中小河川における河道内脆弱点の 水理学的推定の試行

HYDRODYNAMICS ESTIMATION OF WEAK SECTION IN RIVER OF SMALL AND MEDIUM SIZES

安田 浩保¹・五十嵐 拓実²・安田 晃昭³・中土 紘作³ Hiroyasu YASUDA, Takumi IGARASHI, Teruaki YASUDA and Kohsaku NAKATSUCHI

¹ 正会員 博(工学) 新潟大学准教授 災害・復興科学研究所(〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)
² 学生員 修(工学) 新潟大学大学院 自然科学研究科(〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)
³ 正会員 (株) 安田測量 技術推進室(〒 322-0001 鹿沼市栃窪 1164 番 17)

On rivers of small and middle sizes in Japan, spatial information of river geometries and hydrological records for understanding basic characteristics of rivers have not been accumulated, river management officers can't decide a priority of river improvement works based on an objective index. Especially it is quite difficult to immediately estimate damages of the area stricken by a heavily flood disasters. In this study, authors show that spatial data which are freely distributed on the internet can be extracted river geometries for conducting 2-dimensional hydraulic calculation to estimate variation of water level and deviation of river bed. This study was also proposed that variance of time integrated friction velocity can presume weak sections which will be damaged on heavily flood.

Key Words: weak section, Takeshi river, Kanto Heavy Rainfall 2015, iRic

1. はじめに

我が国の都道府県が管理者を担う多くの中小河川で は、河道の幾何学形状の把握のための地理空間情報の 整備は遅れ、また、流水の挙動の把握に不可欠となる 水文情報の蓄積は極めて乏しい。このため、発災後に 第一に実施される被災状況の把握、それに続く復旧対 策の円滑な展開を極めて難しくさせている。また、平 常時における効果的かつ効率的な河川の整備や維持管 理の推進には、客観的な指標に基づいた優先順位の決 定が望ましい。しかし、先述したように河川の基本的 な性質の把握において不可欠となる地理空間情報と水 文情報をはじめとした基盤情報が乏しいことが阻害要 因となり、事業の優先順位などの根拠となる客観的な 指標を模索する目立った動きは今のところ見られない。

著者の一人¹⁾は、平成23年新潟・福島豪雨において 計画規模を大幅に上回る洪水に見舞われた五十嵐川を 対象とし、その洪水による護岸などの河川構造物の被 災箇所と時間積分された摩擦速度の大小関係は良好に 一致することを報告している。その後、重枝ら²⁾は彦 山川における護岸被災の説明変数として時間積分され た摩擦速度が有効であることを報告している。河道内 の脆弱箇所を推定する水理学的な指標の一つとして時 間積分された摩擦速度が有用であることが裏付けられ たものの、現段階では適用事例はこれらの二例に限ら れる。そのうえ、時間積分された摩擦速度が相対的に 大きな箇所が被災箇所と一致することが示されただけ で、具体的な閾値は示されていない。

前出の五十嵐川は平成16年と23年に大規模洪水に 相次いで見舞われたため、時間積分された摩擦速度の 算定に必要となる空間情報と水文情報が偶発的に存在 していた。しかし、一般的には五十嵐川のような都道 府県が管理者を担う河川における地理空間情報の整備 と水文情報の蓄積は皆無と言っても過言ではなく、今 後もこれらの積極的な整備と蓄積は期待できない。

中小河川は、我が国の全体の流路延長の90%ほどを 占めるものの、流路延長に比して事業予算は潤沢とは 言えず、効果的な防減災の実現のためには中小河川に おける脆弱箇所の把握や推定が望ましい。本研究では、 中小河川における河道の脆弱箇所の推定の試行として 以下を実施した。まず、インターネット上に一般公開さ れるようになってきた細密な地理空間情報から水理解 析に適した河道の幾何学形状の抽出を行った。続いて、 この幾何学形状に基づく水理解析から得られる種々の 水理量のうちどれが被災箇所を適当に説明するかを調 べた。本研究では栃木県央部を貫流する武子川を対象 とし、平成27年9月の関東地方を中心とした豪雨によ り、湾曲部では堤防天端に達するほどの顕著な堆積や 固定化していると見なされた砂州が消失するほどの活 発な河床変動が生じ、多数の区間で護岸が大破した。

