

高濃度流の抵抗則について

熊本大学大学院 学生会員 ○崔 志英
 熊本大学大学院 正会員 大本 照憲
 熊本大学工学部 正会員 矢北 孝一
 熊本大学工学部 学生会員 柿原 ゆり

1. はじめに

中国を流れる黄河の中・下流域では、黄土高原からの土砂の流れ込みによる天井川の傾向が強まり深刻な問題となっている。洪水時には、体積濃度で30%に達する高濃度土砂流となり、人々の暮らしを脅かしている。現在、「黄河流域における土砂輸送と河床変動の数値シミュレーション手法の開発」を目的に、衛星データ、現地観測データ、洪水・高濃度流の再現計算を基に、黄河流域における水・土砂動態の解明が行われている。本研究では、黄河における土砂動態の解明の一貫として黄河の河床材料（済南市）と、カオリンを用いて高濃度流を管路流れに再現し、高濃度土砂流の抵抗側について検討した。

2. 実験装置および方法

図-1 に実験装置の概要を示す。実験に使用した円管は内径 $d=20\text{mm}$ の水力学的に滑らかな透明の塩化ビニル管である。圧力損失は $l=500\text{mm}$ で、マンオメータにより計測した。流量は、ポンプ直後に取り付けたバルブにより調整し、重量法により測定した。溶液の温度は、水槽に恒温装置を設置することにより、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ に調整した。濃度を均一に保つために、Mixer①で攪拌し続けた。

高濃度流を再現する試験材料として、実際に黄河で採取した黄河土砂($\rho=2.678\text{g/cm}^3$)と kaolin($\rho=2.7\text{g/cm}^3$)を用いた。粒度分布は図-3 に示す。黄河土砂($d_{50}=44(\mu\text{m})$)と kaolin($d_{50}=5.3(\mu\text{m})$)である。

基本的物性である流体の粘度の測定には図-2 の Rheometer (BROOKFIELD 社) を用いた。粘性の温度依存性は大きいと考えられ、低温恒温水槽 (アズワン株式会社) を設置することにより、試料測定中は槽外循環を行い、温度を 20°C に保った。試料が被さる状態でスピンドルを回転させ、スピンドルと接する面で測定が行われる。

