

1. はじめに

土石流の流動中には流体相が水と細粒土砂から形成されるが、その実態や形成条件などについての知見は十分に得られていない。このような課題の解明を目的として、細粒土砂を含んだ固液混相流を実験的に作り出し、その流体相密度の上昇効果についての検討を進めてきた。ここでは細粒土砂が流体相として機能するための条件について実験的に検討した結果を報告する。

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1m，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。土石流材料は水、粗粒子、細粒土砂の3種類を組み合わせたものとした。粗粒子は $\phi=11\text{mm}$ の球形のプラスチックビーズ（単位体積重量約 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ）である。細粒土砂材料としては標準砂（ $\phi=0.11\sim 0.30\text{mm}$ ）、マサ土をふるい分けることによって粒径を $0.11\sim 0.25\text{mm}$ 、 $0.25\sim 0.42\text{mm}$ 、 $0.42\sim 0.85\text{mm}$ にそれぞれ調整した土砂と珪砂（ $\phi=0.85\sim 2.00\text{mm}$ ）の計5種類と、昨年広島県で発生した土石流災害現場で採取した土砂を用意し、これらの内の1種類または2種類の組み合わせで用いた。実験条件に応じた速さでせん断板を回転させたときの固体粒子の浮遊状況（固体材料の堆積状況）を計測するとともに、水路底面における間隙水圧と底面にかかるせん断応力を読みとった。

3. 結果および考察

水路に水と粗粒子、細粒土砂を入れて強制せん断流を発生させると、固体材料の堆積層からまず比重の軽い粗粒子が浮き上がり、水と粗粒子の固液混相流が発生する。定常状態のとき、流体中で鉛直方向にはせん断力が一定であり、濃度分布に応じた流速分布が発生する。その分布形は表面流速などの条件によって変化するが、ここでは簡単のために濃度分布、流速分布ともに一様であるとして検討を進める。実験の結果、流速を上げていくに従って混相流中に細粒土砂が取り込まれてゆき、底面での間隙水圧が上昇していった。これは、固体粒子が間隙流体の乱れによって浮遊状態となり、その重量が水を介して底面に伝達されたためと思われる。このような固体粒子は周囲との応力伝達が全て水を介して行われており、その意味において流体相を形成する要素と考えられる。図-2は表面流速を有効水深で除した代表ひずみ速度と、流体相密度の関係の一例である。この流体相密度とは、底面で測定された間隙水圧を有効水深で除した値である。この図から、流体相密度はあるひずみ速度で急激に上昇し、そのひずみ速度が細粒土砂の粒径に応じて変わる様子が見られる。このような流体相密度が急激に上昇するときのひずみ速度を限界ひずみ速度と呼ぶこととすると、限界ひずみ速度とは間隙流体の乱れが細粒土砂の浮遊に必要な強さを持つときのひずみ速度であると考えられる。この現象について浮遊砂のメカニズムを参考に考えると、ある粒子が浮遊するために必要な乱れ強さが得られるのは、間隙流体と堆積層表面の間に働く摩擦速度が該当粒子の沈降速度程度になったときと考えられる。今回の実験では堆積層表面に働くせん断応力が十分な精度で計測できなかったために、この両者の関係を調べられなかった。そこでここでは摩擦速度と線形の関係にあると思われるひずみ速度を摩擦速度の指標として用いることとして、ニュートンの式による粒子の沈降速度に対するこの限界ひずみ速度の関係を示したのが図-3である。この図に見られるように、沈降速度と限界ひずみ速度は線形関係にあると思われ、その傾きを決めてやることによって、任意の細粒土砂が流体相化するために必要なひずみ速度がわかることになる。さらに、図-4は細粒材料として2種類の粒径階の細粒土砂（標準砂 $0.42\sim 0.85\text{mm}$ 混合したもの）を用いた実験結果の一例である。細粒土砂に2種類の粒径階を用いた場合には、大きい方の細粒土砂に対する限界ひずみ速度が小さい方の細粒土砂の

含有量に応じて小さくなる傾向がある。この傾向は、小さい方の細粒土砂がより小さいひずみ速度で浮遊・拡散したことによる流体相の物性変化を反映したものと考えられる。この詳細なメカニズムについては未だ不明であるが、その効果をデータから読みとって実験式化することによって、細粒土砂が混合粒径であるときの流体相密度の上昇量をひずみ速度から推定することができる。このような考え方の応用として、昨年広島県で発生した土石流災害現場で採取した現地材料を細粒材料として用いた実験を行い、その実測値と推定値を比較したのが図-5である。混合粒径条件であることを考慮した推定式による計算結果が、実測値をほぼ再現できている。この方法は構築途中で実験式を用いているためにその一般性については今後確認していく必要があるが、土石流の流体相密度を推定するための一つの道筋を示すものと思われる。

