

塊石堆砌工設置方式對淺水域魚類棲地 品質改善評估

Improvement Performance for Fish Habitat of Fresh Water Creek with Variant Configurations of Riprap Works

社團法人
台灣濕地學會
研究員

施上粟*

Shang-Shu Shih

國立台灣大學
土木工程學系
碩士

莊詔傑

Chau-Chei Chung

國立台灣大學
土木工程學系
博士生

邱鵬豪

Pon-Hao Chiu

國立台灣大學
土木工程學系
教授

李鴻源

Hong-Yuan Lee

摘 要

本文以淺水域河流型態的台北市內湖內溝溪為研究案例，同時採用水槽試驗及水平二維水理模式 TABS-2，量化分析設置塊石堆砌工前後之流況變異，及對魚類利用棲息地的改善效果。水理條件設定成福祿數 0.42 及 0.61 兩種、塊石堆砌設置方式分成單組及雙組兩類、魚類則針對鯉科(游泳性魚類)及平鰭鰍科(攀爬性魚類)兩種不同移動模式的魚種。本區原始流況較適合平鰭鰍科魚類，設置塊石工後，則以鯉科魚類的棲地品質改善效益較顯著。在福祿數為 0.42 的情況下，設置塊石工法均導致棲地多樣性上升、魚類可用棲地面積下降；在福祿數為 0.61 的情況下，設置塊石工後棲地多樣性均上升、鯉科可用棲地面積增加、平鰭鰍科可用棲地面積則下降；此結果顯示塊石堆砌工的設置對棲地多樣性的提升有較顯著而一致的效果。在工法間距的安排上，無論是單組或雙組塊石配置，間距加大均有助於魚類可用棲地面積增加、棲地多樣性上升，最佳工法間距為 2~2.5 倍河寬，故建議現場施作的間距可控制在 2.5 倍河寬左右。本文研究結果可補強現場施做塊石堆砌工的理論強度，並釐清塊石堆砌工的生態效益，對現地生態工法的設計及應用應能提供實質的幫助。

關鍵詞：塊石堆砌工，魚類棲地，棲地多樣性，水工模型，數值模式。

*通訊作者，社團法人台灣濕地學會 研究員，33069 桃園市建國路 61 巷 13 號 5 樓之 2，uptreeshih@gmail.com

ABSTRACT

A flume experiment and a horizontal 2D model, TABS-2, were examined to evaluate the hydraulic characteristics of Nei-Go Stream in Northern Taiwan. The simulated water depth and velocity magnitude were employed to calculate both percentage usable area (PUA) for fish and Shannon-Weaver diversity index (SHDI) for habitat type. In addition, by selecting *Cyprinidae* and *Homalopteridae* fishes as the indicator species, habitat improvement performance with and without riprap works were investigated. Due to occupation of ripraps in riverine, the fish habitat area decreases under low Froude number ($Fr = 0.42$) situations. Meanwhile when Fr is equal to 0.61 installing riprap works can decline *Cyprinidae*'s habitat area but rise *Homalopteridae*'s ones. All cases reveal that habitat diversity is getting higher after constructing riprap works. Besides, we found out that the optimum distance between two ripraps set is about 2-2.5 times of river width.

Keywords: Riprap works, Fish habitat, Habitat diversity, Flume experiment, Numerical model.

一、緒 論

過去台灣的河川治理多著重於維護人類生命財產及安全，這類構造物是以人類觀點進行設計建造，對於生態系統常產生劇烈的影響但又缺乏完整的評估，台灣在生態工法推動多年後，已逐漸瞭解到環境共生的重要性及必要性。

國內外許多研究均證明生態工法在改善魚類棲地的貢獻(施上粟等, 2008; 吳瑞賢與溫博文, 2005; 施上粟等, 2004; Shih *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2004; Mitsch, 1998); 針對棲地的優劣評估, 則主要有魚類棲地面積法(于錫亮, 1997; Wu and Wang, 2002; Yu and Peters, 1997; Shih *et al.*, 2008)及棲地多樣性法(Azzellino and Vismara, 2001; Jowett, 1993; Hawkins *et al.*, 1993)兩者, 均可作為評估參考; 另有許多研究指出多樣性的棲地環境有助於提昇魚類棲地品質(Inoue and Nunokawa, 2002; Smith, 1998; Rakocinski, 1988; Gorman and Karr, 1978), 這是因為不同的魚種及不同時期的魚類需要不同類型的棲地。

塊石堆砌工法因其能形成低水流路蜿蜒化的效果, 以營造河川棲地的多樣性, 並於洪氾時提供相對緩流區以供魚類躲避之用, 而常被應用

在生態工法施做上(Shih, *et al.*, 2009)。

然國內大部分的溪流塊石堆砌工法, 往往都是依經驗法則施作, 較無相關理論支持, 在改善效益上往往缺乏量化評估依據。且近年來國內大力推動各項河川生態工法, 但研究多著重於定性探討及現場施作, 而較少對於其生態意涵進行物理模型及數學模型之探討, 且數值模擬時所需之相關參數(如曼寧 n 、渦流黏滯係數等)亦常有決定上之困擾。

因此本文採用實驗水槽模擬內溝溪塊石堆砌工法後的流況, 並配合水平二維水理模式 TABS-2 模擬塊石堆砌工法設置前後河道水理特性的變化, 將水槽試驗結果與 TABS-2 模擬結果進行比對, 確定 TABS-2 模式之各項參數。再利用以上的結果, 探討不同塊石堆砌工配置方式對魚類可用棲地面積與棲地多樣性的關連性, 以量化生態工法成效。

二、研究材料及方法

2.1 研究地點

台北市內湖區內溝溪位於內湖、汐止交界處, 為基隆河的支流之一, 全長約 7 公里。過去曾採用護岸塊石堆砌工法以營造多樣化水域及

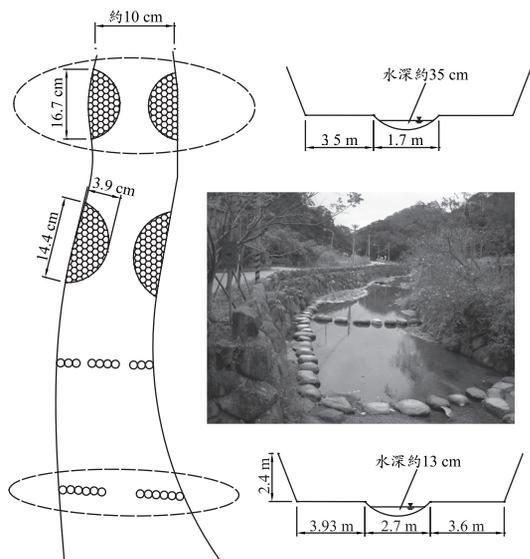


圖 1 內溝溪現場照片及工法相關尺寸示意圖

蜿蜒流路(如圖 1)，內溝溪於 2000 年進行生態及防洪整治後獲得不錯的成效，當地社區亦成立「內溝溪生態展示館」，有義工負責對遊客解說當地生態環境及內溝溪整治史。經濟部水利規劃試驗所曾於本區調查發現台灣細鯿(鯉科)及齊氏石鮒(鯉科)等台灣特有種魚類及吳郭魚等外來種魚類(經濟部水利署水利規劃試驗所，2006)。

