

大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE RELATION OF SAND DEPOSITS ON A LARGE-GRAVEL BED SURFACE TO SUSPENDED SAND LOADS

藤田光一¹・山原康嗣²・富田陽子³・伊藤嘉奈子⁴・小路剛志⁵

Koh-ichi FUJITA, Yasushi YAMAHARA, Yoko TOMITA, Kanako ITO and Takeshi ORO

¹正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 室長
(〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 交流研究員 (同上)

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 主任研究官 (同上)

⁴正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 研究員 (同上)

⁵正会員 工修 国土交通省中国地方整備局 斐伊川・神戸川総合開発工事事務所 調査設計第一課
(〒693-0015 島根県出雲市大津朝倉三丁目5番地3)

In this research, we have taken into account the necessity of technical scheme in order to see the movements of two big different sized grain groups, gravel in size 100 millimeter and sand in size below 1 millimeter. And we concentrated on the situation that sand passed over the bed laying big-sized-gravels in a state of suspended and predominant, and gave experimental consideration to the phenomenon of sand deposition into the gaps of gravels. We focused on the point that the sand suspension occurred on the sand bed that existed partly, and were based on the phenomenal analysis of suspended load and the past knowledge about integration into bed variation, examined methods of calculation about the relation between the concentration of suspended load and the ratio of area that covered with sand.

Key Words : *suspended load, fine sand, large-gravel bed, armoring, sheltering effects, sand deposit*

1. はじめに

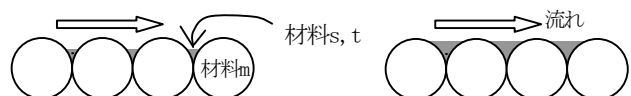
ダム貯水池の存在による下流河川の河床材料変化は、そこでの生物に与えるダム等の影響を評価する上で重要な現象の一つと捉えられている^{1,2)}。

著者らは、水理条件があまり変わらないダム上下流の河床材料を比較し、主材料である礫の粒径に有意な違いがないのに対して、その礫径よりも二桁以上粒径の小さい砂の礫床表面への堆積状況には有意な差があり、下流側では礫間に存在する砂の割合が大幅に減っている事例を見出した³⁾。皆川ら⁴⁾は、ダム下流の付着藻類の特徴と支川合流の影響を調べ、小礫や砂の存在割合が付着藻類に有意な影響を与えている可能性を示している。さらに、ダム貯水池から下流に土砂を流す土砂管理においては、少なくとも量的には砂粒径以下が主対象になることが多く、砂を流した先の河床状況変化の予測が必要となって

いる。

著者らは、これらの河川技術上の課題を検討する上で、大礫床表面への浮遊砂の部分的（礫間への）堆積に関する基本的知見が共通して重要になっていると考えた。そこで、本研究では、図-1に示すように、動かない大礫床上を、それより 10^2 オーダー小さい粒径の砂が浮遊卓越状態で通過する状況に焦点を絞った。流量を一定とし、縦断方向に一樣な水理条件を作り、砂の流送に関しても平衡状態を作るという実験条件の下、浮遊砂量と大礫間に堆積する砂面高さとの関係を実験的に調べた。

同様の現象については、芦田・藤田^{5,6)}が、礫間からの細砂の巻き上がりに関する現象を詳細に調べ、礫による



同じ水理量で浮遊砂量が小さい場合(左)と大きい場合(右)のイメージ

図-1 礫床上の砂流送（堆積）過程の概念図

遮蔽効果と河床表層での砂の存在割合や砂面高さを考慮した浮遊砂量算定式を提示している。道上・藤田ら⁷⁾は、この知見を用いて礫層への砂の沈み込みと堆積過程を実験的に調べ、計算により再現しており、また福島ら⁸⁾は透礫層への浮遊砂による充填速度を簡易に予測する手法を提示している。粒径が大きく異なる礫・砂の挙動の取り扱いには流砂系管理においても重要と認識されるようになり⁹⁾、「粒径集団の通過型・混合型の区分」¹⁰⁾や「オーバーパッシングロード」¹¹⁾という捉え方が提示され、これに基づき、より実態に即した計算法・分析法などが検討されている。関根ら^{12),13)}は、水理的により合理的で精緻な取り扱いを導入することが重要との考えから、芦田・藤田による浮遊砂量式^{5),6)}を組み込んだ礫・シルト充填河床モデルを構築し、流路変動や河床変動などの計算を行っている。

