

# 1 土石流の発生条件および流動特性

京都大学農学部 海塚正博・武居有恒  
 京都大学防災研究所 佐々恭二

はじめに 土石流にもさまざまなタイプのものが存在するが、ここでは溪床堆積物の上に崩土が載ったために液状化し、流動し、土石流になるものを取りあげた。また流動中の摩擦係数の速度依存性をガラスビーズ、標準砂および川砂を用いて調べた。また間隙水のせん断抵抗力への影響および速度によって生じるいわゆるダイラタント・フォースについても検討した。

1 土石流の発生条件 一般に飽和状態でも乾燥状態でも、密に堆積した砂層が変形を受けるとその体積は膨張し、逆にゆるい砂層では収縮する。しかし飽和状態で変形の速度が急激になると、この体積変化が追いつかずに等体積せん断に近い形で変形が生じる。そのため密な砂層では負の間隙水圧が発生して強度が増加するが、逆にゆるい砂層では正の間隙水圧が発生し強度が減少する。今、溪床堆積物が低密度で、かつ飽和で存在し、その上に斜面からの崩土が落ちた場合を考えると、これは急激な応力を加えた前述の条件と同じになる。

1-1. 荷重制御非排水三軸試験 上記の条件に対応する現象を実験室で再現するため、三軸圧縮試験機に試料をつめ、注水して飽和した後、圧密し、非排水状態で軸圧を加える試験を行なった。試験結果を応力経路で表わしたものが図1である。横軸には有効平均主応力  $p' \left( \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3') \right)$  で一面せん断での垂直応力にあたる)、縦軸には偏差応力の半分  $q \left( \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \right)$  でせん断応力にあたる)をとっている。試料が密であれば(△印)せん断応力  $q$  が  $1.3 \text{ kgf/cm}^2$  でも破壊しない。逆にゆるければ(○・印)左方向に進む。非常にゆるい場合(●印)には破壊後のせん断抵抗力  $q$  は  $0.03 \text{ kgf/cm}^2$  と極めて小さくなり、液体に近い状態(液状化)になる。この●印の(液状化した)試験結果を軸ひずみと応力(拘束圧  $\sigma_3$ 、間隙水圧  $u$ 、偏差応力  $\sigma_1 - \sigma_3$ )とで図2に示す。偏差応力が軸ひずみのごく小さいところ(1~2%ひずみ)でピークを示し、その後、間隙水圧の上昇によって強度を失い急速に(図の場合約  $50 \text{ cm/sec}$ )流動した。標準砂についての試験結果から、図1 △印を非液状化、●印を液状化(間隙水圧  $u$  が初期有効拘束圧  $\sigma_3$  の0.9倍以上発生した場合)として、間隙比  $e$  と初期有効

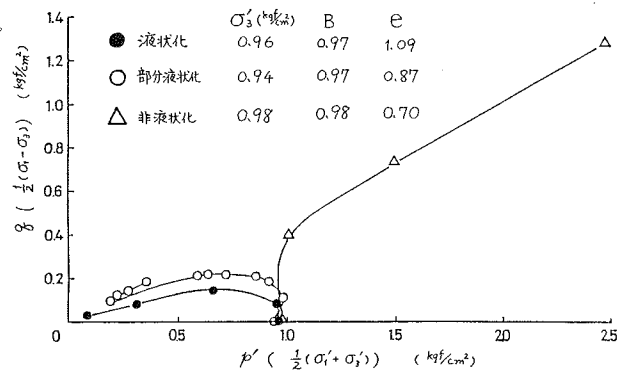


図1 応力経路 (標準砂)

