

礫床河川における洪水時の河床付近の流れと土砂輸送の解析法の開発と実河川への適用

内田 龍彦¹

¹広島大学大学院 准教授 先進理工系科学研究科社会環境工学プログラム

気候変化などにより想定される洪水外力の増大に適応するため、大規模洪水外力に対する河川施設の治水機能を適切に評価することが喫緊の課題となっている。本研究では、河川実用的な平面二次元解析法の枠組において流れの三次元性が考慮できる底面流速解析法を開発し、乱れエネルギーを用いた河岸侵食発生危険箇所の検出方法を提案し、検討した。これを用いて、河川改修による河道の流下能力の量的・質的評価を行った。さらに、土砂洪水氾濫を引き起こす多量の土砂輸送を伴う流れの解析のために、現状の土砂輸送解析モデルの問題点を明らかにし、新しい混合粒径土砂輸送解析法を開発し、検証した。

キーワード：河岸侵食危険箇所，河道流下能力の量的・質的評価，土砂・洪水氾濫

1. 序論

気候変化などにより想定される洪水外力の増大に適応するため、大規模洪水外力に対する河川施設の治水機能を適切に評価することが喫緊の課題となっている。流域の多くが脆弱な地質であるマサ土に覆われる広島県では、豪雨時の土砂災害危険区域が多いだけでなく、上流部の礫床河川には洪水時に多量の土砂が流入し、災害を生じさせる危険性が高い。広島県では、近年の大きな土砂災害時の多くの河川被害を受け、礫床河川の土砂対策が課題であった。さらに、平成 30 年 7 月豪雨によって県内の多くの河川で甚大な被害を受けた。特に、石流と洪水流による土砂洪水氾濫被害や河岸侵食や橋梁破壊による交通ネットワークの寸断が広域に同時多発的に発生し、被害が時空間的に広がる相乗型豪雨災害が引き起こされた。このためには、洪水時の河道内の流れを適切に評価し、流れによって河道がどのように応答するのかを適切に予測することができる信頼度の高い数値解析モデルが不可欠である。

洗掘や浸食による河道応答は河底や河岸付近の流れの作用によって引き起こされることから、このようなモデルの信頼度は、河床抵抗の大きい礫床河川における洪水時の複雑な流れをどの程度適切に評価できるかにかかっている。近年、多くの河川において適用されるようになってきている非定常平面二次元解析法では流れの鉛直構造が考慮できないために、河道湾曲、蛇行部や構造物周辺の河底付近の流れを適切に解析できない課題がある。一方、三次元解析法は、計算コストが高いために、その適用は特定の区間や単純化された条件を対象とした解析に限定され、洪水時の土砂輸送解析には適さない。この

ため、礫床河川の三次元流れを適切に解析し、河岸侵食、洗掘被害を適切に評価できる実用的なモデルが求められる。従来の洪水流・河床変動解析では河道内で生じる様々なスケールの現象に対し、対象とする特定の現象に対して解析法が選定されてきた¹⁾。しかし、平面二次元解析法では流れの三次元性が重要となる水深程度の小さなスケールの現象を評価することができないが、小さな立方体で計算領域を分割する三次元解析法では大きなスケール現象を解析するには計算負荷が大きすぎる課題がある。河道内で生じる種々の現象間には相互作用があり、特に、河床変動がある場合、小規模河床波や構造物周辺の局所洗掘などの流れの鉛直構造に起因する水深スケール以下の三次元現象が河道全体の流れや河床変動に影響することが知られている。洪水時に礫床河道内で生じる現象は、洪水ハイドログラフや縦断面水面形、河床形状などの大きなスケール構造、河道平面形状の影響や交互砂州などの川幅程度のスケール構造、および構造物周りの局所洗掘や砂堆などの水深程度の小さなスケール構造が相互作用計にある多重スケール現象である²⁾。このようなスケール間の相互作用が強い現象においては、従来のスケール分離型の解析法では十分でない。このため、例えばある地点の洗掘、堆積対策を行う場合においては、対象とする区間のみでなく、その河川改修が河道全体の応答を考慮し、新たな問題などを引き起こさないように留意することが重要となる。このため、信頼性の高い河道応答解析のためには、このような礫床河川における多重スケール現象の相互作用を考慮する必要がある。