本研究では、前述の山地部河川の実態になるべく近い条件で実験を行うという考えから、従来の研究よりも礫砂の粒径比を大きく（250程度）、水深礫径比を小さく（1程度；水深・粗度高比で2～4程度）設定するとともに、生物への影響を考える上で重要な礫床表面付近での砂面高さの決まり方を把握しやすい実験条件を設定した。そして浮遊砂量の変化に伴う砂面高変化の特性を把握し、砂面高変化を予測する際の課題を考察することに重点を置いた。

2. 実験方法

実験には、図-2に示す長さ30m、幅1.0m、勾配1/100の開水路を用い、そのうち長さ17mの水路床（水路下流端より4.0m～21mの区間）に、実験用の礫を設置した。設置は、礫形状の違いの影響を把握することをねらって、以下の二通りのやり方で行った。半径48mmのモルタル製半球（以後「半球擬礫」と呼ぶ）を相互に接触させて千鳥に配置したケースと、自然河川から採取した平均粒径約100mm（±20mm）の栗石（以後「自然礫」と呼ぶ）を設置後の礫天端高が±10mm以内、平均高さ133mmで、千鳥配置を基本に2層に設置したケースである。いずれも礫は水流で動かないようにしている。

水路床へ設置した半球擬礫と自然礫の横断模式図を図-3に示す。また、礫間の空隙断面積の高さによる変化を図-4に示す。なお図では、半球擬礫と自然礫の天端高を一致させている。

実験は、水路床に半球擬礫と自然礫をそれぞれ設置し、礫間への砂の堆積状況を見る①堆積過程実験と堆積した砂が浮遊して抜け出す状況を見る②抜け出し過程実験の二つのステージからなる。実験ケースと実験条件を表-1に示す。実験に用いた砂は、珪砂0.4mm、0.8mmの2粒径とし、実験の水理条件として摩擦速度 u_* と砂の沈降速度 w_0 の比 u_*/w_0 を1.26～2.16とした。堆積過程実験は、

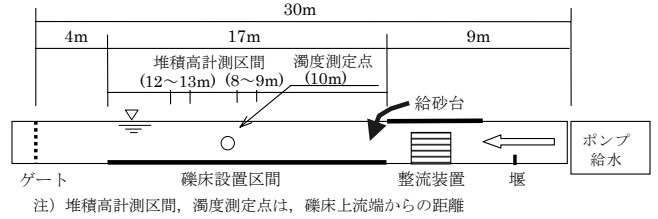


図-2 実験水路の概要図

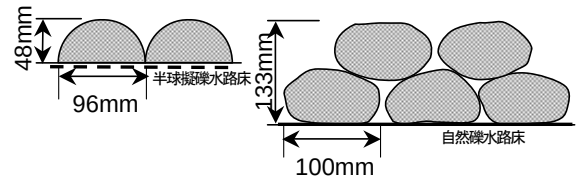


図-3 半球擬礫、自然礫の設置状況の横断模式図

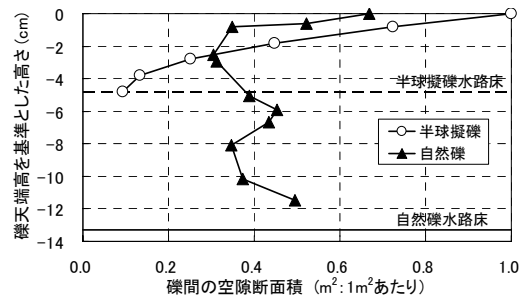


図-4 礫間の空隙断面積の高さによる変化

表-1 実験条件

礫形状	砂粒径 d_s (mm)	流量 (ℓ/s)	水深 (cm)	u_*/w_0	砂供給量		CASE名
					濃度(mg/ ℓ)	(kg/min)	
半球擬礫 直径 96mm	0.4	50	7.41	1.74	250	0.75	CASE 1
					1,000	3.0	
					2,000	6.0	
					3,000	9.0	
					4,000	12.0	
					6,000	18.0	
	100	11.40	11.40	2.16	0	0.0	CASE 2
					250	1.5	
					1,000	6.0	
					2,000	12.0	
					3,000	18.0	
					4,000	24.0	
自然礫 径 100mm	0.8	100	11.40	1.26	6,000	36.0	CASE 3
					0	0.0	
					250	1.5	
					500	3.0	
					1,000	6.0	
					2,000	12.0	
	0.4	100	11.21	2.11	0	0.0	CASE 4
					250	1.5	
					500	3.0	
					1,000	6.0	
					2,000	12.0	
					3,000	18.0	

