

78 固液混相流における間隙水圧分布

東京大学農学部 ○堀田 紀文・権田 豊・鈴木 雅一・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¹⁾によって

$$\tau = \tau_y + \tau_g + \tau_f \quad (1) \quad p = p_s + p_d + p_w \quad (2)$$

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)式では間隙水圧で乱れは考慮されず静水圧とおかれている。土石流の応力構造を解明するために検討が必要だと考えられる間隙水圧は石川等²⁾によって測定され、急勾配水路で静水圧より大きくなるという結果が得られているが他にほとんど測定例はない³⁾。これは水路実験では定常状態を作り出すことが難しく、測器への粒子の衝突の影響も大きいことなどの為でもある。本研究では三好等によって考案された回転流動装置⁴⁾を参考にして新たに実験装置を製作し、この間隙水圧の分布をいくつかのケースについて測定して静水圧より大きくなることを確かめ、測定結果に検討を加えた。

2. 実験

幅4cm、直径20cmのアクリル製円筒を動力装置に連結し、回転円筒水路を製作した(図1)。この水路に水と粒子を混合したものを入れ、円筒を一定速度で回転させることによって定常な流動状態をつくり出した。実験では、

- ・比重約1.3、直径約4mmのプラスチックビーズ
- ・比重約2.6、直径約1.4, 5mmの3種類のガラスビーズ
- ・比重約1.02、直径約6mmのポリプロピレンビーズ(中立粒子)

を用い、円筒の回転速度を段階的に変えて間隙水圧(水頭)の水深方向の分布を測定した。間隙水圧の測定には自作のピトー管と傾斜マンオメーターを用いた。また、プラスチックビーズと中立粒子については同時にビデオ撮影も行い、流速分布を求めた。

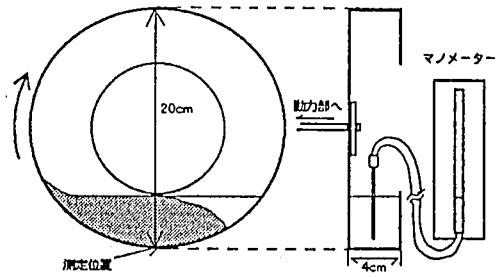


図1 実験装置

3. 実験結果

図2にプラスチックビーズと中立粒子を用いた場合の流速分布を無次元化して示す。実線は土石流の典型的な流速分布である3/2乗則である。回転円筒水路を用いた実験でもプラスチックビーズの場合は土石流と同様の流速分布をしていることが分かる。しかし、中立粒子では流速分布は3/2乗則にのらなかった。

間隙水圧に関して、プラスチックビーズの結果を図3に、中立粒子の結果を図4に示す。プラスチックビーズでは間隙水圧は水面(界面)から路床に向かっていくにつれて静水圧より大きくなっており、従来間隙水圧として仮定されてきた静水圧からのずれが見られた。間隙水圧の静水圧より上昇する値が小さいときには上昇分は直線的に増加するが、大きくなると路床近くで傾きが小さくなる。石川等の実験では路床近傍で静水圧からの上昇分が減少したが本実験では顕著な減少は見られなかった。ガラスビーズでも、プラスチックビーズに比べて値は小さいが同様な傾向が見られた。しかし、中立粒子では条件を変えても間隙水圧はほぼ静水圧と同じ値をとった。プラスチックビーズとガラスビーズについて実験条件を変化させた結果明らかになったこととして

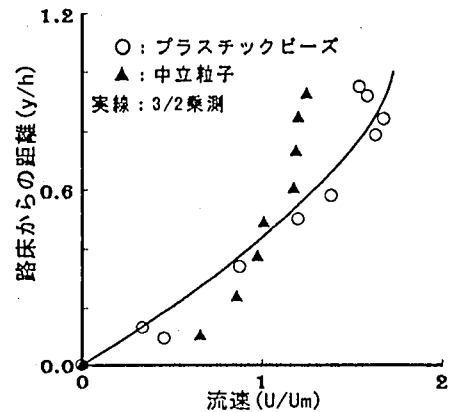


図2 流速分布

①円筒の回転速度が大きくなると間隙水圧も上昇しその分布形も変わる。
②比重の小さな粒子のほうが間隙水圧が大きい。
③粒子径が大きい方が間隙水圧が大きい。

ことが挙げられる。また、①で回転速度が大きくなると粒子は流動層全体に分散し、②で同じ流速では比重の小さな粒子の方が流動層全体に分散するという観察結果と③から
○粒子の間隙が大きくなると間隙水圧の静水圧からの上昇が大きくなる。
ということも考えられる。

4. 実験結果の検討

間隙水圧が静水圧より大きくなる原因として考えられるのは

- ①間隙流体の乱れによるレイノルズ応力の発生
- ②骨格応力の解放による流体の見かけの密度上昇
- ③実際の水路とは異なる条件のために発生する内部流による圧力勾配

