

棧型粗度の抵抗特性と魚道への適用

Resistance characteristics on strip roughness and application of it to fishway

北海道大学工学部 ○学生員 石塚 文彦 (Fumihiko Ishiduka)
 北海道大学大学院 フェロー 黒木 幹男 (Mikio Kuroki)

1. はじめに

近年、潤いや安らぎ、ゆとりと言った言葉で表現されるような、真に豊かな生活が求められ、多自然型河川づくりが進められている。なかでも魚類に関してはその生息環境の改善に関する期待は高い。河川に住む魚はほとんどが河川を移動して生活しているため、その移動を阻害している河川横断構造物が存在する箇所、魚道の設置が求められている。魚道の役割としては、魚の遡上の手助けになるように、落差の大きい河川構造物においては、それをスロープ状や階段状にする。また、流速を大きくする構造物がある箇所では、その流速を抑えるといったものがある。

ここでは、流速に大きく作用するものとして棧粗度の効果に着目し、それを用いた魚道を設計することを目的とする。そのために、実験水路を用いて模型実験を行い、棧粗度が流速にどのような影響を与えるか、また水理条件の変化によってどのように影響を受けるかを求め、そしてその実験から得られた結果を、実在河川に魚道に設置する際に適用する方法について考えた。また、実在河川の魚道内の流速を調べるために、流量から流速を求めるといった方法を用いた。

2 実験装置と方法

本実験に用いた水路は、鋼製ペンキ塗装の幅 30cm、深さ 30cm、長さ 10m の可変勾配ガラス水路で、その底面上に 1.5cm×1.5cm 断面の木製の正方形棧粗度を設けた。棧粗度の配置の仕方については図-1 に示すように、縦断方向に対して一定間隔で敷き並べ、流下方向に対して直角に配置した。実験条件は表-1 に示すように、粗度指数 S/k (棧粗度間隔/棧粗度の高さ) 10 通り、流量 Q (m³/s) 4 通り、勾配 I 4 通りであり、それぞれを組み合わせる実験を行った。流量の測定は実験水路のベンチュリー管に設置されたマンメーターによって行った。

データの測定は、水深についてはポイントゲージを用い、流速については小型プロペラ流速計を用いた。

測定点は横断方向 (y)、流下方向 (x) に格子状にとった。流速については鉛直方向 (z) にも数点測定した。

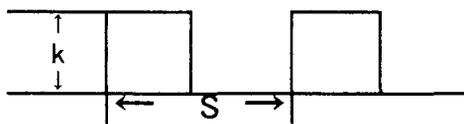


図-1 棧粗度の配置図

表-1 実験条件

S/k	4, 8, 10, 12, 14, 20, 30, 40, 50, ∞(粗度なし)
Q (m ³ /s)	0.002, 0.005, 0.008, 0.0118
I	1/48.4, 1/94.5, 1/173, 1/348

3. 実験結果と解析

3.1 棧粗面の抵抗則

本研究では、実験によって得られた結果は理論平均流速の対数則に従うと考え、粗度の状態をMという形で表した式(1)を用いて解析する。棧粗度のない状態でのMをM₀とすると、第2項目は粗度効果を表していることがわかる。

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(MR) \\ = \frac{1}{\kappa} \ln(M_0 R) + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{M}{M_0}\right) \quad (1)$$

(U_m: 流速、U_{*}: 摩擦速度、κ: カルマン定数、R: 径深)

3.2 実験結果

(1) 粗度効果

図-2 は実験から得られた平均水深 h と S/k の関係で Q=0.008 (m³/s) のデータを示しているが、従来行われてきた実験と同様に S/k=10 の近傍で粗度効果が高くなっていることがわかる。この傾向は Q=0.005、0.002 (m³/s) のデータにも同様に見られた。

