

以 FLUENT 三維模擬檢核馬鞍壩魚道本體之流場適合度

許少華^[1] 劉建榮^{[2]*} 葉治宏^[1]

摘 要 由於水壩或攔河堰的興建，造成上、下游魚類生態廊道的中斷，為使魚類能順利往上或下游洄游移動以維持其後代基因的正常繁衍，故魚道設計顯得格外重要。本研究主要針對大甲河流域的馬鞍壩水池式魚道，以三維數值模式 FLUENT 來模擬探討其魚道內部的流場。模擬結果發現，模擬網格間距必須小於魚道隔板開孔最短邊長度的一半，在模擬計算上方能達到足夠的精度，且上下游邊界條件會影響距其最近的 4 個隔板之流況。故於探討魚道內部流況時，至少需以 10 個魚道隔板來進行模擬，如此距上下游邊界最遠處的中間休息池流況方能不受上下游邊界影響較具代表性。由模擬結果可發現，魚道隔板各開孔之平均流速皆小於大甲溪魚類上溯之流速上限 1.7 m/s，且隔板間休息池未有足以影響魚類上溯之渦流與湧升流，僅於右側溢流頂坎 (Ice Harbor Weir) 流況為較不適合魚類上溯之表面流 (streaming flow) 流況，但不影響其提供魚類上溯或下降之功能。

關鍵詞：豎孔式魚道、FLUENT、數值模擬、表面流、上溯。

Examining the Flow Pattern Suitability of Fishway Design in Ma-Ann Dam by FLUENT 3-D Simulation

Shaohua Marko Hsu^[1] Chien-Jung Liu^{[2]*} Chih-Hung Yeh^[1]

ABSTRACT Most rivers in Taiwan are steep and fast flowing, with extremely different seasonal discharges due to unevenly distributed rainfall. For hydropower generation or water resource purposes, weirs across river are usually built to facilitate water intakes, which may block the pass of fishes. As a result, fishways are important to help fish species pass the constructed structures and maintain their population and good genes. Good design of the fishway is a key element to it being successful.

In this study, a three dimensional flow simulation model, FLUENT, was employed to simulate flow patterns and its three-dimensional velocity fields in a particular fishway with pool type in a hydropower dam in Da-Jia river, central Taiwan. Measurement data, by other people, in a physical model was used for verification and comparison. To have a convergent numerical solution, local refinement of computational grid size around all openings, such as orifices, is needed. The grid size should at least be smaller than half the narrow width of each opening. The upper or lower boundary will affect the flow pattern up to its near-by four pools in sequence. Therefore, at least ten pools are required in the simulation to have a

[1] 逢甲大學水利工程與資源保育學系
Department of Water Resources Engineering and Conservation, Feng Chia University, 100 Wen-Hua Rd, Taichung, Taiwan 407, R.O.C.

[2] 逢甲大學 GIS 中心
GIS center, Feng Chia University, 100 Wen-Hua Rd, Taichung, Taiwan 407, R.O.C.

*Corresponding Author. E-mail address: liucj@fcu.edu.tw

central pool which is unaffected by either the upstream or downstream boundary.

The simulated results show the averaged velocities at all openings are less than the upper-limit design flow-velocity, which is 1.5 to 1.7 m/sec. Within the pool, the flow pattern is stable and no significant circulation or up-lifting flow occurs, which might make the fish in the pool lose their way. Only the free surface flow across the Ice Harbor Weir indicates a streaming flow pattern, which is not suitable for surface-type fish to rest after each jump. Enlarging the longitudinal distance does not improve this drawback.

Key Words: vertical slot fishway, pool type fishway, FLUENT, numerical simulation, streaming flow, sail upstream.

一、前言

河川因建造水壩，會使得連續之河川廊道被阻隔成爲片段的封閉河段，使得魚類在片段的封閉河段內近親繁殖。爲了改善魚類之生態環境，須暢通魚類之洄游路線，於是在水壩、攔砂壩上設置魚道，以利魚類自由的往上或下游洄游移動。設計良好的魚道必須可以讓魚類能無阻礙地儘快尋找到入口，且順利進入魚道中；而進入魚道的魚類，能輕易且快速的找到出口並從出口游出；而從魚道游出的魚類，應能立即找到正確且安全的遊動方向以避免陷入危險的狀態。

本研究主要針對馬鞍壩魚道，以三維流體力學計算軟體 FLUENT 來進行模擬，檢核隔板各孔口配置對內部流場的影響，分析是否會產生不適合魚類上溯的流況，如渦流、湧升流、表面流、水流速度過大或太小等。魚類上溯時會逆著水流方向前進，渦流與湧升流會使其找不到正確的上溯路徑。若水流速度大於魚類上溯之突進泳速，則魚類無法順利上溯；但流速太小會使魚類喪失上溯意願，而將魚道當作一個棲息場所。一個設計良好的魚道必須避免上述的情況發生。此外，魚道本身必須長期保持適當流量避免魚道內產生淤積。