2. 対象河川の概要と幾何学形状の抽出方法

(1) 武子川の概要と対象河川とした理由

武子川は源流を日光山中に発し、その後、栃木県の ほぼ中央部を南下して思川の支川の姿川に合流する流 域面積が34km²、流路延長が約20km、平均的な河床 勾配が1/150、平均的な流路幅が15mほどの小規模と 言ってよい河川である。武子川は栃木県が管理し、同 県はその計画流量を150m³/sと公表している。武子川 は区間の全体を通して概ね掘り込み型の河道である。

平成27年9月の関東地方を中心とした豪雨は、鬼怒 川が破堤して広範囲が氾濫した茨城県だけでなく、栃木 県内の中小河川に対しても甚大な被害を及ぼした。こ の中でも、栃木県のほぼ中央部に位置する武子川とこ れと並行して流れる黒川の被災は著しく、どちらの河 川でも所によっては今次洪水に依って堆積した土砂が 堤防天端に到達するほどの活発な河床変動が見られた。

著者の一人は五十嵐川を対象とした河道内の被災要 因の推定およびそれを適当に説明する水理量がどれで あるかを以前に研究し、河道形状の測量成果に基づい た平面二次元の水理解析が実施されて摩擦速度が見積 もられれば被災要因を概ね推定できることを示した。黒 川はその下流区間での計画流量が1200m³/sとされ、五 十嵐川と黒川の規模はほぼ同程度であるなどの共通点 が多く見られ、黒川を対象として以前の成果の検証の 立場からの研究も重要である。その一方で、武子川のよ うなさらに小規模に分類される河川において横断測量 などの地理空間情報が整備されていることは稀で、こ のことが主因となり、そもそも小規模の河川を対象と した平面二次元の水理解析の前例は僅少である。本研 究では、水理解析が要求する河道の地理空間情報が存 在せず、直ちに水理解析の実施が難しい武子川を対象 とすることとし、全長 20km のうち中央区間の 10km を 対象区間とした。

(2) 対象洪水の要因となった降水現象

平成27年9月の関東地方を中心として豪雨の特徴の 一つは、栃木県の北部から中央部にかけて線状降雨帯 がおよそ6時間にわたり停滞したことである。図-1に 東京大学が運営している DIAS³⁾から取得したXバン ド雨量レーダーの地表雨量を9月9日0時から48時間 分の累積をした結果を示した。同図から栃木県の北部 から中央部にかけて南北方向におよそ60km、東西方向 に20km もの範囲で48時間の累積雨量が500mmを上 回る局所的な降雨帯が存在し、武子川の集水域がほぼ そこに内包されていた事が分かる。

紙面の都合で詳細は割愛するが、図-2 に示した AMeDAS から得られた時間雨量に基づいて線形の貯 留関数法による流出解析を行った。その結果、武子川 における洪水の継続時間はおよそ 40 時間程度でその最 大流量は 180m³/s 程度と推定された。



図-1 X バンドレーダにより推定された 48 時間の累積雨量



 図-2 AMeDAS (鹿沼観測所) および X バンドレーダにより 推定された 48 時間の地点雨量

(3) 対象洪水による武子川の被災概要

本研究で対象としたおよそ 10km の区間では、ほと んど全ての箇所で水位が堤防天端高さまで上昇して河 積が満杯となり、正確には把握されていないが数多く の断面において溢水が発生したことを著者らが独自に 実施した発災後の現地調査により確認している。

