

河川における多段式落差工の エネルギー減勢効果とその評価

STUDY ON ENERGY DISSIPATION OF FLOW OVER A MULTI-STEP TYPE OF DROP STRUCTURE

和田 清¹・藤田裕一郎²・大坪幹弘³
Kiyoshi WADA, Yuichiro FUJITA and Motohiro OTSUBO

¹正会員 工博 (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)

²フェロー 工博 岐阜大学名誉教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³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

Various types of drop structure are constructed to stabilize riverbeds by reducing enormous energy of flood flows and imbalance of transported sediment. Energy dissipating effect was estimated for multi-drop structures of rock-connecting type introduced in Northern anastomotic branch in the Kiso river by using a vertically averaged two-dimensional numerical model implemented in iRIC. The most suitable geometrical condition are studied to install this multi-drop structures to reduce flow energy more effectively by changing discharge and by arranging shapes of drop structure on the basis of 3D-Laser scanning data. The numerical analysis results clarified that changes in water surface profiles, Froude numbers and energy loss quantity depend on locations of hydraulic jump forced by the structures and that flood flows over the structures maintain super-critical conditions when flow discharge exceeds $110\text{m}^3/\text{s}$. Also, it is pointed out that multi-drop structures can cause higher energy reduction effect by raising the top heights of each drop structure.

Key Words : Multi-step type of drop structure, hydraulic jump, energy dissipation, Froude number, iRIC, 3D-Laser scanning

1. はじめに

近年, 自然環境に関する認識の高まりから, 洪水災害の防止とのバランスを図りながら, より自然な河川環境を創出する技術が求められており, 水生植物群落の護岸機能に着目した成果などが報告されている¹⁾²⁾. このような河川の水際部は, 土砂と水と植生の挙動によって, 空間的にも時間的にも変化に富んだ河川固有のハビタットが形成される場として貴重である.

岐阜県では, 自然環境の保全・復元・創出を効果的に進めるために, 「自然の水辺復活プロジェクト」に取り組んでいる. その一環として, 工法や技術の効果などを調査研究するために「自然共生工法展示施設」のプロジェクトが, 2000年4月木曽川三派川地区の北派川に流入する新境川を実験河川として進められ, これまで各種の護岸工や落差工が両岸約200m区間に設置され, 参加企業等によって実際的な研究が行われた. その後, 2000

年の東海豪雨を始めとする数々の被災や2010年の「全国豊かな海づくり大会」を契機として, 岐阜県が主体となった自然共生川づくりのモデル事業の場として石組み落差工が導入されるなど大幅に河川改修された.

実際, 岐阜県には急流河川が多く, 河川改修時には河床安定対策として帯工や落差工が設置されているものの, その後の河床低下により構造が不安定化し河岸の安全性, 魚類遡上などにも支障を来していることなどが課題となっていた. そこで, 2010年には, 自然共生に配慮した落差対策として上述の「石組み落差工」が設置され, その利点が確かめられた.

しかしながら, この工法では, 熟練の石工職人や巨石を設置できる重機が必要, 巨石自体が周囲の景観に馴染まない河川があること, 高価な石材の確保が困難など, 新たな課題も浮き彫りとなった. この課題の解決に向け, 現在ではより施工性の高い「自然石連結落差工」が2段設置され, その環境機能とともに, エネルギー減勢や河床安定化の効果が継続的にモニタリングされ, 現地への適用

性が検討されている。

本研究では、この新たな河床安定対策としての「多段式落差工」を対象にして、UAVによる写真測量やトータルステーション(TS)と3Dレーザースキャナーによる地形測量を実施し、その結果から落差工周辺の地形変化や天端の変形状況を把握するとともに、数値モデルによって落差工のエネルギー減勢効果を定量的に評価して、本落差工の平水時から洪水時における水理特性とその効果を明らかにし、さらに、2015～2016年に発生した洪水（流量：110m³/sの設計流量と同程度）時における流況と比較検討して、現地適用に向けた基礎資料を得た。

