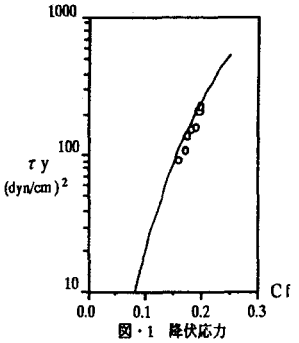
第II部門　　粘性土石流の流動機構に関する研究

京都大学防災研究所　正　員　高橋　保
建設省　　正　員　小林　幸一郎
京都大学大学院　　学生員○白坂　紀彦

1．はじめに　土石流中に粘土粒子が高濃度に含まれると、それによる粘性増加の効果が土石流の流動機構を大きく左右する。このような粘性土石流について、開水路実験を行い流速分布、濃度分布を測定しその流動機構の説明を試みる。

2．実験方法、実験条件　まず実験１は、間隙流体の特性を調べるために幅5cm、長さ4mの長方形断面の開水路を用いてカオリナイト(中央粒径2.1μm密度2.6g/cm^3)と水を混合させ粘土スラリーを作り、カオリナイトの濃度、水路勾配の条件を変化させてその特性を調べた。次に実験２では幅10cm、長さ10mの上流端に給砂装置のある水路を用いて、前述の粘土スラリーに粗い砂粒子(中央粒径3.25mm密度2.62g/cm^3)を混合し土石流を発生させ、粗粒子の濃度、カオリナイトの濃度、水路勾配の条件を変化させて実験を行い側壁より高速度ビデオカメラで撮影し流速分布、濃度分布を測定した。

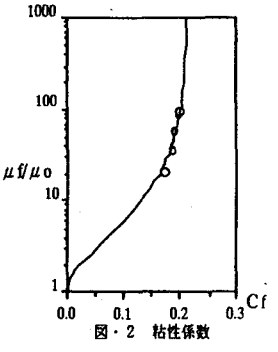


図・1　降伏応力

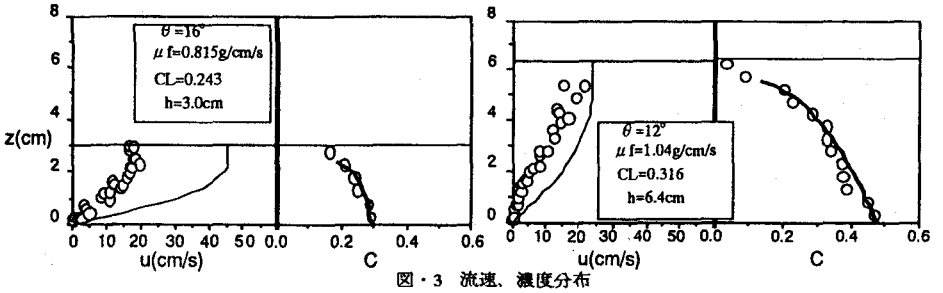
3．間隙流体の実験結果　粘土スラリーを開水路上に流下させると、供給を停止した後もある一定の水深を保ったまま停止する。この水深をhyとすると粘土スラリーの降伏応力は$\tau y=\rho ghy\sin\theta$と表される。そこで粘土スラリーの流れを層流のビンガム流体と仮定すると、粘性係数μfが次のように求められる。

$$\mu_f=\frac{\rho g\sin\theta(h-hy)^2(2h+hy)}{6q}$$

ここにρ：粘土スラリーの密度、h：水深、q：単位幅流量、θ：水路勾配である。本実験では流体が高粘性のため側壁の影響が無視できないため径深による補正を行っている。粘性係数の値は、同じ材料であっても勾配が緩いほど大きな値を示すような結果が出た。こ



図・2　粘性係数



図・3　流速、濃度分布

Tamotu TAKAHASHI　Koh-ichiro KOBAYASHI　Norihiko SHIRASAKA

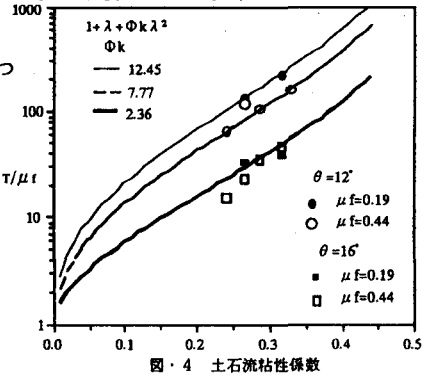
れは粘土スラリーが完全なビンガム流体ではなくμ_fが速度勾配に依存していると考えられる。図1、2に濃度と降伏応力、粘性係数の関係を示す。図中の曲線は芦田ら1)の理論曲線である。

