

急勾配河川の河床変動計算に与える給砂・流砂条件の影響

笹原克夫* 南 哲行** 仲野公章***

1. はじめに

砂防計画の検討や砂防施設の計画設計のために、水理模型実験と並んで一次元河床変動計算がよく用いられる。従来の河床変動計算においては、主に河床変動状況を見るために、掃流砂のみを対象とした流砂量計算が行われることが多く¹⁾、急勾配河川では、河床変動に寄与せず流下して行くだけと考えられている浮遊砂については、計算の中で取り扱わないことがほとんどであった。しかし、山地から海岸の漂砂域までの、いわゆる流砂系の土砂移動について検討する場合には、上流の砂防河川では河床変動に寄与せずとも、下流の緩勾配域において河床変動に寄与するような、細粒分の移動についても考える必要がある。このような細粒分は山地の急勾配河川においては浮遊砂として流下すると考えられるので、河床変動計算に浮遊砂の存在が及ぼす影響について検討する必要がある。またそれに関連して計算上の境界条件として与える流入土砂条件や、流砂量に大きな影響を与える河床材料の粒径も、河床変動計算に大きな影響を与えるといわれている。当研究においては平成7年7月の大災害²⁾を引き起こした姫川をモデルとして、河床材料の粒度分布、上流からの流入土砂量、流砂形態を変化させ、それらの条件が1次元河床変動計算の結果に及ぼす影響の大きさについて検討する。

2. 研究方法

2.1 計算方法

2.1.1 河床変動計算

姫川は、平均河床勾配が1/16ときわめて急峻であり、河口付近も河床勾配が1/100で、流れが射流であることから、等流計算による一次元河床変動計算を行った。

Influence of Sediment Condition to Riverbed Fluctuation Calculation of Steep River

まず、水深についてはマニング式と等流での流れの連続条件を組み合わせた下式により求める。

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i \cdot A \quad (1)$$

ここで n は粗度係数 ($m^{-\frac{1}{3}} \cdot sec$)、 Q は流量 (m^3/sec)、 R は径深 (m) であるが、ここでは水深に比べて川幅が広く水深にはほぼ等しいとみなせる。 i は勾配、 A は流下断面積 (m^2) である。

このように求めた水深より掃流力を計算し、それを用いて流砂量を求める。流砂量については掃流砂量と浮遊砂量を対象とし、混合粒径として計算した。掃流砂量については、芦田・高橋・水山式³⁾により求める。各粒径階に対する無次元掃流力は修正エギアザロフ式⁴⁾により算定した。浮遊砂量は芦田・道上式⁵⁾により算定した。浮遊砂の算定に必要な沈降速度については、Rubey の式⁶⁾により求めた。各々の式については参考文献を参照されたい。

上記により粒径階別の流砂量を求めた後、下記の河床の連続式より河床位を求める。

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} + \frac{1}{B_B(1-\lambda)} \frac{\partial}{\partial x} \{B_s(q_B + q_s)\} = 0 \quad (2)$$

ここで Z_B は河床位、 B_B は河床幅、 λ は河床の空隙率、 B_s は土砂移動に有効な河床幅でこの場合 B_B に等しいとする。また、 q_B 、 q_s は各々単位幅当たりの掃流砂量と浮遊砂量であり、各粒径階の値を合計する。上式の解は式から直接求めることができないので差分化して解く。

2.2 計算条件

計算対象区間としては、直轄区間（高田工事事務所管内）で、河口から距離11.0kmまでの区間とし、平成7年災害以降の計画改修河道断面を河道条件として与えた。図-1は姫川流域全体の平面図、図-2は計算対象区間の縦断図である。また、ハイドログラフは姫川の計画基準点である山本水位流量観測所（河口から7.2km地点）で計測された平成8年11月から平成10年10月の出水実測



