

高濃度流れの流動特性

京都大学防災研究所
防災研究協会
建設省

正員 芦田 和男
正員 山野 邦明
正員 神田 昌幸

1. まえがき 微細土砂を高濃度に含む流れは、その材料特性がせん断降伏応力 τ_y をもつ擬塑性流体的な性質をもつために、流動特性・流動機構が清水とは異なる。本研究では電気化学的な相互作用を考慮したレオロジーモデルに基づいて与えられる τ_y 、粘性係数 μ を用いて、高濃度流れの流動機構、抵抗則、転波列について実験的および理論的考察を行っている。

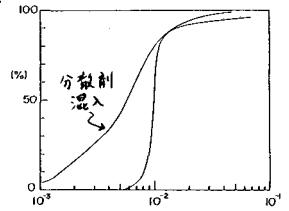


図-1

2. 開水路流れの流動機構 開水路乱流の流動式は、

$$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{du}{dz} \right) + \epsilon \left(\frac{du}{dz} \right) = \tau_y + \mu \left(\frac{du}{dz} \right) + \rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2$$

$$= \tau_y + \mu \left(\frac{du}{dz} \right) + f(Kz)^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

で表わされる。ここに K はカルマン定数、 ϵ は渦動粘性係数である。 τ_y 、 μ は参考文献に示される式で与えられる。図-2-a, bには図-1に示すような粒度分布をもつパールレイを試料に用い、応用ピトー管法を利用して得た流速分布の実験データと、式(1)を直接数値積分して得られた流速分布を示している。実験データより各高さの混合距離 l を求めたその一例が図-3であるが、河床近傍では、 l が充分大きくなり、そのために河床近傍の流速が急激に増加している。つまり粘性底層とそのやや上部では混合距離は小さい。これを渦動粘性係数 ϵ の分布からみた例が図-4である。図中の曲線は高濃度流れの流動層(厚さ H)に対して清水の ϵ を示したものであり、ここでも河床近傍で ϵ が小さくなっており、また、 ϵ の極大も流動層の中央付近になっている。図-5はせん断応力の分配を示しており、レイノルズ応力 $\rho l^2 (du/dz)^2$

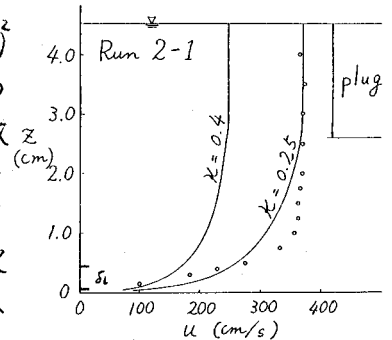


図-2-a

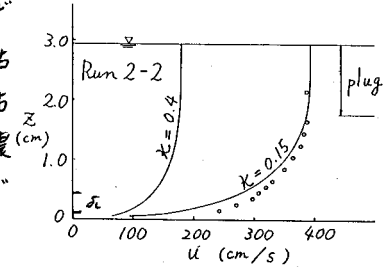


図-2-b

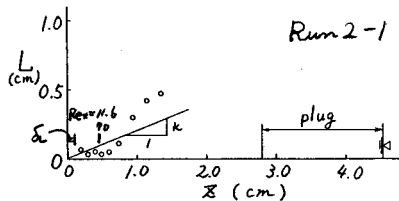


図-3

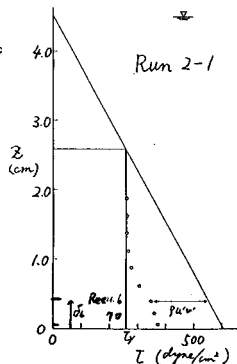


図-5

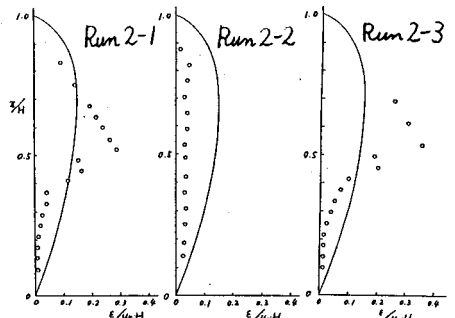


図-4

= $\rho u'v'$ の分布を読みとることが出来る。

3. 抵抗則 高濃度流れのレイノルズ数・摩擦損失係数は、せん断降伏応力 τ_0 を考慮した形で評価しなければならない。清水の開水路流れにおいては、壁面せん断応力 τ_w は、 $\tau_w = \frac{1}{2} f_{BV} \rho \bar{u}^2$ で与えられ、層流状態で $f_{BV} = 64/Re$ である。ここに、 $\bar{u}$ は断面平均流速、 τ_w は河床壁面せん断応力である。抵抗則を評価する時には流れをビンガム流体として近似するのがよく、上関係をもビンガム流体の流動層に適用すると、河床での u と y 、流動層における平均流速と u_m とのおくことにより、 $Re_B = f_{BV} u_m H / \mu_b$ 、 $f_{BV} = 2(\tau_w - \tau_0) / f_{BV} u_m^2$ と定義して、ビンガム流体の流れの特性が清水の特性とアナロジーをもつと Fr 考えると、 $f_{BV} = 6/Re_B$ が成立すると考えられる。 u_m とビンガム流体の流れの断面平均流速 u_m との間には、 $u_m = \bar{u}_m \times \{1 + \frac{1}{2} (\frac{\tau_0}{\tau_w})^2\}^{1/2}$ の関係があるので、 $Re_B^* = f_{BV} \bar{u}_m H / \mu_b$ 、 $f_B^* = 2\tau_w / f_{BV} \bar{u}_m^2$ を用いて抵抗則を評価すると、