3. 実験結果と考察

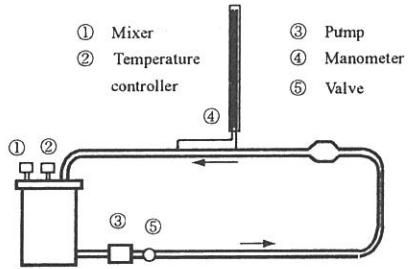


図-1 実験装置の概要

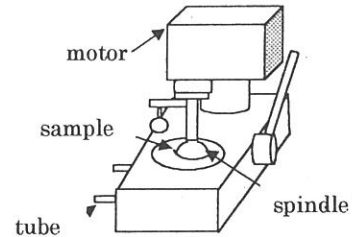


図-2 Rheometer

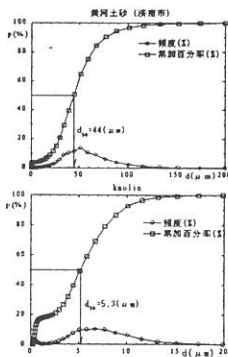


図-3 試験材料の粒度分布

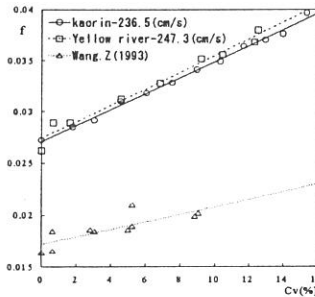


図-4 摩擦損失係数の濃度依存性

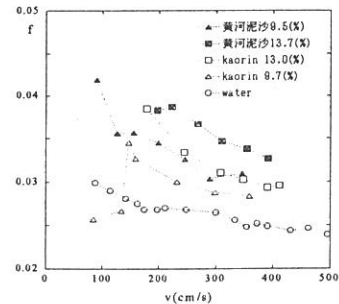


図-5 流速と摩擦損失係数

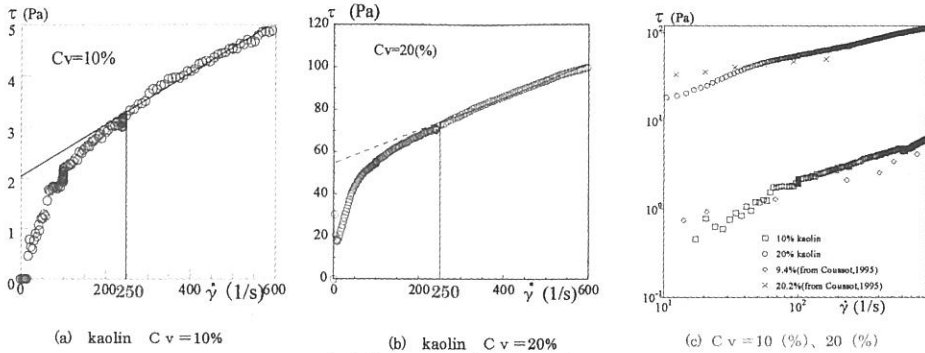


図-6 セン断速度とせん断応力との関係

3.1 管路実験

流速を一定にして管路に流すと、体積濃度 $C_v(\%)$ の増大に伴って摩擦損失係数 f が大きくなった。この結果は Smooth Bed 状態の開水路実験結果¹⁾と一致した。図-4に C_v と f の関係を示す。過去の実験データでは、濃度依存性として摩擦損失係数は減少傾向²⁾の結果もあるが、その原因となるメカニズムの解明は今後の大きな課題となる。ただし、流速を大きく設定したことにより粒子の沈降は観測されず、摩擦損失への影響は考えられないものとする。また、kaolin と黄河土砂の濃度依存性における摩擦損失係数の変化はほぼ等しく増加傾向にあることも示している。体積濃度を一定に 2 種類 {kaolin [13.0% と 9.7%] と Yellow River [13.7% と 9.5%]} 設定し、流速と摩擦損失係数の関係に注目した結果、流速が加速されると、摩擦損失係数は減少する傾向がみられた。一定流速に着目すると、濃度が大きい場合（高濃度流の場合）、大きい摩擦損失係数を示すことも図-5でうかがえる。

3.2 粘性特性実験

図-6は kaolin の体積濃度 10%、20%における Shear rate $\dot{\gamma}$ と Shear stress τ の関係を示す。図-6の(a),(b)より Shear stress τ と Shear rate $\dot{\gamma}$ との関係は線形とはなっておらず、非ニュートン流体であることが認められる。Shear rate が $\dot{\gamma}=250(1/s)$ 以下では擬塑性流体 (Shear thinning) の特徴がある。 $\dot{\gamma}=250(1/s)$ 以上では、ビンガム流体 ($\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}$, τ_y : 降伏応力) によって近似可能である。また、実験値は Coussot³⁾のデータと類似していることがわかる。図-7は、体積濃度 20%における粘性係数 μ と Shear rate $\dot{\gamma}$ の関係を示す。 μ は $\dot{\gamma}$ の増大に伴って減少傾向を示し、 $\dot{\gamma}=10^0 \sim 10^1(1/s)$ では $\mu \propto \dot{\gamma}^{-1}$ 、 $\dot{\gamma}=10^1 \sim 40(1/s)$ では $\mu \propto \dot{\gamma}^{-3/10}$ 、 $\dot{\gamma}=40 \sim 600(1/s)$ では $\mu \propto \dot{\gamma}^{-6/10}$ の関係があり、特に Low shear rate において μ は水の粘性係数の $10^2 \sim 10^3$ 倍を示す。

4.まとめ

管路実験と粘度特性の実験結果から高濃度流は非ニュートン流体の特性を示し、摩擦損失係数は土砂濃度の増加に伴って増加する傾向のあることが明らかとなった。この原因の一つとして土砂濃度が粘性係数 μ を急増させ、Re 数を減少させることによって流れが乱流から層流に遷移したことが予想される。

本研究は、科学技術振興事業団・戦略基礎研究「黄河流域の水利用・管理の高持続性化」(代表: 楠田哲也) の支援を受けている。記して、謝意を表する。

参考文献: [1]Wanr,Z.1993b.Structural features of turbulent flow of clay suspensions over rough boundary. Research Report,Inst.f.Wasserbau and Kulturtechnik,University of Karlsruhe.1993 [2]Zhang,R.(1959).A Study of the Sediment Transport Capacity of the Middle and Lower Yangtze River,Journal of Sediment Research,Beijing,vol.4,no.2(in china)[3]Coussot,P.1995.Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for water-clay suspensions.Phys.Rev.Lett.,74,3971-3974.