

# 十文溪橫向構造物改善規劃研究

## Check Dam Implementation and Fishways Installation in the Shi-Wen River

國立臺灣大學  
水工試驗所  
副研究員

胡通哲\*

Tung-Jer Hu

國立臺灣大學  
水工試驗所  
研究員

賴進松

Jihn-Sung Lai

國立臺灣大學  
水工試驗所  
副研究員

施上粟

Shang-Shu Shih

國立臺灣大學  
土木工程學系  
教授

韓仁毓

Jen-Yu Han

### 摘要

本研究進行林務局東勢林區管理處治理範圍的十文溪一號防砂壩構造物生態面向的改善規劃，研究項目包含無人空拍機(UAV)測量、水域生物調查、水工模型試驗、水理模式分析等項，並提出魚道改善規劃構想。水域生物的魚類進行4次調查，共有7種，並對於生物整合指標IBI計算，十文溪下游樣點的IBI多數維持在輕微受損的狀態，但一號防砂壩上的IBI指數，則有中度受損的情形，主因為多樣性不高，與防砂壩阻隔生物進入有關，因此建造魚道(生物通道)有其必要性。UAV空拍測量，共設置22個控制測站點位，分別分佈於斷面變化較劇烈處，採用4部高精度GPS定位儀實施靜態控制量測，產出正射影像圖，DSM成果網格解析度約為8公分，供水工模型製作與水理模擬。採集5個樣點進行河床質分析，河床質粒徑d50約在15~100mm間，水工模型採用縮尺比例1/25，定床、動床試驗流量峰值採130、10cms，數值模式採用HEC-RAS、CCHE2D兩種，分別代表一維、二維模式，與水工模型試驗的資料比較，進行定床、動床率定驗證。經由上述的調查研究，採全斷面階段式+改良型舟通式魚道，此型魚道可適用高、低流量，在土石流災後，魚道仍有機會保有功能。

**關鍵詞：**十文溪，防砂壩，生物整合指標，魚道，正射影像圖，無人空拍機。

### ABSTRACT

This study into a check dam for the Shi-Wen River included unmanned aerial vehicle measurements, aquatic species investigations, hydraulic physical modeling, and numerical model tests. On the basis of these measurements, we offer planning

\*通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所副研究員，10617臺北市羅福斯福路四段一號，tjhu001@gmail.com

improvement ideas and designs for the Shi-Wen River check dam. Aquatic species were investigated during April, June, August, and October 2015. Seven fish species and 30 macroinvertebrate families were found in the river. The Index of Biotic Integrity was calculated using the number and species of fish. At the sites downstream and upstream of the dam, the stream conditions were "slightly impaired" and "moderately impaired," respectively. This may be due to obstruction by the check dam. To collect unmanned aerial vehicle measurements, we first established 22 control stations. Then, using four pieces of high-accuracy GPS equipment, the ground control points were acquired using a static survey mode. Meshes with a DSM resolution of approximately 8 cm provided data for the physical and numerical models tests. To measure the bed-load gradation, we selected five sampling stations. The D50 data collected were between 15 and 100 mm, the physical model scale was 1/25, and flow discharges were 10 and 130 cm. For the larger flow discharges, we employed the HEC-RAS and CCHE2D numerical models. We completed simulations for one- and two-dimensional fixed-bed and movable-bed cases. To improve planning, we suggest the "Full cross section and modified boating passage" design. This design is suitable for all high and low flow conditions, and for mitigating debris flow during disasters.

**Keywords:** Shiwen stream, Check dam, Index of Biotic Integrity, Fishway, Orthoimage, Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

## 一、前言

水文事件會影響河相，河相變遷會影響生物棲地，進而影響微棲地，在臺灣極端颱風降雨事件可能是棲地品質的影響因素之一，但人為因素可能影響河相，防砂壩或橫向構造物是改變河相的手段，如何兼顧防砂壩穩定河床功能與水域生態，一直是個難題。林務局東勢林區管理處治理範圍內的十文溪現有一號防砂壩之壩基淘刷受損，尋求改善之道，在此同時考量加入生物通道/魚道的設置，提升水域生態保育的作為。

魚道的設計，要求設計流速減緩以適合魚類溯游，在中下游河川適用，但是在山區防砂壩魚道，魚道內部設置阻流材，水流減慢會使泥沙沉積，雖然適合魚類輕易上溯，往往導致魚道受洪水土砂掩埋，失去功能。後有「改良型舟通式(魚骨型)」魚道的研究設置，主要在於提高魚道內部流速，使小顆粒土砂如細砂、礫石可以順利通

過，而且下游的魚道入口因為土砂補充，不致掏刷懸空。但此水槽型態的魚道，對於土砂運動劇烈的集水區，往往一場大型颱風就被土砂掩埋，失去功能，讓工程單位飽受批評，因此對於防砂壩魚道設置，演化成「存活」的概念，吾人認為能在颱風存活下來保持有限的功能之魚道，是比較可行的，因此有所謂「全面式」魚道的設置，但建造經費高昂為其主要缺點。而水槽型態魚道維持成功的案例多數在棲地穩定的集水區內，如宜蘭縣粗坑溪、新北市桶後溪、灣潭溪、花蓮縣砂婆礑溪等，在土砂運動劇烈的溪流，水槽型態魚道實難持續地保有魚道功能。

因此防砂壩的改善或增設魚道，須考慮極端天候下，如何去對應洪水的衝擊，若是容易被土砂破壞，應改弦易轍尋找下一個方案，否則經歷極端洪水土砂衝擊，魚道隨即被毀，很難說服工程單位採行。規劃方案需依集水區土砂運動情形及經費預算額度，再來決定，集水區棲地穩定良

好或位於水源地，可以採用水槽型態的魚道以節省經費，水槽型態內部可採改良型舟通式魚道，此種魚道除了魚類可利用，另有觀察過蝦蟹類、蛙類，其對土砂的排送，也比較好，但若土砂運動劇烈的溪流，就難以持續地維持功能。

若河川的流心左右擺盪難以預測，如何因應？過去有些案例利用防砂壩與魚道的配置，將水流集中到中央，但對於景觀衝擊太大，而且中間的阻流材需要經常維修。若是鋪設粗石的斜曲面，對於生態較自然，因坡度至少要 1/15，只能用在低壩(最好 3 公尺以下)，對於高壩的衝擊大、經費高。解決的方式，可建造規模較大的階段式魚道，如全斷面或一半斷面，防砂壩全斷面型態階段式魚道(全面式魚道)，落差控制在 50 公分以內，可消能也可讓魚類上溯，在颱風後繼續保有功能的機會比較大，但全面式經費較高，是缺點。若是採用一半斷面，對於流心掌握需很有把握。

以防砂壩對河川生態的影響而言，農委會特有生物研究保育中心曾經針對全省攔(防)砂壩對魚類生態影響，調查壩上、下的魚類，以曼-惠特寧差異分析壩上下魚種，認為防砂壩的存在對魚類有顯著影響(張世倉, 2001)，因此防砂壩需要改善。林務局羅東林區管理處曾經針對圳頭坑溪進行生態環境調查(Chen *et al.*, 2013)，對於舊有防砂壩拆除前後，進行魚類及水棲昆蟲調查，約有 12 年的調查資料，以評估壩體移除對生態的影響為何？發現颱風災害的影響，為顯著相關的因子，而壩體存在，或可減輕災害影響。胡通哲(2007)「國有林生態工法之研究」計畫，對於臺灣東西部共 23 條山區溪流的魚類生態資料，進行補充調查與整理，胡通哲(2009)於林務局舉辦的「國有林地魚道設置原則及圖說規範建置之研發」成果發表會，提出魚道設計規範與參考圖說。

