

砂供給量の増減に伴う礫床面への砂充填・堆積 状況の変化に関する実験

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHANGE OF SAND FILLING AND
ACCUMULATION OVER A GRAVEL RIVER BED WITH SANDY SEIMENT
SUPPLY

竹中 裕基¹・中村 圭吾²・服部 敦³
Yuki TAKENAKA, Keigo NAKAMURA, Atsushi HATTORI

¹正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(現 国土交通省 大臣官房技術調査課 (併) 観光庁 観光地域振興部 観光資源課)
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(現 国土交通省 近畿地方整備局 福井河川国道事務所)
(同上)

³正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(同上)

In this study, we conducted the open channel experiment in order to examine the effect of sediment supply upon the riverbed downstream of dams. Sediment supply practiced to restore the riverbed environment, but excessive sediment sometimes causes negative environmental effect upon the riverbed.

Our experiment aimed to understand the riverbed changes by sandy sediment supply on the gravel riverbed. The experiment used the open channel with three-layered gravel riverbed filled with sand, and the height of sand surface was measured. Flow condition was controlled by the ratio of the friction velocity and sedimentation rate (u^*/w_0) and the suspended sediment concentration.

As a result, the entrainment rate into suspension and the surface height of sand against several u^*/w_0 was obtained. The experiment result makes it possible to set the condition avoiding excessive sediment supply using the suspended sediment concentration and u^*/w_0 .

Key Words : gravel riverbed, sand supply, comprehensive sediment management, sand deposit

1. はじめに

流砂系は、流域の上流から海岸まで一貫した土砂の運動領域と定義される。河道、海岸、砂防区間などにおける土砂問題に対して、各区間での各々の対策に加え、流砂系として各区間を一続きとして捉え、相互の土砂のやり取りのもとで区間の異なる複数の課題を一体的に改善しうる対策を加える、という総合的な土砂管理の枠組みが提唱され¹⁾、今日に至るまで河川、海岸、砂防の分野において実践が進められている。

総合的な土砂管理計画において、ダム貯水池に堆砂した土砂を下流へと流す土砂還元について検討されている。その具体的な土砂還元量を設定するために、礫床面を維

持できる、すなわち砂の還元によって礫が砂に埋没しないような土砂供給を実現することが、本研究の狙いの一つである。

そのためには、図-1に示すような洪水低減期において、砂供給前の流量 Q と流砂量 Q_s の関係（以下、 $Q-Q_s$ ）に加え、砂による礫の埋没を引き起こさないため、土砂を流すことのできる物理的な限界量である $Q-Q_s$ 関係について把握する必要がある。またその結果をもとに、小流量時には掃流力が低下し河床が砂により埋没しやすくなるが、どの程度流量が低減した際に砂供給を低減・停止するか、すなわち出水末期における本来の $Q-Q_s$ 曲線への擦り付けやそれに伴う砂供給時間について検討をする必要がある。

