

山地河川における河床変動と 魚道の流入土砂量の制御に関する研究

和田 清¹・橋口 喬太²

¹正会員（独）国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 教授（〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2）
E-mail:wada@gifu-nct.ac.jp

²学生会員（独）国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 専攻科 先端融合開発専攻（同上）
E-mail:2017y24@edu.gifu-nct.ac.jp

本研究は、河道の流送土砂によって魚道内に堆積した土砂量を把握し、魚道と河道の相互作用を明らかにすることを目的として、出水時における河道の河床変動及び魚道内の土砂堆積の把握、洪水前後の魚道プール内堆積土砂量の現地計測などを行った。対象河川においてトータルステーションによる地形測量、UAVによる写真測量を実施し、GISソフトを用いて河道および魚道内の地形情報を3次元化した。水位上昇が1.1mの洪水規模において、堰上流60mの区間で最大1.0mの河床低下が確認でき、河床低下量は上流への距離に比例して増加することが把握された。また、洪水時を想定した数値モデル（流量100m³/s）において、堰上流部から流送された土砂の一部は、右岸側の魚道に流入することが示唆され、簡易床固め工を試験施工した。さらに、洪水時の越流量の増大によって魚道プール部内の堆積土砂はほぼ一掃されたが、下流側の巨石や凹地等の影響を受けて堆積が集中するプール部が存在した。数値解析から、この発生箇所は河道からの流れの集中によって魚道からの越流水へ影響を与えた可能性があり、魚道設計において洪水時を想定した魚道の設置条件などの事前検討が重要性であることが示唆された。

Key Words : fishway, sedimentation, flood flow, interaction of riverbed, UAV, ArcGIS

1. はじめに

河川の魚類生態環境を保全することは、環境機能の維持改善に大きく関係しており、河川管理上重要な課題である。河川などに設置される魚道は、ダムや堰などの高低差が生じる場所において、魚類の遡上や降下を目的として設置される構造物である。しかしながら、経年的にその機能が失われているのが現状である。岐阜県には673ヶ所に魚道が設置されており、現状で良好な魚道は全体の約2割であり、約4割が改修の必要な魚道である。つまり、十分に機能していない魚道が数多く存在している¹⁾²⁾。これには様々な原因が考えられるが、魚道内に土砂・流木が堆積して魚類の遡上・降下を妨げる場合や、魚道本体の破損が著しい場合、さらに河床変動が大きい場合に、局所洗掘や河床低下によって魚道入口の落差が大きくなったことにより、魚道における水流の連続性が確保されない事例が多数存在している³⁾。

これらの原因の中で、土砂・流木の堆積は維持管理の重要性を示すものであり、また、本体の破損や河床低下などの他の機能低下の要因と比較すると、

比較的短期間の対策が可能であり、早期の機能回復が見込める。魚道の入口および出口部に土砂が著しく堆積すると、魚類は遡上・降下の経路が妨げられることになり、また、魚道プール内に土砂が堆積することも機能低下の原因である。魚類は越流部を遡上、プール部内での適度な休憩を繰り返すことで遡上を行う。魚道設計において、これらは体長と突進速度などを関連づけて、越流水深や水位差、プール部の容積などが決定される。しかしながら、魚道内に土砂の堆積が著しい場合には、越流水の減勢が十分ではなく、休憩場所が減少することは遊泳力の弱い魚類にとって遡上を困難にする要因となる。

本研究では、土砂移動の大きい山地河川において、洪水時の河床変動量と魚道内の堆積土砂量に関する現地観測およびUAVによる地形測量を行い、洪水時における流送土砂の変化量の実態を明らかにする。また、維持管理を考慮して魚道入口等への土砂流入防止策、河床の簡易床止め工を試験施工した。さらに、数値解析モデルにより洪水流が魚道本体へ及ぼす流水の集中度などについて検討を行い、魚道と河道の相互作用について考察したものである。

