# 高圧三軸圧縮試験における砂粒子の破砕特性について

三　浦　哲　彦*・山　本　哲　朗*

# Crushing Properties of Sand Grains during Shear at High Confining Pressures.

Norihiko MIURA and Tetsuro YAMAMOTO

**Abstract**

In order to clarify the property of grain crushing of a sand during a high pressure triaxial compression test, a mineralogical examination was made on the samples sheared under such a high confining pressure as 100 kg/sq. cm.

Comparing two samples, which were compressed under the same confining pressure but in the states of different initial porosities, it was found that they were experienced the different features of crushing of their main mineral particles, quartz, chert and feldspar. This phenomenon was considered to be related to the volume change characteristics of the samples during shear tests.

## 1. まえがき

周知のように，高い拘束圧の下で粒状材料をせん断すると，材料を構成する粒子はせん断中に著しく破砕される．筆者の一人は，これまでに，15kg/cm$^2$ から500kg/cm$^2$ までの拘束圧下における砂の排水せん断特性について一連の研究を行なってきたが[1)2)]，前報[3)]においては特に，せん断中の供試体に関するエネルギー式について考察し，粒子破砕現象を量的に把握するため，粒子破砕に消費される仕事量を平均主応力の関数として表わすことを提案した．粒子破砕に関する上述のエネルギー式については，その後，Rittinger の粉砕理論を用いて，せん断中の試料表面積変化の観点からの検証が試みられたが[4)]，その際に，前記のような検証を行なう以前に検討しておかねばならないくつかの問題があることも明らかにされた．その一つは，豊浦標準砂のように，粒子破砕強度の著しく異なる鉱物粒子（たとえば石英と長石）が混っている材料においては，試験条件（拘束圧の大きさ）や試料条件（供試体の初期密度の大きさ，粒子間水分の有無）によって，試料はせん断中に異った破砕特性を示す[5)]，ということである．すなわち，せん断中に生じた試料の表面積変化量をもとにして，単純にその材料の破砕に消費された仕事量を求めることには問題がありそうに思われた．

本文は，上述の問題を解決するのに検討しておく必要のあるせん断中の試料の破砕特性について述べるもので，その内容はおよそ次のようである．異なった試験条件または試料条件において行なわれたいくつかの圧縮試験またはせん断試験供試体を対象にして，まず，各試料各粒径毎の鉱物組成を調べた．このデータをもとにして，各試料に含まれている主要鉱物（石英，チャートおよび長石粒子）のせん断中における表面積変化量を求めた．そして，試験条件または試料条件の違いによって生じたせん断中の破砕特性の差異を，これらの試料の応力〜軸ひずみ〜体積ひずみ曲線との関係において検討した．さらに，ある試料のせん断中の粒子破砕に消費された仕事量を，その試料に含まれる各鉱物の破砕に消費された仕事量の和として求め，試料の粒子破砕に消費される仕事量について若干の検討を行なっている．

## 2. 試料ならびに試験方法

### 2・1 試　料

本文においては，Table 1に示されるような条件のもとで圧縮または排水せん断試験された飽和豊浦標準砂の試験後試料を対象に，それらのせん断中の粒子破砕特性について考察を行なった．拘束圧50kg/cm$^2$ および，100kg/cm$^2$ の下でせん断された密づめ供試体（初期間げき比 $e_0 \doteqdot 0.61$）およびゆるづめ供試体（$e_0 \doteqdot 0.83$）についての応力〜軸ひずみ〜体積ひずみ

* 土木工学科

Table 1 Grain size distribution of saturated samples

| No. | Test | Confining pressure (kg/cm²) | Initial density | Per cent finer by weight | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 210μ | 177μ | 149μ | 105μ | 74μ |
| 34 | Compression | 100 | Dense(D) | 57.4 | 20.8 | 4.3 | 0.3 | 0.1 |
| 101 | 〃 | 〃 | Loose(L) | 62.4 | 25.6 | 7.0 | 1.6 | 0.6 |
| 63 | Shear | 50 | D | 81.1 | 50.7 | 33.8 | 21.6 | 15.3 |
| 60 | 〃 | 〃 | L | 80.4 | 46.1 | 30.9 | 19.0 | 13.8 |
| 72 | 〃 | 100 | D | 87.6 | 66.1 | 50.0 | 35.0 | 26.6 |
| 71 | 〃 | 〃 | L | 88.7 | 69.1 | 53.2 | 37.9 | 29.1 |

