

出水溪整治工程 生態友善成效追蹤評估

文圖 | 胡通哲

(國立臺灣大學水工試驗所副研究員／通訊作者)

郭家暢

(國立臺灣大學水工試驗所研究專員)

林志明

(羅東林區管理處治山課課長)

過去溪流整治經常使用矩形斷面混凝土固床工調整河床縱坡度，部分案例造成水域棲地多樣性降低，間接導致水域生物數量與多樣性難以恢復，而幾近陡峭的混凝土護岸，造成橫向生物通道被阻斷，陸域動物難以穿越濱溪帶。出水溪整治工程，在工程的規劃設計階段，引入工程生態檢核，並經由分區工作圈會議與專家委員指導，確立以環境友善的方式進行設計，施設拱形石梁，避免造成縱向通道阻隔與水域棲地劣化；施設護岸大型緩坡，以避免對旁側坑溝往來動物造成影響；參考原住民智慧，採用亂砌石多孔隙護岸，降低對生物衝擊。施工前後邀請工程與生態專家，辦理民眾參與，進行施工前中後調查，並就維護管理進行評估，探討棲地是否因工程而劣化。

背景資料蒐集

出水溪整治工程的工區位於宜蘭縣大同鄉，通行道路為宜33縣道，經由寒華大橋進入聯絡道，上游有原住民保留地及寺廟等出入通行需求。施工前，原有連外道路仰賴寬度約3公尺的混凝土版橋（圖①），若洪水溢淹，版橋左岸易被沖毀，造成聯外道路中斷。

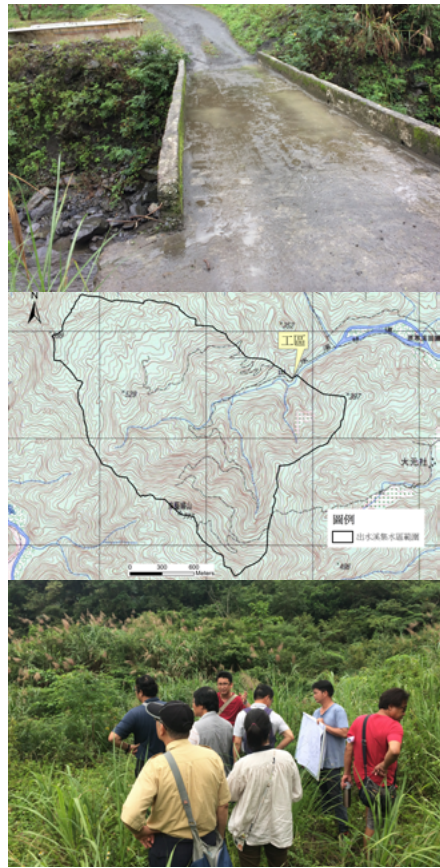
出水溪集水區面積約382公頃，集水範圍如圖②，為瞭解是否事涉法定保護區與生態敏感區域，經由套疊國有林班地界等生態敏感圖層，工區與集水區並未與法定生態敏感區域重疊，但進行生態檢核初勘，發現有食蟹獾（第三級保育類），由當時預訂建造護岸的坑溝進入濱溪地帶，且出水溪集水區鄰

近宜蘭縣寒溪水質水量保護區，經由分區工作圈會議，將其列為第一級檢核案件。

出水溪工程內容

治理對策包含改建出水溪原有舊版橋確保道路暢通、導正流心保護路基的基腳、設置砌石護岸保護河岸、擴大通洪斷面降低水位、配置固床工以穩定溪床。出水溪集水區面積屬於中小型，經水文分析洪峰流量 Q_{50} （含砂流）為173cms，並不需設置高強度的固床工，因此將固床工改以8座拱形石梁替代原來設計，降低落差（小於40公分），而上下游各一座的固床工採複式斷面中間開缺口，使上下游落差趨近於0。辦理民眾參與時環團委員提醒順流右岸凹岸處有一乾溝（圖③），為重要溪溝與本流間的重要生物通道，於施作砌石護岸時不宜阻斷，此處後來變更設計為大型緩坡，以避免阻斷食蟹獾或鼬獾的生物通道。

整治工程定案設置拱形石梁8座、砌石護岸346公尺、動物通道1座、植生袋溝75公尺、鋼構橋1座，工程目的為穩定流心並保護生態棲地。拱形石梁為日本福留脩文博士（1943—2013）倡議，過去臺灣曾有實際案例（如雙溪后番子坑溪上游等處），出水溪拱形石梁為福留脩文博士離世後依其著作「近自然工法之石組技術（2003）」並加入鋼軌樁固結石梁組「力石」改良施作。拱形石梁完工後，理論上可創造多樣的水域型

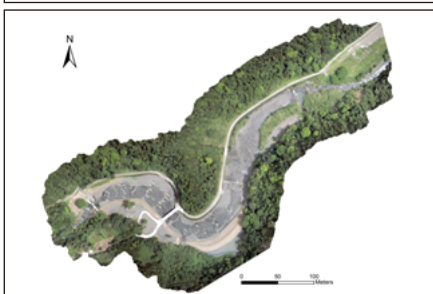


①
—
②
—
③

① 出水溪施工前的版橋
② 出水溪集水區範圍
③ 民眾參與出水溪會勘

態（魚窪地、湍瀨），相較傳統的矩形斷面固床工，設計理念上不同。從2018年開始進行施工前的陸域生物與水域生物監測，並對完工後的生態復原，進行調查評估。

拱形石梁，依就地取材原則現地採石，8座拱形石梁固床工的力石，共使用51顆石頭，力石朝上游側傾斜15度（仿叩首姿態），類似棒球帽下壓提高頂風能力，輪石採八字形砌石，利用拱的效應，將水流沖擊