図-1 姫川平面図

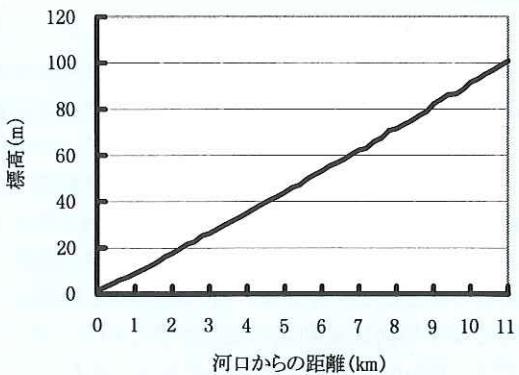


図-2 計算対象区間の縦断形状

データより計算対象ハイドログラフを作成した(図-3)。ただし、水位が非常に小さい時は流水が河道全体を流れず、流水幅が不明であるので流量の推定精度が悪い。よってそのような状態になる流量 $10\text{ m}^3/\text{sec}$ 以下の流量については除外した。本文川への流量配分は流域面積比によって行った。

2.3 検討ケース

今回の検討においては、河床材料の粒度分布、本文川上流からの流入土砂量、流砂形態の3種類の計算条件を変えてその計算結果への影響を検討した。

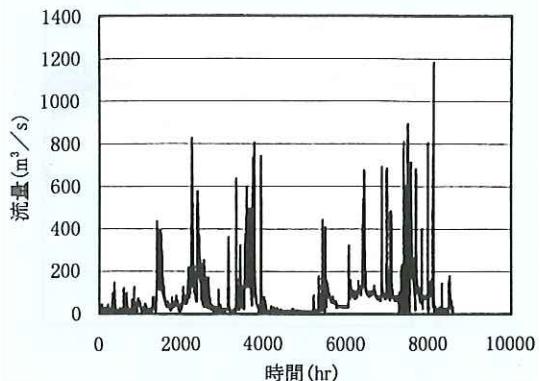


図-3 計算に用いたハイドログラフ(山本地点)

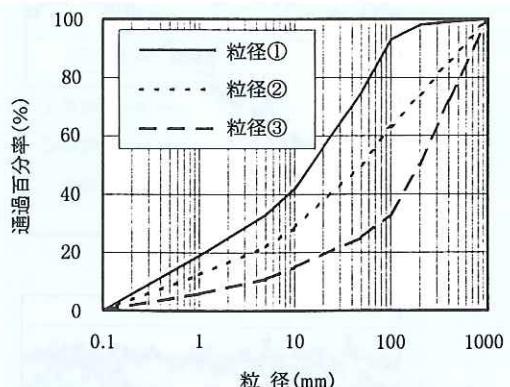


図-4 検討対象の粒度分布

表-1 本文川からの流入土砂量のケース
(単位: m^3 、空隙込み)

	流入土砂量①	流入土砂量②	流入土砂量③
姫川本川	0	500,000	2,000,000
横川	0	200,000	200,000
小滝川	0	500,000	500,000
根知川	0	300,000	300,000

まず河床材料の粒度分布については、河口から 11.0km 地点付近までの直轄河川区間の平成 3, 7, 8 年度の河床材料調査結果⁷⁾より、その分布範囲の最小側(粒径①: 平均粒径 37.3mm)、平均付近(粒径②: 平均粒径 155mm)、最大側(粒径③: 平均粒径 272mm)に粒度分布曲線を引き検討対象とした(図-4)。なお流砂量を計算する時には混合粒径として計算するが、その時の粒径階としては、0.1~1mm、1~5mm、5~10mm、10~50mm、50~100mm、100~200mm、200~400mm、400mm 以上とした。