2. 研究方法

対象河川の牧田川は、岐阜県大垣市と養老郡養老町、安八郡輪之内町を流れる木曾川水系の河川であり、養老山をはじめとする養老山地の河川である。対象魚道は、掛斐川流域の1級河川牧田川の田村頭首工（川幅50m、落差1.5m、平均河床勾配1/100）である。牧田川右岸に設置された魚道は、越流した流水のエネルギーをプール部で減勢するプールタイプ構造となっている（図-1参照）。台風時の洪水規模を把握するために、メモリ式水位計（S&DL mini）を河道の上流左岸側に設置し、大気圧補正を併設して水位データに換算した（計測間隔：10分）。なお、台風16号による9/19～20の2日間における観測点（大垣）の総降水量と最大1時間降水量は、それぞれ150.0mm、29.5mmである。

洪水前後の河床変化量の算定には、UAVによる空撮およびトータルステーションによる地形測量を実施した。河道のUAV画像を立体視する上で画像解析ソフトウェア（Photo Scan Pro）を用いた。このソフトはUAV画像をポイントクラウドという位置と高さの情報をもつ点の集合体にして、ポイントクラウドの点を繋ぎ合わせることで三次元画像を作成する。作成した三次元画像に既知の座標データを入力すると、すべての座標値を補間して得ることができる。得られた座標値の三次元画像をソフトウェア（ArcGIS）を用いて任意点の標高を求めた。標高から地形形状の推定が可能になり、河道の河床形状及び魚道の堆積土砂量の推定を行うことができる。なお、UAVの空撮では、キャリブレーション用の基準点やプレートを地上および水面下に35ヶ所設置し、それらの画像を解析ソフトによる画像多重合成によって地形情報を3次元化した。

魚道プール内の堆積土砂量は自作したフレームにより計測した。魚道の設計図面から魚道のプール部の寸法を調べて、同じ大きさの枠組み（1.0m×1.7m）を作製。縦横25cmピッチでワイヤーを取り付けた（6測線目のみ20cm×25cm）。この枠組みをプール部上部に重ねて、10ヶ所のプール部の全40ヶ所の交点で堆積土砂の頂点から側壁天端までの高さを測定した。4点の平均高さから、25cm四方の正方形1つずつの堆積土砂の平均体積を求め、計24ヶ所の総和を各プール部の堆積土砂量とした。

さらに、下流側の微地形（巨石や凹みなど）によって河道から魚道への流れの集中度などを明らかにするために、平面2次元数値解析を行った。数値モデルには iRIC Nays2DHのソルバーを用いて、上述した地形測量から得られた3次元座標データを数値モデルの地形境界として設定し、洪水時（流量100m³/sなど）の流況を再現した。計算条件は、マニングの粗度係数： $n=0.03$ 、河床勾配： $i=1/100$ などに設定した。

3. 出水履歴および河道の河床変動の把握



(a) 魚道・取水堰

(b) 取水口・魚道出口

図-1 牧田川田村魚道

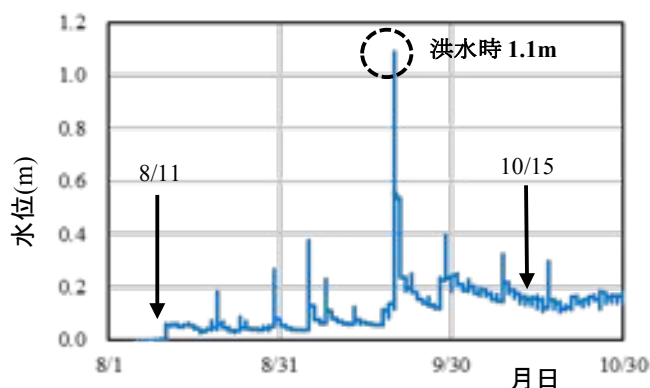


図-2 洪水前後における水位変動

(1) 台風前後の洪水履歴のモニタリング

水位計は圧力式であるため、大気圧計のデータで補正をする必要がある。水位計で測定した水圧データには、水圧に加えて大気圧が付加しているため、大気圧計によって得られた大気圧データを水圧データから差し引くことで大気圧補正を行った。台風16号による洪水前後の水位変化（補正済み）を示したものが図-2である。なお、水位の基準点は魚道出口側壁の天端としている。平水時では10～20cm程度の水深であることに対して、台風16号（最大930hPa、最大風速50m/s、牧田川下流合流点の文篠橋の最大水位6.87m）の影響により、1.1mの最大水位が確認された。平水時と洪水時の水位差を比較すると約1mの増水が把握された。

