

高濃度泥流の貯水池内流動について

名城大学理工学部 正 員 新井宗之
 京都大学防災研究所 正 員 高橋 保
 名城大学理工学部 学 員○中井 淳

1. はじめに: 土石流のような土砂を高濃度に含む流れが湛水域に流入した場合, 土石流が流入点近傍で堆積する場合と, 流入点付近では堆積せず密度流として流動を継続する場合がある. しかしそれがどのような条件のもとに生じているか, まだ十分に明らかにされていない. 土石流が小規模な湛水域を流下する過程を明らかにするうえで, このような現象の違いを明らかにする事は重要であると思われる. そこでここではどのような条件のもとにこのような変化を生じるのか検討した.

2. 実験の概要及び実験結果: 実験水路は, 長さ 6 m, 幅 15.0 cm, 深さは下流側 2 m が 45 cm, それ以外は 20 cm で, 下流端に高さ 43 cm の堰を設けた. 両側壁は透明アクリル製であり, 水路床はペンキ塗布仕上げの可変勾配水路である. 水路勾配は $\theta=18^\circ$ であり, 実験砂は粒径 $d_{50}=0.98, 0.16$ mm, 土砂の容積濃度は $C=0.35$, 単位幅流量 $q_T=53.3, 80.0$ cm³/s/cm である.

図-1, 2 は実験結果の例である. いずれの実験も単位幅流量 $q_T=80.0$ cm²/s, 容積濃度 $C=0.35$, 図-1 の粒径は $d_{50}=0.98$ mm, 図-2 のそれは $d_{50}=0.16$ mm であり, これらの実験における違いは粒子径のみである. 図-1 は堆積形状であるが, 図-2 は密度流として流動を継続している状態で粒子によって周囲水よりも濃度が高くなっている形状を示したものである.

3. 考 察: 土石流のように粒子を高濃度に含む流れの場合, その流動に支配的な要因はその流れ場の水理条件や含有粒子径と水深比などにより変化し, 粒子径が比較的大きく慣性項が卓越しているような状態では粒子相互の衝突効果が重要であるが, 粒子径が微細な場合には粒子と流体とが一体となった流体塊の混合の効果が無視し得ないものとなる. 後者の場合には粒子が間隙流体中に浮遊していることが必要となる. 外力の減少に伴う土石流の堆積過程において, 比較的粒子が大きな場合にはクーロン摩擦応力に相当する応力を考えた粒子相互の接触応力と降伏応力を考慮したモデルで多くの事項が説明し得るが, 粒子径が微細な場合にはそのようなモデルではなく, その水理条件での平衡濃度よりも過剰な粒子が沈降堆積するモデルで実験的な多くの現象が説明され得る. したがって, 湛水域への流入による堆積・流動過程も含有粒子が間隙流体中を浮遊できるのかどうかにより流動を継続するのかが支配されるものと考えられる.

そこで流下方向の流速を u , 水路床と直角方向を y 軸にとると Bagnold による分散応力とせん断力に間隙水の乱れによって受け持たれるせん断力 τ_f を加えて流動深 h の開水路に適用し, 水深方向に濃度が一様であるとすれば, 底面における間隙水のせん断力 τ_{0f} は,

$$\tau_{0f} = \rho g h \sin \theta \left[\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \right) C + 1 \right] \quad (1)$$

ここに, σ, ρ : 固体粒子, 水の密度, α : 粒子の衝突角, g : 重力加速度.

したがって, 粒子の沈降速度を w_s とすれば, 間隙流体の摩擦速度 $u_{*f} (= \sqrt{\tau_{0f}/\rho})$ が, $u_{*f} \geq w_s$ (2) の関係を満足するとき, 粒子を浮遊できるものと考えられる. したがって, 粒子の沈降速度に Rubey の式を用いると, (2) 式の関係は (3) 式のようなものである. 式中の $\sin \theta_e$ は平均的な流動層厚 h におけるエネルギー勾配とする. 図-3 は $\alpha=32^\circ$, $\sigma/\rho=2.65$, $\nu=0.01$ cm²/s とし, $d_{50}=0.016$ cm, 0.098 cm のそれぞれの容積濃度 $C=0.1, 0.35$ における h/d と $\sin \theta_e$ との関係を示したものである. 描線よりも右方が浮遊

状態である。

$$\frac{h}{d} \geq \frac{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \left\{ \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \right\}}{\sin \theta_e \left[\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta_e}\right) C + 1 \right]} \quad (3)$$

