

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 赤司淳也

1. まえがき

高濁度の泥流がダム湖に流入すると泥水密度流が発生する。泥水密度流は非定常で強い渦運動を伴う先端部とその後方の定常な流れの部分とから成る。そのうち定常な部分については連行や界面抵抗などに関して、多くの理論的・実験的研究が行なわれ、その性状はかなり明らかにされているが、非定常な運動をする先端部についての解析的な取り扱いはあまりなされておらず不明な点が多い。

本文は泥水密度流の特に先端部の運動を解明するために、若干の実験を行ない、理論的考察を試たものである。

2. 実験装置および方法

実験装置は、長さ4m、幅0.2m、せき位置での水深0.8m、底面勾配0.204の水槽である。実験はこの水槽に水道水を満たしておき、濁水・着色塩水を所定の流量密度で供給して泥水密度流を発生させ、その形状をV.T.R.で撮映して測定した。密度(cm)はサイフォンで採水して測定した。また、先端部の採水は困難なため、上流の定常部で採水した。

3. 実験結果

泥水密度流先端部は、図-1に示すように盛り上がり、上層の清水を連行するなどして、流動厚さが増大しながら流下する。そして下流端に達して壁体に衝突すると、壁体に沿って上昇し、衝突時にもっていた運動量と密度差によって決まるある高さに達すると静止し、その後上流側へ遡上し始める。その際、泥水は稀釈されているため、後続の泥水密度流と清水との境界付近に侵入し、段波状に遡上していく。

また、流下状態において先端部の足下を先端とし、その位置 x と先端部の最大厚さ d_{max} とをプロットしたのが図-2であり、 d_{max} は x に対してほぼ直線的に増大している。さらに先端位置を x とし、そのときの先端速度 u を各々無次元化してプロットしたのが図-4である。図によると初め徐々に加速され、その後一定値に漸近するようである。

4. 理論的考察

図-3に示す座標系で考える。図の斜線部について考えた連続式、質量保存則および近似的な運動方程式は各々式(1)、(2)、(3)となる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial \delta}{\partial x} = \delta_s - \delta_{*b} \quad (1) \quad \frac{\partial \Delta \rho}{\partial t} + \frac{\delta}{\delta} \frac{\partial \Delta \rho}{\partial x} = - \frac{\Delta \rho \delta_s}{\delta} \quad (2)$$

$$\rho \int_{h_b}^{h_s+\delta} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) dy = g \Delta \rho \delta \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \rho \delta^2 \right) + \tau_s - \tau_z \quad (3)$$

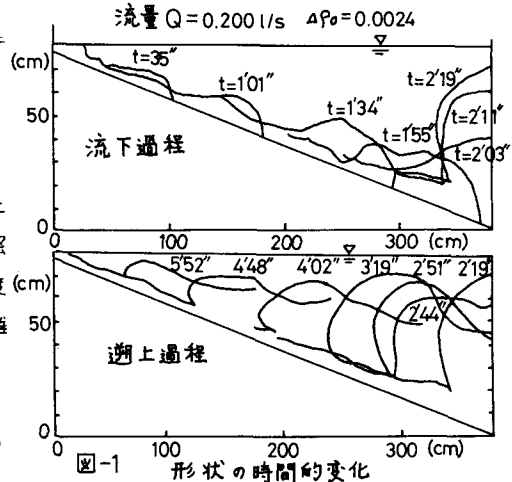


図-1 形状の時間的变化

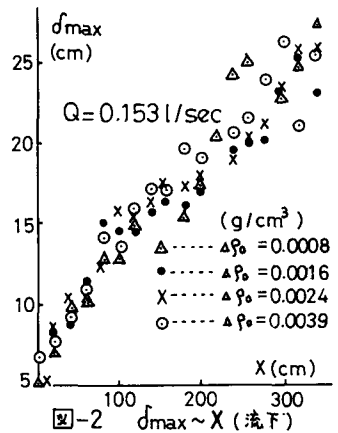


図-2 $d_{max} \sim X$ (流下)

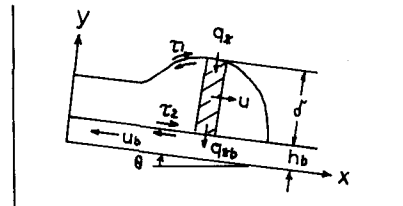


図-3

ここに、 δ は泥水層先端部の厚さ、 $\bar{u}, u_b$ は各々泥水層の上層、下層の平均流速、 u_1, u_2 は各々上下境界面での流速、 $\Delta\rho$ は泥水と清水の密度差の断面平均、 ρ は泥水の密度、 g は泥水の単位幅あたり流量、 g_b, g_{ab} は各々上下境界面での連行速度で、 $g_b = E\bar{u}$ 、 $g_{ab} = E_b(\bar{u} + u_b)$ 、 g は重力加速度、 u および v は各々 x および y 方向の流速成分である。式(3)の左辺を連続式を用いて変形し、 $\int_{x_0}^{x_0+\delta} u dx = g = \bar{u}\delta$ 、 $\int_{x_0}^{x_0+\delta} u^2 dx = \beta \bar{u} g$ を用い、式(1)を考慮し、さらに福岡らの測定結果を参考にし、後の取り扱いを簡単にするために $\beta=1.0$ とし、抵抗係数 f_1 および f_2 を用いて、 $\tau_b = -f_1 \rho \bar{u}^2$ 、 $\tau_s = f_2 \rho (\bar{u} + u_b)^2$ とおけば(3)式は次式のようになる。

$$\rho \delta \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \rho \bar{u}^2 \left[\left(1 - \frac{u_b}{\bar{u}} \right) E - \left(1 - \frac{u_2}{\bar{u}} \right) \left(1 + \frac{u_b}{\bar{u}} \right) E_b + \frac{1}{2} \left\{ f_1 + f_2 \left(1 + \frac{u_b}{\bar{u}} \right)^2 \right\} \right] \\ = g \Delta \rho \delta \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \rho \delta^2 \right) \quad (4)$$

