

II-20

貯水池の水位変化を伴うダム堆砂量予測計算

北海道大学大学院	学生会員	○井上卓也
(株)日本建設コンサルタント	正会員	坊野聡子
北海道開発局室蘭開発建設部	正会員	船木淳悟
北海道大学大学院助教授	正会員	清水康行

1. はじめに

わが国の河川は急流であることに加えて降雨量も多いため、土砂生産および流出する土砂量が多い。このような河川にダムを建設する場合、流れを遮断するため水理条件が変化し、ダム下流における河床高の低下や貯水池内での堆砂が生じる。ダム堆砂は貯水池の貯水容量を減少させ、利水および治水機能の低下につながる深刻な問題である。

本研究では沙流川二風谷ダムを例に、沖積河川の中流部にダムが建設された場合に生じる土砂輸送環境の変化を坊野ら¹⁾の研究に引き継ぎ検討したものである。

坊野ら¹⁾は出水時における連続土砂観測や河床形状・河床材料の調査結果に基づき、河床変動モデルを作成し、長期的な堆砂量予測を行っている。本研究では貯水池内に既に堆砂している土砂をゲート操作で貯水位を下げるにより排砂することの可能性を探ることを目的とする。貯水位の変動や放流に伴う流れの急激な変化に対応するために次元河床変動モデルにおける流れの計算法の改良を行う。モデルの妥当性は実測データおよび坊野ら¹⁾の計算結果と比較することにより行う。さらに、このモデルを用いて仮想的なゲート操作を行った場合の河床変動を試算し、その効果の検討を行う。

2. 対象区間の河道特性

沙流川は北海道の日高山系から太平洋へと流れる一級河川であり、その名が示すように流砂が多いことで知られている。沙流川の中流部、河口から21.4km上流地点に建設された。二風谷ダム(1996年4月完成)は設計時から貯水池の堆砂問題が懸念されたため、貯水池上

¹⁾ Sediment Transport in the Saru River by Takuya Inoue, Satoko Bouno, Jungo Funaki and Yasuyuki Shimizu

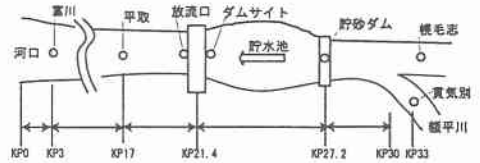


図-1 沙流川の模式図(○は観測地点)

流端には流入土砂の軽減対策としての貯砂ダムや、ダムの本体の河床付近への排砂機能を併せ持つ放流ゲートの設置などの対策が設置されている。沙流川および二風谷ダムの位置関係を模式的に図-1に示す。

3. 既往の研究

坊野ら¹⁾が過去の調査結果から近年の河道特性について調べ確認した事象の中で本研究に用いた事象を以下に掲げる。

- (1) ダム貯水池内における堆砂および河床材料の細粒化の傾向。
- (2) ダム下流区間における洗掘。
- (3) 出水時における採水調査により浮遊成分の多くが貯水池内で沈降していることと。

また、坊野ら¹⁾は浮遊流砂量と流量の関係式として次式を導いている。

$$Q_s = 7.8 \times 10^{-7} Q^{2.06} \quad (1)$$

ただし、 Q_s は浮遊砂量(m^3/s)、 Q は流量(m^3/s)である。この式は全国河川のウォッシュロードの推定式²⁾の範囲($(Q_s = 4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6} Q^2)$)に入っていることから、流砂の成分のほとんどがウォッシュロードであると推定している。

4. 一次元河床変動モデル

計算モデルは基本的に清水ら³⁾による1次元の河床変動計算法を用いるが、流れの計算の部分には今回新たにCIP法⁴⁾を用いることとする。モデルでは河床材料から計算される掃流砂・浮遊砂(Bed Material Load)に加え、ウォッシュロード(Wash Load)を組み入れる。一般に河川においてはウォッシュロードは河床とは交換されることなく通過するものと考えられるが、ダムなどによって水や流砂の流れが遮られる場合にはその堆積を考慮する必要がある。そこで、本研究では上流端地点においてウォッシュロードを観測結果に基づいた流量との相関式[(1)式]で与え、計算区間内では最小粒径の浮遊砂として扱うこととする。