以上のような検討を行い、目標とする河道を実現するためには、セグメント1やセグメントM区間を想定した

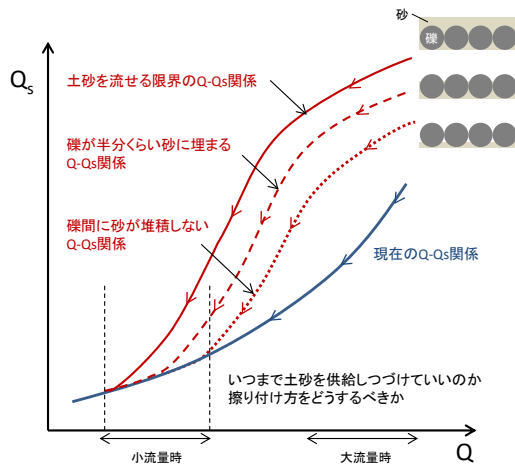


図-1 洪水低減期における Q - Q_s 関係設定の概念

礫床面に砂が堆積し、その状況に応じて巻き上げられる浮遊砂量が変化するという洪水時の基礎的な知見が不可欠である。

礫床上を流下する砂についての検討は、藤田ら²⁾が半球と自然礫による模擬的な礫河床を再現し、砂供給量を系統的に変化させ砂供給量の増大に伴う礫間の砂捕捉状況について検討している。関根ら³⁾は、河床が粒径差のある3つの粒径集団区分からなると仮定し、移動しない大粒径の遮蔽係数などについて検討を行っている。原田ら⁴⁾は、大規模な実験河川を用い、動かない礫間を砂が掃流状に流下する状況において検討している。福島ら⁵⁾は大礫が流砂に及ぼす影響について検討している。このように、礫床上の砂の流送についてはいくつかの研究が行われている。特に藤田らの研究は、大礫と浮遊砂の基本的な関係性を示しているが、本研究の目的に対する適用性について不明確な部分が存在する。

そこで本研究は、河床をより実態に近づけ、出水時の流況を想定し、水量及び浮遊砂濃度を变化させ礫床に砂を供給した際の河床変化に関する水理実験を行った。その実験結果を基に浮遊砂量と流量の関係性について考察することで、 Q - Q_s 関係の基礎的知見を得、洪水低減期適切な土砂還元量の検討に寄与するものである。

2. 実験方法

本実験は、礫の配置（礫間の空隙率）の異なる2パターンと、礫間に充填する砂の粒径の異なる2パターン、浮遊砂の有無の2パターンおよび水量を5パターン程度に変化させて礫間の砂面高について検討を行った。

実験は写真-1及び図-2のように砂・水を循環させて通水可能な開水路（幅1.0m×高さ0.8m×長さ30m）を用いて行った。河床については、礫間からの砂の抜け出しにより水路床面が露出しない十分な礫層厚を確保するため、水路に平均粒径約100mmの礫を3個重ねた厚さ（20cm程



写真-1 実験水路内の礫設置状況

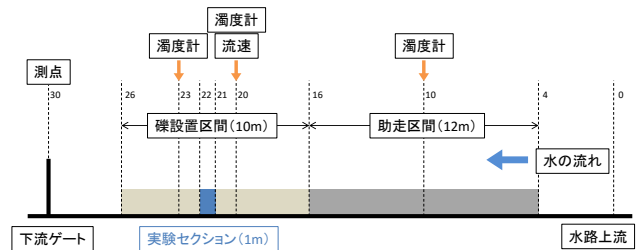


図-2 実験水路概略図



写真-2 格子状配置(左)とランダム配置(右)

度)で敷き詰め、図-2の実験セクション（1m）または礫設置区間に礫頂部まで砂を充填する。この状態から一定流量を断続的に通水して砂面高（礫天端高から礫間砂面までの距離）が経時的に変化していく状況を測定する実験を、通水流量及び砂粒径等を変えて実施した。

礫の配置については、実験水路内において現地河川の状況を厳密に再現することは難しい。また河川ごとに礫配置の疎密が異なり、礫の配置によって砂の堆積傾向は異なるものと考えられる。そこで、礫をできる限り格子状に近づけて配置した格子状配置と、空隙率を変化させることを目的としてある程度疎に配置したランダム配置の2パターンを用意し、河床の礫配置及び空隙率による変化について感度分析的に検討できるようにした。礫面の基準高とした礫天端（最上部に位置する礫群の頂部高さの平均値）から水路床面までの礫層厚は、格子状配置で19.98cm、ランダム配置で18.26cmである。また、礫の設置においては、通水中に礫の移動が生じないよう礫と水路底面及び礫同士をシリコン製ボンドにより固定した。礫配置状況と空隙率は写真-2及び図-3のとおりである。

礫間に充填する砂は平均粒径0.14mm（以下、細砂）及び平均粒径0.37mm（以下、中砂）の2種類を用意した。充填は手作業で隙間のないよう充填し、水締めを行った。通水流量は、摩擦速度 u^* と砂の沈降速度 w_0 の比である

