

階段式魚道におけるプランジングフローとストリーミングフローの発生条件に関する研究

PLUNGING AND STREAMING FLOWS IN POOL-AND-WEIR FISHWAYS

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・木内大介³・川良典彰⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Daisuke KIUCHI and Noriaki KAWARA

¹正会員 博(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

³学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Fishways are river constructions which give a helping to fish migration. There are three types of flow formations in pool-and-weir fishways such as a plunging flow, streaming flow and intermixed flow of plunging and streaming flows. Rajaratnam *et al.* proposed a criterion formula that predicts the flow formations. However, this criterion formula has no physical meaning. Further the accuracy of prediction of their formula is not high. In this study, the criterion formula, which can predict the flow formation in a pool-and-weir fishway, is derived semi-theoretically. The experiments were conducted with changing the aspect ratio and discharge in the pool-and-weir fishway. The water surface profiles were measured and also three components velocities were measured with a 3-D electromagnetic current meter. A new criterion formula, which is able to predict the flow formation, is proposed under the condition that the channel slope is 1 on 12.

Key Words : pool-and-weir fishway, plunging flow, streaming flow, migration

1. はじめに

ダムあるいは落差の大きな堰などの河川横断構造物が設置されると、水位の縦断方向の連続性が損なわれ、水生生物の移動が困難となる。回遊魚にとってはこうした事態は深刻で、種の絶滅にもつながりかねない。分断された水位をなめらかに接続あるいは水位落差を小さく分割し、魚の遡上および降下を助けるものが魚道である。

魚道は水理構造の違いによって、プールタイプ、ストリームタイプおよびオペレーションタイプに分類される。¹⁾さらにプールタイプは、階段式、バーチカルスロット式および潜孔式に分類される。階段式の代表例として、全面越流型、部分越流型、アイスハーバー型、ノルウェー型などが挙げられる。このように様々なタイプの魚道が提案されているが²⁻⁴⁾、我が国の既設魚道の9割以上が階段式魚道である。

プールと隔壁とで構成される階段式魚道は次のような欠点をもつことが指摘されている。隔壁からプールへと越流した後に流下方向に位相を有する定在波が発生する

場合があること¹⁾、横断方向に位相を有するセイシュが発生する場合があること⁵⁾およびプランジングフローとストリーミングフローが交互に発生し、プール内の渦の回転が時間的に変化するといった不安定な状態になる場合があること⁶⁾などである。ここに、プランジングフローとは隔壁を越流した流れが一度プール底面付近まで潜り込み、下流側隔壁に衝突することで再び水面付近に上昇する流れのことで、ストリーミングフローとは落下流がプール内に潜り込まずに水面付近を流下し下流側隔壁を越流する流れのことである。中村ら⁵⁾は全面越流型魚道の中央部に非越流部を設け、アイスハーバー型にすることでセイシュの発生を抑えることに成功した。プランジングフロー、ストリーミングフローおよび両状態が交互に発生する条件については、Rajaratnam *et al.*⁷⁾によって検討されている。

Rajaratnam *et al.*⁷⁾はプランジングフローとストリーミングフローの発生条件について、彼らの提案した無次元流量が0.25よりも大きな場合にストリーミングフローが発生し、逆に小さい場合にプランジングフローが発生すると述べているが、Rajaratnam *et al.*⁷⁾の提案した無次元

流量は次のような問題を有している。彼らはプランジングフローについて堰上で限界流になることを利用して流量と越流水深との関係を導出しているが、越流水深をプール長で代用しており、この代用には疑問が生じる。事実、浦ら⁸⁾が現地計測で観察したプランジングフローの発生を彼らの基準では説明できない。さらに、VOF法を用いて階段式魚道の流況を再現した前野ら⁹⁾および前野・小川¹⁰⁾の数値計算結果においても、プランジングフローとストリーミングフローの両者が発生しているが、Rajaratnam *et al.*⁷⁾の基準ではやはり発生理由を説明できないのが実情である。これらの結果はRajaratnam *et al.*⁷⁾の基準に問題があることを示唆している。

