

II—21 流砂の構造に関する実験的研究

北海道大学工学部 正 員 森 明 巨
 北海道大学工学部 正 員 岸 力
 北海道大学工学部 史 亜 傑
 北海道大学工学部 ○石 塚 宗 司

はじめに

流砂公式を作る場合には、流砂形態を、その機構の相違から掃流と浮遊に分けるのが適切である。この考え方に立って、それぞれの流砂機構の解明が多くの研究者によってなされてきたが、この方向を更に進めるには両者間の遷移機構を明らかにして両者を統一的に説明する理論の開発が必要である。

掃流砂から浮遊砂への遷移機構の中心的な考え方は、何等かの形態の掃流運動があり、その掃流層から間欠的な強い乱れによって浮遊層への pick up が行われる、とするものである。この考え方では掃流砂または浮遊砂の定義の仕方で掃流層の厚さが異なる。saltation 運動による移動粒子を掃流砂の主体とすると、その跳躍高近辺が掃流層厚になる。転動または滑動粒子のみを掃流砂とすると、粒子の2倍程度の厚さとなる。前者が最も良く取られる掃流砂の定義である。後者は、Engelund(1)が非平衡性のある粒子運動を総て浮遊砂とすることによってなされている。

上述の考え方に対して Luque and Beek(2)は、移動床流れにおける saltation 粒子軌跡の16mmフィルムの解析から、粒子が河床からある程度上昇すると流下速度は周辺流体とほぼ同じになり、軌跡の大部分を浮遊流下すると述べている。このときの河床材料は粒径 1.8mmの砂で流れは移動限界せん断力を僅かに越えたところである。著者ら(3)も単一粒子の軌跡の解析から同様の結果を得ている。この考えにしたがえば、移動層厚は、前述の2つの定義の中間的なものとなる。

この様に掃流から浮遊への遷移についていくつかの考え方があり、掃流層の厚さは定まっていない。この原因は実験的に掃流砂層厚を求めるのが極めて困難な点にある。本研究は、掃流砂と浮遊砂のそれぞれに適当なモデル関数を与えたときに、掃流層の厚さに着目して流砂を統一的に説明するための補正法について1つの試みを行ったものである。

1. 流砂のモデル関数

モデル関数は掃流砂量式に Meyer-Peter-Muller の公式(1)、平衡浮遊砂の底面濃度 c_b に Itkura and Kishiの式(2)を用いる。(ただし、式(2)は近似式である)

$$\Phi_b = A\Phi = A(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \quad (1)$$

$$C_b = K\Gamma, \quad \Gamma = \alpha_* \frac{\sqrt{sgd}}{W} (14\sqrt{\tau_*} - \frac{0.9}{\sqrt{\tau_*}}) - 1 \quad (2)$$

ここに、 Φ : 無次元流砂量、 τ_* : 無次元河床せん断力、 d, s, w_0 : それぞれ粒子の粒径、水中比重、沈降速度。

(1)、(2)式中、 $A \sim 8$ 、 $K = 0.008$ 、 $\alpha_* = 0.14$ とされている。ところで(2)式中の C_b は $y/h = 0.05$ 地点の濃度であるが、(1)式は、必ずしも $y/h \leq 0.05$ の流砂を掃流砂としているわけではない。したがって、同一の掃流層厚を取るためには修正が必要である。(2)式において α_* は $y/h = 0.05$ での乱れ強度に関するものであり、 K は同地点から浮遊砂への捕捉率を表すと考えられる。また、掃流砂量は τ_* に比例すると考えられるから、移動層厚を統一するためには A の修正が必要である。

2. 浮遊砂のモデル

浮遊砂の拡散式を(3)で表す。

$$\frac{\partial UC}{\partial x} = \frac{\partial WC}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (3)$$

ここに、 x 、 z ：流下方向および鉛直方向の座標、 U ： x 方向流速、 ϵ ：渦動粘性係数。(3)式を、 $(z - \eta)/h = \xi$ 、 $x = Lx$ 、 $U = u_{*0} \phi$ 、 $\epsilon = \epsilon_* u_* h$ 、 $u_*/w = \omega$ とおいて無次元化すると(η ：河床高)。

$$M_C \frac{\partial \phi C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} (C + \epsilon_* \omega \frac{\partial C}{\partial \xi}) \quad (4)$$

ここに、 $M_C = \omega_0 h/L$ 、添字 0 は、 $x=0$ での値を表す。 $M_C \gg 1$ 、または、 $M_C \ll 1$ の場合は摂動法を用いて c が求められる。 0 次解を求めると

$$M_C \gg 1 \text{ のとき } c_0 = c(x=0), \quad (\text{ただし、}\phi = \text{const. とした}) \quad (5)$$

$$M_C \ll 1 \text{ のとき } c_0 = c_b \cdot \exp(-\xi/Z), \quad Z = \epsilon_* \omega \quad (6)$$

