

土石流の流体相密度の形成機構

京都府立大学大学院生命環境科学研究科 三好岩生 ○松野千華

1. はじめに

土石流に含まれる土砂礫の一部は、流動中に流体相として機能することがあり、その結果として見かけの流体相密度が大きくなることが知られている（三好ら,1999；西口ら,2012）。流体相密度は、その上昇が土石流の流動性を大きく高める効果があり、流動・氾濫範囲の予測を行う際の重要なパラメータとなる。しかし、これまでに土砂礫の流体相化のメカニズムについては十分に解明されておらず、流体相密度を推定する手法も確立していない。著者らはこれまでに土石流の流体相密度について実験的に研究を行い、土砂礫粒子の粒径などの材料特性やひずみ速度などの流動条件と、流体相密度の上昇との関係について明らかにしてきた（三好ら,1999,2000,2015）。今回新たに実験方法に改良を加えて流動層中の土砂礫粒子濃度を厳密に評価するとともに、先行研究の成果も取り入れて実験結果の再解析を行うことにより、土砂礫粒子の流体相化のメカニズムに関する一通りの解釈を得た。

2. 実験方法

実験装置は図-1に示すようなリング状強制流動水路（外径75cm，水路幅6cm）である。リング状の水路に試供体となる水と固体粒子を入れ、その水面をせん断板によって強制的にせん断することによって混相流を発生させた。水路床にはフィルターを介してマンメータが設置されており、水路床における間隙水圧を測定することができ、これと水深を比較することによって流動層中の平均の流体相密度を計測することができる。流動体の材料は、水、粗粒子、細粒土砂の3種類を組合せたものである。粗粒子は $\phi=9.5\text{mm}$ 、単位体積質量が 1.4g/cm^3 の球形のプラスチックビーズであり、実験中に流体相密度が上昇した際に流体内にはほぼ均一に散らばることを意図している。細粒土砂材料としては、マサ土をふるい分けることによって、粒径範囲を $0.11\sim 0.25\text{mm}$ 、 $0.25\text{mm}\sim 0.42\text{mm}$ 、 $0.42\text{mm}\sim 0.85\text{mm}$ にそれぞれ調整した土砂を用いた。粗粒子の量は、全流動体材料に対する体積濃度で5%~25%の間の数段階の条件で実験を行った。細粒土砂の量は全流体材料に対して25%で、すべての材料を水深が4cmになるように水路に入れた。せん断板を水路中央での周速で $0\sim 180\text{cm/sec}$ の範囲の数段階の速さで回転させ、それぞれの段階で流動の様子を観察し、水路床での間隙水圧を測定した。また、低速での流動中には一部の固体粒子が堆積したままであるため、堆積層の表面形状を計測するとともに、停止後に堆積層中の粗粒子と細粒土砂の体積濃度を計測して流動層中のそれぞれの体積濃度を算出した。

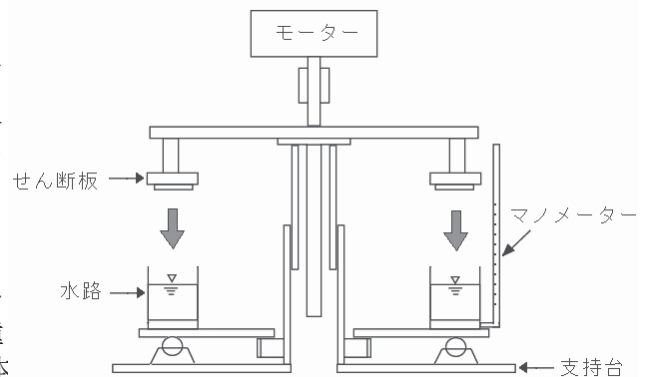


図-1 実験水路の構造

3. 実験結果

せん断板を回転させると水路内にせん断流が生じ、流速の上昇に伴って水路床上に堆積していた固体粒子が流動層中に取り込まれて混相流となった。速度が小さい範囲では細粒土砂の大部分が堆積したままであったが、速度の上昇とともに巻き上げられ、高速度範囲での実験ではすべての細粒土砂が流動層中に取り込まれ、それに伴って水路床での間隙水圧が上昇していった。図-2にひずみ速度と見かけの流体相密度の上昇との関係の一例を示す。

4. 考察

細粒土砂の流体相化は、先行研究によって細粒土砂の沈降速度に対する間隙流体の乱れ速度の比率（以降、速度比とする）に依存すると考えられている（西口ら,2012）。そこでここでは、土石流中で土砂礫粒子の流体相化が許容される濃度は、任意の粒径に対して次のように速度比の関数で表されるとした。

