

### 3 固液混相流における過剰間隙水圧発生機構の考察

東京大学大学院 ○堀田 紀文  
東京大学大学院 太田 猛彦

#### 1. はじめに

土石流、掃流状集合流動等の固液混相流体の構成則は江頭等<sup>1)</sup>によって

$$\tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f \quad (1) \quad p = p_s + p_d + p_w \quad (2)$$

と与えられている。ここで両式の第1項は粒子のクーロン力による項で、第2項は粒子の非弾性衝突による項である。第3項は(1)式では間隙流体の乱れによって生じるせん断力であり、(2)式では間隙水圧で静水圧とおかれている。(1)式における $\tau_d$ 、 $\tau_f$ が流動に関与すると考えられ、 $\tau_d$ については実験的に確認されている<sup>2)</sup>が、 $\tau_f$ についてはまだ確認されていない。ここで $\tau_f$ は乱れによって生じるレイノルズ応力であり、レイノルズ応力は圧力としても存在するはずであるから、静水圧とおかれている間隙水圧 $p_w$ 中にもレイノルズ応力成分 $p_f$ が存在し、 $p_w$ は静水圧とはおけないはずである。また、乱流場が等方に近いと考えられるならば $p_f$ を測定することによって $\tau_f$ の挙動についても知ることが出来る。

固液混相流における間隙水圧の測定は、定常状態の実現が難しく測器への粒子の衝突の影響が大きいために通常の実験水路では困難であるが、著者らは新たな実験装置として回転円筒水路を製作して、間隙水圧が静水圧より大きな値を取ることを確認している<sup>3)</sup>。本研究ではそこで得られた実験結果の詳細な検討を行い、併せて新しい実験装置の適用範囲について考察した。

#### 2. $p_f$ についての考察

間隙水圧の静水圧からの上昇がレイノルズ応力によるものだとすれば、静水圧からの上昇分を $p_f$ としたとき、プラントルの混合距離仮説によって

$$p_f = \overline{\rho u' u'} = \rho l^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \quad (3)$$

と表される。ここで $\rho$ は間隙流体の密度、 $l$ は混合距離である。このような固液混相流での混合距離は粒子に規定されると考えられて、粒子濃度一定とすれば粒径 $d$ 、係数 $\alpha$ を用いて

$$l = \alpha d \quad (4)$$

と表すことができる。流速 $u$ が固定床における土石流の典型的な流速分布である3/2乗則に従うとするならば、平均流速 $u_m$ を用いて式(3)は

$$p_f = \alpha^2 \rho \frac{25u_m^2}{4h^2} d^2 \left( 1 - \frac{y}{h} \right) \quad (5)$$

となる。 $h$ は水深、 $y$ は路床からの距離である。式(5)から $p_f$ は水面から路床に向かって直線的に増加していくことが分かる。また粒径と平均流速の2乗に比例する。

#### 3. 実験と結果

図1に示す幅4cm直径20cmの回転円筒水路を製作し、試料として粒径1~6mmのガラスビーズ50cm<sup>3</sup>を水130cm<sup>3</sup>と混合させたものを用いて実験を行った。まず、画像解析によって流速分布が3/2乗則とみなせることを確認した後、間隙水圧の静水圧からのずれである過剰間隙水圧の水深方向の分布をピトー管で測定した。その分布形を示したものが図2で

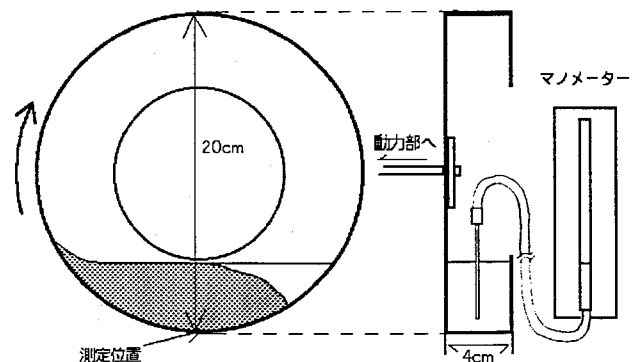


図1 実験装置

あり、分布形がほぼ直線であること、流速が大きくなると過剰間隙水圧も大きくなること分かる。これは上での  $p_f$  についての考察と一致する。ところが、過剰間隙水圧増大の傾きを粒径別に比較すると、図3のように粒径が小さいほど傾きが大きくなるという、式(5)とは逆の結果を示すことが明らかになった。

