

泥水密度流先端部の挙動について (予報)

九州大学工学部 正会員 平野 宗夫
九州大学工学部 正会員 羽田野 繁義
九州大学大学院 学生員 〇外 村 健司

1. まえがき

前報において、粗砂のまき上げと沈積を考慮して泥水密度流先端部の特性について考察を行なったが、まき上げについての考察が不十分であった。本研究は密度流による細砂のまき上げ実験の結果をもとに、先端部の流動特性に関して考察を行なったものである。

2. 理論

現象は非定常な下層密度流であり、図-1 に示すような2層流モデルで考える。基礎方程式は下層流床に関する体積保存則・質量保存則および流れ方向の運動方程式であり、底面に平行にx軸、これに垂直上方向にz軸をとるとそれぞれ次式のようになる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = V_e + Y_* - Y_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\delta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\eta)}{\partial x} = \rho_0 V_e + \{\sigma(1-\lambda) + \lambda\rho_0\} (Y_* - Y_f) \quad (2)$$

$$\int_{h_b}^{h_b+\delta} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = \Delta \rho g \delta \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \rho \delta^2 \right) + \tau_i - \tau_b \quad (3)$$

ここで、 V_e は周囲水の進行速度、 Y_* および Y_f はまき上げおよび沈積による河床の低下および上昇の速度、

$\delta = \int_{h_b}^{h_b+\delta} u dy$, θ はx軸と水平との角、 $\Delta \rho = \rho - \rho_0$ 、その他は慣用記号である。上式を連続式などを用いて変形し、同一の特性曲線 $\frac{dX}{dt} = \bar{u}$ 上で考える。 $X = x/\delta_0$, $D = \delta/\delta_0$, $R = \Delta \rho/\rho_0$, $U = \bar{u}/\bar{u}_0$, $F_0 = \bar{u}_0/\sqrt{\Delta \rho_0 g \delta_0/\rho_0}$

$\tau_{b0} = f_b \bar{u}_0^2 / \{(\sigma/\rho_0 - 1) g d\}$ とおくと、結局無次元形で

$$\frac{dD}{dX} = m + \frac{Y_* - Y_f}{\bar{u}}, \quad m = E - \frac{\delta}{\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{dR}{dX} = -\frac{R}{D} \left\{ E + \frac{Y_* - Y_f}{\bar{u}} - (1-\lambda) F_0^2 \frac{\delta_0}{d} \frac{f_b}{\tau_{b0}} \frac{Y_* - Y_f}{\bar{u}} - \frac{1}{R} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{dU}{dX} = -\frac{U}{D} \left\{ \frac{\rho_0}{\rho} (1-r_1) E + \frac{\sigma(1-\lambda) + \rho_0 \lambda}{\rho} \frac{Y_* - Y_f}{\bar{u}} + f_i + f_b \right\} + \frac{R}{U} F_0^{-2} \sin \theta + 2(\beta-1)(m-E) \frac{U}{D} + U \frac{\partial \beta}{\partial X} \quad (6)$$

のようになる。ここで、 $E = V_e/\bar{u}$, $r_1 = u|_{z=h_b+\delta}/\bar{u}$, $\tau_i = f_i \rho \bar{u}^2$, $\tau_b = f_b \rho \bar{u}^2$, β は運動量補正係数および入は空けき率であり、 δ_0 , $\Delta \rho_0$ はそれぞれ $x = x_0$ における δ , $\Delta \rho$ の値である。以前赤司²⁾は珪砂($\rho/\rho_0 = 2.65$, $d_{50} = 47 \mu$)を用いて塩水密度流による細砂のまき上げ実験を行なっている。図-2はその結果を示したものである。図中の曲線は pick up rate に関する辻本³⁾

$P_3 \sqrt{d/(\sigma/\rho_0 - 1) g} = 0.03 \tau_* (1 - \tau_{*c}/\tau_*)^3$, $\tau_* = U_*^2 / \{(\sigma/\rho_0 - 1) g d\}$ (7) において限界掃流力に岩垣⁴⁾の式 $U_{*c}^2 = 226 d$ を用いて得られたものである。なお Y_* と P_3 は $Y_* = P_3 d$ の関係にある。底面抵抗と噴流の研

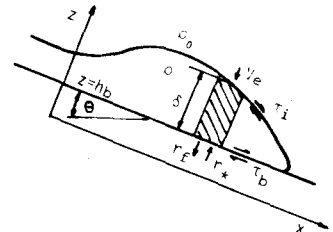


図-1 解析モデル

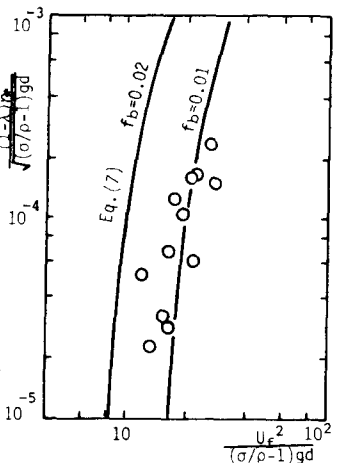


図-2 密度流先端部の流動による細砂のまき上げ量

究結果⁵⁾から評価した場合、実測値と計算値は近い傾向を示すようであり、密度流によるまき上げに対して述べの式が適用できると考えられる。また、粒子の体積濃度 C 沈降速度 w_0 を用い、 $Y_f = CW_0$ で与えることにする。