次に本文川上流からの流入土砂量については、流入土砂がない場合(流入土砂量①)、平成 7 年

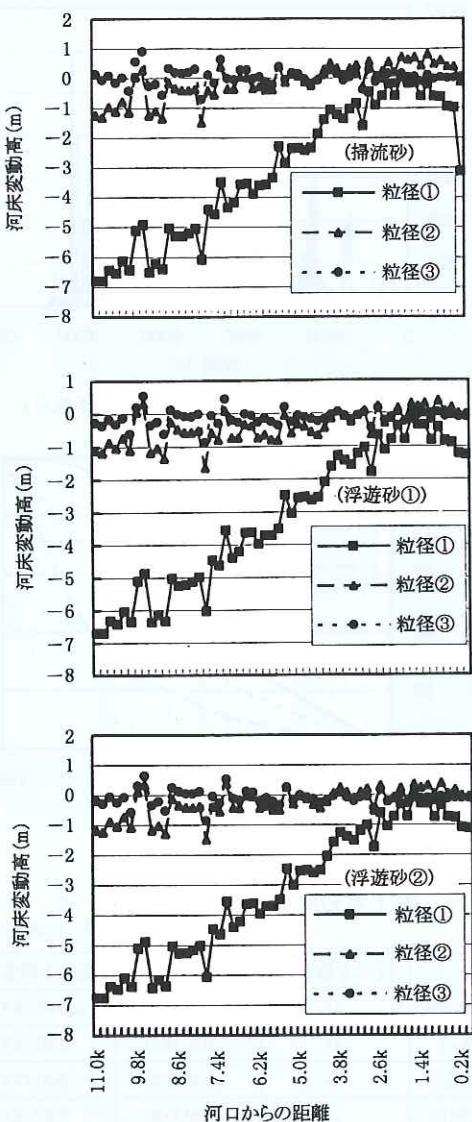


図-5 粒径の相違による河床変動状況の差異
(流入土砂量①)

災害時の実績を基に本川上流からの流入土砂量を少なく見積もった場合(流入土砂量②)、同じく多く見積もった場合(流入土砂量③)の3種類とした(表-1)。また流入土砂の粒度分布は河床材料と等しいものとした。

最後に流砂形態であるが、まず掃流砂のみを対象とする場合(掃流砂)、掃流砂のみならず浮遊砂をも対象とするが各粒径階においてRubey式により各粒径階の平均粒径に対して沈降速度を求め、芦田・道上式より浮遊砂濃度を求める場合(浮遊砂①)、浮遊砂を対象とするが通常よく行われる

ように最小粒径階のみを浮遊砂として計算する場合(浮遊砂②)、の3種類について検討した。つまり浮遊砂①については各粒径階毎に掃流砂で流れる成分と浮遊砂として流れる成分があり、水理条件によってその割合が変化する。しかし浮遊砂②についてはある粒径以下、今回は最小粒径階からのみ浮遊砂が発生し、それ以上の粒径のものは掃流砂としてしか流下しないとした。

3. 計算結果

3.1 納砂・流砂条件が河床変動に与える影響

まず粒径の相違が河床変動に与える影響について検討する。図-5は流入土砂量①(流入土砂量無し)の条件の下での粒径の相違による河口から11.0km地点までの河床変動状況を、流砂形態毎に整理したものである。これより流入土砂量がないと仮定した場合は、流砂形態が異なっても河床変動状況はほとんど変わらないこと、そして粒径が最も小さい粒径①の場合に侵食傾向が著しくなるが、中間及び最大粒径である粒径②、③はほとんど河床変動状況が同様で変動が小さいことがわかる。

次に、河床変動状況を一つのパラメーターで表すために、河口から11.0km地点までの河床変動高を積分して距離で除した平均河床変動高を定義する。次に流入土砂量①(流入土砂量無し)の条件下での河床材料の平均粒径と平均河床変動高の関係を、流砂形態別に図-6に示す。この図よりまず河床材料の平均粒径が小さいほど侵食深が顕著に大きくなることが分かる。特に粒径②と粒径①の間では平均河床変動高の変動が著しいことから、37.3~155mmの間に変曲点があり、それより小さい平均粒径では、平均粒径が小さくなるに伴って侵食深が著しく大きくなるが、平均粒径がそれ以上ではその変化に伴う侵食深の変化はそれほど大きくなりといえる。また流砂形態の差異が平均河床変動高に与える影響は小さいことから、浮遊砂を考慮した場合としない場合の河床変動状況はそれほど変わらないと考えられる。

