

# 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす 一次性質の影響

吉村優治\*・小川正二\*\*

本研究では、粒状体の一次性質が間隙比およびせん断特性に及ぼす影響を解明するために、粒度組成(粒径、粒度分布)、粒子形状の一因子が独立して異なる試料を用いて最大密度・最小密度試験および圧密排水三軸試験を実施した。その結果、間隙比およびせん断強さ、ダイレイタンス特性には粒子形状の違いが大きく影響し、粒径および粒度分布の影響は小さいことが明らかになった。また、せん断初期の剛性を示す変形係数は一次性質のいずれの因子にも無関係に余裕間隙比によって一義的に定まることがわかった。

**Key Words** : shear strength, void ratio, gradation, grain shape granular material

## 1. はじめに

砂質土の力学的性質は土粒子の材質、粒子形状、粒度組成のような一次性質、あるいは密度、含水量、骨組構造などの二次性質によって決定されるといわれている<sup>1)</sup>。天然に産する砂は材質、粒度組成、形状などの一次性質が産出地によって異なり、さらに堆積状況によって密度、含水量などの状態が変化するので、砂の力学的性質を検討するに際しては、まず一次性質が力学的性質に及ぼす影響を明らかにし、その集合体としての砂の状態変化の影響を調べる必要がある。しかし、土粒子の材質や粒子形状などの因子に関する測定技術の普及の遅れ、あるいは試料の準備の煩雑さなどの理由により、これまでの砂に関する実験的研究の多くは、ある特定の砂(たとえば、わが国では豊浦標準砂)を用いて、密度や含水量などの状態あるいは試験条件が砂の変形あるいは強度特性に与える影響について検討されてきた。

しかしながら一方では、定性的ではあるが Terzaghi and Peck<sup>2)</sup> は粒子形状が内部摩擦角に及ぼす影響について述べており、Sowers and Sowers<sup>3)</sup> は粒子形状、粒度分布が内部摩擦角に与える影響を報告している。また、小田ら<sup>4)</sup> は10種類の砂について、粒度組成、粒子形状、鉱物組成とせん断抵抗、最大・最小間隙比などの土質工学定数との関係を調べ、粒子形状、粒径、粒度の影響が大きいことを報告している。さらに、Youd<sup>5)</sup>、立元<sup>6)</sup> も人工的に粒度調整をした試料を用いて最大・最小間隙比に及ぼす粒子形状、粒度組成の影響を調べている。わが国ではロックフィルダムや海中ケーソンのマウンドなどの粗粒材料を用いた巨大構造物がこれまでに数多く建設されてきており、近年になって、これらの巨大構造物の

変形量や安定度を的確に把握するために、粗粒材料の変形・強度特性を正確に評価するための研究が行われてきている<sup>7),8)</sup>。さらに、三浦ら<sup>9)</sup> は粒度調整をした約80種類の砂試料の変形・破壊挙動に及ぼす砂粒子の形状、破碎性および粒度分布などの影響を明らかにしている。

しかしながら、上述の研究のいずれにおいても、砂の粒度分布、粒径、粒子形状のような一次性質である一因子が間隙比、相対密度などを介して力学的特性に与える影響についての系統的な研究は行われていない。そこで本論文では、粒状体の基本的要素である粒度組成および粒子形状の一因子が砂の最大、最小間隙比で表される密度特性および強度、変形性などのせん断特性に与える影響について述べている。

## 2. 土粒子の基本的要素の定量化と実験に用いる試料

### (1) 粒径、粒度分布および粒子形状の定量化

#### a) 粒径

粒状体は種々の大きさの粒子の集合体であり、JISでは砂や礫のような粒状体の粒子の大きさはふるい分け時の網ふるいの目の開きを粒径としている。したがって、この粒子径は Zingg<sup>10)</sup> の三軸表示(図-1)では直交した三軸のうちの中径に相当している。このような粒子の集合体である粒状体の大きさを平均的な値として示す粒径には、有効径  $D_{10}$ 、平均粒径  $D_{50}$ 、最大寸法  $D_{90}$ 、最大粒径、モード(最頻値)径などの定量化された粒径があり、必要に応じて使い分けられている。たとえば、 $D_{10}$  は古くから透水係数の推定<sup>11)</sup>に利用されてきたし、モード径は砕屑性堆積物の研究<sup>12)</sup>に用いられ、最大寸法はコンクリートの粗骨材<sup>13)</sup>では重要な粒径である。

集合体である粒状体の平均的な径を代表するような一つの量としては  $D_{50}$  あるいはモード径が適当であると考えられるが、土質の分野では土の粒度試験の結果は粒径

\* 正会員 工修 岐阜工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒501-04 本巣郡真正町上真桑 2236-2)

\*\* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系

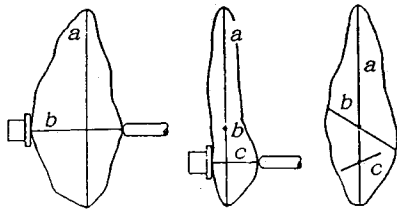


図-1 Zinggの三軸  
(a:長軸, b:中軸, c:短軸)

加積曲線を描いてまとめる<sup>14)</sup>ことを考慮すると、粒径を表すインデックスとしては  $D_{50}$  の方が便利であり、しかも最近、この  $D_{50}$  は液状化強度の補正<sup>15)</sup>など、土の力学特性への影響に関する研究において利用されることが多くなっている。したがって本研究では、密度およびせん断特性に及ぼす粒径の影響は平均粒径  $D_{50}$  を用いて検討する。

b) 粒度分布

前述したように、土質の分野では粒度試験の結果は粒径加積曲線にまとめられ、粒度分布の良否を判断する定量的な定義としてすでに均等係数  $U_c$  および曲率係数  $U_c'$  がある。この  $U_c$  は粒径加積曲線の傾度を示すものであり、 $U_c'$  はこの曲線のなだらかさを示すものである<sup>16)</sup>。

本研究では、全試料について曲率係数  $U_c' = 1.0$  とし、均等係数  $U_c$  を変化させて、密度およびせん断特性に及ぼす粒度分布の影響を検討する。

c) 粒子形状

1. でも述べたように砂粒子の形状がせん断強さなどの工学的な性質に大きな影響を与えることは、すでに Terzaghi and Peck の著書<sup>2)</sup>の中で報告されている。しかし、砂粒子では個々の粒径が小さく、定量化の作業が煩雑であるために、現在も粒子形状の定量的評価はほとんどなされておらず、土質工学会基準 (JSF) でも粒状体の形状を定量化する指標は定義されていない。したがって、本研究では筆者ら<sup>17)</sup>の提案した凹凸係数  $FU$  を用いて密度およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響を検討する。この  $FU$  は、粒子内の直交する三軸を考え、図-2 に示すようにその長軸と中間軸を含むように粒子を投影した断面の外周長を  $\ell$ 、その断面積を  $a$  としたときに、

$$FU = 4\pi a / \ell^2 \dots\dots\dots (1)$$

で定義され、粒が完全球 (投影断面が円) の場合には 1.0 で、凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる係数である。

