

頭首工に設置された石組み魚道に関する 実験から実務への適用

PRACTICAL APPROACH FROM EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON FISH PASSAGE WITH STACKING BOULDERS INSTALLED IN WEIR

安田陽一¹
Youichi YASUDA

¹正会員 博士（工学） 日本大学教授 理工学部土木工学科（〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8）

This paper presents the fish passage with stacking boulders which is installed in ogee crest weir. Practically, the fish passage with stacking boulders was constructed in both Murasaki and Ukan Rivers. In order to install the fish passage as a semi-permanent construction, the experiments on the stabilization of stacking boulders were carried out. Also, a stone masonry method with stacking boulders as the fish passage was discussed. The experiment revealed that the stability of the fish passage with stacking boulders was confirmed under several types of discharges. In the case of Murasaki River, Kitakyushu city, Fukuoka pref., the masonry without filling by concrete was applied for stacking boulders. While, In the case of Ukan River, Okayama city, Okayama pref., the masonry with filling by concrete was applied. The necessity of filling by concrete depends on the impingement of flood flows and the water leakage in construction area.

Key Words: Stacking boulders, Stone masonry, Ogee crest weir, Fish passage, Upstream migration

1. はじめに

固定堰が全国に今でも数多く点在し、遊泳魚をはじめとする水生生物の移動が困難となっている¹⁾。経済的な事情から落差構造物に設置可能な魚道として、差し筋した巨礫に生コンクリートを打設する「こわざ」²⁾の試みが行われている。この場合、洪水時に礫が衝突し礫が抜け落ちるなど、機能が損なわれることがある。巨礫設置の安定化の観点から石組み³⁾が重要であるが、城壁の石組みではなく、平水時から豊水時にかけて遡上経路になり得る流れが礫間で形成されるように、洪水流には石組みされた礫が流出しないように石を組む河川技術⁴⁾の確立が必要不可欠となる。

ここでは、固定堰の越流面が曲面になっている頭首工を対象に、落差部に設置する巨礫を用いた石組みの仕組みとその組み立て方法、および石組み周辺の流れの再現性を確立するために、石組みの構成に基づき実験的に検討した。また、行政機関の協力のもとで石組みによる魚道整備事業を通して、河川に適用する石組み技術が普及できるように落差部に設置する石組みの普遍性を体系的にまとめることを目的としている。

福岡県北九州市内を流れる紫川中流部（写真-1）および岡山県岡山市内を流れる旭川の支川である宇甘川中流部（写真-2）にある固定堰である頭首工を対象に石組み施工することになった。落差高さはいずれも2m前後である頭首工に、経済性を考慮し、紫川では河川整備で発生した巨礫を用い、宇甘川では山間部から発掘した巨礫を用いて、石組みをすることになった。落差部に設置する石組みの安定性について、実験規模で検討し、様々な洪水規模の流量に変化させて検討を行った。実験結果に基づき現場で石組みを行い、地元の施工業者が施工できる技術指導を行った。現場によって洪水流による衝突の影響が異なることから、紫川では空積みで石組みを行い、宇甘川では生コンクリートを練り積みとして使用した。紫川および宇甘川での頭首工に石組み魚道をそれぞれ2017年秋冬の約3日間で施工完了し、施工後の経過観察を行った。紫川では流量変化に伴い多様な流況が形成され、水生生物の生息・移動できる環境となっていることが確認できた。また、中小洪水に遭遇したが、石組みの流出はなく、減勢工としての役割を確認した。



写真-1 北九州内を流れる紫川における頭首工（伊崎堰）



写真-2 岡山市内を流れる宇甘川における頭首工（中泉堰）



写真-3 石組みに使用する巨礫

2. 落差構造物に設置する石組みの留意点

（1）紫川における頭首工の場合

写真-1に示される落差約2mを有する頭首工の上流側では、河道が蛇行し、頭首工の左岸下流側では滞留域になりやすい。出水後には、輸送される砂礫の堆積が上流側で見られる。なお、左岸側の直下では落差越流面からの流れによって堆積は見られない。この点を考慮して、頭首工左岸側のエリアに石組みを行うことにした。現場では土嚢を用いて堰天端を止水しても、堰堤下流側の水叩き上では止水することはできないため、主要な巨礫の背後はグリを投入し砕石で間詰めする。また、空積みを使用する巨礫については、河川整備に発生した写真-3に示される巨礫を使用した。巨礫のサイズは少なくとも頭首工周辺に見られる巨礫よりも大きいものが含むように考える。ここでは70 cm～1.2 m程度の巨礫を用いている。



