

泥水密度流先端部の挙動について(第8報)

九州大学工学部 正員 平野 宗夫
九州大学大学院 学生員 松尾 俊洋
九州大学工学部 本 田 喜久雄

1. まえがき

貯水池における泥水密度流は、重い流体が粒子の浮遊により形成されるが、このような流れでは周囲流体の連行に加え、浮遊粒子の沈積と底面を構成する粒子のまき上げが影響してくる。本報は濁質として珪砂を用い、水路幅が流下方向に直線的に拡幅される場合の plume 実験を行ない、先端部の挙動について理論的、実験的考察を試み、前報での密度物質として塩を用いた場合の結果とも比較して、流動特性を調べたものである。なお、粒子のまき上げに関しては考えていない。

2. 理論

現象は非定常な下層密度流であると考え、解析に際しては、図-1に示した2層流モデルを用いた。下層の流体に関する体積保存則、質量保存則は式(1)および(2)である。

$$\frac{\partial \hat{\delta}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{\delta}}{\partial x} = \hat{v}_e + \hat{r}_* - \hat{r}_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \hat{\delta}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \hat{\delta}) = \rho_0 \hat{v}_e + \{ \delta(1-\lambda) + \lambda \rho_0 \} (\hat{r}_* - \hat{r}_f) \quad (2)$$

ここに $\hat{\delta} = \delta(x, t) = \int_0^b u(x, y, z, t) dz$, ρ は下層流体の密度, ρ_0 は周囲流体の密度, δ は粒子の密度, λ は堆積状態における空げき率, δ は下層流の流動厚さ, v_e は周囲水の連行速度, r_* は路床洗掘速度, r_f は堆積速度である。式(1)および(2)は断面平均流速 $\bar{u}$ を用いて、それぞれ次のように変形される。

$$\frac{\partial \hat{\delta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \hat{\delta}}{\partial x} = \hat{v}_e - \hat{\delta} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\hat{\delta}}{b} \frac{\partial b}{\partial x} - \hat{r}_* + \hat{r}_f \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \hat{\delta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho \hat{\delta}}{\partial x} = -\frac{\rho \hat{\delta}}{\hat{\delta}} [\hat{v}_e + \hat{r}_* - \hat{r}_f] + \frac{(1-\lambda)(\rho - \rho_0)}{\hat{\delta}} (\hat{r}_* - \hat{r}_f) \quad (4)$$

式(3)および(4)を特性曲線法で解くと、 $d\hat{x}/dt = \bar{u}$ 上で以下の式がそれぞれ得られる。

$$\frac{d\hat{\delta}}{d\hat{x}} = E - \frac{\hat{\delta}}{\hat{a}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \hat{x}} - \frac{\hat{\delta}}{b} \frac{db}{d\hat{x}} + \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} = m - \frac{\hat{\delta}}{b} \frac{db}{d\hat{x}} + \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} \quad (5)$$

$$\frac{d\rho \hat{\delta}}{d\hat{x}} = -\frac{\rho \hat{\delta}}{\hat{\delta}} \left[E + \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} \right] + \frac{(1-\lambda)(\rho - \rho_0)}{\hat{\delta}} \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} \quad (6)$$

ここに E は連行係数, m は周囲水の連行と速度のひずみによる流動厚さの増加割合を合わせたものである。 ω は粒子沈降速度で、また、次のような関係がある。

$$m = E - \frac{\hat{\delta}}{\hat{a}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \hat{x}} \quad (7) \quad r_f = \frac{1}{1-\lambda} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \omega \quad (8)$$

式(5)および(6)において E と m が現象を規定する重要なパラメータになると考えられるので、以下これらについて実験的に検討を行なうことにする。

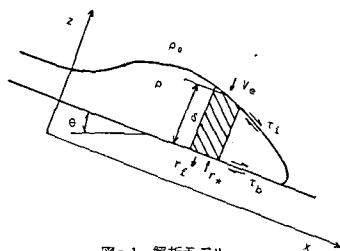


図-1 解析モデル

$d\hat{x}/d\hat{x}$	Q (l/s)	$\sin\theta$
0.020	0.05	0.044
		0.102
		0.152
	0.10	0.202
		0.044
		0.102
0.040	0.05	0.152
		0.202
		0.044
	0.10	0.102
		0.152
		0.202

表-1 実験条件

3. 実験結果とその考察

(1) 実験 実験水路は前報のものを用いた。傾斜水路内を水道水で満たした後、ヘッドタンクで所定の流量の濁水を投入して、各測定点において、濁度、先端部の流動厚さおよび移動速度を測定した。実験条件は表-1に示すとおりである。