二、前人研究

1. 水池式魚道

Rajaratnam and Katopodis (1988) 分析水池式魚道流況，將水池式魚道區分爲容易產生自由跌水的跌水流(plunging flow)、表面流(streaming flow)以及介於兩者之間的過渡流況(transition flow)三種流況(如圖 1 所示)。並以無因次經驗公式(1)式來定義各種流況可能發生的範圍。

$$\hat{Q}_t = \frac{Q_w}{b_w S L^{3/2} \sqrt{g}} \quad (1)$$

其中： \hat{Q}_t 代表無因次流量(過渡流況取 \hat{Q}_t 爲 0.25)、 Q_w 爲通過頂坎之流量、 g 爲重力加速度、 S 乃水位差與兩個魚道隔板長度之比值(= $\Delta h_w/L$)、 b_w 爲頂坎開口寬度、 L 爲兩個魚道隔板的間距。

因魚類逆流而上的習性，於表面流流況發生時，魚類會直接由隔板上方表面流區域直接上溯，無法利用到隔板中間流速較緩之區域休息；若魚類停留在隔板中間流速較緩之區域，則容易因休息池中封閉的環狀渦流而於休息池中洄游無法找到正確的上溯方向，降低其上溯成功率。於跌水流流況發生時，魚類會有較明確的上溯方向，爲較佳之流況。

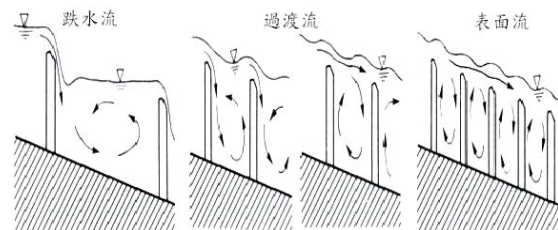


圖 1 水池式魚道三種流況

Fig.1 Three flow conditions of the pool type fishway

2. 豎孔式魚道

Wu and Rajaratnam (1999) 針對定量流，不同坡度條件下豎孔式魚道流場渦流產生的數目與位置進行探討。發現當坡度小時，渦流會位於射流之兩側，但隨流量與坡度的增加，短隔板側渦流的範圍會變大，但長隔板側渦流卻會漸漸縮小直至消失，最後只

剩短隔板側有渦流存在。

3. 馬鞍壩水池式魚道

Chang (1993) 分析大甲溪魚類生態習性，並配合馬鞍壩水壩工程之特性，設計以水池式魚道作為主魚道，配合丹尼爾式副魚道作為吸引魚類上溯之水路。設計魚道放水量在高水位時為 2.08 cms，低水位時為 0.6 cms。馬鞍壩水池式魚道全長為 144 m、內寬 2.30 m，整體魚道可分為上游直線段、轉彎段與下游直線段三段，坡度約為 5% (如圖 2 所示)。全程每隔 2 m 設置一高 5 m 之隔板 (總共 72 個隔板)，每一隔板上設有 0.5 m × 0.5 m 的中央潛孔 (Orifice)、0.2 m × 0.6 m 的右側潛孔 (Slot A)、0.2 m × 5 m 的左側垂直豎孔 (Slot B) 以及距離渠底 4 m 高 0.32 m × 1 m 的右側溢流頂坎 (Ice Harbor Weir) 以提供不同魚類上溯之通道 (如圖 3 與圖 4 所示)。

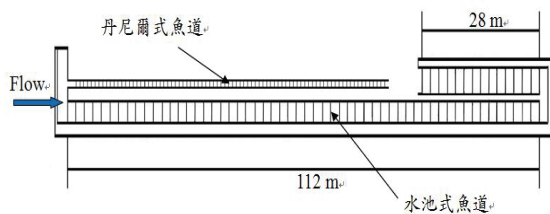


圖 2 馬鞍壩魚道示意圖 (俯視圖)
Fig.2 Diagram of the fishway of Ma-An reservoir (top view)

