

階段式魚道の水理特性に関する研究

Experimental Study on the Hydraulic Characteristics of Fish Ladder

高須修二*・箱石憲昭**・村岡敬子***・田中和浩****・尾崎佳史*****

By Shuji TAKASU, Noriaki HAKOISHI, Keiko MURAOKA, Kazuhiro TANAKA, Yoshifumi OZAKI

Recently, it has become important to consider environment around dams or weirs according to the change of the social background.

Under the circumstances, many fishways have been constructed on the weir or low dams. Most of fishways, however, are designed without hydraulic consideration. It is useful to research into the inside structure of the pool-type fishway, in order to increase the rate of passing fish. In this paper hydraulic problems are reported that have to be taken into consideration at the design of fishway.

Keywords: pool length, overflow depth, weir height

1. はじめに

近年、社会情勢の変化により自然環境に対する配慮が重要になってきた。河川においてもダム・堰等の建設に伴う生態系への影響を極力小さくするために、様々な工夫がなされており、その中で遡上降下を行う魚類に対しては魚道等により対処することが必要とされている。魚道のタイプは、プールタイプ、水路タイプ、閘門タイプ、リフトあるいはエレベータータイプに分類されており、それぞれ水理的にも異なった特徴を有するが、我国では、アユのように比較的遊泳力のある魚種を対象とする場合、必要とされる流量が少ないなどの長所からプールタイプの階段式魚道が数多く使用されてきた。しかしながら、プール長、堰高等諸元については、経験的に設計されてきたのが現状である。近年、過去の研究の分析や新たな研究がなされるようになってきた¹⁾²⁾がまだ十分とはいえない。本報文は、階段式魚道について、魚がのぼりやすい適正な形状・規模を得るために、水理模型を用いて行った研究の結果について述べるものである。

* 正会員 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 室長(305 茨城県つくば市大字旭1番地)

** 正会員 建設省関東地方建設局宮ヶ瀬ダム建設事務所調査設計課長

*** 正会員 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 研究員

**** 正会員 同室

***** 正会員 (株)建設技術研究所

2. 目的

階段式魚道は我国における魚道の形式としては最も一般的に採用され、かなり長い歴史を持つ魚道形式のひとつであるが、現在設置されている魚道の中にはその形状が不適切であるために魚道としての効果を十分に発揮していないものも多い。例えば、堰天端形状の不適切な設計により越流水脈が越流面から剝離し、堰下流面と越流水脈との間に大きな空間が生じるために、魚がジャンプしなければ遡上できないような流れが生じているものもある。この堰天端形状については、円弧による形状などを用いて越流水脈形状に沿わせることが望ましいことは、幾つかの研究^{3) 4)}によって報告されている。そこで、著者らは堰天端形状を水脈のナップ形状を基本に設計し、標準的な形状として選定し、水脈の剝離を抑えると共に、越流水深と下流プールへの突入時の流速の関係を求め、魚種に応じた適切なプール間落差を算出できるようにする。

また、比較的落差の大きい堰等にも魚道設置の必要性が生じてきている中で、魚道の規模もかなり大きなものとなっており、機能を確保しつつコンパクトな魚道を求めることが必要となっている。そこで、プール長、堰高をパラメータに魚道の内部における水理量がどのように変化するのか検討を行い、適正規模の決定方法を示す。

3. 実験概要

実験モデルは図-3に示すとおり、実寸の1/2縮尺で再現した基本形階段式魚道（切り欠きおよび潜孔なし）の二次元模型である。堰の天端は、越流水面形に沿うよう、設計水頭 H_d :25cm（実寸）のランドルフの標準越流頂に近い複合円弧とした。越流水深は、鮎の稚魚などを対象とする10cm（実寸）

