

建構臺灣野溪魚道成效標準化監測方式

劉廷彥^{[1]*} 黃宥禎^[1] 賴建宏^[1] 謝傳鎧^{[1][2]} 鄭暉^[1]

摘要 魚道為改善野溪縱向阻隔之常見設施，然其成效研究有限。本文建構一套適用各類魚道標準化監測流程，整合魚類上溯、生物群聚與水力學資料，從物種組成與族群結構評估阻隔效應。三年調查十座魚道發現，落差過大、流速高與休息區失效等因素影響生物通行，各魚道生物上溯量與類型差異顯著，群聚阻隔指數與體長分析有助辨識潛在阻隔效應。此流程有助於魚道設計改善與成效評估之標準化，具實務應用與擴充精進潛力。

關鍵詞：魚道、阻隔效應、成效監測

Constructing A Standardized Monitoring Method for The Performance of Fishways in Torrents in Taiwan

Ting-Yan Liu^{[1]*} Yu-Chen Huang^[1] Chien-Hung Lai^[1] Chuan-Kai Hsieh^{[1][2]} Wei Cheng^[1]

ABSTRACT In Taiwan, fishways are widely used to mitigate longitudinal barriers in river systems. However, very few studies have evaluated the effectiveness of fishways. In this study, we developed a standardized protocol for monitoring the performance of various fishways. We integrated data derived through upstream fish-passage surveys, biological community assessments, and hydraulic measurements to analyze barrier effects from the perspectives of species composition and population structure. Monitoring of 10 fishways over a 3-year period revealed that structural and hydraulic problems, such as excessive drop height, high flow velocity, and ineffective resting zones, impeded the movement of aquatic organisms. Considerable intersite variations were noted in species richness and composition. Metrics such as community barrier index and body length distribution were used to measure potential barrier effects. Our protocol supports standardized evaluation, design, and improvement of fishways and holds promise for broader application.

Key Words : Fishway, barrier effect, performance monitoring.

一、前言

運用各種壩體、攔河堰和固床工等人工構造物進行野溪治理，是在治理臺灣陡而急且含砂量高的野溪時常見之方法。這些人工縱向阻隔構造物會限制水域生物進入產卵場和偏好棲地，並阻止其正常擴散及再度拓殖，更中斷了部分淡水生物的遷徙路徑 (O'Connor et al., 2015)。這類構造物對水域生物的影響，可透過設置魚道、低落差固床工、壩體開口等維持縱向連結性的措施所減輕。然而，不同坡度、水力學條件、生物群聚組成與工程設計方案等條件，都影響工程措施維持縱向連結性的能力。近年間河溪公共工程積極推動生態友善措施，已建設相當數量魚道等補償措施，更凸顯一套有效、跨構造物類型進行可比較的效益評估方法之必要性。

過去探討水域生物縱向連結阻礙的文獻集中在魚類運動表現、魚類行為模式以及魚道水理設計等領域。部分研究專注於單一類型魚道，透過長期調查魚道內及魚道上下游的

群聚變動了解魚道是否發揮功能 (巨廷工程顧問股份有限公司, 2019; 宋承恩, 2016); 有些針對特定類型魚道進行室內模型試驗，評估各種水流條件下的魚類上溯狀況 (莊明德, 2003; 王順昌, 2015; Chen et al., 2017)。此外，葉明峰 (2005, 2006) 指出魚類之泳速和體長成正比關係，結構物的流速設計會影響具有不同泳速之物種、甚至同一物種中不同尺寸的個體之上溯成功率。就族群層面而言，若構造物造成之阻隔輕微，洄游性物種在魚道上下游族群體長分布應趨於一致。換言之，人工構造物對於淡水生物的影響，不僅止於影響水域生態系上下游的物種組成分布，也可能對於同一物種在構造物上下游的族群體長結構有所影響。

然而，多數魚道調查均屬於個案研究，針對多種不同類型魚道現地執行監測，並對重要水力學狀況進行調查及探討的研究僅有「本土型魚道之效益評估」(郭金泉, 2006) 與「本土型魚道之效益評估及可行性研究」(鄭先佑, 2006) 兩篇。

[1] 觀察家生態顧問有限公司
Observer Ecological Consultant Co., Ltd., Taipei, Taiwan

[2] 國立中興大學水土保持學系
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: mansrna@gmail.com

整體而言，過往研究較少直接監測魚類上溯狀況，故難以評估個別魚道在不同年間的成效表現，或比較不同類型魚道提供魚隻的跨越阻礙能力。本研究提出可適用於不同類型魚道的「野溪魚道成效監測標準化作業流程」，整合上溯魚隻監測、魚道上下游與魚道內生物群聚調查、以及測量重要水力學資訊等系統化調查方法為核心，針對魚道個案探討成效表現，並提出跨類型與區域的魚道間比較框架。這套作業流程透過物種組成及族群結構等兩層次的分析，分析魚道個案的阻隔效應成因，再透過整合不同個案的評估成果，提供既有魚道維管改善、新建魚道設計及魚道成效監測之參考資料。本文介紹標準化作業流程之設計與執行方法，並彙整 2021 年至 2023 年間的調查資料，說明標準化作業流程之跨魚道類型比較方法與應用價值。

二、研究方法

1. 研究地點與魚道案例

本研究為 2021 年至 2023 年水土保持局 (2023 年後改制為農村發展及水土保持署，下均簡稱為農村水保署) 委辦「保育治理工程指標性環境友善措施生態調查評析與相關案例彙編」等計畫研究工作之一，基於農村水保署轄區內近年完成魚道之生態調查成果，評估標準化作業流程的效益。本研究中介入同為保持水域廊道縱向通透而為的工程設計，如低落差固床工、拆降壩等，以利跨域分析與比較。魚道形式分類參考「水土保持單元叢書 03-水土保持設施常見生物通道」(行政院農業委員會水土保持局, 2020)，所有案例魚道基本資訊列於表 1，各魚道分布與參考照片如圖 1。

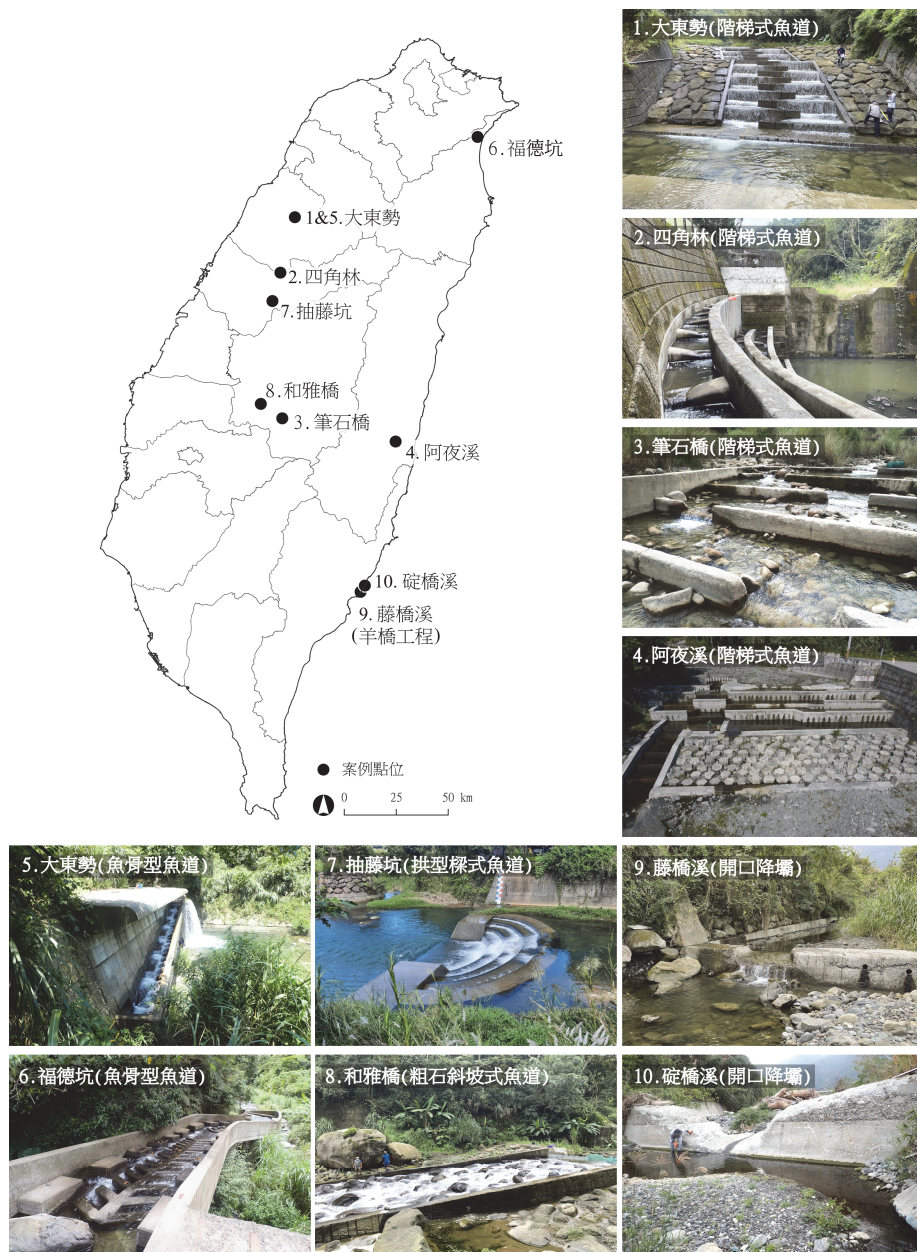


圖 1 十處魚道案例分布與參考照片

Fig.1 Locations and reference photos of ten fishway case studies

表 1 魚道成效監測執行案例概要彙整

Table 1 Summary of fishway performance monitoring case studies

案例編號	工程名稱	行政區	座標 (TWD97)	執行魚道型式	原有落差高度 (m)	通道全長 (m)	通道寬度 (m)	流路坡度	階層數
1	獅潭大東勢溪大東勢尾野溪整治工程	苗栗縣獅潭鄉	X : 243820 Y : 2712848	階梯式	7	28	1 ~ 15	上層 1 : 14 下層 1 : 18	2 層 23 階
2	四角林野溪整治工程	台中市東勢區	X : 236971 Y : 2686010	階梯式	4.6	15	0.8	1 : 16	4 層 46 階
3	筆石橋上游野溪整治工程	南投縣信義鄉	X : 237873 Y : 2615674	階梯式	1.6	6.6	6	1 : 7	5 階
4	阿夜溪五號壩上下游改善工程	花蓮縣瑞穗鄉	X : 292392 Y : 2604469	階梯式	5	26	1.8 ~ 6.6	1 : 5	2 層 32 階
5	獅潭大東勢溪大東勢尾野溪整治工程	苗栗縣獅潭鄉	X : 243931 Y : 2712776	魚骨型	4.3	24	0.7	1 : 8	2 層
6	福德坑溪上游野溪治理工程	宜蘭縣頭城鎮	X : 331802 Y : 2751529	魚骨型	8.5	55.6	2.8	1 : 5	3 層
7	新社中和里 6-7 鄰抽藤坑溪整治工程	台中市新社區	X : 233132 Y : 2672307	拱型樑式	0.7	6.7	5 ~ 13	1 : 7	5 階
8	和雅橋上下游固床工改善三期工程	南投縣鹿谷鄉	X : 227545 Y : 2622642	粗石斜坡式	3.5	28	8.9	1 : 8	未分階層
9	羊橋溪等鄰近野溪加強維護改善工程	台東縣東河鄉	X : 275541 Y : 2531901	開口降壩	1.2	0.9	3 ~ 4	—	未分階層
10	碇橋溪等鄰近野溪加強維護改善工程	台東縣東河鄉	X : 277596 Y : 2534933	開口降壩	2	1.4	3 ~ 9	—	未分階層

