

# 砂の異方性に関する基礎的研究(その1)

小 田 匡 寛\*  
かざ ま ひで ひこ彦\*

## 1. ま え が き

土の土質工学的性質は各種の要因に支配される。<sup>1)</sup> これらの要因に関する詳細な実験的研究は数多く報告されているが、多くの場合土質工学的な現象面のみとらえた議論に終始する傾向がある。土の性質の理解を深めるためには、土を粒状体と考え、土粒子の形状、土構造などをミクロ的に観察する必要のあることが早くから知られており、この方面の研究も最近活発に行なわれてきている。たとえば、異方向圧密した土は強度および変形係数などに異方性を示すことが知られている。<sup>2),3)</sup> この異方性の原因について、電子顕微鏡やX線などを利用して基礎的な研究が行なわれ、その結果、異方向圧密した土の異方性は板状粒子(粘土鉱物)が最大主応力面に平行配列することと密接に関係することが明らかにされた。

一方、砂は球状粒子からなると考えられており、そのためほぼ等方的であると見なされている。一般的に砂は力学的に等方性であるという仮定のもとに、実験データの処理や解釈がなされている。しかし、後述するように、ごく普通に見られる砂粒子も球状粒子とみなされるよりも、むしろ扁平だ円体に近いものである。扁平だ円体の砂粒子は粘土中の粘土鉱物と同様に、各種の要因で定方向配列することが明らかにされている。<sup>4)</sup> 砂粒子の定方向配列は砂の強度および変形係数の異方性に密接な関係があり、砂はほぼ等方的であるという点に深い疑問がある。

本報告はマスとしての砂に見られる各種の異方性と、砂の(内部)構造の異方性との関係を明らかにすることを目的としている。また、砂の力学的特性を解明しようとする理論式は、砂の構造をも考慮した形で展開されており、<sup>5),6)</sup> 今日、砂の構造を定量的に測定、把握することはきわめて重要であり、これによって砂に関する多くの新しい知識が得られると思う。

本報告の前半は砂の構造の異方性について、後半は三軸圧縮試験結果について述べている。

なお、この研究を実施するにあたり、終始ご指導をい

ただいた埼玉大学小野寺透教授をはじめ、教室の皆様に深く感謝いたします。

## 2. 試 料

本実験に使用した試料は 10 種類(A砂…J砂)で、その採取地および比重を表—1に示した。なお、採取した砂は水洗い後乾燥して、2.38, 1.68, 1.19, 0.84, 0.59, 0.42, 0.25, 0.149, 0.105 の各フルイでフルイ分けた。実験に使用した砂は、たとえば、A  $\frac{1.19}{0.84}$  で表わし、これは 1.19 mm フルイを通過し、0.84 mm フルイにとどまる A 砂を示すことにする。

表—1 試料の採取地と比重

名 称	採 取 地	比 重
A 砂	山口県・豊浦(標準砂)	2.65
B 砂	栃木県 (栃木砂)	2.68
C 砂	埼玉県・秩父(荒川砂Ⅰ)	2.75
D 砂	埼玉県・秩父(荒川砂Ⅱ)	2.70
E 砂	埼玉県・浦和(荒川砂Ⅲ)	2.79
F 砂	愛知県 (矢作川砂)	—
G 砂	山口県・徳山(マ サ)	2.63
H 砂	福島県・相馬(相馬砂)	2.64
I 砂	工事現場より採取	2.68
J 砂	チャート(の)の砕砂・秩父	2.68
K 砂	新潟県・新潟	—

## 3. 砂 の 構 造

### —砂粒子の定方向配列について—

#### (1) 砂 の 構 造

砂のモデルとして球を規則的に積み重ね、そのせん断強度、変形特性などを理論的に求める試みが多くなされている。<sup>7),8)</sup> それらの研究によると、球粒子の積み重なり方が、強度・変形特性などに重要な役割を占めることが明らかにされてきた。しかるに、砂粒子の積み重なり方について、土質工学的には“かみ合い”とか“インターロッキング”とか言ったあいまいなことばでしか表現されていない。これらのことばが砂の構造に対して、どのような意味をもち、どのように、“かみ合い”の程度を定量的に把握できるかといった究明は、ごく一部の研究を除いてほとんどなされていない。<sup>9)</sup> 砂の構造の定量的

\* 埼玉大学理工学部建設基礎工学科

表現は砂の構成要素である砂粒子・水・空気間ゲキの三者を三次元的に表現し得るものでなければならないが、今回の実験では砂の構造の重要な部分である粒子の長軸の定方向配列 (preferred orientation) について、砂の異方性という観点から検討している。

## (2) 粒子の定方向配列

砂粒子の定方向配列の観察は次の要領で実施した。  
内径 5 cm, 高さ 10 cm の円筒容器に所定の砂を次の 3 種類の方法で詰めた。

I 方法：スプーンで円筒容器に砂を注いだだけのもの。(相対密度：0.1~0.3)

