

含水比変動に伴う破砕性土のせん断特性変化

CHANGES OF SHEAR CHARACTERISTICS OF COLLAPSIBLE SOILS
DUE TO VARIATIONS IN WATER CONTENT

三浦 哲彦*・村田 秀一**・原田 敦***

By Norihiko MIURA, Hidekazu MURATA and Atsushi HARADA

1. ま え が き

砂質土の切土斜面や盛土斜面はしばしば豪雨時に崩壊する。その原因としては、a) 土の単位重量の増加と地下水浸透力による斜面の不安定化、b) 雨水による表面侵食、c) 土のせん断強度の低下などが考えられよう。これらはいずれも土質工学上の重要な問題であって、それぞれのテーマについて数多くの研究が行われている。本研究は、c) の問題に関連して含水比変動に伴う砂質土特にまさ土のような破砕性土のせん断特性変化について検討し、斜面崩壊の機構解明に寄与しようとするものである。

さて、これまでの諸研究の成果より、砂質土のせん断特性が変化するのは水の作用によって次の4つの効果が変わるためと考えられる。すなわち、毛管結合力効果、摩擦効果、セメンテーション効果および粒子破砕効果である。これらの効果のうちいずれが関与しているかを考察しつつ従来の研究で明らかにされたことを概観する。

まず、湿潤砂と乾燥砂のせん断特性はほぼ同じであるという実験結果が Nash¹⁾、Horn et al.²⁾、Lee et al.³⁾ ほかによって報告されている。いずれも強い土粒子からなる乱した砂についての実験結果であるから、粒子破砕効果およびセメンテーション効果については考えなくてよい。Horn らは、その実験において毛管結合力効果が認められたと述べており、また、石英ブロック間の摩擦係数は水の作用で増加するのに砂試料の摩擦効果は変わらないことを示し、これは砂粒子表面がミクロ的には非常に粗いからであると推論している²⁾。

砂や礫について、乾燥試料の内部摩擦角 ϕ' に比べて湿潤試料の ϕ' は低いという結果が Bishop et al.⁴⁾、

Zeller et al.⁵⁾、Lee et al.³⁾ ほかにより報告されている。この中で Lee et al. は、強い土粒子からなる Ottawa sand は水分の影響を受けないが、弱い土粒子を含む Antioch sand は水分の作用で粒子破砕が進み応力ひずみ、強度特性が著しく変わることを示している。豊浦砂のように強い土粒子からなる砂であっても、高圧下では水の作用でせん断強度は低下する⁶⁾。これは、低圧下での Antioch sand の場合と同じように、粒子破砕効果と関係が深い。

乱したしらすやまさ土のせん断特性は含水状態によって著しく変化するが^{7), 8)}、これらの土粒子はきわめて弱い弱であるので水の作用で粒子破砕効果が変わったのがそのおもな原因ではないかと考えられる。また雲母などの粘土鉱物を含むまさ土では、砂の場合に比べて摩擦効果および毛管結合力効果の影響も一層大きいであろう。

乱さないしらすやまさ土においても含水比増大に伴ってせん断強度は低下する^{9), 10)}。この場合には、毛管結合力効果、粒子破砕効果のほかにセメンテーション効果が関与していると思われる。

上述のように、砂質土のせん断特性が水の作用で著しく変化する場合には粒子破砕効果が重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、この効果について詳しく検討したものはあまり見当たらない。そこで本研究では砂質土の応力ひずみ、強度特性に及ぼす含水比の影響を先述の4つの効果、特に粒子破砕効果の観点から詳細に調べることにする。

2. 実験方法

(1) 実験試料

本研究では豊浦砂と乱したまさ土について実験を行った。両試料の諸性質は表—1 および図—1 に示すとおりである。まさ土は宇部市内で採取した試料のうち 4760

* 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科

** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科

*** 学生会員 山口大学工学部建設工科大学院生

表-1 試料の諸性質

Sample	Toyouira sand	Masado
Initial water content (%)	0.1	2.5
Maximum diameter (mm)	0.25	4.76
50% diameter (mm)	0.20	1.00
Finer than 74 μm (%)	1.0	11.0
Specific gravity	2.64	2.63
Initial void ratio	0.60~0.62	0.67~0.73

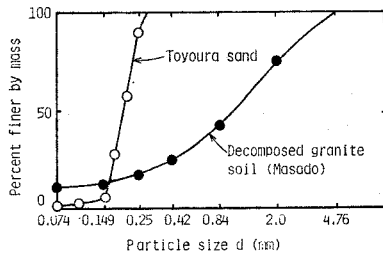


図-1 試料の粒度曲線

μm ふるい通過分を用いた。

実験は任意な応力状態で含水比の調節が可能な三軸圧縮試験を行った。その供試体はモールドに支持されたゴムスリーブ内に密な状態に気乾試料を押し固めて、寸法が直径 50 mm, 高さ 125 mm となるように作製した。供試体自立のために -10 kPa の負圧をかけ、寸法を測ってこれを試料の初期状態とした。

