

16 液固混相流体のせん断試験

筑波大学農林学類 ○水野正樹
 建設省土木研究所 石川芳治、小泉豊
 河川情報センター 井良沢道也
 筑波大学農林工学系 天田高白

1. はじめに

土石流は、山地の溪流に発生して下流に流下・堆積し、周囲の人命、施設、自然環境などに大きな被害を与える。この土石流は流体力学的には水と砂礫の混じった液固混相流と考えられる。

現在、土石流の流動の説明に一般的に用いられている高橋による式¹⁾は、「高濃度に粒子を含む流れでは、衝突など粒子同士が影響を及ぼし合い、それが流れ全体の機構に対して重要な役割を演ずる」と考えた Bagnold のダイラタント流体の理論を基礎としている。

しかしながら Bagnold のダイラタント流体の理論の根拠となっているのは、小型の回転式せん断抵抗試験装置を用いた試験結果である。一方、実際の土石流は水と粘土と砂と砂礫と巨礫が混合して流れる流体であることを考えると、Bagnold の試験結果をそのまま土石流の説明に使うことには疑問が残る。すなわちダイラタント流体の理論を土石流の運動にあてはめて適切に利用するためには Bagnold の試験をより土石流に近い状態で広範囲に検証する必要があると考える。

そこで、Bagnold の用いた回転式せん断抵抗試験装置を大型化して、遠心力による影響を少なくすると共に、より大粒径の粒子を用いることができる「高濃度流体せん断試験装置」²⁾を用いることにより、Bagnold の試験を検証 (Bagnold Number と $\Delta T / \Delta P = \tan \alpha$ の関係について試験して検証) することを目的として試験を行ったので報告する。

2. 試験方法

2.1 高濃度流体せん断試験装置の概要

表一 Bagnold の試験装置と高濃度流体せん断試験装置との比較

2.1.1 本装置の主な仕様と特徴

高濃度流体せん断試験装置は Bagnold の用いた試験装置と比較して①円筒の直径が大きい (大きい粒子を使用することができる) ②遠心加速度が小さい (粒子に働く遠心力が小さい) ③大きい Bagnold Number が得られる (実際の土石流に近い) ことが特徴である。

項目	Bagnold の試験装置	高濃度流体せん断試験装置
1. 外筒直径 (cm)	14.4	48.8
2. 内筒直径 (cm)	9.24	38.4
3. 内外筒深さ (cm)	5	30.6
4. 回転数 (回転/分)	最大 516	最大 60
5. 外筒速度 (m/sec)	最大 3.0	最大 1.53
6. 遠心加速度 (m/sec ²)	最大 166.3	最大 9.86 ^{3/8}
7. 粒子の径 (cm)	0.132	1.495
8. 粒子の比重 (gf/cm ³)	≒ 1.000	1.019
9. Bagnold Number	最大 1,600	最大 35,000
10. 粒子の材質	ワックス球	プラスチック球

2.1.2 本装置の構造と測定装置

本装置 (図一 1) において粒子を含む流体の試料は、外筒と内筒の間の空間の部分にいれる。外筒はモーターにより 0~60 回転/分で回転するが、内筒は回転しない。したがって外筒と内筒の間でせん断が生じることとなる。内筒の表面にはゴム膜が張られている。

粒子間の接触によって内筒の表面に働く垂直力 ΔP は、ゴム膜を通して内筒の中の水に伝えられる。そしてこの水圧が圧力検出器によって検出される。さらに、この水圧を別に付けたマンローメータの読みとして記録した。

今回使用している圧力測定器の精度に限界があるためにマンローメータの読みの値を ΔP 算定の採用値とした。

ゴム膜に働くせん断

力 ΔT は、内筒を介してトルクとなりトルク検出器により検出される。

制御部においては、内筒内の圧力、内筒に働くトルク、および外筒の回転数が表示される。外筒は透明アクリル製で粒子の挙動が外から観察できる。また、上蓋はアルミニウム製である。