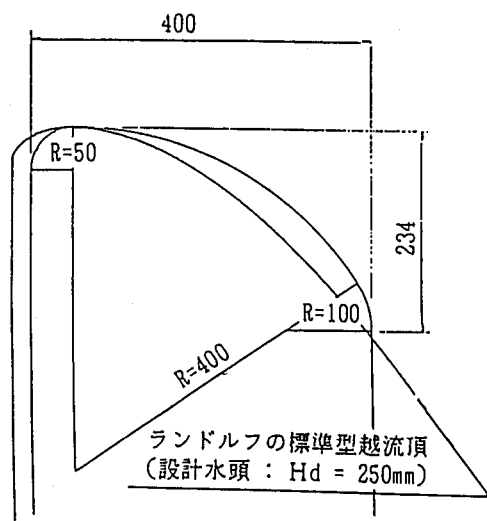


图-1 堰天端形状

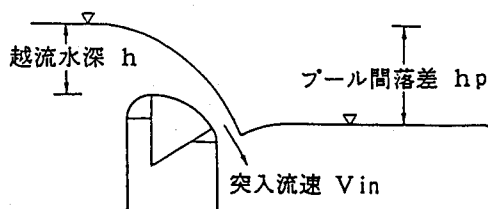
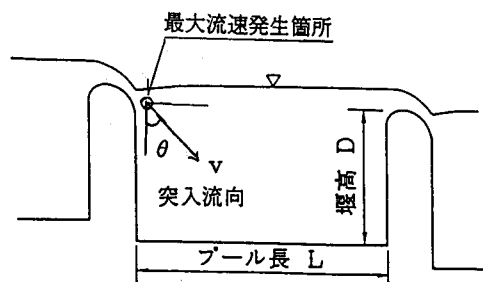


図-2 記号説明図

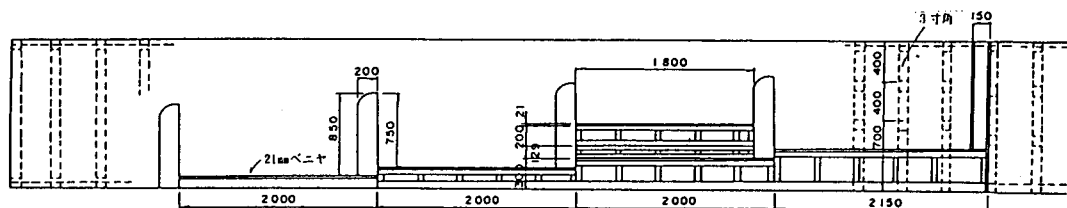


図-3 実験装置概念図

(单位 四四)

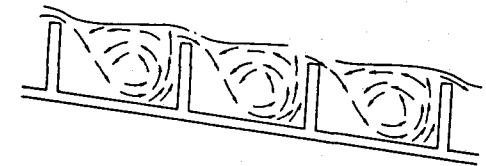
(0.4Hd)から比較的大型の魚種(アマゴなど)を対象とする25cm(1Hd)までの範囲について5cm(0.2Hd)刻みに設定した。堰間プールの規模の検討においては、プール間落差は0.8Hd(20cm)とし、堰高0.8Hd(0.2m)から16Hd(1.8m)、プール長4Hd(2m)から16Hd(4m)までの範囲について前述の越流水深について行った。すなわち、検討の対象とした魚道勾配は1/10から1/20の範囲となる。

水面形はポイントゲージを、流速は2方向電磁流速計を用いて計測を行った。

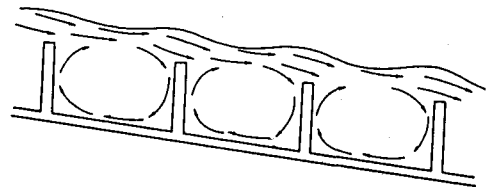
4. 堰越流部の特性

4.1 流れの遷移

基本形の階段式魚道における流況は、図-4に示すように、流量、プール形状および堰越流部の形状によって大きく二つに分かれる。ひとつは、プール長、勾配に比べて水深が低く堰頂で落下流が形成されそれがプール内に潜入する流況で、下流プール水面が高く潜り状態になる流れを含めて、「落下流状態」と呼ぶ。もうひとつは、水深が高くプール上に連続した表面流が形成される場合で、「表面流状態」と呼ぶ。これら両者の流れの間には遷移領域があり、流れは不安定となる。このうち表面流状態では、プール内での減勢効果があまり期待できず、堰上の流速も早くなること、アユを含む多くの魚は流れに逆らって遊泳する特性を持つ一方でプール内においては水面より底部に集まること⁵⁾⁶⁾を併せて考えるならば、魚道内の流れとしては避けなければならない状態である。



落下流状態 (Plunging Flow)



表面流状態 (Streaming Flow)

図-4 流れの状態

落下流の状態が発生する条件については、シャープクレストを用いたKatopodis等⁷⁾によって以下の式が与えられている。

$$C_b = Q / (b \cdot S \cdot L^{3/2} \cdot \sqrt{g}) < 0.22 \sim 0.31 \quad (\text{平均的には} 0.25) \quad \dots\dots (1)$$

ここに、Q:流量(m³/s)、g:重力加速度(=9.8m/s²)、S:勾配、b:水路幅、L:プール長

今回の検討モデルでは、プール間落差hp、および水路幅bを固定しているため、右辺はプール長と越流水深の関係で示すことが出来る。

$$C_b = \alpha \cdot F_{e(h)} \cdot h^{3/2} / L^{1/2} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、h:越流水深、 $\alpha: 1 / (h_p \cdot \sqrt{g})$ 、 $F_{e(h)}$:堰上の流量係数

