

山地河川における洪水流の三次元解析と 護岸被災機構に関する研究

NUMERICAL STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN 3-D CHANNEL FLOW AND BANK PROTECTION DAMAGE IN MOUNTANOUS RIVER FLOOD

河野晃寛¹・守田優²

Akihiro KAWANO and Masaru MORITA

¹学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒135-0061 東京都江東区豊洲3-7-5)

²正会員 工博 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒135-0061 東京都江東区豊洲3-7-5)

This study investigates the relationship between the impacts of the flood channel flow and the damage of the bank protection in the mountainous river using the 3-D channel flow model, iRIC NaysCUBE, for the case of the flood disaster in the Tadami River in 2011.

First, we applied the 3-D model to the flood flow and then verified the applicability of the model using the recorded water level data. Second, we investigated in the site the actual damages of the bank protection for the flood disaster. The calculated hydraulic parameters such as flow velocity, turbulence energy, and pressure to the bank protection, were thus compared with the location and the extent of the flood damage. As a result, the extent and magnitude of the damage can almost be explained by the hydraulic parameters, but the considerations of the overflow, the shape and strength of the bank protection could not be ignored.

Key Words : 3-D flow, Analysis, Open channel, Flood disaster, Bank protection damage, iRIC

1. はじめに

近年の日本においては、洪水災害が毎年のように発生しており、その背景として、全国的な豪雨の増加傾向が指摘されている。水害のたびに記録的な豪雨が話題になるが、特に計画規模を超える超過洪水による流域への被害は甚大である。山地河川の洪水被害を防ぐためには、洪水流の特性を水理学的に明らかにし、特に河道の護岸被害をもたらす水衝部の水理特性、高速流、高掃流力の発生機構を把握することが必要である。

しかし、山地部の河川は、起伏のある河床や穿入蛇行、様々な河川構造物の影響など、平地河川とは異なる山地河川特有の洪水特性を有している。これまで洪水流の流況を詳細に把握するため、三次元解析モデルによる数値解析手法が開発されてきた。しかし、三次元解析モデルは計算負荷が大きいため、蛇行区間や構造物周辺など、一部の局所的な範囲での適用に限られることが多かった

¹⁾ 三次元解析モデルを実河川の洪水に適用すれば安田ら²⁾の平面二次元解析モデルによる洪水解析のように、

河積や粗度、勾配等の変化にともなう洪水流の特性を水理学的に解析することが可能となり、護岸などに被害を及ぼす水衝部や乱れの生成、高速流、高掃流力の発生箇所を予測することが期待できる。ただ、山地河川における洪水流の三次元解析による流況の把握、そして三次元解析から得られる流れ場と河川護岸被害との関係を明らかにした研究はほとんどない。

本研究では、H23年新潟・福島豪雨によって山地洪水が発生した阿賀野川水系只見川の河道を対象とし、洪水流と河岸の被災状況の分析を行う。そこで三次元的、局所的な流況を把握するために三次元水理解析モデルを用いて流れ場における水理量を把握し、その結果を用いて、流れ場と護岸被災状況との関係を検討し、護岸被災をもたらす水理的要因について分析を行う。

2. 阿賀野川水系只見川流域

(1) 阿賀野川水系・只見川流域の概要

阿賀野川水系に属する只見川は、国立公園として指定

されている盆地状高原の尾瀬を水源とし、大きく南西から北東方向へ屈曲しながら流下する、延長145 km、流域面積2765 km²の阿賀野川流域最大支流である。流域内は、越後山脈に属する起伏量200m以上の急峻な斜面に囲まれた谷底地形である。地形特徴より、只見川流域内は本川からの洪水だけでなく、背後の沢群からの出水、および土砂流出も懸念される地域である。また、流域の特徴として、地形的に急峻であること、気候的に年降水量2368 mmの日本有数の豪雪地帯である。