これらから、 $M_C \gg 1$ の場合は上流の濃度分布の影響が大きく、非平衡性の強い流れであることがわかる。一方、 $M_C \ll 1$ では c_b が平衡時の $c_b = c_b$ と異なる点に非平衡が表われる。 M_C は、流れが河道から貯水池に流入するときの様に急変流において $L \rightarrow$ 小となり大きくなる。芦田(5)や岡部(6)の近似解はこの点に着目したものと考えられる。本報告では流れが漸変流として、 $M_C \ll 1$ とみなし、濃度分布を(6)式で与える。

なお、流れの変化率はパラメーター $M_F = F^2 h/L$ (F ：流れのフルード数) で表せれるが、浮遊砂の場合と同様な考え方を取り、漸変流であることから $M_F \ll 1$ として、速度水頭の補正項=constantと考える。

3. A 、 K 、 α_* の決定法

以上の流砂モデルを用い A 、 K 、 α_* を修正すべき量として、以下の方法でこれを求める。

流砂の連続式は(7)式で与えられる。

$$(1-\lambda) \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\eta+h} U C_b \exp(-\frac{z}{Z}) dz = 0 \quad (7)$$

漸変流であることから(7)式中の c_b を c_b で近似することにとすると、適当な量の河床変動データが与えられれば観測方程式(8)が得られる。

$$a_0 + a_A A + a_K K = 0$$

$$a_0 = \frac{1-\lambda}{W_0} \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad a_A = \frac{\sqrt{Sg d^3}}{WL} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \quad (8)$$

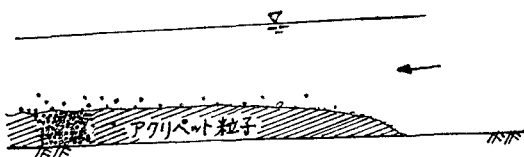
$$a_K = \frac{\partial}{\partial x} (M \Gamma \int_0^1 \phi \exp(-\frac{z}{Z}) dz)$$

ϕ には二次流速分布式(9)を与える。

$$\varphi = \frac{1}{\varepsilon_*} \left(\zeta - \frac{\zeta^2}{2} \right) + \varphi_* - \frac{1}{3\varepsilon_*} \quad (9)$$

ここでは最少二乗法を用いずに、残差の二乗和 $R(A, K, \alpha_*)$ の分布形を調べて最適の係数について考える。

図-1



4. 実験

直線の矩形断面水路（長さ 8 m、幅 10 cm、側壁および水路床はアクリル樹脂）の途中に

河床材料を図-1の斜線部の様に敷いて、その先端周辺と水面形の変化を一定時間間隔で写真撮影する。使用材料は $d = 3.1 \text{ mm}$ 、 $s = 0.17$ 、 $w_0 = 0.73 \text{ cm/sec}$ 、 $= 0.37$ の円柱状をしたアクリル素材である。この材料を用いたのは、顕著な河床波が発生せず取扱が容易なためである。予備実験から $\tau_{*c} = 0.05$ 、マンニングの粗度係数 $n_b = 0.024$ が得られた。側壁の粗度係数はアクリル水路床の固定床実験から 0.01 である。

図-2に河床の変化例を示した。実験条件は $Q = 1.54 \text{ l/sec}$ 、河床勾配 $= 1/151$ である。河床形を図中の点線で近似して、これに対する R を求める。図中には τ_* の値を示した。 τ_* は $g n_b^2 u^2 / R_b^{1/3}$ で与えた。 u は平均流速、 R_b は径深で Einstein の方法で側壁の補正を行った。

図-2

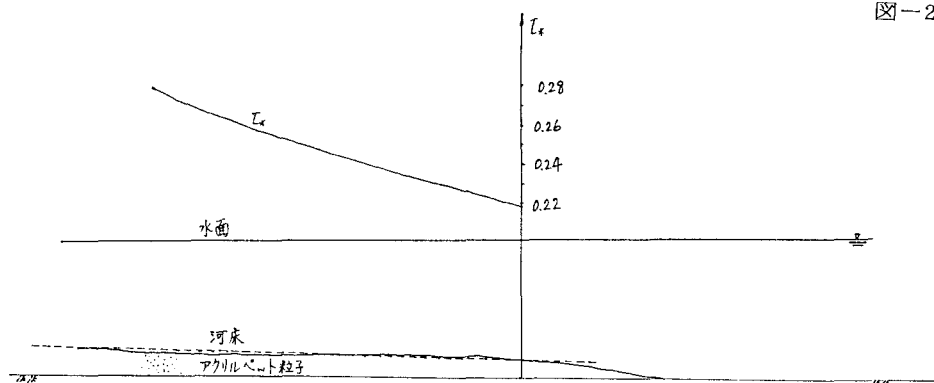
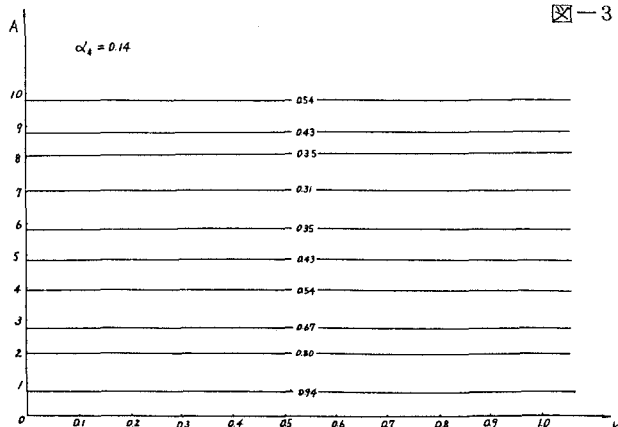