本研究は、全面越流型階段式魚道においてプランジングフローとストリーミングフローが発生する条件について理論的考察を行うと共に、室内実験によってこの検証を行い両者が発生する条件について検討したものである。

2. 理論的考察

図-1に全面越流型階段式魚道でプランジングフローが発生した状況の模式図を示す。プール底面に沿って流下方向に x 軸を、鉛直上向きに y 軸を、横断方向に z 軸をとり、 x および y 軸方向の瞬間流速を $\tilde{u} \equiv U + u$ 、 $\tilde{v} \equiv V + v$ 、時間平均流速を U 、 V 、変動成分を u 、 v とした。プール長を L_x 、プール高を L_y 、隔壁厚を Δx 、プール間落差を Δy 、水深を h 、越流水深を Δh とする。また、隔壁を越流したプールに落下したときの流入角度を θ 、隔壁上での諸量には添字 w をつけて表す。プール内の流れの形態を決定するパラメータは、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta y)$ 、流入角度 θ および流入時の運動量の3つと考えられる。なお、水路勾配や流量が変化すると上記の3つのパラメータが変化するという特徴がある。

(1) プランジングフローに関する理論展開

プール内の水面と隔壁の水面でベルヌーイの式を立てると次式となる。

$$\Delta y + h + \frac{U_m^2}{2g} = \Delta y + L_y + h_w + \frac{U_{mw}^2}{2g} \quad (1)$$

ここに、 U_m は断面平均流速、 g は重力加速度である。なお、エネルギー補正係数が1よりも大きな値をとることは想像に難くないが、エネルギー補正係数を未知量とすると式が解けないことおよび速度水頭は一般的に圧力水頭よりもかなり小さな値となるので事実上あまり影響がないため、ここではエネルギー補正係数を1とおいた。堰上で流れが限界流となることを利用すると、堰上水深 h_w および堰上流速 U_{mw} は次式となる。

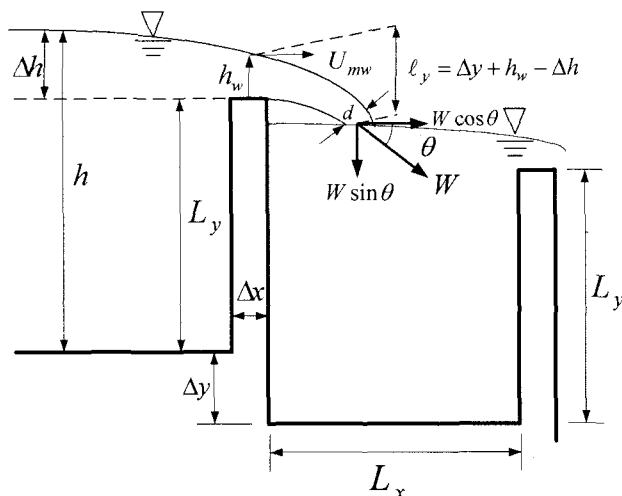


図-1 プランジングフローの概要

$$h_w = (hFr^2 + 2\Delta h)/3 \quad (2)$$

$$U_{mw} = \sqrt{g(hFr^2 + 2\Delta h)/3} \quad (3)$$

$Fr \equiv U_m / \sqrt{gh}$ はフルード数である。堰上の水面と次のプールとの鉛直落差 ℓ_y は幾何学的に次式となる。

$$\ell_y = \Delta y + h_w - \Delta h \quad (4)$$

式(4)に式(2)を代入し、自由落下理論を利用すると、落下時間 t は次式となる。

$$t = \sqrt{2(hFr^2 - \Delta h + 3\Delta y)/(3g)} \quad (5)$$

落下流が水面に到達した時の流速ベクトルを W とする。鉛直下向き流速 $W \sin \theta$ は自由落下理論および式(5)を利用すると次式のように得られる。

$$W \sin \theta = \sqrt{2g(hFr^2 - \Delta h + 3\Delta y)/3} \quad (6)$$

堰を離れた流れの水平方向の挙動が等速運動と仮定すると、水平方向成分 $W \cos \theta$ は式(3)と同値となる。

$$W \cos \theta = \sqrt{g(hFr^2 + 2\Delta h)/3} \quad (7)$$

式(6)および(7)より流入角度 θ が求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{2 + \frac{6(1 - \Delta h/\Delta y)}{h/\Delta y \cdot Fr^2 + 2\Delta h/\Delta y}} \quad (8)$$