資料來源：觀察家生態顧問有限公司，2023

2. 監測標準化作業流程

本研究建立的魚道成效監測流程調整自「Monitoring the performance of fishways and fish passage works」(Jones and O'Connor, 2017)，該文獻整理世界各地多處魚道成效監測評估案例，歸納出適用於各種型式魚道之評估架構。魚道結構、溪流的水文條件與上下游流路的縱向連結狀態，都可能影響生物利用魚道的成效。故本研究在標準化作業流程中整合生態與水力學評估，以掌握各種可能造成影響的因子。此外，考量國內溪流陡急且含砂量高之特性，我們額外加入「魚道淤積堵塞情形」、以及「受評估魚道上下游其他阻隔構造分布」等兩項因子後，研擬評估作業流程如圖 2。監測流程始於蒐集魚道之背景資料；再利用生態評估記錄水域生物實際利用魚道的情形，並同步進行水力學評估記錄影響魚道成效之各項因子；最後以質性描述與統計方法分析目標魚道維持水域廊道縱向通透之效益。作業方法詳述如下。

(1) 基本資料蒐集與水力學評估

魚道基本資料蒐集內容包括工程名稱、主辦機關、基礎氣候資料、設計資料、周邊生態調查記錄、現地勘查記錄等資料。詳細內容與記錄表格式可參考觀察家生態顧問有限公司 (2023) 報告資料。

水力學評估則由周邊棲地連結之評估開始，檢視結構物上下游一定距離內是否有其他造成縱向阻隔的構造；再針對魚道本體進行調查，測量及評估入口端、魚道本體及出口端各斷面之流速、落差、剝離流、土砂堆積、休息區配置與體積、進入難易度等各項影響魚道成效之水理因子 (圖 2)。此外，考慮到魚道通常僅為橫向結構物之一部分，標準化監測流程也需評估魚道上溯路徑外的堰體溢流對魚體下落的保護狀況。

(2) 生態評估

魚道成效之直接評估方法，為單位時間內生物通過量，常見的調查方式包含採捕搬運式陷阱、漏斗式陷阱、待袋網、電器採捕、影像監測、聲納監測及標記再捕法等 (Jones and O'Connor, 2017)。本研究整理各項方法之設備、人力成本、適用魚道類型及適用生物類群等資訊於表 2 中。綜合考量作業成本與效益，本研究採用適用於各類型魚道與生物類群的待袋網為監測魚道通過量之標準化作業方式。於 2021 年至 2023 年間，本研究選取每年枯豐水期於各魚道出口架設待袋網 (圖 3)，連續捕捉上溯個體 24 小時，期間搭配電器採捕於魚道上下游溪寬十倍之調查範圍及魚道內調查物種組成，並記錄調查到的魚類個體體長。捕捉的個體在測量體長後均釋回原棲地。

本研究依據相關魚道研究成果，將水域生物運動模式分為二類型。魚類一般屬於游泳型，上溯能力較弱；鰕虎科、鰻鱺科、爬鮡科等具有吸盤的魚類屬於攀爬型，可透過附著於底質，於底質表面匍匐前進，上溯能力較強，蝦蟹類雖亦屬於攀爬型，但可直接在底質表面爬行，相較於魚類擁有更強的上溯能力。

3. 資料分析與統計檢定

(1) 通過結構物魚隻數量比

為評估不同魚道之實際通過效益，本研究以待袋網所採獲、成功上溯至結構物上游之魚隻數量，作為判定魚道功能表現之主要依據。惟考量各魚道下游原始族群量可能存在顯著差異，且調查年度間之魚類組成與數量亦具變動性，為提升結果之可比性與解釋力，本文僅選取於同次調查中在「待袋網」與「下游電器採捕」均有出現之物種作為指標，並依其上溯能力類型分類，計算其通過結構物之魚隻數量比。對於

特定上溯類型 k ，其通過數量 N_{kr} 表示為該類型所有物種於 24 小時待袋網調查中之累積上溯個體數；潛在族群量 N_{kd} 則為同類型物種在結構物下游（不含魚道內部）調查所記錄之總個體數。通過結構物魚隻數量比在本研究中用於推論可能上溯的潛在族群量，計算式如下：

$$\text{通過結構物魚隻數量比} = N_{kr} / N_{kd} \quad (1)$$

(2) 群聚阻隔指數

為量化個別阻隔結構物對其上下游物種群聚之影響，本研究將阻隔結構物下游分布之物種視為上溯的物種組成庫 (Species Pool)，計算僅於下游出現且在上游未見之物種 (S_d)，佔下游總物種數 (S_{all}) 的比例，作為該結構物之群聚阻隔指數。群聚阻隔指數越高，表示結構物上游較下游丟失了更多物種，亦即上下游間的

阻隔可能較強。計算式如下：

$$\text{群聚阻隔指數} = S_d / S_{all} \quad (2)$$

考慮到結構物造成的溪流棲地切割具有方向性，故指數計算並不考量上游物種狀況。本研究將同一魚道上、下游在同年度豐枯水期的資料合併，計算當年度的群聚阻隔指數，此外也計算三年資料累積的群聚阻隔指數，以評估不同年度的阻隔狀況。

(3) 構造物上下游優勢物種族群結構分析

本研究採用的優勢物種定義為單一年度於上、下游累計採獲數量超過 30 隻個體之物種，使用 Kolmogorov-Smirnov 檢定該物種在上下游族群的體長分布曲線是否相異，並檢視上游是否缺失特定體長以下之個體，以確認阻隔效應存在於族群層面 (Jones and O'Connor, 2017)。

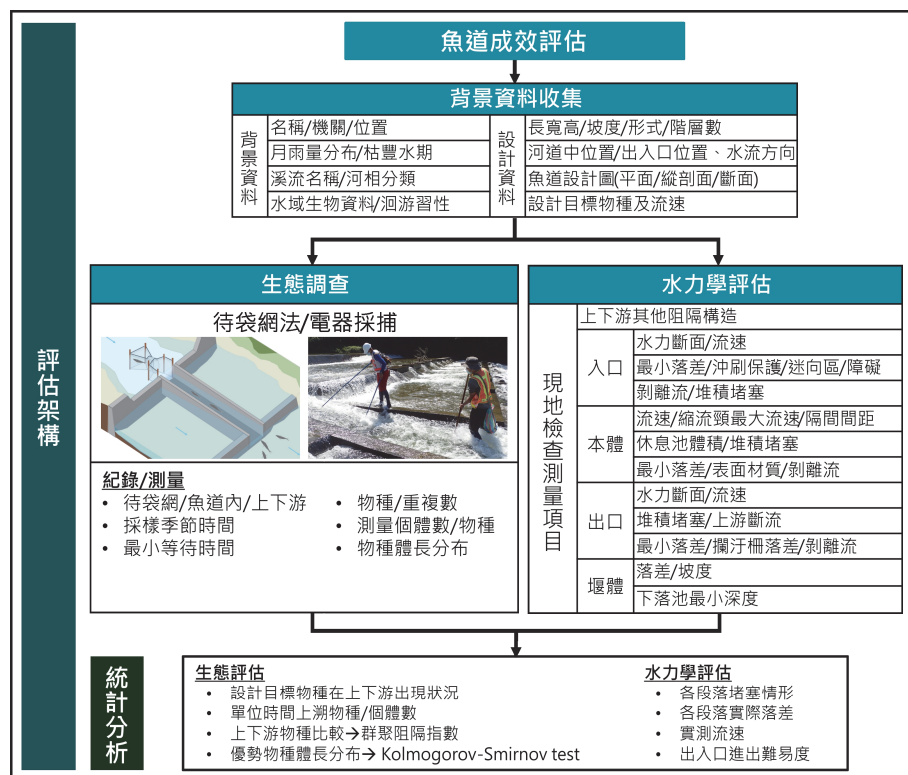


圖 2 本研究魚道成效評估作業流程

Fig.2 Flowchart of the fishway effectiveness assessment process in this study

表 2 監測作業生態調查方法比較

Table 2 Comparison of ecological survey methods for effectiveness monitoring

項目	採捕搬運陷阱	漏斗式陷阱/待袋網	電器採捕	影像監測	聲納	標記再捕
設備相對成本	高~很高	低~中	低	高~很高	高	低~高
操作人力成本	低	低~中	中	低	低	極高
適用魚道類型	採捕搬運式 出口狹窄魚道	各類型	各類型	出口狹窄魚道	出口狹窄魚道	各類型
適用生物類群	大型魚、小型魚、 蝦蟹	大型魚、小型魚、 蝦蟹	大型魚、小型魚、 蝦蟹	大型魚	大型魚	大型魚 小型魚
其他限制			資料不易直接證明 結構阻隔	受水中懸浮固體、 氣泡干擾		

