

浮遊砂の非平衡性を考慮した貯水池堆砂の計算法

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
 鴻池組(株) 正員 前田 真吾
 前田建設工業(株) 正員 茶谷 晴也

1. まえがき 貯水池における浮遊砂は非平衡状態となり、堆砂計算ではそれを考慮する必要がある。本研究では、デルタ下流における非平衡濃度分布を拡散方程式より求め、それを堆砂シュミレーションに導入しようとするものである。また、急勾配にダムが設置されると流れは射流から常流に遷移する。従来、跳水点の河床変動の差分近似法については明確にされていないので、この点についても検討する。

2. デルタ下流の浮遊砂堆積量 デルタ下流の非平衡浮遊砂濃度分布を、定常二次元の拡散方程式において、拡散係数を一定と仮定し、また、流下方向の流速を断面平均流速で近似し、かつ貯水池水位を水平として解き、デルタ下流における浮遊砂の堆積量を求める。以下、基礎式および境界条件を示す。(図-1 参照)

$$\hat{u} \frac{\partial \hat{c}}{\partial x} = \hat{\varepsilon} \alpha \frac{\partial^2 \hat{c}}{\partial z^2} + \hat{w}_0 \alpha \frac{\partial \hat{c}}{\partial z} \quad \dots (1)$$

水面: $\hat{\varepsilon} \frac{\partial \hat{c}}{\partial z} + \hat{w}_0 \hat{c} = 0$, 底面: $\hat{\varepsilon} \frac{\partial \hat{c}}{\partial z} = 0$ (純堆積)

$$x = 0 \quad ; \quad \hat{c} = C_0(z)/C_m = (c_*)$$

ここに、 $\hat{x} = x/L$, $\hat{z} = z/h_0$, $\hat{u} = u/u_{*0}$,
 $\hat{w}_0 = w_0/u_{*0}$, $\alpha = L/h_0$, $\hat{c} = c/C_m$,

$\hat{\varepsilon} = \varepsilon/(u_{*0} \cdot h_0)$ で、 c : 浮遊砂濃度、 ε : 水

深方向の砂の拡散係数、 w_0 : 粒子沈降速度、 u : 流下方向の断面平均流速、 C_m , h_0 , u_{*0} : デルタ上の平均濃度、水深、および摩擦速度、 L : デルタからダムまでの距離である。式(1)を境界条件で解くと、次のようなフーリエ級数解が得られる。ただし、簡単のため“ $\wedge$ ”は省略する。

$$c = \sum [E_k e^{\int_0^x \frac{\lambda_k^2}{u} dx - \frac{w_0}{2\varepsilon} z} \{w_0/(2\varepsilon q_k) B_k \sin(q_k z) + \cos(q_k z)\}] \quad \dots (2)$$

ここで、 $B_k = w_0/(2\varepsilon q_k)$, $E_k = \int_0^{h_0} c_* e^{(-w_0/2\varepsilon)z} \{w_0/(2\varepsilon q_k) \sin(q_k z) + \cos(q_k z)\} dz / \int_0^{h_0} \{w_0/(2\varepsilon q_k) \sin(q_k z) + \cos(q_k z)\}^2 dz$, $q_k = \sqrt{4\varepsilon \alpha \lambda_k^2 - w_0^2 \alpha^2 / (2\varepsilon \alpha)}$ で、固有値 q_k は、 $\tan(q_k h) = \varepsilon q_k k w_0 / (\varepsilon^2 q_k^2 - w_0/4)$ で求められる。

以上より、浮遊砂の堆積量は、 $c(0)w_0$ または $d(\int_0^L c u dz)/dx$ から求められる。濃度分布が収束するのに必要な項数は20個程度であるが、デルタの高さ、沈降速度などによって多くとる必要がある場合がある。また、 c_* の分布型は c の結果にそれほど影響しなかった。図-2は勾配1/40, $\Delta z = 5.73$, $\hat{w}_0 = 0.26$, $\hat{u}(0) = 18.33$, $\hat{\varepsilon} = 0.2$ の条件で、デルタ下流における浮遊砂の堆積率を求めた結果で、点線は $c(0)w_0$ で計算したもの、実線は断面間の浮遊砂量の差から計算したものである。両者は一致しなければならないが、式(1)で鉛直方向の平均流速 w を無視しているため相違している。急勾配の時、 w は w_0 に比べて無視できなくなるので、この事については今後改善する必要がある。しかし、同図に示す実験結果と比較すると、断面間の浮遊砂量の差から求めた結果は、実験値と適合しているので、以後、この方法で堆積量を算定する。

