

複合栈粗度の水理特性と全断面魚道への適用

Hydraulic characteristics on combined strip roughness and application of it to whole section fishway

北海道大学大学院 ○学 生 員 丹羽雄一郎 (Yuichiro Niwa)
 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、潤いや安らぎを求める風潮が高まり、多自然型河川づくりが進められてきた。河川に生息する魚類のほとんどは、日常的に遡上、降下をしており、こうした魚類にとって、堰、床止め、ダム等の河川横断構造物は移動の障害物となりうる。このような魚類の生息環境の改善に関する期待が高まる中、多くの河川に魚道が設置されてきた。しかしながら、実際に魚道を設置しても、様々な問題を抱えている場合もあり、我々が本研究を始めるにあたって最も問題視したのは、魚が魚道の入り口へうまく誘導されずに遡上不可能地点で滞留してしまうことである。他にも、従来多く見られる水路タイプの幅狭魚道ではその魚道を遡上可能な対象魚種に限られたり、流木やゴミなどがひっかかり堆積する等の問題が考えられる。これらの問題に対しては、魚道の設置地点各々の流況に応じて議論の必要があるであろうが、本研究ではひとつの改善策として全断面に数種の粗度を複合的に設けた全断面魚道を考えた。そこで、魚道の流速に大きく影響を与えるものとして栈粗度の効果に着目し、様々な粗度配置で模型実験を行い、そこに起きる水理現象を調べる。複数のパターン of 粗度領域から構成される全断面魚道において、各領域に配分される流量を知るところを目的とする。

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栈粗度を設けた。栈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る単一間隔の場合と、間隔を横断的に 2 種に分ける複合間隔の場合の 2 パターンであり、どちらの場合も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 (栈粗度間隔/栈粗度の高さ) 10 通り、流量 Q (m^3/s) 3 通り、勾配 I 4 通りであり、それぞれを組み合わせ実験を行った。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ノメーターにより行った。

単一粗度実験の場合はこれらの条件をそれぞれ組み合わせ水深・流速を測定した。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、平均値をその x y 座標でのデータとした。

複合粗度実験の場合は前述したように水路の左右で S/k の異なる栈粗度配置にして同様の測定を行った。栈

粗度配置は $S/k=10\&\infty$ 、 $10\&40$ 、 $10\&30$ 、 $10\&40$ の 4 パターンで実験した。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。

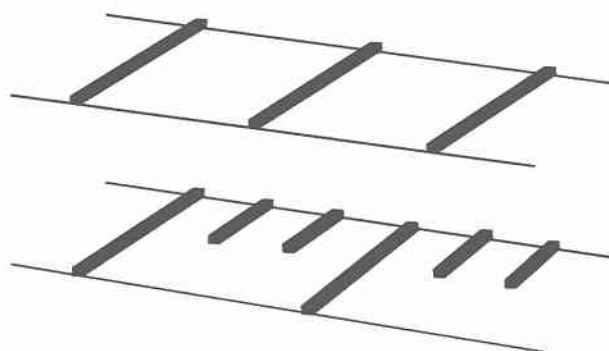


図-1 栈粗度の配置図
(上:単一配置、下:複合配置)

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
I	1/48.4, 1/94.5, 1/173, 1/348

3. 実験結果と解析

3. 1 栈粗面の抵抗抗

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。栈粗度の無い状態での M を M_0 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 単一粗度実験

(1) 粗度効果

図-2 は単一粗度実験から得られた平均水深 h と S/k の関係で $Q=0.008$ (m^3/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。また、 $S/k=10$ 以下の粗度効果については、10 でのそれ以下であり、 $S/k=10$ 以上において同等の効果が得られる。従って $S/k=10$ 以下は魚道の粗度配置には適当でないと考えられるので、図-3に M/M_0 のデータを $S/k=10\sim50$ との関係で示した。