計画流量に匹敵する規模の流量の流下が容易に想像 され、図-3に青色と赤色の丸印で示したように栃木県 が復旧対象と認定した被災箇所がわずか10kmほどの 区間中に20カ所に上った。これらの被災要因は、大き く二つに大別され、一つは図中に青色の丸印で示した 溢水による堤内地から河川に向かう浸食を起因とした 護岸の倒壊、もう一つは、赤色の丸印で示した河道内 の変動が活発な箇所で共通的であった護岸の基礎部分 の弱体化を起因とした護岸の倒壊である。この他にも、 明瞭な倒壊や大破には至らなかったものの、石積の接 合面に連続した亀裂が生じ、今後の出水により容易に



図-3 武子川流域の標高図(国土地理院 5m DEM)および被 災箇所(赤色の丸印が基礎からの護岸の破損、青色の丸 印が溢水による破損の箇所)

破壊や倒壊に繋がることが予想される護岸の箇所が多 数見られた。また、このような人工構造物の破損など 以外の目立った河道内の変化としては、洪水前には護 岸に沿った川幅の数倍程度の長さの明瞭な交互砂州が 洪水後には全く視認できないほどに流失している区間 が見られたほか、湾曲部の内岸には堤防の天端高に達 するほどの堆積する箇所が複数見られ、対象区間の全 体を通して河床の変動が活発であったことが窺えた。

(4) インターネット上に公開されている空間情報に基 づく幾何学形状の抽出

一般的に河川の流況の把握を目的とした平面二次元 の水理解析を実施するためには、縦断方向に一定間隔 で計測された横断測量およびその測量測線の平面座標 が必要となる。前述までの通り、武子川にはこのよう な地理空間情報は存在しない。そこで、本研究では国 土地理院が電子国土 web⁴⁾としてインターネット上に 公開している地理空間情報に基づき、以下の手順によ り武子川の幾何学形状の抽出を試みた。

まず、電子国土 web から 5m 間隔の DEM を入手し、 図-3の右側に示した標高図の陰影図を作成した。つぎ に、この陰影図上において視認できる武子川の平面形 状の位置座標の読み取りを地形図と見比べながら行っ た。同図中の水色の実線が位置座標の読み取り位置で、 左右岸の位置を図-5のように数値化した。

河道内の標高は、前述した 5m 間隔の DEM を用い ることとした。武子川の平均的な川幅が 15m 程度であ ることから、この DEM から一つの横断面あたりに概 ね3から4個程度の標高値が与えられる。 上記までに抽出された武子川の幾何学形状であるが、 まず、平面形状は、図-3に示したように電子国土 web の基図に示された水色の河道と一致する事を確認する とともに、現地踏査による検証を行い、妥当性が認めら れると判断した。また、河道内の標高値については直 接的な検証が難しいものの、図-4に示した各横断面に おける最深河床の縦断勾配はおよそ1/125となり、栃 木県が公表する資料および対象区間の堤内地の勾配と 概ね一致するほか、図-5の最上段に示したようにどの 断面でも左右岸に比べて流心付近が最低標高となるこ とが確認され、これらを総合して妥当と判断した。

3. 水理解析

五十嵐川と比べると、武子川は、圧倒的に地理空間 情報と水文情報に乏しく水理解析の実施には不利であ る。本研究では、前章までに得た地理空間情報と水文 情報に基づいた水理解析から、武子川における被災実 績とその要因、さらには河道内の脆弱点の推定がどの 程度可能となるかを試みる。

(1) 数値解析モデル

河道内の流況の把握は、平面形状や縦断勾配などの 幾何学形状だけからは難しく、これらの幾何学形状に 対応して決定される流水の挙動は水理解析に基づいて 把握することが適当である。河岸に沿って配置される 護岸の被災要因および脆弱点の推定が本研究の目的で あり、それには平面2次元の水理解析を選択すること が望ましい。武子川は図-3中に水色の実線で示したよ うに10kmほど区間内に複数の湾曲部が存在するため、 一般座標による境界適合の導入が好ましい。本研究で は、一般座標による境界適合に導入した平面2次元の 河床変動を含む水理解析を実施することとし、その数 値解析モデルにはiRIC⁵⁾に同梱させる平面2次元解析 のソルバーである Nays-2D を用いた。

