

1. はじめに

現在、土石流の流動を説明する式として、Bagnoldの示したダイラタント流体の理論を発展させた高橋による式が用いられている。Bagnoldのダイラタント流体の理論は、Bagnoldの行った小型の回転式せん断抵抗試験機を用いた実験結果を根拠にしている。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の実験結果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られる。今回、Bagnoldの実験結果をより土石流に近い状態で検証する目的で「高濃度流体せん断試験装置」を試作したので紹介する。

2. 試験装置試作の背景

2. 1 Bagnoldの実験

Bagnold(1954)¹⁾は、図-1に示すような回転式せん断抵抗試験機により流体中の粒子がせん断に及ぼす影響を実験し、その機構について研究した。実験に用いた液体は水であり、粒子には直径1.32mmで比重がほぼ1.0のワックスを塗布した球を用いた。図-1の試験機においてBagnoldは外側の円筒を回転させて内側のゴム張りの円筒に働く垂直応力Pとせん断抵抗力Tを測定した。

この実験により、Bagnoldは次のような結論を得た。

- (1) 液体中の粒子は粒子同士の接触により内側の円筒の壁面に対して次式で示す垂直力P (Bagnoldはこれをdispersive pressureと呼んだ) とせん断力Tを生ずる。

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

$$T = P \cdot \tan \alpha \dots (2)$$

ここに、 a_i は係数でBagnoldによれば $\lambda = \{ (C./C_d)^{1/3} - 1 \}^{-1} > 0.071$ の範囲で一定値0.042をとる。なおC.は最大粒子濃度(土石流では堆積層の砂礫の容積濃度)である。 α は粒子の接触によりもたらされる動摩擦角に相当するものであり、 $\tan \alpha$ は動摩擦係数に相当するものでgrain stress ratioと呼ばれている。 σ は粒子(砂礫)の密度、 d は粒子の粒径、 u は壁面から距離 y 離れた

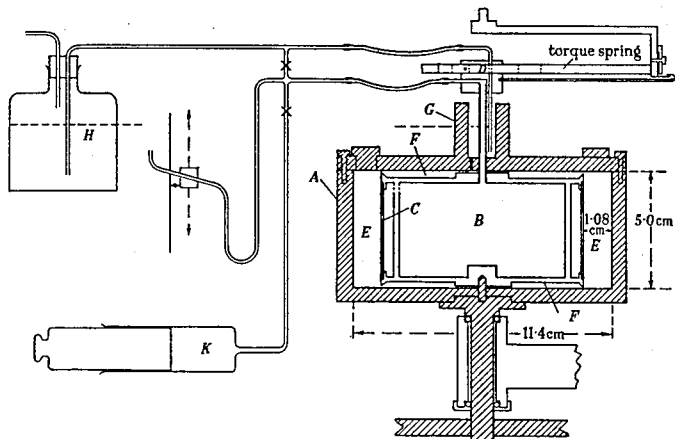


図-1 Bagnold の用いた回転式せん断抵抗試験機
(斜線の部分は回転する部分である)

位置での流速で、 du/dy は流体のせん断速度である。

(2) $T/P = \tan \alpha$ とすると T と P との間には次のような関係がある (図-2)²⁾。

① 高速、高濃度の状態 (inertial range) ($N > 450$) では $\tan \alpha = \text{const.} (= 0.32)$

② 低速、低濃度の状態 (viscous region) ($N < 40$) では $\tan \alpha = \text{const.} (= 0.75)$

③ ① ② の中間領域 (transition region) ($40 < N < 450$) では $\tan \alpha$ は 0.32 から 0.75 に変化する。

ここに、 N は Bagnold Number と呼ばれるもので

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

また、 η は液体の動粘性係数である。

2. 2 高橋による土石流の流動式への応用

高橋 (1977)³⁾ は、前述した Bagnold のダイラタント流体の理論を用いて定常状態における土石流中の土砂濃度および流速分布を与える次式を得た。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \alpha - \tan \theta)} \dots\dots\dots (4)$$

$$u = \frac{2}{3d} \left[\frac{g \sin \beta}{a_r \sin \phi_r} \left\{ C_d + (1 - C_d) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right\} \left\{ h^{3/2} - (h - y)^{3/2} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ は水の密度、 θ は河床勾配、 h は土石流の流動深、 u は底面から高さ y における速度、 β は土石流表面の勾配である。現在この高橋の式は土石流の流下堆積機構の説明に広く用いられている。