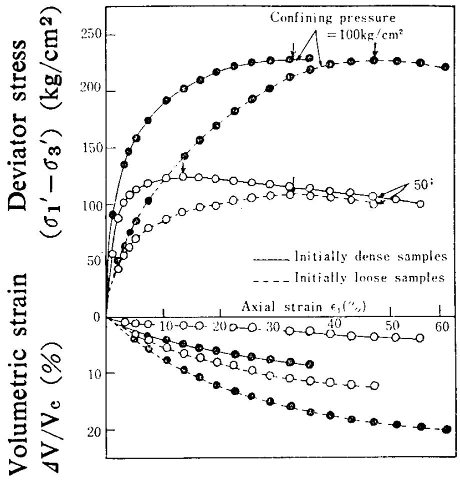


Fig. 1 Stress-strain curves of saturated samples at elevated cell pressures

関係曲線はFig. 1に示すとおりであった．なお，原試料である豊浦標準砂の粒度はFig. 2に示されており，そのおもな物理的性質は，次のとおりであった：土粒子の比重＝2.646，均等係数＝1.5，50%粒径＝0.2 mm，最大間げき比＝0.91，最小間げき比＝0.58．

## 2・2 試験方法

各試料について粒度分布，各粒径毎の鉱物組成および比表面積を調べたが，その測定は次の方法によって行なった．

まず試験試料を110°Cの温度で1日間乾燥し，デシケータ中で冷したのち，ロータップふるい振とう機にかけて10分間ふるい分けた．ふるい分けには，網目の開きが，210μ，177μ，149μ，105μ および74μの5つのフルイを用いた．

次に，上記の各フルイに残留した試料の中から2000〜3000個の粒子をとり出し，これらをガラス板の上にのせてアクリル系樹脂（リゴラック）により固結させた．この試料を研磨機にかけて約0.02mmの厚さの薄片を作製し，偏光顕微鏡観察用の試料とした．各試料とも500個の粒子を数え，各種鉱物の個数パーセントを求めた．

試料の比表面積は次の方法によって求めた．まず，74μ以上の粒子については，ふるい分け試験のデータをもとにして，各粒径ごとにその平均粒径の粒子を球形とみなして表面積を求め，それをもとに比表面積を計算した．74μ以下の試料に対しては，Blaine法（空気透過式比表面積測定法）によって比表面積測定を行なった．この値と先に求めた粗粒試料の値とから，この試料の比表面積を求めた．なお，粒子径が1μから100μの範囲の試料に対しては，空気透過法による比表面積測定値と吸着法等による値とはほぼ一致することが認められている[6]．

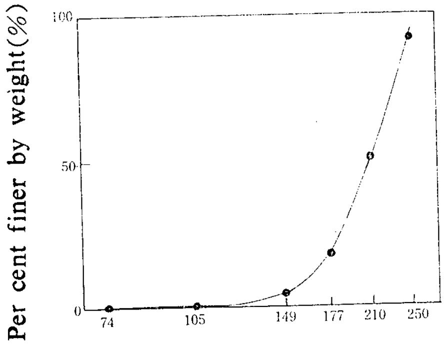


Fig. 2 Grain size distribution curve of Toyoura standard sand

## 3. 実験結果と考察

### 3・1 試験試料の粒度組成

試験条件および試料条件の異なる6個の試料について調べた粒度組成は，Table 1 に示すとおりであった．これらのデータから，圧縮過程およびせん断過程における飽和豊浦標準砂の粒子破砕特性について次のような傾向が認められる．まず，同じ大きさの圧力で等方圧縮された試料においては，ゆるづめ砂の粒子破

砕量は密づめ砂のそれより多いこと，ならびに，せん断中の粒子破砕量は，等方圧力下におけるそれより著しく多いこと，については前にも指摘した通りである[1].