(2) 只見川の河道状況

只見川ダム地点における状況を表-1に示した。只見川では堆砂が進行しており、H23年7月新潟・福島豪雨直前では、複数のダムにおいて堆砂率が20%程度になっていた。また只見川流域においては、過去にも洪水被害があったことより、ダム堆砂による河床上昇が洪水疎通能力を減少させ、浸水氾濫の危険性を増加させている可能性が懸念されていた。

表-1 只見川ダム地点における河道状況

| ダム名 | ダム種別 | 設計洪水位 | 基本高水 流量 | H23年洪水 最大放流量 | 堆砂率 H23年洪水前 |
|-----|------|-------|-------------------|-------------------|----------------|
| | | m | m ³ /s | m ³ /s | % |
| 本名 | Ⅲ型 | 317 | 6,000 | 6,405 | 19.0 |
| 上田 | Ⅲ型 | 280 | 6,300 | 6,564 | 21.4 |
| 宮下 | Ⅲ型 | 255 | 6,900 | 6,249 | 19.7 |

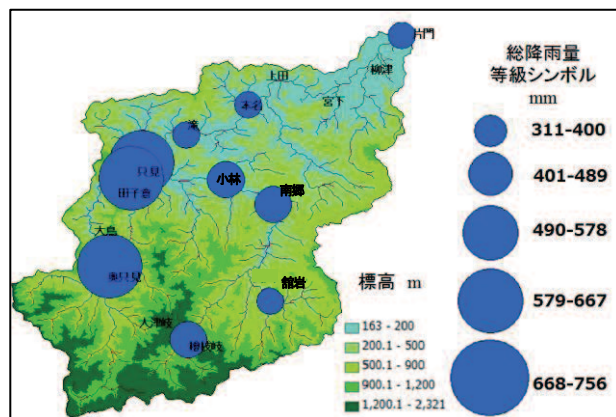


図-1 只見川流域及び各地点における総降雨量

3. H23年7月新潟・福島豪雨

(1) H23年新潟・福島豪雨の概要

7月27日から30日にかけて、新潟県と福島県会津を中心に前線による豪雨となった。特に28日から30日においては、前線が関東の東にかけて停滞したことで、前線に向かって暖かく非常に湿った空気が流れ込み、大気の状態が不安定となり、記録的な大雨をもたらした。図-1に只見川流域における総降雨量を示した。降水量は福島県会津の多いところで700mmを記録し、特に福島県の只見においては29日19時までの1時間に約70mmの非常に激しい雨が降り、1日雨量、3日雨量においても観測史上1位を更新した。総降雨量の多い地点は只見川本流上流域に集中しており、降雨の空間分布に偏りがあった。

(2) 河道内被害状況

本豪雨により、複数のダム地点において超過洪水が発生し、河道内外において被害が発生した³⁾。筆者らの現地調査等から得られた被害箇所および護岸の被害程度の分類を図-2に示す。調査対象区間において、特に本名ダム下流の下谷原地区における浸水被害及び護岸の流出や同じくダム下流のJR只見線第五鉄橋及び第六鉄橋の流出など被害程度が大きかった。これらは山地河川特有の湾曲部、屈曲部に位置しており、洪水流が衝突することで、護岸の破壊や河岸侵食されたと考えられる。

また本名ダムから上田ダム区間においては、過去の水害を受けて護岸整備や地形改変を行ったにもかかわらず、本洪水でまたしても浸水被害が発生した箇所があった。



図-2 只見川流域の被害箇所

4. 三次元水理解析による水理量の把握

本研究で用いる三次元水理解析モデルはiRIC (International River Interface Cooperative) ソフトウェアに同梱されているソルバーのNaysCUBEである⁴⁾。本モデルは計算格子にスタガード格子、座標系は移動一般曲線座標系を採用している。

