

II-266 土石流の抵抗則に及ぼす液相の物性の影響

立命館大学理工学部

正会員 ○ 江頭進治*

立命館大学大学院

学生員

伊藤隆郭*

大阪府立工業高等専門学校

正会員

本田尚正**

1. はじめに 土石流を構成する流体相に微細砂が加われば、密度や粘性係数といった間隙流体の物性が変化する。しかし、間隙流体の物性の違いが、土石流の応力構造に本質的な違いをもたらすのかどうか判然としない。ここでは、著者らの土石流の構成則を用いて、液相の物性が流れの抵抗に及ぼす影響について検討する。

2. 流体相粘性を考慮した土石流の構成則 石礫と微細砂を高濃度に含む泥水とからなる混合物の流れに対し、著者らの土石流の構成則^{1),2)}を適用することによれば、これらは次のようである。

$$\tau = \tau_y + \tau_d + \tau_f \quad (1), \quad p = p_s + p_d + p_w \quad (2), \quad p_s / (p_s + p_d) = f(c) = (c/c_s)^{1/n} \quad (3)$$

ここに、 τ はせん断応力、 τ_y は降伏応力、 τ_d は粒子の非弾性衝突による応力、 τ_f は粒子間隙の流体のせん断による応力、 p は圧力、 p_s は静的圧力、 p_d は粒子の非弾性衝突の前後において保存される圧力、 p_w は間隙水圧、 c は粗粒子の体積濃度、 c_s は静止堆積層濃度、 n は経験定数($n=5$)である。ここで、 τ_f に流体粘性による応力を加えれば、これは次式のように表される³⁾。

$$\tau_f = \rho(1-c)l^2 \partial u / \partial z (\partial u / \partial z) + \rho(1-c)v_f (\partial u / \partial z), \quad l = \sqrt{k_f \{(1-c)/c\}^{1/3} d} \quad (4)$$

右辺第一項、第二項はそれぞれ、粒子間隙の流体の乱れによるレイノルズ応力、粘性応力である。ここに、 ρ は流体の密度、 u は流速、 v_f は流体の動粘性係数、 l は間隙流体の運動量輸送の混合距離、 k_f は形状係数比($k_f=0.16$)、 d は粒子径である。式(4)の二つの項の大小により流れの構造が規定される。そこで、流れの構造を分類する指標を求めてみる。式(1)において、一般の土石流の領域では、 τ_d の全応力に対する寄与は小さい⁴⁾ので、指標を求めるときに限って近似的にこれを無視すると、 $\tau_f = \tau - \tau_y - \tau_d \cong \tau - \tau_y$ となる。さらに摩擦速度 $u_{\tau f}$ を $u_{\tau f} = \sqrt{(\tau - \tau_y) / \rho}$ と定義すると、 $|\partial u / \partial z|$ は、 $u_{\tau f} / l$ とおけるので、式(4)は次式で表される。

$$\begin{aligned} \tau_f &= \rho(1-c)(\partial u / \partial z) \left(l^2 |\partial u / \partial z| + v_f \right) \\ &= \rho v_f (1-c)(\partial u / \partial z) (R_e^* + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $R_e^* \equiv u_{\tau f} l / v_f$ で、レイノルズ数である。これを用いると、間隙流体の流れは表-1のように分類できる。

表-1 間隙流体の流れ

$R_e^* \ll 1$	層流粘性の卓越する流れ
$R_e^* \sim 1$	遷移的な流れ
$R_e^* \gg 1$	乱れ応力の卓越する流れ

3. 抵抗則に及ぼす物性の影響 定常・等流の運動方程式に、式(1)、(2)を適用し、議論を簡単にするために、粗粒子濃度 c を一定とすると、流れ方向と流れに垂直な方向の成分について、次式が得られる。

$$\tau_y + \tau_d + \tau_f = \rho \{ (\sigma / \rho - 1) c + 1 \} g \sin \theta (h_t - z) \quad (6), \quad p_s + p_d + p_w = \rho \{ (\sigma / \rho - 1) c + 1 \} g \cos \theta (h_t - z) \quad (7)$$

