

III-6 水の作用による砂粒子の破碎強度の低下について

山口大学工学部 正員 O三浦哲彦

同上

日本道路公団

山本哲朗

松置 繁

1. まえがき

砂の高圧下におけるせん断強度は、間隙水存在によって低下することが知られているが、そのメカニズムはほとんど検討されていない。本報告は、このメカニズムは隣接した粒子間の接触部に生じるフラックの表面エネルギー変化にあるのではないかと考え、このことを実験によって確かめようとしたものである。まず、表面エネルギー変化を異にする4種類の砂供試体（水飽和、乾燥、エチルアルコール飽和、真空）について高圧下で排水せん断試験を行ない、それらの変形・強度特性を比較することによって、水の作用のメカニズムを検討した。次に、図-5の装置による一連の実験によって、砂の粒子破碎特性と表面エネルギー変化との間に一定の関係があることを示した。

2. 砂の圧縮・せん断特性に及ぼす水の作用

乾燥および飽和試料についての等方圧力 P_i と体積ひずみ V_i の関係は図-1 のようであった。この体積ひずみの大部分は粒子破碎に起因するものと考えられた。そこで、粒子破碎の程度（粒子破碎量）を試料の74μフルイ通過率 $F_{74\mu}$ で表わすことにし、乾燥および飽和試料について、 P_i と $F_{74\mu}$ との関係を求めてみた。その結果（図-2）は、飽和試料の粒子破碎量は乾燥試料のそれより多いこと、すなわち水が砂粒子の破碎強度を低下させていること、を示している。

次に、せん断試験によって得られた飽和試料の最大軸差応力と乾燥試料のそれとの比は図-3に示されるようであり、前者は後者よりも数%小さい値であることが分かる。また、両供試体の破壊時における体積変化特性は、図-4に示されるようであった。（図-3中、 Δ ：飽和、 $\circ$ ：乾燥）

さて、水分の有無によって生じる砂のせん断特性および粒子破碎特性の変化は、水の作用によって砂粒子の破碎強度が低下したために生じたと考えられるが、そのメカニズムは次のように説明できよう。高い応力によって隣接した粒子の接触部に発生したフラックに粒子を取りまわっている水が浸透し、フラックの表面エネルギーを低下させる。そのため、フラックの拡大は容易となり、砂粒子の破碎は促進される。

3. エチルアルコール飽和、真空状態での砂のせん断特性

水が砂のせん断特性に及ぼすメカニズムを明確にするために、エチルアルコール飽和供試体および 10^{-3} mmHg 程度の真空状態の供試体についてせん断試験を行なった。エチルアルコールは、それによる固体の表面エネルギーの低下量は水の場合より小さいことが知られている。一方、高真空状態においては、固体の表面エネルギーの減少は、事実上、0であると言われている。 $\sigma_3 = 100 \text{ kg/cm}^2$ の試験によって得られたエチルアルコール飽和および

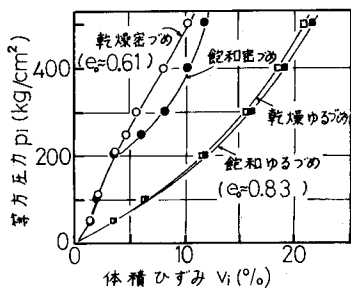


図-1 $P_i \sim V_i$ 関係

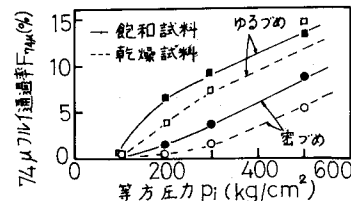


図-2 $F_{74\mu} \sim P_i$ 関係

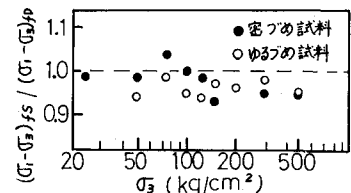


図-3 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fs} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{fo} \sim \sigma_3$