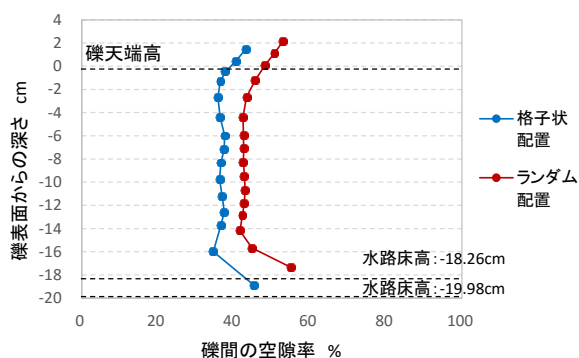


図-3 礫層の空隙率の鉛直分布

表-1 実験条件

実験ケース	礫配置	対象砂 d(mm)	流量 (m ³ /s)	水深 (cm)	u^*/w_0	平均濃度 (mg/l)
CASE I-1 循環無	1	細砂 0.14	0.115	26.88	2.3	
	2		0.150	28.50	3.3	
	3		0.195	28.87	4.2	
	4		0.276	29.40	6.0	
	5		0.400	29.03	8.2	
	6		0.508	29.75	10.4	
CASE I-2 循環有	1-1		0.150	28.50	3.3	2
	1-2					8
	2-1		0.195	28.87	4.2	43
	2-2					145
	3-1					106
	3-2		0.276	29.40	6.0	362
	3-3					1057
	4-1					244
	4-2		0.400	29.38	8.2	1362
	4-3					1057
CASE I-3 循環無	1	中砂 0.37	0.180	29.62	1.1	
	2		0.255	28.34	1.6	
	3		0.320	30.01	1.9	
	4		0.420	29.34	2.5	
	5		0.508	30.70	3.0	
	6		0.508	30.70	3.0	
CASE II-1 循環無	1	細砂 0.14	0.115	27.70	2.4	
	2		0.195	30.21	4.1	
	3		0.276	31.71	6.0	
	4		0.400	30.62	8.2	
	5		0.508	32.23	10.4	
	6		0.508	32.23	10.4	
CASE II-2 循環有	1-1		0.195	30.37	4.1	33
	1-2					214
	2-1					77
	2-2		0.276	31.71	6.0	210
	2-3					635
	3-1					443
	3-2		0.400	30.62	8.2	1098
	3-3					1833
CASE II-3 循環無	1	中砂 0.37	0.180	29.57	1.0	
	2		0.255	29.00	1.6	
	3		0.320	31.05	2.0	
	4		0.420	30.17	2.5	
	5		0.508	32.23	3.0	
	6		0.508	32.23	3.0	

u^*/w_0 を、細砂では2～10の範囲、中砂では1～3の範囲となるように設定した。ここで、摩擦速度は、細砂において3.0～14.0cm/sの範囲、中砂において4.9～14.2cm/sの範囲をとる。沈降速度はRubey式（水温15℃）により算定し、細砂において1.4cm/s、中砂において4.7cm/sである。

本実験では礫間からの浮上率（礫面単位面積あたりからの砂の巻き上げ量） E と u^*/w_0 との関係について把握すべく、2つの通水手法を採用した。1つ目は、浮遊砂を含まない清水を一定時間通水し、実験セクションにおける砂面高の変化量から浮上率を把握する手法である（循環無）。しかし、清水による通水は通水初期段階においては、短時間で砂面高が大きく低下し、計測が困難であった。そのため、2つ目の手法として、浮遊砂を含む水を

通水し、砂面高が安定した際の基準面濃度 C_a と沈降速度 w_0 から浮上率を把握する手法をとった（循環有）。これにより、清水による通水の初期段階における計測困難な時点の浮上率を補完するものとした。なお、循環有のケースにおける浮遊砂濃度の設定については、 u^*/w_0 ごとに2～3ケースの濃度を設定した。ただし、循環有の通水では実験機器の関係により中砂による実験は行わなかった。循環有の通水では、礫設置区間に砂を充填した。

砂面高は、実験セクションにおいて63点の計測地点においてポイントゲージで設定し（図-2参照）、その平均値として算定した。また、水深方向の流速分布については実験セクションの1m上流で、同じく浮遊砂濃度分布については10m上流、1m上流、1m下流で測定を行った（循環有では1m上流のみ）。循環有の実験では、透過型濁度計により連続的に浮遊砂濃度を計測し、時間的な変化が小さくなり平衡に達したと見なせる状態に達した後に、浮遊砂量 Q_s および u^*/w_0 などの測定を行った。