などであるが、③についてはアルミ粉を用いて流れの可視化を行っても内部流は観察されなかったので今回は考慮に入れる必要がないと判断した。中立粒子で圧力の上昇が見られないことは②を支持するが、同じ比重でも粒径が大きい（間隙の大きい）場合に圧力上昇が顕著なこと、同じ粒径では間隙の大きくなる比重の小さな粒子で圧力が大きくなる事は①を支持する。

ここでは、中立粒子の流速分布が3/2乗則にのらなかつたことから、流速分布を決定する応力構造が中立粒子の実験では土石流と異なると考えて除外し、土石流型の流速分布を示したプラスチックビーズとガラスビーズについて、①のように乱れによるレイノルズ応力により間隙水圧の上昇が生じるものと仮定して考察をすすめる。このとき上昇分を p_f とすると間隙水圧は $p_w + p_f$ と表され、 p_f は Prandtl の混合距離仮説によって

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

と表される。但し、 y は路床から鉛直方向の高さ、 ρ は水の密度、 u' は流速の乱流成分、 l は乱れの混合距離である。

ここで混合距離 l が粒子の間隙の大きさに規定されると考える。観察結果から回転速度の比較的小さい場合に粒子は層流状に流動しており、間隙の大きさが流動層全体にわたってほぼ一定であるとみなせる。この時、 l を一定として上式を解くと p_f の分布形は路床に向かって増大する直線分布となる（図5(a)）。次に、回転速度をあげた場合や比重の小さい粒子を用いた場合に観察される、上層での粒子の分散による間隙の増大を考慮して l の分布を与えて上式を解くと、路床近くで傾きが減少する曲線となり（図5(b)）、 l が増大するにつれ路床近傍で減少するようになる（図5(b)）。(a)(b)は図3に示された間隙水圧の静水圧からの上昇分の分布形に合っており、(c)は石川等の実験における路床近傍での減少に対応する。

p_f が乱れによって生じているならば、その値は τ_f と同程度になるはずである。江頭等の式で τ_f を計算すると $\tau_f = 3 p_f$ となって、剪断力と圧力の違いや実験装置の違いを考慮すると妥当であるといえる。

5. まとめ

作製した回転円筒水路によって固液混相流の間隙水圧いくつかのケースについて測定し、固体の比重が1より大きければ間隙水圧が静水圧より大きな値をとること、条件により値、分布形が変化することを示した。また、静水圧からの上昇が乱れによるものだとすれば分布形が説明でき、値も妥当なものとなる。

参考文献

- 1) 江頭、芦田、矢島、高濱：土石流の構成則に関する研究，京大防災研年報，32号B-2，1989，pp. 487-501
- 2) 石川、前田、高濱：掃流状集合流動に関する実験的考察，平成7年砂防学会研究発表会概要集，pp. 317-322
- 3) 高橋、藤井：土石流の流動機構，第16回自然災害科学総合シンポジウム，1979，pp. 219-220
- 4) 三好、小橋、鈴木：回転流動装置による混相流実験，平成元年砂防学会研究発表会概要集，pp. 295-298

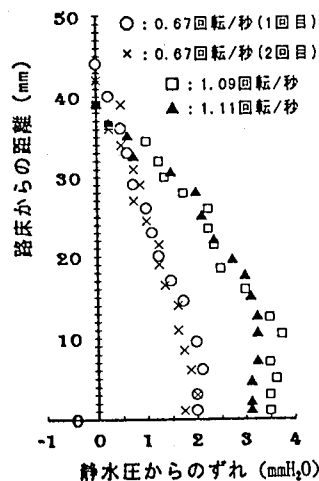


図3 プラスチックビーズの間隙水圧分布

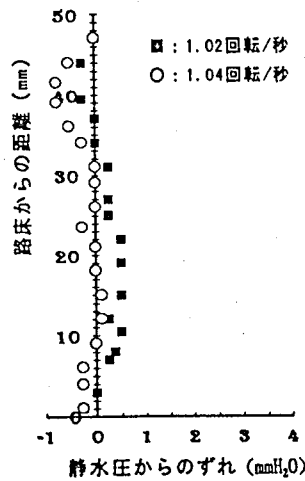


図4 中立粒子の間隙水圧分布

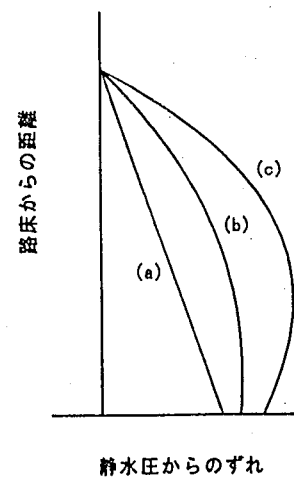


図5 レイノルズ応力の分布形