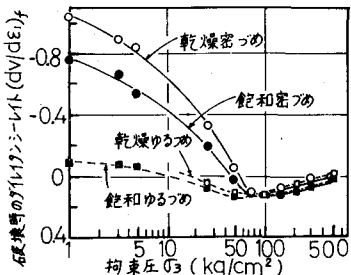


図-4 $(dv/d\epsilon_1)_f \sim \sigma_3$

真空試料の最大軸差応力を乾燥ならびに飽和試料のそれらと比較してみると、次のようであった。水飽和：207 (kg/cm²)，エチルアルコール飽和：209，乾燥：209，真空：220。さて、個々の粒子の破砕強度は、間げき流体による固体の表面エネルギー低下量（水>エチルアルコール>乾燥>真空）に依存するはずである。また、粒子破砕量は破砕強度の逆関数であると考えられる。これらのことを確かめるために、4種類の供試体のせん断中に受けた粒子破砕量 $F_{74\mu}$ を調べ、次の結果を得た。水飽和： $F_{74\mu} = 28.6$ (4)，エチルアルコール飽和：27.0，乾燥：26.1，真空：24.5。これらの結果は、固体の表面エネルギーをより低下させる液体ほど、粒子破砕を促進させることを示しており、Hammond²⁾の実験結果ともよい対応を見せている。彼らは、真空ならびにいろいろガス雰囲気中におかれた溶融シリカロッドの破砕強度を調べて、ロッドの強度は真空中でもっとも大きく、水蒸気中でもっとも小さかったと述べている。

4. 粒子破砕量と表面エネルギー変化量との関係

液体の存在による固体の表面エネルギーの低下は、その液体の極性と関係があることが知られている。そこで、図-5に示されるような簡単な装置を用いて、側方拘束状態での単軸圧縮試験を行い、液体の極性が砂粒子の破砕特性に及ぼす影響を調べた。得られたデータについて、液体の双極子モーメント D と $F_{74\mu}$ との関係を調べたところ、今中らの実験結果から予測されたような直線関係は見出せなかった。しかし、 D のほかに液体のモル容積 V および粘性を考慮に入れることで、この実験結果は図-6に示されるようにうまく説明できるようである。砂粒子のクラックの表面エネルギー低下は、液体がクラックに浸透し、その表面をぬらす場合にはじめて生じるものである。したがって、この液体の浸透能力は液体の粒子破砕に及ぼす重要なファクターと思われる。そのようなファクターのうちで、液体のモル容積は粒子破砕量と逆比例すると考えて図-6のように $F_{74\mu} \sim D/V$ 関係とプロットしたものである。図において、5つの点はほぼ直線上にあり、アセトンを除いた4つの液体の粘性率はほぼ1であることが注目される。直線から離れた4つの点のうち、ベンゼン、エチルエーテルは両者とも低粘性の液体であり、したがって、それらのクラックへの浸透は比較的容易であろう。これに対して、エチレングリコール、ホルムアミドは高粘性液体であり、それらはクラックへの浸透に際して大きな抵抗を受けるものと考えられる。以上の検討によって、水は大きな極性、低い粘性、小さなモル容積などの特異な性質をもつため、それは粒子破砕にもっとも大きな影響を与えうる。また、種々の方法で水飽和させた試料についての側方拘束状態での単軸圧縮試験結果は、図-7に示されるようであり、砂粒子がよく水になじんでいると思われる試料ほど、その粒子破砕量が多いことが分かった。

まとめ：水が砂のせん断強度を低下させるメカニズムを明らかにするために、異なった間げき流体をもつ豊浦砂の高圧三軸試験を行ない、次のような見解を示した。すなわち、高圧下で隣接粒子の接触部にクラックが発生するが、水は分子容が小さくまた粘性が低いためこのクラック内部に容易に侵入でき、その高極性のためにクラックの表面エネルギーを著しく低下せしめる。その結果、クラックの拡大は容易となり、粒子破砕は促進される。

文献：1) 三浦・山内・井上：第10回工質工学研究発表会（発表予定）

2) M.L. Hammond and S.F. Ravitz: Jour. of the American Ceramic Soc., Vol. 46, No. 7, 1963

3) O. Imanaka, S. Fujino and K. Shinohara: Bull. the Japan Soc. of Prec. Eng., Vol. 2, No. 1, 1966

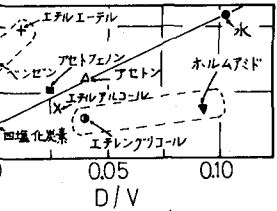
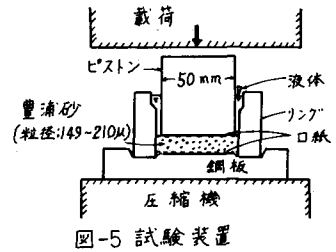


図-6 $F_{74\mu} \sim D/V$

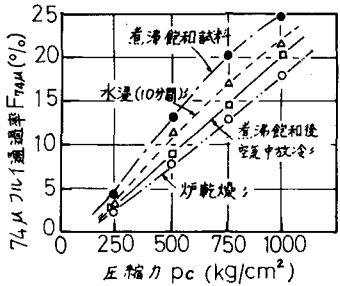


図-7 $F_{74\mu} \sim P_c$