写真-4 模型規模の石組みの状態（写真下が下流）



写真-5 原型規模の石組みの状態



写真-6 主要な巨礫の背後に投入したグリとバラス（砕石）

落差部に設置する石組みについて、写真-4は模型規模で石組みした状態を示す。写真-5は原型規模で石組み途中の状態を示す。写真中の鉄筋棒は予備鉄筋であり、実質の機能はしていない。水叩き上に設置する場合、写真に示されるように小型の礫(10cm前後)を敷いて巨礫が下向きにならないようにする。また、巨礫同士の接点を含めて4点以上の接点（底面との接点、小型礫との接点、礫同士の接点）が保つように石を組む。また、礫間の谷間が遡上経路になるか否かを常に確認する。巨礫の内側では10 cm前後のグリで埋める。その後、0～40 mmの砕石を10～15 cm厚まで充填する。また、巨礫を上を重ねる場合には巨礫の傾斜角度が20～30度⁹⁾になるように、グリと砕石の充填厚さを考慮して施工する（写真-6）。

（2）宇甘川における頭首工の場合

写真-2に示される落差約2mを有する頭首工の上下流

側の河川は直線区間であり、頭首工中央部の切り欠きから越流していることから、洪水時には、頭首工からの流れが石組みに直接当たることから、石組みの安定性を高めるために、練り積みを組み合わせた石組み魚道とすることにした。ここで用いる巨礫の場合、地元企業が石垣として保管されていた巨礫（70 cm～1.2 m）を用いているため、平たい長めの玉石とは異なる巨礫が多い（写真-7）。これらのことから紫川で行った石組みとは異なる工法となった。写真-8は水叩きの上に1層目の巨礫を設置した状態を示す。1層目に設置する巨礫については、紫川で実施した場合と同様に15～20 cmの平石を設置個所に置き、巨礫が20度前後下流に向けて上げる状態となるように設置している。巨礫の形状によっては15～20 cmの平石を設置することはなかった。巨礫の移動については、チェーンによる玉掛けで行い、金テコで巨礫の位置の調整を行っている。写真に示されるように、堰堤の天端にはブルーシートおよび大型土嚢を用いて止水をしているが、老朽化に伴う越流面の凹凸により漏水が常にある状態となっている。この現場では通常コンクリートを打設する必要があるため、現場の河道成形から発生した碎石・グリを含んだ土砂を写真-9に示されるように巨礫の背後に投入した。整形した後に、通常コンクリートで10～15 cmの層で打設し、2層目の巨礫が組めるようにした（写真-10）。コンクリート打設して20分後には巨礫を設置しているため、巨礫がめり込むように設置された状態となる（写真-11）。なお、越流面と水叩きの境界近くでは排水路となるように溝を設け、排水箇所においては階層が増す段階で10～15 cmのグリを投入し（写真-12）、最終的には50～60 cmの巨礫を投入し、グリから20 cm程度上部まで可能な限りコンクリートで間詰めして完了している（写真-13）。