平面二次元解析において流れの三次元性を考慮に入れようとした試みはこれまでも多くある。西本・清水ら³⁾は一樣湾曲部の二次流モデルを流線曲率部に導入し、流

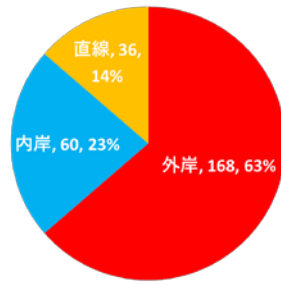


図-1 2018年7月豪雨による広島県内河川の
河岸侵食被害箇所

砂ベクトルを修正する方法を提案した。この方法は、湾曲二次流の効果を従来の二次元解析法に容易に導入できることから、これまでに国内外の多くの解析に適用されてきたが、一様湾曲部の二次流モデルに基づいたものであることと三次元流れが二次元流れに及ぼす影響が十分に考慮されていない課題がある。平面二次元解析法の枠組において、より一般的に流れの三次元構造を評価するものには福岡ら⁴⁾の静水圧準三次元解析法がある。また、三次元解析法の計算負荷を軽減するための静水圧三次元解析法もある⁵⁾。しかし、静水圧分布の仮定は構造物周辺などの複雑な流れ場の河床変動解析に適さないことが知られている⁶⁾。著者らは大きなスケールの流れの解析が可能な平面二次元解析法の枠組みで河道湾曲蛇行部や河川構造物周辺の三次元的な流れ構造、圧力の非静水圧成分、および礫床河川の底面の大きな抵抗と複雑な流れを解くことのできる一般底面解析法を開発してきた⁹⁾。

本研究では、まず平成30年7月豪雨時に広島県内の河岸被害箇所を調べ、その特徴を把握した。そして、河川実用的な平面二次元解析法の枠組において、河床抵抗の大きい礫床河川の流れの三次元性を考慮できる解析モデルを開発し、これによって河岸侵食発生危険箇所の検出が可能かどうかを検討した。さらに、土砂洪水氾濫を引き起こす多量の土砂輸送を伴う流れの解析のために、現状の土砂輸送解析モデルの問題点を明らかにし、新しい混合粒径土砂輸送解析法を開発し、検証した。

2. 2018年7月豪雨における河岸侵食の特徴

解析モデルの開発に先立ち、2018年7月豪雨によって広島県で発生した河岸侵食について現地観測及び航空写真によって調査を行った。調査項目は、侵食形態や縦断的な侵食長さ、川幅を調べた。侵食形態は侵食が発生した箇所の河川の形状を湾曲部外岸、湾曲部内岸や直線の三種類に分けて分類した。三篠川および根谷川では現地調査を、賀茂川、沼田川、瀬野川では国土地理院の災害後の航空写真によって侵食箇所の調査を行った。その結果、広島県の5つの河川すべてにおいて、8割程度の河岸侵食が湾曲部外岸で発生していることが分かった(図-1)。

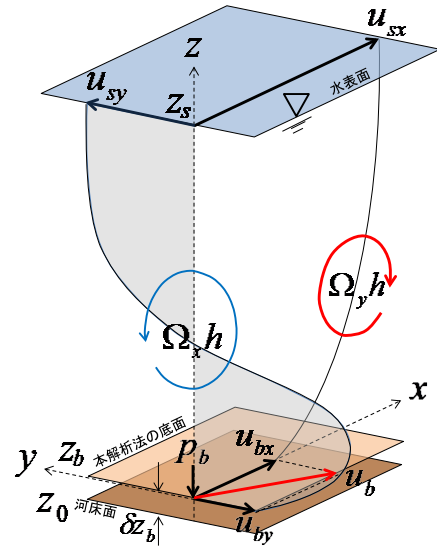


図-2 底面流速解析法の枠組

これは、湾曲部では二次流の発生に伴う三次元流れが発生するため多くの侵食が発生すると考えられる。残りの2割弱は直線部の段落ち下流や橋脚下流で発生している。いずれも、段落ち部によって乱れの供給や、橋脚によって迂回流などの三次元流れが発生し河岸侵食が発生したと考えられる。