さて，Table 1に示されたデータの中で注目されるのは，拘束圧 $\sigma_3=50\mathrm{kg/cm^2}$ の条件下でせん断された密づめ砂（No. 63）の粒子破砕量が同じ条件下におけるゆるづめ砂（No. 60）のそれより多いことである．拘束圧 $\sigma_3$ が，$100\mathrm{kg/cm^2}$（No.71およびNo. 72）の場合を含む $500\mathrm{kg/cm^2} \geqq \sigma_3 > 50\mathrm{kg/cm^2}$ なる条件下ではつねに，ゆるづめ砂の方がより多くの粒子破砕をせん断中に受けているのに対して，$\sigma_3=50\mathrm{kg/cm^2}$ の場合にのみ前述のような逆の関係が生じたのは，その原因の一部は両供試体の受けたせん断ひずみ $\varepsilon_1$ の大きさの違い（密づめ砂は $\varepsilon_1=55\%$，ゆるづめ砂は $\varepsilon_1=51\%$，ともに自然ひずみ）によるのであろう．しかし，そのほかに，Fig. 1の応力～ひずみ曲線にみられるように，両試料がせん断中に受ける応力に違いがあること（密づめ供試体およびゆるづめ供試体の最大平均主応力は，おのおの $92\mathrm{kg/cm^2}$ および $85\mathrm{kg/cm^2}$ であった），および後述するように，両試料における鉱物粒子の破砕特性に明らかな差異が認められることも両試料の粒度分布の違いに密接な関係があるように思われる．

### 3・2 試料の各粒径における鉱物組成

各試料の粒径毎に調べた鉱物組成は Table 2に示されるようであった．Table 1および2のデータをもとにして，豊浦標準砂を構成する3つの主要鉱物，すなわち石英，チャートおよび長石の各粒径毎の重量を全試料重量に対する百分率で表わすと Table 3のとおりであった．また，Fig. 3は，試験試料に含まれる主要鉱物の粒径頻度分布を表わしている．

Table 2 Relationships between particle size and mineral composition of saturated samples

| No. | Test | Confining pressure (kg/cm²) | Initial density | Particle size (μ) | Mineral composition (%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Quartz | Chert | Feldspar | Amphibole | Pyroxene | Mica | Magnetite |
| 34 | Compression | 100 | Dense (D) | >210 | 82.6 | 2.2 | 14.6 | 0 | 0.4 | 0.2 | 0 |
| | | | | 177−210 | 78.3 | 5.9 | 15.5 | 0.1 | 0.2 | 0 | 0 |
| | | | | 149−177 | 75.0 | 7.2 | 16.4 | 1.2 | 0.2 | 0 | 0 |
| | | | | 105−149 | 69.4 | 7.6 | 17.6 | 2.2 | 1.4 | 0 | 5.8 |
| | | | | 74−105 | 47.6 | 7.4 | 25.2 | 2.8 | 3.8 | 0.4 | 12.8 |
| 101 | 〃 | 〃 | Loose (L) | >210 | 79.4 | 4.0 | 16,0 | 0.6 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | 177−210 | 81.2 | 6.0 | 12.4 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0 |
| | | | | 149−177 | 81.6 | 5.8 | 11.2 | 0.8 | 0.4 | 0.2 | 0 |
| | | | | 105−149 | 72.0 | 3.8 | 16.0 | 2.6 | 2.0 | 0.4 | 3.2 |
| | | | | 74−105 | 64.6 | 6.8 | 19.6 | 1.8 | 0.8 | 0.2 | 6.2 |
| 63 | Shear | 50 | D | >210 | 89.6 | 3.6 | 6.6 | 0.2 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | 149−210 | 86.6 | 3.2 | 8.6 | 0.8 | 0.6 | 0 | 0.2 |
| | | | | 105−149 | 74.2 | 4.8 | 18.4 | 0.6 | 0.8 | 0 | 1.2 |
| | | | | 74−105 | 58.2 | 6.6 | 31.4 | 0.8 | 0.8 | 0.2 | 2.0 |
| 60 | 〃 | 〃 | L | >210 | 90.0 | 2.2 | 7.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | 149−210 | 88.8 | 2.8 | 8.2 | 0.2 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | 105−149 | 81.4 | 4.2 | 12.6 | 0.6 | 0.8 | 0 | 0.4 |
| | | | | 74−105 | 69.8 | 4.2 | 24.0 | 1.6 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| 72 | 〃 | 100 | D | >210 | 93.0 | 2.2 | 4.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | 149−210 | 91.2 | 3.8 | 4.8 | 0.2 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | 105−149 | 85.4 | 5.2 | 7.8 | 0.2 | 1.2 | 0 | 0.2 |
| | | | | 74−105 | 84.4 | 4.2 | 10.2 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 |
| 71 | 〃 | 〃 | L | >210 | 91.0 | 3.4 | 5.4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | 149−210 | 87.8 | 4.2 | 7.4 | 0 | 0.6 | 0 | 0 |
| | | | | 105−149 | 86.2 | 3.6 | 8.8 | 0.2 | 0.2 | 0 | 1.0 |
| | | | | 74−105 | 84.8 | 3.0 | 10.2 | 0.4 | 1.0 | 0 | 0.6 |