(2) 三軸圧縮試験

次の 5 種類の方法で供試体の含水状態を変化させて側圧一定の排水条件下で三軸圧縮試験を行った(図-2参照)。せん断ひずみ速度は、応力制御式でせん断する過程では約 2 時間をかけて 6~8 段階で所定応力レベルに達せしめ、また、ひずみ制御式では $0.4\%/min$ の軸ひずみ速度でせん断した。

D_0 : 気乾試料を 1 時間圧密し、次いでひずみ制御式でせん断。

D_{20} : 気乾試料圧密後、応力制御式で破壊時軸差応力 q_f の 20% の応力状態とし、120 時間放置した後ひずみ制御式でせん断。

$D_{20}W$: 同じく q_f の 20% の応力状態で水を供給して湿潤状態とし、120 時間放置した後せん断。

$D_{20}WD$: 同じく q_f の 20% の応力状態で湿潤状態とし、24 時間放置した後 96 時間乾燥空気を通して気乾状態に戻してからせん断。

$D_{20}WD_w$: $D_{20}WD$ と同じく乾燥空気中含水比を下げ、ある含水比 w とした後せん断。

供試体への水の供給は、上部ペDESTALから -10 kPa で吸引しつつ下部ペDESTALから脱気水を供給し、吸引ビンに約 10 cm^3 の水がたまるまで(まさ土で約 3 時間)行った。この操作による飽和度は、豊浦砂で 94%, ま

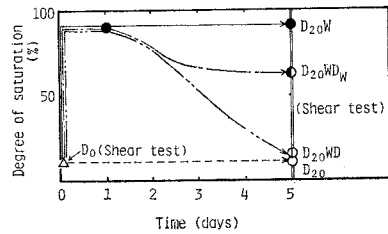


図-2 三軸圧縮試験の手順

さ土で 91% 程度であった。

$D_{20}WD$ など一度湿潤した試料を気乾状態に戻すには下部ペDESTALから -10 kPa で吸引しつつ上部ペDESTALからアクリル円筒(内径 5 cm×長さ 70 cm)のシリカゲル中を通った空気を供給することで行った。まさ土の場合、この方法で約 96 時間乾燥すると当初の気乾試料に近い含水比となる。このように、 $D_{20}WD$ 試験では合計 120 時間を要したのでこれに合わせて他の試験も全試験時間を 120 時間とした。

q_f の 20% の応力状態で水を供給した上記の D_{20} シリーズのほかに、 q_f の 40% で給水した D_{40} シリーズの実験も行った。

供試体の体積変化 ΔV は 2 重ビューレット法によって測定した。これは供試体の体積変化およびピストン貫入に伴う三軸室の圧力変化を常にゼロに戻すように 2 重ビューレットの水位を調節し、ビューレットの水量変化からピストン貫入量を差し引いて ΔV を間接的に測る方法である。飽和供試体を用いて 2 重ビューレット法と通常の方法(供試体からの排水量を測定)の比較を行った結果、両者はよい一致を示すことがわかった¹⁾。

3. 実験結果

(1) 応力ひずみ関係

a) 豊浦砂

側圧 $\sigma_3 = 294 \text{ kPa}$ で行った D_{40} シリーズの実験結果は図-3に示すようであった。これからわかるように給水開始から 120 時間の間に生じる軸ひずみの変化はわず

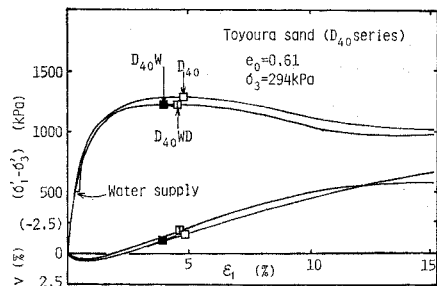


図-3 豊浦砂の排水三軸圧縮試験結果 (D_{40} シリーズ)

か0.2%であって、応力ひずみ曲線に目立った変化は生じない。これは、せん断中に粒子破砕はほとんど生じないこと、摩擦効果の変化は無視できること^{2), 12)}、毛管結合力効果の影響は小さいこと(4.(1)参照)などから当然の結果であるといえる。

b) まさ土

D_{20} シリーズおよび D_{40} シリーズの実験結果を 図-4, 5 に示す。両図の比較から、給水時の応力レベルが高いほど応力ひずみ曲線への影響は強く現われることがわかる。また、気乾試料 D_{20} , D_{40} では所定応力を120時間保持した間の軸ひずみ ϵ_1 と体積ひずみ v の増加は小さいのに対して、湿潤試料 $D_{20}W$, $D_{40}W$ では給水中の3時間に ϵ_1 , v とともに急激に変化しそれぞれ約3%も増加する。しかし後者の場合も、給水後からせん断直前までの約117時間における ϵ_1 , v の変化は2%に満たない。

(2) せん断強度～含水比関係

まさ土について破壊時軸差応力 $q_f = (\sigma_1' - \sigma_3')_f$ と破壊時含水比 w_f の関係を調べたのが 図-6 である。気乾試料では D_0 , D_{20} , D_{40} の間の q_f 差は小さいことか

