

■植え石（粗石）付き魚道の設計方法を教えてください

○県 匿名希望

農林水産省農村振興局整備部設計課監修の”よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針” p. 79 に、植え石（粗石）付き斜路型魚道の粗度係数（ n ）の算出方法として、足立の式が紹介されています。

当現場に魚道を設置する場合、魚道勾配が 1/15 より急になるため、リープフロッグ式の採用を検討しています。以下のような設計条件において、足立の式を参考にしてよいでしょうか。また、参考にする際の留意点は何でしょうか。

<設計条件>

①魚道勾配 1/7、②魚道有効幅 0.6m、③粗石は現地採取（直径 18cm 程度）し、千鳥に配置（足立の式の $S_1=0.6m$ 、 $S_2=0.4m$ ）して半分コンクリートに埋め込み。

●お答えします。

施設資源部水源施設水理研究室主任研究員 浪平 篤、技術移転センター専門員 加藤 敬

ご質問の内容を要素分割し、当方の考え方を述べて参ります。

Q 1 机上設計でリープフロッグ式魚道を検討したい。

A 1

「頭首工の魚道」設計指針（以下、設計指針という）p. 79 によると、リープフロッグ式魚道は、千鳥型に粗石を配置し、従来の植え石付き斜路型魚道よりも魚道勾配をきつくできる型式の魚道とされています。ただし、このような植え石付き型式の魚道に適する水理設計公式がないため、設計指針 p. 79 には、”現状では水理模型実験が必須”という記述が添えられています。水理模型実験を行わないのであれば、急勾配であっても、ある程度の効果が期待できるプールタイプの魚道型式を選定することをお勧めします。

【右写真の説明】

・リープフロッグ式魚道（向かって右側）を採用したM頭首工の完成直後の魚道全景。
（非かんがい期に左岸側上流から撮影）
・ただし、この河川は土砂の流量が多く、現在は土砂が粗石の間を埋め、植え石の機能は著しく低下しています。



<注釈：河川を上流から下流に向かって眺めたとき、右側を右岸、左側を左岸と呼びます。>

【右写真の説明】

- ・ 国営鬼怒中央農業水利事業により、栃木県鬼怒川に建設された岡本頭首工の左岸側に設置された植え石付き型魚道。
（水面が白濁しているのは、水深の浅い流れが植え石と衝突し、水面から水中に多量の気泡が取り込まれている状況を示しています。）



【右写真の説明】

- ・ 国営野洲川沿岸農地防災事業により、滋賀県野洲川下流に建設された石部頭首工の右岸側に設置された魚道。
 - ・ 向かって左が多自然型魚道、右がアイスハーバー型魚道（プールタイプ）。また、左岸側には傾斜導流壁型魚道が設置され、多様な魚種に配慮されています。



【右写真の説明】

- ・ 山口県木屋川に建設された大野頭首工の右岸側に設置されたアイスハーバー型魚道。
（非かんがい期に右岸側下流から撮影）
 - ・ この型式は、非越流部の障壁が上流プールに突き出ていることで流況をよくする。しかし、プール長に対して障壁が長すぎると流況が悪くなり、土砂が堆積しやすくなる。両側越流が原則。
（前記した設計指針 p. 169 から引用）
（隔壁中央下部に潜孔が設けられている。）



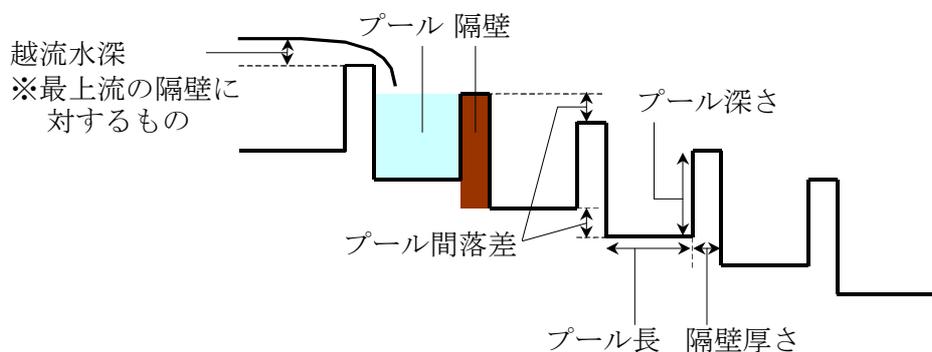
Q2 現場条件から魚道勾配を1/7としたいが、設計指針 p. 79 の水理計算方式に従って、マンニングの平均流速公式と足立のイボ粗度算定式を組み合わせる算定して良いか。