(1) 三次元水理解析モデル

a) 数値解析手法

<基礎方程式>

本解析対象河道においては、起伏に富む山地河川の特徴である湾曲部や屈曲部における遠心力と圧力勾配による二次流やダム付近における鉛直方向の流れが重要となることから三次元モデルを利用した。

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial v^a \sqrt{g}}{\partial \zeta^a} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i (V^j - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i \\ = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j [-\overline{v^i v^j}] + 2v \nabla_j e^{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

<乱流モデル>

乱流モデルは、二方程式モデルとして一般的に用いられている標準型k-ε方程式を利用した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_j [k (V^j - W^j)] + k \nabla_j W^j \\ = -g_{ij} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i + \nabla_j \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) g^{ij} \nabla_j k \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla_j [\varepsilon (V^j - W^j)] + \varepsilon \nabla_j W^j \\ = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} g_{ij} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla_j \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + v \right) g^{ij} \nabla_j \varepsilon \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 ζ :一般曲線座標、 t :時間、 V^i :速度ベクトルの反変成分、 p :圧力、 v :動粘性係数、 ρ :水の密度、 k :乱れエネルギー、 ε :乱れエネルギー散逸率、 v_t :渦動粘性係数、 g_{ij} 、 g^{ij} :メトリックテンソルの共変、反変成分、 g :メトリックテンソルの行列式、 F^i :重力加速度の反変成分をそれぞれ表す。

b) 解析条件

本解析対象河道は上田ダムにより河道が大きく分断されることから、本名ダムから上田ダムまでの約8.5kmの上流区間と上田ダムから宮下ダムまでの約11.8kmの下流区間に分けて解析を行った。境界条件については模型実験⁵⁾を参考に、ダム地点における越流水位と放流量の関係からH-Q図を作成し、表-2に示すように設定した。また壁面や底面の摩擦の評価方法については本モデルの設定方法に基づき、マニング則を利用した。粗度は格子毎に設定できるため、河道内はおおむね $n=0.03$ とし、河原（第五鉄橋付近の左岸等）を $n=0.05$ とした。

表-2 解析条件

| 区間 | 上流端 流入量 (m^3/s) | 下流端 水位 (m) | 計算格子数 $x \times y \times z$ (個) |
|---|---|------------------|---------------------------------------|
| 上流区間 | 4000 | 277.7 | $219 \times 9 \times 8$ |
| | 5000 | 279.3 | $219 \times 9 \times 8$ |
| | 6000 | 280.8 | $219 \times 9 \times 8$ |
| | 6405 | 282.0 | $219 \times 9 \times 8$ |
| 下流区間 | 4000 | 252.6 | $301 \times 9 \times 8$ |
| | 5000 | 253.6 | $301 \times 9 \times 8$ |
| | 6000 | 254.5 | $301 \times 9 \times 8$ |
| | 6564 | 255.0 | $301 \times 9 \times 8$ |
| 計算時間幅 $\Delta t=0.01(\text{s})$, マニング粗度係数 $n=0.03 \sim 0.05$ | | | |

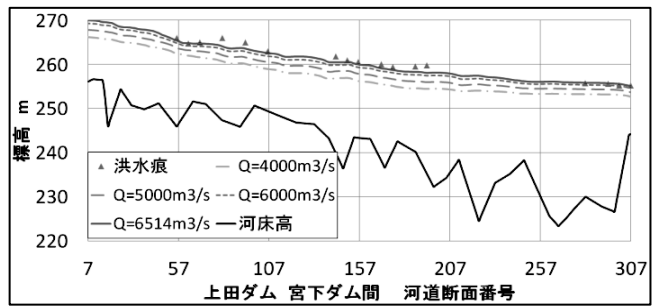
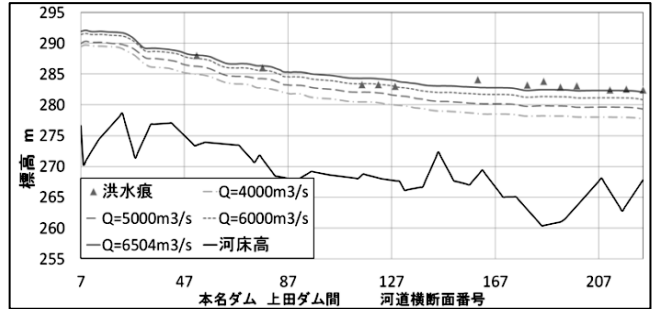


