

# 礫石河床魚卵存活率之不確定性分析

吳富春<sup>1</sup>、周逸儒<sup>2</sup>

## 摘要

一般鮭鱒魚類具有溯游產卵之習性，其產卵棲地為粒徑較大之礫石河床，雌魚將魚卵產於礫石孔隙間，利用孔隙水流將溶氧帶入，並將新陳代謝之廢物帶走，如此可維持一良好之孵化環境。然而大量之細顆粒泥砂滲入礫石孔隙並積存其間，會降低孔隙水流速度，造成孵化環境之惡化，使魚卵之存活率大為降低。本研究利用水力半徑模式估算礫石河床之導水係數因泥砂積存量之增加而降低之情況，將所求得之導水係數代入礫石河床雙層模式推求其孔隙流速，並利用實驗資料經驗曲線估算魚卵之存活率，建立泥砂積存量與魚卵存活率之關係。本研究首先針對模式之參數進行敏感度分析，再利用 Rosenblueth 機率點估計法進行魚卵存活率之不確定性分析。敏感度分析結果顯示泥砂與礫石粒徑比為敏感度最高之模式參數，對魚卵存活率之影響最為顯著。不確定性分析結果顯示泥砂比積存量之均值及標準偏差分別為 0.2 及 0.05 時，魚卵存活率之期望值為 66%，標準偏差 25%，偏態係數-1.3。

**關鍵詞：**魚卵存活率、產卵礫石河床、敏感度分析、不確定性分析。

## Uncertainty Analysis of Egg Survival in Spawning Gravel

Wu, Fu-Chun<sup>1</sup> Chou, Yi-Ju<sup>2</sup>

## Abstract

Salmonids use the structure of natural gravel bed as the spawning habitat. The female releases fertilized eggs into the voids of gravel substrate. The intergravel flow benefits the exchange of dissolved oxygen and removal of metabolic waste to maintain an appropriate environment for spawning success. Intrusion and deposition of fine sediment into the gravel substrate results in the reduction of interstitial flow and thus egg survival. The present study develops a quantitative model to predict the egg survival as a function of sediment deposit. The hydraulic radius model is used to evaluate the reduction of gravel permeability due to sediment deposit. The reduced permeability is linked to a two-layer model to determine the apparent velocity through the spawning gravel. The survival rate is estimated with an empirical equation relating the apparent velocity and egg survival. The sensitivity of model parameters is investigated. Rosenblueth probabilistic point-estimation method is then used to analyze the uncertainty of egg survival. The results reveal that size ratio (sediment to gravel sizes) is the most sensitive parameter significantly affecting the egg survival. Under the condition that the mean and standard deviation of specific sediment deposit are 0.2 and 0.05 respectively, the expected value of egg survival is 66%, with a standard deviation of 25% and skewness coefficient of -1.3.

**Keywords:** Egg survival, spawning gravel, sensitivity analysis, uncertainty analysis.

- 
1. 台大農工系助理教授兼水工所助理研究員
  2. 台大農工系研究助理

## 一、前言

一般鮭鱒魚類(Salmonids)具有溯游產卵之習性，其選擇之產卵棲地為底質粒徑較大之礫石河床(Spawning gravel)，雌魚以其尾部掘一凹坑，將魚卵產於礫石孔隙間，並覆蓋一層礫石以避免魚卵受水流冲刷或受河床推移質之影響。圖一所示即為產卵坑(Redd)示意圖，此種特殊之河床形貌使水流向下進入礫石孔隙並從尾堆(Tailspill)下游面流出，此水流一方面將溶氧(DO)帶入礫石孔隙，另一方面將魚卵(胚胎)新陳代謝之廢物(Metabolic waste)帶走，可維持一良好之孵化環境，有利魚卵之存活。然而由於人為或天然因素所造成之沖蝕土壤進入河川，大量之細顆粒泥砂隨水流滲入礫石孔隙並積存其間，降低礫石河床之透水性及孔隙水流速度，減小溶氧傳輸率，使魚卵之存活率大為降低。

本研究利用水力半徑模式(Hydraulic radius model)推估礫石河床之導水係數(Hydraulic conductivity)因泥砂積存量之增加而降低之情形，將所得結果代入礫石河床雙層模式(Two-layer model)計算其孔隙流速，並利用流速與存活率之經驗曲線估算魚卵之存活率，以建立一套泥砂積存量與魚卵存活率之量化模式。由於各項參數均具有變異性，因此本研究首先針對模式之各項參數進行敏感度分析，再利用Rosenblueth 機率點估計法(PE method)進行魚卵存活率之不確定性分析。