2. 多段式落差工の概要

落差対策の前提条件としては、①治水面：河床安定が図れること、②環境面：平水時に魚類等の移動が可能なこと、③景観面：周囲の景観に馴染むことが不可欠で、これらに加えて、④施工が容易（普通作業員で施工可能な工法）、⑤資材の入手が容易（二次製品であることなど）、⑥比較的小型の重機で施工できること（重量3t未満のクレーン仕様バックホウで施工可能な工法）が求められる、図-1の落差工を多段化する方式が採用された。

図-1はその断面の概略図を示したものである。自然石を連結した二次製品（自然石9個、2t型、1.8m×1.8m）を1ユニットとして、河道の縦断方向に6列（上流側1ユニット分はコンクリートブロック）、横断方向に8列の設置とし、落差1.2mを確保するために1基当たりの落差を0.6mとした2基（96ユニット）の設置である。両側の端部は詰石や多自然型ネットで処理し、河床変動への追従性、底生生物の生息空間の確保などの観点から、吸い出し防止材を設けない施工である。なお、設計流量は、1次元解析により得られた橋梁ボックスカルバートの最大流下流量110 m³/sである。

図-2は、北派川に設置された多段式落差工（2段）の施工直後の状況である。自然で多様な流れの創出や渇水時の濡筋を確保するために、下流側中詰め材の法面が弧（凸型）を描くように施工したり、1ユニット（9個）中央部の自然石の下に割栗石を置いて盛り上げたり、河道中心の連結自然石を両端部より低く配置するなどの工夫が行われている。2015年度以降、河道形状や河床材料、水理量の把握に加えて、生息魚類、植生調査や河川景観や利用状況などのモニタリング調査が継続されている。木曽川に合流する北派川下流部はほぼ直線河道で、実験河川の対象区間は、木曽川合流部よりも上流側に400mであり、幅20mのほぼ直線河道に、下流から、落差約1.7mの落差工2基、粗石付き魚道、橋梁ボックスカルバートが設置されている。ボックスカルバート上流側では、ワンド確保を目的とした河道拡幅により緩い湾曲流れが生じ、左岸寄りでの砂洲の形成・発達と右岸での河岸侵食が起きて

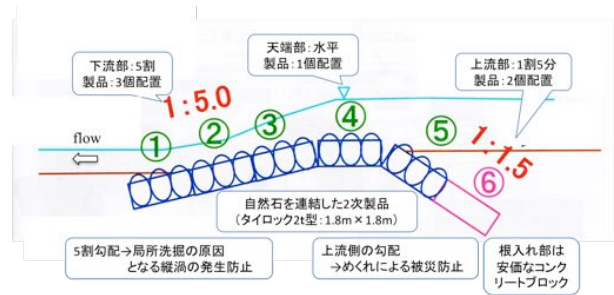


図-1 落差工の断面イメージ図

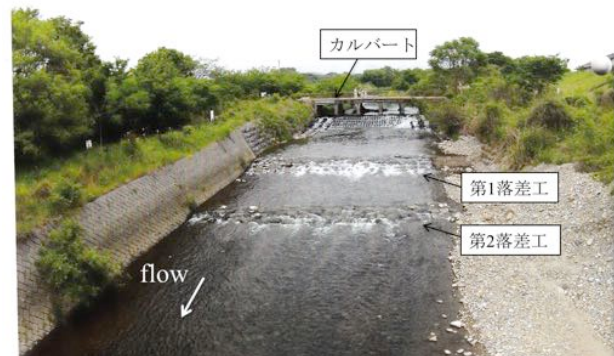


図-2 北派川における多段式落差工（2015年5月）

いる。また、カルバート下流側では、2014年に右岸側の河岸線を下げて緩傾斜化したことにより部分的な河道拡幅となり、緩い湾曲流れが生じている。その影響により、右岸側の河岸侵食と左岸寄りに土砂堆積が見られる。