続いて、堰上の流量 $h_w U_{mw}$ と落下点との間に連続の式を立てて、式(6)および(7)より得られる流速 W を代入すると落下流の流脈幅 d が得られる。

$$d = \sqrt{(hFr^2 + 2\Delta h)^3 / (3hFr^2 + 4\Delta h)/3} \quad (9)$$

すると、式(6)、(7)、(9)より運動量 dW^2 は次式となる。

$$\frac{dW^2}{g\Delta y^2} = \frac{1}{9} \sqrt{\left(\frac{h}{\Delta y} Fr^2 + 2\frac{\Delta h}{\Delta y}\right)^3 \cdot \left(3\frac{h}{\Delta y} Fr^2 + 4\frac{\Delta h}{\Delta y}\right)} \quad (10)$$

以上のように、流れの形態を直接決めているのはアスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta y)$ 、流入角度 θ および運動量であるが、式(8)および(10)に見られるようにこれらに影響を与えるパラメータは、フルード数 Fr 、相対水深 $h/\Delta y$ 、

表-1 実験条件

Flow L_x / L_y	Plunging (l/s)	Streaming (l/s)	Streaming to Plunging (l/s)	Plunging to Streaming (l/s)
1	0.4~1.1	4.0~10	1.05	2.35
2	1.0~3.5	5.4~10	4.20	4.65
3	1.0~4.0	7.0~10	4.65	5.64
4	1.0~6.0	8.4~11	6.78	8.00

アスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta y)$ および相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ の4つである。

(2) 低フルード数近似 (仮定1)

流れの形態を決定するパラメータが、 Fr 、 $h / \Delta y$ 、 $L_x / (L_y + \Delta y)$ および $\Delta h / \Delta y$ であることが解明されたが、これら4つのパラメータを系統的に変化させる実験的検証を行うことは困難なことや、工学的には少ないパラメータで流れの概略を予測できればよいので、ここでパラメータのオーダー比較を行いパラメータ数を減ずることを試みる。式(8)および(10)にはフルード数 Fr が含まれているが、プール内のフルード数 Fr が小さいと仮定 (仮定1) すると、両式は次のように変形される。

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{2 + 3(\Delta y / \Delta h - 1)} \quad (11)$$

$$dW^2 / (g\Delta y^2) = 8\sqrt{2}(\Delta h / \Delta y)^2 / 9 \quad (12)$$

すなわち、低フルード数近似が成立すれば、流れの形態を決定するパラメータはアスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta y)$ および相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ の2つとなる。

(3) ストリーミングフローに関する仮定 (仮定2)

ストリーミングフローは堰上で限界流とならないため、理論展開が困難である。しかし、仮に堰上で限界流に近い状態であれば (仮定2)、式(1)~式(12)の理論を代用できる。すると、同様に流れの支配パラメータがアスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta y)$ および相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ の2つとなることが期待される。

3. 実験装置および実験条件

前章の2つの仮定の妥当性を検証することおよびプランジングフローとストリーミングフローの発生条件を定式化することを目的とし、室内実験を行った。

実験には、長さ0.48m、幅0.4m、高さ0.4mのプールを5個つなげ、長さ0.08mの直角型隔壁を設けた全面越流型魚道を用いた。平均的な傾斜角度は1/12である。こうした傾斜角度およびプール長に対する隔壁幅などには実河