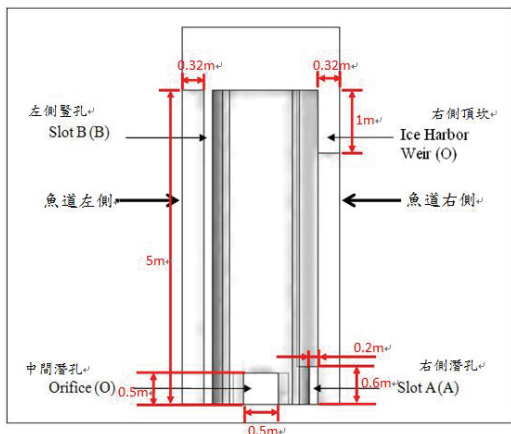


圖 3 隔板開孔示意圖 (正視圖)
Fig.3 Diagram of open holes on partition of the fishway of Ma-An reservoir (front view)

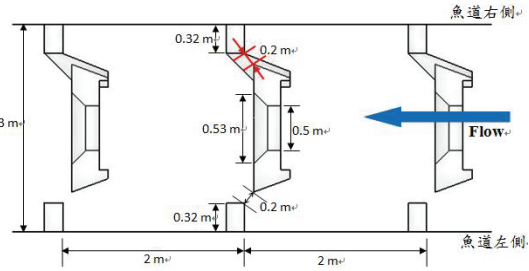


圖 4 隔板開孔示意圖 (俯視圖)
Fig.4 Diagram of open holes on partition of the fishway of Ma-An reservoir (top view)

中興工程顧問社 (1993) 針對馬鞍壩水池式魚道以 1:4 之模型比例進行水工模型試驗，固定上游魚道進水口之水深與流量分別為 4.3 m 與 1.992 cms，改變魚道下游出水口尾水水位藉以觀察魚道內的水位變化、各部位之流況以及隔板開孔之流速...等。

4. 數值模擬

Khan (2006) 以 $k-\epsilon$ 紊流模式與 Navier-Stoke 方程式模擬三維度豎孔式魚道，並加入自由液面的邊界條件來求解流場。為避免初始條件對流場的影響，故僅取中間池來進行討論。顧可欣等人 (2008) 利用標準 $k-\epsilon$ 紊流模式配合體積分率法進行魚道之三維流場數值模擬。

三維魚道流場之數值模擬類似明渠流，有自由液面存在，但渠道中間有隔板阻礙水流通過，故流場較為混亂。由上述研究可知，三維魚道流場可利用 $k-\epsilon$ 紊流模式配合體積分率法來進行求解。

5. 魚類上溯條件

胡通哲 (2001) 提出當隔板上下游水位差為 0.12 m 時，台灣原生魚種的上溯率最高，大部份游泳性魚類皆可在隔板上下游水位差 (Δh) 小於 0.2 m 時溯游，因水位差大於 0.2 m 時，潛孔流速 ($\approx \sqrt{2g\Delta h}$) 將過大不利魚類上溯，故建議池堰式魚道隔板上下游水位差應控制在 0.2 m 以下。

經濟部水利署 (2007) 對魚道設計提出應注意之環境條件如下：

- (1) 跳躍水位差 (針對跳躍高度)：國內實地調查資料顯示，中、上游河段之內河迴游鯉科之跳躍高度可達 0.3 m 以上，故針對跳躍式之迴游魚類其隔板上游水位差可採用小於 0.3 m 之標準。
- (2) 流速：若針對大甲溪魚類之游泳特性進行分析，

魚道各開孔之流速應小於 1.7 m/s。

- (3) 水深：魚道應維持常流水狀態以供魚類基本洄游條件，水深應參考當地河川特性。

三、模式建立

1. 網格建構

本研究使用 Gambit 前處理軟體來繪製馬鞍壩水池式魚道模型；採用四面體、稜錐等網格單元，而網格類型則使用非結構網格。因本研究主要探討魚道內部隔板間的流場，馬鞍壩水池式魚道隔板潛孔最小截面積為 0.2 m × 0.6 m，故在魚道隔板各開孔網格節點間距以 0.2 m 為其上限，比較 0.2 m 以下網格節點間距之數值模擬結果差異，並選定較適當之網格間距來進行後續案例之模擬。

2. 自由液面

自由液面部分採體積分率法，是將流體在一個網格中所佔有的體積比率當作指標，可用來訂定流場中空氣與水之交界面，其定義如下 (Ma et al., 2002)：

$$F = \frac{\delta\Omega_{water}}{\delta\Omega_{cell}} \quad (2)$$

式中 $\delta\Omega_{cell}$ 為控制體積的大小， $\delta\Omega_{water}$ 則是控制體積內水的體積。當 $F=0$ 表示控制體積內充滿了空氣；當 $F=1$ 時，代表控制體積內充滿水； $0 < F < 1$ 時，控制體積內同時包含著水與空氣。