写真-7 宇甘川の頭首工で使用する巨礫



写真-8 頭首工に巨礫を1層目に設置した状態



写真-9 巨礫の背後に河道整備で発生したグリ・碎石が混在する土砂で埋設した状態



写真-10 生コンクリートを10cm程度打設した状態



写真-11 堰堤からの漏水を排水しながら施工している状態



写真-12 堰堤の越流面との境界近くの施工処理の状態



写真-13 堰堤天端近くの施工処理の状態

3. 石組みの安定性を検討するための実験結果

空積みとした石組みの洪水時における安定性を検討するため、実験は長さ15m、幅80 cm、高さ60 cm（中間から下流側の高さ）の矩形断面水路に高さ10 cm、長さ1 m、幅80cmの耐水性合板からなる箱型模型を設置した（これは頭首工直上流の河床の高さを再現するためのもの）。また、頭首工の高さに合わせるため、箱型模型の下流端に高さ20 cm、長さ10 cm、幅80 cmの頭首工模型を木ねじで結合した。さらに、頭首工の越流面を再現するために、模型実験において、押出発泡ポリスチレンからなる厚さ10 cmの断熱材（商品名：スタイロホーム）で加工したものを結合した（写真-14）。石組みに用いた石材は1.5寸（45 mm）前後、1寸（30 mm）前後の玉石（商品名：伊勢五郎）、および20 mm前後および10 mm前後の庭石（大磯）であり、それぞれ、1.5寸（45 mm）前後玉石は161個、1寸（30 mm）前後の玉石は143個、20 mm前後の庭石は約150個（7 kg）、10 mm前後の庭石は約1000個（7 kg）の石材を用いた。対象となる流況は重力の影響が大きいことから、フルードの相似則（原型と模型との間でフルード数が同じになるように設定した実験）に基づいた実験を行った。流量は水路上部に設置されているバルブで調整し、水路下流部に設置された全幅刃形せき（JIS規格）を用いて測定した。流況の記録のためにデジタルカメラを用いた。流速測定はケネック社製のポータブルプロペラ流速計（内径30 mm）を用いた（時間平均10 sec）（測定箇所は写真-15の赤丸で示す）。

実験では、豊水時の中間の流況、中小洪水時の流況（3 ケース）、および想定洪水（洪水痕跡から想定した洪水：10年確率以下）時の流況を対象に検討を行った。すなわち、頭首工直上流の水深（堰天端から水面までの水深） H が模型規模で、それぞれ 1.63 cm、3.2 cm、4.39 cm、4.97 cm、5.95 cm（原型規模では、約 16.3 cm、約 32 cm、約 44 cm、約 50 cm、約 60 cm）を想定した実験を行った。

越流水深が原型換算で40 cmを越えるようになると、石組みの設置箇所においても流れの主な方向は流下方向となる（写真-16）。また、礫の凹凸の影響を受けて、落差部を越える流れが減勢されやすくなっている。石組みの設置形状から、堰堤天端から石組みまでの落差が変わり、右岸側の衝突位置の流速が他の衝突位置の場合に比べて速くなっている。

越流水深が 5.95 cm（原型換算：約 60 cm）の場合においても石組みが安定した状態となっている（写真-17）。この場合、石組み直下流部では、右岸側近くを除いて流速が 55.1～87.7 cm/s であった。原型に換算すると、174～277 cm/s の値となる。また、右岸側（ここでは水路壁近く）では 82.5 cm/s、右岸側の水路壁より 10 cm 離れた箇所では 139 cm/s となる。原型に換算すると、水路側壁近くでは 261 cm/s となり、石組みによる礫の形状抵抗の影響を受けて流速が減勢される結果となる。

石組みと堰との境界の上流部では、堰から越流した流速が 74 cm/s となり、原型換算すると 234 cm/s となる。石組みと堰との境界の中間部では、流速が 115 cm/s とな

り、原型換算すると 363 cm/s となる。石組みと堰との境界の下流部では、流速が 135 cm/s となり、原型換算すると 441 cm/s となる。これは石組みに接近する流速が 4 m/s 以上でも礫が安定することを示す。なお、石組み左岸側の中間部では 101 cm/s となり、下流部では 88 cm/s となった。原型換算すると、中間部では 320 cm/s であり、下流部では 278 cm/s となり、礫の凹凸形状の影響で減勢されている。



