

急勾配潜孔式魚道の水理特性について

常住 直人¹

¹正会員 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門

(〒305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目一番地二号)

E-mail:azum@affrc.go.jp

農業取水堰付設魚道は魚道機能と農業利水の調和から多様な魚種の遡上が可能でかつ極力、小流量、急勾配でも魚道流況が安定する事が望ましい。この観点から本論文では隔壁間隔を狭めた急勾配潜孔式魚道を検討した。この魚道では隔壁間隔が狭くても大型魚が遡上可能なように、隣接潜孔断面の一部を流下方向に重ね合わせている。この魚道の水理特性を実験により検証した結果、隣接潜孔の重合率次第では、勾配 1:2.5 でも水深 0.8m 以上で安定して潜り流出に近い状態が保たれる事、その際の魚道流量は約 0.1m³/s で安定する事、潜孔断面の非重合側には緩流速域（潜孔中心で約 0.7m/s）が生じプール下層の側壁近傍にも緩流速域（約 0.2~0.6m/s）が確保される事が明らかとなった。

Key Words: fishway, orifice, headwork, steep slope, hydraulic design,

1. はじめに

近年、多様な魚種に配慮した魚道の整備が行われるようになってきている¹⁾。しかし、農業用取水堰に付設する魚道では、魚道本来の遡上機能の他、利水や治水などとの整合も考慮しなければならない^{2,4)}。このことから農業用取水堰に設置する魚道の所要条件を考えると表-1 のようになる^{5,6)}。表-1 中、4)は常時流量が小さい中上流域に多い農業用取水堰では重要である。小流量化により魚道の複数設置が可能になるので、河床変動時の堰下流での遡上魚の迷走防止にも有効である。一方、7)は堰直下の河床低下対策として重要である。実際、農業用取水堰は中上流域に多いため、経年的な河床低下での魚道機能低下も多く見られる^{7,8)}。以上より本論文では小流量化、急勾配化が可能で、かつ多様な魚種の遡上にも配慮した魚道形状を考案し、その水理特性について検証を行った。この魚道は型式としては潜孔式である。潜孔式は小流量化しやすいうえ、魚道上下流の水位変動に対し流量、流況も安定しやすい¹⁾。魚が表層遡上せずに済むので、捕食減耗抑制にも効果的で、海外では遊泳魚を対象にした施工例も散見される⁹⁾。

2. 実験方法

表-1 農業用取水堰付設魚道に求められる事項^{5),6)}

環境保全より
1) 多様な魚種が遡上(降河)できること
2) 捕食減耗が自然状態に比し過大とならないこと
3) 自然状態に近い形状・流況
利水管理との整合より
4) 小流量でも機能すること
5) 上下流水位変動に対し機能すること
6) 魚道放流量の安定性
7) 急勾配や高落差への適応性
8) 魚道放流量の把握の容易さ
9) 低コスト化
10) 維持管理のコスト、労力の低減
治水、その他より
11) 洪水の疎通
12) 景観上優れていること

(1) 魚道形状と模型縮尺

魚道幅は現地寸法換算で内幅 1m と極力小規模化した。小規模化が可能ならば、流量、地形条件の制約下でも適用しやすく、低コスト化もしやすい。また、小型魚が遡上可能なようにプール間水位差を小さくし、かつ急勾配化を図るため、プール長を短縮した形状とした。この短いプール長で大型魚を遡上させるため、隣接する潜孔断面を一部重合させると共に、小流量化のため、重合断面を極力小さくし、潜孔を交互配置とした(図-1)。この形状で多様な魚種が遡上しうるように図-1 に示す遡上経路を想定し、隣接潜孔の非重合断面幅とプール長を調整する予備実験を重ねた。