3. 底面流速解析(BVC)法(準三次元洪水解析法)

底面流速解析(BVC)法の特徴と考え方を説明する。図-2にBVC法の枠組みを示す。本解析法では河床からわずかに上の面を底面として、渦度の定義式を水深積分すると(1)式の底面流速方程式が得られる。

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

ここに、 $i, j=1, 2$ ($x_1=x$, $x_2=y$, z :鉛直方向), δ_{zi} :水面と底面の x_i 方向流速の差, u_{si} :水面の x_i 方向流速, u_{bi} :底面の x_i 方向流速, ε_{ij} :Levi-Civita記号, Ω_i :水深平均渦度, h :水深, W :水深平均鉛直方向流速, w_s , w_b :水面、底面の鉛直方向流速, z_s :水面高, z_b :水面高である。

式(1)の右辺第一項に関してBVC法では、水平二方向の水深積分渦度方程式を水平方向の運動方程式と連立して解くことによって、水深スケールの渦の三次元挙動が解析される。式(1)の右辺第二項に関しては、浅水流の仮定を用いずに鉛直方向流速の場所的変化を連続式を用いて解き、これを用いることによって圧力の非静水圧成分を解析することを可能としている。BVC法では水深スケールの渦運動成分が水深積分渦度方程式を中心とした基礎方程式で直接解析される。水深スケールよりも小

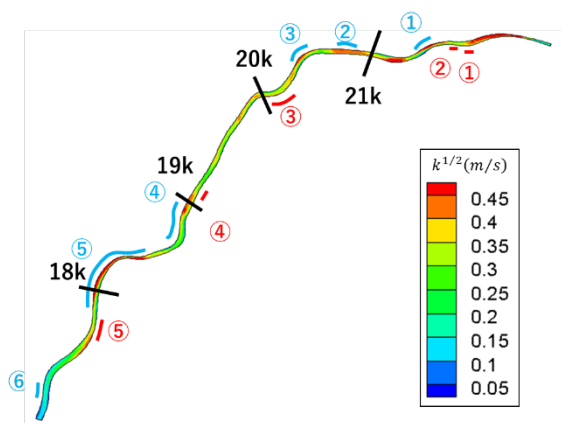


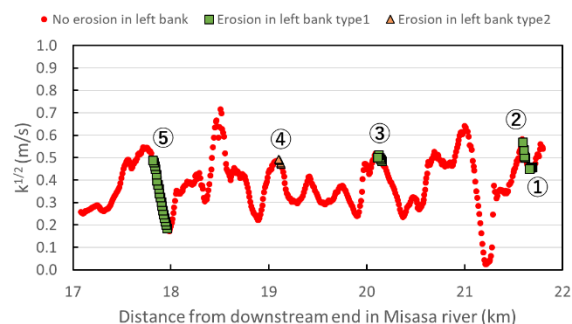
図-3 三篠川の乱れエネルギー $k^{1/2}$ の平面分布

小さな渦運動は渦度方程式等の分散項で評価されて、さらに小さいものは乱流運動として評価されている。即ち、BVC 法は開水路流における底面せん断力によって生じる水平方向渦度が水平方向流れによって変形し生じることが支配的な三次元流れが計算の主対象であり、水深に比べてかなり小さいスケールの三次元渦運動を扱う必要がある場合は、三次元解析法を用いる必要がある。解析法の詳細については既往の文献⁹⁾を参照されたい。

