

82 間隙流体密度が土石流の流動機構に与える影響について

京都府立大学 ○三好岩生
京都府立大学大学院 藤田英信

1. はじめに

火山地域などで多く見られるような、細粒土砂を多量に含んで間隙流体密度が大きい土石流の流動特性を明らかにすること、及び、間隙流体密度と流動特性との応答関係を基にして土石流中の応力構造に検討を加えることを目的として実験を行った。

2. 実験の概要

実験方法としては、長さ 6m、幅 10cm の可変圧配水路に直径 65mm、比重 2.65 のほぼ均一な丸みを帯びた川砂を 5cm の厚さで敷き詰め、ポンプによって初期給水を行って飽和したところに定められた流量の泥水を与えることによって土石流を発生させた。発生した流は下流端から 70~100cm のところで側面からハイスピードビデオによって撮影し、下流端でサンプリングを行った。飽和のための初期給水及び発生のために給水する泥水は、粒径が約 0.01mm でほぼ均一であり、比重が 2.93 である細粒砂を水に加えてよく攪拌し、数日間放置しても沈殿しない状態としたものである。実験条件となるのは水路圧配、泥水の濃度と給水量であり、水路圧配は $\tan \phi$ で 0.2 から 0.4 までの間で 5 段階設定し、泥水の濃度は清水と 0.1, 0.2 の三段階に変えて間隙流体の密度を変化させ、これらの各条件に対して 2~3 段階の給水量を与えた。

3. 結果及び考察

実験によって発生した土石流の流速は約 40~130cm/s、等流と見なせる部分での流動深は約 2~12cm 程度であり、これらはそれぞれ摩擦速度の 1.5~4 倍、砂礫粒径の 3.2~18.3 倍に相当する。水路圧配が $\tan \theta = 0.2$ で間隙流体中に細粒部を含まない場合のみ掃流状集合流動的な流れが見られたが、それ以外は全流動層に砂礫が分布したいわゆる石礫型土石流とみなせる流れが観測された。図-1 は水路圧配に対する砂礫濃度 C_c 、及び、砂礫に細粒を加えた全固体成分の濃度 C_t との関係と細粒部濃度 C_f を示したものである。間隙流体密度の上昇に伴って同じ圧配でも濃度が上がる傾向が見られる。図中の実線は次式(1)に示される土石流の濃度式による計算値である。

$$C_c = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad \dots (1)$$

土石流中に含まれるある粒径以下の細粒土砂は、流動中には流相として機能することが知られているが、式(1)は土石流の流動中に固相として機能する材料の濃度を土質力学的に導いたものであり、堆積域において再び固相となる細粒部も考慮されていない。これら流動中には流相として機能する材料も考慮して全固体濃度を表すために(1)式は次のように書き換えられる。

$$C_c = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \cdot \frac{(\sigma - \rho)}{(\sigma - 1)} + \frac{\rho - 1}{\sigma - 1} \quad \dots (2)$$

本実験の場合には泥水中に含まれる細粒部は流動層中でほぼ完全に流相として機能したと考えられ、(1)式による計算値が測定された砂礫のみの濃度と、(2)式による計算値が全固体濃度とほぼ一致している。高圧配時に測定値が計算値より小さくなるのは、砂礫濃度が環密充填濃度に近づき、物理的にこれ以上土砂を取り込めなかったためと考えられる。本実験でも見られたように、流動中に液相として機能する細粒部の全移動土砂中に占める割合は、材料特性によっては 20% 程度以上になることも考えられ、このような土石流の発生が見込まれる地域においては土砂移動量の見積りにも際して(2)式のような細粒部を考慮した算定が必要であろう。

図-2 に流速分布の一例を示す。流速分布形はほとんどのケースで底面付近で上向きに凸、表面付近で下向きに凸な曲線を描いており、水深方向の濃度分布を反映した広義の粘生流本タイプの流れであるといえる。抵抗のメカニズムについては、比較的高濃度で相対水深と流速係数が小さく、特に細流を含んだ場合には間隙流体の粘性が清水よりも大きいことを考えると粒子間の接触摩擦、間隙流体の粘性と粒子間衝突に伴う抵抗などが考えられる。そこで、これら三つのメカニズムに対応したせん断抵抗力をそれぞれ τ_s 、 τ_v 、 τ_a とし、それぞれの効果を考えるために、砂礫濃度が 0.4 を越えたケースを対象として、全せん断力 τ がそれぞれ二つのせん断抵抗力項から成る次のような二つの式を使った検討を行った。

$$\tau = \tau_s + \tau_a = p_s \tan \phi + \pi/12 \cdot (\pi/6)^{1/3} \sin^2 \alpha_i (1 - e^2) \sigma d^2 c^{1/3} (\partial w / \partial z)^2 \quad \dots (3)$$

$$\tau = \tau_s + \tau_v = p_s \tan \phi + \mu (\partial w / \partial z) \quad \dots (4)$$

ここに、 p_s は粒子間の骨格応力、 ϕ は土砂材料の内摩擦角、 α_i は粒子の衝突角を示す係数、 c は粒子間の反照係数、 d は粒子径、 μ は見かけの粘性係数であり、 τ_a の係数項は宮本の成果を用いた。 μ については真の粘性係数 μ_0 との関係森・乙竹の成果を流用して計算を行い、内摩擦角と間隙流体の真の粘性係数との関係について行った簡易な試験によって求めた。図-2 には(4)式による計算値の適合性が比較的良好であった例を示したものであり、この他にも(3)、(4)式ともあまり適合性が良くない例も見られたが、この検討から次のようなことが考えられる。まず、全せん断力中に占める粒子間摩擦によるせん断抵抗力が非常に大きく、その抵抗力に対する間隙流体密度の影響が大きいこと

