大規模洪水時における河岸侵食 危険箇所の検出法 A DETECTION METHOD FOR RIVER REACH VULNERABLE IN BANK EROSION DURING LARGE FLOOD

八木郁哉¹・内田龍彦²・河原能久³ Fumiya YAGI, Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA

 1学生会員 広島大学大学院博士課程前期 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
2正会員 博(工) 広島大学大学院准教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻(同上)
3フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻(同上)

Heavy rainfall that occurred in July 2018 caused severe damage along rivers in western Japan widely such as bank erosion, collapse of dikes, etc. Those also broke many the evacuation routes along rivers. In this paper, we aim to investigate a method of detecting the vulnerable points at the time of large flood occurrence to a wide area of rivers including the upper stream of a first class river and the second class river with a small amount of data. It is presented by the BVC method that the bank erosions are considered to be induced by the high turbulence energy produced by local three dimensional flow structure, such as the secondary flow in meandering rivers. Then simple evaluation method for vertical velocity distribution variating by two dimensional model and the strength of the secondary flow by a one-dimensional model are proposed.

Key Words : BVC method, turbulence energy, bank erosion, one-dimensional model

1. 序論

2018年7月西日本豪雨では、河川沿いの主要道路が河岸 侵食等によって分断され、被害が時空間的に拡大した. 被害軽減対策のためには、大規模洪水時において河岸侵 食の危険場所の予測手法を確立することが喫緊の課題で ある.

これまで河岸侵食のメカニズムの解明のために多くの 研究が行われてきた.特に湾曲部では、遠心力の鉛直方 向の不均一さによる2次流が生じ、外岸に大きな流速が偏 ったために起きる、せん断力の増加と二次流の作用によ る河床洗掘により、外岸で河岸侵食が生じやすい¹⁰.河岸 侵食発生箇所の危険度に関する研究は、大規模な河川で 様々な方法を用いて評価する研究が多く行われている. 例えばGraft²⁾やSandra・Devid³⁰は、GISによって年代ごとの 河川の地形の変化を調査して河川をセルに分割し、所要 期間の洪水規模を表す値を考慮することによって河岸浸 食の発生確率を推定し、その適用性を検討している.ま たRosgen⁴⁰は河岸侵食の要因である河岸の特徴を河岸の

高さや根の深さ、根の密度、河岸の角度、土の種類で表 わしたBank Erosion Hazard Index(BEHI)と, 流れの特徴を 河岸近傍の鉛直流速分布とせん断力の大きさをモデル化 した, Near-Bank-Stress(NBS)を組み合わせたBEHI-NBS法 で各地点の特徴を把握し、河岸浸食速度を定量化してい る. 最終的に河岸侵食の危険度を6段階の指標で評価して いる. またBeeson⁵は植生がある場合とない場合での侵食 確率の違いに着目した結果、湾曲部に植生がある場合で はない場合と比べて、侵食確率は1/5程度に減少すること を示している. またBandyopadhwayのは広域の河岸浸食に 関して降雨,堤防の勾配,曲率半径,河川の勾配,河岸の 土の特性、河岸が植生でおおわれているのかどうか、人 的起源の八つの条件を考慮に入れたデータを用いて、現 地調査を行わずにBEHI-NBS法を用いた河岸侵食の危険 度の指標とほぼ一致する指標を示した. しかしこれらは 経験的な定性的指標であり、定量的指標とは言えず、例 えば雨量による河岸侵食の指標は土地ごとに土地利用に よって変わる等の課題を含む.また、調査した地点の数 が少なく、適用の際の精度についても不明な点が多い.



図-1 三篠川流域と河岸侵食箇所

このように河岸侵食の特徴を踏まえて定性的な評価法は あるものの、大規模洪水に対する中小河川の危険度予測 を精度よく検出するには十分でないと考えられる.本研 究では大規模な洪水発生時のデータ量の少ない一級河川 の上流部や二級河川を含めた広域の河川の河岸侵食危険 度について、BVC法を用いた洪水流の準三次元解析に基 づいて、河岸侵食の危険度の検出方法を検討することを 目的としている.

