

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

Deposition and Transport Processes of Suspended Load on a Channel Bed with a Large Porosity

道上正規*・藤田正治**・北川豊広***・三村光太郎****

By Masanori MICHIE, Masaharu FUJITA, Toyohiro KITAGAWA and Koutarou MIMURA

In this paper, deposition and transport processes of suspended load on a channel bed with a large porosity are discussed. These processes might be observed in mountain rivers, particularly in deposition areas of debris flow. In such a field, suspended load would fall into the bed layer and its transport rate would decrease in the streamwise direction. With an attention focussed on the difference of the deposition processes due to the geometrical size of the porosity, the deposition and transport processes are investigated experimentally and its numerical model is presented.

Keywords: suspended load, porosity, deposition, non-equilibrium

1. はじめに

礫床河川のある区間の河床が大粒径の礫や巨石である程度の厚さで構成されていると、河床の空隙が非常に大きいために、上流から流送されてきた浮遊砂の大部分は、その区間の河床の中に沈み込み、浮遊砂濃度は非平衡状態になる。山地河川の浮遊砂の流送過程には、場合によってはこのような沈み込み現象に伴う非平衡浮遊砂の過程が含まれる場合もあるものと考えられる。本研究は、このような場を対象として、浮遊砂の河床材料への沈み込み過程とそれに伴う非平衡浮遊砂濃度について実験と理論から検討するものである。まず、沈み込み過程を支配するパラメータを示し、沈み込み過程のモデル化を行なうとともに、沈み込み過程に及ぼす流水の影響、河床の礫層が二粒径混合砂で構成されている場合の沈み込み過程について検討する。さらに、水路実験によって、浮遊砂の沈み込み過程とそれに伴う非平衡浮遊砂の過程を考察し、そのシミュレーション方法を提示する。

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学助教授 地域共同研究センター

(〒680 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

*** 正会員 工修 岡山県庁

(〒700 岡山県岡山市内山下2-4-6)

**** 学生会員 鳥取大学大学院土木工学専攻

2. 礫層への細砂の沈み込み過程

2.1 沈み込み過程の支配パラメータ

浮遊砂の礫層への沈み込み過程のみに着目して、図-1のような粒径 d_r の粗礫層に、粒径 d の細砂が単位時間、単位面積当たり q_d の割合で真上から散布される場合を考える。ただし、外部から礫層に振動が与えられることはないものとする。 d_r が d に比べて十分大きいときは、細砂は容易に礫層中を落下し、礫層の底面にまで到達するが、 d_r が小さいときは、礫層に沈み込まないかまたは礫層中のどこかの位置に捕捉され、細砂が礫層の底面に達しない場合もある。このような現象は、礫層の空隙の代表スケール l_s と細砂の粒径 d との比に最も強く影響されるものと考えられる。 l_s は礫を直径 d_r の球と仮定して一つの空隙の体積の立方根で代表されるものとする、このパラメータは、次式で表わされる。

$$d/l_s = (d/d_r) / (0.49 \lambda^{1/3}) \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 λ ：粗礫層の空隙率である。

ここで、式(1)で表わされるパラメータによって、礫層への細砂の沈み込み易さがどの程度変化するかを調べるために次のような実験を行なった。粒径 0.6mm、1.6mm、3.7mm、7.2mm、12.2mm の礫や砂を2cm から50cmの層厚で敷き詰め、振動を与えないように注意しながら、粒径0.17mmの細砂を礫層の上方から、礫層表面が細砂で覆われるようになるまで少しずつ散布した。ただし、空气中で実験は行われた。このような実験において、礫層中の下方に細砂が入らない場合は、礫層が厚くなるほど礫層中の細砂の割合が減少することになる。

図-2に全砂礫層の重量に含まれる細砂の重量の割合と d/l_s の実験値を層厚をパラメータとして示したものである。この図より、 $d/l_s < 0.06$ ($d/d_r < 0.02$ 、ただし $\lambda = 0.4$ のとき)では、細砂は層厚が大きくなってもほぼ礫層の底まで落下するのに対し、 $d/l_s > 0.6$ ($d/d_r > 0.21$ 、ただし $\lambda = 0.4$ のとき)では、細砂はほとんど沈み込まないことがわかる。また、 $0.06 < d/l_s < 0.6$ のときは、細砂は礫層の表面からある範囲内のみに堆積し、礫層厚の増加とともに細砂の割合が小さくなる。 $d/l_s < 0.06$ のとき、細砂の割合が約25%になっているが、これは礫層の全空隙に占める細砂の入り込むのに有効な空隙の割合が約80%であることを意味している。

