呼び水式階段魚道における問題点と その対処法について

A STUDY ON ISSUES AND COPING METHODS IN THE POOL-AND-WEIR-FISHWAY WITH PRIMING WATER

小坂祐樹¹・青木宗之²・田口裕基³・福井吉孝⁴
Yuki KOSAKA, Muneyuki AOKI, Yuki TAGUCHI and Yoshitaka FUKUI

¹学生員 東洋大学大学院 工学研究科環境・デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

²正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-6018 新宿区西新宿6-8-1)

³非会員 東洋大学 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

⁴正会員 工博 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

Through the ages, the pool-and-weir-fishway have been installed in many rivers in Japan. As time advances, fish-ways fail to function adequately because they are deteriorated, broken or changed flow in the downstream.

The main purpose of this study is to make clear the problems of fish-ways and to find better resolution methods to solve it. Therefore, we carried out the model experiment by using the open channel where a pool-and-weir-fish way had been set up.

As a result, a promising method to cope with the local scouring and circulation flow at the downstream of fish-way is studied by the model experiment.

Key Words : *pool-and-weir-fishway, priming water, Tribolodon hakonensis, division wall, fish behavior*

1. はじめに

我が国の魚道には、十分に機能していない魚道が数多く存在している。例えば、魚道から流出する流れにより魚道下流域の河床が洗掘され、魚道下流端の隔壁と魚道直下との水面間に大きな落差が生じていることである^{1,2)}。この場合、流出水脈が剥離するため魚類は跳躍しなければならず、魚道機能低下の原因となり、問題となっている^{1,3)}。しかし、魚道下流域の河床洗掘についての研究報告は棚田式魚道工についてのみであり⁴⁾、階段式魚道からの落下流による洗掘への影響については明らかにされていない。青木らは、階段式魚道の遡上効果を増進させる呼び水水路の効果について研究を行ってきた^{7,8)}。この呼び水水路から流出する呼び水は、魚道越流流速の2倍以上とすることが設計上の留意点となっている^{1,2)}。そのため、呼び水の強い流れが魚道下流域の洗掘をより進行させ、落差が拡大する可能性が考えられる。したがって、階段式魚道においても洗掘への影響を明らかにする必要があると考える。

階段式魚道は、我が国の既設魚道の約90%以上を占めているといわれており⁵⁾、魚道下流入口への集魚を目的として、呼び水水路が併設されることが多い。呼び水水路から流出する呼び水には、1)魚道下流入口の流れの影響範囲の拡大と、2)魚を魚道下流入口へ誘導する機能がある。これは、魚が持つ走流性を利用したものである。しかし、呼び水により、魚道下流域に循環流が発生する可能性がある^{5,6)}。循環流が生じると魚はその流れに乗ってその場に滞留してしまい⁷⁾、魚道下流入口を見つけることが困難になってしまう。

青木らは、呼び水式魚道のつくり出す魚道下流域の流況が、魚類の行動に及ぼす影響について模型実験での研究を行い、以下のことを明らかにしている。①呼び水には集魚効果が有り、 $v_p/v_f=3$ のとき最も効果が高い(v_p :呼び水流速、 v_f :魚道越流流速)⁸⁾。②循環流の形成条件は模型水路での実験では、 $v_p/v_m \geq 5$ (v_p :呼び水流速、 v_m :主水路流速)⁷⁾、平行流水路を用いた実験では $u_{mR}/u_{mL} \geq 3.8$ であった⁸⁾。また、フルード数で評価すると $Fr_R/Fr_L \geq 3.59$ である⁸⁾。ここで、添字R、Lはそれぞれ平行流水路右岸側、左岸側を表す。③呼び水水路と

図-1 階段式魚道モデル図

主水路間に導流壁を設けることで、循環流の発生を抑制し、呼び水の集魚効果を増進することができる。

本研究では、主水路幅を45(cm)に拡張した階段式魚道を用いて、呼び水のつくり出す魚道下流域の流れと魚の行動特性について、更に詳細な検討を行う事を目的としている。とくに、魚道下流域の河床変動と魚の行動域についても着目し、下流の河床変動、流れの変化によってもたらせられる魚道の機能低下防止法について検討するため、模型実験（固定床、移動床）および実魚を用いた挙動実験、数値解析を行った。

2. 模型実験

実験に用いた階段式魚道モデルを図-1に示す。魚道勾配および呼び水水路勾配はそれぞれ1/10であり、隔壁には交互に切り欠きを配置した。導流壁は魚道と平行に設け、導流壁長さ l_D が魚道幅 b_f の2倍の場合に最も効果が発揮されるため⁷⁾、 $l_D/b_f=2$ とした。