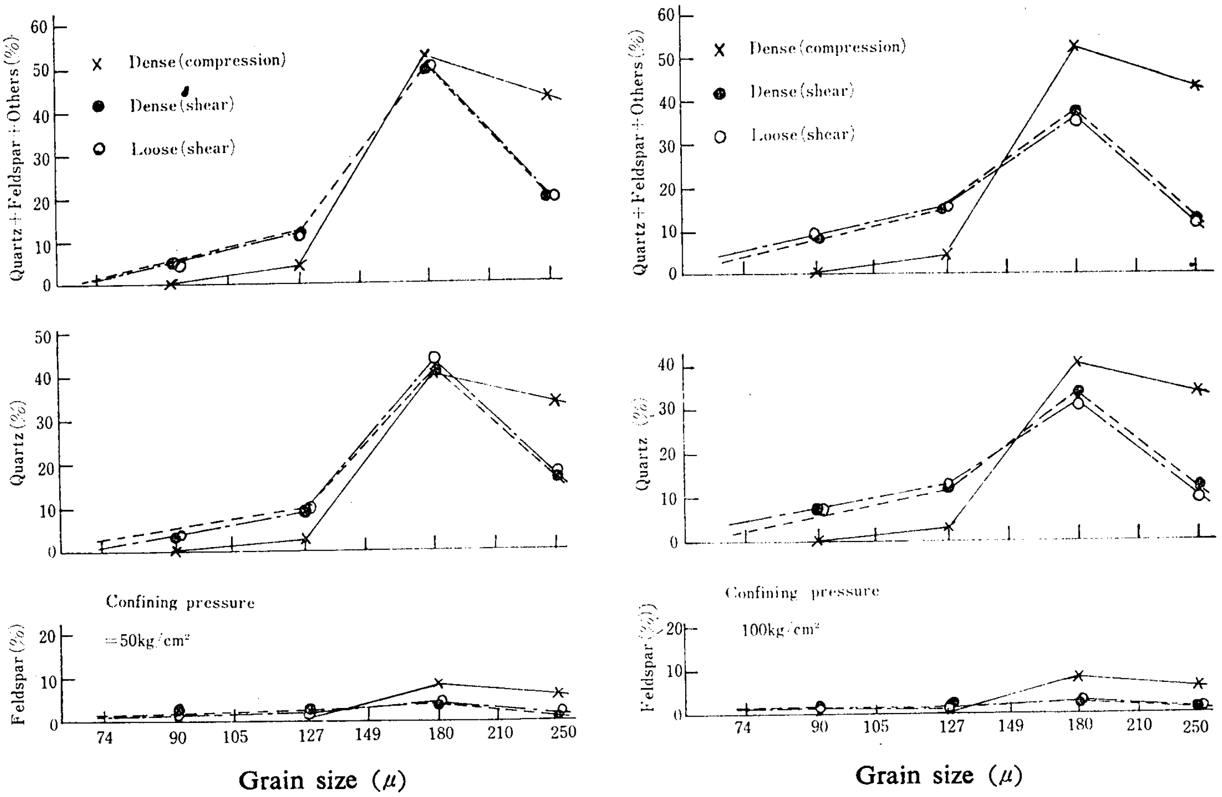


Fig. 3 Grain size and mineralogical composition

Table 3 Weight per cent of mineral particles

| No. | Test | Confining pressure (kg/cm²) | Initial density | Minerals | D>210 (μ) | 149—210 (μ) | 105—149 (μ) | 74—105 (μ) | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 63 | Shear | 50 | Dense (D) | Quartz (Q) | 17.1 | 40.6 | 9.4 | 3.4 | 70.5 | 83.2 |
| | | | | Chert (C) | 0.7 | 1.5 | 0.6 | 0.4 | 3.2 | |
| | | | | Feldspar(F) | 1.3 | 4.0 | 2.3 | 1.9 | 9.5 | |
| 60 | 〃 | 〃 | Loose (L) | Q | 17.6 | 44.0 | 9.7 | 3.6 | 74.9 | 85.7 |
| | | | | C | 0.4 | 1.4 | 0.5 | 0.2 | 2.5 | |
| | | | | F | 1.5 | 4.1 | 1.5 | 1.2 | 8.3 | |
| 72 | 〃 | 100 | D | Q | 11.5 | 34.3 | 12.8 | 7.1 | 65.7 | 73.1 |
| | | | | C | 0.3 | 1.4 | 0.8 | 0.9 | 3.4 | |
| | | | | F | 0.6 | 1.8 | 1.2 | 0.4 | 4.0 | |
| 71 | 〃 | 〃 | L | Q | 10.2 | 31.2 | 13.2 | 7.5 | 62.1 | 70.3 |
| | | | | C | 0.4 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 2.8 | |
| | | | | F | 0.6 | 2.6 | 1.3 | 0.9 | 5.4 | |