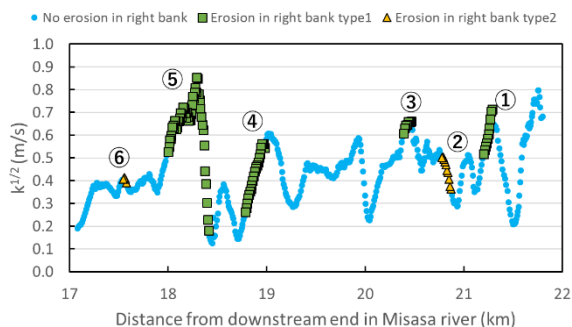
4. 洪水流解析に基づく河岸侵食危険箇所の検出法

2018 年 7 月豪雨の現地調査によって湾曲部や段落ち部などの流れの三次元性が大きくなる場所において河岸侵食が発生したことが明らかにされた。三次元流れのエネルギーは水深平均流速のエネルギーから生産され、より小さな乱れエネルギーを生産する。また、一般に、乱れエネルギーと関係の深い水面変動は河岸侵食を引き起こす外力であることが知られている¹⁾。このことから、河岸侵食は、流れの運動エネルギーの消散過程で生じると考えられる。実際、多くの河岸侵食モデルがエネルギー損失と関係づけられている¹⁾。そこで、本研究では準三次元解析に基づいて三次元流れから乱れエネルギーを推定し、それを用いた河岸侵食の危険箇所の検出に用いることができるかを検討する。

本研究では三篠川、瀬野川では平成 30 年 7 月豪雨、千曲川では令和元年台風 19 号、根谷川では平成 26 年 8 月豪雨、平成 30 年 7 月豪雨を対象として解析を行った⁷⁾。流量の計算は流出解析モデルの一つである RRI モデルを用いた⁹⁾。ここでは、代表例として三篠川において一般底面流速解析法によって解析した乱れエネルギーの最大値の分布を図-3 に示す。主に乱れエネルギーによる河岸侵食は 3 つの形態で生じると考えられる。第一に湾曲部などの二次流が発生する場所において、水平方向渦が伸縮・回転することによって三次元流れから乱れが生産



(a) 左岸

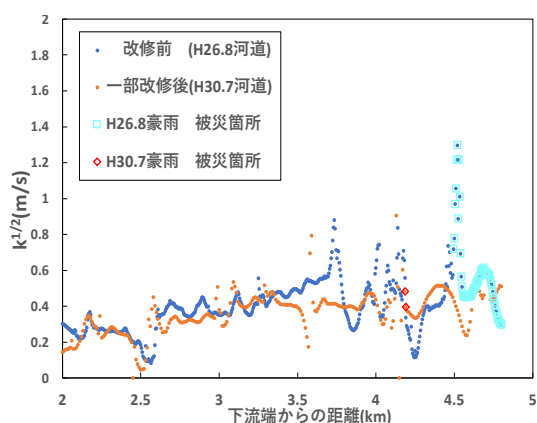


(b) 右岸

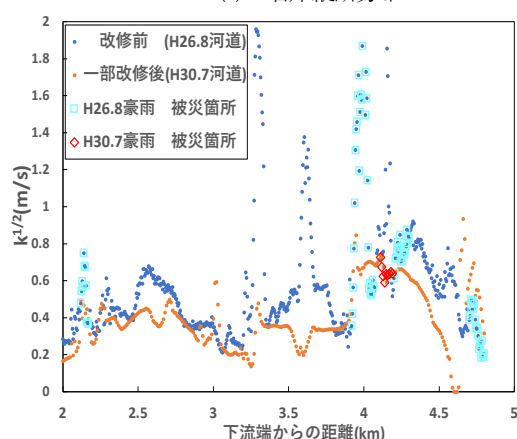
図-4 三篠川の乱れエネルギー $k^{1/2}$ の縦断分布

されたものである。第二に段落ち部などの河床勾配が大きくなる地点では水深平均流が大きくなるとともに底面せん断力が大きくなったものである。第三に橋脚などの構造物の影響で、水平方向渦が伸縮・回転することによって乱れが生産されたものである。図-4 に三篠川の左岸と右岸の乱れエネルギーの縦断分布を示す。左岸右岸ともに乱れエネルギーの値は、壁際のメッシュを除いて端二つの平均値を用いた。左岸右岸ともに河岸侵食形態にかかわらず河岸侵食は概ねどちらも乱れエネルギーのピークの上流もしくは下流方向で発生している。