- ④
-
- ⑤
-
- ⑥
-
- ⑦
-
- ⑧
-
- ⑨

力傳遞至力石，希望完工後能重現天然石梁般的棲地，能具有深潭、淺瀨、岸邊緩流、沙洲等。力石與輪石設置的概念如圖④，施設時擔心中間力石強度不足，部分石梁在後方加入2—3顆力石等級的石頭加以頂強，而輪石亦可採用雙層控制水位高度（圖⑤），完工後拱形石梁下方因沖刷會產生「魚窩地」。

出水溪拱形石梁完工後相片如圖⑥，大型緩坡供動物往來水陸域間的動物通道，如圖⑦。其中石拱形石梁下游魚窩地易形成深潭，為魚類棲息重要棲地。研究指出潭區水深與極限魚體體長、整體生物量、生物密度顯著正相關（Harvey and Stewart, 1991），而較大的魚體有高繁殖能力（Barneche et al., 2018），在生態系中具重要角色。

以無人空拍機UVA拍攝施工前後工區，產出正射影像（2018/6/8、2019/5/16），如圖⑧、圖⑨，並產製數值地形DSM（Digital Surface Model）。

工程生態檢核

工程生態檢核，先確認有無法定生態敏感區域，再套繪生態情報點位與野鳥IBA圖層等，提出生態友善評估，以朝向棲地保護、

- ④ 拱形石梁的力石與輪石配置
- ⑤ 拱形石梁的力石與輪石（雙層）配置
- ⑥ 出水溪拱形石梁完工後環境照片
- ⑦ 出水溪大型緩坡（動物通道）完工後環境照片
- ⑧ 空拍正射圖（施工前2018/6/8）
- ⑨ 空拍正射圖（完工後，2019/5/16）

維持生物縱橫向連結性，並就陸域生物與水域生物進行施工前後的調查監測。

法定保護區或生態敏感區域

套疊出水溪集水區與法定生態保護區，包含野生動物的自然棲息環境、自然保留區、自然保護區、IBA野鳥圖層、淺山生態情報點位等，集水區與工區並未位於法定保護區內，但工區屬於國有林班地，鄰近水質水量保護區、保安林。

生態保育措施

對於出水溪工區的生態保育措施（迴避、縮小、減輕、補償）：

迴避：標記工區內大樹與其他保全對象（野溪坑溝以警示帶圍起），避免施工時受損，其中在最上游固床工（起頭工）因保全大樹而變更位置。

縮小：當地哺乳類出現頻繁（食蟹獾、山羌、臺灣獼猴），為主要保全對象，考量其利用溪流環境之行為，應確保下溪路徑通暢，原來設計護岸的坑溝匯入溪流處，縮小護岸範圍，採用大緩坡。

減輕：(1) 提高乾砌石護岸比例，在常水

位以上採用乾石砌護岸，增加多孔隙材質，以求減輕敏感區之損傷；(2) 原有設計將造成水域棲地底床淤積平滑化，影響附生藻基礎生產量、水生昆蟲，建議變更，設置拱型石梁，減輕水域生態衝擊；(3) 最上游與最下游固床工採複式斷面，中間開缺口，使底棲生物與鱸鰻（居民指認）等容易通過；(4) 設置橫向生物通道，提供生物通行。

生態關注圖

繪製中尺度關注圖，出水溪工區位於天然林地範圍內，自然基質良好，具有恢復潛力。小尺度生態關注圖判釋，河道及敏感區，與工區高度重疊，故應盡可能採取保育措施中的迴避措施，如果施工線無法迴避，應採縮小、減輕之原則，減少對敏感區域之干擾。沿岸敏感區為土壤基質，若轉變為不透水漿砌石後，僅可供低矮草本植物零星生長，不利樹木生長，且高水位漫淹區消失，水域與陸域能量交流降低，食物網結構將改變。

生物調查監測

進行施工前後水域生物與陸域生物調查追蹤，以了解出水溪整治工程對生物是否有負面影響。



⑩ 2018年至2020年於施工至完工後，均邀請生態檢核團隊、設計單位等專家學者到工區現場指導。

水域生物變化

魚類調查，參考林務局（2019）「溪流魚類資源監測技術手冊」使用背負式電器採集；水棲昆蟲採沿岸水深50公分範圍內，以蘇柏氏網採集3網底泥，較大型的水棲昆蟲以鑷子夾取，而較小型的水棲昆蟲則以毛筆沾水將其取出，採獲之水棲昆蟲帶回鑑定分類。

魚類調查於施工前的2次調查分別採得46與121尾魚、完工後的3次調查分別採得78、101、72尾魚（註：其中2018年秋該次調查正逢施工前將魚類移置作業，捕捉的努力較高），5次調查之魚類組成相同，施工前的調查平均為83.5尾，完工後平均為83.6尾，並無數量變少之趨勢（表1）。

蝦蟹類調查於施工前後調查，如表2，蝦蟹類為底棲生物，出水溪工程，過程將部分河床挖填尋找大型塊石，可能底棲大型無脊椎生物重新進駐需要更多時間。

水棲昆蟲類調查，施工前的2次調查分別採得21與8隻、完工後的3次調查分別採得98、7、64隻（表3）。水棲昆蟲數量波動雖劇烈，完工後並無減少趨勢。

陸域生物變化

鳥類以穿越線調查法為主，兩棲類採綜合沿線調查、繁殖地調查和聽音調查等方式，爬蟲類調查採沿線調查和逢機調查兩種調查

方式，陸域昆蟲（蝶類）採沿線調查法，哺乳類採集則以足跡、排遺、目視及其他痕跡進行判斷，輔以紅外線自動相機進行。

鳥類調查於施工前的2次調查分別採得26與24隻、完工後的3次調查分別採得42、12、62隻（表4）。完工後並無減少趨勢，可能因為溪床視野變開闊容易觀察到個體而增加計數。

