

ダムからの土砂供給に伴う物理環境変化を予測する 河床変動モデルの開発

石神孝之・櫻井寿之・中西 哲

1. はじめに

近年、ダム貯水池の堆砂問題や総合土砂管理の視点からダムからの排砂、置土等の土砂供給が多く実施されてきているが、掃流砂観測が困難なことなどから、どのような粒径の材料がどこまで流下するのかなどが十分に明らかとなっていない。一般的には混合粒径の河床変動モデルでの再現計算により流砂量の推定等を行う場合が多いが、沖積河川を対象とした比較的粒度分布幅の狭い混合粒径材料での検討に基づく流砂量式等が使用されており、ダム周辺の粒度分布幅の広い河床材料での適用に課題があると指摘されている¹⁾。このため、本研究はダム周辺の粒度分布幅の広い多様な河床材料で構成されている河川を対象として、水理実験により流砂量および河床変動に関して粒径集団の粒度分布や空隙率の変化の影響を明確にするるとともに、これらを考慮する河床変動モデルを開発することを目的として実施したものである。

2. 水理実験

2.1 実験方法

水理実験は、長さ60m、幅2m、勾配1/100の直線実験水路を使用し、河床材料は図-1に示す6種類の粒度分布の材料を使用した。各河床材料のケースで、1回目にはほぼ平坦に様に敷均した河床形状を初期河床として小さな流量で通水し、2回目に大きな流量で1回目の通水後の河床形状を初期河床として通水した。通水中および通水後に水位・流速・流砂量・河床形状・流砂の粒度分布等を測定し、河床材料の粒度分布等の違いによる河床変動特性の相違を検討した。表-1に実験ケース一覧を示すとともに河床材料の特性値を示す。

河床材料の粒度分布変化については、各ケースで4～5地点を選定し、(1)通水中の流砂（写真-1に示す掃流砂採取器で採取）、(2)通水後の河床表

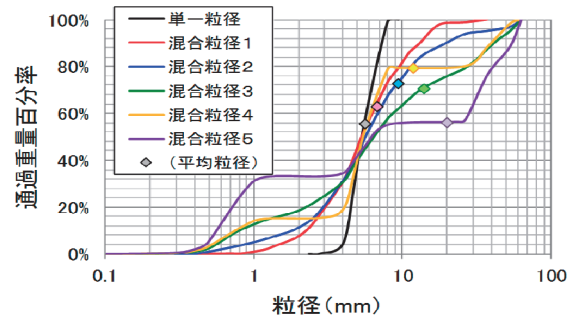


図-1 河床材料粒度分布

表-1 実験ケース一覧

	河床材料			流量 (m ³ /s)	通水時間 (分)
	d ₅₀ (mm)	d _m (mm)	d ₈₄ /d ₁₆		
単一粒径	5.4	5.6	1.6	0.127	150
				0.186	120
混合粒径1	5.4	6.7	3.9	0.127	168
				0.186	127
混合粒径2	5.6	9.3	5.3	0.127	159
				0.186	117
混合粒径3	6.5	13.9	22.3	0.186	108
				0.300	100
混合粒径4	5.5	11.8	10.4	0.186	100
				0.300	100
混合粒径5	6.6	19.9	70.7	0.186	100
				0.300	100

面の試料（幅10cm×長さ15cm×厚さ約2cm）、(3)通水後河床の円形φ19.5cm×厚さ約10cmの試料の各々を同一箇所

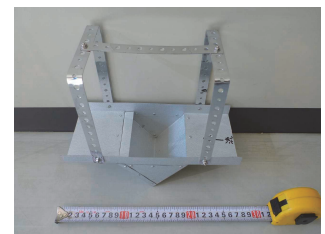


写真-1 掃流砂採取器

採取するとともに、水路下流端から流出し沈砂池で捕捉した流砂についてふるい分け試験を行った。なお、水路上流部河床を砂の供給部分としており、上流端での河床材料の供給は行っていない。

また、通水後の河床材料の採取について、前述の(3)の円柱形での採取では、内径φ19.5cmの円筒のサンプラー（アクリル製）で採取厚さを計測して空隙を含んだ体積を算定した。採取した材料のふるい分け試験による粒度分布と合わせて採取した試料全体の重量を計測し空隙率を算定した。