2.2 研究方法

本文之研究方法是兼採水槽試驗(物理模型)及數值模擬(數學模型)方式重現內溝溪流況，並加入本文設計的預案進行模擬分析，預案模擬結果再進行魚類可用棲地面積及棲地多樣性指數計算，研究流程如圖 2 所示。

2.2.1 水槽試驗

水槽試驗係於國立台灣大學水工所雷射精密實驗室的循環水槽內進行。循環水槽之總長為 12 m，寬度為 0.3 m，其中在上游入流處安裝了一道蜂巢管牆(Honeycomb)，以有效消除水體中不同尺度之漩渦。實驗觀察段設置於距上游入流口約 6 m 處，以期實驗段能夠有足夠的空間讓水流達到完全發展(Fully-developed flow)，如圖 3。

為表現內溝溪塊石堆砌工法的施作現場，

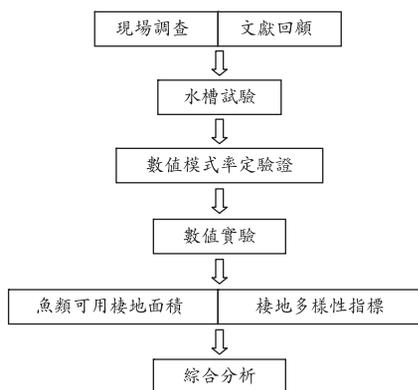


圖 2 研究流程圖

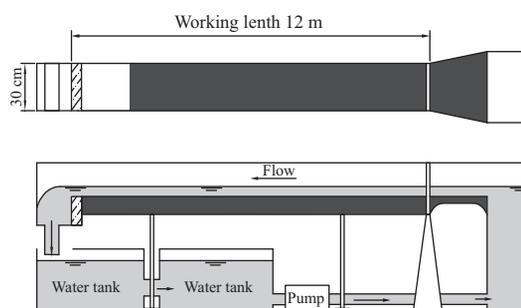


圖 3 實驗水槽示意圖

必須選擇較具代表性的渠道，同時又要兼顧實驗的水理狀況較符合現場，因此選用不等比模型以達到實驗目的，不等比模型假設以下兩個條件：(1)忽略黏滯力效應，因此動力相似以福祿數相似為主；(2)忽略垂向加速效應，因此動量方程式壓力項可視為靜水壓。

經由因次分析發現福祿數為控制實驗之主要變數，符合明渠流重力傳輸之原理。因而根據動力相似的原理，採用實驗與原型福祿數相等的模型縮比理論，可得到模型比尺關係如下表 1 所示。

另外，實驗流況必須與現場相似，而現場河流大多為完全紊流流況(Fully turbulent)，因此必須控制實驗室水槽流況以滿足此條件。依據 Moody diagram (Henderson, 1966)，以雷諾數 $Re = 3 \times 10^4$ ，水力半徑 $R = 0.032$ ，可計算得到粗糙高度 $Ks \approx 4.2$ mm，複算後發現實驗流速必須大於 0.24 m/s；此時流況為完全紊流(Fully turbulent)。

表 1 水槽試驗之模型比尺關係

模型比例	水深 Hr	時間 Tr	流速 Vr	流量 Qr	粗糙係數 Nr
關係式	1/y	y ^{1/2} /x	1/y ^{1/2}	1/xy ^{3/2}	Manning's equation
比例	1/10	1/9.49	1/3.16	1/948.68	1/1.63

x：原型與模型水平比為 30；y：原型與模型垂直比為 10

表 2 水槽試驗之來流水理條件

實驗參數	Fr = 0.42	Fr = 0.61
坡度	0.0026	0.0054
流量	3.12 l/s	4.55 l/s
流速	0.26 m/s	0.38 m/s
水深	0.04 m	0.04 m



圖 4 塊石堆砌工模型式樣

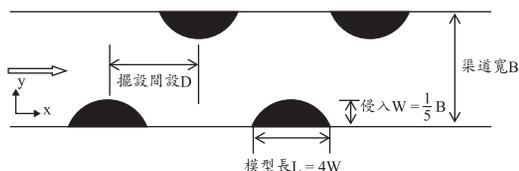


圖 5 水槽試驗塊石工法配置上視圖

配合前述滿足完全紊流之流況，本研究設計了兩組福祿數，實驗水理條件如表 2 所示。

考量需滿足前述粗糙高度要求，水槽底床鋪設建築工程用的洗石子石頭，並經過六號篩(#6, 3.25 mm)篩選，確保粒徑在 3.25 mm~7 mm 之間。佈置糙度段的長度為 8.5 m，並預留約 6 m 作為糙度發展及整流段，實驗觀察段長度約 3.2 m。

塊石堆砌工模型製作上，以不考慮透水性的情況下，採用混凝土澆灌出長 24 公分、寬 6 公分(約 1/5 渠道寬)、高 6 公分之塊石模型，並依實驗條件配置於水槽上，如圖 4、圖 5 所示。並以顆粒追蹤法(Particle Tracking Velocimetry; PTV)，量測各種塊石佈置情形的表面流速及水深，如圖 6 所示。

2.2.2 數值模擬

數值模擬採用水平二維 TABS-2 模式(US Army Corps of Engineers, 1997)。TABS-2 模式為美國陸軍工兵團水道實驗站(U.S. Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, WES)所發展的深度平均二維變量流水理、水質及輸砂模式。適用於河川、港灣及河口等寬淺水域的模擬，能夠表現出水平方向物理量。TABS-2 模式採用有限元素法中葛樂金之權重殘差法(Weighted residuals method)之 Galerkin 法運算，