兩爬類調查於施工前的2次調查分別採得11與3隻、完工後的3次調查分別採得31、22、27隻（表5）。完工後並無減少趨勢，但有發現外來種紅耳龜（又稱巴西龜）1隻次，巴西龜經常被用來放生，過去沒有紀錄但2020年調查出現，有可能是完工後視野開闊，水質又乾淨，而被放生的物種。

陸域昆蟲（蝶類）調查於施工前的2次調查分別採得4與9隻、完工後的3次調查分別採得1、8、18隻（表6），蝶類調查與對應的天候相關性大，資料僅做參考。

哺乳類調查於施工前的2次調查分別觀察到6與2隻、完工後的3次調查分別觀察得2、0、2隻（表7），施工前有出現的鼬獾（圖⑪）尚未拍攝到，推測哺乳類還需要更長的時間復原，完工自動相機有拍攝到第三級保育類動物食蟹獾（圖⑫）的蹤跡。

表 1：出水溪整治工程魚類調查種類與數量清單

物種	學名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
明潭吻鰕虎	<i>Rhinogobius candidianus</i>	13	16	1	2	2
粗首馬口鱮	<i>Opsariichthys pachycephalus</i>	1	6	2	22	4
臺灣白甲魚	<i>Onychostoma barbatulum</i>	24	89	47	35	47
臺灣石鱮	<i>Acrossocheilus paradoxus</i>	2	7	12	29	14
臺灣間爬岩鰕	<i>Hemimyzon formosanus</i>	6	3	16	13	5
總計		46	121	78	101	72
備註		施工前		完工後		

表 2：出水溪整治工程蝦蟹類調查種類與數量清單

物種	學名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
大和沼蝦	<i>Macrobrachium japonicum</i>	2			1	
宜蘭澤蟹	<i>Geothelphusa ilan</i>		1			
總計		2	1	0	1	0
備註		施工前		完工後		

表 3：出水溪整治工程水棲昆蟲類調查種類與數量清單

目名	科名	英文科名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
毛翅目	角石蛾科	Stenopsychidae	4		2	1	10
	指石蛾科	Philopotamidae		1	5		10
	流石蛾科	Rhyacophilidae	2				4
	紋石蛾科	Hydropsychidae	2	1	20		20
蜉蝣目	小蜉科	Ephemerellidae			1		
	四節蜉科	Baetidae		2	50	1	4
	扁蜉科	Heptageniidae	1		14	3	1
	蜉蝣科	Ephemeridae					1
蜻蛉目	幽蟴科	Euphaeidae	4			1	8
廣翅目	泥蛉科	Sialidae	2				
積翅目	石蠅科	Perlidae	1	4	4		4
	短尾石蠅科	Nemouridae			2		
鞘翅目	圓花蚤科	Scritidae	3				
雙翅目	舞虻科	Empididae	2				2
	蚋科	Simuliidae				1	
總計			21	8	98	7	64
備註			施工前		完工後		

表 4：出水溪整治工程鳥類調查種類與數量清單

物 種	學 名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
大 冠 鷺	<i>Spilornis cheela</i>	1				3
大 彎 嘴	<i>Megapomatorhinus erythrocnemis</i>		3	1		3
小 白 鷺	<i>Egretta garzetta</i>		1		2	2
小 卷 尾	<i>Dicrurus aeneus</i>			3		
小 彎 嘴	<i>Pomatorhinus musicus</i>	2	4	6		5
山 紅 頭	<i>Cyanoderma ruficeps</i>		2	3		2
小 啄 木	<i>Dendrocopos canicapillus</i>					1
五 色 鳥	<i>Psilopogon nuchalis</i>	1		1		5
北方中杜鵑	<i>Cuculus optatus</i>	1				
白 耳 畫 眉	<i>Heterophasia auricularis</i>			1		1
白 腰 文 鳥	<i>Lonchura striata</i>				1	6
白 頭 翁	<i>Pycnonotus sinensis</i>	2	1	2	1	6
白 鵲 鶇	<i>Motacilla alba</i>				2	
灰 喉 山 椒 鳥	<i>Pericrocotus solaris</i>			1		1
灰 鵲 鶇	<i>Motacilla cinerea</i>	1	3		1	
洋 燕	<i>Hirundo tahitica</i>			2	2	2
紅 嘴 黑 鶇	<i>Hypsipetes leucocephalus</i>	5	4	5		5
野 鶇	<i>Calliope calliope</i>					
短 尾 鷺	<i>Urosphena squameiceps</i>					
黑 枕 藍 鶇	<i>Hypothymis azurea</i>	6		4		1
黑 喉 噪 眉	<i>Ianthocincla chinensis</i>					1
鉛 色 水 鶇	<i>Rhyacornis fuliginosa</i>		1			2
綠 畫 眉	<i>Erpornis zantholeuca</i>		2	5		2
綠 繡 眼	<i>Zosterops japonicus</i>	6				
翠 鳥	<i>Alcedo atthis</i>				1	1
臺灣山鷓鴣	<i>Arborophila crudigularis</i>	1				1
臺灣竹雞	<i>Bambusicola sonorivox</i>					2
臺灣紫嘯鶇	<i>Myophonus insularis</i>		1	1	1	
樹 鶇	<i>Dendrocitta formosae</i>		2	1	1	2
繡 眼 畫 眉	<i>Alcippe morrisonia</i>			6		2
朱 鶇	<i>Oriolus traillii</i>					1
黃 頭 鷺	<i>Bubulcus ibis</i>					1
巨 嘴 鴉	<i>Corvus macrorhynchos</i>					1
極 北 柳 鶇	<i>Phylloscopus borealis</i>					1
黃 嘴 角 鶇	<i>Otus spilocephalus</i>					2
	總計	26	24	42	12	62
	備註	施工前		完工後		