落差工2基の上下流側に自記式圧力センサを2箇所、側方にインターバルカメラを設置して洪水時の状況を把握した。UAVによる空撮は、基準点や鋼製プレート(25×25cm)などを水面下に設置し水深補正を行ってから、解析ソフト(Photo Scan Pro)による画像多重合成によって3次元の地形情報を得た。また、精密な地形測量にはTopcon製3Dレーザースキャナーを用い、そのデータの検証のためSokkia製TSを併用した。

3. 多段式落差工周辺の洪水流の解析

(1) 平面2次元解析モデル (iRIC Nays2D)

洪水時における多段式落差工のエネルギー減勢効果を評価するために、水深、河床高、流速などの水理量を数値解析によって得る必要がある。数値解析モデルに用いるソルバーはiRICである。対象区間は蛇行部などが少なく、比較的直線的な河道であるため2次元性が卓越するという理由から、iRICの中でも主に平面2次元解析を行うためにiRIC Nays2Dを用いることとした。Nays2Dは、河川における流れ、河床変動、河岸侵食の計算を行うために開発された一般曲線座標で境界適合座標を用いた非定常平面2次元流れと河床変動計算の解析用ソルバーである。この解析において、乱流場の計算方法には便宜的

に経験的0次方程式を選択し、マンニングの粗度係数 n は地形や構造物の要素形状に応じて0.015～0.028の間で変化させた。また、設計流量 $110 \text{ m}^3/\text{s}$ を参考に計算流量は $10 \sim 160 \text{ m}^3/\text{s}$ に設定した。

(2) 流量を変化させた数値解析結果

図-3は、設計流量 ($Q=110 \text{ m}^3/\text{s}$) におけるカルバートを含む対象河道の流速分布を示したものである。なお、左上にはUAVによる地形情報と計算領域が併記されている。同図から、カルバート5孔からの流出は、下流側の全面魚道ブロックから第1、2落差工にかけて流速 5 m/s を超える速い流れが生じていることなどがうかがえる。

これらの解析結果において、流下方向の水面形、フルード数およびエネルギー線の空間分布形状の類似性から、流量 $10 \sim 30$, $40 \sim 120$, $130 \sim 160 \text{ m}^3/\text{s}$ の3パターンに分類された。以下では、常流や射流の遷移限界流量（変曲点）の下限値 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ および上限値 $130 \text{ m}^3/\text{s}$ に加えて、基準値 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ と対比しながら考察する。

図-4は、遷移限界流量 ($Q=40, 130 \text{ m}^3/\text{s}$) において、河道の中心軸上の水位の空間分布を示したものである。同図から、カルバートの上流側では通過流量が制限されるために水位が上昇している。カルバートを通過した流れは、基準流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ では、第1および第2落差工の前面において水面形がほぼ水平となっていることがわかる。遷移限界流量 ($Q=40, 130 \text{ m}^3/\text{s}$) では、第1落差工を流下するまでは河床形状とほぼ平行に水面形が推移する場合 ($Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$) と、第2落差工の下流まで河床形状とほぼ平行になる場合 ($Q=130 \text{ m}^3/\text{s}$) に大別される。

図-5は、フルード数の流下方向の空間分布を示したものである。同図から、カルバートを通過した流れは、 $1/10$ 勾配の魚道ブロック部では限界流から射流 ($Fr > 1$) に遷移し流下している。基準流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ では、第1および第2落差工の前面において、フルード数が変化し、射流から限界流、常流に遷移し跳水が発生している。遷移限界流量 ($Q=40, 130 \text{ m}^3/\text{s}$) では、第1落差工周辺で常流に遷移せず射流状態のまま流下し、流量 $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$ では、第2落差工において常流へ遷移している。また、流量 $Q=130 \text{ m}^3/\text{s}$ では下流部全域にわたって射流状態で流下することとなっている。なお、第2落差工の下流部では $Fr \approx 1$ の限界流の発生が示唆され、この周辺では波状跳水などが生じているものと推察される。