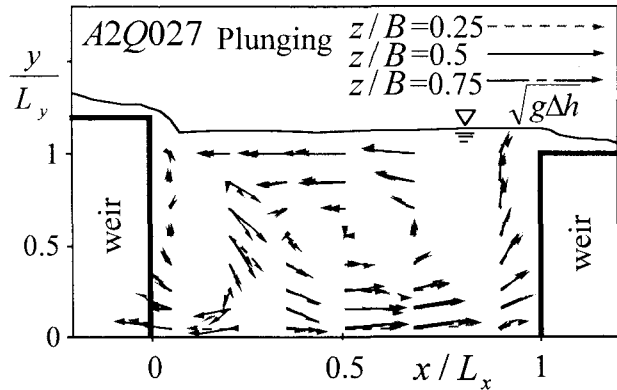


図-2 流速ベクトルの横断方向の比較

川に設置されている階段式魚道の平均的な値を適用した。計測は上流から4つ目のプールで行った。実験条件を表-1に示す。プール形状 L_x / L_y および流量 Q を変化させ、プランジングフロー、ストリーミングフローを再現した。また、プランジング状態で流量を徐々に増加させストリーミング状態になった直後(PS遷移直後と称す)およびストリーミング状態で流量を徐々に減少させてプランジング状態になった直後(SP遷移直後と称す)の場合も計測対象とし、合計40ケースの実験を行った。以後、実験ケース名として、A2Q027などを用いるが、これはプール形状 L_x / L_y が2で流入流量 Q が2.7 l/s を意味する。

計測項目は水位計測および流速計測である。ポイントゲージを用いて3番目のプールの越流部から4番目のプールの越流部までの約30点における水位を計測した。続いて、電磁流速計を用いて4番目のプール内の中央断面 ($z/B = 0.5$) において、 x 方向に6点、 y 方向に8点の格子点における流速 U および V を計測した。 B は水路幅である。ただし、プランジング状態のA2Q027およびストリーミング状態のA2Q042については、流れの2次元性を確認するために、 $z/B = 0.25, 0.5, 0.75$ の3断面について流速計測を行った。両流速計測とも計測間隔および計測時間はそれぞれ0.1sおよび40.96sとした。

4. 実験結果および考察

(1) 流れの2次元性

図-2に $z/B = 0.25, 0.5, 0.75$ の3断面におけるケースA2Q027の無次元流速ベクトル $\sqrt{U^2 + V^2} / \sqrt{g\Delta h}$ を示す。なお、接近流速をゼロとして求められる隔壁上の流速値が $\sqrt{2g\Delta h}$ となるため、流速の無次元化には $\sqrt{g\Delta h}$ を用いた。同図より、プール内水面近傍の x 方向流速が負であるため、流れの形態がプランジングに属していることがわかる。また、横断方向の変化による流速の差はほ

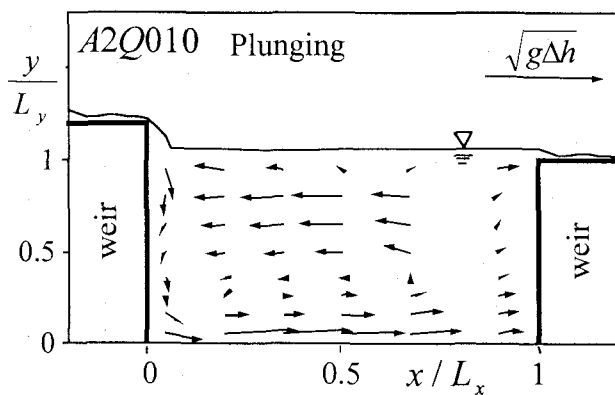


図-3 水面形および流速ベクトル(プランジングフロー)

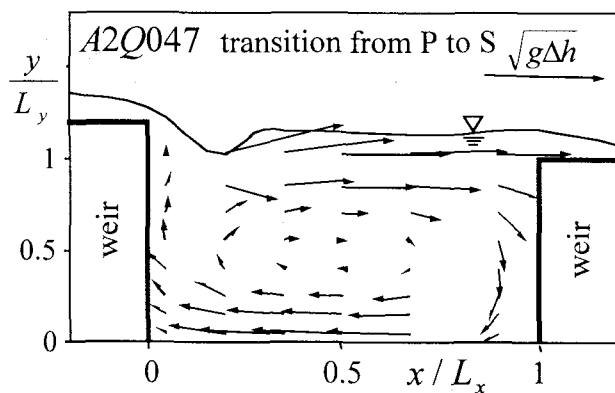


図-4 水面形および流速ベクトル(PS遷移直後)