3. 試験装置の目的

前述したように、現在一般的には、土石流は Bagnold の示したダイラタント流体理論を基礎として説明されているが、そのダイラタント流体の論理的根拠となっているのは 2. 1 で述べた Bagnold の実験結果である。しかしながら、Bagnold の実験では水の中に浮く直径わずか 1.32mm のワックス球を用いており、一方、実際の土石流は水と粘土-砂-砂礫-巨礫が混合して流れる流体であることを考えると Bagnold の実験結果の土石流への適用についてはさらに検討する必要があるといえる。

このような目的で、今回、図-1 に

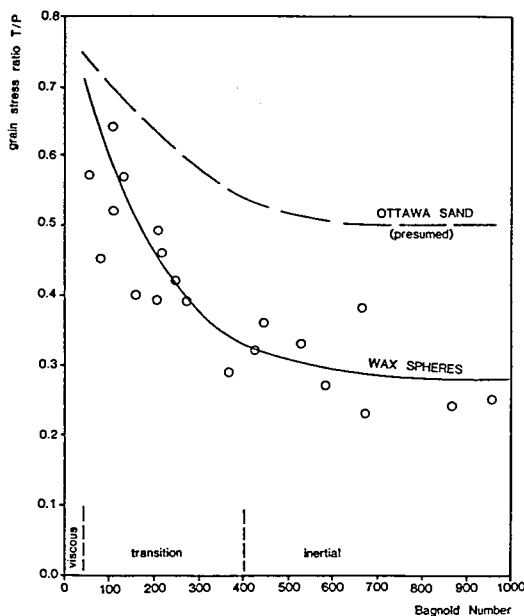


図-2 Bagnold Number と grain stress ratio T/P
(Hung, 1981 による)

示すBagnoldの用いた回転式せん断抵抗試験機を大きくすることにより、遠心力による影響を少なくするとともに、より大きな直径の（実物に近い）粒子を用いることができ、さらに現実の土石流に近い大きなBagnold Numberを得ることができる「高濃度流体せん断試験装置」を製作した。

本試験装置を用いて行われる予定の主な検討項目は以下の通りである。

- ① Bagnold Numberと $T/P = \tan \alpha$ の関係
- ② 係数 a_i の値
- ③ ①と②の粒子の材質による影響
- ④ ①と②の粒子の粒度分布による影響

4. 高濃度流体せん断試験装置の概要

4. 1 本装置の主な仕様と特徴

高濃度流体せん断試験装置の外観及び概略の構造を図-3に示す。主な仕様をBagnoldの試験装置と比較したものを表-1に示す。高濃度流体せん断試験装置はBagnoldの用いた実験装置と比較して①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）ことが特徴と言える。

4. 2 本装置の構造

本装置において粒子を含む流体の試料は外側の円筒Aと内側の円筒Bの間の空間Eの部分に入れる。モーターにより外側の円筒Aは0～1回転/secで回転するが内側の円筒Bは回転しない。従って外側の円筒Aと内側の円筒Bの間で流体のせん断が生ずることとなる。内側の円筒BのEに接する表面にはゴム膜Cが張られており、粒子間の接触によってゴム膜Cに働く垂直応力Pは内側の円筒Bの中にある液体（水）に伝えられ、この水圧が圧力検出器により検出される。また、ゴム膜Cに働くせん断力Tは内側の円筒Bを介してトルクとなりトルク検出器により検出される。なおE内に入れられた試料である液体や粒子が流れ出さないように、またAとBの接触により回転時に大きな摩擦抵抗力が生じないように外側の円筒Aと内側の円筒Bの接触面には滑らかな回転ができる特殊なシール材が用いられている。制御部においてはB内の圧力、Bに働くトルクおよびAの回転数が表示される。さらに、BおよびE内への給水のために給水および圧力負荷装置が装備されている。