この  $FU$  はすでに筆者ら<sup>17)</sup>が報告しているように、これまでしばしば形状評価に用いられてきた roundness<sup>18)</sup>では砕砂のように尖ったかどの形状を、angularity<sup>19)</sup>では丸みを定量化できないのに対してこれらの形状を統一



図-2 粒子の投影断面模式図

的に評価可能であり、しかも roundness や angularity の測定にはかなりの個人誤差をとまうが、 $FU$  の測定には個人誤差がほとんど入らず、さらに画像処理付きのパーソナルコンピュータを用いても測定が可能であり、この場合には人為的誤差は皆無である。

なお、本研究での粒子形状の評価には粒子表面の粗度は考慮していない。

(2) 実験に用いる試料

実験に用いる試料は Glass Beads, 豊浦標準砂, 木曾川砂および砕砂の四種類で、網ふるいを用いたふるい分けにより図-3の粒度分布になるように粒度調整をした。しかし、JSF 基準<sup>14)</sup>に定められている方法では、網ふるいのメッシュ幅が粗く完全に粒度組成を等しく調整するには不十分であるので、JISの全標準網ふるいを用いて細かいメッシュ幅でふるい分けを行った。図-3の粒径加積曲線中の記号 (●○△□) が実際のふるい分けに用いた網ふるいの粒径を示しており、たとえば ③-D ( $D_{50}$  が 0.745 mm で  $U_c$  が 10) の試料では 19 個の網ふるいを用いて粒度調整を行っている。なお、各試料の材質の硬さはほぼ等しく、モースの硬度では Glass Beads が 6.5, 豊浦標準砂が 7, 木曾川砂が 6.5, 砕砂が 6.5 であり、いずれも堅硬である。

本研究で検討する  $D_{50}$ ,  $U_c$ ,  $FU$  の基本的要素のうち、 $D_{50}$  と  $U_c$  については人工的に調整が容易であるが、粒子形状はその砂がたとえ同じ鉱物から構成されていたとしても、一般には粒子の大きさによって異なる<sup>20)-22)</sup>ためにこれをそろえるのは難しい。すなわち、集合体である砂の平均的な  $FU$  が同一になるように調整したとしても、粒度組成が良くなる試料ほど  $FU$  の異なる大小の粒子が混合することになり、これでは粒子形状因子の影響を検討することにはならない。

したがって以上のことを考慮し、因子  $D_{50}$ ,  $U_c$  の影

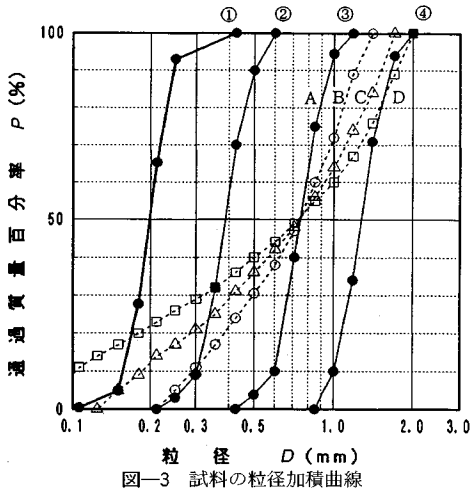


図-3 試料の粒径加積曲線

響は、大から小粒子まで同一形状の粒状体を準備できる人工試料である Glass Beads, 砕砂により検討し、因子  $FU$  の影響は、 $U_c=1.32$  でほぼ均等である 4 種類の試料 (Glass Beads, 豊浦標準砂, 木曾川砂, 砕砂) により検討した。ただし、ここで用いた砕砂は岐阜県揖斐郡谷汲村長瀬産の頁岩をクラッシャーにて破碎して作っているが、この頁岩には層理がまったく見られないので、クラッシャーの目盛により粉碎の程度を調整することで粒の大小によらずほぼ同一形状の砕砂が準備できる。木曾川砂は現木曾川河川敷の堆積砂では最上流部にあたる愛知県犬山市のライン大橋下流の右岸側から採取した砂であり、形状はかなり角張っている。なお、これらの四試料の光学顕微鏡写真および  $FU$  の計測結果についてはすでに報告したとおりである<sup>17)</sup>。

本研究で検討した間隙比およびせん断特性に影響を及ぼす因子の範囲をまとめると、平均粒径  $D_{50}=0.202\sim 1.28\text{ mm}$ 、均等係数  $U_c=1.32\sim 10$ 、凹凸係数  $FU=0.644\sim 0.908$  であり、各因子の検討範囲は、濃尾平野水成堆積砂の一次性質<sup>23)</sup>を考慮すると自然砂の粒度組成、粒子形状のほとんどを網羅していると考えられる。表-1 に実験に用いた試料の基本的な諸性質を示す。

### 3. 密度特性への一次性質の影響

#### (1) 実験方法

試験は、「砂の最大密度・最小密度試験方法 (JSF T 161-1990)」<sup>24)</sup>にしたがって行った。このとき、Glass Beads 試料は、わずかな振動、湿度変化などに対して敏感であったので、実験は振動の少ないストーンテーブルの上で行い、試料は 1 回の実験毎にデシケーターに入れて湿気を取るなど特に注意を払った。また、粒度分布が良くなると分級を起しやすくなるので、試料は毎回十分に攪拌してから中身の見えるガラス容器を用いて試験容器に詰め、さらに最大密度試験では打撃力が小さく

表-1 実験に用いた試料の基本的な性質

試料名	$\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\tau$ -硬度	$FU$	試料番号	$D_{50}$ (mm)	$U_c$	$U_c'$
Glass Beads	2.495	6.5	0.908	①	0.202	1.32	1.0
				②	0.390	1.32	1.0
				③-A	0.745	1.32	1.0
				③-B	0.745	3.0	1.0
				③-C	0.745	5.0	1.0
				③-D	0.745	10.0	1.0
④	1.280	1.32	1.0				
豊浦標準砂	2.637	7	0.745	①	0.202	1.32	1.0
木曾川砂	2.682	6.5	0.689	①	0.202	1.32	1.0
砕砂	2.750	6.5	0.644	①	0.202	1.32	1.0
				②	0.390	1.32	1.0
				③-A	0.745	1.32	1.0
				③-B	0.745	3.0	1.0
				③-C	0.745	5.0	1.0
				③-D	0.745	10.0	1.0
④	1.280	1.32	1.0				

