

九州大学工学部 正会員 平野宗夫
九州大学工学部 正会員 河田野繁義
九州大学大学院 学生員 梅尾信之

1. まえがき

前報¹⁾では、密度流が濁質の沈積や底質のまき上げを起さずには流下する場合について先端部の運動を解析し、その結果を報告した。今回は、塩水を用いて密度流による底質のまき上げに関して若干の実験を行ない、固・液二相流の取扱により解析を行なったのでその結果を報告する。

2. 実験および実験結果

実験水路は図-1に示すような幅0.2mの2次元水路で、下流端に越流せきを設置している。実験は上流端より下流方向0.8~3.4mの間に細砂(比重2.71, 平均粒径60 μ)を約1.5cmの厚さに敷き、清水を満した水路に上流端から塩水を供給して密度流を発生させた。流れ方向に4地点で先端部がさしかかった時、瞬時的に採水を行ない、細砂・塩分の濃度分布を測定した。また、同時に密度流先端部の運動の様子を16mmカメラで撮影した。

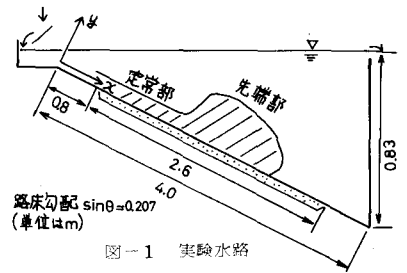


図-1 実験水路

上記のようにして求めた密度流先端部の塩分濃度分布および

細砂濃度の分布の一例を示したのが図-2である。

図より、濁度は底面近くの極く薄い層に於て高い値を示し、また流下するにつれて増加する。塩分濃度は底面付近で大きく、流下とともに一様分布に近づいている。

つぎに、密度流定常部で得られた細砂の断面平均濃度の変化から河床洗掘速度 V_s ($\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{s}$) を

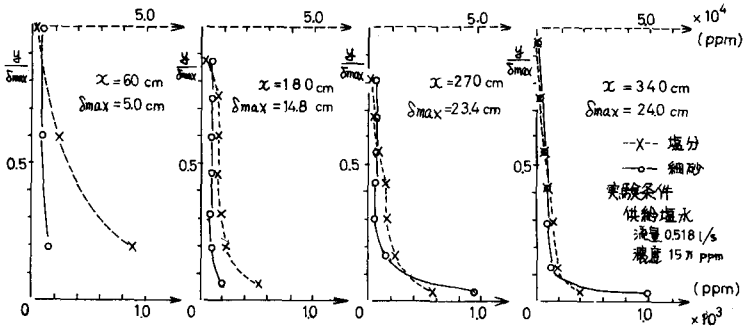


図-2 細砂および塩分の濃度分布

求め、プロットすると図-3の様になる。これに中川ら²⁾による pick up rate の式(1)を記入すると図中の実線のようになり、実測値の傾向とほぼ一致する。

$$V_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma_s/\rho_f - 1)g}} = F_0 \tau_* (1 - \tau_{*sc}/\tau_*^3), \quad \tau_* = \frac{U_*^2}{(\sigma_s/\rho_f - 1)gd} \quad (1)$$

ここに、 σ_s : 砂の密度、 ρ_f : 流体密度、 d : 砂の粒径。上式に於ては $F_0 = 3.0/2d$ の関係があり、底面の勾配を考慮し $\tau_{*sc}/\tau_* = \omega \theta - \alpha \omega \theta/\rho_s$ (τ_{*sc} : 斜面上での限界掃流力、 θ : 底面勾配、 α : 砂の水中摩擦係数) とし、 $U_*^2 = 226d$ (岩垣式)、 $U_* = u/4$ (u は密度流先端部の移動速度)、 $\rho_s = 1.0$ 、 $F_0 = 0.03$ とし計算を行なった。

3. 理論的考察

浮遊粒子は十分小さく固相の流れは連続体として記述できるものとする。

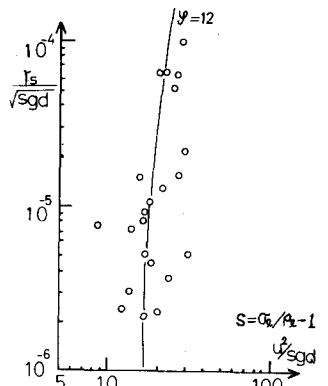


図-3 洗掘速度

図-4に示すモデルに於て連続式・質量保存則は各々次式となる。

連続式

$$(固相) \quad \partial \bar{c} \delta / \partial t + \partial \bar{c} \bar{z} / \partial x = \gamma_s \quad (2)$$

$$(液相) \quad \partial (1-\bar{c}) \delta / \partial t + \partial (1-\bar{c}) \bar{z} / \partial x = \bar{z}_* \quad (3)$$