図-3 下流区間の解析値と実績値との比較
(上図:上流区間, 下図:下流区間)

(2) 壁面に作用する外力

三次元水理解析から得られた水理量をもとに、壁面に垂直に働く外力を算出する。運動の第二法則を用いて、壁面近傍の流体に横断方向に作用した流体圧から外力を推定した。

$$Pv = -M(v_{v2} - v_{v1})/t \quad (5)$$

ここに Pv :壁面に作用した外力、 M :単位格子内の流体の質量、 Vv :横断方向の流速、 t :計算格子を流体が通過する時間である。なお外力の向きは、壁面近傍の流体に作用した力の負の方向であり、その大きさは右岸と左岸で向きが異なることから作用外力の絶対値をとる。

(3) 解析結果

a) 河道モデルの適用性評価

本モデルでの実河道の再現性を確かめるために、H23年新潟・福島豪雨時におけるピーク流量時の水面標高と実績洪水痕の標高との比較を行った。図-3は上流区間と下流区間における各流量での解析から算出した水面標高と

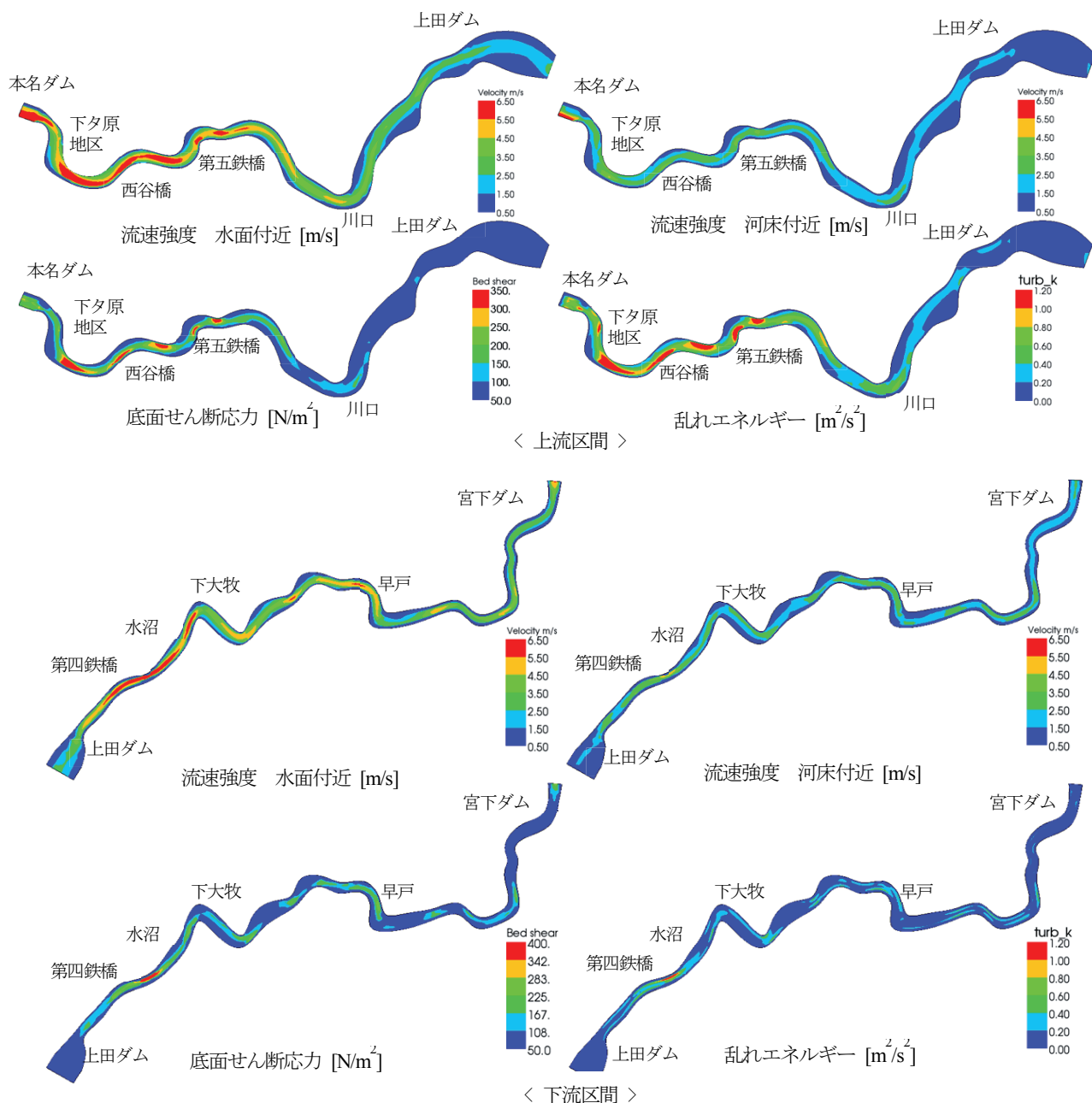


図-4 ピーク流量時の各水理量

洪水による実績洪水痕の標高を示したものである。上流区間及び下流区間において、ピーク流量時における各断面位置の水面標高と実績洪水痕の標高とを比較すると良く適合していることから、水理学的に妥当な結果を得ることができていると判断できる。

洪水時における3次元流の測定は容易ではないため、数値解析によって洪水流を把握することは重要である。とりわけ本モデルでは湾曲部や屈曲部における局所的な水面標高の変化を捉えることができたことから、山地河道における計画洪水水位を定める際に三次元解析モデルは有用な手法になると考えられる。