2. 現地調査結果

本研究の対象河川は2018年7月豪雨によって多くの河 岸侵食被害を受けた太田川流域の三篠川とする(図-1). 三篠川流域は主に関川, 栄道川, 見坂川などの15の河川 から構成され,総流域面積274.2km²,幹川流路延長42.4km となっている.現地調査は流域面積が三篠川流域の中で も比較的大きい三篠川,見坂川,有坂川,栄堂川,関川, 東川とし、現地調査では河岸侵食発生場所や縦断的な侵 食長さ、川幅を計測した. 河岸侵食箇所(図-1)は、現地 調査の結果、湾曲部外岸で全体の河岸侵食の64%と多く 発生したことが明らかになった.他は、湾曲部内岸が全 体の22%で、残りの直線部の河岸侵食は主に橋脚上下流 と段落ち部直下であった. 橋脚では迂回流が発生するこ とによって橋脚前後の侵食危険性が増加したことが原因 の一つと考えられる". 図-2に三篠川の河岸侵食長さLを 川幅Bで除した頻度分布を示す. L/Bが1を超えない場所 でピークを示しその後は減少していく傾向がみられた. また河岸侵食がもっとも大きい場所では川幅の約14倍と なる約300mから400mの侵食が発生していた.



図-2 三篠川流域の侵食長さL/川幅Bの頻度分布

表-1 RRIモデルでの計算条件

| 対象雨量 | XRAIN-GIS(250mメッシュ) | |
|-----------|------------------------------|-------------------------|
| 地盤データ | 50mメッシュ | |
| 土地利用 | JAXA日本域10m解像度 | |
| Cell size | 150m(201×146) | |
| 計算期間 | 2018/7/3 0:00~2018/7/8 23:00 | |
| パラメータ | 山地 | 平野 |
| 河道粗度係数 | 0.03 | 0.03 |
| 斜面粗度係数 | 0.1 | 0.1 |
| 土層厚 | 0.7 | 1 |
| 有効空隙率 | 0.4 | 0.4 |
| 側方飽和透水係数 | 0.2 | - |
| 鉛直浸透係数 | - | 5.57 × 10 ⁻⁷ |

3. 準三次元洪水流解析法を用いた河岸侵食箇所 の検出法の検討

(1) 解析方法·条件

河岸侵食の発生原因を明らかにするために



図-3 三篠川下流中深川でのRRIと観測流量の比較

BVC(Bottom Velocity Computation)法^{8,99}を用いて洪水流の 準三次元解析を行う.BVC法は大きなスケールの流れの 解析に適用できる水深積分モデルの枠組みで流れの三次 元性を考慮することができる準三次元解析法である.底 面流速は渦度,水表面流速および鉛直方向流速を用いて 式(1)で表わされ,これらに関する方程式と水深積分流速 場の基礎方程式が連立されて解かれる.

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3}\Omega_j h - \left(\frac{\partial Wh}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i}\right)$$
(1)

 $i, j = 1, 2(x_1 = x, x_2 = y, z: 鉛直方向), u_{si}: 水面のx_i$ $方向の流速, u_{bi}: 底面のx_i 方向の流速, <math>\varepsilon_{ijk}$: Levi-Civita 記号, Ω_i : 水深平均渦度, h: 水深, W: 水深平均の鉛直 方向流速, w_s, w_b : 水面, 底面の鉛直方向流速, z_s : 水 面高, z_b :河床高である. 解析区間は三篠川の見坂川合流 点下流 (22k) から栄堂川合流点上流 (17k) までの約5kmで ある (図-1).

BVC法の方程式は一般座標系で解かれる. 格子間隔は 横断方向に11分割、縦断方向に523分割とした。河道の地 形データは5mのLPデータを用いて作成した.解析の上流 端では助走区間として直線200mの矩形断面水路を設け, 下流端では縦断方向の水深勾配をゼロとした. 解析の初 期条件は、20m³/sの定常流とした.上流の流量ハイドログ ラフはRRI (Rainfall-Runoff-Inundation)モデル¹⁰⁾を用いて 算出した. RRIモデルは降雨を入力し降雨氾濫と洪水氾 濫を一体的に解析することによって、従来の分布型流出 モデルでは再現の難しかった低平流域での河川流量にお いて精度のよいモデルである.詳しい計算方法などは文 献¹⁰⁾を参照されたい.計算条件を表-1に示す.解析パラメ ータ(表-1)は流域で一定とし、三篠川下流2.6kに位置す る中深川水位観測所で観測された流量¹¹⁾とRRIによって 求めた流量が一致するように定めた(図-3). 解析流量ハ イドログラフは観測の流量ハイドログラフをおおむね捉 えていることから, 準三次元洪水流解析の上流端境界 (22k)をRRIの解析値(図-4)で与える.計算期間は流量ハ イドログラフの立ち上がりの7月6日12時から7月7日の12 時までとした.