II 方法：I 方法により詰めた状態から、さらに上下方向の振動を与えて詰めたもの。(相対密度：0.5~0.8)

III 方法：I 方法により詰めた状態から、さらに 500 g の重錘を上のにせ、円筒管の側壁を軽く連打して詰めたもの。(相対密度：0.7~0.9)

以上の方法で砂を詰めた円筒容器に、低粘性 (0.5~2 ポアズ) の樹脂性接着剤 (商品名リゴラック) を、粒子の構造を乱さないように注意しながら、上方から注ぎ込み、20~30 分放置し、粒子間に接着剤を浸透させた。この後、接着剤は 2~3 時間で固結した。

鉛直断面・水平断面での粒子の配列状態を顕微鏡観察するために、固結した砂を図-1 に示すように鉛直断面 (abcd) および水平断面 (efg) で切断して、厚さ 0.03 mm の薄片 (hijk) と (lmno) とを作製した。ここでは、便宜上、鉛直断面および水平断面の薄片を、それぞれ、(V-S), (H-S) で表わし、砂の詰め方 (I, II, III 方法) を添字で表わして、(V-S)<sub>I</sub>, (H-S)<sub>I</sub>... のように表わすことにする。

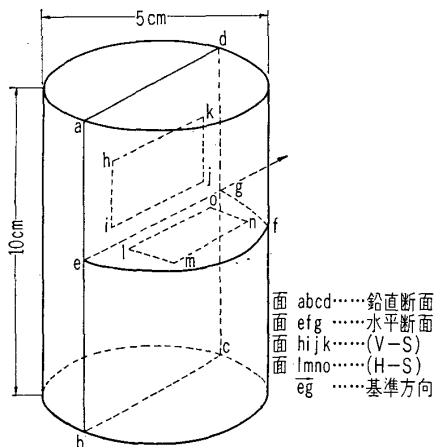


図-1 顕微鏡用薄片の製作方法の説明図

(V-S) と (H-S) 断面とで粒子の長軸の定方向配列の有無を調べるために、各薄片について、顕微鏡で次のような測定を行なった。(なお、ここでは各断面 (V-S) と (H-S) とにおける粒子の見掛けの長軸を問題にして

いる。) すなわち、図-1 において鉛直断面と水平断面との交線  $\vec{eg}$  を基準方向として、無作為に抽出した 100 個の砂粒子のおおのについて図-2 に示したようにこの基準方向と粒子の長軸方向とのなす角度  $\theta_i$  を測定した。A 砂 (標準砂) の (V-S)<sub>I</sub>, (H-S)<sub>I</sub>, (V-S)<sub>II</sub> について測定した  $\theta_i$  のヒン度分布図を図-3 に示した。ここで (H-S)<sub>I</sub> では、粒子の長軸方向は明りょうな集中傾向を示さないのに対し、(V-S)<sub>I</sub> は 0° 付近にはっきりとした集中傾向を示す。このことは粒子の長軸が水平面に平行に配列する傾向が標準砂にはあることを示している。

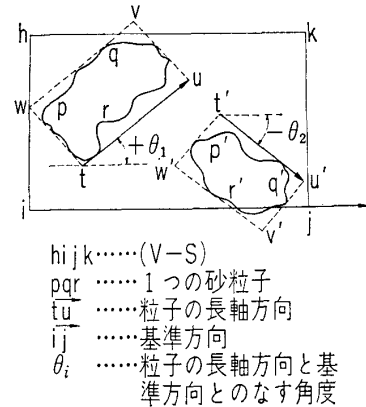


図-2  $\theta_i$  測定方法の説明図

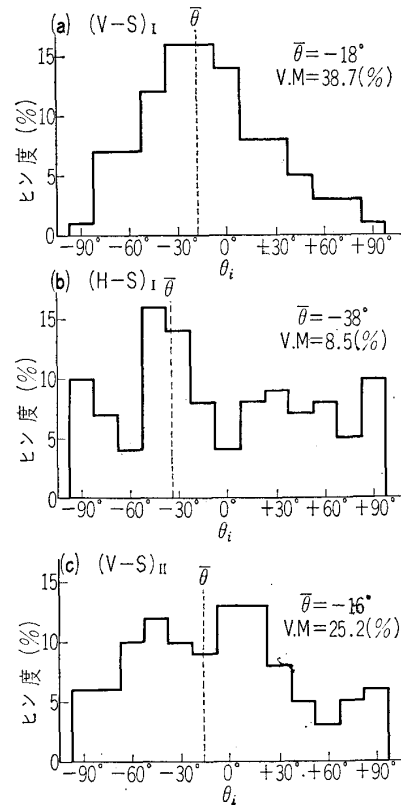


図-3  $\theta_i$  のヒン度分布図 (A 0.42 砂 0.25)