4.1 基礎式

流れの基本式は1次元非定常流の運動方程式、掃流砂量式は次式の芦田・道上の式⁵⁾、浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式⁶⁾、浮遊砂の沈降速度はRubeyの式を用いる。

流れの計算において、坊野ら¹⁾の研究では長期的な堆砂予測のため、流れを擬似常流・不等流と見なしている。しかしながら、本研究ではダムのゲート操作が貯水池内におよぼす影響を検討するため短期間における流れの変化を考慮する必要がある、非定常流として扱われる。

さらに、貯水位の変化やダム放流などの流れの急激な変化にも対応可能とするため、CIP法⁴⁾を用いる。CIP法はある点の計算誤差が他点におよぼす影響が少ない高精度の計算である。以下にCIP法の概略を以下の(2)式の計算法を例に述べる。

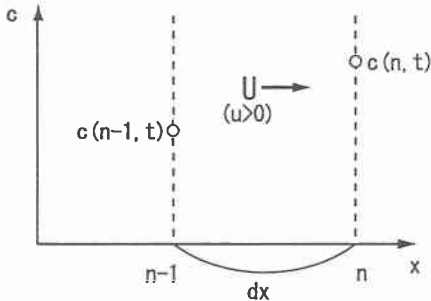


図-2 CIP法の説明図(1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ただし、 C はある物理量、 U は C が移流する速度、 t は時間、 x は流下方向距離である。

(2)式は図-2に示すように、ある物理量 C (白丸○)が流速 U によってそのまま x 軸方向に運ばれて行く場合を示している。不等流計算等に用いられる差分法では微分方程式を差分化し、時刻 t における $C(n-1)$ および $C(n)$ から時刻 $t+1$ の C を求める(ただし、 n は x 軸方向の計算点の番号である)。この手法では微分方程式の中に人工的な拡散項が入ってしまい、 C は減衰してしまう。また、ある計算点での誤差が他点に伝播してしまう。CIP法では物理量 C は dt 時間に $u \times dt$ だけ x 軸方向に進むため、 $F(z = -u \times dt)$ と時刻 $t+1$ の $C(n)$ は同じ量であると言う発想から、図-3のように2点間を内挿する三次関数($F = a \times z^3 + b \times z^2 + c \times z + d$)を用いて求めようとする手法である。なお、 z は x 軸と逆方向にとった座標軸であり、 n 点で $z = 0$ 、 $(n-1)$ 点で $z = dt$ である。

F を求めるための境界条件は以下のとうりである。

$z=0$ のとき

$$F(z) = C(x) \quad (3)$$

$$\frac{\partial F(z)}{\partial z} = \frac{\partial C(x)}{\partial x} \quad (4)$$

$z=dx$ のとき

$$F(z) = C(x-1) \quad (5)$$

$$\frac{\partial F(z)}{\partial z} = \frac{\partial C(x-1)}{\partial x} \quad (6)$$

この手法によれば数値拡散を最小に抑えることができ、誤差の伝播を防ぐため、精度の良い計算が得られる。

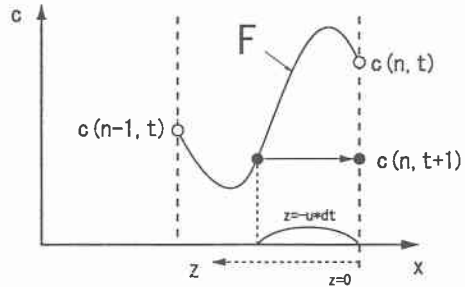


図-3 CIP法の説明図(2)