(2) 画像解析による河床形状の把握

洪水期間における河道の河床変動量を把握するために、解析ソフトArcGISを用いて河川縦断方向および横断方向における河床断面図を作成した。河川縦断方向は堰中央を通過する100m（堰から下流に35m、上流に65m）の範囲、横断方向は右岸に砂州が広がっており、堰から上流に40mの箇所を対象に、東西50mの範囲で解析を行った。

図-3は、対象領域の縦断方向100m、横断方向50mの範囲で河床断面図を作成した概略図である。作成した洪水前後の縦断（流れ）方向の河床断面図の一例が図-4である。同図から、洪水後、堰から上流に20mの範囲から洪水の掃流力増大によって河床低下が生じている。詳細に見ると、30m：約0.2m、40m：約0.4m、50m：約0.6m、60mでは約1.0mの河床低下が発生している。一方、堰から0～10mの範囲、堰直下部から下流に10mの範囲、護床工ブロッ

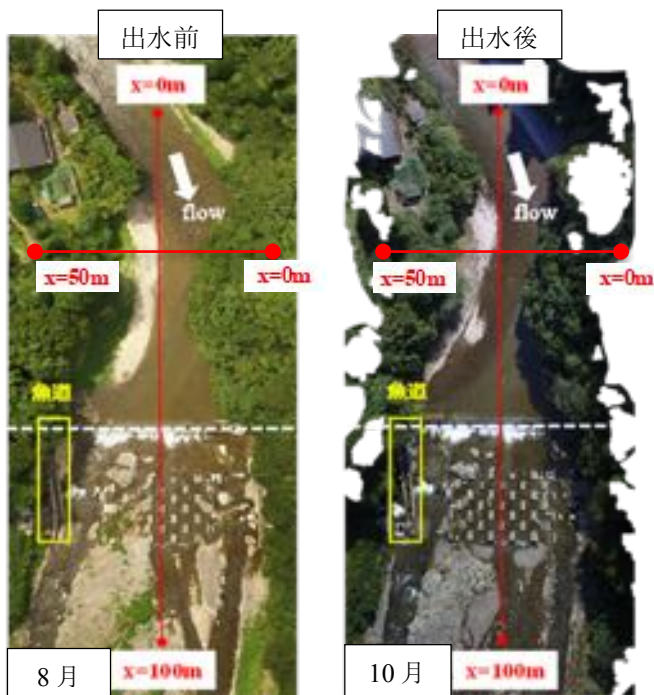


図-3 河床断面の作成範囲

クから下流10mにかけては河床低下は顕在化しておらず、堆積が生じている箇所も点在した。これらのことから、洪水時の掃流力の増大により上流部の洗掘された河床の多くは堰下流部に流送され、その一部が右岸側の魚道方向にも流入し、プール内部に土砂が堆積したと考えられる。

河川の横断方向に堰上流 10m～60m まで 10m 間隔で河床断面図を作成した（図-3 参照）。図-5 は堰から上流側 40m 地点の横断方向の河床形状を表したものである。この地点では、堰から左岸側で約 0.2～0.4m、右岸側で約 0.4～0.7m と横断方向 20m の広範囲にわたって河床低下が確認できたことから、出水期間に多量の土砂が流送されたことがわかる。堰中央から右岸側に 6～7m の範囲では、約 0.7m と大きく河床が低下していた。右岸付近では出水以前より、堰から上流に 10m から 45m の範囲にかけて植生が繁茂した砂州が形成されており、特に 40m の場所では多量の土砂が堆積していた。図-3 からわかるように、堰上流部の流心は堰と斜め方向となっており、この砂州の発生は河道の水衝部の反対側に生じている。砂州が冠水する水位上昇 1m 程度の洪水時には流れの主流軸は堰と直交するように流入し掃流力は増大するので、砂州全体が洗掘され広範囲で大きな河床低下が生じたものと考えられる。

洪水時には上流部で土砂流送が発生し、その多くは堰下流部に流送され、その一部が魚道方向にも流送する。また、右岸側の魚道上流部に位置する砂州も含めて河床低下が生じており、その土砂の一部は魚道や取水口に流入したものと考えられる。

