

粗礫河床への浮遊砂の沈み込み過程

鳥取大学工学部 正 員 道上 正規
鳥取大学工学部 正 員 藤田 正治
鳥取大学工学部 学生員 ○北川 豊広

1. はじめに 粗礫で構成された河床上を浮遊砂が流下すると、河床に沈降した細砂が粗礫の隙間に捕捉され、条件によっては細砂が河床の下層へと沈み込んでゆく。本研究は、粗礫河床への浮遊砂の沈み込み過程やこのような場で生じる非平衡浮遊砂濃度分布について検討するものである。

2. 細砂の沈み込み過程のモデル化

図-1 (a) のような粒径 d_r の粗礫で構成された河床上に、粒径 d の細砂が単位時間、単位面積あたり q_d の割合で沈降する場合を考える。 $d_r \gg d$ のとき、細砂は容易に礫層中を落下するが、 d_r が小さい場合礫層のどこかで捕捉される。このような現象には礫層の空隙のスケール l_s と d の比が最も強く影響していると考えられる。そこで、 l_s を礫で囲まれた一つの空間の体積の立方根で定義し、 d/l_s によって細砂の沈み込み

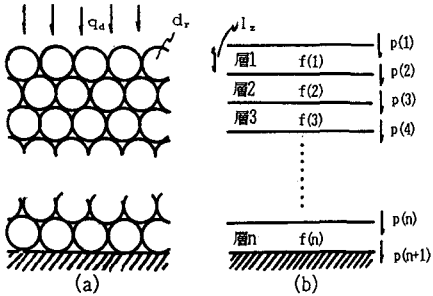


図-1 礫層のモデル

現象が決定されるものとする。 l_s は、礫の最密充填状態を考え、 $l_s = 0.49 \sqrt[3]{d_r}$ (1) とする。ここに、 λ : 粗礫層の空隙率である。図-2 は、 d_r および層厚の異なる礫層の表面に粒径0.17mmの細砂を供給したときの細砂の堆積割合を d/l_s をパラメータとして調べたものである。ただし、層厚は2cm、4cm、8cm、 $d_r = 0.6\text{mm}$ 、1.6mm、3.7mm、7.2mm、12.2mmとし、水を含まない条件で実験した。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、 $0.06 < d/l_s < 0.6$ のときは細砂が上層で止まり、下層まで達しないことがわかる。

このような粒子の沈み込み過程を以下のようにモデル化する。まず、礫を底面から最密充填状態で敷き、同じ高さにある礫の層を1つの層とする n 層からなる礫層を考える。このとき、1層の厚さ l_s は $0.82d_r$ である。各層に含まれる細砂の割合を $f(i)$ 、 i 層の上面に到達した細砂がそこを通過する確率を $p(i)$ とすると、単位時間に第 i 層に貯まる砂の量および $f(i)$ の変化率は式(2)、(3)のようになる。ただし、 $p(1) = 1$ 、 $p(n+1) = 0$ 、 λ_r : 細砂を含まない初期状態における礫層の空隙率である。

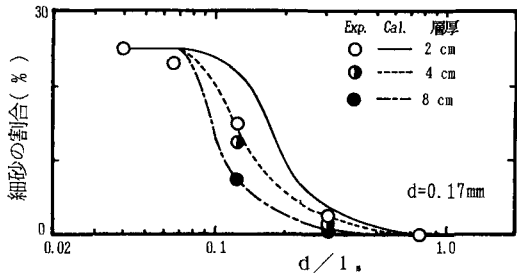


図-2 細砂の割合と d/l_s の関係

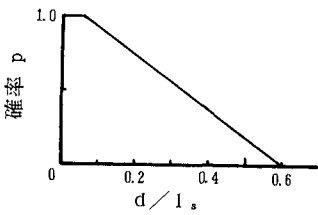


図-3 p と d/l_s の関係

$$Q_s(i) = q_a \cdot \left(\prod_{j=1}^i p(j) - \prod_{j=1}^{i+1} p(j) \right) \quad \dots\dots(2) \quad \frac{\Delta f(i)}{\Delta t} = \{1-f(i)\}^2 \cdot \frac{Q_s(i)}{(1-\lambda_r) \cdot 1_s} \quad \dots\dots(3)$$

