

高拘束圧下でせん断される粒状材料の比表面増加について

三浦 哲彦・山本 哲朗*

Increase of Specific Surface Area of Particulate Materials Subjected to High Shear Stresses

Norihiko MIURA and Tetsuro YAMAMOTO

Abstract

Taking the value of an increase of specific surface area ΔS as a quantity expressing the degree of grain crushing of a particulate material subjected to high stresses, a relationship is investigated between ΔS and shear properties of saturated Toyoura sand at a high confining pressure, up to 500kg/sq. cm. An experimental equation relating ΔS to the mean effective stress at failure, p_f is presented in the form: $\Delta S = a \log_{10} (p_f/b)$, where a and b are constants.

A linear relation is also found between ΔS and F_{74} , the weight per cent of a fraction finer than 74 micron to the total sample weight. Thus, the relation curve between F_{74} and logarithm of p_f has the same pattern with the relation curve between ΔS and logarithm of p_f . On the other hand, comparing the relation curve of F_{74} and logarithm of p_f of the Toyoura sand with those of a dry limestone sand and a dry quartz sand, on which a number of high pressure triaxial tests were made by Lo and Roy, it is shown that these three curves are approximately parallel to each other. Hence, it can be presumed that the curves of ΔS and logarithm of p_f of these three materials, and probably of any particulate materials, will have approximately the same value of slope, that is $a \approx 2100$.

It is suggested that there exists a method to estimate easily the value of ΔS during shear test, as a function of mean effective stress.

1. ま え が き

粒状材料の圧縮応力あるいはせん断応力下における粒子破碎現象を検討する場合に、粒子破碎量をどのように表現するかは重要な問題である。その方法として一般によく用いられているのは、応力を受ける前後の粒度分布の違いをもって材料の破碎の程度を表わそうとするものであり、さらにこれを定量化する試みもなされている¹⁾²⁾。しかし、粒度分布の変化に基づいて求められるこれらの量は、粒子破碎の程度を示す一つの尺度として用いることはできても、その物理的意味は必ずしも明確でない。そこで筆者らは、粒子破碎量を表わすものとして、より明確な物理的意味を持つ材料の比表面積増加量 ΔS に着目し、この量と粒子破碎を伴う材料の力学的性質との間には何らかの関連性があるものと考え、以下に述べるような検討を行なった。

本文で検討している実験試料の多くは、飽和豊浦砂に対する先の高圧三軸圧縮試験³⁾(拘束圧一定、排水条件)によって得たものであり、試験後に保存しておいた試料を対象に一連の比表面積測定を行なった。なお、比表面積の算定は前報¹⁾と同様な方法で行なった。

2. 応力の大きさと比表面積増加量との関係

25kg/cm² から 500kg/cm² までの等方的圧縮圧力を付加した後の試料の比表面積 S_e 、ならびに前記の拘束圧のもとで軸荷重を加えてせん断した後の試料の比表面積 S_s を測定し、それらから原試料の比表面積 $S_0 = 110\text{cm}^2/\text{g}$ を差し引くことによっておのおのの比表面積増加量 ΔS (ΔS_e および ΔS_s) を算出した。これらの値と試料に作用した応力の大きさとの関係を求めてみると Fig. 1 のような結果が得られた。図中の