b) 洪水時の流況

本解析から得られたピーク流量時の4種類の水理量を

図-4に示す。解析対象河道内のダム付近や湾曲部及び屈曲部において、局所的に流速などの水理量の大きくなる箇所が明らかになった。

図-4上の上流区間において、水面付近及び河床付近の流速強度より、本名ダム直下において高速流が発生し、その流れが左岸の下タ原地区護岸まで到達することで、壁面に洪水流が衝突する水衝部が形成されていることがわかる。さらに、本名ダムの下流から第五鉄橋付近の蛇行区間を抜けるまで局所的に5m/sを超える箇所が形成されている。この区間は湾曲部や屈曲部の河道地形によって二次流が発達しやすい箇所であり、解析結果から水面と河床の速度ベクトルの角度に差があり、底面における二次流が強く現れることを確認した。またこの区間では湾曲が連続しており、湾曲の入り口では流速が高くなるこ

とから、水面及び底面付近の流速強度が局所的に高くなったと考えられる。また下タ原地区の湾曲部や下流の蛇行区間においては、護岸の洗掘破壊を招く要因となる二次元量である底面せん断応力と河床付近の速度勾配による乱れエネルギーも局所的に高くなっていることから、土砂の移動が活発であり、洪水流の乱れが強い場所であると判断できる。

図-4上の上流区間において、上田ダム付近では、ダム調節池の影響により流速が低下することに加え、ダム右岸側に設置されているゲートに向けて流れの向きが変わっている。上田ダム付近における底面せん断応力の低下や流速分布より、上田ダム調節池の右岸側に堆砂が進行しやすい傾向にあることが明らかとなった。上田ダム上流右岸においては堆砂が右岸に分布し、堆砂量も多いことから実河道の状況を概ね再現している。