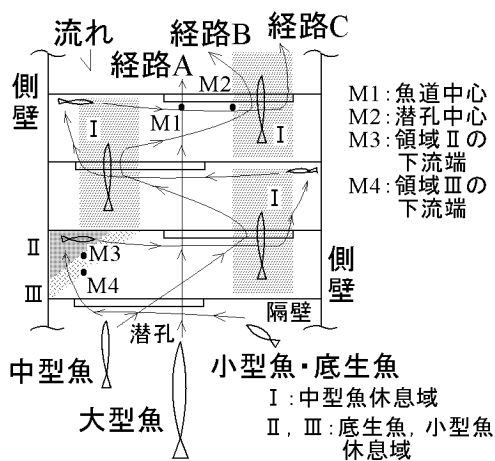


図-1 多魚種遡上を考慮した潜孔式魚道の概念図

その結果、潜孔部で概ね潜り流出状態が保たれ遡上可能な形状として図-2 に示す形状が導出された（隔壁間隔 0.25m, 底勾配 1/2.5, 潜孔高さ 0.25m, 潜孔重合幅 0.15m）。本論文ではこのうち、隣接する潜孔断面の非重合幅が異なる Type1（非重合幅 0.325m）、Type2（同 0.150m）、特に比較的良好な流況となった Type1 についてその水理特性を検討した。なお、本論文での実験模型縮尺は 1/5 であり（フルード模型）、現地適用性の検証のため、以下、特に断らない限り現地換算値で表記する。

(2) 実験水深

実験で設定した魚道上下流水深 (h_u , h_d) は、約 0.6, 0.8, 1.0, 1.5m である (図-2)。

(3) 実験方法と計測方法

実験では、魚道上下流の水深を流入バルブと模型末端ゲートの開度調整により設定し、流量、水位が十分安定したことを確認したうえで計測を行った。流量は計量堰で、流速は 5mm 径プロペラ式流速計 ((株)ケネック VOT2-100-05 型)、4mm 径 Z 方向電磁流速計 ((株)ケネック VMT2-200-04PL 型) で計測した。流速計測は各測点につき、模型時間で 30 秒間、1 秒間隔で行った。潜孔・プール内における流速測点は図-2 に示すとおりで、潜孔断面では潜孔直下で計測した。水位は、1mm 読みスケールによりプールの四隅で計測し、上流端プールについては隔壁から 0.25m 上流の左右側壁沿いで計測した。

3. 実験結果

(1) 潜孔の流況

非重合幅が狭い場合、すなわち所定重合幅に対し重合率が高い場合には、潜孔直下のプール水位が上がりず潜り流出状態にならなかった。特に上流端潜孔の上下流の

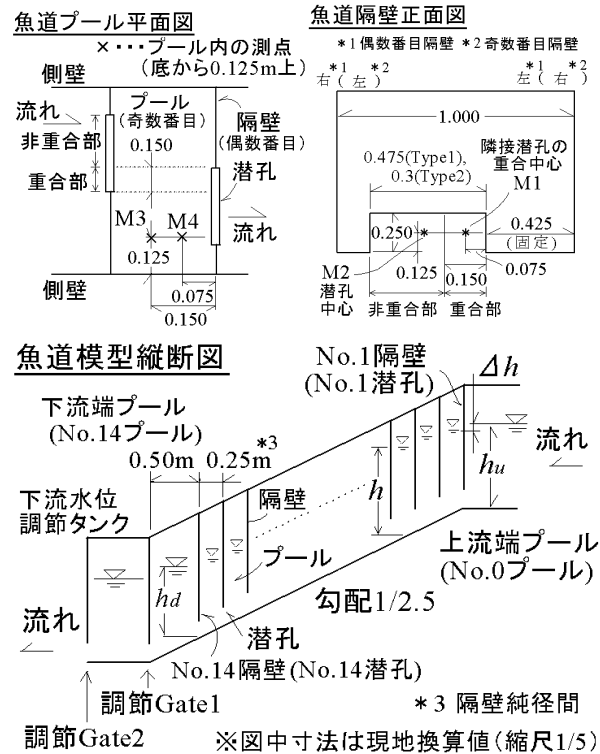


図-2 検討魚道の形状と模型上下流端の構造 (下)