3. 控制方程式

為探討數值模擬結果之收斂特性，本研究採用一階上風法並搭配體積分率法模擬自由液面；由於水流場涉及重力設定，壓力項則採用 Body Force Weighted 法，並採用 PISO 法中的歪斜修正及鄰近修正來模擬複雜粗糙的暫態自由液面流場。假設流體為不可壓縮流後，可得到紊流流場之雷諾平均連續方程式與雷諾平均納維爾-史托克方程式 (Reynolds-averaged Navier-Stoke equation)：

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i' u_j'}) + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (4)$$

式中： ρ 為流體密度， ν 為動力黏滯係數， g_i 為重力

項。 $\overline{u_i' u_j'}$ 為雷諾剪力張量 (Reynolds stress tensor)，為紊流所造成之動量通量。

計算紊流通量方面，可假設紊流通量與速度梯度成正比：

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中 ν_T 為紊流黏滯係數 (eddy viscosity)。將上式替代紊流通量帶入(4)式可得：

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu_T \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j}) + g_i \quad (6)$$

本研究使用 $k-\varepsilon$ 紊流模式來進行魚道流場之模擬，其紊流動能方程式(7)式與動能消散方程式(8)式以張量型式表示如下：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{C_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{C_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

式中 k 為紊流動量、 ε 為紊流動能消散率，而模式之參數值 $C_\mu = 0.09$ ， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $C_k = 1.0$ ， $C_\varepsilon = 1.3$ ，均為由實驗驗證所得之經驗值，故 $k-\varepsilon$ 紊流模式為半經驗式紊流模式。

連續方程式、三方向之動量方程式、紊流動能方程式、紊流消散率方程式與紊流黏滯係數方程式，此七個方程式對應七個未知數 (\bar{U}_i 、 \bar{P} 、 k 、 ε 、 ν_T)，故可進行流場之求解。

4. 邊界條件

馬鞍壩水池式魚道在魚道渠底、邊壁及隔板堰體邊界皆為不滑動 (non-slip) 之鋼筋混凝土構造，故可假設其接觸面之流速為零，搭配邊牆函數使其模擬結果更符合魚道之情形。上、下游邊界條件部分，因馬鞍壩水池式魚道當初設計之理想水深為 4.3 m，理

想流況為魚道隔板各個開孔均有水流通過，故上、下游邊界條件皆假設為固定水深 4.3 m。入流量則是參照馬鞍壩魚道水工模型試驗所給定之數值 1.992 cms。

四、模式驗證

本研究主要探討馬鞍壩水池式魚道主體內部隔板間之流況，故不針對整體馬鞍壩水池式魚道進行模擬。因此在模式驗證時有兩點必須確認：(1)網格疏密對流場之準確性影響；(2)確定需模擬多少隔板數以上，其流況才不受上下游邊界條件影響。

1. 模型與網格建構

本研究之模擬魚道寬度為 2.3 m，坡度為 5%，魚道左右側之隔牆高度為 6 m，各魚道隔板之開孔與馬鞍壩水池式魚道一樣。魚道內部網格設計如圖 5 所示，由於本研究主要針對距離上下游邊界最遠處中間休息池之流場進行探討，故此區塊需局部加密。

2. 流速分析

右側潛孔與中間潛孔是將該潛孔內部所有網格節點之流速數據加以平均代表其流速；左側豎孔是以 0.1 倍至 0.9 倍水深這 9 個點之流速加以平均代表之；右側頂坎是將自由液面以下，溢流頂坎以上所有網格節點流速取平均代表之。

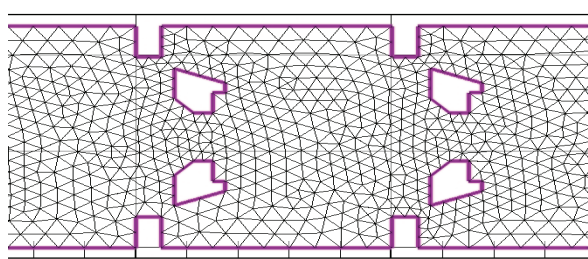


圖 5 網格設置示意圖 (俯視圖)

Fig.5 Diagram of the setting grids of the fishway (top view)

3. 網格疏密之模擬案例設計

本研究主要針對右側潛孔於網格節點間距為 0.2 m、0.15 m、0.1 m 以及 0.05 m 四種案例時之模擬結果進行比較。

4. 魚道隔板數 (總長度) 模擬案例設計

本研究以魚道內部隔板 6 個、魚道總長 14 m (每個隔板間距為 2 m) 為基準進行模擬，並依次增加 2 個魚道內部隔板 (魚道總長增加 4 m) 進行模擬，透過觀察距離上下游邊界最遠之中間隔板魚道休息池之流況變化趨勢，找出在魚道總隔板數 (與總長) 須達到多少以上時流況將不再改變趨於穩定。