* 土木工学科

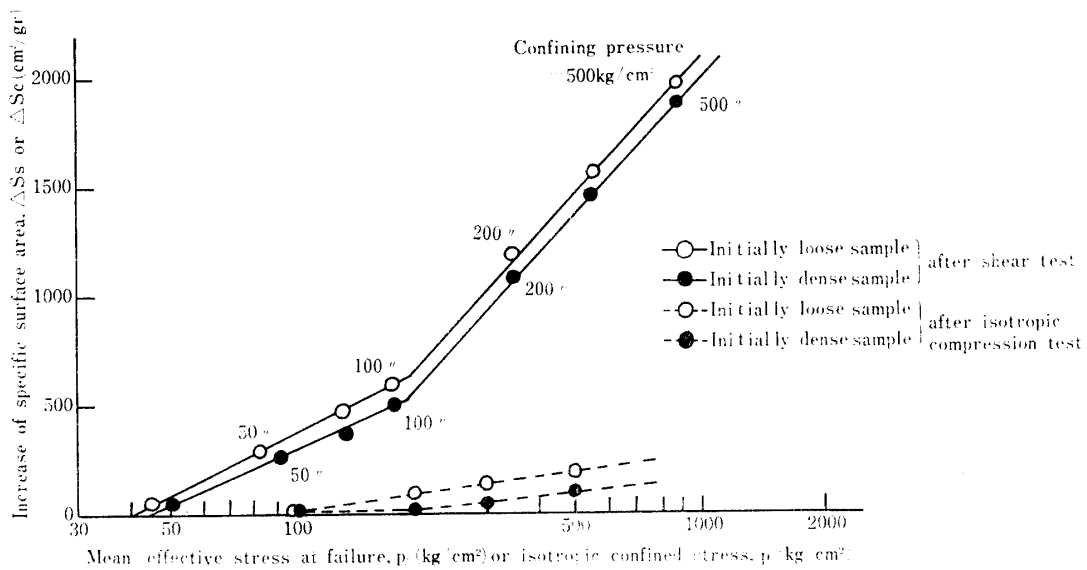


Fig. 1 Curves between increase of specific surface area and logarithm of stresses. ΔS_c corresponds to p_i , ΔS_s to p_s , respectively

$\Delta S_s \sim p_f$ 関係は、せん断中に達した最大平均主応力 $p_f (= (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3)$ を ΔS_s と対応させたものである。ここに σ'_1 および σ'_3 は、おのおの最大有効主応力および最小有効主応力である。また、黒丸の線は初期密づめ供試体(初期間げき比 $e_0 = 0.61$)の関係曲線を、また白丸の線は初期ゆるづめ供試体 ($e_0 = 0.83$) の関係曲線を示す。

さて、上述の2種類4本の曲線はそのいずれもが、ある位置で折れる半対数図上の直線からなっている。したがって、これらの関係曲線は、 a および b を各直線部分に関する定数であるとして、応力 p (p_i または p_f) の変域を指定することにより次の形の式で表わすことができよう。

$$\left. \begin{aligned} \Delta S &= a \log_{10}(p/b) \\ p &= b \exp(2.3 \Delta S/a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 1 に見られるように、折点より右側の領域においては、密づめおよびゆるづめ両試料の直線は互いに平行な関係にある。特に $\Delta S_s \sim p_f$ 曲線に関していえば、後章で述べるように、異なった材料であっても上記の領域の勾配 a は特定の値、2100、をとることが十分に予想される。もしこのことが普遍的に言えるのであれば、上記の実験式は粒状材料のせん断中に生じる粒子破砕量を検討する場合に有用であると考えられる。また、式(1)から次のようなことがいえる。Fig. 1 の破線で示されている $\Delta S_c \sim p_i$ 曲線において、 $\Delta S_c = 0$ すなわち直線が横軸と交わる場所では式(1)は $p = b$ となり、値 b はその材料が破砕されはじめる圧

縮圧力の大きさを表わしていることになる。このような b の値を密づめ試料およびゆるづめ試料について求めてみるとおのおの約 150 kg/cm^2 および約 90 kg/cm^2 というものであった。2つの b 値の違いはもちろん両試料の密度の差に起因するものであるが、上述の圧力下における2つの試料の架けき率(密づめ試料: 38%, ゆるづめ試料: 45%)の違いに比べて b 値の開きはやや大きいように思われる。これは、両者の破碎特性が異なることと多分に関係がありそうである(豊浦砂を構成する主要鉱物は、石英粒子および長石粒子であるが、ゆるづめ試料ではまず破碎強度の低い長石粒子から先に破碎される傾向があり、密づめ試料においてはその逆の現象が見られる。もっとも前述のことは、相対的にはそう言えるというのであって、いずれか一方の鉱物粒子のみが先に破碎されるというものはもちろんない)。

次に、 $\Delta S_c \sim p_i$ および $\Delta S_s \sim p_f$ 両曲線の相対的關係について検討すると次のようなことがいえよう。まず、 $\Delta S_c \sim p_i$ 曲線上のある点に対応する ΔS_c に原試料の比表面積 S_0 を加えたものは、いうまでもなく、それに相当する拘束圧 σ_3 のもとでの排水せん断試験直前の試料の比表面積を与える。一方、上記の σ_3 に対応する $\Delta S_s \sim p_f$ 曲線上の点の比表面積 ΔS_s に S_0 を加えたものは、せん断応力下で達しうる試料の比表面積の限界値にほぼ近い値を与えると考えてよい。なぜなら Fig. 1 にプロットしているデータはいずれも、最大平均主応力 p_f に達したあと十分な軸ひずみを与えた結果得られたものであり、 p_f に達したあとの軸ひ

