

狭さく部を流下する粒子流の流動機構

立命館大学 大学院 学生員○谷田 承久
立命館大学 理工学部 正 員 大同 淳之

1. まえがき

粒子流は摩擦角、または水を媒介して作用する粒子間力等のため、水流とは異なった性質をもつ。この特性が流れの領域によって、顕著に作用する場合とその影響が消失する場合があると考えられる。本文では粒子流はある流動条件下では水流と同じような挙動を示すという考えの下に狭さく部を有する流路での粒子流の流動形状に関する実験を行い、流動条件について考察した。

2. 実験による観察

実験に用いた水路は長さ4.8m、幅0.1mの変勾配式直線水路であり、中央部は長さ1.0mにわたって幅0.06mの狭さく部となっている。実験に用いた砂は平均粒径0.35cm、比重2.709、最密濃度 $C_r=0.522$ である。実験は水路上流端のタンクに砂を詰め、ゲートを開けて重力流動させ、粒子流を発生させた。また、水路側面より高速ビデオカメラにより流動形状を撮影した。水路勾配は $30' \sim 43'$ 、ゲートの開口面積は $100 \sim 300 \text{ cm}^2$ の範囲で実験を行った。流れは厳密には定常流にはならないが、現象の中期には定常とみなしてよい状態が観測された。この定常状態のときの粒子を追跡することによって、流速分布および流量を測定した。また、流動中の粒状体の空隙率は下流端で測定した流量と流動中の流積から求めた。ビデオカメラから得られた流動形状を図-1に示す。(a)は(b)より勾配が急で流量の多い場合であり、(b)は比較的勾配が緩く流量の少ない場合である。本実験の範囲では、流量が多く、狭さく部入口での堆積層が厚くなるにつれて、狭さく部入口から堆積層下流端までの長さが増加している。ケース(a)では断面急変部近傍付近において、顕著な洗掘現象が生じている。このように断面急変部では流動面形状が急激に変化するので局所損失を考慮する必要があると考えられる。

3. 考察

粒状体の運動方程式は次のような関係である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = g \sin \theta - g \frac{\partial h}{\partial x} - \mu_k g \cos \theta - \frac{1}{2 \sigma c h} f' u^2 \quad (1)$$

ここに、 u : 流れ方向の速度、 h : 流動深、 μ_k : 動的摩擦係数、 σ : 粒子比重、 c : 粒子流の体積濃度、 f' : 抵抗係数、 g : 重力加速度

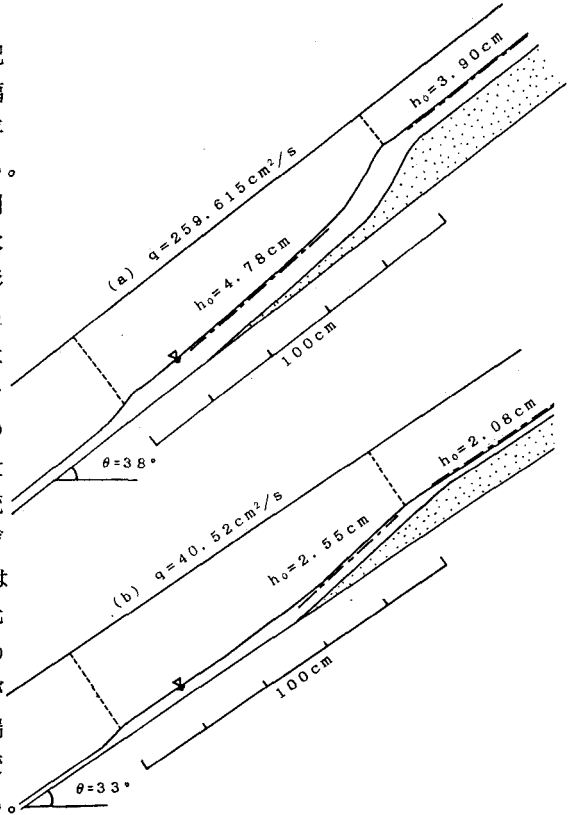


図-1 粒子流の縦断形状

また、粒状体の流速分布は大同¹⁾によると次式で表される。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{2}{3} (K \sin \alpha)^{-\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{y}{d} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