本研究針對十文溪一號防砂壩，進行生態方面的改善規劃研究，佐以 UAV 空拍地形測量、水域生物調查、水工模型試驗、水理數值分析，期能在防災與生態方面找到可能的平衡方案。

## 貳、背景資料調查及研究方法

### 2.1 基本背景資料

十文溪位於八仙山國家森林遊樂區內，下接大甲溪，治理單位為治山防災目的建造系列橫向構造物/防砂壩，其中位於最下游的一號防砂壩屬於高壩，阻礙洄游性魚類通行，為尋求改善解決方案，進行本研究。本文針對十文溪，進行水域生物調查、UAV 空拍測量、水工模型試驗與規劃及水理數值模式分析，以下說明。

為瞭解防砂壩對水域生物的影響，進行生物與棲地調查，以魚類而言，欲瞭解洄游性魚類是否因防砂壩阻隔而無法上溯。經過生物調查，若確認需要建造生物通道或魚道，考量整體的溪流狀況與土砂堆積情形，初步選擇合適的魚道型態並進行規劃設計，為避免魚道建造後在一次的土石流災害便壽終正寢，進行水工模型試驗，以瞭解魚道的位置與出入口配置是否恰當，溪流沖淤位置是否有影響，水工模型試驗搭配數值模式模擬，可相互進行動床與定床驗證。

### 2.2 測量資料及檢核

#### 2.2.1 控制測量作業

有關全球衛星定位系統(GPS)網型規劃，地面控制作業採用 GPS 靜態量測方式獲取三維空間資訊，所使用衛星訊號接收儀器為 3 臺 Topcon GR-3 及 1 臺 Topcon Hiper V 儀器。鄰近測區基站為內政部公告一等衛星控制站谷關(GUKW)，單次靜態定位以一基站三測站，共同施測時間約為 30 分鐘，滿足測站空間佈設以站間不超過 500 公尺距離為原則，共施測 22 測站點位，分別分佈於斷面變化劇烈處，其中測站間最長距離為 210 公尺、最短距離為 36 公尺，經 GPS 靜態量測獲取 22 測站點位。於測站位置上放置規標，規標中心大小為 10 公分之矩形，作為後續 UAV 影像上判視與地面約制解算使用。

#### 2.2.2 DSM 產製作業

利用 UAV 拍攝測區重疊影像，搭配影像自動匹配技術與地面控制點約制，產製三維點雲，並輸出成數值地表模型(DSM)，主要工作內容說

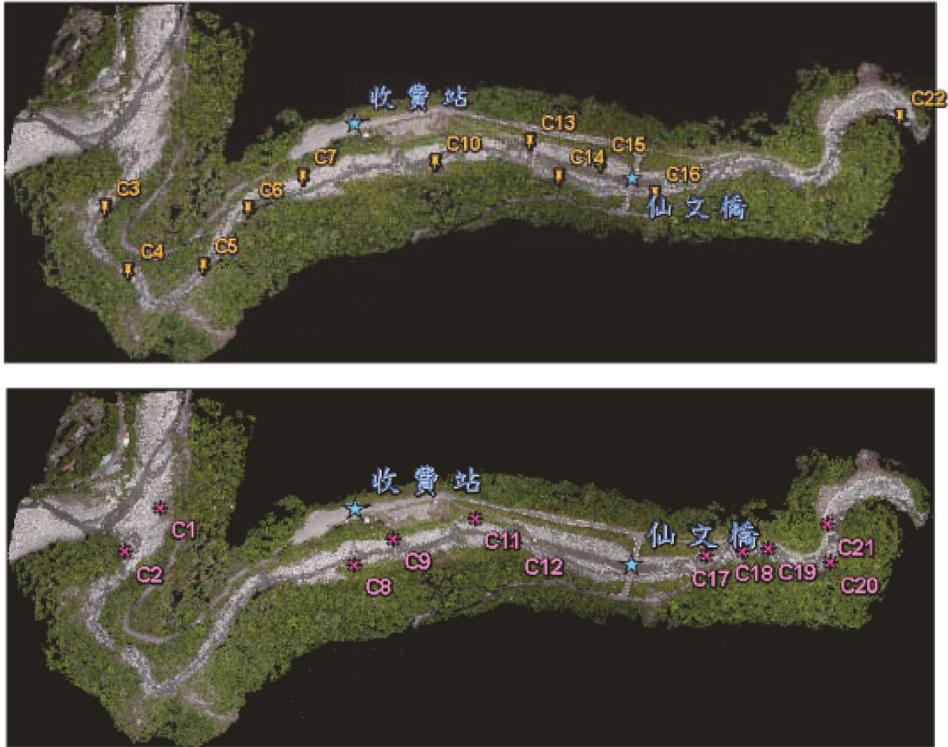


圖 1 測量地面控制點(上)與檢核點(下)分佈圖。

明如下：

- (1) UAV 影像感測器皆經嚴密率定程序，並檢核率定。
- (2) 影像初始解算採相對方位模式，由影像匹配技術搜尋重疊影像中共軛像點，並採 RANSAC 技術進行粗差偵測與剔除。
- (3) 經由密匹配結果，以光線交會法解算物點三維坐標，產製高密度三維點雲(模型空間)。
- (4) 引入高精度地面控制點，將模型空間三維點雲轉換至絕對物空間，並檢核轉換成果一致性。
- (5) 輸出正射化影像以及 DSM 網格資料，解析度為 8 公分，供後續水工模型分析之用。

### 2.2.3 控制點位量測成果

採高精度 GPS 全球衛星定位技術靜態基線測量配合嚴密平差解算，並挑選一半 GPS 靜態量測點作為控制點，另一半作為檢核點所使用，依

均勻分佈原則挑選控制點為 C3、C4、C5、C6、C7、C10、C13、C14、C15、C16 及 C22 共 11 點(圖 1 上)，經由 GPS 靜態量測網型平差計算，控制點之坐標值及其精度如表 1 所示，其平面精度  $\sigma_{Hz}$  為 0.2 至 0.6 公分、高程精度  $\sigma_u$  為 0.5 至 2.1 公分。

### 2.2.4 檢核點位量測成果

檢核點分佈為另一部分點 C1、C2、C8、C9、C11、C12、C17、C18、C19、C20 及 C21 共 11 點(圖 1 下)，由 GPS 靜態量測網型平差計算，檢核點之坐標值及高程(視為地真高程)如表 2 所示，再由 DSM 資料獲取該同 11 點位之內插格網高程資料進行比對，成果顯示平均高程誤差為 0.286 公尺。

### 2.3 魚類與水棲昆蟲調查

選取 5 個樣點，從上到下游，分別位於十文溪與佳保溪會流處(st.1)、八仙山遊客中心旁三號防砂壩上游(st.2)、二號防砂壩上游(st.3)、一號防

表 1 控制點坐標及空間精度

控制點點號	坐標(TWD97)			平面精度	高程精度
	E(m)	N(m)	h(m)	$\sigma_{Hz}$ (m)	$\sigma_u$ (m)
C3	2676748.638	249994.471	716.7	0.004	0.012
C4	2676650.944	250031.009	728.317	0.003	0.009
C5	2676658.638	250147.971	736.752	0.003	0.008
C6	2676747.091	250218.031	742.855	0.003	0.007
C7	2676796.668	250303.263	753.928	0.002	0.007
C10	2676819.045	250510.65	764.07	0.002	0.005
C13	2676851.22	250658.344	776.276	0.002	0.005
C14	2676797.368	250703.96	775.708	0.003	0.006
C15	2676817.14	250767.47	778.926	0.003	0.008
C16	2676770.646	250854.245	782.612	0.003	0.008
C22	2676889.215	251235.633	812.748	0.006	0.021