ても、また大きすぎても密度は小さくなるので、予備実験により適度な打撃力を決めるなどの配慮をした。

#### (2) 実験結果および考察

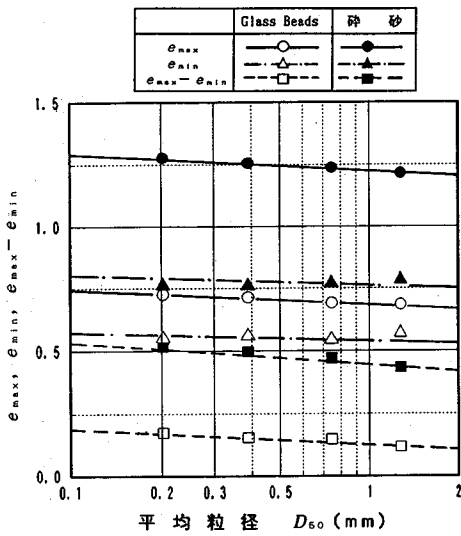
図-4~6 は最大間隙比  $e_{max}$ 、最小間隙比  $e_{min}$  および間隙比幅 ( $e_{max}-e_{min}$ ) と前述の  $D_{50}$ 、 $U_c$ 、 $FU$  の関係を示している。なお、各図の間隙比の比較を容易にするために縦軸スケールを統一してある。この間隙比幅 ( $e_{max}-e_{min}$ ) は、砂の状態を表すパラメータとして一般的に用いられる相対密度  $D_r$  の分母であり、 $e_{max}$ 、 $e_{min}$  と同様に砂固有の性質を示す値で、砂の基本的特性の一つである。

$e_{max}$ 、 $e_{min}$  は図-4 に示すように平均粒径  $D_{50}$  の増加に伴って若干小さくなり、間隙比幅も  $D_{50}$  の対数にほぼ比例して減少している。したがって、地盤の透水性は粒径が大きいほど良くなるが、これは粒径が大きいほど間隙比が大きくなるからではなく、むしろ間隙比は小さいが一つ一つの間隙が大きく、水道がき易いためであると推測できる。

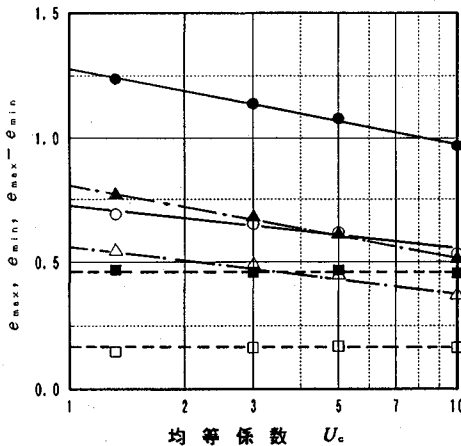
さらに、図-5 のように  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  は均等係数  $U_c$  の対数にほぼ比例して小さくなっており、この  $U_c$  の増加に伴う  $e_{max}$  と  $e_{min}$  の減少量はほぼ等しいために間隙比幅は  $U_c$  の大小には無関係に一定値を示している。

また、 $D_{50}$ 、 $U_c$  の増加に伴う  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  の減少量は Glass Beads よりも砕砂の方が大きくなっており、 $D_{50}$  あるいは  $U_c$  が  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  に与える影響は粒子形状が丸い砂よりも角張った砂の方が大きいといえる。

さらに、図-6 に示されるように  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  および間隙比幅は凹凸係数  $FU$  が大きくなり粒形が球に近くなると小さくなっている。これは粒子形状が球形に近づくほどゆる詰め状態、すなわち高位構造を作るのが難しくなることを意味している。しかし、最上<sup>25)</sup>は均質な完全球の集合体の間隙比は幾何学的には最も緩詰め (simple



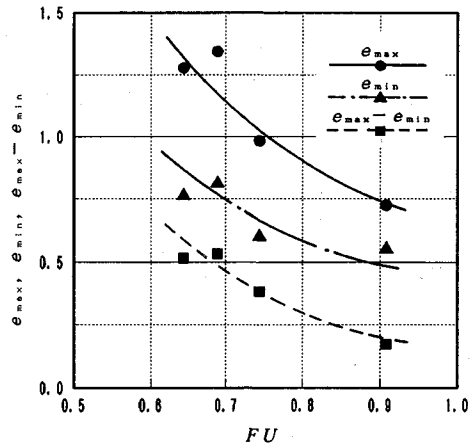
図—4 間隙比と平均粒径の関係



図—5 間隙比と均等係数の関係

cubic packing) 状態での 0.9098, 最も密詰め (pyramidal or tetrahedral packing) 状態での 0.3504 になることを計算で示しており, 本実験とは大きく結果が異なっている。ただし, 現実には  $e_{max}$  は重力場では粒子の自重の影響で小さくなり, また  $e_{min}$  は粒子の表面粗度の影響で大きくなるのが予想できるので, 最上<sup>25)</sup>の示した幾何学的な解は無重力状態で, しかも均質で表面がなめらかな完全球を用いた実験により実証できるものと考えられる。

また, 木曾三川流域から採取した碎屑性堆積砂により間隙比と各因子の関係を検討した結果, 粒度組成および粒子形状の三つの基本要素 ( $D_{50}$ ,  $U_c$ ,  $FU$ ) が複雑な相互関係にあり, 各々の因子が独立していない自然砂についても, 図—7~9 に示すように定性的には上述した関係が成り立っている。また, これらの試料はわが国の代表的な一級河川である木曾三川の本流およびその支川の



図—6 間隙比と凹凸係数の関係

上流から下流域までの広い範囲で採取した砂で, その多くが図のように  $D_{50}$  は 0.2~1.0 mm,  $U_c$  は 1.3~5,  $FU$  は 0.7~0.8 の範囲にある。

一般に砂は間隙比が小さいほど安定な状態にあるので, 基本的特性である  $e_{max}$ ,  $e_{min}$  は小さいほど, さらにはダイレイタンスの大きさを表す指標<sup>26)</sup>でもある間隙比幅 ( $e_{max} - e_{min}$ ) が小さいほど工学的に望ましい砂であるといえる。したがって, 密度特性の面からは粒径が大きく, 粒度分布が良く, 形状が丸い粒状体が土質工学的には安定した粒状材料であるといえる。