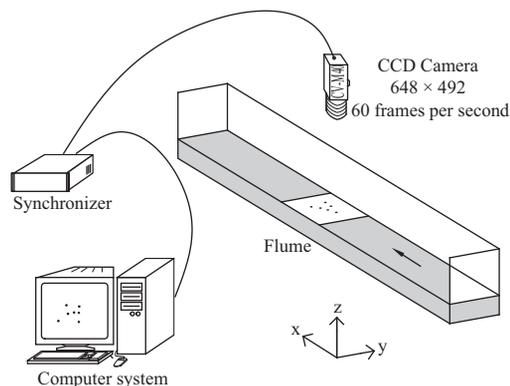


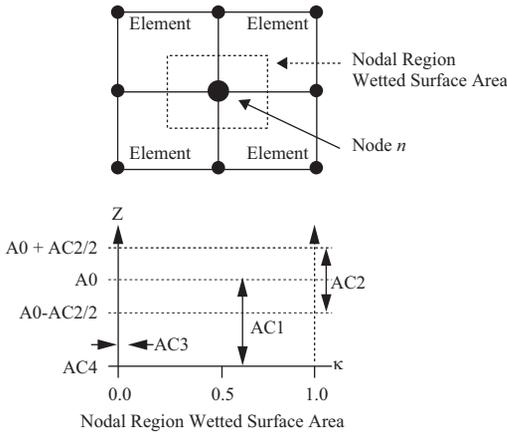
圖 6 應用 PTV 方法量測表面流場之實驗佈置

即可推導得元素矩陣，並配合給定之邊界條件，即可構成全域格網聯立方程式，並據以求得各節點之水深及流速。

模式控制方程式說明如下：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial(hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \right) + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \dots\dots\dots (2)$$



Where:

- A0** = average nodal area bed elevation ('z' value from GFGEN GNN Card). **A0** is the mean land elevation in the vicinity of node **n**.
- AC1** = distance from **A0** to minimum regional bed elevation.
- AC2** = transition range of the distribution.
- AC3** = minimum wetted area of the distribution.
- AC4** = minimum regional bed elevation.

圖 7 TABS-2 乾濕網格處理機制示意圖

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \right) + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

其中，

- u**、**v**：水平方向及垂直方向之流速；
- x**、**y**、**t**：**x**、**y** 座標值及時間；
- ρ**：流體密度；
- g**：重力加速度；
- a**：底床高程；
- h**：水深；
- τ_x**、**τ_y**：各種剪應力(包含底床摩擦力、風力、科氏力等)之總和在 **x** 方向及 **y** 方向上之分量。

另外，TABS-2 模式可進行乾網格(dry element)演算，對本研究於常流演算穩定性有極大幫助。有兩種設定方式可進行乾網格演算：「Wet/dry element check」的設定功能比較單純，主要目的在簡化矩陣演算的大小，若水位值低於

表 3 數值實驗代號及說明

入流之水理條件		塊石堆置方式
Fr = 0.42	Fr = 0.61	
數值實驗代號		
f1	f2	未有任何設施
f1S1	f2S1	單組工法、單側
f1S2-0B	f2S2-0B	單組工法、二側(D=0)
f1S2-1/2B	f2S2-1/2B	單組工法、二側(D=0.5B)
f1S2-1B	f2S2-1B	單組工法、二側(D=1B)
f1S2-3/2B	f2S2-3/2B	單組工法、二側(D=1.5B)
f1S2-2B	f2S2-2B	單組工法、二側(D=2B)
f1S2-5/2B	f2S2-5/2B	單組工法、二側(D=2.5B)
f1S4-1B	f2S4-1B	雙組工法、二側(D=1B)
f1S4-3/2B	f2S4-3/2B	雙組工法、二側(D=1.5B)
f1S4-2B	f2S4-2B	雙組工法、二側(D=2B)

「dry depth」則假設該網格點屬於無水區域，若水位值高過「active depth」，則該網格點重新進入矩陣演算中，如圖 7 所示。

TABS-2 模式模擬區域配合實驗原型(prototype)為長 90 公尺、寬 9 公尺之河段，有限元素網格尺寸為 0.3 公尺×0.3 公尺，全區共 9,000 個網格。水槽試驗結果供作數值模式率定及驗證之用，一旦數值模式通過驗證後，即可進行後續的數值實驗。數值實驗共設計 22 組，相關之實驗設計條件整理如表 3。

2.2.3 魚類可用棲地面積

魚類棲地面積採用權重可用面積法(Weighted usable area; WUA)，鯉科及平鰭鱖科魚類的水深及流速適合度曲線採用胡通哲與葉明峰(2002)的調查資料。而 WUA 及 PUA (percentage usable area)的計算式如下：

$$WUA = \sum_i [f(V_i) \times f(D_i) \times A_i] \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$PUA = WUA/A \quad \dots\dots\dots(5)$$

其中，**f(V_i)**：在河道中編號 **i** 網格之流速適合度值；**f(D_i)**：在河道中編號 **i** 網格之水深適合度值；**A_i**：網格面積。

2.2.4 棲地多樣性指數

對魚類而言，河川中不同的水域型態，可以提供河川中不同的棲息環境，而水域型態又

表 4 水域型態分類標準[19]

水域型態	深潭 (Pool)	深流 (Run)	淺瀨 (Riffle)
福祿數	<0.18	0.18~0.41	>0.41

與河川水利特性(如水量、流速)、河道特性(深度、坡度、底質)及人為工程有密切的關係(汪靜明, 2000)。本文根據 Jowett (1993)之標準將水域型態分成深潭(Pool)、深流(Run)、淺瀨(Riffles)三類, 上述三類水域型態可依福祿數值加以區分(如表 4)。

另外, 水域型態分類完成後必須進行型態多樣性的分析, 本文採用 Shannon Weaver diversity index (SHDI)多樣性指數(Shannon and Weaver, 1949), 此指數為量測一地區之棲地組成類型, 其值越高代表棲地越多樣(Odum and Barrett, 2005)。

$$SHDI = -\sum_{i=1}^m P_i \times \ln(P_i) \dots\dots\dots (6)$$

上式的 P_i 為第 i 種棲地類型所佔的比例, m 為棲地類型總數。當棲地類型為平均分配時(即 $P_i = 1/m$ 時), SHDI 有極大值 $\ln(m)$; 反之若只有一種棲地類型($m = 1, P_i = 1$), 則 $SHDI = 0$, 即無棲地多樣性可言。

三、結果與討論

3.1 數值模式率定驗證

因研究區屬緩流淺水河川, 故渦流黏滯係數(eddy viscosity)採用 TABS-2 使用手冊之建議值: $250 \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$ 。