以上より、乱れエネルギーは、湾曲部、堰下流、上流の勾配が大きい箇所、構造物の周辺で大きくなる傾向が示され、侵食被害箇所はいずれも乱れエネルギーが局所的に大きくなっている箇所を含むことが分かった。そこで根谷川において H26.8 から H30.7 で行われた河川事業区間において、河川改修が洪水流の流れ場の変化に与える影響を検討する。改修前・一部改修後の河道に既往最大流量を記録した H26.8 豪雨流出解析結果を用い、各河道の洪水流の流況を河川事業実施区間である 3.0～4.8km 区間において比較することで河川事業効果を評価をする。図-5 に乱れエネルギーの縦断分布と平面分布を改修前後で比較する。縦断分布を見てみると河川事業が行われた区間において、改修前と一部改修後で比較すると全体的に低減していることがわかる。主に右左岸の縦断分布のうち、3.5～3.8 km の乱れエネルギーが大きく低減しており、一部改修後の河道において改修前の最大 1/2 以下になっている区間も見受けられる。一方、4.2 km



(a) 右岸縦断分布



(b) 左岸縦断分布

図-5 改修前後の河道における乱れエネルギーの分布の比較

付近の上市井堰堤直下では全体的に値は低減したものの、一部改修後(H30.7)の河道で見ると0～4.8km区間では他の区間よりも比較的高い値であった。堰直下では流れの三次元性が高くなる傾向が見られ、河道の危険箇所の変化がしていなかったことが考えられる。平面分布より改修前の河道の被災箇所 42～4.3km 付近で護岸沿いに乱れエネルギーが低減しており、その 4.6km 付近においても同様に値が大きく減少している。以上より被災箇所付近での乱れエネルギーが減少し、流下能力の向上に対する効果が示された。

5. 河川に流入する土砂量評価法

2018年に発生した西日本豪雨により、広島県の多くの河川では土砂洪水氾濫により甚大な被害が発生した。これらの多くは河川上流の砂防堰堤に堆積した土石流堆積土砂が後続流の作用により流出し、これが下流河道の通砂能力を超えてしまったため、土砂洪水氾濫が発生したと考えられる。このため、流れによる砂防堰堤からの土