4. 魚道内の堆積土砂量の算定

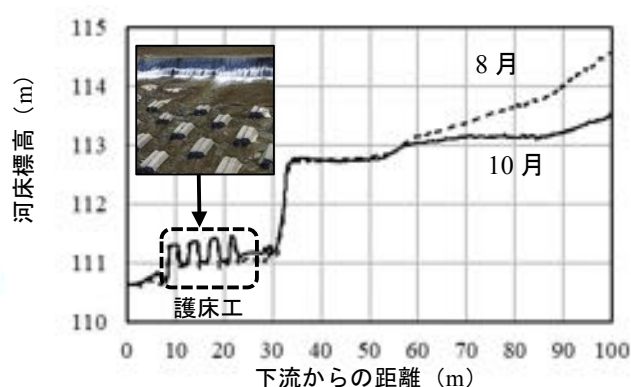


図-4 河道縦断方向の河床標高

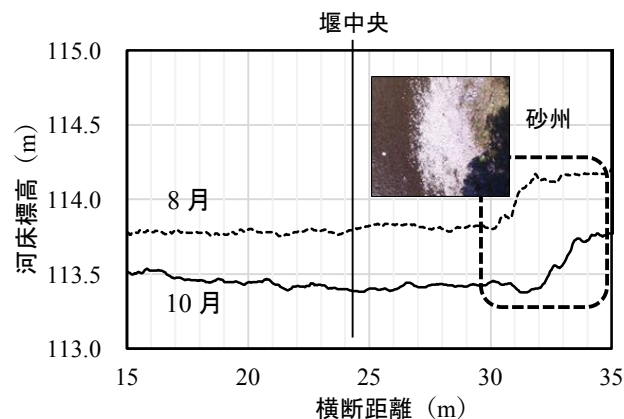


図-5 河道横断方向の河床標高（堰上流 40m）

洪水前の 8 月に各プール部の堆積土砂量の測定を行い、台風 16 号通過後の 10 月にも同様に測定を実施した。最上流のプール部（No.1）から番号を付し、プール番号を記入した魚道の全体図を図-6 に示す。

図-7 に洪水前後における堆積土砂量の算定結果の比較を示す。No.1 は本川からの流送土砂が直接流入する箇所であり、他のプール部と異なり土砂溜まり構造となっているため、ほぼ常に堆積状態であるため土砂量は他のプール部よりも多くなる。8 月測定時の No.2 のプール部の土砂量が少ないのは、8 月の測定を行う前に取り除いたためである。洪水後の測定時、No.11 は右岸側の取水口からの流入が発生していたため測定不可とした。洪水後の 10 月に、No.2～5 では $0 \sim 0.05\text{m}^3$ と土砂の堆積はほぼなかった。一方、No.6 では No.2～5 から急激に土砂量が増加し、No.7,8 では再び減少の傾向となった。さらに、No.9,10 では再び土砂量が増加した。前半のプール部の土砂が減少したことは、洪水による流量が増大し、魚道プール内に越流水による強力な縦渦が発生したことが要因であると考えられる。この縦渦の発生がプール内部に堆積した土砂を巻き上げ、その流入エネルギーが大きい場合には、プール内部の土砂を一掃し下流のプール部へ流送したものと推測できる。また、No.6 で堆積土砂量が急増したのは、河道からの流れの集中などの影響を受けたことが考えられる。つまり、魚道内を越流した縦渦流が、河道からの横方向の流れの作用により越流水のエネルギーが偏向したことなどから、プール上部から流送