(2) 抽出した幾何学形状に基づく水理解析の計算点配置

一般座標の導入は効率的かつ対象に忠実な計算点配 置が実現できる一方で、計算点配置によってはしばし ば支配方程式を満足しない解を与える。本研究では武 子川の計算点配置を星野・安田⁶⁾が提案する方法に基 づいて行い、その配置間隔は、横断方向は5m程度、縦 断方向は20m程度となるように設定した。

(3) 計算条件

本研究において実施した水理解析では、下流端の水位 は等流水深を与え、上流端には前述した簡便な流出解析 から得られた値を参考にし、洪水継続時間を40時間、最 大流量を計画流量の150m³/s、洪水波形をsin²とした ハイドログラフを与えた。区間全体の平均粒径が実測の 結果10cm 程度であることを踏まえ、Manning-Strickler



図-4 武子川の最深河床、最大流量時の水位、天端高の縦断 図(各値とも平均河床勾配 1/125 を差し引いている)

式から求めた Manning の粗度係数である 0.026 を与え た。時間分割の間隔は 1 秒とした。

五十嵐川を対象とした被災箇所の推定のための水理 解析¹⁾は固定床として実施した。本研究では、五十嵐 川の前例にならった固定床に加え、移動床の計算も行っ た。また、各計算点に与える標高値は5m間隔のDEM から推定した値を与える場合と、同一横断の中の最深 河床をその横断面の全てに与えて矩形断面とした場合 の二つを行った。固定床と移動床、推定断面と矩形断 面の2つずつを組合せた合計4つの条件の水理解析を 実施した。

(4) 設定した水理条件および計算点配置の妥当性

図-4 に移動床かつ推定断面を与えた水理解析の結果 のうち最大流量が出現する計算開始から20時間後の流 心における水位の縦断図を青線で示した。まず、逆勾 配となる水面形や不自然な振動は見られず、一般座標 による境界適合が適切に機能しているものと判断でき る。また、上述したように本研究の対象区間において 堤防天端に達する水位であったことが推測されており、 同図に緑線で示した堤防の天端高と青線の水位はほぼ 対応し、設定した水理条件および計算点配置は合理的 であると判断される。

4. 被災実績を適切に説明する水理量

(1) 被災箇所の推定に適した解析条件の選定

本研究では、まず、著者らの先行研究を踏襲し、固 定床の水理解析を推定断面と矩形断面のそれぞれにお いて実施した。紙面の都合で図表掲載を含む詳細につ いては割愛するが、これらの固定床かつ推定断面と矩 形断面の2つの条件の計算結果からは被災箇所におい て活発な河床変動が生じるような実現象を良好に説明 するような優位な結果は得られなかった。

武子川の平均的な川幅は 15m 程度であるものの、容 易に入手できるのは 5m 間隔の DEM であるため断面 形状の推定には曖昧さが残る。そこで、つぎに、河道の 幾何学形状と流水と流砂の均衡の結果として適当な河 床形状が得られ、その結果、被災箇所や脆弱点が適当 に推定できることを狙い、移動床かつ矩形断面とした 水理解析も実施した。その解析結果は、全体的に河床 変動量が実績に比べて明らかに小さく、被災実績の周 辺でも活発な変動が見られないものとなった。このこ とは、例え武子川のような規模の小さな河川において も流れを拘束する河道の平面形状と大まかな流れのエ ネルギーの規模を決定する縦断方向の勾配だけからは 河床変動を適切に評価できないことが推測される。ま た、河道の横断方向の勾配は、最終的な河床変動量に 対し、河道の平面形状と縦断方向の勾配と同程度の貢 献を果たすことが推察され、河道内の被災過程の把握 や脆弱点の推定には少なくとも平面二次元の水理解析 が必要となることを示唆する。