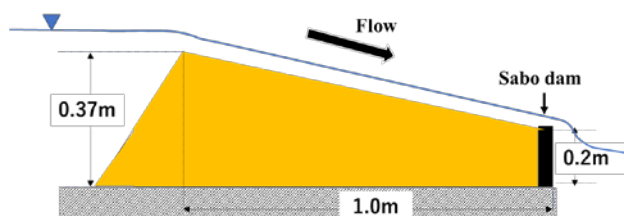


図-6 初期河床形状

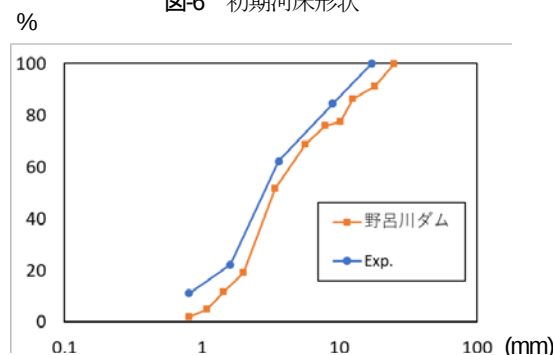


図-7 粒度分布

砂流出量と下流河道の通砂能力を適切に評価し、砂防堰堤の設置計画や下流河道の改修を行う必要がある。しかし、下流河道の計画において、上流にある砂防堰堤からの土砂流出量は適切に考慮されておらず、砂防堰堤の計画においても後続流による土砂流出量は考慮されていない。従来の混合粒径の河床変動解析法では交換層と呼ばれる河床表層の土砂が様に混合するコントロールボリュームの概念を導入し、河床変動量と粒度分布について河床が上昇する場合と低下する場合に分けて定式化した連続式が用いられてきた⁹⁾。しかし、交換層モデルは空隙率の変化と交換層の厚さの評価に課題がある。特に、土石流により砂防堰堤に堆積した土砂はコラストーンと呼ばれる巨石を含む幅広い粒度分布を持つ。そのため、砂防堰堤からの土砂流出量の評価には混合粒径による、粒度分布や堆積土の空隙率の変化やそれに伴う土砂堆積の変化⁹⁾を考慮することが重要と考えられる。ここでは、砂防堰堤からの土砂流出量現象を実験的に明らかにすることとその解析法を検討する。解析法において、オイラー型堆積モデル¹⁰⁾¹¹⁾を侵食過程に拡張し、掃流力から算出した流砂量式を組み合わせ河床変動解析法を開発し、混合粒径を用いた砂防堰堤流出実験を対象にモデルの検証を行った。

実験には、幅0.2 m、高さ0.6 mの右岸側面がアクリル板のコンクリート素材の直線水路を用いた。図-6のように水路に不透過型の砂防堰堤模型(0.2 m)を配置し、砂防堰堤上流に土砂を計画堆砂勾配(0.17)で堆砂させた。初期水深が0 m状態から一定流量(9.0 l/s)を流し、上流端から越流させた。時間軸は、下流端の砂防堰堤から水が流れ始めた時を0秒とした。混合粒径実験は水利条件と初期の堆積形状はH30年7月豪雨災害で被害にあった広島県呉市大屋大川上流の砂防ダムを参考にして決定している(図-7)。実験では5粒径を用いた。下流端の砂防堰堤直下

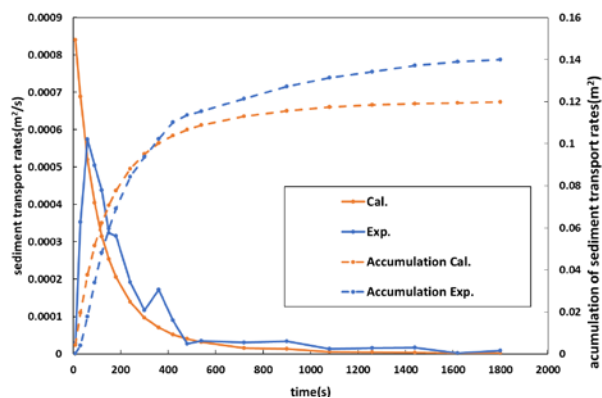


図-8 流砂量(一樣粒径)

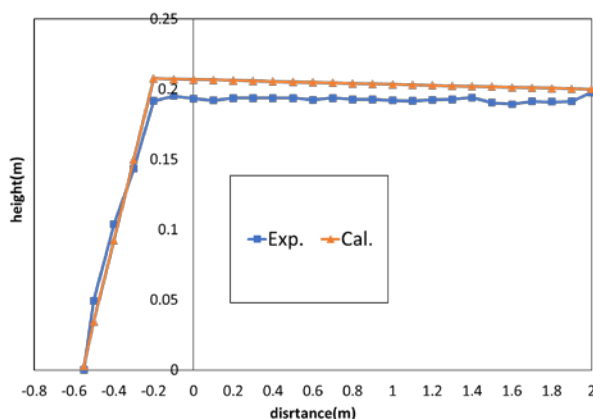


図-9 河床形状(一樣粒径)

で網を設置し、実験開始から180秒間、30秒ごとに流砂量を計測した。網で捕捉した流砂量は篩を用いて粒度分布を測定した。河床高の測定は、側面からの撮影による画像判定と通水前後にポイントゲージを用いて計測をした。砂防堰堤上流の堆積土の表層の粒度分布は通水終了後に撮影した画像により計測した。