質量保存則

$$(固相) \quad \partial \bar{c} \delta \sigma_s / \partial t + \partial \bar{c} \bar{z} \sigma_s / \partial x = \gamma_s \sigma_s \quad (4)$$

$$(液相) \quad \partial (1-\bar{c}) \rho_l \delta / \partial t + \partial (1-\bar{c}) \bar{z} \rho_l / \partial x = \bar{z}_* \rho_w \quad (5)$$

x方向の液相の運動方程式については、 $v_x \approx 0$, $v_s \approx v_x - w_s$

(v_x, v_s はそれぞれ液相, 固相の流速のy方向成分, w_s は沈降速度) とし、底面から境界面まで積分すると次式を得る。

$$\int_0^\delta \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) dy = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_l} g \sin \theta - \frac{g}{R} \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \delta^2 \sigma^2 \right) + \frac{\tau_i - \tau_b}{\rho_l} - \frac{1}{R} \int_0^\delta R_x dy \quad (6)$$

ここに、 c : 固相粒子の体積濃度, \bar{z} : 密度流の単位幅当りの流量, γ_s : 河床洗掘速度, \bar{z}_* : 用風水進行速度, σ_s : 固相粒子の密度, u_x : 液相の流速のx方向成分, $\rho_l = \rho_l - \rho_w$, $\rho_l = \rho - \rho_w$, ρ_l, ρ_l, ρ : 液相, 固相, 混相の密度, θ : 底面勾配, P_x : 固相・液相間に加力(x方向成分), $\bar{(\quad)}$ は断面平均値を示す。

一方、実験的に先端部最大厚さ δ_{max} は流下方向に直線的に増加することが確かめられているので、 δ_{max} 付近については、 $\delta = m(x-x_0) + \delta_0$ (δ_0 は $x=x_0$ の厚さ) とし、式(5)の右辺第2項が他の項に比して無視できるとし、 $R_x \approx -(\rho_l - \rho_l) g \sin \theta$, 運動量補正係数を1.0, $E_1, E_2 = const$ ($E_1 = \bar{z}_* / \bar{u}_l$, $E_2 = \gamma_s / \bar{u}_l$) とすると、特性曲線 $d^2x/dt^2 = \bar{u}_l$ 上で次式を得る。

$$\Delta \bar{p}_2 = \sigma_l \frac{E_2}{E} + (\Delta \rho_0 - \sigma_l \frac{E_2}{E}) \left\{ m(x-x_0) + 1 \right\}^{-\frac{E}{m}} \quad (7)$$

$$U^2 = 2F_0^2 \sin \theta \left[\frac{H}{2\{E_1(1-k)+f\}+m} + \frac{1-H}{2\{E_1(1-k)+f\}+m-E} \left\{ m(x-x_0) + 1 \right\}^{-\frac{E}{m}} \right] \times \left\{ m(x-x_0) + 1 \right\} + C \left\{ m(x-x_0) + 1 \right\}^{-\frac{2\{E_1(1-k)+f\}}{m}} \quad (8)$$

$$H = \frac{\sigma_l E_1}{\Delta \rho_0 E} \quad C = 1 - 2F_0^2 \sin \theta \frac{2\{E_1(1-k)+f\}+m-E}{\left[2\{E_1(1-k)+f\}+m \right] \left[2\{E_1(1-k)+f\}+m-E \right]}$$

ここに、 $\sigma_l = \sigma_s - \rho_l$, $E = E_1 + E_2$, $X = x/\delta_0$, $U = \bar{u}_l / \bar{u}_0$, $F_0 = \bar{u}_0 / \sqrt{\Delta \rho_0 g \delta_0 / \rho_w}$, $k = u_x(\delta) / \bar{u}_l$, $f = (\tau_i - \tau_b) / \rho_l \bar{u}_0^2$, 添字0は $x=x_0$ における値であることを示す。

上式において $E_1 = 0.1$, $E_2 = 20 \times 10^{-4}$, $f = 0.05$, $m = 0.1$, $k = 0$ とし計算し、実測値と比較したのが図-4および5である。両図とも曲線は実測値の特性を比較的良好に示しているといえる。

4. あとがき

以上より、まき上げを伴う密度流先端部の断面平均密度の変化、速度変化について一応説明できると考えられるが、先端部の抵抗係数 f 、洗掘速度 γ_s 、進行速度 \bar{z}_* については明らかでなく今後の課題である。最後に本研究にあたり熱心に協助して頂いた若木大学院生、赤司淳也氏ならびに井本大吉氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 平野・羽田野・赤司; 第33回土木学会年講, 1978
- 2) 中川・辻本; 土木学会論文報告集, 第244号, 1975.

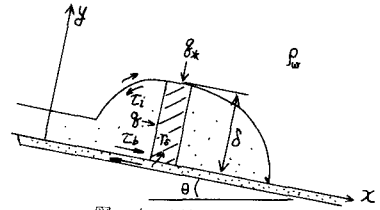


図-4 解析モデル

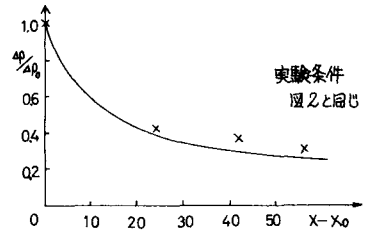


図-5 先端部の密度の変化

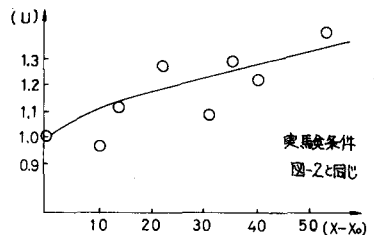


図-6 先端速度の変化