表 2 檢核點差值

檢核點點號	DSM 求解坐標(TWD97)			地真高程	高程誤差
	E(m)	N(m)	h(m)	ht(m)	$\Delta h(m) = ht-h$
C1	2676880.784	250078.257	708.881	708.927	0.046
C2	2676812.62	250023.273	710.848	710.546	-0.302
C8	2676792.602	250382.683	754.441	754.795	0.354
C9	2676832.662	250444.776	758.707	759.149	0.442
C11	2676864.417	250573.232	771.275	771.596	0.321
C12	2676824.614	250634.796	770.79	770.997	0.207
C17	2676806.409	250934.809	785.582	785.779	0.197
C18	2676813.301	250992.711	788.82	789.047	0.227
C19	2676817.318	251032.3	790.768	790.945	0.177
C20	2676796.158	251130.078	796.63	796.279	-0.351
C21	2676854.223	251125.372	803.215	802.905	-0.31
RMS					0.286
					百分比(%)
				高程誤差小於 0.5m	100

砂壩上游(st.4)、一號防砂壩下游(st.5)，樣點位置如圖 2。樣點選取原則，對可能造成魚類洄游障礙的構造物群最上游、最下游、構造物間、支流來匯，選擇代表性樣點，st.1 代表支流佳保溪匯入十文溪之處，st.2 代表三號防砂壩上游，st.3 代表二、三號防砂壩之間，st.4 代表一號防砂壩上游，st.5 代表構造物群最下游。

### 2.3.1 魚類

利用電魚器間歇放電採集，並採用蝦籠法輔

助，調查之單位努力量以距離為努力量標準(50 m，之字型前進)。採得的魚類馬上鑑定種別，數計尾數，測量魚體全長，隨後立即將採得的魚類放回溪中。魚類之分類主要參採陳義雄、方力行(1999)的分類方式；蝦類的分類參考施志均、游祥平(1998)；蟹類參考施志均、游祥平(1999)的分類方式。

分別利用電捕法與蝦籠法調查兩種方法(日期：104.04.25~26、104.06.27~28、104.08.29~30、

十文溪魚類調查樣點

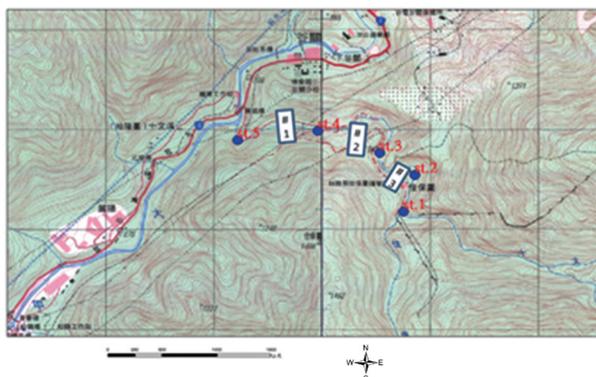


圖 2 魚類與水棲昆蟲調查樣點與三座高壩相對位置。

表 3 捕獲的魚種紀錄與數量

物種	第 1 次(104.04.25、26)					第 2 次(104.06.27、28)					第 3 次(104.08.29、30)					第 4 次(104.10.01、02)					
	st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	
臺灣石魚賓			2	7					5					1						13	2
臺灣鬚鰻					1																
臺灣間爬岩鰍			5	5	13					21											7
纓口臺鰍	2		8	26	5		12	1	5	10			2			1		2			2
明潭吻鰕虎					6					1				1							
短吻紅斑吻鰕虎					6					3					3						
臺灣白甲魚	33	50	96	107	17	27	22	50	62	7	47	25	67	65	12	75	62	48	67	19	

104.10.01~ 104.10.02)，綜合兩種方法的種類數量如表 3，共有 7 種，數量最多的魚種是鯛魚(臺灣白甲魚)。以捕獲的魚類紀錄，進行生物整合指標 IBI 計算，其中 IBI 各分項指標與評分標準，參考 Hu *et al.* (2007)，其計算值若超過 35 分，屬未受損等級，超過 23 分，屬於輕度受損，一般可被接受，低於 23 分，屬於中度受損，棲地有受損，可能需要棲地改善。

各次調查的 IBI 數值，第一次調查結果顯示：三號防砂壩以下的樣站，屬於輕微受損狀態，而上游的 st.1、st.2，屬於中度受損狀態。第二次調查結果顯示：除了最下游之 st.5 樣點，屬於輕微受損狀態外，其於 4 個樣點 st.1、st.2、st.3、st.4，屬於中度受損狀態。第三次調查結果顯示：各樣站之 IBI 質皆小於 23 分，屬於中度受損狀

態。第四次調查結果顯示：除了最下游之 st.5 樣點，屬於輕微受損狀態外，其於 4 個樣點 st.1、st.2、st.3、st.4，屬於中度受損狀態。

從魚種分析，一號防砂壩下游有短吻紅斑吻鰕虎，屬於較高階的食蟲性魚類，也會進行溪內洄游，從調查結果，春、夏季均有其蹤跡。另外從生物整合指標 IBI 值來看，上游的多樣性較差、IBI 數值偏低，有其必要建造魚道或生物通道。

### 2.3.2 水棲昆蟲

利用蘇伯氏採集網(Suber net sampler)篩取，在河中的各種流況下採 3 網河床底泥，水棲昆蟲採集係在沿岸水深 50 公分內。將篩得的水棲昆蟲以夾子採取，並置於 10%福馬林或酒精中攜回實驗室進行分類鑑定。分類依據為川合禎次

表 4 捕獲的水棲昆蟲紀錄與數量

目名	科名	第 1 次(104.04.25、26)					第 2 次(104.06.27、28)					第 3 次(104.08.29、30)					第 4 次(104.10.01、02)					
		st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	
蜉蝣目	姬蜉蝣科			2	1										1							
	四節蜉蝣科	7	3	8	9	1	13	14	74	15	5	21	2	24	18	7	32	18	72	53	7	
	小蜉蝣科	1	1	3	2					2					2		2		7	11		
	扁蜉蝣科	14	17	12	5	5	5	16	40	1	3	29	5	26	1		25	20	77	36	7	
	蜉蝣科									1		1	1						1	2		
	褐蜉蝣科											1							3			
積翅目	石蠅科	5	31	21	16	2	10	20	11	4	15	4	6	21	1	6	1	4	10	5	2	
	短尾石蠅科						2	3	3	2		14	5	1		22	4		3			
	卷石蠅科									2												
	扁石蠅科											1	1									
毛翅目	網石蠅科	3	3	4	9	4	9	24	26	25	6	9	7	11	5	1	2	8	12	34	2	
	流石蠅科	6	1	8	9	1	5	2	2		3			4	2	1	2	3	78	3	4	
	指石蠅科				2				6	2	1	1	1	7	3			1	5	17		
	長鬚石蠅科	20	6	7	24	3	4	10	11	5	4	1	1	2			1		5	20	1	
	囊翅石蠅科																5	2				
	舌石蠅科				1		1	1	3					1								

