

II-125 障害物を越える粒状体の流れ

立命館大学大学院 学生員 市川 滋己
立命館大学理工学部 正 員 大同 淳之

1. まえがき 粒状体が、粒子流として、粒子の堆積層の上を流動する場合にはその流動の条件により、堆積あるいは洗掘を行いながら流動する。また、固定床の上を平衡勾配以上の勾配で流れる場合には、通常の流体と同じような挙動をするものと考えられる。このときの流れにおいて、抵抗則を適切に評価し、粒状体が所有する降伏値を合理的に算定すれば、流れの粒状形状は通常の流体と同様に不等流として扱うことができると考えられる。しかしながら、突起物への衝突後の挙動など不明な点が多いので、障害物上での粒状体の流れについて実験を行い、その挙動を観測し、考察を行った。

2. 実験による観察 長さ0.295m、高さ0.045mの突起物を持つ、長さ4.0m、幅0.10mの水路の上流端のタンク中に砂を詰め、ゲートを開けて重力流動させ、そのときの縦断形状を測定した。流れは厳密には定常流でないが、現象の中期では定常と見なしてよい状態が観測された。観測した水路勾配は、 $\sin \theta$ が0.5~0.6の範囲で、用いた砂の平均粒径は $d_m = 3.5\text{mm}$ である。また、粒子の流量は粒子の痕跡から求めた。図1は、実験により測定された流動形の例を示した。

(a)は表乾状態、(b)は表面が湿潤状態、(c)は表乾状態で、かつケース(a)(b)より勾配が緩い場合である。前者2者の相違は障害物を越えた部分で、表面が湿潤状態のときは乾いた場合よりも摩擦が多いためか、定常流になるまでの遷移区間が長くなっている。3ケースに共通して観測されたこととして、上流側では、突起物に沿って上昇した粒子の一部は突起物上を下流に流れ、一部上流側に堆積し、堆積波形を上流側に伝播している。そして、断面急変部では、水流と同じように局所損失を考慮する必要があることを示している。

3. 考察 平衡勾配以上の勾配で粒状体が流れているとき、流線上におけるエネルギー e は $e = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\sigma g c} + z$ (1)より、比エネルギー E は $E = \frac{v^2}{2g} + h$ (2)となる。一方、流れ全体の平均のエネルギーは

$$\bar{E} = \frac{1}{\sigma c u_m A} \int_A \left(\frac{v^2}{2g} + h \right) \cdot \sigma c u dA \quad \text{より}$$

$$\bar{E} = \alpha \frac{u_m^2}{2g} + h \quad \alpha = \int \frac{v^3}{u_m^3} \frac{\sigma c}{\sigma \bar{c}} \frac{dA}{A} \quad (3)$$

となる。

粒状体の流れの流速分布は、大同¹⁾によると次のように

表される。 $\frac{u}{u_*} = \frac{2}{3} (k \sin \alpha)^{\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{h} \right) \left(\frac{y}{d} \right)^{\frac{3}{2}}$

$$\psi = \frac{\rho + \{\sigma - \rho(1 + \cos \theta)\} \bar{c}}{\sigma} \left\{ \left(\frac{c}{\bar{c}} \right)^{1/3} - 1 \right\} \quad (4)$$

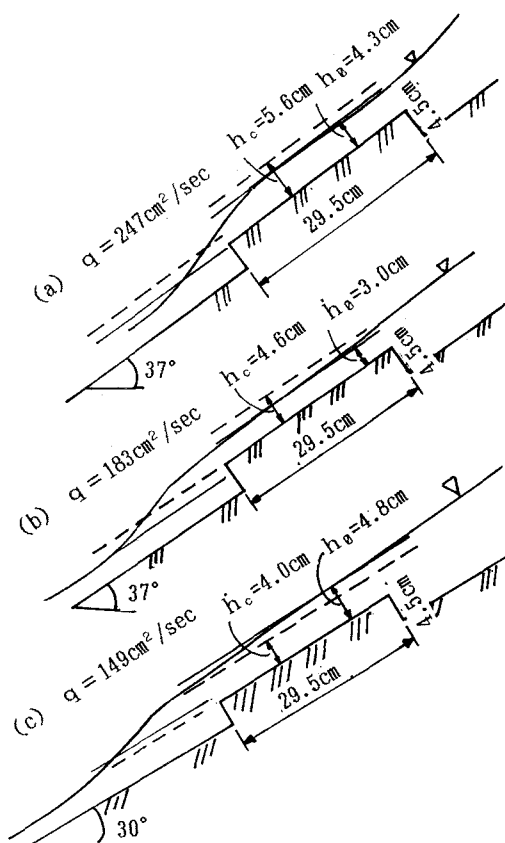


図1 粒子流の縦断形

ここに、 K は係数で、 α は粒子の衝突条件から決定される角度である。

したがって、等流流動深は大同によると

$$h_0^{5/2} = \frac{15}{4} \frac{Q}{g^{1/2} \left(\frac{\sin \theta}{K \sin \alpha} \right)^{1/2} \psi^{1/2} \left(\frac{b}{d} \right)} \quad (5)$$

