

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

1. はしがき

粒状体が、粒子の堆積上を流れるときは、流動条件によって、堆積、洗掘をしながら流動する。固定床上を平衡勾配以上で流れるときは、通常の流体と同じ挙動をすると考えてよい。この流れの流動形状は抵抗則の適切な評価と粒状体の有する降伏値の合理的な算定を行うと、通常の流体と同じように不等流としての扱いができると考えられる。ただ、突起物の背後は堰上げのみで、跳水に似た現象は生じないか等、不明な点があるので、これらを明確にするために障害物上での粒状体の流れについて実験を行い、その挙動を観測すると共に、不等流式を適用して考察した。

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。砂は表乾状態と湿潤状態で行った。図1に測定された流動形の例を示す。

(a)は表面が乾いた状態、(b)は表面が湿潤状態である。両者の違いは、障害物を越えた部分では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。上流側では、跳水と同じような現象が生じ、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、堆積波形を上流へ伝播する。

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、流線上的エネルギー e は
$$e = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\sigma g c} + z \quad (1)$$
 より、比エネルギー E は
$$E = \frac{v^2}{2g} + h \quad (2)$$
 となる。一方、流れ全体の平均のエネルギーは

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

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

となる。粒状体の流れの流速分布は、大同¹⁾あるいは宮本²⁾によると次のように表される。

大同
$$\frac{u}{u_*} = \frac{2}{3} (k \sin \alpha)^{\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{h} \right) \left(\frac{y}{d} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

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

$$\frac{u}{u_*} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\rho}{\sigma K_B \tan \varphi}} \frac{h}{\lambda D} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z}{h} \right)^{3/2} \right\} \quad (5)$$

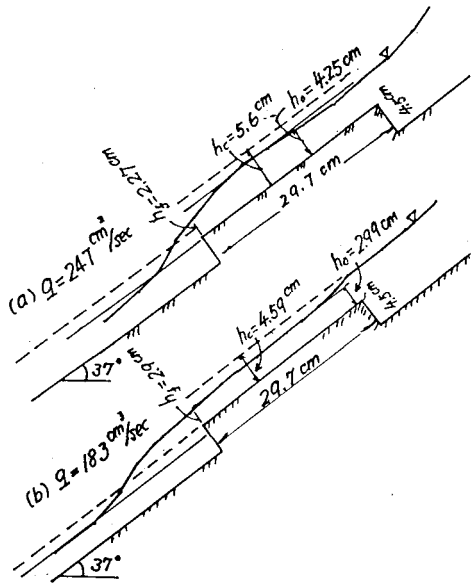


図1 粒子流の縦断形

したがって、等流水深は大同によると

$$h_0^{5/2} = \frac{15}{4} \frac{Q}{g^{1/2} \left(\frac{\sin \theta}{K \sin \alpha} \right)^{1/2} \psi \left(\frac{b}{d} \right)} \quad (6) \text{ で、宮本の場合は係数が } 5/2 \text{ となり、} K \sin \alpha \text{ は } K_B \tan \phi \text{ に置き換えられる。}$$

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。

$$h_c^3 = \alpha \frac{Q^2}{g b^2} \quad \alpha = 2.84 \text{ (大同)} \quad (7)$$

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、

$$\text{(水とれきの場合)} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = -\frac{1}{c_*} \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (8)$$

$$\text{(砂れきの場合)} \quad \frac{\partial c h}{\partial t} + \frac{\partial c v h}{\partial x} = -\frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (9)$$

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³⁾の式に従うと

$$\frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} = \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{(\sigma/\rho-1)h}{(\sigma/\rho-1)c+1} \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{(\sigma/\rho-1)cg \cos \theta}{(\sigma/\rho-1)c+1} \mu - \frac{v^2}{\{(\sigma/\rho-1)c+1\}h} f v^2 \quad (10)$$

となる。ただし、式(10)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。

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

$$\text{その結果} \quad \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\theta \left(1 - \frac{Q^2}{kg b^2 h^3} \right) + \frac{Q^2}{g b^3 h^2} \frac{\partial b}{\partial x}}{1 - \frac{Q^2}{g b^2 h^3}} \quad (11)$$

が成り立つ。

4. 実験値との比較

流量は粒子の痕跡から得た速度から求めた。障害物上の水深と流量の関係は図2に示すように式(6)を満足している。

図1の実験は勾配が $\sin \theta = 0.60$ で $\theta >$ 平衡勾配より、障害物より下流では堆積は生じない勾配である。実験結果について式(6)、式(7)より h_a 、 h_c を求めて図1に示すと水面形の形はほぼ一致している。

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

$$\tau_y = \sigma c g z \cos \theta \cdot \tan \phi + \{z - (h + \alpha x)\} \tan \phi_0 \quad \text{と表せる。ここに } h \text{ は障害物の}$$

上流端の流動深さ、 α 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 $\tan \alpha = \tan \phi$ ⁴⁾ 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 $h + \alpha x$ の点となる。これに局所の損失を加えると流動形が計算できる。

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) 宮本：Newton流体を含む粒子流の流動機構，立命館大学学位論文，1985

3) 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

4) 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

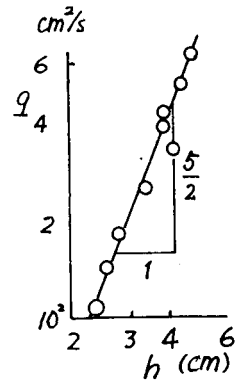


図2 q と h の関係