

22 粗礫河床における浮遊砂の流送・堆積過程

鳥取大学工学部 ○藤田 正治
 鳥取大学工学部 道上 正規
 鳥取大学大学院 北川 豊広
 鳥取大学大学院 三村光太郎

1. はじめに

空隙の大きな堆積物で構成された礫床河川上を浮遊砂が流送される場合、浮遊砂は礫層に捕捉されるため非平衡状態になる。また、水理条件に対して河床条件が平衡状態になると、浮遊砂濃度も平衡になるが、このとき河床の礫が濃度分布に影響を及ぼす。本研究は、このような場を対象として平衡浮遊砂濃度分布型および底面濃度に及ぼす礫の影響、礫層への浮遊砂の捕捉過程について検討するものである。

2. 平衡浮遊砂濃度

表-1 実験条件

2.1 実験の概要

Run	流量 (l/sec)	給砂量 (g/sec)	水深 (cm)	u. (cm/sec)	河床条件	β
A-1	4.4	0.0	2.36	5.09	粗面	—
A-2	4.4	4.9	2.26	4.99		4.61
A-3	4.4	12.3	2.28	5.12		3.78
A-4	4.4	39.5	2.01	4.73		4.13
B-1	16.5	0.0	6.17	7.60		—
B-2	16.5	5.1	6.13	7.58		1.96
B-3	16.5	14.5	6.11	7.57		1.37
B-4	16.5	37.0	5.92	7.48		2.00
C	2.2	0.4	2.31	2.85	滑面	2.98
D	9.6	4.4	5.86	4.22		2.07
E	8.5	2.0	6.19	4.31		1.68

実験には長さ15m、幅40cmの水路を用い、河床材料に平均粒径12.24mmの礫、浮遊砂に平均粒径0.17mmの細砂を使用した。実験は、表-1の条件に対して、浮遊砂濃度が平衡状態になるまで細砂を上流端から供給し続け、そのときの濃度分布、河床の粒度分布および粗

礫中の細砂の存在高さを測定した。表中のA、Bは勾配1/80で流量の異なる条件、C、DはそれぞれA、Bと同じ水深であるが摩擦速度の小さい条件、Eは滑面上でDと同じ条件で行った実験である。A-1、B-1は給砂量0の実験で、浮遊砂が発生し始める限界の細砂の存在状態を調べるための実験である。

2.2 濃度分布型

濃度分布はRouse式で表されるものとし、式中の浮遊砂の拡散係数と渦動粘性係数との比 β について考察する。濃度分布の実験値より β を求めると表-1のようであり、粗面では β が1.0より大きく、相対水深、摩擦速度によって変化している。まず、AとBを比較すると、Aでは $\beta=3.8\sim 4.6$ 、Bでは $\beta=1.4\sim 2.0$ であり、水深の小さいAの方が β が大きい。これは、Aの方が相対水深が小さいため、河床の礫の影響を強く受けるためであると考えられる。ついで、AとCおよびBとDを比べると、前者では摩擦速度の小さいCの方が β が小さいのに対し、後者ではほぼ同じ値である。これらのことから、相対水深が小さいときは摩擦速度とともに β が減少する傾向がある。また、滑面では粗面より β は減少しているが、河床に小さい河床波が形成されたために1.0より大きい1.68になった。

以上のような β の変化特性を浮遊砂の確率論的解析から検討する。この方法は、河床砂が浮上してから河床に戻るまでの間、乱れの時間スケールに相当する時間間隔毎にランダムな鉛直方向の乱れが

