XS}：上游斷面與計算斷面之間的河道距離

DS Dist_{XS}：計算斷面與其下游斷面之間的河道距離

Unsteady Computation Options and Tolerances 之改動參數皆為子標籤 2D Flow Options 之細項，如圖 3-13 所示。

表 3-9 Wu et al.適用範圍數據表

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

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances			
General 2D Flow Options Pipe Systems 1D/2D Options Advanced Time Step Control 1D Mixed Flow Options			
☐ Use Coriolis Effects (not used with Diffusion Wave equation)			
	Parameter	(Default)	Perimeter 1
1	Theta (0.5-1.0)	1	1
2	Theta Warmup (0.5-1.0)	1	1
3	Water Surface Tolerance [max=0.06](m)	0.003	0.0001
4	Volume Tolerance (m)	0.003	0.0001
5	Maximum Iterations	20	20
6	Equation Set	Diffusion Wave	SWE-ELM (original/faster)
7	Initial Conditions Time (hrs)		0.03
8	Initial Conditions Ramp Up Fraction (0-1)	0.1	0.1
9	Number of Time Slices (Integer Value)	1	1
10	Turbulence Model	None	None
11	Longitudinal Mixing Coefficient	0.5	0.5
12	Transverse Mixing Coefficient	0.1	0.1
13	Smagorinsky Coefficient	0.05	0.05
14	Boundary Condition Volume Check	☐	☐
15	Latitude for Coriolis (-90 to 90)		
16	Solver Cores	All Available	All Available
17	Matrix Solver	PARDISO (Direct)	PARDISO (Direct)
18	Convergence Tolerance	0.00001	0.00001
19	Minimum Iterations	5	5
20	Maximum Iterations	30	30
21	Restart Iteration	10	10
22	Relaxation Factor	1.5	1.5
23	SOR Preconditioner Iterations	10	10

圖 3-13 Unsteady Computation Options and Tolerances 參數設置



3.5 生物棲息地指標

棲地適合度指數 (Habitat Suitability Index, HSI) 是以量化方式來表示生物對其環境的反應，以做為河川棲地品質的評估基礎。此指數的基本假設是物種會選擇與使用最能滿足其生活需求的地點，而頻繁的使用地點出現在最高品質的棲地。棲地適合度指數其應用基礎為建立某特定魚類或野生動物之棲地評估架構。(經濟部水利署, 2019)

過去國內外已有許多研究單位及政府機關致力於建立魚類棲地適合度指標 (Habitat Suitability Index, HSI) 與適合度曲線 (Habitat Suitability Curves, HSC)。透過現地調查與生態觀測，記錄魚類分布與豐度數據，並與棲地條件如流速、水深及底質特徵進行統計分析，以量化魚類對不同環境條件的適合度，並進而建立出目標魚種的適合度曲線(Bovee, 1986; Stalnaker, 1995)。這些方法最早由美國魚類與野生動物管理局所推動(U.S. Fish and Wildlife Service, 1981)，並在歐洲、美國及澳洲等地被廣泛應用於河川生態復育、水資源管理及環境影響評估中(European Commission, 2000; Jowett et al., 2008)。

本研究採用的棲地適合度評估方式，將採水理模型分析福摩沙橋與泰安橋區域，參考 Ahn et al. (2023)所使用的棲地評估模式，考慮到算術平均值對極值的影響(Roff, 2002)，將模擬出的流速、水深參照目標魚種之適合度對應值後，兩者相乘後開平方根得到該點位的棲地適合度指數，如式 3.22 所示。

$$HSI = \sqrt{S_v \times S_d} \quad (\text{式 3.22})$$

S_v = 該物種的流速適合度

S_d = 該物種的水深適合度

本研究選取大吻鰕虎 (*Rhinogobius gigas*) 和高屏馬口鱮 (*Opsariichthys kaopingensis*) 兩魚種，探討在生態基流量的環境下之棲地適合度指標之變化。物種選擇依據主要包括：其一，兩者皆為台灣原生淡水魚類，並於港口溪流域內實地

調查紀錄中確認出現，具地方代表性；其二，兩物種生態習性互補，高屏馬口鱖偏好湍急礫石底水域，大吻鰕虎則多見於靜水或緩流區，能反映不同水理環境下棲地條件之適宜性；其三，兩者皆有適合度曲線之文獻資料可供參考，利於建立數值化的 HSI 模型進行比較分析。

根據經濟部水利署 (2019)的「河川原生魚種及棲地適合度曲線調查與資料庫建置」，其中若要選取魚類的適合度曲線，建議依下列順序選取，以做為後續應用(流程圖請參考圖 3-14)，以此次研究參考港口溪大吻鰕虎之適合度曲線為例：

1. 同地區同水系同魚種：搜尋是否已建立東部地區港口溪之大吻鰕虎之適合度曲線，如有資料則使用，若否則進行 2。
2. 同地區不同水系同魚種：因港口溪水系同魚種資料，故搜尋東部其他水系之大吻鰕虎的棲地適合度曲線資料，建議依鄰近目標水系資料優先使用，如有則使用，否則進行 3。
3. 不同地區同魚種：因無東部地區各水系之同魚種資料，故搜尋北部、中部、南部地區水系之大吻鰕虎的棲地適合度曲線資料，建議依鄰近目標水系資料優先使用，如有則使用，否則進行 4。
4. 同地區同水系同屬魚種：因全臺水系皆無同魚種之資料，故搜尋東部地區港口溪之吻鰕虎屬的棲地適合度曲線資料，如有則使用，否則進行 5。
5. 同地區同水系同科魚種：因港口溪無同屬之資料，故搜尋港口溪之鰕虎科的棲地適合度曲線資料，如有則使用，否則進行 6。
6. 同地區不同水系同屬魚種：因港口溪無同科之資料，故搜尋東部地區其他水系之吻鰕虎屬的棲地適合度曲線資料，如有則使用，否則進行 7。
7. 同地區不同水系同科魚種：因東部地區各水系皆無同屬之資料，故搜尋東部地區其他水系之鰕虎科的棲地適合度曲線資料，如有則使用，否則進行 8。
8. 不同地區同屬魚種：因東部地區各水系皆無同科之資料，故搜尋北部、中部、南部地區水系之吻鰕虎屬的棲地適合度曲線資料，如有則使用，否則進行 9。

9. 不同地區同科魚種：因全台水系皆無同屬之資料，故搜尋北部、中部、南部地區水系之鰕虎科的棲地適合度曲線資料，如有則使用。

根據以上敘述，港口溪大吻鰕虎之適合度曲線將依照順序選取順序 2 的卑南溪大吻鰕虎之適合度曲線，其水深、流速棲地適合度指標如圖 3-15、圖 3-16 所示；港口溪高屏馬口鱮之適合度曲線將依照順序選取順序 6 的卑南溪粗首馬口鱮之適合度曲線，其水深、流速棲地適合度指標如圖 3-17、圖 3-18 所示。

範例：若欲選擇地區 A、A1 水系之 F 科 G1 屬 X_1 魚種適合度曲線，魚種選擇優先順序如下：

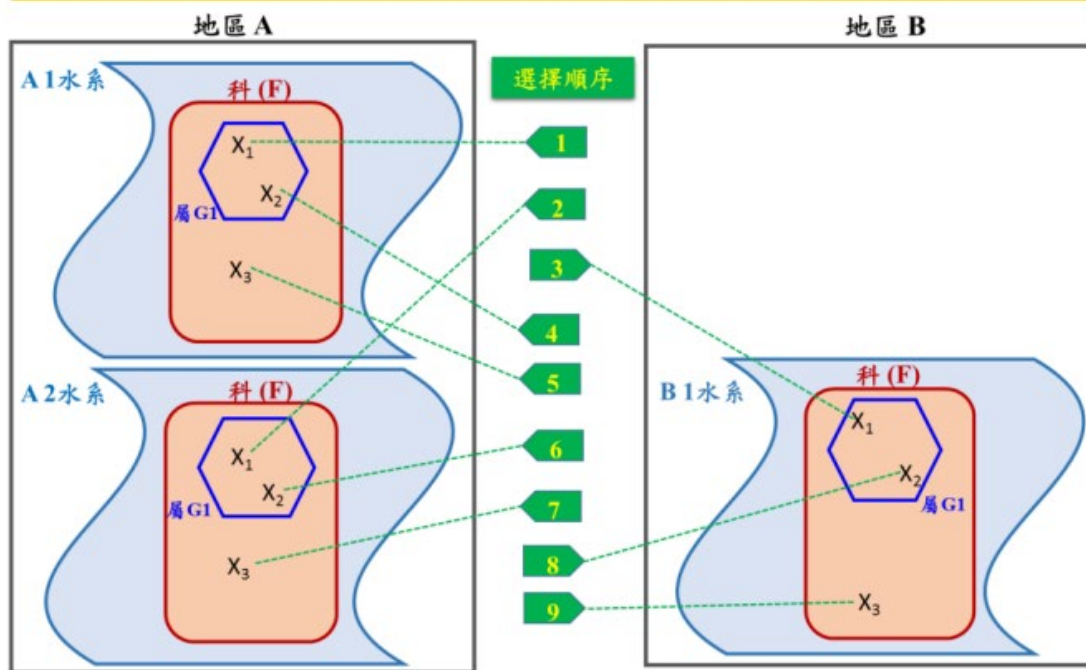


圖 3-14 魚類棲地適合度曲線應用原則流程圖(經濟部水利署, 2019)

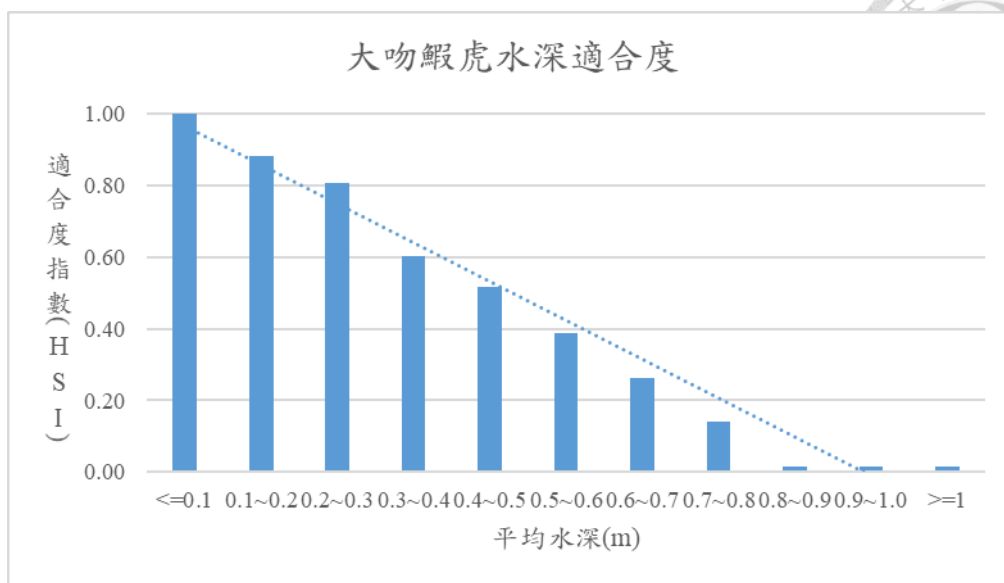


圖 3-15 大吻鰕虎水深適合度指數分布圖

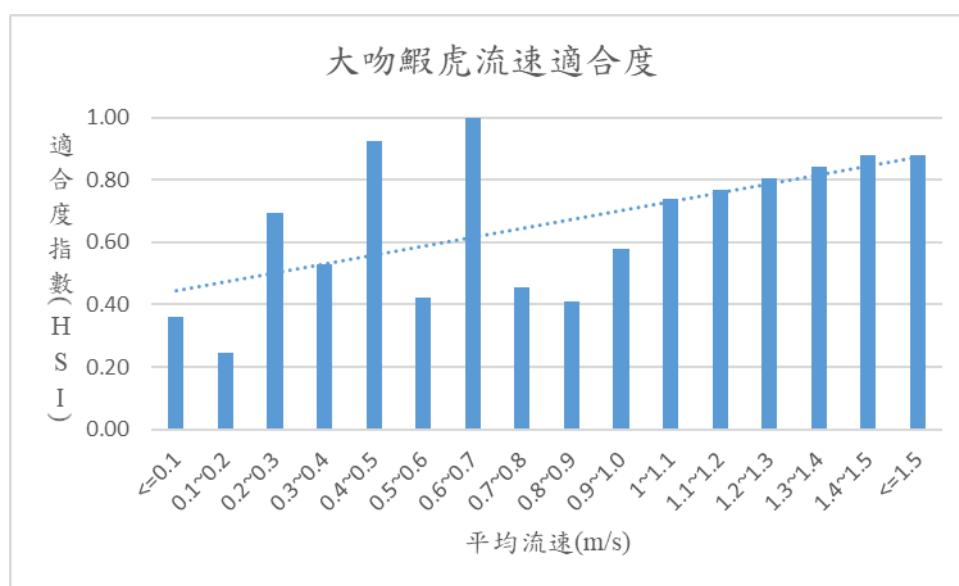


圖 3-16 大吻鰕虎流速適合度指數分布圖

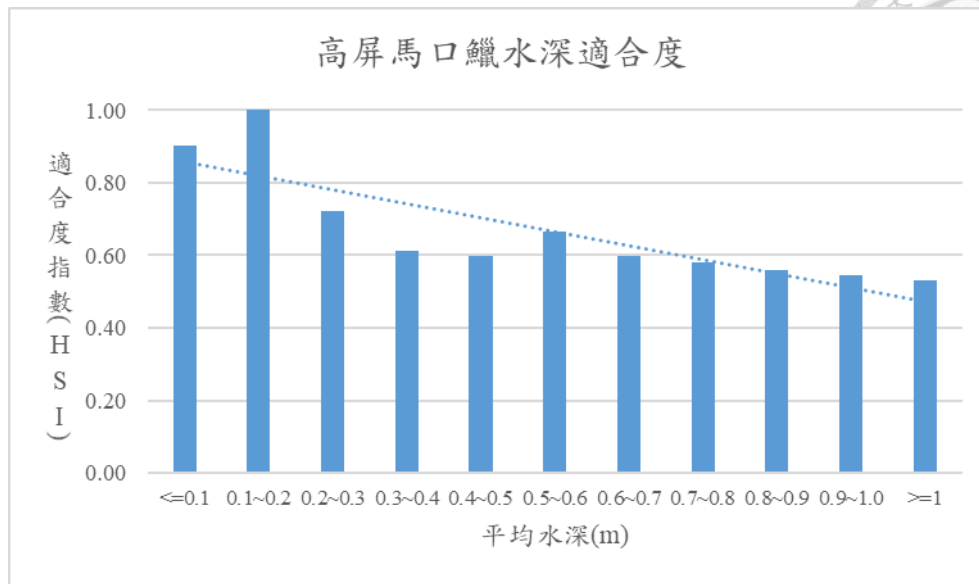


圖 3-17 高屏馬口蠟水深適合度指數分布圖

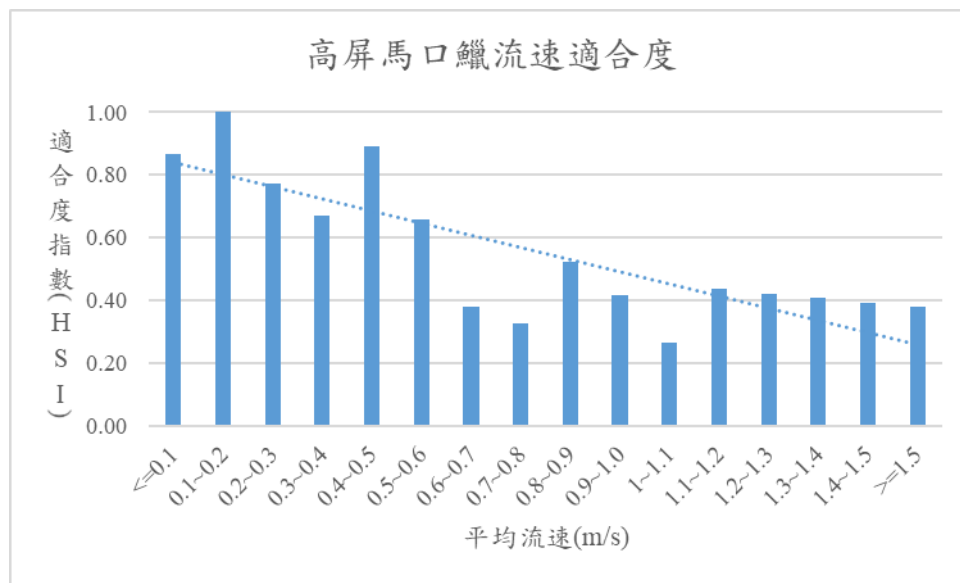
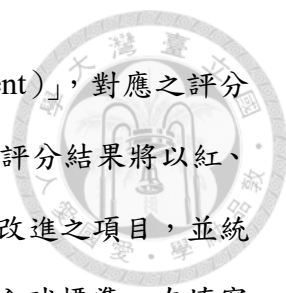


圖 3-18 高屏馬口蠟流速適合度指數分布圖

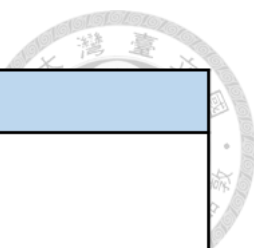
3.6 自我評估工具 (Self-Assessment Tools)

為協助規劃者評估調適措施與 IUCN 所制定之自然解方 (NbS) 全球標準間的契合程度，IUCN 開發了具結構性之 Excel 表格格式的自我評估工具，可供使用者辨識措施是否符合 NbS 八大標準與 28 項指標 (Angela et al., 2020; Saikia et al., 2022)。使用者可依據各指標的符合程度進行自評，評級分為「高度符合 (strong)」、「基本



符合 (adequate)」、「部分符合 (partial)」及「不符合 (insufficient)」，對應之評分百分比區間分別為大於 75%、50%–75%、25%–50%與低於 25%。評分結果將以紅、黃、綠燈號進行視覺化標示，如圖 3-19 所示，用以強調需優先改進之項目，並統整整體符合程度，判斷調適措施是否滿足 IUCN 所設定之 NbS 全球標準。在填寫評分過程中，使用者需閱讀並思考每項指標下所附的指導問題，於下拉選單中選擇相應等級，並說明評分依據與佐證資料，例如政策報告、基線資料、生態監測數據等，所有指標得分將進行標準化處理，以確保各標準之評分權重一致，最終計算整體評分百分比作為總體相符程度的量化依據。需特別注意，若調適措施在任一項指標的得分為「不符合」，則代表該措施不符合 IUCN 的 NbS 全球標準。

為了系統性檢視規劃措施與 IUCN 自然解方標準間的一致性，本文選擇採用自我評估工具，具有下列優點：其一，該工具可量化各項指標的符合程度，有助於辨識潛在不足與改進空間；其二，能提供視覺化結果，便於與其他案例比較。然而，也有部分研究選擇不採用此工具，可能因需主觀判斷，或部分指標在特定情境下難以量化。考量本研究評估對象為具體的河川治理方案，需檢視其是否落實生態與減災並重之 NbS 核心原則，且具備足夠的資料與背景知識以進行客觀判讀，因此本文仍採用 IUCN 自我評估工具作為輔助分析依據可提升論文的系統性與國際接軌性，亦有助於後續政策對話與利害關係人溝通，為地方化的 NbS 實踐提供更具結構性的檢視依據。



指標評分 (%)			產出結果
	≥75	高度符合	干預措施遵循IUCN的NbS全球標準
	≥50 & <75	基本符合	
	≥25 & <50	部分符合	
	<25	不符合	干預措施不遵循IUCN的NbS全球標準

圖 3-19 自我評估表之評分

此外，雖然自我評估工具能夠識別和評估措施的設計是否符合 NbS 的標準，它更接近一種輔助性評估工具，並無法直接取代其他實踐的指導標準、工具和方法。在規劃至實施的過程中，使用者應根據實際情況將自我評估工具與其他現有的實踐標準和方法結合使用，以確保措施的全面性和有效性。

針對自我評估表，根據 IUCN 指導之使用步驟及本研究應用該 Excel 表格之經驗，具體流程如下：

(一) 註冊使用者帳號，下載最新版自我評估工具。

(二) 資源彙整與佐證準備：

在「資源 (Resources)」子表單中，填列常見的佐證資料類型及其儲存位置。表格中已預列如「生態多樣性基線資料」、「成本效益分析」、「利害關係人分析圖」等欄位，以利後續稽核與透明化目的。

(三) 標準與指標評分（於每個標準子表單內進行）：

a. 閱讀指導問題，評估並從下拉選單選擇相應等級 (Strong, Adequate, Partial, Insufficient)，系統將自動套用燈號顯示。

b. 逐項說明評分依據，簡述其符合或不符合之原因。

c. 列舉支持評分之佐證資料，包括報告、網頁、審查意見、研究數據等。

(四) 總覽評估 (Overview 子表單)：



若任一標準內有指標為「不符合」，即代表整體不符合 IUCN NbS 標準。可使用「蜘蛛圖 (Radar Chart)」檢視整體分布，辨識需強化之項目與潛在缺口。

(五) 回饋與共識程序：

評估結果應與計畫主持人與利害關係人共同檢討，必要時補充資料或調整評分，並在「最後意見」欄記錄未來建議、機會與挑戰。

(六) 結果揭露與經驗分享：

為強化透明度與推廣應用，建議將最終評估結果(可製作為 PPT 或 PDF 格式)提供相關利害關係人。若選擇與 IUCN 分享成果與經驗，可透過 NbS 標準小組 (NbSStandard@iucn.org) 提交資料，並有機會納入國際案例之試點報告。

本研究將港口溪流域之自然解方措施套用於上述評估流程，並藉由 Excel 表格工具（見圖 3-20）進行初步自評，以系統性與客觀性方式評估本研究成果對應於 NbS 八大標準的符合程度。藉此不僅可釐清目前設計的優劣與問題點，亦可辨識未來可進一步優化之方向，為後續推廣與實施提供具體建議與改進依據。