上記の3つの条件に比べ、移動床かつ5m間隔のDEM からの推定断面を与えた水理解析からは有意な結果が 得られた。紙面の都合により、10kmの解析範囲のうち、 その下流端から 5.5 から 7km および 8 から 9.5km の区 間の結果を図-5のa)とb)として示した。ぞれぞれ上 から1段目が河床位、2段目が初期からの河床変動量、 3段目が合成流速および4段目が時間積分された摩擦 速度の全区間の平均値からの偏差を示している。ここ で、時間積分した摩擦速度は、著者らの先行研究と同 様¹⁾に各計算点毎に流下方向とその法線方向のエネル ギー勾配に基づいた摩擦速度を水理解析の開始時刻か ら終了時刻まで時間積分したもので、図-5のa)とb) のそれぞれの上から4段目は、全ての計算点毎に求め られた時間積分された摩擦速度の平均値と各計算点毎 の時間積分された摩擦速度の偏差を表している。また、 図中の赤色の丸印は、著しい洗掘のために護岸の基礎 部が破損した箇所、青色の丸印は、溢水により護岸の 背後から侵食が進み護岸が破損した箇所である。

移動床かつ推定断面とした水理解析から有意な結果 が得られたとした最も大きな理由は、図-5のa)とb) のそれぞれの上から2段目に示した初期からの河床変 動量を著者らの現地踏査から得た実河川の実績と照合 したところ、各図中の赤点線で囲った箇所を除き、そ れ以外の箇所では、薄い橙色で示した洗掘傾向、白色 で示した変動なし、青灰色で示した堆積傾向が定性的 に一致したためである。また、各図中に赤色の塗り潰 しの丸印で示した河床の洗掘を起因とした基礎からの 護岸の破損が確認された全ての地点では、水理解析か ら得られた河床変動量は橙色で示される明瞭な洗掘と なったことも解析結果を支持する理由である。

これらのことは、5m 間隔の DEM から抽出のため一 つの横断断面あたり3から4個程度しか標高値が配さ れないことに対し、推論の域を脱さないものの、概ね 妥当であるとの判断を与える。

(2) 護岸の被災可能性および脆弱箇所の推定に適した 水理学的な指標

図-5中に赤色の丸印で示した河床の洗掘を起因とした基礎からの護岸の被災箇所は、上から2段目に示した初期からの河床変動量が洗掘を示す橙色に着色された箇所と良好に対応する。しかし、同図は、水理解析



図-5 河床位、初期からの河床変動量、合成流速および時間積分された摩擦速度の区間全体平均からの偏差

の最終時刻における変動量を示すものでしかなく、洪 水期間中に一時的に洗掘に転じた履歴を把握できない。 河床変動量に基づいて護岸の被災を判断するなら、そ の経時変化の把握が不可欠となる。

著者の一人は、洗掘と堆積の河床変動のうち、被災に 結びつきやすい洗掘の履歴を一つの図上で簡便に把握 する方法として、土砂輸送の強度の独立変数となる摩 擦速度を時間積分した値が適当であることを提案¹⁾し ている。この他に、流速の採用も考えられるが、図–5 に示したとおり、河床変動量と流速の間には明瞭な対 応はないことが分かる。また、護岸の設計強度の基準 値として計画流量時における等流流速がしばしば用い られる⁷⁾のに対し、各横断面における合成流速の最大 値はそれぞれの断面の流心付近で生じるなどの幅広い 空間的な分布を持つことが分かる。設計の基準値とし て等流流速を採用することは、結果として、暗黙のう ちに直線かつ一様勾配かつ一様流路幅である流路形状 を仮定し、その設計強度は均一であることを意味する。