これらのデータを統計的に処理する方法は J.R. Cur-

ray<sup>10)</sup> や H.J. Pincus<sup>11)</sup> などによって考え出されているが、ここでは Curaray の方法を用いて検討を進めた。すなわち、粒子の長軸を長さ1の単位ベクトルとみなし、 $\bar{\theta}$  (vector mean direction) と V.M. (%) (vector magnitude) とを

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^M \sin 2\theta_i}{\sum_{i=1}^M \cos 2\theta_i} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \text{V.M.}(\%) = & \sqrt{\left(\sum_{i=1}^M \sin 2\theta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^M \cos 2\theta_i\right)^2} \\ & \times \frac{100}{M} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

( $M$ : 測定個数)  
( $\theta_i$ : 測定角度)

で定義する。 $\bar{\theta}$  は個々の単位ベクトルの合ベクトルの方向を示し、粒子の長軸の平均的配列方向を表わす。V.M. は合ベクトルの長さを示し、長軸の配列程度を示すものである。(なお、(1) 式、(2) 式中の  $2\theta_i$  は、 $180^\circ$  分布の  $\theta_i$  を  $360^\circ$  分布にするためである。詳しくは、参考文献を参照して下さい。) 無作為に抽出した  $M$  個の粒子について  $\theta_i$  を測定した場合、V.M.=100 (%) は粒子の長軸が完全に一方向に並んでいることを意味し、V.M.=0 (%) の時は完全にランダムに並んでいることになる。したがって、V.M. が 100 (%) に近いほど配列傾向は強い。

各試料の (V-S), (H-S) から 100 個の砂粒子について  $\theta_i$  を求め、 $\bar{\theta}$ , V.M. を計算して表—2 に示した。表—2 の Yes と No との意味は 95% の信頼限界において、定方向配列ありと見せる場合を Yes とし、定方向配列ありと判断できない場合を No とした。A, C, D, J 砂の (V-S) では、I, II, III—方法のどの詰め込み方法を用いても、粒子の長軸は明りょうな方向性をもち、その平均的方向  $\bar{\theta}$  は水平方向 (基準方向) と  $30^\circ$  内外である。以上のように (V-S) で明りょうな粒子の長軸の定方向配列を示す A, J 砂も (H-S) では顕著な定方向配列は認められない。このことは、粒子の長軸は水平面と平行になる傾向をもち、水平面内ではその長軸方向はランダムであることを示している。

### (3) 粒子の定方向配列と粒子形状

砂を容器に詰める場合、一般に砂粒子の長軸は水平面に平行に配列する傾向があるが、この傾向は砂粒子の形状、詰め方、および詰めた状態などに左右されることが表—2 から推測できる。砂粒子の形状、とくにその扁平性は砂の定方向配列にもっとも密接な関係がある。粒子の扁平性の定量的表現は形状係数:  $\frac{a_i+b_i}{2c_i}$  や、球形率:  $\sqrt[3]{\frac{b_i c_i}{a_i^2}}$  などがしばしば用いられている<sup>4)</sup>。(  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  はそれぞれ粒子の長軸、中間軸、短軸の長さ)。砂粒子

表—2 砂粒子の長軸の配列傾向と粒子形状

薄片の種類	試料名	$\theta$	V. M. (%)		$\bar{n}$
(V-S) I	A 0.42 0.25 砂	+18°	38.7	Yes	0.605
	B 1.19 0.84 砂	+18°	15.1	No	0.698
	E 0.59 0.42 砂	+ 5°	34.1	Yes	0.619
	G 1.19 0.84 砂	-11°	19.2	Yes	0.675
	H 1.19 0.84 砂	-30°	23.1	Yes	0.696
	J 1.19 0.84 砂	-30°	31.4	Yes	0.554
	K 0.42 0.25 砂	-30°	17.9	Yes	0.679
(H-S) I	A 0.42 0.25 砂	-38°	8.5	No	0.605
	H 1.19 0.84 砂	+ 9°	15.2	No	0.696
	J 1.2 0.84 砂	+15°	3.6	No	0.554
(V-S) II	A 0.42 0.25 砂	-16°	25.2	Yes	0.605
	B 1.19 0.84 砂	-66°	1.1	No	0.698
	B 0.59 0.42 砂	+42°	7.3	No	0.700
	B 0.42 0.25 砂	-26°	5.5	No	0.706
	C 1.68 1.19 砂	+ 3°	38.5	Yes	0.537
	C 0.84 0.42 砂	-13°	27.0	Yes	0.549
	D 1.29 0.84 砂	+17°	23.9	Yes	0.573
	D 0.84 0.59 砂	+12°	25.1	Yes	0.559
	F 1.68 1.19 砂	+17°	14.5	No	0.622
	G 0.12 0.84 砂	+ 6°	1.1	No	0.675
	G 0.84 0.42 砂	+ 3°	11.0	No	0.618
	H 1.19 0.84 砂	- 2°	11.8	No	0.696
	H 0.84 0.59 砂	+17°	16.9	No	0.671
	I 1.68 1.19 砂	+13°	16.3	No	0.639
	J 1.19 0.84 砂	+10°	19.9	Yes	0.554
	J 0.48 0.25 砂	+ 7°	31.2	Yes	0.605
(V-S) III	G 1.19 0.84 砂	+ 6°	19.8	Yes	0.675
	H 1.19 0.84 砂	- 4°	38.1	Yes	0.696
	J 1.19 0.84 砂	-15°	47.3	Yes	0.554