標準 1: NbS 需有效應對社會挑戰

指標編號	指標	指導問題	使用下拉選單獲取干預措施之評分	符合指標之程度				評分理由	驗證文件	建議、機會與挑戰
				強烈	充足	部分	不足			
1.1	優先考慮利害關係人最急迫的社會挑戰	社會挑戰是否被識別？ 權利持有人和受益人是否被諮詢？ 權利持有人和受益人面臨的急迫的社會挑戰是否得到了優先考慮？	強烈	是，社會挑戰是根據與權利持有人和受益人的充分協商確定優先事項的。	經過與權利持有人和受益人的一番諮詢後確認具體的社會挑戰。	僅通過部分權利持有人和受益人的有限意見，確認了一般性的社會挑戰。	否，未確認明確的社會挑戰，也未與任何權利持有人和受益人進行諮詢。	對當地利害關係人、相對應實施單位、專業學術單位等工作充分協商後，以確定優先事項的。		
1.2	所應對的社會挑戰能被清楚的理解與記錄	社會挑戰的驅動因素和應對措施是否被識別？ 社會挑戰是否在相關的國家/地方層面上被理解？ 社會挑戰是否被記錄並對受影響的利害關係人可見？	強烈	是，對已確認的社會挑戰的驅動因素和應對措施有清晰的理解，並參考相關的國家/地方政策，並且已完整記錄並易於訪問。	在相關層面上，對已確認的社會挑戰的驅動因素和應對措施有清晰的理解，但對一些文件和知識方面的缺口仍然存在。	社會挑戰的驅動因素以非系統認可的方式呈現，但存在多個文件和特定層面的驅動因素，並且存在較少或沒有文件記錄。	否，對於已確認的社會挑戰的驅動因素和應對措施的驅動因素和應對措施，並且存在較少或沒有文件記錄。	港口溪流域明確對社會挑戰，且對社會挑戰有明確的指標，且參考相關紀錄且充分訪問當地居民，以對應相對的社會挑戰。		
1.3	識別、設立基準並定期評估 NbS 所產生的人類福祉	人類福祉的成果是否與所確定的社會挑戰相關？ 是否有基準指標來監控影響？ 是否定期評估成果和基準指標？ 人類福祉的成果是否已納入干預措施？	部分	是，針對已確定的社會挑戰和國家/地方政策，已確定了與之相關的 SMART 人類福祉結果和基準，並且定期進行評估。	在干預期間，已確定並至少評估了與已確認的社會挑戰和國家/地方政策相關的具體人類福祉結果和基準。	已確定了一組人類福祉結果和基準，但尚未安排進行評估。	否，未確定人類福祉結果或基準指標，缺乏基準和評估安排。	人類福祉涵蓋範圍，ex健康安全生命品質環境...，本研究評估降低自然災害風險和生態系統服務價值等，無法涵蓋完全。		

圖 3-20 自我評估工具

第四章 結果與分析



4.1 HEC-RAS 模式驗證

為確保數值模擬之結果有一定的可信度，本研究將以定床模擬之模擬結果做為模式的驗證，包含淹水潛勢區域、流量歷線、水位及流速。

4.1.1 淹水潛勢區域

本研究針對不同重現期進行 HEC-RAS 2D 定床模擬，並參考港口溪治理規劃報告(2010)所提供之 50 年重現期淹水潛勢範圍圖資，作為模式初步驗證依據。根據該報告，港口溪集水區之治理設計標準為「25 年重現期預留 1 公尺出水高」或「50 年重現期不發生溢岸」，採兩者中較高者作為設計原則。因此，擇定本研究所模擬之 50 年重現期結果與治理規劃書中之淹水潛勢範圍示意圖進行比對，以檢視模擬成果之合理性(見圖 4-1 及圖 4-2)。

治理規劃書報告中提到，其淹水範圍示意圖(圖 4-2)從上游至下游大致分為四塊淹水區域，分別為：

1. 鄰近響林橋兩側農地，淹水面積約 20 公頃（後續簡稱「一區」）
2. 秀林橋以西至滿州國中之區域，淹水面積約 10 公頃（簡稱「二區」）
3. 港口橋以西之永港國小區域，淹水面積約 20 公頃（簡稱「三區」）
4. 港口溪下游出海口段，淹水面積約 25 公頃（簡稱「四區」）

本研究依模擬成果（圖 4-1）計算上述各潛勢淹水區之面積，並扣除河道範圍後進行比對，結果如下：

1. 一區淹水面積約為 21.7 公頃，與治理規劃報告相差 5%
2. 二區淹水面積約為 10.3 公頃，與治理規劃報告相差 3%
3. 一區淹水面積約為 18.8 公頃，與治理規劃報告相差 6%

4. 一區淹水面積約為 27.9 公頃，與治理規劃報告相差 12%

綜合比對結果顯示，模擬與治理規劃報告所示之淹水範圍差異均在 20% 以內，其中部分區域差異甚微，顯示本研究模擬結果具合理性與參考價值。惟考量淹水潛勢範圍具有一定程度之主觀判釋成分，故本研究採以淹水範圍之對應程度作為模式驗證之輔助依據，評估其整體趨勢與空間分布是否相符。



圖 4-1 Q_{50} 淹水潛勢模擬結果與衛星照片疊圖

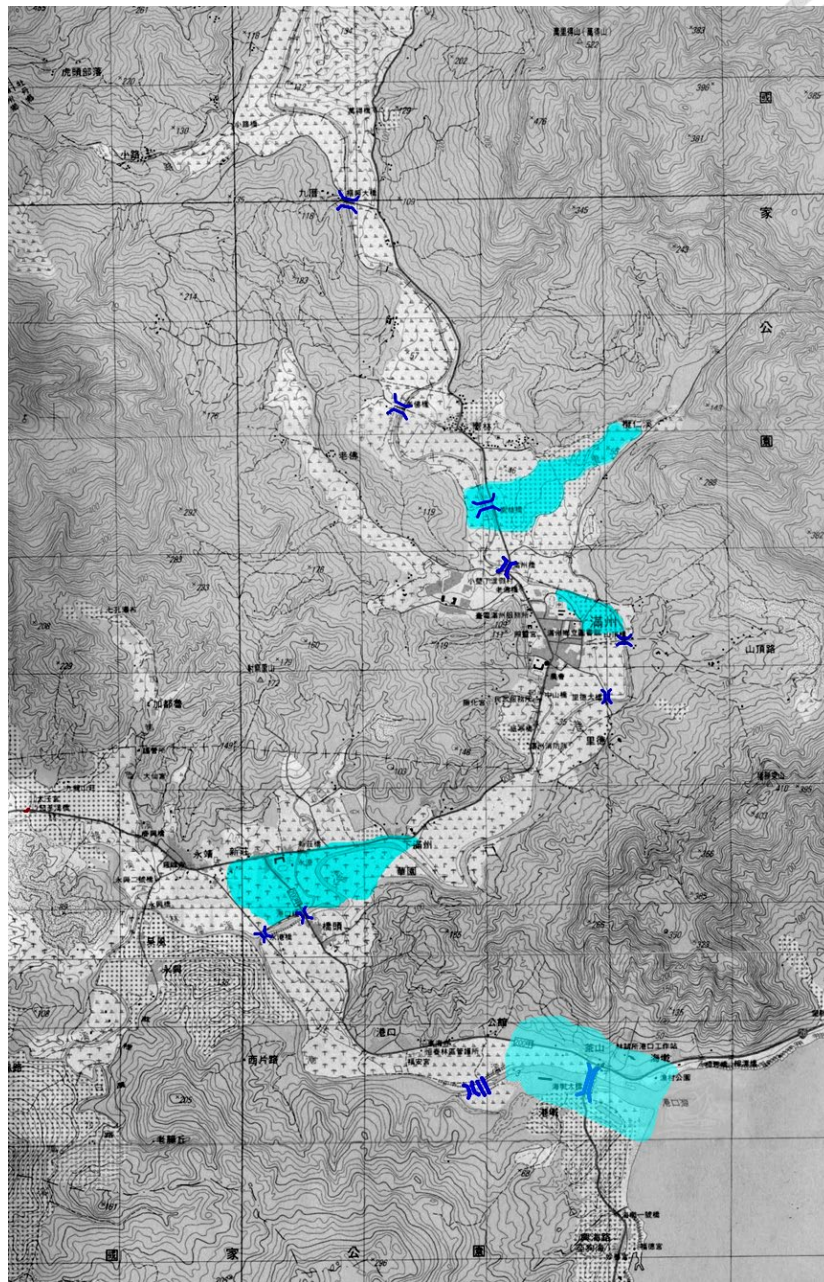


圖 4-2 治理規劃報告之淹水範圍示意圖

4.1.2 流量歷線

選定靠近出海口處做為流量歷線之驗證，利用出流邊界為治理規劃報告(2010)中的流量歷線，以及出流邊界為 Normal Depth，兩者進行比較，如圖 4-3 及圖 4-4 所示。

模擬結果顯示，無論是以港口溪集水區之保護標準 50 年重現期距，亦或是考

量極端降雨之 100 年重現期距，兩者之流量歷線都十分相似。

另外由於出流邊界位於出海口，可能受到潮汐之影響，故在使用 Normal Depth 做為出流邊界之設定時，應檢驗出海口之水位。本研究參考港口溪治理規劃報告(2010)，採用離港口溪出海口最近之蟬廣嘴潮位站，其暴潮水位為 2.2 公尺。而本研究利用 Normal Depth 做為出流邊界設置，並檢驗靠近出海口之水位，結果顯示保護標準之 50 年重現期距大約為 2.2 公尺，極端降雨之 100 年重現期距則大約為 2.6 公尺，皆大於暴潮水位，故認定其符合檢驗。

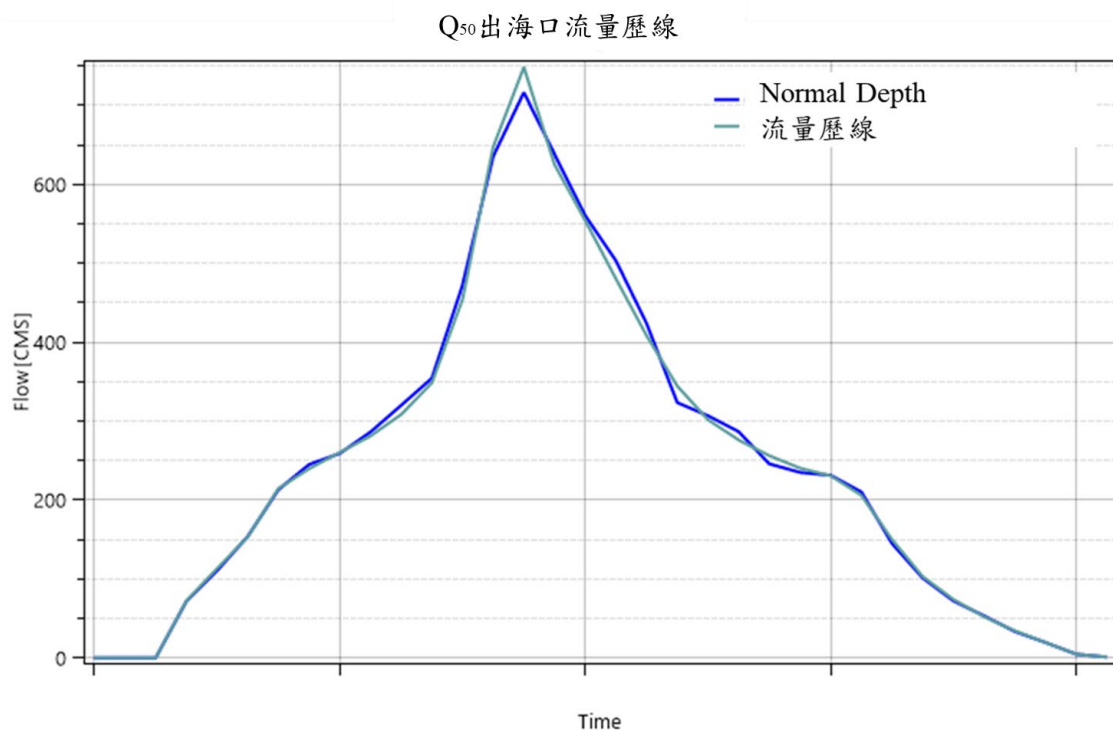


圖 4-3 Q₅₀ 出流邊界設定之比較

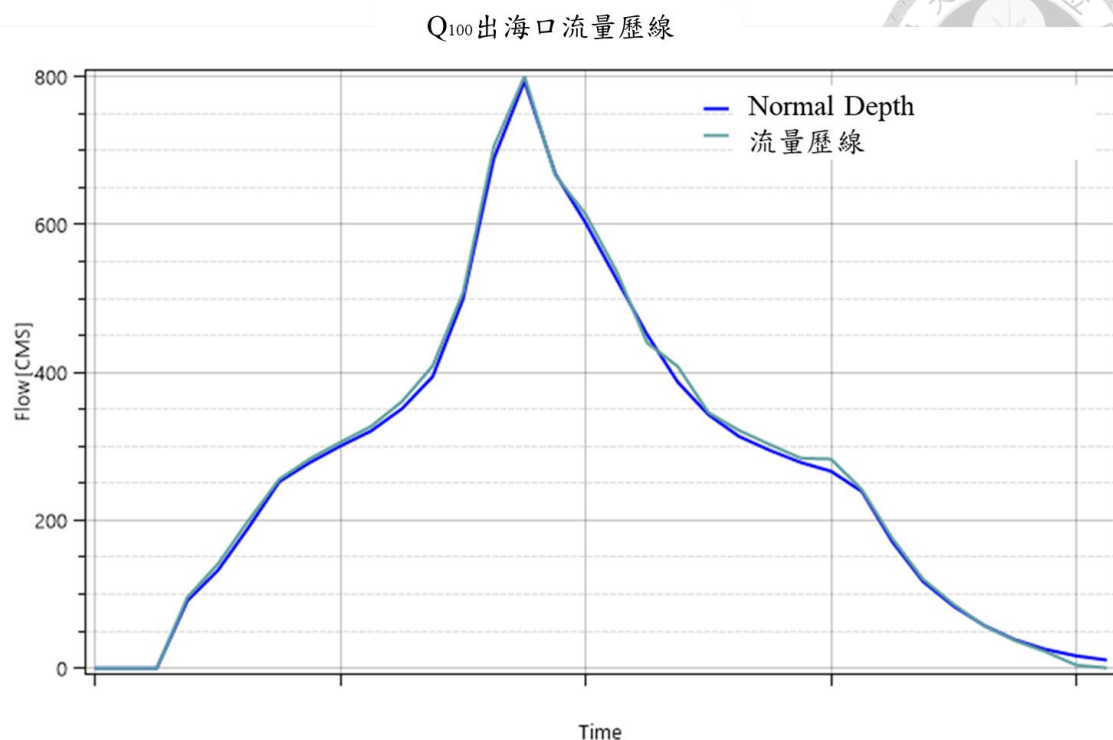


圖 4-4 Q_{100} 出流邊界設定之比較

4.1.3 水位及流速

在完成淹水潛勢範圍之初步驗證後，本研究進一步以 50 年重現期 (Q_{50}) 模擬結果之水位與流速進行定量驗證。於研究區內選定數處代表性橫斷面，將模擬所得之水位與流速資料與治理規劃報告(2010)中對應斷面之設計成果進行比對，相關結果彙整於表 4-1。

比對結果顯示，本研究模擬之流速與治理規劃報告相當接近，整體流況趨勢一致，惟模擬水位普遍低於報告所示數值。此一差異可能肇因於建模假設、地形解析度與斷面處理方式之不同。治理報告可能基於設計保守性考量，於斷面高程或自由高設計上採取較保守值，致使其模擬水位偏高；而本研究採用 HEC-RAS 2D 模式，搭配較高解析度之地形資料與更細緻之計算格網，有助於更準確捕捉地形變化與側向擴散現象，可能導致模擬結果呈現水位較低但流速相近之現象。

雖然流速與水位間理論上應符合連續方程式之關係，然因不同模式處理斷面

與地形方式差異，於水位模擬上仍可能產生偏差。整體而言，在流速表現一致且趨勢合理情況下，本研究模式已具備相當可信度，模擬成果可提供後續調適策略研擬與水理分析之基礎依據。

表 4-1 水位及流速驗證

位置	模擬結果		治理規劃報告	
	水位(m)	流速(m/s)	水位(m)	流速(m/s)
海墘大橋	2.67	2.74	4.19	2.53
老佛橋	3.28	4.78	4.56	4.70
福興大橋	2.93	3.36	4.24	3.03

4.2 HEC-RAS 定床模擬

定床模擬為 HEC-RAS 模式中較基礎且常用之模擬形式，當設定完成邊界條件、流量歷線及相關水理參數後，即可進行模擬以推估不同條件下之淹水範圍。

本研究分別針對 2 年、10 年、25 年、50 年及 100 年等不同重現期進行定床模擬，藉以瞭解港口溪在各洪水條件下之潛在淹水行為與水理變化。並進一步結合先前透過實地探查及利害關係人意見整合所辨識之問題，據以研擬對應之調適策略，期能提出具在地適應性與可行性之治理建議。

4.2.1 模擬結果

模擬整個港口溪集水區不同重現期之淹水潛勢，如圖 4-5~圖 4-9 所示。根據模擬結果顯示，港口溪全流域約有 14 處易淹水區域，影響的村落包含中上游的長樂村、中游的滿州村、里德村及下游的港口村，且超過 10 年重現期的洪水就有機會導致大範圍的淹水，主要集中在河段彎道處、河道變窄或水流受限之區位，顯示此些區域為潛在洪災熱區，應納入優先治理對象。本模擬結果不僅呈現港口溪在不

同規模洪水下之水理響應，也有助於釐清災害與生態衝突熱點。結合上述分析，後續將據以擬定水砂溢淹區之空間範圍與自然解方之應用位置，提升治水效能並兼顧生態與社會需求。



圖 4-5 $Q_{1.11}$ 淹水潛勢模擬結果

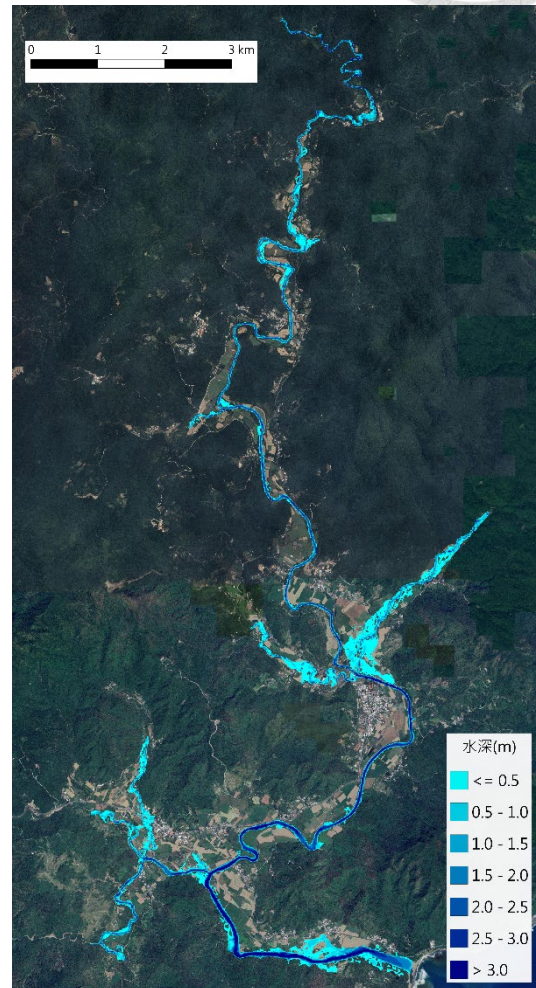


圖 4-6 Q_{10} 淹水潛勢模擬結果

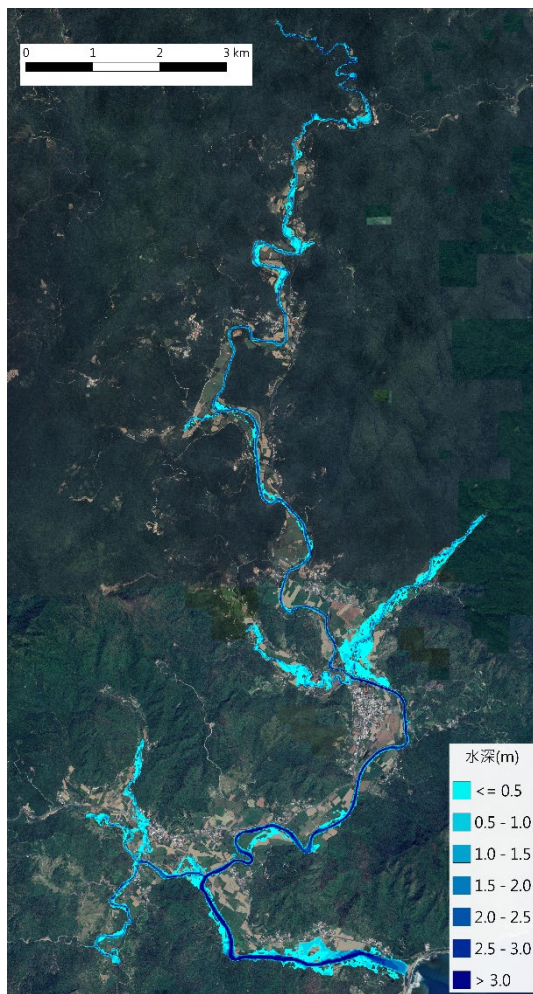


圖 4-7 Q_{25} 淹水潛勢模擬結果

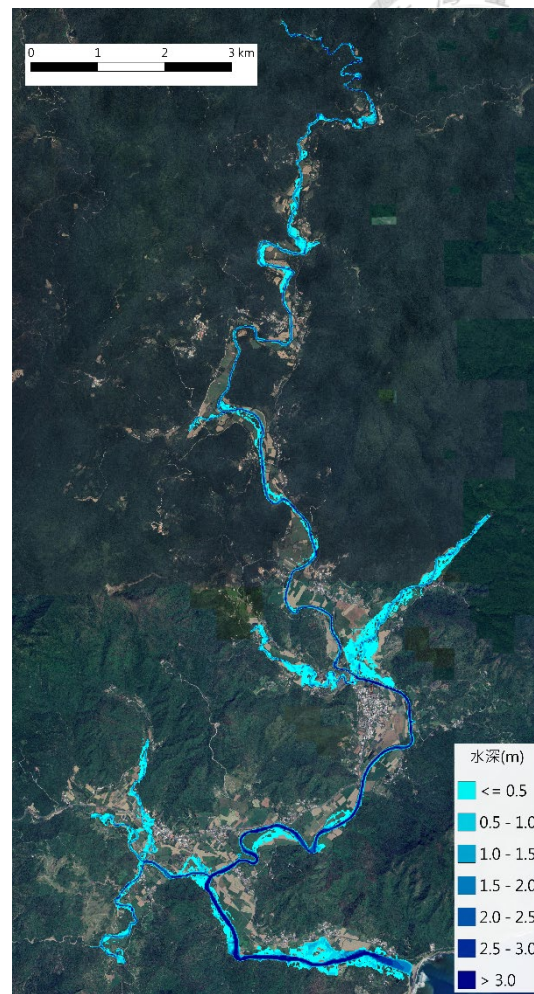


圖 4-8 Q_{50} 淹水潛勢模擬結果

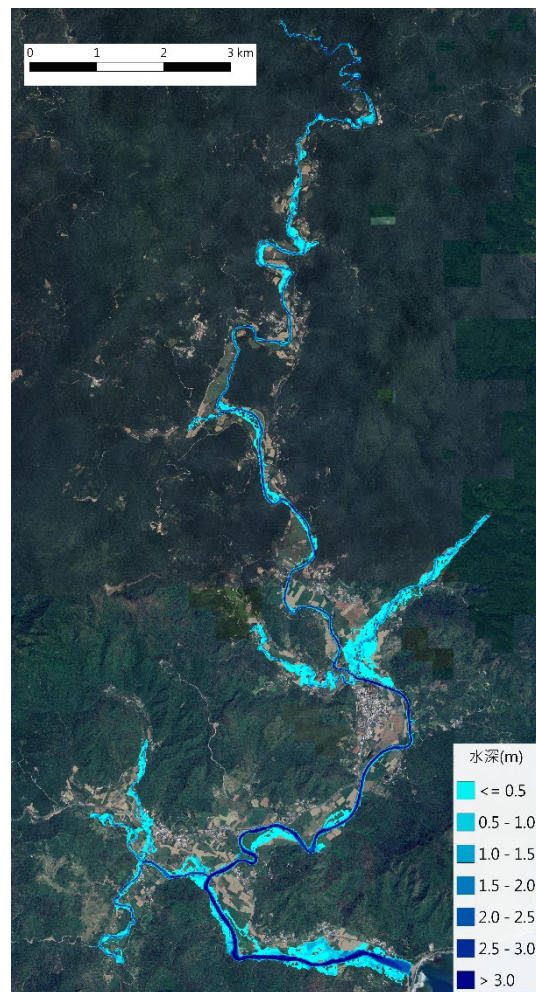


圖 4-9 Q_{100} 淹水潛勢模擬結果

4.2.2 調適策略

針對淹水災害之治理對策，傳統上多以加高堤防、強化護岸等硬體工程手段為主，亦常搭配設置滯洪池或蓄洪設施以調節洪峰流量。然而，考量到現今對生態永續與韌性環境之重視，本研究選擇導入農業部農村發展及水土保持署近年所推動之「水砂溢淹區」概念，作為本研究區域之調適策略。

