

石組み台形断面水路としてのバイパス水路および転流工の提案

Proposal of trapezoidal waterway with the arrangement of stones
as temporary waterway during dam construction and bypass along dam-lake

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田 陽一
日本大学理工学部土木工学科 正会員 ○高橋 直己
日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生会員 中嶋 和成

1. まえがき

ダムの建設に伴い、水生生物の連続性確保およびダム上流側の回遊性魚類の生態系保全を目的に魚道整備が求められている^{1), 2)}。ダム周辺に整備される魚道には、魚道上・下流側での迷入対策、魚道内の溯上環境を検討する必要がある。これまでのダムに整備される魚道はダム本体に魚道を設置し、魚道上流端はダム湖に接続される場合が多く、河川環境が急変するなど迷入しやすい課題の多い状況となっている¹⁾。また、ダム湖を迂回するためにバイパス水路を設けた事例があり、美利河ダムに設置された2 km前後のバイパス水路が挙げられる^{3), 4)}。最近、北海道天塩川水系のサンル川においてサンルダムの建設が始まり、水生生物の連続性確保およびダム上流側の回遊性魚類の生態系保全対策として、魚道下流端での迷入対策、分水施設、ダム本体に設置される魚道構造の提案が示され、実験的・実証的な検討が行われている⁵⁾。ここでは、サンルダムに整備する魚道の検討事項としてダム湖を迂回するための7 kmにおよぶバイパス水路の構造を提案し、その物理環境の特徴を実験的に検討した結果を報告する。また、ダム建設中の3~4年間に使用される120 m区間の転流工において、平水時から豊水時の流量規模で溯上可能な構造を提案し、その物理環境の特徴を実験的に検討した結果を報告する。

2. バイパス水路および転流工の提案

サンルダムに整備するバイパス水路^{2), 5)}の場合、図1に示されるように、ダム湖を迂回するため、全長が約7 km、高低差が約4.5 mとなり、水路の勾配が1/1000~1/2000となる。水路の構造として、溯上意欲を削ぐことなく速やかに溯上行動を促す工夫が必要となる。また、回遊性魚類の生態系保全の観点からダム建設中にもダム上下流側での連続性確保が必要不可欠となり、1/230勾配を有する転流工としてカルバート内を排水路にするのではなく、渇水時から豊水時に至るまで溯上可能な水路とすることが重要である。そこで、バイパス水路および転流工水路を同一な構造として提案する。その特徴を以下に示す。

水路を20 cmから30 cmの礫で石組みした台形断面水路とする(写真1参照)。水路内の流量が1 m³/sとなる場合でも、水路内の水深を確保するため、台形断面の上辺の幅を5 m程度とし、底面幅を1.5 mとする。また、溯上意欲が損なわれないように1 m/s程度の流速が生じる環境とし、かつ側壁・底面付近で休息できるように、側壁近く



図1 サンルダム上流側に整備されるバイパス水路



a) 石組み台形断面水路(設置完了の状態) b) 石組み水路下流端での礫の流出防止対策

写真1 バイパス水路かつ転流工としての模型

キーワード 重力式ダム, バイパス水路, 転流工, 溯上環境, 生態系保全

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8, TEL:03-3259-0409, E-mail:yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

の流速を小さくするため側壁勾配（鉛直1:水平 m）を(1:1.5)とする．側壁部については，整形した地盤の上部（法肩）から自然落下して構成された石組みを基本とし，上流側の礫および上部の礫が上に重なるように，かつ礫同士の接点が多くなるように組み方を調整する（写真1参照）．バイパス水路の場合，利水の制約から流量が $1\text{ m}^3/\text{s}$ とされているので，石組み水路整備後に容易に水路内で追加作業することができる．このことから，50 cm 前後の礫を用いて，水路内での局所的な流れの3次元性（逆流域の形成，主流の流速変化など）の増大を試行錯誤的に実施することができる（写真4参照）．水路内の礫はバイパス水路および転流工ともに，基本として空積みの石組みを想定している．転流工においては，3年から4年の建設期間に通水するため，洪水対策が必要となり，豊水流量以上の流量規模に対して水路内の礫が流出しにくいように，一定区間ごとに礫の固定化を行う（この点については，災害防止対策の観点からさらに検討する必要がある）．