図-6は、エネルギー線の流下方向の空間分布を示したものである。基準流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ では、上述の水位変化やフルード数の空間分布に対応してエネルギー線が急変し、射流から常流に遷移する領域で跳水が発生していることがわかる。さらに、エネルギー線の分布からは、魚道ブロック領域で徐々に流水エネルギーの減勢が行われていること、2基の落差工の前後では急激なエネルギー減勢が生じており、特に、第1落差工のエネルギー損失が第2落差工に比べて大きいことなどがわかる。これらのこと

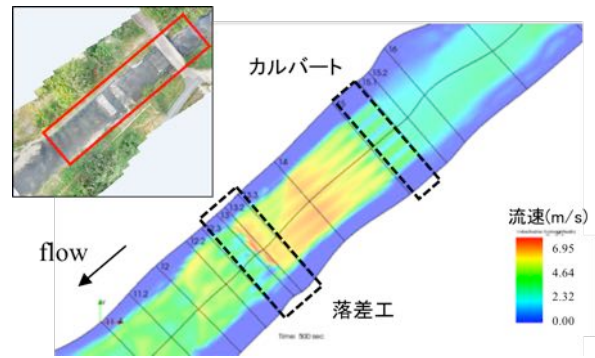


図-3 平均流速ベクトルの空間分布 ($Q=110 \text{ m}^3/\text{s}$)