2.2 実験結果

2.2.1 河床材料と流砂の粒度分布幅

図-2は、流量別に各ケースにおける前述の(2)で採取した表層の河床材料（通水前・後）と流砂（前述の(1)で採取した材料）の粒度（d₅₀,d_m及びd₁₀～d₉₀の範囲を明示）について比較したもので

Development of a River Bed Variation Model to Predict Physical Environment Changes Associated with Sediment Supply from a Dam

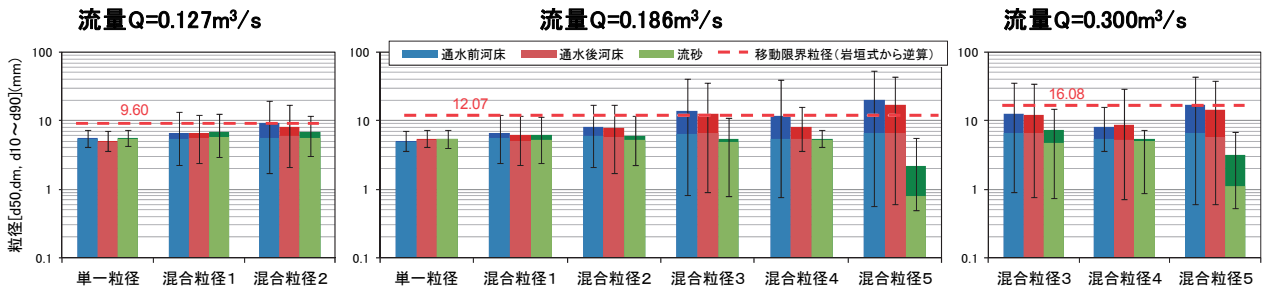


図-2 河床材料と流砂の粒度分布幅の比較

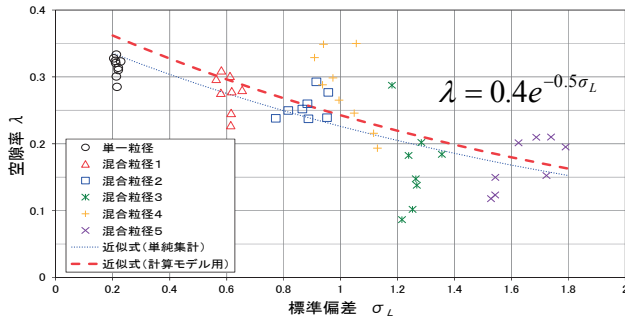


図-3 河床材料の標準偏差と空隙率

ある（棒グラフの棒の長さが d_{50} （薄い色）、 d_m （濃い色）、縦方向バーが $d_{10} \sim d_{90}$ の範囲）。

ここで、流砂の粒径範囲（特に上限側の d_{90} ）に着目すると、河床材料の粒度分布幅が広がっても、一定の粒径（10mm～20mm程度）以下の材料が流下していることが分かる。また流量が大きくなると、混合粒径3、5のように流砂の粒径範囲（上限側の d_{90} ）が若干ではあるが大きくなっている。このことは、河床材料の粒度分布幅にはほぼ関係なく、水理量に応じて、ある一定の粒径以下の材料が流下することが示唆されるものである。そこで、実験の各流量に対して、岩垣²⁾による一様粒径の無次元限界掃流力の実験式から逆算で求まる粒径（移動限界粒径）を図-2に示した（破線）。流量 $Q=0.127\text{m}^3/\text{s}$ の場合は流砂の粒径範囲（上限側の d_{90} ）が移動限界粒径を上回っているが、流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ 及び $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ の場合は何れの河床材料のケースでも流砂の粒径範囲は移動限界粒径以下に収まっている。

一般的に混合粒径の場合は一様粒径の場合に比べて粒径の大きな材料が動きやすいことが示されている¹⁾が、以上の結果を整理すると、今回の粒度分布幅の広い河床材料の場合は、流砂の最大粒径については、岩垣による無次元限界掃流力の一様粒径の実験式の逆算から求められる移動限界粒径程度であることが明らかとなった。