藉由保留河道一定範圍之溢淹空間，使洪水在超過設計標準時得以自然擴散至周邊低窪地區，達到分洪、減洪及暫時滯蓄之效果，期望能兼顧災害防治、空間彈性與土地利用效率，有效回應流域內之水文風險與地貌特性。

1. 水砂溢淹區



「水砂溢淹區」為農業部農村發展及水土保持署近年提出的策略構想，目的在於提升山坡地面對災害的韌性與自我調適能力，促進集水區永續治理與自然解方的實踐。此概念著重於多目標整合，期望透過特定區位之劃設與治理行動，同步達成降低洪氾風險、減緩土壤流失、提供生態棲地與增進涵養水源等效益，藉以實現集水區空間與資源的多元利用。

為有效推動此類調適措施，農村發展及水土保持署亦配合規劃「韌性坡地補助」制度，針對棲地營造、緩衝綠帶設置與水砂溢淹區建構三大類型進行政策誘因引導。本文研究即聚焦於其中「水砂溢淹區」的應用與成效，作為集水區調適策略的核心手段之一，進一步探討其在防災與生態整合治理上的潛力。

水砂溢淹區指的是預先劃設提供水流與土砂自然漫溢之區域，與傳統的滯洪池不同，其設置並非以明顯削減洪峰或減少特定保全標的之淹水面積為主要功能；相對地，其重點在於透過土地之預劃與分區使用，使可能受災區域轉為具容受功能之空間。其補償方式則依據劃設面積計算，作為土地持有者之經濟誘因。

此種作法有助於降低災後堤防或其他防災設施損壞所需之公共財政支出，並兼顧生態友善、經費控管及防災效益之平衡，為實務上具潛力之低衝擊開發與綠色調適策略之一。

2. 選定分析區域

本研究依據前階段統整之利害關係人意見與實地勘查結果，選定港口溪與小路溪之匯流處，以及永港橋上游左岸地區作為水砂溢淹區之規劃位置。此兩處地點分別具備主支流交會與河道坡度由陡轉緩之地形特性，且兩岸灘地開闊，易形成水流滯留與漫溢現象，導致周邊地區產生淹水風險。

鑑此，本研究將上述區域納入水砂溢淹區設置範圍，期望藉由預劃容受區域與適度釋放洪水動能，達到分洪減災之目的，並進一步降低極端降雨事件下對當地居民生命財產之潛在威脅，提升整體集水區之災害韌性與調適能力。

3. 分析結果

本研究針對港口溪與小路溪匯流處，及永港橋上游左岸等潛勢區位，進行不同重現期模擬結果之比對分析，重點觀察其水深與流速之變化。港口溪與小路溪匯流處之淹水範圍以保護標準 Q_{50} 來規劃，其淹水範圍約 173800m^2 ，其淹水深度超過 3m 以上，流速最大為 6.6m/s ，模擬結果分別呈現於圖 4-10～圖 4-14（水深）及圖 4-15～圖 4-19（流速）；而永港橋上游左岸之淹水範圍以保護標準 Q_{50} 來規劃，其淹水範圍約 100300m^2 ，其淹水深度超過 3m 以上，流速最大為 5.6m/s ，模擬結果分別呈現於圖 4-20～圖 4-24（水深）及圖 4-25～圖 4-29（流速），其不論水深或流速，在不同的重現期距的模擬結果下，都有相同的趨勢。

在確認水砂溢淹區設置地點後，後續可依據港口溪治理標準所對應之 50 年重現期 (Q_{50}) 模擬結果中之潛勢淹水範圍，作為劃設水砂溢淹區之依據，如圖 4-30、圖 4-31 所示，以提供後續調適策略具體範圍之參考，並利於相關補償機制及土地使用規劃之推動。