另以實驗測得之水深與數值模式計算出之水深做比較, 以兩場不同水理流況進行比對(如下圖 8 及圖 9), 並調整數值模式的曼寧 n 值使水深

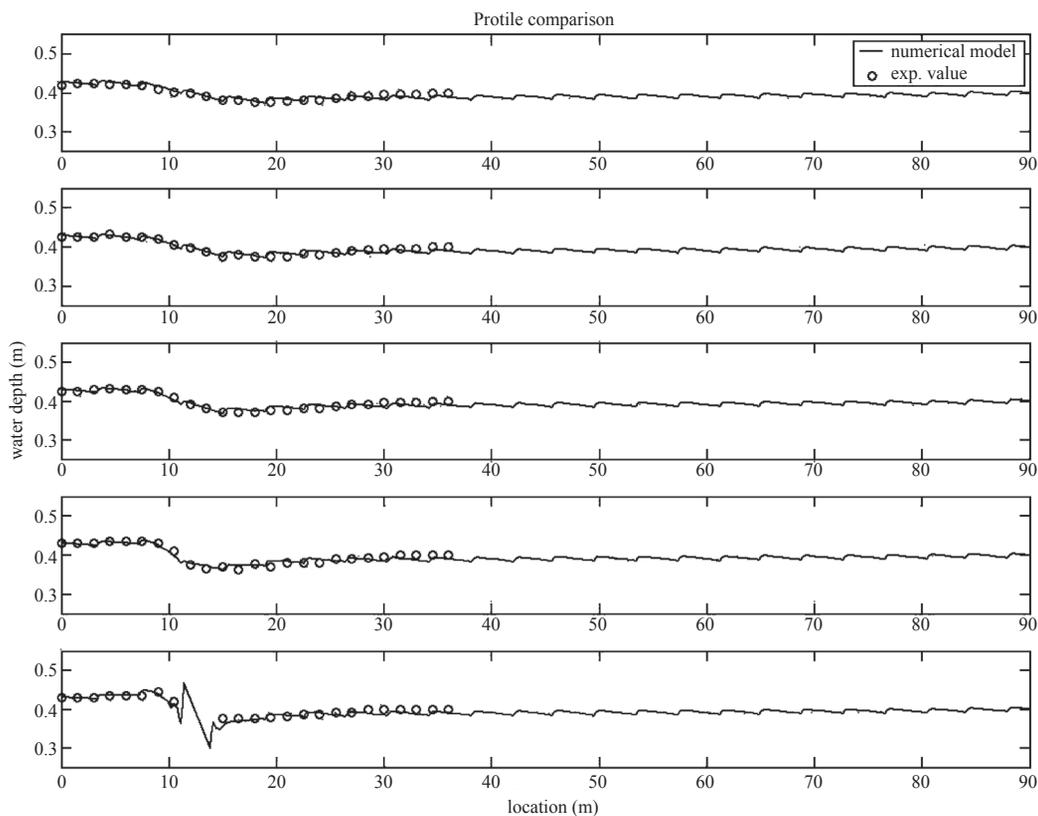


圖 8 TABS-2 模式水位率定結果

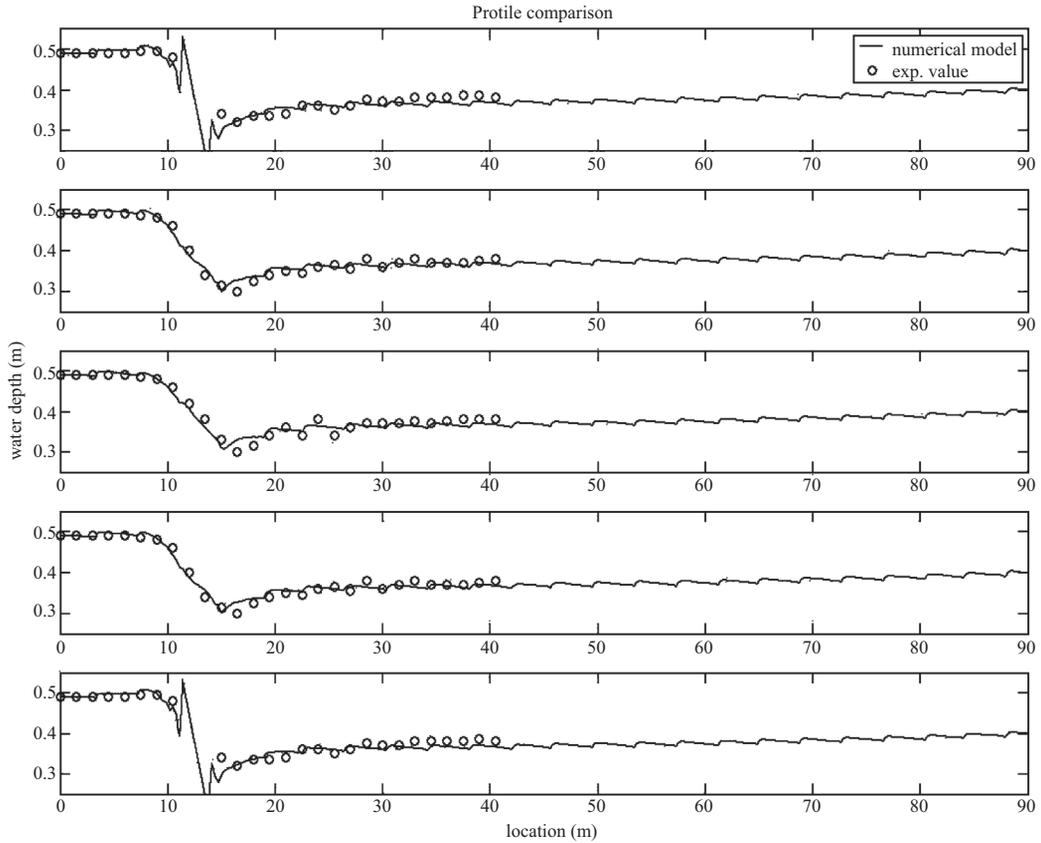


圖 9 TABS-2 模式水位驗證結果

的平均誤差最小(相對誤差低於 5%)，結果發現數值模擬結果與水槽試驗結果相當吻合。獲得率定、驗證後之曼寧 n 值：0.028~0.033，平均值為 0.032。由於希望釐清在各種不同塊石工法佈置下，對魚類棲地之影響，實驗設計上先由單側堆置塊石的流況開始，並比較二岸塊石堆砌的結果；而二岸同時堆置的情形中，由堆置在同一河段逐漸延伸至交錯 2.5 倍河寬的情形，並比較其 PUA 與 SHDI 之差異。