写真-14 10分の1スケールの石組み模型（写真下が下流）



写真-15 流速測定箇所



写真-16 越流水深が44cm（原型換算数値）となる流況



写真-17 越流水深が約60cm（原型換算数値）となる流況

4. 現地に施工した石組み魚道の状態

(1) 紫川に設置された石組み魚道

2017年10月15日に施工が完了した状態を写真-18に示す。石組みは9月26、27日に行い、一部を残して10月15日に再開し、施工が完了した。施工期間中（10月6日）に越流水深60 cm規模の洪水が発生した(写真-19)。写真に示されるように、石組み設置箇所では巨礫の形状抵抗が大きいことから、石組み魚道直下では流速が減勢され、常流となっている。その一方、魚道のない箇所では射流区間となる。10月15日に施工再開するときに状態を確認したところ、越流面と石組みの境界付近の石組みの向き（境界面に沿った方向に石組みしたこと）が不適切であったため一部崩されたが、9割以上の巨礫が施工当初と同じ状態となっていた(写真-20)。すなわち、石組みが適切に施工されることによって、洪水流に対して空積みで石組みした魚道の安定性が維持できることを確認した。施工完了したときには降雨に見舞われ、土嚢を開放した段階で越流水深が10 cm前後となった。そのときに記録した流況を写真-21～23に示す。写真に示されるように、石組み魚道全体に通水され、巨礫の間を通る流れが形成された。越流面と石組みとの境界近くでは流れが集中するため、遊泳魚の遡上環境には適していない流れになっているが他の箇所では、流速が減勢され、気泡混入が抑えられた状態となり、遡上できる環境^{5),6)}が形成された。石組みの場所によって、通水量が小さくなる箇所があり、底成魚、小型魚にとって遡上できやすい状況になっている。また、石組みの下流面には多数の窪みがあり、小規模のプールが形成されている。小型魚、底生魚、甲殻類の棲みかになっている。なお、越流水深が20 cm程度まで増加しても遡上経路は確保される。

越流水深が5 cm前後の流況を写真-24、25に示す。右岸側を中心に魚道内の流れが見られ、遡上経路が確保されている。魚道中央部でのわずかながら流れが形成され、底生魚、甲殻類を中心とした遡上環境として確保されている。

この石組みでは、昨年の10月に完成したものであることから遡上調査について今後進める予定である。



写真-18 空積み石組みが組みあがった状態（2017. 10. 15記録）



写真-19 10月6日の出水時に記録された流況（北九州職員記録）



写真-20 10月6日の出水後の未完成段階の石組みの状態



写真-21 越流水深10cm前後の流況その1（2017. 10. 15記録）

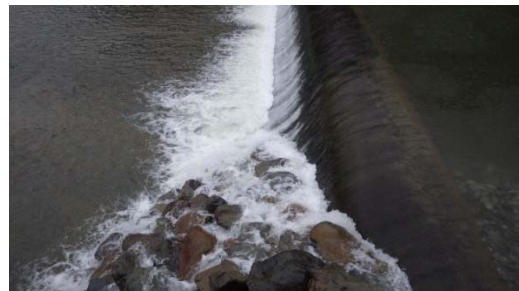


写真-22 越流水深10cm前後の流況その2（10月15日記録）

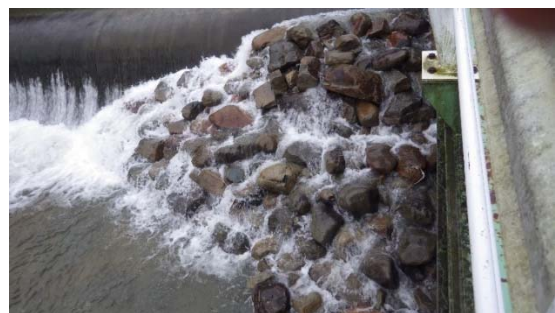


写真-23 越流水深10cm前後の流況その3（2017. 10. 15記録）

(2) 宇甘川に設置された石組み魚道

2017年12月22日に施工が完了し、その後に通水した状態を写真-26、27に示す。写真に示されるように、通常の越流部を中心に魚道内の主な流れが形成され、非越流部でも越流面と魚道との境界を中心に流れる。このことか