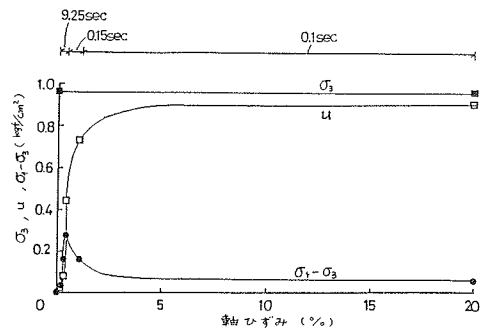


図2 液状化時の軸ひずみと応力の関係

拘束圧  $\sigma'_3$  との関係として表わすと図3のようになった。図から間隙比が0.86程度以上では液状化し、拘束圧の影響がこの応力範囲ではわずかであることがわかった。次に有珠山の土で飽和度を変化させて同様の試験を行ない、飽和度  $S_r$  と間隙比  $e$  の関係を図4に表わした。図から飽和度が100%なら間隙比が0.73程度以上で液状化し、また飽和度が85%でも間隙比が0.85以上で液状化しうることがわかる。有珠山の土の採取現場付近では間隙比が0.61~0.77だったことから、飽和度が95%以上になると液状化の可能性がある。

1-2. 溪床堆積物の土石流化 室内実験が示す

ように溪床堆積物が液状化して土石流になる条件としては、間隙比と飽和度が重要である。特に現場の調査にあたっては堆積物の間隙比を知る必要がある。今、仮りに調査現場の間隙比で非排水三軸試験を行なったとき図5のような応力経路が得られたとする。この図は、堆積物の非排水状態での最大応力点Pを上回る力が急激に加えられると、この土が液状化してその強度をほとんど失ってしまうことを意味する。溪床堆積物はふつう、すでに0もてもかかった状態で存在するので、それを図5のO'の位置があるとすると、もし  $\Delta T$  なる応力を与えるような現象(たとえば崩土が載ったり、地震力が加わったりしたときの応力)が生じれば、この土は液状化し、

最終的な応力点Qと載荷応力T(=T<sub>0</sub>+ $\Delta T$ )との差  $\Delta F$  が加速度項となって流動を開始する。液状化を起す限界間隙比より大きな間隙比を持つ飽和した堆積物が連続的に存在すれば、こんどは動きはじめた土石流段波により、 $\Delta T$  に相当する力が加えられるので、土石流はしだいに生長してゆくことになる。

2. 土石流の流動特性 土石流現象を室内で再現するための試験機が筆者の一人佐々により試作された。この装置は基本的には大型のリングせん断試験機であるが、側面からの流動状態の観測および高速の試験が可能である。せん断速度が小さい時はある面でせん断が生じるが、せん断速度が大きくなるとせん断ゾーンが拡大し、粒子の流動している様子が見られるようになる。試験に用いたせん断速度範囲は0.001~90 cm/secであったが、10 cm/sec以上になると活発な粒子の動きが見

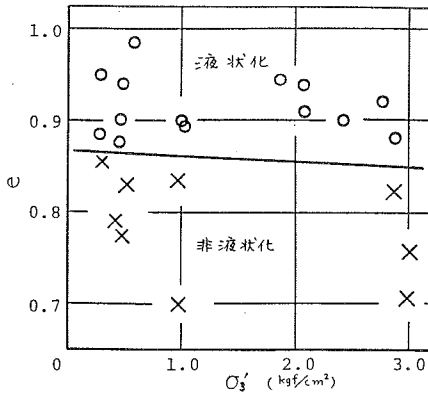


図3 有効拘束圧  $\sigma'_3$  と間隙比に対する液状化-非液状化の関係 (標準砂)

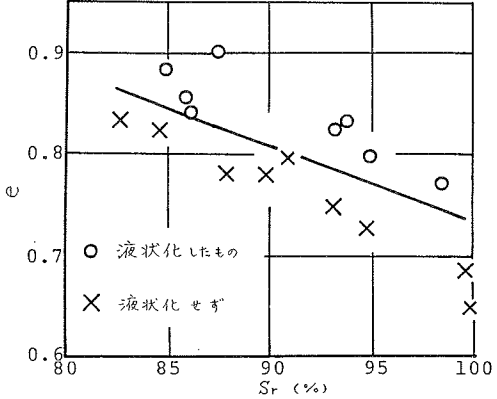


図4 飽和度  $S_r$  と間隙比  $e$  に対する液状化-非液状化の関係 (有珠山の土)