表 5：出水溪整治工程兩爬類調查種類與數量清單

物種	學名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
太田樹蛙	<i>Buergeria otai</i>			6	4	6
艾氏樹蛙	<i>Kurixalus eiffingeri</i>	3	2			
赤尾青竹絲	<i>Trimeresurus stejnegeri</i>	1	1	1		2
面天樹蛙	<i>Kurixalus idiotocus</i>	2		5	3	4
莫氏樹蛙	<i>Rhacophorus moltrechti</i>			4	5	
斯文豪氏赤蛙	<i>Odorrana swinhoana</i>	1				3
盤古蟾蜍	<i>Bufo bankorensis</i>	1				
褐樹蛙	<i>Buergeria robusta</i>	3		15	10	5
黑眶蟾蜍	<i>Duttaphrynus melanostictus</i>					2
澤蛙	<i>Fejervarya kawamurai</i>					4
紅耳龜	<i>Trachemys scripta</i>					1
總計		11	3	31	22	27
備註		施工前		完工後		

註：紅耳龜為外來種，可能是放生行為所致。

表 6：出水溪整治工程昆蟲類調查種類與數量清單

物種	學名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
弄蝶科	<i>Hesperiidae</i>		3			
粉蝶科	<i>Pieridae</i>		4			
杜松蜻蛉	<i>Orthetrum sabina</i>				5	1
臺灣紋白蝶	<i>Pieris canidia</i>		2			
白粉蝶	<i>Pieris rapae</i>	1				
罕眉眼蝶	<i>Mycalesis suavolens</i>	1				
密紋波眼蝶	<i>Ypthima multistriata</i>	2		1		
臺灣黃蝶	<i>Eurema blanda arsakia</i>				1	
薄翅蜻蛉	<i>Pantala flavescens</i>				2	
白痣珈蟴	<i>Matrona cyanoptera</i>					1
短腹幽蟴	<i>Euphaea formosa</i>					2
褐翼勾蜓	<i>Chlorogomphus risi</i>					1
斑翼勾蜓	<i>Sinorogomphus suzukii</i>					1
金黃蜻蛉	<i>Orthetrum glaucum</i>					2
霜白蜻蛉	<i>Orthetrum pruinosum</i>					4
鼎脈蜻蛉	<i>Orthetrum triangulare</i>					6
總計		4	9	1	8	18
備註		施工前		完工後		

表 7：出水溪整治工程哺乳類調查種類與數量清單

物 種	學 名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
山 羌	<i>Muntiacus reevesi micrurus</i>	1	2	1		
赤 腹 松 鼠	<i>Callosciurus erythraeus taiwanensis</i>	1		1		
食 蟹 獾	<i>Herpestes urva formosanus</i>	1				1
臺 灣 獼 猴	<i>Macaca cyclopis</i>	2				1
鼬 獾	<i>Melogale moschata subaurantiaca</i>	1				
總 計		6	2	2	0	2
備 註		施 工 前		完 工 後		



⑪ 鼬獾（紅外線相機拍攝）



⑫ 食蟹獾（紅外線相機拍攝）

結果與討論

討論出水溪整治工程施工前後的變化，包含河相、野溪治理工程生態回復追蹤評估指標、魚類相關指數分析，以及利用二維水理模式（CCHE-2D）推估模擬區域的福祿數、水域型態分類、棲地適合度等項目。

河相

出水溪位於羅東溪上游，工區位置河川級序（Stream Order）為2，屬於山區溪流，計算整治工程前後重要的河相因子，以橋為界分成上游、下游2河段，將結果列

於表8，表中並判定其溪流類型（Stream Type），其類型判定係參考USDA（2007）的溪流分類方式。

坡度係利用數值地形推算，施工前的出水溪上游河道坡度5.2%，溪流類型屬於山區溪流「A」型；下游段受防砂壩淤砂影響降低為1%，溪流類型屬於中游溪流類型「C」型。完工後的出水溪上下游河道坡度調整為3.3%、2%，溪流類型皆屬於山區溪流「A」型。

表 8：出水溪施工前後的河相因子

	位置	Stream Types	坡度 (%)	寬深比	水面寬 (m)	底質組成 (優勢)	蜿蜒度
施工前	上游段	A	5.2	<3	6	大漂石	>1.2
	下游段	C	1	>12	7	小漂石	<1.2
完工後	上游段	A	3.3	<3	18	大漂石	>1.2
	下游段	A	2	<3	20	小漂石	<1.2

水面寬為調查時水面寬度平均值，施工前上游河道水面寬 6 公尺，下游 7 公尺。完工後的出水溪河道被打開，上下游水面寬度 18、20 公尺。

施工前上游河道，寬深比小於 3，下游受淤砂影響，河道寬淺化，寬深比大於 12，完工後的出水溪上下游河道，寬深比皆小於 3。上游河道的蜿蜒度（波峰間距除以直線距），河道蜿蜒度多數大於 1.2，屬於中度蜿蜒（Moderate Sinuosity），下游河道蜿蜒度受防砂壩影響小於 1.2，屬於低度蜿蜒。調查底質組成分為六級，分別是大漂石、小漂石、圓石、卵石、礫石、沙，底質（優勢）為穿越線調查的底質組成最大比例者，上游段優勢底質為大漂石。

野溪治理工程生態回復追蹤評估指標

評估出水溪整治工程的「野溪治理工程生態回復追蹤評估指標」，分別說明施工前後

溪流狀態，依指標的 10 項因子進行評估，出水溪施工前指標總分約 149 (74.5%)，完工後（2018 年 10 月）總分約 154 (77%)，評分有提昇（如表 9）。其中河床底質包埋度，施工前河床受下游高壩影響而寬淺化，細砂堆積掩埋原河床底質（評分較低），拱形石梁施工後，已改善此現象。評分降低項目為縱向連結性，因施設拱形石梁後落差 30—40 公分，分數稍降。評分較差的項目有堤岸植生保護、河岸植生帶寬度兩項，受左岸面臨道路影響。