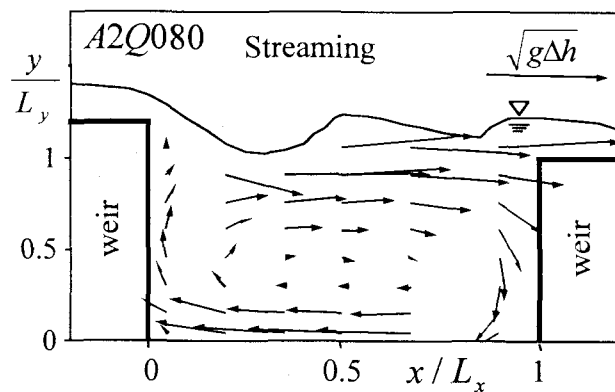


図-5 水面形および流速ベクトル(ストリーミングフロー)

とんど観察されない。そのためプール内の流れは側壁の影響を受けていない2次元的な流れと判断される。こうした結果はストリーミング状態のA2Q042でも確認された。したがって、水路中央の $z/B=0.5$ の結果を代表値として使用しても適切であると判断される。

(2) 流れの概要

図-3～5にプール形状 L_x/L_y が2の時プランジング状態となったA2Q010, PS遷移直後状態のA2Q047およびストリーミング状態となったA2Q080における水面形および $\sqrt{g\Delta h}$ で無次元化された流速ベクトル(U, V)を示す。流量が少ない場合は図-3に示すようなプランジング状態となっている。流量を増しても図-2に示したように、

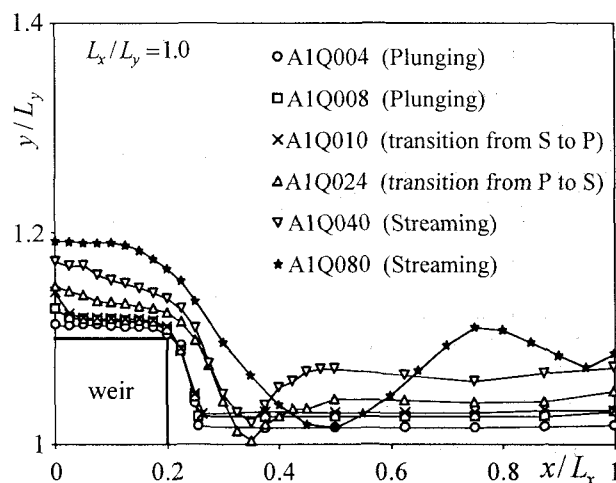


図-6 プール形状 $L_x/L_y=1$ における各水面形

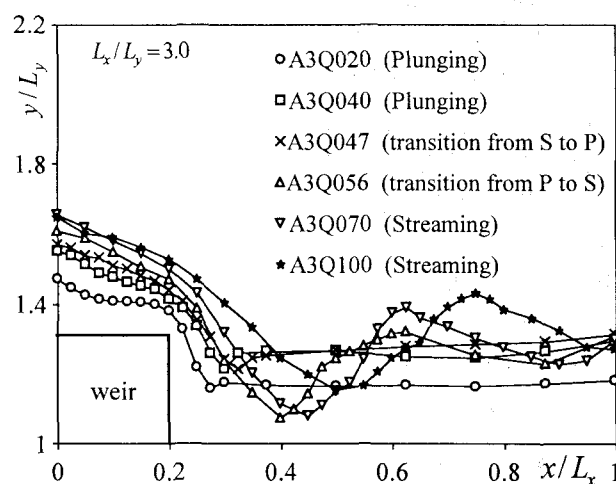


図-7 プール形状 $L_x/L_y=3$ における各水面形

ある程度の流量まではプランジング状態のままである。しかし、ある流量を超えると図-4に示すようにプランジング状態からストリーミング状態となるPS遷移が発生する。それ以上流量を増加させてもストリーミング状態のままであった。一方、ストリーミング状態において、流量を徐々に減少させてSP遷移を発生させた時の流量は、PS遷移の流量よりも小さかった。こうした結果は、他のプール形状 L_x/L_y の全てで確認された。また、中村⁹⁾はプランジング状態とストリーミング状態が時間的に交番する不安定な状態が存在することを指摘しているが、今回の実験では不安定状態は発生しなかった。本実験では流入流量がほぼ一定であるが、実河川では流入流量が時間的に微小に変化するため、PS遷移とSP遷移が繰り返して発生する場合があると推測される。