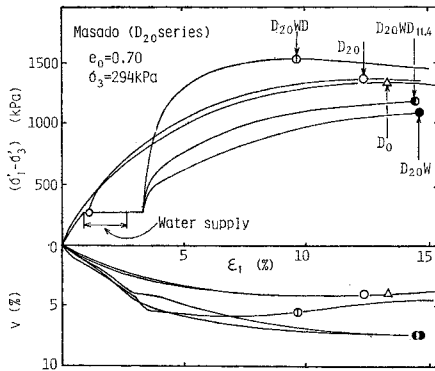


図-4 まさ土の排水三軸圧縮試験結果 (D_{20} シリーズ)

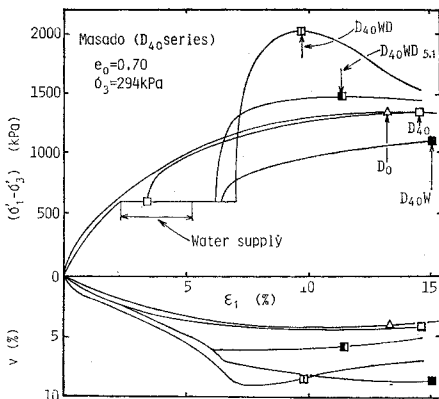


図-5 まさ土の排水三軸圧縮試験結果 (D_{40} シリーズ)

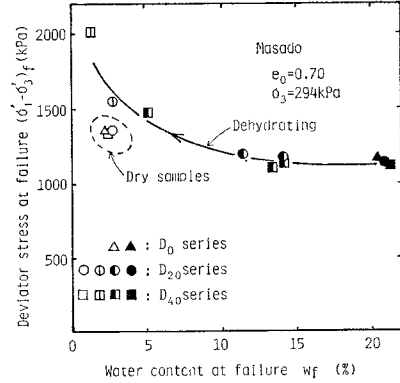


図-6 まさ土の破壊時軸差応力～含水比関係

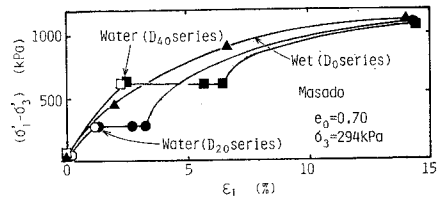


図-7 水供給時の応力レベルの影響(まさ土)

ら、せん断前に q_f の40%以下の応力を120時間与えても強度への影響は小さいことがわかる。一方、湿潤試料では D_0W , $D_{20}W$, $D_{40}W$ の間の q_f 差は小さいので、応力径路上のどの位置で給水したかはせん断強度にはわずかな影響しか与えないといえよう(図-7)。さらに、気乾試料の破壊時軸差応力 q_f に対して、湿潤試料の q_f は約20%低く、湿潤後再気乾試料の q_f は約30%高いことがわかる。

(3) ストレスダイレイタンスー関係

砂質土の破壊時有効応力比 $(\sigma_1'/\sigma_3')_f$ と体積変化率 $(dv/d\epsilon_1)_f$ との間には直線的関係のあることが知られている^{14), 15)}。すなわち、

$$\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}\right)_f = \alpha - \beta \left(\frac{dv}{d\epsilon_1}\right)_f \dots\dots\dots (1)$$

豊浦砂について既発表のデータ^{9), 15)}を式(1)の形にプロットした結果は 図-8 中に示されている。乾燥試料、湿潤試料の区別なく、 $\sigma_3 = 98 \text{ kPa} \sim 50 \text{ MPa}$ の広範な圧力域に対して式(1)が成り立つことがわかる。係数の値を求めると $\alpha = 3.5$, $\beta = 2.1$ となって、この数値は 図-3 の結果にもおおむね適用できる。

次に、まさ土についてもストレスダイレイタンスー関係は直線となるのがわかる(図-8)。これで注目されるのは、試料の初期条件が同じであればせん断過程での含水状態・粒度・密度の変化にかかわらず $(\sigma_1'/\sigma_3')_f \sim (dv/d\epsilon_1)_f$ 関係は1本の直線で表わされることである。気乾試料(マーク△, ○, □)は湿潤されると直線に沿って強度は低下し(▲, ●, ■), 再気乾されると右上方

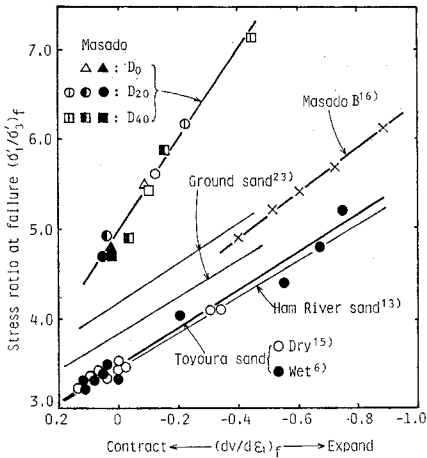


図-8 破壊時応力比～体積変化率関係

に移動して強度は高くなる (■, ⊙, □). この直線の係数は $\alpha=5.0$, $\beta=5.0$ である.