(1) 水理実験

水理量の測定は、二次元電磁流速計（KENEK製、VM2001）を使用し、流速の測定を行った。1測点毎に2048個のデータをサンプリング周波数100(Hz)で採取し、単純平均した。なお、実魚の遊泳深度が水路底面付近であるため、水深方向の測点 $h_z=2$ (cm)とした²⁾。

(2) 実魚を用いた挙動実験

実魚としてウグイ(*Tribolodon hakonensis*)を用いた。ウグイはほぼ全国に分布し、アユ(*Plecoglossus altivelis*)と

表-1 実験ケース

ケース名	全流量 Q (l/s)	呼び水 水路	l_D/b_f	河床 条件	プール数
Run 1-1-A	5.0	有り	2	固定床	5
Run 2-1-A	6.0	有り	2	固定床	5
Run 3-1-A	7.0	有り	2	固定床	5
Run 4-1-A	8.0	有り	2	固定床	5
Run 5-1-A	18.0	有り	2	固定床	5
Run 2-2-A	6.0	有り	0	固定床	5
Run 4-2-A	8.0	有り	0	固定床	5
Run 5-2-A	18.0	有り	0	固定床	5
Run 2-1-B	6.0	有り	2	移動床	5
Run 2-2-B	6.0	有り	0	移動床	5
Run 2-3-B	6.0	無し	0	移動床	5
Run 2-4-B	6.0	無し	0	移動床	4

同様に強い走流性を持っていることが知られている。実験には平均体長 $BL=8.3$ (cm)の個体を用いた。実験手順は、階段式魚道モデル下流 ($x=250\sim300$ (cm)) に仕切りを設け、その中で30分間ウグイの流れに慣れさせた。その後仕切りを取り、ウグイの挙動をビデオカメラで撮影した。1回の実験に使用した個体数は20であり、ウグイの学習能力を考慮し毎回異なる個体を用いた。

(3) 移動床実験

一様粒径の中礫（平均粒径 $d_{50}=6.2$ (mm)）を水路に3(cm)の厚さで敷き均し、流量 $Q=6$ (l/s)の条件で30分間通水を行い洗掘の様子を観察した。その後、ポイントゲージを用い魚道下流域 ($x=0\sim120$ (cm)) で河床高の測定を行なった。測点間隔は x , y 軸方向にそれぞれ 5×5 (cm)のメッシュと、側壁から2(cm)離れた箇所 x 軸方向に5(cm)間隔でとり、合計325点で測定した。

3. 実験ケース

前述した、青木らが明らかにした流速比 v_p/v_f と遡上率の関係と、導流壁の循環流抑制効果^{7,8)}の適用範囲を広げるために、主水路幅を15(cm)から45(cm)に広げた階段式魚道を用いた。そして、呼び水および導流壁の効果について検討を行なうため、表-1に示すケース（Run 1-1-A~5-2-A）で流量および導流壁の有無を系統的に変化させ、水理量の測定および実魚を用いた挙動実験を行なった。なお、青木ら^{7,8)}の用いた階段式魚道モデルの主水路幅 b_m 、呼び水水路幅 b_p 、魚道幅 b_f の比は、 $b_m:b_p:b_f=3:1:2$ であり、幅30(cm)水路を用いている。本実験に用いた階段式魚道モデルは $b_m:b_p:b_f=9:1:2$ である。また、どちらの魚道モデルも魚道幅10(cm)、呼び水水路幅5(cm)と同値であり、主水路幅の違いによる呼び水機能の比較検討を行なった。

魚道下流域での洗掘の様子をみるため、Run 2-1-Aの

河床条件を移動床としたもの（Run 2-1-B）を基本とし、導流壁無し（Run 2-2-B）、導流壁および呼び水水路無し（Run 2-3-B）の条件で模型実験を行なった。また、魚道下流端の隔壁部での水脈の剥離を再現するため、Run 2-3-Bの条件で図-1 a)のpool-5を外し、魚道下流端の隔壁高10(cm)にし模型実験を行なった（Run 2-4-B）。