3. 計算結果

式(4)(5)および(6)の適合性をみるため、芦田ら⁶⁾が $\sigma/\rho_0 = 2.65$, $d_{50} = 30 \mu$ のカオリン懸濁液を用いて行なった thermal の実験結果を計算値とともにプロットしたのが図-3および図-4である。計算条件は最上流の測定値を初期条件として与え、 $M = 0.35 \sin \theta$, $Y_f = 0$, $\lambda = 0.45$, $f = 0.02$ とした。thermal の場合、 E_m の値は plume に比べて大きな値となるため $E_m = 2.0$ について計算した。また沈降速度として Stokes の公式による値 $w_0 = 0.1 \text{ cm/s}$ と、分級作用や乱流中の沈降であることなどを考慮して $w_0 = 0.035 \text{ cm/s}$ について計算した。図より $w_0 = 0.035 \text{ cm/s}$ としての計算が実験値と割合よい一致を示すようである。

次に泥水密度流の流動特性が内部フルード数の初期値 F_0 と底面粒子のまき上げを規定する流れの掃流力と限界掃流力との比 τ_b/τ_{bc} に強く依存することに着目し、 $F_0 \sim \tau_b/\tau_{bc}$ の平面上で泥水密度流の発達・減衰の領域区分を行なった。その結果が図-5に示されている。この図において領域①から出発した密度流は常にまき上げを生じて、濃度・速度とも急増し、泥流や土石流に転行する。この領域では、 $X=0$ において $d\tau_b/dX > 0$ かつ $\tau_{b0} > \tau_{bc}$ となる条件が満たされ、式(6)を用いて

$$\begin{cases} \tau_{b0}/\tau_{bc} > 1 \\ F_0^2 < \frac{\sin \theta + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\tau_{b0}}{\tau_{bc}} \frac{d}{d_0} \frac{w_0}{u_0} \frac{\sigma(1-\lambda) + \rho_0 \lambda}{\rho_0}}{(1-k_1)E + \frac{\sigma(1-\lambda) + \rho_0 \lambda}{\rho_0} \times 0.03 \sqrt{f_b} \tau_{b0} (1 - \frac{\tau_{bc}}{\tau_{b0}})^3 + f_i + f_b} \end{cases}$$

で表わされる。領域②から出発した密度流は泥ごみなどのため次第に減衰する。この領域では $X=0$ で $d\tau_b/dX < 0$ かつ $\tau_{b0} < \tau_{bc}$ の条件が満たされ、次式

$$\begin{cases} \tau_{b0}/\tau_{bc} < 1 \\ F_0^2 > \frac{\sin \theta + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\tau_{b0}}{\tau_{bc}} \frac{d}{d_0} \frac{w_0}{u_0} \frac{\sigma(1-\lambda) + \rho_0 \lambda}{\rho_0}}{(1-k_1)E + f_i + f_b} \end{cases}$$

で表わされる。なお図中 F_{01}^2 および F_{02}^2 の値は次のようである。

$$F_{01}^2 = \frac{\sin \theta}{(1-k_1)E + f_i + f_b}, \quad F_{02}^2 = \frac{\sin \theta + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\tau_{bc}}{\tau_{b0}} \frac{d}{d_0} \frac{w_0}{u_0} \frac{\sigma(1-\lambda) + \rho_0 \lambda}{\rho_0}}{(1-k_1)E + f_i + f_b}$$

上記①および②以外の領域から出発した泥水密度流は加速または減

速した後①、②いずれかの領域内に移行し、発達または減衰する。これらのいずれのコースになるかは、初期条件と $E, m, \sin \theta$ などの他、粒子に関するパラメータ w_0/u_0 および d/d_0 に規定される。

参考文献

- 1) 平野・羽田野・外村；西部支部，1982
- 2) 赤司淳也；九州大学修士論文，1980
- 3) 辻本哲郎；京都大学学位論文，1977
- 4) 岩垣雄一；土木学会論文集，才41号，1956
- 5) Sigalla；J.R. Aeronaut. Soc. 62, 1958
- 6) 芦田・江頭・中川；京都大学防災研年報，才24号，B-2，1981
- 7) 平野・羽田野・松尾；西部支部 1983

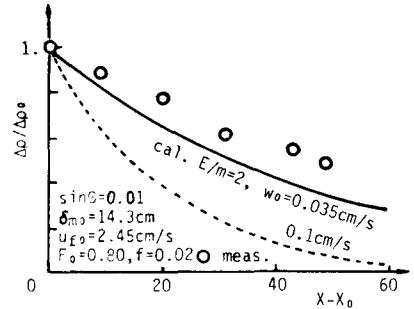


図-3 先端部 密度の計算値と実測値

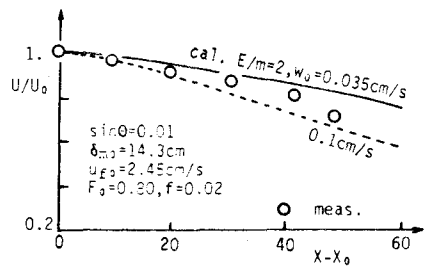


図-4 先端部 速度の計算値と実測値

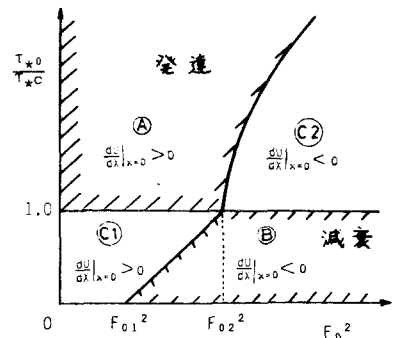


図-5 泥水密度流の発達・減衰の領域区分