3.2 單組工法佈置

3.2.1 $Fr = 0.42$

圖 10(a)~10(d)分別表示來流條件 $Fr = 0.42$ 時，二側堆置塊石間距 $D = 1\sim 2.5B$ 的福祿數分布情形。結果發現隨著 D 的增加，急流區逐漸擴大，並且產生分離的現象，當距離增加到 2.5B

時，急流區已經一分為二。就棲地變化而言，隨著 D 的增加，淺瀨這種棲地類型逐漸分開，深流棲地逐漸靠近進而連續，深潭的比例則隨著 D 的增加而上升。

表 5 為 $Fr = 0.42$ 時不同工法配置下各魚類之 PUA 總表，並放入未有任何工法之原始流況做為比對的基準。放置工法後 PUA 都是下降，然而下降幅度並不大，而以二岸設置塊石結構物的情況下可得到，當間距越大，PUA 均會隨之上升，然而以平鰭鰍科而言在 1.5 倍河寬間距時趨勢已穩定，而鯉科在 2.5 倍河寬間距雖有微微上揚，然而也幾乎趨於穩定。

另外，SHDI 的計算結果如表 6 所示。可發現擺放工法後 SHDI 值隨著工法間距增加而上升，表示工法可增加棲地多樣性，比照未設置任何工法前絲毫沒有棲地多樣性的結果，發現設置

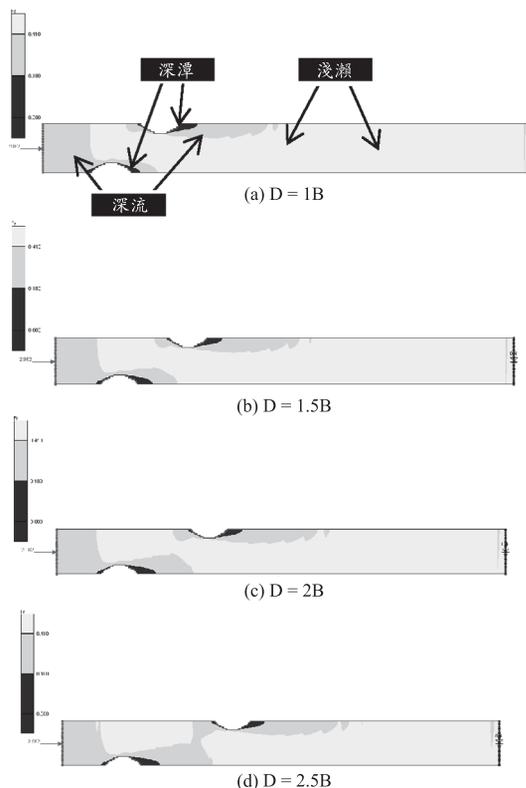


圖 10 單組塊石工法不同間距的福祿數及棲地類型分布($Fr = 0.42$)

塊石工法後使得三種棲地類型之間面積比例較為平均。

3.2.2 $Fr = 0.61$

圖 11(a)~11(d)分別表示來流條件為 $Fr = 0.61$ 時，二側堆置塊石間距 $D = 1\sim 2.5B$ 的福祿數分布，與低福祿數時相仿，隨著 D 的增加，急流區逐漸擴大及分離現象，而最大流速也呈遞減之情形。就棲地變化而言，隨著 D 的增加，原本大部分為淺瀨的棲地分布，逐漸增加深流的棲地面積，同時深潭的比例也跟著增加。

在 $Fr = 0.61$ 的情況下鯉科魚類 PUA 放置工法後適合度均比沒放工法為高(表 7)，但適合度值均偏低，平鰭鰍科呈現與 $Fr = 0.42$ 時相似的趨勢，且因是處於相對較高的福祿數(反應急流)，故棲地面積均比 $Fr = 0.42$ 時小。

由表 8 的 SHDI 計算結果可發現，二側 $D = 0$ 與 $D = 0.5B$ 這兩組多樣性不規則的提高，原因在

表 5 $Fr = 0.42$ 時不同配置工法與各魚種棲地面積之關係(單組工法)

代號	魚種(科)	PUA (%)
f1	鯉科	23.8
	平鰭鰍科	97.64
f1S1	鯉科	21.16
	平鰭鰍科	89.8
f1S2-0B	鯉科	17.4
	平鰭鰍科	79.8
f1S2-1/2B	鯉科	18.4
	平鰭鰍科	81.7
f1S2-1B	鯉科	18.8
	平鰭鰍科	83.5
f1S2-3/2B	鯉科	19.4
	平鰭鰍科	84.0
f1S2-2B	鯉科	19.8
	平鰭鰍科	83.9
f1S2-5/2B	鯉科	20.2
	平鰭鰍科	83.8

表 6 $Fr = 0.42$ 時不同配置工法與棲地多樣性指標之關係(單組工法)

代號	棲地類型	棲地多樣性	
		各棲地所佔比例(%)	SHDI
f1	深潭	0	0.00
	深流	0	
	淺瀨	100	
f1S1	深潭	0.67	0.44
	深流	16.33	
	淺瀨	83.00	
f1S2-0B	深潭	0.80	0.40
	深流	13.57	
	淺瀨	85.63	
f1S2-1/2B	深潭	0.96	0.46
	深流	16.72	
	淺瀨	82.32	
f1S2-1B	深潭	1.10	0.47
	深流	17.11	
	淺瀨	81.79	
f1S2-3/2B	深潭	1.38	0.51
	深流	19.11	
	淺瀨	79.51	
f1S2-2B	深潭	1.52	0.54
	深流	21.56	
	淺瀨	76.92	
f1S2-5/2B	深潭	1.53	0.58
	深流	25.11	
	淺瀨	73.35	

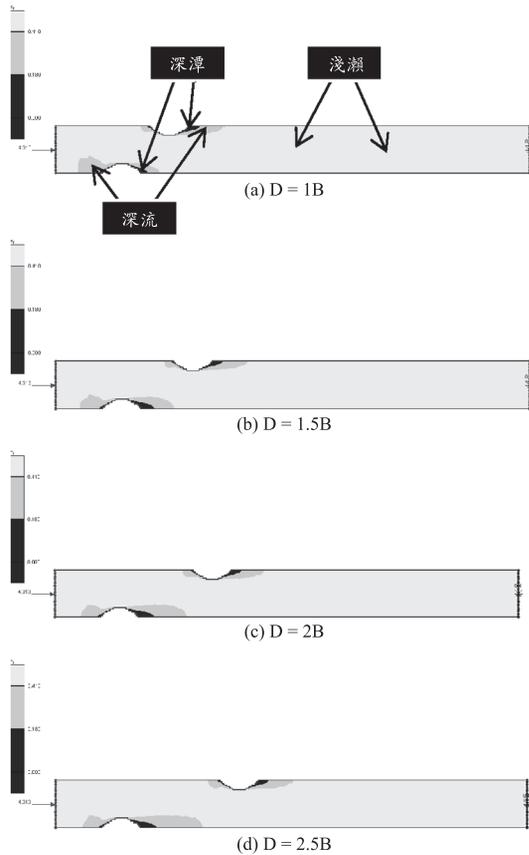


圖 11 單組塊石工法不同間距的福祿數及棲地類型分布(Fr = 0.61)