図-6～7にプール形状 L_x/L_y が1および3の場合の水面形を示す。プランジング状態およびSP遷移直後の状態ではプール内水深がほぼ一定なため、越流水深 Δh の抽出は容易である。一方、ストリーミング状態およびPS遷移直後の状態ではプール内水深が流下方向に激しく変化し

ており、越流水深 Δh の抽出が容易ではない。これは跳水的な波の発生を意味している。ここでは跳水的な流れの影響を除外するために、流れがプール内に流入した直後に水深が最大となる領域よりも下流側の水深を平均し、越流水深 Δh を求めた。隔壁上水深 h_w については隔壁上の水深を平均して求めた。

(3) 仮定1の検証

仮定1を検証するために、式(2)において、フルード数 Fr を考慮した値とフルード数 Fr をゼロとした値の比 r_1 を計算し、図-8に示す。

$$r_1 = 2 \frac{\Delta h}{\Delta y} \left/ \left(\frac{h_1}{\Delta y} Fr^2 + 2 \frac{\Delta h}{\Delta y} \right) \right. \quad (13)$$

同図には、浦ら⁸⁾の現地計測で観察したプランジング状態の結果も併示している。室内実験におけるプランジング状態での r_1 値は極めて1に近い。一方、ストリーミング状態での r_1 値は1より減少するものの平均的には0.97程度であり、仮定1は妥当と判断される。

(4) 仮定2の検証

式(2)に仮定1および仮定2を適用すると、堰上での水深 $h_w(cal)$ が次式で計算される。

$$h_w(cal) = \frac{2}{3} \Delta h \quad (14)$$

図-9に本実験および浦らの現地計測の堰上水深 h_w の実測値 $h_w(exp)$ と、計算値 $h_w(cal)$ との関係を示す。プランジング状態では、実測値と計算値が極めて良好に一致していることが確認できる。これは、理論通りに堰上で限界状態となっていることおよび低フルード数近似が妥当であることを意味している。一方、ストリーミング状態では、計算値が実測値を下回っている。これは、計算上では堰上でフルード数が1となると仮定しているのに対し、実際は堰上でフルード数が1以上となるために生じたものである。しかし、その差異は平均的には10%程度であり、仮定2を使用してもよいと判断される。

(5) 流入角度の検討

仮定1および仮定2を用いると流れの形態を直接決めるパラメータである流入角度および運動量が式(11)および(12)で示される。ただし、多くの仮定を用いていることおよび測定誤差などを考慮し、改めて実測値と理論値を比較する。運動量を実測することは困難なため、次式で流入角度の実測値 $\theta(exp)$ と式(11)で求められる理論値 $\theta(cal)$ とを比較する。

$$r_2 = \theta(cal) / \theta(exp) \quad (15)$$

図-10は本実験および浦ら⁸⁾の現地計測における相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ に対する、 r_2 を示したものである。プ