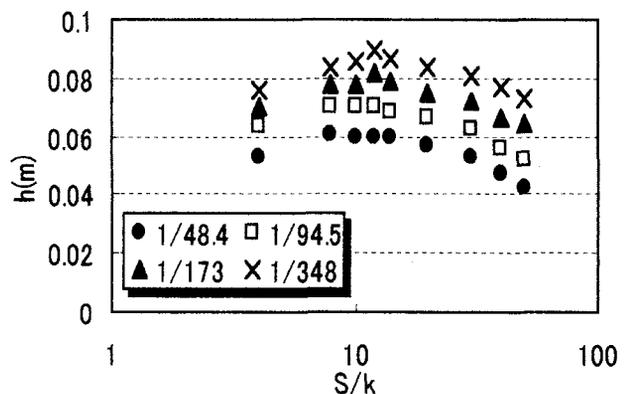


図-2 S/k-平均水深hの実験値

(2) M/M₀ の評価について

粗度の効果を表している式 (1) の第 2 項における M/M₀ について評価する。従来の実験のように S/k=10 近傍で粗度の効果が最も高いことがわかったので、今回の実験においては S/k=8~14 における値について考える。

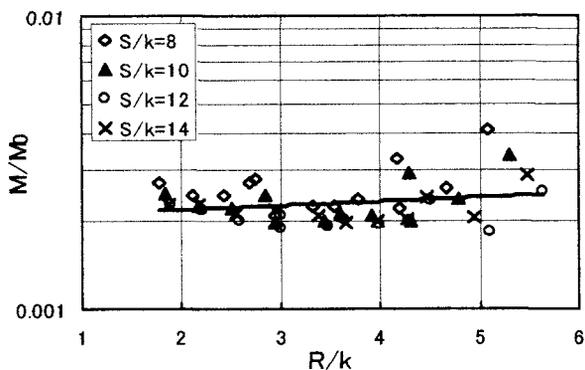


図-3 M/M₀-R/k の実測値

図 3 は R/k (粗度高さ) に対する 実験値をプロットしたものであるが、S/k=8~14 において違いが見られなかったため、一本の近似直線を引いた。この近似直線を式であらわしたものが式 (2) である。

$$M/M_0 = 0.002 \exp(0.352R/k) \quad \dots\dots (2)$$

この式を用い、魚道の設計へと応用していく。

(3) 水深・流速の標準偏差

栈粗度を有する流れでは水面は波打ち、縦断方向に流速・水深の変化が見られた。図-4 はその一例である。

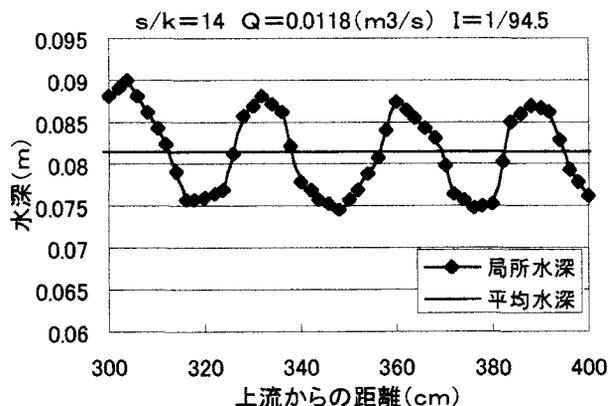


図-4 水深の縦断変化

より効果的な魚道を設計するには、水深・流速の平均値だけでなく、それらの変化も考慮し、最高流速、または最低水深を予測する必要があると考え、先で示した粗度効果の高い S/k=8~14 の水深・流速の標準偏差を求めた。図-5 は S/k=8~14 の実験から得られた水深の標準偏差を平均水深で割ったものと勾配との関係を流量別に表したものである。どのパターンでも流量による違いは見られず、平均水深に対する標準偏差の割合は S/k=8~14 の間では S/k が大きくなるにつれて、その値も大きくなり、勾配に対する変化の割合も大きくなる傾向が見られた。