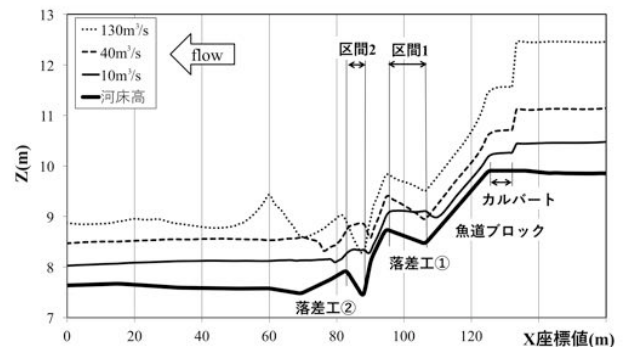


図-4 水位の流れ方向変化

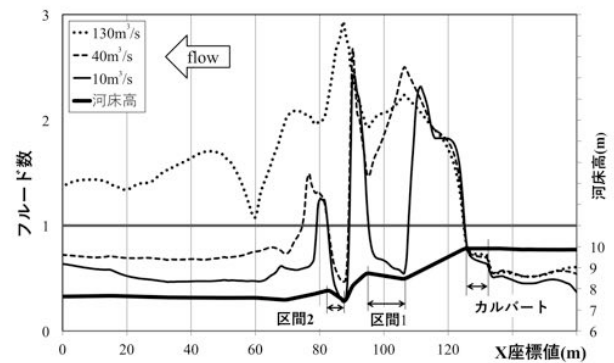


図-5 フルード数 (Fr) の流れ方向変化

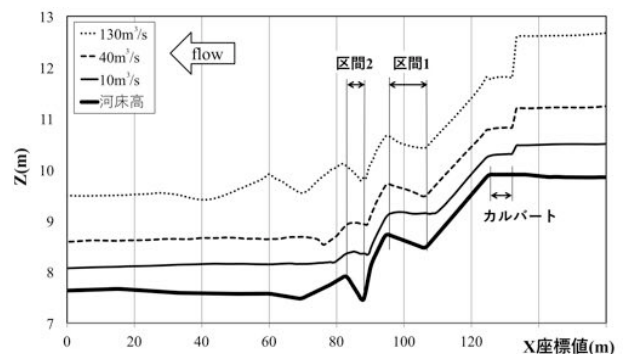


図-6 エネルギー水頭の流れ方向変化

から、流水エネルギーは、魚道ブロック領域において約 $1/2$ 、多段式落差工において約 $1/2$ のエネルギー減勢が行

われていること、2基の落差工では、第1落差工>第2落差工として分担しエネルギー減勢していることがわかる。

さらに、遷移限界流量 ($Q=40, 130\text{m}^3/\text{s}$) では、第1および第2落差工周辺のエネルギー線が逆勾配になっていることに注意する必要がある。周知のように、圧力の補正係数 η を導入すれば、静水圧分布の時は $\eta=1$ 、流線が下に凸に曲がる時は $\eta>1$ 、上に凸に曲がる時は $\eta<1$ となり、局所的な水面形や河床形状が曲率をもつ際には、遠心力の効果を考慮する必要がある。水路勾配が緩い場合には $\eta=1$ と近似しても影響は小さいが、本研究で対象とする落差工のような急勾配 (1/5, 1/1.5) 付近では、静水圧分布が成立せず局所的な流れの遠心力を考慮することが必要であることを示唆している³⁾⁴⁾。この点について、水面と河床の縦断形状の局所曲率を用いて検討したが、局所的変動が強く十分な補正効果は得られなかった。今後より合理的な解釈に繋がるようさらに検討したい。

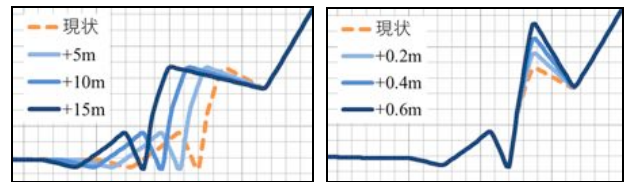
(3) 落差工の設置条件を変化させた数値解析結果

上述したように、現状地形では水面形、フルード数の変化形状から、流量：10～30 m^3/s 、40～120 m^3/s 、130～160 m^3/s において同一のグルーピングとなり、落差工の強制跳水において複数の遷移限界流量（変曲点）が生じる。現状では落差工の区間長が短いことや天端高が低いことなどにより、流量が増加すると射流状態が連続し跳水によるエネルギー減勢効果が弱くなると考えられる。そこで、落差工の設置条件、第1、2落差工の前面（逆勾配）の区間長および天端高を変化させた解析を行った。

図-7は、第1落差工の設置状況について例示したものであり、同様に第2落差工についても検討した。なお、第1、第2落差工の組合せは行わず、各々単独の影響を水面形とフルード数に着目して考察を行った。

遷移限界流量の下限值40 m^3/s において、第1落差工の前面の区間長を+15m延長した場合および第1落差工の天端高を+0.2m嵩上げした場合には、第1落差工前面において射流から常流状態へと遷移し、跳水の発生が計算された。また、遷移限界流量の上限値130 m^3/s では、第2落差工の区間長を+10m延長した場合および第2落差工の天端高を+0.2m嵩上げした場合には、第2落差工前面において射流から常流状態へと遷移し跳水が生じた。

これらの落差工の設置条件について、遷移限界流量の変化に着目して整理した結果が図-8および図-9である。第1、第2落差工の前面を延長した図-8では、遷移限界流量の下限值40 m^3/s はほとんど変化せず、遷移限界流量の上限値130 m^3/s の大きな変化は見られない。一方、第1、第2落差工の天端高を嵩上げた図-9では、遷移限界流量を引き上げることがわかり、射流から常流状態へと流れを遷移させ、より強制跳水によるエネルギー減勢が期待できる。また、区間長を延長するよりも天端高の嵩上げの方が、水理学的にもコスト的にも有利であると考えられる。