である(図-3)。言い換れば、間隙流体密度によって定常速度になるために必要な速度依存型の抵抗力の大きさが大きく異なることになり、土石流の定常速度が大きく変わることになる。次に、しかしながら、実験で測定された流速は、前述のような関係にあるにも関わらず、間隙流体密度の変化によって大きく変わることがなかった。(3),(4)式の速度依存型の抵抗を示すそれぞれの右辺第2項のパラメータをいくつか変えて検討したが、(3)式によっては現象がうまく説明できなかった。(4)式においても実験結果を説明するためには、実験ケースによって見かけの粘性係数を変えてやる必要があったが、結果から逆算することにより砂礫濃度と見かけの粘性係数の関係が図-4のように得られた。流体中に固体粒子を含むときに粒子の細密充填濃度に向かって見かけの粘性が急激に上昇することは既に言われていることであり、この図に示されるような粘性が働いた可能性が十分考えられる。

4. まとめ

本検討により、間隙流体密度の上昇が最も端的に現象として現れるのは土砂輸送濃度の上昇としてであり、このような細密層を多く含む土石流による土砂移動量の算定には、流動中は流林相として機能する成分も考慮する必要が感じられた。また、流速を基にした検討からは、一般にせん断力中で大きな割合を占める粒子間摩擦による抵抗力が、間隙流体密度の上昇によって減少するが、同時に高濃度になりやすいことと流体の真の粘性が上がることから、粘性が大きく働くことが考えられた。

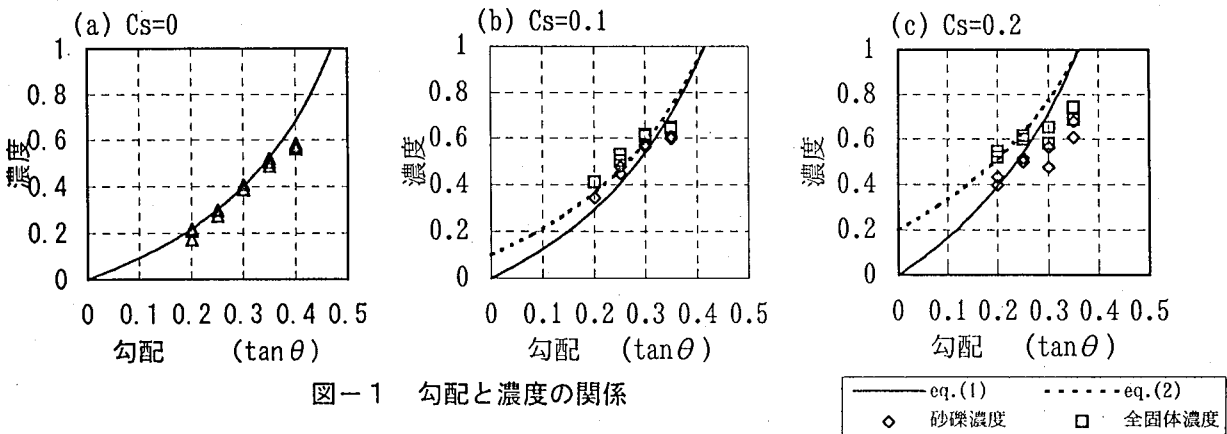


図-1 勾配と濃度の関係

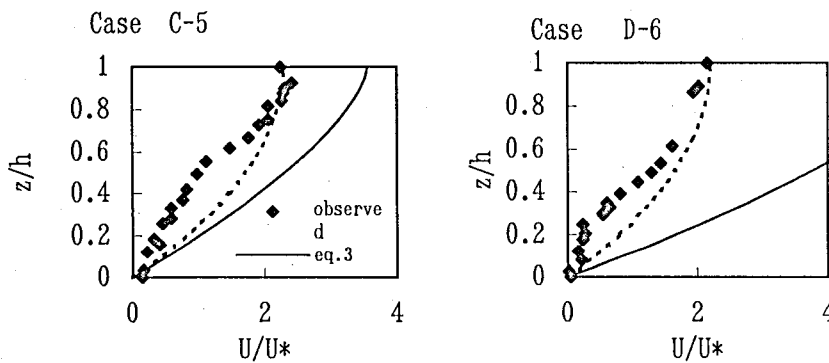


図-2 流速分布の一例

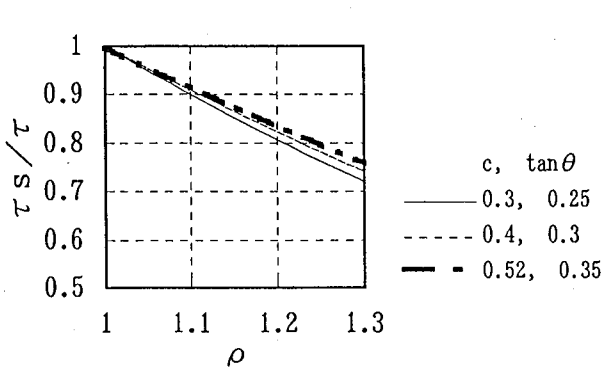


図-3 間隙流体密度による全せん断力中の粒子間摩擦力が占める割合の変化

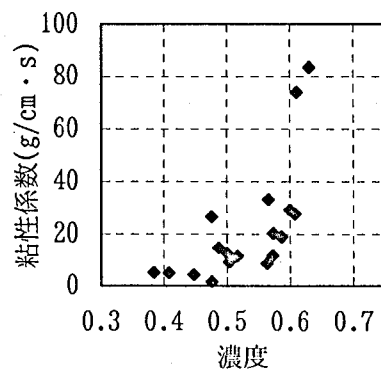


図-4 濃度と粘性係数の計算値