## 二、研究方法

### 2.1 魚卵存活率模式

#### 1. 礫石底床透水係數與泥砂積存量之關係

根據 Sakthivadivel(1966)提出之水力半徑模式，可推導礫石底床透水係數與泥砂積存量之關係式如下：

$$\frac{K}{K_0} = (4.54) \frac{(0.42 - 1.54C)^3}{(0.58 + 1.54C)^2} + (3.66) \cdot R_d^2 \cdot C \quad (1)$$

式中  $K_0$  = 無泥砂沈積量之起始透水係數；

$K$  = 泥砂沈積後之透水係數；

$C$  = 泥砂比沈積量；

$R_d$  = 粒徑比 = 泥砂粒徑/礫石粒徑。

#### 2. 孔隙水流速度與礫石底床透水係數之關係

根據 Milhous(1982)所提出之礫石河床雙層模式估算產卵礫石河床之孔隙水流速度(如圖一所示)，其關係式如下：

$$V = \frac{(h/L_1)K_2}{(L_2/L_1) + (K_2/K_1)} \quad (2)$$

式中  $L_1$  = 層 1(泥砂沈積層)之水流途徑長度；

$L_2$  = 層 2(無泥砂沈積層)之水流途徑長度；

$K_1$  = 層 1 之透水係數；

$K_2$  = 層 2 之透水係數；

$h$  = 礫石底床水流進出點之壓力水頭差。

(2)式中之  $K_1/K_2$  即為(1)式所求得之  $K/K_0$ 。

#### 3. 魚卵存活率與孔隙水流速度之關係

根據 Cooper(1965)之實驗數據可得到魚卵存活率與孔隙水流速度之迴歸式關係如下：

$$S = -(17.6)(\log V)^2 - (39.6)(\log V) + 68.7 \quad (3)$$

式中  $S$  = 魚卵存活率(%)；

$V$  = 孔隙水流速度(cm/s)。

### 2.2 不確定性分析

本研究採用 Rosenblueth(1981)之機率點估計法進行不確定性分析，若考慮單一參數  $X$  之函數  $W = g(X)$ ，則此隨機變數  $X$  之機率分布可以保留前三項動差特性而用  $x_+$  及  $x_-$  兩點代表之，其所對應之機率分別為  $p_+$  及  $p_-$ ，如下所示：

$$\begin{aligned} x_+ &= m + z_+s \\ x_- &= m - z_-s \\ p_+ &= \frac{z_-}{z_+ + z_-} \\ p_- &= 1 - p_+ \\ z_+ &= \frac{g}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{g}{2}\right)^2} \\ z_- &= z_+ - g \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $m$ 、 $s$  及  $g$  為隨機變數  $X$  之均值、標準偏差及偏態係數。若為多變數函數  $W = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，

式中  $X_1$ 、 $X_2$  及  $X_n$  為所牽涉之  $n$  個相關隨機變數，則每一變數均可以上述方法得到兩代表點，函數  $W = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$  之不確定性可透過  $2^n$  個變數組合而求得，模式輸出值相對於原點之  $m$  階動差為

$$\begin{aligned} m'_m &= E(W^m) \\ &\approx \sum_{d_1=+, -} \dots \sum_{d_n=+, -} P(d_1, d_2, \dots, d_n) W^m(d_1, d_2, \dots, d_n) \end{aligned} \quad (5)$$

式中下標  $d_i$ ， $i = 1 \sim n$ ，為正負符號指標，正負號分別表示輸入參數  $X_i$  之兩代表點  $x_{i+}$  及  $x_{i-}$ ； $W(d_1, d_2, \dots, d_n)$  為模式在  $(x_{1, d_1}, x_{2, d_2}, \dots, x_{n, d_n})$  之輸出值；權重因子  $P(d_1, d_2, \dots, d_n)$  可表示如下：

$$P(d_1, d_2, \dots, d_n) = \prod_{i=1}^n P_{i, d_i} + \left( \sum_{j=i+1}^{n-1} d_j d_i a_{ij} \right) \quad (6)$$

式中  $P_{i, d_i}$  為點  $x_{i, d_i}$  之機率； $a_{ij}$  以下式求之：

$$a_{ij} = \frac{r_{ij} / 2^n}{\sqrt{\prod_{i=1}^n [1 + \left(\frac{g_i}{2}\right)^2]}} \quad (7)$$

式中  $r_{ij}$  為變數  $X_i$  與  $X_j$  之相關係數。由(5)式可知，利用 Rosenblueth 法進行不確定性分析時需要做  $2^n$  次模式之計算。