(1985)所著之「日本產水生昆蟲檢索圖說」；谷田一三(1991)，水棲昆蟲圖解手冊。

水棲昆蟲採集調查 5 個固定樣站，地點與魚類樣站相同，共記錄到 8 目 30 科的水棲昆蟲，如表 4。

## 2.4 水理模式

### 2.4.1 HEC-RAS

水理模式模擬範圍為十文溪的佳保溪匯流口至下游大甲溪匯流口，主要研究區域為二號防砂壩至一號防砂壩河段。數值模式之地形資料採本研究 2015 年 5 月 UAV 調查之 DSM 及全臺灣 DTM 數值地圖，前者地形資料範圍包含二號防砂壩至大甲溪匯流口河段，後者範圍為二號防砂壩上游至佳保溪匯流口，精度為 40m × 40m，相對較低，兩者結合易有一致性問題，在接合處(二號防砂壩)以人工判斷檢視，結合兩份數值地圖資料擷取出 15 處斷面，各斷面分佈位置詳見圖 3。

採用一維水理 HEC-RAS 模式進行全部研究

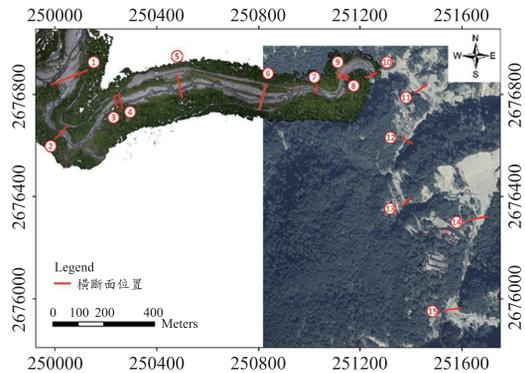


圖 3 數值模式採用之斷面位置分佈圖。

範圍的水理計算，局部區域之水理及泥砂運移演算，採水平二維 CCHE2D 模式。HEC-RAS 模式採用全部範圍(斷面 1 ~ 15)，在下游(斷面 1)為配合過去水利規劃試驗所「大甲溪治理規劃檢討報告(天輪溪至河口段)」的範圍，並採用其建議河床曼寧 n 值(0.04)，在上游起點(斷面 15)附近上游有佳保溪來匯，模擬的全部範圍沒有其他支流匯



圖 4 模型製作範圍與現場景緻對應圖。

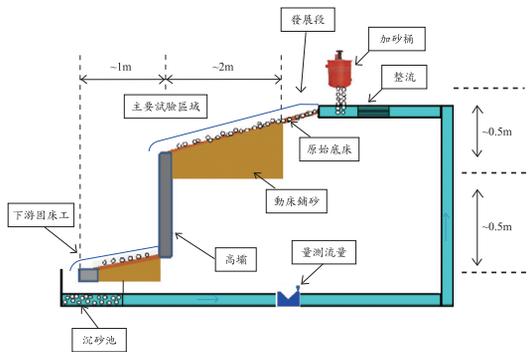


圖 5 水工模型試驗佈置圖。

入，HEC-RAS 模式模擬結果，可提供二維 CCHE2D 模式水流邊界，而模擬的水面剖線，提供作為水工模型試驗底床糙度測試，待水工模型通過糙度測試，再進行其他二維模式的模擬的相互驗證。

#### 2.4.2 CCHE2D

模擬十文溪一號防砂壩改善方案之水理輸砂情況，綜合考量模式網格數限制及網格大小，範圍選定為十文溪仙文橋至下游大甲溪匯流口。二維 CCHE2D 模式網格點於十文溪採用沿水流方向切分 35 格( $I = 35$ )，垂直水流方向切分 340 格( $J = 340$ )；河道中有多座攔河堰、固床工等水工構造物，流況較為複雜，因此進行局部網格加密；網格產生方式選用「Algebraic Mesh」，網格大小的長寬分別介於 1.37 ~ 5.25 及 0.37 ~ 7.74

公尺。依網格分佈及實測高程，選用模式的「Triangulation Interpolation」進行全區域高程之空間內插，後續以此地形進行水理參數率定驗證。

## 2.5 水工模型試驗

水工模型試驗以一號防砂壩上下游為試驗區域，模型製作範圍與現場景緻對應如圖 4，水工模型試驗之佈置圖如圖 5，包含一號防砂壩及上下游固床工，主要試驗區域集中在一號壩下游固床工，以及一號壩上游到一號潛壩之河道，以比尺 1/25 作為水工模型試驗條件。

由於十文溪屬山區河川，坡陡且顆粒粒徑大，因此泥砂運移以底床質為主，定床模型試驗組數以 2 種流量(130 cms、10 cms)為案例，作為模型與數模比較之檢定驗證案例，最後利用防砂壩改善魚道設計，進行動床試驗，以 130 cms、10 cms 入流歷線，了解既有構造物改善等方式，對於溪流河床產生之變化，及做為水中動物回溯之可行性評估。

水工模型試驗之地形依據 UAV 地形之量測成果，利用定床試驗所量測之水位與流速，與數值模擬結果進行比較，檢定驗證試驗模型之適用性，並依據現場一號壩下游冲刷坑之位置與形狀，驗證試驗模型之設計符合現地歷史變化與模型相似，之後進行現況河道加砂試驗，了解河道一號壩之水理條件做為了解既有構造物改善規劃案對於溪流河床產生之變化。

### 2.5.1 模型比尺

水工模型的模型比尺以相似理論為基礎(幾何相似、運動相似)，模型相似律必須同時滿足水流動力相似及泥砂動力相似性，建造模型如圖 6。

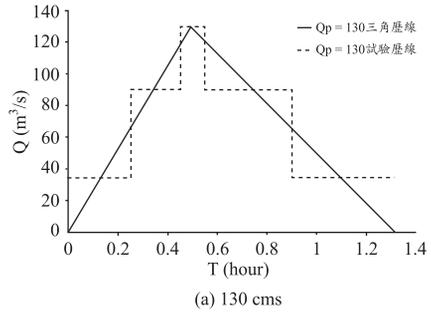
### 2.5.2 試驗流量

十文溪全面式魚道溢流部位規劃淨寬 28 m，取高流量為 130 cms，試驗場現有馬達 20 HP 可供水。若以十文溪泥沙啟動條件，依據現場底床質粒徑與斷面，參考 Lane (1957)、Mavis and Laushey (1948)的方法，試驗的流量 130 cms 已大於泥砂啟動流量。

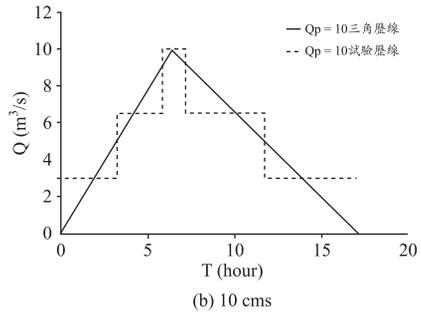
本研究定床試驗流量，分高、低流量 2 種，



圖 6 十文溪一號壩改善規劃魚道水工模型。



(a) 130 cms



(b) 10 cms

圖 7 入流量壓線。

分別是 130 cms 與 10 cms，換算成定床模型試驗流量為 0.0416、0.0032 cms。動床試驗的入流量採類三角形歷線，根據 2013「十文溪整體治理規劃報告」，參考其三角形單位歷線，設定 130 cms 與 10 cms 的入流歷線，如圖 7(a)、(b)。