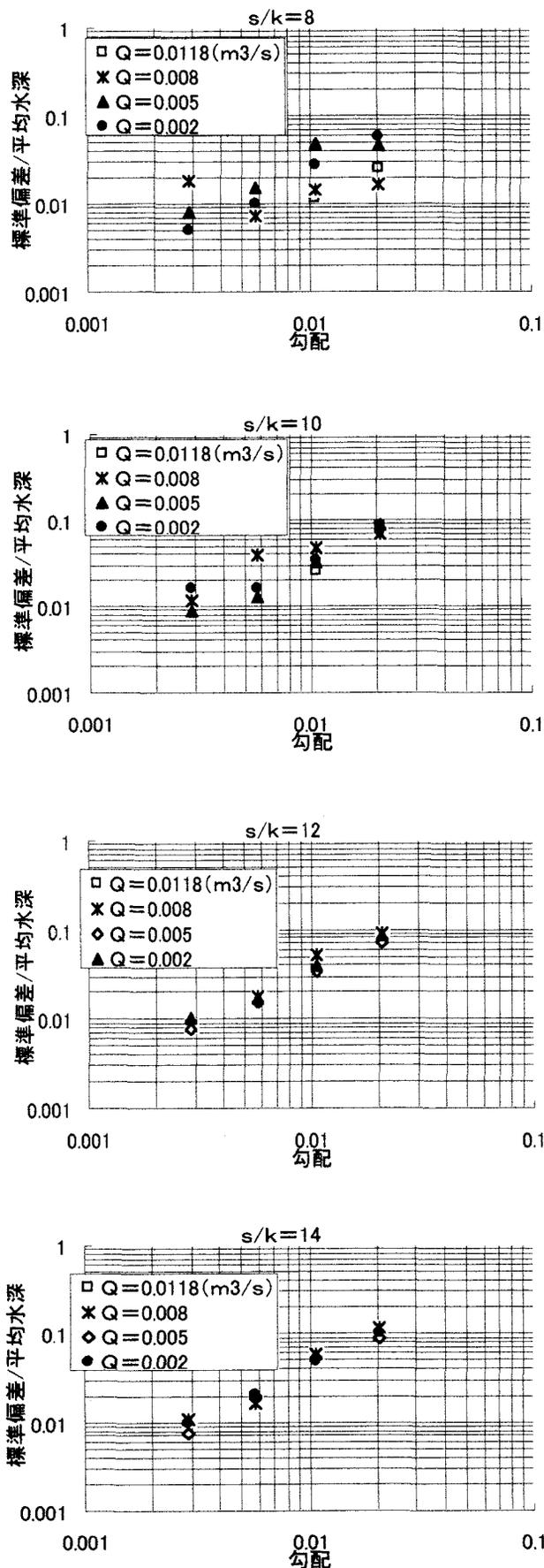
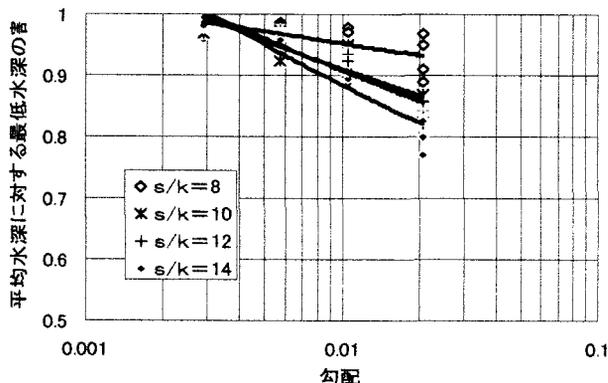


図-5 標準偏差/平均水深-勾配の実験値

これらの結果より水深の標準偏差は平均水深と勾配によって求めることができたので、勾配の変化によって予測される最低水深を平均水深との比で S/k ごとに表すことができた。(図-7)



近似曲線 $S/k=8$ $y=0.8321x^{-0.0292}$
 $S/k=10$ $y=0.6583x^{-0.0704}$
 $S/k=12$ $y=0.6269x^{-0.0804}$
 $S/k=14$ $y=0.549x^{-0.1035}$