$p(i)$ は図-2の実験結果を考慮して、 $d/l_s(i) > 0.6$ のとき0、 $d/l_s(i) < 0.06$ のとき1とし、その間は図-3のように直線で近似する。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-2に各実験に対する計算値を示す。計算値は実験値と多少異なっているが、 d/l_s や層厚によって細砂の堆積割合が変わるという実験値の傾向を表している。

3. 礫層中の細砂の割合と浮遊砂濃度分布 水路に 礫を敷き上流から 細砂を供給したときの濃度分布と $f(i)$ の時間的、場所的变化について検討する。基礎式は式(1)～(3)と式(4)の浮遊砂の2次元拡散方程式と式(5)～(7)に示す上流端、水面および河床における境界条件からなる。 q_a は式(8)から算定する。

$$u \left(\partial C / \partial x \right) = w_s \left(\partial C / \partial z \right) + \partial \left(\varepsilon \partial C / \partial z \right) / \partial z \quad \dots\dots(4) \quad C(z) = C_0 \quad \dots\dots(5)$$

$$w_s C + \varepsilon \left(\partial C / \partial z \right) = 0 \quad \dots\dots(6) \quad -\varepsilon \left(\partial C / \partial z \right) = q_{su}(x) \quad \dots\dots(7) \quad q_d = C_0 w_0 - q_{su}(x) \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 C : 濃度、 u : 主流方向の流速、 w_s : 浮遊砂の沈降速度、 ε : 拡散係数 ($= u_* h / 15$)、 x, z : 主流および水深方向の座標、 u_* : 摩擦速度、 h : 水深、 C_0 : 上流端の平均濃度、 $q_{su}(x)$: x における河床からの細砂の浮上率である。 q_{su} は礫の遮蔽効果を考慮した芦田らの式¹⁾を用いる。

以上のような解析方法の妥当性を検証するために次のような実験を行った。幅40cm、長さ15m、勾配1/80の水路に粒径3.7mmおよび12.2mm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1.95cm³供給した。この時、浮遊砂濃度分布と河床の細砂の割合を礫層を5層にわけて測定した。実験結果を図-4および5に示す。 d_r の大小によって $f(i)$ の鉛直分布形が異なり、 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。濃度分布は $d_r = 12.4$ mmの場合、給砂開始後60分では非平衡状態にあるが、120分ではほぼ平衡状態に達している。図中には計算結果も示しているが、計算値は、前述の細砂の割合の実験値の傾向や濃度分布の非平衡状態から平衡状態になる過程が再現されている。

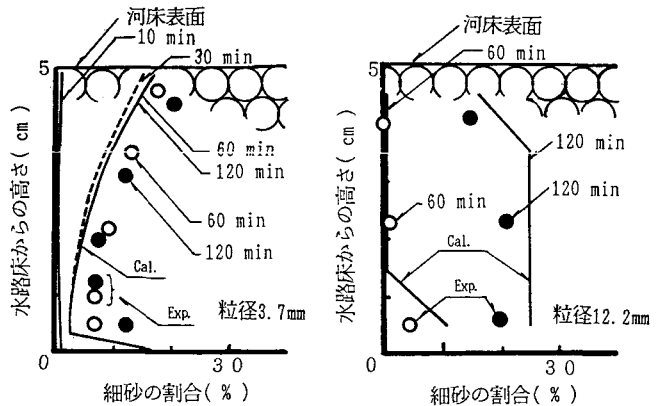


図-4 3m地点の細砂の割合

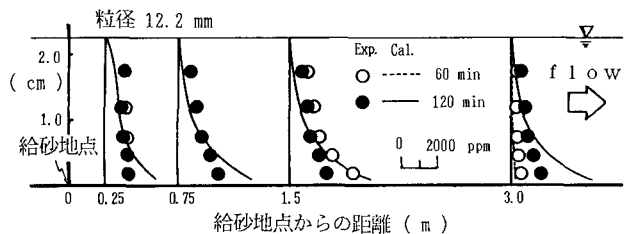


図-5 流下方向の浮遊砂濃度分布の変化

4. おわりに 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河床材料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

芦田・藤田: 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