図-4 RRIによる上流端(22k)の解析流量ハイドログラフ

(2) 解析結果と考察

乱れの局所平衡を仮定すると、各点の流速分布から乱 れエネルギーkは式(2)で算出される.

$$k = \frac{4C_h C_\mu}{5C_{\varepsilon}^{\prime 2}} (8\Delta u_i^2 - 7\Delta u_i \delta u_i + 2\delta u_i^2)$$
(2)

ここに、 $C_h = 2.25$ 、 $C_\mu = 0.09$ 、 $C'_{\varepsilon} = 1.7$ 、 $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ 、 $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ 、 $u_i : i$ 方向流速である. 一般底面流 速解法によって解析した乱れエネルギーkの最大値の分 布を図-5に示す.

河川に沿って右岸で侵食が起きた場所には赤色で,左 岸で侵食が起きた場所には青色で線を引いている.河岸 侵食が起きる箇所は他の箇所に比べ乱れエネルギーkが 大きくなることがわかる.この原因は、乱れが大きい箇 所では流れのエネルギーが消散する過程で土粒子が流出 し、河岸侵食が発生するためと考えられる.しかし、図-5の21kより上流の湾曲部外岸では乱れが大きいものの侵 食が起きていない.解析では、勾配が急なため流速が増 加し湾曲により乱れが大きくなっているが、現地調査よ り外岸沿いに樹木が繁茂していたことがわかっている. 今回の解析では、上流の外岸の樹木を考慮していないが、 洪水時には樹木により流速が低下するとともに、乱れエ ネルギーが減衰していたと考えられる.

乱れエネルギーは三次元的な流れによる渦の伸長により生産されることから、流れの三次元性の強さを表す指標として底面と水表面の流速差の大きさ $\delta u = \sqrt{\delta u_i \cdot \delta u_i}$ ($\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$)の縦断的な分布を調べた. 図-6に左岸右岸沿いの乱れエネルギーkと δu の縦断的変化を合わせて示す.また図-7(a)にその平面分布を示す.侵食が起きた箇所は白抜きの丸で表し、侵食が起きていない箇所は塗りつぶしの丸で表している.左岸右岸ともに、侵食発生箇所は河岸沿いの乱れの局所的な最大値から上流方向あるいは下流方向に発生している.侵食範囲の広がり方についてはさらなる検討が必要であるが、河岸沿いの乱れエネルギーの局所最大値は侵食危険箇所と言え、河岸沿いの乱れエネルギーの分布は水面と底面の流速差 δu でおおむね表現できることがわかる.



図-5 三篠川の乱れエネルギーkの平面分布と河岸侵食箇所



図-6 BVC法を用いた乱れエネルギーと水面と底面の流速差Su(左:左岸,右:右岸)

4. 二次元・一次元解析法を用いた河岸侵食危険箇 所の検出法の検討

乱れエネルギーを代表するδuを評価するためには、流 速鉛直分布の変形を解析する必要があるが、河岸侵食危 険度の検討範囲の広さと求められる精度を考えると、解 析精度は低くても、より計算負荷が小さい方法も有用と 考えられる.そこで、実務で用いられている二次元解析 や一次元解析結果から、これを評価する手法を検討する.