Table 3において，まず，50kg/cm²の拘束圧下でせん断された初期密度の異なる2つの試料を比較して次のことが分かる．石英粒子についていえば，ゆるづめ試料の場合は74.9%が74μフルイに残留しているのに対し，密づめ試料においてはそれより4.4%少ない70.5%がとどまっているにすぎない．一方，長石粒子の74μフルイ残留量について両試料を比較してみると，石英粒子の場合とは逆に，密づめ試料の方が1.2%ほど多くなっている．上述のことは，試料の密度条件が異なると，せん断中における粒子の破砕特性が変わることを示すものである．このような実験事実は，次節でふれるように，せん断中の粒子破砕に消費され

るエネルギーについて考察する場合には重要な意味をもってくる．50kg/cm² の拘束圧下でせん断された試料において，密づめ試料中の石英粒子の破砕量がゆるづめ試料中のそれより多いことは，粒子のつまり方とせん断中における粒子の動きの特徴に密接な関係があるように思われる．すなわち，密づめ試料においては，ゆるづめ試料の場合に比べて石英粒子どうしの接触の機会が多く，試料に加えられる力は，主として粒子強度の高い石英粒子間を通して伝達されると考えられる．Fig. 1 に見られるように，密づめ供試体の体積ひずみ曲線はかなり大きな軸ひずみを受けるまで横ばいの傾向を見せている．このような体積ひずみ曲線の傾向と，3・1 で述べた試料の粒度分布とを考え合わせると，せん断過程における密づめ試料内部の粒子の動きは，ある石英粒子がそれに隣接する石英粒子をのり越えてダイレイトしようとするときに粒子破砕を生じる，というような動きを繰返しているように見受けられる．これらの石英粒子の間にあって，長石粒子の破砕はそれほど進行しないものと推察される．一方，ゆるづめ試料においては，体積ひずみ曲線の変化から分かるように，せん断中に供試体は収縮する一方であり，この過程においては，まず先に長石粒子が破砕されて石英粒子間を埋め，その結果石英粒子の破砕は起こりにくくなったものと解釈される．しかし，拘束圧が50kg/cm² を越えるような高い圧力のもとでは，破砕強度の高い石英粒子も長石粒子と同じように著しい破砕を受けるようになろうが，このときは，間げき比の大きなゆるづめ砂の粒子の方が1個当りに加わる力は相対的に大きいので，密づめ砂の粒子よりも多く破砕されるものと思われる．