(a)区間長を延長した場合 (b)天端高を上昇した場合

図-7 落差工を変化させた設置条件の設定

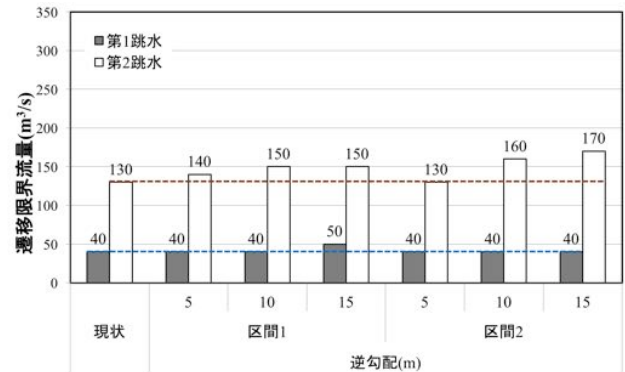


図-8 区間長を変化させた場合の遷移限界流量の変化

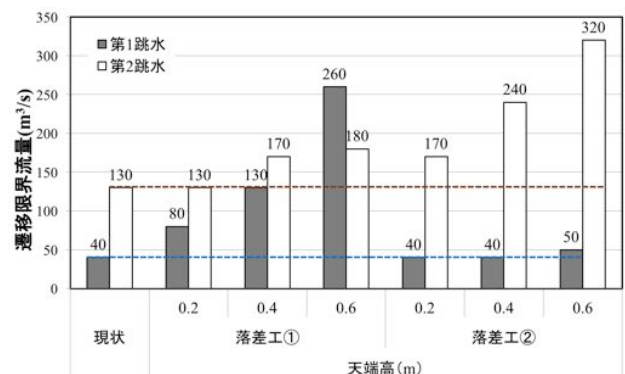


図-9 天端高を変化させた場合の遷移限界流量の変化

4. 設計流量時における流況と被災状況

設計流量に相当する最大流量 ($Q=110\text{m}^3/\text{s}$) を超える洪水が、2015年8月29日に発生した。カルバート上には流木等が堆積し越流した痕跡が確認されている。この洪水により、第1落差工と第2落差工の間の左岸側の覆土および間詰材が流出して、下流側の第2落差工端部において洗掘が生じた。これらにより第2落差工の左岸側天端高が最大24cmの低下が確認されている。また、右岸側や中央部では、中詰材の流出は確認されず本土工に大きな変形はなく、設計流量相当の洪水における多段式落差工の可撓性や安定性が確保されていると考えられる。

図-10は、2015年8月29日の8時頃の流況を示したものである。上流の市街地に設置された水位観測データによれば、洪水のピーク時刻は4時頃であり、カルバート断面を通過する水位状況からもわかるように、同図はピークをやや経過した減水期に相当する。同図から、カルバ