比エネルギーが、式(3)で表せるならば、限界流動深 h_c が、通常の流れと同じように定義される。

$$h_c^3 = \alpha \frac{Q^2}{g b^2} \quad \alpha = 2.84 \quad (6)$$

一方、水と砂れきの混合物および砂れきの連続式は、河床の堆積、洗掘を考慮して、水を含む場合およびれきのみの場合についてそれぞれ、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = -\frac{1}{c_*} \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (7) \quad \frac{\partial c h}{\partial t} + \frac{\partial c v h}{\partial x} = -\frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (8)$$

ここに、 c は堆積層内の堆積濃度、 z_b は河床の高さである。

運動方程式は定常のとき、芦田ら²⁾の式に従うと

$$\frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} = \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{(\sigma/\rho-1)h}{(\sigma/\rho-1)c+1} \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{(\sigma/\rho-1)cg \cos \theta}{(\sigma/\rho-1)c+1} \mu - \frac{v^2}{\{(\sigma/\rho-1)c+1\}h} \cdot f v^2 \quad (9)$$

となる。ただし、式(9)右辺4項は静摩擦勾配、5項は動摩擦項である。以下の解析は両者を含ませた摩擦項 v^2/kh として表せるものとする、流動形状の基礎式は次のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\theta \left(1 - \frac{Q^2}{K g b^2 h^3} \right) + \frac{Q^2}{g b^3 h^2} \frac{\partial b}{\partial x}}{1 - \frac{Q^2}{g b^2 h^3}} \quad (10)$$

4. 実験結果との比較 さて、流量は粒子の痕跡から得た速度から求めた。

この流量と流動深との関係は図2に示すように式(6)を満足している。

等流流動深と限界流動深を求めるわけであるが、式(5)中の係数 $K \sin \alpha$ は濃度に関係する値であるが全ケースにおいて、 $K \sin \alpha = 0.6$ を用い¹⁾、 $\psi^{1/2} = 0.278$ として、式(5)、(6)を用いて、等流流動深 h_0 と限界流動深 h_c が算定される。算定された h_0 、 h_c を図1に示すと流動形の形は、ほぼこの値に一致していることが読み取れる。

ケース(a)(b)は、等流流動深 h_0 と限界流動深 h_c の関係が $h_0 < h_c$ の場合、ケース(c)は、 $h_0 > h_c$ の場合の観測例である。

限界流動深について、この両者のケースに共通していることは支配断面が下流側に僅かながら移動しているということである。このような現象が起こりうる要因としては粒状体の流動という現象には水などの流体に比べて内部の降伏力の影響が大きく関与しているためであると考えられる。

障害物の上流側の堆積が定常化しての流動形は、せん断力 τ とせん断抵抗 τ_y が等しいという条件で決まる。ただし、障害物のせき止めによる抵抗が生じるので $\tau_y = \sigma c g z \cos \theta \cdot \tan \phi + \{z - (h + \bar{\alpha} x)\} \tan \phi_0$ と表せる。ここに h は障害物の上流端の流動深さ、 $\bar{\alpha}$ は粒状体の集合流動を許す勾配で、 ϕ_0 はせん断を起こさせない大きさの摩擦角、例えば、水を伴う場合、 $\tan \alpha = \frac{c_* (\sigma - \rho)}{c_* (\sigma - \rho) + \rho} \tan \phi$ 、乾燥砂の場合 $\tan \bar{\alpha} = \tan \phi$ ³⁾として表せるものである。したがって、粘着性のない粒状体では $\tau = \tau_y$ の位置、すなわち流動形の基準点は表面より $h + \bar{\alpha} x$ の点となる。これに局所の損失を加えると流動形を計算することが可能である。

参考文献 1)大同：急こう配上の多量のれきを含む流れの流動特性，第18回水理講演会，1974

2)芦田・江頭・矢島：土石流の流動・堆積機構，京大防災研年報第31号B-2，1988

3)高橋：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研年報第20号B-2，1977

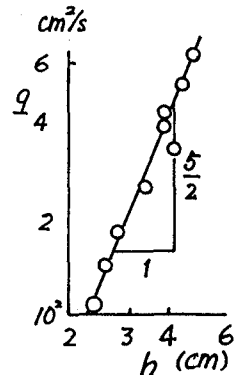


図2 q と h の関係