4. 実験結果の考察

砂質土の応力ひずみ、強度特性が含水状態に変化する原因は、先述のように毛管結合力・摩擦・セメンテーション・粒子破碎の諸効果の変化にあると考えられるので以下に個々の効果について検討を加える.

(1) 毛管結合力効果

非粘性土が不飽和状態でみかけの粘着力を示す現象は毛管結合力効果で説明される. この効果がせん断強度に及ぼす影響の度合いは試料の飽和度によって変わる. その詳しい検討は改めて行うことにして、ここでは湿潤試料の毛管結合力効果がせん断強度をどの程度増加せしめるのかを一軸圧縮試験の結果に基づいて推定する.

$D_{10}W$ 試験において $\epsilon_1=5\%$ (豊浦砂) または 10% (まさ土) で実験を停止し、供試体からゴムスリーブを除去し毛管結合力のみで自立した状態で一軸圧縮強度を調べた. その結果、図-9 に示すように豊浦砂で 10.8 kPa 、まさ土で 45.1 kPa の強度が測定された. これらの全応力モール円 (実線) がそれぞれの破壊線に接する

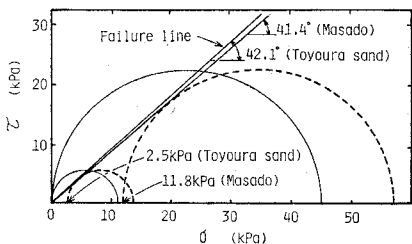


図-9 一軸圧縮試験結果 (実線) による毛管結合力の推定

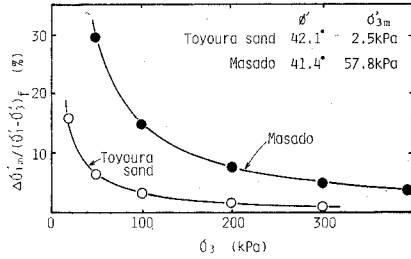


図-10 毛管結合力効果によるせん断強度増加割合

まで移動させると、これは有効応力円 (破線) となってその σ'_3 は毛管結合力によって生じた有効側圧の増加 $\Delta\sigma'_{3m}$ を与える. 試料の内部摩擦角を ϕ' とすると、 $\Delta\sigma'_{3m}$ による σ'_1 の増分は、

$$\Delta\sigma'_{1m} = \left(\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \times \Delta\sigma'_{3m} \dots \dots \dots (2)$$

それゆえ、破壊時軸差応力 $q_f = (\sigma'_1 - \sigma'_3)_f$ に及ぼす毛管結合力効果の割合は次式で表わされる.

$$\frac{\Delta\sigma'_{1m}}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f} \times 100 = \frac{\Delta\sigma'_{3m}}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f} \left(\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \times 100 (\%) \dots \dots \dots (3)$$

図-10 は種々の側圧に対して $\Delta\sigma'_{1m}/(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f$ の値をプロットしたものである (ただし、 ϕ' は σ_3 によらず一定であるとしている). たとえば $\sigma_3=50 \text{ kPa}$ では、毛管結合力による q_f の増加割合は豊浦砂で約 6% 、まさ土では 30% にも及ぶ.

しかし、図-3 の豊浦砂の場合は $\sigma_3=294 \text{ kPa}$ で実験しているので毛管結合力の影響は 1% 程度であって実験誤差の範囲に入る. 一方、まさ土の場合は、図-10 から $\sigma_3=294 \text{ kPa}$ の条件下では毛管結合力効果による q_f の増加は 5% 程度と推定されるが、実際には図-4, 5 に示されるように湿潤試料の q_f は気乾試料のそれより 20% も低くでている. したがって、この湿潤による強度低下の原因は毛管結合力効果以外に求めなければならない.

(2) 摩擦効果

実験試料について、摩擦効果の変化だけを単独に測定することは非常に難しいが、次の方法で摩擦効果に及ぼす水分の影響の程度を推定した.

まず豊浦砂の場合は、石英(80%)、長石(17%)を主体としているので、Horn et al.²⁾、Bromwell と Dickey¹²⁾ の実験結果を参考にして水分の作用で摩擦効果は変わらないと考えた.

まさ土の場合は、主要鉱物である石英・長石と雲母とでは摩擦特性が著しく異なる²⁾ので、試料全体としての摩擦効果の変化を知るために2種類の実験を行った. 一つは、原試料から取り出した 5 cm 立方程度の岩片をダイヤモンドカッターで切断し、得られた2片をそれぞれ

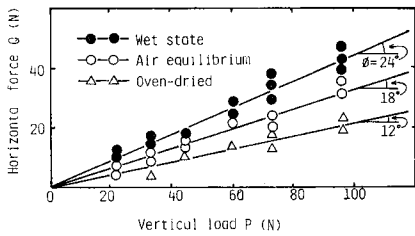


図-11 まさ土母岩のブロック-ブロック間摩擦角 $\phi_b = \tan^{-1}(Q/P)$ に及ぼす水分の影響

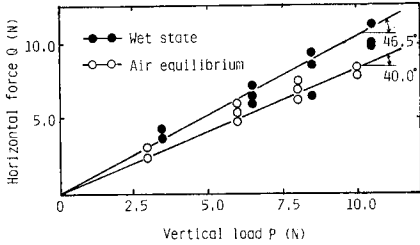


図-12 まさ土-母岩間摩擦角 $\phi_\mu = \tan^{-1}(Q/P)$ に及ぼす水分の影響

円形容器内に石膏で固定して面対面の摩擦係数 $\mu = \tan \phi_b$ を調べた。試験片は、炉乾燥 (110°C) 直後・気乾・湿潤の3状態で実験を行った。図-11 は実験結果の一例であるが、試験片を代えて行った4回の実験より湿潤状態での ϕ_b 値は気乾状態のそれより平均で 7.3° 高いことがわかった。

