

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。一方、場所的に変化する流れを考察し、水流との違いを明らかにすることによって、粒子流の特性をより明確にすることが期待される。

以上の理由から、一様水路内に水路床の一部をかき上げて障害物とし、その上を乗り越えて流れる粒状体および泥しよの挙動を観察して、考察した。

2. 障害物を越える粒状体の流れ

2. 1 実験における挙動

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。

2. 2 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

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

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

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。

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

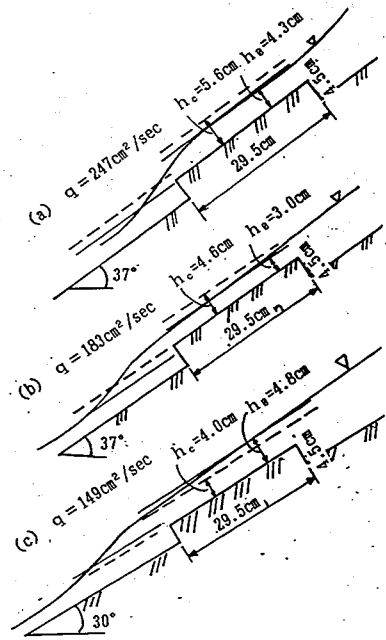


図1 粒子流の縦断形

$$\psi = \frac{\rho + (\sigma - \rho(1 + \cos\theta))\bar{c}}{\sigma} \left\{ \left(\frac{c_0}{c} \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (4)$$

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

$$h_0^{3/2} = \frac{15}{4} \frac{Q}{g^{1/2} \left(\frac{\sin\theta}{K \sin\alpha} \right)^{1/2} \psi^{1/2} \left(\frac{b}{d} \right)} \quad (5)$$

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。

$$h_c^3 = \alpha \frac{Q^2}{gb^2} \quad \alpha = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{u}{u_*} \right)^3 dA \quad \alpha = 2.84 \quad (6)$$

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、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = -\frac{1}{c_*} \frac{\partial z_0}{\partial t} \quad (7) \quad \frac{\partial c h}{\partial t} + \frac{\partial c v h}{\partial x} = -\frac{\partial z_0}{\partial t} \quad (8)$$

ここに、 c_* は堆積層内の堆積濃度、 z_0 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

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

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。

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

2. 3 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 は障害物の上流側の流動深さ、 $\bar{\alpha}$ 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、 $\tan\bar{\alpha} = \frac{c_* (\sigma - \rho)}{c_* (\sigma - \rho) + \rho} \tan\phi$ 、乾燥砂の場合 $\tan\bar{\alpha} = \tan\phi$ 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。

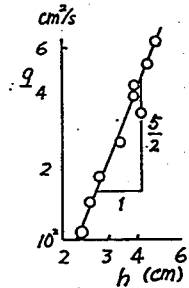


図2 q と h の関係

3. 障害物を越える泥しよりの流れ

3. 1 実験における挙動

さきの砂れき流動の水路と同じ水路を用いて実験をした結果を図3に示す。泥しよりは、平均径 $0.34 \times 10^{-2} \text{mm}$ の粘土を水に混合したもので、図3に示す場合は流体の比重1.323、相対粘度 $\mu_s/\mu_0 = 200$ で、 $\tau = 0.02 \text{g/cm}^2$ 以上のせん断力のもとでは、見かけ上、せん断降伏値の存在を示す物質である。

流動状況は、水路勾配が緩いときは水路勾配と無関係に流動勾配を形成する。清澄な水は、ごくわずかのせん断応力で流動するため、水路の局所変化に対しても、低下背水は局所に限られ、すぐ、河床と平行な水面形を形成するが、泥しよりのせん断抵抗は水に比べてはるかに大きいから、流動に必要なエネルギー勾配は、条件によって、水面勾配より大きくなり、不等流になる。

また、突起物上においても、その長さが長いときは、当然低下背水が生じる。

図4は、その一例で幅0.2m、長さ20mの水路で、泥しよりを流し、せき上げ、低下背水現象を起こさせたものである。せき上げでは、水路勾配が1/20でも跳水を起こさず、せき上げ背水が観察された。一方、低下背水の場合は水路全長にわたって低下背水を示した。

3. 2 考察

泥しよりの抵抗則は、大同³⁾によると、エネルギー勾配をI、径深をR、R、流速を u_m とすると、次のように表される。

$$I = f_s \frac{1}{R} \frac{u_m^2 R \Gamma_a'}{2g} \quad (11)$$

ここに、 F_a および Γ_a' はせん断降伏値 τ_0 以下のせん断応力の部分では、ひずみ速度がなく、エネルギー消費が生じないことを補正する係数である。

抵抗係数 f_s' は、層流、乱流に対して、それぞれ次のように表せる。

$$f_s' = \frac{6}{R_{es}} \quad (12) \quad 1/\sqrt{f_s'} = 1.5 + 4.07 \log(R_{es} \sqrt{f_s'}) \quad (13)$$

ここに

$$R_{es}' = \frac{f_b u_m h \Gamma_a'}{\mu_s} \quad (14) \quad \Gamma_a' = \frac{3}{2} F_a' (a'^2 - \frac{a'^3}{3})$$

$$F_a' = \frac{4}{7} \frac{a'}{(1-a'/3)^2} \quad a' = 1 - \frac{\tau_0}{\tau}$$

である。したがって、等流流動深は

$$h_0^3 = \frac{f_b Q^2 \Gamma_a}{2g I b^5} \quad (15)$$

と表される。限界流動深 h_c は

$$h_c^3 = \frac{\alpha Q^2}{g B^2 \cos^3 i} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{1 - \frac{19}{35} a'}{(1 - \frac{a'}{3})^3} \quad (17)$$