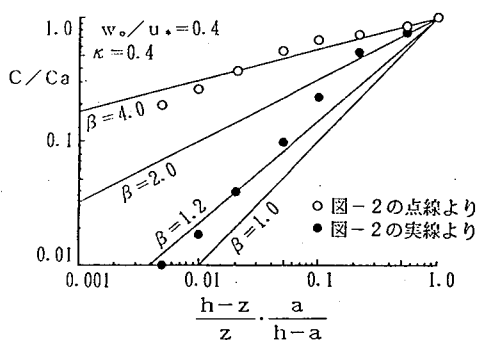


図-1 濃度分布

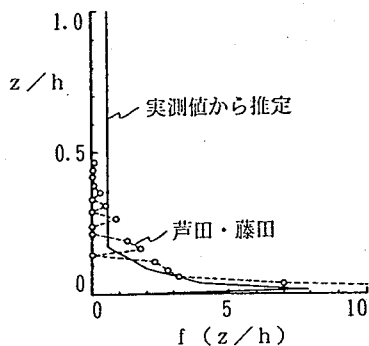


図-2 河床砂の初期浮上高さの確率密度

作用するものとし、各時刻における浮遊砂の存在高さの分布を求め、それを時間軸に沿って積分して濃度分布を求めるものである。乱れ強度や時間スケール等の乱流特性に従来の結果が使えるものとする、初期浮上高さの分布が β に強く影響する。そこで、初期浮上高さの分布に芦田・藤田¹⁾の方法、その後の浮遊砂の運動をYalin²⁾の方法に基づいて解析する。解析の方法は参考文献を参照されたい。図-1の○は濃度分布の計算結果、図-2の点線は初期浮上高さの確率密度分布 $f(z/h)$ の計算結果を示したものである。この場合 β

は1.2であり実験値より小さい。そこで、図-2の実線のような浮上高さを与えたときの濃度分布を求めたものが図-1の○である。このとき、 β は4.0であり、実験値と適合する。このように、実験で得られた β を説明するためには、初期の浮上高さを水面近くまで与えなければならない。このことより、相対水深が小さい粗面の場合、摩擦速度が大きいと河床砂は初期に水面近くまで浮上し、 β が大きくなるのが推察されるが、この点に関しては今後の検討を要する。

2.3 基準点濃度

図-3は、Run Bの平衡状態での底面濃度 C_b （高さ $z/h=0.05$ における濃度）と細砂の存在高さ Δ との関係を示したものである。ここに、細砂の存在高さとは河床表面から細砂の堆積面の位置までの距離、 d_r ：礫の粒径である。 Δ が大きいほど C_b が減少し、河床表面から礫の粒径の1.8倍程度細砂の堆積面が下がると礫の遮蔽効果のため浮遊砂がなくなっている。したがって、本条件では、浮遊砂が発生し始める限界の Δ は粗礫の粒径の1.8倍である。ついで、図中の一点鎖線は、芦田・藤田の浮上率および河床表面に占める細砂の存在面積率から底面濃度を計算したものであり、参考のため芦田・道上の底面濃度と河床表層における細砂の存在率から計算した結果も示している。芦田・藤田の浮上率の式では礫の遮蔽効果を考慮しているので、浮遊限界に理論曲線が漸近しており、理論値と実験値の適合性が良い。

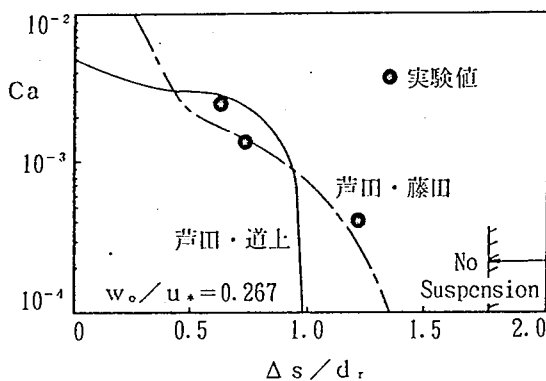


図-3 底面濃度と細砂の堆積面の位置との関係

3. 浮遊砂の堆積過程

3.1 捕捉過程を表わすパラメータ

図-4のような粒径 d_r の粗礫河床上に粒径 d の浮遊砂が単位時間、単位面積当たり q_a の割合で沈降する場合を考える。 $d_r \gg d$ のときは、浮遊砂は容易に礫層中を落下するが、 d_r が小さいとき礫層中に捕捉される。このような現象は、礫層の空隙のスケール l_s と d の比に最も強く影響されるものと考えられる。 l_s は一つの空隙の体積の立方根とすると、このパラメータは、 $d/l_s = (d/d_r) / (0.49 \lambda^{1/3}) \dots (1)$