他の一つは、粒子間摩擦角を求めるための Rowe の方法¹⁹⁾に準じて岩片とまさ土試料を用いて実験を行った。そして図-12 に示すように湿潤状態で 46.5°, 気乾状態で 40.0°, その差 6.5° という結果を得た。上述の湿潤による ϕ_b, ϕ_μ の増加分をただちにせん断強度の増加に結びつけることはできないにしても、まさ土の摩擦効果が水分の作用で増加するのは確かであるといえよう。このことと前項(1)で述べたことから、湿潤によるまさ土の強度低下は摩擦効果・毛管結合力効果以外に原因があることは明らかである。

(3) セメンテーション効果

本実験で用いた豊浦砂とまさ土は、いずれも乱した試料であるのでセメンテーション効果については考えなくてよい。しかし、この効果が水分の影響でどの程度変わるのか概略の値を知るために簡単に考察しておく。セメンテーション効果は土質、応力履歴、地質学的堆積時間、環境条件等によって大きな隔たりがあるが、ここでは乱さないしらすについて述べる。

著者の一人⁹⁾は、先に乱さないしらす供試体を湿潤土の中に静置することによって含水状態を変え、側圧 29 kPa~392 kPa のもとで排水三軸圧縮試験を行った。その結果、図-13 に示すように供試体の含水比が 14.8%

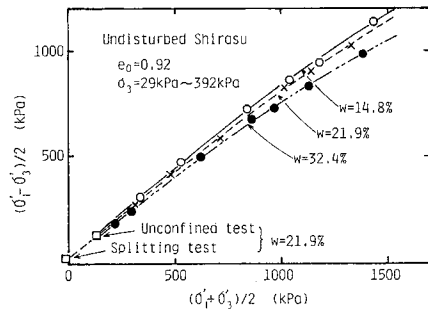


図-13 含水比の変動に伴う乱さないしらすのせん断強度の変化

から 32.4% に増加するとせん断強度は約 10% 低下することを見出した。これは主としてセメンテーション効果の減少に起因するものと推察される。すなわち、せん断過程において粒子間のセメンテーションはしだいに破壊されていくが、そこに水分が存在すると破壊は一層容易となりせん断強度は低下すると考えられる。この現象のメカニズムは、次項で述べる粒子破砕促進のメカニズムと類似している。このように、乱さないしらすの強度低下にはセメンテーション効果のみならず粒子破砕効果も関与していると考えられるが、両者を分離評価するためにはさらに詳細な実験を要するのでこの問題は今後の検討課題としたい。

(4) 粒子破砕効果

まさ土は $\sigma_3 = 100$ kPa 程度の通常の大きさの側圧下でせん断される場合にもかなりの量の粒子破砕を生じるのであって、しらすなどとともに破砕性土に分類されるべき土である。側圧が大きくなると当然粒子破砕量も増えせん断特性への影響は顕著となってくる¹⁰⁾。一方、粒子破砕は水分の作用で促進されることが知られている⁹⁾。それゆえ、含水比変動に伴うまさ土のせん断特性変化を明らかにするには粒子破砕の観点から調べるのが大切である。

粒子破砕に及ぼす水分の作用のメカニズムについてはすでに述べている⁹⁾ところであるが、要約すると次のようである。

クラックを有するぜい性材料の引張強度 σ_t はOrowan によって次式で表わされている²⁰⁾。

$$\sigma_t = (Ea/c)^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 E はヤング率、 a はクラックの表面エネルギー、 c はクラックの長さである。粒子の潜在クラックあるいは粒子間力で生じたクラック中に水分子等が侵入すると、 a が低下して σ_t は小さくなり結局粒子破砕は促進される。メカノケミストリーの知識によれば、水は、表面エネルギーを低下せしめる作用が特に強い液体である²¹⁾。これは、水は他の液体に比べて双極子モーメント

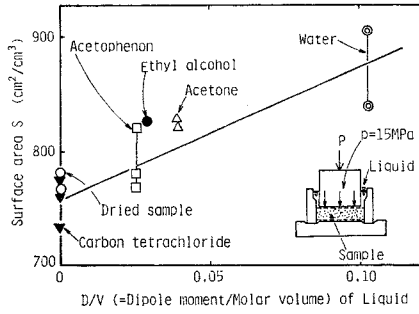


図-14 まさ土の粒子破砕量（表面積の増加）に及ぼす各種液体の影響

D が大きいこと、分子の大きさ V が小さくまた粘性が低いのでクラックに侵入しやすいことなどが関与していると考えられている⁹⁾。

図-14 はまさ土の粒子破砕（表面積 S の増加，5. (1) 参照）に及ぼす水の影響を他の液体と比べて示したものである。4種類の液体は水の粘性に近い粘性のものを選んで、この実験からみても水は粒子破砕を促進させる作用の強い液体であることが理解されよう。