### 2.5.3 加砂量

推估本研究試驗範圍上游入流邊界之加砂量，採用 E-H (Engelund-Hansen) 總輸砂量公式，搭配不同設定流量推估上游加砂量，並加以迴歸求出關係式，以建立流量與對應加砂量之關係，並根據現場地形坡降及河寬現況，以及現場中值粒徑計算總輸砂量。

E-H (Engelund-Hansen) 總輸砂量公式：

$$\frac{q_s}{d^{3/2}\sqrt{g\Delta}} = \frac{0.05V^2}{gSh} \left( \frac{hS}{d\Delta} \right)^{5/2} \dots\dots\dots(1)$$

其中  $q_s$ ：單位河寬之輸砂率， $d$ ：河床質粒徑， $\Delta$ ：河床質之沉沒相對密度， $V$ ：斷面平均流速， $h$ ：水深， $S$ ：能量坡降。

主魚道斷面較規則，採鋼板、水泥砌磚製

作，副魚道形狀較複雜，以 3D 列印機使用 ABS 塑料材質方式建造水工模型魚道中的阻流材。副魚道 0.6 m 寬，低流量魚類使用，進水口布置於左岸側，採用進水格柵之入口結構，取水深度為 0.5 m、進水口底檻高程 749.2 m，落差 0.3 m，臨界水深 0.2 m，入流量計算為 0.02 cms。

## 參、魚道設計與水理分析

### 3.1 魚道設計

一號防砂壩改善規劃，採主魚道與副魚道兩座，主魚道採用全面式魚道，總寬 32 m，溢流堰寬 28 m，長 26.6 m；副魚道為改良型舟通式魚道的標準形狀的一半(右半邊)，寬(含側壁)0.8 m、內寬 0.6 m，長 35.5 m。溢流堰頂標高 749.0 m(一號防砂壩頂 EL.749.5 減 0.5 m)、河床標高 743 m、於堰體左側(上游往下視之)增設低流量之副魚道，上游出口設計水位為 749.2 m(一號防砂壩頂 EL.749.5 減 0.3)，預計進入副魚道水深約 0.2 m(由臨界狀況水深粗估)。低流量時，魚道具有足夠流量使魚群上溯，而全面式魚道即為高流量時魚類通路，其數據如表 5 所示。

表 5 設計的魚道工程數據

主魚道		副魚道	
魚道型式	全面式魚道	魚道型式	改良型舟通式魚道，阻流材為標準型式的一半，內寬 0.6m，長度 35.2m，坡度 1/6
設計流量	Q50 = 753cms	流量	供低流量使用 Q = 0.02cms
落差	約 6m (749.5-743.5)	總落差	約 6m
上游底標高	749.5(一號防砂壩頂)、749.0(第一階頂)	上游底標高	749.2
下游底標高	743.0	下游底標高	743.4(749.2-35.2/6)
魚道淨寬 (溢流部分)	28m	魚道淨寬	0.6m
坡度 (垂距/斜距)	23%，每階落差 0.5m	坡度 (垂距/斜距)	16%
魚道總長	26m	魚道總長	35.2m
設計水深 (每個水池)	0.75m	上游端設計水深	0.2(= 0.3 × 2/3，上游進水口 EL.749.2)

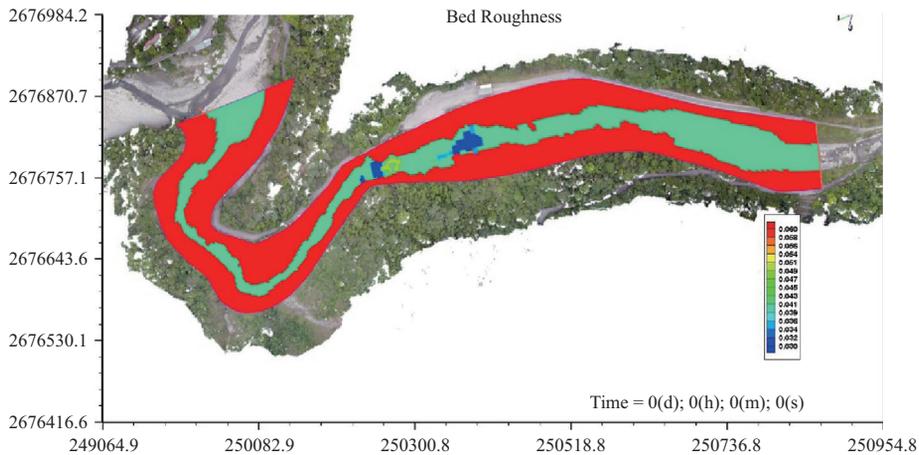


圖 8 CCHE2D 模式曼寧 n 值空間分佈。

### 3.2 水理模式與水工模型驗證

#### 3.2.1 水理模式模擬

HEC-RAS 一維模式模擬之邊界條件，上游分別採用 130 cms、10 cms，下游採用正常水深作為起算水位。二維 CCHE2D 模式模擬之邊界條件，上游分別採用 130 cms、10 cms，下游採用一維 HEC-RAS 模擬結果之下游斷面(大甲溪匯流口)水位，分別為 705.86 m 及 706.67 m 正常水深作為起算水位。河床曼寧 n 值先參考建議值

0.04，再進行率定驗證調整，曼寧 n 值率定結果如圖 8。

比較物模與數模水位模擬率定結果如圖 9、圖 10，驗證結果如圖 11、圖 12，比較結果可知二維 CCHE2D 模擬水位與一維 HEC-RAS 模擬水位相近，而高流量時的誤差又較低流量時誤差略小。整體而言，CCHE2D 模式整可表現現場水位分佈情形。