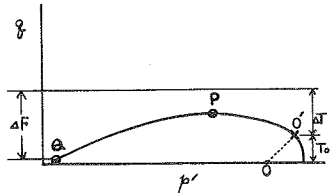


図5 外力  $\Delta T$  が加わって液状化する場合の加速度項の考え方

られた。なおひずみ速度およびその分布状態については現段階では測定していない。

### 2-1. 摩擦係数について

通常の水路等で行なわれている土石流実験と違い、リングせん断型土石流試験機では垂直応力 $\sigma$ の載荷が可能なので摩擦係数を直接求めることができる。図6にガラスビーズ(2mm径)を用いて行なった等圧試験結果をあげる。各点はせん断が定常的に行なわれる状態、すなわち残留状態での垂直応力 $\sigma$ とせん断応力 $\tau$ の関係を示している。せん断速度が $0.001 \text{ cm/sec}$ から $90 \text{ cm/sec}$ まで9万倍変わっているが、どの点も $19^\circ$ の勾配を持つ1本の破壊包絡線上に分布している。すなわち静的なせん断時に発揮される摩擦係数と動的な流動時に発揮される摩擦係数とが等しいことを意味する。標準砂についても同様に、せん断速度によらず全ての点が摩擦角 $33.5^\circ$ の破壊包絡線上に並んだ(図7)。また図7には等体積試験結果も並記されている(破線)が、その応力経路も破壊包絡線上を進み、等圧・等体積を問わず摩擦係数が一定であることを示している。最後に宇治川砂(2~3mm径)を用いて同様の試験を行なった(図8)。川砂の場合もせん断速度によらず摩擦係数は一定である。

### 2-2. 間隙水の影響について

間隙流体の粘性がせん断抵抗に影響を持つとすれば速度依存性があるに違いない。すなわちせん断速度に応じた粘性抵抗が粒子の摩擦抵抗にプラスした形で現れるものと思われる。乾燥状態においてガラスビーズ、標準砂、川砂ともせん断速度にかかわらず摩擦係数が一定であったこと

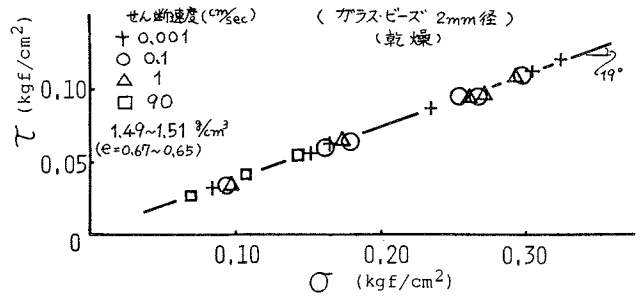


図6 等圧試験の残留状態での $\sigma$ - $\tau$ 関係 (ガラスビーズ 2mm径)

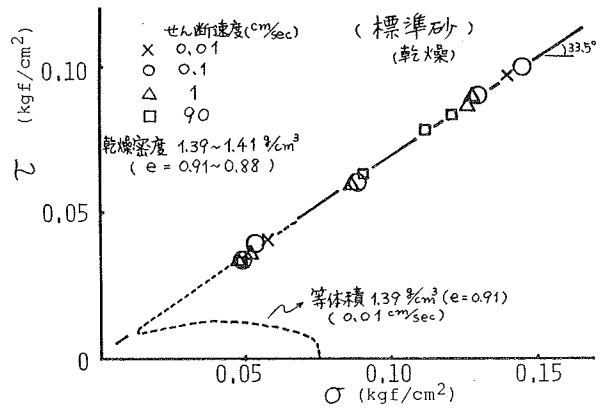


図7 等圧試験の残留状態での $\sigma$ - $\tau$ 関係 (ただし、破線のみ等体積結果) (標準砂)

