

九州大学工学部 正員 平野 宗夫
 山口大学工学部 正員 羽田野 袈弥義
 九州大学大学院 学生員 松尾 俊洋

1. まえがき

貯水池内における泥水密度流は、重い流体が粒子の浮遊によって形成されるものであるが、周囲流体の連行に加え、浮遊粒子の沈積や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た場合のthermal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慮していない。

2. 実験

実験水路は図-1に示したものをを用いた。実験はこの水路内に水道水を満たし、上流端より濁度10000 ppmの珪砂を混合した水を所定の体積だけ瞬時に供給して行なった。測定は、先端部の発達、先端移動速度および濁度について行なった。実験条件は表-1に示す。濁質として用いた珪砂は比重2.68、中央粒径約110 μ であるが、これが水路を流下していくとき、比較的粒径の大きな粒子は先に沈降するので、粒度分布は小さい方に変化する。そこで、流下する濁水を採水し、サンプラーにとり、顕微鏡写真を撮り、プロジェクターで拡大した後、デジタイザーで粒径を測定した。粒子沈降速度はStokesの式より計算した。

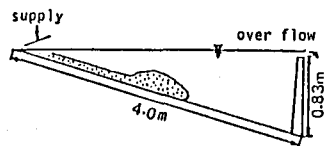


図-1 実験水路

dB/dx	V (l)	sin θ
0	6.0	0.044
		0.102
		0.152
		0.202

表-1 実験条件

3. 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、図-2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、質量保存則およびx方向についての運動方程式はそれぞれ次のようになる。

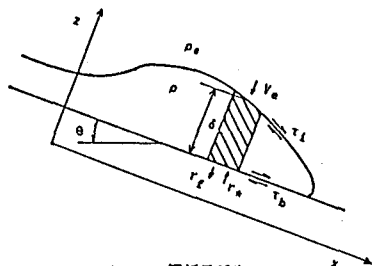


図-2 解析モデル

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

$$\left\{ \frac{\partial (\rho_s(1-C)\delta)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_s(1-C)\hat{u}\hat{\delta})}{\partial x} \right\} = \rho_s \hat{v}_e + \rho_s \lambda (\hat{r}_* - \hat{r}_f) \quad (\text{水の質量保存則}) \quad (2)$$

$$\left\{ \frac{\partial (\sigma C \hat{\delta})}{\partial t} + \frac{\partial (\sigma C \hat{u} \hat{\delta})}{\partial x} \right\} = \sigma (1-\lambda) (\hat{r}_* - \hat{r}_f) \quad (\text{砂の質量保存則}) \quad (3)$$

$$\int_0^\delta \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = - \int_0^\delta \frac{\partial P}{\partial x} dz + \int_0^\delta \rho g \sin \theta dz + \tau_i - \tau_b \quad (\text{運動方程式}) \quad (4)$$

ここで、 $q = q(x, t) = \int_0^\delta u(x, z, t) dz$ 、 ρ および ρ_s はそれぞれ下層流体および周囲流体の密度($\rho = \rho_s(1-C) + \sigma C$)、 δ は下層流の流動厚さ、 v_s は周囲流体の連行速度、 P は圧力、 θ は底面傾斜角、 τ_i および τ_b はそれぞれ内部界面および底面におけるせん断力、 u および w はそれぞれxおよびz方向の流速成分、 r_* は路床洗掘速度、 r_f は堆積速度、 σ は粒子の密度、 λ は堆積状態における空け率である。

ところで、式(2)、(3)について、流下方向に粒度分布が変化するので、体積濃度Cをある適当な粒径別に分割し、粒径別の式をたてると、ある粒径区間における C_i については次のようになる。

$$\frac{\partial (C_i \hat{\delta})}{\partial t} + \frac{\partial (C_i \hat{u} \hat{\delta})}{\partial x} = (1-\lambda) (\hat{r}_* - \hat{r}_f) \quad (5)$$

また、 $r_f = C w_b / (1-\lambda)$ (6)とすると、式(1)、(4)、(5)も特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で表すことができるようになる。

$$\frac{d\hat{\delta}}{dx} = E - \frac{\hat{\delta}}{\hat{a}} \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} + \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} = m + \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} \quad (7) \quad \frac{dC_i}{dx} = -\frac{C_i}{\hat{\delta}} \left(E + \frac{u_{bi}}{\hat{u}} \right) \quad (8)$$

$$\frac{d\hat{u}}{dx} = -\frac{\hat{u}}{\hat{\delta}} \left(\frac{p_0}{\rho} (1-k) E + \frac{\delta(1-\lambda) + p_0 \lambda}{\rho} \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} + f_i + f_b \right) + \frac{dp}{\rho} \frac{1}{\hat{a}} \sin \theta - \frac{1}{\rho \hat{\delta} \hat{a}} g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho \hat{\delta}^3 \right) - 2(\hat{\beta}-1) \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} - (\hat{\beta}-1) \frac{\hat{u}}{\hat{\delta}} \frac{\partial \hat{\delta}}{\partial x} + \hat{u} \frac{\partial \hat{\beta}}{\partial x} \quad (9)$$