表-1 Bagnoldの用いた実験装置と高濃度流体せん断試験装置の比較

項 目	Bagnoldの用いた実験装置	高濃度流体せん断試験装置
1. せん断シリンダー外径	0.144 m	0.5 m
2. せん断シリンダー内径	0.0924 m	0.4 m
3. せん断シリンダー深さ	0.05m	0.25m
4. 回転数（最大）	8.6 回/sec	1 回/sec
5. 速度（外筒）	最大 3 m/sec	最大 1.6 m/sec
6. 遠心加速度	最大 166.3 m/sec ²	最大 9.86 m/sec ²
7. 粒子の径	0.132 cm	最大 1 cm
8. Bagnold Number	最大 1,600	最大 5,300
9. 粒子の材質	ワックス球	ナイロン球、砂礫

（実際の土石流では
 $V=10$ m/s, $h=2.5$ m
 $d=0.5$ m とすると
 $N=8,600,000$ ）

4. 3 本装置を用いた場合の試験方法

外側の円筒Aが回転する時に計測されるトルクの発生原因となる力は (a) 円筒の軸受け等の機械の接触による摩擦抵抗力、(b) 内側の円筒B内にある水による抵抗力及び (c) E内に入れられた試料である粒子を含んだ流体によりCに働く力Tに大別できる。(a)と(b)によるトルクはEのみを空にして外側の円筒Aを回転させて、この時生ずるトルクを測定することにより知ることがで

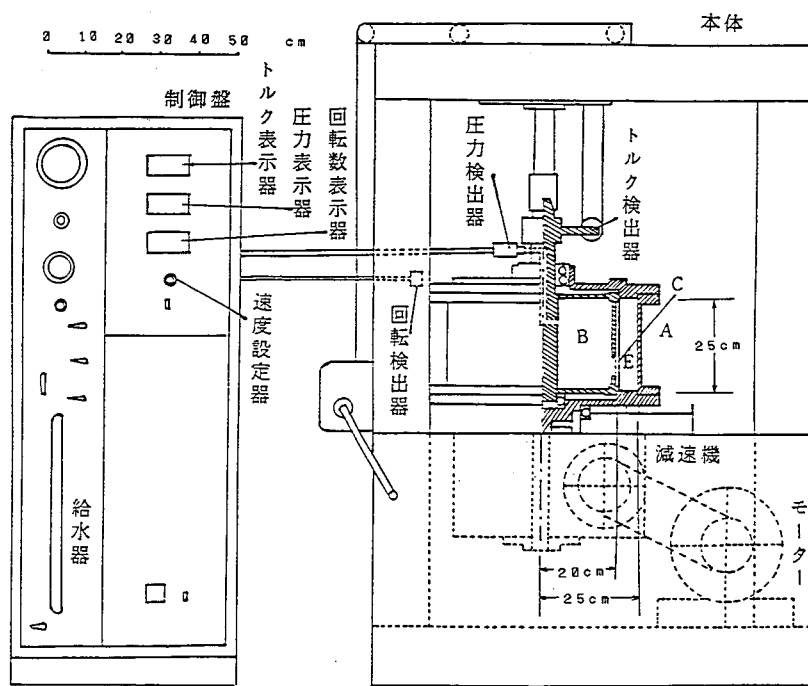


図-3 高濃度流体せん断試験装置概要図

きる。従ってこれら二つの場合のトルクの差を計算することによりE内にある試料によりCに働くせん断力Tを知ることができる。なお、E内にある試料によりCに働く垂直応力Pは圧力検出器により直接測定できる。このようにして Bagnoldの測定した流体中の粒子同士の接触により壁面Cに働く垂直力Pとせん断力Tを測定できる。

5. おわりに

試作した高濃度流体せん断試験装置は、現在のところ試運転の段階にあり、具体的な実験結果は得られていない。今後種々の条件で実験を行い、Bagnoldの実験結果の検証とダイラント流体モデルの土石流の流動式への適用について検討を実施して行く予定である。

参考文献

- 1) Bagnold, R.A., 1954. 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.
- 2) Hungr, O., 1981, Dynamics of rock avalanches and other types of slope movements, Ph.D. thesis, U. of Alberta.
- 3) 高橋保, 1977, 土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研究所年報, 第20号, B-2, pp405-435.