於這兩組設置方式會造成較劇烈的上游水位湧升現象，因此上游增加較多的深流類型棲地，造成棲地面積分配較平均，SHDI 值也就比較高，但實際施作時，應防範因束縮河道造成的沖刷現象。

3.3 雙組工法佈置

另以序列的方式在二岸各設置二處塊石堆砌工法(雙組工法)，序列交錯的間距由 1 倍、1.5 倍至 2 倍河寬。

3.3.1 Fr = 0.42

圖 12(a)~12(d)表示來流條件為 Fr = 0.42 時，雙組塊石工法的福祿數分佈。當 D = 1B 時，棲地分布因為上游水位湧升而呈現深流棲地類型，淺瀨這種棲地類型在主流加速段呈現帶狀分布。

表 7 Fr = 0.61 時不同配置工法與各魚種棲地面積之關係(單組工法)

代號	魚種(科)	PUA (%)
f2	鯉科	4.00
	平鰭鯪科	69.4
f2S1	鯉科	4.50
	平鰭鯪科	61.4
f2S2-0B	鯉科	4.30
	平鰭鯪科	58.7
f2S2-1/2B	鯉科	4.70
	平鰭鯪科	53.8
f2S2-1B	鯉科	4.90
	平鰭鯪科	58.2
f2S2-3/2B	鯉科	5.30
	平鰭鯪科	59.4
f2S2-2B	鯉科	5.50
	平鰭鯪科	59.5
f2S2-5/2B	鯉科	5.80
	平鰭鯪科	60.5

表 8 Fr = 0.61 時不同配置工法與棲地多樣性指標之關係(單組工法)

代號	棲地類型	棲地多樣性	
		各棲地所佔比例(%)	SHDI
f2	深潭	0	0.00
	深流	0	
	淺瀨	100	
f2S1	深潭	0.3	0.10
	深流	1.70	
	淺瀨	98	
f2S2-0B	深潭	0.41	0.34
	深流	11.14	
	淺瀨	88.45	
f2S2-1/2B	深潭	0.54	0.38
	深流	12.59	
	淺瀨	86.87	
f2S2-1B	深潭	0.62	0.18
	深流	3.88	
	淺瀨	95.50	
f2S2-3/2B	深潭	0.82	0.20
	深流	4.09	
	淺瀨	95.09	
f2S2-2B	深潭	0.89	0.22
	深流	4.81	
	淺瀨	94.30	
f2S2-5/2B	深潭	0.84	0.24
	深流	5.46	
	淺瀨	93.71	

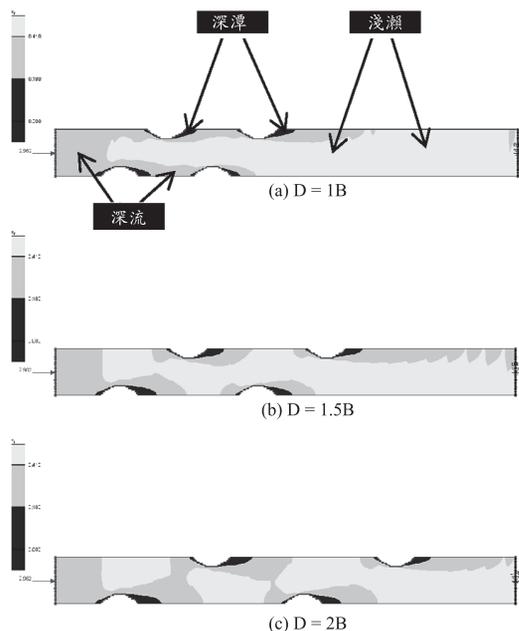


圖 12 雙組塊石工法不同間距的福祿數及棲地類型分布(Fr = 0.42)

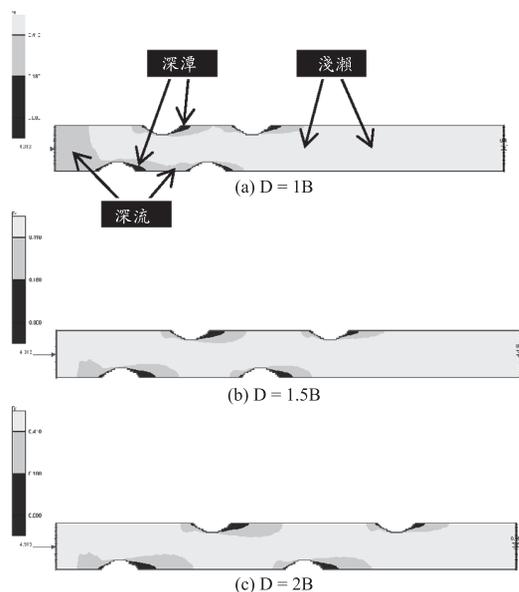


圖 13 雙組塊石工法不同間距所得的福祿數及棲地類型分布(Fr = 0.61)

當 $D = 1.5B$ 時，棲地分布除深流棲地類型外，淺瀨這種棲地類型也在主流加速段呈現出即將分離之帶狀分布。

表 9 雙組工法不同配置對於各魚類 PUA 之關係 (Fr = 0.42)

代號	魚種(科)	PUA (%)
f1S4-1B	鯉科	18.3
	平鰭鯢科	77.2
f1S4-3/2B	鯉科	18.8
	平鰭鯢科	75.7
f1S4-2B	鯉科	19.3
	平鰭鯢科	74.0

表 10 雙組工法不同配置與棲地多樣性指標之關係(Fr = 0.42)

代號	棲地類型	棲地多樣性	
		各棲地所佔比例(%)	SHDI
f1S4-1B	深潭	2.4	0.62
	深流	26.6	
	淺瀨	71.16	
f1S4-3/2B	深潭	3.17	0.70
	深流	33.31	
	淺瀨	63.52	
f1S4-2B	深潭	3.64	0.73
	深流	38.09	
	淺瀨	58.26	

當 $D = 2B$ 時，淺瀨在主流加速段呈現出已經分離的狀態，值得注意的是深流這種棲地類型相對的就連結起來，可能意味著在水理上相對緩流區域的通道已經形成，有利於游泳能力較弱的魚類。