各実験ケースの条件については、表-1のとおりである。

3. 実験結果

(1) 循環無（浮遊砂なし）ケースの結果

実験結果の例として、浮遊砂なし・格子状配置における通水時間ごとの側面の様子を図-4に示す。また、 $u^*/w_0=2.3$ のケースについては礫床面の状態を示している。これを見ると通水時間が経つごとに砂が礫間から抜けだしている。 $u^*/w_0=8.2$ 及び10.4では、2層目の礫の間の砂もほとんどが抜け出していることが分かる。循環無のケースにおける通水時間と砂面高の関係を図-5及び図-6に示す。細砂による充填を行ったCASE I-1では、 u^*/w_0 の値が2.3と4.2の間に大きく開きがある。 $u^*/w_0=2.3$ では、通水による砂の吸い出しは少なく、通水時間1000分を超えても礫1層分の目安である砂面高さが6cmを超えることがない。しかし、 $u^*/w_0=4.2$ 以上の水理量では4.2では30分、6.0以上では5分以内に6cm以上の砂が流出していることがわかる。 $u^*/w_0=8.2$ 及び10.4では、砂面高が礫2層分である12cmを下回っても砂面高が低下し続けていることがわかる。 $u^*/w_0=2.3$ と4.2の間に大きく開きがあるため、参考として $u^*/w_0=3.3$ で実験を行った。 $u^*/w_0=3.3$ では通水開始から800分で砂面高が6cmに達している。

中砂による充填を行ったCASE I-3では、 $u^*/w_0=1.1$ で既に砂面高が礫1層分に達している。 $u^*/w_0=2.5$ 及び3.0では砂面高が礫2層分に達しているがそこで砂面高の低下はおおよそ停止している。

また、格子状配置とランダム配置における差については、細砂における $u^*/w_0=2.3$ 、4.2、6.0及び、中砂における $u^*/w_0=1.6$ 以外では、同じ通水時間においてランダム配置の砂面高がより低下している。