4. 実験結果

(1) 呼び水効果および導流壁の機能の検討

青木らの遡上率の定義⁸⁾を用い遡上率 R_r を求めた。

$$R_r = \frac{F_c}{F_T} \quad (1)$$

F_c ：遡上に成功した魚の個体数， F_T ：実験に使用した魚の個体数である。

ここで、図-2に導流壁の有無と遡上率の関係を示す。導流壁のない場合に比べ、導流壁を設けたRun 2-1-A、Run 4-1-A、Run 5-1-Aは遡上率がそれぞれ2.0、1.8、4.9倍に増えている。図-3 a) b)に示す魚道下流域の流速ベクトル図を見てみると、導流壁を設けることで魚道下流域での循環流の発生を抑制していることがわかる（図-3 a)破線○部）。青木らの示した「呼び水水路と主水路間に導流壁を設けることで、循環流の発生を抑制し、呼び水の集魚効果を増進することができる。」⁸⁾と同様な結果を得ることができた。

図-4に、呼び水流速 v_p と魚道越流流速 v_f の比 v_p/v_f と遡上率の関係を示す。Run 1-1-A~4-1-Aについては、青木らの研究結果⁸⁾と同様な傾向を示した。しかし、Run 5-1-Aについては異なる結果となった。これは、Run 5-1-AはRun 1-1-A~4-1-Aに比べ、魚道下流域の流速が増加しウグイの行動に影響を及ぼしているのではないかと考えられる。ここで、図-5にRun 4-1-AとRun 5-1-Aの魚道下流域でのウグイの軌跡図を示す。Run 4-1-Aでは、多くの個体が左岸側を遡上し、 $x=50\sim120(\text{cm})$ 、 $y=35\sim45(\text{cm})$ の辺で定位した後に、さらに左岸側壁にそって魚道下流入口へと進入を試みていることがわかった（図-5 a)）。多くの個体が定位していた領域の流速は、 $8\sim32(\text{cm/s})$ であり、実験に使用したウグイの体長 BL の約1~4倍の流速であった（図-6 a)）。また、魚道下流入口への遡上経路となる左岸側壁付近の流速は、魚道下流入口へ近づくにつれ上昇し、 $28\sim48(\text{cm/s})$ であった。ウグイの体長の2~4倍の値の流速は巡航速度と呼ばれ、長時間遊泳することが可能な流速と言われている。したがって、ウグイは魚道下流域において巡航速度内の流速域で定位し、そこから魚道或いは呼び水から出る速い流れを感知し、走流性を発揮することで魚道下流入口へ遡上していったといえる。一方、Run 5-1-Aでは水路右岸側、 $x=60\sim110(\text{cm})$ 、 $y=0\sim25(\text{cm})$ の範囲に多く定位していることが確認できた。また、遡上

図-2 導流壁の有無と遡上率

a) Run2-2-A

b) Run 2-1-A

■魚道、■呼び水水路、■主水路、—導流壁

図-3 魚道下流域の流速ベクトル図

図-4 流速比 v_p/v_f と遡上率の関係

を試みた個体は左岸側壁に沿って遡上を試みるが、魚道下流入口まで辿りつけず下流へ押し流されてしまっていることが確認された（図-5 b)）。右岸側の定位

a) Run 4-1-A

b) Run 5-1-A

■魚道, ■呼び水水路, ■主水路, —導流壁

図-5 魚道下流域のウグイの軌跡図

a) Run 4-1-A

b) Run 5-1-A

■魚道, ■呼び水水路, ■主水路, —導流壁

図-6 魚道下流域の流速コンター図

がみられた領域の流速は体長 BL の約2倍の流速であり(図-6 b)), 巡航速度に当てはまる。遡上経路となっていた左岸側壁付近の流速は約65~90(cm/s)であり, 体長 BL の8~11倍の値であった。ウグイは速い流速の中では下流へ押し流されないように突進速度で遊泳する。その突進速度は体長の10倍以上だが, 1~5秒間しか持続しないとされている¹¹⁾。泉らのスタミナトンネルを用いた遊泳力に関する研究では⁹⁾, 管内流速が約100(cm/s)の時の突進速度は8~15 BL/s であった。今回の実験で用いた個体が15 BL/s の突進速度で5秒間遊泳した場合, 遡上経路である左岸側壁では8~11 BL/s の流速であるため, 相対遊泳速度は4~7 BL/s になり, その時の遊泳距離は20~35(cm)程度となる。魚道直下流の流速は8~12 BL/s であり, $x=20\sim120$ (cm)付近までその流れが持続している。したがって, 魚道直下流では突進速度での遊泳が魚道下流入口まで持続できず, 遡上率の低下につながった。

(2) 移動床の実験

図-7に, 通水30分経過後における最終河床形状の等高線図を示す。呼び水水路および導流壁の無いRun 2-3-B, Run 2-4-Bを比較してみると, Run 2-3-Bは洗掘が小規模であったが, Run 2-4-Bは広範囲に洗掘が生じている。Run 2-3-BとRun 2-4-Bの河床から隔壁上端までの距離は, それぞれ2(cm)と7(cm)である。したがって, Run 2-4-Bでは隔壁からの落下流がRun 2-3-Bに比べ卓越しているため, 河床洗掘が広範囲に広がったと考えられる。一方, Run 2-3-Bは魚道最下流のプール床が本川

