

京都大学防災研究所 佐々恭二

まえがき

土石流は水と土砂が一体となった流れであり、水の性質と土砂の性質とあわせ持っていると考えられる。水の場合、水は拘束圧（流動深）によって性質が変化し、数cmの流動深を持つ水路実験の結果を無次元化して表示することにより、自然現象の解釈に用いられている。一方、土は間隙水圧を含めた拘束圧が、そのせん断特性を決定する最大の要素と考えられ、その試験は自然現象に対応した拘束圧を載荷して行なわれている。土石流現象を室内で再現する場合、土石流の流動深に対応する拘束圧を載荷しつつ流動を発生させることが必要と考えられたが、従来の水路実験では拘束圧を載荷できず、従来の土質試験機では流動を発生させることが困難である。そこで、二つのリング状の水路の上部より載荷しつつ下部リングを回転させ、その時の応力-歪を測定しつつ流動状態の観察できる試験機—リングせん断型土石流試験機と考案・試作した。

1. 土石流研究に用いられて来た試験法とその特徴

A. 水路実験 水路を用いた土石流の実験は Bagnold⁵⁾の後、多くの研究者によって行われており、砂を含む水の流れの抵抗則の研究に有効であるが、自然の土石流の流動深である1mのオーダーの再現は困難であり、拘束圧の載荷は不可能に近い。Bagnoldの実験の流動深は0.5~0.9cmであり、日本で多く行われている実験も数cmのオーダーである。

B. 二重円筒試験 Bagnold⁵⁾は液体の粘性を調べるのに用いられる回転粘度計、すなわち同心二重円筒の間に液体を入れ、外筒を回転させて内筒へ伝達されるトルクを測定する試験機に改良を加えて内筒にかかる垂直応力を測定できる試験機(図1)を製作した。Eの部分に水と同じ比重を持つ直径1.32mmのワックスの球と水を入れ、外円筒を回転させた時に内円筒にかかるせん断応力と垂直応力を測定した。回転速度は0.25~8.6回転/秒 すなわち2~279 cm/secで実際の土石流に対応する流速を与えている。半径約5cmの円筒を高速回転しているため、遠心力は最大で重力の3.8倍になっており、かつそれがせん断面に

対する垂直応力として作用する形になっているが、比重が水と同じ粒子を用いているので、粒子への遠心力の影響は取りのぞかれている。この実験結果を図2に示す。試験を行なったサンプルの容積濃度は13~62%、間隙比にして0.61~6.69、これを通常の石の比重2.6~2.7を用いて乾燥密度に換算すると0.35~1.65 g/cm³前後になる。また、測定された垂直応力は275/cm²以下、せん断応力は185/cm²以下である。したがって 彼の実験し

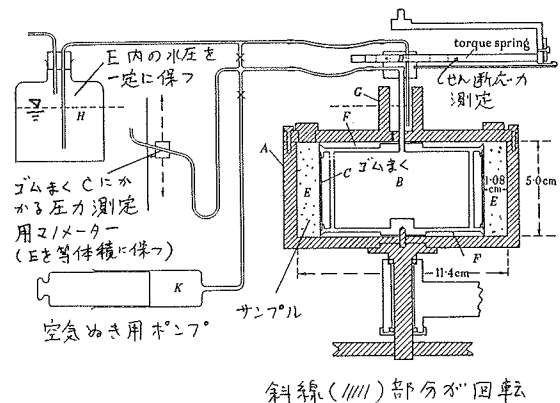


図1 Bagnold の二重円筒試験機

ているのは、水路実験と同じく 1cm 前後の流動深に対応する試験であり、現実の土石流のオーダーとはかけ離れている。そして、この試験機ではせん断応力が大きくなると図1 Cのゴムがよじれて支えることができず、拘束圧が少し小さくなると、粒子内のせん断抵抗より粒子とドラムとの境界のせん断抵抗力の方が小さくなるので、ドラムの内壁ですべりが生じ、そのせん断抵抗力が測定される事になる。(一般に最密状態につめた粒状体と等体積条件でせん断しようとするとき、ダイヤランシーのために垂直応力、せん断応力とも、著しく増大し、せん断できないうちが粒子破壊が生じるからいずれかになる。図2の最密状態($e=0.61$)の球が、わずか 0.04 gf/cm^2 でせん断されているのは、壁面でのすべり以外には解釈が困難である) したがって、この方法では拘束圧の大きい状態や密な状態の試験は困難である。