ずみの進行に伴う比表面積の増加の割合は、急速に低下すると考えられるからである。さて、ある拘束圧 $(\sigma_3)_n$ で圧縮された後にせん断される供試体は、 $\Delta S_c \sim p_i$ 曲線上の $p_i = (\sigma_3)_n$ に相当する点を出発点としてある径路をたどったのち、 $\Delta S_s \sim p_f$ 曲線上の $p_f = (\sigma_1' + 2\sigma_3')_n / 3$ なる点に到達する。この径路は2つの制約、すなわち $\Delta S_s \geq 0$ ならびに $p_i \leq p \leq p_f$ (ここに p はせん断過程における平均主応力)、によってある限られた領域内を通るべきものである。現在、この径路のパターンを知るための実験データは乾燥密づめ砂に関するもの ($\sigma_3 = 300 \text{ kg/cm}^2$) を1つ得ているに過ぎず明確なことは何も言えない。しかし、この径路は、軸ひずみの小さい間は $\Delta S_c \sim p_i$ 曲線上を右に移動し (この移動量に関しては、 σ_3 が小さいほど大きいことが、他の実験によって確認されている)、その後ほぼ直線的に $\Delta S_s \sim p_f$ 曲線上の対応する点に向うであろうことが十分に予想される。今後、いくつかの実験によって、このパターンを把握する必要があるが、もしそれがFig. 1の曲線上と同様に式(1)の形で表わし得るものならば、せん断中の粒子破砕量 ΔS_s は平均主応力 p との関係において容易に知ることができるようになる。

3. 体積変化量と比表面積増加量との関係

等方的圧縮圧力 p_i の下で生じた供試体の体積ひず

み $\Delta V_c/V_0$ (V_0 は供試体の初期体積、 ΔV_c は p_i による体積変化量) とそれによる試料の比表面積増加量 ΔS_c との関係、ならびに、せん断中の最大平均主応力 p_f に達するまでに生じた全体積ひずみ $\Delta V_t/V_0$ ($\Delta V_t = \Delta V_c + \Delta V_s$, ここに ΔV_s は p_f に達するまでのせん断中の体積変化量) とそれによる試料の比表面積増加量 ΔS_s との関係はFig. 2に示されるとおりであった。このように、 ΔS_s と体積ひずみとの間には、両者を算術目盛上にプロットすることによって、Fig. 1の $\Delta S \sim p$ 曲線と類似の形の関係が認められる。c, d を定数としてこれらの関係曲線を次式

$$\Delta S = c(\Delta V/V_0) + d \dots\dots\dots (2)$$

で表わすとき、 $\Delta S_s \sim \Delta V_t/V_0$ 曲線の勾配は折点を境にして3~5倍大きくなる。これは全体積ひずみを構成している3つの体積ひずみ要素、すなわち粒子間すべり、弾性変形、および粒子破砕の3つに起因する各体積ひずみの割合が折点を境にして変化し、粒子破砕に関する体積ひずみが他の2つのひずみに比べて相対的に大きくなったことを意味する。Fig. 1の $\Delta S_s \sim p_f$ 曲線についてもいえることであるが、 $\Delta S_s \sim \Delta V_t/V_0$ 曲線の折点に対応する ΔS_s の値が比較的狭い範囲の値 (500~600 kg/cm²) に集中することは注目してよいように思われる。なぜなら、上記のことは密度の異なる豊浦砂に対してのみならず、 L_0 と Roy が実験に用いた石灰砂および石英砂に関しても言える