2.2 沈み込み過程のモデル化

図-1を参照して、前述のような沈み込み過程を以下のようにモデル化する。まず、礫層が1層の厚みが l_s の n 層からなるものとする。 l_s は直径 d_r の球の最密充填状態を考えると $0.82d_r$ である。時刻 t に第 i 層に含まれる細砂の割合を $f_i(t)$ 、 i 層の上面に到達した砂が i 層を通過する確率を $p_i(t)$ とすると、 $f_i(t)$ の

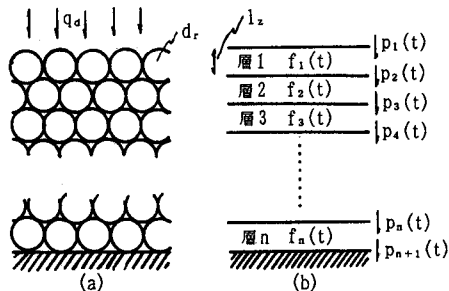


図-1 浮遊砂の捕捉過程

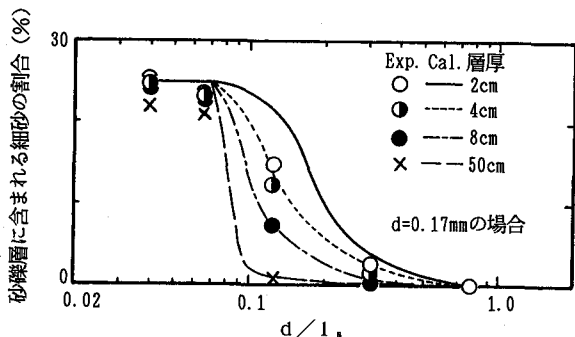


図-2 礫層の全重量に対する細砂の重量の割合

時間変化を表わす式は、 i 層における細砂のフラックスと貯留量のつり合いから、次式のように表わされる。

$$\frac{\partial f_i(t)}{\partial t} = \frac{\{1-f_i(t)\}^2}{(1-\lambda_r) l_s} q_d \cdot \left(\prod_{j=1}^i p_j(t) - \prod_{j=1}^{i+1} p_j(t) \right) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $p_i(t)=1$ 、 $p_{n+1}(t)=0$ とする。ここに、 λ_r ：細砂を含まない初期状態における砂礫層の空隙率、 q_d ：単位時間、単位面積当たりに沈降する浮遊砂の体積である。 $p_i(t)$ は理論的に求められないので、 d/l_s のみによって決定されるものとし、図-5の結果より、

$$p_i(t) = \begin{cases} 1.0 & (d/l_s \leq 0.06 \text{ のとき}) \\ (0.6-d/l_s) / 0.54 & (0.06 < d/l_s < 0.6 \text{ のとき}) \\ 0 & (0.6 \leq d/l_s \text{ のとき}) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

のような簡単な線形関係を仮定する。ただし、 $f_i(t)$ の増加に伴って $p_i(t)$ が減少することを表すために、 d/l_s の値は $f_i(t)$ を考慮して礫層の空隙率を計算し、式 (1)より算定されるものとする。

上述のモデルの妥当性を 2. 1 の実験のシミュレーションによって検証する。図-2の曲線は計算結果を示したもので、 λ_r は各粗礫に対する実測値の平均値である 0.45、礫層の全空隙に対する細砂の堆積に有効な礫層の空隙の割合は 0.8 とした。計算値の方が多少過大に見積もられているところもあるが、計算値は実験値の傾向をよく表現しており、前述のようなモデルで細砂の沈み込み過程がほぼ表現できることがわかる。