河床よりも低い位置にある。和田は, 流量の変動や河床低下に対応できるよう, 魚道下流入口は最下流部のプールの隔壁上端を河床にまで潜入させることを提案している¹⁾。今回の実験により, その提案が河床洗掘の抑制にも効果があることが明らかになった。

これまでの研究で, 呼び水水路および導流壁を設けることで魚道の集魚効果を上げることが可能であることが明らかにした。しかし, 移動床の実験の結果, 呼び水が有るRun 2-1-B, Run 2-2-Bではどちらも河床の洗掘が著しく, 呼び水の河床洗掘への影響が大きいことがわかる。河床洗掘の進行は, 隔壁部での落差の増大や水脈の剥離を引き起こす。したがって, 魚道への集魚効果を目的とする呼び水水路の魚道への付加が, 河床洗掘をより進行させ, 隔壁部での落差の増大や水脈の剥離による遡上への障害が発生する可能性があることが示唆された。引き続き河床洗掘対策について研究を行い, 呼び水による河床洗掘の問題点の解決法を明らかにしていく必要がある。

5. 数値解析

魚道下流域の流れの変化と魚の行動予測を行なうことで, 階段式魚道の問題点に対する一つの解決策を見出すことができると考えている。

模型実験によって, 魚道直下の局所洗掘に呼び水が大きく起因することが分かった。これにより, 魚の行

動に対しても影響を及ぼすことが示唆された。

数値解析においても、河床変動を考慮した流れの計算と、それに対する魚の行動予測を行う必要があると考えられる。そのためには先ず、固定床での流れの計算が無理なく行えることが重要である。そこで本研究では、固定床での流れの計算モデルを構築した。

また、魚の行動予測については、著者らの既往の研究でも提唱しているランダムウォークモデル¹²⁾を用いることとした。これは、「通常の流れ」に対する魚の行動を対象にしているが、本研究では、呼び水水路や魚道から流出する、いわゆる「速い流れ」を対象にし、魚の行動予測を行った。

(1) 解析概要

a) 魚道下流域における流れの解析

魚道下流域での流れを二次元的な流れとみなし、二次元浅水方程式および連続式を用いた。ここで、呼び水流速 v_p が主水路流速 v_m よりも非常に大きい($v_m \ll v_p$)ことから、複断面開水路における低水路と高水路間または河道内の樹木群内外の流れの境界部と同様に、両流体間で運動量交換が生じてしまうので、本研究では、呼び水と主水路間の流れの境界部での流体混合を考慮し、干渉によるせん断力項を考慮している⁸⁾。

b) 魚道下流域における魚の行動解析

魚の遊泳行動は、水理条件や環境条件に左右されるが、微小時間における移動は、本質的にランダムな動きと考えられる。そこで、魚の行動追跡には、ランダムウォーク法を使用した¹⁰⁾。具体的には、ある地点にいる仮想魚が次の瞬間に移動する方向をランダムに選択させ、移動速度をその場の水理量（流速 u, v ）にあわせ、変化させるものとした。本研究では、線形合同法により得られる乱数数列 $Z=(z_0, \dots, z_n)$ を使用した。仮想魚の存在箇所は、次式により求めることができる。

$$\begin{cases} X_n = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \Delta t (U_m - U) \cos \theta_n + X_{n-1} \\ Y_n = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \Delta t (U_m - U) \sin \theta_n + Y_{n-1} \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 X_n, Y_n ：現時刻に仮想魚が存在している箇所の x, y 座標、 α ：走流性を表す係数、 β ：壁に反応を示す係数、 γ ：構造物に反応を示す係数、 U_m ：仮想魚の遊泳速度(m/s)、 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ ：その場の流速値(m/s)である。なお、 U_m, U はスカラー量で与えており、 U は見かけの流速であり、仮想魚の遊泳行動に対する抵抗とみなしている。 X_{n-1}, Y_{n-1} ：前時刻に仮想魚が存在していた箇所の x, y 座標である。 θ_n は魚の移動方向と x 座標とのなす角度であり、

$$\theta_n = 2\pi z_n \quad (3)$$

であり、 $0 \leq \theta_n \leq 2\pi$ の範囲で与えられる。

なお、青木らは構造物に反応を示す係数 γ を $0 \leq \gamma \leq 1$ の範囲で与えている⁸⁾。魚道は構造物であるため、 γ を考慮する必要があるが、ここでは先ず、魚道の呼び水がつくり出す流れと魚の行動のみに着目しているため、構造物に反応を示す係数 γ を考慮しないことにした。