なお平均粒径が150mm程度までは侵食深の変化が著しく、平均粒径がそれ以上であると侵食深の変化が小さくなることについて、ここでその理由を考察する。図-3より計算期間中の洪水のピーク流量は小さいものほど出現頻度が大きく、かつ

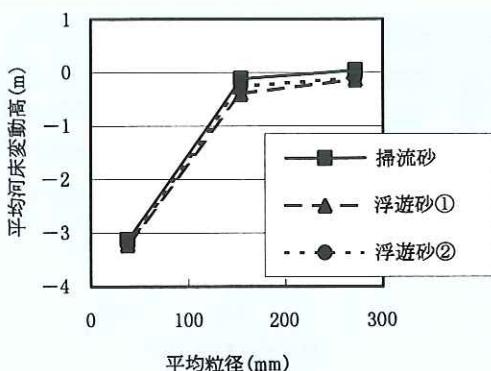


図-6 河床材料の平均粒径と平均河床変動高の関係
(流入土砂量①)

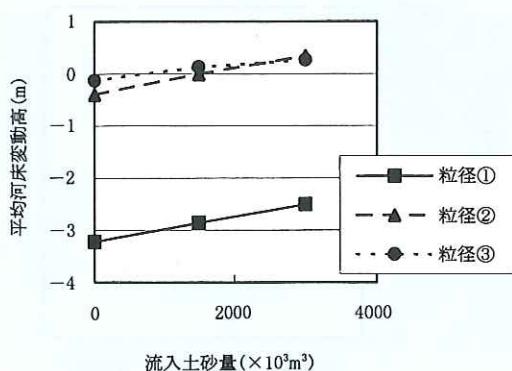


図-8 流入土砂量と平均河床変動高
(浮遊砂①)

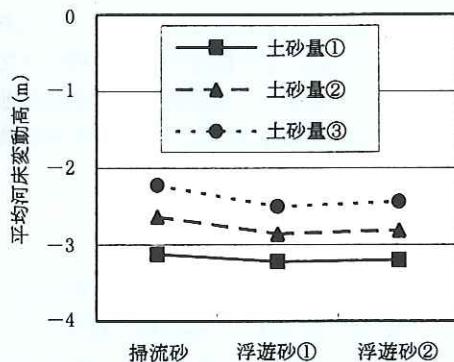


図-7 流砂形態と平均河床変動の関係
(粒径①)

ほとんどの洪水のピーク流量は $600 \sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下である。この値を超えるピーク流量を有する洪水は非常に少ない。この流量に対応する移動限界粒径を、山本地点において、岩垣式⁸⁾により求めると、 $160 \sim 190 \text{ mm}$ 程度となる。つまりこれ以下の粒径の土砂は出現頻度の高い小規模な洪水により移動し、粒径が小さいほど移動する機会も多い。よって侵食深が大きく、粒径変化に伴うその値の変動も大きい。しかし逆に粒径が $160 \sim 190 \text{ mm}$ 以上であると、それを移動させる大規模な洪水は非常に少なく、そのため侵食深が非常に小さくなると考えられる。これらの流量と河床材料の移動限界粒径の関係が現れたのが図-6であると考えられる。

次に、河床材料の粒度分布が最も小さい(粒径①)、つまり侵食が最も大きくなる河床材料の場合の、流砂形態と平均河床変動高の関係を、流入土砂量毎に図-7に示す。これより流砂形態として