3. 実験概要

石組み台形水路内の物理環境を検討するために，水路長さ 16 m，水路高さ 0.6 m（下流部），水路幅 0.8 m となる勾配可変型矩形断面水路を用いた．また，写真1, 2に示すように，礫は1寸および1.5寸サイズの玉石を用いて傾斜台および水路に設置した．傾斜部においては，木製の傾斜台をあらかじめ水路に設置し，傾斜台に玉石を自然落下させた後に石組みの向きおよび重なり具合を調整した（写真1b）参照）．さらに，石組みの上下流端で，設置された玉石が流出しないように，最大径 10 cm のホワイトストーンを用いて石組みをした．なお，石組み水路の上流端では，浸透流による影響が小さくなるように，径が 1 cm から 3 cm まで異なる玉砂利を用いて対応し，その上にホワイトストーンで石組みをした．水深測定するためにあらかじめ，ポイントゲージを 6 台用いた．また，水深測定位置を定め，矩形断面実験水路の底部を基準に水深測定し，ダルシーワイズバッハの式および乱流粗面の場合の摩擦抵抗係数の式を用いて，仮想底面（図2の破線）を算定した．石組み水路内の流速を測定するために，KENEK製のプロペラ流速計を用いた（時間平均は20秒で行った）．石組み水路作成過程および流況を記録するために，デジタルカメラで写真および動画記録をした．

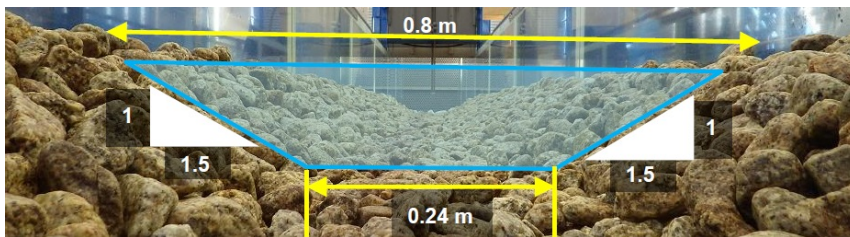


写真2 石組み台形断面水路内の状態

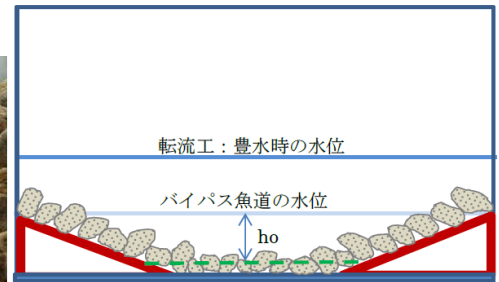


図2 石組み水路内の断面（概略図）



a) 水路内のポイントゲージによる水面形測定の様子 b) 水路内のプロペラ流速計による流速測定の様子

写真3 バイパス水路内の物理環境の測定状況



写真4 緩勾配水路における流れの緩急増進対策としての石組み台形断面水路中の巨石の設置

4. バイパス水路内の流速場

1/1000 および 1/2000 勾配のバイパス水路内の等流状態を対象とした流速場を図3に示す. 図中に示される流速は流下方向成分の流速であり, 流速の大きさを測定箇所ごとに色別に示し, 流速コンター図を付記したものである. 図に示されるように, 水際を含む底面近傍の流速は 10~50 cm/s の間となり, 遊泳魚および底生魚が休息・溯上することが可能な環境となっている. また, バイパス水路では 1/1000 から 1/2000 勾配と勾配が小さいため, 流速低下による溯上意欲の半減が懸念されていたが, 20 cm から 30 cm の巨石を用いた台形断面水路であるため, 水路中央部における流速が 1 m/s 前後になることが分かった. なお, バイパス水路に用いる巨石の代表粒径 (平均粒径) を原型換算で $k_s = 0.265$ m として等流計算を行うと, 等流状態の断面平均流速は $i = 1/1000$ の場合, 0.532 m/s, $i = 1/2000$ の場合, 0.418 m/s である. 等流計算については, 実験概要で記述したように, 以下のダルシーワイズバッハの式および乱流粗面の場合の摩擦抵抗係数の式を用いている.

$$i = f \frac{1}{4R_o} \frac{V^2}{2g} = f \frac{(2h_o\sqrt{1+m^2}+b)Q^2}{4[h_o(mh_o+b)]^3} \frac{1}{2g\sqrt{f}} = 2.0 \log_{10} \left(\frac{2R_o}{k_s} \right) + 1.74 = 2.0 \log_{10} \left(\frac{2[h_o(mh_o+b)]}{k_s(2h_o\sqrt{1+m^2}+b)} \right) + 1.74 \quad (1)$$