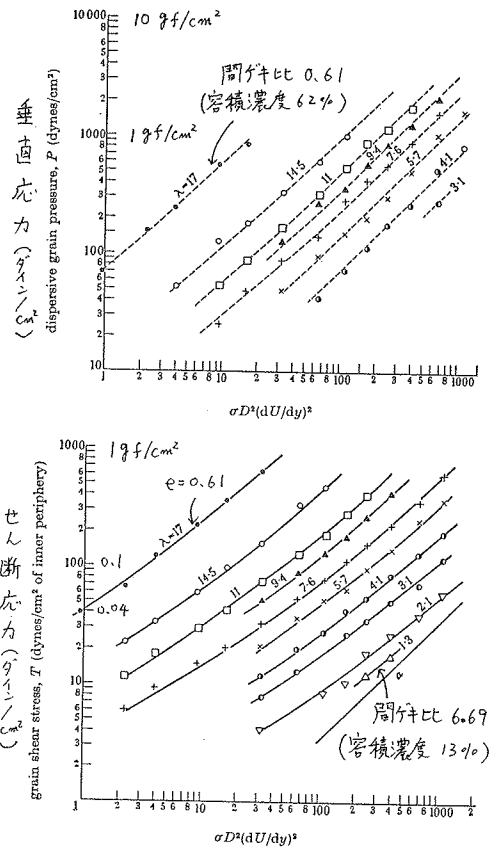
C. 荷重制御非排水三軸試験

Castro⁶⁾は図3

に示す三軸試験機を用いて、一定の拘束圧をかけたサンプルを非排水状態の荷重制御(重り)を段階的に増減して圧縮すると、ある限界間隔き比以上のルースな砂は、あるまで急激にせん断強度を失い、流動することを見出した。そして、これが流動型崩壊(地すべり)(flow slide)の原因としている。この実験は、その後 Lindenberg⁷⁾ 他の人々によっても確認されている。また、佐々他も標準砂や土石流の発生する溪床堆積物を用いて実験を行っている。¹⁴⁾ この方法は現場の土を用いて現場の拘束圧に対応する圧力をかけて、流動化を発生させることができるが、円筒形サンプルの圧縮試験方法で、流動距離(?)、すなわち変位はCastroの実験でわずか1.8cm(20%歪)、佐々他の実験¹⁴⁾でも供試体が大きいとはいへ5cmである。したがってこの方法では定常的な流動状態の再現は困難である。

2. リングせん断型土石流試験機の構造

現実の土石流に対応する拘束圧(流動深を数mと考えると、 0.4 kg/cm^2 まで)と現実の土石流と同じオーダーの流速(1m/sec まで)を再現でき、どのようなせん断が



$980 \text{ g/cm}^2 = 1 \text{ gf/cm}^2$, dU/dy : ヒズミ速度
 D, σ : 粒子の直径と比重 λ : 線密度

図2 Bagboldの二重円筒試験の結果

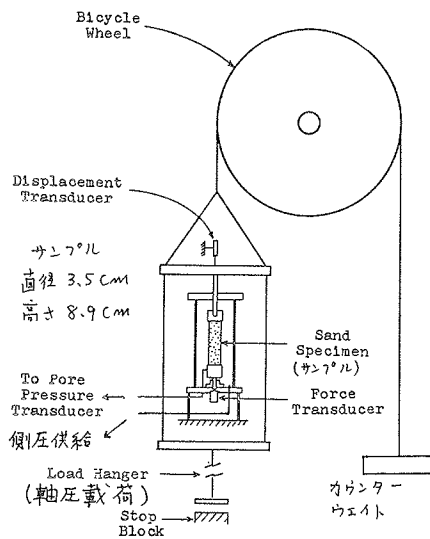


図3 Castroの荷重制御非排水三軸試験機

生じているか観察でき、かつ土石流発生時の急速載荷の状態に対応する等体積条件のせん断と定常的な流動に対応する等圧条件（垂直応力一定）の両試験ができる構造になっている。図4にその模式図を示す。内径30cm、外径48cm、深さ9cmの回転水路の上部より ゴム袋に空気圧をかけ、載荷板を通じてサンプルに垂直応力を与える。載荷板は本体のベアリング付き支柱で支えられている。等圧試験ではこの支柱の変位で体積変化を測定し、等体積試験ではこの支柱を上盤に固定して、サンプルの体積を一定に保つ。サンプルの下半分はリングの下盤（////部）に固定されており、この部分はギヤーと周波数制御モーターにより 0.3mm/分～約1mm/秒