資料來源：本研究整理

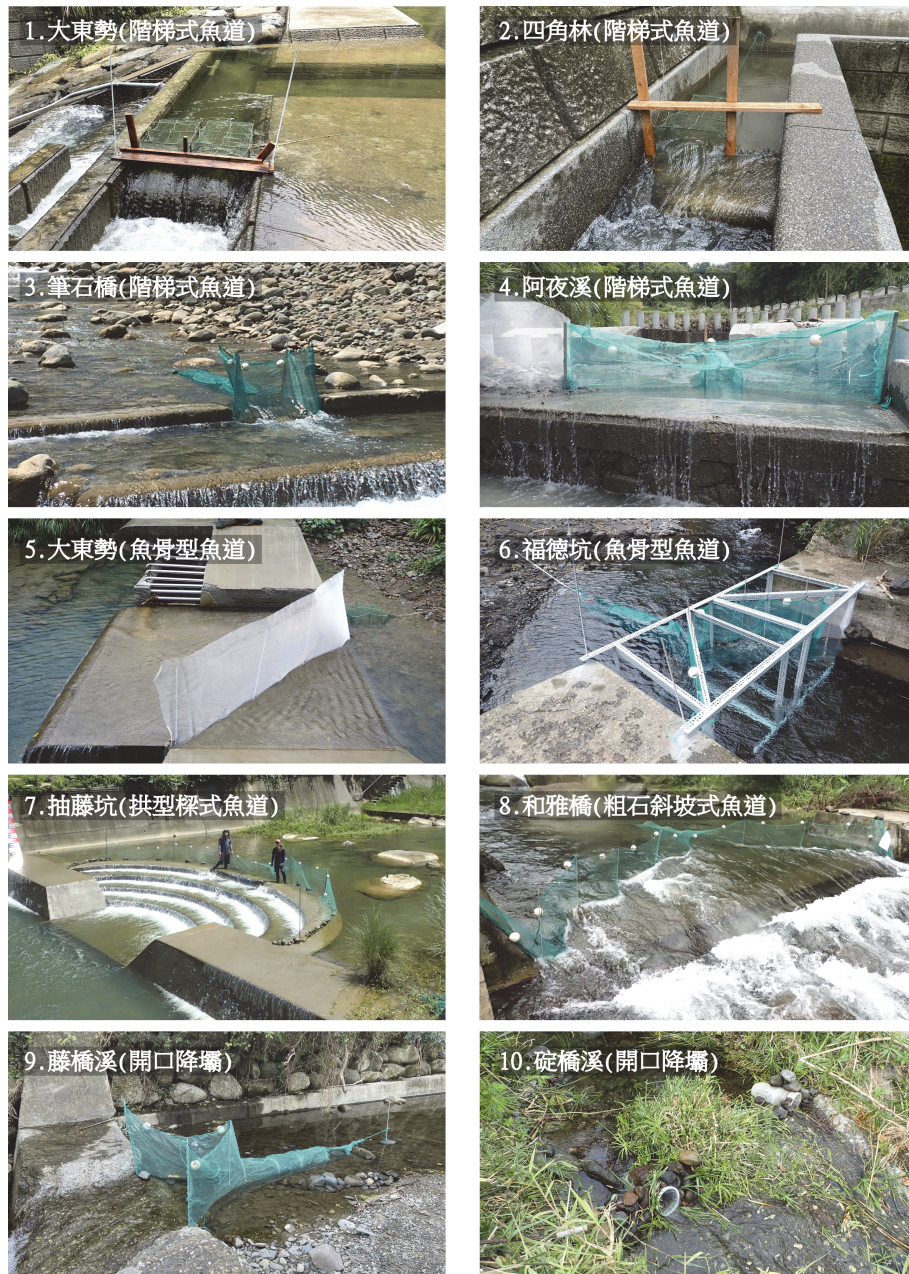


圖 3 十處魚道案例待袋網架設情形

Fig.3 Fyke net installation at ten fishway case studies

三、結 果

1. 水力學評估

三個年度之水力學評估成果彙整如表 3 及表 4 所示，本文概述可能影響生物利用的因子。在魚道外部，多數魚道的上下游都有其他橫向構造物影響整體廊道連通性，惟藤橋溪與碇橋溪受評估點位接近出海口，下游無其他構造物；筆石橋、四角林、福德坑、和雅橋上下游有部分結構物落差超過 50 cm，其餘魚道周邊因阻隔構造物造成的落差較不明顯。阿夜溪在 2022 年以後因主流偏離導致魚道出口水流減少；碇橋溪上游因人為取水常有斷流情形、下游經常沒口；藤橋枯水期下游經常沒口，在 2023 年海葵颱風後因河道擺盪以致開口處無水。大東勢魚骨型、福德坑與阿夜溪在枯水期亦

有斷流或乾涸記錄；其餘調查魚道則無斷流紀錄。

不同魚道的入口方向普遍明確，大部分魚道未發現明顯的迷向區，但大東勢魚骨型及福德坑魚道入口旁因有其他水流而形成迷向區（表 3）。多數魚道的各斷面最大落差在枯水期仍可達到 50 cm 以上，僅四角林、福德坑、抽藤坑與改善後的和雅橋案例最大落差在 50 cm 以下（圖 4）。此外，筆石橋與豐水期的抽藤坑魚道有觀察到明顯的剝離流產生。

就魚道內部的水力學評估因子而言。多數階梯式魚道不同斷面的流速變化幅度在 1.5 m/s 以內（表 3），大東勢、四角林與筆石橋三處魚道在三年度間的豐枯水期流速測量有相似的年度趨勢（圖 5）。阿夜溪魚道則因越趨嚴重的淤積致使水流減少，至 2023 年枯水期魚道出口處已無地表逕流。其他類型的魚道在部分斷面處的流速較高，如福德坑與大東

勢魚骨型 (圖 6)，其中福德坑魚道坡度約 19%，測量的斷面流速為所有魚道中最高。此外，多數魚道的休息區有程度不一的失效情況，其中和雅橋魚道明顯缺乏休息區，大東勢魚

骨型、抽藤坑、筆石橋、福德坑休息區的水深不足，阿夜溪魚道則有嚴重的淤積狀況使得休息區失效。

表 3 階梯式魚道與魚骨型魚道案例 3 年水力學評估結果摘要

Table 3 Summary of 3-year hydraulic assessment results for pool-and-weir and fishbone-type fishway case studies

魚道型式	階梯式魚道				魚骨型魚道	
工程名稱	1.大東勢	2.四角林	3.筆石橋	4.阿夜溪	5.大東勢	6.福德坑
上下游其他阻隔構造 (天然或人工)	上游具魚道防砂壩2座	上游具魚道防砂壩1座；下游距離400 m具無魚道3 m防砂壩	上游具魚道 (已完全堵塞) 防砂壩2座；下游具魚道固床工1處、2m高固床工2處	無落差高於50 cm之構造	上游具魚道防砂壩1座	上游具4m無魚道防砂壩1座
入口水流方向	平行上溯方向，路徑明確	垂直上溯方向，路徑明確	平行上溯方向，路徑明確	平行上溯方向，路徑明確	平行上溯方向，但主要水流為壩頂溢流，魚隻可能受其吸引而找不到入口	平行上溯方向，但另有副壩滲出水流於入口兩側形成迷向區
上/下游斷流/沒口	無	無	無	2022年枯水期曾上下游皆斷流	下游枯水期易完全乾涸	下游攔水堰2022年枯水期曾斷流
入口流速(m/s)	BDL ~ 1.4	0 ~ 0.6	0 ~ 2.2	0 ~ 1.1	無法測量	0 ~ 2.3
本體流速(m/s)	BDL ~ 1.9	0 ~ 0.9	0 ~ 1.7	0 ~ 1.3	0 ~ 1.4	0 ~ 2.2
出口流速(m/s)	0.2 ~ 1.6	0 ~ 0.7	0 ~ 1.4	0 ~ 1.0	0 ~ 0.7	0 ~ 0.5
最大落差(cm)	79 (入口)	2~3 (本體，2019年枯水期)	47~50 (入口，枯水期)	60~78 (本體，2022~2023年)	52 (枯水期入口下游潭區乾涸情形下)	30 (枯水期本體的主要上溯通道石塊堵塞處)
剝離流	有，但不明顯	無	入口與本體會產生剝離流	有，但不明顯	無	無
休息區數量	32個	36個	6個	15個	64個	66個
堆積堵塞	淤積體積 < 10%	逐漸增加，2023年淤積體積40 ~ 50 %	淤積有逐漸增加趨勢，然因休息區原有設計包含拋塊石，無法估算淤積體積	淤積體積 > 70 %	出口攔汙柵易受石塊堵塞。本體主要上溯通道有石塊堵塞；轉折處休息區淤積體積約5 ~ 50%	本體部分主要上溯通道有石塊堵塞，並形成落差
其他影響魚道成效狀況	—	—	—	出口位於河段堆積坡，然主流路已擺盪回河道中央，導致出口2022年以後無水	休息區水深不足，即使在豐水期亦平均僅有3 cm	—

註：1.大東勢魚骨型魚道於2021年枯水期開始調查，福德坑於2022年開始調查

3.流速欄位標註「BDL」表示低於儀器偵測極限。本研究採用流速計偵測極限為0.08 m/s

2.上下游阻隔構造僅列出落差高於50 cm之構造

4.最大落差為取所有斷面最小落差中之最大值

表 4 拱型樑式、粗石斜坡式魚道及開口降壩案例 3 年水力學評估結果摘要

Table 4 Summary of 3-year hydraulic assessment results for arch-beam type fishways, rough-stone ramp fishways and opening weir case studies

魚道型式	拱型樑式魚道	粗石斜坡式魚道		開口降壩
工程名稱	7.抽藤坑溪	8.和雅橋	9.藤橋溪 (羊橋)	10.碇橋溪
上下游其他阻隔構造 (天然或人工)	無落差高於50 cm之構造	上游具魚道防砂壩*1；下游具魚道防砂壩或固床工*14	無落差高於50 cm之構造	上游具1m高柵格保護工*1
入口水流方向	平行上溯方向，路徑明確	平行上溯方向，路徑明確	平行上溯方向，路徑明確	平行上溯方向，路徑明確
上/下游斷流/沒口	無	無	2022&2023年枯水期下游沒口	上游因人為取水嚴重常接近斷流；2022年豐水期、2023年枯水期下游沒口
入口流速(m/s)	0 ~ 1.0	0 ~ 1.8	0 ~ 1.3	0 ~ 0.9
本體流速(m/s)	0 ~ 1.2	0 ~ 2.3		
出口流速(m/s)	0 ~ 1.8	0 ~ 1.4		
最大落差(cm)	20 ~ 27 (本體)	2021年入口55 ~ 110 cm，2022年已改善為無落差	50 (2021年)	105 ~ 121 (2021枯水期至2022年)
剝離流	豐水期易有明顯剝離流	僅2021年入口有	不明顯 (2021年豐枯水期及2023年枯水期)	僅2023年豐水期部分有
休息區數量	4個	無	—	—
堆積堵塞	幾乎無淤積	無淤積	無淤積	無淤積
其他影響魚道成效狀況	—	無流速緩、水深足的休息空間	2023年經海葵颱風影響，上游水流自原開口處擺盪至左岸，以致枯水期原開口處幾乎無水	本為無落差，然下游冲刷落差向源移動，導致落差逐漸增大 (105 ~ 121 cm)；2023年經海葵颱風影響，下游潭區淤積嚴重而落差減小