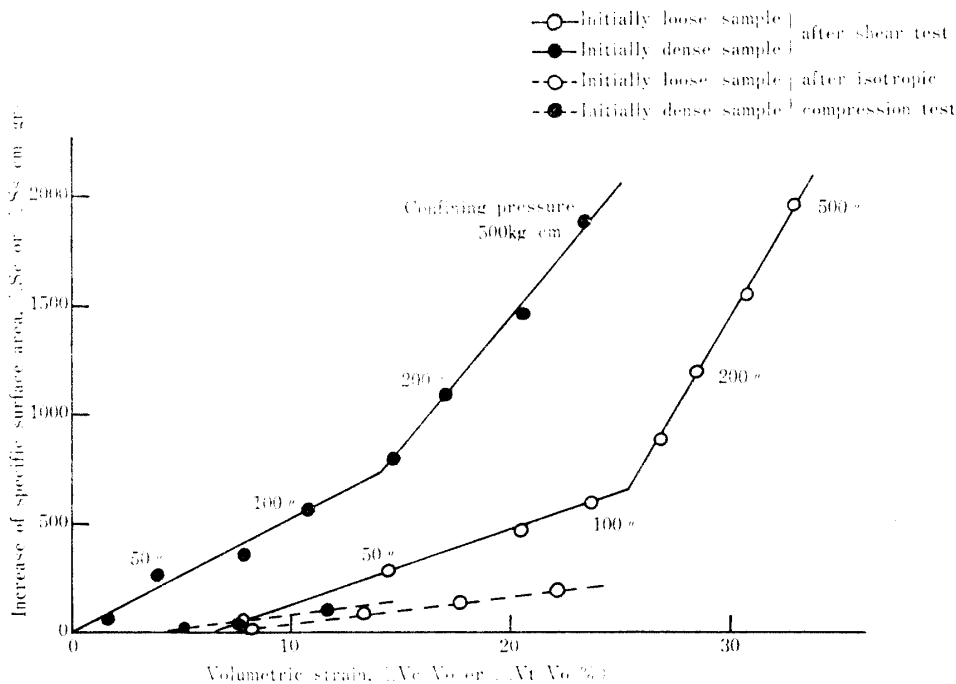


Fig. 2 Relationships between increase of specific surface area and volumetric strain in per cent ΔS_c correspond to $\Delta V_c/V_0$, ΔS_s to $\Delta V_t/V_0$, respectively

よう思われるからである(次章参照)。

$\Delta S_s \sim \Delta V_i/V_0$ 曲線ならびに $\Delta S_c \sim \Delta V_c/V_0$ 曲線上の対応する2点がどのような径路で結ばれるかは今後の検討をまたねばならない。その際、径路が横軸に垂直になるような等体積せん断試験をも併せ行ない、径路の終点が $\Delta S_s \sim \Delta V_i/V_0$ 曲線と一致することが認められるならば、粒状材料のせん断中の粒子破碎現象を明らかにする上に Fig. 2 の有用性は確かなものになる。同様なことは、Fig. 1 において平均主応力一定のせん断試験の径路を調べることも言えると考えられ、現在これらの実験を行なうべく準備中である。

4. 破碎による粒状材料の比表面積増加量と粒度特性との関係

先に述べた検討によって、試料の比表面積増加量 ΔS は、粒子破碎を受ける材料の強度または変形特性を表わすある量と一定の対応関係にあることが示された。このことから、圧縮またはせん断中に生じる試料の粒子破碎量を ΔS によって表わすことは十分に意義のあることが明らかにされた。

さて、上述のように粒子破碎量を表わす一つのインデックスとして比表面積増加量を用いるとき、この ΔS と、一般に粒子破碎の程度を定性的に表わすのによく用いられている粒度曲線との間に何らかの関係を見出すことができれば大変都合が良い。いま、粒度曲線の特性を表わすものとして 74 μ フルイ通過率 F_{74} をとるとすれば、以下のような検討を通して F_{74} と ΔS とを関連づけることができよう。石炭の粉砕の難易さ

を示す指数として知られている ハードグロブ指数 $G.I.$ の定義は次のとおりである。 $G.I. = (\text{所定粒度の試料炭の粉砕による単位供給エネルギー当りの比表面積の増加 } \Delta S_i) \times 100 / (\text{所定粒度の基準石炭試料の粉砕による単位供給エネルギー当りの比表面積の増加 } \Delta S_b)$ 。そして、この $G.I.$ と、原試料(50g)のうち粉砕によって 74 μ フルイを通過する試料重量 W との間には $G.I. = 13 + 6.93W$ なる実験式が与えられている。上述のことをもとにすれば、 a および b を定数として次のような関係式を与えることができよう。

$$G.I. = \frac{\Delta S_i}{\Delta S_b} \times 100 = a + b \cdot F_{74} \dots\dots\dots (3)$$

ここで ΔS_b も定数であると考え、結局式(3)は粉砕による試料の比表面積増加量 ΔS と 74 μ フルイ通過率 F_{74} との間に一次的関係が存在することを示唆するものである。