となる。ここに、 λ ：礫層の空隙率である。図-5は、ある厚さの礫層に含み得る細砂の割合を水の無い状態で調べたものである。ただし、 $d=0.17\text{mm}$ 、層厚は2cm、4cm、8cm、 $d_r=0.6\text{mm}$ 、1.6mm、3.7mm、7.2mm、12.2mmである。この図より、 $d/l_s < 0.06$ では、細砂は層厚に関係なく礫層の底まで落下するのに対し、 $d/l_s > 0.6$ 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、細砂は上層で止まり下層まで達しない。

3.2 捕捉過程のモデル化

前述のような捕捉過程を以下のようにモデル化する。(図-4参照) まず、礫層が1層の厚みが l_z の n 層からなるものとする。 l_z は最密充填状態を考えると $0.82d_r$ である。各層に含まれる砂の割合を $f(i)$ 、 i 層の上面に到達した砂がそこを通過する確率を $p(i)$ とすると、 $f(i)$ の変化を表わす式は次式となる。

$$\frac{\Delta f(i)}{\Delta t} = \frac{\{1-f(i)\}^2}{(1-\lambda_r) l_z} q_a \cdot \left(\prod_{j=1}^i p(j) - \prod_{j=1}^{i+1} p(j) \right) \dots (2)$$

ただし、 $p(1)=1$ 、 $p(n+1)=0$ 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である。 $p(i)$ 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、 $d/l_s < 0.06$ のとき $p(i)=1.0$ 、 $d/l_s > 0.6$ のとき $p(i)=0$ 、この間の $p(i)$ の変化は直線式で表わす。なお、 $f(i)$ の増加にともなって礫層の空隙率は λ_r から次第に減少し、 $p(i)$ も減少する。

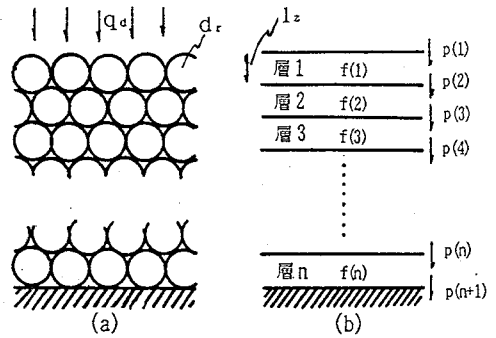


図-4 浮遊砂の捕捉過程

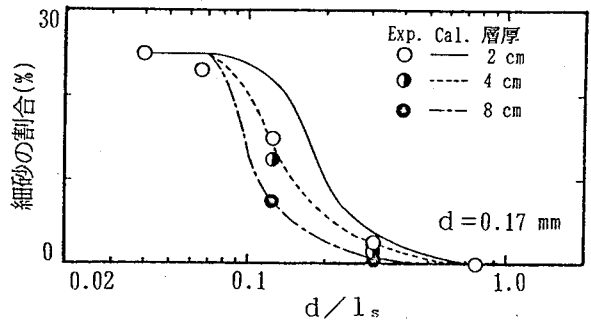


図-5 細砂の割合と d/l_s の関係

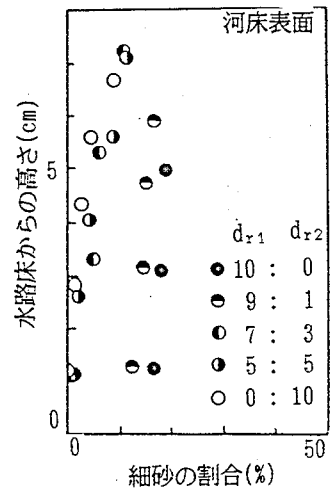


図-6 捕捉過程に及ぼす混合砂の影響

上述のモデルの妥当性を3.1の実験のシミュレーションによって検証する。図-5の曲線は、各層厚に対する計算結果を示したものである。ただし、 λ_r は各粗礫に対する実測値の平均値0.45とした。計算値と実験値は多少のずれはあるが、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捕捉過程が表現できることがわかる。