3. 沈み込み過程に対する流水の影響

沈み込み過程に及ぼす流水の影響を考察するため、粒径 3.7 mm の礫で層厚 5 cm の河床を作り、空気中、清水中および流水中で礫層内に粒径 0.17mm の細砂を沈み込ませ、十分細砂が沈み込んだ状態に対して、礫層中の細砂の割合の鉛直分布を調べた。空気中および清水中では礫層上方から細砂をまき、流水中では、河床勾配 1/80 および 1/200 の条件に対して 5.0 l/s の流量を与え、等流条件で上流から細砂を供給して礫層に堆積させた。清水および流水中の実験結果を図-3に示す。流水中では、この図に示すように細砂の堆積量は清

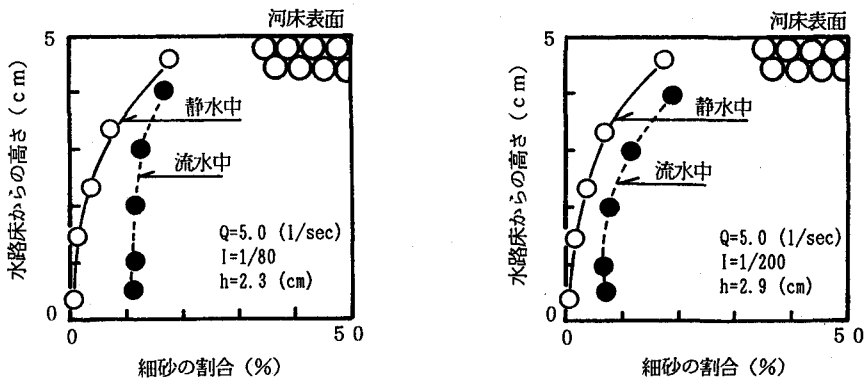


図-3 沈み込み過程に及ぼす流水の影響

水中に比べて大きくなっており、また、河床勾配が急なほど、したがって、浸透流速や流速が大きいほどその傾向が強い。わずかな振動で細砂が沈み込むことを考慮すると、これは礫層内の浸透流、流速または流速変動が礫層内に堆積した細砂にわずかな揺動を与え、細砂の沈み込みを助長したものと推察されるが、詳細な機構については今後検討を必要とする。なお、空気中と清水中では、堆積量に相違がほとんど見られず、礫層中の細砂の堆積割合の鉛直分布にも差異はないものと思われる。

4. 混合砂礫層における沈み込み過程

実河川では、礫層は混合砂礫で構成されている場合がほとんどなので、大小二つの粒径 d_{r1} 、 d_{r2} の礫の混合物からなる礫層を考え、小さい粒径 d_{r2} の礫が細砂の沈み込み過程にどのような影響を与えるかについて考察する。図-4は $d_{r1} = 12.2\text{mm}$ と $d_{r2} = 3.7\text{mm}$ の混合砂中に占める 3.7mm の礫の割合を0、10、30、50、100%（全て d_{r2} ）に変え、

粒径 0.17mm の細砂を清水中で沈み込ませたときの混合砂礫層に含まれる細砂の堆積割合の鉛直分布を求めた結果である。 d_{r2} の割合が増加すると、大粒径のつくる間隙が小粒径の礫で占められてくるため、空隙の容積とスケールの減少のため細砂の堆積割合が減少する。さらに d_{r2} の割合が増加し30%以上になると d_{r2} のみの場合の結果とほぼ同様の分布形になる。これは、 d_{r2} の礫の割合が約30%以上の時、 d_{r1} の礫の作る空隙が d_{r2} の礫でほとんど満たされるため、 d_{r2} の一樣砂の場合とほぼ同じ条件になるためであり、このような場合は、式(1)の d_r には d_{r2} を用いて d/l を計算する必要がある。以上のことから、細砂が容易に沈み込むような大粒径の礫層に、細砂があまり沈み込まないような小粒径の砂礫がどの程度混合すると、混合礫層に細砂が沈み込まなくなるかの目安が得られたが、 d_{r2} の割合が30%以下の場合や実河川のように連続的な粒度分布のとき、空隙のスケールをいかに決めるかが今後の課題である。

