

## 土石流の構成則に関する研究

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男  
京都大学大学院 学生員 矢島 啓

京都大学防災研究所 正員 江頭 進治  
京都大学大学院 学生員 高濱 淳一郎

1. はじめに 土石流のエネルギー散逸及び圧力の構造を評価して構成則を提案するとともに、それを水路実験に適用し、その妥当性を調べた。

2. 構成則 せん断応力 $\tau$ と圧力 $p$ が与えられると、土石流の流れは決定される。連続体において $\tau$ はエネルギー散逸関数 $\Phi$ によって表わされる。特に図-1に示すような2次元等流の場合には $\tau = \partial \Phi / \partial (du/dz)$ で与えられる。ここで $\Phi$ は下方の粒子を乗り越えるときの散逸 $\Phi_v$ 、粒子間隙の水の乱れによる散逸 $\Phi_f$ 、及び粒子の非弾性衝突による散逸 $\Phi_g$ に分けられる。

$$\Phi = \Phi_v + \Phi_f + \Phi_g \quad (1)$$

$\Phi_v$ は粒子骨格応力 $p \tan \phi$ の中の粒子の相対移動を考えることによって与えられ、 $\Phi_f$ については粒子間隙のスケールの乱れの混合距離によって与えられ、これらはそれぞれ次式のように表わされる。

$$\Phi_v = p \tan \phi (du/dz) \quad (2) \quad \Phi_f = \rho d^2 (k_p/k_v)^{2/3} \{ (1-c)^{5/3} / c^{2/3} \} (du/dz)^3 \quad (3)$$

ここに $\phi$ は内部摩擦角、 $\rho$ は水の密度、 $d$ は粒子径、 $(k_p/k_v)^{1/3}$ は粒子及び間隙の形状係数比<sup>1)</sup>である。 $\Phi_g$ は宮本の研究<sup>2)</sup>によれば次式で表わされる。

$$\Phi_g = k_g \sigma d^2 (1-e^2) c^{1/3} (du/dz)^3 \quad (4)$$

ここに $\sigma$ は粒子の密度、 $e$ は反発係数、 $k_g = 0.0828$ である。以上より、せん断応力 $\tau$ は次式で与えられる。

$$\tau = p \tan \phi + \rho d^2 (k_p/k_v)^{2/3} \{ (1-c)^{5/3} / c^{2/3} \} (du/dz)^2 + k_g \sigma d^2 (1-e^2) c^{1/3} (du/dz)^2 \quad (5)$$

圧力については粒子間隙水の圧力 $p_w$ 、粒子骨格による静的な圧力 $p_s$ 、及び非弾性衝突の際に保存されるエネルギーに対応する圧力 $p_e$ に分けて考える。 $p_w$ は静水圧近似でできるものとし、さらに、 $p_e/p_s = \alpha = \text{const}$ と仮定すれば、次式が成り立つ。

$$dp_w/dz = -\rho g \cos \theta \quad (6) \quad dp_s/dz = -\rho \{ (\sigma/\rho - 1)c / (1+\alpha) \} g \cos \theta \quad (7)$$

$p_e$ は宮本<sup>2)</sup>の研究によれば次式で与えられる。

$$p_e = k_g d^2 e^2 c^{1/3} (du/dz)^2 \quad (8)$$

x方向の運動量保存式に上述の $\tau$ を適用すれば、流速の垂直分布が次のように得られる。

$$\frac{du}{dz} = \left[ \frac{1}{f(c) + f_g(c)} \int_z^h \{ G(c) - Y(c) \} dz \right]^{1/2} \quad (9)$$

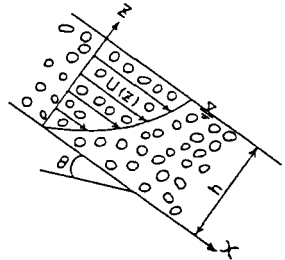
ここに  $f(c) = \rho d^2 (k_p/k_v)^{2/3} (1-c)^{5/3} / c^{2/3}$   $f_g(c) = k_g \sigma d^2 (1-e^2) c^{1/3}$

$G(c) = \rho \{ (\sigma/\rho - 1)c + 1 \} c g \sin \theta$   $Y(c) = \rho \{ (\sigma/\rho - 1)c / (1+\alpha) \} g \cos \theta \tan \phi$

上式は濃度一様の条件では、容易に解けて、流速分布は次のよう与えられる。

$$\frac{u(z)}{\sqrt{gh}} = \frac{2}{3} K \{ 1 - (1-z/h)^{3/2} \} \quad (10)$$

ここに  $K = (k_v/k_p)^{1/3} \left\{ \frac{\sin \theta - (\sigma/\rho - 1) \frac{c}{1+\alpha} \tan \phi}{c^{1/3} \{ (1-c)^{5/3} + \frac{(1-c)^{5/3}}{c} \frac{\sigma}{\rho} k_g \frac{1-e^2}{(k_p/k_v)^{2/3}} \}} \right\} \frac{1/2 h}{d}$