混合粒径を用いた砂防堰堤からの土砂流出実験をするにあたり、一樣粒径を用いた予備実験を行った。一樣粒径実験においても河床がほぼ線形を保ったまま低下したため、解析では河床を線形として河床変化を下流端からの流砂量を用いて計算した。流砂量の計算では、河床勾配Iから等流を仮定して、掃流力を評価し、この掃流力を用いて芦田・道上の平衡流砂量式⁹⁾により流砂量を算出した。図-8, 9に示すように流砂量の時間変化と河床形状の計算値は実験結果を概ね表すことができている。

そこで、本研究では混合粒径の場合も等流仮定を用いて計算された流砂量を用いて解析を行うこととした。限界掃流力はEgiazaroffの式を芦田・道上が修正した式⁹⁾、流砂量式には芦田・道上式⁹⁾を用いる。河床高の変化には粒度分布による空隙率の時間的変化を考慮できるオイラー型堆積モデル⁹⁾を侵食過程に拡張し、掃流力から算出した流砂量式を組み合わせた河床変動解析法を開発し、混合粒径を用いた砂防堰堤流出実験を対象にモデルの検証を行った¹²⁾。

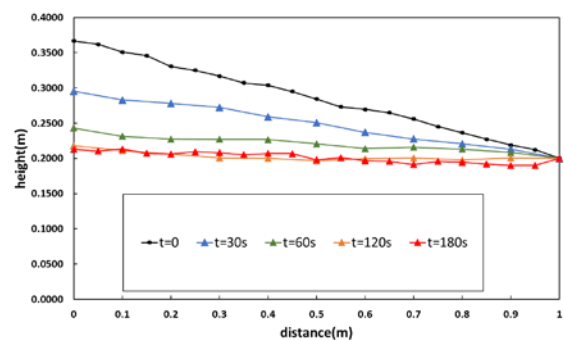


図-10 河床高の時間変化

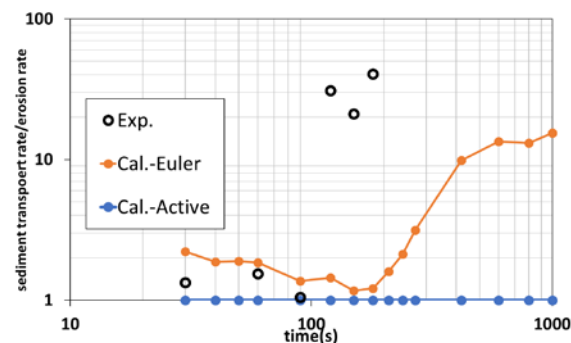


図-11 土砂流出量と侵食量の関係

図-10に河床形状の時間的変化を実験開始から180秒までの結果を示す。実験開始120秒ほどで河床形状はほぼ平坦となっている。また、河床形状はほぼ線形を保って低下していくことが分かる。図-11は土砂流出量と侵食量の比の時間変化である。ここで、土砂流出量は砂防堰堤下流で6秒間に流出した単位幅土砂量、侵食量は各計測時間の堆積が減少した部分の量とした。実験初期では土砂流出量と侵食量の比は2倍ほどであるが、100秒以降、数10倍となった。これは大きい粒子の間に充填された小さい粒子が流出し、骨格となる大きい粒子の移動がないため、侵食量がほとんどなくなるためと考えられる。120秒以降はほとんど河床高の変化がなくなるため、この現象が顕著に見られたと考えられる。土砂流出量と侵食量の変化の解析結果は、初期では実験値で一致が見られるが、120秒後から実験値では、土砂流出量が侵食量の20倍以上となっている。時間が経過すると、オイラー型堆積モデルの解析値でも侵食量に対する土砂流出量が10倍以上となった。一方、交換層を用いた既往の解析法では空隙率の変化に伴う体積変化が考慮できない。本解析では河床が安定状態になるまでの時間は解析値と実験値で異なること、土砂流出量と侵食量の比の時間的を再現することなどに課題を残したが、空隙率の時間変化による見かけの侵食量と土砂流出量を捉えることが出来た。これは、砂防堰堤からの二次流出による河道への細粒土砂の供給量を推定する上で極めて重要である。