※1 砂供給量（濃度0、砂量0.0）は、抜け出し過程実験時

※2 水深は礫床設置区間5点の平均（礫天端高から測定）

※3 自然礫の水深は2層めの礫間に砂が堆積し砂供給量0.0の時の値

※4 砂供給量の濃度は投入した時間あたりの砂重量を流量で除した値

砂のない大礫床上に所定の流量を流下させ、他の水理条件は変えずに投入砂量だけを段階的に上げていくというものである。各段階の砂供給量の下で、平衡状態を得てから大礫間の砂の堆積高さを測定した。一方、抜け出し過程実験は、実験のケースごとに堆積過程実験を完了した後、清水を断続通水し、通水時間と大礫間の砂の堆積の減少量を測定するものである。

砂が礫間に堆積した後の砂の高さの計測は、礫床設置区間の上流端から8～9m, 12～13mの2区間について区間内の全ての礫間の砂面高を測定し、その平均値を堆積高または抜け出し高とした。実験時は、水位計測を礫床設置区間内の5地点で行い、ほぼ等流となっていることを確認している。これより摩擦速度 $u_* = \sqrt{gh_t I}$, h_t : 礫天端高から測った水深, I : 水路勾配より算定している。また、砂投入前の清水の通水中、二次元電磁流速計により、礫設置区間の上流端から6, 10, 14mの3地点で鉛直流速分布の計測を行うとともに、砂の投入中は、透過光式濁度計により、同じく上流端から10mの地点で浮遊砂鉛直濃度分布を測定した。

3. 実験結果

(1) 鉛直流速分布と鉛直浮遊砂濃度分布

CASE-2, 4 (流量 $0.1\text{m}^3/\text{s}$) の半球擬礫と自然礫それぞれについての鉛直流速分布を図-5に示す。また、同じケースでのマンニングの粗度係数 n と流速係数 $\phi (=v/u_*)$ を砂供給量との関係で図-6に示す。ここで砂供給量は水路の上流端から投入した時間あたりの砂体積を重量換算し流量で割った形で表しており、以後も同様である。砂供給量が増すと粗度係数がやや小さくなっているが、その差は本実験の範囲内では小さい。

やはりCASE-2, 4について、各砂供給量の下で定常になった時の浮遊砂濃度の鉛直分布を図-7に示す。また、砂供給量と礫天端高での浮遊砂濃度の関係を図-8に示す。河床面付近の浮遊砂濃度は、流量一定の下で、砂供給量の増加とともに概ね線形的に増加していることがわかる。

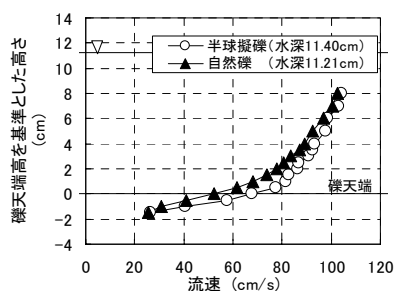


図-5 鉛直流速分布の測定値 (CASE2, CASE4)

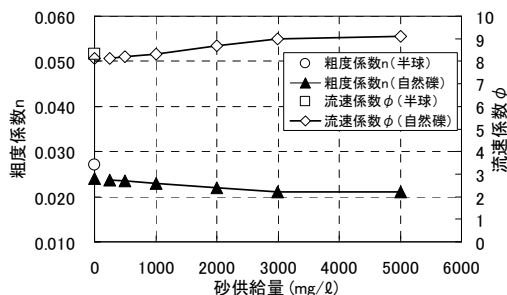


図-6 粗度係数・流速係数 (CASE2, CASE4)

(2) 堆積過程実験の結果

各砂供給量の下で平衡状態になった後の砂の堆積状況を半球擬礫の場合について図-9に例示し、図-10には、平衡状態での砂の堆積高と砂供給量との関係を示す。なお、礫間の砂の堆積高は、砂供給量の増加に伴い大きくなり、礫の間を埋める砂の被覆面積が増加している。ただし、本実験条件での最大砂供給量の下でも、砂が礫間