#### 4. 考察

得られた結果から、レイノルズ応力以外の機構による間隙水圧上昇が生じていると考えられる。考えられる要因としては

- ・遠心力による間隙水圧上昇
- ・実際の水路とは異なる条件のために生じる内部流による圧力勾配の発生

が挙げられる。共に回転円筒水路特有の要因である。前者については場の力であり、粒径の違いによって生じる間隙水圧上昇の違いには無関係な筈であるから今回は考慮しない。

後者については、通常の水路実験では粒子と水との間に相対速度差はないとされるが、本研究で用いた回転円筒水路では実際に粒子流後部で水と粒子の相対速度差があり、圧力勾配が生じていると考えられる。単純に、粒子が水中を運動する際に受ける抗力の線形和から圧力勾配を、濃度  $c$  としてストークスの抵抗法則によって求めると

$$\frac{dp}{dy} = -\frac{3}{4} c C_D \rho U_0^2 \frac{1}{d} = -18c\mu U_0 \frac{1}{d^2} \quad (6)$$

となる。ここで  $C_D$  は粒子の抵抗係数、 $\mu$  は間隙流体の粘性係数、 $U_0$  は粒子と水との速度差である。または、多孔質内の流れと考えると、ダルシー則にポアズイユ流れの考えを適用して圧力勾配を求めると

$$\frac{dp}{dy} = -\frac{\mu(1-\lambda)^2}{\beta\lambda^3} U \frac{1}{d^2} \quad (7)$$

となる。 $\lambda$  は空隙率、 $\beta$  は補正係数、 $U$  は浸透速度である。(6)(7)式共に負となっているのは原点を路床にとってあるからである。両式を式(5)を  $y$  で微分して得られる圧力勾配と比較すると、粒径の2乗に反比例するという部分で大きく異なり、図3の、粒径が大きくなるにつれて圧力勾配が小さくなるという現象が表現されている。しかしながら、式(6)(7)に従えば粒径が大きくなるにつれて圧力勾配は急激に0に漸近するはずであるが、図3においては、僅かではあるが粒径6mmのケースで増加している。この部分がレイノルズ応力による圧力上昇の成分であると考えられる。さらに、江頭等による  $\tau_f$  の理論式に今回の実験条件をあてはめて解いたものを図3に示してあるが、粒径6mm付近において実験値とほぼ一致していることもこれを支持する。

#### 5. おわりに

土石流等の固液混相流における間隙水圧は乱れによって静水圧より大きくなっている。回転円筒水路を用いれば実験的に測定でき、その挙動についても把握することが出来るが、内部流による圧力勾配も存在するために実験にはある程度以上の粒径の粒子を用いる必要がある。

#### 参考文献

- (1) 江頭、宮本、伊藤：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集第41巻，1997，pp. 789-794 (2) 宮本：Newton 流体を含む粒子流の流動機構に関する基礎的研究，立命館大学学位論文，1985，pp. 39-72 (3) 堀田、権田、鈴木、太田：固液混相流における間隙水圧分布，平成8年砂防学会研究発表会概要集，pp. 155-156

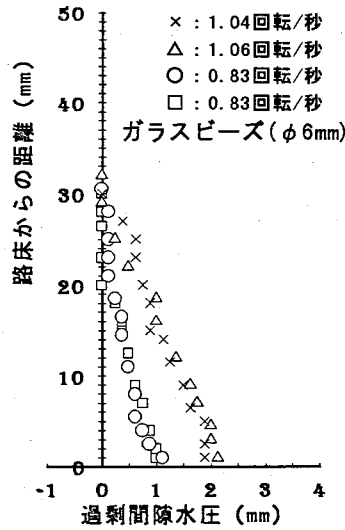


図2 過剰間隙水圧分布

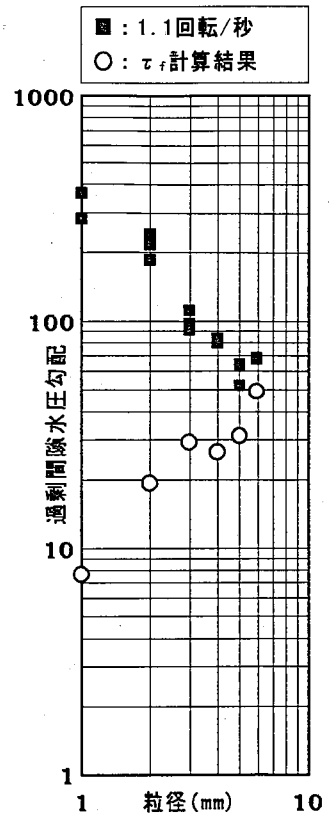


図3 過剰間隙水圧勾配