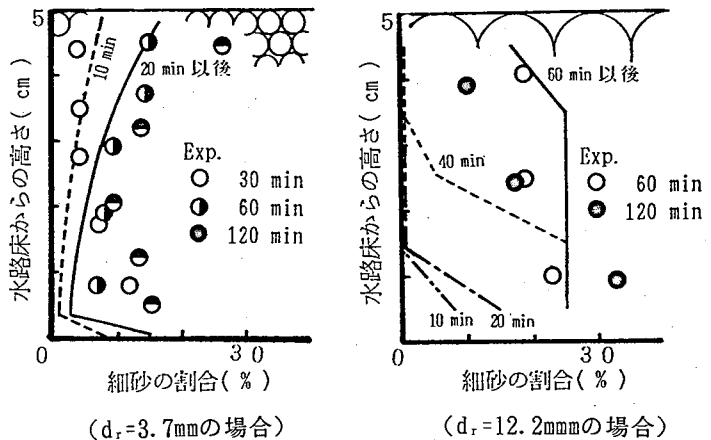


図-7 細砂の割合の鉛直分布

3.3 捕捉過程に対する混合砂の影響

実河川では、礫層が混合砂で構成されている。そこで、粒径 d_{r1} と d_{r2} の礫からなる礫層を考え、小さい粒径 d_{r2} の礫が細砂の沈降過程に与える影響を考察する。図-6は $d_{r1}=12.2\text{mm}$ と $d_{r2}=3.7\text{mm}$ の混合物中に占める 3.7mm の礫の割合を0、10、30、40、100%に変え、粒径 0.17mm の細砂を3.1と同様な方法で沈降させたときの混合砂礫に含まれる細砂の割合の鉛直分布を求めた結果である。 d_{r2} の割合が30%以上になると d_{r2} のみの場合の結果と同様になる。これは、 d_{r2} の礫の割合が $\lambda/(1+\lambda)$ ($\approx 30\%$)以上の時、 d_{r1} の礫の作る空隙が d_{r2} の礫で満たされるためである。

3.4 水路における堆積過程

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 upstream から粒径 0.17mm の細砂を毎秒 1.95cm^3 供給した。この時、河床の細砂の割合を礫層を5層にわけて測定した。図-7は細砂の堆積割合の深さ方向の変化を給砂地点から 1.5m の地点について示したものであり、 d_r が小さいとき最下層と上層で $f(i)$ が大きくなっているのに対し、 d_r が大きいとき細砂は礫層の底面から堆積し、下層ほど $f(i)$ が大きくなっている。また、最終的には $f(i)$ は深さ方向に一様になっている。図-7には3.2の捕捉過程のモデルと2次元の浮遊砂拡散方程式から求めた計算結果も示しているが、計算値は実験値の傾向をよく再現している。

4. おわりに

今後、水理条件に対する β の変化を系統的な実験により明らかにするとともに、相対水深の小さい粗面における乱流特性、河床砂の浮上過程について検討し、 β の変化特性を明らかにしたい。

<参考文献>

- 1) 芦田・藤田：土木学会論文集、第375号、PP79-88、1986.
- 2) Yalin, M.S. : I.A.H.R., Int. symposium on river mechanics, 1973, A52-1-A52-12.
- 3) 芦田・藤田：土木学会論文集、第375号、PP107~116、1986.