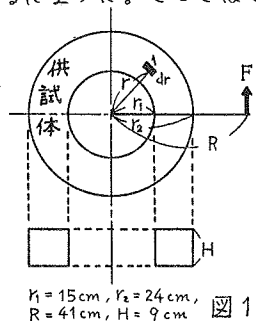


京大農学部 海堀 正博[○]
京大防災研究所 佐々 恭二

はじめに： 筆者の一人、佐々は長年にわたる土砂災害研究の結果、地下侵食によりあらかじめその空隙を増大せしめられた土層が、何らかの原因で崩れ、ゆるい飽和土の急速せん断（非排水せん断）の形で液状化し、流動し、土石流になることがあると考えるに至った。¹⁾ゆるい飽和土の非排水せん断による液状化実験は、Casagrandeの指導の下にCastroにより1969年に、また日本でも半沢、龍岡らにより行なわれ、それぞれその成果が発表されている。²⁾³⁾⁴⁾しかしこれらの研究ではそのような静的荷重の増大による液状化の存在が示されたものの、自然界にこの機構をもつ土砂移動現象が存在するかどうかにについてはまだ十分な検討がなされたとはいえない。そこで筆者らも標準砂と現場の土を使って同様の実験を行なったのであるが、三軸試験においてはその生じさせるヒズミの程度が限られており、必ずしも定常状態に達しない（Castroの実験では定常状態に達しているが）ので、液状化後の流動現象を研究する目的で新しく大型リングせん断型土石流試験機を試作するに至った。⁵⁾⁶⁾ここではこの試験機を用いて行なったいくつかの実験結果を紹介する。

1. 試験方法： 試験機についてはすでに文献6)に述べられているので詳

細は省くが、一面せん断試験が円状につながった形で、供試体部分の大きさは、図1に示すとおりである。せん断力 F を測定し、 $F \cdot R = \int_{r_1}^{r_2} \tau \cdot r \cdot 2\pi r dr$ の関係からせん断応力 $\tau = \frac{3R \cdot F}{2\pi(r_2^3 - r_1^3)}$ を計算する。また供試体表面全体にかけた垂直荷重 N から、垂直応力 $\sigma = \frac{N}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}$ を計算する。試料としては2種類のガラスビーズ（1mm径及び2mm径で、比重はそれぞれ



2.51, 2.49)を用いた。約1.4, 1.5, 1.6 g/cm^3 の3種類の詰め固め密度について、ヒズミ制御（回転速度制御に相当）で定圧、定体積試験を行なった。用いられた回転速度は最高4.887 rad/sec （平均せん断速度に換算すると90.8 cm/sec ）である。次に回転に伴う遠心力の応力場への影響について考えてみる。図1のように供試体内部に中心からキヨリ r の位置に微小要素（単位巾、厚さ dr ）を考える。この要素での遠心力は $r\omega^2 \gamma dr$ であるが、中心に近い部分からの力加わるので、 $\int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 \gamma dr = \frac{1}{2} \gamma \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)$ となる。ここに角速度 $\omega = 4.887 \text{ rad/sec (max)}$ 、供試体密度 $\gamma = 1.5 \text{ g/cm}^3$ 、 $r = r_2 = 24 \text{ (cm)}$ としてこれを計算すると、約6.3 gf の遠心力が働くことになる。今、仮りに通常の一面せん断試験の場合の解釈ではなく、三軸試験の場合の解釈をするものとして、拘束圧として鉛直方向の σ_v と水平方向の σ_h との両方を考える。また $\sigma_h = K_0 \sigma_v$ 、 $K_0 = 1 - \sin \phi$ 、 $\phi = 18^\circ$ とすると、平均主応力 $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h)$ に及ぼす遠心力の影響割合は、7.5/ σ_v となる。 $\sigma_v = 100 \text{ gf/cm}^2$ とすると約7.5%だけ平均主応力を高めるように作用することがわかる。しかし、実際は上下端面の摩擦が働くので、遠心力の応力場への影響はこれより小さく、無視しうるものと思われる。また本来は一面せん断的であり、影響は全くないとも考えられる。

2. 定圧試験とその結果： せん断中垂直応力を一定に保ち、試料に自由な膨張・収縮をさせるのが定圧試験である。土石流の流動中は、どちらかと言えばこの一定垂直圧の状態に近いものと思われる。