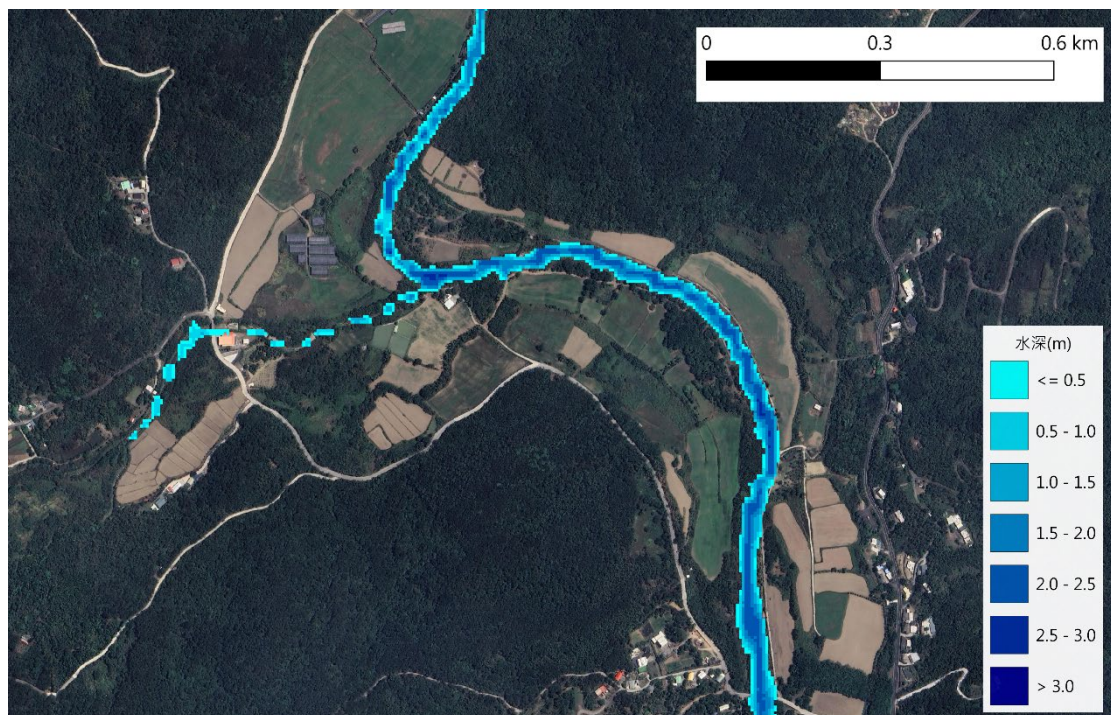


圖 4-10 港口溪及小路溪匯流處 $Q_{1.11}$ 水深變化

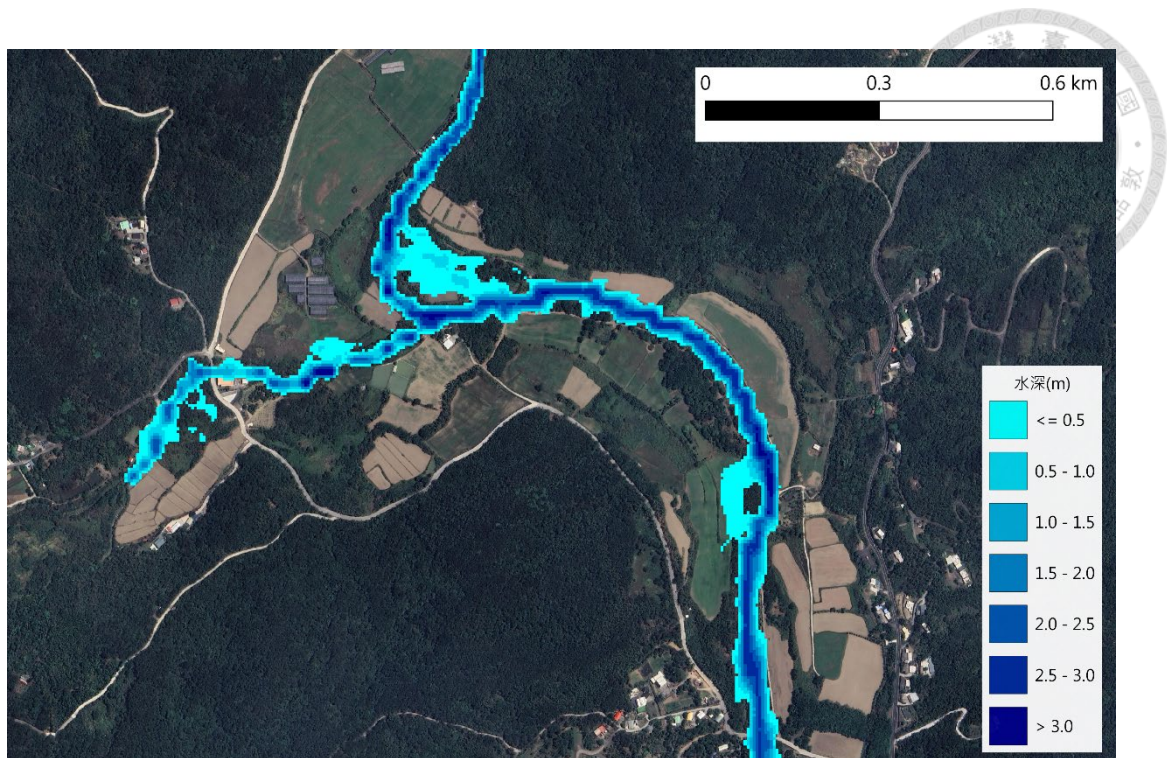


圖 4-11 港口溪及小路溪匯流處 Q_{10} 水深變化

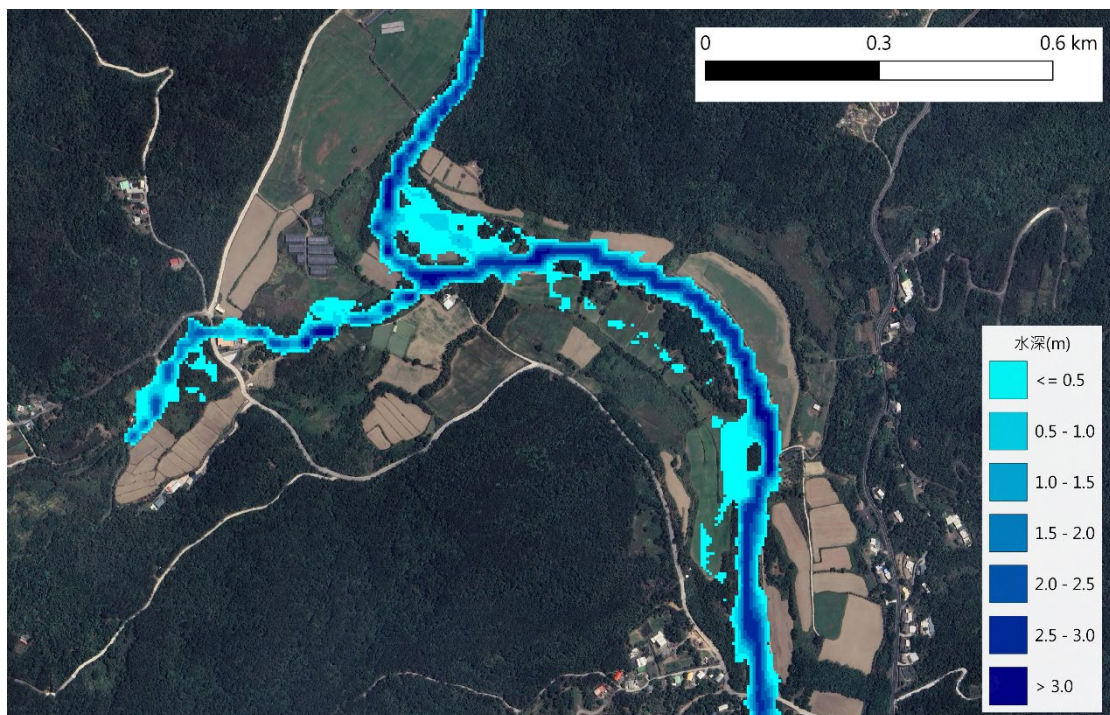


圖 4-12 港口溪及小路溪匯流處 Q_{25} 水深變化

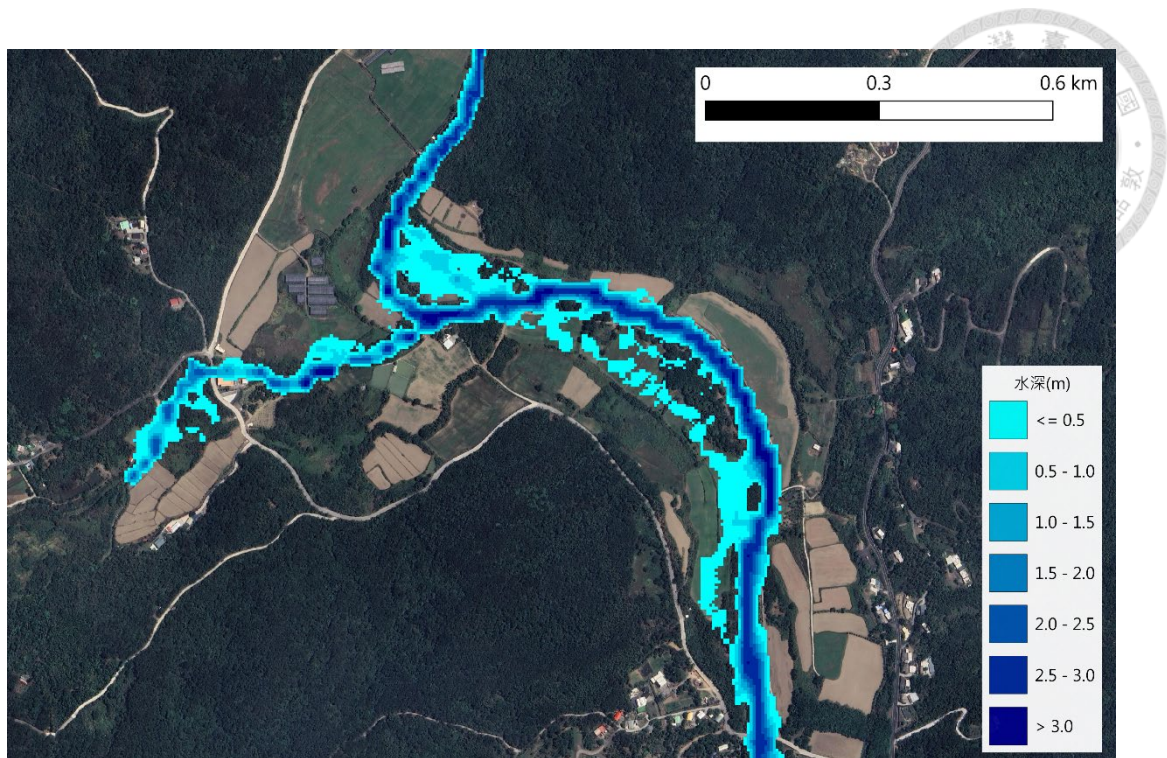


圖 4-13 港口溪及小路溪匯流處 Q_{50} 水深變化

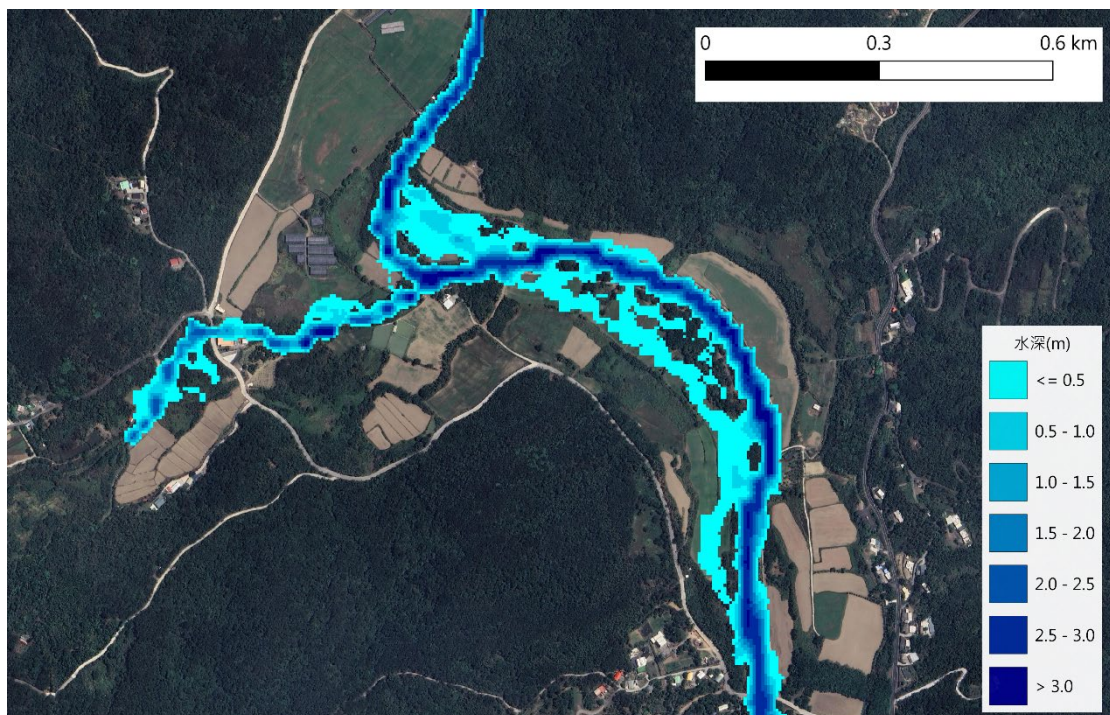


圖 4-14 港口溪及小路溪匯流處 Q_{100} 水深變化



圖 4-15 港口溪及小路溪匯流處 $Q_{1.11}$ 流速變化

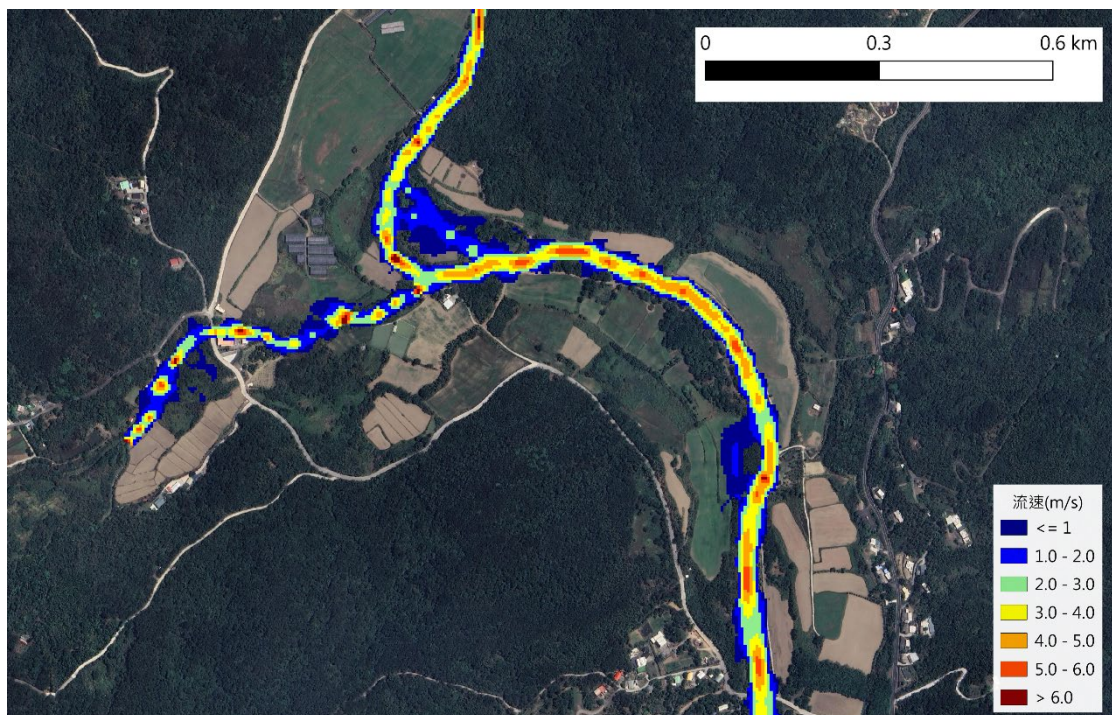


圖 4-16 港口溪及小路溪匯流處 Q_{10} 流速變化

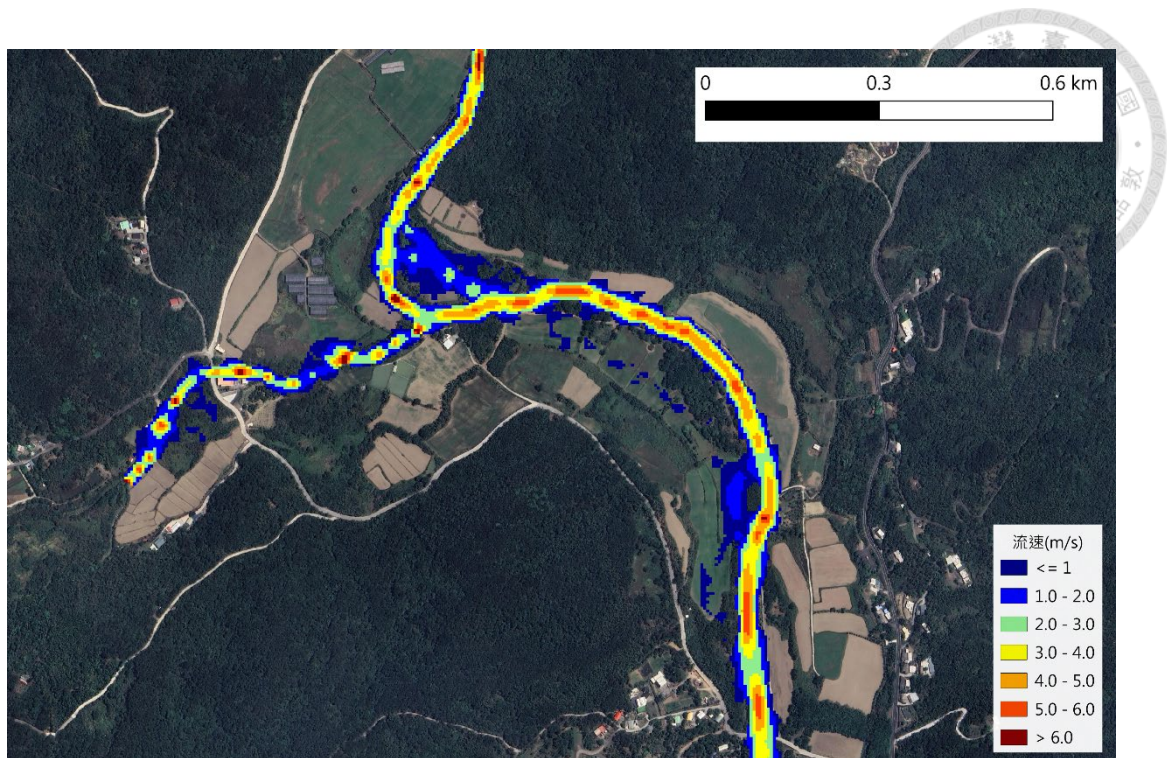


圖 4-17 港口溪及小路溪匯流處 Q₂₅ 流速變化

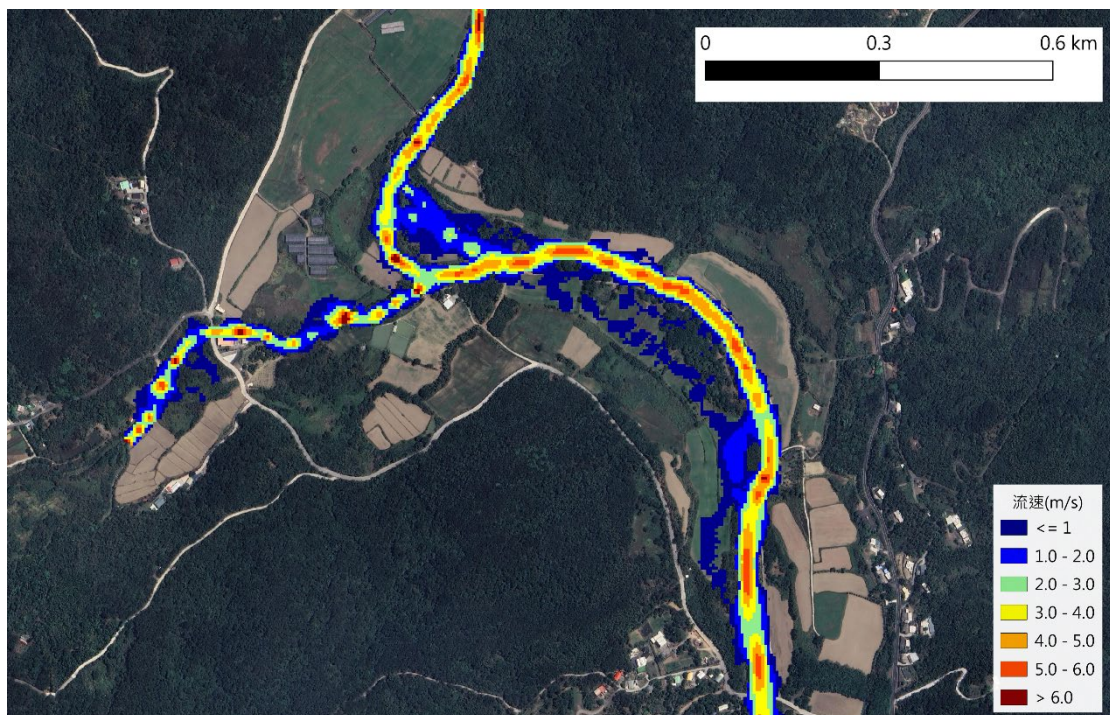


圖 4-18 港口溪及小路溪匯流處 Q₅₀ 流速變化

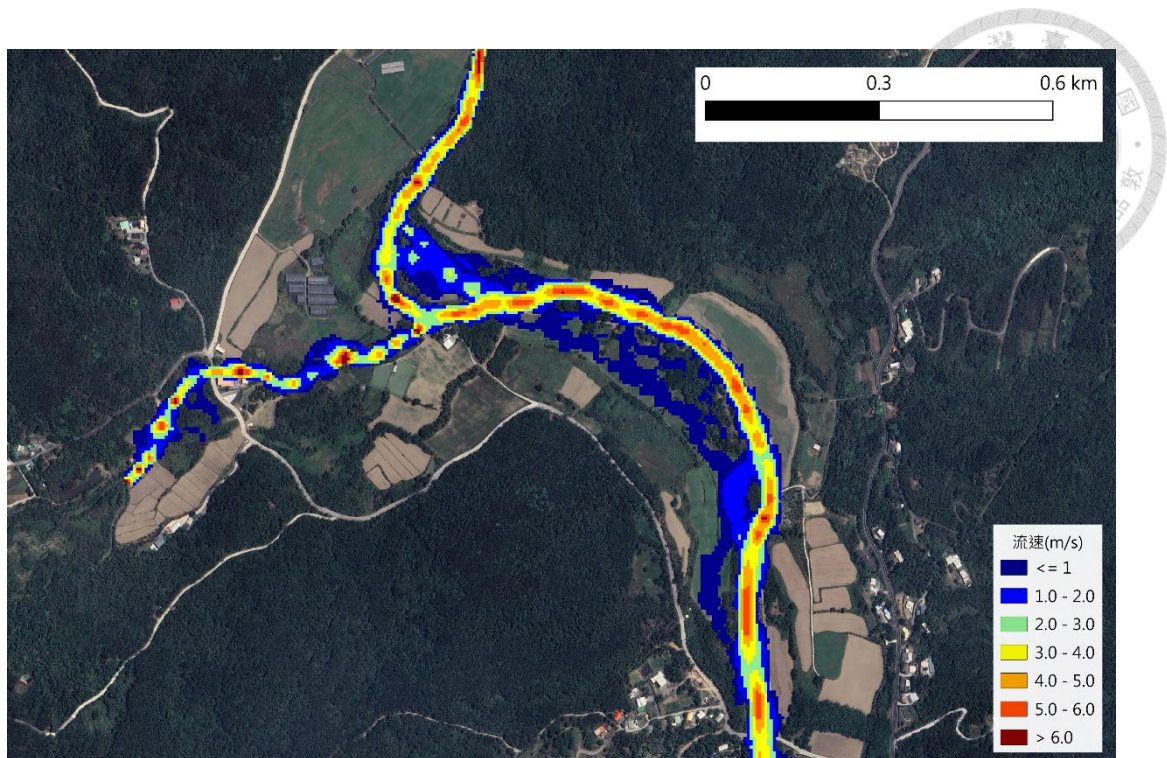


圖 4-19 港口溪及小路溪匯流處 Q_{100} 流速變化

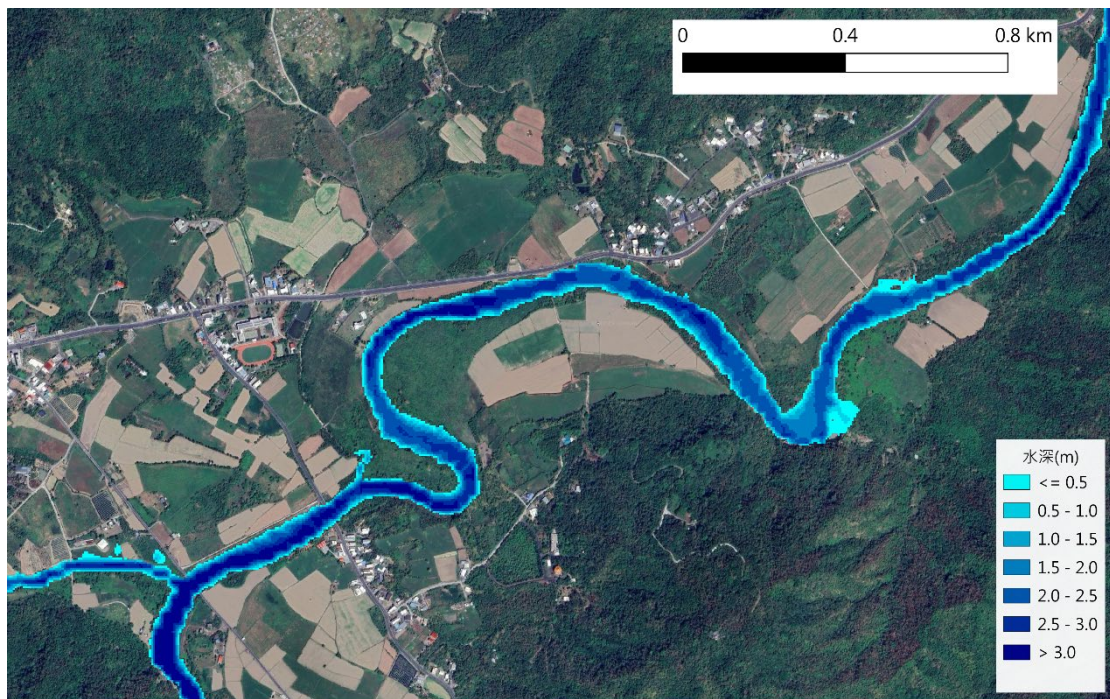


圖 4-20 永港橋上游 Q_2 水深變化

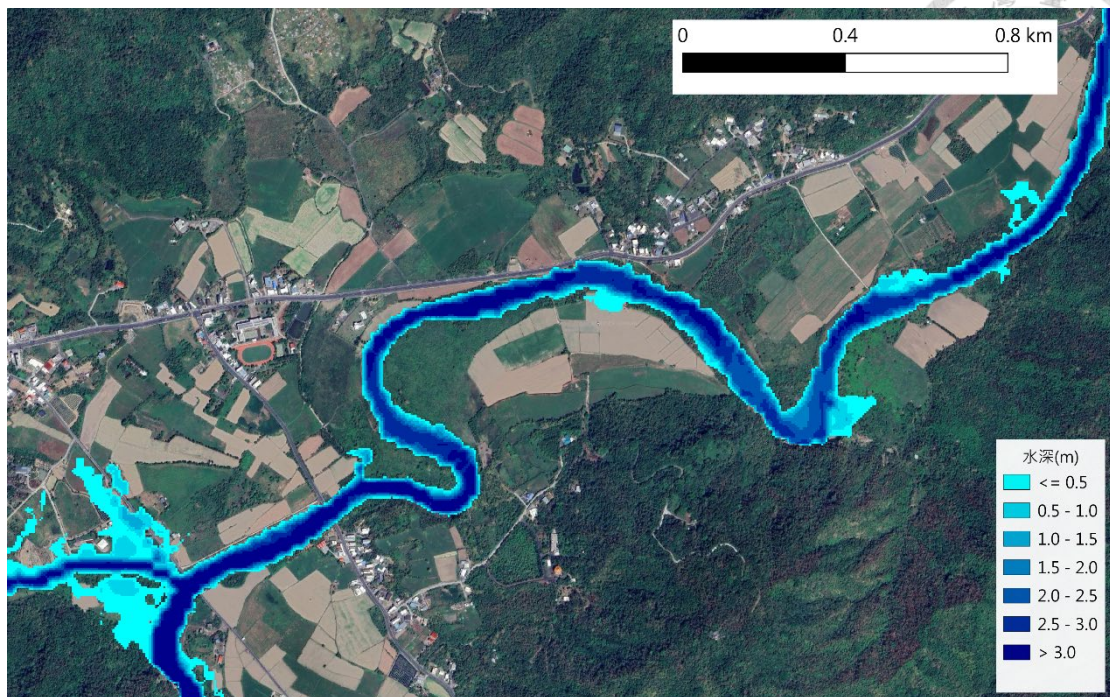


圖 4-21 永港橋上游 Q_{10} 水深變化

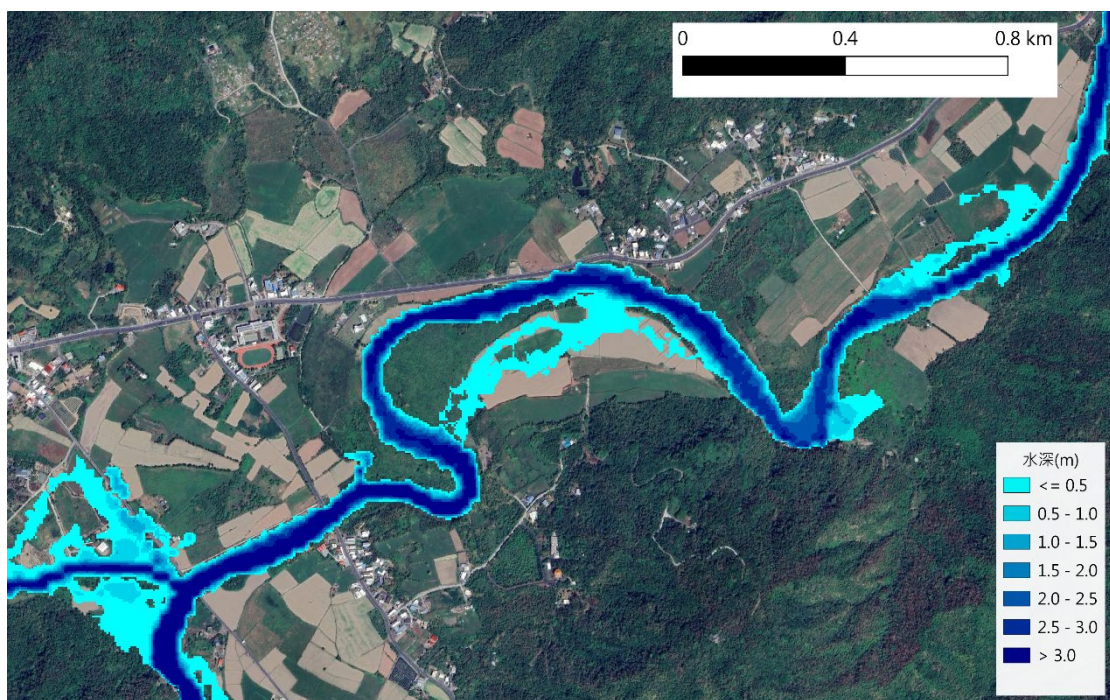


圖 4-22 永港橋上游 Q_{25} 水深變化

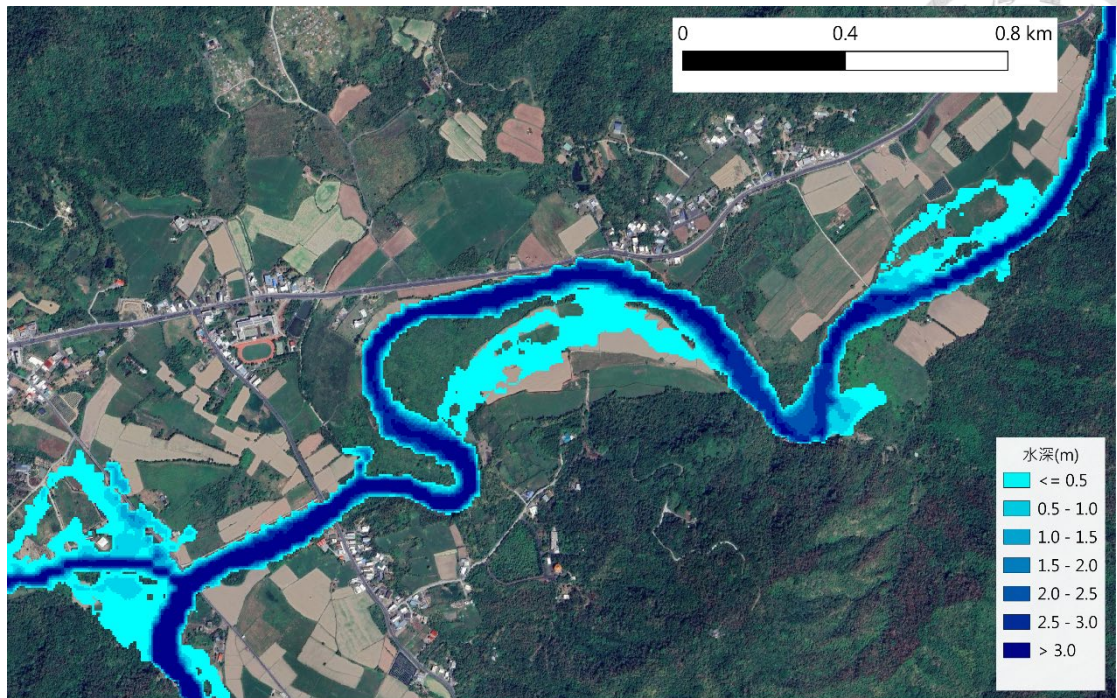


圖 4-23 永港橋上游 Q_{50} 水深變化

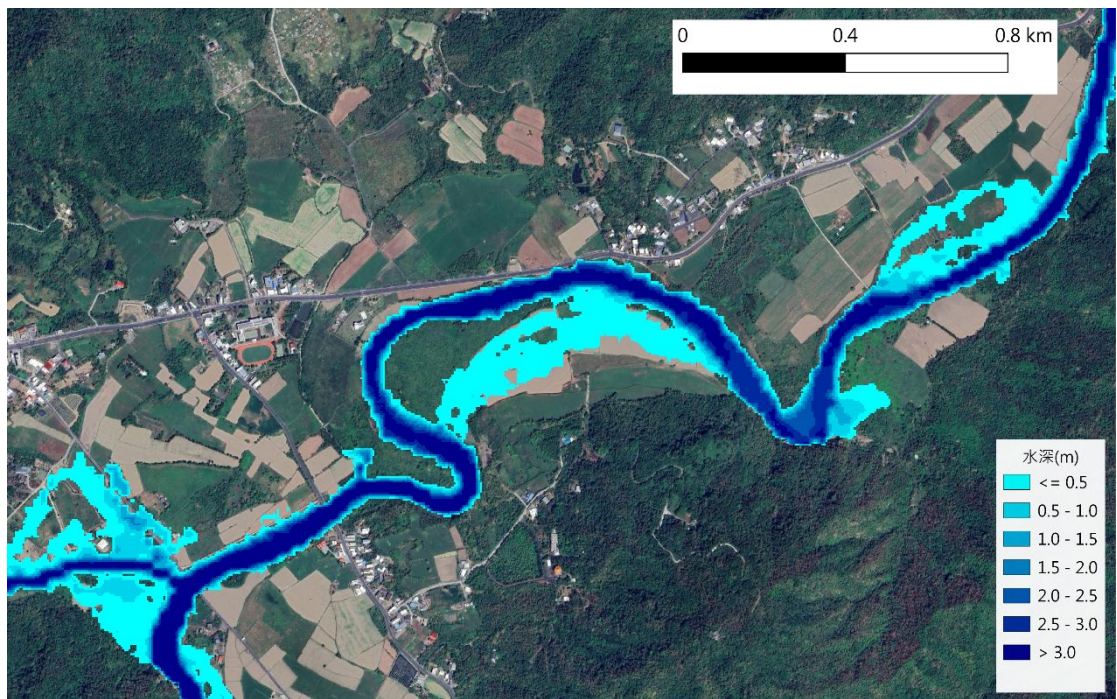


圖 4-24 永港橋上游 Q_{100} 水深變化

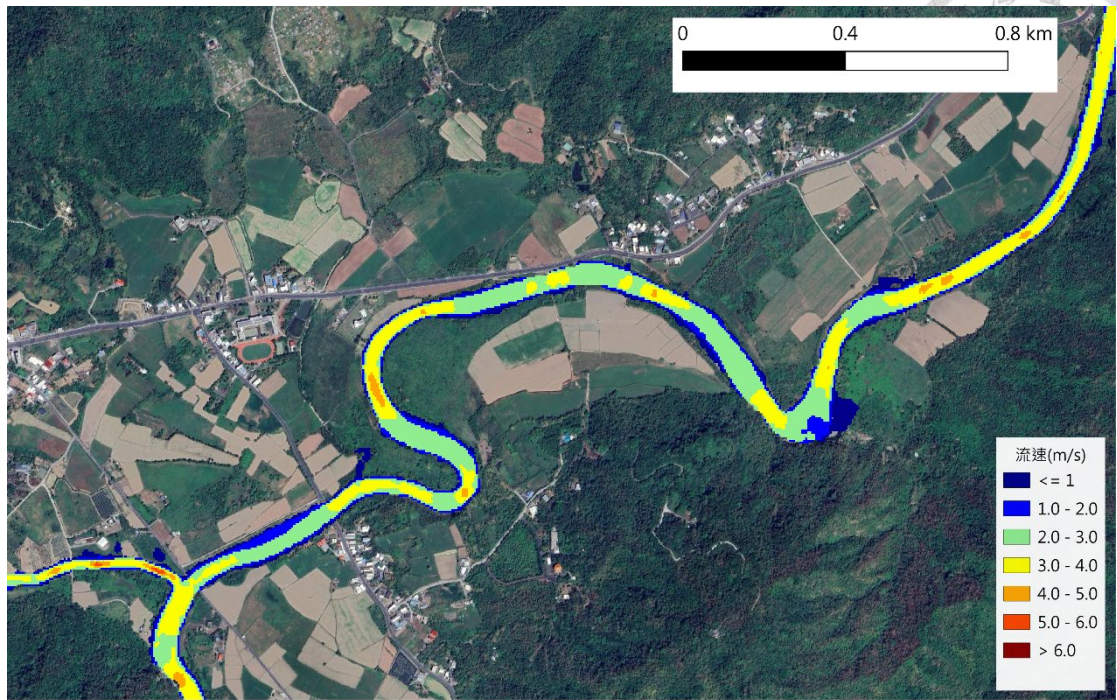


圖 4-25 永港橋上游 Q_2 流速變化

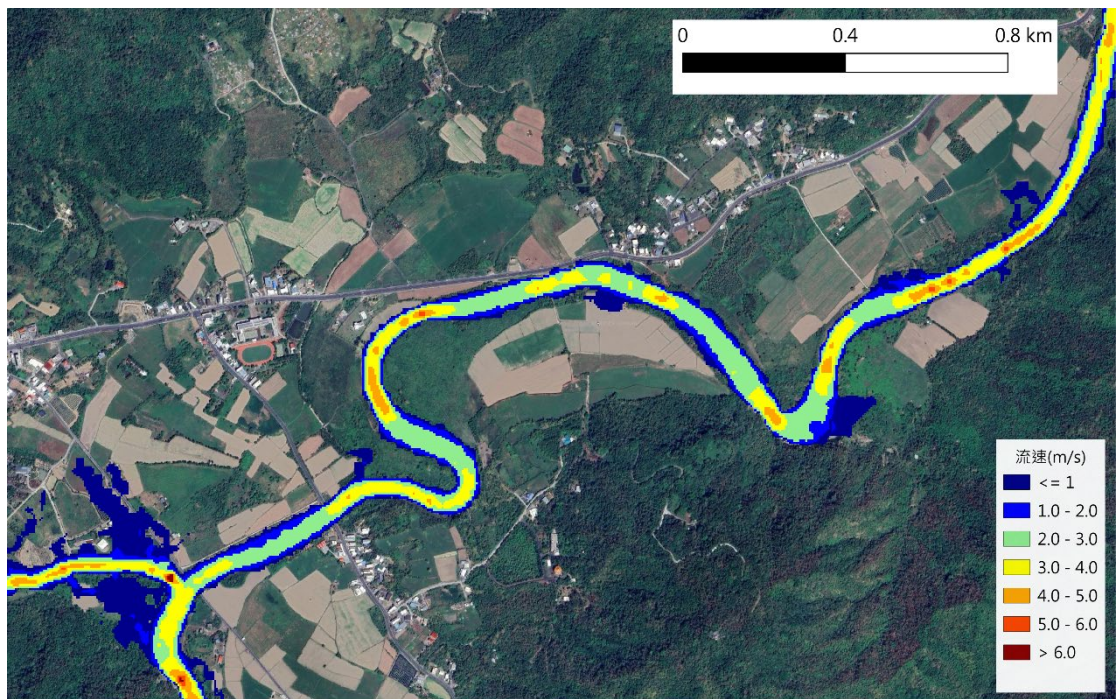


圖 4-26 永港橋上游 Q_{10} 流速變化

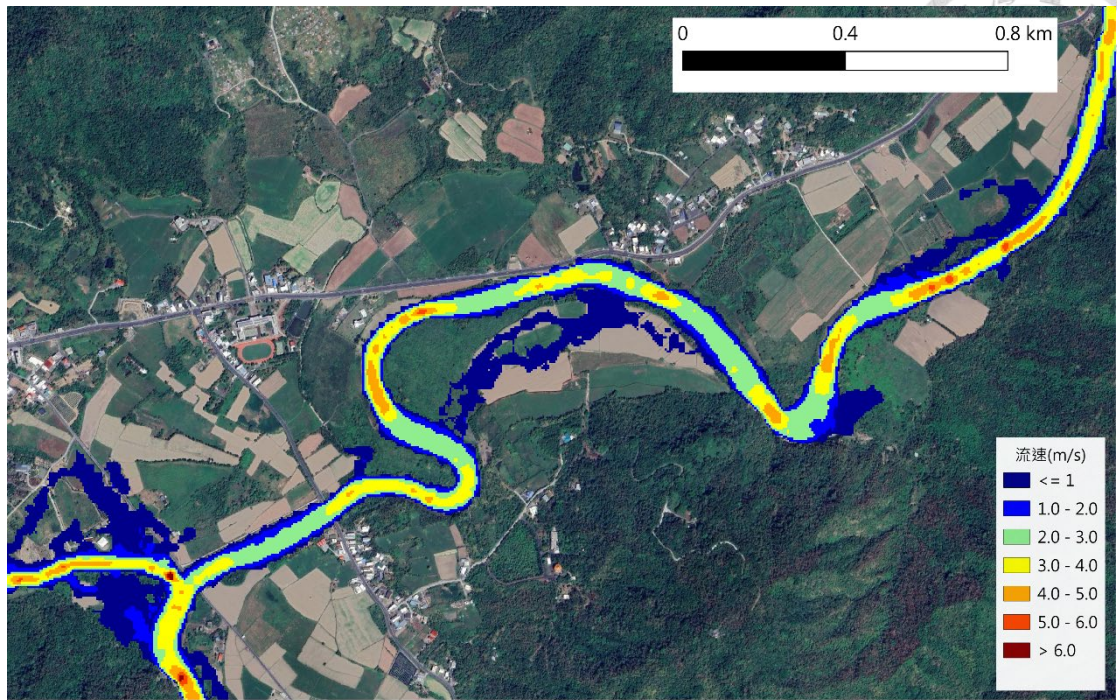


圖 4-27 永港橋上游 Q_{25} 流速變化

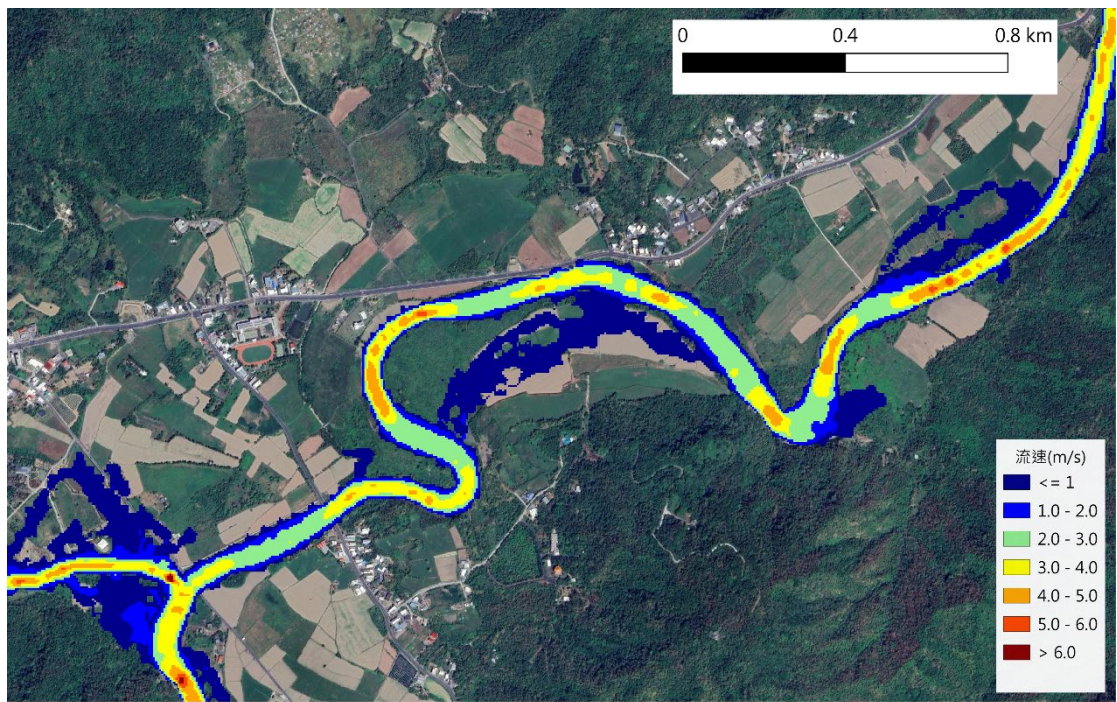


圖 4-28 永港橋上游 Q_{50} 流速變化

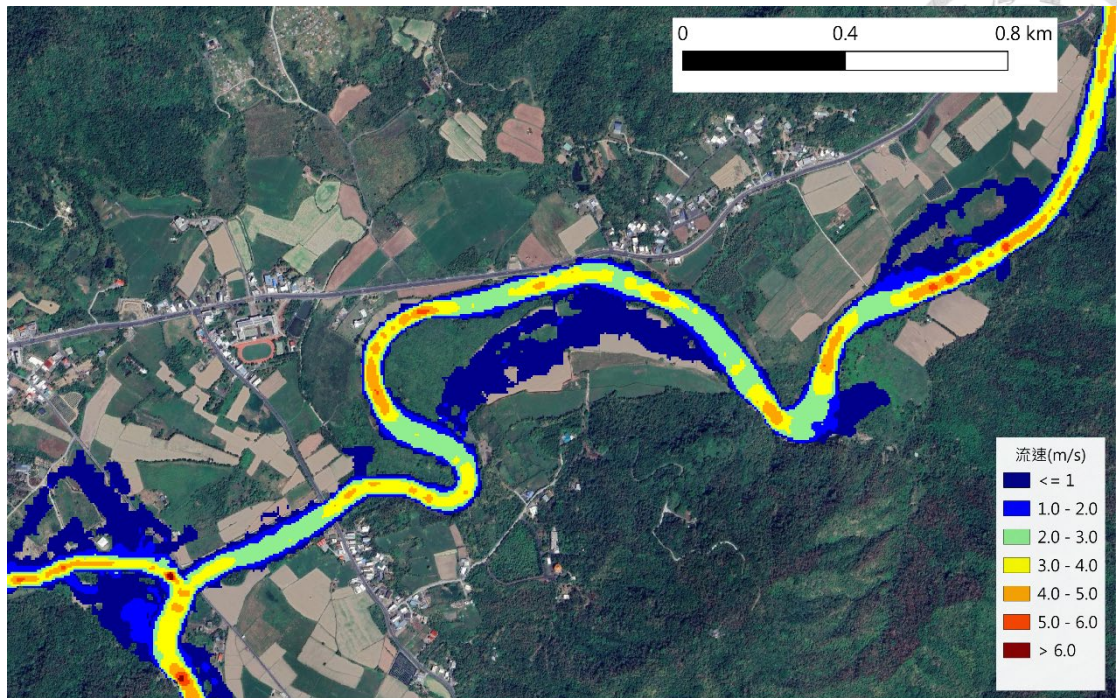


圖 4-29 永港橋上游 Q_{100} 流速變化

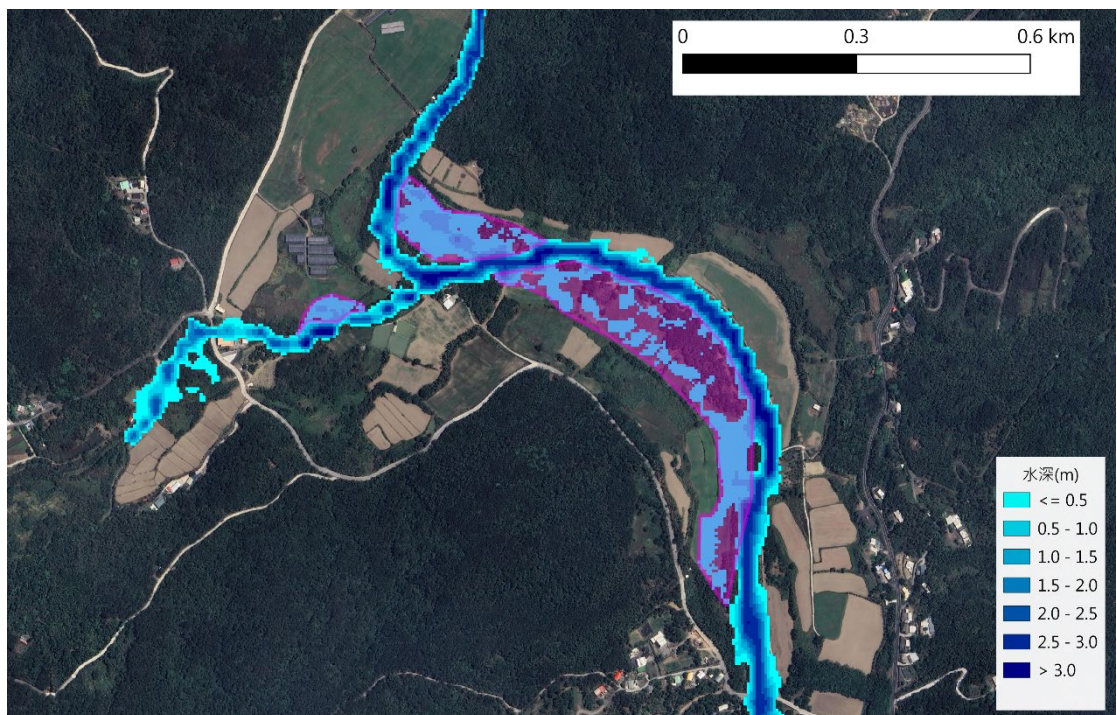


圖 4-30 港口溪及小路溪匯流處 Q_{50} 之淹水潛勢與水砂溢淹區

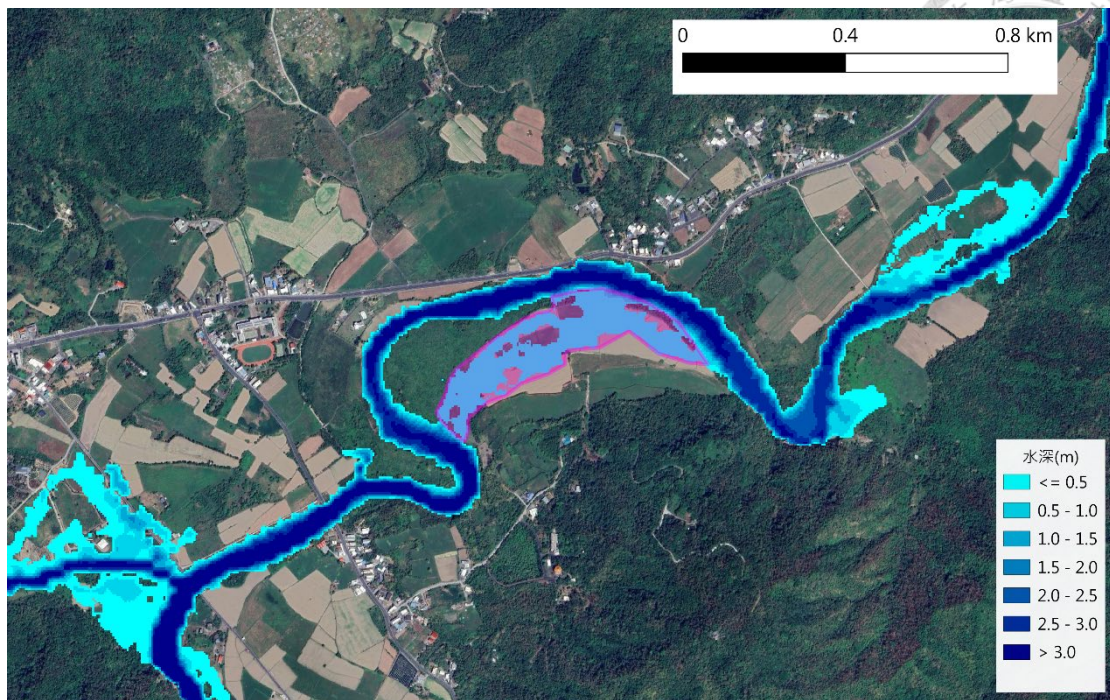


圖 4-31 永港橋上游 Q_{50} 之淹水潛勢與水砂溢淹區

4.3 HEC-RAS 動床模擬

相較於定床模擬，HEC-RAS 動床模擬需額外設定輸砂相關參數，包括土砂粒徑分布、輸砂公式之選定、不可沖刷區域劃設等。本研究考量模式運算負荷限制，故針對先前利害關係人意見統整時所提出具改善需求之區域進行模擬分析，探討其現況與調適後條件下之差異。

需要注意的是，由於本次 HEC-RAS 動床模擬並未於模型中明確設置既有之護岸或堤防高程，因此在部分高流量條件下，模擬結果出現超出河道邊界之溢淹情形。然而實際現況中，河段兩側多已設有護岸防護結構，並不會產生大規模溢流。因此，為避免此類非現實溢淹範圍影響後續分析判斷，本研究於模擬成果圖像中另行加設遮罩處理，以突顯河道內部之變化趨勢；此外，在數值結果統計方面亦僅納入河道範圍內之資料進行計算，藉此聚焦於河道水理與地形變化之評估，確保分析結果更貼近現地情況並具參考價值。