本研究では最大密度・最小密度を求める JSF の試験法<sup>24)</sup>の制約のために, 砂に関する結果しか得ることができなかったが, 自然の堆積物には礫や細粒分を含んだ砂質土, 粗粒材料も多いので, 今後は前述した関係が粒状体全般について成り立つか否かの検討を行う予定である。

#### 4. せん断特性への一次性質の影響

##### (1) 実験方法

供試体は図—10 に示す落下装置を用いて, 乾燥試料を空中落下させて直径 50mm, 高さ 100mm に作成した。この方法によると, 同図 (b) のフィルター穴の径と個数および図 (a) に示すフィルター下の落下高さ  $h$  を変えることによって, 供試体の相対密度  $D_r$  をおおよそ 30~85% の範囲で任意に定めることができる。なお, 筆者らはこの方法で作成した供試体の均一性, 再現性が良好であること, および圧縮条件下ではこれまでに多くの研究成果を提供してきた空中落下 AP 法<sup>27)</sup>で作成した供試体との力学的試験結果の一致性が比較的良好であることを確認している。

供試体寸法は, 29.4 kPa の負圧を作用させて測定し, これを供試体の初期状態 ( $e_0$ ,  $D_{r0}$ ) とした。拘束圧  $\sigma'_c = 29.4$  kPa に保って脱気水を通水させて供試体を飽和さ

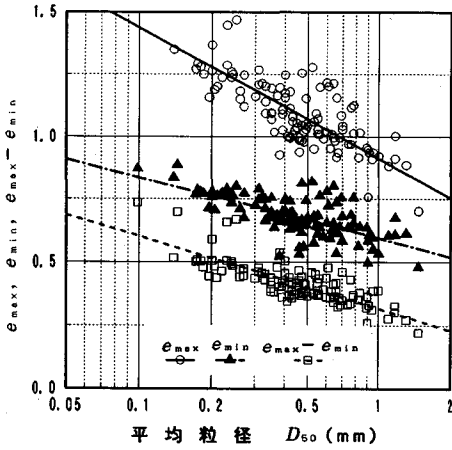


図-7 自然砂の間隙比と平均粒径の関係

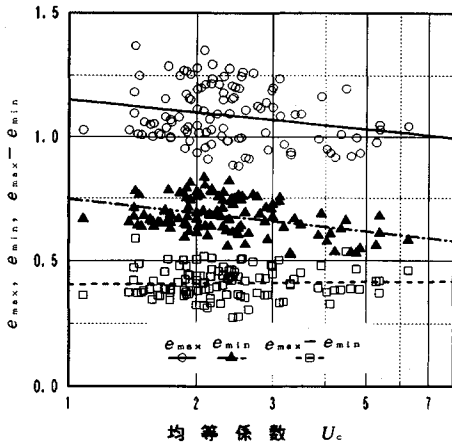


図-8 自然砂の間隙比と均等係数の関係

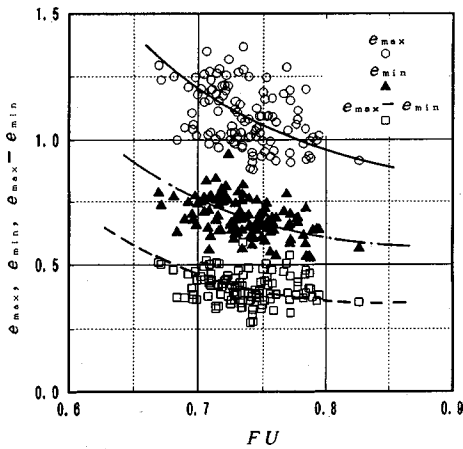


図-9 自然砂の間隙比と凹凸係数の関係

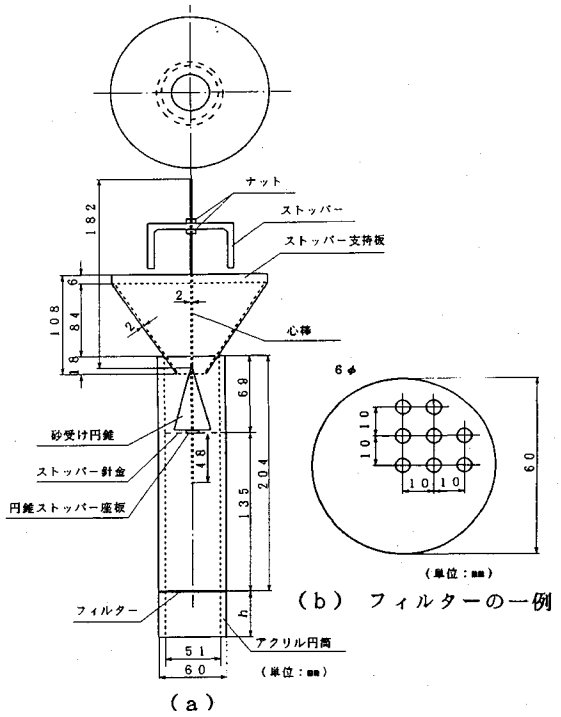


図-10 供試体作成用空中落下装置

せた後、バックプレッシャー B.P. = 196 kPa を与え、B 係数が 0.98 以上であることを飽和の条件とした。

排水三軸圧縮試験は、有効拘束圧力  $\sigma'_c = 49$  kPa で圧密した後、ひずみ制御方式の拘束圧一定の CD 試験とした。

全試料とも細粒分 (75  $\mu$ m 以下) はまったく含んでおらず、予備試験でひずみ速度 0.1~0.5%/min. の範囲でせん断特性にひずみ速度の影響がないことを確認し、本実験では 0.25%/min. でせん断試験を実施した。また、ゴムスリーブの厚さは 0.15 mm、ロードセルは内セル式で、体積変化は排水に伴う水位差をギャップセンサーで電気計測するフロート式体積計を用いて測定した。

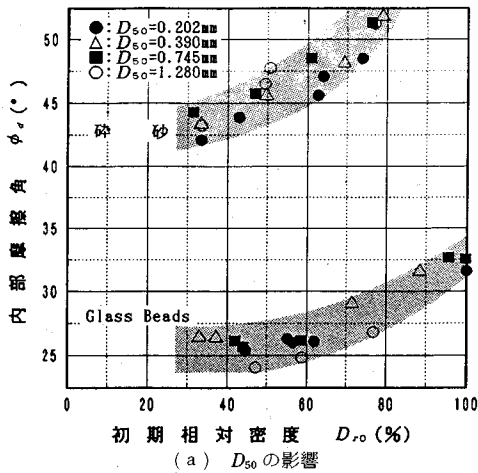
なお、一回の試験の後に粒度分布を調べた結果では粒子破碎はほぼ皆無であったが、蓄積を避けるために試料は使い捨てとし繰返し使用は避けた。