ふくらみ頂部を含む断面について、上式右辺第2項は第1項に比べて小さいと考えてこれを無視し、特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で次式となる。

$$\frac{d\bar{u}^2}{dx} = \frac{2}{\delta} \bar{u}^2 \left[-E \left(1 - \frac{u_1}{\bar{u}} \right) + E_b \left(1 - \frac{u_2}{\bar{u}} \right) \left(1 + \frac{u_b}{\bar{u}} \right) - \frac{f_2}{2} \left\{ \frac{f_1}{f_2} + \left(1 + \frac{u_b}{\bar{u}} \right)^2 \right\} \right] + 2 \frac{\Delta \rho}{\rho} g \sin \theta \quad (5)$$

以下、先端が流下する場合を考える。この場合式(1)、(3)、および(5)中に現われる g_{ab} 、 E_b 、 u_b 、 u_2 および u_1 はいずれも0となる。また、 $g = \bar{u}\delta$ を考慮して式(1)を若干変形すると、特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で、 $\frac{d\delta}{dx} = E - \frac{\delta}{\bar{u}} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$ となるが、図-2より δ_{max} は x に対して直線的に増大している。そこで先端が相似な形状を保ちながら移動すると仮定し、 $m = E - \delta/\bar{u} \cdot \partial \bar{u}/\partial x$ を一定とすれば次式を得る。

$$\delta = m(x - x_0) + \delta_0 \quad (6) \quad (\text{ここに、}\delta_0 \text{は} x_0 \text{における}\delta)$$

また、式(2)の特性曲線表示を考え、式(6)を考慮すれば次式を得る。

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta \rho_0} = \left(\frac{\delta}{\delta_0} \right)^{-\frac{F_0}{\delta_0}} = \left\{ \frac{m}{\delta_0} (x - x_0) + 1 \right\}^{-\frac{F_0}{\delta_0}} \quad (7) \quad (\text{ここに、}\Delta \rho_0 \text{は} x_0 \text{における}\Delta \rho \text{である。})$$

一方、式(5)は上記を考慮して簡略化される。さらに式中の δ および $\Delta \rho$ に式(6)および(7)を代入し、 E 、 m 、 $u_b = u_1/\bar{u}$ および $f = f_1 + f_2$ を一定として積分し、 $U = \bar{u}/u_b$ 、 $X = x/\delta_0$ および $F_0 = \bar{u}_0/\sqrt{\Delta \rho_0/\rho} \delta_0$ を用いて表せば

$$U^2 = \frac{2 F_0^2 \sin \theta}{2 f + E(1 - 2 u_b) + m} \left\{ m(X - X_0) + 1 \right\}^{1 - \frac{E}{m}} + \left(1 - \frac{2 F_0^2 \sin \theta}{2 f + E(1 - 2 u_b) + m} \right) \left\{ m(X - X_0) + 1 \right\}^{-2 \frac{E(1 - u_b) + f}{m}} \quad (8)$$

また、相似形の仮定から先端と頂部を含む断面の速度とは比例することになるから、式(8)は先端速度の変化特性をも与えている。式(8)の適合性をみるために、実測値として $m=0.06$ を用い、 $u_b=0$ 、 $f=0.01$ とおき、連行係数として、 $E=0.04$ および 0.06 の2つに対して $F_0=0.6, 0.8, 1.0, 2.0$ および 5.0 の場合を計算し、実測値をもとにプロットしたのが図-4である。なお、図には上流の定常部で測定した流動層の断面平均密度を用いた内部フルード数を表にして記入した。それによると、 $E=0.06$ の方が近い特性を示すが、概して計算値が実測値よりも大きめの値を示している。この原因としてはパラメータ u_b 、 E および f の値の適否、あるいは内部フルード数を求めるために定常部の密度を用いたため、内部フルード数が小さめに計算されることなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 福岡, 木村, 加納: 第21回水理講演会論文集 P63
- 2) Ippen, Harleman: Nat. Bur. of Standards Cir. 521 P79

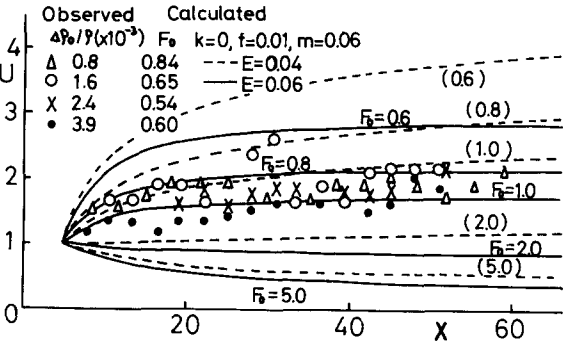


図-4 先端の移動速度