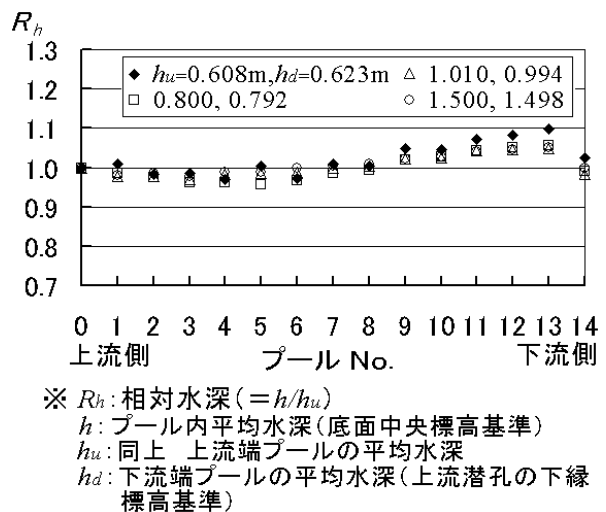
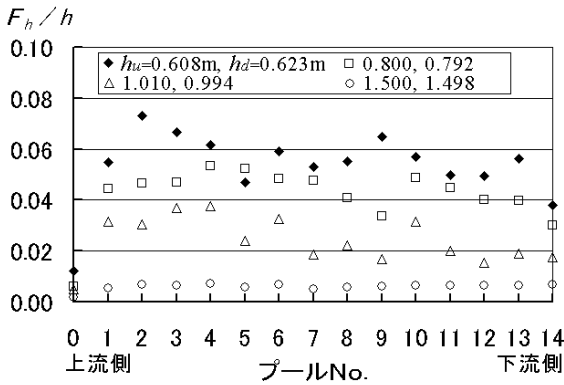


図-3 各プールの相対水深 (R_h) (Type1)

プール間水位差は大きく、上流端潜孔含め幾つかの潜孔で自由流出状態に近くなった。反面、魚道下流部のプールでは、プール間水位差が小さくなり、魚道上流部と下流部で流況に大きな差異が生じた。この状態は Type2 形状（非重合幅 0.150m）でも完全には解消されず、Type1 形状（同 0.325m）のように非重合幅を広げ重合率を 31.6%まで下げることで概ね解消された。

(2) プール水深

Type1 形状では各プールの水深は比較的安定した (図-3)。



※ F_h : プール内各測点の水面変動幅の平均
 h : プール内平均水深(底面中央標高基準)
 h_u : 上流端プールの平均水深(底面中央標高基準)
 h_d : 下流端プールの平均水深(上流潜孔の下縁標高基準)

図4 各プールの相対水面変動幅(F_h/h) (Type 1)

表-2 魚道流量と潜孔流速

形状	Type1	Type1	Type1	Type1	Type2
h_u (m)	0.608	0.800	1.013	1.500	0.805
h_d (m)	0.623	0.795	1.000	1.493	0.795
上記平均 (m)	0.615	0.798	1.006	1.496	0.800
流量 (m^3/s)	0.103	0.108	0.111	0.111	0.111
潜孔平均流速 (m/s)	0.868	0.913	0.936	0.931	1.482
$(V_1)_{av}$ (m/s)	-	1.620	-	-	-
$(V_2)_{av}$ (m/s)	-	0.710	-	-	-

$(V_1)_{av}$: 各潜孔の測点M1(隣接する潜孔との重合断面の中心点)における流速(x,z方向の経時平均流速の合成)の平均値
 $(V_2)_{av}$: 各潜孔の測点M2(潜孔断面の中心点)における流速(x,z方向の経時平均流速の合成)の平均値

傾向が見られた。

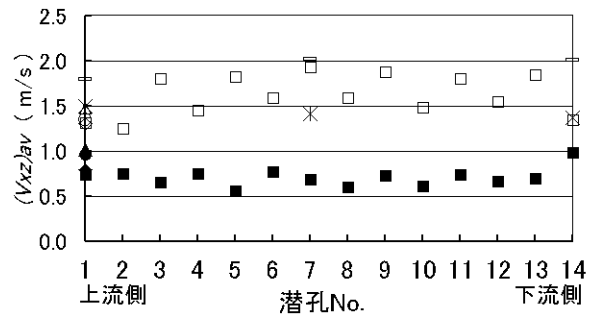
(3) プール内の水面変動

Type1 形状ではプール水深が下がるほどプール水深に比し水面変動が増大した(図-4)。特に水深 0.6m ではプール毎のバラツキも著しくなった。なお、水面変動幅(F_h)も水深低下により大きくなるが、その最大値は0.045m以下であった。