さて、飽和豊浦砂のせん断試験試料について ΔS_s と F_{74} との関係をプロットすると Fig. 3 のような結果が認められた。それを式で表わせば次のようである。

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_s &= 18F_{74} && (F_{74} \leq 30\%) \\ \Delta S_s &= 38F_{74} - 500 && (F_{74} > 30\%) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 1 および 2 の場合と同様に、 $F_{74} = 30\%$ 、 $\Delta S_s = 500 \text{ kg/cm}^2$ の点を境にして折れてはいるが、両者の間には明瞭な相関性があり、しかもそれはせん断供試体の密度条件には無関係であることが注目される。このことは、Fig. 1 および 2 の縦座標を F_{74} で置きかえた図は元の図に類似した特徴をそなえていることを意味している。

ところで、Lo と Roy は先に石灰砂および石英砂(

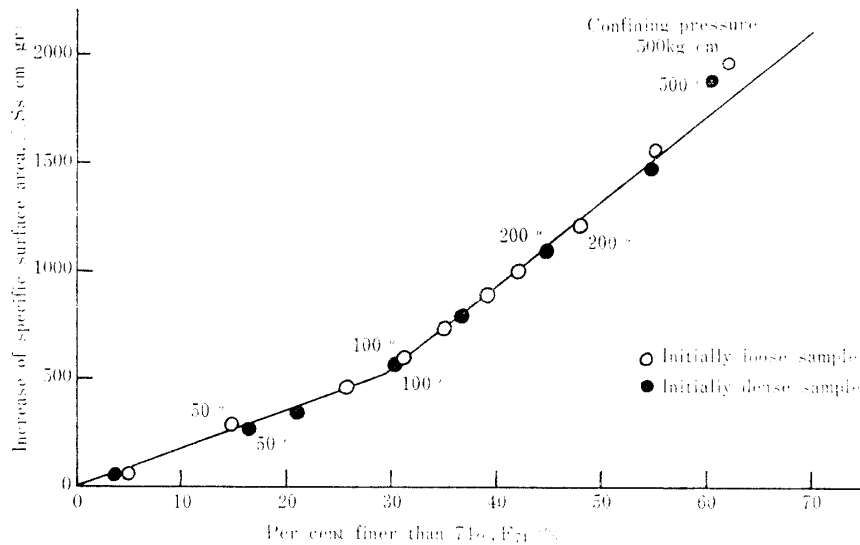


Fig. 3 Relationships between increase of specific surface area and weight per cent of a fraction finer than 74 micron

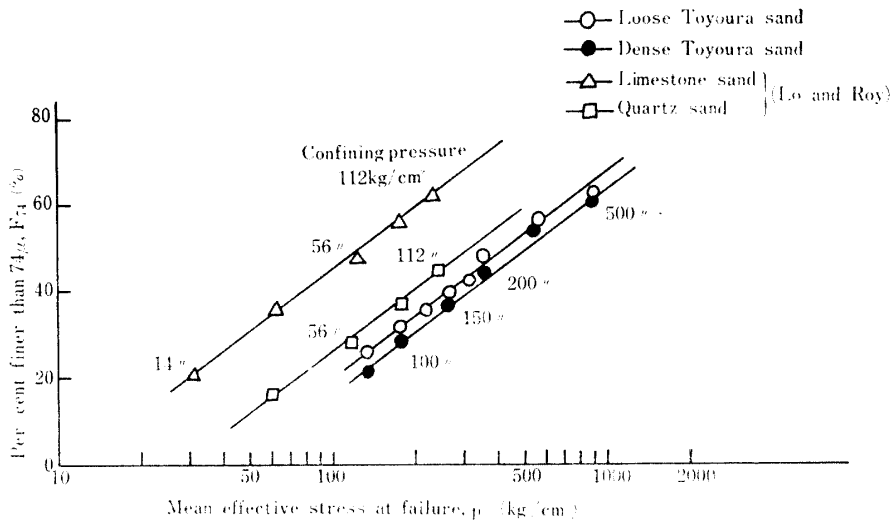


Fig. 4 Relationships between weight per cent of a fraction finer than 74 micron and logarithm of mean effective stress at failure