上述のように破砕性土であるまさ土では、粒子破砕効果が重要な役割を果たしていることが明らかであるので、以下にこの問題について詳しく述べることにする。

5. 粒子破砕効果に関する考察

(1) 実験方法と実験結果

せん断過程におけるまさ土の粒子破砕量変化を調べることによって含水比変動に伴うせん断特性の変化に粒子破砕効果がどのように関与しているかを明らかにする。粒子破砕量は試料の表面積 $S(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ の増加で表わすこととし¹³⁾、次の関係から求める。

$$S = S_w \times \rho_d \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 S_w は比表面積 (cm^2/g)、 ρ_d は乾燥密度である。 S_w は、細粒分についてはブレン法で、粗粒分についてはふるい分けによって求める。

S の値は試料になされた塑性仕事 $W(\text{J}/\text{cm}^3)$ とユニークな関係にあることがわかっているので本実験試料についても $S \sim W$ 関係を調べていく。 W は、応力成分 $q (= \sigma_1' - \sigma_3')$ 、 $p (= (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3)$ およびひずみ増分 $d\varepsilon (= 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/3)$ 、 $dv (= d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3)$ を用いて次式で表わされる。

$$W = \int (qd\varepsilon + pdv)_p \dots \dots \dots (6)$$

脚符 p は塑性成分を示す。これより、負荷・除荷全過程の $q \sim \varepsilon$ 、 $p \sim v$ 両曲線の面積より W の値が求められる。なお、比表面積 S_w および塑性仕事 W の詳しい

求め方は文献^{15), 16)}に示している。

さて、ある応力レベル q/q_f まで載荷される過程で生じた粒子破砕量 ΔS およびその応力下で給水したことによって生じた ΔS の関係の一例は図-15に示すようである。給水する前の ΔS は q/q_f が高くなるとともに大きくなる。これは q/q_f の増加に伴って W が増大するためである（次項参照）。次に高い応力レベルで給水すると著しく粒子破砕が進み、その結果図-4, 5に示したように軸ひずみ ε_1 、体積ひずみ v が急激に進むものと考えられる。 q/q_f が80%以上の応力状態で給水すると供試体は破壊する。

次に、せん断中のある応力点で実験を停止し、そのときの試料表面積およびそれまでになされた塑性仕事 W を求めてプロットしたのが図-16である。プロットされた各点が応力ひずみ曲線上で概略どのあたりに位置していたかは挿入図に示されている。先の研究^{15), 16)}では側圧の大きさによらずユニークな $S \sim W$ 曲線が得られたことに鑑み、図-16のデータはかなりばらついてはいるが1本の曲線で表わせると考えて議論を進める。つまり、含水状態や応力履歴のいかんによらず、粒子破砕量は塑性仕事によってユニークに定まると考えるのであ

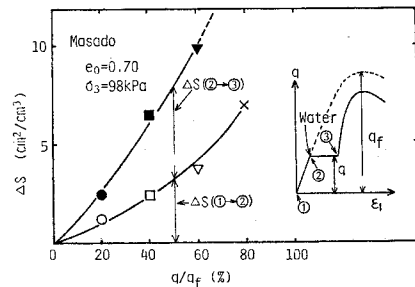


図-15 水供給時の応力レベル (q/q_f) と粒子破砕量 (ΔS) の関係

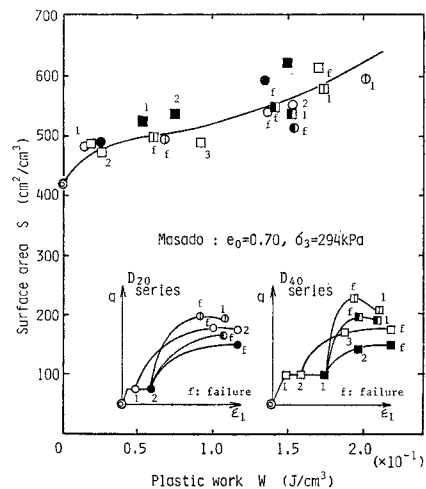


図-16 まさ土の塑性仕事～表面積関係

る。この考えは、次項の検討によって結果的に妥当であることが理解される。

(2) せん断強度に及ぼす粒子破砕の影響

せん断強度に及ぼす粒子破砕の影響は粒子破砕率を用いて説明できる。図-16の $S \sim W$ 曲線において、破壊応力に相当する点 (f 点) の曲線勾配が粒子破砕率 $(dS/dW)_f$ を与える。そしてこの値は体積変化率 $(dv/d\epsilon_1)_f$ と直線的関係にあることが他の試料についてわかっているので^{15), 16)}、本実験試料についても両者の関係を調べた。その結果、図-17に示すように、含水状態や応力履歴によらず $(dS/dW)_f \sim (dv/d\epsilon_1)_f$ 関係はほぼ直線となることが確かめられた。