(2)式を越流水深とプール長の関係について示したものが図-5である。今回の実験ではKatopodis⁷⁾によれば、不安定流が発生する領域にあると考えられる実験ケースについても、全て落下流状態を示し、式で示された範囲よりも表面流が発生しにくいことがわかった。これは、越流部形状の差によるもので、設計の意図通り、堰下流面に沿った流れが実現されていることによる。

このような状態の変化をさらに詳しく調査するために、堰上からの流れがプールに流入した地点の流速・流向を調査したものを図-6に示す。プールへの突入流向は30°から40°の範囲に分布するが、水深、水路長との関係ははっきりしていないが、プール長及び堰高の影響を受けていることがわかる。

4.2 突入流速と適切なプール間落差

魚道内で最も大きな流速は、プールに突入する前後の越流水脈中に生じる。魚が水脈中を遊泳しながら遡上する場合には、この突入位置における流速が突進速度よりも小さい必要がある。よって、越流水脈の流速分布を計測し、落差と水深の関係を求めた。越流水脈の流速と落差の関係を図-7に示す。図中の計算値は、損失を無視して測点の流速を(3)式で計算したものである。

$$v_p = \sqrt{2g\Delta h} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 v_p :測点の流速、 Δh :越流面から測点までの落差

対象魚に必要な越流水深を設定すれば限界となるプール間落差を求めることができる。例えばアユを対象とした越流水深10cmの魚道の場合には、そのプール間落差は17cmから20cm程度が限界であると考えられる。

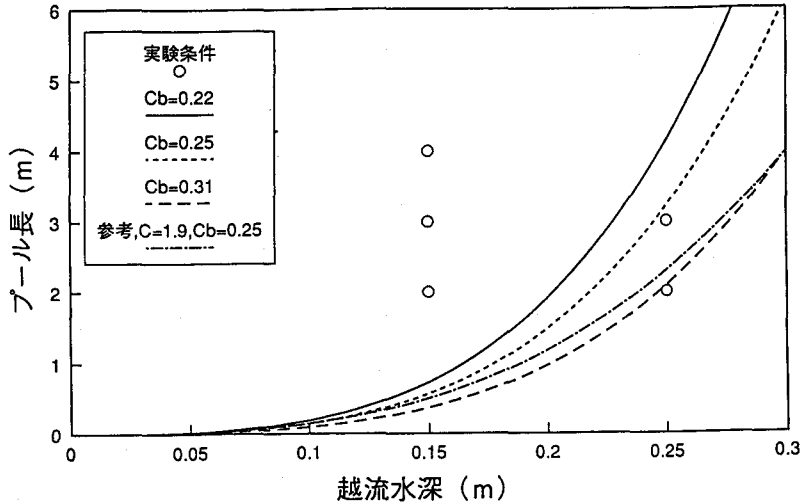


図-5 流れの境界と実験条件

5. プール形状に関する検討

堰を越流してプールに流入した水脈は、堰下流面に沿って底面に達し、噴流拡散しながらプール底面を流下していく。そして、次の堰上流面で水脈は水表面に達し、次の堰を流下する主流とプール表面近くを上流側に流れる循環流とに分かれる。図-8にプール内の循環流の概要を示す。プールの中で主流が十分に減勢されていないと、次のプールに越流水脈の乱れあるいは水面の盛り上がりなどの影響を与えることとなり、

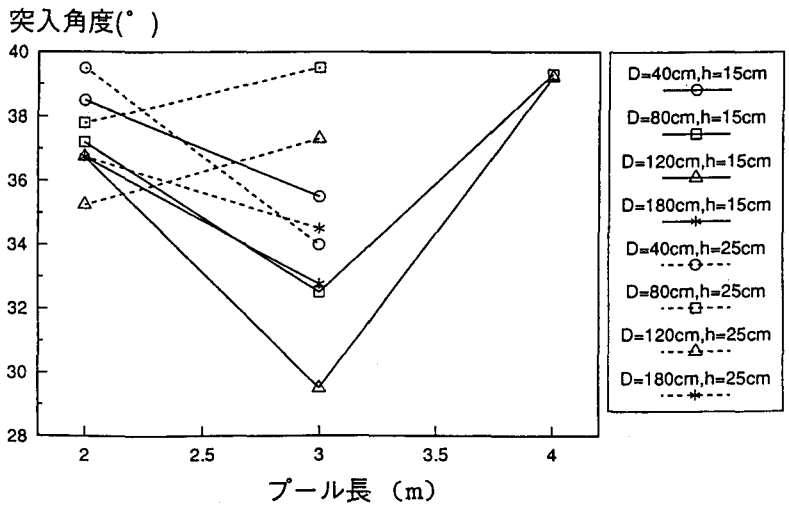


図-6 突入角度とプール長との関係

ある程度落下すると魚道として好ましくない状態に到ることになる。プール形状による流速の減勢効果を評価するために、突入流速に対する図-8に示す循環流の測点の流速の比率を、流速の低減効果を示す流速比として次式で定義した。