4.3.1 泰安橋上下游河段

本段模擬範圍長度約為 600 公尺，上游邊界設於泰安橋位置。現況河段自上游至中游設有 6 座固床工，於泰安橋下游約 500 公尺處另設有一座固床工。由於固床工下游已形成明顯冲刷坑，長期將影響構造物穩定性，加上高落差對魚類縱向遷移構成阻礙，另有護岸出現裂縫現象，可能衍生潛在安全疑慮。為改善上述問題，本研究提出調適設計方案，針對該段進行高程順接與局部緩坡化處理，以降低冲刷風險並提升生態通透性，並著重觀察裂縫護岸之穩定情形，以評估是否需進一步補強。換言之，改善前模型包含 6 座固床工與 1 座下游固床工；改善後則維持固床工配置，並移除下游固床工區段進行緩坡化設置調整優化。

模擬條件涵蓋基流量、常見洪水事件(Q_2)與設計保護標準之洪水條件(Q_{50})，採用 HEC-RAS 2D 變量流動床模式分析水深、流速與冲刷深度變化，評估構造物對水理與地貌的影響，以及調適措施之成效。模擬成果如圖 4-32~圖 4-40 所示。為精確評估調適前後的影響差異，觀測範圍依工址地形分為中下游兩段：中游段為固床工上游約 267 公尺區間，下游段為固床工下游約 104 公尺區域。詳細數據如表 4-2~表 4-3 所示。

在基流量條件下，調適前後中游平均流速均為 0.11 m/s，平均水深由 0.29 m 降至 0.27m，變化甚微；下游平均流速由 0.30 m/s 上升至 0.33 m/s，平均水深則維持於 0.04 m，顯示調適措施不致改變常態流況穩定性。

Q_2 條件下，中游平均水深由 1.69 m 至 1.68 m，平均流速由 1.50 m/s 增至 1.51 m/s，變化幅度極小，顯示調適後中游水理條件趨於穩定；下游平均水深由 0.73 m 下降至 0.68 m，平均流速則由 2.45 m/s 增至 2.65m/s，雖局部水深減少、流速上升，但未觀察明顯冲刷惡化，推測為局部河床調整後主流集中所致，整體仍屬穩定範圍。

Q_{50} 條件下，中游平均水深由 1.90 m 至 1.91 m，平均流速則由 1.80m/s 至 1.75m/s，顯示高流量條件下調適後具備一定蓄洪與減能效果；下游平均水深由 0.88 m 升高

至 0.95 m，平均流速由 2.86 m/s 升至 3.17 m/s，顯示局部坡度調整與河寬變化導致水流集中，雖有流速提升，但水位未異常上升，亦未觀察顯著沖刷擴大，整體水理表現仍維持穩定。

觀察護岸破損處，基流量下最大水深由調適前之 0.42 公尺降至 0.40 公尺； Q_2 條件下由 1.92 公尺降至 1.91 公尺； Q_{50} 條件下則由 2.16 公尺降至 2.14 公尺，差異雖小但顯示調適後無造成水位上升現象，不致增加溢堤風險。另外觀察沖刷情況，除了在基流量條件下，護岸區段沖刷情形有小幅提升 0.02m，其餘條件皆明顯下降。

本調適設計於常態及高流量條件下皆具良好水理穩定性，並能有效減緩下游沖刷及維持縱向連通性，顯示其具兼顧防災與生態之可行潛力。

表 4-2 泰安橋模擬結果之平均值

		基流量		Q_2		Q_{50}	
		調適前	調適後	調適前	調適後	調適前	調適後
平均流速 (m/s)	中游	0.11	0.11	1.50	1.51	1.80	1.75
	下游	0.30	0.33	2.45	2.65	2.86	3.17
平均水深 (m)	中游	0.29	0.27	1.69	1.68	1.90	1.91
	下游	0.04	0.04	0.73	0.68	0.88	0.95

表 4-3 泰安橋之固床工區域、護岸之模擬結果

	基流量		Q_2		Q_{50}	
	調適前	調適後	調適前	調適後	調適前	調適後
固床工區域流速(m/s)	0.74	0.54	3.92	3.37	3.96	3.60
固床工區域水深(m)	0.18	0.15	0.84	1.06	1.00	1.39
固床工區域沖刷情況(m)	0.00	0.00	0.92	0.00	1.32	0.08
護岸流速 (m/s)	0.81	1.06	4.23	4.67	3.63	4.79
護岸水深 (m)	0.42	0.40	1.92	1.91	2.16	2.14
護岸沖刷情況(m)	0.02	0.04	0.36	0.30	0.53	0.36

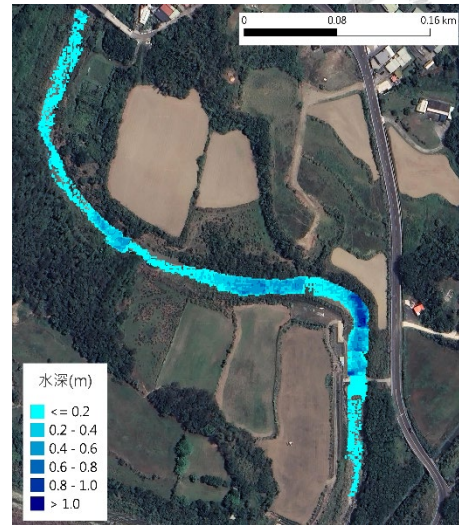
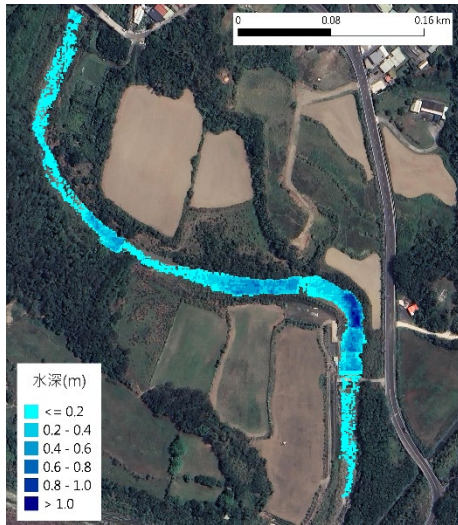