魚類指數分析

1. 多樣性指數

夏儂多樣性指數 H' 計算結果，將施工前後歷次調查的指數作圖，如圖 13 左 Y 軸，圖中 2018_1、2018_2 代表施工前，2019_1、2019_2、2020_1 代表完工後調查，施工前的魚類多樣性指數平均 1.04，施工後為 1.17，施工後多樣性指數略增高。

表 9：出水溪野溪治理工程生態回復追蹤評估指標

評估因子	施工前狀態說明	評分 (施工前)	完工後狀態說明	評分 (完工後)
1. 溪床自然基質多樣性	理想基質超過河道面積約70%、基質穩定且有生物利用。	16	理想基質超過河道面積約70%	16
2. 河床底質包埋度		15		18
3. 流速水深組合	具有4種以上流速／水深組合	17	具有4種以上流速／水深組合（淺流、淺瀨、深潭、深流、岸邊緩流）。	18
4. 湍瀨出現頻率	目視可見河道有連續湍瀨，有巨石、礫石等。	14	目視可見河道有連續湍瀨，有大漂石、小漂石等。	16
5. 河道水流狀態	連續深流、水深超過30公分。	16	連續深流、水深超過30公分，拱形石梁下游有魚窪地（深潭）。	16
6. 堤岸植生保護	具有完整分層植被，但左岸臨路。	右岸 9 左岸 5	具有完整分層植被，右岸施作疊石護岸。	右岸 9 左岸 5
7. 河岸植生帶寬度	右岸植生帶寬超過18公尺，左岸臨路。	右岸 10 左岸 2	右岸植生帶寬超過18公尺，雖經工程擾動，但仍有大片的森林基質。	右岸 10 左岸 2
8. 溪床寬度變化	施工前50公尺（護岸到森林週緣）	15	完工後最大河寬60公尺，約1.2倍。	15
9. 縱向連結性	構造物與溪床落差低於25公分	16	石梁構造物與魚窪地落差25—50公分。	15
10. 橫向連結性	順流左岸為既有護岸，落差超過3公尺；右岸為天然濱溪植被帶，可能是食蟹獾、兩棲爬蟲類、鳥類及昆蟲之活動棲地。	右岸 9 左岸 5	順流左岸既有護岸未更動，右岸設置大型緩坡，使坑溝的動物可以往來於濱溪與森林間。	右岸 9 左岸 5
總分		149		154

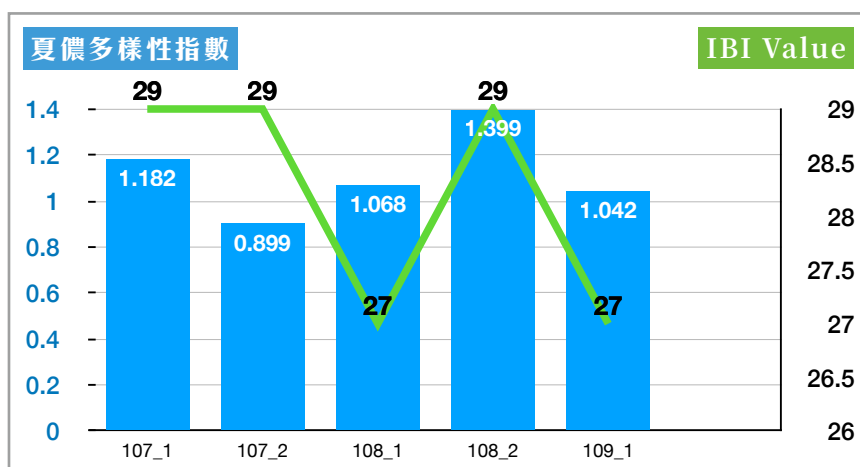
2. 生物整合指標IBI

計算結果發現 IBI 評分範圍為 27—29 (圖⑬右 Y 軸)，顯示樣站施工前後狀態皆屬於輕微受損 (Slightly Impaired) 狀態，施工後的 IBI 平均值略降，其中以完工後第一次調查 IBI 較低，可能因施工擾動尚未回復。

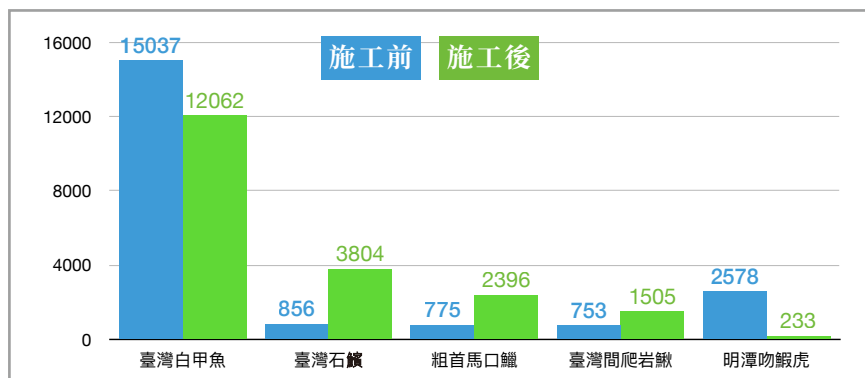
3. 重要值指標 IRI

重要值 IRI，參考胡通哲 (2016) 的計算

方式，係利用魚類捕獲數量加上魚類體重，乘以出現頻度，得重要值。經過計算，各魚種之 IRI 如圖⑭，施工前後重要值最高的物種為臺灣白甲魚，代表在出水溪調查河段，考量魚類數量、魚類重量 (資源量) 及被捕獲 (出現) 頻度等三個因子，綜合的重要值指標，施工前後，臺灣白甲魚 IRI 最高並未被改變，但明潭吻鰕虎重要值排序，由施工前排序 2，轉變為排序 5 (2578 → 233)。