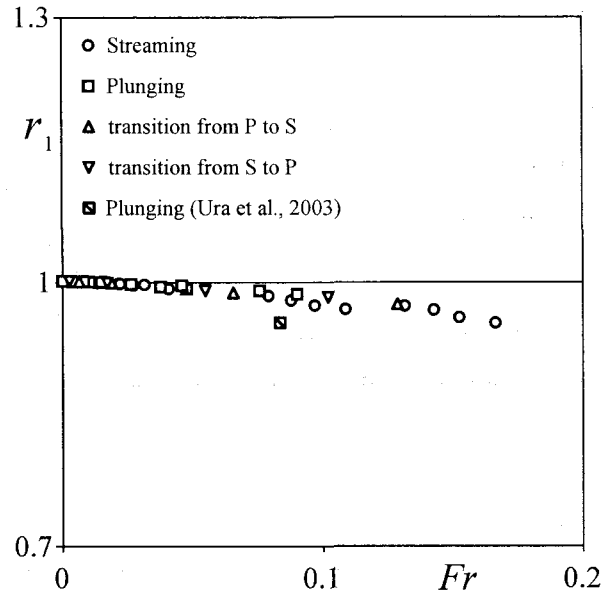


図-8 r_1 とフルード数 Fr との関係

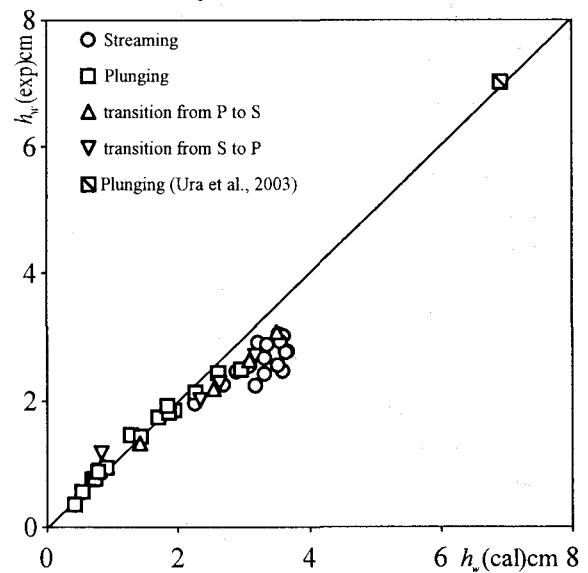


図-9 h_w の実験値と計算値との比較

ランジング状態では1ケースを除いて20%以下の差異となっており、理論値が実測値をほぼ再現しているといえる。一方、ストリーミング状態においては、かなりの差異が見られる。これは、各仮定の誤差が累積して結果生じたものと考えられる。平均的な差異は50%にも達するが、今までプランジング状態とストリーミング状態を判定する理論式が全くなかったことなども考慮すると、仮定1および仮定2を用いた理論結果はひとつの目安となるといえる。

(6) プランジングおよびストリーミングの発生条件

仮定1および仮定2がある程度成立することが確認されたので、流れの形態を決定するパラメータは、アスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta y)$ および相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ の2つとなった。図-11に各流れの状態ごとのアスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta y)$ と相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ の関係を示