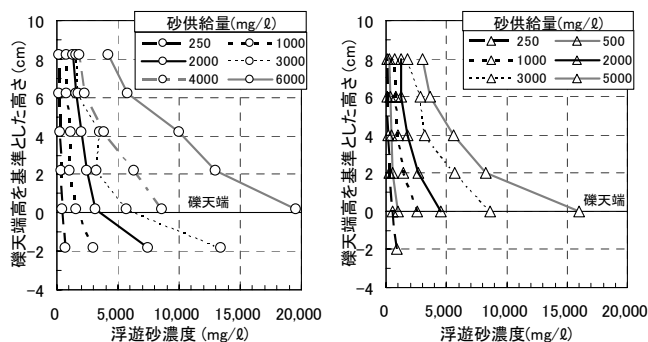


図-7 浮遊砂濃度の鉛直分布の測定値 (CASE2左, CASE4右)

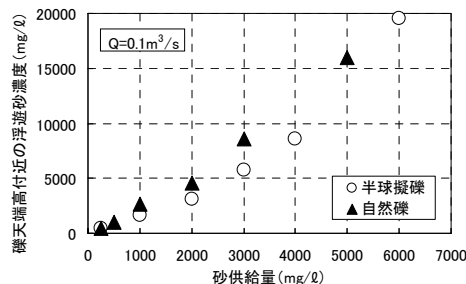


図-8 砂供給量と浮遊砂濃度の関係 (CASE2, CASE4)

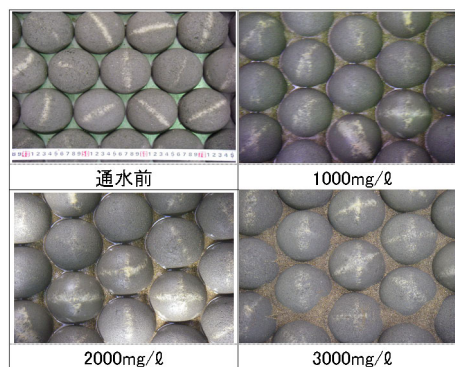


図-9 砂供給量の増大に伴う礫間の砂面積増加状況 (半球: CASE1)

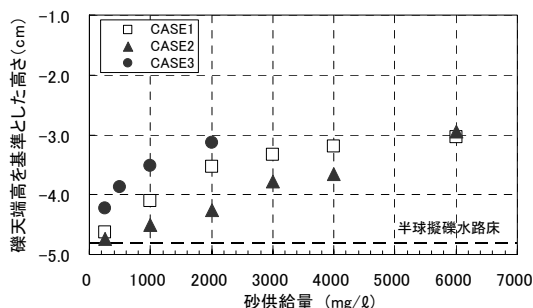


図-10 堆積過程実験による砂面高さと砂供給量の関係 (半球)

を埋めつくし、礫床を全面的に被覆するまでには至っていない。また、砂供給量の増大に伴う堆積高の増加量は、砂供給量の増大とともに小さくなる傾向がある。

同じ水理条件での半球擬礫と自然礫の堆積過程実験の結果を図-11に示す。半球擬礫と自然礫では、砂面高さと砂供給量との関係に違いが生じており、自然礫の場合、砂供給量1000mg/l 辺り（砂面高さでいえば、礫の天端高から-4.0cm程度）を境に、それを越えると砂供給量増加に伴う砂面高さ増の傾きが大幅に鈍化するのに対し、半球擬礫ではそのような鈍化は見られず、全体的に傾きが小さい。また、砂供給量1000mg/l 以上の領域で比較すると、傾きは同程度であるが、礫天端高を基準とした砂面高は、自然礫の方が1cm程度高くなっている。

(3) 抜け出し過程実験の結果

同じ水理条件での、半球擬礫と自然礫の抜け出し過程実験結果を図-12に示す。半球擬礫と自然礫では砂の抜け出し過程でも明確な違いがあり、自然礫の場合、砂の抜け出し速度は遅く、砂面高と礫天端の比高が-4.5cm程度となって以降、さらに鈍化している。