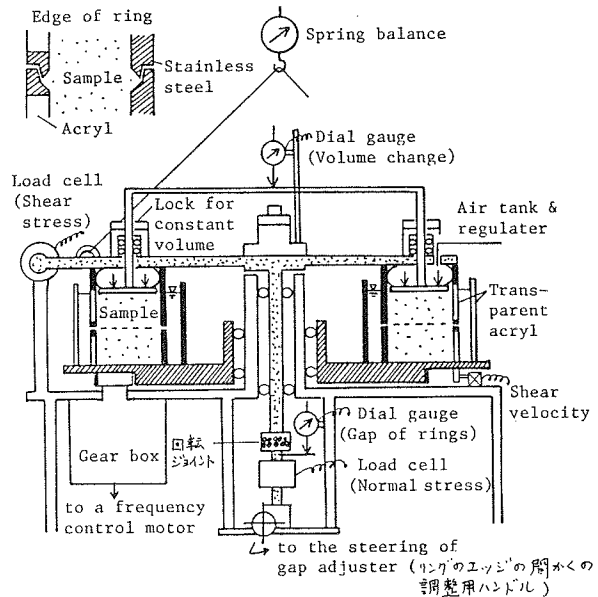


図4 リングせん断型土石流試験機（模式図）

の速度で回転できる。せん断面にかかる垂直応力は 上盤と本体をつなぐ部分に取りつけたロードセル（これを常に引張側に保ち、かつ回転ジョイントやギヤップ調整ギヤー内の遊びをとるために、上盤の自重分は上部よりバネ計りでつり上げている）で測定し、せん断応力は 図4左端のロードセルで上盤の回転を止める形で測定している。サンプル箱のエッジは サンプルの流出を防ぎ、かつ上盤が微少に振れても下盤に当るような 1/6 のテーパードがみ合わせている。写真1は試験機の上盤を取りのぞいた所、写真2はサンプル箱の中 $\phi=2\text{mm}$ のガラスビーズを入れた所、写真3はその上から上盤をセットした所である。

3、リングせん断型土石流試験機の試験結果

試験機の最初のテストとして 試験を単純化するために $\phi=1\text{mm}$ 、及び 2mm の均等粒径のガラスビーズを用いて 乾燥状態で試験を行なった¹⁾²⁾³⁾。本発表会でも引用文献³でより詳しく報告するが、 $\phi=1\text{mm}$ のビーズの実験結果の一部を図5に示す。たい実験線及び2本の点線が等体積試験の結果である。粗な炭灰埋積物の上に、斜面または源頭部からの崩落