4．土石流の実験結果　土石流の流速分布、濃度分布の測定結果の例を図3に示す。これによると水路勾配が急なほど全層に粒子が分散し、水深方向に濃度分布が一定に近くなっている。逆に勾配が緩くなると粒子が全層に分散できず水面と底面で濃度に大きく差が現れ堆積が生じやすくなっている。さらに流速分布に底面付近に変曲点が現れてくる。

5．土石流の流動機構の考察　粘性の卓越する土石流について高橋2)は、粒子同士の接近に伴う間隙流体の排除によって生じる分散圧力と、粒子が存在することによる見かけの粘性係数増加を考えて、深さ方向、流下方向それぞれの力のつり合い式は

$$k\lambda^2\mu_f\frac{du}{dz}=(\sigma-\rho)g\cos\theta\int_z^h c\,dz\quad,\quad \lambda=\left\{\left(\frac{c_*}{c}\right)^{1/3}-1\right\}^{-1}$$

$$(1-c)\tau_y+\left(1+\lambda+\phi k\lambda^2\right)\mu_f\frac{du}{dz}=(\sigma-\rho)g\cos\theta\int_z^h c\,dz+\rho g(h-z)\sin\theta$$



図・4　土石流粘性係数

と表している。ここにk：分散圧力の係数、λ：線濃度、μf：間隙流体の粘性係数、σ：粗粒子の密度、ρ：間隙流体の密度、θ：水路勾配、c：粗粒子の体積濃度、c*：粗粒子の最充填濃度、τy：間隙流体の降伏応力、ϕ：分散圧力とそれに対応するせん断応力を結びつける係数である。(4)式で濃度分布をCL(混合した粗粒子の体積濃度)一定として$\mu T=(1+\lambda+\phi k\lambda^2)\mu f$とすると$\mu T$は土石流全体の平均的な見かけの粘性係数を表す。(4)式を積分することによりμTを求め、この見かけの粘性係数増加$\mu T/\mu f$と粗粒子の体積濃度CLとの関係を図4に示す。これから、間隙流体の粘性が高いほど粗粒子混合による粘性の増加が小さいことが読み取れる。また、同じ材料であっても水路勾配によって粘性増加が異なっているが、これは勾配が緩いほど濃度分布が一定でないこと、さらに粘土スラリー同様に粘性係数が速度勾配に依存していることが考えられる。次に、(3)(4)式からdu/dzを消去して濃度分布式が求められる。

$$\left|\frac{c-c_\infty}{c}\right|=\left|\frac{c_b-c_\infty}{c_b}\right|\left\{\frac{h-z-(1-C_L)h_y}{h-z-(1-C_L)h_y}\right\}^{3k(\Psi-\tan\theta)}$$

$$c_\infty=\frac{\rho\tan\theta}{(\sigma-\rho)(\Psi-\tan\theta)},\quad \Psi=\frac{\tau}{p}=\frac{1+\lambda+\phi k\lambda^2}{k\lambda^2},\quad k=\frac{(\sigma-\rho)C_L}{\{(\sigma-\rho)C_L+\rho\}}\frac{1}{\lambda^2}\frac{1}{\tan\theta}\frac{\mu_T}{\mu_f}$$

ここでCbは底面濃度で、係数kは両式の速度分布形が同じであることから求められ、Ψを一定値として適当に与えた曲線が図3中のものである。さらに、(5)式を用いて(4)から流速分布式が求められる。流速分布は側壁で測定すると粘性が高いため側壁の影響がかなりでていることが考えられる。

6．おわりに　土石流の特性を大きく左右すると認められた粘性係数が速度勾配に依存していることの検討、および粒子間支持圧力の力学的モデルのさらなる検討が必要である。

参考文献・1)高橋保：粘性土石流の流動機構に関する研究，京大防災研究所年報1993pp433-449

2)芦田和男,山野邦明,神田昌幸：高濃度流れに関する研究，京大防災研究所年報1986pp361-