## (2) 実験結果および考察

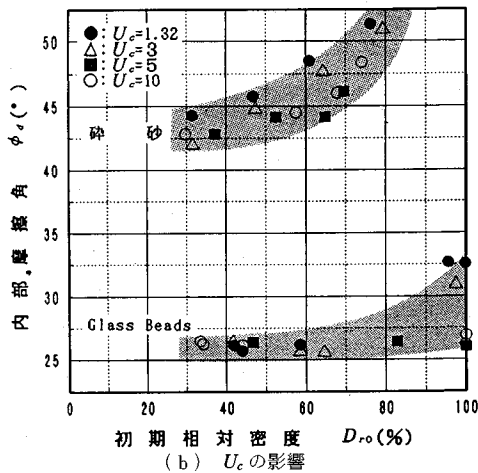
### a) 内部摩擦角

$D_{50}$ ,  $U_c$ ,  $FU$  の異なる試料の内部摩擦角  $\phi_d$  と初期相対密度  $D_{r0}$  の関係を図-11 に示す。ここでは、各図の  $\phi_d$  の比較を容易にするために縦軸スケールを統一してある。

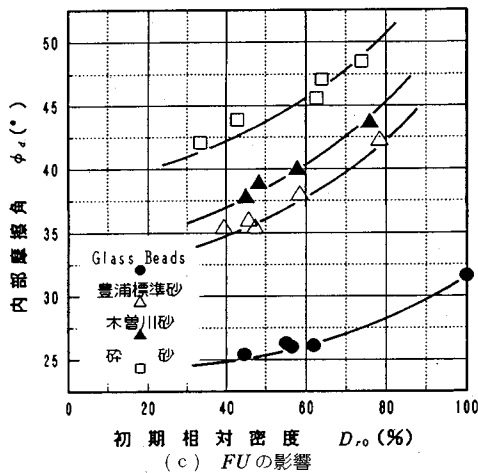
$D_{50}$  の異なる Glass Beads および砕砂の  $\phi_d$  は図-11 (a) に示すように、 $D_{50}$  が 0.202~1.28 mm まで変化してもほとんど差異がなく、むしろ  $D_{r0}$  の増減に伴う変化



(a)  $D_{50}$ の影響



(b)  $U_c$ の影響



(c)  $FU$ の影響

図—11 内部摩擦角と初期相対密度の関係

量が大きい。これまで、 $\phi_d$ は粒子破砕性の点から一般には粒径が大きくなるほど小さくなる<sup>28)~30)</sup>とされてきたが、本実験においては試料の材質がいずれも堅硬で、試料を繰り返し使用しておらず、しかも拘束圧が49

kPaと小さく試験中の粒子破砕はほぼ皆無であったので、粒子破砕が無ければ粒径の $\phi_d$ に及ぼす影響は極めて小さいといえる。

さらに図—11(b)をみると、 $\phi_d$ に及ぼす $U_c$ の影響は小さく、 $D_{r0}$ の増減に伴う $\phi_d$ の変化量が大きくなっているが、 $\phi_d$ は $U_c$ が大きくなり粒度分布が良くなると若干小さくなる傾向にある。これまで、 $\phi_d$ は粒度分布がよくなるほど大きくなるといわれてきたが<sup>たえば2)</sup>、本研究の結果はむしろ逆の傾向にある。しかしながら一方では、最大粒径が63.5mmの河床砂礫(円礫)と掘削ずり(角礫)のいずれにおいても低い拘束圧( $\sigma_c=294$  kPa程度以下)条件下では、粒径のそろった材料の $\phi_d$ は粒度配合の良い材料の $\phi_d$ より大きくなるという報告<sup>29)</sup>もあり、さらに高橋ら<sup>31)</sup>は基礎マウンドに用いる捨石材の研究において、 $U_c$ が大きくなると $\phi_d$ は大きくなるが、圧密・せん断中の粒子破砕率も $U_c$ が大きくなるほど小さいと報告している。これらの研究対象は粗粒材料であり、本研究で使用した試料の粒径とは大きく異なっているものの、粒子破砕を考えなくてもよい低圧の場合には $U_c$ が大きいほど $\phi_d$ は小さくなるというこの報告<sup>29)</sup>は本研究の結果と一致しており、さらに $U_c$ が大きくなるほど粒子の破砕性は小さくなることを考慮すると、粒状体では粒子破砕が無ければ粒度分布が良くなると $\phi_d$ は若干小さくなるといえる。これは松岡<sup>32)</sup>の示した光弾性写真に見られるように、せん断中の個々の粒子を微視的に見ると、せん断中では応力を受け持っている粒子とそうでない粒子があり、応力を受け持っている粒子は前田・三浦<sup>33)</sup>が定義しているように楕円構造体を形成するので、 $U_c$ が大きくなると粒子の大小の差が大きくなり、せん断中に小粒子が大粒子の間を移動し易くなって、この楕円構造の粒子接点力が小さくなるために要素全体としての $\phi_d$ が小さくなるものと考えられる。また、松岡ら<sup>34)</sup>のアルミ丸棒積層体を用いた一面せん断試験でも、内部摩擦角は単一径よりも2種混合径の試料を用いた方が小さくなっており、これは粒子の譲り合い易さのためであり、この傾向は鉛直圧力が大きくなるほど顕著であると報告している。しかしながら、福本<sup>20)</sup>や諸戸<sup>21)</sup>の研究のように、粒径によって粒子形状の異なる砂を混合して $U_c$ を調整した場合には、集合体である砂の平均的な粒子形状が等しくても $U_c$ が大きいほど $\phi_d$ は大きいという結果も示されており、後述するように粒子形状が $\phi_d$ に及ぼす影響は粒度分布に比べてはるかに大きいことから、異なる形状の粒子が混合された場合の $\phi_d$ に及ぼす粒度分布の影響については特に粒子間のかみ合わせに注目した検討が必要であろう。なお、本研究では、 $U_c$ の検討に用いた試料中の粒子形状( $FU$ )のばらつきは変動係数で約10%程度であった。

一方、 $FU$ が0.644~0.908まで変化したときの $FU$

の大きさの  $\phi_d$  への影響を示した図-11(c) をみると、粒形状が丸くなると  $\phi_d$  は大きく減少している。拘束圧が大きい場合、あるいは粒子がもろい場合には粒形状が角張っているほど粒子破碎を生じ易くなり粒形状による  $\phi_d$  の差異は小さくなると考えられるが、粒形状が  $\phi_d$  に及ぼす影響は  $D_{50}$ ,  $U_c$  の影響に比べるとはるかに大きいといえる。