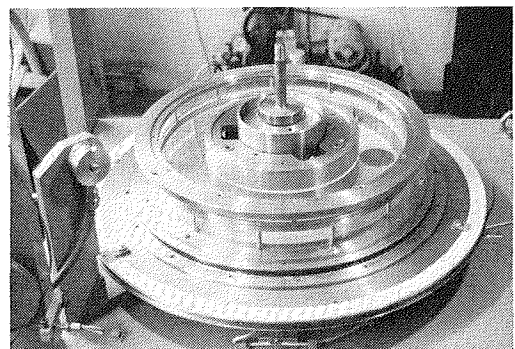


写真1 試験機の上盤を取りのぞいた所

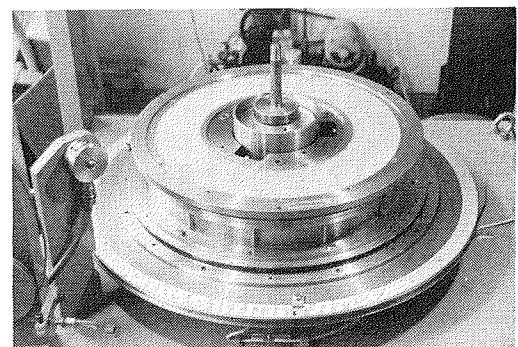


写真2 サンプル箱にガラスビーズ ($\phi=2\text{mm}$) を試験としてつけた所

土砂が集る状態に対応させて、急激 (90.76 cm/sec) に等体積条件でせん断したものがたい実験である。この場合、ビーズは一たんせん断強度がゼロになり、約 2 mm せん断後 8 gf/cm^2 の極めて低いせん断強度で定常状態になった。すなわち粗大構造を持つ粒状体が等体積条件でせん断されれば、著しく小さなせん断強度しか發揮しないこと (液状化すること) が示された。一方、密なものはせん断とともに応力が上昇し、試験機の垂直応力測定範囲の上限 (0.4 kg/cm^2) でも定常状態に至らず、試験を中止した。また、中間の密度では、一たん垂直応力は減少したが、その後、破壊包絡線に沿って上昇し 60 gf/cm^2 のせん断抵抗力を發揮する状態で定常状態になった。一方、土石流の定常的な流動状態に対応する等圧状態で試験したところ、せん断速度を変化させてもすべて同じ破壊包絡線上に乗り、静的なせん断で發揮される内部マツ角も、約 1 cm/sec のせん断速度の時に發揮される動的内部マツ角も同じであることが見出された。この事は土石流が平坦部まで流れる理由が、流動中の内部マツ角 (動的マツ角係数) が小さいためではなく、流動発生後の攪乱により土層内の細粒部が間ゲキ水に浮遊し、「間ゲキ水の比重の増大」→「土石流底面の有効垂直応力の低下」→「せん断抵抗力の低下」という機構で生じることと示唆するものと思われる。

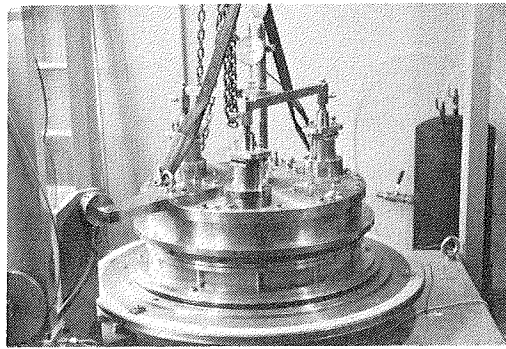


写真3 上盤 (垂直応力載荷部) の取付け後

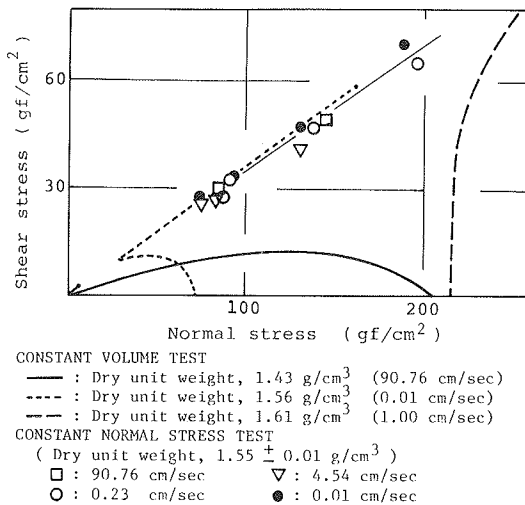


図5 リングせん断型土石流試験機の試験結果

本研究は文部省科学研究費補助金 (試験研究 2, No. 57860028, 代表者 佐々) によって行われ、また、研究の実施にあたり、京都大学教授 島通保、武居有恒両先生と大学院生 海堀正博君の協力を得たことを記し、感謝の意を表します。

引用文献 1) Sassa (1984): The mechanism starting liquefied landslides und debris flows. オ4回国際地すべりシンポジウム, オナダ. 2) 佐々 (1984): リングせん断型土石流発生・流動停止現象再現試験機の製作研究, 昭和58年度科学研究費研究成果報告書 3) 海堀・佐々 (1984): リングせん断型土石流試験機を用いたガラスビーズの流動特性, 昭和59年度砂防学会研究発表会 4) 木寺、大井、海堀・佐々: 荷重制御非排水三軸試験による土砂の液状化について, 昭和59年度砂防学会研究発表会 5) Bagnold (1954): Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. Roy. Soc. London. A, 225 6) Castro (1969): Liquefaction of sands. Harvard Soil Mechanics Series No. 81 7) Lindenberg & Konig (1981): Critical density of sand. Géotechnique 31, No. 2