(4) 流量、潜孔断面平均流速

Type1 形状では、水深約 0.6m 以上ではどの潜孔でも自由流出状態は生じず、概ね潜り流出に近い流況が保たれた。魚道流量、潜孔平均流速(流量、潜孔断面積より算出)も比較的低位で安定した(表-2)。一方、同程度の魚道上下流水深(h_u, h_d)では、Type2 形状と Type1 形状の流量は同程度であり、結果、潜孔断面積が小さい Type2 形状の方が潜孔平均流速は速くなった(表-2)。

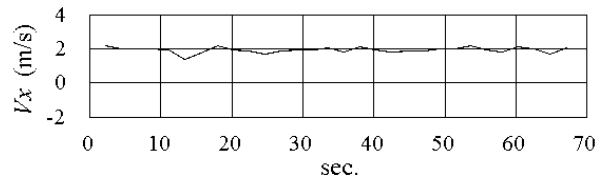
(5) 潜孔断面、潜孔重合断面の中心流速と経時変動



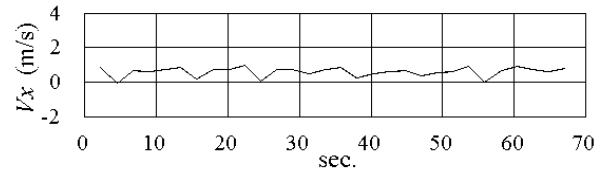
◇Type1, M1, $h_u=0.605$ m, $h_d=0.603$ m ■Type1, M2, 0.800, 0.795
□Type1, M1, 0.800, 0.795 ▲Type1, M2, 1.013, 1.000
△Type1, M1, 1.013, 1.000 ●Type1, M2, 1.500, 1.493
○Type1, M1, 1.500, 1.493 =Type2, M1, 0.805, 0.795
◆Type1, M2, 0.605, 0.603 *Type2, M2, 0.805, 0.795

※ $(V_{xz})_{av}$: V_x (流下方向が+の流下方向流速), V_z (下方が+の鉛直方向流速)の経時平均値の合成流速
 h_u : 上流端プールの平均水深(底面中央標高基準)
 h_d : 下流端プールの平均水深(上流潜孔の下縁標高基準)

図-5 潜孔中心流速と重合中心流速 ($(V_{xz})_{av}$, Type 1)



※ Type 1, 潜孔No.7, 測点M1, $h_u = 0.800$ m, $h_d = 0.795$ m



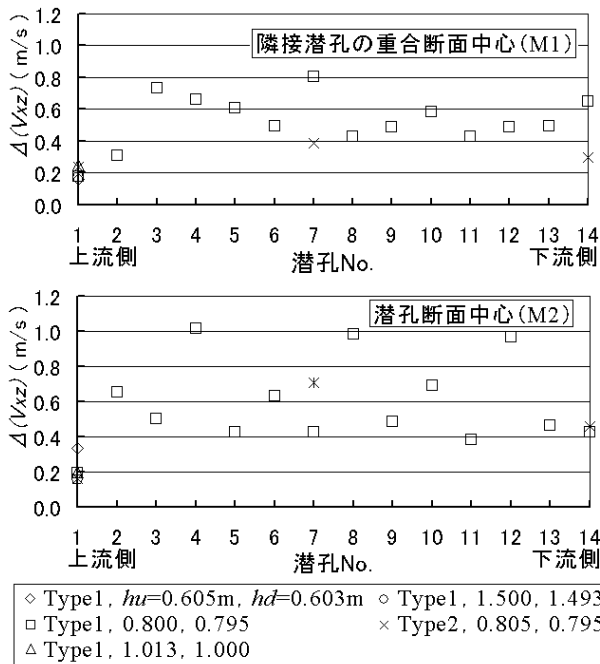
※ Type 1, 潜孔No.8, 測点M2, $h_u = 0.800$ m, $h_d = 0.795$ m

h_u : 上流端プールの平均水深(底面中央標高基準)
 h_d : 下流端プールの平均水深(上流潜孔の下縁標高基準)