ここで、 E は連行係数、 m はふくらみ係数 ($m = E - \frac{\hat{\delta}}{\hat{a}} \frac{\partial \hat{u}}{\partial x}$)、 $\hat{\beta}$ は運動量補正係数、 $k = u_{zs} / \hat{u}$ である。
よって、式(7)~(9)を用いて数値計算を行なうことにする。

4. 考察

(1) ふくらみ係数 $m = \frac{d\hat{\delta}}{dx} - \frac{\hat{r}_* - \hat{r}_f}{\hat{a}} \quad (10)$

本実験では、式(10)の右辺第2項が第1項に比べ微小なので、 $\hat{\delta}$ の実測値から m を求めることができる。図-3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、塩分の場合ともに底面勾配に比例して増加していることがわかるが、後者の方が大きい値をとっている。また、珪砂の場合、底面勾配が小さくなると流動厚さが減少する傾向がみられ、 m が負値をとったが、福嶋・早川²⁾も同様の報告をしている。

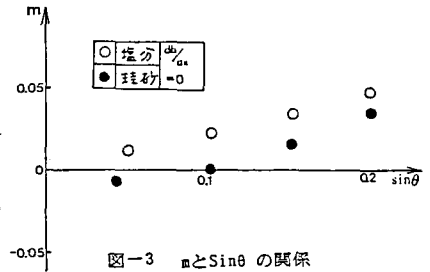


図-3 m と $\sin \theta$ の関係

(2) 連行係数 E 式(8)に、 $\hat{\delta}$ の実測値を与えると、 $E' = E + u_{bi} / \hat{u}$ の値が求まるが、今回は粒度分布の流れ方向変化の測定がなされていないので E そのものの値を求めることはできない。この E' の値も塩分の場合の E と同じように底面勾配に対してプロットしたのが図-4である。底面勾配が小さい所では E' が塩分の場合の E より大きくなっており、沈積項の影響であると思われる。また、底面勾配が大きい所では E' が塩分の場合の E より若干大きくなっており、沈積項の影響を考慮すると、珪砂の場合の E は m の場合と同様、塩分の場合より小さいものと考えられる。

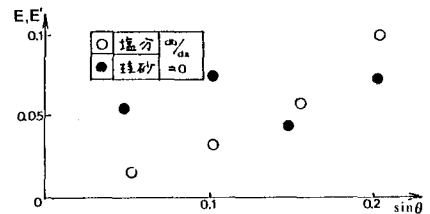


図-4 E と $\sin \theta$ の関係

(3) 実験値と計算値の比較

式(7)~(9)を用いて数値計算を行ない、実験値との適合性をみたものが図-5である。 $E/m = 1$ のとき、濃度の計算値は実験値に近くはっているが、速度に関してはあまり良い適合性が得られなかった。

5. 結論

ふくらみ係数 m については、沈積項は流動厚さの発達を示す項に比べ、微小で考慮せずとも良く、珪砂、塩分の場合ともに底面勾配に比例して増加するが、前者の場合、底面勾配が小さくなると負値となり、流動厚さは流方向に減少する。連行係数 E の評価や数値計算の際には、沈積項の評価が重要であり、今後の課題である。

<参考文献>

- 1) 平野・羽田野・外村・松尾; 泥水密度流先端部の挙動について(第5報) 第38回年次学術講演会
- 2) 藤本・福嶋・早川; 傾斜面上のサマルの流動特性 第38回年次学術講演会

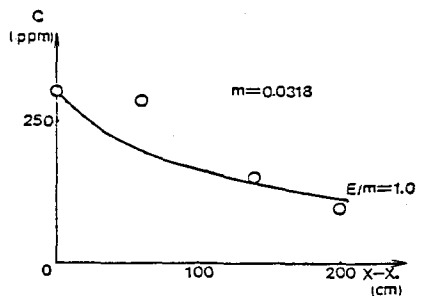


図-5 濃度の実験値と計算値