同図には本試料とは異なる2種類のまさ土および高圧下の豊浦砂の粒子破砕率～体積変化率関係を示している。まさ土と豊浦砂では直線の勾配はかなり異なるようである。 $(dS/dW)_f > 0$ の範囲で直線を式で表わすと、

$$\left(\frac{dv}{d\epsilon_1}\right)_f = a + b \left(\frac{dS}{dW}\right)_f \quad \dots\dots\dots (7)$$

本実験に用いたまさ土では、 $a = -0.85, b = 0.0092$

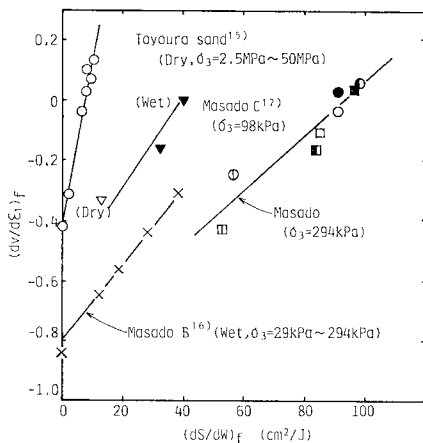


図-17 体積変化率 $(dv/d\epsilon_1)_f$ と粒子破砕率 $(dS/dW)_f$ の関係

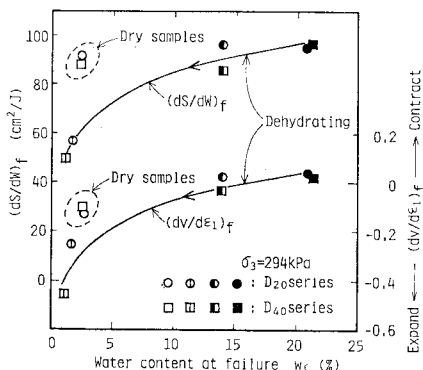


図-18 まさ土の破壊時の粒子破砕率 $(dS/dW)_f$ 、体積変化率 $(dv/d\epsilon_1)_f$ と含水比 w_f の関係

となる。この関係を式 (1) に代入すると次式を得る。

$$\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}\right)_f = 9.3 - 0.046 \left(\frac{dS}{dW}\right)_f \quad \dots\dots\dots (8)$$

この式は粒子破砕率がゼロでない場合に限って適用できる式であるが、その場合にはまさ土の破壊時応力比は含水状態や応力履歴に無関係に粒子破砕率のみによって定まることを示している。側圧を低くしていくと、ピーク応力付近での粒子破砕が生じなくなる場合が現われよう。このときの $(\sigma_1'/\sigma_3')_f$ は式 (8) より 9.3 と予測される。

豊浦砂についても、粒子破砕を生じる高圧下では式 (8) と同形の関係 $(\sigma_1'/\sigma_3')_f = 4.34 - 0.111 (dS/dW)_f$ が得られる。

次に、破壊時の粒子破砕率 $(dS/dW)_f$ と体積変化率 $(dv/d\epsilon_1)_f$ が含水比の変動に伴ってどのように変化するかを示したのが 図-18 である。同図において、一度湿潤した試料のデータのみ注目すると、供試体の含水比 w_f が減少するにつれて $(dS/dW)_f$ は小さくなり、また $(dv/d\epsilon_1)_f$ も小さくなって体積膨張の傾向が強まることがわかる。さらに、 $(dS/dW)_f$ と $(dv/d\epsilon_1)_f$ の変化は w_f に対して同じ傾向を示し、図-17 に示した両者の直線的な関係を裏付けている。なお、気乾試料 D_{20}, D_{40} の粒子破砕率と体積変化率が湿潤後再気乾試料の値より大きいのは、前者は湿潤過程での粒子破砕を受けないために破砕されやすい粒子がより多く残っていたためと解釈できる。

以上の議論から、含水比変動に伴う粒子破砕効果の変化とそれがせん断強度に与える影響については次のように要約することができよう。すなわち、気乾試料に比べて湿潤試料は粒子破砕を生じやすいので粒子破砕率は大きく、したがってダイレイタンス効果は減少してせん断強度は低いものとなる。また、湿潤後再気乾試料は湿潤過程の粒子破砕で粒度も密度もより安定な状態に変わっており、同時に含水比も気乾状態に戻されている。それゆえ、再気乾後にせん断される場合には破壊点での粒子破砕率は気乾試料 D_{40} のそれより小さくなり、結果的により高いせん断強度を示したと解釈される。

6. ま と め

含水比変動によって砂質土のせん断特性が変化する場合、毛管結合力・摩擦・セメンテーション・粒子破砕の4つの効果の変化が関与していると考えられる。本研究では、豊浦砂および破砕性土のまさ土を実験対象として湿潤・再気乾に伴う応力ひずみ、強度特性の変化を上記4つの効果、特に粒子破砕効果の観点から検討し、次のような結論を得た。