しかし回転の最初の段階で試料の体積変化を少し拘束するような傾向にあり、完全な定圧条件を保つことが難しいので、ここでは残留状態における σ - τ 関係をあげる(図2)。回転速度を変化させても $\phi \approx 19^\circ$ の破壊包絡線からのズレはほとんど見られない。このことから静的な定圧せん断による残留強度も、動的なものも差がないと言える。

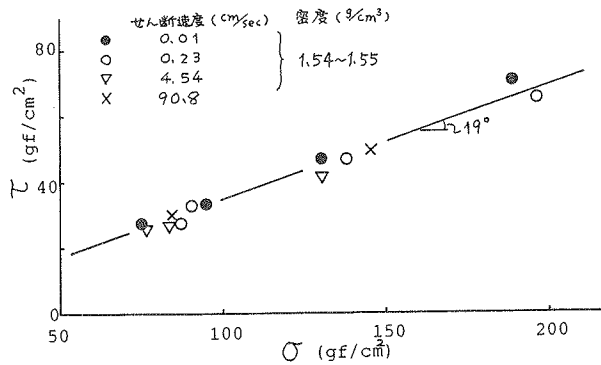


図2 残留状態における σ - τ の関係(1mm径ビーズの定圧せん断)

すなわち Casagrande の言う flow structure⁷⁾は何ら特別のものではなく、残留状態のときの構造である可能性がある。

3. 定体積試験とその結果: せん断中の体積を一定に保ち、そのときの垂直圧の変化及びせん断力を測定するのが定体積試験である。先に流動中の土石流では定圧状態に近いと述べたが、土石流が flow structure⁸⁾をもち、かつそれが steady-state deformation の状態であるとするなら、このとき定圧も定体積も全く区別のない状態である。とすれば、土石流に至るまでの土塊の応力経路の検討をする上でも、また先に述べたようにゆるい飽和砂の非排水せん断型の土石流を研究する上でも、定体積試験による研究方法も十分に意味深いものであろう。ただし定常状態に至る過程において定圧と定体積が常に一定の対応関係にあるかどうかについてはここでは触れない。静的な問題について成立っても、動的な場合に必ずしも成立つとは限らないからである。さて、定体積試験の結果からまずせん断速度(回転速度)を毎秒1cmとしたときの、つめ固め密度 γ_d の違いで整理したものの一例を示す(図3)。

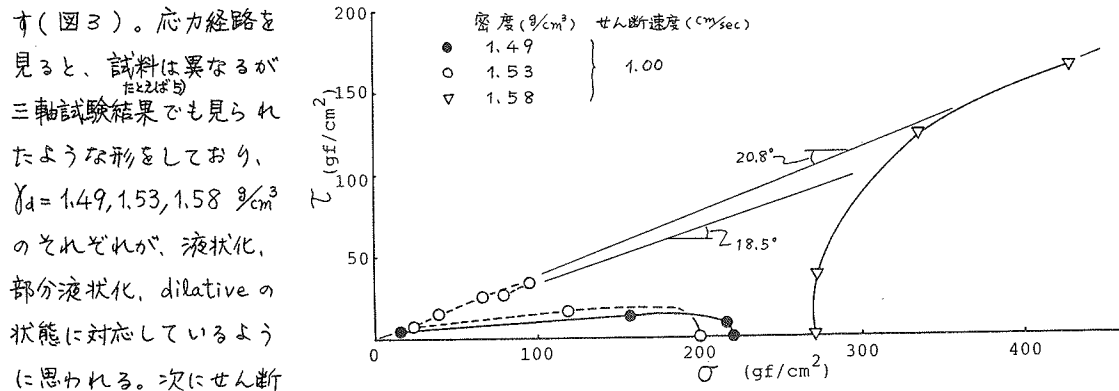


図3 つめ固め密度の違う場合の応力経路(1mm径ビーズの定体積せん断)

を見るために、図4、図5を示す。図4では、ほぼ同じつめ固め密度をもつ供試体が、せん断速度の違いにより、どのような応力経路をとるかが示されている。各応力経路の最後の位置で定常状態になったことを表わしているが、その大きさはマクロに見ると、せん断速度の大きいものほど大きくなっている。さらに、定常状態にあるが、せん断速度を少し変えることによってその応力状態がどのように変化するかをや、ミクロに見たものが図5である。これを見ると、せん断速度の小さい領域(<0.23 cm/sec)では、速度が大きいほど応力状態が小さく、せん断速度の大きい領域(>1 cm/sec)では、速度