4. 既往の算定式を用いた分析

(1) 巻き上げ速度と基準面浮遊砂濃度について

CASE-2（半球擬礫）とCASE-4（自然礫）の堆積過程実験で平衡状態に達した後の砂面高さや底面付近の浮遊砂濃度を対象に、既存の浮遊砂算定式から計算される結果との比較を行う。既往の算定式が想定している条件は本実験と異なる点があるので、本章では、比較を算定式の評価につなげるのではなく、想定・設定している条件の違いと照らし合わせ、本実験が設定したような場での砂面高予測の課題を把握することをねらっている。条件の違いは、①一様砂でなく砂が河床の一部にしか存在しないこと、②砂が礫間に埋もれた状態になっていること、③水深と粗度高 Δ_s （礫天端と砂面高の差）の比が2~4と小さく、 $u_* \Delta_s / \nu$ が 10^3 のオーダーと大きいこと（ ν ：動粘性係数）、の三段階に大きくは整理できる。

まず、一様砂を対象にした板倉・岸¹⁴⁾による基準面濃度の算定式と本実験結果との比較を図-13に示す。ここで縦軸は巻き上げ速度の形で表している。図中の□印は、礫天端高が概ね基準面位置に相当すると仮定して、礫天端高での浮遊砂濃度測定値 C_T に w_0 を掛けた値をプロットしたものである。半球擬礫、自然礫ともに、実験値が計算値に比較して全体的に小さく、また、砂供給量による値の変化の幅が無視し得ないほど大きくなっている。条件の違い①を考えれば、このズレは当然である。そこで次に、このことを最も単純に考慮した以下のような補正を試みた。図-10や図-11に示したように、河床表面に占める砂面積の割合 a （以後「砂面積率」と呼ぶ）は1以下

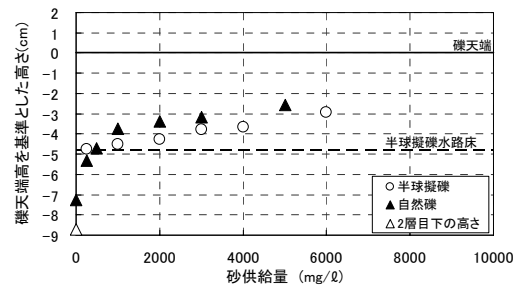


図-11 堆積過程実験から得られた砂面高さと砂供給量との関係 (CASE2, CASE4)

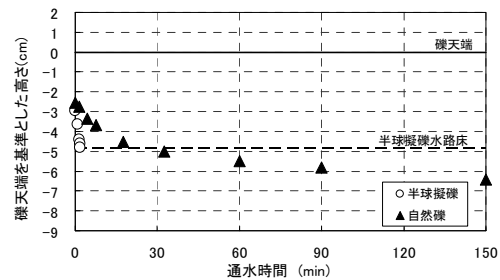


図-12 抜け出し過程実験における砂面高さの時間変化 (CASE2, CASE4)

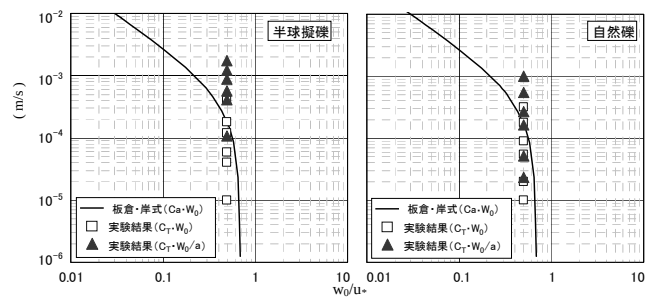


図-13 巻き上げ速度の実験値と一様砂を対象とした浮遊砂量算定式の比較

である。砂の巻き上げは、砂面からしか起こらないので次式が成立すると置く。

$$C_T \cdot w_0 = a \cdot (C_a \cdot w_0) \quad (1)$$

ここで、 C_a は板倉・岸式による基準面濃度であり、式(1)により求めた $(C_T \cdot w_0)/a$ の値が図-13の▲のプロットである。なお、平衡状態における砂面高さ z_s での a は、砂面高さ z_s の実測値より図-4の関係をj用いて与えている。図-13より、補正により実験値は上に移動し、全体としては計算値に近づいているものの、砂供給量の違いによって生じる巻き上げ速度の変化の幅が補正によっては吸収できておらず、さらに、計算値よりも上回るプロットが新たに生じている。以上から、一様砂を対象とした基準面濃度算定式に、砂面積率 a による補正を加えた、すなわち①のみの相違点を考慮しただけでは、本実験で現れた現象を記述するのは難しいことが確認できる。