図-12は図-11の  $D_{50}$  に換えて初期間隙比  $e_0$  と  $\phi_d$  の関係を示したが、これらの図を見ると  $\phi_d$  は粒径の大小にはほぼ無関係で、粒度分布が良くなるほど、あるいは粒形状が丸くなるほど小さくなり、 $\phi_d$  への粒形状の影響が大きいことが明らかであり、この結果は前述の  $D_{50}$  で整理した結果をより明確に示すものである。すなわち、異なる粒状体の内部摩擦角  $\phi_d$  を比較する場合には従来通り相対密度との関係を明示すればよく、間隙比との関係はその試料の  $e_{max}$ ,  $e_{min}$  を考慮して決定できる。

したがって、粒形状が同じ材料を用いれば、軽部ら<sup>35), 36)</sup>の報告のように礫材のような大粒径の強度定数は、これと相似粒度の小粒径の材料を用いた実験により決定でき、さらに実験時の相対密度がわかれば粒形状のみが同じ試料を用いれば粒径、粒度分布にはほぼ無関係に大粒径の強度定数を決定することが可能である。

b) ダイレイタンスー特性

破壊時の主応力比 ( $R_f = (\sigma_1/\sigma_3)_f$ ) と主ひずみ増分比 ( $D_f = -(2de_3/de_1)_f = 1 - (de_v/de_a)_f$ ) との直線関係は、粒状体に固有のダイレイタンスー挙動であり、広範囲の粒状体および応力条件下で成立することが認められており、この直線の比例定数が Rowe<sup>37)</sup>のダイレイタンスー係数  $K$  である。また、 $R_f - D_f$  関係はすでに小田<sup>38)</sup>が内部構造変化の微視的な考察によって説明しているように定数項 (切片)  $C$  を加えた次式のような一般式になる。

$$R_f = K' \times D_f + C \dots \dots \dots (2)$$

この式 (2) が小田<sup>38)</sup>によって密度や圧密条件ばかりではなく、初期の粒子配列構造にも依存しないことが明らかにされたことは、構成式においてストレス-ダイレイタンスー関係が極めて単純に取り扱えることを示したものである。

いま、 $D_{50}$ ,  $U_c$ ,  $FU$  の異なる試料の  $R_f - D_f$  関係は図-13に示すとおりであり、この  $R_f - D_f$  関係を原点側へ延長すると切片  $C$  はいずれの場合もほぼ零となる。これらの図から明らかなように、 $K$  は  $D_{50}$  および  $U_c$  が変化してもほとんど変わらず、 $FU$  のみの影響が顕著である。これらの全データをまとめると図-14のように各  $FU$  別の  $R_f - D_f$  の直線関係の相関係数は 0.95 程度以上あり、この  $K$  の値は Glass Beads が 1.1、豊浦標準砂が 3.0、木曾川砂が 3.9、砕砂が 5.1 である。したがって、粒状体のストレス-ダイレイタンスー関係は粒子の形状

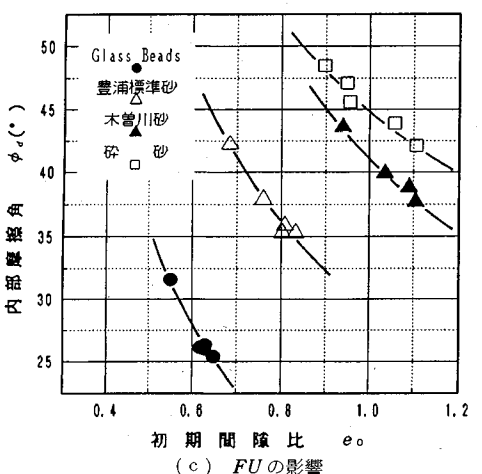
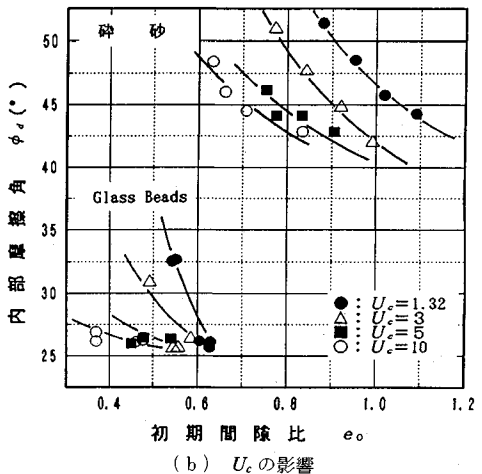
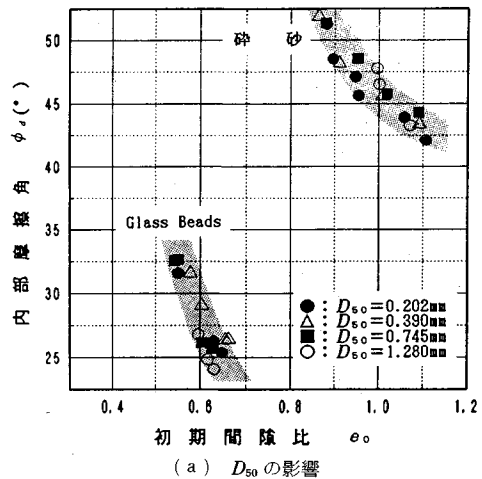
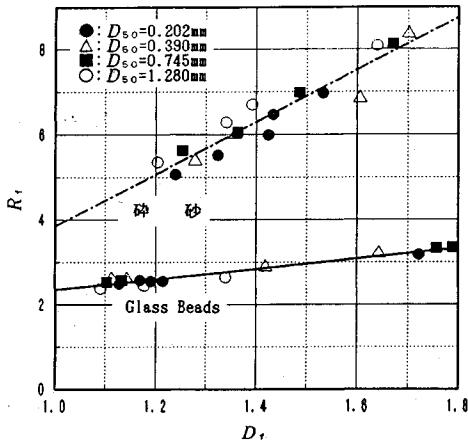
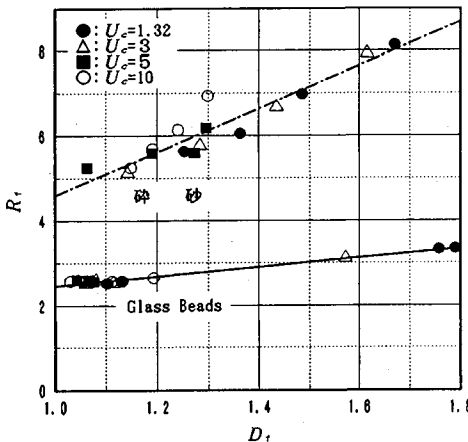