ここに、 ν : 水の動粘性係数, $s(\sigma/\rho - 1)$: 粒子の水中比重。

図中には流入点におけることを想定し図-1, 図-2 に対応する $d_{50}=0.098$ cm(黒丸), 0.016cm(白丸) の h/d と $\sin \theta_e$ の関係もプロットしている。いずれも粒子の浮遊条件を満たしているが, $d_{50}=0.098$ cm(黒丸) の場合は浮遊限界に近くわずかなエネルギー勾配の減少によって粒子が浮遊できず堆積することを示しており, 流入後の流動の継続ができないことを示しているものと思われる。

一方, $d_{50}=0.016$ cm の場合, 図-2 のように流入後の流動の抵抗則に次式の泥流型土石流の抵抗則を適応し, フロント部の流速を満足する摩擦速度 u_* についてみることにする。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1}\left(\frac{1}{\phi}\right) - \sinh^{-1}\left(\frac{Y_0}{\phi}\right) - \sqrt{1 + \phi^2} + \phi \right\} \quad (4)$$

ただし, $Y_0 = \frac{y_0}{h}$, $\phi^2 = \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\kappa^2}\right) \left(\frac{\sigma}{\rho_m}\right) \left(\frac{d}{h}\right)^2$, $\lambda = \{(C_*/C)^{1/3} - 1\}^{-1}$ (5)

ここに, y_0 : 滑面の場合, av_0/u_* , $a = 1/9.025$, 粗面の場合 bk_s , $b = 1/30$, κ : カルマン定数, a_i : Bagnold の定数 ($a_i \sin \alpha = 0.022$), ρ_m : 見かけの平均密度, C_* : 堆積濃度である。フロント部の流速を実験結果の値を用いると, 図-2 に対応する流速は $U=45$ cm/s, また $C=0.1$, $h=5$ cm とすると, 上式より摩擦速度は $u_*=3.4$ cm/s であり粒子の沈降速度は $w_s=1.8$ cm/s であるから $u_* > w_s$ の関係も満足している。一方, 図-1 に対応する $d_{50}=0.098$ cm の場合には同様な条件とした場合, 摩擦速度は $u_*=4.2$ cm/s であるが粒子の沈降速度は $w_s=9.6$ cm/s であり, $u_* < w_s$ の関係からこのような流れの場合には流動を継続せず流入点付近で堆積することを示している。

4. まとめ: 以上, 土石流のように高濃度の流れが湛水域に流入した場合, 流れが流動を継続するためには粒子の浮遊する条件が必要であることを示した。

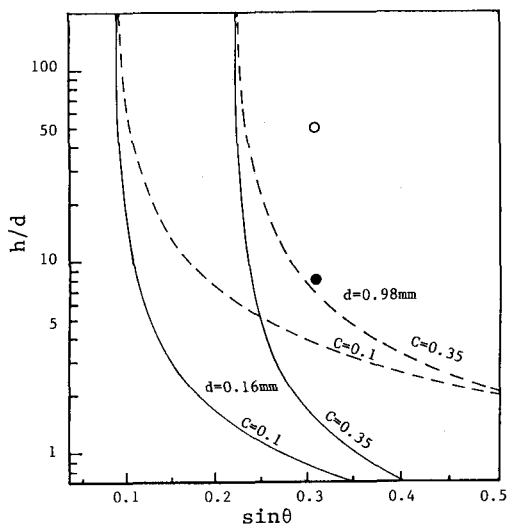
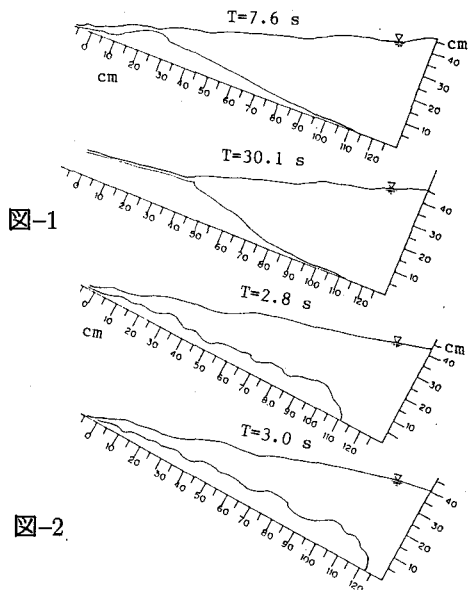


図-3 h/d と $\sin \theta_e$ の関係