図-7 最終河床形状の等高線図

走流性を表す係数 α および壁に反応を示す係数 β の詳細は、既往の報告に示されている¹³⁾。

(2) 解析結果

a) 流れの解析結果

図-8 流速の数値解析結果

図-9 魚の挙動の数値解析結果

図-8に、Run 4-1-Aにおける流れの解析結果を示す。実験結果（図-6 a））と比べ、呼び水の拡がり方や魚道延長上の流速、主水路での循環流の生起など、概ね良好に再現できている。

b) 魚の行動解析結果

図-9に、Run 4-1-Aにおける魚の解析結果を示す。仮想魚が主水路側から魚道下流入口へ向かって遡上する様子を再現できている。魚の行動特性をさらに詳細に検討し、モデルに反映させることで、より精度の高いランダムウォークモデルを構築できるので、魚の行動予測を精度良く行える。その結果、魚道に対する問題点を解決する一つの方法を確立できると考えている。

6. おわりに

規模の異なる2種類の階段式魚道を用い、呼び水のつくり出す魚道下流域の流れとウグイの行動特性について、模型実験および数値解析により、更に詳細な検討を行った。また、呼び水による魚道下流域の河床洗掘への影響について、移動床を用いて実験的に調査を行った。これらにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 模型規模の異なる階段式魚道においても、導流壁の循環流抑制効果を確認できた。
- (2) 流速比 v_p/v_f と遡上率の関係は、青木らの研究結果⁸⁾と同様な傾向を示し、 $v_p/v_f=3.58$ まで適応することが可能な事を明らかにした。

- (3) 魚道直下流の魚が突進速度で突破することのできない領域では、青木らによる流速比 v_p/v_f と遡上率の関係⁸⁾は当てはまらないこともある。今回の場合は、8~12BL/sの流速が縦断方向に20~35(cm)の範囲である場合に魚道下流入口への進入が困難になる。
- (4) 魚道下流入口の集魚効果を増進する呼び水によって、河床の洗掘が進行する恐れがあることが分かった。それに対しては、プールを増設し落差を小さくする方法が有効である。
- (5) 二次元浅水流モデルとランダムウォークを用いることにより、呼び水効果は十分に検討することができる。

参考文献

- 1) 和田吉弘：言いたい放題魚道見聞録，pp.62-63，山海堂，2003
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局HP：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kankyousakana_tebiki/pdf/print.pdf
- 3) 浦 勝，山口秀和，鬼束幸樹，秋山壽一郎：水位落差の大きな魚道の流況改善について，水工学論文集，第47巻，pp.769-774，2003
- 4) 前川勝朗，大久保博，大石幸司：棚田式魚道工における下流部の洗掘について，農業土木学会全国大会講演要旨集，pp.668-669，2004
- 5) 中村俊六：魚道のはなし，pp.2,92，山海堂，1995
- 6) 広瀬利雄，中村俊六：魚道の設計，p.255，山海堂，1991
- 7) 青木宗之，福井吉孝，小原 誠，染井香栄：階段式魚道の呼び水がつくり出す流れとそれに対する魚の行動，環境システム論文集，Vol.36，pp.457-465，2008
- 8) 青木宗之，吉野 隆，福井吉孝：呼び水式魚道における流れとそれに対する魚の挙動，ながれ，第28巻，pp.485-494，2009
- 9) 泉 完，山本泰之，神山公平：高速流条件における現地のスタミナトンネルを用いたウグイの突進速度，農業農村工学会全国大会講演要旨集，pp.552-553，2007
- 10) 高水克哉，栗原朋之，青木宗之，内山文哉，福井吉孝：杭水制内外の流れと魚の挙動，水工学論文集，第51巻，pp.1273-1278，2007
- 11) Blaxter, J.H.S : Swimming Speeds of Fish, *proceedings of the FAO Conference on Fish Behavior in relation to Fishing Techniques and Tactics*, in Bergen, Norway, pp.69-100, 1967
- 12) 関谷 明，福井吉孝，下村 充，打田 剛：魚類の迷入とその防止法，土木学会論文集，No.782/α-70，pp.81-91，2005
- 13) 青木宗之，福井吉孝：魚道下流域での流れと魚の行動，土木学会関東支部第37回技術研究発表会，II-35，2010

(2011. 9. 30受付)