図-6 田村魚道プール No.6

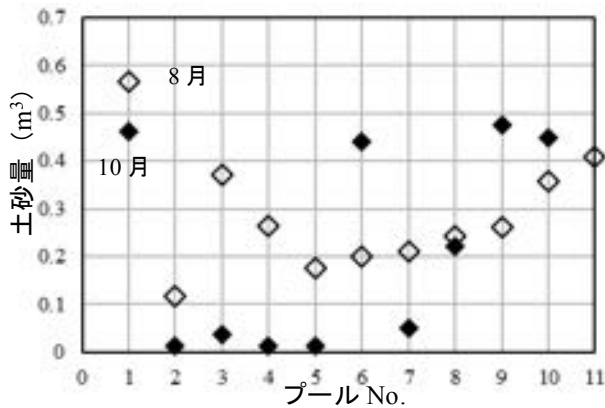


図-7 出水前後の堆積土砂量の比較

された土砂が No.6 に堆積したものと推察される。No.6 の側壁天端と河床の高低差が約 0.8m であるのに対して上流側の洪水水位は 1.1m であるため、河道から魚道に向かう流れの影響を受けた可能性が示唆される。No.7,8 では再び堆積土砂量は減少したことから、河道から付加された流入水と越流水によってプール内の縦渦流が増大化し流送されたと考えられる。これらのことから、河道から魚道へ流れの集中の影響を強く受けているのは No.6 であったと理解できる。また、No.9,10 の側壁天端と河床の高低差は約 0.4m と低いため、洪水時には河道を流送した土砂が、下流部の魚道プール部側面を越えて流入し、魚道入口に堆積したと考えられる。なお、魚道プールへの土砂堆積の集中箇所は、洪水規模に依存するものの、周辺の地形条件などから No.6 周辺がその主要な場所になるものと想定される。

5. 平面2次元解析による魚道方向への流れ

プール部No.6への集中的な流れが発生することで、洪水流と魚道の越流水の相互作用の結果、魚道プール内に土砂の堆積する箇所が発生していることを指摘した。そこで、洪水時の河道および魚道周辺の流れを模擬し、流れの集中などの発生を確認するために、iRIC Nays2DHのソルバーを用いて平面二次元数値解析を行った。堰上流60mから堰下流30mの範囲を対象に、 $1 \text{ m}^3/\text{s} \sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を設定した。

図-8に流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 時における流速と流れベクトルの解析結果を示す。流れのベクトルに着目すると、堰上流の流れは堰に対して垂直ではなく、魚道方向に向かって流れていることが確認できる。これは、

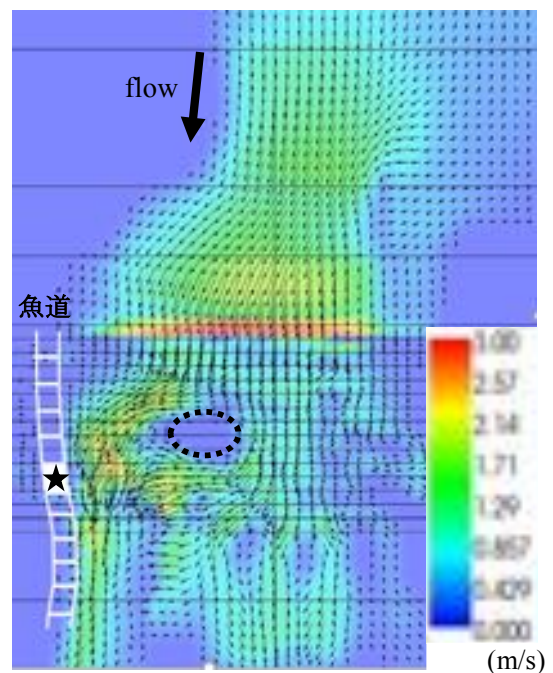
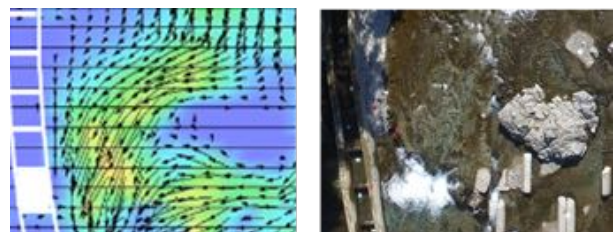