また、ダム貯水池内での非常に非定常性の強い現象を扱うために粒径別浮遊砂濃度の連続式では次式に示

す通り、左辺第1項の濃度の時間変化の項および右辺第4項の拡散項を考慮する。

$$q_{sui} - w_{fi}c_{bi} + \frac{q_x < c_{xi} >}{B} + D_s \frac{\partial^2 (< c_i >)}{\partial x^2} = \frac{\partial (< c_i >)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q < c_i >)}{\partial x} \quad (7)$$

ここで、 h は水深、 B は低水路幅、 q_{sui} は粒径別浮遊砂の単位面積当たりの浮上量、 w_{fi} は粒径別浮遊砂の沈降速度である。 q_x は流入流量であり、 D_s は浮遊砂の流下方向の拡散係数、 c_{bi} は河床付近の粒径別浮遊砂濃度、 $< c_i >$ は水深平均の粒径別浮遊砂濃度、 $< c_{xi} >$ は水深平均の粒径別流入浮遊砂濃度であり $< c_i >$ と等しいと仮定する。

5. 解析

5.1 モデルの検証

1996年8月9日～15日の出水による平均河床高および河床材料の計算結果と坊野ら¹⁾の研究を比較することによりモデルの妥当性を検証する。

5.1.1 計算条件

対象河川をもとに簡易化した河床高および低水路幅(図-4)を用いてダム地点から約30kmの区間を400m間隔に分割して計算を行う。境界条件として、1997年8月9日～13日にかけての実測流量(図-5)を上流端に、実測水位を下流端に与え、ダムの水位を42.24mに保つことにする。また貯砂ダムは無いものとする。

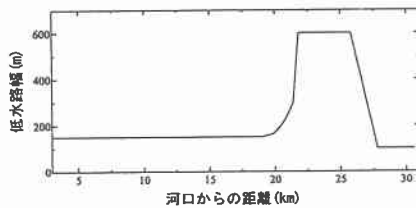


図-4 低水路幅と河口からの距離の関係

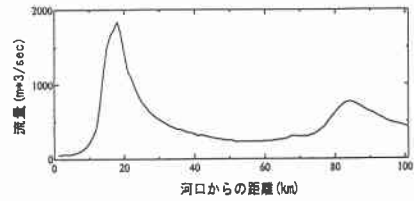


図-5 出水期間中(1997年8月9～13日)の時間流量

流砂は表-1に示すようにウォッシュロードを考慮して18のクラスの粒径に分割する。ウォッシュロード成分の代表粒径は0.01mmとする。また、ウォッシュロードは初期の河床材料中には存在しないものと仮定し、上流端から流量との関係式(8)によって与える。この関係式は出水時観測による上流端地点(幌毛志・貫気別)のSSから算出した流砂と流量の関係から求めたものである。

$$Q_s = 1.39 \times 10^{-6} Q^{2.02} \quad (8)$$

また、Bed Material Load(掃流砂・浮遊砂)は上流端で動的平衡状態であると仮定し、計算区間内では河床材料から計算されるものとする。ここで初期河床材料の各粒径の存在割合は、ダム完成前の河口からダム地点までの区間の10%、50%、90%粒径(mm)の近似式(9)～(11)式をもとに対数正規分布を仮定して与える。

$$d_{10} = \exp(0.006kp - 0.96) \quad (9)$$

$$d_{50} = \exp(0.033kp + 1.48) \quad (10)$$

$$d_{90} = \exp(0.021kp + 3.45) \quad (11)$$

ここで、 kp は河口からの距離(km)である。

ダム上流区間においてもダム下流区間から求めた近似式をもとに計算を行なったが、これはダム建設の影響を受けていない状態の初期条件を想定するためである。

5.1.2 計算結果

以上の条件で1996年8月9日から13日までの計算を行った。図-6は河床材料の粒径変化の計算結果、坊野ら¹⁾の行った不等流計算による計算結果と実測値を併せて示したものである。上から順に90%粒径、50%粒径、10%粒径を示している。実測値および坊野ら¹⁾の