圖 4-32 泰安橋河段基流量調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)

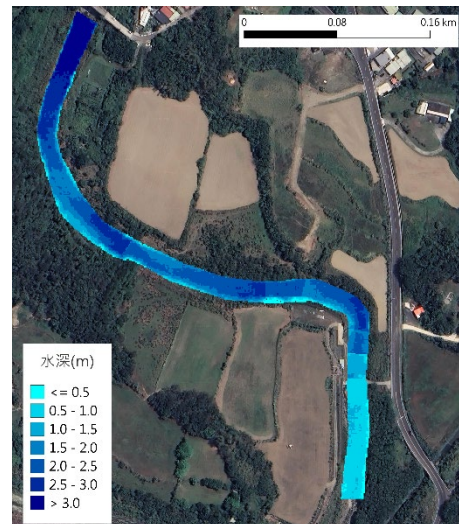
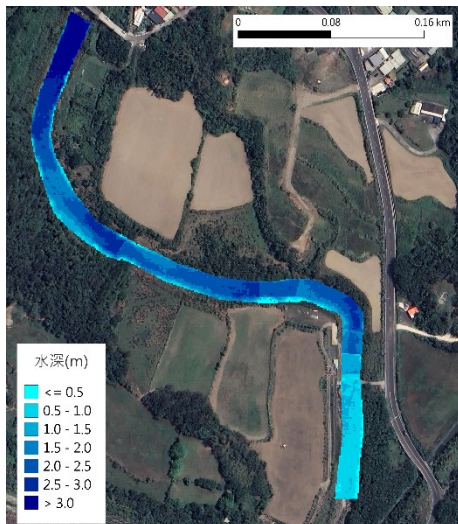


圖 4-33 泰安橋河段 Q_2 調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)

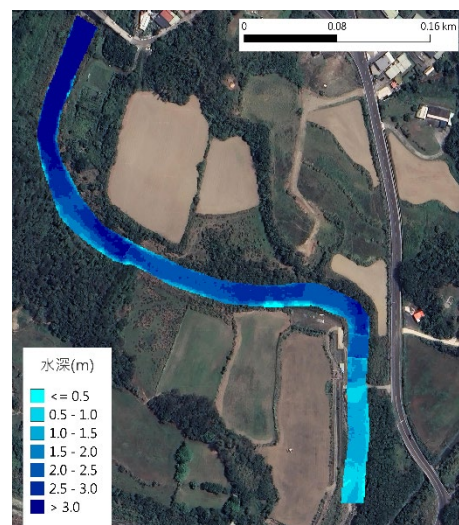
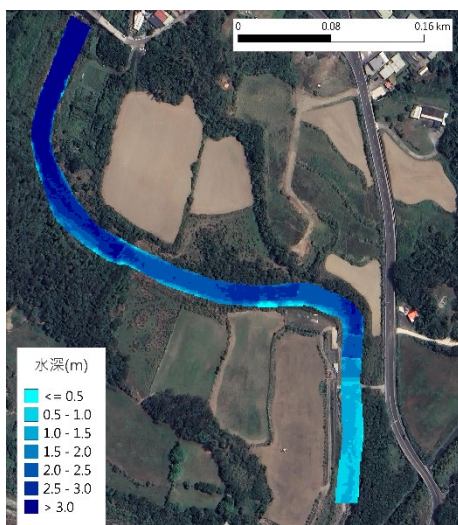


圖 4-34 泰安橋河段 Q_{50} 調適前後之水深(左:調適前;右:調適後)

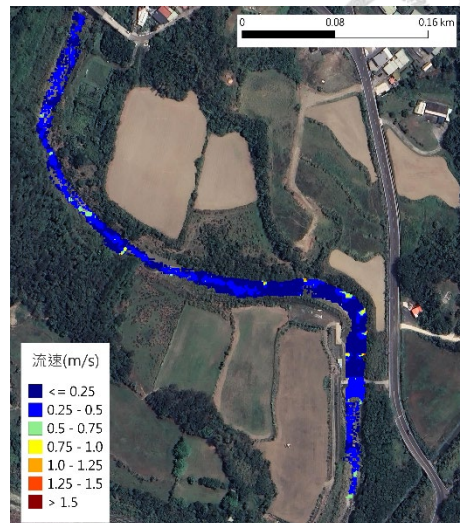
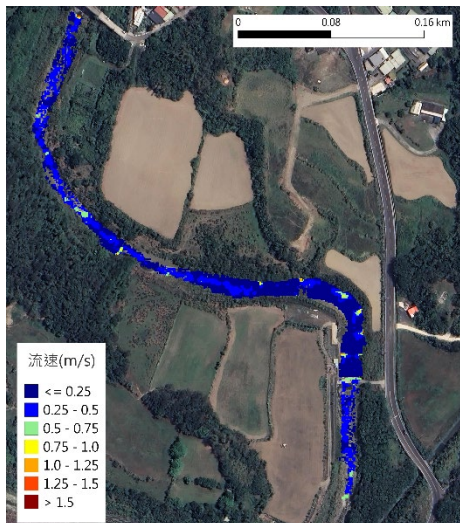


圖 4-35 泰安橋河段基流量調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)



圖 4-36 泰安橋河段 Q_2 調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)

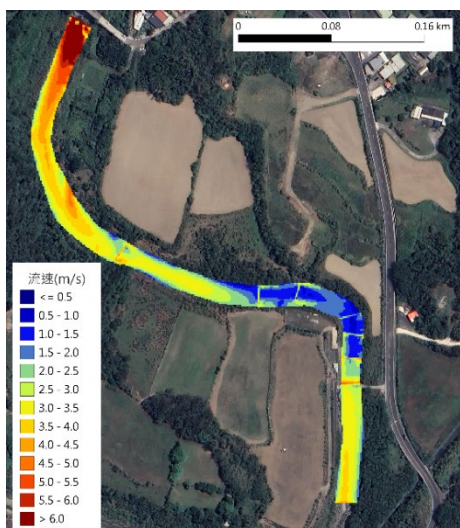


圖 4-37 泰安橋河段 Q_{50} 調適前後之流速(左:調適前;右:調適後)



圖 4-38 泰安橋河段基流量調適前後之河床冲刷變化(左:調適前；右:調適後)

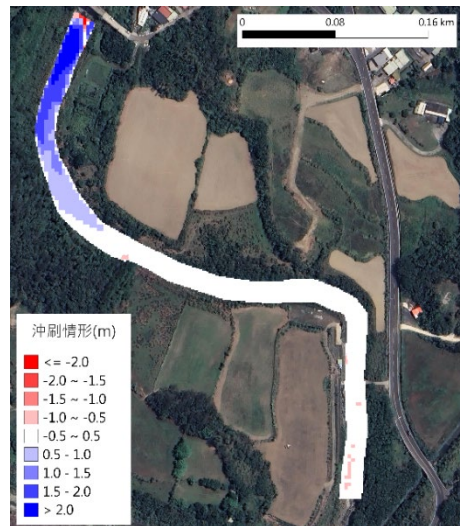
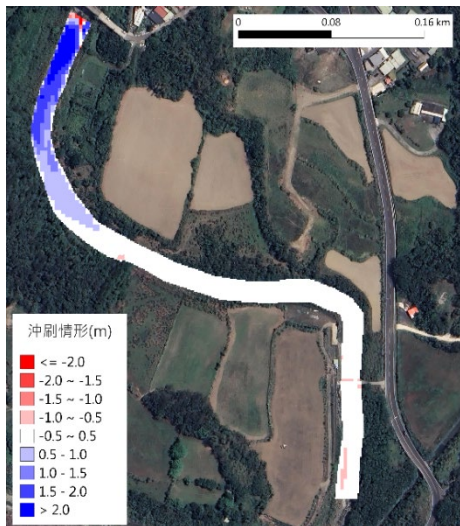


圖 4-39 泰安橋河段 Q_2 調適前後之河床冲刷變化(左:調適前；右:調適後)

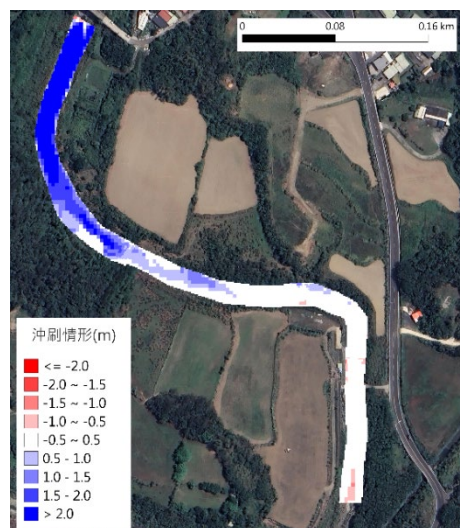
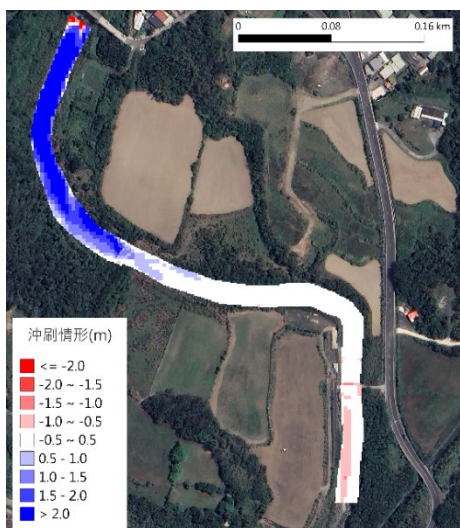


圖 4-40 泰安橋河段 Q_{50} 調適前後之河床冲刷變化(左:調適前；右:調適後)



4.3.2 福摩沙橋上下游河段

本段模擬範圍長度約為 720 公尺，上游邊界設於福摩沙橋上游約 550 公尺處。現況河段中上游設置 6 座固床工，下游則有 1 座格框填塊石及 1 座固床工。根據現地調查顯示，下游固床工因高落差易造成局部強烈沖刷，並導致縱向魚類遷移受阻，以及現場有一處護岸基腳淘刷，潛藏安全風險。因此，本研究提出調適設計方案，針對下游段進行緩坡化與高程順接處理，並拆除下游固床工，以降低落差與穩定河床，同時提升生態通透性與構造物安全性。換言之，改善前模型包含中上游 6 座固床工、下游 1 座格框填塊石與 1 座固床工；改善後模型則維持中上游固床工配置，並以緩坡化設計取代下游固床工。

模擬條件涵蓋基流量、常見洪水事件 (Q_2) 以及設計保護標準 (Q_{50})，以 HEC-RAS 變量流動床模擬分析水深、流速與沖刷深度之變化，評估構造物對水理與地貌之影響，以及調適設計之成效。模擬成果如圖 4-41~圖 4-49 所示，為精確評估調適前後之差異，觀測範圍依地形與工址劃分為上下游兩段：上游段定義為固床工上游約 301 公尺區間，下游段則為固床工下游約 176 公尺區間。詳細數據由表 4-4~表 4-5 所示。

在基流量條件下，調適前後中游平均流速皆維持於 0.09 m/s、平均水深亦維持於 0.22 m，顯示常態條件下流況變異極小；下游區段平均流速由 0.24 m/s 持平不變，平均水深亦維持於 0.09 m，整體表現穩定。

Q_2 條件下，中游平均水深由 2.51 m 微幅上升至 2.52 m，平均流速則由 2.24 m/s 降至 2.16 m/s，顯示調適後坡降趨緩可有效降低主流流速與沖刷潛勢；下游平均水深則由 1.96 m 降至 1.87 m，平均流速由 3.09 m/s 上升至 3.25 m/s，儘管局部區段流速略有提升，但整體仍處於穩定範圍，未見異常水位變化或侵蝕惡化情形。

Q_{50} 條件下，上游平均水深由 2.58 m 升高至 2.67 m，平均流速則由 2.20 m/s 降至 1.95 m/s，顯示高洪水位下調適方案可有效延緩流速、降低沖刷風險；下游水深

由 1.87 m 升高至 1.91 m，流速則從 3.24 m/s 降至 3.21 m/s，顯示調適設計整體具穩定河床與控制沖刷之潛力。

觀察護岸破損處，基流量條件下，最大水深由 0.18 公尺升高至 0.20 公尺； Q_2 條件下由 1.24 公尺下降至 1.01 公尺； Q_{50} 條件下則由 0.95 公尺升高至 1.07 公尺。將固床工拆除後，水深升高幅度差異不大，且不會造成溢堤風險。另外觀察沖刷情況，在各重現期流量條件下，護岸區段以及固床工區段之沖刷情形皆下降。

福摩沙橋段調適後於中高流量條件下均展現出良好穩定性，特別在高流速區域仍可有效減緩沖刷，維持縱向連通與水理安全，為具兼顧生態與防災效益之可行方案。

表 4-4 福摩沙橋模擬結果之平均值

		基流量		Q_2		Q_{50}	
		調適前	調適後	調適前	調適後	調適前	調適後
平均流速 (m/s)	中游	0.09	0.09	2.24	2.16	2.20	1.95
	下游	0.24	0.24	3.09	3.25	3.24	3.21
平均水深 (m)	中游	0.22	0.22	2.51	2.52	2.58	2.67
	下游	0.09	0.09	1.96	1.87	1.87	1.91

表 4-5 福摩沙橋之固床工區域、護岸之模擬結果

	基流量		Q_2		Q_{50}	
	調適前	調適後	調適前	調適後	調適前	調適後
固床工區域流速 (m/s)	0.21	0.18	3.11	5.10	3.00	5.19
固床工區域水深 (m)	0.07	0.40	1.44	1.57	1.48	1.56
固床工區域沖刷情況 (m)	0.03	0.00	0.78	0.00	0.70	0.00
護岸流速 (m/s)	0.50	0.48	4.44	4.58	4.26	4.15
護岸水深 (m)	0.18	0.20	1.24	1.01	0.95	1.07
護岸沖刷情況 (m)	0.01	0.00	0.39	0.24	1.23	1.01

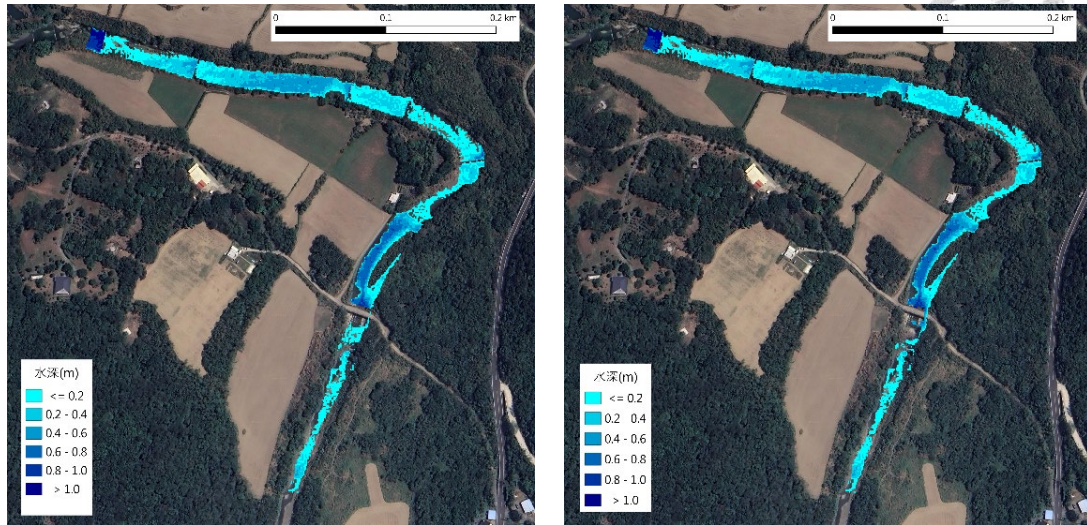


圖 4-41 福摩沙橋河段基流量調適前後之水深(左:調適前；右:調適後)

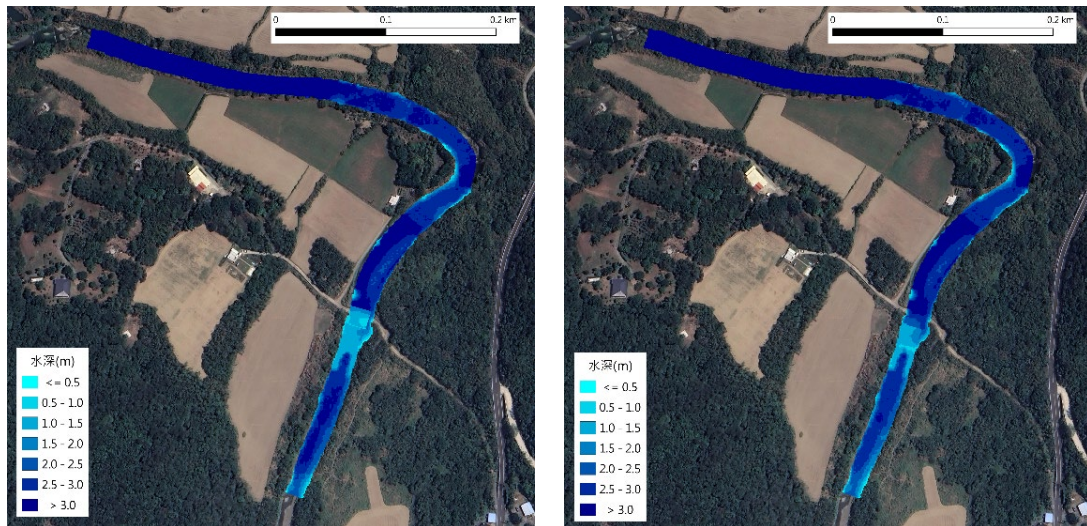


圖 4-42 福摩沙橋河段 Q_2 調適前後之水深(左:調適前；右:調適後)

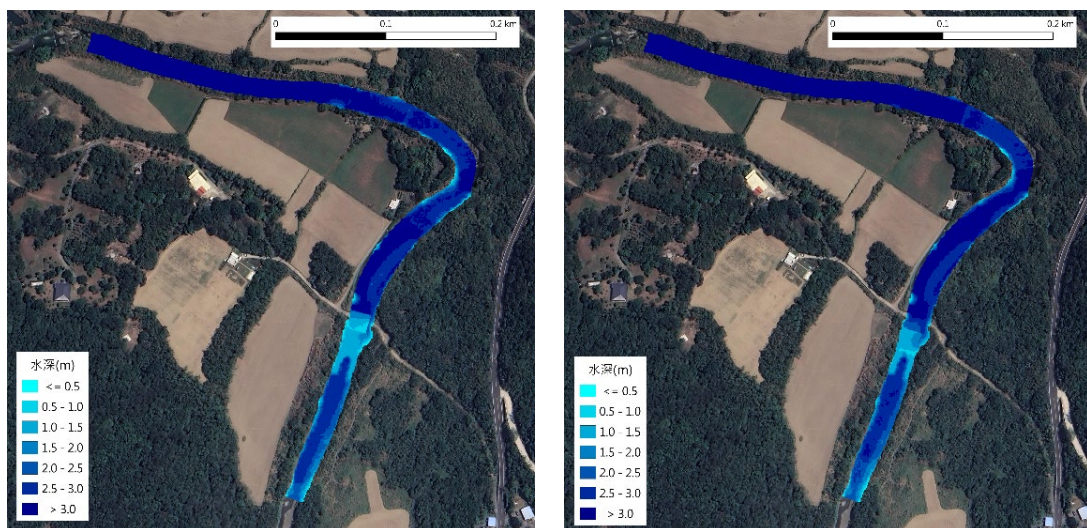


圖 4-43 福摩沙橋河段 Q_{50} 調適前後之水深(左:調適前；右:調適後)

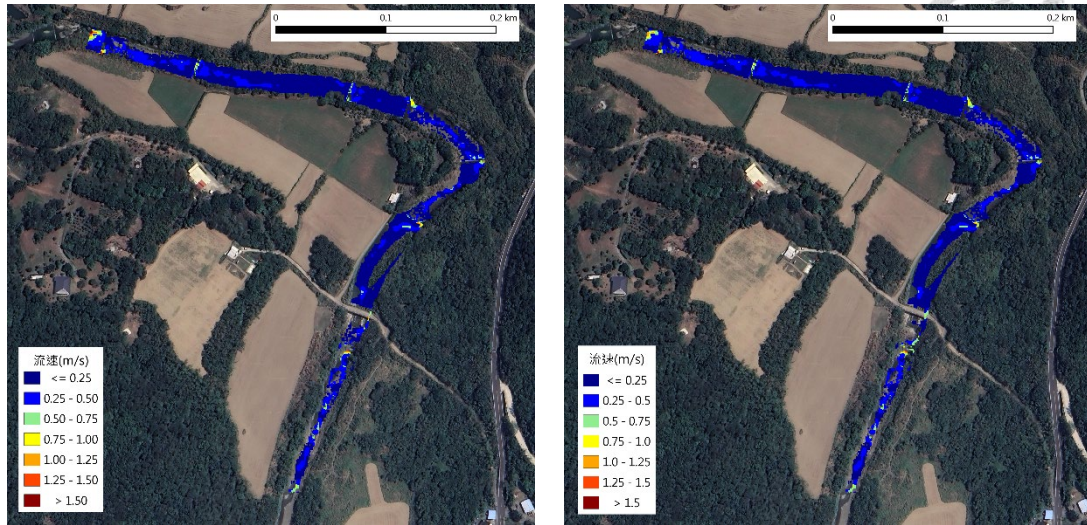


圖 4-44 福摩沙橋河段基流量調適前後之流速(左:調適前；右:調適後)