A2

(1) 植え石付き斜路型魚道は、設計指針 p. 77 に記述されているように、緩勾配(1/15~1/30程度)で設計することが基本です。A1で述べたように、貴現場ではプールタイプの魚道型式が適すと考えられます。例えば、文献によると、全面越流式(階段式)やアイスハーバー式等のプールタイプでは1/10程度まで適用できるようです。

(2) 農工研では、急勾配魚道にならざるを得ない現場を想定し、1/5勾配の階段式魚道の効果を測定しました。その結果、プール数は3段と少ないものの、小流量であれば、ウグイの遡上率が57%~63%程度期待できる効果を確認しました。その際の実験模型の概要と具体的データは次の通りです。詳細は参考文献4)をご覧ください。再度、お問い合わせ下さい。

<実験条件> 勾配: 1/5、プールの数: 3段、プール深さ: 0.4m、プール間落差: 0.2m、隔壁厚さ: 0.2m、プール長: 0.8m、越流水深: 5cm(単位幅流量: 21L/s)、ウグイの遡上率: 63%(体長: 8.5~12.5cm、実験使用: 208尾)、57%(体長: 6.5~9.5cm、実験使用: 160尾)。なお、下図に示す実験の隔壁天端には、水流が隔壁から剥離しないように丸みを付けました。



$$\text{※魚道勾配} = \text{プール間落差} \div (\text{プール長} + \text{隔壁厚さ})$$

Q3 設計指針 p. 79 によると、植え石のある流れを表す適当な式が無いことから、マンニングの平均流速公式と足立のイボ粗度算定式を組み合わせるよう述べているが、そもそも足立の式は、水路勾配 1/500 模型実験から得られており、1/15~1/30 の魚道勾配の水理設計に援用できないのではないか。

A3

(1) イボ粗度付きの水路では、粗度係数を求める方法として足立の実験式1)、2)などが不規則な自然石を使用した植え石のある流れの粗度係数を求める方法として援用されてきました。ご指摘の通り、この式は限られた実験条件の下で求められており、その適用に当たって

は注意が必要です。そのため、前記したように、設計指針 p. 79 において、急勾配のリープフログ式魚道を設計する場合には水理模型実験が必須と記されています。

(2) 貴現場に植え石付き魚道を設置することとして、足立の式を適用した場合、貴設計条件のように千鳥に粗石を配置し、水深を 12cm と設定すると粗度係数 (n) は 0.13 程度になりますが、水深を小さくしていくと、水深 10cm では $n=0.26$ 、水深 9cm では $n=0.60$ と、極めて大きな値となっていきます。逆に、水深を大きくしていくと、水深 30cm で $n=0.044$ 、水深 40cm で $n=0.038$ と、イボ粗度の影響が小さくなっていきます。このように、足立の式は、イボ粗度(ブロック)の高さに比べて水深が十分深い領域に適する式であり、水深がイボ粗度の高さに近づくほど粗度係数は過大な値と(誤差が大きく)なります。

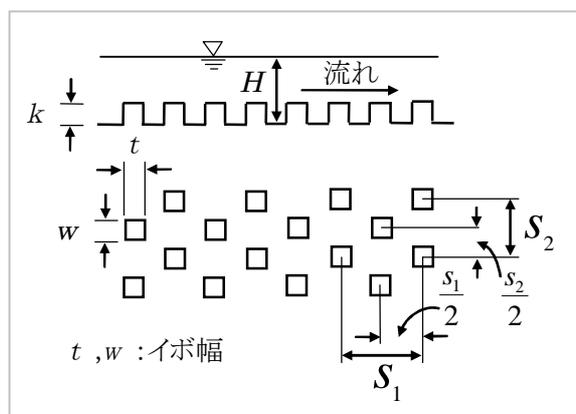
(3) 足立の式が 1/500 勾配の水路において行われた実験式であるため、1/15~1/30 の魚道勾配の水理設計に援用することは適さないのではないかとのご指摘ですが、この式は次のように、勾配 (1) を含まないことから、急勾配であることが本式の適用除外とは結びつかないと考えられます。前述の通り、本式には水深の大きさが特に影響を及ぼします。