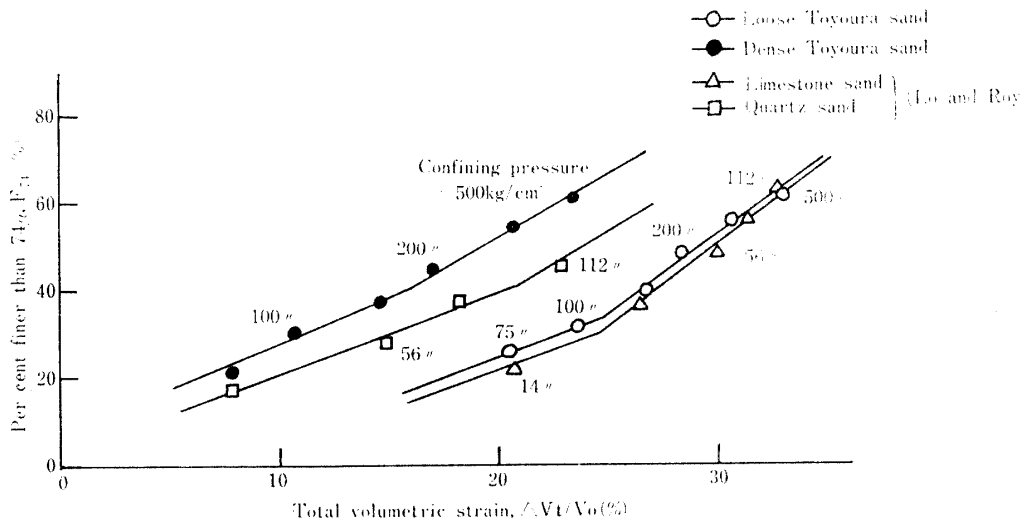


Fig. 5 Relationships between total volumetric strain and weight per cent of a fraction finer than 74 micron

ともに原石を破碎して準備されたもの)の乾燥供試体について一連の高圧三軸圧縮試験(拘束圧一定,排水条件)を行なっている⁶⁾。そこでは ΔS_s の値はもちろん報告されていないが, F_{74} は与えられているので, $F_{74} \sim (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ ならびに $F_{74} \sim \Delta V_t/V_0$ の両関係を調べてみることはできる。その結果を飽和豊浦標準砂についての同じ関係曲線と比較してみると Fig. 4 および 5 のようである。これらの図は, Fig. 1 および 2 に示された曲線の折点より, 右側に相当するデータを中心に描いたものであるが, 4 本の関係曲線の勾配がほぼ一致しているのが注目される。特に Fig. 4 の実

験式 (m, n は定数)

$$F_{74} = m \log_{10}(p_f/n) \dots \dots \dots (5)$$

で与えられる 4 本の曲線の勾配の値は 46~47 というごく近い数字を示す。このことは, もし石灰砂および石英砂の $\Delta S_s \sim p_f$ 曲線をプロットするならば, それは豊浦砂の同曲線と類似のパターンを示し, かつ折点より右側の勾配は豊浦砂のそれに近い値をとるであろうことを示唆している。 $\Delta S_s \sim \Delta V_t/V_0$ 曲線に関しても同様のことがいえよう。

ここで比較検討した 3 つの材料の粒度分布は Fig. 6 に示されている。いずれも均等な粒径を持つ材料とい

えるが、豊浦砂の均等性の程度(均等係数 $D_{60}/D_{10}=1.5$, ここに D_{10} および D_{60} は、粒度曲線の加積通過率10%および60%に相当する粒径)は他の2者(石灰砂の $D_{60}/D_{10}=2.85$, 石英砂の $D_{60}/D_{10}=2.71$)に比べて一段と高い。以上に述べた議論によって、原試料の粒度が前述の程度異なっているにもかかわらず、 $\Delta S_s \sim p_f$ 曲線等の勾配に顕著な影響は現われないことが明らかにされたと考える。今後は、応力を受ける前の均等係数が一層大きい材料、すなわち良い粒度の粒状材料の場合に式(1), (2)あるいは(5)で表わされる関係曲線がどのように変化するかを調べていく必要がある。