の  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  を求めることはほとんど不可能に近いので、ここでは扁平度の尺度として、細長比:  $n_i = s_i/l_i$  を用いた。(V-S) から 50 個の砂粒子を無作為に抽出して、それぞれの粒子について、図—4 に示したように、長軸の長さ:  $l_i$ , 短軸の長さ:  $l$ , 短軸の長さ:  $s_i$  を測定して、

$$\bar{n} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{s_i}{l_i} \dots\dots\dots (3)$$

により平均細長比  $\bar{n}$  を求めた。その結果を表—2 に、(V-S) の V.M. と  $\bar{n}$  の相関関係を図—5 に示した。

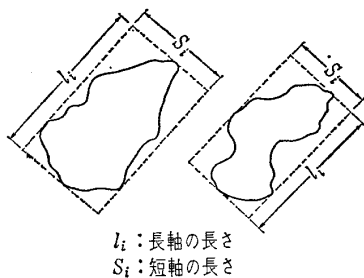


図-4 砂粒子の長軸と短軸の説明図

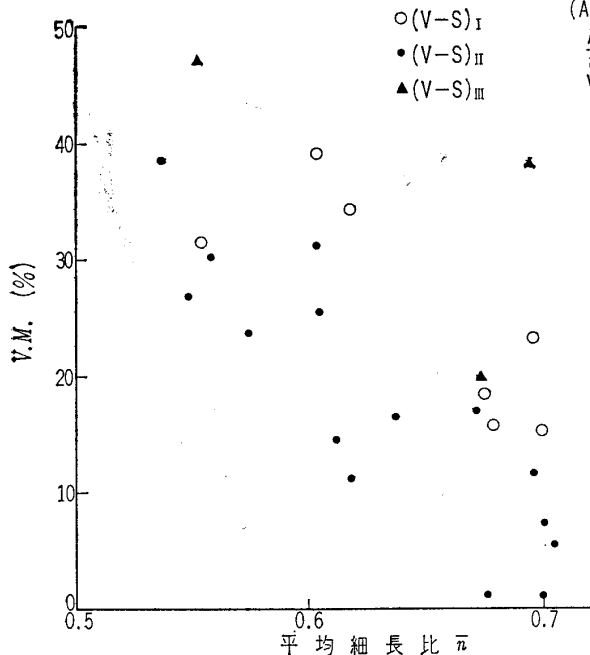


図-5 V.M. と平均細長比との関係図

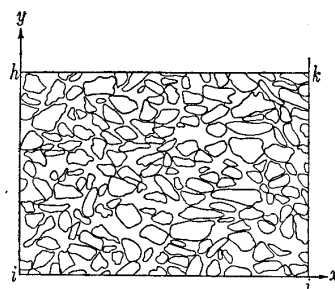
(V-S) の V.M. と  $\bar{n}$  の関係を見ると、I, II, III 方法の詰め方による差が認められるが、各グループについては、かなりの相関性が認められる。これから V.M.,  $\bar{n}$  に関して、次のようなことが考えられる。

- i) 砂の詰め方および詰めた状態が同じならば、細長比  $\bar{n}$  が小さくなると粒子の長軸の定方向配列傾向はいちじるしくなる。
- ii) 砂の詰め方が粒子の定方向配列に大きな影響を及ぼし、同じ間ゲキ比に調整した砂でも、その詰め方により粒子の長軸の定方向配列傾向を異にすると考えられる。

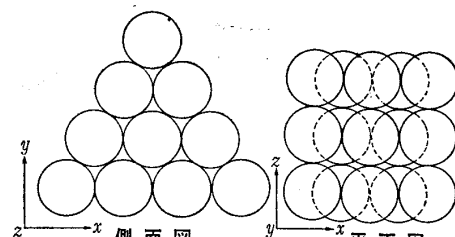
同一試料で同一間ゲキ比の砂でも詰め方によってその性質を異にし、必ずしも同じ力学的性質を示さないことはすでに多くの人々によって指摘されている<sup>12)</sup>。しかし、砂の構造という観点から具体的にどのように違うかは、ほとんど明らかにされていないと言ってもよい。特に、標準砂は  $\bar{n}=0.605$  で、かつ粒子の定方向配列性が強く、強度などに強い異方性が予想されるので、標準砂の試験結果の解釈には慎重な配慮が必要であろう。