ここに、 h_t は流れの厚さ、 σ は砂粒子の密度、 g は重力加速度、 θ は路床と水平とのなす角度である。式(6)、(7)に対し、これまで得られた成果^{2),4)}、および式(3)、(4)を代入すれば、流速分布と抵抗則の近似解が次式のように求められる。

$$u'(z') = -\frac{f_v}{f_{fd}} z' + \frac{2}{3} \frac{f_{fd}}{K} \left[\left\{ \left(\frac{f_v}{f_{fd}} \right)^2 + \frac{K}{f_{fd}} \right\}^{3/2} - \left\{ \left(\frac{f_v}{f_{fd}} \right)^2 + \frac{K}{f_{fd}} (1-z') \right\}^{3/2} \right] \quad (8)$$

$$\frac{U}{u_{\tau}} = \frac{1}{\sqrt{\sin \theta}} \left\{ -\frac{1}{2} \frac{f_v}{f_{fd}} + \frac{2}{3} \frac{f_{fd}}{K} \left\{ \left(\frac{f_v}{f_{fd}} \right)^2 + \frac{K}{f_{fd}} \right\}^{3/2} + \frac{4}{15} \left(\frac{f_{fd}}{K} \right)^2 \left[\left(\frac{f_v}{f_{fd}} \right)^5 - \left\{ \left(\frac{f_v}{f_{fd}} \right)^2 + \frac{K}{f_{fd}} \right\}^{5/2} \right] \right\} \quad (9)$$

$f_v = (1/2)(1-c)(v_f/d^2)\sqrt{h_t/g}$, $f_{fd} = k_d(1-e^2)(\sigma/\rho)c^{1/3}$, $f_{pd} = k_d e^2(\sigma/\rho)c^{1/3}$, $f_f = k_f(1-c)^{5/3}/c^{2/3}$, $f_{fd} = f_f + f_d$, $z' = z/h_t$, $u' = u/\sqrt{gh_t}$, $K = \{ (\sigma/\rho - 1)c + 1 \} \sin \theta - f(c)(\sigma/\rho - 1) \cos \theta \tan \phi_s \} (h_t/d)^2$, $u_{\tau} = \sqrt{gh_t \sin \theta}$ であり、ここに、 e は反発係数、 ϕ_s は砂粒子の内部摩擦角、 U は断面平均流速、 k_d は実験定数で

Key words : constitutive equations, debris flow, solid-liquid two phase flow, erodible bed, flow resistance, viscosity

* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL 077-561-2732 FAX 0775-61-2667

** 〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12 TEL 0720-20-8585 FAX 0720-21-0134

0.0828である。

式(8), (9)において, v_f を直接議論するのは困難であるので, 清水の動粘性係数 ν_0 との比 ν_f/ν_0 をパラメータとして流速分布や抵抗則を検討する。図-1 は, 式(8)を示したものである。計算では, $\sigma = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 1.50 \text{ g/cm}^3$ (流体相の微細砂濃度 $c_f = 0.3$), $d = 10 \text{ cm}$, $c_s = 0.52$, $\phi_s = 33.0^\circ$ とし, $\theta = 5.7^\circ$, 断面平均濃度は $\bar{c} = \tan \theta / \{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)\}$ を用いて算定し, $h_t/d = 20$ としている。なお, 材料特性値や勾配は, 蒲原沢における土石流の再現計算⁵⁾に用いられているものとほぼ等しい値である。図には, $u_{\tau f}$ に河床から60%水深の位置の値を用いた時の R_{e*} の値も示している。これによれば, ν_f/ν_0 が 10^3 を越えると流速分布や抵抗に対する粘性の影響が現れはじめ, 10^4 を越えると顕著になってくる。ここで, $\nu_f/\nu_0 = 10^3 \sim 10^4$ の領域の R_{e*} についてみると, $R_{e*} = 21.6 \sim 2.16$ となっており, この領域は, 粘性応力と乱れ応力が混在する領域になっている。

図-2 は, 図-1 の計算と同じ条件の下で得られる流れの抵抗を示したものである。これによれば, ν_f/ν_0 が 10^4 を越えると流れの抵抗に対する粘性の影響が顕著になるのが分かる。なお, 図に示す四角形の領域は, 蒲原沢における土石流のデータの推定範囲⁶⁾である。ただし, h_t/d の範囲は代表粒径 $d = 10 \text{ cm}$ として示している。