註：1.上下游阻隔構造僅列出落差高於50 cm之構造

2.最大落差為取所有斷面最小落差中之最大值

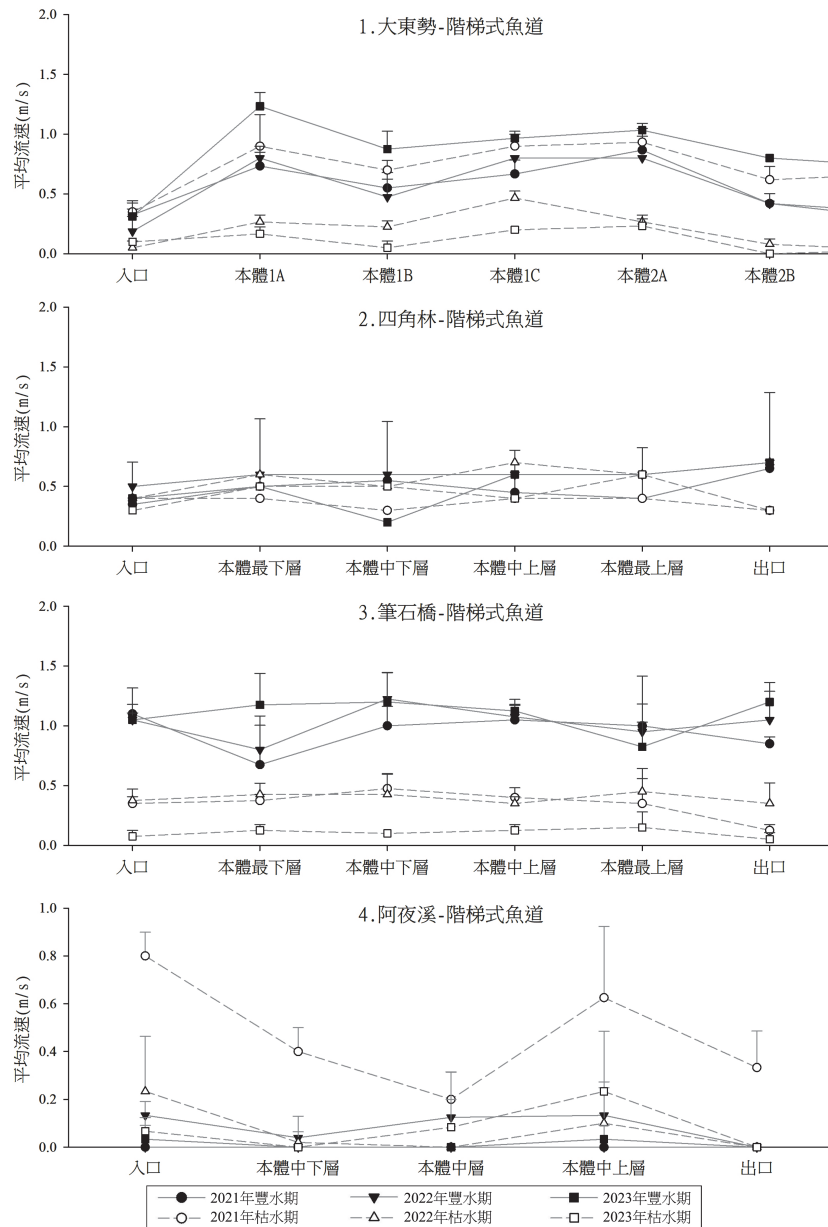
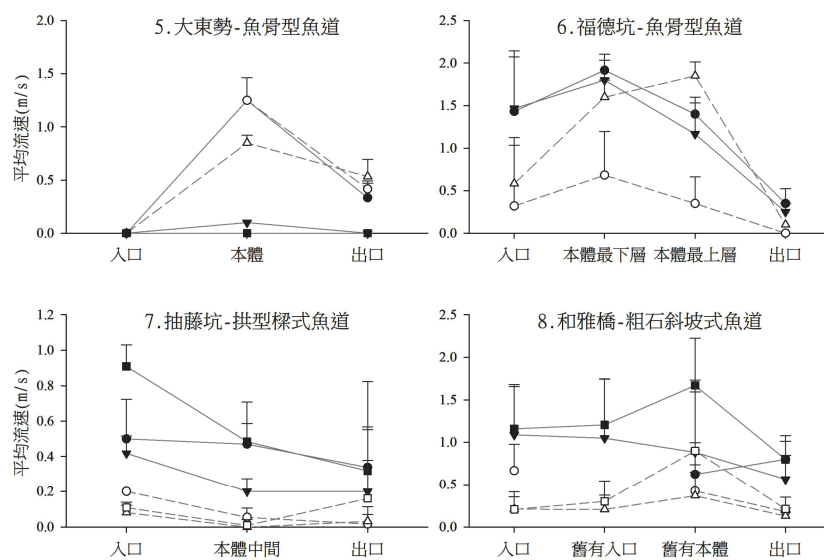
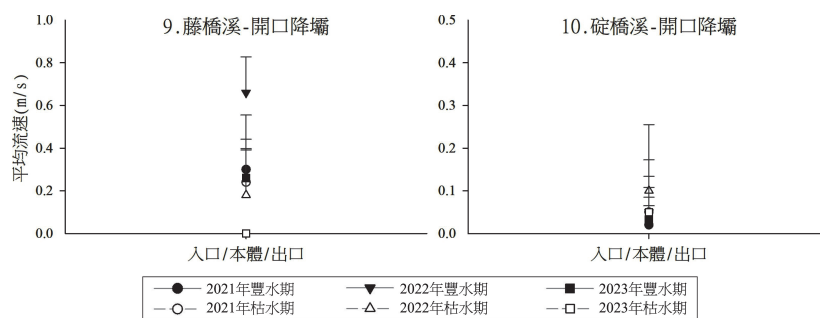


圖 4 階梯式魚道案例歷年各斷面平均流速

Fig.4 Average flow velocity of cross-sections over the monitoring period in pool-and-weir fishway case studies



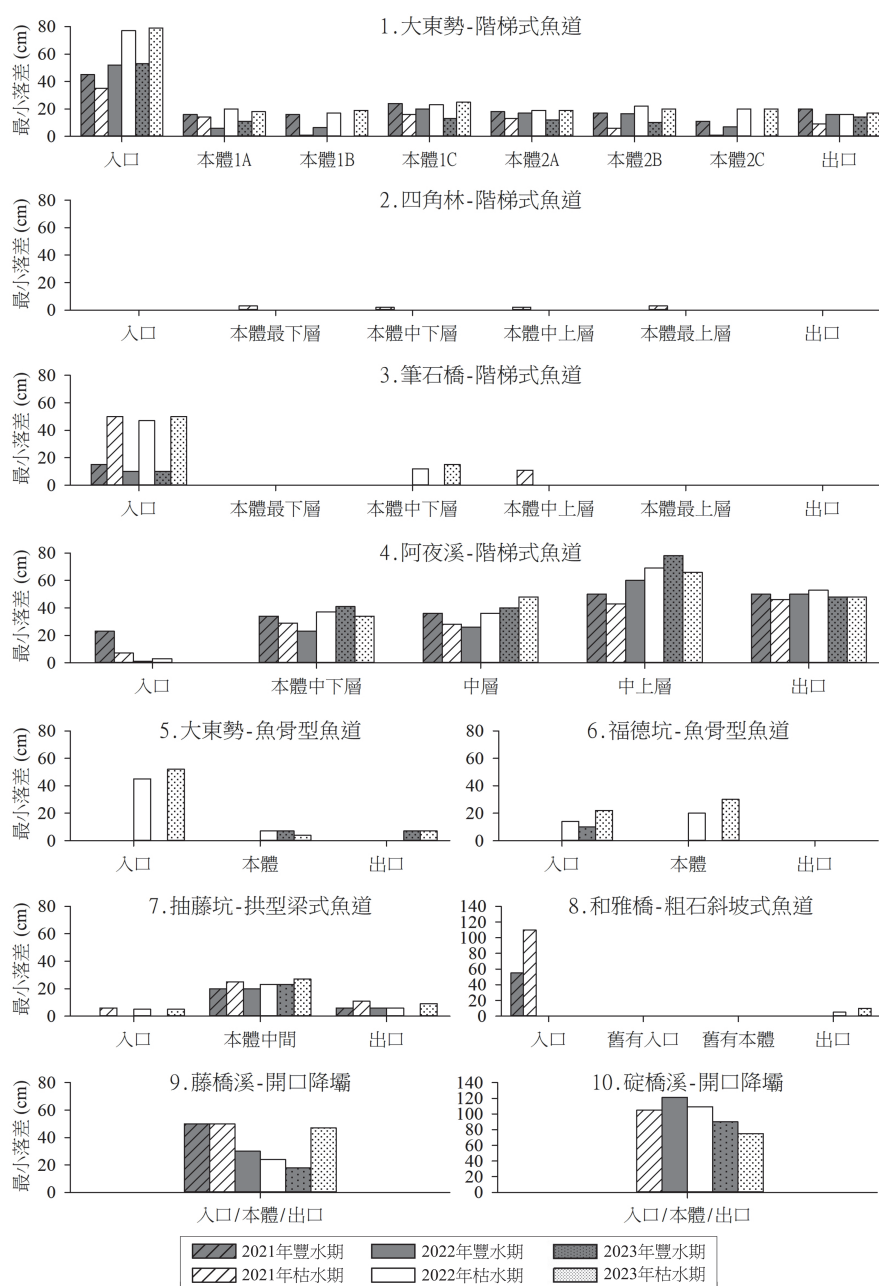


註：1.大東勢魚骨型魚道於2021年枯水期開始調查；福德坑魚骨型魚道於2022年開始進行調查

2.魚骨型魚道平均流速為以生物上溯主要路徑之流速進行計算

圖5 魚骨型、拱型樑式、粗石斜坡式魚道及開口降壩案例歷年各斷面平均流速

Fig.5 Average flow velocity of cross-sections over the monitoring period in fishbone-type, arch-beam type, rough-stone ramp fishways and opening weir case studies