図-6 重合中心流速、潜孔中心流速 (V_x) の経時変動の一例

前出 3.(1)のように、隣接潜孔の重合率が高い場合、水深低下で自由流出状態になりやすく流速が加速しやすい。しかし、重合率を下げた Type1 形状では魚道水深 0.8m でも潜孔中心点 (M2)、重合断面中心点 (M1) の流速が下流に向けて加速していく傾向は見られなかった(図-5)。魚道水深 0.8m での流速経時変動は図-6 のようになったが、どの潜孔でも重合中心流速は比較的安定する反面、潜孔中心流速は変動が大きく、間欠的に 0m/s 近くに低下する潜孔が多く見られた。なお、重合中心、潜孔中心とも下向き流速成分 V_z は 0m/s 近くで経時的に安定した。

(6) プール内の流速とその経時変動



※ $\Delta(V_{xz})$: 流速変動の想定最大値(= $V_{xz}max - V_{xz}min$)
 $(V_{xz})max$: x,z各方向の経時的な絶対値最大流速の合成値
 $(V_{xz})min$: 同上 絶対値最小流速の合成値
 h_u : 上流端プールの平均水深(底面中央標高基準)
 h_d : 下流端プールの平均水深(上流潜孔の下縁標高基準)

図-7 潜孔流速の推定最大経時変動幅

重合中心流速、潜孔中心流速の推定最大経時変動幅は図-7に示すとおりである。Type1形状で水深約0.8mの場合、No.7, No.1潜孔で(主流である)重合中心流速の推定最大経時変動幅が各々最大、最小となった。同条件下で、No.7潜孔は重合中心流速も最大となり、一方、No.1潜孔の重合中心流速はほぼ最小相当であった(図-5)。

このように重合中心流速とその推定最大経時変動幅が最大、最小相当となるNo.7, No.1潜孔の直下流プール(No.7, No.1プール)のプール内流速は、図-8に示すようになった。図-8よりこれら2プールの下層側壁付近(上流隔壁の背面側)の流速、流速変動幅はそれほど変わらず、特にNo.1プールでは水深に依らずそれほど変化しないことが分かる。

(7) 隣接プール間の水位差

Type1形状における各プール間の水位差(Δh)は、水深低下に伴いばらつく傾向が見られたが、概ね0.10±0.02mの範囲には収まった(図-9)。しかし、上下流端の潜孔ではこの範囲から外れ、かつ水深増大に伴い Δh が増す傾向が見られた。

4. 考察

(1) 魚道水深による水理諸元の変化

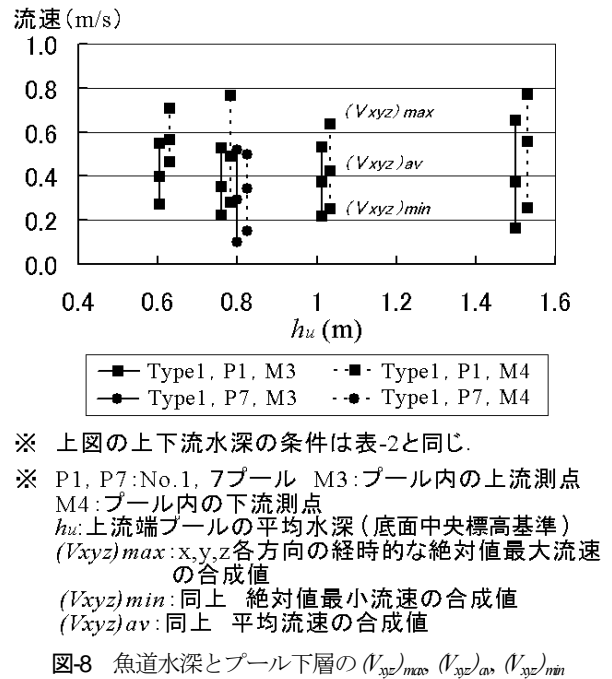
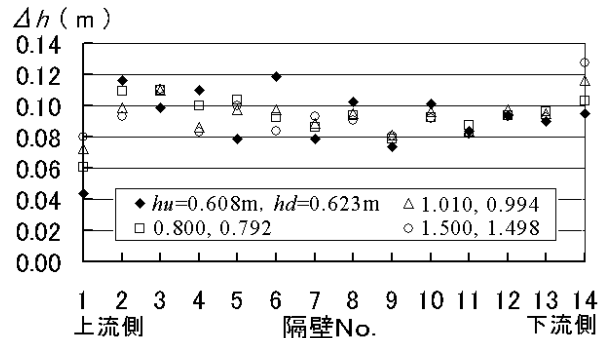