⑬ 出水溪魚類多樣性指數平均值及各樣站的生物整合指標IBI平均值



⑭ 出水溪魚類施工前後重要值變化

魚類體長

過去研究指出深潭深度與魚類個體體長呈正相關 (Harvey and Stewart, 1991)，而大體型個體在生態上意義重大，包括高繁殖力、取食對象更廣，在食物網中的地位更加重要 (Barneche *et al.*, 2018)。根據臺灣魚類資料庫指出，明潭吻鰕虎最大體長為9公分、粗首馬口鱖最大體長為16公分（野外觀察可達20公分以上）、臺灣白甲魚最大體長為45公分、臺灣石鱚最大體長為20公分（據野外觀察可達29公分以上）、臺灣間爬岩鰍最大體長為10公分，顯示出水溪魚體尚未達極限體長。

比較施工前與完工後各魚種最大體長變化 (表 10)，發現粗首馬口鱖、臺灣白甲魚、臺灣石鱚、臺灣間爬岩鰍之完工後最大體長皆較施工前大，推測完工後深潭棲地條件並未劣化。透過食物網，較大魚體的高繁殖力對能量傳遞（植物低品質蛋白質轉為動物高品質蛋白質）與生物量（水域覓食之各種生物，如保育類食蟹獾等）有正向影響。

另以出水溪魚類調查重要值最高的臺灣白甲魚為對象，比較施工前後體長比例變化 (圖⑮)，完工後小型魚類（體長小於6公分），從 25% 變成 33%，較大型魚類（體長大於9公分），從 19% 變成 20%，且完工後有捕獲 18.7 公分的大型成魚，棲地未惡化。

臺灣白甲魚屬於中上層的魚種，而底棲性的臺灣間爬岩鰍（名列臺灣魚類紅皮書 NVU），施工前平均捕獲數量為 4.5 尾／次，完工後為 14.5 尾／次，完工後體長 3—6 公分小型魚類比例增多（78% → 97%），但體長 6—9 公分成魚比例降低（22% → 3%），如圖⑮，推測臺灣間爬岩鰍受施工擾動，但小型臺灣間爬岩鰍仍會日漸成長，需要再觀察。

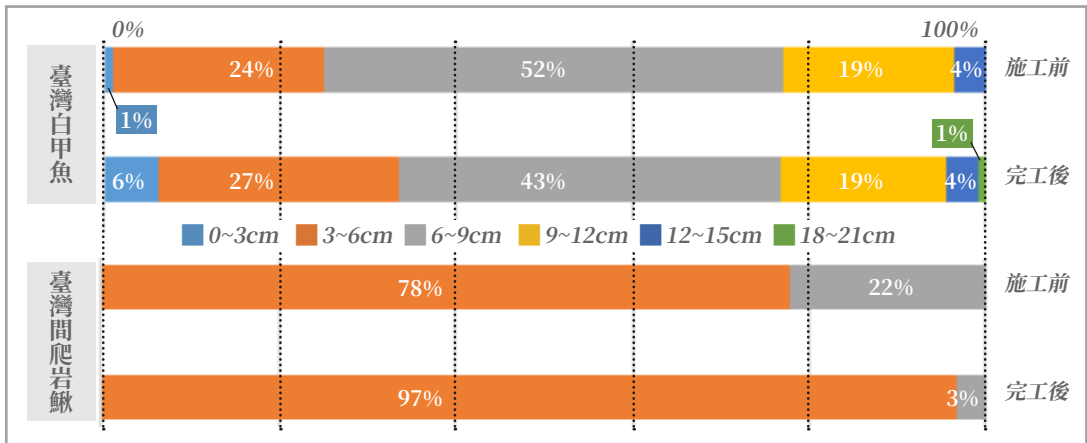
水域型態分類

利用 CCHE-2D 模式計算模擬各網格的流速水深，配合水域型態（深流、淺瀨、淺流、緩流、深潭）的流速水深條件進行高低流量（Q50 流量 173cms、0.3cms）水域型態分類判釋，目的在了解高低流量水域型態分布的差異，並了解高流量（Q50）的水域型態，魚類有無避難空間。

水域型態分類條件，參考河川情勢調查作業要點（水利署 2015 年 1 月版）附表四，設定水域型態（深流）的流速 $\geq 0.3\text{m/sec}$ 、水深 $\geq 0.3\text{m}$ ；水域型態（淺流）的流速 $\geq 0.3\text{m/sec}$ 、水深 $< 0.3\text{m}$ ；水域型態（深潭）的流速 $< 0.3\text{m/sec}$ 、水深 $\geq 0.3\text{m}$ ；水域型態（緩流）的流速 $< 0.3\text{m/sec}$ 、水深 $< 0.3\text{m}$ ，在溪流中，淺瀨的水流撞擊石頭產生水花，通常流速較快，依據經驗設定水域型態（淺瀨）的流速 $\geq 0.9\text{m/sec}$ 、水深 $< 0.3\text{m}$ 。

表 10：出水溪整治工程魚類調查種類與最大體長（公分）

物種	學名	2018 春	2018 秋	2019 夏	2019 秋	2020 夏
明潭吻鰕虎	<i>Rhinogobius candidianus</i>	6.5	7.4	3.8	5	5.7
粗首馬口鱮	<i>Opsariichthys pachycephalus</i>	8.5	11.1	14.3	15.5	12.1
臺灣白甲魚	<i>Onychostoma barbatulum</i>	12.6	12.5	11.7	14.8	18.7
臺灣石鱮	<i>Acrossocheilus paradoxus</i>	8.7	6.3	13.6	10.5	12.6
臺灣間爬岩鰍	<i>Hemimyzon formosanus</i>	6.4	5.1	4.9	6.2	7.4
備註		施工前		完工後		



⑮ 出水溪臺灣白甲魚及臺灣間爬岩鰍施工前後體長比例變化

1. 出水溪施工前（2018年）

區分低流量與高流量（流量0.3cms、173cms）下的水域型態，ArcGIS套疊底圖繪製水域棲地型態。

施工前流量0.3cms流場，水域型態空間分布如圖⑯左；施工前流量173cms流場，水域型態空間分布如圖⑯右。在低流量，以緩、潭占多數，但淺流、淺瀨等水域型態具有相當比例數，具有水域棲地多