図-8 河道から魚道方向への流れ



(a) 解析結果

(b) UAV 画像

図-9 巨石・段落ちが魚道に及ぼす影響

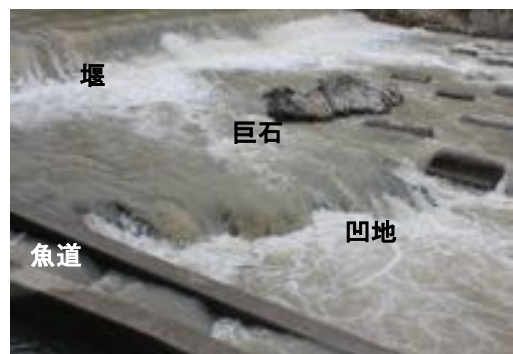


図-10 魚道周辺の微地形（巨石・凹地）

堰上流部が河道の主流軸が偏向しているためである。洪水流の一部が魚道出口や取水口に流入する傾向が見られ、掃流土砂の一部が魚道にも流入した可能性を示唆している。図-9は、堰下流部の魚道および巨石周辺について、解析結果と画像を比較したものである。同図から、巨石に沿って流れが左右に分流し、巨石の右岸側への流れは、魚道方向に偏向して流れている。この周辺では流速 2.5 m/s を超える高速となっていることから、大きい流体力を魚道に及ぼしていることが推察される。巨石の中央よりの流れは、そのまま流下するものの、一部の流れは、巨石の下流側、魚道寄りには凹地があり、巨石を通過した両

側の流れはこの凹地に向かって流れが集中している。これは、巨石の下流には護床工が設置されており、堰を越流し減勢した流れは常流となり水位が上昇すること、凹地との局所的な水面勾配が大きくなり流れが集中していることなどが考えられ、上述した魚道プール（No.6）の土砂堆積箇所は、この流れが集中する付近とほぼ一致している。図-10は、魚道周辺のと巨石・凹地（段落ち部）の位置関係を示している。巨石により分岐された2種類の速い流れは再び凹地で合流することによって、魚道プールNo.6周辺には強い流れが作用し、流砂が衝突しているものと推察される。事実、No.6の魚道コンクリート壁面には亀裂が発生していたことから、洪水時の衝撃力の強さが裏付けられる。

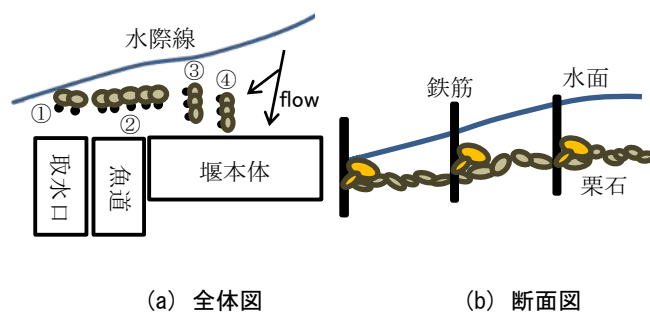
6. 土砂流入防止対策

対象河川では、河床変動が大きくその一部は魚道内に流入していることが明らかとなった。魚道内部への土砂流入対策として、通常、洪水時に角落しなど設置して強制的に流入を防止する方法が採用されている。また、魚道出口周辺の河床の安定化の一案として、簡易床固工による土砂流入の軽減を図ることができれば、魚道の寿命を延ばすことが可能であると考えられる。現況は、取水口の水路床高が河床面よりかなり低い状態で、平時時にはその取水口に向かって堰直上の河床にかなりの横断勾配が付いて勢いよく流れ込んでおり、それだけ土砂の引き込みが多くなっている。堰に直角方向に 25cm 程度の間隔で鉄筋を数本打ち込み、その間に栗石を並べて上流側の河床安定化を図り、これを 3 箇所程度設置することで流入土砂量を軽減できると考えられる。簡易床固工の施工イメージを図-11 に示す⁴⁾⁵⁾。本研究では本川から魚道への土砂流入防止策として、施工イメージに基づいた簡易床固工を洪水前の 8 月に試行した（図-12 参照）。

洪水後の 10 月に土砂流入防止策の確認を行ったところ、本川の主流が作用する場所での防止策は栗石が流出されており、防止策としての機能が低下した（図-13 参照）。これは洪水によって流体力を増した水流に加えて、上流から掃流された河床材料の衝撃が加わったものと考えられる。一方、魚道上部の本川の流れが当たりにくい場所（取水口直上など）では、魚道右岸側に位置する取水口への土砂流入を防いだため（図-14(a)参照）、設置する場所次第では防止策の機能が十分発揮された。

7. おわりに

本研究により、UAV および TS の測量と解析ソフトを用いた画像解析によって、河道および魚道内の 3 次元的地形形状の推定が示された。また、現地観測により、洪水時には河川上流部から流送された土砂の一部が魚道内に流入すること、魚道プール内の土砂は一掃される箇所と堆積する箇所に大別され