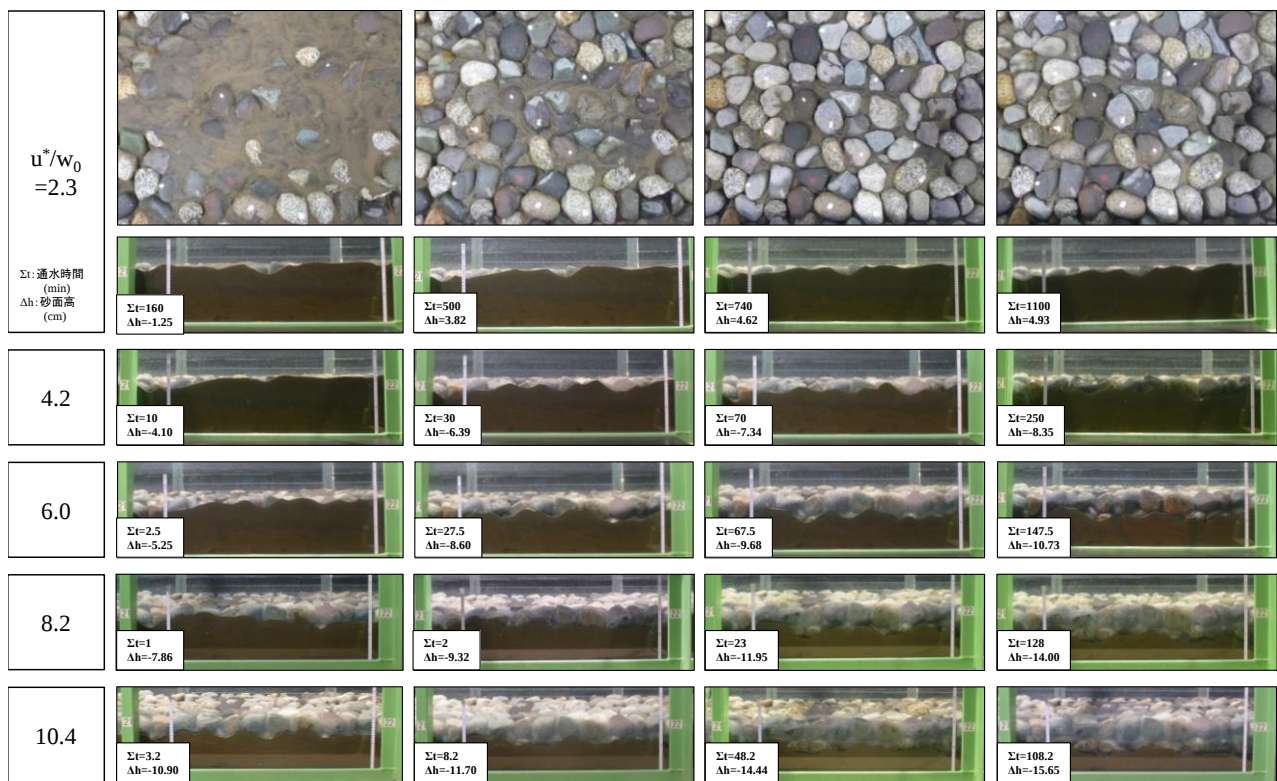


図-4 浮遊砂なし・格子状配置における通水時間ごとの砂面高

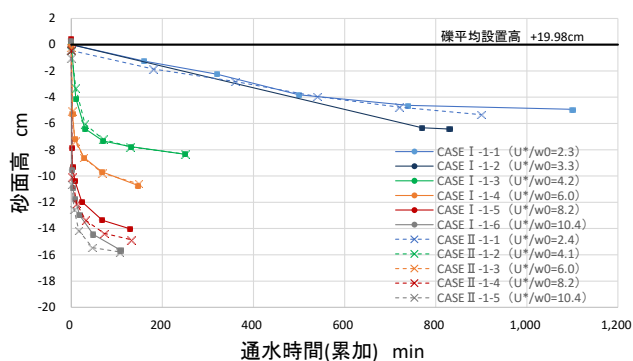


図-5 CASE I-1及びCASE II-1の通水時間と砂面高の関係

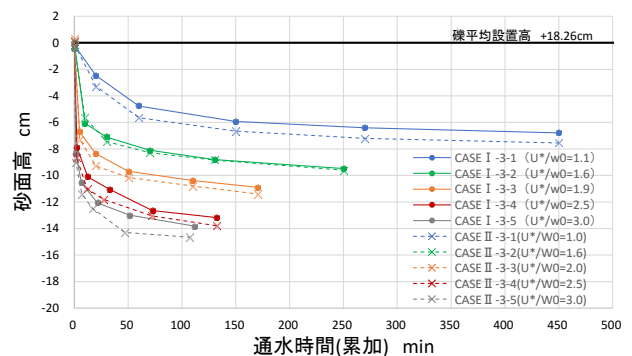


図-6 CASE I-3及びCASE II-3の通水時間と砂面高の関係

(2) 循環有（浮遊砂あり）ケースの結果

循環有実験結果例について図-7に示す。また、循環有実験における各ケースの平均濃度と基準面濃度 C_0 を表-2に示す。ここでは、礫間から抜ける砂粒子と w_0 の積を浮上率とすることから、基準面濃度の基準面位置を流水と礫の境界である礫の平均天端高とした。また、濃度分布の測定値と、Lane-Kalinske式による濃度分布を図-8に示す。ここで式による濃度分布は、水面側の測定値にフッティングして、平均礫天端高まで外挿することで得たものである。測定値は底面で濃度が大きくなる特徴的な分布をよく捉えているが、濃度分布式に比較して基準面における濃度が大きな値となった。これについては今後の課題となった。

図-7における浮遊砂濃度が0mg/lの場合の砂面高は、図-5, 6に示した各ケースの最終通水後の測定値である。浮遊砂濃度0mg/lの場合は礫2層目まで砂面高が低下して