6. 結論

現地調査によってH30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。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。BVC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。

次に、改修前河道(H26.8)と一部改修後河道(H30.7)を比較し根谷川の改修効果を検討した。まず、H26.8、H30.7洪水時の水位が再現できることと、また両洪水において侵食被害を受けた箇所は洪水時の乱れエネルギーが高い箇所であることを確認した。既往最大流量を記録したH26.8豪雨のハイドログラフが改修後の河道に流れた場合を改修前の場合と比較した結果、河川事業実施区間では乱れエネルギーが低減しており、河道内の危険箇所が低減していることを示した。また引堤による2倍程度の拡幅は水位のみならず、底面せん断力や乱れなど流れの3次元性からもたらされる河岸侵食の危険性も低減させることを示した。

下流河川の通砂能力の評価法として一次元河床変動計算法を用いて実験を対象に検証を行った。砂防堰堤からの土砂流出量の評価法においては、混合粒径による空隙率の時間的変化が考慮できるオイラー型堆積モデルを考慮した河床変動計算法を用いて実験を対象に検証を行った。混合粒径を用いた砂防堰堤からの土砂流出実験において、河床高は直線的に減少することが分かった。また、侵食量に対する土砂流出量は初期では2倍程度であったが河床変化がほぼなくなった100秒以降は20倍以上になった。砂防堰堤からの土砂流出量の評価法においては、オイラー型堆積モデルを侵食過程に拡張したモデルと掃流力から評価される流砂量式を組み合わせたモデルを用いた。河床変動、流砂量の時間的変化を概ね再現できた。河床が安定状態になるまでの時間は解析値と実験値で異なること、土砂流出量と侵食量の比の時間的を再現することなどに課題を残したが、空隙率の時間変化による見かけの侵食量と土砂流出量を捉えることが出来た。

参考文献

- 1) 水理公式集[2018度版], 土木学会, 丸善株式会社, 2019.
- 2) Fukuoka, S. and Uchida, T.: Toward integrated multi-scale simulations of flow and sediment transport in rivers, Journal of JSCE, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 69, No. 4, II_1-II_10, 2013.
- 3) 西本直史, 清水康行, 青木敬三: 流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算, 土木学会論文集, No.456/II-21, pp.11-20, 1992.
- 4) 福岡捷二, 渡辺明英, 西村達也: 水制工の配置法の研究, 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.27-36, 1992.
- 5) Uchida, T. and Fukuoka, S.: Numerical calculation for bed variation in compound-meandering channel using depth integrated model without assumption of shallow water flow, Advances in Water Resources, Vol.72, pp.45-56, 2014.
- 6) 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.
- 7) 永井秀和, 内田龍彦, 河原能久, 八木郁哉, 中野光隆: 礫床河川における河川改修後の流況改善効果の評価法-根谷川を対象にして-, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp.169-174, 2020.
- 8) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡奨, 牛山朋来, 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.
- 9) 林勇輔, 内田龍彦, 河原能久: 分級作用に伴う混合粒径土砂の空隙率と堆積変化に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 75 巻, pp.1_913-918, 2019.
- 10) 立石彩乃, 内田龍彦, 河原能久: 礫床河川における広い粒度分布をもつ河床材料の空隙率と土砂堆積高の解析法, 河川技術論文集, pp.95-100, 第 24 巻, 2018.
- 11) Uchida, T., Kawahara, Y., Hayashi, Y., and Tateishi, A.: Eulerian deposition model for sediment mixture in gravel-bed rivers with broad particle size distributions, Journal of Hydraulic Engineering, Vol 146, Issue 10, 2020.
- 12) 中島奈桜, 田丸雄大, 内田龍彦, 河原能久: 流れによる砂防堰堤からの流出土砂量の評価に関する基礎的研究, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp.615-620, 2020.