5. 驗證結果分析

於網格疏密部分，由圖 6 與圖 7 可知，網格節點間距為 0.1 m 與 0.05 m 時，魚道隔板入流與出流流況已趨於穩定，故選擇以隔板開孔網格間距為 0.1 m 來進行後續之數值模擬。於魚道隔板數部分，本研究假設魚道數值模擬中，隔板數越多，距離上下游邊界條件最遠處之中間兩個魚道隔板開孔 (潛孔、切欠、豎孔) 之流速變化將會越趨穩定。由圖 8 與圖 9 可知，當隔板數超過 10 個時，魚道中間兩個隔板各開孔之流速幾乎已趨近於穩定。表示當隔板數大於 10 個時，上下游邊界將不再影響中央隔板間的流況，其流況會趨於穩定不再改變。故馬鞍壩水池式魚道數值模擬中，在魚道各潛孔網格節點間距需小於 0.1 m，魚道總隔板數需至少 10 個，距離上下游邊界條件最遠之中間隔板間的流況較具代表性。

五、魚道流場分析

馬鞍壩水池式魚道內部流場主要針對下列 3 項探討其是否適合魚類上溯：

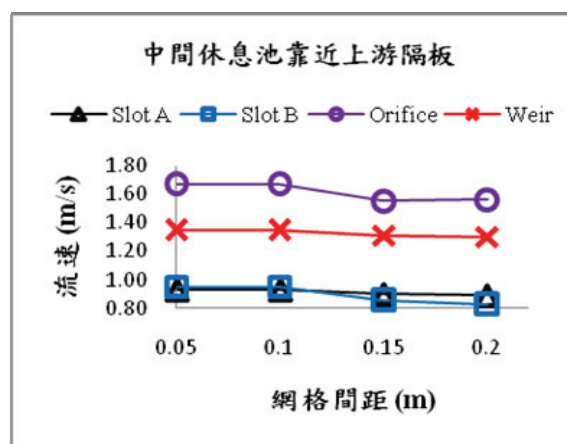


圖 6 不同網格間距之流速比較 (入流)

Fig.6 Comparison of inflow velocity calculated by different grid size

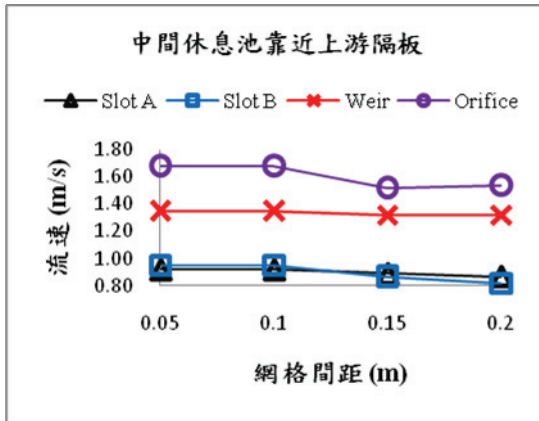


圖 7 不同網格間距之流速比較 (出流)

Fig.7 Comparison of outflow velocity calculated by different grid size

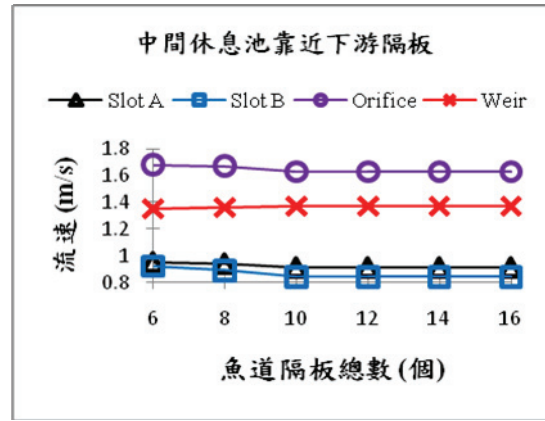


圖 9 不同隔板數之流速比較 (出流)

Fig.9 Comparison of outflow velocity calculated by different partition number

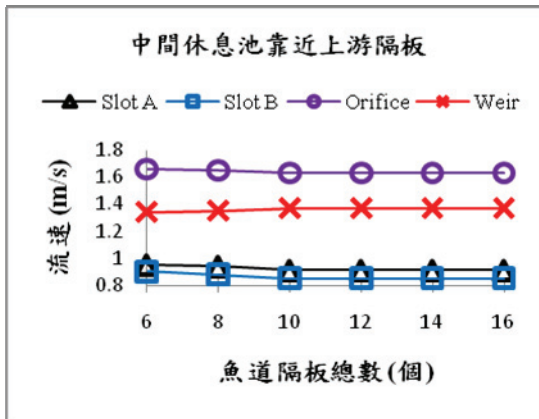


圖 8 不同隔板數之流速比較 (入流)