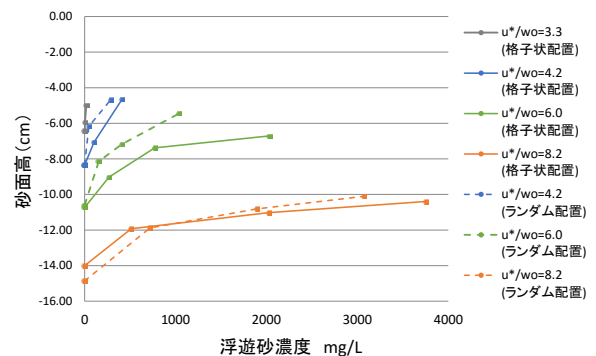


図-7 平均濃度と砂面高の関係

いるが、浮遊砂濃度を上昇させるにつれて砂面高が上昇している。図-7のとおり浮遊砂なしに比べ、浮遊砂濃度の増加にともなって砂面高が上昇するが、その増分は低減していくという関係性わかる。また、 u^*/w_0 が小さい程、低濃度での砂面高の増分が大きくなる傾向が見られた。

表-2 循環有における浮遊砂平均濃度と基準面濃度

u^*/w_0	格子状配置		ランダム配置	
	平均濃度	基準面濃度	平均濃度	基準面濃度
	SS(mg/L)	SS(mg/L)	SS(mg/L)	SS(mg/L)
3.3	4	12	—	—
	19	54	—	—
4.2	103	341	46	82
	413	1461	288	476
6.0	268	916	154	381
	771	2125	411	1116
	2034	6386	1040	2134
8.2	513	871	719	1079
	2025	2707	1896	2843
	3752	5237	3077	4619

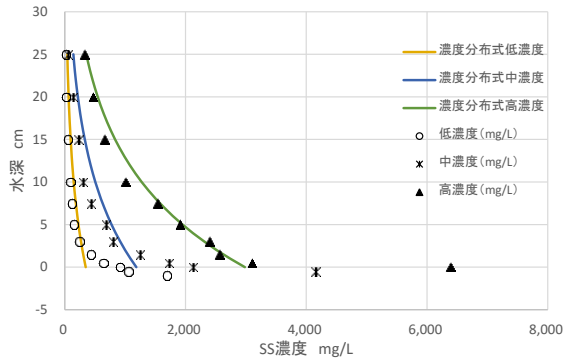


図-8 濃度分布の実測値と推定値($u^*/w_0=6.0$)

また、図中の実線は格子状配置、破線はランダム配置における浮遊砂濃度と砂面高の関係を示しており、これらを比較すると、ランダム配置の方がより大きく砂面高が増加している。

4. 礫間からの砂巻き上げに関する考察

(1) 砂面高と浮上率の関係について

実験から得られた結果をもとに、洪水時の浮遊砂と礫間への砂充填について考察を行う。まず、砂面高と浮上率の関係性について図-9および図-10に示す。ここで、図中の浮遊砂なしの浮上率は各通水間での砂面高の変化幅から得られる抜け出した砂の総体積を通水時間により除すことで算定したものである。また、浮遊砂ありのプロットは、基準面濃度 C_a (表-2に示した値) と沈降速度 w_0 を掛け合わせることで求めたものである。

本実験によると、概ね2~3cmの河床低下(礫粒径で無次元化すると0.2~0.3)とともに浮上率が1オーダーずつ変化していることがわかる。

(2) 礫の配置による影響

図-9と図-10を比較すると、浮上率は同一の u^*/w_0 に対してほぼ同様の値をとることがわかる。特に $u^*/w_0=4.2$ 及び6.0では、礫の配置による差は全般的に小さい。例えば、図中における砂面高-6cmや-10cmを見るとオーダーの単位では違いがない。しかしながら、ランダム配置の

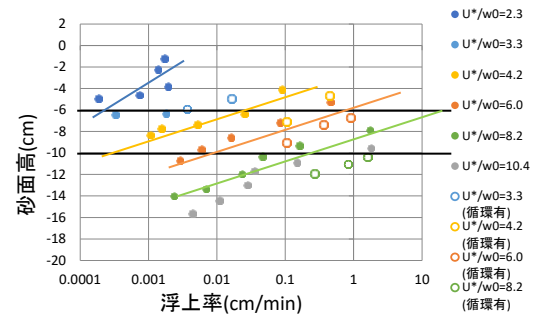


図-9 浮上率と砂面高の関係(細砂, 格子状配置)