#### 3.2.2 水工模型驗證

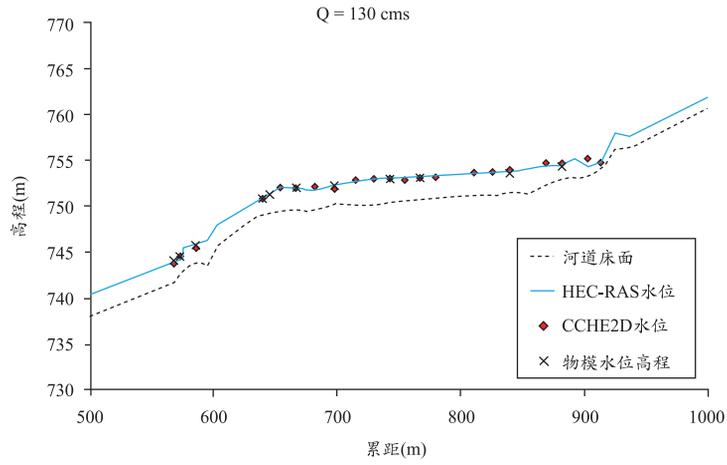


圖 9 物模與數模水位率定結果(Q = 130 cms)。

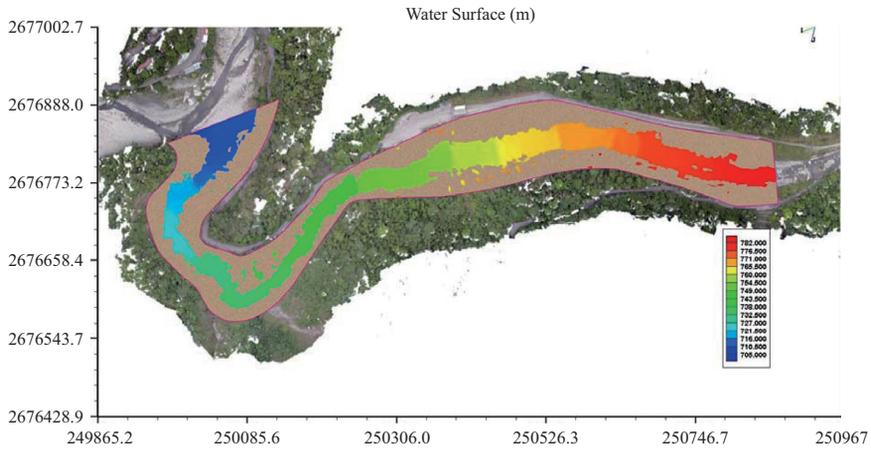


圖 10 CCHE2D 模式水位空間分佈(130 cms)。

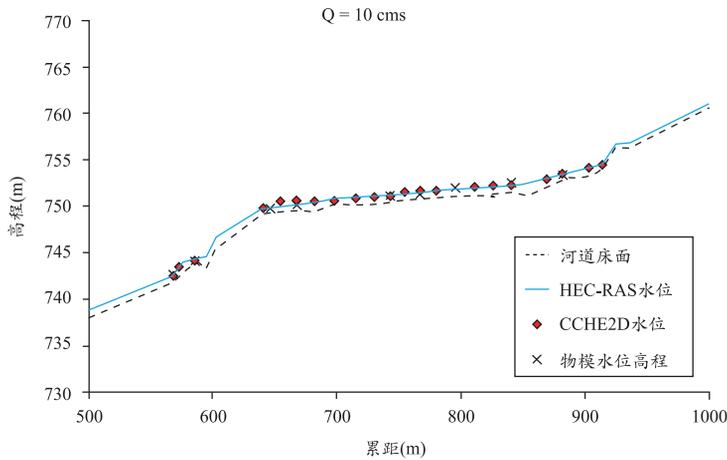


圖 11 物模與數模水位驗證結果(10 cms)。

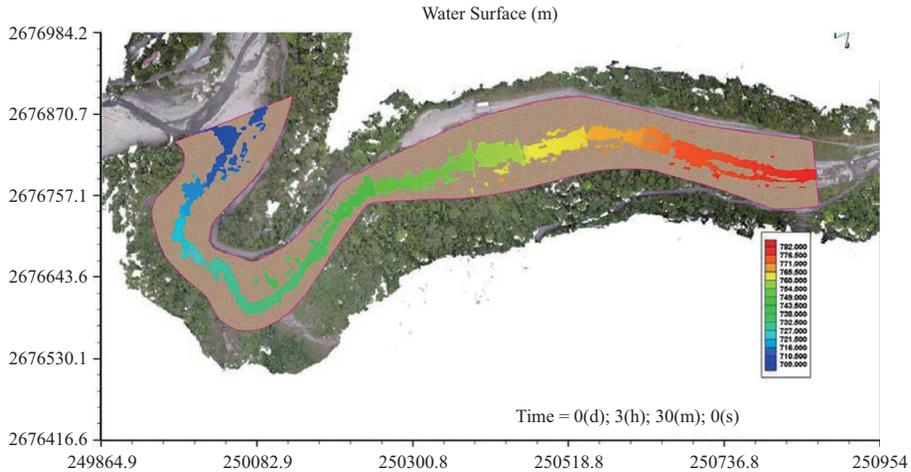


圖 12 CCHE2D 模式水位空間分佈(10 cms)。

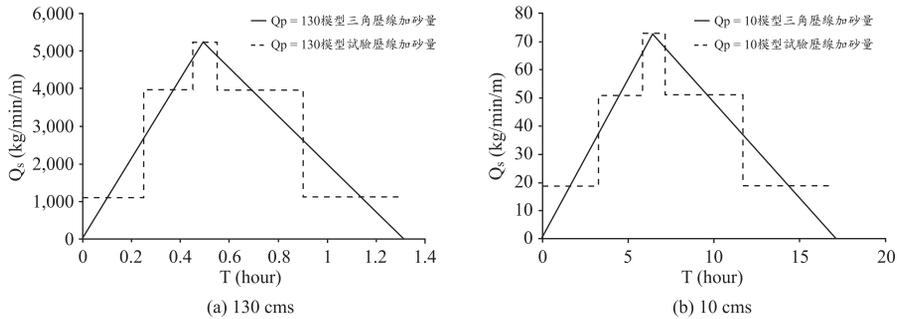


圖 13 試驗上游加砂量歷線圖。

### (1)清水定床試驗

探討高低流量(130 cms、10 cms)十文溪壩上的水位，藉由數模計算，檢討物模的糙度，經過相互比較、加糙，使物模水位接近模擬值，數模與物模比較的結果如圖 9 (130 cms)、圖 11 (10 cms)，兩者可吻合。

### (2)加砂動床試驗

探討尖峰流量 130 cms、10 cms 之歷線，藉由加砂試驗，瞭解一號防砂壩改善規劃案，對河道變化、上游土砂堆積及水位。試驗流量歷線如前述之圖 7(a)(b)；加砂量與流量之關係如圖 13(a)(b)；下游水位歷線如圖 14(a)(b)，試驗所量測的水位相對於累距，結果提供二維 CCHE2D 模式進行率定驗證(圖 15、圖 16)。

## 3.3 魚道規劃方案模擬與評估

### 3.3.1 規劃方案動床模擬

經過上述率定驗證過程，已確立曼寧  $n$  值的分布情況，接下來將數模地形更改為全面式魚道的情況，與全面式魚道的動床物理模型實驗結果相比較，進行輸砂參數的率定驗證。物模邊界條件經過模型比例換算後，做為數值模式邊界條件以進行率定驗證，物模共有兩場試驗，其一為峰值 10 cms 延時 1.32 小時的上游流量歷線，另一試驗為峰值 130 cms 延時 17.1 小時的上游流量歷線，下游條件對應其各別水位歷線；上游加砂量的換算，依照原型水體泥砂濃度要相似模型水體泥砂濃度來考量，原型跟模型輸砂量比尺與流量比尺相同，為 1：252.5。上游流量、加砂量歷線