間隙流体の粘性応力を無視して, 流体の密度が流れの抵抗に及ぼす影響をみる。図-3 は, $\rho = 1.00$, $\rho = 1.50$, $\rho = 1.83 \text{ g/cm}^3$ とし, 移動床上の土石流の流速と粒子濃度を厳密に解いて求めた抵抗^{2), 5)}と $c = \bar{c} = \text{const.}$ として求めた抵抗である。計算条件は, 図-1 の場合と同じである。これによれば, 流体の密度の増加に伴い, 流れの抵抗は増加する。これは, 密度の増加によって, 粒子濃度が増加し, 間隙の空間スケールが小さくなり τ_y (Yield stress)が増加するからである。なお, 近似解と厳密解にはかなりの違いがみられる。これは, 粒子濃度の鉛直分布が流れの抵抗に顕著な影響を及ぼしているからである。図-2 および図-3 の結果を参照すれば, 蒲原沢土石流の流れは, 間隙流体の粘性を用いても評価できるし, 間隙流体の密度が大きかったとしても評価できるが, これらについては今後の検討が必要である。

おわりに 液相に微細砂を高濃度に含む土石流に対して, 間隙流体の粘性や密度の流れに及ぼす影響を議論した。これによれば, R_{e*} によって粒子間隙の流体の応力として, 粘性が卓越するか, 乱れが卓越するかが評価できるようである。本研究は, 文部省科研費基盤研究 B (代表 江頭進治) の補助を受けている。ここに記して感謝します。

参考文献 1) 江頭・芦田・矢島・高濱: 京大防災研年報, 33B-2, 487-501, 1989, 2) 江頭・宮本・伊藤: 水工学論文集, 41, 789-794, 1997, 3) 芦田・江頭・神矢・佐々木: 京大防災研年報, 28B-2, 297-307, 1985, 4) Egashira, S., Miyamoto, K. and Itoh, T.: 1st, Int. Conf. on Debris-Flow Hazard Mitigation, ASCE, 340-349, 1997, 5) 江頭・本田・宮本: 水工学論文集, 42, 919-924, 1998, 6) 江頭進治: 土木学会誌, 83, 49-54, 1998, 2.

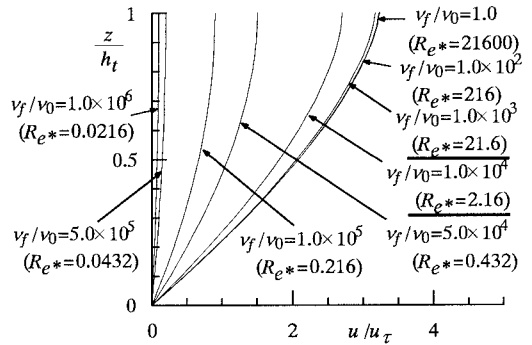


図-1 流体相の粘性の変化に対応する流速分布 (移動床流れの近似解: $c(z) = \bar{c}$)

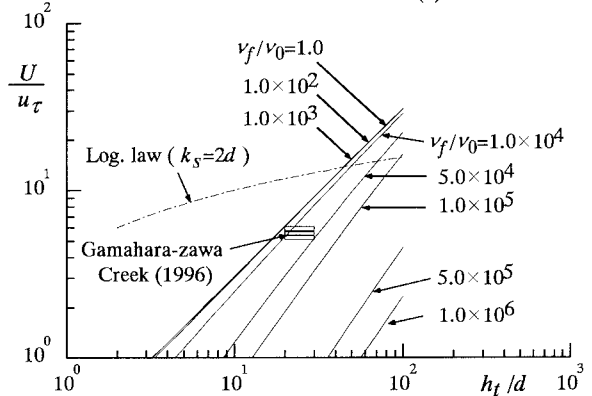


図-2 流れの抵抗に及ぼす流体相の粘性の影響 (移動床流れの近似解: $c(z) = \bar{c}$)

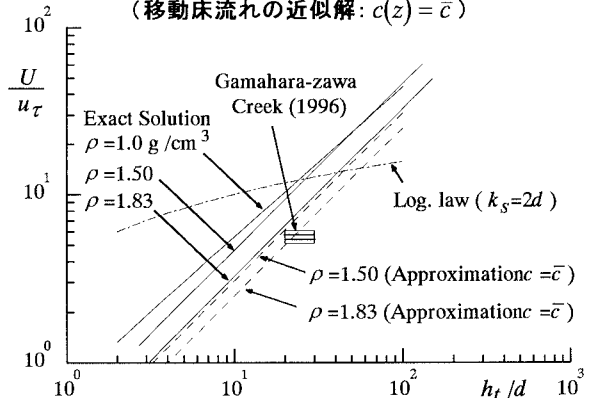


図-3 流れの抵抗に及ぼす密度の影響 (移動床流れの厳密解と近似解)