樣性，但在Q50情形，河道多數轉變為深流，此時水生物將採取躲避行為，濱溪植被相對地重要。

2. 出水溪完工後（2019年）

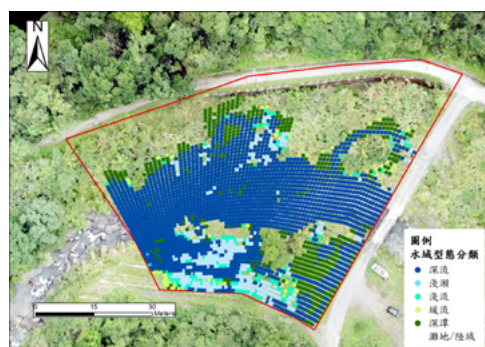
完工後流量0.3cms流場，水域型態空間分布如圖⑰左；完工後流量173cms，水域型態空間分布如圖⑰右，水位未漫淹到左岸道路，但抵近右岸濱溪植物帶，右岸中間保留的樹島，未受溢淹。

低流量下，各種水域型態（淺流、淺瀨、深潭、緩流、深流）皆有相當比例，具有水域棲地多樣性，但在高流量下，轉變為深流為主的水域型態。低流量的水域型態多樣性指數（夏儂），施工前多樣性較低（0.355），完工後多樣性提高（0.552）。

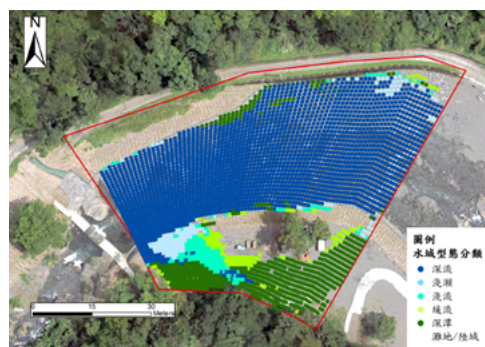
適合棲息區域（以福祿數評估）

Yu and Peters (1997) 提出不同魚類會選擇不同的棲地，而可以採福祿數（Froude Number）進行區分。

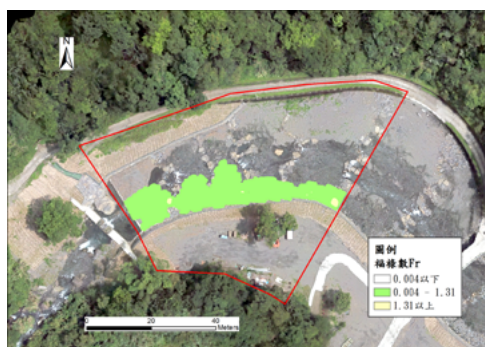
基於此概念，以出水溪調查的魚種之流



⑯ 施工前各型水域型態空間分布。左 $Q=0.3\text{cms}$ 、右 $Q=173\text{cms}$ 。



⑰ 施工後各型水域型態空間分布。左 $Q=0.3\text{cms}$ 、右 $Q=173\text{cms}$ 。



⑱ 福祿數適合區空間分布， $Q=0.3\text{cms}$ 。左為2018年，右為2019年。

表 11：各魚類對應水深流速及福祿數

物種	V_min	V_max	D_min	D_max	Fr_min	Fr_max
臺灣石鱚	0.01	1.3	0.1	0.7	0.004	1.31
明潭吻鰕虎	0.01	1.3	0.1	0.6	0.004	1.31
臺灣白甲魚	0.01	1	0.1	0.5	0.005	1.01
臺灣間爬岩鰍	0.01	1.2	0.1	0.6	0.004	1.21
粗首馬口鱮	0.01	1.2	0.1	0.6	0.004	1.21

速水深上下限，推估其適合的福祿數區間，進而將模擬區域分為適合與不適合 (Unsuitable) 兩部分，藉以量化計畫區內的魚類可能分布範圍。出水溪魚種的最大容許流速 Vmax、水深 Dmax 參考水利規劃試驗所「河川環境資訊平台 - 指標魚種棲地適合度曲線」(<https://ire-123.wrap.gov.tw/>) 之資料最大值，例如臺灣白甲魚的最大容許流速，參考其調查的資料最大值。

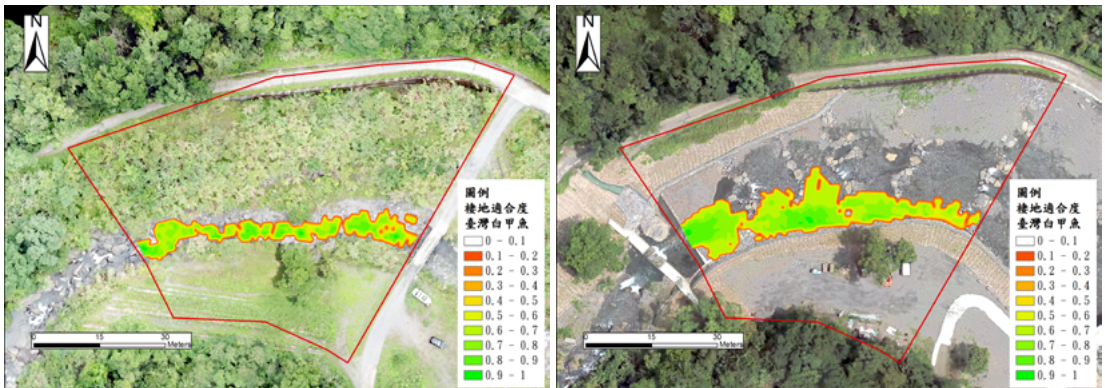
另外過低的水深將造成魚類游泳腹鰭摩擦底部，屬於不適合的棲地範圍，因此中村 (1996) 對於魚道水域最小水深建議標準為魚類體高 2 倍，另外美國魚類及野生動物管理局亦建議至少維持 2 倍的體高，在應用上採取較大的 10 公分為魚類可使用最小水深 (Nakagawa and Koike, 1999)。