2.2.2 河床材料の粒度分布と空隙率

河床材料の粒度分布が極端に変化しないような

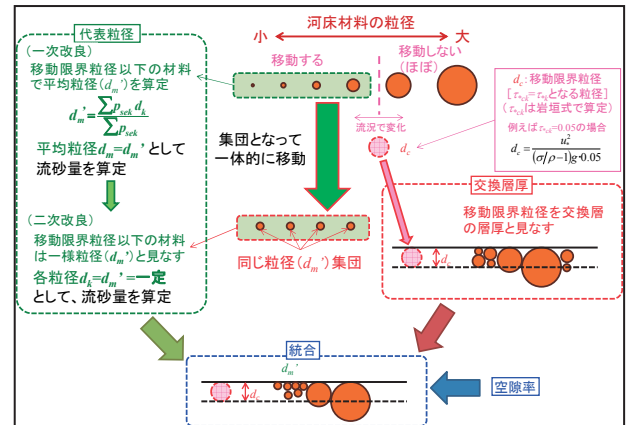


図-4 流砂量算定方法改良の概要

場合は、河床変動は空隙率を一定にして計算していることが多い³⁾。本研究では通水前後で河床材料の粒度分布が変化していることが考えられることから、各ケースの通水前後の河床材料の粒度分布変化と空隙率変化を比較検討した結果、通水により河床材料の粒度分布が変化するとともに、空隙率も変化する結果が得られた。そこで、粒度分布と空隙率の関係について検討を行った。

河床材料の粒度分布と空隙率の関係については、藤田ら³⁾、Sulaimanら⁴⁾により検討された事例があり、これらを参考にして、水理実験の結果から対数正規分布型での標準偏差 σ_L と空隙率 λ の関係について図-3のとおり整理した。対数正規分布型の粒径 d に対する密度関数は次式で示すとおりである。（ d_{mg} ：幾何平均粒径（ $\doteq d_{50}$ ））

$$p(\ln d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left[-\frac{(\ln d - \ln d_m)^2}{2(\sigma_L)^2}\right] \quad \text{式(1)}$$

河床材料の粒度分布型としては対数正規分布型とはいえないケースのものがあるが、図-3に示すとおり全体的には標準偏差 σ_L の値が大きいほど空隙率 λ が小さくなっている傾向が見られる。参考とした既往の研究^{3),4)}においても同様な結果が得られており、この全体的な傾向を近似する式として指数関数での近似式を検討し次式を得た。