(2) 実験結果および考察

(a) ふくらみ係数 m 式(5)より式(9)が得られる。

$$m' = m + \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{\alpha}} = \frac{d\hat{\delta}}{dX} + \frac{\hat{\delta}}{b} \frac{db}{dX} \quad (9)$$

ここで m' は見かけのふくらみ係数で、 $\hat{\delta}$ の実測値を与えることにより求まる。図-2は m' と底面勾配の関係プロットしたものであるが、投入物質が珪砂、塩分ともに底面勾配に比例して増加していることがわかる。また、図-2(a)から、 m' の振幅率が大きい方が大きくなる傾向が見られる。図-2(b)では、投入流量の差を示しているが、流量が大きい場合の方が若干大きいようであった。さらに、投入物質の別に比較してみると、塩分の場合の方が若干大きくなっているが、これは珪砂の場合、本実験では浮遊粒子のまき上げはなく、 $\hat{r}_* = 0$ と考えられるので、沈積の項の影響によるものと思われる。 $\hat{r}_* > 0$ 、かつ、微小な項であるので、これらも考慮すると両者の差はほとんどないと考えられる。

(b) 連行係数 E 理論的には、式(6)から E の値は求まるが、すべての項も厳密に評価して、解析的に解くことは難しい。そこで、本報では浮遊粒子のまき上げを考慮していないので $\hat{r}_* = 0$ 、かつ、 Δp は $(1-\lambda)(\sigma-p_0)$ に比べて微小なので、式(6)は次のように変形される。

$$\frac{d\Delta p}{dX} = -\frac{\Delta p}{\hat{\delta}} E + \left(\frac{\Delta p - (1-\lambda)(\sigma-p_0)}{\hat{\delta}} \right) \frac{1}{1-\lambda} \frac{\Delta p}{\sigma-p_0} \frac{w_0}{\hat{\alpha}} = -\frac{\Delta p}{\hat{\delta}} \left(E + \frac{w_0}{\hat{\alpha}} \right) \quad (10)$$

式(10)を $E + w_0/\hat{\alpha} = \text{const.}$ とし積分すると式(11)が得られる。

$$E' = E + \frac{w_0}{\hat{\alpha}} = -\ln \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right) / \int_{x_0}^x \frac{dX}{\hat{\delta}} \quad (11)$$

図-3は式(11)で得られた E' の値を珪砂と塩分の別に底面勾配に対してプロットしたものである。ともに底面勾配に比例して増加しているが、図-3(a)より振幅率による差は明白ではなかった。図-3(b)では流量による差であるが、流量が大きい方が若干大きい程度であった。また、珪砂の E' と塩分の $E' = E$ は、あまり差が見られなかったが、沈積の効果を考えると、珪砂の連行係数 E は塩分のそれよりかなり小さい可能性がある。また、まき上げの影響も考えられる。 $w_0/\hat{\alpha}$ と E は同じオーダーの値と考えられるので、これらの点については今後、詳しく検討する予定である。

<参考文献>

1) 平野・花尾・小野・馬場：泥水密度流先端部の挙動について(第7報) 昭和58年度土木学会西部支部研究発表会

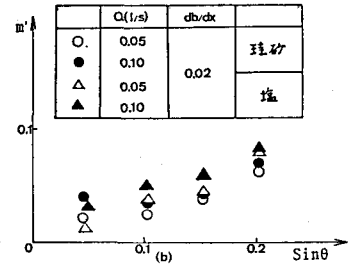
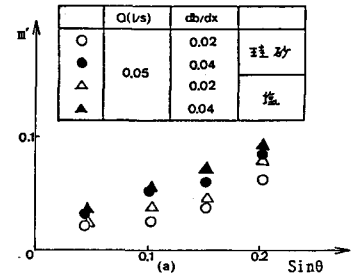


図-2 m' と $\text{Sin}\theta$ の関係

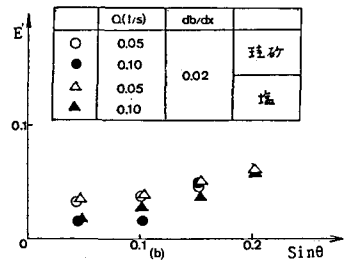
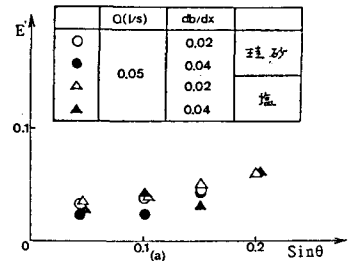


図-3 E' と $\text{Sin}\theta$ の関係