測定装置として、回転数の測定に電磁式回転検出器、内筒圧力の測定にストレインゲージ式圧力検出器及びマンローメータ、内筒トルクの測定にストレインゲージ式ロードセルを用いた。

2.2 試験条件

表-2に示す10種類のせん断試料を用い、外筒の回転数としてそれぞれ10, 20, 30, 40, 50, 60回転/分の条件で試験を行った。なお、塩水の比重はプラスチック球の比重(1.019)と同じとした。

2.3 解析方法

測定したデータから ΔT と ΔP を計算し、さらにBagnoldの示した次の式³⁾を用いて解析した。

$$\Delta P = a_1 \cdot \cos \alpha \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot d^2 \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \dots\dots(1)$$

$$\tan \alpha = \frac{\Delta T}{\Delta P} \dots\dots(2)$$

$$N = \frac{\lambda^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma \cdot d^2 \cdot \frac{du}{dy}}{\eta} \dots\dots(3)$$

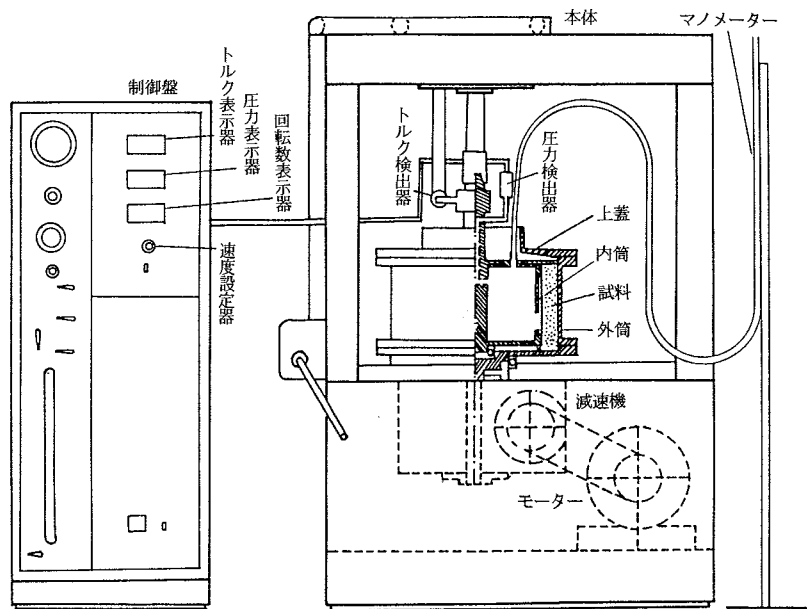


図-1 高濃度流体せん断試験装置の概要図

表-2 試験に用いた試料条件

用いた流体	プラスチック球の体積濃度
水	0%, 40%, 50%, 55%, 57.5%
塩水	0%, 40%, 50%, 55%, 57.5%

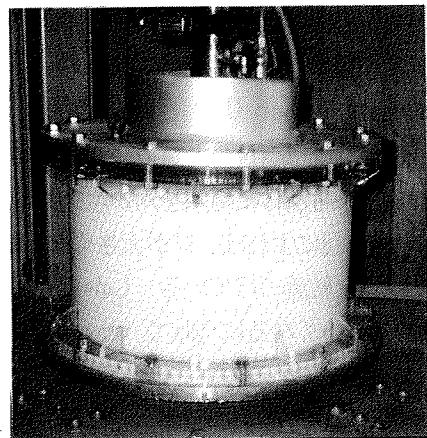


写真-1 高濃度流体せん断試験装置

なお、

$$\lambda = \left\{ \left[\frac{C_*}{C_a} \right]^{\frac{1}{3}} - 1 \right\}^{-1}$$

