

1. まえがき

粒状体または泥流が、流動する場合には流体の特性とその流動の条件により、一定の勾配を形成して流動する。このとき、一定の条件下では、通常の流体と同じような挙動をするものと考えられる。本文は、この一定の条件として、流体の静的摩擦と動的摩擦の和に相当する勾配を平衡勾配と名づけ、この勾配以上の場の粒状体は、流体と同じ挙動をすると推論した。

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) であり、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

$$\bar{E} = \frac{1}{\sigma c u_m A} \int_A \left(\frac{u^2}{2g} + h \right) \cdot \sigma c u dA \quad \bar{E} = \alpha \frac{u_m^2}{2g} + h \quad \alpha = \int \frac{u^2}{u_m^2} \frac{\sigma c}{\sigma \bar{c}} \frac{dA}{A} \quad (3)$$

となる。等流流動深は大同によると

$$h_0^{5/2} = \frac{15}{4} \frac{Q}{g^{1/2} \left(\frac{\sin \theta}{K \sin \alpha} \right)^{1/2} \psi^{1/2} \left(\frac{b}{d} \right)} \quad \psi = \frac{\rho + (\sigma - \rho(1 + \cos \theta)) \bar{c}}{\sigma} \left\{ \left(\frac{c_*}{c} \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (4)$$

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。

$$h_c^3 = \alpha \frac{Q^2}{g b^2} \quad \alpha = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{u}{u_*} \right)^3 dA \quad \alpha = 2.84 \quad (5)$$

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、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = - \frac{1}{c_*} \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (6) \quad \frac{\partial c h}{\partial t} + \frac{\partial c v h}{\partial x} = - \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (7)$$

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

$$\frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} = \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{(\sigma/\rho - 1) h}{(\sigma/\rho - 1) c + 1} \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{(\sigma/\rho - 1) c g \cos \theta}{(\sigma/\rho - 1) c + 1} \mu - \frac{v}{\{(\sigma/\rho - 1) c + 1\} h} f v^2 \quad (8)$$

となる。ただし、式(8)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。

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \left(\theta \left(1 - \frac{Q^2}{K g b^2 h^3} \right) + \frac{Q^2}{g b^2 h^2} \frac{\partial b}{\partial x} \right) \left/ \left(1 - \frac{Q^2}{g b^2 h^3} \right) \right. \quad (9)$$

もし、定常で流れるとき、勾配は

$$I_0 = \mu_* \cos \theta + \frac{1}{2 \sigma c h g} f' u^2 \quad (10)$$

となる。この勾配は流動に必要な摩擦に相当するので、この勾配を平衡勾配と呼ぶことにする。

3. 実験との比較

実験は障害物を越える場合、および狭く部を通過する流れについて行った。

図1は障害物を越える粒子流で、図2は同じく泥流で障害物を越える場合、図3は狭く部で粒子流の流れである。式(4)中の係数 $K \sin \alpha$ は濃度に関係する値であるが、粒子流については、 $K \sin \alpha = 0.6$ を使い、 $\psi^{1/2} = 0.278$ として、式(4)、(5)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。図1の障害物より上流は、障

害物上より摩擦が大きいため急な平衡勾配をとる。

図2の泥流の場合、水路の下流端には何の工作物もしていないが、みかけ上、非常に長い低下背水を示す。この場合も水路の下流端からひいた平衡勾配から下は流動せず、平衡勾配線上に h_0 をとった高さの水面形で流動する。

図3の狭さく部を有する流れの場合、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(10)で示す平衡勾配になり、そのうえを式(4)で示す h_0 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流れる。図3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(10)にしたがう平衡勾配を形成して流下する。移動床での現象とどのよう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 $h_c > h_0$ であり、床面は連続の条件から堆積の進行がきまる。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_1 のとき

$$I = \frac{C * (\sigma - \rho)}{C * (\sigma - \rho) + \rho (1 + h_1 / d)}$$

の摩擦角等に常識的な値を入れたとき 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角だけ大きくなる。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挙動をすると考えられる。

5. あとがき

粒子流が挙動を維持するためには式(10)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合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：障害物を越える粒子流の挙動，平成2年度砂防学会研究発表会概要集，pp214-217

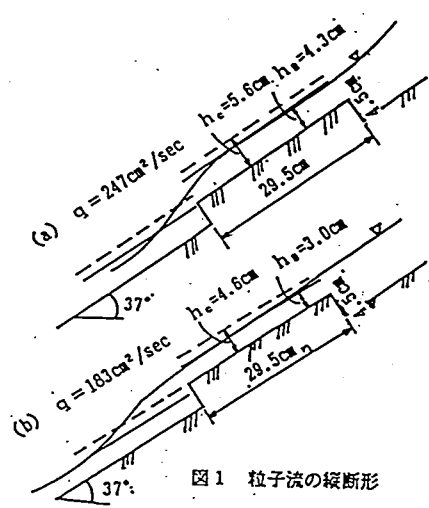


図1 粒子流の縦断面形

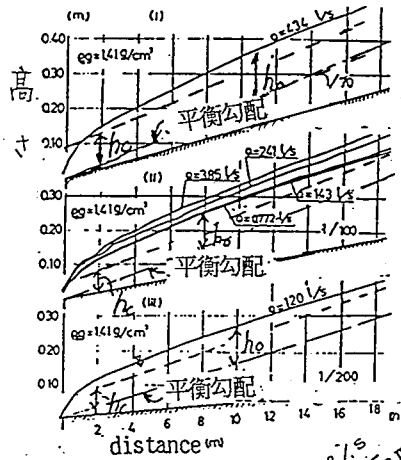


図2 泥流の流動形状

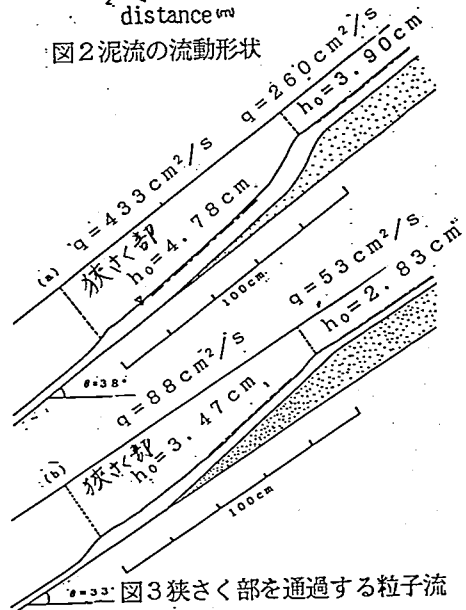


図3 狭さく部を通過する粒子流