算定された等流水深と実測した水深との比較から仮想底面の位置を推定した. $i = 1/1000$ の場合, 等流水深は $h_o = 0.726$ m となり, 礫を設置した水路底部からの水深($H = 0.982$ m)との差が 0.256 m となる. また, $i = 1/2000$ の場合, 等流水深は $h_o = 0.858$ m となり, 礫を設置した水路底部からの水深($H = 1.020$ m)との差が 0.162 m となる. すなわち, $i = 1/1000$ の場合の仮想底面は礫を設置する水路底部から平均粒径の 97%の高さに位置する. また, $i = 1/2000$ の場合の仮想底面は平均粒径の 61%に位置する. これらのことから, 同一の流量で勾配が小さくなると, 仮想底面は低下することが推定される. 写真5に示されるように, バイパス水路の途中に 50~60 cm の巨石を用いて狭窄部を設けると (写真で示した場合には左右岸に2個ずつ巨石を設置した場合), 図4に示されるように, 狭窄部より下流側 (原型換算で 80 cm 下流側) で中央の流速が 1.1~1.2 m/s 程度まで上昇する. 底面近傍の流速については, 10~50 cm/s の間の値を示し, 遊泳魚および底生魚が休息・溯上することが可能な環境となっている. 礫を設置したことによる堰上げの影響については, 設置前の 1.7~1.8% 上昇程度であるため, バイパス水路の通水機能を損なうことはない.