が大きいほど応力状態が大きくなって定常になることがわかる。定体積せん断における応力状態の変化が、主に供試体のせん断中の体積変化傾向によることを考えると、あるせん断速度を境に、速度と供試体の膨張・収縮傾向との関係が逆転していることになる。しかし我々が対象としている土砂移動現象のスケールから考えると、むしろマクロな見地から、せん断速度が大きいほど、供試体は膨張傾向にあると判断するのが妥当であろう。

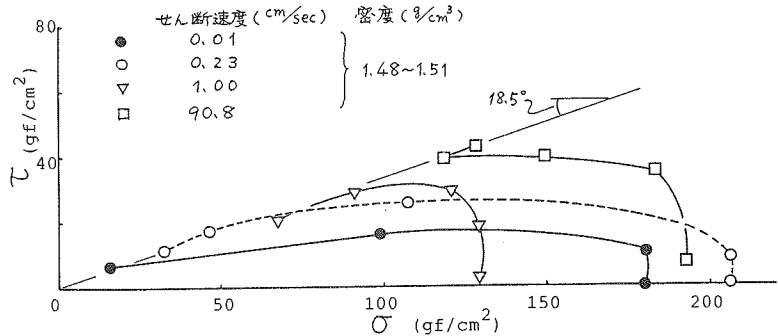


図4 せん断速度の違う場合の応力経路(1mm径ビーズの定体積せん断)

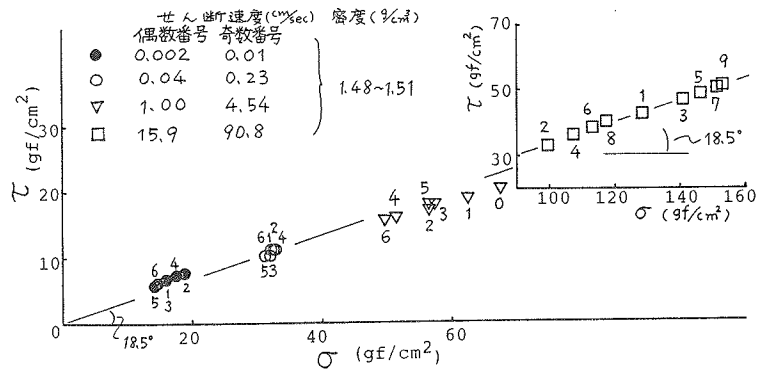
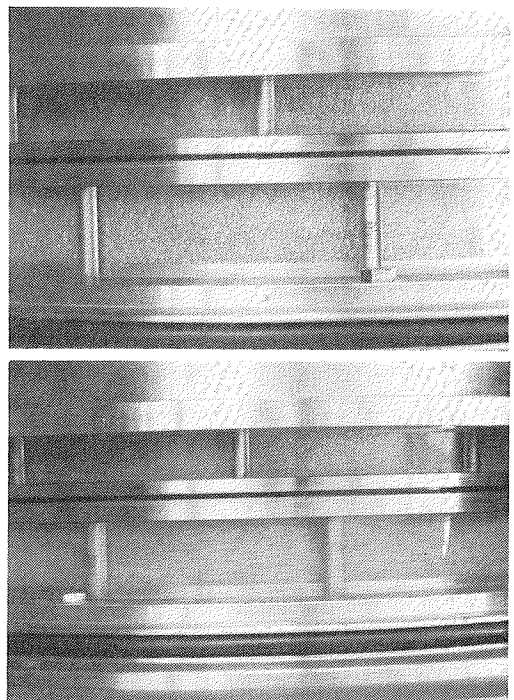


図5 定常状態における速度変化の影響(図4のつづき)

せん断速度が大きくなると、供試体が膨張傾向にあるのは、粒子どおしが激しく衝突するようになり、そのため反発力が大きくなるからであろう。しかし、図2であげた定圧せん断の結果からは、このことがまだ明らかとは言えず、今後定量的な面を含めて、もう少し検討する余地がある。

なおこれまでにあげた結果は、ガラスビーズの粒径(1mm径、2mm径)を問わず得られたものである。また、いずれも空隙流体としてはほとんど空気だけが存在する条件である。せん断前とせん断中の試料の様子について写真をあげておく。