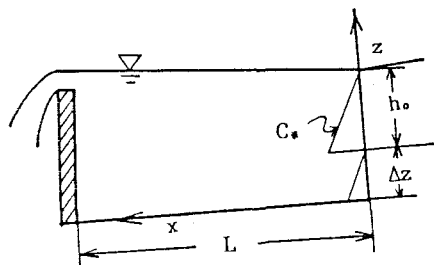


図-1 記号説明図

3. 跳水点における河床変動の式の差分化 図-3は、 x 方向の差分格子点における河床位の取り方を示したものである。今、河床位が○印の位置に求められているとし、 S 点から J 点の間で跳水が生じているものとする。すなわち、 $i \leq S$ では射流、 $i \geq J$ では常流とする。一般に、河床変動の式は、射流のとき前進差分、常流のとき後退差分とする必要がある。図-3において、点線のように各区間に土砂が堆積したとすると、 $i > J$ および $i < S$ では、△の点が河床位となる。しかし、 S 点と J 点においては不明確であり、ここにおいても他の点と同様、前進差分および後退差分をとると、土砂収支が合わない。図-4はその一例を示したもので、勾配1/50、せき高10cm、単位幅流量97.5 cm²/sの条件に、粒径1.4mmの砂を給砂した時の実験値と計算値を示したものである。図中の Case A が上述の取り方をした場合で、堆砂量が増加していることがわかる。そこで、図-3のような場合では、 J 点の河床位は後退差分で求め、 S 点では z_{so} を元河床として前進差分で求めた点と z_{s1} を元河床として後退差分で求めた点のうち高い方の値を河床位とする。このような取り方をして堆砂計算した結果が Case Bであり、土砂収支が合い、堆砂形状も実験値と比較的一致している。Case A のとき堆砂量が増加するのは、図-3で、 $S-J$ 間の平均河床増分がその上流側のものより大きいとき、 S 点の河床が×印の位置となり、実際の河床位(△点)より過大に評価されるためだと考えられる。

4. 浮遊砂の非平衡性を考慮した堆砂計算結果

堆砂形状は、一次元河床変動計算によって求められるが、デルタが一定高(ここでは5mm)になった時点より、デルタの下流では2.で述べた非平衡浮遊砂量を考慮するものとする。デルタ上流では、浮遊砂量は平衡状態を仮定して算定する。また、跳水点の扱い方は3.で述べたCase Bのようにする。図-5は、勾配1/40の水路に高さ10cmのせきを設け、単位幅流量59.8 cm²/sの給水と混合砂(粒径1.4mmと0.1mmの砂を8:2で混合したもの)の給砂を行ったときの堆砂形状の実験値と計算値を比較したものである。 ε は1.0とした。本計算手法によると、デルタの形状は大体再現されており、また、デルタ下流の浮遊砂の堆砂形状もある程度一致しており、本計算手法の妥当性がうかがわれる。

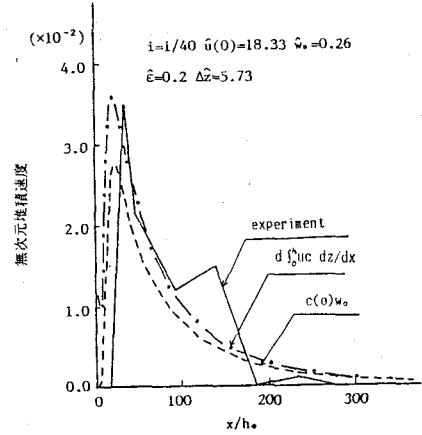


図-2 無次元堆積速度の実験結果と計算結果

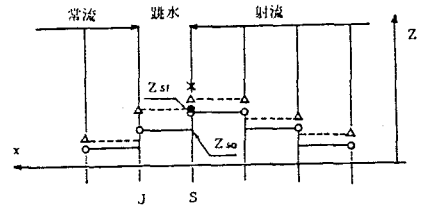


図-3 差分説明図

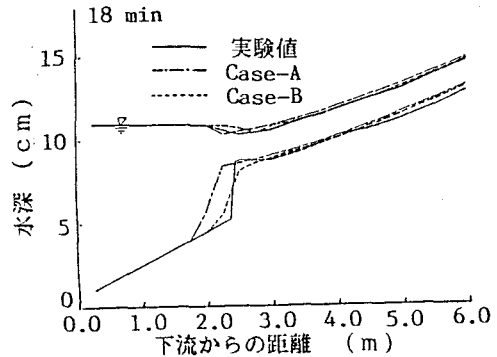


図-4 実験値と計算値の河床縦断形状

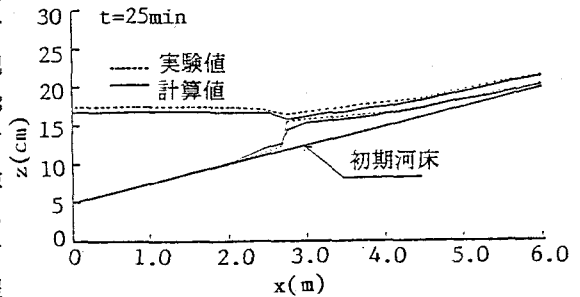


図-5 実験値と計算値の河床縦断形状