註：大東勢魚骨型魚道於2021年枯水期開始調查；福德坑魚骨型魚道於2022年開始進行調查

圖6 十處魚道案例歷年豐枯水期各斷面最小落差

Fig.6 Minimum head difference per section during high-flow and low-flow periods over the years in ten fishway case

2. 生態評估

(1) 待袋網調查成果

2021 至 2023 年的待袋網調查累計成果彙整於表 4 至 5。若先不考慮物種組成相差甚大的東部獨流溪個案，各案例魚道之上溯水域生物三年度累計組成與數量仍有相當的差異。24 小時的上溯魚隻總數以大東勢階梯式魚道最多 (91 尾)，福德坑 (74 尾) 與筆石橋 (73 尾) 次之，大東勢魚骨型 (11 尾) 及和雅橋 (僅 3 尾) 較少。蝦蟹類上溯個體數則以抽藤坑最多 (58 隻)，四角林 (3 隻)、大東勢階梯式 (1 隻) 與和雅橋 (1 隻) 較少。物種豐富度則以福德坑 (13 種) 明顯高於其他各案例，次之為抽藤坑 (7 種) 與筆石橋 (7 種)。

東部獨流溪案例由於物種組成和其他案例相差較大，在此另外討論。藤橋溪三年累計的上溯魚蝦蟹類不論種類與數量都多於碇橋溪，其於 2021 年枯水期調查採獲大量上溯的沼蝦幼苗，同時進行調查之碇橋溪則未記錄到任何魚蝦幼苗大量上溯情形。

以水域生物上溯類型區分各魚道的調查成果如圖 7 所示。大東勢階梯式、大東勢魚骨型、四角林、抽藤坑均以游泳型魚類上溯為主。福德坑與筆石橋個案則同時記錄到數量相當的游泳型與攀爬型魚類、蝦蟹類群，且筆石橋的上溯類型紀錄有明確的豐水期 (攀爬型魚類)、枯水期 (游泳型魚類為主) 差異。至於阿夜溪、藤橋溪及碇橋溪等案例，受到溪流原物種組成影響，上溯物種則明顯以攀爬型魚類及蝦蟹類為主。和雅橋案例三年度的調查僅累計 4 尾個體紀錄，無法區辨主要的上溯類型組成。

(2) 魚道內水域生物上溯型態組成

除採用降壩措施的藤橋溪與碇橋溪外，其他魚道內的生態調查成果依上溯類型彙整如圖 8。階梯式魚道因每階層由休息區構成，在正常流況下可有大量魚隻棲息，故無論就魚道內採獲之魚隻或水域生物總量都高於其他類型的魚道。和雅橋 (粗石斜坡式魚道) 因豐水期流速快缺少休息區、枯水期流速較緩但水深不足，大東勢魚骨型魚道因為結構尺寸較小，魚道內多數空間可蓄水深度不超過 10 cm，兩個案均受休息區容量所影響，魚道內魚類蝦蟹總量相較其他案例低 (圖 8)。

(3) 通過結構物魚隻數量比

彙整各魚道不同年間每一季的通過結構物魚隻數量比成果如圖 9。區分不同上溯類型後，排除調查中記錄到的下游總個體數小於 10 隻 (異常狀況) 的季次資料，以避免影響評估成果。檢視本項指標確實較容易凸顯不同魚道之成效差異。階梯式魚道、福德坑魚骨型及藤橋降壩案例比其他魚道個案有稍高的通過比。大東勢階梯式與四角林階梯式魚道在不同年份與豐枯季的通過數量比都以游泳型魚類較高，其餘魚道個案調查成果則多以攀爬型魚類的通過數量比較高。除福

德坑與藤橋溪以外，其餘魚道個案在調查中均有待袋網內缺乏攀爬或游泳型魚類的狀況 (圖 9 中標註 n.d. 的欄位)。此外，筆石橋與阿夜溪在三年度間的通過數量比具較明顯的下降趨勢。

(4) 魚道群聚阻隔指數計算

各魚道案例於不同年間的群聚阻隔指數呈現如圖 10。四角林、筆石橋、大東勢魚骨型、和雅橋四處的三個年度之群聚阻隔指數以及三年度累計群聚阻隔指數均為零，意即未發現僅分布於下游的物種。抽藤坑三年度間的群聚阻隔指數均在 0.2 以下，三年度累計阻隔指數在第二年降為 0.09，顯示上下游的群聚組成差異變小。其餘魚道在多數年份的群聚阻隔指數都在 0.2 以上，三年累計群聚阻隔指數在第三年收斂於 0.20 至 0.23。兩處獨流溪降壩案例之上游物種缺失情形較明顯，藤橋溪三年度的群聚阻隔指數分別為 0.40、0.18 與 0.31，到第三年度之累計為 0.31；碇橋溪三年度的群聚阻隔指數分別為 0.50、0.26、0.39，到第三年度之累計為 0.37，高於藤橋溪案例。然而，多數魚道案例的上游缺失物種在下游的年度採獲量均少於 5 隻 (即在下游本就稀少)，考慮到電器法在開闊水域空間或獨流溪常較難取得完整的物種組成資訊，故無法直接推論群聚組成的阻隔是由結構物造成。此外，部分魚道上游為缺失攀爬能力強的蝦蟹類物種 (如大東勢魚骨型魚道三年度上游都未記錄到寶夏澤蟹)，較難完全歸因於魚道無效或結構物造成阻隔，推測採樣範圍增加後尚能在上游發現這些缺失的蝦蟹物種。

(5) 優勢物種體長分布差異

本研究統計各魚道三年度上下游優勢物種體長，以 Kolmogorov-Smirnov 檢定上下游樣本之體長分布差異，除碇橋溪因三年度均未出現符合優勢物種定義之資料而不納入統計外，具顯著差異的魚道之魚隻體長分布資料與檢定結果列於表 7。本研究僅在大東勢階梯式魚道、四角林二個案中偵測到優勢物種體長分布具顯著差異。基於縱向阻隔造成的體長篩選具有方向性，若結構物確實造成阻隔，應為上游缺失特定體長以下、泳速不足以上溯魚道的個體，如 Jones 和 O'Connor (2017) 針對具河海洄游習性之大斑南乳魚 (*Galaxias maculatus*) 在魚道上下游案例所示 (圖 11, a-b)，上游較小體長個體的分布頻率遠低於下游。由圖 11 可知，體長分布呈現顯著差異的大東勢階梯式魚道 2021 年臺灣鬚鱨族群、2023 年臺灣石鱨族群、以及四角林魚道 2022 年臺灣鬚鱨族群體中，小體長個體在上游出現的頻率略低於下游 (圖 11, c-h)。然而，在此三筆資料中，亦可發現中等體長、甚至是大體長個體在下游區域的分布頻率較上游低，且臺灣鬚鱨及臺灣石鱨為純淡水魚較沒有長距離洄游之需求，因此無法確立這兩處魚道案例上下游優勢物種體長分布差異與魚道阻隔之關聯性。

表 5 階梯式魚道與魚骨型魚道案例待袋網 3 年累計調查成果

Table 5 Cumulative 3-year fyke net survey results for pool-and-weir and fishbone-type fishway case studies

類別	中文名	魚道類型		上溯類型	階梯式魚道				魚骨型魚道	
		學名			1.大東勢	2.四角林	3.筆石橋	4.阿夜溪	5.大東勢	6.福德坑
魚類	臺灣石鱚	<i>Acrossocheilus paradoxus</i>	游		14		2		1	21
	臺灣白甲魚	<i>Onychostoma barbatulum</i>	游		7		3			8
	粗首馬口鱚	<i>Opsariichthys pachycephalus</i>	游				45			3
	臺灣鬚鱚	<i>Candidia barbata</i>	游		69	60	3		9	
	纓口臺鯪	<i>Formosania lacustre</i>	攀		1				1	27
	臺灣間爬岩鯪	<i>Hemimyzon formosanus</i>	攀				16			
	明潭吻鰕虎	<i>Rhinogobius candidianus</i>	攀				4			12
	細斑吻鰕虎	<i>Rhinogobius delicatus</i>	攀					38		
	日本瓢鰕虎	<i>Sicyopterus japonicus</i>	攀							1
	兔頭瓢鰕虎	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	攀							1
蝦蟹	黑紫枝牙鰕虎	<i>Stiphodon atropurpureus</i>	攀							1
	日本絨螯蟹	<i>Eriocheir japonica</i>	攀							3
	粗糙沼蝦	<i>Macrobrachium asperulum</i>	攀		1	3	16	17	7	8
	貪食沼蝦	<i>Macrobrachium lar</i>	攀							2
	鋸齒新米蝦	<i>Neocaridina denticulata</i>	攀							2
	日本米蝦	<i>Caridina multidentata</i>	攀							1
總計物種數					5	2	7	2	4	13
總計個體數					92	63	89	55	18	90

註：1.上溯類型欄位標註「游」表示為游泳型物種、「攀」表示為攀爬型物種 2.大東勢魚骨型魚道於 2021 年枯水期開始調查，福德坑於 2022 年開始調查

表 6 拱型樑式、粗石斜坡式魚道及開口降壩案例待袋網 3 年累計調查成果

Table 6 Cumulative 3-year fyke net survey results for arch-beam type fishways, rough-stone ramp fishways and opening weir case studies