4. 三軸試験結果: ガラスビーズを用いたリングせん断試験結果から、定常状態での摩擦角φは約18~19°となったが、一般によく用いられている三軸試験機により、この結果が妥当なものであることを示す。用いられた三軸装置は文献5)に紹介されているもので、試験方法として、A: 荷重制御圧密非排水、B: 荷重制御圧密排水の各方式が



写真上はせん断直前、下はせん断中(試料は2mm径ガラスビーズ)

用いられた。結果を平均主応力 $p' = (\sigma_1' + \sigma_3')/2$ と偏差応力の半分 $q' = (\sigma_1' - \sigma_3')/2$ とで表わしたものが図6である。今こ成分が全く働かないものとして、 ϕ 成分だけを考えると、この図から $\phi' = 16.5 \sim 20.8^\circ$ という結果が得られる。ただし三軸試験の結果からは残留状態での ϕ が明らかではないので、厳密な比較をすることはできないが、リングせん断試験の結果による値と大きく異なるものではない。なお三軸試験においては飽和試料が用いられた。

5. まとめと今後の課題： 佐々によ

り設計されたリングせん断型土流試験機により、ガラスビーズの流動試験を行なった結果、次のようなことがわかった。①静的な定圧せん断による残留強度も、動的な定圧せん断による残留強度も大差のないこと、②定体積せん断試験結果から求まる摩擦角も、定圧せん断試験結果から求まる摩擦角も大差のないこと、③定体積せん断

試験においては、マクロに見て、せん断速度の大きいものほど、大きい応力状態の下で定常になること、しかし④ミクロに見ると、あるせん断速度を境にそれより大きい領域では、速度が大きくなると定常に至る応力状態は大きくなり、あるせん断速度を境にそれより小さい領域では、速度が大きくなると、定常に至る応力状態は小さくなること、⑤粒径が1mmのものと2mmのものとで特性が変わらないことなど。

ところで今回のリングせん断試験は、先にも述べたように、乾燥（または一部1～2%含水比）状態で行なわれたものである。また均一径のガラスビーズという特殊な試料を用いたために、必ずしも現場の土に一般的な特性が得られたとは考えられない。また現段階ではまだ予備実験的な性格をっており、さらに厳密かつ包括的な意味での解析は今後の課題である。

最後にこの研究を行なうにあたり、終始貴重な御助言を賜った京大農学部の武居有恒教授、京大防災研究所の島通保教授に心から感謝いたします。なおこの研究の一部は、昭和58年度文部省科学研究費補助金・試験研究(2)「リングせん断型土流発生・流動・停止現象再現試験機の試作研究」(研究課題番号57860028)の研究成果である。

参考及び引用文献： 1) たとえば「Sassa, K.: The Mechanism to Initiate Debris Flows as Undrained Shear of Loose Sediments, Interpraevent 1984 2) Castro G.: Liquefaction of Sands, Harvard Soil Mechanics Series, No.81 (1969) 3) たとえば半沢ら：「非常にゆるい砂」の非排水せん断特性についての一考察，土質工学会論文報告集，Vol.14, No.4 (1974) 4) 龍岡：(文献3)へのディスカッション，土質工学会論文報告集，Vol.15, No.3 (1975) 5) 木寺ら：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 6) 佐々：リングせん断型土流試験機の試作について，昭和59年度砂防学会研究発表会 7) Casagrande, A.: Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands — A Critical Review, Harvard Soil Mechanics Series, No.88 (1975) 8) Poulos, S.J.: The Steady State of Deformation, ASCE, No. GT5 (1981)

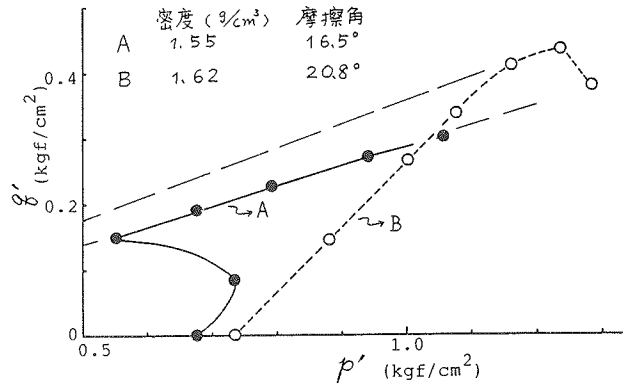


図6 三軸試験結果の応力経路図(1mm径ビーズ)
A:荷重制御圧密非排水, B:荷重制御圧密排水