図-4下の下流区間を見ると、水面付近の流速強度より、上田ダム下流の第四鉄橋付近で6m/sを超える高速流が発生していることがわかる。第四鉄橋付近における高速流の発生要因はダムによる影響だけでなく、河道幅が狭くなっていることによる河道地形的要因も考えられる。

蛇行区間である下大牧及び早戸付近の各水理量において、右岸と左岸では流れに大きな差があることがわかる。特に下大牧地点の蛇行区間においては、右岸の底面せん断応力が低く、洪水時に流された台船や河道内堆砂が右岸に偏っていることから、今後も右岸側に堆砂が進行していくと考えられる。

図-4の上流区間と下流区間における湾曲部や屈曲部の水理量を比較すると、上流区間の水理量の方が大きくなる傾向があった。さらに上流区間では、流況に上田ダム調節池の影響があったが、下流区間においては、宮下ダム付近の水理量に大きな変化がみられないことから、宮下ダム調節池の影響は上田ダムに比べて小さいと考えられる。以上のことから、隣接する上流区間と下流区間では、同規模の流量であっても局所的な水理量や洪水時の流況に差があることがわかった。

5. 水理量と護岸被害との比較

(1) 水理量と護岸被災箇所との比較

護岸被災箇所を示した図-2と各水理量を示した図-4との比較を行った結果を表-3に示した。護岸被災要因である河床低下や洗掘において、河床付近に影響を与える水理量が重要である。二次元量である掃流力及び三次元解析により得られた河床付近の流速強度及び乱れエネルギーは、下タ原地区や第五鉄橋付近、下大牧などの湾曲部や屈曲部で、周囲よりも局所的に高い値になっており、護岸の被災箇所とよく対応している。このことから、底面せん断応力に加えて、三次元解析モデルから得られた水理量によって、洪水時における詳細な流況が把握でき、高

表-3 護岸被災程度と各水理量の比

| 護岸被災箇所 | | 護岸被害程度 | 水面付近流速強度 [m ³ /s] | 底面付近流速強度 [m ³ /s] | 掃流力 [N/m ²] | 底面付近乱れエネルギー [m ² /s ²] | 壁面への外力 [KN/m ²] |
|-----------|----|--------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--|--------------------------------|
| 本名ダム直下 | 左岸 | 流出 | 4.79 | 2.86 | 157 | 0.9 | 24 |
| 下タ原地区 | 左岸 | 倒壊 | 4.69 | 3.15 | 121 | 1.3 | 55 |
| 西谷橋付近 | 右岸 | 倒壊 | 6.77 | 4.39 | 251 | 2.3 | 54 |
| JR只見線第五鉄橋 | 右岸 | 流出 | 6.60 | 4.26 | 207 | 1.9 | 126 |
| JR只見線津川口駅 | 右岸 | 損傷 | 2.06 | 1.04 | 27 | 0.1 | 12 |
| 大志地区 | 右岸 | 損傷 | 3.08 | 2.18 | 116 | 0.5 | 7 |
| 宮崎地区 | 右岸 | 欠損 | 1.83 | 1.28 | 35 | 0.2 | 12 |
| 上田ダム直下 | 右岸 | 流出 | 3.21 | 2.25 | 23 | 0.1 | 41 |
| 水沼橋 | 右岸 | 欠損 | 2.77 | 1.48 | 60 | 0.2 | 3 |
| 下大牧地区 | 左岸 | 欠損 | 4.15 | 2.97 | 100 | 1.1 | 36 |
| JR只見線早戸駅 | 左岸 | 損傷 | 4.03 | 2.55 | 171 | 0.8 | 22 |

速流や水衝部、高掃流力等の作用現象の発生箇所を推定することができると考えられる。また作用現象の発生箇所と護岸の被災箇所はよく対応していることから、これらの水理量は護岸の被災発生箇所の抽出に適用できると考えられる。