另外，放置雙組工法依然是造成三種魚種 PUA 的下降(表 9)，間距與 PUA 之間並沒有太大關連性，均只有微幅上升或下降，研判是因為原流況本已相當適合魚類生存，放置一倍河寬間距以上之塊石堆砌工法並不會對 PUA 造成太大影響。

而雙組工法之 SHDI 數值均在 0.6 以上(表 10)，並且隨著間距增加而增加，可見雙組工法改善後之棲地面積比例較單組工法平均。

3.3.2 Fr = 0.61

圖 13(a)~13(d)表示來流條件為 $Fr = 0.61$ 時，雙組塊石工法的福祿數分佈。 $Fr = 0.61$ 時流況的變化情形與 $Fr = 0.42$ 有許多相似之處，都是隨著 D 的增加，深潭、淺瀨類型的棲地逐漸增加，深

表 11 雙組工法不同配置對於各魚類 PUA 之關係 (Fr = 0.61)

代號	魚種(科)	PUA (%)
f2S4-1B	鯉科	5.60
	平鰭鰍科	54.0
f2S4-3/2B	鯉科	6.50
	平鰭鰍科	54.8
f2S4-2B	鯉科	7.30
	平鰭鰍科	55.3

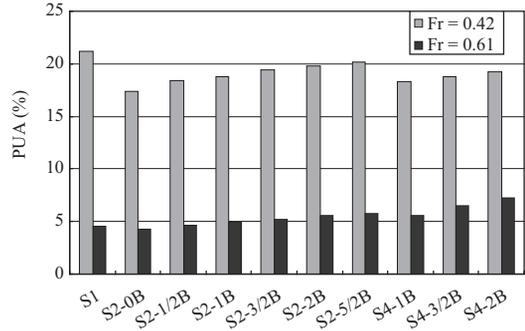
表 12 雙組工法不同配置與棲地多樣性指標之關係 (Fr = 0.61)

代號	棲地類型	棲地多樣性	
		各棲地所佔比例(%)	SHDI
f2S4-1B	深潭	1.60	0.47
	深流	16.09	
	淺瀨	82.31	
f2S4-3/2B	深潭	2.09	0.38
	深流	9.73	
	淺瀨	88.18	
f2S4-2B	深潭	2.29	0.46
	深流	13.39	
	淺瀨	84.32	

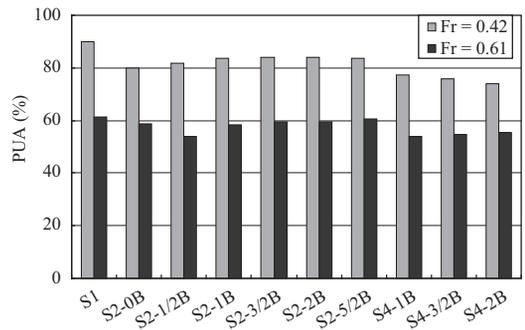
流棲地面積則先下降再上升(表 11)。但間距提升至 2B 時，仍不會造成淺瀨區的分離，這個現象與 Fr = 0.42 時不同，此時的深流棲地也並未連結(緩流通道)，對不耐高流速的魚種而言相對較不利。

另外，以 Fr = 0.61 這組實驗而言，平鰭鰍科 PUA 在放置雙組工法後下降，其原因乃因原流況本就適合平鰭鰍科生存，放置工法後反而造成棲地面積下降；而原流較不適合鯉科魚類棲息或利用，因此放置工法後，對 PUA 有所提升應屬於結構物後方緩流區的局部貢獻，並且 PUA 會隨著排列間距增加而上升，原因在於工法若屬於較緊密排列(一倍河寬)，上下游水位落差加大也就造成流速湍急，對鯉科這類型的游泳性魚類會比較不利。

以 Fr = 0.61 時雙組工法之 SHDI，趨勢也應該隨著間距增加而上升(表 12)，D = 1B 這組因為上游水位湧升較多而造成棲地轉為深流，因而造成 SHDI 超越 D = 1.5B 之現象，其值約為 0.5，



(a) 鯉科



(b) 平鰭鰍科

圖 14 不同工法佈置方式下的棲地面積變化 (PUA)

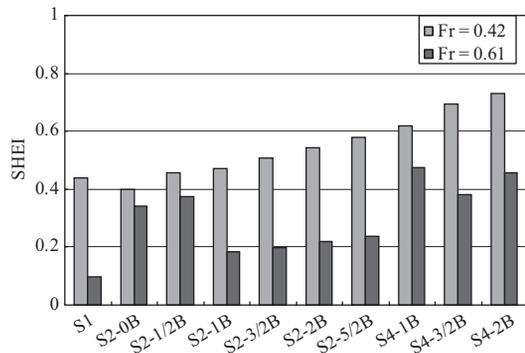


圖 15 不同工法佈置方式下的棲地多樣性變化 (SHDI)

表現尚可。

3.4 小結

整理上述成果並以柱狀圖表示不同工法佈置方式下之棲地面積變化(圖 14)及棲地多樣性變化情形(圖 15)。

在 $Fr = 0.42$ 的情況下，單組工法佈置對兩種魚類的 PUA 來看，設置工法後 PUA 都是下降，然而下降幅度並不大，當間距加大，PUA 則逐漸上升。對於雙組工法而言，放置雙組工法依然是造成兩種魚種 PUA 下降，間距的改變與 PUA 的提升並無明顯的關係。以 SHDI 指標比較後，原始河段數值為 0，設置單組塊石工法後 SHDI 的結果為在 0.40 與 0.58 之間，隨著間距 D 增加而上升。雙組塊石工法設置後 SHDI 的結果為在 0.62 與 0.73 之間，顯示具有更好的棲地多樣性。

在 $Fr = 0.61$ 的情況下，鯉科魚類在放置單組工法後 PUA 值由原始的 3.95% 上升至 5.75%，雙組最高為 7.27%，表示塊石工法能改善原本不合適的棲地條件，然而其適合度值仍偏低。平鱮鰍科在原始河段 PUA 值 69.4%，設置單組工法後範圍在 53.8% 至 61.4% 之間，較原始河段的表現降低 10% 左右。以 SHDI 評估之結果可發現，單組工法範圍約落在 0.10~0.24 之間，雙組工法落在 0.38~0.47 之間相比，多樣性表現仍以雙組配置為佳。