Fig.8 Comparison of inflow velocity calculated by different partition number

1. 流速部分：

由模擬結果可知，右側潛孔平均流速約為 0.85 m/s；左側豎孔平均流速約為 0.91 m/s；右側頂坎平均流速約為 1.37 m/s；中間潛孔平均流速約為 1.64 m/s。但若以圖 10 來之流速分布來看，中間潛孔之流速在部分區域已超過魚類上溯標準，但仍有 50 % 以上的範圍在上溯上限值之內，故有足夠空間供魚類上溯之用。

2. 流場部分

在魚道隔板間的休息池流場、右側潛孔、左側豎孔與中間潛孔皆無足產生以影響魚類上溯之湧升流；但在右側頂坎會發生不適合魚類上溯之表面流 (圖 11)。

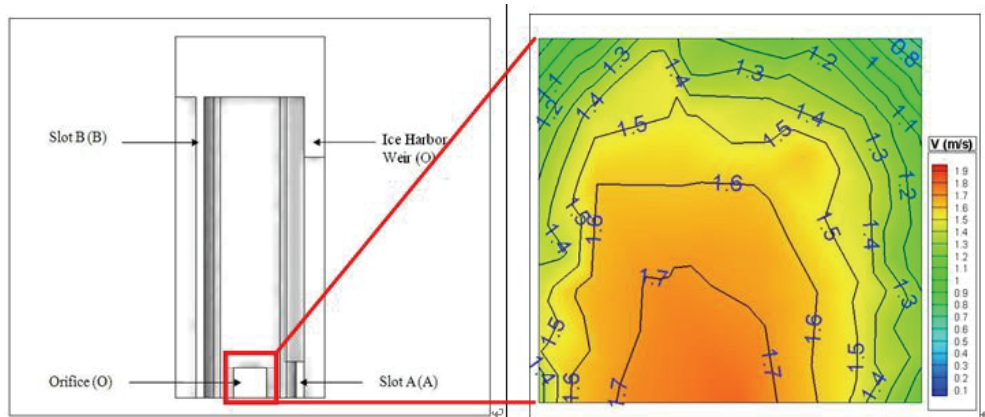


圖 10 中間潛孔流速分布 (正視圖)

Fig.10 Velocity distribution on the central orifice (front view)

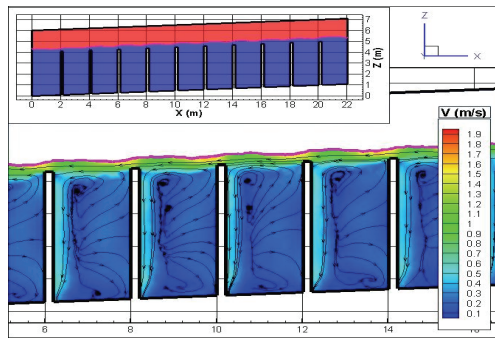


圖 11 頂坎位置流況 (側視圖)

Fig.11 Flow condition of the ice harbor weir (top view)

3. 與馬鞍壩水工模型試驗數據比較

馬鞍壩水池式魚道之右側潛孔平均流速約為 0.85 m/s；左側豎孔平均流速約為 0.91 m/s；右側頂坎平均流速約為 1.37 m/s；中間潛孔平均流速約為 1.64 m/s。表 1 為本研究之模擬結果與與馬鞍壩水工模型試驗結果比較一覽表。兩者之條件皆固定上游進口水深為 4.3 m、流量為 1.992 cms，在水工模型試驗中，距離上游進口水第 11 個魚道隔板與第 1 個隔板之水位差，在不同尾水深條件下之試驗結果皆在 0.05 m 以下，較符合數值模擬所假設之情況，故選擇水工模型試驗第 11 個隔板之數據與數模結果進行比較。首先將數值模擬第 11 隔板之各開孔上的所有點流速進行平均，再與水工試驗結果進行比較，結果發現兩者間的中間潛孔流速大小相當接近，而數模之右側頂坎與右側潛孔流速較馬鞍壩水工模型大，但左側豎孔之流速較馬鞍壩水工試驗小。分析兩者流速差異的原因可能為馬鞍壩水工試驗所量測之流速乃單點之流速，且無註明量測位置，無法於數值結果中取單點流速進行比較，僅能將數模結果開孔處所有點之流速進行平均加以比較，故造成結果差異。但僅以平均流速進行比較所得之流速誤差皆在 30%，若能得知確切的量測位置，應可較準確的結果比較。