(1) 豊浦砂のせん断特性は含水比変動の影響をあまり受けない。これは摩擦・セメンテーション・粒子破碎の3効果が含水状態にあまり依存しないからである。毛管結合力効果によるせん断強度の増加率は、 $\sigma_3=50$ kPaで6%、 $\sigma_3=300$ kPaで1%程度である。

(2) 破砕性土であるまさ土の応力ひずみ、強度特性は含水状態により著しく変化する。破壊時軸差応力 q_f の40%の応力下で平衡状態にある気乾試料を湿潤状態にすると、軸ひずみと体積ひずみは2, 3%程度進行し、強度は約20%低下する。湿潤後再気乾してからせん断すると強度は逆に約30%増加する。

(3) まさ土の摩擦効果は湿潤によって破壊時軸差応力 q_f を増加させる方に変化するとともに、毛管結合力も飽和状態以前の含水比までは q_f を増加させる効果を発揮する。それにもかかわらず湿潤によって q_f が低下するのは、含水比の増加によって粒子破碎が著しく促進されるためである。

(4) まさ土の破壊時主応力比～体積変化率関係および体積変化率～粒子破碎率関係は、いずれも直線関係となる。これより、破壊時主応力比と粒子破碎率の間の直線関係(式(8))が導かれる。また、粒子破碎率は含水比の増加に伴って大きくなる。

(5) 以上より、含水比増加によってまさ土のせん断強度が低下するのは、湿潤されると粒子が破砕されやすくなって粒子破碎率は大きくなり、したがってダイレイタンシー効果は減少して強度は低下する、と説明される。

参考文献

- 1) Nash, K.L.: The Shearing Resistance of a Fine Closely Graded Sand, Proc. 3rd Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engrg., Vol. 1, pp. 160~164, 1953.
- 2) Horn, H.M. and D.U. Deere: Frictional Characteristics of Minerals, Geotechnique, Vol. 12, No. 4, pp. 319~335, 1962.
- 3) Lee, K.L., H.B. Seed and P. Dunlop: Effect of Moisture on the Strength of a Clean Sand, Proc. ASCE, Vol. 93, No. SM 6, pp. 17~40, 1967.
- 4) Bishop, A.W. and A.K.G. Eldin: The Effect of Stress History on the Relation Between ϕ and Porosity in Sand, Proc. 3rd Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engrg., Vol. 1, pp. 100~105, 1953.
- 5) Zeller, J. and R. Wullmann: The Shear Strength of the Shell Materials for the Goschenalp Dam, Switzerland, Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engrg., Vol. 2, pp. 399~404, 1957.
- 6) Miura, N. and T. Yamanouchi: Effect of Water on the Behavior of a Quartz-Rich Sand under High Stresses, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp. 23~34, 1975.
- 7) Haruyama, M.: Effect of Water Content on the Shear Characteristics of Granular Soils such as Shirasu, Soils and Foundations, Vol. 9, No. 3, pp. 35~57, 1969.
- 8) 福田 護: 浸水に伴う土のせん断抵抗の低下と盛土斜面の安定解析—まさ土のような風化砂質土を対象として—, 土質工学会論文報告集, Vol. 18, No. 3, pp. 75~83, 1978.
- 9) 村田秀一・山内豊聡: 乱さないシラスの強度特性に及ぼす含水比の影響について, 土質工学会論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 105~115, 1978.
- 10) 西田一彦・青山千彰: 不かく乱まさ土のせん断強度に及ぼす浸水の影響について, 第15回土質工学研究発表会, pp. 501~504, 1980.
- 11) 三浦哲彦・河原徹郎: 砂質土の collapse 現象に関する実験, 第36回土木学会年次学術講演会, III-17, pp. 33~34, 1981.
- 12) Lambe, T.W. and R.V. Whitman: Soil Mechanics, SI Version, John Wiley & Sons, New York, p. 66, 1979.
- 13) Bishop, A.W.: The Strength of Soils as Engineering Materials, Geotechnique, Vol. 16, No. 2, pp. 91~128, 1966.
- 14) Oda, M.: The Mechanism of Fabric Changes during Compressional Deformation of Sand, Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, pp. 1~18, 1972.
- 15) 三浦哲彦・山内豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, No. 260, pp. 109~118, 1977.
- 16) Miura, N. and S. O-hara: Particle-Crushing of a Decomposed Granite Soil under Shear Stresses, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 3, pp. 1~14, 1979.
- 17) Miura, N.: A Mechanism of the Deterioration of Decomposed Granite Soil due to Submergence, Jour. of Natural Disaster Science, Vol. 1, pp. 67~76, 1979.
- 18) 前出 12) p. 245.
- 19) Rowe, P.W.: The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc., A 269, pp. 500~527, 1962.
- 20) Orowan, E.: Energy Criteria of Fracture, Welding Research Supplement, Vol. 9, pp. 157s~160s, 1955.
- 21) 久保輝一郎: メカノケミストリー概論, 東京化学同人, pp. 22~106, 1971.
- 22) Lo, K.Y. and M. Roy: Response of Particulate Materials at High Pressures, Soils and Foundations, Vol. 13, No. 1, pp. 61~76, 1973.

(1982.10.1・受付)