図-12 内部摩擦角と初期間隙比の関係

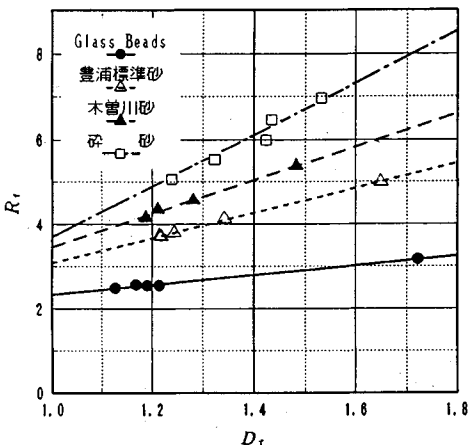
のみで決まり、その関係は図-15に示すように  $FU$  が小さくなり粒形状が丸くなるほど小さくなる。また、これらのダイレイタンスー係数は図中に併記した龍岡ら<sup>39)</sup>の豊浦標準砂の 3.1、日下部ら<sup>40)</sup>のアンギュラリティ



(a)  $D_{50}$  の影響



(b)  $U_c$  の影響



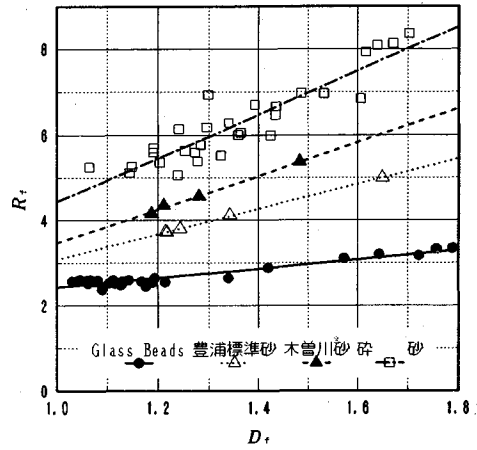
(c)  $FU$  の影響

図—13  $R_r$  と  $D_r$  の関係

の大きいスコリア攪乱試料（筆者らが論文中の顕微鏡拡大写真を計測したところ  $FU \approx 0.65$  であった）の 5.4 と比較しても妥当な値を示している。

c) 変形特性

実験に用いた全試料の割線変形係数  $E'_{50}$  と余裕間隙比



図—14 全データの  $R_r$  と  $D_r$  の関係

( $e_0 - e_{min}$ )<sup>26)</sup> の関係を示した図—16 をみると、 $E'_{50}$  は粒度組成や粒子形状には無関係に余裕間隙比によって一義的に定まっており、せん断中の粒状体の変形特性は余裕間隙比に支配されると考えられる。これまで、土の変形係数は同じ拘束圧力下では密度が大きく、強度が大きいほど大きいとされてきたが、Glass Beads のように一般には間隙比幅 ( $e_{max} - e_{min}$ ) が小さい砂ほど詰まりの状態によらず余裕間隙比は小さいので、せん断初期の剛性は大きくなるものと考えられる。

5. 結 論

本研究では、粒状体の基本的要素である粒径、粒度分布および粒子形状の一因子が異なる試料を用いて最大密度・最小密度試験および圧密排水三軸試験を実施し、間隙比およびせん断特性に及ぼす粒状体の一次性質の影響を明らかにした。

本研究によって得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 最大間隙比  $e_{max}$ 、最小間隙比  $e_{min}$  は粒径が大きくなり、粒度分布が良く、粒子形状が丸くなるほど小さくなる。また、間隙比幅 ( $e_{max} - e_{min}$ ) は粒度分布が異なってもあまり差がなく、粒径が大きくなるほど、また粒子形状が丸くなるほど小さくなる。特に、最大間隙比、最小間隙比、間隙比幅のいずれの変化量とも粒子形状の影響が著しく大きい。

(2) 粒子破砕を生じない拘束圧力下での内部摩擦角  $\phi_d$  への粒径の影響はほとんど無く、 $\phi_d$  は粒度分布が良くなると若干減少し、粒子形状が丸くなると小さくなる。したがって、 $\phi_d$  は粒子形状が同じ材料を用いれば、相似粒度の材料を用いた実験により決定できる。

(3) 破壊時のストレス-ダイレイタンス関係の定数項  $C$  は粒子破砕が無ければ粒度組成、粒子形状に無関係にはほぼ零である。また、ダイレイタンス係数は粒



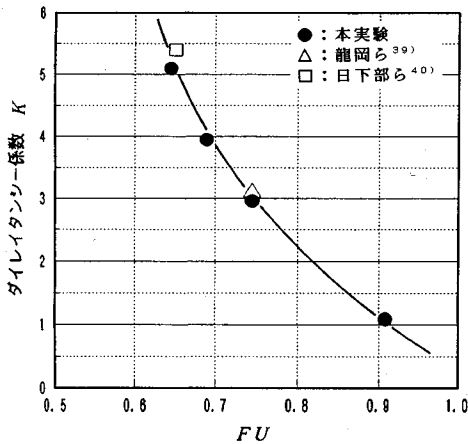


図-15 ダイレイタンス係数とFUの関係

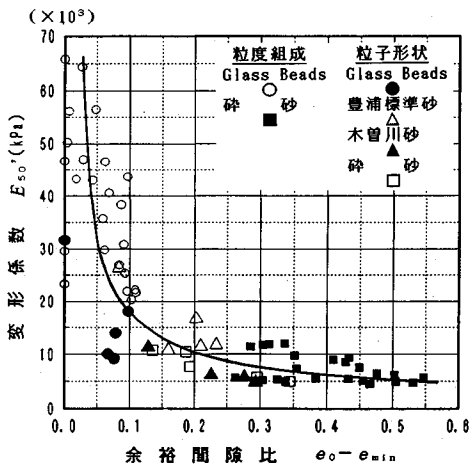


図-16 変形係数と余剰間隙比の関係

度組成には影響を受けず、粒子形状が丸くなるほど小さくなる。

(4) 変形係数  $E_{50}'$  は粒度組成や粒子形状には無関係に余剰間隙比 ( $e_0 - e_{min}$ ) によって一義的に定まるので、一般には間隙比幅 ( $e_{max} - e_{min}$ ) が小さい土ほどせん断初期の剛性は大きい。

謝辞：本研究を行うにあたり、名古屋工業大学 松岡元教授、東京大学生産技術研究所 龍岡文夫教授、北海道大学工学部 三浦均也助教授、高松工業高等専門学校 土木工学科 土居正信助教授には有益な御助言と御指導をいただきました。ここに、感謝の意を表する次第です。

参考文献

1) 三笠正人：土の工学的性質の分類表とその意義，土と基礎，Vol.12, No. 4, pp.17~24, 1964.  
 2) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, p.85, Wiley, New York, 1948.  
 3) Sowers, G.B. and Sowers, B.F. : Introductory Soil Me-

chanics and Foundations, Macmillan, New York, 1953.

