

II-13 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の可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、流量が平衡勾配を形成するのに十分なとき、狭さく部で平衡勾配の形成がみられた。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。

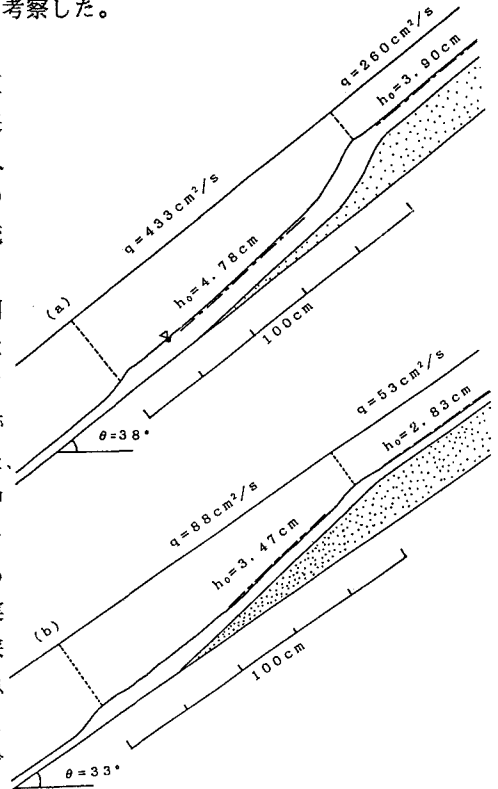


図-1 粒子流の縦断形状

3. 平衡勾配

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

平均流速は大同¹⁾によると、次式のように表される。

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

ただし、

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

式(2)より、等流流動深は次式となる。

$$h_o^{\frac{5}{2}} = \frac{15}{4} \frac{Q}{g^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\sin \theta}{K \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{b}{d} \right)} \quad (3)$$

限界流動深は比エネルギー最小の考えより次式となる。

$$h_c^3 = \alpha \frac{Q^2}{g b^2} \quad \alpha = 2.84 \quad (4)$$

したがって、

$$\frac{dh}{dx} = I \frac{1 - \left(\frac{h_o}{h} \right)^3}{1 - \left(\frac{h_c}{h} \right)^3} \quad (5)$$

となる。

また、式(1)より流れが流動をつづけるための勾配、平衡勾配 I_o は次式で表される。

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

式(1)、式(2)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. 実験結果の考察

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、狭さく部の可能流下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り、そのうえを式(3)で示す h_o で流れる。計算結果と測定値はほぼ一致する。一方、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。ただ、狭さく部入口付近では水流と同じように限界流動深さに相当する位置まで跳水を示す。床面はこの影響で局所的に低下するがそのあと式(6)にしたがう平衡勾配を形成して流下する。移動床での現象と同様に流れの自己作用で不等流の部分は極めて短い。この実験では上流から流動した粒子のみで勾配を形成させたため流砂量が不足しており水路全長にわたって平衡勾配が形成されていないが、観測の結果、実験のケースは $h_c > h_o$ であり床面は上流から規定されている。土石流の発生条件は堆積層表面に水が流れたときの静的なせん断力のつりあいから決めた。たとえば水深が h_o の

とき $I = \frac{C * (\sigma - \rho)}{C * (\sigma - \rho) + \rho (1 + h_o / d)} \tan \phi$ の摩擦角等に常識的な値を入ると14' ぐらいである。これに対して平衡勾配は流動にともなう摩擦分だけ大きくなる。この平衡勾配より大きい勾配上における流れは粒子のもつ固有の性質の効果が無視できない通常の流体としての挙動をすると考えられる。

5. あとがき

粒子流が流動を維持するためには式(5)で規定される平衡勾配以上の外力が必要で、平衡勾配以上の勾配の場では粒子流は水と同じ挙動をすると考えられる。

〈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。

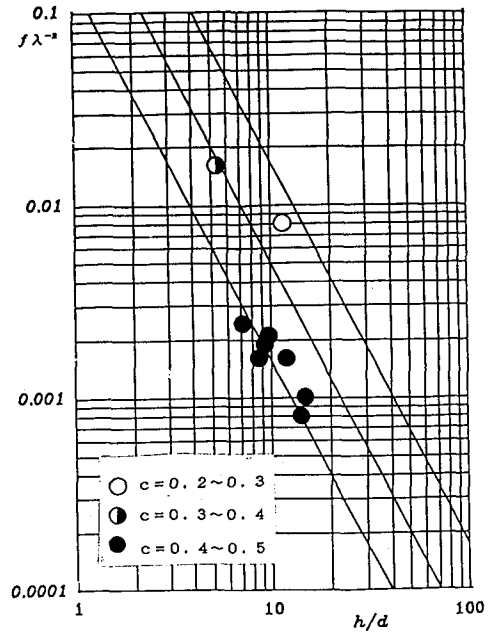


図-2 抵抗係数