UAVによる河川測量と 多段式落差エのエネルギー減勢効果

和田 清¹·大坪 幹弘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 建設工学専攻(同上) E-mail:2016y03@edu.gifu-nct.ac.jp

本研究は、木曽川の支川北派川の多段式落差工周辺において、UAVによる写真測量と一般測量の比較に より、河川構造物周辺の地形情報や測定誤差などについて明らかにするとともに、数値モデルによる落差 エのエネルギー減勢効果を定量的に把握したものである.得られた結果は以下のようである.UAVによる 3次元データは、魚道や落差工による剥離流や高低差、カルバート内部の状況が可視化され、水面上は2~ 5cm程度の誤差で測定できる.また、水面下については、透明度がよければ80~100cmの濃を10cm以内の 誤差で把握することなどが明らかにされた.最大流量(110m³/s)における数値解析結果では、エネルギ ー勾配、フルード数、水面形、乱れ強度の関連から、落差工および魚道ブロック付近において強制跳水が 生じ、エネルギー減勢効果が発揮していることが定量的に把握された.さらに、2015年8月29日の出水時 (110m³/sに相当)のビデオ画像により、跳水を含めた水面形状は数値解析結果とほぼ対応している.

Key Words: UAV, multi-drop head works, hydraulic jump, energy dissipation, iRIC, analyzing flow

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はかりながら,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月木曽川の支流・北派川河口の両岸 約200m区間に設置された.その後、2008年の被災や2010 年の「全国豊かな海づくり大会大会」に併せて、自然共生 川づくりのモデル事業として改修された.

一方,岐阜県は急流河川が多く,従来の河川改修では 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河川構造物が不安定化し河 岸の安全性,魚類遡上などに支障を来すことなどが課題 となった.2010年には、自然共生に配慮した新たな落差 対策として「石組み落差工」が設置されモニタリングが進 められた.この工法を進める上で、熟練の石工職人が必 要、巨石が周囲の景観に馴染まない河川があること、石 材の確保により高価になるなどの新たな課題が抽出され た.そこで、これを補完する工法の開発が必要となった.

本研究では、この新たな落差対策として土木研究所が 提案した「多段式落差工」を対象にして、流れの数値解 析により、その落差工のエネルギー減勢効果を定量的に 把握した.また、2015年8月に発生した洪水時(流量: 110m³sの設計流量と同等)における流況と比較検討した. さらに、周辺の地形情報を迅速・簡便に把握できる UAVによる写真測量と一般測量の比較を行い、河川構 造物周辺の地形情報の測定誤差などについて検討した.

2. 多段式落差工の概要

落差対策の前提条件としては、以下の要件が挙げられ る.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 に馴染むことなどである.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(2次製品であること),⑥通常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,多段式落差工が採用された.



図-1 多段式落差工(断面イメージ図)

図-1 は、多段式落差工の断面の概略図を示したもの である。自然石を連結した2次製品(自然石9個,2t型, 1.8m×1.8m)を1ユニットとし、河道の縦断方向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列設置した。また、落差12mを解消するため に1基当たりの落差を0.6mとし、2基(96ユニット) 設置した。両側の端部処理は詰石や多自然型ネットを設 置し、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とした。



図-2 北派川における多段式落差工(2015年5月)

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 時の澪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く配置するなどの 工夫を行われている.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 ある.詳細に見ると、ボックスカルバート上流側では、 ワンドを目的とした河道拡幅により緩い湾曲流れが生じ たため、左岸の砂洲の形成・発達や右岸において河岸浸 食が生じている.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,緩い湾曲流れの傾向が生じてい る.その影響により,右岸側の河岸浸食と左岸の土砂堆 積が見られる.

3. UAVによる河川地形情報の収集

河川管理において,洪水前後の微地形の情報を迅速に 把握することは重要である.本研究では UAV による地 形情報について,トータルステーションによる地形測量 と比較検討した.UAV の型番は t600,空撮に使用され たカメラはソニー製で,解像度は 1200 万画素 JPEG であ る.GPS を登載した UAV によって撮影された 2 側線の 画像を解析ソフト Photo Scan Pro により処理した.なお, UAV の空撮時には,座標のキャリブレーションのため に,地上および水中に鋼製白プレート (30cm×30cm) を 28 枚設置して,トータルステーションによる 3 次元 座標値を測量した.

Photo Scan Pro による解析手順の概略は以下のようであ る.まず、①写真のアラインメント(画像の位置合わせ) を行い、画像を正しく配置させる。それにより配置だけ でなく、ある程度の地形情報がポイントクラウドという 3次元座標を持った点の座標に置き換わる、次に、② 高 密度のクラウド構築を行い、ポイントクラウドよりさら に細かい点群データにする。③メッシュ構築作業では、 点群データをつなぎ合わせて作成されワイヤーフレーム が完成し、3次元的に表示される。④座標入力では、白 プレートの座標がトータルステーションにより把握され ているので、その位置座標を Photo Scan Pro に入力する ことで全体の3次元座標が把握できる。⑤テクスチャー 構築では、写真を合成した地形情報が形成される。 ⑥デ ジタルエレベーション構築 (DEM) では、標高値をも った白黒データが形成され、最後にオルソモザイク構築 によって3次元の地形情報が表示される.



図-3 UAVによる河川地形情報の一例(2015年10月)

図-3 は、UAV による地形情報を 3 次元表示した画像 であり、①は平面図、②は上流側からカルバート、③は 下流側からカルバートを眺めたものである.なお、①お よび②の図中の破線は地形測線である.同図から、カル バート周辺の微地形が取得されており、カルバート内部 の空洞や魚道や第1落差工の高低差などの立体感が読み 取れる.