(1) 二次元解析法を用いた評価法

広域の範囲の検討においては、式(1)の右辺第3項が無視 でき**δ**uは水深積分渦度によって決定される^{8,9}.水深積分 渦度方程式において等流の流速分布からのずれが小さい として線形化すると、**δ**uは式(3)で表わされる¹².

$$\delta u_i - \delta u_{ei} = -\frac{h^2}{2\kappa\nu_{tb}}C_0\left(1 - \frac{C_0}{2\kappa}\right)U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$
(3)

ここに、 $\delta u_i - \delta u_{ei}$:水面と底面の流速差 δu の等流状態

からの変化量、 $\kappa = 0.4$, $v_{tb} = \kappa/6 u_* h = \kappa/6 C_0 U h$, $C_0 = u_*/U$, u_* : 摩擦速度, U:水深平均流速の大きさ($U^2 = U_i U_i$)である. また δu_{ei} は等流時の δu_i であり, $\delta u_{ei} = 3 u_*/\kappa = 3 C_0 U_i/\kappa$ である⁸⁰ので,式(3)は式(4)で表される.

$$\delta u_i = \frac{c_0}{\kappa} \left\{ 3U_i - \frac{\hbar^2}{2\nu_{tb}} \left(1 - \frac{c_0}{2\kappa} \right) U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right\}$$
(4)

式(4)の δu (= ($\delta u_i \cdot \delta u_i$)^{1/2})に関する一次近似は水深平 均流速の空間分布で表され、平面二次元解析の結果から 計算できる.

図-7,8は、BVC法によって算出した水面と底面の流速 差の大きさδuの平面的な変化と二次元解析法によって 算出したδuの平面的な変化,δuの縦断的な変化の比較で ある.図-7より平面的にみると二次元解析の結果もBVC 法によって求めたδuと対応しており河岸侵食箇所を表 しているといえる.図-8より左岸右岸で侵食が発生した 箇所はδuが比較的高い場所が多いものの低い場所も存 在しており、BVC法を用いてδuを算出した図-6と比較し て侵食発生箇所との対応が良くない.しかし左右岸を合 わせて見ると、δuが大きい場所では左右いずれかの侵食





図-8 二次元解析によって算出した河岸沿いのδuの縦断分布(左:左岸,右:右岸)

被害が生じていることがわかる. したがって、二次元解 析結果を用いた式(4)は河岸侵食の危険箇所を特定するに は課題があるが、弱点となる断面を検出するのには有効 と考えられる.

(2) 一次元解析法を用いた評価法

流域全体を対象にする場合や河道データがほとんどな い河川においては二次元解析も困難であり、一次元解析 に基づく河岸侵食危険度評価が必要と考えられる. 図-1

に示したように、河岸侵食の8割以上は湾曲部で生じて いるため、二次流強度が指標になると考えられる、一様 湾曲部では式(3)はδuと二次流強度q/rの関係式(5)で表 される.

$$|\delta u_i - \delta u_{ei}| = |\delta u_n| = \frac{\alpha}{2C_0} \left(1 - \frac{C_0}{2\kappa}\right) \frac{q}{r} \tag{5}$$

ここに δu_n :流線と垂直方向(主流に対して左方向が正) の水面と底面の流速差(二次流強度を表す), $\alpha = \kappa/6$, $C_0 = u_*/U, q$:単位幅流量, r:曲率半径(の大きさ)であ る. ここでは単位幅流量gと曲率半径rを用いたg/rで表 される二次流強度を湾曲部の侵食危険度の指標とする.

曲率半径rは湾曲部を一つの円周とみなした時の半径と した. 流量はRRIモデルで解析を行い, 区間内の最大の流 量を使用した.川幅Bは調査において特定した場所を,国 土地理院の平成30年7月豪雨発生後(7/10~14)の航空写 真¹³⁾とGoogle Mapの画像を使用し求めた.解析区間内で の一次元解析の縦断的な分布を図-9に示す.図-5~8と同 様に左岸右岸の河岸侵食発生箇所の番号を示している. 被害が直線部で生じた左岸の②と右岸の⑤以外は、比較 的g/rが高い場所で侵食が起こることが表されており, 一次元解析からq/rを用いておおむね被災箇所を表現で きることが分かる.

RRIモデルの計算結果を用いて三篠川流域全体でq/r の分布と河岸被害の関係を調べた.6つの対象河川におい て区間を侵食間隔の最小値で区切った. (三篠川:360m. 関川:160m, 栄道川:110m, 東川:260m, 有坂川:400m, 見坂川: 434m). 対象区間ごとの代表点はq/rが最も大き い場所とした.