		魚道類型	拱型樑式魚道		粗石斜坡式魚道		開口降壩	
類別	中文名	學名	上溯類型	7.抽藤坑	8.和雅橋	9.藤橋溪	10.碇橋溪	
魚類	臺灣石鱚	<i>Acrossocheilus paradoxus</i>	游	14	2	1		
	臺灣白甲魚	<i>Onychostoma barbatulum</i>	游	5	1			
	粗首馬口鱮	<i>Opsariichthys pachycephalus</i>	游	3				
	臺灣鬚鱨	<i>Candidia barbata</i>	游	24				
	纓口臺鯪	<i>Formosania lacustre</i>	攀	1				
	大吻鰕虎	<i>Rhinogobius gigas</i>	攀			5		
	日本瓢鰕鰕虎	<i>Sicyopterus japonicus</i>	攀			20	2	
	兔頭瓢鰕鰕虎	<i>Sicyopterus lagocephalus</i>	攀			17	1	
	黑鰕枝牙鰕虎	<i>Stiphodon percnopterygionus</i>	攀			3		
	條紋狹鰕虎	<i>Stenogobius genivittatus</i>	攀			1		
	眼斑厚唇鯊	<i>Awaous ocellaris</i>	攀			3		
	黑邊湯鯉	<i>Kuhlia marginata</i>	游			4		
	褐塘鱧	<i>Eleotris fusca</i>	游			16	6	
	黑體塘鱧	<i>Eleotris melanosoma</i>	游			2		
	尖頭塘鱧	<i>Eleotris oxycephala</i>	游			4	1	
	珍珠塘鱧	<i>Giuris margaritacea</i>	游			3	1	
	花鰻鱺	<i>Anguilla marmorata</i>	攀			4	1	
蝦蟹	拉氏清溪蟹	<i>Candidiopotamon rathbuni</i>	攀	7				
	字紋弓蟹	<i>Varuna litterata</i>	攀			23	2	
	帝王仿相手蟹	<i>Sesarmops imperator</i>	攀				9	
	粗糙沼蝦	<i>Macrobrachium asperulum</i>	攀	51	1	1		
	貪食沼蝦	<i>Macrobrachium lar</i>	攀			24	20	
	大和沼蝦	<i>Macrobrachium japonicum</i>	攀			66		
	南海沼蝦	<i>Macrobrachium australe</i>	攀			113	2	
	日本米蝦	<i>Caridina multidentata</i>	攀			1	1	
	韋氏米蝦	<i>Caridina weberi</i>	攀			1	2	
	維氏米蝦	<i>Caridina villadolidi</i>	攀				2	
	大額米蝦	<i>Caridina grandirostris</i>	攀			2		
	刺足仿匙蝦	<i>Atyopsis spinipes</i>	攀			35	2	
螺貝	壁蜆螺	<i>Septaria porcellana</i>	攀			2		
總計物種數				7	3	23	14	
總計個體數				105	4	351	52	

註：上溯類型欄位標註「游」表示為游泳型物種、「攀」表示為攀爬型物種

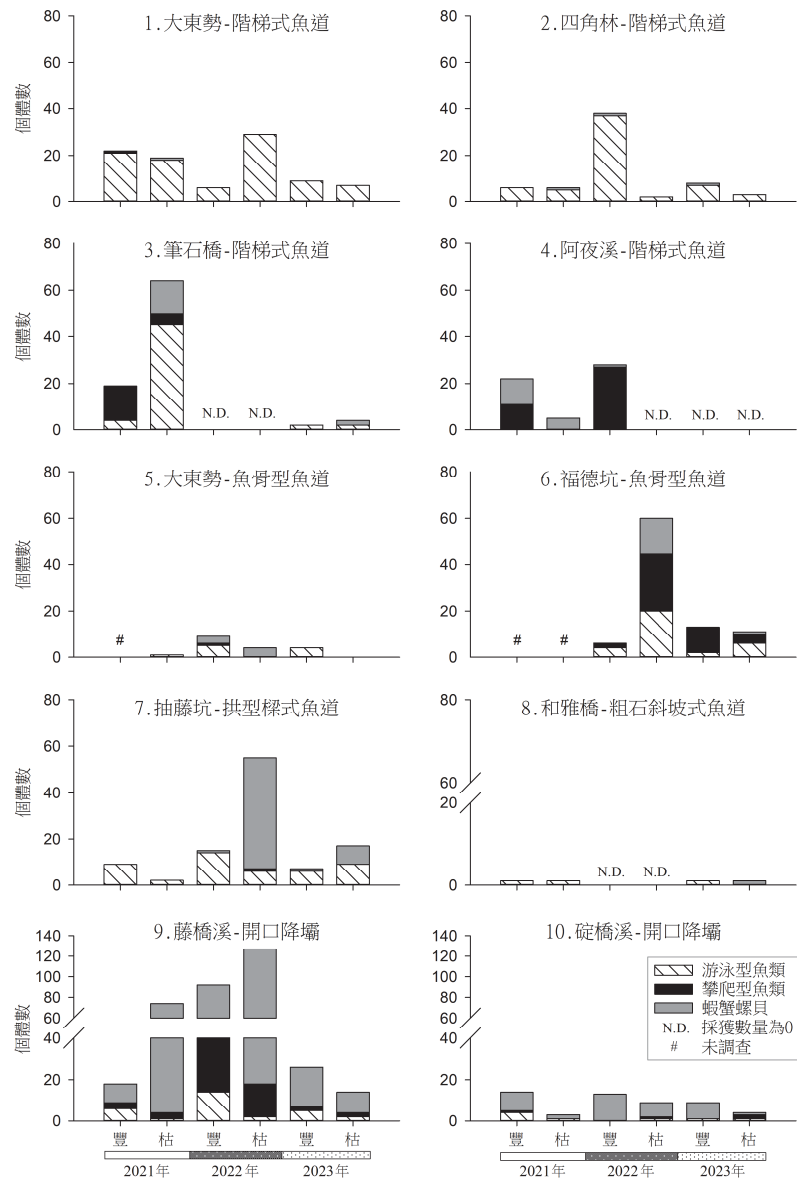
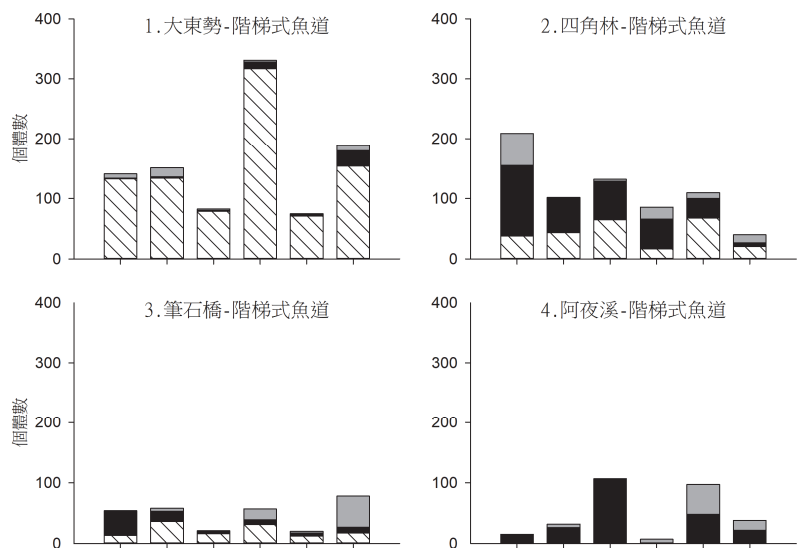
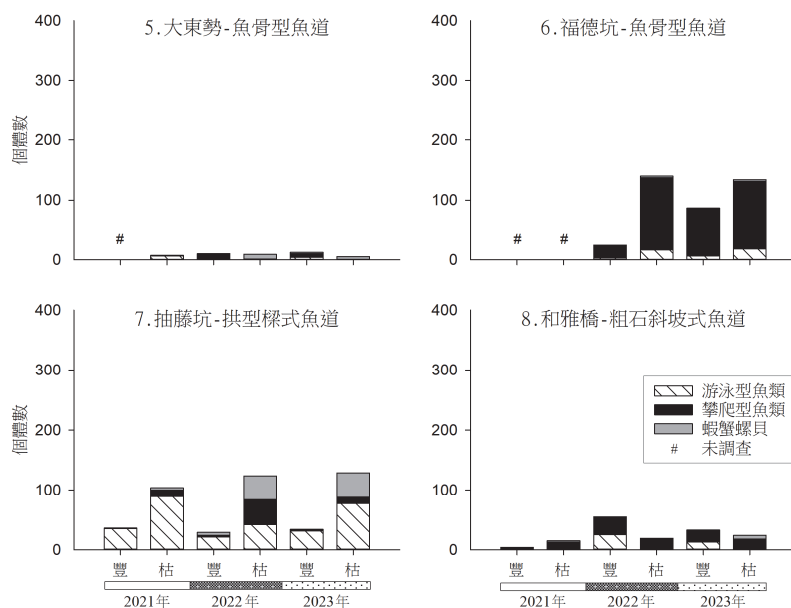


圖 7 十處魚道案例待袋網歷年豐枯水期調查成果

Fig.7 Fyke net survey results during high-flow and low-flow periods over the years in ten fishway case studies

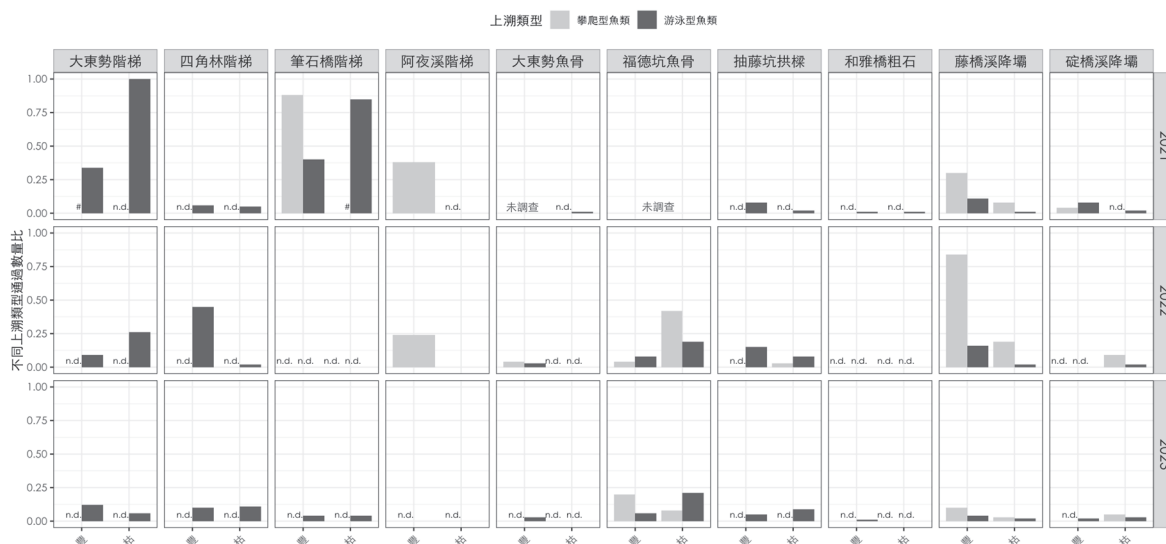




註：藤橋溪與碇橋溪開口降壩 2 處案例因無法拆分入口/本體/出口，故無魚道內調查成果

圖 8 八處魚道案例魚道內歷年豐枯水期調查成果

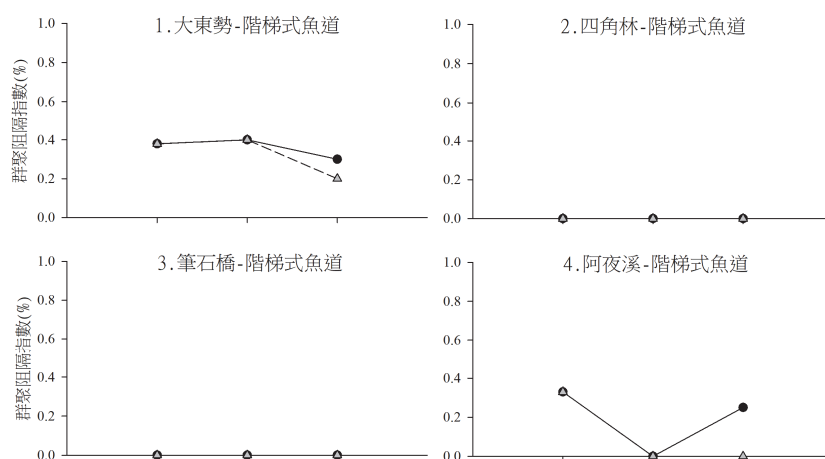
Fig.8 Survey results within eight fishway case studies during high-flow and low-flow periods over the years