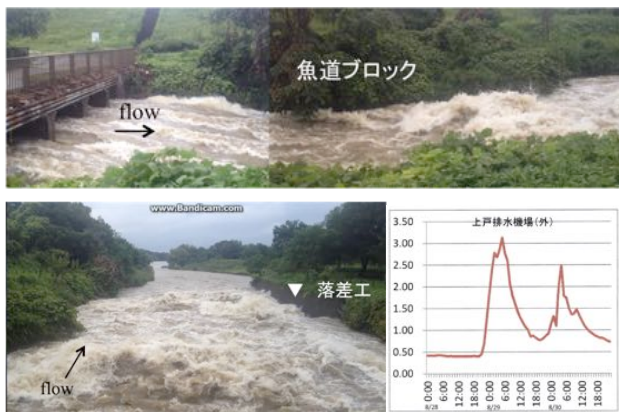


図-10 最大流量 ($Q=110\text{m}^3/\text{s}$) 付近の流況

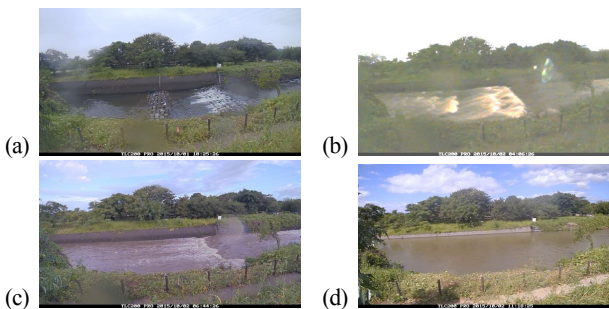


図-11 多段式落差工の洪水前後の流況

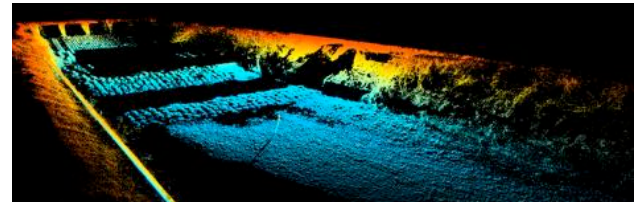
ートを通過して魚道ブロックを流れる状況は、射流から遷移した跳水現象の発生が見られること、多段式落差工周辺においても跳水が発生していることなどがわかる。さらに、最大流量時には時空間的に複雑で3次元的な跳水現象を示しており⁵⁾⁶⁾⁷⁾、本研究で扱った平面2次元流れはその空間平均場の再現に対応するものと考えられる。

一方、2016年7月～11月にかけてメモリ式水位計をカルバート上流側に設置した。このデータによると9月20日に約2.0mの洪水が確認されている。本研究では、流量10～160 m^3/s の範囲で変化させた平面2次元の解析を行っており、この洪水時の水位と流量との対応関係を検討した。カルバート天端のBMと水位計設置の標高、洪水ピークの最大水位などにより、カルバート（高さ2m×幅3m）下端からの水位は2.03mと計算され、カルバートをほぼ満水で流下したことになり、その際の計算流量は100 m^3/s に対応する。対象河川の設計流量は、1次元解析により求められた110 m^3/s を設定しており、ほぼ同程度の流量が平面2次元解析からも算定された。

図-11は現地モニタリング用に設置したインターバルカメラの画像を示したものである（2015年10月2日、水位差：0.9m）。同図(a)は平時時、(b)は最大流量時、(c)減水期、(d)は木曽川からの堰上げ背水の影響を受けた後である。同図(a)と(b)の比較から、多段式落差工（2基）において跳水現象が2箇所発生している。その後、北派川の流量減水とともに木曽川からの堰上げの影響を受けて下流端水位が上昇していることなどがわかる。



(a) 堆砂状況（パノラマ画像）



(b) 3D画像（点群データ）

図-12 落差工下流部の地形情報

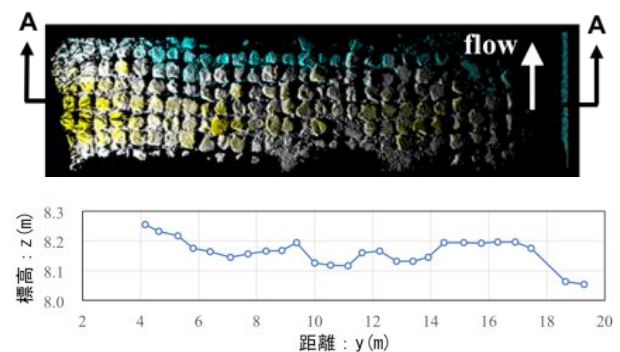


図-13 第2落差工における天端高の変形量（平均値）

5. 落差工天端の変形と砂州の堆積

前述のような設計流量を上回る洪水の履歴を受けて、繰り返し外力と多段式落差工の本体工および兩岸の護岸工の安定性について検討するために、2017年2月14日地形測量調査を行った。測量には3Dレーザースキャナー（Topcon製GLS-2000）を使用し、水面下についてはトータルステーション、電磁流速計等を用いた。