(注) 近似曲線は両対数上で引いたが白黒では見分けにくいいため片対数グラフにした。

図-7 最低水深-勾配の関係

この結果を用いることでより効率的な魚道を設計できると考えられる。

横断方向の流速変化の一例を次図に示す。

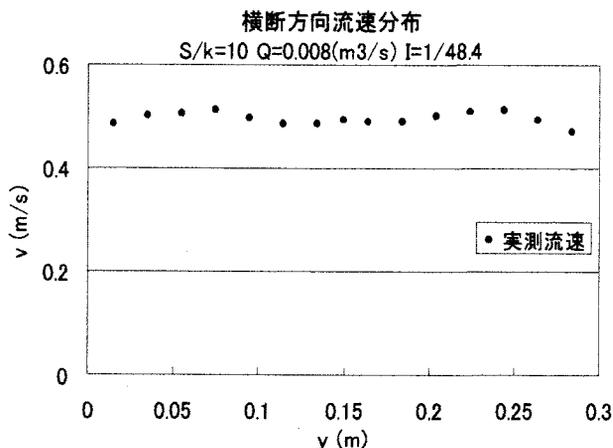


図-8 横断方向流速分布

図-8のように横断方向には流速の変化は縦断方向に比べて微小であった。この傾向は $S/k=4\sim 30$ で同様の結果が見られた。よって今回は横断方向の流速・水深の変化を無視し、縦断方向の流速・水深変化のみについて考慮する。

4. 魚道の設計への適用

3-2.(3)で得られた結果より、魚道を設計する際に、まず魚道が効率的に機能するように流速・水深の変化が小さくなるように S/k を設定する。勾配が緩やかな場合は先で得られた実験結果より $S/k=8\sim 14$ の

どれを使っても問題ないが勾配が急な場合は $S/k=8$ を用いたほうがよいと考えた。そして次にその魚道を遡上させる魚の遡上能力を、カトボディアスの遊泳力-持続時間曲線を用いて考えていく。魚種には様々なものがあるが、河川遡上を考える上では遊泳型により、サケのような一般魚と、ウナギのような全身をくねらせて泳ぐ魚の2種にのみ分類する。本研究では前者の一般魚を対象として解析する。式(3)はカトボディアスによる一般魚の遊泳速度を表す式であり、これを用いて遊泳速度を求める。これと魚の遊泳持続時間、魚道長を考慮して相対速度を求め、魚道内の目標流速を決定し、そのときの水深を仮の目標水深とする。そして、先の結果を用いて、仮の目標水深が最低水深となる平均水深を真の目標水深とする。不等流計算により魚道内の水深の変化を調べ、その最小水深が目標水深に到達したときの Manning の粗度係数 n を設計する魚道の n 値として決定する。つぎに、式(1)を M について整理して得られる式(4)と、求めた n 値を用いて M を決定する。 M_0 については魚道の材料により決まる n 値と等流水深から求める。求めた M 、 M_0 各値を用いて、式(2)より粗度工の高さを算出する。

$$U = 1.295 \sqrt{gl} \left(t \sqrt{\frac{g}{l}} \right)^{-0.124} \quad (\text{一般魚}) \dots\dots (3)$$

$$M = \exp \left(\frac{R^{1/6} \kappa}{n \sqrt{g}} \right) R^{-1} \dots\dots (4)$$

(U : 魚の遊泳速度 l : 魚の体長 t : 遊泳持続時間)

5. 実河川における計算例

表-2 豊平川5号床止の水理条件

単位幅流量 q (m^3/s)	0.329
勾配 I	1/20(=0.05)
魚道長 L (m)	18.2
魚道の材質	コンクリート

魚道を遡上させる魚の体長を0.4mと仮定し、豊平川の5号床止の流量、勾配を参考に計算する。5号床止における各水理条件、魚道の形状を表2に示す。ここで、勾配1/20における平均水深に対する最低水深の割合を図-7の近似式より予測する。

$S/k=8$ 最低水深=0.908×平均水深
 $S/k=10$ 最低水深=0.813×平均水深
 $S/k=12$ 最低水深=0.798×平均水深
 $S/k=14$ 最低水深=0.749×平均水深