$$f_{BV} = f_B^* (1 - \tau_0/\tau_w) (1 + \tau_0/2\tau_w)^2 \quad (2)$$

$$Re_B = Re_B^* (1 - \tau_0/\tau_w) (1 + \tau_0/2\tau_w)^{-1} \quad (3)$$

で与えられる。図-6に実験により求めたデータを示す。実験は乱流となる領域で行っており、Prandtl-Karman則によく適合しており、乱流領域でも清水とのアナロジーがほぼ成立していることがわかり、河床近傍での τ_0 のすれだけ理論線からずれていると思われる。

4. 転波列 従来、開水路における高濃度流れでは転波列が発生することが認められており、実験においても薄層流の場合と水深もある程度もつ場合との異なる2種類の転波列が発生した。水深もある程度もつ場合の転波列の発生限界の実験結果を図-7に示す。ここに、 Re 数は式(2)で与えられる Re_B 、また $Fr = \bar{u}_m / \sqrt{gH}$ であり、図中の実験式は、 $Fr = 20.2 - 3.73 \log Re_B$ である。一方、転波列の形状特性は表-1に示すとおりである。ここで、 $\bar{u}$ は転波列の平均波速、 $\bar{T}_a$ 、 $\bar{T}_b$ 、 $\bar{H}_a$ 、 $\bar{H}_b$ はそれぞれ大小の転波列の平均発生周期、平均波高である。この転波列は波速が表面流速より小さいので側壁と τ_0 の影響によると考えられる。

5. あとがき 高濃度流れの流動機構。抵抗則、転波列では、土砂濃度に対する τ_0 、 μ の効果が支配的であり、正確な値を用いると抵抗則では清水の場合とのアナロジーが成立し、転波列では Re_B と Fr によって発生限界が求まることがわかった。流動機構の研究の発展にはさらに詳細

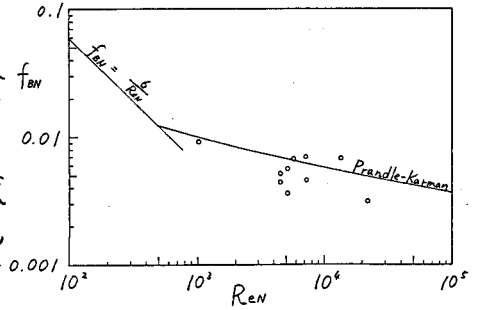


図-6

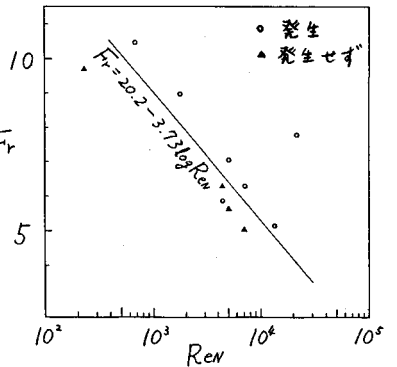


図-7

表-1 水理条件 および転波列の形状特性

RUN	Cv	ρ (g/cm ³)	I	τ (dyne/cm ²)	μ_b (dyne·s/cm ²)	h (cm)	Um (cm/s)	Ren	Fr	$\bar{U}$ (cm/s)	$\bar{T}_a$ (s)	$\bar{T}_b$ (s)	$\bar{H}_a$ (cm)	$\bar{H}_b$ (cm)
1-1	0.181	1.299	0.102	157.3	0.148	3.10	323	4480	5.86	257	73	36	0.54	0.32
2	0.158	1.261		96.1	0.212	1.27	368	694	10.43	240	187	43	0.41	0.26
3	0.158	1.261		96.1	0.125	1.62	357	1800	8.96	272	40	17	0.66	0.38
4	0.180	1.297		154.2	0.0766	3.02	383	5100	7.04	292	9	8	1.18	0.73
5	0.180	1.297		154.2	0.0588	3.37	362	7190	6.30	301	3	4	1.25	0.74
6	0.201	1.332		229.3	0.0329	4.56	343	13550	5.13	273	112	67	1.26	0.84
7	0.201	1.332		229.3	0.0398	5.27	558	21600	7.76	314	22	20	1.05	0.75
2-1	0.208	1.343	0.102	259.0	0.172	4.52	338	5640	5.08					
2	0.180	1.297		154.2	0.145	2.95	338	4430	6.29					
3	0.201	1.332		229.3	0.128	4.25	324	7090	5.02					

な実験データが必要とされよう。
参考文献1) 芦田ら:
泥水のレオロジー、開水
支部年議 1986