濃度の垂直分布は、z 方向の運動量保存式より、若干の演算の後、次のように導かれる。

$$\frac{dc}{dz} = \frac{f_{n2}(c)}{a_1(1-z^-)f_{n1}(c)} \quad (11)$$

$$\text{ここに } f_{n1}(c) = \left(\frac{1-c}{c}\right)^{5/3} + 5/3(1-c)^{2/3}$$

$$f_{n2}(c) = \{(\sigma/\rho-1)c+1\} \tan \theta$$

$$-(\sigma/\rho-1) \frac{c}{1+\alpha} \tan \phi - a_2(1-c)^{5/3} - a_3c$$

$$a_1 = \frac{9}{4} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{u_m^2}{gh} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \left(\frac{k_p}{k_v}\right)^{3/2}$$

$$a_2 = \frac{\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{\sigma/\rho-1}{\sigma/\rho} \cdot \frac{(k_p/k_v)^{2/3}}{k_p e^2}$$

$$a_3 = \frac{\alpha}{1+\alpha} \cdot (\sigma/\rho-1) \cdot \frac{1-e^2}{e^2}$$

$$z^- = z/h \quad u^- = u/u_m \quad u_m \text{は最大流速}$$

なお  $\alpha$  については土石流の静止状態から運動状態への変化を考えれば次式のように推定される。

$$\alpha = (\tan \phi - \tan \phi_k) / \tan \phi_k \quad (12)$$

ここに  $\tan \phi_k$  は動摩擦係数である。

3. 適用例  $\tan \phi_k = (0.70 \sim 0.85) \tan \phi$  程度であるから  $\alpha$  は  $0.18 \sim 0.43$  程度であると推定される。ここでは  $\alpha = 0.25$  とする。  $\tan \phi$  は実験より、砂：0.8、ビーズ：0.5である。  $e$  は砂：0.7、ビーズ：0.9<sup>2)</sup> とする。本モデルが一般性をもつためには形状係数比  $(k_v/k_p)^{1/3}$  が一定値をとることが必要である。図-2は、砂粒子とビーズを用いた水路実験によって、これを調べたものである。形状係数比は  $c = 0.3 \sim 0.4$  の範囲において2程度の値になっている。図-3は、式(10)による流速分布と実験値を示し、さらに、式(11)による濃度分布と実験値を示している。ただし、計算では、第一次近似として、流速分布において濃度分布の影響は考慮していない。実験において濃度分布は砂を用いたケースでは流れの上層の方が小さく、ビーズを用いたケースでは逆の傾向を示している。計算によってもこれらのことが再現されている。

4. おわりに 本モデルにより材料の性質による濃度分布への影響を示すことができた。今後、式(9)と式(11)を用いて厳密な計算(収束計算)を行い、流速分布や濃度分布を詳細に検討するつもりである。

参考文献 1) 芦田 和男・江頭 進治・佐々木 浩：斜面崩壊の発生と土石流の流動機構、京大防災年報、30号 B-2、1987、pp. 516-526 2) 宮本 邦明：Newton流体を含む粒子流の流動機構に関する研究、立命館大学学位論文、1985、pp. 39-72 3) 芦田 和男・江頭 進治・神矢 弘：斜面における土塊の抵抗則と移動速度、京大防災年報、28号、B-2、1985、pp. 297-307

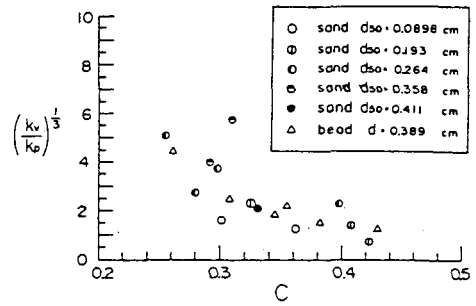


図-2 実験より求めた形状係数比

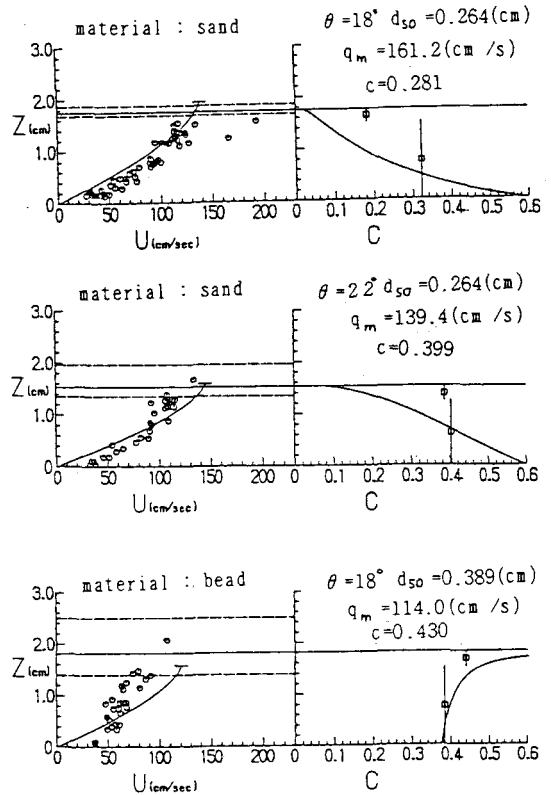


図-3 実験より求めた流速・濃度分布と理論曲線