図-10はq/rがある値を超過した時の侵食被害の発生 確率を示しており、データラベルがg/rの超過件数を示 している. 例えば、q/r > 1.0の地点数は全体305地点の うち56地点あり(超過確率=56/305=18%),そのうち41%の



図-9 q/rの縦断分布と河岸侵食箇所の比較

地点が侵食被害を受けたことを示している. 図-5,6に示した準三次元解法と比べ,詳細な発生確率の精度は低いものの一次元解析から被災箇所の傾向はある程度説明できる.

5. 結論

本研究では現地調査によって2018年7月豪雨によって 被害を受けた場所を,解析によって河岸侵食の原因を明 らかにしながら,河岸侵食の危険度を検出する方法を検 討した.以下に本研究の主要な結論を述べる.

①現地調査より,河岸侵食は主要河川の上流域や支川で 多く見られ,主に湾曲部の外岸で発生したことを明らか にした.

②BVC法を用いた解析より,湾曲部や急拡部などの河岸 侵食の被災箇所では,局所的に流れの三次元性が強く, 乱れエネルギーが大きい箇所で河岸侵食の危険性が高く

なることを明らかにした.

③二次元解析法の結果を用いた流れの三次元性の簡易的 推定法より,流速分布が変形しやすい箇所において平面 的に河岸浸食が起きやすいことを示した.

④一次元解析を用いた検出法では直線部の侵食以外の被 災箇所の傾向はある程度説明できる.また指標q/rは大き くなるほど河岸侵食の発生確率が増加することを示した.

謝辞:三篠川の洪水流解析に用いたLPデータは広島県から提供いただきました.深く御礼申し上げます.

参考文献

- Blanckaert. K.: Saturation of curvature-induced secondary flow, energy losses, and turbulence in sharp open-channel bends: Laboratory experiments, analysis, and modeling. Journal of geophysical research, Vol.114, F03015, 2009.
- Graft, W.L.: A probabilistic approach to the spatial assessment of river channel instability. Water Resour. Res. 20 (7), pp. 953-962,1984.
- Sandra, J.W., David, J.G.: A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated River Tummel,





Scotland. Regul. Rivers Res. Manag. 16, pp. 127-140, 2000.

- Rosgen, D.L.: A practical method of computing streambankerosion rate. Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25 to 29, 2001, Reno, Nevada
- Beeson. C.E., Doyle. P.F.: Comparison of bank erosion at vegetated and non-vegetated channel bends. Water resources Bulletin, Vol. 31, No.6, 1995.
- Bandyopadhway, S., Ghosh, K., Kumar, D.S.: A proposed method of bank erosion vulnerability zonation and its application on the River Haora, Tripura, India. Geomorpholigy, Vol 224, pp. 111-121, 2014.
- 和田高宏,竹林洋史,久加朋子,眞間修一,藤田正治,岡本隆明,戸田圭一:橋脚周辺に発生する迂回流の流れと河岸侵食特性,土木学会論文集B1(水工学)Vol.71, No.4, pp. I_895-I_900, 2015.
- 8) 内田龍彦,福岡捷二:非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面 流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用,土木学会論 文集B1(水工学)Vol.71, No.2, pp. 43-62, 2015.
- 内田龍彦,福岡捷二:浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法,土木学会論文集B1(水工学) Vol. 68, No.4, pp. l_1225-l_1230, 2012.
- 佐山敬洋,建部祐哉,藤岡奨,牛山朋來,萬谷敦啓,田中 茂信:2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾 濫予測,土木学会論文集B1(水工学)Vol.69, No.1, pp. 14-29, 2013.
- 広島県:平成30年7月豪雨災害を踏まえた今後の水害・土 砂災害対策のあり方検討会,第1回河川・ダム部会,配布資 料,2018. <u>https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/99/arik</u> atakento.html (2019.1.参照)
- 12) 立山政樹,内田龍彦,福岡捷二:底面境界が大きな勾配を 有する河口砂州周辺の三次元流れと河床変動の解析法,土 木学会論文集B1(水工学)Vol.72, No4, pp. L_835-L_840, 2016.
- 国土地理院:平成30年7月豪雨に関する情報,空中写真, 2018年7月9日~14日.
 <u>http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html</u> (2019.1.参 照)

(2019.4.2受付)