### 三、結果與討論

#### 3.1 魚卵存活率敏感度分析

為進行魚卵存活率之各項參數敏感度分析，本研究根據相關文獻[5]設定各項物理量之基準值如下：

物理量	基準值
$R_d$	0.06
$h$	12cm
$L_1$	6cm
$L_2$	180cm
$K_2$	5cm/s

模式之各參數變化範圍則選定如下：

參數	變化範圍
$R_d$	0.02 0.1
$h/L_1$	0.2 2.0
$L_2/L_1$	10 60

此三項參數對魚卵存活率之敏感度如圖二至圖四所示，由此三圖可知魚卵存活率均隨泥砂比沈積量之增加而減小，當比沈積量接近飽和( $C = 0.273$ )時，最嚴重者存活率可降至 30%以下(圖二)，其他亦分別降至 60%及 75%以下(圖三及圖四)。圖二顯示細砂對魚卵存活率之影響較粗砂為大，在比沈積量  $C = 0.25$  時， $R_d = 0.10$  之粗砂僅使魚卵存活率降至 85%，然而  $R_d = 0.02$  之細砂卻使存活率降至 39%，此乃因為細砂之透水性較粗砂為差，故雖含有相同之泥砂比沈積量，但細砂使孔隙水流速度大幅降低。圖三顯示礫石河床之壓力水頭差較小時，魚卵存活率亦較小，例如在比沈積量  $C = 0.25$  時， $h/L_1 = 2.0$  之水頭差仍能維持 89%之存活率，而在  $h/L_1 = 0.2$  之情況下，僅有 58%之魚卵得以存活，此乃因壓力水頭差較大時，雖有大量泥砂沈積，但仍能維持適當之孔隙水流速度使魚卵得以保持較高之存活率。圖四顯示魚卵存活率隨水流途徑長度之增加而減小，例如在  $C = 0.25$  時， $L_2/L_1 = 10$  之魚卵存活率降至 75%，而  $L_2/L_1 = 60$  之存活率則降至 73%，此乃因水流途徑較長時，相同之壓力水頭差僅能得到較小之壓力水頭梯度及孔隙水流速度，故魚卵之存活率較低。綜觀圖二至圖四，吾人可發現  $R_d$  及  $h/L_1$  為敏感度較高之參數，在比沈積量值較高時，魚卵存活率有顯著之差異，其中尤以  $R_d$  之敏感度為最高，在泥砂比沈積量接近飽和時，參數值變化範圍存活率之差距甚至可達 45%以上；而  $L_2/L_1$  之敏感度為最低，在接近飽和沈積量時，參數值變化範圍存活率之差距亦僅有 2%，其存活率之差距始終維持在 4%以內。

#### 3.2 魚卵存活率不確定性分析

為進行魚卵存活率不確定性分析，各參數之均值、標準偏差及偏態係數給定如下：

參數	均值	標準偏差	偏態係數
$C$	0.2	0.05	0
$R_d$	0.06	0.04	0
$h/L_1$	1.0	0.5	0
$L_2/L_1$	30	20	0

各參數間之相關係數矩陣如表一所示。根據 Rosenblueth 機率點估計法計算所得之魚卵存活率期望值為 66%，標準偏差 25%，偏態係數 -1.3，魚卵存活率大

多分佈於 60% 90%之間,並向右侧扭曲(即尾部在左側)。

表一 相關係數矩陣

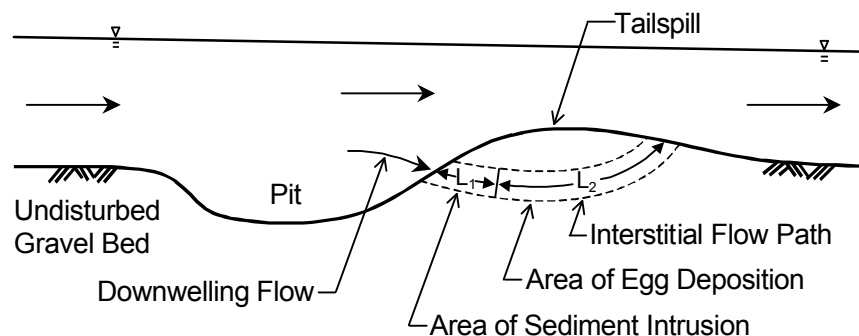
	$C$	$R_d$	$h/L_1$	$L_2/L_1$
$C$	1.0	0.25	0.2	-0.15
$R_d$		1.0	-0.1	0.2
$h/L_1$			1.0	-0.15
$L_2/L_1$				1.0