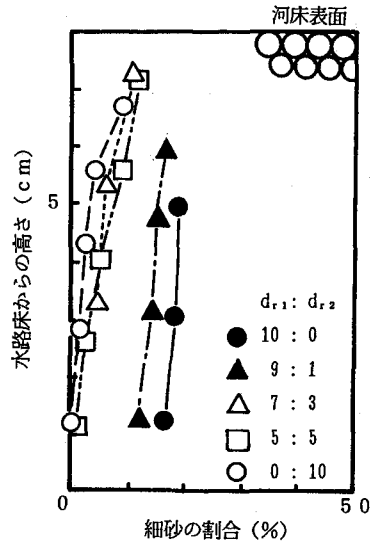


図-4 二粒径混合礫層における沈み込み過程

5. 沈み込みに伴う非平衡浮遊砂に関する実験と計算

5. 1 実験

幅 40cm 、長さ 15m 、勾配 $1/80$ の水路に粒径 12.2mm および 3.7mm の礫を 5cm の厚さで敷き、流量 5l/s の条件で通水し、水路上流端から粒径 0.17mm の細砂を毎秒 1.95cm^3 の割合で供給した。この時、浮遊砂濃度分布および河床礫層内の細砂の割合の時間変化を測定した。

図-5は、細砂の堆積割合の鉛直分布の時間変化を給砂地点から 1.5m および 3.0m の地点について示したものである。 $d_r = 12.2\text{mm}$ のとき、細砂はまず礫層の底面に堆積し、その後上層に堆積してゆき、最終的には細砂の堆積割合は深さ方向にほぼ一様になっている。一方、 $d_r = 3.7\text{mm}$ のときも、礫層底面付近に堆積がみられるが、初期から礫層の上方にも堆積がみられ、最終的に上層と河床表面の細砂の堆積割合が大きくなっている。

図-6は、 $d_{r2} = 12.2\text{mm}$ の場合の給砂後60分および120分における浮遊砂濃度の実験値を示したものである。給砂直後は、浮遊砂が河床礫層に捕捉されるため、濃度が下流方向に減少しているが、その後、礫層に細砂が十分貯まり河床からの細砂の浮上率と浮遊砂の沈降率が釣り合うと濃度分布が平衡状態に達して

いる。

5. 2 計算

5. 1 の実験のシミュレーションを、沈み込み過程のモデルと 2 次元浮遊砂拡散方程式を用いて行った。
計算式と境界条件は、つぎのようである。

基礎式：

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots\dots(4)$$

境界条件：

$C(z)=C_0(z)$ (給砂点)、 $w_0 C + \varepsilon \partial C / \partial z = 0$ (水面)、 $-\varepsilon \partial C / \partial z = q_{su}(x)$ (河床)

ここに、 C ：浮遊砂濃度、 C_0 ：給砂点における濃度、 w_0 ：浮遊砂の沈降速度、 ε ：浮遊砂の拡散係数、 $q_{su}(x)$ ：地点 x における河床砂の浮上率である。