図-3、4、5に $\alpha_* = 0.14$ 、0.20、0.22 の場合の R の等高線図を示した。

$\alpha_* = 0.14$ は板倉、岸によって提示された値であるが、図からわかる様に R は K によらない。これは $\alpha_* = 0.14$ では浮遊砂が発生しないためである。

$\alpha_* = 0.22$ として浮遊砂が発生させたのが図-5である。この場合には図中の点線の位置に R の谷が走っている。これを定式化すると、

図-3



$$A = 6.7 - 8.4K \quad (10)$$

である。これはKとAの相補的な関係を示している。この線上におけるRの最少値を見ると、 $K=0$ の地点にあるが、全体的な傾向を見ると $K<0$ のところに最少値がある様に見え、この α_* が過大であることを推測させる。

図-4は、 $\alpha_*=0.20$ であるが、この場合には $A>0$ 、 $K>0$ の部分にRの最少値がある。

図-6は、ある α_* に対してRが最少となるA、Kの位置をR、 α_* の値とともに示したものである。図から、 $\alpha_*=0.2$ 、 $A=4.5$ 、 $K=0.5$ 付近に最少値があるのがわかる。

おわりに

前節で得られたAの値は従来考えられていた値より小さく、一方、 α_* 、Kは Itakura and Kishiの示した値より大きい。この結果は、掃流砂と考えられていた部分に浮遊砂とした方がより適切なものが含まれていることを表し、Luque and Beek や著者ら(3)の測定結果に対応している。ただし、今回の水理条件は掃流砂が卓越する場合であり、浮遊砂が掃流砂と同程度の条件での実験が必要である。

参考文献

- (1)Engelund, Nordic Hydrology, 7, 1976 (2)Luque and Beek, Jor. Hydr. Res., 14, 1976 (3)山本、森、岸、第29回水理講演会論文集、1985年 (4)Itakura and Kishi, ASCE, 106, Hy. 8, 1980 (5)芦田、京都大学防災年報、第13号B、1970 (6)岡部、学位論文、1982

図-4

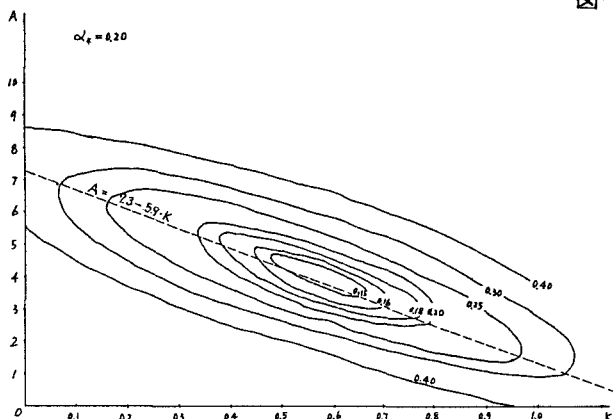


図-5

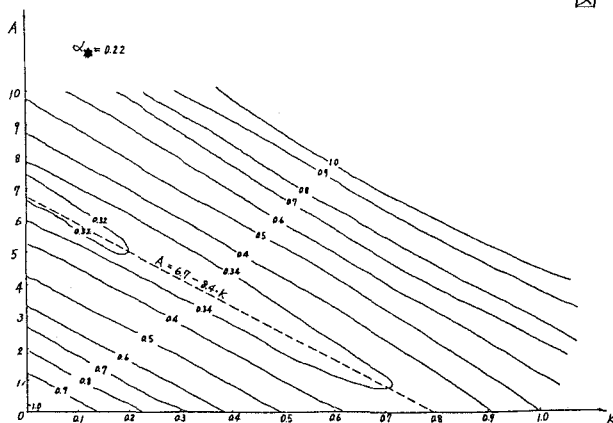


図-6