(足立の式)

$$\frac{H^{1/6}}{n\sqrt{g}} = 10.6 \log_{10} \frac{H}{k} + 5.4 \log_{10} \frac{S}{F} - 5.47$$

ここで、H: 底面からの水深、n: 粗度係数、k: イボ粗度高さ、g: 重力加速度、S: 1つのイボ粗度要素が受け持つ面積(千鳥配置の場合は $S=S_1 \times S_2 \div 2$)、F: 1つの粗度要素の流れ方向への投影面積 ($F=k \times w$)

●計算方法 上式に H を代入し n を求める。この n と、水路勾配、径深をマンニングの平均流速公式に代入し流速を求め、通水断面積を乗じて流量を求める。ただし、水深が浅いときに、径深や通水断面積をイボ粗度(植え石)との関係でどのように取り扱えばよいかが大きな問題となります。



足立の式におけるイボ粗度(千鳥配置)の諸元

(4) 足立の式の適用性について述べてきましたが、植え石の高さ、大きさ、配置を考慮して粗度係数を求めるには、今のところ足立の式に頼らざるを得ないというのが実情です。そこで、足立の式の適用性について別の角度から考えてみましょう。ここでは、水理模型実験にもとづいて水深～流量公式が求められ、古くから利用されている舟通し型魚道（デニール式）を引き合いに出します。

(5) 舟通し型魚道（例えば、5）、6）、設計指針 p. 87）は、水路底に V 字の付いた棧が設置されており、この魚道の水深～流量の関係は、設計指針 p. 88 の図-3. 3. 12 に示されているように、実験的に求められています。この図では魚道入口の水深を適用しているので、魚道内の水深を使った実験データ 7) を利用し、貴現場条件に合わせて水路勾配 15% ($\cong 1/7$) で試算すると、水深 10cm で $n \cong 0.08$ 、水深 40cm で $n \cong 0.08$ が得られました。底と壁が平坦なコンクリート水路の粗度係数 ($n=0.015$) に比べるとかなり大きな値ですが、舟通し型魚道の粗度係数は、その適用範囲において水深の影響をさほど受けないことが分かります。

(6) 貴現場の設計条件として水深が与えられ、魚道流量が示されていませんが、仮に、実際の粗度係数が、足立の式で求めた粗度係数 $n=0.13$ に比べて小さかった場合（例えば、舟通し型魚道の実験式から求めた $n=0.08$ 程度）には、魚道の水深は貴設計条件の 12cm より浅くなり、魚の遡上条件は悪化することになります。

(7) 加えて足立の式は、流れに気泡は混入していないという実験条件から得られています。植え石付き魚道において流れが浅い場合には、A 1 で紹介した岡本頭首工の魚道の流れのように、流れに多量の気泡が混入し、足立の式の適用条件外となるだけでなく、魚には白濁して前が良く見えない泳ぎにくい流れとなります。

(8) ご存じのとおり、魚道設計には、魚道型式の選定とその水理計算だけでなく、魚道に流入する河川の水位（流量）の変動、魚道の入口が魚にとって見つけやすいか、鳥の捕食対策は必要か、魚道の下流端と河床とのすりつけ高さは河床低下や堆砂の影響を受けないかなど、様々な要素を加味する必要があります。魚道の効果は、実際に魚の遡上と降下でしか判定できず、その予想は難しいと言わざるを得ません。そのため、魚道の計画設計基準は未だに確立されていないと認識しております。貴県で建設された種々の魚道の効果や経験を参考にしながら、効果的な設計を行って下さい。

(参考文献)

- 1) 足立昭平(1964)：人工粗度の実験的研究、土木学会論文集、p104
- 2) 農林水産省構造改善局：イボ型護床工の粗度、設計基準・頭首工 H7 年 p256、
- 3) ダム水源地環境整備センター編(河村三郎ほか)：最新魚道の設計、p260-263、信山社サイテック

- 4) 浪平 篤(2010) : 魚道内の流況に着目した階段式魚道の設計に関する研究、農村工学研究所所報、第 49 号、P. 1-48
http://nkk.naro.affrc.go.jp/library/publication/seika/hokoku/49/49_1.pdf
- 5) 紀の川水系における魚道の調査設計について
<http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/kannai2004/04/11.pdf>
- 6) <http://www.rfc.or.jp/kawa/sakana/saka03.html>
- 7) C. Gosset, M. Larinier, et 著、中村俊六、東信行 訳監修 : 魚道及び降下対策の知識と設計、p. 144、リバーフロント整備センター