### 3・3　せん断による鉱物粒子の比表面積増加

試料がせん断中に破砕されると，その結果として，当然試料の比表面積は増加する．筆者の1人は先に，せん断中に生じる試料の表面積増加量をもとにして，粒子破砕に消費された仕事量を検討したが[4]，その際は，試料全体の平均的な比表面積の変化量に基づいた計算を行なった．しかしながら，3・2でも述べたように，試験条件または試料条件によって，試料を構成する複数の鉱物が異なった破砕特性を示す場合には，そしてこれらの鉱物の破砕強度が著しく異なる場合には特に，試料の平均的比表面積増加量をもとにして粒子破砕仕事量を求めようとすると，誤った結果を得るおそれも出てくる．そこで，これまでに示された試料の粒度分布および各粒径毎の鉱物組成についてのデータをもとにして，試料に含まれる主要鉱物毎に，それらのせん断中における比表面積変化を調べてみた．そのうち，石英粒子および長石粒子については，Table 4に示すような結果を得た．Table 4において，一番右よりの欄に示されているせん断中の比表面積増加量の数値は，せん断後の試料の比表面積の値からせん断前のその値を差し引いて得た値である．

まず，拘束圧50kg/cm² でせん断された試料について検討すると次のようである．せん断中に生じた試料の平均的な比表面積変化量については，密づめ試料の値は，ゆるづめ試料のそれに比べて約15%大きい値になっている．いま，せん断中の粒子破砕に消費された仕事量 $W_c$ を Rittinger の粉砕理論によって求めようとすれば，試料の表面積増加量を $\Delta S$ として，$W_c = C \cdot \Delta S$ なる式で与えられよう．ここに C は，材料によってきまる定数である．先に述べた，密づめおよびゆるづめ両試料の平均的な $\Delta S$ の値を用いて両者の $W_c$ を比較すると，密づめ試料の場合の $W_c$ は，ゆるづめ試料のそれより約15%大きいということになろう．さて，平均的 $\Delta S$ にしめる石英および長石粒子の

Table 4　Increase of specific surface area of minerals during shear

| No. | Confining pressure (kg/cm²) | Initial density | Specific surface area S (cm²/gr) | | Increase of specific surface area ΔS (cm²/gr) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Quartz ($S_q$) | Feldspar ($S_f$) | Quartz ($\Delta S_q$) | Feldspar ($\Delta S_f$) | Total ($\Delta S_q + \Delta S_f$) |
| 63 | 50 | Dense (D) | 227 | 131 | 137 | 112 | 249 |
| 60 | 〃 | Loose (L) | 161 | 164 | 71 | 145 | 216 |
| 72 | 100 | D | 357 | 261 | 267 | 242 | 509 |
| 71 | 〃 | L | 461 | 255 | 366 | 244 | 610 |