よって S/k による水深変化が最も小さい $S/k=8$ を用いる。次にカトボディアスの遊泳力-持続力曲線より魚の遡上能力を求め、仮の目標水深を決める。この例では

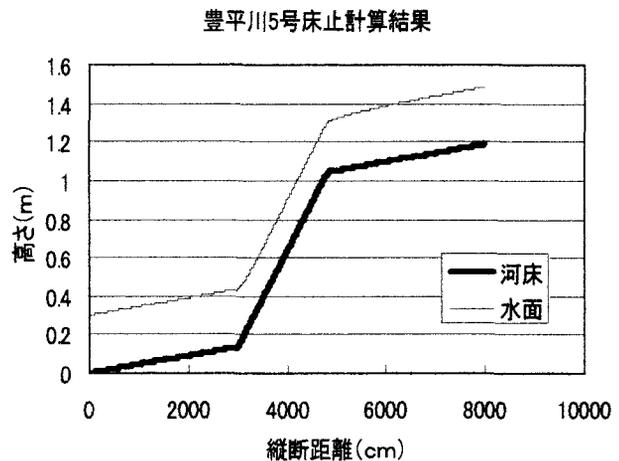
24.0 cm。よって $S/k=8$ の場合、目標水深は 26.4 cm となる。次に不等流計算よりこの目標水深を満たす n 値を計算する。今回の例では全て常流なので、下流から計算した。計算結果は図-9 に示す。 n 値は 0.739。この値と式 (4) を用いて M 、 M_0 を求める。 M_0 は等流水深 9.7 cm、コンクリートの n 値 0.014 より $M_0=5007$ 。 $M=16.3$ 。式 (2) を k について整理し各値を代入し、粗度高さを決定する。この計算例では $k=17.1\text{cm}$ が得られた。 $S/k=8$ を用いるので粗度間隔は 1.37m にする。以上の計算結果を表 3 に示した。

6. おわりに

以上の解析より、現地で割と簡単に得られる流量、勾配、川幅、魚道幅から魚道内の平均流速だけでなく最高・最低流速、水深も予測することができ、より効率的な魚道を設計することが可能になったと思われる。今後は、実験より $S/k=40$ 以上で無視できない影響を与える側壁の影響の解析、そして以前行った左右で粗度間隔が異なるように粗度を設置した複合配置の場合についても同様の解析を進め、全断面魚道の設計方法について研究する。

参考文献

- 1) 足立昭平：開水路における棧型人工粗度の実験的研究，京大防災研究所年報，第 3 号，1959。
- 2) 廣瀬利夫，中村中六，（財団法人ダム水源地環境整備センター編）：魚道の設計
- 3) 土木学会：水理公式集，平成 11 年版
- 4) 野村俊介、磯部龍太郎、黒木幹男、板倉忠興：魚道における棧型粗度の抵抗特性に関する研究、北海道支部論文報告集 第 54 号 1998
- 5) 磯部龍太郎、丹羽雄一郎、黒木幹男、板倉忠興：開水路における棧型粗度の抵抗特性と魚道への適用に関する研究、北海道支部論文報告集 第 57 号 2001
- 6) 丹羽雄一郎、黒木幹男：複合粗度の水理特性と全断面魚道への応用、北海道支部論文報告集第 58 号 2002



上流部 $n=0.0275$ $I=1/222$ $h_0=30.0\text{cm}$
 魚道部 幅 5m $I=1/20$ $h_0=9.73\text{cm}$
 下流部 $n=0.0275$ $I=1/222$ $h_0=30.0\text{cm}$

図の範囲内では全て常流

図-9 5号床止不等流計算結果

表-3 豊平川5号床止計算結果

適用する S/k	8
仮の目標水深	24.0cm
真の目標水深	26.4cm
上・下流部等流水深	30.0cm
魚道部等流水深	9.73cm
必要とする n 値	0.0739
M	16.3
M_0	5007
粗度高さ	17.1cm
粗度間隔	1.37m