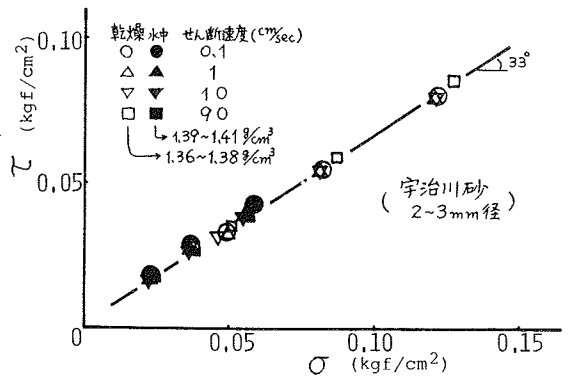


図8 等圧試験の残留状態での $\sigma$ - $\tau$ 関係 (川砂 2-3mm径)

すなわちせん断速度に応じた粘性抵抗が粒子の摩擦抵抗にプラスした形で現れるものと思われる。乾燥状態においてガラスビーズ、標準砂、川砂ともせん断速度にかかわらず摩擦係数が一定であったこと

から、もしこれに粘性抵抗分が加わるならばその分だけ破壊包絡線を上に平行移動させたような形が得られるだろう。しかもより速度の大きいものがより上に平行移動するはずである。図8の川砂を使った試験では、試料を水で飽和した状態での $\sigma$ - $\tau$ 関係もとられている。黒ぬりの各点がそれにあたるが、この砂では $90\text{cm/sec}$ までのせん断速度では間隙水の影響はほとんどないと言える。

2-3. ダイヤタント・フォースについて 図9は、等体積状態でせん断速度を $15\text{cm/sec}$ から $90\text{cm/sec}$ に変化させた時の応力変化を示している(文献の図5より)。これは速度変化により、いわゆるダイヤタント・フォースが $\Delta\sigma$ だけ増加し、結局それに応じた抵抗力の増分 $\Delta\tau$ が生じるが、その応力は常に同じ破壊包絡線上に存在することを示している。

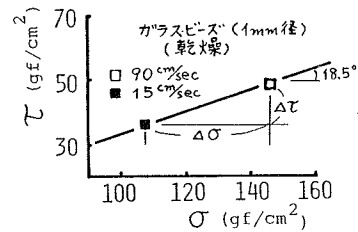


図9 ダイヤタントフォースと摩擦係数

3. まとめ ① 溪床堆積物に急激な応力が働いた場合、その堆積物が液状化して土石流になりうるかどうかはその間隙比に最も左右される。② 飽和度が必ずしも100%でなくても90%程度以上で液状化しうる。③ 溪床堆積物がこのような過程で土石流になる可能性は、有珠山での現地のデータ(間隙比)から見ても少なくはないと思われる。④ 土石流が発揮する動的な摩擦係数は、静的なせん断による残留状態での摩擦係数と等しい。⑤ その関係は乾燥状態でも飽和の状態でも同じである。⑥ 2~3mm径の川砂の場合、間隙水の粘性抵抗の影響はせん断速度が $90\text{cm/sec}$ 以下では無視しうる。⑦ せん断速度が増えることにより、いわゆるダイヤタント・フォースが増加し、それに伴いせん断抵抗力も増加するが、その応力は常に同じ破壊包絡線上にある。

謝辞 この研究を進めるにあたり、木寺信男氏(京都府土木部)には実験・データ整理他多方面でお世話になりました。ここに記して心より感謝いたします。また京都大学防災研究所の島通保教授にはいろいろと御助言いただき感謝いたします。

引用文献

- 1) 木寺他：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講演集
- 2) Sassa, K. et al : Liquefaction and Undrained Shear of Torrent Deposits as the Cause of Debris Flows , Proc. Int. Sympo. Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention , Tsukuba , Japan (1985)
- 3) 佐々：リングせん断型土石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講演集
- 4) Sassa, K. : The Mechanism of Debris Flows , Proc. XIth Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. , San Fransisco (1985)
- 5) 海堀他：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について、昭和59年度砂防学会研究発表会講演集