(a) 全体図 (b) 断面図

図-11 簡易床固工の施工イメージ⁴⁾⁵⁾

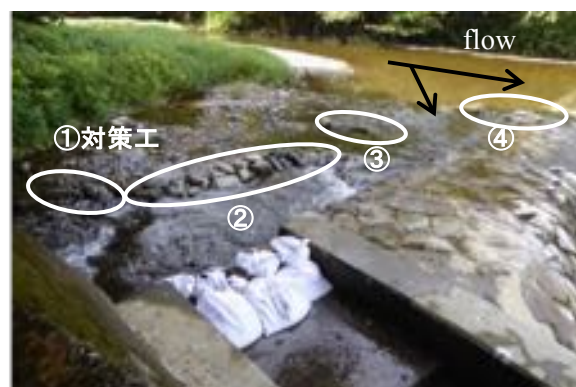


図-12 簡易床固工による対策（出水前）



図-13 簡易床固工による対策（出水後）



(a) 取水口上流部 (b) 差筋による固定

図-14 取水口上流部及び河道部

ることなどが明らかとなった。これは魚道に隣接する側方の微地形（巨石・凹地など）が洪水時には大きく影響していることが想定され、数値解析により、河道から魚道に向かう流れが局所的に集中することが要因であることが指摘された。さらに、河床の安定化を図る試みとして簡易的な床固工を実施し、主流の影響を受けない箇所では、取水口への土砂流入

を防止するなど、ある程度の効果は確認された。

魚道への土砂流入防止策は、魚道入口および出口の堆積や局所洗掘について留意するとともに、魚道の途中から流入する流れや流砂についても考慮することが今回の事例は示している。魚道設計において、本川からの流況の影響をどの程度受けるのか、数値解析などの予備的な検討の必要性を示唆しており、今後は、維持管理を含めた魚道の機能維持・強化について検討する予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、岐阜大学名誉教授 藤田裕一郎先生には多大な助言をいただいた。また、現地観測や設計図面の提供などについては、岐阜県河川課、既設魚道の改善策の現地調査などについては、岐阜県自然共生工法研究会、魚道研究専門WGの方々にご協力をいただいた。最後に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 俊六：魚道のはなし，リバーフロント整備センター，山海堂，225p., 1995.
- 2) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，155p., 2005.
- 3) 奥田好章：岐阜県内における魚道点検結果の分析と補修工法の提案（中間報告），岐阜県自然共生工法研究会，pp.3-10, 2013.
- 4) 岐阜県自然共生工法研究会魚道研究専門 WG：平成27年度第2回魚道研究専門 WG 議事録（案），岐阜県自然共生工法研究会，4p., 2015.
- 5) 藤井克哉：岐阜県魚道カルテの評価軸の分析と既設魚道の改善策に関する研究，岐阜工業高等専門学校建設工学専攻 特別研究，pp.27-32, 2016.

(2017.8.25 受付)

STUDY ON THE SEDIMENT OF MOUNTAINOUS RIVER AND CONTROL OF RIVERBED MATERIALS INTO FISHWAY

Kiyoshi Wada and Kyota Hashiguchi

The purpose of this study is observationally to clarify the sediment fluctuation in the river, and deposition in the pool of the fishway at the flood stage to grasp the mutual influence between the fishway and the mountainous river. Both the ordinary survey by the total station and the photographic survey by UAV (Unmanned Aerial Vehicles) were carried out. The image analysis softwares were used in order to estimate topographical shapes of river and the fishway. By the image analysis using UAV, it has confirmed that riverbed scouring occurred in the upstream part when the water level of the flood was raised to 1.1m. The riverbed is flattened by flood, the amount of riverbed degradation increases in proportion to the distance to the upstream. By the flood, it was indicated that the flowing river materials from the upstream of the weir flows through to the downstream of the weir, but the part of them flows into the fishway. The sediment in the pool of the fishway was swept away, there was a riverbed materials deposit in another pool. Based on the reproduction calculation of the analysis, it is pointed out the mutual influence between a flood flow and an overflowing water in the fishway.