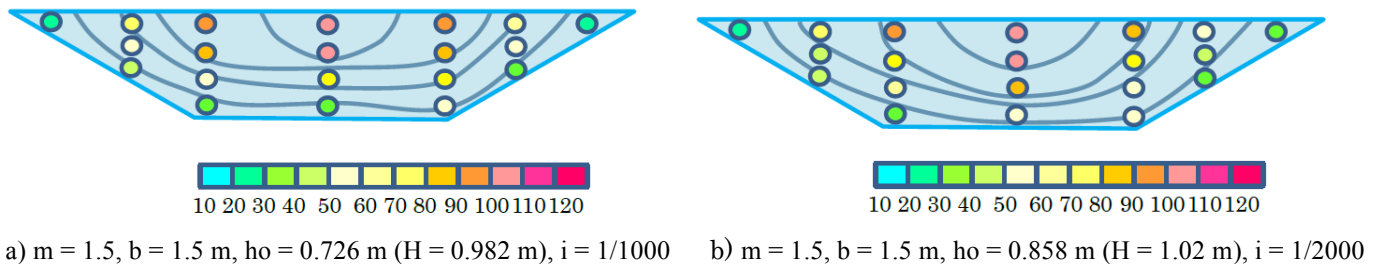


図3 バイパス水路における等流状態の断面内の流下方向成分の流速場



a) 豊水流量($11.8 \text{ m}^3/\text{s}$)を想定した転流工内の流れ
写真5 1/230 勾配を有する転流工内の流れ



b) 平水流量($5.0 \text{ m}^3/\text{s}$)を想定した転流工内の流れ

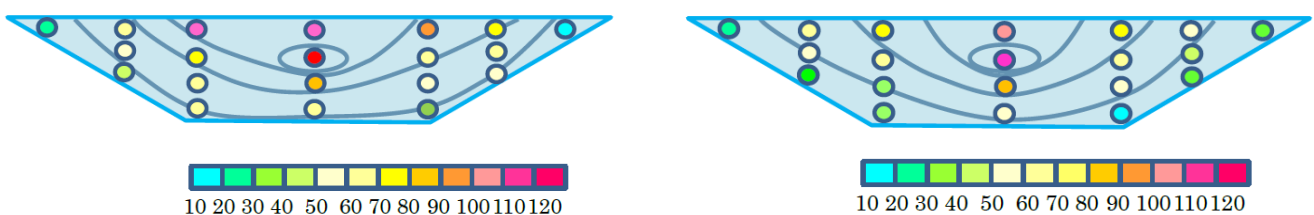


図4 狭窄部下流側の断面内の流下方向成分の流速場

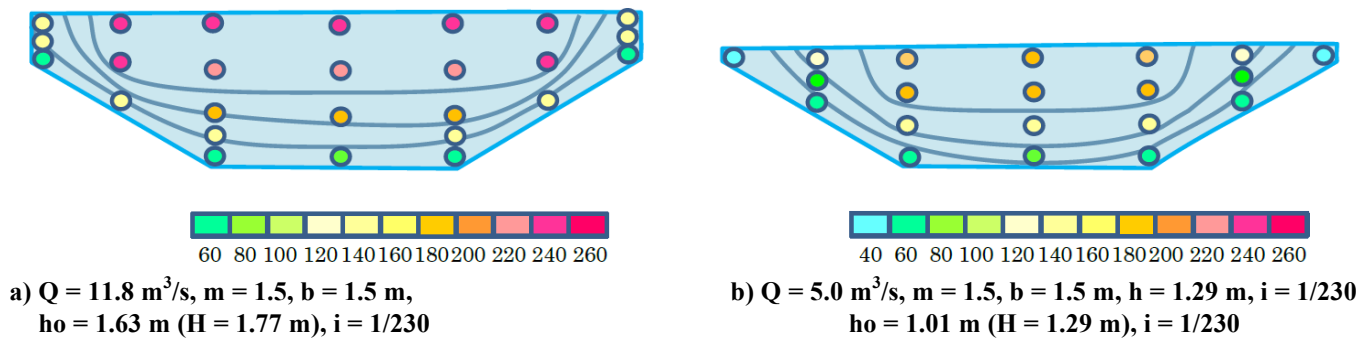


図 5 転流工断面内の流下方向成分の流速場

5. 転流工水路内の流速場

1/230 勾配の転流工水路内の等流状態を対象とした流速場を図 5 に示す。図中に示される流速は流下方向成分の流速であり、流速の大きさを測定箇所ごとに色別にし、流速コンター図を付記したものである。図に示されるように、豊水時の場合($Q = 11.8 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合)、水際を含む壁面近傍の流速は 60～120 cm/s の間となり、特に側壁と底部との接続部および傾斜壁と鉛直壁との接合部付近では 60 cm/s となり、遊泳魚および底生魚が休息・溯上することが可能な環境となっている。また、平水時の場合($Q = 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合)、水際を含む壁面近傍の流速は 40～80 cm/s の間となり、特に側壁付近では 40～60 cm/s となり、遊泳魚および底生魚が休息・溯上することが可能な環境となっている。これらのことから、転流工水路では、平水時から豊水時の流量規模では底面近傍の流れを利用することによって、溯上可能な環境が確保される。なお、等流状態の断面平均流速は $Q = 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合、1.44 m/s、 $Q = 11.8 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合、1.84 m/s である。なお、等流計算については、バイパス水路と同様である。断面平均流速と実測値とを比較すると、石組み台形断面水路の場合、断面内の流れの 3 次元性がボックスカルバート内を全てコンクリートで仕上げた状態より強調されたものとなっていることが推定できる。等流水深については、 $Q = 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合、 $h_o = 1.01 \text{ m}$ となり、礫を設置した水路底部からの水深($H = 1.29 \text{ m}$)との差が 0.28 m となる。 $Q = 11.8 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合、 $h_o = 1.63 \text{ m}$ となり、礫を設置した水路底部からの水深($H = 1.77 \text{ m}$)との差が 0.14 m となる。すなわち、流量規模が大きくなるにつれて、仮想底面は低下する傾向となる。

6. まとめ

サンルダムに整備する魚道整備としてダム湖を迂回するための 7 km におよぶバイパス水路について 20～30cm 径の巨石を用いた石組み台形断面水路（側壁勾配 1:1.5、底面幅 1.5m、台形断面上辺の幅 5m 程度）として提案した。また、建設中のダム前後の溯上環境を確保するため、転流工内の幅 5m のカルバート内の構造をバイパス水路と同じ石組み台形断面水路とした。バイパス水路および転流工水路内の流速場を検討すると、巨石による壁面の粗度が大きく、流れの 3 次元性が強調されることが分かった。バイパス水路の場合には 1/1000 から 1/2000 勾配となる水路でも中央部で 1m/s 程度の流速が創出され、溯上意欲を損なわない物理環境が創り出せることを見出した。転流工の場合には勾配は 1/230 であり、幅は 5m と制限されているが、豊水流量時でも壁面近傍の流速が小さくなり、溯上できる環境が確保できることを示した。

参考文献

- 1) 安田陽一、技術者のための魚道ガイドライン-魚道構造と周辺の流れからわかること-、コロナ社、2011、154 pages.
- 2) 天塩川における魚類等の生息環境保全に関する平成 21 年度年次報告書、天塩川魚類生息環境保全に関する専門家会議、北海道開発局旭川開発建設部、2010 年 6 月 4 日、41 pages.
- 3) 林田寿文、新居久也、春日慶一「サクラムスの産卵期における美利河ダム魚道の評価」、『月報』第 715 号、独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所、2012 年 12 月 10 日、pp.29-36.
- 4) 二階堂司、齋藤源、藤田光則、青山裕俊「美利河ダム魚道における降下魚対策施設の検討」、『ダム工学』第 13 巻第 3 号、一般社団法人ダム工学会、2003 年 9 月 15 日、pp.152-162.
- 5) H. Miyafuji and Y. Yasuda, Proposal of total migration route systems bypassing a dam-lake installed in Sanru dam, IAHR Congress, C1, Topic C, Poster, August 13, 2007, CD-ROM.

著者の一人である安田陽一が天塩川魚類生息環境保全に関する専門家会議の委員であり、北海道開発局旭川開発建設部サンルダム建設事業所との協議の中でこの研究が行われたことを付記する。