ら、底生魚、甲殻類の遡上は非越流側水際の流れ^{5),6)}を利用し、遊泳魚は越流部側の流れを利用して遡上することが考えられる。流量変化に伴い、紫川の場合と同様に遡上経路が変化し、多様な流れの形成が期待できる。通水が2018年3月下旬から始まったため、今後の遡上調査によって、どのように水生生物が利用するのかが明らかにされる。また、様々な洪水規模の流量に対して石組みの設置がどのような減勢機能を発揮するのかを検証する。

5. まとめ

福岡県北九州市を流れる紫川に設置された頭首工（伊崎堰）、岡山県岡山市内を流れる宇甘川に設置された頭首工（中泉堰）を対象に経済性を考慮して、石組み魚道を施工した。対象箇所の河川地形、施工環境を考えて、紫川では空積み、宇甘川では練り積みで行った。また、洪水時の石組み魚道の安定性を考えて、70 cm～1.2 mの巨礫を用いて石組みを行った。空積みによる石組み魚道を対象に、10分の1スケールの石組み模型を製作し、洪水時の巨礫の安定性を検証した。施工経験から魚道として石組み施工の留意点を示すことができた。なお、石組み施工は施工経験することで地元業者が施工できることが分かった。いずれも3日間で施工完了した。施工後、石組み魚道内の流況について、多様な流れが形成されることで、遊泳魚、底生魚、甲殻類の遡上経路として想定できる流れが形成され、流量規模の変化によって流れ方が変化することを確認した。ただし、施工完了時期から

施工された魚道を水生生物がどのように利用するのか不明であるため、今後の遡上調査によって具体的な魚道機能を明らかにする必要がある。

謝辞

福岡県北九州市南区役所まちづくり整備課および岡山県備前県民局農林水産事業部水産課、岡山県農林水産総合センター水産研究所からの依頼のもとに、石組み魚道の整備が可能となった。また、魚道施工に至るまで施工指導する機会を得ることができた。ここで記して謝辞を申し上げる。

参考文献

- 1) 安田陽一：技術者のための魚道ガイドライン，コロナ社，144 pages, 2011.
- 2) 浜野達夫編集：水辺のこわざ，改訂増補第二版，山口県建設部河川課，288 pages, 2016.
- 3) 福留脩文他3名：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計，土木学会論文集F，Vol.66，No.4，pp.490-503，2010.
- 4) 安田陽一，石組みを利用した減勢工に関する実験から実務への適用とその成果，土木学会河川技術論文集，第23巻，pp.639-644，2017.
- 5) 安田陽一：生態系保全と治山・治水との調和のとれた河川環境，フォレストコンサル，森林部門技術士会，No.138，pp.7-22，2014.
- 6) 安田陽一：河川整備の土木技術から見た通し回遊性の水生生物の保全に向けた貢献，海洋と生物 225，生物研究社，Vol. 38，No. 4，pp.387-396，2016.

(2018. 4. 3受付)



写真-24 越流水深5cm前後の流況その1 (2017.12.27記録)

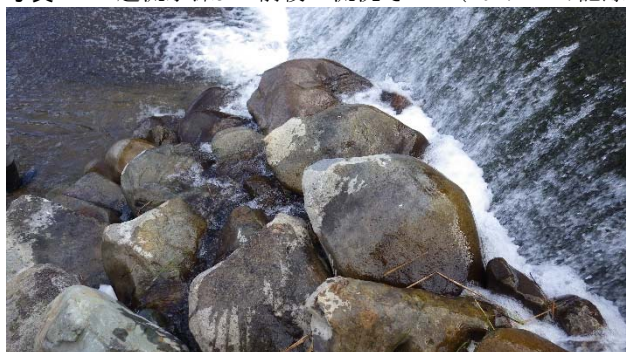


写真-25 越流水深5cm前後の流況その2 (2017.12.27記録)



写真-26 越流水深10cm前後の右岸側の流況 (2018.4.1記録)



写真-27 越流水深10cm前後の左岸側の流況 (2018.4.1記録)