図-8 魚道水深とプール下層の $(V_{yz})max$, $(V_{yz})av$, $(V_{yz})min$



※ Δh : 隣接プールの平均水面間の落差
 h_u : 上流端プールの平均水深(底面中央標高基準)
 h_d : 下流端プールの平均水深(上流潜孔下縁標高基準)

図-9 プール間水位差 (Type 1)

本節では潜り流出状態が保たれたType1形状について考察する。

a) 水深変化によるプール内水面変動の変化

Type1形状では魚道水深が低下しても潜孔流量、潜孔断面平均流速はあまり変わらない(表-2)。このため、魚道水深が低下するほどプール内の水面変動が大きくなった(図-4)。特に水深0.6mまで低下すると、水面変動幅、相対水面変動幅(F_w/h)が増大するのみならず、それらのプール毎のばらつきも大きくなった(図-4)。ここまで水深が低下するとプール内の流れの攪乱(流向、流速の経時変動)が著しくなり、かつその度合いもプール毎に大きく変化している可能性が高い。

b) 水深変化によるプール間水位差の変化

潜孔流量、潜孔断面平均流速は、水深に依らず、全潜孔でほとんど変わらない反面(表-2)、各潜孔のプール間水位差のばらつきは、水深低下に伴い広がる傾向が見

られた(図-9)。特に水深 0.6m ではそれが著しい。これは、水深低下により各潜孔上流のプール内流況の攪乱が大きくなり、その攪乱状況がプール毎に異なってくるためと考えられる。

c) 水深変化によるプール流況の変化

図-9 より No.1 潜孔と No.2 潜孔のプール間水位差の差異は水深増大につれて低減すること、No.2 潜孔以下の潜孔におけるプール間水位差の差異はこの 2 潜孔ほど大きくなく水深増大につれ差異縮小となっていることから、各プール内の流況は、水深が上がるにつれ上流端プール(No.0 プール)の静穏度に近づいていくと考えられる。

d) 水深変化による潜孔流量、潜孔断面平均流速の変化

潜孔流量、潜孔断面平均流速は、水深増大により微増し、更なる水深増大で微減したが、プール内流況に依らずほぼ一定だった(表-2)。水深増大での流速微増は、プール内の攪乱が低減し流れが疎通しやすくなるため、更なる水深増大での流速微減は攪乱の更なる低減で通常の潜り流出の放流特性に近づくためと考えられる。

e) 水深変化による潜孔流速の変化

重合中心流速は潜孔中心流速よりも速く、潜孔では重合部を中心に速い流れが生じていた(図-5)。しかし、最上流潜孔では、重合中心・潜孔中心の流速が比較的近い値で、それらの経時変動幅も小さかった(図-7)。この状態は魚道水深が低い場合もさほど変わらなかった。これらより最上流潜孔では比較的浅水深から通常の潜り流出に近い流れだったと考えられる。

他の潜孔でも水深増大による各プール流況の静穏化・均等化(前出(1)c)項)に伴い、通常の潜り流出状態に近づいていくので、それらの重合中心流速、潜孔中心流速も最上流潜孔の値に近くなっていくと考えられる。すなわち、水深増大につれ各潜孔の潜孔中心流速は上がり、重合中心流速は低下していくと考えられる。

なお、最上流潜孔では h =約 0.6~1.5m で潜孔中心流速と重合中心流速の中間値は最大約 1.2m/s であった(図-5)。また、水深に依らず潜孔平均流速は 1m/s 以下であった(表-2, Type1 形状)。これらより水深 0.6m 以上では、水深に依らず、どの潜孔でも潜孔中心流速は概ね 1.2m/s 以下になると考えられる。