$$R_n = V_n / V_{in} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 R_n :低減率、 V_n :測点nの主流速値(m/s)、 V_{in} :突入流速(m/s)

堰高とプール内循環流の低減率の関係を示したものが図-9である。堰高が180cmと高い場合には、プールの断面が広いため循環流が安定しており、隔壁直下の下降流の低減効果は優れているが、下流堰およびプール表面の流速比は大きいままである。一方、堰高が40cmと低いケースでは、全体としては大きな循環流を構成

しているものの、水深が浅いために小さな渦がいくつも発生し、このため隔壁直下の下降流の流速比は大きいものの、全体的に流速比は小さくなっていることがわかる。これは、水深の深いケースに比べて混合拡散が強く、減勢効果が高いためと考えられる。このような、堰高の低い魚道は、和田⁵⁾による研究によれば遡上率が極めて高く、浮遊魚に対しては有効ではないかということが報告されている。しかし、一方で、プール内の流速の緩やかな範囲が少ないために、休息場所が得られ難くなることも考えられ、高落差魚道に対しては不利となることが予測され、別途休息場所を確保する等の工夫が必要となる。

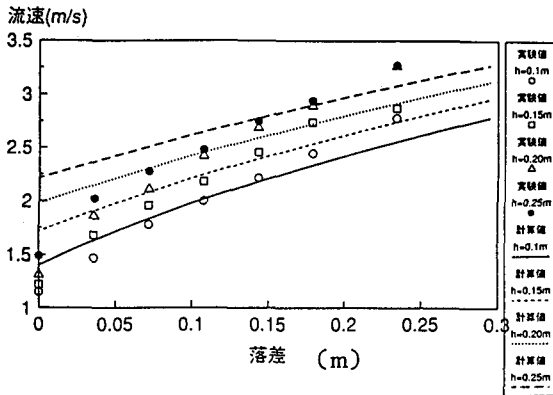


図-7 落差と突入流速

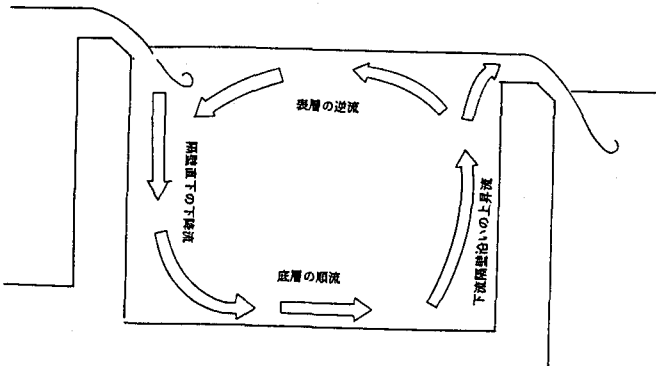


図-8 プール内の循環流

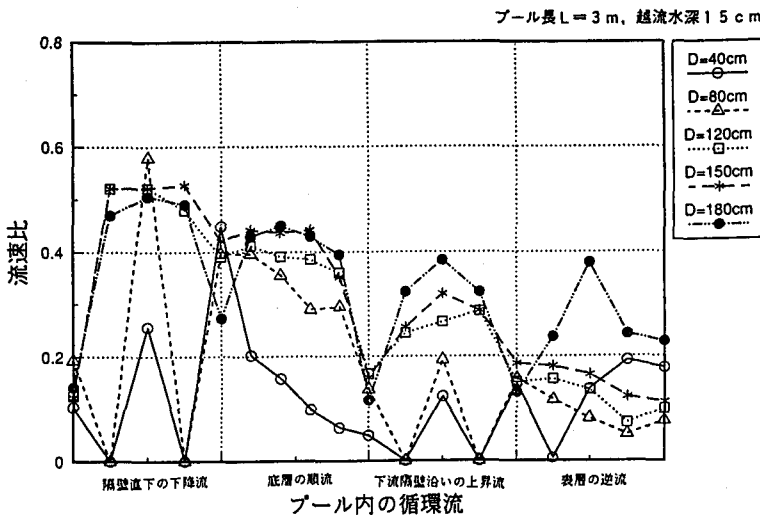


図-9 プール内における循環流の流速比

次に、底面の中央部と下流側堰の中央部における低減率を比較した。(図-10, 11) 堰高が小さいほど低減率は大きくなる傾向を示し、減勢効果が高いことがわかるが、プール長も堰高も小さくなると逆に低減率が小さくなる。これはプールの規模が不十分であるために、