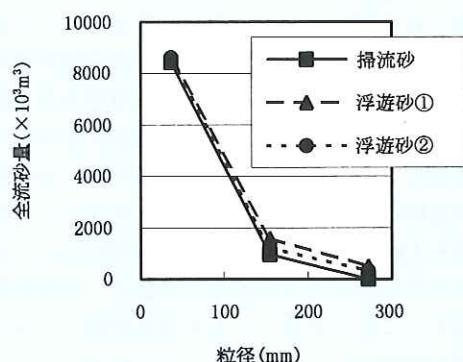


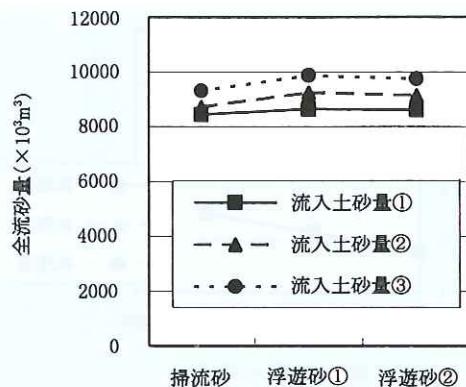
図-9 河床材料の平均粒径と全流砂量
(流入土砂量①)

掃流砂のみを考えた場合より、浮遊砂を考慮した場合の方が侵食深がやや大きくなることがわかる。しかし、これらの流砂形態の相違による河床変動状況の差異は小さい。また流入土砂量が少ないほど、わずかではあるが侵食深が大きくなることもわかる。

最後に、最も侵食傾向が強くなる流砂形態である浮遊砂①の下での、流入土砂量と平均河床変動高の関係を、河床材料の粒度分布毎に、図-8に示す。まず流入土砂量が多くなると侵食深が小さくなるが、その差異は小さい。そして河床材料の粒度分布が最も小さい粒径①の侵食深が、粒径②及び③の場合より顕著に大きくなるが、これについては先の図-6で確認された傾向と同様である。

3.2 給砂・流砂条件が全流砂量に与える影響

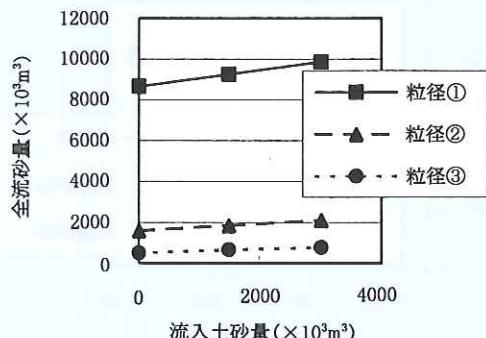
次に、粒径・流砂形態・流入土砂量が流砂量に与える影響について検討する。全流砂量は河口から 2 km の地点で、計算ハイドログラフによって

図-10 流砂形態と全流砂量
(粒径①)

生じる全流砂量を計算した。本来は計算区間の下流端である河口における全流砂量を用いて計算するべきであるが、縦断勾配等の下流端境界条件の影響を受ける。そのため、下流端境界条件の影響を受けない最下流の地点である 2km 地点での全流砂量とした。まず粒度分布の相違が 2km 地点の全流砂量に与える影響について見てみる。図-9 に流入土砂量のない場合(流入土砂量①)の、河床材料の平均粒径と全流砂量の関係を、流砂形態毎に示す。これを見ると、まず流砂形態による全流砂量の相違はほとんどないことがわかる。そして平均粒径が 150mm 程度までは平均粒径の増大に伴って全流砂量の減少が著しくなるが、平均粒径がそれ以上になると、全流砂量は減少するもののその変化は小さくなることがわかる。これは図-6において平均粒径が 150mm 以下であると侵食深の変化が著しいものの、それ以上では変化がやや小さくなる傾向と調和的である。