(2) 水理量と護岸被災程度との比較

本解析より、護岸被災の程度と各水理量の大きさを比較した結果、水理量の上昇に伴って被災程度は上昇しており、対応する傾向があった。

護岸が流出し、被害程度が大きかった第五鉄橋付近においては、各水理量より水衝部、高掃流力の発生箇所であったことがわかる。しかし、同等の護岸被害程度であった各解析区間上流端の本名ダムと上田ダム地点においては、計算方法として上流端に助走区間及び助走勾配を設け、流速は再現したが、被害程度と水理量との対応が良くなかった。これはダムから放流された洪水流は縦断方向だけでなく、横断方向にも強い流れを擁しているが、モデルでは十分に再現できなかったためと考えられる。

次に護岸が倒壊していた下タ原地区や西谷橋付近と、護岸被害が欠損程度であった水沼付近や川口付近、早戸付近を比較すると、各水理量と護岸被害の程度の大きさの大小は対応する傾向にあった。下タ原地区や水沼地区の護岸において、同程度の被害の箇所と比較すると各水理量は低いが、これらの箇所については、解析による水面標高が護岸の標高を超えていることから、越流による被害の拡大があったと考えられる。

(3) 水衝部における外力比較

第五鉄橋付近では、護岸の流出し、河岸が激しく侵食されるとともに、落橋を招くなど特に被害程度が大きい箇所であった。洪水流の影響を受ける危険な箇所の予測をするためには、流量の増加に伴う水衝部の形成と、水衝部付近における外力を算出することが重要である。図-5に西谷橋付近と第五鉄橋付近における、中規模洪水時とピーク流量時の掃流力を示し、図-6に各流量時における壁面に垂直に作用した外力を示す。

図-5より、中規模洪水時とピーク流量時における掃流力の比較より流量の増加に伴って掃流力が解析範囲内において相対的に高まるとともに、河道形状により外

力のピーク作用位置に差が生じている。西谷橋付近では、流量の増加にともなって掃流力が高く作用する範囲が下流側に広がるのに対して、第五鉄橋の右岸では掃流力が高く作用する場所が局所的であることがわかる。

一方、図-6の壁面に作用した水面付近の外力を見ると、西谷橋右岸付近に働く外力(No.50付近)に比べて、第五鉄橋右岸付近に働く外力(No.77付近)は、流量増加とともに局所的に上昇する傾向にあり、第五鉄橋右岸が洪水時に非常に危険な箇所であったことが明らかとなった。護岸被災においては流量の増加による水理量のピーク作用位置の変化の有無を把握することは、河道の治水計画に重要である。

西谷橋付近と第五鉄橋付近の護岸被災程度に差が生じた要因として、それぞれの護岸の形状が挙げられる。西谷橋付近においては昭和44年の洪水被害をうけて護岸に鋼矢板で洗掘防止対策を行っていたが、第五鉄橋付近の護岸はコンクリートブロックを並べた程度であり、護岸の流出が河岸浸食を招き、橋梁の流出に繋がったと考えられる。護岸被災程度は水理的要因のほかに、護岸の状況、強さによっても大きく影響されるため、重要性が高く、復旧が容易でない社会資本がある場合は、洪水流に対して強い護岸にする、もしくは危険な箇所を避ける等の災害に強い治水対策が重要である。

以上のことから、三次元解析による護岸被災要因の分析は、洪水時における作用現象および作用外力の把握に繋がり、水理的要因に適した治水対策ができることを示唆している。

6. 結論

本研究では、ダムが連続して設置された山地河川の洪水流を対象に三次元解析モデルを用いて河道を一体的に解析し、詳細な流況の把握を行った。また解析から得られた水理量と護岸の被災箇所との比較を行い、護岸の被災要因の分析を行った。以下に得られた主な結論を示す。