ここで、 ΔP は垂直応力、 ΔT はせん断応力、 α は粒子の接触にもたらされる動摩擦角であり、 σ は粒子の密度、 λ は線形濃度、 d は粒子の粒径、 u は壁面から距離離れた位置の流速、 du/dy は流体のせん断速度、 $\tan \alpha$ は動摩擦係数、 η は流体の動粘性係数、 C_* は最大粒子濃度(74%)、 C_a は粒子濃度である。 a_1 は係数で Bagnoldによれば $\lambda > 0.071$ の範囲で一定値0.042をとる。この a_1 は高橋による土石流の流動式¹⁾に用いられている。 N は Bagnold Number³⁾で濃度と速さの関数である。

3. 試験結果及び考察

(1) 垂直応力とせん断応力

図-2と図-3には、塩水を用いた場合の内筒に作用する垂直応力(ΔP)とせん断応力(ΔT)と Bagnold Numberの関係を示す。

(2) 水流体の条件と塩水流体の条件との違い

図-4, 5より流体に水を用いた場合の方が塩水を用いた場合に比べ $\tan \alpha$ が大きい。また、流体に水を使った場合では、プラスチック球の体積濃度40%条件の時に ΔP がマイナスを示している。これは、プラスチック球粒子の比重が水より大きいので、外筒の回転時に粒子が遠心力によって外側に偏って外筒に押しつけられ、粒子の内筒壁への衝突回数が塩水の条件に比べ少なくなり、粒子による内筒への垂直力が小さくなっているためと考えられる。いずれにしても流体に水を用いると、プラスチック球との比重差が出て水とプラスチック球が均一に混合されないで、流体に水を用いた結果と Bagnoldの結果を単純に比較することは適当でない。

(3) Bagnold Number (N) と $\tan \alpha$ の関係

Bagnold Number (N) と $\tan \alpha$ の関係の解析には、上記の理由から流体に塩水を用いた条件の結果を用いた。

Bagnoldによれば、 N が大きくなるにつれて $\tan \alpha$ が小さくなり、 $450 < N$ の時に $\tan \alpha = 0.32$ で一定になると結論づけている。しかし今回の試験では逆に、図-5に示すように全体的には Bagnold Numberが大きくなるにつれて $\tan \alpha$ が大きくなっている。さらに、プラスチック球の体積濃度により $\tan \alpha$ が変化しているので、Bagnold Numberのみからは、 $\tan \alpha$ が特定されないと言える。

プラスチック球濃度40%の条件では、Bagnold Numberが大きくなるにつれて $\tan \alpha$ が大きくなっている。しかし最大粒子濃度に近いプラスチック球濃度57.5%の条件では、Bagnold Numberの変化によ

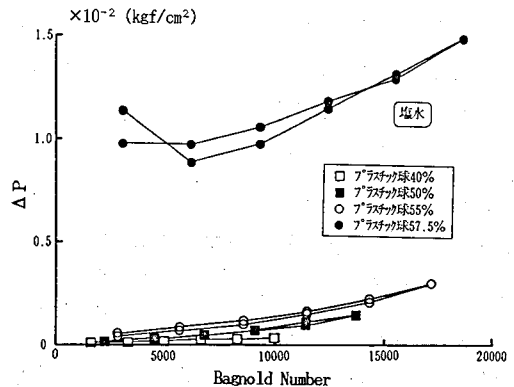


図-2 ΔP とBagnold Numberの関係 (流体は塩水)

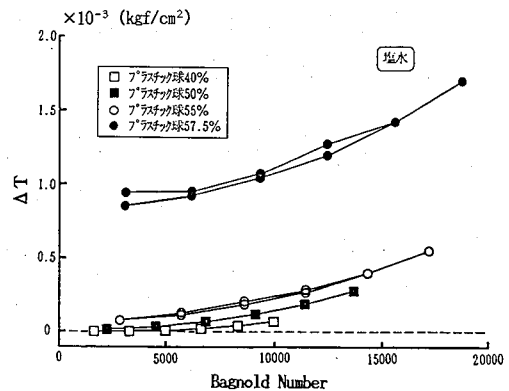


図-3 ΔT とBagnold Numberの関係 (流体は塩水)