ただし、

$$\psi = \frac{\{\rho(1-c) + (\sigma - \rho)c\} \sin \theta - \mu_* \sigma c \cos \theta}{\sigma \sin \theta} \left\{ \left(\frac{c_*}{c} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\}^2$$

平均流速は式(2)を積分し、河床で $u=0$ の条件を与えることにより次式のように表される。

$$\frac{u_m}{u_*} = \frac{4}{15} (K \sin \alpha)^{-\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{d} \right) \quad (3) \quad f \lambda^{-2}$$

式(3)より、等流流動深は次式となる。

$$h_o^{\frac{5}{2}} = \frac{15}{4} \frac{Q}{g^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\sin \theta}{K \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{b}{d} \right)} \quad (4)$$

限界流動深は次式で表される。

$$h_o^3 = \alpha \frac{Q^2}{g b^2} \quad \alpha = 2.84 \quad (5)$$

また、式(1)より平衡勾配 I_o は次式で表される。

$$I_o = \mu_* \cos \theta + \frac{1}{2 \sigma c h g} f' u^2 \quad (6)$$

式(1)、式(3)より、抵抗係数は

$$f' = \frac{225}{8} \sigma K \sin \alpha \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \lambda^2 \quad (7)$$

である。

4. 実験結果との比較

流動形状はつぎのように説明される。狭さく部の上流では、狭さく部の可能流量より上流からの供給量が多いときは、余分の土砂が堆積し、その上を流れが通過する。このときの勾配は式(6)で示す平衡勾配になる。そのうえを式(4)で示す h_o で流れる。狭さく部内で狭さく部の幅にしたがって狭さく部全長にわたって平衡勾配上を h_o で流れる。図-1に示す測定例ではこのときの平衡勾配を狭さく部全長にわたって形成するだけの流砂量が供給されるまでに平衡勾配がなくなり、水路勾配に従う流れに変わっている。流れは $h_o < h_c$ であるから、流れは上流側より規定されている。平衡勾配は狭さく部入口よりひくことになる。この結果から、粒子流の場合も水流と同じように、式(4)、(5)で説明できることを示した。以上から粒子流の場合でもある流動条件のこえる流れの領域におかれたとき、水流と同じ挙動をすることが考えられる。

5. あとがき

粒状体は摩擦角を持っているので、 τ/σ が摩擦角より大きくなるとはじめて粒子間にすべりが生じる。しかし、 τ/σ が摩擦角より大きくなるだけでは、流れを維持することはできず、摩擦抵抗に見合うだけの質量力を得るまで勾配を大きくしてゆく。すなわち、平衡勾配以上の勾配で粒子流が流動するときには、水流と同じような取り扱いが可能であると考えることができる。

〈参考文献〉

1) 大同・市川：粒子流及び粘土を多量に含む流体の不等流，水工学論文集，第35巻，pp417-422，1991。

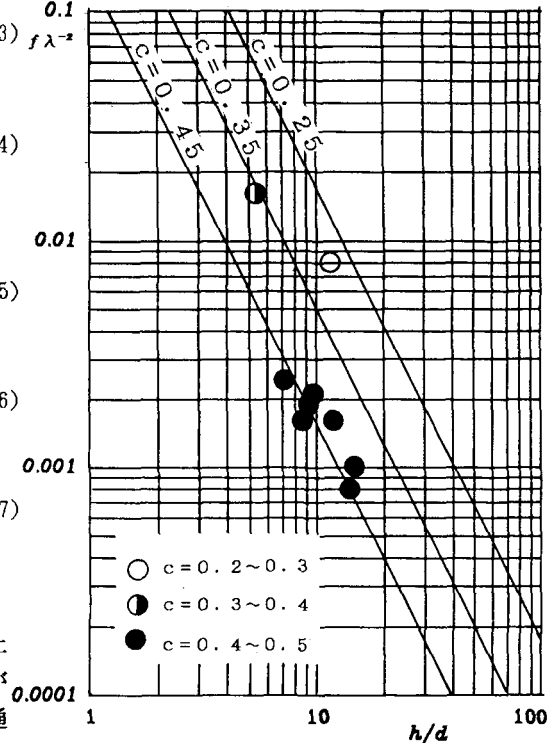


図-2 抵抗係数