プール内の減勢効果が小さくなり、跳水に似た流況を呈するためで、越流水深を大きくしたケースでも同様の結果が起こりやすくなっていた。よって、低減率を最も大きくする、すなわち最も効果的で小規模な堰高はプール長、越流水深によって異なるピークを持ち、またこの付近が遡上効果も大きい形状であると考えられる。

6. まとめ

従来、経験的に設計されてきた階段式魚道について水理的な面から、落下流状態にする適切な規模の考え方を示すことが出来た。しかしながら、魚のための施設である以上、魚にとって望ましい姿を追求することが重要であり、今後魚の挙動の観察を行い、具体的な設計手法を示していきたいと考えている。

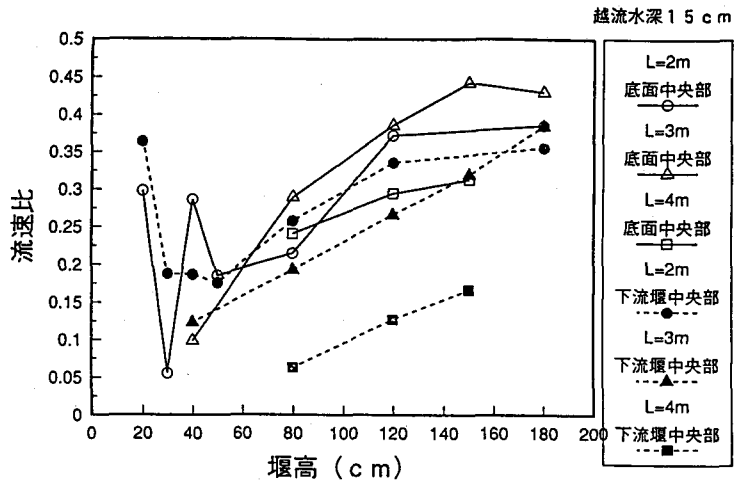


図-10 堰高、プール長による流速比の変化(越流水深15cm)

参考文献

1) 高須・箱石・村岡：ダムと魚道，ダム技術

No. 78, 1993.

2) 廣瀬・中村：魚道の設計，ダム水源地環境整備センター，山海堂，1991.

3) 篠邊三郎：頭首工の魚道—現状と水理模型実験，Fishways'90 in Gifu, 1990.

4) 卯月雅裕：階段式魚道の隔壁形状及び水位調節装置に関する実験的研究，Fishways'90 in Gifu, 1990.

5) 和田吉弘：長良川のアユづくり，治水社，1993.

6) 中村俊六：階段式魚道模型内でのアユの挙動，Fishways '90 in Gifu, 1990.

7) Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Mainali, A.: Plunging and streaming flows in pool and wiers fishways, J. Hydraulic Engineering, 117, ASCE.

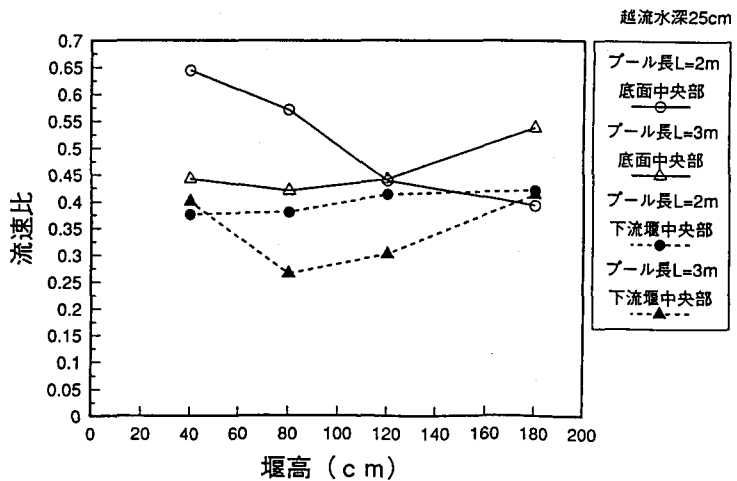


図-11 堰高、プール長による流速比の変化(越流水深25cm)