#### 4. 砂の構造の異方性

砂を扁平だ円体と考えると、砂を容器に詰める場合、



(a) 砂粒子の定方向配列によるもの  
(A<sub>1.19</sub>砂の(V-S)<sub>II</sub>)  
 $hijk \dots (V-S)_{II}$   
 $ij \dots$  水平方向  
V.M.=38.5%  $\theta=+3^\circ$



(b) 球粒子の積み重なり方によるもの  
(Cubical-tetrahedral packing)

図-6 砂の構造の異方性

重力場の影響で、粒子の長軸と中間軸とを含む面は水平面に平行になろうとする傾向があり、この傾向は粒子の扁平度、詰め方、詰めた状態などに左右されると予想できる。われわれの実験では、粒子が扁平であることに起因する粒子の定方向配列だけを問題にし、その構造の異方性を明らかにしてきた。しかし、粒子が球であったとしたら、その積み重なり方は等方的であると見なし得るだろうか？

Kallstenius, Bergau<sup>9)</sup> は均一径の球粒子 (ガラス) を容器に静かに注いだ場合にできる粒状体の構造について統計的な研究を行ない、砂粒子がたとえ球であったとしても、その積み重なり方は必ずしも等方的でないことを明らかにしている。すなわち、 $x$  方向、 $y$  方向および  $z$  方向で粒子の積み重なり方は、図-6 に示したように違う。図-6 (a) の  $x$  方向と  $y$  方向とにおける積み重なり方の違いは、粒子の定方向配列によるもので、図-6 (b) のこの違いは球粒子の積み重なり方によるものである。われわれの実験で明らかになった扁平粒子の定方向配列と、Kallstenius などが示した粒子の異方的積み重なり方とが複雑にからみ合いながら、砂の構造の異方性を作っているものと考えられる。(容器に球状粒子を注いでできる構造の異方性の詳細な観察・検討は続報においてなされる。)

砂の構造は、異方向圧密された粘土と同様に、等方的でないという観点に立って、砂に関する各種の問題について再検討してみる必要がある。たとえば、圧縮試験 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) 結果と引張試験 ( $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ) 結果とを比較検討する場合に、 $\sigma_2$  の違い、せん断領域の違い、などを考慮すべきことはもちろんであるが、試料の構造の異方性を無視した試験結果の解釈ならびに適用は誤りを含むことも考えられる。

#### 5. 砂の三軸圧縮試験

以上のことから、砂の構造にみられる異方性と力学的な異方性とを関係づけるために以下に述べるような三軸

圧縮試験を行なった。

### (1) 試験方法

図-7 に示したように、砂粒子の長軸の平均配列方向と圧縮方向とのなす角  $\beta$  をいろいろ変えた供試体を得るために、つぎのような方法により供試体を作製した。

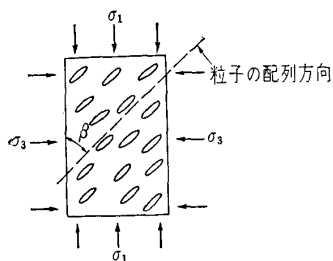


図-7 粒子の配列方向と  $\sigma_1$  との関係

二つ割りモールド (内径 5 cm, 高さ 10 cm) に同じ内径の円筒管を継ぎ足し、図-8 に示すように角度  $\beta$  だけモールドを傾ける。その中にロートで静かに砂を注ぎ入れ、モールドの側壁を軽く

連打して、なるべく密になるように詰めた。なお、砂の詰め込み終了時に砂の上面と台との距離 (gh) が 13~15 cm になるようにした。砂を詰めたモールドを砂の構造を乱さないように注意しながら、静かに水中に沈め、水でほぼ飽和させた後、全体を  $-24^\circ\text{C}$  で凍結させた。凍結後 ad 面を岩石用カッターで切断して、供試体 abcd を得た。この方法で  $\beta$  を  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$  の 3 段階に変化させた供試体を作った。

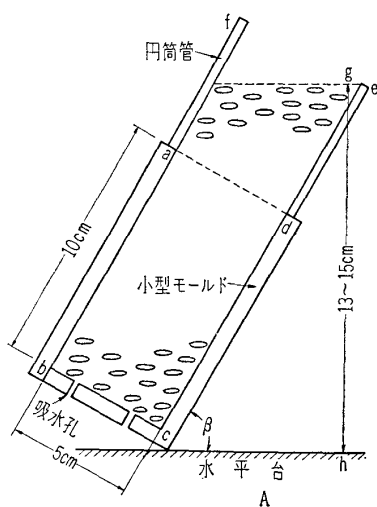


図-8 供試体の作製方法説明図

$\beta=0^\circ$  の供試体は図-8 の ad 面をブリキ板でふたをして、モールドの側壁に  $0.5 \times 10$  cm のあき窓を作り、ここから砂を注ぎこみ、前と同様な方法で凍結させて、カッターなどを用い円柱状の供試体になるように成形した。このようにして、ほぼ同一間ゲキ比をもつ、 $\beta=90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $0^\circ$  の 4 種類の供試体を作った。4 種類の供試体はほぼ等しい間ゲキ比のものが得られたが、平均間ゲキ比との差が 0.02 以上ある供試体は作りなした。