図-4 は、UAV と Photo Scan Pro によって画像処理され た3次元地形データについて、図-3の①および②の地形 測線の河床地形を示したものである. 同図(a)はカルバ ートを基準とした流れ方向の河床形状であり、カルバー ト直下の魚道, 第1落差工や第2落差工の凹凸形状が確 認できる.また、同図(b)は、左岸側を基点としてカル バート上流部の河畔林と砂洲を含む横断方向の河床形状 である. 河畔林のオーバーハングによって UAV の空撮 が遮られた水面下の情報は欠落しているが、水深 lm 程 度の淵が捉えられている. トータルステーションによる キャリブレーション結果によれば、水面より上部の地形 形状は 2~5cm 程度の誤差で測定できること、水面下に ついては、透明度がよければ 80~100cm の淵を 10cm 以 内の誤差で把握することなどが明らかにされた. 水面下 の地形の推定には屈折などにより実際の河床地形よりも 浅く算定されることが知られているが、この点について は、今後のデータ蓄積により再検討する必要がある、



4. 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 kをモ デルを用いて、マニングの粗度係数nは地形や構造物に 応じて 0.02~0.05 間で変化させた.また、ボックスカル バートが支配断面となり、そこを流下する最大流量 110 m³/s を設計流量に設定した.

(2) 最大流量時の水理特性

図-5は、最大流量(Q=110m³/s)におけるカルバート より下流側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、カルバート下流側の魚道ブロック、第1、2落 差工において流速5m/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.

図-6は、最大流量(Q=110m³s)における下流側のフ ルード数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、限界流以下の射流(Fr>1) となり、第1,2落差工にも射流が発生していることがわ かる.また、これらの射流の発生領域の間には、Fr<1 の常流域が混在しており、射流から常流に遷移する跳水 現象が同時に発生していることが想定される.



図-5 平均流速ベクトルの空間分布 (Q=110m³/s)



図-6 フルード数 (Fr) の空間分布 (Q=110m³/s)







図-8 エネルギー線の流れ方向の変化 (Q=110m³/s)

図-7は、河道の中央部における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)として流下し、第1落差工直前にも 射流から常流への遷移領域が発生している.この要因に は河床の逆勾配と流量の関係などが起因し、別途、水面 形などのデータとの整合性を図る必要がある. 図-8は、河道の中央部における水面形、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. 同図の水面変化から、図-7のフルード数の分布に対応して水面形が急変し、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とほぼ対応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いることがわかる. これらの結果から、最大流量(Q=110m³s)においてカルバートを通過した流水エネルギーは、魚道ブロック領域において約1/3、多段式落差工において約2/3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、その半分をそれぞれが分担して減勢していることが明らかとなった.

5. 最大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=110m³s)の洪水が, 2015年8月29日に発生した.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 れず本体工に大きな変形は見られず,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.今後,同程度の出水の履歴を受けた 際の繰り返し外力と本体工および両岸の護岸工の安定性 について検討する必要がある.

この出水時の流況や水面形状と、上述した数値解析結 果について比較検討する.

図-9は、2015年8月29日の8時頃の流況を示したもので ある.上流側に位置する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、同図はピークを過ぎた減水 期に相当する.



図-9 最大流量時の(Q=110m³/s)流況

同図から、カルバ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.図-9のような最大流時には時空間的 に複雑で3次元的な跳水現象を示しており³⁴⁶、本研究で 扱った平面2次元では現象を十分再現されていないもの と考えられる.

図-10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)は平水時、(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.

図-10 多段式落差工の洪水前後の流況

6. おわりに

本研究により得られた結論は以下のようである. 1) UAVと画像解析による3次元データは、魚道や落差工による剥離流や高低差、カルバート内部の状況が可視化され、水面上は2~5cm程度の誤差で測定できること、 水面下については、透明度がよければ80~100cmの淵を 10cm程度の誤差で把握することなどが明らかにされた. 2)最大流量(110m³/s)における数値解析結果では、エネ ルギー勾配、フルード数、水面形などの関連から、落差 工および魚道ブロック付近において強制跳水が生じ、エ ネルギー減勢効果が発揮していることが定量的に把握さ れた.なお、2015年8月29日の出水時(110m³/sに相当) のビデオ画像により、跳水を含めた水面形状は数値解析 結果とほぼ対応していることが示された.

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提供については岐阜県河川課の協力, および岐阜大学名誉教授 藤田裕一郎先生の助言をいた だいた.また,UAV撮影は合同会社空創技研プロペラ (櫻井優一代表)の協力を得た.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.
- 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.
- 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.
- 禰津家久・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.
- 5) 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.

(2016.8.26受付)

EVALUATION OF RIVER SURVEY USING UAV AND FORCED ENERGY DISSIPATION OF FLOW BASED ON THE MULTI-DROP STRUCTURE

Kiyoshi WADA and Motohiro OTSUBO

In this study, the surveying by the total station and photographic surveying by UAV (Unmanned Aerial Vehicles) are carried out for the Kita-Ha-Sen River. Minimization of an error and the precision of UAV, and underwater topography information are considered. As a result, multiplex a photograph by Photo Scan Pro was composed, and three dimensions of river topography information are displayed. The possibility that UAV become the effective tool is shown by improving calibration to understand-like river information as soon as possible. Furthermore, the energy dissipating effect is estimated by twodimensional numerical model for multi-drop structures. The result of analysis is considered from the angle of energy gradient, Froude number, turbulence intensity. As the decline of energy gradient and the sudden change of Froude number is indicated to hydraulic jump at drop structures, it is clarified that the drop works is useful to large energy dissipating effect.