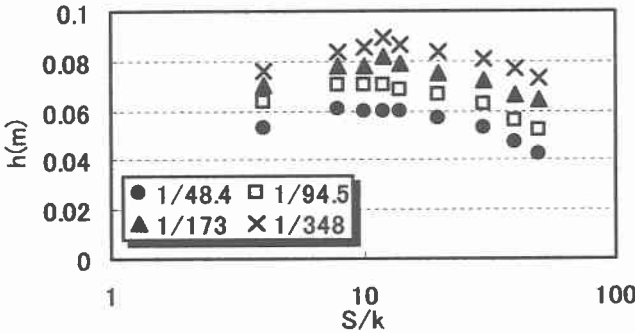


図-2 単一粗度実験の平均水深

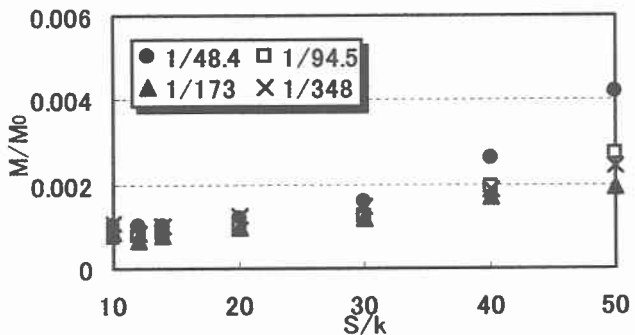


図-3 M/M_0 と S/k の関係

(2) 複合粗度の流量配分の理論値 1

複合粗度実験の結果を述べる前に単一粗度実験の結果を用いて複合粗度の領域 1、2 の流量配分を計算によって求める。単一粗度の平均水深は式(1)と径深と連続式を水深に対して繰り返し計算することで求まる。この計算を複合粗度の場合にも適用してみる。粗度の配置の仕方は $S/k=10$ と 20、30、40、 ∞ をそれぞれ組み合わせた 4 パターンを考えこのときの M については次のように考える。

水深を 2 領域で等しいと仮定し、領域 1、2 の平均流速を式(2)のように表す。連続式は式(3)のようになり、これより平均流速は式(3)の中括弧内が表しており複合粗度での M は式(4)となる。

$$U_1 = U \cdot \frac{1}{k} \ln(M_1 R) \tag{2}$$

$$U_2 = U \cdot \frac{1}{k} \ln(M_2 R)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{b}{2} h (U_1 + U_2) \\ = bh \left\{ U \cdot \frac{1}{k} \ln \left(\sqrt{M_1 M_2} R \right) \right\} \tag{3}$$

$$\overline{M} = \sqrt{M_1 M_2} \tag{4}$$

式(4)を式(1)に適用し前述の様に径深と連続式との間で繰り返し計算を行い複合粗度での平均水深^(※)を求める。各領域をそれぞれ幅 $b/2$ の単一粗度領域と考え、領域毎に^(※)の水深となるときの流量を Q_1 、 Q_2 とする。これは前述の繰返し計算を各領域で逆算することで求まる。このようにして求めた Q_1 、 Q_2 の比を表-2に示した。

表-2 流量配分比(理論値1)

(a) $Q=0.008(m3/s)$				
S/k	10& ∞	10&40	10&30	10&20
Q_2/Q_1	7.13	1.73	1.18	1.14

(b) $Q=0.005(m3/s)$				
S/k	10& ∞	10&40	10&30	10&20
Q_2/Q_1	5.26	1.82	1.40	1.15

3. 3 複合粗度実験

(1) 粗度効果

図-4は複合粗度実験から得られた平均水深と 3. 2-(2)で求めた^(※)の水深を式(4)の複合 M との関係で示したものである。横軸の複合 M は左から $S/k10\&20$ 、 $10\&30$ 、 $10\&40$ 、 $10\&\infty$ の値をそれぞれ示している。これに示されるように全平均(流下・横断方向)については単一粗度の場合と同様の傾向があり、また $10\&\infty$ の場合意外は理論値と実験値が合致していると言える。しかし横断方向に各ポイント毎のデータ(流下方向平均値)を検討すると、図-5、図-6に示したように領域間で水深に著しい相違は見られなかったが、局所流速 v は大きく変化するパターンもあり、2 領域に流量が等しく配分されていないことがわかる。また、水深の変化が大きくないことから流速変化は流量変化の様子も表していると考えられる。 $S/k=10\&20$ から $10\&\infty$ へ移行していくに連れて、流量は粗度効果の低い方へ集中している様子がわかる。これは複合的な間隔で粗度を配置する魚道について検討する際の基礎的かつ重要な点であり次項で流量配分を計算する。