直径 5 cm, 高さ 10 cm の凍結した供試体を手早く三軸室内に固定し、所定の側圧  $\sigma_3$  を加えて、氷を溶かす

ためにそのまま 1 時間 30 分放置した。試料は  $\bar{n}$  を異にする 5 種類で、C  $\frac{2.38}{0.25}$  砂と H  $\frac{1.19}{0.59}$  砂は  $\sigma_3=0.25$ , 0.5, 0.75 kg/cm<sup>2</sup> の 3 段階、A  $\frac{0.42}{0.105}$  砂、B  $\frac{0.59}{0.149}$  砂、C  $\frac{1.19}{0.42}$  砂は  $\sigma_3=0.5$  kg/cm<sup>2</sup> だけについて実施した。圧縮方法は側圧一定の排水方式、圧縮速さは 1.2%/分の軸ヒズミ制御方式、体積変化は三軸室の水の変化により測定した。凍結した供試体を三軸室内で溶かす時に、体積変化を綿密に測定したが、その変化はほとんど無視し得る程度のものであった。このことから、密に詰められた砂の構造は水の凍結および氷の融解にともなう、ほとんど変化しないと考えられる。なお、軸応力、側圧、軸ヒズミ、体積ヒズミをそれぞれ、 $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ,  $\epsilon$ ,  $v$  で表わす。

### (2) 試験結果

供試体の変形様式は従来の報告とよく似ている。すなわち、粒径が小さい砂では明りょうな一方のセン断面をつくる。それに対し、粒径が大きい砂では広い範囲にわたるセン断領域が認められる。また、最終的に形成されるセン断面は必ずしも、粒子の配列方向と一致しない。 $\bar{n}=0.703$  の B  $\frac{0.59}{0.149}$  砂と  $\bar{n}=0.549$  の C  $\frac{1.19}{0.42}$  砂との応力~軸ヒズミ、応力~体積ヒズミ曲線を図-9, 図-10, 表-3, 表-4 に、また最大主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ,  $1/2$  の主応力差における接線変形係数  $E_{50}$ , 最大主応力差時でのダイレタンシーインデックス  $\left(\frac{dv}{d\epsilon}\right)_f$  などが  $\beta$  によってどのように変化するかを図-11, 図-12, 図-13 に示した。なお、図中に用いた記号の説明は表-5 に示した。

$\bar{n}=0.703$  の比較的球に近い砂粒子からなる B 砂を除いて、最大主応力差は  $\beta$  が小さくなると減少する傾向を示す (図-11)。 $\beta=90^\circ$  と  $\beta=0^\circ$  とにおける最大主応力差の比,  $X$  (強度比)  $= \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f(\beta=0^\circ)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f(\beta=90^\circ)}$  は D 砂で 0.85, C 砂で 0.98 である。強度比  $X$  と粒子の平均細

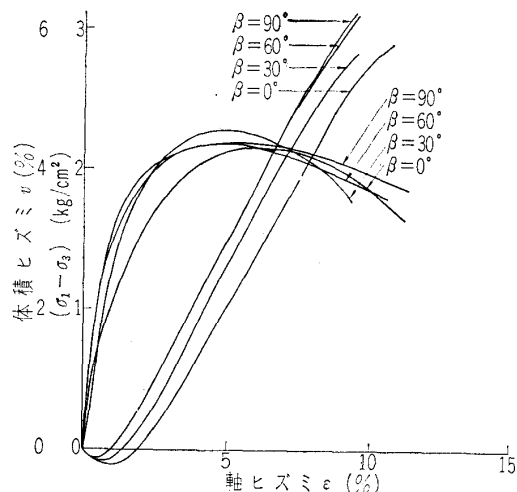


図-9 B  $\frac{0.59}{0.149}$  砂の応力・ヒズミ・体積ヒズミ曲線

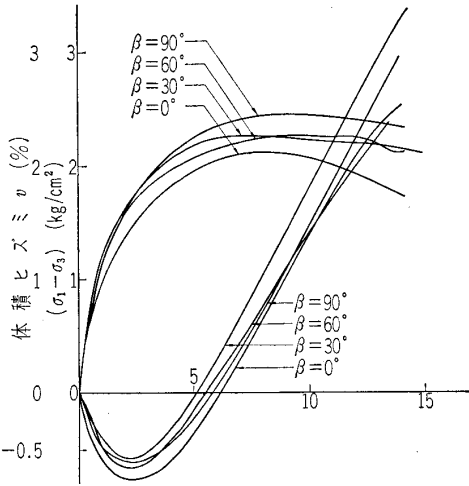


図-10 C 1.19 砂の応力・軸ヒズミ・体積ヒズミ曲線

表-3 B 0.59 砂の三軸圧縮試験結果

供試体	間ゲキ比	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{50}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\frac{dv}{d\varepsilon})_f$
$\beta = 90^\circ$	0.689	2.18	163.2	0.858
$\beta = 60^\circ$	0.700	2.17	151.1	0.820
$\beta = 30^\circ$	0.705	2.28	137.6	0.811
$\beta = 0^\circ$	0.694	2.14	71.8	0.802