(2) プール内の流れの攪乱状況 (Type1 形状) に関する考察

プール内の流れの攪乱が大きい場合、潜孔流れが阻害されるので、その直下の潜孔の重合中心流速(主流速)は抑えられると共に、主流周辺の流速(潜孔中心流速など)の変動幅は大きくなると考えられる。実際、重合中心流速が小さい潜孔では、潜孔中心流速の変動幅が大きくなる傾向が見られた(図-5, 図-7, 水深 0.8m)。また、このように攪乱が大きいプールでは、プール間水位

差も下流潜孔が上流潜孔より大きくなると考えられ、実際、多くのプールでそのような傾向が見られた(図-9)。なお、攪乱が比較的大きいと見られるプールでも、その直下潜孔の重合中心流速(XZ 合成値)については、(潜孔中心流速のように)流速変動幅は必ずしも大きくない(図-7)。これは、重合中心の流れが流速が速い主流で(図-5)、経時変動が小さく(図-6)、流速の推定最大経時変動幅にプール内攪乱の影響が現れにくかったためと思われる。

一方、プール内攪乱の絶対的な大きさは、直上潜孔の流量と流速(特に主流である重合中心流速)が大きく、それらの経時変動幅も大きい場合、かつプール水深が小さい場合に大きくなると考えられるが、Type1 形状では各潜孔で潜孔流量、プール水深とも概ね均一である(表-2, 図-3)。よって、主流である重合中心流速とその経時変動幅の大きさがプール内攪乱を規定するとすれば、水深約 0.8m の場合、攪乱が最大、最小と推測されるプールは No.7, No.1 である(図-5, 図-7)。この 2 プールの下層側壁付近(上流隔壁の背面側)の流速、流速変動幅は水深に依らずそれほど変わらないので(図-8)、どのプールでもプール下層側壁付近の流速、流速変動幅は、(水深 0.8m 以上では)水深に依らずさほど変わらないことが推測される。

(3) 非重合断面幅に関する考察

a) 非重合断面幅による流況の差異

Type2 形状(非重合幅 0.15m, 重合率 50%)では上流部の各プールで開水路流れに近い状態であった(3.1)節)。これは、Type2 形状の非重合幅が小さく、潜孔幅が比較的狭く、潜孔直下のプール水位が上がりにくかったためと考えられる。Type2 形状でも下流に向かうにつれ、流れの攪乱や魚道下流水深の背水影響によりプール水深は増大したが、プール間水位差は最上流隔壁で極端に大きく下流隔壁に行くにつれ低減する状態で、最上流潜孔では自由流出状態に近かった。

一方、Type1 形状(非重合幅 0.325m, 重合率 31.6%)の各プールでは、プール水深、プール間水位差とも差異が小さかった(図-3, 図-9)。Type1 形状では隔壁間隔が狭い(0.25m)ものの非重合断面が広いいため、最上流潜孔でも放流初期から直下のプール水位が上昇しやすく、潜り流出状態に近くなったと考えられる。

b) 魚道として効果的な非重合幅

Type1 形状(非重合幅 0.325m)は Type2 形状(非重合幅 0.15m)よりも非重合幅、潜孔幅が広く、潜孔断面積が大きいものの、流量はそれほど変わらない(表-2)。Type1 形状では隔壁間隔の狭さに比し非重合部幅が広いいため、直下の隔壁に衝突し攪乱される潜孔放流の割合が高く、それにより最上流潜孔直下でもプール水位が上昇

しやすく、かつ非重合断面が大きい割に流量が増えにくくなっていると考えられる。

また、Type1形状はType2形状と比べ流量が同程度だが潜孔断面積が大きいので潜孔平均流速は低い(表-2)。流量と重合中心流速はType2形状と同程度だが(表-2, 図-5)、潜孔中心流速はType2形状より低く(図-5)、広い非重合断面側に緩流速域が出来ていることが分かる。

Type1形状はType2形状と比べ、流量が同程度だがプール水深が大きいので、プール内の流れの攪乱もType2形状より小さいと推測される。

以上のようにType1形状は十分なプール水深の確保、水深変動に対する流量(プール流況)と潜孔流速の安定性、潜孔断面での緩流速域確保等、魚道機能と利水上、有効な水理特性があることが分かる。このような流況は、Type1形状程度まで非重合幅を拡大しなければ安定して得られなかったため、魚道として機能させるためにはこの程度の非重合幅(非重合幅0.325m, 重合率31.6%)が必要と考えられる。逆にこれ以上、非重合幅を広げても、魚道幅が限られているので、プール内の安定した低流速域(図-5)が縮小する可能性もあり、遡上魚のプール内休息(図-1)には不都合になる。