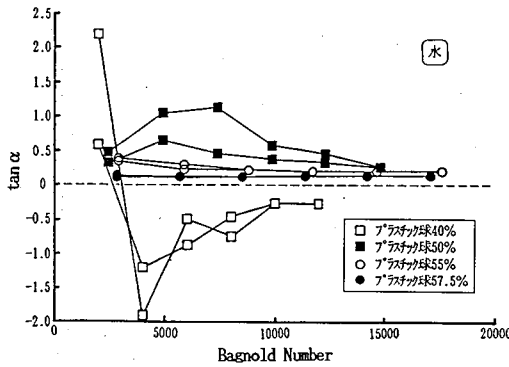


図-4 $\tan \alpha$ とBagnold Numberの関係 (流体は水)

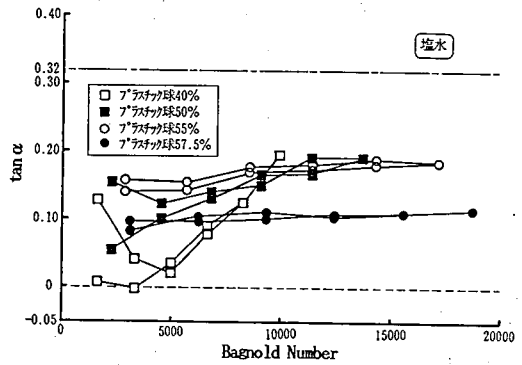


図-5 $\tan \alpha$ とBagnold Numberの関係 (流体は塩水)

らず $\tan \alpha$ の値がほぼ一定である。このことから、粒子濃度が高くなるにつれて Bagnold Numberの変化に伴う $\tan \alpha$ の変化の割合が小さくなり、最大粒子濃度に近い57.5%になると $\tan \alpha$ は一定の値を示すようになると思われる。これは、これまで数多く試験のなされているリングせん断試験等による土のせん断試験の結果である「垂直力とせん断抵抗力の比である $\tan \phi$ はせん断速度にかかわらずほぼ一定である」という結果⁴⁾と一致する。

4. まとめ

大型の回転式せん断試験装置を用いて Bagnoldの試験を検証したが、今回得られた結果は Bagnoldの試験結果と大きく異なることとなった。すなわち粒子の濃度が最大粒子濃度に近い場合には、液固混相流の動摩擦係数はほぼ一定となり、粒子の濃度が最大粒子濃度よりもかなり小さい場合には、せん断速度が増加すると動摩擦係数も大きくなる傾向があることが確認された。また今回の試験では、Bagnoldの提案した a_1 の値よりもかなり小さな値を得た。今後は、さらに試験精度を向上させると共に、試験条件を変化させて液固混相流の流動機構を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号 B-2，pp.405~435，1977
- 2) 石川芳治，水山高久：高濃度流体せん断試験装置の試作，平成元年度砂防学会研究発表会概要集，pp.303~306，1989
- 3) Bagnold, R.A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Royal Soc. London. Proc., Ser. A., Vol. 225, pp. 49~63, 1954
- 4) Vibert C., 佐々恭二，福岡浩：粒状体の高圧高速リングせん断特性，平成元年度砂防学会研究発表会概要集，pp.93~96，1989

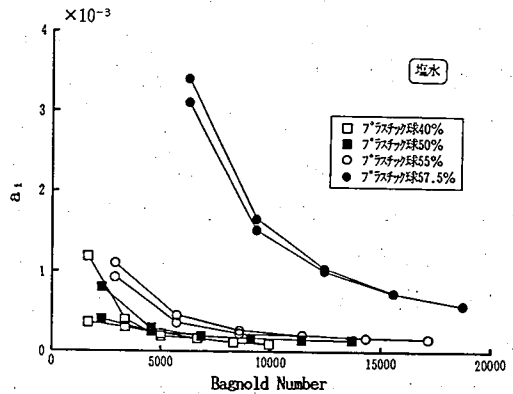


図-6 a_1 とBagnold Numberの関係 (流体は塩水)