表-1 数値計算に用いる河床材料の粒径区分

粒径の範囲	代表粒径	流砂の種類
0.01 ~ 0.02mm	0.010mm	WashLoad
0.02 ~ 0.03mm	0.025mm	Bed Material Load
0.03 ~ 0.04mm	0.035mm	
0.04 ~ 0.05mm	0.045mm	
0.05 ~ 0.06mm	0.055mm	
0.06 ~ 0.07mm	0.065mm	
0.07 ~ 0.08mm	0.075mm	
0.08 ~ 0.09mm	0.085mm	
0.09 ~ 0.1mm	0.098mm	
0.1 ~ 0.2mm	0.15mm	
0.2 ~ 0.4mm	0.3mm	
0.4 ~ 1.0mm	0.7mm	
1.0 ~ 2.0mm	1.5mm	
2.0 ~ 4.0mm	3.0mm	
4.0 ~ 10.0mm	7.0mm	
10.0 ~ 20.0mm	15.0mm	
20.0 ~ 40.0mm	30.0mm	
40.0 ~ 100.0mm	70.0mm	

計算結果でも出水後の堆砂に伴うダム貯水池内の細粒化がみられる。これと同様の傾向が本モデルの計算結果からも見られる。不等流計算でも CIP 法による計算でも 10%粒径の計算結果が実測値に比較して大きい。これは計算に用いている最小粒径の大きさが 0.01mm であるという限界があることと、出水時以外の堆砂の影響を考慮していないことが原因と考えられる。

図-7 は初期河床高を基準とした計算終了後の河床高の変化量を示している。河口からの距離 26km から 27.5km にかけての堆砂は低水路幅の拡大による流速の減少によるもので、この区間に堆砂した砂の粒径は 10%粒径、50%粒径、90%粒径の粗粒化から比較的粗いものと考えられる。その後、さらなる流速の減少によりウォッシュロードなどの細かい粒径の砂が 22km から 25km にかけて徐々に堆砂していったと考えられる。

このように CIP 法を用いた本研究の計算モデルが簡易化されたダムではあるが、河床高および河床材料の変化を再現することが可能であることが示された。

5.2 貯水位を変化させた場合の影響の検討

過去の実際の出水においては流入流量とほぼ同じ流量の放流の操作が行われている。これは実際にダムに洪水を貯め込む必要があるような大きな出水が起きていないためである。本節においては、試行的に出水時に流入量より放流量が多くなるようなゲート操作を行った場合の河床変動の状況を検討する。即ち、出水時に貯水

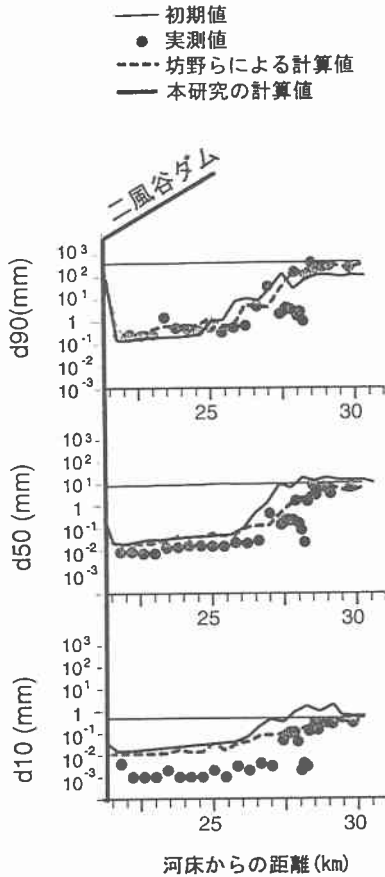


図-6 出水後(1997年8月9~13日)の河床材料の縦断分布

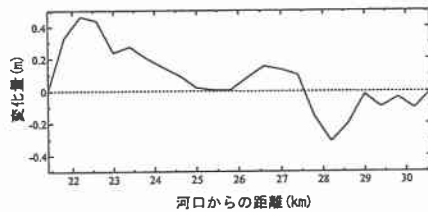


図-7 初期河床高からの変化の縦断分布