$$\lambda = 0.4e^{-0.5\sigma_L} \quad \text{式(2)}$$

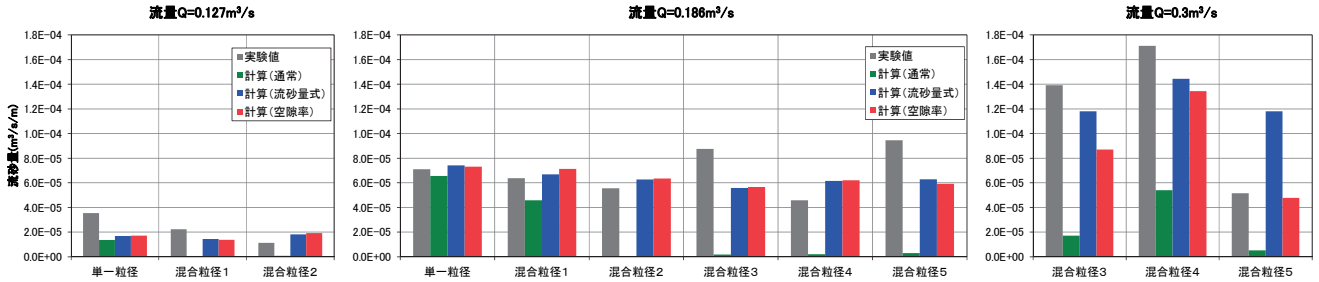


図-5 流砂量（下流端）の実験値と計算値との比較

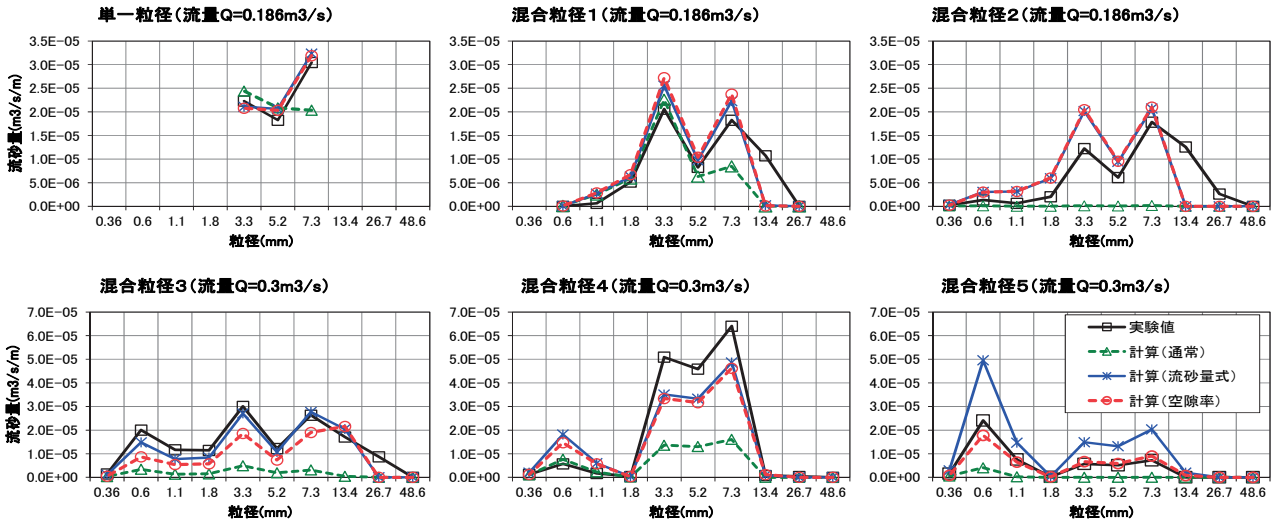


図-6 粒径別流砂量（下流端）の実験値と計算値との比較

3. 河床変動モデル

3.1 平面2次元河床変動モデルの改良

河床変動モデルは、櫻井ら⁵⁾が開発した直交格子の平面2次元河床変動モデルを元に水理実験等の結果を考慮して、流砂量式の見直し、空隙率変化の考慮等の改良を行った。図-4に改良の概要を示す。

改良前のモデルにおいて流砂量算定に使用している基礎式は、混合粒径の河床変動計算でよく使用される芦田・道上の流砂量式⁶⁾を採用している。

改良後のモデルは、芦田・道上の流砂量式を基本としつつ、移動限界粒径以下の河床材料のみが移動するものとし、代表粒径にその粒径集団の平均粒径を適用するものとした。また、空隙率については、前述の式(2)に示す河床材料の対数正規分布型での標準偏差 σ_L と空隙率 λ の関係式を導入した。詳細については、筆者ら^{7),8)}の論文を参照されたい。

3.2 検証結果

改良した河床変動モデルについて、前述の水理実験の再現計算により検証を行った。図-5に全流砂量、図-6に粒径別流砂量、図-7に河床形状の結

果の代表事例を示す。改良前のモデルの結果を「計算（通常）」、流砂量の算定方法のみ改良したモデルの結果を「計算（流砂量式）」、流砂量及び空隙率変化を改良したモデルの結果を「計算（空隙率）」と示す。

図-5、6に示すとおり、通常の手法である改良前のモデルでの計算では、流砂量はかなり過小に算定される結果となった。流砂量の算定方法を改良した結果、流砂量はかなり実験結果に近くなった。さらに、空隙率変化を考慮することで、流砂量がやや過大に算定されていた混合粒径5の流量 $Q=0.3m^3/s$ のケースでもかなり実験値に近いものとなった。

河床形状については、図-7に示すとおり、通常の手法である改良前のモデルでの計算では、流砂量がほとんど無い結果の影響を受け、河床形状の変化がほとんど無い状況となった。流砂量の算定方法を改良した結果、上流側の河床が大きく低下するとともに下流側は河床が上昇し、実験結果と近い形状となった。