次に、式(2)に示す芦田・藤田⁵⁶⁾による浮遊砂量算定式との比較を試みる。この算定式は、以下に示すように、少なくとも前述の①②までの相違点が考慮されている。

$$\hat{q}_{su} = \frac{2}{3} K p_f \sqrt{\frac{6}{\pi}} (s+1) \int_{\eta_0}^{\infty} \frac{u_*}{\sqrt{gd}} \sqrt{ck^2 \eta - \frac{\pi}{8} C_{D0} \xi_0^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \eta^2\right) d\eta \quad (2)$$

ここで、巻き上げ速度 q_{su} は、 q_{su} の無次元表示である $\hat{q}_{su}$ に $\sqrt{gd}$ を掛け体積換算することで求まる。ここに、 K ：定数0.035、 $\eta_0 = (\pi/8) C_{D0} \xi_0^2 / (ck^2)$ 、 $s = \sigma/\rho - 1$ 、 $\xi_0 = w_0/u_*$ 、 c ：揚圧力係数、 k ：遮蔽係数、 p_f ：礫径の厚さを持つ河床表層内の砂含有比率である。揚圧力係数 c は、砂粒レイノルズ数と、遮蔽係数 k は砂面高さと礫径の比と関係づけられ、これらの関係は実験から求められている。 p_f は、図-4の関係を空隙体積～高さの関係に変換することで、砂面高より算出できる。

図-14は、図-13と同じように、巻き上げ速度 q_{su} について、計算値と実験値を比較したものである。芦田・藤田の算定式には砂面高の影響が考慮されているので、与えた砂面高さごとに巻き上げ速度の計算値の線が出てくる。この図では、実験値を△印で、計算値のうち該当する砂面高さに対応する値を○印で示している。この図によると、砂面高が増すと巻き上げ速度が増加するという実験値の傾向は計算でも表現されている。一方、実験条件の範囲の中で、砂供給量が（したがって砂面高も）大きい条件では実験値が大きめに、逆では小さめになっており、砂面高変化による巻き上げ速度の変化が小さめに計算されている。

(2) 砂面高について

次に、砂面高さについて計算値と実験値を比較する。

式(2)に示した芦田・藤田の算定法には、式(3)のとおり砂面高 z_s の影響が組み込まれており、巻き上げ速度 q_{su} を規定する他の条件が既知の場合、 q_{su} から砂面高 z_s を求めることができる。

$$\hat{q}_{su} = f(u_*, p_f, k) \quad p_f = g(z_s), \quad k = g(z_s) \quad (3)$$

また、一様砂を対象にした基準面濃度算定式についても、砂面高 z_s が砂面積率 a の一意の関数となる礫形状の場合、式(1)による簡易補正を導入すると、式(4)のとおり、巻き上げ速度 q_{su} から a を求め、その値に対応する z_s を計算できる。

$$q_{su} = f(u_*, a) \quad a = g(z_s) \quad (4)$$

以上、二つの方法で計算した結果と実験値との比較を図-15に示す。なお、後者の方法については、一様砂を対象にした基準面濃度算定に板倉・岸の式を用いている。また、自然礫は図-4に示す通り z_s と a の関係が複雑なので、後者の方法による計算は行っていない。

この結果、いずれの方法についても砂供給量の増大に伴う砂面上昇の傾きが計算値が実験値よりも大きくなること、加えて、式(4)と板倉・岸の式を組み合わせた方法では砂面高が全体的に高めに計算されることがわかる。