表-4 C 1.19 砂の三軸圧縮試験結果

供試体	間ゲキ比	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{50}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\frac{dv}{d\varepsilon})_f$
$\beta = 90^\circ$	0.868	2.47	68.7	0.392
$\beta = 60^\circ$	0.868	2.26	68.7	0.322
$\beta = 30^\circ$	0.850	2.26	79.5	0.393
$\beta = 0^\circ$	0.863	2.12	55.4	0.393

表-5 図-11~13 の記号説明

記号	試料	平均細長比	平均間ゲキ比
○	A 0.42 砂	0.605	0.677
●	B 0.59 砂	0.706	0.697
△	C 2.38 砂	0.537	0.853
▲	C 1.19 砂	0.549	0.862
×	H 1.19 砂	0.683	0.595

-----  $\sigma_3 = 0.25 \text{ kg/cm}^2$   
 -----  $\sigma_3 = 0.50 \text{ kg/cm}^2$   
 - . . . . .  $\sigma_3 = 0.75 \text{ kg/cm}^2$

長比  $\bar{n}$  との関係を図-14 に示した。図-14 によれば砂粒子の平均細長比が増すと強度比は減少する傾向にある。すなわち、砂の強度の異方性は粒子の定方向配列による構造の異方性に密接な関係があると判断できる。  
 $E_{50}$  はピストンの摩擦などによる影響で、バラツキが認められるが、次の2点が指摘できる(図-12)。

- i)  $E_{50}(\beta = 90^\circ) > E_{50}(\beta = 0^\circ)$  である。
- ii)  $\beta = 90^\circ$  の砂と  $0^\circ$  の砂の変形係数の比  $Y = \frac{E_{50}(\beta = 0^\circ)}{E_{50}(\beta = 90^\circ)}$  は必ずしも粒子の扁平性に相関をもたず、主として、別の構造要素に支配されると考えられる。