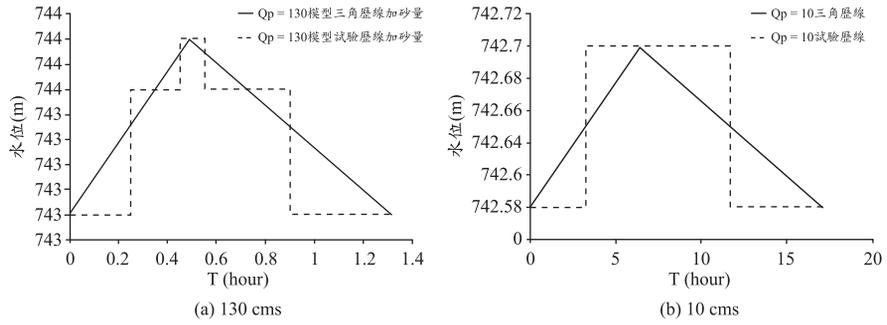


圖 14 試驗下游水位歷線圖。

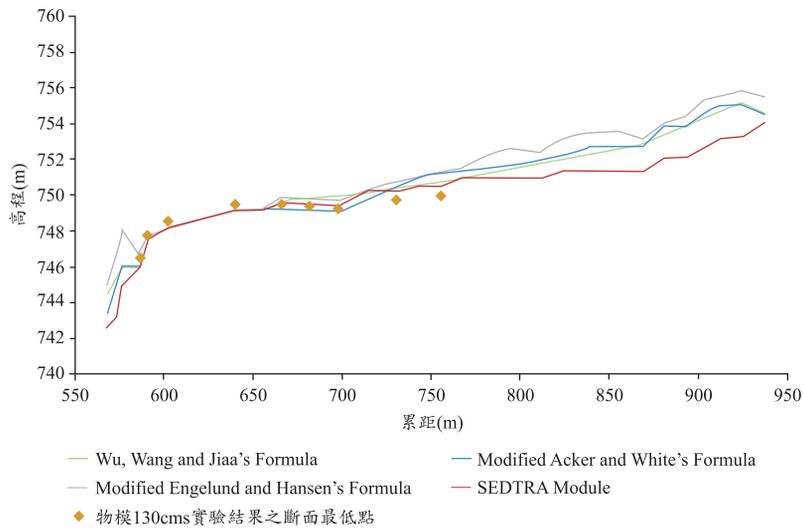


圖 15 各輸砂公式於 130 cms 放流量之床高縱剖面模擬結果(率定)。

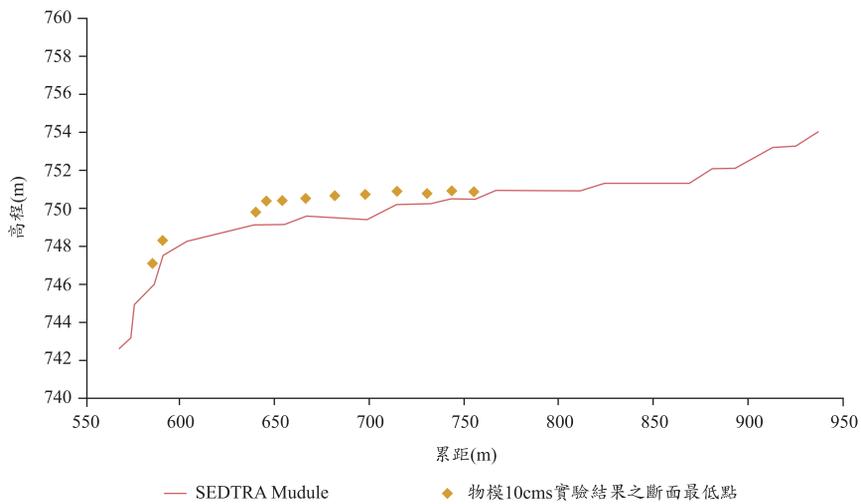


圖 16 SEDTRA Module 輸砂公式於 10 cms 放流量之床高縱剖面模擬結果(驗證)。

及下游水位邊界條件與水工試驗條件相同，河道底質粒徑分布參考本研究粒徑採樣結果進行設定，上游來砂的粒徑分布則參考物模實驗採用的數據。

CCHE2D 模式可選擇之輸砂公式共有 4 種，分別為 Wu, Wang and Jia's Formula、Modified Acker and White's Formula、Modified Engelund and Hansen's Formula、SEDTRA Module。模式亦有調適長度  $L$ 、調適係數  $\alpha$ 、混合層厚度、紊流模式、時間間距與施密特數可調整，但經試驗比較後，其他參數對於沖淤影響的程度不彰，不同輸砂公式是影響模擬結果的主要因素。

根據吳健民(1991)輸砂公式選擇原則，應先分析實測資料之特性，比較現場條件，在有實測輸砂資料時，選擇較符合實測資料之公式。採用 130cms 的流量事件作為率定，將各公式成果整理比較如圖 15，Wu, Wang and Jia's Formula 與 Modified Acker and White's Formula 的模擬結果在魚道附近的地形相近，河道整體有沖有淤；Modified Engelund and Hansen's Formula 的模擬結果，淤積情況最為嚴重，淤積產生的地形改變大於物模變化；SEDTRA Module 的模擬結果則是沖淤情形最穩定，與物模的實驗結果最為相近。比對平面的沖淤變化，則 SEDTRA Module 在壩前左側魚道入口並無模擬出淤積的現象，其原因可能是受到物模地形與數模地形的差異、數模網格大小分布等因素影響，導致數模與物模的差異產生。

率定及敏感度分析結果選定採用 SEDTRA Module 輸砂公式；時間間距考慮網格大小及數目，採用 0.5 秒；混合層厚度依底床質粒徑調查資料，設定為河床質  $d_{50}$  的兩倍；紊流模式選用 Mixing length model；調適長度  $L$  選用採用模式內定設定「Set as average grid length」；調適係數  $\alpha$  選用採用模式內定 Armanini and di Silvio 的設定；施密特數則採用 0.5。

模式驗證結果如圖 16 所示，壩前及魚道段與數模結果相比淤積約 1 公尺，數模模擬結果與初始地形較為相近，物模在此段淤積較高現象，造成此差異的原因可能是物模的模擬範圍較

短，上游邊界距離壩的位置較近，而上游邊界因水流沖刷的邊界效應，為下游帶來了額外的砂量，造成壩前的平緩區域產生淤積。

### 3.3.2 規劃方案評估

綜合上述 UAV 測量、魚類調查、水工物模、數模分析成果，進行十文溪橫向構造物改善(魚道)方案評估。

對於十文溪全區防砂壩的改善，本研究認為優先處理對象為八仙山國家森林遊樂區入口處前的高壩(一號防砂壩)。基本上，改善的方式可分為三項：增建魚道、拆、維持現狀，根據過去的研究，集砂區土砂運動劇烈的山區溪流，不論拆或開缺口，在洪水期間引起劇烈土砂運移，水棲昆蟲、藻類無法附著在底質上，短期內(數年)對生態反而不利。因此十文溪朝增設魚道進行較可行，魚道的增設，可分成水槽型態與全面式兩種，但水槽型態魚道似乎只在集水區穩定的情形，才會長期維持功能，若土砂運動劇烈，每年要編列經費去清理，是個負擔，全面式魚道化的做法，似乎比較可行。

全面式魚道雖然可以適應流心變化，但階段式落差對於某些蝦蟹類仍不夠友善，結合改良型舟通式魚道，對於水生物的可利用性提高，也不致受流心變化影響。成本高為其缺點，臺灣案例有結合兩種的，例如桶后溪的全斷面階段式建造時，保留原有的魚道水槽，讓不同水生物可以各取所需，但水槽型態的改良型舟通式魚道需要定期維護清理。

規劃建議採用全斷面階段式魚道(主魚道)+改良型舟通式魚道(副魚道)的組合(圖 17)。11 階的落差，每階 0.5 m，魚類可以跳躍通過，最後下游設置混凝土鼎塊，彌補 0.5 m 的落差，共處理落差 6 m，下游再利用現場巨石漿堆疊，類似副壩以穩定水位。全面式的階段式魚道兩側設計高度 3 m 牆，保護兩岸，牆內設寬 0.5 m 側斜坡，上嵌塊石，可供作呼魚(水)道，水量大時，可供攀爬性魚類如短吻紅斑吻鰕虎利用，亦可供兩棲爬蟲類利用，進入溪流的哺乳類如山羌、山豬亦可經由此通道往來上下游。左岸(上游往下視之)設置改良型舟通式魚道一座，寬度僅 0.6 m，因