図-12は調査時のパノラマ写真と3Dレーザの点群データを併記したものである。同図から、第2落差工の下流左岸側において堆砂がみられること、第2落差工の右岸側では、深掘れ部が生じ偏った流水となり流れが集中していること、左岸側の表法面（1割勾配）において土砂の剥離、崩壊が生じていることなどがうかがえる。

図-13は、第2落差工の天端における変形量を3Dレーザースキャナーにより計測したものである。ただし、施工時の最大天端高に対応するA-A断面（川幅：y方向）において、自然石1ユニットあたりの平均値である。同図から、右岸側の自然石が沈下し、兩岸の地上部において20cm程度の沈下量の差異が確認できる。トータルステーションによる実測によれば、右岸の深掘れ部は中詰め材が流出し、幅3m程度において落差工の沈下量が最大60cm程度である。また、第1落差工では、下流側に木

工沈床が設置されており、右岸間詰め処理により沈下は見られず大きな変形は生じていない。なお、右岸側の表法面は5分勾配のコンクリートブロック護岸である。

実験河川に施工された2段の「自然石連結落差工」は、既設護岸の状態を維持した条件下で横断構造物として設置されている。上述したように、両岸との一体施工ではないために、両岸擦り付け部において局所洗掘や表法面崩壊などが発生している。今後の河川改修において、護岸と落差工の一体施工が望ましいが、この擦り付け部において流水が集中しても構造物として十分機能するように、落差工を含めた河川構造物の安定性や持続性などについて検討する必要がある。

6. おわりに

以上、「自然石連結落差工」を対象にして、数値モデルにより平水時から洪水時における水理特性および設置間隔や天端高を変化させた効果を定量的に評価した。さらに、洪水履歴とともに落差工の変形形状などについて述べた。

本研究で得られた結論は以下のようである。

- 1) 10～160m³/sで流量を波形変化させた数値解析結果について、エネルギー勾配、フルード数、水面形、乱れ強度を検討したところ、洪水時には落差工による跳水に加えて魚道ブロック下流側の逆勾配区間において顕著なエネルギー減勢を生じていることなどが定量的に把握された。また、流量増大に伴い、落差工下流のかなり長い区間に亘り射流→射流で遷移する可能性と静水圧分布から曲率を考慮した圧力補正の必要性が指摘された。
- 2) 水位実測値と数値解析の比較から、上流側の水深2.0mは設計流量110m³/sとほぼ一致し、落差工の設計に用いられた1次元解析の最大流量設定の妥当性が確認された。また、最大流量時（110m³/sに相当）のビデオ画

像における跳水の発生箇所や水面形遷移も数値解析結果と概略対応していた。

3) 設計対象の最大流量時における落差工本体の安定性は実績で確認されているが、両岸擦り付け部において局所洗掘や表法面崩壊などが発生し、実際には一体型施工が望ましいことなどが指摘された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、実験河川北派川の多段式落差工の調査データの提供について、岐阜県河川課の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) 河川伝統工法研究会編、河川伝統工法、193p., 1995.
- 2) 財団法人リバーフロント整備センター編、河川と自然環境、理工図書、152p., 2000.
- 3) 細田尚：河川流と河床・河道変動の水理解析法、物性研究、第83巻1号、76p., 2004.
- 4) 玉井信行：土木工学基礎シリーズ5-1、水理学1、培風館、pp.214-217, 1992.
- 5) 大本照憲・成合功光・矢北孝一：階段状開水路流れにおける三次元波状跳水の内部構造、応用力学論文集、vol.5、pp.673-680, 2002.
- 6) 瀬津家久・中川博次・天野邦彦：開水路段落ちにおける剥離流の乱流構造に関する研究、水理講演会論文集第30巻、pp.601-606, 1986.
- 7) 森秋巨・板倉忠興・森平宏治・高田修二：跳水と境界層の相互干渉～三次元波状跳水～、水工学論文集、第36巻、pp.367-372, 1992.

(2017. 4. 3受付)