註：#表示因調查總數不足，不予納入；n.d.表示待袋網無調查到通過個體

圖 9 十處魚道案例通過結構物魚隻數量比

Fig.9 Ratio of passing to downstream surveyed counts within ten fishway case studies



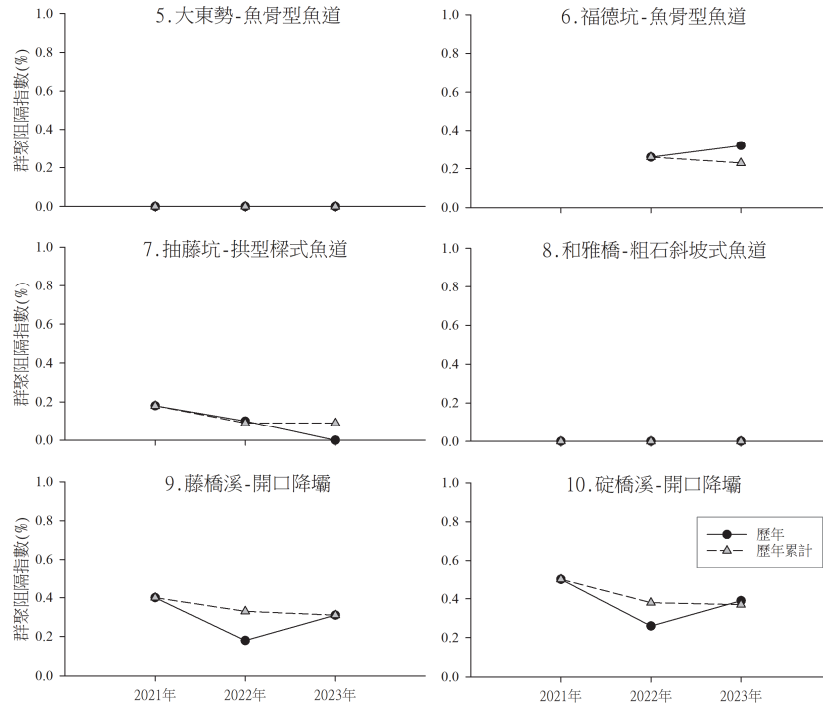
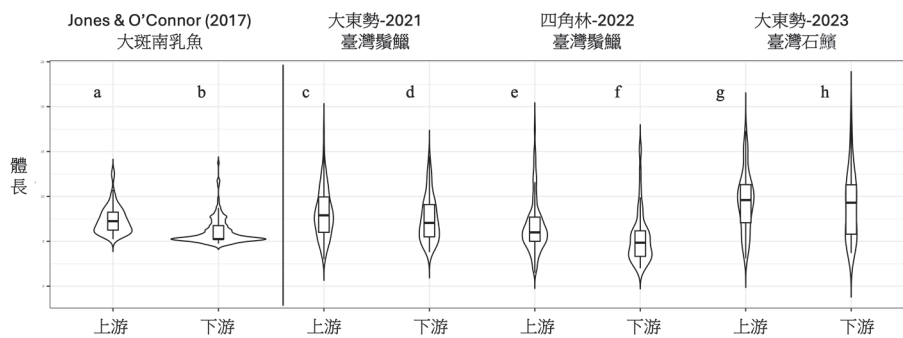


圖 10 十處魚道案例上下游物種歷年與歷年累計群聚阻隔指數成果

Fig.10 Annual and cumulative community blockage index results based on upstream/downstream species data for ten fishway case studies



註：1. a、b 圖改編自 Jones and O'Connor(2017)，體長資料經轉換以趨近本研究之資料分布
2. c 至 h 圖為本研究資料

圖 11 上下游體長顯著差異案例資料分布圖

Fig.11 Body length distributions in case studies with significant upstream-downstream differences

表 7 大東勢與四角林案例優勢物種體長分布與檢定成果

Table 7 Body length distribution and statistical test results for dominant species in case studies

案例編號	名稱	優勢物種	位置	2021年			2022年			2023年		
				數量	平均	ks.test D值	數量	平均	ks.test D值	數量	平均	ks.test D值
1	大東勢 (階梯式魚道)	臺灣鬚鰱	上游	331	8.14	0.625*	273	10.20	0.333	208	9.54	0.222
			下游	76	7.54		158	9.11		152	9.09	
		臺灣石鱗	上游	-	-	-	-	-	-	128	9.46	0.555**
			下游	-	-		-	-		39	8.90	
2.	四角林 (階梯式魚道)	臺灣鬚鰱	上游	204	7.65	0.354	295	6.65	0.444*	79	4.92	0.143
			下游	102	6.05		98	5.39		58	5.56	

註：1.*為 $P < 0.05$ ，**為 $P < 0.01$ 2. 體長之平均單位為公分(cm)

四、討論與建議

1. 流速與休息區設計對魚道效益的影響甚大

歷時三年的監測結果 (表 3、表 4) 顯示，不同設計型式

的魚道都面臨流速過高與休息區功能不佳等問題。如福德坑魚骨型魚道因坡度較陡，主要上溯路徑流速普遍偏高 (圖 6)，可能超出部分物種或小型個體的泳速而形成通過障礙；相較下，多數階梯式魚道本體流速較緩 (圖 5)，有利於游泳

型魚類的利用(表 5)。休息區功能不佳是另一常見問題。和雅橋案例因缺乏休息區(表 4)，導致上溯成功率極低(表 6)；其他案例的休息區或有淤積(如阿夜溪、筆石橋)、或因為結構尺寸限制導致水深不足(如大東勢魚骨型)(表 3)。足夠的有效休息區對魚類成功上溯相當重要，換言之，魚道設計過程應該強化考量不同流量下的泥砂運移特性，並於可能條件下規劃後續清淤維護方案。設計階段的水理計算需充分考量不同流量下的流速分布，平衡魚道排除淤積的能力與服務多數現地魚種的流速設計，更需審慎評估後續維護管理的可能性來設計魚道結構。

2. 監測標準化作業流程成效驗證：跨案例比較分析

本研究建立「野溪魚道成效監測標準化作業流程」，並在 2021 至 2023 年間實際操作，藉由此標準化資料蒐集的流程，得以對十處案例的成效進行分級評估(觀察家生態顧問有限公司，2024)。透過標準化評估工作的操作步驟與方法，本研究也得以比較跨幅甚大的案例資料，以釐清水力學條件對於魚道效益的可能影響。一致的調查方法也能突顯各魚道的效益受其環境脈絡影響甚大，舉例來說，福德坑魚道的水力條件較嚴苛，但因其水系鄰近溪流下游，上溯生物物種組成卻相當豐富，而和雅橋魚道的落差與水力條件尚可，但卻因缺乏休息區導致魚道上溯利用的成效不彰。

3. 待袋網與電器法於上溯魚類評估之差異與意涵

過往在評估魚道效益時，較少直接調查成功通過魚道的個體作為評估標準，雖近年利用影像辨識等方法，能針對魚道通過狀態進行快速的了解，但考量到設備建置成本與魚道內濁度、氣泡干擾，較難運用於高坡度、泥沙量高或不易抵達的野溪。經常被使用的電器法則僅能得到一個時間點的魚道內物種組成資料，亦僅為推論魚道效益的間接資料。本研究除成功運用待袋網調查到 10 個個案的成功上溯個體資料外，也是國內第一次直接比較電器法和待袋網成果的紀錄。

比較四角林、筆石橋及阿夜溪等三處案例的待袋網(設置於魚道出口)與電器法(魚道內調查)的結果。一般來說，魚道內調查(圖 10)記錄到的總個體數，尤其在階梯式魚道(四角林、筆石橋)，通常遠高於待袋網 24 小時記錄到的上溯個體總量。顯示魚道內可能聚集了大量正在利用該空間(棲息、休息、移動及嘗試上溯)的魚隻，但這些存在於魚道內的魚隻並不一定能完成上溯過程，也有從上游出口進入魚道內的可能性。因此，魚道內的魚隻數量不應直接等同於魚道效益。

比較待袋網與電器法所調查到的上溯類型組成，更顯現兩種方法所得的成果差異。比較圖 7 與圖 8，筆石橋魚道內常年有游泳型魚類棲息(圖 8)，但從待袋網成果可發現成功上溯魚隻數量時常很低或為零(圖 7)；阿夜溪在待袋網未能採獲成功上溯個體時，仍可發現大量棲息在魚道內之魚蝦蟹類。換言之，在未進行待袋網調查的情況下，僅憑藉魚道內調查成果推論其上溯成效，雖然資料量較大，但卻無法回

答「誰通過了魚道？」的關鍵問題。待袋網方法調查到的樣本數雖較少，在量化通過個體的物種組成等多樣性資訊上較易受放置時間長短限制，但仍為不可取代的方法，也有未來進一步推廣和增加調查努力量的必要性。

4. 利用通過結構物魚隻數量比探討魚道成效變遷

本研究使用「通過結構物魚隻數量比」作為魚道效益之量化指標，比較成功通過魚道與下游棲地潛在上溯的個體量，推論調查期間個體成功通過魚道的潛勢。此指標之侷限在於，待袋網架設前未記錄已進入魚道內的個體，故可能低估整體潛在上溯的個體總量，換言之，在休息區量體較大、可以容納較多魚隻的魚道個案中，此指標可能因未納入魚道內個體量而有較大的偏誤。但在個別案例之不同調查間、或同一類型的魚道比較上，可用於快速判別年間的魚道表現差異，並得以討論不同魚道或調查間差異的成因。