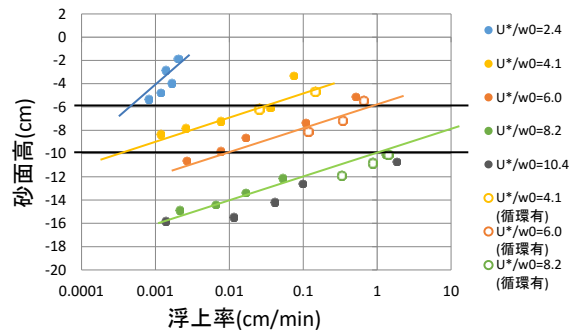


図-10 浮上率と砂面高の関係(細砂, ランダム配置)

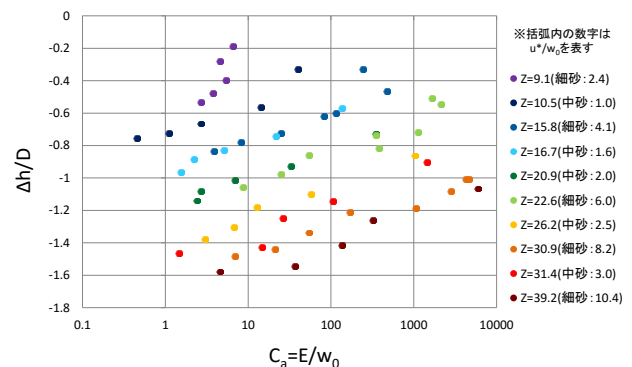


図-11 浮上率と砂面高の関係(式(1)による無次元化)

ほうが、同じ砂面高でも浮上率が大きくなる傾向が若干見られる。特に $u^*/w_0=8.2$ 及び10.4では、その差が大きくなり、1オーダー程度の差となり、無視できない値となっている。

(3) 粒径の違いによる影響

細砂と中砂の粒径の違いによる影響を見るために、縦軸は砂面高と礫の粒径の比である $\Delta h/D$ を、横軸は基準面濃度 C_a ($=E/w_0$)を用いプロットしたものが図-11である。ここで、Akiyamaほか⁶⁾やGarciaほか⁷⁾は、基準面濃度が u^*/w_0 に粒子レイノルズ数 $Re_p=(sgd)^{0.5}d/\nu$ (ここで、 s :土粒子の水中比重、 ν :水の動粘性係数)の m 乗を乗じた変数 Z の関数として評価できることを提案している。ここで m は、Akiyamaほかは0.5、Garciaほかは0.6を提案している。本研究では検討の結果、 $m=0.7$ と設定し、式(1)による Z 値に応じて色を変えてプロットを行っている。

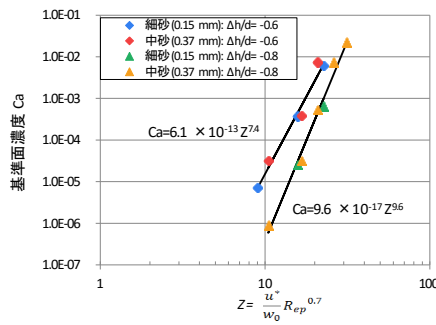


図-12 Zと基準面濃度Caの関係（ $\Delta h/D = -0.6, -0.8$ の場合）

$$Z = \frac{u^*}{w_0} R_{ep}^{0.7} \quad (1)$$

この結果を見ると、あるZに対する基準面濃度 C_a と $\Delta h/D$ の関係は図上で概ね直線（対数式）で近似できること、その位置はZの増加に伴い若干傾きを緩くしつつより小さい $\Delta h/D$ の側に移動する傾向が見られる。ここで、この傾向がZを用いることによって細砂・中砂の区別なく表せていることから、本実験で対象とした礫床からの砂の巻き上げに対しても、既往の基準面濃度の評価手法を適用しうる可能性があると考えられる。