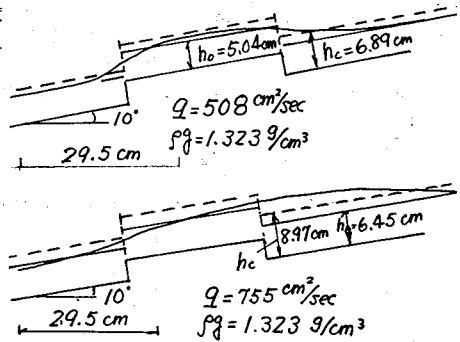


図3 泥しよりの縦断形

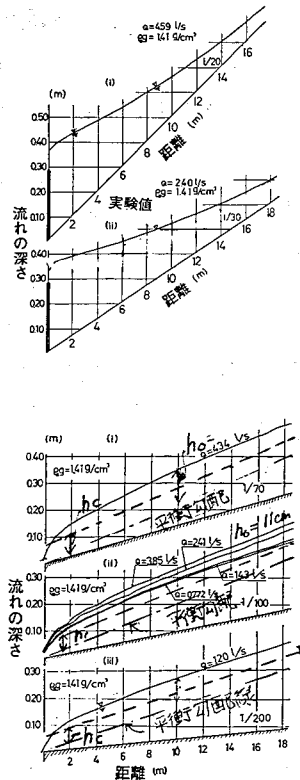


図4 泥しよりの縦断形

ここに、粘土 μ_B は粘土が水中で凝集して作るフロックの濃度 Φ_F を用いて図5のように表される。 $\Phi_F = C_{FS} \cdot \Phi_s$ 、ここに Φ_s は粘土粒子の容積濃度、 C_{FS} は比例定数で、大同によると、 $C_{FS} = 2.08$ の値を得ている。この Φ_F を用いて、相対粘度は次のように表した。

$$\frac{\mu_B}{\mu_0} = 1 + \frac{3}{\frac{1}{\Phi_F} - 0.52}$$

また降伏値 τ_y は、フロック間の結合の破壊に要する力 τ_v と、フロックの集団の破壊に要する力 τ_u の和であると、次のように表した。

$$\tau_y = \tau_v + \tau_u = A_1(\Phi_F - \Phi_{Fc})^2 + A_2\Phi_F^2 = 4.5(\Phi_F - \Phi_{Fc})^2 + 0.131\Phi_F^2$$

ここに、測定によって $A_1 = 4.5$ 、 Φ_{Fc} は下限降伏値の生じる限界の容積濃度で、0.17、 A_2 は0.131の値を得ている。

3. 3 実験との比較

不等流動の特性から、低下背水の場合は、上流に移るにしたがって等流動深に漸近する以外の流動形以外はあり得ない。したがって、図4の低下背水の場合、等流動深を適用すると、水路床の底面に流動していない層が図4の中に点線で示すような形で存在していたと推定される。流速分布が測定されていないので、流速分布から実証する事ができないが、実験時、流動中の流体は、ポンプの熱を受けて温度が上昇していたのに対し、底面付近は温度がはっきりと違う程度に低温で、流動していないことを示した。

この未流動層の勾配は、泥しようを形成するフロック間の摩擦によって、粒状体と同じように、摩擦角を持つため、安息角が生じ、この安息角とその上を流れるせん断力との釣合いから定まる平衡勾配から下の層は流動しないと考えられる。この勾配の算定法は、発表時に報告する。

4. むすび

本報告で得られた結果は次の通りである。粒状体、泥しようにかかわらず、それぞれの物質の持つ摩擦角とその上を流れる流体のせん断力とから定まる平衡勾配より急な勾配では、水路床が堆積物からなるときは、平衡勾配まで堆積層を洗掘して勾配を緩くする。固定床での流動では、固定床上に等流が形成される。

平衡勾配より緩い勾配上に流れが生じたとき、平衡勾配まで流動床が上昇する。

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) 大同：土石流に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1970

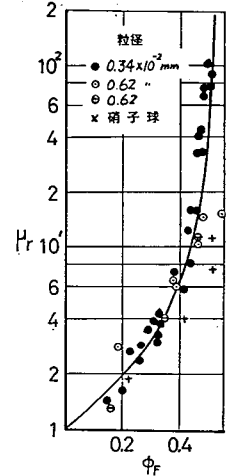


図5 フロック濃度 Φ_F を用いて整理した粘度

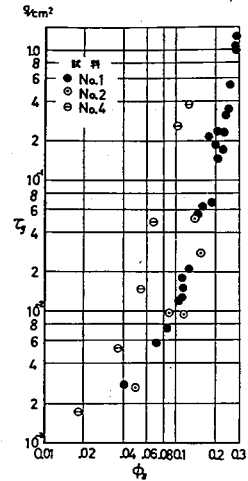


図6 容積濃度 Φ_s とビンガム塑性降伏値 τ_y の関係

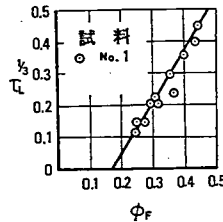


図7 フロック濃度 Φ_F と下限降伏値 τ_y との関係

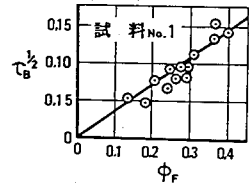


図8 フロックの結合力 τ_u とフロック濃度 Φ_F の関係