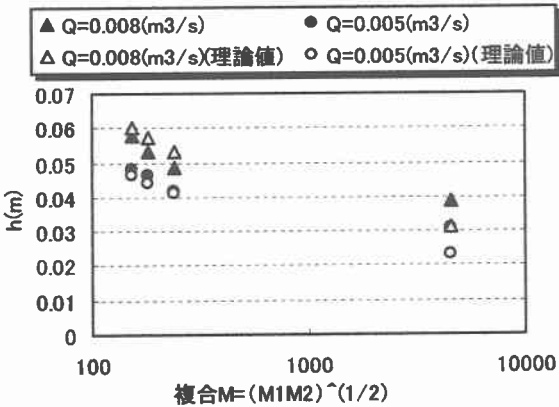
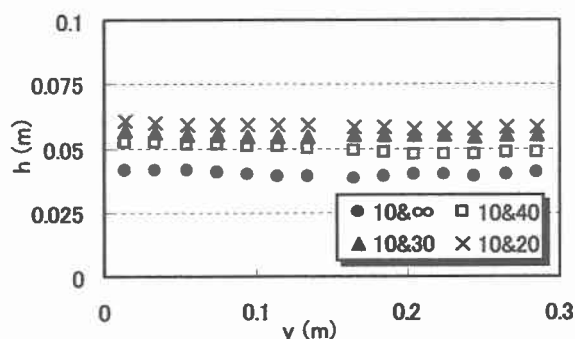
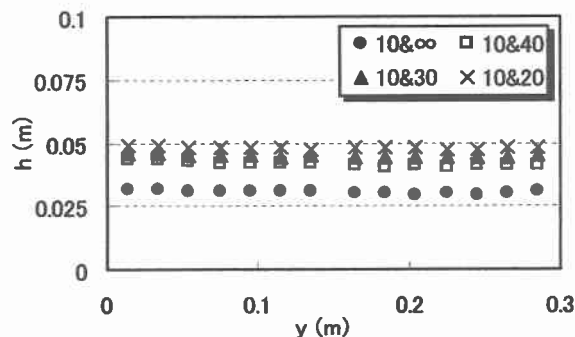