(1) 山地河川において三次元モデルを用いた結果、複雑な河道形状をモデル化することで、湾曲部や屈曲部における局所的な水理量の変化が明らかとなった。また本解析では実績の洪水痕の標高と解析値の水面標高とは良好な一致が得られたことから、山地河川における三次元解析モデルの適用性ととも、本手法が計画高水位を定める際に有用であることを示した。

(2) 護岸被災を招く水理的要因である洪水流の越流や高速流、水衝部、高掃流力の形成箇所を推定することができた。また護岸の被災箇所で各水理量も高い値を示しており、水理量と護岸被災箇所の対応が明瞭であった。本解析では各水理量を相対的に判断したが、今後さらに適用事例を増やし、基準値や閾値を設定することにより、被災箇

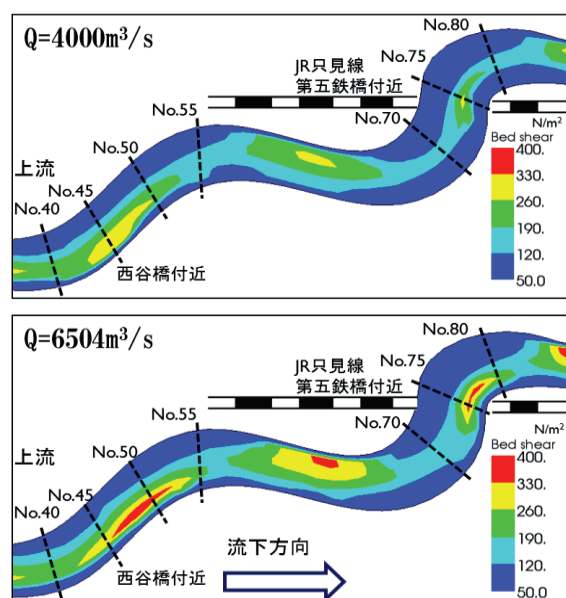


図-5 流量の変化による掃流力の変化

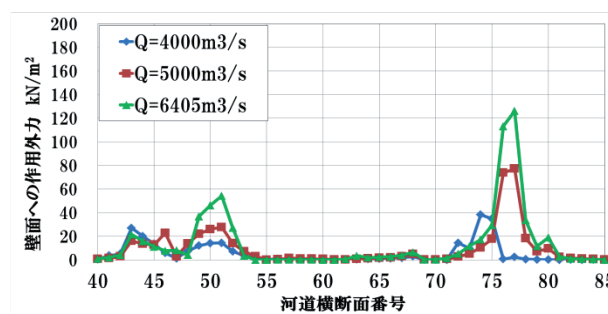


図-6 右岸壁面への作用外力

所の抽出を行うことで有用な指標になると考えられる。

(3) 護岸被災の程度と各水理量の大きさを比較した結果、水理量の上昇に伴って被災程度も上昇しており、水理量と護岸被災程度とは対応する傾向にあった。また護岸被災程度は水理的要因のほかに、護岸の状況、強さによっても大きく影響されることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎: 橋脚による堰き上げ効果の再現性に着目した数値解析モデル比較, 水工学論文集, 第49巻 pp.559-564, 2005.
- 2) 安田浩保, 高橋玄, 酒井公生, 竹村仁: 五十嵐川における河川構造物への流速の作用時間に着目した被災要因の分析, 河川技術論文集, 第18巻, pp.245-250, 2012
- 3) 風間聡・仙頭紀明・川越清樹: 平成23年7月新潟・福島豪雨災害による只見川流域の水害特徴について, 2011新潟・福島豪雨災害土木学会調査団報告書, 2011
- 4) 北海道河川財団: 河川シミュレーションソフトNaysCUBE, <http://i-ric.org/ja/>
- 5) 土木学会東北支部: 平成23年7月新潟・福島豪雨に関する阿賀野川水系技術委員会 報告書, 2012

(2014. 4. 3受付)