六、頂坎流況改善

1. 改變休息池間距

由於上下游邊界條件水深為 4.3 m、魚道休息池間距為 2 m 時，右側頂坎會發生表面流流況，本研究參考 Rajaratnam and Katopodis (1988) 的公式 (1)，並以 Chang (1993) 時之設計條件來探討馬鞍

壩水池式魚道隔板休息池間距與頂坎之流況關係。由 Rajaratnam (1988) 的公式(1)計算可知，在固定坡度條件下，馬鞍壩水池式魚道隔板間距應該至少超過 2.24 m，右側頂坎才能產生跌水流之流況。故本研究以相同的網格配置方式、魚道隔板數、流量與水深條件，進行隔板休息池間距分別為 2.5 m、3.0 m 以及 3.5 m 之數值模擬。由模擬結果可發現，隔板間休息池間距愈大右側頂坎的跌水幅度會隨之增加，但其流況仍為表面流 (如圖 12 至圖 14 所示)，故可知增加休息池間距可改善其表面流情況。

若持續增加魚道隔板間休息池間距 (3.5 m)，右側頂坎最終形成跌水流流況，但魚道隔板各開孔與內部流速將會超過魚類上溯標準值，且左側豎孔將會出現一種不適合魚類上溯之湧升流 (如圖 15 所示)。故增加魚道隔板間休息池間距雖可改善右側頂坎之表面流流況，但魚道隔板其他開孔之流況亦會到影響，故若以隔板所有開孔之流況適合度來看，馬鞍壩水池式魚道仍以原設計為較佳配置。

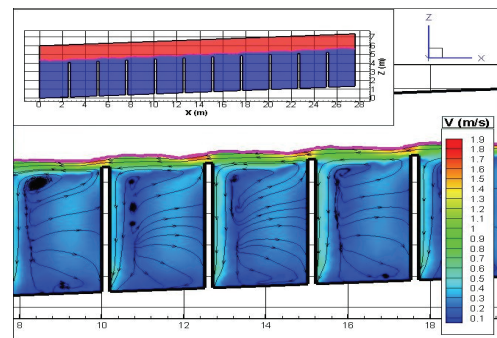


圖 12 當 L=2 m 時頂坎流況 (側視圖)

Fig.12 Flow condition of the ice harbor weir when L=2.0 m (top view)

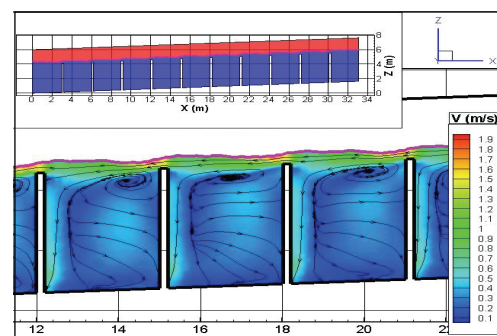


圖 13 當 L=2.5 m 時頂坎流況 (側視圖)

Fig.13 Flow condition of the ice harbor weir when L=2.5 m (top view)

表 1 馬鞍壩水池式魚道隔板開孔平均流速與數模結果比較表

	中間 潛孔	右側 潛孔	左側 豎孔	右側 頂坎
水工試驗流速 (m/s)	1.67	0.69	1.26	1.07
數值模擬流速 (m/s)	1.64	0.85	0.91	1.37
相對誤差(%)	2	19	28	22

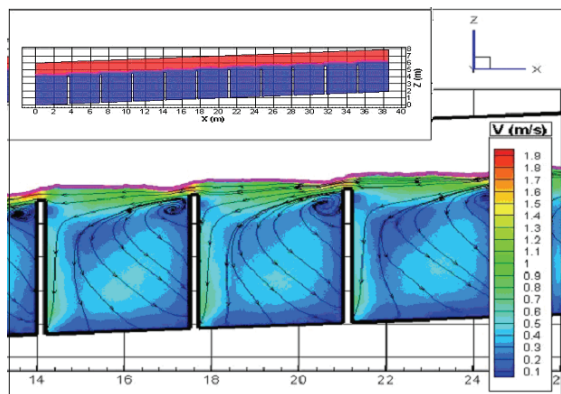


圖 14 當 $L=3\text{ m}$ 時頂坎流況 (側視圖)

Fig. 14 Flow condition of the ice harbor weir when $L=3.0\text{ m}$ (top view)