次に、上記の検討より最も全流砂量が多くなる河床材料の条件である、粒度分布が最も小さい場合(粒径①)の、流砂形態と全流砂量の関係を、流入土砂量毎に図-10 に表す。この図より浮遊砂を考慮した場合の方がやや全流砂量は大きくなり、特に図では差異が判別しにくいものの、浮遊砂②より浮遊砂①の方が全流砂量が大きい。しかし流砂形態による全流砂量の差異は小さい。そして、流入土砂量が多くなると全流砂量もやや増加する。

最後に、最も流砂量の大きくなる流砂形態である浮遊砂①の条件での、流入土砂量と全流砂量の関係を、河床材料の平均粒径毎に図-11 に示す。これを見ると流入土砂量が多くなるほど全流砂

図-11 流入土砂量と全流砂量
(浮遊砂①)

量もやや増加することが分かる。この傾向は河床材料の粒度分布が小さいほどはっきりするが、顕著な変化ではない。また粒径②から粒径①まで粒度分布が小さくなると、全流砂量は顕著に増加する。これらの傾向は図-8 に示される平均河床変動高と流入土砂量の関係と同様である。

4. おわりに

以上の計算結果とその解析により、姫川をモデルにした急勾配河川の、河床材料の粒度分布、上流からの流入土砂量、流砂形態の一次元河床変動計算結果への影響について以下のことが判明した。

- (1) これらの条件が河床変動量に与える影響については、河床材料の粒度分布が変化した場合の河床変動量の変化が大きいのに対して、上流からの流入土砂量及び流砂形態の河床変動量への影響はそれほど大きくないといえる。
- (2) 細砂・流砂条件が流砂量に与える影響についても、上記の河床変動量に与える影響と同様である。

今回の検討は非常に急勾配な姫川下流の、限られた地形・水理条件の下で行われたものであり、さらに広い条件の下での検討が必要である。しかし少なくとも今回の検討に類似した、急勾配河川の河床変動計算においては、河床材料の粒度分布の設定方法により計算結果が大きな影響を受けること、また上流からの流入土砂量や流砂形態の相違の影響は小さいといえる。このような地形・水理条件下においては、河床材料の粒径については、現地での河床材料の粒度分布調査に基づいて

慎重に設定する必要がある。流砂形態の差異については、今回の計算については、計算対象区間の勾配が大きいことと、河床材料の粒径が比較的大きく、本来浮遊砂成分として流下する細粒分が少なく、ほとんどが掃流砂として流下してしまったため、浮遊砂を考慮した場合とそうでない場合で顕著な差異が認められなかった。この場合従来行われているように、掃流砂のみで河床変動や流砂量を考えても、ほぼ妥当な結果をもたらすと考えられる。

参考文献

- 1) 柚木敏仁他：総合土砂管理計画における整備目標土砂について、平成 11 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.172-173, 1998.
- 2) 建設省土木研究所砂防部：平成 7 年 7 月 11 日～12 日長野県・新潟県豪雨による土砂災害(速報), 砂防学会誌, Vol.48, No.3, pp.42-47, 1995.
- 3) 芦田和男、高橋保、水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.30, No.4, pp.11-17, 1978.
- 4) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 5) 芦田和男、道上正規：浮遊砂に関する研究(1)-河床付近の濃度-, 京大防災研年報, 第 13 号 B, pp.233-242, 1975.
- 6) 土木学会：水理公式集(平成 11 年度版), p.157, 丸善, 1999.
- 7) 建設省北陸地方建設局松本砂防工事事務所：姫川水系総合土砂管理計画検討業務報告書, 2000.
- 8) 土木学会：水理公式集(平成 11 年度版), p.158, 丸善, 1999.

笹原克夫*



建設省土木研究所砂防部
砂防研究室主任研究員
Katsuo SASAHARA

南 哲行**



建設省河川局砂防部
砂防課砂防事業調整官
(前 砂防研究室長)
Noriyuki MINAMI

仲野公草***



建設省土木研究所砂防部
砂防研究室長
Masaaki NAKANO