以大東勢魚骨型和福德坑兩案魚骨型魚道案例而言，後者休息區的體積、數量及二年間的堵塞狀態都較優於前者，繼而觀察到較高的魚類通過數量比，但福德坑魚道也因為豐水期時流速偏高，游泳型魚類在枯水期的上溯成效優於豐水期，反而不能滿足一般魚類偏好於豐水期上溯之需求。

同為階梯式魚道之大東勢及筆石橋案例，第一年之成效若僅檢視上溯魚隻數量，會認為筆石橋魚道成效較佳，但若檢視其通過結構物魚隻數量比，則可發現兩者在游泳型魚類的上溯表現其實相當接近。相較於大東勢魚道成效的穩定發揮，筆石橋魚道的上、下游棲地陸續受到其他構造物切割及魚道內淤積堵塞影響，並在第二年與第三年調查期間，這些負面影響已逐步顯現，導致其上溯比例下降；而同樣為階梯式魚道之阿夜溪案例，也有十分類似之情形發生。

此外，藤橋溪與碇橋溪兩處降壩個案，因沒有停留於魚道內的個體，亦相當適合採用此指標評估年間與跨個案的效益。碇橋溪受到下游落差增加的影響，在 2022-2023 年間的調查僅記錄到少量魚隻成功上溯，降壩成效較藤橋溪個案而言不明顯。

5. 物種組成指標與優勢種族群結構於魚道成效評估之比較

在規模甚小的野溪棲地，計算上下游的物種組成差異往往難以正確的推論結構物造成的縱向連續阻隔。本研究運用群聚阻隔指數在許多中上游案例中常年為零或極低，但實際上透過待袋網調查卻幾乎不存在成功上溯的個體(如和雅橋案例，比較表 6 與圖 8 的資料)，是因為這些中上游案例地點本來就缺乏需要長距離洄游之物種，其原有物種大部分在魚道上下游棲地皆能繁殖。換言之，在偏向上游、或受到評估標的下游其他結構物造成的阻隔影響，利用物種組成比較來量化野溪魚道的阻隔情況，可能受到原有物種洄游習性之限制，以及物種調查難度、採樣誤差、以及上下游棲地差異等因素干擾，常無法單獨透過此類指標來判定阻隔程度。

此外，獨流溪的水域生物組成以兩側洄游物種為主，且物種豐度高，棲地利用的差異分化也較顯著，和辮狀河中上

游案例的水域生物組成有很大差異。對此類溪流而言，自出海口往上游第一道較難跨越之落差，其跨越難度和出現位置會影響河口汽水域魚類及海水魚之幼魚能上溯利用棲地的上限，也影響中上游分布物種幼苗上溯時被水中天敵（如湯鯉科及塘鱧科）捕食之機會，而對整條溪流之水域生物相有顯著之影響（Keith et al., 2015）。也因獨流溪物種繁多、棲地利用分化程度高，有些物種偏好較上游棲地，有些僅只出現於下游或出海口，這些物種轉換的情形有機會在極短距離（幾十公尺）內發生；又因治理工程造成物理及水文棲地型態改變，有些物種容易隨棲地型態的消失而消失，顯示在獨流溪中可能有多種因素會高估構造物阻隔對上游物種缺失的影響。

分析上下游共有之「優勢物種的族群結構」(本研究以體長分布作為代表)，理論上可對於野溪魚道的阻隔效應有更強的推論能力。魚道因其流速與結構設計，會選擇性影響特定體長以下、最高泳速不足以上溯的個體通過率，導致上下游體長分布產生差異（如圖 11 所示範例）。本研究以 Kolmogorov-Smirnov 檢定比較案例中的優勢物種體長分布（表 7），僅在少數情況下偵測到顯著差異（大東勢階梯式、四角林兩處）(圖 11c-h)。然而，這些差異模式的分布並不完全符合理論預期，由於體長分布可能受到棲地適宜性、族群動態、採樣方法與頻率等多重因素影響，單獨以此判定阻隔效應仍需謹慎。建議未來可更強化待袋網調查的努力量，累積成功上溯個體的體長級距資料，以進一步強化「野溪魚道成效監測標準化作業流程」的評析能力。

五、結 論

本研究成功建立一套適用於臺灣野溪環境之「魚道成效監測標準化作業流程」，透過整合水力學與生態調查方法，能有效比較不同魚道類型的通過成效。成果顯示，魚道之流速設計與休息區功能對通過效率影響甚鉅，特別是在含砂量高且流速變化大的野溪環境中，若缺乏有效休息空間與適當流速緩衝，將大幅降低魚類與蝦蟹上溯成功率。本研究亦顯示待袋網作為監測工具，較能直接反映成功通過魚道的個體數與物種組成，補足以往僅靠電器法於魚道內調查所難以確認的通過成效，並提出「通過結構物魚隻數量比」作為魚道效益之量化指標。此外，群聚阻隔指數與優勢物種體長分布分析，提供定量評估構造物是否導致物種阻隔的依據，雖應注意其受限於物種洄游行為、環境特性等因素，仍皆為辨識潛在阻隔的重要工具。總結而言，標準化作業流程不僅提升魚道成效評估之一致性與科學性，也有助於建立跨案例的監測資料庫，對於臺灣未來魚道設計、施作與維護管理具有高度參考價值。建議未來能透過更多樣之魚道案例進一步優化監測流程，提升魚道作為重要補償措施之實際效益與發展性。

誌 謝

本文為農業部農村發展及水土保持署之研究計畫成果，相關計畫編號為 SWCB-111-009、SWBC-112-018 及 ARDSWC-113-015，謹此致謝。

參考文獻

- [1] 巨廷工程顧問股份有限公司 (2019), 「石岡壩魚道生物監測成果報告」, 經濟部水利署中區水資源局委辦。(G T International Engineering Consultants, Co., LTD. (2019). *Report on Ecological Monitoring of Fishway in Shih-Kang Dam*, Central Region Water Resources Office, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [2] 行政院農業委員會水土保持局 (2020), 「水土保持單元叢書 03-水土保持設施常見生物通道」, 行政院農業委員會水土保持局。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (2020). *Soil and Water Conservation Series-Common Biological Channels in Soil and Water Conservation Facilities*, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 王順昌 (2015), 「魚骨型魚道流場分析及本土性魚類上溯試驗」, 國立中興大學水土保持學系研究所博士論文。(Wang, S.C. (2015). *Flow Field Analysis and Native Fishes Migration Behaviors in Fish-Bone-Type Fishway*, Ph.D. Dissertation, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 宋承恩 (2016), 「以斗六堰長期生態監測資料分析優勢魚種洄游習性」, 國立清華大學生物資訊與結構生物研究所碩士論文。(Song, C.E. (2016). *Using a Long-term Ecological Record of Dou-Liou Weir to Analyze Migratory Behaviors of Dominant Fish Species*, Master Thesis, National Tsing Hua University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [5] 郭金泉 (2006), 「本土型魚道之效益評估」, 行政院農業委員會水土保持局委託研究。(Guo, J.Q. (2006). *Local Fishway Assessment*, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [6] 莊明德 (2003), 「原生魚種在魚道溯游之試驗研究(IV)」, 行政院農業委員會特有生物研究保育中心。(Zhuang, M.D. (2003). *Migration Experiment of Native Fishes in Fishways (IV)*, Endemic Species Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [7] 葉明峰 (2005), 「河川魚類游泳能力之研究(I)」, 行政院農業委員會特有生物研究保育中心。(Ye, M.F. (2005). *Swimming Ability of Stream Fish (I)*, Endemic Species Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))

- [8] 葉明峰 (2006), 「河川魚類游泳能力之研究(II)」, 行政院農業委員會特有生物研究保育中心。(Ye, M.F. (2006). *Swimming Ability of Stream Fish (II)*, Endemic Species Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [9] 鄭先佑 (2006), 「本土型魚道之效益評估及可行性研究」, 行政院農業委員會委託研究。(Zheng, X.Y. (2006). *Functional Assessment and Feasibility Study on Fishway Used in Taiwan*, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [10] 漢林生態顧問有限公司 (2022), 「保育治理工程指標性環境友善措施生態調查評析與相關案例彙編」, 行政院農業委員會水土保持局委託計畫。(Han-Lin Ecological Consultant Co., LTD. (2022). *Investigation And Consulting Case Study Workbook Of Indicative Environmental Friendly Measures In Soil And Water Conservation Engineering Projects*, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [11] 觀察家生態顧問有限公司 (2023), 「111 年度生態檢核成效追蹤評估與資料庫擴大介接運用計畫」, 行政院農業委員會水土保持局委託計畫。(Observer Ecological Consultant, Co., LTD. (2023). *Ecological Check Results Tracking Evaluation and Database Expansion Interface Application of 2022*, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [12] 觀察家生態顧問有限公司 (2024), 「112 年度生態檢核成效追蹤與生態資料精進及系統功能維運計畫」, 農業部農村發展及水土保持署委託計畫。(Observer Ecological Consultant, Co., LTD. (2024). *Ecological Check Results Tracking Evaluation and Ecological Data Improvement and System Function Maintenance of 2023*, Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, Ministry of Agriculture, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [13] Chen, S.C., Wang, S.C., and Tfwala, S.S. (2017). “Hydraulics driven upstream migration of Taiwanese indigenous fishes in a fish-bone-type fishway.” *Ecological Engineering*, 108, 179-193.
- [14] Jones, M.J. and O'Connor, J.P. (2017). *Monitoring the performance of fishways and fish passage works*, Arthur Rylah Institute for Environmental Research Technical Report Series No. 257, Department of Environment, Land, Water and Planning, Heidelberg, Victoria.
- [15] Keith, P., Lord, C., and Maeda, K. (2015). *Indo-Pacific Sicydiine Gobies: Biodiversity, life traits and conservation*. Société Française d'ichthyologie, Paris.
- [16] O'Connor, J., Stuart, I. and Jones, M. (2017). *Guidelines for the design, approval and construction of fishways*. Arthur Rylah Institute for Environmental Research Technical Report Series No. 274, Department of Environment, Land, Water and Planning, Heidelberg, Victoria.

2025 年 04 月 11 日 收稿

2025 年 06 月 10 日 修正

2025 年 08 月 11 日 接受