比表面積増加量 $\Delta S_q$ および $\Delta S_f$ の量的割合いをみると，Table 4に示されるように，密づめ試料とゆるづめ試料ではきわめて対照的である．これらの $\Delta S_q$ および $\Delta S_f$ に基づいて $W_c$ を求めるには，$W_c=C_q\cdot\Delta S_q+C_f\cdot\Delta S_f$ なる関係を用いればよいであろう．ここに，$C_q$ および $C_f$ は，おのおの石英粒子および長石粒子の破砕性を示す定数である．現在のところ，$C_q$ および $C_f$ の値をまだ得ていないが，筆者らが先に推定した $C_q\fallingdotseq 3C_f$ なる関係を用いて密づめ砂およびゆるづめ砂の $W_c$ について比較してみると次のようである．まず，密づめ砂について，$W_{cD}=3\times137C_f+112C_f=523C_f$，またゆるづめ砂については，$W_{cL}=3\times71C_f+145C_f=358C_f$，したがって密づめ試料の場合の $W_c$ はゆるづめ試料のそれより約46%大きいことになる．この値は先に述べた両試料の平均的 $\Delta S$ の値をもとにして求めた両者の違い（15%）に比べてきわめて大きな数値である．上述のことから，せん断中の試料の比表面積増加量をもとに粒子破砕仕事量を求めようとする場合には，そこに含まれる個々の鉱物についての比表面積増加量に関するデータを用いるのでなければならないことが明らかとなった．拘束圧 100kg/cm² でせん断された試料についても同様な計算を行ない，ゆるづめ試料の $W_c$ に対する密づめ試料の $W_c$ の大きさを求めると，平均的 $\Delta S$ を用いた場合には，後者は前者より17％小さいが，$\Delta S_q$ および $\Delta S_f$ の値を用いて計算すると22%小さいという結果が得られた．

## 4．ま　と　め

せん断中の粒子破砕に消費される仕事量を計算することに関連して，ある条件の下で圧縮またはせん断された飽和豊浦標準砂についてその粒子破砕特性を調べ，次のことが明らかにされた．

異なる試験条件（拘束圧の大きさ）または試料条件（試料の初期密度の大きさ）のもとでせん断された試料は，異なった粒子破砕特性を示す．たとえば拘束圧 50kg/cm² の条件下でせん断された試料についていえば，密づめ試料中の石英粒子はゆるづめ試料中のそれより多く破砕される．これはせん断中の供試体の強度特性および変形特性と密接な関係があると考えられる．

試料中の鉱物粒子の破砕量が上述のように試料条件によって異なった値を示すために，せん断中に生じる試料の平均的な表面積増加量 $\Delta S$ をもとにして粒子破砕仕事量 $W_c^*$ を計算すると，誤った結果を与えるおそれがある．拘束圧 50kg/cm² に場合について検討した結果によれば，ゆるづめ試料における $W_c$ の値に対する密づめ試料の $W_c$ の大きさは，平均的 $\Delta S$ を用いて計算すると 115%であるが，試料中の石英および長石粒子のそれぞれの表面積増加をもとにして計算すると $W_{cD}$ は $W_{cL}$ の146%にもなる．したがって，せん断中の粒子破砕仕事量を試料の表面積増加量をもとに計算しようとする場合には，試料を構成するおのおのの鉱物についての表面積増加量のデータを用いることが重要である．

本文では，拘束圧および試料密度の異なる4種類のせん断試験試料についてそれらの粒子破砕特性を検討した．今後は乾燥試料と飽和試料との粒子破砕特性の違いについても検討し，粒子破砕特性とせん断特性との関係を明らかにしていきたい．

終りに，試料の鉱物組成を調べるにあたって多くの御助言を得た本学資源工学科島敞史助教授ならびに北風嵐助手に感謝の意を表します．

## 参　考　文　献

1）三浦哲彦，山内豊聡：土木学会論文報告集，193，69 (1971)
2）N. Miura and T. Yamanouchi : Tech. Reps. of the Yamaguchi Univ., 1, (1973)
3）三浦哲彦：山口大学工学部研究報告，24，2 (1973)
4）三浦哲彦：土木学会論文報告集（投稿中）
5）三浦哲彦，山本哲朗：土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ (1973)
6）久保，水渡，中川，早川：粉体理論と応用．丸善 (1962) p. 171

（昭和48年12月18日受理）