四、結論與建議

1. 本區內溝溪之水域型態以淺瀨為主，施作塊石堆砌工後，能營造出深流及深潭類型的棲地，唯深潭水域比例較低，未來在營造改善上，可再加入類似石樑工法的設計。
2. 設置塊石堆砌工後，於高福祿數時的棲地面積增加情形比低福祿數時明顯；另外，設置塊石堆砌工後，SHDI 值有顯著的提升。由此可知，塊石堆砌工在內溝溪的主要功能為：(1) 提供較多樣的棲地類型，對水棲昆蟲等不同水生物可能產生正面效果；(2) 提供魚類於洪氾時期的躲避空間。
3. 本區原始流況較適合平鱮鰍科魚類，設置塊石堆砌工後，對鯉科魚類的生態效益優於平鱮鰍科，且雙組工法配置模式優於單組工法。
4. 塊石堆砌工間距加大有助於提升棲地多樣性，魚類可用面積也會微幅上昇，最佳配置間距為 2-2.5 倍河寬；因此若欲以此工法改善河道流況，應避免太近間距，建議控制在 2.5 倍河

寬左右。

5. 研究結果顯示在高福祿數河段(0.6 以上)，施作塊石堆砌工法方能同時達到魚類棲地面積與棲地多樣性皆提升的效果，亦即此工法若施作在較湍急的河段中，確實能發揮效果並製造緩流區供魚類休息之用。
6. 放置塊石堆砌工法雖能製造出後方之緩流區，但因造成局部河道束縮及挑流，故也同時造成主流段的加速現象，在水量較大時可能形成一條主槽急流帶，是否形成魚類等水生物或兩棲類在橫向移動上的障礙，值得再予深入探討。
7. 本文主要針對常流量時是否適合施設塊石堆砌工法進行評估，且發現不同的塊石堆砌工法設置有時會造成魚類棲地面積的減少，但是可以增加棲地多樣性，因此增加棲地面積與棲地多樣性雙重目標有時難以兼顧，必須針對改善目的作適當的取捨，未來可再針對此深入探討。
8. 上述降低的棲地面積有部分是因為塊石本身佔據了部分河道面積之故，但這些塊石具多孔隙特質，能營造水生植物、水棲昆蟲、蝦蟹類、兩棲爬蟲類等優良的棲息環境，對水域生態系的完整性有相當程度的貢獻。

參考文獻

1. 于錫亮(1997)，淺談流量與棲地關係的方法學，自然保育季刊，19: 15-19。
2. 吳瑞賢、溫博文(2005)，河川水理與魚類棲地型式之時空分佈，中國土木水利工程學刊 17(3): 537-549。
3. 汪靜明(2000)，大甲溪水資源環境教育教材，經濟部水資源局。PP. 30~45。
4. 施上粟、李鴻源、胡通哲(2008)，應用數值模式及丁壩工於魚類棲地改善之研究，中國土木水利工程學刊 20(3): 331-339。
5. 施上粟、李鴻源、胡通哲(2004)，台中柳川應用生態工法於魚類棲地改善之研究，中華水土保持學報，35(2): 229-239。
6. 胡通哲、葉明峰(2002)，基隆河員山子至八堵河段環境基流量之研究，中華水土保持學報，33(3): 241-247。

7. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2006)·區域排水整治及環境營造規劃-台北地區內溝溪排水環境營造規劃。
8. Azzellino, A. and R. Vismara (2001). Pool Quality Index: New Method to Define Minimum Flow Requirements of High-Gradient, Low-Order Streams. *J. of Ecological Engineering* **127(11)**: 1003-1013。
9. Gorman, O. T. and J. R. Karr (1978). Habitat structure and stream fish communities. *Ecology* **59**: 507-515.
10. Hawkins, C. P., J. L. Kershner, P. A. Bisson, M. D. Bryant, L. M. Decker, S. V. Gregory, D. A. McCullough, C. K. Overton, G. H. Reeves, R. J. Steedman, and M. K. Young (1993). A hierarchical approach to classifying stream habitat features. *Fisheries* **18(6)**: 3-12.
11. Henderson, F. M. (1966). Open channel flow. Macmillan. New York.
12. Inoue, M. and M. Nunokawa (2002). Effects of longitudinal variations in stream habitat structure on fish abundance: an analysis based on subunit-scale habitat classification. *Freshwater Biology* **47(9)**: 1594-1607
13. Jowett, I. G. (1993). A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **27**: 241-248.
14. Lin, J. Y., E. Tsao, T. C. Lee and S. L. Yu (2004). Stream Physical Parameters and Habitat Requirement: The Case of the Formosan Salmon, *J. of Ecological Engineering* **22(4-5)**: 305-309.
15. Mitsch, W. J. (1998). Ecological Engineering-the 7-year itch, *J. of Ecological Engineering* **10(2)**: 119-130.
16. Odum, E. P. and G. W. Barrett (2005). Fundamentals of ecology. Fifth edition. Thomson & Brooks/Cole, Inc. U.S.A.
17. Rakocinski, C. (1988). Population structure of stream-dwelling darters: correspondence with habitat structure. *Environmental Biology of Fishes* **23**: 215-224.
18. Shannon, C. and W. Weaver (1949). The mathematical theory of communication, University of Illinois Press, Urbana, Illinois.
19. Shih, S. S., H. Y. Lee and J. C. Chen (2008). Model-based Evaluations of Spur Dikes for Fish Habitat Improvement: A Case Study of Endemic Species *Varicorhinus barbatulus* (Cyprinidae) and *Hemimyzon formosanum* (Homalopteridae) in Lanyang River, Taiwan, *J. of Ecological Engineering* **34(2)**: 127-136.
20. Shih, S. S., T. J. Hu, H. Y. Lee and Y. C. Tan (2009). Ecotechnologies Applied on Agricultural Irrigation and Drainage Channels- Case study Taichung Irrigation Association in Taiwan, *Irrigation and Drainage*. (DOI: 10.1002/ird.522)
21. Smith, K. M. M. (1998). Relationships between fishes and habitat in rainforest streams in Sabah, Malaysia. *Journal of Fish Biology* **52**: 458-482.
22. US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory. (1997). Users Guide to RMA2 WES, Version 4.3.
23. Wu, F. C. and C. F. Wang (2002). Effect of flow-related substrate alteration on physical sinogastromyzon puliensis (cypriniformes, homalopteridae) downstream of Chi-Chi diversion weir, Chou-Shui creek. *River research and application*. **18**: 155-169
24. Yu, S. L. and E. J. Peters (1997). Use of froude number to determine habitat selection by fish. *Rivers* **6(1)**: 10-18.

收稿日期：民國 100 年 7 月 28 日
 修正日期：民國 100 年 9 月 23 日
 接受日期：民國 100 年 9 月 27 日