図-4 複合粗度実験の平均水深

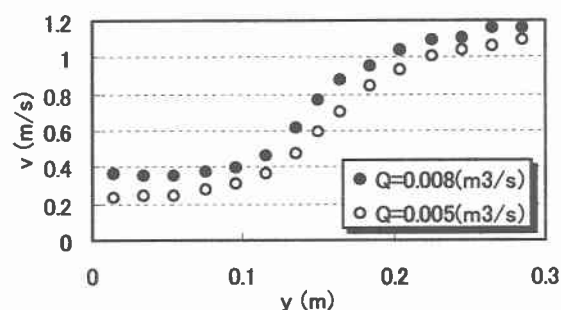


(a) $Q=0.008(\text{m}^3/\text{s})$

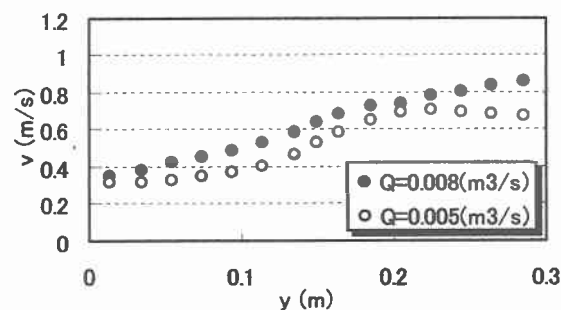


(b) $Q=0.005(\text{m}^3/\text{s})$

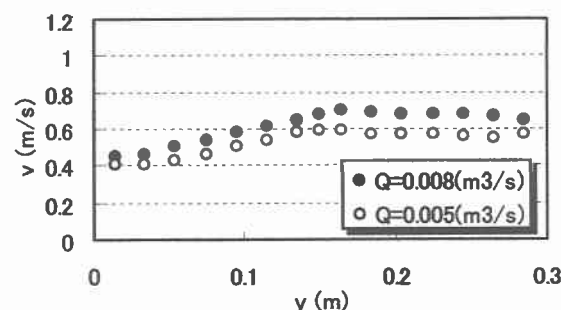
図-5 横断方向の水深分布



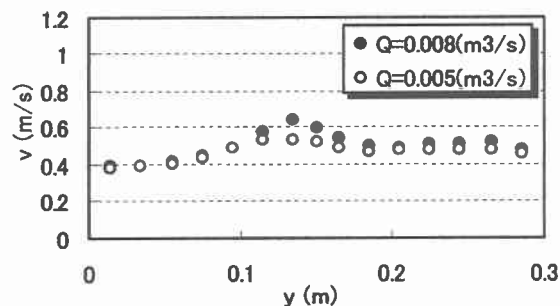
(a) $S/k=10\&\infty$



(b) $S/k=10\&40$



(c) $S/k=10\&30$



(d) $S/k=10\&20$

図-6 横断方向の流速分布

(2) 流量配分

横断方向の水深と流速分布のデータから以下の式(5)でそれぞれの S/k の組み合わせでの各領域の流量を求めた。こうして求めた流量から領域間の流量配分比を計算した結果を表-3に示した。

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{n/2} h_i v_i \Delta x \quad Q_2 = \sum_{i=n/2}^n h_i v_i \Delta x \quad (5)$$

(Δx : 測定間隔)

表-3 流量配分比(実験値)

(a) $Q=0.008(\text{m}^3/\text{s})$

S/k	10& ∞	10&40	10&30	10&20
Q_2/Q_1	2.41	1.57	1.24	1.05

(b) $Q=0.005(\text{m}^3/\text{s})$

S/k	10& ∞	10&40	10&30	10&20
Q_2/Q_1	2.94	1.73	1.17	1.05

(3) 流量配分の理論値1と実験値の比較

図-7は以上のようにして求めた流量配分比の理論値と実験値を2領域間の $\Delta M/M_0 (=M_2 - M_1)$ との関係で示している。これに式(6)で示す対数近似線を引き両者を比較すると、単一粗度実験の結果から求めた理論値は実験値と合致しているとは言えない。これは理論値では流速を式(1)で与えていたため図-6に現れているような横断的な流速変化が考慮されていないことが原因と考えられる。

$$y = a \ln x + b$$

(6)

(y : Q_2/Q_1 , x : $\Delta M/M_0$, a, b : 定数)

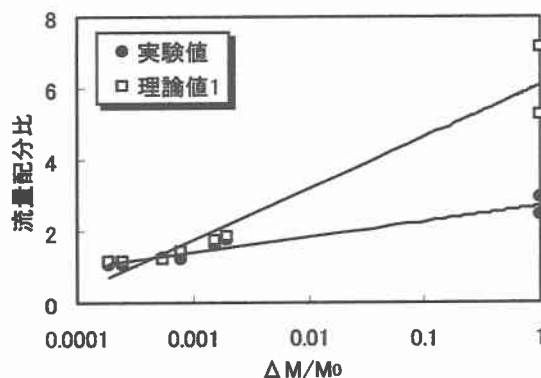


図-7 流量配分比(理論値1と実験値の比較)

3. 4 複合粗度の流量配分計算の補正

(1) 横断方向流速分布の計算

前項で論じた流量配分比の理論値と実験値の不一致を補正するため K.Shiono らの研究に基づき横断方向の流速分布を求める。以下にその方法を示す。

流下方向に流れを一様とし、横断方向にのみ変化するものとする。また横断方向の平均流速はゼロとする。浅水流理論を用いると流れは式(7)で与えられる。

ghI - \frac{f}{2} v^2 \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon h \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \tag{7}

f、ε はそれぞれ次式で定義される。

f = \frac{2 ghI}{v_*^2}, \quad \epsilon = \lambda h v_*

(f : せん断力係数、η : 局所水路床高、ε : 横断方向拡散係数、λ : 無次元横拡散係数、v_* : 摩擦速度)