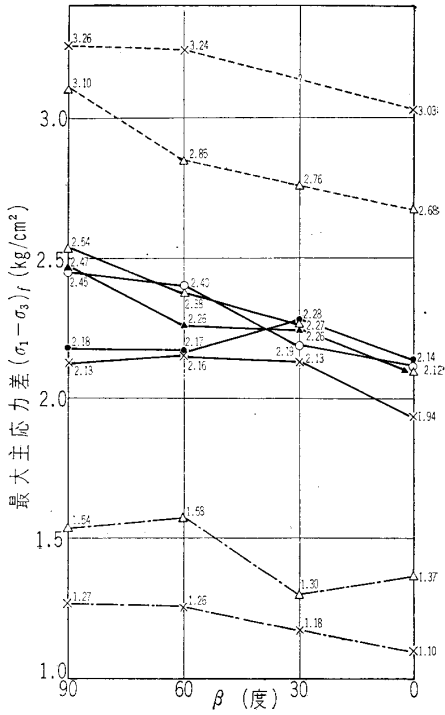


図-11  $\beta$  と最大主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  との関係図

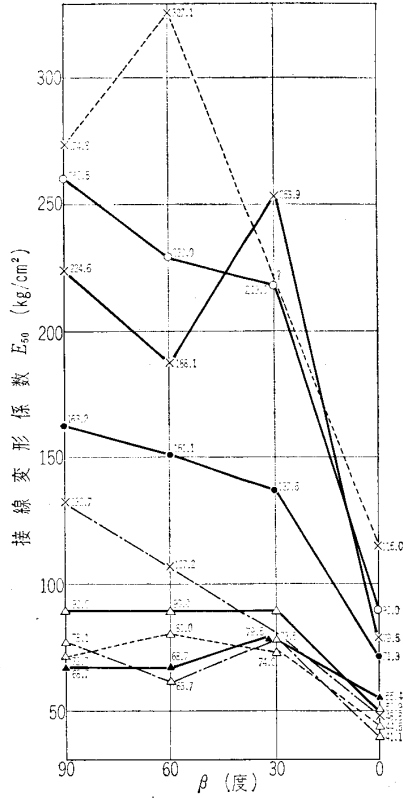


図-12  $\beta$  と接線変形係数  $E_{50}$  との関係図

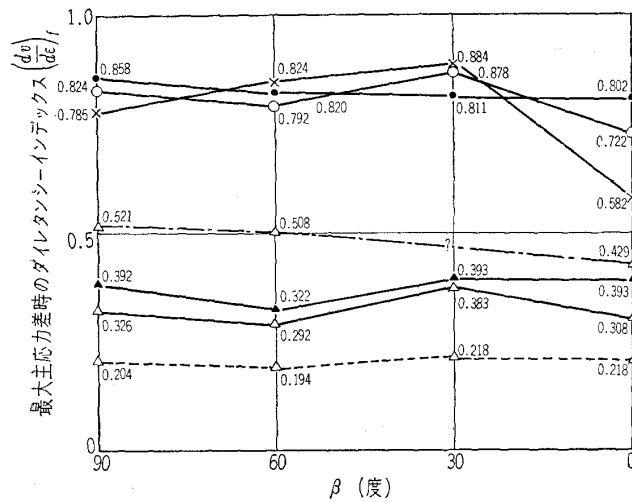


図-13  $\beta$ と最大主応力差時のダイラタンシー  
インデックス  $(\frac{dv}{d\varepsilon})_f$ との関係図

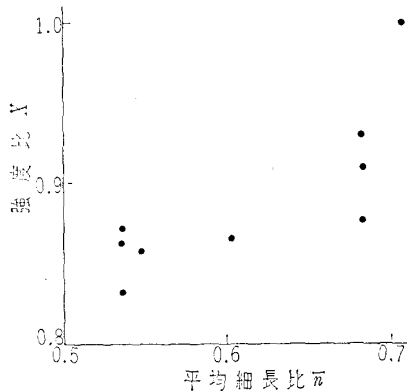


図-14 強度比と平均細長比との関係図

## 5. 結 論

以上われわれの実験から次のような結論が得られた。

### i) 砂の構造の異方性は

粒子の定方向配列によるものと、Kallstenius などが示した球粒子の異方的な積み重なり方によるものとの性質を異にする二つのものに分けられる。

(なお、球粒子の異方的な粒子の積み重なり方については、続報において詳しく論ずる。)

### ii) 砂粒子の定方向配列の程度は粒子形状、砂の詰め方、詰めた状態などによって異なる。

iii)  $\beta=90^\circ$  と  $0^\circ$  とにおける強度比  $X$  は細長比  $\bar{n}$  と相関関係があり、強度の異方性は粒子の定方向配列による構造の異方性と密接な関係がある。強度比  $X$  は扁平粒子からなる砂 (C 砂) で 0.85 で球粒子に近い砂 (B 砂) で 0.98 である。

iv)  $\beta=90^\circ$  と  $0^\circ$  とにおける変形係数比  $Y$  は粒子の扁平性とはほぼ無相関である。変形係数比  $Y$  は A 砂, B 砂, H 砂で約 0.4 で、扁平性の高い C 砂で 0.6~0.7 ある。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば三笠正人：土の工学的性質の分類表とその意義 土と基礎, 第 12 巻, 第 4 号 1964, pp. 17-24
- 2) Mitchell, J.K. : The Fabric of Natural Clays and Its Relation to Engineering Properties, Proc. Highway Research Bd., Washington, D.C., Vol. 55, 1956, pp. 693-713
- 3) Duncan, J.M. and Seed, H.B. : Anisotropy and Stress Reorientation in Clay, Jour. Soil Mech. Found. Divi., ASCE, Vol. 92, No. SM5, 1966, pp. 21-49
- 4) Griffiths, J.C. : Scientific method in Analysis of Sediments, New York, McGraw-Hill, 1967
- 5) Rowe P.W. : The Stress Dilatancy Relations for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Roy. Soc. London, Series A, Vol. 269, 1962, pp. 500-527
- 6) Barden, L. and Khayatt, A.J. : Incremental Strain Ratios and Strength of Sand in the Triaxial Test, Géotechnique Vol. 16, 1966, pp. 338-357
- 7) たとえば Scott, R.F. : Principles of Soil Mechanics, Chapter 7, Addison-Wesley, 1963, pp. 291-333
- 8) Leussink, H. and Wittke, W. : Difference in Triaxial and Plain Shear Strength, Symp on the Lab. Shear Testing of Soils, ASTM, Ottawa, Canada, 1963, pp. 77-89
- 9) Kallstenius, T. and Bergau, W. : Research on the Texture of Granular Masses, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech Found Eng., Vol. 1, 1961, pp. 158-165
- 10) Curray, J.R. : The Analysis of Two-Dimensional Orientation Data, Jour. Geol. Vol. 64, 1956, pp. 117-131
- 11) Pincus, H.J. : Some Vector and Arithmetic Operations on Two-Dimensional Orientation Variates, with Applications to Geological Data, Jour. Geol., Vol. 64, 1956, pp. 533-557
- 12) たとえば 井上広胤, 他 : 土のセン断試験法に関する基礎的研究, 第 3 章, 影響要因についての研究, 土質工学会, 1968, pp. 41-69

(原稿受付, 1970.2.4)