將流速水深上下限值，計算相對應的福祿數 Fr (式1)，福祿數最小值 0.004，最大值 1.31。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (1)$$

式中：V 為流速 (m/sec)；D 為水深 (m)；g 為重力加速度 (9.81m/sec²)。將水理模式 CCHE-2D 計算流量 Q=0.3cms (2019/6/23 實測流量) 的格點福祿數，套繪至出水溪模擬範圍，以自然鄰近法進行空間內插。出水溪調查的魚種，福祿數適合區間 0.004—1.31，計算出水溪工程前後其空間分布與流場面積占比，適合 (Suitable) 與不適合 (Unsuitable) 空間分布如圖⑱。

其中，福祿數小於 0.004 及大於 1.31，屬於不適合部分，福祿數介於 0.004—1.31 區間，視為屬適合魚類棲息的部分，計算 2018 年未施工適合面積占比為 8.6% (331.6 平方公尺)，2019 年適合部分面積占比為 14.2% (549.1 平方公尺)，魚類適合面積占比提高。



⑱ 施工前（左）及完工後（右）的棲地適合度分布圖對比

棲地適合度分析

利用前述二維 CCHE-2D 模擬結果，再利用計算的流速水深，配合出水溪常見的臺灣白甲魚之水深適合度 (S_d)、流速適合度 (S_v)、底質適合度 (S_s)，其中魚類適合度參考水利規劃試驗所「河川環境資訊平臺—指標魚種棲地適合度曲線」(<https://ire-123.wrap.gov.tw>) 之魚類資料。參考陳淑媛等 (2019) 計算出水溪魚類的棲地適合度 HSI (Habitat Suitability Index)，再利用 ArcGIS 空間模組的自然相鄰內插法 (Natural Neighbor) 進行空間內插分析，繪製臺灣白甲魚的棲地適合度 HSI 空間分布圖，以瞭解其適合度分布。

棲地適合度 HSI 為水深適合度 (S_d)、流速適合度 (S_v)、底質適合度 (S_s) 三者相乘後開立方根，如式(2)：

$$HSI = \sqrt[3]{S_d S_v S_s} \quad (2)$$

以低流量0.3cms，目標魚種採重要值最

高的臺灣白甲魚，計算施工前完工後魚類棲地適合度空間分布，如圖⑱。計算2處低流量棲地適合度 (HSI) ≥ 0.8 所占面積相對於流場的面積比例，分別為0.9%、1.8%，以完工後占比較高。計算2處低流量棲地適合度 ≥ 0.6 面積相對於流場的面積比例，分別為3.9%、8.6%。完工後的魚類棲地適合度，面積占比較大。

可能的生態課題

出水溪施工前，有多次觀察到食蟹獾往來於溪流與森林間，當時對此生態課題就特別加以關注，完工後再度發現食蟹獾，橫向生物通道並未受損。而完工後觀察到的保育類物種，珍貴稀有鳥類有黃嘴角鴉、大冠鷲，其他應予保育鳥類有白耳畫眉、鉛色水鶉、臺灣山鷓鴣，其中黃嘴角鴉與鉛色水鶉為完工後新增調查到的物種。出水溪施工前後魚種沒有變化，名列紅皮書的魚類臺灣間爬岩鰍 (NVU，國家易危)，族群體型變小，需要持續關注。食蟹獾為其他應予保育動物，

施工前後均有觀測紀錄。

縱向生物通道，有拍攝到臺灣白甲魚從拱形石梁的輪石間瀨區躍過，橫向生物通道，出水溪大緩坡處完工後有發現食蟹獾、山羌、臺灣獼猴等動物出沒。外來種紅耳龜是完工後才出現的物種，為強勢外來種，有可能是宗教放生的物種，需要防範後續的放生行為。

結論與建議

- 一、出水溪整治工程以拱型石梁、大緩坡（生物通道）施作完工後，大致上，水陸域生物豐度並無惡化趨勢。
- 二、以最大魚體體長評估水域生態功能，完工後深潭棲地條件尚可，其中臺灣白甲魚成魚（體長超過9公分），比例增加為20%，並未惡化，而各種魚類體長尚未達極限體長，有發展空間。
- 三、採用施工前後空拍數值地形，進行水理模式（CCHE-2D）模擬，顯示施工後的低流量下的適合棲息區域（福祿數推算）、水域型態多樣性指數、魚類的棲地適合度，朝正向發展。以魚類棲地適合度分析方式，完工後的魚類棲地適合度，面積占比相較於施工前較大。

四、黃嘴角鴉與鉛色水鵝為出水溪完工後新增調查到的保育類物種，名列紅皮書的臺灣間爬岩鰍（NVU），需持續關注。

五、出水溪整治工程完工後發現外來種紅耳龜，為施工前沒有紀錄的物種，是否因為民眾覺得溪流環境很自然，因此帶來放生，其行為可能持續，建議勸導後續的放生行為。

六、經過2019年、2020年數次豪雨侵襲後，拱型石梁結構尚在，顯示石梁具備一定抗洪能力。但是施工時以「就地取材」原則在河床翻找石頭（力石），對於底棲大型無脊椎生物的重新進駐，需要時間。而且將出水溪護甲層內大漂石、小漂石等級以上的底質幾乎取光，只剩砂、卵礫石等底質，拱形石梁輪石底部的承載力不足，開始產生掏刷，而輪石採用漿砌固結，無法隨著河床局部下陷而下移，產生間隙，為需要注意之處。建議塊石就地取材原則應採因地制宜方式加以檢視，例如改以3（現採）：7（外購）比例方式使用塊石，或是以FRP仿石開模灌鑄方式，為力石所用。🏠