λ については多くの実測値から二次元水路内の場合には代表横拡散係数として 0.23 という値が与えられている。

*) 水深は 3. 2-(2) で求めた (※) の水深を与え、水路床は一定として式(7)を解くと、式(8)のようになる。

v^2 = c_1 e^{v y} + c_2 e^{-v y} + \frac{2 ghI}{f} \tag{8}

※ Y = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \sqrt{\frac{f}{2}} \frac{1}{h} \quad (C_1, C_2 : 積分定数)

なお f は式(1)より M を用いて次式で表される。

f = \frac{2 \kappa^2}{\{\ln(MR)\}^2}

式(8)を各領域に与え原点をそれぞれ側壁部にとり、断面中央部に向かって正値をとる。側壁部付近での流速の欠損がないと近似し、境界条件を以下のように与え流速分布式を求めた。

- (i) 両側壁で dv1/dy=0, dv2/dy=0
- (ii) 領域の接続部すなわち断面中央部で v1=v2, dv1/dy=-dv2/dy

(2) 流量配分の理論値 2

求めた流速分布式を用いて式(9)によりそれぞれの S/k の組み合わせにおいての各領域の流量を求めた。

Q_1 = \frac{b}{2} h \int_0^b v dy \quad Q_2 = \frac{b}{2} h \int_b^b v dy \tag{9}

こうして求めた流量から領域間の流量配分比を計算し結果を表-4に示した。

表-4 流量配分比(理論値2)

(a)Q=0.008(m3/s)				
S/k	10&∞	10&40	10&30	10&20
Q2/Q1	2.90	1.27	1.13	1.05
(b)Q=0.005(m3/s)				
S/k	10&∞	10&40	10&30	10&20
Q2/Q1	3.69	1.47	1.25	1.10

(3) 流量配分の理論値 2 と実験値の比較

図-8は以上の方法で補正し求めた流量配分比を 3. 3-(3)と同様に実験値と比較したグラフである。補正前の比較よりも理論値の近似線が実験値のそれにかかなり近付いた結果となった。

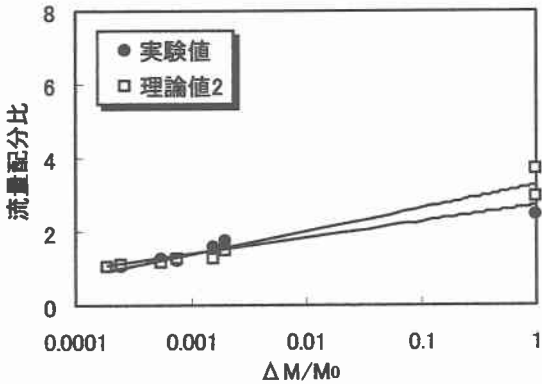


図-8 流量配分比(理論値 2 と実験値の比較)

4. 考察

図-7と図-8を比較すると実験値との誤差を大きく補正することができたが、理論値 2 も領域間の粗度効果の差が大きくなるにつれ誤差が大きくなる傾向が見られる。これは実際には領域間の流速差が大きくなるにつれ、流体中で働くせん断力が大きくなることを理論値では考慮していないため、理論値の方が流量配分比が大きく算出されたと考えられる。

5. おわりに

以上の解析で粗度効果の異なる隣り合う領域間の流量配分比が求まった。これにより複数領域を持つ全断面魚道の流量配分比を検討でき、各領域の流量は最も粗度効果の高い領域の流量との比で表せる。またそういった魚道を設計する際には当然対象にする魚種の遊泳力で遡上可能でなくてはならない。カトポディアスの遊泳力・持続時間曲線から遊泳力を求め、想定すべき流量を算出し、これを満たすような粗度配置を算定することもできると考えられる。

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，昭和 60 年版，p.46
- 4) 土木学会土木情報システム委員会，情報活用・教育小委員会編：土木技術者のための Excel 活用
- 5) K.Shiono , D.W.Knight : Two dimensional analytical solution for a compound channel, Proc.of The Third International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, pp.503-510, 1988.