また、地点 x における河床砂礫層への単位時間単位面積当たりの沈み込み量は、

$$q_d(x) = c(0) \cdot w_0 - q_{su}(x) \dots\dots\dots(5)$$

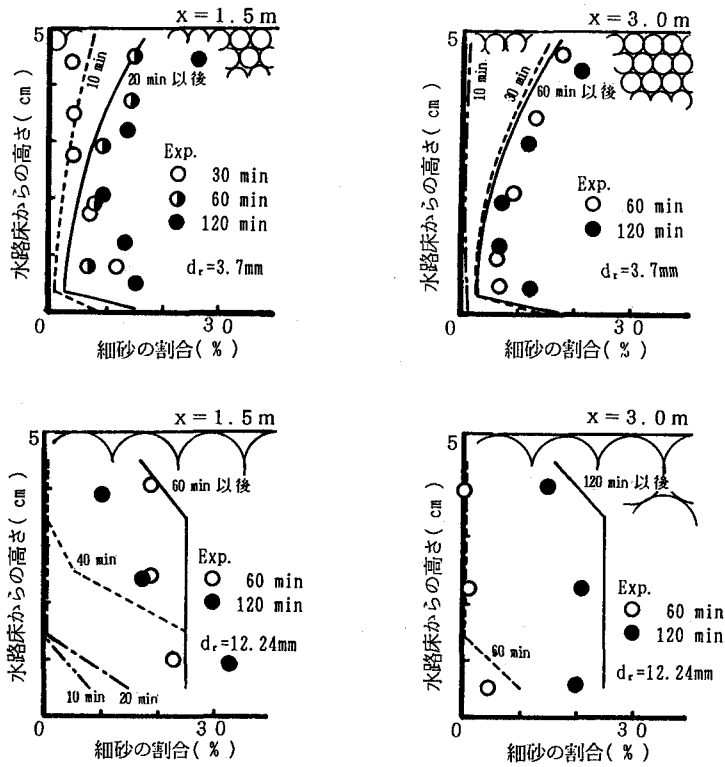


図-5 礫層中の細砂の割合の鉛直分布

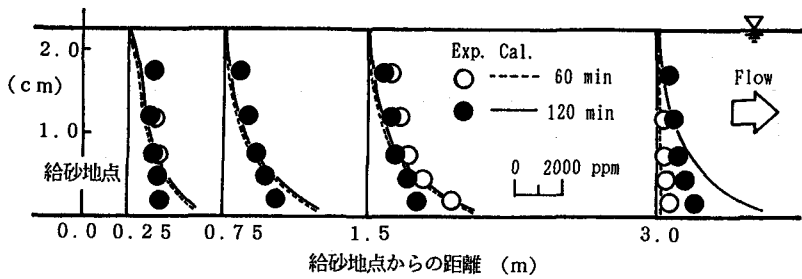


図-6 細砂の沈み込み過程に伴う非平衡浮遊砂

で表される。

給砂地点 ($x=0$) での濃度分布を一樣とし、浮上率に式に礫の遮蔽効果が考慮できる芦田らの式¹⁾を用い、拡散係数に鉛直方向の渦動粘性係数の平均値を与えて上式を計算した。図-5、6に計算結果を示す。これらの図から、礫層内への細砂の沈み込み過程が礫層の粒径によって異なることや浮遊砂の非平衡性がよく再現されていることがわかる。ただし、 $p_i(t)$ が空隙のスケールを表すパラメータのみによって決められているので、 $d_r=3.7\text{ mm}$ のときのように、礫層内の細砂の堆積割合に流水の影響が現れるような場合は、十分よい精度で細砂の割合の鉛直分布が再現できているとは言い難い。

6. おわりに

河床材料が空隙の大きな大粒径の粗礫で構成されているときの浮遊砂の礫層への沈み込み過程とそれに伴う非平衡浮遊砂濃度の算定法を示した。本研究で得られた結果を要約すると次のようである。

- (1) 礫層へ細砂が沈み込む過程を支配するパラメータとして、礫層の空隙の大きさを表わす l と細砂の粒径 d の比を考え、 $d/l < 0.06$ のときは、細砂は礫層の下層部まで沈み込むのに対し、 $d/l > 0.6$ のときは細砂はほとんど沈み込まないことがわかった。
- (2) 一樣粒径の粗礫河床上に浮遊砂を供給した場合、 d/l が小さいときは、細砂は下層から堆積するため、初期には下層の方が細砂の堆積量が多くなり、最終的に堆積量は深さ方向に一樣になる。一方、 d/l が大きいときは、細砂は初期の段階から礫層表面からある範囲内に堆積し、最終的に、礫層上層ほど堆積割合が大きな分布形になる。
- (3) 礫層への沈み込み過程には流水が影響し、流水状態の方が清水状態より細砂は沈み易くなる。
- (4) 一樣粒径の粗礫河床上に浮遊砂を供給した場合の細砂の堆積割合と濃度分布を計算する手法を提示した。本方法によって、(3)のような礫層の粒径による堆積割合の変化特性や濃度分布が非平衡状態から平衡状態に近づく過程がよく再現された。

今後、礫や細砂の粒径を変えてもう少し広範囲の条件に対して本理論の妥当性を検証するとともに、礫層の粒度が一定でない場合への適用法を考える必要がある。

参 考 文 献

- 1) 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、PP106~116、1986。