4) 小田匡寛・榎本文勇・鈴木 正：砂粒子の形状・組成が砂の土質工学的性質に及ぼす影響に関する研究，土と基礎，Vol. 19, No. 2, pp. 5~12, 1971.  
 5) Youd, T.L. : Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands, ASTM STP 523, pp.98~112, 1973.  
 6) 立元 勉：砂質土の粒度粒形などが最大・最小間隙比におよぼす影響について，砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 71~78, 1981.  
 7) 土質工学会：ロックフィル材料の試験と設計強度，1982.10.  
 8) 土質工学会：粗粒材料の変形と強度，1986.5.  
 9) 三浦均也・長谷川敬寿・松本吉英・土岐祥介：砂の力学的性質に及ぼす粒子形状および粒度分布の影響，北海道大学工学部研究報告，第149号，pp.11~24, 1990.2.  
 10) Zingg, Th. : Beiträge zur Schotteranalyse, Min. Petrog. Mitt. Schweiz., 15, pp.39~140, 1935.  
 11) 久保田敬一・河野伊一郎・宇野尚雄：透水設計へのアプローチ，鹿島出版会，pp.73~87, 1976.7.  
 12) 碎屑性堆積物研究会編：堆積物の研究法—礫岩・砂岩・泥岩—，地学団体研究会，pp.151~244, 1983.7.  
 13) 日本材料学会編：建設用材料と試験法，pp.147~198, 1967.3.  
 14) 土質工学会：土質試験の方法と解説，pp.54~67, 1990.3.  
 15) たとえば，日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp.99~121, 1990.2.  
 16) 三木五三郎：粒径加積曲線と均等係数および曲率係数，土と基礎，Vol.18, No.11, p.4, 1970.11.  
 17) 吉村優治・小川正二：砂のような粒状体の簡易な定量法，土木学会論文集，No.463/III-22, pp.95~103, 1993.3.  
 18) Wadell, H.A. : Volume, Shape and Roundness of Rock Particles, Jour. Geol., Vol.40, pp.443~451, 1932.  
 19) Lees, G. : A New Method for Determining the Angularity of Particles, Sedimentology, 3, 1964.  
 20) 福本武明：砂のせん断特性におよぼす粒径と粒度の影響について，第4回土質工学研究発表会発表講演集，pp.475~480, 1968.6.  
 21) 諸戸靖史：河川の砂礫のせん断強度に関する一考察，土と基礎，Vol.33, No.6, pp.31~35, 1985.6.  
 22) 吉村優治・鈴木義仁：木曾三川砂の粒子形状について，平成3年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.336~337, 1992.3.  
 23) 吉村優治：濃尾平野の水成堆積砂の物理的性質について，第5回地盤工学シンポジウム論文集，土質工学会中部支部，pp.89~94, 1993.7.  
 24) 前掲14) pp.106~114.  
 25) 最上武雄：土質力学，技報堂出版，pp.893~1036, 1969.8.  
 26) Ishihara, K. and Watanabe, T. : Sand Liquefaction Through Volume Decrease Potential, Soils and Foundations, Vol.16, No.4, pp.61~70, 1976.12.  
 27) たとえば，土質工学会：飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会：委員会報告 I，土の非排水繰返し三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集，pp.1~53, 1988.12.  
 28) 前掲7) pp.78~93.

- 29) 前掲 8) pp.300~322.
- 30) 前田健一・三浦均也・斎藤和弘・土岐祥介：砂の変形・破壊強度特性の相対密度依存性と一次的性質の影響，第 26 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.449~452, 1991.7.
- 31) 高橋邦夫・春日井康夫：捨石材の強度特性における粒度組成と最大粒径の影響，粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.41~48, 1986.10.
- 32) Matusoka, H. : Deformation Characteristics of Soil, 京都大学博士学位論文，1973.8.
- 33) 前田健一・三浦均也：砂粒子が形成する楕円構造の破壊条件，第 27 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.627~630, 1992.6.
- 34) 松岡 元・加藤正司・滝脇泰勝：乾燥状態と水で濡らした状態のアルミ棒積層体の低拘束圧下のせん断強度の微視的考察，土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集 (Ⅲ)，pp.868~869, 1993.9.
- 35) 軽部大蔵・足立智之・米本義彦：粒状土の力学的特性と土粒子の性状の関係，粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.49~54, 1986.10.
- 36) 椎名教之・川尻峯裕・軽部大蔵：相似粒度をなす礫材の三軸圧縮強度特性について，第 27 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.597~598, 1992.6.
- 37) Rowe, P.W. : The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact, Proc. Royal Soc., London, Series A, Vol.269, pp.500~527, 1962.
- 38) Oda, M. : The Mechanism of Fabric Changes during Compressional Deformation of Sand, Soils and Foundations, Vol.12, No.2, pp.1~18, 1972.6.
- 39) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kamamura, T. and Fukushima, S. : Strength and Deformation Characteristics of Sand in Plane Strain Compression at Extremely Low Pressures, Soils and Foundation, Vol.26, No.1, pp.65~84, 1986.3.
- 40) 日下部治・前田良刀・大内正敏・荻原敏行：不攪乱スコリアの強度・変形特性と攪乱の影響，土木学会論文集，No.439/Ⅲ-17, pp.69~78, 1991.12.

(1993. 4. 27 受付)

## THE INFLUENCE OF THE PRIMARY PROPERTIES ON THE VOID RATIO AND SHEAR CHARACTERISTICS OF GRANULAR MATERIALS

Yuji YOSHIMURA and Shoji OGAWA

The purpose of this study is to conduct a maximum and minimum densities test and a consolidation drained triaxial test, utilizing materials one of whose particle size, grain size distribution and grain shape is independently different, and to explicate how the primary properties of granular materials influence their void ratio and shear characteristics. The result is that the void ratio, the shear strength, and the dilatancy characteristics are greatly affected by the difference of grain shapes, but not much influenced by the particle size and grain size distribution. However, the modulus of deformation indicating the rigidity in the early stage of the shearing is uniquely determined by the volume decrease potential, irrespective of any one of the primary properties.