#### 四、結論

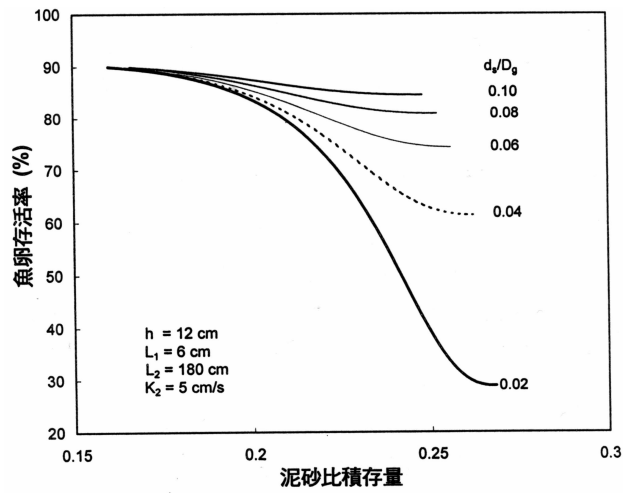
本研究建立一套量化模式以推估礫石河床泥砂積存量與魚卵存活率之關係。分析結果顯示泥砂礫石粒徑比( $R_d$ )及無因次壓力水頭( $h/L_1$ )為敏感度較高之參數,其中尤以 $R_d$ 之敏感度為最高,對魚卵存活率之影響最為顯著;而水流途徑長度比( $L_2/L_1$ )之敏感度為最低。本研究採用 Rosenblueth 機率點估計法進行不確定性分析,計算結果顯示若泥砂比積存量之均值及標準偏差分別為 0.2 及 0.05 時,其魚卵存活率之期望值為 66%,標準偏差 25%,偏態係數-1.3。本研究之魚卵存活率不確定性分析結果可做為後續風險評估之依據。

#### 參考文獻

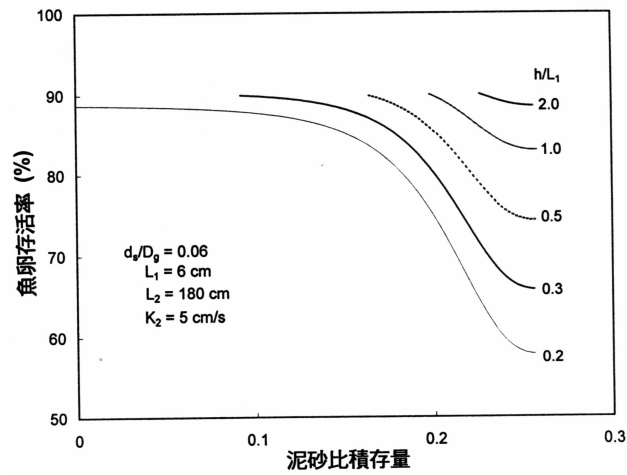
1. Milhous, R. T., "Effect of sediment transport and flow regulation on the ecology of gravel-bed rivers." In *Gravel-bed rivers*, Hey, R. D., Bathurst, J. C., and Thorne, C. R. (eds.) John Wiley & Sons, New York, (1982).
2. Rosenblueth, E., "Two-point estimates in probabilities." *Appl. Math. Modelling*, 5, 329-335, (1981).
3. Sakthivadivel, R., "Theory and mechanism of filtration of non-colloidal fines through a porous medium." *Tech. Rep. HEL 15-5*, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, Calif., (1966).
4. Cooper, A. C., "The effects of transported stream sediments on the survival of sockeye and pink salmon eggs and alevin." International Pacific Salmon Fisheries Commission, New Westminster, BC, (1965).
5. Lisle, T. E., "Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California." *Water Resour. Res.*, 25(6), 1303-1319, (1989).



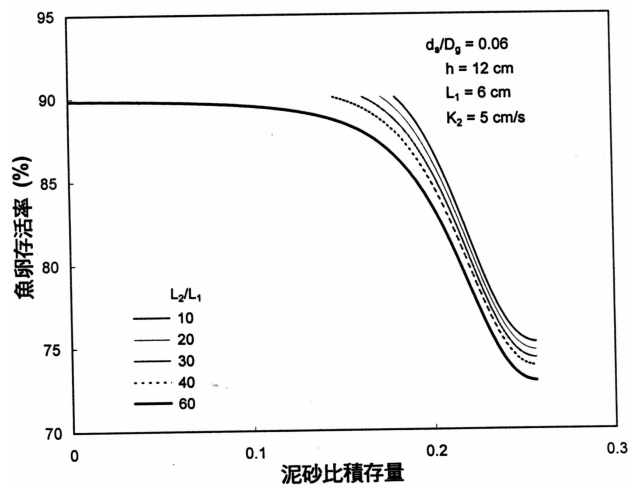
圖一 產卵坑示意圖



圖二 泥砂積存量與魚卵存活率之關係 (各種粒徑比)



圖三 泥砂積存量與魚卵存活率之關係 (各種壓力水頭)



圖四 泥砂積存量與魚卵存活率之關係 (各種水流途徑長度)