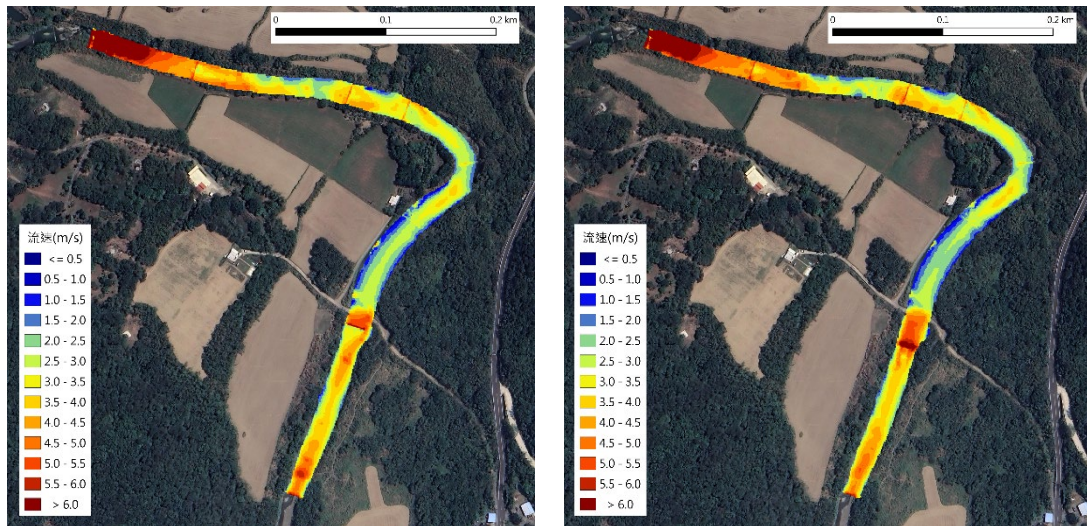


圖 4-45 福摩沙橋河段 Q_2 調適前後之流速(左:調適前；右:調適後)

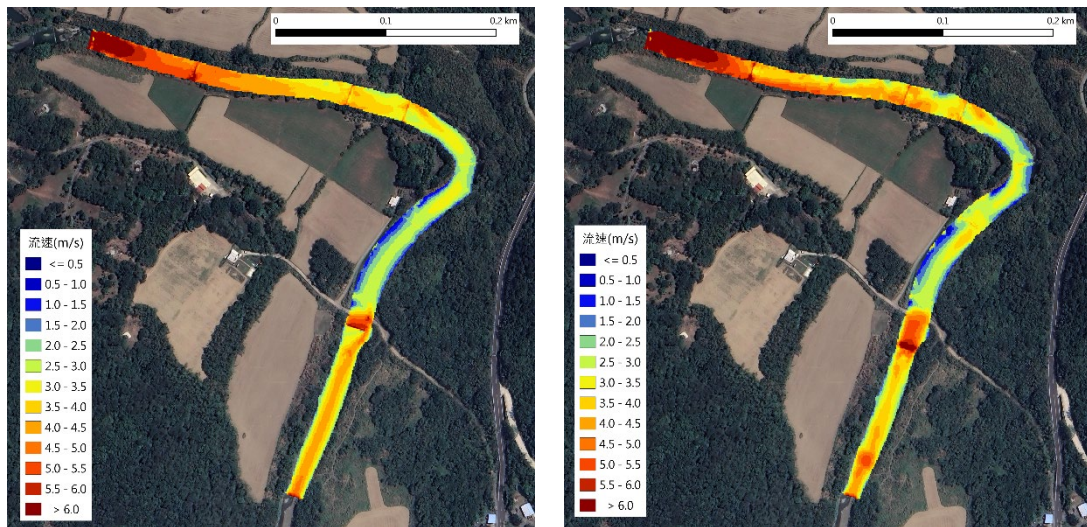


圖 4-46 福摩沙橋河段 Q_{50} 調適前後之流速(左:調適前；右:調適後)

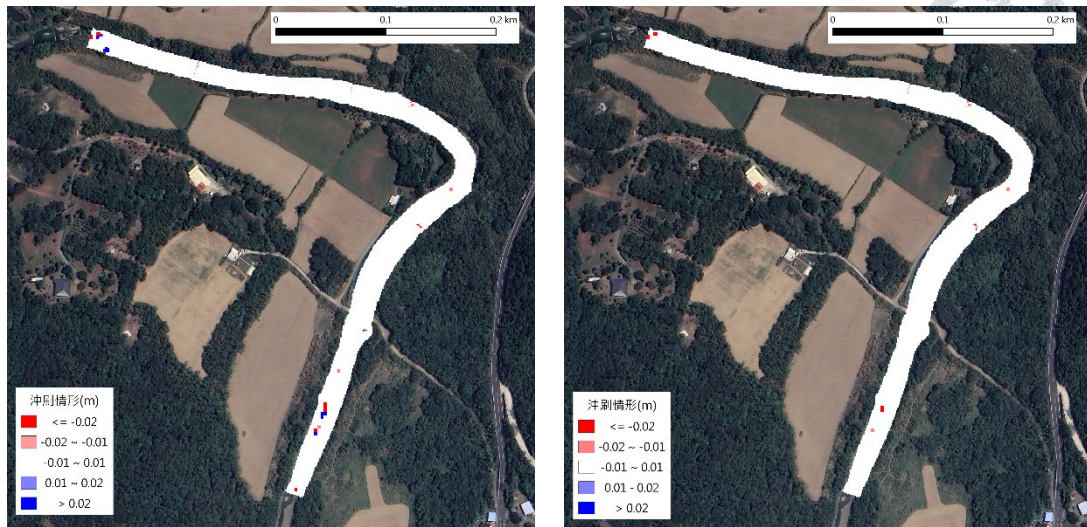


圖 4-47 福摩沙橋河段基流量調適前後之冲刷情形(左:調適前;右:調適後)

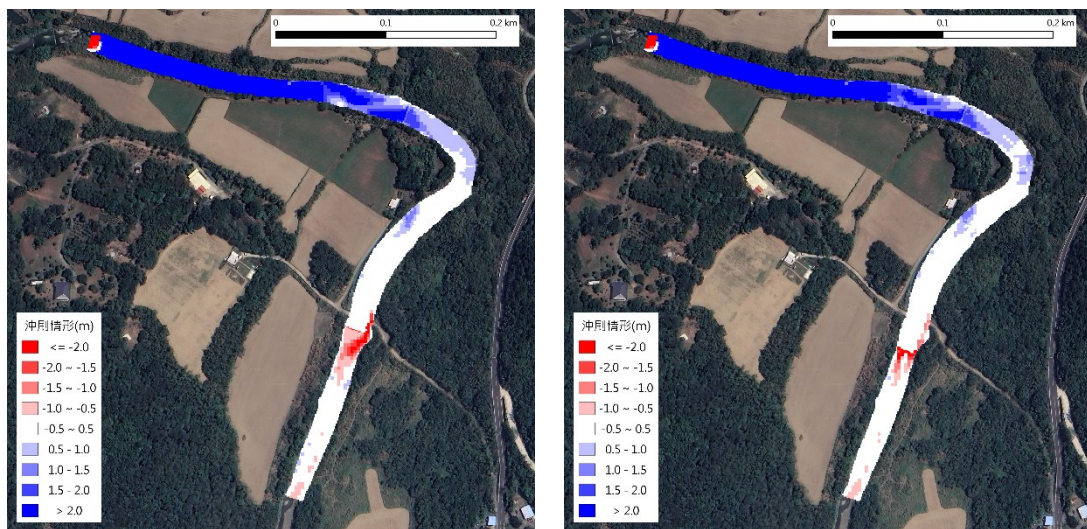


圖 4-48 福摩沙橋河段 Q_2 調適前後之冲刷情形(左:調適前;右:調適後)

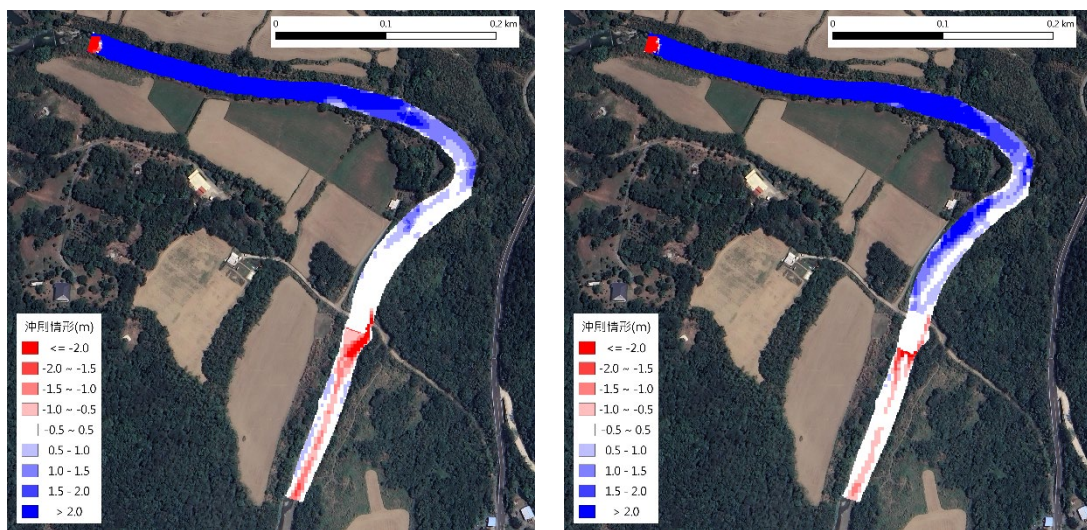


圖 4-49 福摩沙橋河段 Q_{50} 調適前後之冲刷情形(左:調適前;右:調適後)



4.4 生物棲息地指標評分

在完成 HEC-RAS 2D 模擬後，本研究進一步應用模擬結果中之水深與流速資料，評估不同方案對目標魚種棲地適宜性之影響。因此本研究將進行調整方案前後在基流量下之進行分析，透過水理條件與棲地類型對應關係，如表 4-6 所示，藉此劃分出各類潛在棲地型態。

本研究以大吻鰕虎與高屏馬口鱮為目標物種，分別根據其對水深與流速的適合度進行生物棲息地指標評估。透過比較調整前後方案在棲地分布與適合度之差異，分析本次調適工程是否有助於提升該兩魚種之棲地品質與生存潛力。以下將進一步說明分析方法與評估結果。

表 4-6 河流棲息地區分指標

棲息地種類	流速(m/s)	水深(m)
淺瀨(Riffle)	>0.3	<0.3
淺流(Glide)	<0.3	<0.3
深潭(Pool)	<0.3	>0.3
急流(Run)	>0.3	>0.3

4.4.1 大吻鰕虎

依據前述模擬結果，本研究針對泰安橋與福摩沙橋兩區段，結合 HEC-RAS 2D 模擬輸出之水深與流速資料，透過 Python 程式運算以及結合表 4-6 之棲地分類標準，進行大吻鰕虎之棲息地適合度指數分析。泰安橋區域結果如圖 4-50 所示，福摩沙橋區域如圖 4-51 所示，詳細數據如表 4-7~表 4-8 所示。

由評估結果顯示，在泰安橋區域中，淺流以及深潭兩者區域經過調適後，平均 HSI 值分別從 0.78 上升到 0.80 以及從 0.50 上升到 0.55，顯示調適措施對於提升大吻鰕虎棲地品質具正面成效。而在福摩沙橋地區中，雖然淺瀨區之平均 HSI 值從

0.60 下降到 0.59，略為下降，但深潭區之平均 HSI 從 0.17 上升到 0.18，整體變化幅度有限，顯示該區調適成效相對保守。綜合而言，調適方案於泰安橋區段對大吻鰕虎棲息環境改善具有明顯成效，福摩沙橋區段則相對穩定，結果可作為後續調適策略優化與比對之依據。

表 4-7 大吻鰕虎調整方案前後泰安橋區域 HSI 指數

棲息地 種類	流速 (m/s)	水深 (m)	平均 HSI		面積占比(%)	
			調適前	調適後	調適前	調適後
淺瀨 (Riffle)	>0.3	<0.3	0.60	0.60	80.69	80.47
淺流 (Glide)	<0.3	<0.3	0.78	0.80	6.43	7.90
深潭 (Pool)	<0.3	>0.3	0.50	0.55	0.03	0.06
急流 (Run)	>0.3	>0.3	0.39	0.39	12.84	11.57

表 4-8 大吻鰕虎調整方案前後福摩沙橋區域 HSI 指數

棲息地 種類	流速 (m/s)	水深 (m)	平均 HSI		面積占比(%)	
			調適前	調適後	調適前	調適後
淺瀨 (Riffle)	>0.3	<0.3	0.60	0.59	74.57	74.46
淺流 (Glide)	<0.3	<0.3	0.77	0.77	4.27	4.25
深潭 (Pool)	<0.3	>0.3	0.17	0.18	1.33	1.22
急流 (Run)	>0.3	>0.3	0.39	0.39	19.83	20.08

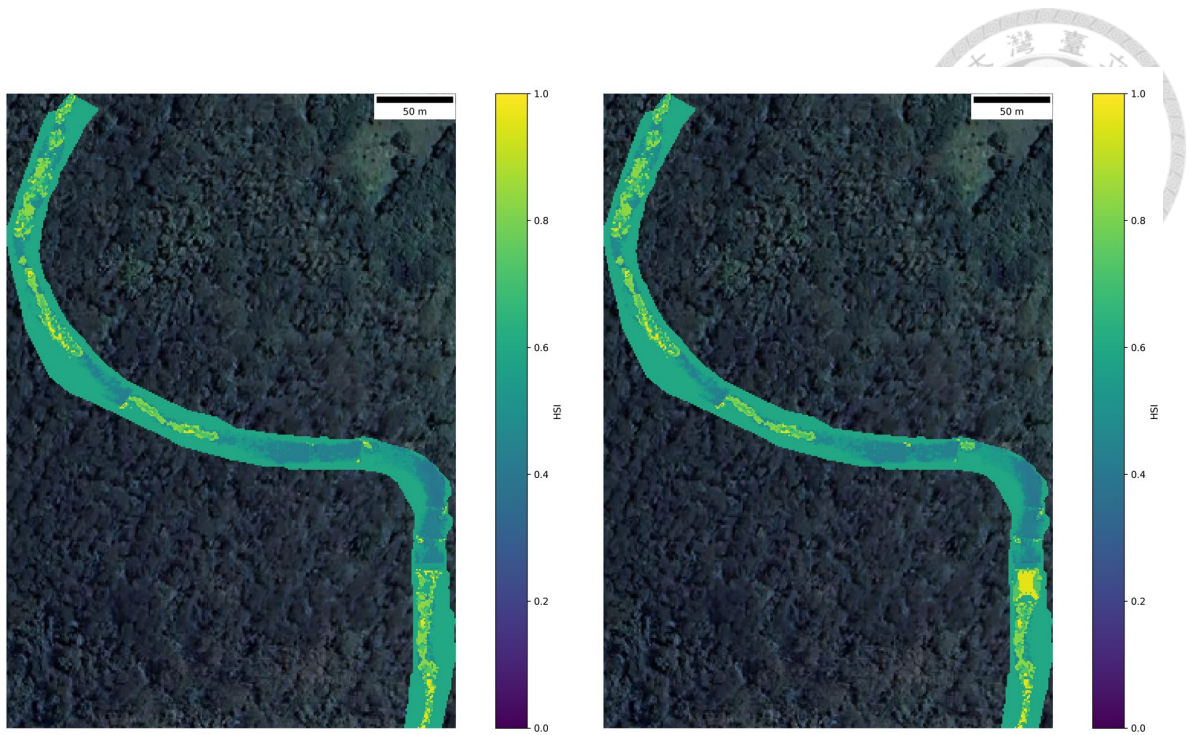


圖 4-50 泰安橋河段調適前後之大吻鰕虎 HSI 值(左:調適前；右:調適後)

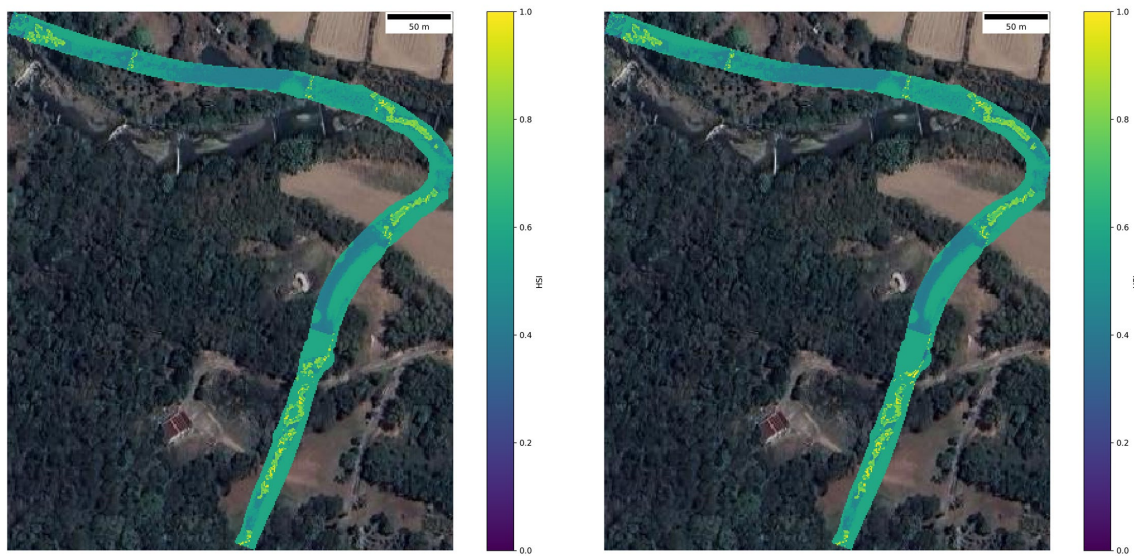


圖 4-51 福摩沙橋河段調適前後之大吻鰕虎 HSI 值(左:調適前；右:調適後)



4.4.2 高屏馬口鰐

延續前述分析方法，針對泰安橋與福摩沙橋兩區段，結合 HEC-RAS 2D 模擬結果與 Python 運算，並依據表 4-6 棲地類型分類標準，計算高屏馬口鰐在不同棲地類型下的棲息地適合度指數。泰安橋區域結果如圖 4-52 所示，福摩沙橋區域如圖 4-53 所示，詳細數據如表 4-9~表 4-10 所示。

結果顯示，在泰安橋區域中，調適後淺流與深潭兩類棲地之平均 HSI 分別由 0.80 提升至 0.81，以及由 0.62 提升至 0.65，顯示調適措施對於高屏馬口鰐棲地品質略有改善。而福摩沙橋地區則呈現相對穩定之趨勢，僅深潭棲地 HSI 由 0.44 提升至 0.45，其餘棲地類型之 HSI 值則無顯著變化。

整體而言，調適工程對高屏馬口鰐於泰安橋區域之棲地適合度具有正向影響，雖提升幅度有限，但已顯示改善趨勢；福摩沙橋區段則因調適前棲地條件相對穩定，變化幅度較小。本研究結果可作為後續調適規劃優化與成效評估之基礎依據。

表 4-9 高屏馬口蠟調整方案前後泰安橋區域 HSI 指數

棲息地 種類	流速 (m/s)	水深 (m)	平均 HSI		面積占比(%)	
			調適前	調適後	調適前	調適後
淺瀨 (Riffle)	>0.3	<0.3	0.88	0.88	80.69	80.47
淺流 (Glide)	<0.3	<0.3	0.80	0.81	6.43	7.90
深潭 (Pool)	<0.3	>0.3	0.62	0.65	0.03	0.06
急流 (Run)	>0.3	>0.3	0.71	0.71	12.84	11.57

表 4-10 高屏馬口蠟調整方案前後福摩沙橋區域 HSI 指數

棲息地 種類	流速 (m/s)	水深 (m)	平均 HSI		面積占比(%)	
			調適前	調適後	調適前	調適後
淺瀨 (Riffle)	>0.3	<0.3	0.88	0.88	74.57	74.46
淺流 (Glide)	<0.3	<0.3	0.79	0.79	4.27	4.25
深潭 (Pool)	<0.3	>0.3	0.44	0.45	1.33	1.22
急流 (Run)	>0.3	>0.3	0.71	0.71	19.83	20.08

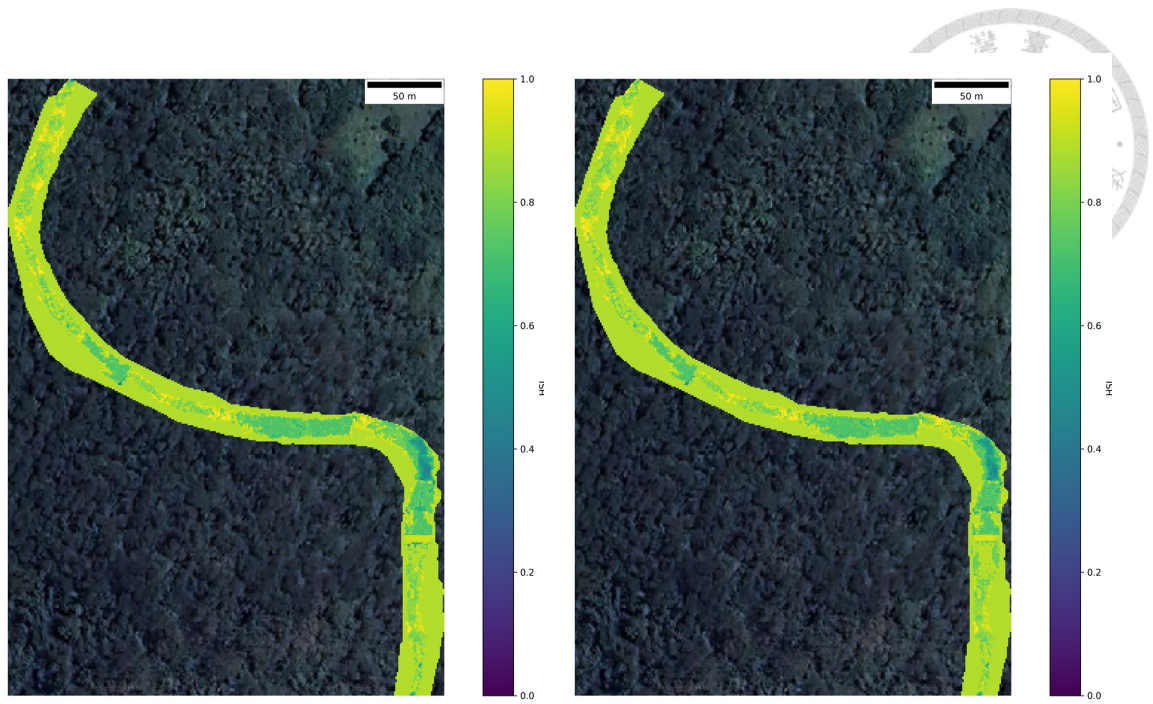


圖 4-52 泰安橋河段調適前後之高屏馬口鱸 HSI 值(左:調適前；右:調適後)



圖 4-53 福摩沙橋河段調適前後之高屏馬口鱸 HSI 值(左:調適前；右:調適後)



4.5 自我評估工具

本研究將現有的研究成果以及各文獻資料統整，將此些結果進行初步自我評估，評估成果表 4-11 與表 4-12 所示，總分為 40 分，最終結果為部分相符。在 28 項指標中，高度符合有 2 項、基本符合有 6 項、部分符合有 12 項、不符合有 8 項。