上記のような流速の空間分布は、不等流性の規模と 言い換えられ、河道の平面形状や縦横断方向の勾配に 由来して生じる等流からの偏差である。つまり、等流流 速に基づいて設計された流路においては、平均的な水 理量(等流流速がその代表)との偏差が正側に大きな ところほど被災可能性が大きくなると考えられる。こ の考え方に基づき、図-5の上から4段目に示した全て の計算点毎に求められた時間積分された摩擦速度の平 均値と各計算点毎の時間積分された摩擦速度の偏差を 指標とした護岸の被災可能性の有無について考察した。

a) 護岸の被災可能性あり

図-5 中に赤色の丸印で示された護岸の被災箇所に おける時間積分された摩擦速度の偏差は、いずれも 0.7×10⁵以上となる共通点があった。一方で、この値を 上回るにもかかわらず今回の洪水においては護岸の被 災を免れた箇所も数多く見られた。等流流速を基準値 とした流路の強度は均一に設計されていると見なすと、 時間積分された摩擦速度の偏差が大きいにもかかわら ず護岸が未被災となった箇所は、今回の洪水ではたま たま被災を免れただけで、その被災可能性は今回の被 災実績の箇所と同程度と推測でき、安全側の判断とし ては河道内の脆弱点と言える。

解析区間の全区間における時間積分された摩擦速度 の平均値からの偏差を $\mathbf{20}$ -6のように度数分布として整 理した。この分布における 1 σ は 0.8×10⁵ 程度となり、 今回の洪水において護岸の被災が発生した箇所はこの値 に近く、少なくとも平均値からの偏差が 1 σ よりも大き くなる箇所は被災可能性が高いと判断すべきであろう。

なお、今回の洪水による溢水により護岸が被災した 箇所も多数見られた。その発生要因は、河積不足など の河道内の状況と背後地の地形特性などの要因を重ね 合わせて考える必要がある。このため、溢水による被 災推定は上述以外の別法を要すると考えられる。



図-6 時間積分された摩擦速度の平均値からの偏差

b) 護岸の被災可能性なし

前節の護岸の破損が生じた箇所に対し、護岸の破壊 が生じなかった箇所では、時間積分された摩擦速度の 偏差は0以下となる共通点があった。少なくとも時間 積分された摩擦速度の偏差が0よりも小さくなる箇所 は被災可能性が低いと判断すべきであろう。

5. おわりに

本研究では、まず、河道内の脆弱点の推定において 必要となる河道の幾何学形状が一般に公開されている 地理空間情報から抽出が可能なことを示した。つぎに、 主要な成果として、中小河川ほど不等流性が強いため、 復旧が必要なほどの被災可能性を有する箇所の推定は、 河道の幾何学形状からの推定は難しく、水理解析から 得られる時間積分された摩擦速度の偏差に基づく方法 が有用である事を示した。本研究の成果は、現状におい ては発災後と常時のいずれともで事業の優先順位を客 観的に判断できない課題の緩和への貢献が期待できる。

謝辞:本研究は、科研費 基盤研究 (A)(代表者 山田正) および河川整備基金 指定課題 (代表者 安田浩保)の支 援を受けて実施されている。また、栃木県県土整備部 からは貴重資料の引用の承諾を頂いた。新潟大学大学 院の斉藤充紀君と須田光千野君には資料整理などに多 大な尽力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 安田浩保,高橋玄,酒井公夫,竹村仁志,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
- 重枝未玲,秋山壽一郎,平松裕樹,松本拓磨,平成24年豪 雨災害時の彦山川の護岸・河岸の被災プロセスの検討,土 木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, pp.1399–1404, 2015
- 3) 地球環境情報統融合プログラム, http://www.diasjp.net
- 4) 国土地理院 電子国土 web, http://maps.gsi.go.jp
- 5) 北海道河川財団, http://i-ric.org
- 6) 星野剛, 安田浩保, 自然河川の水理解析における一般座標 格子が有する打切り誤差の理論的評価とその緩和手法, 土 木学会応用力学論文集, 第16巻, pp.I 573-I 582, 2013.
- 7) 中小河川計画の手引き(案), 1999年