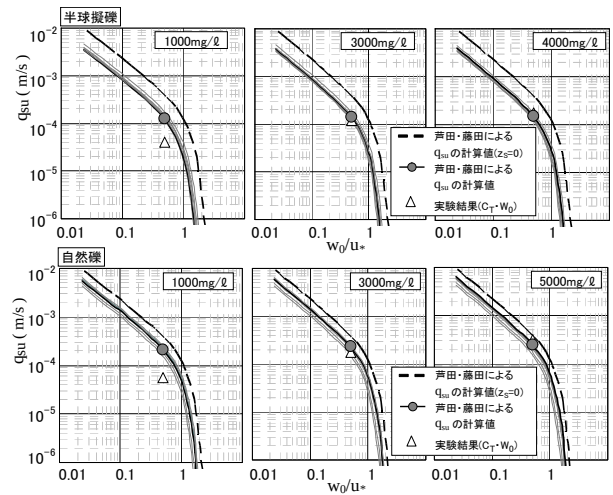


図-14 q_{su} の実験値と芦田・藤田式計算値の比較

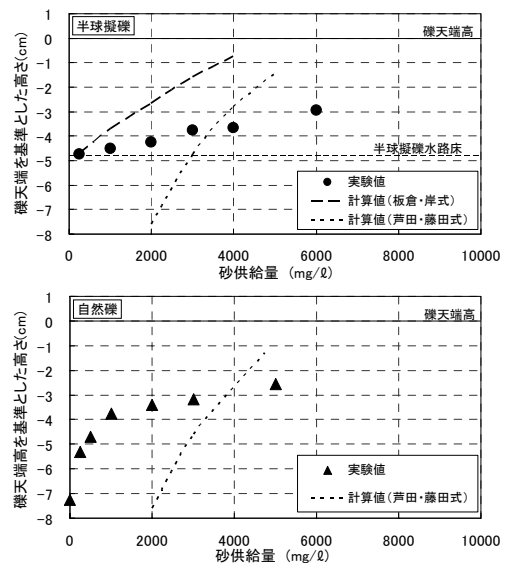


図-15 砂面高さの実験値と計算値の比較

5. 考察

前章に示した分析の結果を解釈する際には、従来から指摘されているように、基準面のとり方が種々の算定に大きな影響をもたらすことに留意する必要がある。本論文では、礫天端高を基準面位置として検討を行ったが、本実験のような水深礫径比の小さい大礫床上の浮遊砂に関する基準面のとり方には課題を残す。ただし、図-7や図-8からわかるように、砂供給量の増大に応じて、底面付近の浮遊砂濃度は線形的に増大しており、基準面のとり方を少々変えても、砂供給量の増大（したがって砂面高の上昇）に伴う C_a 増大の基本的傾向は変わらない。したがって、大礫床上の浮遊砂の挙動を理解する上で、 $C_a \cdot w_0$ の変化に関する本実験での特性を水理的に説明することが重要であるという点は、基準面のとり方の曖昧さを考慮してもなお変わらないと考えられる。

また、流量が一定でも、砂堆積が進み、砂面高が上昇することにより底面の粗度高 Δ_s が小さくなり、流れの抵抗が減ることの影響にも留意する必要がある。図-6にも、砂供給量の増大（したがって砂面高の上昇）に伴う抵抗の減少が現れている。しかし、前述のように、本実験条件の範囲内に限れば、抵抗の減少幅は小さく、摩擦速度に与える影響も小さいので、抵抗減少の影響は重要ではないと判断して良さそうである。ただし、さらに砂面高が上がれば、粗度高の減少が顕著となって、浮遊砂現象にも有意な影響が出てくると推定される。

以上を踏まえつつ、4章の分析内容を以下のように考察する。一様砂を対象とした浮遊砂量算定式に砂面積率だけの補正を行っても、砂面高の変化に伴う $C_T \cdot w_0$ の変化を吸収できないことから（図-13参照）、4(1)で述べた相違点②、すなわち砂が礫間に埋もれた状態になっていることの効果、具体的には遮蔽などの影響を考慮する必要があると言える。その遮蔽効果が組み込まれた芦田・藤田の算定法を用いて砂面高を計算すると、砂供給量の増大に伴う砂面高変化が実験よりも大きく、すなわち鋭敏に計算されることから（図-15参照）、本実験条件における遮蔽効果が砂面位置が低いときには計算での想定より大きく、砂面位置が高いときは計算での想定よりも小さくなっていると捉えることができる。この理由に関しては、4(1)で述べた相違点③、すなわち水深・粗度高比が小さいことの影響、あるいは粗度高 Δ_s を長さのスケールに用いた粒子レイノルズ数が従来の実験^{5),6)}より 10^2 オーダーで大きいことの影響、さらには大礫が作る乱れの効果¹⁵⁾などを可能性のある要因として指摘できる。しかし、それらの影響度の評価には、砂面高増大に伴う抵抗減少の影響も合わせ、さらに検討が必要である。