4. まとめ

ここでの検討により、細粒土砂を含んだ固液混相流の流体相密度上昇について、細粒土砂の粒径とひずみ速度との関係からその条件を明らかにすることができた。しかし、論理構成の一部においてメカニズムが未解明であるためのブラックボックス的な部分が含まれており、全容を解明するにはまだ課題を残している。今後はさらにその詳細なメカニズムについての検討を加えることによって、より合理的な流体相密度の推定手法を構築するとともに、土石流の流体相が持つ機能についての検討を進めていきたい。

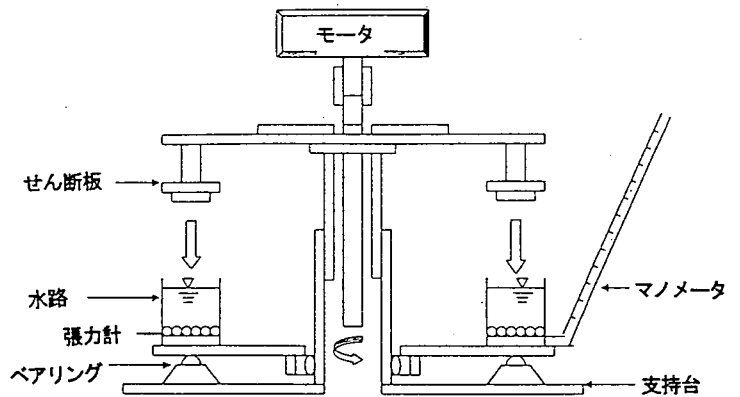


図-1 実験装置の概要

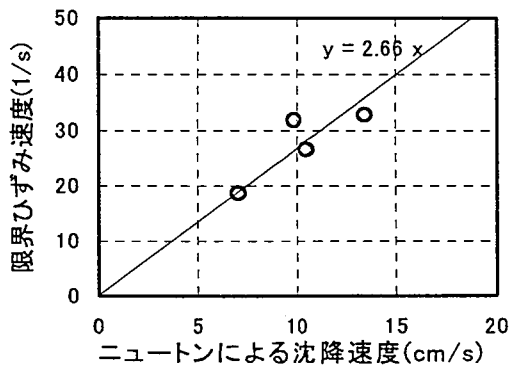


図-3 沈降速度と限界ひずみ速度の関係

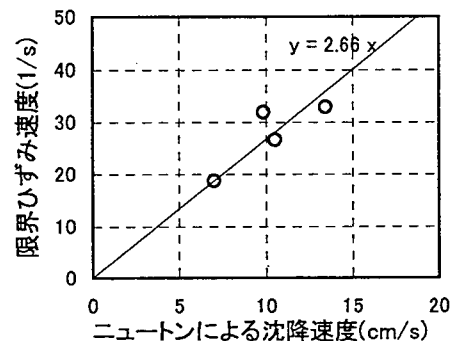


図-3 沈降速度と限界ひずみ速度の関係

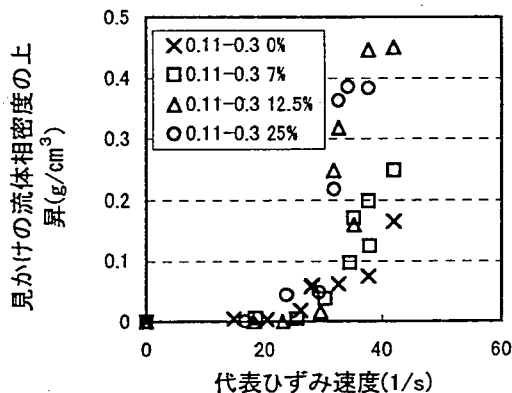


図-4 細粒土砂に二粒径を用いた場合のひずみ速度と流体相密度上昇の関係 (0.11-0.3と0.42-0.85の混合粒径)

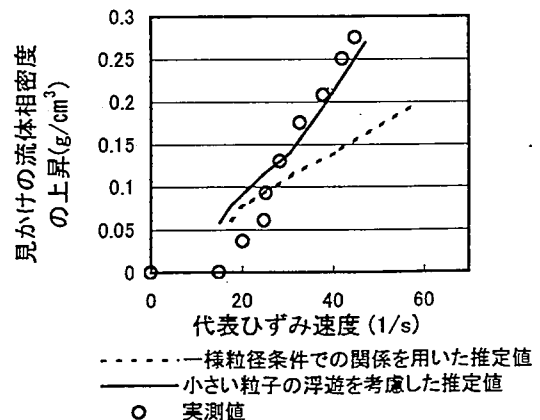


図-5 災害現場で採取した土砂を細粒土砂材料とした実験結果と推定値の比較