本研究現階段港口溪調適方案作為 NbS 的優勢，在能有效應對社會挑戰（標準 1；總分 80 分）、考慮設計尺度的措施（標準 2；總分 60 分）以及基於包容、透明和賦權的治理過程（標準 5；總分 50 分）。

在標準 1：能有效應對社會挑戰中，根據 HEC-RAS 2D 模擬結果及當地居民的災情分享，可知港口溪流域存在溢淹問題，導致農作物損失，並對居民生活造成影響。針對此問題，調適方案著力於治理集水區內的溢淹情況，藉此提升當地居民的生活品質，對應到「防災減災」的社會挑戰。

在標準 2：考慮設計尺度的措施中，在大尺度方面，首先藉由 HEC-RAS 2D 模擬進行全流域的溢淹潛勢分析，根據模擬結果確認溢淹範圍，並提出兩處水砂溢淹區作為後續規劃的重點。此過程同時需蒐集近年來的重大災害數據，以判斷敏感區域，優先進行修復及改善。另外也需以小尺度方式進行，聚焦於特定區域的精細規劃，調整範圍縮小至福摩沙橋及泰安橋區域，針對該地區所面臨的問題逐一列出並進行改善，後續管理規劃問題亦需同步考量，確保整體策略的持續性與實施效果。

最後在標準 5：基於包容、透明和賦權的治理過程中，確保港口溪集水區調適方案的全面性與可行性，規劃過程中邀請在地社區、專家學者、相關權責單位及利害關係人參與，於不同階段共同討論，釐清面臨的社會挑戰，並藉此促進跨域合作與對話，共同討論港口溪集水區的調適課題。透過一系列工作坊及協調會議，促進調適議題的多元視角與共識，並為後續的規劃與實施奠定良好的基礎。

部分達成的標準是對生物多樣性產生淨效益（標準 3；總分 40 分）。根據現場觀察，建議福摩沙橋、泰安橋有修復之必要，高落差影響到生物廊道，棲地的多樣



性降低，為改善此現象而提出調適策略藉此改善構造物，將棲地的功能提升。對於生物多樣性淨增益及生態系完整性，可透過建設監測、評估系統，須包括物種、數量、期望變化之方向(例如 80%)、時間週期(例如 5 年內)，透過這些指標來評量生物多樣性和生態系統完整性。

經濟可行性(標準 4)、公平與平衡的權衡(標準 6)、適應性管理(標準 7)、在適當的司法背景下主流化(標準 8)，此些標準評分為不符合，表示在這些方面尚未滿足 NbS 全球標準。以下將進行理由以及改善方向。

在標準 4：經濟可行性中，現階段港口溪調適方案為規劃評估階段，將聚焦在社會防災與生態系統方面，故缺乏支持其經濟可行性之相關證據使其納入設計方案中。後續可善加利用港口溪地區豐富的自然資源，推動地方生態旅遊發展，藉此提升當地觀光經濟價值。也可透過坡地治理減少災害風險，降低當地居民的經濟損失，同時考量坡地補償機制，為居民提供合理的經濟保障，進一步促進地方經濟穩定。

在標準 6：公平與平衡的權衡、以及標準 7：適應性管理中，因方案還在規劃階段，而自我評估需涵蓋全生命週期，評估利害關係人的土地使用權、義務與責任、擬定效益指標後續監測與評估之方案、建立適應性管理之迭代學習框架皆未達成。未來建議可考慮不同設計方案，對於不同的方案進行成本效益分析，藉此評估兩者方案的可取與改進之處，且蒐集利害關係人的意見後，評估多方的權利、義務與責任以及知情同意書(FPIC)，以保障互相的權益。另外可增加相關之儀器或方法，以增加港口溪的實際數據而用來推廣調適港口溪的有力證據，以用來組織學習框架，以生命週期持續監測此系統，供後人學習此方案。

在標準 8：在適當的司法背景下主流化中，在本研究中期望達成之目標，希望能分享此次規劃經驗以促進變革以及為全球目標做出貢獻，但礙於研究時間，支持的證據和完整性和說服力尚需加強，且並無提供加強本地 NbS 採用極推動相關法規的證據。為改進這些不足之處，後續可在相關平台發表此次經驗，例如資料管理

方案 (Data Management Plan, DMP) 平台，藉由平台分享此次的設計、實施和學習經驗，以促進永續主流化。

自然解方為一種永續、基於自然游生態系主導的管理洪水方式，能提供多方面人類福祉及價值，已逐漸成為現今社會的焦點以及探討議題。而為了符合國際公認的 NbS 全球標準，自我評估表成為一個不可或缺的工具。然而，雖說自我評估工具可分項描述期望改進目標以及當今達成任務，然而此次研究使用完畢後，還是有些地方尚需改進以及討論。

自我評估工具各指標之敘述，以簡單易懂方式進行描述，讓使用者可獨立操作且方便快捷。然而也因為這樣的設計，使指標描述得不夠明顯和精細，其敘述範圍較大且過於籠統，讓使用者較難以判定評分；建議可將各指標在精細劃分，比如 1.1 的社會挑戰直接在劃分成各社會挑戰有無達成之小指標，讓使用者能直接對應來評分等等。此種設計可能會使評分程序變得較繁雜，但可以讓評分成果更有證據和說服力，提高評分的客觀性和準確性。且此次研究因時間受限，只能以歷史文獻以及此調適方案的相關人員來進行此次評分，使評分較主觀。若能集結相關領域專家，像是 IUCN 之 NbS 團隊成員來共同完成評估，其結果將更具說服力以及代表性。

最後，雖然自我評估還有改進的方面，此些評分為初步且片面的評估，但依舊能辨別調適方案之優點和缺點，進而改善和調整。自然解方的概念與框架正處於發展階段，透過此次研究分享應用經驗，以加強交流學習，亦可推廣台灣背景之自然解方措施。

表 4-11 自我評估工具評分成果-1

標準編號	指標編號	指標	評分
1	1.1	優先考慮利害關係人最急迫的社會挑戰	強烈
	1.2	所應對的社會挑戰能被清楚的理解與紀錄	強烈
	1.3	識別、設立基準並定期評估 NbS 所產生的人類福祉	部分
2	2.1	NbS 的設計認識並回應經濟、社會和生態系統之間的相互作用。	充足
	2.2	NbS 的設計與其他互補性干預措施相結合，並尋求跨部門的協同效應。	充足
	2.3	NbS 的設計納入了風險識別和風險管理，超越了干預地點的範疇。	部分
3	3.1	NbS 行動直接回應基於證據的生態系統現狀和現有退化與損失驅動因素的評估。	充足
	3.2	已識別明確且可衡量的生物多樣性保護成果，並進行基準測試和定期評估。	部分
	3.3	監測包括定期評估 NbS 對自然環境產生的意外不良後果。	部分
	3.4	已識別並納入 NbS 策略的機會，以增強生態系統的完整性和連通性。	部分
4	4.1	直接和間接與 NbS 相關的利益和成本，包括支付者和受益者，已被識別並記錄。	不足
	4.2	提供了一項成本效益研究，以支持 NbS 的選擇，包括任何相關法規和補貼可能產生的影響。	不足
	4.3	對 NbS 設計的有效性進行了辯護，與可用的替代方案進行了比較，考慮了任何相關的外部性。	不足
	4.4	NbS 設計考慮到了一系列資源選項，例如市場化、公共部門、自願承諾和行動，以支持法規遵從。	不足
5	5.1	在開始 NbS 干預之前，所有利益相關者都有一個明確且完全同意的反饋和申訴解決機制可供使用。	部分
	5.2	參與是建立在相互尊重和平等的基礎上，無論性別、年齡或社會地位如何，並且尊重原住民人民享有自由、事前和知情同意 (FPIC) 的權利。	充足
	5.3	已識別並涉及了直接和間接受 NbS 影響的利益相關者，他們參與了 NbS 干預的所有過程。	充足
	5.4	決策過程記錄並回應所有參與和受影響利益相關者的權利和利益。	充足
	5.5	如果 NbS 的範圍超出了管轄邊界，則將建立機制，以便在受到 NbS 影響的那些司法管轄區中的利益相關者之間進行聯合決策。	部分
6	6.1	NbS 干預的潛在成本和利益以及相關的權衡被明確承認，並指導著保障措施和任何適當的糾正措施。	部分
	6.2	土地和資源的權利、使用和訪問以及不同利益相關者的責任被承認並受到尊重。	部分
	6.3	已建立的保障措施會定期審查，以確保尊重相互協議的權衡限制，並且不會破壞整個NbS。	不足
7	7.1	NbS 策略被建立並用作定期監測和評估干預的基礎。	不足
	7.2	在干預生命週期的整個過程中，開發並實施監測和評估計劃。	不足
	7.3	應用了一個促進適應性管理的迭代學習框架，並在干預生命週期中持續使用。	部分
8	8.1	分享NbS 設計、實施和學習的經驗，以促進變革。	部分
	8.2	NbS 提供信息並加強政策和法規框架，以支持其採用和主流化。	不足
	8.3	在相關情況下，NbS 為人類福祉、氣候變化、生物多樣性和人權（包括《聯合國原住民族權利宣言》）的國家和全球目標做出貢獻。	部分

表 4-12 自我評估工具評估成果-2

標準	評分	該標準總分	標準化評分	最終評分
1. 社會挑戰	7	9	0.78	0.8
2. 規模化設計	5	9	0.56	0.6
3. 生物多樣性淨增益	5	12	0.42	0.4
4. 經濟可行性	0	12	0.00	0
5. 包容性治理	8	15	0.53	0.5
6. 公平權衡	2	9	0.22	0.2
7. 適應性管理	1	9	0.11	0.1
8. 可持續性和主流化	2	9	0.22	0.2
總計			3.39	0.4

第五章 結論與建議



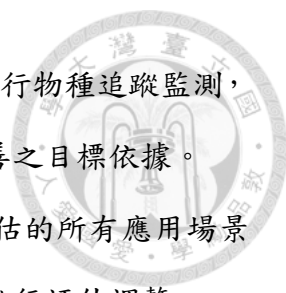
本研究之區域於屏東縣港口溪集水區，透過文獻回顧、現地勘查以及統整利害關係人之意見，選定待分析之水砂災害，再透過二維水理及輸砂模式分析集水區災害及調適策略，並將此流程和結果導入 NbS，確保各工作細項能盡量滿足 NbS 的全球標準，為自然解方的應用與評估提供實例。其得出的結論與建議如下：

5.1 結論

1. 通過 HEC-RAS 2D 模型進行定床模擬，參考各重現期淹水潛勢，以規劃水砂溢淹區範圍，除了能減少經濟損失，也能維護當地生態環境。
2. 福摩沙橋和泰安橋利用自然解方之概念改善固床工高落差之狀況，解決了構造物沖刷問題，且也改善了當地的生態環境。
3. 依照模擬成果進行 HSI 評分，說明福摩沙橋和泰安橋兩個調適方案對當地物種大吻鰕虎和高屏馬口鱮並無太大之影響。
4. 利用 NbS 自我評估之工具，顯示調適方案尚有需要調整的空間，並以此來調整和規劃設計方案。
5. 本研究證實結合二維水理模擬、棲地適合度分析與 NbS 全球標準評估，可作為規劃河川調適策略之整合性方法，提供兼顧防災與生態的決策依據，未來可作為其他集水區推動自然解方之參考模式。

5.2 建議

1. 對於水砂溢淹區之規劃，建議可加入經濟考量，例如建堤防的花費，或者淹水的預估損失，用來提升規劃水砂溢淹區之建議。
2. 因應氣候變遷，建議未來可加入近期之強降雨事件，像是山陀兒颱風等等，以評估未來風險，提升調適策略之韌性與前瞻性。

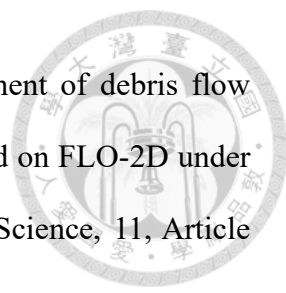
- 
3. 為提升適合度曲線參數來源，建議可於港口溪集水區當地進行物種追蹤監測，以提升生物棲息地指標評分之準確性，以做為規劃生態改善之目標依據。
 4. 自我評估工具尚有改進之地方，無法完全涵蓋自然解方評估的所有應用場景和方法，後續若有更多相關研究或更精進此項工具，可再進行評估調整。
 5. 本研究之規劃以及效益評估，期望後續研究能加以分享，以推廣 NbS 自然解方之概念，以此次經驗應用於其他流域或鄉鎮等等地區，促進自然解方在台灣地區的發展。

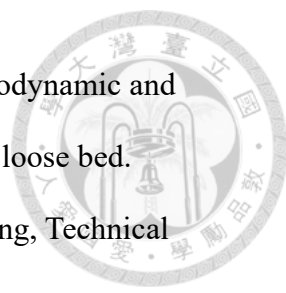
參考資料



1. 水利技師公會. (2007). 水利工程相關應用軟體簡介. 水利會訊, 10, 120-123.
2. 水利署臺北分局 (2022)。111 年度臺北分局集水區治理規劃導入 NbS 調適策略研究及防砂設施減碳綠能加值計畫。經濟部水利署。
3. 李政璋. (2019). 墾丁國家公園陸蟹生態與分類探討.
4. 林冠余. (2024). 磺溪流域洪水治理自然解方可行性評估. 國立臺灣大學生物環境系統工程學系學位論文, 1-99.
5. 林庭任. (2023). 3Di 應用於坡地農塘減洪效率之可行性研究 [碩士論文, 逢甲大學].
6. 洪煒甯, 邱渝方, 陳弘恩, 梁閔智, 廖雯慧, 李霽修, ... & 陳樹群. (2024). 南投種瓜坑溪還溪於野之自然解方. 中華水土保持學報, 55(3), 107-121.
7. 陳伸安. (2006). 二維水理棲地模式運用於南崁溪生態規劃之研究. 中央大學土木工程學系學位論文, 1-95.
8. 經濟部水利署. (2019). 河川原生魚種及棲地適合度曲線調查與資料庫建置.
9. 經濟部水利署水利規劃試驗所. (2012). 台美合作案之技術引進及應用研究 [成果報告].
10. 經濟部水利署第七河川局. (2010). 「易淹水地區水患治理計畫」屏東縣管河川港口溪水系規劃報告.
11. 農業部農村發展及水土保持署台南分署. (2023). 112 年度調適策略推動計畫-港口溪集水區.
12. 農業部農村發展及水土保持署台南分署. (2024). 113 年度調適策略推動計畫-港口溪集水區.
13. 顏啟峯、張國楨 (2015)。基隆河土地覆蓋時空變遷分析：以第二次截彎取直計畫範圍內為例。地理研究, (62), 71-90。
14. 劉烘昌等. (2009). 墾丁國家公園陸蟹資源調查與經營管理計畫.

- 
15. 魏楷倫. (2024). 集水區水砂災害分析與調適策略研擬-以港口溪集水區為例. 國立臺灣大學生物環境系統工程學系學位論文, 1-94.
 16. Abban, B., Lai, Y., & Politano, M. Application of SRH-2D to Predict Post-Fire Water and Sediment Delivery from a Watershed.
 17. Ahn, W., Shim, T., Kim, Z., Ki, S. J., An, K. G., & Jung, J. (2023). Life-history habitat suitability modelling of a potential invasive alien species, smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*), in South Korea. *Ecological Indicators*, 154, 110507.
 18. Akter, A., & Tanim, A. H. (2019). An assessment of ecological habitat suitability in a tidal stream using River 2D model. *J. Civil. Eng.(IEB)*, 47, 23-29.
 19. Angela, C.-S., Emmanuelle; Dalton, James; Edwards, Stephen; Hessenberger,, Daisy; Maginnis, S. M., Simone; McElwee, Pam; Murti, Radhika; Nelson, Cara; Ruiz, Verónica;, & Siikamäki, J. V., Liette. (2020). *Guidance for Using the IUCN Global Standard for Nature-Based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions. First edition.* Gland, Switzerland: IUCN. International Union for Conservation of Nature (IUCN).
 20. Bovee, K. D. (1986). Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology [Report](FWS/OBS-86/7). U. Fish & S. Wildlife. <https://pubs.usgs.gov/publication/70121265>
 21. Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual Version 5.0.* U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
 22. Calligaris, C., Boniello, M. A., & Zini, L. (2008). Debris flow modelling in Julian Alps using FLO-2D. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 60, 81-88.
 23. Dahm, R., Hsu, C.-T., Lien, H.-C., Chang, C.-H., & Prinsen, G. (2014). Next generation flood modelling using 3Di: A case study in Taiwan. *DSD international conference*,

- 
24. Ding, X.-Y. H., W.-J.; Liu, F.; Yang, X. (2023). Risk assessment of debris flow disaster in mountainous area of northern Yunnan province based on FLO-2D under the influence of extreme rainfall. *Frontiers in Environmental Science*, 11, Article 1252206. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1252206>
 25. Downs, P. W., & Kondolf, G. M. (2011). *River Restoration: Managing the Uncertainty in Restoring Physical Habitat*. Springer.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-90-481-9265-6>
 26. Erena, S. H., Worku, H., & De Paola, F. (2018). Flood hazard mapping using FLO-2D and local management strategies of Dire Dawa city, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19, 224-239.
 27. European Parliament and Council. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. European Environment Agency.
<https://www.eea.europa.eu/policy-documents/directive-2000-60-ec-of>
 28. Farooq, M., Shafique, M., & Khattak, M. S. (2019). Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and high-resolution 12-m TanDEM-X DEM (WorldDEM). *Natural Hazards*, 97, 477-492.
 29. Gard, M. (2009). Comparison of spawning habitat predictions of PHABSIM and River2D models. *International journal of river basin management*, 7(1), 55-71.
 30. HEC. (2021). *HEC-RAS River Analysis System, Version 6.0: User's Manual*. H. E. Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
 31. IUCN. (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. International Union for Conservation of Nature.
 32. IUCN. (2020). *Global Standard for Nature-based Solutions: A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*. IUCN.

- 
33. Jia, Y., & Wang, S. S. (2001). CCHE2D: Two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flows over loose bed. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1.
34. Jowett, I. G. (1997). Instream flow methods: a comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management*, 13(2), 115-127.
35. Jowett, I. G., Payne, T. R., & Milhous, R. T. (2008). Instream habitat models and their application in environmental flows. *River Research and Applications*, 24(6), 755-769.
36. Lee, S. K., Dang, T. A., & Le, V. T. (2019). Assessment of river morphological change for Co Chien Estuary applying the CCHE2D model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47, 1623-1632.
37. Lomulder, R. (2004). Appropriate modelling: Application of Sobek 1D2D for dike break and overtopping at the Elbe. Universiteit Twente.
38. Merufinia, E., Sanı, S. J., & Nouri, S. (2015). Evaluation of Hydrodynamic and Sediment Transport equations and Parameter Sensitivity Analysis Using the SRH_2D Model. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 36(3), 2143-2152.
39. Morello, E., Mahmoud, I., Colaninno, N., (eds.). (2020). Catalogue of Nature-based solutions for urban regeneration, Energy&Urban Planning Workshop, School of Architecture Urban Planning Construction Engineering, Politecnico di Milano.
40. Nakamura, F., Watanabe, Y., Negishi, J., Akasaka, T., Yabuhara, Y., Terui, A., Yamanaka, S., & Konno, M. (2020). Restoration of the shifting mosaic of floodplain forests under a flow regime altered by a dam. *Ecological engineering*,

- 157, 105974.
41. Nassar, M. (2011). Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile River. *Journal of hydro-environment research*, 5(3), 187-195.
42. O'Brien, J. S. (2004). *FLO-2D Users Manual Version 2004.10* (V. 2004.10, Ed.). FLO-2D Software Inc.
43. Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., & Zinabdin, N. (2020). Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) river in Kazakhstan. *Water*, 12(10), 2672.
44. Prinsen, G., & Becker, B. (2011). Application of SOBEK hydraulic surface water models in the Netherlands Hydrological Modelling Instrument. *Irrigation and drainage*, 60, 35-41.
45. Quirogaa, V. M., Kurea, S., Udoa, K., & Manoa, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua*, 3(1), 25-33.
46. Rijke, J., van Herk, S., Zevenbergen, C., & Ashley, R. (2012). Room for the River: delivering integrated river basin management in the Netherlands. *International journal of river basin management*, 10(4), 369-382.
47. Roff, D. A. (2002). Life history evolution.
48. Saikia, P., Beane, G., Garriga, R. G., Avello, P., Ellis, L., Fisher, S., Leten, J., Ruiz-Apilánez, I., Shouler, M., & Ward, R. (2022). City Water Resilience Framework: A governance based planning tool to enhance urban water resilience. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103497.
49. Salmasi, F., Ayaseh, A., Dalir, A. H., & Arvanaghi, H. (2020). Flow pattern study in Beshar River and its two straight and meander reaches using CCHE2D model.

- 
- Applied Water Science, 10(1), 1-15.
50. Schneider, E. (2010). Floodplain Restoration of Large European Rivers, with Examples from the Rhine and the Danube. In M. Eiseltová (Ed.), *Restoration of Lakes, Streams, Floodplains, and Bogs in Europe: Principles and Case Studies* (pp. 185-223). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9265-6_11
 51. Smets, M., Baeyens, H., Liekens, I., Pauwels, M., Verdoodt, M., & De Smedt, P. (2023). The Blue Belt Program: River Restoration and Flood Protection with Nature-based Solutions. In N. K. Kabisch, H.; Stadler, J.; Bonn, A. (Ed.), *Nature-based Solutions for Resilient and Biodiverse Landscapes* (pp. 113–125). Federal Agency for Nature Conservation (BfN).
 52. Speet, F. (2014). Improving decision quality in urban storm water management projects by using the 3DI system (Master's thesis, University of Twente).
 53. Stalnaker, C. B. (1995). The instream flow incremental methodology: a primer for IFIM (Vol. 29). US Department of the Interior, National Biological Service.
 54. Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10.
 55. Thakur, B., Parajuli, R., Kalra, A., & Ahmad, S. (2018). Exploring CCHE2D and its sediment modelling capabilities. World Environmental and Water Resources Congress 2018,
 56. Wildlife Service. Division of Ecological Services, Western Energy, & Land Use Team. (1980). *Habitat Evaluation Procedures (HEP)*. Division of Ecological Services, US Fish and Wildlife Service, Department of the Interior.
 57. Wu, W. (2008). *Computational River Dynamics*. CRC Press.
 58. WWF. (2009). *Floodplain restoration: improving water security and resilience to climate change*.