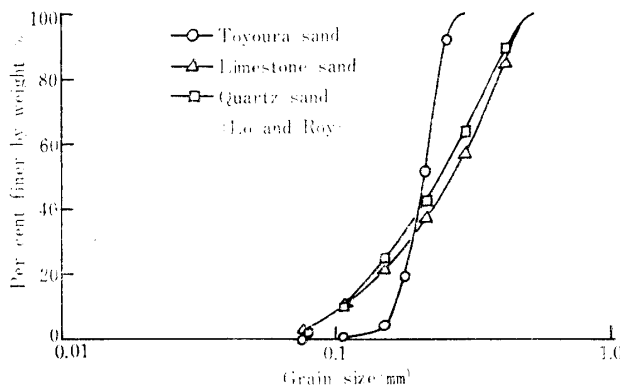


Fig. 6 Grain size distribution curves

5. まとめ

本文では、等方的圧縮応力またはせん断応力下における粒状材料の粒子破砕量を表わすのに、物理的意味が比較的はっきりしている試料の比表面積増加量 ΔS を用いて2, 3の検討を行なった。周知のようにこの ΔS は、Rittinger の粉砕理論においては粉砕仕事量 W との間に $W=C \cdot \Delta S$ なる比例関係が仮定されている⁷⁾。ここに C は、材料および粉砕機構によって決まる定数である。このような粉砕理論の考え方を、本文で対象としている静的な圧縮あるいはせん断過程における破砕現象に適用することについては議論のあるところであろう。しかしながら、ハードグロブ試験における材料の粉砕機構とせん断応力下の粒子破砕機構との間には一部共通するところがあると考えられ、さらに、等方圧縮応力 p_i 下における比表面積増加量 ΔS_c と粒子破砕仕事量 W_c ($p_i \sim \Delta V_c/V_0$ 関係の処女載荷曲線と除荷曲線で囲まれた面積が W_c を与えると考えた) との関係はポールミル等で求めた $\Delta S \sim W$ 関係曲線と類似している⁸⁾。このようなことから、筆者らは圧縮およびせん断応力下における粒状材料の破砕現象を粉砕理論の立場から説明することを試みつつあるが、本文ではそれに関連するものとして、 ΔS と

高拘束圧下における粒状材料の力学的性質との関係を調べてみた。

得られた知見を要約すると次のようである。

1) 等方圧縮応力またはせん断応力下で生じる比表面積増加量 ΔS と応力 p との関係は、 a および b を定数として、 $\Delta S = a \log_{10}(p/b)$ なる実験式で表わすことができる。

2) 同様に、体積ひずみ $\Delta V/V_0$ と ΔS との間には $\Delta S = c(\Delta V/V_0) + d$ なる対応関係が認められる。

3) 破砕された試料の74 μ フレイ通過率 F_{74} と ΔS とは一次式で関係づけることができるので、 ΔS が与えられていなくても F_{74} が分かっているならば $\Delta S \sim p$ あるいは $\Delta S \sim \Delta V/V_0$ 関係を推定することができる。

4) 初期密度条件の異なる飽和豊浦砂ならびに Lo と Roy が提示した乾燥石灰砂および乾燥石英砂のそれぞれについて F_{74} と p_f との関係調べて比較したところ、これら4本の曲線は事実上平行な関係にあることが分かった。このことを3) で述べた ΔS と F_{74} との関係を考えて、これら3つの粒状材料の $\Delta S \sim \log p_f$ 曲線の勾配は同じ値をとるものと推定される。

5) Fig. 1 に示した2つの曲線 $\Delta S_c \sim p_i$ および $\Delta S_s \sim p_f$ の対応する2点を結ぶ径路は式(1)で表わし得ることが予想されるが、もしこのことが確かであるならば、供試体のせん断中における粒子破砕量 ΔS は平均主応力 p の関数として容易に推定できるようになる。

終りに、実験データの一部は工業技術院九州工業技術試験所の高圧三軸圧縮試験装置を使用して得たものであることを付記し、実験を行なうに当たって種々便宜を計っていただいた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) R. J. Marsal: Proc. ASCE, 93, SM 2, 27 (1967)
- 2) 吉越 洋: 第5回土質工学研究発表会講演集, IV-23. (1970)
- 3) N. Miura and T. Yamanouchi: Tech. Repts. of the Yamaguchi Univ., 1, 271 (1973)
- 4) 三浦哲彦, 山本哲朗: 山口大学工学部研究報告, 24, 237 (1974)
- 5) 矢内昭二: 選炭, 46, 41 (1960)
- 6) K. Y. Lo and M. Roy: Soils and Foundations, 13, 61 (1973)
- 7) 久保, 水渡, 中川, 早川: 粉体理論と応用, 丸善, (1962) p. 171
- 8) 三浦哲彦, 山本哲朗: 未発表資料