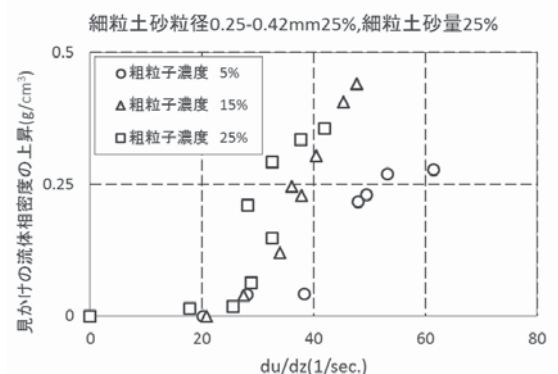


図-2 ひずみ速度と見かけの流体相密度の上昇の関係

$$c_f(d) = f\left(\frac{u_{*f}}{w_0(d)}\right) \dots\dots (1)$$

ここに、 $c_f(d)$ は任意の粒径において土砂礫粒子の流体相化が許容される濃度、 u_{*f} は粒子間隙における流体の乱れ速度、 $w_0(d)$ は該当する粒径の土砂礫粒子の沈降速度である。今回は速度比の関数形が線形関係であり、 $c_f(d)$ が速度比に比例して大きくなると考えて、(1)式は係数Aを用いて次のようになる。

$$c_f(d) = A \times \frac{u_{*f}}{w_0(d)} \dots\dots (2)$$

ただし、 $c_f(d)$ はそこに存在する該当粒径の土砂礫粒子の濃度を最大値とする。このように流体相化する土砂礫粒子の濃度が算出されれば、間隙流体相密度は次のように表される。

$$\rho = 1 + (\sigma - \rho_w) \int_0^{d_{max}} c_f(d) dd \dots\dots (3)$$

ここに、 σ は土粒子の単位体積質量(g/cm^3)、 ρ_w は水の単位体積質量(g/cm^3)である。乱れ速度 u_{*f} については、江頭ら(1998)が示した間隙流体の乱れに伴う応力の評価法を参考として、次の式で算出した。

$$u_{*f} = \sqrt{K_f} \left(\frac{1-c_e}{c_e}\right)^{\frac{1}{3}} \times d_e \times \left(\frac{du}{dz}\right) \dots\dots (4)$$

ここに、 K_f は係数、 c_e は流動層中の粒子間隙での流体の乱れのスケールを支配する粒子濃度、 d_e は間隙流体の乱れのスケールを支配する固体粒子の粒径 (cm)、 u は平均表面流速 (cm/sec)、 z は有効水深 (cm)である。流動層中においては、粗粒子・細粒土砂ともに固体相として機能するものと流体相として機能するものがあると考えられるが、ここでの解析においては、流動層中では粗粒子群がいわゆるバグノルド配列状でせん断されることを仮定し、粒子間隙における流体の乱れのスケールを支配する固体粒子としては、流動層中の全粗粒子に、固体相として機能する細粒土砂粒子を加えたものとした。また、 du/dz については、本実験の場合、粗粒子の挙動が中立浮遊粒子に近いために、水深方向の流速分布については一様であるとして算出した。土砂礫粒子の沈降速度 $w_0(d)$ については今回は次に示す Rubey の沈降速度式を用いた。

$$w_0(d) = \sqrt{sgd} \times \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sgd^3}} \right) \dots\dots (5)$$

ここに、 ν は水の動粘性係数、 ρ は流体相密度 (g/cm^3)、 d は土粒子の粒径 (cm)、 g は重力加速度であり、 s は $(\sigma - \rho) / \rho$ である。これら一連の式により、流体相密度の推定が可能となる。実験により、流動層中の固体粒子濃度やひずみ速度、間隙流体密度などがわかっているため、それらのデータを用いて唯一の未知数となっている A を逆算する形で検証を行った。図-3は逆算した A の流速係数に対する関係である。ここでの流速係数とは、リング状水路の表面流速を乱れ速度 u_{*f} で除したものを充てている。解析対象とした実験ケースは、表面流速が 70cm/sec.以上で、全固体濃度が 30%以上となる条件のみとした。これは、発生した流れにおいて慣性領域の石礫型土石流と同様の抵抗則が支配的であると思われる条件である。この図より、A は 0.01~0.05 の範囲に分布することがわかり、この結果は西口ら(2012)、長谷川ら(2013)の研究結果と同様の傾向を示している。細粒土砂の粒径ごとに A の分布領域に違いが見られるが、これは用いた沈降速度式が不適切であった可能性が考えられ、Rubey の沈降速度式以外の沈降速度式についても検討する必要がある。

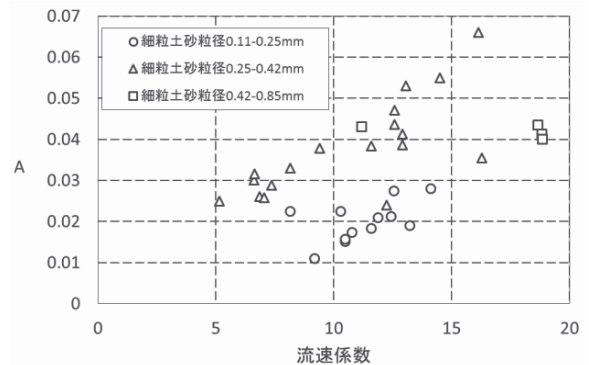


図-3 係数 A と流速係数の関係

参考文献

三好ら(1999)平成 11 年度砂防学会研究発表会概要集, 三好ら(2000)平成 12 年度砂防学会研究発表会概要集, 三好ら (2015) 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, 西口ら(2012)第 6 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 江頭ら(1989)京大防災研年報第 32 号 B-2, 長谷川ら(2013)平成 25 年度砂防学会研究発表会論文集