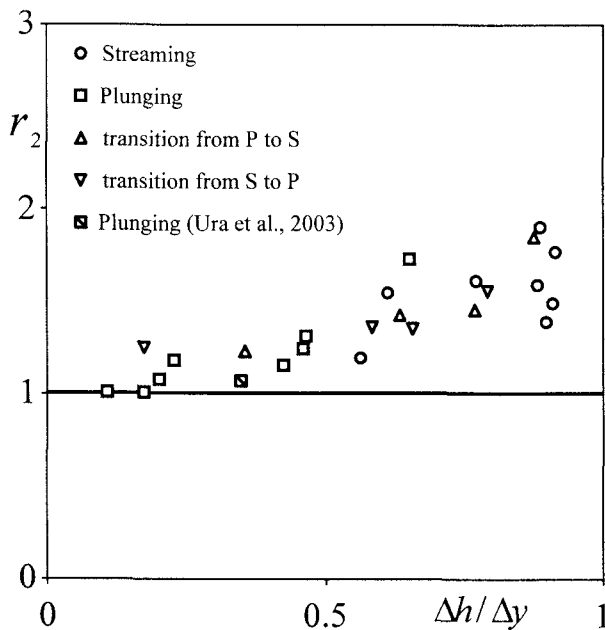


図-10 r_2 と相対プール高落差の関係

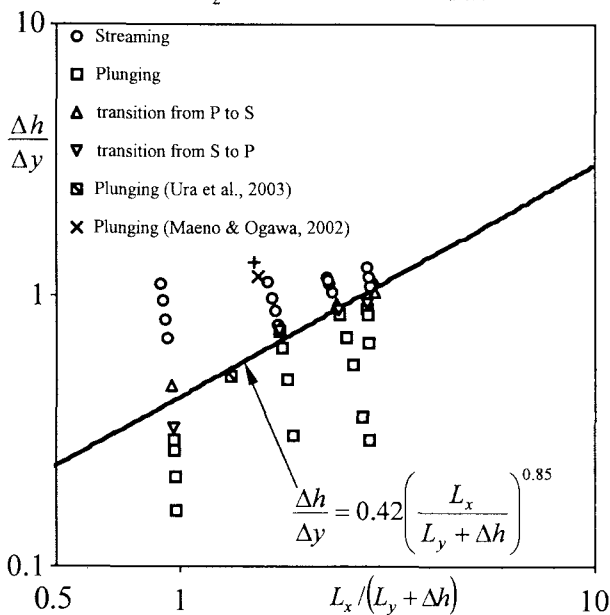


図-11 $L_x/(L_y + \Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ に基づく流れの形態の予測

した。同図には浦ら⁸⁾の計測したプランジング状態、前野・小川¹⁰⁾が数値計算によって再現したプランジングおよびストリーミング状態もプロットしている。プランジング状態とストリーミング状態がプロットされたエリアが異なっていることと判断される。ただし、前野・小川¹⁰⁾のプランジング状態だけが傾向が異なっているが、この理由は現在不明である。SP遷移直後およびPS遷移直後の状態の $L_x/(L_y + \Delta h)$ および $\Delta h/\Delta y$ はかなり類似しているため、今回は両状態の中央を通る線を求めた。

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} = 0.42 \left(\frac{L_x}{L_y + \Delta h} \right)^{0.85} \quad (16)$$

式(16)より、前野・小川¹⁰⁾のプランジング状態以外は表現可能となった。

5. おわりに

本研究は、全面越流型階段式魚道における流れの形態を予測するモデルを求めたものである。得られた知見を以下に示す。

- (1) プランジング状態とストリーミング状態が時間的に交互に発生する不安定な状態は確認されなかった。これは流入流量の変動によって生じたものと推測された。
- (2) プランジング状態で流量を増加させてストリーミング状態に遷移する時の流量よりも、ストリーミング状態から流量を減少させてプランジング状態に遷移した時の流量の方が少ないことが判明した。
- (3) プール内の流れの形態を直接決定するパラメータとして、アスペクト比、プールへの落下流の角度および運動量が考えられる。プランジング状態における落下流の角度および運動量を理論的に求めると、式(8)および(10)のように求められた。その結果、流れの形態を決定するパラメータがフルード数 Fr 、相対水深 $h/\Delta y$ 、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta y)$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の4つであることが解明された。
- (4) プール内のフルード数が微小であることおよびストリーミングフローが堰上で限界流と近似できるとの仮定がある程度妥当であることが実験によって示された。その結果、流れの形態を決定するパラメータが、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta y)$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の2つとなることを示し、プランジング状態およびストリーミング状態の発生を予測する式(16)を提案した。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，pp.42-49，1995。
- 2) Rajaratnam, N. and Katopodis, C.: Hydraulics of Denil fishways, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, pp.1219-1233, 1984。
- 3) 和田清，東信行，中村俊六，水工学論文集，第42巻，pp.499-504，1998。
- 4) 辻本哲郎，泉倫光，山本貴章，水工学論文集，第40巻，pp.731-736，1996。
- 5) 中村俊六，和田清，土木学会論文集，No.521/II-32，pp.207-215，1995。
- 6) 中村俊六：魚道の設計，水工学に関する夏期講習会，A-6-1～A-6-24，1991。
- 7) Rajaratnam, N. and Katopodis, C. and Mainali, A., *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, pp.939-944, 1988。
- 8) 浦勝，山口秀和，鬼束幸樹，秋山壽一郎，水工学論文集，第47巻，pp.769-774，2003。
- 9) 前野詩朗，尾上博則，宮内洋介，水工学論文集，第45巻，pp.421-426，2001。
- 10) 前野詩朗，小川信，水工学論文集，第46巻，pp.421-426，2002。

(2004. 9. 30 受付)