5. おわりに

本論文では多様な魚種の遡上のほか、小流量化、急勾配化を考慮した潜孔式魚道(図-2)についてその水理特性を検証した。この結果、この急勾配潜孔式魚道について次のことが明らかとなった。①隣接潜孔断面の重合率を31.6%に低減すれば(非重合断面幅を0.325mまで拡大)、魚道水深0.6m以上では潜り流出に近い流況が安定的に得られ、潜孔流量は約0.1m³/sで安定する、②魚道水深0.6mでは各プールの水面変動が大きくなるとともにプール毎のばらつきも大きくなる、③潜孔中心流

速は重合断面中心流速より低く(魚道水深0.8mで約0.7m/s。体長7cmの遊泳魚の突進速度¹⁾に相当)、非重合断面側に緩流速域が生じる、④隣接潜孔の非重合断面幅を0.325mに抑えた場合、魚道水深0.8m以上では、プール下層側壁付近に流速0.2~0.6m/sの緩流速域が生じる(体長5~15cmの遊泳魚の巡航速度¹⁾に相当)。

以上より、本論文で検討した急勾配潜孔式魚道(図-2, Type1形状)は、既往の農業用取水堰の魚道¹⁾に比し急勾配かつ小流量(底勾配1:2.5, 約0.1m³/s)でも、水深0.8m以上であれば、多様な魚種遡上の可能性があると考えられる。今後は実規模での遡上実験によりこの魚道の効果を検討したい。

参考文献

- 1) 農林水産省:「頭首工の魚道」設計指針, pp.20-21, 25, 73-76, 138-166, 農業土木学会, 2002.
- 2) 農林水産省:土地改良事業計画設計基準及び運用・解説設計「頭首工」, pp.138-152, 546-550, 農業農村工学会, 2008.
- 3) (社)日本河川協会:改定 解説・河川管理施設等構造令, pp.183-207, 山海堂, 2000.
- 4) 横田達雄:池田ダムの魚道, 国際魚道会議ぎふ90講演要旨集, pp.163-168, 1990.
- 5) Tsuneshumi,N., Naka,T. and Kobayashi,H.: Problems with fishways on an irrigation barrage in Japan, *Proc. of The International Symposium on Fishway '95 in Gifu.*, pp. 431-436, 1995.
- 6) 常住直人, 中達雄, 加藤敬:農業利水との調和に配慮した取水堰付設魚道の実験的検討, 応用生態工学, Vol.3, No.2, pp. 179-192, 2000.
- 7) 篠邊三郎:頭首工の魚道 上巻, pp. 12-25, 笹野印刷, 1989.
- 8) 水産庁:内水面漁場環境・利用実態調査報告書, pp. 225-226, 1987.
- 9) 廣瀬利雄, 中村中六:魚道の設計, pp.57, 山海堂, 1993.

(2016.9.30 受付)

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF STEEP FISHWAYS WITH MULTIPLE SHORT-SPAN ORIFICES

Naoto TSUNESUMI

It has been required on fishway design to harmonize the improvement of fishway performance with operations of headworks. For this requirement, it is important to save the fishway discharge, make fishway slope steeper and secure the fishway flow stability to changes of head and tail water level with securing the migration of various fish species through an weir of headworks. For low fishway discharge and steep fishway slope, we proposed a submerged orifice fishway with short pool length in this paper. Adjacent orifices in this fishway were arranged partially superimposed to make large fish pass through short span orifices. In this study, the flow regimes were compared through hydraulic tests (the number of fishway pools: 13, total drop of the fishway model: 1.4 m (prototype size)) among several kinds of fishways differed in the orifice width and so on. These results indicated that stable orifice velocity and low discharge of 0.1 m³/s were secured in spite of steep fishway slope (1/2.5) and the change of fishway depth (≥ 0.8 m).