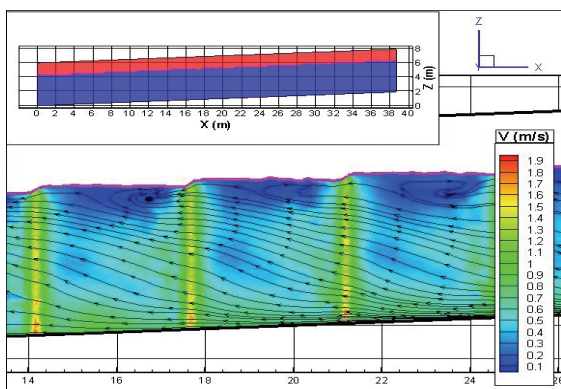


圖 15 當 $L=3.5\text{ m}$ 時豎孔流況 (側視圖)

Fig. 15 Flow condition of the ice harbor weir when $L=3.5\text{ m}$ (top view)

七、結 論

1. 使用三維具自由液面之流體力學計算軟體 FLUENT 對魚道進行數值模擬，上下游邊界條件會影響鄰近邊界之 4 個魚道隔板的流場，故須以

10 個以上之魚道隔板進行，此時最中間之魚道休息池流況方視為完全發展 (fully developed) 且不受上下游邊界影響。

2. 數值模擬右側潛孔、左側豎孔以及右側頂坎之流速皆小於大甲溪魚類上溯之流速設計上限值 1.7 m/s 。魚道休息池之流速亦接近魚類巡航速度 0.6 m/s ，且並無足以影響魚類上溯之渦流與湧升流產生，顯示馬鞍壩水池式魚道之設計流場符合魚類上溯條件。
3. 模擬結果發現中間潛孔部分區域流速已超過大甲溪魚類上溯流速上限值 1.7 m/s ，但仍有 50% 以上的範圍在上溯上限值之內，故仍有足夠空間供魚類上溯之用。
4. 模擬結果發現右側頂坎流況會發生表面流流況，不適合魚類上溯。雖然增加隔板間休息池間距可改善其表面流流況使之成為跌水流，但增加隔板間休息池的間距，會降低魚道整體水流之消能率，造成魚道水流流速增快，影響魚道隔板其他開孔之流況，故目前仍以原設計為較佳之配置。

誌 謝

感謝國家高速網路與計算中心提供軟硬體資源，使本研究得以順利進行。以及中興工程顧問社水工部謝國正工程師所提供的寶貴意見。

參考文獻

- 中興工程顧問社 (1993)，「馬鞍壩及進水口水工模型試驗報告」，經濟部水資源統一規劃委員會。
- 李家和 (2002)，「泛用性三維計算流體力學模式應用於明渠流之研究」，國立交通大學土木工程學研究所碩士論文。
- 胡通哲 (2001)，「水位差對原生魚種在階段式魚道潛孔中溯游之試驗研究」，中華水土保持學報，32(2): 125-132。
- 顧可欣、張高華、張倉榮 (2008)，「三維度魚道水理及魚體行進力能之數值模擬研究」，農業工程學報，54(3): 64-84。
- Chang, K. H. (1993), "A fishway design plan for the Ma-An dam project." *Final Report for Sinotech Engineering Consultants, Inc.*
- Faure, J.B., N. Buil and B. Gay (2004), "3-D Modeling of Unsteady Free-Surface Flow in Open Channel." *Journal of Hydraulic Research*,

- 42(3):263-272.
- Hirt, C.W. and B.D. Nichols (1981), "Volume of fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries." *Journal of Computational Physics*, 39 : 201-225.
- Katopodis, C. (1992), "Introduction to Fishway Design." *Department of Fisheries and Oceans*.
- Khan, L.A. (2006), "A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) Model Analysis of Free Surface Hydrodynamics and Fish Passage Energetics in a Vertical-Slot Fishway." *North American Journal of Fishwaies Management*, 26:255-267.
- Ma, L., P.J. Ashworth, J.L. Best, L. Elliott, D.B. Ingham, L.J. Whitcombe (2002), "Computational fluid dynamics and the physical modeling of upland urban river." *Geomorphology*, 44:375-391.
- Rajaratnam, N. and C. Katopodis (1984), "Hydraulics of Denil Fishway." *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9) : 1219-1233.
- Rajaratnam, N. and C. Katopodis (1986), "Hydraulics of Vertical-Slot Fishway." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 112 : 909-927.
- Rajaratnam, N. and C. Katopodis (1988), "Plunging and Streaming Flow in Pool and Weir Fishways." *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8):939-944.
- Rajaratnam, N., C. Katopodis and S. Solanki (1992), "New Designs for Vertical-Slot Fishways." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19: 402-414.
-
- 2010年7月15日 收稿
2010年9月14日 修正
2010年11月11日 接受

(本文開放討論至2011年9月30日)