そこで、図-11の C_a と $\Delta h/D$ の関係を対数式で近似し、 $\Delta h/D$ が-0.6、-0.8となる C_a とZの関係を算定した結果を図-12に示す（ランダム配置の場合）。ここで-0.6および-0.8は、砂供給によって礫が砂に埋没しない状況を仮に表すとして、その差異が浮遊砂濃度としてどの程度の大きさの差異となって現れるかの感度分析を目的として設定したものである。各 $\Delta h/D$ の近似曲線を見ると、そのべき乗数は-0.6では7.4、-0.8では9.6となった。Akiyamaほか⁶⁾のべき乗数10およびGarciaほか⁷⁾の5と比較すると、それら中間的な値となった。また、図-12より $\Delta h/D$ の0.2の差異により基準面濃度が1オーダー以上異なることが分かる。さらに、中砂は細砂に比較して R_{ep} が4.3倍大きいことに留意すると、 u^*/w_0 すなわち流量の低下に伴って基準面濃度をより大きく減じないと、 $\Delta h/D$ が-0.6、-0.8を越える砂堆積が生じやすいと考えられる。

5. 結論

水理実験は水路床に平均粒径約100mmの大礫を3層に敷き詰め、砂を充填した状態で水理量及び浮遊砂を変化させながら通水を行い、各実験ケースにおいて礫間の砂面高を得た。そしてこの実験結果をもとに考察を行った。

その結果、細砂において u^*/w_0 が4を下回ると礫間からの砂の浮上率が大きく低下することがわかった。また、 $u^*/w_0 = 3 \sim 4$ 程度の水理量では少量の浮遊砂でも砂面が大きく上昇することから、洪水の低減期における河道への土砂投入は慎重に行う必要があることが示唆された。また、 u^*/w_0 が8を超えるような水理量では、礫粒径の2つ分

砂面高が低下するほどの砂の抜け出しが確認された。

浮遊砂と砂面高の関係については、浮遊砂なしの通水において空隙率の大きなランダム配置では、格子状配置に比べて砂面高が低下するケースが見られた。しかし浮遊砂がある場合には、砂面高が格子状配置よりも上昇する傾向を確認することができた。

また、浮上率と砂面高の関係については、浮上率は砂面高のべき乗に比例する関係が見られた。また、 u^*/w_0 の上昇とともに同じ砂面高でも浮上率が大きくなるという基本的な傾向が認められた。また、異なる粒径についても基準面濃度の関数Zを用いることによって、評価が可能であることを示唆した。これらの結果をもとに礫が砂に埋没しないための u^*/w_0 と基準面濃度の関係性について整理を行った。礫が砂に埋没しない状況として、砂面高が礫粒径の半分以上となることを一つの目安と仮設定し、それを満たす浮遊砂濃度と u^*/w_0 の組み合わせを図-12に示すように得ることができた。

この関係をもとに洪水の低減期における砂供給量を調整すれば、礫の砂埋没を防止できると期待される。礫間への砂充填による河道の状況や環境への影響の大きさなどの知見に基づいて仮設定を今後見直す必要があるが、上記の成果は $Q-Q_s$ 関係の設定に寄与すると考えている。

参考文献

- 1) 河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会：「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」報告，http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/shingi/980730in.html, 1998.
- 2) 藤田光一，山原康嗣，富田陽子，伊藤嘉奈子，小路剛志：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，水工学論文集，第52巻，pp.547-552，2008.
- 3) 関根正人，平松裕基，三國寛正，門井勇樹：三つの粒径集団からなる河床の静的安定状態と遮蔽効果，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，pp.1931-1936，2012.
- 4) 原田守啓，藤田裕一郎，水上精栄，萱場祐一：実験河川石礫床区間への土砂供給による河床状態と流水抵抗の変化に関する実験的研究，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.67，No.4，pp.1763-1768，2012.
- 5) 福島雅紀，櫻井寿之，箱石憲昭：大きな石による河床再生技術に関する実験的検討，水工学論文集，第54巻，pp.763-768，2010.
- 6) Akiyama, J., and Fukushima, Y.: Entrainment of noncohesive bed sediment into suspension, Third International Symposium on River Sedimentation, S. Y. Wang, H. W. Shen, and L. Z. Ding, eds., The University of Mississippi, Mississippi, pp.804-813, 1986.
- 7) Garcia, M. H., and Parker, G.: Entrainment of Bed Sediment into Suspension, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(4), pp.414-435, 1991.

(2016. 4. 4受付)