なお、同一の実験条件の下で、砂面高が-4.5~-2.5cmの範囲では自然礫の方が半球擬礫よりも砂面高が大きくなっている（図-11参照）。この砂面高の範囲では自然礫の空隙断面積割合が半球擬礫よりも大きい（図-4参照）。にもかかわらずこのような傾向が出たのは、半球擬礫が上方に開いた形状を持ち、遮蔽効果を受けにくいと考えられる。このことは、礫形状や礫群の配置特性が砂面高に一定の影響を持ちうることを示す。

6. 結語

山地部河道の状況を意識して、水深礫径比が小さく、礫砂粒径比が大きい条件を設定し、流量一定かつ等流の下、浮遊砂が卓越する水理条件で一定の砂供給量を与え続けて平衡状態に至った段階での大礫間への砂の堆積状況を実験で調べ、その結果に基づいて検討した。主要な結果を要約すると次のようである。

1)砂供給量の増大とともに大礫間にある砂面の高さが上昇するという明確な関係が得られた。この関係は、砂

供給条件の変化に対する河床表面状態の応答を簡潔に表す基本特性として重要である。

- 2)半球擬礫の方が砂面高の上昇が鈍いなど、礫形状がこの関係に一定の影響を与える。
- 3)砂供給量の増大に伴い砂面高が上昇するという傾向は河床表面での砂の存在割合と礫による遮蔽効果が考慮された既往の浮遊砂量算定式で表しうるが、本実験における砂面高上昇の度合いは計算値に比べかなり鈍い。
- 4)この理由として、砂面高変化に伴う遮蔽効果の変化が本実験においてより大きくなっている可能性を指摘できる。上記1)の関係の予測精度を上げるには、この点についてさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：ダムが河川の物理的環境に与える影響—河川工学及び水理学的視点から—、応用生態工学、Vol.2, No.2, pp.103-112, 1999.
- 2) 谷田一三、竹門康弘：ダムが河川の底生動物に与える影響、応用生態工学、Vol.2, No.2, pp.153-164, 1999.
- 3) 山原康嗣、藤田光一、小路剛志ほか：ダム上下流で水理条件がほぼ同様な河道区間の河床材料比較、河川技術論文集、第13巻、pp.147-152, 2007.
- 4) 皆川朋子、片野泉、萱場祐一、河口洋一：ダム下流における付着藻類の特徴と支川合流の影響—阿木川ダムを事例にして—、応用生態工学会、第10回研究発表会講演集、pp.15-18, 2006.
- 5) 芦田和男、藤田正治：河床粒子の浮遊機構とそのモデル化、第375号/II-6, pp.79-88, 1986.
- 6) 芦田和男、藤田正治：平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル、土木学会論文集、第375号/II-6, pp.107-116, 1986.
- 7) 道上正規、藤田正治、北川豊広、三村光太郎：空隙の大きな河床への浮遊砂の沈み込み過程と非平衡浮遊砂、水工学論文集、第38巻、pp.609-614, 1994.
- 8) 福島雅紀、末次忠司、瀬崎智之：透礫層の形成とその充填機構に関する研究、水工学論文集、第50巻、pp.777-782, 2006.
- 9) 辻本哲郎、藤田光一：流砂系管理に向けての学術・技術の展開の方向、河川技術論文集、第10巻、pp.13-18, 2004.
- 10) 藤田光一：流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望、土木学会、2000年度（第36回）水工学に関する夏期研修会、B-4-1~4-15, 2000.
- 11) 江頭進治、金海、竹林洋史、池田晶、永田徹：木津川下流域の河床変動と土砂収支、水工学論文集、第44巻、pp.777-782, 2000.
- 12) 関根正人、矢島英明：礫・シルト充填河床モデルを用いた植生を伴う流路の変動解析、水工学論文集、第49巻、pp.991-996, 2004.
- 13) 関根正人、林将宏：礫・シルト充填河床モデルを用いた礫河道の準二次元河床変動解析、水工学論文集、第51巻、pp.973-978, 2007.
- 14) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Proc. of ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol.106, HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 15) 芦田和男、岡部建士、藤田正治：粒子の浮遊限界と浮遊砂量に関する研究、京都大学防災研究所年報、第25号B-2, pp.401-416, 1982.