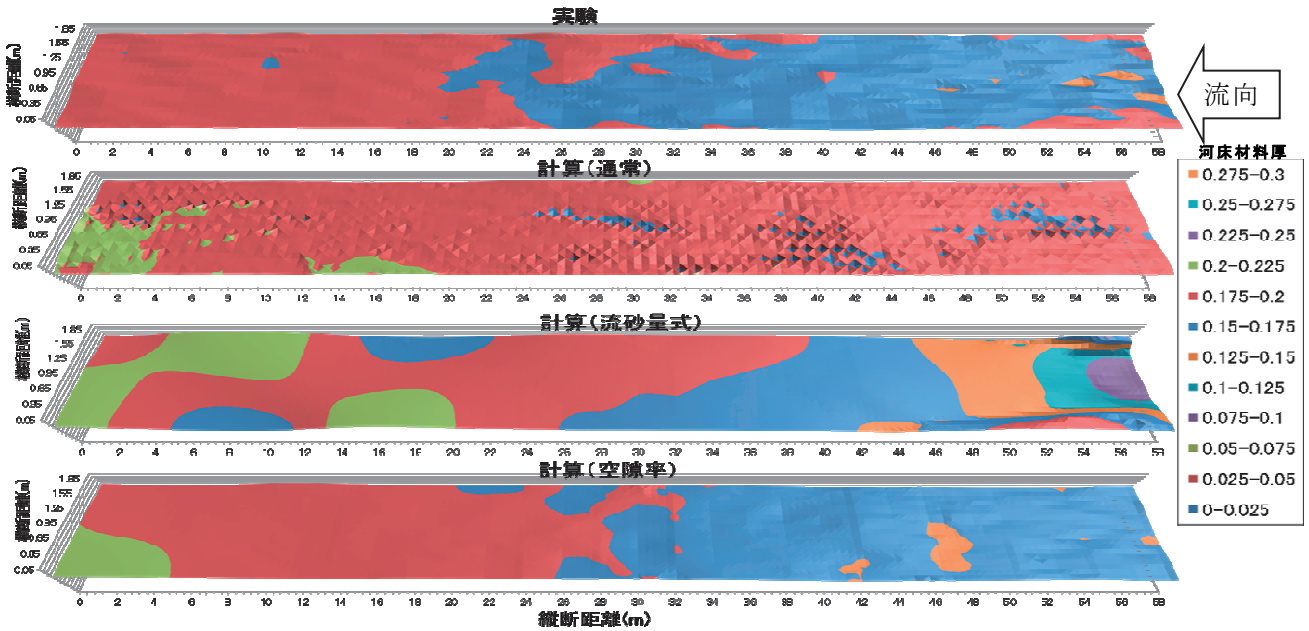


図-7 通水後の河床形状(河床材料厚)
[混合粒径2(流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$)]

4. おわりに

ダム周辺の粒度分布幅の広い多様な河床材料で構成されている河川を対象として河床変動計算を行う場合、流砂量の算定において一様粒径を対象とした岩垣式で求められる移動限界粒径以下の粒径集団を対象とすることが有効であることが確認された。さらに、河床材料の対数正規分布型での標準偏差 σ_L と空隙率 λ の関係式を導入することにより河床形状変化の推定に有効であることが確認された。

これらを考慮した河床変動モデルを用いることで、ダムからの土砂供給に伴う下流河川の流砂量や河床表面の状態などの物理環境変化の予測精度の向上が期待できるものと考えられる。

参考文献

1) 藤田光一ほか：ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方、国総研資料第521号・土研資料第4140号、pp.1-13~1-21、pp.6-4~6-10、2009

2) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究、土木学会論文集、第41号、pp.1~21、1956
 3) 藤田正治ほか：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用、河川技術論文集、第14巻、pp.13~18、2008
 4) Muhakmmad Sulaiman et al. : Porosity of sediment mixtures with different type of grain size distribution, AJHE, JSCE, Vol.51, 23, 2007
 5) T. Sakurai & N. Hakoishi : Numerical simulation of sediment supply from dam reservoirs to downstream by the placed sediment, Advances in River Sediment Research- Fukuoka et al. (eds), pp.1193-1199, 2013
 6) 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
 7) 石神孝之ほか：河床材料の粒度分布幅の広い河川における河床変動特性の実験的検討および河床変動モデルの開発、河川技術論文集、第20巻、pp.265~270、2014
 8) 石神孝之ほか：河床材料の空隙率および交換層厚変化を考慮した河床変動モデルの開発、河川技術論文集、第21巻、pp.131~136、2015

石神孝之



土木研究所水工研究グループ
水理チーム 上席研究員
Takayuki ISHIGAMI

櫻井寿之



土木研究所水工研究グループ
水理チーム 主任研究員
Toshiyuki SAKURAI

中西 哲



土木研究所水工研究グループ
水理チーム 研究員
Satoru NAKANISHI