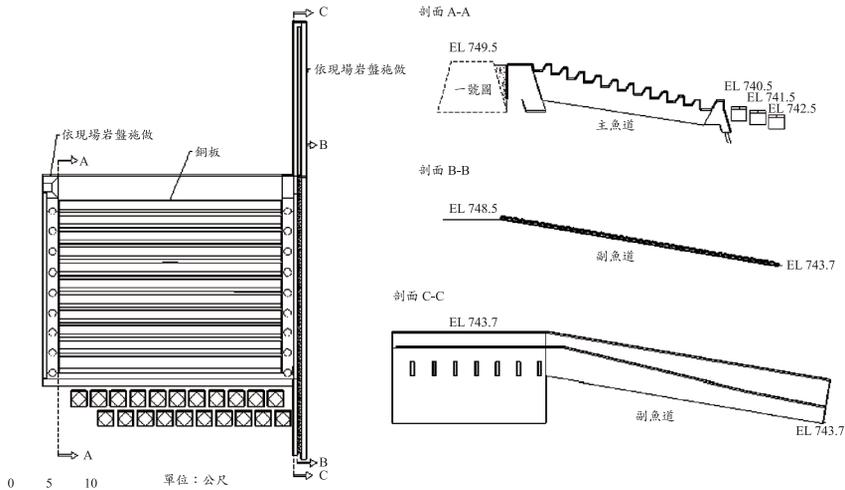


圖 17 全面式(階段式+改良型舟通式)魚道平面與側視規劃圖。

為此種魚道標準斷面左右對稱，設置一半即可發揮功用，改良型舟通式魚道坡度 1/6，延伸入河床，長度約 36 m。

#### 肆、結論與建議

1. 十文溪的溪流構造物，從下游的一號防砂壩到上游到三號防砂壩，共有 13 座構造物，需要先進行改善的是一號防砂壩。
2. 由溪流魚類調查，分別於 2015 年 4、6、8、10 月進行 4 次調查，共發現 7 種魚類，一號防砂壩上的生物整合指標 IBI 數值多屬中度受損狀態，壩下多屬輕微受損狀態，主因為壩上的魚類多樣性不高緣故。十文溪魚類其中以鯛魚(臺灣白甲魚)數量最多，鯛魚會因水溫變化在溪流上下游遷徙，有建造魚道或生物通道之必要，另外短吻紅斑吻鰕虎，只在壩下發現，亦是增建魚道原因之一。
3. 本研究利用 UAV 拍攝測區重疊影像，搭配影像自動匹配技術與地面控制點約制，產製三維點雲，並輸出成數值地表模型(DSM)，輸出正射化影像以及 DSM 網格資料，解析度約 8 公分，可提供高細緻化三維空間資訊於水工模型與水理模擬分析之用。
4. 水工模型主要試驗區域在一號防砂壩下游固

床工以及壩上游到一號潛壩之河道，以比尺 1/25 作為水工模型試驗條件。由於十文溪屬山區河川，坡陡且顆粒粒徑大，因此泥砂運移以底床質為主，定床模型試驗組數以 2 種流量 (130 cms、10 cms)為案例，作為模型與數模比較之檢定驗證案例，最後利用防砂壩改善魚道設計案，進行動床試驗，以 130 cms、10 cms 入流歷線，了解既有構造物改善等方式，對於溪流河床產生之變化，及做為水中動物洄游之可行性評估。

5. 水理數值模式模擬範圍為十文溪的佳保溪匯流口至下游大甲溪匯流口，利用一維 HEC-RAS 模擬現況地形在 130 cms 及 10 cms 兩種流量下的水位，提供物理模型(現況地形)進行率定驗證。二維模式 CCHE2D 模擬之邊界條件，上游分別採用 130 cms 及 10 cms 入流歷線，下游採用一維 HEC-RAS 模擬結果之下游斷面(大甲溪匯流口)水位，分別為 706.67 m 及 705.86 m 作為起算水位。
6. 進行第一號防砂壩改善規劃方案研析，建議採全斷面階段式(主魚道)加改良型舟通式的組合型態魚道(副魚道)，以適應高低不同流量，低流量時期，魚類使用改良型舟通式魚道，可供多種生物(魚蝦蟹、兩棲爬蟲類)利用。洪水時

高流量，魚類主要利用全斷面階段式魚道，但洪水退去後的土砂淤積可能阻塞副魚道進水口，經過修正壩翼設置，保留與山壁岩盤相連的壩翼並沿山壁設置側牆，經試驗後，已經沒有副魚道進水口淤積的問題，而主魚道較無泥沙淤積的問題，較大的問題在於下游沖刷，因此增加一排混凝土鼎塊，由於該處河床幾近岩盤，應依現場地形地質調整。對於主魚道右岸，為避免洪水高流量衝擊，設計導流側牆，約可阻擋一日暴雨 Q50 的洪峰量，超過 Q50，有可能從側牆越流進入道路邊坡間的的全面式魚道腹側區域，造成上頂破壞，需加以留意。

### 誌 謝

本文感謝林務局東勢林區管理處，提供計畫經費補助，特此致謝。

### 參考文獻

1. 川合禎次：日本產水生昆蟲檢索圖說，東海大學出版社，1985。
2. 行政院農業委員會林務局東勢林區管理處：「十文溪整體治理規劃」，程泰水土保持技師事務所，2013。
3. 谷田一三：水棲昆蟲圖解手冊，行政院環保署環境檢驗所編譯，1991。
4. 吳健民：泥沙運移學，中國土木水利工程學會，1991。
5. 胡通哲：「國有林生態工法之研究」計畫報告，林務局委託研究報告，96 蘭應學 0005 號，2007。
6. 胡通哲：「國有林地魚道設置原則及圖說規範建置之研發」成果發表會，林務局，2009。
7. 施志昫、游祥平：臺灣的淡水蝦，國立臺灣海洋生物博物館籌備處，1998。
8. 施志昫、游祥平：海洋生物博物館圖鑑系列(7)臺灣的淡水蟹，國立海洋生物博物館籌備處，1999。
9. 張世倉：「防砂壩對河川魚群及其棲地影響之研究(3/3)-計畫編號：90-農科-1.3.3-生-W5(5)」，行政院農業委員會特有生物研究保育中心，2001。
10. 陳義雄、方力行：臺灣淡水及河口魚類誌，國立海洋生物博物館，1999。
11. 經濟部水利署水利規劃試驗所：「大甲溪治理規劃檢討報告(天輪溪至河口段)」，2010。
12. Chen, Y.C., T.J. Hu and Y.C. Shiau, "A study on the Potential Disaster Caused by Precipitation for the Aquatic Ecology of Zuntoukeng Stream in Taiwan," Disaster Advances 6(S6): 93-101, 2013.
13. Hu, T.J., H.W. Wang, and H.Y. Lee, "Assessment of Stream Condition on Nan-Shih Stream in Taiwan," Ecological Indicators 7(2), 430-441, 2007.
14. Lane, E.W., "A Study of the Shape of Channels formed by Natural Streams Flowing in Erodible Material," M. R. D. Sediment Series NO.9, US.Army Engineering Division, Missouri River, Corps of Engineers, 1957.
15. Mavis, F.T. and L.M. Laushey, "A reappraisal of the beginning of bed movement-competent velocity," Intern. Assoc. Res., 2d Meeting, Stockholm, 1948.

收稿日期：民國 105 年 9 月 9 日

修正日期：民國 105 年 12 月 15 日

接受日期：民國 105 年 12 月 19 日